

Tesztpálya kiszolgálására alkalmas autonóm robotplatform gépészeti tervezése

Machine Design of a Robot Platform for Traffic Cone Handling

Krecht Rudolf^a, Ballagi Áron^b

^aSzéchenyi István Egyetem, Automatizálási és Mechatronikai Tanszék
krecht.rudolf@ga.sze.hu

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

Absztrakt: A zalaegerszegi ZalaZone Járműipari Tesztpálya számos szempontból, megközelítésből teszi lehetővé közúti járművek tesztelését. Számos teszt esetén előfordul, hogy egyedi pályaelemek építése válik szükségessé, amelyeket forgalomtechnikai terelőelemek kihelyezésével alakítanak ki. Ezen elemek kihelyezése pontos, időigényes méréseket, majd precíz elemmozgatási műveleteket követelnek meg. A cikk célja olyan autonóm robotplatform gépészeti tervezésének ismertetése, amely alkalmas forgalomtechnikai elemek manipulációjára digitális térképen kijelölt pozícióknak megfelelően. A robotplatform tervezett üzemfolyamata során megközelíti az első forgalomtechnikai terelőelem pozícióját, majd az általa hordozott, előre előkészített terelőelemet fedélzeti robotmanipulátor segítségével az aktuális pozícióra helyezi, majd tovább halad a következő pozícióhoz. Bemutatásra kerülnek a tervezési kritériumok meghatározásának lépései, egyes gépelemek méretezési módszerei, végül pedig a teljes összeállítás kialakítása.

Kulcsszavak: mobil robotplatform, gépészeti tervezés, járműipari tesztpálya

Abstract: The ZalaZone Automotive Test Track in Zalaegerszeg allows road vehicles to be tested from a variety of approaches. In case of many test scenarios, it is necessary to build individual track elements, which are constructed by placing traffic cones. The placement of these elements requires precise, time-consuming measurements and then precise element handling operations. The aim of this paper is to describe the mechanical design of an autonomous robotic platform capable of manipulating and placing traffic cones according to positions assigned by a human operator on a digital map. During the planned operation of the robot platform, it approaches the planned position of the first traffic cone, then places the prepared traffic cone it is carrying to the current position using an on-board robot manipulator, and then moves on to the next position. The steps to define the design criteria, the sizing methods for individual machine elements and finally the design of the complete assembly are presented.

Keywords: mobile robot platform, machine design, automotive test track

Bevezetés

A cikkben ismertetett kutatás-fejlesztési folyamat célkitűzése a forgalomtechnikai terelőbóják kezelése által pályarendezésre, pályaépítésre alkalmas robotplatform gépészeti tervezése és gyártáselőkészítése. A gépészeti tervezés feladatköre a pályaépítő robotplatform hajtására és szerkezeti vázára terjedt ki, azzal a céllal, hogy az eredmény egy önállóan mozgásra képes, a célnak és a követelményeknek megfelelően működő mobil platform legyen. A fejlesztési folyamat tartalmazza a platform koncepciójának kialakítását, a hajtás működési elvének kidolgozását, méretezését, majd a kereskedelemben kapható alkatrészek paraméterhelyes kiválasztását. A kutatás-fejlesztési folyamat hosszútávú célja a tervezett robotplatform prototipizálása is, ezért a feladat része az egyedi alkatrészek méretezése és 3D-modellezése, valamint gyártásra kész műhelyrajzaik elkészítése.

Az Ackermann-kormányzású járművek kormányzásához szükséges nyomatékok meghatározása elméleti és tapasztalati módon is lehetséges [1] [2], a kormányzástól függetlenül vizsgálható a hajtáslánc [3]. A differenciálhajtású járművek esetében a hajtás és a kormányzás méretezése egyetlen folyamat során történik.

Koncepcióalkotás

A pályaépítő robot kialakítása során szem előtt tartottuk a fejlesztés modularitását az egyes elemek későbbi felhasználhatósága érdekében [4], továbbá célként tűztük ki a platform gépészeti szempontból egyszerű felépítését, könnyű szerelhetőségét. A célok alapján a következő fejlesztési kritériumokat tűztünk ki:

- Gépészetileg egyszerű, robusztus komponensek kiválasztása és/vagy tervezése
- Hasonló funkciók esetén azonos alkatrészek alkalmazása
- Szimmetrikus elemek alkalmazása az eltérő komponensek darabszámának csökkentése érdekében
- Olyan esetekben, ahol a költségeket nem befolyásolja negatívan, komponensek túlméretezése teljesítmény és teherbírás szempontjából annak érdekében, hogy a jövőben a robot feladatának kis mértékű változása esetében terhelhetőségi mozgástér rendelkezésre álljon
- A konstrukció adjon lehetőséget iteratív fejlesztési lépések során felmerülő módosítási igények végrehajtására, új megoldások tesztelésére alkatrészek újragyártásának mellőzésével.

A bójamanipulációs feladat és az alkalmazás helyszínének ismeretében meghatároztuk az alkalmazásspecifikus követelményeket is:

- A robotnak 40 db, darabonként 5 kg tömegű forgalomtechnikai terelőbóját kell szállítania
- Hatótávolságának lehetővé kell tennie a szállított 40 db bója kihelyezését, valamint a kiindulópontonra való visszatérést
- A haladási és bójalerakási sebességek egyensúlyban kell állnia – biztonság és hatékonyság
- A bójalerakás pontossága 100 mm.
- A robotplatform alapterülete maximum 1x2 m.

A robotplatform felépítésének kialakítása szempontjából kulcslépés a kerékképlet meghatározása. Az „Introduction to Autonomous Mobile Robots” [5] szakirodalom alapján a gépészeti egyszerűsége és kompakt méretek mellett megvalósítható jó terhelhetősége miatt a négykerekű differenciálhajtásra esett a választás.

Hajtás tervezése

A robotplatform hajtásának tervezése során a cél a kefe nélküli egyenáramú (BLDC) motorok alkalmazása volt, a kompakt méretek mellett az alkalmazásnak megfelelő nyomatékgörbe miatt. A megoldás során bolygókerékes hajtómű és fogasszíjhajtás együttes alkalmazása mellett döntöttünk. A bolygókerékes hajtómű elsődleges előnye szintén a kompakt méretek melletti nagy áttétel. A fogasszíjhajtásra a végső áttétel értékének finomhangolása, valamint a motor és a kihajtótengely közötti helytakarékos erőátvitel miatt van szükség.

A kiválasztott négykerekű differenciálhajtás miatt négy, szimmetrikus hajtóműre van szükség, ezért a modulárisan beépíthető, szimmetrikus, egymás közt felcserélhető alkatrészek alkalmazásával szimmetrikus hajtáselrendezést alakítottunk ki. A motor, valamint az áttételek méretezési folyamata a következőkben látható. A tervezés során figyelembe vett általános jellemzőket az 1. táblázat foglalja össze.

Megnevezés	Jelölés	Érték
maximális emelkedési szög	θ	10°
maximális sebesség	v	2 m/s
maximális gyorsulás	a	0,2 m/s ²
gördülő súrlódási együttható gumiabroncs és aszfalt között (száraz körülmények)	μ_G	0,02

1. táblázat: A tervezés során figyelembe vett általános jellemzők

A korábbiakban meghatározott tervezési kritériumok számszerűsítése révén megállapításra kerültek azok a paraméterek, amelyek a robotplatform hajtásának méretezése során kell figyelembe venni. Ezek a paraméterek a robottal szemben támasztott követelmények mellett a megvalósíthatóság korlátaiból is adódnak. A robotplatform kerekek nélküli öntömege a tervezett szerkezeti elemek, robotmanipulátor, akkumulátorok és egyéb fedélzeti komponensek tömege alapján került megállapításra. A megvalósíthatóság és a robot feladatának figyelembe vétele által meghatározott paramétereket a 2. táblázat tartalmazza.

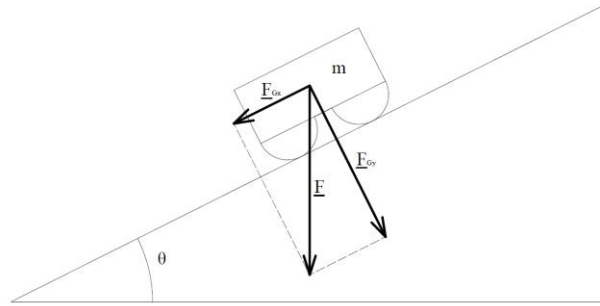
Megnevezés	Jelölés	Érték
gumiabronccsal szerelt kerék tömege	$m_{kerék}$	4 kg
gumiabronccsal szerelt kerék sugara	r	0,208 m
hajtott kerekek darabszáma	n	4
a robot öntömege kerekek nélkül	m_{robot}	410 kg
szállítandó terelőbója tömege	$m_{bója}$	5 kg
robotplatform terhelt össztömege	$m_{össz}$	626 kg

2. táblázat: A robotplatformra vonatkozó számszerűsített követelmények

A hajtás méretezése során figyelembe vételre került a hajtómű, az alkalmazott szíjhajtás, a villanymotor, valamint a teljesítmény elektronika hatásfoka. Ezeken kívül a biztonsági tényező kijelölése is megtörtént.

$$\eta = \eta_{szíjhajtás} \cdot \eta_{hajtómű} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{elektronika} = 0,84 - \text{össz hatásfok} \quad (1)$$

$$S = 1,5 - \text{biztonsági tényező} \quad (2)$$



1. ábra: A robotplatformra ható erők meghatározása lejtőn állás esetén

A hajtás méretezése a kerekeknél fellépő nyomatékszükséglet meghatározásával kezdődött lejtő esetén. Első lépésként meghatározásra került a fellépő erők értéke. Lejtő esetén a robotplatformra ható erőket az 1. ábra alapján határoztuk meg:

$$F_{Gx} = m_{\text{össz}} \cdot g \cdot \sin(\theta) = 1,066 \cdot 10^3 \text{ N} \quad (3)$$

$$F_{Gy} = m_{\text{össz}} \cdot g \cdot \cos(\theta) = 6,046 \cdot 10^3 \text{ N} \quad (4)$$

$$F_S = \mu_G \cdot F_{Gy} = 120,91 \text{ N} \quad (5)$$

Továbbá szükséges a kerék inercianyomatékának megállapítása:

$$I_{\text{kerék}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{kerék}} \cdot r^2 = 0,086 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (6)$$

Végül pedig, az összes hajtott kerék számának ismeretében megállapítható az egy hajtott kerék esetén szükséges nyomaték.

$$M_{\text{kerék}} = \frac{(r \cdot F_S + r \cdot m_{\text{össz}} \cdot a + r \cdot m_{\text{össz}} \cdot g \cdot \sin(\theta))}{n} = 68,067 \text{ Nm} \quad (7)$$

A hajtás végső finomhangolhatósága, valamint nyomatéknövelés elérése érdekében fogasszíjhajtás beépítése került figyelembe vételre az alábbi jellemzőkkel:

$$z_{\text{hajtó}} = 15, \quad r_{\text{hajtó}} = \frac{d_{\text{hajtó}}}{2} = 0,038 \text{ m}, \quad m_{\text{hajtó}} = 0,3 \text{ kg} \quad (8)$$

$$z_{\text{hajtott}} = 48, \quad r_{\text{hajtott}} = \frac{d_{\text{hajtott}}}{2} = 0,12 \text{ m}, \quad m_{\text{hajtott}} = 0,7 \text{ kg} \quad (9)$$

Meghatározásra került a fogasszíjhajtás komponenseinek inercianyomatéka. Alacsony tömege miatt a szíj esetében egyszerűsített számítást alkalmaztunk:

$$I_{\text{szíj}} = m_{\text{szíj}} \cdot r_{\text{hajtott}}^2 = 0,003 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (10)$$

$$I_{\text{hajtó}} = \frac{1}{2} m_{\text{hajtó}} \cdot r_{\text{hajtó}}^2 = 2,109 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (11)$$

$$I_{\text{hajtott}} = \frac{1}{2} m_{\text{hajtott}} \cdot r_{\text{hajtott}}^2 = 0,005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (12)$$

A fogasszíjhajtás áttétele:

$$i_{fogasszija} = \frac{Z_{hajtott}}{Z_{hajto}} = 3,2 \quad (13)$$

A robotplatform hajtása bolygómu áttétellel egészül ki, melyek áttétele $i_{hajtomu} = 10$. Tehát a szükséges motornyomaték meghatározása:

$$\beta = \frac{a}{r} \quad (14)$$

$$M_{motor} = S \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \left(\frac{M_{kerék}}{i_{hajtomu} \cdot i_{fogasszija}} + \frac{I_{kerék} \cdot \beta}{(i_{hajtomu} \cdot i_{fogasszija})^2} + \frac{I_{szija} \cdot \beta}{(i_{hajtomu} \cdot i_{fogasszija})^2} + \frac{I_{hajtott} \cdot \beta}{(i_{hajtomu} \cdot i_{fogasszija})^2} + \frac{I_{hajto} \cdot \beta}{(i_{hajtomu})^2} + I_{hajtomu} \cdot \beta \right) = 3,798 \text{ Nm} \quad (15)$$

A kerék paramétereinek, valamint az elvart maximális sebesség ismeretében meghatározható a kerék szögsebessége és fordulatszáma maximális haladási sebesség esetén:

$$\omega_{kerék} = \frac{v}{r} = 9,639 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad n_{kerék} = 92,041 \text{ rpm} \quad (16)$$

Az alkalmazott áttételek mellett a motor esetében szükséges maximális szögsebesség és fordulatszám:

$$\omega_{motor} = \omega_{kerék} \cdot i_{fogasszija} \cdot i_{hajtomu} = 308,434 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad n_{motor} = 2,945 \cdot 10^3 \text{ rpm} \quad (17)$$

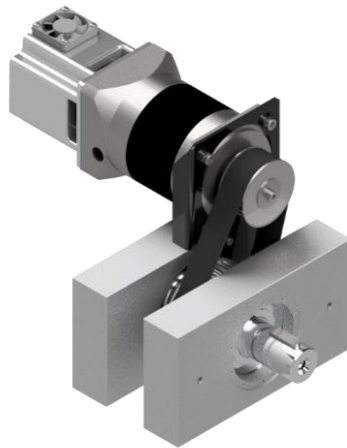
Gépészeti összeállítás létrehozása

A forgalomtechnikai bóják manipulációjára alkalmas robotplatform gépészeti összeállítása az előzőkben ismertetett méretezési folyamat eredményei alapján kiválasztott komponensekre építve a hajtás modul összeállításával kezdődött. A hajtás modul felépítése során cél volt, hogy alkalmas legyen a jobb és bal oldali, valamint első és hátsó kerekek hajtására is módosítás nélkül. A hajtás az ODrive Robotics motorvezérlőjére és BLDC motorjaira alapoz, amely teljesíti a hajtással szemben támasztott teljesítményre vonatkozó követelményeket, valamint nyílt forráskódú fejlesztőkörnyezete ROS-kompatibilitást biztosít, és fel van készítve a differenciálhajtáshoz szükséges szoftveres komponensekre. A kiválasztott motor (ODrive Robotics D6374) paramétereit a 3. táblázat foglalja össze.

Jellemző	Érték
Sebességkonstans	150 rpm/V
Maximális áramfelvétel (aktív hűtés esetén)	70 A
Maximális feszültség	48 V
Fázis ellenállás	39 mΩ
Maximális nyomaték	3,86 Nm
Üresjárat fordulatszám	5,760 rpm
Öntömeg	890 g

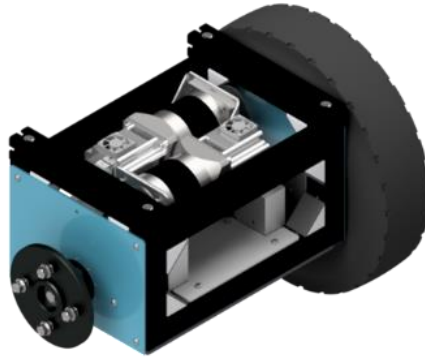
3. táblázat: Az ODrive Robotics D6374 BLDC motor paraméterei

Az elkészült hajtás modul összeállítását az 2. ábra szemlélteti.



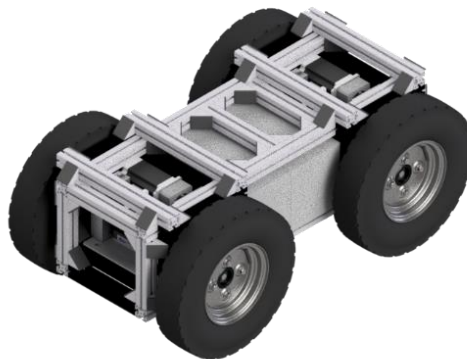
2. ábra: Robotplatform hajtóművének összeállítása

A differenciálhajtás megvalósítására alkalmas modult szintén moduláris kialakításúra terveztük. Ezzel elérhető az, hogy a fejlesztett hajtásmodul a páros számú hajtott kerekekkel rendelkező robotok esetében módosítás nélkül alkalmazható, láncolható. Mivel ezen cikkben ismertetett feladat alanyául szolgáló robotplatform négykerék-meghajtású, ezért ezen platformhoz két darab hajtómodulra van szükség. Ezek a modulok a Robot Operációs Rendszer (ROS) szabvány üzenettípusai által hangolhatók össze. A hajtómodulok (3. ábra) szerkezeti váza extrudált alumínium profilokból áll össze a könnyű bővíthetőség és módosíthatóság érdekében.



3. ábra: A robotplatform hajtásmoduljának összeállítási modellje

A hajtómodulok mechanikai összekapcsolása a 4. ábra által szemléltetett, szintén alumínium profilokból felépített szerkezeti váz által valósul meg. A váz úgy lett kialakítva, hogy alkalmas legyen a robot energiaellátásáért felelős akkumulátor csomag, magasszintű irányítás, és érzékelők rögzítésére is. Továbbá megvalósult a forgalomtechnikai bóják szállítására és manipulációjára alkalmas felépítmény rögzítőpontjainak kialakítása is.



4. ábra. A robotplatform összeállítási modellje

Összefoglaló

A cikkünkben ismertetésre kerültek egy forgalomtechnikai terelőbóják manipulációjára, precíziós elhelyezésére alkalmas robotplatform gépészeti tervezésének főbb lépései. A tervezési lépések közül hangsúlyos volt a hajtás komponenseinek méretezése. A tervezési kritériumok megállapítását és ismertetését követően a cikk ismerteti az említett hajtásméretezési folyamatot, majd bemutatásra kerülnek a robotplatform megvalósításához alapul szolgáló összeállítási modellek is.

A cikk általános, sok esetben egyszerűsített eljárásokat alkalmaz a robotplatform hajtáselemeinek méretezéséhez. A bemutatott eredményekre alapozva további cél a robotplatform prototípus szintű megvalósítása, majd a prototípus alkalmazása komplex, célirányosan differenciálhajtású robotplatformok hajtásának méretezéséhez alkalmas eljárás leírása. Az eljárás tervezett fejlesztési lépései tartalmazzák a differenciálhajtásból adódó hajtásigények elméleti és gyakorlati követelményeinek együttes vizsgálatát.

Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz a „Nemzeti Laboratóriumok 2020 Program – Autonóm Rendszerek alprogram – Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium létrehozása a Széchenyi István Egyetemen (NKFIH-869-9/2020)” biztosított forrást.

Irodalomjegyzék

- [1] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh and D. Scaramuzza, Introduction to Autonomous Mobile Robots, Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2011.
- [2] Szilágyi Z., Gömböcz Z., Krecht R. és Ballagi Á., „Forgalomtechnikai terelő bója manipulációja valós és szimulált mobilplatform alapon,” in *Digitális Járműipari Kutatások a Széchenyi István Egyetemen - Konferenciakiadvány 2021*, Győr, Széchenyi István Egyetem, 2021, pp. 48-55.
- [3] Istenes Gy. és Polák J., „Kormányzáskor ébredő visszatérítő nyomatékok modellezése alacsony sebességeknél,” in *Intelligens közlekedési rendszerek a fenntarthatóságért Konferenciakiadvány*, Győr, 2020.
- [4] J. Polák and I. Lakatos, “ANALYSIS OF PROPULSION UNIT MATHEMATICAL MODEL,” *MACHINE DESIGN*, vol. 7, no. 4, pp. 137-140., 2015.
- [5] J. Polák and I. Lakatos, “EXAMINATION OF DRIVE LINE MATHEMATICAL MODEL,” *MACHINE DESIGN*, vol. 8, no. 1, pp. 33-36., 2016.