



KUKA KR3 IPARI ROBOTEGYSÉG HMI-TERVEZÉSE ÉS VEZÉRLÉSE UNIVERZÁLIS IPARI PC-N SIPY FEJLESZTŐPLATFORM SEGÍTSÉGÉVEL

KUKA KR3 INDUSTRIAL ROBOT UNIT HMI DESIGN AND CONTROL WITH UNIVERSAL INDUSTRIAL PC IN SIPY DEVELOPMENT ENVIRONMENT

Diós Szabolcs Sándor,¹ Asztalos Gergő Tamás,² Husi Géza³

¹ Debreceni Egyetem Műszaki Kar Mechatronika Tanszék, Debrecen, Magyarország,
dios.szabolcs@eng.unideb.hu

² Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, Magyarország, gergoasztalos.28@gmail.com

³ Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Mechatronika Tanszék, Debrecen, Magyarország, husigeza@eng.unideb.com

Abstract

The challenges presented by Industry 4.0 require an innovative, new type of thinking from the engineers. Connecting old machines into a network presents significant problems, as the switch cabinets for these are obsolete and non-upgradeable. This has made developing a solution necessary, that is later universally applicable for scrapped, but mechanically intact robot arms. During the realization of the project such an IoT compatible graphical interface was developed, which can control a KUKA KR3 industrial robot unit and can also Real-Time simulate it in virtual reality. The security functions of the robot are provided by a Pycom SiPy developer panel.

Keywords: KUKA KR3, C++, JavaScript, Pycom SiPy, HMI.

Összefoglalás

A projektem megvalósításra került, és az abban foglaltak megtervezése is megtörtént. A KUKA KR3 ipari robotkar új HMI-je megtervezésre került, amihez a robotegység valós 3D-modellje is elkészítésre és integrálásra került a virtuális környezetben. A Dead man's switch-hez a Pycom által fejlesztett SiPy vezérlő került felhasználásra, míg a Linuxot, egy egykártyás számítógépet, a Strato Pi Base Board és Raspberry Pi-t alkalmaztuk. A 3D-s KUKA KR3 HMI segítségével pontosan nyomon követhetjük a pozíciók változását, és a koordinációja is lehetséges a valódi KUKA KR3-asnak. További fejlesztési lehetőségek között szerepel egy megfogó integrálása a virtuális környezetbe, és annak 3D-modelljének megtervezése is.

Kulcsszavak: KUKA KR3, C++, JavaScript, Pycom SiPy, HMI.

1. Bevezetés

A Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Mechatronikai Tanszék, Cyber-Physical & Intelligent Robot Systems Laboratóriumában az oktatás mellett kerülnek végrehajtásra az elvégzett kutatások éles tesztelése [1]. A projektek egyik fő iránya az ipari robotkarok és azok vezérlőrendszereinek a teljes újratervezése, valamint, az új hálózati funkciók támogatásának megvalósítása. A régi, leselejtez-

zett gépegységek mechanikailag nem avulnak el, viszont vezérléstechnikailag igen. A laborban a hallgatók gyakorlati oktatásban vesznek részt Robottechnikai ismeretekből, viszont új ismeretanyagok átadása is történik, hiszen az egyes kutatások befejezésével integrálásra kerülnek az oktatásba. A laborban megtalálható ipari robotok közül sok felújítás alatt áll, többek között a KUKA cég által gyártott KR3 ipari robotok [2]. A gépegy-

ségek mechanikailag ép állapotban találhatóak, működő motorszabályzó áramkörrel, viszont nem lehetséges gyári ipari számítógéppel történő vezérlésük, mivel az üzemképtelen, és részegységei nem javíthatóak.

A fentiek miatt egy saját HMI került megtervezésre és megírásra a KUKA KR3 részére, mely 3D-pozíció megjelenést tesz lehetővé, Real-Time-környezetben, valamint a biztonsági szabványok figyelembevételével került a Dead Man-Switch is átértelmezésre.

2. KUKA KR3 ipari robotkar

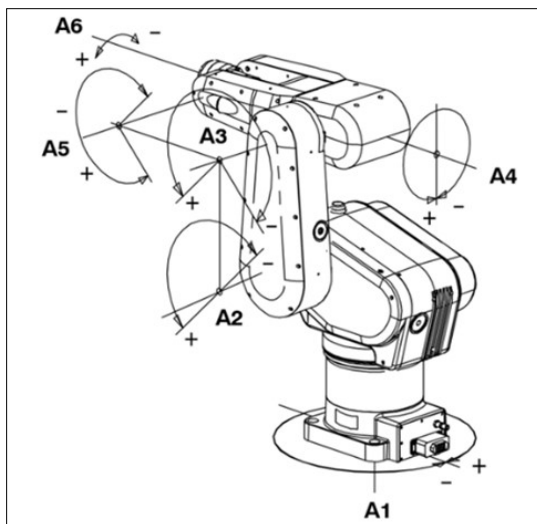
A KUKA cég által gyártott KR3-robot és annak variánsai hattengelyű ipari robotok, melyek kis súlyú, hasznos teher precíz mozgására vannak tervezve.

Szűk térben gyártandó kis alkatrészekhez alkalmazkodik, 3 kilogrammos, névleges hasznos terhet (payload) képes elmozdítani, a maximális kinyúlása 635 mm. Fő felhasználási területei: ívhegesztés, csiszolás, összeszerelés, laboratóriumi automatizálás, alkatrészek pakolása és beültetés [3].

A robotkar felépítése az 1. ábrán látható, ahol a tengelyek és azok elfordulásának szögtartományai, illetve irányai vannak feltüntetve.

A robotkar maga 6R-típusú robot, vagyis minden tengelyénél rotációs mozgást valósít meg, ez adja meg számunkra a gömb munkaterületet. Fontos megjegyezni, hogy a tényleges munkaterületet befolyásolja az adott gépegység axis-limitációja.

A KUKA KR3-robotkar és variánsai már nincsenek forgalmazásban, a hivatalos támogatás megszűnt.



1. ábra. A KUKA KR3-robotkar felépítése [3]

1. táblázat. KUKA KR3-axis-mozgástartományok [3]

A robot axisainak maximális szögsebességei:	Az axisok mozgástartománya °-ban:
Axis 1 (A1) 240°/s	Axis 1: $\pm 180^\circ$
Axis 2 (A2) 210°/s	Axis 2: $-45^\circ / +135^\circ$
Axis 3 (A3) 240°/s	Axis 3: $-225^\circ / +45^\circ$
Axis 4 (A4) 375°/s	Axis 4: $\pm 180^\circ$
Axis 5 (A5) 300°/s	Axis 5: $\pm 135^\circ$
Axis 6 (A6) 375°/s	Axis 6: végtelen

Az ipari számítógép egy olyan, ipari célokra tervezett számítógép, mely precíz szabványoknak kell, hogy megfeleljen, nagyobb megbízhatóságot, bővíthetőséget, hosszú távú támogatást nyújt, és általában drágább, mint a fogyasztói elektronikai cikkek.

Az Ipari PC-t elsősorban folyamatirányításra és/vagy adatgyűjtésre használják, vagy néhány esetben, ha elosztott feldolgozásról van szó, Front-Endként használják egy másik vezérlő számítógéphez.

A robotot irányító vezérlőrendszer az ipari számítógépből és a hozzácsatlakoztatott HMI-vezérlőfelületről áll.

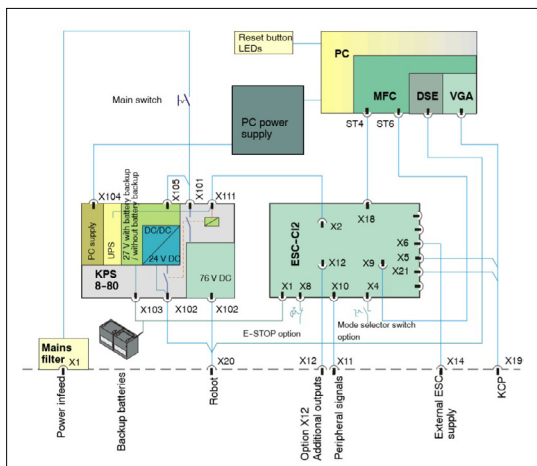
A fentiek az általános követelményeket sorolják fel, amelyeknek a tervezendő KUKA KR3 új vezérlőrendszerének is meg kell felelnie.

Ennek egyik fő oka, hogy a teljes vezérlés ugyan átértelmezésre kerül, viszont elvi szinten továbbra is ugyanazon funkciók használata válik lehetségessé. Többek között DeadMan Switch-, Joint-, World-, Tool-, Base-koordináta-rendszerek, sebességszabályozás és az axis-end-stopok használata.

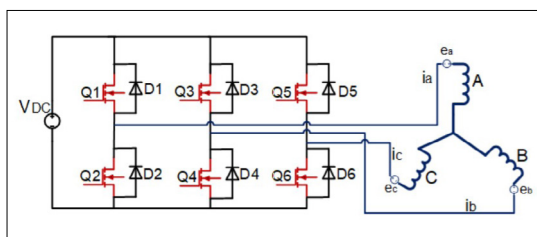
A jelenlegi KUKA KR3 állapota a projekt kezdetekor nem volt alkalmas a HMI-n keresztüli vezérlésre, annak hiánya miatt. Mindössze axisonként volt lehetséges a robotegység mozgása Step-Dir-paranccsal.

A fő problémát az jelentette, hogy a legtöbb iparban alkalmazott vezérlő vagy kapcsolószekrény cégspecifikus, vagyis nem lehet őket lecserélni és javítani sem. A tényleges életciklust a hivatalos gyártó supportja határozza meg.

A KUKA KR3-as által alkalmazott eredeti KR C3-as verziójú vezérlő (2. ábra) már nincs forgalomban, és üzemképtelen. Alapvető funkciók hiánya és szoftverfrissítés sem lenne lehetséges egy működő vezérlőszekrény esetén, ami limitációként szolgálna az elvégezhető feladatokra nézve. Az Embedded OS, amely elérhető rá a Windows 95, amely a Microsoft egy korábbi fejlesztése volt és a hivatalos



2. ábra. A KR C3-robotvezérlő felépítése



3. ábra. BLAC vezérlő áramkör kapcsolási rajza [4]

supportja 2001. december 31-én fejeződött be. Az akkor támogatott portok közül az USB 1.0 is csak utólagos OSR 2.1-frissítéssel került be, amelynek adatátviteli sebessége fizikai rétegben 1.5 Mbps volt. Valamint a szélessávú internet sem volt lehetséges [5].

Kijelenthetjük, hogy a fentiek tükrében az KR C3-as ipari vezérlő nem felel meg az Ipar 4.0 által támasztott követelményeknek és a hálózaton történő kommunikációnak sem.

Alapvetően a kapcsolószekrény alkalmas a KR3-szervomotorok vezérlésére, a gyári HMI futtatására, a sebesség állítására és a programkódok tárolására is. Maga az Ipari PC része, több tekintetben megegyezik egy általános felhasználású Desktop PC-vel, így megtalálhatóak benne olyan alapvető belső hardveres elemek, mint CPU, RAM, HDD, alaplap.

Az alkatrészek nem pótolhatók, mivel egyfajta hardveres kulcsként szolgálnak a gyári ipari HMI számára.

Az eredeti robotvezérlőben helyet kapott egy MFC-bővítőkártya, ez az I/O-kat kezeli, valamint a DeviceNet/CAN bus is, amely lehetővé teszi a kommunikációt a teach pendant (KCP2) és ipari PC között.

3. BLAC motor vezérlése

A KUKA KR3 ipari robotegységben szervomotorok találhatóak, melyek rotációs mozgást hajtanak végre a robot minden csuklópontjában. A motorok kefe nélküliek és váltóáramú motorok, vagyis a tekercselés az állórészen található, míg a forgórészen a mágnesek.

A szervomotor precíz működése érdekében szükség van egy HALL szenzorra is, hogy minden időpillanatban meghatározható legyen a motor pozíciója. A feszültség a tekercsekre a tranzisztorok vezérlésével kapcsolható a motorokra, így áll rendelkezésre a forgáshoz a mágneses tér [6].

Általánosan elmondható, hogy a BLAC-típusú motorok jobb hatásfokkal üzemelnek, mivel kefe nélküliek, és alacsonyabb a hőveszteség (3. ábra).

A tekercsek kivezetései az U, V, W, míg a HALL szenzoré VCC, GND, HU, HV, HW. Pozíciókra vonatkozó adatok szolgáltatását a motorok felől a Tamagawa TS5643 N 100 (11/24 bit) enkóderek teszik lehetővé [7].

A KUKA KR3-robotkar 24V egyenfeszültségen működő Inertia Dynamics M1701-2221 (FSB series)-fékeket használ, viszont nem mind a 6 axison (az A1, A2, A3, A4, A5 alkalmaz csak féket).

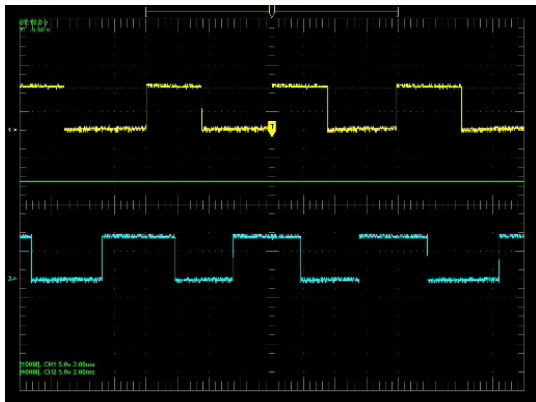
A fékek szerepe az ipari robotkarok esetében az, hogy a tápfeszültség megszűnését követően is biztosított legyen a pozíció és nyomatéktartás [8].

KR3-as robotkar esetében a korábbi motorvezérlők már lecserélésre kerültek Leadshine ACS606 [9] ipari szervomotor-szabályzókra (4. ábra). Ezeket a típusú szabályzókat többtengelyes ipari marókhoz szokták alkalmazni gyártási célokból, elsősorban kefe nélküli (BLAC) motorokhoz.

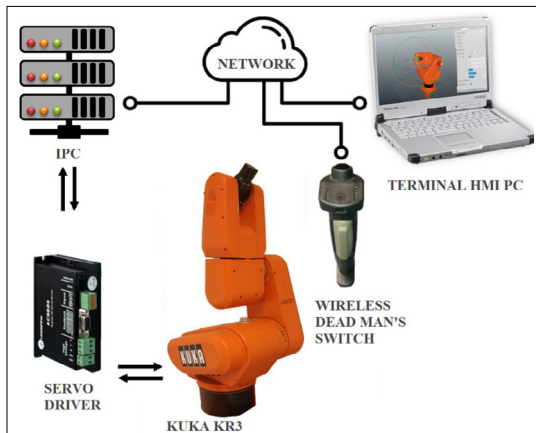
A szabályzó által biztosított egyenfeszültség a motorok számára +18V-tól +60V-ig terjed. Az U-, V-, W-kivezetéseken keresztül pedig lehetséges teszik a motorok tápellátását. Az axisokat vezérlő motorok pozícióinak feldolgozása egy 15 pin-es egyedi csatlakozón keresztül történik.



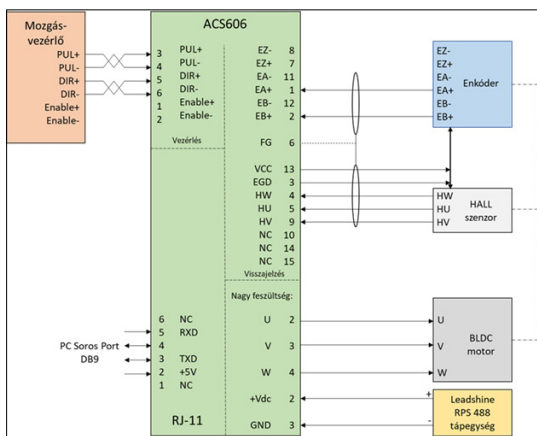
4. ábra. A LeadShine ACS606-szervovezérlő [9]



5. ábra. Enkóder EA+- és EB+-jelek



7. ábra. A rendszerblokk diagramja



6. ábra. ACS606-szervovezérlő és az érzékelők [9]

A négyoszögjelek, az enkóder által szolgáltatott EA+ és EB+, míg a HALL szenzor HU és HV és HW (5. ábra).

Az enkóderek az új HMI megtervezése előtt ellenőrzésre kerültek oszcilloszkóppal. Egy axis teljes fordulata 8192 impulzust jelent. Az 5. ábrán látható oszcilloszkóp X tengelyén, t idő van ábrázolva (2ms), míg az Y tengelyen feszültség. A motorok beállított fordulatszáma 0,915 fordulat/perc volt.

A vezetékezéshez felhasznált kábeltípus sodort érpár volt, amely gégecsőben került elvezetésre.

4. HMI tervezése és a követelményeknek való megfelelés

Ahogy az korábban leírásra került, a legtöbb eleme a KUKA KR3-nak nem cserélhető, mivel egyfajta hardware kulcsok is, a rendszerre nézve, illetve a laborban lévő KR C3-vezérlőszekrény

működésképtelen állapotban található. Viszont a HMI (Human Machine Interface) tervezésénél voltak bizonyos támpontok, amelyek, hogyha teljesülnek a saját HMI-nk kapcsán, akkor reprodukálásra kerül az eredeti HMI, elvi szinten. Ahhoz, hogy az új HMI megfeleljen az Ipar 4.0 követelményeinek, a 7. ábrán látható rendszer lett kialakítva [7].

A robotkar minden axisához egyenként a 6. ábra [9] szerint van csatlakoztatva egy motorvezérlő, amelyek egy számítógéphez csatlakoznak. Ez a számítógép egy ipari PC is lehet, ahogy esetünkben is történt. Ezen a számítógépen Linux operációs rendszer fut, mely úgy lett módosítva, hogy egy saját alkalmazást legyen képes futtatni valós időben.

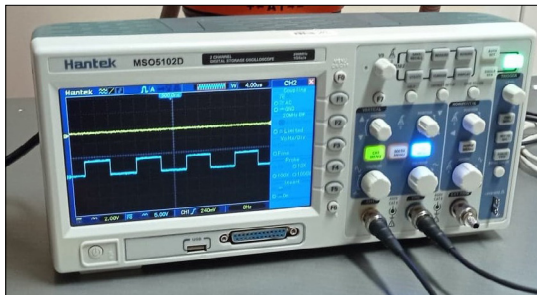
Továbbá egy webszerver található rajta, ahol a virtuális KUKA 3D-modellje, illetve a HMI felületért felelős weboldal van tárolva, ezáltal flexibilitás megoldást szolgáltat a felhasználó részére. Szemben a csak egy adott hardware kulccsal rendelkező Ipari PC-vel, így hálózaton belül szinte bármilyen számítógépen futtathatjuk a saját HMI-nket, ha rendelkezik egy JavaScript engedélyezett böngészővel.

Ha a webszerverhez szeretne kapcsolódni egy kliens, először ellenőrzi, hogy a valós idejű alkalmazás fut-e, ezek után a 3D-modell fájljait, illetve a HMI futtatásához szükséges JavaScript-kódot átadja a kliensnek.

Tehát a Human Machine Interface teljes egészében a kliensen fut, a parancsokat hálózaton küldi át a valós idejű alkalmazásnak, amely azt végrehajtja.



8. ábra. Strato Pi Base Board & Raspberry Pi [11]



9. ábra. Motorvezérlő jelalakok vizsgálata

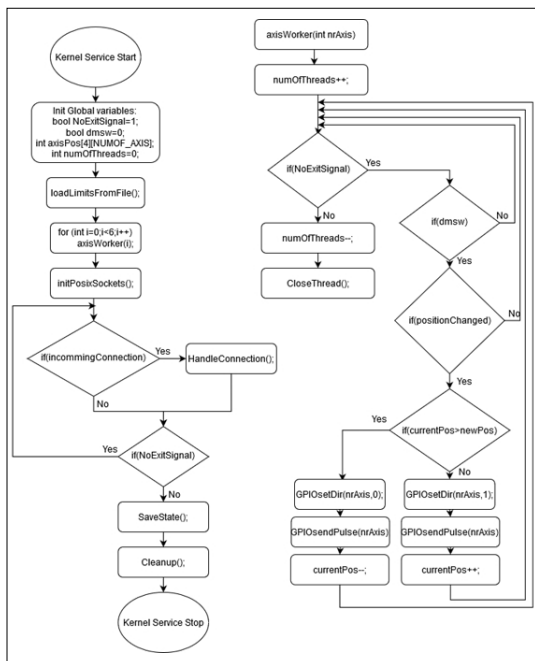
5. Ipari Compute Engine

A projekt megvalósítása céljából egykártyás számítógép került kiválasztásra, amely beágyazott rendszerként van jelen a használata során. A Strato Pi Base Board [10] egy Raspberry Pi-vel [11] került alkalmazásra (8. ábra), ami lehetségessé teszi számunkra a RS-232- és az RS-485-kommunikációt is.

A plusz bővítőkártya segítségével ipari feladatok ellátására teszi alkalmassá a Raspberry Pit. A webserver és a Linux operációs rendszer maga a Raspberry Pi-on fut, a Strato Pi Base Board [7] pedig a jelet küldi ki a motorvezérlőnek. A régi ipari PC kiváltása előtt szükségesnek bizonyult a motorszabályzó elektronikának küldött jelalakok vizsgálata.

A motorvezérlő STEP/DIR-típusú jelet kap, tehát minden axishoz tartozik két jelvezeték. A DIR-inputra kötött vezetéken a motor lépegetési irányának függvényében 0V vagy 5V feszültség jelenik meg (9. ábra).

A STEP-inputra egy 16us periódusidejű 5V csúcsfeszültségű impulzus van kapcsolva ahhoz, hogy lépjen egy egységet a DIR-jel által megadott irányba. A lépési egység függ az adott tengely mozgástartományától és a pozícióenkóder felbontásától, illetve a motor áttételeitől.



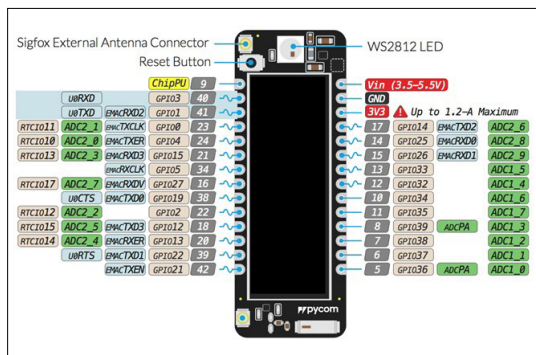
10. ábra. Folyamatdiagram

6. Valós idejű applikáció

Az alkalmazott operációs rendszer Linux kernelének verziószáma 5.4.51-v8+, illetve Preemptive-típusú kernel, mely kulcsfontosságú az applikáció valós idejű futtatásához.

A „core” program egy rendszerszintű service-ként indul el, a hálózati interfészek inicializálása után. A program azon az elven alapul, hogy a tengelyek konkrét pozícióját digitális kódként adja meg számunkra, vagyis az alkalmazott digitális enkóder miatt tudjuk, hogy pontosan hány lépés megengedett.

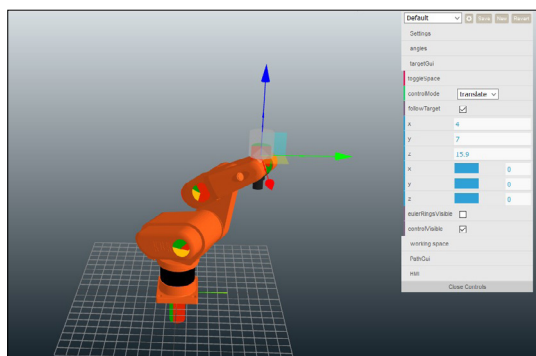
A „core” program indítását követően az elementett maximális pozíciószámokat olvassa be, majd az inicializálási folyamat történik meg, és létrehozza a megfelelő POSIX socket-erőforrásokat a hálózati kommunikációkhoz. A háttérben létrehozásra kerül 6 darab szál (thread), melyek mindegyik a KUKA KR3 ipari robot tengelyeinek felel meg egyenként. Abban az esetben, ha bejövő kapcsolat történik, létrehozásra kerül egy új szál (thread), amely azt végrehajtja. A tengelyeknek megfelelő threadek ellenőrzik, hogy a bejövő információ változás történt-e a tárolt állapothoz képest. Valamint a DeadMan Switch állapota ellenőrzésre kerül, ami ugyanúgy hálózaton keresztül történik (10. ábra).



11. ábra. Pycom SiPy Pinout [13]



12. ábra. Pycom SiPy Deadman Switch



13. ábra. KUKA KR3 3D HMI

7. A Dead Man's Switch kialakítása

A tervezés alatt felmerült az a probléma, hogyha a HMI elérhető bárhol a hálózathoz, akkor a robotoperátor nem biztos, hogy mindig a vészstop gomb közelében van, ami balesetveszélyes. Murphy törvényéből kiindulva, ami így hangzik: „Ami elromolhat, az el is romlik” [12], célszerű volt egy egyszerű, hálózat alatt bárhol elérhető vészstop gombra.

A megoldást a Pycorn cég által gyártott SiPy [13] fejlesztői modul adja, ez egy Micropythonnal programozható mikrokontroller, mely az Espressif ESP32 chipre épül (11. ábra).

Két processzor található benne: a hálózati processzor, mely a Wifi rádiókapcsolatot kezeli, illetve egy főprocesszor, mely a felhasználó által felprogramozott programot futtatja. A Pycom SiPy tulajdonságai közt megtalálható még az ultraalacsony energiafogyasztás, 1 km hatótávolságú Wifi-rádió megvalósítása Pycom-eszközök között, illetve SigFox-kommunikáció létesíthető vele, egyéb IoT-eszközök között.

A kábel nélküli Dead Man's Switch csak a tápfeszültséget kapcsolja, illetve megszakítja a SiPy-panteltől (12. ábra). A mikrokontrolleren futó program mindenképp megpróbál kapcsolódni hálózaton a valós idejű applikációhoz, mely detektálja a kapcsolat állapotát és az eszköz MAC-címét.

8. 3D KUKA KR3 HMI

A HMI egyik alapfeltétele az volt, hogy 3D-s legyen a megjelenítése az adott robotegységnek. Ennek több oka is volt, az egyik, hogy könnyebben nyomon követhetővé válnak az egyéni axisok pozícióinak a változásai, illetve könnyebb mozgáskoordinációt tesz lehetővé a felhasználó számára.

KUKA KR3 ipari robot kar 3D-modellje 3D CAD (Computer Aided Design) programban került megtervezésre. Az egyik megoldást erre a SketchUp [14] szolgáltatja, amely alacsony poligonszámmal teszi lehetővé számunkra 3D-térbeli alakok modellezését, így nemcsak a 3D-modellek szeletelése válik könnyebbé a 3D-nyomtatások során, de a különböző szimulációs modellek tervezése is lehetséges.

A HMI felület a JavaScript-alapú ThreeJS 3D grafikai motor segítségével lett létrehozva. A HMI funkciói, mint például koordinátszámítás, robotpozicionálás ugyancsak JavaScriptben lettek megírva, tehát a HMI teljes egészében a kliens számítógépen fut (13. ábra).



14. ábra. 3D vs Real KUKA KR3 HMI

A HMI-n keresztül küldött jel a valódi KR3-s ipari robot kar felé lehetséges, így az leköveti a HMI-ben felvett pozíciót. Pozíciók felvételét a robotegység beállítható sebességen veheti fel (14. ábra).

Kliens PC-ként felhasznált laptop paraméterei a teszt során, egy ipari Panasonic Toughbook CF-C2, amely 8 GB DDR3 RAM, Intel Core i5 4300U-val volt felszerelve.

A Cyber-Physical & Intelligent Robot Systems Laboratory lehetőséget szolgáltatott korábban már más típusú kutatási feladatok ellátásához is, legyen szó képelemzésről, adott elemek detektációjára a munkaállomásokon [15], virtuális környezet megalkotására [16] vagy szingularitással kapcsolatos mérések elvégzésére [17]. Az imént említettek mellett, a fenti HMI-tervezés és vezérlési feladat ezen labort öregbíti.

9. Következtetések

A projektem megvalósításra került, és az abban foglaltak megtervezése is megtörtént. A KUKA KR3 ipari robotkar új HMI-je megtervezése megtörtént, amelyhez a robotegység valós 3D-modellje is elkészült és integrálásra került a virtuális környezetben. A Dead man's switch-hez a Pycom által fejlesztett SiPy vezérlő került felhasználásra, míg a Linuxot, egy egykártyás számítógépet a Strato Pi Base Board és Raspberry Pi alkalmaztuk. A 3D-s KUKA KR3 HMI segítségével pontosan nyomon követhetjük a pozíciók változását, és koordinációja is lehetséges a valódi KUKA KR3-asnak. További fejlesztési lehetőségek között szerepel egy megfogó integrálása a virtuális környezetbe, és annak 3D-modelljének megtervezése is.

Köszönetnyilvánítás

A TKP2020-NKA-04. számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2020-4.1.1-TKP2020 pályázati program finanszírozásában valósult meg. Külön köszönet a Debreceni Egyetem Műszaki Karának, a Cyber-Physical & Intelligent Robot Systems Laboratorynak és Décei Rolandnak.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Erdei T. I., Molnár Zs., Obinna N. C., Husi G.: *Cyber Physical Systems in Mechatronic Research Centre*. MATEC Web on Conferences, 126. (2017) 1006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712601006>
- [2] Erdei T. I., Molnár Zs., Husi G.: *Robot Visual and Virtual Control Technology in Industrial Environment*. WoS (Web of Science) (SIMS), Narvik, NORWAY- IEEE, Jun 21-24, 2016. <https://doi.org/10.1109/SIMS.2016.7802902>
- [3] KUKA KR3 | Eurobots, [Online]. Available: <https://www.eurobots.net/kuka-robots-kr-3-p248-en.html> [Accessed on: 10.08.2021].
- [4] Flah A., Lassaad S.: *Overview on BLAC and BLDC Motors: designs and Mathematical Modeling*. International Journal of Powertrains, 10/2. (2021) 204–215. <https://doi.org/10.1504/IJPT.2021.117470>
- [5] Win95 - INDIANA University [Online]. Available: <https://kb.iu.edu/d/aezf> [Accessed on: 12.10.2021].
- [6] K. R. GmbH, „KR C3 User Manual,” 11 november 2003. [Online]. [Accessed on: 06.06.2021].
- [7] L. Tamagawa Seiki Co., „Rotary Encoders,” 20.09.2021. [Online]. Available: https://www.tamagawa-seiki.com/assets/img/downloads/pdf/rotaryencoder/1228N58EJ_shusei3.pdf.
- [8] FSB Series, Spring Applied Brakes | Inertia Dynamics, Altra Industrial Motion Corp., 2019. [Online]. Available: <https://www.idicb.com/products/spring-applied-brakes/type-fsb>. [Accessed on: 01.10.2021].
- [9] User's Manual For ACS606 Digital AC Servo Drive, 2009. [Online]. Available: <http://www.leadshine.com.ua/pdf/acs606.pdf>. [Accessed on: 03.10.2020].
- [10] Sfera Labs S.r.l. Strato Pi Base User Guide Revision 024 [Online]. Available: <https://www.sferalabs.cc/files/strato/doc/stratopi-base-user-guide.pdf> [Accessed on: 11.01.2021].
- [11] Raspberry Pi Ltd. Raspberry Pi 3 Model B Plus [Online]. Available: <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-B-plus-Product-Brief.pdf> [Accessed date: 11.01.2021].
- [12] Spark N. T.: *A History of Murphy's Law*. Periscope Film (21 May 2006). ISBN 0-9786388-9-1
- [13] Pycom Ltd. „SiPy Datasheet” [Online]. Available: https://docs.pycom.io/gitbook/assets/specsheets/Pycom_002_Specsheets_SiPy_v2.pdf [Accessed on: 15.10.2021].

- [14] 3D CAD - SkechUp” [Online]. Available: <https://www.sketchup.com/> [Accessed on: 18.10.2021].
- [15] Kapusi T. P., Erdei T. I., Husi G., Hajdu A.: *Application of Deep Learning in the Deployment of an Industrial SCARA Machine for Real-Time Object Detection*. Robotics, 11/4. (2022) 69. <https://doi.org/10.3390/robotics11040069> .
- [16] Erdei T. I., Krakó R., Husi G.: *Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm*. Applied Sciences, 12/17. (2022) 8862. <https://doi.org/10.3390/app12178862>
- [17] Erdei T. I., Husi G.: *Singularity Measurement in the Cyber-Physical and Intelligent Robot Systems Laboratory*. International Review of Applied Sciences and Engineering, 11/2. (2020) 82–87. <https://doi.org/10.1556/1848.2020.20001>