

VARGA ROLAND
SZAKDOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MECHATRONIKA, OPTIKA ÉS GÉPÉSZETI INFORMATIKA TANSZÉK



SZAKDOLGOZATOK



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

MECHATRONIKA, OPTIKA ÉS GÉPÉSZETI INFORMATIKA TANSZÉK

VARGA ROLAND

SZAKDOLGOZAT

**Ember és robot kooperációjának demonstrálása
Sakközö iixa robotkar segítségével**

Demonstrating human-robot collaboration

With chess-playing iiwa robotic arm

Konzulens:

Magyar László
tesztmérnök

Témavezető:

Dr. Czmerk András
egyetemi adjunktus

Budapest, 2018

Copyright ©Varga Roland, 2018.



SZAKDOLGOZAT FELADATKIÍRÁS (BSc)

AZONOSÍTÁS	Név: Varga Roland			Azonosító: 79133741039
	Képzéskód:	2N-AM0	Specializáció kódja:	Feladatkiírás azonosító:
	Szak:	Mechatronikai mérnöki alapképzési szak	2N-AM0-MB-2010	SZD-GEMI-2018/19/1-XZYX5L
	Szakdolgozatot kiadó tanszék:	Zárvizsgát szervező tanszék: Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika		
	Témavezető:	Dr. Czmerk András adjunktus, 71543276716, czmerk@mogi.bme.hu, 463-3795		

FELADAT	Cím	Ember és robot kooperációjának demonstrálása sakkozó iifa robotkar működtetésével Demonstrating human and robot collaboration by operating a chess-playing iiwa robotic arm
	Részletes feladatok	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kooperatív robotok alkalmazásának ismertetése, összehasonlítása hagyományos robotkarokkal. 2. Az alkalmazáshoz szükséges műszaki feltételek elemzése (képfeldolgozásra és robotmozgatásra alkalmas sakk bábuk tervezése; kamera elhelyezés; robotvezérlő illesztés). 3. Robotkar kalibráció, referencia felvétel kidolgozása. 4. Robotkar mozgásának definiálása és programozása. 5. Sakkalgoritmus beágyazása. 6. Eredmények értékelése.
Hely	A szakdolgozat készítés helye: KUKA Hungária Kft. 2335 Taksony, Fő út 140. Konzulens: Magyar László, Tesztmérnök, laszlo.magyari@kuka-robotics.hu, +36305554439	

ZÁRVIZSGA	1. zárvizsga tárgy(csoport)	2. zárvizsga tárgy(csoport)	3. zárvizsga tárgy(csoport)
	Mechatronika BMEGEFOAMM1 (3 kr) BMEGEFOAMM2 (3 kr)	Analóg és digitális technika BMEVIAUA009 (3 kr) BMEVIAUA010 (3 kr)	Automatika BMEGEFOAMA2 (5 kr) BMEGEMIAMI2 (3 kr)

HITELESÍTÉS	Feladat kiadása: 2018. szeptember 3.	Beadási határidő: 2018. december 7.
	Összeállította: <i>Cs. S.</i> témavezető	Ellenőrizte: <i>[Signature]</i> BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék tanszékvezető/tanszékvezető-h.
	Alulírott, a feladatkiírás átvételével egyúttal kijelentem, hogy a Szakdolgozat készítés c. tantárgy előkötélményeit maradéktalanul teljesítettem. Ellenkező esetben tudomásul veszem, hogy a jelen feladatkiírás és a tárgy felvétele érvényét veszti.	
	Budapest, 2018. szeptember 3.	<i>Varga Roland</i> hallgató

NYILATKOZATOK

Beadhatósági nyilatkozat

A jelen szakdolgozat az üzem által elvárt szakmai színvonalnak mind tartalmilag, mind formailag megfelel, beadható.

Kelt,

Az üzem részéről:

üzemi konzulens

Elfogadási nyilatkozat

Ezen szakdolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmeérnöki Kara által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a feladatkiírásban előírtaknak maradéktalanul eleget tesz. E szakdolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja:

témavezető

Nyilatkozat önálló munkáról

Alulírott, Varga Roland (XZYX5L), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal igazolom, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2018

sziigorló hallgató

TARTALOMJEGYZÉK

1. Előszó	1
2. Köszönetnyilvánítás	3
3. Bevezetés	4
3.1. Célkitűzés	4
3.2. Áttekintés	4
4. Irodalomkutatás	5
4.1. Ipar 4.0 eredete	5
4.2. Előnyei	5
4.3. Kialakítási alapelvek	6
4.3.1. Összekapcsolás	6
4.3.2. Információs átláthatóság	7
4.3.3. Decentralizált döntéshozatal	8
4.3.4. Technikai asszisztens	9
4.4. Ember-robot kollaboráció	10
4.4.1. Fogalmak tisztázása	10
4.4.2. Biztonsági szempontok ember-robot kollaboráció esetén . . .	11
4.4.3. Érzelmi megfontolások	14
4.5. KUKA-specifikus biztonsági funkciók	14
4.5.1. Használt szakkifejezések	15
4.5.2. Biztonságszempontú funkciók	18
5. Projekt részletes leírása	20
6. Kameraválasztás, képkészítés programozása	23
6.1. Kameraválasztási szempontok, választott kamera	23
6.2. Képkészítés OpenCV-vel	24
7. Sakkbábuk kialakítása, felismerésük a képeken	26
7.1. A sakkbábuk formatervezése	26
7.2. Bábuk pozíciójának azonosítása	28
7.3. QR-kód alapú képfeldolgozás - továbbfejlesztési irány	31
7.3.1. A forráskód build-je	31
7.3.2. ZXing könyvtár beimportálása és használata	32
7.3.3. QR kód generálás és olvasás	33

8. Sakkalgoritmus beágyazása	35
8.1. A chess.algorithm csomag - az algoritmusok működtetője	36
8.2. A chess.core csomag - a játék magja	37
8.3. A chess.properties csomag - kiegészítő funkciók	40
8.4. A sakkprogram kiegészítése a projekthez	40
9. Robotkar kalibráció, referencia felvétel kidolgozása	42
9.1. Koordinátarendszerek	42
9.2. Szerszámkalibráció - XYZ 4-pont metódus	44
9.3. Báziskalibráció - 3 pont metódus	45
9.4. A szerszám tömegeloszlásának meghatározása	46
10. Robotkar mozgásának definiálása és programozása	48
10.1. Biztonsági beállítások	48
10.1.1. Vészleállító eszköz	48
10.1.2. Engedélyező eszköz	48
10.1.3. Operációs mód rögzítése	49
10.1.4. Megállást előidéző események	50
10.2. Mozgástípusok elméletben	50
10.2.1. Mozgástípusok áttekintése	50
10.2.2. PTP mozgástípus	51
10.2.3. LIN mozgástípus	51
10.3. A robotkar mozgatása	52
11. A megfogó vezérlése	54
11.1. A vezérlés hardveres kialakítása	54
11.2. A megfogó szoftveres konfigurációja	55
12. Eredmények, továbbfejlesztési irányok	58
12.1. Képkészítés értékelése	58
12.2. Képfeldolgozás megbízhatósága	59
12.3. A sakkprogram értékelése	59
12.4. A robotvezérlés értékelése	60
12.4.1. A megfogó irányítása	60
12.4.2. A robotkar vezérlése	60
13. Összefoglalás	62
Abstract	64

Hivatkozások	66
14. Függelékek	68

1. ELŐSZÓ

Napjainkban egyre növekszik az igény arra, hogy a robotok az emberekkel kapcsolatba léphessenek, ne legyenek kerítésekkel elválasztva. Ilyen módon sokkal inkább ki tudják segíteni az embert, egyfajta technikai asszisztens szerepet láthatnak el. Olyan munkákat képesek elvégezni, amely az ember számára fárasztó, monoton vagy veszélyes lehet.

A különféle robotokkal már nem csak ipari környezetben, hanem akár a gyógyászat területén is találkozhatunk. Ilyen robotok képesek például rehabilitációs tornákkal segíteni a betegeknek. Az ilyen mértékű együttműködésre tervezett robotok kialakításánál fontos szempont, hogy az ember biztonságban érezze magát mellettük. Ha egy robot tud vigyázni a körülötte lévőkre, mozgása gördülékeny, kiszámítható és jól alkalmazkodó, akkor sokkal könnyebb a bizalmat megadni neki.

A szakdolgozat célja az ember és a robot finom együttműködését bemutató robotalkalmazás kidolgozása. Ez egy társasjáték formájában valósul meg: lehetőség nyílik egy ipari robot ellen egy sakkjátszma lejátszására.

2. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szakdolgozat elkészítése során sokak segítségére számíthattam. Köszönöm a KUKA Hungária Kft.-nek, hogy eszközöket és színvonalas környezetet biztosított a projekt megvalósításához. Szeretném megköszönni a támogatást Magyar Lászlónak, konzulensemnek és munkatársamnak, akitől a legtöbb szakmai segítséget kaptam. Köszönet illeti a többi munkatársam is, akiket a szakdolgozat valamely eleme kapcsán felkerestem, mindegyikük rendkívül segítőkész volt.

Az általam tervezett sakkbábuk 3D kinyomtatásáért köszönettel tartozom a BME Polimertechnika Tanszéknek, ezen belül is Horváth Istvánnak és Dr. Kovács Norbertnek.

Köszönöm Dr. Czmerk Andrásnak, témavezetőmnek, hogy a szakdolgozat elkezítéséhez iránymutatást adott.

Ezentúl szeretném megköszönni a családomnak a belém vetett bizalmat, a törődést és a támogatást. Mindig számíthattam a segítségükre.

Köszönettel tartozom Pál Imrének, aki kiskoromban sakközni tanított.

Végül de nem utolsó sorban szeretném megköszönni barátaimnak, hogy biztattak, és hogy segítettek a szakdolgozat és az egyetemi teendők mellett is jól érezni magam. Külön köszönettel tartozom a Martos Klubnak és a Drönök csapatának, hogy teret és lehetőséget biztosítottak a kikapcsolódáshoz.

Budapest, 2018.12.05.

Varga Roland

3. BEVEZETÉS

3.1. Célkitűzés

A szakdolgozat célja megismertetni az olvasóval az Ipar 4.0 (az ipari fejlődés egyik legújabb és legmeghatározóbb trendje) fontos elemét, az ember-robot kollaborációt. A fókuszon egy gyakorlati megvalósítás, egy demo áll, viszont általános irányelvök és módszerek is taglalásra kerülnek. A szakdolgozat feltételezi, hogy az olvasó rendelkezik alapszintű ismeretekkel az Ipar 4.0 főbb elemeit illetően. A dolgozat fő szerepe az Ipar 4.0 egy kisebb részletének praktikus, szemléletes bemutatása, de mégis érdemes rendszerszemléletűen hozzájondolni a többi elemét is, mivel így kaphatunk csak teljes képet ennek funkciójáról.

3.2. Áttekintés

Első körben a 4. ipari forradalom főbb vonásai kerülnek bemutatásra, különös tekintettel az ember-robot együttműködésre (későbbiekben HRC - Human-Robot Collaboration). Ezen belül az ember és robot együttműködésének különböző szintjei is taglalásra kerülnek azért, hogy szemléletesekkel legyenek az előnyök. Ezt követően a szakdolgozat magját jelentő demóhoz használt KUKA LBR iiwa 7 R800 robotkarhoz tartozó biztonságtechnikai fogalmakat és specifikációkat ismertetem, mivel ennek keretében beszélhetünk a HRC-vel kapcsolatos funkciókról.

A projekt több, különböző típusú részfeladatból áll. A szakirodalomkutatás utáni fejezetek ezen részfeladatok kidolgozását tartalmazzák.

A projekt eredményeit a 12. és a 13. fejezetek tartalmazzák.

4. IRODALOMKUTATÁS

4.1. Ipar 4.0 eredete

Az Ipar 4.0 koncepcióját Németországban dolgozták ki, mely ország világszinten kiemelkedő termelési iparágával és a gyártóeszközök területén. Az Ipar 4.0 a német kormány stratégiai kezdeményezése volt, mely nagy mértékben támogatta az ipari szektor fejlesztését. Ilyen értelemben az Ipar 4.0-ra tekinthetünk egy olyan mozgalomként, amelynek célja megőrizni Németország befolyását a gépiparban és az autógyártás területén.[1]

Az alap koncepciót először a Hannover Messe-n¹ prezentálták 2011-ben. A bemutató óta az Ipar 4.0 Németország vezető téma a kutatások területén, egyetemi és ipari környezetekben, különféle eseményeken. A fő irányvonal az új technológiákban és koncepciókban rejlő potenciál kihasználása felé mutat, ilyen területek:

- az IoT (Internet of Things²) elérhetősége és kihasználása,
- a technológiai és gazdasági folyamatok integrációja cégen belül,
- a valóság virtuális leképezése,
- ‘okos’ gyárak beleértve az ‘okos’ gyártást és termékeket.

4.2. Előnyei

Amellett hogy a digitalizáció és az új technológiák természetes következménye, az Ipar 4.0 megjelenése szintén kapcsolatban áll azzal a tényel, hogy a gyártásban a profit növelésére irányuló kezdeményezések, lehetőségek nagy része kiaknázásra került, új megoldásokat kellett keresni. A gyártási költségek csökkentek a Just-In-Time (röviden JIT) termelés bevezetésével, a lean elveinek alkalmazásával és a gyárak olyan helyre telepítésével, ahol a munkaerő lényegesen olcsóbb. Ha az előállítási költségek minimalizálása a célunk, az Ipar 4.0 egy ígéretes megoldásnak tűnik. Számos forrás alapján az Ipar 4.0 alkalmazása csökkentheti[2]:

- a gyártás költségét 10-30%-kal,
- a logisztikával kapcsolatos kiadásokat 10-30%-kal,

¹A hannoveri a világ egyik legnagyobb kereskedelmi bemutatója. Körülbelül 6500 kiállító és 250.000 látogató vesz részt ezen a rendezvényen.

²A Dolgok interne fizikai eszközökből, járművekből, otthoni felszerelésekkel és további elektronikát, szoftvert, szenzorokat, aktuátorokat tartalmazó tételekből álló hálózat, amelyek képesek egymással kapcsolatba lépni, adatot fogadni és küldeni.

- a minőségmenedzsmenthez köthető költségeket 10-20%-kal.

Ezekenkívül a koncepció alkalmazásának számos egyéb előnyéről szólhatunk: (1) új termékek piacra kerülési ideje csökken, (2) érzékenyebb reagálás a megváltozott vásárlói igényekre, (3) lehetővé teszi a személyreszabott tömeggyártást az összgyártási költség jelentős növelése nélkül, (4) rugalmasabb és barátságosabb munkakörnyezetet teremt, (5) a természletes erőforrásokat hatékonyabban hasznosítja.

4.3. Kialakítási alapelvek

A rendelkezésre álló, áttanulmányozott irodalom négy fő dizájn elvet emelt ki, hogy irányvonalat mutasson a szakértőknek és tudósoknak az Ipar 4.0 környezet kialakításához: összekötés, információs átláthatóság, decentralizált döntéshozatal és technikai asszisztens szerep (4.1. ábra). Ezek az alapelvek a következő alfejezetekben kerülnek részletes tárgyalásra az egyetemi és ipari publikációkban használt kifejezések (és következésképpen a kialakítási alapelvek) rövid elemzése után.

Összességeiben a két különböző típus szövegelemzése nem mutat lényeges eltérést, mindenkorral külön-külön történő elemzése ugyanazokat a kialakítási alapelveket eredményezi. Azonban szembetűnő, hogy egyes dizájnelemeket gyakrabban tárgyalnak az ipari publikációkban. Az ember-robot kollaboráció, az adat- és információbiztonság, illetve a decentralizált döntéshozatal gyakrabban fordul elő ipari kiadványokban. Az első kettővel kapcsolatos értekezések magas száma rávíláigít az Ipar 4.0 eredményes implemetálásának legnagyobb kihívásaira, amivel az iparban dolgozók szembesülnek. Mindeközben a decentralizált döntéshozatalat tekintik az Ipar 4.0 legproblémásabb elemének, és ezért ez rendkívül részletes és át fogó tárgyalásra kerül.

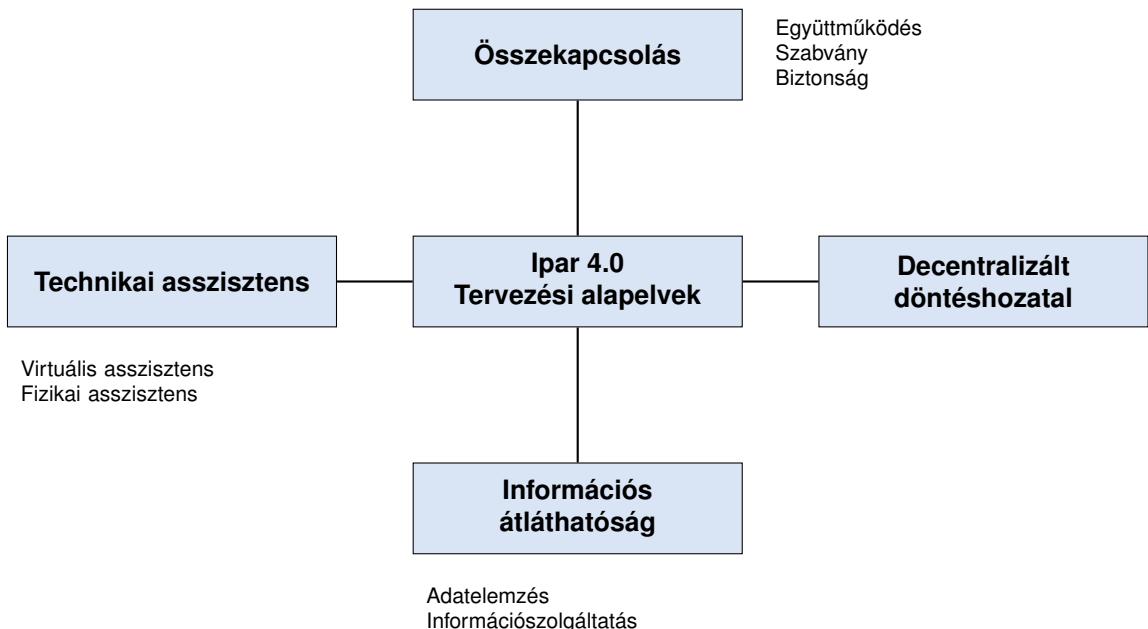
4.3.1. Összekapcsolás

Gépek, eszközök, szenzorok és emberek kapcsolatba lépnek IoT-n (Internet of Things - Dolgok interne) és IoP-n (Internet of People - Emberek interne[3]) keresztül és így formálnak egy IoE-t (Internet of Everything - minden interne[4]). A vezetéknélküli technológiák kiemelkedő szerepet játszanak az interakciók során, mivel lehetővé teszik az internetes hozzáférést mindenfelé. Az IoE-n keresztül összekötött emberek és eszközök képesek egymással információt megosztani, ami a kollaboráció alapját jelenti a közös célok elérése érdekében. 3 különböző típust különböztethetünk meg az IoE kapcsán: ember-ember együttműködés, **ember-robot kollaboráció** és robot-robot kollaboráció.[5]

A különböző gépek, eszközök, érzékelők és emberek egymás közötti interakciója során elengedhetetlen szerepe van a széles körben elfogadott kommunikáci-

ós szabványoknak. Ezek teszik lehetővé a különböző gyártóktól érkező moduláris eszközök rugalmas kombinálását. Ez a modularizáció az alapfeltétel, hogy az Ipar 4.0 'okos' gyárai alkalmazkodni tudjanak a folyamatosan változó piaci igényekhez vagy a személyreszabott rendelésekhez.

Ahogy nő az IoE-ben résztvevők száma, a monetáris¹ és politikai érdekek meg fogják növelni az ilyen létesítmények elleni káros támadások számát, így az igény is nőni fog a magasabb fokú informatikai biztonság iránt.



4.1. ábra: Ipar 4.0 tervezési szempontok

4.3.2. Információs átláthatóság

Az összekapcsolt objektumok és emberek növekvő számának köszönhetően, a fizikai és a virtuális világ egybeolvadása lehetővé tesz egy újfajta információs modellt[6]. Az érzékelők összekapcsolása révén képezhetünk egy digitális, virtuális leképezést a világunkról.

Az összefüggés-tudatos információk az IoE résztvevői számára elengedhetetlenek a megfelelő döntések meghozatalához. Az ilyen összefüggés-tudatos rendszerek a feladataikat a virtuális és a fizikai világból érkező információk alapján látják el. A virtuális világból érkező információkra példák az elektronikus dokumentumok, rajzok, szimulációs modellek. A fizikai világ információi például a pozíció vagy a szerszám állapota. A fizikai világ elemzéséhez az érzékelők felől érkező nyers adatokat magasabb szintű értelmezési és egyéb információval kell kiegészíteni. Ahhoz

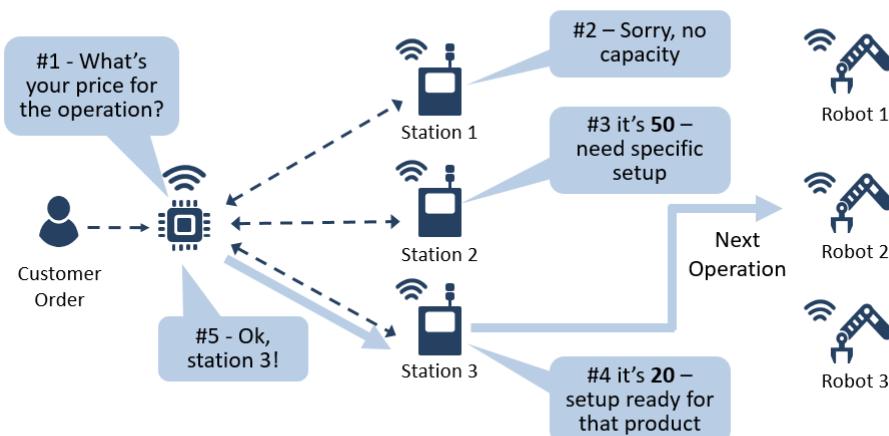
¹pénzhez vagy valutához kötődő

hogy az átláthatóságot fenntartsuk, az adatalemzés eredményeit egy olyan kisegítő rendszerbe kell bevinni, ami minden IoE résztvevő számára elérhető. A folyamatkritikus információk esetén a valós idejű adatszolgáltatás elengedhetetlen.

4.3.3. Decentralizált döntéshozatal

A decentralizált döntések meghozatalának két alappillére az objektumok és az emberek összekapcsolása, illetve a termelő létesítményen belülről és kívülről érkező információk átláthatósága. Az összekapcsolt és decentralizált döntéshozó egységek lehetővé teszik a lokális információk globálissal együtt felhasználását egyazon időben, így elősegítve az átgondoltabb döntéshozatalt és így növelve összességében a termelékenységet. Az egyes IoE elemek a feladataikat annyira önállóan látják el, amennyire csak lehet. A feladatok csak kivételek, zavarok vagy ellentmondásos célok esetén kerülnek továbbításra magasabb szintre.

Gyakorlati szempontból a decentralizált döntéshozatalt a kiber-fizikai rendszerek teszik lehetővé. Ezen rendszerek beágyazott számítóegységeinek, szenzorainak és aktuátorainak felhasználásával történik a fizikai világ autonóm nyomon követése és irányítása.



4.2. ábra: A vevői igényekhez igazodó decentralizált döntéshozatal¹

¹A kép forrása: <http://www.criticalmanufacturing.com/en/newsroom/blog/posts/blog/manufacturing-software-for-industry-4-0#.XBA9lmhKiUk>, 2018.12.05.

4.3.4. Technikai asszisztens

Az Ipar 4.0 ‘okos’ gyáraiban az ember szerepe alapvetően megváltozik: gépkezelő helyett inkább stratégiai döntéshozóvá és rugalmas problémamegoldóvá válik. A termelési folyamatok növekvő komplexitása miatt – ahol a kiber-fizikai rendszerek összetett hálózatot alkotnak és decentralizált döntéseket hoznak – az embereknek támogató rendszerekre van szükségük. Ezeknek a rendszereknek a szerepe az információk összegyűjtése és megjelenítése egyértelműen és érthetően annak érdekében, hogy az emberek jól megalapozott döntéseket tudjanak hozni, és magas prioritású problémákat tudjanak megoldani rövid időn belül.

Jelenleg az embereket főként az okostelefonjaik és táblagépeik kötik össze az IoT-vel[7]. A hordozhatóság kiemelkedően fontossá fog válni a jövőben, amint a jelenlegi kihívásokon (mint például az energiaellátás) sikerül felülkerekedni.



4.3. ábra: Robotkar technikai asszisztens szerepe¹

Az emberek robotok általi fizikai kisegítése – a robotika területén elérte fejlesztésekkel – szintén a technikai asszisztens szerep részét képezi. A robotok számos feladatot képesek elvégezni, amelyek az ember számára kellemetlenek, túl fárasztóak vagy veszélyesek más munkásokra nézve[8]. Az emberek fizikai feladatokban hatékony, sikeres és biztonságos segítésének érdekében szükséges, hogy a robotok az emberrel zökkenőmentesen és intuitívan működjenek együtt[8]. Ezen felül elengedhetetlen, hogy az emberek megfelelő képzésben részesüljenek az adott ember-robot kollaborációhoz[9].

¹A kép forrása:

<https://www.electrive.com/2018/08/06/kuka-to-deliver-electric-car-making-robots-to-china/>, 2018.12.05.

4.4. Ember-robot kollaboráció

4.4.1. Fogalmak tisztázása

Az ember és a robot közösen végzett feladataikat különböző interakciós szinteken valósíthatják meg, ezeket érdemes egymástól elhatárolni¹ (4.4. ábra):

1. *Robot cella (Robotic cell)*: a robot önállóan végzi a feladatát az embertől kerítéssel elválasztva. Ez esetben nem beszélhetünk ember-robot együttműködésről.
2. *Együttes jelenlét (Coexistence)*: a robot és az ember közel helyezkedik el egymáshoz védőkerítés nélkül, de nincs közös munkaterük. A robotnak van saját meghatározott tere.
3. *Szinkronizált munkavégzés (Synchronized work)*: olyan elrendezés, melyben az ember és a robot osztozik egy közös munkateren, de egyszerre csak egyikük aktív. A munkamenet az ember és a robot jól definiált 'koreográfiája'.
4. *Kooperáció (Cooperation)*: a két „partner” mindegyike a saját feladatával foglalkozik. A munkaterük lehet közös, de nem dolgozhatnak sem ugyanazon a terméken, sem ugyanazon a munkadarabon.
5. *Kollaboráció (Collaboration)*: olyan elrendezés, amely esetén az ember és a robot közösen és szimultán dolgozik egyazon terméken vagy munkadarabon. Tipikusan a robot megfogja, átnyújtja és tartja a munkadarabot amíg a munkás dolgozik rajta.



4.4. ábra: Balról jobbra: együttes jelenlét, kooperáció, kollaboráció²

¹Forrás:

<https://hohmannchris.wordpress.com/2017/02/08/cobots-more-cooperation-than-collaboration/>, 2018.11.12.

²Képek forrása: <https://www.safetysolutions.net.au/content/machine/article/safety-solutions-for-intelligent-human-robot-collaboration-990038334>, 2018.11.12.

4.4.2. Biztonsági szempontok ember-robot kollaboráció esetén

A biztonságos ember-robot együttműködés érdekében az elmúlt években különböző stratégiák lettek kifejlesztve. Ezek a módszerek különböző biztonságtípusra építének, többek közt[10]:

- az ütközésbiztonság érdekében csak 'biztonságos'/kontrollált ütközésre kerülhet sor robotok és emberek között. Az emberekre gyakorolt erő/nyomaték határolása a fő szempont.
- aktív biztonsági rendszer az ember és a berendezés közötti közelgő ütközések időben történő észlelésére és a műveletek megszakítására ellenőrzött módon. Távolságérzékelők, látórendszerök és erő/érintkező érzékelők használhatóak erre a célra.
- a hardver elemek működtetése során adaptív biztonsági stratégia a beavatkozáshoz, illetve korrekciós eljárások implementálása, amelyek az ütközéseket a munkafolyamat megszakítása nélkül kerülik el.

Ilyen irányban nemzeti és nemzetközi szabványokat, irányelveket és törvényeket vezettek be annak érdekében, hogy a rendszerintegrátorok könnyebben be tudják építeni a biztonsági metódusokat a saját rendszerükbe. Tekintettel arra, hogy egy kollaborációs munkatéren nem csak az ember és a robot tartózkodik, hanem egyéb segédberendezések is megjelennek (például: elektromos csavarbehajtók, elektromos szorítóberendezések stb.) minden egyes cella egyedülálló kockázatot jelent biztonságtechnikai szempontból. Ebből kifolyólag minden berendezés és folyamat esetén be kell tartani az ezekre vonatkozó hatályos törvényeket és szabványokat. A 4.1., 4.2. és 4.3. táblázatok indikatív példákat tartalmaznak az EU ismertebb tövényei és általános normáiból válogatva.

4.1. táblázat: EU Direktívák

Title	Description
2006/42/EC	Machinery Directive (MD)
2009/104/EC	Use of Work equipment Directive
89/654/EC	Workplace Directive
2001/95/EC	Product Safety Directive
2006/95/EC	Low Voltage Directive
2004/108/EC	Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

Jelenleg közel 30 aktív uniós irányelv és körülbelül 600 szabvány létezik a biztonságtechnikával kapcsolatosan. Különösen robot cellákkal kapcsolatban a 4.3. táblázat előrevetít számos különböző stratégiát a megfelelő biztonság kialakítására. Pár a legfontosabbak közül[10]:

4.4 Ember-robot kollaboráció

4.2. táblázat: Indikatív célú általános szabványok

Title	Description
EN ISO 12100	Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction
EN ISO 13849-1/2	Safety of machinery - Safety-related parts of control systems - Part 1: General principles for design, Part 2: Validation
EN 60204-1	Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements
IEC 62061	Safety of machinery - Functional safety of safety related electrical, electronic and programmable electronic control systems

4.3. táblázat: Robot szabványok

Title	Description
EN ISO 10218-1	Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 1: Robots
EN ISO 10218-2	Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 2: Robot systems and integration
ISO/PDTS 15066	Robots and robotic Devices - Collaborative Robots

- **Biztonsággal kapcsolatos vezérlőrendszerek teljesítménye:** biztonságkritikus vezérlőrendszer-egységeknek biztosítaniuk kell, hogy az egyes hibákra van oly mértékű tolerancia, hogy a biztonságot nem veszélyezteti.
- **Robotmegállító funkciók:** minden robotnak rendelkeznie kell védőleállító funkcióval, továbbá független vészleállító funkcióval. Külső biztonsági berendezésekkel való kapcsolatot is biztosítani kell.
- **Sebességkorlátozás:** a robot végén található beavatkozó és a szerszámközéppont (TCP - Tool Center Point) sebessége kontrollálható kell legyen. Kollaboratív munkaállomások esetén a TCP sebessége nem haladhatja meg a 250 mm/s-ot.
- **Kollaboratív műveletekre vonatkozó követelmények:** együttműködésre képes robotok kell hogy működtessenek valamilyen látható indikátort amikor a robot kollaboratív műveletet hajt végre. A következő követelmények érvényesek:
 - **Biztonsági rendszer által kezdeményezett felügyelt megállás:** a robotnak kötelező megállnia, amikor az ember a kollaboratív munkaterületen tartózkodik. Amint az ember elhagyja ezt a területet, a robot folytathatja az automatikus munkavégzési folyamatot.

- **Kézi vezetés** (Hand guiding): a kézi vezetéshez alkalmazott berendezésnek tartalmaznia kell egy vészleállítót és egy engedélyező szerkezetet. E művelet során biztonságkritikai szempontból tanúsított módon nyomon kell követni a robot sebességét. Számos technológia felhasználható az ember által kézzel történő irányításhoz, mint például az impedancia vagy a merevség szabályozása.
- **Sebesség és pozíció monitorozása**¹: a robot fenn kell tartson egy adott távolságot az üzemeltetőtől. Ezt integrált jellemzők vagy külső bemenetek kombinációjának figyelésével tudja megvalósítani.
- **Teljesítmény- és erőhatárolás belső dizájnnal**: a teljesítmény-/erőhatároló funkcióknak be kell tartatniuk a szabvány által meghatározott határértékeket. Ha ezt túllépik, megállást kell eszközölniük.
- **Vezérlőrendszer által határolt erő és teljesítmény**: egy vezérlőfunkció biztosítja, hogy a maximális erő és teljesítmény értékeket ne lehessen túllépni.
- **Robot mozgásterének korlátozása**: feleslegesen nagy tér elhatárolására lehet szükséges akkor, ha a robotnak engedélyezett a teljes mozgástartomány kihasználása. A mozgástér leszűkítése lehetséges a robotba integrált rendszerek kihasználásával vagy külső korlátozó eszközök telepítésével, illetve e kettő kombinációjával. Dinamikus korlátozás érhető el vezérlőeszközök (kapcsolók, fényfüggönyök stb.) alkalmazásával, ha további limitációkra van szükség a robotprogram vérehajtása során.
- **Minimális távolság meghatározása**: feladattól függően kockázatelemzés útján kerül meghatározásra az ember és a robot közötti minimális távolság. Az elemzés során érdemes figyelembe venni a) a végeffektorokhoz és az esetlegesen ezek által tartott munkadarabokhoz kapcsolódó kockázatokat, b) a munkaterület elrendezését, c) a munkás feladatát és d) a rendszer felhasználhatóságát.
- **Ütközésérzékelés**: a biztonsági funkcióknak meg kell tudniuk határozni mind az ember, mind pedig a robot pillanatnyi pozíciója és sebessége alapján, hogy a minimális távolság alá csökkenhet-e az ember és a robot távolsága (ütközés).
- **Esetleges ütközések elkerülése**: ez a funkció lehetővé teszi a robot számára, hogy megelőzze az ütközéseket a) lassítás vagy megállás, b) a meghatározott

¹folyamatos megfigyelés

útja során eszközölt irányváltás és c) egy másik biztonságos útvonalon haladás által.

- **Technológiai és ergonómiai követelmények:** az ember és robot közötti esetleges ütközés esetén megfelelő óvintézkedéseknek kell biztosítaniuk, hogy éles, hegyes vagy durva felületek ne legyenek az érintkezési zónában. Továbbá a környező munkaterületet (ahol az ember a kollaboratív robottal ütközhet) úgy kell kialakítani, hogy a felhasználó számára elegendő tér biztosítva legyen ahoz, hogy kockázatos helyzeteket elkerülje.

Ezeket a funkciókat szabványosítással foglalkozó szervek dolgozták ki a különböző biztonsági szempontok átfedés nélküli ellenőrzésének érdekében. Átfedések előfordulhatnak az egyes projektek kivitelezésekor; a biztonsági követelményeknek teljes mértékben való megfelelést minden esetben felül kell vizsgálni.

4.4.3. Érzelmi megfontolások

Az ember-robot együttműködésnek és a kollaboratív celláknak a kialakítása, valamint az ember és a robot közötti hatékony feladatmegosztás szorosan kapcsolódik társadalom-fiziológiai kérdésekhez. A mélyebb megértés és az ember viselkedésének megjósolása, valamint a HRI (Human-Robot Interaction - Ember-Robot Interakció) fejlődése részben a kognitív mérnökséghez, pszichológiához és szociológiához kötődik. A bizalom, a terheltség és a kockázatosság a legfontosabb emberi tényezők, amik befolyásolják az automatizálási technológiák alkalmazását. Az emberközpontú robotcella kialakítása során az emberi tényezők, mint a leterheltség, éberség, helyzetfelismerés, hibák stb. figyelembe vétele ugyanúgy fontos, mint a kognitív mérnöki szempontok és az ergonomia[11].

4.5. KUKA-specifikus biztonsági funkciók

A következő részben a KUKA Sunrise OS 1.16[12] biztonsági funkciói kerülnek taglalásra. Az alábbi fogalmak és szempontok egy része már a 4.4.2 fejezetben előkerült általánosságban, viszont gyakorlati szempontok miatt ezek specifikus tárgyalására is szükség van. Az itt leírtak tájékoztató jellegűek, céljuk a szakdolgozat értelmezhetőségének javítása, nem foghatóak fel általános iránymutatásként. Adott KUKA Sunrise OS és egyéb kiegészítő berendezések esetén minden található ezekhez mellékelt biztonsági utasítás. Ezek betartása elengedhetetlen a hatékony és biztonságos működtetéshez.

A biztonsági funkciókat két csoportra lehet osztani:

- Biztonságkritikus funkciók az emberi biztonság fenntartása érdekében:
Az ipari robot biztonságkritikus funkciói megfelelnek a felsorolt biztonsági követelményeknek:
 - EN ISO 13849-1 (4.2. táblázat) szabvány 3-as kategóriája (Category 3), illetve a d teljesítményszint besorolás (Performance Level d)
 - EN 62061 (4.2. táblázat) SIL 2 követelménye Ezek a követelmények azonban csak a következő feltétel fennállásakor teljesülnek:
Az ipari robot minden biztonsági szempontból releváns mechanikus, illetve elektromechanikus komponense a biztonságos működés szempontjából le lett tesztelve a beüzemeléskor és legalább egyszer minden évben, hacsak a kockázatelemzők másképp nem határoztak. Ilyen eszközök:
 - * Vészstop eszköz (Emergency stop device) a smartPAD-en
 - * Engedélyező kapcsoló a smartPAD-en
 - * Kulcsos kapcsoló a smartPAD-en
- Nem biztonságkritikus funkciók a gépek védelme érdekében:
Az ipari robot nem biztonságkritikus funkciói nem tartoznak kitüntetett biztonsági követelményekhez.

4.5.1. Használt szakkifejezések

4.4. táblázat: A használt szakkifejezések

Kifejezés	Leírás
Tengely mozgástartománya (Axis range)	Az a tartomány, amelyben a tengely mozoghat. Ezt a tartományt minden tengelyre külön meg kell határozni.
Megállási út (Stopping distance)	Megállási út = reakcioidő alatt megtett út + fékút. A megállási út része a veszélyzónának.
Munkatér (Workspace)	A beavatkozó (manipulator) ezen tartományon belül mozoghat. A munkatér az egyes tengelyek mozgástartományából származtatott.
Automatikus (AUT) (Automatic)	A programvégrehajtáshoz tartozó üzemmód. A beavatkozó a programozott sebeséggel mozog.
Gépkezelő/Felhasználó (Operator/User)	Az ipari robot üzemeltetője lehet a menedzsment, alkalmazott vagy megbízott ember, aki felelős a robot működtetéséért.
A következő oldalon folytatódik	

4.4. táblázat – a 15. oldalon kezdődik

Kifejezés	Leírás
Veszélyzóna (Dangerzone)	A veszélyzóna a munkaterületből és a megállási útból áll.
Élettartam (Service life)	A biztonságkritikus komponensek élettartama az ügyfélnek kiszállítástól számítandó. Az élettartam nem függ attól, hogy a komponens a robotvezérlőbe került beépítésre vagy más hova, vagy akár egyáltalán nem is volt használva, mivel a biztonságkritikus alkatrészek is ki vannak téve előregedésnek a tárolás alatt.
CRR	<p>Irányított Robot Visszatérés (Controlled Robot Retraction)</p> <p>A CRR egy olyan üzemmód, amelybe akkor lehet lépni, ha az ipari robotot megállította a biztonsági vezérlő a következő okok valamelyike miatt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A robot megsértett egy tengelyspecifikus vagy egy Descartes-i koordinátára vonatkozó szabályt. • A biztonság-orientált szerszám elhelyezkedése a megfigyelt tartományon kívülre esik. • A robot megsérti az erőre vagy a nyomatékra vonatkozó korlátozásokat. • A pozíószenzor nem ‘mastered’ vagy ‘referenced’.¹ • A csuklóban lévő nyomásszenzor nem ‘referenced’. <p>CRR üzemmódba lépés után a robotot újra lehet mozgatni.</p>
KUKA smartPAD	Lásd „smartPAD”
Beavatkozó (Manipulator)	A robotkar és a hozzá telepített elektronika.
A következő oldalon folytatódik	

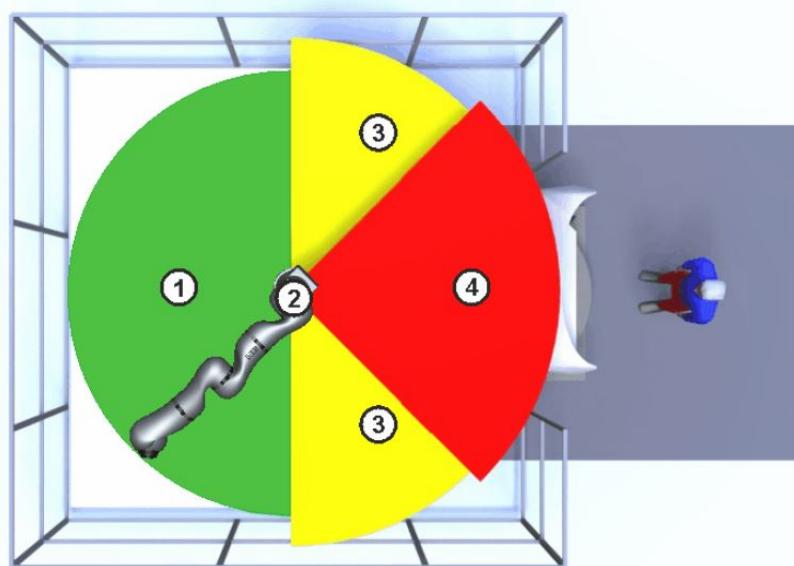
¹ A két kifejezést nem célszerű lefordítani magyarra.

4.4. táblázat – a 15. oldalon kezdődik

Kifejezés	Leírás
Biztonsági sáv (Safety zone)	A beavatkozó nem léphet a biztonsági sávba. Ez a tartomány kívül esik a veszélyzónán.
Biztonsági megállás	A biztonsági megállást a biztonsági vezérlő idézheti elő, így megszakítva a munkamenetet és megállítva a robot mozgását. Biztonsági megállás esetén a programadatok nem vesznek el, így a program folytatódhat a megszakítás pontjától kezdve. A biztonsági megállás lehet 'Stop category 0', 'Stop category 1' vagy 'Stop category 1 (path-maintaining)' (útvonal követés).
smartPAD	A smartPAD egy kézbevehető, irányító panel a robotcellához (-állomáshoz). A robotállomás működtetéséhez szükséges összes üzemeltetői és megjelenítési funkciót tartalmazza.
Stop category 0	A motorok kikapcsolnak és a fékek összezárnak.
Stop category 1	A robotkar lefélkeződik és közben nem marad a programozott útvonalon. A beavatkozó a motorok segítségével jut álló pozícióba. Amint megállnak a csuklók a motorok kikapcsolnak és a fékek behúzódnak.
Stop category 1 (path-maintaining)	A beavatkozó lefélkeződik és közben a programozott útvonalon marad. Amint megállnak a csuklók a motorok kikapcsolnak és a fékek behúzódnak. Ha 'Safety category 1 (path-maintaining)'-et idéz elő a biztonsági vezérlő, akkor ez felügyeli is a megállítás folyamatát. A fékek behúzódnak és a motorok legkésőbb 1 másodperc elteltével kikapcsolnak. Hiba esetén 'Stop category 1' kerül végrehajtásra.
Rendszerintegrátor (System integrator / plant integrator)	A rendszerintegrátorok feladata az ipari robot integrálása egy rendszerbe és ennek hitelesítése.
T1	Teszt üzemmód, manuálisan csökkentett sebesség (Manual Reduces Velocity) (≤ 250 mm/s) Megjegyzés: 'kézi vezetés T1-ben' esetén a sebesség nem kimondottan csökkentett, inkább limitált biztonságszempontú sebességmonitorozás által.
A következő oldalon folytatódik	

4.4. táblázat – a 15. oldalon kezdődik

Kifejezés	Leírás
	Megjegyzés: a 250 mm/s maximális sebesség a mobil platformokra nem vonatkozik.
T2	Teszt mode, manuálisan állított nagy sebesség (> 250 mm/s megengedett)



4.5. ábra: Példa a mozgástartományokra: 1. munkaterület, 2. beavatkozó, 3. megálízási út, 4. biztonsági sáv

4.5.2. Biztonságszempontú funkciók

Az alábbi funkciók permanenten jelen vannak az ipari robot esetén:

- Vészleállító eszköz (EMERGENCY STOP device)
- Engedélyező eszköz (Enabling device)
- Az üzemmód lezárása (a kulcsos kapcsoló által)

A következő biztonságszempontú funkciók előre konfiguráltak és a robotvezérlő biztonsági interfészén keresztül bármikor a rendszerbe integrálhatóak:

- Üzemeltető biztonsága (= a fizikailag jelen lévő biztonsági kerítések megfigyeléssére alkalmas csatlakozó)
- Külső vészleállító eszköz

- Külső, útvonalkövető, megállást előidéző eszköz (Stop category 1 (path- maintaining)) (4.4. táblázat)

Egyéb biztonsági funkciók konfigurálása esetleges, pl.¹:

- Külső engedélyező eszköz
- Tengelyspecifikus munkatér monitorozás
- Descartes-i munkatér megfigyelés
- Descartes-i védet tér monitorozás
- Sebesség nyomon követés
- **Tengelyekben ébredő nyomatékok megfigyelése**
- **Üktözés detektálása**

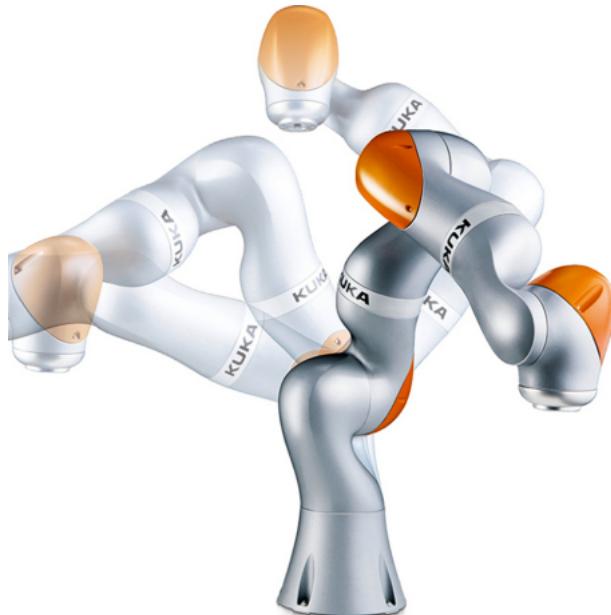
Az egyes pontokról további információ a technikai specifikációban található[12].

¹A vastag betűvel szedett pontok a szakdolgozat fontos elemei

5. PROJEKT RÉSZLETES LEÍRÁSA

A projekt célja egy olyan robot bemutató hardveres és szoftveres kidolgozása, amely képes egy emberrel (továbbfejlesztés után akár egy másik robottal) lejátszani egy sakkkátszmát. A bemutató az ember-robot kollaboráció szemléltetésére szolgál. Fontos szempont az interakció biztonságos megvalósítása mind az emberre, mind a környező tárgyakra tekintettel.

A projekthez egy KUKA gyártmányú LBR iiwa 7 típusú robotkar került felhasználásra (5.1 ábra).



5.1. ábra: A projekthez használt robotkar²

A megvalósításhoz a következő problémák megoldására van szükség:

1. szükséges biztonsági funkciók beüzemelése,
2. a bábuk helyzetének felismerése az egyes lépések előtt és után,
3. a kamera kiválasztása és robotvezérlőhöz illesztése (a bábuk helyzetének felismeréséhez),
4. a bábuk megfogása és mozgatása (ide tartozik a kalibráció, a referenciafelvétel és a megfogó vezérlése is),
5. kiválasztott sakkalgoritmus beágyazása a programba,

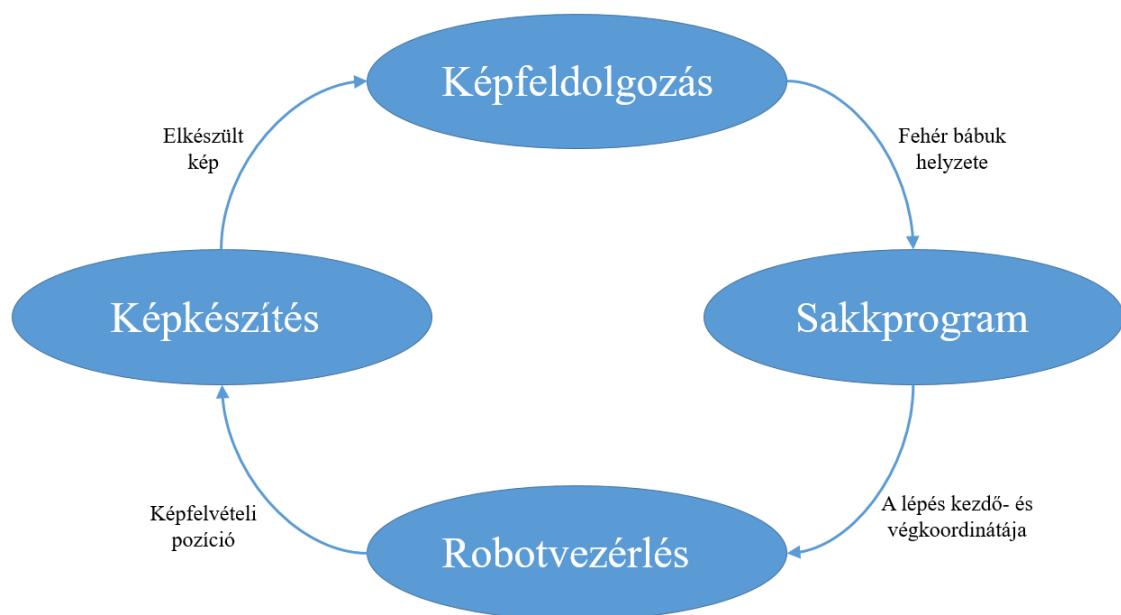
²A kép forrása: <https://www.businesswire.com/news/home/20150320005018/en/KUKA-Robotics-Corporation-debuts-LBR-iiwa-North>, 2018.11.25.

6. a sakkbábuk és a tábla megtervezése és megvalósítása,
7. jelzés a robotkar számára, ha lépés történt.

A felsorolt pontok a projekt során a következőképpen kerültek kidolgozásra:

- A bábuk helyzetének detektálása a projekt során zöld szín szűrő képfeldogozó eljáráson alapul (a bábuk tetején zöld színű lap található). A kamera a roboton kerül rögzítésre.
- A bábuk mozgatása egy elektromosan vezérelt, párhuzamos megfogó (gripper) segítségével történik.
- Ahhoz hogy a bábuk megfogása egyszerű legyen, azonos magasságú és azonos módszerrel megfogható bábuk készültek.
- A biztonsági funkciók főként az tengelyekben ébredő plusz nyomatékok monitorozására épül.
- A tábla és a robotkar, illetve a megfogó (egy jól definiált pontja) és a robotkar relatív helyzetének kalibrálására a robotvezérlő szoftverben elérhető alapfunkciók kerültek felhasználásra.
- A sakklépés megtörténtét a robotvezérlőhöz tartozó smartPAD-en lehet jelezni.
- A képek fogadása, feldolgozása és a sakkalgoritmus futtatása is mind a robotvezérlőn történik.
- Mivel a robotvezérlőn Java alapú környezet fut magas szinten, így a képfeldolgozó és a sakkprogram is ebben lett implementálva.

A projekt főként 4 modulból áll: képkészítés, képfeldolgozás, sakkprogram és robotvezérlés. Ezek kidolgozásánál fontos szempont a modulok közötti kapcsolat is. A projekt folyamatábráját az 5.2 ábra mutatja. A most következő fejezetek a folyamatábra elemeit igyekszenek bemutatni.



5.2. ábra: A fő modulok és az azok közötti kapcsolat

6. KAMERAVÁLASZTÁS, KÉPKÉSZÍTÉS PROGRAMOZÁSA

6.1. Kameraválasztási szempontok, választott kamera

A sakkbábuk pozíciójának felismerése képfeldolgozási eljáráson alapul. A képek készítéséhez használt kamera kiválasztásánál többféle szempont is szerepet játszott:

- *fekete-fehér/színes kép*: a zöld szín alapú bábukeresési eljárásban elengedhetetlen a színes képet szolgáltató kamera használata. QR-kód alapú felismeréshez megfelelő fekete-fehér kép is.
- *felbontás*: ezt a legkisebb megkülönböztetni kívánt 2 fizikai pont távolsága, illetve a pontok kamerától vett távolsága egyaránt befolyásolja (később kerül részletes tárgyalásra).
- *látószög*: ha a sakktábla kitölti a teljes képet, akkor a látószög azt határozza meg, hogy milyen távol lesz a kamera a tárgyaktól (a nem kifejezetten szűkített látóterű kamerák megfelelnek a célra).
- *az illesztőszoftver (driver) kompatibilitása*: a projekthez valamilyen webkamera típus kiválasztása jó ötlet lehet a könnyű kezelhetőség, kedvező ár-érték arány és a viszonylag széles szoftveres támogatottság miatt. A robotvezérlőn Windows Embedded Standard 7 operációs rendszer fut, emiatt windows 7 kompatibilis webkamerát választottam.

A sakktábla egy mezőjének mérete 40x40 mm, így az egész tábla 320x320 mm-es. A kalibráló kép ennél nagyobb, mivel az 10x9 cellából áll, ez így 400x360 mm. Egy sakkmezőt vízszintes és függőleges irányban is érdemes legalább 50 részre osztani ($50 \times 50 = 2500$ pixelre), így a mezőkről készült kép megfelelően kivehető lesz. Ez azt jelenti, hogy 10×50 , azaz 500 pixel szélesnek és magasnak kéne lennie a képnek legalább. Ezek alapján egy HD (1280*740 pixel) webkamerát választottam.

Az első körben választott webkamera típusa: Microsoft LifeCam HD-3000. Az illesztőszoftver kizártlag Windows 7-re elérhető, de Windows 10 kompatibilis. Ennek ellenére a szoftver csak korlátozott funkciókkal működik Windows 7 alatt. Ezen kamera választásának másik hátránya, hogy az illesztőszoftver telepítője nem offline. Ez azért lehet probléma, mert a robotvezérlő alapvetően nem rendelkezik internethozzáféréssel, emiatt a telepítés kifejezetten körülményes. Windows Embedded Standard 7 (WES7) operációs rendszerrel nem sikerült kompatibilissá tenni az illesztőszoftvert.



6.1. ábra: A projekthez kiindulásként használt Microsoft (balra) és a végső konstrukcióba beépített Logitech (jobbra) webkamera²

A második választás a Logitech C270 HD webkamerára esett. Az illesztőszoftver alapvetően Windows 7-hez készült. Az illesztőprogram telepítője offline működik. További előny, hogy az illesztőprogrammal együtt a gyártó saját alkalmazását is telepíti hozzá, amivel a kamera képet stream-ként lehet nézni. Erre alkalmas lenne a Windows verziókban általában elérhető kamera alkamazás is, de ez WES7 esetén nem alapfunkció. A saját alkalmazással így a kamerát a robotvezérlőhöz kötve is elvégezhetjük a megfelelő kamerapozíció beállítását, nincs szükség külön laptopra.

6.2. Képkészítés OpenCV-vel

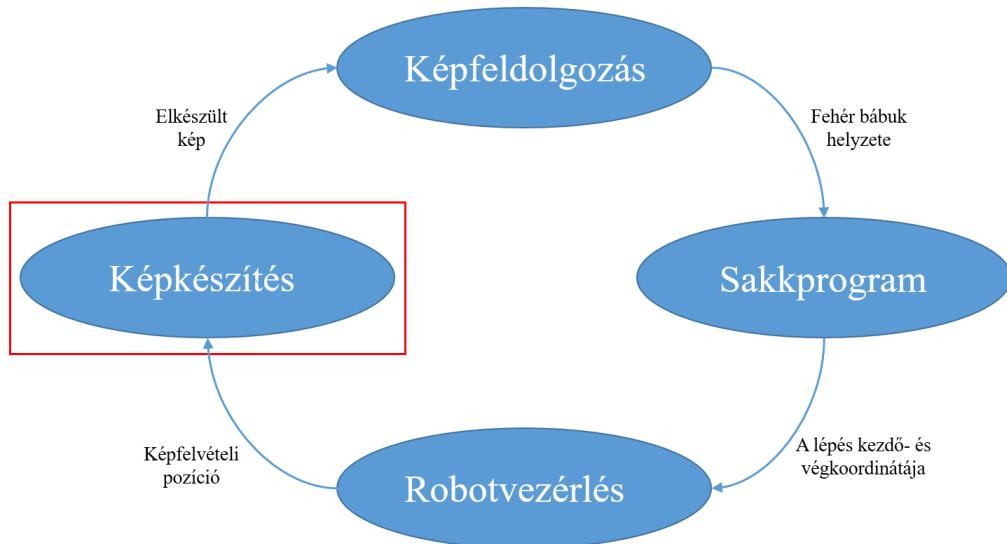
A webkamerát a programon belül OpenCV-s függvények kezelik. A szükséges metódusokat az 'imgprocess' csomagban található CameraHandler.java' fájl tartalmazza. Az alábbi függvények kerültek implementálásra:

- CameraHandler konstruktör: az osztály példányosításakor paraméterként azt a számot kell megadni, ahanyadik indexű a kamera az elérhető képkészítő eszközök listájában (a robotvezérlőhöz ha nincs más kamera csatlakoztatva, akkor ez a 0. index). Sajnálatos módon OpenCV-ben nem lehet kilistázni az elérhető kamerákat, és például név alapján kikeresni a megfelelő kamerát. A konstruktur a képkészítés felbontását HD-ra állítja (ha ez nincs definiálva, akkor a program nem feltétlen ezt választja).
- grabFrame: ez a metódus adja vissza a csatlakoztatott kamera által készített képeket (BufferedImage).

²A Microsoft kamera képének linkje: <https://www.microsoft.com/accessories/hu-hu/products/webcams/lifecam-hd-3000/t3h-00004>, 2018.12.03.

A Logitech kamerájé: <https://www.logitech.com/hu-hu/product/hd-webcam-c270>, 2018.12.03.

- rotateClockwise90: erre a függvényre azért van szükség, mert a kamera a robotkarra 90°-kal elforgatva lett felszerelve az képfeldolgozó eljárások által várt orientációhoz képest.
- closeCamera: ha már a kamera nincs használatban, ezzel a függvénnnyel lehet inaktívvá tenni.



6.2. ábra: Képkészítés helye a folyamatban

7. SAKKBÁBUK KIALAKÍTÁSA, FELISMERÉSÜK A KÉPEKEN

A sakkjáték során a két fél (az ember és a robot) felváltva lép. A robot az ember korábbi lépéseiit (a sajátjai mellett) számon tudja tartani, az ember új lépéseiit viszont meg kell tudnia határozni. A sakkprogram működtetéséhez tehát elegendő a bábuk új pozíciójának felismerése azután, miután az ember lépett.

Könnyebbéget jelent, hogy elég csak az ember bábuinak pozícióját megkeresni (a robot vezeti magának a bábuk pillanatnyi helyzetét). A sakkbábuk felismerésére többfajta módszer is megfelelő lehet. A képfeldolgozást lehet saját vagy szabványos mintára alapozni (pl.: QR-kód alapú felismerés - 7.3 fejezet), illetve színes kamera-kép esetén adott színek keresésére. A szakdolozat során a második módszer került beágyazásra, viszont a sakkbábuk formai kialakításakor a QR-kód alapú felismerhetőség is fontos szempont volt, így biztosítva az ilyen irányú továbbfejlesztés lehetőségét.

7.1. A sakkbábuk formatervezése

Ahhoz hogy a megfogó fel tudja emelni a bábukat könnyebség, ha a bábuk egyforma magasak, vagy ha a megfogó mindegyik bábut egy kitültetett, egy magasságban lévő részénél fogja meg (akár a talprészenél vagy alá is nyúlhatna). A talprésznél megfogás jó megoldás lehet, ha maguk a bábuk színesek, és így biztosított a képeken való felismerhetőségük. A QR-kódos továbbfejlesztéshez viszont elkerülhetetlen, hogy a QR-kód a bábuk tetején legyen elhelyezve. Ezen megfontolások alapján a bábuk végleges konstrukciója (7.1 ábra):

- Mindegyik bábu tetején található egy négyzet alapú, szélességéhez viszonyítva alacsony hasáb, amire az adott színt/színeket/QR-kódot rá lehet ragasztni.
- Ennél a hasábnál fogva emeli meg a megfogó a bábut, így kevésbé kell lenyúlnia a robotkarnak, kisebb az esély arra, hogy egy másik bábut felborít.
- A hasáb 6 mm vastag, hogy a megfogó viszonylag nagy terhelését (min. 50 N) elviselje.
- Mindegyik bábu egyforma magas (40 mm), így a robotkarral felemelés programja és a képfeldolgozás is nagy mértékben leegyszerűsödik.
- A bábuk viszonylag alacsonyak és a talprésük vastagított, tömör, hogy kevésbé legyenek borulékonvak.

- Annak érdekében, hogy a bábukat kevesebb támaszanyag felhasználásával lehessen nyomtatni a bábuk tetején elhelyezkedő hasábok külön lettek kinyomtatva és csak utólag lettek a bábukra felragasztva.

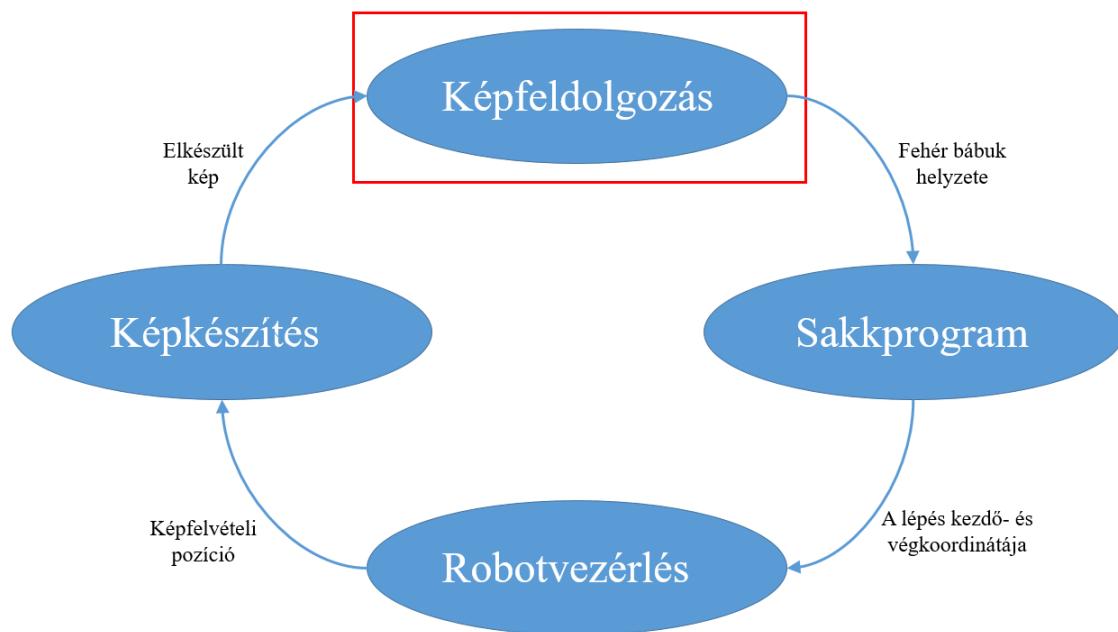


7.1. ábra: A sakkbábuk 3D-s terve



7.2. ábra: A kinyomtatott sakkbábuk

7.2. Bábuk pozíciójának azonosítása

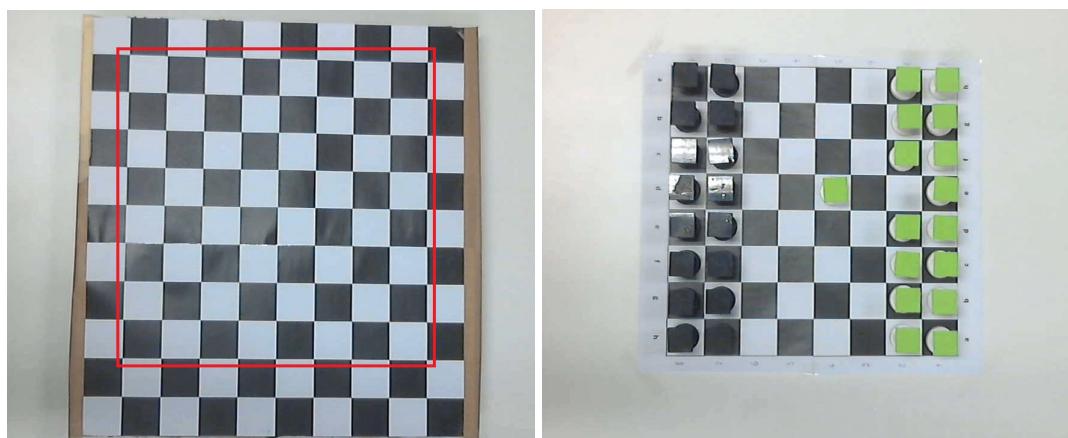


7.3. ábra: A képfeldolgozás helye a folyamatban

A bábuk pozíciójának azonosításához szükség van valamelyen kalibrációs eljárásra, hogy a képek egyes részeihez a sakktábla mezőit tudjuk rendelni. A mezők definiálásához kötődő módszer alapjait OpenCV-s függvények jelentik. A kidolgozott eljárás lényege, hogy a kalibrációs képen egy sakktáblaminta belső sarokpontjait (azon sarokpontok, amelyek 4 mezőnek együttes sarokpontjai) határozza meg a képen. A képkoordináták alapján történik az egyes mezők felosztása az élek mentén szomszédos pontok képzeletbeli összekötésével. Mivel a perspektivikus hatások elhanyagolhatók a tábla mezőre nézve, így 2 szemközti pontra illesztett téglalap jó közelítés az egyes képek kivágásához. Fontos elem, hogy a kalibrációs sakkmintha mezőszámai vízszintes és függőleges irányban különbözzenek, mert így fogja a sarokpontkereső függvény minden ugyanabban a sorrendben visszaadni a pontok koordinátáját. A sorszámozás a minta bal felső részénél lévő, fekete mező sarkától indul és soronként halad (a hosszabb élek mentén) a 7.5 ábrán látható módon. Az algoritmus az elmosódásokra, nagyobb szögekre ($30\text{-}40^\circ$) és a papír gyűrődéseire nem érzékeny.

Fontos elem ezeken túl, hogy a kalibrációs lap abban a síkban helyezkedjen el, ahol a bábukon a zöld minta, így biztos megfelelő helyen keressük a bábukat. Ha az alsó tábla színtjére helyeznénk a kalibrációs lapot, akkor az egyes mezőkre helyezett bábukon lévő minták átlóghatnának a szomszédos mezőkre. Ezt mutatja be a 7.4 ábra. Ezek alapján a kalibrációs eljárás lépései:

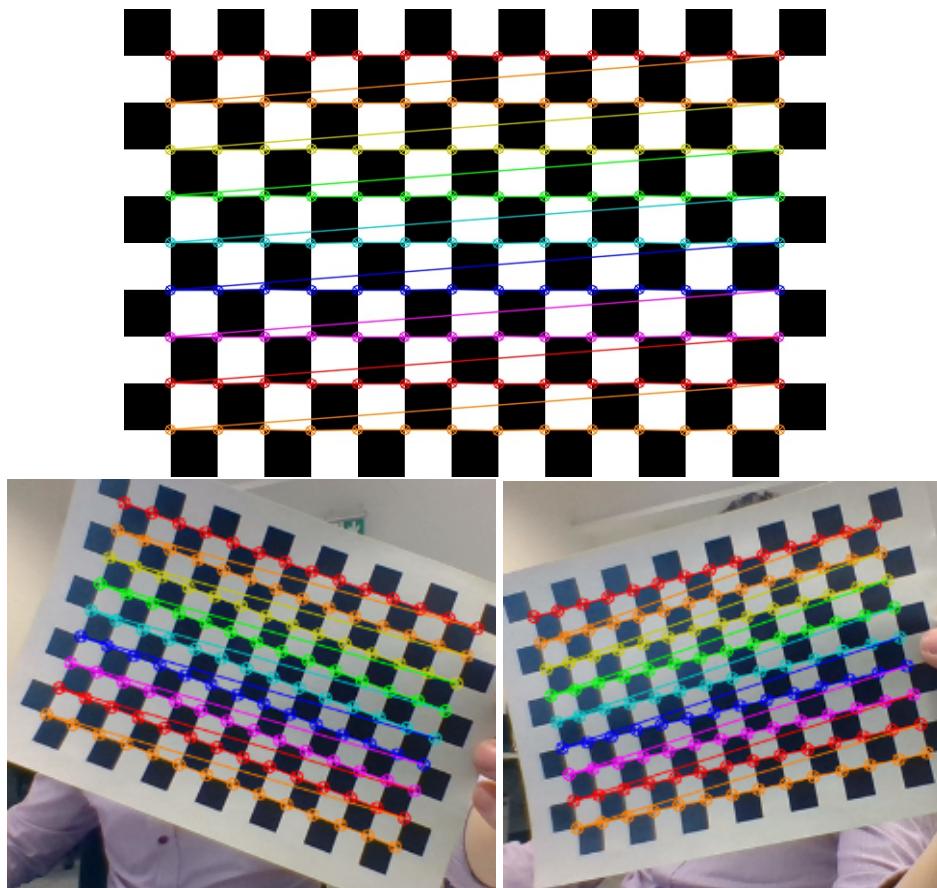
1. Néhány sakkbábú táblára helyezése.
2. A bábuk teteje által kifeszített síkra egy sakktáblamintás papír ráhelyezése úgy, hogy az egyes mezők az alsó sakktábla mezői felett legyenek (mindegyik alsó sakktáblamező felett legyen egy belső sarokpontokkal határolt mező).
3. Kép készítése abból a pozícióból és szögből, ahova a robotkat a kamerával minden képkészítés előtt vissza fog térti.
4. A képen a sarokpontok keresése és a mezők meghatározása automatikusan történik a programban, de a sarokpontok számát vízszintes és függőleges irányban előre definiálni kell.



7.4. ábra: Kalibrációs kép felvétele (a pirossal bekeretezett rész alatt található a jobb oldali képen látható sakktábla)

A képfeldolgozáshoz szükséges osztályokat az ‘imgprocess’ csomag tartalmazza (az OpenCV-s és a QR-kódhoz tartozó .jar fájlokat a Build path-hoz hozzá kell még adni). A sakkbábuk pozíciójának felismerését végző metódusok a ScanPiecesPosition osztályban vannak implementálva. Az osztályt példányosítani a BufferedImage típusú kalibrációs képpel lehet, megadva még a horizontális és vertikális sarokpontok számát függvényparaméterként. A példányosítás hatására lefut a sarokpontkezelő függvény. A ScanPosition függvényt erre a példányra meghívva visszakapjuk a fehér bábuk helyét egy boolean mátrix formájában, ahol a mátrix egyes elemei a tábla egyes mezői. A kép mezőkre darabolását a CropImages privát függvény végzi, amely a kalibráció során meghatározott sarokpontok alapján darabolja fel a képet: a kapott képek a mezők bal felső és jobb alsó pontjai által meghatározott téglalapon belüli részek.

A kapott képekről a FindGreen függvény dönti el, hogy található-e rajtuk jelenősebb kiterjedésű zöld szín. A zöld színre szűrést RGB színtartományban vizsgálja



7.5. ábra: A sakktáblaminta feltérképezett pontjai²

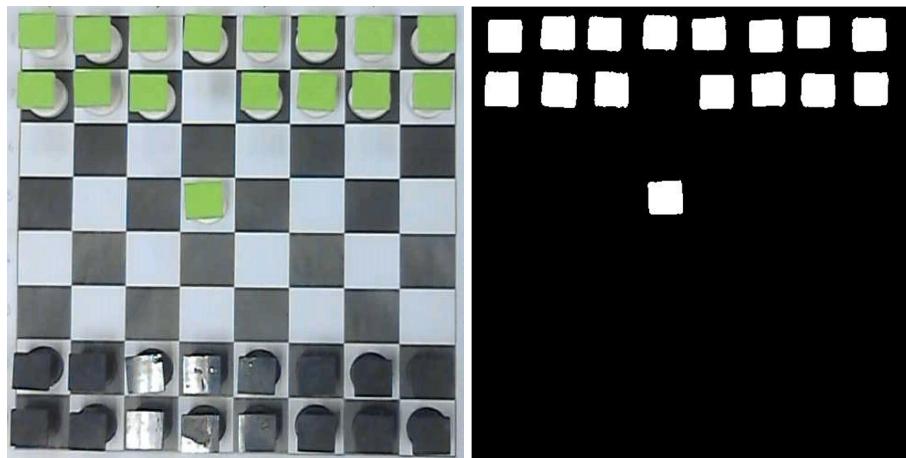
a program (HSV színskálába transzformálással a szűrés még finomítható és kevésbé lesz érzékeny a különböző fényviszonyokra is). Az egyes képek minden pixele esetén kiszámol a program egy értéket a következő képlet alapján:

$$value = greenComponent - \frac{redComponent}{2} - \frac{blueComponent}{2}$$

Ha ez a 'value' érték egy megadott határértéknél nagyobb (jelenleg 40 egy 0-tól 255-ig terjedő skálán), akkor a pixel színét a szűrő algoritmus fehérre állítja, ellenkező esetben feketére. Utolsó lépésként a szűrő algoritmus minden mezőre külön-külön kiszámítja a fehér és a fekete pixelek számának az arányát. Ha ez az érték 10%-nál nagyobb egy mező esetén, akkor ott található bábu, azaz a hozzá tartozó boolean mátrix elem true értékű lesz. A visszaadott mátrixot a sakkprogram kapja majd meg, ami ez alapján és az előző állás alapján dönti el, hogy mi volt a lépés.

²A felső kép forrása:

<http://stadatum.blogspot.com/2016/05/corner-identification-in-computer.html>, 2018.11.05.



7.6. ábra: Zöld szívre szűrés (bal oldalt az eredeti kép, jobbra a szűrt)

7.3. QR-kód alapú képfeldolgozás - továbbfejlesztési irány

Ahhoz, hogy sakkjátékot tetszőleges állapotból lehessen kezdeni, illetve folytatni szükség van a bábu helyének felismerésén túl azok típusának egyértelmű felismerésére. Erre alkamas megoldás lehet a bábu tetejére helyezett QR-kód, amelyben kódolva van a bábu típusa. A QR-kódok kezelésére jó választás a nyílt forráskódú ZXing („Zebra Crossing”) program³. Ez a Java könyvtár (library) alkamas különböző formátumú, egy- és kétdimenziós vonalkódokkal kapcsolatos képfeldolgozásra, amelynek csak egyik eleme a QR-kód olvasás és generálás.

7.3.1. A forráskód build-je

A könyvtár egyszerű használatához célszerű .jar fájlokat generálni a forráskódból. Az első lépés a Github-on elérhető forráskód letöltése vagy klónozása a saját számítógépre. A programkód számos mappába és almappába van rendszerezve az egyes moduloknak megfelelően (pl.: core/ és javase/). **Fontos:** a mapparendszert olyan helyre tegyük a számítógépen, melynek elérési útjában nem található szóköz karakter (ékezetes karakter is probléma lehet)! minden Java alapú modul esetén található egy pom.xml fájl, amit Apache Maven⁴ segítségével lehet használni.

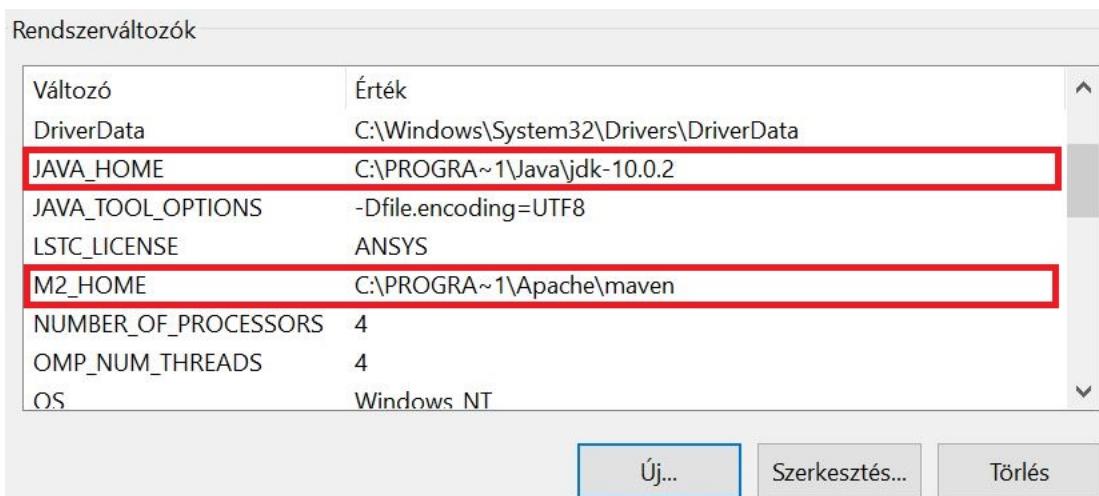
Szükségünk van megfelelő java verzió telepítésére. A JRE (Java Runtime Environment) helyett a JDK (Java Developement Kit) valamelyik verzióját (a projekt jdk 10.0.2 verziót használ) érdemes telepíteni, ha fejlesztői funkciókat is igénybe szeretnénk venni (a JRE csomagot ez már tartalmazza). Az Apache Maven telepítése után szükségünk van az ehhez és a JDK-hoz tartozó környezeti változók be-

³További információk és forráskód: <https://github.com/zxing/zxing>, 2018.10.02.

⁴Az Apache Maven program ingyenesen letölthető: <https://maven.apache.org/>, 2018.10.02.

állítására. Ezt a Vezérlőpult->Rendszer->Speciális rendszerbeállítások->Környezeti változók....->Rendszerváltozók címszó alatt tehetjük meg. Szükségünk van egy 'JAVA_HOME' és egy 'M2_HOME' változóra (7.7. ábra).

Parancssorban navigálunk a ZXing projekt gyökeréhez és futtassuk a 'mvn install' parancsot a fordításhoz, a tesztekhez és az összes modul felépítéséhez. A „-DskipTests” paraméter hozzáadásával a unit teszteket kihagyhatjuk. Szükség lehet a '-Drat.ignoreErrors=true' paraméterre a licensz tesztekkel kapcsolatos problémák ignorálásához. A build folyamat akkor mondható sikeresnek, ha minden modul felépítése sikeres ('ANDROID_HOME' környezeti változó beállítása nélkül az Androidhoz kapcsolódó modulokat nem build-eli) (7.8. ábra).



7.7. ábra: Szükséges környezeti változók beállítása

```
[INFO] Reactor Summary:
[INFO]
[INFO] ZXing 3.3.4-SNAPSHOT ..... SUCCESS
[INFO] ZXing Core ..... SUCCESS
[INFO] ZXing Java SE extensions ..... SUCCESS
[INFO] ZXing zxing.org web app 3.3.4-SNAPSHOT ..... SUCCESS
[INFO] -----
[INFO] BUILD SUCCESS
```

7.8. ábra: Sikeres build végeredménye

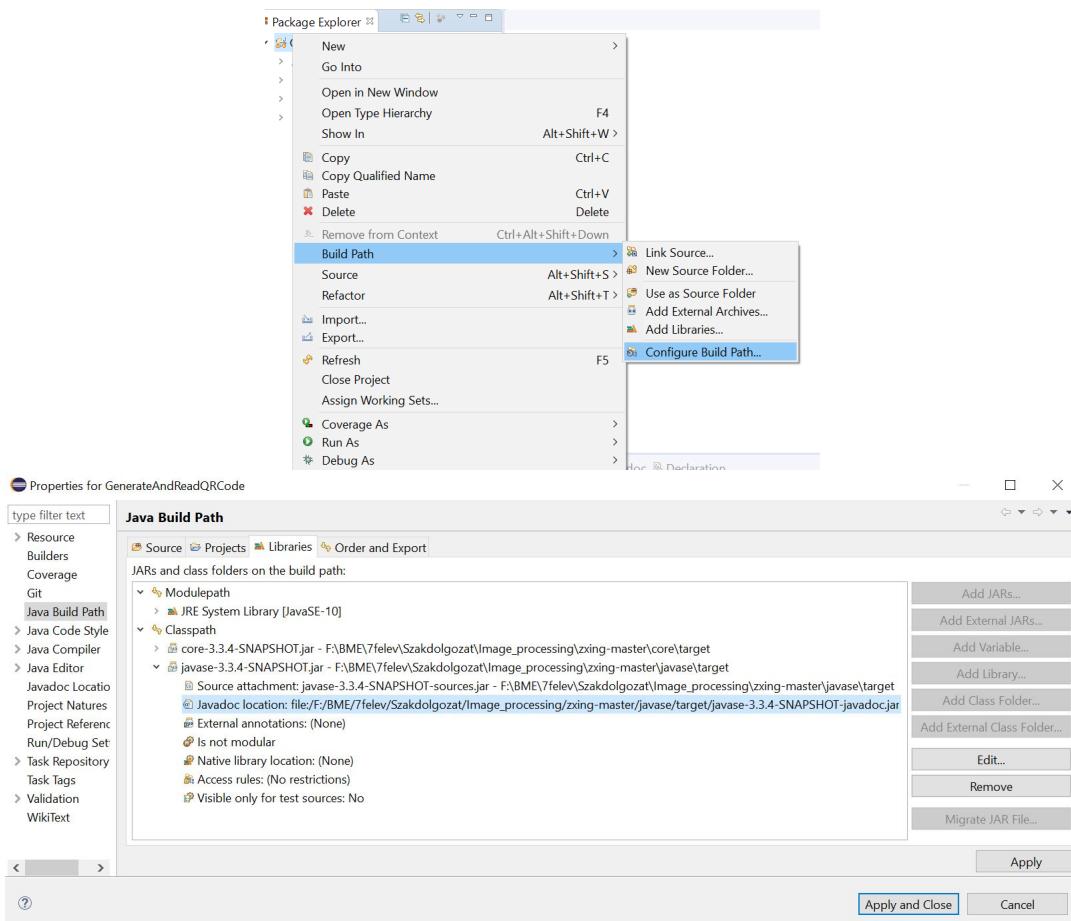
A lefordított .jar fájlokat ezt követően az egyes modulokon belül találjuk. Például a lefordított *core/* kód helye a *core/target/core-x.y.z.jar*. Ezeket lehet beimportálni a képfeldolgozást megvalósító projektbe.

7.3.2. ZXing könyvtár beimportálása és használata

Az iiwa robotkart programozni Sunrise Workbench használatával a legegyszerűbb, ami egy JAVA Eclipse platformú szoftver. Emiatt praktikus okokból a szakdolgo-

zat képfeldolgozási és sakkalgoritmus beágyazási része túlnyomó részt Eclipse-ben történt (verzió: 4.9.0)⁵.

A könyvtár beimportálásához létrehoztam egy java projektet. Erre jobb egér-gombbal kattintva elnavigáltam a ‘Configure Build Path...’ menüponthoz (7.9. ábra). A ‘Classpath’-t kiválasztva jobb oldalt aktivizálódik az ‘Add External Jars...’ gomb. Kiválasztottam a *core/* és a *javase/* modulok .jar fájljait. Ezeken belül lehetőség van forráskód (Source attachment) és dokumentáció (Javadoc location) csatolására (7.9. ábra). ‘Apply and Close’ után megjelennek a csomagok a hivatkozott könyvtárak (Referenced libraries) pont alatt.



7.9. ábra: ZXing hozzáadása a hivatkozott könyvtárakhoz

7.3.3. QR kód generálás és olvasás

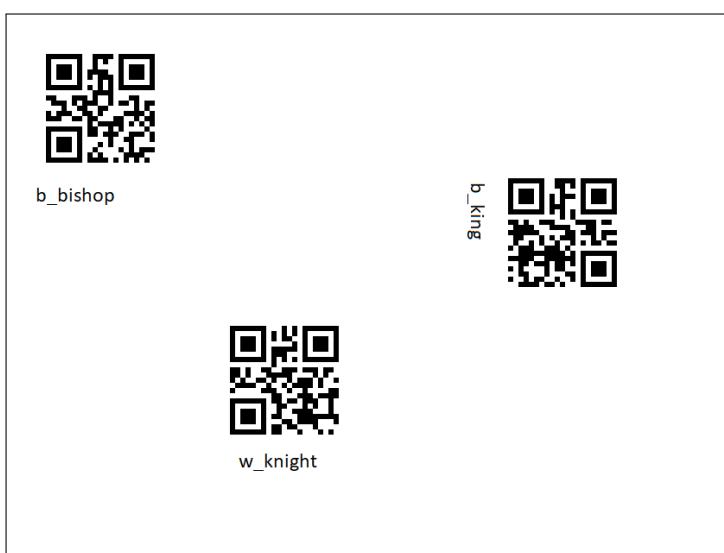
A ZXing könyvtárt felhasználó, ehhez a projekthez szükséges elemek az ‘imgprocess’ csomagban találhatóak a ‘QRCodeMethods.java’ fájlban. A függvények leírása a 7.1 táblázatban találhatóak⁶.

⁵Link: <https://www.eclipse.org/>, 2018.09.10.

⁶Forráskód: <https://github.com/rolandvarga601/Szakdolgozat>

Függvény neve	Paraméterek	Leírás
createQRCode	<ul style="list-style-type: none"> String qrCodeData - a kódolt szöveg String filePath - a képek mentési helye String charset - karakterkódolás int qrCodeheight - a kép magassága int qrCodewidth - a kép szélessége 	Nincs visszatérési értéke, a QR-kódot tartalmazó képet a megadott elérési helyre menti.
readQRCode	BufferedImage image - a kép amelyen a QR-kód található	Visszaadja a képen található QR-kódba kódolt szöveget.
readMultiQRCode	String FileName - a kép elérési útja, amelyen a QR-kódok találhatóak	Képes egyazon képen különböző szögekben elhelyezkedő QR-kódok felismerésére és dekódolására (7.10 ábra). Visszatérési érték: Result[], amely tömb elemei tartalmazzák többek között az egyes QR-kódok helyét a képeken és a kódolt szöveget.

7.1. táblázat: QRCodeMethods.java függvényei



7.10. ábra: Példa a több QR-kódot tartalmazó kép kiolvasására (jobb oldalt a program kimenete látható)

8. SAKKALGORITMUS BEÁGYAZÁSA

A robotprogramhoz felhasznált sakkalgoritmusok és főbb Java osztályok alapja egy versenyre készített, nyílt forráskódú sakk alkalmazás [13]. 2005-ben Arwid (Arvydas) Bancewicz első helyezést ért el ezzel az alkalmazásával az OBEA Számítógépes Programozó Versenyen (OBEA Computer Programming Contest) 17 évesen. Az általa készített program rendelkezik grafikus felhasználói felülettel (továbbiakban GUI - Graphical User Interface), a forráskód nagy része ennek megfelelő működéséhez lett megírva.

A szakdolgozat keretében megvalósított projektem során külön a sakk alkalmazáshoz felhasználói felületet létrehozni nem volt szükségszerű. A robotprogram továbbfejleszthető olyan formában, hogy folyamatosan kijelezze a jelenlegi sakkállást, így még inkább nyomon követhető a játék menete, így megkönnyítve a továbbfejlesztést. Ezen a felületen keresztül akár tetszőleges felállást lehetne konfigurálni a játék kezdetéhez.

A sakkprogram beágyazásának első fő kihívása a GUI elhagyásával egy konzolalkalmazás létrehozása. A program forráskódja viszonylag hosszú, sok osztály lett implementálva különböző csomagokba rendezve (12 csomag és ezeken belül 93 osztály). A program működésének megértéséhez jó kiindulási pont a mellékelt README fájl és a „program documentation” mappában található szotver leírás (Software Documentation.doc)[13]. Habár ezek főként a GUI működését taglalják, az ehhez tartozó főprogram kódjából a meghívott függvények alapján ki lehet következtetni a működés struktúráját. Ezen felül a Java osztályoknak és az egyes csomagoknak beszédes nevük van, például a következő sakklépést az algorithm (algoritmus) csomagban található különböző algoritmusokra alapozott osztályok metódusai határozzák meg.

A szakdolgozathoz felhasznált csomagok az alábbiak (ezeken belül is bizonyos funkciók ki lettek kapcsolva, de ezek jelentik a program magját):

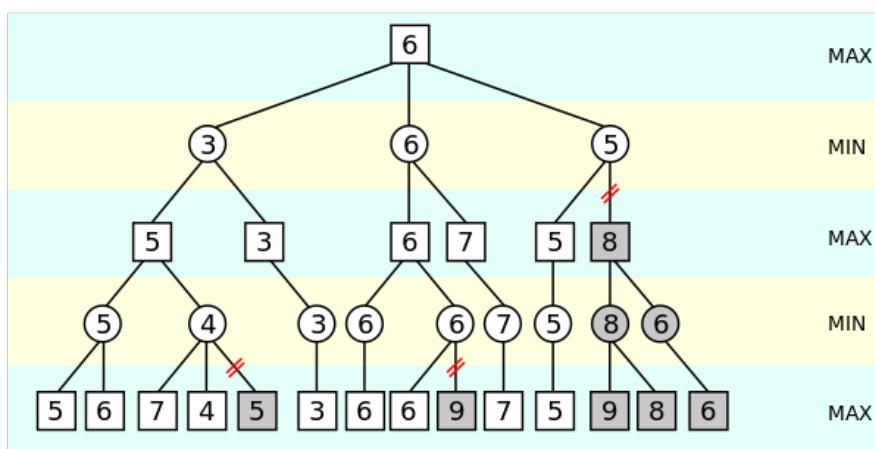
- chess.algorithm: Ebben a csomagban kerültek implementálásra a különböző sakkalgoritmusokat meghívó és végrehajtó utasítások. Ezen felül itt lettek implementálva az bábuk lehetséges lépései.
- chess.core: Ez a csomag tartalmazza a sakkhoz szorosan kötődő osztályokat, metódusokat (pl.: bábuk elhelyezkedése a táblán).
- chess.properties: Itt találhatóak a programozott sakkjáték szempontjából praktikus funkciók (pl.: játék jelenlegi állása, játékosok neve stb.).

8.1. A chess.algorithm csomag - az algoritmusok működtetője

A programban az alábbi sakkalgoritmusok lettek implementálva:

- Alfa-béta vágás (AlphaBeta.java)
- Minimax elv (MiniMax.java)
- NegaScout algoritmus (NegaScout.java)
- Principal variation search (PrincipalVariation.java)
- Kvázi véletlenszerűen választott szabályos lépés (RandomGen.java)

A sakkprogram alapbeállításként az Alfa-béta vágást használja. Az Alfa-béta vágás egy olyan kereső algoritmus, amely igyekszik csökkenteni a minimax algoritmus keresséi fájában lévő kiértékelt elemek számát. Ezt a módszert gyakran alkalmazzák kétszemélyes játékok (pl.: amőba, sakk, go, stb.) esetén gépi játékos programozására. Egy adott lépés kiértékelését akkor szakítja meg teljesen, ha legalább egy válaszlépés bebizonyítja, hogy a lépés rosszabb, mint a korábban vizsgált lépés. Az ilyen lépések további vizsgálata felesleges. Ha egy hagyományos minimax fára alkalmazzák, akkor ugyanazt a lépést adja majd vissza, mint amit a minimax algoritmus adna, de kimetszi azokat az ágakat a fában, amik a kimenetet nem befolyásolják.¹



Az algoritmus két változót értékel ki minden lépésben, alfát és bétát. Az alfa érték reprezentálja azt a minimum pontszámot, amely az u.n. 'maximalizáló' játékos számára már biztosítva van, illetve a béta érték az a maximum pontszám, ami az u.n. 'minimalizáló' játékos számára biztosított. Kezdetben alfa értéke negatív végig, bétá pozitív végig, azaz mindenkét játékos a saját legrosszabb lépéssel indít. A fa rekurzív vizsgálata során folyamatosan változik az értékük a játékosok által garantáltan elérhető értékekre. Amint a bétá érték az alfa alá csökken az azt jelenti, hogy ez az állás (ha minden játékos részéről a legjobb lépéseket tételezzük fel) nem állhat elő, így további vizsgálatuk felesleges.

Az algoritmusokat a sakk szabályaihoz és sajátosságaihoz a MoveAlgorithm illeszti. Ez az osztály az alábbi funkciókat tartalmazza (egyéb kiegészítő, teszteléshez megírt függvényeken felül):

- Definiálja az egyes bábuk lehetséges lépései mezőkre lebontva, tehát az erre vonatkozó metódusok pontosan megadják, hogy az egyes bábuk melyik mezőkről melyikekre léphetnek. Példának okáért a gyalog esetén külön a fehér bábukra és külön a feketékre is meg van határozva (getPawnMoves(Coord c) függvény), hogy a kiindulási pontjukról az ellenfél irányába egyet vagy ketet is léphetnek. Bármely más esetben 1-et léphetnek előre (az ütések külön függvények definiálják, ezek elkülönítése a robotprogramozás esetén is kifejezetten előnyös).
- Az egyes bábuk lehetséges ütései külön függvények határozzák meg. A gyalog kivételével a többi bábunál ez megegyezik az előző pontban leírt lépésekkel.
- A bábuk játékhelyzettől függő összes lehetséges lépését, ütését a getRealMoves', a getRealAttacks' és a getRealAll' függvények adják vissza. Ezek kizártján azon lépéseket, melynél az adott játékos királya a lépés előtt és utána is sakkban áll. Ezt úgy vizsgálja meg a program, hogy adott játékállásban „meglépi” a kívánt lépést, majd ellenőrzi, hogy a király sakkban maradt-e.
- Itt találhatóak még az egyes játékállások „költségét” meghatározó függvények, amelyek által visszaadott értékek az algoritmusok működtetésének alapjait jelentik.

8.2. A chess.core csomag - a játék magja

A chess.core csomag definiálja az algoritmusok működtetéséhez nem szorosan kapcsolódó osztályokat. A fő fájl a ChessGame.java, ennek segítségével lehet egy játékot elkezdeni. A példányosításakor az alábbi inicializáló lépések futnak le:

1. A játék állapota inicializáltra változik (a játékállapotokról a chess.properties csomag kapcsán lesz bővebben szó).
2. Alapértelmezetten az Alfa-béta kereső algoritmus kerül beállításra. Ezt a játék során bármikor lehet módosítani a setAlgorithm' függvény segítségével.
3. A játékosok neve alapértelmezetten „Black” és „White”, ezt is bármikor lehet módosítani a játék közben. Kiindulásként a fehér játékos az ember, a fekete a robotkar, de a program viszonylag könnyedén átalakítható ha ezt meg szeretnékn cserélni.
4. A hagyományos sakkjátszmák során a játékosok egy sakkórát (8.2 ábra) használnak arra, hogy maximalizálják a játék idejét. Mindkét játékosnak előre meghatározott és beállított ideje van a gondolkozásra. Ha az adott játékos lépett, lenyom az órán egy kapcsolót, melynek hatására a másik játékos ideje telik addig, amíg ő is vissza nem kapcsolja az órát. A program két virtuális órát használ erre a célra, melyek indítása és megállítása automatikusan történik minden lépésnél.

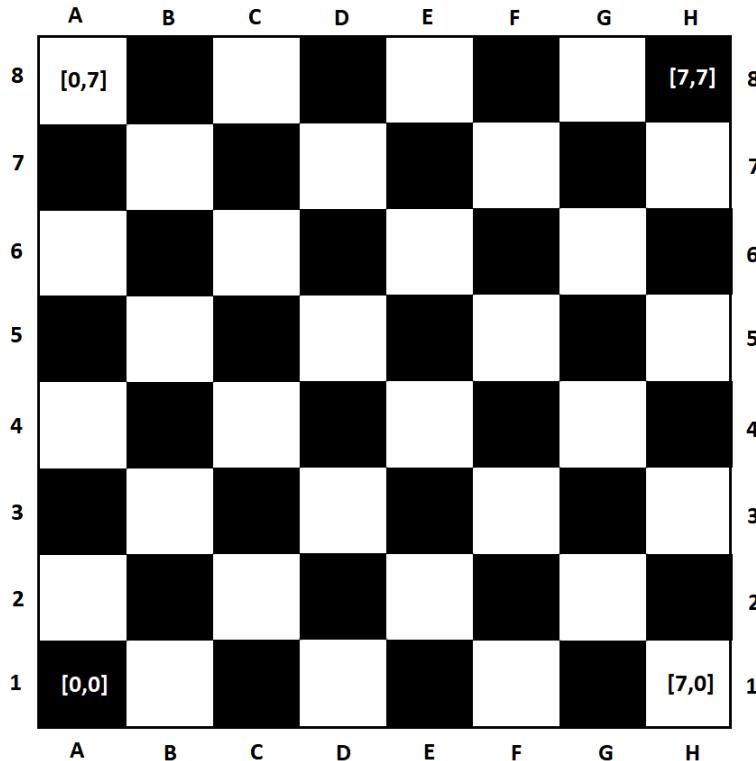


8.2. ábra: Hagyományos játékokhoz használt sakkóra - a piros zászló leesése jelzi, ha a játékos ideje elfogyott¹

5. A tábla és az alap felállás inicializálása a Board osztály példányosításával történik. Ez az osztály tartja számon, hogy melyik mezőn milyen bábu található, emellett praktikus okokból a két király jelenlegi helyzetét külön változókban tárolja.

¹A kép forrása: <https://www.polishchess.com/images/Foto%20szachow/CHCLK16%20GARDE%20CLASSIC/1.jpg>, 2018.11.25.

A báruk pozíciója kapcsán külön érdemes kiemelni, hogy a pozíciót a báruk koordinátája határozza meg. A lehetséges koordinátákat egy 8x8-as tömb jelképezi. A tömb [0,0] indexű eleme a tábla A1 mezője, a [7,7] pedig a H8 (8.3 ábra).



8.3. ábra: A sakktábla mezőihez koordináták rendelése

Létrehozni lépést a Move osztály példányosításával lehet. A konstruktur egy kezdő és egy végponti x és y koordinátát vár, amelyek a bábu kiindulási- és végkoordinátái. Azt, hogy egy lépés szabályos volt-e úgy lehet ellenőrizni, hogy meghívjuk a sakkjáték példányunk checkIfLegalMove' függvényét paraméterként átadva a lépést. Fontos, hogy a jelenlegi sakkjáték példányunkra hívjuk meg ezt a metódust, így biztos a pillanatnyi állás alapján dönt.

A lépések végrehajtása a szintén a ChessGame példányon belül implementált 'movePiece' függvénytelével lehet. Ez első körben értelemszerűen megváltoztatja a báruk helyzetét. Második lépésként az adott lépést hozzáadja a lépésekkel vezetett listához (a ChessTableModel osztály segítségével). Ezek után a program átállítja, hogy ki a soron következő játékos, elindítja az óráját és ellenőrzi, hogy véget ért-e a játék, azaz mattot adott-e valamelyik fél.

8.3. A chess.properties csomag - kiegészítő funkciók

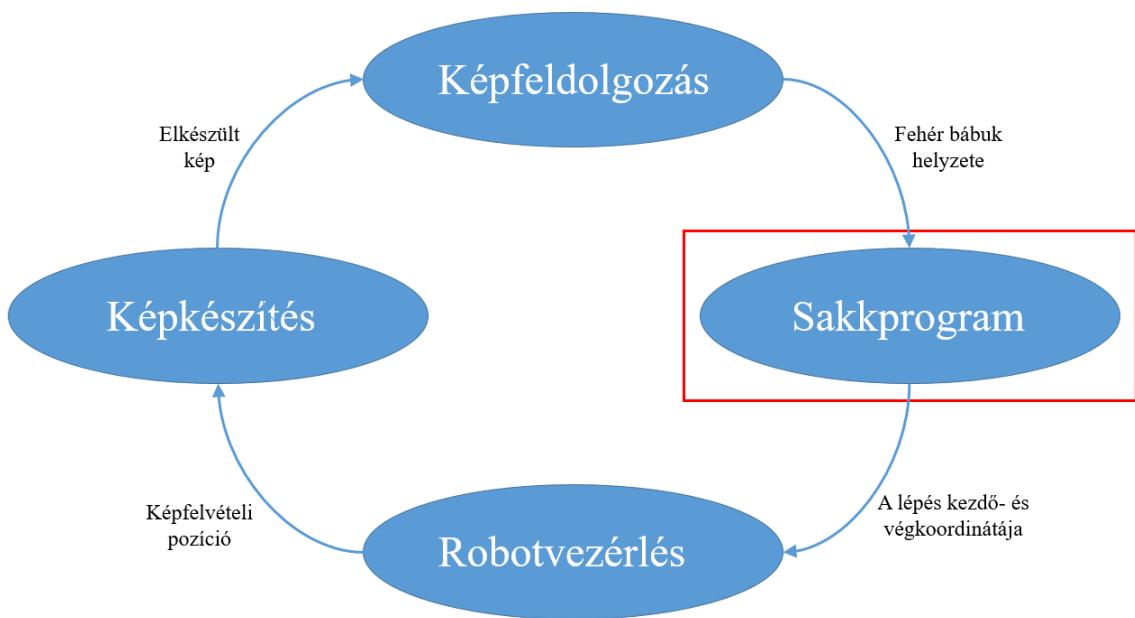
Ezen a csomagon tartalmaz számos a hagyományos sakkjáték végigjátszásához elengedhetetlen és néhány extra funkciót (a nélkülözhetetlen elemek ki lettek emelve a felsorolásban):

- **BoardParameters:** továbbfejlesztés részeként a smartPAD-en meg lehetne jelezni a jelenlegi állást. Ehhez hasznos függvényeket és beállításokat tartalmaz ez az osztály.
- **ChessColors:** az előző pontban említett megjelenítéshez különböző színdefiníciókat bocsát rendelkezésre.
- **ChessPreferences:** segítségével el lehet menteni a jelenlegi játékhelyzetet. A program képes tetszőleges helyzetből kezdeni egy játékot, tehát ennek segítségével lehetséges egy játék későbbi folytatása.
- **GameParameters:** itt lehet beállítani az adott játékhoz használt sakkalgoritmus paramétereit (az algoritmus kiválasztása, kereső fa szintjeinek száma). Ezen felül itt lehet a játéknak címet adni, ez tárolja a játékosok nevét és azt, hogy melyik játékos helyett játszik a gép.
- **State:** meghatározza a játék jelenlegi állását (Vége van-e? Meg lett-e állítva? Inicializálva lett-e már? stb.).

8.4. A sakkprogram kiegészítése a projekthez

Ahogy a 8.4 ábrán is látszik, a projekt megvalósításához a sakkprogramot össze kellett kötni a képfeldolgozást végző résszel és a robotvezérlővel. A képfeldolgozó rész meghatározza, hogy melyik mezőön helyezkednek el a fehér bábuk, ez a sakkprogram bemenete. A kimenete pedig a szükséges lépés kezdő- és végpontja (pl.: [0,0] mezőről a [0,7] mezőre). Ezek fizikai koordinátákra transzformálása már a robotvezérlőn futó főprogramban történik.

A képfeldolgozás kimenete egy 8x8-as tömb (mátrix), amely indexelése meggyezik a sakkprogramnál bemutatott mezőindexeléssel (8.3 ábra). Ez a tömb az ember lépése utáni állapotban mutatja a bábuk elhelyezkedését. Ahhoz, hogy a megtett lépést meg lehessen határozni, ezt az állapotot össze kell venni a lépés előttivel. A programban vezetett állást bármikor le lehet kérdezni (sakkjáték példány -> board -> b). A kapott elem egy 8x8-as tömb, amely egyes elemei vagy null értékűek vagy az ott található bábut írják le. minden bábu esetén le lehet kérdezni, hogy fekete-e vagy fehér (white: bábu boolean tulajdonsága - igaz ha fehér, hamis ha fekete). Ezek



8.4. ábra: A sakkprogram helye a folyamatban

alapján létre lehet hozni egy olyan logikai értékeket tartalmazó tömböt, amely formalag megegyezik a képfeldolgozó rész által szolgáltatott tömbbel.

A lépés előtti és utáni tömböket a 'FindMove' függvény értékeli ki. Elemenként hasonlítja össze a tömböket a program. Ha két elem megegyezik, az azt jelenti, hogy az ott lévő bábu nem mozdult el. Ha különbözik a két érték, akkor két eshetőség állhat fenn:

- a bábu ellépett onnan (lépés után 'false' a mező értéke) - ekkor ez a mezőkoordináta lesz a lépés kiindulópontja, vagy
- a bábu oda lépett (lépés után true' a mező értéke) - ez a mező a lépés végpontja.

Két fehér bábu egy kör alatt csak sánszoláskor mozdulhat el. Ezt az eshetőséget a lépés meghatározásakor külön meg kell vizsgálni. Mivel a fekete bábu pozícióját a sakkprogram követi, így nem igényel külön eljárás kialakítását az, ha a fehér játékos leüti a fekete egy bábuját. Ilyen esetben a leütött bábu pozíójához a lépés előtt 'false' érték tartozott, ezt a sakkprogram adja meg. A képfeldolgozó rész csak a fehér bábut keresi (azokon van csak zöld jelölő), így az ütés után a mező értéke true' lesz.

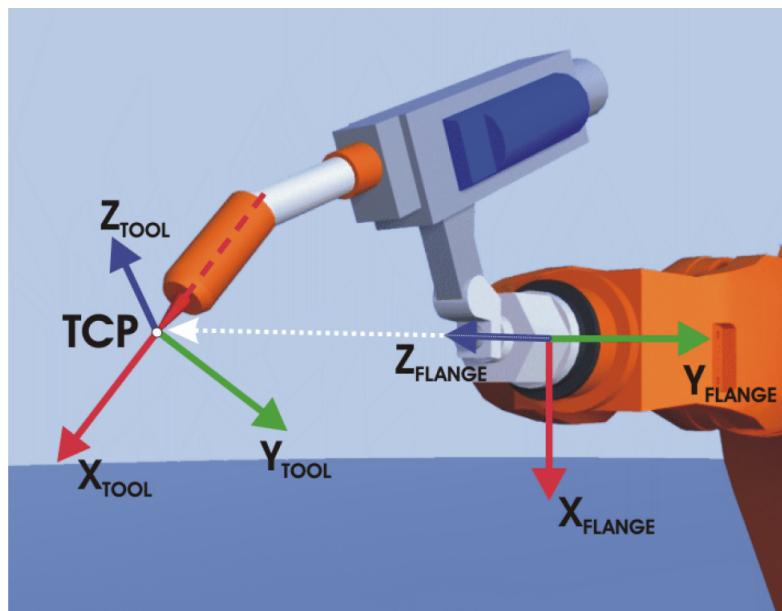
A lépés validálására érdemes meghívni a sakkjáték checkIfLegalMove' függvényét mielőtt a lépést a programban végrehajtjatnánk, mivel szabálytalan lépést is lehetne vinni.

9. ROBOTKAR KALIBRÁCIÓ, REFERENCIA FELVÉTEL KIDOLGOZÁSA

Ha a robotkarhoz szerszámokat szeretnénk csatolni vagy a mozgását a térben elhelyzkedő tárgyakhoz szeretnénk igazítani, akkor kalibrációs eljárásokat kell végrehajtani.

9.1. Koordinátarendszerek

Ha a robotkar pozíciójáról beszélünk, akkor elsősorban a végpontjának vagy az arra szerelt szerszámnak a pozíójára és orientációjára vagyunk kíváncsiak. Az ilyen elhelyezkedést a térben különböző koordinátarendszerekkel és a közöttük felírható transzformációkkal tudjuk jellemzni. A főbb koordinátarendszereket foglalja össze a 9.1 táblázat.



9.1. ábra: A TCP (Tool Center Point) elhelyezkedése[12]

Ahhoz hogy egy test pozíóját és orientációját definiálni tudjuk a térben legalább 6 lineárisan független koordinátára van szükség. A viszonyítási koordinátarendszerben felírt 3 transzlációs és 3 rotációs koordináta megfelel erre a célra.

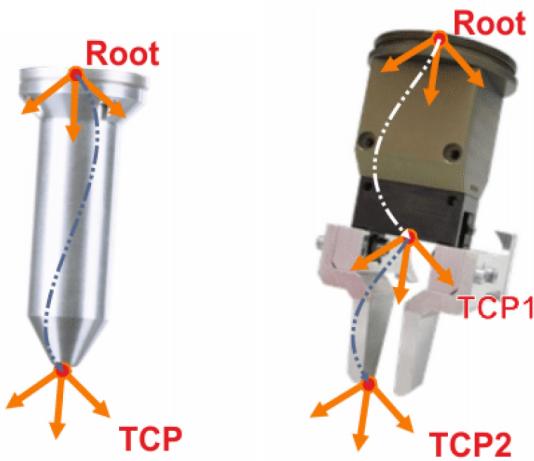
- Transzlációs vektorok:
 - X távolság: a referencia KR X tengelye mentén vett transzláció
 - Y távolság: a referencia KR Y tengelye mentén vett transzláció
 - Z távolság: a referencia KR Z tengelye mentén vett transzláció

- Rotációs vektorok:

- A szög: a referencia KR Z tengelye körül vett forgatás
- B szög: a referencia KR Y tengelye körül vett forgatás
- C szög: a referencia KR X tengelye körül vett forgatás

Koordinátarendszer (KR)	Leírás
Világ KR	A világ KR egy állandó, Descartes-i (Cartesian) koordinátarendszer. Ez minden más KR gyökere, mint például a bázis KR-é vagy a robot bázis KR-é. Alapértelmezetten a világ KR a robot bázispontjában található.
Robot bázis KR	A robot bázis KR-e olyan Descartes-i KR, amely a robotkar bázispontjában található. Ez definiálja a robotkar relatív helyzetét a világ KR-hez képest. Alapértelmezetten a robot bázis KR megegyezik a világ KR-rel. Meg lehet adni egy elforgatási vektort a Sunrise.Workbench-ben, amely definiálja a robot relatív forgatását a világ KR-hez képest. Alapbeállítésként a padlóra rögzített robot felszerelési orientációja: ($A=0^\circ$, $B=0^\circ$, $C=0^\circ$).
Bázis KR	Ahhoz hogy a Descartes-i térben mozgásokat definiálhassunk szükség van referencia KR (bázis) felvételére. Sztenderd módon a világ KR a mozgás bázis KR-e. További bázis KR-eket lehet definiálni a világ KR-hez képest. Ezt mutatja be a 9.3. fejezet.
Flange KR	A flange KR írja le a robot flange középpontjának a pozíóját és orientációját. Ennek az elhelyezkedése nem fix, a robottal együtt mozog. A flange KR használható a rá fogatott szerszámokhoz kötődő KR-ek origójaként. Például a szakdolgozat keretében a gripper egy jól definiált pontjára illesztett KR a robot flange KR-éhez kepést relatív lett megadva (9.1 ábra).
Szerszám KR	A szerszám KR az a Descartes-i KR, amely a felszerelt szerszám munkapontjára illeszkedik. Ezt hívják szerszám középpontnak (Tool Center Point - TCP). Bármennyi frame-ot lehet definiálni egy szerszámhoz és ezek mindegyike kiválasztható TCP-nek. A szerszám KR rendszerint a flange KR-ből származtatott.

9.1. táblázat: A főbb koordinátarendszerek



9.2. ábra: Szerszám 1 (balra) és 2 (jobbra) TCP-vel[12]

9.2. Szerszámkalibráció - XYZ 4-pont metódus

A sakkprojekt kivitelezése során szükséges a robotkarra szerelt megfogó kalibrálása ahhoz, hogy a pozícionálás minél pontosabb legyen. A robotkar szoftverében ez egy alapfunkció, kiegészítő csomag nem szükséges hozzá. A kalibrációs eljárás alapvetően 2 lépésből áll:

1. a TCP origójának meghatározásból,
2. az origóra illesztett koordinátarendszer orientálásából.

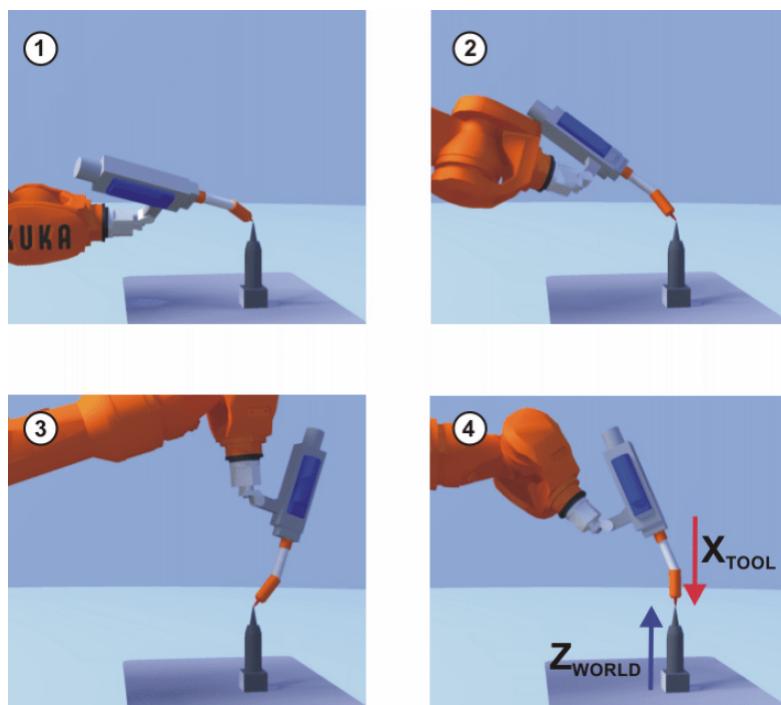
A második lépés jelen esetben elhagyható, megfelelő ha a TCP az orientációját a referencia KR-től örökli.

A TCP origójának meghatározására használt módszer: XYZ 4-pont metódus. Ehhez ki kell választanunk a szerszám egy adott pontját adott helyzetben (pl.: gripper egyik csúcspontja nyitott állásban); ez lesz a TCP. Az eljárás lényege, hogy a kalibrálni kívánt szerszám ezen pontját egy referenciaponthoz vezéreljük 4 különböző irányból. A referencia pont szabadon választható. A robot kontroller a különböző flange pozíiókból számolja ki a TCP helyzetét.

A 4 flange pozíció egymás közötti távolságainak meg kell haladniuk egy előre definiált minimumot. Ha a pontok túl közel vannak egymáshoz, akkor a pozíció adatokat nem lehet elmenteni. Erre hibaüzenet figyelmeztet.

A kalibráció minősége a transzlációs vektor hibájával mérhető, amit a program kalibráció közben számít ki. Ha ez a hiba meghalad egy definiált határértéket, akkor célszerű a TCP-t újból kalibrálni.

A minimális távolságok és a maximális számítási hiba a Sunrise Workbench-ben konfigurálható. Részletesebb leírás az eljárásról a megfelelő Sunrise.OS verzió manuáljában található[12].



9.3. ábra: XYZ 4-pont metódus 4 lépése[12]

9.3. Báziskalibráció - 3 pont metódus

A báziskalibráció során a felhasználó egy Descartes-i koordinátarendszert (bázis koordinátarendszert) rendel a bázisnak választott frame-hez. A bázis KR-nek a felhasználó által választott, tetszőleges helyen lehet az origója.

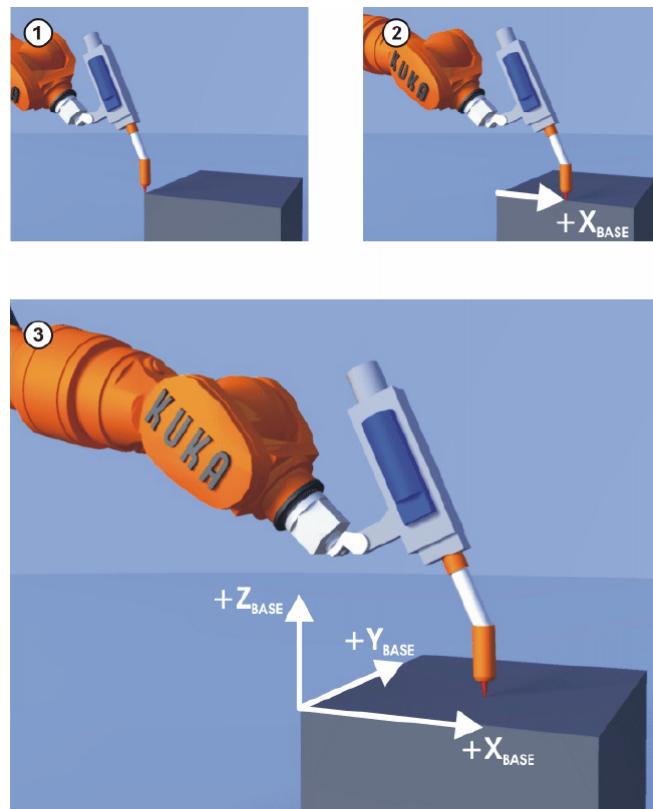
A bázis kalibráció előnyei:

1. A TCP végigvezérelhető a munkafelület szélein vagy egy munkadarabon.
2. A bázishoz viszonyítva lehet felvenni a szükséges pontokat. Ez a szakdolgozat során azért fontos, mert így nem kell a sakktábla egyes mezőihez tartozó pontokat külön felvenni, a pozíciókat meg lehet adni a bázisponthoz képest, ami lehet például a sakktábla egyik sarokpontja.

A 3-pont metódus során az origó és a bázis 2 további pontja kerül rögzítésre. Az origó felvétele után a kívánt X tengely pozitív felén egy tetszőleges pont rögzítése következik. Végezetül az XY sík első térnegyedébe eső, szintén tetszőlegesen választott pontot kell felvenni. Ez a 3 pont egyértelműen meghatározza a bázist.

A rögzített pontok origótól vett távolságának meg kell haladnia egy minimumot, illetve az egyenesek között is meg kell lennie egy minimum szögnek (origó - X tengely és origó - XY síkon felvett pont). Ha a pontok túl közel vannak vagy az említett szögek túl kicsik, akkor a pozíció adatokat nem lehet elmenteni. Erre hibaüzenet figyelmeztet.

A minimális távolságok és szögek a Sunrise Workbench-ben módosíthatók. Részletesebb leírás az eljárásról a megfelelő Sunrise.OS verzió manuáljában található[12].



9.4. ábra: Báziskalibráció 3-pont metódussal[12]

9.4. A szerszám tömegeloszlásának meghatározása

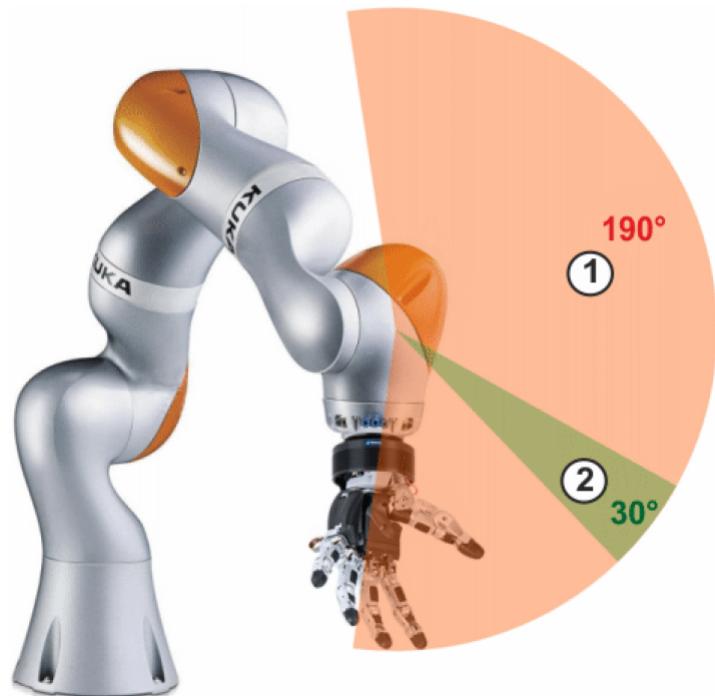
A robotkaron tengelyeiben ébredő többlet nyomatékokra meg lehet határozni egy maximális értéket, így ha a munkaterében lévő objektummal ütközik, detektálja és megáll. A robot saját tömegének dinamikus mozgatásához szükséges nyomatéka nem adódik hozzá ehhez a többlet nyomatékhöz. Adott szerszám robotkarra erősítésével viszont előfordulhat, hogy a maximális járulékos nyomatékérték átlépi valamelyik tengelyen a megengedett nyomatékértéket. Ezen hatás korrigálásához szükséges a szerszám tömegeloszlásának kalibrálása (a sakkbábuk, mint munkadarabok kalibrálása nem szükséges, azok tömege elhanyagolható).

A tömegeloszlás meghatározásához a robot először különböző méréseket futtat automatikusan a csuklótengelyek (utolsó három tengely: A5, A6, A7) mozgatásával. Ez alapján a robotkarra szerelt szerszám tömege és a tömegközéppontjának helye meghatározható. Másik lehetőség a szerszám tömegének megadása (például katalogus alapján), majd ez alapján a tömegközéppont helyének kalibrálása.

Az eljárás futtatásához nincs szükség plusz csomagra, a funkció a robotszoftver beépített eleme. A lépések a következők (automatikusan történik, a folyamat 1-2 percret vesz igénybe):

1. A folyamat kezdetén az A7 tengelyt a vezérlő a 0 pozícióba mozgatja. Ezen kívül az A5 tengelyt úgy pozicionálja, hogy az A6-os tengelyre többletnyomatékot a súly ne fejtsen ki. Ekkor a szerszám tömegközéppontja abba a síkba esik, amit az A6 tengely és a gravitációs térerősségvektor kifeszít.
2. A mérés futása során az A6 és az A7 tengelyek egy bizonyos tartományban vesznek fel helyzeteket:
 - Alapbeállításként az A6 tengely -95° és $+95^\circ$ közötti vesz fel pozíciókat. Ha a munkatér nem elég nagy ehhez a mozgástartományhoz, akkor ez a tartomány csökkenthető.
 - Az A7 tengely 0° és -90° között mozog.

A mérést befolyásoló tényezőkről információ a Sunrise kézikönyvében[12] található.



9.5. ábra: Az A6 tengely mozgástartománya: 1-es esetben teljes, 2-es esetben csökkentett tartomány[12]

10. ROBOTKAR MOZGÁSÁNAK DEFINIÁLÁSA ÉS PROGRAMOZÁSA

10.1. Biztonsági beállítások

Ahhoz hogy a robot működése során ne jelentsen veszélyt a munkaterében lévő emberekre és vagyontárgyakra, különböző biztonsági eszközök beszerelésére, illetve akitválására van szükség. A robotszoftverben implementált biztonsági funkciók között vannak módosítható és permanens elemek. Ezeket foglalja össze felsorolás jelleggel a 4.5.2 fejezet. A továbbiakban csak a projekt során is aktív elemek kerülnek tárgyalásra.

10.1.1. Vészleállító eszköz

Az ipari robot esetében a vészleállító eszköz (EMERGENCY STOP device) a smartPAD-en található vészleállító (10.1 ábra). Ezt a kapcsolót kockázatos szituációban vagy vész helyzetben kötelező benyomni.

Ha az operátor benyomta a vészleállító gombot, akkor a robotkar Safety stop 1 (path-maintaining) (leírás a 4.4 táblázatban) megállást hajt végre. Az EMERGENCY STOP eszközt el kell csavarni ahhoz, hogy a műveletek folytatódhassanak.

10.1.2. Engedélyező eszköz

A robotkar esetében az engedélyező eszközök (enabling devices) a smartPAD-re szerelt engedélyező kapcsolók. 3 ilyen kapcsoló található a smartPAD-en (10.1 ábra). Ezek mindegyikének 3 állása van:

- Nem behúzott
- Középső pozíció
- Teljesen behúzott (pánik pozíció)

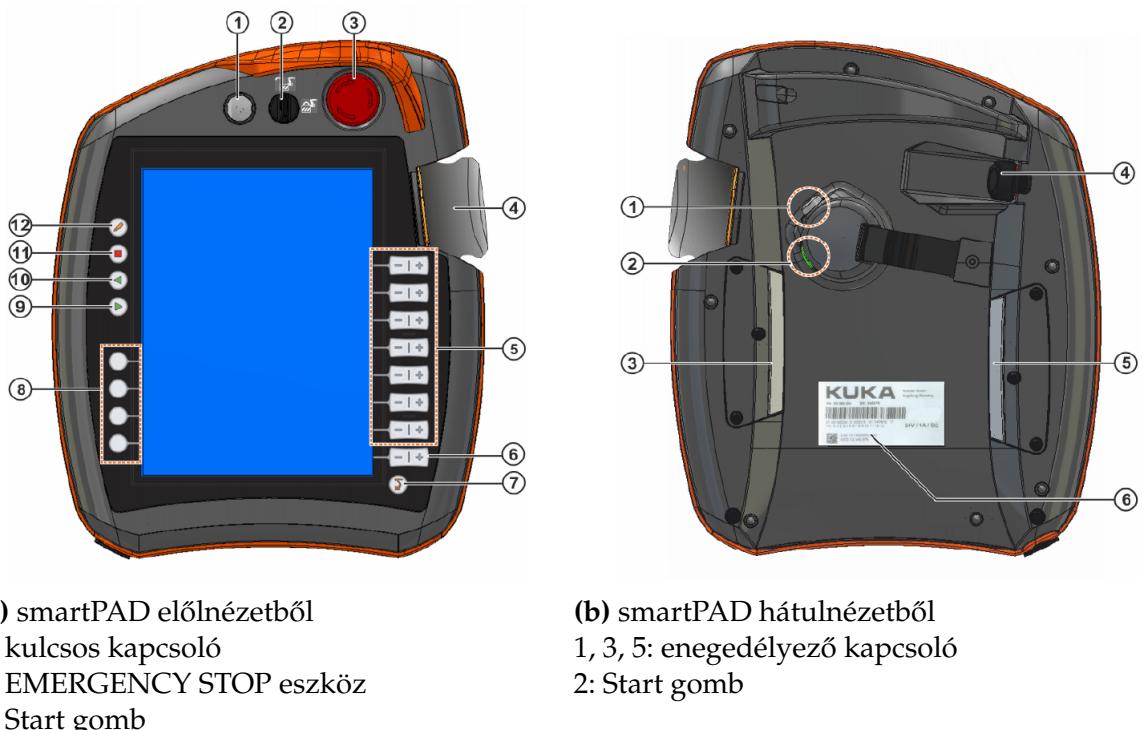
A teszt módokban és CRR esetén (4.4) a robotkar csak akkor mozgatható, ha legalább 1 engedélyező kapcsoló középső állásban van.

- Az engedélyező kapcsoló elengedése Safety stop 1 (path-maintaining) megállást fog okozni.
- A kapcsoló teljes behúzása is ugyanilyen megálláshoz vezet.

- 2 engedélyező kapcsolót a középső pozícióban tartani lehetséges néhány másodpercig. Ez lehetőséget ad arra, hogy az operátor fogást váltszon. Ha 2 engedélyező kapcsoló párhuzamosan középső pozícióban van tartva 15 másodpercnél tovább, az szintén Safety stop 1 (path-maintaining) megállást fog okozni.

Ha az engedélyező kapcsoló a középső állásban ragad, akkor a következő lehetőségek állnak rendelkezésre:

- a kapcsoló teljes behúzása,
- az EMERGENCY STOP eszköz benyomása,
- illetve a Start gomb elengedése



10.1. ábra: KUKA smartPad[12]

10.1.3. Operációs mód rögzítése

Ahhoz hogy a robot mozgása közben ne lehessen operációs módot váltani (pl.: T1 módból T2-be), a smartPAD-en található egy kulcsos kapcsoló (10.1 ábra). Ennek előfordítására a robot megáll, ekkor lehet tetszőleges operációs módot választani. Ezeket a 4.4 táblázat részletesen tartalmazza.

10.1.4. Megállást előidéző események

A sakkprojekt során az alábbi események megállást idézhetnek elő a program futása során (a csillagozott elemek permanensen a robotszoftverbe vannak programozva, ezeket módosítani nem lehet):

- operációs mód váltás történt mozgás közben*,
- az engedélyező kapcsolót elengedték*,
- az engedélyező kapcsolót teljesen behúzták*,
- a smartPAD-en található EMERGENCY STOP eszközt benyomták*,
- a tengelyekre előírt maximális többletnyomatékot valamelyik tengelyen meghaladja a terhelés.

10.2. Mozgástípusok elméletben

Ez a fejezet bemutatja a mozgások programozásának elméleti szabályait. A szakdolgozat során programozott elemeket a 10.3 fejezet tárgyalja.

10.2.1. Mozgástípusok áttekintése

Több egymás utáni mozgás végrehajtása során a mozgás kezdőpontja minden az előző végpontja. A következő mozgástípusokat lehet beprogramozni különálló modulatokként:

- Point-to-point (PTP, Ponttól pontig)
- Lineáris mozgás (LIN)
- Körkörös mozgás (Circural motion, CIRC)
- Manuális vezetés kézi vezető eszközzel

A következő mozgástípusokat lehet beprogramozni a CP („Continuous Path” - „folytonos út”) spline¹ blokk[12] részeként:

- Lineáris mozgás (LIN)
- Körkörös mozgás (Circural motion, CIRC)
- Polinomiális mozgás (SPL)

¹A mozgatott pont spline mentén halad a térben

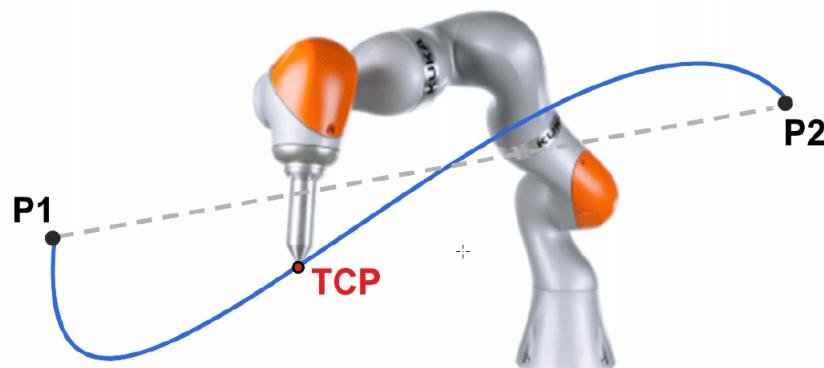
JP („Joint Path” - „tengely út”) spline¹ blokk[12] programozásakor PTP elemeket lehet használni.

A LIN, CIRC, SPL, CP spline blokk mozdulatok CP („Continuous Path”) típusúak, míg a PTP és a JP spline blokk JP („Joint Path” - „tengely út”) típusúak.

10.2.2. PTP mozgástípus

A robot a TCP-t a leggyorsan úton vezeti el a végponthoz. A leggyorsabb út általában nem egyezik meg a térbeli legrövidebbel, tehát nem egy egyenes (10.2). A görbe útvonalak lekövetése gyorsabb az egyenesnél, mivel a robot tengelyei forogva és szimultán mozognak.

PTP a gyors pozicionáló mozgás. A mozgás pontos útvonala nem előre megjósolható, de többszöri futtatásra is ugyanazt az útvonalat követi le, feltéve ha az általános feltételek nem változtak.

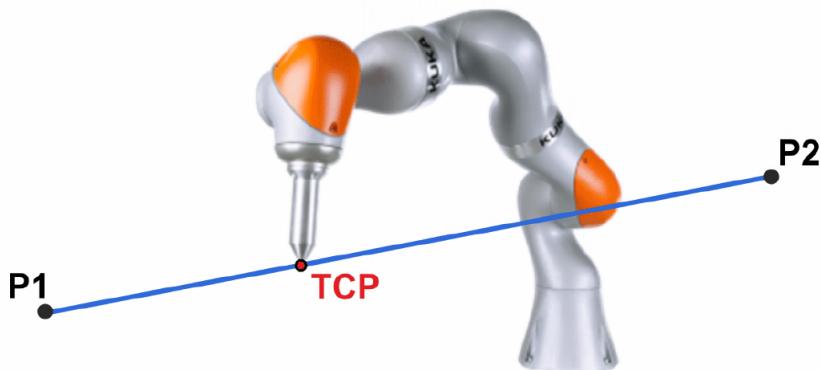


10.2. ábra: PTP mozgás[12]

10.2.3. LIN mozgástípus

A robot a TCP-t egy térbeli egyenes mentén mozgatja a végponthoz. A LIN mozgás során a végpozíció konfigurációját a program nem veszi figyelembe.

¹Mivel a robotkar 7 tengellyel rendelkezik, a mozgása közben a tengelyek állása nem egyértelmű. JP spline blokk kivitelezésénél a tengelyek szögsebessége folytonos, így egy kedvezőbb dinamikájú mozdulatsort visz véghez.



10.3. ábra: LIN mozgás[12]

10.3. A robotkar mozgatása

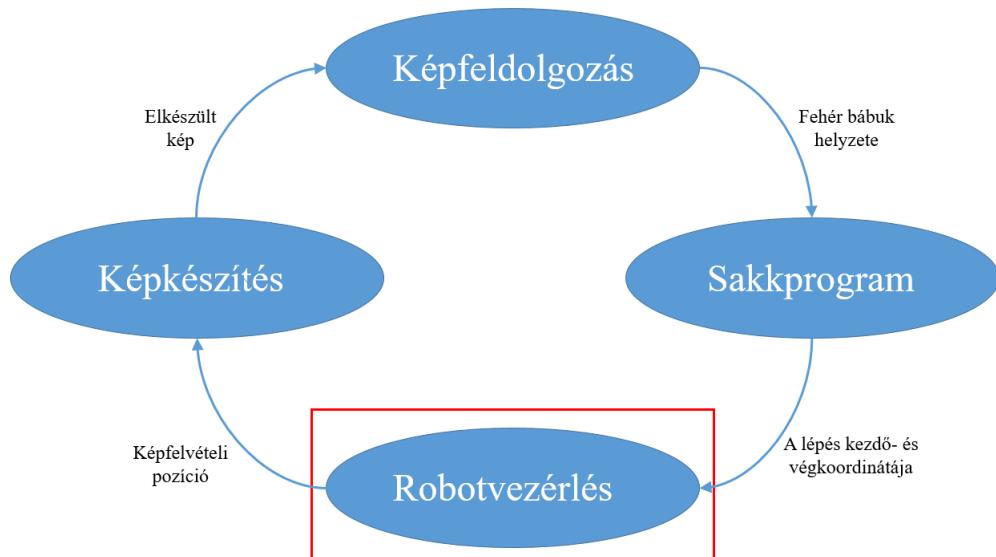
A projekt során a robotkarral egyszerű mozgásokat kellett végeztetni. Nem volt szükség bonyolultabb görbék és felületek lekövetésére, csak ponttól pontig mozgásra.

A robot mozgása szekvenciálisan ismétlődik, ennek lépései a következők:

0. a robotkar képfelvételi pozícióba vezérlése (a normál játékmennet közben mindenkorábban ebből a pozíóból indul, nem kell ide irányítani)
1. a sakkprogram által meghatározott lépés kezdőmezője fölé irányítása
2. csökkentett sebességgel a bábuért lenyúlás, majd a gripper záródása után szintén csökkentett sebességgel visszaemelés
3. a lépés végpontja fölé vezérlés
4. redukált sebességgel a bábu lerakása, majd a gripper kinyílása után szintén redukált sebességgel visszaemelkedés a bábu fölé
5. képkészítési pozícióba való visszatérés

A szakdolgozat keretében megírt program nem keresi meg automatikusan az ideális képkészítési pozíciót (továbbfejlesztési irány), ezt kézzel kell megtennünk. Erre a csuklók direkt vezérlése is alkalmas, de praktikusabb egy tetszőleges koordinátarendszerben XYZ tengelyek mentén mozgatni (például a sakktábla sarkán felvett bázis KR-ben).

Ahhoz hogy a kamera látóterébe az egész kalibrációs tábla beleessen a robotkarnak viszonylag magasra kell nyúlnia. Ezt a 7, illetve a 14 kilós iiwa robotkar mozgástere is megengedi. Kisebb méretű robottal a projekt megvalósításához nagyobb látószögű kamerára vagy több képkészítési pozícióra lenne szükség.



10.4. ábra: A robotvezérlés helye a folyamatban

Praktikus lehet egy olyan frame betanítása, ahol az orientáció olyan, ahogyan a robotkarnak a bábut meg kéne fognia. Erről a frame-ról másolatot készítve annak X, Y és Z koordinátáját külön-külön be lehet állítani. A sakktábla bázispont és ez a frame alapján a tábla összes mezőjéhez lehet generálni egy alsó megfogó helyzetet (ahol a megfogó két pofája összezárodik) és egy felsőt, ahová a képkészítés után megy. Az alsó megfogó helyzet a gripper TCP-re vonatkozik, a robotkar mozgatásához célszerű ezt a pontot irányítani.

A hagyományos sakktábla 8x8-as, az alsó és felső pozíciót is beleszámolva ez 128 generált frame-et jelent. Ezek kiszámítása nem különösebben időigényes, de áttekinthetőbb a programkód, ha ezekből a fizikai pozíciókból a sakkprogramhoz hasonlóan egy (az alsó és felső helyzet miatt 2) 8x8-as tömböt építünk fel a sakkprogramhoz hasonló indexeléssel. Mivel a sakktábla méretei ismertek, ezt 2 egymásba ágyazott for ciklussal meg lehet oldani, a bázis koordinátarendszerhez a megfelelő offszetet hozzáadva.

A projekt során a megfogópofa egyik sarokpontja lett betanítva TCP-nek, így szükség van még egy plusz offszetre ahhoz, hogy a robotkar mozgatásakor a megfogó középvonal kerüljön a mező közepe fölé, ne pedig a TCP (9.3 ábra).

A bábuk mozgatására érdemes külön függvényt írni, ami fogadja a sakkprogram által visszaadott kezdő- és végpont indexeket, majd ez alapján az adott bábut át helyezi a megfelelő mezőre. A főprogramban implementált 'MovePiece' függvény ezt a célt szolgálja. A bábuk emelésekor és letételekor érdemes a PTP mozgatás helyett a LIN-t alkalmazni, mivel annak tetszőlegesen állítható a sebessége¹.

¹A PTP esetén is meg lehet adni egy százalékos sebességredukciót a tengelyekre.

11. A MEGFOGÓ VEZÉRLÉSE

11.1. A vezérlés hardveres kialakítása

Ahhoz hogy a megfogót (grippert) a robotvezérlőn futó programból lehessen irányítani, több kiegészítő eszközre is szükség van a gripperen és a vezérlőegységén kívül. Többféle konstrukcióval is el lehet érni ezt a célt. A projekt során használt összeállítás elemei (11.1 ábra):

- *Megfogó (gripper)*: párhuzamosan mozgó, két pofajú, elektromos megfogó; pontos típusa: SCHUNK MEG 50 EC[14].
- *Grippervezérlő*: a megfogóhoz tervezett vezérlő; pontos típusa: SCHUNK Controller MEG EC[14]
- *Analóg és digitális I/O modulok*¹: a robotvezérlő ezen modulok segítségével tudja irányítani a grippervezérlőt. A felhasznált eszközök Beckhoff gyártmányúak. Pontos tipusaik:
 - EL1809: 16 csatornás, digitális bemeneti modul²
 - EL2809: 16 csatornás, digitális kimeneti modul³
 - EL3002: 2 csatornás, analóg bemeneti modul⁴
 - EL4032: 2 csatornás, analóg kimeneti modul⁵
- *EtherCAT⁶ Coupler*: az I/O modulok az ú.n. E-bus-on keresztül kommunikálnak. Ahhoz hogy a robotvezérlőhöz lehessen kötni az E-bus-t, EtherCAT Coupler-re van szükség. Pontos tipusa: Beckhoff EK1100⁷.
- *Tápegység*: a fentebb felsorolt eszközök mindegyike 24 V megtáplálást igényel, ezt a projekt során egy Siemens tápegység szolgáltatja.

¹I/O ((Input/Output): bemeneti és kimeneti modulok

²<https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/el1809.htm>, 2018.11.10.

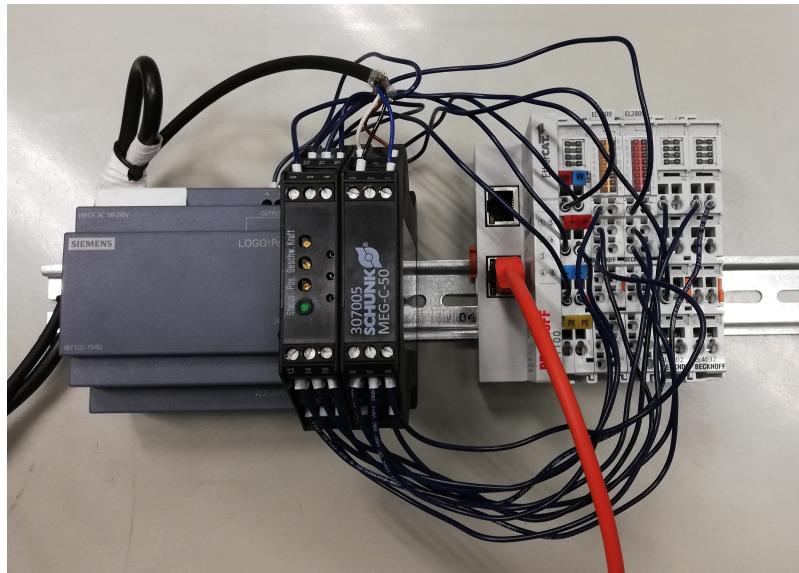
³<https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/el2809.htm>, 2018.11.10.

⁴<https://www.beckhoff.hu/english.asp?ethercat/el3002.htm>, 2018.11.10.

⁵<https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/el4032.htm>, 2018.11.10.

⁶Általános ismertető az EtherCAT-ről: <https://en.wikipedia.org/wiki/EtherCAT>, 2018.11.09.

⁷<https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/ek1100.htm>, 2018.11.10.



11.1. ábra: Kép a megfogóhoz tartozó konstrukcióról

11.2. A megfogó szoftveres konfigurációja

KUKA SunriseOS esetén (és általánosságban a KUKA robotok esetén) a különböző bemeneti, kimeneti és kommunikációs csatornák kezelésére I/O konfigurációs fájl generálására van szükség. Ezeket a fájlokat a KUKA WorkVisual nevű program segítségével lehet létrehozni és szerkeszteni. Adott KUKA SunriseOS-hez meghatározott a kompatibilis Sunrise Workbench verzió (ebben a programban a legegyszerűbb a robotvezérlőn futó program megírása, feltöltése). Adott Sunrise Workbench verzóval kompatibilis WorkVisual verzóra vonatkozó információkat a Sunrise Workbench-et megnyitva a Help->Sunrise.OS Release Notes menüpont alatt találunk. A szakdolgozathoz felhasznált szoftverek és környezet:

- SunriseOS 16
- Work Visual 5.0.5 build600
- Windows 10 a PC-n

A megfelelő IOConfig elkészítéséhez az alábbi lépések szükségesek:

1. Ahhoz hogy a WorkVisual verziót összekössük a Sunrise Workbench-csel importálni kell a Workbench-hez tartozó Sunrise.kop fájl a WorkVisual-ba. Ez a fájl a telepített Workbench verzióhoz tartozó mappán belül a 'WorkVisual AddOn' nevű almappában található. Az importálás menete: WorkVisual->Extras->Option package management->Install... gomb. A felugró ablakban lehet ki-választani a megfelelő Sunrise.kop fájlt és telepíteni. Ahhoz hogy az egyes

Beckhoff modulokkal lehessen kommunikálni szükség van a Device description file'-ok importálására. Ezek a fájlok a gyártó oldaláról letölthetőek¹. A (XML) fájlok importálásához a WorkVisual->Import / Export->Import device description file lehetőséget kell választani (ezt a műveletet adott eszközön csak egyszer kell elvégezni, új projekt esetén ezt a lépést már ki lehet hagyni). A megfelelő fájlok kiválasztása és importálása után szükség van a DTM Catalog frissítésére (WV->Extras->DTM Catalog Management->Search for installed DTMs). A fájlok használatához a 'Known DTMs' részről át kell emelni az elemeket a Current DTM Catalog' részre (11.2).

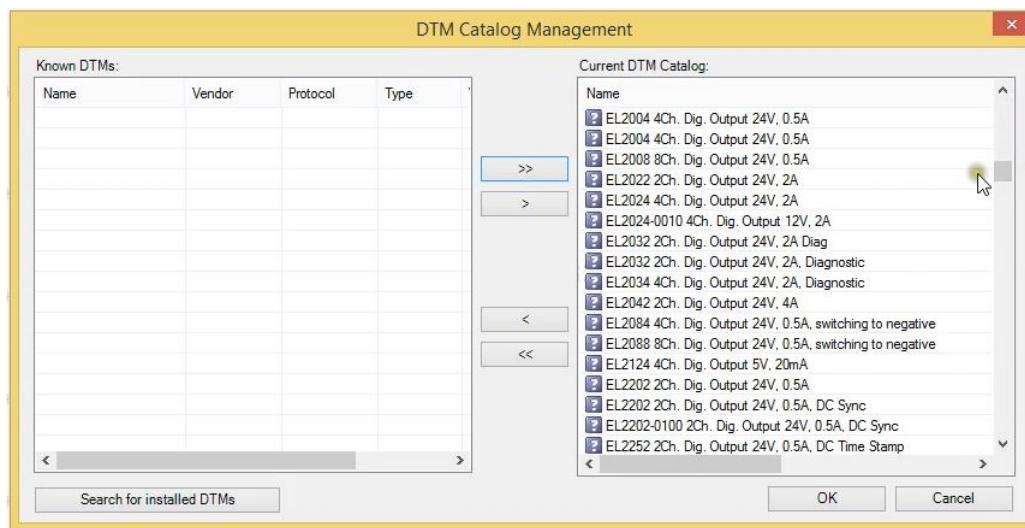
2. A Sunrise Workbench-ben új projekt létrehozása után a projektre jobb egérgomb->New->I/O Configuration. A WorkVisual automatikusan elindul. A projektre jobb egérgombbal kattintva (WV-ban) a 'Set as active controller' lehetőséget kell választani. A busz struktúrákhoz hozzá kell adni a 'KUKA Extension Bus (SYS-X44)' elemet ahhoz, hogy az EtherCAT kommunikációt inicializáljuk a robotvezérlőben. Ehhez adhatjuk hozzá az EK1100 EtherCAT Coupler-t, ami az összeköttetést biztosítja a robotvezérlőben található EtherCAT hálózat és a modulok között (E-bus). Az egyes modulokat ehhez adhatjuk hozzá a programban. **Fontos:** az egyes fájlokat olyan sorrendben kell hozzáadni, ahogy azok fizikailag kapcsolódnak egymáshoz (11.3 ábra).
3. Ahhoz hogy ezeket a be- és kimeneteket a Sunrise Workbench-ben használni tudjuk szükség van Sunrise I/O Group létrehozására (VW->IO Mapping->Sunrise I/Os->Creates signals at the provider). Az I/O Group-nak tetszőleges nevet adhatunk. Az egyes be- és kimenetek kezeléséhez létrehozhatunk változókat az I/O Group-on belül. A gripper nyitásához és zárásához alapvetően 3 változó deklarálása elegendő²), pl.:
 - OpenGripper: bool, output, digital
 - CloseGripper: bool, output, digital
 - Status: bool, input, digital

Az egyes változókat a kívánt bemenetekkel és kimenetekkel Drag and drop módszerrel lehet összerendelni (11.4). Megfelelő összekötés esetén a változók melllett szürke nyilak zölddé változnak.

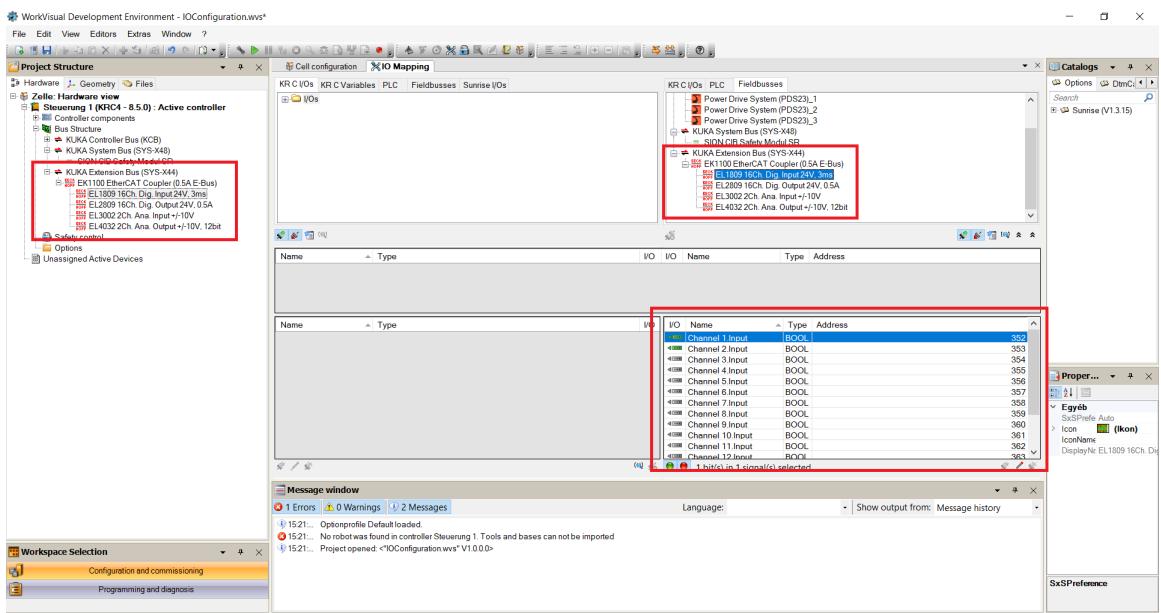
¹Device description files: <https://www.beckhoff.com/english.asp?download/elconfig.htm>

²A gripper nyitásához és zárásához elegendő csak a digitális ki- és bementeket használni, de például a pozíció követéséhez használni kell analóg bemeneti modult, a fogóerő programból történő beállításához pedig analóg kimeneti modult.

4. Az elkészült I/O konfigurációt exportálni kell ahhoz, hogy a Sunrise Workbenchben használni lehessen (WV->File->Import / Export->Export I/O Configuration to Sunrise Workbench project). A Workbench-ben ezek után megjelenik az src' mappában egy ioAccess nevű csomag. Ezen belül található az IO Group-hoz tartozó osztály (pl.: GripperControlIOGroup.java). Ez tartalmazza a szükséges metódusokat a gripper vezérléséhez, ezeket lehet meghívni a programból.



11.2. ábra: Az xml fájlok sikeres beimportálása után láthatjuk a Device description fájlokat



11.3. ábra: Az EtherCAT konfiguráció

11.4. ábra: Az I/O változók hozzárendelése a be- és kimenetekhez

12. EREDMÉNYEK, TOVÁBBFEJLESZTÉSI IRÁNYOK

A projekt 4 főbb modulból áll (képkészítés, képfeldolgozás, sakkprogram és robotvezérlés), ezeket kellett összekötni ahhoz, hogy sakkozásra képessé lehessen tenni a robotkart az 5 fejezetben bemutatott konstrukcióval. A projekt összesített értékelését a 13. fejezet tartalmazza. Ebben a fejezetben az egyes modulok korlátai, kiforrotsága, megbízhatósága és továbbfejleszthetősége kerül taglalásra.

12.1. Képkészítés értékelése

A robotvezérlő (KRC4) (és a rajta futó szoftver) kompatibilis a választott Logitech C270 HD webkamerával. A kamerát egyszerűen a robotvezérlőn található USB beemenetek valamelyikére lehet kötni. A robotkar és a robotvezérlő több méteres távolsága miatt USB hosszabító kábelre van szükség, 2 méteres passzív toldókábelrel kommunikációs hiba nélkül üzemel a kamera.

A kamera kezelő osztály (CameraHandler.java) HD képes webkamera kezelésére lett kialakítva. minden bizonnal egyéb képkészítésre alkalmas eszközök is tudna kezelni, de ez további teszteket igényelne. A kamera megnyitási ideje erősen változó lehet a tipus függvényében: a Logitech kamera esetén ez pár másodperc, míg a Microsoft kameránál fél vagy 1 perc is lehetett. A Windows alapfunkciójaként elérhető kamera alkalmazás mindenkorábban kamerát 1-2 másodperc alatt megnyitotta, szóval az OpenCV kamerakezelésében lehet különbség.

Továbbfejleszthető ez a modul:

- a felbontás és képarány automatikus választásával,
- több csatlakoztatott kamera esetén a megfelelő kiválasztásával,
- illetve a torzítások ellensúlyozásával.

12.2. Képfeldolgozás megbízhatósága

A képfeldolgozás alapvetően 2 elemből áll: a mezőkalibrációból és a fehér bábuk kereséséből.

A mezőkalibráció főként a kalibrációs sakktáblamintán található sarokpontok kereséséből áll. Ezek alapján történik a mezőkről (Pontosabban a bábuk tetejéről) készült képek kivágása. Az OpenCV 2.4.13.6-os verzióján a 3.4.4 megbízhatóbban működik, ugyanazon a képen megtalál olyan sarokpontokat, amiket a régebbi verzó nem. A sarokpontok megtalálása nem csak a kalibrációs tábláról alkotott képrészlet minőségétől függ, hanem a képen található egyéb mintázatoktól is, főként ha annak vonalai kontrasztosak. A kalibrációs képet utólagosan lehet módosítani, hogy a sakktáblán kívüli részt adott színnel ki legyen töltve. Ezt manuálisan kell megtenni.

A fehér bábuk keresése a mezőkről kapott képeken belüli színszűrésen alapszik. A módszer RGB színskálát használ a zöld színű részek megtalálására, ami átlagosnak mondható fényviszonyok között kifejezetten jól működik. Rosszabb fényviszonyok között nem lett tesztelve a módszer, de ilyen esetben a HSV színskála használata (az RGB helyett) előnyösebb lehet. A tesztelt fényviszonyokkal a képek körülbelül 50%-át tölti ki zöld szín, ha ott fehér bábu található (a tetejükre zöld lap van ragasztva). Ez alapján a bábuk pozíójának kiértékelése egyszerű.

Továbbfejleszthetési irányok:

- A projekt kidolgozásának idején az OpenCV egy újabb verzióját is kiadták, érdemes lehet azt beépíteni a programba.
- A kamerapozícionálás során a megtalált sarokpontok szinekkel megjelölése (kvázi valós időben) elősegítené a megfelelő pozíció megtalálását, illetve a megfelelő pozíció megtalálását automatizálni is lehetne.
- Az 7.3 fejezetben ismertetett QR kód alapú eljárás kidolgozása további funkciókat tenne elérhetővé.

12.3. A sakkprogram értékelése

A sakkprogram elsődleges forrása egy kész, Java alapú, felhasználói interfésszel rendelkező program volt, ebből lettek a projekthez szükséges elemek kiemelve. További függvényekkel kellett kiegészíteni ezt a programrészletet ahhoz, hogy a képfeldolgozó és a robotvezérlési modulokkal kompatibilis legyen.

Az sakkprogram magja fel van készítve arra, hogy egy teljes sakkjátszmát le lehessen játszani, viszont a képfeldolgozási résszel összekötés olyan módon lett implementálva, amely a sáncolást nem tudja ilyen formában felismerni és kezelní. Ez a probléma pár függvénykibővítéssel megoldható.

A sakkprogram által használt algoritmus tetszőlegesen módosítható lenne játék közben is, de ennek kezelésére nem készült külön felhasználói bemenet. Jelenleg a sakkprogram kódjának megváltoztatásával lehet ezt állítani.

A program beépített virtuális sakkórát is használ, emellett a játékosok nevei is személyre szabhatóak (ezt a nevet írja ki a program bármely játékoshoz kötődő esemény kiíratásánál). A sakkprogram magja képes lenne adott játékállásból folytatni egy játékot, illetve elmenteni az adott állást.

Ezzel a modullal kapcsolatos legjelentősebb fejlesztési irány a smartPAD-re ki-dolgozott felhasználói interfész kifejlesztése, így lehetőség nyílna játék közben a különböző paraméterek állítására, illetve a folyamatok monitorozására.

12.4. A robotvezérlés értékelése

12.4.1. A megfogó irányítása

A robotvezérlő EtherCAT kommunikációt használó, digitális és analóg I/O modulok segítségével tudja vezérelni a megfogót. A jelenleg implementált funkcióhoz elég csak a digitális modulok használata, de az analóg modulokra is szükség van az összes gripperfunkció kihasználáshoz.

A pozícióvisszacsatolás segítene eldönteni, hogy a megfogónak ténylegesen sikerült-e megfognia a bábút. A szorítóerő beállítása jelenleg hardveresen történik, de ezt a programból is lehetne vezérelni.

12.4.2. A robotkar vezérlése

A robotkar kalibrálása a sakktáblához gyorsan kivitelezhető. A robot képes a képkészítési pozíció ismételt felvételére, illetve a sakkalgoritmus által meghatározott lépések kivitelezésére, leszámítva azokat a lépéseket, amikhez több bábú mozgatása is szükséges (ütések, sáncolás, en passant). Ezen lépések implementálása nem ütközik hardveres problémába, így viszonylag könnyen megvalósíthatóak.

Továbbfejleszthető elemek:

- Ha a robotkar ütközés hatására megáll, akkor jelenleg csak manuálisan lehet visszatéríteni az eredeti program folytatásához. Ezt a visszavezetést a programból is meg lehetne oldani.
- A robotkar jelenleg a robot bázis koordinátarendszerben mozog, de praktikusabb lenne a sakktáblához rendelt bázist használni. Ekkor a folyamatok a sakktábla különböző irányú dőléseire sokkal kevésbé lennének érzékenyek.

- A sakktábla bázispontjának felvétele „handguiding” (kézi vezetés) használataval gyorsabb és kényelmesebb lenne.

13. ÖSSZEFoglalás

A szakdolgozat keretében megvalósított projekt célja egy emberrel kollaboratív mun-kavégzésre képes robottal bemutató alkalmazás készítése. Ez az alkalmazás egy sak-kozó program, amelyet a robotvezérlőn futtatva lehetőség nyílik a robotkar ellen egy sakkjátszma lejátszására.

A projekthez egy KUKA gyártmányú LBR iiwa 7 robotkar és egy KRC4 (KUKA Robot Controller 4) robotvezérlő került felhasználásra.

A bábukat a robotkarra erősített, elektromos megfogó[14] ragadja meg. A meg-fogót vezérlő egységet a megfogóhoz gyártották[14]. Ahhoz hogy a robotkontroller tudjon utasításokat adni a megfogó vezérlőjének, szükség volt EtherCAT-en kom-munikáló, digitális (a továbbfejlesztéshez analóg is) bemeneti és kimeneti modulok-ra.

A robotprogram az ember egyes lépéseiit képfeldolgozási eljárásokkal határoz-za meg. A képek készítéséhez egy HD felbontású webkamera lett a robotvezérlőhöz csatlakoztatva USB porton keresztül (külön illesztőszoftver offline telepítésére szük-ség volt). A kamera a robotkarra, a megfogó oldalára lett rögzítve, így a robotkarral együtt mozog.

A képfeldolgozási eljárás kalibrálásához szükség van a tábla cellaméreteivel ren-delkező, viszont nem 8x8-as, hanem 10x9-es sakkmintás kalibrálótáblára. Az erről felvett kép alapján tudja meghatározni a program, hogy később a sakktábláról kés-zült képeken melyik mezőt (és bábut) hol keresse. A képfeldolgozó rész és a ki-bővített sakkprogram együttesen vissza tudja adni a fehér bábuk (amivel az ember játszik) lépésein.

A projekthez felhasznált sakkprogram alapját egy már kész, felhasználói felü-lettel rendelkező program adta. Ebből kerültek a projekthez szükséges elemek ki-emelésre. További kiegészítő funkciókra volt szükség ahhoz, hogy a képfeldolgozó modul által szolgáltatott információkat (fehér bábuk helyzete) fel tudja dolgozni. A megtett lépésekre különféle algoritmusok alapján képes válaszlépést meghatározni.

A robotkar a sakkprogrammal generált lépéseket képes végrehajtani, viszont az olyan mozdulatokra még nincs beprogramozva, mint ellenfél egy bábujának leütése, sánc vagy en passant. minden lépése után képfelvételi pozícióba áll, és amikor az ember visszajelzett számára, hogy lépett, akkor készít a program képet a jelenlegi állásról, majd ezt dolgozza fel.

A programon futó folyamat ciklikus, lépései:

1. kép készítése az állásról
2. kép feldolgozása, az ember által tett lépés meghatározása

3. válaszlépés generálása
4. a robotkarral (és a megfogóval) a válaszlépés végrehajtása
5. a robotkarral a képkészítési pozíció felvétele

Mindent összevetve a robotprogram jelenlegi állásában képes arra, hogy az emberrel együttműködve néhány sakklépésre válaszlépést határozzon meg, és azokat végre is hajtsa. Kisebb továbbfejlesztéssel akár egy teljes mérkőzést is le lehet majd játszani. A főbb modulok részletes értékelései a 12. fejezetben találhatóak.

ABSTRACT

The aim of this paper is to demonstrate the human-robot collaboration via a robot demo application. This application is a chess player program which can be executed on the robot controller. This makes it possible to play chess against the robot.

A KUKA iiwa robotic arm and a KRC4 (KUKA Robot Controller) was used for this purpose.

The electric gripper that grabs the chess pieces is attached to the robot arm. The controller for the gripper was designed by the same manufacturer as the gripper itself. Digital (and for the further development analog) input and output modules were also installed to send commands to the gripper controller. These modules communicate with the KRC4 via EtherCAT.

The robot program uses image processing methods to recognize the individual chess steps of the partner during the game. A HD webcam is connected to the robot controller via an USB port to take the pictures (the webcam driver had to be installed offline). The camera is attached to the side of the gripper, thus it moves with the robot arm.

To calibrate the image processing methods a calibration table is used. It has the same cell size as the chessboard but it consists of 10x9 cells instead of 8x8 . The robot program can find the individual chess fields (and pieces) based on a picture of the calibration table (setup). The image processing part and the extended chess program together can recognize the steps of the white chess pieces.

The chess program used for the project is mainly based on an already developed application which also has graphical user interface (GUI). To process the result of the image processing module (positions of white pieces) it was required to add some extra functions. The response step can be determined by different algorithms.

The robotic arm can execute the defined chess moves generated by the algorithms. Although some special moves are still under development such as the captures, castling, en passant and promotion. After every move the robot arm goes to the picture capturing position and after the chess partner gives a feedback that a move has been taken the program grabs a frame from the camera and processes it.

The program processes are cyclic, the steps:

1. capturing an image of the current state
2. image processing, finding the move that was made
3. generating response
4. executing the move with the robotic arm (and with the gripper)

5. moving to the image capturing position

Altogether the chess player program currently is able to generate and execute chess moves after recognizing the move of the human partner. After some smaller extensions and modifications it will be possible to play a whole game against the robot.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Andreja Rojko. Industry 4.0 concept: Background and overview. 2017.
- [2] Thomas Bauernhansl, Jörg Krüger, Gunther Reinhart, and Günther Schuh. Wgp-standpunkt industrie 4.0. Technical report, Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik, 2016.
- [3] T. Vilarinho, B. A. Farshchian, J. Floch, and B. M. Mathisen. *A Communication Framework for the Internet of People and Things Based on the Concept of Activity Feeds in Social Computing*. July 2013.
- [4] F. J. N. d. Santos and S. G. Villalonga. Exploiting local clouds in the internet of everything environment. In *2015 23rd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing*, March 2015.
- [5] C. Wesch-Potente G. Schuh, T. Potente and Annika Hauptvogel. Sustainable increase of overhead productivity due to cyber-physicalsystems. In *Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, March 2013.
- [6] Henning Kagermann. Change through digitization : value creation in the age of industry 4.0. 2015.
- [7] J. Miranda, N. Mäkitalo, J. Garcia-Alonso, J. Berrocal, T. Mikkonen, C. Canal, and J. M. Murillo. From the internet of things to the internet of people. *IEEE Internet Computing*, 19(2):40–47, Mar 2015.
- [8] M. Awais and D. Henrich. Human-robot interaction in an unknown human intention scenario. In *2013 11th International Conference on Frontiers of Information Technology*, pages 89–94, Dec 2013.
- [9] S. Jaschke. Mobile learning applications for technical vocational and engineering education: The use of competence snippets in laboratory courses and industry 4.0. In *2014 International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL)*, pages 605–608, Dec 2014.
- [10] George Michalos, S Makris, Panagiota Tsarouchi, Toni Guasch, Dimitris Kontovrakis, and George Chryssolouris. Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces. *Procedia CIRP*, 37:248–253, 12 2015.
- [11] Olessia Ogorodnikova. Human weaknesses and strengths in collaboration with robots. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 52(1):25–33.

- [12] KUKA Deutschland GmbH. *System Software - KUKA Sunrise.OS 1.16 - Operating Instructions for End Users*, 2018.
- [13] Arwid (Arvydas) Bancewicz. Arwid-chess, 2005.
<https://github.com/Arwid/chess>.
- [14] SCHUNK GmbH & Co. KG. *Electrical parallel gripper MEG 50 EC Assembly and Operational Manual*, 3 2016. Rev. 02.01 EN.

14. FÜGGELÉKEK

A projekt programozási része verziókezelt. A felhasznált és implementált összes programkód elérhető az alábbi linken:

<https://github.com/rolandvarga601/Szakdolgozat>