



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR

Demonstrációs célú mobil inverz inga fejlesztése

TDK dolgozat

Készítette:
Molnár Gyula
Y8YH6H

Konzulens:
Gözse István

2013/14/1. félév

Tartalom

| | |
|------------------------------------------------------|----|
| 1. A dolgozat témájának bemutatása..... | 1 |
| 1. About the topic of this paper..... | 1 |
| 1.1. Motiváció..... | 1 |
| 2. Az inverz inga általános bemutatása | 3 |
| 3. Az inverz inga mint platform bemutatása..... | 6 |
| 3.1. A hardware eszközök ismertetése..... | 7 |
| 3.1.1. A tápelektronika | 8 |
| 3.1.2. A mikroprocesszor..... | 9 |
| 3.1.3. Az általános célú LED | 10 |
| 3.1.4. A szögmérő egység..... | 10 |
| 3.1.5. A gyorsulásmérő..... | 11 |
| 3.1.6. A pozíció mérő | 11 |
| 3.1.7. A kommunikációs modul | 13 |
| 3.1.8. A motorvezérlő elektronika..... | 16 |
| 3.2. A szoftverek ismertetése | 18 |
| 3.2.1. A mikrokontroller szoftvere | 18 |
| 3.2.1.1. A demonstrációs program szabályzó köre..... | 18 |
| 3.2.1.2. Az inga mozgásegyenletei | 19 |
| 3.2.1.3. Állapotteres leírás..... | 21 |
| 3.2.1.4. A demonstrációs program felépítése..... | 22 |
| 3.2.2. A PC-oldali szoftver | 24 |
| 4. Összefoglalás..... | 24 |
| 5. Irodalomjegyzék..... | 25 |
| 6. Mellékletek | 26 |

1. A dolgozat témájának bemutatása

A dolgozat témája egy olyan inverz inga bemutatása, melynek tervezési szempontjai a tantermi demonstráció céljának alárendeltek. Az elkészült inga rendeltetése egyrészt, hogy demonstrációs eszközként szolgáljon az irányítástechnikát tanító oktatóknak, másrészt pedig, hogy segítségével a hallgatók gyakorlatias módon ismerkedhessenek meg az irányítástechnikai módszertanok alkalmazásával. Célja még, hogy a beágyazott rendszerekkel, mikrokontroller alkalmazásokkal ismerkedő hallgatók számára egyfajta próbapanelként is használható legyen.

1. About the topic of this paper

The topic of this paper is to present the development process of an inverted pendulum, of which main goal is to provide a device for classroom demonstration purposes. The finished pendulum's purpose, on one hand, is to serve as a demonstration device for control teachers, and on the other hand, to provide a device for students to gain knowledge about control methods in a practical way. Providing a demoboard-like platform for students learning about embedded systems and microcontroller applications is also an intention.

1.1. Motiváció

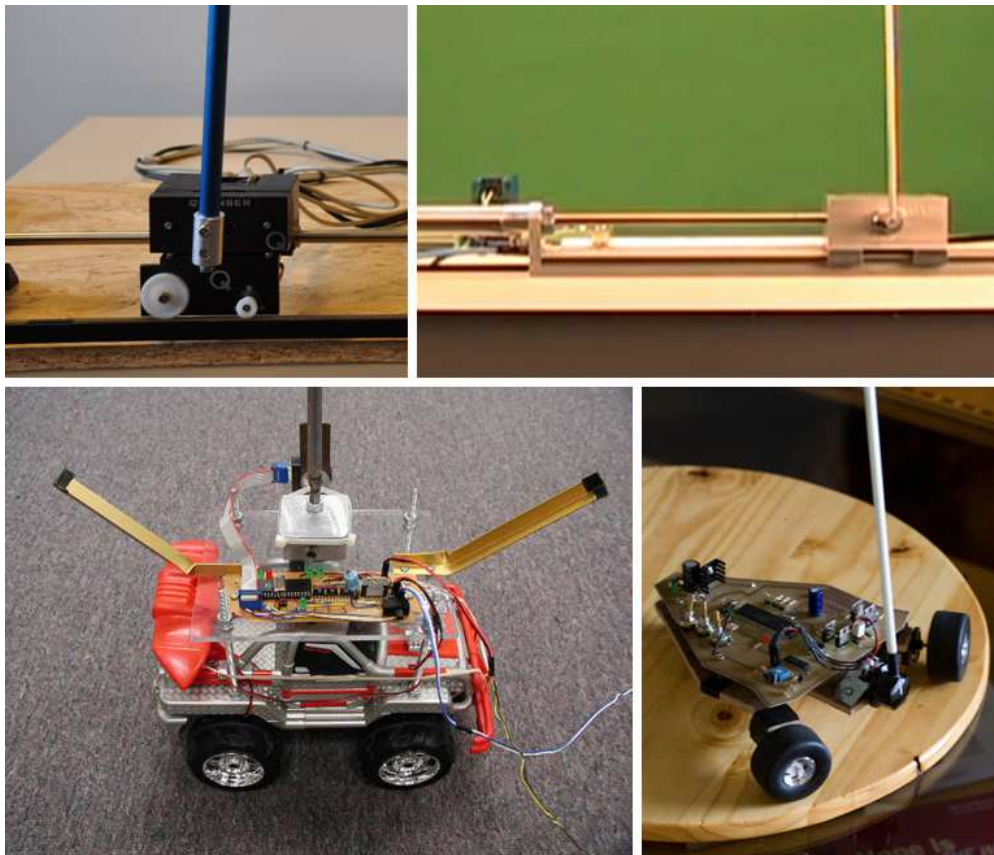
Az inverz inga mint modell egy klasszikus problémának számít az irányításelmélet területén. Az alapmodell fizikai implementációi jellegüket tekintve a kerekes kialakításoktól kezdve a különböző sínen futó megoldásokon át a precíziós pneumatika használatáig számtalan módon megépítésre kerültek már (*1. ábra*), mivel ezek kézenfekvő eszközként szolgálnak az irányítástechnikai módszerek demonstrálására.

A műszaki felsőoktatásban oktatási eszközként széles körben elterjedt inverz inga implementációk általában a laboratóriumi használat körülményeihez igazodnak. Az intézmények számára készen megvásárolható eszközöket gyártó cégek (Quanser, Googol Technology, ECP Systems, Kent Ridge Instruments) csak nagyobb méretű, nehezebb, álló inverz ingákat forgalmaznak.

Az ilyen, nehezen szállítható inverz ingák nem teszik lehetővé, hogy a hallgatók otthon, egyéni feladat keretében használják az eszközt. Ezen kívül a mindennapi

egyetemi életben is előfordulhat, hogy nem, vagy csak nehézkesen biztosítható laboratóriumi hozzáférés minden hallgató számára. Mindkét esetben, a hallgatók, és az oktatók számára is nagyobb rugalmasságot biztosítana, ha az inga könnyedén szállítható lenne.

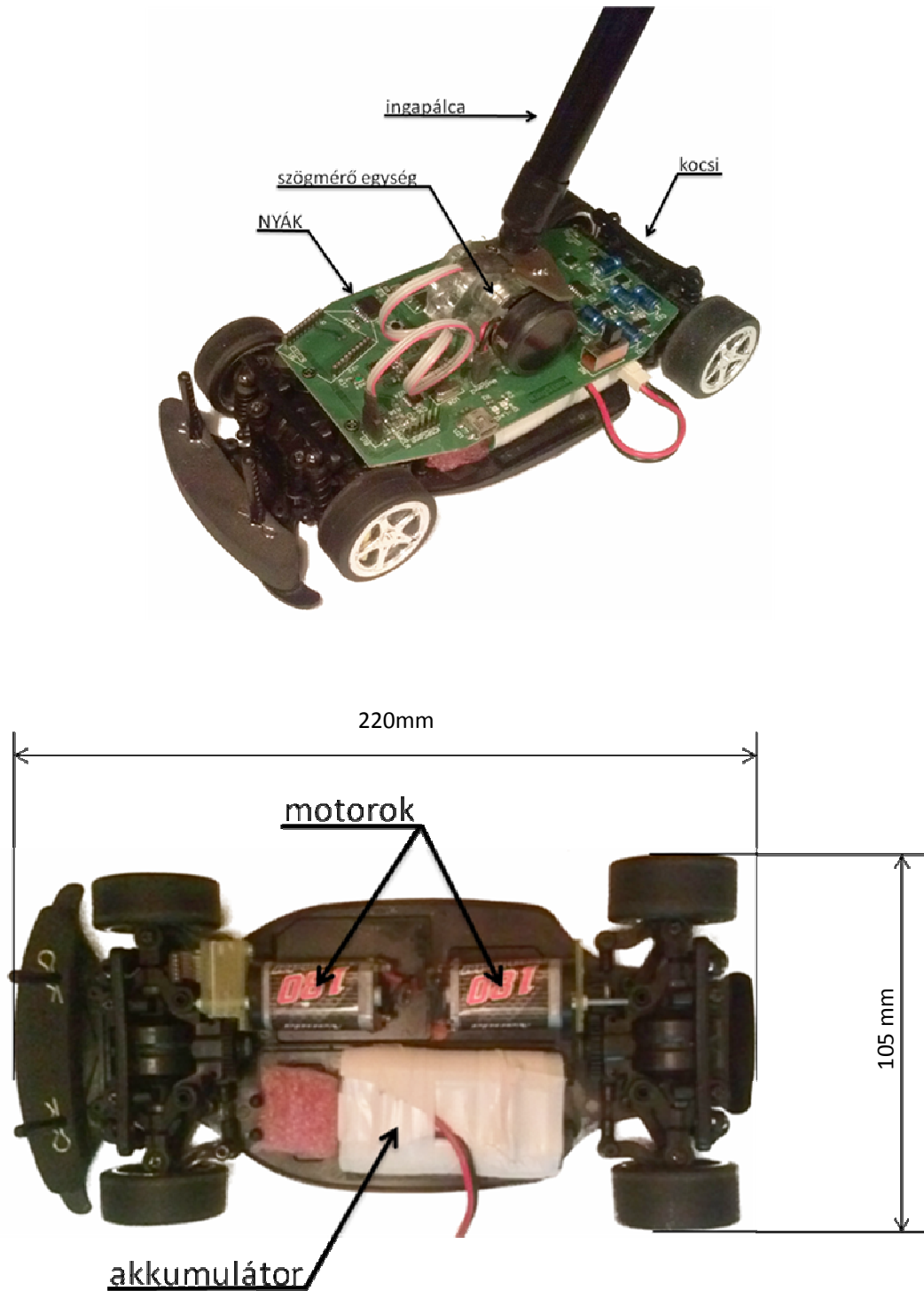
A dolgozat témája egy olyan inverz inga bemutatása, mely egy kis méretű, kis tömegű, mobil inverz inga fejlesztésével próbál megoldást találni erre a problémára. Az inga beágyazott rendszerként került megvalósításra, így az is kézenfekvő cél volt, hogy az platformot szolgáltasson a mikrokontrolleres alkalmazástechnikával ismerkedő hallgatók számára.



1. ábra
Különbözőképpen megvalósított inverz inga implementációk[9][10][11][12]

2. Az inverz inga általános bemutatása

Az elkészült eszköz főbb részegységeinek magyarázatával az 2-3. ábra szemlélteti.



Kocsi: A hordozhatóságra való törekvés miatt a kocsi kerek kialakítást kapott, mivel ez bármiféle speciális pályát szükségtelenné tesz, nagyban csökkentve ezzel az eszköz tömegét, és méretét. Az is szempont volt, hogy az inga lehetőleg minél olcsóbban megépíthető legyen, így a kerek konstrukció elképzelését kihasználva annak vázát egy kereskedelmi forgalomban kapható, NANDA NRX-18 típusú rádió távirányítású játékautó adja.

Akkumulátor: Az inga tápellátását a beépített akkumulátor biztosítja. Ezt a mobilitás növelésén kívül még a kerek kialakítás azon sajátossága is indokolja, hogy az inga működésekor a kocsi a talajon elmozdul, így egy külső tápellátás kábeleinek elvezetése nehézséget okozna.

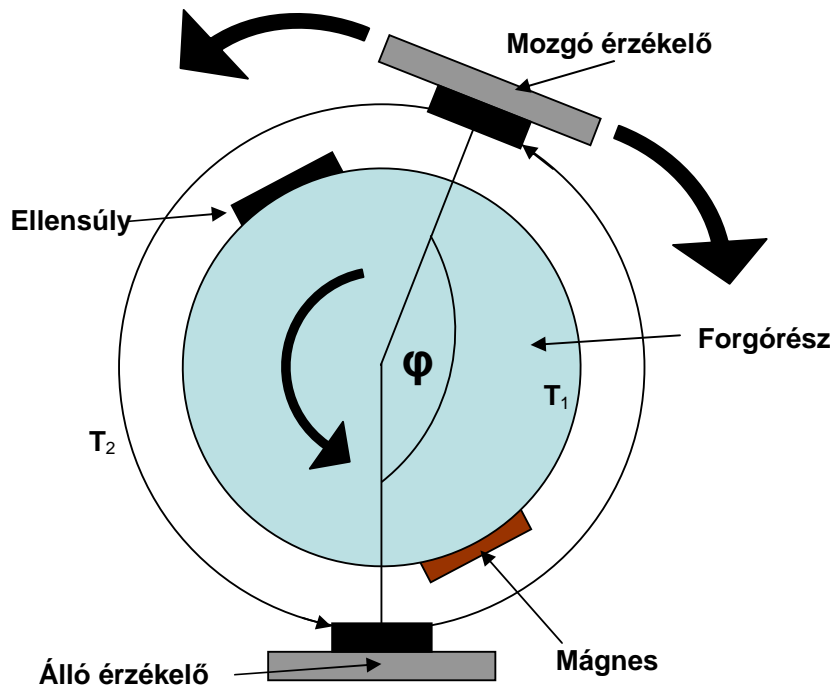
Ingapálca: A szögmérő egységhez rögzíthető műanyag pálca. Szállíthatósági szempontok miatt a pálca a szögmérő egység csuklójából kicsavarható.

Motorok: A kocsi mozgását végzik. A fogaskerék-áttételek miatt jelen lévő holtjáték csökkentésére az első, illetve a hátsó tengely hajtása 1-1 motorral függetlenül megoldott. A holtjáték csökkentésére azért van szükség, mert az ingapálca függőleges állapotban tartásakor a kocsi gyakran vált mozgásirányt, és a szabályozás szempontjából fontos, hogy az ilyenkor kiadott motorfeszültség késleltetés nélkül fejtsen ki hatását. A jelenlegi konstrukcióban mindig a megkívánt mozgásiránnyal ellentétes oldalon található motort használjuk, tehát az éppen nem hajtó motor is kapcsolódás helyzetben van, így a holtjáték teljesen kiküszöbölhető.

Nyáklap: A kompakt kialakításra való törekvés részeként a nyáklapnak mint központi elemnek az alkatrészek összefogásán, és az elektronikai kapcsolások megvalósításán túl az inga testének merevítésében is szerepe van. A szögmérő egység csavarokkal, a motorok, és egyéb eszközök pedig a megfelelő pontokon elhelyezett kábelcsatlakozókon keresztül csatlakoznak az áramköri laphoz. A használt elektronikai eszközöket, illetve azok kapcsolásait részletesebben a dolgozat következő pontja ismerteti.

Szögmérő egység: A szögmérés elve, hogy egy forgó részre elhelyezett jeladó, és a köré elhelyezett érzékelők segítségével, időmérés segítségével határozzuk meg az

érzékelők egymáshoz viszonyított szöghelyzetét. A megvalósult konstrukcióban a forgó részt egy egyenáramú motor tengelyén rögzített henger, a jeladó szerepét a hengerre rögzített mágnesek, míg az érzékelők szerepét HALL IC -k töltik be. A megoldás előnye az alkatrészek alacsony beszerzési költsége. A szögmérő egység felépítését a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra
A szögmérő egység felépítése

Legyen T_1 az az idő, amíg a forgórész alsó álló érzékelőtől a felső mozgó érzékelőig elér, és legyen T_2 , amíg a felsőtől az alsóig jut. Ekkor az egy kör alatti átlagos szögsebessége:

$$\omega = \frac{2\pi}{T_1 + T_2}$$

Feltételezhetjük, hogy egy fordulaton belül nem változik jelentősen a szögsebesség, ezért írható hogy:

$$\varphi = T_1 \cdot \omega$$

Behelyettesítve és rendezve:

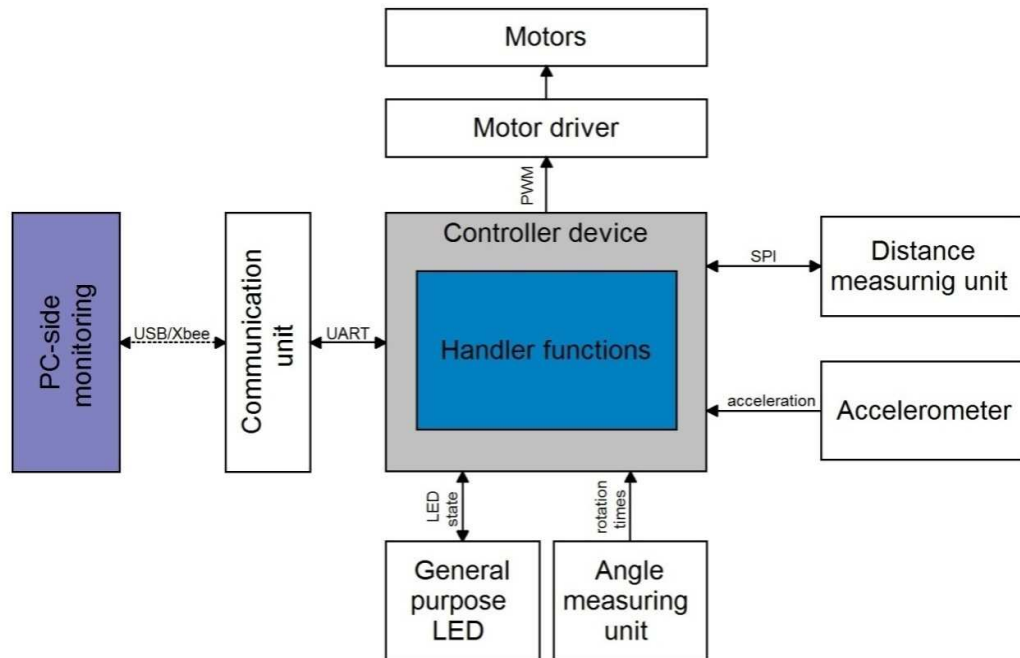
$$\varphi = \frac{T_1 \cdot 2\pi}{T_1 + T_2}$$

A motor körülbelül 9000 RPM -es sebességgel forog, tehát a szenzor 150 Hz-es frekvenciával képes szögadatot biztosítani.

A pontosság nagyban függ az időmérés pontosságától. Az időosztás 0.6 μ s, így 150 Hz -es mintavételezést feltételezve, figyelembe véve a különböző zavaró hatásokat körülbelül 0.03-0.04 fokos pontosság érhető el. Ez az inverz inga szabályozása szempontjából pontos szöghelyzet mérést tesz lehetővé, a mintavételezési frekvencia pedig kielégítően gyors a használt ingahossz mellett.

3. Az inverz inga mint platform bemutatása

Az inverz ingának, mint platformnak az a célja, hogy az oktatóknak, és a hallgatóknak is egy "kulcsrakész" felületet adjon az ingával való munkához. A platform egyszerűsített blokkdiagramja az 5. ábrán látható.



5. ábra
Az inga platform egyszerűsített blokkdiagramja

Az inga hardware szinten egy központi feldolgozóegységből, és az ahhoz kapcsolódó elektronikai eszközökből áll. Az eszközök az inga működéséhez szükséges

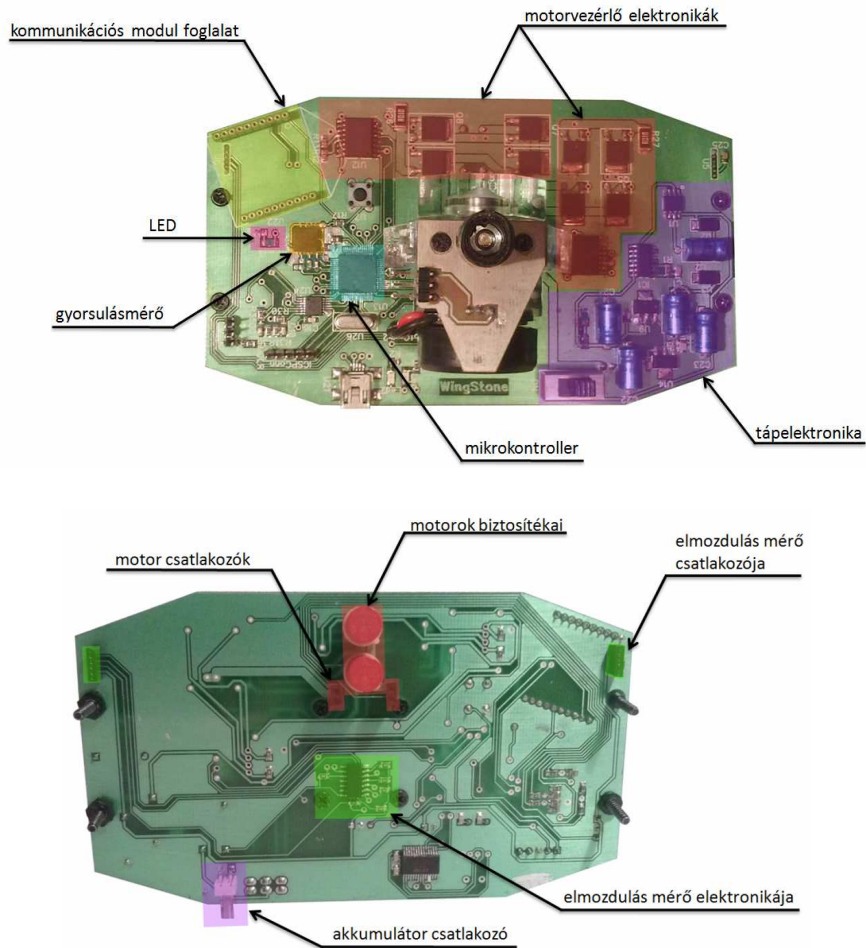
méréseket szolgáltatják, az inga mozgását végzik, illetve kommunikációt valósítanak meg. A feldolgozóegység feladata az eszközök alacsony szintű kezelése.

A platform szoftver szinten egy monitorozást lehetővé tévő PC-oldali programból, és az eszközök magasabb szintű kezelését biztosító függvénygyűjteményből tevődik össze.

A következőkben az inga hardware elemeinek kapcsolásait ismertetem, majd a 3.2 pontban a platform szoftver oldalára térek ki.

3.1. A hardware eszközök ismertetése

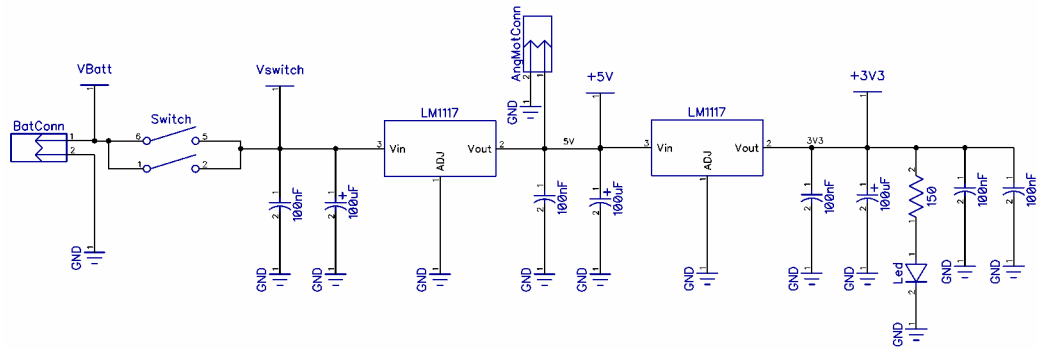
A fontosabb hardware-elemek fizikai elrendezését az áramkörtől az 6-7. ábra szemlélteti.



6-7. ábra

A hardware eszközök elhelyezkedése az áramkörtől, felül-, és alulnézetből.

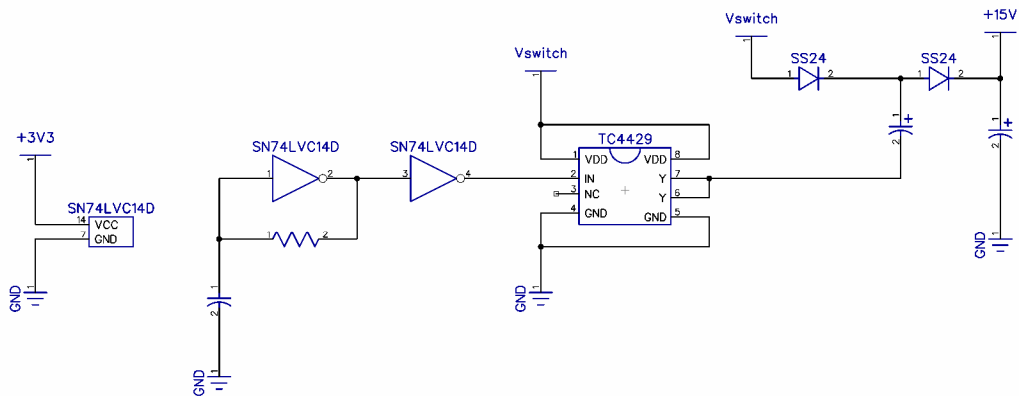
3.1.1. A tápelektronika



8. ábra

A 3.3V -os, illetve 5V -os feszültség szintet előállító tápelektronika

Az ingán található digitális elektronikai alkatrészek 5V -os, illetve 3.3V -os feszültségen üzemelnek, míg az akkumulátor kapocsfeszültsége teljes töltöttségnél körülbelül 8.2V. A megfelelő feszültség szinteket Texas Instruments LM1117 típusú feszültség szabályozó IC -kel állítjuk elő. Ez az alkatrész több kimeneti feszültség szinthez, illetve állítható kivitelben is elérhető, itt az 5, és 3.3V -hoz tartozó típusok kerültek beépítésre. A chipek előnye, hogy 20V -os bemeneti feszültségig (25 °C -os hőmérsékletet feltételezve) a kimeneti feszültség a megkívánttól maximum $\pm 1\%$ -kal tér el [13]. Ekkora eltérést az ingában használt minden alkatrész képes tolerálni [2]-[8]. A kondenzátorok a chipek bemenő feszültségét szűrik, a kimenő oldalon pedig a feszültség stabilizátorok stabil működéséhez szükségesek [13].



9. ábra

A feszültség kétszerező

A motorok H-hídjainak meghajtásához a charge-pump által kiadott körülbelül 15V -os feszültséget használunk, amelyet a Texas Instruments SN74LVC14D invertáló Schmitt-trigger IC -jével, és a Microchip TC4429 MOSFET-driverével megoldott charge-pump feszültségkészerezővel állítunk elő.

A 9. ábrán balról az első inverter oszcillációját a vele sorba kötött kondenzátor, és párhuzamosan kötött ellenállás értékével állítottuk be. A következő inverternél annak nagy bemeneti ellenállását használjuk ki, így biztosítva a megfelelő oszcilláló kapcsolás működését. A TC4429 jelű MOSFET-driver IC kifejezetten a nagyobb bemeneti kapacitású alkatrészek vezérlését hívatott szolgálni[16]. Annak kimenetétől a charge-pump áramkör látható.

3.1.2. A mikroprocesszor

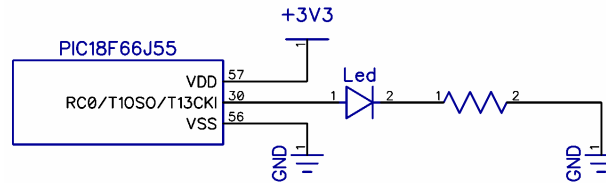
A központi feldolgozóegység szerepét egy Microchip PIC18F66J55 típusú 8 bites mikroprocesszor látja el. Ez a típus alacsony energiafogyasztással bír, és rendelkezik az inverz ingában használatos eszközök illesztéséhez szükséges modulokkal. [2] A mikrokontroller főbb műszaki paramétereit az 1.táblázat foglalja össze.

| Paraméter | Érték |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Programmemória típusa | Flash |
| Programmemória (KB) | 96 |
| CPU sebesség (MIPS) | 12 |
| RAM (byte) | 3,904 |
| Digitális kommunikációs perifériák | 2-UART, 2-A/E/USART, 2-SPI, 2-I2C2-MSSP(SPI/I2C) |
| Capture/Compare/PWM perifériák | 2 CCP, 3 ECCP |
| Számlálók | 2 x 8-bit, 3 x 16-bit |
| A/D konverterek | 8 csatorna, 10-bit |
| Komparátorok | 2 |
| USB (csatorna, sebesség, specifikáció) | 1, Full Speed, USB 2.0 |
| Működési hőmérséklettartomány (°C) | -40 - 85 |
| Tápfeszültség (V) | 2 - 3.6 |
| Lábak száma | 64 |
| Tokozás | TQFP |

1. táblázat [2]

3.1.3. Az általános célú LED

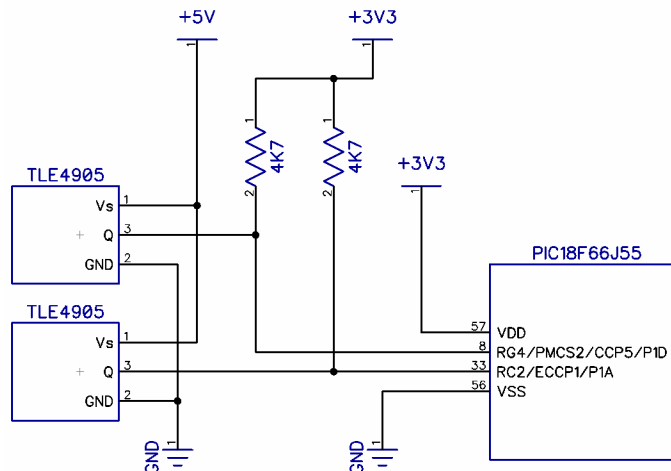
A LED célja lehet, hogy valamely eseményről tájékoztassa az inga használóját.



10. ábra
A LED kapcsolása a mikrokontrollerhez

A LED egy 200Ω értékű előtét ellenállással a mikrokontroller RC0 jelű lábára van kötve.

3.1.4. A szögmérő egység

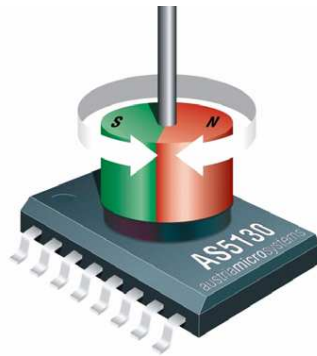


11. ábra
A szögmérő egység Hall-szenzorainak kapcsolása a mikrokontrollerhez.

A TLE 4905 típusú HALL-szenzorok open collector kimenetei [3] egy-egy 4.7 kΩ -os felhúzó ellenállással a mikrokontroller RG4, illetve RC2 (CCP5, illetve ECCP1 modulokhoz tartozó) lábaihoz csatlakoznak.

A CCP (Compare/Capture/PWM) modulok Capture módja lehetővé teszi, hogy a megfelelő lábon mérhető felfutó jel hatására egy a mikrokontrollerben futó számláló aktuális értéke automatikusan elmentődjön. Így pontosabb időadatot kapunk, mint külső interrupt, vagy mintavételező programciklus használatával, mivel a program futása nem okoz késleltetést.

Az inga elmozdulásával arányos adatot a motorok tengelyein mérő AMS 5130 típusú szög helyzet-jeladó IC -k szolgáltatnak. Ezek tokozásukban system-on-chip megoldásként tartalmaznak Hall-szenzor-mátrixot, analóg-digitális konvertert, erősítő áramkört, PWM dekódert, és SSI (Serial Synchronous Interface) interfészt, ezért a chip alkalmazása igen kézenfekvő. Az IC -t egy egyszerű mágnessel megfelelően elrendezve (14. ábra) SSI interfészen, vagy impulzusszéleség-modulált (PWM) jel átlagos feszültségértékének formájában olvasható a szögadat.



14. ábra
A szögelfordulás mérő IC, és a mágnes (a tengely) elrendezése[4].

A használt típus 8 bites felbontásra képes, ami $1,42^\circ$ -os pontosságot jelent. A típus sajátossága még, hogy egy belső átfordulás-számlálót tartalmaz, melynek használatával tetszőleges mintavételezési sebességnél is megbízható elmozdulás értéket kaphatunk. Ezen kívül lehetőség van még az aktuális szögállást referenciaszögnek beállítani. Ezen funkció használatával nincs szükség az olvasott szögadat iniciális értékkel való korrigálására [5]. Az említett funkciók SSI interfészen küldött parancsokkal használhatóak, ezért a megvalósult kapcsolásban a chip SSI interfészét használjuk a szögadat átvitelére.

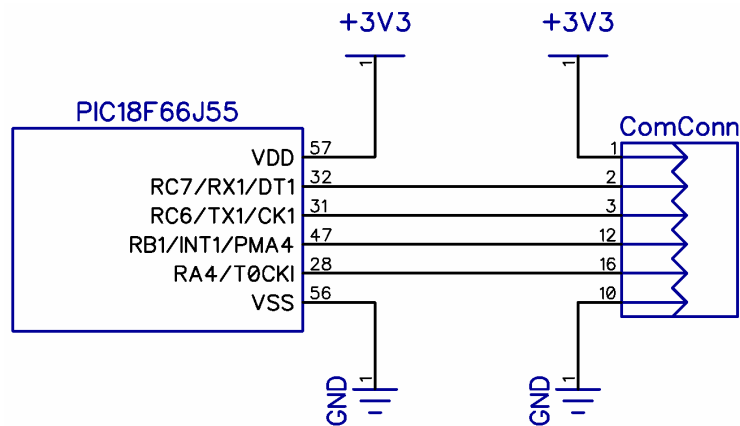
A szögelfordulás mérő IC a mikroprocesszor 3.3V -os tápfeszültségétől eltérő, 5V -os feszültségen üzemel. A feszültségkülönbség áthidalását az 13. ábrán látható módon, egy Texas Instruments 74LVC07 típusú open-drain driverrel oldottuk meg. Ez az alkatrész 1.6-5V -os tápfeszültség, és maximum 5.5V -os be-, és kimeneti feszültségek mellett képes üzemelni. A be-, és kimeneti jelszintek megváltozása közti késés legfeljebb 3.6 ns lehet[6], mely az SSI interfész szempontjából elhanyagolható.

Az open-drain driver bemenő lábait célszerűen a mikrokontroller MSSP2 (Master Synchronous Serial Port) moduljához tartozó RD4-RD7 (SDO2, SDI2, SCK2, SS2) lábaira kötöttük. Mivel a modulhoz csak egy SS (Slave Select) láb tartozik, ezért a két szögelfordulás mérő közül az egyik SS lábához tartozó open-drain bemenetet az általános I/O port -ként használt RD3 lábhoz kötöttük.

A 4 db 4.7 k Ω -os, és az egy darab 560 Ω -os ellenállás az open-drain driver IC kimeneteit húzza fel.

Az 560 Ω -os ellenállásra az open-drain driver negyedik számú kimenete (4Y), és ötödik számú bemenete (5A) között a mikrokontroller SPI, és az IC SSI interfésze közti konverzió miatt van szükség. A szögelfordulás mérő IC SSI interfésze ugyan azon a lábon fogadja az adatokat, mint amelyen (egy parancs fogadása után) kishifteli azokat. "Írásakor" a kontroller SDO2 (Serial Data Output) lábának logikai jelszintje az open-drain bufferen, és az említett ellenálláson keresztül a szögelfordulás mérő DIO (Digital Input Output) lábára kerül. (Ilyenkor a kontroller parancs byte -okat, a szögelfordulás mérő pedig 0 byte -okat shiftel.) "Olvasáskor" a slave eszköz DIO lábának logikai jelszintje az open-drain bufferen keresztül a PIC SDI2 (Serial Data Input) lábára kerül, mivel az ellenállás megakadályozza, hogy a feszültségszint az open-drain driver (a mikrokontroller SDO2 lábához tartozó) nyitott kimenetén a földpotenciálra kerüljön. ("Olvasáskor" a szögelfordulás mérő adat byte -okat, a PIC pedig 0 byte -okat shiftel.)

3.1.7. A kommunikációs modul

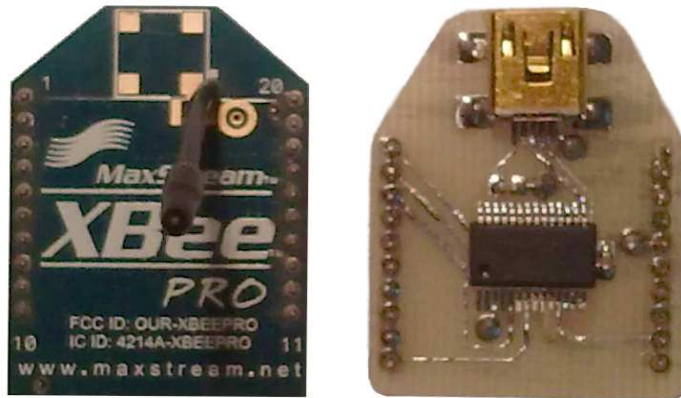


15. ábra
A kommunikációs modul (foglatának) kapcsolása a mikrokontrollerhez

A kommunikációs modul célja, hogy adatokat szolgáltatson a PC-oldali szoftver részére.

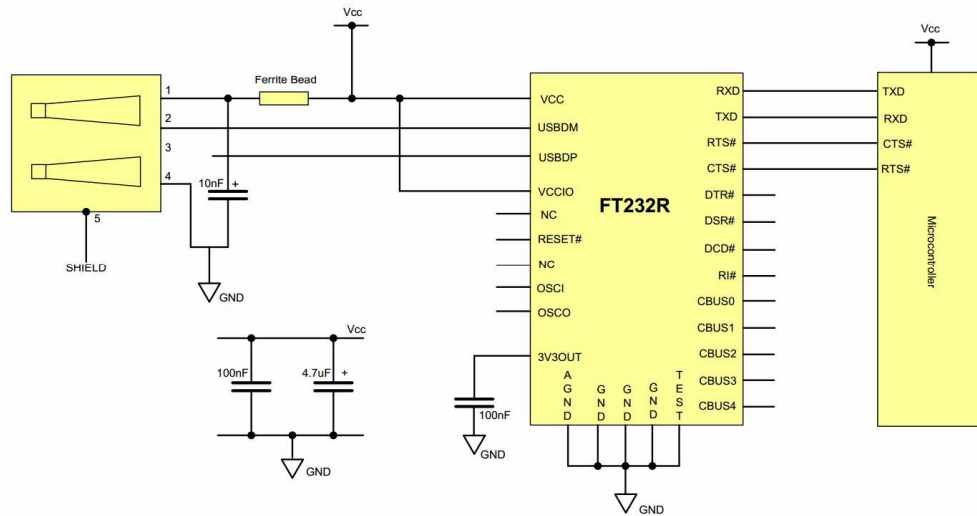
A mikroprocesszor RC7 (RX1), RC6 (TX1), RB1, és RA4 lábai a kontroller EUSART1 (Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) moduljához tartoznak. Az EUSART modul soros adatátvitelt valósít meg, és gondoskodik az átviteli sebesség (baud rate) beállításáról is. Az RX1 porton az adatok fogadása, a TX1 porton pedig az adatok küldése történik. Az RB1, és RA4 lábak rendre az RTS/CTS handshake CTS (Clear to Send), és RTS(Request to Send) szignáljait továbbítják.

A portok egy foglalat megfelelő lábaihoz csatlakoznak, melybe rádiófrekvenciás, vagy USB -s kommunikációs egység helyezhető. Ezeket az *16. ábra* szemlélteti.



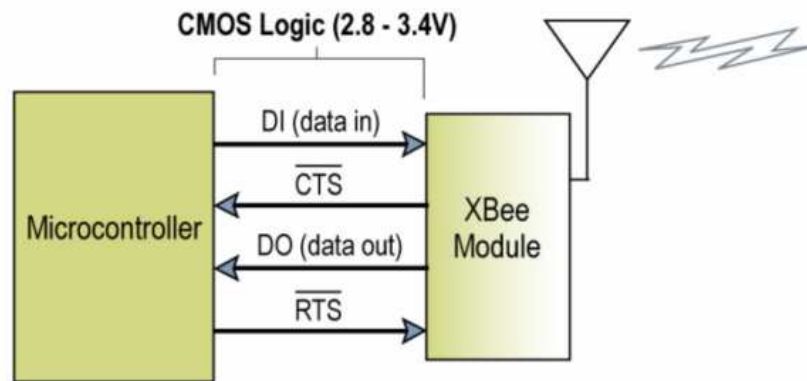
16. ábra
RF (balra), és USB (jobbra) kommunikációs egység

Az USB -s egység lényegében egy mini-USB csatlakozóból, és egy FTDI FT232RL típusú IC -ből áll. Ez a chip egy egyszerűen alkalmazható UART - USB interfészt valósít meg. A tokozáson belül megtalálhatóak az USB végellenállások, az órajel generátor, és a chip lekezeli a teljes USB protokollt. Az eszköz PC -s illesztését megkönnyíti, hogy a gyártó kész drivereket kínál termékéhez. Az IC a kontrollerhez az *17.ábra* szerinti módon csatlakozik.



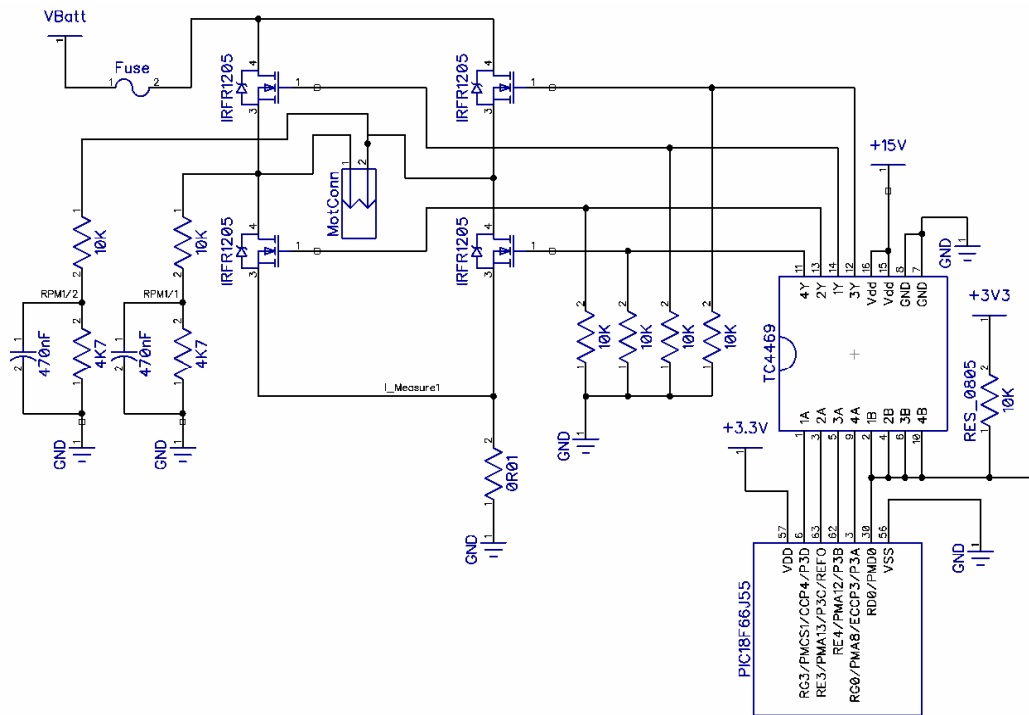
17. ábra
Az UART-USB interfész IC kapcsolása egy mikrokontrollerhez [7].

A rádiófrekvenciás kommunikációhoz a Digi cég kész egységként megvásárolható "XBee" eszközei használhatóak. Ezek teljes egészében kezelik az egymás közötti rádiófrekvenciás adattovábbítást, és velük ugyancsak UART interfészen lehet kommunikálni. Egy XBee egység és egy mikrokontroller kapcsolásának egyszerűsített blokkdiagramját az 18. ábra szemlélteti.



18. ábra
Egy XBee-egység, és egy mikrokontroller kapcsolódásának egyszerűsített diagramja [8].

3.1.8. A motorvezérlő elektronika



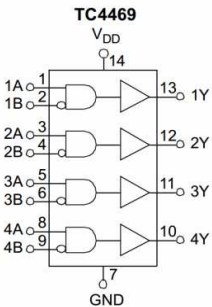
19. ábra

A (szimmetrikus) motorvezérlő elektronika egyik motorhoz tartozó fele

A processzor RG3, RE3, RE4, és RG0 lábai a kontroller CCP4, az RE7, RE2, RE1, RE0 lábak pedig a CCP2 (Capture/Compare/PWM) moduljához tartoznak. Ezeket a modulokat itt PWM (Pulse Width Modulation, impulzusszélesség-moduláció) módban használjuk. Ez a kitöltési tényező beállítása után a kívánt modulált jelet adja, illetve H-Bridge driverként is funkcionál. Megadható, hogy Half-Bridge, Full-Bridge Forward, Full-bridge Reverse, vagy egyszerű PWM módban működjön -e. Az egy modulhoz tartozó négy láb ezen beállítás szerint a megfelelő lábra 0, 1, vagy modulált jelet tesz. Az inverz inga esetében a modult Full-Bridge driver minőségében használjuk.

A motorokat a Microchip TC 4469 buffer IC -jén keresztül vezérelt H-hidak irányítják. Az IC -re azért van szükség, mert a H-híd MOSFET -jeinek Gate-Source kapacitása jelentős, így a PWM-szignál egy felfutó élének megjelenésekor a MOSFET -ekben lejátszódó tranzien্স jelenségek késleltetést okoznak a motorok vezérlésében. A késleltetést nagyobb feszültség használatával csökkenteni lehet. Az alkatrész fő feladata a mikrokontroller 3.5V -os feszültsége, és a MOSFET -eket vezérlő körülbelül 15V -os

feszültség közti különbség áthidalása.. Az IC által megvalósított logikai függvényt a 20.ábra szemlélteti.



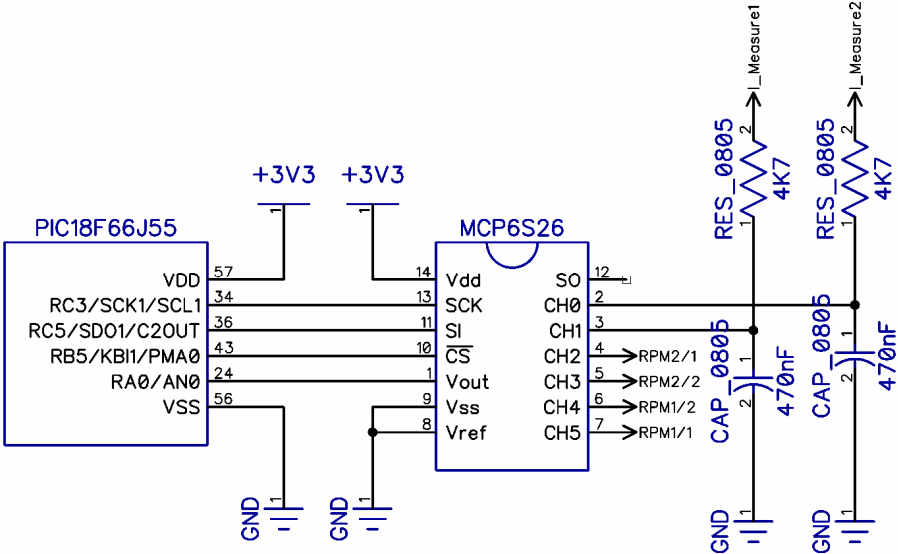
20. ábra

A TC4469 IC által megvalósított logikai függvény[14]

A bemeneti párok negált lábait egy 10 KΩ -os ellenállás húzza fel, melyek a mikroprocesszor RD0 lábával húzhatóak földpotenciálra. Így az RD0 port értékének változtatásával megengedhető, vagy kizárható az inverz inga motorjainak mozgatása.

Az IC kimeneti lábain a bemeneti lábak logikai szintjétől függően 0, vagy 15V -os feszültség mérhető. Az IC -k kimenetei egy-egy 10 KΩ értékű ellenállással egy-egy MOSFET Gate lábához csatlakoznak. Az ellenállások célja, hogy az inga bekapcsolásának pillanatában meghatározzák a MOSFET –ek Gate lábainak kezdeti értékét. A motorokat egy-egy 3.15A/250V értékű biztosíték védi.

A 19. ábrán jelölt "RPMx/y", illetve "I_measurex" pontok segítségével a motorfeszültségeket, és a Back EMF feszültségek értékeit is tudjuk mérni.



21. ábra

Back EMF, és motorfeszültség mérése

A mérendő feszültségértékek az MCP 6S26 típusú erősítő IC bemeneti csatornáin jelennek meg. Ennek az IC -nek az erősítési tényezője programozható módon 1-32 V/V között állítható. Az IC a mikrokontroller MSSP1 moduljához tartozó SPI interfészen programozható, az erősítés értékének megadása, és a csatorna kiválasztása a megfelelő parancs írásával történik. Ezek beállítása után a chip Vout lábán az erősített analóg jel mérhető, melyet a mikroprocesszor egy A/D konvertere dolgoz fel. [15]

3.2. A szoftverek ismertetése

Az inga-szoftver elsősorban a mikrokontrolleren futó programot, és a kontroller programozását segítő függvénygyűjteményt, másodsorban az inga monitorozását végző PC-oldali szoftvert jelenti.

3.2.1. A mikrokontroller szoftvere

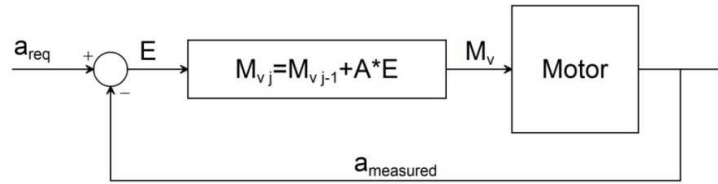
A szoftver célja, hogy demonstrálja az inverz inga platform működőképességét. A mikroprocesszor programozása C nyelven, Microchip MPLAB XC8 fordító használatával történt. Először az eszközök kezelését megvalósító függvények készültek el, majd ezek segítségével egy demonstrációs program került megírásra. A megvalósított függvényeket felsorolás szinten az *1.melléklet* ismerteti.

3.2.1.1. A demonstrációs program szabályzó köre

Az inverz ingát a jól ismert állapotvisszacsatolás módszerével stabilizálhatjuk [1]. Azonban a motorokra alkalmazunk egy belső visszacsatolást ami az inga gyorsulása és a motor kapocsfeszültsége között hat, ennek oka, hogy a motor indulásakor jelenlévő nemlinearitások hatása mérsékelhető. Ezt a mérséklést lehetővé teszi a motor gyors dinamikája az inga dinamikájához képest. Fontos megjegyezni, hogy a szabályzás és annak struktúrája a működőképességet hivatott demonstrálni és –bár nagyon jelentős-nem képzí a dolgozat törzsét. A szerző nem kívánja megkötni a szabályzás struktúráját, azt szabadon hagyva a további felhasználók számára, tehát a következőkben közölt szabályzó a számtalan lehetőség közül, amit a platform kínál csak az egyik.

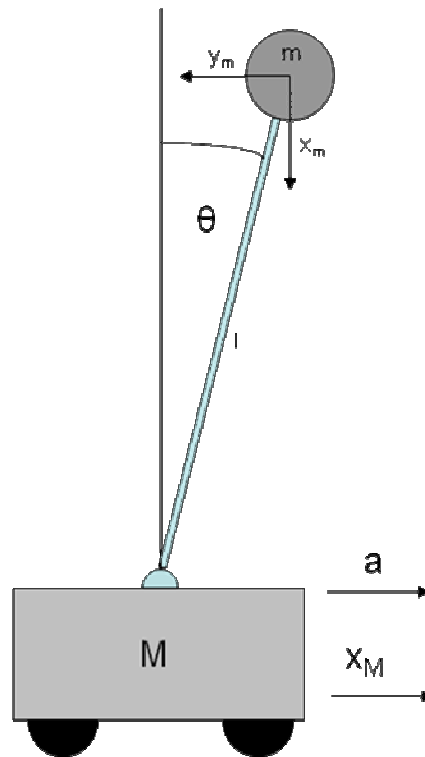
Az inverz inga belső hurkának szabályozásának lényege, hogy a kocsí mozgás irányú gyorsulását mérjük, és ha az nem egyezik az inga szabályozás szempontjából megfelelő gyorsulásával, akkor a motor feszültségét egészen addig változtatjuk, amíg a motor által leadott nyomaték biztosítja a megkívánt gyorsulást [1].

A megvalósult szabályzást a 22. ábra mutatja. A szabályzás integráló jellege biztosítja a jelkövetést. A hibát szorzó "A" konstans, és a mért adatokat szorzó "k" konstansok értékének meghatározása kísérleti úton történt.



22. ábra [1]
A megvalósított szabályzó kör

3.2.1.2. Az inga mozgásegyenletei



23. ábra
Az inverz inga modellje

Az ingapálca egy homogén, állandó keresztmetszetű test, ezért tehetetlenségi nyomatékának közelítésével modellezhető a tömegközéppontjába helyezett tömegponttal. A kocsit "a" gyorsulás gyorsítja, míg a rúdban "F" és "-F" erők ébrednek.

A kocsi adott gyorsulással indul meg, ezért gyorsulása a rendszer "u" bemenetével egyenlő:

$$\ddot{x}_M = u$$

Az M tömegű kocsi " x_M " irányú, valamint az "m" tömegű rúd " x_m " és " y_m " irányú gyorsulása a következőképp írható:

$$m\ddot{x}_m = F \cdot \sin(\Theta)$$

$$m\ddot{y}_m = F \cos(\Theta) - m \cdot g$$

Kiküszöbölve F-et és rendezve:

$$m\ddot{x}_m \cos(\Theta) - m\ddot{y}_m \sin(\Theta) = m \cdot g \cdot \sin(\Theta)$$

Figyelembe vesszük, hogy:

$$x_m = x_M + l \cdot \sin(\Theta)$$

$$y_m = l \cos(\Theta)$$

Képezzük az összefüggések magasabb deriváltjait, hogy be tudjuk helyettesíteni a mozgásegyenletekbe:

$$\dot{x}_m = \dot{x}_M + l \cdot \dot{\Theta} \cdot \cos(\Theta)$$

$$\dot{y}_m = -l \cdot \dot{\Theta} \cdot \sin(\Theta)$$

$$\ddot{x}_m = \ddot{x}_M + l \cdot \dot{\Theta}^2 \cdot \sin(\Theta) + l \cdot \ddot{\Theta} \cdot \cos(\Theta)$$

$$\ddot{y}_m = -l \cdot \dot{\Theta}^2 \cdot \cos(\Theta) - l \cdot \ddot{\Theta} \cdot \sin(\Theta)$$

A kapott eredményeket az eredeti egyenletbe visszahelyettesítve és rendezve, a mozgás egyenletek a következő alakban írhatóak:

$$\ddot{x}_M = u$$

$$m\ddot{x}_M \cos(\Theta) - m \cdot l \cdot \ddot{\Theta} = m \cdot g \cdot \sin(\Theta)$$

A célunk az hogy egyszerűbben számolható modellt alkalmazzunk ezért érdemes az egyenleteket linearizálni. Megtehetjük a következő egyszerűsítő feltételeket:

Mivel θ kicsi ezért

$$\cos(\Theta) \approx 1 \text{ és}$$

$$\sin(\Theta) \approx \Theta$$

Továbbá m-et kiküszöbölve:

$$\ddot{x}_M = u$$

$$\ddot{x}_M - l \cdot \ddot{\Theta} = g \cdot \Theta$$

Kifejezve a szöggyorsulást, a mozgásegyenletek:

$$\ddot{x}_M = u$$

$$\ddot{\Theta} = -\frac{\ddot{x}_M}{l} + \frac{g}{l} \cdot \Theta$$

3.2.1.3. Állapotteres leírás

Legyenek az állapotváltozók :

$$x_1 = x_M$$

$$x_2 = \dot{x}_M$$

$$x_3 = \Theta$$

$$x_4 = \dot{\Theta}$$

A kimeneti egyenletek ilyen módon egyszerűen adódnak, mert a mért érték az inga szöghelyzete:

$$y = x_3$$

A mozgásegyenletekből és az állapotváltozók definíciójából az állapotmodell a következő:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{g}{l} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -\frac{1}{l} \end{bmatrix} \cdot u$$

$$y = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

Az együtthatómátrixok:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{g}{l} & 0 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -\frac{1}{l} \end{bmatrix} \quad c^T = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$

Az inga fizikai adatai:

$$l = 0.5m$$

$$g = 9.81 \frac{m}{\text{sec}^2}$$

Behelyettesítve:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 19,62 & 0 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -2 \end{bmatrix} \quad c^T = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$

Legyen:

$$k^T = [-26.0869 \quad -108.697 \quad -1564.55 \quad -208.607]$$

Ekkor a pólusok:

$$\begin{aligned} & -298.20 \\ & -9.59 \\ & -0.36 + 0.0022i \\ & -0.36 - 0.0022i \end{aligned}$$

Az ingát ez a visszacsatolás stabilizálja.

3.2.1.4 A demonstrációs program felépítése

A szabályzó kör szoftveres megvalósításánál számolni kellett a mikrokontrolleres alkalmazás azon sajátosságával, hogy a mikrokontroller csak limitált erőforrásokkal rendelkezik. Törekedni kellett rá, hogy a szabályzás minél kevesebb programmegszakítással kerüljön implementálásra, és hogy a megszakításokba lehetőleg rövid programrészek kerüljenek.

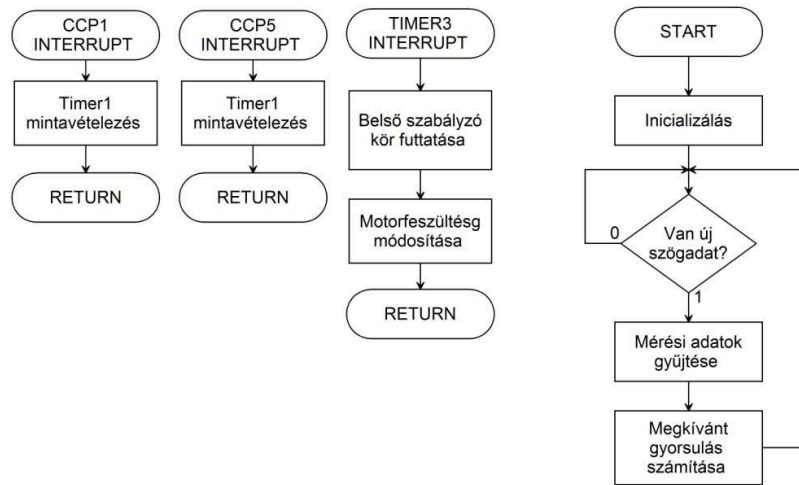
A belső kontroll körnek a megfelelően gyors iteráció eléréséhez elegendően kicsi, rendszeres időközönként kell lefutnia, míg a külső szabályzó kör futása a legritkábban előálló mért adat frekvenciájához van kötve.

Ezek alapján a belső szabályzókörhöz tartozó programrész egy 750Hz frekvenciával beálló timer interruptba került, a külső körhöz tartozó függvény pedig minden új szögadat előállása után hívódik meg.

A külső kör esetében további megfontolásra van szükség. A mérések pontosságát nagyban befolyásolja az időmérés pontossága, ezért kívánatos, hogy az időadatok rögzítése közvetlenül a külső szabályzó körhöz tartozó függvény meghívásakor történjen. Ennek egyik módja, hogy azt a mikrokontroller CCPx interruptjaiban (melyeket a szögmérő egység Hall szenzorainak felfutó éle generál) hívjuk meg, mivel

ez a modul Capture módban automatikusan elmenti egy timer állását. Ezen megoldás alkalmazása a fentebb említett szűkös erőforrások miatt nem célszerű. Ehelyett a CCPx megszakításokban mentett időértékeket később csak a szögadat számításához használjuk fel, és az interruptokban csupán esemény-flageket állítunk be, ezzel a megszakítást néhány utasításra korlátozva. A flagek beállítát a fő programciklusban ellenőrizzük, és a sebesség számításához használt időértékeket csak itt, közvetlenül a külső kör meghívása előtt mentjük el.

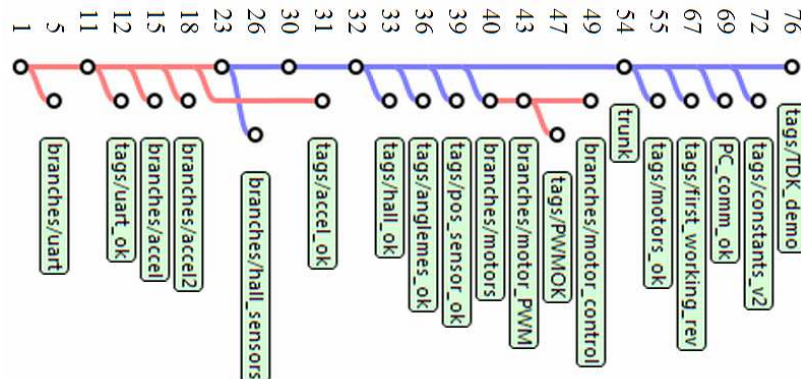
A program folyamatábráját a 24.ábra szemlélteti.



24. ábra

A demonstrációs program folyamatábrája

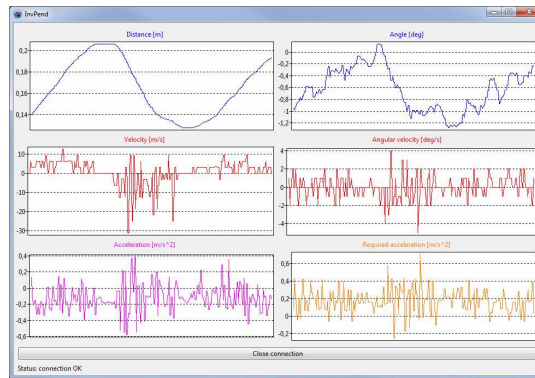
A program megírásának megkönnyítésére verziókövető programot használtam (Apache Subversion). A verzió követés revízió gráfja az alábbi ábrán látható. Az ilyen eszköz használata nagyban megkönnyíti az egyes szenzorok kiszolgáló rutinjainak tesztelését anélkül hogy a fő programstruktúrán módosítani kellene.



25. ábra

A demonstrációs program fejlesztésének revízió-gráfja

3.2.2. A PC-oldali szoftver



26. ábra
A PC-oldali szoftver felhasználói felülete

A PC-oldali szoftver rendeltetése, hogy az inga működését monitorozza. Segítségével bemutatható az inga mért adatai, és a megkívánt állapot közötti kölcsönhatás. Fejlesztése Object Pascal nyelven, Lazarus fejlesztő környezetben történt. A környezet választásának oka, hogy az egy FreePascal fordítóval integrált, keresztplatformos fejlesztői környezet, így a szoftver minimális átalakítással átvihető egyéb (pl. Mac OS X, GNU/Linux) operációs rendszerekre.

4. Összefoglalás

Dolgozatomban bemutattam az inverz inga fejlesztésének főbb állomásait. Részletesebben leírtam az inga részegységeinek paramétereit. A dolgozathoz kapcsolódóan implementáltam egy lehetséges alkalmazást a megvalósult platformon, melyre a dolgozatban is kitértem. Ezzel reményeim szerint megmutattam, hogy az inverz inga mint platform működőképes, és megfelel mind a tantermi demonstráció, mind pedig az önálló hallgatói munka követelményeinek.

5. Irodalomjegyzék

- [1]: Bokor József et al., IRÁNYÍTÁSTECHNIKA GYAKORLATOK, TypoTex Kiadó (2012)
- [2]: Microchip Technology Inc., PIC18F87J50 FAMILY DATA SHEET (2009)
- [3]: Infineon technologies AG, UNI- AND BIPOLAR HALL IC SWITCHES FOR MAGNETIC FIELD APPLICATIONS Datasheet (2000)
- [4]: Freescale Semiconductor Inc., $\pm 1.5\text{G}$ - 6G THREE AXIS LOW-G MICROMACHINED ACCELEROMETER Technical Data (2008)
- [5]: ams AG, AS5130 8-BIT PROGRAMMABLE MAGNETIC ROTARY ENCODER WITH MOTION DETECTION & MULTITURN DATASHEET (2011)
- [6]: Texas Instruments Inc., SN74LVC07A-EP, HEX BUFFER/DRIVER WITH OPEN-DRAIN OUTPUTS Datasheet (2008)
- [7]: Future Technology Devices International Ltd., FT_000053, FT232R USB UART IC Datasheet (2010)
- [8]: Digi International Inc., 90000982_M, XBEE®/XBEE-PRO® RF MODULES Product Manual (2013)
- [9]: Quanser Inc., LINEAR CONTROL CHALLENGE IP01 AND IP02 Product Information Sheet (2008)
- [10]: Enfield Technologies LLC., CONTROL OF INVERTED PENDULUM WITH SERVO PNEUMATICS Demonstration video (2009), <http://www.youtube.com/user/EnfieldTech/videos>
- [11]: Eitan Sherer & Kenji Hashimoto, Cornell University, ECE476, INVERTED PENDULUM BALANCER Final Project (2009)
- [12]: Eric Sorensen, PID CONTROL OF AN INVERTED PENDULUM (2011), <http://www.esorensen.com/ip/>
- [13]: Texas Instruments Inc., SNOS412M, LM1117-N/LM1117I 800MA LOW-DROPOUT LINEAR REGULATOR Datasheet (2013)
- [14]: Microchip Technology Inc., DS21425B, TC4467/TC4468/TC4469 LOGIC-INPUT CMOS QUAD DRIVERS Datasheet (2002)
- [15]: Microchip Technology Inc., DS21117B, MCP6S21/2/6/8 SINGLE-ENDED, RAIL-TO-RAIL I/O, LOW GAIN PGA (2003)
- [16]: Microchip Technology Inc., TC4420/9-6, TC4429 6A HIGH-SPEED MOSFET DRIVERS (2001)

6. Mellékletek

1. Melléklet

Az inverz inga platform megvalósított függvényei

```
//init.h
void initLED();
void initPLL();
void initUART();
void initTimer1();
void initTimer2();
void initTimer3();
void initCCP();
void initHallSensors();
void initGlobalInterrupts();
void initPWM();
void initSPI();
void initADC();
void init();

//motors.h
void setShortForwardPWMDutyCycle(unsigned short dutyCycle);
void setShortBackwardPWMDutyCycle(unsigned short dutyCycle);
void stopFrontMotor();
void stopBackMotor();
void setCharForwardPWMDutyCycle(unsigned char dutyCycle);
void setCharBackwardPWMDutyCycle(unsigned char dutyCycle);
void driveMotor(short motorLevel);
void driveMotorLong(long motorLevel);

//sensors.h
unsigned short getAngleClock1();
unsigned short getAngleClock2();
signed long getRearSPIData();
signed long getFrontSPIData();
void getZeroDistance();
void storeSPIReferenceAngle();
signed long getAbsoluteDistance();
signed long getAccel();
void switchLEDState();

//usb_comm.h
unsigned char readChar();
void writeChar(unsigned char data);
void writeShort(unsigned short data);
void writeSignal();
void returnClockCounts();
void returnLEDState();
void returnFrontAngle();
void returnRearAngle();
void returnZeroAccel(unsigned short zeroaccel);
void returnAccel(unsigned short accel);
```

A hallgató neve: **Molnár Gyula**
BSc. 3. évfolyam
mogyula@gmail.com

A dolgozat címe: **Demonstrációs célú mobil inverz inga fejlesztése**

Konzulens: Gőzse István
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék
gozse@sztaki.hu

A dolgozat témája egy olyan inverz inga bemutatása, melynek tervezési szempontjai a tantermi demonstráció céljának alárendeltek. Az elkészült inga rendeltetése egyrészt, hogy demonstrációs eszközként szolgáljon az irányítástechnikát tanító oktatóknak, másrészt pedig, hogy segítségével a hallgatók gyakorlatias módon ismerkedhessenek meg az irányítástechnikai módszerek alkalmazásával. Célja még, hogy a beágyazott rendszerekkel, mikrokontroller alkalmazásokkal ismerkedő hallgatók számára egyfajta próbapanelként is használható legyen.

Dolgozatomban bemutatom az inverz inga általános, illetve részletesebb, elektronikai felépítését, továbbá kitérek az ingához, mint platformhoz kapcsolódó szoftverekre is: egy elektronikai eszközök magasabb szintű kezelését megvalósító függvénygyűjteményre, illetve egy, az eszköz működését monitorozó PC-oldali programra.

A dolgozathoz kapcsolódóan a megvalósult inverz inga platformon implementálásra került egy lehetséges alkalmazás, mely a platform működőképességét hivatott demonstrálni, és amelyet a dolgozatban szintén ismertetek.

Name of student: **Gyula Molnár**
BSc. 3rd year
mogyula@gmail.com

Title: **Development of a mobile inverted pendulum**

Consultant: István Gőzse
Budapest University of Technology and Economics
Department of Control for Transportation and Vehicle Systems
gozse@sztaki.hu

The topic of this paper is to present the development process of an inverted pendulum, of which main goal is to provide a device for classroom demonstration purposes. The finished pendulum's purpose, on one hand, is to serve as a demonstration device for control teachers, and on the other hand, to provide a device for students to gain knowledge about control methods in a practical way. Providing a demoboard-like platform for students learning about embedded systems and microcontroller applications is also an intention.

In my paper I present the general, and the more detailed, electronic structure of the inverted pendulum. I discuss the software platform related to it, consisting of a collection of higher level device handler functions, and a monitoring PC-side program.

A possible application has been implemented on the inverted pendulum platform, to demonstrate it's usability. This application is also a subject of my paper.