

# KOLLABORATÍV FUNKCIÓ MEGVALÓSÍTÁSA NÉGY SZABADSÁGFOKÚ ROBOTKARON

Kóczy Dávid – Jernei Mihály – Sárosi József

**Abstract:** A kollaboratív robotok széles körben alkalmazhatók olyan munkaterületeken, ahol az emberrel közös munkatérben végeznek munkafolyamatokat, ezért fontos a biztonságuk együttműködő képességük. Az általunk tervezett és kivitelezett négy szabadságfokú, rotációs csuklókból felépülő robotkar motoráram mérésével képes reagálni a mozgás közben bekövetkező váratlan külső hatásokra, ütközésekre. A robotkar alkatrészei 3D nyomtatással készültek, a csuklók mozgását digitális RC szervó motorok biztosítják. A vezérlés interfészként két Arduino mikrovezérlőt használ, az irányításról egy saját fejlesztésű informális, grafikus kezelőfelület gondoskodik, amely LabVIEW grafikus programkörnyezetben lett kialakítva. Az elkészült kollaboratív robotkaron elvégzett különböző mérések célja az volt, hogy mennyire felel meg a megalkotott eszköz és kollaboratív funkció az előzetes elvárásoknak. A vizsgálatok az ütközés irányának meghatározhatóságára, a reakcióidőre, az ütközéskor kifejtett erőhatásokra, pozícionálási pontosságra, valamint a robotkar teherbírására irányultak. A mérések alapján a robot alkalmasnak bizonyult adott határokon belüli kollaboratív működésre. A munkában értékelésre kerül a rendszer hasznosíthatósága és továbbfejlesztési lehetőségei.

**Abstract:** A wide range of applications exist where workspaces are shared with humans by collaborative robots, making it important for them to be able to work safely together. The robotic arm has been designed and built with four degrees of freedom and rotary joints. It can react to unexpected external forces and collisions during movement by measuring motor current. The robotic arm components have been 3D printed, and the joints are driven by digital RC servo motors. The control interface is provided by two Arduino microcontrollers, and the control is executed through a graphical user interface developed in the LabVIEW graphical programming environment. Various measurements were performed on the collaborative robot arm to assess how the implemented device and collaborative function meet the preliminary expectations. The tests focused on impact direction determination, reaction time, impact forces, positioning accuracy, and the load capacity of the robotic arm. The measurements showed that the robot is capable of collaborative operation within given limits. The usability of the system and its potential for further development were evaluated.

*Kulcsszavak:* robotkar, kollaboratív robot, motoráram, ütközés, cobot

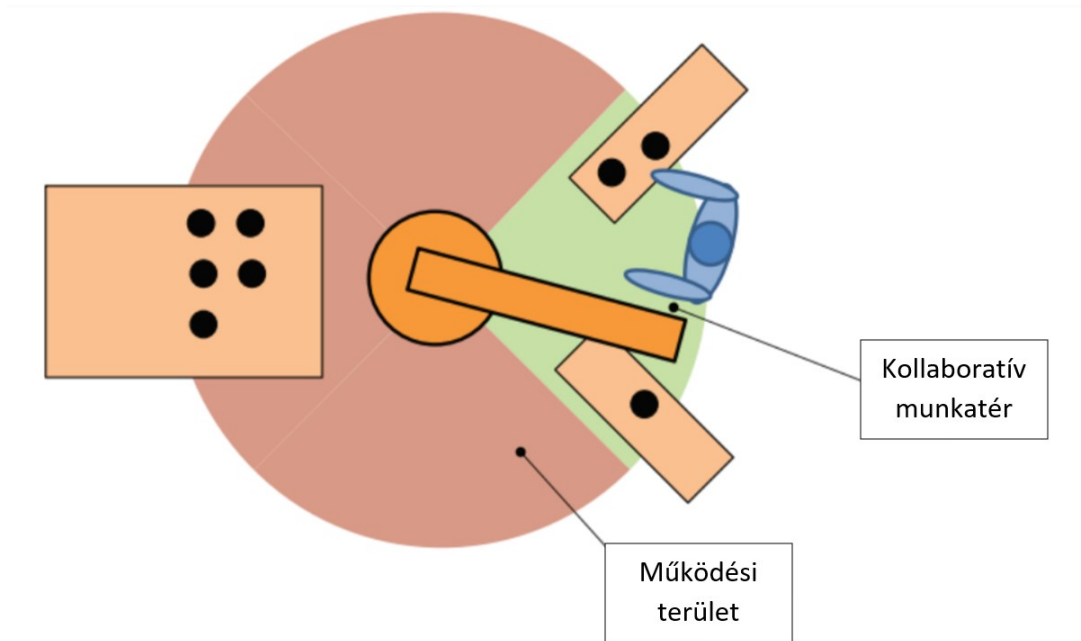
*Keywords:* robot arm, collaborative robot, motor current, collision, cobot

## 1. Bevezetés

A kollaboratív robot, egy olyan robotkar, amely képes az emberrel egy munkatérben történő munkavégzésre (Vicentini, 2020). A kollaboráció szintjei lehetnek koegzisztencia, kooperáció és kollaboráció (Aaltonen et al., 2018). A koegzisztencia kollaboratív robotok esetén a legegyszerűbb együttműködést jelentik, az ember és a robot szomszédos munkatérben dolgoznak, azonban egymástól térben és időben is elkülönülnek, például közös szállítószalagra dolgoznak (Long et al., 2018). A második szint a kooperáció, ebben az esetben az ember és a robot közös munkatérben osztoznak, azonban a munkavégzésük időben elhatárolt. Ilyen applikációra számos példát találunk, jellemzően azokat, amikor az ember előkészíti a munkadarabot további manipulációra a robot számára (Fanklin et al.; Feng et al., 2020; Hentout et

al., 2019). Kollaboráció esetén a munkatér közös, időben elhatárolás nincs. Az 1. ábrán látható a munkatér felosztása.

1. ábra: Kollaboratív munkatér



Forrás: ISO 15066 alapján a szerzők szerkesztése.

A kollaboratív robotok számos feladat elvégzésre alkalmazhatóak úgy, mint az ipari társaik. Ezek lehetnek az egyszerű anyagmozgatástól, a ragasztáson át, a precíz mozgásokat megkövetelő szerelési, csavarozási műveletekig (Parodi et al., 2017; Kragic et al., 2018; Böjrn et al., 2016)

Kollaboratív működések az ISO/TS 15066 szabvány szerint lehetnek a „*Felügyelt biztonsági leállás*” amely azt jelenti, hogy az embernek valamilyen interakció segítségével vagy pusztán biztonsági eszközök segítségével lehetősége van a robotot gyorsan és hatékonyan megállítani. Következő a „*Kézi mozgatás*”, amely során az operátor úgy képes a robotot betanítani, hogy kezével a robotot a megfelelő pozícióra mozgatja. A „*Sebesség és távolság megfigyelés*” egy olyan kollaboratív funkció, amely lehetővé teszi a robot számára, hogy érzékelje az ember mozgását és biztosítsa, hogy a robot a megfelelő sebesség és távolsági határokon belül maradjon. „*Erő és teljesítmény korlátozás*” egy olyan biztonsági funkció, ami esetén a robot képes az általa kifejtett erőt és teljesítményt úgy korlátozni, hogy elkerülje az ütközést, vagy annak hatását csökkentse (ISO 15066:2016).

Fentiek közül ebben a cikkben a „*Felügyelt biztonsági leállás*” egy lehetséges megvalósítása kerül bemutatásra. A funkció általában egy külön biztonsági körre épül, amelyet a robot vezérlőegysége folyamatosan figyel (Marvel et al., 2017). Ha bármilyen veszélyes helyzetet észlel a biztonsági rendszer, akkor az beavatkozik (Bi et al., 2021). A beavatkozás lehet pálya módosítás, részleges megállítás, teljes

leállítás (Mihelj et al., 2019). A leállási időt meghatározza a robot sebessége, saját, valamint mozgatott tömege. A leállási időt a stopjel kezdetétől a manipulátor mozgásának teljes leállításáig mérjük így mindig az adott applikáció jellemzője (ISO 10128-2:2011).

A funkció megvalósítható biztonsági érzékelőkkel, amelyek a robotra vagy annak környezetében elhelyezve képes érzékelni a tárgyakat vagy a személyeket. Ezek az érzékelők gyakran távolságerzékelők, mozgásérzékelők vagy nyomás szenzorok (Tsuiji et al., 2019).

Megvalósítható továbbá a robot vezérlőegységében implementált biztonsági funkcióval, amely folyamatosan figyeli a robot motor mérhető értékeinek változását. Ilyen tulajdonság lehet a feszültség, motor áram, hőmérséklet (Raiola et al., 2018).

## **2. Anyag és módszer**

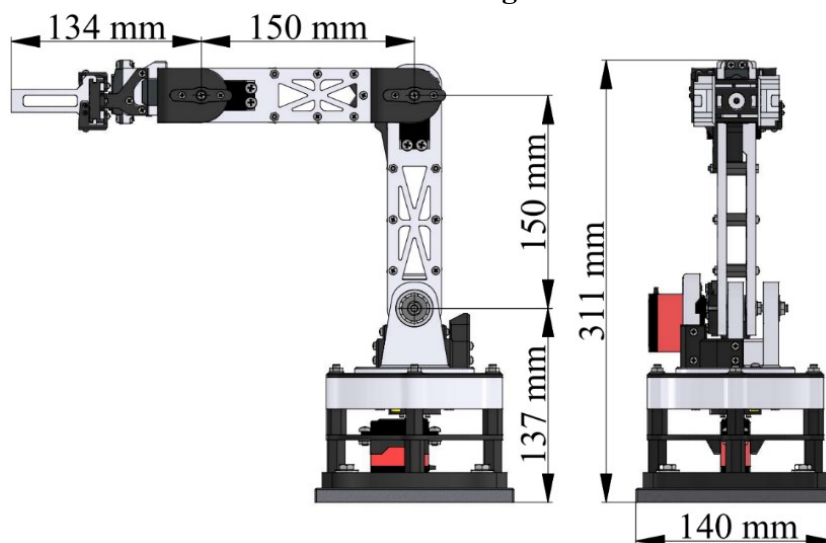
### **2.1. A robotkar mechanikai kivitelezése**

A robotkar felépítését tekintve egy három rotációs csuklóval rendelkező (RRR) alapkonfigurációból kiinduló, nyitott kinematikai láncolattal rendelkező manipulátor. Rotációs csuklói 4 szabadságfokú mozgást tesznek lehetővé a robotnak a gömb alakú munkatérben való pozicionálás során. A kollaboratív működés megvalósítása miatt a robotnak mechanikai, elektronikai és vezérlési oldalról nézve több kritériumnak is meg kell felelnie. Ezek a stabil mechanikai felépítés, a vázszerkezet maradandó alakváltozással szembeni ellenállása, az egyenletes, stabil mozgás. További szempont, hogy a vezérlés képes legyen a meghajtó motorok áramfelvételét érzékelő szenzorok értékeit feldolgozni és vizsgálni, melyek alapján ütközéseket tud detektálni, valamint megfelelő reakciót kiváltani.

A vázszerkezet alkatrészei FDM (Fused Deposition Modelling) technológiát alkalmazó 3D nyomtatással, PLA (Polylactic Acid) típusú műanyag alkalmazásával kerültek legyártásra, melyek kellő merevséget és stabilitást adnak a robotkarnak mozgása során. Az elemek összekötését metrikus csavarkötések, a teljes váz önsúlyából adódó felborulás elleni védelmet egy edzett acéllapból kialakított talp biztosítja. A szerkezeti kialakításnak és az anyagválasztásnak köszönhetően a robotkar egy ütközés bekövetkezésekor alacsony valószínűséggel szenved maradó alakváltozást vagy törést, továbbá stabil mozgással rendelkezik. A robotkar össztömege közel 3 kg.

A robottal történő anyagmozgatás megvalósíthatósága érdekében a végmanipulátor egy megfogó szerkezet, amely kisebb tárgyak manipulálását teszi lehetővé.

2. ábra: A robotkar befoglaló méretei



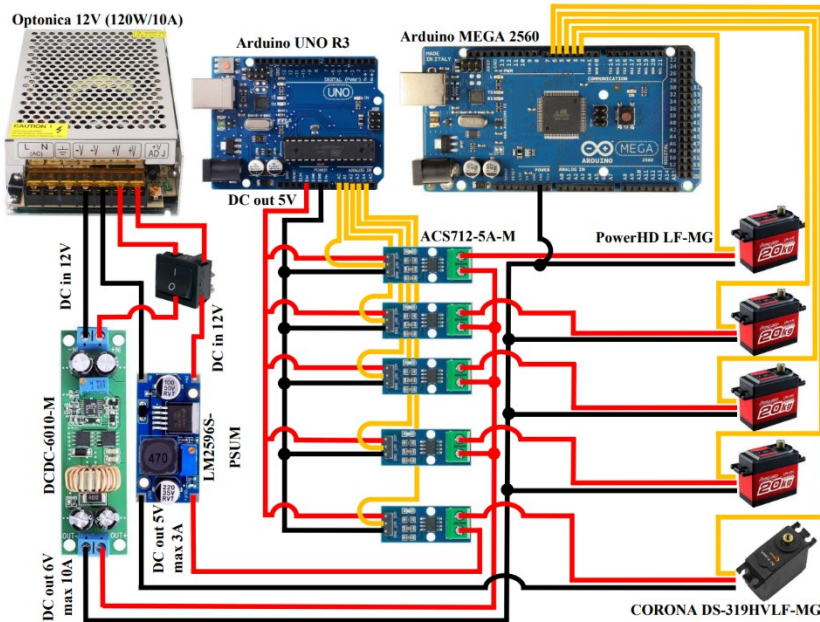
Forrás: a szerzők szerkesztése.

## 2.2 A robotkar hajtásrendszere és vezérlése

A robot hajtásrendszere digitális RC szervó motorokból épül fel. A mozgás közbeni ütközések miatt megjelenő nagyobb igénybevételek elviselése érdekében az alkalmazott szervó motorok fém fogaskerekekkel és dupla golyóscsapágyazással vannak ellátva, így képesek a robotcsuklóknak egyenletes és nagy nyomatékú szögelfordulást biztosítani. A szervó motorok strapabíró kialakításából adódóan az ütközések során keletkező többletterhelések nem képesek jelentős mértékben károsítani a hajtásrendszert, továbbá az üzem közbeni áramfelvételük kellően magas értékeket képvisel, így azok mérése és feldolgozása erősítés nélkül közvetlenül is megvalósítható.

A robot vezérléséről egy Arduino MEGA 2560, valamint egy Arduino UNO R3 mikrovezérlő gondoskodik, melyek a LabVIEW grafikus programkörnyezetben kialakított irányító szoftver interfészeiként funkcionálnak. A 3. ábrán látható kapcsolási rajz alapján a mikrovezérlők gondoskodnak a szervó motorok vezérléséhez szükséges impulzus-szélesség modulációs jelek (PWM) előállításáról, továbbá a szenzorok által szolgáltatott analóg értékek A/D átalakításáról, melyet az irányító szoftvernek feldolgozásra továbbítanak.

## 3. ábra: A vezérlés kapcsolási rajza



Forrás: a szerzők szerkesztése.

Az ütközések detektálása a kritériumoknak megfelelően a motoroknál mérhető áramfelvételi értékek begyűjtésével és vizsgálatával valósul meg. Az áramfelvételek mérését ACS712 típusú áramérzékelő IC-t használó szenzor modulok végzik a hajtásrendszer minden eleménél. Működésük az áramjárta vezető által keltett elektromágneses tér érzékelésén, vagyis Hall effektuson alapul, kimenetükön a mért árammal arányos analóg feszültségértéket szolgáltatnak. Ezek digitalizálását és továbbítását a kapcsolásban elhelyezett Arduino UNO R3 mikrovezérlő végzi el 10 Hz-es frekvencián történő mintavételezéssel. A mérési zajok csökkentése érdekében a vezérlő szoftver 10 minta számtani középértékét veszi alapul a motorok áramfelvételének vizsgálatakor.

Az áramerősség és az érzékenységi tényező meghatározása a következő képletek alapján történik:

$$I = \frac{V - 2,5}{m} \quad (1.1)$$

$$m = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \quad (1.2)$$

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

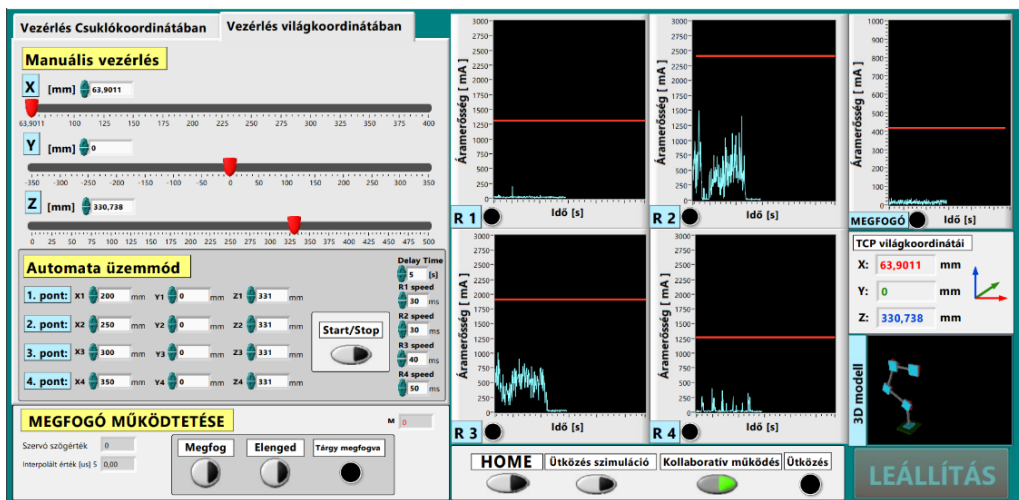
$V_2$  – szenzor analóg kimenetén mérhető feszültségek átlaga fogyasztó bekötése esetén

$I_1$  – digitális multiméterrel mért áramerősség értékek fogyasztó nélkül

$I_2$  – digitális multiméterrel mért áramerősség értékek fogyasztó esetén

A LabVIEW-ban fejlesztett egyedi irányító szoftver (4. ábra) egyben egy informális grafikus kezelőfelületet is biztosít, amely számos opciót kínál a robotkar vezérlésére. Lehetőséget ad csukló-, illetve világkoordinátákban történő pozicionálásra, betanítást követő automata üzemmódra, vezérelhető a végmanipulátor megfogó szerkezete, továbbá grafikonok segítségével valós időben nyomon követhető a szenzorok által mérhető áramfelvételi értékek változása.

4. ábra: A kezelőfelület



Forrás: a szerzők szerkesztése.

Ezen funkciók mellett az irányító szoftver felelős a robot kollaboratív működésének megvalósításáért. A szenzorok értékeinek beolvasásakor a mA-ben feldolgozott adatok az adott motorokhoz definiált, kísérleti úton meghatározott áramfelvételi határértékekkel kerülnek összehasonlításra. A küszöbértékek csuklókra vonatkoztatva a következők:

- 1. csukló: 1300 mA
- 2. csukló: 2450 mA
- 3. csukló: 1625 mA
- 4. csukló: 1300 mA

Ezek közül egyet is elérve, vagy túllépve a rendszer ütközést detektál, majd a robotkar aktuális mozgási folyamatait megszakítva korrekciót végez, így reagálva a bekövetkezett ütközésre. A reakció során a robotkar az ütközés irányával ellentétes irányba, egy korábban felvett pozícióba lép vissza, amely az érintett csuklóra nézve 15 °-os ellentétes irányú elmozdulást jelent. Az irányító szoftver a robotcsuklók által felvett szögértékek üzem közben történő folyamatos tárolásával képes megvalósítani a beavatkozást, amellyel a kialakult kontaktus nagy valószínűséggel megszűnik.

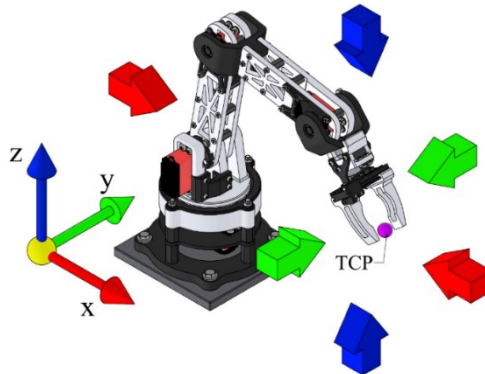
### 3. Eredmények és értékelésük

Az elkészült robotkaron különböző mérések és vizsgálatok kerültek elvégzésre, melyek az eszköz kollaboratív funkcióinak helyes működésére és az előzetesen felállított kritériumokkal szembeni megfelelésre irányultak.

#### 3.1 Ütközés irányának vizsgálata

A vizsgálat célja az ütközések irányának meghatározása volt a rendelkezésre álló, ütközés pillanatában mért és eltárolt motoráramok értékei alapján. A mérés során a 5. ábrán látható módon hat ütközési irány került kitüntetésre, melyek a robot platformjához rögzített nyugvó, derékszögű koordináta-rendszer x, y és z tengelyének pozitív és negatív irányultságainak feleltethetőek meg. A mérések alatt a robotkar automata üzemmódban egy előre definiált pályán mozgott. A mozgás során a körülmények változása nélkül mind a hat esetben a robot 20-20 alkalommal ütközött a munkaterében opcionálisan elhelyezhető és rögzíthető merev tárgynak.

5. ábra: A kitüntetett ütközési irányok

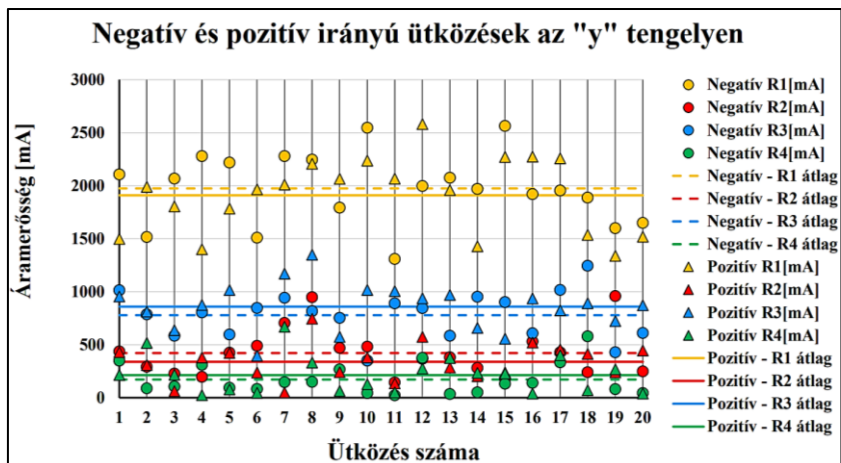


Forrás: a szerzők szerkesztése.

A kinyert adatok diagramos ábrázolását szemlélteti a 6-7-8. ábra, melyeknél az ütközések számának függvényében láthatóak a motoroknál mérhető pillanatnyi áramfelvételi értékek mA-ben, valamint leolvashatók a méréssorozat csuklókra vonatkoztatott átlagos középértékei. Az iránypárokat ábrázoló diagramokat összevetve mindegyik esetben egyértelműen megállapítható, hogy az ütközés melyik tengellyel párhuzamosan következett be. Az y és z tengelyek mentén végzett pozitív és negatív irányultságú ütközéseknél az értékeket nézve számottevő különbségek nem adódnak, így a motoráramok figyelésével nem kapunk egyértelmű információt az ütközés irányáról.

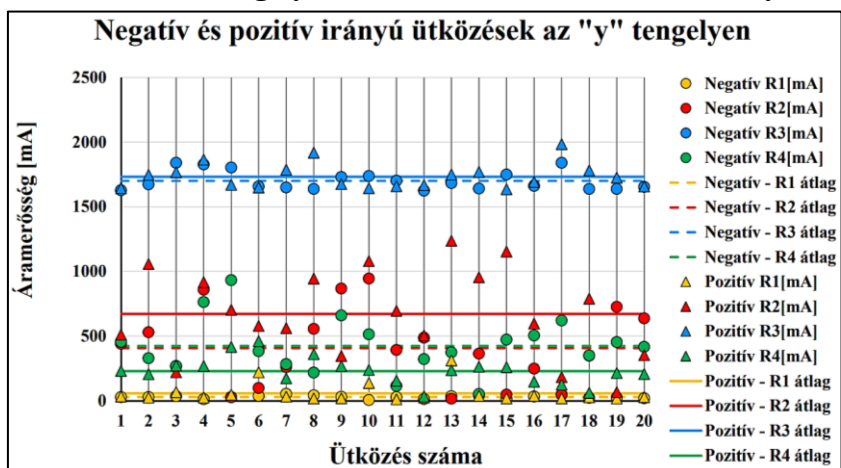


6. ábra: „y” tengely menti ütközések mérési eredményei



Forrás: a szerzők szerkesztése.

7. ábra: „z” tengely menti ütközések mérési eredményei

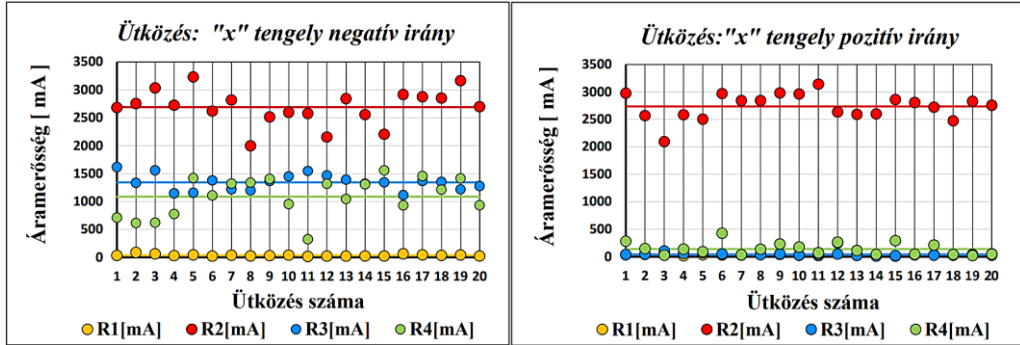


Forrás: a szerzők szerkesztése.

Az x tengely esetében az y és z tengellyel ellentétben jelentős különbségeket lehet felfedezni a két irányból származó eredményeken (8. ábra). A tengellyel párhuzamosan érkező behatásoknál jól láthatóan eltérő áramfelvételi képet kapunk eredményül, melyből következik, hogy a motoráramok értékére hagyatkozva egyértelműen eldönthető, hogy az ütközés az adott tengely mentén pozitív vagy negatív irányból érkezett.



## 8. ábra: Az „x” tengely menti ütközések mérési eredményei



Forrás: a szerzők szerkesztése.

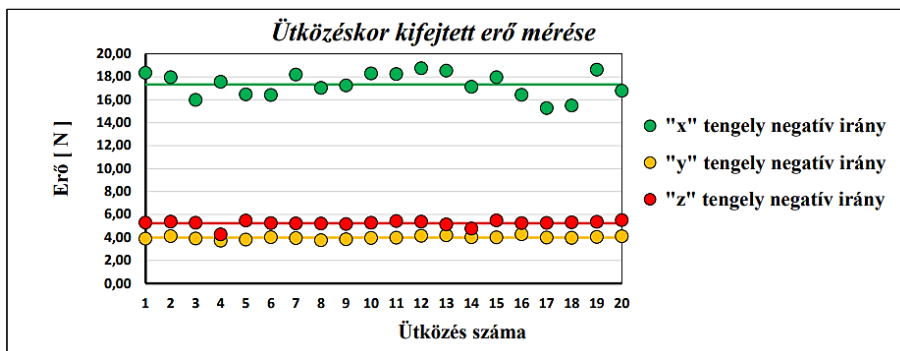
## 3.2 Az ütközéskor kifejtett erő

A robotkar ütközéskor kifejtett erő mértéke is meghatározásra került. Ennek megállapítása egy 2 kg-ig terhelhető erőmérőcella, egy ESP 32S típusú mikrovezérlő és egy erre a célra írt program segítségével történt. Adatok gyűjtése céljából 3 méréssorozat lett végrehajtva, melyek során a robotkar ismét egy előre definiált pályán végzett automata mozgást, miközben többször ütközött a mérőcellával.

Az ütközéskor fellépő erők nagyságának ábrázolása látható a 9. ábrán, melyről az átlagértékek alapján leolvasható, hogy a legnagyobb kifejtett erő az x tengely mentén létrejövő negatív irányultságú ütközésnél keletkezett. Ennek oka a második csuklónál alkalmazott magasabb áramfelvételi küszöbértékre vezethető vissza. A diagramról a következő átlagértékek olvashatóak le:

- „x” tengely negatív irány → 17,3 N
- „y” tengely negatív irány → 4 N
- „z” tengely negatív irány → 5,23 N

## 9. ábra: Ütközéskor kifejtett erő mérési eredményei



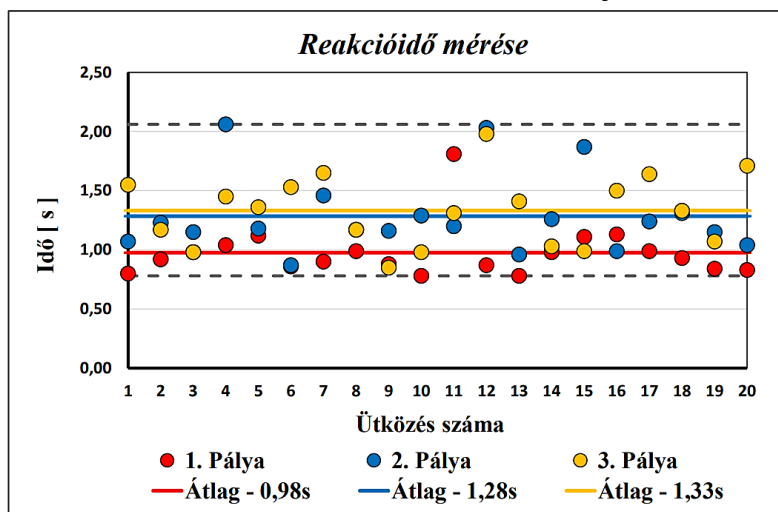
Forrás: a szerzők szerkesztése.

## 3.3 A vezérlés reakcióideje

A robotkar kollaboratív működéséből adódóan fontos tulajdonságként említhető az ütközések detektálásához és a robotkar reagálásához szükséges időintervallum. A

reakcióidő mérése szintén több mérésorozat segítségével lett elvégezve, amely során 3 különböző pályán történő mozgás alatt 20-20 ütközés lett előidézve. Az adatgyűjtés során az ütközés észlelésétől a vezérlés beavatkozásán keresztül a kezelőfelületen megjelenő figyelmeztetésig eltelt idő mérése történt. Ennek eredményeit ábrázolja a 10. ábra, amelyből leolvasható az egyes pályákon mért reakcióidők átlagértéke és értéktartománya, melynek minimum értéke 0,78 s, maximális értéke 2,06 s.

10. ábra: A robotkar reakcióideje



Forrás: a szerzők szerkesztése.

#### 4. Összefoglalás

Összességében elmondható, hogy sikerült egy olyan robotkart megalkotni, amely kollaboratív funkciókkal képes a váratlan ütközések hatására megfelelő módon reagálni, így eleget téve a vele szemben támasztott követelményeknek.

A mérések megmutatták, hogy az alkalmazott szerkezet reális időn belül képes a váratlan ütközésekre reagálni olyan módon, hogy az ütközést érzékeli, majd az ütközés irányával ellentétesen mozgatva a robotot a veszélyes helyzetet megszünteti. 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 anyag típusok 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

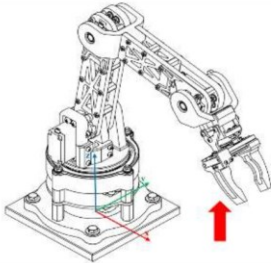
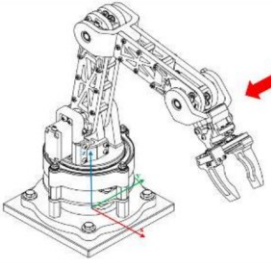
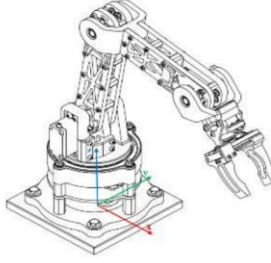
javulását eredményezheti, ezáltal tovább csökkentve az ütközések detektálásának reakcióidejét.

A csuklókat mozgató RC szervó motorok vezérelhetőségének könnyedsége hasznosnak mutatkozott a vezérlő szoftver megalkotásánál, a robotkar pozicionálásánál azonban jelentős pontatlanságot idézett elő a motorok holtjátékának összegződése. Érdeemes 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.

A vezérlést végző szoftver megalkotásánál nagy segítséget nyújtott a LabVIEW programkörnyezet és az Arduino mikrovezérlők összehangolhatósága, melynek köszönhetően egy grafikus, informális kezelőfelületet került kialakításra, amely a robotkar több irányítási és programozhatósági módozatát teszi lehetővé. Külön kiemelő, hogy a program számos biztonsági funkciót kapott, melyekkel az esetleges kezelési hibák kivédhetők. A program számítási igényének csökkentése érdekében javasolt a későbbiekben optimalizálni azt, mellyel mind a jelfeldolgozás, mind a motorok vezérlése gördülékenyebbé válhat.

Az ütközés irányultságának meghatározására irányuló mérések eredményeiből következtetésként levonható, hogy a motoráram figyelés alkalmas ütközések detektálására, valamint egyértelmű információt szolgáltat arról, hogy mely tengely mentén következett be váratlan behatás. Az irányultságról azonban nem kapunk teljes képet ezek vizsgálatával, így a pontos irányok meghatározására további fizikai jellemzők mérését teszi szükségessé.

### 11. ábra: Különböző pályákon mérhető átlagos ütközési erők és reakcióidők

Átlagosan kifejtett ütközési erő:	5,28 N	Átlagosan kifejtett ütközési erő:	3,98 N	Átlagosan kifejtett ütközési erő:	17,32 N
Átlagos reakcióidő:	0,97 s	Átlagos reakcióidő:	1,28 s	Átlagos reakcióidő:	1,33 s
					

Forrás: a szerzők szerkesztése.

## Irodalomjegyzék

- Aaltonen, I., Salmi, T., Marstio, I (2018): Refining levels of collaboration to support the design and evaluation of human-robot interaction in the manufacturing industry. *Procedia CIRP*, 72: 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.214>.

- Bi, Z. M., Luo, C., Miao, Z., Zhang, B., Zhang, W. J., Wang, L. (2021): Safety assurance mechanisms of collaborative robotic systems in manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67: 102022. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102022>
- Björn, M., Reisinger, T. (2016): Example application of ISO/TS 15066 to a collaborative assembly scenario. In: *Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics*, 1–5.
- Feng, Z., Hu, G., Sun, Y., Soon, J. (2020): An overview of collaborative robotic manipulation in multi-robot systems, *Annual Reviews in Control*, 49: 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.02.002>
- Franklin, C., Dominguez, E., Fryman, J., Lewandowski, M. (2020): Collaborative robotics: New era of human–robot cooperation in the workplace. *Journal of Safety Research*, 74: 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.06.013>
- Hentout, A., Aouache, M., Maoudj, A., Akli, A., (2019): Human–robot interaction in industrial collaborative robotics: a literature review of the decade 2008–2017. *Advanced Robotics*, 33: 15–16, 764–799, <https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1636714>
- ISO 10218-2:2011 (2011): Robotok és robotikai eszközök - Biztonsági követelmények ipari robotok számára - 2. rész: Robotrendszerek és integráció.
- ISO/TS 15066 (2016): Robotok és robot szerkezetek. Kollaboratív robotok.
- Kragic, D., Gustafson, J., Karaoguz, H., Jensfelt, P., Krug, R. (2018): Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities. *IJCAI*, 18–25. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2018/3>
- Long, P., Chevallereau, C., Chablat, D., Girin, A. (2018): An industrial security system for human–robot coexistence. *Industrial Robot*, 45 (2): 220–226. <https://doi.org/10.1108/IR-09-2017-0165>
- Marvel, J. A., Norcross, R. (2017): Implementing speed and separation monitoring in collaborative robot workcells. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 44: 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.08.001>
- Mihelj, M., Bajd, T., Ude, A., Lenarčič, J., Stanovnik, A., Munih, M., Šlajpah, S. (2019): Collaborative robots. *Robotics*, 173–187. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72911-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72911-4_12)
- Parodi F., Gerio P., (2017): An Example of Collaborative Robot for Automotive and General Industry Applications. *Procedia Manufacturing*, 11: 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.116>.
- Raiola, G., Cardenas, C. A., Tadele, T. S., De Vries, T., Stramigioli, S. (2018): Development of a safety-and energy-aware impedance controller for collaborative robots. *IEEE Robotics and automation letters*, 3 (2): 1237–1244. <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2795639>
- Tsuji, S., Kohama, T. (2019): Proximity skin sensor using time-of-flight sensor for human collaborative robot. *IEEE Sensors Journal*, 19 (14): 5859–5864. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2905848>
- Vicentini F. (2020): Collaborative Robotics: A Survey. *ASME. J. Mech. Des.*, 143 (4): 040802. <https://doi.org/10.1115/1.4046238>