



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

MŰSZAKI MECHANIKAI TANSZÉK

Autonóm földi robot tervezése és építése

Készítette:

GÓGH László

OW1IUJ

Gépészmérnök Msc. II. évf.

MOHÁCSI Bálint

H0HL11

Gépészmérnök Msc. II. évf.

ZANA Roland Reginald

PJL928

Gépészeti Modellezés Msc. II. évf.

Konzulens:

Dr. KOVÁCS László

Tudományos főmunkatárs

Műszaki Mechanikai Tanszék

Bencsik László

Tudományos segédmunkatárs

Műszaki Mechanikai Tanszék

2014. Október 22.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Konceptcionális tervezés	4
2.1. Korábbi versenyek robotjai	4
2.2. Konceptió kiválasztása	8
3. Navigáció	11
3.1. Helyzetmeghatározás	11
3.1.1. LLA (Latitude, Longitude, Altitude)	11
3.1.2. ECEF (Earth centered, Earth fixed)	12
3.1.3. ENU (local East, North, Up)	13
3.2. Haladási irány meghatározása	14
3.2.1. GPS koordináták alapján	14
3.2.2. Földi mágneses mező alapján	15
3.3. Haladási irány szabályozása	16
3.3.1. Kapcsolóüzemű szabályozás	17
3.3.2. PD szabályozó	17
4. Elektronika tervezés	18
4.1. Hajtó motorok	18
4.2. Motor vezérlő elektronika	19
4.3. GPS vevő	20
4.4. SD adatrögzítő	20
4.5. Ejtőernyő nyitás	21
4.6. Akkumulátor	21
4.7. Mikrokontroller	22
4.8. Nyomtatott áramkör	23
5. Köztes prototípus plusz tesztek	24
6. Mechanikai tervezés	26
6.1. Tervezési szempontok	26
6.2. Rover CAD terve	27
6.3. Ejtőernyő nyitó mechanizmus	30
7. Szabályozó program elemei	33
7.1. Modulok inicializálása	33
7.2. Keréksebesség szabályozó	33

7.3. A program felépítése	35
7.4. Kiszabadulás rutinok	36
8. Teszt és verseny eredmények	37
8.1. Sivatagi teszt	37
8.2. A verseny	39
9. Tapasztalatok, tovább fejlesztési lehetőségek	44
10. Függelék	51
11. Köszönetnyilvánítás	52

1. Bevezetés

Az ARLISS program célja, hogy hallgatók, egyetemi csapatok számára lehetőséget biztosítson kisméretű műholdak tervezésére és tesztelésére [1]. A tesztek során a műholdakat rakétával közel 3000 m magasságba juttatják ahonnan ejtőernyővel ereszkedés közben végeznek méréseket. Az évente megrendezésre kerülő tesztidőszak további űripari illetve földi technológiákhoz kötődő projektekben tervezett eszközök kipróbálását is segíti. Példaként említhetők a földi leszálló és felderítő robotok. A TDK dolgozatban bemutatott autonóm földi robotot is egy, az ARLISS program keretében megrendezett nemzetközi versenyre készítettük, mely során a Geroga Institute of Technology csapatával működünk együtt [2].



1. ábra. A helyszín

A verseny célja egy olyan robot elkészítése, amely képes autonóm módon egy GPS koordinátákkal megadott helyre navigálni. A verseny a földfelszíntől nagyjából 3000 m-es magasságban levő pontból indul, ahova a szerkezetet egy rakéta juttatja el. A kilövési ponttól hozzávetőleg 1500 m távolságban van a cél, azonban a rakéta emelkedése során nagymértékben elsodródhat vízszintes irányban, főleg erős szél esetén.

A résztvevő robotok néhány paraméterére bizonyos előírások vonatkoznak. Ezek egy része abból adódik, hogy a szerkezetnek bele kell férnie az azt kilövő rakétába, így adottak a kilövés során a robotot tartalmazó henger méretei. Emellett a szerkezet tömege is korlátozott.

A megmérettetést helyszíne a nevadai Black Rock Playa, ami egy nagyjából 520 [km²] kiterjedésű kiszáradt sóstó, melyen belül a tengerszint fölötti magasság ingadozása csupán pár méter. Talaja alapvetően keményre száradt homokhoz hasonlítható, amelyen a versenyzők és szervezők autói pár centiméter mély keréknyomokat hagynak, mely akadályt jelent a robotoknak. A felszín azonban természetes állapotában sem teljesen sík, a sóstó kiszáradása során repedezetté, göröngyössé válik olyan kemény talajt alkotva amely 1 – 2 kg tömegű robotok súlya alatt nem deformálódik.

A versenyen résztvevők szerkezeteinek szélsőséges körülmények között kell megbízhatóan működniük. Nagymértékű mechanikai terheléseknek vannak kitéve a robotok, mivel a kilövés pillanatában nagyjából 20 g nehézségi gyorsulás hat rájuk. Ezt követően gyakran 40°C-t meghaladó hőmérsékletű poros közegben kell üzemelniük és elérni a kijelölt célt.

2. Konceptcionális tervezés

A feladatkiírásnak eleget tevő autonóm robot sokféleképpen megvalósítható, hiszen a versenykiírás igen kevés megkötést tartalmaz. Első lépésként a versenyen eddig résztvevő szerkezetekről, tervekről gyűjtöttünk információt. Ezt követően számba vettük vizsgált konstrukciók előnyeit és hátrányait. Alkottunk egy szempontrendszert aminek segítségével értékeltük a különböző megoldásokat, majd a legjobbnak ítélt koncepciót kiválasztottuk.

2.1. Korábbi versenyek robotjai

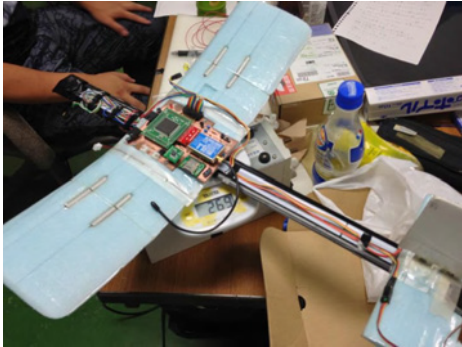
A versenyen korábban résztvevő szerkezeteket alapvetően három kategóriába lehet sorolni; a földfelszínen közlekedő (továbbiakban földi), a repülő járművek, valamint a hibrid gépek kategóriájába. A földi járművek a rakétából kikerülve ejtőernyő segítségével érik el a felszínt, majd ezt követi a célpont önálló megközelítése. A repülő szerkezetek esetén ilyen szakaszokról nem beszélhetünk. A hibrid szerkezetek az előbbi két kategória ötvöztetésével jönnek létre, ezek képesek repülni és a földön navigálni is.

A versenyen elinduló repülő szerkezeteket további két kategóriába sorolhatjuk; a quadrokopterek (2. ábra) és a hagyományos, szárnnyal rendelkező repülő szerkezetek (3. ábra) körébe. A quadrokopterek négy propellerrel rendelkeznek. A légcsonkoknak a tengelye egymással párhuzamos, irányításukat a propellerek fordulatszámának szabályozásával valósítják meg.



2. ábra. N-MOS's Quadrokopter (Tokyo Institute of Technology, 2013) [3]

A szárnnyal rendelkező sikló repülőgépek képesek a kezdeti helyzeti energiájukat felhasználni a célba jutáshoz, ami csökkenti a szerkezet energiaszükségletét. Ilyen sikló megalkotását tervezte a versenyen 2013-ban elindult BME-s csapat is, akiknek a feladat összetettsége miatt nem sikerült a prototípust időben megépíteni.



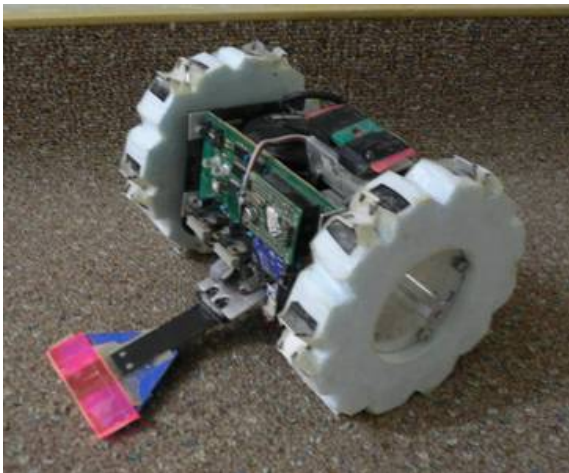
IKATOZ (The University of Tokyo, 2013) [4]



APUS-11 (The University of Tokyo, 2011) [5]

3. ábra. Sikló repülőgépek

Földi robotokból többféle különböző típus készült a korábbi években. A szerkezetet fellövés közben tartalmazó konténer hengeres alakja miatt, ezek általában kétkerekű roverek, hiszen így a rakétában rendelkezésre álló tér helykihasználtsága jó.



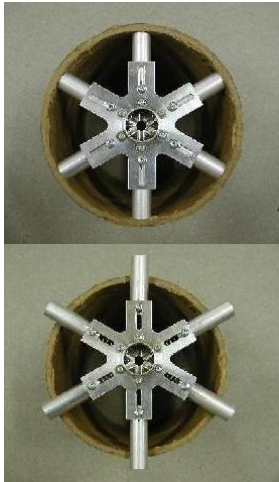
Two wheeled rover (Tohoku University, 2006) [6]



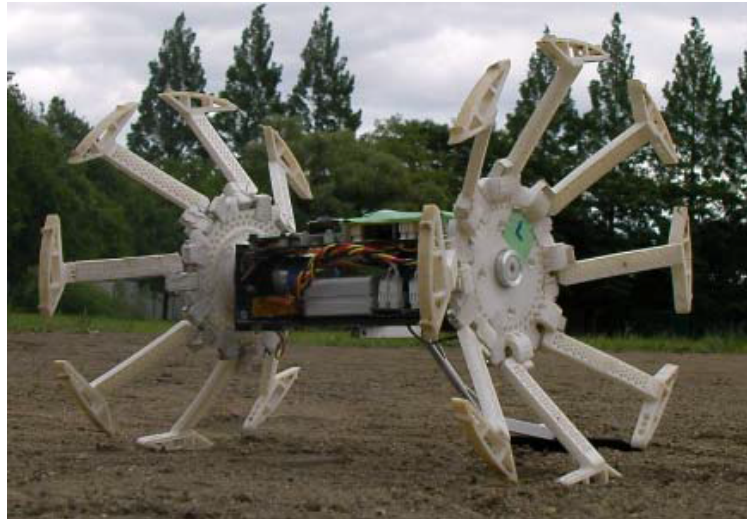
STELA I (Aichi University Of Technology, 2013) [7]

4. ábra. Kétkerekű roverek

Nagyobb átmérőjű kerekkel rendelkező roverek (5. ábra) hatékonyabban jutnak át terep-akadályokon. Készültek olyan szerkezetek is, melyek a földleérés után megnövelték kerekük sugarát a konténer belső átmérőjénél nagyobb méretűre. Ezekre mutat példákat az 5. ábra.



Expanding wheel (Tohoku University, 2002) [8]



Team I2 (Tohoku University, 2010) [9]

5. ábra. Kinyíló kerékkonstrukciók

A földi járművek terepjáró képességének érdekében egyes csapatok láncaltpas szerkezeteket építettek (6. ábra)



STELA (Aichi University Of Technology, 2011) [10]



Caterpillar robot (Georgia Inst. of Tech. 2005) [11]

6. ábra. Láncaltpas földi járművek

Néhány kettőnél több kerekű jármű terve is készült (7. ábra), azonban csak kevés csapat épített ilyen szerkezeteket. Ennek oka, hogy a megfelelő méretre való összecsuksukhatóság általában nem, vagy csak bonyolult mechanizmusokkal valósítható meg.



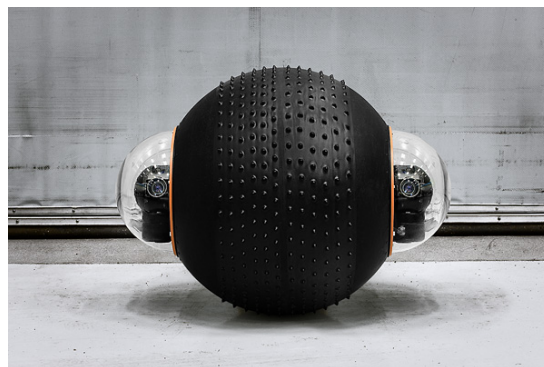
Four wheeled rover (Georgia Institute of Technology, 2004) [12]



Hat kerekű rover [13]

7. ábra. Több kerekű jármű

Több terv is készült gömbi robotok megépítésére (8. ábra). Ezen szerkezetek lényege, hogy a robot egy üreges gömb belsejében levő mechanika segítségével gördül előre. A meghajtás történhet gravitációs, vagy giroszkopikus elv szerint is. Igen nagy gördülő sugarat alakíthatunk ki ilyen módszerrel, amennyiben a szerkezet összecsuksukott állapotban ér földet és sűrített gáz segítségével fújódik fel a végleges gömb alakú futófelületet.



8. ábra. Gömbi robotok [14], [15]

A hibrid járművek a fenti két kategória előnyös tulajdonságait ötvözik. A földi megoldások nagy hátránya, hogy a leszállás során ejtőernyőket használnak, a mozgás ekkor irányíthatatlan. Ezzel szemben a repülő társaik ereszkedés közben irányíthatóak a levegőben, azonban a repüléshez a földi manőverezés energiaszükségletének sokszorosa szükséges. A 9. ábrán egy olyan quadrokoptert láthatunk, amely egy segédkeret segítségével földi mozgásra is képes.



9. ábra. HyTAQ Robot [16]

2.2. Konceptió kiválasztása

Mivel a három fő kategóriába eső szerkezetek igen eltérő felépítésűek, a koncepció kiválasztásánál első lépésként számba vettük a repülő, földi és hibrid járművek előnyeit és hátrányait, majd ezek alapján meghatároztuk az építeni kívánt szerkezet típusát.

A repülő járművek legfőbb előnye, hogy rakétából kikerülés pillanatától a célba érkezésig a szerkezet mozgása irányított. A vitorlázó típusú gépek emellett fel tudják használni a kezdeti helyzeti energiájukat haladásuk során. A megfelelő működésükhöz azonban elengedhetetlen a folyamatos kontroll, hiszen egy repülő szerkezet stabilitásvesztése esetén jellemzően nehéz beavatkozni, elkerülhetetlen a földbe ütközés. Mivel a robotnak autonóm módon kell megvalósítani a feladatot, sok érzékelő és viszonylag bonyolult szabályozás szükséges a stabil repüléshez. Kritikus pontja a feladatnak a földre való leszállás, melynek során megsérülhet a szerkezet. A cél elvétele esetén javításra, ismételt felszállásra, megfordulásra jellemzően nincs lehetőség, illetve túl nagy energiaszükséglettel járna.

A földi járművek esetén egyszerűbb szabályozással elérhető a megfelelő irányú mozgás, azonban két további hibalehetőség jelenik meg a repülő robotokhoz képest. A szerkezetnek ki kell bírni a földetérés során rá ható gyorsulást, valamint terepakadályok esetén fennáll az elakadás lehetősége. Földre ereszkedésük során, mozgásuk irányíthatatlan, nagy oldalirányú szél esetén, a kilövés pontjától igen távolra sodródhatnak el. Előny, hogy a földi mozgás energiaszükséglete jóval kevesebb mint a repülésé.

A hibrid gépek előnyeit a fentiekben már említettük. Hátrányai között szerepel, hogy a földi mozgást biztosító segédkeretet (ld.: 9. ábra) csak bonyolult mechanizmussal segítségével lehet

a konténer méretére összezsugorolni.

A versenyen először résztvevő csapatként az volt a célunk, hogy egy relatív egyszerű, biztos működésű szerkezetet hozzunk létre. E fő szempontot figyelembe véve, valamint azt, hogy nincs tapasztalatunk repülő gépek építésében és üzemeltetésében, földi jármű készítése mellett döntöttünk. A megfelelő koncepció kiválasztásához a fentiekben felsorolt járműtípusokat pontozással értékeltük az 1. táblázat szempontjai alapján. Ezen pontokat összegeztük, így kiválasztva a szerkezet típusát. A szerkezetek pontozása előtt, részletezzük azok legfőbb előnyeit és hátrányait.

Kétkerekű rover

Felépítését tekintve egyszerű, csak minimális számú mozgó alkatrészt tartalmaz. Működtetéséhez szükséges a két kerék meghajtása, valamint a haladási irány, így végső soron a kerekek fordulatszámának szabályozása. A konténerben rendelkezésre álló hely kihasználtsága maximális lehet, hiszen ezen szerkezetek felépítése is hengeres. A földre érkezés utáni üzemhez csupán kitámasztó farok, vagy kitámasztó kerék kinyitása, illetve az ejtőernyő lekapcsolására van szükség. Széles, megfelelő mintázatú kerekek segítségével terepjáró képességük jó. Megfelelő kialakítás esetén az elektronika, valamint a sérülékeny szenzorok könnyen elhelyezhetők mechanikailag védett helyen.

Kétkerekű rover nyíló kerékkel

Ez a típus rendelkezik a fix kerekű roverek tulajdonságaival, azonban a földre érkezés után további kritikus pont a kerék üzemi méretre való kinyitása. A nagyobb gördülési sugár lehetővé teszi a kisebb akadályokon való könnyű átjutást, azonban csak nehezen érhető el a fix kerékhez hasonló futófelület-szélesség.

Lánctalpas robot

A lánctalpas szerkezetek terepjáró képessége kimagasló. Legsérülékenyebb pontja ezeknek a robotnak maga a lánctalp, meghibásodás esetén (pl.: a lánctalp lefordulása) azonban mozgásképtelenné válnak. További hátrányuk, hogy a konténer belső térfogatának kihasználtsága jóval kisebb mint a kétkerekű roverek esetén. Ez növelhető kinyíló szerkezetek alkalmazásával, ekkor azonban a kinyitó mechanizmus bonyolulttá válhat.

Többkerekű rover

A többkerekű roverek előnye az egyszerű irányíthatóság, valamint a jó terepjáró képesség. Ennek elérésére azonban általában szükséges az összes kerék hajtása. A kis átmérőjű kerekek azonban nehezebben küzdenek meg nagyobb méretű egyenetlenségekkel. A lánctalpas szerkezetekhez hasonlóan, a konténer jelentősen korlátozza a robot méretét és arányait, míg kinyíló mechanizmus alkalmazása további meghibásodási lehetőségeket teremt.

Gömbi robot

A gömbi robotok sok szempontból megfelelőek a verseny által állított követelmények megvalósítására. Nagy hátrányuk azonban, hogy a gömb alakú köpeny nehezen összezsugorolható,

nagynyomású gázzal való felfújás esetén pedig fennáll a kilyukadás lehetősége, ami mozgás-képtelenné teszi a szerkezetet. Bonyolultságukat az is jól tükrözi, hogy ugyan több csapat is számításba vette ilyen típusú szerkezet építését, de tudomásunk szerint senki se indult el ehhez hasonló szerkezettel a versenyen.

A szerkezeteket értékelését és pontozását az 1. táblázat foglalja össze:

	Kétkerekű rover	Rover nyíló kerékkel	Lánc talpas szerkezet	Több kerekű rover	Gömbi robot
Földre érkezés, átállás földi üzemre	9	7	7	6	4
Egyszerű irányíthatóság	10	10	10	8	7
Ütésállóság, földre érkezés	8	7	8	7	8
Elektronika és szenzorok védelme	10	8	9	8	7
Konstrukció összetettsége	10	8	8	7	6
Terepjáró képesség	7	8	10	9	10
Összegezve	54	48	52	45	42

1. táblázat. Konceptiók értékelése

A szerkezetek értékelése után a kétkerekű, támasztófarokkal rendelkező rover koncepciója mellett döntöttünk. Így a rover célpont megközelítési stratégiája két fő feladatra bontható, úgy mint a *landolás* valamint a *földfelszíni navigáció*.

A landolás feladatcsoport további részekre osztható. Egyrészt megfelelő pillanatban nyitni kell az ejtőernyőt. Ennek időzítéséhez érzékelni kell a rakétából való kiszabadulást, valamint mérni kell a rover földfelszíni magasságát zuhanás közben. Másrészt földet érés után biztosítani kell, hogy a rover ledobja magáról az ejtőernyőtartó és -nyitó szerkezetet, valamint hogy elindulás után ne akadjon bele az ejtőernyő kötélezetébe. Onnantól, hogy akadálytalanul eltávolodott a landolás helyétől kezdődik a földfelszíni navigáció.

A két fő feladaton kívül fontos figyelembe venni, hogy mi történik akkor, ha a rover beleakad valamilyen terepakadályba. Ennek a problémának a megoldásával csak a rover megépítése után foglalkoztunk, mivel az így elvégzett tesztek alapján tudtunk következtetéseket levonni, hogy milyen elakadások lehetségesek. Az így tapasztalt, valamint a még lehetségesnek gondolt elakadásokhoz kiszabadulási rutinokat terveztünk.

3. Navigáció

A rover landolás utáni feladata, hogy önállóan 10 méteres közelségébe kerüljön az előre definiált célkoordinátákhoz. Ezt a rover haladási irányának szabályozásával valósítjuk meg. A szabályozási célunk, hogy az aktuális haladási iránya egyezzen meg a rover pillanatnyi pozíciója és a célkoordináták által definiált vektor irányával. A rover kanyarodását a kerekeket külön-külön meghajtó motorok sebességkülönbsége idézi elő. Megjegyeznénk, hogy ehhez szükséges a keréksebességekre szabályozót tervezni, melynek elektronikai előfeltétele a keréksebességek mérése.

A haladási irányra vonatkozó szabályozónak megtervezéséhez ismernünk kell a célkoordinátákat, a rover jelenlegi pozícióját és haladási irányát. Az aktuális pozíció detektálásához GPS érzékelőt használhatunk, míg a mindenkori irány meghatározásához használhatunk mágneses szenzort vagy a korábbi GPS koordináták segítségével számolhatjuk az aktuális haladási irányt. Mindkét módszernek van előnye és hátránya, azonban mielőtt ezeket kifejténénk, szükséges a helyzetmeghatározásról általánosságban is beszélni.

3.1. Helyzetmeghatározás

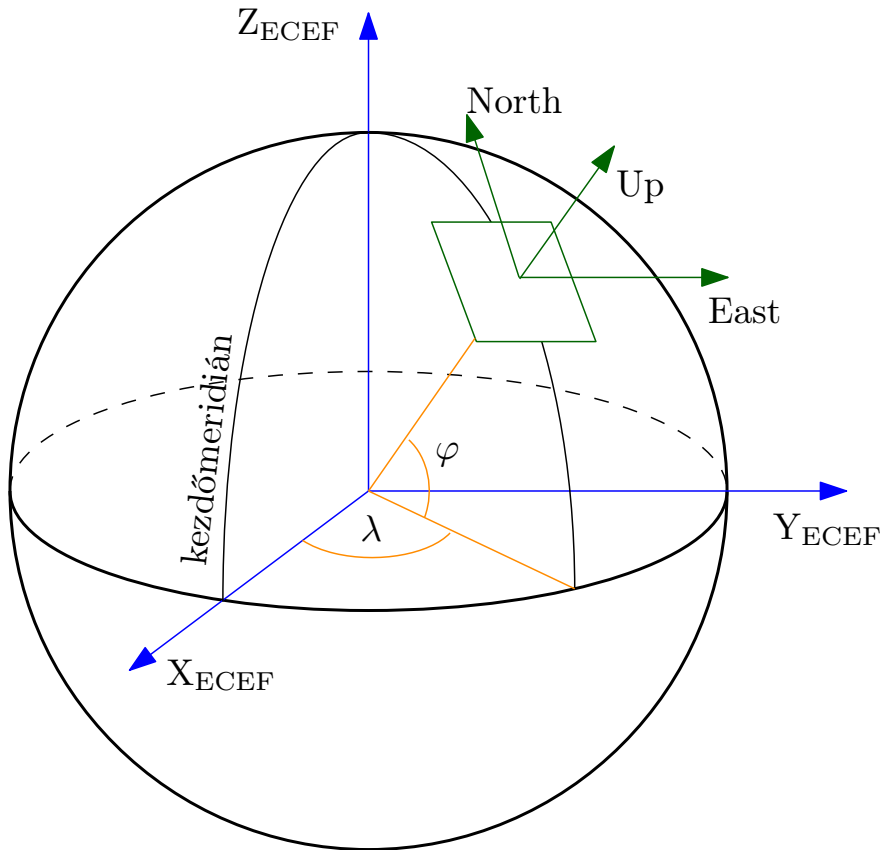
A GPS Globális Helymeghatározó rendszer az Amerikai Egyesült Államok által kifejlesztett és üzemeltetett műholdas rendszer. Ez 24 műholdból áll, melyek nagyjából 20000 kilométeres magasságban keringenek. A műholdak pályáit úgy tervezték, hogy a Föld felszínéről sík terep esetén 7-12 műhold látható. A síkbeli koordinátákat háromszögeléssel határozhatjuk meg, ha a vevő legalább 4 műholdat lát. A tengerszint feletti magasság meghatározásához legalább 5 műhold szükséges. Minél több műholddal van kapcsolatban a vevő, annál pontosabban határozza meg a koordinátáit [17].

A továbbiakban a három legismertebb és általunk is használt Földi koordináta rendszereket mutatjuk be, melyek között egyszerű koordináta transzformációval teremthetjük meg az átváltást.

3.1.1. LLA (Latitude, Longitude, Altitude)

A Föld felszínét a geodéziában forgási ellipszoiddal helyettesítik. Az egyik legelterjedtebb Föld középpontú koordináta rendszert földrajzi koordináta rendszernek nevezik. Ebben a koordináta rendszerben az első koordináta a keresett ponton átmenő forgási ellipszoid felszínére merőleges egyenes és az egyenlítő síkjával bezárt szög a földrajzi szélesség (jele: φ , angolul: latitude). Az előbbi normális egyenest tartalmazó és az egyenlítő síkjára merőleges sík (a keresett pont meridiánsíkja) valamint a kezdőmeridián által bezárt szöget a ponthoz tartozó hosszúságnak nevezzük (jele: λ , angolul: longitude). A harmadik koordináta az ellipszoid felszínétől mért távolság azaz a magasság (jele: h , angolul: altitude). (10. ábra) A földrajzi koordináták előjeles

menntiségek. A földrajzi szélesség az egyenlítőtől északra pozitív, délre negatív, míg a földrajzi hosszúság a greenwichi kezdőmeridiántól keletre pozitív, nyugatra pedig negatív előjelű.



10. ábra. Földi koordináta rendszerek

Ez a koordináta rendszer a leggyakoribb a hétköznapi életben. Ezt használja a legtöbb GPS készülék is, ha koordináták szerint keresünk rajtuk.

3.1.2. ECEF (Earth centered, Earth fixed)

Az ECEF koordináta-rendszer a Föld origójába rögzített derékszögű koordináta rendszer [18]. Az X_{ECEF} tengelye átmegy a kezdőmeridián és az egyenlítő metszéspontján, Z_{ECEF} tengelye átmegy az északi sarkon, míg az Y_{ECEF} tengelye olyan, hogy a három tengely együtt jobb sodrású rendszert alkot (10. ábra)

A földrajzi koordináták és az ECEF koordináták között az alábbi transzformáció teremt kapcsolatot:

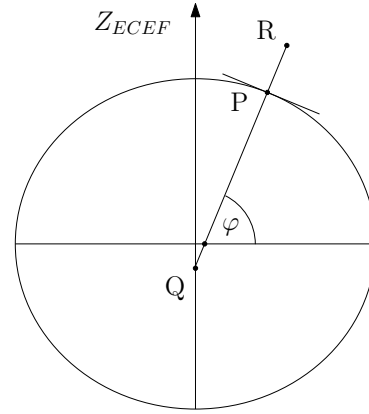
$$X_{ECEF} = (N(\varphi) + h) \cos \varphi \cos \lambda, \quad (1)$$

$$Y_{ECEF} = (N(\varphi) + h) \cos \varphi \sin \lambda, \quad (2)$$

$$Z_{ECEF} = (N(\varphi)(1 - e^2) + h) \sin \varphi, \quad (3)$$

ahol:

- φ a latitude, λ a longitude, míg h a Föld felszíntől mért távolság azaz az altitudo,
- X_{ECEF} , Y_{ECEF} és Z_{ECEF} rendre az ECEF koordináták,



11. ábra. $N(\varphi)$ Normális

- $N(\varphi)$ a Normális, azaz a távolság az ellipszoid felszínére merőleges és a kere-
sett ponton átmenő egyenes mentén a Z_{ECEF} tengely és a Föld felszíne között. A 11.
ábrán az R jelöli a rovert, míg a Normális értéke a QP távolság. Az ábrán az origó és
a Q pont közötti távolságot eltúlzottan ábrázoltuk. A Normális alábbi egyenlet alapján
számolható:

$$N(\varphi) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \quad (4)$$

- valamint a a forgási ellipszoid fél nagytengelyének hossza, és e^2 az ellipszoid első excentricitásának a négyzete.

3.1.3. ENU (local East, North, Up)

Az ENU koordináta rendszer kialakítása olyan, hogy az x és y tengelyek által kifeszített sík egybeesik a 11. ábra P pontjában az ellipszoid érintősíkjával. Ezen a síkon keletre mutat az x tengely, északra az y tengely és ezekre merőlegesen felfelé a z tengely [18]. (10. ábra) Az ENU koordináta rendszer origójának a célpont koordinátáit választottuk.

Az ECEF koordinátákból az alábbi transzformáció segítségével válthatunk át az ENU koordinátákra:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_d & \cos \lambda_d & 0 \\ -\sin \varphi_d \cos \lambda_d & -\sin \varphi_d \sin \lambda_d & \cos \varphi_d \\ \cos \varphi_d \cos \lambda_d & \cos \varphi_d \sin \lambda_d & \sin \varphi_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R - X_d \\ Y_R - Y_d \\ Z_R - Z_d \end{bmatrix}, \quad (5)$$

ahol:

- x , y és z a rover ENU koordinátái,
- valamint a d index a célpont koordinátáit jelöli az adott koordináta rendszerben.

A rovert vezérlő program megírásánál ezt a koordináta rendszert használtuk. A GPS vevő szolgáltatotta nekünk a földrajzi koordinátákat, melyeket két lépésben átváltottuk ENU koordinátákra. Azért választottuk ezt a koordináta rendszert, mert a talaj felszíne jó közelítéssel egybeesik az xy síkkal, így a rover célpont megközelítési feladata sík feladatra egyszerűsödik.

3.2. Haladási irány meghatározása

3.2.1. GPS koordináták alapján

A módszer alapgondolata, hogy az aktuális és a korábbi GPS koordinátákat használjuk fel a mindenkori haladási irány számításához. Fontos megjegyezni, hogy jól kell megválasztani a GPS koordinátákat, amelyek alapján számolunk. Abban az esetben, ha időben túl közeli GPS koordinátákat használunk, akkor pontatlan eredményeket kaphatunk, míg távoli adatok esetén jelentős lesz az időkésés és nem megfelelő irányt számolunk. A módszer mérés-technikai előfeltétele a nagy felbontású, gyors és pontos GPS vevő. Azt is figyelembe kell venni, hogy a rover sebessége valamint a talaj minősége befolyásolja, hogy melyik adat alapján számoljunk.

Tehát ennek a módszernek az egyik hátránya, hogy nehéz pontosan beállítani, vagy adaptív működés is szükséges lehet a pontos haladási irány meghatározásához. Ezen kívül álló helyzetben nem lehet meghatározni, hogy a rover milyen irányba néz, sőt a GPS vevő adatainak szórása alapján hibás eredményeket kaphatunk. Valamint a módszer további hátránya, hogy időkésést tartalmaz.

Előnyként megjegyezhetjük, hogy nem igényel semmilyen plusz mérőegységet, mivel a GPS koordinátákat mindenféleképp mérnünk kell a feladat megoldásához. Valamint állandó terepviszonyok és állandó haladási sebesség esetén nagyon pontos lehet a módszer, nem terheli a talaj egyetlenségén kívül egyéb zaj.

3.2.2. Földi mágneses mező alapján

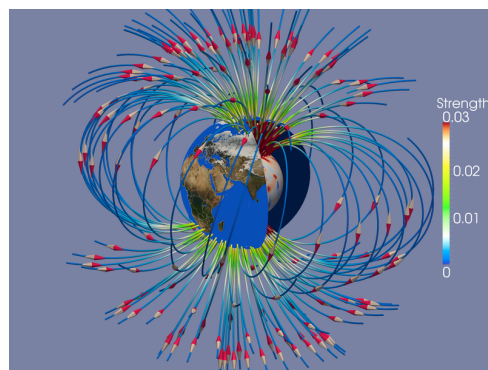
A Földet körülveszi a földi mágneses mező, amely lényegében egy mágneses dipólus, melynek egyik pólusa az Északi-sark, másik pólusa a Déli-sark közelében található. A mágneses mező több tízezer kilométerre terjed ki a világűrbe, melyet magnetoszférának nevezünk. A mágneses mező legvalószínűbb oka a Föld belső szerkezetében működő dinamó-mechanizmus. Ennek a mechanizmusnak a lényege, hogy a Föld belsejében lévő olvadt vasból és nikkelből álló külső mag áramlásai révén örvényáramok keletkeznek, melyek kiterjedt mágneses mezőt gerjesztenek [19].

Ez a mágneses mező a Föld sarkaitól távol meglehetősen stabil, így a mező irányának mérésével meg lehet állapítani, hogy a rover milyen irányba néz az észak-déli irányhoz képest. Ebben az esetben a Föld mágneses mezejének észak-déli irányához képest mérünk, nem a földrajzi észak-déli irányhoz képest, így a mért értéket még korrigálni kell.

Ennek a módszernek a legnagyobb előnye, hogy a mérési és adatfeldolgozási időt nem számítva, időkésés nélkül a rover aktuális irányát kapjuk eredményül. Valamint a méréshez a rovernek nem kell mozognia, álló helyben is azonnal működik.

Azonban ennek a módszernek is vannak hátrányai. A legnagyobb hátránya, hogy egyéb mágneses mezőt generáló eszközök tönkre teszik a mérést. Mivel az egyenáramú motor által keltett mágneses mező kis távolságban sokkal erősebb, mint a Föld mágneses mezeje, így ez a módszer csak akkor működhet, ha a szenzort kellő távolságra helyezzük a két egyenáramú motortól. A teszt méréseink alapján a feladatkiírásban szereplő befoglaló méretek nem adnak akkora mozgásteret, hogy a két motor között elhelyezett szenzorral pontosan tudjunk mérni. Egyedül a rover farkára lehetne helyezni a szenzort, azonban ott túl nagy a sérülés veszély. Másik megoldás erre a problémára az egyenáramú motorok árnyékolása, azonban idő hiányában ezzel nem foglalkoztunk.

Így végül úgy döntöttünk, hogy a GPS koordináták alapján számoljuk az aktuális haladási irányt. Később tervezzük a két módszer ötvöztetését. A motorok megfelelő árnyékolása esetén ki lehetne használni mindkét módszer előnyét.



12. ábra. A földi mágneses mező [20]

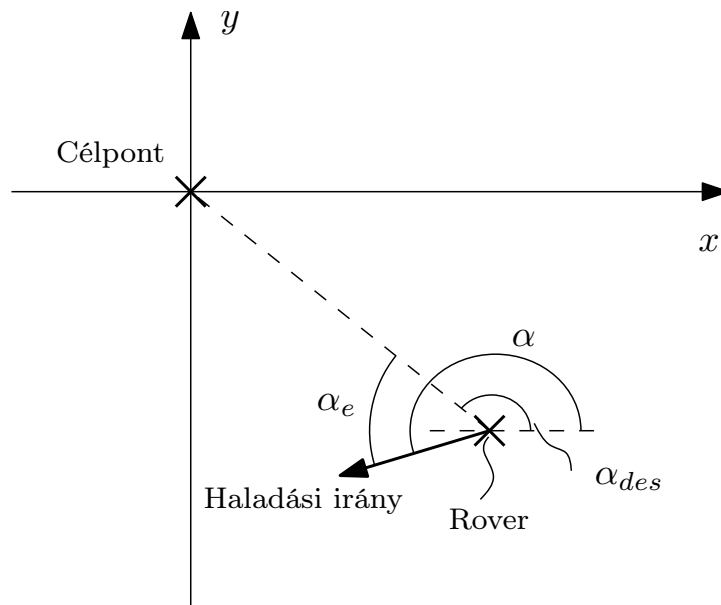
3.3. Haladási irány szabályozása

Az eddigiek alapján ismerjük a rover aktuális pozícióját, a célbaéréshez szükséges irányt, valamint a rover haladási irányát. Így a 13. ábra alapján a szabályozási célunk az alábbiak szerint fogalmazható meg:

$$\alpha_e = (\alpha - \alpha_{des}) \equiv 0, \quad (6)$$

ahol:

- α_e a szöghiba,
- α a rover aktuális haladási iránya korábbi GPS koordináták alapján számolva,
- illetve α_{des} a célpont és a rover pozíciója alapján számolt szükséges haladási irány.



13. ábra. Haladási irány szabályozó

Alapvetően két szabályozót terveztünk, az egyik egy esetszétválasztáson alapuló kapcsolóüzemű szabályozó a másik egy PD szabályozó.

3.3.1. Kapcsolóüzemű szabályozás

Ennél a szabályozónál a szöghiba szerint különböző eseteket definiálunk, ami alapján beállítjuk a két kerék ω_1 és ω_2 szögsebességének arányát, így készítetve kanyarodásra a rovert. Az alábbi eseteket különböztetjük meg, a szükséges haladási irány szerint:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \begin{cases} < 1 & \text{ha } \alpha_e > 20^\circ \\ = 1 & \text{ha } 20^\circ > \alpha_e > -20^\circ \\ > 1 & \text{ha } -20^\circ > \alpha_e \end{cases}$$

Itt a kanyarodás alatt egy előre megválasztott sugarú köríven való haladást értünk. Ez a struktúra egy nagyon egyszerű szabályozót eredményez, amely megfelelő kanyarodási sugarat és haladási sebességet választva stabilan működhet. Azonban hátrányként meg kell jegyeznünk, hogy a kanyarodás mértéke nem veszi figyelembe a szöghiba nagyságát. Azaz 160° -os szöghiba esetén is ugyanúgy reagál a rover, mint 25° esetén. Valamint nem a zérus szöghibára, hanem a zérus szöghiba egy környezetére működik a szabályozó.

3.3.2. PD szabályozó

A PD szabályozó alatt egy olyan szabályozót értünk, amely a rover kerekeinek szögsebesség különbségét változtatja a szöghiba alapján, azonban ezt nem előre definiált értékek szerint teszi. A szabályozót az alábbiak szerint definiáljuk:

$$(\omega_1 - \omega_2) = P\alpha_e + D\dot{\alpha}_e, \quad (7)$$

ahol a szabályozónak P a proporcionális, D a differenciális tagja. A szabályozónak a paramétereit már nehezebb beállítani, az ideális értékek erősen függenek a terepviszonyoktól, valamint a rover aktuális haladási sebességétől. Azonban ez a szabályozó dinamikusan reagál a szöghibára, valamint szabályozási célja a zérus szöghiba.

Végül a kapcsolóüzemű szabályozó mellett döntöttünk. Az egyik érvünk a döntés mellett, hogy a helyszínen kevés időnk lesz teszteket végezni, a másik érvünk, hogy a terepviszonyok amúgy sem engedik meg, hogy a rover hosszútávon a megfelelő irányba haladjon. Elegendő egy kis egyenetlenség és a rover drasztikusan irányt változtat. Így valójában a szabályozóval annyi a célunk, hogy biztosítsa, hogy nagyobb valószínűséggel haladjon a rover a célpont irányába, mint attól eltérő irányba. Ehhez a feladathoz bőven elegendő az egyszerűbb, lassabban reagáló, de robusztus szabályozó.

4. Elektronika tervezés

Minden alkatrész kiválasztása során fő szempont a minél kisebb méret és tömeg valamint törekedtünk az olcsó, költséghatékony tervezésre.

4.1. Hajtó motorok

A rover fő aktuátorai az egyenáramú motorok. Kefés motorokat választottunk olcsóbb árú és egyszerűbb működtetésük miatt. A DC motorokban a kommutáció kefék által mechanikusan megvalósított, nincs szükség további vezérlő áramkörre, kefe nélküli társaikkal szemben. Elvárt a 0.5 Nm nyomaték folyamatos biztosítása, valamint a 16 cm-es kerékátmérő mellett 8-10 km/h sebesség elérése. A nagyobb sebesség csökkenti az elakadás esélyét, mivel a kisebb terepakadályokon a lendület átjuttatja a rovert.

Továbbá mivel két motor sosem teljesen egyforma, az egyenes haladáshoz szükséges a motorok mindenkor szöghelyzetének ismerete, tehát olyan motort választottunk, amely forgás jeladóval van ellátva. Ennek segítségével valósítottuk meg a kerekek sebességszabályozását.

Egy 12 V-os kefé Pololu gyártmányú egyenáramú motort választottunk, amely 18.75:1 áttétellel rendelkezett [21]. A motor a 37D×52L (átmérő×hossz mm-ben) széria tagja, további adatai a 2. táblázatban találhatók.



14. ábra. Egyenáramú motorok [21]

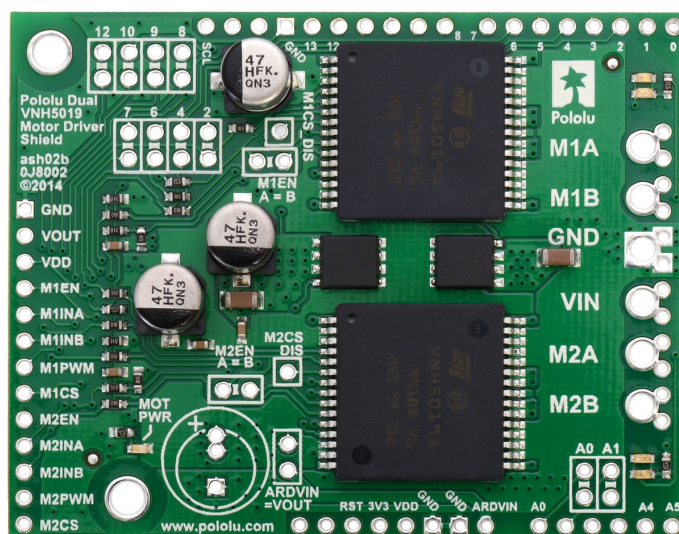
Tulajdonság	Érték
Névleges feszültség	12V
Áttétel	18.75:1
Üresjárat sebesség	350 fordulat/perc
Üresjárat áram	300mA
Tartó áram (elakadás)	5000mA
Nyomaték	0.78Nm
Enkóder	kvadratikuss, Hall szenzor

2. táblázat. Egyenáramú motor paraméterek

4.2. Motor vezérlő elektronika

A motorok üresjáratban 300 mA-t vesznek fel, elakadás esetében pedig 5A-re is növekedhet a szükséges áram. Egy mikrokontroller maximum 1-200 mA kiadására képes, ezért a motorok meghajtásához teljesítmény elektronika szükséges. A kereskedelemben kapható áramkörök rendelkeznek védőáramkörökkel is.

Erre a célra egy Pololu gyártmányú VNH5019 típusú duális motor meghajtót [22] választottunk. A modul folyamatos üzemben 12A, rövid ideig pedig akár 30A leadására is képes csatornánként, ez eleget tesz a motorok energia igényeinek. Továbbá beépített védelemmel rendelkezik rövidzár és a kefések motorokból származó visszafele folyó árammal szemben, megvédve így a H-hidat alkotó tranzisztorokat és a hidat vezérlő mikrokontrollert.

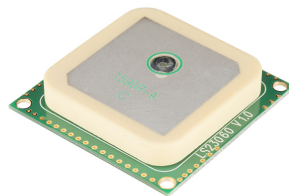


15. ábra. Pololu Dual VNH5019 Motor Driver Shield [22]

4.3. GPS vevő

A pozíció meghatározásához GPS modult használtunk. A feladathoz egy nagy érzékenyséű, alacsony fogyasztású, gyors eszközre volt szükségünk. Ezért választásunk a Locosys LS20031 típusú modulra esett [23].

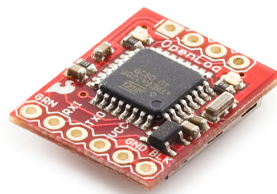
A modul nagy érzékenyséű, alacsony fogyasztású, SMD típusú szenzort tartalmaz. Az LS20031-es típus megnövekedett antenna mérettel rendelkezik, elméletileg 66 műhold jelének érzékelésére képes, A mikrokontroller felé másodpercenként maximum öt pozícióadat küldésére képes, emellett beépített mikroelemének köszönhetően megőrzi a korábbi rendszeradatokat meggyorsítva a bekapcsolás utáni inicializálást. Ezen tulajdonságainak köszönhetően, rövid idő (akár pár másodperc) alatt nagy pontossággal meghatározza saját pozícióját.



16. ábra. Locosys LS20031 [23]

4.4. SD adatrögzítő

A verseny követelménye az autonóm működés bizonyítása, így bizonyos rendszer információk mentésére külső memória használata szükséges. Ehhez a Sparkfun OpenLog nevű terméket használtuk [24]. A modul microSD kártyára írja a soros kommunikáción keresztül kapott adatokat. A verseny során ez az eszköz rögzíti a szabályozott, önműködő navigáció adatait.



17. ábra. SD adatrögzítő modul [24]

4.5. Ejtőernyő nyitás

Az ejtőernyőt, az ejtőernyőt tartó dobozt valamint a farkat becsukott helyzetben rögzítő kötelek kioldását a rögzítő kötelek elégetésével valósítottuk meg. Az égetéshez olyan megoldás szükséges, amely áram hatására magas hőmérsékletet hoz létre. Ehhez a kötelek köré ellenálláshuzalt tekertünk, ami a rajta átfolyó áram hatására magas hőmérsékleten izzani kezdett, elegendő hőt biztosítva a kötél elégetéséhez. Ez a módszer bizonyult a legkevesebb hozzáadott tömeggel járó megoldásnak és relatív egyszerű és biztos működésűnek. Ilyen alkalmazásra a króm-nikkel ötvözetből készült, ellenálláshuzal egy megfelelő választás (NiCr vagy Kanthal) [25]. Olvadáspontja 1200-1400° C fok körüli. Annak érdekében, hogy csak a körülbelül 10 cm-es huzal felizzításához elegendő áram folyjon, és még ne égjen el az ellenálláshuzal, kellően nagy fajlagos ellenállású, azaz minél kisebb átmérőjű huzalra volt szükség. Így 0.16mm átmérőjű huzalt választottunk, melynek fajlagos ellenállása $\approx 53.37 \Omega/\text{m}$. Ami azt jelenti, hogy $I = \frac{U}{R} = \frac{12}{53.37 \times 0.1} = 2.24\text{A}$ folyt át a huzalon, mely már megközelítőleg 1100° C fokra hevítette azt.

4.6. Akkumulátor

A szerkezet legnagyobb fogyasztója a két egyenáramú motor. A kísérletek alapján a motorok átlagosan 400-500 mA vesznek fel üzem közben.

Legrosszabb esetben a rakétából kikerülve akár 5km-es távolságba is kerülhet a szerkezet a céltól. Ezt a távolság 8-10 km/h-ás sebességgel 30-40 perc alatt megtehető, ezalatt a két motor $\approx 1500\text{-}2000\text{ mAh}$ -t fogyaszthat. A többi elektronika nagyságrendileg a tesztek alapján 200-300 mAh-t fogyaszt. Ezért olyan 12V-os akkumulátor szükség amely legalább 2000 mAh kapacitású.

A választás egy 3 cellás, 2200 mAh-ás lítium polimer (LiPo) akkumulátorra esett [26]. A LiPo akkumulátorok fő előnye a kis tömeg és a nagy energiasűrűség.



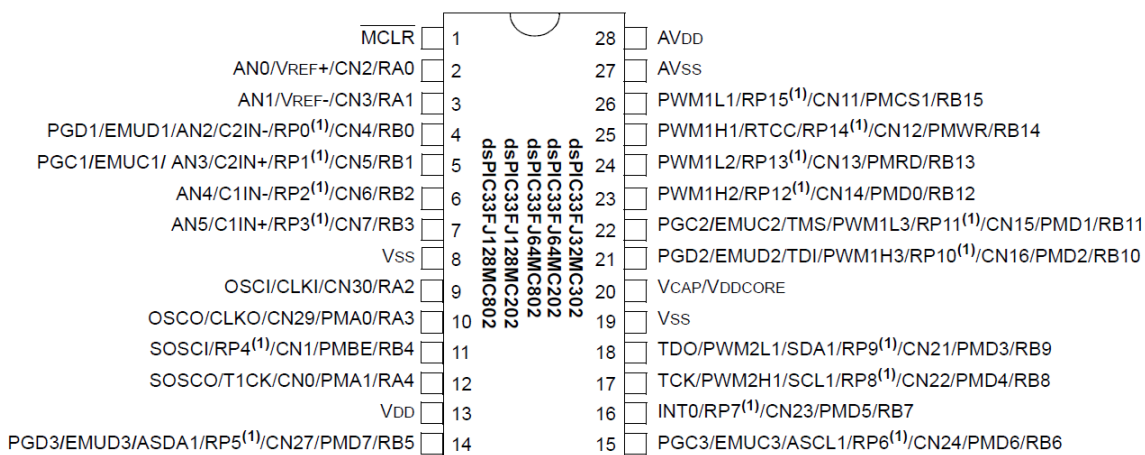
18. ábra. E-flite 2200mAh 3S 11.1V 30C LiPo akkumulátor [26]

4.7. Mikrokontroller

A modulok működtetéséhez olyan mikrokontroller szükséges amely megfelelő számú vezérelhető lábbal és a megfelelő kommunikációs és vezérlő modulokkal rendelkezik. Ezek az igények a következők:

- 2 UART modul, a GPS modullal és SD kártya íróval történő kommunikációhoz
- 2 PWM kimenet, a motorok vezérléséhez,
- 2 QEI modul, az enkóderek négyszögjeleinek értelmezéséhez,
- 2 digitális kimenet, a motorra ható nyomaték irányának változtatásához,
- 4 digitális be/kimenet, a rakétából történő kiszabadulás érzékeléshez és a kötél égetésekhez

A választás így egy DSPIC33FJ64MC802 [27] típusú mikrokontrollerre esett, amely eleget tett minden feltételnek továbbá már rendelkezünk a programozásához szükséges eszközökkel és korábban már tapasztalatokat is szereztünk a programozásában.



19. ábra. DSPIC33FJ64MC lábkiosztás [27]

4.8. Nyomtatott áramkör

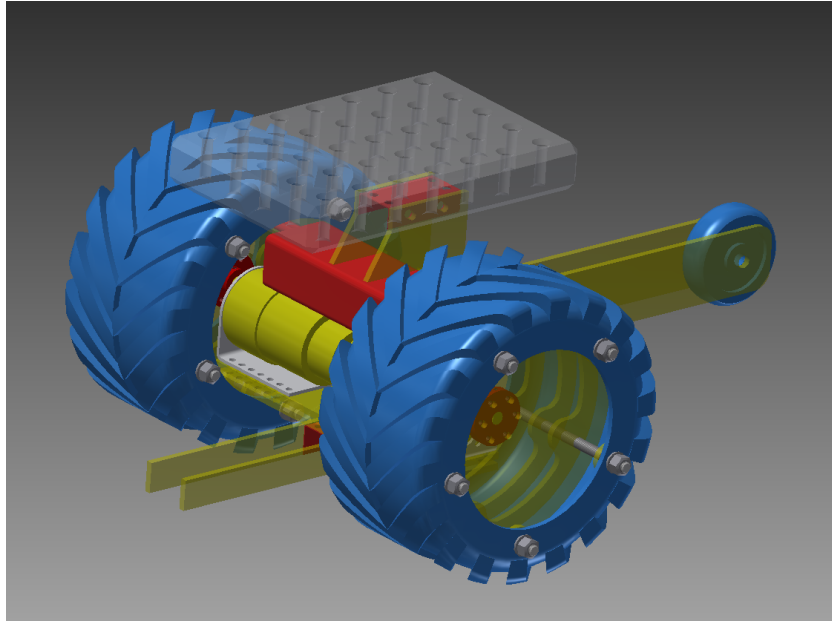
A nyomtatott áramkörhöz (továbbiakban: NYÁK) többnyire felületszerelt alkatrészeket alkalmaztunk (SMD-Surface Mount Device) jelentősen kisebb méretük miatt. A jobb helykihasználtság érdekében kétoldalú áramkört terveztünk.

Habár az SMD alkatrészek a kisebb forrasztási felület miatt kevésbé stabilan rögzülnek a NYÁK-hoz a furat szereltekkel szemben, mégis a tapasztalat azt mutatta, hogy elegendő ez a kötés.

Az áramkör tervét P-CAD-ben készítettük el. A nyomtatott áramkör sematikus rajzát és nyák tervét méretéből adódóan csak CD-n mellékeljük.

5. Köztes prototípus plusz tesztek

A mechanikai tervezéshez Inventor programot használtunk. A végső szerkezet megépítése előtt elkészítettünk egy prototípust. Ennek célja a rover fő funkcióinak tesztelése, illetve a program fejlesztése. Mivel ennek a modellnek nem kellett megfelelnie a végső méret, illetve tömegkorlátnak, anyagát nagyrészt egyszerűen megmunkálható 3 mm vastagságú plexi alkotta. A gépet a végleges NYÁK prototípusával üzemeltettük, így ellenőrizve az elektronika megfelelőséget. A szerkezet 3D-s Inventor modellje a 20. ábrán látható.



20. ábra. A prototípus 3D modellje

A szerkezettel az alábbi funkciókat teszteltük:

- A megbecsült indítónyomaték illetve névleges fordulatszám ellenőrzése. A tesztek során a motorok megfelelőnek bizonyultak, a szerkezet képes túljutni kisebb akadályokon, az alacsony sebességtartományban dinamikusan működött. Emellett a rover elérte a felállított követelménynek megfelelő sebességet.
- A szerkezet lehetőséget nyújtott a kerekek sebességszabályozásának tesztelésére, a kanyarodási rutinok kipróbálására.
- Az elektronika kipróbálására is lehetőség nyílt. Valós környezetben tudtuk tesztelni a GPS, valamint a SD kártya modulokat.
- Lemértük a szerkezet üzem közbeni fogyasztását ami alapján az akkumulátor szükséges kapacitását megállapítottuk. A tesztek alapján elegendőnek bizonyult a 2200mAh]-s telep.

- Teszteltük a mágneses szenzort, illetve a motor zavaró hatását. A szenzor csak akkor működött kielégítően, amikor a rover kitámasztó kereke mellett helyeztük el.
- Fontos, hogy a mikrokontroller a különböző feladatokat valós időben megfelelően elvégezze. A megalkotott programstruktúrát teszteltük a prototípus segítségével.

6. Mechanikai tervezés

6.1. Tervezési szempontok

A rover mechanikai tervezésénél a következőket vettük figyelembe:

- A szerkezetet tartalmazó konténer mérete $\varnothing 146.81 \times 254$ mm. Ebbe a hengeres testbe kell beleférnie a rovernek, valamint az ejtőernyőknek.
- A teljes szerkezet maximális tömege 1800 g.

A tervezés során a fő irányelvek a következők:

- A szerkezet felépítése legyen a lehető legszimmetrikusabb. Ez azért szükséges, hogy a két kerékre működő szabályozó megegyező paraméterek esetén biztosítsa a gép egyenes haladását.
- A szerkezet bírja ki a fellövés illetve landolás során rá ható erőket.
- Legyen a rover kereke könnyen leszerelhető a módosítások egyszerű elvégzésének érdekében.
- A kerék átmérője legyen a konténer méreteit figyelembe véve a lehető legnagyobb. Ezzel elérhető a helykihasználtság valamint a gép terepjáró képességének maximalizálása.
- Az elektronika és a szenzorok lehető legteljesebb védelme. Ezek a szerkezet legsérülékenyebb alkatrészei, amelyek tönkremenetelével könnyen üzemképtelenné válhat a robot.
- Legyen egyszerű, kevés mozgó alkatrészt tartalmazó kinyitható kitámasztó farka a rovernek.

6.2. Rover CAD terve

Mivel a kerék gumiköpenyének mérete igen meghatározó, a végső modell tervezését ennek kiválasztásával kezdtük. Választásunk egy 1/8 méretarányú RC autó külsőjére esett (21. ábra). A gumi mérete $\varnothing 142 \times 60$ mm. Így a konténer és a kerék között megfelelő, kicsit több mint 2 mm légrés adott.



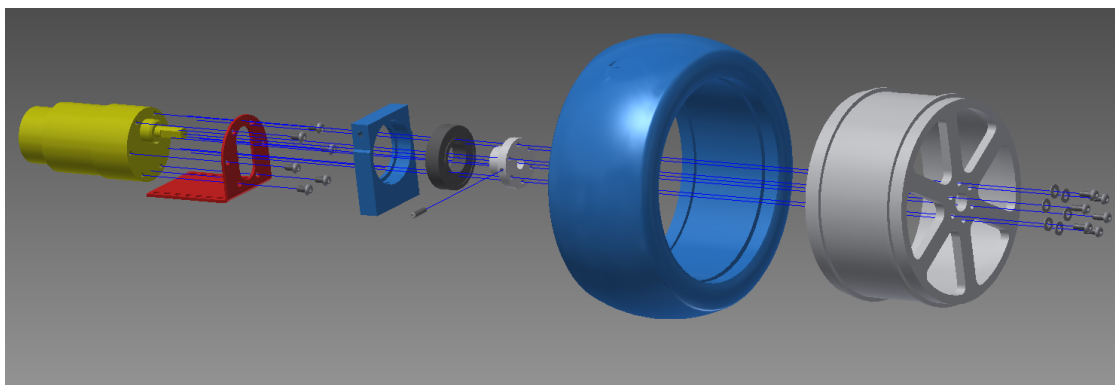
21. ábra. 1:8 Proline Hole Shot VTR gumiköpeny

A konténer lehető legjobb helykihasználása érdekében az ejtőernyőt a rover kereke mellett helyeztük el. Mivel annak rögzítését is itt oldottuk meg, a talajra landolás során a szerkezet kerekeinek tengelye a Föld középpontja felé néz. Ennek a megoldásnak előnye, hogy a két kritikus terhelés iránya megegyezik, mivel fellövés valamint landolás során is tengelyirányú terhelések hatnak a szerkezetre.

A motorok áttételezései siklócsapágyakkal rendelkeznek, amelyeknek axiális irányú terhelhetősége minimális. Ahhoz, hogy a szerkezet kibírja a fellövéskor illetve földbecsapódáskor rá ható erőket, külső csapágyak alkalmazása szükséges. Alacsony tömeg, valamint a kis méret elérése érdekében mélyhornyú golyóscsapágyakat alkalmaztunk, SKF 16002-2Z.

A becsapódáskor ható nagy terhelések miatt a csapágyházak, a csapágyakba illeszkedő agyak, valamint a felnik anyaga 7075 alumínium. Ezt az anyagot kiváló tulajdonságai miatt gyakran használja a repülőgépipar is (szakítószilárdsága nagyjából 275 MPa).

A kritikus külső terhelések mindig egy irányból érik a rovert, méghozzá úgy, hogy a szerkezet kerekeinek külső felületétől a rover belseje felé irányulnak. Emiatt elegendő egy tengelyváll kialakítása a csapágyházakban, valamint kerékagyakban. Szoros illesztés, valamint csapágyragasztó alkalmazásával megakadályozható a csapágyak másik irányú mozgása, illetve kirázódása.

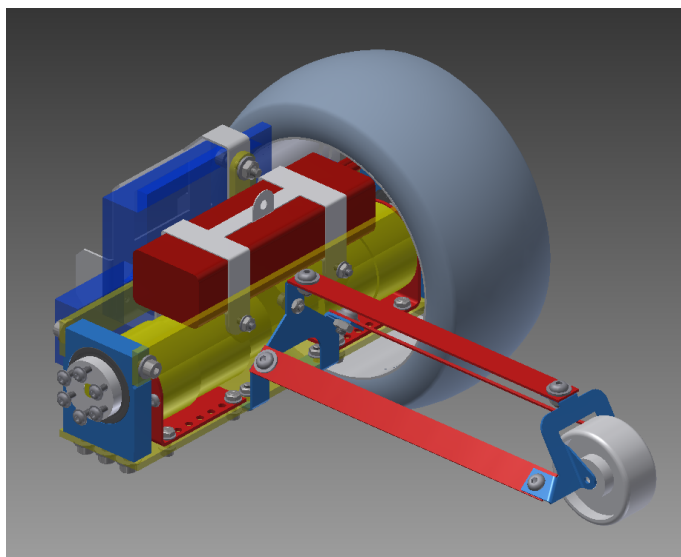


22. ábra. A hajtáslánc robbantott ábrája

A talajra érkezés után fontos a becsapódási energia elnyelése. Ennek érdekében a kétoldali csapágyházakat üvegszálas műanyag kompozit elemek kötik össze. Ezeknek az anyagnak további előnye a jó megmunkálhatóság, valamint a nagy szilárdság.

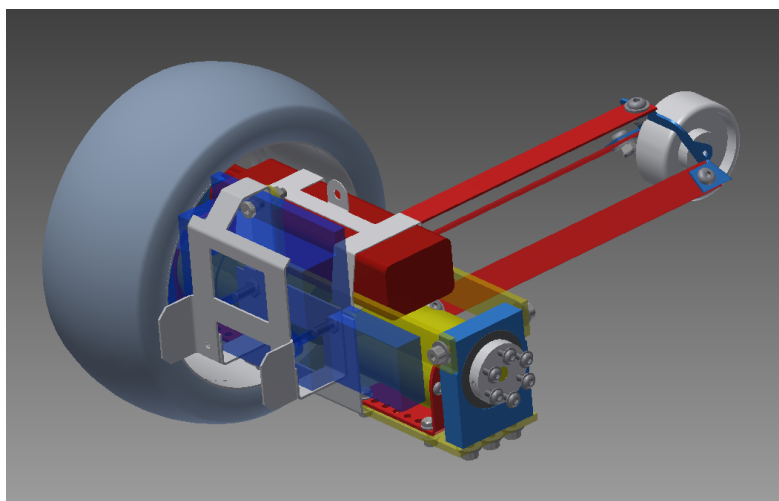
A további alkatrészek a csapágyházakból, valamint a kompozit kereszttartókból álló keretbe illeszkednek. Az akkumulátor a motorok fölött, míg a NYÁK a szerkezet elején kapott helyet. Az elektronika mechanikai védelmének érdekében a szerkezet eleje alumíniumlappal burkolt.

A kitámasztó kerék kerete acél laprugókból készült, így a nyitószerkezet nem tartalmaz klasszikus értelemben vett mozgó alkatrészt. További előnye ennek a megoldásnak, kis tömeg. A segédkerék repülőgép modelleknél alkalmazott extra kis tömegű szerkezeti elem.



23. ábra. A rover 3D-s ábrája I

A 23. és 24. ábrákon a szerkezet Inventor modellje látható. A sötétpiros alkatrész az akkumulátor, az átlátszó sárga elemek a hosszmerevítők, míg az átlátszó kék test a NYÁK-ot jelképezi.



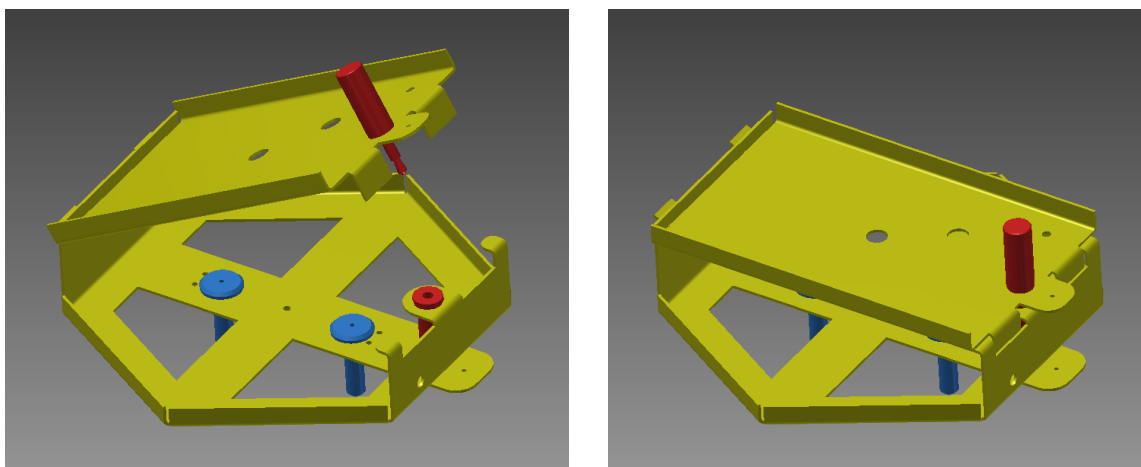
24. ábra. A rover 3D-s ábrája II

6.3. Ejtőernyő nyitó mechanizmus

A rover földre juttatását ejtőernyők segítségével valósítottuk meg. A feladathoz két fokozatot használtunk. Elsőként egy kisebb stabilizáló ernyő nyílt ki, melynek feladata a leereszkedés első szakasza során a szerkezet stabilizálása, valamint a második ernyő biztos nyitásának biztosítása. A második nagyobb méretű ernyő feladata a szerkezet lassítása a becsapódási sebességre. Két ernyő használatával elérhetjük, hogy nagy magasságból viszonylag nagy zuhanási sebességgel megközelíthessük a felszínt, így az oldalirányú szél csak rövidebb ideig hat a robotra, mint egy ernyő használata esetén. Ez azt eredményezi, hogy a rover kevésbé sodródik el vízszintes irányban a rajttól és így a célponttól is.

A nagy ejtőernyőt tartalmazó alumíniumdobozt egy 3 mm átmérőjű hegymászáshoz használt 120 kg teherbírású kötél rögzíti a roverhez. Ennek a kapcsolatnak a megszüntetésére előfeszített rugókat, valamint NiCr ellenálláshuzalt alkalmaztunk. Ehhez hasonló módszerrel nyitható a nagyobbik ejtőernyő, azzal a különbséggel, hogy itt a nyitást a kisebbik ernyőre ható erők is segítették.

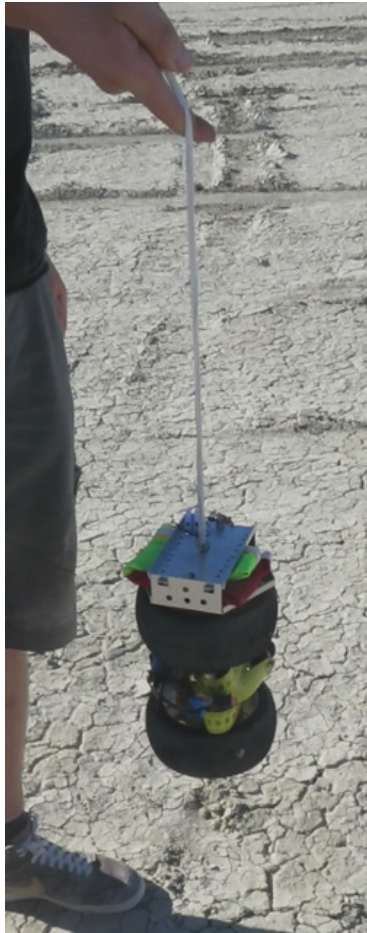
A szerkezet működtetésének érdekében érzékeltük azt pillanatot, amikor a robot kikerül a rakétából. Erre a kisebbik ernyő kötélzetét használtuk, amely megfeszülésekor megszakított egy áramkört, így jelezve a mikrokontroller számára az ereszkedés megkezdését.



25. ábra. Ejtőernyő tartó doboz nyitott és csukott állapotban

A 25. ábrán látható az ejtőernyőt tartó doboz, melyen a sárga színű elemek jelölik az alumínium lemezeket. A felső kinyíló lemez furataihoz csatlakozik a kisebb ejtőernyő, míg a nagyobb ernyő nyitás előtt összehajtogatva a dobozban van. A kisebb ernyő nyílását jelző áramkör valamint a mikrokontroller összeköttetését a piros színű 3,5mm-es jack csatlakozó valósítja meg. A kék csapok a rover megfelelő oldali csapágyházába illeszkednek. A rajtuk található furatokon keresztül lehet a két szerkezeti elemet összekapcsolni egy kötél segítségével.

Az ejtőernyő nyitó mechanizmus működésének különböző állapotai az alábbi ábrákon láthatóak. A 26. ábrán a robot látható az ereszkedés állapotához hasonlóan. A kötélen amelyen a szerkezet lóg, a stabilizáló ernyő kötélzete. A kis ernyő leválása után a rover nyitott nagy ernyővel ereszkedik tovább. A földet éréshez hasonló állapotot tükröz az ábrán látható összeállítás, a teszteket a sérülékeny ernyő mellőzésével végeztük.



A rover a kisejtőernyővel



A rover az ejtőernyő doboz leoldása előtt

26. ábra. Ejtőernyő tartó doboz nyitott és csukott állapotban

Az előfeszített rugós mechanizmus a szerkezeti elemeket összekötő kötél elégetése után a lehető legmesszebbre löki el az ejtőernyőt, valamint az azt tartalmazó dobozt. (27. ábra)



27. ábra. Az ejtőernyődoboz lerugása

7. Szabályozó program elemei

A DSPIC33FJ64MC802 mikrokontrollerre C programnyelven MPLAB környezetben írtuk meg a programot. A megvalósításban sokat segített, hogy korábbi projekteket hasonló mikrokontroller segítségével készítettünk el. Így a processzor moduljainak működését ismertük.

7.1. Modulok inicializálása

Az alábbi modulok inicializálását kellett megoldani:

- **UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)** Kommunikáció a GPS modul és a mikrokontroller, valamint az SD kártya író és a mikrokontroller között.
- **QEI (Quadrature Encoder Interface)** Segítségével könnyen értelmezhető az egyenáramú motorokon található encoderek 2-2 négyyszögjele.
- **PWM (Pulse Width Modulation)** Ez felel az egyenáramú motorok vezérléséért.
- **DMA (Direct Memory Access)** Ennek a modulnak a használata azért szükséges, mert nélküle a program futása közben a GPS modulból érkező üzenetkből adatokat veszünk. A DMA a processzor lefoglalása nélkül, hardveresen menti az üzenetet.
- **DMA Interrupt** Ez a főprogramnak egy megszakítása, amely akkor lép életbe amikor a DMA modul által használt két puffer közül az egyik megtelt. Feladata a beérkezett üzenet értelmezése, a fontos adatok továbbítása a főprogramnak.

7.2. Keréksebesség szabályozó

A rover haladási irányát a keréksebességek nagyságának megfelelő beállításával változtathatjuk meg. Különböző fordulatszámok esetén a szerkezet kanyarodik, míg amennyiben ezek megegyeznek a rover egyenesen halad.

A kerekek szögsebességére vonatkozó PID szabályozó egyenlete analóg esetben:

$$M = -P \omega_{err} - D \varepsilon - I \int_{t-T}^t e^{\tau-t} \omega_{err} d\tau \quad (8)$$

$$\omega_{err} = \omega_{des} - \omega \quad (9)$$

ahol M a motorról a kerekre ható forgatónyomaték, ω_{err} a szögsebesség-hiba, ω_{des} a megkövetelt, ω pedig az aktuális szögsebesség. ε a tengely szöggyorsulása, P , I , D és T pedig szabályozási paraméterek. Az integráló tag bemenete ebben az esetben exponenciálisan elhal, így a szöghiba nem halmozódik fel a szabályozó indulásától kezdve [28].

A szerkezet jelentős mechanikai csillapítása miatt a szabályozó D paraméterét nullának vehetjük, így is stabil lesz a rendszer. Ezt a feltételezést alátámasztották a prototípus, valamint a végső szerkezet tesztsjelei is.

A rover esetén a szögelfordulás értékeit a motoron levő mágneses Hall szenzor segítségével érzékeljük. Digitális feldolgozás esetén a kerekek szögsebességét két egymás után érzékelt szögelfordulás érték, valamint a mintavételezési idő segítségével közelíthetjük.

Az egyenáramú motorokat H-híd segítségével üzemeltettük. Ennek az elektronikai alkatrésznek a feladata, hogy a mikrokontrollerből érkező PWM jeleket, annak kitöltési tényezőjével arányos feszültséggé alakítsa. Mivel a DC motor elektromos körének sajátfrekvenciája a mechanikai rendszer sajátfrekvenciájának többszöröse, állandó fordulatszám esetén a ható forgatónyomaték, valamint a feszültség között egyenes arányosságot feltételezhetünk [28].

$$iR + K_M \Omega = U_{be} \quad (10)$$

$$-K_M i = M_t \quad (11)$$

Ahol i a motoron folyó áram, R a motor tekercseinek ellenállása, Ω a motor forgó részének szögsebessége, U_{be} a motoron eső bemeneti feszültség, M_t a leadott nyomaték, K_M pedig a motorra jellemző konstans.

A digitális szögsebesség-szabályozás egyenlete [29]:

$$U_{be}(t) = -P [(\varphi_{j-1} - \varphi_j) - \Omega_{j,des}] - I \sum_{n=j-k}^j 2^{n-j} [(\varphi_{n-1} - \varphi_n) - \Omega_{n,des}]; \quad (12)$$

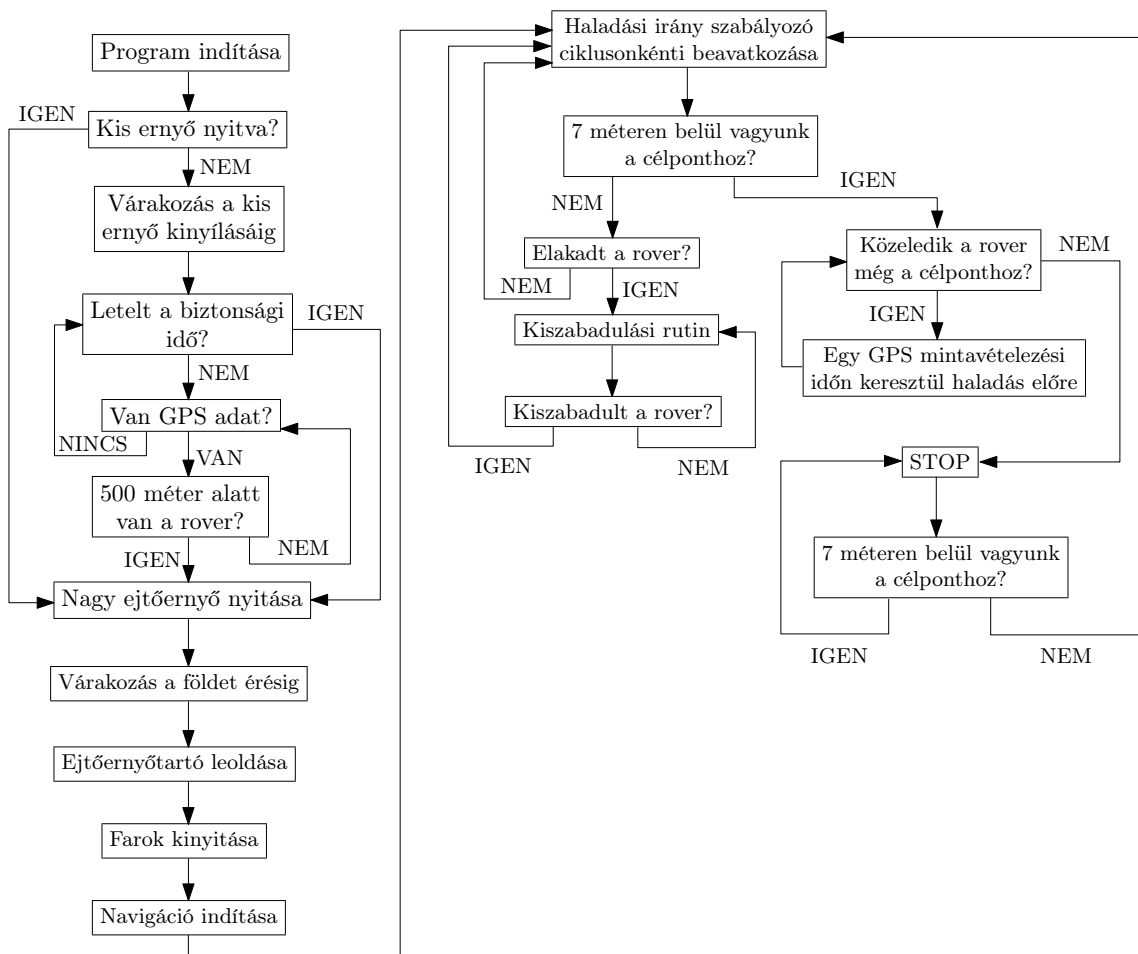
$$t \in [j\Delta t, (j+1)\Delta t)$$

ahol $\Omega_{k,des}$ a két mintavételezés között megkövetelt szögelfordulás, φ_k pedig az érzékelt szöghelyzet a k -adik mintavételezésnél. Az exponenciális tag 2-es alapja a mikrokontroller futási idejének optimalizálása miatt szükséges. Ennek oka az, hogy a 2-vel való osztás megvalósítható bitműveletek segítségével, melyeket a mikrochip processzora egy órajel alatt képes elvégezni 16-bites számok esetén.

A szabályozó paramétereit tapasztalati úton állítottuk be. A végső modell szabályozója 30Hz-es mintavételezési frekvenciával üzemelt.

7.3. A program felépítése

A 28. ábra a program futásának felépítését mutatja be.



28. ábra. A program sematikus ábrája

A program indításánál a landoláshoz szükséges modulokat inicializáljuk. Ezután megvizsgáljuk, hogy a program indításával egy időben kinyílt-e már a kis ejtőernyő. Ha igen, akkor ez azt jelenti, hogy egy váratlan újraindulás történhetett a mikrokontrolleren. Ilyenkor vészmegoldásként azonnal nyitjuk a nagy ejtőernyőt. Ha nem történt a zuhanás közben újraindulás, akkor a GPS adatai alapján 500 méteres magasságban nyitjuk a nagy ejtőernyőt. Ehhez a köteleket a 6.3. fejezetben leírt módon égetjük.

Földet érés után inicializáljuk a mozgáshoz szükséges modulokat. Ezután, amíg a rover 7 méterre meg nem közelíti a célpontot, addig a 3.3.1. fejezetben leírt irányszabályozót működtetjük. A rover haladási sebességét és kanyarodási sugarát állandó értékre állítjuk, melyeket a helyszínen a sivatagban kísérletezünk ki. Amikor a rover 7 méterre megközelítette a célpontot, akkor lassan haladunk előre, amíg tovább közelítjük a célpontot, utána a rover abbahagyja a mozgást és figyel, hogy valóban 7 méteren belül helyezkedik-e el. Ilyenkor a kiszabadulási rutinokat kikapcsoljuk.

Ha a rover menet közben megakadna, akkor a 7.4. fejezetben leírt kiszabadulási rutinok lépnek életbe.

7.4. Kiszabadulás rutinok

A kiszabadulási rutinoknak akkor kell elindulniuk, ha a rover elakad a célpont megközelítése közben. Elképzelhető, hogy beássa valamelyik kerekét a homokba, nekimegy egy terepakadálnak, vagy fennakad egy kisebb gödör peremén. Ilyenkor az első feladat, hogy szoftveresen érzékeljük az elakadást. Mivel a rover célja a haladási irány szabályozó futása alatt, hogy folyamatosan haladjon, így ha hosszabb ideig egy helyben marad a rover, akkor biztosan elakadt. Ezt úgy érzékelhetjük, hogy ha huzamosabb ideig (5-6 másodperc) a rover pozíciója GPS vevő szórásánál kicsivel nagyobb sugarú területen belül marad, akkor a rover elakadt. Ilyenkor az alábbi három kiszabadulási rutint futtatjuk egymás után ciklusosan, ameddig a rover ki nem szabadul, azaz elhagyja a megfigyelt területet.

Kiszabadulási rutinok:

- A rover kerekeit maximális kivezérelt feszültség alatt ellentétes irányba forgatjuk 3 másodpercen keresztül.
- Ugyanaz, mint az előző pont, csak a másik irányba forgatjuk a kerekeket.
- A roverrel hátrafelé próbálunk haladni 5 másodpercig, majd előre felé haladva élesen kanyarodunk 2 másodpercig.

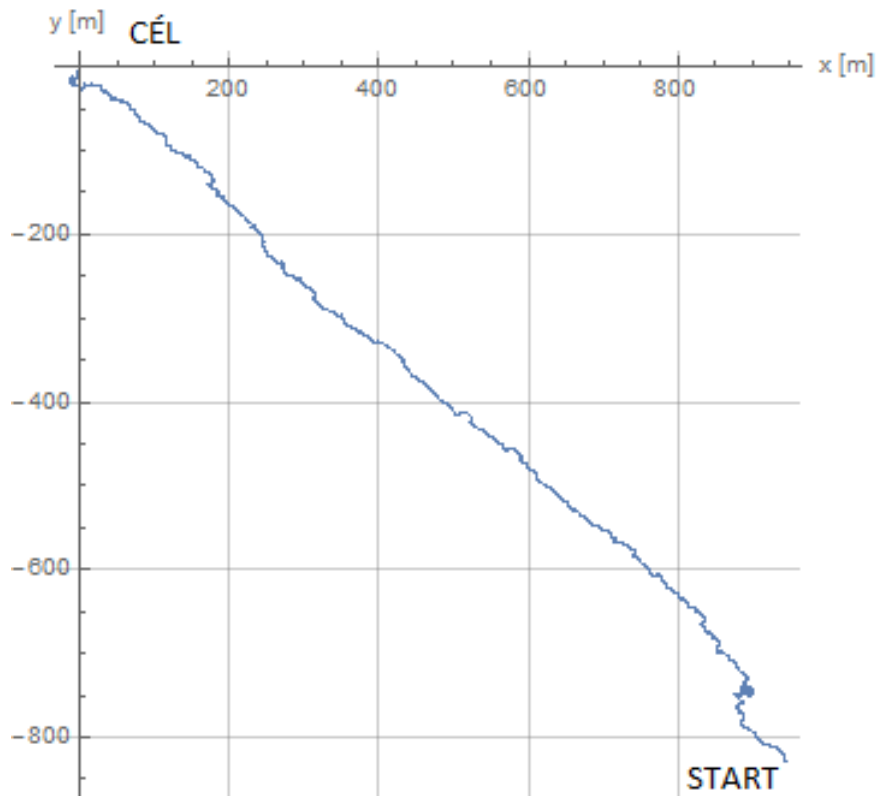
Mindegyik próbálkozás után 5 másodpercig előre felé próbálunk haladni, hogy érzékelhessük, ha kiszabadult a rover.

8. Teszt és verseny eredmények

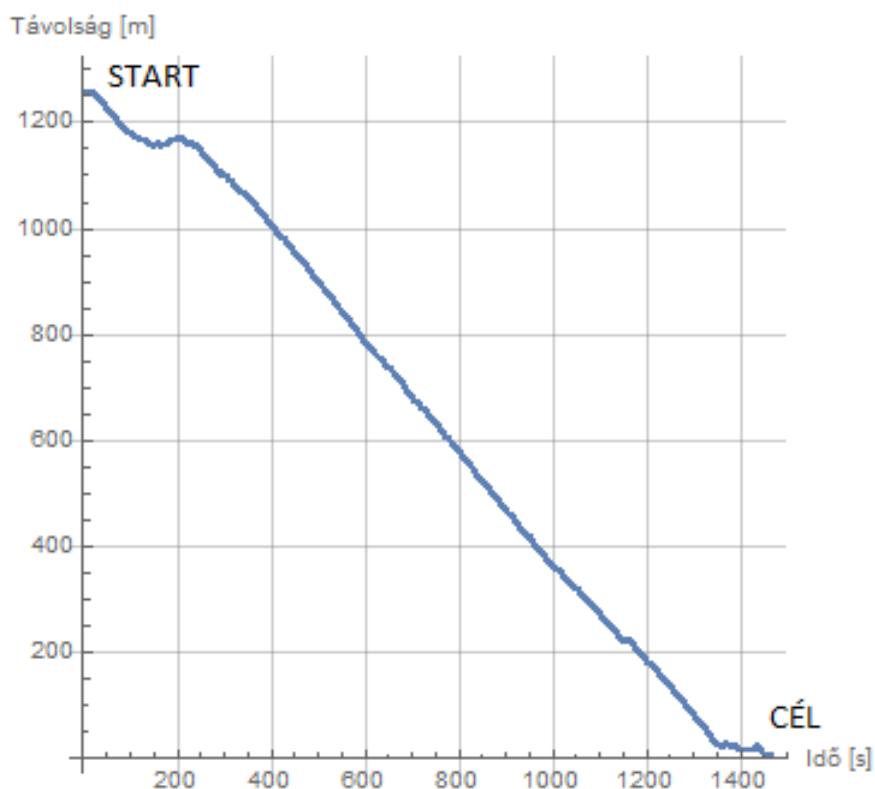
8.1. Sivatagi teszt

Amerikába megérkezve Reno közelében, a verseny helyszínéhez hasonló sivatagban végeztünk teszteket. Első tesztjeink segítségével, megfelelően inicializáltuk a GPS vevő készüléket, valamint beállítottuk a haladási irány szabályozó paramétereit. Így ezek után nagyobb távolságon a teljes programot teszteltük a landoláshoz kapcsolódó részeket leszámítva.

A rover kiindulási pozíciója 1250 méterre található az általunk kijelölt célponttól. Nehezítésképpen a rovert szándékosan rossz irányba nézve helyeztük el. A teszt eredményeit a 29. és 30. ábra mutatja. Az első ábrán xy síkban látható, ahogy a rover haladt az origóban levő célpont felé. A második ábrán a célponttól való távolság látszik az idő függvényében.



29. ábra. A rover útvonala xy síkban



30. ábra. A rover távolsága a célponttól

Mindkét ábrán látható, hogy a rover szinte végig töretlenül haladt a célpont felé. Nem okozott gondot a szerkezetnek sem a sivatag nyújtotta környezet, sem az autók által képzett barázdák. A 150-200. másodperc környékén a második ábrán látható, hogy a rover megakadt. Az első ábrán a jobb alsó részen látható ugyanez a jelenség. Itt valóban nem is egy általunk definiált elakadás történt, hanem a rover olyan terepre érkezett, ahol kis kövek voltak a földön. Ezek a kövek megdobták a rover kerekét és így teljesen koordinátatlanul haladt, amíg el nem hagyta ezt a részt. Innentől a célíg párszor előfordult, hogy az autók által képzett barázdákba akadt el a rover, de a kiszabadulási rutin olyan jól működött, hogy ezek nem is láthatóak a diagramokon. Az ábrákról azt lehet még leolvasni, hogy amikor a rover 50 méternél közelebb van a célponthoz, akkor már nem olyan hatékony a haladási irány szabályozó. Azonban további teszteket végezve megállapítottuk, hogy a teljes versenyhez képest rövid idő alatt ezt a feladatot is megoldja a szerkezet.

A versenyen a várható távolság a célpont és a landolási hely között másfél és öt kilométer közé tehető. A teszt során az akkumulátor szint mindösszesen 20-25%-kal csökkent, így a rover akár 5000 méteres távolságról is célba érhet. A 31. ábra a rovert mutatja a teszt közben, valamint a CD mellékleten található videó felvétel is a tesztről.



31. ábra. Sivatagi teszt

8.2. A verseny

Az ARLISS verseny szeptember 8. és 12. között került megrendezésére. Az első négy napon zajlott le a megmérettetés, míg az utolsóra a csapatok prezentációi maradtak.

A helyszín a hatalmas kiterjedésű sivatag középső területén helyezkedett el. A szervezők biztosítottak sátrakat a csapatok számára, ahol a robotok felkészítése és tesztelése történt. A rakéták kilövési területét egy elkülönített részen alakították ki. Itt biztonsági okokból csak a fellövések között tartózkodhattak a csapattagok.



32. ábra. Panoráma kép a táborról

Az esemény az ARLISS versenyen kívül, otthont ad több különböző osztályú rakéták kilövésére és tesztelésére. Az itt résztvevők biztosítják a versenyzők számára a kilövésekhez szükséges nagyteljesítményű rakétákat, amelyek a kezdőpontba repítik a megépített szerkezeteket.

A fellövések után a rakéták 3 szerkezeti részre kapcsolódnak szét, melyek ejtőernyők segítségével ereszkednek vissza a földfelszínre. Ezek az ernyők 3 km magasságban szabad szemmel csak nehezen kivehetők.



33. ábra. Rakéta

A rover fellövésére szeptember 11-én került sor. Reggeli időpontot választottunk, hogy a robot a lehető legkisebb hőterhelésnek legyen kitéve.

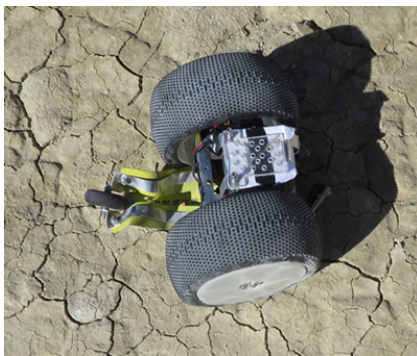


34. ábra. Csapatkép

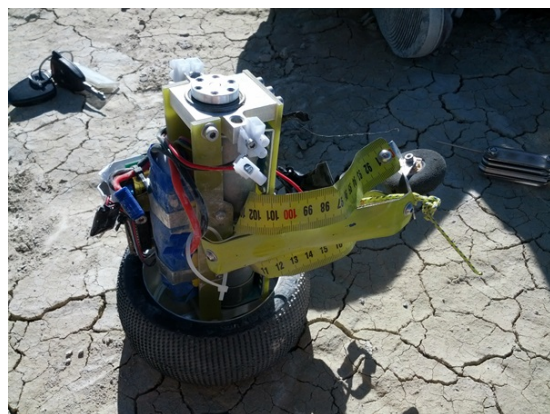
A kilövés során minden rendben zajlott, a magasban szétnyílt a rakéta és megjelent 4 ejtőernyő, ami alapján kijelenthető, hogy a stabilizáló ernyő megfelelően kinyílt az indítás pillá-

natában. Mivel a robotunk nem rendelkezett jeladóval, a szerkezet követéséhez folyamatosan szemmel kellett tartani, ez azonban nem bizonyult kivitelező feladatnak.

A sivatagban egy idő után egy másik csapat megtalálta az ejtőernyő tartó doboz nélküli eldeformálódott szerkezetet. A rover alkatrészei nagymértékben deformálódtak, azonban alapvető felépítésüket tekintve egyben maradtak, nem törtek el.



35. ábra. A rover leérkezés után



36. ábra. A deformálódott szerkezet

Külön említésre méltó alumínium alkatrészek kimagasló szilárdsága. A csapágyházak, valamint kerékagyak sértetlenek voltak a zuhanás után is. Ennek további oka, hogy a becsapódás energiájának nagy részét elnyelték a kerekek. Ennek az alkatrésznek a méretezése kritikus, több csapat roverje ment tönkre leérkezés után a kerekek eltörése miatt.



37. ábra. Georgia Institute of Technology csapatának első kísérlete

A robot részeit egyenként megvizsgáltuk a leérkezés után. Ezek alapján próbáltuk a meghibásodás okát kideríteni, lehetséges forgatókönyveket felállítani.

A rakéta szétválásakor a stabilizáló ejtőernyő megfelelően működött, a rakéta szétválását követően négy ejtőernyő volt látható a levegőben. A mikrokontroller nagyjából 500 m-es magasságban kivezélte a nagy ernyő nyitásához szükséges feszültséget. A rover leérkezésekor azonban a szerkezethez kötéllal hozzárögzített ejtőernyő tartó doboz már nem volt a helyén, ennek oka egyértelműen a kötél elszakadása. Erre több bizonyítékunk is van. A NiCr vezeték felizzása során megolvasztja az azt burkoló szigetelőszalagot, azonban az sértetlen volt a zuhanás után tehát nem programhiba okozta az idő előtti szétkapcsolódást. Emellett a kötéltre hurkolt ellenállás-vezeték elszakította a kötél elszakadása.

A szerkezeti kialakítása olyan, hogy az elektronika a lehető legnagyobb mértékben védve legyen. Rögzítését a rugalmas üvegszálak kompozit anyagra csavarokkal és csillapító gumigyűrűkkel valósítottuk meg. Ezeknek köszönhetően a földbe csapódás után az elektronika, illetve a program megfelelően működött tovább. A GPS jelek alapján a robot azt érzékelte, hogy megtörtént a földre érkezés, így megkezdte az elindulási rutint. Elégette a kitámasztó kereket megfeszítve tartó kötelet, majd megpróbálta a ejtőernyő doboz kötelét is elégetni, azonban az elszakadt huzal miatt ez nem volt lehetséges. Ezt követően következett volna a guruló haladás, azonban az elhajlott tengelyek miatt a kerekek befeszültek. A motor vezérlő elektronikán átfolyó nagy áramok túlhevítették a tranzisztorokat, amik kiégtek. Ezt alátámasztja az is, hogy a rovert megtaláló csapat elmondása szerint a szerkezet füstölt a leérkezés után.

Ezek alapján a elmondhatjuk, hogy a rover a verseny egyetlen kiteszteleetlen szakaszában a landolás közben hibásodott meg. A sivatagban elvégzett felszíni tesztek alapján a rover képes

lett volna sikeres földet érés után a feladat teljesítésére. A hibás alkatrésznek a kötélt bizonyult, pedig a paraméterei alapján ki kellett volna bírnia ezt a szintű terhelést. A lehetséges hibákat az alábbiakban szedtük össze:

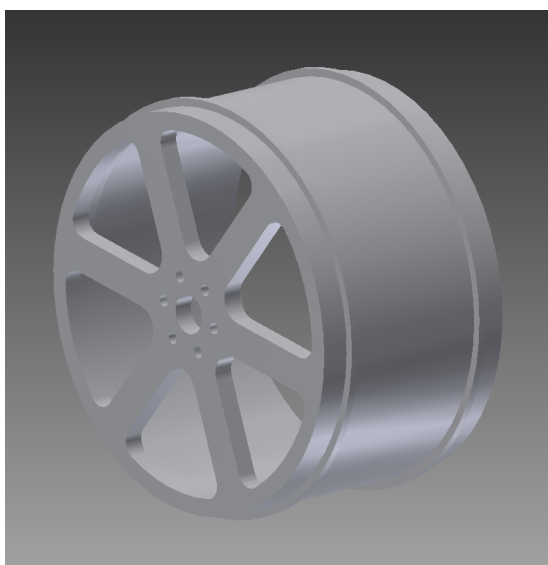
- Elképzelhető, hogy a kötéltben anyaghiba volt, így nagyobb terhelés hatására elszakadt. Ennek kicsi az esélye, mert ezeket a köteleket sok vékony szál összeszövésével készülnek, így egy-egy szálban levő hiba nem vezet az elszakadáshoz.
- A dobozt tartó hurkot egy csomó segítségével rögzítettük. A kioldódás lehetőségének minimalizálásának érdekében a csomó anyagát égetéssel összeolvasztottuk. Az óvintézkedések ellenére azonban lehetséges, hogy a csomó kioldódott, esetleg az összeolvasztás során a kötélt terhelte szakasza megsérült.
- Egy másik lehetőség, hogy a dinamikus terhelések hatására szakadt el a kötélt. Esetleg olyan rezgés keletkezett, amelynek hatására a letöréseknél a szálak elnyíródtak. Ennek az esélyét is kicsinek találjuk, mivel a kötélt szakítószilárdsága 1200N, míg a szerkezet csupán 1,8 kg tömegű. A rövid zuhanási idő miatt az elnyíródás esélye is minimális, főleg annak tükrében hogy az alkalmazott kötelet hegymászáshoz ajánlják, ahol az éles sarkok és peremek elleni védelemnek kimagaslónak kell lennie.
- Extrém dinamikus terhelés hathatott a kötéltre, ha egy leereszkedő rakétaalkatrésszel ütközött. Az ereszkedő alkatrészek között azonban kicsi a sebességkülönbség, így ez is nehezen elképzelhető.

Összességében a robot mind modulonként, mind szerkezeti egységként megfelelően működött egy hibás alkatrész kivételével. A meghibásodás oka nehezen visszafejthető, hiszen az alkatrész többszörösen túlméretezettek a feladathoz. Két azonos rover esetén ennek a hibának az előfordulási valószínűsége minimálisra csökkenthető.

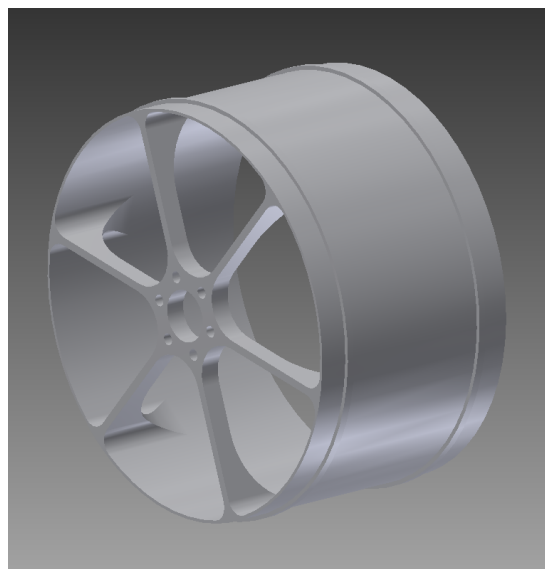
9. Tapasztalatok, tovább fejlesztési lehetőségek

A versenyen való részvétel után, legfontosabb tapasztalatunk az, hogy az ejtőernyőnyitó szerkezet tesztelését meg kell valósítani. Erre lehetőséget nyújthatnak szélcsatornában elvégzett kísérletek, melyek során az alkatrészekre ható terhelések mérhetővé válnak. A mechanizmus egyszerűsítésével, egy ernyő használatával lecsökken a hibalehetőségek száma.

A szerkezetet könnyebbé, valamint felépítését kompaktabbá tehetjük, amennyiben bizonyos alkatrészeket 3D nyomtatással készítjük el, mivel így bonyolult geometriai formákat alakíthatunk ki egy szerkezeti elemből. További alkatrészeket is újraméretezhetjük kisebb biztonsági tényezővel, hiszen a jelenlegi konstrukció vázát alkotó alumínium és kompozit anyagok, szabad-esés utáni becsapódás során sem sérültek. A jelenlegi kerékkonstrukciót továbbfejlesztve közel fele tömegű alkatrész alakítható ki (38. ábra). Egy könnyebb rover meghajtására elegendő lenne kisebb tömegű és teljesítményű egyenáramú motorok használata. Ez magával vonja az akkumulátorok méret és tömegcsökkenthetőségét is. Ilyen módon továbbfejlesztve a robotot, a verseny kisebb tömeg határú, 1050 grammos kategóriájába is be lehetne nevezni.



A jelenlegi kerék modellje (110 g)



Módosított alkatrész (56 g)

38. ábra. A kerék továbbfejlesztésének egy lehetséges modellje

A tesztek adatfeldolgozásának valamint a verseny során a robot követésének megkönnyítése érdekében, érdemes lenne vezeték nélküli kommunikációt alkalmazni. Egy ilyen eszköz segítségével a tesztek során valós időben monitorozhatnánk a szenzorok és szabályzók adatait. A paraméterek módosításához nem lenne szükség a mikrokontroller időigényes újraprogramozására.

Ahogy már a dolgozatban korábban is említettük jelentősen növelheti az irány szabályozó mérési pontosságát, ha az aktuális haladási irányt nem csak a GPS koordináták alapján, hanem

mágneses szenzor segítségével is mérjük. Ennek előfeltétele az egyenáramú motorok árnyékolása.

Két rover építése esetén lehetőség nyílik kétszeri kilövésre, így a célba érkezés esélyei jelentősen megnőnek. Két, a jelenlegi robothoz hasonló nagyjából 80-90%-os valószínűséggel célba érő rover esetén a sikeres szereplés esélye 95-97%-ra nő. Amennyiben úgy alakítjuk ki a két szerkezetet, hogy azok illeszkedő méretei megegyeznek, azonban szerkezeti felépítésük kis mértékben eltér, az összeépíthető különböző összeállítású szerkezetek száma meghatározódik. Ezzel a módszerrel egy esetlegesen meghibásodó alkatrész erősebb, más kialakítású alkatrészre cserélhető.

A fejlesztésben résztvevő különböző egyetemek roverjeinek bizonyos csatlakozó méreteit egységesítve, az összeszerelhető különböző felépítésű robotok száma tovább nő. Ennek megvalósítására legkézenfekvőbb alkatrész a rover kereke, amelynek csupán minimális belső átmérőjét, a peremek szélességét, valamint a felfogatási furatok elhelyezkedését szükséges egyeztetni. Így a rover egy kritikus alkatrészéből több konstrukció is rendelkezésre áll, meghibásodás esetén más technológiával, és felépítésessel rendelkező alkatrészre cserélhető. Emellett lehetőség nyílik különböző gumiköpenyek tesztelésére a verseny során.

Reméljük a TDK dolgozatban leírt rover tervezése és megépítése segítségül szolgál a további években, a versenyen elinduló csapatok számára. A tapasztalatok hozzásegítenek továbbfejlesztett konstrukciók kialakításához, az egyetemek közötti szorosabb együttműködéshez, így a versenyen való még eredményesebb részvételhez.

Ábrák jegyzéke

1.	A helyszín	3
2.	N-MOS's Quadrokopter (Tokyo Institute of Technology, 2013) [3]	4
3.	Sikló repülőgépek	5
4.	Kétkerekű roverek	5
5.	Kinyíló kerékkonstrukciók	6
6.	Lánc talpas földi járművek	6
7.	Több kerekű jármű	7
8.	Gömbi robotok [14], [15]	7
9.	HyTAQ Robot [16]	8
10.	Földi koordináta rendszerek	12
11.	$N(\varphi)$ Normális	13
12.	A földi mágneses mező [20]	15
13.	Haladási irány szabályozó	16
14.	Egyenáramú motorok [21]	18
15.	Pololu Dual VNH5019 Motor Driver Shield [22]	19
16.	Locosys LS20031 [23]	20
17.	SD adattároló modul [24]	20
18.	E-flite 2200mAh 3S 11.1V 30C LiPo akkumulátor [26]	21
19.	DSPIC33FJ64MC lábkiosztás [27]	22
20.	A prototípus 3D modellje	24
21.	1:8 Proline Hole Shot VTR gumiköpeny	27
22.	A hajtáslánc robbantott ábrája	28
23.	A rover 3D-s ábrája I	29
24.	A rover 3D-s ábrája II	29
25.	Ejtőernyő tartó doboz nyitott és csukott állapotban	30
26.	Ejtőernyő tartó doboz nyitott és csukott állapotban	31
27.	Az ejtőernyődoboz lerugása	32
28.	A program sematikus ábrája	35
29.	A rover útvonala xy síkban	37
30.	A rover távolsága a célponttól	38
31.	Sivatagi teszt	39
32.	Panoráma kép a táborról	39
33.	Rakéta	40
34.	Csapatkép	40
35.	A rover leérkezés után	41

36.	A deformálódott szerkezet	41
37.	Georga Institute of Technology csapatának első kísérlete	42
38.	A kerék továbbfejlesztésének egy lehetséges modellje	44

Hivatkozások

- [1] Arliss, A Rocket Lunch for International Student Satellites, November 2014. URL:
<http://www.arliss.org/>
- [2] Georgia Tech RescueBot, November 2014. URL:
<http://singhose.marc.gatech.edu/RescueBot/Home.html>
- [3] N-MOS's quadrokopter, Tokyo Institute of Technology, November 2014 URL:
http://www.unisec.jp/history/arliss2013/report/03_n-mos_pre.pdf
- [4] IKATOZ, The University of Tokyo, November 2014 URL:
http://www.unisec.jp/history/arliss2013/report/15_ikatoz_pre.pdf
- [5] APUS-11, The University of Tokyo, November 2014 URL:
http://www.unisec.jp/history/arliss2011/report/u-tokyo_apus11_pre.pdf
- [6] Two-wheeled rover, Tohoku University, November 2014 URL:
<http://www.unisec.jp/history/arliss2006tohoku-r-koriki-e.html>
- [7] STELA I, Aichi University Of Technology, November 2014 URL:
http://www.unisec.jp/history/arliss2012/report/aichi_pre.pdf
- [8] Expanding wheel I, Tohoku University, November 2014 URL:
<http://www.astro.mech.tohoku.ac.jp/yoshida/ARLISS2002/>
- [9] Expanding wheel II, Tohoku University, November 2014 URL:
http://www.unisec.jp/history/arliss2010/report/tohoku-i2_pre.pdf
- [10] STELLA, Aichi University Of Technology, November 2014 URL:
http://www.unisec.jp/history/arliss2011/report/aichi_pre.pdf
- [11] Caterpillar robot, Georgia Institute of Technology, November 2014 URL:
http://singhose.marc.gatech.edu/rescuebot/2005_ARLISS_Pictures.html#31
- [12] Four wheeled rover, Georgia Institute of Technology, November 2014 URL:
http://singhose.marc.gatech.edu/rescuebot/2004_ARLISS_Pictures.html#4
- [13] Six wheeled rover, Let's make robot, November 2014 URL:
<http://letsmakerobots.com/node/5155?page=8>
- [14] Gömbi robot I, Rotondus, November 2014 URL:
<http://www.rotundus.se/performance.html>

- [15] Gömbi robot II, Rotondus, November 2014 URL: http://digitool.library.colostate.edu///exlibris/dtl/d3_1/apache_media/L2V4bGlicmlzL2R0bC9kM18xL2FwYWNoZV9tZWRpYS84ODY4Ng==.pdf
- [16] HyTAQ Robot, November 2014 URL: <http://www.gizmag.com/hytaq-rolling-aerial-robot/25220/pictures>
- [17] WIKIPEDIA, *Global Positioning System*. November 2014. URL: http://hu.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- [18] WIKIPEDIA, *Geodetic datum*. November 2014. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Geodetic_datum
- [19] WIKIPEDIA, *A Földi mágneses mező*. November 2014. URL: http://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%B6ldi_m%C3%A1gneses_mez%C5%91
- [20] New insight into the Earth's deep interior with Cray XE6 Monte Rosa, November 2014. URL: <http://www.hpc-ch.org/new-insight-into-the-earths-deep-interior-with-cray-xe6-monte-rosa/>
- [21] 18.75:1 Metal Gearmotor 37Dx52L mm with 64 CPR Encoder, Pololu, November 2014. URL: <http://www.pololu.com/product/1443>
- [22] Pololu Dual VNH5019 Motor Driver Shield for Arduino, Pololu, November 2014. URL: <http://www.pololu.com/product/2507>
- [23] GPS Receiver - LS20031 5Hz (66 Channel), Sparkfun, November 2014. URL: <https://www.sparkfun.com/products/8975>
- [24] SD adat rögzítő modul, Sparkfun, November 2014. URL: <https://github.com/sparkfun/OpenLog/wiki/Datasheet>
- [25] WIKIPEDIA, *Nichrome*, November 2014. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Nichrome>
- [26] E-flite, 2200mAh 3S 11.1V 30C LiPo, 13AWG EC3, November 2014. URL: <http://www.e-fliterc.com/Products/Default.aspx?ProdID=EFLB22003S30>
- [27] Microchip, dsPIC33FJ64MC802, dsPIC33FJ128MC802, November 2014. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70291G.pdf>
- [28] Mechatronika I jegyzet, BME MOGI, November 2014. URL: http://www.mogi.bme.hu/letoltes/MECHATRONIKAI_20&20IR_C3_81NY_C3_8DT_C3_81STECHNIKAI_20T_C3_81RGYAK/MECHATRONIKA_20I_2028BSC_29/

[29] Mechatronika II jegyzet, BME MOGI, November 2014. URL:
http://www.mogi.bme.hu/letoltes/MECHATRONIKAI_20&20IR_C3_81NY_C3_8DT_C3_81STECHNIKAI_20T_C3_81RGYAK/MECHATRONIKA_20II_2028BSC_29/

10. Függelék

A PIC program kódját, valamint a műszaki rajzokat CD mellékletben csatoljuk a dolgozathoz nagy terjedelmük miatt. A dokumentációkon kívül a CD-n megtalálhatóak az Inventor fájlok, a PIC program, a megtervezett NYÁK modellje, valamint képek és videók a tesztekéről valamint a versenyről.

11. Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani a BME MM tanszékének és William Singhose Professzor úrnak (Georgia Institute of Technology) akik anyagi támogatásukkal lehetővé tették, hogy szerepeljünk a versenyen. Köszönettel tartozunk Ali AlSaibi-nek, aki korábbi tapasztalatait átadva segített minket. Továbbá köszönet jár Wohlfart Richárdnak amiért megtanított a nyomtatott áramkör tervezés folyamatára és a konstrukció tervezése és építése során is számtalan jó ötlettel látott el minket.