

AUTONÓM JÁRMŰVEK – WORKSHOP-SOROZAT

Konferenciakiadvány 2020

AUTONÓM JÁRMŰVEK – WORKSHOP-SOROZAT

Konferenciakiadvány 2020

Lektorok:

Dr. Czinege Imre, Dr. Lakatos István,
Dr. Szauter Ferenc, Dr. Varga Zoltán

Széchenyi István Egyetem
2021

ISBN 978-615-5837-80-7

TARTALOMJEGYZÉK

Hálózati eszközök beüzemelése prototípus jármű autonóm modulján <i>Gulyás Péter, Kőrös Péter, Pusztai Zoltán, Kecskeméti István</i>	7
Önvezetés a gyakorlatban: az egyszemélyes kísérletitől a közúti járműig <i>Horváth Ernő, Kőrös Péter, Hajdu Csaba, Pusztai Zoltán, Gulyás Péter</i>	15
Sebességszenzor nélküli aszinkronmotoros hajtás paraméterérzékenységi vizsgálata <i>Horváth Krisztián</i>	24
Villamos motorok többcélú optimalizációja kriging asszisztens algoritmus alkalmazásával <i>Istenes György, Dr. Horváth Zoltán</i>	34
Energiahatékony versenyjármű komplex világítási rendszere <i>Kecskeméti István, Gulyás Péter, Szeli Zoltán</i>	41
Nissan Leaf akkumulátor rendszerének diagnosztikája <i>Kocsis Szürke Szabolcs, Horváth Krisztián, Lakatos István</i>	46
Autonóm járművek lehetséges érintésmentes öndiagnosztikai rendszereinek kutatása <i>Őri Péter, Prof. Dr. Lakatos István</i>	52
Energiatakarékos járműüzemeltetést biztosító modell létrehozása Simulink-ben <i>Kőrös Péter, Pusztai Zoltán</i>	64
Autonóm járműfunkciók megvalósítására alkalmas versenyjármű Gazebo-ROS szimulációja <i>Krecht Rudolf, Hajdu Csaba</i>	72
Háromdimenziós objektumdetektálás implementációja <i>Markó Norbert, Hollósi János</i>	78
Topológiai optimalizálás alkalmazása autonóm energiahatékony jármű motortartó adapterén <i>Pusztai Zoltán</i>	85
Teljesítmény félvezetők kapcsolási veszteségeinek vizsgálata kettős impulzusos teszteléssel <i>Szakállas Gábor</i>	91
Feszültség csökkentő DC/DC konverter tervezése eGaN FET-tel <i>Szeli Zoltán</i>	97
ROS-alapú szoftverinterfészek modell-alapú kódgenerálása <i>Hajdu Csaba, Ballagi Áron</i>	105
Új Architektúra Mozgástervező Algoritmusok Integrálására <i>Hajdu Csaba, Ballagi Áron, Horváth Ernő</i>	113
Kamera-Lidar Kalibráció <i>Hollósi János, Ballagi Áron</i>	123
A golyósrakéta hajtómű szilárdsági vizsgálata <i>Dr. Polák József</i>	131
Inerciális szenzormodellhez szükséges hiba karakterisztika elemzés MATLAB-ban <i>Somogyi Huba</i>	146
Lidar alapú lokalizáció NDT-vel <i>Unger Miklós, Hajdu Csaba</i>	152

Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában

EFOP-3.6.2-16-2017-00016

Konzorcium:

Széchenyi István Egyetem

Dunaújvárosi Egyetem

Neumann János Egyetem

Óbudai Egyetem

A támogatási összege:

1,448 MILLIÁRD FORINT

A projekt időtartama: 2017.06.01. - 2020.12. 29.

A projekt megvalósításával a konzorciumi partnerek hosszú távú célja az, hogy közös erővel tudjanak aktívabb és kezdeményezőbb szerepet vállalni a tudásalapú gazdaság kiépítésében és a magyar felsőoktatás kutatás-fejlesztési potenciáljának erősítésében. A kialakított új tudásbázisok alapján kezdeményezik a nemzetközi hálózatokba való bekapcsolódást és együttműködést. Rövidtávon elérhető célnak tekintik, hogy hálózatos formában együttműködnek, a kapacitásokat összehangolva közös kutatói teameket hoznak létre, melyek szinergikus hatása sokszorosa lehet a jelenleg egyénileg működő intézményi potenciáloknak. A kutatások konkrét célja az, hogy a partner intézmények jelentős eredményeket érjenek el az autonóm járművek és járműrendszerek irányításában és kommunikációjában.

A projekt stratégiai környezetének kulcs eleme az elektromobilitás, melynek terjedése folyamán a klasszikus értelemben vett járműgyártás új alapokra helyeződik. Ennek két fő része van, egyrészt a jármű hajtások fejlődése a hagyományos belsőégésű motoroktól az elektromos hajtáslánccok irányába, másrészt a vezetői funkciók fokozatos felváltása az autonóm járműirányítással, melynek végső célja a teljesen autonóm járművek megvalósítása és bevonása a mindennapi közlekedésbe.

A projekt 3 kutatási főirányhoz rendelve 5 alprojekt által megfogalmazott 13 feladatot tartalmaz. A kutatások az elektromos hajtáslánccok, valamint a járműirányítás új megoldásainak fejlesztésére irányulnak. Ezen kutatások súlypontjai közül első az autonóm járműtechnológiák igényeihez illeszkedő villamos hajtás fejlesztés és hajtás optimalizáció, speciális diagnosztikai és üzemeltetési feltételek elemzése, az autonóm navigációt végző járművek mozgás kölcsönhatásainak modellezése. A második fontos terület a villamos hajtások igényeit kiszolgáló új, innovatív anyagok és anyagszerkezetek kutatása, míg a harmadik főirány az ember-gép (járművezető-jármű) kapcsolati viszonyainak elemzésével, valamint a járművek és közlekedési rendszer által generált adatok feldolgozásával, értelmezésével és hasznosításával foglalkozik.

A projekt közvetlen célcsoportját alkotják a jelenlegi hallgatók, doktoranduszok és predoktorok; posztdoktorok, oktatók, kutatók; kiemelten a fiatal kutatók és K+F munkatársak. Az alapkutatási jelleghez igazodóan az elsődleges célcsoport az akadémiai kutatószféra. Másodlagos célcsoport az intelligens közlekedési rendszerek technológiáinak fejlesztésével foglalkozó intézetek, fórumok és munkacsoportok (ETSI, ISO, CEN), továbbá a közlekedési rendszerek és úthálózatok, valamint a távközlési infrastruktúra üzemeltetői. Érintettek a középiskolások, leendő hallgatók, a hallgatók hozzátartozói, valamint a közvélemény, és az elektromobilitásba bekapcsolódó lakosság.

Hálózati eszközök beüzemelése prototípus jármű autonóm modulján

Implementation of communication units on an autonomous module of a prototype car

Gulyás Péter^a, Kőrös Péter^b, Pusztai Zoltán^c, Kecskeméti István^d

^a Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont - Győr

gulyas.peter@ga.sze.hu

^b Széchenyi István Egyetem, Közúti és Vasúti Járművek Tanszék, Járműipari Kutatóközpont - Győr,

korosp@ga.sze.hu

^c Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont - Győr,

pusztai.zoltan@ga.sze.hu

^d Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont - Győr,

kecskemeti.istvan@ga.sze.hu

Absztrakt: A Széchenyi István Egyetemen működő Járműipari Kutatóközpont tagjai évek óta elkötelezetten végeznek kutatásokat az önvezető autózás megvalósításáért. A jelen cikk egy prototípus autó autonóm moduljának kommunikációs részegységeit és azok beállítását mutatja be. A darabonként összeválogatott komponensektől, a 3D modellben összeállított modulon keresztül, a fizikailag összeépített és felprogramozott egészig. A cikkben megtalálható a fejlesztés több ciklusa is, különös figyelmet fordítva a hálózati eszközök hardveres beépítésére és szoftveres beüzemelésére. A cikk alapul szolgál a további fejlesztésekhez is, a V2V és V2X kommunikációs protokollok kapcsán.

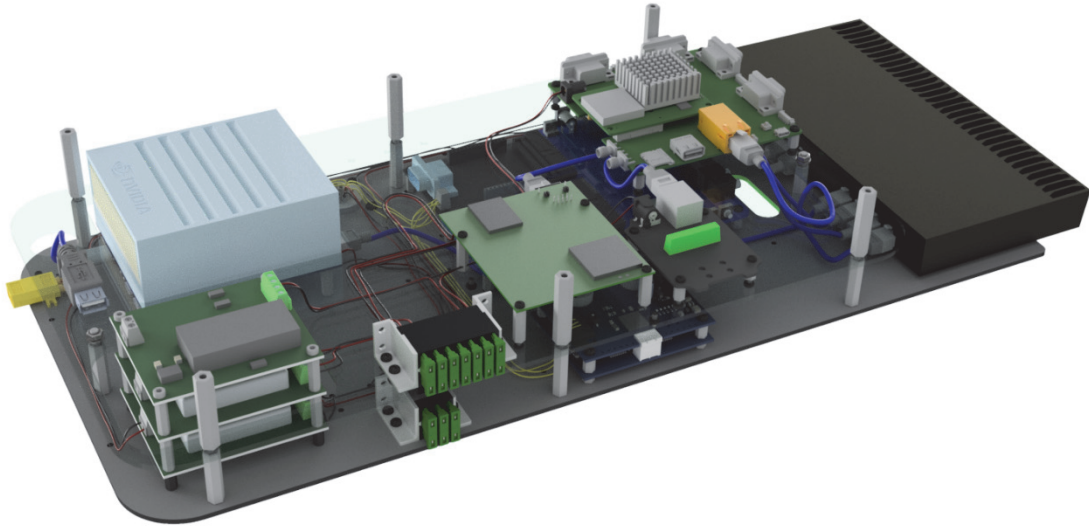
Kulcsszavak: M2M router, 4G hálózat, switch, Mikrotik, OpenWrt

Abstract: The members of the Research Center of Vehicle Industry at the Széchenyi István University committed to working on the realization of autonomous driving. The content of this publication represents the subunits of the autonomous module of our prototype car and all the communication units, and the needed associated settings. All the way from the component selection, through the assembled module in 3D model, to the physically built and programmed complete set. Through our publication the reader can recognize several development stages, paying attention to the hardware installation and software setup of the communication units. The publication is also a base of our future developments about V2V and V2X protocols.

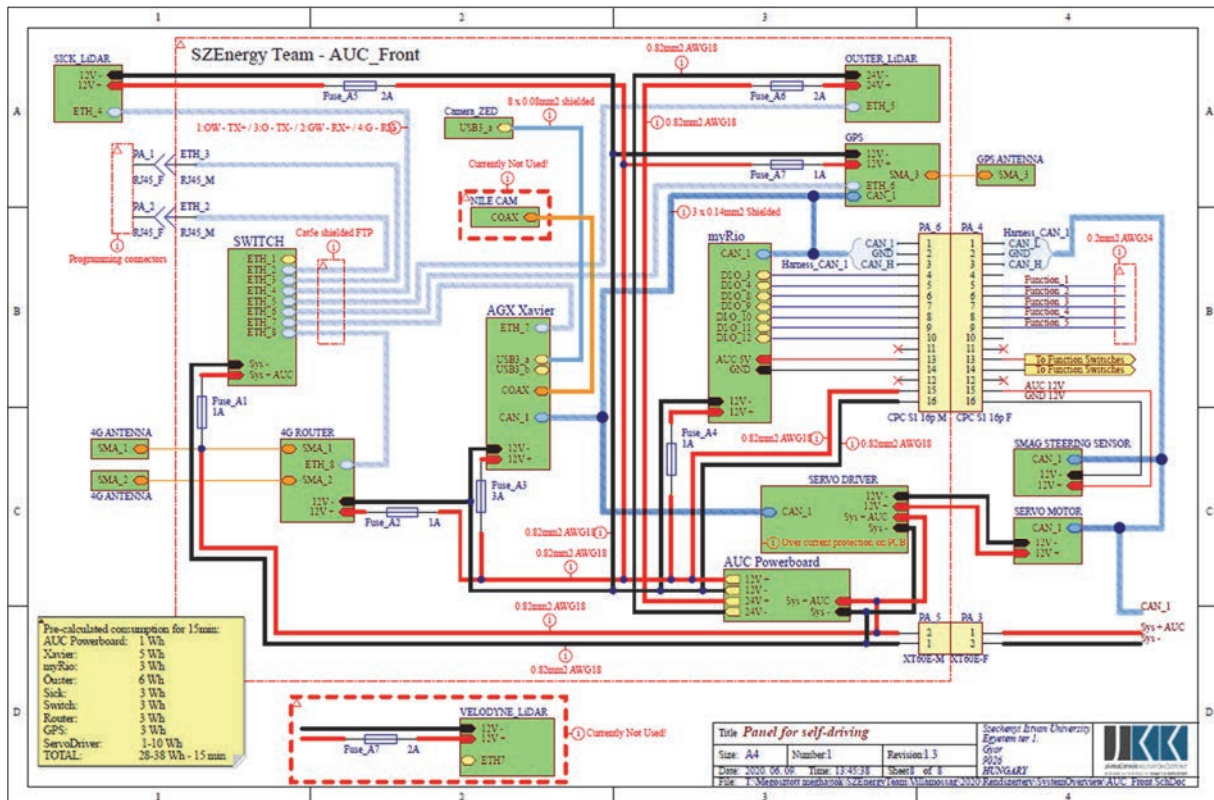
Keywords: M2M router, 4G network, switch, Mikrotik, OpenWrt

1. Bevezetés

A SZEenergy Team prototípus autójának átalakítása során önvezető funkciókkal kívánjuk ellátni azt. Ennek alapfeltétele a hozzá tartozó elektronikai elemek kiválasztása és összeépítése. Ennek tervezése már a 2019-es évben elkezdődött. A 2020 tavaszán véglegesített 3D-s terveket (1. ábra) követően a gépészeti kivitelezés vette kezdetét. Miután az összes szükséges, CNC marással készült elem rendelkezésre állt, elkezdődhetett a panel fizikai összeépítése és kábelezése az előkészített kapcsolási rajz (2. ábra) alapján és a rászerezésre kerülő hardver elemek szoftveres élesztése.



1. ábra: Véglegesített, 3D-s tervezéssel készült szerkezeti összeállítás.



2. ábra: Komplex kapcsolási rajz a szerelőpanelen elhelyezkedő részekeségekről.

2. M2M 4G Router

A mobil kommunikációs hálózat már évek óta jól kiépített Magyarország teljes területén, ahol az utóbbi években a szélessávú internet elérés lefedettsége is nagymértékben megnőtt. Az önvezetés egyik fontos pillére a kommunikáció, melyben fontos szerepet kap a jelenleg még csak 4G LTE hálózat, majd később az 5G lehetősége is. Autóipari oldalról a V2X és V2V kommunikációs kifejezések utalnak a járművek közti és infrastrukturális kommunikációs módokra [1]. A Széchenyi István Egyetemen jelenleg is fejlesztés és tesztelés alatt áll a V2X és V2V protokollok alkalmazhatósága. A prototípus autó elsődleges fejlesztési lépéseként szélessávú internet elérést kívánunk biztosítani a jármű számára. Az ehhez szükséges mobil router választását követően, több tárgyalás után a WM Rendszerház Kft. szponzorációjaként tudtuk integrálni az építés alatt álló rendszerbe. Ennek a routernek és a Telenortól kapott SIM kártyának a segítségével a versenyautónak lehetősége lesz Európából bárholnan a világháló elérésére, ezzel biztosítva a GPS pontosításhoz szükséges adatokat és a későbbi kooperatív irányításhoz alkalmazott információk csatornáit. Az alábbi képen (3. ábra) a választott M2M 4G LET Cat. 1 router [2] látható. A router rendszerbe illesztése során fontos volt annak lecsupaszítása, a helytakarékoság, a tömeg minimalizálása és az egyszerű elektronikai bekötés érdekében. Az alumínium ház eltávolítását követően, szabaddá vált a jóval egyszerűbb rögzítéssel és kisebb tömeggel rendelkező elektronikai panel. A router fogyasztásához méretezett 18 AWG átmérőjű kábellel megvalósított 12VDC tápellátást biztosító vezetékeezést egy biztosíték közbeiktatásával készítettük el, mely így szakszerű védelmet biztosít a kiszolgáló konverter, és a párhuzamosan kötött elektronikai eszközök számára. Az adatátvitel számára szabadon maradt micro-USB csatlakozó a konfigurációs feladatok kapcsán szükséges a további beállításokhoz, míg az RJ-45 csatlakozón keresztül a teljes panelre szerelt eszközparkhoz csatlakozik majd a router. Az antennákat egy toldó segítségével vezettük ki a karosszérián kívülre, ezzel biztosítva a karosszéria árnyékoló hatásának elkerülését.



3. ábra: Szélessávú internet elérést biztosító M2M Router

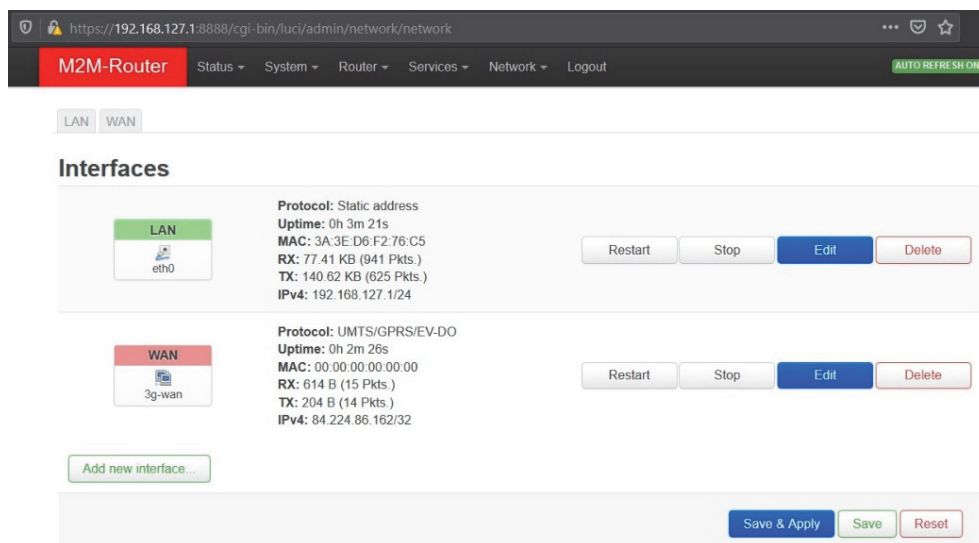
A router pontos beállítása kapcsán meg kellett ismerkednünk az OpenWrt rendszerrel.[3] Ez egy speciálisan routerek számára készített Linux alapú nyílt forráskódú beágyazott rendszer, ami ma már jól kezelhető grafikus programozói felülettel is rendelkezik az üzembe állítás és monitorozás érdekében. Ez lehetőséget biztosít arra, hogy a kommunikációs tesztek és fejlesztések során, akár egyéni firmware használatát is kipróbáljuk, valamint arra is, hogy

egészen mélyen személyre szabjuk az eszköz működését. Az OpenWrt összes részegysége úgy van optimalizálva, hogy a legkisebb rendszerterületet foglalja így a rendszer elég kicsi ahhoz, hogy akár az otthoni routerek limitált háttértárába és memóriájába való telepítésre is alkalmas legyen, vagy olyan kis eszközökön is elfusson, mint ez az ipari kis méretű 4G LTE router. A programozás során TCP/IP kapcsolaton keresztül egy számítógéppel közvetlenül összekötve web böngészőn keresztül lehet elérni a router kezelőfelületét, ahol elvégezhetjük a beállításokat. A szerelő panelre felhelyezett router beállítása kapcsán deklarálni kellett az egyes interfészek feladatát, mert az ipari felhasználású router teljesen nyersen érkezett hozzánk. Az interfészek feladatosztását az alábbi, 1. táblázat szerint készítettük el.

Csatlakozó típusa	Port	Feladat
RJ-45	eth0	Csatlakozás a switch-hez, eszközparkhoz
4G LTE antennák	3g-wan	Szélessávú internet elérés
micro-USB	usb0	Szerviz elérés

1. táblázat: Az M2M 4G LTE router interfészeinek osztott feladatkörök listája.

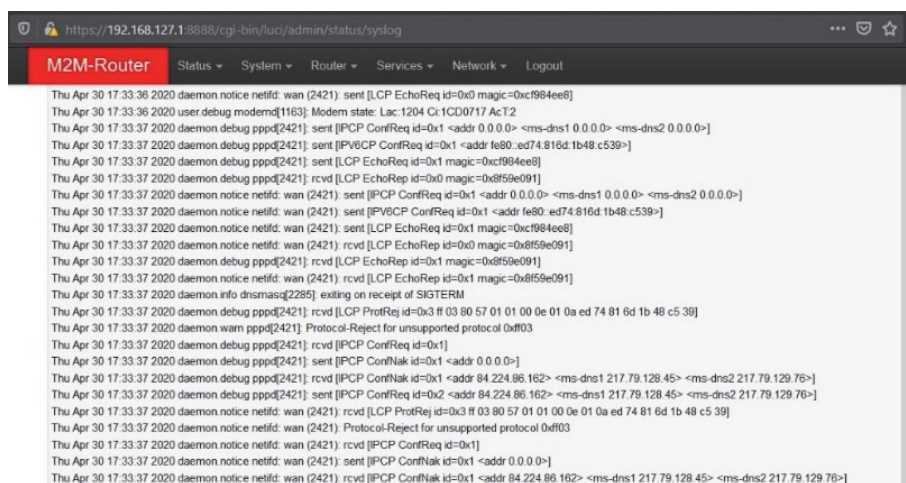
Az interfészek beállítása a LuCi webes felületen keresztül történt. A kábeles kapcsolatok esetén csak a DHCP szerver kikapcsolását volt fontos megtenni, hiszen erre a feladatra nekünk dedikált eszközünk van, ellenben a mobilhálózat beállításainál már ennél többre volt szükség. A beállítás során több hálózat specifikus beállítást is meg kellett tenni, mely az épp használatban lévő SIM kártya által használt hálózattal szinkronban kell, hogy legyen. A beállítások során rengeteg protokoll került megvizsgálásra, hiszen a hardveres egység önmagában képes ezek kezelésére, ellenben meg kellett találnunk a SIM kártyának megfelelő beállításokat. Az interfészek beállítására szolgáló felületet az alábbi 4. ábra szemlélteti.



4. ábra: M2M Router interfész beállításai.

Az interfész beállítások után a hálózati tesztek lefuttatását végeztük el, mely során elvégeztünk ping műveleteket és DNS név feloldást is. Megbizonyosodva az internet elérésről, a szoftveres adatnaplózást állítottuk be. Ennek segítségével lehetőségünk nyílik megfigyelni a különböző kommunikációs protokollok felépülését, hálózati válaszát akár egy-egy paraméter módosítását követően is.

Az adatnapló részletes értelmezése rendkívül hasznos lesz a későbbiekben felmerülő problémák gyors orvoslása esetén, vagy akár a legjobb és leggyorsabb kommunikációs megoldás beállítására a végső felhasználás során, esetleg egy másik országban való felhasználás alkalmával. Az adatnapló egy részét az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra: Az M2M router által használt OpenWRT adatnaplója.

3. Mikrotik RB4011iGS switch

A kommunikációs hálózatba kötött eszközök sokasága miatt, szükséges volt egy switch beépítése is a rendszerbe, melyet a lehető leghosszabb távra kívántunk kiválasztani, és nagy számú Ethernet portokkal kívántunk biztosítani. Terveink szerint, a jövőben csak még több TCP/IP alapú eszköz kerülhet majd a prototípusba, ami rövid időn belül eszköz cserét igényelne. Az általunk választott switch (6. ábra) legfontosabb feladata az összes kommunikálni kívánó hardver közti kapcsolat megteremtése az útválasztás során. Tíz portjának köszönhetően jelenleg két szerviz csatlakozóval is elláthattuk a szerelőpanelt, az egyszerű programozás, beállítás és monitorozás érdekében, ezek felhasználhatóak lesznek a későbbi átalakítások esetén, amennyiben új eszközt lenne szükséges bekötni. A switch 12-57 VDC bemenetet képes kezelni, viszont fix teljesítmény esetén az áramok minimalizálása volt a cél, ezért a tápellátást közvetlenül a 48 VDC hálózatról választottuk le, önálló biztosítékkal az elektromos hálózat szakaszolása érdekében. Ennek köszönhetően itt is elegendő volt a 18 AWG méretű kábelek alkalmazása, mely a modul tömegét és szerelhetőségét tekintve is fontos.



6. ábra: Mikrotik RB4011iGS menedzselhető hálózati eszköz.

Ez a switch egy jól kezelhető típus, mely lehetőséget biztosít az összes belső, hálózati beállításának szerkesztésére. A specifikáció [4] fontos tulajdonságait a 2. táblázat tartalmazza.

Architektúra	ARM 32bit
CPU frekvencia	1,4 GHz
RAM	1 GB
Tárhely	512 MB
Max teljesítmény	44 W
Wireless	Dual-band 5/2,4GHz
Méret	228 x 120 x 30 mm

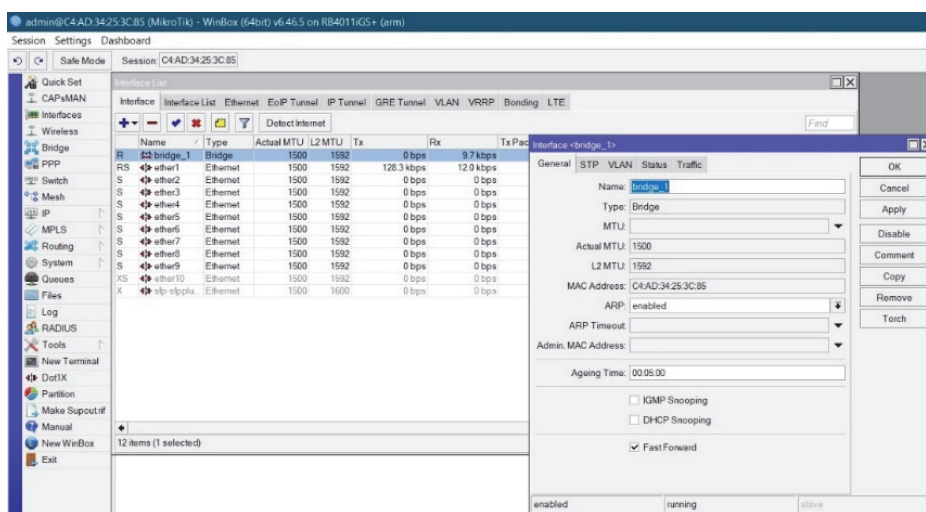
2. táblázat: A Mikrotik RB4011iGS hálózati eszköz fontosabb tulajdonságai.

Elérése egy egyedi WinBox nevű szoftveren keresztül valósítható meg, mely a biztonságot szem előtt tartva az OSI modell [5] szerinti adatkapcsolati rétegen keresztül hardveres MAC cím alapján találja meg a célezközt. A switch a cég saját fejlesztésű RouterOS beágyazott operációs rendszert [6] futtatja, mely az OpenWrt-hez hasonló Linux alapú rendszer. Az első indítást és belépést követően szükséges az összes port és interfész definiálása, valamint az egyedi IP címek kiosztása is. A hálózat beállításához használt fix IP címek az alábbi 3. táblázat szerint kerültek kiosztásra, melyeket MAC címeken keresztül érvényesít a switch.

Eszköz	Definiált IP cím
NVIDIA Jetson Xavier eth0	192.168.1.54
SICK LMS111 Lézer scanner	192.168.1.105
SwiftNav Piksi GPS	192.168.1.222
Ouster - 128 ch LiDAR	192.168.1.204
Mikrotik switch	192.198.1.1
M2M 4G Router	192.168.1.29

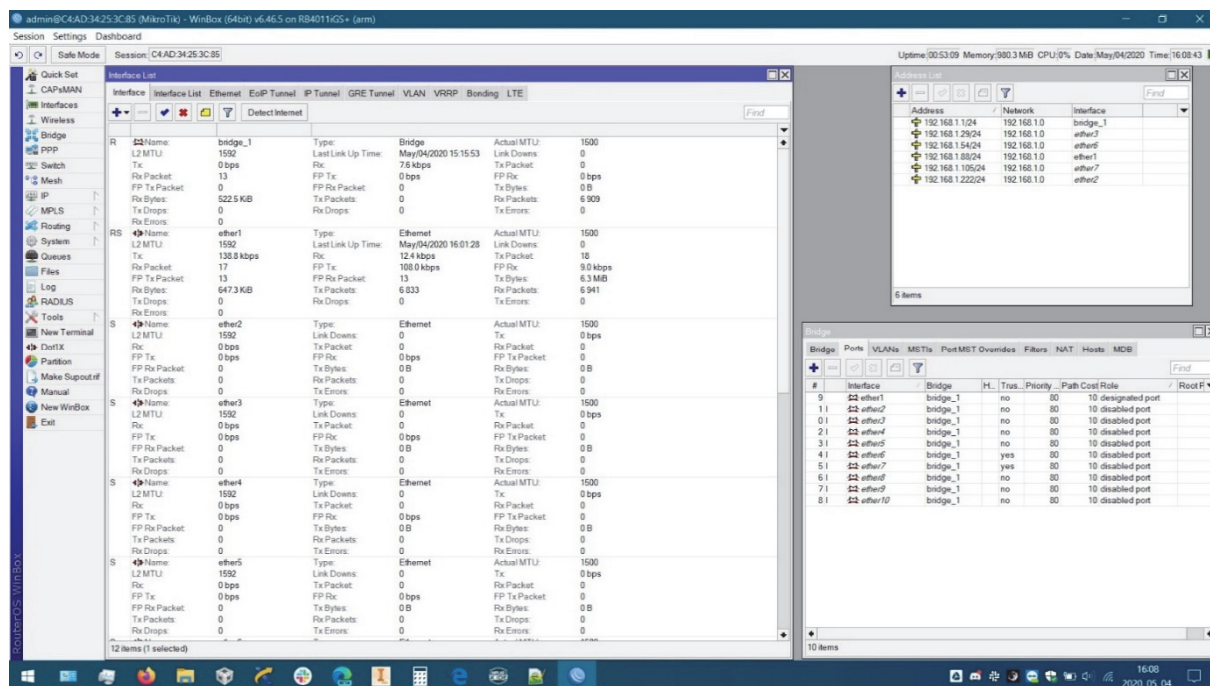
3. táblázat: Az eszközökhöz rendelt IP címek.

Az IP címek részletes beállítását a híd kapcsolat kiépítése zárja, melynek grafikus felületét alább, a 7. ábra szemlélteti. A híd kapcsolatnak köszönhetően a tesztek, és a komplett autonóm autó beüzemelésének idejére minden eszköz láthat minden más eszközt is a hálózaton. A későbbiekben természetesen ez kisebb halmazokra lesz felbontva.



7. ábra: A híd kapcsolat részletes beállítása a Mikrotik RB4011iGS-en

A fejlesztői felület biztosít diagnosztikai eszközöket is a hálózat és az eszköz beállításainak gyors ellenőrzésére, ezeken felül lehetőség van a Linux alapú rendszerhez egy terminálon keresztül is hozzáférni. A hálózati forgalom és az interfészek részletes monitorozására is szükséges volt a konfiguráció során, hogy vizsgálni lehessen az épp állítás alatt lévő hálózati paramétereket melyben nagy segítségül szolgált a portokon folyó kommunikáció részletes nézete. Ennek segítségével egyszerűen vizsgálható volt a küldött és fogadott csomagok száma, valamint az aktuális sávszélesség is.(8. ábra)



8. ábra: Részletes táblázat a Mikrotik által kezelt interfészekről.

4. Összefoglalás

Az autonóm szerelő modul szoftveres élesztése egy hosszú munkafolyamat apró sarokpontja. A kiválasztott és kézhez kapott eszközök beüzemelése nem volt zökkenőmentes, ellenben megismertetett bennünket sok hálózati részlettel, akadállyal és lehetőséggel is, mely eddig a projekt kapcsán nem merült fel, viszont kutatási irányt és témaköröket is nyithat a továbbiakban. Az elkészült beállításokat nem tekintjük véglegesnek, azok optimalizációja a jövőben folytatódni fog, és bízunk abban, hogy a közeljövőben 5G-s méréseket is végezhetünk majd a prototípus autó segítségével a ZalaZone tesztpályán.

5. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] H Hartenstein, K Laberteaux: *Vehicular applications and inter-networking technologies* John Wiley & Sons, Ltd(2009); ISBN:9780470740569; pp. 225-232
- [2] WM Rendszerház: *M2M 4G Router leírás*: https://www.m2mserver.com/m2m-downloads/M2M_Router_Felhasznaloi_Utmutato_V1_94.pdf
(utolsó megnyitás: 2020.06.15)
- [3] OpenWrt Project: *Felhasználói leírás*: <https://openwrt.org/docs/guide-user/start>
(utolsó megnyitás: 2020.06.15)
- [4] Mikrotik RB 4011 Series datasheet: https://i.mt.lv/cdn/rb_files/RB4011-RM-180919132428.pdf
(utolsó megnyitás: 2020.06.15)
- [5] Lencse Gábor: *Számítógép Hálózatok*, 2. kiadás, UNIVERSITAS-GYŐR NONPROFIT Kft. Győr; 2008; pp. 6-10
- [6] Mikrotik: *RouterOS szoftver leírás*: <https://wiki.mikrotik.com/wiki/Manual:TOC>
(utolsó megnyitás: 2020.06.15)

Önvezetés a gyakorlatban: az egyszemélyes kísérletitől a közúti járműig

Autonomous tasks in practice: from one-seated experimental to road-legal vehicle

Horváth Ernő^a, Kőrös Péter^b, Hajdu Csaba^c, Pusztai Zoltán^d, Gulyás Péter^e

^aSzéchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont
herno@ga.sze.hu

^bSzéchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont, Közúti és Vasúti Járművek Tanszék
korosp@ga.sze.hu

^cSzéchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont, Automatizálási Tanszék
hajdu.csaba@ga.sze.hu

^dSzéchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont
pusztai.zoltan@ga.sze.hu

^eSzéchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont
gulyas.peter@ga.sze.hu

Absztrakt: Ahogy egyre több és több autonóm járművekről szóló publikáció jelenik meg, tisztán körvonalazódik, hogy a teljesen autonóm jármű technológia meg fog valósulni. Az egyetlen kérdés az, hogy mikor. Éppen ezért a Széchenyi István Egyetem eltökélt szándéka az önvezető technológia kutatása és oktatása. A két terület eltérő szükségleteket és hozzáállást igényel. A publikációban leírjuk a rendszer architektúráját, és az általunk használt rendszereket és szenzorokat. Továbbá össze kívánjuk foglalni az egyszemélyes kísérleti önvezető járműről közúti járműre történő migráció helyzetét. Meghatározzuk a migrációs folyamat kihívásait, és azt, hogy miként lehet ezeket leküzdeni. Jelen cikk esettanulmányokat és javaslatokat is bemutat az autonóm járművekre és a szenzorrendszerekre vonatkozóan.

Kulcsszavak: önvezetés, szenzorok, járművek

Abstract: As more and more papers published regarding autonomous vehicles, it can be clearly seen that fully functioning autonomous vehicles will be realized, the only question is when. Thus, Széchenyi István University is determined to *research* and *educate* autonomous technology. The two fields require different necessities and attitude. In this work, we describe our system architecture and the specialized sensors we used. In the paper we would like to summarize the migration from a self-developed, one-seated vehicle to a road-legal vehicle. We will define the challenges of the migration process and how to overcome these challenges. The current paper also proposes use-cases and suggestions regarding autonomous vehicles and sensory systems.

Keywords: self-driving, sensors, vehicles

1. Bevezetés

Cikkünk fő eredményterméke, hogy az olvasót megismerteti a jelenleg alkalmazott fejlesztési gyakorlattal az önvezetés, autonóm járműfejlesztés különböző vonatkozásaiban. Emellett ismerteti azokat a tervezési döntéseket is, amikor széles spektrumú **kutatási, fejlesztési és oktatási** feladat lefedése is cél. Mindhárom terület eltérő követelményrendszerrel rendelkezik, amelyeket meglehetősen nehéz megkerülni.

A kutatásból az oktatásba történő átmeneti folyamat kevésbé fájdalmas lehet, ha összeegyeztetjük a két rendszer követelményeit és akár a két rendszer fejlesztését is. A projektjeink kezdetén sok hetet, akár hónapokat is áldoztunk az igények kielégítő ökoszisztémájának megalkotásán. Abban az időben ugyanis nem volt útmutatás az ilyen ambiciózus projekt elindításához. A jelenlegi publikáció szeretne legalább egy szerény darabot kitölteni a területen tátongó űrből.

Az elején úgy döntöttünk, hogy készülő autonóm rendszerünk biztosítsa a következő szükséges minimális elvárásokat. Ezeket az elvárásokat az alábbiakban soroljuk fel:

- A rendszernek robusztusnak, egyidejűleg a lehető legegyszerűbbnek kell lennie
- A rendszernek minden körülmények között biztonságosnak kell lennie, és soha nem okozhat pénzügyi károkat vagy sérüléseket
- A rendszert könnyen karban kell tudni tartani, és kiterjeszthetőnek kell lennie / lehetőséget kell biztosítani a jövőbeli interfészekre történő kiterjesztésre
- A szoftver lehet nyílt forráskódú vagy zárt, de együtt kell működnie a meglévő szoftverünkkel (MATLAB, LabVIEW)
- A rendszert a lehető legjobb szenzorokkal kell felszerelni
- A rendszernek elegendő számítási teljesítményt kell biztosítania minden jelentős érzékelési, észlelési, tervezési és azt követő feladat elvégzéséhez
- Legyen jövőbiztos, azaz a továbbfejlesztés lehetősége legyen adott a jövőbeli technikákkal

Egy ilyen komplex rendszer megtervezése és fejlesztése meglehetősen nagy kihívást jelent. Számos követelményt kell figyelembe venni: az architektúrának egyszerűnek, olcsónak, de elég rugalmasnak kell lennie.



1. ábra. Bal oldalon az egyszemélyes hallgatók által fejlesztett, míg jobb oldalt a közúti elektromos jármű

A saját példánkat esettanulmányként hivatkozva a következő előre meghatározott kezdeti feltételek álltak rendelkezésünkre. Kutatóközpontunk elkötelezett a környezetvédelem iránt (ideértve a különféle veszélyes gázok, például CO₂-kibocsátás csökkentésére való törekvéseket), cél tehát, hogy lehetőség szerint elektromos járműveket használjunk. A hallgatók egy elektromos, együléses járművet terveztek és készítettek (1. ábra), ám a tervezés első pillanatától a jövőbeni önvezetési feladatokkal is számoltak. Ami a kutatási oldalt illeti,

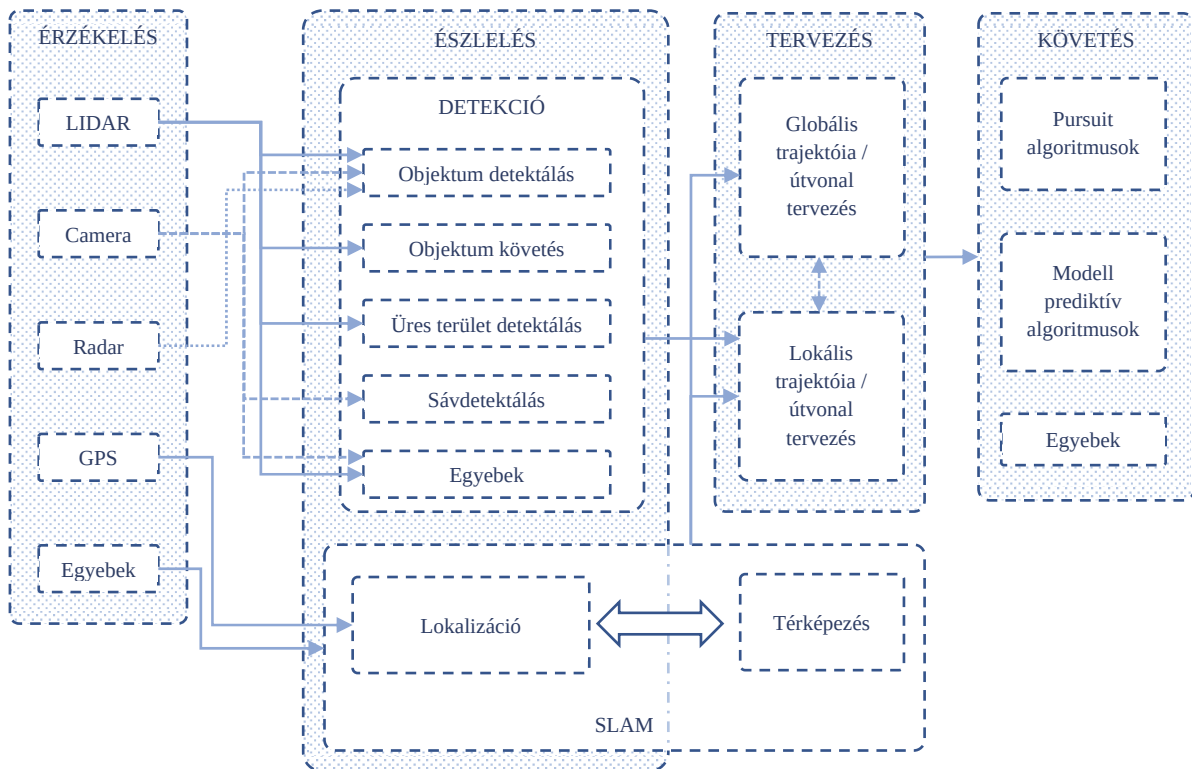
kutatóközpontunk jó kapcsolatot ápol a Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézettel (SZTAKI), ami a közúti alapjármű kiválasztásánál játszott fontos szerepet. Ez a jármű egy elektromos, első generációs Nissan Leaf lett (1. ábra).

2. Szenzorok

a. A rendszer áttekintése

Rendszer-felépítés szempontjából egy autonóm jármű (absztrakt szinten robot) alrendszerei az alábbiak szerint írhatók le. A fő modulok: érzékelés, észlelés, tervezés és követés. Az *érzékelés* adatait az érzékelő modul gyűjti össze, ami gyakorlatilag egyszerű adatgyűjtési feladatot jelent. Az *észlelési* komponens összetettebb folyamatokat tartalmaz, azaz az összegyűjtött adatok értelmezését. A *tervezésnél* megkülönböztethetünk globális és lokális szintet. A globális tervezés azzal foglalkozik, hogy hogyan érhető el általában a B pont az A pontból, az előre ismert megszorítások mellett. Ezzel szemben a lokális tervezés a szenzorok észlelési tartományban az útvonal (trajektória) újratervezésére korlátozódik. Amint az adott trajektória összeállt, akkor annak végrehajtását a *követés* komponens végzi.

Ezeket a modulokat tovább lehet osztani almodulokra és komponensekre.



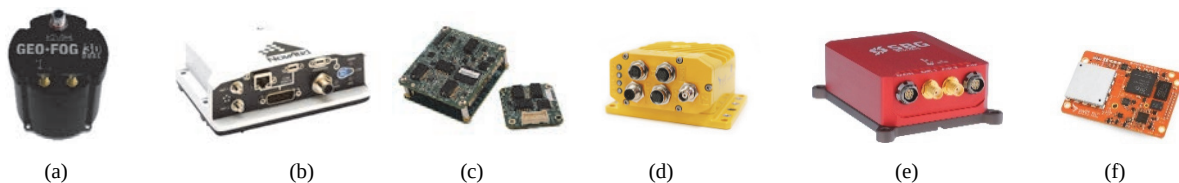
2. ábra. Egy autonóm jármű vagy robot absztrakt rendszerleírása

Jelen publikáció vonatkozásait tekintve összefüggésében az *érzékelés* komponens a legfontosabb. Az érzékelő modul tartalmazza az érzékelőket, amelyek jellemzően: LIDAR, kamera, radar, GPS és egyéb alkatrészek. Más szenzorokra példa lehet az IMU (inerciális mérőegység) vagy az odometria. Az inerciális mérőegység több érzékelő kombinációja. A szenzorrendszer szögsebességet, gyorsulást, tájolást mér különböző szenzorok segítségével. Az említett szenzorok leggyakrabban gyorsulásmérők, giroszkópok és magnetométerek

kombinációját jelentik. Az odometriát különféle kinematikus vagy dinamikus modellek kiszámításával kaphatjuk (például egy autó kerékpár-kinematikai modellje vagy egy differenciális robot differenciális kinematikai modellje). A következőkben bemutatásra kerülnek a fontosabb szenzortípusok és tulajdonságaik.

b. GPS (GNSS)

A GPS (pontosabb, szakmai kifejezéssel élve GNSS) kiválasztása több szempont mérlegelését igényli. Érdemes megjegyezni, hogy a GNSS, amely a globális navigációs műholdas rendszert (Global Navigation Satellite System) jelent, a helyes kifejezés a tárgyalt érzékelő számára. A GPS a legismertebb legkorábbi GNSS-rendszer, a köznyelv viszont gyakran egymás szinonimájaként használja a két kifejezést, ami pontatlan ugyanakkor mégis érthető. Számos gyártó gyárt nagy pontosságú GPS-t (GNSS-t), amely orientációt is szolgáltat. Néhány példa: Javad, Trimble, Leica Viva GS25, Applanix, U-BLOX, SBG Systems, KVH, Swift Nav és NovAtel. Fontos tudni, hogy a járműirányításhoz nemcsak a pozíció, hanem az orientáció is szükséges. Az orientáció természetesen megszerezhető más szenzoroktól is, de a fejlesztés első szakaszában hasznos, ha rögtön rendelkezésre áll. A GPS-érzékelők pontossága többféle módon mérhető. Ide tartoznak a CEP (körkörös szórás), RMS (négyzetes középérték), RMSE (átlagos négyzetgyök hiba), átlagos hiba, DRMS (távolság-súlyozott átlagos négyzetgyök hiba). Szerencsére ezeket a pontossági mértékeket konvertálhatjuk egymásba, de az szenzorok adatlapjai jellemzően különböző mértékegységeket használnak. Az amerikai kormányzat szerint a klasszikus GPS pontosságát négyzetes középértéke ~ 4 m [1] pontosságú ~ 5 Hz frekvencián. A differenciál GPS (DGPS) pontosabb lehet ~ 10 cm RMS-ig. A valós idejű kinematika (RTK) kibővítésével az érzékelő ~ 1 cm-re lehet RMS-re. Járművezérléshez (kiegészítő érzékelő nélkül) 10 cm RMS vagy pontosabb ajánlott.



3. ábra. GPS (GNSS) szenzorok különböző kivitelekben

Első tapasztalatunk a KVH GEO FOG Dual 3D-vel volt (lásd 3/a ábra). Ez a szenzor alkalmasnak mondható járművezérlési feladatokhoz. Duális antennás, az orientációt a két antennából nyeri. Megjegyzendő, hogy az orientációt egy antennából is ki lehet számítani. Ez az érzékelő szintén RTK technológiát használ, így további vezeték nélküli mobil telekommunikációra van szükség a legpontosabb póz (pozíció és orientáció) elérése érdekében. A szenzor hátrányai az interfészei (csak RS-422 és RS-232) és viszonylag magas ára. Az összes vizsgált szenzor IMU-t is használ leginkább az orientáció számításához, valamint a "dead reckoning"-hoz, ha nincs rendelkezésre álló műholdas jel. A szenzorfüziónél általában egy konfigurálható Kálmán-filter a felelős. Ezen kívül tapasztalataink vannak a NovAtel PW7720E1-DDD-RZN-TBE-P1 (lásd a 3/b ábra) duális antennás RTK-képes GPS szenzorával is. Ez egy modernebb szenzor a korábban leírtéhoz képest. Ennek nagy előnye a CAN és az Ethernet interfész. A használt érzékelők közül az utolsó a Swift Navigation (SwiftNav) Duro Inertial (lásd 3/d ábra). A Duro Inertial a Pixi Multi Inertial RTK GNSS vevő dobozolt, katonai minőségű változata. Ennek létezik még egy olcsóbb változata is, amely nem tartalmazza az IMU-t, de ez nem ajánlott járművekhez. Ez lassabb pozíciófrissítést biztosít (10 Hz stabil

alacsony késleltetésű üzemmód illetve 20 Hz, de ez a városi területeken instabil lehet), és egyetlen antennával rendelkezik. A leírtaknak megfelelően az ára is jóval alacsonyabb, mint a korábban leírtaké, még úgy is, hogy minden fontos interfésszel rendelkezik: RS232, CAN, ethernet.

c. LIDAR

A LIDAR-t hagyományosan a következő célokra használják: LOAM: LIDAR odometria és térképezés valós időben, NDT pont-felhő illesztés, NDT SLAM és objektumdetekció. Tapasztalataink a következő gyártókkal vannak: Velodyne, Ouster és SICK. Mindegyik gyártó kellő támogatást nyújt, és nagy pontosságú, tartós termékeik mindegyike alkalmas járműves célokhoz. A szenzorhelyezés tekintetében, tapasztalataink alapján a legjobb megoldás az, ha a nagy csatornaszámú LIDAR-t a jármű tetejére helyezzük, és a vakfoltokat kifeléből LIDAR-okkal fedjük le. A LIDAR szenzor kiválasztása nehéz feladat lehet. A projekt kezdete után rögtön megvizsgáltuk a lehetőségeinket, megállapíthattuk, hogy nagyjából 10 típus jöhet szóba a céljainknak megfelelően. Egy év után ugyanezt a kutatást végeztük, és ekkor ez a szám több mint háromszor nagyobb volt. Az I. táblázat önkényesen kiválasztott szenzorokat mutat a cikk megjelenésének idején. Frissebb listát a GitHub-on teszünk közzé: <https://github.com/szenergy>. Szerencsés módon az összes vizsgált szenzor ROS kompatibilisnek bizonyult. Mivel a piac nagy ütemben bővül, csak általános ajánlások fogalmazhatók meg. Sok gyakorlati szempont van, egyik, hogy a legtöbb szenzor 12 V-os áramforrásról működik, de pl. az Ouster 24 V-os. Adott esetben tervezési szempont lehet, hogy minden szenzor egy bizonyos feszültségszinten legyen, mivel nehézkes lehet később egy másik feszültségszintű szenzor csatolása.

Név	Horiz. FOV	Vertikális FOV	Csatornák száma	Tömeg (g)	Távolság (m)
Hesai Pandar40	360°	+7° -16°	40	1430	200
LeiShen Ls32	360°	+15° -16°	32	1500	150
Luminar Hydra	270°	30°	200p/deg ²	N/A	250
Ouster OS-1 128	360°	45° (gen2)	128	455	120
Ouster OS-1 16	360°	31.6°	16	330	120
Ouster OS-1 64	360°	31.6°	64	330	120
Robosense RS LIDAR 16	360°	±15°	16	840	150
Robosense RS LIDAR 32	360°	+15° -25°	32	1130	200
Robosense Ruby	360°	+15° -25°	128		200
Sick LMC132-11101 VdS	270°	1 Ch	1	1100	18
Sick LMS111	270°	1 Ch	1	1100	18
Sick MRS1000	275°	7.5°	4	1200	64
Velodyne Puck VLP-16	360°	±15°	16	830	100
Velodyne Ultra Puck VLP-32C	360°	+15° -25°	32	925	200

I. táblázat. LIDAR szenzorok összevetése

Egy másik gyakorlati szempont lehet a látómező (FOV). Járműveknél fontos, hogy nem csak egyenesen elosztott csatornájú LIDAR létezik. Például az Ouster OS1 1. generációs változatának 31,6 ° függőleges FOV értéke van, ami ± 15,8 ° vagy ~ 5 ° -26,6 ° is lehet. Még érdekesebb pl. A Hesai Pandar sorozatot autóiipari célokra tervezték, így a függőleges középső csatornák sűrűbben helyezkednek el. Ez elég egyedülálló csatornaeloszlás, további érdekesség még a Luminar megközelítése szintén nem hagyományos megközelítése. Ugyanis a hagyományos megközelítés az, hogy a LIDAR csatornákat egymás fölé tervezik, és vízszintes irányú forgással mérnek. A Luminar szinte kameryszerű felbontást kínál, mivel az érzékelő a

vízszintes helyett két dimenzióban is mozog. Egy másik folyamatban lévő áttörés a "solid state" megközelítés. Ez megváltoztatható, különböző felbontási zónákat ígér alacsonyabb áron, de cikk az írásának idején csak előrendeléseként érhető el.

d. Radar

A radartechnika hasonló a LIDAR-hoz abban az értelemben, hogy meg tudja határozni a tárgy távolságát. A fő különbség, hogy rádióhullámokat használ a szemre biztonságos lézert fény helyett. Ez hagyományosan olcsóbb megközelítés, bár távolról sem olyan pontos, mégis bizonyos időjárási körülmények között van előnye. Csak a Continental ARS 408 szenzorral vannak tapasztalataink. Ez a szenzor gyors, általában megbízható és költséghatékony, valós idejű távolságot biztosít az objektumok szkenneléséhez. Csak a CAN interfészt támogatja, ennek oka az autóiipari használat. A radarnak van egy beépített ütközésetekciós eljárása, amely (a jármű sebességétől függően) adatokat szolgáltat egy esetleges ütközés kockázata esetén. Tehát alapvetően előfeldolgozott információkat ad a járműnek. Ezzel szemben a LIDAR nyers 3D-s adatokat szolgáltat. A radar az időjárási körülmények nagy részén működőképes. A hagyományosan alacsonyabb költségeket a gépjárműipar tömeggyártása és az egyszerűbb mérési technológia okozza.

e. Kamera

A kamera az egyik legolcsóbb érzékelő, amelyet egy autonóm jármű használhat. Természetesen ez a költség attól is függ, hogy kül- vagy beltérben használható, milyen sebességet, felbontást, lencsét stb. biztosít. A választási szempontok meglehetősen egyszerűek, látómező, mintavételi gyakoriság, felbontás és a további funkciók. További funkciók alatt értjük pl. mélységérzékelést, további integrált szenzorokat (IMU) vagy sztereo kivitelt. A különböző keretrendszerek különböző kamerákat támogatnak, de itt a kompatibilitás ritkán jelent problémát. Például az Autoware [2] támogatja az összes ROS-kompatibilis kamerát: PointGrey Glasshopper, LadyBug, Baumer, StereoLabs stb. Míg Baidu Apollo [3] a Leopard, a Truly és a Wissen kamerákat ajánlja. Tapasztalataink vannak a StereoLabs Zed kamerával. A StereoLabs Zed érzékeli és feldolgozza a környezetet és legfeljebb 40 m távolságig becsült távolsági információt is szolgáltat. Ez azt jelenti, hogy leginkább olyan kis sebességű feladatokra alkalmas, min pl. a parkolás. A mélységi-adat szolgáltatása mellett klasszikus USB3 sztereo kameraként működik. A kamera a legnagyobb kihívása általában az észlelés. Ezt számos [4] tényező okozza: pl. az objektum méreteinek változása, nézőpontváltozás, deformáció, kitakarás, megvilágítási körülmények, háttérbe beleolvadás, osztályon belüli variáció.

f. Odometria

Odometria alatt a póz (pozíció és orientáció) becslését értjük, bármely mozgásérzékelőtől kapott adat alapján az idő függvényében. Ez a fejezet a jármű hosszirányú sebességéből és a kormányzásból kiszámított odometrával foglalkozik. Ennek oka, hogy ez a két szenzoros kimenet megtalálható minden kereskedelemben kapható járműben, sőt hallgatói járműveinkben is. A jármű (általános esetben robot) mozgásának kinematikai leírására a bicikli modell alkalmas (Bicycle Model, BM) [2]. A jármű ebben az esetben négy kerékkel rendelkezik, ahol az irány megváltoztatása az első kerekek forgatásával érhető el. A modell számol az Ackermann

kormányzás megkötéseivel. A jármű kinematikai modellje a bicikli modell (BM) tehát a kormányzási szög, a jármű sebesség és a jármű pozíciója közötti kapcsolatot (1) írja le a globális referenciakeretben.

$$\dot{q} \rightarrow \begin{cases} \dot{x} = v_1 \cdot \cos(\theta) \\ \dot{y} = v_1 \cdot \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega = v_1 \cdot \tan(\gamma)/L \end{cases} \quad (1)$$

Ahol

- x a pozíció vektor longitudinális komponense;
- y a pozíció vektor laterális komponense;
- v_1 a sebesség normálja, laterális sebesség;
- γ a jármű orientációja;
- ω a jármű szögsebessége;
- γ a jármű kormányzöge;
- L a jármű tengelytávolsága.

A direkt kinematikai probléma Euler-féle közelítés alapú numerikus megoldása (2) a következőképp írható fel:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} \delta_d \cdot c(\theta + \delta_\alpha) \\ \delta_d \cdot s(\theta + \delta_\alpha) \\ \delta_\alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

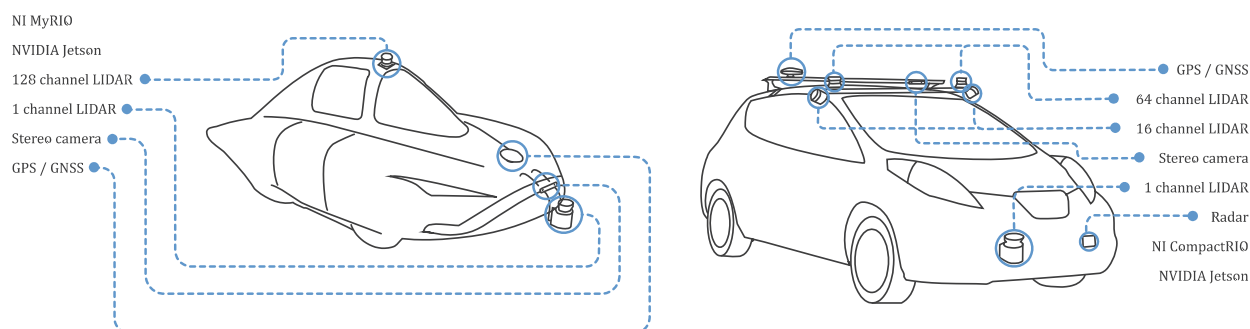
ahol:

$$\mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ \theta(k) \end{bmatrix}, \begin{cases} \delta_d = v_k \cdot \Delta t \\ \delta_\alpha = \omega_k \cdot \Delta t = \frac{v(k)}{L} \tan(\gamma(k)) \cdot \Delta t \end{cases}$$

Itt Δt a mintavételezési idő.

3. Esettanulmány és záró gondolatok

A cikkben az esettanulmány egy egyszemélyes elektromos járművet (Szenergy) és egy közúti elektromos járművet (Nissan Leaf) jelent. A projektünk legelején két külön ágon folyt fejlesztés, egy a kutatás és egy a fejlesztés irányába. Azonban hamar rájöttünk, hogy szinkronizálnunk kell a rendszereket, hogy minimalizáljuk az átmeneti nehézségeket a két rendszer között. Ehhez egy egységes keretrendszerre vagy köztes szoftverre volt szükség. A szükséges eszközök (interfészdefiníciók, GUI-k, hibakeresési eszközök, naplózás, visszajátszás stb.) nulláról történő építése általában nem javasolt, ez a mi kereteinket meghaladó feladat. Szerencsére rengeteg ilyen rendszer érhető el, akár még ingyenesen is. A keretrendszer vagy a köztes szoftver kiválasztása kiterjedt folyamat, és külön cikk célja is lehet [2] [6] [7] [8] [9]. A szakmai vita végén az ROS rendszer mellett döntöttünk, amely kompatibilis platform a meglévő eszközrendszerünkhöz és meglehetősen egyszerűen használható.



4. ábra. Szenzorelhelyezés a két járművön

A kutatási célú jármű (Nissan Leaf) fő funkciója, hogy a kutató munkatársaink számára platformot biztosítson, ahol ki tudják próbálni és értékelni új algoritmusaik vagy megoldásaik eredményeit. Ezért a több, mint elegendő számítási teljesítmény és szenzoros rendszer lett üzembe helyezve a járművön. Így többek között különféle szenzor-fúziós lehetőségeket is megvizsgálhatunk. Itt eltérően az egyedi fejlesztésű hallgatói járművektől, alkalmazkodnunk kellett a meglévő rendszerhez. A kihívás ekkor a jármű kormányzásának és hosszirányú irányításának elérése volt. Itt egy biztonsági rendszert is ki kellett építenünk, amely lehetővé tette, hogy nemcsak a sofőr, hanem a jármű műszaki személyzete is biztonságosan megállítsa a kísérleteket veszély esetén. Eredményeink igazolására több funkcionális tesztet is készítettünk. Ehhez képest a másik járművünket (Szenergy) eltérő célokra szántuk. Az egyszemélyes jármű fő célja, hogy részt vegyen a Shell Eco-marathon Autonomous Urbanconcept versenyen (SEM-AUC), ezáltal lehetőséget adva a hallgatók számára, hogy ilyen komplex rendszerrel dolgozhassanak. Itt nagy jelentősége van az energiahatékonyságnak. Ez a verseny eredeti céljának és a hallgatói csapatunk gondolkodásmódjának a következménye. Tehát több érzékelő használata helyett itt egy minimalista konfiguráció mellett döntöttünk. Ez azt jelenti például, hogy a 4 felső LIDAR helyett csak egy került alkalmazásra. Ezt a jármű alakja és az esetlegesen kölcsönhatásba lépő tárgyak is indokolják. Itt is a CompactRIO helyett hasonló, de kisebb MyRIO készüléket használunk. A két rendszerhez szükséges fejlesztési eszközök többé-kevésbé azonosak, így könnyebb mind a kutatási, mind a hallgatói oldal számára. Jó példa ennek a megközelítésnek a sikereire, amikor a hallgatók saját algoritmusukat kipróbálták a Nissan Leaf-en algoritmikus módosítás nélkül.

Az önvezető és autonóm technológia *kutatása* és *oktatása* eltérő igényeket és hozzáállást igényel. Jelen cikk ajánlásokat és esettanulmányokat mutatott be az önvezető járművek szenzoros és beágyazott rendszerei tekintetében. Továbbá ismertettük azokat a tervezési döntéseket, amelyeket figyelembe kell venni, amikor az említett nagy spektrumú célokat célba kell hozni.

4. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] "US GOV – GPS Accuracy" 2017. [Online]. Available: <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy>. [Accessed 2020]
- [2] S. Kato, S. Tokunaga, Y. Maruyama, M. Hirabayashi, Y. Kitsukawa, A. Monrroy, T. Ando, Y. Fujii and T. Azumi, "Autoware on Board: Enabling Autonomous Vehicles with Embedded Systems," in *ACM/IEEE 9th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS)*, 2018.
- [3] J. Pan, H. Sun, K. Xu, Y. Jiang, X. Xiao, J. Hu and J. Miao, "Lane Attention: Predicting Vehicles' Moving Trajectories by Learning Their Attention over Lanes," *arXiv preprint*, p. arXiv:1909.13377, 2019.
- [4] A. Karpathy and e. al., Writers, *Convolutional Neural Networks for Visual Recognition notes accompany the Stanford class CS231*. [Performance]. 2017.
- [5] L. Krammer, "Motion Planning for Car-like Robots," Technische Universität Wien, 2010.
- [6] S. Thrun, W. Burgard and D. Fox, *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*, The MIT Press, 2005.
- [7] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [8] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler and A. Y. Ng, "ROS: an open-source Robot Operating System cite," *ICRA workshop on open source software*, vol. 3, no. 2, 2009.
- [9] OSRF, "Robot Operating System," Open Source Robotics Foundation, [Online]. Available: <http://wiki.ros.org/>

Sebességszenzor nélküli aszinkronmotoros hajtás paraméterérzékenységi vizsgálata

Parameter sensitivity analysis of speed sensorless induction motor drive

Horváth Krisztián

Széchenyi István Egyetem, Automatizálási Tanszék
krisztian.horvath@sze.hu

Absztrakt: Ez a tanulmány egy sebességszenzor nélküli aszinkronmotoros hajtás paraméter-érzékenységi vizsgálatának eredményeit ismerteti. A vizsgált hajtás sebességszabályozását egy állapotbecslésen alapuló mezőorientált irányítási módszer biztosítja, ahol az aszinkron gép nemlineáris viselkedése miatt alkalmazott becslőalgorithmus az unscented Kalman filter (UKF). A szabályozott hajtás szimulációs környezetben végzett paraméterérzékenységi vizsgálata során sebességválaszok kerülnek összehasonlításra különböző mértékben elhangolt motorparaméterek mellett.

Kulcsszavak: aszinkronmotoros hajtás, nemlineáris állapotbecslés, sebességszenzor nélküli irányítás, paraméterérzékenységi vizsgálat

Abstract: This study presents the main results of a parameter sensitivity analysis made for a speed sensorless induction motor drive. In this drive, the rotor speed is controlled by an estimator-based field-oriented control method, in which structure the unscented Kalman filter (UKF) algorithm is applied for state estimation due to the non-linear behavior of the machine. For the parameter sensitivity analysis of the controlled drive, step response simulations are investigated besides detuned motor parameters.

Keywords: induction motor drive, non-linear state estimation, speed sensorless control, parameter sensitivity analysis

1. Bevezetés

A sebesség- és pozíciószenzor nélküli, szabályozott aszinkronmotoros hajtások olyan vonzó tulajdonságokkal rendelkeznek, mint az alacsony költségű gyárthatóság és a magas megbízhatóság. Az ilyen hajtások széles körben alkalmaznak állapotbecslőket, amelyek megfelelő pontossággal képesek meghatározni a hajtásszabályozási algoritmusok számára alapvető fontosságú változókat.

Az aszinkron gépek nemlineáris viselkedése miatt állapotbecslőként olyan algoritmusok alkalmazhatók, amelyek képesek kezelni a nemlineáris állapottermodelleket. A legelterjedtebb ilyen állapotbecslő algoritmus az extended Kalman filter (EKF), amelyet sebességszenzor nélküli állapotbecslőként alkalmaznak az [1]-[3] munkák. Azonban az EKF számos jól ismert hátrányos tulajdonsággal rendelkezik, amelyek a nemlineáris rendszer elsőrendű, lineáris közelítéséből származnak. A linearizálási hibák elkerülésére dolgozták ki az unscented Kalman filter (UKF) becslő algoritmust, amely az unscented transzformációt (UT) alkalmazza a nemlineáris modellek kezelésére. UKF alapú sebességszenzor nélküli hajtásszabályozási módszerek a [4]-[8] publikációkban olvashatók.

A szabályozott hajtások állapotbecslőinek és irányítási algoritmusainak tervezéhez a legtöbb esetben felhasználásra kerülnek az aszinkronmotor paraméterei. Ezek a paraméterek azonban nem minden esetben ismertek kellő pontossággal, illetve változhatnak a különböző üzemi tartományokban, így a szabályozott hajtás teljesítőképessége jelentősen romolhat. Jelen tanulmányban egy UKF becslőt alkalmazó sebességszenzor nélküli hajtásszabályozási módszer paraméterérzékenységi vizsgálatának fő eredményei kerülnek közlésre. A szerző felhívja a figyelmet arra, hogy az alkalmazott UKF állapotbecslő a korábbi [6] konferenciákban került bevezetésre és azt a [7]-[8] publikációk is alkalmazzák sebességszenzor nélküli hajtásszabályozási algoritmusokban. Azonban újdonság a [6]-[8] munkákhoz képest, hogy a mezőorientált irányítási algoritmus kaszkád elven bővítésre kerül egy sebességszabályozási hurokkal. Emellett a [8] konferenciákban olvasható paraméterérzékenységi vizsgálatokhoz képest újdonság, hogy stationer üzem mellett a dinamikus viselkedés is vizsgálatra kerül.

2. Alkalmazott modellek és algoritmusok

Ebben a fejezetben röviden áttekintésre kerül az UKF algoritmus, az aszinkron gép alkalmazott állapotterez leírása és a sebességszenzor nélküli hajtásszabályozási módszer.

2.1. Az UKF algoritmus

Általános esetben, egy nemlineáris rendszer diszkrét idejű állapotátviteli egyenlete a következőképpen írható:

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{f}(\mathbf{x}[k], \mathbf{u}[k]) + \mathbf{w}[k] \quad (1)$$

ahol $\mathbf{x}[k]$, $\mathbf{u}[k]$, $\mathbf{w}[k]$ az állapotvektor, a bemeneti vektor, a rendszerzaj a k időpontban és $\mathbf{f}(\mathbf{x}[k], \mathbf{u}[k])$ ismert nemlineáris függvény. A mérési modell számos gyakorlati esetben lineáris és a kimeneti egyenlet

$$\mathbf{z}[k] = \mathbf{H}\mathbf{x}[k] + \mathbf{v}[k] \quad (2)$$

ahol $\mathbf{z}[k]$ és $\mathbf{v}[k]$ a mérési vektor és mérési zaj, valamint $\mathbf{H}$ a kimeneti mátrix. Az (1)-(2) egyenletekben $\mathbf{w}[k]$ és $\mathbf{v}[k]$ valószínűségi változók, amelyek fehérzaj-folyamatként realizálhatók zérus átlaggal, valamint $\mathbf{Q}$ és $\mathbf{R}$ kovarianciamátrixokkal.

Az UKF egy iteratív algoritmus, amelyben az állapotvektor átlagának és hibakovarianciájának predikcióját egy korrekciós lépés követi, amelyben az állapotvektor becslült értéke frissítésre kerül a legutolsó mérési eredmények felhasználásával. A predikciós lépésben az UKF mintavételi pontokat, ún. szigma pontokat jelöl ki az UT segítségével. Ebben a munkában az általános (general) UT kerül alkalmazásra, amely esetén a $2n+1$ szigma pont a következőképpen kerül meghatározásra:

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{x}_c[k]}^{(i)} = \begin{cases} \mathbf{x}_c[k] & \text{ha } i = 0 \\ \mathbf{x}_c[k] + \left(\sqrt{(n+\kappa) \mathbf{P}_c[k]} \right)_{(i)}^T & \text{ha } i = 1, \dots, n \\ \mathbf{x}_c[k] - \left(\sqrt{(n+\kappa) \mathbf{P}_c[k]} \right)_{(i-n)}^T & \text{ha } i = n+1, \dots, 2n \end{cases} \quad (3)$$

ahol n az állapotváltozók száma, $\mathbf{x}_c[k]$ és $\mathbf{P}_c[k]$ a becsült állapotvektor és a becslési hiba kovarianciamátrix korrigált értéke, κ tervezési paraméter, $\left(\sqrt{(n+\kappa)\mathbf{P}_c[k]}\right)_{(i)}^T$ a $\left(\sqrt{(n+\kappa)\mathbf{P}_c[k]}\right)^T$ mátrix i -edik sora és $\sqrt{(n+\kappa)\mathbf{P}_c[k]}$ az $(n+\kappa)\mathbf{P}_c[k]$ mátrix Cholesky-faktorizációja. Az egyes szigma pontokhoz tartozó súlyparaméterek a következőképpen függenek κ értékétől:

$$\mathbf{W}^{(i)} = \begin{cases} \frac{\kappa}{n+\kappa} & \text{ha } i = 0 \\ \frac{1}{2(n+\kappa)} & \text{ha } i = 1, \dots, 2n. \end{cases} \quad (4)$$

Az ismert nemlineáris függvény segítségével határozhatók meg a szigma pontok értékei a következő időlépésre:

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{x}_p[k+1]}^{(i)} = \mathbf{f}\left(\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{x}_c[k]}^{(i)}, \mathbf{u}[k]\right). \quad (5)$$

A predikciós lépés végén meghatározásra kerül az állapotvektor becsült értéke a $\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{x}_p[k+1]}^{(i)}$ pontok súlyozott összegzésével:

$$\mathbf{x}_p[k+1] = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}^{(i)} \boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{x}_p[k+1]}^{(i)} \quad (6)$$

valamint a becslési hiba kovarianciamátrix a következő összefüggés segítségével:

$$\mathbf{P}_p[k+1] = \sum_{i=0}^{2n} \left(\mathbf{W}^{(i)} \left(\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{x}_p[k+1]}^{(i)} - \mathbf{x}_p[k+1] \right) \left(\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{x}_p[k+1]}^{(i)} - \mathbf{x}_p[k+1] \right)^T \right) + \mathbf{Q}. \quad (7)$$

Mivel a (2) mérési egyenlet lineáris, ezért az UKF algoritmus korrekciós lépésében a lineáris Kalman szűrő egyenletei alkalmazhatók:

$$\mathbf{K}[k+1] = \mathbf{P}_p[k+1] \mathbf{H}^T \left(\mathbf{H} \mathbf{P}_p[k+1] \mathbf{H}^T + \mathbf{R} \right)^{-1}, \quad (8)$$

$$\mathbf{x}_c[k+1] = \mathbf{x}_p[k+1] + \mathbf{K}[k+1] \left(\mathbf{z}[k+1] - \mathbf{H} \mathbf{x}_p[k+1] \right), \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_c[k+1] = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}[k+1] \mathbf{H} \right) \mathbf{P}_p[k+1] \quad (10)$$

ahol $\mathbf{K}[k+1]$ a Kalman erősítés a $k+1$ időpontban.

2.2. Állapotbecslő tervezése

Az előző alfejezetben ismertetett UKF algoritmus állapotbecslőként történő alkalmazásához szükséges megadni az aszinkron gép egy alkalmas állapotmodelljét. Ebben a munkában az aszinkron gép egy bővített, hetedrendű állapotmodellje kerül alkalmazásra, amely a [6] konferenciákban került bevezetésre. Az állapotátviteli függvény folytonos idejű alakja a forgórészfluxus koordináta-rendszerében a következőképpen írható:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{mr} \\ \varphi_r \\ \omega_r \\ \varphi_e \\ T_{load} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s \sigma} v_{ds} - \frac{R_s}{L_s \sigma} i_{ds} - \frac{R_r L_m^2}{L_s L_r^2 \sigma} i_{ds} + \frac{R_r L_m^2}{L_s L_r^2 \sigma} i_{mr} + i_{qs} \omega_r + \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{qs}^2}{i_{mr}} \\ \frac{1}{L_s \sigma} v_{qs} - \frac{R_s}{L_s \sigma} i_{qs} - \frac{L_m^2}{L_s L_r \sigma} i_{mr} \omega_r - \frac{R_r L_m^2}{L_s L_r^2 \sigma} i_{qs} - i_{ds} \omega_r - \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{ds} i_{qs}}{i_{mr}} \\ \frac{R_r}{L_r} i_{ds} - \frac{R_r}{L_r} i_{mr} \\ \omega_r \\ \frac{3}{2} \frac{p^2}{J} \frac{L_m^2}{L_r} i_{qs} i_{mr} - \frac{D}{J} \omega_r - \frac{p}{J} T_{load} \\ \omega_r + \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{qs}}{i_{mr}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ahol az állapotvektor elemei az i_{ds} , i_{qs} állórészáram-komponensek, az i_{mr} mágnesezőáram, a φ_r és ω_r forgórész villamos pozíció, illetve szögsebesség, a φ_e forgórészfluxusvektor-pozíció és a T_{load} külső terhelés. A modell bemenetei v_{ds} és v_{qs} állórészfeszültség-komponensek, valamint paraméterei az R_s , R_r állórész- és forgórész-ellenállások, az L_s , L_r állórész- és forgórész-induktivitások, az L_m kölcsönös inductivitás, a p póluspárszám, a J inercia és a D súrlódási tényező. A (11) egyenletben a teljes szivárgási tényezőt σ jelöli, amely az inductivitásértékekből a következőképpen határozható meg:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}. \quad (12)$$

Az állórész- és forgórész-induktivitások felbonthatók az alábbiak szerint:

$$L_s = L_{ls} + L_m, \quad (13)$$

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (14)$$

ahol L_{ls} az állórész szivárgási inductivitása, valamint L_{lr} a forgórész szivárgási inductivitása. Mivel az UKF algoritmus a 2.1. alfejezetben diszkrét alakban került ismertetésre, így annak alkalmazásához a (11) állapotátviteli függvényt diszkrétizálni kell. Az alkalmazott diszkrét közelítés a következő:

$$\mathbf{x}[k+1] = \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}[k], \mathbf{u}[k]) T_s + \mathbf{x}[k] \quad (15)$$

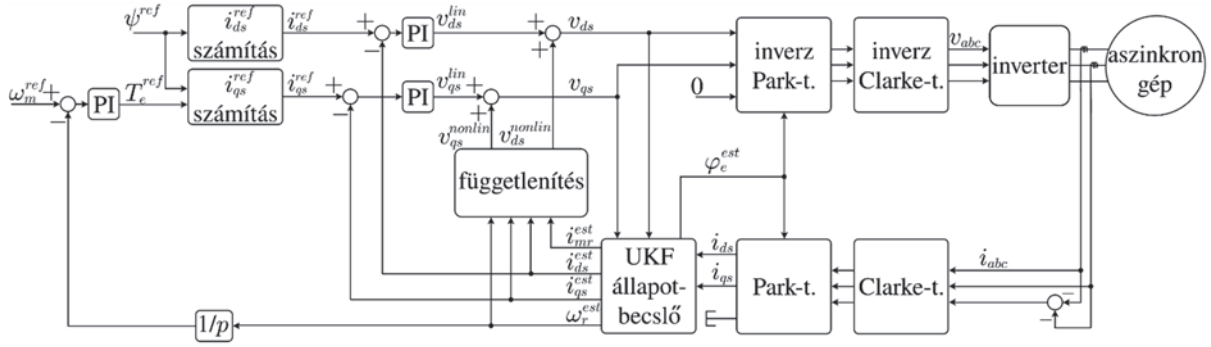
ahol T_s a diszkrét idejű rendszer mintavételi ideje.

Az UKF alkalmazásához szükséges meghatározni a mérési modellt is, amely jelen esetben lineáris és a sebességérzékelő nélküli alkalmazás miatt a mért mennyiségek kizárólag az állórészáramok, így a mérési mátrix:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

2.3. Az alkalmazott sebességérzékelő nélküli hajtásszabályozási algoritmus

Az aszinkronmotor fluxusának és forgórész-sebességének szabályozásához egy mezőorientált elvű irányítási struktúra kerül alkalmazásra, ahol a nyomatékszabályozási kör kaszkád elven sebességszabályozás alá van rendelve. Az alkalmazott sebességszenzor nélküli hajtásszabályozási módszer blokkvázlata az 1. ábrán látható.



1. ábra. Az aszinkron gépes hajtás UKF alapú sebességszenzor nélküli irányítási algoritmusának blokkvázlata

Az 1. ábrán látható, hogy az UKF alapú hajtásszabályozási módszer alkalmazásához elegendő két fázisáram mérése, hiszen két fázisáram ismeretében a harmadik áram Kirchhoff törvénye szerint számítható ($i_a + i_b + i_c = 0$). A fázisáramokból koordináta-transzformációk segítségével előállíthatók az i_{ds} , i_{qs} állórészáram-komponensek, amelyek az ismert állórészfeszültség-komponensek mellett lesznek az UKF becslő bemenetei. Az alkalmazott transzformációs mátrixok a következő alakban írhatók:

$$\mathbf{C} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \text{és} \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_e & \sin \varphi_e & 0 \\ -\sin \varphi_e & \cos \varphi_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

ahol a Park-transzformáció pozícióparamétere az UKF által becsült forgórészfluxusvektor-pozíció.

Az UKF által becsült villamos forgórészsebességet p póluspárszámmal osztva előáll a mechanikus sebesség szabályozásának ellenőrzőjele. A sebességhibajelből PI szabályozó határozza meg a T_e^{ref} elektromágnesesnyomaték-referenciát, amelyből a q -irányú áramreferencia a következőképpen számítható:

$$i_{qs}^{\text{ref}} = \frac{2}{3} \frac{1}{p} \frac{L_r}{L_m} \frac{T_e^{\text{ref}}}{\psi^{\text{ref}}} \quad (18)$$

ahol ψ^{ref} a fluxusreferencia. ψ^{ref} -t osztva a kölcsönös induktivitással meghatározható a d -irányú áramreferencia:

$$i_{ds}^{\text{ref}} = \frac{\psi^{\text{ref}}}{L_m}. \quad (19)$$

Az áramreferenciákból kivonva az UKF által becsült áram-ellenőrzőjeleket, előállnak az áramszabályozási körök hibajelei, amelyekből PI szabályozók segítségével kerülnek

meghatározásra az állórészfeszültségek. A PI áramszabályozók tervezéséhez célszerű felbontani az állórészfeszültség-egyenleteket lineáris és nemlineáris tagok összegére:

$$v_{ds} = \underbrace{\left[R_s i_{ds} + L_m \sigma \frac{d}{dt} i_{ds} \right]}_{v_{ds}^{lin}} + \underbrace{\left[\frac{R_r L_m^2}{L_r^2} i_{ds} - \frac{R_r L_m^2}{L_r^2} i_{mr} - L_s \sigma \left(\omega_r + \frac{R_r i_{qs}}{L_r i_{mr}} \right) i_{qs} \right]}_{v_{ds}^{nonlin}}, \quad (20)$$

$$v_{qs} = \underbrace{\left[R_s i_{qs} + L_m \sigma \frac{d}{dt} i_{qs} \right]}_{v_{qs}^{lin}} + \underbrace{\left[\left(\omega_r + \frac{R_r i_{qs}}{L_r i_{mr}} \right) \left(L_s \sigma i_{ds} + \frac{L_m^2}{L_r} i_{mr} \right) \right]}_{v_{qs}^{nonlin}}. \quad (21)$$

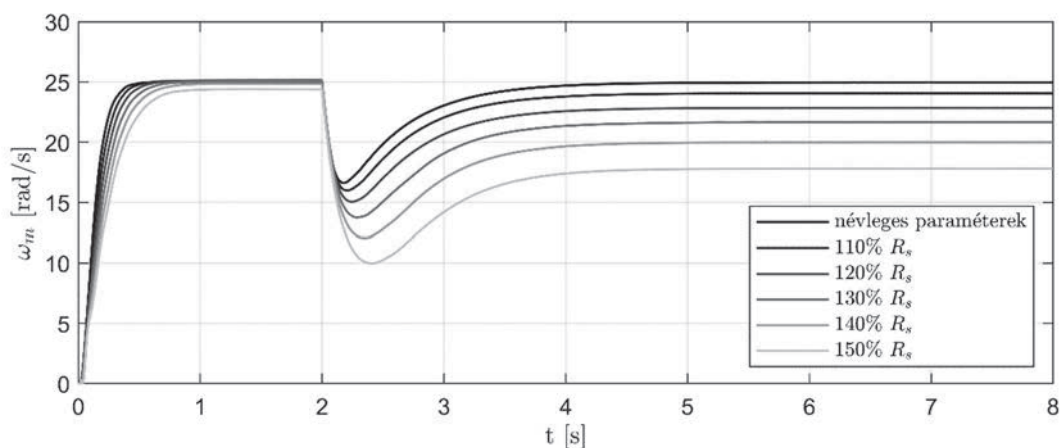
A (20)-(21) egyenletek lineáris tagjai alapján megtervezhetők a PI áramszabályozók erősítési tényezői, a nemlineáris tagokkal pedig kikompenzálható a szabályozók kimenete az 1. ábrán látható módon. Ezzel a kompenzációval függetleníthetők egymástól a d - és q -irányú áramszabályozási körök, ami kedvezőbb dinamikus viselkedést biztosít a szabályozott hajtásnak. Az állórészfeszültség-komponensekből inverz koordináta-transzformációkkal állnak elő a feszültséginverter referenciái.

3. Paraméterérzékenységi vizsgálat

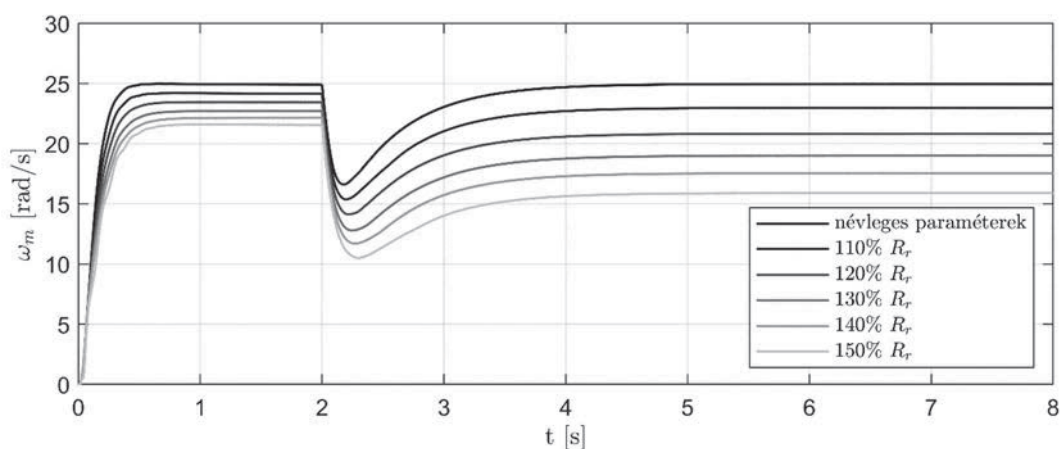
Ebben a fejezetben egy 0.8 kW névleges teljesítményű kalickás forgórészű aszinkronmotoros hajtás paraméterérzékenységi vizsgálatának eredményei olvashatók. Az alkalmazott aszinkron gép névleges paraméterei $p = 2$, $R_s = 4.7 \, \Omega$, $R_r = 5.2 \, \Omega$, $L_m = 0.1690 \, \text{H}$, $L_{ls} = 0.0098 \, \text{H}$, $L_{lr} = 0.0100 \, \text{H}$, $J = 0.001395 \, \text{kgm}^2$ és $D = 0.003429 \, \text{Nms/rad}$. Az UKF állapotbecslő tervezési súlyparamétere $\kappa = 1$, zajparaméterei $\mathbf{R} = \text{diag}\{1.93, 1.93\}$ és $\mathbf{Q} = \text{diag}\{2.68 \cdot 10^{-4}, 1.48 \cdot 10^{-3}, 1.69 \cdot 10^{-6}, 0.34, 9.94 \cdot 10^{-4}, 8.86 \cdot 10^{-6}, 7.04 \cdot 10^{-5}\}$. A sebesség- és áramszabályozók erősítési tényezői $P_{sp} = 0.0127$, $I_{sp} = 0.0262$, $P_{cur} = 2.3500$ és $I_{cur} = 287.0122$.

A paraméterérzékenységi szimulációs vizsgálatok során alkalmazott referenciák $\psi^{ref} = 0.1 \, \text{Wb}$ és $\omega_m^{ref} = 25 \, \text{rad/s}$. A terheletlen indítást követően 2 s-nál T_{load} külső terhelés 0 Nm-ről 0.15 Nm-re ugrik. A vizsgálatok során a becslő és a hajtásszabályozási algoritmus paraméterei változatlanok, azonban a motormodell R_s , R_r , L_m , L_{ls} , L_{lr} , J és D paraméterei a névleges értékről külön-külön elhangolásra kerülnek az egymást követő szimulációk során 10%-os lépésekben. Ilyen módon a sebességválaszok segítségével vizsgálható a szabályozott hajtás érzékenysége az egyes paraméterek megváltozására.

Az állórészellenállás-változás és forgórészellenállás-változás sebességválaszra gyakorolt hatását a 2-3. ábrák mutatják. Látható, hogy R_s paraméter növekedésével nő a szabályozási idő, de terheletlen esetben a statikus pontosság megfelelő. Azonban terhelés mellett a statikus hiba már jelentős. A 3. ábrán látható, hogy R_r paraméter elhangolása esetén már terheletlen esetben is erőteljesen romlik a statikus pontosság. Továbbá terhelt esetben, növekvő R_r értékek mellett a referenciakövetés hibája egyre nagyobb lesz. Ezek alapján megállapítható, hogy a vizsgált, UKF alapú sebességszenzor nélküli hajtásszabályozási módszer mindkét ellenállásparaméter változására nagymértékű érzékenységet mutat.

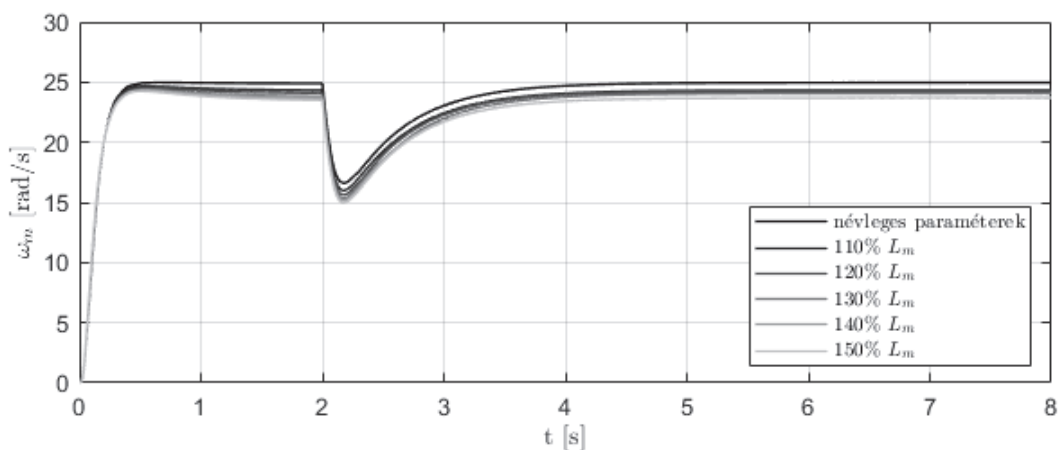


2. ábra. Sebességválaszok különböző mértékben elhangolt R_s értékek mellett

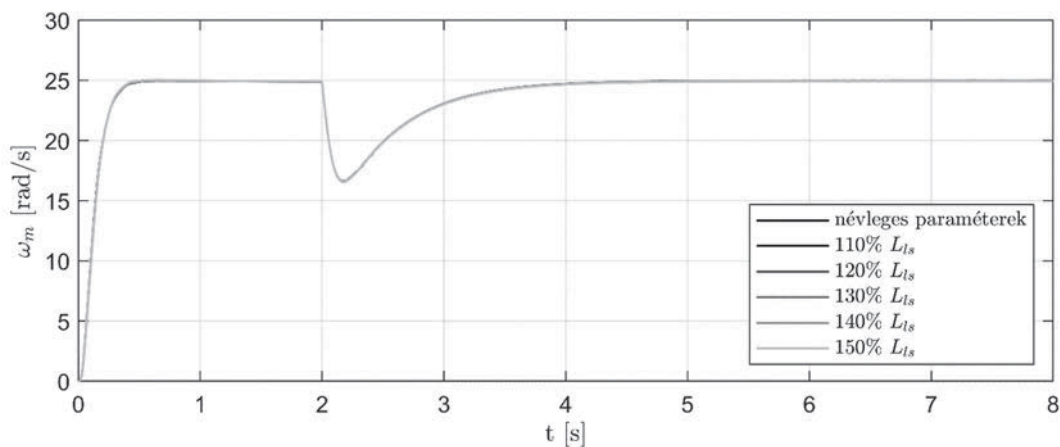


3. ábra. Sebességválaszok különböző mértékben elhangolt R_r értékek mellett

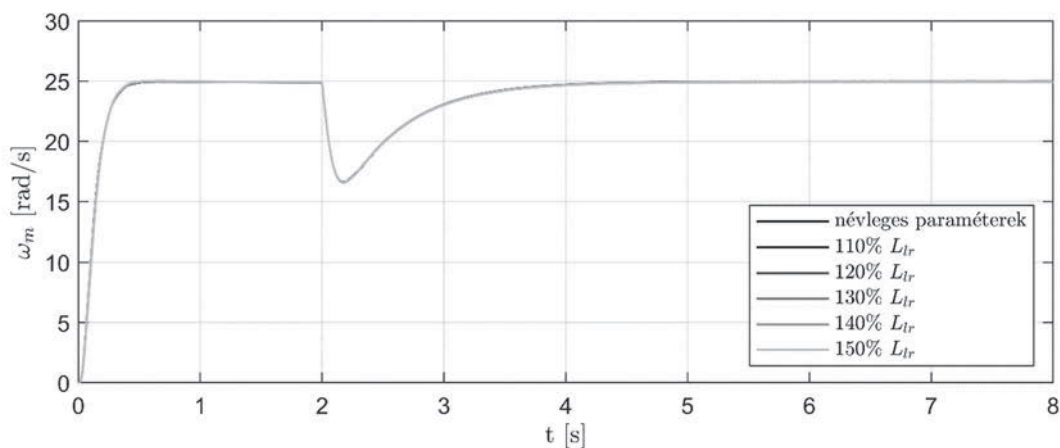
Az induktivitásértékek változásának sebességugrásra gyakorolt hatását mutatják a 4-6. ábrák. A 4. ábrán látható, hogy L_m paraméter változása nem növeli lényegesen a szabályozási időt, de kismértékű statikus hibát eredményez. Ez a statikus pontatlanság azonban kevésbé jelentős, mint R_s és R_r növekedése esetén. Az L_{ls} és L_{lr} szivárgási induktivitások sebességválaszra gyakorolt hatása azonban nem számottevő az 5-6. ábrák eredményei szerint.



4. ábra. Sebességválaszok különböző mértékben elhangolt L_m értékek mellett

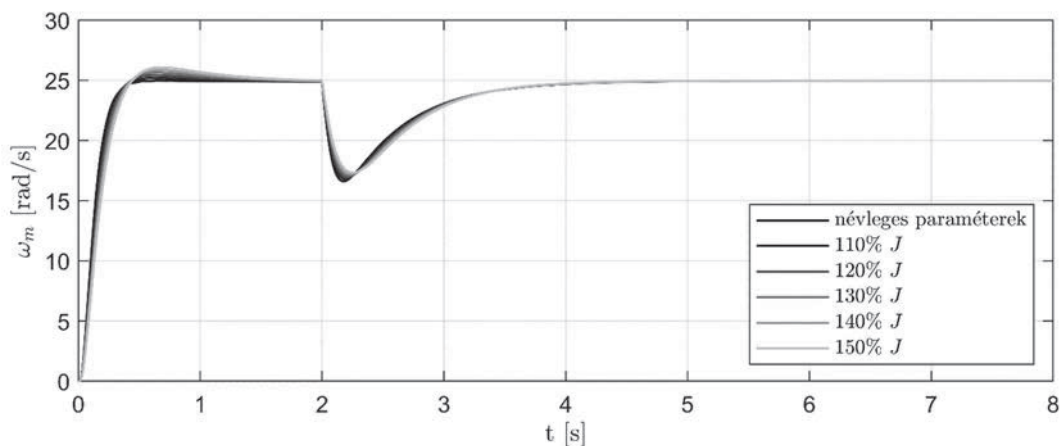


5. ábra. Sebességválaszok különböző mértékben elhangolt L_{ls} értékek mellett

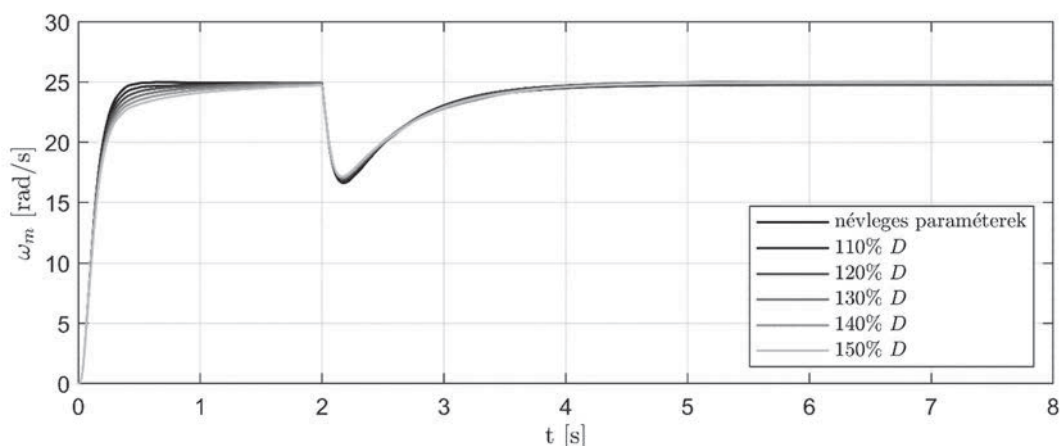


6. ábra. Sebességválaszok különböző mértékben elhangolt L_{lr} értékek mellett

A mozgásegyenlet paraméterváltozásainak sebességugrásra gyakorolt hatását a 7-8. ábrák mutatják. Jól látható, hogy állandósult állapotban mindkét vizsgálat során megfelelő pontosságú a referenciakövetés, azonban a megnövekedett inercia túllendülést eredményez az indítást követően.



7. ábra. Sebességválaszok különböző mértékben elhangolt J értékek mellett



8. ábra. Sebességválaszok különböző mértékben elhangolt D értékek mellett

A paraméterérzékenységi vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a sebességérzékelő nélküli, szabályozott hajtás paraméterérzékenysége az R_s és R_r ellenállásparaméterek tekintetében a legjelentősebb. Ez gyakorlati alkalmazások esetén problémát okozhat, hiszen a hőmérsékletváltozás hatására ezek a paraméterek megváltozhatnak.

4. Összefoglalás

Ebben a tanulmányban egy sebességérzékelő nélküli, szabályozott aszinkron gépes hajtás szimulációs környezetben végzett paraméterérzékenységi vizsgálatának eredményei voltak láthatók. A szimulációk eredményei alapján megállapításra került, hogy a vizsgált hajtás sebességválasza az ellenállásparaméterek változására a legérzékenyebb. Az állórészellenállás-változás és forgórészellenállás-változás sebességválaszra gyakorolt hatásánál látható, hogy R_s paraméter növekedésével nő a szabályozási idő, de terheletlen esetben a statikus pontosság megfelelő. Azonban terhelés mellett a statikus hiba már jelentős. Az R_r paraméter elhangolása esetén már terheletlen esetben is erőteljesen romlik a statikus pontosság. Továbbá terhelt esetben, növekvő R_r értékek mellett a referenciakövetés hibája egyre nagyobb lesz. Ezek alapján megállapítható, hogy a vizsgált, UKF alapú sebességszenzor nélküli hajtásszabályozási módszer mindkét ellenállásparaméter változására nagymértékű érzékenységet mutat.

5. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Young-Real Kim, Seung-Ki Sul, Min-Ho Park: Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter, *IEEE Transactions on Industry Applications* **30** (1994), 1225–1233.
- [2] Murat Barut, Seta Bogosyan, Metin Gokasan: Speed-sensorless estimation for induction motors using extended Kalman filters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **54** (2007), 272-280.
- [3] Francesco Alonge, Tommaso Cangemi, Filippo D’Ippolito, Adriano Fagiolini, Antonino Sferlazza: Convergence analysis of extended Kalman filter for sensorless contr of induction motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **62** (2015), 2341-2352.
- [4] Saeed Jafarzadeh, Cristian Lascu, Mohammad Sami Fadali: State estimation of induction motor drives using the unscented Kalman filter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **59** (2012), 4207-4216.
- [5] Recep Yildiz, Murat Barut, Emrah Zerdali, Remzi Inan, Ridvan Demir: Load torque and stator resistance estimations with unscented Kalman filter for speed-sensorless control of induction motors, *In proceedings of International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) and International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)* (2017), 456-461.
- [6] Krisztián Horváth, Márton Kuslits: Speed sensorless field oriented control of induction machines using unscented Kalman filter, *In proceedings of International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) and International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)* (2017), 523-528.
- [7] Krisztián Horváth, Márton Kuslits: Dynamic performance of estimator-based speed sensorless control of induction machines using extended and unscented Kalman filters, *Power Electronics and Drives* **3** (2018), 129-144.
- [8] Krisztián Horváth, Márton Kuslits: Parameter sensitivity analysis method for speed sensorless induction machine drives based on unscented Kalman filter, *In proceedings of IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)* (2018), 744-749.

Villamos motorok többcélú optimalizációja kriging asszisztens algoritmus alkalmazásával

Multiobjective optimization of electric motors with a kriging surrogate model

Istenes György^a, Dr. Horváth Zoltán^b

^aSzéchenyi István Egyetem
istenes.gyorgy@ga.sze.hu

^bSzéchenyi István Egyetem
horvathz@math.sze.hu

Absztrakt: Mivel villamos hajtásrendszereket sok járműben alkalmaznak, a széles körben változó felhasználási területek megkövetelik az egyes alkalmazásokhoz szabott motorok tervezését. A különböző szempontok szerinti specifikus motorok megtervezéséhez az egyik legcélravezetőbb eszköz a validált szimuláción alapuló többcélú optimalizáció. Ebben a cikkben egy villamos járműmotorok fejlesztését célzó, számítógépes szimulációkon alapuló optimalizációs rendszer, és az ezt kiegészítő kriging asszisztensalgoritmus kerül bemutatásra. A motorok vizsgálatához a motormodellek és szimulációk ANSYS Maxwell és MATLAB környezetben lettek felépítve. Az optimalizáció mérnöki vonatkozásai:

- tervezési változók: a motor geometriai paraméterei;
- célfüggvények és típusaik: veszteségek, tömeg és a mágnesek tömegeinek minimalizálása;
- kényszerfeltételek: a geometriára vonatkozó gyárthatósági feltételek, illetve az egyes optimalizációs paraméterek alsó és felső határértékei.

A MATLAB többcélú genetikusan optimalizáló algoritmusának segítségével lett elvégezve az optimalizáció, amit egy könnyen kezelhető input-output felülettel lehet használni.

Kulcsszavak: optimalizáció, villamos motor, kriging

Abstract: The electric drive systems for cars and other vehicles have been used, the widely varying fields of applications requires custom engine design. The most efficient tool for different specified motor designs is the multi-purpose optimization tool based on a validated simulation. In this paper we developed an electrical engine optimization system with a kriging surrogate model, based on computer simulations. I will present the application of this system. The models and simulations was created in ANSYS Maxwell and MATLAB. The optimization problem for engine design has been set up to meet the criteria of the engineering:

- design variables: the geometric parameters of the engine;
- objective functions and types: minimize the weight of the motor and the magnets and minimize losses;
- constraints: manufacturability of geometry, and the upper and lower limits of each optimization parameters.

The optimization was performed with the multi-purpose genetic optimization algorithm by MATLAB, which we can handle with an easy to use input-output interface inside MATLAB.

Keywords: optimization, electric motor, surrogate model, kriging

1. Bevezetés

Az elektromos és hibrid autók területén szükséges villamos motoroknál, fontos a nagy nyomaték és teljesítménysűrűség, a magas hatásfok, miközben a rendelkezésre álló hely és energiafogyasztás korlátozott. Ezeknek a követelményeknek leginkább az aszinkronmotorok és az állandó mágneses szinkronmotorok (PMS motorok) felelnek meg. Ebben a cikkben egy PMS motorok többcélú optimalizációjára alkalmas szoftver-keretrendszer van bemutatva.

2. Az optimalizáció célja

A cél az elektromos hajtás teljesítménysűrűségének és a hatásfokának maximalizálása a rendelkezésre álló hely és energiafogyasztás feltételei mellett. Ennek eszköze egy olyan matematikai modelleken alapuló mérnöki optimalizációs keretrendszer, amely alkalmas villanymotorok hatékony és gyors többcélú optimalizációjára, ahol:

- Célfüggvények: tömeg és veszteségek minimalizálása.
- Tervezési változók: geometriai tulajdonságok.
- Optimalizációs algoritmus: genetikusan algoritmus.

3. Az optimalizációs algoritmus

A matematikai optimalizációt olyan, általában analitikus módszerekkel nem megoldható problémák megoldásakor alkalmazzuk, amikor egy- vagy többváltozós térben kell megtalálni azt az optimális paraméterkombinációt, ahol a célfüggvényünk értéke extrémális. Ez az extrémizálás általában a célfüggvény-értékének minimalizálása vagy maximalizálása.

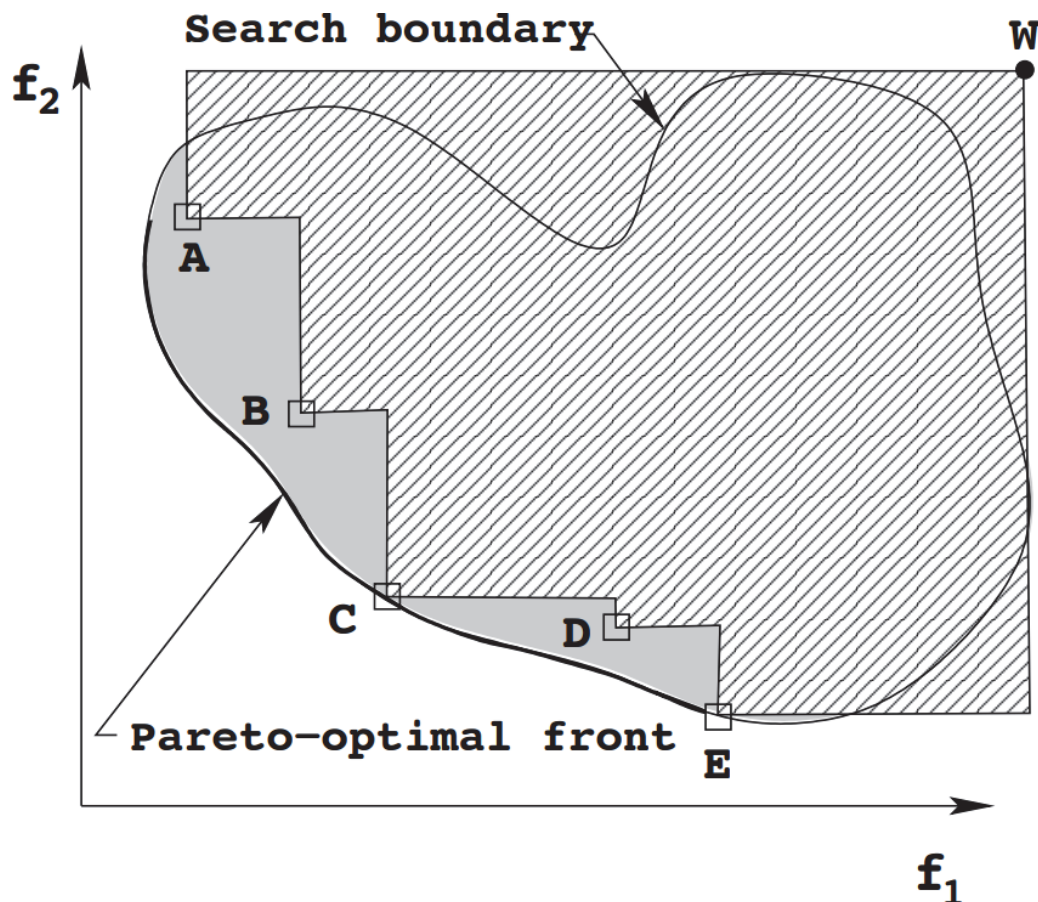
Genetikusan optimalizáció

Az evolúciós matematikai optimalizáló algoritmusok közé tartozik a genetikusan optimalizáló algoritmus. A kezdeti populációban van p darabszámú véletlenszerű paraméterkombináció, az ezeken futtatott célfüggvény kiértékelések után a célfüggvény-értékeknek megfelelő sorrendbe rendeződnek. Az optimalizáló algoritmus ezekből a paraméterkombinációkból (egyedekből) hoz létre egy újabb generáció p darabszámú egyedeit. Az új generációba az előző generáció legjobbjai egy az egyben belekerülnek, a többi egy vagy több előző generációs szülőből jön létre. Az optimalizáció során kiértékelésre kerül g darab generáció, és az utolsó generáció legjobbja alkotja az optimalizáció eredményét.

Többcélú optimalizáció

Amennyiben nem csak egy célfüggvényt kell optimalizálni, nem minden esetben lehet megállapítani, hogy egy egyed egyértelműen jobb egy másiknál. A legegyszerűbb módszer ezek kezelésére, a célértékek súlyozott átlagával egy egycélú optimalizációra visszavezetni a problémát. Más megközelítésnél a kiértékelt egyedek két részre oszthatók, a domináltakra, és a nem domináltakra. Egy több célfüggvényből álló problémánál egy adott egyednél csak akkor lehet egyértelműen jobb egy másik egyed, ha a másik egyed dominálja ezt, tehát az összes

célfüggvény-értéke jobban megközelíti az optimumot. Egy példa erre a következő ábrán látható (1. ábra):



1. ábra. Egy példa a pareto frontra

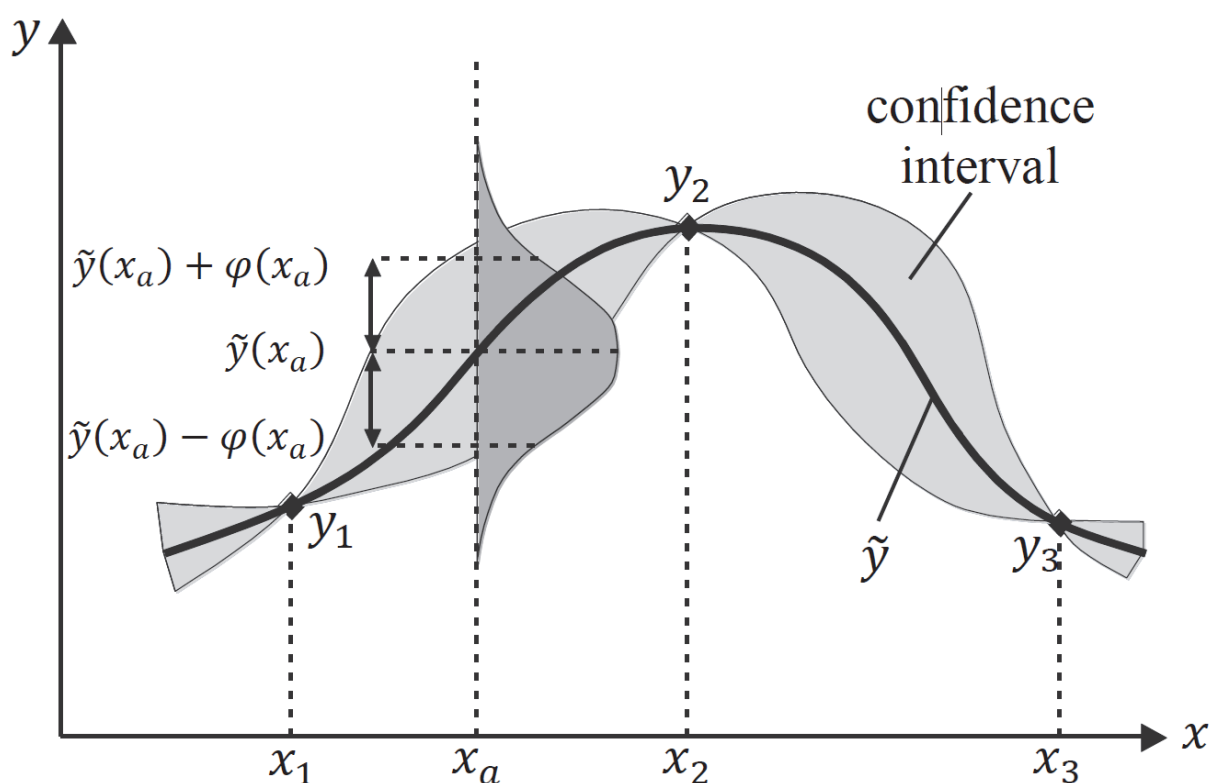
Az ábrán egy két célfüggvényből álló többcélú optimalizációnak a pareto frontja látható. Az ábrán lévő terület a kényszerfeltételek által meghatározott mező, a kényszerfeltételeket teljesítő egyedek csak ebben a mezőben lehetségesek. Az optimális pareto front ezen mező burkológörbéjének egy szakasza. Ennek a szakasznak az elhelyezkedése a mezőhatáron természetesen attól függ, hogy mindkét célfüggvényt minimalizálni szeretnénk-e (bár a gyakorlatban általában minden célfüggvényt úgy adnak meg, hogy azt minimalizálni kelljen). Konkáv mezőnél ez több szakaszból is állhat. Ennek az optimális pareto frontnak a közelítését kapjuk meg egy többcélú optimalizáció lefuttatásával. Az ábrán az A, B, C, D és E pontok határozzák meg ezt a frontot, és ezt nevezzük az optimalizáció pareto frontjának.

Kriging asszisztensalgoritmus működése

Az asszisztensalgoritmus a többcélú optimalizációs környezet belső számítási modelljeit helyettesíti sok esetben. Az optimalizálós algoritmus először az asszisztensalgoritmusnak adja át a paramétereit, ami egy analitikusan megoldható módszerrel válaszként ad egy vagy több költségesen kiértékelhető célfüggvényértékre egy-egy várható értéket, és egy alsó illetve felső határt. A célfüggvényértékek minimalizálása esetén azt kell megvizsgálni, hogy ez az alsó határ alatta van-e bármely eddig ténylegesen (végelem módszer segítségével) kiszámolt célfüggvényértéknek. Ha ez akár az egyik célfüggvényértéknél igaz, akkor elindul a tényleges

célfüggvény kiértékelés, ellenkező esetben pedig az optimalizáló algoritmus a célfüggvényértékek várható értékét kapja meg bemenetként a következő motormodellek tervezési paramétereinek megalkotásához.

Asszisztensalgoritmusként a MATLAB Kriging toolbox DACE (Design and Analysis of Computer Experiments) rendszert használtam. Működését tekintve ez egy valószínűségi számításra alapuló asszisztensalgoritmus, ami a ténylegesen kiszámított célfüggvényértékekre a tervezési változók függvényében egy interpolációs (néhány esetben pedig extrapolációs) függvényt illeszt, majd a ténylegesen kiértékelt pontok távolságától függően normálosztású sűrűségfüggvények segítségével egy alsó és egy felső határt határoz meg. A működése egy tervezési változó és egy célfüggvény esetén a következő ábrán látható (2. ábra):



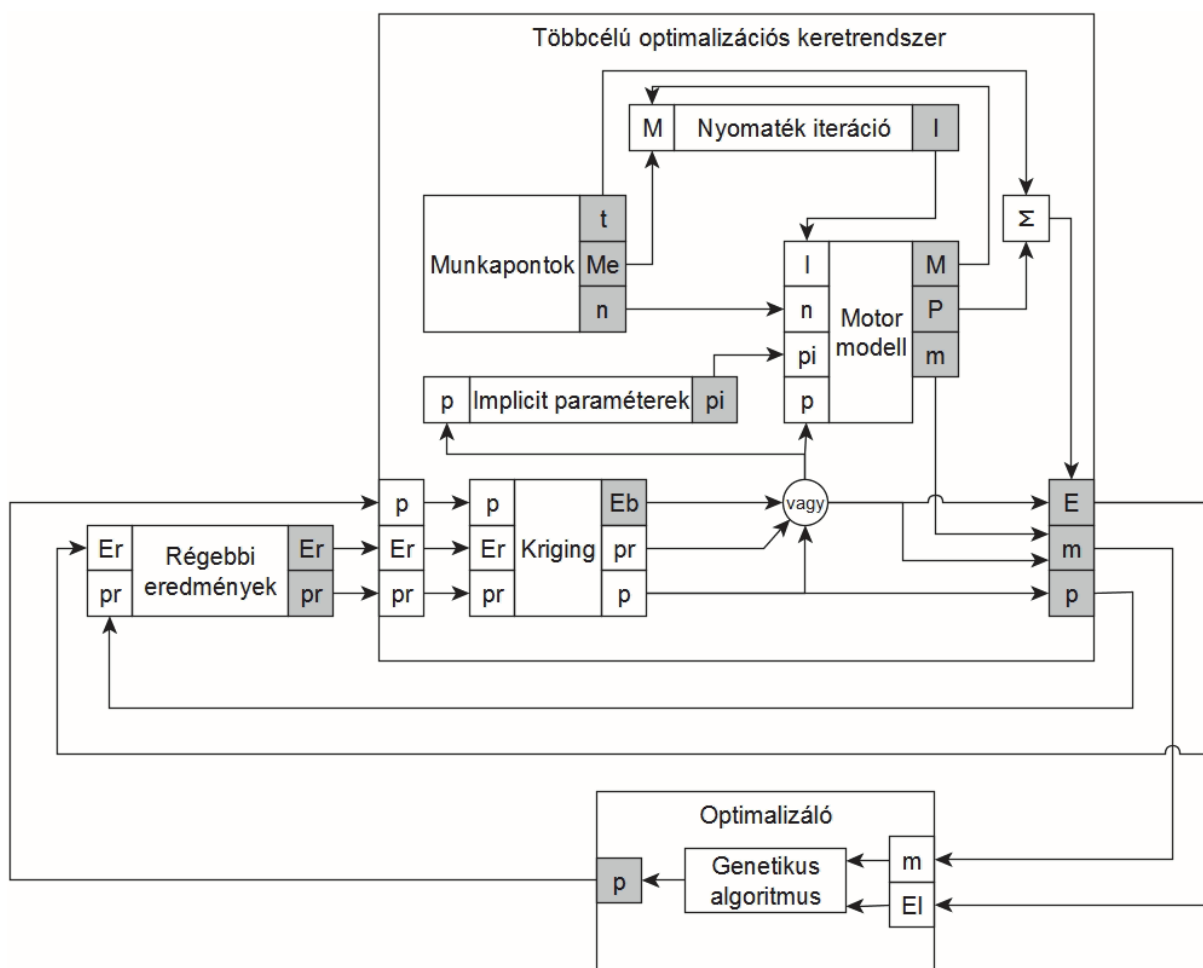
2. ábra. A DACE működése

Minél több ténylegesen kiértékelt eredmény van, az asszisztensalgoritmus annál pontosabb becslést és annál szűkebb határokat tud meghatározni, tehát annál pontosabb. A használata olyan esetekben előnyös, ha a célfüggvény kiértékelés az asszisztensalgoritmus futási időtartamánál lényegesen kisebb (a végeselemes szimulációt igénylő kiértékelések esetén ez az arány több nagyságrendű is lehet) és a megfelelő optimum megtalálásához elegendően sok célfüggvény kiértékelés szükséges.

Jelen alkalmazásban elegendő a veszteségenergia becslése, mivel a kényszerfeltételek ellenőrzése során minden esetben lefut egy végeselemes szimuláció, ami eredményként megadja a motor tömegének kiszámításához szükséges adatokat.

4. Az optimalizációs keretrendszer

Az optimalizációs keretrendszer az optimalizáló algoritmustól kapott paramétereket, és a korábbi kiértékelések eredményeit egyből a Kriging asszisztensalgoritmusnak juttatja el, amely költségesen kiszámítható célfüggvények értékeire egy becslést ad. Amennyiben ennek a becslésnek az alsó határértékénél születtek már kedvezőbb eredmények, az optimalizációs algoritmus a becsült eredményt kapja vissza válaszként a keretrendszertől, és nem készül el a tényleges kiértékelés. Amennyiben mégis szükséges a tényleges kiértékelés, a motor tulajdonságait a modell az előzetesen meghatározott menetciklus alapján felvett nyomaték, fordulatszám és időszűlyezés munkapontokban vizsgálja. Mivel a végelelem modell bemenetei áram és fordulatszám paraméterek, szükséges egy belső nyomaték iteráció, amivel meg lehet határozni a munkaponthoz tartozó áramgerjesztés amplitúdóját. Az optimalizációs algoritmus a kiértékelés végén megkapja az adott egyed célfüggvény értékeit (a lenti ábrán látható példában ezek a veszteségenergia és a tömeg), és ez alapján folytatódik az optimalizációs folyamat. Az optimalizációs keretrendszer blokkdiagramja a következő ábrán látható (3. ábra):

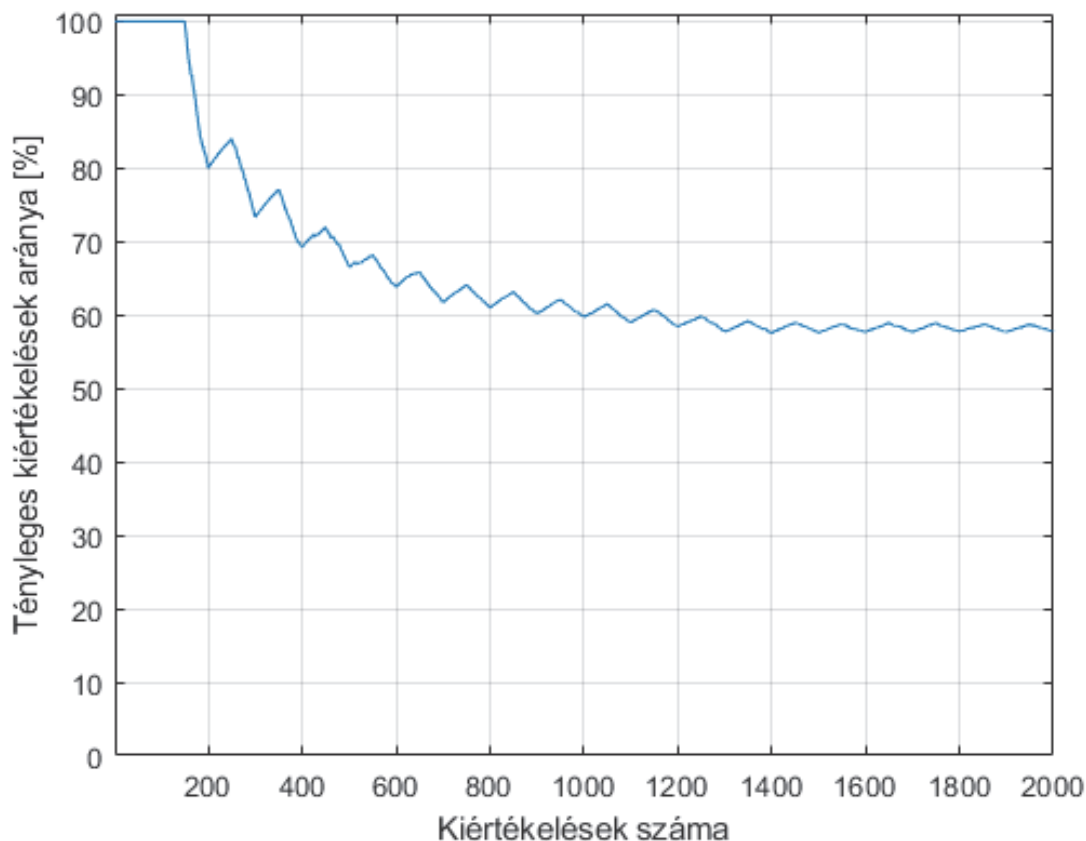


3. ábra. Az optimalizációs keretrendszer felépítése.

5. Az elért eredmények

A teszt optimalizáció során összesen kétezer kiértékelésre került sor. Az asszisztensalgoritmus használatának köszönhetően a kiértékelések 58%-át kellett csak ténylegesen kiértékelni, így

mivel a tényleges kiértékelés időszükséglete ennél az alkalmazásnál nagyságrendekkel nagyobb, mint a becslés, a teljes kiértékelési idő több, mint egyharmadát sikerült megtakarítani. A tényleges kiértékelések aránya az összes kiértékeléshez képest a vizsgált motorok számának függvényében a következő ábrán látható (4. ábra):



4. ábra. A tényleges kiértékelések aránya.

Ahogy a fenti ábrán is látható, minél több a kiértékelés, annál hatékonyabban működik a becslő algoritmus. Az, hogy az idővel ellaposodik a javulási görbe, az evolúciós algoritmus tulajdonságainak köszönhető. Egy idő után ez az algoritmus a tervezési változók kombinációit néhány kis területre korlátozza, ahol a globális optimumot keresi néhány lokális minimum közelében. Ez azt eredményezi, hogy az egyes generációkban nagyon sok egymáshoz nagyon hasonló motormodell jön létre, ahol az asszisztensalgoritmus már nem tud kellő hatékonysággal dolgozni. A görbe ellaposodásának helye nagymértékben függ az alkalmazott optimalizációs algoritmustól és annak paraméterezésétől egyaránt. Egy a forrásként megjelölt cikkben például [7] sikerült elérni kellő számú kiértékeléssel, hogy a tényleges kiértékelések száma csupán az 5%-a volt az összes kiértékelésnek.

6. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az

Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. Szeretnék még köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Horváth Zoltánnak.

Irodalomjegyzék

- [1] Abkememier, K. (, Mize, A.): Hybrid and Electric Vehicles The Electric Drive Gains Traction, Hybrid and electric vehicle implementing agreement, International Energy Agency (2013), 226
- [2] Hatwágner, F.: Nagy számításidejű, folytonos változójú célfüggvények optimalizációja evolúciós számítások segítségével, Széchenyi István Egyetem, Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola (2012)
- [3] Deb, Kalyanmoy: Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithm, „Könyv:” John Wiley & Sons, Chichester (2001), 518
- [4] ANSYS Maxwell, <http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>, 2020. 06. 16.
- [5] MathWorks, <http://www.mathworks.com/help/gads/gamultiobj.html>, 2019. 06. 16.
- [6] Horváth, Z. (, Morauszki, T., Tóth K.): CAD-based optimization and applications in automotive engineering, EUROSIM 2007. Proceedings of the 6th EUROSIM congress on modelling and simulation Vol. 2., Ljubljana (2007), 9-16.
- [7] Bittner, F. (, Hahn, I.): Kriging-Assisted Multi-Objective Particle Swarm Optimization of Permanent Magnet Synchronous Machine for Hybrid and Electric Cars, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Chicago (2013), 1-8
- [8] García, Gilberto Alejandro Ortiz: Identificación de sistemas estructurales histeréticos usando algoritmos de optimización multi-objetivo, Universidad Nacional de Colombia, Industrial Automation (2013)

Energiahatékony versenyjármű komplex világítási rendszere

The complex lighting system of energy efficient vehicle

Kecskeméti István^a, Gulyás Péter^b, Szeli Zoltán^c

^a Széchenyi István University SZE-JKK Győr Egyetem tér 1, Hungary

kecskemeti.istvan@ga.sze.hu

^b Széchenyi István University SZE-JKK Győr Egyetem tér 1, Hungary

gulyas.peter@ga.sze.hu

^c Széchenyi István University SZE-JKK Győr Egyetem tér 1, Hungary

szeliz@sze.hu

Absztrakt: A Széchenyi István Egyetem SZEnergy Team hallgatói csapata már évek óta részt vesz a Shell Eco Marathon rendezvényen, amely a világ legnagyobb energiahatékonsági versenye. A városi autó kategóriában a versenyjárműveknek rendelkezniük kell olyan berendezésekkel, amelyek egy hétköznapi személygépkocsin is megtalálhatóak, ilyen például: irányjelző, féklámpa, menetfény, ablaktörlő, duka. A 2020-as versenyszezonra egy teljesen új elektronikai rendszer került megtervezésre, és a fényszóró rendszer is megújult. Az új fényszórók tartalmazzák a LED-eket és a hozzá tartozó vezérlést is, a megfelelő tápellátásért egy nagyhatásfokú DCDC konverter felel. A programozható RGB LED-eknek köszönhetően bármilyen színárnyalatot lehetséges beállítani. A rendszer digitális bemenetein keresztül vezérelhető, ezért egyszerűen alárendelhető egy felsőbb irányítási rendszernek is, ezáltal később könnyen megvalósítva az önvezető funkciókat.

Kulcsszavak: energiahatékony, autonóm, mikrovezérlő

Abstract: The SZEnergy Team at the Szechenyi Istvan University has been participating in the Shell Eco Marathon, the world's largest energy efficiency competition, for many years. In the Urban Concept category, racing vehicles must have peripherals that can also be found in a road vehicle, such as: turn signal, brake light, headlight, wiper, horn. A completely new electronic system has been designed for the 2020 racing season, and the headlight system has been renewed accordingly. The new headlights also include LEDs and associated control, with a high-efficiency DCDC converter responsible for proper power supply. Thanks to the programmable RGB LEDs, any color shade can be set. It can be controlled via the digital inputs of the system, so it can easily be subordinated to a higher control system, thus easily implementing self-driving functions later.

Keywords: energy efficient, autonomous, microcontroller

1. Bevezetés

Az autóiiparban egyre nagyobb teret hódítanak az elektromos hajtású járművek. Az új hajtás rendszer viszont új kihívások elé állítja a tervezőket, ugyanis egy elektromos autó legfontosabb jellemzője a hatótávolság. Az akkumulátorok kapacitása véges, és azok feltöltése időt vesz igénybe, ezért létfontosságú olyan eszközökkel felszerelni a gépjárműveket, amelyek

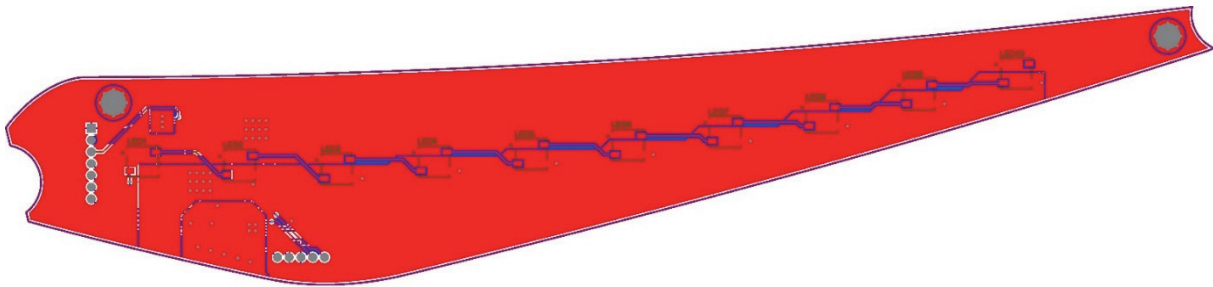
megtartják azokat a kényelmi funkciókat amiket egy belső égésű motoros autónál megszokhattunk, viszont minél kevesebb energiát használnak fel. A SZEenergy Team hallgatói csapat már évek óta részt vesz a világ legnagyobb energiahatékonysági versenyén, a Shell Eco Marathonon, ahol az a cél, hogy adott mennyiségű energiával minél nagyobb hatótávolságot lehessen elérni. Az elektronikai részleg feladata, hogy a rendszer fogyasztását évről évre csökkentse, a funkciók megtartásával. A 2020-as versenyre egy teljesen új terv készült, mely megköveteli az autó összes villamos jelzőberendezésének, ezen belül kiemelve a fényszóró rendszerek újratervezését.

2. Fényszóró áramkör tervezése

Korábban a lámpatestbe LED szalagok voltak beépítve, vezérlésükért egy-egy mikrokontroller felelt, ami az autó elejében és hátuljában volt megtalálható. A rendszer legnagyobb hibája a melegedés és a megbízhatatlan adatfeldolgozás volt. A LED szalagok nem rendelkeztek nagy hűtőfelülettel, ezért hajlamos volt a ragasztó elolvadni, és a LED-ek élettartama is jelentősen csökkent. Az adatfeldolgozásban keletkező problémák a vezérlő és a szalag közti távolságra vezethető vissza. A két egység között árnyékoltan vezeték került beépítésre, ezért hajlamos volt a zavarok felszedésére. Ezeknek a hibáknak a kiküszöbölésére lett elkészítve az új fényszóró egység egyetlen nyákon, amelyen a LED-ek és a vezérlés is megtalálható. [1]

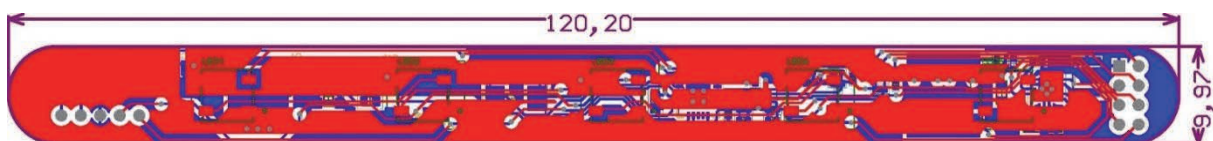
A vezérlést egy PIC16F1829 mikrovezérlő [5] végzi, mely rendelkezik elegendő digitális be és kimenettel, és maximális 32Mhz-es sebességével alkalmas a megfelelő címezésre. A tápellátásért egy LM5166-os DCDC konverter [3] felel, mely nagy bemeneti feszültségtartománnyal rendelkezik, és kis terhelések mellett is magas hatásfokkal működik. Az IN-PI554FCH RGB LED-ek lettek SMD tokozással beépítve. Ezek voltak korábban szalag formájában használva. [2]

Az autó fényszóróinak körvonalát a karosszériába épített lámpatest adja meg. Az alkatrészek kis mérete miatt a felhasznált felület nagyrésze üres, ezért alkalmas a LED-ek behűtésére [4]. Elöl a két fényszóróforma (1. ábra) egymás tükörképe, ezért az alkatrészek elrendezése kis mértékben eltér a két oldalon.



1. ábra Első fényszóró PCB terve.

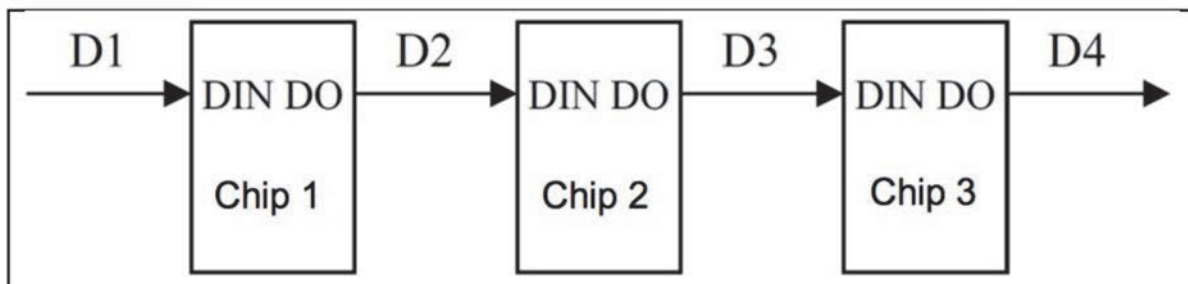
A hátsó lámpatest mindkét oldalon egyforma, ezért itt elég volt egy nyák megtervezése. Ennek az elemnek különlegessége, hogy LED szalag méretben van megvalósítva a teljes vezérlés és világítás is.



2. ábra Hátsó fényszóró PCB terve.

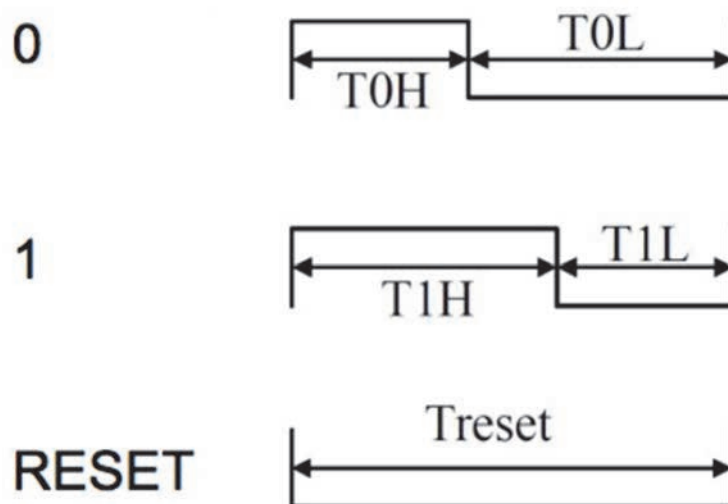
3. Vezérlő szoftver

A szoftver megírásához meg kell érteni az IN-PI554FCH működését. Az áramkörön a LED-ek adatvonala egymás után vannak kötve (3. ábra). Ezen a vonalon küldi a mikrovezérlő az RGB színkódot. A színkódot 24 bites üzenetekben kell kiküldeni. Ha az adatvonalon az első LED megkapta az első 24 bitet, a soron következő biteket tovább küldi a következő LED-nek addig, amíg nem telik le a reset idő.



3. ábra LED-ek adatvonala.

Az 1-es és 0-s biteket kódolt formában (4. ábra) kell kiküldeni. A 0 bitnél a T_{0H} időtartam $0,3 \mu s$, a T_{0L} pedig $0,9 \mu s$, ez az időzített szintváltás minősül egy 0 bitnek. Az 1 bitnél a T_{1H} $0,6 \mu s$, a T_{1L} szintén $0,6 \mu s$ hosszú, ez minősül egy 1 bitnek. Ezt a szintváltást a megfelelő időzítéssel a mikrovezérlőnek kell kiadnia. A RESET idő után tud a LED újabb adatot fogadni, ez több mint $80 \mu s$ eltelte után lehetséges.



4. ábra Üzenet kódolása.

Ezt az időzítést a mikrovezérlőnek pontosan kell kezelnie, ezért a mikrovezérlő utasítás végrehajtási frekvenciája 8 MHz -re lett beállítva, így már közelítőleg be lehet állítani a bitek kódolását. A kimenetet, ami az adatvonalra van bekötve, az alábbi függvények vezérik.

```

void WRITE_LED_0 (void)
{
    DOUT_LAT = 1;
    NOP();
    DOUT_LAT = 0;
    NOP();
}
    
```

```
NOP();  
NOP();  
NOP();  
}  
  
void WRITE_LED_1 (void)  
{  
    DOUT_LAT = 1;  
    NOP();  
    NOP();  
    NOP();  
    DOUT_LAT = 0;  
    NOP();  
    NOP();  
}
```

A színek kódok kiküldéséért a következő függvény felel:

```
void WRITE_LED_DATA (uint8_t R, uint8_t G, uint8_t B)  
{  
    uint8_t i = 0;  
  
    for(i=0; i<8; i++)  
    {  
        if(G&0x01)  
            WRITE_LED_1();  
        else  
            WRITE_LED_0();  
        G = G >> 1;  
    }  
  
    for(i=0; i<8; i++)  
    {  
        if(R&0x01)  
            WRITE_LED_1();  
        else  
            WRITE_LED_0();  
        R = R >> 1;  
    }  
  
    for(i=0; i<8; i++)  
    {  
        if(B&0x01)  
            WRITE_LED_1();  
        else  
            WRITE_LED_0();  
        B = B >> 1;  
    }  
}
```

Bemeneti paraméternek bekéri a kívánt színek kódját, majd azt 24 bitre osztja és a megfelelő kódot küldi ki a LED-eknek. Ezután minden bemenethez hozzá kell rendelni a megfelelő szint, és

azokat prioritás szerint sorba állítani. Jelen esetben az autonóm jelzés a legmagasabb prioritású, majd a vészjelzés, féklámpa, irányjelzés és végül a menetfény.

4. Összefoglalás

A projekt során sikerült egy olyan energiahatékony fényszóró rendszert kialakítani, ami képessé teszi az autót a városi közlekedésben használt jelzések alkalmazására. Az új eszközök kijavították elődjük hibáit, eltűntek a melegedési, és a zavaros kommunikációból adódó problémák. Könnyen programozható, és könnyen alárendelhető más rendszereknek. A magas hatásfokú konverternek köszönhetően minimális az eszközök fogyasztása, ha nincs szükség rájuk, akkor a konverter teljes lekapcsolásával pedig nem fogyasztanak.

5. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Gulyás Péter, Szakállas Gábor: *Energiahatékony versenyjárműbe tervezett komplex világítási rendszer*; In: Barabás, István (szerk.) **XXVIII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2020** Erdélyi Magyar Tudományos Társaság, (2020) pp. 211-214., 4 p. - ISSN 2668-968
- [2] Inolux 5050 RGB LED 4-Pin With Integrated IC IN-PI554FCH (https://hu.mouser.com/datasheet/2/180/IN-PI554FCH_v2.4-1665238.pdf)
- [3] LM5166 Synchronous Buck Converter (<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5166.pdf>)
- [4] Wessel W. Wits: *INTEGRATED COOLING CONCEPTS FOR PRINTED CIRCUIT BOARDS*, PhD Thesis, 4 december 2008
- [5] PIC16F/LF1825/1829 Data Sheet 14/20-Pin Flash Microcontrollers with nanoWatt XLP Technology (<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/41440a.pdf>)

Nissan Leaf akkumulátor rendszerének diagnosztikája

Nissan Leaf battery system diagnostics

Kocsis Szürke Szabolcs^a, Horváth Krisztián^b, Lakatos István^c

^a 9026 Győr, Egyetem tér 1/Széchenyi István Egyetem/Járműipari Kutatóközpont
kocsis.szabolcs@ga.sze.hu

^b 9026 Győr, Egyetem tér 1/Széchenyi István Egyetem/Automatizálási Tanszék
krisztian.horvath@sze.hu

^c 9026 Győr, Egyetem tér 1/Széchenyi István Egyetem/ Közúti és Vasúti Járművek Tanszék
lakatos@sze.hu

Absztrakt: Az akkumulátorrendszer-diagnosztika során cél a jármű akkumulátor cellák állapotának a felmérése, a rendszer megbontása nélkül. A publikációban méréseket végeztünk egy Nissan Leaf elektromos járművel és folyamatosan monitoroztuk és mentettük mind a 96 cella feszültségét. A teszt során adatokat gyűjtöttünk autópályán haladáskor és nagyobb gyorsítások esetén. Az így kapott adatokat kiértékeljük, és az akkumulátor rendszert cellánként elemeztük. Az elemzés során megkerestük a pakkban a leggyengébb cellákat és figyeltük, hogy melyek azok a részek, modulok, amelyek folyamatosan az átlag feszültség alatti értékkel rendelkeznek. A vizsgálat során sikerült egy olyan elemzési módszert létrehozni, amellyel a későbbiekben gyorsan és hatékonyan tudunk hibát keresni. Ezen kívül a vizsgálat során sikerült kijelölni az akkucsomag szempontjából kritikus területeket.

Kulcsszavak: *akkumulátor diagnosztika, Nissan Leaf, Consult III, cella hibakeresés*

Abstract: During battery system diagnostics, the goal is to assess the condition of the vehicle's battery cell without disassembling the system. In this publication, measurements were taken with a Nissan Leaf electric vehicle and the voltages of all 96 cells were continuously monitored and saved. During the test, data were collected during highway use and at higher accelerations. The data thus obtained were evaluated and the battery system was analyzed cell by cell. During the analysis, we looked for the weakest cells in the pack and observed which parts, modules, are constantly under the average voltage. In the course of the study, we created an analysis method with which we can quickly and efficiently search for errors per cell in the future. Also, the study was able to identify critical areas for the pack.

Keywords: *battery diagnostics, Nissan Leaf, Consult III, faulty cell detection*

1. Bevezetés

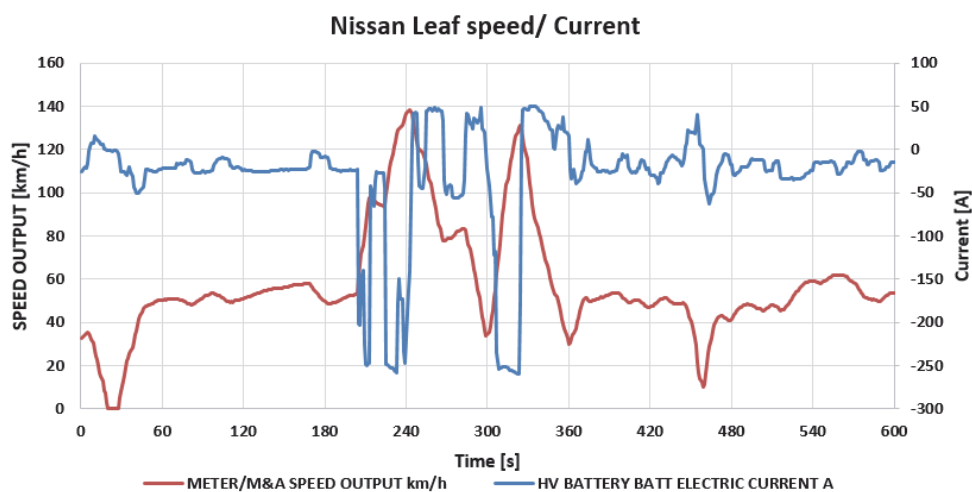
Az elektromos járművek hatótávolságát meghatározni a járműgyártóknak sem egyszerű, mivel rengeteg tényező befolyásolhatja. Ilyen tényezők például: hőmérséklet, vezetési stílus, terepviszonyok, hőcserélő rendszerek, illetve egyéb fogyasztók. Léteznek különféle szabványok [1-2] és vizsgálatok NEDC (New European Driving Cycle - Új európai vezetési ciklus), WLTP (World Harmonized Light Vehicle Test Procedure - Könnyű Gépjárművek Világszerte Összehangolt Teszteljárása), EPA (US Environmental Protection Agency - USA Környezetvédelmi Ügynökség), amelyekkel meghatározzák a járművek hatótávját, de ezek az értékek leginkább új járművekre vonatkoznak. A különböző márkaszervizek éves szinten felülvizsgálják a cellák állapotát, de hibakeresés egy gyors teszt erejéig tart, és hiba esetén az

egész rendszert vagy modult cserélik. Így viszont számos még jó állapotú cella is hulladékként végzi. Jelenleg a hibakeresés csak nagyon ritka esetben terjed ki cella szintű hibákra. Azonban többféle elemzés is létezik a meghibásodást kiváltó okok keresésében, ilyen pl. a Barré és társai által bemutatott 23 hónapos vizsgálat is. A teszt során próbapadon, tesztpályán és tárolási körülményeket is vizsgálva megállapították, hogy utóbbi az egyik legfontosabb tényező. [3] Ezen kívül statisztikai [4], nagy adat elemzési (big data analysis methods) [5] és feszültség-hiba észlelési módszerekkel [6] próbálják kiszűrni a hibás eseteket.

Ebben a munkában különböző sebességeknél vizsgáltunk egy Nissan Leaf járművet, és egy újfajta feszültség hiba észlelési módszerrel határoztuk meg, hogy a nagyobb terhelés során a cella feszültségek mennyire térnek el egymástól, valamint, hogy a rendszerben melyek azok a régiók, ahol a feszültség szétszúszása jobban kimutatható.

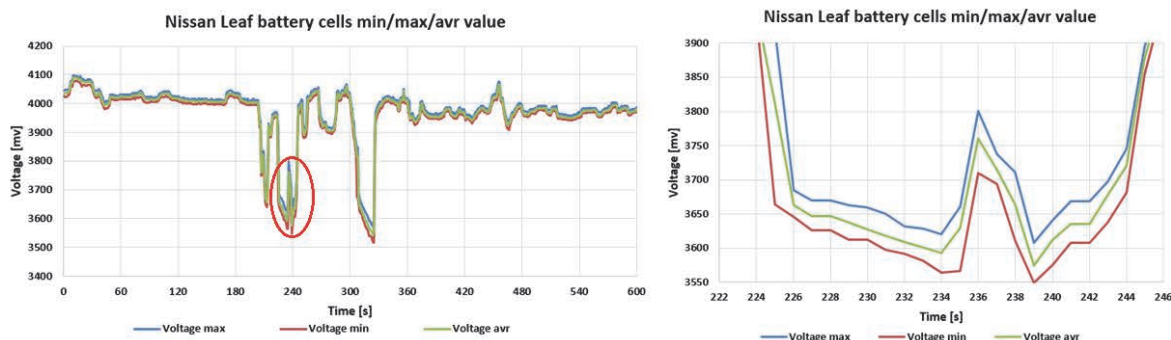
2. Mérési eredmények

A jármű adatainak a kiolvasásához a Panasonic Toughbookot CF-D1 használtuk fel. A tesztek végrehajtása során jármű diagnosztika csatlakozójára csatlakoztunk, és elindítottuk a CONSULT III plusz programot. A mérés során nagyobb sebesség és gyorsítások esetén is vizsgáltuk a cellák működését. Ennek során az akkumulátorokra jutó terhelő áram mértéke egyes esetekben 200A felett is volt. Az akkumulátor rendszeren mért terhelő áram és a jármű sebessége látható a 1. ábrán:



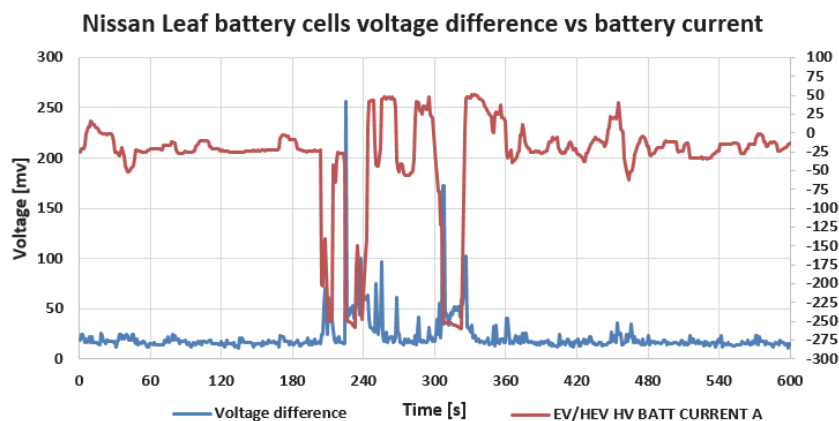
1. ábra A sebesség és terhelő áram változása az idő függvényében

Az ábrán több gyorsítás és lassítás is megfigyelhető, és a sebesség tartomány is viszonylag szélesen, 0-140km/h között mozgott. Az így kapott cella különbségek láthatóak a 2. ábrán:



2. ábra Nissan Leaf cella feszültségeinek min/max és átlagos értéke

Mivel a terhelés változás is nagy tartományban ingadozott, ezért a feszültség szint is 4,1V és 3,5V között mozgott. A 2. ábra jobb oldalán a kritikus, nagy terhelésű szakaszt külön ki is emeltük. A cella feszültségek ettől függetlenül viszonylag egységesen együtt mozogtak. A nagyobb eltérések detektálásához a minimum és maximum értékeket hasonlítottuk össze a terhelő áram függvényében:



3. ábra Feszültség eltérés és terhelő áram változása az idő függvényében

Ez alapján már jobban megfigyelhető, hogy az eltérés nem jelentős, azonban a nagy terhelés pillanatában (270A) legkisebb és legnagyobb cella között akár 250mV is lehet (gyakori előfordulás esetén hibát is jelenthet), ami már jelentős különbségnek számít. A gyengébb cella kiszűréséhez azt vizsgáltuk, hogy a rendszerben az adott sorszámú akkumulátor hányadik helyen található. A következő táblázat összefoglalja a leggyengébb cella előfordulásának a helyét %-osan:

1. táblázat Legalacsonyabb feszültségű cella %-os eloszlása sorszám alapján

Cella szám:	0-5	10,00	%
	5-10	2,50	%
	10-20	2,17	%
	20-30	13,33	%
	30-40	0,17	%
	40-50	1,17	%
	50-60	6,50	%
	60-70	18,83	%
	70-80	3,00	%
	80-90	30,00	%
	90-96	12,33	%

A táblázat alapján legtöbb esetben, 30%-ban a 80 és 90 közötti sorszámú cella legalacsonyabb feszültségű. Ezzel a fajta elemzéssel sajnos csak az adott időpillanat legrosszabb esetét vesszük figyelembe. Ezért a következő lépésként azt vizsgáltuk meg, hogy a teszt során, egy cella az átlagos feszültségszintnél, hány esetben volt rosszabb. A 600s teszt során, minden akkumulátor bizonyos ideig az átlagfeszültség szint alatt volt, ami annyit jelent, hogy kiemelkedően jó cella nincs a rendszerben. Viszont az adatelemzés során az is meghatározható, hogy melyek azok a cellák, amelyek a teljes mérési tartomány 80%-ban alacsonyabb feszültség szinten voltak, mint az átlag. Az egyszerűség kedvéért a következő táblázatban csak azok a cellák indexét tüntetjük fel, amelyek a mérés teljes hossza során 480s vagy annál hosszabb ideig az átlagos feszültség alatt voltak:

2. táblázat Gyengébb cellák meghatározása

HV BATTERY	CELL VOLTAGE 03	489s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 07	528s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 25	500s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 26	524s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 42	496s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 54	570s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 65	534s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 66	512s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 85	496s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 86	521s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 87	559s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 93	557s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 94	510s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 95	537s

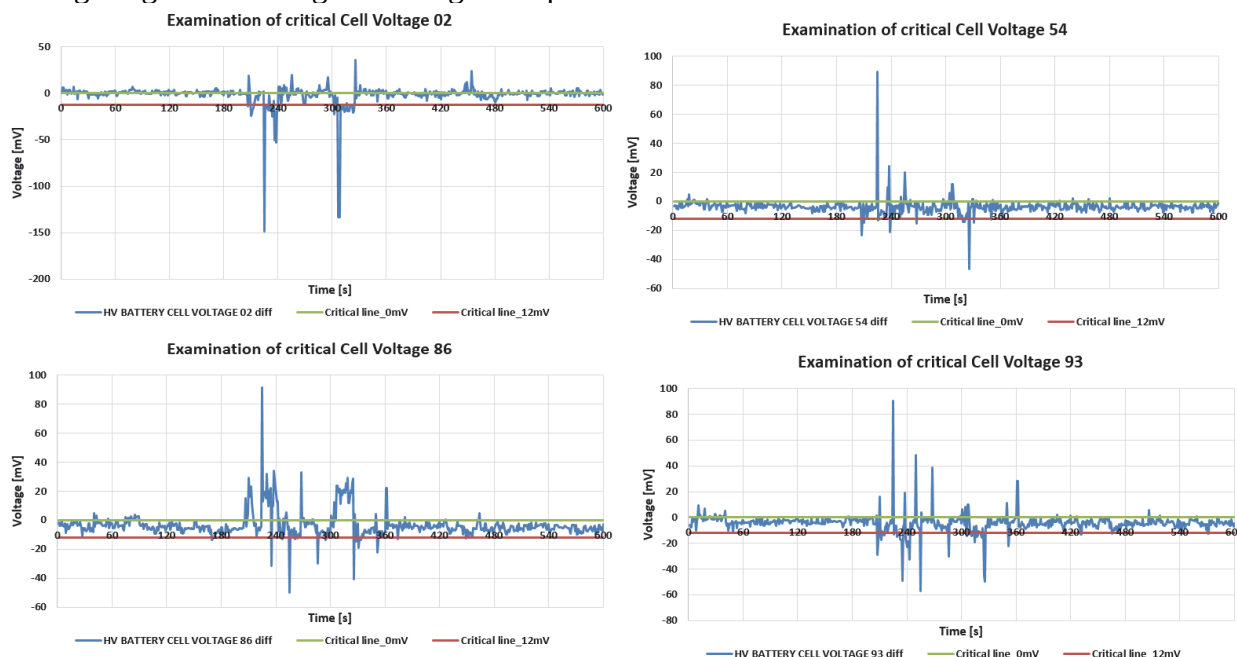
A táblázat alapján belátható, hogy néhány esetben már 500s-nál is tovább az átlag feszültség alatt vannak egyes akkumulátorok. Ez a meghatározás nem jelenti feltétlenül azt, hogy rossz állapotú vagy cserére szorulna, csak annyit, hogy ezen cellák meghibásodása legvalószínűbb. További fontos dolog, hogy nem mindegy, hogy az adott cella tartósan az átlag feszültségtől hány tized voltal tér el. Abban az esetben, ha egy cella folyamatosan nagyon kicsivel néhány mV tér el az átlagtól, akkor ez a fajta elemzés ezt a cellát is a rosszabbak közé sorolja. Ezért következőkben azt elemeztük, hogy a teszt során az egyes cellák, hány másodpercig tértek el 12mV-al átlagtól. (Azért ennyivel vizsgáltuk, mert 3V és 4,2V közötti 1,2V tartomány 1%-a) Az egyszerűség kedvéért csak azokat az esteket tüntetjük fel, ahol a teljes mérési idő közel 4-5%-ban ez az eset megtörtént ez mind összesen 24-30s jelent:

3. táblázat Gyengébb cellák meghatározása 12mV eltérés az átlagtól:

HV BATTERY	CELL VOLTAGE 01	29s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 02	40s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 20	25s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 92	25s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 93	35s
HV BATTERY	CELL VOLTAGE 94	26s

A hosszabb időtartamú eltérések jellemzően a cella első és utolsó elemein jelentek meg. Ebből az állapítható meg, hogy ezen vizsgálat során a rendszer nem rendelkezik kifejezetten rossz akkumulátorral. Kritikus pontként az 54. cellát lehetne megjelölni, mivel a mérés során nagyon

sokáig az átlag feszültség alatt volt, valamint a 02 és a 93 számú akkumulátort, mivel ezek voltak legtovább 12mV eltérésben az átlag feszültséghez. Utolsó lépés a rosszabb cellák kiemelése a rendszerből és külön vizsgálata. Az eredmények alapján megjelölt cellákat külön is megvizsgáltuk az átlag feszültséghez képest:



4. ábra A kritikus cellák elemzése

A 4. ábrán a zöld vízszintes csíkkal (0mV) az átlag feszültség vonala látható, a piros csíkkal pedig a 12mV-os eltérés. Látható, hogy minden cella eltérése többnyire a zöld vonal alatt, de a piros fölött található. Ez azt jelenti, hogy az akkumulátorok az átlag feszültség alatt ugyan, de nem sokkal az alatt működnek a nagyobb terhelések során. Nagyobb kilengések, tüskék, a terhelés rátételének a pillanatában láthatóak.

3. Összefoglaló

A most bemutatásra került diagnosztizálási módszer cellánként elemzi a jármű akkumulátor rendszerét, és így lokalizálja azokat a cellákat, amelyek a legtovább az átlag feszültség alatt voltak. Esetünkben a legnagyobb eltérés a 2. cellánál figyelhető meg, amelyet érdemes a későbbiek tovább mérésekkel elemezni. A most kapott eredményekből messzemenő következtetések még nem vonhatóak le, de ezzel a módszerrel vizsgálva egy WLTP cikluson keresztül a rendszert, várhatóan jó cella állapot felmérések születhetnek és a gyengébb akkumulátorok könnyebben és gyorsabban kiszűrhetőek lesznek.

4. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] E. C. Castillo, Standards for electric vehicle batteries and associated testing procedures. Elsevier Ltd., 2015
- [2] V. Ruiz, A. Pfrang, A. Kriston, N. Omar, P. Van den Bossche, and L. Boon-Brett, “A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. April, pp. 1427–1452, 2018
- [3] A. Barré, F. Suard, M. Gérard, M. Montaru, and D. Riu, “Statistical analysis for understanding and predicting battery degradations in real-life electric vehicle use,” *J. Power Sources*, vol. 245, pp. 846–856, 2014
- [4] Y. Zhao, P. Liu, Z. Wang, and J. Hong, “Electric Vehicle Battery Fault Diagnosis Based on Statistical Method,” *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2366–2371, 2017
- [5] Y. Zhao, P. Liu, Z. Wang, L. Zhang, and J. Hong, “Fault and defect diagnosis of battery for electric vehicles based on big data analysis methods,” *Appl. Energy*, vol. 207, pp. 354–362, 2017
- [6] X. Li and Z. Wang, “A novel fault diagnosis method for lithium-Ion battery packs of electric vehicles,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 116, no. October 2017, pp. 402–411, 2018

Autonóm járművek lehetséges érintésmentes öndiagnosztikai rendszereinek kutatása

Research of contactless self diagnostic systems for autonomous vehicles

Óri Péter^a, Prof. Dr. Lakatos István^b

^aSzéchenyi István Egyetem – JKK - KVJT
ori.peter@sze.hu

^b Széchenyi István Egyetem – JKK - KVJT
lakatos@sze.hu

Absztrakt: Az önvezető járművek fejlesztése során nem szabad figyelmen kívül hagyni a diagnosztikai lehetőségek bővítését sem. Korábban közzétettük azon mérések eredményeit, melyeket kis költségű mikrofonokkal végeztünk, most pedig elkészült az ipari mikrofonkészlettel és erősítővel végzett referenciamérés. A tesztek alapján diagnosztikai szempontból a kondenzátor-mikrofon és a referencia közötti különbségek nem jelentenek nagy adatvesztést. Fontos vizsgálni a mikrofon elhelyezését és gyorsulásmérők alkalmazásának lehetőségét.

Kulcsszavak: mikrofon, öndiagnosztika, összehasonlító elemzés, gyorsulásmérő

Abstract: During the development of driverless cars the diagnostic possibilities should also stay in focus. Last year an article was written about the measurements with low cost microphones, now we can show the results of the reference measurements. We can say that comparing the low cost measurements with the reference, the loss of data is low. To choose the right locations of the microphones and usage of accelerometers open more solutions.

Keywords: microphone, self-diagnostic, acceleration-sensor

1. Bevezetés

Az öndiagnosztika és a zajdiagnosztika összekötése nem újkeletű igény, Chandroth és társai kísérletei a hengernyomás rezgéseire kapcsolódtak. A kísérleteik során dízel motorokon mesterséges hibákat idéztek elő pl. kipufogószelep szivárgás, üzemanyag injektor elzáródás, rossz üzemanyag porlasztás. Minden ciklusból 7200 mintát vettek, az elemzést 20 kHz frekvenciáig végezték FFT analízissel, és az eredményeket teljesítmény-sűrűség függvényben ábrázolták. A kutatások kimutatták, hogy a rezgésjellemzők eltérnek különböző hengerszámú és üzemállapotú motoroknál. [1]

Bohn kutatásaiban a motor-fogaskerék hajtómű-forgattyús hajtómű kapcsolatát vizsgálta. Bizonyította, hogy a komplexum testhangjának amplitúdója és frekvenciája az olajfilm tulajdonságaitól is függ. [2]

Jindal kutatásaiból kiderül, hogy a különböző üzemanyagok fajtája is befolyással van a motorok rezgésjellemzőire. [3]

Delvecchio és kutatótársai olyan rezgésméréseken alapuló automatikus hibadiagnosztikai rendszert fejlesztettek ki, amely a hidegteszt során a végellenőrzési fázisban alkalmazható.

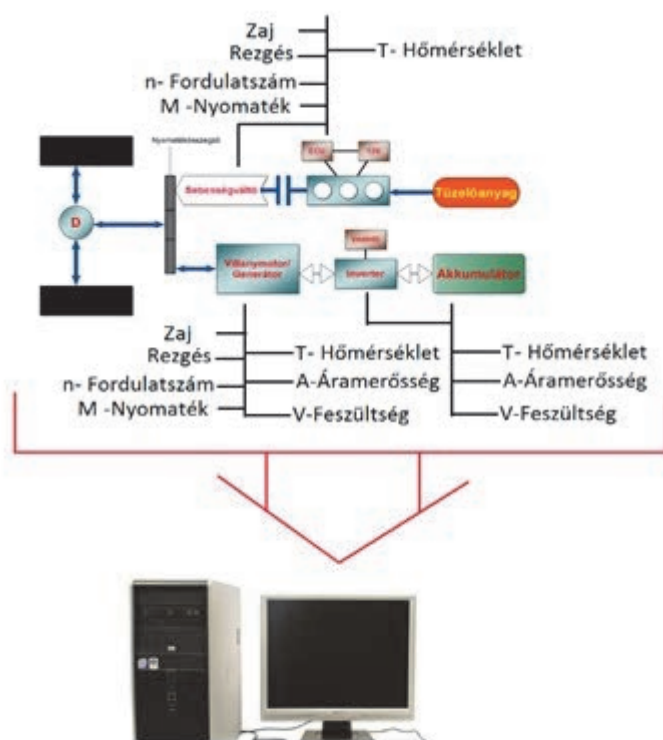
Chen és Yadav egymástól független kísérletei is az automatikus hibadiagnosztika fejlesztése felé irányultak. [4]

Liu és csoportja a motorból érkező akusztikus zajok beazonosítását, majd a rezgő elemek zajemisszióra gyakorolt hatását vizsgálták. A motort egy zajelnyelő burkolattal fedték le, és kisebb-nagyobb modulként mérték a zajt. [4]

2. Hibrid és elektromos járművek hajtásláncainak gyakori meghibásodásai

Az elektromos és hibrid járművek akusztikai vizsgálata során először meg kell ismerni a gyakori meghibásodási lehetőségeket, hogy a mérések során valós problémákra koncentrálhassunk. Ehhez egy kérdőívet állítottunk össze, amelyben 50 magyar és 50 német márkaszervizt kérdeztünk meg az elektromos és hibrid járművekkel kapcsolatos gyakorlati tapasztalatokról.

A hajtáslánccal kapcsolatosan kevés meghibásodási tapasztalatról számoltak be a márkaszervizek. Legfőképp a kopó alkatrészek cseréje gyakori az elektromos hajtásláncban. Hibrid járművek esetén a belső égésű motorok jelentik a fő hibaforrást, így azok vizsgálatára érdemes hardveres és szoftveres eszközöket fejleszteni.



1. ábra Mérési lehetőségek hibrid járműveken

3. Az öndiagnosztikai lehetőségek kutatása, mérések

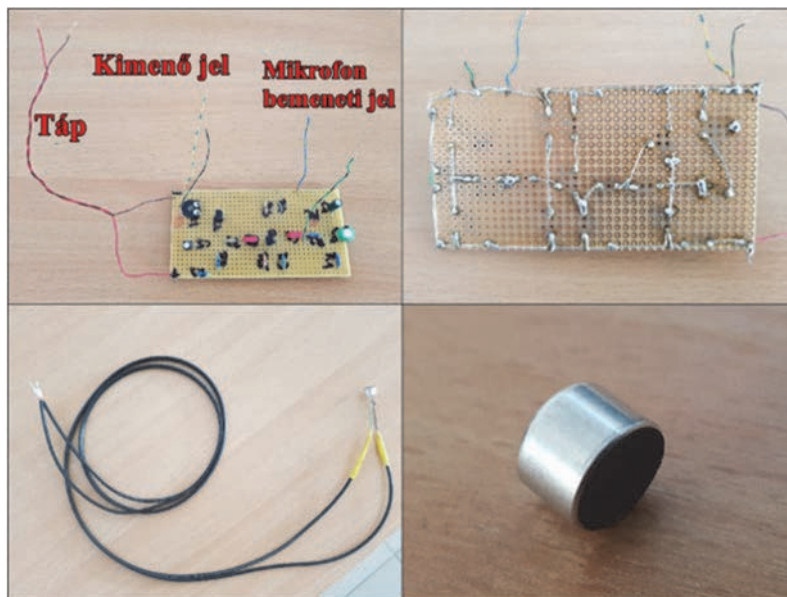
Ide A zajmérés nagy előnye, hogy úgynevezett „contactless” vagyis érintés nélküli vizsgálatot tesz lehetővé. Nem kell a nehezen hozzáférhető alkatrészre csatlakozni, nem szükséges azt kiszerezni és nem jár semmiféle roncsolással a mérés kivitelezése, ellentétben például az emissziós vizsgálatokkal [6].

Bohn kutatásaiban a motor-fogaskerék hajtómű-forgattyús hajtómű kapcsolatát vizsgálta. Bizonyította, hogy a komplexum testhangjának amplitúdója és frekvenciája az olajfilm tulajdonságaitól is függ [7].

Jindal kutatásaiból kiderül, hogy a különböző üzemanyagok fajtája is befolyással van a motorok rezgésjellemzőire [8].

A gépjárművekben az alkatrészek nagyrésze valamilyen forgó vagy alternáló mozgást végez, tehát működésükben periodikusság figyelhető meg. A zajmérésből kapott, valamilyen ismétlődést mutató jelek így társíthatók az adott alkatrészhez. A hajtásláncban számos olyan hibalehetőség rejlik, ami a szokásostól eltérő zajkibocsátást eredményez. Ezek közül felsorolunk néhány példát: kiegyensúlyozatlanság, excentricitás, tengelygörbülés, tengelykapcsoló-hiba, siklócsapágyak túlzott kopása, kenéshiány, gördülőelemes csapágyak hibái, hajtómű-meghibásodások, fogaskerék-problémák, lánchajtások hibái, szíjhajtások hibái, szivattyú-meghibásodások, ventilátor-problémák, villamos gépek hibái, rezonancia jelenségek, folyadékok és gázok áramlásával kapcsolatos problémák. A járművek egyre növekvő automatizáltsága mellett kiemelt fontosságú a fedélzeti diagnosztika fejlesztése [9].

Ha öndiagnosztikáról beszélünk, akkor nagy sorozatgyártásban alkalmazható, gazdaságos eszközök alkalmazására kell fókuszálni. Az akusztikai vizsgálatoknál az első feladat a mikrofon és a mérőrendszer kiválasztása [10]. Így esett a választásunk egy egyszerű kondenzátormikrofonra, melyhez az erősítőt magunk készítettük el [11, 5] (2. ábra).

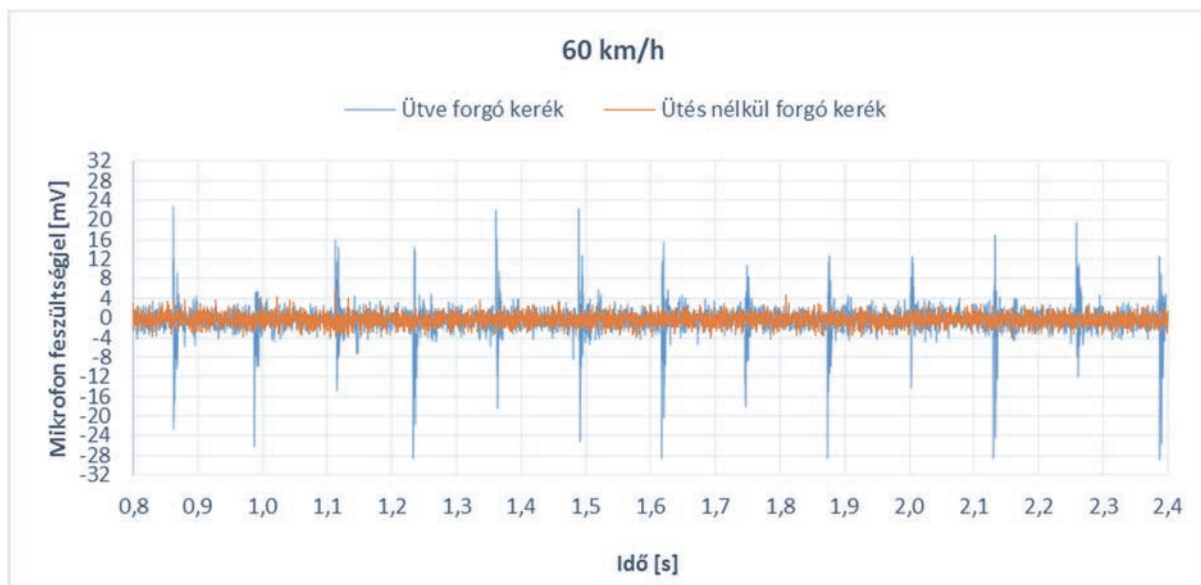


2. ábra A saját készítésű erősítő és a kondenzátor mikrofon

A mérés célja az volt, hogy a gazdaságos rendszerrel hibát detektáljunk, így a járművekben széria felszerelésként az akusztikai öndiagnosztika funkció alkalmazhatóságát vizsgáljuk.

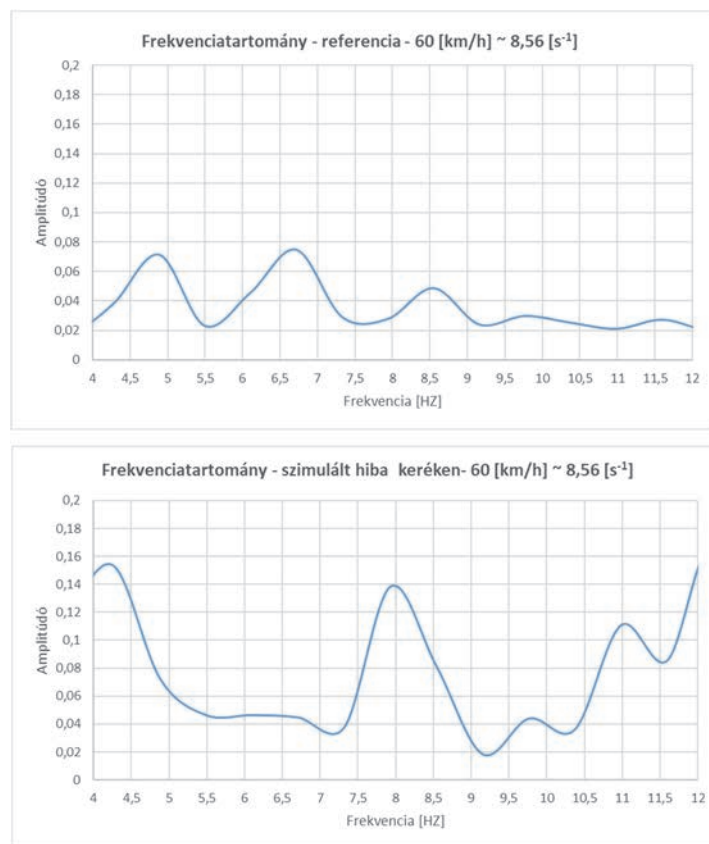
Az első méréseket teljesítménymérő görgős padon végeztük el. A mikrofont a járművön kívül helyeztük el, hogy közvetlenül a generált hiba közelében tudjunk mérni. Ezzel az üzem közbeni mérés két zavaró tényezőjét ki tudtuk szűrni: a szélzajt és a karosszéria szigetelés okozta zajcsökkenést [8,9]. Természetesen a görgők újabb zajforrást visznek a mérésbe, viszont a fordulatszámok ismerete miatt az abból adódó zajok és mérési csúcsok kiszűrhetők [10].

Az első mérések pozitív eredményt mutattak, mivel a mikrofon erősítőjének kimenetén jól kivehető amplitúdóként jelentkezett a mesterséges hiba. Állandó menetsebesség tartása mellett végeztünk méréseket, hogy a fordulatszám ingadozás okozta frekvenciaváltozás ne nehezítse a kiértékelést (3. ábra). Az elemzés célja megfigyelni a kondenzátormikrofon feszültségjeleit a hibamentes és hibás üzemállapotban. A 3. ábrán jól láthatók a kék görbe kiugró feszültségcsúcsjai.



3. ábra Görgős padi mérés 60 km/h-val, hibával és hiba nélkül, időtartományban

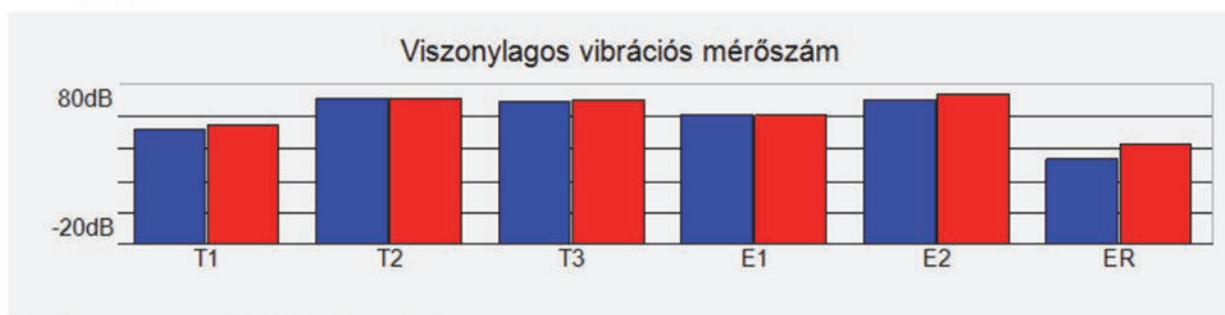
A periodikus mozgás miatt az adathalmazt FFT-analízisnek vetettük alá, hogy a zajforrást frekvenciatartományban is megvizsgálhassuk. A jellemző frekvencia meghatározása segít a zajforrás azonosításában, hiszen a periodikus mozgást végző alkatrészek fordulatszámából meghatározott alap frekvenciát és felharmonikusait össze tudjuk vetni a mérés során tapasztalt zaj frekvencia komponenseivel.



4. ábra: Görgős padi mérés 60 km/h-val, hibával és hiba nélkül, frekvenciatartományban

Amikor a mérést két darab ipari, kívül elhelyezett mikrofonnal végeztük, szintén megfigyelhetővé vált a leragasztott, ezáltal radiális ütéssel forgó kerék hatása. Az 5. és 6. ábrán látható ezen mérések eredménye. Az 5. ábra a referencia mérés, a 6. ábrán pedig a radiális ütéssel forgó kerékkel végzett mérés eredményei láthatóak. Mindegyik mérésnél két mikrofont használtunk. A Pico NVH szoftver egy OBD-csatlakozón keresztül tudta mérni a jármű keréke sebességét és a motor fordulatszámát, így a frekvencia-tartománybeli vizsgálatoknál rögtön ki tudja venni az abroncshoz és a motorhoz tartozó frekvencia értékeket. Jól látható, hogy a hiba nélküli állapotban a motorzaj erősebb volt a kerékzajnál, majd a hiba fennállásakor a kerékzaj 16-17 dB-lel erősödött, zajosabb lett, mint a motor.

Rezgésjelentés

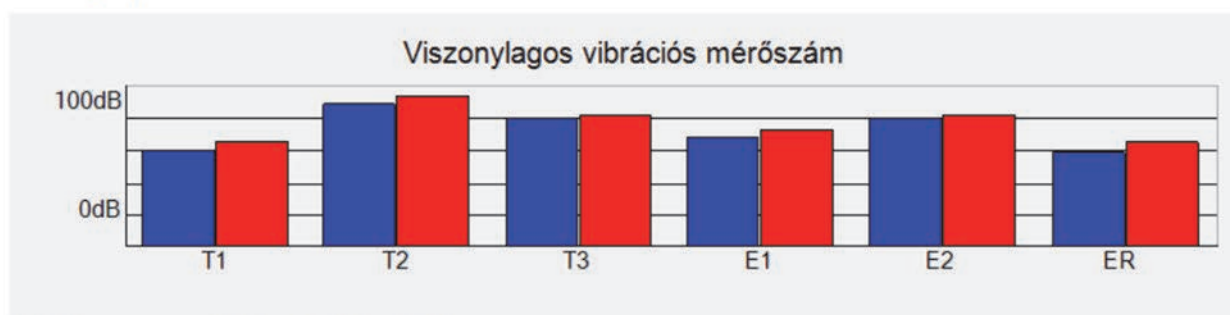


Csatorna A: TA144 Mikrofon

Csatorna B: TA144 Mikrofon

5. ábra: Görgős padi mérés hiba nélkül, frekvenciatartományban – Pico NVH kit

Rezgésjelentés



Csatorna A: TA144 Mikrofon

Csatorna B: TA144 Mikrofon

6. ábra: Görgős padi mérés hibával, frekvenciatartományban – Pico NVH kit

4. Külső hatások vizsgálata

A referenciamérésekhez alkalmazott ipari mikrofon készlettel további méréseket végeztünk, ahol azt vizsgáltuk, hogy a mikrofon utastérben belüli és kívüli elhelyezése között milyen jelszint különbségeket tapasztalunk. Az utastér körüli szigetelés és a menet közben felmerülő külső zajok okozta zavarás felmérése volt a célunk. Ezen vizsgálatokat valós környezetben, mozgó járművel célszerű elvégezni, mivel a szélzajt csak így lehet figyelembe venni a mérés során. A korábbi mérésekhez alkalmazott járművel forgalmi méréseket nem végezhattünk, ezért másik járművön tudtuk a vizsgálatokat folytatni.

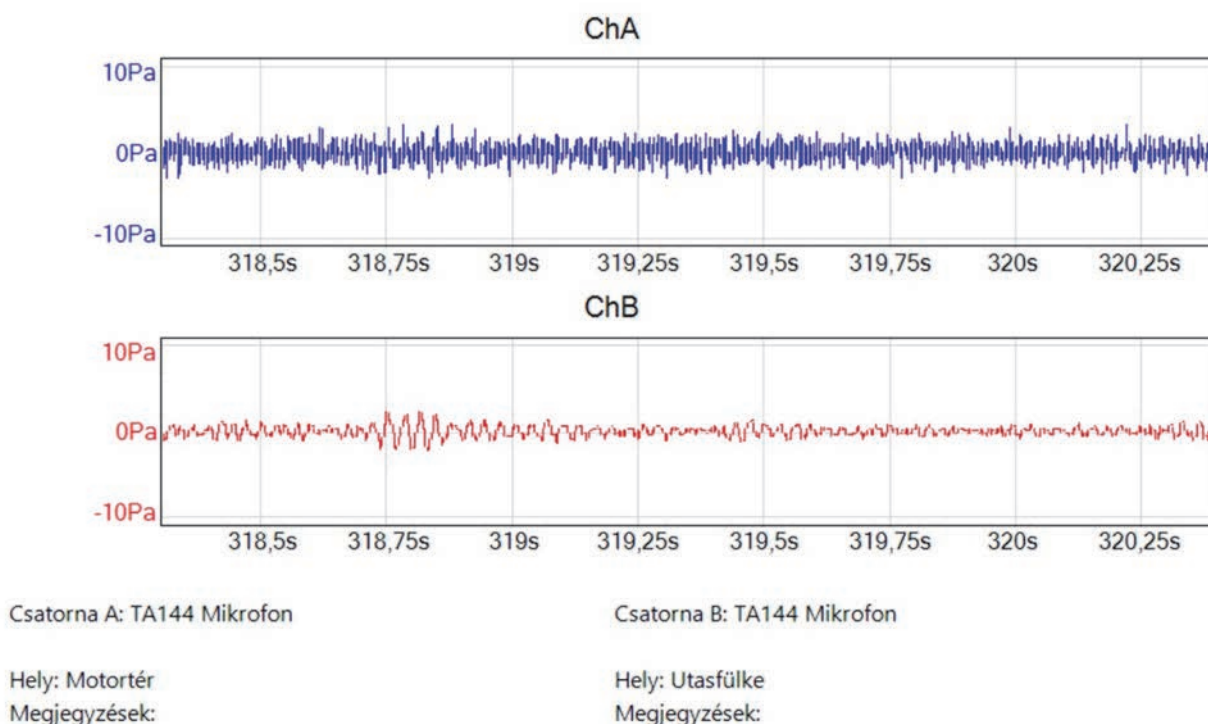
Az elektromos hajtás kis alapzajszintje a kezdeti méréseknél könnyebbséget jelent, mivel a két mérés közötti különbség jobban megfigyelhető.



7. ábra Ipari mikrofon elhelyezése az utastérben

A 8. ábra mutatja a mikrofon elhelyezések közötti különbséget. A kívül elhelyezett mikrofon a motorháztető alatt kapott helyet, hogy valamelyest védve legyen a menetszélről, és így közelebb kerülhet a hajtáslánchoz.

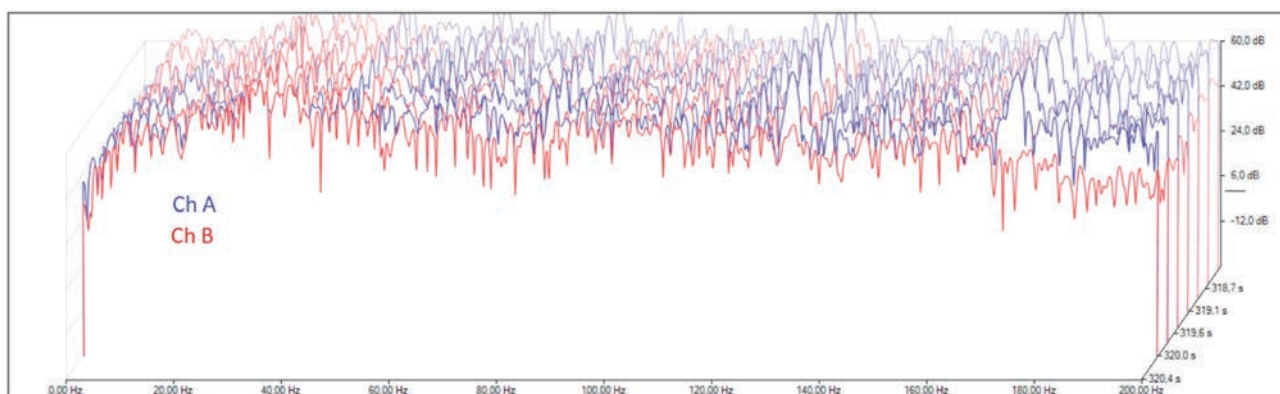
Rezgésjelentés



8. ábra: Az utastérben és a motorháztető alatt elhelyezett mikrofonnal végzett mérések közötti különbség

A kék görbe jelöli a motortérben elhelyezett mikrofon jelét, a piros pedig az utastérben mért zaj. Az időtartományban mutatott jelekből jól kivehető, hogy a motortérben az elektromos hajtás nagyfrekvenciás zajt generál, amit az utastérben már nem érezni a szigetelés miatt. A kisfrekvenciás zajok bejutnak az utastérbe, a futómű által átadott rezgések eljutnak a karosszériára a csatlakozó pontokon keresztül. A kivett mérési részletben nem volt úthiba, így csak a menetszél, a gördülési zaj és a hajtáslánc volt releváns.

A 9. ábrán egyszerre tudjuk idő- és frekvenciatartományban vizsgálni a zajokat. Itt jól látható, hogy a nagy frekvenciás zajok esetében a kék görbék nagyobb amplitúdót mutatnak, ráadásul a forgó gép és a kerek fordulatszámának megfelelő frekvenciákon lokális csúcsok is láthatók.



9. ábra: Az utastérben és a motorháztető alatt elhelyezett mikrofonnal végzett mérések kiértékelése idő- és frekvenciatartományban

5. Rezgésmérés

A rezgésmérés lehetőségeit a Pico NVH kit-tel kapcsolatos tanulmány [12] tökéletesen leírja. A rezgésjelből nem csak a frekvencia-analízis lehet hasznos, hanem az időbeni megjelenés. Több szenzor esetében a rezgésjel felfutásának időpontja segít megállapítani, hogy melyik érzékelőhöz van közelebb a rezgés forrása. Természetesen az amplitúdó és a frekvencia is információ-hordozó.

A hivatkozott cikkben egy kormánymű meghibásodást fejtenek vissza a gyorsulásmérők segítségével. A hibaforráshoz közelítve a szenzorok folytonos áthelyezésével sikerült eljutni addig a pontig, amikor már 4 gyorsulásmérő 1 m-en belül helyezkedett el egymástól.

A mérési feltételek: Álló motor, rögzített kormány



10. ábra: Hibafeltárás gyorsulásmérővel.

- A: Kormánymű fogaskerék alatti részen elhelyezett gyorsulásmérő (kék)
- B: Kormánymű jobb első rögzítőcsavarján elhelyezett gyorsulásmérő (piros)
- C: Kormánymű ház kormányoszlop felőli részen elhelyezett gyorsulásmérő (zöld)
- D: Kormánymű jobb hátsó rögzítőcsavarján elhelyezett gyorsulásmérő (sárga)

A fenti reakciók arra utalnak, hogy a zaj epicentruma a kormánymű ház alsó részéhez rögzített gyorsulásmérő azonnali és drámai reakciója alapján azonosítható be.

Gyorsulásmérők válaszsidejének sorrendje (10. ábra):

- 1.: Kormánymű fogaskerék alatti rész (0 sec)
- 2.: Kormánymű jobb első rögzítőcsavarja (81.43 μ s)
- 3.: Kormánymű jobb hátsó rögzítőcsavarja (81.43 μ s)
- 4.: Kormánymű ház kormányoszlop felőli rész (204.9 μ s)

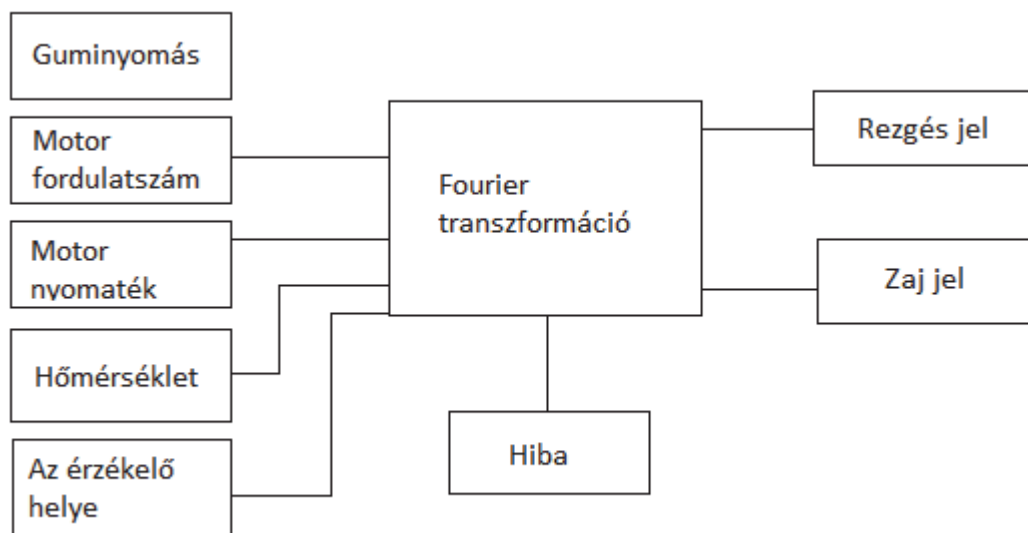
Eredmények: A diagnosztikai esettanulmány során rögzített válaszidők alapján (a kormányzáshoz viszonyítva) a következő sorrendet lehet felállítani:

- 1.: Kormánymű fogaskerék alatti rész. **Ez a hibaforrás.**
- 2.: Kormánymű rögzítő csavarok
- 3.: Kormánymű ház (felső)
- 4.: Bölcső jobb első része
- 5.: Bölcső bal első része
- 6.: Alváz jobb első része
- 7.: Alváz bal első része

6. Összefoglalás

Az eddigi mérések alapján akár kis költségű mikrofonnal is lehet detektálni hibákat a jármű haladása közben, ami lehetőséget ad a fedélzeti diagnosztikába való bekötésre.

A mikrofon elhelyezésének vizsgálata során azt tapasztaltuk, hogy az utastérben elhelyezett mikrofon a jármű szigetelése ellenére is jól felhasználható, az utastéren kívüli mérések pedig a szélzaj miatt körülményesek.



11. ábra: A mérőrendszer és a hozzá tartozó hatások, zavarások.

További mérések elvégzése szükséges, hogy a mikrofonok számának és elhelyezésének hatását is elemezni tudjuk. Feltételezzük, hogy több mikrofonnal a zajforrás helye jobban detektálható, valamint a mikrofonok elhelyezése fontos szerepet játszik egy-egy hiba észlelésében. A közúton végzett referenciamérések segítenek az alap zajszint

meghatározásához, ami a jármű normál működését jellemzi, illetve a külső zajforrások, lehetséges zavaró zajok felismerésében.

7. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Chandroth, G.O. (Sharkey A. J. C., Sharkey N. E.): Cylinder Pressures and Vibration in Internal Combustion Monitoring
University of Sheffield, Department of Computer Science, 1999.
- [2] Bohn, P.: Wechselwirkungen von Schwingungen zwischen Motor-Getriebe-Verbund und Kurbeltrieb als Grundlage für Körperschallanalysen
„PhD disszertáció”: Technische Universität Berlin, V - Verkehrs- und Maschinensysteme, 2006.
- [3] Jindal, S.: *Vibration signatures of a biodiesel fueled CI engine and effect of engine parameters*
International Journal of Energy & Environment, 3. kötet, 1. kiadás, 151-160. oldal, 2012.
- [4] Dr. Bánlaki P.: *Gépjármű hajtáslánc fődarabok rezgés- és zajdiagnosztikai végellenőrző rendszereinek továbbfejlesztése*
„PhD disszertáció”: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, 2014.
- [5] ÓRI Péter, Prof. Dr. habil LAKATOS István: Kis költségű mikrofon alkalmazási lehetőségei akusztikai öndiagnosztikára (2019)
- [6] Zöldy M, Török Á: A forgalomba belépő gépjárművek többlet károsanyag kibocsátásának számítása a nemzetközi határértékek figyelembevételével, Közlekedéstudományi Szemle 55 pp. 336-339, 4 p. (2005)
- [7] Bohn, P.: Wechselwirkungen von Schwingungen zwischen Motor-Getriebe-Verbund und Kurbeltrieb als Grundlage für Körperschallanalysen, „PhD disszertáció”: Technische Universität Berlin, V - Verkehrs- und Maschinensysteme, 2006.
- [8] Jindal, S.: Vibration signatures of a biodiesel fueled CI engine and effect of engine parameters. International Journal of Energy & Environment, 3. kötet, 1. kiadás, 151-160. oldal, 2012.

- [9] Derenda T, Zanne M, Zöldy M, Török Á (2018): Automatization in road transport: a review, Production Engineering Archives 20 : 20 pp. 3-7. , 4 p.
<https://doi.org/10.30657/pea.2018.20.01>
- [10] Van Riesen D., Schlensok C., Henrotte F., Hameyer K.: “Acoustic measurement for detecting manufacturing faults in electrical machines”, 17th International Conference on Electrical Machines ICEM, (2006)
- [11] Dr. Bánlaki P.: Gépjármű hajtáslánc fődarabok rezgés- és zajdiagnosztikai végellenőrző rendszereinek továbbfejlesztése „PhD disszertáció”: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, 2014.
- [12] BMW 320D M Sport xDrive Touring (RH-Drive) | Knocking noise from steering column – Steve Smith - <https://www.picoauto.com/library/case-studies/bmw-knocking-noise-from-steering-column>

Energiatakarékos járműüzemeltetést biztosító modell létrehozása Simulink-ben

Creating a model for energy-efficient vehicle operation in Simulink

Kőrös Péter^a, Pusztai Zoltán^b

^a9026 Győr, Egyetem tér 1, Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont
korosp@ga.sze.hu

^b9026 Győr, Egyetem tér 1, Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont
pusztai.zoltan@ga.sze.hu

Absztrakt: A jelen cikk bemutat egy olyan módszert, amellyel leírható egy olyan jármű, hajtáslánc és környezetmodell, amely alapját fogja képezni egy olyan optimalizáló eljárásnak, ami meghatározza a szimulált jármű energiatakarékos üzemeltetését bizonyos peremfeltételek betartása mellett. A cikk tárgyalja továbbá azokat mérési módszereket is, amellyel a három modellkomponens felvehető. A méréseket egy Shell Eco-marathon jármű példáján keresztül mutatjuk be.

Kulcsszavak: hajtáslánc, jármű, energiatakarékos, Shell Eco-marathon, kísérleti jármű, menetciklus, elektromos hajtás

Abstract: This paper presents a method for describing a vehicle, powertrain, and environmental model that will form the basis of an optimization procedure that determines the energy-saving operation of a simulated vehicle under certain boundary conditions. The article also discusses the measurement methods by which the three model components can be included. The measurements are presented through the example of a Shell Eco-marathon vehicle.

Keywords: powertrain, energy efficient, lightweight vehicle, Shell Eco-marathon, experimental vehicle, driving cycle, electric vehicle

1. Bevezetés

Az elektromos járművek üzemeltetése során kulcskérdést játszik az energiatakarékosság. Ezt nem amiatt kell szem előtt tartania a mérnököknek, mert az elektromos hajtáslánc sokkal rosszabb hatásfokkal dolgozna, mint a belsőégésű társai, hanem pont ellenkezőleg, sokkal kedvezőbb üzemelési jellemzőkkel bír. A kedvező jellemzők már nem mondhatók el az elektromos energiátárolókra, nagy térfogatban és nagy költséggel tárolható az energia. Ez okok miatt fontos, hogy a meglévő energiát a lehető leghatékonyabb módon használjuk fel a közlekedés során. Természetesen az üzemeltetés feltételrendszere gyakran nem adja meg azt a lehetőséget, amellyel ezt a célt meg tudjuk valósítani, hiszen a közlekedés során sok más szereplőhöz kell alkalmazkodnunk, nem csak az A pontból B pontba jutás a cél. Vannak olyan versenyek, amelyek ilyen megkötéseket nem tartalmaznak, azaz a jármű sebessége minden időpillanatban szabadon megválasztható, azaz meghatározható. Meghatározható az üzem úgy, hogy a jármű a minimális energiát használja fel a közlekedése során a cikkben javasolt módon. A modellnek tartalmaznia kell a hajtáslánc együttes hatásfokmezejét, ami magában foglalja a

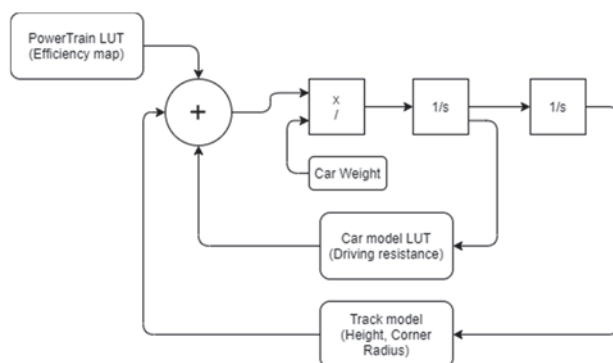
motormeghajtó elektronika, az elektromos gép és az (általában lassító) hajtómű működési jellemzőit. A jármű esetén legfontosabb ilyen vizsgálatoknál a menetellenállást meghatározni, amely mindig bonyolult feladat a rendszer nem lineáris viselkedése miatt. A jármű menetellenállása mindig tartalmazza a közegellenállást, amely nagymértékben módosulhat különböző szélességek, haladási irányok esetén. A jármű által bejárt szakasznál legfontosabb információ a tengerszintfeletti magasság és a kanyarodási rádiuszok ismerete, hiszen ezek a rendszerben gyorsító és lassító erőkomponenseket hoznak létre. A Járműipari Kutatóközpont fő tevékenysége elektromos hajtásláncok és motormeghajtó elektronikák fejlesztése, amelyekhez az adott járműnél, meghatározott útvonalon a minimális energiafelvételt biztosítható üzemeltetési ciklusokat határozzunk meg. A modellt azért a MATLAB Simulink programban hoztuk létre, hogy könnyen csatlakozhat legyen irányítási, optimalizációs és egyéb feladatokhoz is.

1. táblázat - Hajtásláncok maximum hatásfoka

Hajtáslánc	Maximum hatásfok [%]
Belsőégésű motor	30-40
Hibrid hajtáslánc	40-60
Elektromos hajtáslánc	80-92

2. A szimulációs modell

A szimulációs modell hatásvázlatát az alábbi ábra szemlélteti (lásd. 1. ábra). A fékpadi mérésekből létrehozható a hajtáslánc hatásfokmezeje, ami Look-up Table-ben (LUT) tárolja az adott fordulatszám, nyomaték párhoz az aktuális hatásfok értéket. Az LUT használatának az előnye a hajtáslánc polinom leírásával [1] szemben az, hogy diszkrét mérési pontok között a módszer lineáris interpolációt alkalmaz, amely gyorsabb eljárás, mint a polinom kiszámítása. A hajtáslánc által szolgáltatott vonóerőt elosztva a jármű tömegével megkapjuk a rendszer gyorsulását, amit idő szerint integrálva sebességet és megtett távolságot kapunk. A sebesség és távolság bementét fogják képezni a következő két modellelem számára. A járműmodell független változója a járműsebesség lesz, illetve a kanyarodási rádiusz, amit a pályamodel határoz meg a megtett távolság alapján. Mindkét modellelem LUT-t alkalmaz, így azokat a modell futtatása előtt fel kell venni a modellben.



1. ábra. A szimulációs modell hatásvázlata

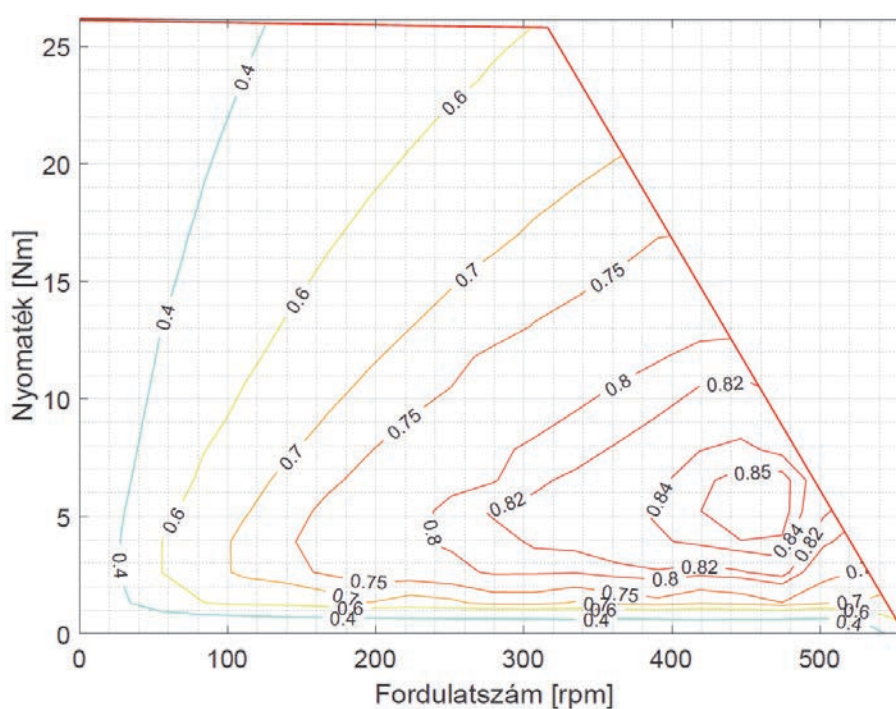
A felvett járműadatok csak a legfontosabb paramétereket tartalmazzák a járműről, dinamikai jellemzőket nem kezel, a jármű jellege miatt. A jármű dinamikai vizsgálata azért sem célszerű, mert a verseny során alacsony dinamikával mozog a jármű.

A járműről felvett paraméterek listája:

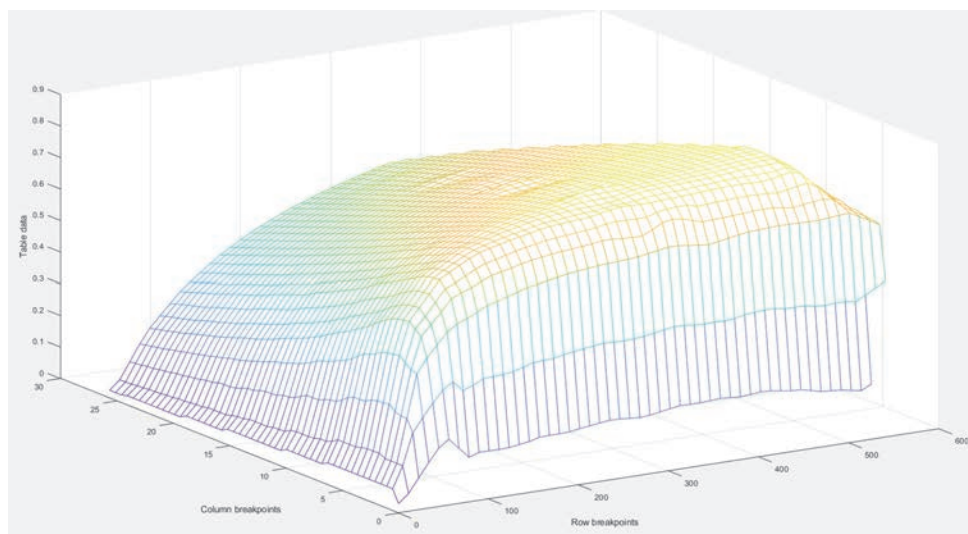
1. *Car_overall_weight* [kg]
2. *Car_wheel_radius* [m]

A paraméterek listájából látható, hogy csak azokat az adatokat kell felvenni, amelyek megteremtik a hajtáslánc és a vonóerő közötti kapcsolatot, hogy a modell Newton II. törvénye szerint működjön.

A hajtáslánc LUT felvételénél jelenleg két hajtásrendszer jellemzőit vettük fel, mindkét hajtásrendszer állandómágneses, háromfázisú motor által szolgáltatott hajtáselrendezés, de a motor kommutációja során szinuszos és trapéz jelalak a különbözőség a két hatás között.

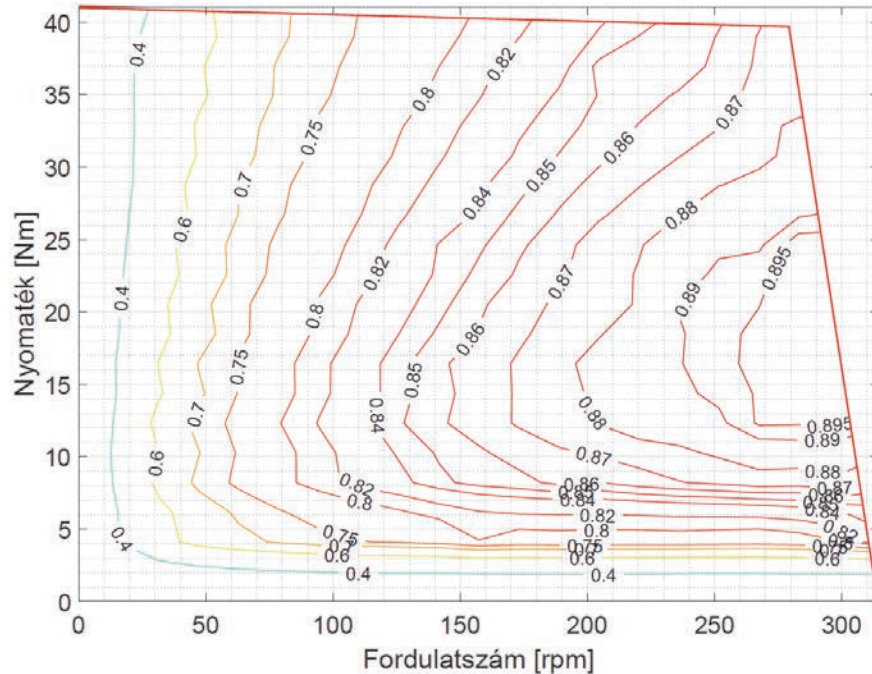


2. ábra - Allied_Motion Quantum QB03403 B10 - NEMA34 hajtáslánc hatásfokmezeje 4-es lassító bordásszíjjal



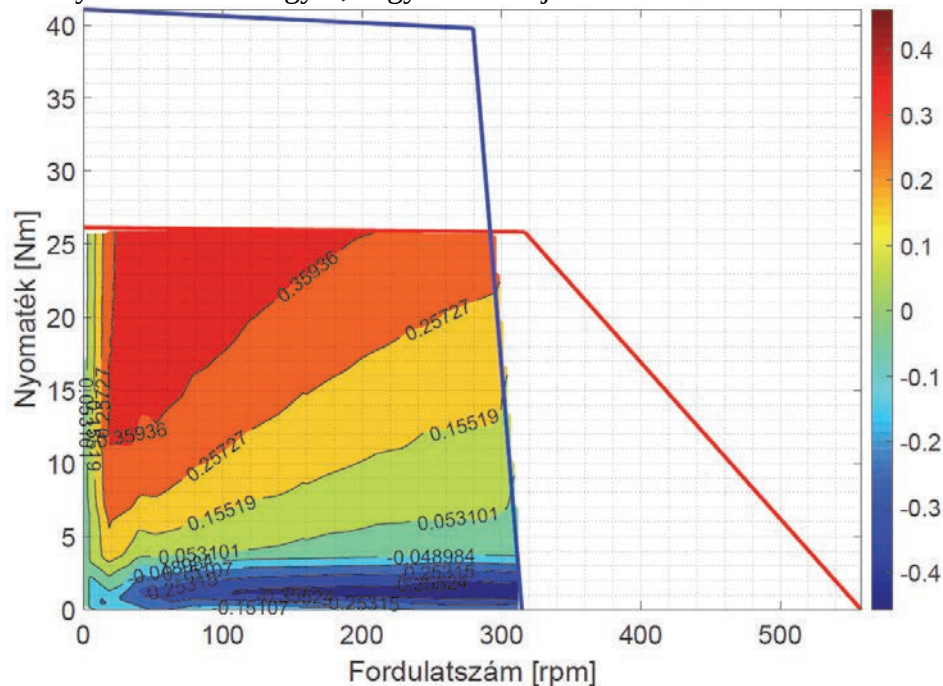
3. ábra - Allied_Motion Quantum QB03403 B10 - NEMA34 hajtáslánc LUT a szimulációs modellben

A fenti ábrákon (lásd. 2. ábra) bemutatott hajtáslánc szinuszos kommutációt alkalmazva is csak a munkatartományban mutat kedvező hatásfok értékeket, amely kb. 420-480 rpm és 5-6 Nm tartományra korlátozódik. A 2019-ben alkalmazott hajtáslánc mellett egy új hajtásrendszert is fékpadi vizsgálatok alá vetettünk. A hajtáslánc hatásfokmezeje az alábbi ábrán látható (lásd. 4. ábra).



4. ábra – Volcano EMP038 BLDC hajtáslánc hatásfokmezeje 3,6-os lassító bordásszíjjal

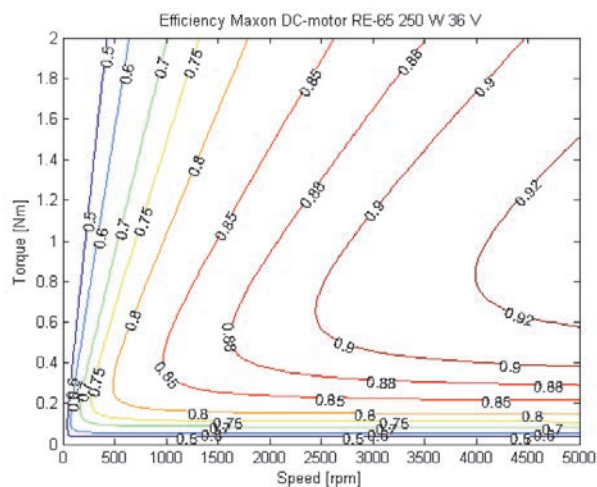
A Volcano EMP038 hajtáslánc maximum hatásfok munkatartománya sokkal nagyobb nyomatékterületet fed le, 260-300 rpm és 14-24 Nm tartományban megközelíti a 90%-ot is. Ha a két hajtáslánc hatásfokmezejét összehasonlítjuk, láthatóvá válik, hogy mely munkatartományokban kell az egyik, vagy másik hajtást alkalmazni.



5. ábra – Hajtásláncokat összehasonlító kagylógörbe

A fenti ábrán (lásd. 5. ábra) látható, hogy a 2019-ben alkalmazott Allied Motion hajtás csak kis munkatartományban (1-4 Nm) bír kedvezőbb hatásfokértékekkel, a nagynyomatékú munkatérben jelentős hátránya van a másik hajtáslánccal szemben (akár 35%-os különbség is). A szimuláció így választ adhat arra, hogy mely hajtáslánc alkalmazásával lesz a jármű energiatakarékosabb. A fenti ábrán viszont az is megfigyelhető, hogy a jármű a Volcano hajtáslánc alkalmazásával nem képes a 35-36 km/h-s végsebességet elérni, így egy kb. 3-as lassító áttétellel újra kell mérni a hajtáslánccot. Érdekes ilyen esetekben a hajtáslánccot mindig úgy lemérni, hogy a munkatér a lehető legnagyobb legyen, a végül alkalmazott nyomatékreferenciákat az optimalizáló fogja „megtalálni”.

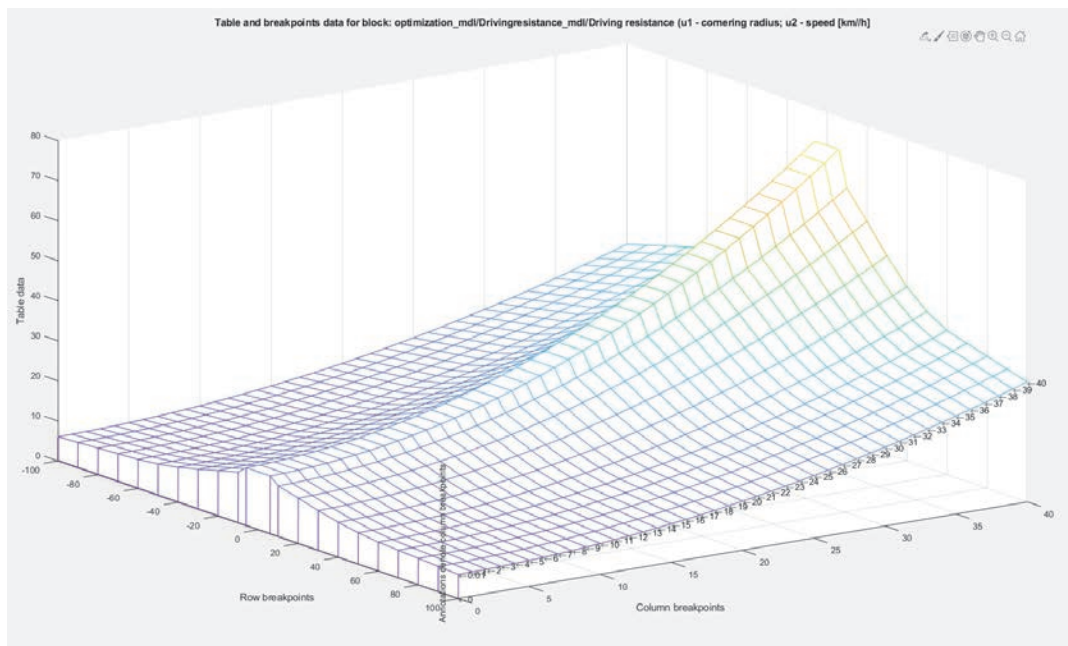
A fenti ábrákon bemutatott hajtáslánccokon kívül még kívánunk alkalmazni a szimulációban egy nagy áttétel (11-16-os lassítás) alkalmazásával egy DC motoros meghajtást is, amelynek a hatásfokmezeje az alábbi kagylógörbét mutatja (lásd. 6. ábra).



6. ábra – Maxon RE 65 250W hatásfokmezeje [3]

A hajtáslánc modell felvétele mellett legfontosabb, hogy a jármű menetellenállás görbéit meghatározzuk sebesség és kanyarodási rádiusz függvényében. A méréseket sebességtartó módon (sebességszabályozott hajtás) vagy kigurulásos módszerrel is meghatározhatjuk.

A 2019-es Shell Eco-marathon járművünk esetén ezeket a méréseket még nem tudtuk elvégezni, de a valószínűsíthető LUT jelleget már a régebbi mérések alapján felvettük (2015-ös jármű - SZElectricity) a modellbe (lásd. 7. ábra).



7. ábra – A járműmodell LUT-je (független változók: járműsebesség, kanyarodási rádiusz)

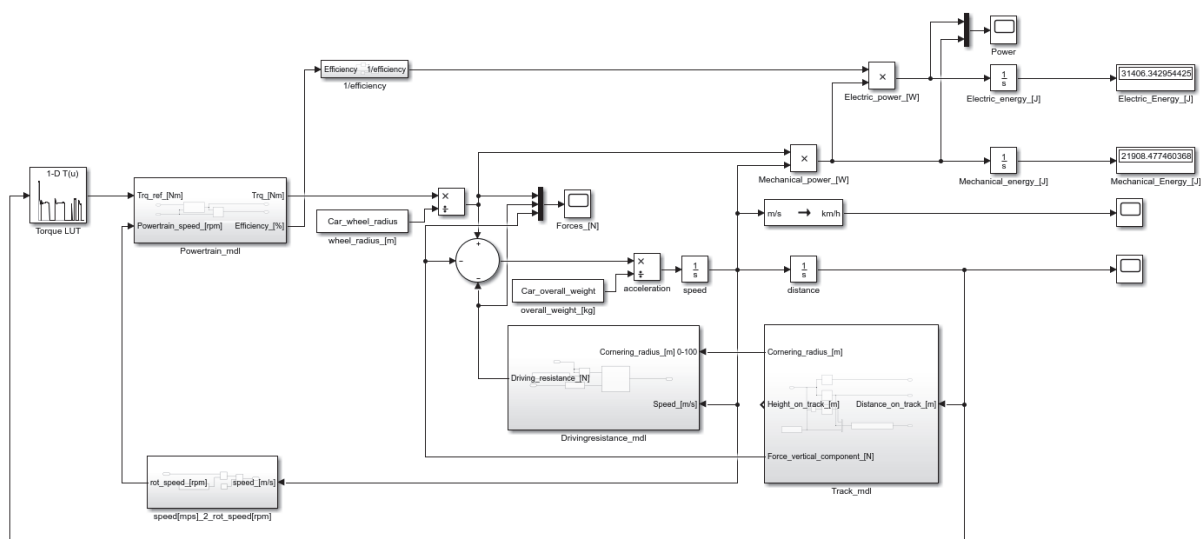
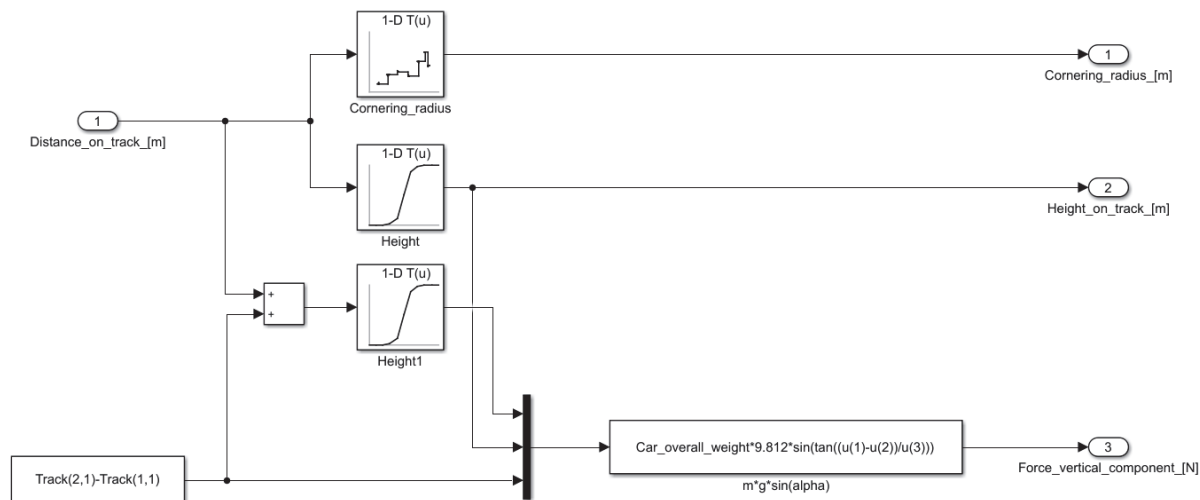
Érdeemes megfigyelni, hogy a modell a 100 m feletti kanyarodási rádiuszt már egyenesfutásként kezeli, így mindig meg kell határozni azt a küszöbértéket, amely a pályára jellemző tulajdonság lesz. Az LUT képes arra, hogy aszimmetrikus mentellenállásgörbéket is letároljon, azaz megkülönböztethető jobbra és balra kanyarodás is.

A kanyarodás során fellépő plusz erőkomponensek lassítják a járművet, így ennek a hatásnak a minimalizálására egy megfelelő, Ackermann hibát nem tartalmazó kormányzás megvalósításával csökkenthető ez a lassító a kedvezőtlen hatás [2].



8. ábra - Menetellenállás mérés sorozat járműve a 2020-as járművel a ZalaZone tesztpályán

A jármű és hajtáslánc modell után fel kell venni azt a pályát – útvonalat – ahol a jármű közlekedni fog, azaz amelyre menetciklust fogunk optimalizálni. A pálya két módon befolyásolhatja a járműre ható erőkomponenseket. A pálya lejtéséből vagy emelkedéséből olyan erőkomponens képződik, amely vagy gyorsítja vagy lassítja a járművet. Az ívmenetek



3. Összefoglalás

A létrehozott szimulációs modell alkalmazásával létrehozható olyan optimalizáló rendszer, amely megadja az adott jármű, különböző hajtásrendszer esetén is az optimális menetciklust (megtett távolság, hajtáslánc által kifejtett nyomaték), amelyek alkalmazásával a minimum energiafelvétel biztosítható az adott pályán. A módszer alkalmazásához elengedhetetlen a jármű menetellenállás mezejét és a hajtáslánc hatásfokmezejét kimérni.

4. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Péter Kőrös, Ernő Horváth, István Lakatos, Ferenc Szauter: TWO OPERATING STATES-BASED LOW ENERGY CONSUMPTION VEHICLE CONTROL, *ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, August 2017
- [2] Zoltán Pusztai, Péter Kőrös: STEERING MECHANISM DESIGN FOR LIGHTWEIGHT VEHICLE, *ACIPV 2020*
- [3] Emma Grunditz, Emma Jansson: MODELLING AND SIMULATION OF A HYBRID ELECTRIC VEHICLE FOR SHELL ECO-MARATHON AND AN ELECTRIC GO-KART, *Master of Science Thesis in Electric Power Engineering Chalmers University, Göteborg, 2009*

Autonóm járműfunkciók megvalósítására alkalmas versenyjármű Gazebo-ROS szimulációja

Gazebo-ROS simulation of a Vehicle with Self-Driving functions

Krecht Rudolf^a, Hajdu Csaba^b

^aSzéchenyi István Egyetem – Járműipari Kutatóközpont
krecht.rudolf@ga.sze.hu

^bSzéchenyi István Egyetem – Járműipari Kutatóközpont
hajdu.csaba@ga.sze.hu

Absztrakt: A cikk célja a SZEnergy versenycsapat SZEmission versenyjárművének Gazebo-ROS szimulátorban készített modelljéhez kapcsolódó munkafolyamatok ismertetése. A szimuláció elkészítésének célja a Shell Eco-marathon Autonomous Urban Concept versenykategória versenyszámaira való felkészülés segítése. A szimuláció készítése során a versenyjármű gépészeti felépítését, érzékelőinek tulajdonságait és elhelyezését ismertnek tekintjük. A szimuláció kialakítása során fontos továbbá a szimuláció olyan jellegű felépítése, hogy a versenyszámokban kitűzött feladatok a Shell Eco-marathon Autonomous Urban Concept versenyszámainak szabályzatának megfelelően reprodukálhatóak legyenek benne. A cél az önvezető versenyszámok emberi irányítással történő szimulációja szenzoradatgyűjtés céljából, valós tesztek mellőzésével. A szimulátor ilyen módon történő használata lehetővé teszi az algoritmusok viselkedését tetszőleges körülmények között, valamint megkönnyíti az iteratív munkát. Az algoritmusok fejlesztési folyamatainak végeztével teljes rendszerteszt is végrehajtható.

Kulcsszavak: szimuláció, ROS-Gazebo, önvezető

Abstract: The aim of this article is to present the development processes connected to the Gazebo-ROS simulation of SZEnergy Team's SZEmission competition vehicle. The motivation behind the simulation creation is the provision of a complex test tool for high-level self-driving control algorithm development for the challenges of Shell Eco-marathon Autonomous Urban Concept competition. The simulation creation process assumes that the vehicle is known from the point of view of actuators (throttle, steering) and sensors (lidar, laser scanner and stereo camera). The simulation ensures the possibility of modular racetrack creation, with racetrack elements that comply with the competition rulebook. The resulting simulation can be used for sensor data collection and for iterative algorithm development. After the completion of the control algorithm development process, the simulator can be used for complex system tests.

Keywords: simulation, ROS-Gazebo, self-driving

1. Bevezetés

Az önvezető és autonóm járművek egyre jelentősebb térhódításának következményeként ezen területek egyre gyakrabban jelennek meg hallgatói versenyek kihívásai közt is. Ezen tendenciát követve, a Royal Dutch Shell által szervezett Shell Eco-marathon hallgatói energiahatékonysági verseny is önvezető járműfunkciók fejlesztésére irányuló versenyszámokat vezetett be Autonomous Urban Concept (AUC) néven. Az AUC versenyszámai alatt biztonsági okokból folyamatosan pilóta foglal helyet a járműben. A SZEenergy versenycsapat több éves energiahatékonysági versenyzést követően az önvezetési versenyszámokban való indulást is céljává tűzte ki. A versenyszámok teljesítéséhez szükséges algoritmusfejlesztési folyamatok gyakran igényelnek valós méréseken, szenzoradatokon alapuló adatokat, valamint számos fejlesztési és algoritmus-paraméterezési eljárás iteratív feladat elvégzését. Ezen folyamatok megfelelő végrehajtása teszteket és méréseket követel, amelyek feltételezik a versenyautó hardverének teljes rendelkezésre állását, ezen felül rendkívül időigényes, valamint környezetfüggő (helyszín, pálya, időjárás) feladatok. A valós tesztek helyettesítésének céljával alkalmazunk önvezető járműfunkciók fejlesztésére számítógépes szimulációkat. Jelen cikk célja a SZEenergy versenycsapat SZEmission versenyjárművének számítógépes szimulációjához szükséges folyamat ismertetése.

2. Gazebo-ROS szimulációs környezet

Az önvezető funkciókkal felvértezendő jármű kezelhető úgy, mint egy Ackermann-kormányzású robot. A SZEenergy SZEmission versenyjárművének önvezetést megvalósító rendszerei ROS (Robot Operating System) alapúak. A számítógépes szimuláció megvalósításához ebből kiindulva az ROS-tól függetlenül fejlesztett, de teljesen integrált Gazebo szimulációs környezetet célszerű alkalmazni.

Az ROS (Robot Operating System) rugalmas keretrendszer robotszoftverek létrehozásához. Számos eszközt, könyvtárat és általánosított eljárást foglal magába, melyek segítik komplex robotok platformfüggetlen, moduláris fejlesztését [1]. Általános célú robotszoftver fejlesztése a számos hardvertípus miatt rendkívül nagy kihívás. Az ROS lehetővé teszi robot hardverelemeinek önálló fejlesztését, és a standardizált elemközi kommunikációs eljárásainak segítségével biztosítja az így fejlesztett hardverelemek kompatibilitását. Robotszimulációk fejlesztése során is célszerű az ROS alkalmazása, ugyanis a szimulátor segítségével fejlesztett és tesztelt kódrészek adott esetben módosítás nélkül átültethetők a később elkészülő valós robotba. Az ROS gráf rendszerű, a csomópontok (node) közvetlenül kommunikálhatnak egymással. Publisher/Subscriber típusú kommunikáció valósul meg közöttük. A node-ok közölhetik (publish) üzenetüket, a többi node feliratkozhat (subscribe) erre, így minden node kommunikálhat minden node-dal [2].

A Gazebo számítógépes szimulátor az Open Source Robotics Foundation (OSRF) projektje. A kezelői felület segítségével történő modellalkotás az újabb verziók megjelenésével került funkciói közé. Jellemzői közé tartozik, hogy könnyen kezel komplex robotokat, ráadásul ezek szimulációját teljes pontosság mellett teszi lehetővé. Flexibilis kialakításának köszönhetően adaptálható a felhasználó igényeihez, a szimulátor pár paraméterének állításával szimulálható vele több száz egyszerű, vagy egy-két komplex robot. A beépített szenzormodellek lefedik közel az összes valós szenzortípust, így nem okoz gondot a robotok szenzorainak valósághű modellezése. Mivel a Gazebo szimulátor és az ROS rendszer fejlesztése sokáig összefonódott, a Gazebo támogatja a legjobban az ROS rendszer használatát. Az az ROS rendszer, ami a szimulált roboton megfelelően működött, módosítás nélkül futtatható a valós roboton is. Hátránya a nehézkesen használható kezelői felület, amely komplex robotok építése során

jelentős időtöbbletet eredményezhet. Továbbá jelen projekt szempontjából hátrány, hogy nem tartalmaz lineáris aktuátor modellt, rugót, vagy csillapítót; semmilyen elemet, ami lehetővé tenné rugózott futómű modelljének gyors összeállítását. Teljesen nyílt forráskódú szoftver, alapvetően Linux alapú rendszerekre készült, de megoldható futtatása Windows és Mac rendszereken is.

3. A szimulált jármű

Ahogy a korábbiakban is említésre került, a jármű szimulációjának elkészítése céljából általános célú robotszimulációs környezetet alkalmazunk, így a szimulált jármű felépítése szempontjából a robotok szimulációjának létrehozása során ismert lépéseket kell követni.

Gazebo szimulátorban a szimulált modellt az URDF (Unified Robotic Description Format) típusú XML fájl írja le. Az URDF az ROS rendszer sajátossága, ROS rendszerű robotok leírására alkalmazható. Az URDF Gazebo-ban történő alkalmazása során néhány szimulátor-specifikus elemmel kell kiegészíteni a fájlt. Az URDF alapvető elemei a *link*, a *joint*, valamint a *robot*. A robotmodell Gazebo-ban történő alkalmazása során ezen elemeket *Gazebo* típusú elemekkel szükséges kiegészíteni [3]. A kiegészített fájlt, az SDF (Simulator Description Format) használható Gazebo szimulációs környezeten belüli robotmodell leírására.

Az URDF fájl írja le a jármű kinematikai modelljét is. Ezen leírás csapatunk modellgenerátorával készült [4]. A jármű felépítését az 1. táblázat tartalmazza.

Links	Joints	Plugins
base_link	jnt_front_left_steer	gazebo_szeMission
front_left_wheel_link	joint_wheel_front_left	
front_left_wheel_link_drive	jnt_front_right_steer	
front_right_wheel_link	joint_wheel_front_right	
front_right_wheel_link_drive	joint_wheel_rear_left	
	joint_wheel_rear_right	

1. táblázat. A szimulált járműmodell alkotóelemei

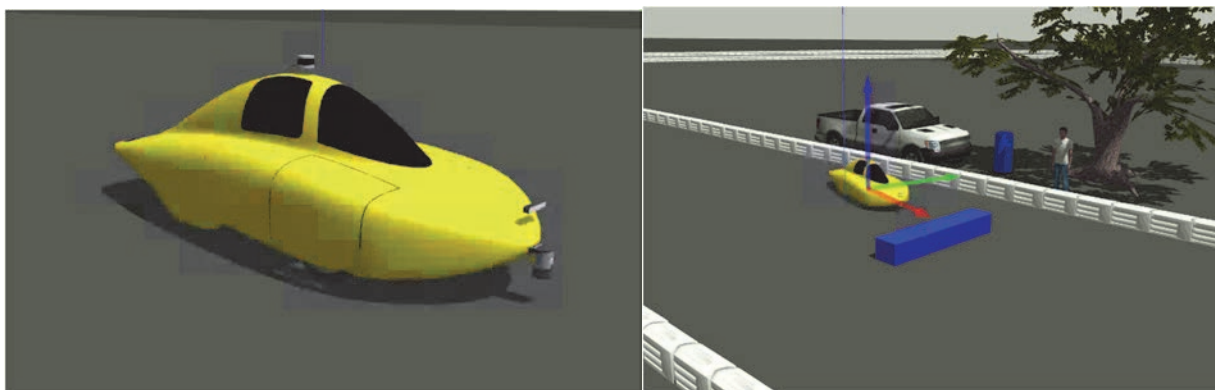
A jármű vizuális megjelenítéséhez a SZEmission versenyjármű gépészeti tervezése során kialakított számítógépes modellek kerültek felhasználásra. A szimulátor számára módosított, egyszerűsített textúrával ellátott jármű Collada fájlként importálható Gazebo szimulátorba. A leírófájl alkalmazásával elhelyezésre kerültek a jármű szenzorai is (1. ábra).

A verseny több, különböző nehézségi szintű, egymásra épülő küldetésből áll: autonóm távolság, komplex pálya, manőverezhetőség, akadálykerülés, meglepetésküldetés. A küldetések vázlatos megismerése kulcsfontosságú a versenyszámokra való felkészülés segítése céljából készülő számítógépes szimulációk szempontjából. Lényeges felmérni az adott versenyszámok teljesítése közben felmerülő esetleges zavaró tényezőket, a feladat teljesítését nehezítő faktorokat. Ezeket kiemelt figyelemmel szükséges reprodukálni a szimulált versenyjármű és pályamodellek elkészítése során is. Ezen célból a versenyszámok ismertetése:

- Autonóm távolság – előre definiált paraméterekkel rendelkező terelőelemekkel határolt versenypályán zajlik, célja az, hogy a versenyjármű minél nagyobb távolságot tegyen meg hibátlanul, vagyis a terelőelemek érintése, vagy a pilóta beavatkozása nélkül.
- Komplex pálya – valós közúti útszakaszokra emlékeztető pályaelemeket tartalmaz, a versenyjárműnek ezen szakaszokat kell teljesítenie. A közúti jelzések (forgalmi táblák, felfestések) felismerése nem a feladat része.

- Manőverezhetőség – a versenyjárműnek egyenes, terelőelemekkel határolt pályaszakasz végén elhelyezett, terelőelemmel határolt parkolóhelyen kell megállnia, minél pontosabban.
- Akadálykerülés – a versenyjárműnek szlalomkapukat kell teljesítenie, bizonyos útfelfestések érintésével kiegészítő pontok szerezhetők. A pályát terelőelemek határolják.
- Meglepetésküldetés – a feladatot a versenybírók a verseny napján határozzák meg.

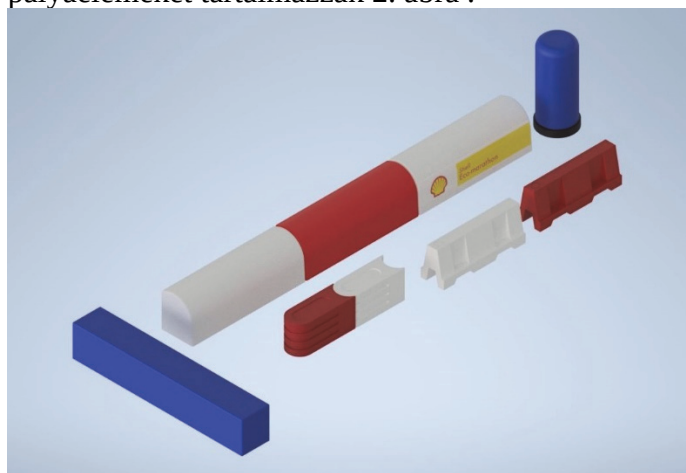
A jelen cikkben bemutatott számítógépes szimuláció elsősorban az autonóm távolság, valamint a manőverezhetőség küldetések teljesítését célozza segíteni, ezen belül is a lézerszkenner és lidar szenzor alapú fejlesztéseket kívánja segíteni, de kialakítása során szempont volt a többi küldetés szimulálásához való adaptálhatóság is. A SZEmission versenyjármű szimulációjának alapjául a valós versenyjármű szolgál, szenzoros és aktuátoros szempontból egyaránt. A szimulált környezet szintén valós elemekre épül, a versenypálya egy korábbi Shell Eco-maraton Autonomous Urban Concept verseny helyszíne alapján készült, a hivatalos versenyszabályzatban definiált pályaelemekkel kiegészítve.



1. ábra. A SZEmission versenyjármű Gazebo modellje

4. Szimulált környezet

A releváns szenzoradatok gyűjtése érdekében elengedhetetlen volt megfelelő, célirányosan készített tesztkörnyezetek kialakítása, amelyek a Shell Eco-marathon versenyszámainak szabályzatában leírt pályaelemeket tartalmazzák 2. ábra .

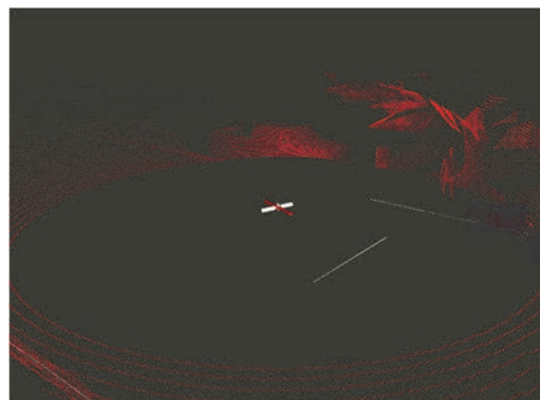
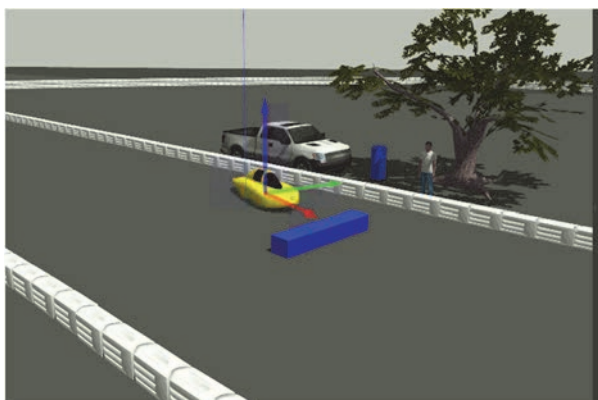


2. ábra. A Shell Eco-marathon AUC versenypálya-terelőelemei

A pálya kialakítása a következő szempontok szerint történt:

- A versenyszabályzatban leírtaknak megfelelően
- Minden versenyszámnak megfelelően, könnyen átépíthető legyen
- Adjon lehetőséget pályamenti zavaró tényezők, kézzel, hibásan elhelyezett terelőelemek hatásának szimulálására
- Legyen alkalmas szenzoradatok gyűjtésére, valamint a jármű irányítóalgoritmusainak tesztelésére.

A szimulátor az által felel meg a felsorolt elvárásoknak, hogy a szabálykönyvben megadott paraméterek alapján modellezett pályaelemeket tartalmaz. A pályaelemek darabonként elérhetők, a felhasználási mód függvényében egyenként elhelyezhetők a szimulált környezeten belül. Továbbá a szimulációs munkamenetek felgyorsítása érdekében a korábban Shell Eco-marathon Autonomous Urban Concept versenynek helyszínt adó Kartbaan Berghem versenypálya nyomvonala is elhelyezhető modellként kezelhető. A pálya lehetőséget ad az autonóm távolság elnevezésű, pályabejárást megkövetelő feladat szimulálására, valamint egyenes szakaszain kialakítható a manőverezhetőség és akadálykerülés versenyszámok pályája is. A 3. ábra a manőverezhetőség versenyszám egy scénáriójára ad példát, zavaróelemekkel kiegészítve. Látható továbbá a mért szenzoradatok vizuális megjelenítése (Rviz) is.



3. ábra. Szimulációs példa megjelenített adatokkal

5. Összefoglaló

A SZEmission versenyjármű Gazebo szimulációja segítségével a jármű önvezető funkcióinak fejlesztése felgyorsítható. Elkészült a szimuláció, amely a Shell Eco-marathon Autonomous Urban Concept versenyszámainak megfelelő versenypályákon tesztelhető. A szimuláció segítségével sikeresen hajtottunk végre szenzoradat-gyűjtéseket (*roscap* formájában), így a versenyjárműre fejlesztett önvezető algoritmusok már a versenyjármű üzembe helyezése előtt is a fejlesztés szempontjából releváns körülmények között tesztelhetők.

A szimulált versenyjárműhöz készített versenypálya moduláris elemekből áll, amely gyorsan adaptálható újabb scénárió szimulálásához. Szintén megoldható a pálya mentén előforduló zavarok, a pályaelemek kézi elhelyezéséből adódó hibák szimulálása.

6. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] „About ROS,” Open Source Robotics Foundation, [Online]. Available: <https://www.ros.org/about-ros/>. [Hozzáférés dátuma: 30 május 2020].
- [2] S. Cousins, „Welcome to ROS Topics [ROS Topics],” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, %1. kötet17, %1. szám1, pp. 13-14, 2010.
- [3] „URDF in Gazebo,” Open Source Robotics Foundation, 2014. [Online]. Available: http://gazebo.org/tutorials?tut=ros_urdf. [Hozzáférés dátuma: 10 május 2020].
- [4] C. Hajdu, *Eclipse Robot description generator plugins*, GitHub tárhely, https://github.com/kyberszitty/eclipse_robot_description.

Háromdimenziós objektumdetektálás implementációja

Implementation of three-dimensional object detection

Markó Norbert^a, Hollósi János^b

^a Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont
marko.norbert@ga.sze.hu

^b Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont
hollosi.janos@ga.sze.hu

Absztrakt: Az autonóm járművek kutatási és alkalmazási területén a jelenlegi is zajló kutatásokban és megvalósításokban jelentős szerephez jut a háromdimenziós objektumdetektálás. A célunk, hogy egy ilyen modellarchitektúrát mi is megvalósítsunk és alkalmazzunk a saját fejlesztésű autonóm funkciókkal rendelkező járművünkbe. Mivel a mélységadatok több forrásból is származhatnak (LiDAR, sztereokamera), ezért ezt a témát a cikkben alaposan körüljárjuk, hogy a különböző szenzorokból érkező adatokat hogyan reprezentálhatjuk, illetve milyen módon juthatnak el a bemenetre. A továbbiakban céljaink közé tartozik hogy a megvalósított hálózaton a különböző szenzorokból érkező adatokat külön-külön kipróbáljuk a bemeneten, és teszteljük változatos körülmények között, hogy mely forrás számít a megbízhatóbbnak és azt is, hogy melyikkel nyújt a hálózat jobb teljesítményt, majd a kettőt összevetve miként lehet kompromisszumra jutni, hogy melyiket használjuk a továbbiakban. A cikk második felében a választott architektúra működését nézzük meg, ami a későbbiekben a tárgyalt Frustum-PointNet modell megvalósításával fog megtörténni.

Kulcsszavak: objektumdetektálás, háromdimenziós, frustum-pointnet

Abstract: In the field of research and application of autonomous vehicles, three-dimensional object detection plays an important role in the current research and implementation. Our goal is to implement and apply such a model architecture to our vehicle with autonomous functions developed by our department. Because depth data can come from multiple sources (LiDAR, stereo camera), we'll cover this topic in depth in this article on how to represent data from different sensors and how to get them directly to the input. In the near future, our goals include trying out the data coming from different sensors on the implemented network, testing them in various conditions to see which can be combined with the model for a more reliable input, and also testing them with the model to see which one provides a faster performance. Given these data, we can make a compromise on the type of depth input used with the network. In the second half of the article, we will discuss the operation and implementation details of the chosen Frustum-PointNet architecture.

Keywords: object detection, three-dimensional, frustum-pointnet

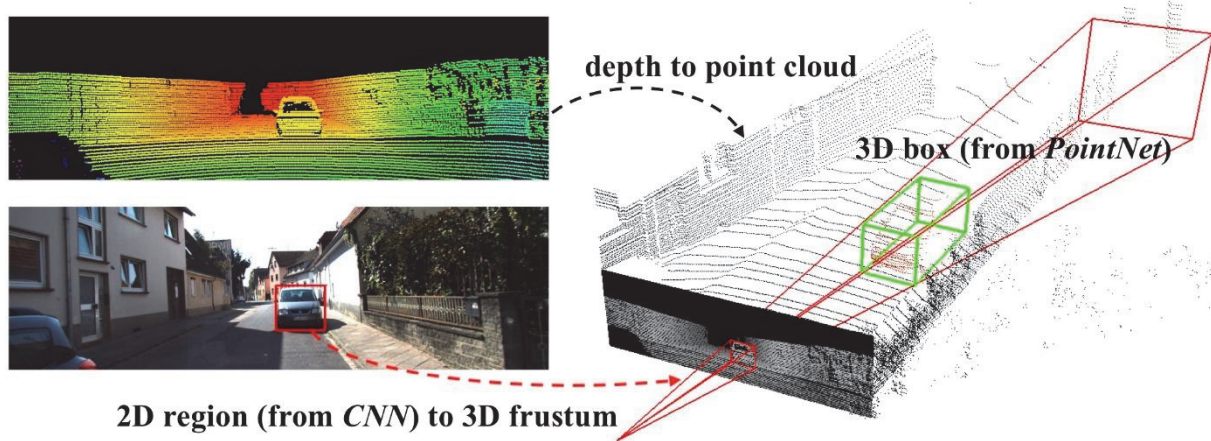
1. Bevezetés

Az autonóm járművek kutatási és alkalmazási területén jelenleg az egyik legelterjedtebb objektum megjelenítési módszer a három dimenzióban történő objektumdetektálás. Ez a módszer értelemszerűen felülmúlja megbízhatóságban a kétdimenziós változatot, illetve az útvonaltervező számára is sokkal megbízhatóbb bemenetet nyújt, ha az adatokat olyan kész formára hozzuk, amivel azonnal képes dolgozni, és így a felmerülő akadályokra tekintettel (járművek, gyalogosok, kerékpárosok, bolyák) a tervezett pályát módosítani. A célunk a saját járművön egy ilyen háromdimenziós objektumdetektáló modell implementálása. Egy ilyen

megvalósításához számos úton eljuthatunk, az adatok (pl. a mélység) is több formában kerülhetnek a hálózatbemenetre. A célunk egy ilyen hálózat teljeskörű megvalósítása, majd a továbbiakban gyakorlatban való tesztelése. A jelen értekezésben ennek a megvalósításnak a hátterét járjuk körül.

2. Háromdimenziós objektumdetektálás

A háromdimenziós objektum detektálásra képes modell a bemenetén kapott szenzoros adatok alapján minden érdekelt tárgyra (Object of Interest) egy 3D határoló dobozt ad vissza a kimenetén a hozzá tartozó osztálycímkével egyetemben. A 3D határoló dobozhoz a két dimenziós változattal ellentétben nem csak négy koordináta határozza meg, hanem kibővített paraméter listával kell dolgoznunk. Az ide tartozó paramterizáló adatok: $(x, y, z, h, w, l, \theta)$. Az (x, y, z) koordináták a határoló doboz középpontját hivatottak meghatározni, míg a (h, w, l) koordináták a doboz magasságát, szélességét és hosszúságát adják meg ebben a sorrendben. A theta (θ) paraméter a doboz elfordulását adja meg a „yaw” dimenzióban, a „pitch” és a „roll” értékek az autonóm földi jármű alkalmazások területén elhanyagolható fontossággal bírnak, így feltesszük róluk, hogy mindkettő 0.



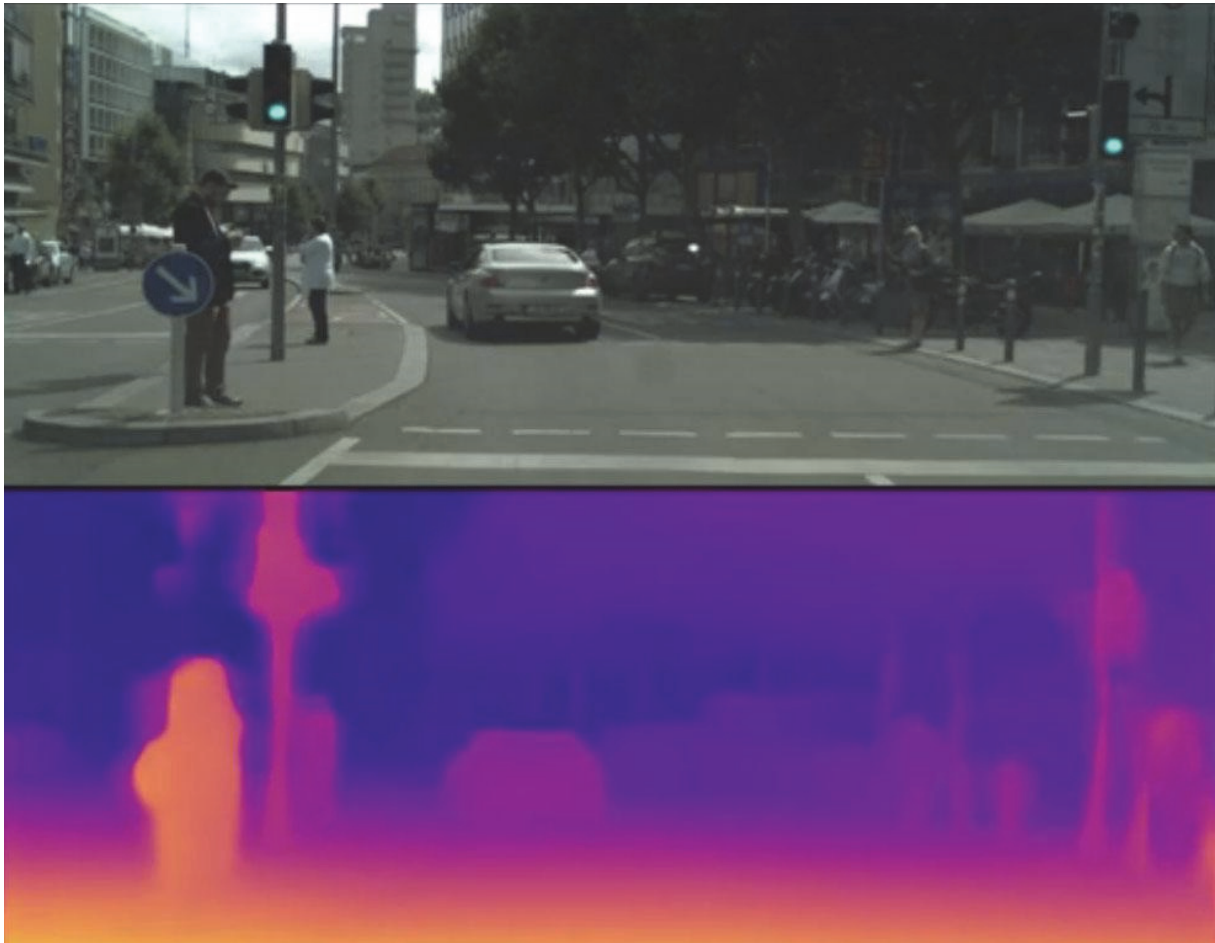
1. ábra. A Frustum-PointNet modell 3D objektumdetektálási folyamatának összefoglalása. (Forrás: [2])

Ahhoz, hogy egy ilyen detektálási modellt létrehozzunk szükségünk van elsősorban egy megfelelő hálózat architektúrára, és egy bemeneti pontfelhőre. Azonban az nem egy eldöntött kérdés, hogy a bemeneti pontfelhőt milyen mélységinformációból nyerjük ki, a pontfelhőt átalakítsuk-e más formába, avagy nyersen kerüljön felhasználásra, illetve az átalakítástól függően milyen hálózati architektúra segítségével történjen a mélytanulás folyamata.

3. Bemeneti adatok

Az alapprobléma, amit a háromdimenziós objektumdetektálással szeretnénk megoldani a következő: Adott RGB-D adathalmaz, mint bemenet esetén osztályozzunk, majd helyezzük el a tárgyakat a háromdimenziós térben. Amikor RGB-D adatokról van szó, a mozaikszó első része a használt vörös-zöld-kék (red-green-blue) színteret hivatott jelölni, amiben a kamerakép létrehozásra kerül, a „D”-rész pedig a mélységre utal (depth). Mélység adat előállítására több utat is választhatunk. A két rész származhat egy és ugyanazon szenzor információiból vagy különálló szenzoroktól is. Az RGB, vagyis a kamerakép előállítására használhatunk mono- vagy sztereokamerát, a mélységinformációk rögzítésére pedig rendelkezésre állnak LiDAR (light detection and ranging) szenzorok, vagy a sztereokamerák mélységérzékelési funkciói.

Utóbb említett mélységszenzorral rendelkező kamerák sorába tartozik például az Intel Realsense, az Asus Xtion termékcsalád, az Xbox Kinect v1/v2, Azure Kinect DK, vagy a Zed kamerák termékcsaládja amit jelenleg mi is alkalmazunk az autonóm járművön.



2. ábra. Kamerakép és hozzá tartozó sztereokamera által előállított mélységkép. (Forrás: UCLB)

Ezeknek a mélységszenzoroknak a működési elve az emberi szem, pontosabban a látás felépítésén alapul. A sztereókamerának kettő, vagy akár több lencséje is van, és mindegyik lencséhez tartozik egy külön szenzor. Ennek segítségével a két emberi szem analógiájára, ami közösen képes a mélységérzékelésre, a kamera is képes mélységinformációval szolgálni.

4. A LiDAR szenzor

A LiDAR szenzor alapvető működése megegyezik a radar illetve a szonár működésével. A szerkezetben lévő emitter kibocsátja a szenzor által használt jelet, ami a LiDAR esetében lézerfény impulzus, a radar és a szonár esetében pedig rádiójel, illetve hanghullám. A kibocsátott jel addig

terjed, amíg valamiféle akadályba nem ütközik, majd a visszaverődést követően a detektor fogadja, amit követően a terjedési időből számítható a megtett távolság, így a nagy frekvenciával kibocsátott jelek alapján valós időben feltérképezhetők az akadályok a szenzor érzékelési területén. Természetesen nem egyetlen jel kerül kibocsátásra, hanem több emitter-detektor párral (amit együttesen csatornának nevezünk) is rendelkezik a szenzor eltérő szögekben felszerelve.

5. Mélységadatok reprezentációja

Fontos arra felhívnom a figyelmet, hogy miután a mélység adatot valamilyen módon előállítottuk a szenzorok segítségével, ezt az adatot ezután valamilyen formában reprezentálni kell. Autonóm alkalmazások területén három gyakori formája ennek:

1. Előlnézeti képen alapuló megoldások
2. Felülnézeti (madártávlati) képen alapuló megoldások
3. Háromdimenziós megoldások

Előlnézeti képen alapuló megoldás esetén a mélységadatot egy kétdimenziós hő térképen ábrázoljuk, majd erre alkalmazzuk például a konvolúciós neurális hálózatot az objektumok lokalizációja érdekében. Madártávlati megoldás használatkor felülnézetbe transzformáljuk a mélységpontokat, hogy ezt dolgozzuk fel a továbbiakban. Ezzel a megoldással a probléma, ami egy autonóm járműnél felmerülhet, hogy a kisebb térfogatú objektumokat (pl. biciklis, gyalogos) nem detektálja túl megbízhatóan, így ez a módszer nem a legmegfelelőbb ha közúton történő objektumdetektálás a célunk. A harmadik esetben a mélységadatokat háromdimenziós pontfelhőként tárolja és vizualizálja. Ez képviseli jelenleg a leggyakoribb és legmegbízhatóbb formája a mélységadat reprezentációnak. A pontfelhő matematikai leírása LiDAR-ból beérkező adatok esetén:

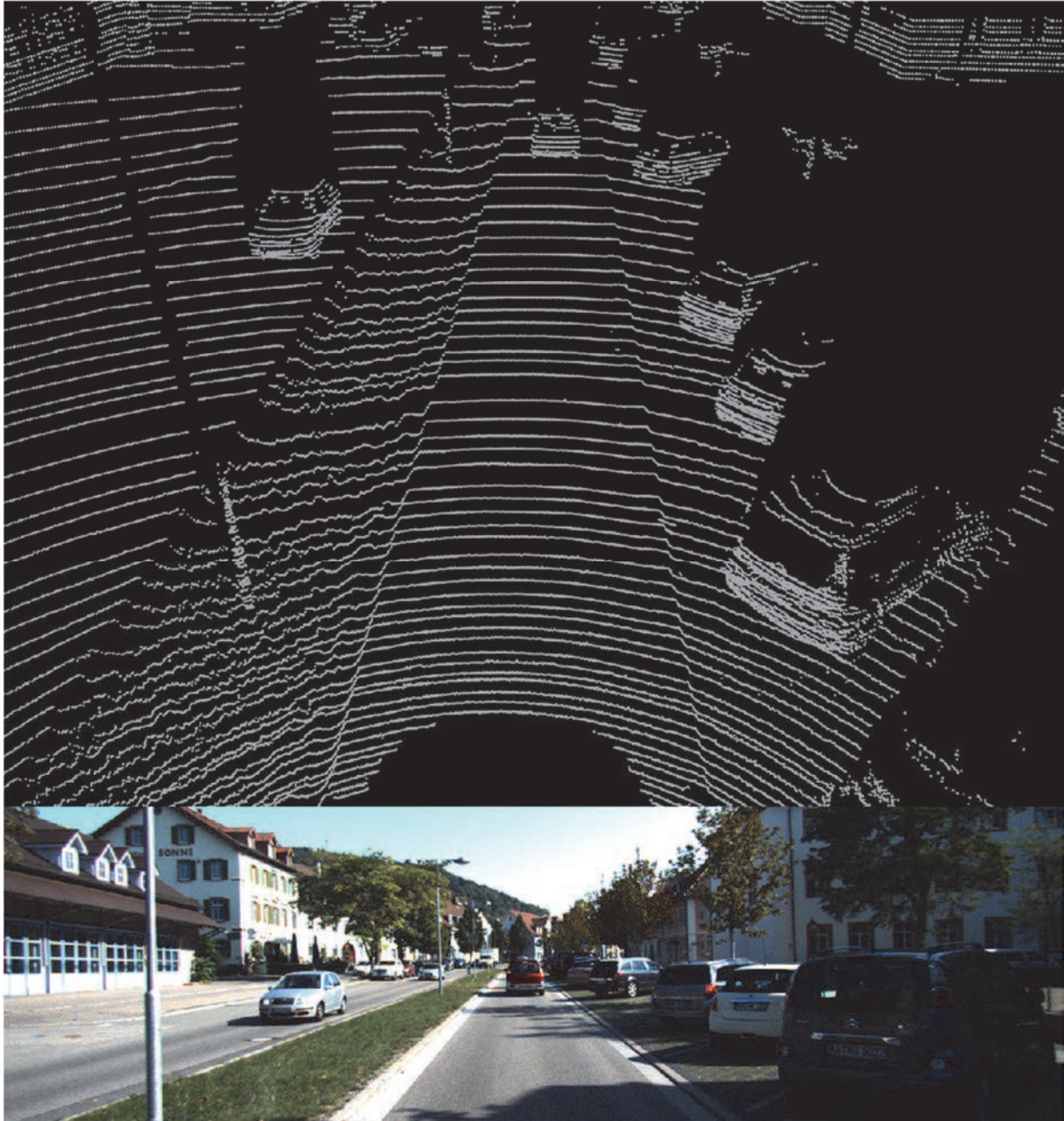
$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \subset \mathbb{R}^4$$

ahol az egyes pontok,

$$p_i = \{x_i, y_i, z_i, r_i\} \in \mathbb{R}^4$$

tartalmazzák a 3D koordináta paramétereket (x_i, y_i, z_i) , illetve a reflektancia értéket (r_i) . Amennyiben valamilyen lehetséges útvonalat követve rendelkezünk a pontfelhőnkkel, itt ismét dönthetünk, hogy további feldolgozásnak vetjük alá a pontfelhőt, vagy nyersen akarjuk inputként felhasználni valamilyen modell számára.

Nyers pontfelhő felhasználására egy úttörő tanulmánynak számít a PointNet [1], mely segítségével lehetőség nyílik a „mély 3D megjelenés tanulásra” (deep 3D feature learning). A PointNet-et az eredeti értekezésben objektum osztályozásra és szemantikus szegmentációra használták fel, azonban létezik egy objektum detektálásra kibővített architektúra is, ami a Frustum-PointNet [2] névre hallgat. Ez egy teljeskörű megoldást kínál az autonóm járművek körében 3D objektum detektálásra.



3. ábra. Kamerakép és a hozzá tartozó LiDAR pontfelhő. (Forrás: KITTI adatkészlet)

Mivel a nyers pontfelhő felhasználás meglehetősen magas számítási teljesítményt igényel, ezért korábbi próbálkozások során a pontfelhőt további feldolgozásnak vetették alá, mellyel hatékonyabban megoldható lett a tanulás a pontfelhő által képviselt mélységadatokon. Ez megoldható projekciós, illetve diszkretizációs módszerrel. Projekció esetén a mélységet indikáló pontokat egy kétdimenziós képre vetítjük ki, diszkretizáció során pedig egy megadott voxel felbontással kvantáljuk (voxelesítjük) a pontfelhőt, aminek az eredménye egy térfogati rács (volumetric grid) lesz, ennek az építő egységeit nevezzük voxelnek, ami gyakorlatilag a tér egy pontját képviselő adategység. A kettő megoldás közül a nekünk megfelelőt elvégezzük, ami után alkalmazhatjuk a konvolúciós neurális hálónkat egy számítás során effektívebb bemeneti adathalmazra.

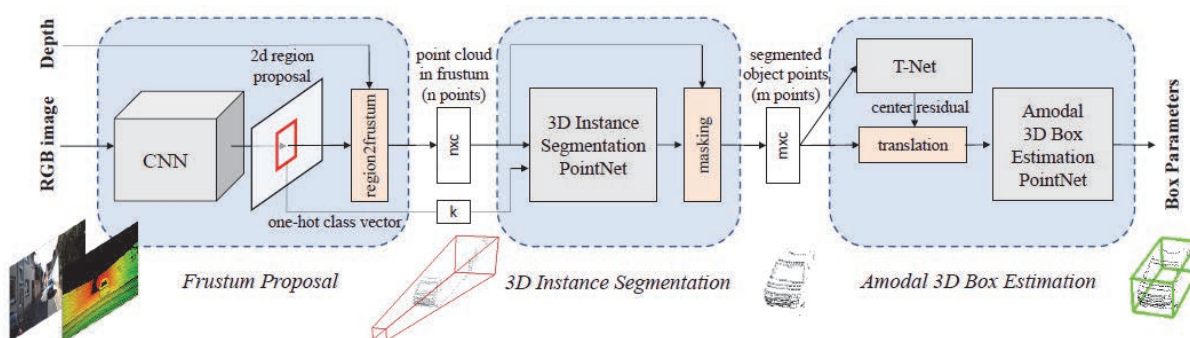
Érdemes megjegyezni, hogy a pontfelhő generálása, hőterkép előállításuk sokszor automatikusan történik a szenzorok beépített szoftverei segítségével, így bizonyos esetekben ezt nekünk nem

kell külön megtenni, de természetesen rendelkezésre állnak lehetőségek a teljesen testreszabott mélységrepresentáció generálásra is, amennyiben például a szenzorfüzió így könnyebben megoldható.

6. A Frustum-PointNet Architektúra

Mivel a megvalósításhoz a Frustum-PointNet [2] hálózatra esett a választás, a modell felépítéséből következik, hogy a bemeneten mélységrepresentációként a már előzetesen tárgyalt nyers pontfelhőt kell alkalmazni. Nézzük meg kicsit részletesebben a modell felépítését.

A Frustum-PointNet architektúra a bemenetére biztosítanunk kell a kétdimenziós RGB-kameraképet, és a háromdimenziós pontfelhőt. A kameraképből egy konvolúciós neurális hálózat kinyeri a kétdimenziós határolódobozt 2D objektumdetektálás segítségével, majd ennek segítségével a pontfelhőt a képre vetítve megahtározzuk, hogy potenciálisan mely mélységpontok tartozhatnak az érdekelte tárgyhoz, avagy mely pontok esnek bele a határolódoboz által kimetszett térfogatba. Az így kimetszett csomagtűla nyomán kapta a „frustum” elnevezést az architektúra.



4. ábra. A Frustum-PointNet architektúra. (Forrás: [2])

A második lépésben a kimetszett pontfelhő térfogatot bemenetként átadjuk a 3D példányszegmentálónak (3D Instance Segmentation), amit az alaphálózatként használt PointNet végez. Itt mindegyik pont binárisan osztályozásra kerül aszerint, hogy az objektumhoz tartozik-e avagy sem, melynek végeztével megkapjuk a szegmentált csomagtűla által határolt pontfelhőt, amiről a hálózat úgy ítéli meg, hogy az objektum része.

Az utolsó lépésben az objektum pontfelhő részlete átkerül a T-net hálózathoz, ami egy becslést ad a három dimenziós határolódoboz középpontjára. Ezt követően az középpontból kapott információ feldolgozásra kerül, majd bemenetként a Bbox-Net hálózat kiszámítja a határoló doboz összes paraméterét (x, y, z, h, w, l, θ).

7. Összefoglalás

Jelen cikk sorain keresztül részletesen elemzésre került a háromdimenziós objektumdetektálás, illetve már egy jelenleg is létező architektúra, melyet a gyakorlatban is szeretnénk alkalmazni a munkánk során, így elengedhetetlen volt az ezzel kapcsolatos fogalmak mélyebb megértése, majd pedig az architektúra alapján egy vázlat felépítése a további munka segítése érdekében. A munkánk során tesztelni fogjuk mélyrehatóan, hogy milyen különbségek jelentkeznek, amennyiben az architektúra bemenetén a pontfelhő sztereó kamera segítségével lett létrehozva, avagy LiDAR támogatásával kerül kialakításra. A tesztek eredményei nagy segítségünkre lehetnek a döntéshozás során, amennyiben az autonóm jármű használt szenzorait szeretnénk módosítani, javítani vagy bővíteni, ugyanis a szenzortechnológia területén folyamatos a fejlődés, és nem eldöntött kérdés, mely mélységrepresentációs modalitás alkalmazása a legcélravezetőbb.

8. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Charles R. Qi, Hao Su, Kaichun Mo, Leonidas J. Guibas: ”PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification” (2016)
- [2] Charles R. Qi, Wei Liu, Chenxia Wu, Hao Su, Leonidas J. Guibas: „Frustum PointNets for 3D Object Detection from RGB-D Data” (2017)
- [3] Fredrik K. Gustafsson, Erik Linder-Norén: „Automotive 3D Object Detection Without Target Domain Annotations” (2018)

Topológiai optimalizálás alkalmazása autonóm energiahatékony jármű motortartó adapterén

Pusztai Zoltán^a

^aSzéchenyi István Egyetem Járműipari Kutatóközpont
pusztai.zoltan@ga.sze.hu

Absztrakt: Az energiahatékonyság egy fontos fogalom manapság a járműiparban, nincs ez máshogy az autonóm járművek esetén sem. Az egyik legkézenfekvőbb megoldás az alkalmazott szerkezetek tömegének csökkentése, azonban ezt úgy kell megvalósítanunk, hogy a szerkezet szilárdsága és funkciója megmaradjon. A topológiai optimalizálás módszere pont ebben a helyzetben nyújt számunkra segítséget. A publikációmban egy energiahatékony autonóm jármű motoradapterének megtervezésén keresztül mutatom be topológiai optimalizálást, mellyel több, mint 30%-os tömegcsökkenést értem el.

Kulcsszavak: autonóm jármű, topológiai optimalizálás, szimuláció, tömegcsökkentés

Abstract: Energy efficiency is an important concept in the automotive industry today, it is no different in the case of autonomous vehicles. One of the most obvious solutions is to reduce the weight of the applied structures, but this must be done with the maintaining of the strength and function of the structure. The method of topological optimization helps us in this situation. In my publication, I present topological optimization through the design of an engine adapter for an energy-efficient autonomous vehicle, with which I have achieved a weight reduction of more than 30%.

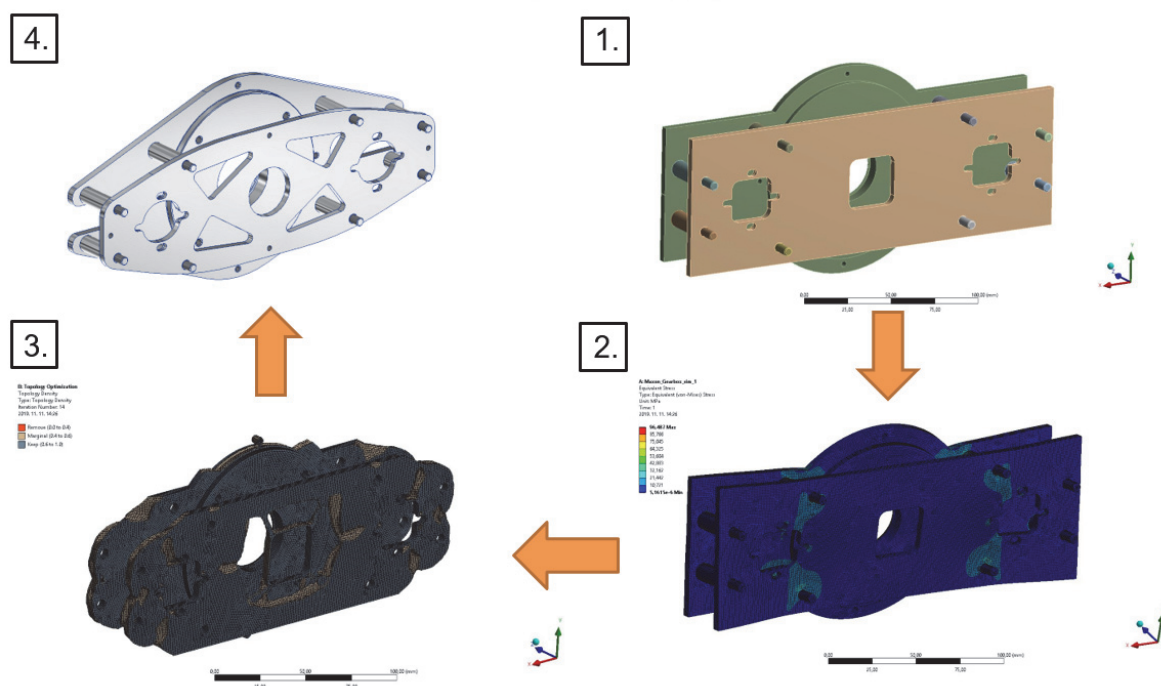
Keywords: autonomous vehicle, topology optimization, simulation, weight reduction

1. Bevezetés

Az energiahatékonyság és annak fontossága egy elterjedt fogalom az élet minden területén. Nincs ez másképp a járművek esetében sem, ahol az összes járműkomponensnél a mérnökök a gazdaságos megoldások elérésén dolgoznak. A járművekben alkalmazott szerkezeti elemek tömegének csökkentése belátható módon hozzájárul az erőforrások megtakarításához. Azonban az alkatrészek tömegét úgy kell csökkentenünk, hogy szerkezeti jellemzőik kielégítőek legyenek a funkcionalitás megtartása mellett. Korábban sok prototípus legyártására és tesztelésére volt szükség, hogy erről megbizonyosodjunk. Manapság a szimulációk világában sokkal hamarabb és gazdaságosabban tudunk eredményt elérni ezen a téren. A különböző szimulációs eseteket célszerű összekapcsolni és együtt valamilyen optimalizáló eljárásnak alávetni. Strukturális elemek esetén a topológiai optimalizálás a legmegfelelőbb választás annak érdekében, hogy az alkatrészek tömegét csökkentsük a szilárdságuk megtartása mellett. Az eljárás hatékonyságát és gazdaságát jól jelzi, hogy a repülőgépipar, ami az egyik legjobban tömegkritikus ágazat, már évek óta sikerrel alkalmazza. Az egyik legjobb példa az Airbus A380-as típusánál a szárnyszerkezetnél végzett optimalizálás, ahol összességében 500 kg szerkezeti tömegcsökkenést értek el. [1] Egy 5%-os tömegcsökkenést, a repülőgép teljes életciklusát tekintve 1.5 millió eurós költségmegtakarítást jelent. [2] Az esetünkben a topológiai optimalizálás alkalmazásával elért tömegcsökkenés, főleg az energiahatékonyság jegyében fontos.

2. A topológiai optimalizálás alapjai

A végeselemes szimulációknál alkalmazott topológiai optimalizálás tulajdonképpen nem más, mint egy matematikai módszer, ami az adott peremfeltételek mellett ideális szerkezeti kialakítást tesz lehetővé. Peremfeltételek alatt azokat a terheléseket, megfogásokat és szimulációs korlátokat értjük, amiknek köszönhetően leírhatjuk fizikai környezetet a szimulációs térben. A módszernek köszönhetően gyakran olyan komplex formákat kaphatunk, amikre szimuláció használata nélkül nem is gondoltunk volna. A topológiai optimalizálás nem összetévesztendő a méret és alak optimalizálással. Az utóbbi kettő esetén valamilyen előre meghatározott mintából kiindulva kaphatunk eredményt, azonban a topológiai optimalizálás esetén ennek definiálása nem szükséges. Bármilyen alakzat, ami megfelel a peremfeltételeknek elképzelhető eredményként. A szimuláció célfüggvénye rendszerint a merevségi mátrix maximalizálása a kívánt tömeg elérésekor. A gyakorlatban a végeselemes szoftverek esetében a módszer úgy működik, hogy az algoritmus a peremfeltételek alapján a végeselem háló egyes részeit iteratív módon eltávolítja, majd megvizsgálja, hogy az így kialakult szerkezet milyen tulajdonságokkal rendelkezik. Az iterációs eljárás addig folytatódik, míg a megoldás nem konvergál megfelelő biztonsággal a kívánt célhoz. A topológiai optimalizálás folyamatát az 1. ábra szemlélteti, egy tartó szerkezet tömegcsökkentését valósítottam meg. [3]



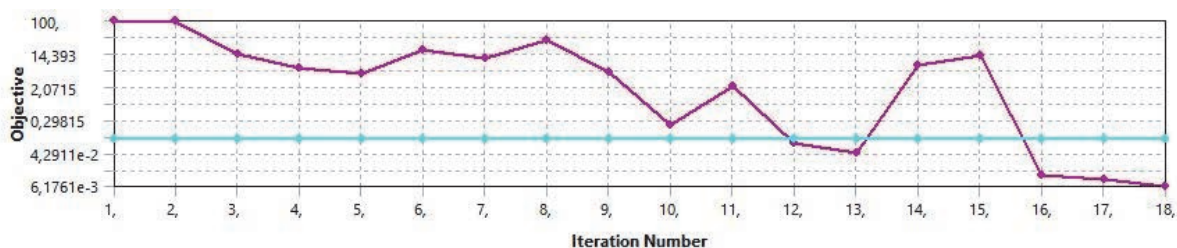
1. ábra. Topológiai optimalizálás folyamata

Az 1. pontban egy elnagyolt CAD geometria importálása történik, ahol meghatározzuk a szerkezetet leíró peremfeltételeket, valamint behálózuk a modellt, ezt a lépést a szimuláció előkészítésnek hívjuk. A 2. pontban történik a szimuláció futtatása, azaz a matematikai egyenletek megoldása és az eredmény kiértékelése. Eddig a pontig tart egy hagyományos értelemben vett szilárdságtani szimuláció, azonban a topológiai optimalizálás csak itt kezdődik. A 3. pontban a 2. pont eredményei alapján a végeselem háló egyes részeit eltávolítja a program, valamint látszólagosan megvalósítja az 1. pontban történő előkészítést. Ezt követően a szimuláció lefut, megkapjuk az eredményeket és azoktól függően tovább csökkenthetjük a

hálót, vagy visszaépíthetjük a megadott helyre. Ezt az iteratív folyamatot a szoftverek különböző algoritmusok alapján hajtják végre. Az általam alkalmazott Ansys 2020 R1 a SIMP¹ módszert használja. A SIMP eljárás a tömör izotróp anyag a közbenső sűrűségek büntetésén alapszik. Az optimalizálás a 3. pontban addig tart, amíg a beállított célfüggvények nem teljesülnek. Ebben a pontban megkapott geometriát rendszerint nem lehet közvetlenül felhasználni, ezért szükség van a 4. pontba jelzett geometriai korrekcióra, ahol szem előtt tartjuk a gyárthatóság feltételeit is. A szimuláció eredményét úgy validálhatjuk, hogy ha a 4. pontban kapott javított geometriát újra egy egyszerű statikus szilárdságtani vizsgálatnak vetjük alá.

3. A motortartó adapter szimuláció előkészítése

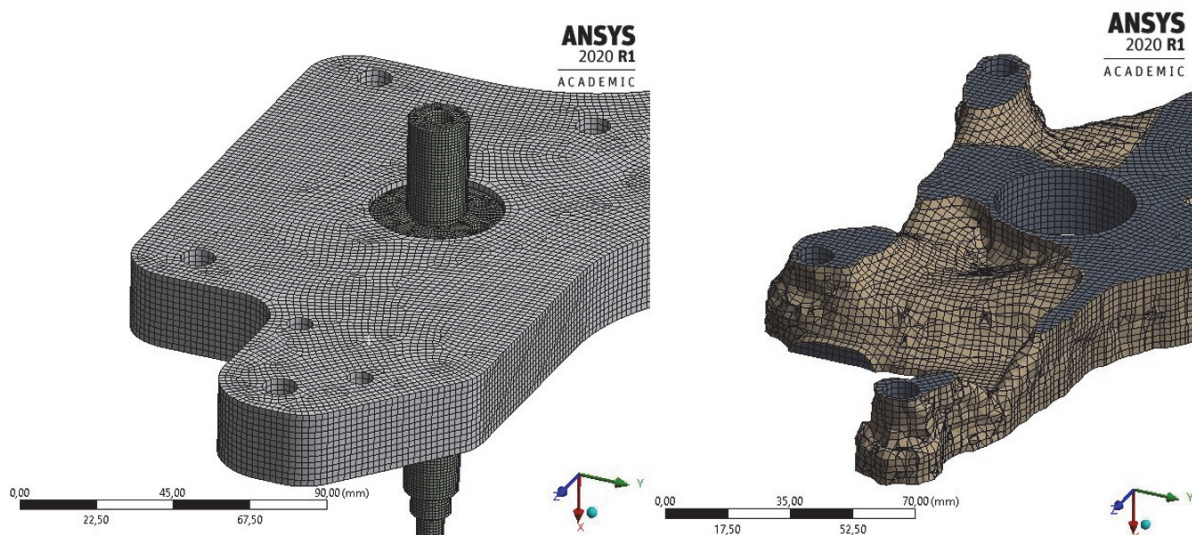
A szimulációs modell felépítése során izotróp anyagmodelleket használtam, a motorhoz és a tengelyhez szerkezeti acélt rendeltem, a tartóhoz pedig a szerkezeti acél anyagmodelljét módosítottam, hogy megfeleljen az alumínium ötvözet tulajdonságainak. A modell hálózásánál hexaéder hálót alkalmaztam a teljes modellben. A peremfeltételeknél fix megfogást alkalmaztam a rögzítő furatoknál, melynek pozíciói a jármű felfüggesztéséből adódnak. A fix megfogás során a felületek összes szabadságfokát lekötöm. A motor homlokfelületénél ugyanezeket a kényszereket alkalmaztam. Az adapterhez csatlakozik a kerékagy tengely, ami a talperőből adódó terheléseket továbbítja az adapterre. Ezt a terhelést a csapágyfelületem adtam meg $F=800\text{N}$ y irányú erőként. A hajtásláncban fogasszíjhajtást alkalmazunk, ezért egy szíj feszítésből származó összemutató erőpárt határoztam meg a kerékagy tengely, valamint a motor tengely felületein. Ezekhez a felületekhez csatlakoznak a fogasszíjtárcsák. A szíj feszítésből származó erőt vektorháromszögek szerint felbontottam x-y összetevőre, melyek eredője 297N . A szíj feszítés értékét a szíjméretezés során a gyári kalkuláció alapján kaptam meg. Továbbá figyelembe vettem a motor tömegét, mely hajlítja a tartót. Az optimalizálás célfüggvénye a maximális merevségi mátrix megtalálása, legalább 30% tömegcsökkenés mellett. Az optimalizálás figyelmen kívül hagyja azokat a felületeket, ahol terhelés, vagy megfogás mellett alkatrész kapcsolódás van. Ilyen felületeket a motor és a tengely kapcsolódási pontjai. Az optimalizálás 18 iteráció után konvergált, melynek lefutását a 2. ábrán szemléltetem.



2. ábra. Az optimalizálás iterációnak lefutásának menete

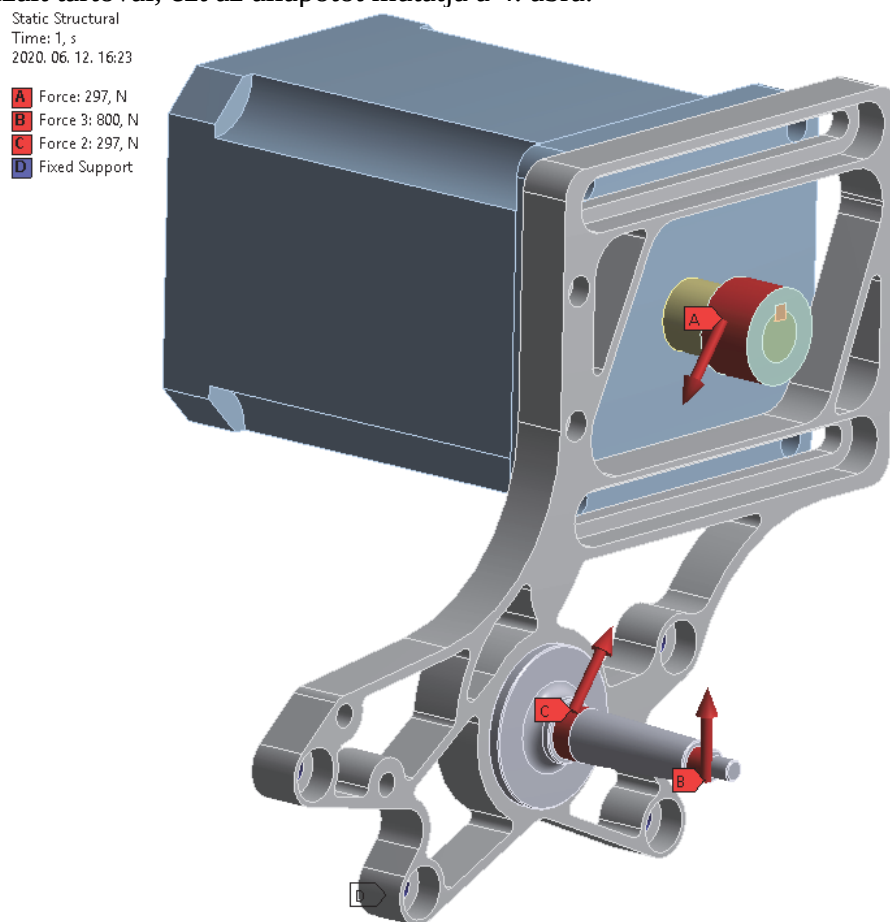
Az optimalizálás során, nyomon követhetjük, hogyan változik az alkatrész topológiája az iterációk után. A 18. iteráció utáni állapotát mutatja a 3. ábra jobb oldali része, míg a bal oldal a kiindulási geometria.

¹ SIMP- Solid Isotropic Material with Penalization (for intermediate density)



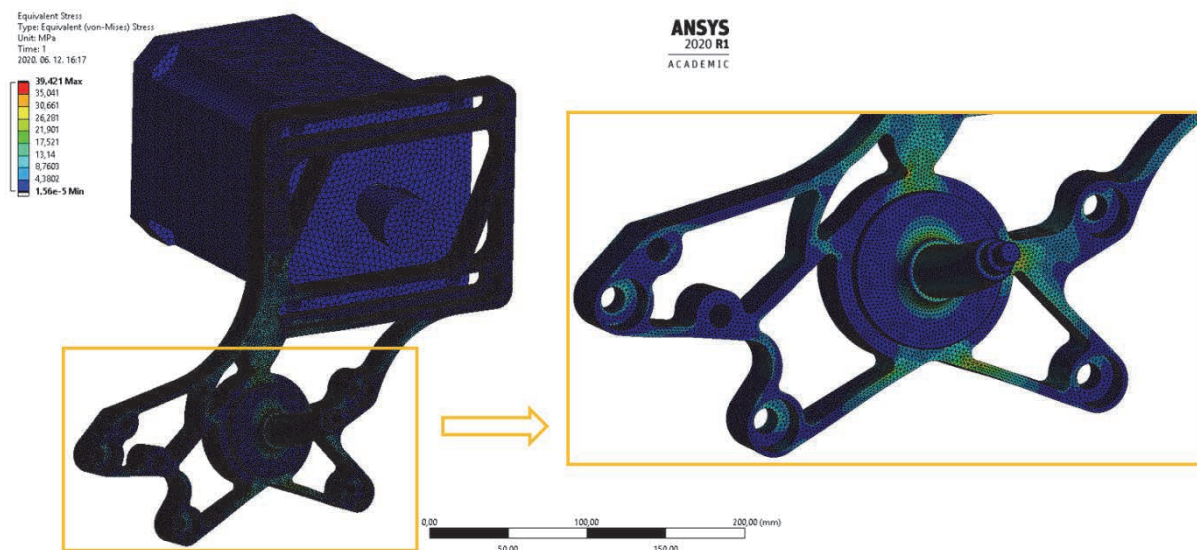
3. ábra. A nyers hálózott geometria (bal oldal) és az optimalizált geometria (jobb oldal)

A kapott alakzatot exportálva a CAD programmal átterveztem, annak érdekében, hogy egy könnyen megmunkálható CNC forgácsolással gyártható alkatrészt kapjunk. A változtatások elvégzése után validálva a szimulációt, felépítettem ugyanazt a modellt, de immár az optimalizált tartóval, ezt az állapotot mutatja a 4. ábra.



4. ábra. Az optimalizált tartó validálásának előkészítése- peremfeltételek megadása

A szimuláció megoldása után látható, hogy a tömegcsökkentett modell statikus szilárdságtani szimulációja is kielégítő eredményeket mutat. A feszültségcsúcs nem is az adapteren, hanem tengely belső csapágyat támasztó vállán található. Ez az érték is bőven folyáshatár alatti, nem éri el a 40Mpa-t. Az optimalizált tartóval végrehajtott szimuláció az 5. ábrán látható.



5. ábra. A szimuláció kiértékelése – redukált feszültségek (Von-Mises)

4. Konklúzió

Összefoglalásképp elmondható, hogy topológiai optimalizálás egy kiváló szimulációs módszer, amivel hatékonyan érhetünk el tömegcsökkentést a járművek szerkezeti alkatrészeknél. A bemutatott alkalmazásban sikerült 33%-os tömegcsökkenést elérnem, az alkatrész szilárdságának megtartásával. Az elkészült autonóm járműben alkalmazott motortartó adaptert a 6. ábra mutatja.



6. ábra. A legyártott autonóm motortartó adapter

5. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] L. Krog, A. Tucker, G. Rollemma: Application of topology, sizing and shape optimization methods to optimal design of aircraft components 2002.
- [2] Kaufmann M.: Cost/ Weight Optimization of Aircraft Structures, KTH School of Engineering Sciences, Stockholm, 2008.
- [3] F. Jensen: Topology Optimization of Turbine Manifold in the Rocket Engine Demonstrator Prometheus, 2018

Teljesítmény félvezetők kapcsolási veszteségeinek vizsgálata kettős impulzusos teszteléssel

Investigation of switching losses of power semiconductors by double-pulse testing

Szakállas Gábor¹

¹Széchenyi István Egyetem - JKK
szgabor@ga.sze.hu

Absztrakt: A kapcsolási veszteségek valós problémát jelentenek minden teljesítményelektronikai eszköz esetében. Ezeket a veszteségeket azonban minimalizálni lehet az energiahatékonysággal kapcsolatos tervezési paraméterek optimalizálásával és ellenőrzési célú mérésével. A kettős impulzusos teszt egy alkalmas módszer a teljesítményelektronikai eszközök kapcsolási paramétereinek mérésére és a dinamikus viselkedésének vizsgálatára.

Kulcsszavak: kettős impulzusos tesztelés, kapcsolási teljesítmény, energiahatékonyság

Abstract: Switching losses are real problem for all power electronics devices. However, these losses can be minimized by measurement and optimization of design parameters related to energy efficiency. The double pulse test is a suitable method for measuring the switching parameters of power electronics devices and investigating their dynamic behavior.

Keywords: double-pulse testing, switching performance, efficiency

1. Bevezetés

A teljesítmény félvezetők kapcsolási teljesítményének tesztelése biztonságos, ellenőrzött környezetben nem egyszerű feladat. A MOSFET vagy IGBT félvezetők kapcsolási paramétereinek mérésére a kettős impulzusos teszt egy gyakran alkalmazott vizsgálati módszer. Segítségével a be- és kikapcsolási, valamint a záróirányú feléledési paraméterek, vagyis a dinamikus viselkedésük vizsgálható különféle körülmények között. A teszt elvégzéséhez legalább két feszültségimpulzust kell generálni változó impulzusszélességgel és pontos időzítéssel, ami meglehetősen időigényes feladat a megfelelő tesztrendszer nélkül.

2. Energiahatékonysági verseny

A teljesítményelektronika fókusza az autóiparban és egyéb ipari alkalmazások területén napjainkban a szilikon alapanyagú eszközökről egyre inkább a szélessávú félvezetőkre (szilícium-karbidra (SiC) és gallium-nitridre (GaN)) kezd áttérni azok kiemelkedő teljesítménye miatt. A GaN és a SiC kisebb fizikai méretet, gyorsabb működést és hatékonyabb tervezést tesz lehetővé. A teljesítményelektronika nagyobb energiahatékonyságra való törekvése az energiatermeléstől kezdve egészen annak felhasználási pontjáig terjed. Energiaátalakító eszközök a termelési, átviteli és fogyasztási láncban több szakaszban működnek, és mivel az

eszközök egyike sem 100% -os hatékonyságú, minden lépésben némi teljesítményvesztéssel kell számolni.

Ideális esetben a kapcsolóeszköz be- vagy kikapcsolt állapotban van, és ezen állapotok között azonnal képes átváltani. Bekapcsolt állapotban a kapcsoló impedanciája nulla, és nincs teljesítményvesztés, függetlenül attól, hogy mennyi áram folyik rajta keresztül. Kikapcsolt állapotban a kapcsoló impedanciája végtelen, és nem folyik rajta keresztül áram, tehát ebben az esetben sincs teljesítményvesztés. A gyakorlatban azonban az átváltások során teljesítményvesztés lép fel az áramkör nem-ideális viselkedése miatt, ami a bennük található parazita elemek miatt keletkezik. A gate elektródán lévő parazita kapacitások lelassítják az eszköz kapcsolási sebességét, meghosszabbítva a be- és kikapcsolási időket, a drain és source kivezetései közötti parazita ellenállásokon hővesztés keletkezik, amikor drain áram folyik. Az eszköz időbeli paramétereinek megméréseivel a kapcsolási veszteségeket minimálisra csökkenthető, és ezáltal hatékonyabb átalakítókat lehet tervezni.

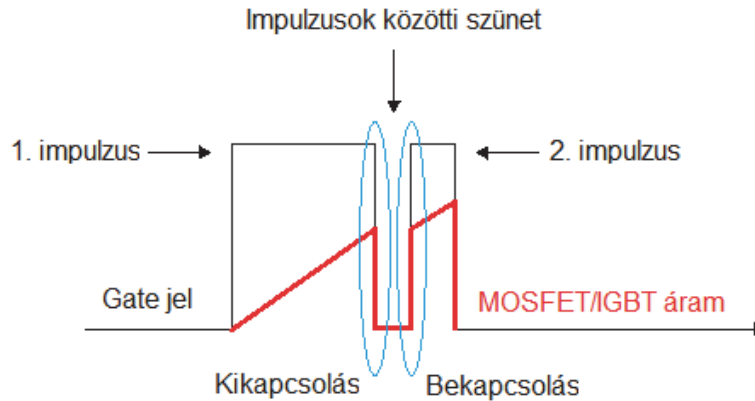
3. A kettős-impulzusos teszt

A kettős impulzus egy tesztelési módszer a kapcsolási paraméterek mérésére és a teljesítményelektronikai eszközök dinamikus viselkedésének vizsgálatára. A következő kapcsolási paraméterek mérésére szolgál:

- Bekapcsolási paraméterek: Bekapcsolási késleltetés (t_d (be)), felfutási idő (t_r), t_{on} (bekapcsolási idő), E_{on} (bekapcsolási energia), dv/dt , és di/dt . Ezután meghatározzuk az energiavesztést.
- Kikapcsolási paraméterek: Kikapcsolási késleltetés (t_d (kikapcsolva)), lefutási idő (t_f), t_{off} (kikapcsolási idő), E_{off} (kikapcsolási energia), dv/dt és di/dt . Ezután meghatározzuk az energiavesztést.
- Záróirányú feléledési paraméterek: t_{rr} (záróirányú feléledési idő), I_{rr} (záróirányú feléledési áram), Q_{rr} (záróirányú feléledési töltésmennyiség), E_{rr} (záróirányú feléledési energia), di/dt és V_{sd} (nyitóirányú bekapsolási feszültség).

A kettős impulzusos tesztelést általában induktív terheléssel végzik el, ami az áramköri körülmények biztosítására szolgál az átalakító kialakításában és egy függvénygenerátort használnak impulzusok előállítására, amelyek bekapcsolják a MOSFET-et a Gate bemeneten keresztül. Az első impulzusnak be kell kapcsolnia az alsó tranzisztort, és az induktivitáson keresztül áramot kell áthajtania. Ez azt jelenti, hogy az első impulzusnak széles impulzusnak kell lennie, amely a terhelő áramot olyan nagyságrendűre állítja be, amelyet vizsgálni szeretnénk. Ezután egy rövid szünetnek, majd egy második rövid impulzusnak kell következnie. A kikapcsolási és bekapcsolási időzítések az első impulzus kikapcsolásakor és a második impulzus bekapcsolásakor kerülnek rögzítésre.

Az áram értékében látható túllövés (1.ábra) annak köszönhető, hogy a flywheel dióda árama megfordul a felső kapcsolóelem esetén. Ez a tüske lényeges a tesztelt eszköz esetében, mivel hozzájárul az energiavesztéshez.



1. ábra Kettős impulzusos teszt vezérlő impulzusai

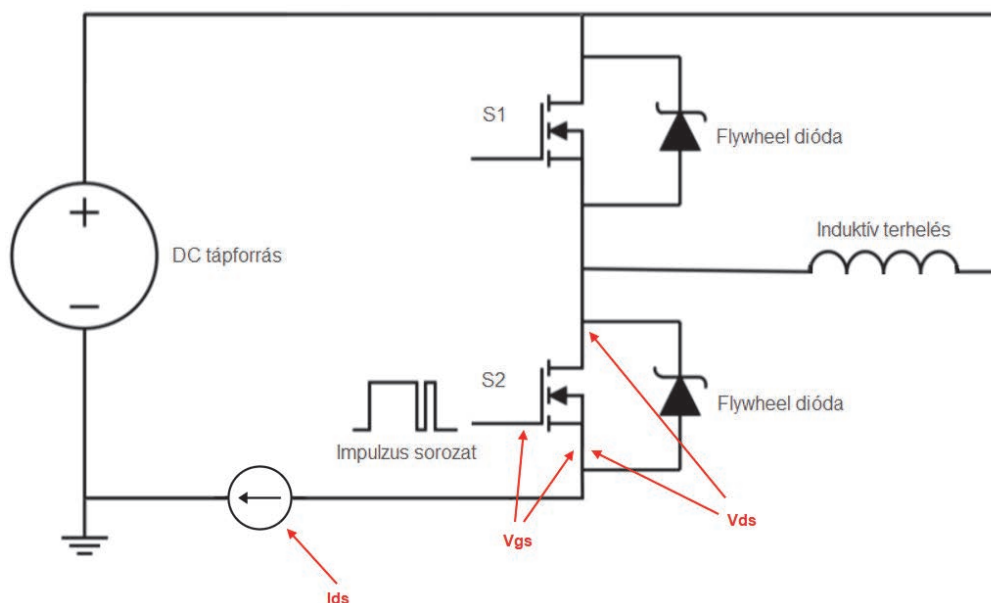
Az ilyen kettős impulzusos teszt lehetővé teszi a félvezető kapcsoló elem kapcsolási tranzienseinek elemzését a bekapcsolása és kikapcsolása esetén a kívánt áramérték mellett. A kettős impulzusos teszt alkalmazható a fejlesztési folyamat során alkatrész szinttől kezdve egészen a végtermék elkészültéig, valamint az utólagos hibafeltárás és javítás során egyaránt. A különféle tesztesetek miatt azonban képesnek kell lennie a rendszernek a paraméterek egyszerű és rugalmas megváltoztatására, valamint megismételhetően történő végrehajtására.

3.1. A tesztrendszer felépítése

A kettős impulzusos teszt elvégzéséhez szükséges felszerelés viszonylag egyszerű, és a legtöbb laboratóriumban rendelkezésre áll. Az összeállításhoz szükséges egy oszcilloszkóp, egy nagy közös módusú feszültségelnyomási tényezővel rendelkező szonda, árammérő és differenciál feszültségmérő szondák, valamint egy tápforrás a terhelési feszültség előállítására. A teszt elvégzéséhez egy függvénygenerátor állítja elő a jeleket az izolált gate meghajtó számára, és legalább két feszültségimpulzust kell generálnia, változó impulzusszélességgel.

Az impulzusokat különböző módokon lehet létrehozni, manuálisan egy számítógép vagy mikrovezérlő segítségével, egy kettős impulzusos teszttel felszerelt függvénygenerátorral, vagy mint esetünkben, egy valós idejű operációs rendszert futtató és FPGA-val rendelkező mérésadatgyűjtő és vezérlő eszközzel (National Instruments MyRIO-1900). A megfelelő eszköz lehetővé teszi a felhasználó számára, hogy számos paraméter beállítható legyen, mint például:

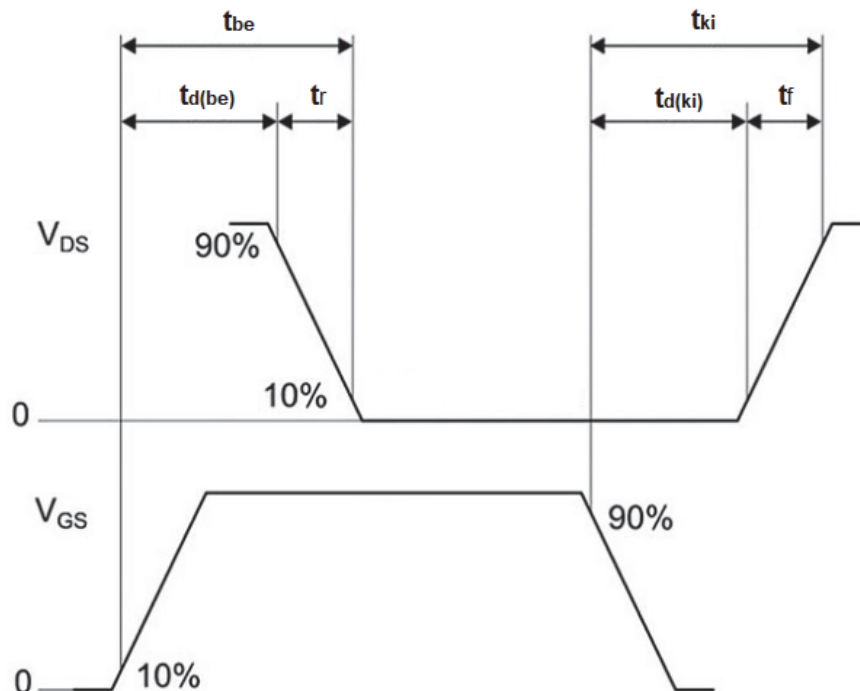
- impulzusok száma: min. 2 db
- impulzusszélesség 20 ns – 150 μ s (tipikus értékek)
- magas és alacsony feszültség
- trigger késleltetés
- trigger forrás: kézi, külső vagy időzíthető



2. ábra Mérési elrendezés a kettős impulzusos vizsgálathoz

3.2. Kettős impulzusos tesztek végrehajtása

A be- és kikapcsolási paraméterek kiszámításához az első impulzus lefutó élét és a második impulzus felfutó élét szükséges vizsgálni. A be- és kikapcsolási paraméterek mérésére szolgáló módszer a 3. ábrán látható, és a következőképpen történik:



3. ábra Kapcsolási paraméterek számításának módszere

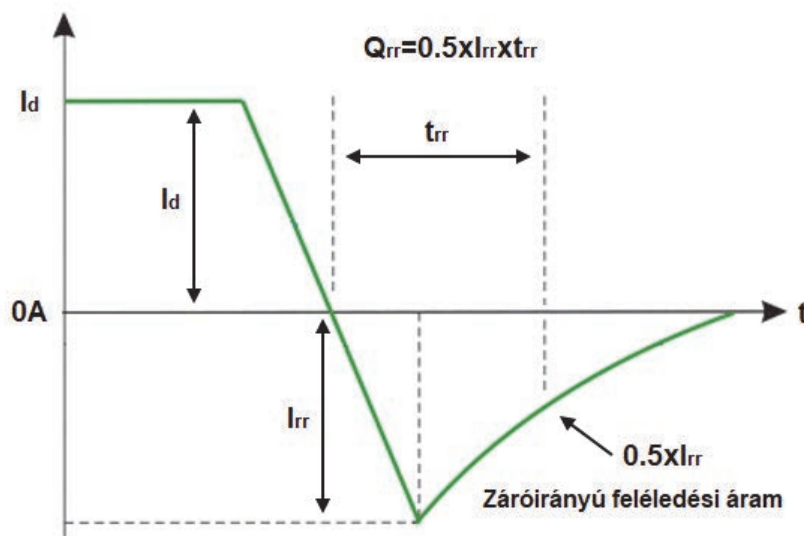
- $t_d(\text{be})$: A V_{gs} csúcsának 10% -a és a V_{ds} közötti időintervallum a csúcs amplitúdójának 90% -án.
- t_r : A V_{ds} közötti időintervallum a csúcs amplitúdójának 90% -án és 10% -ánál

- $t_{d(ki)}$: A V_{gs} csúcsának 90% -a és a V_{ds} közötti időintervallum a csúcs amplitúdójának 10% -án.
- t_r : Az időintervallum a V_{ds} a csúcs amplitúdójának 10% -án és 90% -án.

A következő egyenletet segítségével számítható ki az energiaveszteség a bekapcsolási folyamat során:

$$E_{be} = \int_0^t V_{ds} I_{ds} dt$$

Ugyanaz a fenti egyenletet használható az energiaveszteségek kiszámításához a kikapcsolási átmenet során is. A tesztelési eljárás utolsó lépése a MOSFET fordított diódájának mérése. A záróirányú feléledési áram a második impulzus bekapcsolásakor fordul elő. Ilyenkor a dióda nyitóirányú állapotban vezet. Amint az alsó oldali MOSFET újra bekapcsol, a dióda azonnal záróirányú blokkolásba akar átkapcsolni. A dióda viszont rövid ideig záróirányú körülmények között működik, amelyet záróirányú feléledési áramnak neveznek. Ez az áram energiaveszteségekké alakul, amely közvetlenül befolyásolja a teljesítmény átalakító hatékonyságát. A méréseket a felső oldali MOSFET-en kell elvégezni úgy, hogy megmérjük az I_d áramot a felső oldali MOSFET-en és a V_{sd} feszültséget a diódán keresztül. A 4. ábra a dióda záróirányú feléledési paramétereinek meghatározását mutatja.



4. ábra Flywheel dióda záróirányú átkapcsolási paramétere

A következő egyenlet segítségével számítható ki az energiaveszteség a dióda átkapcsolási folyamata során:

$$E_{rr} = \int_0^t V_{sd} I_{rr,max} dt$$

4. Összefoglalás

A kettős impulzusos teszt egy kiváló teszt módszer a kapcsolási paraméterek mérésére és az energiaellátó eszközök dinamikus viselkedésének kiértékelésére. A tervezett mérési összeállítás

segítségével képesek leszünk az inverter fejlesztési folyamat során optimalizálni a kapcsolási veszteségeket a tervezett áramkörünkben, eszközeinkben.

5. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Gábor Kiss: Comparing the IT skills and the programming knowledge of Hungarian students specialized in informatics with Romanian students attending a science course or a mathematics-informatics course, *Teaching Mathematics and Computer Science* **11** (2013), 21–40.
- [2] Richard Halverson és Annette Smith: How New Technologies Have (and Have Not) Changed Teaching and Learning in Schools, *Journal of Computing in Teacher Education* **26** (2010), 49–54.

Feszültség csökkentő DC/DC konverter tervezése eGaN FET-tel

EGaN FET based buck-converter design

Szeli Zoltán^a

^aSzéchenyi István Egyetem, Győr 9026, Egyetem tér 1.
szeliz@ga.sze.hu

Absztrakt: Magas hatásfokú, feszültség csökkentő, kapcsolóüzemű tápegység tervezésének bemutatása. A konverter új típusú, gallium nitrid teljesítmény FET-ek előnyeinek és tervezési sajátosságainak ismertetése. GaN és Si alapú félvezetők összehasonlítása hatásfok vizsgálat alapján a tervezett konverterben. A konverter 120VDC maximális bemeneti feszültségről állít elő 12VDC kimeneti feszültséget 3A kimeneti áram mellett. Bemutatásra kerül továbbá a tervezett áramkör szimulációs modelljei, kapcsolási rajza és a gyártáskész modellje.

Kulcsszavak: GaN FET, DC/DC konverter, feszültség csökkentés, LTSpice, hatásfok

Abstract: Demonstration of the design of a high-efficiency, voltage-reducing, switching power supply. The description of the advantages and design features of a new type of gallium nitride power FETs for the converter. Comparison of GaN and Si based semiconductors based on efficiency study in the designed converter. The converter produces a 12VDC output voltage from a maximum input voltage of 120VDC at an output current of 3A. Simulation models, wiring diagram and ready-to-manufacture model of the designed circuit are also presented.

Keywords: GaN FET, DC/DC converter, voltage reduction, LTSpice, efficiency

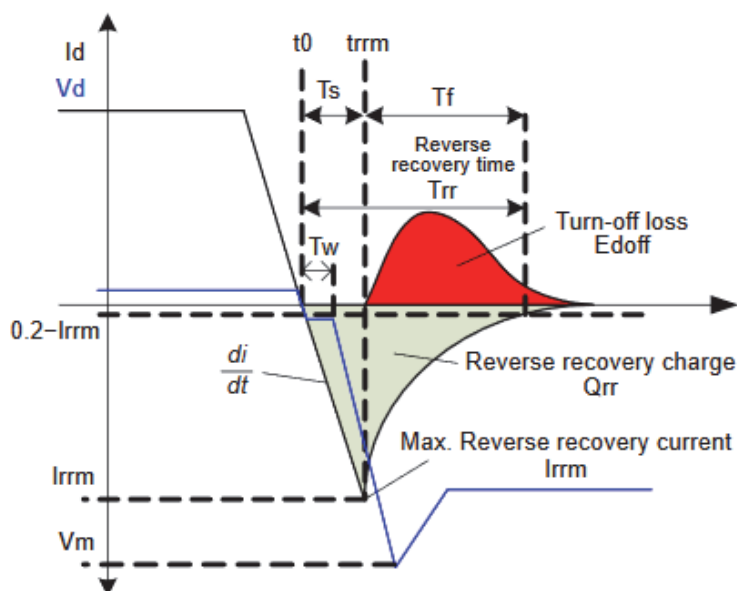
1. Bevezetés

Az energiahatékonysági versenyre tervezett versenyautó irányítási rendszerének névleges üzemi feszültsége 12VDC, míg a rendszer akkumulátora 48VDC feszültséget szolgáltat. Szükséges alkalmazni egy feszültség csökkentő egységet, hogy az irányítási rendszer tápellátását biztosítsuk. Ezen okokból kifolyólag terveztünk egy „buck” típusú, feszültség csökkentő kapcsolóüzemű tápegységet, ahol a fő szempont a kompakt kivitelezés volt az elérhető legnagyobb hatásfok mellett. A tervezés során figyelembe véve ezeket a szempontokat a GaN félvezető technológia alkalmazása mellett döntöttünk.

2. Teljesítmény félvezetők kapcsolási tulajdonságai

A napjainkban legelterjedtebb teljesítmény félvezetők az alacsony feszültségű, nagy teljesítményű alkalmazásokban a „metal–oxide–semiconductor field-effect transistor-ok” (MOSFET). Ezek az eszközök térvezérlésű tranzisztorok, ahol az áramvezetés csatorna jelleggel működik, nincs pn-átmenet. A feszültség vezérelt jellege miatt gyorsabb kapcsolásokra alkalmas, mint a bipoláris tranzisztorok és a csatorna kicsi ellenállása ($m\Omega$ nagyságrend) miatt jó hatásfokkal képesek üzemelni. A felépítéséből adódóan a MOSFET-ek tartalmaznak egy a csatornával párhuzamos diódát, amelynek kapcsolóüzemben a kommutációs

idő alatt van nagy jelentősége. A diódák vezetésből zárásba történő átmeneténél a dióda kiürített rétegéből el kell távolítani a töltéshordozókat. Ez a töltésmennyiség a „reverse recovery charge”, Q_{rr} , amely minden átkapcsoláskor eltávolítandó a diódából (1. ábra). Ennek a töltésmennyiségnek a mértéke függ a dióda teljesítményétől, a dióda hőmérsékletétől, valamint az áram változás meredekségétől. Nagy áramú, nagyfrekvenciás alkalmazások esetében ez számottevő teljesítmény disszipációt jelent. [1]



1. ábra Dióda áram és feszültség karakterisztikája vezetésből zárásba történő átmenetkor [1]

A kapcsolóelem további veszteségei a vezetési, a kapcsolási és a vezérlési veszteségekből tevődnek össze. Egy általános célú alkalmazás esetén a vezérlési veszteséget elhanyagolhatónak tekinthetnénk a többi veszteséghez képest, de jelen alkalmazásban ezzel is foglalkoznunk kell.

A vezetési veszteség a teljesítmény kapcsolóelem bekapcsolt állapotában történő veszteséget jelenti, amely függ a rajta átfolyó áramtól, a csatorna ellenállásától, valamint a bekapcsolt állapot időtartamától. A kapcsolási veszteség a kapcsolt feszültség, az átfolyó áram, a fel- és lefutási idők és a kapcsolási frekvencia függvénye, de ide értendő még a dióda vezetésből zárásba történő átmenetének vesztesége is (2. ábra). [1]

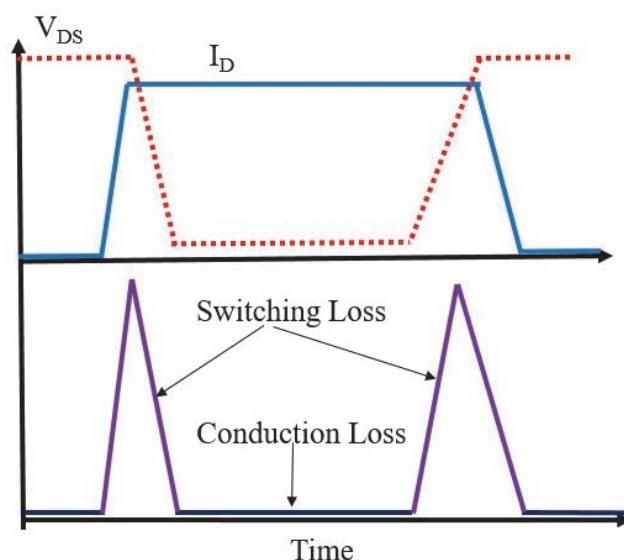
$$P_{COND,MOSFET} = I_D^2 * R_{DS(on)} * t_{ON} \quad [2]$$

$$P_{SW,MOSFET} = 0,5 * V_D * I_D * (t_{SW(on)} + t_{SW(off)}) * f_{SW} \quad [2]$$

$$Q_{rr loss} \approx V_D * f_{SW} * Q_{rr} \quad [3]$$

$$P_{MOSFET} = P_{COND,MOSFET} + P_{SW,MOSFET} + Q_{rr loss} \quad [2]$$

$$P_{Driver} = V_{Driver} * Q_{Gate} * f_{SW} \quad [4]$$



2. ábra MOSFET kapcsolási és vezetési veszteségei induktív terhelés esetén [5]

3. GaN E-HEMT alkalmazása kapcsolóelemként az inverter alkalmazásban

A gallium nitrid alapú félvezetők a „következő generációs” félvezetők. A GaN E-HEMT (GaN Enhancement mode High Electron Mobility Transistor) tranzisztorok kiváló csatorna ellenállással, nagyon gyors (>100MHz) kapcsolási sebességgel, nagyon alacsony gate kapacitással és alacsony gate küszöb feszültséggel rendelkeznek, valamint a felépítési struktúrájuk nem tartalmaz a csatornával párhuzamos diódát, ellenben a csatorna képes záró irányú előfeszítés esetén vezetni, kiküszöbölve ezzel a pn-átmenet hátrányait (3. ábra). [6]

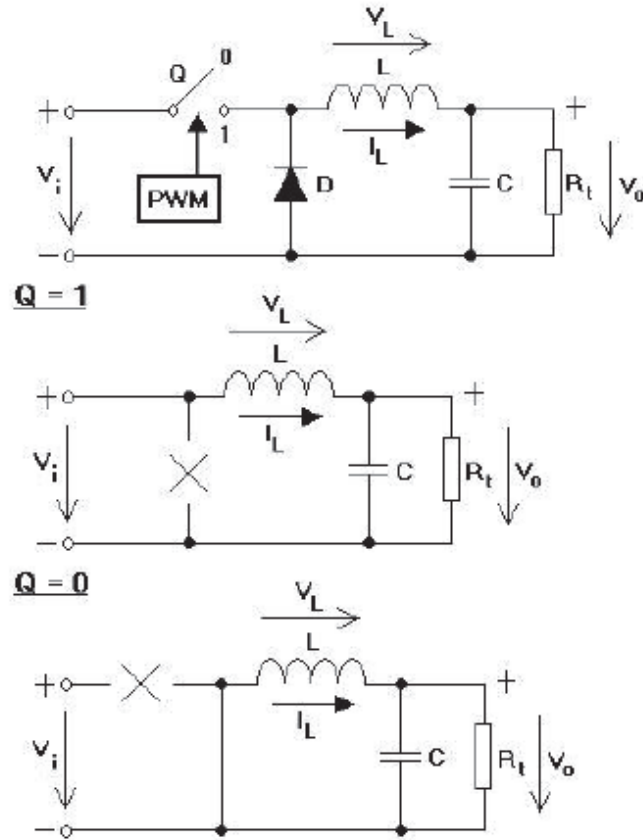
Gate state	MOSFET	GaN E-HEMT
ON		
OFF		

3. ábra MOSFET és GaN E-HEMT vezetési állapotok [6]

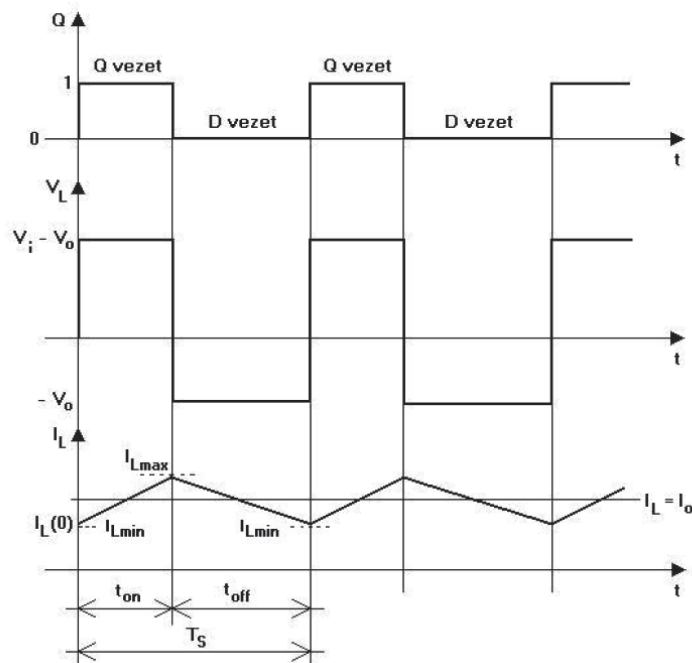
4. Buck konverter felépítése

A buck konverter egy feszültség csökkentő, kapcsolóüzemű konverter. Viszonylag egyszerű felépítése és széles körű alkalmazhatósága miatt népszerű konverter típus. Alapvetően egy teljesítmény kapcsolóelemből, egy induktivitásból (tekercs), egy kapacitásból (kondenzátor) és egy diódából áll (4. ábra). Vezérlési szempontból megkülönböztetünk folyamatos és szaggatott

üzemmódot. Az üzemmódok a tekercsben tárolt energiától függnék. A hatásfok növelése érdekében további vezérlési elveket használhatunk, főként a terhelés nélküli állapotokat tekintve. További hatásfok növelés érhető el a dióda vezérelhető kapcsolóelemre történő cseréjével. Ilyen esetben szinkron buck elnevezést használunk.



4. ábra A buck konverter kapcsolási rajza és működése [7]



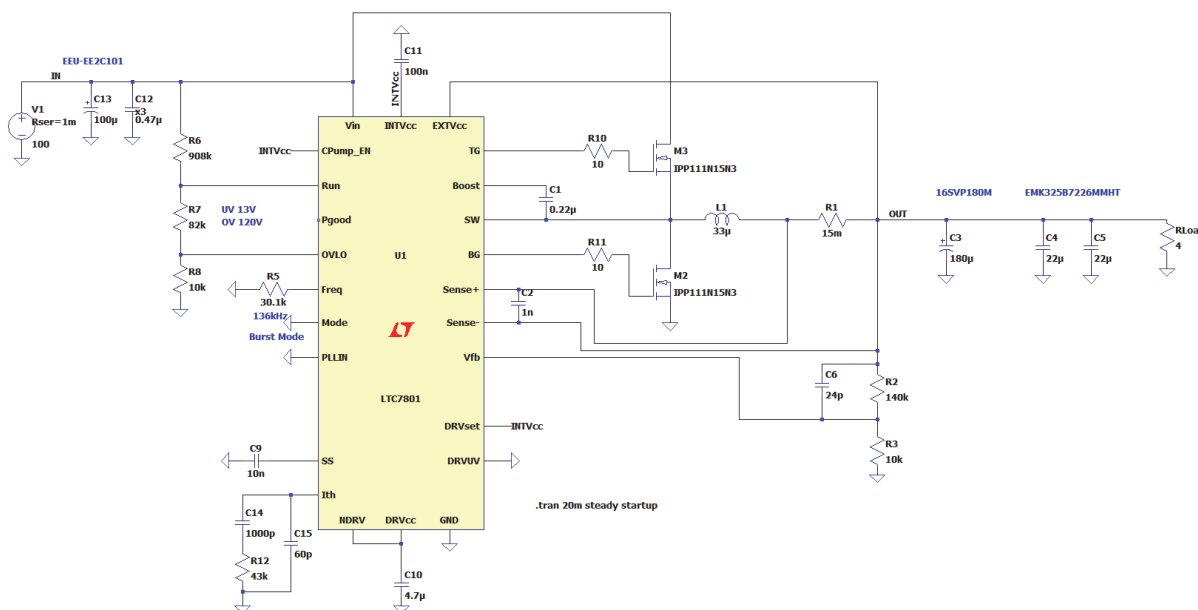
5. ábra A buck konverter jelalakjai folytonos üzemben

5. A tervezett konverter felépítése

A tervezett feszültségcsökkentő konverter egy szinkron buck konverter, amely 13-120VDC bemeneti feszültségből képes előállítani 12VDC kimeneti feszültséget maximális 3A terhelő áram mellett. A konverter kialakításánál a maximális hatásfok elérése volt a cél kompakt kivitelben, az alkatrészek méretezései ennek megfelelően történtek. Elkészítettük a tervek alapján a konverter szimulációs modelljét és összehasonlító szimulációkat futtattunk ugyanazon beállítások mellett Si és GaN típusú félvezetők használatával. A szimulációs modellt a 6. ábrán, míg a hatásfok vizsgálat eredményeit a 7. és 8. ábrán láthatjuk.

Az alkalmazott félvezetők és a szimulációs paraméterek a következők voltak:

- V_{IN} : 100VDC
- V_{OUT} : 12VDC
- I_{OUT} : 3A
- L : 33 μ H
- f_{sw} : 136kHz
- **GaN EPC2010C:**
 - o $R_{DS(ON)}$: 18m Ω
 - o $V_{DS(BR)}$: 200V
 - o Q_{GATE} : 3.7nC
 - o Q_{rr} : 0nC
- **Si IPP111N15N3:**
 - o $R_{DS(ON)}$: 18m Ω
 - o $V_{DS(BR)}$: 150V
 - o Q_{GATE} : 41nC
 - o Q_{rr} : 415nC



6. ábra A tervezett konverter szimulációs modellje

--- Efficiency Report ---

Efficiency: 90.7%

Input: 39.7W @ 100V
Output: 36W @ 12V

Ref.	Irms	Ipeak	Dissipation
C1	68mA	1460mA	0mW
C2	0mA	1mA	0mW
C3	325mA	600mA	3mW
C4	235mA	623mA	0mW
C5	235mA	623mA	0mW
C6	0mA	0mA	0mW
C9	0mA	0mA	0mW
C10	97mA	2162mA	0mW
C11	0mA	0mA	0mW
C12	30mA	954mA	0mW
C13	6mA	97mA	0mW
C14	0mA	0mA	0mW
C15	0mA	0mA	0mW
L1	3079mA	4128mA	491mW
M2	2918mA	16799mA	900mW
M3	1240mA	18908mA	2019mW
R1	3079mA	4128mA	142mW
R2	0mA	0mA	896μW
R3	0mA	0mA	64μW
R5	0mA	0mA	12μW
R6	0mA	0mA	9mW
R7	0mA	0mA	814μW
R8	0mA	0mA	99μW
R10	63mA	760mA	40mW
R11	64mA	785mA	41mW
R12	0mA	0mA	0μW
U1	97mA	2162mA	57mW

7. ábra Veszteségi eredmények Si IPP111N15N3 kapcsolóelemmel

--- Efficiency Report ---

Efficiency: 95.2%

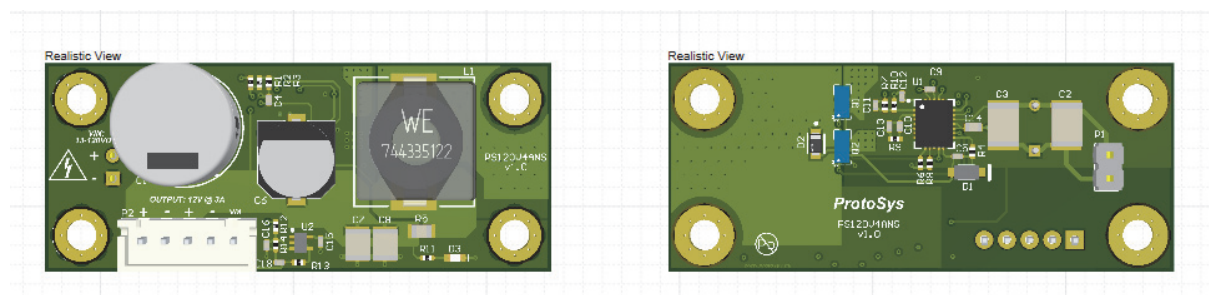
Input: 37.8W @ 100V
Output: 36W @ 12V

Ref.	Irms	Ipeak	Dissipation
C1	12mA	212mA	0mW
C2	0mA	8mA	0mW
C3	304mA	557mA	3mW
C4	231mA	604mA	0mW
C5	231mA	604mA	0mW
C6	0mA	0mA	0mW
C7	0mA	0mA	0mW
C8	0mA	0mA	0mW
C9	0mA	0mA	0mW
C10	28mA	1916mA	0mW
C11	0mA	0mA	0mW
C12	18mA	970mA	0mW
C13	6mA	91mA	0mW
D1	21mA	31mA	99mW
D3	117mA	1907mA	7mW
L1	3083mA	4094mA	492mW
R1	3083mA	4094mA	143mW
R2	0mA	0mA	896μW
R3	0mA	0mA	64μW
R4	0mA	0mA	0μW
R5	0mA	0mA	12μW
R6	0mA	0mA	9mW
R7	0mA	0mA	814μW
R8	0mA	0mA	99μW
R10	25mA	194mA	6mW
R12	0mA	0mA	20μW
U1	34mA	3023mA	177mW
U2	2870mA	15288mA	152mW
U4	1121mA	17842mA	728mW

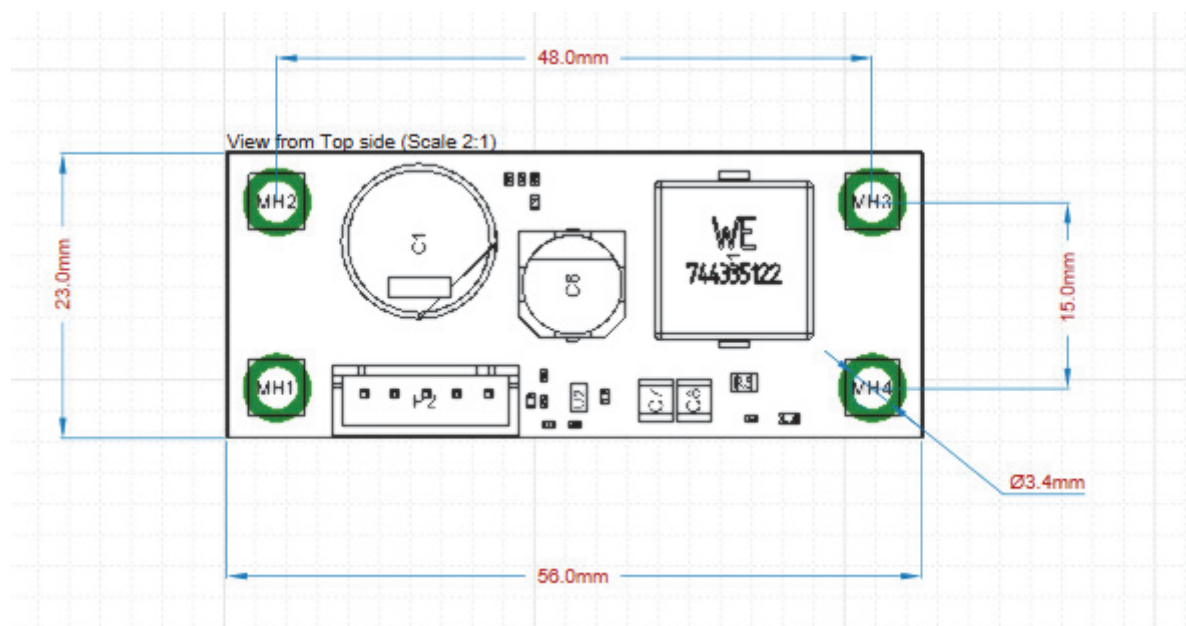
8. ábra Veszteségi eredmények GaN EPC2010C kapcsolóelemmel

6. Összefoglalás

A tervezett konverter GaN típusú félvezető alkalmazásával megkövetelte az erre alkalmas vezérlőegység használatát a vezérlési feszültségek előírásai miatt. A szimuláció eredményei alapján megállapítható, hogy ugyanazon feltételek mellett 5% hatásfoknövekedés érhető el csak a kapcsolóelem megfelelő megválasztásával. Ez a magas, 95%-os hatásfok lehetővé tette számunkra a tervezés során a kompakt kialakítást, valamint a hűtőborda elhagyását. Jelenleg gyártás alatt van a berendezés, amelyen a beüzemelés után modellvalidációs méréseket fogunk végezni. A tervezett konverter a 9. és 10. ábrán látható.



9. ábra 120/12VDC @ 3A buck konverter 3D modell



10. ábra 120/12VDC @ 3A buck konverter befoglaló méretei

7. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Zoltán Szeli, Gábor Szakállas: „Development of 48V DC Motor Drive for Autonomous Servo Steering with new type GaN E-HEMT”, OGÉT 2020: XXVIII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT, Online (2020)
- [2] Daniel Wagner, Roger M. Kenyon: „Switch-Mode Power Supplies for Beginners: An EfficiencyPrimer Part 1”, Power Electronics, Mar, 2016
- [3] Steve Widener: „GaN to the rescue! Part 1: Body-diode reverse recovery”, Technical Articles, Texas Instruments, Oct, 2015
- [4] Laszlo Balogh: „Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits”, Application Report (SLUA618A), Texas Instruments, Oct, 2018
- [5] Moinul Shahidul Haque, Mostak Mohammad, Jason L. Pries, Seungdeog Choi: „Comparison of 22 kHz and 85 kHz 50 kW Wireless Charging System Using Si and SiC Switches for Electric Vehicle”, IEEE 6th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications, Oct, 2018, DOI: 10.1109/WiPDA.2018.8569097
- [6] Miklós Csizmadia, Miklós Kuczmann: „Power Semiconductor Trends in Electric Drive Systems”, Acta Technica Jaurinensis, pp 00-00, vol.11., No.1, 2018, DOI: 10.14513/actatechjaur.v11.n1.000
- [7] Puklus Zoltán: „Teljesítményelektronika”, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2007 egyetemi jegyzet

ROS-alapú szoftverinterfészek modell-alapú kódgenerálása

Model-based code generation of ROS-based software interfaces

Hajdu Csaba^a, Ballagi Áron^b

^aSzéchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont
hajdu.csaba@ga.sze.hu

^bSzéchenyi István Egyetem, Automatizálási Tanszék
ballagi@ga.sze.hu

Absztrakt: A szoftverek kódgenerálása, és az ehhez köthető modell-orientált módszerek egyre elterjedtebbek ipari és akadémiai felhasználásban egyaránt. Ezek az eszközök jellemzően egy (grafikus, vagy szöveges) nyelvre illeszkednek. Alkalmazásuk kifejezetten hasznos, amikor ismétlődő, adott szabályszerűségekhez illeszkedő kódot kell fejleszteni. Ilyen például a Robot Operating System-re (ROS) illeszkedő szoftverek, ahol a kód jelentős része a keretrendszerhez való beágyazódás leírása. Ugyanakkor nehéz a megfelelő egyensúlyt megtalálni a nyelv leíró képességében: fennáll, hogy a nyelv vagy túlzottan specifikus, vagy ellenkezőleg nagyon általános megközelítést próbál adni minden lehetséges esetre. A bemutatásra kerülő fejlesztett Eclipse-alapú eszköz komponens interfészének leírására és generálására összpontosít. Emellett egy egyszerű, hibrid rendszerek formalizmusán alapuló viselkedésmo­dell is felvázolásra kerül. A generált forráskód könnyen integrálható már létező szoftverhez. Az eszköz használatát a Nissan Leaf tesztjármű odometria számításához szükséges program fejlesztésével szemléltetjük.

Kulcsszavak: Robot Operating System, modell-orientált szoftverfejlesztés, kódgenerálás, autonóm járművek, hibrid rendszerek

Abstract: Software Code generation and related model-oriented methods gained increasing popular in industrial and academic applications recently. These software-tools are based on a (graphical or textual) language. Their use is exceptionally useful when repeated boilerplate code is developed. A primal example is the software interfacing the Robot Operating System (ROS) in which large portion of the code is the embedding of the software into the framework. On the other hand, it is a challenge to find the optimal tradeoff between specificity of application areas and generality of possible cases when the language is defined. The introduced developed tool is an Eclipse-based plugin, which is focusing on the description and generation of the component interface. It additionally conceptualizes an extension to describe basic behavioral model based on hybrid system formalism. The generated source code can be easily integrated into existing source base. The use of the tool is demonstrated through the development of the odometry software of our Nissan Leaf test vehicle.

Keywords: Robot Operating System, model-oriented software development, code generation, autonomous vehicles, hybrid systems

1. Bevezetés

A szoftverek forráskódjának generálása kritikus rendszerekben elterjedt gyakorlatnak számít. A szabályszerűségekre illeszkedő, sablonszerű kódok könnyedén és hibamentesen generálhatók a megfelelő munkafolyamat mellett. A sablonok definiálást segíti, hogy a használati eset(ek), vagy az alkalmazandó keretrendszer egy gyakori mintázatra épít, amivel egy adott specifikus feladat oldható meg (pl. PID szabályozók készítése). Ez könnyen megfogalmazható egy absztrakt modellként, ami egy nyelvtan alapját képezi. A nyelvtanra épülő példány egy nézete lehet grafikus (pl. MATLAB Simulink, LabView), vagy szöveges (mint a legtöbb programozási nyelv). Az így megfogalmazott nyelv felhasználható más szoftveres elemek előállítására is, például tesztek, konfigurációk generálására. Egy ilyen modellbe különböző módszerek segítségével más doménből könnyen végezhető transzformáció, így kiterjeszthető az alkalmazási terület.

Tipikus alkalmazás például egy adott kommunikációs keretrendszert (pl. Data Distribution Service - DDS) felhasználó szoftver kódjának generálása egy tervezőrendszerben elkészített (pl. Eclipse, Rational) modell alapján. Bár a modell-orientált módszerek széleskörűen alkalmazottak, például Robot Operating System (ROS), keretrendszerre építő alkalmazások esetén ritkábban használatosak. Továbbá, leíró nyelvtanok megfogalmazásakor általánosan a következő problémákat és szempontokat célszerű figyelembe venni:

- A nyelvtan túl általános, a generált kód gyakorlatban csak további jelentős kódmennyiség írásával tehető használhatóvá.
- Az eszköz által generált kód csak egy specifikus probléma megoldására alkalmas, az nehezen terjeszthető ki más alkalmazásokra.
- A szoftverek viselkedése nehezen fogalmazható meg, a generált viselkedés nehezen bővíthető és/vagy adaptálható más használati esetekben.

Jelen cikk egy olyan nyelvtant, és egy erre épülő eszközt mutat be, ami kísérletet tesz az ROS által használt kommunikációs modellek minél egyszerűbb szövegalapú megfogalmazására. Az így felépített modellből generált kód javarészt a programnak a kommunikációs keretrendszerhez való illeszkedését írja le. Az így generált kód újrahasznosítható, emellett működése a kommunikációs keretrendszertől függetleníthető.

2. Kapcsolódó munka

A kódgenerálás, különösképpen irányítástechnikai feladatokra ipari alkalmazásokban elterjedt módszer, jellemzően Labview, MATLAB/Simulink használatával. A felsorolt programok segítségével több kommunikációs keretrendszerhez generálható illeszkedő kód (pl. DDS [1], ROS [2]). Ezekkel a rendszerekkel visszatérő probléma azok zártsága és magas beszerzési költsége. Továbbá, a generált kód nagyban támaszkodik a fejlesztői környezet által biztosított könyvtári függvényekre, ami bizonyos használati esetekben nem feltétlenül indokolt, emellett csökkentheti a szoftver hordozhatóságát is. Más esetekben, például mikrokontroller- vagy FPGA-alapú rendszerek fejlesztésénél bevett gyakorlat, hogy egy egyszerűsített leírásból a kód jelentős része (jellemzően a hardverabsztrakciós réteg – HAL) generálható a fejlesztőkörnyezet segítségével.

A bemutatott munka aktuálisan futó európai projektek¹ által lefektetett irányvonalból inspirálódott [3] [4]. Az ROS alapú rendszerek ipari és más kritikus rendszerekben (például

¹ <https://www.rosin-project.eu/>

autonóm járművek) is teret nyernek, azok sokoldalúsága, és a szoftveres komponensek egyszerűbb helyettesíthetősége révén. A komponensek és azok kapcsolata jól megfogalmazható egy absztrakt modell segítségével. Az erre illeszkedő modellből generálható egy olyan kód, ami egy céleszközön (pl. mobil robot vagy manipulátor) használható. Ugyanakkor ezek a projektek elsősorban ipari felhasználást céloznak meg nagyvállalatok számára, emiatt elsősorban grafikus megközelítést alkalmaznak az architektúra definíciójára.

A hibrid rendszerek [5] formalizmusa elterjedt mind robotikában viselkedésmoდეllek definiálására [6], mind a szoftveres verifikációban. A formalizmus egyesíti a diszkrét- és folytonos-idejű rendszerek leírását, például hibrid-állapotgépek alkalmazásával. Az ilyen állapotgépeket egyaránt vezérlik diszkrét események és differenciálegyenletek által leírt folytonos változók. Ez a formalizmus alkalmas bonyolult fizikai rendszerek viselkedésének leírására például az autonóm járművek esetében.

Az eszköz megvalósítására a fő motiváció a *Széchenyi István Egyetemen* futó különböző projektek szoftveres munkafolyamatának segítése volt. Ezek jellemzően autonóm járművekkel foglalkozó fejlesztési projektek (1. ábra). Az egyik esetben egy kereskedelmi forgalomban kapható Nissan Leaf tesztjármű szoftveres fejlesztésével foglalkozunk. A másik esetben a *Szenergy* csapat az évente megrendezett Eco-Marathon egy új versenyszámára, az autonóm városi versenyre (Autonomous Urban Challenge) készül fel. Mindkét projektben autonóm járműveken használható algoritmusok fejlesztése és tesztelése a cél, ROS alapokon. Mivel a projekt még kezdeti fázisban tart, a szoftver és annak interfésze sokat változik, így indokolt olyan eszközök fejlesztése, amik segítségével a változtatások a kódban gyorsan érvényesíthetők.

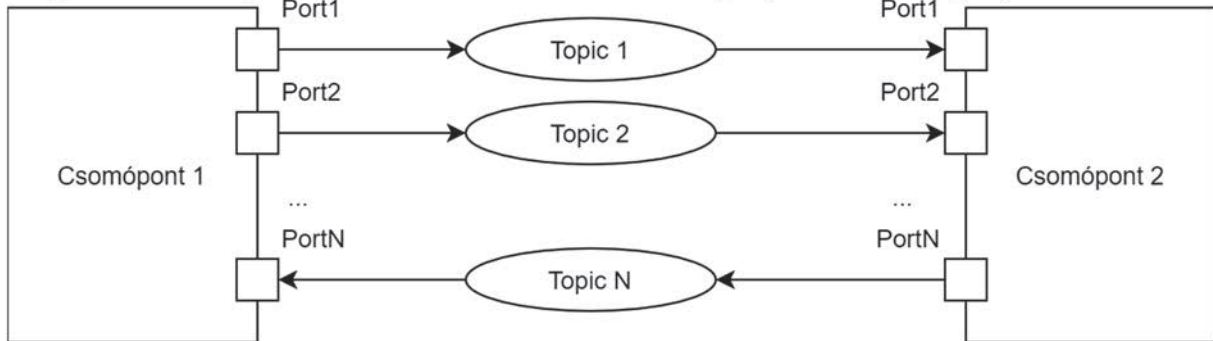


1. ábra: A Széchenyi István Egyetemen fejlesztett autonóm funkcionalitású járművek (balra: Szenergy Szemission, jobb: Nissan Leaf tesztjármű)

3. Modell definiálása

Az absztrakt (gráf)modell definiálásához az ROS-ben alkalmazott kommunikációs gráf és más elosztott kommunikációs keretrendszerek felépítését vettük alapul (pl. DDS). Jellemző ezekre a rendszerekre, hogy az üzenetalapú Publisher/Subscriber modellt valósítják meg, vagyis az egyes futó programok közötti kommunikáció dedikált csatornákon keresztül folyik. Ez megfeleltethető egy $G(V, E)$ gráffal, amiben hurokélek és izolált pontok nem definiáltak. V csomópontok halmaza a keretrendszerhez illeszkedő futtatható programok. A csomópontok közötti kommunikáció egyértelmű leképezésének megvalósításához a *port* definíciója kerül bevezetésre az egyes csomópontok részeként (vagyis $\forall p_i \{p_i \in v_j | v_j \in V\}$). Így már előállítható az E élek halmaza. Kettő $p_1, p_2 \in \{(p_1 \in v_1) \wedge (p_2 \in v_2) \wedge v_1 \neq v_2 | v_1, v_2 \in V\}$ tetszőleges port között, akkor értelmezett egy $e_{12}(p_1, p_2) \in E$ él, ha azok egymás között típusra és névre megegyező csatornán történik kommunikáció (vagyis $\{e_{12}(p_1, p_2) \wedge (n\acute{e}v(p_1) = n\acute{e}v(p_2)) \wedge$

($típus(p_1) = típus(p_2)$)). A típus megadása megtehető az adott névvel és típussal ellátott csatornára való referenciával is. Az alapmodellben a portoknak megkülönböztetjük az irányultságát (be- és kimenő). Megkötjük, hogy egy v csomóponton ugyanazon a porton nem jöhet vissza kommunikáció, gyakorlati alkalmazásokat tekintve élhetünk ezzel a megszorítással. A gráfmodell által leírható hálók koncepcióját a 2. ábra foglalja össze.



2. ábra: A gráfmodellel leírható háló két csomópont esetén

Már ez a modell is felhasználható egyszerű ROS-re illeszkedő kód generálására. ROS esetében egy tetszőleges csomópont regisztrálása rögzített módon történik, minden csomópontot egy egyedi névvel kell ellátni. A portok azonban irányultságuk szerint leképezhetők Publisher (kimenő) és Subscriber (bemenő) attribútumokra. Ezek beállításainak generálásával egy jelentős ismétlődő munka takarítható meg. Azonban élhetünk egy további kiegészítéssel. A modellben egy *állapotban* eltárolhatjuk a legfrissebb bejövő üzenetet, amin a csomópont implementációjában dolgozhatunk. Emellett megtehetjük, hogy egy bejövő üzenettel azonnal dolgozunk egy függvényhívásban. Gyakorlati felhasználásban mindkettő eset tipikus: gyakran előfordulhat, hogy egy kimenő üzenet, több bejövő üzenetből áll össze (tipikusan szenzorfüziós algoritmusok), vagy pedig egy kimenő üzenet egy bejövő üzenetből azonnal előállítható. Az azonnali végrehajtáshoz a portok definíciója bővíthető ki egy ilyen trigger metódus nevének megadásával.

További kiterjesztésekhez alkalmazható, a viselkedésmodell megadása. Ez jelenleg a hibrid automatáknál meghatározott formalizmusban definiálható. Vagyis egy $v \in V$ csomópont részeként a következő $A(L, \delta, E, \Omega, V, I)$ hibrid automata definiálható:

- L az állapotok halmaza.
- δ diszkrét átmenetek halmaza, és a $t \in \delta$ rendelt $e \in E$ trigger esemény.
- Ω aktivitások halmaza, vagyis az $\omega \in \Omega$ rendelt folytonos $v \in V$ változót befolyásoló metódus.
- I invariánsok halmaza, amelyeket $l \in L$ állapothoz rendelünk.

A viselkedésmodell felhasználja a korábban definiált állapotot a folytonos változók és aktivitás (működtető differenciálegyenlet) definiálásánál. Tehát a kommunikációs gráfban definiált bejövő üzenetek értékei direktben felhasználhatók a viselkedésmodellben. Ebben az esetben fontos a diszkrét események és a folytonos változók különválasztása, amit a fejlesztő tehet meg a gráfmodellre épülő nyelv segítségével.

4. Nyelv meghatározása és implementáció

A megadott modellből már előállítható egy nyelv és a rá épülő eszközkészlet. A cikkben a struktúra leírására alkalmas rész kerül bemutatásra. A nyelvtan tartalmazza egyrészt a háló

definícióját (vagyis $G(V, E)$ gráfét), amit egy névvel elláthatunk. A háló részeként a következő fő elemeket definiáljuk:

- Üzenettípusok (**topic_msgs**), amiket típussal és névvel látunk el.
- Topikok (**Topics**). Névvel és típussal (a **topic_msgs** halmazából) ellátott elemek.
- Csomópontok (**Nodes**).

Egy csomópont a gráfmodellben megadott módon építhető fel. Vagyis szükséges egy névvel ellátni, amit tovább lehet bemeneti és kimeneti portokkal bővíteni. Az egyes portokhoz rendelhető hozzá az a topik, amin keresztül kommunikálunk. Bemeneti portok esetén (Subscriber) meghatározhatunk egy trigger metódust is, ami új üzenet esetén végrehajtásra kerül. A nyelvtan vázlatát a 1. kód foglalja össze.

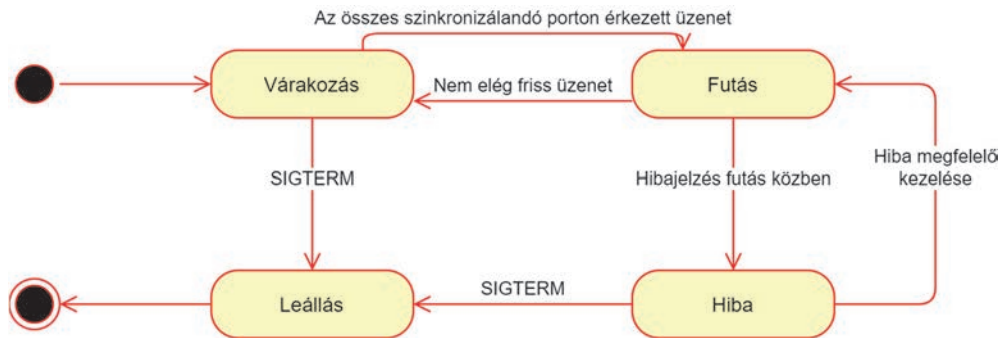
```
<network> = <név> <topic_msgs> <topics> <nodes>
<topic_msgs> = <TopicMessage>
<TopicMessage> = END | <prefix> <név> <TopicMessage>
<topics> =
<Topic> = END | <név> <TopicMessage> <Topic>
<nodes> = <Node>
<Node> = END | <név> <nodeparameters> <continuousstate> <inputs> <outputs>
<nodeparameters> = <NodeParameter>
<NodeParameter> = END | <ParameterGroup> <NodeParameter> | <Parameter> <NodeParameter>
<Parameter> = END | <név> <érték> <Parameter>
<ParameterGroup> = <név> <Parameter>
<inputs> = END | <InputPort> <inputs>
<InputPort> = <név> <Topic> <trigger_függvény>
<outputs> = END | <OutputPort> <outputs>
<OutputPort> = <név> <Topic>

<név> = szöveg
<trigger_függvény> = szöveg
<prefix> = szöveg
```

1. kód: a struktúra megadására alkalmas nyelvtan vázlata

A nyelvtan a definiáltakon túl további hasznos funkcionalitással bővíthető ki. ROS-ben egy hasznos funkció a dinamikus rekonfiguráció. Ennek segítségével egy program paraméterei változtathatók meg futásidőben. Az újrakonfigurálható paraméterek definíciója azonban nehézkes és mechanikus folyamat. Tipikusan alkalmazható egy modellorientált megközelítés, ami leírja a megfelelő paramétereket és felhasználható a leíró fájl generálására és programba való bekötésére. A paraméterek leírása emellett használható kezdeti konfigurációk leírására: az ROS YAML formátumot használ paraméterek leírására. Ezek beolvasása a csomópont elindításakor szintén egy mechanikus folyamat, ami szintén sablonszerűen generálható.

A generáláskor más szoftverek vizsgálata során felfigyeltünk egy közös jellegzetességre. Sok ROS-alapú szoftver nem kezdi el működését mindaddig, amíg bizonyos topikokon nem érkezett üzenet. Ilyen például a lokális trajektóriatervezés is, ahol a póz, célpont ismerete nélkül nem kezdi el a működést a program. Ehhez egy további kiterjesztéssel éltünk, a csomópont állapotában lehetőség van a portok szinkronizálására. Így a csomópont csak akkor kezd működésbe, ha a jelzett topikokon érkezett üzenet. Amennyiben nem érkezik megadott időn belül üzenet, az állapotgép várakozik és megszakítja a futást. Ehhez egy állapotgépet terveztünk (3. ábra), ami generáláskor a program részeként áll elő, amennyiben vannak szinkronizálendő topikok.



3. ábra: Portok szinkronizálására állapotgép

A generált interfész integrálása során a következő munkafolyamat alkalmazható:

- A generált absztrakt osztályból származtassuk le a saját csomópontunk implementációját.
- Az implementációban írjuk felül az **initPre**, **initPost** és a bemenetekhez definiált trigger metódusokat.
- Készítsük el a dinamikus rekonfiguráció szerverét az implementációban és csatoljuk hozzá az interfészben definiált callback metódust.
- Egyéb aktivitás definiálása a szinkronizálás vagy más diszkrét vezérlőesemények elfogásakor.

Az eszköz implementációjának az EMF-Xtext [7] munkafolyamatot választottuk. EMF segítségével könnyen definiálható a gráfmodell egy Ecore példányként. További előny, hogy az EMF-et sok hasznos Eclipse plugin használja, így az Xtext is. Az Xtext segítségével erre a modellre építhető a tárgyalt nyelvtan további kiterjesztésekkel. A kódsablonok Xtend segítségével könnyedén definiálhatók. A teljes eddigi implementáció nyilvánosan elérhető GitHub-on² Eclipse pluginként.

5. Esettanulmány: odometria szoftver

Az eszköz képességeit a robotikában gyakran használt odometria elkészítésén mutatjuk be. A generált program forráskódja nyilvánosan elérhető. Esetünkben az odometriát a jármű által mért proprioceptív szenzorjai (jármű enkóderek, v_l lineáris sebesség és δ kerékszög) által visszaadott folytonos méréseket használjuk fel az odometria előállítására. A jármű állapotát a $X = [x \ y \ \theta]^T$ határozza meg. Viszont az odometriát lehet egy pontban inicializálni, amit például a GPS által visszaadott póz adhat meg. Így két szinkronizálendő topikunk van, a GPS póz és a jármű enkódereinek állapota. A kimenet esetünkben az így számított odometria. Az odometria számításához a következő rendszeregyenleteket használjuk fel a jármű saját referenciájában [8]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v_l \cos(\theta + \beta), \\ \dot{y} &= v_l \sin(\theta + \beta) \\ \dot{\theta} &= \frac{v_l}{l_r} \sin(\beta) \\ \beta &= \tan^{-1} \left(\frac{l_r}{l_f + l_r} \delta \right)\end{aligned}$$

² <https://github.com/kyberszittya/simple-ros-code-generator>

Következésképpen, a differenciálegyenlet numerikus megoldásakor másodrendű Runge-Kutta módszert használtunk (feltételezve, hogy ismerjük a t_s időt két beérkezett üzenet között):

$$x_{k+1} = x_k + v_l t_s \cos\left(\theta + \frac{\dot{\theta} t_s}{2}\right), \quad y_{k+1} = y_k + v_l t_s \sin\left(\theta + \frac{\dot{\theta} t_s}{2}\right), \quad \theta_{k+1} = \theta_k + t_s \dot{\theta}$$

A leírást a 2. kód mutatja be. A leírásban jól látható, hogy definiálva vannak az üzenetek típusai a kimenő és bejövő topikokhoz egyaránt. A csomópontban ezután definiálhatók a rekonfigurálható paraméterek. Az egyik legfontosabb a COG arány $\left(\frac{l_r}{l_f + l_r}\right)$, amivel jelentősen állítható a kimeneti odometria teljesítménye (a leírásban definiáljuk, hogy 0 és 1 közé eső valós számot definiálunk). Mivel ezek új konfigurációk, így jelezhetjük, hogy C++ struktúraként generáljuk le a paramétercsoportot. A portoknál jelezzük egyrészt, hogy mekkora a várható frekvencia (és az ehhez tartozó tűrés) és hogy egymással szinkronizálандók. Az enkóderek topikján megadjuk azt, hogy bejövő üzenet esetén hajtson végre egy metódust (az odometria frissítését).

```
network szenergy
{
  networktype ROS1
  topic_msgs
  {
    messagetype geometry_msgs/PoseStamped
    messagetype geometry_msgs/TwistStamped
    messagetype autoware_msgs/VehicleStatus
    messagetype nav_msgs/Odometry
  }
  topics
  {
    topic "gnss_pose": PoseStamped;
    topic "vehicle/odom": Odometry;
    topic "vehicle_status": VehicleStatus;
    topic "vehicle/current_velocity": TwistStamped;
  }
  nodes
  {
    node KinematicVehicleModel in szenergy_kinematic_model namespace jkk
    {
      language Cpp
      parameters
      {
        parametergroup kinematicparameters generate true
        {
          double wheelbase = 2.7 <1.2, 5.0> -> "kinematic_parameters.wheelbase"
          double track_width = 1.5 <0.7, 2.3> -> "kinematic_parameters.track_width"
          double cog_ratio = 0.9 <0.0, 1.0> -> "kinematic_parameters.cog_ratio"
        }
      }
      continuousstate
      {
        continuousstate kinematicstate;
      }
    }
  }
  inputs
  {
    inputport port_vehicle_status from vehicle_status estimated_freq 30 sample_tolerance 0.1
    {
      continuousstate kinematicstate
      updatefunction "updatevehiclestatus"
      syncstate kinematicstate
    }
    inputport port_gnss_pose from gnss_pose estimated_freq 10 sample_tolerance 0.1
    {
      continuousstate kinematicstate
      syncstate kinematicstate
    }
  }
  outputs
  {
    outputport port_current_velocity to "vehicle/current_velocity" estimated_freq 40{}
    outputport port_update_odom to "vehicle/odom" estimated_freq 40{}
  }
}
```

2. kód: az odometria csomópontjának absztrakt leírása

6. Összefoglalás

A cikkben egy modell-orientált eszköz került bemutatásra, amiben szövegesen lehet leírni egy ROS program interfészét, és le is generálható az interfész, ami felhasználható tetszőleges ROS alapú C++ programban. Az eszköz működőképességét egy példán keresztül bemutattuk.

Az eszköz nyilvánvalóan továbbfejleszthető. A viselkedési modell még nagyon kezdetleges állapotban van és nagyon egyszerű esetek leírására alkalmas csak. Továbbá a modellt érdemes lehet kiterjeszteni, például Fuzzy-alapú szabályrendszerek integrálására is alkalmassá tenni. A modell alkalmas lehet arra, hogy más doménekben használhassuk fel a leírt hálókat, például megbízhatósági modellezésre, számításokra, vagy éppenséggel tesztesetek generálására.

Technikai oldalról érdekes lenne ROS 2 csomópontok generálása is mint lehetőség. A legtöbb induló projekt már egyből szakít az ROS első verziójával és rögtön az új keretrendszerrel foglalkozik. Nagyban könnyíthetné induló projektek fejlesztését egy ilyen eszköz megléte, hasonló metodikával lehetne ROS 2 programokat is generálni. További lehetőség a kezelhetőség fejlesztése illetve a koncepcionálisan hibás leírások tervezési idejű jelzése.

7. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] J. M. Schlesselman, G. Pardo-Castellote, és B. Farabaugh, „OMG data-distribution service (DDS): architectural update”, *IEEE MILCOM 2004 Mil. Commun. Conf. 2004*, kötet. 2, o. 961-967 Vol. 2, 2004.
- [2] M. Quigley és mtsai., „ROS: an open-source Robot Operating System”, 2009.
- [3] A. Remazeilles és J. Azpiazu, „Towards an Advanced ROS Package Generator”, 2019, o. 243–250, doi: 10.5220/0007834002430250.
- [4] C. Vicente-Chicote és mtsai., „A Component-Based and Model-Driven Approach to Deal with Non-Functional Properties through Global QoS Metrics”, 2018.
- [5] R. Alur és mtsai., „The algorithmic analysis of hybrid systems”, *Theor. Comput. Sci.*, kötet. 138, sz. 1, o. 3–34, 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0304-3975\(94\)00202-T](https://doi.org/10.1016/0304-3975(94)00202-T).
- [6] M. Egerstedt, K. Johansson, J. Lygeros, és S. Sastry, „Behavior based robotics using regularized hybrid automata”, in *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 1999, kötet. 4, o. 3400–3405 kötet. 4, doi: 10.1109/CDC.1999.827799.
- [7] M. Eysholdt és H. Behrens, „Xtext: Implement Your Language Faster Than the Quick and Dirty Way”, in *Proceedings of the ACM International Conference Companion on Object Oriented Programming Systems Languages and Applications Companion*, New York, NY, USA, 2010, o. 307–309, doi: 10.1145/1869542.1869625.
- [8] J. Kong, M. Pfeiffer, G. Schildbach, és F. Borrelli, „Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design”, in *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2015, o. 1094–1099.

Új Architektúra Mozgástervező Algoritmusok Integrálására

Novel Architecture for Integration of Motion Planning Algorithms

Hajdu Csaba^a, Ballagi Áron^b, Horváth Ernő^c

^aSzéchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont
hajdu.csaba@ga.sze.hu

^bSzéchenyi István Egyetem, Automatizálási Tanszék
ballagi@ga.sze.hu

^cSzéchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont
hernoe@ga.sze.hu

Absztrakt: A mozgástervezés kritikus feladat mind robotok, mind autonóm járművek működtetése esetén. A jelenleg elérhető keretrendszerek azonban nehezen fejleszthetők és nehezen felügyelhető működésük. Emellett olyan feladatokat is integrálnak, amik más feladatkörhöz is besorolhatók (észlelés, alacsonyszintű irányítás). Jelen cikk egy új architektúrát mutat be mozgástervező algoritmusok integrálásának megkönnyítésére. Az architektúrát hibrid dinamikus rendszerek inspirálták egy elosztott környezetben. A vezérlés és a visszacsatolás megoldott diszkrét- és folytonos-idejű vezérlőjelekkel. A rendszer megtervezése során figyeltünk arra, hogy népszerű keretrendszerekkel (pl. Autoware) kompatibilis legyen.

Kulcsszavak: mozgástervezés, elosztott rendszerek, hibrid dinamikus rendszerek

Abstract: Motion planning is a critical task both at control of robotics and at autonomous vehicles. Current frameworks are difficult to extend and to supervise their operation. Moreover, some functionalities are integrated that can be assigned to other tasks (e.g. perception, low-level control). This article presents a new architecture to simplify the integration of motion planning algorithms. This architecture was inspired by hybrid dynamic systems in a distributed setup. The control and feedback are supported via discrete and continuous-time signals. The framework is developed to be compatible with popular frameworks (e.g. Autoware).

Keywords: motion planning, distributed systems, hybrid dynamical systems

1. Bevezetés

Az autonóm járművek és robotok vezérlésénél a mozgástervezés egy kiemelt feladatnak számít. A problémakör régóta kutatott, sok algoritmus lett kidolgozva merőben eltérő megközelítésekkel (pl. A*, D*, Hybrid A*, RRT*, elasztikus fonal, rácsalapú állapottervezés), amelyek végeredményben különböző esetekre használatosak. Doméntól függően (autonóm járművekhez és mobilrobotokhoz), különböző keretrendszerek kerültek megvalósításra. Ezekkel a megvalósításokkal általános problémák fogalmazhatók meg:

- A megvalósítás jellemzően monolitikus, pluginokkal bővíthető.

- A megvalósítás egy adott feladatra specializált, nehezen változtatható, vagy más algoritmus nehezen integrálható, így az újabb algoritmusok is.
- A keretrendszerek kevés visszajelzést adnak a működésről, a futásidőben esetleg felmerülő hibákról.

A felsorolt problémák indokolhatják egy új architektúra megtervezését és alkalmazását különböző feladatokra. Az új architektúra az egyes már meglévő keretrendszerek előnyeit egyesíthetik, miközben algoritmustól független interfészt biztosítanak. Cél, hogy egy választott algoritmus könnyebben implementálható és integrálható legyen egy általánosabb interfész felhasználásával. A cikkben egy olyan architektúra kerül bemutatásra, amely egy interfész biztosítása mellett lehetővé teszi az egyes algoritmusok rugalmas kezelését, és az olyan feladatok, mint a környezetrepresentáció megosztott kezelését. Az architektúra további szempontja, hogy a működésről folyamatos visszajelzést küldjön, így a hibák vagy a vezérlőesemények nyomon követhetőek legyenek, további döntési lehetőségeket biztosítva.

2. Kapcsolódó munka

Az architektúra elkészítéséhez a legfőbb motivációt a *Széchenyi István Egyetemen* folyó autonóm járművekkel foglalkozó projektek adták. Ezekben a projektekben különböző autonóm funkcionalitással rendelkező járművek épülnek (1. ábra). Az egyik projektben egy kereskedelmi forgalomban kapható Nissan Leaf jármű lett átépítve autonóm járműveken használt algoritmusok tesztelésére. Jellegzetesen olyan forgatókönyveket tesztelése van kilátásban, amelyek valós forgalmi szituációkban előfordulhatnak. Például ilyen egy forgalmi sávban az akadályok kikerülése, sávok váltása, parkolás, kereszteződések kezelése. A másik projektben a Szenergy hallgatói csapat az évente megrendezett Shell-Eco Marathon új versenyszámára, *Autonomous Urban Challenge*-re épít egy autonóm funkciókat megvalósító járművet. A versenyszámon különböző komplexitású feladatokat kell végrehajtani, a forgalmi szituációkra emlékeztető módon (akadálykerülés, parkolás stb.).



1. ábra: A Széchenyi István Egyetemen fejlesztett autonóm funkcionalitású járművek (balra: Szenergy Szemission, jobbra: Nissan Leaf tesztjármű)

Az architektúra kidolgozását megelőzte az elérhető keretrendszerek kipróbálása és alkalmazása az adott használati esetre. A Robot Operating System (ROS) alapételemzett [1] navigációs keretrendszere a **move_base** leginkább differenciális meghajtású robotokra alkalmazható, aránylag jól teljesít ipari és akadémiai környezetben. A keretrendszer monolitikus felépítésű, ami pluginokon keresztül bővíthető. Ugyanakkor a környezetrepresentáció rögzített foglaltsági térképekre, más modelleket erre kell átalakítani. Emellett egy rögzített viselkedésmódel alapján működik, ami egy állapotgép a differenciális hajtású robotok működését célozza meg. Ezek a hibák ihlették a rendszer továbbfejlesztését: például a **move_base_flex** [2], amely

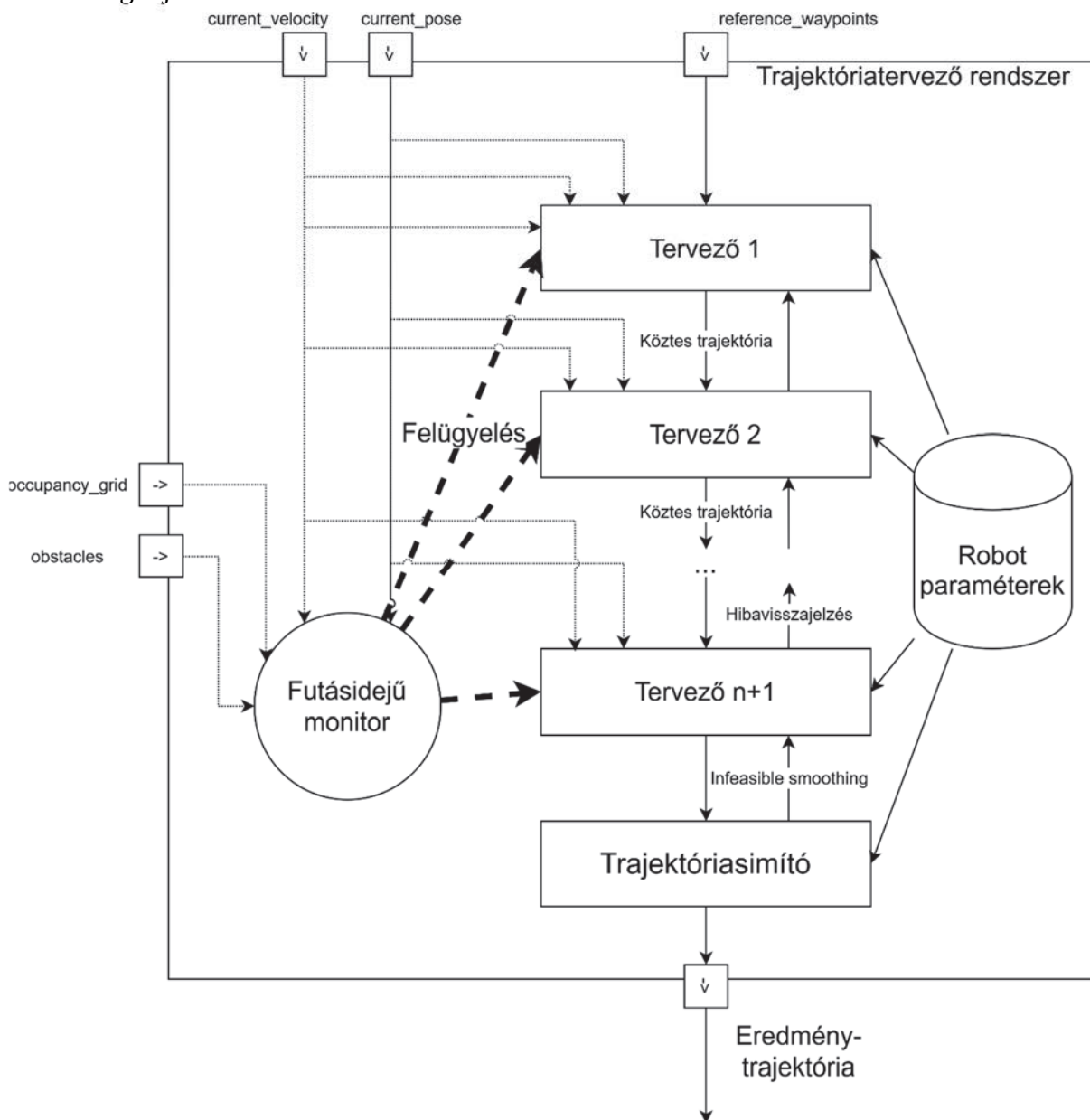
ugyanakkor maradt az eredeti interfész megkötései mellett. Ezzel szemben az Autoware fejlesztői [3] kissé más megközelítést alkalmaznak a mozgástervezés megvalósítására autonóm járműveken. Alapvetően egy elosztott architektúrába szerveződött a sávok kezelése, ezen útvonalak tervezése és az akadályok kikerülésére. Ugyanakkor itt sincs az észlelés teljesen különválasztva az egyes komponensektől, és nem teljesen egységes a komponensek interfésze. A **move_base**-hez képest azonban sokkal rugalmasabb kezelést biztosít detektált objektumok kezelésére, vagy környezetreprezentációk feldolgozására. Szintén hasonlóság, hogy az Autoware komponensek viselkedésmoделlje is rögzített, bár ezek az autonóm járművek forgatókönyveihez vannak igazítva.

Az alkalmazható algoritmusok terén is jelentős előzetes kutatások történtek. A **move_base** a legtöbb közismert algoritmust (Dijkstra, A*) [4] integrálja, globális tervek készítésére. Globális tervek készítésére további algoritmusok implementációi használhatók, amelyek figyelembe veszik az eszköz fizikai modelljét, mint Hybrid A* [5] (ezt az Autoware is használja), vagy képes állapotterek újrahasznosítására, mint a D* (Anytime Dynamic A*) [6]. A **move_base** objektumkerülésre a szintén népszerű dinamikus ablak módszert (*dynamic window approach - DWA*) [7] használja alapértelmezetten. Az objektumkerülési algoritmusok feltételezik egy meglévő referencia globális terv meglétét, ami módosítható. A dinamikus ablak módszer jól használható mind differenciális meghajtású robotokra, mind autonóm járművekre, mivel nagyban épít az eszköz fizikai modelljére és az akadályok geometrikus reprezentációjára. Ugyanakkor a módszer aránylagos pontatlansága több algoritmus kifejlesztését irányozta elő. Egyik általánosabb módszer az *elasztikus fonal* (*elastic band – EB*) [8] módszer, és az *időelasztikus fonal* [9] ami gráfoptimalizáló módszereket használ egy időben is optimális kerülési trajektória tervezésére. Járművek esetén ezek gyakran a Reeds-Shepp-alapú módszerekkel kerülnek összehasonlításra [10]. A rácsgráf alapú módszerek (*lattice state planner*) [11] [12] figyelembe veszik a fizikai modellt és választanak ki az állapottérben egy optimális útvonalat. A módszer könnyedén kiterjeszthető például olyan forgalmi esetekben, ahol sávváltás, vagy sávon belüli kerülés is könnyen megtervezhető. Az RRT algoritmus [13] egy más jellegű algoritmus, amelyik a környezet véletlenszerű mintavételezésével választ ki egy optimális útvonalat a célponthoz. Előnye, hogy könnyedén skálázható lokális és globális problémákra is. Kiterjesztései figyelembe veszik a megoldandó probléma fizikai vonatkozásait, például a LQR-RRT* [14].

3. Architektúra ismertetése

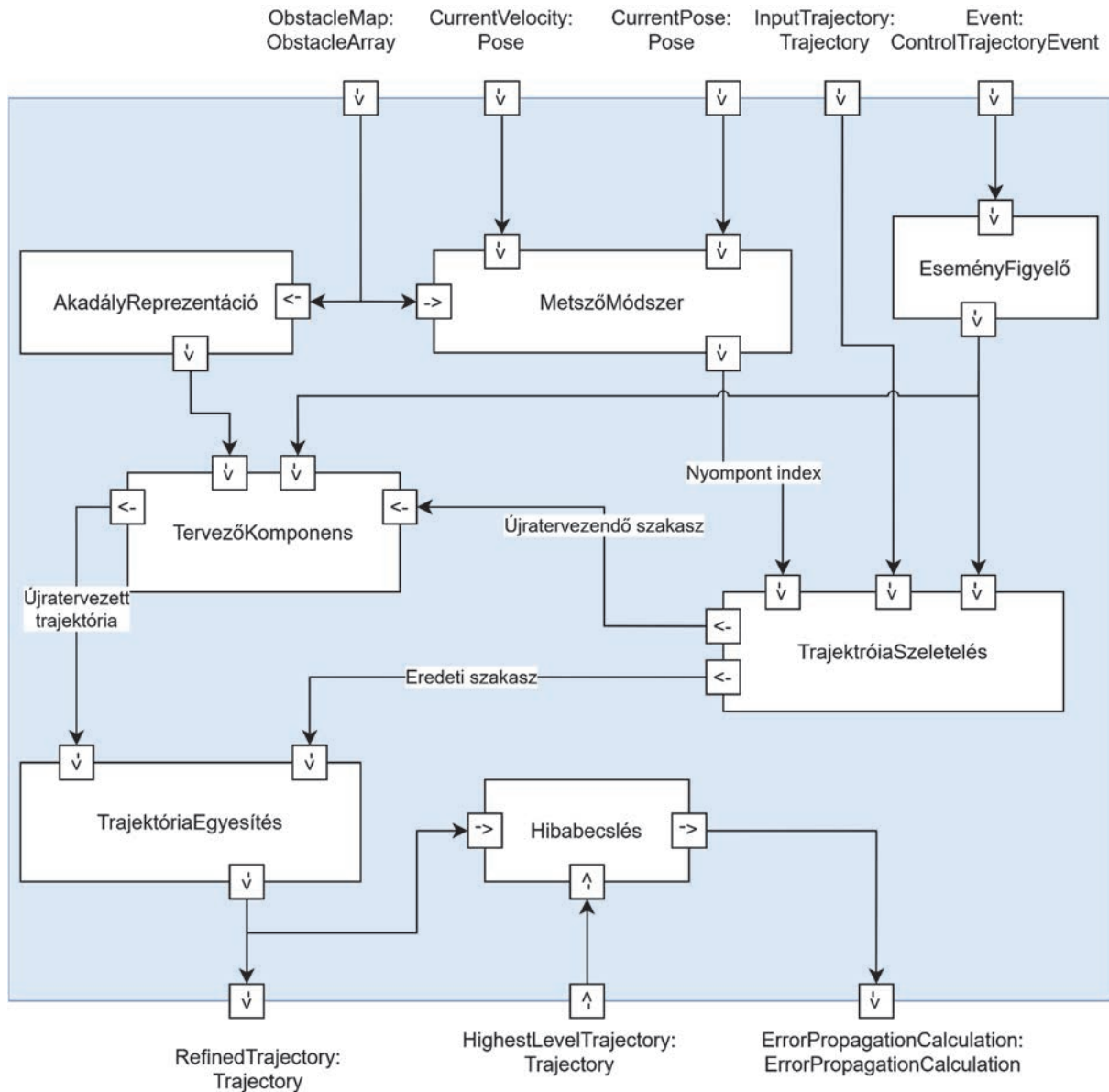
A következőkben az architektúra tervezet kerül bővebb ismertetésre. Az architektúra legfontosabb része, hogy a működésről visszajelzéseket küldjön, különösképpen a hibákról. További események a környezet feldolgozása közben indukálhatók, például egy veszélyes akadály detektálása a lokális környezetben. Az események megfigyelését egy futásidejű monitor végzi, ami az események hatására további beavatkozó jelet adhat a trajektóriatervezés menetére. A futásidejű monitorozás is több független komponensből építhető fel. A trajektóriatervezés felbontható algoritmus-függő komponensekre (továbbiakban *mozgástervező csomópont*), amik bemenetként egy célpontot/referenciapályát várnak, kimenetként pedig egy finomított pályát adnak vissza. A csomópont a működés során eseményeket (végrehajtás, újratervezés, futásidejű hiba) is generál. A kimenetre csatolható egy görbesimító módszer (tetszőleges görbe interpoláció). Ez lehetővé teszi különböző komponensek, ezáltal az egyes algoritmusok egymás utáni láncolását, vagy egy mechanizmus szerinti kiválasztást. Ez gyakorlatban például szituáció-függő alkalmazását jelenti, például a parkolás és a sávváltás közötti váltakozást. Globálisan az egyes komponensek az eszköz (nulladik- és elsőrendű)

állapotát várja. Mivel több egymástól független működésű komponens működik, így a robot paramétereinek reprezentálásához különálló rendszert készítettünk. Az architektúra vázlatát a 2. ábra foglalja össze.



2. ábra: Mozgástervező rendszer architektúra terve

Egy mozgástervező csomópont (felépítés összefoglalva 3. ábra) bemenete a környezetrepresentáció (geometriai objektumok helyzete mozgásprimitívként v. rácstérkép [15]), a referencia trajektória, az eszköz állapotrepresentációja és a futásidejű monitor által generált vezérlőjelek. Kimenete pedig egy eredmény-trajektória, a futásközben keletkező események jelzései. A komponens lehetőséget kell biztosítson valamilyen szeletelési módszer alapján a bejövő trajektória metszésére és összeillesztésére. A használt algoritmus a metszett trajektóriát használja fel. A komponensek felett egy irányító komponens áll, ami vezérjelek hatására módosíthatja az algoritmus működését (pl. paraméterezését, trajektória jellegét). A komponens egy további magasszintű referencia trajektóriához képest megvizsgálhatja a keletkezett hiba mértékét, lehetőséget biztosítva az ez alapján történő beavatkozásra, vagy visszajelzésre.



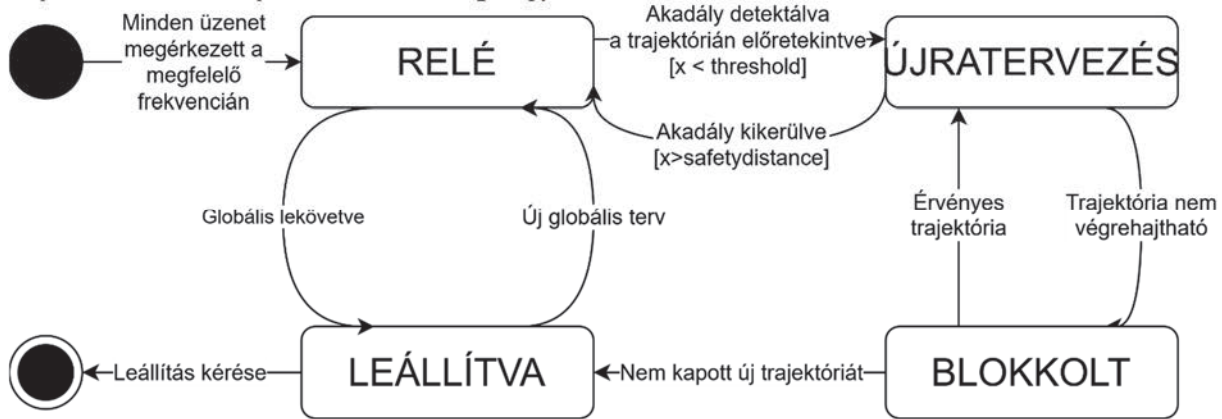
3. ábra: Egy trajektóriatervező csomópont leírása

A kidolgozott architektúra nagyban az Alur és Henzinger [16] [17] által megfogalmazott hibrid automatákból inspirálódott. Az alapértelmezett viselkedésmodell (4. ábra) egy egyszerű állapotgép a legalapvetőbb működésre összpontosítva. Legfontosabb állapottai ennek az állapotgépnek:

- *Relé* állapotban az eredeti bejövő nyomvonal kerül változatlanul hirdetésre.
- *Újratervezés* állapotban a mozgástervező algoritmus működésbe lép, és a veszélyes akadályok figyelembe vételével tervez egy új trajektóriát.
- *Blokkolt* állapotban a csomópont vár egy új referencia trajektóriát, miközben megpróbálja végrehajtani a biztonsági forgatókönyvet. Ha meghatározott időn belül nem kap új referencia trajektóriát, *leáll* állapotba kerül.
- *Megáll* állapotban a jármű áll egy új referencia nyomvonal megkapásáig.
- Bármelyik állapotban a hibás végrehajtás a fel nem tüntetett *hiba* állapotba kerül.

Alapfelvetésünk, hogy az egyes állapotátmeneteket nemcsak diszkrét jelek határozzák meg, hanem folytonos, időben változó jellemzők is. Ilyen például a referencia csomópont legközelebbi csomópontjának indexe is, ami a trajektória lekövetésével változik. Az állapotgép

egyik célja, hogy a számítási teljesítményt leszorítsa azokra az esetekre, amikor arra szükség van, például akadály észlelésekor. Ugyanígy, azt is biztosítani célszerű, hogy sikertelen újratervezést követően egy felsőbb szinten elhelyezkedő komponensnek jelezhesse. Ez tipikusan annak az esetnek a leírásának biztosítása, amikor egy lokális térben működő mozgástervező komponens nem képes egy trajektória megtervezésére és a globális terv újratervezésére van szükség. Amennyiben érkezik egy végrehajtható trajektória, a lokális trajektóriatervező újra működésbe lép, egyébként leáll.

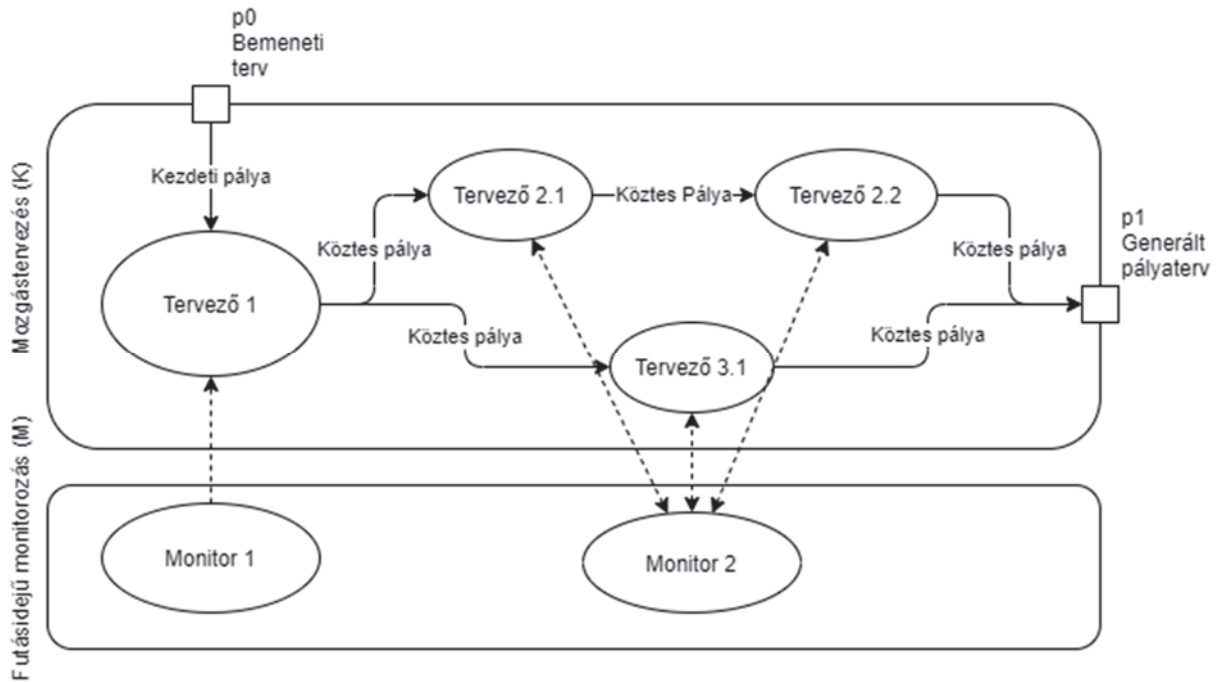


4. ábra: minimális állapotgép alapú viselkedésmo­dell trajektóriatervezésre

Összességében a cél mozgástervezés gráfszerű strukturálása, amivel egy áttekinthető, letisztult folyamat alakítható ki. A folyamat így lebontható egyszerűsített algoritmusokra, amelyek a láncolatai válnak egyre simább, és az eszköz fizikai kényszereinek megfelelő pályavonallá. A választott algoritmus természetesen a fejlesztő döntésétől függ, egy csomópont lehet egy bonyolult algoritmus implementációja is. Ugyanakkor feltételezhetően felső szintről indulva a bonyolult algoritmus lépései is felbonthatók egymáshoz láncolt alcsomópontok sorozataként. Végeredményben tehát a mozgástervezés megvalósítását egy olyan $G(V, E)$ gráfként (5. ábra) ábrázolható, amelyben:

- Minden $v \in V$ csomópont egy hibrid automatát (vagy erre visszavezethető) viselkedésmo­dellt valósít meg. Ez azt jelenti, hogy minden csomópont működése befolyásolható folytonos változókon és diszkrét eseményeken keresztül.
- Csomópontok két csoportját definiáljuk: $K \subseteq V$ mozgástervezést közvetlenül megvalósító csomópontok (gráfkeresési, mintavételezési eljárások, görbesimító eljárások) és az egyes csomópontok által kimenetet generált $M \subseteq V$ monitorozó csomópontok.
- A gráfnak értelmezett két $p_0, p_1 \in V$ kitüntetett csomópontja, ahol $p_0, p_1 \notin (K \cup M)$. p_0 jelöli a bemeneti tervet, p_1 jelöli a kimeneti tervet.
- Két $k_1, k_2 \in K$ csomópont között akkor értelmezünk egy $e(k_1, k_2)$ irányított élet, ha k_2 felhasználja k_1 által generált trajektóriát.
- Alapvetően két $m_1, m_2 \in M$ monitor csomópont között nem értelmezünk élet. $m_1 \in M$ és $k_1 \in K$ között egy $e(m_1, k_1)$ között értelmezünk egy irányítatlan élet, ha m_1 elemzi k_1 által generált állapotjelzéseket, vagy vezérli az adott csomópontokat a környezetrepresentáció feldolgozása alapján.
- Az összes $k \in K$ ponthoz tartozik egy központi egység, ami letiltja, vagy engedélyezi az adott csomópont működését. Így egy úton lévő csomópontok tilthatók vagy engedélyezhetők, ami megfelelhet egy szituációban való tervezésnek (egy út jelölhet például parkolási forgatókönyvet vagy sávváltást forgalmi szituációban). Továbbiakban az engedélyezett részgráf azon feszített részgráf, amelynek csomópontjai a monitorok által engedélyezett.

A gráfalapú megközelítés számos további lehetőséget tesz lehetővé. Az egyik egyértelmű lehetőség a viselkedések megfogalmazása, mint az engedélyezett részgráfon futó utak p_0 és p_1 között. Ez a feltétel nyilvánvalóan szükséges, máskülönben nem biztosított, hogy lesz egy lekövethető trajektória. A váltakozás a megadott viselkedésre akkor engedélyezhető, amennyiben minden előfeltétel biztosított a viselkedéshez leképzett úton elérhető csomópontok elindítására. Ugyanígy hiba detektálása során kereshető egy alternatív viselkedés a K részgráfban. A megfogalmazás ráadásul ekvivalens lehet kiegyensúlyozott Petri-hálókkal (amennyiben p_0 forrás, p_1 nyelő), ami lehetőséget biztosít valósidejű megbízhatósági elemzésekhez is, ami a biztonságkritikus működéshez adhat alapot.



5. ábra: Mozgástervezés gráfalapú nézete

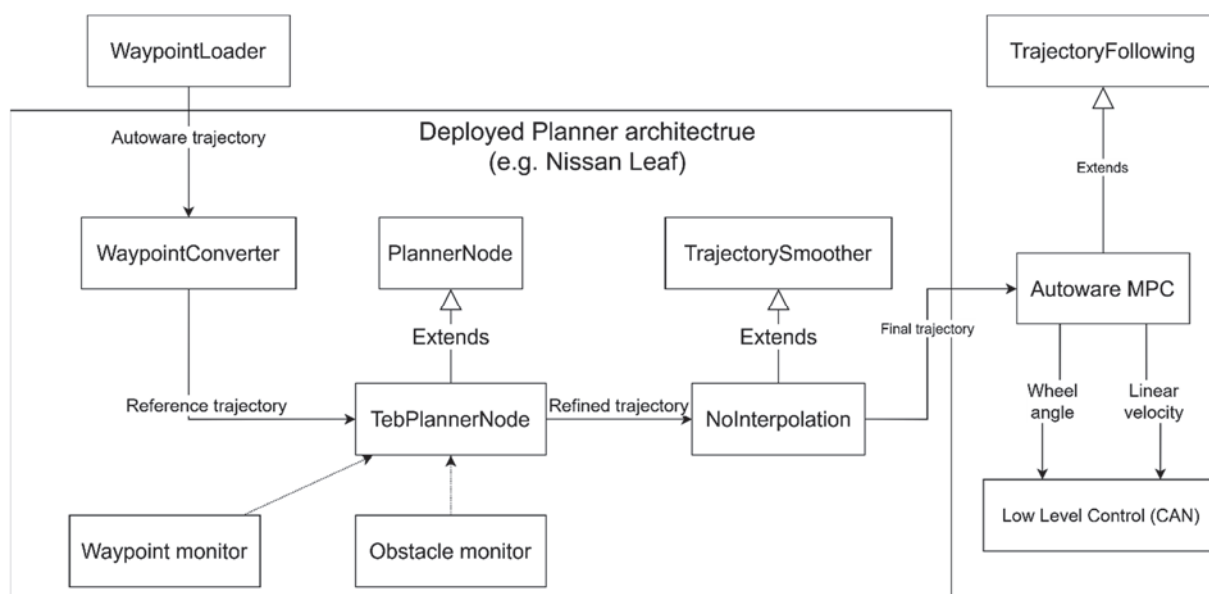
4. Eredmények

Első fázisban az *időelasztikus fonál* [9] módszer integrálása volt a cél, végső soron ennek alkalmazása jármű forgatókönyvekben (6. ábra). Jelenleg ez egy olyan gráf, ami egy csomópontot tartalmaz, ami a nevezett algoritmust integrálja a mozgástervező gráfba. A referencia trajektóriát előre felvett pozíció sorozatokból állítottuk elő, a vezérléshez pedig járművekhez használt modell-prediktív szabályozót használtunk (Autoware.AI [3] komponensek). A mozgástervező csomópontokhoz különböző monitorok lettek implementálva, amelyek a következő feladatokat látják el:

- Detektálják a legmagasabb szintű lekövetendő trajektórián (ez jellemzően egy referencia nyomvonal előre felvett GPS pontok alapján) a járműhöz legközelebbi nyompont indexet és az ahhoz vett merőleges távolságot.
- Detektálják a releváns veszélyes objektumokat. Egy objektum veszélyesnek minősül az esetben, ha a referencia trajektóriához képest egy előretekintő rész-trajektórián a d merőleges távolság egy küszöbérték alá esik. A d távolság meghatározható egyszerű lineáris interpolációval két nyompont használatával (ahol w_i a legközelebbi nyompont, w_{i-1} a megelőző nyompont, P a jármű aktuális helyzete):

$$d = \frac{\|\vec{w_t P} \times \vec{w_t w_{t-1}}\|}{\|\vec{w_t w_{t-1}}\|}$$

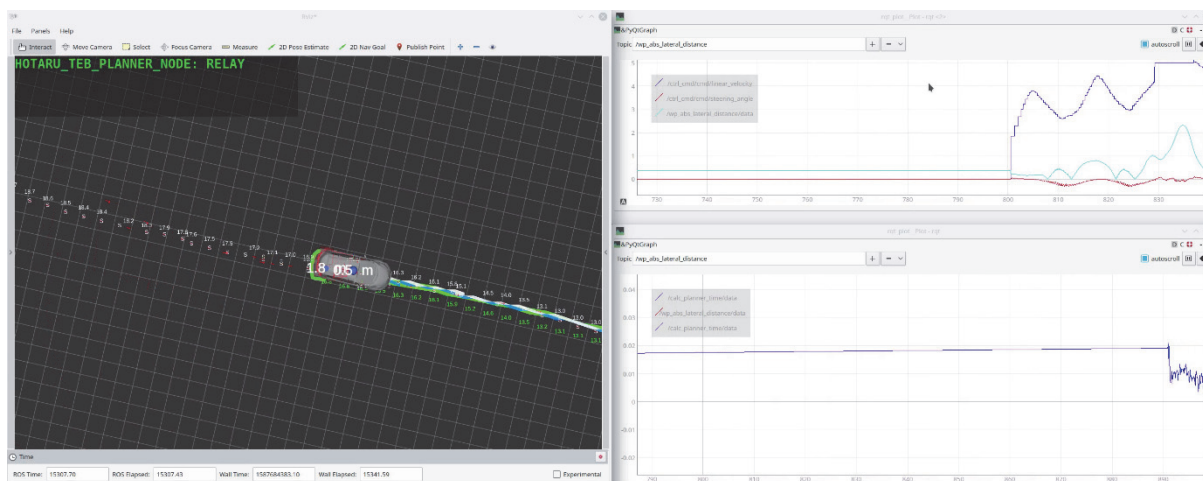
A detektált események kényszerítik a trajektóriatervező csomópontot beavatkozásra. Amennyiben d kisebb mint egy adott küszöbérték, *újratervezés* állapotba ugrik a rendszer. Amennyiben az objektum továbbiakban nem detektálható, egy bizonyos ideig (megfelelő mennyiségű nyompont elhagyását követően) a *relé* állapotba ugrik.



6. ábra: tesztjárművön alkalmazott komponensek (TEB alapú módszer)

Mivel a komponenst Autoware keretrendszerbe integráltuk, így további komponensekre volt szükség, amelyek az Autoware keretrendszerbe integrálják a megvalósított keretrendszert (referenciatrajektória átalakítása, vezérlőparancsok értelmezése). A megvalósított rendszer (működés közben 7. ábra) teljesen ROS kompatibilis, Gazebo szimulációban képes detektált objektumok kikerülésére. Eközben az egyes állapotváltozásokról jelzéseket generál, így teljesen nyomonkövethető a belső működése a csomópontnak. Az implementáció publikusan elérhető GitHub tárhelyen¹.

¹ https://github.com/kyberszittyahotaru_planner



7. ábra: implementált mozgástervező csomópont működés közben

5. Összefoglalás

A cikkben egy részlegesen működőképes mozgástervező architektúra került bemutatásra, ami jelenleg is intenzív fejlesztés alatt áll. A bemutatott architektúrához szeretnénk egy fejlett viselkedésmódot kidolgozni. Szeretnénk az architektúra képességeit úgy demonstrálni, hogy egyszerűbb, de gyorsan működő komponensekből álljon össze egy végső trajektória különböző viselkedésekhez társítva.

A gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából szeretnénk további algoritmusokat a keretrendszerbe integrálni. Egy középtávú cél, hogy a keretrendszer az egyszerű nyomkövethetőségen alapulva különböző szituációkban tegye lehetővé különböző algoritmusok összehasonlítását. A keretrendszer a visszajelzéseken alapulva integrálható más mesterséges intelligencia rendszerekbe is, lehetővé téve például megerősítéses tanulás módszerek alkalmazását például automatikus finomhangolásra.

Hosszabb távú technikai cél, hogy a jelenlegi ROS-alapú rendszert ROS 2 alapokra helyezzük át. Az átemelés kedvező eredményekkel járhat, mivel az ROS 2 fejlesztése során a biztonságkritikus és a biztonsági kritériumokat is figyelembe lehet venni.

6. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] M. Quigley és mtsai., „ROS: an open-source Robot Operating System”, 2009.
- [2] S. Pütz, J. S. Simón, és J. Hertzberg, „Move Base Flex: A Highly Flexible Navigation Framework for Mobile Robots”, okt. 2018, [Online]. Elérhető: https://github.com/magazino/move_base_flex.
- [3] S. Kato és mtsai., „Autoware on Board: Enabling Autonomous Vehicles with Embedded Systems”, in *2018 ACM/IEEE 9th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS)*, ápr. 2018, o. 287–296, doi: 10.1109/ICCPS.2018.00035.

- [4] S. M. LaValle, *Planning Algorithms*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2006.
- [5] J. Petereit, T. Emter, C. Frey, T. Kopfstedt, és A. Beutel, „Application of Hybrid A* to an Autonomous Mobile Robot for Path Planning in Unstructured Outdoor Environments”, 2012.
- [6] M. Likhachev, D. Ferguson, G. Gordon, A. Stentz, és S. Thrun, „Anytime Dynamic A*: An Anytime, Replanning Algorithm.”, in *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*, 2005, o. 262–271.
- [7] D. Fox, W. Burgard, és S. Thrun, „The dynamic window approach to collision avoidance”, *IEEE Robot. Autom. Mag.*, köt. 4, sz. 1, o. 23–33, márc. 1997, doi: 10.1109/100.580977.
- [8] S. Quinlan és O. Khatib, „Elastic bands: connecting path planning and control”, in *[1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1993, o. 802–807 köt.2.
- [9] C. Rösmann, F. Hoffmann, és T. Bertram, „Kinodynamic trajectory optimization and control for car-like robots”, in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, szept. 2017, o. 5681–5686, doi: 10.1109/IROS.2017.8206458.
- [10] J. A. Reeds és L. A. Shepp, „Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards.”, *Pac. J. Math.*, köt. 145, sz. 2, o. 367–393, 1990.
- [11] M. Pivtoraiko, R. A. Knepper, és A. Kelly, „Differentially constrained mobile robot motion planning in state lattices”, *J. Field Robot.*, köt. 26, sz. 3, o. 308–333, 2009, doi: 10.1002/rob.20285.
- [12] M. McNaughton, C. Urmson, J. M. Dolan, és J. Lee, „Motion planning for autonomous driving with a conformal spatiotemporal lattice”, in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, máj. 2011, o. 4889–4895, doi: 10.1109/ICRA.2011.5980223.
- [13] S. M. Lavalle, „Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning”, 1998.
- [14] A. Perez, R. Jr, G. Konidaris, L. Kaelbling, és T. Lozano-Perez, „LQR-RRT* : Optimal Sampling-Based Motion Planning with Automatically Derived Extension Heuristics”, *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, o. 2537–2542, 2012, doi: 10.1109/ICRA.2012.6225177.
- [15] P. Fankhauser és M. Hutter, „A Universal Grid Map Library: Implementation and Use Case for Rough Terrain Navigation”, in *Robot Operating System (ROS) – The Complete Reference (Volume 1)*, A. Koubaa, Szerk. Springer, 2016.
- [16] R. Alur és mtsai., „The algorithmic analysis of hybrid systems”, *Theor. Comput. Sci.*, köt. 138, sz. 1, o. 3–34, 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0304-3975\(94\)00202-T](https://doi.org/10.1016/0304-3975(94)00202-T).
- [17] T. A. Henzinger, „The Theory of Hybrid Automata”, in *Verification of Digital and Hybrid Systems*, M. K. Inan és R. P. Kurshan, Szerk. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000, o. 265–292.

Kamera-Lidar Kalibráció

Camera-Lidar Calibration

Hollósi János^a, Ballagi Áron^b

^aSzéchenyi István Egyetem, Informatika Tanszék
hollosi.janos@sze.hu

^bSzéchenyi István Egyetem, Automatizálási Tanszék
ballagi@sze.hu

Absztrakt: Az önvezető járművek fejlesztése során fontos szempont a jármű környezetének érzékelése különféle szenzorok útján, mint kamera vagy lidar. Ezek a szenzorok külön-külön is nagyon hatékonyan alkalmazhatók számos feladat esetén, azonban együttes alkalmazásuk pontosabb és megbízhatóbb környezet érzékelést és megértést tesz lehetővé. Ebben a cikkben megmutatjuk, hogyan lehetséges a kamera és lidar adatokat összehangolni. Munkánk során egy Stereolabs ZED kamerát és egy Ouster OS1 lidart használtunk. A Kamera és lidar kalibrációjának eredményeként a lidar pontfelhő pontjai egyértelműen hozzárendelhetők egy képponthez a kamera képén. Így lehetőség nyílik arra, hogy összetettebb, magasabb szintű környezetdetektáló algoritmusokat fejlesszünk a jövőben.

Kulcsszavak: kamera lidar kalibráció, környezet detektálás, önvezető járművek

Abstract: An important aspect of the autonomous vehicle development is the vehicle environment detection with various sensors, such as camera or lidar. These sensors can be used very effectively for many tasks, but when used camera and lidar together, they allow for more accurate and reliable environment detection and environment understanding. In this paper, we show how to merge camera and lidar data. We used a Stereolabs ZED camera and an Ouster OS1 lidar in our work. As a result of camera and lidar calibration, lidar pointcloud points can be clearly assigned to a pixel in the camera image. This will allow to develop more complex, higher-level environment detection algorithms in the future.

Keywords: camera lidar calibration, environment detection, autonomous vehicles

1. Bevezetés

Az önvezető járművek egyik fontos kritériuma, hogy különféle szenzorok útján képes legyen érzékelni a saját környezetét. Tegye mindezt úgy, hogy valamilyen szinten tisztában legyen a környezetében található különféle objektumok jelenlétével, és a környezetében végbemenő változásokkal. Ehhez szükséges, hogy valamilyen környezet érzékelésére alkalmas szenzor útján információkat gyűjtsön, és valamilyen módon, jellemzően mesterséges intelligencia módszerekkel, képes legyen megérteni és összefüggéseket találni az érzékelt információhalmazban. A környezet érzékelésére ideálisan kamera és lidar szenzorokat célszerű alkalmazni. A szenzoroknak ezt a két fajtáját külön-külön is nagy hatásfokkal lehet használni a környezet megértésére. Ugyanakkor mindkét szenzornak megvan a maga hiányossága a másikhoz képest. Például kamerafelvétel alapján könnyen detektálható egy jármű, de a detektált jármű térbeli helyzetének meghatározása már sokkal nehezebb és kevésbé megbízható. Lidar segítségével ugyanennek a járműnek a helyzete egyszerűen számítható, viszont pusztán a lidar pontfelhőből meghatározni, hogy az érzékelt ponthalmaz egy jármű, már sokkal nehezebb

feladat. Ezért célszerű a két szenzort valamilyen módon fuzionálni a pontosabb és megbízhatóbb detektálás érdekében. A kamera és a lidar adatok összeegyeztetése, úgymond kalibrálása két módon közelíthető meg: minden ponthoz a lidar pontfelhőjén hozzárendelünk egy képpontot a kamera képén, vagy az összes képpontot a kamera felvételén átültetjük a lidar pontfelhőbe. Ebben a tanulmányban az első megközelítéssel fogunk élni, mivel céljainkhoz ez a megközelítés áll közelebb. A megvalósításhoz a Stereolabs ZED [1] típusú passzív sztereó kamerája és az Ouster OS1 [2] típusú kétdimenziós lidarja lett felhasználva. A 2. fejezetben a fúzió első lépése, a kamera kalibrálása kerül tisztázásra, majd a 3. fejezetben a kalibrált kamerakép és a lidar pontfelhő illesztésének menete kerül részletezésre. A 4. fejezetben az elért eredmények szemléltetése és a két szenzor kalibrált adatainak egy lehetséges felhasználása kerül bemutatásra.

2. Kamera kalibrálás

A digitális kamerák felvételein minden esetben számolni kell valamilyen torzítással, amit az éppen alkalmazott lencse határoz meg. Ennek eredményeként a látott térrész valamilyen módon és valamilyen mértékben torzulva jelenik meg a kamera érzékelőjén. Ez a torzítás sok esetben annyira minimális, hogy esztétikailag nem rontja a képnek a minőségét. Ugyanakkor lehet olyan mértékű is, hogy az már egyértelműen észrevehető az emberi szem számára is. Ennél fontosabb, hogy a digitális képfeldolgozás és gépi látás területén kis mértékű torzítás is jelentős problémát eredményezhet. Ezért szükséges ezeket a torzításokat megszüntetni. Erre szolgál az úgynevezett kamera kalibráció. A megvalósítás során a klasszikusnak nevezhető sakktábla-módszer került alkalmazásra. Ebben a megközelítésben egy fekete-fehér, ismert méretű négyzetekből álló sakktábla-szerű mintát helyezünk a kamera látóterébe. A tábláról tudjuk, hogy annak sík a felülete. Ez a sík felület a kamera lencséjén valamilyen mértékben torzulni fog, ami a négyzeteknek köszönhetően könnyen realizálható. A torzítás megszüntetésére látható példa az 1. ábrán.

Legyen I a vizsgált kamerakép és legyen $I(x, y)$ a vizsgált I kép x -edik sorában és y -edik oszlopában található képpont intenzitása. Azt mondhatjuk, hogy az $I(x, y)$ intenzitáshoz hozzá kell rendelni egy új (x', y') pozíciót a kameraképen, amely az intenzitás kalibrált, torzítás mentes helyének tekinthető. Ekkor legyen

$$x' = x + (2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)), \quad (1)$$

$$y' = y + (p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy), \quad (2)$$



1. ábra: A kamera kalibrálás eredménye (balra: kalibrálatlan kép, jobbra: kalibrált kép)

$$x' = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6), \quad (3)$$

és

$$y' = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6), \quad (4)$$

ahol

$$(k_1, k_2, p_1, p_2, k_3) \quad (5)$$

az úgynevezett torzítási együtthatók és

$$r = x^2 + y^2. \quad (6)$$

Legyen

$$M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

a kamera mátrix, ahol f_x és f_y a kamera fókusztávolságát jelenti, valamint c_x és c_y a lencse középpontját adják meg.

A kalibráció célja, hogy az (x, y) koordináta alapján előálljon az (x', y') koordináta úgy, hogy

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Legyen

$$H = (h_1, h_2, h_3) = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{pmatrix} \quad (9)$$

és

$$(r_1, r_2, t) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Ezek alapján azt mondhatjuk, hogy

$$(h_1, h_2, h_3) = M(r_1, r_2, t), \quad (11)$$

ahol

$$r_1 = M^{-1}h_1 \quad (12)$$

és

$$r_2 = M^{-1}h_2. \quad (13)$$

Továbbá

$$h_1^T M^{-T} M^{-1} h_2 = 0 \quad (14)$$

és

$$h_1^T M^{-T} M^{-1} h_1 - h_2^T M^{-T} M^{-1} h_2 = 0. \quad (15)$$

A fenti képletekből az $M^{-T} M^{-1}$ részt írjuk fel a következő módon

$$B = M^{-T} M^{-1} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

ahol M számítható B -ből a Cholesky-felbontás felhasználásával. Legyen

$$V = \begin{pmatrix} v_{12}^T \\ v_{11}^T - v_{22}^T \end{pmatrix}, \quad (17)$$

ahol

$$v_{ij} = (h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, \dots). \quad (18)$$

Ezek alapján

$$Vb = 0 \quad (19)$$

ahol

$$b = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{22}, b_{23}, b_{33}) \quad (20)$$

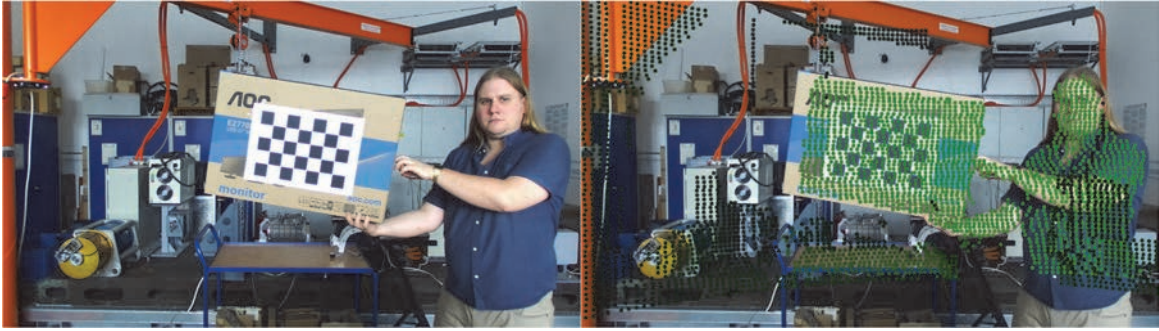
és legyen

$$b = \min_b Vb. \quad (21)$$

A b vektor meghatározásával, majd az értékek visszahelyettesítésével a kalibrálás végrehajtható. Ennek eredményeként olyan kimeneti képet kapunk, amelynek felhasználásával a kamerakép és a lidar pontfelhő kalibrálása megtörténhet.

3. Lidar transzformáció a kamera térbe

A kamera kalibrálása után a kalibrálási paraméterek alapján már keresni lehet a megfelelő transzformációt a kamera kép és a lidar pontfelhő között. Ehhez a kamera kalibrálásához használt kalibráló képek lettek felhasználva. Emiatt volt szükséges, hogy a kinyomtatott sakktábla-szerű mintát egy nagyobb felületen, jelen esetben egy doboz legnagyobb oldalán

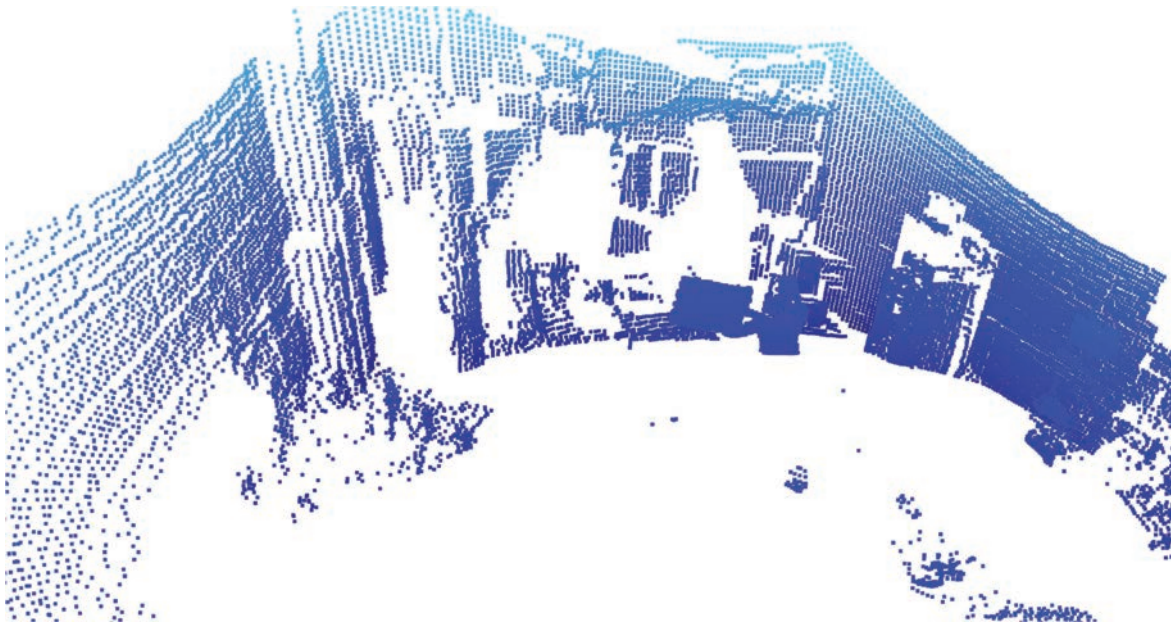


3. ábra: Lidar pontfelhő illesztése a kamera képre

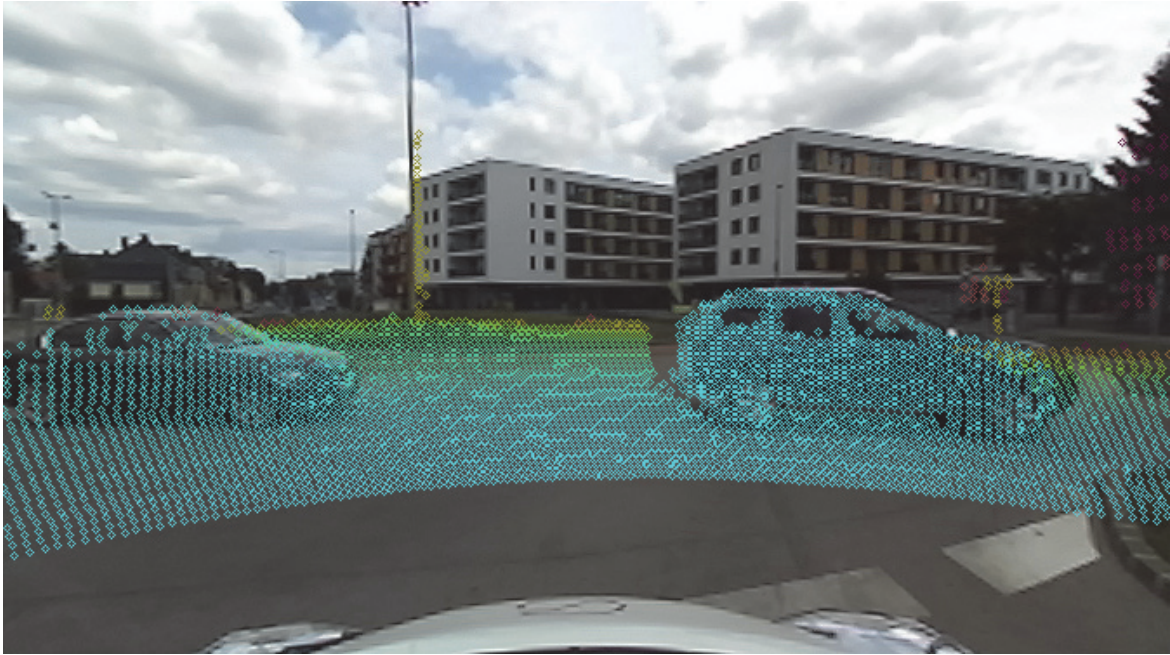
kerüljön elhelyezésre. A transzformáció meghatározásához olyan kamera és lidar felvételeket kellett készíteni, melyeken egyaránt látszik a doboz. Első lépésként ki kellett jelölni meghatározott pontokat a kamera képen és a lidar pontfelhőn egyaránt. A számításhoz 6 darab pontot vettünk figyelembe: a doboz legnagyobb oldalának 4 sarokpontját, illetve a hosszabbik élének középpontját. Ugyanezt a 6 pontot kellett realizálni a kamera képen és ugyanabban az időpillanatban készült lidar felvételen is. Ilyen módon rendelkezésre állt 6 darab síkbeli (u, v) koordináta a kamera képen, és ezekhez tartozó szintén 6 darab (x, y, z) térbeli koordináta a pontfelhő alapján. A cél egy olyan transzformáció leírása, amely egy adott térbeli koordináta számhármából előállítja a hozzá tartozó kamerasisík-beli számkettest.

Legyen

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (22)$$



2. ábra: Illesztett pontfelhő a virtuális térben



4. ábra: A lidar pontfelhő és kamera kép egyesítésének eredménye forgalmi szituációban

ahol x , y és z egy adott pont a lidar pontfelhőn és u valamint v az ehhez a ponthoz tartozó síkbeli pont a kamera képén. A transzformáció létrehozásához a következő minimalizációs optimalizálást kell elvégezni

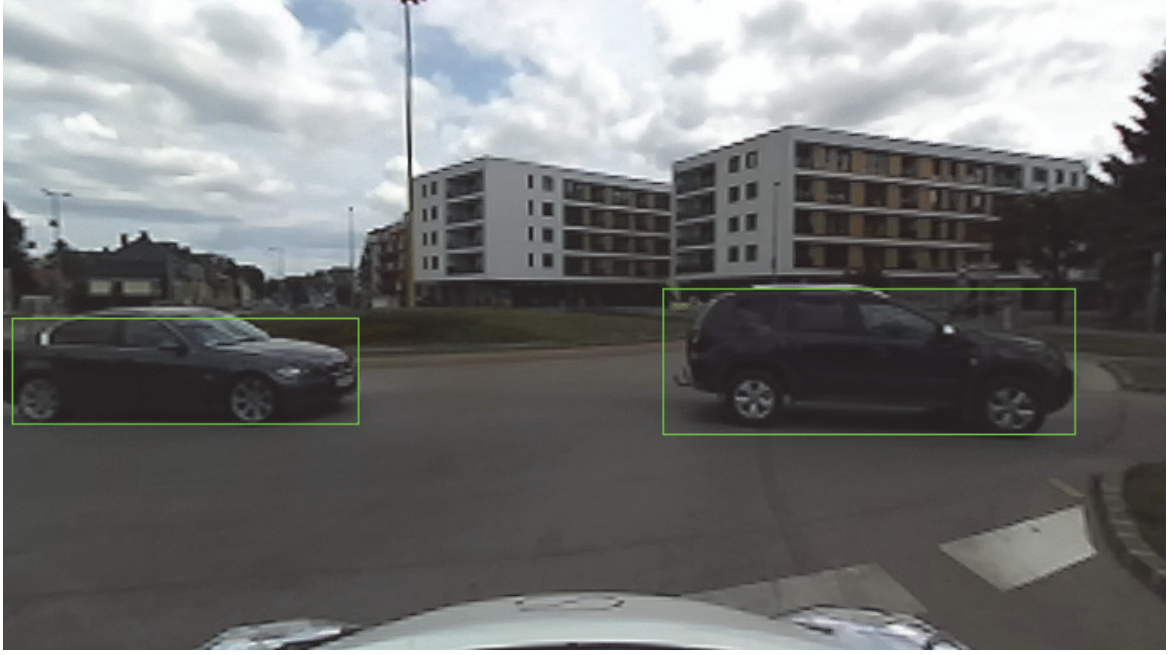
$$\min_{R \in SO(3), t \in \mathbb{R}^3} \|P(RX + t) - x\|^2, \quad (23)$$

ahol $x = (u, v)$ a kamera képpontja, $X = (x, y, z)$ a lidar pontfelhő pontja és P a projekciós operátor. Az optimalizálási feladat az SLSQP (Sequential Least Squares Programming) [3] módszerrel lett megvalósítva, ahol a számításhoz a Han-Powell féle kvázi-Newton módszer, és a BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) eljárás került alkalmazásra.

4. Eredmények

A 2. ábrán a lidar pontfelhő illesztésének az eredménye látható, egy a kalibráláshoz használt felvétel esetén. A felvételhez tartozó lidar pontfelhő vizualizációját a 3. ábra szemlélteti. A 4. ábrán egy további mintakép látható az illesztés sikerességére, immár közúti szituációban. A megvalósításnak köszönhetően lehetővé válik, hogy a lidar által mért távolsági adatok és a vizuális érzékelésre épülő detektáló algoritmusok eredménye egyesíthetővé válik. Ilyen módon például a kamera által rögzített képen detektált járművekhez, és a forgalom egyéb résztvevőihöz azok valós távolsága rendelhető.

A detektálás eredményének lidar adaton történő értelmezéséhez a YOLO [4] mesterséges neurális hálózat került felhasználásra. A YOLO hálózat segítségével különféle objektumokat lehet detektálni. Amik a feladat szempontjából hangsúlyosak, azok a forgalom résztvevői, úgymint személygépjárművel, tehergépjárművek, autóbuszok és motorkerékpárok. Ezeknek az objektumoknak a képsíkban történő detektálására lett kiképezve a mesterséges neurális hálózat. A megvalósítás során a Keras [5] keretrendszer került felhasználásra, amihez a Tensorflow [6] backend került alkalmazásra. Az alkalmazott architektúra sajátossága, hogy az nem



5. ábra: Jármű detektálás eredménye

úgynevezett szegmentált képet ad eredményül, hanem befoglaló geometriát rendel a felismert objektumokhoz. A szegmentálás során minden egyes képpontról eldöntésre kerül, hogy az melyik előre megadott osztálykategóriába tartozik. Ennél a megközelítésnél ettől egyszerűbb és gyorsan megoldásról van szó. A detektálás kimenetét szemlélteti az 5. ábra. A megvalósításban a neurális hálózat kimenete a következő lista

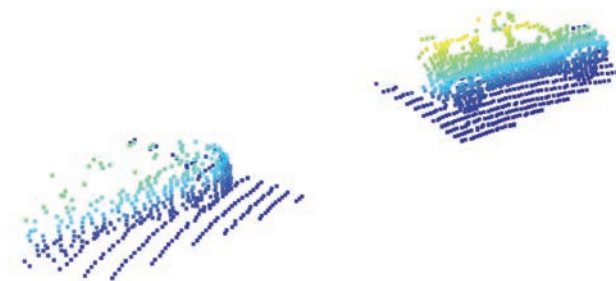
$$R = (r_1, r_2, r_3, \dots, r_n), \quad (24)$$

ahol adott r_i ($i \in [1, n]$) az i -edik detektált objektumhoz tartozó leíró. Minden $i \in [1, n]$ esetén

$$r_i = (t, l, b, r, c), \quad (25)$$

ahol a befoglaló téglalap geometria bal felső sarkának koordinátája (t, l) , jobb alsó koordinátája (b, r) és c az objektum osztálykategóriája.

Ahhoz, hogy az önvezető autó realizálja a közelében található járművek távolságát, nem szükséges, hogy képpont szintű osztályozás történjen. Elégséges, ha közelítőleg tudja, hogy hol található a jármű. Ez alapján az ütközés elkerülése és az akadály kikerülése már megvalósítható. Szükséges a felismert objektumokat detektálni a lidar pontfelhőn is. Ez a következő módon történt. Legyen X az aktuálisan vizsgált lidar pont, R a detektált objektumok listája és (u, v) az X ponthoz tartozó képpont a kamera képén. Ha $\exists i \in [1, n]$ úgy, hogy $t \leq u \leq b$ és $l \leq v \leq r$ igaz, ahol $r_i = (t, l, b, r, c)$, akkor a vizsgált X pont az i -edik objektumhoz tartozik és osztálykategóriája c . A 6. ábrán látható a jármű detektálás eredménye a lidar adaton értelmezve.



6. ábra: Detektált járművek a lidar pontfelhőn

5. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Stereolabs ZED, <https://www.stereolabs.com/zed/> [utolsó hozzáférés: 2020. június 15.]
- [2] Ouster OS1, <https://ouster.com/products/os1-lidar-sensor/> [utolsó hozzáférés: 2020. június 15.]
- [3] D. Kraft, A software package for sequential quadratic programming. 1988. Tech. Rep. DFVLR-FB 88-28, DLR German Aerospace Center – Institute for Flight Mechanics, Koln, Germany.
- [4] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick & A. Farhadi, You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, 2016, 779-788 o., doi: 10.1109/CVPR.2016.91
- [5] F. Chollet, Keras, 2015. <https://keras.io> [utolsó hozzáférés: 2020. június 15.]
- [6] A. Martín et al., 2016. Tensorflow: A system for large-scale machine learning. In 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation, 265–283 o.

A golyósoros hajtómű szilárdsági vizsgálata

The strenght test of a ball row power unit

Dr. Polák József¹

¹Széchenyi István Egyetem, Közúti és Vasúti Járművek Tanszék
polakj@ga.sze.hu

Absztrakt: Célunk egy új típusú közlőelemes (golyósoros) hajtómű statikus és dinamikus viselkedésének a vizsgálata, hogy megtaláljuk az adott hajtómű esetén optimálisan alkalmazható szilárdsági méretezési eljárást. A vizsgálat folyamán igyekszünk feltárni azokat a paramétereket, amelyek később egy energetikai optimalizálás bemenő paramétereiként is felhasználhatók lesznek. Távlati céljaink közé tartozik egy olyan matematikai modell megalkotása, amely segítségével a hajtómű modell implementálható lesz egy adott gépjármű motor-hajtómű-jármű együttesének az energetikai optimalizálási algoritmusába. Ebben a cikkben egy adott hajtómű szilárdsági ellenőrzését végezzük el hagyományos módszerrel.

Kulcsszavak: fizikai modell, matematikai modell, Hertz feszültség

Abstract: Our aim is to investigate the static and dynamic behavior of a new type of transmission (ball-row) powertrain unit in order to find the optimally applicable strength sizing method. During the investigation we try to locate the parameters that can be used as input parameters for an energy optimization, because our long-term goals include the creation of a mathematical model that can be used to implement the engine model. algorithm. In this paper, we perform a strength test of a specified powertrain unit with a conventional method.

Keywords: physical model, mathematical model, Hertz stress

1. Bevezetés

Egy magyar szabadalomban leírt gördülőelemes hajtómű kutatására nyílt lehetőségünk [1]. Ezzel a szerkezettel többféle tengelyelrendezéssel nagy fordulatszám-nyomaték áttételek valósíthatók meg, és jó hatásfokkal használható a villamos járművek hajtóműjeként. Az alkalmazás kezdetén fontos kérdés a hajtómű dinamikai viselkedésének a vizsgálata, és a hajtómű elemeinek a méretezése. Az előtervezés során már szilárdsági szempontokat is figyelembe kell venni. A szilárdsági méretezés első lépéseként olyan analitikus méretezési eljárásokat alkalmazunk, mint a Hertz feszültség meghatározása vagy az EHD (elasztohidrodinamikus kenéselmélet), amelyek segítségével elfogadható pontosságú gyors szilárdsági méretezés végezhető. A modellek pontosítása lehetőséget nyújt arra, hogy a későbbiekben nagyobb pontosságú végelelemes vizsgálatokat végezhesünk el.

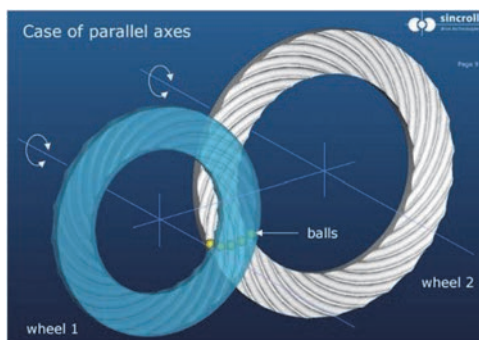
2. A hajtómű modellezése

2.1 A hajtómű fizikai modelljének felállítása

A fizikai modell létrehozásához meg kell határozni, hogy a modell milyen mennyiségeket foglal magába, milyen feltételek mellett [2]:

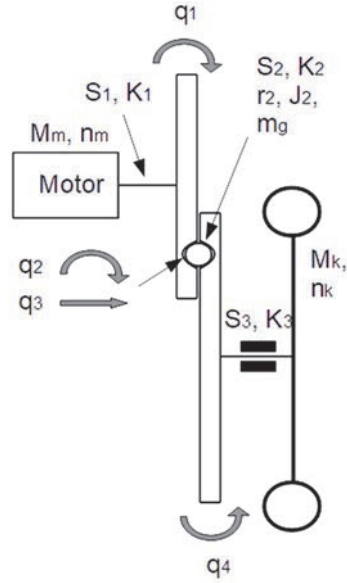
- a járművet hajtó villamosmotor nyomatékát (behajtó nyomaték) és fordulatszámát,
- a golyósoros hajtóművet jellemző mennyiségeket (ideálisan merev golyó- pálya kapcsolattal) (2. ábra): a golyó tömegét, a golyó (mint közvetítő elem a két tárcsa között) és a tengelyek rugalmasságát illetve a veszteségforrásokat,
- a jármű vonóerő igényéből adódó terhelő nyomatékot (kihajtó nyomaték) és a kihajtótengely fordulatszámát.

A golyósoros hajtóműveknél nagyszámú elrendezési változat valósítható meg, ezek közül a fizikai modell létrehozásához egy párhuzamos tengelyű elrendezést választottuk, amelynek a 3D vázlata a következő ábrán látható (1. ábra).



1. ábra: A fizikai modell alapjául szolgáló párhuzamos tengelyű elrendezés vázlata

A szerkezeti modellből származtatott fizikai modell a 2. ábrán látható.



2. ábra: A golyósoros hajtómű fizikai modellje

2.2 A hajtómű dinamikai modelljének felépítése

2.2.1 A matematikai modell leírása

Ahhoz, hogy a hajtómű Euler-Lagrange egyenletét fel lehessen állítani, meg kell határozni a hajtómű mozgási energiáját (E), potenciális energiáját (U) és disszipációs függvényét (D) leíró összefüggéseket, amelyek a következők [2, 3]:

$$E = \frac{1}{2} \cdot J_1 \cdot \dot{\phi}_1^2 + \frac{1}{2} \cdot J_2 \cdot \dot{\phi}_2^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} \cdot J_3 \cdot \dot{\phi}_3^2 \quad (1)$$

$$U = 0 \quad (2)$$

$$D = f_D(\underline{\dot{\phi}}, \underline{Q}(t), \dot{x}, \underline{F}(t)) \quad (3)$$

Mivel a hajtómű összes veszteségnyomatéka ($M_{\Sigma v}$) a disszipációs függvényben lett meghatározva, ezért a parciális deriváltja a következő formába hozható:

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{q}} = \frac{\partial f_D(\underline{\dot{\phi}}, \underline{Q}(t), \dot{x}, \underline{F}(t))}{\partial \dot{q}} = M_{\Sigma v} \quad (4)$$

Az összefüggésből látható, hogy a deriválás eredménye a hajtómű összes veszteségnyomatéka, amely a veszteségtagok összegeként adható meg a következő alakban:

$$M_{\Sigma v} = M_{csu_v} + M_{gv} + M_{csv} + M_{ov} + M_{lv} + M_{tv} \quad (5)$$

- $M_{\Sigma v}$: a hajtómű összes veszteségnyomatéka,
- M_{csu_v} : a golyó és a pálya csúszósúrlódási veszteségnyomatéka,
- M_{gv} : a golyó és a pálya gördülősúrlódási veszteségnyomatéka,

- M_{csv} : a csapágyazás veszteségnyomatéka,
- M_{ov} : az olajkavarás veszteségnyomatéka,
- M_{lv} : a légkavarás veszteségnyomatéka,
- M_{tv} : a tömítéssúrlódás veszteségnyomatéka.

Ahhoz, hogy a hajtómű mozgási egyenletét fel tudjuk írni, meg kell határozni a behajtótárcsa és a golyó közötti kapcsolatot. Ez azért is nagyon fontos, mert amíg ezt nem ismerjük, addig a golyó mozgását nem tudjuk egyértelműen leírni. A kapcsolat meghatározásához be kell vezetni egy új paramétert, amely nem más, mint a belső áttétel. A belső áttétel megmutatja, hogy a behajtó tárcsa egy fordulatra a közvetítő golyó hány fordulatot tesz meg. A belső áttétel (i_{1g}) meghatározása elméletben a hajtótárcsa fordulatszámának (n_1) és a golyó fordulatszámának (n_g) a hányadosaként határozható meg:

$$i_{1g} = \frac{n_1}{n_g} \quad (6)$$

A belső áttétel meghatározásával már pontosan meghatározhatjuk a golyó mozgásviszonyait a hajtómű mozgásegyenletében.

A kapott eredményeket összegezve határozható meg a hajtómű mozgásegyenlete, amely a következő formában adható meg:

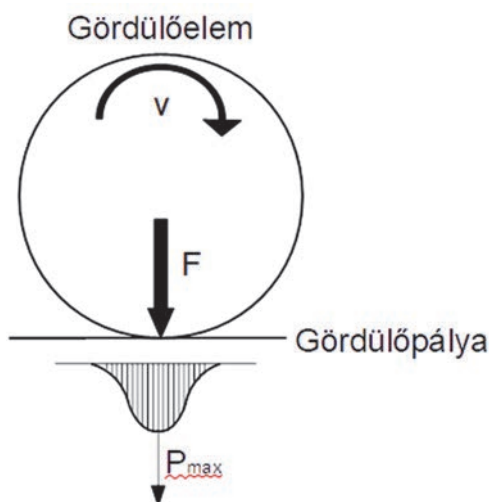
$$\ddot{\varphi} \cdot \left(J_1 + J_2 \cdot \frac{1}{i_{1g}^2} + J_3 \cdot \frac{1}{i^2} \right) + \ddot{x} \cdot m_g + M_{\Sigma v} + 0 = Q(t) \quad (7)$$

A mozgásegyenlet ismeretében a modell mind kvázistacioner esetekben (meghatározott munkapontokon), mind dinamikusan (lassulási és gyorsulási szakaszokban) vizsgálhatóvá és elemezhetővé válik.

3. A golyó és a pálya igénybevételének és méretezésének vizsgálata

3.1 Klasszikus méretezési eljárás

A golyósoros hajtóműben a golyóknak a pályákba való benyomódása következtében keletkező deformációk miatt a golyók és a pályák felszínén jelentős mértékű alakváltozás történik, a felületen ún. Hertz feszültség keletkezik. Az ismétlődő igénybevételek hatására a hornyok és a golyók felületi rétegei elfáradnak, apró ún. mikrorepedések keletkeznek, majd ezen repedések tovább terjednek, és ennek eredményeként a felületi réteg lepattogzódik, kigödrösödik, hasonlóképpen, mint a golyóscsapágyak esetén (3. ábra).



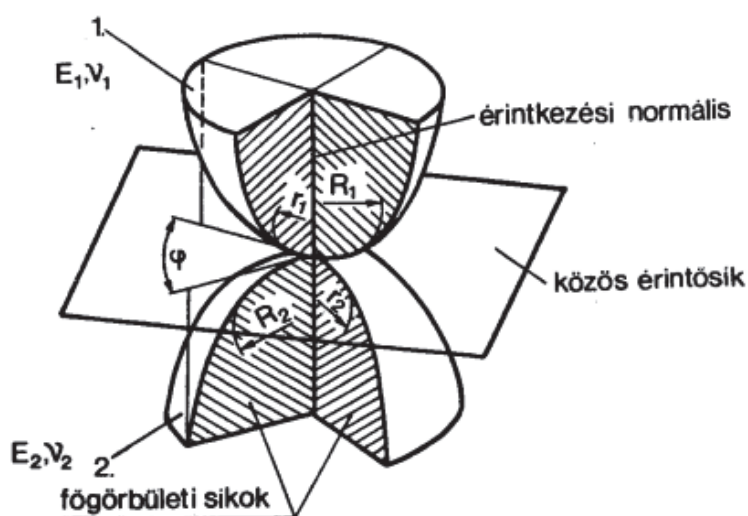
3. ábra: A gördülőpályában kialakuló Hertz feszültség a gördülőelem- pálya érintkezési pontjában.

Az érintkezési feszültségek, valamint deformációk vizsgálatát elsőként Hertz fizikus végezte el, és a mai napig vezető méretezési elvként alkalmazzák a gyakorlati életben olyan eseteknél, amikor az alkatrészek között pontszerű vagy vonali érintkezés van [4]. Azóta számos más méretezési eljárást kidolgoztak, amelyek a valóságot jobban megközelítik, ezek azonban még mindig nehezen valósíthatók meg.

A golyósoros hajtóműben hasonló geometriájú testek érintkeznek, mint egy golyósorsóban, vagy golyóscsapágyban.

A Hertz elmélet alkalmazásához a következő feltételeknek kell teljesülnie (4. ábra):

- A testek anyaga homogén és izotrop.
- Érvényes a testek anyagára a Hooke-törvény.
- Az érintkezési felületek nagysága a testek méreteihez képest kicsi.
- A testek között súrlódás nem ébred.
- A terhelés merőleges a testek közös érintősíkjára.



4. ábra: A pontszerűen érintkező testek geometriai adatai a Hertz feszültség meghatározásához

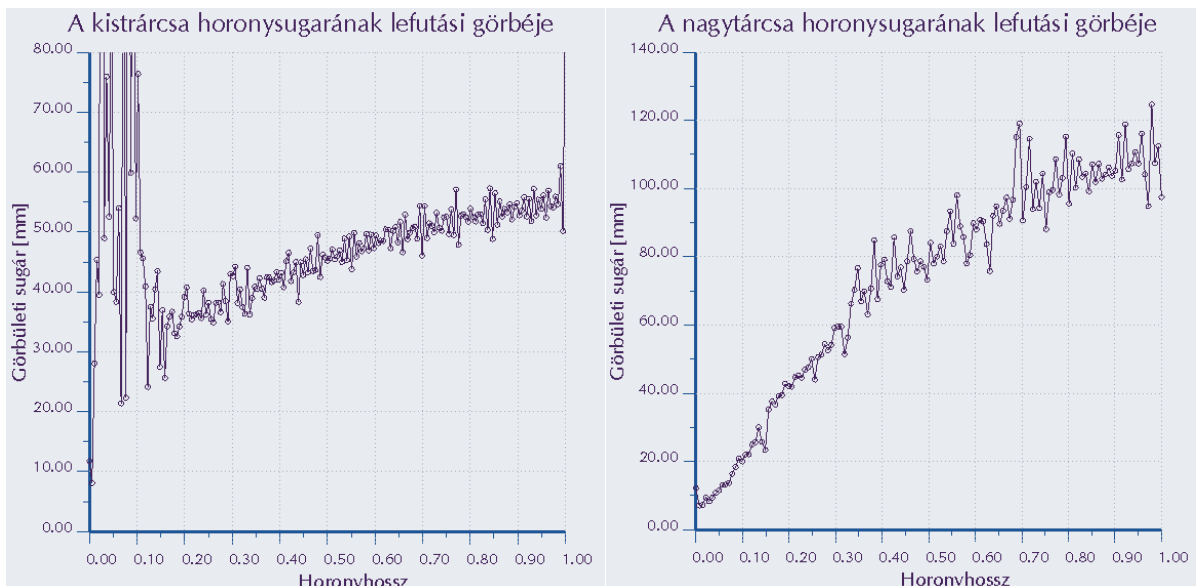
Két görbefulékű rugalmas test egymással pontszerűen, vagy pedig vonalmentén érintkezhét. Az érintkezési felület terhelés hatására, rugalmas deformáció útján alakul ki. Alakja

a testek geometriájától, és a rugalmassági tényezőjüktől függ. Egy görbefelületű test felületének bármely pontjában felvehető egy érintősík, amelyre merőlegesen egy érintkezési normálist lehet állítani. Ha erre a normálisra tetszőleges irányú síkot fektetünk, a test felületéből kimetsz egy görbét. A görbék görbületi sugarának reciproka a görbület. Ezek között a legkisebbnek és a legnagyobbak kitüntetett szerepe van, ezek a főgörbületek. A főgörbületekhez tartozó sugarakat főgörbületi sugaraknak nevezik (R , r [mm]). Ezeket a sugarakat főgörbületi síkok foglalják magukba, amelyek mindig merőlegesek egymásra.

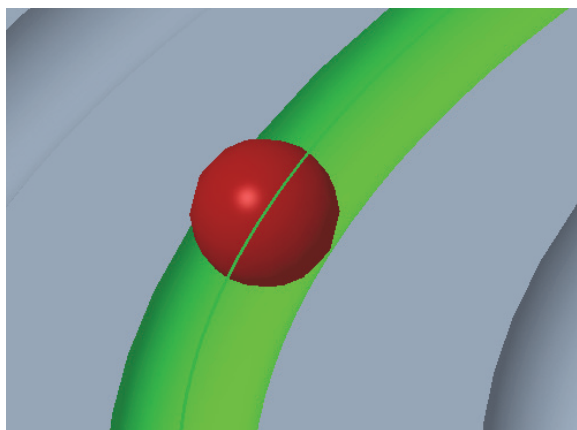
A golyósrörös hajtómű esetében pontszerű érintkezés jön létre a golyó és a tárcsák között. A deformációk és feszültségek meghatározásához ismerni kell a terhelő erőt, a két test rugalmassági modulusát (E_1 , E_2), a testek Poisson-tényezőit (ν_1 , ν_2), illetve a két test geometriai jellemzőit.

A fellépő Hertz-feszültséget $d_w = 6$ mm golyó átmérőnél, $R_1 = 3,1$ mm horony rádiuszánál és $d_e = 96$ mm érintkező átmérőnél vizsgáltuk. (A horonygörbék görbületi sugara lefutás közben folyamatosan változik. A grafikon alapján ez az érték a kistárcsánál 35 és 60 mm között, a nagytárcsánál 10 és 120 mm között változik (5. ábra).)

A következő ábrán látható a horony, és a golyó kapcsolata. Zöld a horony felülete (6. ábra).



5. ábra A horonygörbék görbületi sugarának lefutása. Az x tengelyen a görbék hossza szerepel viszonysszámként.



6. ábra A horony, és a golyó kapcsolata. A horonygörbe zölden látszik, ennek a sugara változik folyamatosan, a többi sugár állandó.

A helyettesítő sugár nagyságát az x és y irányban is meg kell határozni a következő összefüggésekkel:

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_{1x}} \pm \frac{1}{R_{2x}} \quad (8)$$

Ahol R_x a főgörbület és a többi tag a hozzá tartozó legnagyobb és legkisebb görbület a vizsgált pontban. A mínuszjel a másik érintkező test görbületi irányára utal, jelen esetben a horonyra. Úgy értelmezzük az érintkezést, mint ahogyan azt a 4. ábra mutatja.

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{1y}} \pm \frac{1}{R_{2y}} \quad (9)$$

Ahol R_y a másik főgörbület, és a többi tag a hozzá tartozó legnagyobb és legkisebb görbület. A két főgörbület reciprokának összege adja meg a görbületet, amely segítségével meghatározható a Hertz feszültség.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \quad (10)$$

A következő lépésben meg kell határozni a redukált modulust, mely a két érintkező test anyagi jellemzőit foglalja magába, amelyek a Poisson-szám és a rugalmassági modulus.

Ebben az esetben a két test acél, a paramétereiket a modellhez rendelt anyagok anyagkártyáiról határoztuk meg, amelyek a következő táblázatban (7. ábra) láthatók.

Anyagjellemzők	Tárcsák	Golyók
Anyagok	csapágyacél	C45E
Rugalmassági modulus: E [GPa]	208	210
Poisson tényező: ν [-]	0,3	0,3
Folyáshatár: R_{eh} [Mpa]	430	
Keménység [HRC]		62

7. ábra: A tárcsák és a golyók anyag jellemzői

Az érintkező anyagok eredő rugalmassági modulusának meghatározása a következő összefüggéssel végezhető el:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu^2}{E_1} + \frac{1 - \nu^2}{E_2} \quad (11)$$

Az érintkezési pontban kialakuló rugalmas deformáció miatt létrejön egy elliptikus felület, amelynél meg kell határozni az ellipszis átlóit (a, b).

Ahol k elliptikus paraméter a következő összefüggéssel határozható meg:

$$k = 1,0339 \cdot \left(\frac{R_y}{R_x}\right)^{0,636} \quad (12)$$

E(k) másodfajú komplett elliptikus integrál, amelyet a következő összefüggéssel közelítünk:

$$E(k) = 1,0003 + \frac{0,5968R_x}{R_y} \quad (13)$$

F a terhelő erő és R a görbület. A terhelő erőt 0... 450N határoztuk meg, mivel a későbbi szimulációk során a golyón ébredő erő felületre merőleges komponense nagyságrendileg ebben a tartományban ad értékelhető eredményt. A következő összefüggésekkel határozzuk meg az ellipszis átlóit (a,b):

$$a = \sqrt[3]{\frac{3k^2 E(k)FR}{\pi E^*}} \quad (14)$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{3E(k)FR}{\pi k E^*}} \quad (15)$$

A fenti paraméterek ismeretében a pontban kialakuló nyomás értéke a következő összefüggéssel határozható meg:

$$p_0 = \frac{3F}{2\pi ab} \quad (16)$$

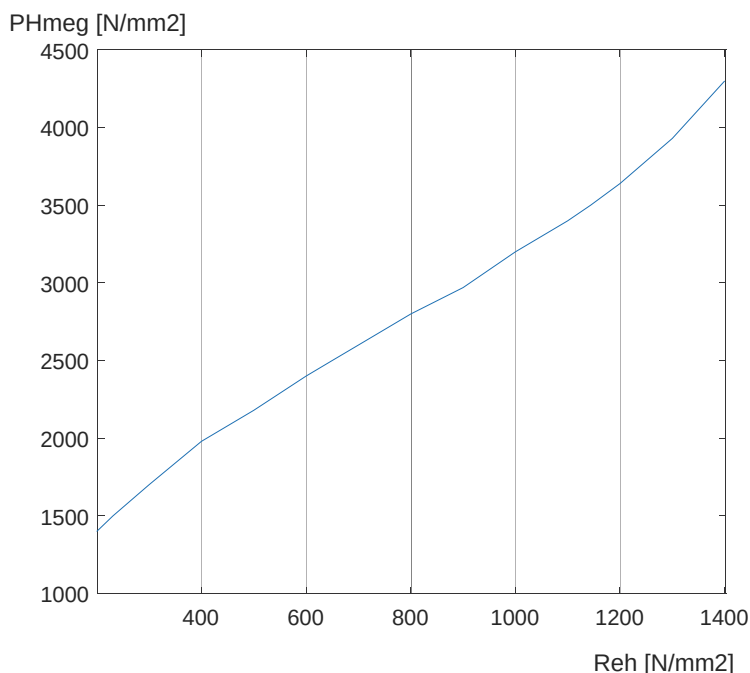
Ha a nyomás kisebb a megengedett értéknél, akkor az alkatrész anyaga felületi nyomásra megfelel. Ebben az esetben a megengedett Hertz-feszültség kb. 2000Mpa ($R_{eh}=430\text{Mpa}$, a 7. ábra alapján), mint ahogy az a 8. ábrán látható. A 9. ábra a műszaki életben alkalmazott acél anyagok folyáshatára (R_{eh}), és a hozzá tartozó maximális Hertz feszültség (P_{Hmeg}) kapcsolatát mutatja be pontszerű érintkezés esetén. A kapcsolat a következő negyedfokú polinommal közelíthető meg:

$$f(x) = p_1 \cdot x^4 + p_2 \cdot x^3 + p_3 \cdot x^2 + p_4 \cdot x + p_5 \quad (17)$$

Ahol az állandók értékei a következők (8. ábra):

Paraméter	Értéke	95%-os megbízhatósággal
p1	4.379e-10	(-1.268e-10, 1.003e-09),
p2	7.968e-08	(-1.749e-06, 1.909e-06),
p3	-0.00187	(-0.003913, 0.0001718),
p4	3.816	(2.912, 4.719),
p5	715.9	(588.3, 843.5),

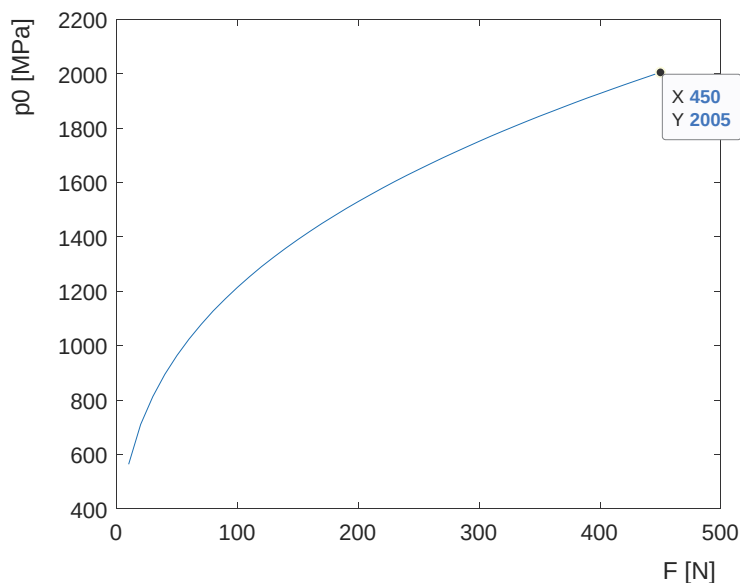
8. ábra: A polinomban szereplő állandók értékei



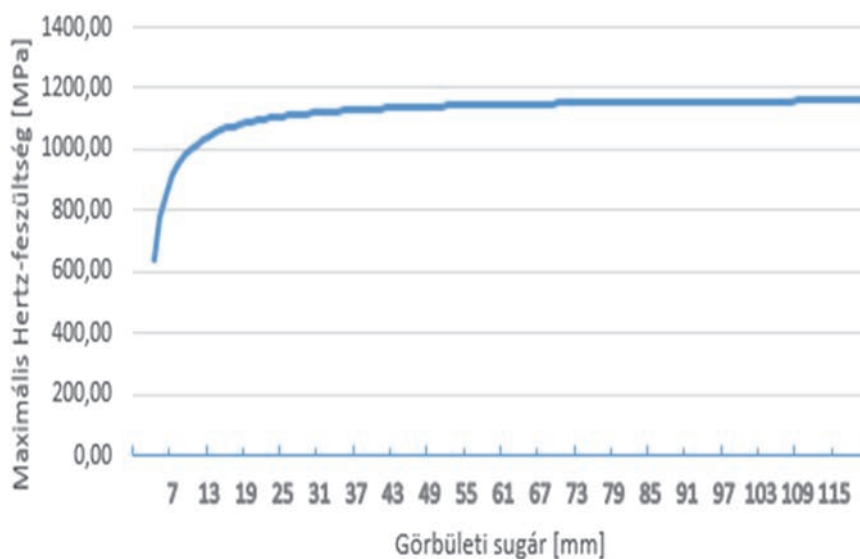
9. ábra: A hertz nyomás és a terhelt anyag folyáshatárának kapcsolata pontszerű érintkezés esetén

A határnyomás ismeretében meghatározható a megengedett maximális nyomóerő, amelyek függvénykapcsolata az általunk tervezett hajtóműre vonatkoztatva a következő ábrán (10. ábra) látható. A számítások egy golyó kapcsolódására vonatkoznak, míg működés közben öt golyó van folyamatos kapcsolatban az általunk vizsgált hajtóműben. Ez azért fontos, mert a vizsgálataink folyamán megállapítottuk, hogy a feszültség a kapcsolatban lévő golyók számának emelésével nem lineárisan, de csökken. Viszont az összes golyó csatlakozása esetén nagyjából egyenletesen oszlik el a feszültség kapcsolódási pontok között.

Ez a számítás egy kitüntetett horonygörbületi sugárra lett elvégezve, de ahogyan az a 11. ábra megfigyelésével is látszik a tárcsákban lévő horonyok görbületváltozásának az intervallumában (10...120 mm) nincs számottevő nyomás különbség ($\Delta p \approx 200$ Mpa).



10. ábra: A nyomóerő és nyomás kapcsolata egy golyó-pálya kapcsolódására vonatkoztatva a tényleges golyósoros hajtóművünk esetén (a terhelőerő $F=0 \dots 450\text{N}$ között változik)



11. ábra: A horony görbületi sugarának hatása a számolt Hertz-feszültségre

3.2 Hidrodinamikai kenéselmélet

A gépészetben sok helyen alkalmaznak olajkenést, amely alkalmazása esetén cél a tiszta folyadéksúrlódási állapot elérése, amelynek jellemzője, hogy az egymáson elmozduló felületeket a köztük lévő olajfilm teljesen elválasztja egymástól, tehát a súrlódási veszteség csak az olajfilmben alakul ki annak nyíródása következtében. Ez a kenési állapot kedvező, mert általában kicsi súrlódással jár (minimális mechanikai veszteségek), a működési környezet hőmérséklete állandósítható, és a kapcsolódó alkatrészek nem kopnak. Ha ez az állapot ki tud alakulni, akkor ez a hidrodinamikai kenés állapota [5].

A gépészetben találhatók viszont olyan alkatrész kapcsolatok, ahol az alkatrészek rosszul simulnak, tehát közöttük pontszerű vagy vonali érintkezés van, ilyen alkatrészek például a fogaskerekek, gördülőcsapágyak, bütykös mechanizmusok, stb..

A vizsgálatok azt mutatták, hogy a hidrodinamikai kenéselmélet nem ad a gyakorlat számára elfogadható megoldást a rosszul simuló felületek között kialakuló kenési és kopási állapot leírására, ezért kidolgoztak egy új elvet, amely az EHD (elasztohidrodinamikai kenéselmélet). Ennek az elméletnek a lényege, hogy a rosszul illeszkedő felületek esetén a terhelés hatására a felületek belapulnak (rugalmas alakváltozás) és a közéjük szorult kenőanyag megnő a viszkozitása.

3.3 Az elasztohidrodinamikai kenéselmélet

A gördülőelemes hajtások és gépelemek (gördülőcsapágyak, golyósoros hajtómű, golyósoros vonó orsók, kormányművek, stb.) esetében a vonóelem (golyó) és pálya kapcsolódási pontján létrejövő terheléseket, nyomásokat, feszültségeket sok esetben a Hertz feszültség alapján határozzák meg.

A golyósoros hajtómű esetén a pálya és a golyó között pontszerű, vagy vonali érintkezés alakul ki,

- amely nem teszi lehetővé az összefüggő kenőfilm kialakulását, ami a hajtómű idő előtti tönkremeneteléhez vezet.
- és a kicsi felület (nagy kontaktfeszültség) miatt csökkenti a hajtómű terhelhetőségét.

Ennek ellenére az a gyakorlati tapasztalat, hogy ezek az alkatrészek kapcsolatok lényegesen nagyobb terheléseket elviselnek, mint az elméleti úton meghatározott érték. Ennek oka, hogy a nagy terhelés és a felületek közé szorult kenőanyag eldeformálja az alkatrészek felületét úgy, hogy közöttük párhuzamos kenőfilmréteg alakul ki, miközben a kenőfilmben kialakuló nyomás eloszlás Hertz elmélete szerint alakul [6, 7].

Ez a hatás az által lehetséges, hogy a nagy felületi nyomás miatt a kenőanyag megnő a viszkozitása, amely következő összefüggéssel írható le:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{kp} \quad (18)$$

$$k = (0,6 + 0,965(3 + \lg \eta_0)) \times 10^{-2} = (0,01 - 0,04) \frac{mm^2}{N} \quad (19)$$

η_0 : normál viszkozitás [Ns/m²],

p : nyomás értéke a vizsgálati helyen [Mpa],

Ha ezt behelyettesítjük a két párhuzamos tengelyű henger érintkezésénél kialakuló hidrodinamikai nyomás meghatározásához létrehozott Reynolds egyenletbe:

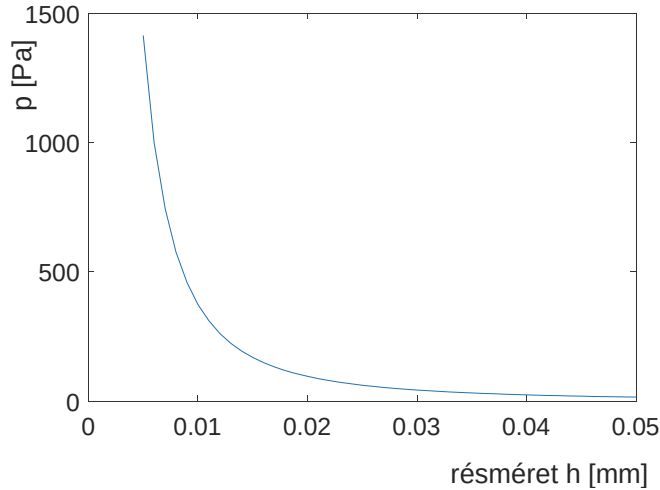
$$\frac{dp}{dx} = 6 \cdot \eta_0 \cdot e^{kp} \cdot U \frac{h - h^*}{h^3} \quad (20)$$

U : a felületek normálirányú mozgási sebessége [m/s],

h : résméret [μ m],

h^* : résméret a legnagyobb nyomású helyen [μ m],

Az alkatrészek illeszkedése mentén vizsgálva a kenőolajban kialakuló nyomást, jól látható, hogy a szűkülő rés felé haladva a kenőanyag nyomása exponenciálisan növekszik (12. ábra).

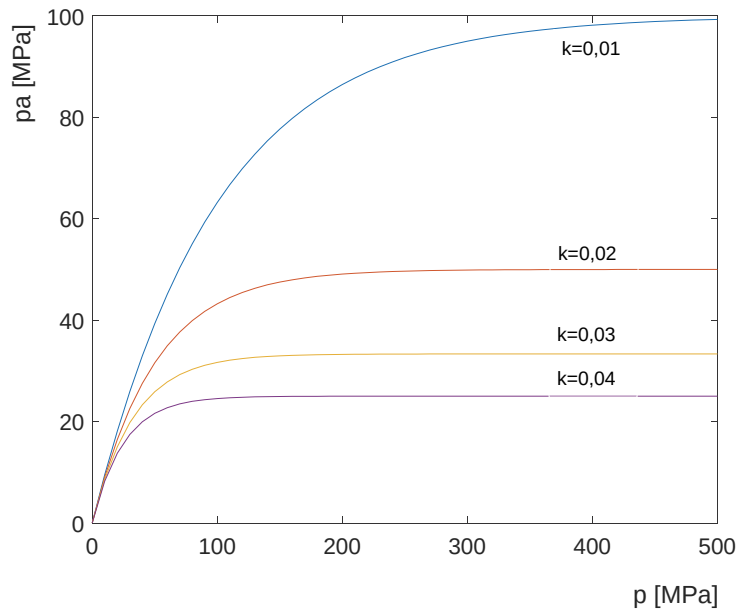


12. ábra: Az ívelt felületek között kialakuló hidrodinamikai nyomásváltozás tangenciális mozgás esetén az 20-as összefüggés alapján ($\eta_0=220\text{mPas}$, $k=0,04\text{mm}^2/\text{N}$, $U=10\text{m/s}$, $h_0=0,5\mu\text{m}$, $h=0,005\dots0,05\text{mm}$)

A 20. összefüggés alapján kimutatható, hogy a felületek úgy deformálódnak, hogy közöttük párhuzamos kenőfilm alakul ki, miközben a kenőfilmbe a nyomáseloszlás és az érintkezési feszültségeloszlás a Hertz feszültségelméletet követi.

A jelenség pontosabb leírásához be kell vezetni a redukált nyomás (p_a) fogalmát, amely a következő módon határozható meg:

$$\frac{dp_a}{dx} = e^{-kp} \frac{dp}{dx}, \quad p_a = \int -\frac{1}{k} \frac{d}{dx} (e^{-kp}), \quad \text{ha } p \rightarrow 0, p_a \rightarrow 0, \quad p_a = \frac{1 - e^{-kp}}{k} \quad (21)$$

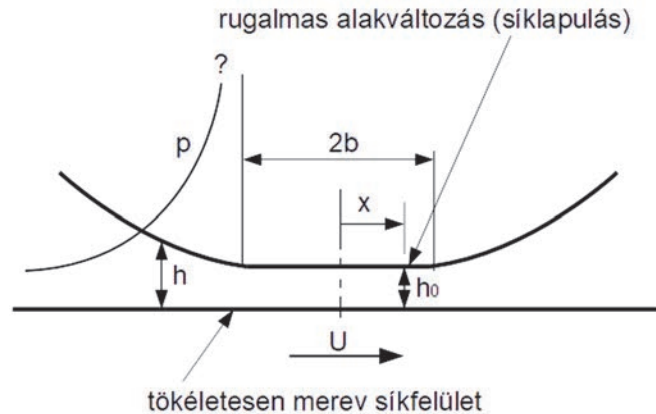


13. ábra: A redukált nyomás alakulása a felületek között kialakuló nyomás függvényében

A 13. ábra vizsgálatával megállapítható, hogy a nyomás növekedésével a redukált nyomás egy határértékhez tart, ami arra utal, hogy párhuzamos kenőfilm réteg alakul ki ($h-h^* \Rightarrow 0$). A kenőfilm vastagságának a meghatározásához az érintkezési terület előtti rés alakját kell figyelembe venni a redukált nyomásra felírt egyszerűsített Reynolds egyenlet (20) megoldásakor.

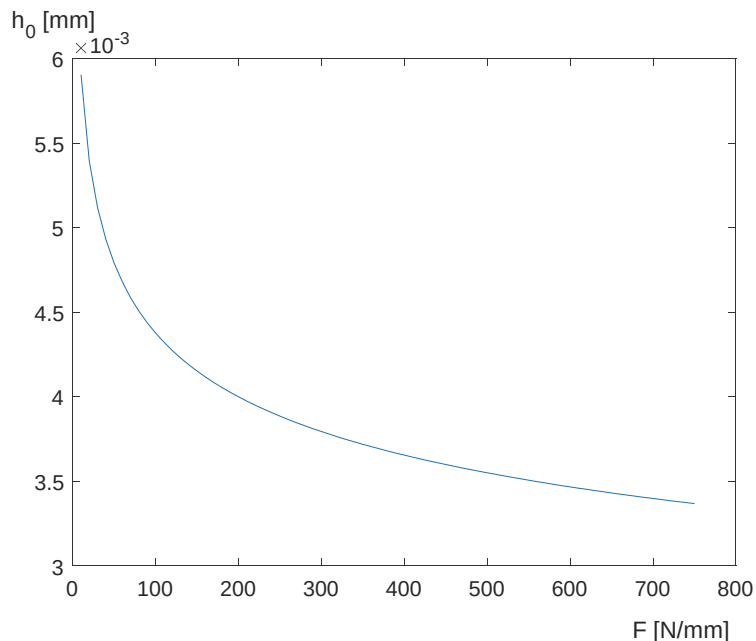
Az egyenlet úgy oldható meg, hogy a henger a rugalmastartományán belül lapul be, az ellenkező felület pedig tökéletesen merev (14. ábra). Ezek mellett a feltételek mellett numerikusan oldható meg a differenciálegyenlet a következő összefüggéssel:

$$\frac{h_0}{R} = 0,88 \cdot (k \cdot E)^{0,6} \cdot \left(\frac{\eta_0 \cdot U}{E \cdot R} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{b \cdot E \cdot R}{F} \right)^{0,13} \quad (22)$$



14. ábra: Az alkatrészek deformációja az érintkezési zónában

A következő ábrát (15. ábra) vizsgálva megállapítható, hogy a fajlagos terhelőerő növekedésével a kenőfilmréteg folyamatosan csökken.

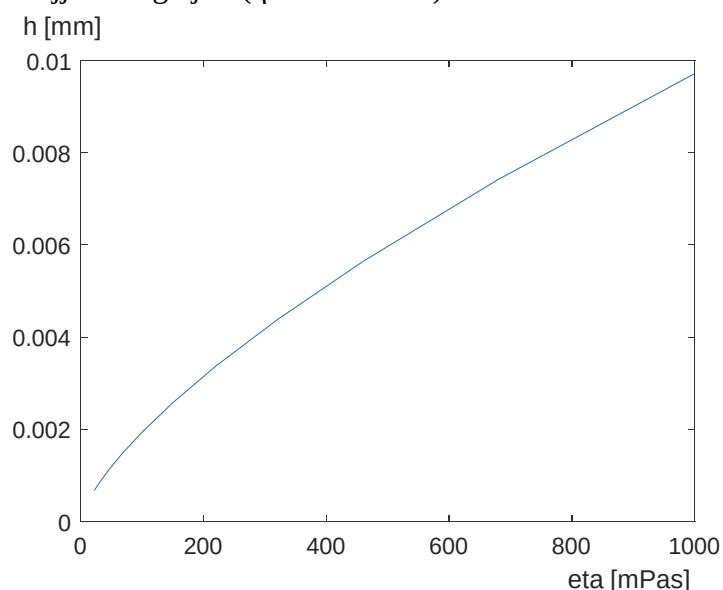


15. ábra: A kenőfilm réteg vastagságának a változása a fajlagos terhelő erő függvényében a 22. összefüggésből meghatározva: ($\eta_0=220\text{mPas}$, $k=0,02\text{mm}^2/\text{N}$, $U=6\text{m/s}$, $b=0,61\text{mm}$, $E=210\,000\text{Mpa}$, $R=100\text{mm}$, $F=0\dots 750\text{N/mm}$)

A fent bemutatott elmélet segítségével és kidolgozásával javítható hajtómű szilárdsági méretezése és ez által a tervezéskor létrehozott geometriák méretének pontosabb meghatározása.

A kenőfilm rétegvastagságának az elméleti vizsgálata a kenőolaj viszkozitás változásának a függvényében szintén elvégezhető a 22. összefüggés segítségével. A vizsgálat eredménye a

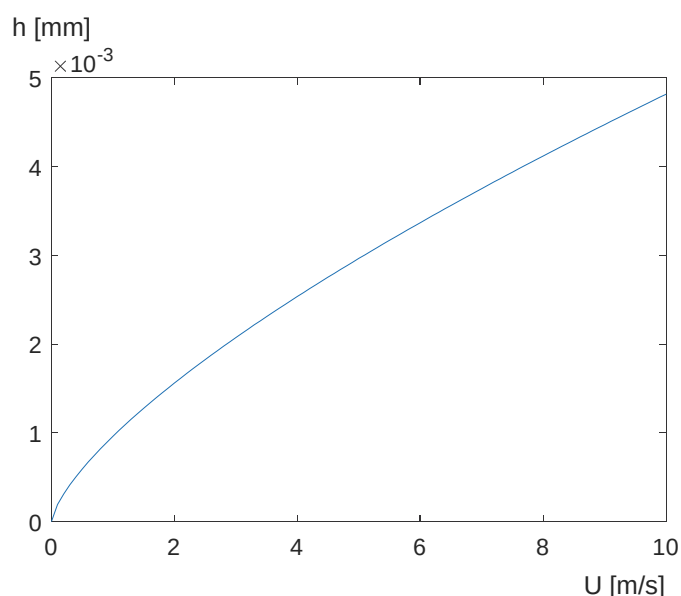
következő ábrán (16. ábra) látható. Az ábráról megállapítható, hogy a kenőolaj viszkozitása jelentős hatással van a kenőanyag rétegvastagságára, mert akár egy nagyságrendet is változhat a rétegvastagság, ha a kereskedelmi forgalomba kapható kenőolajat a választható paletta két végéről választott olajjal vizsgáljuk ($\eta_0=22\dots 1000$).



16. ábra: A kenőfilm réteg vastagságának a változása a kenőolaj viszkozitás változásának a függvényében a 22. összefüggésből meghatározva:

($\eta_0=22\dots 1000$ mPas, $k=0,02\text{mm}^2/\text{N}$, $U=6\text{m/s}$, $b=0,61\text{mm}$, $E=210\,000\text{Mpa}$, $R=100\text{mm}$, $F=750\text{N/mm}$)

A kenőfilm rétegvastagságára hatást gyakorol az egymáson elmozduló felületek sebesség különbsége is. Az elvégzett elméleti vizsgálat alapján megállapítható, a sebesség hatása kevésbé jelentős, mint a kenőolaj viszkozitása, de nem elhanyagolható. A 17. ábra alapján megállapítható, hogy a sebesség különbség növelésével növekszik a kenőfilmréteg a két felület között.



17. ábra: A kenőfilm réteg vastagságának a változása a kenőolaj viszkozitás változásának a függvényében a 22. összefüggésből meghatározva:

($\eta_0=220\text{mPas}$, $k=0,02\text{mm}^2/\text{N}$, $U=0\dots 10\text{m/s}$, $b=0,61\text{mm}$, $E=210\,000\text{Mpa}$, $R=100\text{mm}$, $F=750\text{N/mm}$)

4. Összefoglalás

A cikkben bemutatott modellezési eljárással kísérletet teszünk arra, hogy egy újtípusú hajtómű esetén megállapítsuk a hajtómű dinamikai viselkedését és ezáltal már a tervezési fázisban modellezni tudjuk a hajtómű jellemző tulajdonságait. A hajtómű mozgási egyenletének a felállításával a hajtómű vizsgálhatóvá válik a stacioner (munkaponti) és az instacioner (gyorsítás, fékezés) állapotokban. A hajtómű dinamikai viselkedése mellett kulcsfontosságú a hajtómű közelítő szilárdsági méretezése, amely hatással van a hajtómű méretére és tömegére, amelyek fontos paraméterek, mivel hatással vannak a hajtómű beépíthetőségére és a jármű összes tömegére. Kezdetben a szilárdsági méretezésre a hagyományosan alkalmazott Hertz módszert alkalmazzuk, amelyet a későbbiekben kibővítünk az EHD módszerrel. Az analitikus módszerek megfelelő alkalmazásából gyűjtött tapasztalatokat felhasználva pedig létrehozunk egy olyan modellt, amely segítségével végesek elem analízist is tudunk végezni a pontosabb méretezés érdekében, és jó közelítéssel meg tudjuk határozni a hajtómű kenésére alkalmazandó kenőanyag jellemző tulajdonságait.

5. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Őri Péter, Nagy András, Gördülőelemes hajtómű elektromos járművekben történő alkalmazásának kutatása (témabemutató), IFFK 2016, Budapest, 2016
- [2] József Polák, István Lakatos EXAMINATION OF DRIVE LINE MATHEMATICAL MODEL MACHINE DESIGN 8:(1) pp. 33-36. (2016)
- [3] József Polák, István Lakatos ANALYSIS OF PROPULSION UNIT MATHEMATICAL MODEL MACHINE DESIGN 7:(4) pp. 137-140. (2015)
- [4] Hertz, H., 1881, “On the Contact of Elastic Solids,” J. Reine Angew. Math., 92, pp. 156–171.
- [5] Dr. Valasek István Tribológiai Kézikönyv, TRIBITECHNIK KF. Budapest, 1996.
- [6] D. Dowson, G. R. Higginson ELASTO-HYDRODYNAMIC LUBRICATION, SI EDITION, Oxford, 1977
- [7] Evans, H. P., and Snidle, R. W., 1981, “Inverse Solution of Reynolds Equation of Lubrication under Point Contact Elastohydrodynamic Conditions,” ASME J. Lubr. Technol., 103, pp. 539–546.

Inerciális szenzormodellhez szükséges hiba karakterisztika elemzés MATLAB-ban

Error characteristic analysis required for inertial sensor model in MATLAB

Somogyi Huba^a

^aSzéchenyi István Egyetem – Járműipari kutatóközpont
somogyi.huba@sze.hu

Absztrakt: Az inerciális navigációs rendszer képes nagy pontosságú pozíció, sebesség és irány információt szolgáltatni egy rövid időperiódusban, viszont pontossága rohamosan csökken az időtartam növekedésével. Ahhoz, hogy pontosabban tudjuk becsülni a navigációs információkat, szenzormodellt kell készíteni, amelyhez meg kell határozni a szenzor hibakarakteristikáját. A mikro-elektromechanikai rendszerű (MEMS – Microelectromechanical System) inerciális mérőegységek (IMU – Inertial Measurement Unit) széles körben elterjedt eszközök kis méretük és tömegük illetve alacsony fogyasztásuk miatt. Ez a cikk főleg a MEMS IMU-k hibakarakteristikáira fókuszál különböző hiba paraméterek analizálásával. Az Allan - variancia egy módszer az adatsor elemzésére az időtartományban, az oszcillátorok frekvenciastabilitásának mérésére. Ez a módszer alkalmazható egy rendszer belső zajának meghatározására az átlagolási idő függvényében. A módszer használata és megértése nem bonyolult, manapság ez az egyik legnépszerűbb eljárás az inerciális szenzorok adatai különböző zajparamétereinek a meghatározására. A cikkben leírásra kerül az Allan - variancia elméleti alapja a szenzormodell hiba-karakteristikáinak meghatározásához és implementációjához MATLAB-keretben.

Kulcsszavak: Inerciális szenzor modell, hiba karakterisztika, MEMS szenzor

Abstract: It is a well-known fact that an inertial navigation system is capable of providing high-precision position, velocity and attitude information in a short period of time. At the same time, their accuracy decreases rapidly over time. In order to be able to estimate the navigation information more accurately, a sensor model must be created, for which the error characteristic of the sensor must be determined. Microelectromechanical Systems' (MEMS) Inertial Measurement Units (IMUs) are widely used due to their small size, low weight and low power consumption. This paper focuses mainly on the error characteristics of MEMS IMUs by analyzing various error parameters. Allan variance is a method of analyzing a data set over a time domain to measure the frequency stability of oscillators. This method can be used to determine the internal noise of a system as a function of the averaging time. Using and understanding the method is not complicated, it is one of the most popular methods today for determining various noise parameters of inertial sensor data. This paper describes the theoretical basis of the Allan variance for determining and implementing the error characteristics of the sensor model in MATLAB.

Keywords: IMU sensor model, Error characteristic, MEMS sensor

1. Bevezetés

Az inerciális mérőegység (IMU) általában a jármű gyorsulását és szögsebességét adja meg, amelyeket azután integrálni kell, hogy megkapjuk a jármű helyzetét, sebességét és irányát. Az IMU méréseket általában különféle típusú hibaforrások degradálják, mint például az érzékelő

zajai, a skála tényezője és a hőmérsékleti eltérések (nemlineáris, nehezen jellemezhetőek) stb. Az IMU méréseknek a navigációs algoritmusba történő beépítésével ezek a hibák felhalmozódnak, ami a helyzet és a sebesség kimenetek jelentős eltolódásához vezet. Az önálló IMU önmagában ritkán hasznos, mivel az inerciális érzékelő torzításai és a rögzített lépéses integrációs hibák a navigációs megoldás gyors eltérését idézik elő. Az inerciális rendszerek tervezése és a teljesítmény előrejelzése az érzékelők zajmodelljének pontos ismeretétől függ. A navigációs információk pontos becslésének követelményei szükségessé teszik az érzékelők zajkomponenseinek modellezését. A frekvenciatartománybeli megközelítés a zaj modellezéséhez az energia-spektrális sűrűség (PSD – Power Spectral Density) felhasználásával az átviteli függvények becslésére egyszerű, ám a nem rendszerelemzők számára nehezen érthető. Számos időtartománybeli módszert dolgoztak ki a sztochasztikus modellezéshez. A korrelációs-függvény megközelítés a PSD megközelítés kettős változata, amelyet Fourier-transzformációs párként összekapcsolunk. Ez analóg azzal, hogy a frekvencia-válasz függvényt kifejezzük a részleges frakció expanziója szempontjából. Egy másik korrelációs módszer az autokovarianciát a differenciálegyenlet koefficienseivel kapcsolja össze, amelyet autoregresszív mozgóátlag folyamatként fejeznek ki. A korrelációs módszerek nagyon modellérzékenyek, és nem alkalmasak magasabb rendű folyamatok vagy széles dinamikus tartomány kezelésére. Ennek ellenére több időtartománybeli módszert dolgoztak ki. Alapvetően nagyon hasonlóak és elsősorban abban különböznek egymástól, hogy a különféle jelfeldolgozásokat súlyozási függvényekkel, ablakfüggvényekkel stb. építik be az elemző algoritmusokba annak érdekében, hogy a modell jellemzésének javításával elérjék a kívánt eredményt. A legegyszerűbb az Allan szórás.[1]

Az Allan-szórás egy módszer, amellyel a véletlenszerű drift hibák középértékét (RMS – Root Mean Square) ábrázoljuk az átlagolási idő függvényében. Könnyen számítható a szórás, viszonylag egyszerű értelmezni és megérteni. Az Allan variancia-módszer felhasználható az alapul szolgáló véletlenszerű folyamatok jellemzőinek meghatározására, amelyek zajt okoznak az adatban.

Ez a cikk az Allan variancia módszer elméleti alapjának, és megvalósítási folyamatának vizsgálatával kezdődik, miközben azonosítja a MEMS giroszkópokban létező különféle zajterületeket.

2. Allan - variancia módszer

A NIST kutatójaként Dr. David Allan kifejlesztett egy módszert az óra alkalmazásokban használt oszcillátorok véletlenszerű zajtermékeinek és stabilitásának jellemzésére, amelyet Allan (1966) variancia-módszernek hívnak. Noha az időmérő rendszerekre fejlesztették ki, az Allan variancia módszer hasznos eszköz lehet az inerciális szenzorok adataiban szereplő véletlen zaj kifejezések időtartománybeli jellemzőinek vizsgálatához. Még az olcsó MEMS inerciális szenzorok esetében is a teszteredmények azt mutatták, hogy zajtermékeik továbbra is azonosíthatók és jellemezhetők az Allan variancia módszerrel.[2]

2.1. Allan – variancia módszertana

Feltételezve, hogy a mintavételi intervallum T_s és az összes mintavételi idő T , a teljes adatkészletben található adatpontok száma $N = T / T_s$ értékkel adható meg. A teljes adatkészletet n egymást követő adatpont klaszterekre osztják, ahol n ($n = 1, 2, \dots, n_{MAX}$, $n_{MAX} < N/2$) a klaszter mérete, és n_{MAX} az Allan-variancia kiszámításához megengedett maximális klaszterméret. $K = N/n$ az osztott független klaszterek száma, tehát a $K_{MIN} = N / n_{MAX}$ a minimális klaszterek száma.

Ha a giroszkóp pillanatnyi kimenete $\omega(t)$, akkor a $(k + 1) -$ dik klaszter átlagolási művelete a következő:

$$\bar{\omega}_{k+1}(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_{nk+i} \quad (1)$$

ahol $\tau = nTs$ az egyes klaszterek átlagolási ideje.

Ezután az *Allan-varianciát* a szögsebesség átlaga alapján lehet meghatározni:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(K-1)} \sum_{k=1}^{K-1} \left((\bar{\omega}_{k+1}(\tau) - \bar{\omega}_k(\tau))^2 \right). \quad (2)$$

Az *Allan-variancia* az inerciális érzékelők torzítási stabilitását méri, az $\sigma^2(\tau)$ és a belső sztochasztikus folyamatok spektrális teljesítménysűrűsége között integrációs kapcsolat van, ami a következő képlettel írható fel:

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^\infty S_\omega(f) \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df, \quad (3)$$

ahol $S_\omega(f)$ az $\omega(t)$ sztochasztikus folyamat spektrális teljesítménysűrűsége [3].

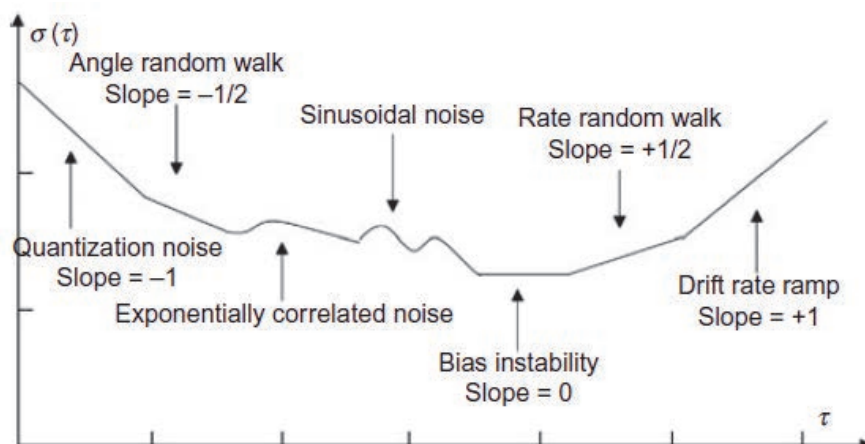
A (3) egyenletből látszik, hogy az *Allan-variancia* arányos a sztochasztikus folyamat teljes kimenő teljesítményével, amikor áthalad egy $\sin^4 x/x^2$ formájú átviteli függvénnyel rendelkező szűrőn, és sávszélessége τ -tól függő. Ezért a szűrő sávszélességének, vagyis a τ változtatásának beállításával különféle típusú sztochasztikus zajtermékek azonosíthatók és számszerűsíthetők. Általában a $\sigma(\tau)$ és a τ közötti log-log diagram közvetlenül jelzi a sztochasztikus zajtípusok típusait, amelyek léteznek az inerciális érzékelő adataiban, ahol $\sigma(\tau)$ az Allan variancia négyzetgyöke, amelyre szintén utalnak úgy, mint Allan szórás.

2.2. Zaj fogalmak

Számos sztochasztikus zajtermék létezik, amelyekről ismert, hogy létezik az inerciális érzékelőben, vagy feltételezhetően befolyásolja az adatokat [4]. Összességében hét zaj kifejezés kapcsolódik az Allan definíciójához és eredményeihez, és ezeknek egy tipikus log-log diagramon $\sigma(\tau)$ és τ viszonylatában az 1. ábrán bemutatotthoz hasonló jellemző görbének kell lenniük.

Általában a hét zajtermék bármelyike jelen lehet a mintaadatokban, és az Allan variancia-módszerrel bármelyik azonosítható. A kutatások és a gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy a legtöbb esetben eltérő zajtípusok jelennek meg τ különböző régiókban, eltérő lefolyással, ami lehetővé teszi az adatokban lévő sztochasztikus zajtermékek egyszerű azonosítását. Normál esetben az alacsonyabb pontosságú inerciális érzékelőnél az Allan eltérési görbe közelebb van az eltérési tengelyhez és távolabb az idő tengelyétől, míg a magasabb fokú inerciális érzékelőknél az ellenkezője igaz. Különösen egy bizonyos tehetetlenségi érzékelőnél az Allan karakterisztikájának görbéje nem lehet az 1. ábrán bemutatott tipikus globális szerkezetű, amelynek helyett csak egy vagy néhány alapszegmense lehet. Ennek oka az, hogy néhány zajterület nem létezik, vagy túl kicsi ahhoz, hogy megkülönböztesse a többi zajtól, amelyek

nagyobb Allan-eltéréssel rendelkeznek. Ezek a zajtartalmak csak akkor jelennek meg, amikor a fő zajtartalmakat kompenzálják vagy csökkentik.



1. ábra Allan karakterisztikus görbe tipikus struktúrája

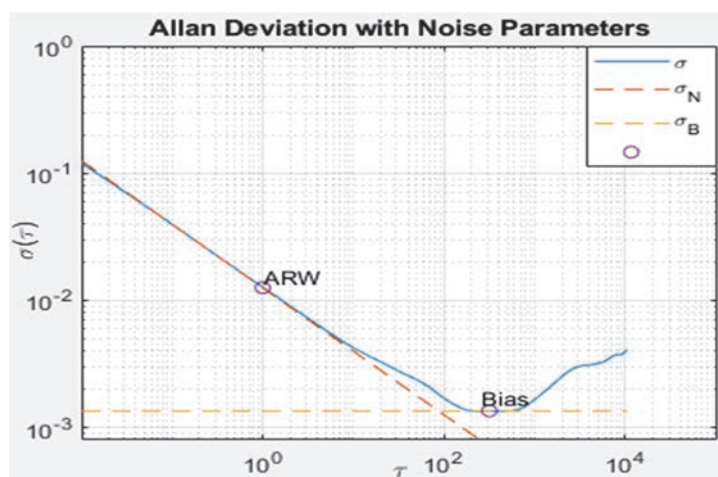
3. Zaj karakterisztika elemzése MATLAB-ban

Az Allan eloszlás meghatározása egy módszer az adatsor elemzésére az időtartományban, és lehetővé teszi mintavételi zaj és bias stabilitás megjelenítését és számszerűsítését.

Az Allan Variancia meghatározásának lépései:

- Az IMU egy hőmérséklet-szabályozott (25°C) kamrába került elhelyezésre, majd 6 órán keresztül a mért gyorsulási és forgási értékeket 150Hz-es mintavételi frekvenciával rögzítettem.
- A rögzített mérések MATLAB-ba beolvashatóak és az `allanvar` beépített függvény segítségével meghatározható az Allan eloszlás, majd egy log-log ábrán jeleníthető meg.

A mérési eredmények alapján a gyorsulási szenzor és a giroszkóp mindhárom tengelyére egy-egy Allan eloszlási görbe felrajzolható, ezek közül egy a 2. ábrán látható. A kapott görbékről az 1. ábra alapján leolvasható értékekből a Bias stabilitási, az ARW (Angle Random Walk) és a VRW (Velocity Random Walk) értékeket egy táblázatba gyűjtöttem (3. ábra).

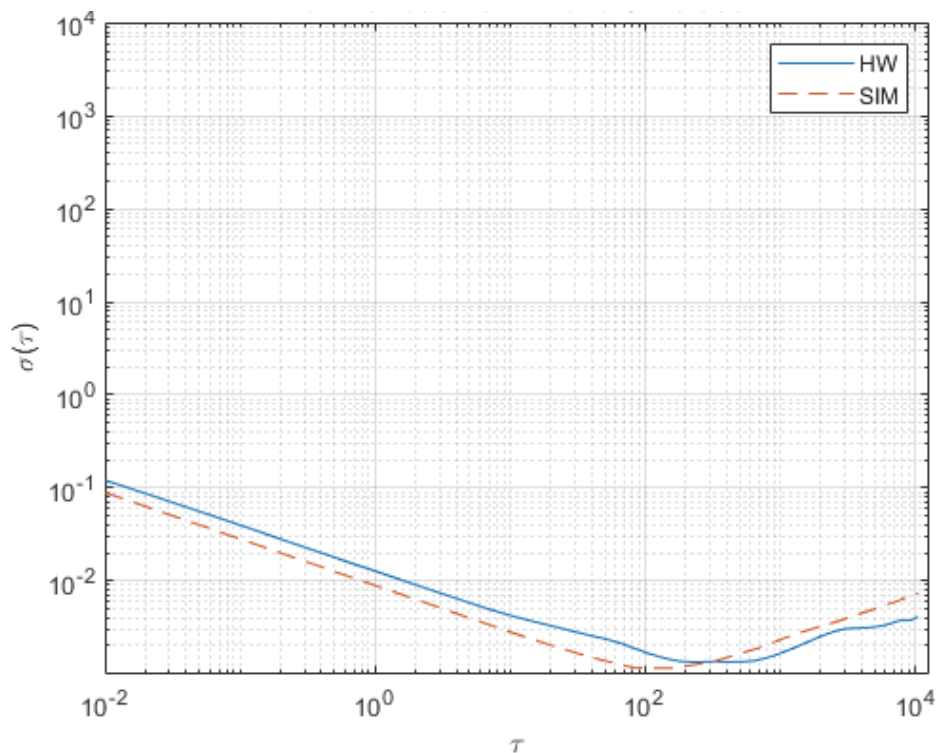


2. ábra A giroszkóp egy tengelyének Allan eloszlása

Mért érték		Mértékegység	X	Y	Z
Gyorsulás mérő	Bias Stabilitás	mg	0.029	0.074	0.043
	VRW	mg / $\sqrt{\text{hr}}$	6.6	7.9	8.5
Gyroszkóp	Bias Stabilitás	° / hr	5.3	4.8	4.0
	ARW	° / s / $\sqrt{\text{hr}}$	0.36	0.31	0.30

3. ábra Zaj karakterisztika eredményeink táblázata

Felhasználva a kapott zajkarakterisztikákat MATLAB-ban az **imuSensor** objektum segítségével, amely a *Sensor Fusion and Tracking* toolbox - ban található, létrehozhatunk egy IMU modellt.



4. ábra Allan eloszlás valós és szimulált értékekkel

A 4. ábra azt mutatja, hogy az **imuSensor** -ból létrehozott IMU modell olyan szimulációkat végez, amelyek Allan eloszlásai megközelítőleg megegyeznek a naplózott adatokkal. A modellmérések valamivel kevesebb zajt tartalmaznak, mivel a kvantálási és hőmérsékleti paramétereket nem az IMU segítségével kerültek beállításra, de a későbbiekben ez is meg fog történni. A kapott IMU – modell már így is felhasználható adatok generálására olyan mozgások esetén, amelyeket nem könnyű rögzíteni a hardverrel. [5]

4. Konklúzió

Az Allan variancia módszer egy egyszerű és hatékony idő-alapú módszer, amely információkat szolgáltat a tehetetlenségi érzékelő adatainak különböző sztochasztikus zajtípusairól és nagyságairól, ezáltal a szenzor modell olyan paraméterei határozhatóak, meg amelyek igen fontos szerepet játszanak a későbbi tesztelési fázisban.

5. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single- Axis Interferometric Fiber Optic Gyros, IEEE Std. 952-1997, 1998.
- [2] El-Sheimy, N., Hou, H. and Niu, X. (2008), “Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 57 No. 1, pp. 140-9.
- [3] Haiying Hou: Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance, A Thesis, Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta, 2004
- [4] Hou, H. (2004), “Modeling inertial sensors errors using Allan variance”, UCEGE Reports Number 20201, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary.
- [5] IEEE Std. 647-2006 IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros

Lidar alapú lokalizáció NDT-vel

NDT localization

Unger Miklós^a, Hajdu Csaba^b

^aSzéchenyi István Egyetem, *Járműipari Kutatóközpont*
unger.miklos@ga.sze.hu

^bSzéchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont, Automatizálási Tanszék
hajdu.csaba@ga.sze.hu

Absztrakt: Az autonóm járművek egyik legfontosabb feladata a saját helyzet meghatározása, az úgynevezett lokalizáció. A járműveket ez alapján tudjuk a kezdő pozícióból a végpozícióba irányítani. A kereskedelembe kapható viszonylag olcsó GPS rendszerek pontossága 2-3 méter is lehet, ez az pontosság autonóm járművekhez nem megengedhető. A valóban nagy pontossággal rendelkező rendszerek viszont több millió forintba is kerülhetnek. A felsorolt okok miatt van szükség egy olyan módszerre, amely a környezetérzékelő szenzorok adatait felhasználva képes a lokalizáció robosztus elvégzésére. Az NDT (Normal Distribution Transform, normál eloszlás transzformáció) egy ilyen módszer, amely Lidar szenzorokból érkező adatokat dolgoz fel. A módszer két részből áll. Az első a térkép építés (NDT mapping), ahol a szenzorból egymás után érkező pontfelhőket fűzi össze egy egységes pontfelhő térképpé, a második rész pedig az elkészített térkép és az aktuális pontfelhő összehasonlítása. Ha az összehasonlítás megfelelő akkor egy nagyon pontos képet kaphatunk az aktuális pozíciónkra, amely felhasználásával autonóm járműirányítási feladatokat oldhatunk meg a GPS rendszerektől való függés nélkül.

Kulcsszavak: autonóm, járműirányítás, NDT lokalizáció

Abstract: One of the most important task of the autonomous self-driving vehicles is the set of the ego position, the so called localization. We could control these vehicles from the start point to the endpoint. The relative cheap GPS systems which are common sensors for the automotive industry have usually 2-3 meters precision which are not permissible for autonomous vehicles however the GPS systems with great precision may cost millions of forints. For these reasons we need an algorithm which are able to localize our position with the help of the environmental sensors. The NDT (Normal Distribution Transform) is one them. This algorithm processes the Lidar data. This has two parts. The first part is the NDT mapping wherewith we build a pointcloud map from the actual Lidar data. The second part is NDT matching wherewith we try to localize our vehicle as we compare the section of our prebuild map with the actual Lidar pointcloud. If the matching is suitable we could get a very accurate position without the dependency of the GPS systems and with the use of these position we could accomplish tasks of autonomous vehicle control.

Keywords: autonomous, vehicle control, NDT localization

1. Bevezetés

A robotikában és így az autonóm feladatokban kiemelt fontossága van a saját helyzet meghatározásának, minél pontosabb ez a meghatározás annál nagyobb biztonsággal tudjuk elkerülni az elénk került objektumot, vagy tudunk megállni a fal előtt. A lokalizáció többféle eszköz segítségével történhet, a legtöbbször a GPS használják. Azonban a GPS pontossága a legtöbb autonóm feladat esetében nem elegendő, ezért igény van egy olyan algoritmusra, amely a környezet érzékelő szenzorok segítségével, - esetünkben Lidarokkal- határozza meg a pontos helyzetet.

2. Normál eloszlás transzformáció (NDT)

Az NDT modellezi a rekonstruált 2D pontok eloszlását a helyi, lokális normál eloszlásokkal. Először konstans értékkel bontja fel cellákra a robot által látott teret, majd minden olyan cellában, ahol legalább három pont van a következő történik:

- 1) Minden olyan 2D pont összegyűjtése, amit a cella tartalmaz $\mathbf{x}_{i=1..n}$
- 2) Középérték kiszámolása $q = \frac{1}{n} \sum_i \mathbf{x}_i$
- 3) Kovariancia mátrix kiszámítása $k = \frac{1}{n} \sum_i (\mathbf{x}_i - q)(\mathbf{x}_i - q)^t$

A $\mathbf{x}$ a cellába esésének valószínűsége a normál eloszlással van modellezve. $N(q,k)$:

$$p(\mathbf{x}) \sim \exp\left(-\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{q})^t \Sigma^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{q})}{2}\right).$$

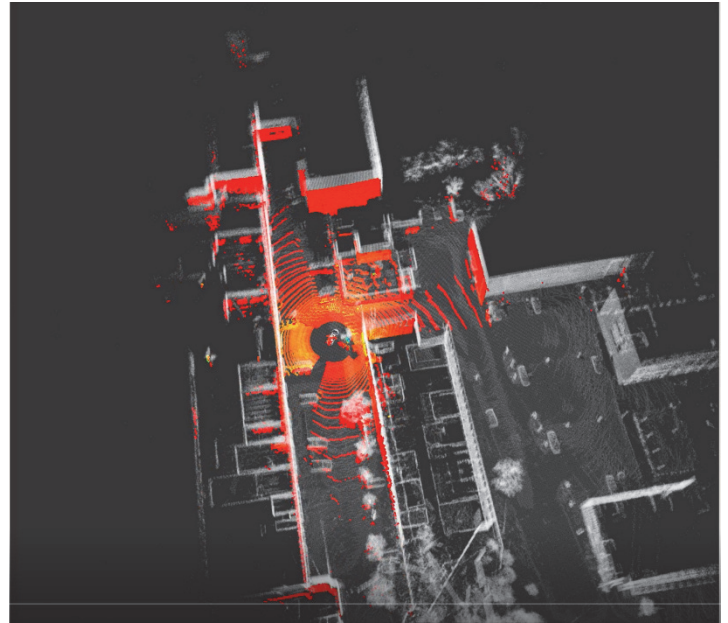
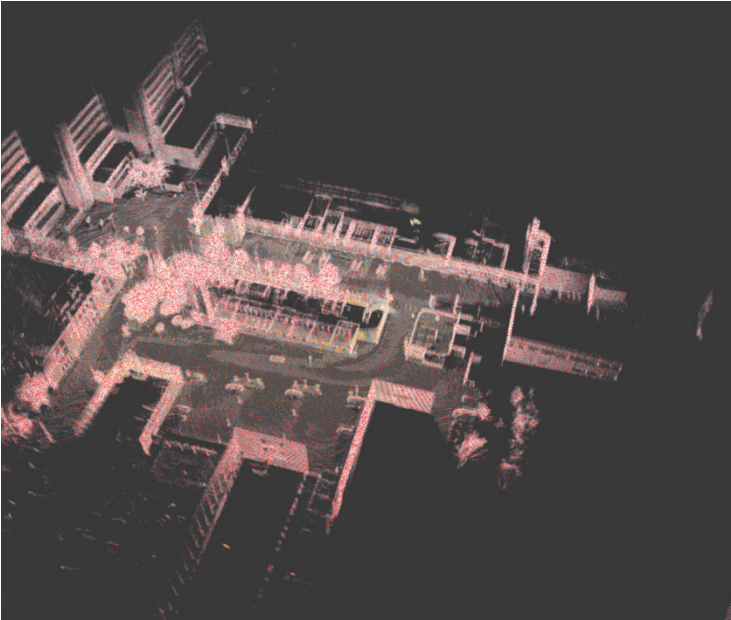
Ezzel az occupancy grid-hez hasonló felosztást kapunk, az NDT azonban a pozíció megfelelőségének valószínűségét adja meg. Ezzel általában nagyobb pontosságot kapunk, mint a voxel grid felosztásnál, de csak a környezetről, a különböző objektumokról kapunk képet, a szabad területről, nem.

3. NDT lokalizáció lépései

Az NDT lokalizációhoz az Autoware Ai node-jait használtuk. Az NDT lokalizációnak két lépése van. Az első a térkép készítés, ekkor akár egy szenzorból, akár több szenzor egyesített képéből, egy statikus pontfelhőt hozunk létre. A statikus pontfelhő létrehozásához szükség van a /tf topicban tárolt, a szenzorok egymáshoz képest helyzetét leíró transzformációs fára. Ezen a pontfelhőn szerepel minden a térképező eszközt körülvevő objektum, látszanak a házak falai, a fák, a parkoló autók, a közlekedési táblák, stb. (1.ábra). Második lépésben ezen a térképen keressük a jármű pozíciót (NDT matching) (2.ábra). Az NDT matching alaphelyzetben az általunk nem ismert $map \rightarrow Base_link$ kapcsolatot adja meg egy 6 elemű vektorban, melyben a pose és az orientációhoz tartozó értékek vannak. Teszi mindezt úgy, hogy a Lidarok által látott pontfelhő számosságát a voxel szűrő használatával csökkenti, majd megkeresi azt a pozíciót a térképen, amely a legnagyobb valószínűséggel egyezik a szűrt pontfelhő képével. A voxel szűrő egy olyan algoritmus, amely a paraméterében megadott méretű $\mathbf{n}$ darab kockát készít a térben

és a benne megtalálható **m** darab pontból, egy darabot készít, melynek pozíciója a kocka középpontjával egyezik meg.

Előnyök és hátrányok



Előny:

1. ábra: Az NDT mapping node-al készített térkép és a lokalizáció

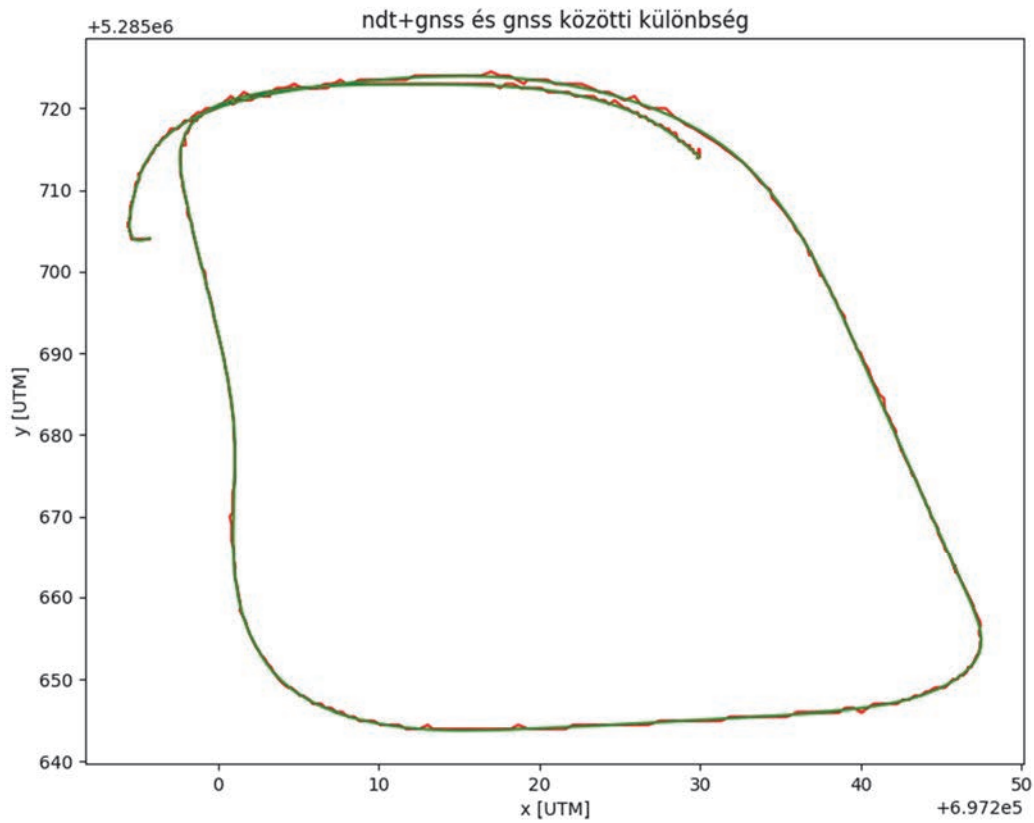
- GNSS rendszerek nélkül is lehetővé teszi a lokalizációt

Hátrányok:

- Előre elkészített statikus térképet használ
- érzékeny a változásokra

4. Alkalmazása az Autoware-ben

Az Autoware-ben alkalmazható node-ban a lokalizáció pontosságát javíthatjuk **GNSS** rendszerek, odometria vagy IMU rendszerek használatával. Az látható, hogy a módszer a saját koordináta rendszerében remekül működik, azonban a GPS rendszerek UTM koordináta rendszerben dolgoznak. Az NDT matching algoritmus a GPU használati lehetőség miatt float típusú változóval adja meg a pose értékeket, melyek nagy számoknál kerekítődnek. Magyarország UTM koordinátái x-ben százezres, y-ban milliós értékűek. Ez számunkra pontonként akár méteres pontatlanságokat okoz, illetve a 2.ábrán a piros görbén látható ugrásokat okoz.



2. ábra: Az NDT a piros görbe, a zöld görbe a GNSS által szolgáltatott pozíció

5. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában (EFOP-3.6.2-16-2017-00016)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Peter Bieber, Wolfgang Straßer (2003): The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching. DOI: 10.1109/IROS.2003.1249285 · Source: IEEE Xplore
- [2] I.J..Cox. Blanche: An experiment in guidance and navigation of an autonomous robot vehicle. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(2):193. 204, 1991

