

# AUTONÓM JÁRMŰVEK – A JÖVŐ KÖZLEKEDÉSE

Konferenciakiadvány 2019



**SZÉCHENYI  
EGYETEM**  
UNIVERSITY OF GYŐR



JÁRMŰIPARI KUTATÓKÖZPONT  
RESEARCH CENTER OF VEHICLE INDUSTRY



# AUTONÓM JÁRMŰVEK – A JÖVŐ KÖZLEKEDÉSE

Konferenciakiadvány 2019

Konferenciaközlemény gyűjtemény

**Lektorok:**

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

Széchenyi István Egyetem  
2020

ISBN 978-615-5837-26-5



# 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. - 2020.09.30.

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 kapacitásukat 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 alapkutatói 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.



# TARTALOMJEGYZÉK

CAN – LIN Transceiver fejlesztése energiahatékony autonóm versenyjármű számára <i>Gulyás Péter, Kőrös Péter, Szeli Zoltán</i>	7
Hevederes rakományrögztés ellenőrző rendszer fejlesztése <i>Szeli Zoltán, Szakállas Gábor, Somogyi Huba, Székely János Ádám, Kocsis Szürke Szabolcs</i>	11
Villamos motorok többcélú optimalizációja <i>Istenes György, Dr. Horváth Zoltán</i>	17
Gépi látás mélytanulás segítségével <i>Markó Norbert, Hollósi János</i>	25
Modell-orientált módszerek használata járműszoftver fejlesztésénél <i>Hajdu Csaba, Krecht Rudolf, Ballagi Áron, Horváth Ernő</i>	30
Esettanulmány autonóm tesztjármű fejlesztésére <i>Hajdu Csaba, Horváth Ernő, Kőrös Péter, Ballagi Áron, Hollósi János</i>	38
Neurális hálózatok hatékonyságának növelése számítógéppel generált tanítási mintákkal <i>Hollósi János, Krecht Rudolf, Markó Norbert</i>	48
Vonóelemes elektromos hajtáslánc tervezése energiahatékony kísérleti jármű számára <i>Pusztai Zoltán, Kőrös Péter</i>	60



# CAN – LIN Transceiver fejlesztése energiahatékony autonóm versenyjármű számára

## CAN – LIN Transceiver development for energy efficient autonomous vehicle

Gulyás Péter <sup>a</sup>, Kőrös Péter <sup>b</sup>, Szeli Zoltán <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Széchenyi István University SZE-JKK Győr, Hungary  
gulyas.peter@ga.sze.hu

<sup>b</sup> Széchenyi István University SZE- JKK Győr, Hungary  
koros.peter@ga.sze.hu

<sup>c</sup> Széchenyi István University SZE-AUT, SZE-JKK Győr, Hungary  
szeliz@sze.hu

**Absztrakt:** A Széchenyi István Egyetemen 2004 óta működő energiahatékony versenyautót fejlesztő csapat, a SZEenergy Team koncepció autója is használ tápvonalra ültetett nagyfrekvenciás kommunikációs protokollt. A Local Interconnect Network kifejezés a SZEmission versenyautó esetében, egy 12V-os tápvonalra modulált 5,5 MHz-es vivő frekvencián zajló jelfolyamot jelent. A jelfolyam speciális szűrést és induktív lezárást igényel a jelalak megőrzésének érdekében, de a technológia segítségével a bonyolult kábel korbácsok lényegesen leegyszerűsíthetők. A hamarosan önvezető funkciókkal is ellátott versenyautó esetében LIN protokoll segítségével kommunikál a versenyautó vezérlőegysége a kisebb perifériákkal. A versenyautó központi vezérlőegysége egy NI myRio beágyazott rendszer, melyet a gázreferencia számítására, szimulációra és telemetria feladatokra használ a jármű. Jelenleg is feldolgozza az összes periféria digitális visszajelzését, melyet az önvezetés alkalmával is biztosítani kell a felső szintű vezérlőegységnek. Az NI myRio UART drivere sok esetben hibával indul, amiért a kommunikáció nem, vagy hibásan épül ki a rendszerben és azonnali újraindítást igényel. A probléma megoldásaként egy olyan átjátszó panel tervezésére van szükség, mely alsóbb szinten valósítja meg a LIN kommunikáció feldolgozását és az autóban már megtalálható üzembiztos CAN busz rendszerre továbbítja azt. A fejlesztés célja, hogy megalapozza az autonóm funkciók és kooperatív jármű irányítás közeledő feladatait, a belső visszajelzések és digitális kommunikáció nagyfokú üzembiztonságát kiépítve.

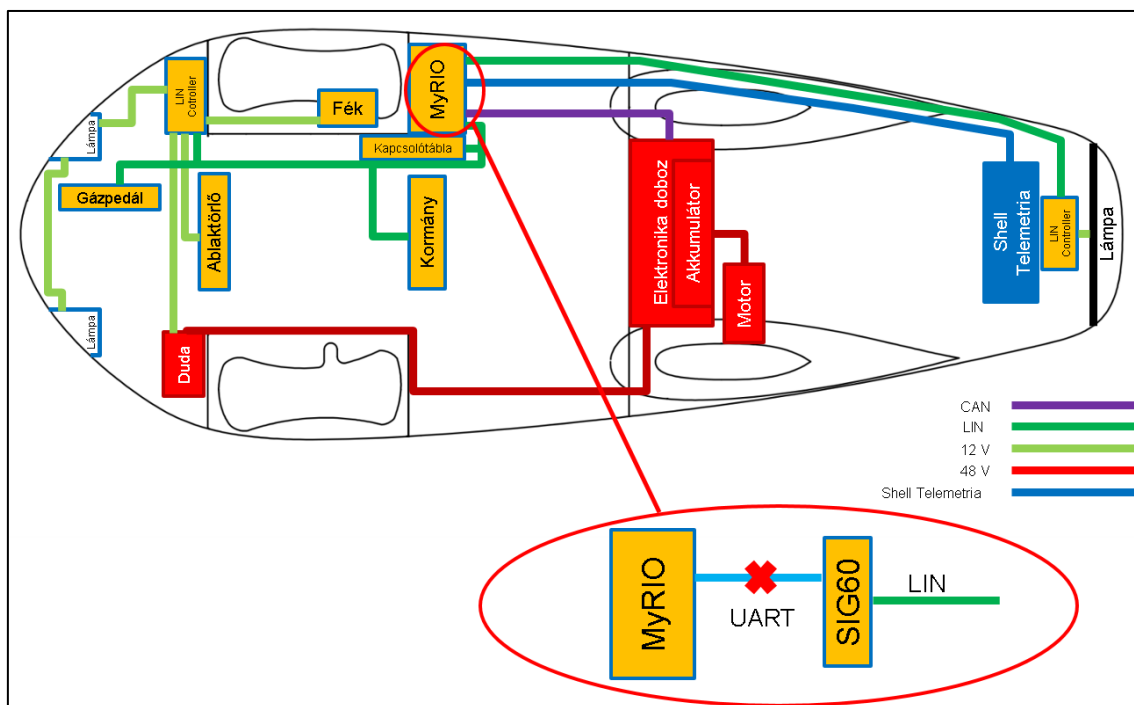
**Kulcsszavak:** CAN, LIN, myRio, PCB

**Abstract:** The SZEenergy Team from the Széchenyi István University is competing with an energy efficient urban-concept car since 2004, which also uses power-line communication protocol. In the case of the SZEmission race car the Local Interconnect Network means that a 5.5 MHz signal stream is modulated over the DC 12V carrier frequency. This stream requires special filtering and inductive termination to prevent any distortion of the signals, but this technology helps us to reduce the wiring in the car, which shortly will be used for autonomous tasks as well. The main controller uses the above mentioned method to communicate with smaller peripherals. The main computer is a NI myRio embedded system, which is used to calculate the throttle references, to simulate during run-time and working with the telemetry data. This computer processes all the digital feedback, which will be critical for the upper-level controlling in autonomous driving. The UART driver of the myRio sometimes starts with an error, that is why the system cannot boot up properly, and needs an instant restart. The solution would be a transceiver circuit, which deals with the processing of the LIN communication, and connects to the reliable CAN bus, which is already present in the car. The main goal of this development is to base the future functions of the autonomous tasks and cooperative vehicle controlling by building a fool-proof communication system with all the needed digital feedback.

**Keywords:** CAN, LIN, myRio, PCB

## 1. Bevezetés

A SZEnergy Team 2005 óta foglalkozik elektromos járműhajtással, melynek elsődleges fejlesztési célja mindig a hatékonyság maximalizálása. 2017-től kezdődően a technológiai fejlődéssel lépést tartva, az önvezetés is a csapat látóterébe került, aminek hatására rövid időn belül egy specifikus részleg is megalapításra került. Az energiahatékony versenyautó jelenlegi elektronikai rendszerére építve szeretné a csapat az önvezető funkciókat megvalósítani, így az alsó szintű járműkommunikációnak üzembiztosan kell működnie ahhoz, hogy a felső szintű irányítás igényeit biztosan ki tudja szolgálni. Az autó belső perifériáinak információ cseréje LIN protokoll segítségével van megvalósítva.[1,2] Ezen kommunikációs vonalak központi feldolgozója egy, a National Instruments által gyártott myRio 1990-as modul. A jelenlegi, beágyazott rendszer UART<sup>1</sup> driver problémákkal küzd, melynek időbeli eloszlása sztochasztikus. Ilyenkor az autó kommunikációs hiba miatt teljes újraindítást igényel, mely versenyhelyzetben nagy kellemetlenséget okoz, mert abban sem lehetünk biztosak, hogy újraindítást követően megoldódik a probléma és a rendszer hiba nélkül épül fel. Az alábbi ábra szemlélteti a versenyautó jelenlegi elektronikai felépítését. (lásd 1 ábra)



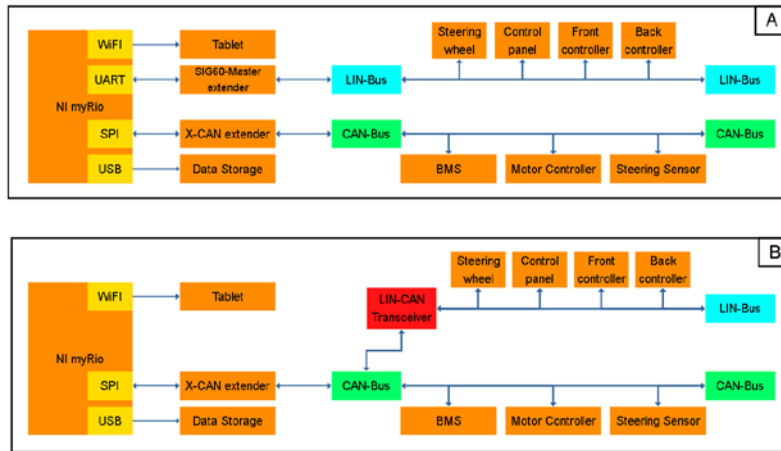
1. ábra: A SZEmission versenyautó elektronikai rendszer diagramja, és a probléma kiemelése.

## 2. Megoldási javaslat

A fentebb leírt probléma megoldására egy olyan áramkör megvalósítása a cél, ami megkerülve a beágyazott rendszert, önállóan végzi a LIN buszra fűzött perifériák kommunikációjának feldolgozását, és azt a CAN hálózatra küldi egy specifikus üzenetben összefoglalva. A megvalósítás folyamán a CAN-LIN Transceiver tervezésekor elsődleges szempontom az alacsony fogyasztású alkatrész választás és a minimalizált panel méret, az energiahatékonyság alapelveit figyelembe véve, valamint a könnyű szerelhetőség és hibakeresés. A jármű kommunikációs modellje szerint egy olyan mikrovezérlőre van szükség, mely átveszi a myRio

<sup>1</sup> UART: universal asynchronous receiver-transmitter – univerzális aszinkron adóvevő

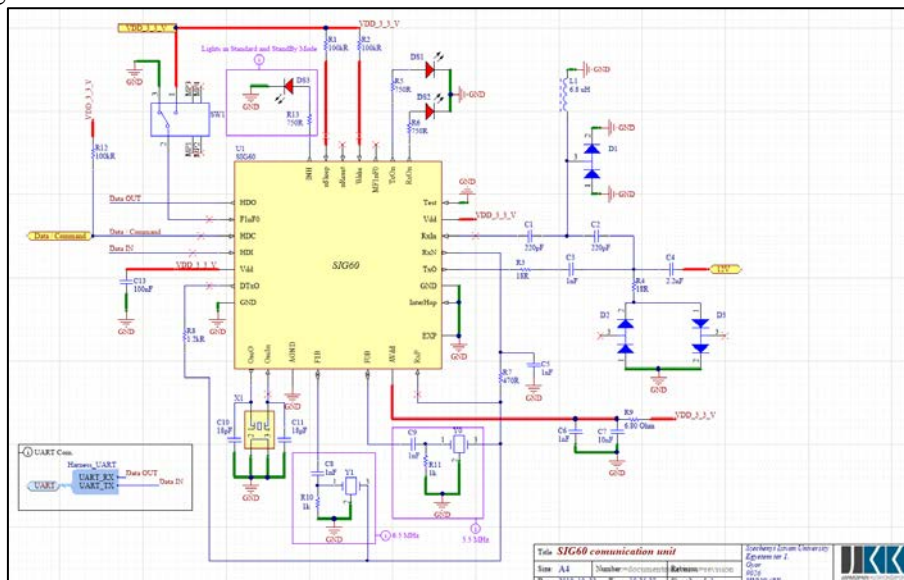
UART kommunikációs szerepét és közvetlenül a CAN buszra tud csatlakozni. Ennek okán a mikrovezérlő alapvető elvárása a két említett protokoll kezelése és az alacsony fogyasztás. Az alábbi ábra bemutatja a jelenlegi, és a megoldással átalakított járműkommunikációs modellt. (lásd 2. ábra)



2. ábra: A: A jelenlegi versenyautó kommunikációs modellje. B: A tervezett új kommunikációs modell.

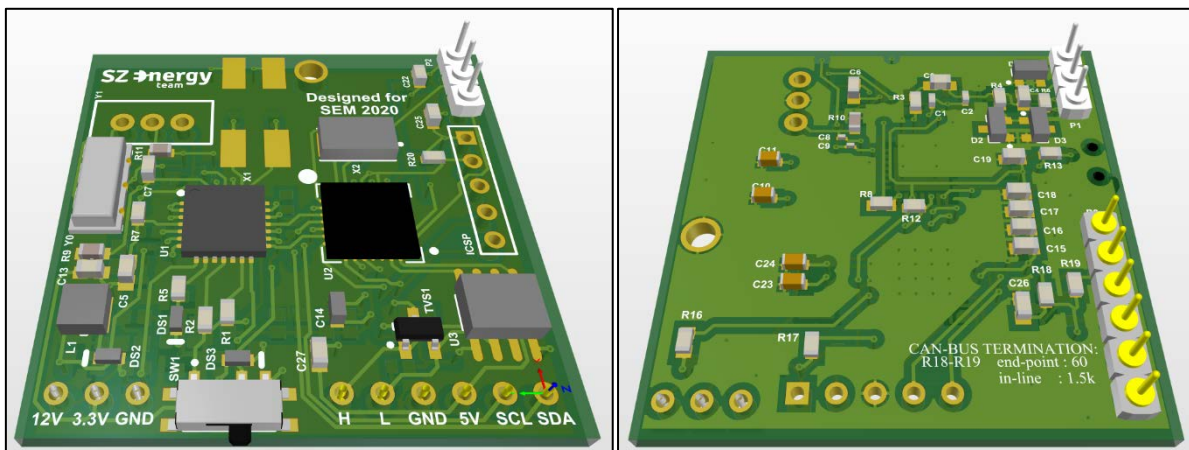
### 3. Paneltervezés

A nagyfrekvenciás kommunikációért felelős eszköz, a SIG60-as integrált áramköri elem környezetének kapcsolásirajza alább látható. (lásd 3. ábra) [3] A kommunikációs modul sokoldalú használatának érdekében a frekvenciaváltás lehetősége is implementálásra került egy kapcsoló segítségével. Ezáltal lehetőség nyílik a későbbiekben a panelt akár ismeretlen környezetben is használni. Esetleges interferencia esetén a kapcsoló segítségével a kommunikáció átváltható az alsóbb 5,5 MHz-es frekvenciára. A könnyű hibakeresés érdekében az IC fontosabb funkcióit működtető ki-bemenetek mellé visszajelző diódákat helyeztem el, ezáltal szemrevételezéssel megállapítható, ha egyes funkciók nem, vagy hibásan üzemelnek, vagy esetleg a panel áramellátása hibás. A későbbi felhasználás érdekében a SIG60-as IC vezérlő lába (Data / Command) is kivezetésre került, melynek használatával funkcióbővítésre is lehetőség van a későbbiekben.



3. ábra: A SIG60-as IC környezetének megtervezett kapcsolásirajza.

A pontos ciklus időzítés érdekében egy külső 16 MHz-es oszcillátorral láttam el mikrokontrollert. A CAN protokoll kapcsán a mikrovezérlő, már tartalmazza az interfészt és kontrollert, de a szintillesztés és adóvevő funkciót egy másik integrált áramköri elem segítségével tudom megvalósítani, melynek lezárása a CAN protokoll szabványa szerint a vonal végen 120  $\Omega$  míg vonal közben 1.5 k $\Omega$ . Ez a két ellenállás a panelen is jelölésre kerül, mert az eszköz helyzetétől függően kell megválasztani a lezárásnak megfelelő értékű ellenállásokat. A CAN busz differenciális jelalakjának és ütemezett feldolgozásának köszönhetően a rendszer stabilitása nőni fog és az üzembiztos működés biztosítható. A nyomtatott áramköri panel tervezése közben alkalmazásra kerültek a kapcsolódó EMC és EMI irányelvek, ezáltal biztosítva az elkészülő panelek elektromágneses kompatibilitását.[4] Alább a megtervezett CAN-LIN Transceiver paneljának vizualizációja látható.(lásd 4. ábra)



4. ábra: Az elkészített panel 3D-s vizualizációja.

#### 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] M. Ruff: *Evolution of local interconnect network (LIN) solutions*, IEEE 58th Vehicular Technology Conference, Orlando- USA, Oct 6-9, 2003
- [2] Gulyás P., Szakállas G., Szeli Z.: *LIN kommunikáció megvalósítása DC tápvonalon elektromos meghajtású kísérleti járműben*, 27th International Conference on Mechanical Engineering, Nagyvárád, April 25-28, 2019
- [3] SIG60 Application Note: Yamar Electronics Ltd:  
<http://www.yamar.com/datasheet/MD%20SIG60.pdf>  
(Letöltve: 2019. február 11.)
- [4] Mark I. Montrose: *Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance: A Handbook for Designers*, Wiley-IEEE Press; 2nd edition, 2000, ISBN: 978-0780353763 p41-44.

# Hevederes rakományrögzítés ellenőrző rendszer fejlesztése

## Cargo lashing belt monitoring system development

Szeli Zoltán<sup>a</sup>, Szakállas Gábor<sup>a</sup>, Somogyi Huba<sup>a</sup>, Székely János Ádám<sup>a</sup>, Kocsis Szürke Szabolcs<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Széchenyi István Egyetem

szeliz@ga.sze.hu

szgabor@ga.sze.hu

somogyi.huba@ga.sze.hu

kocsis.szabolcs@ga.sze.hu

**Absztrakt:** A közúti teherszállítási igény és a forgalom növekedésének hatására az áruszállítás biztonsági kérdései kiemelt fontosságúvá váltak. A cikk az áruszállításkor használatos rögzítő heveder feszességét ellenőrző rendszer fejlesztésének és kísérleti megvalósításának a menetét foglalja össze, beleértve az eszközzel szemben támasztott követelményeket, a mechanikai rendszer alkalmazhatóságát, valamint az elektronikai modul működését és kezelhetőségét, továbbá bemutatásra kerülnek az elvégzett tesztek.

**Kulcsszavak:** rakományrögzítés, flotta menedzsment, felügyeleti rendszer,

**Abstract:** As a result of the demand for road freight transport and the increase in traffic, the security of freight transport has become a priority. This article summarizes the development and experimental implementation of a system for controlling the tensioning strap used in freight, including the requirements for the device, the applicability of the mechanical system, and the operation and serviceability of the electronic module, and the tests performed.

**Keywords:** cargo lashing, fleet management, monitoring system

## 1. Bevezetés

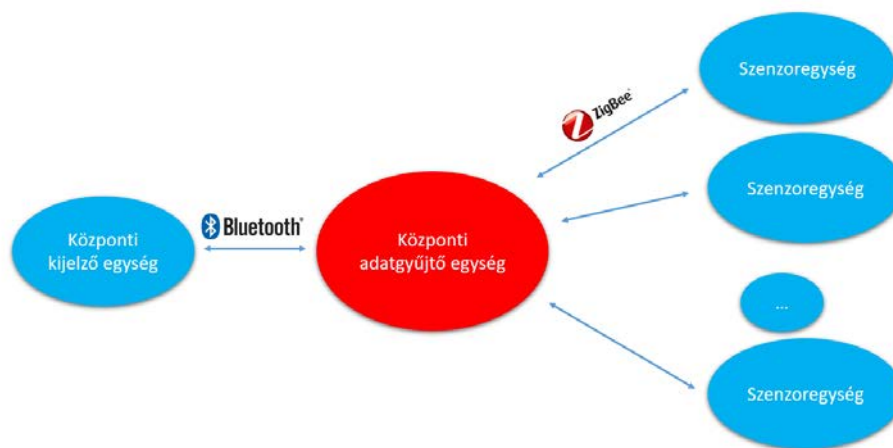
A közúti teherszállításban nemcsak az ellenőrző hatóságok és a vizsgálatokat végző intézmények, hanem a közúti szállítás résztvevői is fokozott figyelmet szentelnek a teher biztonságos rögzítésére. A járművek rakományának megfelelő rögzítése megakadályozza a személyi sérülések létrejöttét, a járművek károsodását és egyéb vagyoni kár bekövetkezését, illetve a rakományvesztés által előidézett forgalmi torlódások kialakulását. A nem megfelelően rögzített rakomány leeshet, kibillentheti egyensúlyából a járművet, sőt, akár borulást, balesetet is előidézhet [1]. A rakomány elszabadulásának megállapítása a szállítás közben nagyon fontos, de nehezen kivitelezhető feladat, mely az áru folyamatos figyelésével lenne megoldható. A rakomány figyelésekor különböző fizikai jellemzőket lehetne vizsgálni, melyeknek a változása mutatná, hogy a rakomány rögzítése milyen állapotban van, és a szállítás a továbbiakban is biztonságosan folytatható. Ilyen fizikai jellemzők lehetnek például:

- A rakomány által gyakorolt terhelő erő változása a rakodófelületre, mely erőzáró rögzítés esetén a rakomány saját tömegéből és a leszorító erő összegéből tevődik össze.
- A rakomány elmozdulásának figyelése mozgás érzékelő szenzorokkal.
- A leszorító hevederek feszességének mérése.

A felsorolt lehetőségek közül az első két variáció kizárható, részben a kivitelezés bonyolultsága, részben pedig a baleset elkerülése szempontjából későn kialakuló jelzés miatt. A rögzítő heveder feszességének folyamatos mérése és az adatok rögzítése viszonylag egyszerűen és kis költséggel megvalósítható. A feszesség mérés megvalósítása egy erőmérő szenzorral ellátott feszesség mérővel történik, mely adott mintavételezési frekvenciával folyamatosan monitorozza a heveder feszességét a szállítás folyamán, és a mért értékek alapján jelet küld a vezetőfülkébe a sofőr számára. A járművezető számszerű adatokat kap, valamint egy minősített, logikai jelet, amely tartalma alapján a heveder feszesség megfelelő és folytathatja az útját, vagy nem megfelelő és ezért minél hamarabb ellenőrizni kell a rakományt.

Az önvezető járművek fejlesztésének üteme előirányozza a járműbe integrált szenzorok, szenzorhálózatok számának növekedését. A teherszállításban már léteznek olyan megvalósított koncepció járművek, amelyek vezető nélküli megoldással üzemelnek. Egy ilyen jármű esetében kiemelten fontos a jármű által szállított rakományok teljeskörű felügyelete. A rakományrögzítés ellenőrző rendszer egy megoldást jelenthet a hevederrel rögzített rakományok monitorozására az autonóm járművek esetében is.

## 2. Felügyeleti rendszer koncepció



1. ábra A felügyeleti rendszer felépítése

A rendszer a rakományegység áru védelmét és a közlekedésbiztonság növelését rendszerszemléletben megközelítő komplex biztonsági rendszer.[2][3]

### Feladatai:

- a rakományegység rögzítettség megfelelőségének detektálása,
- a rakomány rögzítettség és egyéb mért adatok valós idejű kiértékelése és továbbítása szerver oldali komponens (flotta menedzsment) felé,
- folyamatos visszajelzés a gépkocsivezetőnek a jármű oldali komponens segítségével

### Részegységek:

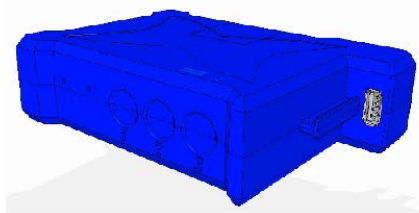
- Központi kijelző egység
- Központi adatgyűjtő egység
- Szenzoregységek

## 2.1. Központi adatgyűjtő egység

A központi adatgyűjtő egység a rendszer irányításáért és adatkezeléséért felelős egység. Kapcsolatot teremt a felhasználóval a központi kijelző egységen keresztül, feldolgozza és tárolja a szenzor és után feszítő egységek által küldött adatokat, valamint információt szolgáltat a járműben használatos flotta menedzsment alkalmazás felé.

### Feladata:

- Információ küldése és fogadása a központi kijelző egységtől
- Kommunikáció a szenzor egységekkel
- Adatfeldolgozás és tárolás
- Kommunikáció a jármű flotta menedzsment rendszerével



2. ábra Központi adatgyűjtő egység

## 2.2. Szenzoregység

A szenzor és után feszítő egység a jármű rakterében elhelyezett rakományok hevederrel történő leszorításos rögzítésének feszítettségének mérésére, a nem megfelelő feszítettségű hevederek után feszítésére és a mért adatok továbbításáért felelős egység.

### Feladata:

- Információ küldése és fogadása a központi adatgyűjtő egységtől
- Heveder feszítettségi értékének monitorozása, a mérési eredmények feldolgozása, valamint továbbítása



3. ábra Szenzoregység

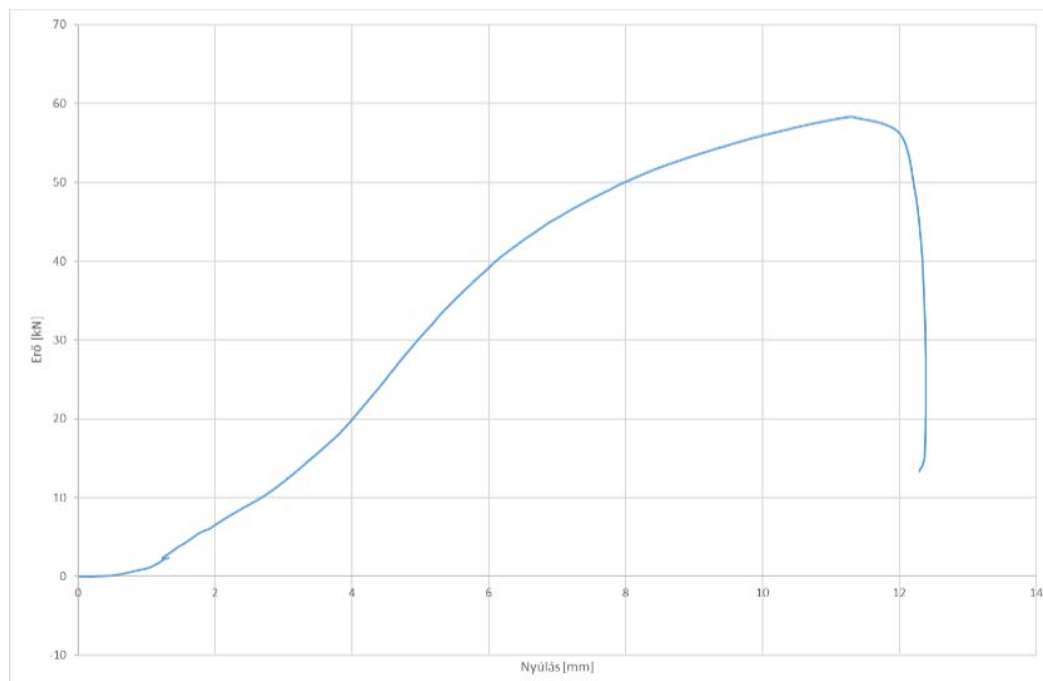
### 3. Mérési eredmények

A rendszer tesztelése során laboratóriumi funkcionális, valamint valós forgalmi méréseket is végeztünk. A laboratóriumi mérések során szakítóvizsgálatot, hőterheléses, erő mérés validációs, valamint kommunikációs tesztekét végeztünk a szenzoregység paramétereinek validálása érdekében.

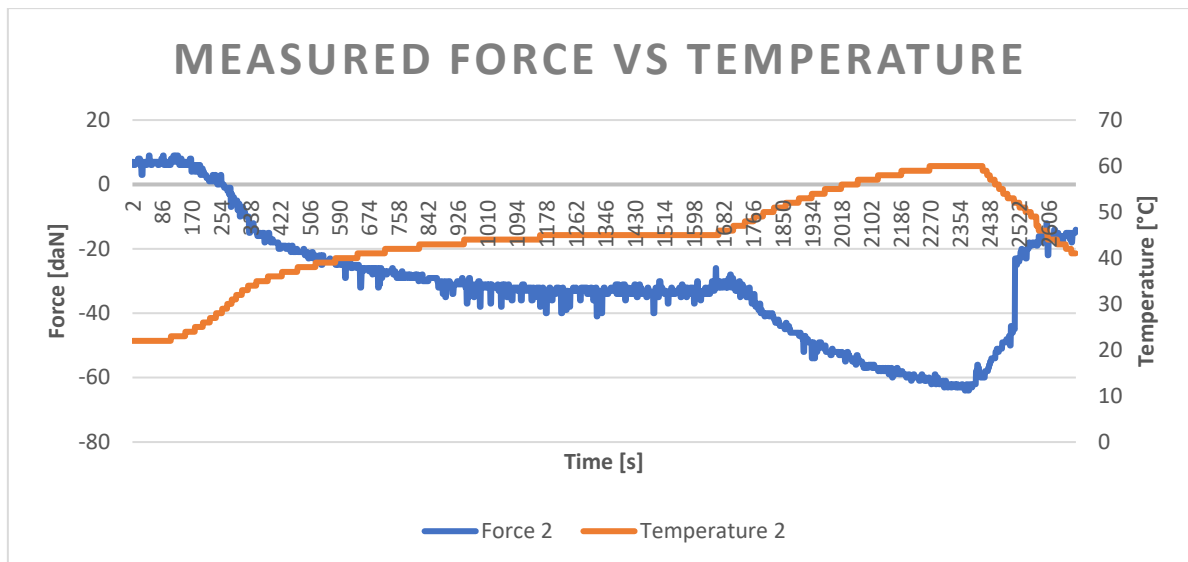
A szakítóvizsgálat során a konstrukció maximális terhelésnél a csavar feje szakadt le. Az alábbi ábrán jó látható, a csavar teljes mértékben elhajlott, ami miatt a szemes részek ki tudtak hajolni. Ahogy a szakító diagramon is látszik a szakadás 58kN-nál következett be. Ez az érték a specifikációban meghatározott 50kN-os célkitűzést teljesítette.



4. ábra Szakítóvizsgálat



5. ábra Szakítódiaagram



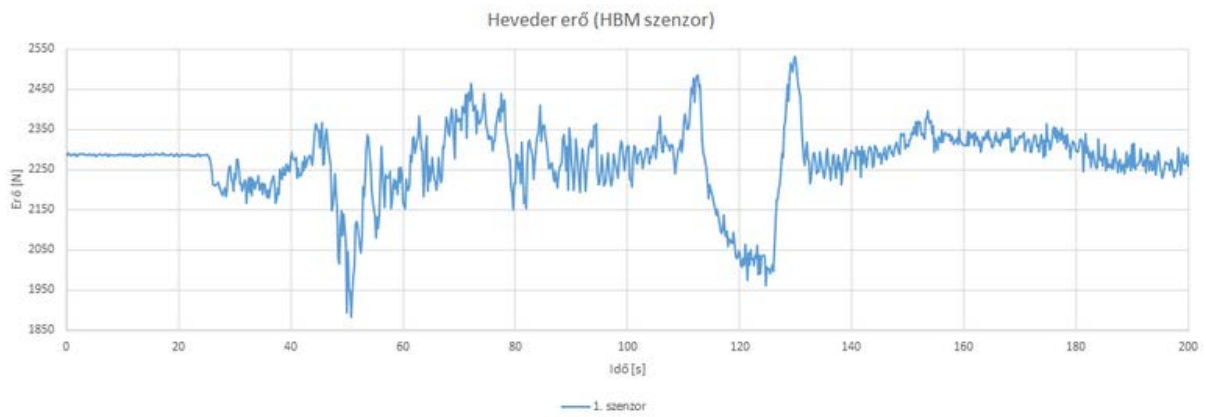
6. ábra Erőmérés hőmérsékletfüggése

A közúti mérések során egy mérőjármű került kialakításra, amelyen különböző típusú rakományokat rögzítettünk és egy meghatározott útvonalat jártunk be. A mérés során a rögzítő heveder feszes ágába kerültek beszerelésre a szenzoregységek, valamint a szenzoregységekkel sorba kötött, HBM gyártmányú, kalibrált erőmérő cellák referencia mérőegységként.



7. ábra Mérőjármű különböző típusú rakományokkal

A 8. ábrán látható két grafikon a közúti mérések eredményéből mutat egy 3 perces szeletet. A felső grafikon a kalibrált mérőeszközzel 5Hz-es mintavételi frekvenciával mért adatok láthatóak, míg az alsón a saját eszközünkkel mért adatok 0.1Hz-es mintavételi frekvenciával. A mérés egyik célja az volt, hogy bizonyítsuk a 10 másodpercenkénti mintavétel elegendőségét, a másik pedig a szenzor mérési pontosságát valós körülmények között tudjuk validálni. A két grafikon összehasonlítva, arra jutottunk, hogy jellegükben megegyeznek, tehát a nagyobb kitörések is jól mérhetőek a saját eszközünkkel, így a 10 másodpercenkénti mintavétel megfelelő. Az erő mérésében tapasztalt 10% alatti eltérés, az eszköz újbóli kalibrálásával kiküszöbölhető, de összességében ez is elégséges eredményt hozott.



**8. ábra Erőmérési adatok összehasonlítása**

## Irodalomjegyzék

- [1] Barna Györgyné: Rakománybiztonság a közúti fuvarozásban (BME OMIKK Logisztika).
- [2] Ballagi Áron: Zigbee: vezeték nélküli komplex szenzorhálózatok gyorsan, olcsón hatékonyan, DCS-13 : Folyamatirányító rendszerek XIII. Találkozó : Miskolc-Lillafüred, 2007. okt. 29-31. Miskolc, Magyarország (2007) p. (CD)
- [3] Fang Dong: The Comparison and research in low power consumption between ZigBee and Bluetooth technologies. Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical, Computer Engineering and Electronics, 2015

# Villamos motorok többcélú optimalizációja

## Multiobjective optimization of electric motors

Istenes György<sup>a</sup>, Dr. Horváth Zoltán<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Széchenyi István Egyetem  
istenes.gyorgy@ga.sze.hu

<sup>b</sup>Széchenyi István Egyetem  
horvathz@math.sze.hu

**Absztrakt:** Mivel villamos hajtásrendszereket sok személyautóban és más járműben is alkalmaznak már, 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 cikkben egy villamos járműmotorok fejlesztését célzó, számítógépes szimulációkon alapuló optimalizációs rendszer és ennek validálása és alkalmazása lesz bemutatva. A motorok vizsgálatához a motormodellek és szimulációk az ANSYS Maxwell és MATLAB környezetben lettek felépítve. Az optimalizációs problémával szemben támasztott mérnöki szempontok a

- 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 MATLAB input-output felülettel kezelhetünk. A szimulációt a nemzetközi szakirodalomban publikált Toyota Prius elektromos motorjának mérési adataival validáltuk.

**Kulcsszavak:** optimalizáció, villamos motor

**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, based on computer simulations. I will present the application and validation 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. The simulation has been validated with the internationally published measurement data of Toyota Prius electric motor.

**Keywords:** optimization, electric motor

## 1. Bevezetés

Világszerte támogatják az országok kormányai az elektromos járművek elterjedését a kőolaj felhasználás csökkentése és a környezetvédelem érdekében. Az egyre emelkedő tüzelőanyagárak miatt manapság már nem csak a tömegközlekedésben és az áruszállításban válik jelentőssé az elektromos járművek száma, hanem a magánfelhasználásban is.

Elektromos meghajtású járművek már a hagyományos meghajtású járművek kialakulásával egy időben léteztek. Az elektromos járművek egyik legnagyobb előnye a nulla helyi káros anyag kibocsátás, így városi környezetben sokkal környezetkímélőbb a használatuk, mint a hagyományos belsőégésű motorral meghajtott járművéké. Az egyre dráguló tüzelőanyagok miatt a manapság elfogadott környezetkímélő villamosenergia-termelő módszerekkel is jóval olcsóbban lehet működtetni az elektromos járműveket.

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: genetikus 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.

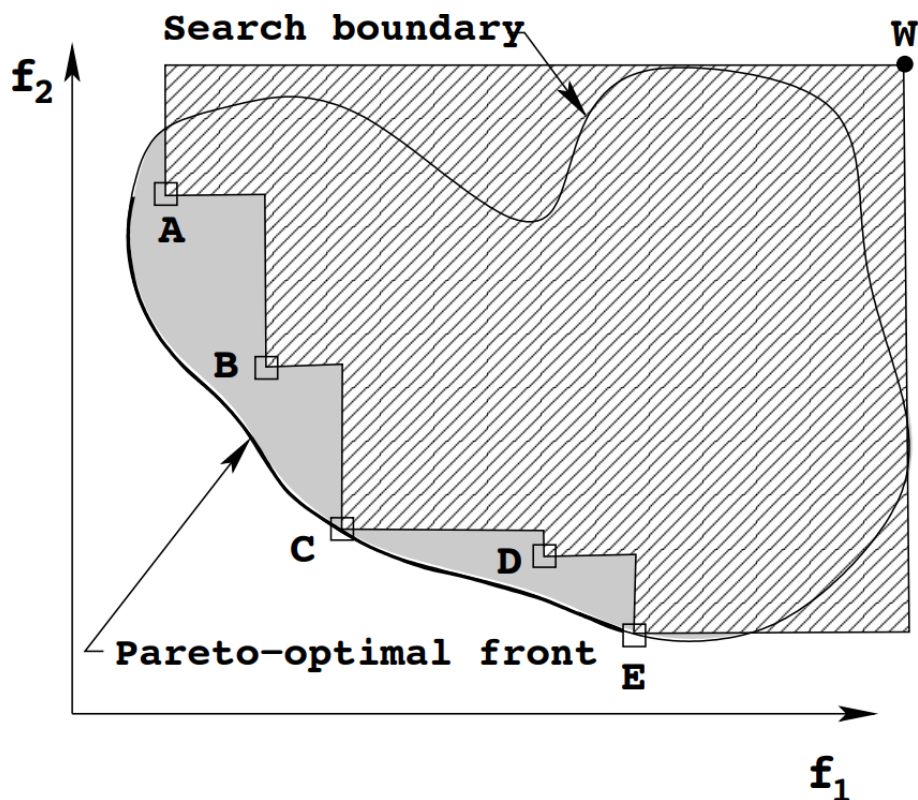
### Genetikus optimalizáció

Az evolúciós matematikai optimalizáló algoritmusok közé tartozik a genetikus optimalizáló algoritmus. A kezdeti populációban van  $p$  darabszámú véletlenszerű paraméterkombináció, az ezeken futtatott célfüggvény kiértékelések után a célfüggvény-értékeiknek megfelelő sorrendbe rendeződnek. Az optimalizáló algoritmus ezekből a paraméterkombinációkból (egyedekből) hoz létre egy újabb generáció  $p$  darabszámú egyedét. 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 legjobbjai alkotják 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 lehet 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):

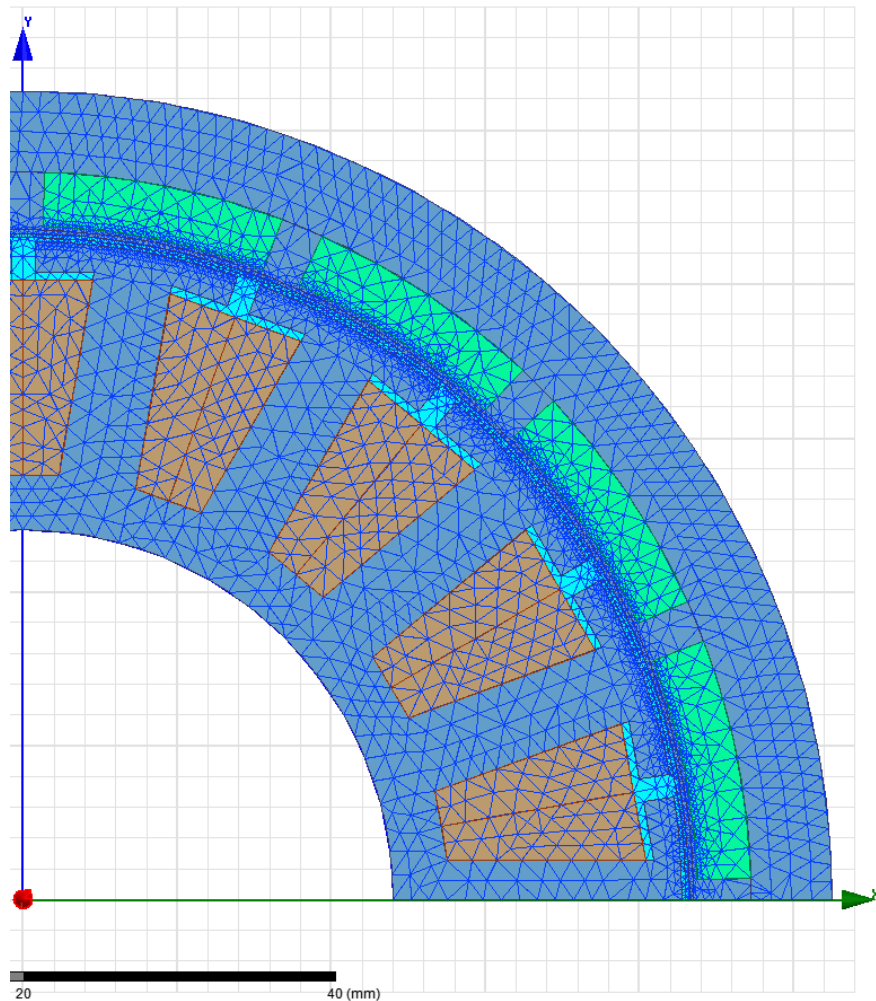


1. ábra. Egy példa a pareto frontra

Az ábrán egy két célfüggvényből álló többcélú optimalizációnak a pareto frontja. Az ábrán látható mező 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.

## 4. Motor modell

Az optimalizáció alapját adó motormodell, egy MATLAB környezetben elkészített analitikus- és egy ANSYS Maxwell környezetben felépített szimulációs részből áll össze. A modell képes olyan eredmények kiértékelésére is, amelyeket nem használ fel az optimalizáló algoritmus, így a későbbi vizsgálatok és az optimalizációs keretrendszer későbbi bővítése részben elő vannak készítve. Jelen alkalmazásoknál a végeselemes szimulációra leginkább a vasvesztések kiszámításához van szükség. A végeselem modell felépítése a következő ábrán látható (2. ábra):

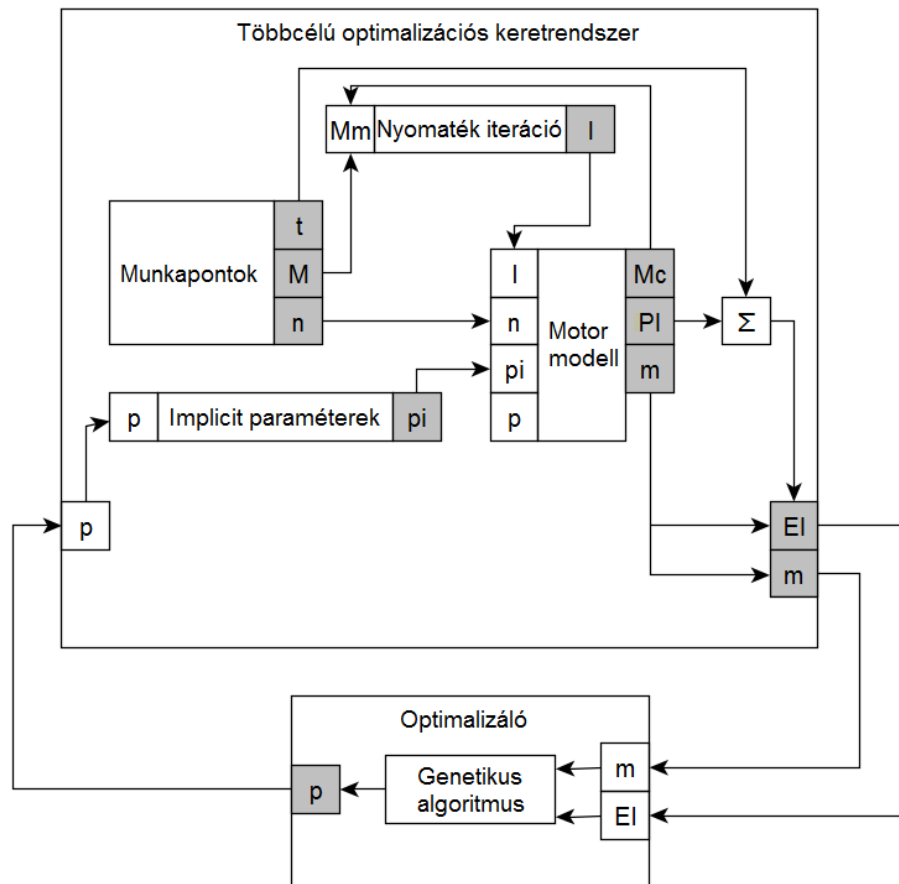


2. ábra. A végeselem modell felépítése.

## 5. Az optimalizációs keretrendszer

Az optimalizációs keretrendszer az optimalizáló algoritmustól kapott paraméterek alapján felépített modelleket nyomtaték, fordulatszám és idősúlyozás munkapontokban vizsgálja. Mivel a végeselem modell bemenetei áram és fordulatszám paraméterek, szükséges egy belső nyomtaték iteráció, amivel meg lehet határozni a munkaponthoz tartozó áramgerjesztés amplitúdóját. A z optimalizációs algoritmus a kiértékelés végén megkapja az adott egyed célfüggvény értékeit (a lenti ábrán látható példában ezek veszteségenergia és tömeg), és ez

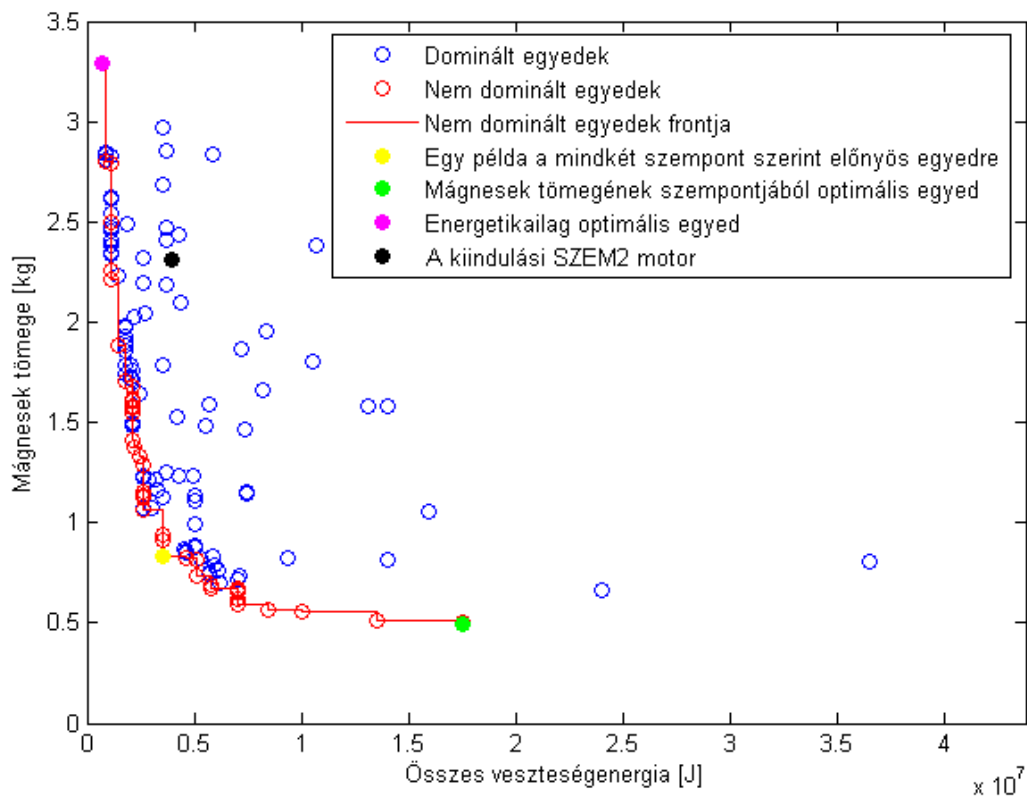
alján folytatódik az optimalizációs folyamat. Az optimalizációs keretrendszer blokkdiagramja a következő ábrán látható (3. ábra):



3. ábra. Az optimalizációs keretrendszer felépítése.

## 6. Az elért eredmények

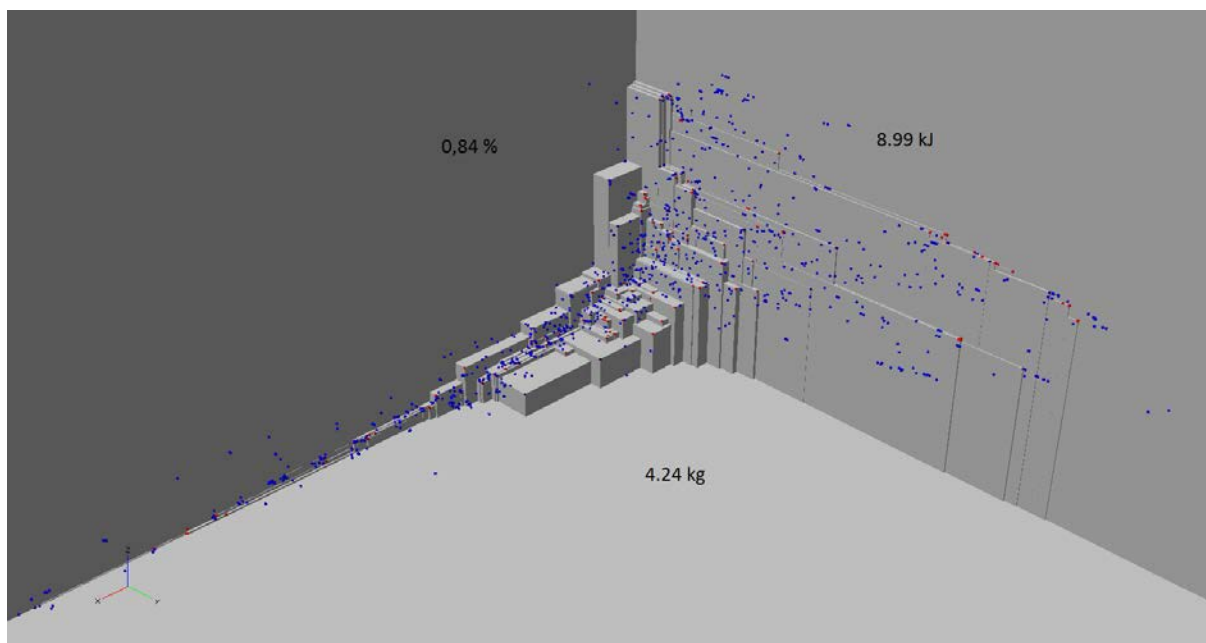
Az egyik alkalmazási lehetősége ennek a keretrendszernek meglévő motorkonstrukciók továbbfejlesztése specifikus felhasználáshoz. Erre egy jó példa egy SZEM2 projektnevű villamosmotor optimalizációja előre meghatározott munkapontokban. Az optimalizáció eredményei a következő ábrán láthatóak (4. ábra):



**4. ábra.** A SZEM2 motor optimalizációjának eredményei.

A fenti ábrán fekete ponttal van jelölve a kiindulási motor tömege és veszteségenergiaja a vizsgált munkapontokban. A piros karikákkal jelölt motorok az optimalizáció eredményei, ezek egyik vagy mindegyik szempont szerint kedvezőbbek az eredeti konstrukciónál.

Egy másik alkalmazási lehetőség a keretrendszerrel egy mérnöki szempontok szerint meghatározott feltételrendszer szerinti optimalizáció. A következő alkalmazás jó példa erre, illetve a célfüggvények bővítési lehetőségeire is egyaránt. Ennek az eredményei a következő ábrán láthatóak (5. ábra):



**5. ábra.** Egy három célfüggvény szerinti optimalizáció eredményei.

Ennél az optimalizációnál három célfüggvény egyidejű minimalizálása volt a cél, amik a motor tömege, veszteségenerációjának és a nyomatéklüktetés volt. Ebben az esetben a megoldások frontját nem egy burkológörbét, hanem egy burkolófelületet alkotnak. Ennek a felületnek az elemei piros pontokkal vannak jelölve az ábrán. Természetesen a célfüggvények számának növelése a számítási időt és az eredmények számát is megnövelheti.

## 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. 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] Kuczmann, M. (, Iványi, A.): The Finite Element Method in Magnetics, Akadémiai Kiadó, Budapest (2008), 308
- [3] Moharos, I. (, Oldal, I., Szekrényes, A.): Végeselem-módszer, Typotex Kiadó, Budapest (2011), 383

- [4] Hatwágner, F.: Nagy számításidejű, folytonos változójú célfüggvények optimalizációja evolúciós számítások segítségével, Széchenyi István Egyetem, Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola (2012)
- [5] Deb, Kalyanmoy: Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithm, „Könyv:” John Wiley & Sons, Chichester (2001), 518
- [6] ANSYS Maxwell, <http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>, 2019. 10. 31.
- [7] MathWorks, <http://www.mathworks.com/help/gads/gamultiobj.html>, 2019. 10. 30.
- [8] Maxwell 2D: ANSYS Maxwell tutorial on the 2004 PriusIPM Motor, Study of a Permanent Magnet Motor with MAXWELL 2D, ANSYS Maxwell (2004), 95
- [9] 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.
- [10] 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
- [11] García, Gilberto Alejandro Ortiz: Identificación de sistemas estructurales histeréticos usando algoritmos de optimización multi-objetivo, Universidad Nacional de Colombia, Industrial Automation (2013)

# Gépi látás mélytanulás segítségével

## Computer Vision using deep learning

Markó Norbert<sup>a</sup>, Hollósi János<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont  
marko.norbert@ga.sze.hu

<sup>b</sup>Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont  
hollosi.janos@ga.sze.hu

**Absztrakt:** A főbb kihívások egyike szemantikus szegmentáció esetén a megfelelő pontosság és gyorsaság elérése a hálózat predikciója során. Az erre irányuló kutatások jelentős része a hálózat pontosságára koncentrál, míg a gyorsabb és számítási teljesítményében hatékonyabb megoldások sokkal kevesebb figyelmet kapnak. Ennek köszönhetően ha egy valós idejű, működő szemantikus szegmentációra képes hálózatot szeretnénk megvalósítani, sokszor akár nagyobb kompromisszumokra is szükségünk lehet. A munkánk középpontjában az ezzel kapcsolatos tanulmányokban fellelhető leghatékonyabb módszer megtalálása és gyakorlatban, élő kameraképpel történő alkalmazása áll. A hálózat fő feladata a vezethető útfelület és a határok detektálása annak érdekében, hogy az autonóm jármű szabályozó rendszerét megbízható információval láthassuk el a szabályozás térbeli határait illetően. A hálózat felhasználásra kerül a Széchenyi István Egyetem Járműipari Kutatóközpont által fejlesztett autonóm jármű rendszerében. Abból kifolyólag, hogy a fedélzeti hardware-ek teljesítménye nem éri el a neurális hálózatokhoz használt fejlesztőeszközök teljesítményét, bizonyos limitációkkal számolni kell ezt illetően, illetve figyelembe venni a hálózat méretének meghatározásakor és annak optimalizációjakor. A megfelelő szintű pontosság elérése érdekében a tanításhoz felhasznált adatkészletnek elég változatosnak kell lennie ahhoz, hogy az útfelszín és a körülmények változása esetén is pontos eredményeket kapjunk vissza.

**Kulcsszavak:** szemantikus szegmentáció, neurális hálózatok, valós idejű hálózat

**Abstract:** One of the main challenges of real time semantic segmentation is to achieve both accuracy and adequate refresh rates on network predictions. Most of the research focuses on developing better and more accurate network architectures with little thought given for faster and computationally more efficient solutions. Given this state, compromises have to be made, sometimes even on a larger scale to realize a working real time segmentation network. The focus of our work is finding the most efficient solutions in research papers for this problem and then implementing it into a working segmentation network with live camera input. The network's main task will be to detect the drivable surface and its boundaries to provide reliable information about the spatial limitations for the autonomous vehicle's control system. The network will be utilized by the autonomous vehicle of Széchenyi István University's Research Center of Vehicle Industry. Since the on-board hardwares of autonomous vehicles are not as strong as the development machines for neural networks, special considerations are have to be made in terms of network size and optimization. To achieve good levels of accuracy the data provided for training has to be diverse enough to ensure adaptations to slightly changing conditions of the road surface.

**Keywords:** semantic segmentation, neural networks, real time network

## 1. Bevezetés

Az autonóm járművek megbízható működésének egyik alappillére a külvilágról történő információszerzés a megfelelő módokon, majd ezek feldolgozása és az információ kinyerése olyan formában, hogy a jármű szabályozórendszere és algoritmusai nagymértékű pontossággal és adekvát gyorsasággal legyenek képesek a számításokat elvégezni. A jármű körül zajló eseményekről számos módon kaphatunk információt, azonban nem mindegyik információ egyenértékű, ez pedig egyrészt annak a függvénye, hogy milyen környezetben dolgozunk (időjárás, útviszonyok), másrészt pedig attól is függ milyen módszerekkel dolgozzuk fel a beérkező információt. Ez lehet többek közt kamerakép, lézershkenner vagy radar adat, illetve gps jel. Az utóbbi pár évben teret nyert mélytanulás részét képező neurális hálózatok egy nagyon sikeres és lehetőségekkel teli módszert kínálnak arra, hogy a kameraképből releváns adatokat nyerjük ki a szabályozó algoritmusok számára.



1. ábra. Példa a bemeneti kameraképre (bal oldal), és a szegmentált képre (jobb oldal). Forrás: Cityscapes [4]

Az egyik ilyen mélytanulásra építő módszer a szemantikus szegmentáció (1. ábra), amely a bemeneti kép alapján olyan kimenetet ad vissza számunkra, ami a bemenet minden képpontjához valamilyen jelentést tartalmat rendel, így az egész kép részei szemantikailag jól elkülönülnek. Erre a módszerre építve számítási algoritmusokkal leszűrhetjük illetve megfelelő formára hozhatjuk a szabályozás szempontjából releváns információkat, így információt kaphatunk végül a felbukkanó akadályokról, azok milyenségéről, távolságáról, vagy a vezethető útfelületről. Ez a vezethető felület, illetve azok határai azok, melyet a jelen értekezésben szeretnénk kinyerni a kamerakép segítségével.

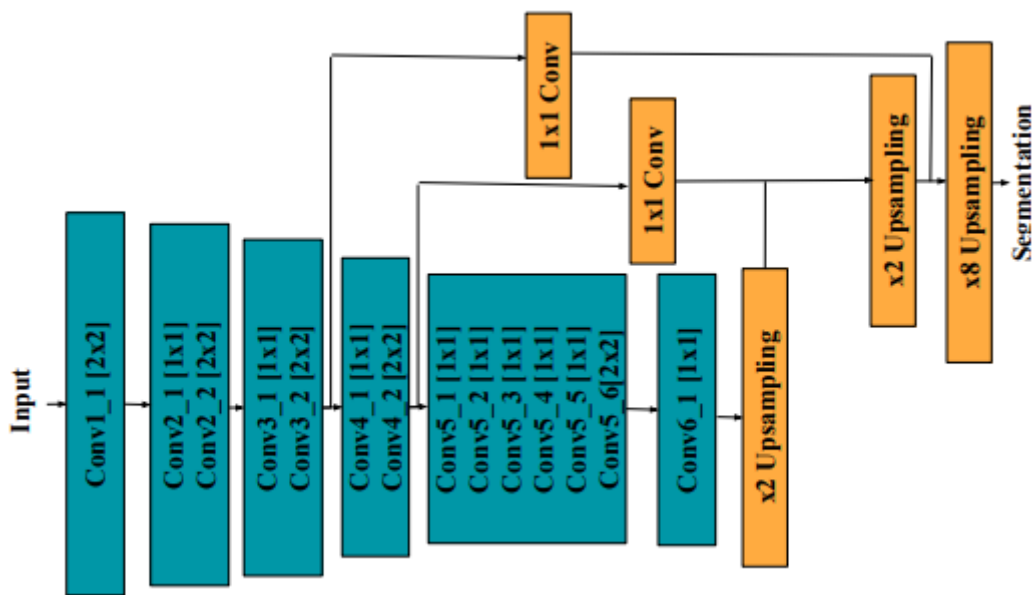
## 1. Problémafelvetés

A feladat, aminek a megoldására vállalkoztunk, egy valós időben működni képes szemantikus szegmentáló hálózat, melyből effektíven kinyerhetőek az útfelületre és az útfelületen felbukkanó akadályokra vonatkozó információk. Ha szegmentációról beszélünk, akkor két fő problémakör megoldását kell szem előtt tartanunk, a pontosságot és a gyorsaságot. Pontosság alatt azt értjük, hogy a hálózat betanítása után a valós környezetben lehetőleg minél változatosabb viszonyok és felbukkanó formák között is képes legyen pontos szegmentációt visszaadni a hálózat. A gyorsaság ebben a viszonylatban pedig azt jelenti, hogy a neurális hálózat olyan sebességgel tudja a predikciókat biztósítani, hogy a jármű sebességétől – és ennek megfelelően a helyváltoztatás mértékétől függően folytonos információforrásként szolgálhasson a szabályozáshoz. A szakirodalom, illetve a kutatások nagy része a témában a pontosságra koncentrál, míg a sebesség terén végzett kutatások a háttérbe szorulnak, így abban az esetben, ha szeretnénk, hogy a megépített és betanított neurális hálózatunk rendelkezzen mind a két tulajdonsággal, kisebb számú útmutatást tudunk csak segítségül hívni. A jelen

értekezésben megoldott problémát egy ilyen gyors szegmentáló hálózatokra összpontosító tanulmány alapján valósítottuk meg [1].

## 2. A megoldás menete

A felhasznált tanulmány megoldásának a különlegessége a szegmentáció folyamatának első körben két részre való bontása. Az első fél az úgynevezett „feature extractor” vagy enkóder, a másik fél pedig a dekóder ami a tényleges szegmentációért felel. A két részt a feladatoknak gyorsaság és pontosság szempontjából leginkább megfelelő, már létező hálózatarchitektúrák részeitől rakjuk össze. Így az egyes hálózatok előnyös tulajdonságait ötvözhetjük egy metarchitektúrán belül. Az enkóder a MobileNet [2] architektúrára épül a dekóder pedig egy FCN-8 [3] fejhálózat (lásd 2. ábra).



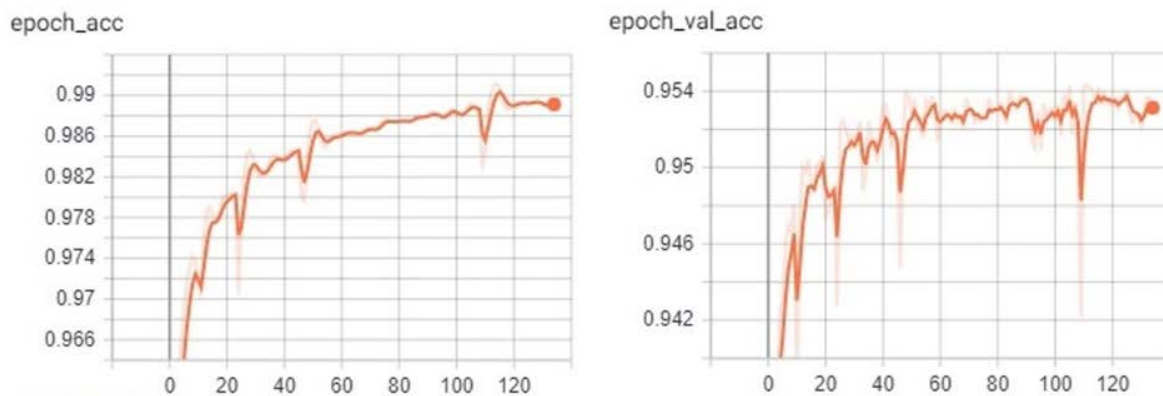
2. ábra. A megvalósított hálózatarchitektúra MobileNet enkóderrel (türkíz) és FCN-8 dekóderrel (sárga).  
 Forrás: [1]

A tanítás során a hálózat enkóder részéhez az Imagenet adatkészleten előtanított súlyokat töltöttük be, hogy ilyen módon felhasználhassuk az azon már megtanult számunkra is hasznos absztrakciókat. Az ezt követő lépés a mi általunk végzett tanítás volt, amit a Cityscapes adatkészleten tettünk meg. Ez a készlet rendkívül hasznos tud lenni olyan helyzetekben, amikor közúti közlekedés főbb részeit szeretnénk megismertetni a hálózatunkkal. A készlet 35 osztállyal rendelkezik, viszont ebből nekünk nem volt mindenre szükségünk a zárt versenypályán való működéshez, így 4 plusz 1 háttér osztály került be a végleges változatba. A tanítást 150 epoch hosszan tartott, a tanításhoz használt batch méret pedig 4 volt. Az első 15 epoch alatt az enkóder rész befagyasztásra került, és a fejhálózatot hoztuk közelebb a számunkra releváns súlyok irányába RMSprop optimalizáció segítségével, kicsit magasabb tanulási rátával ( $4e^{-3}$ ), majd 135 epochon keresztül tanítottuk az egész hálózatot Adam optimalizálással,  $4e^{-4}$  tanulási rátával. A blokkok közé került Batch normalizáció is, illetve L2 normalizáció is alkalmazásra került  $1e^{-3}$  lambda értékkel. A hatékonyság méréséhez a

„categorical crossentropy” veszteségfüggvényt alkalmaztuk, azonban itt lehetséges, hogy egy súlyozott változattal jobb eredmények születtek volna, ez a jövőben kipróbálásra kerül.

### 3. Eredmények

A hálózat tesztelése egy Nvidia GeForce GTX 1060 grafikus kártyán történt első körben, ahol a problémamegoldás és az optimalizáció után stabilan 67-70 Hz képfrekkirítési rátával teljesített 512 x 288 bemeneti képméret mellett. A képméretnél azért esett a választás erre az arányra, mert rendelkezünk már előzetesen annotált saját képekkel a szervezetben belül, illetve ez a képarány közel áll a Cityscapes [4] adatkészlet 2:1-es arányához. Sebesség szempontjából az előzetes tesztek biztatóak voltak, hiszen a mobil eszközre való migráció során lejjebb zuhanó képfrekkirítési ráta sem okozhat gondot, ha asztali eszközökön a képfrekkirítés egy sokkal magasabb szám. Az első teszt az autonóm járműünkben használt Nvidia Jetson Xavier eszközön 47 Hz-es képfrekkirítési rátát adott vissza, ami várakozáson felüli szám volt. A hálózat tanítását a fent említett tanulmány útmutatásai alapján végeztük, azzal különbséggel, hogy a saját megvalósításunkban csak 5 osztályt használtunk fel a tanítás során, melyek a jövőbeni tesztheink előrelátható környezete alapján került kiválasztásra. A végleges pontosság a tanító halmazon 98,9 % lett, a validációs halmazon pedig 95,3 % -os pontosságot sikerült elérnünk. A munkánk során a továbbiakban szeretnénk pontosítani a hálózat felismerőképességén és megbízhatóságán, kipróbálni további hatékony hálózatarchitektúrákat, valamint a felhasználás különböző módszereit is szeretnénk jobban megismerni és a gyakorlatban megvalósítani. A forráskód és a teszteléshez írt kód megtekinthető és kipróbálható a GitHub-on [5].



**3. ábra.** A tanítás végeredménye. A függőleges tengely a pontosság a vízszintes tengelyen pedig az iterációk száma látható, ahányszor megmutattuk a hálózatnak az adathalmazt tanítás közben (epoch szám).

### 4. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül a „Tehetséggondozás és kutatói utánpótlás fejlesztése autonóm járműirányítási technológiák területén (EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00001)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] Mennatullah Siam, Mostafa Gamal, Moemen Abdel-Razek, Senthil Yogamani, Martin Jagersand: "RTSeg: Real-time Semantic Segmentation Comparative Study"
- [2] Andrew G. Howard, Menglong Zhu, Bo Chen, Dmitry Kalenichenko, Weijun Wang, Tobias Weyand, Marco Andreetto, Hartwig Adam: "MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications"
- [3] Jonathan Long, Evan Shelhamer, Trevor Darrell "Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation"
- [4] Marius Cordts, Mohamed Omran, Sebastian Ramos, Timo Rehfeld, Markus Enzweiler, Rodrigo Benenson, Uwe Franke, Stefan Roth, Bernt Schiele "The Cityscapes Dataset for Semantic Urban Scene Understanding"
- [5] <https://github.com/norbertmarko/mobilenet>

# Modell-orientált módszerek használata járműszoftver fejlesztésénél

## Modell-oriented development of automotive software

Hajdu Csaba<sup>a</sup>, Krecht Rudolf<sup>b</sup>, Ballagi Áron<sup>c</sup>, Horváth Ernő<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont

[hajdu.csaba@ga.sze.hu](mailto:hajdu.csaba@ga.sze.hu)

<sup>b</sup>Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont

[krecht.rudolf@ga.sze.hu](mailto:krecht.rudolf@ga.sze.hu)

<sup>c</sup>Széchenyi István Egyetem, Automatizálási Tanszék

[ballagi@ga.sze.hu](mailto:ballagi@ga.sze.hu)

<sup>d</sup>Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont

[herno@ga.sze.hu](mailto:herno@ga.sze.hu)

**Absztrakt:** Napjainkban egyre nagyobb szerepet kapnak a komplex szoftveres megoldások a járműiparban. Ezen rendszerek célja egyre nagyobb mértékű automatizálás és az emberi beavatkozás minimálisra csökkentésének elérése. Bonyolultságuk miatt ezek a rendszerek viszonylag kevés funkció megvalósításával is kezelhetetlenné, áttekinthetlenné válnak, ami megnehezíti a szoftver továbbfejlesztését, karbantartását, emiatt a megbízhatóság is nehezen garantálható.

A közlemény célja ismertetni egy szoftveres fejlesztési folyamatot, amit egy kisméretű fejlesztőcsapat alkalmaz egy autonóm tesztjármű fejlesztésénél. A folyamat során a járműnek egy strukturált absztrakt leírására (metamodell) építkezünk, amely példányából generálhatók a jármű szoftveres komponenseinek és ezek konfigurációinak egy jelentős része, emellett a járműhöz kapcsolódó szimulációs környezet is felépíthető. A bemutatott folyamat használatával a változások gyorsan érvényesíthetők a fejlesztendő szoftveres rendszeren. További motiváció az elkészített szoftver más járművekre való átvitelének megkönnyítése, esetünkben a Szenergy hallgatói csapat által fejlesztett autonóm versenyjárműre.

**Kulcsszavak:** modell-orientált szoftverfejlesztés, metamodellezés, járműszoftver, kódgenerálás

**Abstract:** Nowadays complex software solutions started to gain prominent role in automotive industry. The aim of these systems to provide increasing level of autonomous operation and to minimize human intervention. Due to their complexity, these systems become unmanageable even with a relatively small amount of functions. This makes the software development and maintenance difficult, consequently the reliability is hard to guarantee for such software systems.

The goal of this article is to describe a development process, which is utilized by a small developer group at the development of an autonomous vehicle. The process utilizes a structured abstract description (metamodel) of the vehicle. The instance of this metamodel can be used to generate a large portion of software components and configurations, and it can be also used to build up the simulation of the vehicle. With this process the changes can be rapidly updated on the target software system. Additional motivation is to migrate the software to another vehicles, in our case to the autonomous racing car developed by the Szenergy student team.

**Keywords:** model-oriented software development, metamodeling, automotive software, code generation

## 1. Bevezetés

A járművek szoftveres megoldásai már széles körben elterjedtek egyszerűbb feladatok megvalósításában, mint például fedélzeti rendszerek, irányítástechnikai feladatok. Napjainkban azonban egyre aktuálisabbá komplex intelligens szoftveres rendszerek alkalmazása járművekben. A sofőrt segítő rendszereken túl, friss kutatási területként jelent meg az autonóm járművezérlés mint lehetséges kutatási irány. Bár pár éve aktuális, a téma aktualitását jelzi több kutatóintézet és ipari szereplő fókuszja a területre. Az utóbbi években több kísérlet is történt az autonóm járműveknek a behatárolására és definiálására (pl. SAE taxonómia).

Mint minden intelligens szoftverrendszer esetén, itt is probléma, hogy a verifikáció és a megbízhatóság garantálása egy jellemzően nehéz feladat. A tesztelés és az autonóm járművek biztonságának témakörével több új kutatás is foglalkozik. Ez releváns téma: a járműiparban alapvetően nagy megbízhatóságú elektronikus eszközök üzemelnek, ezzel szemben például a legtöbb intelligens rendszer azok jellemző sztochasztikus jellege miatt (pl.: neurális hálók, Markov-döntési folyamatok) nehezebben fogalmazható meg klasszikus értelemben a megbízhatóság.

Ugyanakkor bizonyos részek, amelyek például könyvtárfüggvények ismétlődő felhasználása, vagy absztrakt módon megfogalmazott (gráfszerű) kapcsolatok konfigurációja, a megbízhatóság gyakran garantálható. Különböző generálási mechanizmusok nélkül az így keletkezett kód nagy kiterjedésű és nehezen változtatható, amennyiben a mögöttes konfiguráció vagy kontextus részben megváltozik. Külön problémát okoz, ha az egyik járművön működő kódot költöztetni kell egy másik járműre, miközben a mögöttes logika nagyrészt változatlan. A cikkben bemutatott munkafolyamat ezt a problémát irányozza meg egy modellorientált eszköztár bemutatásával. Célunk, hogy olyan munkafolyamat álljon elő, aminek segítségével a jármű szoftverének egyes részkomponensei és konfigurációja absztrakt módon megfogalmazható legyen, ebből a kódbázis generálható legyen felgyorsítva a szoftveres fejlesztés folyamatát.

## 2. Probléma bemutatása

A Széchenyi István Egyetem 2018 második félévétől foglalkozik behatóbban az autonóm jármű kérdéskörével. Az eltelt időszakban egy tesztjármű készült el, ami egy átalakított kereskedelmi forgalomban is kapható Nissan Leaf. A tesztjármű elsődleges feladata demonstrációs jellegű: az egyetem ezen a járművön mutathatja be legújabb fejlesztéseit, próbálhat ki új algoritmusokat. A tesztjárművel meg lehet jelenni különböző rendezvényeken, ahol a teljesítendő feladatokat kitűzhetjük előre. Ezzel párhuzamosan a Szenergy csapat célként tűzte ki a Shell-Eco Marathon autonóm kategóriájában való indulást a saját versenyjárművével. Kutatóintézetünk segédkezik a csapatnak az autonóm feladatok fejlesztésében. A tesztjármű feladatai úgy lettek kialakítva, hogy azok könnyedén átemelhetők a versenyjármű problématerébe. A két járművet az 1. ábra mutatja.



**1. ábra.** A Széchenyi István Egyetem által fejlesztett járművek: a) SZEmission, b) Nissan Leaf tesztjármű

Ugyanakkor a szoftveres integráció és a kódbázis migrációja nem magától értetődő feladat. Ennek oka a járművek fizikai paramétereinek eltérései, a szenzorok eltérő elhelyezése és az eltérő alacsonyszintű vezérlés. Klasszikus esetben, az áttérés több programozói órát jelent, nagy hibalehetőségekkel.

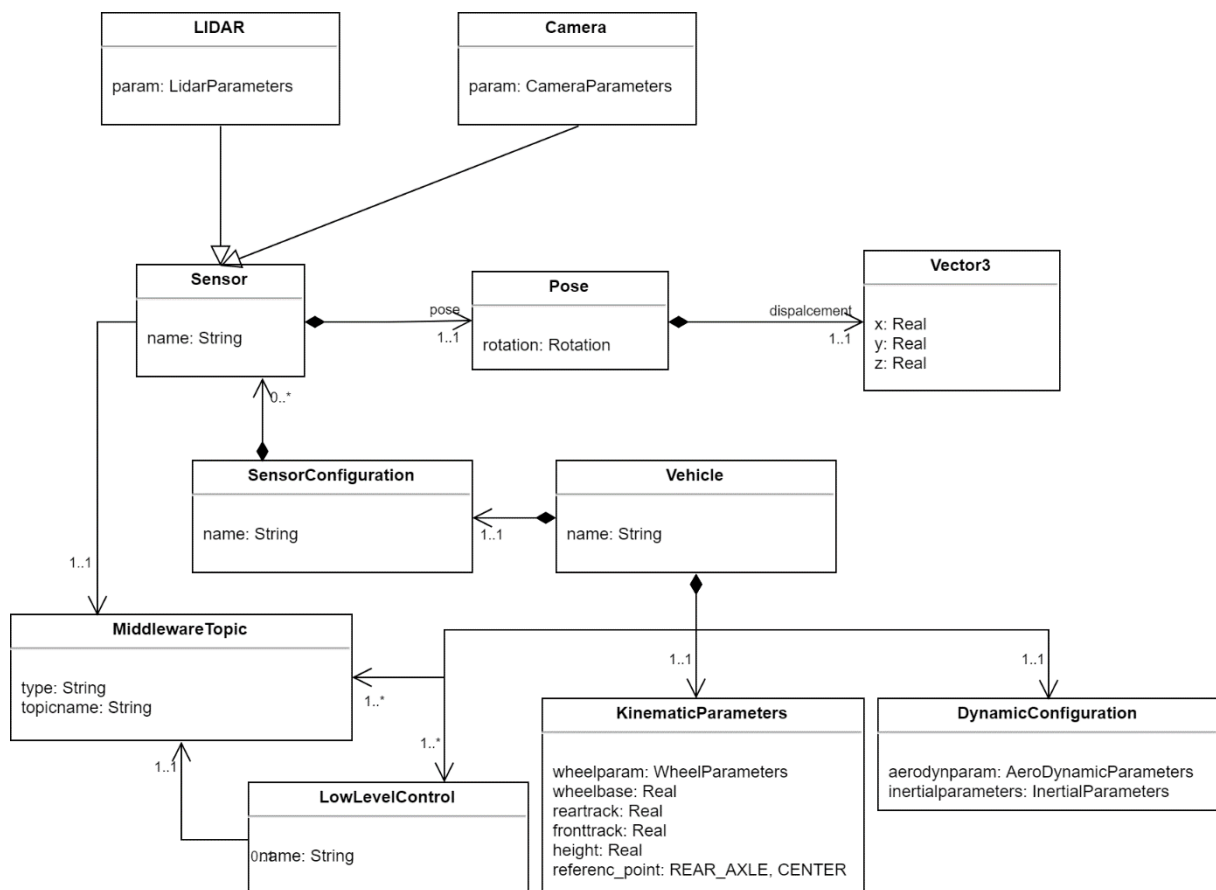
### 3. Absztrakt jármű metamodell

Megoldást ad a problémára a jármű absztrakt megfogalmazása egy gráfszerű modell példányaként. A modellben definiáljuk, milyen jellemzői, részegységei – és ezek közötti kapcsolatai - vannak a járműnek. Ezzel megfogalmazhatók a két járműnek közös jellemzői, de lehetővé teszi a különbségek strukturált kezelését is. Ezek alapján minden jármű a következő részkomponensekkel, attribútumokkal jellemezhető:

- Jármű azonosítása, például névvel.
- Fizikai paraméterek: a jármű fizikai jellemzői.
  - o Kinematikai paraméterek: nyomvonal, keréktáv, kerékszög korlátja, viszonyítási pont meghatározása (tömegközéppont, hátsó tengely, stb.). Kerékinematika: kerékátmérő, keréknyomvonal.
  - o Dinamikai paraméterek: tömeg, tömegközéppontok kezelése, aerodinamikai együtthatók.
  - o További erőátviteli jellemzők, például motorparaméterek, áttételek.
- Vezérlési modell: az alacsonyszintű vezérlés leírása, szoftveres leképezések megfogalmazása.
- Geometria: az egyes részek geometriájának leírása, vizuális megjelenés (külső burok, kerekek) vagy ütközési modell használata.
- Szenzormodell: megfogalmazzuk milyen szenzorok lettek a járművön elhelyezve (pl.: kamera, LIDAR), ezek hol vannak pozicionálva, milyen interfészen érhetők el.
- Szoftver összekötése, integrálása egy elosztott middleware környezetben (pl. Robot Operating System [1]). Ez kiemelt helyen szerepel a metamodellben, ugyanis egyik cél egy szoftveres leképezés előállítás a jármű leírásából.

Az elkészített metamodell nagyon részletes (ennek egy részletét mutatja a 2. ábra), a jármű több paramétereit bővebben megfogalmazza, további részkomponensekre bontja. A cikk az

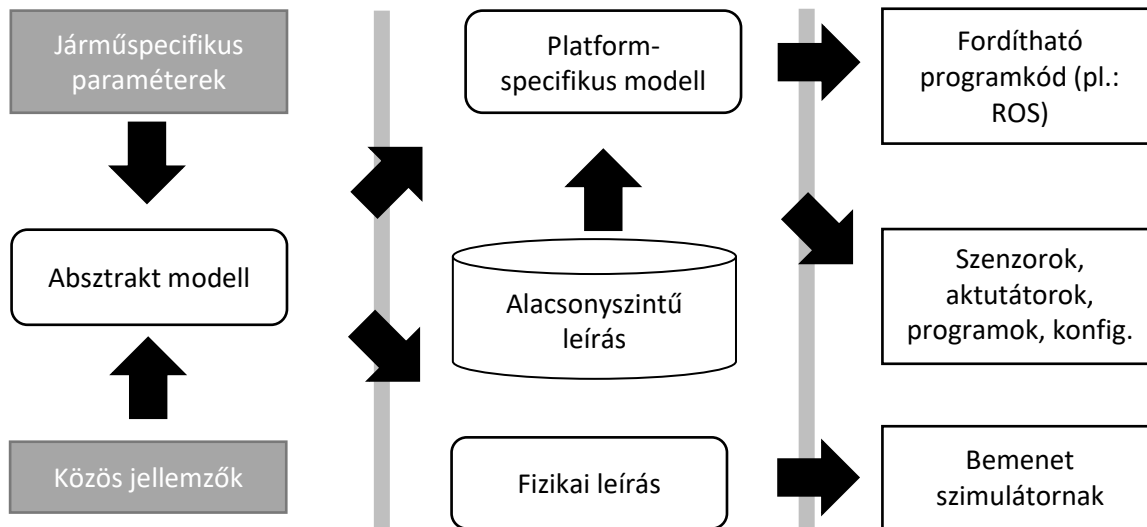
alapkategorizációk közötti relációkat mutatja be (ábra ide) az alapstruktúrát mutatja be. A metamodell elkészíthető egy modellezési nyelv segítségével, például UML vagy Eclipse Modeling Framework (EMF) Ecore [2] segítségével. Utóbbi előnye, hogy ez az iparban és az akadémiában elterjedt alkalmazás: rengeteg fejlesztői eszköz EMF-en, ezáltal Eclipse keretrendszeren alapszik (pl. szöveges szerkesztők [3], grafikus szerkesztők). Esetünkben is a járműnek leírására egy szöveges (Xtext alapú) szerkesztőt fejlesztettünk ki. Az EMF Segítségével ráadásul jól megfogható egy domén megfogalmazása, ami strukturált formában közölhető. A megfogalmazott absztrakt modell könnyen áttanszformálható más doménekbe, például VIATRA [4] [5] segítségével. Így például egy megfogalmazott absztrakt modell értelmezhető szoftvercsomagok közötti hálózat egy példányaként, megbízhatósági modellként, vagy a jármű kinematikai fájaként is. További lehetőség van más, egyes doménekhez tartozó modellekkel való bővítésre, például vezérlés leírása esetén alacsony szintű adatbázisokkal való kiegészítésre. Kódgenerálás esetén jól használható eszköz a JVM alapú Xtend nyelv, ami lehetővé teszi kódsablonok programozott használatát.



2. ábra. Járművek absztrakt modellje (részlet)

Az így elkészített doménmodell és az egyes domének közötti leképezések (transzformációk) együttesen új munkafolyamatot vonzanak magukkal (pl. 3. ábra). Először megfogalmazható egy modellben (szöveges leírásban) a jármű tipikus paraméterei. Ez tartalmazza az adott jármű jellemzőit és a járművek általános jellemzőit is. Ezt a leírást használhatjuk fel leírások áttanszformálására, *platform köztes modellekké (platform intermediate model PIM)* ami kiegészíthető különböző, a leképzett doménben modellszerű leírásokkal (pl. CANDBC

modellel). Az így kiegészített modell felhasználható a doménnek megfelelő analízisre, vagy célprogramok kódjának generálására.



**3. ábra.** Az alkalmazott modellorientált munkafolyamat.

#### 4. Absztrakt járműmodell alkalmazása konfiguráció generálására

Egyértelmű alkalmazása a jármű absztrakt modellnek szoftveres konfigurációk generálása. Cél, hogy a jármű leírás változásával (Xtext alapú szerkesztőben) egyidőben generálható legyen a konfiguráció elemei. Alapszintű konfiguráció ebben esetünkben a következő elemeket jelenti:

- Szenzorok statikus elhelyezése, kinematikai transzformáció.
- Szenzorok szoftveres konfigurációjának összeállítása.
- Kernelszintű meghajtók elindítása.
- Jármű kinematikai fája, bemenet például megjelenítésnek.
- Bemenet a szimulációnak.

A szenzorok leírása megjelenik a metamodellben, így ezek közvetlenül a jármű leírásának egy példányból felhasználhatók a konfiguráció részének összeállításához. A feladat így lényegében mindösszesen a szenzorok halmazának kijelölése – ez megtehető például VIATRA Query használatával. Minden egyes szenzor tartalmazza annak elhelyezését (pozíció és orientáció) amiből a statikus kinematikai transzformáció a jármű kijelölt referenciapontjához képest már könnyedén leképezhető. Ugyanígy a szenzorok minden információt tartalmaznak, hogy a szoftveres konfiguráció összeállítható legyen (elérési cím, middleware leképzés stb.), ezekből összeállítható egy strukturált (pl. XML sémát követő) indító fájl. Tipikusan például az ROS a szenzorokat egy XML-alapú indítófájl segítségével indítja el, amely az össze indításhoz szükséges paramétert tartalmazza. Analóg módon építhető fel a kernelszintű meghajtók beállítását célzó konfiguráció készítése. A különbség annyi, hogy az alacsonyszintű portok (pl.: CAN) kijelölése szükséges, ezek paramétereit kell az indítás során kiolvasni és a megfelelő helyen helyettesíteni egy Xtend kódsablonban (meghajtók betöltése a rendszerbe, hálózati portok felhúzása, bitráta meghatározása stb.).

Némileg bonyolultabb feladat a kinematikai fa generálása és ennek felhasználása a szimulátorban. Egyértelmű, hogy bármely, általunk használt gépjárműnek struktúrában megegyezik a kinematikai felírása: a különbségek a geometriában, dinamikai paraméterekben, kerék paraméterekben és vezérlési kényszerekben érhető tetten. Az első szükséges lépés ebben az esetben az, hogy a jármű leírását egy általánosabb kinematikai leíró modellbe transzformáljuk át. Ez a kinematikai leírás tetszőleges járműhöz és robothoz felhasználható, ehhez generátorok írhatók különböző szimulátorokhoz és kinematikai sémákhoz (pl. URDF, SDF). A 4. ábra egy ilyen transzformáció végeredményét mutatja: a tesztjármű leírásából kiindulva előállt a kinematikai leírás köztes modellje, amiből már generálható volt egy bemenet a szimulátornak (esetünkben Gazebo szimulátorba [6]).



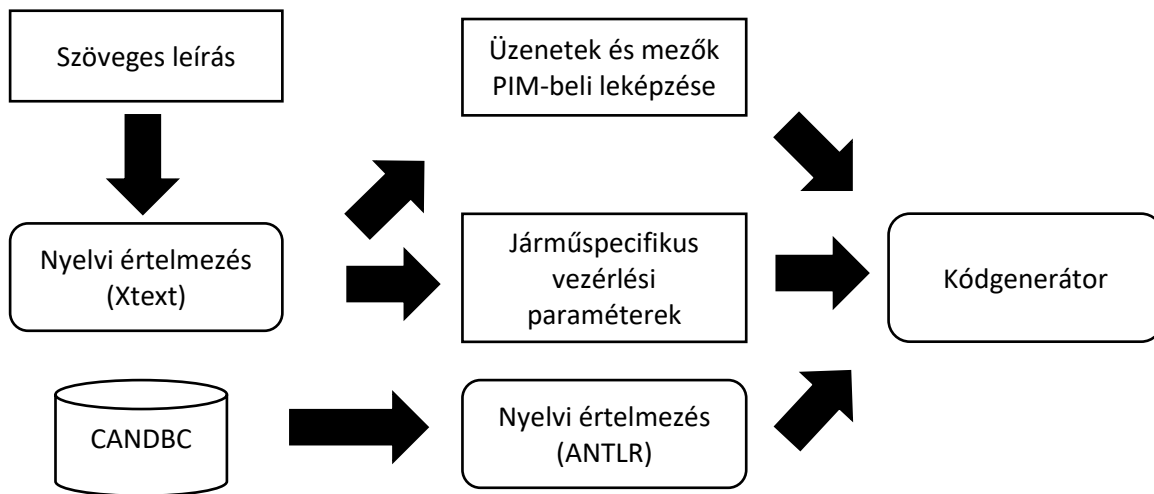
**4. ábra.** Leírásból generált szimuláció

## **5. Absztrakt járműmodell használata alacsonyszintű szoftver generálására**

Egy másik, folyamatában komplexebb feladat a járműleírásból alacsonyszintű szoftver kód generálása. Klasszikus programozói munkával az alacsonyszintű CAN programok megírásánál egyrészt egy üzenetleíró adatbázist használunk fel (CANDBC), ami tartalmazza a bejövő és kijövő üzenetek és jelzések leírását. Egyértelmű, hogy ez egy kritikus feladat, ugyanakkor jelentős fejlesztői hibák lehetőségeit is magában rejti – részben a CANDBC formátum tömörsége miatt is –, miközben jellemzően egyszerű, mechanikus logikára épülő szoftverről van szó. Ráadásul a leírás esetleges változásai nehezen követhetők nyomon a célszoftverben. Általános megoldás vagy teljesítményjellemzők miatt, vagy az egyes járművek jelentős eltérései miatt nehezen alkalmazhatók.

A már korábban bemutatott modellorientált folyamatot felhasználva erre a feladatra egy részfolyamatot dolgoztunk ki (5. ábra). Előnyös, hogy a CANDBC leírások jellemzően egyszerű szöveges leírások, amelyek jól jellemezhetők egy formális nyelvtannal. Ebből kiindulva egy ANTLR [7] [8] nyelvtant készítettünk: az ilyen jellegű leírás lehetővé teszi, hogy a jelenlegi feladattól eltérő esetekben is értelmezhesük a CANDBC leírást. A jármű leírása (a fejlesztett Xtext alapú szerkesztőben) tartalmazza, hogy melyik CAN üzenet és jelzés a middleware melyik (névvel azonosított) topikjára, azon belül milyen üzenettípusra képződik le. Így a járműleírás és a CANDBC együttesen felhasználható az alacsonyszintű programok generálására. További előny, hogy így csak azok az üzenetek kerülnek felhasználásra,

amelyekre az alkalmazáshoz éppen szükséges, nem kerül hirdetésre az összes CAN üzenet, ráadásul az adott architektúrának teljesen megfelelő elérésre fog leképeződni.



5. ábra. Munkafolyamat alacsony szintű (CAN alapú) program kódok generálására

## 6. Összefoglalás

A cikkben egy munkafolyamat részeként egy jármű leírásához használható szakértői modell lett részletesen bemutatva. A modellezés eredményeként kódgenerátorok készültek, ami a szoftveres konfigurációknak, szimulátorok bemenetének és alacsony szintű programok kódjának generálásához használható. A metamodell és a kódgenerátorok elérhetőek az intézményünk publikus GitHub tárhelyén: [https://github.com/szenergy/szenergy\\_mdse\\_tools](https://github.com/szenergy/szenergy_mdse_tools). A kitűzött cél teljesült, a leírás változásai jól nyomonkövethetőek és érvényesíthetőek a szoftverben.

Jövőbeni terveink között szerepel a konfiguráció kiterjesztése további szoftveres részekre, például számítási részhez tartozó (trajektóriatervezés, döntéstámogatás) csomagokra. Ehhez azt a transzformációt érezzük szükségesnek elkészíteni, ami a jármű leírását egy számítási hálózattá alakítja át. Ezen a példányon egyrészt végezhető az adott keretrendszeren jellemző ellenőrzések, analízisek. Szorosan összefügg ezzel, hogy a jármű modelljét kiegészítsük tervezési idejű kényszerekkel a tervezés folyamatának további könnyítését megcélozva. Itt az egyértelmű kényszerek mellett, kicsit komplexebb kényszerek leírását célozzuk meg, amelyek kiszűrhetik az eleve hibás leírásokat. Technikai jellegű cél az ROS 2 támogatása a jelenlegi munkafolyamat segítségével, az új keretrendszer által támasztott konfigurációs lépések megkönnyítésére.

## 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] M. Quigley *et al.*, “ROS: an open-source Robot Operating System,” 2009.
- [2] D. Steinberg, F. Budinsky, M. Paternostro, and E. Merks, *EMF: Eclipse Modeling Framework 2.0*, 2nd ed. Addison-Wesley Professional, 2009.
- [3] M. Eysholdt and 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, pp. 307–309.
- [4] D. Varró and A. Balogh, “The Model Transformation Language of the VIATRA2 Framework,” *Sci. Comput. Program.*, vol. 68, no. 3, pp. 214–234, Oct. 2007.
- [5] Z. Ujhelyi *et al.*, “EMF-IncQuery,” *Sci. Comput. Program.*, vol. 98, no. P1, pp. 80–99, Feb. 2015.
- [6] N. Koenig and A. Howard, “Design and Use Paradigms for Gazebo, An Open-Source Multi-Robot Simulator,” in *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2004, pp. 2149–2154.
- [7] T. J. Parr and R. W. Quong, “ANTLR: A predicated-LL(K) Parser Generator,” *Softw. Pract. Exper.*, vol. 25, no. 7, pp. 789–810, Jul. 1995.
- [8] T. Parr, *The Definitive ANTLR 4 Reference*, 2nd ed. Pragmatic Bookshelf, 2013.

# Esettanulmány autonóm tesztjármű fejlesztésére

## Use-case study of autonomous vehicle development

Hajdu Csaba<sup>a</sup>, Horváth Ernő<sup>b</sup>, Kőrös Péter<sup>c</sup>, Ballagi Áron<sup>d</sup>, Hollósi János<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont  
[hajdu.csaba@ga.sze.hu](mailto:hajdu.csaba@ga.sze.hu)

<sup>b</sup>Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont  
[herno@ga.sze.hu](mailto:herno@ga.sze.hu)

<sup>c</sup>Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont  
[korosp@ga.sze.hu](mailto:korosp@ga.sze.hu)

<sup>d</sup>Széchenyi István Egyetem, Automatizálási tanszék  
[ballagi@ga.sze.hu](mailto:ballagi@ga.sze.hu)

<sup>e</sup>Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutatóközpont  
[hollosi.janos@ga.sze.hu](mailto:hollosi.janos@ga.sze.hu)

**Absztrakt:** Az autonóm járművekhez köthető fejlesztések a közeljövőben nagy jelentőséggel bíró kutatási témának fognak számítani. Napjainkban is egyre több autóiipari vállalatnak és kutatóintézetnek is jelentős célkitűzései között szerepel a teljes autonómítás (SAE 5. szint) elérése, illetve a jelenlegi járműrendszerek kibővítése autonóm funkcionalitásokkal.

Az esettanulmány bemutatja a Széchenyi István Egyetem és a Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet által közösen fejlesztett autonóm tesztjárművet. Ez a jármű egy, a kereskedelmi forgalomban is kapható Nissan Leaf. A jármű elektronikája át lett alakítva, így nyílik lehetőség egyedi szoftver fejlesztésére és alkalmazására. A tanulmány időrendben felépítve mutatja be a jármű szoftverének jelenlegi állapotához szükséges lépéseket, a tervezői döntéseket és felmerült kihívásokat. A jármű működőképességét már nyilvánosság előtt bizonyította a zalaegerszegi ZalaZone járműipari tesztpályán. Zárszóként bemutatja a jövőben kifejlesztendő funkciókat, mint magasabb szintű missziók végrehajtása és vizuális információ felhasználása a teljes vezérlési folyamatban.

**Kulcsszavak:** autonóm járművek, Robot Operating System (ROS), robotika, szoftvertechnológia, elosztott rendszerek

**Abstract:** Developments related to autonomous vehicles are going to be research areas of high prominence. Recently, automotive companies and research institutes aimed to develop a vehicle with full autonomous (SAE level 5) capabilities and to extend with autonomous functionalities.

This use-case study presents a test vehicle developed in a joint effort between Széchenyi István University and the Computation and Automation Institute (MTA-SZTAKI). This vehicle is a commercially available Nissan Leaf. The car is electronically modified to allow the development and application of custom control software. This article describes the steps, the design decisions and challenges that lead to the initial version of the software system of the test vehicle. The vehicle demonstrated its operation in public at the opening ceremony of the ZalaZone automotive test track. As a summary, it presents the functionalities to be developed, such as execution of high-level missions and use of visual feedback in the whole control law.

**Keywords:** autonomous vehicle, Robot Operating System (ROS), robotics, software technology, distributed systems

## 1. Bevezetés

Az autonóm járművek kutatásának témája egyre aktuálisabb és egyre nagyobb jelentőséggel bíró műszaki területnek számít napjainkban. Sok egyetem (pl.: Oxford, Berkeley, Nagoya) és járműiparhoz köthető vállalat (pl. Waymo, Tesla, Toyota) tűzte ki célként autonóm járművek fejlesztését, ahol távlati cél a közvetlen emberi irányítás nélküli vezetés, SAE taxonómia [1] szerint az 5. autonóm szint elérése. A téma jellegében interdiszciplináris: sok más szakterület átfogó ismeretét igényli, lehetőség van specifikus részterületekben való elmélyedésre – például járműipari, szoftvertechnológiai és infrastrukturális fejlesztések. Emiatt egy kutatócsoportnak kihívást jelent az összetett kutatásokba való bekapcsolódás és a majdani tudományos hozzájárulás.

Az esettanulmány a Széchenyi István Egyetem Járműipari Kutatóközpontjának és a Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (SZTAKI) közös autonóm tesztjárművének szoftveres architektúráját mutatja be. Kutatócsoportunk elsősorban a jármű szemszögéből közelíti meg az autonóm járművek témáját. A cikk lépésenként mutatja be a szoftver fejlődését, aminek működését végül a ZalaZone rendezvényein demonstrálhattuk. A kontextus bemutatásával bemutatjuk a fejlesztéseink követelményeit, motivációját és röviden a járművet magát. Ezután az átfogó szoftveres és hardveres architektúra kerül ismertetésre. Ebben a fejezetben a különböző részfeladatok ismertetésre kerülnek. Továbbá itt kerül a rendszer jelenlegi hiányosságainak bővebb elemzése: a lokalizációt, akadálykerülést és a környezetdetektálást (vizuális információ felhasználásával) még javítani, fejleszteni szükséges. Lezárásképp a fennálló hiányosságok orvoslásán túl még további fejlesztések és tervek kerülnek ismertetésre, amelyekhez az eddig megvalósított tesztjármű biztos alapot ad.

## 2. Kontextus bemutatása

Ebben a részben a fejlesztés kontextusa és a kutatócsoport motivációi kerülnek részletesebb bemutatásra. Röviden a tesztjárműről is szó esik, főbb jellemzőire koncentrálva.

A Széchenyi István Egyetem 2018 második félévétől foglalkozik aktívan autonóm tesztjármű fejlesztésével. Ezeket a fejlesztéseket megelőzte doktoranduszok és egyetemi hallgatók számára megszervezett szakkör, ahol a különböző autonóm fejlesztések témakörében lehetett kutatási és fejlesztési munkákba bekapcsolódni. Hamarosan azonban a kutatóközpont különböző lehetőségeket kapott, hogy bekapcsolódjon autonóm járművek fejlesztésébe, különös fókusszal a szabályozástechnikai részen. Elvárás volt az egyértelmű kutatási és tudományos célok mellett, hogy a jármű működése látványosan demonstrálható legyen különböző események keretein belül, például a ZalaZone vagy egyetemünk rendezvényein. Az első ilyen rendezvényen – a ZalaZone megnyitó ünnepségén - a jármű feladata aránylag egyszerű volt: egy kijelölt pályán kellett irányítani a járművet, változó sebességprofil mellett. Ennek kiegészítéseként detektálni kellett az úttestre eső akadályt és kiterő manővert kellett végrehajtani a pálya lekövetése során. Ez a feladat a cikk során *demonstrációs feladatként* van hivatkozva.

Mindemellett célkitűzéseink között szerepelt a Szenergy hallgatói csapat elősegítése, hogy a *Royal Dutch Shell* vállalat által szervezett Eco-marathonon a csapat számára hagyományos energiahatékonysági versenyszám mellett, az autonóm jármű részen is megmérettesse magát. A projekt előrehaladása során emiatt is fontos szempont maradt, hogy hallgatók folyamatosan bevonásra kerüljenek, releváns tapasztalatot és tudást szerezzenek az autonóm járművek

témakörében, amit a leendő versenyfeladatok teljesítéséhez is fel tudnak használni. Mind a verseny során, mind a bemutató során a maximális megengedett sebesség 25 km/h.

A választott tesztjármű egy, a kereskedelmi forgalomban is kapható Nissan Leaf elektromos meghajtású személygépjármű volt (1.ábra). A jármű elektronikája céljainknak megfelelően át lett alakítva: fontos szempont volt, hogy külső szoftver segítségével a lehető legegyszerűbben lehessen vezérelni a járművet, miközben a legpontosabb információk is hozzáférhetők. Emiatt a longitudinális vezérlés során **sebességszabályozást**, laterális vezérlés esetén a **kerékszögek szabályozását** használjuk fel. Az alacsonyszintű szabályozást egy *Native Instruments compactRIO (cRIO)* alapú rendszeren valósítottuk meg, már a projekt egy korábbi fázisában. A jármű különböző pontokon (kerekek, kormánymű) gyárilag elhelyezett enkóderei szolgáltatják a vezérlőszoftver számára az alacsonyszintű visszacsatolást. A jármű elektromos rendszere képes további szenzorok és vezérlőegységek tápellátására.



**1.ábra.** Nissan Leaf tesztjármű (SZE-SZTAKI) a Zalazone tesztpályán (2019. május)

Alapul véve a már kifejlesztett *advanced driver-assistance* (ADAS) rendszereket (mint pl.: Autoware.AI [2]) és a demonstrációs feladat által támasztott követelményeket, a következő részfeladatokat azonosítottuk:

1. Alacsonyszintű szabályozás, ami a jármű és a saját cRIO rendszer CAN kommunikációjára épít.
2. Lokalizáció biztosítása, egyrészt egy megbízható, precíz szenzorinformációra alapozva (pl. differenciális GPS), másrészt elterjedt lokalizációs módszerekkel (pl. SLAM, Kálmán-szűrő).
3. Egy explicit kijelölt pálya pontos lekövetése, egy valós idejű pályakövető algoritmus használatával.
4. Akadályok alapszintű detektálása, pontfelhő információra – amit pl. egy LIDAR biztosít – alapozva. Alapvetően érdemes a környezetdetektálás bemenetére mint pontfelhő tekinteni, ennek (elő)feldolgozása már egy régóta aktívan kutatót téma, több nagyteljesítményű szoftveres programcsomagot eredményezve [3].
5. Futásidejű monitorozás megvalósítása a rendszer és komponenseinek felügyeletére, a detektált hibafolyam felhasználása a vezérlési folyamatban.

A jövőben a következő feladatokat szeretnénk megvalósítani, amivel komplex, az eredeti célkitűzéseken bőven túlmutató feladatok megvalósítását tűztük ki, akár a teljes autonómiát előíró részfeladatok teljesítését:

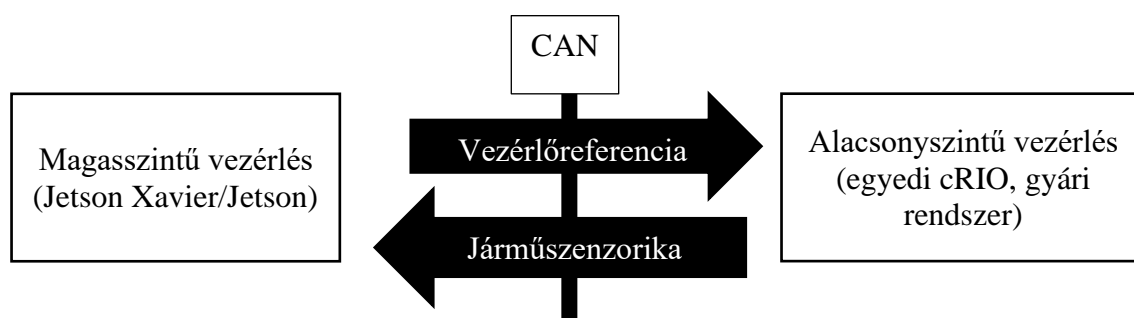
1. Komplex szenzoros információ – például vizuális információ, fuzionált szenzorforrások - alapján történő detektálás, a környezet felismerés, elemzése.
2. Szemantikus információ integrálása, térképek használata. Térképek tárolására és feldolgozására elterjedt formátum a Lanelet [4], ami a teljes világra kiterjedő részletes térképekkel rendelkező OpenStreetMap-en alapszik.
3. Komplex missziók végrehajtása és ezek futásidejű újratervezése a környezet változásainak megfelelően. Például ilyen misszió az egyetem körbejárása különböző pontokra vezényelve és a környezet változásainak a misszió megfelelő újratervezése.
4. Az ember és gép közötti kollaboráció szorosabbra fűzése, annak kényelmesebb tétele, finomhangolása.

A fent azonosított feladatok előirányozzák a tesztjármű szoftveres és hardveres rendszerének architektúráját és a felhasználandó komponenseket.

### 3. Hardveres felépítés

Ebben a fejezetben a tesztjármű hardveres felépítése kerül bemutatásra (használt szenzorok, számítási egységek stb.). Ebben a részben részletezve lesz az egyes szenzorok milyen adathalmaz visszacsatolását valósítja meg egy részfeladat ellátásához.

Az egyes feladatok alapvetően két csoportra lettek bontva: az alacsony szintű feladatok (hosszirányú és laterális szabályozás) ellátását az alacsony szintű szabályozásra bíztuk. A magasszintű feladatokat egy nagyteljesítményű beágyazott rendszeren alakítottuk ki. A jelentős adatmennyiség miatt a magasszintű vezérlőegységnek egy grafikus számítási egységgel (GPU) is felszerelt beágyazott rendszert választottunk ki (NVIDIA Jetson TX2, később NVIDIA Xavier). Az egység, adottságaiból fakadóan képes a szenzoros adatok feldolgozására és a vezérlési feladatok ellátására egyidejűleg. Magasszinten alkalmazásra került konfigurációs és felügyeleti feladatok ellátására egy ipari számítógép is. Áttekintően (2.ábra), a magasszintű vezérlés feladata az alacsony szintű vezérlést referenciaparancsokkal ellátni, a jármű által használt alacsony késleltetésű kommunikációs csatornáját felhasználva (CAN kommunikáció). Az alacsony szintű vezérlés a referencia vezérlés feldolgozása mellett szolgáltatja a járműszenzorika aktuális állapotát (pl. enkóderadatok).

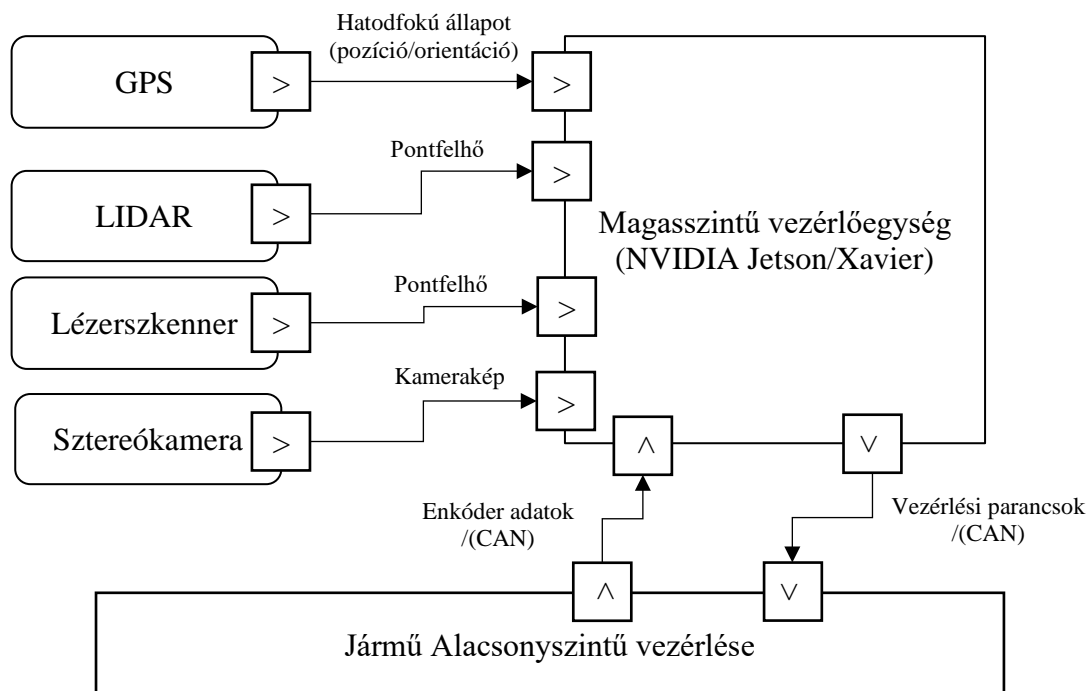


2.ábra. Magasszintű és alacsony szintű vezérlés áttekintése

A szenzorok úgy kerültek kiválasztásra, hogy alapvetően lehetőséget biztosítsanak arra, hogy megbízhatóan adhassanak alapinformációt, amivel az alapfeladat megvalósítható. A feladat így lépcsőzetesen volt felépíthető először az egyszerűbb feladatok megvalósítására összpontosítva.

Az egyes szenzorok és a (magas- és alacsonyszintű) vezérlések közötti kapcsolatot a 3.ábra foglalja össze. Összességében a jármű a következő szenzorokkal van felszerelve:

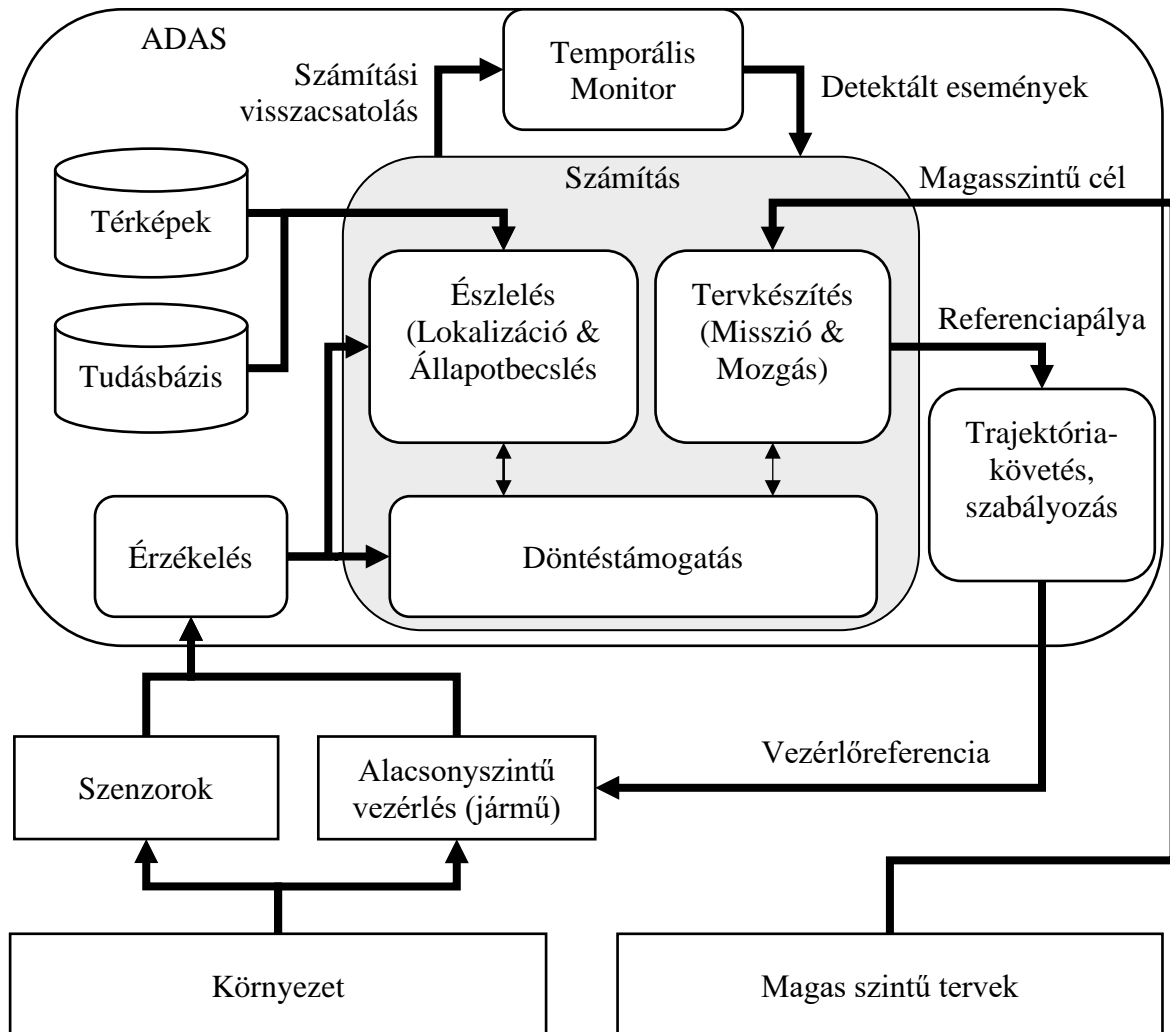
- **GNSS:** differenciális GNSS (KVH GPS), RTK képes, helymeghatározáshoz használható. A szenzor visszaadja a jármű hatodfokú állapotát (pozíció és orientáció együttesét), ami felhasználható a jármű aktuális állapotának megállapítására. Ez szükséges feltétele a lokalizációnak, ennél fogva a pályakövetésnek is.
- **Jármű enkóderek:** a járműszenzorika részeként kinyerhető a jármű kerekeinek sebessége és kormányművének (kerékszögek) állapota az enkóderadatok kiolvasásával. Ez felhasználható az odometria számításához, ami a lokalizációhoz járul hozzá.
- **LIDAR:** alapszintű környezetdetektáláshoz kis sebességen a kezdeti lépésekhez a legkézenfekvőbb lézeres távolságmérő egység (LIDAR) használata. A LIDAR egy pontfelhőt biztosít, ami párhuzamosított módszerekkel gyorsan feldolgozható. Jelenleg a jármű egy 16 csatornás LIDAR-ral (Velodyne VLP-16) van felszerelve, ami a jármű tetején van elhelyezve. A LIDAR használati lehetőségeit korlátozza annak lassú frissülése (~10 Hz) és magas ára.
- **Lézerszkennert:** További kiegészítésként az elülső rendszámábla mellett elhelyeztünk egy sík lézerszkennert (SICK kültéri). Ennek feladata egyrészt a környezetdetektálás kiegészítése további információval és egyfajta biztonsági logika biztosítása. További lézeres távolságmérő használatát annak gyors frissülése (~100 Hz) és megbízhatósága indokolja. A lézerszkennert képes a mért információkat egydimenziós pontfelhőként hirdetni.
- **Sztereókamera:** a demonstrációs feladat teljesítéséhez korlátozottan volt szükség vizuális információ használatára. Előnye, hogy több kamera felhasználásával a LIDAR-hoz hasonló pontfelhő állítható elő a képfeldolgozási feladatok mellett. A sztereókamera használata továbbá előirányozná neurális hálók kutatásának lehetőségét és meglévő hálók alkalmazását [5].



3.ábra. A jármű hardveres felépítménye

## 4. Szoftveres felépítés

Ebben a fejezetben a szoftveres architektúra kerül bemutatásra, időbeli sorrendben véve az implementációt az azonosított részfeladatokkal összhangban. A szoftveres rendszer a nyílt forráskódú Robot Operating System (ROS) [6] keretrendszerre épít. A tesztjármű szoftverét tesztelési és tanulási céllal az Autoware.AI [2] keretrendszerrel szereltük fel. Az általunk megvalósított szoftvercsomagok is ennek a keretrendszernek interfészeire épülnek, mivel ez jellemzően autóiipari alkalmazásokra építkeznek. Az általunk azonosított szoftverarchitektúra nagyban épül az ADAS rendszerek hivatalos terminológiájára (4.ábra), amit részben inspirált az általános mesterséges intelligencia ágens-modellje [7].



4.ábra. Szoftverarchitektúra, ADAS rendszerek és a feladatok alapján

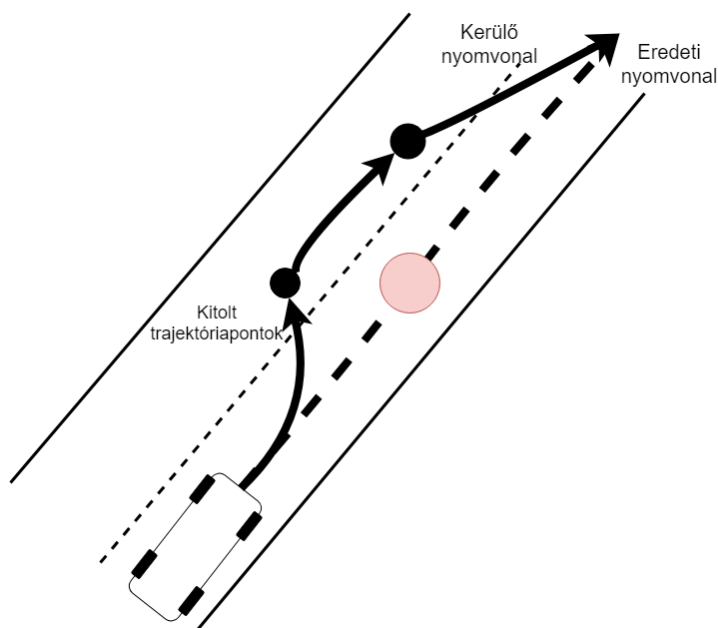
Az alacsony szintű vezérlés már egy korábbi projektből rendelkezésre állt, nyitott a lehetőség, hogy a későbbiekben bonyolultabb szabályozók legyenek alkalmazhatók (pl. soft-computing alapú). Az alacsony szintű irányítás és a szenzorok szoftveres illesztésének megléte lehetővé tette, hogy elsősorban a lokalizációval foglalkozzunk. További alap volt a lokalizációhoz, hogy a használt GNSS szenzor megbízhatóan nagy pontosságú (~2 cm), amennyiben a kellő feltételek adottak (RTK bázisállomás elérhető) – a ZalaZone teszt pályán az infrastruktúra kellőképpen ki lett építve. Az alacsony szintű enkóder adatok lehetségessé teszik odometria

számítását, ami a GNSS szenzor által előállított pózzal fuzionáltunk, Kálmán-szűrő [8] segítségével. Felmerült ennek a továbbfejlesztésekor, pontosításakor annak a lehetősége is, hogy explicit elérhető pontfelhő-térképek vagy szimultán lokalizáció és térképkészítés (SLAM) eljárással lokalizáljuk a járművet a normál-eloszlás transzformációk [9] [10] (normal distribution transform, NDT) használatával, a LIDAR pontfelhőt felhasználva bemenetként. Ennek a módszernek az Autoware.AI keretrendszeren belül elérhető egy alkalmazható verziója. Más megközelítés, de mindenképpen hasznos lehet vizuális SLAM alkalmazása például sztereókamera bemenete alapján, amiben az utóbbi időkben is jelentős áttörések voltak tapasztalhatók [11] [12]. A demonstráció idején a környezetben előforduló objektumok detektálásához egyszerű Euklideszi klaszterezésen alapuló eljárást használtunk [3], ami a LIDAR által biztosított pontfelhőt dolgozta fel. Ez visszaadta a detektált objektum konvex burkát és a burok geometriai középpontját. A demonstráció idején az eljárás képes volt az úttesten 15 méterre előforduló akadályt észlelni.

A lokalizáció és állapotbecslés jelenléte lehetővé tette, hogy egy explicit meghatározott pályát kövessünk le. Az explicit pálya egy pontja két információt tartalmaz: a pont helyzetét egy adott viszonyítási rendszerben (pl.: globális referencia GPS alapján) és a tartani kívánt longitudinális sebességet. A longitudinális szabályozást az alacsonyszintű vezérlőegység valósítja meg. Az aktuális pozíció és a legközelebbi pont(ok) felhasználásával számítható a laterális hiba, ami alapján a laterális szabályozást a magasszintű vezérlés megoldhatja. A demonstráció erejéig a viszonylag egyszerű pure-pursuit [13] [14] nevű geometriai elven működő pályakövető megoldást használtuk fel. Az algoritmus kielégítőnek bizonyult az adott sebességtartományban. A későbbiekben pontossága és hangolhatósága miatt model-prediktív irányításon [15] (model-predictive control, MPC) alapuló pályakövető algoritmust fogunk alkalmazni, aminek tesztelése és hangolása a cikk írásakor már folyamatban volt.

Következő lépés az explicit trajektória dinamikus módosítása volt a környezet valamilyen visszajelzésének megfelelően. Tanulási fázisban az Autoware.AI által biztosított pályatervezési eljárást használtuk, ami Hybrid A\* [16] algoritmuson alapult. Ez az eljárás ugyanakkor sokszor tervezett újra és viszonylag lassan dolgozott, emellett egy foglaltsági mezőt (occupancy-grid) igényelt, amit sokszor memória és számításigényes előállítani. A keretrendszeren belül elérhető még lattice alapú eljárás is, de ennek alkalmazásához térképek szükségesek, ami a demonstráció idején nem voltak elérhető. A demonstráció idején a legegyszerűbb megoldáshoz folyamodtunk: az észlelt objektum pozíciójához képest a legközelebbi pályapontok halmazát kihúztuk laterális irányba, így valósítva meg az elkerülő manővert (5.ábra). A későbbiekben ez a módszer kiváltható egy lokális pályatervező eljárás felhasználásával, például *időelasztikus szalag* (*time elastic band*) módszer [17] alkalmazásával.

Aktuális továbbfejlesztésként megjelent az egyes komponensek reaktív átalakítása. Az alapfelvetés az, hogy mind a trajektóriatervezés, mind a trajektóriakövetés eseményekre reagálnak vagy állítanak elő (például nem végrehajtható terv stb.). Alapvetően a detektálás állít elő olyan állapotterképeket, amelyek indukálhatnak vezérlőeseményeket. Ez inspirálta egy monitorrendszer elkészítését, ami ebben a láncolatban állít elő az elkerülő manővert indukáló eseményt. A monitor jelenleg figyeli az aktuális laterális hibát és az észlelési folyamat által detektált kimenetet. A megoldás más ADAS rendszerekhez képest annyiban újszerű, hogy futásidejű monitorozás a döntéshozatal szintjén is megjelenik, a hibadetektálás külön komponensként jelenik meg. A megoldást a *biztonságos megerősítőes tanulás* (*safe reinforcement learning*) [18] témakörében tett legújabb kutatások inspirálták.



**5.ábra.** Egyszerű kerülő manőver tervezése

Járműrendszerek esetében általában elmondható a nagyfokú megbízhatóság igénye. Sajnos, rendszerünk esetében a tesztelés nem lehetett elég széleskörű, a csapat méretéből kifolyólag. Segítségünkre különböző modellorientált paradigmák álltak rendelkezésre, amivel a kód bázis jelentős része generálható volt. A teljes szoftveres fejlesztési folyamatban a validáció és szoftveres integráció lépésében nagy szerepet játszott a szimuláció használata, ami *in silico* lehetővé tette a rendszer alapszintű tesztelését, *in vitro* a valós környezetben való alkalmazás előtt. A szimuláció a Gazebo [19] nevű szimulátorra építkezett, a tesztjárműnek a fizikai szimulációja is elkészült.

## 5. Összefoglalás

A cikk bemutatta egy autonóm tesztjármű fejlesztési folyamatát a kezdetektől vezetve. A fejlesztés még a kezdeti fázisban tart, további fejlesztések várhatók. Ugyanakkor eredmény már így is felmutatható, elsősorban a demonstrációkon és rendezvényeken mutatott szereplését illetően. A ZalaZone bemutató ceremónián a nyilvánosság előtt demonstrálhattuk a rendszer működőképességét, majd ezt követően egy újabb sajtórendezvényen jelenhettünk meg.

A jelenleg implementált részfeladatok javítása és finomhangolása szerepel rövidtávú célként. Elsősorban a lokalizáció és környezetdetektálás javítása egy fontos kihívás. Itt a már említett SLAM és lokalizációs módszerek (NDT, RTABMAP) kerülnének kipróbálásra és továbbfejlesztésre, hangolásra. A környezetdetektálás további fejlesztése aktuális, jelenleg is folyik intézetben belül a környezet detektálásának javítása LIDAR információk alapján. Továbbá vizuális információra is nagyban támaszkodnánk, amiben például neurális hálók használata lehetséges (szegmentáció, objektumdetektálás, mozgáskövetés stb.).

Középtávú célként a szemantikus információ, térképek felhasználása szerepel. Nyilvánvalóvá vált, hogy a trajektóriakövetés és -tervezés hatékonyabbá tehető ezen információk felhasználásával. Továbbá értelmes missziók tervezéséhez a térképek megléte elengedhetetlen. A pályatervezéshez emiatt is teremben van egy komplexebb szoftvercsomag, ami szemantikus információk figyelembevételére képes, emellett illeszkedik a monitorrendszer által detektált hibaláncolatra.

Végső cél egy olyan kollaboratív rendszer megépítése az autonóm funkciók mellett, amelyik nemcsak az ember-gép közötti kommunikációt, hanem gép-gép kollaborációt is felhasználja. Több tervezet van az infrastruktúra fejlesztésére is, ami az autonóm járművek működését irányul segíteni. Ebbe a kategóriába sorolható be a közlekedésben résztvevő többi (autonóm) jármű is. Jövőbeni tervként szeretnénk ezekre az eszközökre is építkezni, ezzel is kiegészíteni és javítani a már meglévő architektúrát.

## 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] Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. 2018.
- [2] S. Kato et al., “Autoware on Board: Enabling Autonomous Vehicles with Embedded Systems,” in 2018 ACM/IEEE 9th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS), 2018, pp. 287–296.
- [3] R. B. Rusu and S. Cousins, “3D is here: Point Cloud Library (PCL),” in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, 2011.
- [4] P. Bender, J. Ziegler, and C. Stiller, “Lanelets: Efficient map representation for autonomous driving,” in 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, 2014, pp. 420–425.
- [5] D. Feng et al., “Deep Multi-modal Object Detection and Semantic Segmentation for Autonomous Driving: Datasets, Methods, and Challenges,” CoRR, vol. abs/1902.07830, 2019.
- [6] M. Quigley et al., “ROS: an open-source Robot Operating System,” 2009.
- [7] S. Russell and P. Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall Press, 2009.
- [8] R. E. Kalman, “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems,” Trans. ASME–Journal Basic Eng., vol. 82, no. Series D, pp. 35–45, 1960.

- [9] P. Biber and W. Straßer, “The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching,” in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003, vol. 3, pp. 2743–2748 vol.3.
- [10] J. P. Saarinen, H. Andreasson, T. Stoyanov, and A. Lilienthal, “3D Normal Distributions Transform Occupancy Maps: An Efficient Representation for Mapping in Dynamic Environments,” *Int. J. Robot. Res.*, vol. 32, pp. 1627–1644, 2013.
- [11] M. Labbé and F. Michaud, “Appearance-Based Loop Closure Detection for Online Large-Scale and Long-Term Operation,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 29, no. 3, pp. 734–745, Jun. 2013.
- [12] M. Labbé and F. Michaud, “RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation,” *J. Field Robot.*, vol. 36, no. 2, pp. 416–446, 2019.
- [13] R. C. Coulter, “Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm,” *Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, CMU-RI-TR-92-01*, Jan. 1992.
- [14] M. Samuel, M. Hussein, and M. B. Mohamad, “A review of some pure-pursuit based path tracking techniques for control of autonomous vehicle,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 135, no. 1, pp. 35–38, 2016.
- [15] J. M. Snider, “Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking,” 2011.
- [16] J. Petereit, T. Emter, C. Frey, T. Kopfstedt, and A. Beutel, “Application of Hybrid A\* to an Autonomous Mobile Robot for Path Planning in Unstructured Outdoor Environments,” in *Proceedings of ROBOTIK 2012; 7th German Conference on Robotics*, 2012.
- [17] C. Rösmann, F. Hoffmann, and T. Bertram, “Kinodynamic trajectory optimization and control for car-like robots,” in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, pp. 5681–5686.
- [18] M. Alshiekh, R. Bloem, R. Ehlers, B. Könighofer, S. Niekum, and U. Topcu, “Safe Reinforcement Learning via Shielding,” *CoRR*, vol. abs/1708.08611, 2017.
- [19] N. Koenig and A. Howard, “Design and Use Paradigms for Gazebo, An Open-Source Multi-Robot Simulator,” in *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2004, pp. 2149–2154.

# Neurális hálózatok hatékonyságának növelése számítógéppel generált tanítási mintákkal

## Increasing the efficiency of neural networks with computer generated training sets

Hollósi János<sup>a</sup>, Krecht Rudolf<sup>b</sup>, Markó Norbert<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Széchenyi István Egyetem  
hollosi.janos@sze.hu

<sup>b</sup>Széchenyi István Egyetem  
krecht.rudolf@ga.sze.hu

<sup>c</sup>Széchenyi István Egyetem  
marko.norbert@ga.sze.hu

**Abstrakt:** A Széchenyi István Egyetemen egy önvezető járművet fejlesztünk a Shell Eco-marathon versenyre. Az egyik fő feladat, hogy létrehozzunk egy neurális hálózatot, mely képes szegmentálni a versenypálya útburkolatát, a pályát szegélyező biztonsági terelőelemeket és más speciális összetevőit a versenypályának. A feladat nehézségét az adja, hogy nem áll rendelkezésre megfelelő tanítási adatkészlet ilyen speciális objektumok számára. Csupán egy kis méretű adatkészlet áll rendelkezésünkre, ezért ezt szeretnénk kibővíteni számítógéppel generált virtuális tanítási mintákkal. A virtuális minták egy virtuális városi környezetből származnak. Munkánk során szeretnénk megvizsgálni a virtuális képek megjelenésének hatását a neurális hálózat hatékonyságának szemszögéből. A tanítási folyamat során valós képek és számítógéppel generált képek keverékéből álló adatkészleteket hozunk létre több különböző módon. Ezek után három eltérő neurális hálózat architektúrát tanítunk be útfelületek és terelőelemek szegmentálására. A tapasztalataink megmutatják, hogy a kevert adatkészletek milyen módon hatnak a hálózatok hatékonyságára.

**Kulcsszavak:** neurális hálózat, virtuális tanítási adatkészlet, önvezető járművek

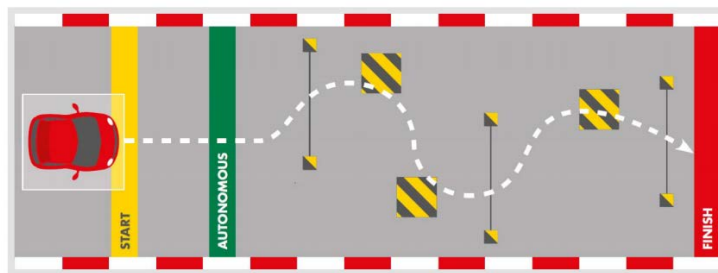
**Abstract:** At the Széchenyi István University we develop an autonomous racing car for the Shell Eco-marathon. One of the main tasks is to create a neural network which is segment the road surface, the protective barriers and other special components of the race track. The difficulty of this task, that there is no a right training dataset for this special issue. Only a limited size dataset available, therefore, we would like to expands this dataset with computer generated virtual training images, which comes from a virtual city environment. In this work we want to examine the effect of computer generated images on the efficiency of different neural networks. In the training process real images and computer generated virtual images are mixed in several different ways. After that, three different neural network architecture for road surface and road barrier detection are trained. Experiences shows how to mixing datasets and how they can improve efficiency.

**Keywords:** neural network, virtual training dataset, autonomous vehicles

## 1. Bevezetés

A Shell Eco-marathon egy nemzetközi verseny a Shell szervezésében. A Shell versenye egyetemi csapatoknak szól, ahol a csapatok célja, hogy minél energia-hatékonyabb versenyautót fejlesszenek. A Széchenyi István Egyetem csapata, a Szenergy Team, már több mint 10 éve aktív és sikeres résztvevője a Shell versenyének. Két évvel ezelőtt a Shell bejelentette, hogy az Eco-marathon egy új, önvezető járművek számára megnyitott versenyszámmal bővül. Az új versenyszám neve Autonomous Urban Concept (röviden AUC), ahol 5 különféle kihívást kell teljesíteni a csapatoknak, ahol a járműnek önvezető üzemmódban kell működni. A kihívások között olyan feladatokon kell helyt állni, mint parkolás, akadály elkerülés, versenykör megtétele és hasonlók.

A hosszú távú célunk, hogy a Szenergy Team versenyautója alkalmassá váljék az AUC kategóriában történő indulásra. Ennek egyik fontos mozzanata, hogy a jármű képes legyen érzékelni a környezetét különféle szenzorok alkalmazásával. Ebben a tanulmányban a vizuális érzékelésen alapuló környezet érzékeléssel foglalkozunk, annak is egy speciális aspektusával. A környezeti adatok feldolgozása során az első lépés, hogy a kamera kép síkjában látható objektumok elkülöníthetők, szegmentálhatók legyenek. Ehhez mesterséges neurális hálózat technikákat kívánunk alkalmazni. A neurális hálózatok elterjedt és hatásos módszerek képi adatok szegmentációja során. Számos népszerű és magas hatásfokú hálózatot találhatunk az elmúlt évek publikációit kutatva, úgymint Krizhevsky és társai által bemutatott AlexNet [1], Simonyan és Zisserman által publikált VGG Net[2], Szegedy és társai által prezentált GoogleNet[3], Shelhamer és társai által létrehozott FCN[4], Ronneberger és társai által létrehozott U-Net[5], He és társai által megkonstruált ResNet[6], valamint Zhao és társai által megjelentetett PSP Net[7]. A neurális hálózatok tanítási folyamata nagy mennyiségű és szerteágazó tanítási adatok meglétét kívánják meg, máskülönben a hálózat hatékonysága az elvárásoknak nem fog eleget tenni. A feladat nehézsége, hogy olyan speciális objektumok esetén, mint amik a Shell versenyén is előfordulhatnak, nem léteznek tanítási adatkészletek, vagy azok csak nagyon korlátozottak és tanításra nem igazán alkalmasak. Lehetőség van arra, hogy saját tanító készletet generáljunk, azonban ez rengeteg időt, energiát és pénzt emésztene fel. Ennek kiküszöbölésére alkalmaztunk a munkánk során úgynevezett virtuális tanítási mintákat. Az elmúlt évek során számos tanulmánnyal találkozhattunk, ahol a virtuális adatok alkalmazásával kíséreltek meg neurális hálózatokat tanítani. Peng és társai [8] CAD modellek felhasználásával tanítottak neurális hálózatokat speciális objektumok felismerésére. Tian és társai [9] egy munkafolyamatot mutattak be, ahol virtuális tereket és virtuális adatkészleteket generáltak neurális hálózatok számára. Židek és társai [10] virtuális modellekre épülő tanító minták segítségével történő neurális hálózat tanítást mutattak be. Tanulmányunkban azt akarjuk megvizsgálni, hogy a virtuális tanítási minták milyen módon járulnak hozzá a neurális hálózatok tanításához, annak érdekében, hogy a jövőben hatékonyabb hálózatokat legyünk képesek kialakítani, mely hozzájárul a Shell versenyén elérendő célokhoz is.



1. ábra Példa Shell Eco-marathon AUC versenypályára

## 2. Szimulációs környezet

Esetünkben a cél valóság-hű, elsősorban a Shell Eco-marathon Autonomous Urban Concept verseny szabályzatának megfelelő pályákat ábrázoló képhalmazok készítése. Az alkotott képek megismételhetőségének, paraméterezetőségének érdekében célszerű adott virtuális térben, szimulációs környezetben összeállítani a pályák 3D modelljét, ezeket valóságnak megfelelő textúrákkal ellátni. A következő lépés a képek elkészítése, amely kívánt időjárásra, fényviszonyokra vonatkozó paraméterek beállítása mellett végezhető a pálya állandó sebességű kamerával való bejárása által, időközönként képek rögzítésével. Az így elkészült valóság-hű képeken elvégzendő továbbá a szegmentálás, a rajta szereplő objektumok csoportokba sorolása, ennek megfelelő kijelölése (útfelszín, terelőelemek, növényzet stb.).

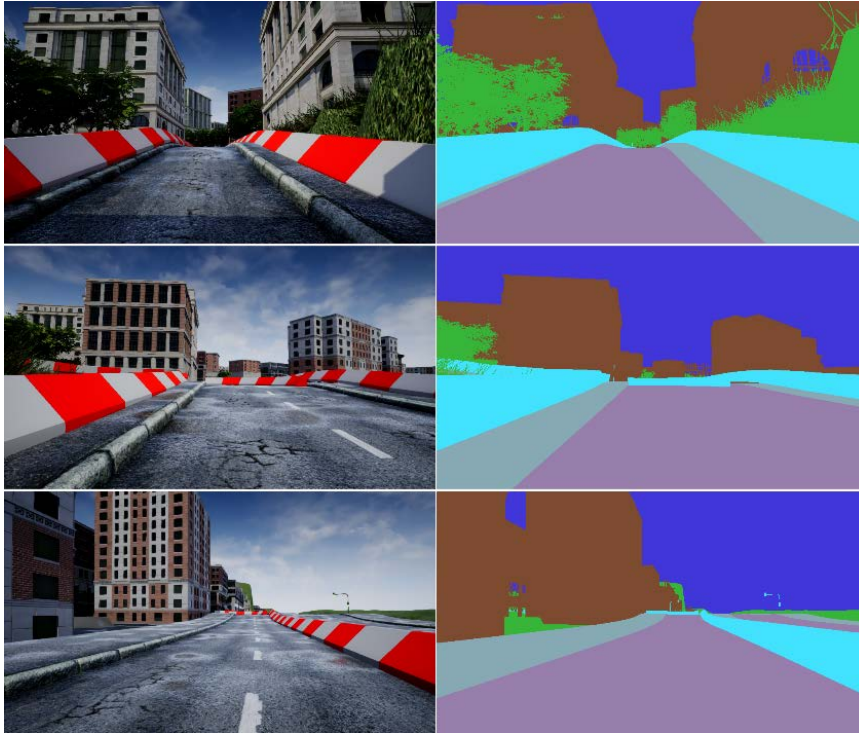
A feladat tulajdonságai alapján előírhatók az alkalmazandó szimulációs környezettel szemben támasztott követelmények:

- valóság-hű megjelenés,
- textúrák könnyű alkalmazhatósága,
- gyors munkamenet,
- paraméterezhető jellemzők (időjárás, fény),
- moduláris környezetépítés,
- CAD modellek importálhatósága.

Az Unreal Engine egy játékmotor, amely lehetővé teszi növényzetet, domborzatot, épületeket tartalmazó világok létrehozását, amelyben saját 3D-modellen alapuló modellek mozoghatnak. Megállapítható, hogy a vizuális szenzorokkal, kamerákkal foglalkozó mérnöki területeken a szimulációs szoftverekkel szemben támasztott követelmények nagy mértékben megegyeznek a játékiparban megfogalmazottakkal. Számítógépes játékok fejlesztése során fontos a valósághoz közel álló megjelenítés relatív kis hardverteljesítmény mellett. Hasonló igény fogalmazható meg kamerákkal felszerelt mobil robotok, járművek virtuális tesztelése során is. Valóság-hű környezetek alkalmazásával a kamerák szimulátoros kalibrálása lecsökkenti a valós tesztek költségeit, az átlagos rendszerigénynek köszönhetően a szimulációk könnyen kezelhetők maradnak. Fontos továbbá, hogy a kiterjedt fejlesztői bázis visszajelzéseinek, tapasztalatainak köszönhetően a játékmotoros szimulátoralkotás munkamenete gyorsabb lehet. A játékmotoron belüli modellfejlesztés C++ kódokkal, vagy az Unreal Engine 4 saját grafikus programozói felületével (Blueprint Editor) végezhető.

Mivel a cél a Shell Eco-marathon önvezető funkciókkal teljesíthető versenyszámai során alkalmazott versenypályákon való környezetészlelés, a modellezett környezetek elkészítése során is a Shell által előírt, versenypályára vonatkozó szabályokat szükséges szem előtt tartani. A szabályzat alapján a részt vevő járművek olyan pályákon versenyeznek, melyeket adott magasságú, váltakozó piros-fehér színű terelőelemek szegélyeznek. Versenyszámtól függetlenül, minden pályán megtalálható egy pályaszélességű sárga, zöld és piros vonal, melyek rendre a startot, az autonóm üzemmódba kapcsolást, és a versenyszám végét jelentik (1. ábra). Nagyon fontos, hogy a szimulált környezetek pontosan kövessék az adott szabályokat, ugyanis a verseny szabályzata azt várja el a résztvevőktől, hogy egy előre definiált, jól leírt környezetben valósítsanak meg önvezetést. Az on-board számítási képesség alacsony tartása érdekében fontos a feladat teljesítésére összpontosítani, a szabályok által definiált környezetek észlelésére felkészülni.

A fent leírtak alapján két virtuális környezetet alkalmaztunk tanító képhalmazok készítéséhez. Első esetben egy rendelkezésünkre álló város modelljét láttuk el a Shell szabályzatának megfelelő útszegélyező terelőelemekkel. Mivel a város modellje úthibákat, különböző aszfalttextúrákat is tartalmaz, ezen képekkel az útfelület felismerése robusztussá tehető. A képek generálása érdekében egy virtuális kamera bejárt egy előre megadott útvonalat, és adott időközönként képeket rögzített. A képeket automatizált algoritmus annotálta (2. ábra).



**2. ábra** Mintaképek a virtuális adatkészletből

A specifikus, szabályzat által előírt feladatokra való készülés érdekében több versenyszámnak megfelelő pályamodellt is készítettünk. A pályamodellek valóság-hű, növényzettel, égbolttal ellátott háttere, alapja közös, a városon kívül eső versenypályák környezetét imitálja (3. ábra).

**3. ábra** Általános környezet versenypályához

A versenypályák a küldetések leírásainak megfelelően a fent említett, általános környezetben kerültek megvalósításra. A pályán szereplő elemek CAD modelljei a Shell szabályzata alapján készültek el. Ezen módon megvalósult egy szlalompálya, illetve egy hosszabb egyenes végén elhelyezett parkolóhely parkolási feladatok gyakorlására (4. ábra). A tanítóképek szintén egy kamera adott pályán történő mozgásával készültek, a szegmentálást textúraváltással végeztük.



4. ábra Parkolóhely és szlalompálya

### 3. Alkalmazott neurális hálózatok

Kutatásunk során három, alapjaiban eltérő neurális hálózat architektúrát alkalmaztunk, melyek a következők voltak: FCN, U-Net, PSP Net. Mindhárom hálózati architektúra vizuális adatok képsíkban történő szegmentálására lettek kialakítva, ahol a bemeneti kép mérete  $256 \times 512 \times 3$ , a kimeneti szegmentáció eredménye pedig  $256 \times 512 \times 1$  méretű mátrix.

Az FCN [4] architektúra az úgynevezett teljesen konvolúciós rétegen alapszik, melynek célja, hogy egyszerű klasszifikációs hálózatokat szegmentációs feladatok megoldására tegye képessé. A megvalósított FCN alapú neurális hálózatunk blokk diagramja látható az 5. ábrán.

Legyen

$$\gamma = (\text{conv}, \text{bn}, \text{ReLU}), \quad (1)$$

$$b_1 = (\gamma, \gamma, \text{maxpooling}), \quad (2)$$

$$b_2 = (\gamma, \gamma, \gamma, \text{maxpooling}), \quad (3)$$

$$B_1 = (b_1, b_1, b_2), \quad (4)$$

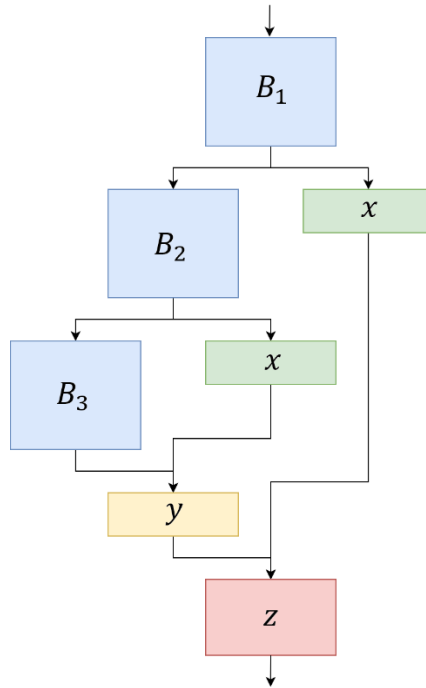
$$B_2 = (b_2), \quad (5)$$

$$B_3 = (b_2, \gamma, \gamma, \gamma), \quad (6)$$

$$x = (\text{conv}, \text{bn}), \quad (7)$$

$$y = (\text{ReLU}, \text{softmax}), \quad (8)$$

ahol *conv* a konvolúciós réteg, *bn* a batch normalization réteg, *ReLU* a ReLu aktivációs réteg és *maxpooling* a maximum összevonás alapú réteg. A megvalósításunkban minden konvolúciós réteg mérete  $3 \times 3$ , kivéve a  $B_3$  utolsó három rétegét, melyek mérete  $7 \times 7$ . A  $B_1$  blokk első két konvolúciós rétege 64 szűrőt, a harmadik és negyedik rétege 128 szűrőt, az utolsó három réteg 256 szűrőt tartalmaz. A  $B_2$  blokk minden konvolúciós rétege 512 darab szűrőt tartalmaz. A  $B_3$  blokkban az első három konvolúciós réteg 512 szűrőt, a többi 4096 szűrőt tartalmaz.



5. ábra FCN architektúra vázlata

A U-Net [5] hálózati architektúrát eredetileg orvosi képek szegmentálására alkották meg, ami az FCN technikán alapszik. A U-Net típusú hálózat két fő egységre bontható, egy fentről lefelé és egy lentől felfelé tartó mintavételezésből áll. A U-Net megvalósításunk vázlata a 6. ábrán látható.

Legyen

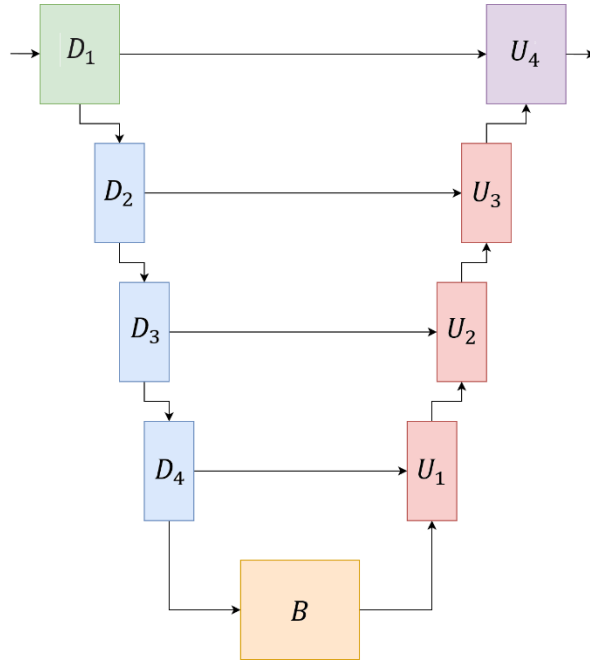
$$D_1 = D_2 = (\gamma, \gamma, \text{maxpooling}), \quad (9)$$

$$D_3 = D_4 = B = (\gamma, \gamma, \gamma, \text{maxpooling}), \quad (10)$$

$$U_1 = U_2 = U_3 = (\text{conv}^t, \text{bn}, \text{ReLU}, \gamma, \gamma), \quad (11)$$

$$U_4 = (\text{conv}^t, \text{bn}, \text{ReLU}, \gamma, \gamma, \text{conv}, \text{softmax}), \quad (12)$$

ahol  $\text{conv}^t$  a fordított konvolúció. A U-Net hálózatban minden konvolúciós szűrő mérete  $3 \times 3$ , a fordított konvolúciós rétegek mérete pedig  $2 \times 2$ . Minden konvolúciós réteg a  $D_1$  blokkban 64, a  $D_2$ -ben 128, a  $D_3$ -ban 256, a  $D_4$ -ben és a  $B$ -ben 512 darab szűrőt tartalmaz. Az  $U_1$  512, az  $U_2$  256, az  $U_3$  128 és az  $U_4$  64 szűrőt tartalmaz minden konvolúciós rétegben.



6. ábra U-Net architektúra vázlatja

A PSP Net [7] a legjobb megvalósításnak bizonyult az ImageNet [11] versenyén 2016. évben. A PSP Net alapvető építőköve az úgynevezett pyramid pooling réteg. A saját PSP Net megvalósításuk vázlatja a 7. ábrán látható.

Legyen

$$B_1 = (\gamma, \gamma, \gamma, \text{maxpooling}), \quad (13)$$

$$C = (\gamma, \gamma, \text{conv}, \text{bn}) + (\text{conv}, \text{bn}), \quad (14)$$

$$I = (\gamma, \gamma, \text{conv}, \text{bn}), \quad (15)$$

$$P_1 = (\text{avgpooling}, \text{conv}), \quad (16)$$

$$P_2 = (\text{avgpooling}, \text{conv}, \text{avgpooling}, \text{conv}), \quad (17)$$

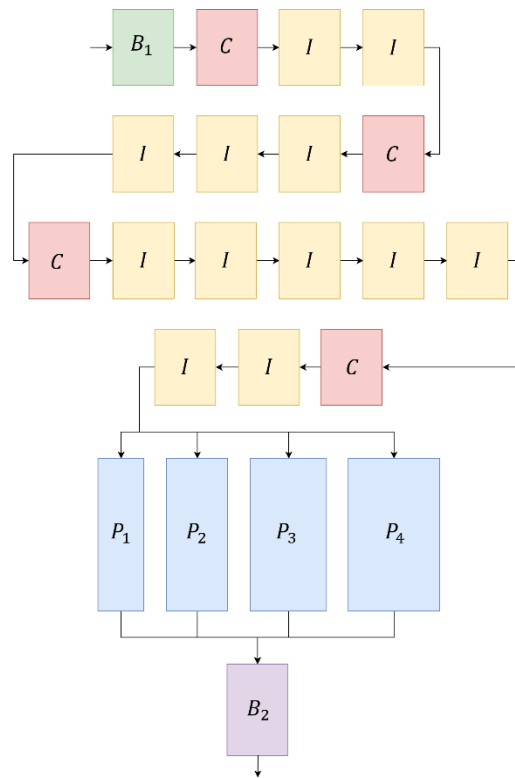
$$P_3 = (\text{avgpooling}, \text{conv}, \text{avgpooling}, \text{conv}, \text{avgpooling}, \text{conv}), \quad (18)$$

$$P_4 = (\text{avgpooling}, \text{conv}, \text{avgpooling}, \text{conv}, \text{avgpooling}, \text{conv}, \text{avgpooling}, \text{conv}), \quad (19)$$

$$B_2 = (\gamma, \text{dropout}, \text{conv}, \text{conv}^t, \text{softmax}), \quad (20)$$

ahol az *avgpooling* az átlagolással összevonó réteget jelöli. A  $B_1$  blokkban minden konvolúciós szűrő mérete  $3 \times 3$ . A  $C$  és az  $I$  blokkokban minden első és harmadik konvolúciós réteg mérete  $3 \times 3$ , és minden második konvolúciós réteg mérete  $1 \times 1$ . A  $B_2$  blokkban az első konvolúció mérete  $3 \times 3$ , a másodiké  $1 \times 1$ . A fordított konvolúció mérete  $16 \times 16$ . A  $B_1$  blokkban az első két konvolúciós réteg 64, az utolsó 128 szűrőt tartalmaz. A  $C$  és  $I$  blokkokban a konvolúciós rétegekben található szűrők darabszáma a következő képpen alakult. Az első  $C$  blokk és az első kettő  $I$  blokkok 64, 64, 256 szűrőt tartalmaznak. A második  $C$  blokk és a következő három  $I$  blokkok 128, 128, 512 szűrőt tartalmaz. A harmadik  $C$  blokk és az azt

követő öt darab  $I$  blokkok 256, 256, 1024 szűrőt tartalmaz. Az utolsó  $C$  blokk és az utolsó két  $I$  blokkok 512, 512, 2048 szűrőt tartalmaz.



7. ábra PSP Net architektúra vázlatja

#### 4. Neurális hálózatok tanítása

Ebben a tanulmányban a neurális hálózatok hatékonyságát akarjuk növelni virtuális tanítási minták alkalmazásával, ahol a virtuális minták a 2. fejezetben bemutatott virtuális városi környezetből érkeznek. A szimuláció segítségével generált képpárok felhasználásával több eltérő adatkészletet generáltunk, melyek virtuális és valós képeket is tartalmaznak. Az eltérő felépítő adatkészletek segítségével akarjuk megmutatni, hogy miként hat a virtuális tanítóminták megjelenése a hálózat hatékonyságára. A valós tanítási mintákhoz a Cityscapes [12] adatkészletet használtuk fel. A Cityscapes egy nagy méretű adatkészlet, amely szemantikus szegmentálás céljából készült, különféle forgalmi szituációkat tartalmazva. Az adatkészlet 5000 mintából áll, melyek 50 különböző városban készültek, változatos időjárási viszonyok mellett. Az adatkészlet 30 osztályba sorolja a látottakat, úgymint útburkolat, járda, gyalogos, jármű, közlekedési lámpa, égbolt stb. Jelen kutatásban csupán az útburkolat felismerése céljából használjuk az adatkészletet.

Munkánk során külön-külön vizsgáltuk az útfelület és a terelőelem szegmentálását. Az útfelület szegmentációja során vegyesen alkalmaztunk valós és virtuális tanítási mintákat. A terelőelem detektáláshoz csak virtuális mintákat használtunk a tanítás során. Az útburkolat felismeréshez 5 különböző adatkészletet generáltunk a virtuális környezetből származó képek és a Cityscapes készletből származó képek alapján. Az adatkészletek összetételét az 1. táblázat szemlélteti, ahol az látható, hogy az egyes adatkészletekben hány darab tanítási és tesztelési minta található a virtuális és a valós adatokból. A terelőelem szegmentálásához nem állt rendelkezésre értelmezhető valós adatkészlet. A tanításhoz 1572 darab virtuális mintát alkalmaztunk, a teszteléshez pedig 131 darab általunk manuálisan előállított valós teszt mintát használtunk fel.

1. táblázat Adatkészletek összetétele az útfelület szegmentáláshoz

Adatkészlet neve	Tanító készlet		Teszt készlet	
	Virtuális	Valós	Virtuális	Valós
A	0	500	0	125
B	500	500	0	250
C	1500	500	0	500
D	1500	1000	0	625
E	1500	1000	0	750

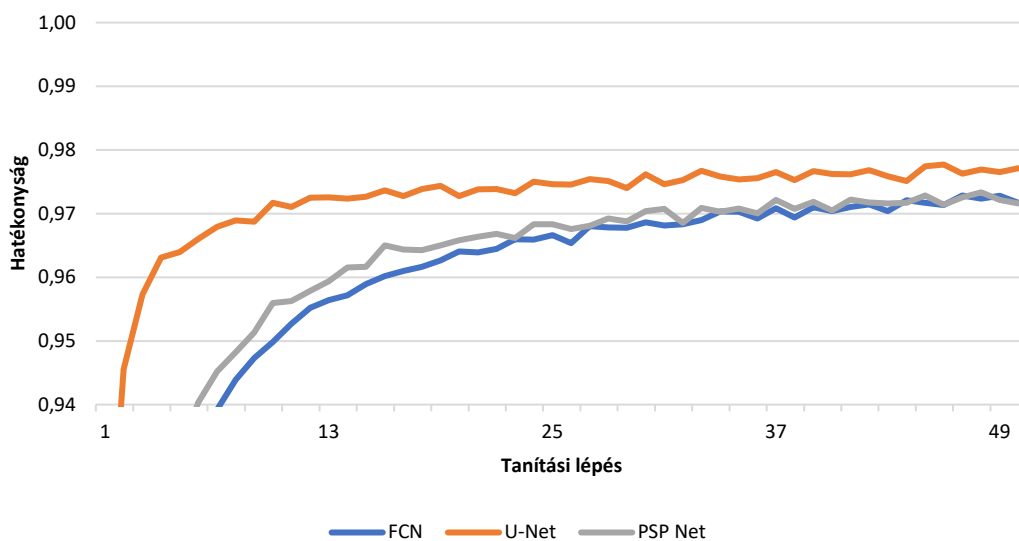
A tanítási folyamat során mind a három neurális hálózatot külön-külön tanítottuk az egyes adatkészletekkel. A tanítás során az Adam (Adaptív momentum) optimalizáló algoritmust alkalmaztuk, ahol a learning rate értéke  $10^{-4}$  volt, és a learning decay értéke  $5 \times 10^{-4}$  volt. A hálózatok hatékonyságának mérésére a dice coefficient (dc) mértéket alkalmaztuk a következők szerint:

$$dc(y, \hat{y}) = 1 - \frac{2y\hat{y}+1}{y+\hat{y}+1}, \quad (21)$$

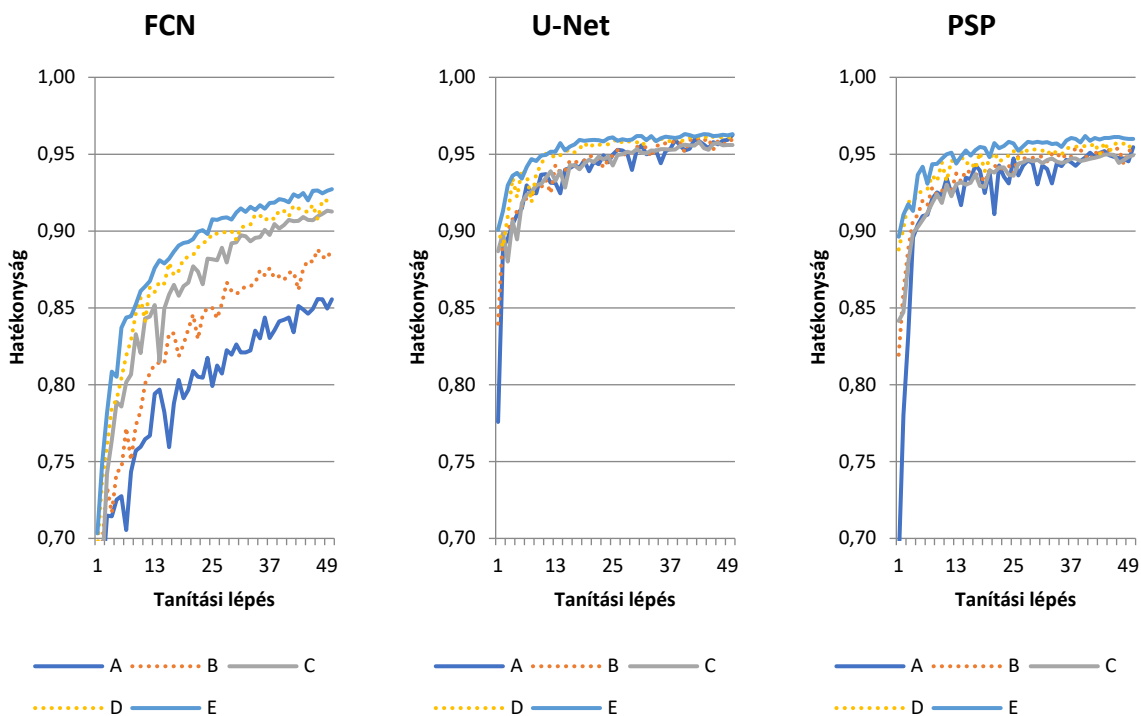
ahol  $y \in \{0, 1\}$  az elvárt kimenet adott osztályra nézve, és  $0 \leq \hat{y} \leq 1$  a hálózat által meghatározott, adott osztályhoz tartozás valószínűségi értéke.

## 5. Eredmények

A mérések során azt próbáltuk vizsgálni, hogy a virtuális képek mennyire alkalmasak arra, hogy segítségével neurális hálózatokat tanítsunk meg valós képek szegmentálására. Az útfelület szegmentálás hatékonyságának eredményét az 9. ábra szemlélteti. Az „A” adatkészlet csupán valós képeket tartalmaz. Ezzel érdemes összevetni az „C” adatkészlet eredményét, mely ugyanannyi valós képet tartalmaz, mint az „A” készlet, viszont ezen felül háromszor ennyi virtuális kép is megjelent az adatkészletben. Ennek köszönhetően a „C” adatkészlettel hatékonyság jellemzően nagy javulást eredményezett az „A” készlethez képest. A legtöbb mintát az „E” adatkészlet tartalmazza, ennek megfelelően ezzel sikerült elérni a legnagyobb hatékonyságot.



8. ábra Terelőelem szegmentálás hatékonysága



9. ábra Útburkolat szegmentálás hatékonysága a különféle adatkészleteken

A terelőelem szegmentálása során mindhárom hálózat elfogadható teljesítményt ért el. A három közül a U-Net teljesített a legjobb, ami megfelelt az előzetes elvárásainknak. Korábbi tapasztalataink is azt mutatják, hogy a U-Net nagyon hatékony hálózati architektúra különféle vizuális adatok szegmentálása során. A terelőelem szegmentálás eredményét a 8. ábra foglalja össze, ahol a tanítási iterációk során elért pontosság látható.

## 6. Összegzés

A munkánk során azt vizsgáltuk, hogy számítógéppel generált tanítási minták milyen hatékonysággal alkalmazhatók mesterséges neurális hálózatok tanítására vizuális adatok szegmentálási feladatok során. A módszer létjogosultsága abban rejlik, hogy speciális feladatok esetén, mint a Shell versenyén felmerülő, a versenypályához tartozó különféle elemek, nehéz alkalmas adatkészletet találni. Megoldás lehet saját adatkészlet előállítása, de ez sok idő és energia befektetést igényel. Ezt kiküszöbölendő merült fel a virtuális adatkészletek alkalmazása. Felmerül a kérdés, hogy nem valós, virtuális képek alapján a neurális hálózat mennyire hatékony lesz képes felismerni valós objektumokat, amiket azelőtt akár sosem látott. Kutatásunk során erre a kérdésre próbáltunk választ adni. A mérési eredményeink azt támasztják alá, hogy a virtuális képek alkalmasak arra, hogy segítségükkel neurális hálózatokat tanítsunk. A tapasztalatunk azt mutatja, hogy egyszerűbb objektumok esetén, mint a versenypályát szegélyező biztonsági korlátok, elégséges csupán virtuális képekkel elvégezni a tanítást. Azonban összetett, változatos objektumok esetén, mint az útburkolat felülete, nem vezet eredményhez hogyha csak virtuális képeket használunk. Azonban ha valós képekhez virtuális képeket keverünk, az képes bizonyos mértékben javítani a hatékonyságot. Eredményeink azt mutatják, hogy a legnagyobb javulást az FCN hálózat esetén sikerült elérni a kevert adatkészletek segítségével. A három hálózati architektúra közül az FCN felépítése a legegyszerűbb, a másik két hálózat meglehetősen robusztus és nagy számításgépi igényű. Ez azért

is fontos, mert a Shell versenyén a neurális hálózat egy kis méretű versenyautó fedélzetén, korlátozott hardver erőforrások felhasználásával fog futni. Emiatt fontos, hogy a hálózat kialakítása minél egyszerűbb legyen, erőforrás igénye pedig minél alacsonyabb legyen. Ez viszont azzal jár, hogy a tanítási folyamat során mélyrehatóbb tanításra van szüksége a hálózatnak, mint egy komplexebb hálózat esetén. Ezt a problémát azonban kiküszöbölhetjük az általunk bemutatott módszerrel.

## 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] G. A. Krizhevsky, I. Sutskever and G. E. Hinton: ImageNet classification with deep convolutional neural networks, *25th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS)*, Nevada, USA, vol. 1, pp. 1097-1105, 2012.
- [2] K. Simonyan and A. Zisserman: Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, *3rd International Conference on Learning Representations*, San Diego, USA, 2015.
- [3] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet and S. Reed: Going deeper with convolutions, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Boston, MA, USA, 2015.
- [4] E. Shelhamer, J. Long and T. Darrell: Fully convolutional networks for semantic segmentation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 39, no. 4, pp. 640-651, 2017.
- [5] O. Ronneberger, P. Fischer and T. Brox: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, In: *N. Navab, J. Hornegger, W. Wells, A. Frangi (eds) Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9351, pp. 234-241, Springer, Cham, 2015.
- [6] K. He, X. Zhang, S. Ren and J. Sun: Deep residual learning for image recognition, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Las Vegas, NV, USA, pp. 770-778, 2016.
- [7] H. Zhao, J. Shi, X. Qi, X. Wang and J. Jia: Pyramid Scene Parsing Network, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, USA, 2017.
- [8] X. Peng, B. Sun, K. Ali and K. Saenko: Learning deep object detectors from 3D models, *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Santiago, Chile, pp. 1278-1286, 2015.

- [9] Y. Tian, X. Li, K. Wang and F. Wang: Training and Testing Object Detectors with Virtual Images, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 5, no. 2, pp. 539-546, 2018.
- [10] K. Židek, P. Lazorík, J. Pitel and A. Hošovský: An Automated Training of Deep Learning Networks by 3D Virtual Models for Object Recognition, *Symmetry*, vol. 11, pp. 496-511, 2019.
- [11] O. Russakovsky, J. Deng, H. Su et al.: ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge, *International Journal of Computer Vision*, pp. 211-252, 2015.
- [12] M. Cordts, M. Omran, S. Ramos, T. Rehfeld, M. Enzweiler, R. Benenson, U. Franke, S. Roth, and B. Schiele: The Cityscapes Dataset for Semantic Urban Scene Understanding, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, USA, 2016.

# Vonóelemes elektromos hajtáslánc tervezése energiahatékony kísérleti jármű számára

## Design of an electric powertrain for an energy efficient vehicle using flexible mechanical elements

Pusztai Zoltán<sup>a</sup>, Kőrös Péter<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Széchenyi István Egyetem Járműipari Kutatóközpont  
zoltan.pusztai@ga.sze.hu

<sup>b</sup>Széchenyi István Egyetem Járműipari Kutatóközpont  
korosp@ga.sze.hu

**Absztrakt:** Az energiahatékonyság szempontjából a hajtáslánc a jármű egyik központi eleme, ahol a hatékonyság mellett a megbízhatóság különösen fontos. Egy verseny célú kísérleti jármű elektromos hajtásrendszerét sok oldalról lehet megközelíteni. Munkánk során olyan, modulárisan felépített elektromos hajtásláncvariációk megtervezése volt a célunk, ahol vonóelemes hajtásegységeket (fogasszíj, lánc), közvetlenül a jármű meghajtására használunk fel. A tervezés során nagy hangsúlyt fektettünk a végeelemes szimulációra, amit a teherviselő alkatrészek ellenőrzéséhez és topológiai optimalizálásához is felhasználtunk. Az optimalizálási folyamat során a tömeg csökkentése a cél, az alkatrészek szilárdságtani tulajdonságainak megtartása mellett. A cikkben röviden ismertetjük a hajtásláncvariációk szerkezeti felépítését és az optimalizálás folyamatát. A cikkben a két megvalósított konstrukciót mutatjuk be.

**Kulcsszavak:** elektromos, hajtáslánc, FEM, topológiai optimalizálás

**Abstract:** The drivetrain is one of the central components of the vehicle, where energy efficiency is extremely important factor, beside reliability. The electric drivetrain of an experimental vehicle can be approached from many various views. During the project, our goal was to design modularly constructed electric drivetrain variations, where we directly use flexible mechanical elements (timing belts, roller chains) to drive the vehicle. During the design period, great emphasis was put on FEM simulation, which was also used for safety checks and topology optimizations of the load carrying structural parts. The goal of the topology optimization process is to reduce the mass of the part, while maintaining the same strength characteristics of the components. This paper briefly describes the structure of the powertrain variations and the optimization process. This paper also demonstrates the two realized and implemented construction.

**Keywords:** electric, powertrain, FEM, topology optimization

## 1. Bevezetés

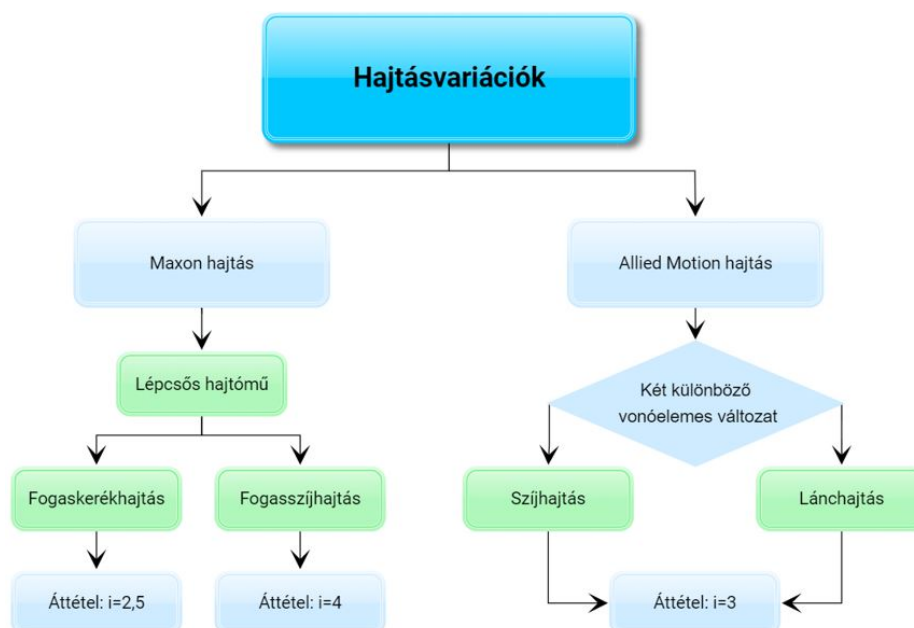
Az elektromos versenyjármű kifejezetten a Shell Eco-marathon (SEM) energiahatékonysági versenyre készült, ahol az Urban Concept kategóriában versenyez. A tervezés során ezért a SEM versenyszabályait és irányelveit vettük alapul, kiegészítve azokkal, az általunk támasztott követelményekkel, amik a jármű versenyképességet növelik. A modularitás és a járműtömeg minimalizálása pontosan ilyen követelmények. A hajtáslánc tulajdonságait mindig az adott versenypálya körülményeihez kell igazítani, azonban ezek folyamatosan

változnak. Egy olyan konstrukció létrehozása, ami biztosítja a hajtásláncvariációk könnyű cseréjét nagyban növeli a versenyképességet, hiszen hosszadalmas átalakítások nélkül lehet kipróbálni a különböző tulajdonságú hajtásláncokat, megtalálva az adott versenypályára optimális megoldást. A különböző hajtásvariációk közötti eltérések, hatásokra gyakorolt befolyását vizsgálhatjuk a továbbiakban, kiemelt figyelmet fordítva a vonóelemekre.

## 2. Hajtásláncvariációk bemutatása

A korábbi versenyen gyűjtött telemetria adatokat elemezve, számszerűsítettük a járműtömeg hatását az energiafogyasztásra, ezek alapján pedig alacsonyabb tömegű konstrukciók megalkotását tűztük ki célul. A meghajtó motorok feltérképezését követően két motort választottunk, amihez megterveztük a kapcsolódó hajtásrendszert. Az egyik változatban 2 db Maxon RE 50 típusú, 200W névleges teljesítményű kefések DC motorhoz terveztünk meg a két lépcsőben megvalósuló hajtásátalakítást. A motor nagy névleges fordulatszáma és alacsony nyomatéka miatt volt szükség, a több fokozatban megvalósuló lassításra. Az első lépcsőben a két motort egy könnyűszerkezetes fogaskerék hajtóművel kapcsoljuk össze, ami után opcionálisan egy bi-stabil elektromágneses tengelykapcsoló egységet is elhelyezhetünk. Ez a tengelykapcsoló egység a szabadonfutás során fellépő veszteségenergiák csökkentését szolgálja. A tengelykapcsoló házból kilépő tengelyt és a hajtott kerékagyat fogasszíjhajtás kapcsolja össze. [1]

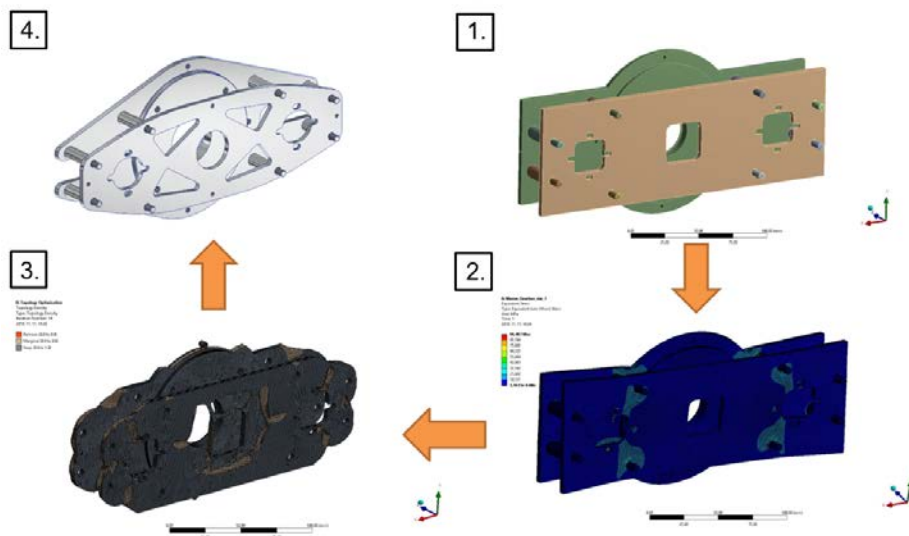
A másik hajtó motor esetén a választásunk egy Allied Motion PMSM motorra esett, a QB03403-as jelölésű motor már alacsonyabb névleges fordulatszámmal és nagyobb nyomatékkal rendelkezik, ezért ebben az esetben a hajtásátalakítást egy lépcsőben megoldható. Az egyszerű konstrukció miatt, itt a szíjhajtás mellett, láncfajtással is használható konstrukciót terveztünk, melyet a későbbiekben összehasonlító merésekkel tudunk tovább elemezni. Az 1. ábrán a hajtásvariációk összefoglalását láthatjuk.



1. ábra. Hajtásláncvariációk összefoglalása

### 3. Maxon hajtásvariáció

A Maxon motorok fogaskerék-hajtását üvegszálerősítéses poliamid kompozitból készült fogaskerekkel oldottuk meg, amikkel  $i=2,5$  lassító áttételt valósítunk meg. A fogaskerekeket statikus szilárdságtani szimulációval ellenőriztük az Ansys 19.1 szoftvercsomagjával, amivel a topológiai optimalizálást is elvégeztük. Az egyik legjobb példa erre a 2. ábrán látható hajtóműház topológiai optimalizálása. Az első lépésben egy elnagyolt geometriát vizsgálunk, a kész szerkezeten fellépő terheléseket alkalmazva. A lefutott szilárdságtani vizsgálat eredményeit felhasználva, az optimalizáló modul segítségével, az adott célfüggvényeknek megfelelő geometriát alakítjuk ki. Az optimalizálás során, kényszereket alkalmazva tudjuk szem előtt tartani a gyártáshelyességet és a funkcionalitást. [2]



2. ábra. A topológiai optimalizálás folyamata

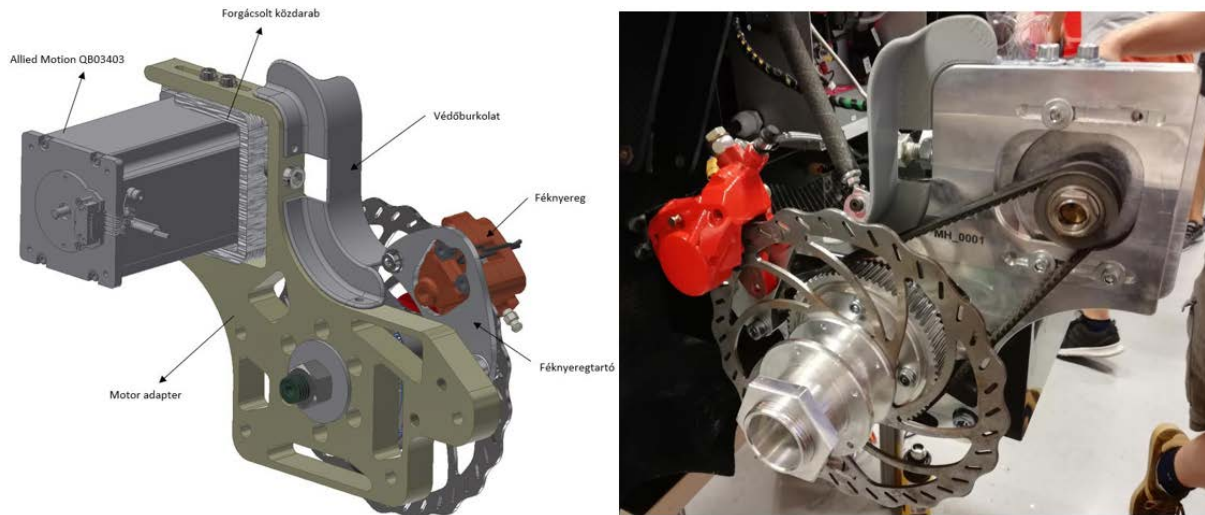
Az optimalizálás eredményét visszavezetjük a tervező programba és a továbbiakban ehhez kapcsolódva építjük fel a végleges CAD modellt. A tengelykapcsolóházból kimenő tengelyen helyezük el a szíjhajtás meghajtó tárcsáját, amin a szíjvezetésről egy vezetőperem gondoskodik. Egységes rögzítési pontokat alakítottunk ki, amik segítségével a motortartó adapterhez tudjuk rögzíteni a hajtást, ezek a rögzítési pontok mindkét hajtásvariációnál megegyeznek. A fő egység modelljét és az elkészült Maxon hajtást a 3. ábrán láthatjuk.



3. ábra. A modellezett és megvalósult Maxon hajtás főegysége

## 4. Allied Motion hajtásvariáció

A PMSM-hez illesztett közdarab gondoskodik az egységes rögzítési pontokról, továbbá a szíj/láncfeszítést is lehetővé teszi. A vonóelemes hajtások úgy lettek kiszámolva, hogy a különböző konstrukciók közötti tengelytávolság változás  $\pm 5\%$ -on belül maradjon, valamint 2,5 kW-ig biztonságosan és hosszútávon üzemképesek legyenek. A motortartó adapter, hasonlóan a hajtóműházhoz, optimalizálásra került, így 25%-os tömegcsökkentést értünk el. A hajtáslánc összeállítási modellje és az elkészült hajtáslánc a 4. ábrán látható.



4. ábra. A modellezett és megvalósult Allied Motion hajtás főegysége

## 5. Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül a „Tehetséggondozás és kutatói utánpótlás fejlesztése autonóm járműirányítási technológiák területén (EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00001)” projekt és a Széchenyi István Egyetem biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] Pusztai Z., Kőrös P., Pup D.: Bistabil elektromágneses tengelykapcsoló alkalmazása energiahatékony elektromos hajtásláncban, *Conference: XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT Nagyvárad* (2019), pp. 440-443
- [2] Larsson R.: Methodology for topology and shape optimization: Application to a rear lower control arm, Master Thesis at Department of Applied Mechanics CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden (2016)





