

Óbudai Egyetem

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

Műszertechnikai és Automatizálási Intézet



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

DELTA ROBOT FEJLESZTÉSE

Szerző:

Kuczman Attila

villamosmérnök BSc. szak, IV. évf.

Konzulens:

Sándor Tamás

adjunktus

Budapest, 2014.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	2
1 Bevezetés.....	4
2 Célkitűzéseim	5
3 Delta robot általános bemutatása.....	6
Az ipari robot:.....	6
3.1 Bevezetés a párhuzamos robotok témájába	6
3.2 Történelmi áttekintés.....	6
Párhuzamos robotok fejlődése	6
3.3 A delta robot története	8
A szabadság	8
Gyártók.....	9
3.4 A delta robot működésének bemutatása.....	10
3.5 Főbb részek ismertetése:	10
3.5.1 Az alap vagy bázis	10
3.5.2 Az effektor	11
3.5.3 A karok.....	11
3.5.4 Előnyök és hátrányok, főképp a delta robotot alapul véve.....	11
4 A kinematika bemutatása.....	13
4.1 A kinematikai leírás alapját képező munkák és szerzőik	13
4.2 Az inverz kinematika problémája	14
4.3 Az inverz kinematika ismertetése	15
4.4 Az inverz kinematika matematikai leírása.....	17
4.5 A direkt kinematika problémája	19
Az E0 koordinátáinak kiszámítása a következőképpen történik:	19
5 A fejlesztés bemutatása	24
5.1 Mechanikai tervezés, fejlesztés.....	24
5.2 Az elektronika és a villamos részek bemutatása	27
5.2.1 A TM4C123G mikrovezérlő (MCU)	27
5.2.2 Servó motorok	29
5.2.3 RC servók.....	29
5.2.4 Az motor elfordulásának mérése	29
5.2.5 Az AS5048B ismertetése.....	30

6	A szoftver megvalósítása	31
6.1	Rendszer szintű ismertetés	31
6.2	Az inverz és direkt kinematika implementálása	31
6.3	Az inverz és direkt kinematika helyességének bizonyítása	32
6.4	Az AS5048B elfordulás érzékelő szoftvere	33
6.5	A PWM modul	33
7	A grafikus felület.....	35
7.1	A Qt bemutatása	35
7.2	A grafikus felület bemutatása	36
7.3	Beágyazott rendszerrel való kommunikáció	36
7.4	Control fül.....	36
7.5	Kinematics fül	37
7.6	A menü bemutatása	39
8	Következtetések	40
9	További lehetőségek	41
9.1	Oktatásba történő bevezetés	41
9.2	További lehetőségek a fejlesztésben.....	41
9.3	Későbbi célkitűzések.....	41
10	Irodalom és ábrajegyzék.....	42
10.1	Irodalomjegyzék	42
10.2	Ábrajegyzék	42

1 Bevezetés

Az egyszerű konstrukció, nagy szerszámsebesség (10 m/s) és gyorsulás (150 m/s^2) miatt az iparban nagy jövő előtt állnak a parallel és ezen belül a delta robotok. Egy viszonylag fiatal robottípus, az elsőt Reymond Clavel alkotta meg még a '80-as években.

A dolgozat célja ezen ipari robot típus ismertetése és fejlesztésének bemutatása. Továbbá demonstrálja az Automatizált gyártórendszerek modulon folytatott oktatást és fejlesztést, mivel betekintést nyújt mind a beágyazott rendszerek, mind a robotok, gyártórendszerek világába.

A dolgozat első részében bemutatásra kerül általános megközelítésben a párhuzamos, majd a delta típusú robot, mint az ipar egy új és korszerű szereplője.

A dolgozat második része a probléma felvetésével és annak megoldásával foglalkozik, bemutatja a fejlesztés lépéseit. A következő szemszögekből közelíti meg a témát:

Az egész dolgozat fő irányvonalát a probléma matematikai úton történő megoldása adja. Ezen probléma két részre oszlik, mégpedig az inverz és a direkt kinematika problematikája. Az inverz kinematika segítségével történik a karok elfordulásának kiszámítása, a direkt kinematika segítségével pedig a koordináták kiszámítás az elfordulásból.

Ezt követően ismertetésre kerül a mechanikai tervezés.

A rendszert működtető elektronika és a hozzá tartozó szenzorok bemutatása képezi a következő fejezetet. A beágyazott rendszer alapját egy ARM Cortex M4 architektúrára épülő TM4C123 mikrokontroller alkotja, melyhez mágneses szögelfordulás csatlakoznak.

Végül a grafikus kezelőfelület és a rendszert működtető szoftver kerül bemutatásra. Ismertetésre kerül a kinematika implementálása és a szögelfordulás mérésének bemutatása is.

2 Célkitűzéseim

TDK munkám és szakdolgozatom célja megtervezni és megépíteni egy delta típusú parallel robotot.

Legfőbb célom az volt, hogy egy sokrétű projekt keretein belül minél jobban bővítsem tudásom. A téma azért került kiválasztásba, mert egy szép kihívást láttam benne, ahol szükség van szoftver, hardver és gépészeti ismeretekre.

Végső célom a delta robot bevezetése az oktatásba, az Automatizált gyártórendszerek modul, hasonló nevű tárgyán belül.

3 Delta robot általános bemutatása

Az ipari robot:

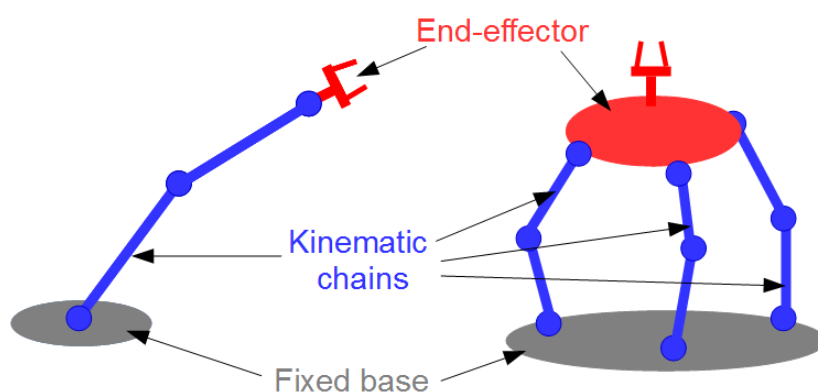
"actuated mechanism programmable in two or more axes with a degree of autonomy, moving within its environment, to perform intended tasks."

ISO 8373:2012

3.1 Bevezetés a párhuzamos robotok témájába

Az iparban szinte egyeduralkodónak számítanak humanoid robotkarok vagy más néven soros robotok. A soros elnevezés itt arra utal, hogy a karok (kinematikai tagok) egymáshoz sorosan csatlakoznak. A robotkart alkotó lánc egyik végpontja a bázis a másik végpontja pedig az effektor. A mechanizmus működtetése az (aktív) ízületeken keresztül történik. [1. j ábra]

Ezzel ellentétben a párhuzamos robotoknál a bázis és az effektor több (legalább kettő) karon keresztül kapcsolódik a bázishoz. Párhuzamos rendszereknél általában passzív ízületekkel találkozunk. [1. b ábra]



1. ábra

Soros és párhuzamos robotok

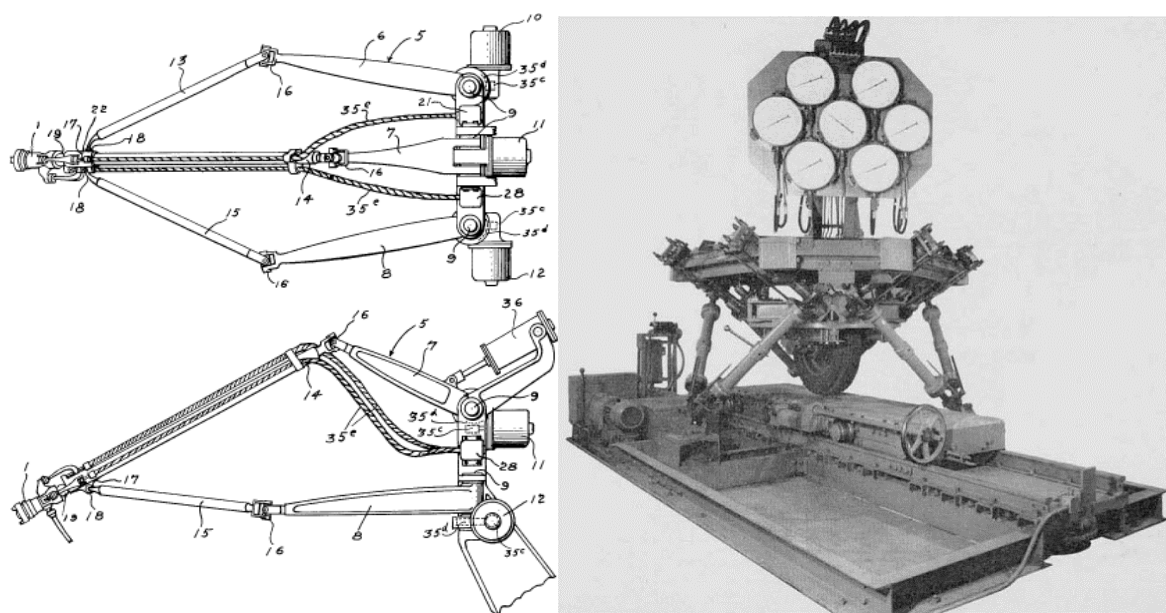
Számos változat mellett a két legismertebb és legsikeresebb párhuzamos robot a Stewart platform (hexapod, hatláb) és a Delta robot.

3.2 Történelmi áttekintés

Párhuzamos robotok fejlődése

Az első párhuzamos robotot 1928-ban egy amerikai farmer James E. Gwinnett álmodta meg, mely egy színházi három szabadságfokú mozgó emelvény volt.

Egy évtizeddel később a szintén amerikai Willard L. V. Pollard feltalált egy három karú, 5 szabadsági fokkal rendelkező festékszóró robotot [2. b ábra]. Az ügyes mechanikával rendelkező robot sajnos nem épült meg. Pollard fia 1937-ben épített és szabadalmaztatott egy hasonló szerkezetet, mely az első ipari robotnak számít.



2. ábra

Pollard (b) és Gough (j) robotja

Az amerikai sikerek után 1947-ben Európában is megszületett az első párhuzamos robot, mely máig az egyik leghíresebb. A Dr. Eric Gough autóipari mérnök által kifejlesztett és repülőgépek gumiabroncsainak tesztelésére szolgáló [2. j ábra] párhuzamos mechanika az alapja az összes későbbi Stewart platformnak. Itt kell megjegyeznünk, hogy a névadó Stewart annak ellenére, hogy ismerte Gough és a hasonló szerkezetet építő Capell amerikai feltaláló munkáját egy szinte megegyező hat teleszkópos lábbal rendelkező mechanizmust mutatott be. A köztudatban mégis Stewart neve fémjelzi ezt a nagyszerű találmányt, melyet főleg precíziós pozicionálásra és repülőgép szimulátorok mozgatására használnak.

A következő fontos állomás a párhuzamos robotok történetében a Raymond Clavel által 1985-ben feltalált Delta robot volt, mely forradalmasította a nagy sebességű pick-and-place műveleteket. Clavel meghatározó találmánya után is sok új kialakítás született, de az alap „delta” koncepció nem változott. Példának említhetjük a 3D nyomtatásban alkalmazott lineáris delta robotot vagy az invertált deltát (A fenti összefoglaló megírása során felhasználásra került a [3] szakirodalom).

3.3 A delta robot története

Reymond Clavel a svájci EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) professzora 1985 nyarán egy forradalmian új párhuzamos robotot mutatott be. A később Delta robotnak elnevezett találmány a századfordulóra a legsikeresebb párhuzamos robottípus lett, köszönhetően a nagy sebességének és a könnyű szerkezetének. [3. ábra]

Clavel és kollégái eredetileg egy olyan rendszert szerettek volna létrehozni, amely kiváltja az emberi munkaerőt a csokoládé bonbonok csomagolásánál. Problémát jelentett a bonbon súlya (~10 g) és az elvárt nagy sebesség. Hosszas kísérletezés után végül az ötletet Clevelnek a felesége kötőtűinek mozgása adta. Egy olyan szerkezetet képzelt el, ami három kar segítségével mozgat egy eszközt.



3. ábra

Az első delta robot

A szabadalom

A szabadalom 1985-ben született meg. Amikor Clavel szabadalmaztatta találmányát, felhívták a figyelmét, hogy már létezik egy hasonló találmány Pollard-tól. (Clavel nem ismerte ekkor még.) A fő különbség a két találmánya között az volt, hogy Clavelé képes volt térbeli elfordulásra is. További információk a két szabadalomról a [8] irodalomban.

Ezt követően szabadalmaztatott még további 36 szabadalmat Európában, USA-ban és Japánban.

Miután a szabadalmak 2006-2007-ben elévültek még több gyártó forgalomba hozta saját robotját, bár az igazán sikeres Delta robotok mögött cégóriások állnak (A történelmi áttekintés és szabadalmat érintő témában a következő szakirodalmak kerültek felhasználásra: [4], [5], [8]).

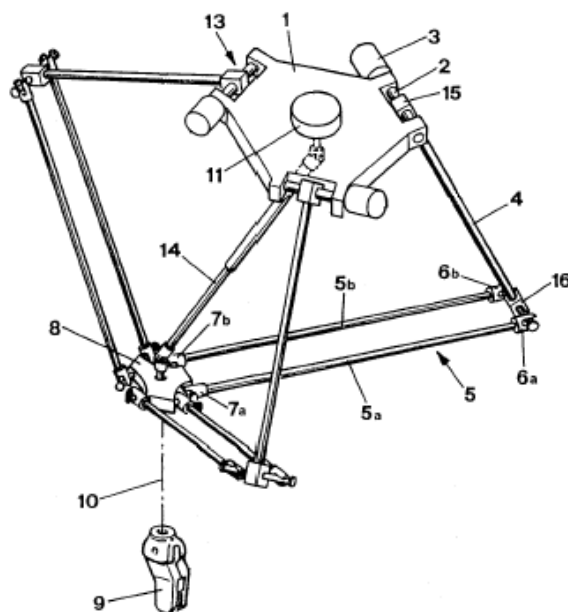
Gyártók

Az első ipari robotokat a svájci Demarex cég (ma már Bosch csoport tulajdona) építette a Nestlé számára. Később a svéd Elektra is megvásárolta a szabadalmat és 20 kg tömegű sebészeti mikroszkópok pozicionálására használta.

Későbbiekben bekapcsolódott az ABB és a japán Hitachi Seiki is. Fontos még megemlíteni a jelenleg leggyorsabb robotot gyártó Adept amerikai székhelyű vállalatot is.

3.4 A delta robot működésének bemutatása

A delta robot két egymás felett elhelyezett háromszög alakú platformból áll (1-bázis, 8-effektor), ahogy azt az 4. ábra is mutatja. A bázis (1) és az effektor (8) háromszögek az oldalfelezőjüknél közép-csuklós (6,16) karral (4-5) vannak összekötve. A három kart a felső platformon elhelyezett motor (3) mozgatja a kívánt szögben. Az egymással párhuzamos csuklós karok elmozdítják az effektort ezáltal megtalálja a kívánt térbeli koordinátákat.



4. ábra

A delta robot felépítése

A felsorolt alkatrészekon biztosítják a robot mozgását, de ezen kívül még szükséges egy tartó konstrukcióra mely a bázison keresztül tartja ez egész szerkezetet.

Ahhoz, hogy a robot érdemi munkát is tudjon végezni az effektort (8) el kell látni egy megfelelő megfogóval (9), mely általában pneumatikus működtetésű.

3.5 Főbb részek ismertetése:

3.5.1 Az alap vagy bázis

A robot fixen elhelyezkedő felső alap platformja. A direkt hajtást biztosító motorok felfogatására szolgál melyek egymástól 120°-ra helyezkednek el. Alakját tekintve egyenlő szárú háromszög. Egyik magasságvonala a y tengely, a középpontja pedig a z tengelyen helyezkedik el.

3.5.2 Az effektor

A két párhuzamosan csatlakozó háromszög alakú platform közül a mozgást végző az effektor. Szintén egyenlő oldalú háromszög. Az effektor középpontja E_0 .

3.5.3 A karok

A két platform csatlakozását három csuklóval összekötött kar biztosítja. A felső vagy rugalmatlan kar közvetlenül csatlakozik a hajtást biztosító motorhoz, az alsó vagy rugalmas kar a rugalmatlan kart és az effektort köti össze gömbcsuklókon keresztül. Itt kell megjegyeznünk, hogy léteznek Delta robotok 2-4-5 karral is.

3.5.4 Előnyök és hátrányok, főképp a delta robotot alapul véve

A napjainkban elterjedt humanoid robotkaroknál a térbeli koordináták eléréséhez a sorosan kapcsolt kinematikai lánc miatt nagy erőt kell kifejteni. Ennek oka, hogy az aktív ízületeken keresztül mozgatott karoknak el kell bírniuk saját és a hozzájuk kapcsolódó karok súlyát is. A nagy erő kifejtése mellett bonyolult hajtásláncokat kell létrehozni, mivel itt maga az ízület végzi a mozgatást. A közvetett hajtás hatással van a sebességre is.

A soros módszer kitűnően alkalmas, ha nagy erőket kell kifejteni vagy nagy munkateret kell elérni. A gyors munkára viszont a párhuzamos robot alkalmasabb. A robotkarok tulajdonképpen az emberi kar másai, beláthatjuk, hogy egyiket sem gyors pick-and-place műveletekre „tervezték”.

A párhuzamos robotok az „oszd meg és uralkodj” elvet követik. A mozgáshoz szükséges erő a párhuzamos karokra oszlik szét. A dolgozat témájaként szereplő delta robot direkt hajtást alkalmaz, ami nagyban megnöveli a sebességet. Az iparban előfordulnak 50 g gyorsulású robotok, laboratóriumi körülmények között pedig a 90 g gyorsulás (Pierrot kísérletei) is megoldott.[5]

Nem elhanyagolható tény az sem, hogy párhuzamos robotok esetében a karok és azok hajtása megegyező.

Különböző területeken különböző típusú robotokat kell alkalmazni, ahogy egy humanoid robot lassú futószalagon jövő élelmiszerek csomagolásához, úgy egy delta robot is kevésbé alkalmas (kvázi alkalmatlan) autóvázak hegesztéséhez. Ezért nem helyes az egyik robot előnyeit a másik

hátrányaiként bemutatni. Ezt figyelembe véve a következő előnyöket és hátrányokat sorolhatjuk fel:

Előnyök:

- Egyszerű konstrukció
- Könnyű, gyors karok
- A motor közvetlenül a kart mozgatja
- Nagy gyorsaság: 300 picks/min
- Kis karbantartási igény

Hátrányok:

- Karok hosszához képest kis munkatér
- Kis teherbírás (max 1-2 kg)
- Járulékos tartó konstrukció

4 A kinematika bemutatása

4.1 A kinematikai leírás alapját képző munkák és szerzőik

Az inverz és direkt kinematika megismerése és implementálása során legfőképp az Maxim Zavatsky *Delta robot kinematics* [1] munkája került felhasználásra. Az említett irodalom tulajdonképpen Prof. Paul Zsombor-Murray *Descriptive Geometric Kinematic Analysis of Clavel's "Delta" Robot* [2] tanulmányát mutatja be és egészíti ki (ábrák). Az elérhető kinematikai leírások közül nagy része a Zavatsky által közreadotton alapszik.

Zsombor-Murray munkája [2] hivatkozik arra, hogy a Clavel eredeti munkája nem bemutatható és az inverz kinematika leírása (nem csak Zsombor-Murray munkájában) François Pierrot-tól származik. (Pierrot francia professzor fejlesztette ki a jelenleg leggyorsabb Adept Quattro delta robotot.)

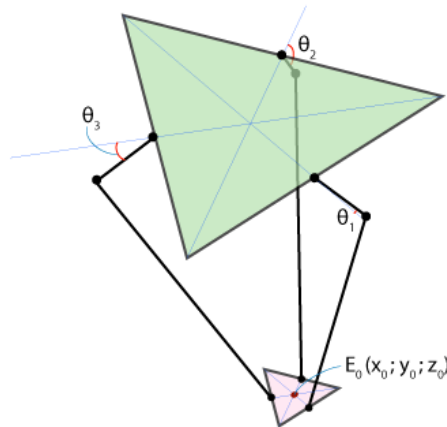
Továbbá fontos megemlíteni még Hevré-t akitől az „Y-Star” módszer származik mely a síkok rotálásánál kerül ismertetésre. (Felfedezhetünk párhuzamot a háromfázisú hálózattal.)

A *precíz* kinematikai analízis kiszámítása bonyolultságát tükrözi az, hogy mindhárom kar „hintázó” mozgása eredményezi a csuklók úgymond parazita elmozdulását. [2] (12 darab csuklónk van.)

4.2 Az inverz kinematika problémája

Az inverz kinematika feladata a rugalmatlan kar elfordulásának kiszámítása a kapott koordinátákból.

A 5. ábrán a felső háromszög (zöld) a bázis az alsó (piros) az effektor. A keresett szögek: θ_1 , θ_2 , θ_3 ;



5. ábra

A keresett szögek

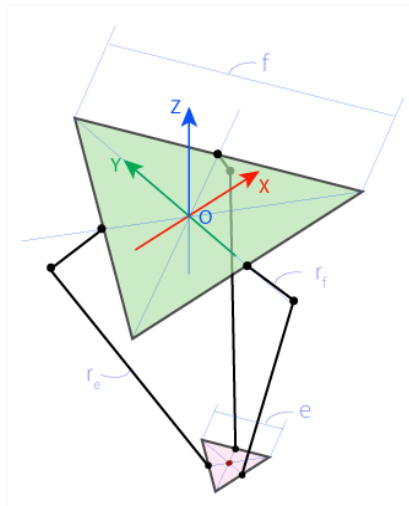
Paramétereit [6. ábra]:

f – az bázis háromszögének oldala

e – az effektor háromszögének oldala

r_f – a rugalmatlan kar hosszúsága

r_e – a rugalmas kar hosszúsága



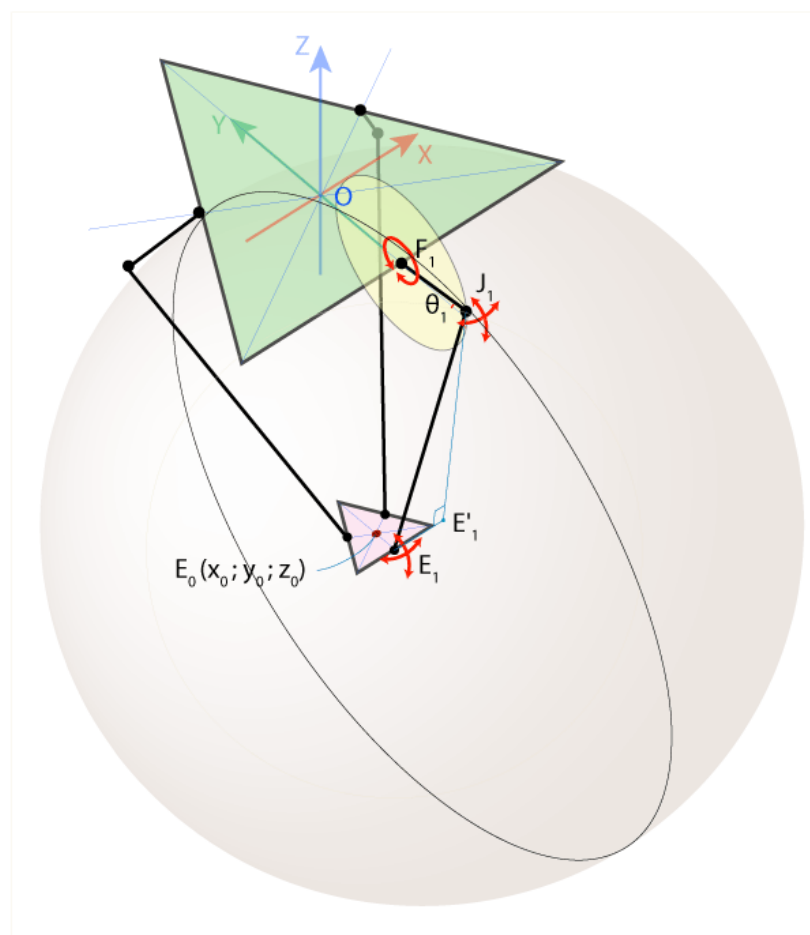
6. ábra

A robot paraméterei

4.3 Az inverz kinematika ismertetése

Az egész rendszer három kitüntetett ponttal rendelkezik [7. ábra] :

- F_1 - mozgató motor tengelye
- J_1 – a rugalmatlan kar és a rugalmas kar csatlakozási pontja
- E_1 – az effektor háromszög oldalfelező pontja, a rugalmas kar másik végpontja
- E'_1 – az E_1 vetülete az YZ síkon



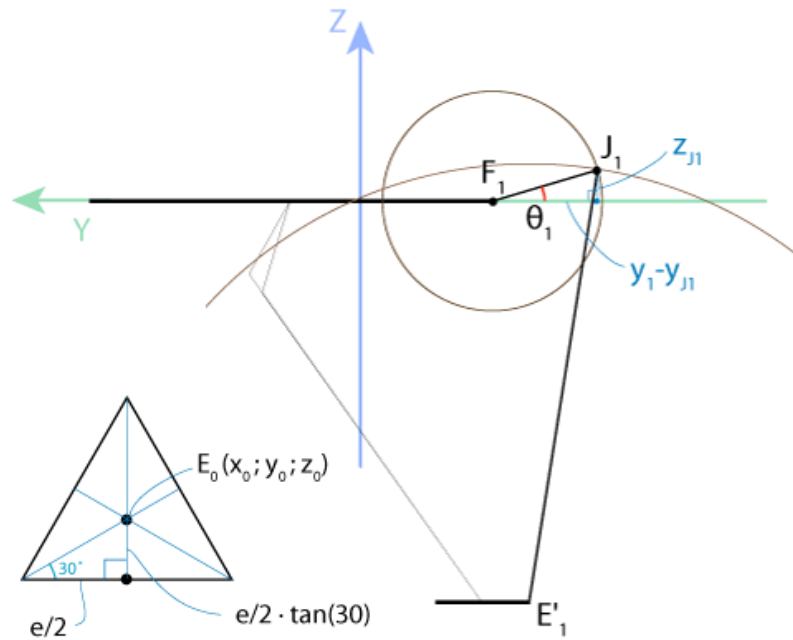
7. ábra

Az inverz kinematika kitüntetett pontjai

A rugalmatlan kar elforgatható az YZ síkon. [8. ábra] A forgatás során kapunk egy kört melynek középpontja F_1 , sugara a rugalmatlan kar (r_f) hosszával egyezik meg.

Az E'_1 jelzett pontból hasonló elgondolással kapunk egy gömböt, mivel a rugalmas kar a forgatásával nem csak egy síkot érint. Középpontja az effektor oldalfelezője, sugara pedig a rugalmas kar hossza. Viszont számunkra csak YZ síkon a gömb által leírt kör érdekes.

A két kör metszéspontja megadja az általunk keresett J_1 pontot. Miután ismerjük a J_1 koordinátáit segítségével kiszámíthatjuk a rugalmatlan kar által bezárt szöget.



8. ábra

 θ szög kiszámítása

Ha ismert a J_1 akkor ismert az ahhoz tartozó y és z irányú koordináta is. Az y_1 - y_{j1} szakasz és a z_{j1} szakasz ismeretében arctg szögfüggvény segítségével kiszámítható a rugalmatlan kar elfordulásának szöge (θ_1).

4.4 Az inverz kinematika matematikai leírása

A kitüntetett pontok meghatározása:

$$E(x_0, y_0, z_0)$$

$$EE_1 = \frac{e}{2} \tan 30^\circ = \frac{e}{2\sqrt{3}}$$

$$E_1\left(x_0, y_0 - \frac{e}{2\sqrt{3}}, z_0\right)$$

$$E'_1\left(0, y_0 - \frac{e}{2\sqrt{3}}, z_0\right)$$

$$E_1E'_1 = x_0$$

$$E'_1J_1 = \sqrt{E_1J_1^2 + E_1E'^1_1^2} = \sqrt{r_e^2 - x_0^2}$$

$$F_1(0, -\frac{f}{2\sqrt{3}}, 0)$$

A kör egyenleteinek felírása:

$$\begin{cases} (y_{J1} - y_{F1})^2 + (z_{J1} - z_{F1})^2 = r_f^2 \\ (y_{J1} - y_{E'1})^2 + (z_{J1} - z_{E'1})^2 = r_e^2 + x_0^2 \end{cases}$$



$$\begin{cases} \left(y_{J1} + \frac{f}{2\sqrt{3}}\right)^2 + z_{J1}^2 = r_f^2 \\ \left(y_{J1} - y_0 + \frac{e}{2\sqrt{3}}\right)^2 + (z_{J1} - z_0)^2 = r_e^2 + x_0^2 \end{cases}$$

$$J_1(0, y_{J1}, z_{J1})$$

A keresett szög:

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{z_{J1}}{y_{F1} - z_{J1}}\right)$$

A fenti leírás egy tengelyhez tartozó szög kiszámítására szolgál. Ahhoz, hogy megkapjuk a másik két karhoz tartozó θ szöget is az YZ síkot rotálnunk kell a z tengely mentén mindkét irányban 120° -al. Ezt nevezzük *Y-Star* módszernek.

Matematikailag egyik irányba:

$$x' = x \cos 120^\circ + y \sin 120^\circ$$

$$y' = -x \sin 120^\circ + y \cos 120^\circ$$

$$E_0(x_0, y_0, z_0) \rightarrow (x'_0, y'_0, z_0)$$

4.5 A direkt kinematika problémája

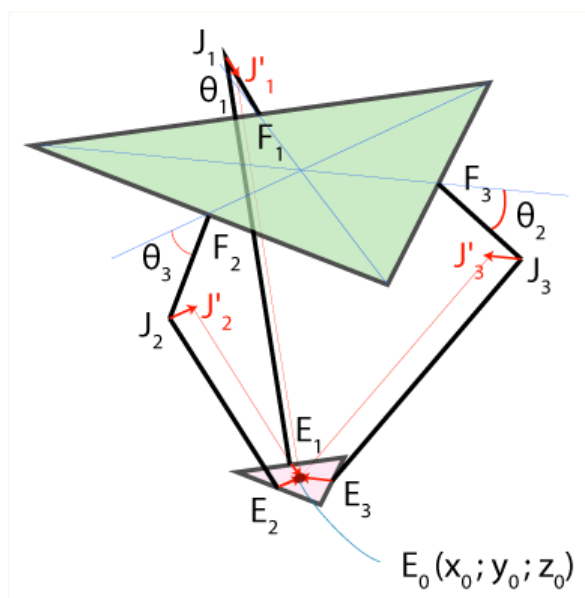
A direkt kinematika feladata a rugalmatlan karok elfordulásából az effektor koordinátáinak kiszámítása. Felhasználása főleg az ellenőrzésénél és a robot tanításnál van.

A direkt kinematika meghatározásához hasonló elvet követünk, mint az inverz kinematikánál, annyi különbséggel, hogy nem köröket használunk a kívánt pont megtalálásához, hanem gömböket.

A direkt kinematikánál a rugalmatlan karok által bezárt szög ($\theta_{1,2,3}$) ismert, viszont nem tudjuk a effektor E_0 koordinátáit.

Az E_0 koordinátáinak kiszámítása a következőképpen történik:

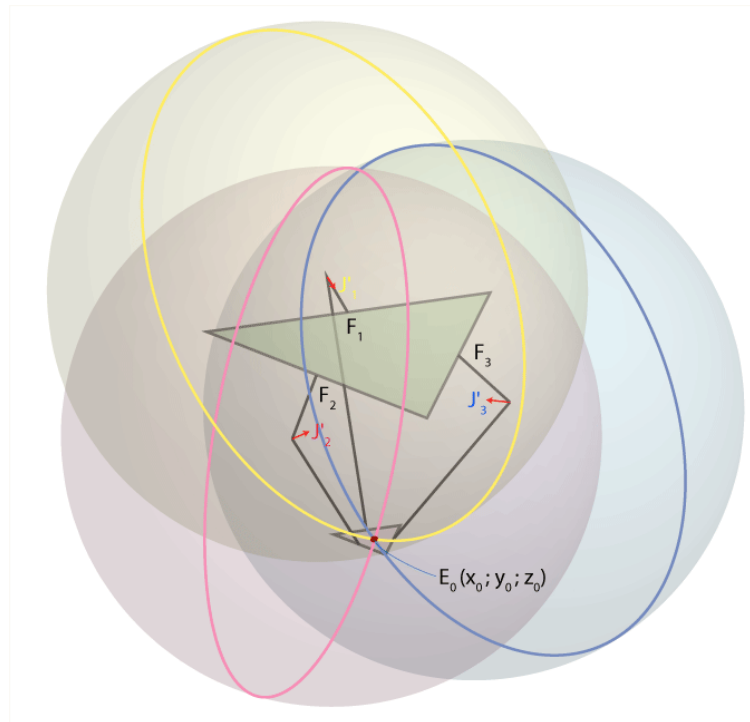
Fontos szerepet kap az inverz kinematikánál megismert J_1 pont ahol a rugalmatlan és a rugalmas kar csatlakozik. Az említett pont egy olyan gömbnek lesz a középpontja, melynek sugara a rugalmas kar hosszával egyenlő, mivel a rugalmas kart szabadon mozgathatjuk a J_1 körül. Ugyanezt a műveletet elvégezzük mind a három kar esetén. Eredményként kapunk három gömböt. [9. ábra]



9. ábra

Az E_0 pont koordinátáinak kiszámítása

Ezek után a gömbök középpontjait eltoljuk, úgy, hogy a rugalmas karok az E_0 pontba csatlakozzanak. A három gömb egy pontot fog érinteni mely a keresett E_0 pont lesz. (10. ábra)



10. ábra

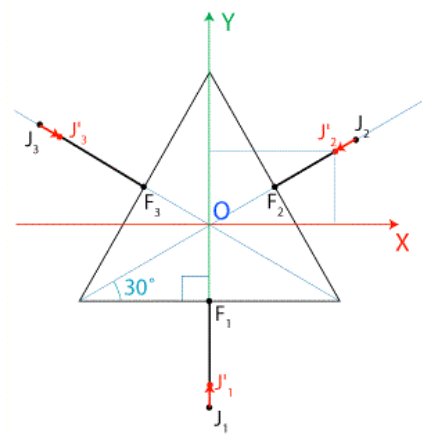
Az E_0 pontot érintő gömbök

Az $E_0(x_0, y_0, z_0)$ koordinátáinak meghatározásához három egyenletből álló egyenletrendszer kell megoldanunk, melynek alakja a következő (gömb egyenlete):

$$(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2 = r_e^2$$

ahol x_j, y_j, z_j és r_e ismert.

A J'_1, J'_2, J'_3 koordináták meghatározása (11. ábra):

**11. ábra**

A $J_1; J_2; J_3$ koordinátáinak meghatározása

$$OF_1 = OF_2 = OF_3 = \frac{f}{2} \tan 30^\circ = \frac{f}{2\sqrt{3}}$$

$$J_1J'_1 = J_2J'_2 = J_3J'_3 = \frac{e}{2} \tan 30^\circ = \frac{e}{2\sqrt{3}}$$

$$F_1J_1 = r_f \cos \check{\theta}_1; F_2J_2 = r_f \cos \theta_2; F_3J_3 = r_f \cos \theta_3$$

$$J'_1 \left(0; -\frac{f-e}{2\sqrt{3}} - r_f \cos \theta_1; -r_f \sin \theta_1 \right)$$

$$J'_2 \left(\left[\frac{f-e}{2\sqrt{3}} + r_f \cos \theta_2 \right] \cos 30^\circ; \left[\frac{f-e}{2\sqrt{3}} + r_f \cos \theta_2 \right] \sin 30^\circ; -r_f \sin \check{\theta}_2 \right)$$

$$J'_3 \left(\left[\frac{f-e}{2\sqrt{3}} + r_f \cos \theta_3 \right] \cos 30^\circ; \left[\frac{f-e}{2\sqrt{3}} + r_f \cos \theta_3 \right] \sin 30^\circ; -r_f \sin \theta_3 \right)$$

A gömböket leíró egyenletek:

$$x_0 = 0$$

$$\begin{cases} x^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_e^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_e^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r_e^2 \end{cases}$$



$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 - 2y_1y - 2z_1z = r_e^2 - y_1^2 - z_1^2 & (1) \\ x^2 + y^2 + z^2 - 2x_2x - 2y_2y - 2z_2z = r_e^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 & (2) \\ x^2 + y^2 + z^2 - 2x_3x - 2y_3y - 2z_3z = r_e^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 & (3) \end{cases}$$

$$w_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$$



$$\begin{cases} x_2x + (y_1 - y_2)y + (z_1 - z_2)z = \frac{(w_1 - w_2)}{2} & (4) = (1) - (2) \\ x_3x + (y_1 - y_3)y + (z_1 - z_3)z = \frac{(w_1 - w_3)}{2} & (5) = (1) - (3) \\ (x_2 - x_3)x + (y_2 - y_3)y + (z_2 - z_3)z = \frac{(w_2 - w_3)}{2} & (6) = (2) - (3) \end{cases}$$

A (4)-(5) egyenletből:

$$(7) \quad x = a_1z + b_1$$

$$a_1 = \frac{1}{d} [(z_2 - z_1)(y_3 - y_1) - (z_3 - z_1)(y_2 - y_1)]$$

$$b_1 = \frac{1}{2d} [(w_2 - z_1)(y_3 - y_1) - (w_3 - w_1)(y_2 - y_1)]$$

$$d = (y_2 - y_1)x_3 + (y_3 - y_1)x_2$$

(8)

$$y = a_2 z + b_2$$

$$a_2 = \frac{1}{d} [(z_2 - z_1)x_3 - (z_3 - z_1)x_2]$$

$$b_2 = \frac{1}{2d} [(w_2 - w_1)x_3 - (w_3 - w_1)x_2]$$

A (7) és a (8) egyenleteket az (1) egyenletbe behelyettesítve:

$$(a_1^2 + a_2^2 + 1)z^2 + 2(a_1 + a_2(b_2 - y_1) - z_1)z + (b_1^2 + (b_2 - y_1)^2 + z_1^2 - r_e^2) = 0$$

A másodfokú egyenlet megoldása után megkapjuk a z_0 koordinátát. Ezt visszahelyettesítve a (7) és (8) egyenletekbe megkapjuk a x_0 és y_0 koordinátákat is.

5 A fejlesztés bemutatása

5.1 Mechanikai tervezés, fejlesztés

Az ipari delta robotokat általában egy tartó vázzal a gyártósor fölé helyezik. Persze kivételre is van példa, mint például a Tosy vagy a Fanuc egyes típusai. A rugalmas karok könnyű üveg vagy szénszálas anyagokból készülnek. Ott ahol számít a kar fizikai mérete, ott könnyű fémötvözetből. A rugalmatlan karoknál általában a könnyű, rugalmatlan fémötvözetek dominálnak.

A mechanika tervezése két részben történt. A fejlesztés megkönnyítése érdekében készült egy az eredetinél kisebb modell. A modell csupán az elv és az algoritmus tesztelésére szolgált mivel mechanikailag gyenge és pontatlan volt.

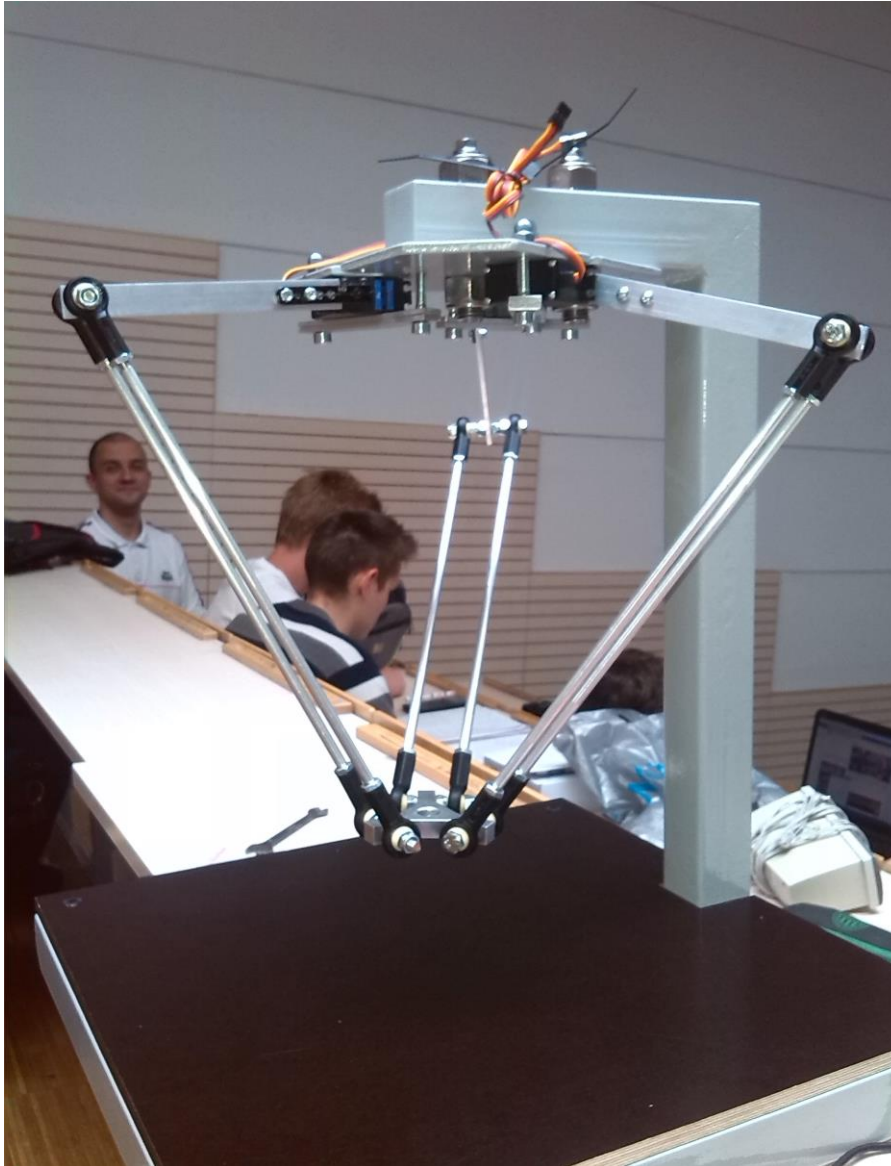
A későbbiekben viszont előnyt jelentett, hogy a végleges modellen nem kellett változtatni, nem bukkantak elő nem várt hibák.

A kisebb modellnél a bázist még három láb tartotta a végleges modellnél viszont már csak egy kar tartja. Erre a megoldásra azért volt szükség mivel így jobban elérhető a munkatér. Az egy tartó karos megoldás mellett még a mechanika minél robosztusabbá tétele is cél volt.

A tesztelések után megépítésre került a végleges rendszer. Fontos szempont volt, hogy könnyen változtatható és javítható legyen. Ahol csak lehetett tipizált alkatrészek kerültek felhasználásra. Továbbá kiinduló pont volt, hogy a robot 200x200x200 térben tudjon manipulálni.

A hegesztett zártszelvény vázra azért került a választás mivel ellenálló a rezgésekkel, kilazulásokkal szemben. A nehéz váz biztosítja a kellő stabilitást is.

A bázis cserélhető, csavarokkal rögzített. Ennek az az előnye, ha új motorokat szeretnénk alkalmazni, akkor nem kell az egész vázat cserélni. A konstrukció méretei: 400x400x550 mm.

**12. ábra***Mechanikai felépítés*

A robot karjainak minél könnyebbnek kell lenniük. Egyrészt azért, hogy ne terheljék feleslegesen a motorokat, másrészt egy könnyű kart könnyebb mozgatni és fékezni, mint egy nehezebbet. Az üvegszál és szénszál anyagok után az alumínium a legjobb választás. Az alumínium mellett szól az is, hogy könnyű megmunkálni (menetek, furatok).

Az összekötő csuklók nagy teherbírású önkéntes műanyagból készültek, egyrészt a kis tömeg másrészt a jó fizikai tulajdonságaik miatt (hosszú élettartam, rezgés elnyelés, karbantartásmentesség). Az önkéntes csapágyak jó tulajdonságai mellett meg kell még említenünk a bejáratáshoz szükséges időt és energiát, mivel kezdetben viszonylag nehezen mozognak. Ha a

mozgás során hő keletkezik, akkor a pozitív visszacsatolásként még inkább nehezíti mozgást, mivel a csapágy anyaga tágul.

Fontos még megemlíteni az effektort mely alumíniumból készült homlokmarással. (13. ábra) Az effektor közepében található 12 mm átmérőjű furat a pneumatikus vákuum megfogó vagy egyéb szerszám befogására szolgál.



13. ábra

Az effektor és a gömbcsuklók

5.2 Az elektronika és a villamos részek bemutatása

5.2.1 A TM4C123G mikrovezérlő (MCU)

A fejlesztés során a Texas Instruments Tiva C nevű fejlesztőpanelja került felhasználásra. Amely a jelen kor elvárásainak megfelelő modern ARM Cortex M4 architektúrára épül. Jelen dolgozatnak nem célja az MCU részletes bemutatása és erre a terjedelmi korlát sem ad lehetőséget, ezért csak pár fontos paramétere kerül bemutatásra. Bővebb információk az adatlapban [7].

Teljesítmény:

- Core ARM Cortex-M4F mag
- Órajel 80-MHz ; 100 DMIPS
- Flash 256 KB
- SRAM 32 KB
- EEPROM 2KB
- ROM mely a TivaWare segítségével konfigurálható (ROM parancs -> kisebb kód)

Kommunikáció:

- 8 db UART
- 4 db SSI modul
- 4 db high-speed I2C
- 2 db CAN 2.0 A/B vezérlő
- USB 2.0 OTG/Host/Device
- Micro Direct Memory Access (μ DMA) ARM® PrimeCell® 32-channel configurable μ DMA controller

Perifériák:

- 6 db 16/32-bit GPTM blokk és 32/64-bit Wide GPTM (timer)
- 2 db WDT

- Hibernation Module (HIB)
- 6 db GPIO blokk

Advanced Motion Control:

- 2 db PWM modul, mindkettő tartalmaz 4 PWM generátor blokkot az összesen 16 csatorna vezérléséhez
- Kvadrátúra enkóder
- Analog Support
- 2 db 12-bites ADC modul 1M minta/s
- ADC
- Analóg komparátor
- Digitális komparátor
- JTAG modul integrált ARM SWD-vel

5.2.2 Szervó motorok

Az iparban és kutatások során elsősorban villamos szervó motorokat alkalmaznak mivel fontos a nagy sebesség. Pontosság tekintetében megfelelő még a léptető motor is, de sebességben nem. Az alkalmazott szervók általában nem tartalmaznak sebességszekrényt.

5.2.3 RC szervók

Mivel az ipari szervó ára nem tette lehetővé alkalmazását ezért kompromisszumos megoldásként a hobbi célokra kialakított RC szervók kerültek felhasználásra. Hasonlóság az ipari szervó és az RC szervó között abban van, hogy mindkettő ismeri a saját pozícióját és azt, hogy milyen pozíciót kell felvennie. Pontosságban, sebességben és nyomatékban nem közelíti meg az ipari kivitelét. A nagyobb nyomaték eléréséhez itt sebességszekrényt alkalmaznak.

A fejlesztés során sok hiba forrása volt ezen szervók alkalmazása. A tömeggyártás miatt a szervók szögtartománya nagy szórást mutat és a kalibráció is hiányos, vagy nincs. A vezérlő impulzus szélessége sincs pontosan meghatározva és ugyanazon szérián belül is változhat.

Annak ellenére, hogy ezek a szervók rendelkeznek bizonyos pontatlansággal használatunk az egyszerűségük (és áruk) miatt esetünkben és az oktatásban indokolt lehet.

A felsorolt hibák kiküszöbölése egy pontosabb szabályozással rendelkező robot vagy smart szervóval lehetséges.

5.2.4 Az motor elfordulásának mérése

A direkt kinematika alapja, a visszamért szögből történő koordináta számítás. Ehhez meg kell mérnünk az elfordulás mértékét. A szögelfordulás mérésére több mérési módszer is ismerünk, de jelenleg a legpontosabb és a robotikában is alkalmazott a mágneses szögelfordulás mérés. A mérési módszer nagy előnye a pontosság és az, hogy nincs szükségünk járulékos mechanikai elemekre, mint például a kódtárcsa. A méréshez csupán az elfordulás érzékelő szenzorra van szükségünk és a fölötte elhelyezett radiális mágnesezésű mágnesre.

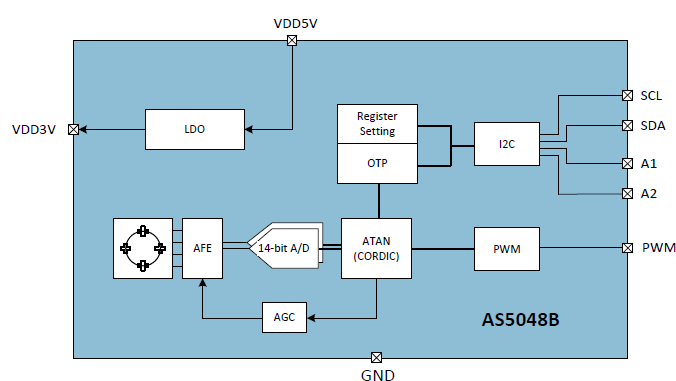
A fejlesztés során az AS5048B mágneses elfordulás érzékelő (rotary szenzor) került felhasználásra, amely a direkt kinematikához szükséges szög visszacsatolást biztosítja.

5.2.5 Az AS5048B ismertetése

Előnyei:

- 360 ° abszolút szögérzékelés
- 14 bites felbontás (0.0219 °/LSB)
- programozható nulla pozíció
- nem igényel mágneses árnyékolást, ellenáll a külső mágneses zajoknak

A kommunikáció I2C buszon történik. Blokkvázlatát 14. ábra mutatja.



14. ábra

Az AS5048B blokkvázlata

6 A szoftver megvalósítása

Támasztott követelmény volt, hogy a rendszer működtetését beágyazott rendszer végezze.

Az inverz és direkt kinematika programjának fejlesztése és tesztelése viszont PC-n történt. Miután a PC-n megírt algoritmusok működőképeseek lettek, azután került implementálásra először Atmega128-ra (Atmel) majd később a szélesebb lehetőségek miatt TM4C123G (TI) mikrovezérlőre (A fejlesztés C nyelven történt).

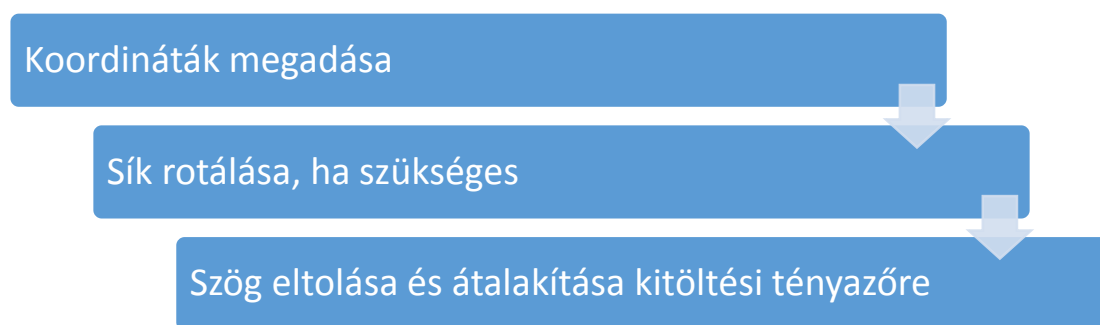
6.1 Rendszer szintű ismertetés

Első lépésben rendelkezünk kell bemenő paraméterekkel. Ezek koordináták (x,y,z) . A koordinátákból az inverz kinematika segítségével kiszámítjuk a szervók elfordulási szögét. A szögből impulzus szélességet számolunk, mely alapján az RC szervó felveszi a kiszámított szöget. Ha csak az inverz kinematikát implementáltuk ezzel a feladatunk be is fejeződött.

A direkt kinematika elkülönülve működik. Az elfordulás érzékelő által mért szögekből kiszámítja az effektor koordinátáit.

6.2 Az inverz és direkt kinematika implementálása

Miután a változók deklarálásra kerültek és a mikrovezérlő perifériáinak inicializálása megtörtént, a kód az inverz és direkt kinematikánál leírt matematikai összefüggéseket kvázi végigszámolja. A direkt kinematikánál paraméterként szöget adunk meg és a program sorról-sorra kiszámolja az egyenleteket. Az inverz kinematikánál koordinátákat és szükségünk van némi átalakításra (rotálás, szög eltolás).[15. ábra]



15.ábra

Az inverz kinematika implementálása

A szög eltolására azért szükséges mivel a matematikai leírásból az következik, hogy a robot rugalmatlan karja akkor van 0° -os pozícióban $(\theta = 0^\circ)$ ha a kar párhuzamos a bázissal. Ebből

következik, hogy ami a szervó motornak a 90° -os pozíciója, az a számolás szempontjából a 0° . Az átalakított szöget a szervó impulzus szélességéhez kell hozzárendelni.

6.3 Az inverz és direkt kinematika helyességének bizonyítása

Az inverz kinematika megvalósítására egy olyan függvény szolgál, aminek bemenő paramétere koordináta érték (x, y, z) visszatérési értéke pedig szög érték.

A direkt kinematikánál a paraméter szög érték, a visszatérési érték pedig koordináta (x, y, z).

Ebből következik, hogy az inverz kinematikát kiszámoló függvény visszatérési értékeit, ha a direkt kinematikát kiszámoló paramétereiként adjuk, akkor vissza kell kapnunk az inverz kinematika bemenő paramétereit. Ugyanez fordítva is igaz.

Direkt kinematika függvénye:

Paraméterek (szög értékek): *direct*(20, 30, 40);

Visszatérési értékek: $x_0 = 12,4$

$$y_0 = -20,4$$

$$z_0 = -179, 207$$

Inverz kinematika függvényébe behelyettesítve:

Paraméterek (koordináták): *inverse*(12.4; -20.4; -179.207);

Visszatérési értékek: $\theta_1 = 19.88^\circ$

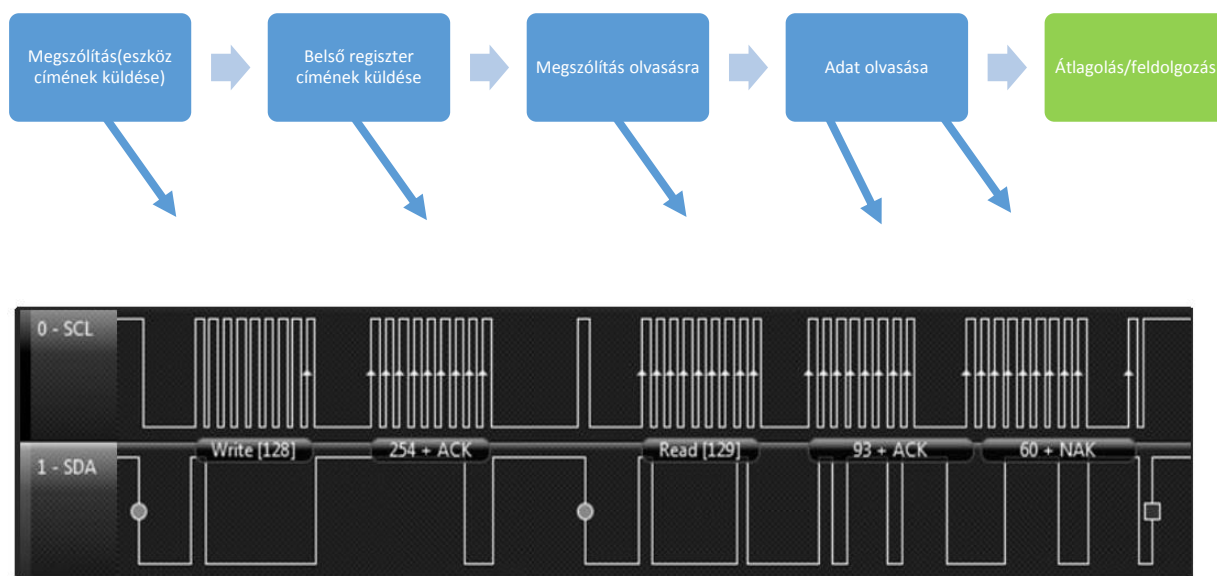
$$\theta_2 = 30.06^\circ$$

$$\theta_3 = 40.06^\circ$$

6.4 Az AS5048B elfordulás érzékelő szoftvere

Az adat olvasás I2C-n történik. Az érzékelő regiszterei olvashatók és van pár kitüntetett, ami írható is. Az érzékelő egyik hátránya, hogy a 0° -hoz, tartozó pozíció programozása csak egyszer történhet, mivel ez az érték egy OTP memóriába íródik be.

Az adat kiolvasása leegyszerűsítve a következőképpen történik: [16. ábra]



16. ábra

Az I2C kommunikáció

Az elfordulás érzékelő használata során figyelmet kell fordítani arra, hogy a 360° és a 0° ugyanarra a pontra esik. Ha az érzékelő ezen a ponton van, akkor a mérés bizonytalan lehet és a hiba értéke jóval meghaladhatja az említett 0.0219° hibát. A felhasználás során az érzékelő egy mérési ciklusban többször mér, majd a mért értéket átlagolja.

6.5 A PWM modul

A felhasznált TM4C123G mikrovezérlő az általános felhasználású időzítő egységeken kívül tartalmaz több kifejezetten motorvezérlésre alkalmas PWM generátort. Használatukat nagyban megkönnyíti a TI által kiadott TivaWare és az ahhoz tartozó driver könyvtár. Mint ahogy minden perifériánál itt is pár lépés elég a működtetéshez:

- PWM órajel beállítása

- Periféria engedélyezése
- Láb konfigurálása
- Generátor konfigurálása
- Periódusidő megadása (órajel ciklusban)
- Kitöltési tényező megadása (órajel ciklusban)
- Generátor engedélyezése

A digitális RC szervóknál a PWM impulzus szélessége határozta meg a szögelfordulás mértékét. Megvalósítása egyszerű fázis korrekt lefele számlálóval történt. A PWM frekvencia a rendszer órajelből kerül leosztásra. Fontos kiemelni a megfelelő leosztás alkalmazását és a kitöltési tényező kiszámításánál a megfelelő felbontást.

7 A grafikus felület

Haavard Nord és Eirik Chambe-Eng norvég programozók 1991-ben kezdték fejleszteni a Qt keretrendszert. A programozók által alapított Trolltech céget a Nokia vásárolta fel 2008-ban majd később a Digia finn vállalat tulajdonába került. [9]

A választás azért esett a Qt keretrendszerre mivel több platformon alkalmas fejlesztésre és sokféle (többek között szabad) licence feltételekkel is használható.

A fő indok viszont az volt, hogy a Qt a világ egyik legelterjedtebb és legismertebb nyelvét egészíti ki a C++-t. A MOC (*Meta Object Compiler*) a használt elemekből szabványos C++ kódot állít elő. Az előállított kódot pedig bármilyen c++ fordítóval lefordíthatjuk. Természetesen C++ nyelven kívül az elemkészlethez használhatunk Java, Python, Perl, Ruby vagy egyéb nyelvet is. [9]

7.1 A Qt bemutatása

A fejlesztés során a Qt Creator alkalmazás került felhasználásra. Ami egyedivé teszi a Qt-t a többi fejlesztőkörnyezettől az a *signals* (jelek) and *slots* (csatlakozók) mechanizmus.

Mivel alapvető követelmény, hogy a grafikus felület eseményvezérelt legyen, ezért minden objektumhoz tartozik többféle signal és slot.

Például egy gomb (*PushButton*) esetén signal lehet a gomb lenyomása, egy ablak esetén pedig slot lehet az ablak bezárása. Ha a gomb lenyomásának signálját összekötjük az ablak bezárás slotjával akkor értelemszerűen a gomb lenyomásakor az ablak bezárul.

A grafikus elemeken kívül minden más objektum is rendelkezik saját signálokkal és slotokkal, de létrehozhatunk sajátokat is.

Kódrészlettel egy csúszka (*Slider*) és folyamatjelző sáv (*ProgressBar*) összekötése:

```
connect(ui->horizontalSlider,SIGNAL(valueChanged(int)),  
        ui->progressBar,SLOT(setValue(int)));
```

A különböző signalokat és slotokat összeköthetjük a *Qt Designer* alkalmazásban grafikusan is.

7.2 A grafikus felület bemutatása

Az egyszerűbb feladatok elvégzéséhez (például az effektor közvetlen mozgatása) a grafikus interfész kínál megoldásokat. Bonyolultabb feladatok elvégzéséhez viszont a C nyelven kell algoritmust írunk. Ezt az indokolja, hogy nagyobb szabadságot és részletességet biztosít az ismert C nyelv, mint a grafikusan létrehozott lépéssorozat.

7.3 Beágyazott rendszerrel való kommunikáció

A grafikus felület a beágyazott rendszerrel soros porton keresztül kommunikál non-blocking üzemmódban (115,200, 8-N-1). A PC oldali soros port kezelésére a Qt által kínált gyári függvények kerülnek felhasználásra. A küldött és fogadott adat karakterlánc formájú, mely konvertálásra kerül. A mikrovezérlő a parancsok értelmezésére és az adatok kezelésére rendelkezik egy parancsfeldolgozóval.

7.4 Control fül

A *Control* fülön egy koordináta-rendszerben láthatjuk az xy síkon az effektor jelenlegi pozícióját és az egér segítségével mozgathatjuk azt. Ilyenkor a *Mouse: Control* opciót kell kiválasztanunk. A koordináták megadásához használhatunk csúszkát illetve manuálisan is megadhatjuk léptetéses lista (SpinBox) segítségével.

A koordináták megjelenítése a *QCustomPlot* nevű függvénykönyvtár került felhasználásra. Lehetőség van koordináta rendszer felbontásának változtatására, az ablak nagyítására és elmozdítására (*Mouse: Range/Zoom*). Az effektor kívánt helyét kék szín jelzi a valós (visszamért, direkt kinematikából kiszámított) pedig pirossal.

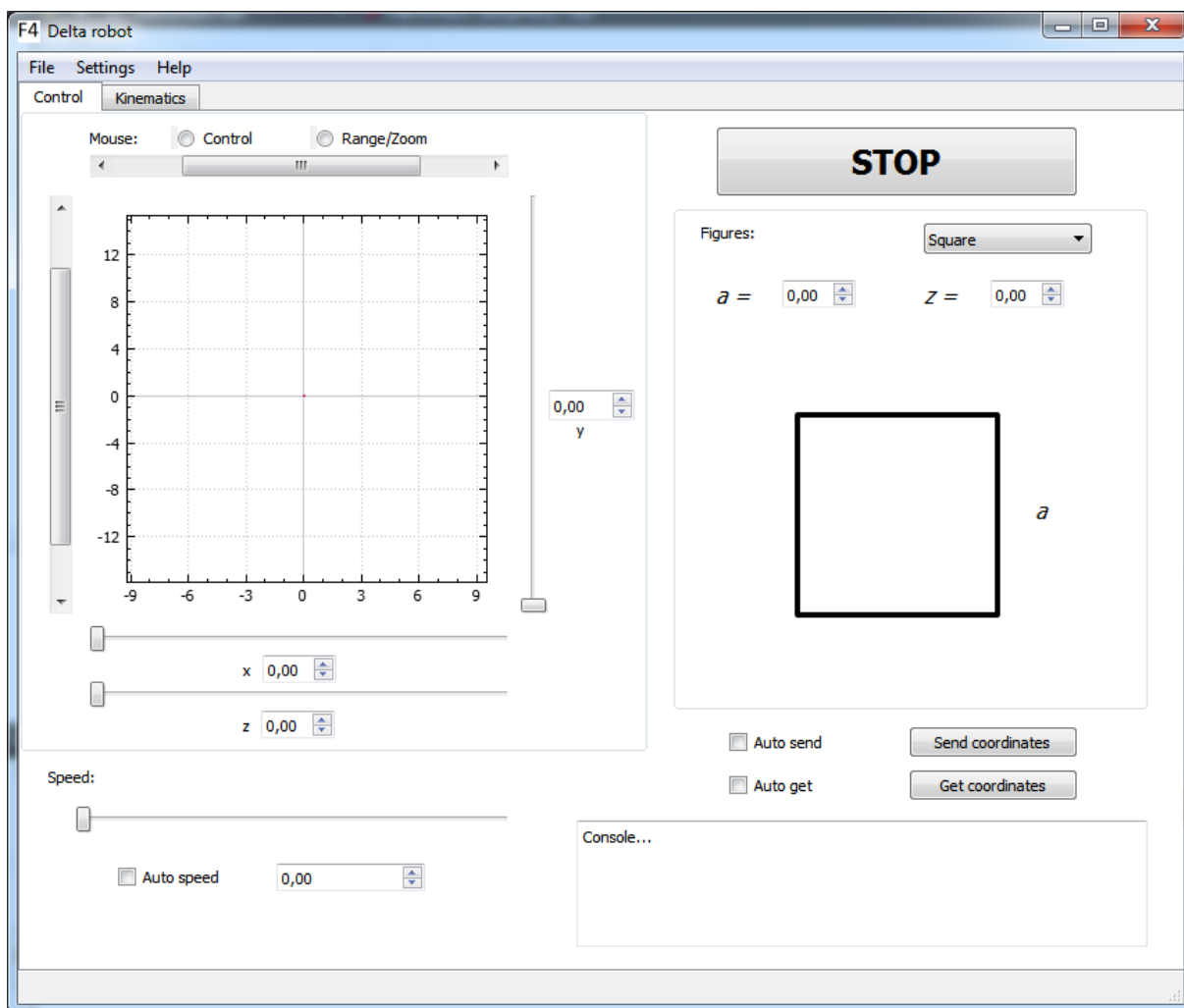
Ugyanitt van lehetőségünk alap 2 és 3D alakzatok megrajzolásához, mint például kör vagy téglatest. Ehhez ki kell választanunk a kívánt alakzatot a legördülő listából majd meg kell adnunk az ahhoz tartozó paramétereket. Meg kell adnunk a z koordinátát is, ami minden esetben az alakzat legkisebb pontja a z tengelyen.

Mindkét esetben az effektor sebességét a *Speed* csúszka segítségével adhatjuk meg. *Auto speed* üzemmódban az effektor egy előre beállított viszonylag lassú mozgást végez.

A parancsok kiadása és az adatok fogadása történhet automatikusan (*Auto send*, *Auto get* jelölőnégyzet) illetve manuálisan a *Send coordinates* és a *Get coordinates* gombok segítségével.

A *Console* ablak az aktuális állapotról ad információt, mint a küldött koordináták vagy a fogadottak.

A grafikus felület segítségével nem adhatunk ki irreális paramétereket (koordináták, sebesség), de az esetleges meghibásodás elkerülése érdekében beépítésre került *Stop* gomb is. (17. ábra)



17. ábra

A *Control* fül

7.5 Kinematics fül

Ez a fül főleg a fejlesztésnél nyújt segítséget. A fül bal részén megjelenik, hogy adott paraméterek mellett (bázis, effektor, karok nagysága) mekkora térben képes a robot manipulálni illetve milyen szögekben kell elfordulniuk a motorjainknak. A *Use default settings*

jelölőnégyzet segítségével automatikusan a Delta robot paraméterei kerülnek felhasználásra. Mielőtt a robotot „munkára bírnánk” jobb oldalon lehetőségünk van az inverz és direkt kinematika által kiszámított koordináták és szögek összehasonlítására, ellenőrzésére. A koordinátákat egyszerűen szövegmezők segítségével adhatjuk meg, programunk pedig a mikrovezérlőnél használt függvényekkel számol.

Lehetőség nyílik arra is, hogy a direkt kinematikához tartozó szögeket ne manuálisan adjuk meg, hanem az elfordulás-érzékelőktől kapjuk (*Get angels from encoders* jelölőnégyzet). (18. ábra)

F4 Delta robot

File Settings Help

Control Kinematics

☐ Use default settings

Robot dimension (mm)

Base (f) 75,5

End Effector (e) 24,0

Bicep length (re) 100,0

Forearm length (re) 300

Cube envelope

x =	-78.231	78.231
y =	-78.231	78.231
z =	-377.8	-221.362
θ1 =	-42.92	98.73
θ2 =	-49.49	98.61
θ3 =	-49.49	98.61

Center (x,y,z)

0	0	-299.593
---	---	----------

☐ Get angels from encoders

Select kinematics type:

☒ Forward (angles) ☐ Inverse (coordinates)

Motor 1 degrees

Motor 2 degrees

Motor 3 degrees

x mm

y mm

z mm

Console...

18. ábra

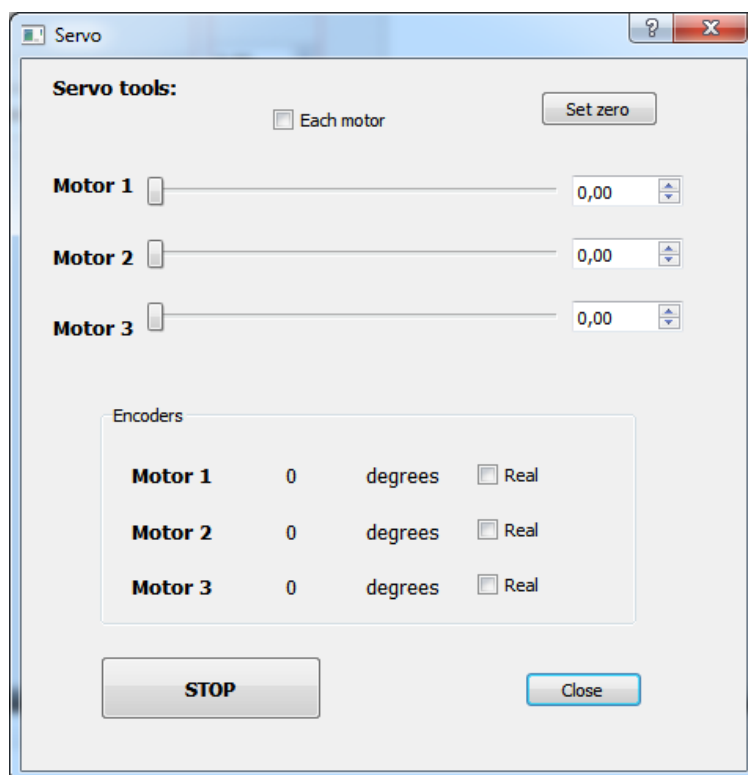
A Kinematics fül

7.6 A menü bemutatása

Itt a *Settings* menüpontot érdemes kiemelnünk mivel a többi menüpont a megszokott funkcióval rendelkezik.

Amennyiben több eszköz csatlakozik, az *UART* beállításánál lehetőségünk van a használni kívánt port kiválasztására. Ha csak egy eszközt használunk a csatlakozás automatikus.

A *Servo tools* pont kiválasztása esetén egy új ablak nyílik meg. A *Set zero* gomb segítségével a rugalmatlan karok 0° -os pozícióba kerülnek. Erre a karok esetleges hibás motor tengelyen való elmozdulásakor illetve a beállításánál van szükség. Ugyanitt van lehetőség egy csuszkák (*Motor 1-2-3*) segítségével változó kitöltési tényezőjű PWM jel előállítására szintén a szervó motorokhoz. Az *Encoders* csoport a visszamért szögekről ad információt -90° és $+90^\circ$ szögtartományban. Amennyiben a *Real* jelölőnégyzet aktív, a kijelzés 0° és 180° szögtartományban történik. (19. ábra)



19. ábra

A Servo tools fül

8 Következtetések

A robot életre keltéséhez rögzös út vezetett. A téma még nem annyira kiforrott, hogy meglennének a bevált módszerek. Igaz, hogy egy ipari minőségű robot megépítése egyetemi körülmények között kivitelezhetetlen, de egy olyan modellt szerettem volna létrehozni, ami komolyabb a hobbi céllal épített társainál és megközelíti a külföldi egyetemeken épített társait.

9 További lehetőségek

9.1 Oktatásba történő bevezetés

Az oktatásba történő bevezetésnek két útját látom. Elsősorban az Automatizált gyártórendszerek tárgy keretén belül jó példa lenne arra, hogy a hallgatók megtanuljanak koordináta-térben gondolkodni.

Összehangolni egy megfogót a robot mozgásával illetve különböző feladatokat elvégezni, az egyszerű pingpong labda felemelésétől egészen az élőképes feldolgozásig.

A másik út a MATLAB és embedded coder-ének megismerése, mert úgy látom a Matlab segítségével könnyen meg lehetne oldani az inverz illetve direkt kinematika problémáját.

9.2 További lehetőségek a fejlesztésben

Az első közeli cél a smart sevak fejlesztése, a robot hatékonyabbá tétele, a második a robot gépi látásának megvalósítása (OpenCV).

9.3 Későbbi célkitűzések

A későbbi fejlesztések során kétfelé szeretném bontani a robot vezérlő elektronikáját, az említett oktatásba való bevezetés miatt.

1. Egy egyszerű elektronika, ahol az MCU segítségével csak a szervókat illetve a megfogót vezéreljük. Ez a megoldás első lépésben könnyebben bevezethető lenne.
2. Egy bonyolultabb rendszer, ahol minden motort külön MCU vezérelne ami CAN vagy egyéb kommunikációs csatornán kapná a fő vezérlő egységtől a kívánt adatokat.

A vezérlő egységet egy Safety MCU-n futtatott RTOS vezérelné, mely a nagy biztonság mellett ellátná a képfeldolgozás feladatait is.

10 Irodalom és ábrajegyzék

10.1 Irodalomjegyzék

[1] – Maxim Zavatsky: *Delta robot kinematics*

(<http://forums.trossenrobotics.com/tutorials/introduction-129/delta-robot-kinematics-3276/>)

[2] – Prof. Paul Zsombor-Murray: *Descriptive Geometric Kinematic Analysis of Clavel's "Delta" Robot*

(<http://www.cim.mcgill.ca/~paul/clavdelt.pdf>)

[3] – Ismeretlen szerző: *What is a parallel robot?*

(<http://www.mecademic.com/What-is-a-parallel-robot.html>)

[4] – Ilian Bonev: *Delta Parallel Robot — the Story of Success*

(<http://www.parallemic.org/Reviews/Review002p.html>)

[5] – Laure-Anne Pessina: *Reymond Clavel, creator of the Delta Robot reflects on his career*

(<http://sti.epfl.ch/page-76362-en.html>)

[6] – Ilian Bonev: *The True Origins of Parallel Robots*

(<http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>)

[7] – Texas Instruments: TM4C123G adatlap

(<http://www.ti.com/product/tm4c123gh6pm>)

[8] – Austria Microsystems: AS5048B adatlap

(<https://www.ams.com/eng/Products/Position-Sensors/Magnetic-Rotary-Position-Sensors/AS5048B>)

[9] – Qt (software) wikipedia

([http://en.wikipedia.org/wiki/Qt_\(software\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Qt_(software)))

10.2 Ábrajegyzék

[1. ábra] – <https://arvc.umh.es/parola/lesson1.html>

[2. ábra] – <http://www.mecademic.com/What-is-a-parallel-robot.html>

[3. ábra] – <http://sti.epfl.ch/page-76362-en.html>

[4. ábra] – <http://www.parallelemic.org/Reviews/Review002p.html>

[5. – 11. ábra] – <http://forums.trossenrobotics.com/tutorials/introduction-129/delta-robot-kinematics-3276>

[14. ábra] – <https://www.ams.com/eng/Products/Position-Sensors/Magnetic-Rotary-Position-Sensors/AS5048B>

[12; 15-19. ábra] – Saját ábrák és képek