

# Demonstrační úloha robota ABB Yumi

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B2612 Elektrotechnika a informatika

*Studijní obor:*

Elektronické informační a řídicí systémy

*Autor práce:*

**Radek Kulhavý**

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky





## Zadání bakalářské práce

# Demonstrační úloha robota ABB Yumi

*Jméno a příjmení:* Radek Kulhavý  
*Osobní číslo:* M17000045  
*Studijní program:* B2612 Elektrotechnika a informatika  
*Studijní obor:* Elektronické informační a řídicí systémy  
*Zadávací katedra:* Ústav mechatroniky a technické informatiky  
*Akademický rok:* 2020/2021

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s možnostmi programování robotů ABB se zaměřením na robota Yumi.
2. Na základě provedené rešerše navrhnete původní demonstrační úlohu.
3. Úlohu realizujte na robotickém zařízení případně pomocí metod offline programování.

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

dle potřeby dokumentace  
30–40  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] Schilling R. J. *Fundamentals of Robotics. Analysis and Control. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.*
- [2] Angeles J. *Fundamentals of Robotics Mechanical Systems. Springer-Verlag, New York, 2003, second edition.*

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Datum zadání práce:*

9. října 2020

*Předpokládaný termín odevzdání:*

17. května 2021

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

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.  
vedoucí ústavu

V Liberci dne 9. října 2020

## 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.

17. května 2021

Radek Kulhavý



## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Josefu Černohorskému, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a poskytnutí přístupu k pracovišti v prostorách Technické univerzity v Liberci. Dále bych chtěl poděkovat rodině, která mě podporovala ve studiu a přátelům, kteří mi v této době byly oporou.

# Abstrakt

## Demonstrační úloha robota ABB YuMi

V bakalářské práci je popsán současný stav využití kolaborativních robotů se zaměřením na typ IRB 14000 YuMi, který nabízí firma ABB. V návaznosti na to jsou uvedeny možné způsoby programování. Jsou popsány možnosti programu RobotStudio od firmy ABB. Byly zjištěny nejčastější typy aplikací kolaborativních robotů v průmyslu, jsou uvedeny příklady úloh využívajících robota YuMi. Je navržena a realizována demonstrační úloha pro robota YuMi IRB 14000, který je instalovaný v prostorách Technické univerzity v Liberci (TUL). V navržené úloze se manipuluje s objekty, které jsou rozpoznávány kamerou. Realizace je provedena offline programováním, přičemž se ověřuje funkčnost simulací na modelu. V online realizaci se využívá funkce Integrated Vision System, která je součástí programu RobotStudio. Demonstrační úloha byla otestována na pracovišti TUL. Doporučuje se pracoviště vybavit barevnou kamerou.

**Klíčová slova:** kolaborativní robot, programování, YuMi, demonstrační úloha, RobotStudio

# Abstract

## Demonstration task of ABB YuMi robot

Bachelor thesis describes current use of collaborative robots, focusing on IRB 14000 YuMi type, offered by the ABB company. Following that are stated possible ways of programming cobots. The RobotStudio program by ABB company was highlighted. The most common types of collaborative robots applications were listed. Examples of tasks utilizing cobot YuMi are given. Demonstration task for IRB 14000 YuMi cobot is proposed and implemented in Technical University of Liberec (TUL) premises. The proposed task includes manipulation with objects, which are recognised using camera. Implementation is carried out using mainly offline programming and its functionality is verified on simulation models. Online part of implementation uses Integrated Vision System function, which is part of RobotStudio program. Demonstration task was tested at work station at TUL. Equipping the workstation with color camera is recommended.

**Key words:** collaborative robot, programming, YuMi, demonstration task, RobotStudio

# Obsah

Poděkování.....	5
Abstrakt.....	6
Abstract.....	6
Úvod.....	10
1 Kolaborativní robot v průmyslu.....	11
1.1 Podmínky použití průmyslových robotů.....	14
1.2 Parametry kolaborativních robotů.....	16
1.2.1 Roboty ABB.....	18
1.2.2 Universal Robots.....	20
1.2.3 Roboty KUKA.....	21
1.2.4 Roboty FANUC.....	22
2 Možnosti programování kobotů.....	23
2.1 Online programování.....	23
2.2 Programování přímým učením.....	24
2.3 Offline programování.....	25
2.3.1 RobotStudio.....	26
3 Příklady uplatnění kobotů v praxi.....	28
3.1 Vybrané průmyslové aplikace využívající koboty.....	28
3.1.1 Manipulace s materiálem (Pick and Place).....	28
3.1.2 Balení a paletování.....	29
3.1.3 Obsluha strojů.....	30
3.1.4 Kontrola kvality.....	30
3.2 Příklady aplikací kobota YuMi.....	31
4 Návrh vlastní úlohy.....	33
4.1 Cíl praktické úlohy.....	33
4.2 Popis pracoviště.....	33
4.2.1 Popis specifikací kobota YuMi.....	34
4.2.2 Příslušenství kobota YuMi.....	34
4.2.3 Ostatní součásti pracoviště.....	36
4.3 Návrh řešení.....	39
4.3.1 Popis programu a blokové schéma.....	40
5 Realizace navržené úlohy.....	42
5.1 Offline simulační model.....	42
5.1.1 Model pracovní stanice.....	42
5.1.2 Zavedení souřadných systémů.....	43
5.1.3 Vytvoření cest a kódu s použitím modelu a jazyku Rapid.....	44
5.1.4 Integrated Vision system.....	45
5.2 Online realizace.....	45
6 Dosazené výsledky a závěr.....	46
Literatura.....	47
Přílohy.....	51

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Graf počtu ročně instalovaných robotů v jednotlivých odvětvích průmyslu [2].....	12
Obrázek 1.2: Graf počtu instalovaných robotů od roku 2010 [2].....	12
Obrázek 1.3: Ukázka z normy ISO 15066 [14].....	15
Obrázek 1.4: Robot IRB 14000 YuMi [19].....	19
Obrázek 1.5: Přehled kobotů firmy Universal Robots [21].....	20
Obrázek 1.6: Přehled kobotů firmy KUKA [22].....	21
Obrázek 1.7: Přehled kobotů firmy FANUC [23].....	22
Obrázek 2.1: Ukázka pendantu [25].....	24
Obrázek 3.1: Ukázka prstového uchopovače [39].....	29
Obrázek 3.2: Stanoviště vybavené kobotem CR-15iA [32].....	30
Obrázek 3.3: Umísťování balení do palety [32].....	30
Obrázek 3.4: DiscCobot od firmy Alicona [33].....	31
Obrázek 3.5: Ukázka pracoviště závodu Elektro-Praga [36].....	32
Obrázek 3.6: Testování automatů ATM pomocí YuMi [37].....	32
Obrázek 4.1: Fotografie pracoviště využitého pro demonstrační úlohu.....	34
Obrázek 4.2: Efektor použitého kobota YuMi.....	35
Obrázek 4.3: Efektor použitého kobota YuMi.....	35
Obrázek 4.4: Kamera ABB Cognex AE3 [38].....	36
Obrázek 4.5: Zásobník s pozicemi přiřazenými k hodnotám řídicí kostky.....	37
Obrázek 4.6: Řídicí kostka umístěna do omezeného prostoru.....	38
Obrázek 4.7: Sada míčků reprezentujících výrobky.....	38
Obrázek 4.8: Ukázka sady míčků, reprezentujících vadné výrobky.....	39
Obrázek 4.9: Kontejner vadných výrobků.....	39
Obrázek 4.10: Blokové schéma navrženého programu.....	41
Obrázek 5.1: Model pracovní stanice.....	43
Obrázek 5.2: Souřadný systém - Stůl.....	44
Obrázek 5.3: Souřadný systém - Zásobník.....	44

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled ISO norem upravujících bezpečnost robotů [15].....	16
---	----

## Seznam symbolů, zkratek a termínů

HCR	kolaborativní robot (Human collaborative robot)
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)
Kobot	kolaborativní robot
TCP	Tool Center Point
TUL	Technická univerzita v Liberci
UTP	Unprotected Twisted Pair neboli kroucená dvojlinka
YuMi	IRB 14000 YuMi

# Úvod

V dnešní době dochází v průmyslu ke stále vyšší míře automatizace. Jedním z hlavních způsobů automatizace je použití robotů v průmyslových aplikacích. Ne všude je však výhodné použití standardních průmyslových robotů. Na pracovištích, kde se nevyplatí úplná automatizace nebo není vzhledem k typu úlohy možná, lze často využít roboty, které spolupracují s člověkem, tzv. kolaborativní roboty. To, v kombinaci s jejich podstatně nižší pořizovací cenou, vytváří stále populárnější alternativní způsob automatizace výroby. Výhodou tohoto typu robotů je jejich flexibilní použití a snadnější způsoby jejich programování.

Cílem této práce je navrhnout demonstrační úlohu pro kolaborativního robota IRB 14000 YuMi firmy ABB nacházejícího se na Technické univerzitě v Liberci. Tato úloha by měla ukazovat použití a práci s kolaborativním robotem.

Pro dosažení cíle byl proveden průzkum aktuálního stavu trhu s kolaborativními roboty. Byly popsány podmínky jejich využití a také byly stanoveny základní parametry, dle kterých lze roboty porovnávat. Byly představeny možnosti programování kolaborativních robotů se zaměřením na program RobotStudio, který je využíván pro programování robotů firmy ABB. Dále bylo zjištěno, pro jaký typ úloh se kolaborativní roboty využívají. Mezi příklady praktických aplikací je uvedeno využití robota IRB 14000 YuMi. Na základě těchto informací byla navržena demonstrační úloha, ve které se manipuluje s objekty. K vytvoření simulace bylo použito offline programování v systému RobotStudio. Pro rozpoznání objektů byla využita integrovaná kamera a systém strojového vidění (Vision system). Demonstrační úloha byla aplikována na skutečného robota.

# 1 Kolaborativní robot v průmyslu

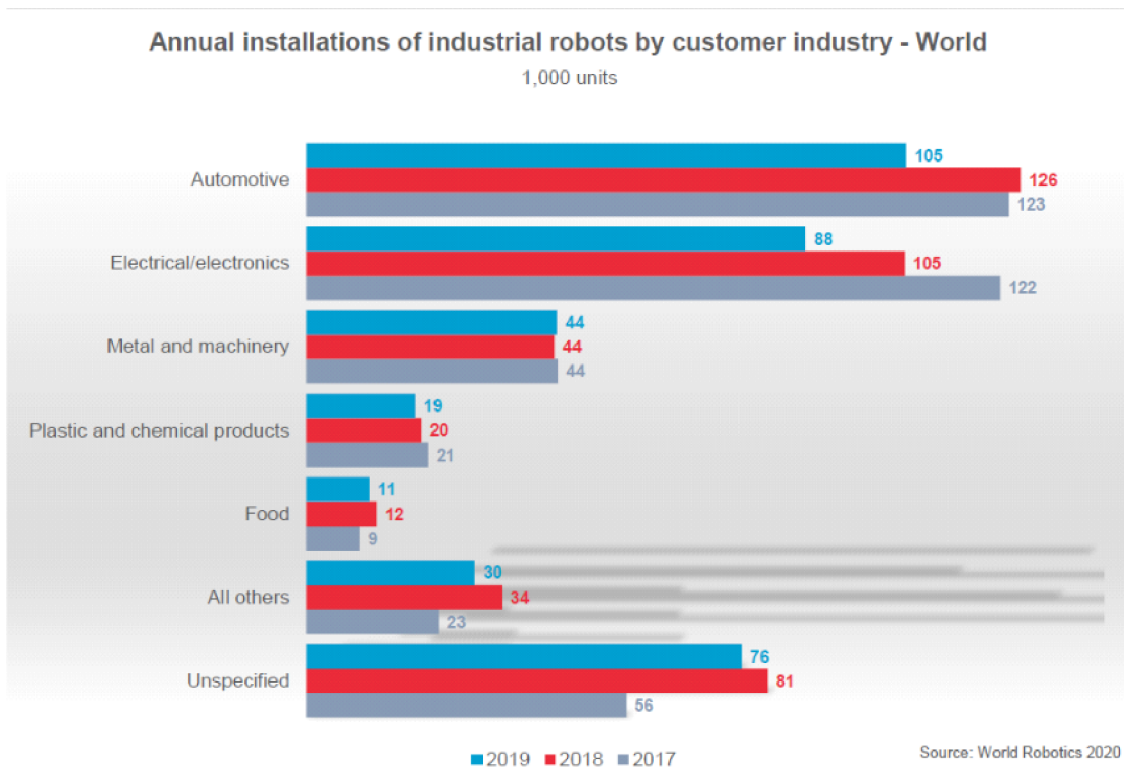
Průmyslový robot je podle normy ISO 8373 [1] definován jako: „Automaticky řízený, opakovatelně programovatelný, víceúčelový manipulátor programovatelný ve třech nebo více osách, které mohou být buď fixované na místě, nebo mobilní pro použití v průmyslových automatických aplikacích.“

Kolaborativní robot, zkráceně kobot, je typ robota, který spolupracuje s člověkem. Slovo kolaborativní je odvozeno od anglického „collaborativity“, což znamená spolupráce, anglická zkratka pro tento typ robota je cobot. Také se označují zkratkou HCR (human collaborative robot). Kolaborativní roboty jsou trendem teprve posledních několika let.

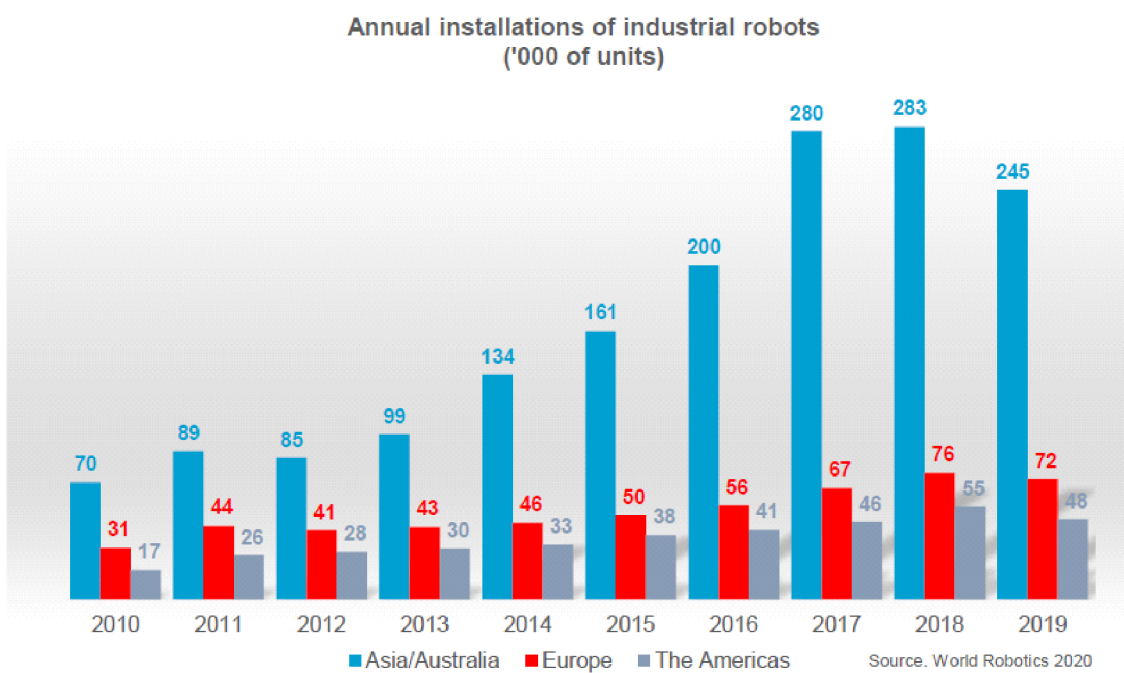
Na rozdíl od klasických robotů kolaborativní roboty nepotřebují zábrany a oplocení. Kobot je navržen tak, aby eliminoval bezpečnostní rizika pomocí svých parametrů, senzorů a nastavení pracovních zón. Tradiční roboty pracují samostatně ve vymezeném prostoru a lidé do tohoto prostoru nesmí vstupovat mimo definovaný bezpečný stav stroje. Koboty pracují ve stejném operačním prostoru a zajišťují stereotypní úkoly, zatímco zaměstnanci se mohou soustředit na přesnost a kvalitu. Díky nenáročnosti programování a flexibilnímu využití je v porovnání s klasickými roboty rychlá návratnost investice a i pořizovací cena je nižší. Implementaci kobota do provozu lze uskutečnit i během jednoho až dvou dnů bez nutnosti složitého programování. Jejich ovládání je snadné, intuitivní .

Kolaborativní roboty mají své využití v průmyslových odvětvích od automotive až po potravinářství. Činnosti, které může kobot vykonávat, jsou například lepení, dávkování, svařování, leštění, montáž součástí, obrábění kovů, třídění, manipulace s materiálem, šroubování, laboratorní analýzy, kontroly kvality, balení [3, 5, 10] .

Ročně se vyrobí více než 370 000 jednotek robotů, největší zastoupení je v automobilovém (28 %) a elektronickém (24 %) průmyslu (viz Obrázek 1.1). V posledních letech docházelo k masivnímu nárůstu v počtu instalovaných průmyslových robotů. Za poslední dva roky došlo ke stagnaci a mírnému poklesu, zapříčiněnému globálním ekonomickým poklesem, umocněným globální pandemií (viz Obrázek 1.2). Tyto příčiny však z dlouhodobého hlediska poptávku po automatizaci umocňují, předpokladem tedy je, že zpomalení nárůstu je pouze krátkodobé [2] .



**Obrázek 1.1:** Graf počtu ročně instalovaných robotů v jednotlivých odvětvích průmyslu [2]



**Obrázek 1.2:** Graf počtu instalovaných robotů od roku 2010 [2]



Novými trendy a směry ve vývoji robotů je rozšiřování jejich funkcionalit, flexibility a snižování celkových nákladů. Rychlý vývoj v systémech a softwarových algoritmech zvyšuje rozsah úkolů, které jsou roboty schopny provádět. Jedním z příkladů je vychystávání koše (tzv. bin picking), složitá operace, která vyžaduje, aby robot dokázal identifikovat a vybrat jednu část z koše buď podobných, nebo odlišných částí. Cílová část může být zcela nebo částečně zakryta jinými. Jakmile je díl nalezen, software robota zpracuje data, aby určil, jak k němu dosáhnout, a vypočítá správnou orientaci efektoru (ruka nebo jiný uchopovací mechanismus). Senzory v chapadle přivádějí data do softwaru robota, který odesílá kód zpět do robota, aby mu umožnil vyzvednout objekt, aniž by jej poškodil buď vynaložením příliš velkého tlaku, nebo upustil při použití nedostatečného tlaku. Během příštích 10 let budou roboty díky vývoji sémantické inteligence stále více schopny posoudit a vhodně reagovat na své prostředí. Výše popsané nové funkcionality vedou k přijetí robota v dalších průmyslových odvětvích a menších společnostech, což umožňuje vstup na další trhy. Roboty také přispívají ke snižování plýtvání materiálem a umožňují výrobcům optimalizovat prostor - a tím i energii spojenou s osvětlením a vytápěním. To umožňuje také kratší dodavatelské řetězce. Samotné roboty jsou také stále energeticky účinnější. Roboty mají obvykle dlouhou životnost, kterou lze v dnešní době dokonce prodloužit, a poté jsou dvě možnosti renovace a recyklace [4].

Na českém trhu se mezi největší dodavatele řadí firmy ABB, KUKA, Fanuc a Universal Robots. Ve světovém žebříčku se k nim přidávají japonské firmy Yaskawa Electric Corporation a Kawasaki Heavy Industries. Mezi další výrobce patří firmy Bionic Robotics, BOSCH, Comau, Epson, F&P Personal, Han's Robot, Hanwha, Kawada industries, MABI Robotics, MRK Systeme, Nachi Fujikoshi Corporation, Omron Adept Technology, Precise automation, Rethink robotics, SIASUN, Stäubli [6, 7, 8, 9].

## 1.1 Podmínky použití průmyslových robotů

Vzhledem k tomu, že kolaborativní roboty pracují ve spolupráci s člověkem, je nutné zajistit jejich funkčnost tak, aby se minimalizovala bezpečnostní rizika. Pro tyto účely je vydána sada norem, které popisují bezpečnostní opatření (viz Tabulka 1). Na dříve vydané normy ISO 10218-1 a ISO 10218, které se zabývají bezpečností robotů, navazuje nověji vydaná norma TS/ISO 15066, která popisuje bezpečnostní opatření pro provozování robotů. Musí pro ně být také provedena analýza rizik dle ISO 12100. Na základě posouzení jednotlivých rizikových oblastí robota musí být přijata opatření, aby se tato rizika snížila na přijatelnou úroveň [10].

ISO 10218-1 a ISO 10218-2 uvádí základní požadavky na design spolupracujících aplikací. Prostor musí být dimenzován tak, aby pracovník mohl bezpečně provádět svěřené úkoly, aniž by dodatečná vybavení nebo jiné stroje v pracovním prostoru představovaly další nebezpečí. Také musí být dodržena minimální bezpečná vzdálenost k dalším oblastem, kde hrozí nebezpečí. Nesmí existovat žádná rizika poranění. To platí také pro příslušná upínací zařízení (nástroje) a obrobky. Kdykoliv to bude možné, je nutné použít bezpečné omezení os, aby se omezil počet volných pohybů robota v prostoru a tím se minimalizovalo riziko zranění osob [12, 13].

V normě TS/ISO 15066 jsou popsány způsoby spolupráce mezi kolaborativním robotem a člověkem, kterými jsou bezpečnostní monitorované zastavení, ruční navádění, sledování rychlosti a vzdálenosti a omezení síly a výkonu. U spolupracujících robotů musí být podle příslušného použití vybrána jedna nebo více uvedených metod, aby byla zajištěna bezpečnost všech osob.

- **bezpečnostní monitorované zastavení**

Robot pracuje ve vymezených pracovních zónách a při vstupu pracovníka do této monitorované oblasti robot sám zastaví ještě před kontaktem s člověkem. Po opuštění monitorovaného prostoru se robot automaticky vrátí k činnosti. Tato funkce se využívá v případech, kdy robot pracuje většinu času sám a člověk pouze krátce vstupuje do procesu.

- **ruční navádění**

Bezpečnost spolupráce člověka a robota je zaručena tím, že je robot při bezpečně snížené rychlosti vědomě veden ručně. Tento způsob ručního vedení se také používá jako jeden ze způsobů programování robotů, přičemž si robot musí být schopen zapamatovat dráhu ručního pohybu.

- **sledování rychlosti a vzdálenosti**

Robot je osazen čidly, která sledují rychlost pohybu a vzdálenost od překážek v pracovním prostoru robota. Při vstupu pracovníka do monitorované zóny či detekci překážky robot zpomalí na definovanou rychlost a pokud identifikuje další přiblížení, kdy by mělo dojít ke kontaktu, tak zastaví. Při tomto způsobu ochrany nemusí být robot zabezpečen ochranným oplocením, proto je často využíván u robotů, kteří většinu času pracují v blízkosti člověka.

- **omezení síly a výkonu**

Roboty mají omezený výkon tak, aby maximální síla, kterou vyvinou, nemohla člověku ublížit. Robot zastaví v případě, že jakákoliv jeho část musí vyvinout větší sílu než je maximálně stanovená. Roboty využívající tento typ ochrany jsou konstruovány z měkkých materiálů a bez ostrých částí a jejich ramena jsou zejména rotační. Omezení síly a výkonu se používá v případech vyžadujících časté zásahy člověka do pracovního prostoru.

V normě TS/ISO 15066:21016 jsou také uvedeny maximální přípustné hodnoty nárazové síly (tlaku) na jednotlivé části lidského těla, které robot nesmí překročit (viz Obrázek 1.3) [5, 10, 11, 17] .

Oblast těla	Efektivní tuhost K [N/mm]	Efektivní hmotnost mH [kg]
Lebka a čelo	150	4,4
Obličej	75	4,4
Krk	50	1,2
Záda a ramena	35	40
Hrudník	25	40
Břicho	10	40
Pánev	25	40
Paže a loketní klouby	30	3
Předloktí a zápěstí	40	2
Ruce a prsty	75	0,6
Stehna a kolena	50	75
Dolní končetiny	60	75

Hodnoty hmotnosti pro stehna, kolena a dolní končetiny jsou nastaveny na celkovou váhu těla, protože tyto části těla jsou ovlivněny zpětným rázem nebo zatažením od nárazu, zatímco operátor stojí.

**Obrázek 1.3:** Ukázka z normy ISO 15066 [14]

Spolupracující robotické systémy musí obsahovat vhodný bezpečnostní řídicí systém, který splňuje požadavky podle normy ČSN EN ISO 13849-1 [15].

**Tabulka 1:** Přehled ISO norem upravujících bezpečnost robotů [15]

ISO 12100	Bezpečnost strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukci - Posouzení rizika a snižování rizika
ISO 13849-1	Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnost ovládacích systémů - Část 1: Obecné zásady pro konstrukci
ISO 13850	Bezpečnost strojních zařízení - Nouzové zastavení - Zásady pro konstrukci
ISO 14118	Safety of machinery - Prevention of unexpected start-up
ISO 13857	Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečné vzdálenosti k zamezení dosahu do nebezpečných prostor horními a dolními končetinami
ISO 13855	Bezpečnost strojních zařízení - Umístění ochranných zařízení s ohledem na rychlosti přiblížení částí lidského těla
ISO 10218-1	Roboty a robotická zařízení - Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů - Část 1: Roboty
ISO 10218-2	Roboty a robotická zařízení - Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů - Část 2: Systémy robotů a integrace
ISO 15066	Robots and robotic devices — Collaborative robot

## 1.2 Parametry kolaborativních robotů

Pro návrh robotického pracoviště je třeba definovat parametry kolaborativních robotů. Základními parametry, dle kterých lze robota definovat, jsou: počet funkčních os / stupňů volnosti, dosah, kinematika robota, nosnost, maximální rychlost, přesnost a opakovatelnost, bezpečnost, hmotnost a možnosti programování.

- **Počet funkčních os / stupňů volnosti**

Pro volný pohyb v prostoru musí mít robot alespoň 3 osy, pro úplnou kontrolu nad pohybem se používá 6 os, kdy se přidávají osy pro klopení, klonění a bočení. Počet stupňů volnosti odpovídá počtu funkčních os a udává pohybové možnosti robota. Roboty se dělí na univerzální (6 stupňů volnosti), redundantní (více než 6 stupňů volnosti) a deficitní (méně než 6 stupňů volnosti).

- **Dosah**

Tento parametr uvádí maximální možnou vzdálenost koncového efektoru ve všech směrech, měřeno od základny. Z toho vyplývá i typ pracovního prostoru kolem robota. Typy pracovních prostorů rozlišujeme na cylindrické, sférické, angulární, SCARA.

- **Kinematika**

Možnosti pohybů robota jsou určeny konstrukcí robota a typem a množstvím pohyblivých kloubů.

- **Nosnost**

Nosnost neboli zatížení uvádí maximální hmotnost předmětu, se kterým je robot schopen pracovat. Uvádí se bez hmotnosti koncového efektoru, tudíž do celkové nosnosti je třeba uvažovat jak hmotnost břemena, tak hmotnost koncového efektoru.

- **Rychlost**

Jedním z parametrů je maximální možná rychlost pohybu robota. Někdy se pro každé rameno, kloub, osu udává zvlášť, nejdůležitější je rychlost koncového členu. Většinou se uvádí v jednotkách  $\text{mm s}^{-1}$ , případně  $^{\circ} \text{s}^{-1}$ , ale může se udávat i počtem provedených cyklů za minutu.

- **Přesnost a opakovatelnost**

Přesnost popisuje odchylku od zadané pozice, s jakou je robot schopen jí dosáhnout. Opakovatelnost uvádí, s jakou přesností robot dokáže opakovaně dosáhnout zadané pozice a vracet se do výchozí polohy.

- **Bezpečnost**

Požadavky na bezpečnost a jednotlivé módy zabezpečení dle normy ISO 15066 jsou popsány v kapitole 1.1.

- **Hmotnost**

Hmotnost robota je jedním z vedlejších parametrů, který je důležitý pro ověření dostatečné nosnosti podkladu nebo pro přepravu a změny umístění robota.

- **Možnosti programování**

Programovat lze několika způsoby, viz kapitola 2. Každý způsob má své výhody a nevýhody, například časovou náročnost nebo složitost vlastního programování [5, 16, 17].

Přehled nabídky robotů vybraných vedoucích firem v oblasti spolupracujících robotů, kterými jsou ABB, Universal Robots, KUKA, FANUC.

### **1.2.1 Roboty ABB**

Firma ABB nabízí 4 kolaborativní roboty GoFa-CRB 15000, SWIFTI-CRB 1100, YuMi-IRB 14050 a YuMi-IRB 14000 se zatížením od 0,5 kg do 5 kg. Robot YuMi-IRB 14000 se na rozdíl od ostatních jednoramenných robotů značí dvěma programovatelnými rameny. Firma ABB jako jediná na trhu vyrábí kolaborativní roboty s jedním nebo dvěma rameny, čímž se od ostatních firem výrazně odlišuje [20].

- **Robot YuMi-IRB 14000**





Spolupracující robot YuMi je vyráběn společností ABB a jeho název je odvozen z anglických slov you and me, což v překladu znamená ty a já. Tento robot se využívá zejména pro montáž malých součástek, kde je potřeba pracovat s velkou přesností, dále pro testování, kontrolu, balení. Robot se využívá zejména pro výrobu elektroniky (i elektroniky pro automobilový průmysl), výrobu hraček, kosmetiky, zdravotnických pomůcek a dalších odvětví, kde se pracuje s malými díly. Skládá se ze základny a dvou pohyblivých programovatelných ramen (viz Obrázek 1.4). Každé pracovní rameno má 7 os pohybu a je schopné synchronizace s pohyby člověka. Programování je možné provádět online za použití FlexPendantu, přímým učením nebo s pomocí offline programu RobotStudio. Pro tento typ robota lze také využít tablet s aplikací YuMi. Obsahuje standardní IRC5 systém, stejně jako ostatní koboty od firmy ABB. Hlavní konstrukce je vyrobena z hořčíkové slitiny, která je pokrytá pružným plastovým pláštěm s polstrováním. Ve vnitřním prostoru je vedena kabeláž a v základně robota je umístěna programovatelná jednotka a konektory pro případné zapojení dalších prvků. Nosnost každého ramene je 0,5 kg. Hmotnost robota je 38 kg. Pracuje s přesností 0,02 mm [18, 19].



**Obrázek 1.4:** Robot IRB 14000 YuMi [19]

## 1.2.2 Universal Robots

Firma Universal Robots nabízí čtyři různé typy robotů UR3, UR5, UR10 a UR16 se zatížením 3, 5, 10 a 16 kg, opakovatelností 0,1 mm a se šesti stupni volnosti a velkým výběrem koncových efektorů, což umožňuje širokou škálu využití, například obrábění, montáž, balení (viz Obrázek 1.5) [21].

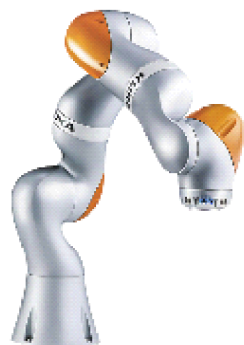
	UR3e	UR5e	UR10e	UR16e <small>NEW</small>
 <b>Rádus</b>	500 mm / 19.7 ins	850 mm / 33.5 ins	1300 mm / 51.2 ins	900 mm / 35.4 ins
 <b>Manipulační zatížení</b>	3 kg / 6.6lbs	5 kg / 11 lbs	10 kg / 22 lbs	16 kg / 35.3 lbs
 <b>Půdorys</b>	Ø 128 mm	Ø 149 mm	Ø 190 mm	Ø 190 mm
 <b>Hmotnost</b>	11.2 kg / 24.7 lbs	20.6 kg / 45.4 lbs	33.5 kg / 73.9 lbs	33.1 kg / 73 lbs

**Obrázek 1.5:** Přehled kobotů firmy Universal Robots [21]



### 1.2.3 Roboty KUKA

Německá firma KUKA uvádí na trh dva roboty (viz Obrázek 1.6), kteří vynikají svou přesností a produktivitou, která je zajištěna 7 osami volnosti. Jsou vyrobené z hliníku, proto jsou velmi lehké [22].



**KUKA LBR IIWA 7 R800 >**



**KUKA LBR IIWA 14 R820 >**

Robot Specifications		Robot Specifications	
Axes:	7	Axes:	7
Payload:	7.00kg	Payload:	14.00kg
H-Reach:	800.00mm	H-Reach:	820.00mm
Repeatability:	±0.1000mm	Repeatability:	±0.1000mm
Robot Mass:	24.00kg	Robot Mass:	30.00kg
Structure:	Articulated	Structure:	Articulated
Mounting:	Floor, Inverted, Angle	Mounting:	Floor, Inverted, Angle

**Obrázek 1.6:** Přehled kobotů firmy KUKA [22]

## 1.2.4 Roboty FANUC

Firma FANUC nabízí 7 spolupracujících robotů ( viz Obrázek 1.7) se zatížením od 4 kg do 35 kg. Roboty lze vzhledem k možnému velkému zatížení až 35 kg použít i pro manipulaci s těžšími břemeny [23].



Obrázek 1.7: Přehled kobotů firmy FANUC [23]

## 2 Možnosti programování robotů

V posledních letech se programování robotů do značné míry odklonilo od kódování k intuitivnějším metodám. Tento trend má za cíl usnadnit programování a obsluhu robotů, jelikož tradiční programovací metody bývají pro operátory omezující. Operátoři robotů většinou nemají znalosti potřebné k programování a programátoři robotů nemají vždy dostatečné zkušenosti k naprogramování konkrétního úkolu.

Třemi populárními metodami programování robotů, které vždy nevyžadují formální znalosti programování, jsou: online programování metodou teach in, programování přímým učením a offline programování.

Každá z metod programování má své výhody a nevýhody, spojením metod online a offline programování tak lze dosáhnout lepších výsledků. Takové programování se někdy označuje jako hybridní. Například program logiky a část pohybových příkazů můžou být vyvíjeny offline a pohybové příkazy k lokalizaci místa obrobku můžou být programovány online.

### 2.1 Online programování

Nejpopulárnější metodou programování robotů je pravděpodobně online programování metodou teach in, která se provádí pomocí pendantu. Podle Britské asociace pro automatizaci a robotizaci (British Automation and Robot Association) je touto metodou programováno více než 90 % robotů.

Vzhled pendantu se během své životnosti poměrně změnil, moderní pendanty vypadají spíše jako tablety s dotykovou obrazovkou (viz Obrázek 2.1). Mohou být připojeny kabelem nebo jsou bezdrátové. Pro naprogramování operátor pohybuje robotem postupně z bodu do bodu pomocí tlačítek na pendantu a ukládá každou pozici zvlášť. Když se naučí celou instrukci, robot může přehrávat body plnou rychlostí. V druhé fázi následuje programování koncového efektoru, popř. nástroje. Nakonec je nutné určit trajektorii a rychlost robota mezi jednotlivými body [24, 26, 27].



**Obrázek 2.1:** Ukázka pendantu [25]

Výhodou online programování je, že většina tradičních průmyslových robotů je dodávána s pendantem, který usnadňuje ovládání technickým pracovníkům. Pendant umožňuje přesné umístění, protože robota lze programovat pomocí číselných souřadnic, buď ve světových souřadnicích, souřadnicích robota nebo v jiném souřadnicovém systému. Programování tímto způsobem je vhodné pro jednoduché pohyby, například malování v přímce nebo na velké rovné ploše. Nevýhodami online programování je případné zastavení výrobní linky kvůli prostojům robotů. Robot musí být uveden do režimu učení a všechny operace s robotem musí být zastaveny, dokud nebude naprogramován. Pro programování je nutné školení. Tento způsob může být obtížný pro operátory, kteří nemají zkušenosti s nastavováním a programováním robotů.

## **2.2 Programování přímým učením**

Programování přímým učením a další specifické metody, jako je například kinetické učení, nabízí intuitivní doplnění ke klasickému online programování pomocí pendantu. Tyto metody zahrnují přímý pohyb robota manipulací jeho snímači nebo joystickem připojeným k robotu. Stejně jako u ovládání pendantem si operátor uloží každou pozici a robot následně nahranou instrukci opakuje (play back). Také lze přímým vedením robota zaznamenat celou dráhu pohybu najednou. Do programu lze takto také vložit požadovaný stav nástroje v daném bodě programu.

Výhodou tohoto způsobu programování je rychlost programování, je odstraněna nutnost vícenásobného stisknutí tlačítka a operátorovi je umožněno jednoduše přesunout robota do požadované polohy. Ovládání je oproti jiným způsobům intuitivnější, a tak školení pracovníků není tolik náročné. Obecně tato metoda nevyžaduje žádné znalosti programovacích konceptů ani znalost prostředí 3D CAD, na rozdíl od simulací. Programování přímým učením je vhodné pro podrobné úkoly, které by k dosažení stejného efektu vyžadovaly mnoho řádků kódu, jako je svařování nebo malování složitých tvarů. Nevýhodou je použití fyzického robota, což znamená, že při programování vznikají prostoje robota. Dráha robota není oproti jiným metodám tak přesná, jelikož pozice nejsou zadávány číselnými souřadnicemi. Rameno robota je při opakování pohybu zatížené opačným směrem a odchylky vymezené vůlemi a pružností konstrukce mají opačnou orientaci. Programování kinetickým učením kombinuje funkce tím, že umožňuje zadávání přesných číselných souřadnic spolu s polohovými souřadnicemi. Tento způsob programování není vhodný pro úkoly, které jsou „algoritmické“, například pokud by robot musel nastříkat povrch pohybem vodorovně po okraji materiálu, pak se posunout o palec dolů, vodorovně se pohybovat opačným směrem atd. Ruční pohyb robota by byl pro takový úkol náročný a nepřesný.

## 2.3 Offline programování

Offline programování nebo simulace se používá zejména v oblastech, kde není možné přerušit výrobu nebo při realizaci nových projektů, aby se zajistilo, že pokročilé řídicí algoritmy fungují správně než se přesunou na skutečného robota. Program je možné mít připravený dříve než nové pracoviště vznikne. V těchto případech se využívá k programování software a virtuální maketa robota. Při offline programování je preferované 3D modelování. Programátor namodeluje pracovní prostředí, které se skládá z vybraného robota, řídicího systému, konkrétního efektoru a vytvoří pracovní cyklus, který je možno rovnou nasimulovat a optimalizovat dle vybraného kritéria. Využití v průmyslu má tam, kde je potřebné snížit prostoje a zvýšit efektivitu. Může to být obzvláště užitečná metoda pro firmy, kde je větší pravděpodobnost, že robot bude častěji překonfigurován. Efektivita programování je zlepšena knihovnamí běžných objektů. Simulátory také umožňují zadat část CAD (obvykle ve formátu STEP) a systém automaticky vygeneruje trajektorie robota.

Výhodou offline programování je eliminace prostojů potřebných pro programování robotů, robot je zastaven pouze během nahrávání a testování nového programu. Naprogramování offline umožňuje pomocí vizualizace v programovacím softwaru zkontrolovat kolizní stavy v plánovaném pohybu robota a zamezit tak případnému poškození nebo zranění předem. Jednoduše lze testovat mnoho různých návrhů a přístupů. Nevýhodou offline programování je pravděpodobnost úprav programu po přenesení z virtuálního prostředí na skutečného robota. Další nevýhodou jsou náklady spojené s nákupem softwaru, vývojem simulace a jejím testováním. Mezi nejznámější programy patří RobotStudio, KukaSim, RobCad [5, 26, 27, 28].

### **2.3.1 RobotStudio**

Program RobotStudio je software určený pro roboty od firmy ABB, využívá ABB VirtualRobot Technology. Virtuální řídicí systém RobotWare pro řízení virtuálního robota v programu RobotStudio, v podobě v jaké je využíván přímo v reálných robotech, umožňuje simulaci reálných procesů s využitím konfigurací a programů z průmyslových pracovišť. Program RobotStudio využívá programovací jazyk RapidLanguage.

Při práci v programu RobotStudio se obvykle nejprve namodeluje budoucí pracoviště, což zahrnuje import robota, osazení vhodnými efektoru, vložení řídicí jednotky a modelování pracovních objektů. K těmto účelům lze využít knihovnu, kde jsou přednastaveny standardizované prvky, řídicí jednotku lze také snadno přidat dle vybraného typu robota. Jednoduché objekty lze modelovat přímo v RobotStudiu, složitější lze importovat z jiných programů. K tomuto účelu lze využít doplňkový program CAD Import, který umožňuje import geometrie jednotlivých objektů. Je možno importovat modely z mnoha různých formátů například STEP, ACIS a CATIA. Dále je nutné vytvořit geometrii efektoru a přizpůsobit ho obrobku. Vlastnosti pracoviště lze dále specifikovat, například je možné doplnit fyzikální vlastnosti materiálů a jejich geometrii. Poté se vytvoří signály v řídicím systému. RobotStudio umožňuje popsat funkce a chování částí stanice, například pohyb dopravníku.

Po vytvoření pracoviště se vytvoří pracovní cesta (Path), která se skládá z jednotlivých bodů polohy (Target). Program RobotStudio umožňuje i tvorbu vlastního souřadnicového systému. Výsledný pohyb robota se bude skládat z pohybů po trajektoriích mezi jednotlivými pracovními body. Tato cesta může být lineární (MoveL), kruhová (MoveC) nebo obecná (MoveJ), kdy robot sám volí nejrychlejší cestu. Mezi jednotlivými body lze nastavit parametry, například rychlost (Speed) a přesnost najetí do daného bodu (Zone). Pracovní cesta může být vytvořena i ručním vedením modelu. Zadáním příkazu Move Along Path lze zkontrolovat, zda při pohybu po dané trajektorii nedojde ke kolizi mezi jednotlivými rameny nebo s jinou překážkou a také ověřit dosažitelnost ramen a správnost pracovní cesty. Také lze zadat další události, tzv. ActionInstructions, které má robot vykonat. Příkladem takové události může být setrvání určitý čas na místě. Vytvořená pracovní cesta se převede do programovacího jazyka robota pomocí příkazu Synchronize to RAPID. Poté lze hotovou simulaci spustit. Po dokončení modelu je také možné simulovat on-line programování a ovládání robota pomocí virtuálního FlexPendantu.

Robot Studio disponuje doplňkovými programy usnadňující návrh pracoviště, například:

- AutoConfiguration – automaticky nastaví polohu robota v určeném bodě.
- Collision detection – vyhodnocuje možné kolize robota se zbytkem pracoviště [5, 17, 29].

## **3 Příklady uplatnění kobotů v praxi**

Neustále se vyvíjejí nové způsoby využití kolaborativních robotů k nejrůznějším pracovním úkolům. Kolaborativní roboty se využívají nejen typicky například ve strojírenství, automotive, elektrotechnice, ale postupně se objevují nové aplikace v netradičních odvětvích typu potravinářství, služby, zemědělství či zábava. Běžné aplikace manipulace s materiálem, obsluha strojů, montáž, balení a štítkování, svařování, povrchové úpravy nebo inspekce kvality jsou doplňovány novými aplikacemi typu laboratorní testování, zdravotní masáže, obsluha kamer v televizních studiích a podobně. Zároveň s novými aplikacemi se rozšiřují i technologie koncových nástrojů, také se zlepšují možnosti výměny koncových nástrojů, a tak je možné uvolnit koncové nástroje na jedno kliknutí. Po připevnění jsou nástroje automaticky nastaveny do správné pozice s vysokou přesností [30, 31].

### **3.1 Vybrané průmyslové aplikace využívající koboty**

Byly vybrány jedny z nejčastěji využívaných aplikací, kterými jsou manipulace s materiálem, balení a paletování, obsluha strojů a kontrola kvality. Tyto aplikace jsou popsány v následujících kapitolách 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 a 3.1.4 [30, 34, 35].

#### **3.1.1 Manipulace s materiálem (Pick and Place)**

Mezi nejčastější úkony pracovníka ve výrobě patří manipulace a přesun objektů (neboli Pick and Place), například polotovarů, nástrojů a výrobků. Manuální manipulace je často velmi stereotypní a namáhavá práce, která může být snadno automatizována, zefektivněna, a tím je docíleno i vyšší kvality. Kolaborativní robot je tak vhodným propojovacím prvkem různých výrobních uzlů. Tato aplikace má nízké pořizovací náklady a je dosahováno rychlých návratností investice.

Využitím standardního příslušenství nebo specializovaných uchopovačů a jiných doplňků je možno manipulovat téměř se všemi typy materiálů a obrobků. Příkladem nových technologií jsou inteligentní prstové nebo vakuové uchopovače (viz Obrázek 3.1).



- Inteligentní prstové uchopovače s vysokým rozsahem síly úchopu, užitečného zatížení a korekce hloubky. Díky sensorům mohou předem detekovat předmět nebo možnost vyklouznutí předmětu.
- Vakuové uchopovače mohou manipulovat s více předměty zároveň a řešit během jednoho přesunu více úkolů. Díky elektrickému kompresoru integrovanému přímo v těle uchopovače není nutné řešit problémy s externí vzduchovou pumpou, hadičkami a kabely [30, 31].

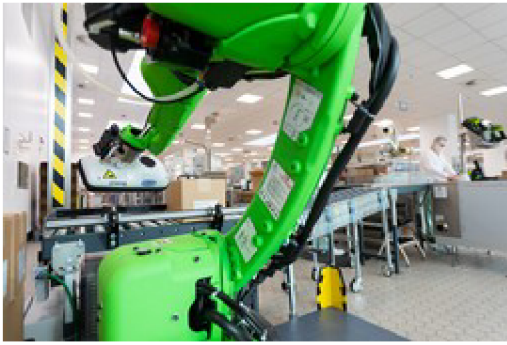


Obrázek 3.1: Ukázka prstového uchopovače [39]

### 3.1.2 Balení a paletování

Hlavní překážkou pro pracovníky v aplikacích tohoto typu je častokrát hmotnost velkých balení. Použití kobota může být také výhodné, pokud je vyžadována manipulace s balením, kde by mohlo dojít k jeho poškození nebo poruše na vzhledu (překládání papírových a kartonových balení).

Příkladem paletovací aplikace je využití kobota CR-15iA od firmy FANUC pro Takeda Pharmaceutical Company Limited. Kobot místo pracovníků přesouvá balení o hmotnosti až 9 kg. To odpovídá přesunu až 5.8 tun za směnu, což předtím vedlo k výraznému množství úrazů a zdravotních problémů pracovníků. Pracoviště (viz Obrázek 3.2) se skládá z dopravníku, kobota a palety.



**Obrázek 3.2:** Stanoviště vybavené kobotem CR-15iA [32]



**Obrázek 3.3:** Umísťování balení do palety [32]

Pracovníci plní balení několika krabicemi obsahujícími lahvičky s léčivý. Po naplnění balení dojde k uzavření, označení etiketou a odeslání balení po dopravníku. Robot balení oskenuje, poté ho uchopí za pomoci vakuového chapadla (viz Obrázek 3.3) a umístí ho do palety tak, aby se etiketa nacházela na vnější straně palety [32, 34, 35].

### 3.1.3 Obsluha strojů

V úlohách typu machine tending zastává částečně kobot funkci operátora při práci s jiným strojem. Operátor není tak často nucen vstupovat do pracovního prostoru stroje, což snižuje míru rizika na pracovišti a dobu zastavení stroje během pracovního cyklu. Jedná se především o operace zakládání a vykládání polotovarů do a ze stroje, nebo výměny nástrojů. Někdy je během těchto úloh kobot zároveň využíván k operacím jiných typů (například mytí, čištění nebo třídění) [31, 34].

### 3.1.4 Kontrola kvality

Při výrobě je nutné, aby byly výrobky odesílány bez výrobních vad. Kontrolování kvality je jednotvárné a pro pracovníky únavné, což může způsobovat vyšší míru chybovosti při kontrole vad. Kobot, vybavený kamerou s vysokým rozlišením, je schopen ověřit kvalitu povrchu a rozměry výrobku. Toho je dosaženo vytvořením digitálního modelu a porovnáním s CAD modely daného výrobku. Tento proces může být nadále zefektivněn za použití vícero softwaru propojených kamer. V problematických místech a při nahlášení drobných odchylek může operátor navést kameru a ověřit kvalitu ručně.

Příkladem je DiscCobot od německé firmy Bruker Alicona (viz Obrázek 3.4). Kobot se používá pro kontrolu minimálního rádiu u hran velkých rotačně symetrických těles. Jeho hlavní využití je u disků turbín letadel a řezných hran u pilových kotoučů [33, 34, 35].

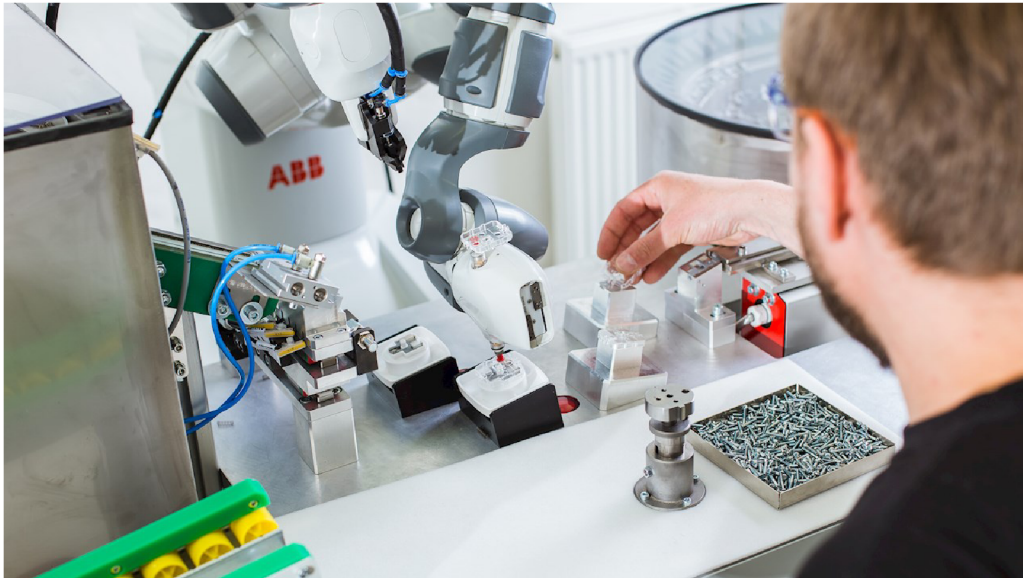


Obrázek 3.4: DiscCobot od firmy Alicona [33]

## 3.2 Příklady aplikací kobota YuMi

Prvním příkladem praktické aplikace robota typu IRB 14 000 YuMi je sestavování zásuvek s dětskou pojistkou v závodu firmy ABB Elektro-Praga (viz Obrázek 3.5). Kobot zde kolaboruje s jedním pracovníkem na základě přesně definované polohy všech součástek. Součástí pracoviště je také dopravník pojistek a podavač pružin. Zařízení na pracovišti je vybaveno senzory a signálními světly, které pracovníkovi indikují dokončení úkonů kobota. Dojde-li ke kontaktu kobota s pracovníkem, senzory způsobí zastavení kobota a poté zpětný pohyb ramen nízkou rychlostí. Pracovní proces je pak pracovníkem obnoven za pomoci pendantu.

Kobot se stará o osazování pružin, dětských pojistek a krytů dětských pojistek. Operátor se stará o přípravu krytů pojistek pro kobota, výměnu zásuvek poté, co signální světlo indikuje dokončení úkolu kobota, a osazení těchto zásuvek zemnicím kolíkem a šroubem. Dále kontroluje dokončenou zásuvku a odkládá ji na odchozí dopravník [36].



**Obrázek 3.5:** Ukázka pracoviště závodu Elektro-Praga [36]

Dalším příkladem úlohy využití kobota YuMi je testování funkcí automatů ATM (viz Obrázek 3.6). Kobot je naprogramován, aby testoval různé funkce automatu a zároveň simuluje i mnoho různých chyb při použití automatu. Dvě ramena a vysoká opakovatelnost umožňují robotu testovat automat vysokou rychlostí. V kombinaci se schopností kobota pracovat 24 hodin denně dochází k značnému zrychlení procesu testování nového softwaru, což způsobuje snížení rizika neodhalení vývojových vad, které jsou v tomto odvětví velmi kritické [37].



**Obrázek 3.6:** Testování automatů ATM pomocí YuMi [37]

## **4 Návrh vlastní úlohy**

Zadáním je na základě provedené rešerše navrhnout původní demonstrační úlohu. Tuto úlohu pak zrealizovat na robotickém zařízení, případně pomocí metod offline programování.

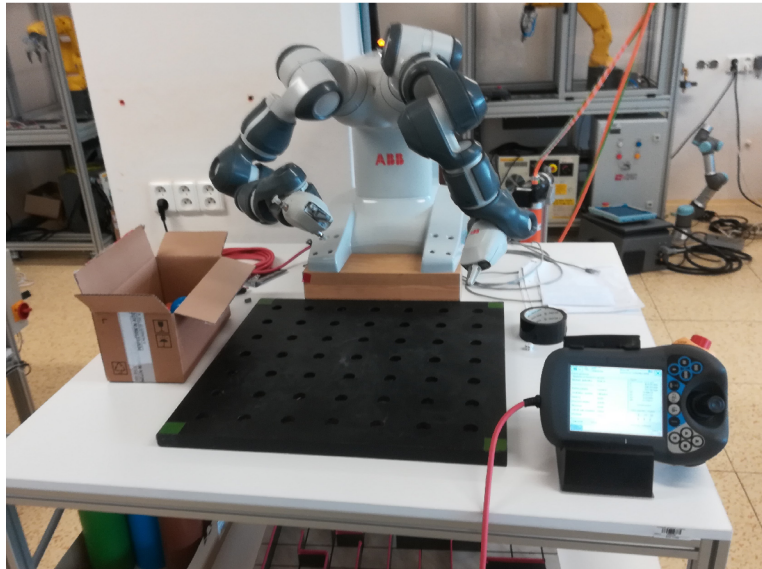
### **4.1 Cíl praktické úlohy**

Cílem úlohy je demonstrace kolaborativních robotů a ukázka jejich možností s využitím IRB 14000 YuMi. Kobot YuMi je určen pro úlohy typu Pick and Place součástek malých rozměrů a hmotností. Úloha by tedy měla obsahovat prvky kooperace s člověkem a využití systému strojového vidění kobota. Na efektivitu vykonání úlohy není kladen velký důraz, naopak by neměla být pro osoby přihlízející a práci si kobotem zkoušející příliš komplikovaná. Dále je vhodné, aby byla spouštěna impulzem od operátora.

### **4.2 Popis pracoviště**

Pracoviště určené k demonstrační úloze je zobrazeno na obrázku 4.1. Jeho hlavní součástí je kobot IRB 14000 YuMi. Ten je připevněn k čtvercové desce stolu o délce strany 120 cm. Tento způsob instalace omezuje dosah efektorů ramen na stůl, ale pro demonstrační účely umožňuje prohlédnutí celého kobota a snadný přístup k jeho konektorům. Kobot je vybaven FlexPendantem a dvěma efektorů. Na pracovišti se dále nachází deska, sada plastových míčků, hrací kostka a papírové krabičky.





**Obrázek 4.1:** Fotografie pracoviště využívané pro demonstrační úlohu

#### **4.2.1 Popis specifikací kobota YuMi**

Označení robota je IRB 14000 YuMi. Sériové číslo robota je 14000-501484. Jedná se o variantu s dvěma rameny. Užitečné zatížení robota je 0,5 kg. Dosah robota je 500 mm. Maximální rychlost TCP je 1,5 m/s. Hmotnost robota je 38 kg. Robot je vybaven přívodem vzduchu a pro připojení k němu je využit ethernetový (UTP) kabel.

#### **4.2.2 Příslušenství kobota YuMi**

Kobot je vybaven YuMi standardními efektory IRB 14000 gripper. Ty existují v několika základních variantách. Všechny varianty obsahují servo modul s úchopovými chapadly. První varianta je doplněna o jeden nebo dva vakuové moduly obsahující generátor, vypouštěcí aktuátor, tlakový senzor a přísavku. Vstup generátoru podtlaku je napojen na tlak maximálně 0,8 MPa. Variantou se dvěma moduly (viz Obrázek 4.2) je vybaveno pravé rameno použitého modelu YuMi.



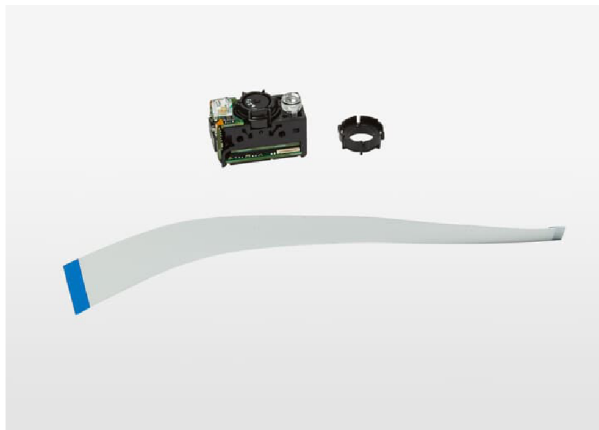
**Obrázek 4.2:** Efektor použitého kobota YuMi

Alternativně jde o variantu s vestavěnou kamerou ABB Cognex AE3, která může být doplněna o jeden vakuový modul. Touto variantou (viz Obrázek 4.3) je vybaveno levé rameno použitého modelu YuMi.



**Obrázek 4.3:** Efektor použitého kobota YuMi

ABB Cognex AE3 je černobílá kamera o rozlišení 1,3 megapixelu s přidavným programovatelným LED osvětlením. Kamera obsahuje automatické zaostřování a je kompatibilní s Vision systémem v programu RobotStudio.



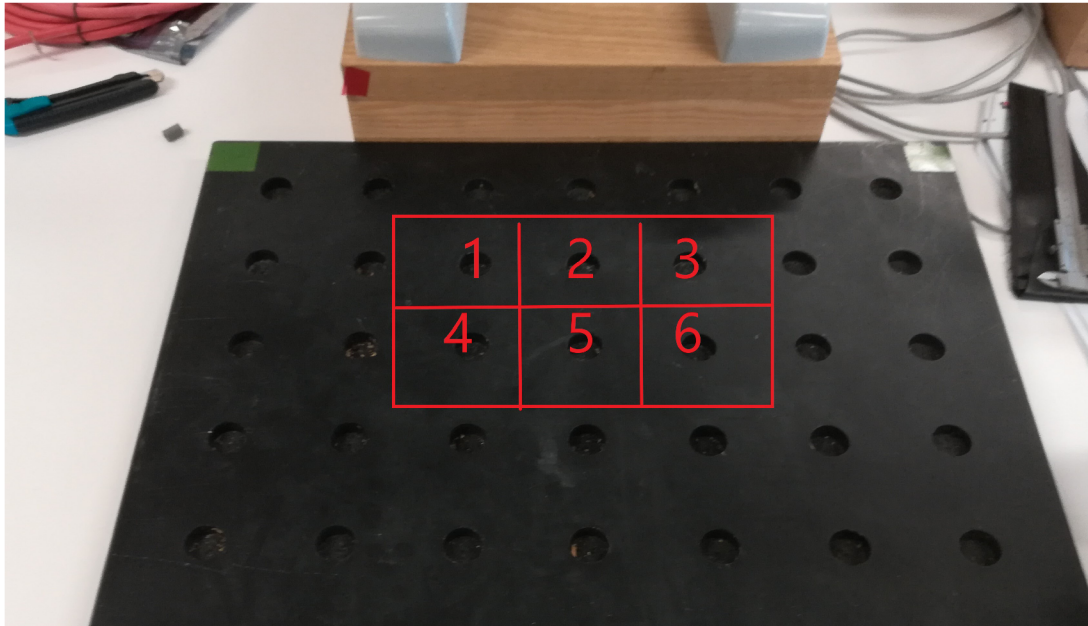
**Obrázek 4.4:** Kamera ABB Cognex AE3 [38]

YuMi je vybaven řídicím systémem IRC5 s FlexPendantem. V něm je nahrán virtuální řídicí kontrolér RoboWare verze 6.06.01.00. Ten umožňuje simulovat program při offline programování a slouží k propojení RobotStudia s řídicím systémem robota v online režimu.

### 4.2.3 Ostatní součásti pracoviště

- Zásobník, tvořený čtvercovou deskou o délce a šířce 60 cm a tloušťkou 3 cm. V desce je vyhloubeno 49 důlků rozmístěných ve čtvercové mřížce 7x7 pozic. Důlky mají tvar kulového vrchlíku o hloubce 10 mm, jsou od sebe navzájem vzdáleny 8 cm. Krajiní důlky se nacházejí 6 cm od okraje desky. Velikost zásobníku neumožňuje jeho plné využití. Volné pozice mohou operátorovi sloužit pro odložení výrobků, což má využití při předpokládané časté změně operátora vzhledem k demonstračnímu účelu úlohy. Určené pozice jsou dány dle obrázku 4.5.





**Obrázek 4.5:** Zásobník s pozicemi přiřazenými k hodnotám řídicí kostky

- Řídicí kostka, která funguje jako ovládací prvek pro operátora. Jedná se o standardní šestihrannou hrací kostku o délce hrany 1,4 cm (viz Obrázek 4.6). Hodnota na kostce určuje, na jakou pozici zásobníku budou výrobky umísťovány. Zároveň interaktivním způsobem slouží jako ukázka rozpoznávacích schopností kamery. Svou funkcí také v úloze kompenzuje schopnost vestavěné kamery pořizovat pouze černobílý obraz.

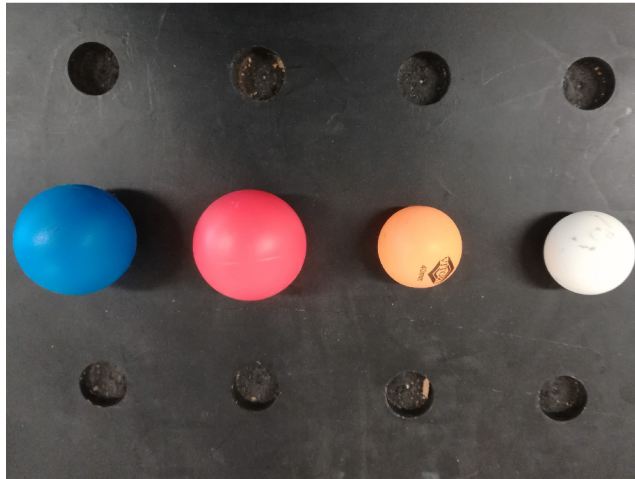


**Obrázek 4.6:** Řídicí kostka umístěna do omezeného prostoru

- Sada plastových míček, zastávajících funkci výrobků (součástek). Sada je tvořena míčky o průměru 6,5 cm. Ty (obrázek 4.7) reprezentují výrobek správných rozměrů. Dále jsou k dispozici míčky různých průměrů od 3,98 cm do 5,1 cm (obrázek 4.8). Ty v úloze figurují jako vadný výrobek.



**Obrázek 4.7:** Sada míček reprezentujících výrobky



**Obrázek 4.8:** Ukázka sady míčků, reprezentujících vadné výrobky

- Kontejner vadných výrobků (obrázek 4.9), tvořený papírovou krabičkou (možnost nahrazení jiným kontejnerem), sloužící k odkládání míčků, které jsou označeny za vadné výrobky.



**Obrázek 4.9:** Kontejner vadných výrobků

### 4.3 Návrh řešení

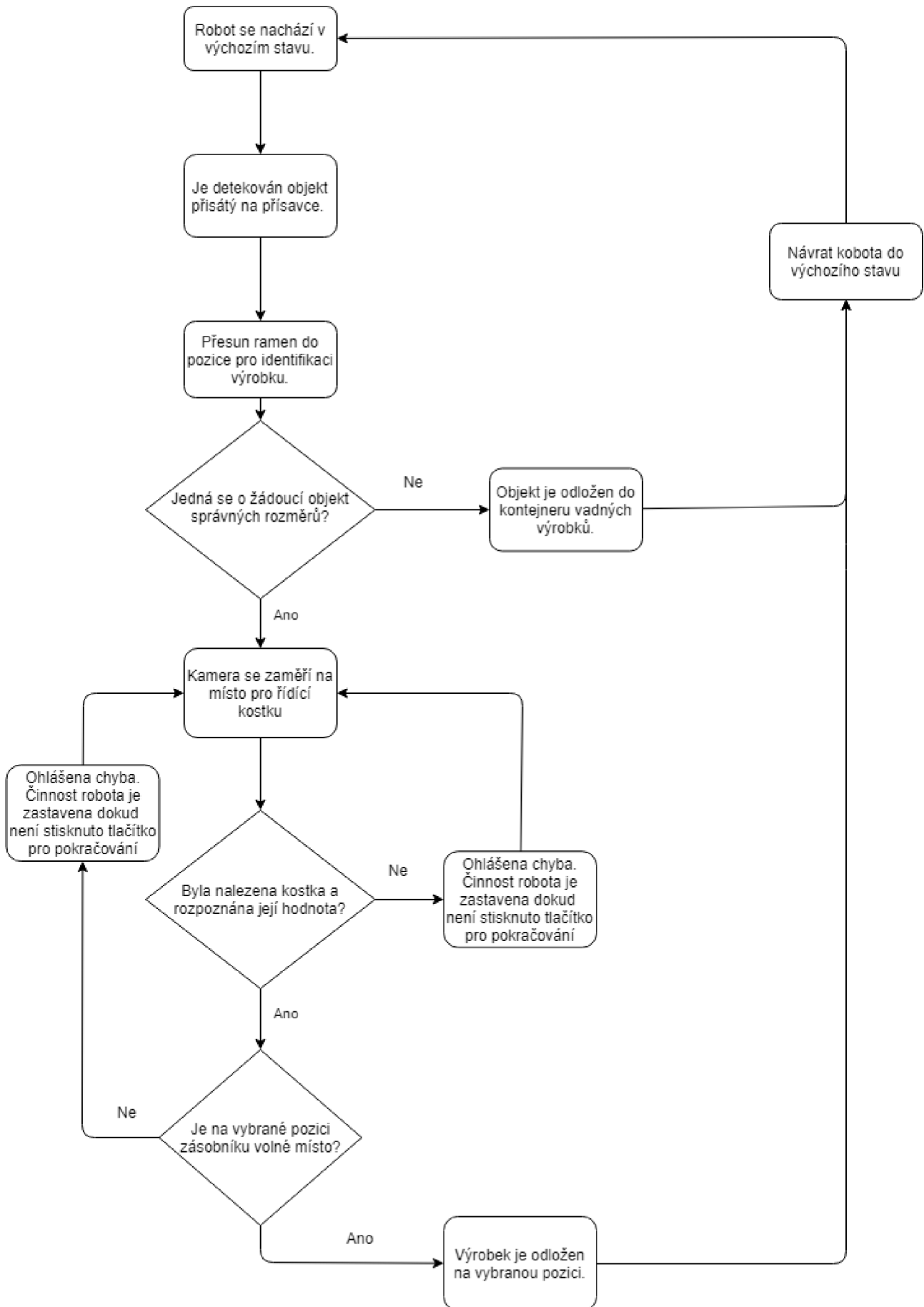
- Zahájení akce obsluhou vložením výrobku (koule) do efektoru robota. Rozhodnutí o umístění výrobku obsluhou pomocí řídicí kostky.
- Vyhodnocení rozměrů výrobku, v případě vady následuje odložení do kontejneru vadných

výrobků. V opačném případě dojde k načtení rozhodnutí o umístění z řídicí kostky.

- Vyhodnocení naplnění zásobníku kobotem. Umístění výrobku ve vybrané sekci zásobníku. V případě, že je sekce zásobníku plná, se kobot zastaví a akce musí být po uvolnění místa v zásobníku znovu spuštěna.
- Po odložení výrobku na jedno z určených míst následuje návrat kobota do výchozí polohy.
- Při havarijním stavu kobota s obsluhou se bude kobot chovat dle svých nastavených bezpečnostních parametrů, aby předešel zranění operátora.

### 4.3.1 Popis programu a blokové schéma

Kobot YuMi se nachází v základní pozici, dokud není obsluhou k jeho přísavce na pravém rameni přiložen výrobek. Poté, co je detekováno přísátí výrobku, jsou ramena přesunuta do pozice pro ověření kvality chyceného výrobku. To je provedeno rozpoznáním rozměrů výrobku. Pokud výrobek neodpovídá předem definovaným parametrům, je odložen do kontejneru vadných výrobků. V opačném případě je pravé rameno přesunuto na okraj zásobníku, dokud není určena pozice pro výrobek. Levé rameno je přesunuto do pozice, kde se očekává výskyt řídicí kostky. Kamerou je poté zjištěno, zda byla obsluhou umístěna řídicí kostka a jaká je její hodnota. Hodnota řídicí kostky určuje pozici zásobníku, do které má kobot objekt odložit. Pokud řídicí kostka není nalezena, nebo není rozeznána její hodnota, zobrazí se operátorovi chybovým hlášením. Pro umístění do zásobníku je kamerou nejprve ověřena obsazenost vybrané pozice. Výrobek je poté do volné pozice zásobníku odložen. Pokud jsou všechna místa zaplněna, je předpokládána nepřítomnost nebo chyba obsluhy. Kobot se zastaví a oznámí na obrazovku FlexPendantu chybu. V případě, že během vykonávání programu dojde ke kolizi, je běh programu, dle bezpečnostních protokolů kobota, přerušen a funkčnost ramen je zastavena, dokud nedojde k opětovnému spuštění. Ramena jsou po vykonání programu (umístění výrobku) vrácena do základní pozice a kobot čeká na další výrobek.



Obrázek 4.10: Blokové schéma navrženého programu

## 5 Realizace navržené úlohy

Navržená úloha je realizována offline programováním za využití programu RobotStudio. Toho je dosaženo v několika krocích:

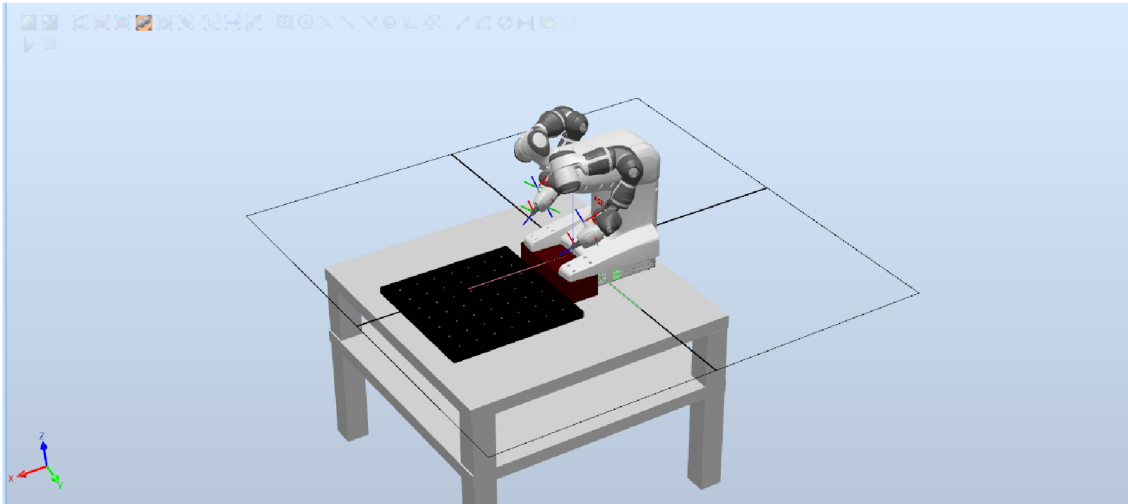
- Vytvoření modelu pracovní stanice a stanovení souřadných systémů.
- Vytvoření kódu pro pohyb ramen v jazyce Rapid. Tento kód obsahuje logické funkce robota, ovládání stavů efektorů, žádané pozice ramen, typ a rychlost pohybu, kterým jich dosáhnou.
- Testováním funkčnosti programu na vytvořené simulaci.
- Vytvoření rozpoznávací logiky kamery pomocí integrovaného systému strojového vidění (Vision system), pomocí nafocených materiálů získaných za použití kamery využívané v úloze.
- Nahráním programu do robota na pracovišti a jeho otestováním.

### 5.1 Offline simulační model

Postup vytvoření offline simulačního modelu je popsán v následujících podkapitolách.

#### 5.1.1 Model pracovní stanice

Model pracovní stanice (obrázek 5.1) s umístěním významných objektů odpovídajícím úloze. YuMi a jeho efektor byly do modelu vloženy ze základních knihoven programu. Ostatní objekty byly vytvořeny použitím modelovacích nástrojů RobotStudio.



**Obrázek 5.1:** Model pracovní stanice

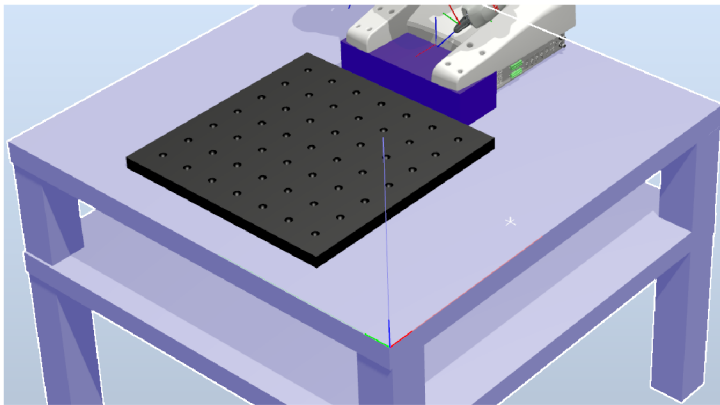
### **5.1.2 Zavedení souřadných systémů**

Zavedené souřadné systémy jsou v modelu označeny červenou barvou pro osu  $x$ , zelenou a modrou pro osy  $y$  a  $z$ . Základní využité souřadné systémy World a Base se nacházejí v patě robota. Systémy ostatních částí kobota nejsou pro úlohu příliš významné a byly ponechány výchozí tak, jak byly načteny z knihovny. Na základě systému World byl vytvořen model pracovní stanice.

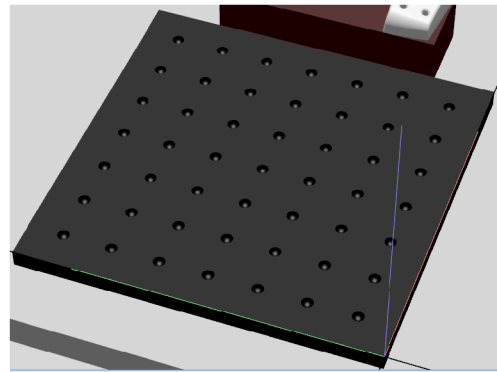
V modelu byly zavedeny dva lokální souřadné systémy zobrazené na obrázcích 5.2 a 5.3: Stůl a Zásobník. Jména těchto systémů odpovídají objektům, k nimž jsou vztaženy. Oba systémy souřadnic jsou navrženy tak, aby umístění počátečního bodu a orientace os působilo pro operátora co nejpřirozeněji vzhledem k jeho pracovní pozici. Toho bylo dosaženo rotací lokálních systémů o  $180^\circ$  okolo osy  $z$  (oproti globálním systémům World a Base) a umístěním počátku souřadnic do rohu vztažených objektů nejbližší k operátorovi.

Lokální systém Stůl slouží uživateli pro usnadnění určení nových souřadnic ostatních objektů v případě změny jejich pozice na desce. Lokální systém Zásobník vede k usnadnění přizpůsobení programu při změně polohy zásobníku.





Obrázek 5.2: Souřadný systém - Stůl



Obrázek 5.3: Souřadný systém - Zásobník

### 5.1.3 Vytvoření cest a kódu s použitím modelu a jazyku Rapid

S využitím modelu stanice byly vytvořeny pozice, do kterých se robot v průběhu vykonávání programu dostane. Část těchto pozic byla vztažena k systému World. Pozice pro odkládání výrobků do zásobníku a ověření jeho plnosti byly vztaženy k systému Zásobník. Mezi těmito pozicemi byly zadány a vygenerovány cesty, po kterých se robot bude pohybovat. Takto vytvořené cesty byly za použití funkce RobotStudia synchronizovány do jazyku Rapid. Po synchronizaci bylo podle potřeby upraveno nastavení pohybu pro jednotlivé cesty (typ pohybu, rychlost, přesnost dosažení bodu) a ověření dosažitelnosti zadaných bodů. Výsledkem bylo vyřazení některých pozic zásobníku z úlohy. Robot do nich nebyl schopen uspokojivě umístit výrobek (nebo by k tomu došlo v případě drobného posunutí zásobníku).

Do takto vytvořených cest byly poté naprogramovány události a funkce, které se mají v určených bodech vykonat. V některých částech úlohy je vyžadována spolupráce obou ramen (např. identifikace rozměrů výrobku), proto byly v kódu použity funkce synchronizovaného pohybu ramen. Použité funkce jsou uvedeny v příloze A.

Na vytvořené simulaci byla průběžně testována funkčnost programu, výstupy identifikačních funkcí, využívající Vision systém, byly v simulaci nahrazeny pevně zadanými hodnotami.



### **5.1.4 Integrated Vision system**

V několika částech úlohy je využito rozpoznávání pomocí vestavěné kamery. Použitá kamera je kompatibilní s funkcí Integrované vidění, obsaženou v RobotStudios. Po připojení kamery k RobotStudios bylo nutné kalibrovat nastavení kamery. Fotografie výrobků, zásobníku a řídicí kostky musely být pořízeny v pozicích kamery, přesně odpovídajících pozicím v úloze. Fotografie byly za pomoci nástrojů obsažených ve funkci Integrované vidění zpracovány. Tyto funkce jsou uvedeny v příloze A.

## **5.2 Online realizace**

Dokončený program byl nahrán do robota YuMi a jeho funkčnost a odchylky od simulace byly testovány v provozu. Do programu bylo na některá místa nutné doplnit prodlevy, aby některé úkony (např. podávání míčku robotovi) byly pro operátora snáze proveditelné. Rovněž došlo k úpravě rozpoznávání kamerou, která byla schopna spolehlivě rozpoznávat výrobky na menším prostoru než se předpokládalo.

Po těchto úpravách fungoval program během dalšího testování správně a odchylky od simulace byly téměř nulové. Vlivem těchto úprav se velikost použitého zásobníku stala nadbytečnou, ale to neomezuje účel a funkčnost úlohy. Při testování bylo zjištěna dobrá schopnost kamery rozeznat hodnotu řídicí kostky i při výskytu jiných předmětů. Při detekci plnosti zásobníku bylo nutné snížit minimální míru podobnosti pro rozpoznání výrobků. Při výskytu předmětů, které nepatří do úlohy, proto může dojít k chybné identifikaci. Výsledné chování robota v úloze bylo po testování shledáno uspokojivým.

## 6 Dosažené výsledky a závěr

Bakalářská práce se nejprve zabývá možnostmi a podmínkami programování a použití kolaborativních robotů se zaměřením na IRB 14000 YuMi. Dále obsahuje rešerši a příklady použití kolaborativních robotů v průmyslu, které jsou využity k vytvoření demonstrační úlohy pro robota YuMi.

V teoretické části je nejprve přiblížen současný stav a podmínky využívání kolaborativních robotů. Dále jsou popisovány používané způsoby programování robotů se zaměřením na program RobotStudio od firmy ABB.

Rešerše je v první polovině zaměřena na zjištění typů průmyslových úloh využívajících kolaborativní roboty a důvodů jejich využití v těchto úlohách. V druhé polovině uvádí rešerše příklady úloh používajících robota YuMi.

V praktické části je využito těchto znalostí k návrhu a realizaci demonstrační úlohy pro robota YuMi instalovaného v prostorách TUL. Navržená úloha je typu pick and place s prvky identifikace výrobku za použití kamery. Je realizována nejprve offline metodou vytvoření modelu a kódu v jazyce Rapid pomocí programu RobotStudio. Funkčnost kódu byla poté ověřena na simulaci, ve které byla rozeznávací funkce kamery nahrazena pevnými vstupy. Po přechodu do online režimu byla doplněna funkce rozpoznávání výrobků, řídicích prvků a stavu zásobníku kamerou pomocí funkce Integrated Vision System obsažené v RobotStudiu. Demonstrační úloha byla poté otestována přímo na zadaném pracovišti.

Rozložení pracoviště a způsob instalace robota YuMi, v kombinaci s jeho poměrně nízkým dosahem ramen, na tomto pracovišti bohužel neumožnily plné využití všech pozic zásobníku. Logika rozdělování pozic zásobníku proto musela být upravena.

Úloha by nadále mohla být vylepšena, například doplněním pracoviště o barevnou kameru a upravením funkce řídicí kostky tak, aby barva výrobku určovala sekci a hodnota řídicí kostky pozici v dané sekci zásobníku. Dále by bylo možné zvážit kompenzaci omezení dosahu zvýšením pracoviště v okolí robota použitého v úloze, což by však mohlo vést ke snížení praktičnosti této úlohy při minimálním vlivu na demonstrační účel úlohy.

# Literatura

- [1] *ISO 8373 Robots and robotic devices – Vocabulary*. ISO, 2012.
- [2] Executive Summary World Robotics 2020 Industrial Robots. *International Federation of Robotics* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: [https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive\\_Summary\\_WR\\_2020\\_Industrial\\_Robots\\_1.pdf](https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2020_Industrial_Robots_1.pdf)
- [3] 6 rozdílů mezi kolaborativními a tradičními roboty. *Aubo* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.aubo.cz/clanky/6-rozdilu-mezi-kolaborativnimi-a-tradcnimi-roboty/>
- [4] Top 5 Robot Trends 2021. *International Federation of Robotics* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://ifr.org/post/top-5-robot-trends-2021>
- [5] ČEFELÍN, David. *Spolupracující roboty*. Brno, 2018. Bakalářská práce. VUT v Brně.
- [6] Produkty. *Allrobots* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.allrobots.cz/produkty/>
- [7] Výrobci průmyslových robotů. *ROBOTUM* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://robotum.cz/vyrobci/>
- [8] Product. Hanwha Precision Machinery / Robotics [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://hanwharobotics.com/En/Product/Product>
- [9] Trh s roboty roste. Kdo jsou hlavní výrobci? *Robotic journal* [online]. 2019, (3) [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.roboticjournal.cz/clanky/2019-cislo-3-trh-s-roboty-roste-kdo-jsou-hlavni-vyrobci>
- [10] VALDMAN, Tomáš. *Implementace kolaborativního robota*. Plzeň, 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [11] ISO/TS 15066. *Robots and robotics devices – Collaborative robots*. ISO, 2016.

- [12] ČSN EN ISO 10218-1. *Roboty a robotická zařízení - Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů - Část 1: Roboty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [13] ČSN EN ISO 10218-2. *Roboty a robotická zařízení - Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů - Část 2: Systémy robotů a integrace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [14] Implementace kolaborativních robotů z pohledu legislativy. *ElektroPrůmysl.cz* [online]. 2019, 16. srpen 2019 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/implementace-kolaborativnich-robotu-z-pohledu-legislativy>
- [15] Bezpečnost kolaborativních robotů. Bezpečnost kolaborativních robotů. *AUTOMA* [online]. 2017, (8-9), 3 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: [https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/11040.pdf](https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/11040.pdf)
- [16] ANGELES, Jorge. *Fundamentals of robotic mechanical systems: Theory, methods, and algorithms*. 2nd ed. New York: Springer, 2003. ISBN 0-387-95368-X.
- [17] HOFÍREK, Radek. *Robotizované pracoviště s kolaborativním robotem ABB YuMi*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
- [18] YuMi: Robot, který spolupracuje s člověkem. *Technický týdeník* [online]. 29. 9. 2016 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/yumi-robot-ktery-spolupracuje-s-clovekem\\_37291.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/yumi-robot-ktery-spolupracuje-s-clovekem_37291.html)
- [19] YuMi – IRB 14000 Overview. *ABB Robotics* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106354A3256&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [20] Collaborative Robots. *ABB Robotics* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/collaborative-robots>
- [21] Produkty. *Universal Robots* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/cs/produkty/>

- [22] KUKA Collaborative Robots. *RobotWorx* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.robots.com/applications/collaborative/brands/kuka>
- [23] Přehled sortimentu. *FANUC* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%c3%a1nka-sortimentu-robot%c5%af>
- [24] Programming Robots. *Phoenix Control Systems* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.phoenixrobotic.co.uk/robot-automation/programming-robots/>
- [25] ABB Teach Pendant. *ABB Robotics* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/3HAC028357-001/teach-pendant>
- [26] Příručka: Automatizační a robotická technika.. *Strojnícka fakulta TUKE* [online]. Košice: Strojnícka fakulta TU v Košiciach, 2011 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: [http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/files/vystupy/prirucka\\_sk\\_final.pdf](http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/files/vystupy/prirucka_sk_final.pdf)
- [27] What Are the Different Programming Methods for Robots? *ROBOTIQ* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/what-are-the-different-programming-methods-for-robots>
- [28] The Facts About Hand Guiding Robots. *FANUC* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.fanucamerica.com/news-resources/articles/the-facts-about-hand-guiding-robots>
- [29] RobotStudio. *ABB* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/robotstudio>
- [30] Kolaborativní aplikace jako další fáze kolaborativní robotiky. *Vše o průmyslu* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.vseoprmyslu.cz/inspirace/firemni-novinky/kolaborativni-aplikace-jako-dalsi-faze-kolaborativni-robotiky.html>
- [31] 5 nejčastějších aplikací kolaborativních robotů ve strojírenství. *AUBO* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.aubo.cz/clanky/5-nejcastejsich-aplikaci-kolaborativnich-robotu-ve-strojirenstvi/>

- [32] Cobot packs pills. *FANUC* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/p/%C5%99%C3%ADb%C4%9Bhy-z%C3%A1kazn%C3%ADk%C5%AF/takeda>
- [33] Cobots - Optical measuring sensor & collaborative robot. *Bruker alicona* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.alicon.com/en/products/collaborative-robots/detail/News/disk-cobot/>
- [34] 7 Common Applications for Cobots. *Machine Design* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21836350/7-common-applications-for-cobots>
- [35] What are the Most Popular Applications for Cobots? *Automate* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.automate.org/blogs/what-are-the-most-popular-applications-for-cobots>
- [36] YuMi manufacturing sockets at ABB's plant in the Czech Republic. *ABB* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://new.abb.com/news/detail/62029/yumi-manufacturing-sockets-at-abbs-plant-in-the-czech-republic>
- [37] Robot YuMi umožňuje nepřetržité testování bankomatů. *ABB* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/czech-local/yumi-testovani-bankomatu>
- [38] ABB Cognex AE3 Camera. *ABB* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/3HAC051676-001/cognex-ae3-camera>
- [39] New 3-Finger electric gripper with large stroke for handling wide range of cylindrical objects. *OnRobot* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://onrobot.com/en/news/new-3-finger-electric-gripper-with-large-stroke-for-handling-wide-range-of-cylindrical-objects>

# **Přílohy**

Přílohy jsou vzhledem k velikosti uloženy pouze v elektronické podobě na digitálním médiu.

## **Příloha A**

příloha obsahuje :

- Přehled funkcí Integrated vision systému, které byly použity.
- Přehled významných funkcí, tvořících kód programu.

## **Příloha B**

příloha obsahuje:

- Zdrojový kód jazyka RapidLanguage, vytvořený k realizaci úlohy.