

Légpárnás jármű irányítása inerciális szenzorokkal

Nagy Csaba, Madarász Rossi, Patka Gergely

Sapientia EMTE

Irányító tanárok: Dr. Domokos József, Szántó Zoltán

Budapest 2015.03.25-27

Óbudai Egyetem

Tartalomjegyzék

Kivonat.....	3
1 Bevezető.....	4
2 Követelmények és specifikációk.....	4
3 Tervezés.....	5
3.1 Mechanikai rész.....	5
3.1.1 Váz szerkezete.....	6
3.1.2 A szoknya felépítése.....	6
3.1.3 Hajtómű szerkezete.....	7
3.1.4 Robotkar és kocka tartály szerkezete.....	7
3.2 Elektronikai rész.....	7
3.2.1 Légpárnás jármű elektronikája.....	8
3.2.2 Kesztyű elektronikája.....	9
3.3 Programozási rész.....	11
3.3.1 Nagy felbontású szervo jelek generálása.....	11
3.3.2 A kommunikációs protokoll.....	13
3.3.3 Robot logika és menürendszer a kesztyűn.....	14
3.3.4 Felügyelő alkalmazás.....	14
3.4 Modellezés és szimuláció.....	15
3.4.1 A légpárnás jármű matematikai modellezése.....	15
3.4.2 Szabályozó algoritmus tervezése és szimulációja.....	16
3.4.3 Szabályozó algoritmus implementálása.....	21
4 Tesztelés és mérési eredmények.....	23
4.1 Teljesítményre utaló mérések.....	23
4.1.1 Végsebesség mérése.....	23
4.1.2 Autonómia mérése.....	24
4.1.3 Súrlódási együttható mérése (szoknya hatékonyság tesztelés).....	24
4.1.4 Hatótávolság mérése.....	24
4.1.5 Kocka elhelyezési teljesítmény mérése.....	24
4.2 Szabályozó működésének a tesztelése.....	24
5 Következtetések.....	25

6	Könyvészet.....	26
7	Függelékek.....	27
7.1	Nagyított méretű kapcsolási rajzok.....	27
7.2	Nagyított méretű 3D nyák tervek.....	29
7.3	Fényképek a rendszerről	30

Kivonat

A dolgozat egy légpárnás jármű tervezését és megépítését mutatja be, amely a 9. Magyar Alkalmazott Mérnöki Tudományok Versenyre készült. Ismerteti a verseny specifikációit, a tervezés során felmerült problémákat és a használt megoldásokat. A gyakorlatba egy három hajtómotorral rendelkező jármű került megépítésre, amely egy motort használ a szoknya felfújására és kettőt az elmozdulásra. A járműre rákerült egy kockák tárolását és elhelyezését lehetővé tevő robotkar. A rendszer irányítása a feladatnak megfelelően egy gesztusérzékelő kesztyűvel történik. Az irányíthatóság növelésének érdekében szükség van egy szabályozó tervezésére, amelyhez elkészítettük a légpárnás matematikai modelljét. A modell segítségével különböző szabályozási struktúrákat tudunk tesztelni szimulált környezetben. A gyakorlatban négy irányítási üzemmód került megvalósításra a maximális manőverezhetőség érdekében. Kivitelezésre került a légpárnás jármű, a gesztusérzékelő kesztyű, felügyelő alkalmazás és a szükséges szoftver és hardver elemek.

1 Bevezető

Feladatunk egy olyan légpárnás jármű megépítése volt, amely egy robotkar segítségével egy adott pályán, mozgó ellenfelek között, dobókockákat tud elhelyezni különböző magasságú dobozokra, úgynevezett „célterületekre”. Az irányítás valós időben kell megtörténjen kézgesztusokkal.

Légpárnás jármű alatt egy olyan járművet értünk, amely levegőt fújva maga alá egy vékony légrétegen siklik. Az elmozdulás egy függőlegesen elhelyezett propeller segítségével valósul meg, az általa fújt levegőt egy oldalkormányval lehet irányítani, így kormányozható a jármű.

A dobókockák lerakása céljából egy egyszerű, két szabadságfokú robotkart használtunk. A robotkar függőleges szegmensében tároljuk a dobókockákat, itt egy adagoló egyenként ki tudja adni a kockákat a robotkar végén lévő fogóba (gripper-be). Ezzel a megvalósítással a robotkar 21-36 cm magas célterületekre tudja lerakni a kockákat.

A robot irányítása egy gesztusérzékelő kesztyű segítségével van megvalósítva. A kesztyű egy gyorsulás érzékelő modul segítségével tudja meghatározni a kézfejek a térbeli orientációját. Az ujjakra elhelyezett nyomógombok segítségével lehet különböző menüpontokat választani. Mindezen információt a kesztyűn lévő mikrovezérlő egy IQRF modul segítségével továbbítja a légpárnáson lévő mikrovezérlőnek.

A robotot a „9. Magyar alkalmazott mérnöki tudományok”, azaz a „Magyarok a Marson”, versenyre készítettük.

2 Követelmények és specifikációk

A verseny szabályok szerint, egy olyan légpárnás járművet kell építeni, amely kézgesztusokkal van irányítva, és dobókockákat tud lerakni különböző magasságú célterületekre.

A jármű maximális mérete 50x40cm, maximális súlya 3 kg. Egy robotkart tartalmazhat, amellyel legfeljebb 35 cm-re nyúlhat ki.

A kézgesztusokat több módszerrel lehet beolvasni: lehet képfeldolgozással, vagy lehet érzékelőket elhelyezni a kézfejre csukótól ujjbegyig. Érzékelőként lehetett használni nyomógombot, gyorsulásmérőt, giroszkópot, flexsensort, stb. de a potenciométerek használata meg volt tiltva, valamint nem lehetett használni előre legyártott gyári műszereket (pl. okos-telefon, kinect, stb.).

A verseny egy 8x8m-es pályán zajlik, ahol egyszerre 4 csapat versenyzik egymás ellen. A pályán levő célterületek magassága 21-36 cm közötti, természetesen minél magasabb egy célterület, annál több pontot ér. A robot egy futamon 20 db. dobókockát vihet magával, amelyből 15 db. használhat fel.

A verseny folyamán szabályos a többi csapat kockáinak a lesöprése a célterületekről, így pontokat lehetett elvenni az ellenféltől.

A kesztyűn kell legyen egy vészmegállító gomb, ami megállítja a robotot probléma esetén.

Általunk felállított cél-specifikációk:

Egy olyan robotot szerettünk volna építeni, amely annyiban tér el a klasszikus légpárnások felépítésétől, hogy két hajtómodult tartalmaz, így könnyebben lehet vele manőverezni. Továbbá a 40x30 cm-es méretet tartottuk optimálisnak, ami 10 cm-el kevesebb a maximálisnál, így könnyebben fér el az akadályok között.

A gesztusérzékeléshez egy olyan kesztyűt tervezünk, amely egy gyorsulásmérő segítségével tudja megállapítani a kézfej pozícióját, és az ujjbegyeken elhelyezett gombokkal lehet funkciókat váltani.

3 Tervezés

Légpárnás járművek használata napjainkban egyre nagyobb népszerűségnek örvend, mivel egyaránt pontosan lehet manőverezni vele földön és vízen is.

Az interneten számos példát lehet találni ilyen a járműveknek kicsi, távirányítható változatára (például az Instructables weboldalon ^[1]).

A hagyományos légpárnás járműveknek az a hátrányuk, hogy csak előre tudnak elmozdulni, ezért ha egy sarokba jut, akkor nem tud visszatolni. Ezen hiba kiküszöbölésére három hajtó modul használatával növeltük a robotunk manőverezhetőségét.

A légpárnás szoknyája azon eleme a járműnek, ami megtartja annak a levegőrétegnek a nyomását, amelyen a robot siklik. Az optimális eredmények elérésének az érdekében a szoknyát szövetből varrtuk meg, a szabásminta megszerkesztéséhez pedig Tony Middleton „Bag Skirt Pattern Design For Model Hovercraft”^[2] c. cikkéből dokumentálódunk.

A robotkart úgy tervezzük meg, hogy képes legyen 20 db. dobókocka tárolására, és ki is tudja adagolni ezeket a fogószerkezetnek. A komplikációk elkerülése és a könnyű vezérlés érdekében a lehető legegyszerűbb megoldást választottuk.

3.1 Mechanikai rész

A robot tervezése és építése folyamán nagy hangsúlyt fektettünk arra, hogy a jármű különálló modulokból legyen felépítve, tehát könnyen szétszedhető legyen javítás és szállítás céljából.

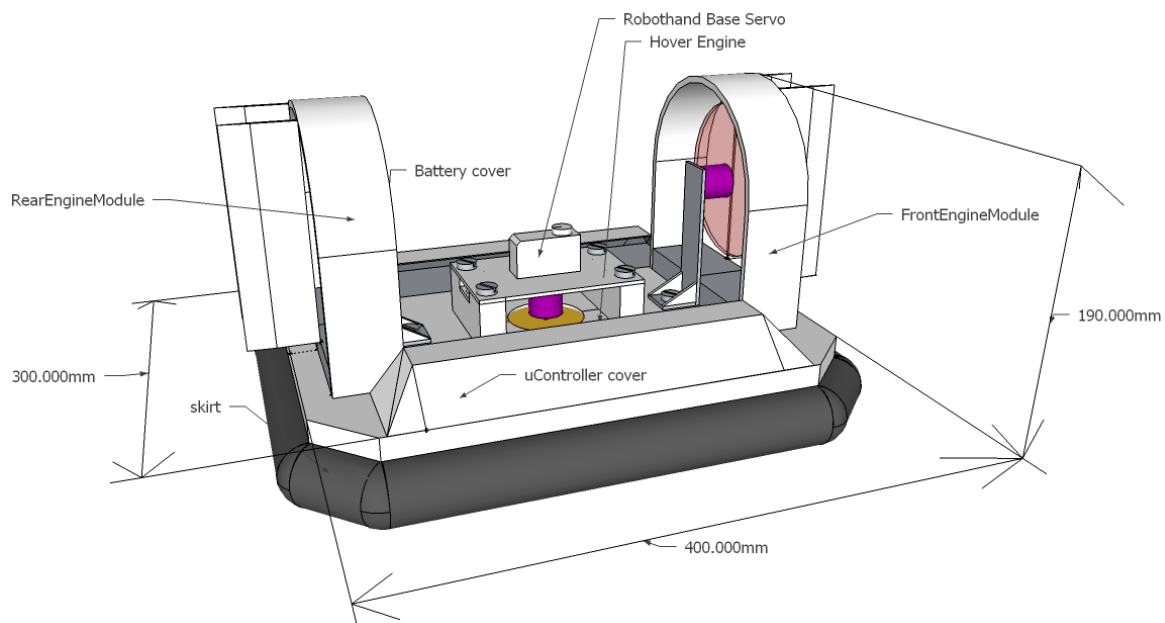
A robot alapja egy 30×40 cm-es polisztirén lap, erre vannak felerősítve a motorok, a robotkar, az akkumulátor, és a vezérlő elektronika részei.

A járműn három motor található. Az egyik motor a jármű közepén van elhelyezve, erre egy centrifugális turbina van szerelve. Ez hozza létre azt a levegőhozamot, ami a jármű alja alá irányítva szolgáltatja azt a levegőréteget, amin a jármű szinte súrlódásmentesen tud siklani. Azért, hogy a levegőréteg vastagabb lehessen, és a kapott levegőhozamot optimálisan ki tudjuk használni, egy úgynevezett szoknyát tettünk a jármű aljára, ami megnehezíti a levegőréteg elvesztését. Ezen felül a szoknya biztosítja, hogy a levegőréteg konstans vastagságú legyen mindenhol, ezzel megakadályozva, hogy a jármű billegjen, vagy nem kívánt irányba mozduljon el.

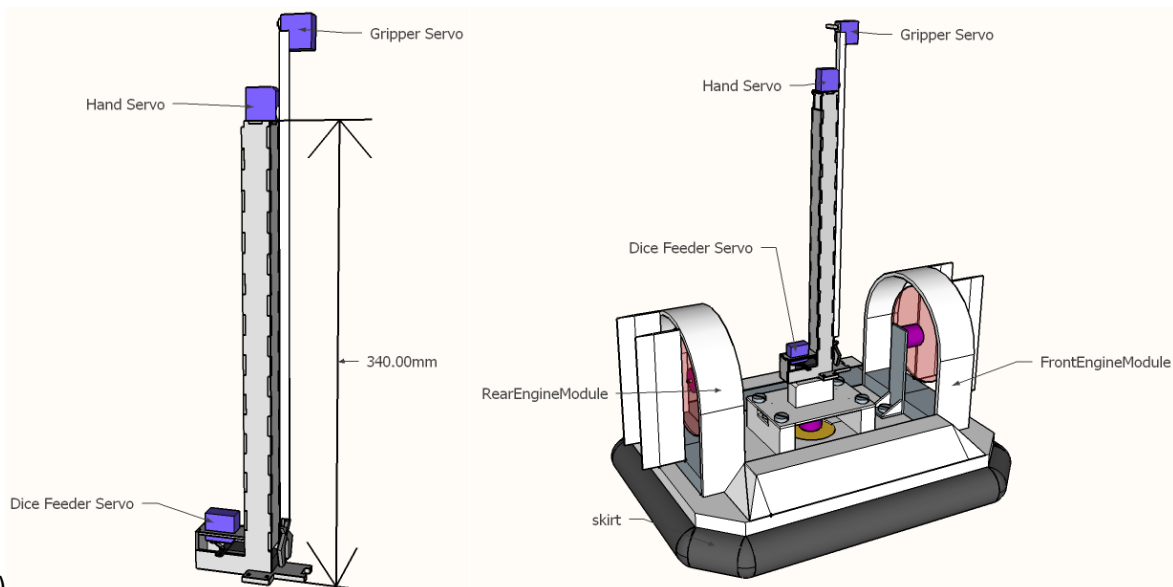
Az elmozdulásért két motor-propeller-oldalkormány modul felel, így tudunk többféleképpen elmozdulni. Az oldalkormányokat egy-egy szervo segítségével tudjuk kimozdítani.

A robotkar az alaphoz a közepére van felfogva, így megnövelve a robotkarnak a munkaterét, és biztosítva a rendszer stabilitását. A robotkaron négy szervo található, az egyik biztosítja a kar függőleges elfordulását, egy másikkal pedig annak vízszintes kimozdulását. A robotkaron lévő dobókocka-adagolót is egy szervo működteti, ill. a fogószerkezetet is egy szervo mozgatja.

A légpárnás jármű és alkotó elemeinek 3D látványterve a 3.1. ábrán láthatóak.



(a)



(b)

(c)

3.1. Ábra. A légpárnás jármű (a), a használt robotkar (b) és a teljes szerkezet (c) 3D látványterve.

3.1.1 Váz szerkezete

A váz építéskor ügyelnünk kellett arra, hogy minél könnyebb, de ugyanakkor minél erősebb szerkezetet kapjunk. Ezt figyelembe véve választottuk ki az építő anyagokat.

Az alaphoz 20 mm vastagságú polisztirén lapot használtunk, amely könnyű, de ugyanakkor erős is (ezt az anyagot a kereskedelemben házfalnak a szigetelésére használják). A motorok védő-modulja balsafából van megépítve, amely egy rendkívül könnyű, mégis erős fajtája. A motorok tartószerkezete, valamint a robotkar alapja 3 mm vastag háromrétegű rétegelt lemezből készült.

3.1.2 A szoknya felépítése

A légpárnásnak a szoknya bélésanyagból van varrva. Azért választottuk ezt az anyagot, mert könnyű, nem engedi át a levegőt, és síkos a felülete, ezért kevés súrlódás keletkezik közte és a föld között.

A szoknya egy gumi pánttal szorul rá a jármű peremére, és alul egy kialakított részbe van beleszorítva. Annak érdekében, hogy kevesebb levegő szivárogjon a szoknya felső része szigetelő szalaggal van bevonva, alul pedig gombostűvel biztosítva. Ennek a megoldásnak köszönhetően szükség esetén hamar ki lehet cserélni a jármű szoknyáját.

A légpárnába a szükséges levegőnyomást egy centrifugál turbina segítségével biztosítottuk, amely a jármű testében van elhelyezve.

3.1.3 Hajtómű szerkezete

A robotra két hajtómodult helyeztünk el. Egyet a robot elejére és egyet a hátára. Ezekben a modulokban megtalálható a motor, a motorvezérlő, az oldalkormány, valamint a szervomotor, amely az oldalkormányt mozgatja.

Az oldalkormány segítségével tudjuk a motor által generált levegőáramlás irányát megváltoztatni, így tudjuk kormányozni a járművet.

3.1.4 Robotkar és kocka tartály szerkezete

A robotkar segítségével lehetséges a dobókockák kitevése. A szerkezet minimális mérete miatt, a robotkar több feladatot is el kell tudjon látni. A robotkar tartalmazza a dobókocka-tárolót, amelybe 20 darab kocka fér el, a dobókocka-adagolót, amely a kockákat a fogószerkezetbe teszi, valamint a fogószerkezetet.

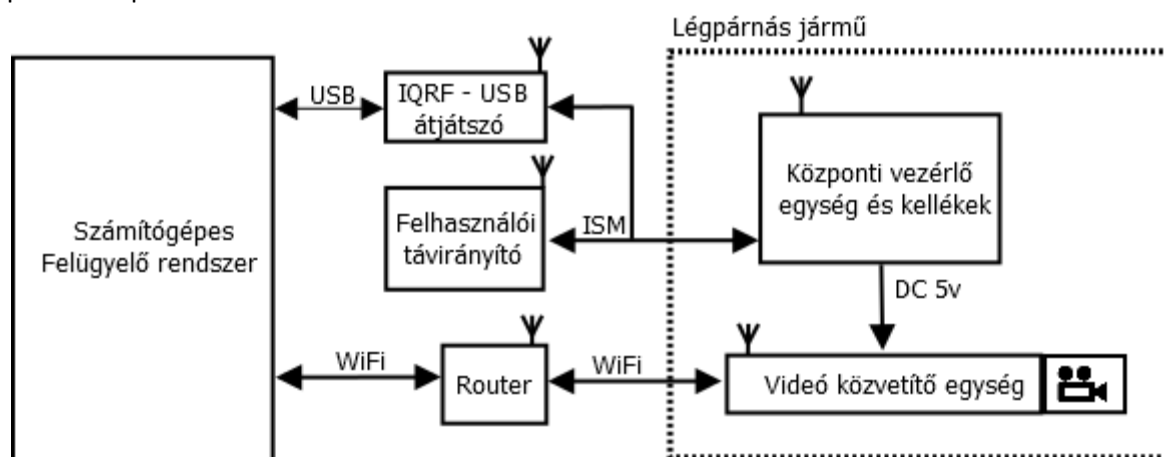
A tárolóban a dobókockák egymáson vannak elhelyezve egy függőleges oszlopban, az adagoló pedig alattuk található. Az adagoló egyenként tudja kiadni a kockákat, elhelyezéséből adódóan a tároló egy kockája mindig itt helyezkedik el.

A fogószerkezettel tudjuk megfogni a dobókockákat.

A robotkar körbe forgatható a függőleges tengelye mentén, amelyet az alatta levő 360 fokos szervomotor valósít meg. Ezen kívül a kar tetején található még egy kisebb fémfogaskerekű szervomotor is, ezzel lehet a robotkart kiemelni a vízszintes tengely szerint.

3.2 Elektronikai rész

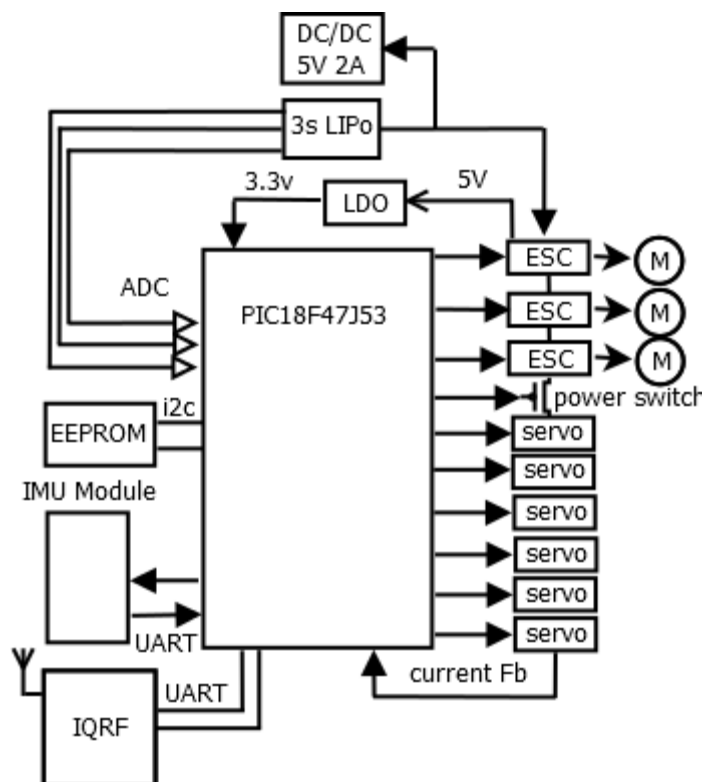
A használt elektronikai rendszer teljes tömbvázlatát az 3.2. ábrán ismertetjük. Az alkotó tömbök szerepét és felépítését a következőkben részletezzük.



3.2. ábra. A teljes elektronikai rendszer áttekintő tömbvázlata.

3.2.1 Légpárnás jármű elektronikája

A légpárnás járművön található a központi vezérlő egység és a hozzá tartozó beavatkozó eszközök (hajtó és szervomotorok), amelyek az 3.3. ábrán láthatóak. A járműn található a távoli felügyeletet elősegítő videó közvetítő áramkör is, amely Wi-Fi kapcsolat segítségével közvetíti a számítógépnek az élő képet.



3.3. ábra. A légpárnás járműn található központi vezérlő egység és beavatkozó eszközök tömbvázlata.

3.2.1.1 Központi egység

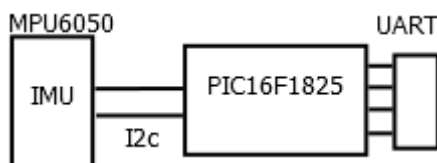
A központi vezérlő feladatai az alábbiak: 5V-os tápfeszültség előállítása a videó közvetítő egység számára, servo jel előállítása a motorvezérlők és szervomotorok számára és biztonsági funkciók ellátása. Adatbegyűjtés az inerciális mérőegységtől, kommunikáció a felhasználói távirányítóval és a számítógéppel, konfigurációs paraméterek tárolása, akkumulátor cellafeszültség mérése, valamint a robotkar servo áramainak a mérése.

A rendszer számára a tápfeszültséget egy 3 cellás lítium polimer akkumulátor szolgáltatja. Az akkumulátorra nagy árambírású vezetékkel csatlakoznak a kefenélküli-motor vezérlők (ESC). Az irányító elektronika és a servók számára az ESC állítja elő az 5V-os tápfeszültséget, míg a mikrovezérlő számára a 3.3V-os tápfeszültséget egy külön stabilizátor szolgáltatja. A servók tápfeszültsége egy MOSFET típusú kapcsoló segítségével megszakítható. A rádiós kommunikációt egy IQRF modul biztosítja, amely soros átjátszóként üzemel. A vezérlési feladatok megoldására a Microchip által gyártott PIC18F47J53 mikrovezérlőt választottuk.

3.2.1.2 Giroszkóp adatbegyűjtő egység

Az inerciális mérőegység feladata a függőleges tengely körüli forgás mérése és előszűrése, továbbá az adatok soros porton történő továbbítása. A mérőmodul azért nem került a központi egységre, mert a pontos mérés érdekében a jármű középpontjában kell elhelyezni. Az inerciális mérőegység az Invensense által gyártott MPU6050 típusú 6 tengelyes gyorsulásmérő és giroszkópra épül. A giroszkópból az adatokat

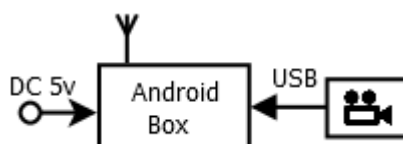
egy PIC16F1825 továbbítja (lásd az 3.4. ábrán). A mikrovezérlő szükségességét a modularitás és a külső zavarokra való érzékenység csökkentése indokolja.



3.4. ábra. Az inerciális mérőegység tömbvázlata.

3.2.1.3 Videó közvetítő egység

A mikroszámítógép egy ARM processzor-architektúra alapú Android operációs rendszer futtatására tervezett eszköz. Ezt HDMI-n keresztül televízióhoz csatlakoztatva olcsó kis fogyasztású internet hozzáféréssel rendelkező eszközt kapunk. Mivel elsősorban a képátvitel miatt van rá szükség ezért fontos az USB-host funkcionalitása. A mikroszámítógép két USB interfésszel rendelkezik ezért legfeljebb két eszköz csatlakoztatható. Ez azt jelenti, hogy legfeljebb két webkamera képét tudja továbbítani az irányító személy fele. Annak érdekében, hogy a vezeték-nélküli kapcsolat megbízhatóságát növeljük, az eszközt egy külső Wi-Fi antennával láttuk el. A videó közvetítő egység tömbvázlata a 3.5. ábrán látható.



3.5. Ábra. A videó közvetítő egység tömbvázlata.

3.2.1.4 Kommunikációs modul

Az IQRF rádió modulok az európai 868Mhz-es ISM sávban működnek. A modulok rendelkeznek saját mikrovezérlővel, amely lebonyolítja az adatátvitelt a rádiós interfészen. Ezek a mikrovezérlők egy egyedi operációs rendszert futtatnak, amely lehetőséget ad arra, hogy a felhasználó is futtasson saját kódot. A jelenlegi alkalmazásban egy adatpufferelési algoritmus fut a kommunikációs modulokon, amely soros porton fogad adatokat, puffereli, majd továbbítja rádiós kapcsolaton keresztül. Ezzel a módszerrel egy vezeték nélküli transzparens UART kommunikációt implementáltunk. A kommunikáció adatszórásos, ezért minden azon a frekvencián található rádiómodul megkapja a csomagot. Ez előnyös hibakeresésnél, és az adatok értékének követésénél. A mi esetünkben ez azért fontos, mert egy számítógéphez kapcsolt vevővel figyelni tudjuk az adatforgalmat, ebből diagnosztikai adatokat megjelenítve a felhasználó számára.

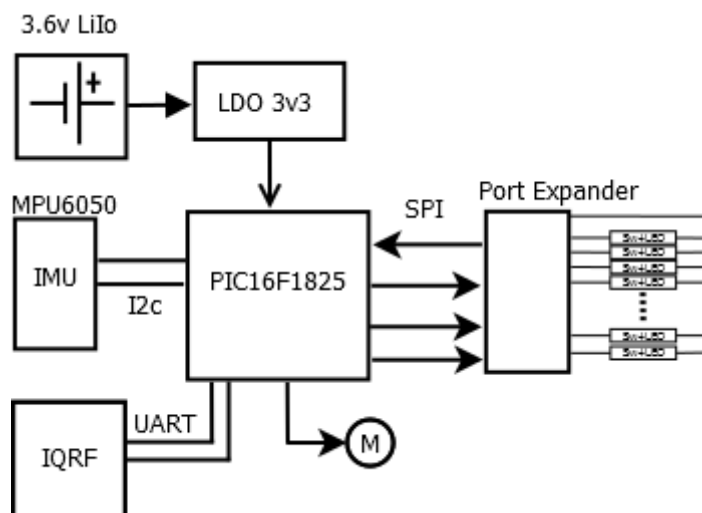
A rádiómodul belső küldő puffere maximum 32bytes csomagot tud továbbítani egy darabban. A nagyobb csomagokat fel kell darabolni és darabokban továbbítani.

A 868Mhz-es sáv előnye a 2.4Ghz-es sávval szemben a nagyobb hatótávolság és a kevesebb zavaró eszköz, hátránya pedig a kis adatátviteli sebesség, amely ebben az esetben nem okoz problémát a kisméretű adatcsomagok miatt.

3.2.2 Kesztyű elektronikája

A versenyfelhívás szerint a légpárnás jármű irányítását egy olyan távirányítóval kell megvalósítani, amelynek minden alkatrésze kizárólag a kézen, csuklótól lefele helyezkedik el.

A légpárnás jármű vezetése két tengely mentén való elmozdulást feltételez. A robotkar használata viszont két szabadságfok, egy fogó és egy adagoló rendszer vezérlését igényeli. Ezért szükség van a kézfej dőlésének a mérésére gyorsulás mérő segítségével, LED-ekkel ellátott felhasználói gombokra és egy rezgő motorra a különböző állapotok visszajelzése céljából. Az említett egységek tömbvázlata az 3.6. ábrán látható.



3.6. ábra. A felhasználói távirányító tömbvázlata.

3.2.2.1 Központi egység

Az adatbegyűjtési és feldolgozási feladatokat egy Microchip gyártmányú PIC16F1825 mikrovezérlő végzi. A gravitációs gyorsulás mérésére a 3.2.1.2 fejezetben említett IMU-t használjuk. Az adatok beolvasása I2C kommunikációs protokollon keresztül történik. A mikrovezérlőnek a korlátozott kimenete miatt, használtunk egy IO bővítő integrált áramkört. A Microchip gyártmányú MCP23S17 port-bővítővel a kapcsolat SPI protokollon keresztül van megvalósítva. A kommunikációs modullal viszont USART interfészen keresztül van létrehozva a kommunikáció. A rezgőmotor kapcsolását viszont egy MOSFET típusú tranzisztor végzi.

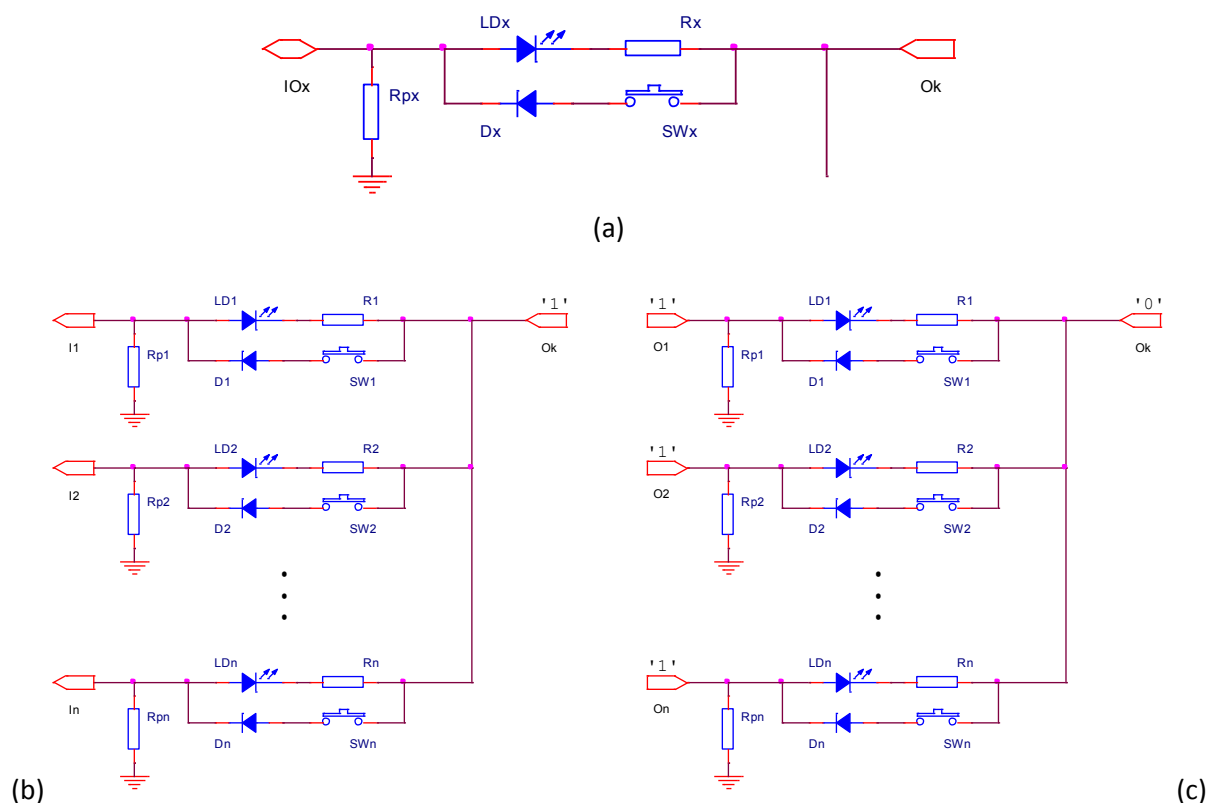
A kézfej dőlési helyzetének mérése a gyorsulásmérő két függőleges tengelyével történik. A tengelyekre eső vetület vízszintes helyzetben 0. Dőlés esetén a vetület nagysága arányosan változik a dőlési szöggel. A dőlési szög visszaszámolása $\arctg$ függvénnyel történik. A kézremegés befolyásának a csökkentése érdekében a mért értékeket egy Alfa-szűrő segítségével szűrjük. Figyelembe véve a maximális dőlési szöget, az eredményt skálázzuk.

3.2.2.2 Ki- és bemeneti ujjperc hálózat

A „távirányító” egy olyan kesztyű formájában született meg, amely fel van szerelve 11 vezérlő gombbal és egy vész megállító gombbal. Minden ujjpercre külön vezérlő gomb és állapotjelző LED került. Lévén, hogy hüvelykujjal kell nyomni a gombokat, a vész megállító gomb került a legkönnyebben elérhető helyre, a mutató ujra. A rezgőmotor a gyorsulásmérőtől legtávolabbi helyen, a kisujj begyén helyezkedik el. A kialakított ujjperc hálózat bekábelezése igényes, elhelyezett vezeték számban és igényelt vezérlő láb számban is. A kimeneti LED-ek és bemeneti gombok összessége külön-külön igényel 1 közös és 12 egyéni drótot. Ez összesen 26 kimenetet venne igénybe a mikrovezérlőn. A sűrű kábelezés elkerülése céljából egy olyan módszert alkalmaztunk, amely időosztásos eljárással és a 3.7(a) ábrán látható áramkörrel mindössze 1 közös és 12 egyéni vezeték igényel csak. Az 3.7(b) ábrán a gombok olvasására használt bekötés látható, míg az 3.7(c) ábrán a ledek vezérlésére használt bekötés látható. A két üzemmód váltogatása

másodpercenként 15-ször lehetővé teszi a ledek és gombok egyszeri használatát. Az időszelét 1%-a gombolvasással, míg a maradék 99% a LED-ek vezérlésével telik el.

A 8. függeléken a megvalósított kesztyűk fényképe látható.



3.7. Ábra. Az ujjperc hálózat áramkörének felépítése (a), bemenetként használva (b) illetve kimenetként használva (c).

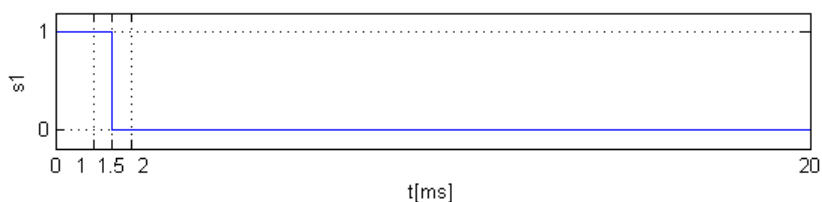
3.3 Programozási rész

A mikrovezérlőkre a szoftvert MPLAB X környezetben fejlesztettük, XC8 fordítót használva [3]. A számítógépes felügyelő alkalmazás .NET alapú.

Mivel a videó közvetítő egység mikroszámítógépen Android operációs rendszer fut, az USB webkamerák támogatottsága korlátozott. Ezért lecseréltük egy Xubuntu Linux operációs rendszerre. Így jobb fejleszthetőséget és megbízhatóbb működést értünk el.

3.3.1 Nagy felbontású szervo jelek generálása

A légpárnás jármű irányítása és a rajta levő robotkar vezérlése 6 szervo motorral és 3 háromfázisú motorral történik. A 3.1.3 fejezetben említett ESC modulok segítségével a 3 háromfázisú motor szervo jellel vezérelhető. A központi egység (3.2.1.1) mikrovezérlője 9 szervo jelet kell, előállítson a jármű minden beavatkozó szervének irányítása céljából. Az általános szervo jel időzítései az 3.8. ábrán láthatóak. Az előállítandó időtartamok a következők: 1ms (-100%), 1.5ms (0%) és 2ms (+100%). Egy teljes periódus időtartama 20ms.



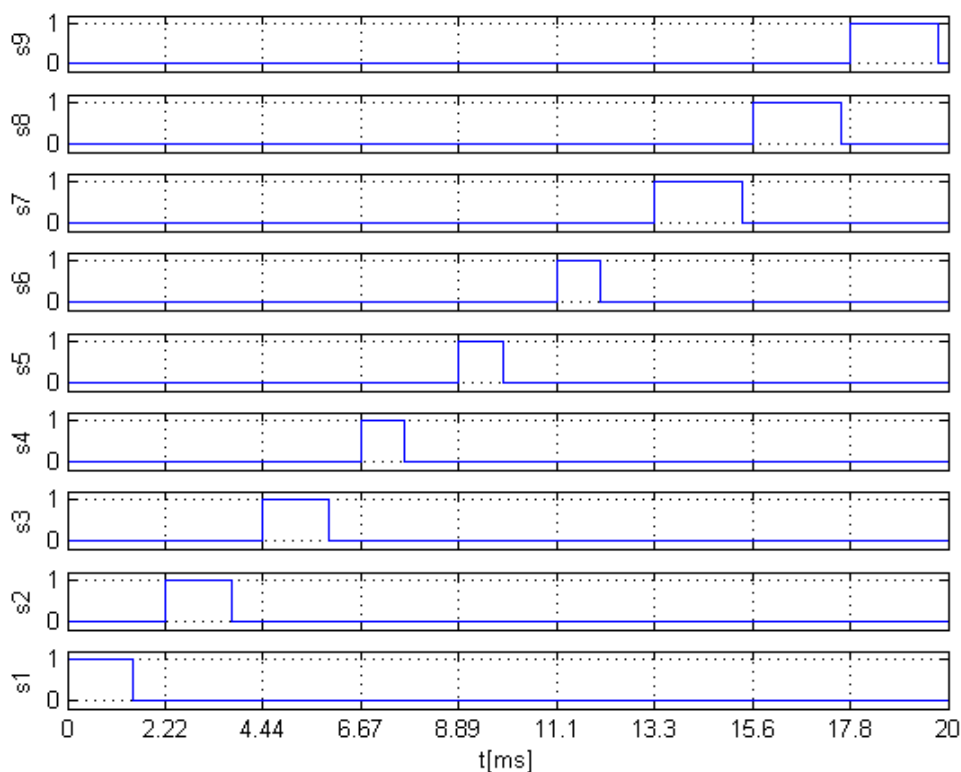
3.8. Ábra. Az általános szervo jel idődiagramja.

A központi egység mikrovezérlője 3 ECCP (Enhanced Capture/Compare/PWM) és 7 CCP (Capture/Compare/PWM) moduldal rendelkezik ^[4]. A Capture és a Compare módok 16 bites módban, míg a PWM mód 10 bites módban működik. Ebben az esetben a teljes periódus időtartama (20ms) $2^{10} = 1024$ szeletre osztható. Egy lépés időtartama $19.53\mu s$. Az előállítandó időtartamok generálásakor a Duty Cycle regiszter értékei a következők: 51 (1ms), 77 (1.5ms) és 102 (2ms). A használható tartomány 51-től 102-ig terjed, mindössze 51 lépésből áll.

Az általunk használt eljárás, a központi egység mikrovezérlőjének egy 16 bites időzítő regiszterét (TMR3) és a megszakítás rendszerét használja. A módszerünk időosztást használva, körkörös permutációval vezérli a 9 szervót (lásd 3.9. ábra). A teljes periódus időtartama a 9-szeresére csökken, $2.222ms$ -ra. Az időzítő regiszter órajelének frekvenciája a processzor frekvenciájának (48MHz) a fele (24MHz). Ezzel a frekvenciával a teljes periódus időtartama alatt 53,341-es értéket vesz fel az időzítő regiszter. Ebben az esetben a teljes periódus időtartama 53,341 szeletre osztható. Egy lépés időtartama $41,66ns$. Az előállítandó időtartamok generálásakor az időzítő regiszter a következő értékeket kell elérje: 24003 (1ms), 36005 (1.5ms) és 48007 (2ms). A használható tartomány 24003-tól 48007-ig terjed. Ez a módszer jelentősebb felbontást eredményez, mint az előző.

Az előállítandó időtartamok alapján, a számláló értékek előre kiszámításra kerülnek, a megszakítás lefutásnak gyorsítása érdekében. A megszakításban a szervóhoz tartozó kimenet beállításra kerül, frissül a számláló kezdeti értéke és növekedik az állapot változó, a szervóindex.

Nagy előnynek bizonyult az, hogy a szervók a mikrovezérlő bármely kimenetére köthetőek, nem igényelnek specifikus kimenetet, hátránya, hogy jelentős processzor időt igényel.



3.9. Ábra. 9 szervo vezérlése körkörös permutációval.
Az időtartamok értéke rendre 1.5, 1.5, 1.5, 1, 1, 1, 2, 2, 2 ms.

3.3.2 A kommunikációs protokoll

A kommunikációs protokoll egységes a rendszer elemei között. Előre definiált üzenet típusokat tartalmaz, az üzenetek hossza állandó és előre meghatározott, az üzenet méretének csökkentése érdekében. Az üzenet felépítése fejlécből, adatmezőből és hibaellenőrző mezőből áll. Mivel az üzenetek UART soros kommunikáción továbbítódnak szükség van az adatok épségének az ellenőrzésére. Minden üzenet azonos fejléccel kezdődik, ez ebben az esetben “.” karakter. Ezt követi az üzenet típusa (4bit) és az üzenet sorszáma (4bit). Az üzenet sorszáma folyamatosan növekszik, ezzel kiszűrhetőek az ismételt üzenetek. Az üzenetek és felépítésük az alábbi:

1. Nyugtázó üzenet (5 byte) HEADER|TYPE+SEQ|H_LED| L_LED|CRC
2. Konfigurációs üzenet (6 byte) HEADER|TYPE+SEQ|Kulcs|H_Ertek|L_Ertek|CRC
3. Kesztyűmérés (11byte)
HEADER|TYPE+SEQ|ACC_X_H|ACC_X_L|ACC_Y_H|ACC_Y_L|BUTTONS_H|BUTTONS_L|LED_H|LED_L|CRC
4. Giroszkóp mérés (9 byte)
HEADER|TYPE+SEQ|GYRO_X_H|GYRO_X_L|GYRO_Y_H|GYRO_Y_L|GYRO_Z_H|GYRO_Z_L|CRC
5. Akkumulátor állapot
HEADER|TYPE+SEQ|CELL1_H|CELL1_L|CELL2_H|CELL2_L|CELL3_H|CELL3_L|CRC

A mikrovezérlőbe bevezetett mindkét soros port ugyanazt a feldolgozó függvényt hívja meg. Ezzel elérhető, hogy más kommunikációs modulról is fogadjunk csomagokat pl. (Wifi vagy bluetooth adapter).

3.3.3 Robot logika és menürendszer a kesztyűn

A jármű teljes irányítása egy kesztyű segítségével történik, amelyen rendelkezésünkre áll 12 nyomógomb, továbbá a kéz megdöntésével arányos két lineáris érték X és Y irányban. A felhasználó számára visszajelzésként minden gombhoz tartozik egy LED.

Az irányító csomagok legfentebb 40ms-os periódussal érkeznek a kesztyűtől. Minden irányító csomag tartalmazza a gombok állapotát, ledék állapotát, valamint a dőlést X és Y irányban.

Annak érdekében, hogy minden szükséges funkcionalitást lefedjünk az alábbi menürendszer került implementálásra, a hozzá tartozó almenükkel.

- Vészmegállás
- Robotkar irányítása
 - Kézi irányítás
 - Automatikus kezdő pozícióba állítás,
 - Kocka elengedése
 - Kocka előkészítése
 - Automatikus utántöltés
 - Robotkar kezdő pozíció kalibrálása (pozíció növelése és csökkentése).
- Légpárnás irányítása
 - Haladás tengely irányban
 - Haladás tengely irányra merőlegesen
 - Helyben forgás
 - Ellenszabályozott haladás
 - Megállás

A vészmegállító gomb lenyomásakor bármilyen állapotból megáll a rendszer. Minden motor kikapcsolásra kerül, a szervókról lekapcsoljuk a tápfeszültséget a szervók védelmének érdekében. A vészmegállás akkor is bekövetkezik, hogyha nem érkeznek új referencia jelek a távirányítótól 100ms ideig. Ez az irányítás elvesztését jelenti.

Kesztyű jelek felhasználása: légpárnás irányítása esetén a kesztyű X irányba dőlése szögsebesség referencia jelet ír elő a robot számára, Y irányba dőlése sebesség jelet.

Robotkar irányítása esetén mindkét csukló számára sebesség referencia jelet írunk elő.

A gyors kocka lerakás érdekében implementálásra került az automata kocka utántöltési módszer. A módszer az alábbi mozdulatsorból épül fel: fogószerkezet kinyitása, emelő csukló leeresztése a töltőhöz, kocka előkészítése, kocka betöltése a fogószerkezetbe, robotkar megmozdítása, hogy a kocka elhelyezkedjen a megfogó szerkezetben, kocka megfogása.

3.3.4 Felügyelő alkalmazás

A felügyelő szoftver feladata az információmegjelenítés az irányító személy számára, valamint a járműben található szabályzók paramétereinek a konfigurálása. A szoftver soros porton csatlakozik egy IQRF kommunikációs modulhoz, folyamatosan fogadja és dekódolja a kesztyű által a légpárnához küldött csomagokat és megjeleníti ezek tartalmát. A megjelenített adatok: akkumulátor feszültség, kéz dőlési szögei, gombok állapota és a ledék állapota.

A paraméterek beállítása kulcs-értékpár módszerrel történik, így könnyen változtatható és bővíthető a paraméterstruktúra.

A légpárnásra vonatkozó paraméterek: légpárna hajtómű sebesség, maximális előre haladási sebesség, maximális szögsebesség, kormányzás érzékenysége, első és hátsó kormánylapátok eltolása, hajtó

motorok közötti különbség és a kormánylapátok maximális mozgása. A szabályozott mozgásra vonatkozó paraméterek a két PI szabályzó proporcionális és integratív együtthatója, továbbá az erőelosztásnál használt korlátozási tényezők.

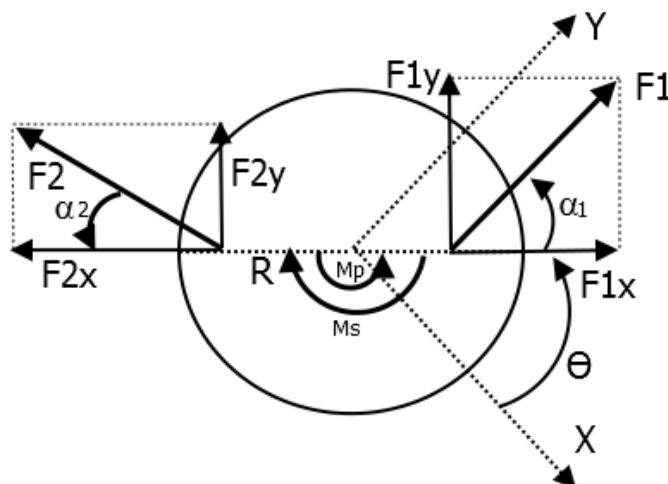
A robotkarra vonatkozó paraméterek: robot maximális emelési sebessége, robotkar maximális forgás sebessége, kockaadagoló maximális és minimális pozíciója, robotkar maximális és minimális pozíciója és a robotkar alap állapotának pozíciója.

3.4 Modellezés és szimuláció

A jármű tesztelése során az irányítás nehézségeivel igenis hamar szembesültünk. Ennek a fő oka a jármű szoknyájának a felfújására használt centrifugál propeller forgató nyomatéka. A súrlódás hiánya miatt a jármű tehetetlensége számottevő, ugyanis a függőleges tengely körüli forgás majdnem elkerülhetetlen, még álló helyzetben is. A könnyebb irányíthatóság érdekében a szögsebesség szabályozása szükséges.

3.4.1 A légpárnás jármű matematikai modellezése

Ahhoz, hogy a járművet szabályozni lehessen, szükséges ismerni a légpárnás fizikai egyenleteit. A légpárnás egyszerűsített ábrája, a ráható erők és nyomatékok az 3.10. ábrán láthatóak.



3.10. Ábra. A légpárnás járműre ható erők és nyomatékok.

Egyensúlyi állapotban a (3.1), (3.2) és (3.3) összefüggések írhatóak fel.

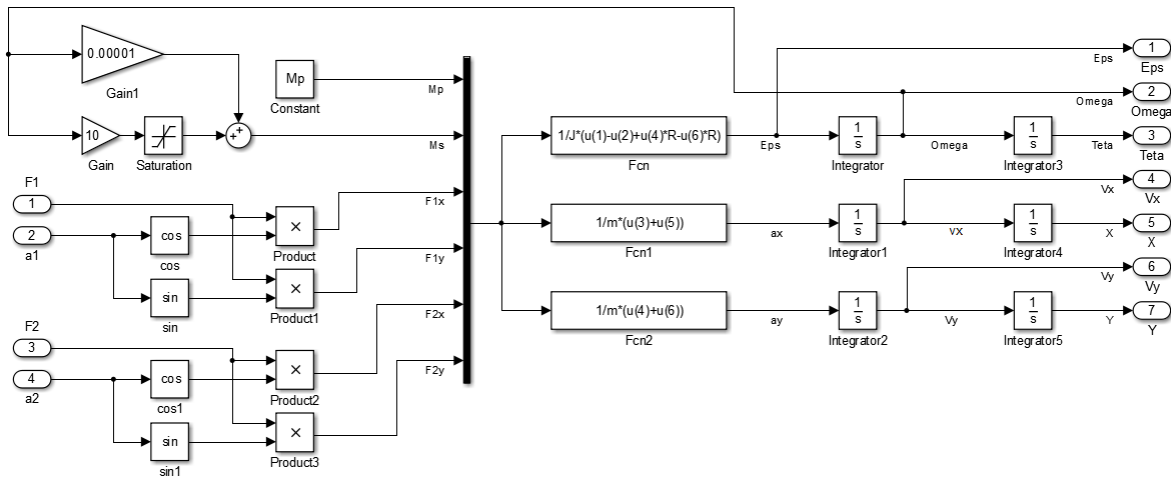
$$M_p + F_{1y} * R - F_{2y} * R - M_s = J * \varepsilon \quad (3.1)$$

$$F_{1x} + F_{2x} = m * a_x \quad (3.2)$$

$$F_{1y} + F_{2y} = m * a_y \quad (3.3)$$

ahol M_p a centrifugál propeller által keltett nyomaték, M_s a súrlódási nyomaték, $F_{1,2}$ a két hajtó motor által keltett erő, $\alpha_{1,2}$ az oldalkormányok kilengési szöge, m jármű tömege, $a_{x,y}$ a tengelyek menti gyorsulás komponensek, R a hajtómotorok távolsága a jármű középpontjától, J a tehetetlenségi nyomaték és ε a függőleges tengely körüli szöggyorsulás.

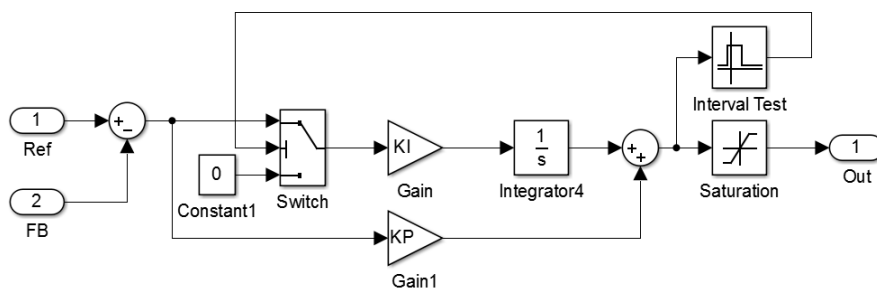
Az egyenletek alapján elkészült légpárnás jármű Matlab Simulink modellje az 3.11. ábrán látható. A rendszer bemenetei a következők: a két hajtó motor vezérlőjele és a két oldalkormány szöge. A rendszer kimenetei a következők: szöggyorsulás, szögsebesség, szöghelyzet, x tengely menti sebesség, x tengely menti helyzet, y tengely menti sebesség és y tengely menti helyzet. Az M_p képviseli, a centrifugál propeller által keltett forgató nyomatékot. Lévén, hogy használat közben nem változtatunk a propeller fordulatszámán (ez által a szoknya felfújtságán), ezt konstansnak tekintjük.



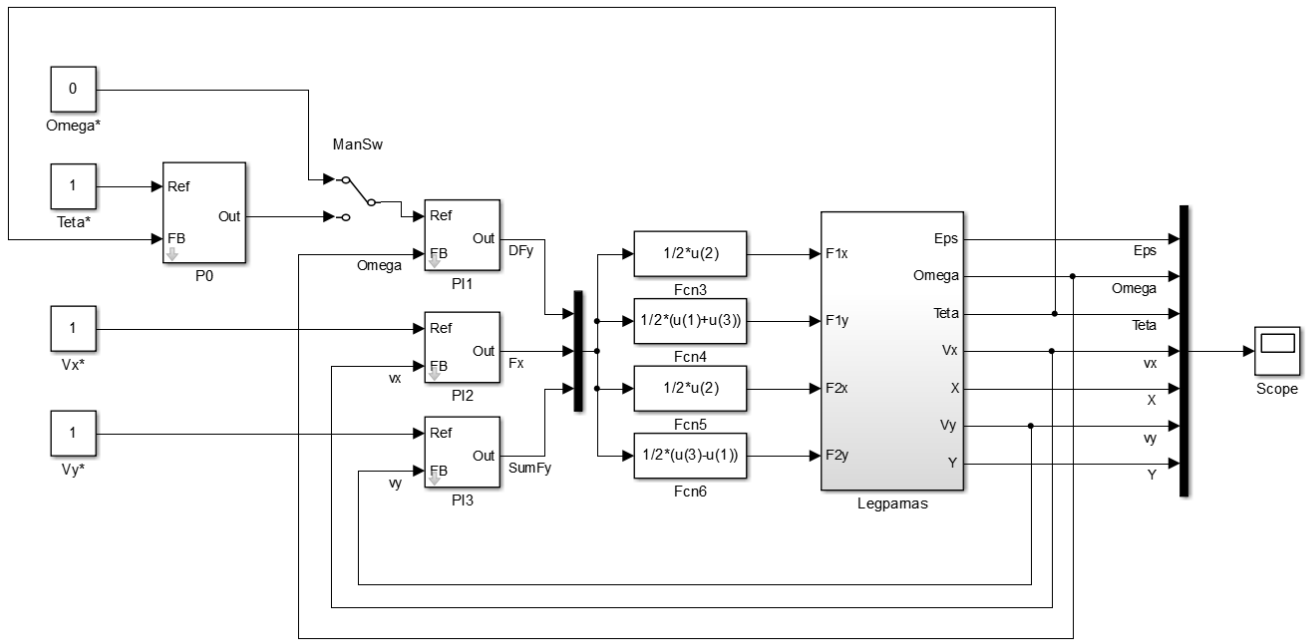
3.11. Ábra. A légpárnás jármű Simulink modellje.

3.4.2 Szabályozó algoritmus tervezése és szimulációja

A jármű irányítása céljából a következőket szükséges szabályozni: szögsebesség, x tengely menti sebesség és y tengely menti sebesség. Ahhoz, hogy a valós értékek az elvárt értékeket kövessék PI (Proporcionális Integratív, lásd 3.12. ábra) típusú szabályozó függvényeket használtunk. A légpárnás modellje hurokba kötve a szabályozókkal az 3.13. ábrán látható.



3.12. Ábra. A PI szabályozó felépítése.



3.13. Ábra. A légpárnás jármű szabályozott modellje.

Az 3.13. ábrán feltüntetett erő elosztás (Fcn3, Fcn4, Fcn5, Fcn6) azt feltételezi, hogy a hajtó motorok bármilyen irányba állíthatóak. Ez azonban nem tükrözi a valóságot.

Figyelembe véve a beavatkozó szervek korlátozásait és a mérhető paramétereket, a következő módon járunk el: elfogadjuk, hogy a jármű irányíthatósága érdekében előnyös lehet a két szembenéző motor egyszeri működtetése. Az x tengely mentén való haladás közben, az 2 számú motort használjuk meghajtásként, míg a 1 számú motort stabilizálásként. Ahhoz, hogy a sebességet ne csökkentsük túlságosan a 2. számú motor vezérlőjelét a (3.4) összefüggés alapján korlátozzuk:

$$F_2 = \frac{F_{max}}{4} \quad (3.4)$$

Az x tengely menti erőt (F_x) a következő képen határozzuk meg:

$$F_{1x} = F_1 * \cos \alpha_1 \quad (3.5)$$

$$F_{2x} = -F_2 * \cos \alpha_2 \quad (3.6)$$

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} = F_1 * \cos \alpha_1 - F_2 * \cos \alpha_2 = F_1 * \cos \alpha_1 - \frac{F_{max}}{4} * \cos \alpha_2 \quad (3.7)$$

Az y tengely menti erőt (F_y) a következő képen határozzuk meg:

$$F_{1y} = F_1 * \sin \alpha_1 \quad (3.8)$$

$$F_{2y} = -F_2 * \sin \alpha_2 \quad (3.9)$$

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} = F_1 * \sin \alpha_1 - F_2 * \sin \alpha_2 = F_1 * \sin \alpha_1 - \frac{F_{max}}{4} * \sin \alpha_2 \quad (3.10)$$

A forgató nyomatékot (M) a következő képen határozzuk meg:

$$\begin{aligned} M &= -F_{1y} * R + F_{2y} * R = -F_1 * \sin \alpha_1 * R - F_2 * \sin \alpha_2 * R \\ &= -F_1 * \sin \alpha_1 * R - \frac{F_{max}}{4} * \sin \alpha_2 * R \end{aligned} \quad (3.11)$$

A (3.10) és (3.11) összefüggéseket a következő képen csoportosítjuk:

$$\begin{cases} F_y^* = F_1 * \sin \alpha_1 - \frac{F_{max}}{4} * \sin \alpha_2 \\ \frac{M^*}{R} = -F_1 * \sin \alpha_1 - \frac{F_{max}}{4} * \sin \alpha_2 \end{cases} \quad (3.12)$$

A két egyenletből álló két ismeretlenes egyenletrendszert (3.12) megoldva, a következőket kapjuk:

$$\sin \alpha_1 = \frac{F_y^* - \frac{M^*}{R}}{2 * F_1} \quad (3.13)$$

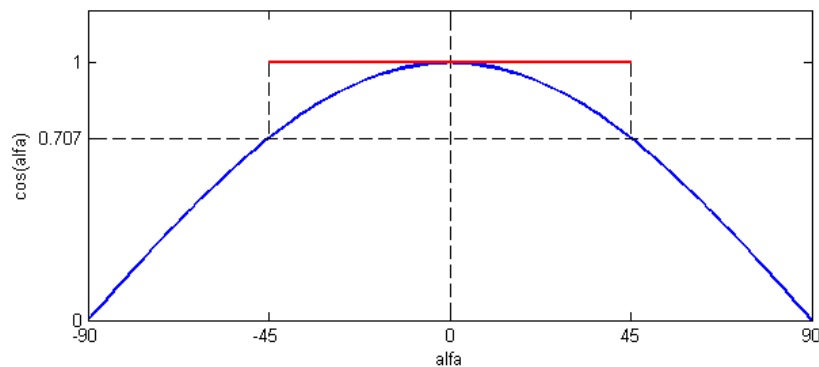
$$\sin \alpha_2 = -2 * \frac{F_y^* + \frac{M^*}{R}}{F_{max}} \quad (3.14)$$

$$\alpha_1 = \sin^{-1} \frac{F_y^* - \frac{M^*}{R}}{2 * F_1} \quad (3.15)$$

$$\alpha_2 = \sin^{-1} -2 * \frac{F_y^* + \frac{M^*}{R}}{F_{max}} \quad (3.16)$$

Figyelembe vesszük, hogy a gyakorlati megvalósítás oldalkormányai nem lengenek ki több mint $\pm 45^\circ$ és, hogy a használat ideje alatt majdnem mindig 0 vagy 0-hoz közeli szöget vesznek fel (lásd 3.14. ábra). Ez után elfogadjuk a (3.17) összefüggést:

$$\cos \alpha_1 \cong 1, \cos \alpha_2 \cong 1 \quad (3.17)$$



3.14. Ábra. Az oldalkormányok kilengési szögének a megközelítése.

Használva a (3.17) megközelítést, az F_1 értékét a következő képen határozzuk meg:

$$F_x^* = F_1 * \cos \alpha_1 - \frac{F_{max}}{4} * \cos \alpha_2 \quad (3.18)$$

$$F_x^* = F_1 - \frac{F_{max}}{4} \quad (3.19)$$

$$F_1 = F_x^* + \frac{F_{max}}{4} \quad (3.20)$$

Összegezve, a légpárnás jármű szabályozásakor a beavatkozó szerveket a (3.21-24) összefüggések szerint vezéreljük (lásd 3.15. ábra):

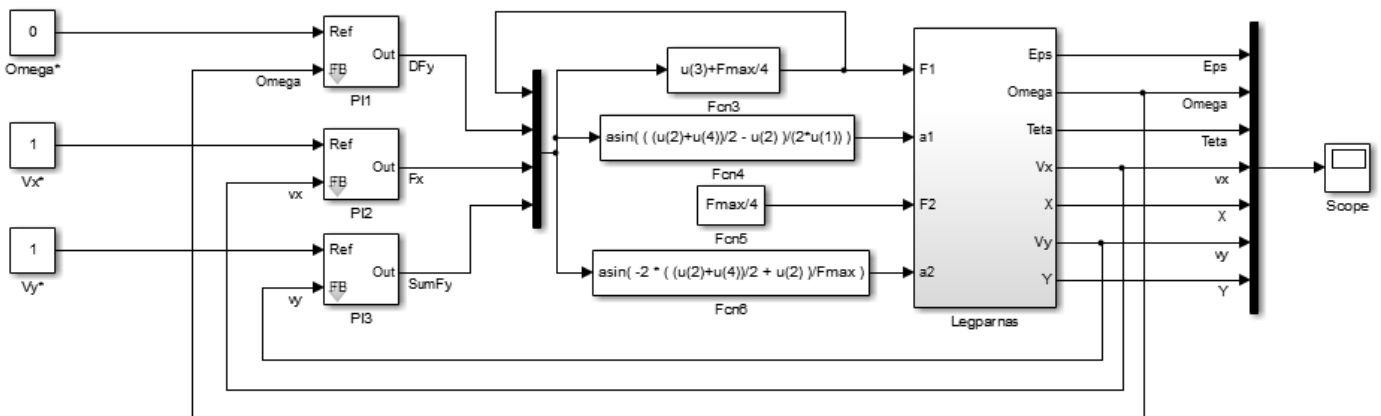
$$F_1 = F_x^* + \frac{F_{max}}{4} \quad (3.21)$$

$$F_2 = \frac{F_{max}}{4} \quad (3.22)$$

$$\alpha_1 = \sin^{-1} \frac{F_y^* - \frac{M^*}{R}}{2 * F_1} \quad (3.23)$$

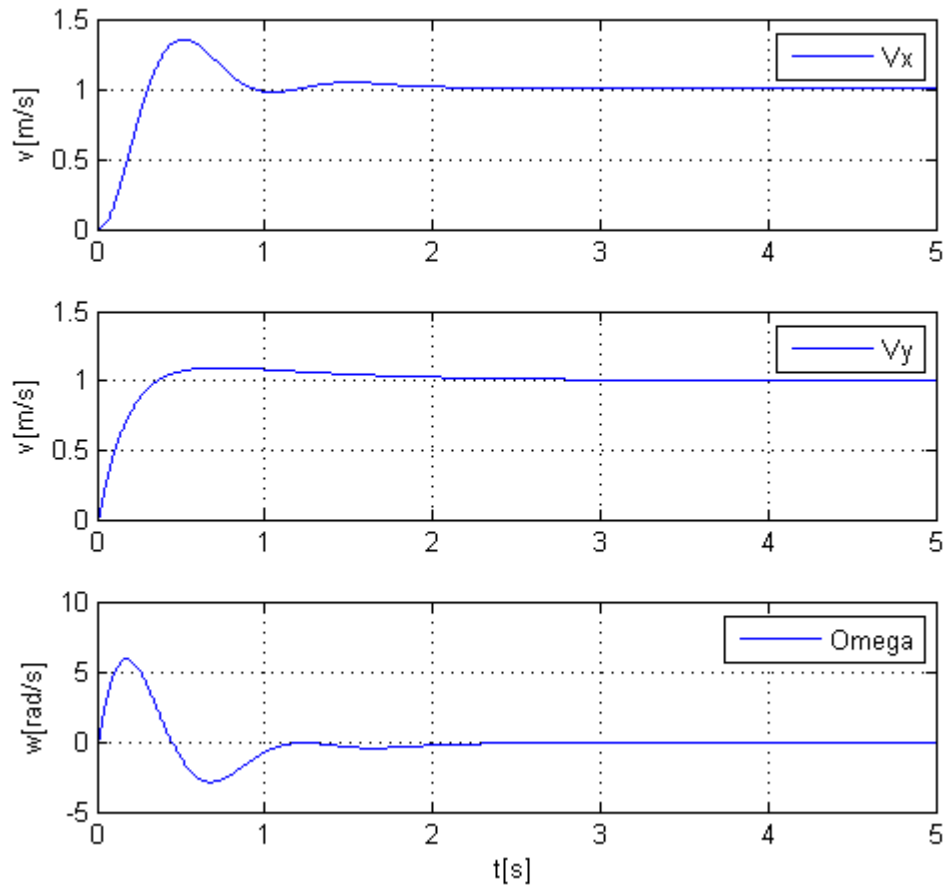
$$\alpha_2 = \sin^{-1} -2 * \frac{F_y^* + \frac{M^*}{R}}{F_{max}} \quad (3.24)$$

ahol F_x^* , F_y^* és $\frac{M^*}{R}$ az előírt értékek, az F_2 értéke pedig konstans.



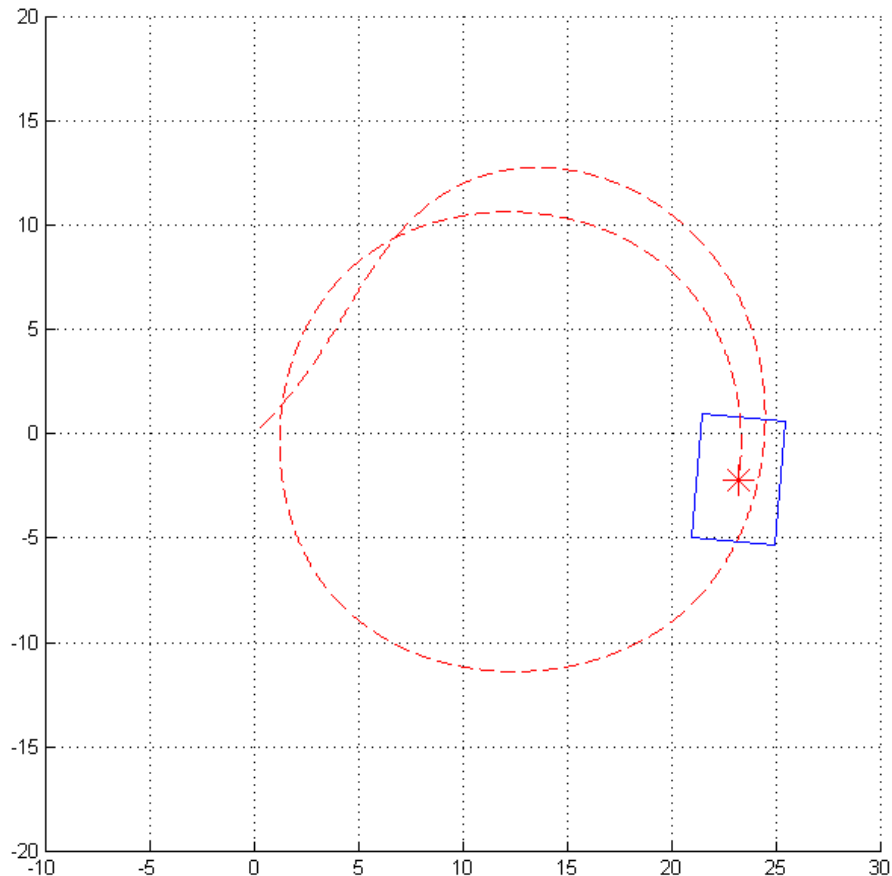
3.15. Ábra. A légpárnás szabályozása figyelembe véve a beavatkozó szervek korlátozásait.

A szabályozó működését elsősorban egységugrás bemenetre teszteltük. Az előírt értékek a következők: $V_x^* = 1$, $V_y^* = 1$ és $\omega^* = 0$. A használt erőelosztás az 3.15. ábrán látható. A szimuláció eredménye a 3.16. ábrán látható.



3.16. Ábra. A légpárnás jármű egységugrás bementre adott válasza.

A szabályozó tesztelését folytatva, a következő szimulációs kísérletet végeztük el: szabályozni a légpárnás járművet, hogy egy körpályát írjon le miközben az iránya mindig merőleges a kör sugarára. Az előírt értékek ez esetben a következők: $V_x^* = \sin at$, $V_y^* = \cos at$ és $\omega^* = \beta = ct$. A megfelelő eredmény elérése az α és β paraméterek megválasztásán múlik, hogy ne írjunk elő fizikailag nem kivitelezhető pályát. A szimuláció eredménye az 3.17. ábrán látható.



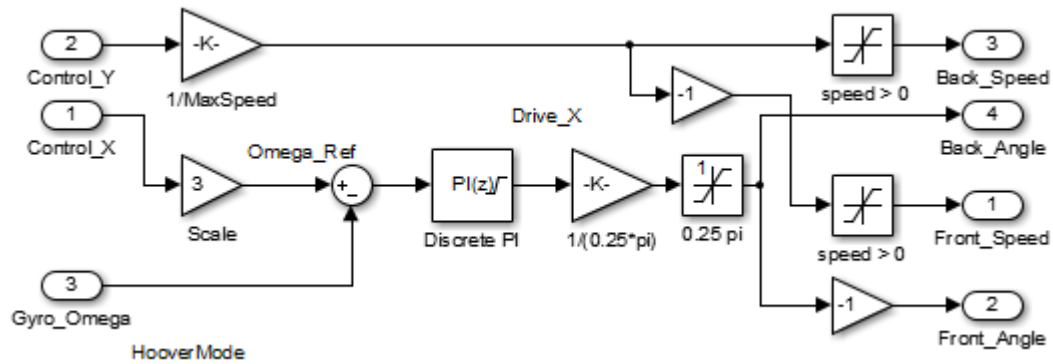
3.17. Ábra. A légpárnás jármű körpályára való szabályozása.

3.4.3 Szabályozó algoritmus implementálása

Az szabályozó algoritmus feladata két referencia érték és a mért szögsebesség alapján meghatározni a hajtó motorok fordulatszámát és a kormánylapátok szögét, ezzel stabilizálva a rendszert és megkönnyítve a légpárnás irányítását.

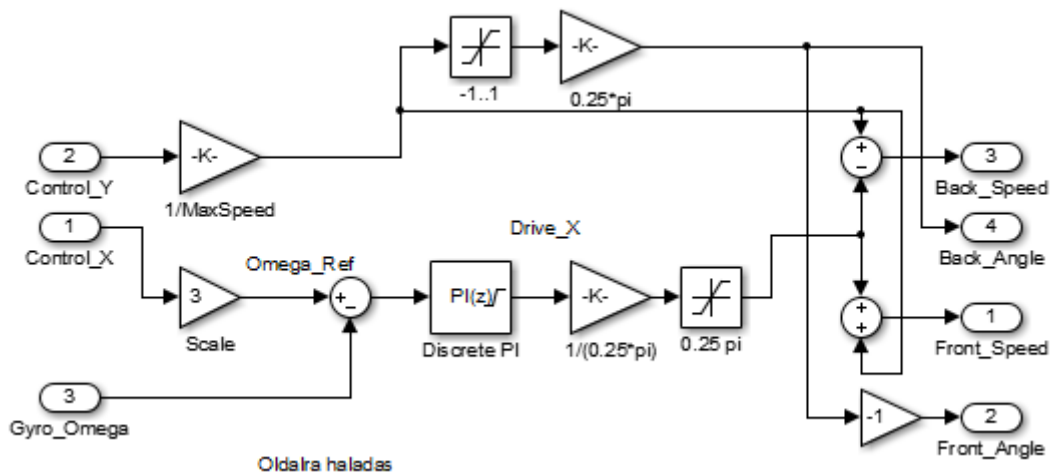
Minden irányítási mód esetén a függőleges tengely körüli forgás szabályozása a cél. Minden üzemmódban a szögsebességet a kesztyű X irányban történő dőltése írja elő. A különböző üzemmódok között csupán a kesztyű Y irányban történő dőltésének funkciója változik, valamint a beavatkozókra az erő szétosztása.

Tengely irányú haladás esetén (lásd 3.18. ábra) mindig csak az egyik hajtómotor dolgozik, attól függően, hogy előre vagy hátra haladunk. A szabályozó a hajtott motor kormánylapátja segítségével avatkozik be a szögsebesség szabályzáshoz. A két motor kormánylapátjai azonos trigonometrikus irányba térnek ki.



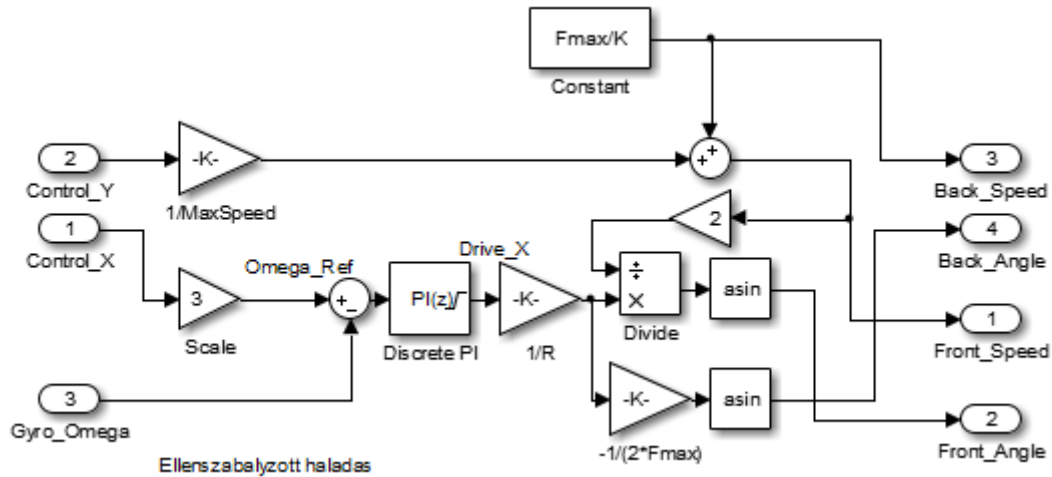
3.18. Ábra. A légpárnás tengely irányban való haladásakor alkalmazott algoritmus.

Oldal irányú haladás esetén (lásd 3.19. ábra) mindkét motor dolgozik, és a kormánylapátok maximálisan ki vannak térve ellentétes trigonometrikus irányba. Ebben az esetben a szabályzó algoritmus a két nyomaték közötti különbséggel avatkozik be a szögsebesség szabályozásába.



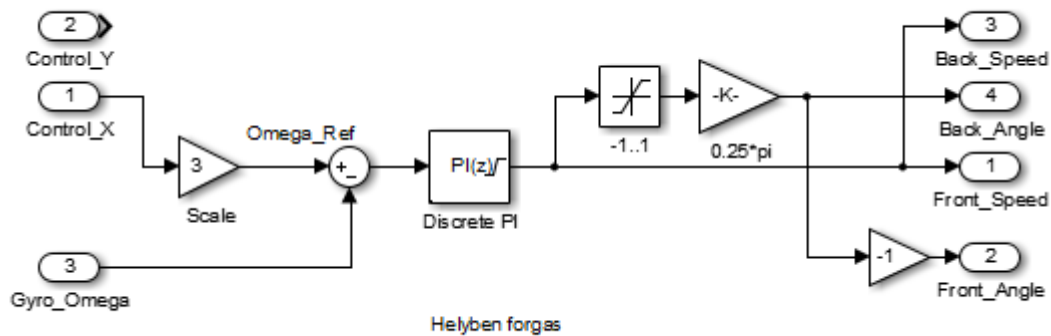
3.19. Ábra. A légpárnás oldal irányú haladásakor alkalmazott algoritmus.

Ellenszabályozott előrehaladás esetén (lásd 3.20. ábra) az első motor konstans nyomatékkal fékezi a járművet és ezzel megegyező nyomatékot fejt ki a hátsó motor is, hogy ellensúlyozza. Hogyha az előírt haladási nyomaték nagyobb, mint 0 akkor a hátsó motorhoz hozzáadódik, az előírt nyomaték. A szabályzó ebben az esetben a kormánylapátok segítségével stabilizálja a szögsebességet. Az első módszerhez képest előnye, hogy sokkal hatékonyabban tudja szabályozni a szögsebességet, hátránya, hogy egyik motor mindig konstans erővel fékezi a járművet, ezzel a maximális haladási sebesség lecsökken.



3.20. Ábra. A légpárnás ellenszabályzott előre haladásakor alkalmazott algoritmus.

A helyben forgás algoritmusá esetén (lásd 3.21. ábra) a két kormánylapát ellentétes trigonometriai irányban, maximálisan tér ki. A szabályozó pedig a hajtómotorok kifejtett nyomatékával szabályozza a forgást.



3.21. Ábra. A légpárnás helyben forgásakor alkalmazott algoritmus.

4 Tesztelés és mérési eredmények

A megvalósított rendszeren elvégzett tesztek két osztályba sorolhatjuk. Ezek a következők: teljesítményre utaló és szabályozó működését igazoló mérések.

4.1 Teljesítményre utaló mérések

A versenyképesség igazolására a következő mérésorozatot hajtottuk végre.

4.1.1 Végsebesség mérése

A résztávon, egyenes úton megtett idő alapján mért végsebesség átlagértéke 2.2 m/s. Megjegyezendő, hogy a végsebesség nem jelent feltétlen előnyt a versenyen.

4.1.2 Autonómia mérése

Az jármű autonómiája, nagyban függ a használt üzemmódtól, mert a fogyasztás jelentős részét a hajtómotorok áramfelvétele teszi ki. Verseny körülmények mellett a tapasztalt autonómia 30 perc, ezzel az átlag áramfelvétel 6A.

4.1.3 Súrlódási együttható mérése (szoknya hatékonyság tesztelés)

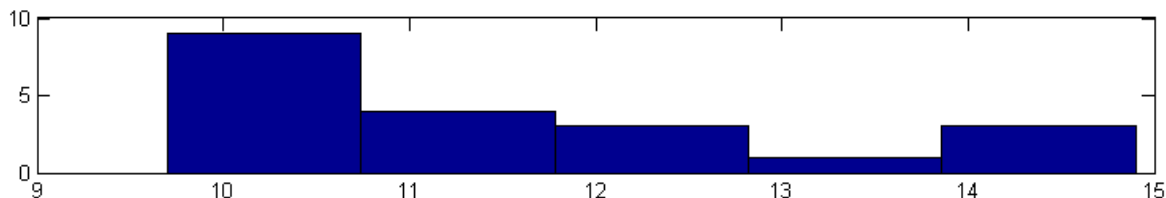
A súrlódási együttható mérése során, a járművet egy dőlhető tükörsima sík felületére (ezzel imitálva a fényezett tornaterem parkettet) helyeztük, felfűjt légpárnával. Ezt követően pedig, addig növeltük a sík dőlési szögét, amíg a súly tangenciális komponense meghaladta a súrlódási erőt. Ekkor a dőlési szög tangense eredményezte a jármű súrlódási együtthatóját. A tapasztalat azt mutatja, hogy már 1 fokos dőlés mellett is kimozdul a jármű. Ez azt jelenti, hogy a súrlódási együttható kisebb, mint $\tan 1 = 0.017$.

4.1.4 Hatótávolság mérése

Az alkalmazott IQRF TR-54D rádió modulok gyártó által specifikált hatótávolsága nyílt terepen 300m^[5]. Az általunk tapasztalt hatótávolság 200m. Ez nem okoz problémát, mert a maximális igényelt hatótávolság kb. 12m.

4.1.5 Kocka elhelyezési teljesítmény mérése

A kocka elhelyezési teljesítmény mérése céljából, a következő mérési módszert dolgoztuk ki: a légpárnás járművet a célterület mellé „parkoljuk” (leeresztjük a szoknyáját), ezt követően a kocka tartályt kiürítjük mérve egyenként a kockák elhelyezési idejét. Az célterület magassága a versenyben használt célterületek magasságának a maximuma. Ahhoz, hogy egy kockát elhelyezzünk, használjuk az automatikus adagoló funkciót. Adagolás után viszont a leggyorsabb kézgesztusokkal irányítjuk a robotkart és elhelyezzük a kockát. A kocka elhelyezési idők hisztogramja a 4.1. ábrán látható.

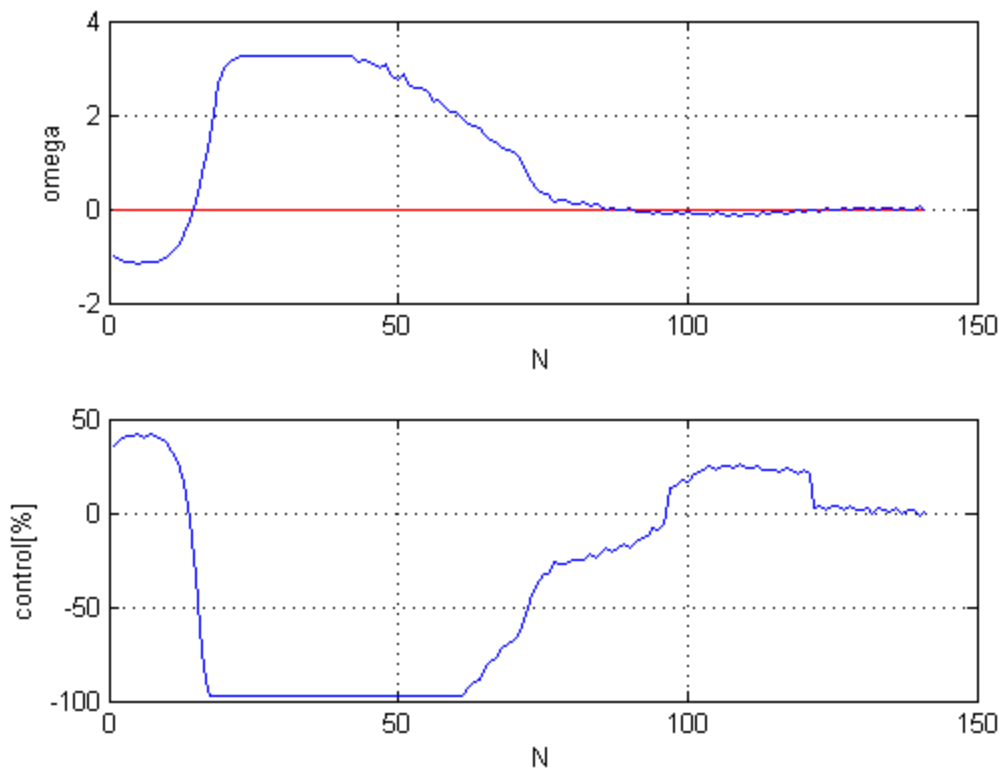


4.1. Ábra. A dobókockák elhelyezési idejének a hisztogramja.

Egy kocka elhelyezési idejének átlag értéke 11.49s. Mindössze 3 perc és 50 másodperc kellett a tartály kiürítéséhez. Mérésünk során, egy kocka elhelyezési ideje 9.7s-tól 14.9s-ig tartott.

4.2 Szabályozó működésének a tesztelése

Mivel, nincs módunk a légpárnás jármű síkbeli pozíciójának vagy sebességének a mérésére, ezért csak a szögsebességet tudjuk ábrázolni. A tesztelési eljárás a következő: a légpárnás szoknyáját felfűjva tartjuk, ez után kézzel külső erőt gyakorlunk rá. A lendületvétel következtében, megfigyelhető a kb. -1 rad/s szögsebesség, ezt követően pedig egy nagyméretű pozitív lökés. Ennek a szögsebességnek a nagysága szaturálja a giroszkóp mérését. Magára hagyva a rendszert a szabályozó előírt értékre hozza a szögsebességet (lásd 4.2. ábra). A mintavételezési időtartam értéke $T_s = 20ms$.



4.2. Ábra. A szabályozó algoritmus gyakorlati tesztelése.

5 Következtetések

Mivel a légpárnás járművek egy vékony levegőrétegen siklanak, ezért szinte súrlódásmentesen lebegnek a föld felett. Ennek köszönhetően nagyon kis erővel el lehet mozdítani a járművet, de hátrányt is jelent, mivel könnyen elfordulhat vagy elindulhat olyan irányba, amely nem előnyös számunkra. Ennek a problémának a kiküszöbölésében nagy segítség volt a giroszkópos szabályozó. A szabályozó használata jelentősen javította a jármű irányíthatóságát.

A kesztyűn alkalmazott gyorsulásmérővel pontosan meg tudtuk állapítani a kézfejnek az elfordítását, és az alfa-szűrő használatával hatékonyan kizárható volt a kézremegés befolyása. A funkcióváltáshoz használt gombok esetén nehéz volt megtanulni az egyedi gombok funkcionálisait, viszont kis gyakorlással viszonylag hamar el lehetett sajátítani. A visszajelző LED-ek jelentősen megkönnyítették az állapotok követését. A vészmegállító gomb nagyon hasznosnak bizonyult elkerülve az esetleges baleseteket, szerkezeti károkat.

A rezgőmotorral hatékonyan lehetett zajos környezetben is jelezni az irányítónak, hogy mikor van semleges helyzetben a kézfej.

A moduláris felépítésnek köszönhetően a jármű rövid idő alatt szétszedhető és javítható volt, mind mechanikai mind, elektromos szempontból.

Igyekeztünk a robot méretét a maximumnál kisebbre tervezni a könnyebb manőverezhetőség érdekében, és sikerült ezt elérnünk, a robot 10 cm-el keskenyebb és rövidebb a megadott maximumnál. Az anyagválasztásnak köszönhetően (polisztrén, Balsa fa, rétegelt lemez, plexi, alumínium profil) a robot tömege fele volt a maximális megengedett tömegnek, de ugyanakkor robusztus a szerkezeti felépítésnek és az anyagoknak köszönhetően.

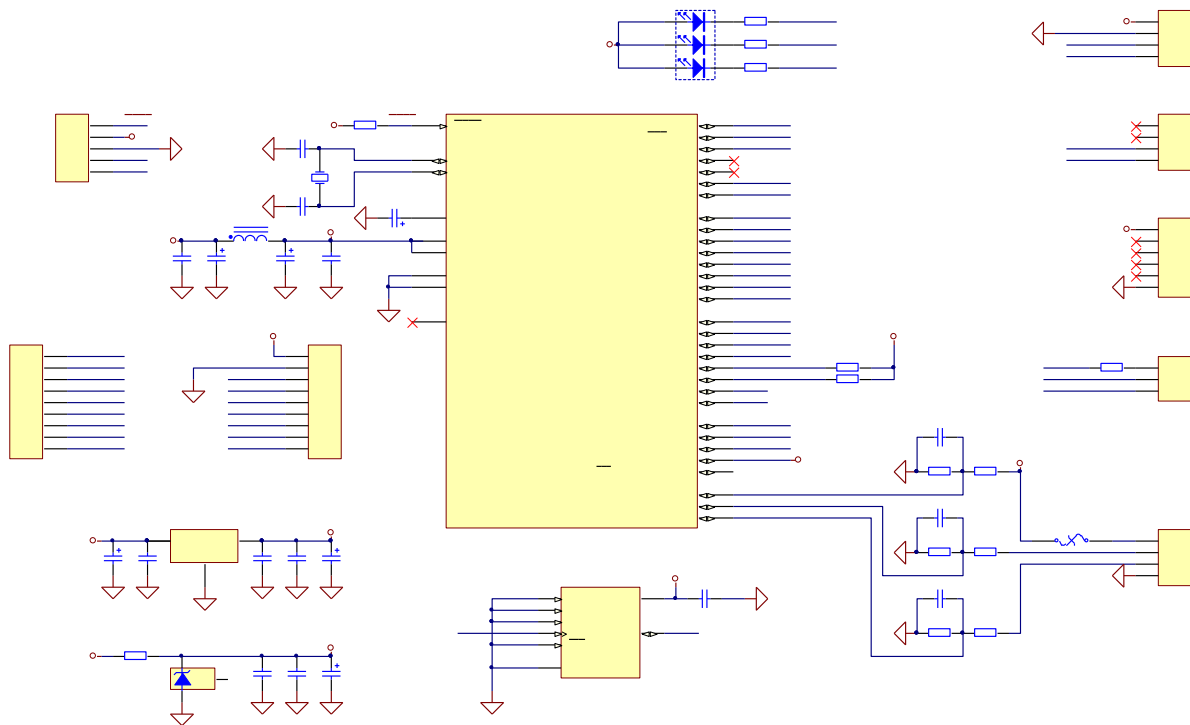
Az IQRF rádiófrekvenciás kommunikáció megbízhatónak bizonyult, nem került interferenciába más eszközökkel, ellenben a WIFI kapcsolattal, amelynek átviteli sebessége a nagyszámú eszköz miatt nagyon lecsökkent, ez viszont alkalmatlanná tette az élő képátvitelt.

6 Könyvészet

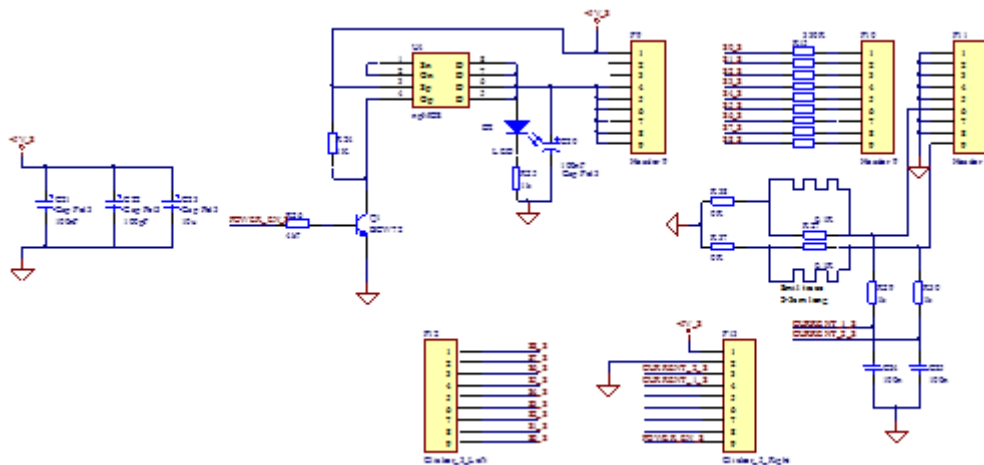
- [1] <http://www.instructables.com/id/How-to-make-a-RC-Hovercraft/>
- [2] <http://www.rc-hovercraft.com/rchovercraft/Skirts/Bag-Skirt-Pattern-Design%20for%20Model%20Hovercraft-v2.pdf>
- [3] Kónya László, Kopják József: „PIC Mikrovezérlők alkalmazástechnikája” harmadik bővített kiadás, ChipCAD Kft., 2009
- [4] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39964B.pdf>
- [5] <http://www.iqrf.org/weben/index.php?sekce=products&id=tr-54d&ot=transceivers&ot2=tr-54d>

7 Függelékek

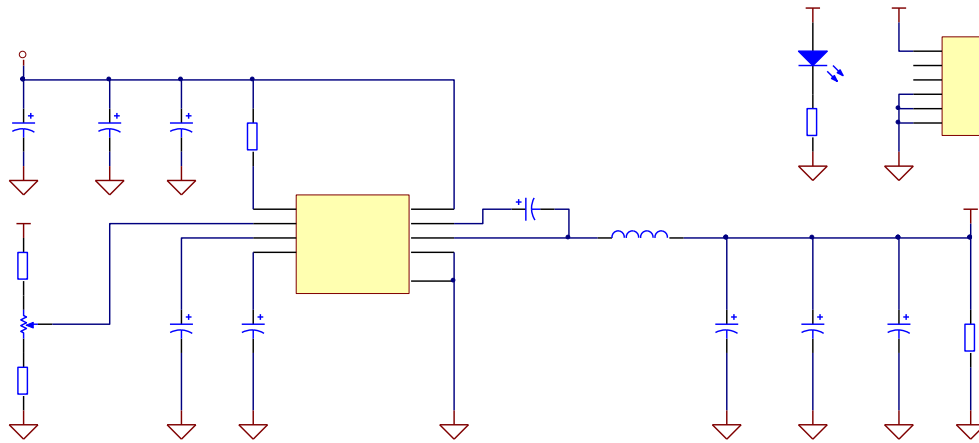
7.1 Nagyított méretű kapcsolási rajzok



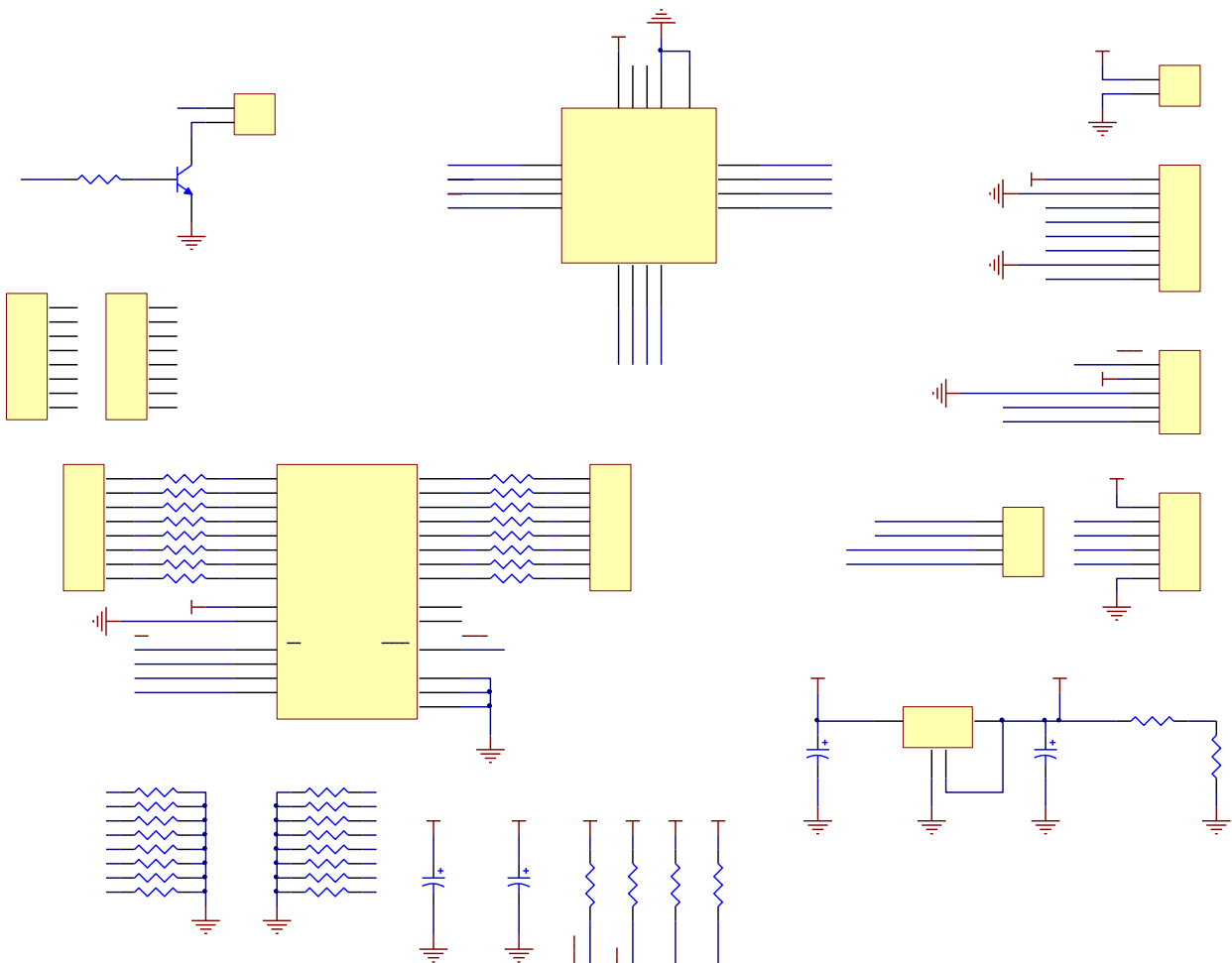
1. Függelék. A légpárnás központi egységének kapcsolási rajza.



2. Függelék. A légpárnás központi egység szervó-panelének kapcsolási rajza.

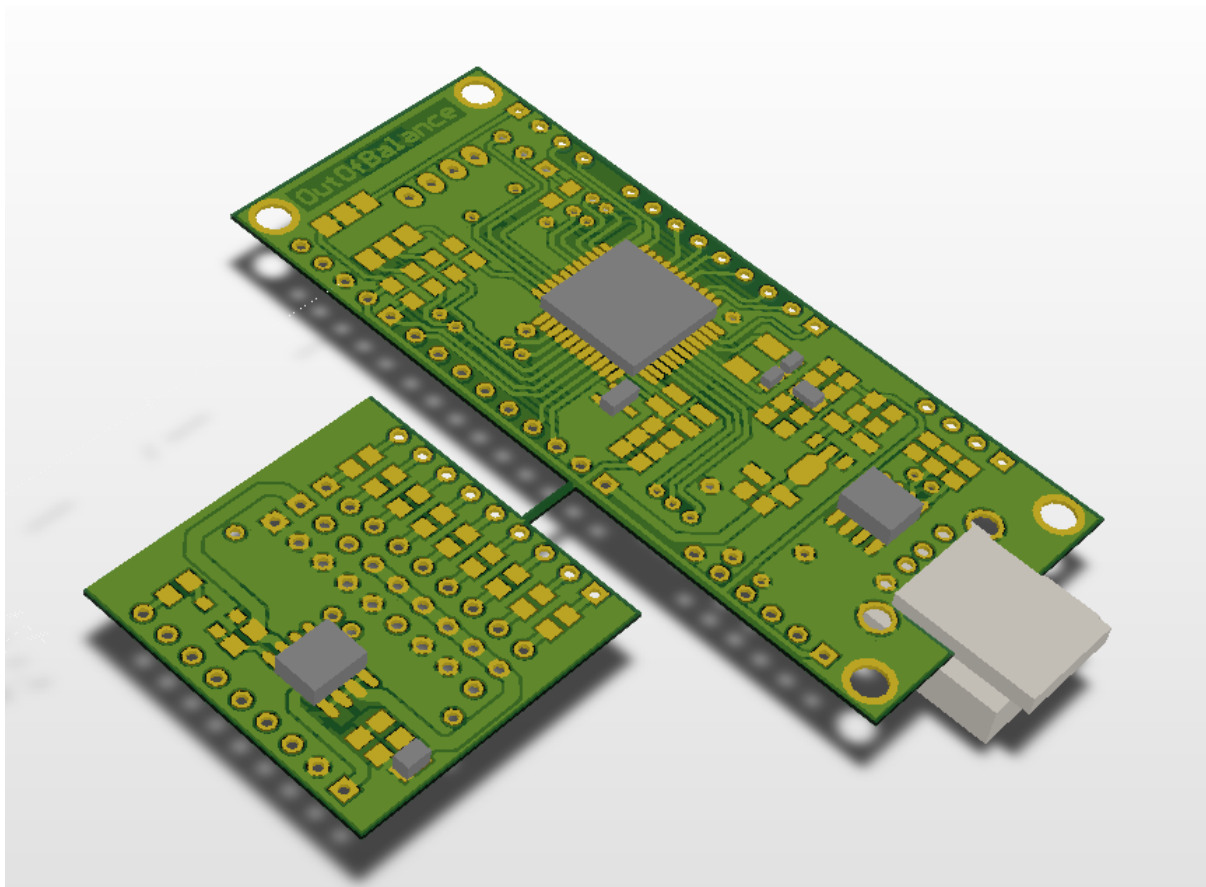


3. Függelék. A légpárnás központi egység DC-DC konverterének kapcsolási rajza.

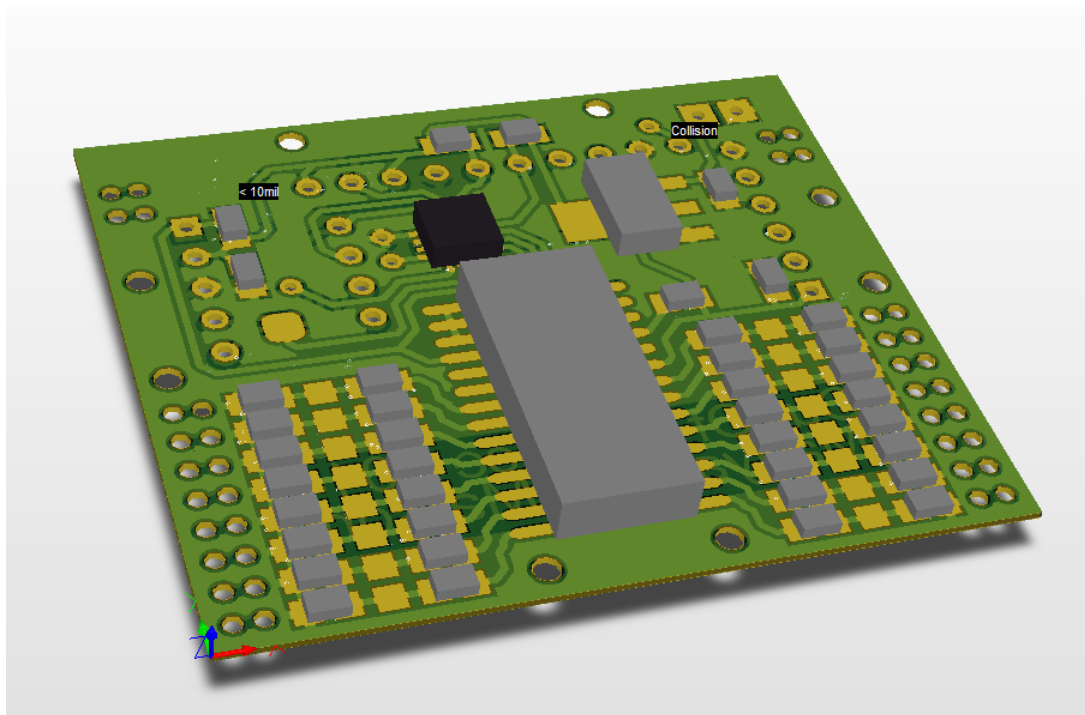


4. Függelék. A kesztyű központi egységének kapcsolási rajza.

7.2 Nagyított méretű 3D nyák tervek

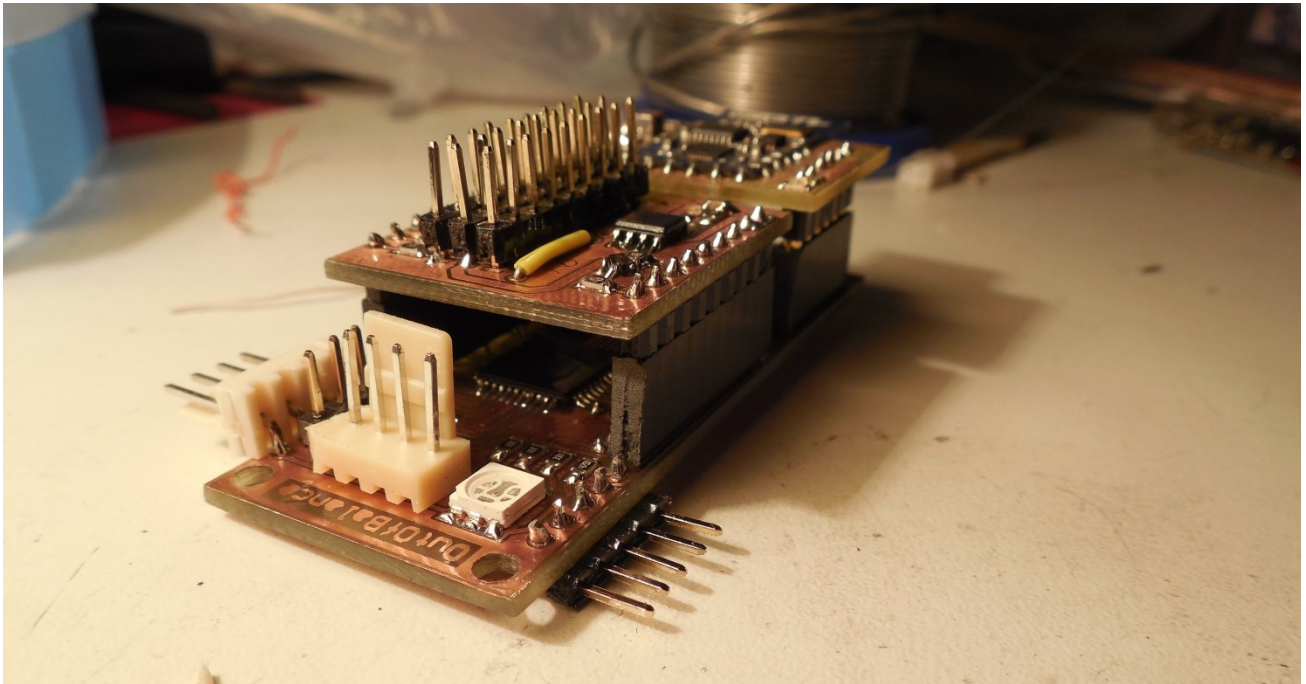


5. Függelék. A Légpárnás jármű központi egységének 3D látványterve.

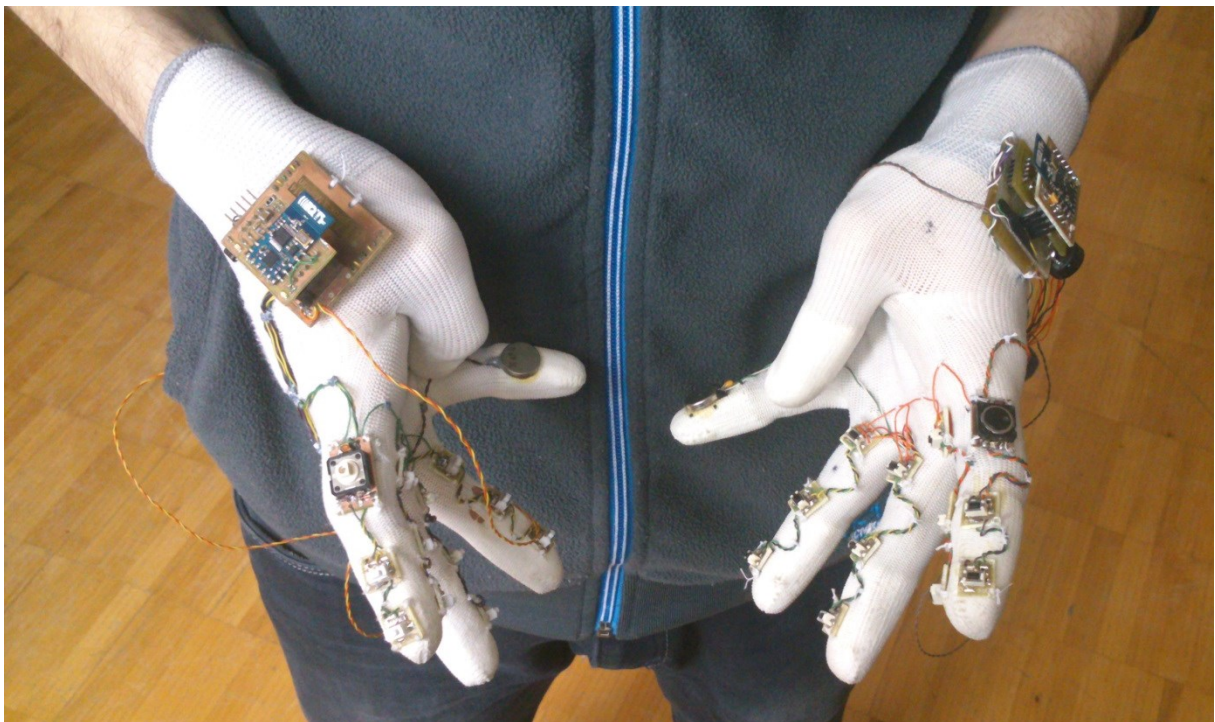


6. Függelék. A kesztyű központi egységének 3D látványterve.

7.3 Fényképek a rendszerről



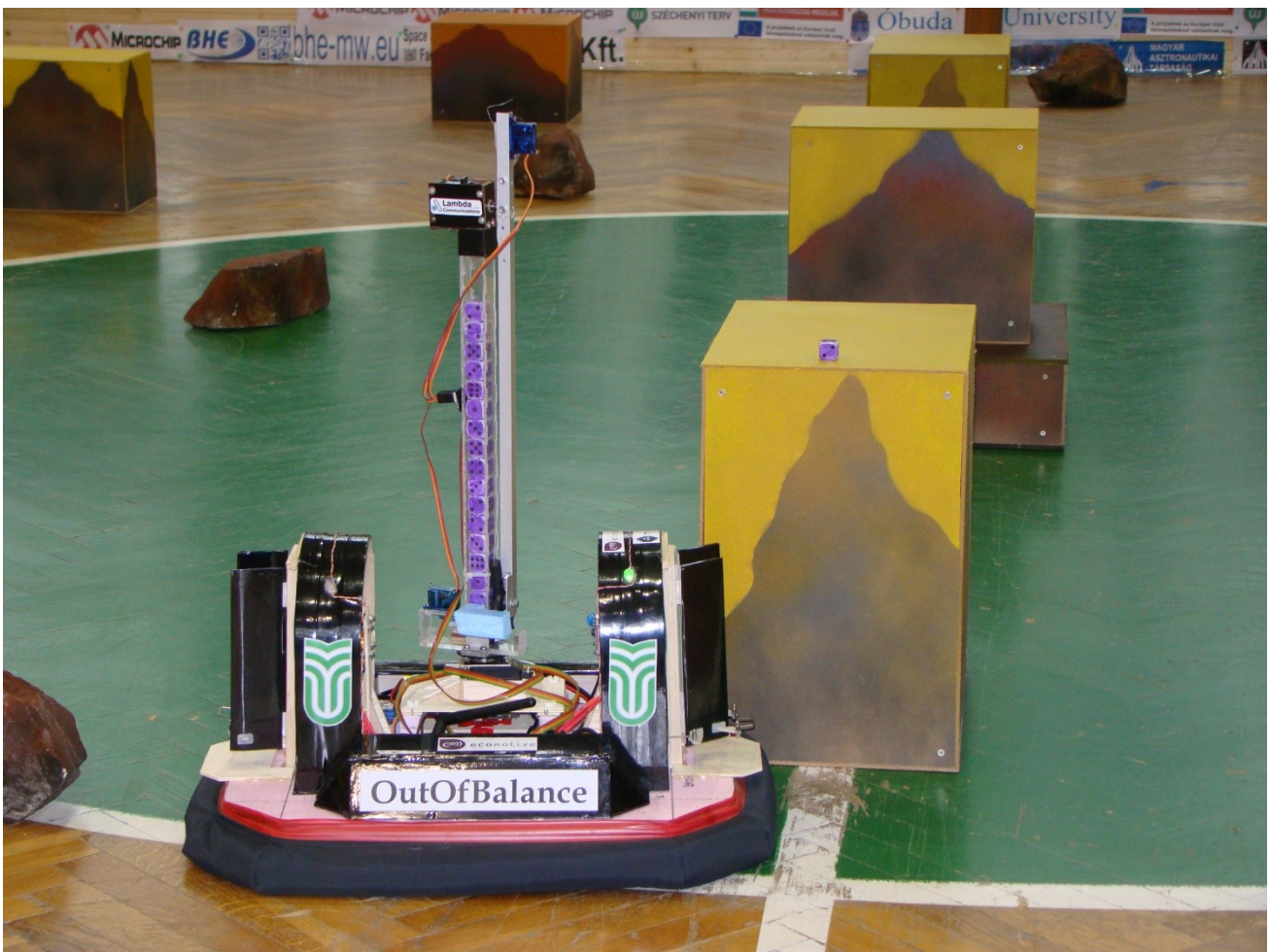
7. Függelék. A légpárnás jármű központi egysége.



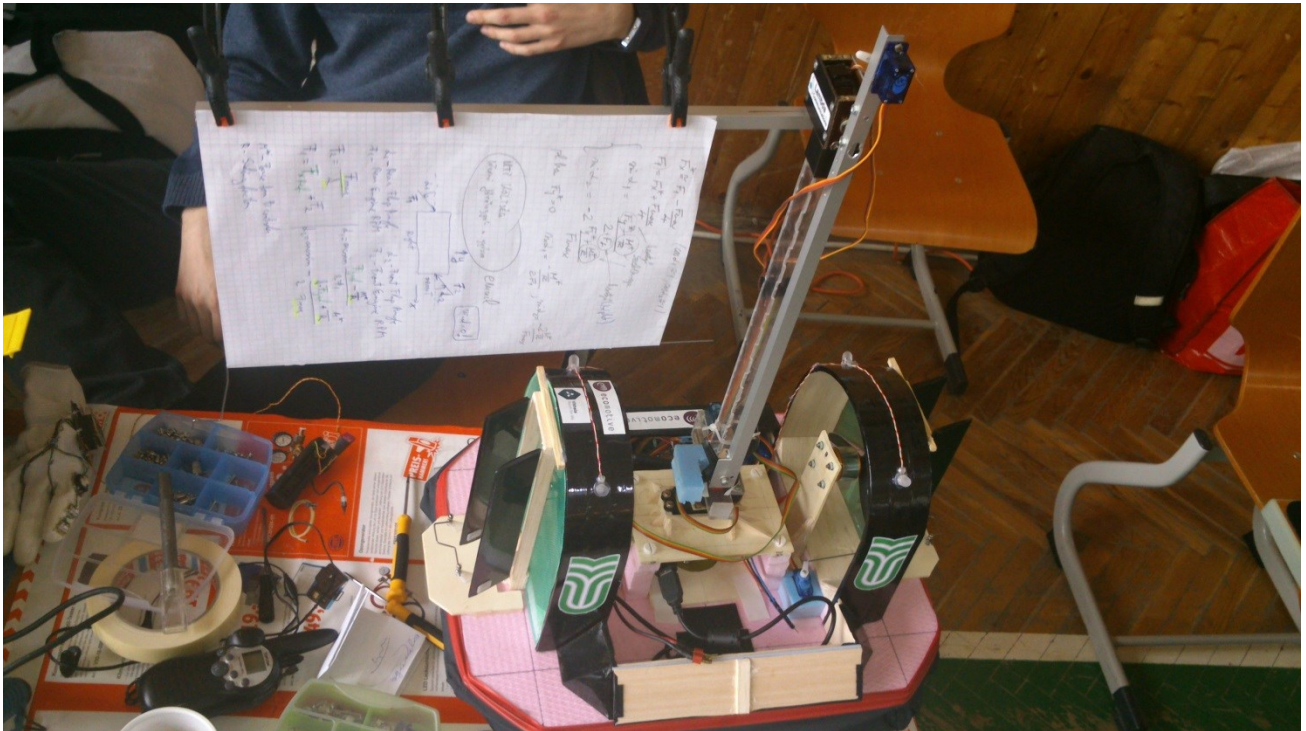
8. Függelék. A kesztyűk fényképe.



9. Függelék. A megvalósított légpárnás jármű fényképe.



10. Függelék. A megvalósított légpárnás jármű fényképe verseny közben.



11. Függelék. Az improvizált kockaseperő kar.



12. Függelék. Az OutOfBalance csapat tagjai balról jobbra: Madarász Rossi, Patka Gergely és Nagy Csaba.