



SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
UNIVERSITAS SCIENTIARUM SZEGEDIENSIS
MÉRNÖKI KAR

***NÉGY SZABADSÁGFOKÚ KOLLABORATÍV ROBOTKAR
MEGTERVEZÉSE ÉS KIVITELEZÉSE***

TDK DOLGOZAT

Jernei Mihály

*IV. évfolyamos mechatronikai mérnök
hallgató*

Témavezető:

Kóczi Dávid

tanársegéd

SZEGED

2022

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	2
1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	3
1.1 Ipari robotok fejlődése.....	3
1.2 Robotkarok csoportosítása	6
1.2.1 Alapfogalmak	6
1.2.2 Csoportosítás	8
1.3 Robotkarok irányítási lehetőségei	11
1.3.1 Robot manipulátorok irányítási rendszere	11
1.3.2 Denavit-Hartenberg eljárás	13
1.3.3 Inverz kinematika	15
1.4 Szervó motorok felépítése és működése	17
1.4.1 RC szervó motorok.....	18
1.5 Kollaboratív robotok	20
1.5.1 Robotok kollaboratív működésének megvalósítása	21
1.5.2 Ipari alkalmazások	23
1.5.3 A kollaboratív robotok ipari alkalmazásának nehézségei	24
2. NÉGY SZABADSÁGFOKÚ KOLLABORATÍV ROBOTKAR TERVEZÉSE	26
2.1 Kritériumok meghatározása.....	26
2.1.1 A robotkarral szemben támasztott kritériumok:.....	26
2.1.2 Időterv és célkitűzések:	27
2.2 Tervezés menete	28
2.2.1 Mechanikai tervezés	28
2.2.2 Elektronikai tervezés	33
3. NÉGY SZABADSÁGFOKÚ KOLLABORATÍV ROBOTKAR KIVITELEZÉSE	38
3.1 Mechanikai kivitelezés	38
3.1.1 Az alkatrészek 3D nyomtatása	38
3.1.2 Mechanikai összeszerelés	40
3.2 Elektronikai kivitelezés.....	42
4. SAJÁT FEJLESZTÉSŰ VEZÉRLŐ SZOFTVER BEMUTATÁSA	44
4.1 Kezelőfelület ismertetése.....	44
4.2 Program működése	47
5. MÉRÉSEK EREDMÉNYEINEK ISMERTETÉSE ÉS KIÉRTÉKELÉSE	55
5.1 Ütközés irányának meghatározása a motoráramok alapján.....	55
5.2 A robotkar által kifejtett erő ütközéskor és megfogáskor	56
5.2.1 A robotkar által kifejtett erő ütközéskor	56
5.2.2 A megfogó szerkezet által kifejtett erő mérése	57
5.3 Ütközési reakcióidő.....	57
5.4 Pozícionálási pontosság.....	57
5.5 Teherbírás	58
6. ÖSSZEGÖGLALÁS ÉS JAVASLATTÉTEL	59
IRODALOMJEGYZÉK	61
ÁBRAJEGYZÉK	63
MELLÉKLETEK	66

BEVEZETÉS

A dolgozatom célja egy 4 szabadságfokkal rendelkező, kollaboratív működésre képes 3D nyomtatott robot manipulátor megtervezésének és kivitelezésének bemutatása, amely alkalmas kollaboratív funkciók mérésére, fejlesztésére.

A témaválasztásom oka, hogy a mechatronikai tanulmányaim alatt mindvégig magas érdeklődést mutattam a robotika világa iránt, azon belül is az emberek és robotok kollaboratív munkavégzése ragadta meg a figyelmemet, amelyből kiindulva kellő motiváció állt rendelkezésemre a dolgozat témájához.

A dolgozatomra mindvégig egy projektként tekintettem, az előzetesen készített időterv és a hozzá kapcsolódó célkitűzések következetes betartásával végeztem el a teljes feladatot a tervezéstől a végső kivitelezésig.

Az első fejezetben ismertetem azokat a szakirodalmi alapfogalmakat és jellemzőket, amelyek alapjául szolgálnak a dolgozatom elkészítéséhez, emellett feldolgozom a szakirodalom azon részeit, amelyek a későbbi továbbfejlesztéseket szolgálhatják vagy a robotika tudományterületében nélkülözhetetlen egységeket képeznek. A második részben bemutatom a robot manipulátor tervezésének főbb lépéseit mechanikai és elektronikai oldalról, ismertetem a felmerülő problémákat és azok megoldásait. A harmadik fejezetben a kivitelezés eredményét szintén mechanikai és elektronikai egységekre bontva mutatom be, valamint ismertetem az alkalmazott 3D nyomtatási technológiát. A negyedik részben bemutatom a saját fejlesztésű szoftvert, valamint a robotkar kollaboratív működésének megvalósítását. Az ötödik fejezetben az elkészített robotkaron végzett méréseket ismertetem, azok eredményeit és a kiértékelésüket. Az utolsó fejezetben értékelő összefoglalást készítek, továbbá módosítási és továbbfejlesztési javaslatokat teszek.

Dolgozatomban arra törekszem, hogy lényegre törően bemutassam és szemléltessem a teljes projektet, mind elméleti és gyakorlati szinten, valamint megfelelően demonstráljam a robotkarok kollaboratív működésének egy lehetséges megoldását. A robot manipulátor reprodukálhatósága nem célom, melynek okán az egyes műszaki rajzok, dokumentációk, a gyártástechnológiára vonatkozó utasítások a dolgozatban nem kerülnek teljes részletességgel bemutatásra.

1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Ebben a fejezetben feldolgozom azokat a szakirodalmakat, amelyek szükségesek a dolgozatom megértéséhez, vagy elkerülhetetlenek a robotika területén. Bemutatom az ipari robotkarok fejlődéstörténetének nagyobb mérföldköveit, ismertetem a robotika fő alapfogalmait, valamint a robot manipulátorok alapkonfigurációit. Kitérek a robotkarok szabályozástechnikai lehetőségeire, a szervó motorok típusaira és működésére, továbbá ismertetem a kollaboratív robotika alapjait.

1.1 Ipari robotok fejlődése

Az ipar múlt évszázadbeli fejlődését nyomon követve jól látható, hogy a modern technológiák megjelenésével az automatizálás a különböző gyártási folyamatok egyre szélesebb területén került alkalmazásra. Ez a változás elsősorban az ismétlődő, periodikus munkálatoknál jelent meg, majd a technológia fejlődésével a komolyabb precizitást igénylő műveleteket is automatizált berendezésekkel hajtották végre.

Az ipari robotkarok először az anyagmozgatási folyamatoknál kerültek alkalmazásra, mint újraprogramozható, többcélú manipulátor. Ezen berendezések alapját George C. Devol tette le, aki 1946-ban szabadalmaztatott egy vezérlő berendezést, amely a villamos jelek feldolgozását tette lehetővé. 1954-ben Joseph Engelberger, Devol szabadalmát megvásárolva létrehozta az „Unimation” névre hallgató vállalatot, ahol megkezdődött az első ipari robotok sorozatgyártása. A világ első Unimate gyártmányú ipari robotját, amely hidraulikus meghajtással rendelkezett, a General Motors állította üzembe egy fröccsöntőgép kiszolgálására (1.ábra).



1.ábra: Első Unimate ipari robot (www.cnc.hu, 2022.07.12)

A robot fogalmát a Nemzetközi Szabványügyi Hivatal a következőképpen foglalta írásba: „A robot automatikusan vezérelt, újra programozható, három vagy több tengelyű mozgásra és sokoldalú beavatkozásra képes eszköz. A robot lehet rögzített vagy mozgó eszköz” (ISO8373 : 1996).

Az Unimate ipari robot manipulátorát követően 1973-ban a Stanford Egyetemen Victor Scheinman kifejlesztett egy 6 szabadságfokkal rendelkező tisztán villamos hajtású robotkart, amely „Stanford kar” néven híresült el (2.ábra). Victor Scheinman a későbbiekben az Unimation vállalatnál dolgozva a Stanford kart alapul véve megtervezte a PUMA robotot, melynek sorozatgyártása 1978-ban indult el. Ezeket a robotkarokat elsőként szintén a General Motors vásárolta meg és helyezte üzembe (3.ábra). A PUMA robotkar korszerű szervó meghajtással, fékrendszerrel, pozíció visszacsatoló egységgel és számítógépes vezérelhetőséggel rendelkezett. Ezen két berendezés nagy mértékben meghatározta a napjainkban alkalmazott robotkarok kinézetét és felépítését (MESTER,2011).



2.ábra: Stanford robotkar (en.wikipedia.org, 2022.07.14)



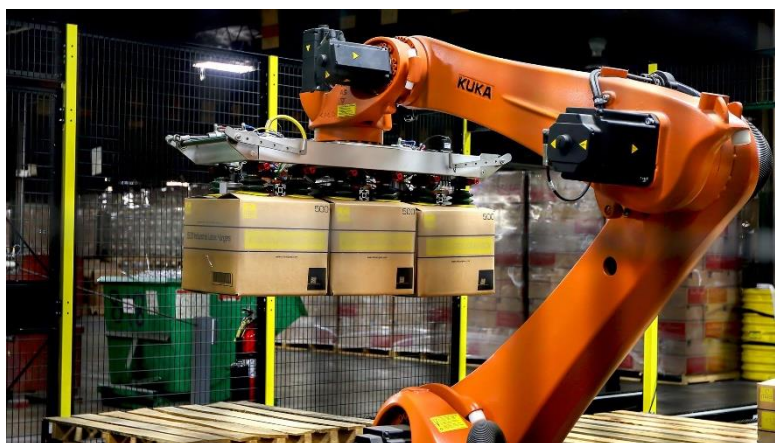
3.ábra: PUMA robotkar (upload.wikimedia.org, 2022.07.12)

A robot manipulátorok másik fő ágát képviselik az 1979-ben kifejlesztett SCARA típusú robotok, melyeket Japánban a Yamanashi Egyetemen terveztek meg (4.ábra). A SCARA robotkarok kialakításából adódóan X-Y irányú mozgásra képesek, Z-irányba mereven viselkednek. Alkalmasak szűk helyeken történő munkálatok végzésére, valamint nagy sebességgel történő munkavégzésre (MESTER,2011).



4.ábra: Az első SCARA robotkar prototípusa (www.researchgate.net, 2022.07.12)

A technológia fejlődésével a robotkarok egyre erősebb mechanikai felépítésű berendezésekké váltak, amelynek köszönhetően napjainkban akár több száz kilogrammos terhelhetőséggel rendelkeznek, precízebb hajtási rendszerek alakultak ki, melyek következtében a pozicionálás század, vagy akár ezred milliméter pontossággal is történhet. Ezen tulajdonságokból kiindulva az iparban egyre jobban elterjedtek a „kar” felépítésű 6 szabadságfokú robot manipulátorok. A 90-es években százalékos arányban főképpen présgép és szerszámgép kiszolgálásra alkalmazták a berendezéseket, emellett kisebb arányban festési és szerelési munkálatokra is igénybe vették. A vezérlőrendszerek fejlődésével napjainkra már nagy mértékű precizitás és munkavégzési sebesség jellemzi a robot manipulátorokat, melyek az elvégzendő feladatok komplexitásának növekedését tették lehetővé, melynek következtében a robotberendezések iránti keresletet évről-évre jelentős mértékben növekszik. (PINTÉR, 2022a)



5.ábra: 6 szabadságfokú palettázó KUKA robot manipulátor (www.kuka.com, 2022.07.14)

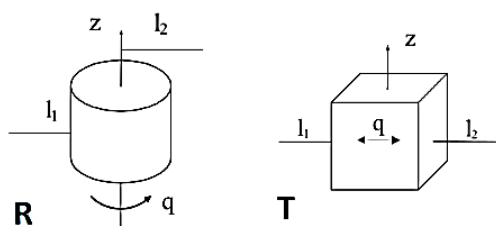
A napjainkban alkalmazott robot manipulátorok legtöbb esetben monoton, ismétlődő munkafolyamatokat látnak el, melyet sok esetben nagy sebességgel végeznek. A nagy sebesség hátránya közé sorolható a berendezés veszélyességi foka. A balesetek elkerülése érdekében a robot manipulátorok az emberektől elkülönítve, egy cellában végzik az adott feladatot, viszont a komoly óvintézkedések ellenére is fordulnak elő balesetek. A modern, újkeletű fejlesztések egyre növekvő mértékben arra irányulnak, hogy olyan robotokat hozzanak létre, amelyek képesek az emberrel biztonságosan együtt dolgozni, vagyis kollaboratív módon tudják elvégezni a kijelölt munkafolyamatukat. A robotkarok ezen tulajdonságát számos érzékelő berendezés alkalmazása teszi lehetővé, melyek a robot és a környezete közötti kapcsolatot hozzák létre. A robotika ezen területén történő fejlesztések kiemelt hangsúlyt fektetnek az érzékelő rendszerek minél pontosabb, precízebb működésére, mivel ez határozza meg a robot manipulátor „intelligenciáját”, amely segítségével egyre pontosabb információkat képes begyűjteni és feldolgozni a környezetéről.

1.2 Robotkarok csoportosítása

1.2.1 Alapfogalmak

A **robotmechanika** egy olyan mechanikai szerkezetnek tekinthető, amely az emberi kar mozgását valósítja meg, vagy az emberi munkavégzés mozgásformáit leképző gépszerkezet, amely kinematikai tagok és kényszerek térbeli kombinációjából épül fel. Az alkalmazott kényszerek teszik lehetővé a robotkarok forgó és haladó mozgását egyaránt. (KULCSÁR, 2012a)

Az iparban használatos robot manipulátorok szerkezeti felépítése két fő egységre bontható, szegmensekre és az azokat összekötő csuklókra. A **robotcsuklók** lehetővé teszik az egyik szegmens másikhöz viszonyított haladó és forgó mozgását. Ebből kiindulva megkülönböztetünk rotációs és translációs csuklókat. A **rotációs csuklók** az egyik szegmens forgó mozgását teszi lehetővé a másik szegmens körül, betűjele **R**, sematikus ábrázolásakor hengerként jelölhető. A **transzlációs csuklóknál** az egyik szegmens képes haladó mozgást végezni a másikhöz viszonyítva, sematikus hasábként ábrázolható, **T** szimbólummal hivatkozhatunk rá (6. ábra). (MESTER, 2011)



6.ábra: Rotációs és translációs robotcsukló sematikus ábrázolása
(MESTER,2011)

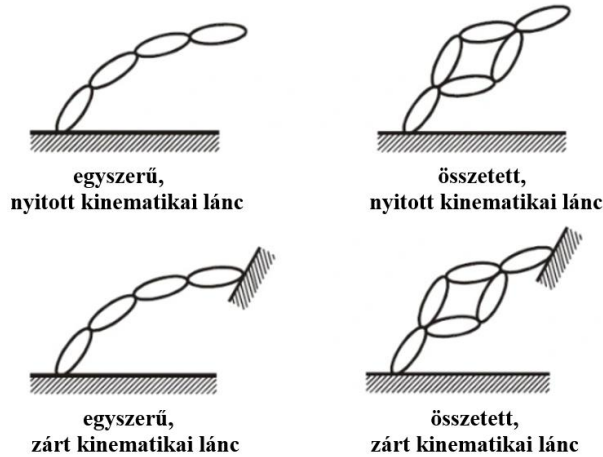
A **robotszegmens** merev testként jellemezhető, amely saját kinematikai és dinamikai paraméterekkel bír. Kinematikai paraméter a szegmens hossza és a robotcsuklók egymással bezárt szöge, a dinamikai paraméterek közé a szegmens tömege, valamint a tehetetlenségi nyomatéka sorolható.

A robotszegmenseket kinematikai párokba és láncokba sorolhatjuk. A **kinematikai pár** két egymás melletti szegmensből, valamint az azokat összekötő robotcsuklókból épül fel. Egy robotkar kinematikai párjai láncolatot alkotnak, melyet **kinematikai láncnak** neveznek, amely alapján több típust különböztethetünk meg (7.ábra):

- Az **egyszerű kinematikai láncnál** egyik szegmens sem kapcsolódik több mint két kinematikai párhoz.
- Az **összetett kinematikai lánc** esetében legalább egy szegmensnek több mint két kinematikai párhoz kell csatlakoznia.

- A *nyitott kinematikai lánc* szegmensei egyenként csak egy kinematikai párhoz tartozhatnak.
- A *zárt kinematikai láncnál* minden szegmens két kinematikai párhoz tartozik.

(MESTER, 2011)



7.ábra: Kinematikai lánc típusai (cserviktamas.wordpress.com, 2022.08.01)

A robotkar munkavégzése közbeni helyzetmeghatározáshoz ismerni kell az effektor pozícióját és orientációját. Az **effektor** a kinematikai lánc végén elhelyezkedő, végmanipulátornak is nevezhető megfogó szerkezet vagy szerszám, amely rendelkezik egy úgynevezett „*Tool Center Point*” -al, röviden **TCP**-vel. Ez fontos szerepet játszik a robotkar pályatervezésekor. Az effektor **TCP pontjának** pozicionálása történhet világ- és csuklókoordináták szerint.

A **robot manipulátor csuklókoordinátája** a kinematikai pár egyik szegmensének a másik szegmenshez viszonyított relatív helyzetét megadó skaláris érték, melynek vektorát q_i -vel jelölhetjük. Rotációs csukló esetében a csuklókoordináta megegyezik a csukló elforgatási szögével, translációs csukló esetében a tengely menti elmozdulással. (MESTER, 2011)

A **világkoordináták** esetében a robot platformjához rögzített nyugvó Descartes féle derékszögű koordinátarendszerben történik az effektor pozíciójának és orientációjának meghatározása. Ez esetben a pozíció három Descartes féle derékszögű koordinátával adható meg, ezek az x , y és z koordináták. Az orientációt a **módosított Euler szögek** írják le, melyek a forgatási szögből - Ψ (Yaw), a billentési szögből - θ (Pitch), és a csavarási szögből - ϕ (Roll) állnak. Ezek segítségével meghatározható az effektorhoz kapcsolt mozgó koordinátarendszer szögelfordulása a robot platformjához rögzített vonatkoztató koordinátarendszerhez viszonyítva. A világkoordináták komponenseit egybefoglaló vektort s -el jelöljük. (MESTER, 2011)

A robotkarok irányításánál fontos szerepet játszik a csuklókoordináták világkoordinátákká történő átalakítása. Erre nyújt segítséget a **Denavit-Hartenberg féle transzformációs eljárás**, melynek lényege, hogy a csuklókra ültetett koordinátarendszerek közötti átmenetet két haladó és két forgó mozgással biztosítani lehet. Ennek pontos működését a későbbiekben részletesebben taglalom. (MESTER, 2011)

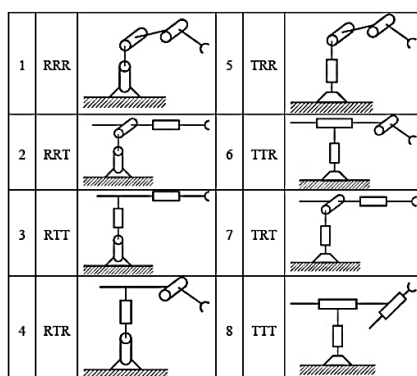
A robotkarok irányításának fontos részét képezik az **érzékelők**, melyek a vezérlés részére szolgáltatnak valós információkat a robotkar különböző mérhető paramétereiről, melyek lehetnek az aktuális csuklókoordináták, erők, nyomatékok, elmozdulások. Az érzékelőket elhelyezkedésük alapján elkülöníthetjük belső és külső elemekre.

- A **belső szenzorok** a robotmechanikán, a hajtórendszeren, valamint a megfogó szerkezeten helyezkedhetnek el. Funkciójukat tekintve ezek a szenzorikai rendszerek főként útmérőkből, szögsebességmérőkből, valamint erő- és nyomatékmérőkből állnak.
- A **külső szenzorok** a robot és a környezete közötti kapcsolatot biztosítják, melyek nagy mértékben meghatározzák a robot intelligencia szintjét. Ezeknek köszönhetően a robotvezérlés önálló beavatkozásokat végezhet a mozgáspályákat megvalósító programokban. Ide sorolhatóak a különböző tapintóérzékelők és látóérzékelők. (SARCEVIC, 2022)

1.2.2 Csoportosítás

a.) *Struktúra alapján*

A robot manipulátorok alapkonzfigurációjuk alapján csoportosíthatóak. **Alapkonzfigurációnak** nevezik a robot manipulátor rögzített alapzatától kiinduló, három csuklós, 3 szabadságfokú kinematikai láncot. Ezt követően helyezkedik el a robotkar effektora, melynek munkatérben való pozicionálását az alapkonzfiguráció végzi. A konzfigurációk között 8 különböző típust különböztetünk meg a rotációs és transzlációs csuklók variációi alapján. (8.ábra) (MESTER, 2011)



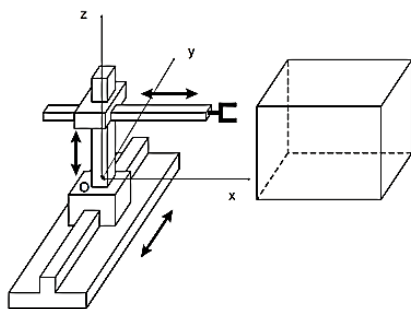
8.ábra: Alapkonzfigurációk (cserviktamas.wordpress.com, 2022.08.01)

Az alapkonfigurációk mozgáslehetőségeit tekintve az egyes elrendezésű robotkarok sajátos munkatérrel rendelkeznek. A robot manipulátor **munkatere** alatt egy bejárható térnagyságot értünk, melynek minden pontjába képes eljutni a harmadik szegmens végső pontja. (MESTER, 2011)

Azokat a tér egységeket, amelyekbe a manipulátor szerkezeti kialakításából adódóan nem képes eljutni, **holttérnek** nevezzük. A munkatérre egyfajta mozgási koordináta-rendszerként is tekinthetünk, amely alapján megkülönböztetünk derékszögű, henger, gömbi koordináta-rendszerű és csuklós rendszerű alapkonfigurációkat. (KULCSÁR, 2012a)

- **Derékszögű koordináta-rendszerű TTT struktúra**

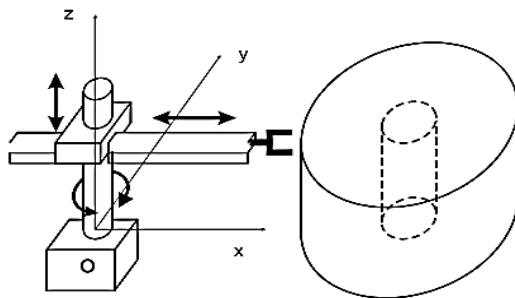
A 9-es ábra alapján 3 transzlációs csukló segítségével 3 haladó mozgást képes végezni, amely egy Descartes féle derékszögű koordináta-rendszerben leképezett hasáb alakú munkatérrel eredményez. Kialakításának köszönhetően aránylag nagy teherbírás és nagy pontosság jellemzi, valamint nem rendelkezik holttérrel. Szabadsági fokai: x, y, z . (NAGY, 2022)



9.ábra: TTT alapkonfiguráció (SARCEVIC, 2022)

- **Henger koordináta-rendszerű RTT struktúra**

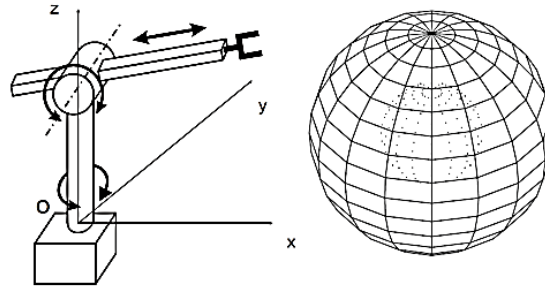
A struktúra 2 transzlációs és egy rotációs csuklójából adódó két haladó és egy forgó mozgáslehetőségből adódóan a munkatér egy hengergyűrűnek feleltethető meg (10.ábra). Szerkezetéből adódóan rendelkezik holttérrel, főként futószalagok által kiszolgált rakodási feladatokra alkalmazzák. Szabadsági fokai: x, y, z, Ψ . (NAGY, 2022)



10.ábra: RTT alapkonfiguráció (SARCEVIC, 2022)

- **Gömbi koordinátarendszerű RRT struktúra**

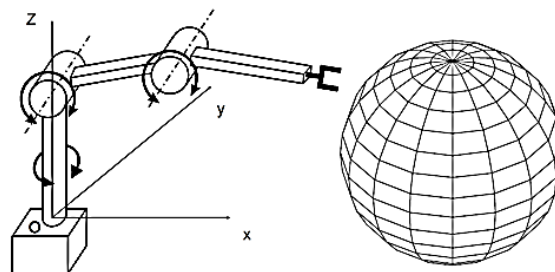
A 11-es ábrán látható konfiguráció esetén a két forgó és egy haladó mozgást megvalósító két rotációs és egy transzlációs csukló egy üreges gömb alakú munkateret eredményez a manipulátornak. A szögmozgások és a struktúra következményeként a munkatér tartalmaz holtteret. Szabadságfoka: x, y, z, Ψ . (NAGY, 2022)



11.ábra: RRT alapkonfiguráció (SARCEVIC, 2022)

- **Csuklós rendszerű RRR struktúra**

A három rotációs csuklónak köszönhetően három forgó mozgást is képes megvalósítani a robotkar, így a munkatér ebben az esetben egy gömb alakját írja le (12.ábra). Nagy munkatéréből és szabadságfokaiból adódóan napjainkban az egyik legnépszerűbb típus. Szabadságfoka: $x, y, z, \Psi, \theta, \varphi$



12.ábra: RRR alapkonfiguráció (SARCEVIC, 2022)

b.) **Alkalmazás szerinti csoportosítás**

A robotkarok kialakításukból adódóan a legkülönbözőbb technológiai területeken is alkalmazhatóak. Eltérő mértékben jelen vannak az ipar, építőipar, az űrkutatás, a harcászat, az egészségügy számos területén, melyek közül az ipari felhasználás a legelterjedtebb. Ezen belül az iparban főként anyagmozgató rendszerekkel, gyártócellákkal, festőrendszerekkel, hegesztőrendszerekkel, kontúrvágó rendszerekkel és szerelőrendszerekkel találkozhatunk, melyek robotmanipulátorokat alkalmaznak. Így megkülönböztetünk anyagkezelő robotrendszereket, gyártócellákat, festő-, hegesztő-, vágórendszereket. (KULCSÁR, 2012b)

A robotkarok a felsorolt felhasználásokon kívül számos más technológiai folyamatba is integrálhatóak. Ezek lehetnek például ragasztási, felület elkészítési, csomagolási, forgácsolási, összeszerelési és mérési munkafolyamatok is, melyek alapján megállapítható, hogy az iparban alkalmazott robot manipulátorok végezhetnek fő munkafolyamatokat, valamint végezhetnek kisegítő technológiai műveleteket is egyaránt. Emellett a robotirányítási technológia jelen állása lehetővé teszi a robotkarok együttes, összehangolt működését, melynek köszönhetően egyre szélesebb körben teljes gyártósorok műveleteit végzik kizárólag robotkarok. (PINTÉR, 2022a)

1.3 Robotkarok irányítási lehetőségei

1.3.1 Robot manipulátorok irányítási rendszere

A robot irányítási rendszere az összes részegységet magába foglalja, amely szükséges a berendezés működéséhez. Ilyen részegység a vezérlő és a beavatkozó szerv, a szoftver és a számítástechnikai eszközök. A robotkarok irányításakor az effektor TCP pontjának pályatervezése az adott munkakörnyezetben való könnyű elhelyezés érdekében világkoordinátákban történik. Az irányító rendszerek legfontosabb feladata a TCP pont pályatervezetéből előállítani a csuklókoordinátákat, melyeket felhasználva az irányító szoftver, a hajtórendszerrel és szenzorikai egységgel együttesen képes végrehajtani a robotcsuklók megfelelő pozicionálását. Emellett az irányító rendszer számos feladatot végez. Ezek a:

- környezettel való kapcsolattartás,
- hajtásszabályozó rendszerek felügyelete,
- programok tárolásának biztosítása,
- egységek közötti adatkommunikáció felügyelete.

(KULCSÁR, 2012b)

A robotkarok irányító rendszerének belső adatfeldolgozó egysége modulokból tevődik össze, melyek mindegyike fontos részfeladatot lát el az üzemeltetés alatt. A modulok struktúrája a különböző gyártók esetében eltérőek, a közös pontok azonban mindegyikben megtalálhatóak. Ezek a CPU modul, a szervó modul, a memória modul és az input-output modul. (KULCSÁR, 2012b)

A robotvezérlések az egyes robot manipulátorok esetében eltérőek felépítésükből adódóan, így meghatározva a felhasználási körüket is. Megkülönböztetünk „*pick and place*” vezérlést, „*pontvezérlést*”, „*pályavezérlést*”, valamint „*Teach-in play-back*” vezérlést. (PINTÉR, 2022c)

A dolgozatom szempontjából releváns a teach-in play back. A *Teach-in play-back* vezérléssel a betanításkor felvett pontok koordinátáit képes tárolni a futó idő függvényében egy

nagy kapacitású háttértárolóban. Egyszerű felépítéséből aóóóan nem tartalmaz aritmetikai és interpolátor egységet, alkalmazható például festési és csiszolási munkafolyamatok végzésére. Hátránya a program körülményes módosíthatósága. (PINTÉR, 2022c)

A robotkarok programozásának a leggyakrabban alkalmazott módja programnyelvi utasításokkal történik. Számos speciális programnyelvet fejlesztettek ki, melyek a robot manipulátorok sajátos feladatait képesek elvégezni. Ilyenek lehetnek a különböző koordináta transzformációk, az effektor- és szenzorvezérlés. PINTÉR (2022c) egyetemi jegyzete szerint a következő elterjed programozási nyelvek vannak használatban:

- SRL (Structured Robot Language)
- PASRO (PAScal for RObots)
- ROBEX (ROBot EXapt)
- ARLA (ASEA Robot Language)
- BAPS (Bosch Advanced Programming System)
- SRCL (Siemens Robot Control Language)
- ROLF (Robot Language Formula)
- ROBOTstar
- AL (Assembly Language)
- AML (A Manufacturing Language)
- HELP
- VAL (Variable Assembly Language)
- SIGLA (SIGma LAnguage).

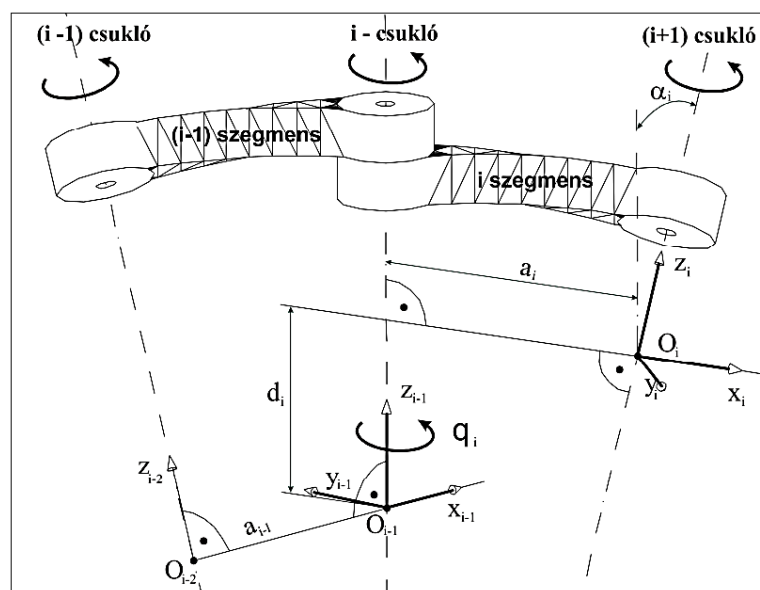
1.3.2 Denavit-Hartenberg eljárás

A robot manipulátorok irányításában és szabályozásában fontos szerepet játszik a csuklókoordináták és a világkoordináták közötti transzformáció lehetősége. Az ehhez szükséges nélkülözhetetlen matematikai eljárását, amellyel az egyik koordinátarendszer két haladó és két forgó mozgással átvihető egy másikba, Jacques Denavit és Richard Hartenberg publikálta 1955-ben. (SIMON, 2022)

Az eljárás MESTER leírása szerint a következőképpen történik. A robotkar az i -edik és $i+1$ -edik csuklójára egy-egy Descartes féle derékszögű koordinátarendszert helyezünk úgy, hogy a z tengely a csuklók tengelyének irányába esik (13.ábra). A két egymás után lévő koordinátarendszer felvételénél a következő szabályokat kell követni:

- Elsőként az $i+1$ -es robotcsuklón megválasztjuk az $O_i x_i y_i z_i$ koordinátarendszert:
 - a z_i tengely az $i+1$ -edik csukló irányába fekszik
 - az x_i tengely a két szemlélt csukló tengelyének közös normálisába esik és az i -edik csuklótól az $i+1$ -edik csukló felé mutat
 - az y_i eleget tesz a következő feltételnek: $x_i y_i z_i = z_i$ – jobbsavár irányú
- Az i -edik robotcsuklón megválasztjuk az $O_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ koordinátarendszert:
 - a z_{i-1} tengely az i -edik csukló irányába fekszik
 - az x_{i-1} tengely az $i-1$ -edik és i -edik csuklók tengelyének közös normálisába esik és az $i-1$ -edik csuklótól az i -edik csukló felé mutat
 - az y_{i-1} eleget tesz a következő feltételnek: $x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1} = z_{i-1}$ – jobbsavár irányú

(MESTER, 2011)



13.ábra: Derékszögű koordinátarendszerek helyzete a Denavit-Hartenberg eljárás szerint (MESTER, 2011)

A Denavit-Hartenberg eljárás a következő paraméterekből tevődik össze:

- q_i - csuklókoordináta, amely rotációs csukló esetén az x_{i-1} és az x_i tengelyek által bezárt jobbsavar irányultságú szög nagysága
- d_i - minden csuklótengely két normálissal rendelkezik (a_{i-1} és a_i) és a normálisok közötti az i -edik csukló z_{i-1} tengelye mentén mérhető távolság adja a paramétert
- a_i - az i -edik és $i+1$ -edik csukló-tengelyek közös normálisának a hossza az x_i tengelyen mérve
- α_i - az i -edik csukló z_{i-1} és az $i+1$ -edik csukló z_i tengelye közötti jobbsavar irányú szög az a_i -re merőleges síkban

(MESTER, 2011)

Az így felvett két szomszédos derékszögű koordinátarendszer a korábban említettek szerint két haladó és két forgó mozgással átvihető egymásba. Elsőként az első koordinátarendszert z tengely körül q_i -vel elforgatjuk, így elérve, hogy a két koordinátarendszer x tengelye párhuzamossá váljon. Következő lépés a d_i transláció, amely során z tengely mentén eltoljuk a koordinátarendszert a két x tengely egybeeséséig. Harmadik lépésként ismét egy eltolást végzünk, ez lesz az a_i transláció, amely most az x tengely mentén történik, így elérve, hogy a két koordinátarendszer origója fedésbe kerüljön. Utolsó lépésként α_i -vel végzünk jobbsavar irányú elforgatást az x tengely körül, annak érdekében, hogy a z és y tengelyek is fedésbe kerüljenek. A négy lépés elvégzésének eredményeként az egyik koordinátarendszert sikeresen átültettük a másik koordinátarendszerbe. A lépések felírhatóak egy-egy homogén koordináta-transzformációs mátrixszal is, melyek a 1. mellékletben láthatóak. (SIMON, 2022)

A négy mozgást leíró mátrixokat összefoglalva egy közös Denavit-Hartenberg (továbbiakban **D-H**): transzformációs mátrixba, a következő alakot kapjuk:

$${}^{i-1}\mathbf{D}_i = \mathbf{D}(q_i)\mathbf{D}(d_i)\mathbf{D}(a_i)\mathbf{D}(\alpha_i) \quad (1.1)$$

A mátrixok behelyettesítésével és a szorzások elvégzésével megkapjuk a két egymást követő rotációs csuklóra rögzített derékszögű koordinátarendszer átmenetét leíró **D-H transzformációs mátrixot**:

$${}^{i-1}\mathbf{D}_i = \begin{bmatrix} \cos q_i & -\sin q_i \cos \alpha_i & \sin q_i \sin \alpha_i & a_i \cos q_i \\ \sin q_i & \cos q_i \cos \alpha_i & -\cos q_i \sin \alpha_i & a_i \sin q_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

A **D-H eljárással** kapott transzformációs mátrixok felhasználásával elvégezhetőek az úgynevezett direkt kinematikai feladatok. **Direkt kinematikai** feladat során a robot

manipulátor szerszámközepontjának világkoordinátáit határozzuk meg az ismert szegmensek hosszával, valamint csuklók szögével. A feladat megoldásaként szolgáló homogén transzformációs mátrixot a az egymást követő **D-H mátrixok** kettessel történő szorzásával kapjuk meg a következő felírás alapján:

$${}^0T_n = {}^0D_1 {}^1D_2 {}^2D_3 \dots {}^{n-2}D_{n-1} {}^{n-1}D_n \quad (1.3)$$

Az így kapott 4x4-es mátrix első három sora és oszlopa megmutatja a robot manipulátor álló platformja és az effektor közötti mozgó koordinátarendszert, más néven a rotációs mátrixot. Az utolsó oszlop szolgáltatja számunkra a végmanipulátor szerszámközepontjának nyugvó koordinátarendszerbeli világkoordinátáit. (MESTER, 2011)

$${}^0T_n = \begin{bmatrix} & {}^0R_n & x \\ & & y \\ & & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

A direkt kinematikai feladat a fent elmondottak alapján akkor tekinthető megoldottnak, amikor a TCP pont világkoordinátabeli x, y és z értékeit, valamint a rotációs mátrix által leírt három módosított Euler szöget (Ψ, θ, ϕ) meghatároztuk. (SIMON, 2022)

1.3.3 Inverz kinematika

A robotkarok effektorának pályatervezése a gyakorlatban a legtöbb esetben világkoordinátákban történik, mivel így egy adott munkafolyamat során elvégzendő mozdulatsor, valamint a mozgás során érintendő pontok könnyebben definiálhatóak. A robot manipulátorok valós pozicionálása az adott csuklók szögelfordulásaival történik, így a tervezett pálya, valamint a vezérlőjelek között szükséges egy úgynevezett inverz kinematikai transzformációt alkalmazni. (MESTER, 2011)

Az inverz kinematikai feladatok esetén a direkt kinematikai feladatokkal ellentétben az **s** világkoordinátákból határozhatóak meg a **q** csuklókoordináták, melyeket vezérlőjelként továbbítani lehet a csuklókat mozgató motoroknak (15.ábra). A transzformáció a következő alakban írható fel:

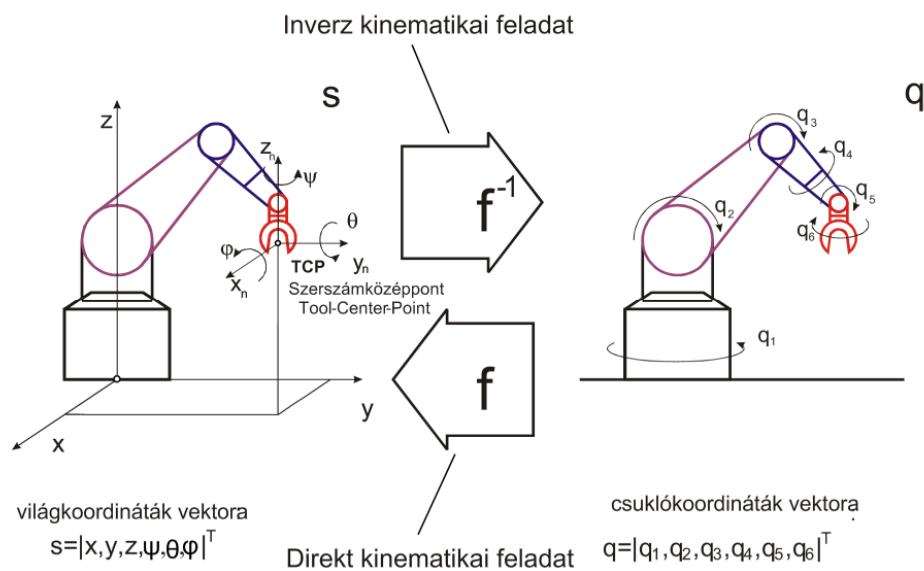
$$\mathbf{q} = f^{-1}(\mathbf{s}) \quad (1.5)$$

A feladat során lényegében meghatározzuk a homogén mátrix transzformációt a nyugvó- és mozgó koordinátarendszerek között az effektor **TCP pontjának** világkoordinátái és orientációjának ismeretében, így a következő módon is felírható a művelet (MESTER, 2011):

$$\mathbf{q} = f^{-1}({}^0T_n) \quad (1.6)$$

Az inverz kinematikai számításokat a robot vezérlő egysége végzi el, amelyről elmondható, hogy nagyszámú nemlineáris trigonometriai egyenletek megoldása komoly számítási kapacitást igényel az összetettsége miatt. A transzformáció elvégzése nem egyértelmű feladat, mivel a számítás a robotkar geometriai paramétereitől nagymértékben függ, továbbá több megoldást is eredményezhet, így szükség van a megoldások közötti vizsgálatokra is.

A több megoldási lehetőség fennállása esetén a manipulátorok vezérlésekor megjelenik a **szingularitás** jelensége. A szingularitás közelében az inverz kinematikai feladat megoldása nem egyértelmű. Ezen esetekben vagy egyáltalán nincs megoldás, vagy végtelen sok áll rendelkezésre, így a robot effektora a munkatér adott irányába a konstrukciójából adódóan nem képes végrehajtani a meghatározott elmozdulást. (MESTER, 2011)



14.ábra: A direkt és inverz kinematikai feladat koordináta-transzformáció struktúrája (MESTER, 2011)

Az inverz kinematikai feladat történhet analitikus és numerikus számításokkal, melyeknek megvannak a sajátos előnyei és hátrányai.

a.) **Analitikus megoldás**

Az analitikus megoldás az inverz nemlineáris, folytonosan deriválható csuklókoordinátákat leképező, összetett n változós f vektorfüggvény tekintetében összetett számítást tesz szükségessé. A legtöbb iparban használatos robot manipulátor inverz kinematikájának megoldása megoldható analitikus módon, így gyakran alkalmazzák.

A módszer előnye, hogy az összes megoldás megkapható, numerikus hibák nélküli pontos eredményeket ad, kevesebb numerikus számítást igényel, így valós idejű számításoknál alkalmazható, emellett felismerhetővé teszi a szingularitásokat. Hátránya, hogy tetszőleges robotkonfigurációkra nem minden esetben írható fel.

b.) *Numerikus megoldás*

A numerikus megoldás szükségessé teszi a Jacobi-mátrix és az inverz Jacobi-mátrix ismeretét. A **Jacobi-mátrix** összeköti számunkra a világkoordináták, valamint a csuklókoordináták sebességvektorait, az effektorra ható erőket, a terhelésből származó erők által előidézett csuklónyomatékokat. A Jacobi-mátrix a világ- és csuklókoordináták közötti összefüggés (fenti képlet) deriválásával állítható elő:

$$\mathbf{s} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) \quad (1.7)$$

$$\dot{\mathbf{s}} = \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{q}} \right) \dot{\mathbf{q}} \quad (1.8)$$

Ebből kifejezve a Jacobi-mátrix a következő módon írható fel:

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{q}} \quad (1.9)$$

(SARCEVIC, 2022)

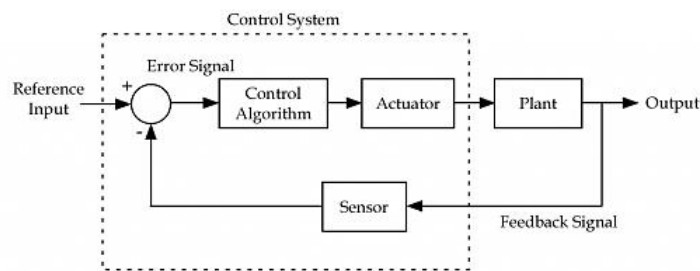
1.4 Szervó motorok felépítése és működése

A robot manipulátorok mozgását biztosító hajtásrendszerek fő feladata a robot TCP pontjának megfelelő pontosságú pozicionálása, valamint az irányítórendszer által előírt pályán történő mozgatása. A robotcsuklók típusa alapján a hajtásrendszer forgó és lineáris mozgásokat valósít meg. Az ipari robotkarok esetében minden egymáshoz képest elmozduló egység rendelkezik egy-egy robottengellyel, melyek mindegyike külön hajtással van ellátva (PINTÉR, 2022b).

Napjainkban főként a villamos hajtások, azon belül is a szervó motorok alkalmazása terjedt el jelentős mértékben az ipari robotok területén. A szervó motorok széles körben megtalálhatóak, például a haditechnikában, járművekben, szerszámgépekben, munkagépekben, műhold követő antennákban, távirányítós modellekben, kamerarendszerekben, valamint egyre nagyobb mértékben a mezőgazdaságban is. (ERDÉLYI, 2011)

Szervó mechanizmusnak hívják azokat a rendszereket, amely negatív visszacsatolású hibaérzékelő rendszer használatával éri el a mechanizmus megfelelő teljesítményét. A definícióban belül egy mechanizmus csak akkor nevezhető szervónak, ha az említett hiba korrekciós rendszer segítségével képes szabályozni a mechanikai pozíciót visszacsatolás segítségével. Ennek értelmében egy általános elektromos aktuátor, például egy villanymotor csak megfelelő érzékelőkkel és szabályozással válik szervó motorrá. (ERDÉLYI, 2011)

A különféle szervó rendszereket a leggyakrabban pozíció szabályozásra alkalmazzák, amely az ipari robotok mozgatásának nélkülözhetetlen eleme. Ennek alapja a negatív visszacsatolási elv, ahol az alapjelet hasonlítják a tényleges helyzethez. A két érték közötti különbség szolgál a hibajelként, majd ennek erősítésével addig korrigálja a rendszert, hogy a lehető legkisebb hibával rendelkezzen a pozicionálás során (15.ábra). Emellett alkalmazhatóak sebesség és nyomaték szabályozási feladatokra is egyaránt. (ERDÉLYI, 2011)



15.ábra: Egyszerű szervó motor szabályozási blokkvázlata
(www.mphysicstutorial.com, 2022.08.07)

A szervó rendszerek aktuátora a fentiek alapján általában valamilyen villamos motor, melyek között több típust is megkülönböztethetünk. Beszélhetünk egyszerű kefések DC motorokról, kefenélküli DC motorokról, Coreless DC motorokról, valamint AC motorokról. A szabályozási kör visszacsatolása különböző berendezésekkel, érzékelőkkel valósítható meg. Ilyen eszköz lehet az analóg és digitális tachométer, resolver, potenciométer, valamint különböző enkóderek. (ERDÉLYI, 2011)

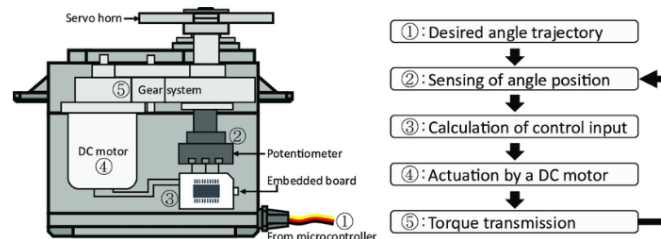
1.4.1 RC szervó motorok

A fentiekben felsoroltak közül az egyszerű DC motoros, potenciométeres visszacsatolású szervó motorokat, hétköznapi nevén RC szervókat ismertetném részletesebben, melyeket felhasználtam a dolgozatomhoz készített kollaboratív robotkar hajtási rendszerében.

Az **RC szervó motorok** széles körben alkalmazhatóak a viszonylag egyszerű felépítésüknek, valamint az egyszerű vezérelhetőségüknek köszönhetően. Leggyakrabban távirányítású modellekben, különböző hobbi elektronikai projektekben, valamint egyszerűbb berendezésekben találkozhatunk ezekkel a típusokkal, ahol valamilyen pozicionálási feladatot, csúrlapátok mozgatását, kanyarodást, ajtó nyitását, zárását kell megvalósítani.

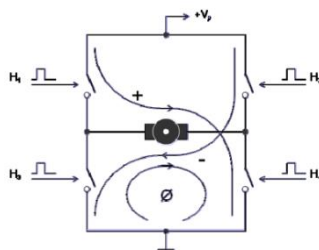
Az aktuátor ez esetben egy egyszerű kefések DC motor, melynek előnye a kis tehetetlenségi nyomatékkal rendelkező armatúra, a kis induktivitás és a kis időállandók. A vezérlést ellátó kis nyomtatott áramkör szintén egy házban helyezkedik el a szervó mechanizmussal. A szabályozáshoz szükséges visszacsatolást egy potenciométer valósítja meg, amely a végajtás tengelyéhez van csatlakoztatva. Emellett fontos részegység a fogaskerék

hajtómű, ahol a fogaskereknek készülhetnek fémből és műanyagból. A hajtómű a DC motor fordulátát és erőátvitelét alakítja át pozícionálhatóság érdekében. A motor és a végső kihajtó tengely közötti áttétel rendszerint magas értékekkel rendelkezik, ezek határozzák meg a szervó nyomatékát, melyet a kihajtási tengelytől számított 1 cm-es erőkarra vonatkoztatva adnak meg. (16.ábra) (blog.modell.hu)



16.ábra: RC szervó motor felépítése (www.researchgate.net, 2022.08.07)

A szervó vezérlése egy úgynevezett H-híddal és PWM jelekkel történik. A **PWM**, vagy másnéven **impulzusszélesség moduláció** esetén egy négyszög jelet állítunk elő, melynek kitöltési tényezőjét változtatjuk a vezérlés során. A PWM jelekkel lényegében olyan gyorsan kapcsolgatjuk ki és be a motort, amelyet már nem képes követni, helyette kiintegrálja azt. A be és kikapcsolás szakaszainak hossza, melyet a négyszögjel ad, határozza meg a teljesítményt százalékos értékben (17. ábra). (ERDÉLYI, 2011)



17.ábra: RC szervó motor H-híd vezérlése (ERDÉLYI, 2022.08.07)

Az RC szervók általában három vezetékkel vannak ellátva, ezek közül kettő szolgáltatja a megfelelő tápellátást, a harmadik pedig a vezérlő kommunikációt valósítja meg. Megkülönböztetünk analóg és digitális vezérléssel ellátott típusokat is, melyeknél a fő különbség, hogy a digitális vezérlésnél beépített mikrokontrollert is találhatunk, amely gyorsabb vezérlést tesz lehetővé (akár 300 Hz). Léteznek különböző motortípusokkal ellátott szervók, például a kefések DC motor mellett találkozhatunk „brushless” és „coreless” motorokkal a magasabb kategóriájú eszközökben. (blog.modell.hu)

1.5 Kollaboratív robotok

Az ipari robot manipulátorok az évek során bebizonyították hatékonyságukat a sorozatgyártásban. Nagy pontosságuk, újraprogramozhatóságuk, ismétlőképességük nagy mértékű termelésnövekedést tettek lehetővé. Azonban, ha a hagyományos robotkarokat a rugalmas munkavégzés szempontjából összehasonlítjuk az emberi munkavégzéssel, jelentősen magasabb képességeket tulajdoníthatunk az emberek által végzett munka javára. Például egy robotkar új feladatra történő alkalmazása során új végmanipulátorok, kiegészítők felszerelése szükséges, valamint a műveletnek megfelelő új programmal kell ellátni azt. Ezzel ellentétben egy ember könnyedén betanítható egy rövidebb képzéssel, így rugalmasan, rövid időn belül képes újabb munkafolyamatokat elvégezni. Ebből a megközelítésből a robotok fenntarthatósága nem garantálható olyan területeken, ahol dinamikusan, új feladatokra kell rövid időn belül átállni a termelés kiesés minimalizálása érdekében. Ennek megoldására számos fejlesztés zajlik az úgynevezett kollaboratív robotika területén, melyeknek célja olyan robotok, vagy újabb nevén **kobotok** létrehozása, melyek képesek működés közben zökkenőmentesen együttműködni az emberekkel és hatékonyan elvégezni feladataikat bármilyen körülmény között. (G. MICHALOS et al, 2022)

Az ember és robot együttműködése akkor tekinthető teljes mértékben kollaboratívnak, ha az ember, a robot, valamint a munkadarab egy időben egy közös munkatérben tartózkodik. Ennek értelmében a kobotokat a hagyományos robot manipulátorokkal ellentétben már nem kell védőkerítésekkel ellátni (18. ábra), melynek köszönhetően a robotkarok akár az operátor munkáját közvetlenül is segíthetik olyan esetekben, ahol a teljes automatizálás nem kivitelezhető. Ilyen lehet a munkadarab befogása, mozgatása vagy továbbítása, egyes esetekben akár a veszélyes munkadarabok megmunkálását is átvehetik. Az ember és robot ilyen módon történő együttműködését a fejlett szoftverek és szenzorikai rendszerek teszik lehetővé, melyekkel a robotkarok képesek információkat gyűjteni a közvetlen környezetükről, majd azok alapján akár sebesség módosítást hajthatnak végre, ütközéseket, kontaktusokat detektálhatnak, mindezzel biztosítva az emberek egészségének védelmét. (viapan.hu)



18.ábra: Hagományos ipari robot, valamint egy modern kollaboratív robot
(loupfunds.com, 2022.08.08)

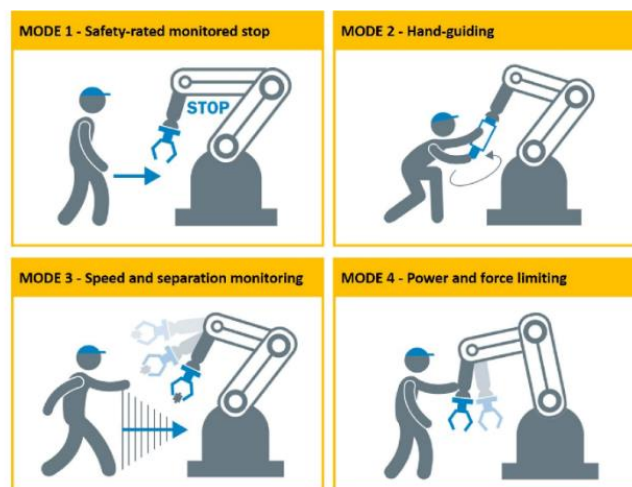
1.5.1 Robotok kollaboratív működésének megvalósítása

Az **ember-robot kollaborációs rendszerek**, más néven **HRC rendszerek** alkalmazásának egyre nagyobb terjedése az emberek és robotok közötti interakciós szintek szabványosítását vonta maga után. Az ISO 10218-1:2011 szerint az együttműködési munkaterület egy a biztonságosan őrzött téren belüli munkaterület, melyen belül az ember és a robot egyszerre végezhetnek gyártási folyamatokat. Ennek értelmében az ember-robot közötti interakció típusát az együttműködési munkaterület kiosztása vagy megosztása, valamint az operátor és a kobotok munka közbeni együttműködése határozza meg. A Nemzeti Szabványügyi Szervezet 2016-os TS/ISO 15066 szabványa alapján az interakciós szintek négy csoportba sorolhatóak (19.ábra), melyek lényegében meghatározzák a robotok kollaboratív működésének megvalósítási lehetőségeit is:

- **Biztonsági besorolású interakciós szintek:** Ebben a kategóriában a legfőbb szerepet a biztonság kapja, melynek értelmében az ember kollaboratív munkatérbe való belépését követően a robot mozgása leáll. Ezzel kiküszöbölhetőek azok az esetek, amikor egy személy véletlenül kerül a robot veszélyzónájába, emellett pedig lehetővé teszi az operátornak a szükséges beállítás elvégzését. A robotok munkatérének határait optoelektronikai eszközök, fénykapuk, radarok, valamint kerítések biztosítják. Ezeket a rendszereket főként a hagyományos robotoknál alkalmazzák, melyek eredetileg nem képesek az emberrel való együttműködésre. Ennek tekintetében ez a kategória a kooperáció legalacsonyabb fokát képviseli.
- **Kézi vezetés:** A robot manipulátorok kézi vezetése, tapintása a lehető legközvetlenebb ember-robot interakciónak tekinthető. Az ilyen típusoknál nem szükséges a hagyományos gombokkal és HMI-kkel ellátott kezelőfelületek használata a robot programozásához, irányításához, helyette az operátor saját kezével és erejével szabadon mozgatva állítja be a robotkart a megfelelő pozícióba. Ennek megvalósításához a robotok mechanikájára, esetleges megfogási pontokra megfelelő erő és nyomaték érzékelő rendszereket szerelnek fel, melyek képesek érzékelni, hogy az operátor megfogta a robotot, ezáltal engedve a robot szabad mozgását. Érzékelők felhelyezése helyett lehetőség van a meghajtó rendszer szervó motorjainak folyamatos áramfelvétel mérésére. A mért értékek vizsgálata alapján a vezérlés képes eldönteni, hogy az operátor megragadta a robotot és szabad mozgást kíván megvalósítani, vagy adott esetben ütközés történt. (G. MICHALOS et al, 2022)
- **Sebesség és munkatér szeparáció figyelése:** A kollaboratív működést a robot manipulátorok esetében a sebesség kontrollálása alapján is meg lehet valósítani. A kontrollálás során a robot munkavégző sebessége annak függvényében változik, hogy az

operátor milyen távol helyezkedik el hozzá képest. Ennek értelmében a munkatér előzetes pontos vizsgálatok, mérések alapján zónákra van osztva, melyeket egy folyamatosan működő területszenner pásztáz végig. Ezek segítségével a vezérlésnek megtanítható, hogy annak függvényében, hogy az ember melyik sávban helyezkedik el, milyen sebességértékekkel üzemeljen. Például, ha az ember közelít a robothoz, az csökkenti sebességét, adott közelségben meg is áll, majd az ember távolodásával ismét elindul és gyorsítja a sebességét. A rugalmas működés következtében jelentős termelési hatékonyságot lehet elérni. (viapan.hu)

- **Erő és teljesítménykorlátozás:** Ebben a kategóriában azok a robotok helyezhetők el, melyek ténylegesen az ember mellett történő munkavégzésre lettek tervezve, vagyis a legmagasabb kollaboratív működésre képes berendezések. A legnagyobb mértékben ezen típusok terjedése zajlik jelenleg az ipar számos területén. A speciális kialakítású robotkarok rendelkeznek passzív és aktív biztonsági rendszerekkel, melyek magán a mechanikán és a hajtásrendszerekben vannak kialakítva. Ezek biztosítják azt, hogy az emberrel való érintkezés során semmilyen sérülés ne következhesen be. A passzív védelembé sorolhatóak a robotmechanika felületeinek, éleinek lesimítása, lekerekítése, adott esetben kipárnázása. Az aktív védelmi intézkedésekhez tartozik a szenzorok alkalmazása, a mozgó részek erejének, nyomatékának, sebességének korlátozása. Ezen módszerek megfelelő összehangolásával a robot manipulátorok még az előtt képesek megállni, mielőtt fájdalmat okoznának az embernek. A hagyományos ipari robotokhoz képest kisebb teherbírással és munkavégzési sebességgel rendelkeznek, így felhasználási körük elsősorban az összeszerelésnél, csomagolásnál és gépkiszolgálásnál található meg. (viapan.hu)



19.ábra: HRC interakciós szintjeinek négy kategóriája (www.semanticscholar.org, 2022.08.09)

1.5.2 *Ipari alkalmazások*

A kollaboratív robotok kereslete jelenleg az autóiparban a legjelentősebb, ahol főként ismétlődő, monoton, vagy fizikailag megterhelő feladatokat végeznek, melyek megkönnyítik a dolgozók munkáját. A leggyakrabban előforduló robotok által végzett gyártási technológiák, valamint kiszolgáló munkafolyamatok az anyagmozgatás, hegesztés és összeszerelés:

- **Anyagmozgatás, munkadarab kezelés:** Az anyagmozgatás az egyik legnagyobb alkalmazási terület, mivel a gyártás és a logisztika minden ágában megtalálható valamilyen formában. Ilyen folyamat lehet a munkadarab megfogása, szállítása, csomagolása és raklapozása, valamint további olyan esetek, melyeknél valamilyen munkadarab manipuláció történik. Ezeknél az alkalmazásoknál általában maga a **kobot**, mint eszköz van jelen, mivel ez a felállás nem igényel kifejezetten emberrel való együttműködést, helyette csak átveszik azokat a feladatokat, amelyek adott esetben veszélyesek és megterhelőek lennének egy ember számára. A kollaboratív funkció az ilyen típusú felhasználási körökben a közös munkatér biztosításában mutatkozik meg, melynek köszönhetően a robot manipulátor nem képes a közelében munkálkodó operátor testi épségét veszélyeztetni. A munkadarab kezelési feladatok területén a kooperáció magasabb szintre emelése érdekében jelenleg is zajlanak fejlesztések, melyek főként arra irányulnak, hogy a robot elvégezze megmunkálás feladatainak nagy részét, majd a végső fázist, amely különböző emberi készségeket igényel, az operátor végzi el.
- **Hegesztés:** A hegesztés, mint gyártástechnológia mindig is vezető szerepet foglalt el az ipari robotok alkalmazása területén, viszont hagyományos ipari robotokkal végzett hegesztési feladatok még mindig korlátozottak a gyártási folyamatok változatosságától, a hegesztési eljárás összetettségétől és a számos zavaró tényezőtől. Ilyen lehet az előmegmunkálási hiba, az illesztési pontosság, a hő által keletkező torzulás. Ezen problémák áthidalására általában a manuális újra programozás nyújtott megoldást, viszont a kollaboratív robotok megjelenésével ez megváltozott. A robotokat olyan intelligens rendszerekkel szerelték fel, mint a látásérzékelés, az automatikus programozás, és a hegesztési folyamat valós idejű intelligens vezérlése. Ezek segítségével a robot manipulátorok képesek az emberrel együttműködni, amely során a bonyolultabb, és bizonytalan esetekben az emberi képességekre bízva a döntést. A kollaboratív robotok ilyen módon történő alkalmazása továbbra is a „robot, mint eszköz” megközelítésbe sorolható, ahol a robot kevés autonóm vagy kognitív képességgel van felruházva.
- **Összeszerelés:** Számos kollaboratív robotkar az összeszerelést végző gyártósoroknál helyezkedik az ipar világában, mivel ismétlődőképességének és precizitásának köszönhetően

magas termelési teljesítmény és minőség érhető el velük. A robotkarok kollaboratív funkciója tovább növeli ezeket, valamint számos új lehetőséget tár fel. A **kobotok** ebben a felhasználási formában a leggyakrabban az egyszerűbb feladatokat végzik el, majd a kész termék végső munkálatait, melyek komolyabb kognitív képességeket igényelnek, az emberi kezelő végzi el.

A kollaboratív robotok iránti legnagyobb érdeklődést a fent említettek alapján az autóipar mutatta, ahol a felsorolt általános felhasználási formák mindegyike kivétel nélkül előfordulhat. Itt azonban a robot, mint eszköz megközelítés már nem elegendő, mivel az autógyártás során lévő számos gyártási folyamat magas együttműködést igényel az ember és robot között. A legmagasabb fokú együttműködés az összeszerelő sorokon található meg, ahol az emberek és a robot manipulátorok közös munkatérben, közös munkákat végeznek. A robotkarok ez esetben az ember számára megterhelő fizikai folyamatokat könnyítik meg, például a nehéz alkatrészeket a megfelelő helyre emelik és ott tartják, amíg az operátor rögzíti azt, a dobozokból kiemelik az alkatrészeket és továbbadják az embernek, valamint elősegítik a dolgozó ergonomikus testtartással történő munkavégzését. (V. VILLANI et al, 2018)

1.5.3 A kollaboratív robotok ipari alkalmazásának nehézségei

Az ipar és a kollaboratív robotika kapcsolatáról elmondható, hogy az elmúlt néhány év megfigyelései alapján a dinamikus és gyors termelési technológiák kialakítása, melyek lehetővé teszik az emberek és robotok együttműködését, elengedhetetlen lett az ipar számos területén. Ezen technológiák termelésbe való beintegrálása során az elsődleges szempont a legmagasabb biztonsági szint biztosítása volt a HRC rendszereknél. A gyakorlat azonban rámutatott ezen rendszerek jelentős hátrányaira, melyek akadályozó tényezőként jelennek meg a megfelelő termelésben. Ez magával vonja a **kobotok** iparban való terjedésének lassulását is.

Az egyik fő probléma, hogy a robotok alkalmazására való igény meglehetősen szerteágazó, így a kollaboratív robotok jelenlegi formájukban nem képesek minden esetben megfelelni, mivel sok feladat elvégzésénél problémát jelent a merev felépítés, az alkalmazkodó képesség, a meglehetősen alacsony teherbírás.

Emellett a termelési hatékonyság az ember és robot közös munkavégzése alatt alacsonyabb, mint abban az esetben, amikor az ember és a robot is önállóan, egymástól függetlenül végeznek feladatokat. Ennek kiváltó okai az összetett biztonsági rendszerek, valamint az operátor elfogadóképessége, melyet a robot felé tanúsít, mivel az emberek általában nem feltétlenül képesek olyan formában együtt dolgozni egy robottal, mint más dolgozókkal.

További hátránya, hogy a robotvezérlési technológia jelenlegi fejlesztései nem képesek az emberek anatómiájának feltérképezésére, amely abban segítené a robotot, hogy meg tudja különböztetni az éppen vele együtt dolgozó operátort. Ennek meglétével a robot a munkavégzését az adott személyhez megfelelő módon tudná hangolni.

A robotok programozása nem kimondottan felhasználóbarát, mivel sok esetben programozói ismereteket igényel, így az operátor nem képes a robottal ily módon interakcióba lépni. Ez tovább nehezíti az ember robot iránti bizalmát. (G. MICHALOS et al, 2022)

2. NÉGY SZABADSÁGFOKÚ KOLLABORATÍV ROBOTKAR TERVEZÉSE

Ebben a fejezetben ismertetem a robotkarral szemben felállított előzetes kritériumokat és a projekt megvalósításához készített időtervet. Bemutatom a dolgozatomhoz készített négy szabadságfokkal rendelkező kollaboratív robotkar tervezésének lépéseit, az anyagválasztást, valamint a különböző műszaki megoldásokat. A robotkar tervezését két részben prezentálom:

Elsőnek a mechanikai tervezést mutatom be, amelyben kitérek a geometriai tervezés főbb lépéseire és az azok mögött lévő megfontolásokra, a felmerülő problémákra és megoldásaikra.

A második részben az elektronikai tervezés menetét ismertetem, indoklom az elemválasztást, valamint bemutatom a tervezés során fellépő akadályokat és azok megoldásait.



20.ábra: Saját tervezésű négy szabadságfokú robotkar összeállítási ábrája

2.1 Kritériumok meghatározása

Mivel egy összetett mechatronikai szerkezet megalkotása volt a cél, így előzetesen rögzítettem azokat a fő kritériumokat, melyeket az elkészített robotkarral szemben elvárok. Ezek a feltételek jelentős támpontokat nyújtottak a tervezés során. Emellett időtervet készítettem a projekt sikeres megvalósítása érdekében.

2.1.1 A robotkarral szemben támasztott kritériumok:

- Négy szabadságfokkal rendelkezzen.
- A mozgatáshoz szükséges erőt RC szervó motorok biztosítsák.
- Stabil mechanikai felépítéssel rendelkezzen.

- A robotcsuklók legalább 90° -ban képesek legyenek rotációs mozgást végezni.
- A munkatér sugara legalább 300 mm legyen.
- A végmanipulátor alkalmassá teszi a robotkart az anyagmozgatásra.
- A munkatér legtávolabbi pontján képes legyen legalább 150g terhet felemelni.
- A szervó motorok vezérlése és az áramerősség mérése egy számítógép és egy vagy több Arduino mikrovezérlő együttesével történjen.
- A robotkar pozícionálható legyen a LabVIEW-ban készített kezelőfelületen keresztül.
- Ütközés hatására képes legyen megállni a motorok által felvett áramerősség értékeinek vizsgálata alapján.
- Ütközés következtében a szerkezet ne szenvedjen maradandó alakváltozást
- A motorok 6 V-os tápfeszültségről üzemeljenek.
- Legalább ± 5 mm-es pozícionálási pontossággal rendelkezzen.

2.1.2 Időterv és célkitűzések:

Az alábbi táblázatban látható az előzetesen felállított ütemterv hónapokra bontva a tervezéstől kiindulóan a kivitelezésig és a tesztelésig (21.ábra). A kék színnel jelölt mezők jelölik az eredeti időtervet, a sárga mezők szemléltetik a projekt azon területeit, amelyekkel hamarabb foglalkoztam vagy később is folytattam a tervezetthez képest. Az ütemtervvel kapcsolatban elmondhatom, hogy a kitűzött időintervallumokat sikerült tartanom a projekt kivitelezése során.

<i>Projekt ütemterve</i>									
2022	02	03	04	05	06	07	08	09	10
Mechanikai tervezés									
Mechanikai kivitelezés									
Elektromos tervezés									
Elektronikai kivitelezés									
Szoftver fejlesztése									
Tesztelés									

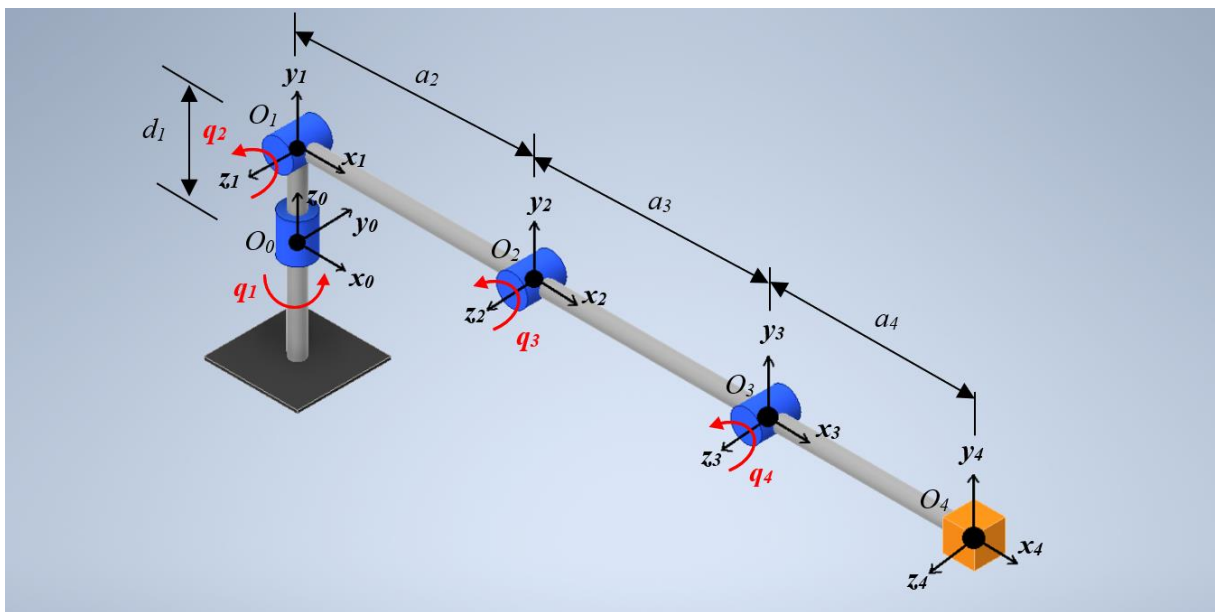
21.ábra: A projekt időterve

2.2 Tervezés menete

2.2.1 Mechanikai tervezés

A tervezés kezdetekor a robotika területén szerzett ismereteim alapján, valamint a megfelelő szakirodalmak áttekintésével elkezdtem elemezni a négy szabadságfokkal rendelkező különböző felépítésű robotkonfigurációkat, amelyek alkalmasak lennének a robotkarral szemben támasztott kritériumok kielégítésére. A döntésem végül egy 4 rotációs csuklót tartalmazó konfigurációra esett, melynek alapötletét egy kereskedelmi forgalomban kapható „LOBOT LeArm” elnevezésű, 6 szabadságfokú open source robotkar készlete adta.

A konfiguráció kiválasztását követően elkészítettem a robotkar **kinematikai láncolatát**, amely a 22. ábrán látható. A nyitott kinematikai lánc 4 rotációs csuklóból, 4 szegmensből és az effektorból áll, továbbá megtalálhatóak rajta a Denavit-Hartenberg eljáráshoz szükséges csuklókra illesztett derékszögű koordinátarendszerek. A sematikus ábrázolási szabályoknak megfelelően a 4 rotációs csuklót a kék hengerek jelölik, a megfogóként funkcionáló végmanipulátor **TCP pontját** a narancssárga kocka szemlélteti. A kinematikai lánc pontos méreteit az 2. melléklet tartalmazza.

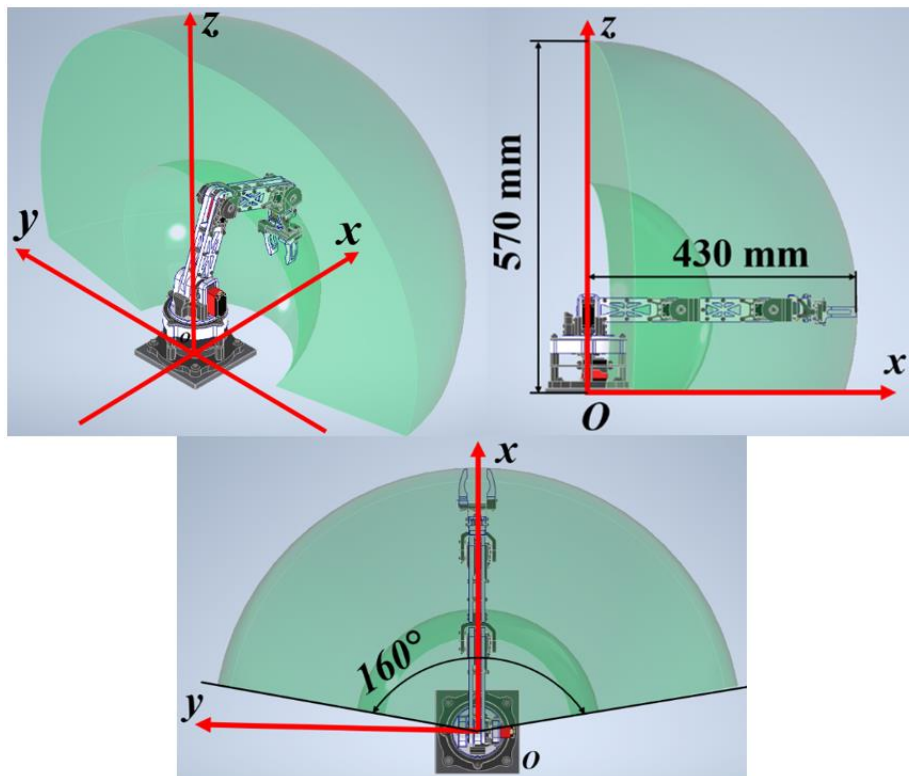


22.ábra: Kinematikai lánc

A kinematikai vázlat alapján elkészítettem a robotkar modelljét, amelyhez az **Autodesk Inventor** tervezőprogramját használtam. A modell kialakításánál mindvégig fontos szempont volt az alkatrészek 3D nyomtathatósága, a logikus, könnyed szerelhetőség, a későbbi tovább fejleszthetőség, valamint az ideális súlyelosztás. Az Inventor lehetőséget biztosít az elkészített modellek különböző elemzésére is egyaránt, így ezt felhasználva a robot modelljének geometriai kritériumoknak való megfelelését meg tudtam vizsgálni. Ennek segítségével már a

tervezés fázisában sikerült feltérképeznem és korrigálnom a mozgásviszonyokat, az ebből adódó ütközéseket, valamint a tervezési hibákat.

A robotmanipulátor **alapkonzfigurációja** a 4 rotációs csukló által az „**RRR**” kategóriába sorolható, melynek következtében a robotkar munkatere egy gömbnek feleltethető meg. A csuklók elfordulási korlátjai miatt a **tényleges munkatér** közel félgömb alakú, melyet a 23.ábra szemléltet. A munkatér méreteinek meghatározását a robot platformjához rögzített nyugvó koordináta-rendszerhez viszonyítva végeztem el. Az „xy” síkban nézve a legtávolabbi pont, amelybe képes eljutni az effektor, az „O” ponttól 430 mm távolságra van. A legmagasabb pont a „z” tengely mentén 570 mm távolságra található a platformtól mérve.



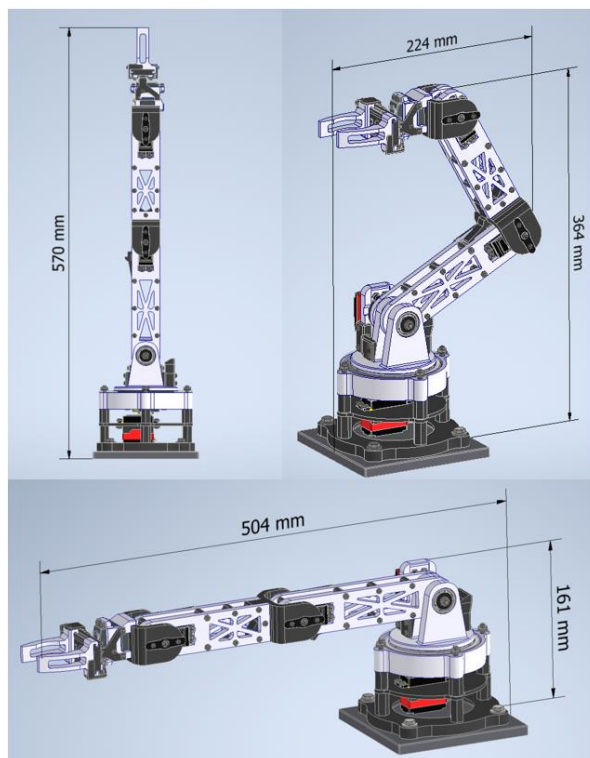
23.ábra: Munkatér

Az **anyagválasztás** esetében a robotkar vázszerkezetének jelentős része PLA műanyagból készült, a második csukló tengelyeként egy horganyzott acélból készült menetes szárat használtam, a robot talpaként szolgáló négyszögletű lap edzett acélból készült. A második csuklót mozgató szervó motor passzív hűtéséhez pedig egy alumínium hűtőbordát választottam.

Mivel a robotkar gyártása főként 3D nyomtatással történt, a vázszerkezet esetében PLA (PoliLactic Acid) anyagot használtam, amely jelentős népszerűségnek örvend a szálhuzalos 3D nyomtatási technológiában, mivel könnyen nyomtatható és az olvasztás során nem keletkeznek egészségre káros gőzök/gázok. A PLA egy tejsav alapú, biológiailag lebomló műanyag, melyet

magas keményítőtartalmú gabonafélékből állítanak elő tejsavas erjesztéssel és polikondenzációval. Nagy stabilitás és jobb felületi minőség jellemzi, szakítószilárdsága 64 MPa, hőállósága 55 °C, sűrűsége 1,25 g/cm³, így a vázszerkezet súlyának alacsonyan tartását megfelelően elősegíti. Az anyag ezen tulajdonságait figyelembe véve megfelelő tervezéssel párosítva alkalmasnak találtam azt a vázszerkezet elkészítéséhez.

A talprész esetében a robot megfelelő tartása érdekében egy, a rendelkezésemre álló 10 mm vastagságú edzett acéllapot választottam, melynek kellően nagy súlya lehetővé teszi a vázszerkezet teljes súlyával való ellentartást. A talp funkciójából adódóan nem volt indokolt a rozsdamentesség megléte, így a korrózióképződés lehetősége miatt az alkatrész teljes egészét megfelelő festékréteggel láttam el a védelem érdekében.

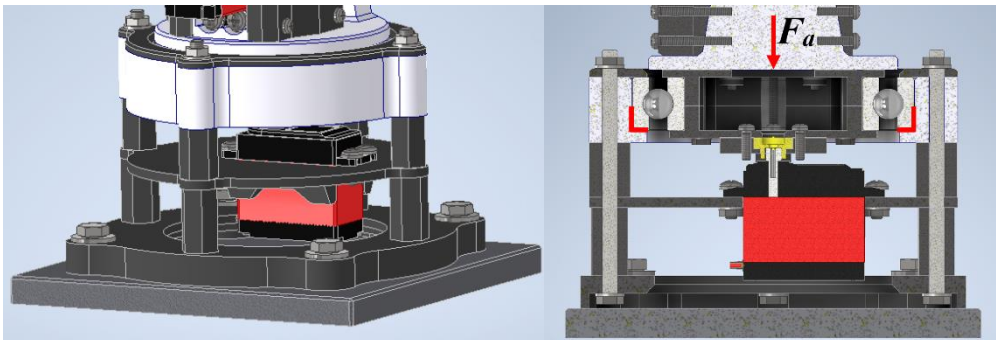


24.ábra: A robotmanipulátor befoglaló méretei

Ahogy a korábbiakban említettem az alkatrészek 3D nyomtathatósága mindvégig fontos szerepet játszott a tervezés során. Ennek okán az alkatrészek kialakításánál számításba kellett vennem az általam használt nyomtató beállítási paramétereit, például a 0,2 mm-es rétegvastagságot, a 0,4 mm-es szálvastagságot. Ezek függvényében törekedtem a kerek, egész méretek meghatározására, melyekben a rétegvastagság maradék nélkül megtalálható, valamint ügyeltem a kellő méretű anyagvastagságokra annak érdekében, hogy a nyomtatás során használt falvastagsági értékek eltérések nélkül alkalmazhatóak legyenek. Emellett törekedtem az egyszerű geometriájú, anyagtakarékos, könnyen és belátható időn belül nyomtatható alkatrészek tervezésére. Mindezeket figyelembe véve tudtam a legpontosabban kinyomtatni a

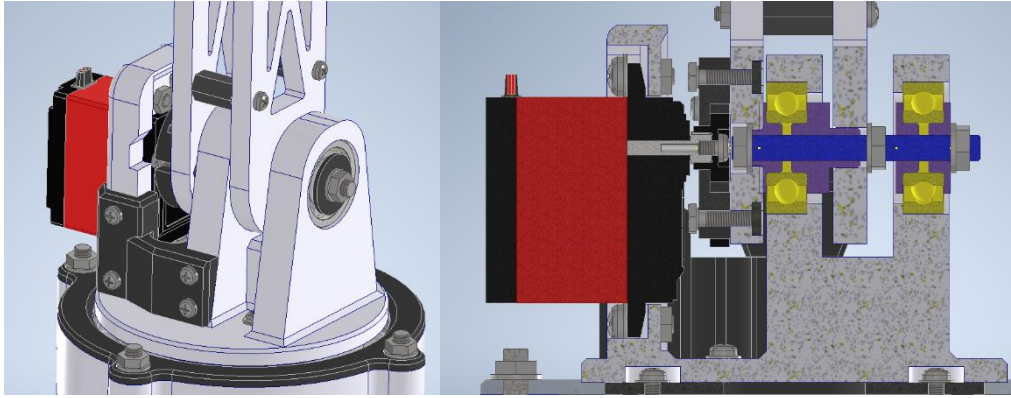
robotkar alkatrészeit. A 3D nyomtatásról és az alkalmazott beállításokról, praktikákról a mechanikai kivitelezésnél részletesebben beszámolok.

A robotcsuklók kialakítása 3 különböző módon került megtervezésre. A robotkar „z” tengely körüli forgását az első csuklónál elhelyezett **SKF 6012-2RS1** típusú 95 mm külső átmérőjű, 18 mm szélességű mélyhornyú golyóscsapágy teszi lehetővé, amely a tengely körüli forgás biztosítása mellett a 0,43 kg-os tömegével elősegíti a robotkar súlypontjának lenn tartását. Az 1-es csuklónál ügyelni kell a meghajtó szervó motor tengelyének axiális irányú tehermentesítésére, így ennek érdekében a csapágy külső gyűrűjének megfelelő alátámasztásokat helyeztem el a 25. ábra alapján, melynek következtében a vázszerkezet további részeinek tömegéből adódó axiális terheléseket maga a csapágy fogja felvenni. A mélyhornyú golyóscsapágyakat általában radiális erők felvételére tervezik, azonban adott mértékben az axiális erőket is képesek elviselni. A gyártó adatlapja szerint, amely a 3. mellékletben látható, a maximális axiális terhelhetőség felső értéke „ F_a ”, a statikus alapterhelés „ C_0 ” felével egyezik meg, amely az esetben jelentős túlméretezést eredményez, viszont a csukló ilyen típusú kialakításánál szükségem volt egy nagy átmérővel rendelkező csapágyra.



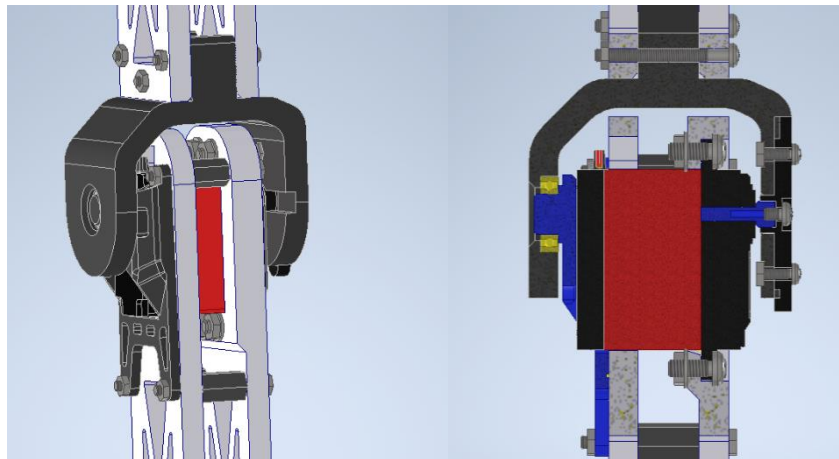
25.ábra: Az 1.csukló és a csapágy alátámasztás

A robotkar második csuklójánál már a tervezés alatt szembetűnő volt, hogy itt fog keletkezni a legnagyobb csavarónyomaték, így ennek fényében fontosnak tartottam egy csapágyazott tengely kialakítását, amely képes lesz azt megfelelően felvenni. A tengelynek egy 5 mm átmérőjű, M5-ös menettel rendelkező, 50 mm hosszú menetesszárat választottam, melynek alkalmazása a menetes rögzítési lehetőségéből adódóan számomra kézenfekvő megoldás volt. A tengely forgó mozgását két **SKF 6000-2Z** típusú mélyhornyú golyóscsapágy biztosítja egymástól 27 mm távolságra elhelyezve, valamint megfelelően perselyezve. A mozgató szervó motor a második robotszegmensen keresztül csatlakozik a tengelyhez, így megvalósítva a csukló tengely körüli forgatását. A második csukló kialakítását a 26. ábra szemlélteti.



26.ábra: Az 2. csukló és a tengelykialakítás

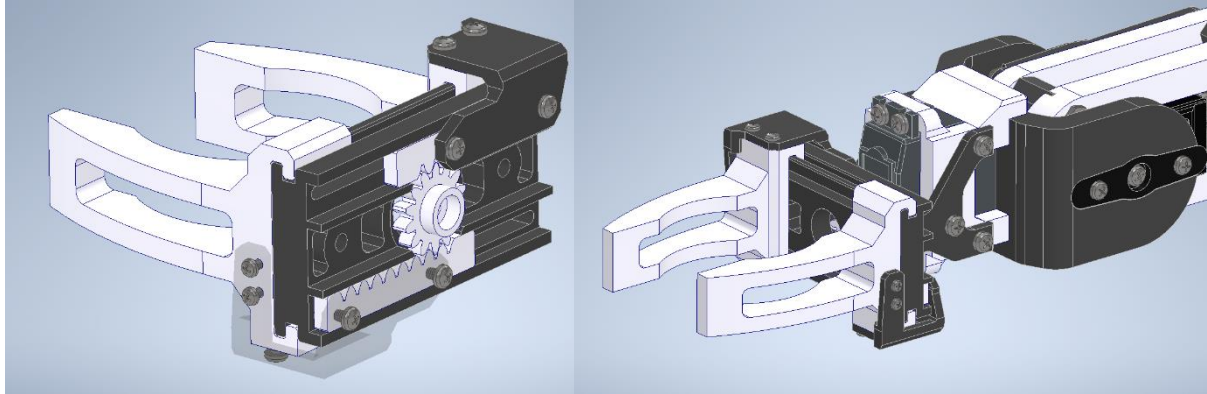
A harmadik és negyedik csuklók kialakítása teljesen megegyezik, amely lehetőséget biztosít a későbbi szabadságfokbővítésre is. A csuklók tervezésénél a mozgató szervó motort teljes méretében a szegmens belsejében helyeztem el, így elősegítve a súlypont egy síkban tartását. A tervezésnél problémát okozott a szervók kialakítása, mivel csak egy tengelykihajtással rendelkeznek, így a csukló megfelelő forгатása érdekében a másik oldalon is gondoskodni kellett egy tengely kialakításáról. Megoldásképpen a 27. ábra alapján egy plusz alkatrészt alakítottam ki, amely a szegmens oldalára felhelyezhető és a szervó tengelyével egybeesően tartalmaz egy 9 mm átmérőjű csapot, amelyen egy **SKF 618/9** típusú csapágy szabad elfordulást és támasztást biztosít a csuklónak, amely így képes egy közös, központosított tengely körül elfordulni. A csapágyak alkalmazásával emellett csökkenteni tudom a motor tengelyére ható radiális erőket is.



27.ábra: A harmadik és negyedik csukló és a csapágyazás kialakítása

A felállított kritériumoknak megfelelően az anyagmozgatás lehetőségét a robotkar végmanipulátora biztosítja. A megfogó szerkezet kialakításánál fontosnak tartottam, hogy a két befogó pofa lineáris mozgást végezzen a becsukás és kinyílás közben. Ennek értelmében az alkalmazott meghajtó szervó szolgáltatva forgó mozgásból lineáris mozgást kellett előállítanom, amelynek megoldására egy fogaskerék és két fogasléc kapcsolatát használtam fel. A szervó

motor kihajtó tengelyére helyeztem el a fogaskereket, a fogasléc mozgásának biztosítására egy speciális alkatrészt terveztem, amely engedi azok lineáris csúszását. Ugyanezen alkatrészen helyezkednek el a megfogó pofák, melyek csavarkötésekkel vannak összekötve a fogaslécekkel. Ezek lineáris mozgásáról szintén két-két horony gondoskodik. Az effektor könnyed működésének érdekében hézagokat helyeztem el az alkatrészek között, melyek megfelelő kenéssel biztosítják a mozgó alkatrészek könnyű elmozdulását. A forgó mozgás lineáris mozgássá alakítását megvalósító mechanizmust a 28. ábra szemlélteti.



28.ábra: Az megfogó szerkezet mechanizmusa és felszerelt végmanipulátor

2.2.2 Elektronikai tervezés

Az elektromos tervezés területén a felállított kritériumok szerint az Arduino mikrovezérlők és a LabVIEW grafikus programozó környezet között kialakítható kapcsolatból indultam ki, amelynél az Arduino mikrovezérlőt, mint interfészt használok fel a robot és a LabVIEW kezelőfelülete között. Fontosnak tartom kiemelni, hogy az elektronikai egység megalkotását kész, megvásárolható modulokkal terveztem meg, így a továbbiakban ezeket ismertetem részletesebben.

A robotcsuklók hajtásának megvalósítására az RC modelleknél alkalmazott szervó motorokat választottam, melyekkel a rotációs csuklók megfelelő szögelfordulását biztosítani tudom. A robotkar kollaboratív működéséből adódóan az ütközések miatt a csuklók hajtása nagyobb igénybevételnek van kitéve, ezért a **PowerHD LF-13MG** és **LF-20MG** típusú szervó motorjai mellett döntöttem (29.ábra). A szervók fém fogaskerekeinek, valamint a dupla golyóscsapágyazásnak köszönhetően egyenletes mozgásra és nagy nyomatékra képesek, az alumínium burkolat lehetővé teszi a keletkező hő gyorsabb távozását. Az említett típusok 13 és 20 kg/cm-es nyomaték kifejtésére képesek, elfordulási szögtartományuk 160 ± 10 fok, amely kielégíti a csuklók elfordulásával szembeni kritériumokat. Az üzemi feszültségük 4,8V és 6,6 V között állítható a kívánt nyomaték függvényében, az áramfelvételük pedig kellően magas a megfelelő mérések érdekében. Vezérlésük egyszerű PWM jelekkel történik, amely az Arduino

mikrovezérlőkkel könnyen előállítható. Ezen tulajdonságokat figyelembe véve megfelelnek a robotkar mozgatására.



29.ábra: PowerHD LF 13-MG, PowerHD LF 20-MG, PowerHD LW 13-MG
(jakomodel.hu, 2022. 08. 22.)

Az effektor megfogó szerkezetének fogaskerék-fogasléc kapcsolatának mozgatására egy **CORONA DS-319HV** típusú (30.ábra), szintén digitális, fém fogaskerekes RC szervó motort választottam, amely a 4 kg/cm-es nyomatékával kellő erőt képes kifejteni a megfogó szerkezet kinyitásához és becsukásához. Üzemi feszültsége 6-7,4 V, áramfelvétele pedig a csuklóknál lévő szervókhoz képest jelentősen kisebb, így az esetleges mérési problémák elkerülése érdekében elkülönítettem a tápellátását a többitől, amelyet a későbbiekben részletesebben is taglалok.

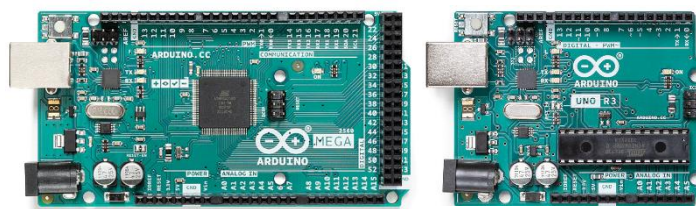


30.ábra: CORONA DS-319HV (jakomodel.hu, 2022. 08. 22.)

A robot vezérlését két fő részre különítettem el, melyek egymástól függetlenül képesek működni. Az egyik felelős a szervók vezérléséért, a másik a motoráramok mérését végzi. Annak érdekében, hogy ez a két folyamat ne befolyásolja egymást, két különálló mikrovezérlőt alkalmazok. A motorok vezérlésére egy **Arduino MEGA 2560** típusú mikrovezérlőt választottam, amely a LabVIEW-ban készített kezelőfelület által utasításba adott PWM jeleket állítja elő és továbbítja azt a szervó motorok felé (31.ábra). Az ATmega2560 típusú mikrokontrolleren alapuló mikrovezérlő kártya 54 digitális bemenettel/kimenettel (I/O-val) rendelkezik, melyek közül 15 PWM kimenetként is használható. Található rajta 16 analóg bemenet, egy 16 MHz-es kristályoszillátor, 256 kB FLASH memória és 8 kB SRAM, valamint egy USB csatlakozási lehetőség. Ezeknek köszönhetően az Arduino Mega 2560 az egyik legnagyobb teljesítményű mikrovezérlő az Arduino termékek kínálatában. A 6 motor vezérlésére egy kisebb teljesítményű mikrovezérlő is elegendő lenne, viszont egy szoftveres probléma miatt csak ezzel a típussal lehet 3-nál több Szervó motort vezérelni a LabVIEW

programkörnyezetben. Ebből következően jelentős tartalékot hagyok a későbbi továbbfejlesztések számára. A mikrovezérlő lábkiosztása a 4. mellékletben található.

A szervó motorok áramfelvételének mérésére egy **Arduino UNO R3** típusú mikrovezérlőre esett a választásom (31.ábra), amellyel a szenzorok által szolgáltatott analóg jeleket továbbítani tudom a LABVIEW-ban lévő kezelőfelületnek. Az Arduino UNO az ATmega328P mikrokontrollerre épülő mikrovezérlő kártya, amely 14 I/O -val, 6 analóg bemenettel, egy 16 MHz-es kerámia rezonátorral, 32 kB FLASH memóriával, 2kB SRAM-al és USB csatlakozási lehetőséggel rendelkezik. A mikrovezérlőt az előzetes tesztek alapján alkalmasnak találtam az analóg értékek feldolgozására. A mikrovezérlő lábkiosztása a 5. mellékletben található.



31.ábra: Arduino MEGA 2560 és Arduino UNO R3 (store.arduino.cc, 2022. 08. 22)

A szervó motorok áramfelvételének mérésére egy **ACS712-5A-M** típusú szenzor modult választottam. Az ACS712 áramérzékelő IC-t számos helyen alkalmazzák áramerősség érzékelésére, mivel egyaránt alkalmas egyen és váltóáramok mérésére is. Működési elve a Hall effekten alapul, amelynél az indirekt érzékelési módszer során az IC felszínén elhelyezett réz vezetési úton áthaladó áram mágneses teret generál, melyet az IC-ben elhelyezett Hall-hatás érzékelő áramkör érzékel, majd az árammal arányos feszültségértéket generál. Az általam választott modul esetén az érzékelő IC egy saját NYÁK-on helyezkedik el, amelynél egy NYÁK-ba ültethető sorkapoccsal a modul beköthető a mérendő áramkörbe, továbbá rendelkezik 3 érintkezővel a tápellátáshoz, valamint az analóg kimenethez (33. ábra). A szenzor modullal 5A -ig tudok áramerősséget mérni, amely elegendő a motorok maximális áramfelvételi értékeihez viszonyítva. A modul 5V -os tápellátást igényel, melyet az Arduino UNO mikrovezérlő biztosít számára.



32.ábra: ACS712-5A-M típusú áramérzékelő modul (nettigo.eu, 2022. 08. 22)

Az **ACS712-5A-M** modulokat használat előtt érdemes kalibrálni, melynek során a szenzor érzékenységi tényezőjét határozhatjuk meg. Erre azért van szükség, mert a szenzor a fent említettek alapján feszültséget szolgáltat a kimenetén, amelyet át kell alakítani az említett

tényező segítségével áramerősséggé. Fontos megjegyezni, hogy a szenzor nulla átfolyó áram esetén 2,5V-os feszültséget ad a kimenetén. Az átalakítás során az analóg kimeneten mérhető feszültségi értékből ki kell vonni a nulla átfolyó áramnál mérhető 2,5 V-ot, majd az így kapott értéket le kell osztani az érzékenységi tényezővel, így megkapva a valós fogyasztó által felvett áramerősséget. Az áramerősség meghatározása és az érzékenységi tényező meghatározása a következő képletek alapján történik:

$$I = \frac{V-2.5}{m} \quad (2.0)$$

$$m = \frac{V_2-V_1}{I_2-I_1} \quad (2.1)$$

ahol:

- I – a fogyasztók által felvett áram
- V – a szenzor analóg kimenetén mérhető áramerősséggel arányos feszültség
- m – szenzor érzékenysége
- V_1 – szenzor analóg kimenetén mérhető feszültségek átlaga fogyasztó nélküli áramkörben
- V_2 – szenzor analóg kimenetén mérhető feszültségek átlaga fogyasztó bekötése esetén
- I_1 – digitális multiméterrel mért áramerősség értékek fogyasztó nélkül
- I_2 – digitális multiméterrel mért áramerősség értékek fogyasztó esetén

A kalibrálást az Arduino UNO mikrovezérlővel végeztem, amely segítségével az Arduino IDE c++ alapú programkörnyezetében írt programmal ki tudtam olvasni a soros monitoron keresztül a szenzor által nyújtott analóg feszültség értékeket. A kialakított kalibráló áramkörben fogyasztóként két 6V-os, E10-es, 2W-os izzót helyeztem el, melyeket 5V-os tápellátást biztosítottam. Elsőnek felvettem a referencia értékeket, amely során egy digitális multiméterrel kimértem a két fogyasztó által felvett áramerősség értékét (I_2). Következő lépésként mérési sorozatot végeztem a szenzor analóg értékeinek soros monitoron történő kiolvasásával, amelynél 20-20 értéket rögzítettem a fogyasztók nélküli és a fogyasztókkal szolgáltatott analóg értékekből, majd ezekből átlagot képeztem (V_1 és V_2). Ezt követően a 2.1 - es képletbe behelyettesítve megkaptam az érzékenységi tényezőt. A részletes számítás a 6. mellékletben található.

A motorok működtetéséhez szükséges tápfeszültséget egy ~230/12 V-os 120W -os, 10A-es kapcsoló üzemű tápegységgel biztosítom, melynek kimeneti feszültségét a fent említett értékek alapján le kell csökkentenem a szervó motorok működési feszültségére. Ehhez két különböző teljesítményű DC-DC „step-down” konvertert használok. Ennek oka, hogy a

csuklókat mozgató szervó motorok megfelelő áramerősség hiányában jelentősen veszítenek az erejükből, mivel együttesen akár több ampert is felvehetnek. Ennek megoldásaképpen ezeket egy nagyobb teljesítményű 10A-t átengedő konverterrel (33.ábra) külön ágon látom el 6,3 V-os feszültséggel. A másik, maximálisan 3A-t átengedő konverterrel (34.ábra) pedig a megfogó szerkezetnél lévő kisebb áramfelvételű szervó motort látom el 5V-os tápfeszültséggel.



33.ábra: DCDC-6010-M step-down 10A konverter (elektroller.shop.hu, 2022. 08. 22)



34.ábra: LM2596S-PSUM step-down 3A konverter (www.3djake.hu, 2022. 08. 22)

A vezérlő elektronika tervezésénél fontosnak tartottam a robotkar hajtásrendszerének áramtalanítási lehetőségét biztosítani, ezért a fő tápegység és a két konverter közé beiktattam egy billenőkapcsolót, amely megvalósítja ezt a funkciót.

A vezérlő elektronika kapcsolási rajzát a 7. melléklet tartalmazza, amely szemléltető jellegű, mivel magát a kapcsolást modulokból állítottam össze, így a teljes műszaki kapcsolási rajz ismerete nem volt indokolt a kivitelezés szempontjából.

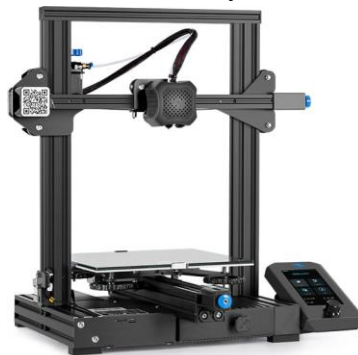
3. NÉGY SZABADSÁGFOKÚ KOLLABORATÍV ROBOTKAR KIVITELEZÉSE

Ebben a fejezetben ismertetem a robotkar kivitelezését mechanikai és elektronikai szempontból. Ismertetem az alkatrészek legyártásához alkalmazott 3D nyomtatási technológiát, az összeszerelés fontosabb lépéseit, továbbá bemutatom a fellépő akadályokat, tervezési hibákat és azok módosításait.

3.1 Mechanikai kivitelezés

3.1.1 Az alkatrészek 3D nyomtatása

A robotkar talp részét leszámítva az összes alkatrész kivitelezését a terveknek megfelelően 3D nyomtatással készítettem el. A nyomtatást egy **Ceality Ender 3v2** típusú nyomtatóval végeztem, amely főként hobbi célú felhasználásra alkalmas (35.ábra). A 3D nyomtatás során a digitális modellekből képezhetünk háromdimenziós tárgyakat. Elsősorban prototípusok készítésre és hobbi célokra alkalmazzák, azonban egyre szélesebb körben megjelenik az orvostudományban is. A technológia egy additív gyártási folyamatot tesz lehetővé, amely során a nyomtatott tárgyak rétegről rétegre épülnek fel. Az Ender 3v2 a legelterjedtebb és legolcsóbb eljárást, a szálhuzalos/FMD technológiát valósítja meg. A nyomtatáshoz szükséges műanyag adott átmérőjű szálként áll rendelkezésre, melyet filamentnek hívnak. Ezt a berendezés folyamatos adagolással fűtőfejben megolvasztja és rétegről rétegre egymásra építi a tárgyasztalon. A nyomtatási programok elkészítéséhez szükségesek az úgynevezett szeletelő programok, amelyek a háromdimenziós modelleket a nyomtatók számára értelmezhető G-kódként képezik le, tartalmazva a megfelelő utasításokat az alkatrészek felépítéséhez. A két legnépszerűbb anyag ennél a technológiánál a PLA és az ABS, melyek 200-250 C°-os hőmérséklettartományban válnak nyomtathatóvá.

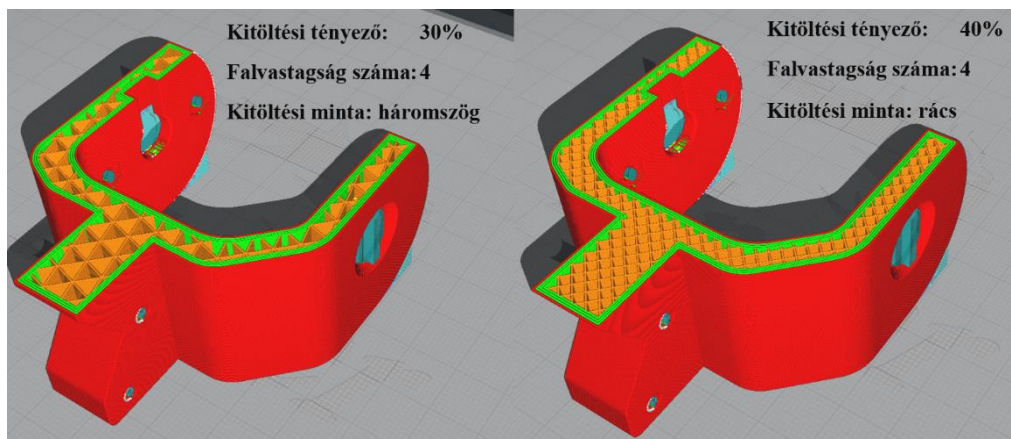


35.ábra: Creality Ender 3v2 FMD 3D nyomtató (www.3djake.hu, 2022. 08. 24)

Az alkatrészek legyártásakor a legnagyobb problémát a megfelelő pontosság elérése okozta, így erre nagy hangsúlyt kellett helyeznem. A berendezéssel a gyártói adatok alapján $\pm 0,05$ mm-es nyomtatási pontosságot lehet elérni, amely az én esetemben $\pm 0,05$ mm és $\pm 0,1$ mm között mozgott, néhány esetben ez a tényező magasabb értékeket is elért, így mérrethibát

generálva. A probléma minimalizálását az alkatrész méreteinek és geometriai bonyolultságának korrigálásával tudtam elérni, amelyeket a nyomtatásnál alkalmazott 0,2 mm-es rétegvastagsághoz és a 0,4 mm átmérőjű fűvókához igazítottam. Tapasztalataim alapján ezek problémák főként a nyomtató összeszerelési pontatlanságából, az alkatrészek geometriájának bonyolultságából, a nyomtatási beállításokból és a szeletelő szoftver hibáiból adódtak.

A nyomtatás során az adott tárgyakat, elemeket általában nem szokták teljes kitöltéssel elkészíteni anyag- és időtakarékosági okokból. Ezt követve az alkatrészek gyártásánál igyekeztem olyan kitöltési tényezőket és térhálózást alkalmazni, amellyel elérhetem a szükséges szilárdságot és tömeget. A kitöltési tényezőt 20 és 40 százalék között választottam meg az alkatrészek funkciója alapján, a térhálózás tekintetében pedig a háromszög és a rács típusú kitöltési mintát alkalmaztam. Az alkatrészek szilárdságát tovább növelve kellő falvastagsággal, valamint kellő számú, teljes kitöltésű alsó és felső réteggel készítettem el a nyomtatásokat.



36.ábra: Példa a nyomtatási beállításoknál lévő térhálózásra és kitöltési tényezőre a Ultimaker Cura szeletelőszoftverben

A robotkar alkatrészeinek nyomtatási időintervallumait és a kész darabok tömegeit táblázatban rögzítettem, amelyet a 8. melléklet tartalmaz. A vázszerkezet 61 alkotórészének kinyomtatása összesítve 61 órát vett igénybe, amely során az alátámasztásokból keletkezett hulladékkal egybevetve körülbelül 600-650 g filamentet használtam el. Fontosnak tartom kihangsúlyozni, hogy a 3D nyomtatáshoz elengedhetetlen a tudatos tervezés, a nyomtató paramétereinek, erősségeinek és gyengeségeinek pontos ismerete. A nyomtatás idő tekintetében elmondhatom, hogy a gondos és körültekintő tervezésnek köszönhetően, az alkatrészekre levetítve normál időkeretek között tudtam tartani a teljes nyomtatási folyamatot, melynek köszönhetően nem volt szükség a berendezés éjjel-nappal történő üzemeltetésére.

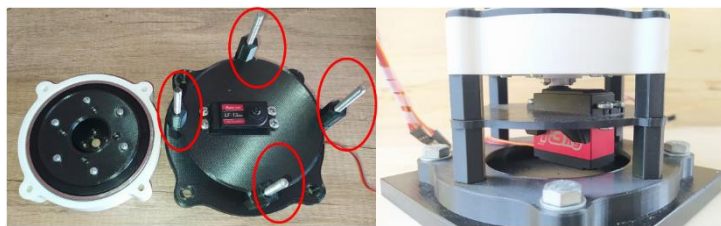


37.ábra: A robotkar néhány nyomtatott alkatrésze

3.1.2 Mechanikai összeszerelés

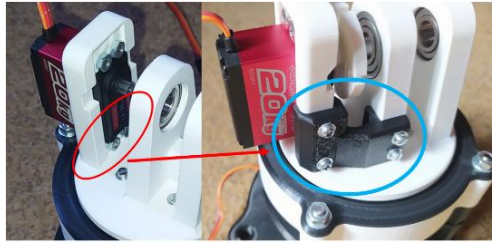
A robotkar tervezése során mindvégig fontos szempont volt a robotmechanika könnyű szerelhetősége, így elősegítve a későbbi javításokat, módosításokat és továbbfejlesztéseket. Ennek érdekében a vázszerkezet elemeit oldható csavarkötésekkel rögzítettem egymáshoz, melyeknél M2-es, M3-as, M4-es, M5-ös és M8- metrikus csavarokat és menetesszárazakat használtam.

Az első csuklónál lévő meghajtó szervó motor és a fölötte lévő, fektetett golyóscsapágy megfelelő illeszkedését a 38. ábrán látható módon a 4 db függőlegesen elhelyezett M5-ös menetesszár teszi lehetővé, melynek köszönhetően a szervó kihajtó tengelye és a csapágy forgási tengelye egybe esik. Ennek összeszerelésekor gondosan ügyelni kell a csavarok meghúzásának mértékére, mivel túlhúzás esetén a szervó és a csapágy forgástengelyei között kitérés keletkezik, amely a csukló mozgásakor nem kívánt többletterhelést okozhat a motornak.



38.ábra: Az első csukló összeszerelése és a kész csukló

A robot második csuklójának fő alkatrészénél az összeszerelést követő mozgástesztelnél a szervó motor rögzítéséhez tervezett konzol nem mutatott kellő merevséget, amely a tényleges működéskor könnyedén töréshez vezetett volna. Az alkatrész újratervezésével ez a probléma megoldható lett volna, azonban az összes alkotóelem közül ezen alkatrész nyomtatási ideje volt a leghosszabb, így ezt elkerülve egyszerűbb megoldást nyújtott két merevítő elem utólagos felhelyezése, amely a 39. ábrán látható.



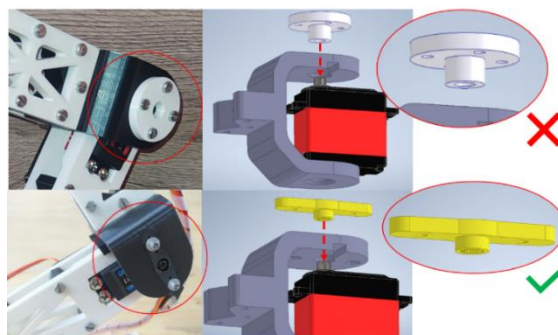
39.ábra: A második csukló motor tartó konzoljának megerősítése

A robotkar szegmensei két fő elemből tevődnek össze, melyeket a 8 db M3-as csavar és az elemek közötti hatszögletű távtartók kellő merevséggel látnak el, így kollaboratív működés tesztelésénél keletkező ütközések hatására nem képes maradandó alakváltozást elszenvedni. Ezek lapján a szegmensek kialakítása nem fog gátat szabni az ütközések detektálásában, így megfelel az előzetesen felállított követelményeknek.



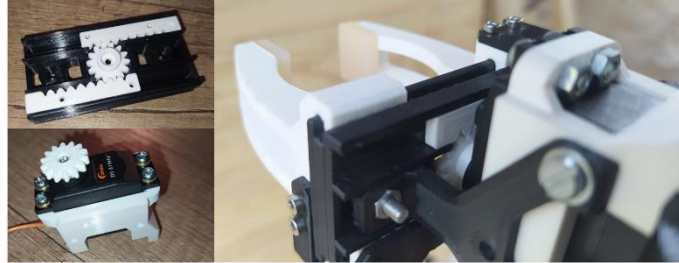
40.ábra: A szegmensek merevségét adó rögzítő csavarok és távtartók

A mechanika összeszerelése közben folyamatosan végeztem előzetes mozgástesztet, amellyel meg tudtam vizsgálni az esetleges gyenge pontokat, amelyek a második csuklónál említettek alapján problémákat okozhatnak a későbbi működésnél. Az egyik legfőbb probléma a szervó motorok kihajtó tengelyeire helyezett nyomtatott szervó tárcsáknál keletkezett, amelyek apró belső fogazatát az apró méretei miatt csak a nyomtatás után melegítéssel és a fogazott tengely műanyagba való préselésével tudtam kialakítani. Az így létrejött fogazat nem rendelkezett kellő szilárdsággal, így rendszeresen kikopott a PLA gyengeségéből adódóan. Ennek megoldására a szervók és a csuklók hajtását a motorokhoz mellékelt gyári szervó karok felhasználásával átterveztem (41.ábra), amelyek keményebb műanyagból készültek és rendelkeztek a szükséges belső fogazattal, így elősegítve a megfelelő nyomatékvitelt.



41.ábra: Csukló és szervó motor kapcsolatának kialakítási folyamata

A végmanipulátor megfogószerkezetének összeszerelésekor a lineáris mozgást megvalósító fogaskereket és a két fogaslécet, valamint a két megfogó pofa csúszó felületeit a korábban leírtak alapján megfelelő kenéssel láttam el a könnyű, akadásmentes mozgás érdekében.



42.ábra: A megfogó szerkezet nyomtatott alkatrészei és az összeszerelt állapot

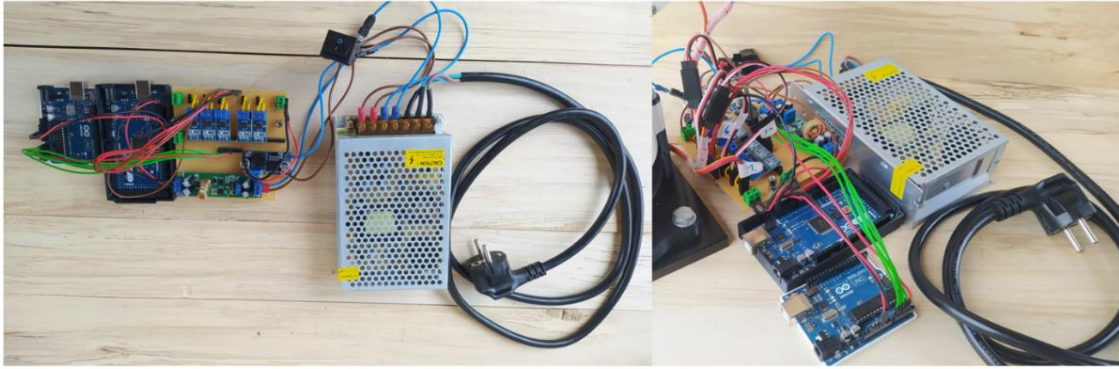
Az összeszerelt robotkar teljes tömege 2955 g, a súlyelosztást a terveknek megfelelően sikerült megfelelően kiegyenlíteni, a talp kellő súlyával a robotkar a legtávolabbi pontban sem tud felborulni. Mivel a vázszerkezet döntő többsége műanyagból készült, a robotkar rendelkezik bizonyos rugalmassággal is, amely az ütközések pontos detektálásánál problémát okozhat. Emellett a rotációs csuklókat alkalmazó robotkaroknál megjelenő probléma, miszerint a holtjátékok és a pontatlanságok összeadódnak, az az általam készített változatban is fennáll. Ez a pozicionálási pontosságot jelentősen befolyásolni fogja, azonban ennek megjelenésére számítani lehetett.



43.ábra: Az összeszerelt vázszerkezet

3.2 Elektronikai kivitelezés

A vezérlő elektronika kialakítását a terveknek megfelelően kész modulokból építettem össze a 7. mellékletben lévő kapcsolási rajz alapján. A teljes kapcsolást egy 10x10 cm-es különálló forrszemeket tartalmazó próba NYÁK-ra helyeztem, így az egész kapcsolás egy egységként kezelhető. A kialakításnak köszönhetően el tudom kerülni a próbapaneleken összeállított áramkörök gyakran előforduló kontakthibáit.

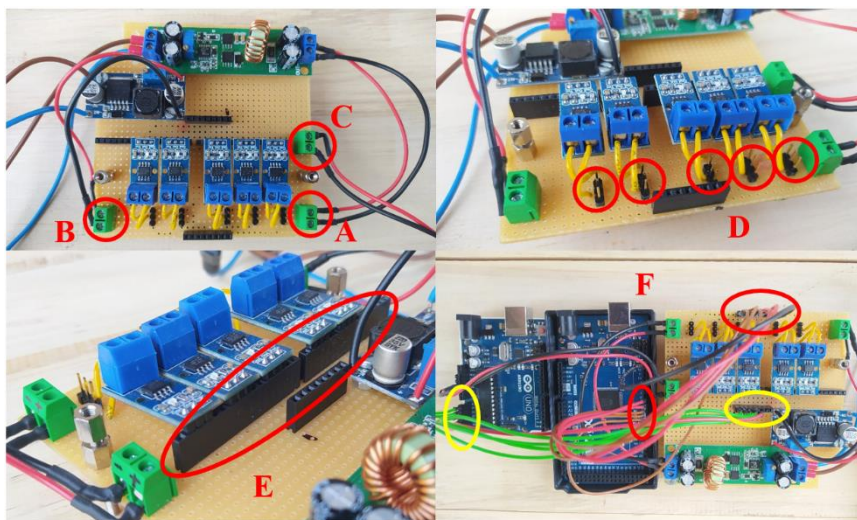


44.ábra: Az összeállított vezérlő kapcsolás

A kapcsolás kialakításánál fontos szempont volt, hogy az áramkör modulárisan szerelhető legyen, ennek érdekében a motorok és a szenzorok tápellátása a PCB sorkapcsokon keresztül könnyedén be- és kiköthető. A szenzorok tűksor aljzatokon keresztül kapcsolódnak az áramkörbe, amellyel a modulok könnyedén kivehetőek. Annak érdekében, hogy a szervó motorok gyári 3 pin-es csatlakozóit ne kelljen módosítani az esetleges fix bekötés érdekében, a NYÁK-on 5 db, egyenként 3 pin-es tűksor csatlakozási pontot helyeztem el, amelyeken keresztül a motorok igény szerint csatlakoztathatóak az áramkörbe.

Fő tápellátás leválasztásáért szolgáló két állású, két pólusú billenő kapcsoló a csúszó saruknak köszönhetően a vezetékek leválasztásával kivehető a kapcsolásból. A két konverter kialakításából adódóan egyszerű csavarkötéssel került felhelyezésre, ezzel is elősegítve a kapcsolás rendezett kinézetét. A két Arduino mikrovezérlő tűksor aljzat típusú csatlakozási módjából adódóan a szervó motorok vezérlő jeleinek és a szenzorok kimeneti értékeinek továbbításáról egy-egy közös tűksorra forrasztott kábelköteg gondoskodik.

Az áramkör elmondott kialakítási módozatai a 45. ábrán látható.



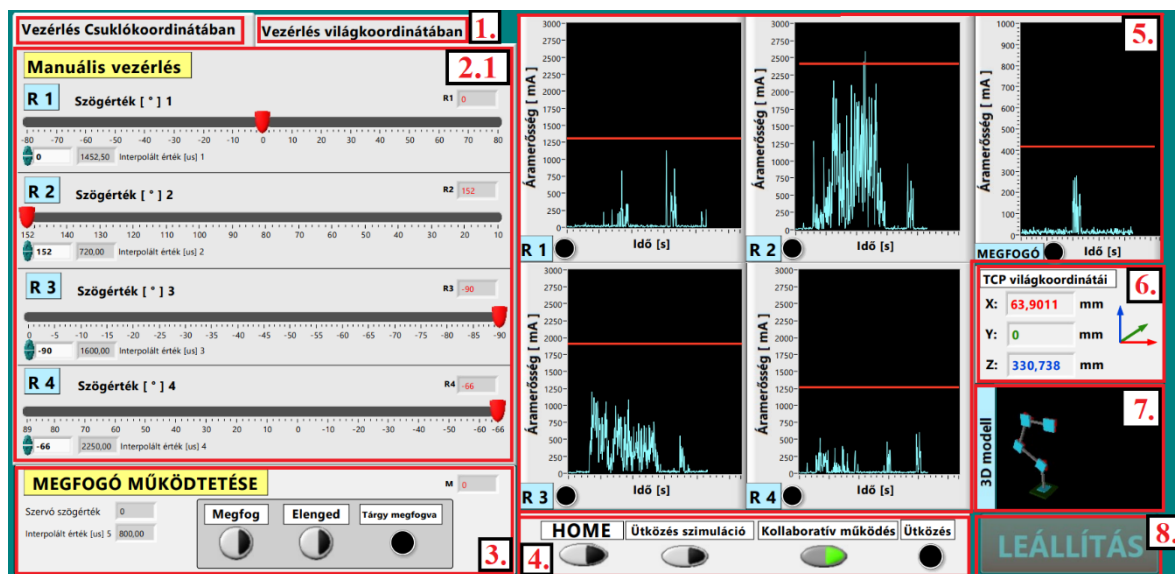
45.ábra: **A** – a 4 csuklóban lévő szervók tápellátása, **B** – a megfogó szerkezet szervó motorjának tápellátása, **C** – a szenzorok tápellátása, **D** – a motorok csatlakozási lehetősége, **E** – a szenzor modulok csatlakozását biztosító tűksor aljzatok, **F** – a mikrovezérlők csatlakoztatása az áramkörbe

4. SAJÁT FEJLESZTÉSŰ VEZÉRLŐ SZOFTVER BEMUTATÁSA

Ebben a fejezetben ismertetem a robot vezérléséhez készített saját fejlesztésű szoftvert, amely a LabVIEW nyújtotta grafikus programozási környezetben került megvalósításra. A kezelőfelület mögött lévő teljes program block diagramja a 9. mellékletben látható. A továbbiakban ismertetem a kezelőfelület használatát, valamint a saját fejlesztésű program működésének főbb részeit.

4.1 Kezelőfelület ismertetése

Maga a kezelőfelület a 46. ábra alapján 8 különálló részre bontható.



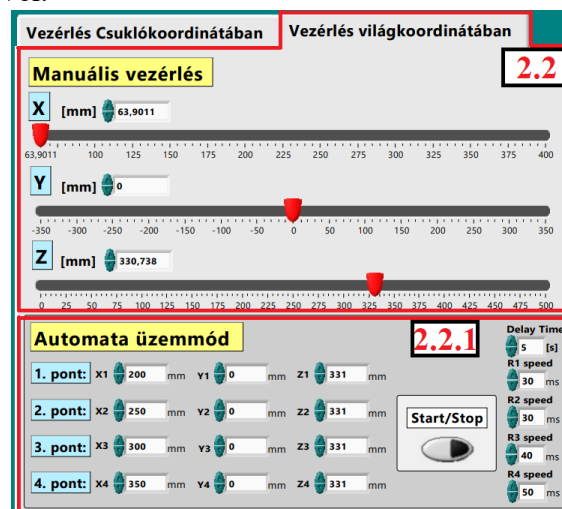
46.ábra: A robotkar vezérlésének kezelőfelülete

Az ábra szerint sorban haladva az **1-es** jelzésnél látható a vezérlés során használható koordináta-rendszerek közötti váltási lehetőség. A csuklókoordinátában, illetve a világkoordinátában történő vezérlés esetén külön-külön irányítási funkciók érhetőek el a felhasználó számára.

A **2.1-es** jelzéssel ellátott részen a *csuklókoordinátákban történő manuális vezérlés* kezelőfelülete látható, amely 4 db vízszintes elrendezésű, külön-külön állítható csúszkából épül fel. Ezek felelnek a robotkar 4 rotációs csuklójának manuális mozgatásáért. A csúszkák elnevezésüknek megfelelően egy-egy csukló vezérléséhez szükséges valós elfordulási szögértékeket állítják elő a megfelelő határértékek között. Például az „**R1**”-es csúszka vezérli az első csuklót. A csúszkák alatt feltüntetésre került a pontos leolvasás érdekében egy-egy numerikus indikátor is, amely az aktuálisan beállított értékeket mutatja. Az indikátor bal oldalán lévő gombokkal lehetőség van fokenként növelni, illetve csökkenteni az adott csukló elfordulási szögét. Mindemellett a PWM jelek ellenőrzésére feltüntetésre került interpolált értéként a motorokhoz továbbított PWM jel működési frekvenciája [μ s] mértékegységben.

Abban az esetben, ha **világkoordinátákban történő vezérlést** választjuk, a 47. ábrán látható felület jelenik meg a fentiekben említett **2.1-es** rész helyén. A **2.2-es** részegységen a csuklókoordinátákban történő irányításnál alkalmazott csúszkákból 3 áll a kezelő rendelkezésére, melyekkel előállítható a robotkar TCP pontjának világkoordinátákban értendő 3 derékszögű koordinátája. Ezzel a TCP pont a robot platformjához rögzített nyugvó derékszögű koordináta-rendszer *x*, *y* és *z* tengelye mentén mozgatható manuálisan.

A szintén ezen a felületen elhelyezkedő **2.2.1-es** jelzésű résszel lehetőség van a robotkart **automata üzemmódban** működtetni, amely során 4 előre definiált pont között fog ciklikus mozgássorozatot végrehajtani. Minden TCP által érinteni kívánt pontot 3-3 derékszögű koordinátával, [mm] mértékegységben kell megadni az indítás előtt a megfelelő beviteli mezőkbe. Például az 1-es pontot az *x1*, *y1* és *z1* mezők értékei fogják definiálni. Az automata üzemmód a **Start/Stop** nyomógomb megnyomásával indítható el és állítható le. Emellett lehetőség van a **Delay Time** értékének módosításával a pontok közötti várakozási időt változtatni, továbbá a csuklók sebessége is finomhangolható az **R1 speed**, **R2 speed**, **R3 speed** és az **R4 speed** segítségével.



47.ábra: Kezelőfelület világkoordinátákban történő vezérlés esetén

A **3-as** jelű sziget segítségével vezérelhető az anyagmozgatásra szolgáló megfogó szerkezet. A **Megfog** illetve az **Elenged** gombok megnyomásával csukható, illetve nyitható a két megfogó pofa. Fontos megjegyezni, hogy a működtetés során a **Megfog** megnyomását követően a rendszer nem engedi újból megnyomni azt, csak az **Elenged** gomb megnyomását követően. A manipulálandó objektum megfogásáról a **Tárgy megfogva** feliratú LED indikátor felkapcsoló zöld fénye ad információt. A bal oldalon lévő két numerikus indikátor a megfogó szerkezetet működtető szervó motor elfordulási szögéről adnak visszajelzést a **2.1-es** részegységnél leírtak alapján.

A **4-es** számmal ellátott bloknál 3 nyomógomb és 1 LED indikátor található. A **HOME** gomb aktiválásával a robotkar a programban rögzített **home** pozícióba küldhető. A gomb megnyomását követően a csuklók adott sorrend szerint felveszik a deklarált szögértékeket. A pozícióba állás folyamata az indítást követően nem állítható meg, a kezelőfelületen inaktívvá válik a nyomógomb a megfelelő pozíció felvételéig.

A **HOME** gomb mellett lévő **Ütközés szimuláció** nyomógommbal a robotkar kollaboratív működésének szemléltetésére használt ütközés hozható létre szimulált módon, az esemény valódi bekövetkezése nélkül. A nyomógomb generálta impulzus hatására a szoftver belép az „**Ütközés**” állapotába, melyről felugró ablak és a blokk jobb szélén lévő **Ütközés** elnevezésű LED indikátor tájékoztat. Ennek használatával a robotkar kollaboratív funkciójának helyes működése tesztelhető akár a robotkar fizikai csatlakoztatása nélkül is.

A **Kollaboratív működés** felirattal ellátott gomb segítségével a robotkar kollaboratív funkciója kapcsolható ki és be. Alapértelmezetten ez a funkció mindig bekapcsolt állapotban van, a felhasználói igénynek megfelelően kikapcsolható, így a robot mozgás közben nem fog reagálni az esetleges ütközésekre.

Az **5-ös** részegység 5 diagramból tevődik össze, melyek a csuklókat mozgató szervó motorok és a megfogó szerkezet motorjának áramfelvételét mutatják [mA] mértékegységben az idő függvényében. A diagram bal alsó sarkában feltüntetett elnevezés határozza meg, hogy melyik csukló értékeit ábrázolja. Az áramfelvételi küszöbértékeket egy-egy piros vízszintes vonal jelöli a diagramokon, melyek elérését a diagram bal alsó sarkában található LED indikátorok piros fényű felvillanása is jelez.

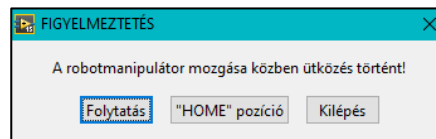
A **6-os** egység a direkt kinematikai számítás eredményeképpen kapott robotkar TCP pontjának elhelyezkedését mutatja a robotplatformhoz rögzített nyugvó koordináta-rendszer által meghatározott világkoordinátákban [mm] mértékegységben. A számítás alapértelmezetten folyamatosan fut az aktuális csuklókoordinátákat felhasználva.

A **7-es** jelzésnél a valós fizikai robotkar 3 dimenziós modellje helyezkedik el, amely valós időben képes a robotkar mozgását szemléltetni.

A **8-as** nyomógomb a teljes vezérlés leállítására szolgál.

A kezelőfelület további részét képezi az ütközésekor megjelenő figyelmeztető ablak, amely a 48. ábrán látható. A robotkar mozgása során történt ütközést követően a kezelőnek 3

lehetőség jelenik meg a felugró ablakon a figyelmeztető üzenet mellett, amellyel folytathatja a robot irányítását, elküldheti a **home** pozícióba, vagy le is állíthatja a teljes vezérlést.

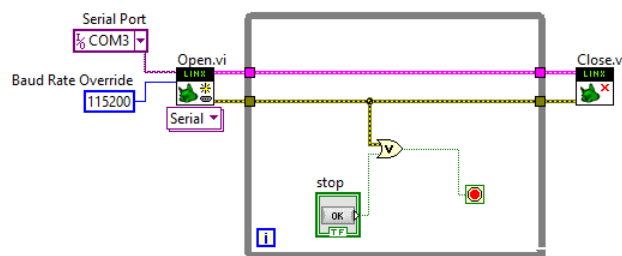


48.ábra: Az ütközéskor megjelenő felugró ablak

4.2 Program működése

A következőkben a forráskód azon egységeit taglalom, melyek fontos részét képezik a szoftver működésének, továbbá azokat, amelyek megvalósítása valamilyen egyedi megoldást igényelt.

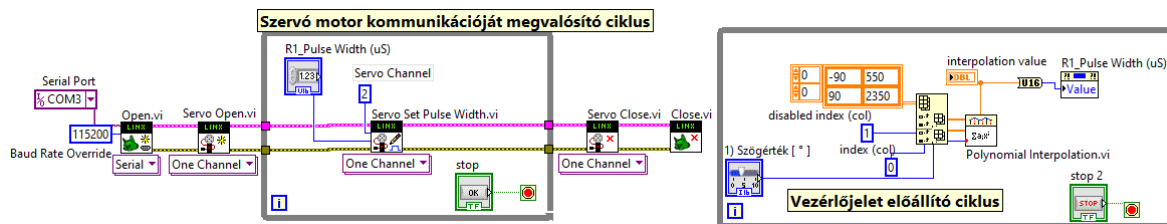
A teljes program a mikrovezérlők és a LabVIEW kapcsolatára épül, melyet a **LINX** elnevezésű kiegészítő modul segítségével valósítottam meg. A két Arduino mikrovezérlőre előzetesen feltöltésre került a modulhoz mellékelt **LIFA-Base** programkód, amellyel a mikrovezérlők képessé válnak kommunikációt folytatni a LabVIEW-val, így kialakítva a vezérlés szükséges interfészeit. A kommunikáció működtetéséhez egy **While** ciklussal meg kell nyitni az adott mikrovezérlővel a kommunikációs csatornát, majd a vezérlés végeztével azt be kell zárni (49.ábra).



49.ábra: Példa Arduino és LabVIEW kommunikációjának megvalósítására

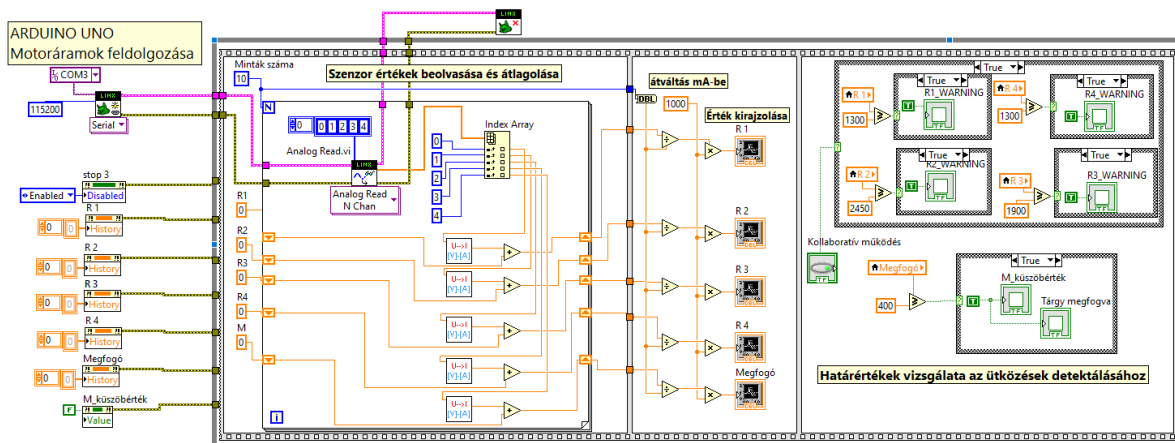
A csuklókat mozgató szervó motorok PWM vezérlése a korábban említettek alapján egy **Arduino MEGA 2560** típusú mikrovezérlővel valósul meg. A kezelőfelületen utasításba adott elfordulási szögértékek közvetlenül nem adhatóak át a szervó motoroknak, átalakítást igényelnek. A 50. ábra alapján akár csuklókoordinátában, akár világkoordinátában történő vezérlés esetén a csúszkából érkező érték átalakítását interpolálással valósítottam meg, amelynél a szögértékek és a használni kívánt impulzusszélesség tartományának határértékeit megadva eredményként megkapjuk a szögértéknek megfelelő impulzusszélességet. Ezt a **LINX Servo Set Pulse Width** alprogram továbbítja a mikrovezérlő megfelelő számú kimenetére, amelyen keresztül a szervó beáll a megfelelő pozícióba. A motorokkal folytatott kommunikációt egy, a vezérlő jelektől független ciklusban helyeztem el, melynek

köszönhetően több csukló egyidejű vezérlése is megvalósítható. Ez fontos szerepet játszik a későbbiekben taglalt *Automata üzemmód* megvalósításában.



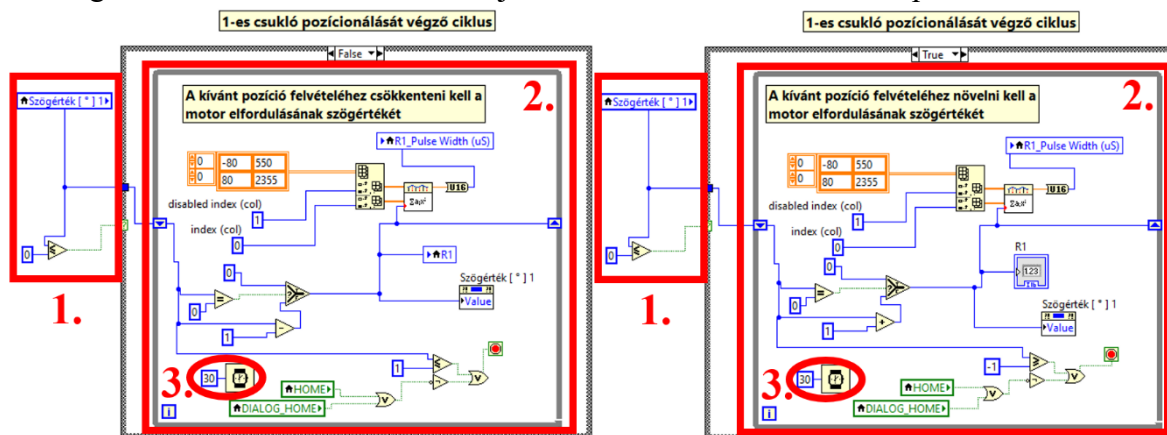
50.ábra: Példa 1 db szervó motor PWM vezérlésére a LabVIEW programkörnyezetben

A motorok áramfelvételének mérésére használt **ACS712-5A-M** típusú szenzorok értékeinek beolvasását az **Arduino UNO R3** mikrovezérlő végzi függetlenül a motorok vezérlésétől egy saját **While** ciklusban. A beolvasást, átalakítást és a küszöbérték vizsgálatát egy **Flat Sequence** struktúrában valósítottam meg, amelyben ez a három folyamat egymás után ismétlődve hajtódik végre. Első lépésként a beolvasott analóg értékeket a szenzor bemutatásánál leírt átalakítási módon áramerősségi értékekké konvertálom. Annak érdekében, hogy a beolvasott jelekben lévő zajt csökkentsem, az átalakított értékek továbbadása előtt egy **For** ciklussal átlagolást végzek szenzoronként 10 mintával, így megkapva az adott pillanatban lévő áramfelvételi középértékeket. Az 5 értéket ezt követően átalakítom [mA] mértékegységbe, majd kijelzem azokat a kezelőfelületen lévő diagramokra. Harmadik lépésként vizsgálatot végzek, amellyel meghatározom, hogy az áramfelvétel egy meghatározott küszöböt átlépett-e. Abban az esetben, ha ez bekövetkezik, feltehetően ütközés történt, így a rendszer be fog lépni az „**Ütközési állapotba**”. Ezt az állapotot a későbbiekben részletesebben is taglalom.



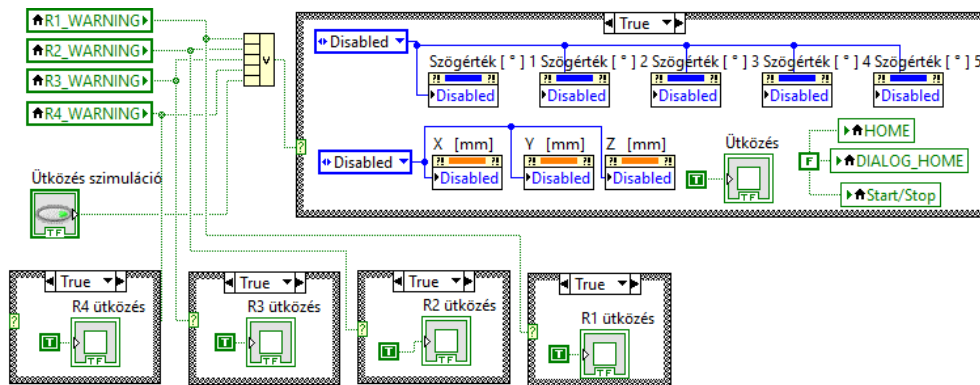
51.ábra: A motoráramok feldolgozásának három lépése LabVIEW-ban

A robotkar **home pozíciójának** felvételét ciklusok sorozatával valósítom meg. Az 50. ábra alapján a teljes folyamat egy **Flat Sequence** struktúrában van elhelyezve, amelyben a csuklók egymás után, meghatározott sorrendben felveszik a kívánt szögértéket **Case** elágazások és **While** ciklusok használatával. A teljes folyamatot a **HOME** nyomógomb, vagy az ütközéskor felugró figyelmeztető ablak szintén **HOME** nyomógombjának megnyomása indítja el. A csuklóknál az automatikus mozgás indítása előtt az 52. ábra szerint elsőnek levizsgálom, hogy a jelenlegi pozíció hol helyezkedik el a kívánt szögértékhez képest (**1-es rész**), így eldöntve, hogy merre kell mozgatni az adott csuklót. A vizsgálat logikai értéke alapján a **Case** elágazás igaz vagy hamis ágában elindul a szögértéket növelő vagy éppen csökkentő ciklus összeadás és kivonás alkalmazásával (**2-es rész**). A mozgás közben lévő aktuális szögértékeket **Shift regiszterek** tartalmazzák, melyek értékei minden egyes iterációnál továbbításra kerülnek a motorok vezérlésére. A ciklus ebből következően automatikus mozgást fog eredményezni, amelynél a csuklók pozicionálási sebességét a **While** ciklus iterációi között lévő várakozási módosításával idővel lehet szabályozni (**3-as rész**). A ciklusok minden esetben csak a kívánt pozícióig futnak, azt elérve leállnak, majd kezdődik a következő csukló pozicionálása.



52. ábra: Az 1-es csukló pozicionálását végző csökkentő és növelő ciklusok

A robotkar kollaboratív funkciójának alapjául szolgáló ütközés detektálás az áramerősség értékek vizsgálatánál kezdődik. Az 51. ábra alapján az átlagolásból kapott középértékeket a harmadik lépésben összehasonlítom a meghatározott küszöbértékekkel. Ha túllépés történik, valamelyik LED indikátor jelezni fog, így a rendszer belép az **ütközési állapotba**. Emellett az 53. ábrán látható módon azt is eltárolom, hogy melyik csuklónál történt a túllépés, mivel ez fontos információként fog szolgálni az ütközésre való reakciónál.



53.ábra: Belépés az ütközési állapotba

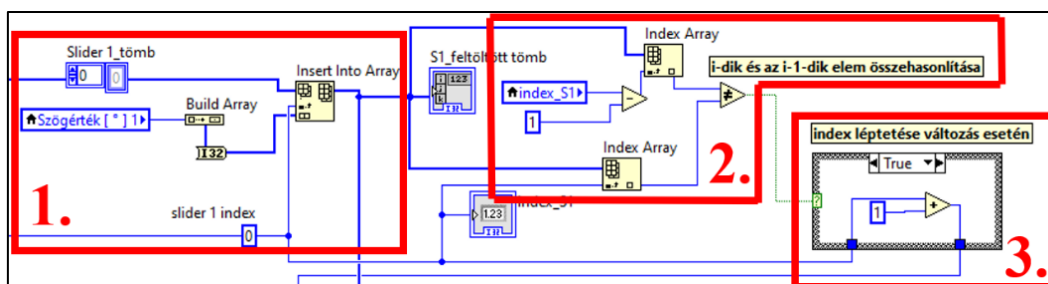
Az ütközések nyomon követhetősége és kiértékelhetősége érdekében elsőként egy Excel táblázatba mentésre kerülnek az ütközés pillanatában mért áramfelvételi értékek időbélyegzővel ellátva.

Dátum	Idő	R1[mA]	R2[mA]	R3[mA]	R4[mA]
2022. 10. 08.	17:01:52	1361,05	915,16	87,72	58,48
2022. 10. 08.	17:03:22	35,09	2679,70	251,45	969,25
2022. 10. 08.	17:03:47	2210,42	38,01	739,73	149,12

54.ábra: Példa Excel táblázatba mentett áramfelvételi értékekre

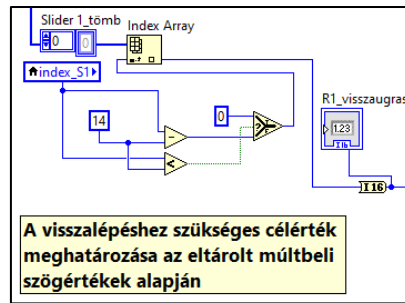
Következő lépésként a rendszer az adott csukló visszafelé történő mozgásával reagál az ütközésre. Ennek megvalósítását a csuklók pozícióértékeinek folyamatos tárolásával alakítottam ki. A csuklók visszalépése a következő elv szerint működik:

Az 55. ábra alapján a csuklók pozíciójának értékeit folyamatosan elmentem egy tömbben (**1-es rész**). A tömb indexét csak akkor lépttettem (**3-as rész**), ha a csukló pozíciója megváltozik, vagyis nem egyenlő a tömb előző értékével (**2-es rész**). Ezzel a tömb sorban feltöltődik a csukló mozgás közben felvett szögértékével, így adva információt a múltbeli mozgásáról.



55.ábra: Csukló által felvett pozíciók tárolását végző programrész

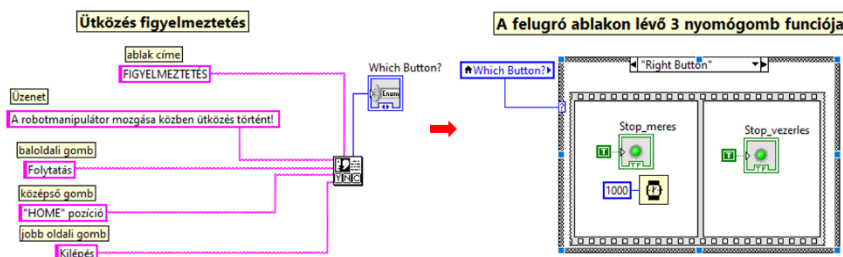
Az ütközési állapot bekövetkezésekor a feltöltött tömb aktuális indexe alapján visszaléptetem a tömböt egy adott távolságban lévő, korábbi elemre, amelyet kinevezek a csukló célpozíciójának (56. ábra).



56.ábra: Visszaugráshoz szükséges érték meghatározása a feltöltött tömbből

Ezt követően a **home pozíciónál** alkalmazott metódussal az adott csuklót a megfelelő pozícióba küldöm. Ezen megoldás nagy előnye, hogy nem szükséges információval rendelkezni arról, hogy a robotkar éppen melyik irányból érkezett az ütközés helyzetébe, mivel a tömb értékeiben való visszaléptetéssel mindig a megfelelő irányba fog visszalépni az adott csukló, így megszüntetve az ütközésnél létrejött kontaktust.

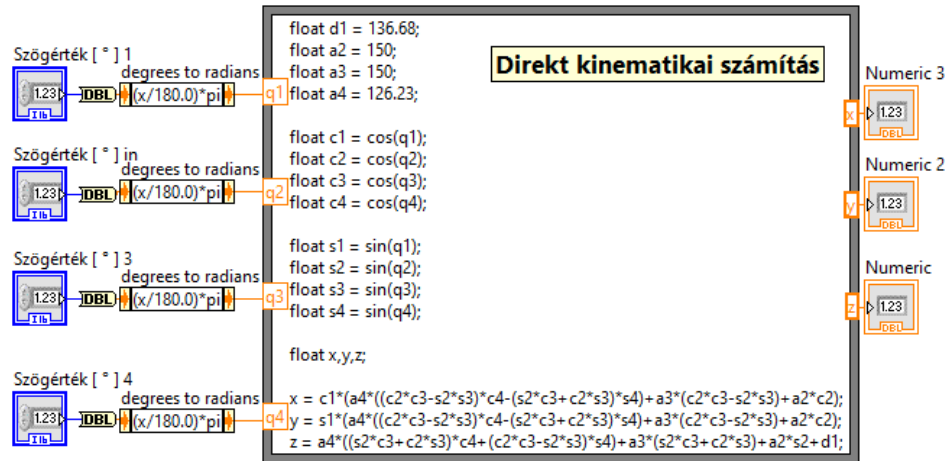
A rendszer **ütközési állapotának** utolsó lépésében egy, a kezelőfelület bemutatásánál már ismertetett figyelmeztető felugró ablak jelenik meg (48. ábra), amely három lehetőséget biztosít a kezelő személynek a robot további irányításában. Az ezt megvalósító programblokkot a 57. ábra szemlélteti.



57.ábra: Figyelmeztető felugró ablak és a továbblépési lehetőségek kezelése LabVIEW-ban

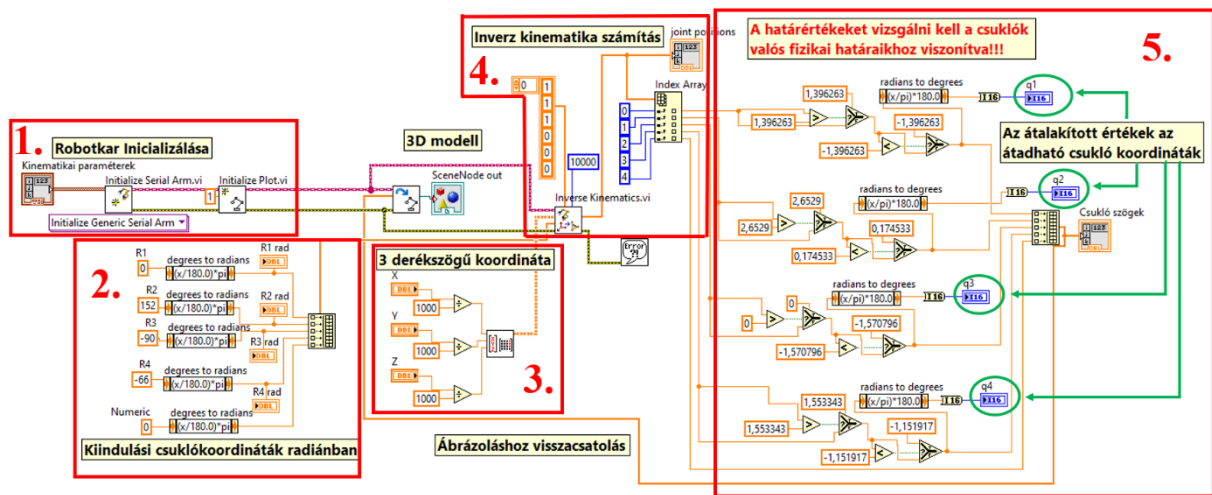
Az effektor TCP pontjának világkoordinátákban lévő elhelyezkedésének számítása a direkt kinematikai feladatok megoldásán alapszik, amelyből meghatározható a TCP világkoordinátáinak x, y és z értéke. A robotkar paramétereivel elvégzett számítás menete a 10. mellékletben látható. Elsőként a 23. ábrán lévő kinematikai lánc segítségével meghatároztam a DH paramétereket, melyeket táblázatba foglaltam. Ezt követően a paramétereket behelyettesítve minden koordináta-rendszer átmenetre felírtam a homogén transzformációs mátrixot. A mátrix szorzások elvégzésével megkaptam a 0D_4 átmenetet leíró homogén transzformációs mátrixot, melynek utolsó oszlopának első három eleme tartalmazza a világkoordinátákat leíró képleteket. A programban ezt a három képletet implementáltam az 58. ábra alapján egy **Formula Node** segítségével, melynek bemenő paramétereinek a csuklók időben változó szögértékeit határoztam meg. A programkódban konstansként deklaráltam a robotkar fizikai paramétereit, megadtam a számításnál alkalmazott egyszerűsítéseket, majd a

három koordinátát meghatározó képletet. Ezek eredményét numerikus indikátorok segítségével kiíratom a kezelőfelületre [mm] mértékegységben. Magát a folyamatot az Arduino UNO mikrovezérlőnek létrehozott **While** ciklusban helyeztem el, így a robot irányításától függetlenül, folyamatosan kijelzi a TCP aktuális pozícióját.



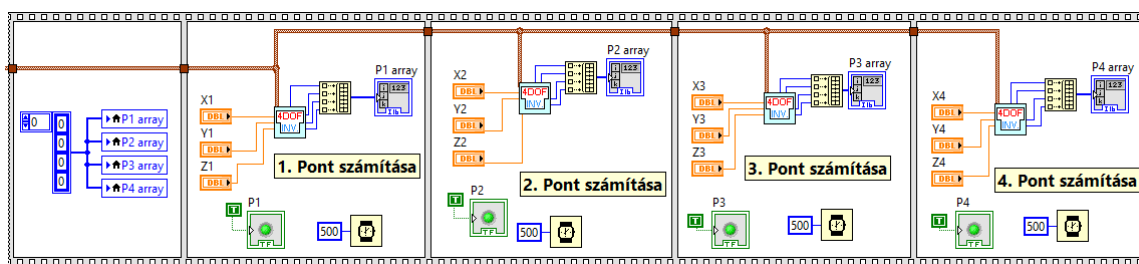
58.ábra: Az effektor TCP világkoordinátáinak számítását végző program blokk

A robotkar világkoordinátákban történő vezérlés inverz kinematikai számítását a **LabVIEW Robotics modul** segítségével valósítottam meg, amely a 59. ábrán látható. Első lépésként inicializálni kell a robotkart a számításhoz (**1-es rész**). Ehhez deklarálni kell a TCP számításnál felírt DH paramétereket a program részére. A világkoordináták csuklókoordinátákká való transzformációjához bemenetként meg kell adni a robot csuklók kiindulási pozícióját (**2-es rész**), valamint az elérni kívánt pontot leíró derékszögű koordinátákat, az x, y és z értékeket (**3-as rész**). Az **Inverse Kinematics.vi** a megadott inputok alapján elvégzi az inverz kinematikai számítást (**4-es rész**), eredményül adva egy tömböt, amely tartalmazni fogja az áttanszformált csuklókoordinátákat radián mértékegységben. Mielőtt ezen értékeket átadnám a csuklók vezérlését végző programrésznek, minden csukló esetében a kapott szögértéket összevetem a csuklók valós elfordulási határaikkal, így megakadályozva azt, hogy olyan pozícióba kényszerüljenek a csuklók, amelyeket fizikai kialakításukból adódóan nem képesek felvenni (**5-ös rész**). Ezt követően a csuklókoordináták már átadhatóak a motorok vezérlésének melynek eredményeképpen a robot TCP pontja fel fogja venni a kívánt világkoordinátabeli értéket.



59.ábra: Inverz kinematika implementációja LabVIEW-ban

Az automata üzemmód megvalósításának első lépéseként a kezelőfelületen megadott 4 pont világkoordinátáit a fent említett módon inverz kinematikai számítással csuklókoordinátákká transzformálok, így megkapva a csuklók pozicionálásához szükséges célértéket.



60.ábra: Az automata mozgáshoz szükséges csuklókoordináták leképezése

Ezt követően 61. ábra alapján a program belép egy **Stacked Sequence** struktúrába, amelyben sorban egymás után a robotkar TCP pontja felveszi a megadott értékeket. A csuklók pozicionálását a **home** pozíció felvételénél ismertetett automata pozicionálást végző **While** ciklusokkal történik, melyek ez esetben párhuzamosan, egy időben futnak. A mozgás a 4 csukló párhuzamos mozgásakor az egyenletesebb pályakövetés érdekében szabályozni kell a csuklók mozgási sebességét. A szabályzás hangolása az **R1_speed, R2_speed, R3_speed, R4_speed** numerikus kontrollokon keresztül valósítható meg, amelyeknél [ms] -ban megadott értékekkel adható meg a pozicionáló ciklusok iterációi között lévő várakozási időt, így gyorsítva és lassítva a létrehozott mozgást.

5. MÉRÉSEK EREDMÉNYEINEK ISMERTETÉSE ÉS KIÉRTÉKELÉSE

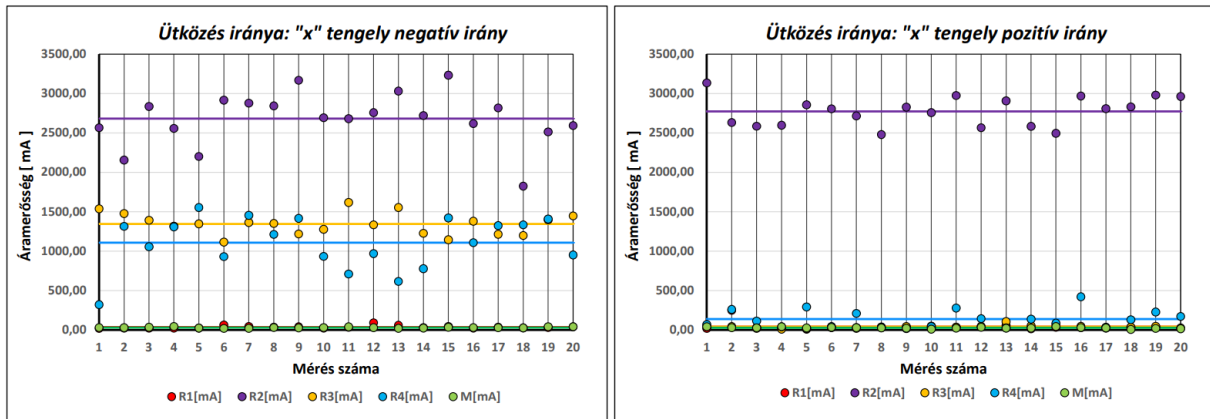
Ezen fejezetben bemutatom a kész robotkaron végzett különböző méréseket. Ismertetem az ütközési irány, a reakcióidő, az ütközéskor kifejtett erő, a pontosság és a teherbírás meghatározásához végzett mérések módszereit, eredményit, valamint azok kiértékelését.

5.1 Ütközés irányának meghatározása a motoráramok alapján

Az első mérés célja az ütközések irányának meghatározása volt a rendelkezésre álló, ütközés pillanatában mért motoráramok értékei alapján. A vizsgálathoz hat kitüntetett ütközési irányt rögzítettem, melyek a robot platformjához rögzített nyugvó, derékszögű koordináta-rendszer x, y és z tengelyének pozitív és negatív irányultságainak felelnek meg. Ezek mindegyikével végeztem egy-egy 20 mintából álló méréssorozatot, amely során a robotkارت automata üzemmódban, a kitüntetett ütközési iránynak megfelelő pályán mozgatva egymás után ugyanabba a pontba ütköztettem, majd az ütközés pillanatában naplózott áramfelvételi értékeket táblázatba foglaltam. A kinyert értékeket csuklónként átlagoltam, így megkaptam a csuklókat mozgató motorok adott irányultságú ütközés esetén felvett átlagos áramfelvételi középértékeit. A méréssorozatok táblázatai és diagramjai a 11. mellékletben láthatóak teljes részletességgel.

Az átlagos középértékek összehasonlításából a hat irány tekintetében általánosságban elmondható, hogy a vizsgált esetek bármelyikében meghatározható, hogy melyik tengely mentén következett be az ütközés. Az értékek alapján jól látható, hogy mindegyik ütközési irányhoz kapcsolható egy csukló, melynek jellemzően nagyságrendileg magasabb az áramfelvétele a többihez viszonyítva. Ennek értelmében a jobbról és balról érkező ütközések során az R1-es csuklónál, az előlről és hátulról bekövetkező ütközéseknél jellemzően az R2-es csukló, az alulról és felülről érkező ütközések esetén az R3-as csuklónál jön létre magasabb áramigény.

Annak vizsgálata, hogy az ütközés az adott tengely mentén negatív vagy pozitív irányból érkezett, csak az előlről és hátulról létrejött kontaktusok esetében végezhető el egyértelműen a motoráramok felhasználásával. A két mérési sorozat eredményét összehasonlítva elmondható, hogy a hátulról történő ütközés, amely a robot mozgásviszonyai alapján nagy valószínűséggel a második szegmenst fogja érinteni, csak az R2-es csuklót mozgató motornál generál magas áramfelvételi értéket, még az ellenkező esetben az R3-as és R4-es csuklónál is nagyságrendekkel magasabb értékek mutatkoznak. Ezen különbséget szemlélteti a 62. ábra is, melyet felhasználva a vizsgált két ütközési irány egyértelműen meghatározhatóvá válik.



62.ábra: Az „x” tengely mentén történő ütközések mérési eredményeinek ábrázolása

A többi irány méréseiből származó átlagértékek alapján azonban nem kapunk egyértelmű képet, mivel egy-egy iránypárnál igen közeli áramfelvételi értékek jelentkeznek, így pusztán ezeket felhasználva nem határozható meg egyértelműen az ütközés irányultsága.

5.2 A robotkar által kifejtett erő ütközéskor és megfogáskor

5.2.1 A robotkar által kifejtett erő ütközéskor

A következő mérés a robotkar ütközéskor kifejtett erőhatásának meghatározására irányult. Ennek megvalósításához egy **HX711AD** mérőátalakítót tartalmazó 2kg-ig terhelhető mérőcellát alkalmaztam, amelyet egy **NodeMCU-ESP-32S** típusú mikrovezérlőhöz kapcsolva a megfelelő program segítségével erőmérésre tudtam használni.

A kifejtett erőhatások meghatározásához a robotkart ismét automata üzemmódban, 3 különböző pályán mozgatva vizsgáltam, amely során húsz-húsz mérési pontból álló méréssorozatot végeztem. Ezek mindegyikénél a mérőcellát az ütközés pontjában helyeztem el, így lehetővé téve az ott fellépő erőhatások mérhetőségét. Az ütközések irányultságát tekintve a robotkart alulról, jobbról és előlről érkező ütközéseknek tettem ki egymás után ugyanabban a pontban. A mért értékeket táblázatba foglaltam és diagramon ábrázoltam, ez a 12. mellékletben látható, majd mindhárom sorozat erő értékeit átlagoltam, így meghatározva az átlagosan kifejtett erőt az adott ütközési pontban.

Az átlagértékeket vizsgálva a jobbról érkező ütésnél keletkezett a legkisebb, közel 4 N nagyságú erő, az előlről történő ütközésnél pedig a legnagyobb, kicsivel több mint 17 N nagyságú erőhatás. Az utóbbi magasabb érték a következőképpen magyarázható. A robotkar csuklóinak igénybevételeit figyelembe véve az R2-es csukló van kitéve a legnagyobb igénybevételnek. Ennek oka, hogy az R2-es csukló fölött elhelyezkedő robotkar alkotó elemek tömegéből adódó forgatónyomatékokat ez a csukló fogja felvenni, így itt jellemzően magasabb áramfelvételi tartományokban üzemel a csuklót mozgató szervó motor. Ebből kifolyólag a többi csuklónál alkalmazott áramfelvételi küszöbértékekhez képest itt magasabb határ került

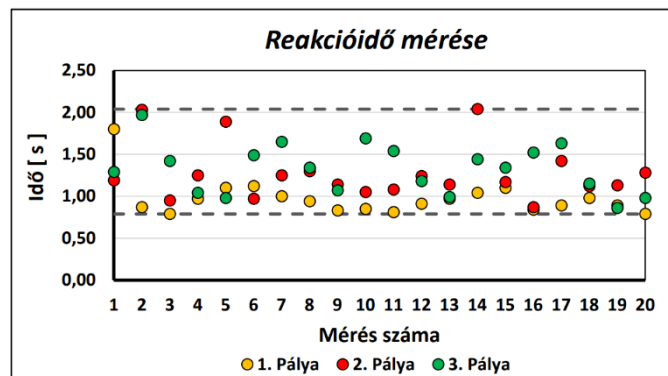
meghatározásra az ütközések detektálásához, amely következtében magasabb erőhatások jöhetnek létre azoknál az ütközéseknél, amelyeknél jellemzően az R2-es csukló áramfelvétele emelkedik meg.

5.2.2 A megfogó szerkezet által kifejtett erő mérése

A robotkar anyagmozgatásért felelős megfogó szerkezet esetében is elvégeztem az előzőekben ismertetett mérést. Itt a cél a két megfogó pofa által, a megfogott tárgyra kifejtett erőhatás meghatározása volt. A méréssorozatot 10 mérési pont felvételével végeztem el, melynek eredményeképpen 4,63 N-os nagyságú átlagosan kifejtett erőt kaptam eredményül. A részletes mérési adatokat és azok diagramos ábrázolását a 12. melléklet tartalmazza.

5.3 Ütközési reakcióidő

A robotkar kollaboratív funkciójából adódó ütközésekre való reagálása esetében fontosnak tartottam meghatározni a reakcióidőt, amely az ütközés detektálásától, a robotkar visszamozgatásán keresztül a figyelmeztető felugró ablak megjelenéséig tart. Ennek méréseire stoppert alkalmaztam, a robotkart szintén automata üzemmódban, három különböző pályán 20-20 különböző irányú ütközést generáltam, így elvégezve három méréssorozatot. A mért értékek táblázatos formában a 13. mellékletben találhatóak, melyekből kiolvasható, hogy a robotkar 0,79 s-tól 2,04 s-ig terjedő tartományban mozgó reakcióidőket produkált a vizsgálat során. Ezt szemlélteti a 63. ábrán látható diagram is.



63. ábra: Reakcióidő mérésének diagramja

Fontos megjegyeznem, hogy a mérésben keletkezett pontatlanságokat a kézi időmérő kezelése könnyedén előidézheti, így a pontosabb mérési eredmény eléréséhez célszerű valamilyen szoftveres módon időmérést alkalmazni.

5.4 Pozicionálási pontosság

A robotkar pozicionálási pontosságának mérése során az előzetes próbák során a TCP pont világkoordinátáit hasonlítottam össze a szoftveres úton kijelzett és a valós mért értékekkel. Az x és y tengelyekkel való pozicionálásnál 10-15 mm -es pontatlanság, a Z tengely menti értékek esetében 20-30 mm-es eltérések is mutatkoztak, amelyek több dologra is

visszavezethetőek. A robotkar tervezett és fizikai méretei bizonyos mértékű eltérést mutatnak, a mechanika hajlása és a szervók holtjátékai is előidézhetik a problémát. Ez utóbbi idézi elő a z tengely menti pontatlanságot, mivel az R2-es, az R3-as és az R4-es csuklók motorjainak holtjátéka összegződik a TCP pont tekintetében, így előidézve a jelentős eltérést.

A világkoordinátákban mért nagy pontatlanságok miatt elvégeztem egy ismétlőképességi mérést is. A mérés során a robotkart egymás után többször ugyan abba a pontba küldtem, valamint a megfogó szerkezet pofái közé egy ceruzát helyeztem. Az ismétlődő mozgás során a ceruza hegye a kívánt pontban egy, az asztalra vízszintesen elhelyezett papírlaphoz ért, így egy pontot ejtve rajta. A mérést különböző pontok esetében is elvégeztem, melyek eredményeképpen elmondható, hogy a papíron ejtett pontok minden esetben egy 5 mm-es átmérőjű körben helyezkedtek el, így az ismétlőképesség tekintetében jelentősen jobb eredményeket produkált a robotkar.

5.5 Teherbírás

A tervezéskor felállított kritériumoknak megfelelően teherbírasi mérést is végeztem a robotkaron. A mérések eredményeképpen a munkatér legtávolabbi pontjában a maximális terhelhetőségi határ 110 g, abban az esetben, ha a robot nincsen kollaboratív üzemmódban. Ellenkező esetben a terhelés hatására magasabb áramerősségi értékek jönnek létre a motoroknál, melyeket a vezérlő szoftver tévesen ütközésként detektál. A vizsgálat során kapott határérték nem éri el a kritériumban meghatározott értéket, amely a csuklóban és a megfogónál lévő motorok plusz tömegére vezethető vissza, melyek hozzáadódtak a vázszerkezethez, így lecsökkentve a terhelhetőségi határértéket.

MÉRÉSEK ÖSSZEFOGLALÓ TÁBLÁZATA							
Ütközés irányának meghatározása a motoráramok alapján					A robotkar által kifejtett erő ütközéskor		
Ütközés iránya:	Motoráramok átlagos értéke: [mA]					Ütközés iránya:	Kifejtett erő átlag értéke: [N]
	R1	R2	R3	R4	M		
"y" tengely negatív irány	1973,52	423,67	777,45	171,27	31,29	"Z" tengely negatív irány	5,28
"y" tengely pozitív irány	1908,24	337,78	856,25	212,93	32,02	"y" tengely negatív irány	3,98
"x" tengely negatív irány	35,96	2680,58	1345,41	1105,87	29,90	"x" tengely negatív irány	17,32
"x" tengely pozitív irány	39,54	2773,85	39,84	138,30	25,80	A robotkar által kifejtett erő megfogáskor	
"z" tengely negatív irány	28,65	407,07	1700,36	424,10	27,63	Kifejtett erő átlag értéke: [N]	4,63
"z" tengely pozitív irány	57,31	670,07	1729,16	232,37	26,24	Teherbírás	
Ütközési reakcióidő.					Maximális terhelhetőség [g]		
Reakcióidő értéktartománya [s]					110		
0,79 – 2,04							
Átlagos reakcióidő [s]							
1.pálya					0,97		
2.pálya					1,28		
3.pálya					1,33		

64.ábra: A mérések összefoglaló táblázata

6. ÖSSZEGÖGLALÁS ÉS JAVASLATTÉTEL

A projekt megvalósításával kapcsolatban elmondhatom, hogy sikerült egy olyan robotkart alkotnom, amely kollaboratív funkciókkal képes a váratlan ütközések következtében megfelelő módon reagálni, így eleget téve a vele szemben támasztott kritériumoknak.

A tervezés során a kiválasztott kinematikai lánc elkészítését követően sikerült a követelményeknek megfelelő modellt létrehozni a tervezőprogram segítségével, amely a fizikai megvalósítás előtt lehetőséget nyújtott a mozgásvizonyok vizsgálatára, a tervezési hibák feltárására, melyek jelentős problémát okoztak volna. A modell megalkotásánál mindvégig nagy hangsúlyt fektettem a könnyű és logikus szerelhetőségre és az alkatrészek 3D nyomtathatóságára. Az elektronikai tervezésnél törekedtem arra, hogy minél egyszerűbb kapcsolást készítssek, amely átlátható, könnyedén módosítható és a későbbi fejlesztések alapjául szolgálhat. A kivitelezésnél alkalmazott 3D nyomtatási gyártástechnológia esetében mindvégig igyekeztem az általam használt berendezés pontos paramétereit figyelembe véve a lehető legjobb nyomtatási minőséget elérni.

A robot kivitelezése alatt nem ütköztem olyan problémába, amely megoldása érdekében jelentős eltéréseket kellett volna eszközölnöm a tervekhez képest. A nyomtatott alkatrészek minősége és pontossága erősen hozzájárult a sikeres megvalósításhoz, viszont a teljes rendszert vizsgálva a merevség nem lett mindenhol kellő mértékű, így előidézve a pozicionálási pontosság romlását. Ennek kiküszöbölése érdekében javasolt lehet más filament típus, például PETG, ABS vagy ASA anyagtípusok alkalmazása az alkatrészek legyártásához, továbbá érdemes a második csukló megerősítése és a megfogó szerkezet felfogatásának módosítása, melyekkel jelentős javulás idézhető elő a robotkar pozicionálása és terhelhetősége területén.

A motorok áramfelvételének mérésére szolgáló szenzorok jelfeldolgozása megfelelőnek bizonyult az ütközések detektálásához, viszont célszerű lehet az elektromos rendszert esetleges zajforrásait feltárni és megvizsgálni, melyek megszüntetése vagy szűrése a szenzorok által előállított jel minőségének jelentős javulását eredményezheti, ezáltal tovább csökkentve az ütközések detektálásának reakcióidejét.

A csuklókat mozgató RC szervó motorok vezérelhetőségének könnyedsége hasznosnak bizonyult a vezérlő szoftver megalkotásánál, a robotkar pozicionálásánál azonban jelentős pontatlanságot idézett elő a motorok holtjátékának összegződése. Érdemes lehet erősebb nyomatékkal rendelkező modelleket alkalmazni, így javítva a teherbírást is, közvetlen hajtás helyett szíjhajtást beiktatni vagy léptető motorokra váltani a csuklók hajtásrendszerét. Ez utóbbi alkalmazása a vázszerkezet jelentős áttervezését vonja maga után, valamint a kivitelezési költségek emelkedésével számolni kell.

Az elektronikai kivitelezés a terveknek megfelelően kellő biztonsággal képes ellátni a feladatát. Az áramkör esetleges sérülései és érintésvédelmi okok miatt célszerű a teljes kapcsolást a későbbiekben egy zárt házba helyezni, amely mind a kezelőt, mind az elektronikát képes megvédeni.

A vezérlést végző szoftver megalkotásánál nagy segítséget nyújtott a LabVIEW programkörnyezet és az Arduino mikrovezérlők összehangolhatósága, melynek köszönhetően egy grafikus, informális kezelőfelület tudtam létrehozni, amellyel a robotkar számos irányítási és programozhatósági módozatát teszi lehetővé. Az ütközésre való reakció leprogramozásának és az inverz kinematikai vezérlés implementálásának folyamata hosszú időt vett igénybe a jelenlegi szint eléréséig. A program számos biztonsági funkciót kapott, amellyel számos kezelési hiba kivédhető. A program számítási igényének csökkentése érdekében javasolt a későbbiekben optimalizálni azt, amellyel mind a jelfeldolgozás, mind a motorok vezérlése gördülékenyebbé válhat.

Összegzőképpen elmondhatom, hogy a projekt kivitelezése során rengeteget tanultam, számos ismerettel gazdagodtam mind a mechanikai tervezés, az elektronika, a 3D nyomtatás, a programozás és az irányítástechnika területén. A robotkar megvalósításának sikeressége érdekében rengeteg időt fektettem a projektbe, melynek köszönhetően az elvárásoknak megfelelő módon helytálló eszközt tudtam létrehozni, amely során megtapasztalhattam egy összetett mechatronikai szerkezet megvalósulásának teljes folyamatát. Bízom benne, hogy az így megszerzett tudás és tapasztalata későbbi szakmai pályafutásomat jelentősen elősegíti.