



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# Využití senzitivních robotů v průmyslu

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B2612 Elektrotechnika a informatika

*Studijní obor:*

Elektronické informační a řídicí systémy

*Autor práce:*

**Luboš Kasal**

*Vedoucí práce:*

Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky





## Zadání bakalářské práce

# Využití senzitivních robotů v průmyslu

*Jméno a příjmení:* **Luboš Kasal**  
*Osobní číslo:* M18000031  
*Studijní program:* B2612 Elektrotechnika a informatika  
*Studijní obor:* Elektronické informační a řídicí systémy  
*Zadávací katedra:* Ústav mechatroniky a technické informatiky  
*Akademický rok:* **2021/2022**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s vlastnostmi senzitivních (kooperativních, kolaborativních) robotů a s možnostmi jejich použití v průmyslu. Zaměřte se konkrétně na roboty KUKA iiwa.
2. Seznamte se s existujícími příklady využití senzitivních robotů v průmyslu a navrhnete různé aplikace, na kterých by bylo možné prezentovat možnosti a výhody senzitivních robotů.
3. Realizujte a otestujte několik z těchto navržených aplikací v laboratoři na robotu KUKA iiwa.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

dle potřeby dokumentace  
30–40 stran  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] KUKA Sunrise Cabinet, Assembly Instruction, KUKA Roboter GmbH, Augsburg, 2015.
- [2] KUKA Sunrise.OS 1.7, KUKA Roboter GmbH, Augsburg, 2015.
- [3] BÉLANGER-BARRETTE, Mathieu. Cobots Ebook [online]. 8th Edition Update. Levis, 2017 [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/collaborative-robot-ebook>
- [4] LAWTON, Jim. Collaborative ROBOTS. InTech [online]. Durham: International Society of Automation, 2016, 63(5), 12-14 [cit. 2020-02-18]. ISSN 0192303X. Dostupné z: <https://www.isa.org/intech/20161001/>
- [5] BARTOŠÍK, Petr. 2017. Bezpečnost kolaborativních robotů. Automa: časopis pro automatizační techniku. 2017(8-9), 74-76. ISSN 1210-9592. Dostupné také z: [http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/11040.pdf](http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/11040.pdf)

*Vedoucí práce:*

Ing. Tomáš Martinec, Ph.D.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Datum zadání práce:*

12. října 2021

*Předpokládaný termín odevzdání:*

16. května 2022

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D.  
vedoucí ústavu

V Liberci dne 12. října 2021

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

16. května 2022

Luboš Kasal

# Využití senzitivních robotů v průmyslu

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou využití senzitivních robotů v průmyslu. Práce obsahuje teoretickou část přibližující zejména vlastnosti, bezpečnost a principy programování těchto systémů. Dále je součástí teoretické části rozbor současného trhu a příklady reálného využití v praxi. V praktické části je blíže popsán senzitivní robot Kuka LBR iiwa. Na tomto robotu jsou poté otestovány navržené aplikace, které mají za úkol demonstrovat výhody a možnosti využití senzitivních robotů v průmyslu.

**Klíčová slova:** průmyslová robotika, kolaborativní robotika, senzitivní robot, kobot, Kuka LBR iiwa

# Use of sensitive robots in industry

## Abstract

The bachelor thesis is concerned with the topic of sensitive robots for industry use. Theoretical part describes mainly their characteristics, safety, and principles of programming of such systems. Furthermore, it analyses the current market and shows examples of use in practice. The practical part describes the sensitive robot Kuka LBR iiwa. Purposefully designed applications are tested on this robot in order to demonstrate benefits and possibilities of sensitive robots for industry use.

**Keywords:** industrial robotics, collaborative robotics, sensitive robot, cobot, Kuka LBR iiwa

## Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Tomáši Martincovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady a vstřícný přístup při konzultacích. Dále bych rád poděkoval své rodinně, která mě velmi podporovala při celém období mého studia.

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Průmyslová robotika</b>	<b>12</b>
1.1 Definice průmyslového robota	12
1.2 Stručná historie průmyslové robotiky	12
1.3 Průmyslový robot	14
1.4 Kolaborativní robotika	19
1.5 Bezpečnost průmyslových robotů	20
<b>2 Senzitivní robotika</b>	<b>22</b>
2.1 Senzitivní robot	22
2.2 Druhy senzitivity	23
2.3 Výrobci senzitivních robotů	25
2.4 Využití senzitivních robotů v průmyslu	28
2.5 Programování	33
<b>3 Praktická část</b>	<b>34</b>
3.1 Kuka LBR iiwa	34
3.2 Programování Kuka LBR iiwa	36
3.3 Tower of Hanoi	40
3.4 Puzzle	45
3.5 Bin picking	50
<b>4 Závěr</b>	<b>55</b>
<b>Použitá literatura</b>	<b>58</b>
<b>A Přílohy</b>	<b>59</b>
A.1 Obsah přiloženého ZIP souboru	59

## Seznam obrázků

1.1	Průmyslový robot Unimate[6]	13
1.2	Druhy pracovních prostorů prům. robota[10]	16
1.3	Konstrukce SCARA[11]	17
1.4	Konstrukce Delta robota[12]	18
1.5	Konstrukce Angulárního robota[13]	18
2.1	Robot s technologií Airskin [21]	23
2.2	Využití momentových senzorů v základně a kloubech robota[8]	24
2.3	YuMi - IRB 14000[23]	26
2.4	Rodina robotů E-series[24]	27
2.5	Využití kobotů dle aplikace[27]	29
2.6	Graf procentuálního zisku z kobotů dle průmyslového odvětví[27]	29
2.7	YuMi montáž zásuvek ABB Jablonec[29]	30
2.8	Kuka LBR iiwa ve Vrchlabí[30]	31
2.9	Kuka LBR iiwa na lince BMW[31]	32
3.1	Kuka LBR iiwa[33]	34
3.2	Přehled systému LBR iiwa 7 R800[33]	35
3.3	Media flange Touch pneumatic[34]	36
3.4	Vývojové prostředí <i>Sunrise.Workbench</i>	37
3.5	Diagram programu Tower of Hanoi	40
3.6	Počáteční rozestavění hlavolamu	41
3.7	Kontrola počátečního rozestavění	43
3.8	Vyřešení hlavolamu	44
3.9	Diagram programu Puzzle	45
3.10	Počáteční rozestavění aplikace puzzle	46
3.11	Nalezení dílu v prostoru	47
3.12	Napasování dílu do výřezu	48
3.13	Úspěšně umístěné díly do výřezů	49
3.14	Diagram aplikace Bin picking	50
3.15	Počáteční rozmístění dílů	51
3.16	Zjištění těžiště jednotlivých kontur	52
3.17	Uchopení dílu do kleští	54



## Seznam ukázek kódů

3.1	Základní šablona programu . . . . .	38
3.2	Metoda mapping() . . . . .	42
3.3	Metoda putPiece() . . . . .	47
3.4	Metoda grabPiece() . . . . .	53

## Seznam zkratek

<b>ISO</b>	(International Organization for Standardization) Mezinárodní Organizace pro Normalizaci
<b>ČSN</b>	Česká technická norma
<b>KOBOT</b>	Kolaborativní robot
<b>IP Rating</b>	(Ingress Protection) Stupeň krytí
<b>SCARA</b>	(Selective Compliance Articulated Robot Arm) Selektivní kompatibilní kloubové robotické rameno
<b>LBR</b>	(Leichtbauroboter) robot lehké konstrukce
<b>IIWA</b>	(intelligent industrial work assistant) inteligentní průmyslový pracovní pomocník
<b>HRC</b>	(Human robot collaboration) Spolupráce člověka s robotem
<b>TCP</b>	Tool Center Point

## Úvod

Robotizace výroby se stala nedílnou součástí automatizace výrobních procesů. Průmyslové roboty v dnešním světě představují atraktivní způsob zlepšení efektivity, bezpečnosti a zajištění kvality výroby. Trh průmyslových robotů se stále rozrůstá a výrobci představují stále sofistikovanější systémy. Mezi tyto systémy patří i senzitivní roboty. Tento speciální druh průmyslového robota se vyznačuje schopností detekovat kolize pomocí skupiny vestavěných senzorů. Tato vlastnost otevírá nové možnosti automatizace a zkvalitnění výrobního prostředí.

Se senzitivní robotikou se pojí pojem kolaborativní či spolupracující robot, zkráceně kobot. Kobot dokáže díky svým vlastnostem bezpečně spolupracovat bok po boku s lidským operátorem. Robot tak neautomatizuje celý proces ale pouze dílčí část. To otvírá možnost automatizovat procesy, jejichž automatizace se v minulosti cenově nevyplatila nebo nebyla z technologického důvodu možná.

Tato práce má za úkol přiblížit problematiku právě těchto systémů. První část práce se zaměřuje na teoretický popis. Zvláštní pozornost je věnována vlastnostem, bezpečnosti a využití v průmyslu. Probrány jsou stupně kolaborativní robotiky a požadované bezpečnostní normy. Následuje rozbor trhu a reálné příklady použití ve výrobě. Úkolem praktické části je navrhnout a naprogramovat ukázkové aplikace demonstrující výhody a možnosti senzitivních robotů v průmyslu. Tyto úlohy jsou poté otestovány na senzitivním robotu Kuka LBR iiwa.

# 1 Průmyslová robotika

Tato kapitola se zabývá popisem průmyslové robotiky a její úlohy v průmyslu. Úvodem je upřesněna definice robota. Následuje stručná historie průmyslové robotiky, popis průmyslového robota, popis parametrů a rozdělení dle konstrukce.

## 1.1 Definice průmyslového robota

Definici robota ucelila mezinárodní organizace pro standardizaci v normě ISO 8373: Roboty a robotická zařízení. Norma definuje robota jako: „Ovladatelný, programovatelný mechanismus pro činnost ve dvou nebo více osách s určitým stupněm autonomie, pohybující se v rámci svého prostředí za účelem plnění zamýšlených úkolů.“

Norma dále určuje samostatnou definici pro průmyslového robota. Průmyslový robot je dle definice: „Automaticky řízený, opětovně programovatelný, víceúčelový manipulátor pro činnost ve třech nebo více osách, který může být buď upevněn na místě, nebo mobilní k užití v průmyslových automatických aplikacích.“[1]

## 1.2 Stručná historie průmyslové robotiky

První průmyslový robot, který splňoval definici ISO, byl vytvořen již v roce 1937. Jednalo se o robota konstrukcí podobného jeřábu. Robot měl pět os pohybu a byl schopný skládat dřevěné kostky do vzoru pohyby, které byly naprogramovány na děrnou pásku.[2]

V roce 1954 si americký vynálezce George Devol podává patent na svého robota zvaného Unimate. V roce 1956 Devol společně s americkým fyzikem a inženýrem Joseph Engelbergerem zakládá první společnost na výrobu průmyslových robotů zvanou Unimation. Unimation začíná vyvíjet robota Unimate a roku 1962 pomáhá automatizovat výrobu společnosti General Motor. Hlavním účelem robotů Unimate je přemísťovat horké kovové části. Unimate se tak stává prvním průmyslovým robotem implementovaným do výroby významným výrobcem.[3]

## Další důležité milníky průmyslové robotiky

- **1969** – Victor Scheinman vynalézá prvního plně elektrického 6-osého kloubového robota
- **1975** – První mikroprocesorem řízený průmyslový robot ASEA IRB
- **1981** – Takeo Kanade vytváří první robotické rameno, které má motory instalované ve všech kloubech.
- **1996** – J. Edward Colgate a Michael Peshkin vynalézají prvního kolaborativního robota
- **2004** – Kuka uvádí na trh svého prvního kobota LBR 3
- **2008** – Universal Robots uvádí na trh svého prvního kobota UR5

Pro dnešní výrobní procesy je zcela běžná automatizace pomocí průmyslových robotů. Na základě dat [4] dosáhl celosvětový trh s roboty v roce 2020 hodnoty 27,73 miliard amerických dolarů. Největším odběratelem jsou státy Amerika, Čína, Japonsko, Německo a Jižní Korea, které tvoří 76% celosvětového trhu. Kolaborativní robotika v roce 2020 tvořila 979,6 amerických dolarů z celosvětového trhu.[5]



Obrázek 1.1: Průmyslový robot Unimate[6]

## 1.3 Průmyslový robot

Průmyslové roboty jsou dnes nepostradatelnou součástí pro průmyslovou výrobu. Robot se nikdy neunaví a dokáže tak plnit úkoly bez přestávky, a to se stále stejnou přesností a opakovatelností. Dokáže plnit rutinní úkoly v konzistentní kvalitě a rychlosti, což má za důsledek snížení výrobních chyb, a tím snížení odpadu a výrobních nákladů. Robot je schopen pracovat s velkým užitečným zatížením a dokáže tak zastávat role, jež jsou pro lidského operátora fyzicky náročné nebo nebezpečné. Robotizace výroby zlepšuje bezpečnost na pracovišti. Robot dokáže bez problému pracovat například v prostředí, kde je nebezpečí výskytu škodlivých látek, vysokého hluku, vysokých teplot a výskyt nebezpečí úrazu elektřinou. Zaměstnanec se tak může zabývat úkony, které jsou složitější, naplňující a méně nebezpečné. Všechny tyto výhody mají za důsledek zvýšení výrobní kapacity, zkrácení výrobních časů a snížení ceny výroby daného výrobku. Průmyslové roboty se proto staly atraktivní volbou pro automatizaci výroby.

Robotizace výroby ovšem s sebou nese i řadu nevýhod. Ve výrobě je kladen velký důraz na bezpečnost, proto se většina robotů musí umístit do bezpečnostních klecí. Bezpečnostní klece vyžadují různé senzory a další bezpečnostní prvky pro zabránění přístupu nepovolaným osobám. Navíc obvykle zabírají mnoho pracovního prostoru. To ztěžuje přeinstalování na jinou úlohu. Naprogramování takového robota často vyžaduje kvalifikovaného programátora a i tak může programování zabrat stovky hodin. Důsledkem může být velmi vysoká počáteční investice. Proto záleží na pečlivém propočítání návratnosti. Na rozdíl od lidského operátora se robot může porouchat. Tím se zvyšují náklady na opravy, údržbu a zároveň se prodlužují prostoje.[7]

V dnešním světě průmyslové roboty pomáhají automatizovat řadu úloh. Největší zastoupení nacházejí v automobilovém a elektrotechnickém průmyslu. Dále je využívá hlavně strojírenský, chemický a potravinářský průmysl. Určité druhy robotů lze najít i v lékařství, kde pomáhají například při operacích nebo rehabilitačních úlohách.[5]

### 1.3.1 Parametry průmyslových robotů

Průmyslové roboty lze dělit podle řady kritérií. Při výběru robota se řídíme hlavně dle základních parametrů. Mezi ně patří:[8]

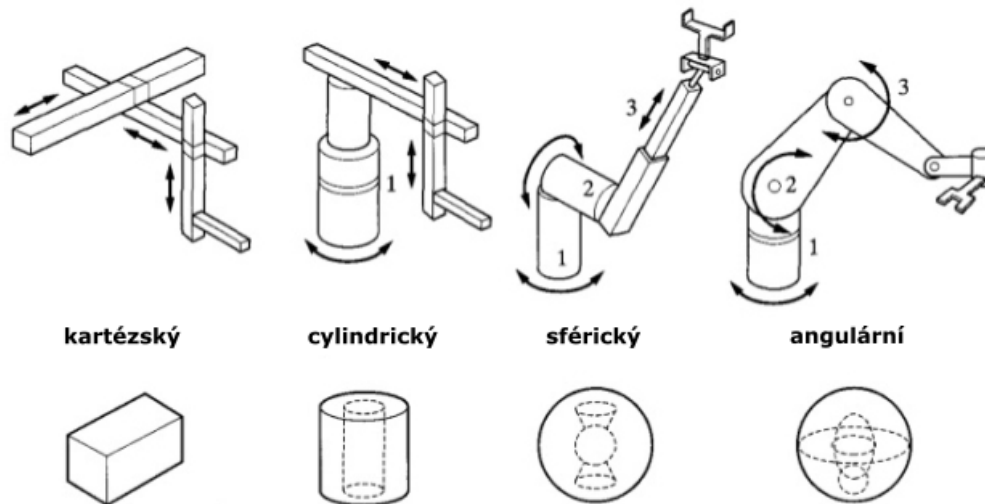
#### Základní parametry průmyslového robota

- **Maximální užitečné zatížení** – Maximální hmotnost, se kterou je robot schopen pracovat v daném pracovním prostoru. Udává se bez hmotnosti koncového efektoru a udává se v kilogramech.
- **Opakovatelnost** – Určuje s jakou přesností se robot dokáže znovu vrátit do určitého bodu ze stejného směru. Jedná se o rozdíl vzdáleností mezi požadovaným bodem a bodem skutečně dosažené polohy. Udává se v milimetrech.
- **Dosah** – Maximální vzdálenost, které je schopno robotické rameno koncovým efektozem dosáhnout. Udává se v milimetrech.
- **Stupeň volnosti** – Počet os, kolem kterých se robot může pohybovat. Většina robotů má šest stupňů volnosti pro základní osy (X, Y, Z) a jejich rotace. Větší stupeň volnosti dovoluje dosáhnout určitého bodu více způsoby.
- **Maximální rychlost** – Maximální rychlost, které může koncový efektor dosáhnout. V praxi se robot musí, kvůli bezpečnosti, často pohybovat rychlostí pomalejší.
- **IP Rating** – IP rating udává, jak efektivně je robot chráněn proti vodě a prachu. Příkladem může být rating s hodnotou IP36. První číslo udává hodnotu ochrany proti pevným částicím. V tomto případě je robot chráněn proti částicím do 2,5 mm. Druhé číslo udává ochranu proti vodě. V tomto případě je robot chráněn proti silnému proudu ze všech úhlů. Maximální hodnoty ochrany jsou 6 a 8. Obvykle je IP rating definován zvlášť pro různé části robota. Jelikož je robot často umístěn do prostředí s vysokou mírou nečistot, je důležité tyto hodnoty vzít v potaz.

Další důležité parametry při volbě robota jsou: hmotnost robota a jeho možná metoda upevnění (dostatečně lehké roboty lze umístit na stropy nebo stěny), maximální teplota prostoru ve kterém robot může pracovat, možnost komunikace s externím zařízením, cena, elektrická spotřeba, design, náročnost instalace a integrace do výroby, nabízený servis výrobce. Všechny tyto vlastnosti hrají důležitou roli při volbě robota pro danou úlohu.

### 1.3.2 Rozdělení průmyslových robotů dle konstrukce

Konstrukce robota definuje pracovní prostor. Pracovním prostorem robota se rozumí množina bodů, kterých je robot schopen dosáhnout referenčním bodem svého koncového efektoru. Tento prostor je určen maximálním dosahem robotického ramene a počtem stupňů volnosti, které jsou určeny druhem kinematických dvojic. Kinematické dvojice lze dělit na translační, rotační a jejich kombinace. Dle druhu konstrukce můžeme dělit roboty na kartézské, cylindrické, sférické a angulární. Speciálním druhem jsou poté paralelní roboty scara a delta.[9]



Obrázek 1.2: Druhy pracovních prostorů prům. robota[10]

#### Kartézský robot

Kartézský robot je konstrukčně nejjednodušší typ průmyslového robota. Obvykle se jedná o stacionárního robota s minimálně třemi translačními prvky. Dokáže tak svůj koncový efektor posouvat v každé ose (X, Y, Z), případně koncovým efektozem otáčet. Pracovním prostorem kartézského robota je kvádr. Používá se například pro pick-and-place úlohy nebo třeba pro 3D tisk. Výhodou je velká přesnost a snazší programovatelnost, nevýhodou je potřeba většího prostoru pro instalaci.

#### Cylindrický

Pokud je kombinace kinematických dvojic RTT, jedná se o cylindrický typ robota. Pracovním prostorem je dutý válec. Jde o další konstrukčně jednodušší druh průmyslového robota. Výhodou je rychlejší pohyb mezi body než u kartézského robota, což představuje benefit zejména v případě, kdy jsou dva cílové body ve stejném poloměru. Zároveň je tento typ robota jednoduchý na integraci a programování. Nevýhodou je menší přesnost a opakovatelnost ve směru rotace. Tyto roboty jsou vhodné například pro svařování, lakování, broušení nebo k obsluze strojů.

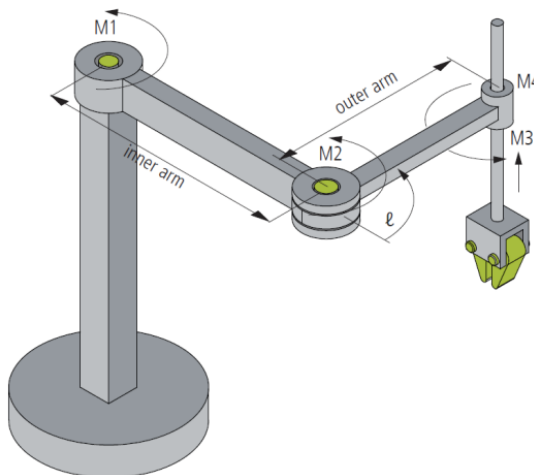


## Sférický robot

Sférický robot má kinematickou strukturu typu RRT a pracovním prostorem je kulový pás. Výhody cylindrických robotů jsou podobné jako u sférických. Nevýhodou je ještě menší přesnost než u cylindrických kvůli další rotační kinematické dvojici.

## Scara robot

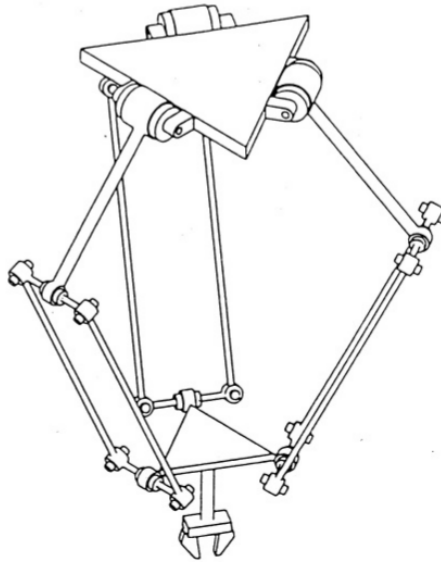
Robot SCARA byl vyvinut roku 1981 v Japonsku. Jedná se o průmyslového robota s paralelní kinematickou strukturou RRT. Skládá se z dvoučlankové robotické paže s otočným kloubem a s možností vertikální translace koncového efektoru. Pracovním prostorem je dutý válec. Výhodou je vysoká přesnost, rychlost, nízká váha, jednoduchá integrace do výroby a často nižší kupní cena. Nevýhodou je nižší užitečné zatížení. Roboty SCARA jsou navrženy tak, aby napodobovaly pohyb lidské ruky. Jejich konstrukce jim dovoluje obejít různé druhy překážek. Používají se hlavně k automatizaci montážních úloh a pick and place.



Obrázek 1.3: Konstrukce SCARA[11]

## Delta robot

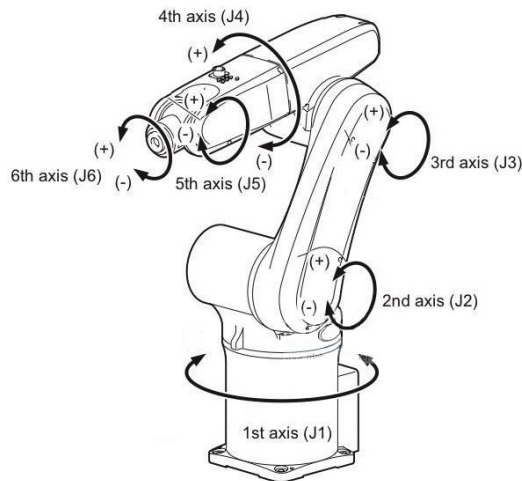
Delta roboty mají paralelní kinematickou strukturu. Byly vytvořeny počátkem 80. let švýcarským profesorem Reymondem Clavelem za účelem velmi rychlé manipulace s drobnými předměty. Ramena jsou obvykle rotační kinematickou dvojicí upevněna k základně a další dvojicí jsou upevněna k druhému článku ramene, konce druhého článku jsou připojeny k přírubě robota. Delta roboty jsou navrženy pro maximální rychlost a okamžité zrychlení. Dokáží manipulovat i s velmi malými součástkami, využívají se proto nejčastěji k přemísťování, balení a paletizaci těchto součástek. Nevýhodou je složitější řízení a omezený pracovní prostor.



Obrázek 1.4: Konstrukce Delta robota[12]

### Angulární robot

Angulární robot je v praxi nejpoužívanějším typem průmyslového robota. Nejčastěji se používají roboty se šesti osami. Jeho kinematická struktura je RRR a pracovní prostor je tvaru koule. Jejich výhodou je velký pracovní prostor a možnost většího užitečného zatížení. Nevýhodou je, že se zvětšující se délkou ramene se snižuje opakovatelnost. Díky svým vlastnostem nacházejí využití v celém spektru průmyslové výroby. Tato práce se bude výhradně zabývat tímto typem robota.



Obrázek 1.5: Konstrukce Angulárního robota[13]

## 1.4 Kolaborativní robotika

Průmyslové roboty nemusí automatizovat pouze celé výrobní procesy, ale mohou být využity i na výpomoc lidským operátorům, aby vykonávaly pouze určité části úloh. Tyto roboty se nazývají kolaborativní či spolupracující, zkráceně koboti. Koboti pomáhají automatizovat části procesů, které jsou například repetitivní, fyzicky namáhavé nebo náročné na přesnost, a zároveň jsou schopni přímo spolupracovat s lidským operátorem. Operátor je tak oproštěn od provádění nepříjemných úkonů, což má za důsledek zpříjemnění pracovních podmínek, a tím dochází ke zvýšení výkonnosti a kvality výroby.

Aby mohl průmyslový robot spolupracovat s člověkem, musí splňovat náročné požadavky na bezpečnost. Kromě standardních norem ISO 10218-1 a ISO 10218-2, které specifikují požadavky na bezpečnost pro všechny průmyslové roboty, koboti musí navíc splňovat požadavky na bezpečnost popsané v technickém standardu ISO TS 15066. Tento technický standard, vydaný v platnost v roce 2016, se přímo věnuje bezpečnosti kobotů. Bezpečnosti robotů se blíže věnuje kapitola 1.5. Dle ISO 10218 lze dělit provoz kolaborativních robotů do čtyř stupňů.[14]

### Stupně provozu kolaborativních robotů

- **Bezpečnostní monitorované zastavení** – Principem tohoto stupně je detekce přítomnosti osoby v daném chráněném prostoru. Pokud člověk zasahuje do dané oblasti, senzory tuto skutečnost zachytí a robot svoji činnost zastaví, dokud člověk daný prostor neopustí. Tato metoda se používá v případech, kdy interakce člověka s robotem není tak častá.
- **Monitorování rychlosti a polohy** – U těchto robotů se jedná o podobný systém jako u monitorovaného zastavení. Rozdíl spočívá v použití přesnějších senzorů, nejčastěji optických závor. Pokud člověk nezasahuje do pracovního prostoru robota, ale nachází se pouze v omezené blízkosti, robot svůj pohyb pouze zpomalí. Jakmile se člověk ocitne v pracovním prostoru, robot svůj provoz úplně zastaví. Opět se jedná o metodu, která se používá v případech, kdy je potřeba pouze minimální spolupráce s robotem.
- **Ruční vedení** – Jedná se o roboty vybavené bezpečnostním zařízením, které dovoluje lidským operátorům přímo kontrolovat pohyb robotického ramena ručním naváděním. Robot tak může například nést těžký obrobek, zatímco operátor s ním manipuluje do určité polohy. Důsledkem je zvýšení bezpečnosti na pracovišti. Ruční vedení se často používá k procesu programování úlohy robota. Pomocí ručního vedení se jednoduše programují nové dráhy a pozice robota.
- **Omezení síly a příkonu vlastní konstrukcí nebo ovládáním** – Tyto typy robotů dokáží reagovat na přímý kontakt s člověkem. Často mají ergonomický tvar konstrukce a jsou vybaveny řadou inteligentních kolizních senzorů. Jsou určeny pro přímou spolupráci s člověkem. Tyto roboty patří do množiny senzitivních robotů.

## 1.5 Bezpečnost průmyslových robotů

S rostoucí automatizací výrobních procesů je potřeba definovat bezpečnostní pravidla pro jednotlivá výrobní zařízení. Roboty nejsou v této oblasti výjimkou a jejich selhání může mít vážné důsledky jak pro lidi, tak pro zařízení. Proto byly představena pravidla, která musí robotická zařízení splňovat, aby se dala považovat za bezpečná k provozu. Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů definuje norma ISO 10218 část 1. a 2. Bezpečností kobotů se zabývá technická specifikace ISO/TS 15066. Norma ani specifikace se nevztahují na roboty vyrobené před datem zavedení současné verze normy. V době psaní této práce, je platná verze normy z roku 2011 a specifikace z roku 2016.[15]

### 1.5.1 ISO 10218 - Roboty a robotická zařízení

První část této normy má označení: „ISO 10218-1: Robots and robotic devices, safety requirements for industrial robots, Part 1: Robots.“ V České republice je zavedená pod označením: „ČSN EN ISO 10218-1: roboty a robotická zařízení, požadavky na bezpečnost průmyslových robotů, Část 1: Roboty.“ Tato část specifikuje požadavky a směrnice pro bezpečnou konstrukci a ochranná opatření průmyslového robota. Dále popisuje základní nebezpečí spojená s průmyslovými roboty a poskytuje požadavky na odstranění nebo adekvátní snížení těchto rizik spojených s těmito nebezpečími. Norma neřeší robota jako kompletní stroj. Například emise hluku není považována za významné nebezpečí samotného robota, a proto je hluk vyloučen z působnosti normy. Norma se nevztahuje na neprůmyslové roboty, ačkoliv i na ně lze použít bezpečnostní zásady stanovené v ISO 10218.[16]

Druhá část této normy má mezinárodní označení: „Robots and robotic devices, safety requirements for industrial robots, Part 2: Robot systems and integration.“ V České republice je zavedená pod označením: „ČSN EN ISO 10218-2, roboty a robotická zařízení, požadavky na bezpečnost průmyslových robotů, Část 2: systémy robotů a integrace.“ Druhá část normy specifikuje bezpečnostní požadavky na integraci průmyslových robotických systémů, jak jsou definovány v ISO 10218-1, a průmyslové robotické buňky. Robotickou buňkou se rozumí kompletní systém, který zahrnuje robota, řídicí jednotku a další periferie, jako jsou například polohovadlo dílů a bezpečnostní klec. Integrace zahrnuje návrh, výrobu, instalaci, provoz, údržbu a vyřazení robotického systému nebo buňky z provozu. Norma dále popisuje základní nebezpečí a nebezpečné situace identifikované u těchto systémů a poskytuje požadavky na odstranění nebo přiměřené snížení rizik spojených s těmito nebezpečími. ISO 10218-2 také specifikuje požadavky na systém průmyslových robotů jako součástí integrovaného výrobního systému. Norma se nezabývá nebezpečími jako jsou např. laserová záření, vymrštěné třísky, kouř ze svařování. Na tato procesní rizika lze použít jiné normy.[17]

## 1.5.2 ISO/TS 15066

Při spolupráci člověka s robotem vznikají vyšší rizika spjatá s bezpečností provozu. S rostoucí popularitou přímé spolupráce robota s člověkem bylo potřeba upřesnit pravidla pro bezpečnost spolupracujících robotů. V roce 2016 vyšel v platnost technický standard, respektive technická specifikace, ISO/TS 15066, zabývající se právě bezpečností spolupracujících robotů. Jako technická specifikace se označují normy v přípravě. Tato specifikace není tedy přímo normou, ale doplněním normy ISO 10218. V době psaní této práce je v platnosti stále jako technická specifikace. Technická specifikace má úplné označení: „ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices, collaborative robots.“ Specifikace platí pro průmyslové robotické systémy, nevztahuje se tedy na neprůmyslové roboty.[18]

Specifikace definuje bezpečnostní požadavky na kolaborativní průmyslové robotické systémy a pracovní prostředí. Dále popisuje možnosti a rizika kolaborativní práce s roboty a stanovuje limity, při kterých je ještě kooperace dostatečně bezpečná. V praxi se hlavně jedná o požadovaná výkonová omezení robota, vhodné dimenzování aplikací a nastavení limitních hodnot možného silového působení robota na různé části lidského těla tak, aby nedošlo ke zranění.

Výkonovým omezením se rozumí hlavně omezení maximální rychlosti, snížení maximální zdvihací síly a přitlačné síly robota. Vhodné dimenzování aplikace zajišťuje odstranění všech ostrých hran a nebezpečných částí v oblasti pracovního prostoru, a to především zvolením vhodného koncového efektoru robota. Při kontaktu robota s částí lidského těla nesmí být vyvinuta větší síla než je maximální povolená hodnota. Kontakt lze dělit na kvazi-statický, který definuje sevření částí těla mezi částmi robota, a na přechodový kontakt, který definuje kontakt mezi operátorem a částí robotického systému, kde žádná část těla operátora není zablokována. Tabulka 1.1. ukazuje maximální síly kvazi-statického kontaktu. U přechodového kontaktu jsou limitní síly dvojnásobné (nevztahuje se na lebku a obličej).[19]

Tabulka 1.1: Maximální povolená síla na část těla[20]

Část těla	Maximální síla [N]
Lebka a čelo	130
Obličej	65
Krk	150
Záda a ramena	210
Hrudník	140
Břícho	110
Pánev	180
Paže a loketní klouby	150
Předloktí a zápěstí	160
Ruce a prsty	140
Stehna a kolena	220
Dolní končetiny	130

## 2 Senzitivní robotika

Kapitola přibližuje problematiku senzitivní robotiky. Úvodem je vysvětlena motivace použití senzitivních robotů v průmyslu a jejich základní vlastnosti. Dále jsou přiblíženy nejčastější metody detekce síly působící na robota. Následně je uveden seznam známých společností, které se zabývají výrobou senzitivních robotů. Nakonec jsou ukázány možné aplikace použití těchto robotů v praxi a programování.

### 2.1 Senzitivní robot

V posledních deseti letech lze pozorovat v průmyslu rostoucí trend využití senzitivní robotiky. Důvodem jsou výhody plynoucí z vlastností těchto průmyslových robotů. Od ostatních robotů se odlišují možností detekovat a reagovat na fyzické dotyky. K tomuto účelu slouží řada silových senzorů a senzitivních materiálů. Nejčastějším řešením je umístění momentového senzoru do každého kloubu robota. Robot dokáže při kolizi spočítat, dle změny momentů v každé ose, místo dotyku a dle toho zareagovat. Tuto vlastnost lze využít například při kontrole kolize s lidským operátorem ve výrobě. Při kolizi robot zpomalí nebo zcela zastaví a buď svoji úlohu na požadovanou dobu přeruší, nebo změní svoji trajektorii a rychlost pohybu. Díky tomuto řešení není potřeba instalovat rozlehlé bezpečnostní klece. To přináší obrovské výhody v rámci bezpečnosti a následně ulehčení integrace do výroby. Druhou možností je detekovat kolizi na koncovém efektoru robota. Díky tomu lze využít senzitivní roboty na úlohy, kde obyčejného robota využít nelze. Příkladem mohou být montážní úlohy, ve kterých se robot snaží dle odporové síly, působící na efektor, napasovat určitou součástku do požadovaného dílu.

Se senzitivní robotikou je přímo spjata již zmiňovaná kolaborativní robotika. Senzitivní roboty totiž splňují jednu z úrovní kolaborativní robotiky, a to omezením síly a příkonu vlastní konstrukcí nebo ovládním. Většina senzitivních robotů je zároveň vybavena zařízením pro ruční vedení, což nejen přidává další stupeň kolaborativní robotiky, ale zároveň umožňuje další metodu programování. Většina těchto robotů tak splňuje základní bezpečnostní podmínky pro použití v aplikacích, kde přímo spolupracuje robot s člověkem. Z tohoto důvodu jsou senzitivní roboty často konstruovány účelově jako koboti. V této práci je slovo kobot použito ve významu senzitivního robota, kterého je možné použít k přímé spolupráci s člověkem. Důležité je si ale uvědomit, že i když je robot certifikován jako bezpečný, automaticky to neznamená, že daná aplikace je rovněž bezpečná. Vždy je potřeba zhodnotit možná rizika aplikace dle ISO/TS 15066.

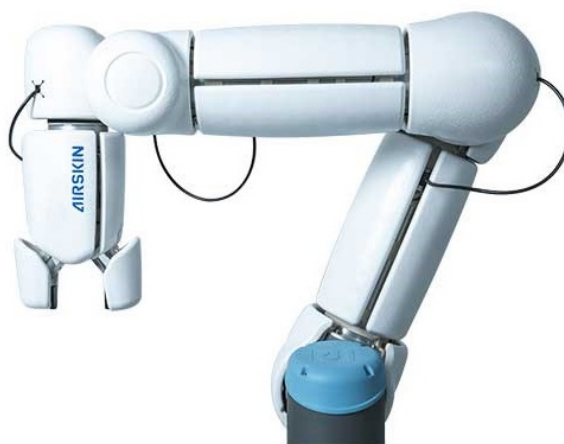
## 2.2 Druhy senzitivity

Většina společností zabývajících se výrobou kobotů certifikuje své roboty jako zcela bezpečné. Nejčastějším zajištěním bezpečnosti je právě snímání síly. K tomuto účelu slouží řada senzorů a citlivých materiálů. Snímací systém je konstruován tak, aby dokázal detekovat velmi malé síly a byl schopen na ně velmi rychle zareagovat. Mezi nejpoužívanější metody snímání síly patří skin sensing a momentové senzory.

### 2.2.1 Skin sensing

V průmyslu se jedná o méně rozšířený, zato však nejbezpečnější typ senzitivního robota. Tyto roboty využívají různé hmatové senzory pro detekci kolize. V praxi se jedná o takovou montáž, při které je celé rameno pokryto senzitivním materiálem, a tak robot získává vlastní citlivou „kůži.“ Dle použitých senzorů lze měřit například změnu tlaku působící na materiál nebo změnu vodivosti daného materiálu. Jakmile robot dosáhne nastavené hranice hodnot, adekvátně zareaguje. Výrobci často využívají tuto technologii k transformaci svých klasických robotů na senzitivní. Transformace je totiž velmi jednoduchá. Rameno robota se pokryje senzitivním materiálem a přidá se řídicí elektronika. Výsledkem je robot, který je pro koncového uživatele skutečně bezpečný. U těchto robotů lze očekávat i vyšší maximální zatížení.

Příkladem takové technologie je řešení, které vyvinula rakouská společnost Blue Danube Robotics GmbH. Tato společnost nabízí univerzální systém měkkých a současně citlivých snímacích krytů pod označením Airskin. Airskin využívá sérii tlakových senzorů k detekci kolize a dokáže reagovat na sílu od pěti newtonů. Zároveň je možné kryt namontovat na jakéhokoliv průmyslového robota. Technologie Airskin tak umožňuje splnění podmínek v ISO/TS 15066 i pro klasické průmyslové roboty.[21]



Obrázek 2.1: Robot s technologií Airskin [21]

## 2.2.2 Momentový senzor v základně robota

Tento typ senzitivních robotů využívá trochu jiný přístup k detekci silového působení na rameno robota. V základně robota je umístěn větší senzor točivého momentu, který dokáže monitorovat změnu síly v různém směru. Pokud je robot naprogramován tak, aby se pohyboval daným směrem a někdo nebo něco mu v daném pohybu zabránil, snímač tuto skutečnost zaznamená a pozmění chování robota. Výrobci opět tuto techniku často používají k transformaci svých klasických robotů na kolaborativní roboty. Jedná se totiž o velmi jednoduchou transformaci, kdy se původní konstrukce zachová a přidělá se momentový senzor do základny robota.

## 2.2.3 Momentové senzory v kloubech robota

V průmyslu se jedná o nejrozšířenější druh senzitivních robotů. Principem detekce kolize je měření momentů síly, které působí na každou osu robotického ramene. K měření dochází pomocí senzorů umístěných v každém kloubu. Pro koncového uživatele se jedná o velmi atraktivní řešení. Robot dokáže detekovat nejen kolizi, ale je také schopen vypočítat přibližné místo a směr kolize. To otvírá nejen nové bezpečnostní prvky, ale hlavně dovoluje různorodější aplikační využití robota. V praktické části této práce se budeme zabývat právě tímto typem senzitivního robota.



Obrázek 2.2: Využití momentových senzorů v základně a kloubech robota[8]



## 2.3 Výrobci senzitivních robotů

Trh senzitivních robotů se za posledních deset let velmi rozrostl. Může za to zejména větší poptávka po řešení kolaborativních průmyslových úloh. Z tohoto důvodu spousta výrobců průmyslových robotů začala vyvíjet své vlastní senzitivní roboty, respektive koboty. V dnešní době je nabídka těchto systémů velmi široká a stále se rozrůstá. Mezi výrobce senzitivních robotů kupříkladu patří:[22]

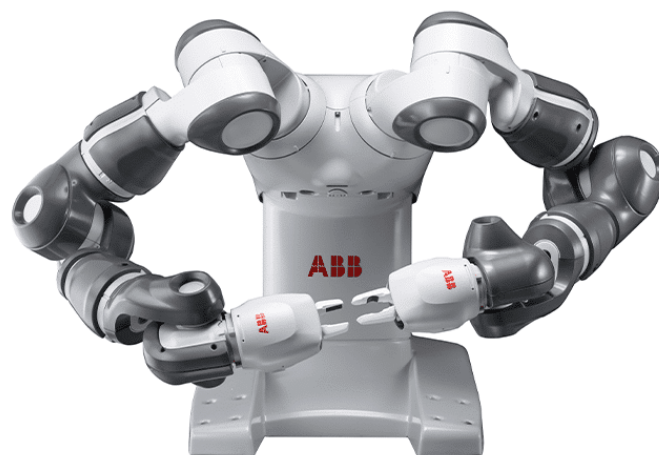
- **Universal robots** – Universal robots je jednou z prvních společností, která vstoupila na trh s kolaborativními roboty. Společnost byla založena roku 2005 v Dánsku s cílem zpřístupnit automatizaci pomocí robotů malým a středně velkým podnikům. Tento cíl naplnila pomocí své rodiny kobotů pod označením CB-series, v současnosti je nahrazena novější E-series. Do roku 2019 byla společnost největším výrobcem kobotů na světě.
- **Kuka** – Kuka je německá technologická společnost zabývající se vývojem a výrobou průmyslových robotů a automatizačních řešení. Patří mezi nejvýznamnější producenty robotů na světě. V roce 2013 společnost představila senzitivního robota lehké konstrukce pod označením LBR iiwa. Jedná se o nástupce řady robotů LBR3 a LBR4 z roku 2003 a 2008. Dodnes se jedná o jednoho z technologicky nejpokročilejších senzitivních robotů. Vlastnosti a systém tohoto robota je přiblížen v oddílu 3.1. V praktické části bude využit právě tento robot pro naprogramování ukázkových úloh.
- **ABB** – ABB je švédsko-švýcarská nadnárodní korporace, poskytující technologie pro energetiku a automatizaci. V roce 2015 uvedla na trh svého prvního kolaborativního robota pod označením YuMi - IRB 14000. Tento robot nabyl velké popularity, a to zejména v elektrotechnickém průmyslu, kde automatizuje procesy spojené s montáží velmi drobných součástí. Tento robot je blíže popsán v oddílu 2.3.1. ABB se zároveň věnuje vývoji kolaborativního robota ROBERTA, kterého získala díky odkupu společnosti Gomtec.
- **Fanuc** – Japonská společnost Fanuc vyvíjí a dodává své průmyslové roboty po celém světě. V roce 2015 představila řadu spolupracujících robotů pod označením Fanuc CR. Roboty z této řady se od robotů již představených výrobců liší zejména větším užitečným zatížením a dosahem ramene, nejedná se tedy úplně o roboty lehké konstrukce. Zároveň mají momentový senzor zpravidla umístěný v základně robota. V následujících letech rozšířila svoji sekci spolupracujících robotů o novou sérii Fanuc CRX. Ty mají oproti CR umístěny momentové senzory v kloubech a podobají se tak více robotům z rodiny E-series od Universal Robots.
- **Rethink robotics** – Společnost Rethink robotics byla založena v roce 2008 v USA. Proslavila se zejména jako výrobce kolaborativních robotů Baxter a Sawyer. V roce 2018 byla většina aktiv společnosti koupena německou HAHN Group. Ta v současné době nabízí na trhu novou verzi kobota Sawyer, Sawyer Black Edition.

- **Aubo** – Mezi méně známé společnosti patří Aubo robotics. Společnost vznikla na základě spolupráce profesorů z Ameriky a Číny s cílem vytvořit inteligentního robota lehké konstrukce. V současnosti se společnost zabývá výrobou mobilních robotů a kobotů. Na trhu vystupuje se svojí řadou Aubo i-series, u které lze najít velkou podobnost s E-series od Universal Robots.
- **Techman Robot** – Techman je jedním z největších výrobců kobotů na světě. Tato společnost, se sídlem na Taiwanu, nabízí na trhu svoji řadu kobotů TM-series. Tyto roboty se od ostatních vyznačují zejména zabudovaným kamerovým systémem.

Mezi další výrobce senzitivních robotů patří například Dobot, Doosan robots, Epson, Denso Wave, Hanwha Robotics, Omron a mnoho dalších. Trh senzitivních robotů je opravdu široký a koncový uživatel si může pro svoji aplikaci vybrat toho nejvhodnějšího dle parametrů popsanych v oddílu 1.3.1. V následujících oddílech jsou blíže představeny některé roboty od zmíněných výrobců.

### 2.3.1 YuMi - IRB 14000

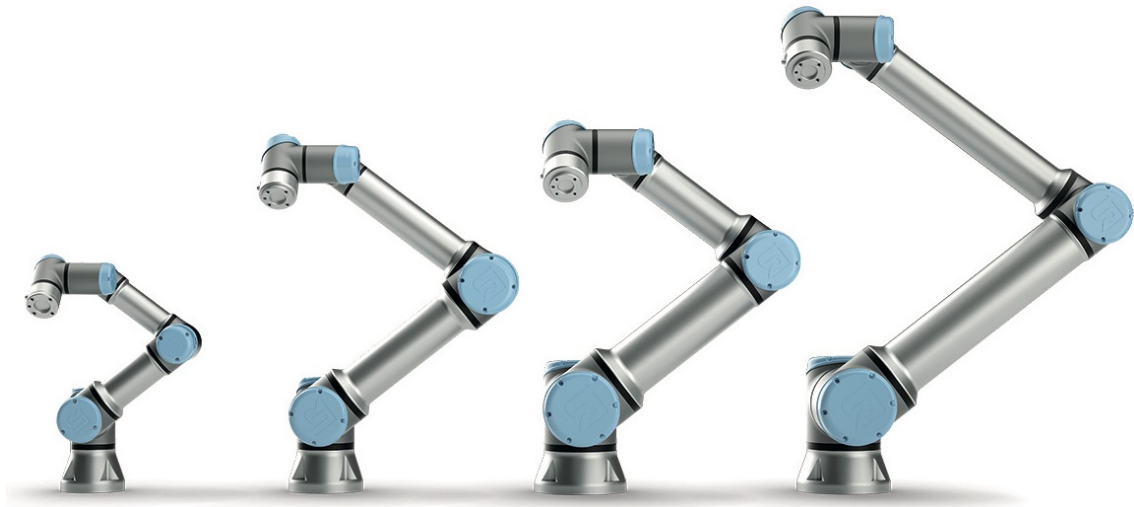
YuMi je dvouramenný senzitivní robot. Jeho název vznikl ze spojení anglických slov „You and Me.“ Název odkazuje na schopnost přímé spolupráce robota s člověkem při zajištění jejich bezpečnosti. Každá paže disponuje maximálním zatížením 0,5 kg, dosahem 500 mm a opakovatelností 0,02 mm. YuMi je konstruován za účelem montáže velmi drobných součástek. Duální paže jsou schopny provádět pohyby ve velmi omezeném prostoru. Při montáži lze využít lokalizaci součástek s kamerovým systémem. Díky svým vlastnostem se těší velké oblibě zejména v elektrotechnickém průmyslu. Cena robota se pohybuje v rozmezí 50 až 70 tisíc dolarů.[23]



Obrázek 2.3: YuMi - IRB 14000[23]

### 2.3.2 Rodina robotů E-series od Universal robots

Série robotů E-series od Universal robots se skládá z modelů UR3e, UR5e, UR10e a UR16e. Výhodou této série je větší cenová dostupnost, intuitivní ovládání a uživatelsky přívětivý teach pendant. UR3e je ultralehký robot ideální pro stolní aplikace. S užitečným zatížením 3 kg, dosahem 500 mm a neomezenou rotací na koncovém kloubu se hodí zejména pro lehkou montáž a šroubování. UR5e je lehký robot s pracovním rozsahem 850 mm a s užitečným zatížením do 5 kg. Hodí se zejména pro středně náročné aplikace. UR10e a UR16e s největším zatížením 10 a 16 kg, dosahem 1300 a 900 mm jsou všestranné roboty pro ty nejnáročnější aplikace. Jsou vhodné k obsluze strojů, paletizaci, balení, lakování, svařování atd. Cenová relace se pohybuje mezi 35 až 60 tisíc dolarů dle modelu robota.[24]



Obrázek 2.4: Rodina robotů E-series[24]

### 2.3.3 Rodina robotů Fanuc CR a CRX

Rodiny robotů Fanuc CR a CRX obsahují modely CR-4iA, CR-7iA, CRX-10iA, CR-15iA, CRX-20iA a CR-30iA. Modely řady CR mají momentové senzory instalované v základně, zatímco CRX disponuje senzory v každém ze svých kloubů. Zajímavými extrémy z těchto rodin jsou poslední dva zmíněné modely. Model CRX-20iA dovozuje maximální užitečné zatížení 20 kg, dosah 1418 mm a opakovatelnost 0,04 mm. CR-30iA dokáže uzvednout až 35 kg a rameno dosáhne do vzdálenosti 1813 mm s opakovatelností 0,03 mm. Pokud je aplikace robota správně navržena, jsou modely i s těmito parametry stále schopné HRC. Všechny modely z obou rodin jsou vybaveny ručním vedením, uživatelsky přívětivým teach pendantem a intuitivní možností naprogramování. Díky svým vlastnostem a širokému výběru jsou schopny senzitivní roboty Fanuc automatizovat široké spektrum výrobních procesů.[25]

## 2.4 Využití senzitivních robotů v průmyslu

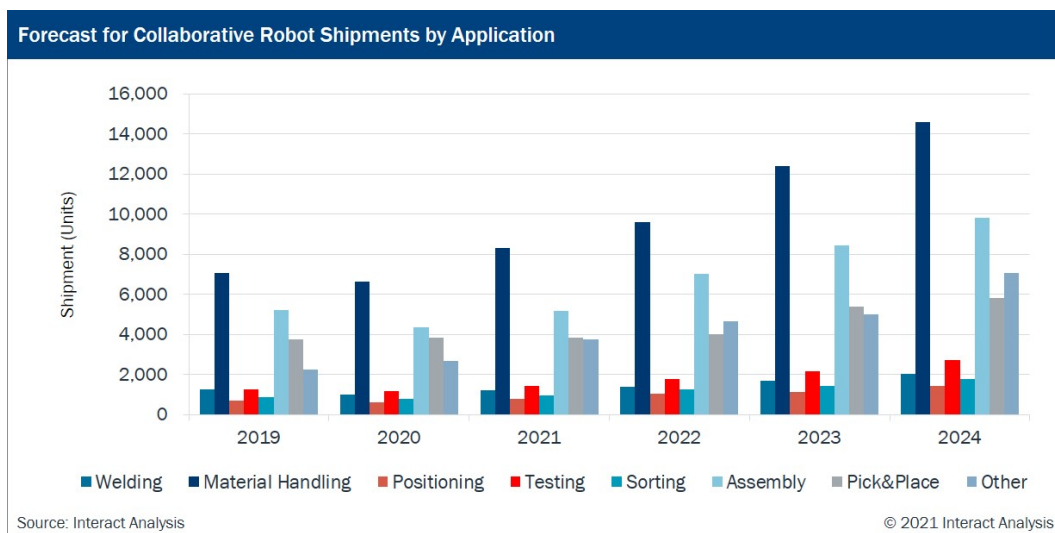
Dle představených vlastností senzitivních robotů lze posoudit vhodné použití v praxi. Největší výhodou je jistě možnost detekce síly působící na robota a s tím spojené splnění jednoho ze stupňů kolaborativní robotiky. Proto jsou tato zařízení využívána zejména pro automatizaci aplikací, kde přímo spolupracují s lidským operátorem. Ulehčují operátorovi od namáhavé a repetitivní práce a zároveň zvyšují přesnost, kvalitu a rychlost výroby. Operátor se tak může věnovat více naplňující činnosti, což přispívá k zlepšení podmínek na pracovišti a celkovému chodu ve výrobě. Druhou obrovskou výhodou je lehká konstrukce a absence nutnosti umístit robota do bezpečnostních klecí. Díky tomu lze integrovat robota do menších prostor a zároveň je mnohem jednodušší ho přemístit na jinou aplikaci. Díky lehké konstrukci lze robotické rameno umístit na stěny nebo stropy.

Ačkoliv existují senzitivní roboty s poměrně velkým maximálním zatížením, viz Fanuc CR-35, zpravidla dosahují maximální zatížení menších hodnot. Z bezpečnostních důvodů je u těchto robotů omezená i rychlost. Z tohoto důvodu se automatizují senzitivními roboty zejména procesy, kde je potřeba manipulovat s lehčími břemeny a není vyžadována vysoká rychlost pohybu. Mezi nejčastější aplikace patří například:[26]

- **Obsluha strojů** – Robot přemísťuje předměty dovnitř a ven ze stroje za účelem zpracování.
- **Montáž** – Robot provádí jednoduché montážní úkoly, které vyžadují nízkou obratnost. Naopak úkoly vyžadující vysokou míru obratnosti jsou vhodné pro člověka. Zde vznikají ideální podmínky pro využití přímé spolupráce robota s člověkem a pro nasazení kobota. Kobot provádí jednodušší montážní úkoly a poté přesune díl do oblasti, kde lidský operátor proces dokončí.
- **Pick-and-place** – Robot přemísťuje díly z výstupu jednoho procesu na vstup dalšího.
- **Testování kvality** – Robot nakládá produkty do stroje na testování kvality a odebírá je jakmile je testování dokončeno. Případně je využit kamerový systém a strojové učení. Robot navede kamerový systém do požadovaných bodů pro snímání a po vyhodnocení oddělí vadné kusy.
- **Další** – Robot provádí základní balení, konečnou úpravu, lepení, lakování, svařování a další úkoly. Senzitivní roboty dokáží automatizovat většinu úkolů, které dělají lidé, pokud nevyžadují velkou míru obratnosti.

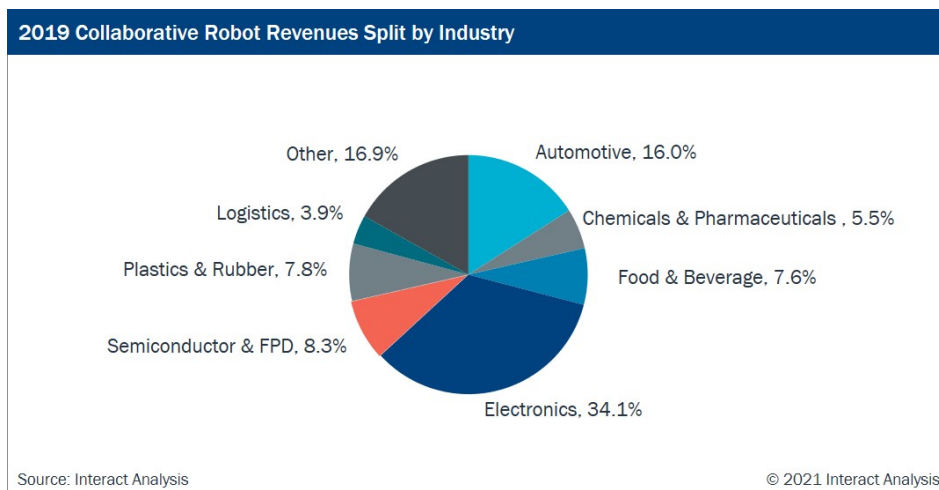
## 2.4.1 Průmyslové odvětví využívající koboty

Interact Analysis, mezinárodní agentura zabývající se průzkumem trhu průmyslové automatizace, zveřejnila studii zabývající se vývojem trhu kolaborativních robotů od roku 2021 do 2028 [27]. Dle této studie si lze představit množství využitých kolaborativních robotů pro jednotlivé oblasti aplikací. Na obrázku 2.5 je znázorněn graf ukazující množství robotů na jednotlivé oblasti využití a předpoklad vývoje v následujících letech. Mezi nejčastější aplikace patří manipulace s materiálem, montáž a pick-and-place.



Obrázek 2.5: Využití kobotů dle aplikace[27]

Na obrázku 2.6 je znázorněn graf procentuálního zisku kobotů dle průmyslových odvětví z roku 2019. Největším odběratelem je zejména elektrotechnický a automobilový průmysl.



Obrázek 2.6: Graf procentuálního zisku z kobotů dle průmyslového odvětví[27]

## 2.4.2 Příklad použití kobota v ABB

Zásuvky s dětskou pojistkou od ABB obsahují spoustu drobných částí. Jejich montáž je náročná na manuální zručnost, monotónní a pro zaměstnance obtížná. V jabloneckém závodě společnosti ABB spolupracuje s pracovníkem bok po boku dvouramenný kolaborativní robot YuMi-IRB 14000, který vyvíjí právě ABB.

Lidský operátor před robota umístí dvě víka, objímky a dva kryty dětské pojistky. Robot vezme z podavače dvě pružiny a vloží je do prostoru mezi dětským zámekem a víkem zásuvky. Robot potom umístí dětskou pojistku na víko zásuvky. Sestava zásuvky je dokončena zasunutím krytu dětské pojistky do víka zásuvky. Operátor vloží šroub do víka a odešle výrobek k balení.

YuMi využívá připojené služby, které monitorují robota během výroby. Monitorování zvyšuje jeho efektivitu, snižuje náklady na servis, zajišťuje spolehlivost a prodlužuje jeho životnost. Operátor je tak oproštěn od monotónní práce a je zajištěna kvalita a efektivita výroby.[28][29]



Obrázek 2.7: YuMi montáž zásuvek ABB Jablonec[29]

### 2.4.3 Příklad použití robota v ŠKODA AUTO

Ve vrchlabském závodě ŠKODA AUTO se vyrábí dvouspojkové převodovky s automatickým řazením DQ200. Součástí převodovky je mechatronická řídicí jednotka. V řídicí jednotce jsou čtyři písty řazení. Každý píst je spojen s vidlicí určenou k řazení převodových stupňů. Zakládání pístů řazení je repetitivní a na přesnost náročný proces. Při zakládání musí lidský operátor dbát na co největší opatrnost, aby píst nepoškodil.

Kvůli náročnosti operace byla snaha tento proces automatizovat. ŠKODA AUTO zvolila řešení pomocí senzitivního robota Kuka LBR iiwa. Díky svým vlastnostem dokáže založit píst s co největší a stále se opakující přesností. Je tak minimalizováno riziko poškození pístu a operátor je oprostěn od únavné a monotónní práce.

Zároveň je řídicí jednotka velmi náchylná na kontaminaci nečistotami, což může vést k nefunkčnosti převodovky. Z tohoto důvodu je výrobní linka na mechatroniku umístěna v izolovaném a poměrně stísněném prostoru, kde platí přísná pravidla na čistotu. Na stísněném prostoru se v bezprostřední vzdálenosti pohybují pracovníci, kteří obsluhují ostatní části výrobní linky. Pokud dojde ke kolizi, robot okamžitě zareaguje a přeruší na požadovanou dobu svoji činnost. Je tedy možné robota umístit i do stísněného prostoru a neřešit problém s instalací rozsáhlých bezpečnostních klecí.[28][30]



Obrázek 2.8: Kuka LBR iiwa ve Vrchlabí[30]

#### 2.4.4 Příklad použití robota na linkách BMW

Továrna BMW v Dingolfingu vyrábí převodovky předních náprav. Zaměstnanci BMW museli při montáži na lince zvedat až 5,5 kilogramů těžké a obtížně uchopitelné součásti. Tyto součásti musí do převodovky být integrovány s maximální přesností. Tento proces se ukázal být pro zaměstnance jako příliš namáhavý a ergonomicky nepřívětivý. Řešením společnosti bylo pomoci lidskému operátorovi robotem lehké konstrukce Kuka LBR iiwa.

Výzvou byla instalace robota na malém prostoru výrobní linky. Tento problém byl vyřešen pomocí štíhlé ocelové konstrukce v podobě portálu. Robot na tomto portálu pracuje v zavěšené poloze, a tím šetří pracovní prostor. Externí senzory a bezpečnostní klece nejsou nutné, jelikož LBR iiwa disponuje sensorikou momentů v každé ze svých sedmi os. Nástroj robota je zbaven ostrých hran pomocí bezpečnostního pláště. Aplikace tak splňuje normy a podmínky pro HRC. Člověk a robot zde nyní společně spojují vyrovnávací skříně pro převodovky předních náprav – a to za méně než půl minuty.[31]



Obrázek 2.9: Kuka LBR iiwa na lince BMW[31]



## 2.5 Programování

Naprogramování robota je nedílnou součástí při integraci robota do výroby. Moderním přístupem výrobců, a to zejména u kolaborativních robotů, je dodání systémů, které jsou na naprogramování jednoduché a intuitivní. Některé aplikace dokáže s těmito systémy, po krátkém zaučení, naprogramovat i sám operátor a není tak potřeba zkušeného programátora. Dle použité metody dělíme programování na on-line a off-line.[32]

### 2.5.1 On-line programování

On-line programování probíhá přímým naváděním robotického ramene programátorem do určitých bodů. Tyto body jsou uloženy do paměti řídicí jednotky. Následuje definování typu pohybů mezi těmito body a definování akcí, které mají být v těchto bodech provedeny. Výhodou je rychlé naprogramování a otestování dané úlohy. Nevýhodou je nutnost odstavení robota, a tím vzniklé prostoje ve výrobě. Metody on-line programování dělíme na Teach-in a Play-back.

#### Teach-in

Jedná se o nejrozšířenější metodu programování. Programování probíhá pomocí teach pendantu. Moderní teach pendanty jsou dotykové panely s tlačítky sloužící k ovládání a zobrazení informací o robotu. Pomocí tlačítek na teach pendantu je robot naváděn do daných bodů a následně programován. Výhodou je vysoká přesnost. Nevýhodou je delší doba programování.

#### Play-back

Pokud je robot vybaven ručním vedením, lze využít k programování metodu play-back. Robot je naváděn do daných bodů právě pomocí ručního navádění. U senzitivních robotů se jedná o častou metodu programování. Výhodou je rychlé naprogramování aplikace. Nevýhodou je menší přesnost nastavení bodů způsobené nepřesností navedení programátorem.

### 2.5.2 Off-line programování

Off-line programování spočívá v přípravě a otestování programu na externím zařízení pomocí speciálního softwaru. Příkladem takového softwaru je kupříkladu Robot-Studio od ABB, Kuka.SIM nebo také RoboDK. Program je na robotické zařízení přenesen až po naprogramování aplikace. Většina těchto systémů dovoluje naprogramované aplikace otestovat v simulačním prostředí. Výhodou tohoto přístupu jsou menší prostoje ve výrobě. Nevýhodou může být rozdílnost simulované aplikace oproti reálné a s tím spojené chyby v programu. Zároveň je v některých případech vyžadována znalost některého z programovacích jazyků.

## 3 Praktická část

Kapitola popisuje navržení a tvorbu praktických úloh prezentujících výhody a možnosti použití senzitivních robotů v průmyslu. Úvodem jsou popsány vlastnosti, příslušenství a princip programování použitého robota Kuka LBR iiwa. Dále je popsán návrh a programování ukázkových úloh. Každá úloha je zakončena vysvětlením motivace a přirovnáním k reálným příkladům použití v praxi.

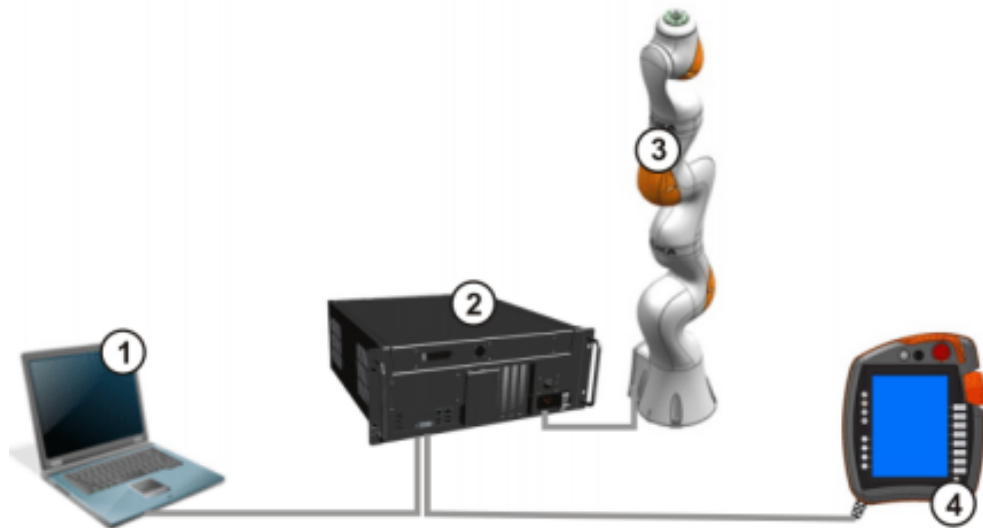
### 3.1 Kuka LBR iiwa

Robot LBR iiwa od společnosti Kuka je první sériově vyráběný senzitivní robot schopný plné spolupráce s člověkem. Jedná se o angulárního robota se sedmi osami. Díky tomuto počtu os je schopen dosáhnout určitého bodu z více směrů. V každé ose je umístěn momentový senzor umožňující detekovat sílu vyvíjenou na každou část robota. Detekce momentů v osách dovoluje reagovat na kolize, a tím umožňuje bezpečnostní nastavení pro spolupráci s člověkem. Zároveň detekce sil dovoluje využití při citlivých montážních úlohách. LBR iiwa se dále vyznačuje ergonomickým tvarem ramene, a lehkou konstrukcí. Ergonomický tvar robota zajišťuje ještě větší bezpečnost při kolaborativních úlohách, zabraňuje zranění v důsledku sevření končetin mezi osami robota. Lehká konstrukce je další bezpečnostní prvek a zároveň usnadňuje integraci do výroby, dovoluje upevnění robota na stěny nebo stropy.



Obrázek 3.1: Kuka LBR iiwa[33]

LBR iiwa se vyrábí ve dvou provedeních, která se liší v nosnosti a maximálním dosahu ramene. První z nich je LBR iiwa 7 R800 s nosností 7 kg a dosahem ramene 800 mm. Druhé provedení LBR iiwa 14 R820 dovoluje nosnost 14 kg a dosah 820 mm. K naprogramování úloh v rámci této bakalářské práce byl použit LBR iiwa 7 R800. Přehled systému robota, včetně příslušenství, je znázorněn na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Přehled systému LBR iiwa 7 R800[33]

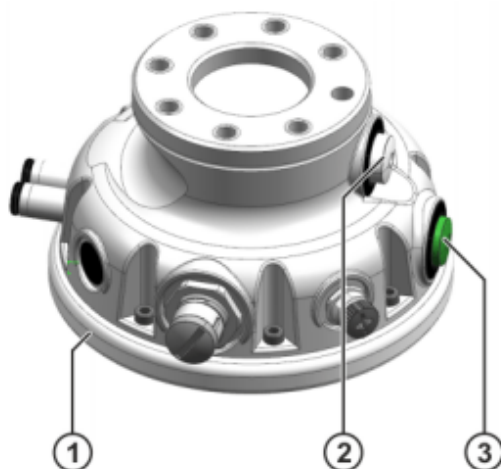
Systém robota obsahuje řídicí jednotku Kuka Sunrise Cabinet (2), která se stará o řízení manipulátoru a komunikaci s externími zařízeními. Do řídicí jednotky se připojuje počítač s požadovaným softwarem pro programování (1) a teach pendant (4), pomocí kterého lze robota ovládat, programovat a zobrazovat informace při provozu. Teach pendant dále obsahuje bezpečnostní tlačítka, používaná při programování, a programovatelná tlačítka, která je možné využít jako další volitelné vstupy v programu. Řídicí jednotka ovládá robotické rameno (3) dle nahraného programu.

### 3.1.1 Příruba Media flange Touch pneumatic

Na hlavu robota lze připevnit různé druhy přírub, lišící se možnostmi připojení elektrických a pneumatických komponent, a počtem vstupních/výstupních konektorů. U některých přírub je instalováno programovatelné tlačítko, tlačítko pro ruční vedení a signalizační LED pásek.

Na robotu, určeném pro tuto práci, je připevněna příruba s označením Media flange Touch pneumatic viz obrázek 3.3. Příruba obsahuje konfigurovatelné vstupy a výstupy pro připojení senzorů a dalších elektrických komponent. Jedná se konkrétně o čtyři digitální výstupy, pět digitálních vstupů a čtyři konektory napájení o velikosti napětí 24 V. Příruba dále obsahuje pneumatické rozhraní se dvěma přípojkami stlačeného vzduchu pro připojení pneumatických efektorů. Programovatelné tlačítko (3) a tlačítko ručního vedení (2). Při stisku tlačítka (2), do aktivní polohy, lze robotem volně pohybovat pomocí ručního navádění. Zároveň je příruba

ergonomicky přizpůsobena lepšímu držení při vedení. Příruba dále obsahuje signalizační LED pásek, kde modrou barvu lze volně využít v programu a červená a zelená jsou rezervovány pro interní stavy robota.



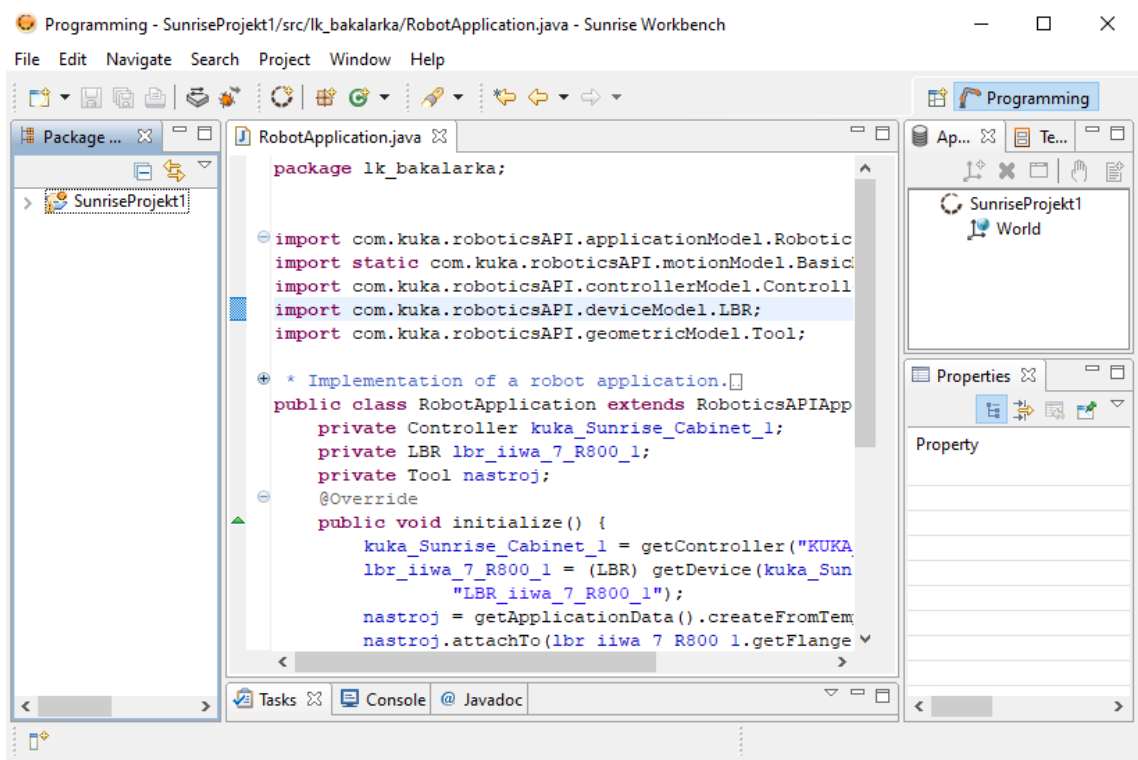
Obrázek 3.3: Media flange Touch pneumatic[34]

## 3.2 Programování Kuka LBR iiwa

Robota LBR iiwa lze naprogramovat pomocí externího zařízení, ve kterém je nainstalován požadovaný software, jenž se připojí přes Ethernet do řídicí jednotky. Pro programování se používá vysokoúrovňový programovací jazyk Java s přidávanými knihovnami. Požadovaným softwarem je vývojové prostředí zvané *KUKA Sunrise.Workbench*. Jedná se o vývojové prostředí na bázi Eclipse, prostředí pro Javu. Vývojové prostředí je obohaceno o uživatelské prostředí pro správu a tvorbu nástrojů, bodů, rychlou diagnostiku, rychlé uvedení do provozu a další funkce pro snadný návrh aplikací.

K snadnému naprogramování aplikací dále slouží externí balíčky knihoven *KUKA Sunrise.OS* a *KUKA Sunrise.HRC*. Balíček *Sunrise.OS* obsahuje třídy a metody pro ovládání pohybu robotického ramene, obsluhu vstupních/výstupních konektorů, interakci s teach pendantem a definování akcí při stisku uživatelských tlačítek. Dále obsahuje šablony pro jednoduchý start vývoje programu. *Sunrise.HRC* umožňuje spolupráci člověka s robotem, tzn. monitorování síly a točivého momentu, bezpečné rozpoznání kolizí a bezpečné hlídání rychlostí.

Tvorba programu pro robota obsahuje následující kroky. Vytvoření projektu a třídy s aplikací robota. Tvorbu nástroje, báze a bodů pro pohyb. Tvorbu samostatné logiky programu. Nahrání programu na řídicí systém — po nahrání programu lze pomocí teach pendantu naučit parametry pro nástroj, bázi a pozice bodů.



Obrázek 3.4: Vývojové prostředí *Sunrise Workbench*

### 3.2.1 Tvorba nástroje a definice báze

Před tvorbou samotného programu je potřeba definovat základní referenční body pro používaný nástroj, tzv. tool center point (dále *TCP*) a bázi souřadnicového systému, vůči kterému budeme definovat cílové body pohybu nástroje. Výchozí *TCP* je nastaven ve středu příruby robota, výchozí báze má zase počátek v základně robota a v programu se označuje jako *world*. Jako nástroj pro ukázkové aplikace byly využity pneumatické paralelní kleště od firmy Festo s označením HGPC-16-A. Tento akční člen je řízen pomocí jednoho z digitálních výstupů z Media flange Touch pneumatic.

V *Sunrise.OS* je každý bod definován objektem *Frame* nebo konstantním objektem *ObjectFrame*. Tyto objekty lze zakládat v záložce application data. Dané objekty lze používat jako cílové body pohybu nebo je označit jako definici pro bázi. Po založení báze je potřeba nastavit její parametry. To lze provést pomocí teach pendantu a naučeného nástroje po nahrání programu, nebo lze hodnoty nastavit přímo ve workbench prostředí. Pro naučení nástroje je potřeba ho nejprve vytvořit v záložce template data. Po vytvoření lze definovat pod nástroj libovolné množství *Frame* objektů, které definují *TCP* nástroje. *TCP* lze opět naučit pomocí teach pendantu nebo napřímo ve workbench. Pokud máme nástroj, který v průběhu aplikace mění další nástroje, je vhodné použít objekt zvaný *Workpiece*. Jedná se o nástroj, který je upevněn na původní nástroj. Pro *Workpiece* objekty lze definovat vlastní *TCP*.

### 3.2.2 Základní tvar programu a základní příkazy pro pohyb

Pro vytvoření programu je potřeba nejdříve založit projekt v prostředí workbench. Po vytvoření projektu je možné vytvořit třídu, která reprezentuje samotnou aplikaci robota. Tato třída dědí ze třídy *RoboticsAPIApplication*. Třída programu obsahuje vstupní statickou metodu *main()*, která je zavolána po spuštění programu. Pro správné fungování aplikace nesmí být metoda *main()* upravena. V metodě *main()* je vytvořena instance třídy aplikace a zároveň je zavolána metoda *initialize()*. V této metodě je vhodné přiřadit požadované hodnoty deklarovaným atributům třídy. Povinnými atributy jsou objekty představující řídicí jednotku robota a samotné robotické rameno. Vhodné je deklarovat objekt představující nástroj připevněný na přírubu robota. Na tyto objekty lze poté volat různé metody, včetně důležitých metod pro pohyb.

---

```
public class RobotApplication extends RoboticsAPIApplication {
    private Controller kuka_Sunrise_Cabinet_1;
    private LBR lbr_iiwa_7_R800_1;
    private Tool tool;

    @Override
    public void initialize() {
        kuka_Sunrise_Cabinet_1 = getController("KUKA_Sunrise_Cabinet_1");
        lbr_iiwa_7_R800_1 = (LBR) getDevice(kuka_Sunrise_Cabinet_1,
            "LBR_iiwa_7_R800_1");
        tool = getApplicationData().createFromTemplate("tool");
        tool.attachTo(lbr.getFlange());
    }

    @Override
    public void run() {
        lbr_iiwa_7_R800_1.move(ptp({frame}));
    }

    public static void main(String[] args) {
        RobotApplication app = new RobotApplication();
        app.runApplication();
    }
}
```

---

Ukázka kódu 3.1: Základní šablona programu

Příkazy pro pohyb lze volat na všechny objekty, které reprezentují pohybující se části robota. Takovou částí může být samostatné robotické rameno, ale i například nástroj připevněný na přírubu robota nebo *Workpiece*, který je připevněn na původní nástroj. Referenčním bodem pro pohyb, je v případě robotického ramene, střed příruby. V případě nástrojů a *Workpiece* je referenčním bodem přiřazený *TCP*. Metody pro pohyb jsou *move()* a *moveAsync()*. Při použití *moveAsync()* je další řádek programu spuštěn okamžitě po zaslání příkazu pro pohyb. U metody *move()*

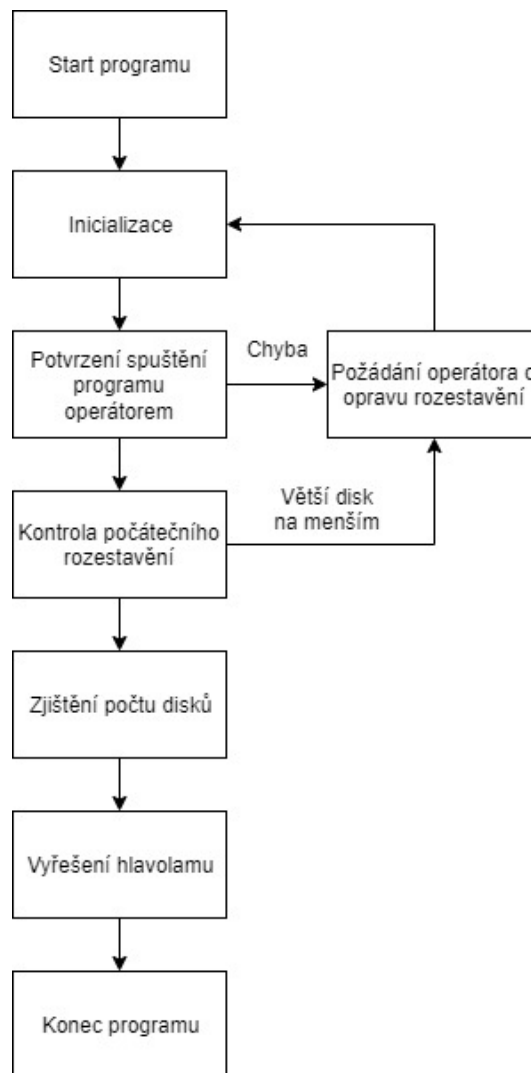
je program pozastaven, dokud robot pohyb nedokončí. Balíček *Sunrise.OS* nabízí několik druhů metod pohybu. Dané metody se liší v dráze, po které se referenční bod pohybuje.

- **Pohyb PTP** – Jedná se o tzv. pohyb point-to-point. Robot vypočítá nejrychlejší možnou cestu k cílovému bodu. V tomto případě je tvořen pouze rotačními vazbami, proto pohyb po přímce nemusí být nejrychlejší. Dráha mezi počátečním bodem a koncovým bodem je libovolná křivka.
- **Pohyb LIN** – Jedná se o lineární pohyb. Referenční bod se pohybuje od počátečního bodu ke koncovému bodu po přímce.
- **Pohyb CIRC** – U tohoto pohybu se referenční bod pohybuje po kruhové dráze. Povinnými parametry této metody jsou koncový bod a pomocný bod, které nutné pro výpočet kruhové dráhy.
- **Pohyb LINREL** – U této metody není parametrem *Frame* cílového bodu. Robot se pohybuje nebo rotuje relativně k určenému souřadnicovému systému. Výchozím souřadnicovým systémem je systém základny robota. Parametry dané metody jsou posuny ve všech osách báze a rotace kolem nich.

V následujících podkapitolách jsou popsány navržené aplikace. Aplikace jsou naprogramovány pomocí představených principů a nástrojů. Pro lepší představu jsou součástí popisu ukázky zdrojových kódů programu. Celý zdrojový kód všech aplikací se nachází v příloze této práce [A.1](#).

### 3.3 Tower of Hanoi

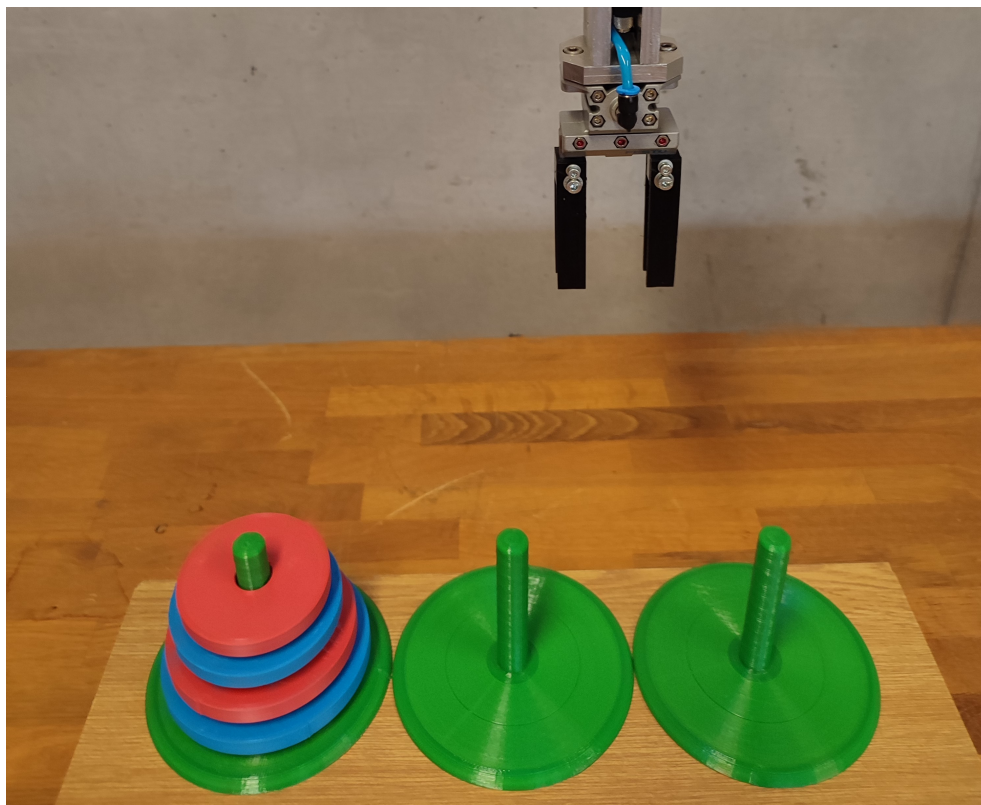
Tower of Hanoi je matematický hlavolam, který vymyslel francouzský matematik Édouard Lucas v roce 1883. Hlavolam se skládá ze tří věží a několika disků různých průměrů. V počáteční fázi jsou všechny disky seřazeny na jedné věži od největšího průměru (vespod) po nejmenší průměr (nahore). Cílem hlavolamu je přemístit všechny disky z jedné věže na druhou za určitých podmínek. Za prvé je možné v jednom tahu přemístit pouze jeden disk. Za druhé, disk většího průměru nesmí být umístěn na disk o menším průměru. Cílem robota je v následující aplikaci zkontrolovat pomocí senzitivity počáteční stav a hlavolam vyřešit. Diagram programu je znázorněn na Obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Diagram programu Tower of Hanoi



Pro tuto aplikaci byl na 3D tiskárně vytvořen model daného hlavolamu. Model se skládá ze tří věží a čtyř disků různých průměrů. Různý průměr disků komplikuje uchopení akčním členem. Proto byl na 3D tiskárně zároveň vytvořen adaptér, pomocí kterého lze přemístit disk libovolného průměru. Adaptér byl připevněn na pneumatický akční člen a byl mu definován samostatný *TCP*. Model, počáteční rozestavení a připevněný adaptér lze vidět na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Počáteční rozestavení hlavolamu

V počáteční fázi se musí všechny disky nacházet na jedné věži. Tuto skutečnost robot v první fázi zkontroluje pomocí senzitivity. Programově jsou věže reprezentovány jako samostatné objekty. K vytvoření objektů slouží třída *Tower*. Třída obsahuje několik proměnných, včetně atributů typu *Frame* pro body určující pozici věže a pozici pro položení a uchopení disku. V aplikacích je kladen důraz na dodržení principů objektového programování. Proto třída *Tower* obsahuje *GET* a *SET* metody pro práci s atributy. Tím je splněno paradigma zapouzdření.

V hlavní třídě programu se při inicializaci vytvoří základní objekty, jako jsou objekty robotického ramena, příruby, řídicí jednotky a nástroje. Dále jsou vytvořeny objekty pro každou věž a pomocí konstruktoru jsou přiřazeny hodnoty atributům. Výhodou je možnost měnit parametry jednotlivých *Frame* atributů a tím měnit pozici bodu. Toho je později využito v programu při přemísťování disků. Ke změně parametrů slouží pomocné metody ve třídě *Tower*.

Aplikace začíná na teach pendantu informativním sdělením s žádostí o připravení hlavolamu. K práci s teach pendantem slouží funkce *getApplicationUI()*. Ta vrátí

objekt, na který lze volat metody pro interakci s obsluhou a vypisování zpráv na displej teach pendantu. Zároveň, pokud je potřeba zasáhnouti operátora, rozsvítí se signalizační LED pásek na přírubě robota. LED pásek, uživatelské tlačítko a piny na přírubě lze číst a ovládat pomocí objektu typu *MediaFlangeIOGroup*.

Po potvrzení operátorem započne kontrola počátečního rozestavení disků. K tomuto účelu byly naprogramovány metody *check()* a *mapping()*. Metoda *check()* obsahuje základní logiku kontroly. V této metodě se pro každou věž volá metoda *mapping()*, která má na starost pomocí senzitivity kontrolu disků na určité věži.

---

```
public int mapping(Frame towerCheckPosition, ObjectFrame towerBase,
    boolean auxRodBool)
{
    int kruhy = 0;
    double predchoziPolomer = 0;
    mediaFlange.setLEDBlue(false);
    ForceCondition maxForce = ForceCondition.createSpatialForceCondition(
        grabber.getFrame("/GripperTCP"),
        3.0);
    while(true)
    {
        grabber.move(ptp(towerCheckPosition)
            .setJointVelocityRel(fastVel));
        grabber.move(linRel(0,-100,0)
            .setJointVelocityRel(checkVel)
            .breakWhen(maxForce));
        double colissionY =
            lbr.getCurrentCartesianPosition().getY();
        double polomer = colissionY - towerBase.getY();
        if()...
    }
    return kruhy;
}
```

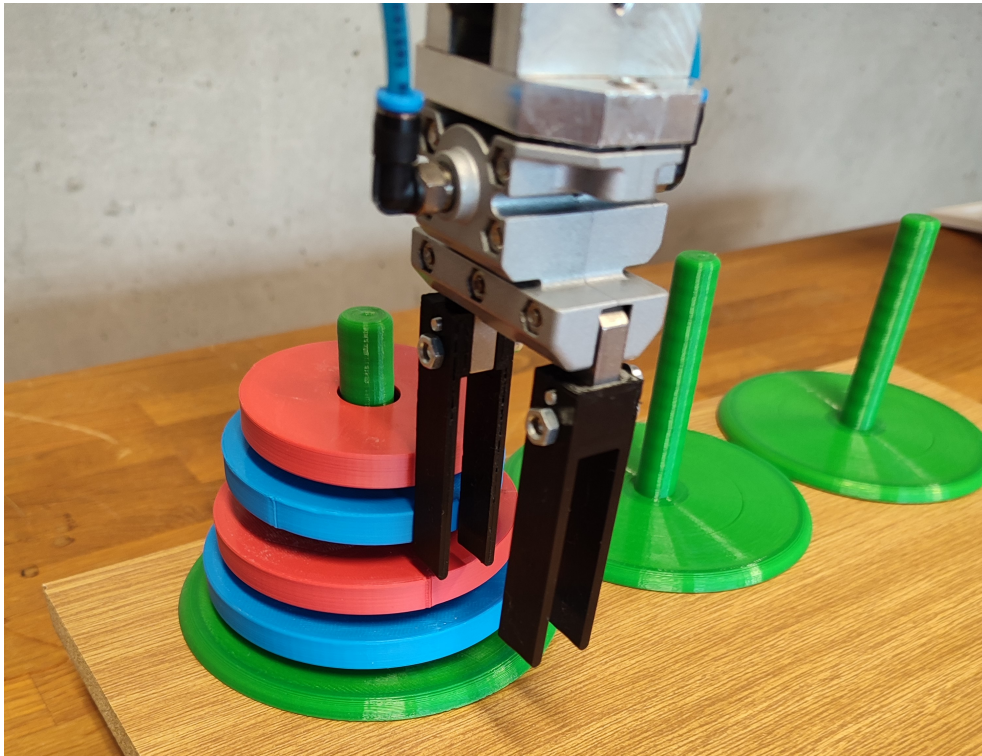
---

#### Ukázka kódu 3.2: Metoda mapping()

Pro detekci kolize je potřeba vytvořit objekt typu *ForceCondition*. Lze vytvořit několik druhů těchto podmínek. V tomto programu je vytvořen podmínka, která detekuje sílu ze všech směrů vůči definovanému objektu. Povinnými parametry při tvorbě této podmínky jsou *Frame*, vůči kterému se má síla detekovat, a prahová hodnota síly. Při překročení prahové hodnoty je podmínka splněna a lze na tuto událost reagovat. Volitelně lze definovat směr síly, kterým musí síla na definovaný objekt působit.

Parametry metody *mapping()* definují věž, na které je potřeba zjistit počet a rozestavení kruhů. Nástroj se opakovaně přibližuje k věži, dokud není splněna podmínka kolize. Po kolizi robot pohyb přerušuje a odečte současnou pozici nástroje. Poté vypočítá vzdálenost mezi odečteným bodem a referenčním bodem věže. Následují podmínky, které vyhodnocují, zdali se nachází větší disk na menším, nebo jestli se

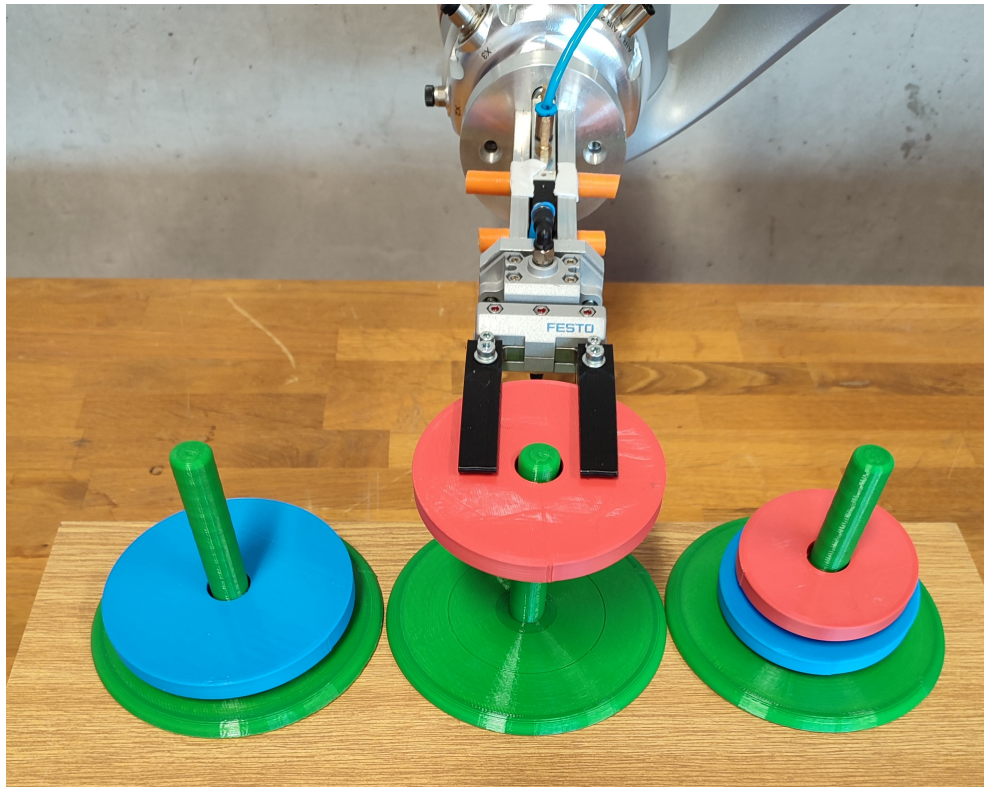
na věži nachází další disk. Návratovou hodnotou metody je počet kruhů na věži. Kontrolu počátečního rozestavení lze vidět na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7: Kontrola počátečního rozestavení

Metoda *check()* nechá nejdříve zkontrolovat věže, na kterých se disky nesmějí nacházet. Pokud se disky na těchto věžích nachází, program se pozastaví a operátor je přes teach pendant požádán o nápravu. Po potvrzení operátorem se proces opakuje. Po zkontrolování prázdných věží se robot přesune ke spočítání disků na startovací věži. Pokud je v průběhu počítání detekován větší disk na menším, operátor je opět požádán o nápravu. Po zjištění počtu disků se zavolá metoda *solve()*, kde je vstupním parametrem počet disků.

Metoda *solve()* zjistí pohyby robota pro vyřešení hlavolamu dle daných pravidel. Metoda je rekurzivně volána, dokud není hlavolam vyřešen. V každém volání je vyhodnoceno přemístění jednoho disku. Pro přemístění disku je zavolána metoda *move()*. Tato metoda přemístí disk z jedné věže na druhou dle definovaných parametrů. Při přemísťování disků je kontrolována síla působící na rameno robota. Pokud působící síla překročí hranici 50 N, robot pohyb pozastaví a počká několik sekund, než pokračuje dále. Jednotlivá přemístění jsou zároveň vypisována na displej teach pendantu. Princip přemístění disků lze vidět na obrázku 3.8.



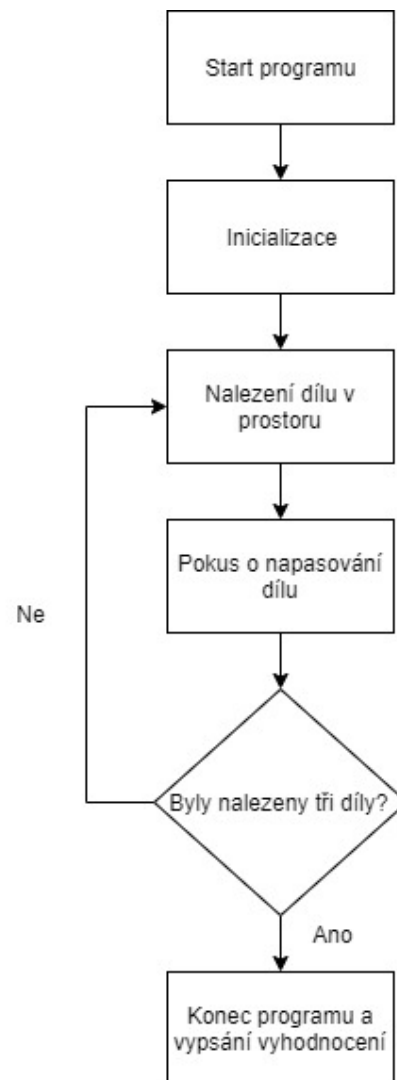
Obrázek 3.8: Vyřešení hlavolamu

Cílem aplikace je prezentování výhod senzitivního robota při řešení hlavolamu. Aplikace poukazuje zejména na možnost využití senzitivity pro zjištění počátečního rozestavění hlavolamu. Aplikace tak může simulovat úkol, při kterém je v praxi potřeba přemístit nebo balit díly tak, aby byla dodržena určitá pravidla. Robot dokáže sám pomocí senzitivity zjistit rozestavění a počet dílů a podle toho zareagovat. Díly nemusí být pravidelného tvaru a velikosti. Pomocí teach pendantu byla demonstrována možnost logování průběhu aplikace a možnost přivolání operátora, aby napravil stav, který nemůže robot sám vyřešit. Zároveň je v aplikaci naprogramován bezpečnostní prvek, spočívající v zastavení robota na požadovanou dobu při detekci kolize. Touto funkcí je poukázáno na skutečnost, že není potřeba kolem robota stavět bezpečnostní klece, jelikož robot dokáže detekovat kolize s operátorem a adekvátně zareagovat. Robot může pracovat volně v prostoru, dokud splňuje limity uvedené v tabulce 1.1. U klasického průmyslového robota by musely být instalovány rozsáhlé bezpečnostní klece a dodatečné senzory pro zjištění pozice a velikosti dílů.

## 3.4 Puzzle

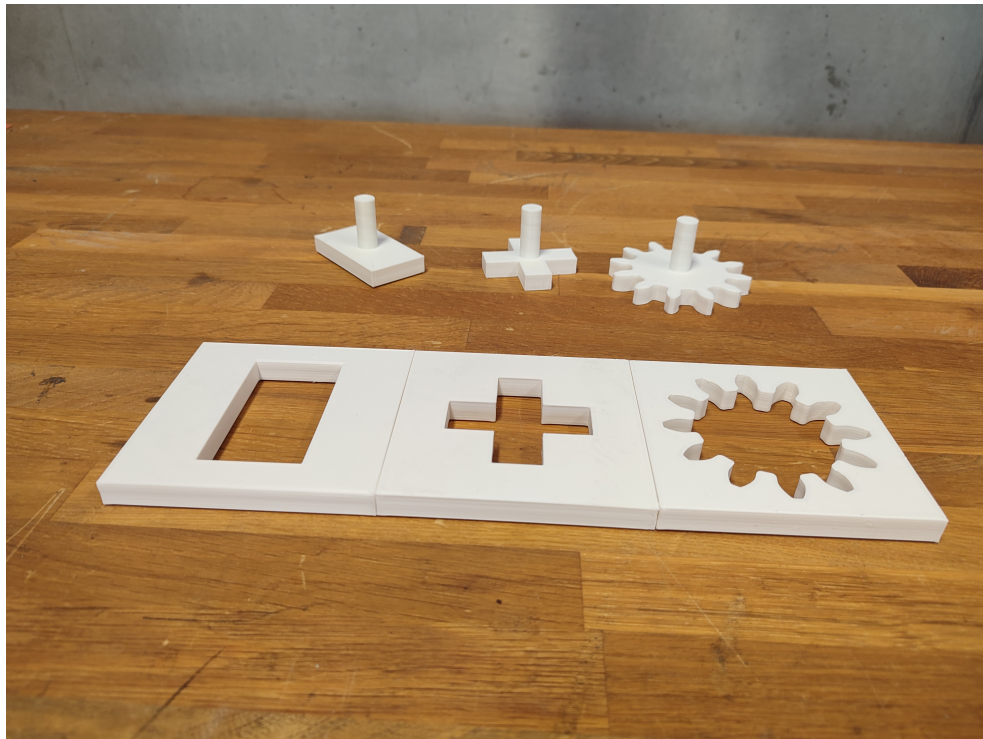
Senzitivní roboty jsou hojně využívány pro montážní aplikace. Při montáži je často potřeba napasovat díl určitého tvaru do požadované pozice výrobku. Využitím senzitivity lze napasování dílu zjednodušit na sadu podmínek. Pokud na robota působí síla v požadovaném směru a díl stále nedosáhl požadovaného bodu, robot díl buď pootočí, nebo změní směr a pokusí se o montáž znovu.

Následující aplikace má za cíl simulovat právě tento druh montáže. Pro aplikaci byly vytisknuty tři díly různých tvarů. Úkolem robota bude najít tyto díly v prostoru a pokusit se díl napasovat do příslušného výřezu. Diagram programu je znázorněn na obrázku 3.9.



Obrázek 3.9: Diagram programu Puzzle

V počáteční fázi aplikace jsou díly rozmístěny libovolně před požadovanými výřezy. Počáteční rozestavení je znázorněno na obrázku 3.10. V programu je pro jednoduchost uvažováno, že pořadí nalezených dílů odpovídá výřezům, do kterých je potřeba díly napasovat.

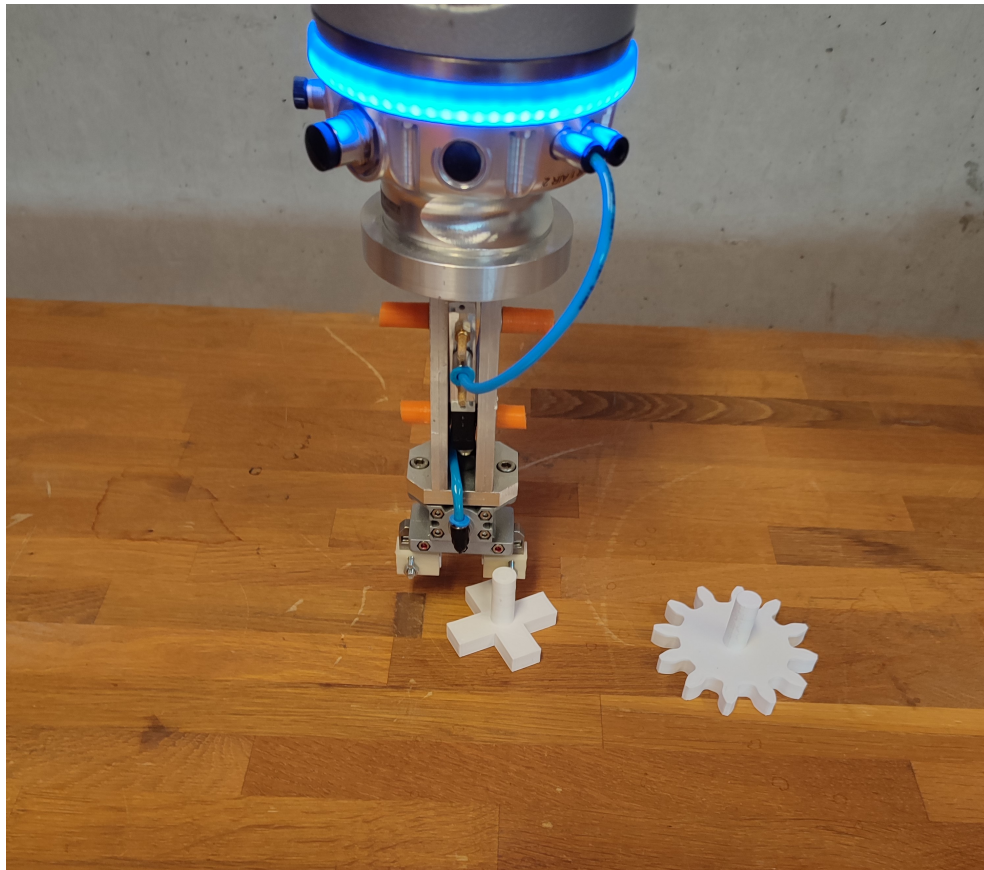


Obrázek 3.10: Počáteční rozestavení aplikace puzzle

Při spuštění programu jsou inicializovány standardní objekty reprezentující nástroj a robota. Dále jsou inicializovány body pro pozici výřezů a bod počátku, ze kterého robot začíná hledat díly v prostoru. Robot má definovaný prostor, který se snaží pomocí nástroje prohledat. Prohledávání probíhá opakovaným systematickým pohybem nástroje před výřezy, kde by se díly měly nacházet. Pokud nástroj detekuje sílu přesahující 6 N, která působí na nástroj ve směru osy Y, našel tak jeden z dílů. Pro nalezení dílu byla naprogramována metoda *findPiece()*.

Po nalezení dílu se nástroj nachází před válcovou částí. Válcovou část je potřeba napasovat mezi kleště nástroje za účelem uchopení. K napasování dílu mezi kleště slouží metoda *grab()*. Metoda implementuje logiku, kdy se nástroj opakovaně snaží urazit danou vzdálenost směrem k dílu. Pokud nástroj při tomto pohybu detekuje kolizi, znamená to, že se díl stále nenachází mezi kleštěmi. Nástroj se v tomto případě posune rovnoběžně k dílu a pokus opakuje. Tento proces se opakuje, dokud se válcová část dílu nenachází mezi kleštěmi.

Po umístění dílu mezi kleště je díl uchopen. Pro demonstrační účely byla naprogramována logika, pomocí které dojde k uchopení až po stisku uživatelského tlačítka umístěného na přírubě. Po stisknutí tlačítka se převede výstupní pin X3Pin1 do stavu true a kleště díl uchopí.



Obrázek 3.11: Nalezení dílu v prostoru

Po nalezení a uchopení dílu následuje proces umístění dílu do výřezu. K tomuto účelu slouží metoda *putPiece()* viz zdrojový kód 3.3. Vstupním parametrem této metody je bod určující střed výřezu. Díl je přemístěn nad výřez tak, aby střed dílu byl v ose se středem výřezu.

---

```
public boolean putPiece(Frame toPut)
{
    int STIFFNESS = 2500;
    double DAMPING = 0.9;
    cartImp = new CartesianImpedanceControlMode();
    cartImp.parametrize(CartDOF.Z).setStiffness(STIFFNESS)
        .setDamping(DAMPING);

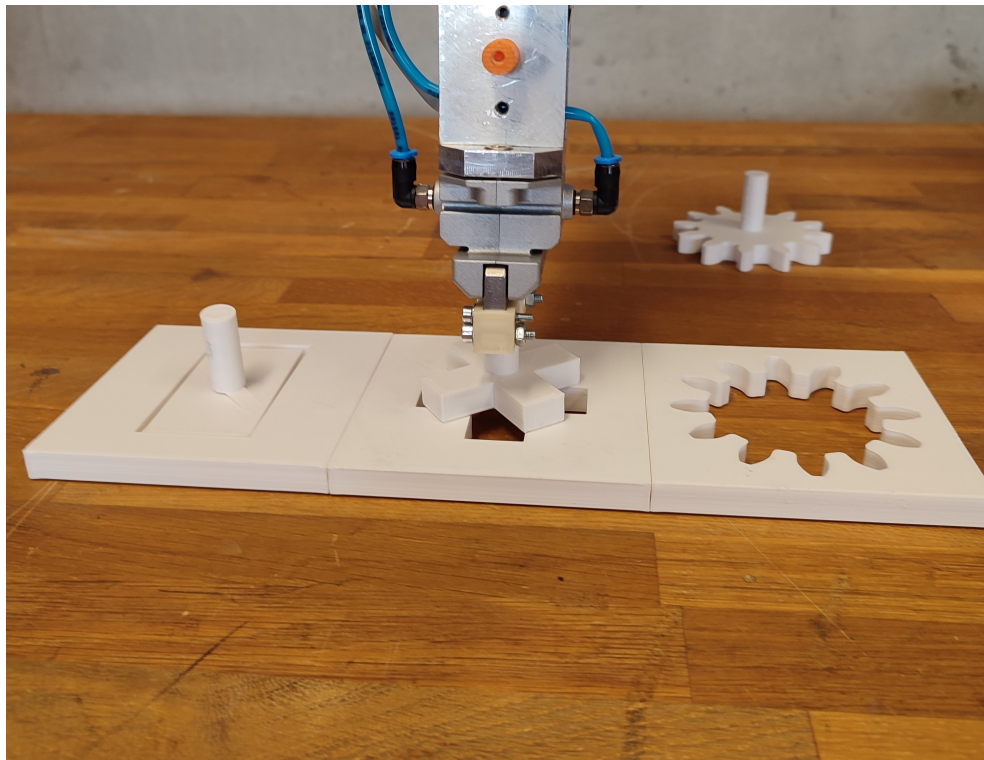
    RelativeLIN dropping =
        new RelativeLIN(0,0,200).setJointVelocityRel(checkVel)
            .setMode(cartImp)
            .breakWhen(maxForceZ);
    gripper.move(ptp(toPut).setJointVelocityRel(fastVel));
    while(true)....
}
```

---

Ukázka kódu 3.3: Metoda putPiece()

V metodě *putPiece()* je využito přenastavení chování robotického ramene na kolizi pomocí třídy *CartesianImpedanceControlMode*. Tato třída dovoluje přepnout robota do módu, v němž se robotické rameno při kolizi chová jako pružina. Po vytvoření objektu z této třídy lze nastavit hodnoty tlumení a tuhosti této virtuální pružiny. Zároveň je možné definovat směr, ve kterém se má robotické rameno takto chovat. Tento mód lze poté aplikovat na libovolný pohyb. Při správně nastavených hodnotách *stiffness* a *damping*, je možné tuto funkčnost využít k tlumení nárazů. Nevýhodou je delší doba dosažení prahové hodnoty kontrolované síly. To může zpomalovat dobu vyřešení úlohy. Zároveň při použití tohoto módu vzniká riziko, při kterém robot nemusí přesně dosáhnout cílového bodu.

Po deklarování proměnných v rámci této metody následuje spuštění cyklu pro napasování dílu do výřezu. Robot se s uchopeným dílem opakovaně přibližuje seshora k výřezu. Na tento pohyb je aplikován impedance control mod. Kolize ve směru osy Z je tedy tlumena. Pokud je detekována kolize, robot odečte současnou pozici nástroje a porovná, zdali se nachází pod určitou hodnotou ve směru osy Z. Pokud se nástroj pod touto hodnotou nenachází, znamená to, že díl stále není umístěn ve výřezu. V tomto případě robot díl pootočí okolo osy Z a pohyb opakuje. Tento proces je opakován dokud není díl umístěn do výřezu. Příklad napasování dílu lze vidět na obrázku 3.12. Posloupnost těchto pohybů je provedena pro všechny tři díly.



Obrázek 3.12: Napasování dílu do výřezu

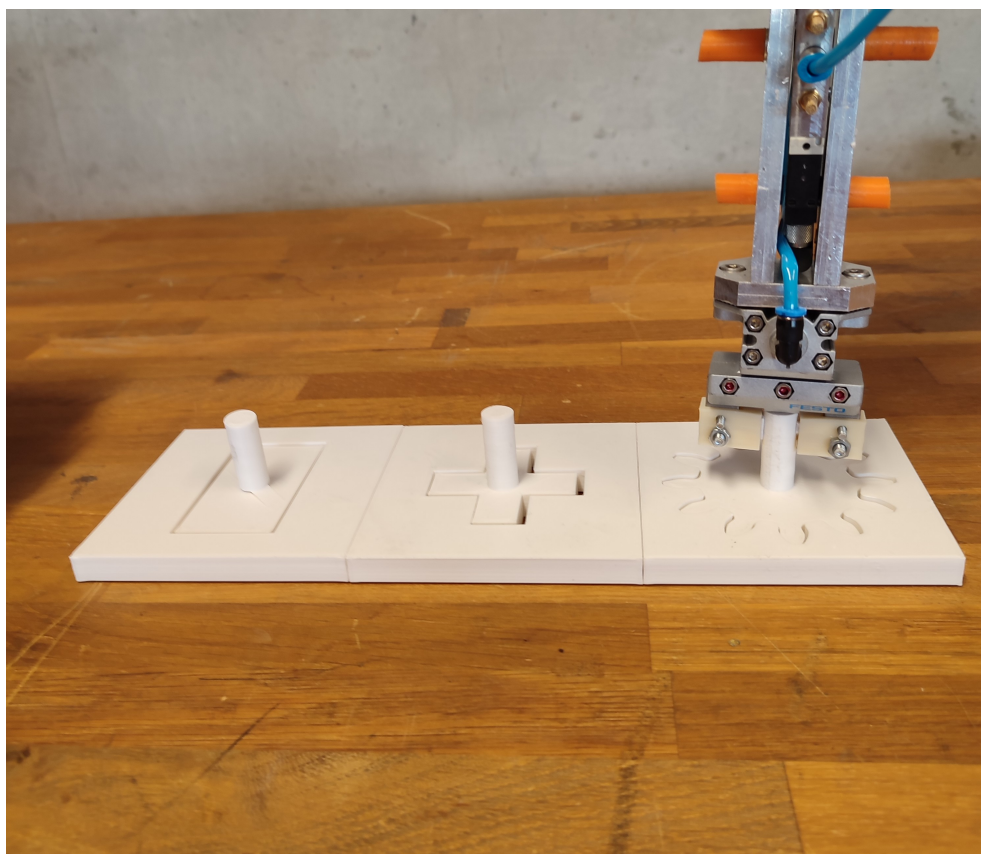


Cílem aplikace je demonstrovat možnosti robota při montáži. Jedná se zejména o ukázání senzitivity při montáži a využití třídy *CartesianImpedanceControlMode* pro tlumení nárazů. Zároveň je ukázána možnost ovládní pneumatického členu pomocí konektorů a uživatelského tlačítka na přírubě.

V praxi by aplikace mohla simulovat montáž ozubených kol. Robot ozubené kolo uchopí a snaží se ho napasovat do požadované pozice. Opakovaně se snaží ozubené kolo pootáčet dokud neregistruje změnu síly v určitém směru.

Opačným příkladem z praxe může být i problém popsán v oddílu 2.4.3. Robot stejného typu se snaží napasovat píst řazení do mechatronické součásti. Díky zaznamenání kolize může detekovat problém, kdy mohlo dojít k poškození pístu, a následně upozornit obsluhu linky, aby problém prověřila.

Nastavení virtuální pružiny robota lze využít i v rámci bezpečnosti. Při správném nastavení tohoto módu může tlumit následky kolize s lidským operátorem, nebo operátor může robota rovnou odstrčit ze své dráhy. Tím je zvýšena bezpečnost robota v přímé spolupráci s člověkem.

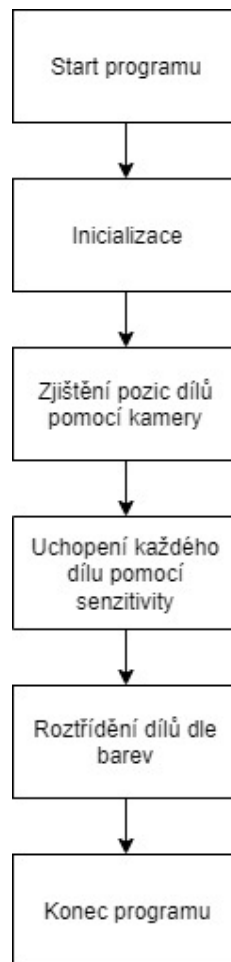


Obrázek 3.13: Úspěšně umístěné díly do výřezů

### 3.5 Bin picking

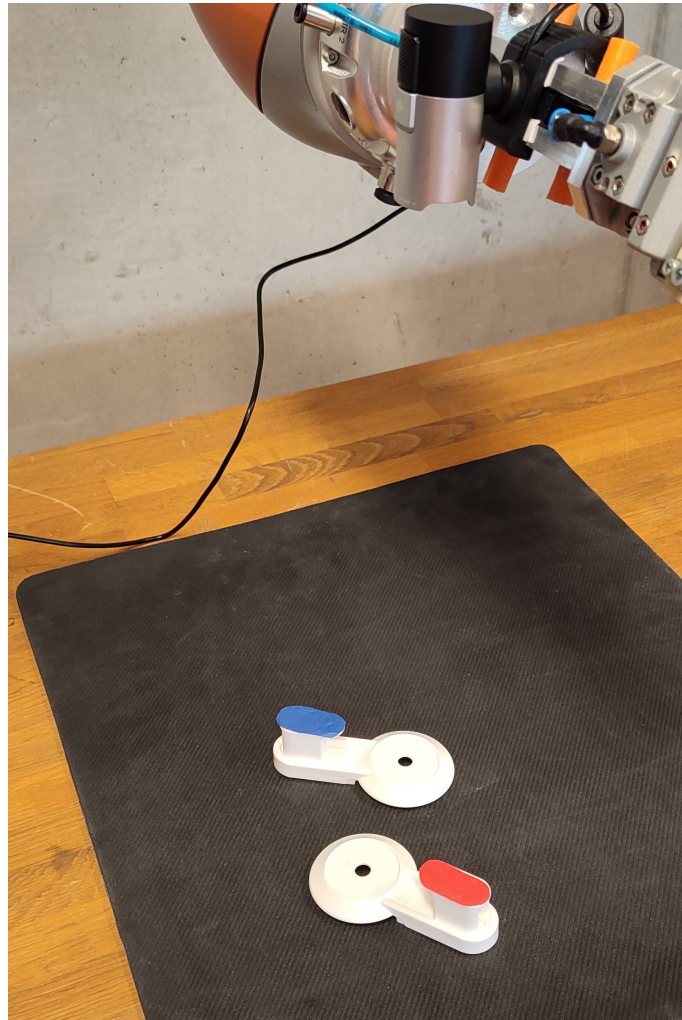
Některé druhy senzitivních robotů jsou vybaveny vestavěným kamerovým systémem. Příkladem může být již zmíněný ABB YuMi nebo série TM od společnosti Techman. Kamerové systémy otevírají nové možnosti automatizace. Vhodným přístupem pro mnohé průmyslové aplikace je zahrnutí technologie strojového vidění pro automatizované výrobní linky a robotická pracoviště. Příkladem může být využití strojového vidění pro kontrolu kvality výrobku nebo pro nalezení vhodného úchopu dílu v přepravce, kde jsou díly nahodile rozmístěny. Zároveň s rostoucím trendem digitalizace a přechodem na průmysl 4.0 je žádoucí, aby mezi sebou výrobní systémy navzájem komunikovaly.

Následující aplikace demonstruje možnosti robota Kuka LBR iiwa v obou těchto směrech. Cílem aplikace je rozřídění dílů do dvou skupin. Robot musí komunikovat s externím zařízením, které pomocí kamery zjistí polohu a druhy dílů na dané ploše. Poté pomocí senzitivity díly uchopí a dle pravidel rozřídí. Diagram aplikace je znázorněn na obrázku 3.14.



Obrázek 3.14: Diagram aplikace Bin picking

V počáteční fázi jsou na černé podložce libovolně rozmístěny díly pro roztřídění. Díly jsou od sebe rozlišeny pomocí červené a modré barvy. Cílem je roztřídit tyto díly do skupin dle barev. Na těle nástroje robota je umístěna kamera. Ta má za úkol určit pozici a příslušnou barvu všech dílů na podložce. Počáteční rozestavení lze vidět na obrázku 3.15. Pro demonstraci byly k dispozici pouze dva díly, aplikace je ale navržena pro libovolný počet dílů.



Obrázek 3.15: Počáteční rozmístění dílů

Kamera je připojena do počítače, na kterém je nahrán program určený pro zpracování obrazu. Na tomto počítači běží server s otevřeným socketem pro komunikaci. Server čeká na připojení klienta s požadavkem. Komunikačním protokolem je TCP/IP. Server i program pro zpracování obrazu jsou napsány ve vyšším programovacím jazyce Python. Důvodem je možnost využití knihovny OpenCV, která velmi zjednodušuje pořízení a zpracování obrazu.

Řídící jednotka robota je propojena s tímto počítačem pomocí Ethernetu. Na řídicí jednotce se nachází program robota a třída *Client*. Podle třídy *Client* se inicializuje objekt, který má možnost posílat serveru požadavek na zaslání souřadnic.

Aplikace opět začíná spuštěním programu na straně robota. Při spuštění se inicializují základní objekty pro ovládání robota a objekt reprezentující klienta. Dále se inicializují objekty reprezentující bod pro základní polohu nástroje při snímání plochy a referenční body pro odkládání dílů jednotlivých barev. Robot poté najede do bodu pro snímání plochy kamerou viz obrázek 3.15. Program je poté pozastaven a vypíše na teach pendant dotaz pro operátora, zdali mají být díly na ploše rozříděny. V opačném případě může operátor program ukončit.

Po potvrzení pokračování programu je zavolána metoda *Client.connect()*. Tato metoda se připojí na poslouchající server a odešle požadavek. Server tento požadavek zpracuje a spustí program na zpracování obrazu. Tento program nejdříve pořídí snímek plochy, jenž uloží a vytvoří jeho kopii ve formátu HSV. Na tomto formátu jsou poté pomocí masek vyhledány zvlášť červené a zvlášť modré pixely. Po aplikování masek je formát obrázku převeden do binární podoby, kde bílé pixely reprezentují nalezené pixely. V následujícím kroku program nalezne všechny vzniklé kontury. Konturou je myšlena uzavřená oblast pixelů stejné barvy — v tomto případě všechny oblasti bílých pixelů. Pro jednotlivé kontury jsou vypočítány souřadnice těžiště v pixelech. Příklad vypočítaných souřadnic pro jednotlivé díly lze vidět na obrázku 3.16.

Po zpracování obrazu jsou souřadnice formulovány do textového řetězce pro odeslání zpět klientovi. Textový řetězec má následující formát. Řetězec začíná souřadnicemi červených dílů. Jednotlivé souřadnice jsou odděleny čárkou a jednotlivé díly středníkem. Následuje znak „|“, který odděluje souřadnice červených a modrých dílů. Textový řetězec pro přiložený obrázek by vypadal následovně: *304,129|390,227*. Takto formulovaný řetězec odešle server zpět klientovi.



Obrázek 3.16: Zjištění těžiště jednotlivých kontur

Po přijmutí souřadnic od serveru, program robota daný řetězec rozparsuje. Jednotlivé souřadnice v pixelech jsou převedeny na souřadnice v milimetrech. Pro správné převedení bylo důležité definovat nový souřadný systém, vůči kterému se robot pohybuje. Tento systém musí přímo odpovídat systému, který snímá kamera. Následně je pro všechny souřadnice zavolána metoda *grabPiece()* viz zdrojový kód 3.4. Vstupními parametry této metody jsou souřadnice dílu a informace o barvě dílu.

---

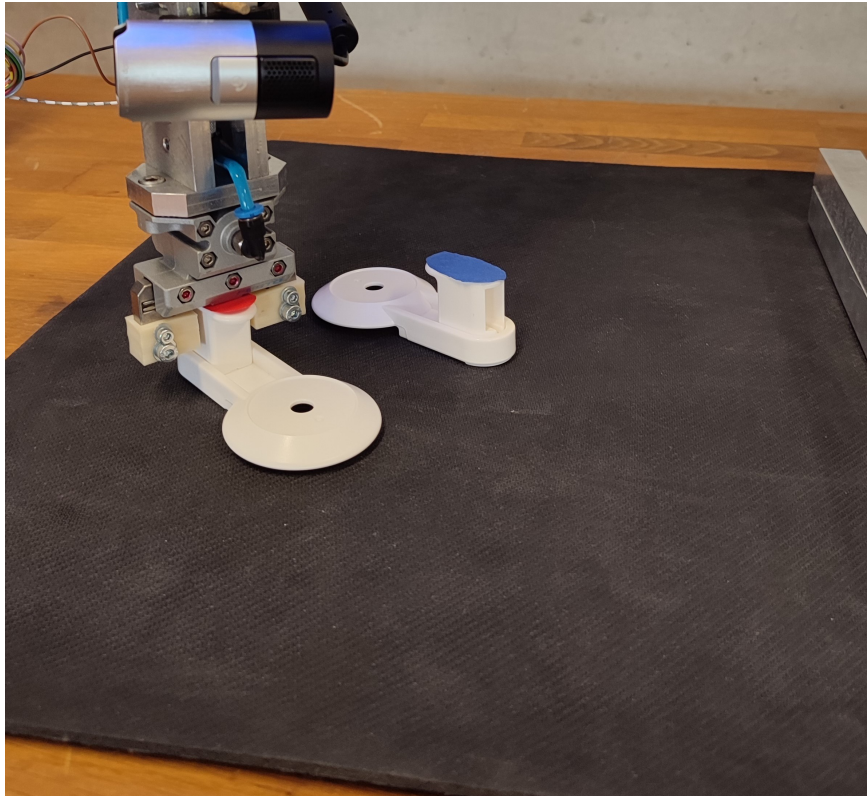
```
public void grabPiece(boolean red, double mX, double mY)
{
    int maxZ = 25;
    to_grab.setX(mX);
    to_grab.setY(mY);
    to_grab.setZ(-50);
    to_grab.setAlphaRad(Math.toRadians(130));
    boolean result = True;
    while(result)
    {
        result = checkPiece(maxZ);
        to_grab.setAlphaRad(to_grab.getAlphaRad() - Math.toRadians(20));
        grabber.move(lin(to_grab).setJointVelocityRel(moveVel));
    }
    ....
}
```

---

Ukázka kódu 3.4: Metoda *grabPiece()*

Po zavolání metody *grabPiece()* najede *TCP* nástroje nad bod, který je určený vstupními parametry metody. Jelikož díl může být libovolně natočen, je potřeba ho nejdříve napasovat mezi kleště nástroje. Díl je potřeba uchytit za vyvýšenou část. K tomuto účelu opět pomůže senzitivita robota. Po zavolání metody *checkPiece()* se robot opakovaně přibližuje nástrojem seshora k dílu. Pokud detekuje kolizi s nástrojem, svůj pohyb zastaví a odečte současnou pozici. Pokud je hodnota vzdálenosti od stolu větší než vstupní parametr metody, nástroj se pootočí kolem osy *Z* a pohyb opakuje. Tento proces je opakován, dokud není díl mezi kleštěmi nástroje.

Aplikace má za cíl díly roztřídit dle barvy a umístit je všechny na určené místo tak, aby díly měly stejnou orientaci. Orientací dílu je myšleno, na jaké straně vůči nástroji se nachází kruhová část dílu. K tomuto účelu je potřeba orientaci daného dílu nejprve zjistit. Po napasování dílu mezi kleště nástroje se kleště nejdříve sevrou a hned na to uvolní. To má za následek srovnání dílu vůči nástroji. Tato pozice nástroje je uložena do proměnné. Nástroj se poté posune o určitou vzdálenost ve směru osy *Y* vůči svému souřadnému systému. Poté je opět zavolána metoda *checkPiece()*. Touto metodou je zjištěno, zdali se nástroj nachází nad kruhovou částí dílu, a nebo ne. Tímto procesem se určí orientace dílu. Nástroj se poté přesune zpět do uloženého bodu k uchopení dílu. Díl je uchopen pomocí pneumatických kleští a přemístěn na určité místo dle barvy dílu. Díky zjištěné orientaci lze určit směr, kterým má být díl natočen po přemístění.



Obrázek 3.17: Uchopení dílu do kleští

Naprogramovaná aplikace úspěšně komunikuje s připojeným počítačem. Algoritmus na zpracování obrazu správně detekuje umístění a barvu dílu. V současném stavu musí být ručně vytvořena báze a přenastaveny konstanty pro přepočítání pixelů na reálnou pozici v prostoru. Rozšířením aplikace může být vylepšení o automatické vypočítání těchto konstant a nastavení báze. Toto rozšíření by vyžadovalo složitější algoritmus pro zpracování obrazu.

V aplikaci je opět demonstrována největší výhoda robota, a to využití senzitivity. Robot pomocí senzitivity dokáže zjistit správné natočení nástroje pro uchopení libovolně natočeného dílu. Zároveň je senzitivita využita pro zjištění natočení dílu v prostoru.

Aplikace může například simulovat situaci, kdy je ve výrobě potřeba roztřídit a zabalit určité součástky přijíždějící na páse. K roztřídění je využita vizuální kontrola pomocí kamery a jednoduché zpracování obrazu. Zároveň je možné, aby robot komunikoval s externími zařízeními. Robot tak může nejen žádat o data, ale i posílat různé informace uvádějící například počet roztříděných kusů, počet vadných kusů atd.

## 4 Závěr

Cílem práce bylo širší přiblížení problematiky využití senzitivních robotů v průmyslu. Výsledkem práce je v první řadě teoretický rozbor týkající se senzitivní robotiky a její použití. Senzitivní roboty jsou zajisté rostoucím trendem v oblasti robotizace výroby. Může za to zejména rostoucí poptávka po řešení aplikací, u kterých je potřeba přímá spolupráce robota s člověkem. Dalším důvodem je jednoduchá integrace do výroby a vysoká míra bezpečnosti. Ze zmíněných studií je zřejmé, že se trh senzitivních robotů za posledních několik let velmi rozrostl. Předpoklady ukazují, že se tento trend v dalších několika letech nebude měnit. Důvodem je zejména stále rostoucí elektrotechnický a automobilový průmysl. Nejčastějším řešením výrobců, při návrhu senzitivních robotů, je umístění momentových senzorů do kloubů angulárního robota. V závěru teoretické části jsou přiblíženy oblasti využití senzitivních robotů v praxi. Součástí jsou reálné příklady z firem. V neposlední řadě jsou objasněny nejčastější metody pro programování těchto systémů.

V praktické části práce jsou navrženy a naprogramovány tři ukázkové aplikace demonstrující výhody a možnosti senzitivních robotů. Hlavním cílem je v každé aplikaci demonstrovat zejména využití senzitivity. Dále je poukázáno na možnosti využití teach pendantu, ovládání nástroje, využití programovatelných tlačítek, módů robota a možnost komunikace s externím zařízením. Naprogramované aplikace lze například využít na dnu otevřených dveří univerzity. Zejména vhodnou aplikací k tomuto účelu je Tower of Hanoi.

Možným rozšířením práce může být vytvoření aplikace, kde úkolem robota bude přímo spolupracovat s lidským operátorem. Společně se budou muset kupříkladu podílet na montáži určitého výrobku. Součástí rozšíření může být i tvorba univerzálního nástroje. Robot by mohl komunikovat s externím zařízením, na kterém bude uživatelské prostředí zobrazující informace o probíhající montáži. Součástí může být využití kamerového systému.

## Použitá literatura

- [1] *ISO 8373: Robots and robotic devices, Vocabulary*. 3. vyd. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.
- [2] *From robot to cobot, a look through history* [online]. WiredWorkers, 2019 [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: <https://wiredworkers.io/blog/from-robot-to-cobot/>.
- [3] DAVIDS, Mariane. *A Brief History of Robots in Manufacturing* [online]. 2017 [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/a-brief-history-of-robots-in-manufacturing>.
- [4] *Executive Summary World Robotics 2021 Industrial Robots* [online]. 2021 [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: [https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive\\_Summary\\_WR\\_Industrial\\_Robots\\_2021.pdf](https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2021.pdf).
- [5] *Collaborative Robots Market Size* [online]. 2021 [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/collaborative-robots-market-101692>.
- [6] *Robot, First Unimate Robot Ever Installed on an Assembly Line, 1961* [online]. USA, Copyright © 2019 [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://www.thehenryford.org/collections-and-research/digital-collections/artifact/183434#slide=gs-450965>.
- [7] STEVENS, Mark. *Pros and cons of using industrial robots in your manufacturing operation* [online]. Wipfli, 2021 [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://www.wipfli.com/insights/articles/mad-pros-and-cons-of-using-industrial-robots-in-manufacturing>.
- [8] MATHIEU, Bélanger-Barrette. *Cobots Ebook* [online]. 8. vyd. Robotiq, 2017 [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/collaborative-robot-ebook>.
- [9] MARQUISS, Ray. *Five Types of Industrial Robots And How To Choose The Best Fit* [online]. Valin, 2018 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.valin.com/resources/articles/five-types-of-industrial-robots-and-how-to-choose-the-best-fit>.
- [10] *Why does it bend like that* [online]. Copyright © 2015 [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: <https://opendog.wordpress.com/tag/workspace/>.



- [11] *Five Types of Industrial Robots And How To Choose The Best Fit* [online]. Copyright © 2014 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: [https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tf5110-tf5113\\_tc3\\_kinematic\\_transformation/1955476875.html&id=](https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tf5110-tf5113_tc3_kinematic_transformation/1955476875.html&id=).
- [12] STAICU, Stefan a Daniela-Craită CARP-CIOCARDIA. Dynamic analysis of Clavel's Delta parallel robot. In: 2003, sv. 3. Dostupné z DOI: [10.1109/ROBOT.2003.1242230](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1242230).
- [13] *Robot Unit Components and Motion Direction* [online]. Copyright © 2014 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: [http://eidtech.dyndns-at-work.com/support/RC8\\_Manual/005391.html](http://eidtech.dyndns-at-work.com/support/RC8_Manual/005391.html).
- [14] PLATBROOD, Fabby a Otto GÖRNEMANN. *Bezpečnost ve spolupracujících robotických systémech* [online]. 2019 [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/bezpecnost-ve-spolupracujicich-robotickyh-systemech>.
- [15] BARTOŠÍK, Petr. *Bezpečnost kolaborativních robotů*. [Online]. Automa: časopis pro automatizační techniku., 2017 [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/bezpecnost-ve-spolupracujicich-robotickyh-systemech>.
- [16] *ISO 10218-1: Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 1: Robots*. 1. vyd. Geneva: International Organization for Standardization, 2011.
- [17] *ISO 10218-2: Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 2: Robot systems and integration*. 1. vyd. Geneva: International Organization for Standardization, 2011.
- [18] *ISO/TS 15066: Robots and robotic devices — Collaborative robots*. 1. vyd. Geneva: International Organization for Standardization, 2016.
- [19] VOJÁČEK, Antonín. *Problematika bezpečnosti kolaborativních robotů - ISO/TS 15066* [online]. automatizace.hw, 2019 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/problematika-bezpecnosti-kolaborativnich-robotu-isots-15066.html>.
- [20] *Implementace kolaborativních robotů z pohledu legislativy* [online]. 2019 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/implementace-kolaborativnich-robotu-z-pohledu-legislativy>.
- [21] *Airskin technology* [online] [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.airskin.io/airskin>.
- [22] WANDELBOE, Andreas. *10 Innovative Cobot Companies to Watch In 2020* [online]. The ai journal, 2020 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://aijournal.com/cobot-companies/>.
- [23] CALIENDO, Heather. *Meet YuMi: ABB's new collaborative dual-arm robot* [online]. Plastics technology, 2015 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.ptonline.com/articles/meet-yumi-abbs-new-collaborative-dual-arm-robot->.

- [24] *Universal robots* [online] [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/cs/>.
- [25] *Fanuc spolupracující roboty* [online] [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/spolupracuj%C3%ADc%C3%AD-roboty>.
- [26] *Getting Started With Collaborative Robots* [online]. Robotiq, 2017 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://robotiq.com/why-robots/getting-started>.
- [27] XIAO, Maya. *The Collaborative Robot Market 2021–28: Grounds for Optimism After A Turbulent Two Years* [online]. Interact Analysis, Copyright © 2021 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.interactanalysis.com/the-collaborative-robot-market-2021-28-grounds-for-optimism-after-a-turbulent-two-years/>.
- [28] KASAL, Luboš. *Využití senzitivních robotů v průmyslu*. 2020. Ročníkový projekt. Fakulta mechatroniky informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci. Vedoucí práce Tomáš MARTINEC.
- [29] *YuMi manufacturing sockets at ABB's plant in the Czech Republic* [online]. 2017 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://new.abb.com/news/detail/62029/yumi-manufacturing-sockets-at-abbs-plant-in-the-czech-republic>.
- [30] BARTOŠÍK, Petr. *Kooperující roboty ve Škoda Auto Vrchlabí založily již milióny píst převodovky DQ 200* [online]. Automa, 2017 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/kooperujici-roboty-ve-skoda-auto-vrchlabi-zalozily-jiz-milionty-pist-prevodovky-dq-200-2017\\_02\\_0\\_9827/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/kooperujici-roboty-ve-skoda-auto-vrchlabi-zalozily-jiz-milionty-pist-prevodovky-dq-200-2017_02_0_9827/).
- [31] *Systémy HRC na výrobních linkách u BMW* [online] [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/pr%c5%afmyslov%c3%a1-odv%c4%9btv%c3%ad/solutions-database/2017/06/solution-systems-bmw-dingolfing>.
- [32] OWEN-HILL, Alex. *What Are the Different Programming Methods for Robots?* [Online]. Robotiq, 2016 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/what-are-the-different-programming-methods-for-robots>.
- [33] *KUKA Sunrise Cabinet, Assembly Instruction*. Augsburg, 2015.
- [34] *KUKA Sunrise.OS 1.7*. Augsburg, 2015.

## A Přílohy

### A.1 Obsah přiloženého ZIP souboru

- Zdrojové kódy pro jednotlivé aplikace
- CAD soubory s modely hlavolamů
- Xml soubor s daty pro robota