

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
STROJNÍCKA FAKULTA**

**VYUŽITIE SYSTÉMOV STROJOVÉHO  
VIDENIA PRE POTREBY PRIEMYSELNEJ  
PRAXE A ICH INTEGRÁCIA V RÁMCI  
VIRTUALIZAČNÝCH NÁVRHOV  
ROBOTICKÝCH PRACOVÍSK**

**Diplomová práca**

SjF-5226-76242

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
STROJNÍCKA FAKULTA**

**VYUŽITIE SYSTÉMOV STROJOVÉHO  
VIDENIA PRE POTREBY PRIEMYSELNEJ  
PRAXE A ICH INTEGRÁCIA V RÁMCI  
VIRTUALIZAČNÝCH NÁVRHOV  
ROBOTICKÝCH PRACOVÍSK**

**Diplomová práca**

SjF-5226-76242

Študijný odbor: automatizácia a informatizácia strojov a procesov  
Študijný odbor: kybernetika  
Školiace pracovisko: Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky (SjF)  
Vedúci záverečnej práce: doc. Ing. Ján Vachálek, PhD.  
Konzultant: Ing. Ivan Fiška

**Bratislava, 2020**

**Bc. Matej Šofranko**



## ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent: **Bc. Matej Šofranko**  
ID študenta: 76242  
Študijný program: automatizácia a informatizácia strojov a procesov  
Študijný odbor: kybernetika  
Vedúci práce: doc. Ing. Ján Vachálek, PhD.  
Konzultant: Ing. Ivan Fiťka  
Miesto vypracovania: Ústav automatizácie, merania a aplikovanej informatiky (SjF)

Názov práce: **Využitie systémov strojového videnia pre potreby priemyselnej praxe a ich integrácia v rámci virtualizačných návrhov robotických pracovísk.**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

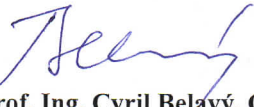
1. Teoreticky naštudujte metódy virtuálneho sprevádzkovania robotických pracovísk s dôrazom na pokročilú robotiku a strojové videnie (Vision systémy).
2. Na základe teoretického naštudovania navrhnete a simulačne realizujete vizualizáciu a signálnu simuláciu robotizovaného pracoviska budovaného na ústave v softvérovom prostredí Siemens Tecnomatix Process Simulate s využitím uvažovaných prvkov strojového videnia.
3. Na základe simulácie prakticky prevedte generovanie riadiaceho výstupného kódu a jeho aplikácie na priemyselného robota KUKA v rámci jeho implementácie do robotizovaného pracoviska realizovaného na ústave.

Rozsah práce: 60-80

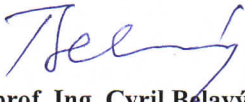
Riešenie zadania práce od: 17. 02. 2020

Dátum odovzdania práce: 19. 06. 2020

**Bc. Matej Šofranko**  
študent

  
prof. Ing. Cyril Belavý, CSc.  
vedúci pracoviska

**Slovenská technická univerzita**  
v Bratislave  
Dekanát Strojníckej fakulty  
Útvar pedagogických činností  
812 31 Bratislava, Nám. Slobody 17  
-1-

  
prof. Ing. Cyril Belavý, CSc.  
garant študijného programu

## Čestné prehlásenie

Vyhlasujem, že som záverečnú prácu vypracoval samostatne na základe štúdia a konzultácií s použitím uvedenej literatúry.

Bratislava, 19. júna 2020

.....  
Vlastnoručný podpis

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce, doc. Ing. Jánovi Vachálkovi, PhD., za odbornú pomoc a pripomienky pri vypracovaní diplomovej práce. Zároveň chcem vyjadriť poďakovanie konzultantovi diplomovej práce, Ing. Ivanovi Fiťkovi a Ing. Pavlovi Vašekovi, za cenné rady poskytnuté počas riešenia tejto diplomovej práce.

Bratislava, 19. júna 2020

Bc. Matej Šofranko

**Názov práce:** Využitie systémov strojového videnia pre potreby priemyselnej praxe a ich integrácia v rámci virtualizačných návrhov robotických pracovísk

**Kľúčové slová:** strojové videnie, virtuálne sprevádzkovanie, Tecnomatix Process Simulate, priemyselný robot, signálna simulácia

**Abstrakt:** Diplomová práca je zameraná na systémy strojového videnia v priemysle a ich integráciu do robotických pracovísk. Teoretická časť diplomovej práce sa venuje témam kolaboratívnej priemyselnej robotiky, konceptom inteligentného priemyslu a systémom strojového videnia v priemyselných aplikáciách. Práca sa ďalej venuje téme virtuálneho sprevádzkovania a jeho softvérovým riešeniam zameraným na priemyselnú robotiku. Praktická časť diplomovej práce je venovaná návrhu robotizovaného pracoviska pre laboratórium priemyselnej robotiky. Simulačný model je vypracovaný pomocou softvéru Siemens Tecnomatix Process Simulate a pozostáva z vizualizácie pracoviska a signálnej simulácie navrhnutej aplikácie. Proces skladania žetónov do plastových puzdier je vykonávaný pomocou priemyselného robota KUKA a komponentov pneumatického systému.

**Title:** Utilization of machine vision systems for the needs of industrial practice and their integration within the virtualization design of robotic workplaces

**Keywords:** machine vision, virtual commissioning, Tecnomatix Process Simulate, industrial robot, event-based simulation

**Abstract:** The diploma thesis is focused on the machine vision systems in industry and their integration into robotic workplaces. The theoretical part of the diploma thesis deals with the topics of collaborative industrial robotics, the concept of intelligent industry and machine vision systems in industrial applications. The work also deals with the topic of virtual commissioning and its software solutions focused on industrial robotics. The practical part of the diploma thesis is devoted to the design of a robotic workplace for the laboratory of industrial robotics. The simulation model is developed by using Siemens Tecnomatix Process Simulate software and consists of workplace visualization and event-based simulation of the designed application. The process of packaging tokens into plastic cases is performed using an industrial KUKA robot and pneumatic system components.

# Obsah

Úvod	1
<b>1 Koncepty inteligentného priemyslu</b>	<b>3</b>
1.1 Internet vecí a priemyselný internet vecí . . . . .	4
1.2 Kolaboratívna priemyselná robotika . . . . .	7
1.3 Strojové videnie v priemysle . . . . .	12
1.3.1 Oblasti použitia strojového videnia . . . . .	14
1.3.2 Základné prvky strojového videnia a jeho delenie . . . . .	15
1.3.3 Integrácia strojového videnia do robotických pracovísk . . . . .	18
<b>2 Virtuálne sprevádzkovanie v priemyselných aplikáciách</b>	<b>21</b>
2.1 Virtuálne sprevádzkovanie robotických pracovísk . . . . .	22
2.2 Softvérové riešenia pre návrh robotických pracovísk . . . . .	24
2.2.1 Softvér Siemens Tecnomatix Process Simulate . . . . .	25
2.2.2 Softvér ABB RobotStudio . . . . .	28
2.2.3 Softvér Visual Components . . . . .	30
<b>3 Tvorba vlastného robotizovaného pracoviska</b>	<b>32</b>
3.1 Konceptné návrhy robotizovaného pracoviska . . . . .	33
3.2 Popis navrhutej robotizovanej bunky budovanej na ústave . . . . .	37
3.3 Technologické vybavenie pracoviska . . . . .	39
3.3.1 Priemyselný robot KUKA KR3 R 540 . . . . .	39
3.3.2 Komponenty strojového videnia . . . . .	42
3.3.3 Komponenty pneumatického systému . . . . .	44

3.3.4	Pásový dopravník Automatica . . . . .	45
3.3.5	Optoelektronické snímače SICK . . . . .	46
3.4	Vlastný návrh komponentov pre realizáciu robotizovanej bunky . . . . .	47
3.4.1	Návrh dielov technologického vybavenia pracoviska . . . . .	48
3.4.2	Návrh koncového efektora robota . . . . .	52
3.5	Bezpečnosť navrhutej robotizovanej bunky . . . . .	53
3.6	Simulačný model a signálna simulácia navrhnutého robotizovaného pracoviska . . . . .	56
3.6.1	Kinematické väzby komponentov . . . . .	57
3.6.2	Inteligentné komponenty pracoviska . . . . .	58
3.6.3	Operácie typu uchop a polož (Pick and Place) . . . . .	59
3.6.4	Operácie toku materiálu (Object Flow) . . . . .	61
3.6.5	Popis toku materiálu na pracovisku . . . . .	62
3.6.6	Operácie simulovanej ľudskej činnosti . . . . .	63
3.6.7	Ganttov diagram a riadiaci modul simulácie . . . . .	64
3.7	Výsledný návrh budovaného robotizovaného pracoviska . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Generovanie riadiaceho kódu na priemyselného robota KUKA</b>	<b>69</b>
	<b>Záver</b>	<b>72</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>74</b>
	<b>Zoznam príloh</b>	<b>78</b>



# Zoznam obrázkov

1.1	Možnosti použitia priemyselného internetu [13]. . . . .	5
1.2	Inteligentné okuliare Vuzix používané spoločnosťou Airbus [29]. . . . .	7
1.3	Nasadenie robotov Unimate 1900 na linke General Motors [20]. . . . .	8
1.4	Porovnanie a) priemyselného robota a b) kolaboratívneho robota [30]. . . . .	9
1.5	Kolaboratívne roboty Universal Robots na montážnej linke Audi. [26]. . . . .	11
1.6	Kolaboratívne roboty Yaskawa radu MOTOMAN-HC v nasadení [30]. . . . .	12
1.7	Princíp triedenia produktov pomocou kamerového systému [9]. . . . .	14
1.8	Inšpekcia fliaš pomocou strojového videnia [16]. . . . .	15
1.9	Základné funkčné celky pre strojové videnie [5]. . . . .	16
1.10	Získanie 3D obrazu laserovou trianguláciou [6]. . . . .	18
1.11	Získanie 3D obrazu metódou doby letu (Time-of-Flight) [6]. . . . .	18
1.12	Získanie 3D obrazu metódou priestorového zobrazovania [6]. . . . .	19
1.13	Integrácia 3D snímania v robotickej bunke (Bin Picking) [17]. . . . .	20
2.1	Porovnanie tradičného a nového prístupu k vývoju automatizovaných výrobných systémov [19]. . . . .	23
2.2	Optimalizácia programu robota v prostredí softvéru Tecnomatix Process Simulate [24]. . . . .	24
2.3	Simulácia činnosti človeka na pracovisku pomocou vstavaného modulu Human [25]. . . . .	27
2.4	Ukážka použitia nástroja FlexPedant v prostredí RobotStudio [2]. . . . .	29
2.5	Ukážky zo softvéru Visual Components [28]. . . . .	30
3.1	Variant A - pohľad zhora a popis častí pracoviska. . . . .	34

3.2	Variant A - detailný pohľad na pracovisko. . . . .	35
3.3	Variant B - pohľad zhora a popis častí pracoviska. . . . .	36
3.4	Variant B - detailný pohľad na pracovisko. . . . .	36
3.5	Variant C - pohľad zhora a popis častí pracoviska. . . . .	37
3.6	Grafické návrhy žetónov. . . . .	38
3.7	Priemyselný robot KUKA KR 3 AGILUS [11]. . . . .	39
3.8	Diagram užitočného zaťaženia robota KUKA KR 3 R540 [11]. . . . .	40
3.9	Pracovná obálka robota KUKA KR 3 R540 [11]. . . . .	40
3.10	Kamera Cognex In-Sight série 7000. . . . .	42
3.11	Photoneo PhoXi 3D skener, prevedenie L [18]. . . . .	43
3.12	Schematické prepojenie 3D skenera PhoXi a robota. . . . .	43
3.13	Skenovací rozsah 3D skenera PhoXi L [18]. . . . .	44
3.14	Rozloženie pneumatických valcov v rámci pracoviska. . . . .	45
3.15	Pásový dopravník Automatica. . . . .	46
3.16	Optoelektronický snímač SICK W2 WT2S-F131 [23]. . . . .	47
3.17	Spínacia vzdialenosť snímača SICK WT2S-F211 [23]. . . . .	47
3.18	Pneumatický valec C85E10-80 s uchytением a vysúvačom. . . . .	48
3.19	Navrhnuté typy zásobníkov. . . . .	50
3.20	Navrhnutý systém fixácie polohy obalu počas skladania. . . . .	50
3.21	Systém pre dávkovanie žetónov na dopravníkový pás. . . . .	51
3.22	Hliníkové profily použité na montáž systémov strojového videnia. . . . .	51
3.23	Rozmery montážnej príruby robota KUKA KR 3 R540 [11]. . . . .	52
3.24	Popis častí použitého vákuového efektora robota. . . . .	53
3.25	Port rozvodu tlakového vzduchu integrovaný do ramena robota. . . . .	53
3.26	Umiestnenie bezpečnostných prvkov v rámci robotizovanej bunky. . . . .	54
3.27	Bezpečnostný skener SICK S3000 Standard a jeho rozsah skenovania [22]. . . . .	55
3.28	Výstražné a bezpečnostné pole skenera SICK S3000 Standart. . . . .	56
3.29	Editor kinematiky pre pneumatický valec C85E25-25 (vysunutá pozícia). . . . .	57
3.30	Logický blok valca C85E25-25, vstupy (vľavo) a výstupy (vpravo). . . . .	59
3.31	Logický blok valca C85E25-25, parametre (vľavo) a akcie (vpravo). . . . .	59
3.32	Trajektórie robota pre operácie typu uchop a polož. . . . .	60

3.33	Analýza optimálneho umiestnenia robota - Smart Place. . . . .	61
3.34	Trajektórie pohybu súčiastok pomocou operácií materiálového toku. . .	62
3.35	Definovaný materiálový tok v simulácii. . . . .	63
3.36	Editor na vytváranie úloh pre model postavy. . . . .	64
3.37	Vytvorené pozície pre doplnenie zásobníka a spustenie programu. . . . .	65
3.38	Ganttov diagram signálnej simulácie. . . . .	66
3.39	Editor dráhy pohybu operácie vykonávanej robotom. . . . .	66
3.40	Riadiaci modul operácií robota KUKA. . . . .	66
3.41	Pohľady zobrazujúce pracovisko z prednej a zadnej strany. . . . .	67
3.42	Konečná podoba simulačného modelu. . . . .	68

# Zoznam tabuliek

1.1	Provnanie charakteristík priemyselných a kolaboratívnych robotov. . . .	10
2.1	Popredný výrobcovia priemyselných robotov a simulačný softvér. . . .	25
3.1	Technické údaje robota KUKA KR 3 R540 [11]. . . . .	41
3.2	Rozsah pohybu osí robota KUKA KR 3 R540 [11]. . . . .	41
3.3	Popis použitých pneumatických valcov na pracovisku. . . . .	45

# Zoznam použitých skratiek a jednotiek

<b>mm</b>	milimeter
<b>s</b>	sekunda
<b>°</b>	stupeň
<b>1D</b>	jednorozmerný priestor
<b>2D</b>	dvojrozmerný priestor
<b>3D</b>	trojrozmerný priestor
<b>CAD</b>	počítačom podporovaný grafický návrh (Computer Aided Design)
<b>IoT</b>	internet vecí (Internet of Things)
<b>IIoT</b>	priemyselný internet vecí (Industrial Internet of Things)
<b>ISO</b>	medzinárodná organizácia pre normalizáciu (International Organization for Standardization)
<b>JT</b>	Jupiter Tessellation CAD formát
<b>OLP</b>	programovanie mimo robota (Off-line Programming)
<b>OPC</b>	otvorená komunikačná platforma (Open Platform Communications)
<b>PLC</b>	programovateľný logický automat (Programmable Logic Controller)
<b>TCP</b>	súradnicový systém definujúci orientáciu nástroja (Tool Center Point)

Skratky a jednotky, neuvedené v tomto zozname, budú lokálne uvedené v texte.

# Úvod

Priemysel sa za posledné desaťročia výrazne zmenil. Významné zlomové momenty vo vzťahu výrobných technológií a človeka sú známe ako priemyselné revolúcie. Od parného stroja a prvej automatizovanej linky v továrňach Henryho Forda sa priemysel zmenil na nepoznanie a v súčasnosti sa nachádzame na prahu v poradí už štvrtej revolúcie. Vyznačuje sa digitalizáciou a zavádzaním kyberneticko-fyzických systémov v rámci celej hierarchickej štruktúry priemyslu od plánovania až po procesnú úroveň. Presné hranice ani definíciu zatiaľ nepoznáme, pretože sme v dobe, kedy sa sami podieľame na definovaní konceptu štvrtej industrializačnej zmeny.

Cieľom diplomovej práce je navrhnúť robotizované pracovisko, ktoré bude postavené na základných princípoch priemyselnej automatizácie, avšak s využitím prvkov moderných technológií, ktoré začínajú určovať charakter súčasnej revolúcie v priemysle. Technológie, ako ich poznáme dnes, môžu byť o niekoľko rokov zastarané. Preto je potrebné neustále sa v danej oblasti vzdelávať, držať krok s dobou a prepájať to s terajšími poznatkami.

Či sa jedná o priemyselné roboty alebo programovateľné logické automaty, oblasť automatizácie v priemysle ma baví a zaujíma. Preto som neváhal využiť možnosť pracovať s týmito technológiami už počas štúdia na vysokej škole a naučiť sa čo najviac. Návrh robotického pracoviska je komplexné zadanie pozostávajúce z množstva čiastkových problémov a úloh, ktoré je potrebné vyriešiť na to, aby sme vo výsledku dokázali vytvoriť plne funkčnú linku s využitím moderných automatizačných technológií. Pre návrh pracoviska je potrebné dobre ovládať nielen riadiace PLC systémy a priemyselnú robotiku, ale aj na metódy tzv. strojového videnia pre navádzanie robota a riadenie linky. Periférie linky sú riadené prostredníctvom pneumatických prvkov.

Cieľom diplomovej práce je simulačný návrh robotického pracoviska v prostredí

Siemens Tecnomatix Process Simulate, pričom nemalý podiel práce tvorí návrh všetkých jedinečných dielov a prípravkov na montáž prvkov pracoviska.

# 1 Koncepty inteligentného priemyslu

Písal sa rok 2011, keď bol na poprednom svetovom veľtrhu v nemeckom Hannoveri širokej technickej verejnosti prvý krát predstavený pojem Priemysel 4.0 a vyvolal množstvo otázok. Dnes, o deväť rokov neskôr môžeme jednoznačne povedať, že pojem Priemysel 4.0 nebol len prechodným marketingovým termínom, ale naopak charakterizuje celý rad nových technológií a riešení pre potreby rozvoja priemyselného odvetvia a udržateľnosť podnikových procesov. Zmeny ktoré do sveta automatizácie prináša sú tak prevratné, že o Priemysle 4.0 čoraz častejšie hovoríme ako o štvrtej priemyselnej revolúcii. Ani najväčší poprední lídri v oblasti informačných technológií, či automatizácie, sa nevedia zhodnúť na definícii a existuje na to jednoduché vysvetlenie. Stojíme na prahu štvrtej priemyselnej revolúcie a my sami sme tí, ktorí tvoria jej kontúry aj definície. Najbližšie roky v priemysle budú prelomové. V rámci Kap. 1 sa budeme venovať technológiám, ktoré budú v čoraz viac na vzostupe a už dnes významne ovplyvňujú prístup k riadeniu a automatizácii výroby [15].

Súčasná revolúcia Priemysel 4.0 sa od tretej priemyselnej revolúcie odlišuje zavádzaním decentralizovaných systémov. Centralizované systémy postavené na princípe server-klient disponovali jednou centrálnou databázou, charakteristickou konzistenciou uložených dát, ich jednoduchou správou spolu s vysokou mierou bezpečnosti. Nevýhoda tohto riešenia bola obmedzená kapacita serverov a zvýšené riziko nestability systému pri výpadku. Moderné výrobné podniky predstavujú komplexné digitálne ekosystémy a preto je nevyhnutné využiť decentralizované riešenia.

V koncepte Priemysel 4.0 sa počíta s vytvorením inteligentnej siete distribuovaných prvkov naprieč výrobnými, obchodnými, ekonomickými, logistickými a ďalšími úsekmi. Distribuovaná infraštruktúra by tak umožnila komunikáciu jednotlivých prvkov medzi sebou, ako sú stroje, objekty, systémy ale aj samotní ľudia. Cieľom je



vytvorenie pracovísk, na ktorých vznikajú produkty pri najvyššej efektívite využitia dostupných výrobných zdrojov s ohľadom na aktuálne podmienky [15].

## 1.1 Internet vecí a priemyselný internet vecí

Internet vecí (z angl. Internet of Things – IoT) a hlavne priemyselný internet vecí (z angl. Industrial Internet of Things – IIoT) tvoria neoddeliteľnú súčasť konceptu inteligentnej výroby a samotného Priemyslu 4.0. Internet vecí je sieť navzájom prepojených inteligentných zariadení, ktoré monitorujú, zhromažďujú, vymieňajú a analyzujú údaje. Priemyselný internet vecí vychádza z IoT a zabezpečuje automatizáciu a optimalizáciu výrobných procesov vďaka aplikovaniu technológií internetu vecí a zbieraniu dát zo všetkých pripojených objektov, vrátane ľudských, materiálových a technologických zdrojov.

Hoci internet vecí a priemyselný internet vecí majú spoločných mnoho technológií, vrátane cloudových platforiem, senzorov, konektivity, komunikácie medzi strojmi a analýzy údajov, používajú sa na rôzne účely. Aplikácie internetu vecí spájajú zariadenia naprieč rôznymi odvetviami, vrátane poľnohospodárstva, zdravotníctva, podnikania, spotrebiteľov a verejných služieb, ako aj štátnej správy a miest. Medzi zariadenia IoT patria inteligentné spotrebiče, fitness náramky, inteligentné žiarovky a ďalšie aplikácie, ktoré vo všeobecnosti nevytvárajú život ohrozujúci stav, ak dôjde k chybe.

Na druhej strane aplikácie IIoT spájajú stroje a zariadenia v takých odvetviach (Obr. 1.1), ako je spracovanie ropy, zemného plynu, energetika, verejné služby a priemyselná výroba. Poruchy systému a výpadky pri zavádzaní IIoT môžu viesť k vysoko rizikovým alebo dokonca k život ohrozujúcim situáciám. Aplikácie IIoT sa tiež viac zaoberajú zlepšovaním účinnosti a zlepšovaním zdravia alebo bezpečnosti v porovnaní s povahou aplikácií IoT orientovaných na používateľa.

Každý priemyselný internet pozostáva z [13, 15]:

- **inteligentných prvkov**, ktoré dokážu snímať, komunikovať a ukladať informácie o sebe,
- verejnej a/alebo súkromnej **dátovej komunikačnej infraštruktúry**,

- aplikácií na analýzu dát a aplikácií na generovanie obchodných informácií zo surových údajov,
- ľudských zdrojov.

Benefity, ktoré so sebou internet vecí v priemysle prináša, jasne reflektuje aj zvýšený dopyt zo strany výrobcov. Podľa prieskumu International Data Corporation (IDC) bol v strednej a východnej Európe v roku 2018 zaznamenaný nárast investícií do IoT o 15 % vyšší, ako v predchádzajúcom roku [15].



Obr. 1.1: Možnosti použitia priemyselného internetu [13].

Výrobné stroje a technológie dlhé roky produkovali popri svojej produkčnej činnosti aj enormné množstvo údajov bez ďalšieho využitia. Napriek tomu sa tieto dáta uchovávali a dnes sa tomu pripisuje ešte väčší význam. Dôvodom je obrovská informačná hodnota dát pre analytické a štatistické využitie, a to dokonca aj spätne. Zistené poznatky je potom možné využiť pre zvýšenie efektivity a pružnosti dnešnej výroby. Silou priemyselného internetu je údaje zo súčasných inteligentných strojov a zariadení analyzovať z reálnom čase a dôležité výsledky použiť na rýchlejšie a presnejšie

riadenie výroby. Všadeprítomné dáta v reálnom čase a dynamické rozhodovanie môžu podnikom priniesť významný nárast efektivity a výkonu.

Pripojené senzory a akčné členy umožňujú spoločnostiam rýchlejšie sa zaoberať neefektívnosťou výroby a problémami, čím šetria čas a peniaze. Vo výrobe má priemyselný internet vecí veľký potenciál na kontrolu kvality, udržateľné a ekologické postupy, sledovateľnosť dodávateľského reťazca aj celkovú efektívnosť dodávateľského reťazca. V priemyselnom prostredí je IIoT kľúčom k procesom ako je prediktívna údržba či správa energie a sledovanie materiálového toku vo výrobe. Informácie sú prenášané priamo do infraštruktúry dátovej komunikácie, kde sa prevádzajú napríklad na informácie o fungovaní určitého stroja. Tieto informácie sa následne dajú použiť na prediktívnu údržbu stroja alebo na jeho optimalizáciu. Senzory môžu monitorovať vibrácie, teplotu a ďalšie faktory, ktoré by mohli viesť k nastaveniu optimálnych prevádzkových podmienok. [13].

Jednou z najväčších výhod, ktorú priemyselný internet poskytuje podnikom, je práve už spomenutá prediktívna údržba. Podniky využívajú údaje v reálnom čase generované zo systémov IIoT na predpovedanie porúch vo výrobných strojoch a zariadeniach. Spoločnostiam umožnia zasiahnuť skôr, ako k poruche dôjde, čím sa predíde zlyhaniu časti stroja alebo k výpadku celej výrobnéj linky.

Sledovanie životného cyklu výrobku je ďalším bonusom IIoT. Dodávatelia, výrobcovia a zákazníci môžu pomocou systémov správy majetku sledovať umiestnenie a stav produktov v celom dodávateľskom reťazci. Systém pošle zainteresovaným stranám okamžité varovania, ak je tovar poškodený alebo hrozí poškodenie, čo im dáva možnosť prijať okamžité alebo preventívne opatrenia na nápravu situácie.

V neposlednom rade IIoT tiež umožňuje zvýšenie spokojnosti zákazníkov. Keď sú výrobky pripojené k internetu vecí, výrobca môže zachytávať a analyzovať údaje o tom, ako zákazníci používajú svoje produkty, čo výrobcom a návrhárom produktov umožňuje prispôbiť budúce zariadenia IoT a vytvárať plány produktov zamerané na zákazníka [13, 14, 15].

Ako príklad z praxe môžeme uviesť popredného výrobcu dopravných lietadiel, spoločnosť Airbus, ktorý spustil iniciatívu digitálnej výroby zameranú na zefektívnenie výroby pod názvom „továreň budúcnosti“. Airbus má integrované snímače do strojov

a nástrojov vo výrobnjej hale a zamestnancov vybavil nositeľnou technikou, akou sú inteligentné okuliare zobrazené na Obr. 1.2, vyvinuté spoločnosťou Vuzix [29]. Cieľom tohto inovatívneho prístupu je znížiť počet chýb a zvýšiť bezpečnosť na pracovisku.



Obr. 1.2: Inteligentné okuliare Vuzix používané spoločnosťou Airbus [29].

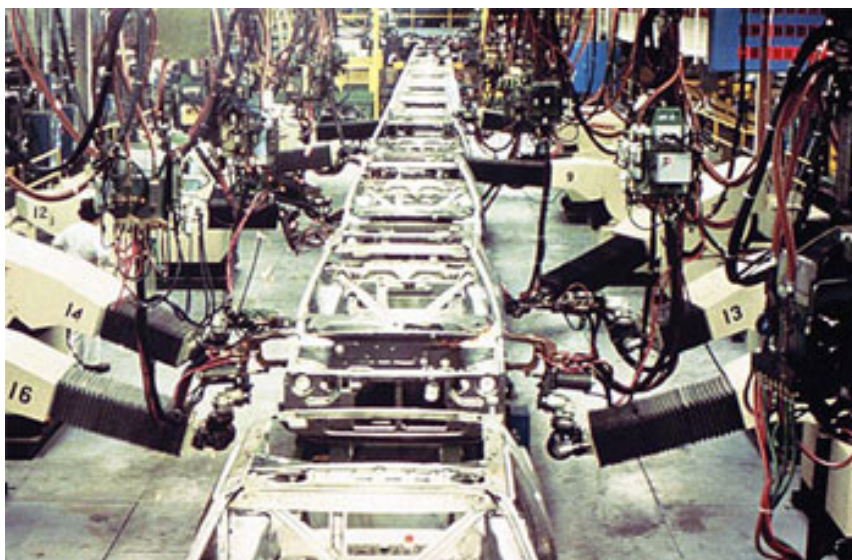
V praktickej časti diplomovej práce sa venujeme návrhu robotickej bunky, preto si uveďme príklad z oblasti priemyselnej robotiky. Výrobca robotov Fanuc do svojich robotov integroval snímače a prepojil ich s cloudovou analýzou dát, vďaka ktorej dokáže predpovedať bezprostredné zlyhanie komponentov. V praxi sa to využíva na plánovanú údržbu vo vhodne zvolenom čase s ohľadom na minimalizáciu strát a prestojov vo výrobe. Rovnaký princíp analýzy stavu svojich robotov zaviedli aj konkurenčné spoločnosti KUKA a ABB [13].

Budúcnosť IIoT vo veľkej miere závisí od rozširovania technológie IoT. Jednoznačne však môžeme povedať, že vzostupný trend implementácie IIoT bude pokračovať. Modernizácia systémov a zariadení vyplýva z požiadaviek na splnenie nových predpisov európskej únie aj globálneho trhu, udržanie kroku s rastúcimi požiadavkami trhu a v neposlednom rade potrebou zaoberať sa bezpečnosťou a dopadom súčasných technológií. Podniky, ktoré už aplikovali IIoT, zaznamenali výrazné zlepšenie v oblasti efektívnosti, bezpečnosti a ziskovosti [14].

## 1.2 Kolaboratívna priemyselná robotika

História priemyselnej robotiky je úzko prepojená s automobilovým priemyslom. Prvý priemyselný robot Unimate 1900 na Obr. 1.3 bol nasadený do prevádzky v roku 1961 spoločnosťou General Motors pri lakovaní karosérií automobilov. Od tohto prelomo-

vého obdobia je automobilový priemysel charakteristický hromadným nadsadzovaním robotických systémov na produkčných linkách. Roboty si medzičasom našli uplatnenie v každej výrobnjej oblasti priemyslu [27].

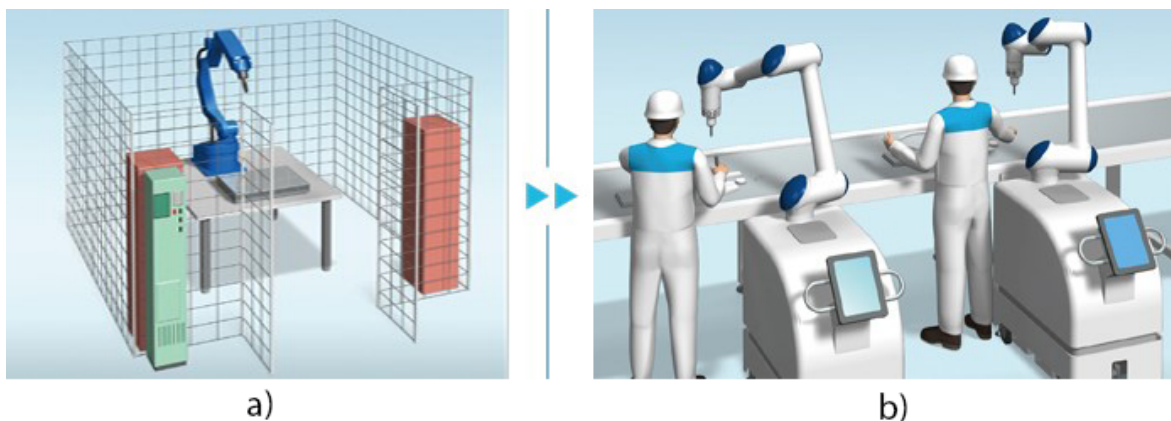


Obr. 1.3: Nasadenie robotov Unimate 1900 na linke General Motors [20].

Tak ako sa menili požiadavky zákazníkov a trhu, zmenili sa aj prostriedky automatizácie výroby. Kým niekedy sme sa uspokojili s menšou variabilitou výrobkov a voliteľná bola nanajvýš farba, dnes nastupuje trend vysoko prispôsobiteľných výrobkov podľa prání zákazníka. Zmena prístupu zákazníkov zvýšila tlak na flexibilitu výroby pri produkcii špecificky dopytovaných produktov a konvenčné výrobné metódy vrátane robotiky narazili na svoje limity. Postupná zmena trhu prirodzene vyústila do vývoja kolaboratívnych robotov.

Myšlienka pre kolaboratívne roboty vznikla v roku 1995 ako súčasť výskumného projektu vedeného nadáciou General Motors Foundation. Cieľom projektu bolo vytvoriť natoľko bezpečné roboty, aby mohli pracovať bok po boku s ľuďmi, ako to znázorňuje Obr. 1.4 b) [1].

Na pochopenie potreby nasadenia kolaboratívnych robotov do prevádzky sa musíme pozrieť na podstatu používania priemyselných robotov. Klasická koncepcia priemyselného robota spočíva v jeho pevne stanovenej lokácii v rámci výrobnjej haly, vrátane presne vymedzeného pracovného priestoru, ktorý musí byť vždy bezpečnostnými prvkami oddelený od priestoru pre obsluhu. Najčastejšie sa jedná o oplotené robotické



Obr. 1.4: Porovnanie a) priemyselného robota a b) kolaboratívneho robota [30].

bunky, prípadne kombináciu bariér a iných bezpečnostných prvkov, tak ako to môžeme vidieť na Obr. 1.4 a). Takýto robot obvykle váži desiatky až stovky kíl, je pevne ukotvený do podlahy a je určený na výrobu veľkých sérií rovnakých výrobkov pri vysokej rýchlosti a presnosti. Rovnako nájde uplatnenie pri odbremenení ľudského personálu od namáhavých alebo nebezpečných činností. Slabou stránkou tradičnej priemyselnej robotiky je flexibilita výroby. Nakoľko klasický priemyselný robot je samostatná jednotka vykonávajúca činnosť na základe pevného programu, pri zmene výroby je potrebné zabezpečiť tím odborníkov na programovanie nového zadania a jeho integráciu [21, 1].

Hlavnou prednosťou kolaboratívnych robotov spolupracujúcich s ľuďmi je práve ich flexibilita, ktorá je ale podmienená aj istými obmedzeniami. Na dodržanie bezpečnostných podmienok na pracovisku sú kolaboratívne roboty obmedzované pri nosnosti a dosahu ramien, ako aj rýchlosti vykonávaných pohybov. Nehodia sa do ťažkých prevádzok, opodstatnenie nájdu v zmiešanej výrobe pri malosériovej vysoko individuálnej produkcii. Ideálne sa hodia do firiem, kde je možné automatizovať čiastkové procesy popri práci ostatných pracovníkov. Spolupracujúce roboty, často nazývané coboty, sa vyznačujú kompaktnou ľahkou konštrukciou bez potreby fixnej inštalácie na jedno miesto. Nastavenie pracovnej činnosti prebieha jednoducho cez intuitívne používateľské rozhranie, čím oproti priemyselným robotom odpadá potreba odborníkov na naprogramovanie a integráciu [21, 26].

Tabuľka 1.1: Provanie charakteristík priemyselných a kolaboratívnych robotov.

	<b>Priemyselný robot</b>	<b>Kolaboratívny robot</b>
Bezpečnosť	Zabezpečený pracovný priestor	Žiadne dodatočné zabezpečenie
Programovateľnosť	Pokročilé programovanie	Jednoduché programovanie
Softvér	Špeciálny SW	Vstavaný SW
Údržba	Náročná údržba	Minimálna/jednoduchá údržba
Prevádzka	Viaczmenná prevádzka	Jednozmenná prevádzka
Výroba	Veľkosériové výrobné podniky	Menšie a stredne veľké podniky
Umiestnenie	Trvalá inštalácia	Flexibilné umiestnenie

Tabuľka 1.1 prehľadne zobrazuje porovnanie a rozdiely medzi priemyselnými a kolaboratívnymi robotmi. Samozrejme nemôžeme sa na tieto vlastnosti a rozdiely pozerať striktne, existujú aj výnimky, ktoré sú v rozpore s naším porovnaním. Ako príklad nám poslúži nemecký výrobca prémiových automobilov, spoločnosť Audi. Na podujatí s názvom Tech Day Smart Factory, ktoré sa konalo v nemeckom Ingolstadte, spoločnosť predstavila novú výrobnú koncepciu montážnej linky. Nový prístup spočíva v modulárnom a mobilnom prístupe montáže. Aby bol výrobca schopný čeliť vysokej zložitosti nových verzií produktov, implementoval do svojej výroby kolaboratívne roboty značky Universal Robots (Obr. 1.5) [26]. Hoci kolaboratívne roboty sú určené prevažne na jednozmennú a malosériovú prevádzku, spoločnosť Audi ich dokázala implementovať aj do veľkosériovej výroby. Zmenila tak doterajší pohľad na aplikáciu cobotov v priemysle. Za povšimnutie na Obr. 1.5 stojí ukotvenie robotov. Vidíme, že nie sú pevne fixované do podlahy, ale sú uchytané do drážkovanej podstavy linky a tým je zabezpečená veľmi jednoduchá zmena ich rozmiestnenia pre iný typ úlohy.

Rozsah použitia robotov spolupracujúcich s človekom je veľmi široký, od výroby a logistiky, cez skladovanie až po zdravotníctvo. K rýchlemu rastu prispieva Intenzívny vývoj u všetkých popredných výrobcov robotov (ABB YuMi, Fanuc rad CR, KUKA LBR iiwa, Yaskawa rad MOTOMAN-HC a iné) ako aj spoločností zameraných výhradne na coboty (Universal Robots, Rethink Robotics, Sarris a iné). Ilustrácia od spoločnosti Yaskawa na Obr. 1.6 zobrazuje príklady použitia robota spolupracujúceho



Obr. 1.5: Kolaboratívne roboty Universal Robots na montážnej linke Audi. [26].

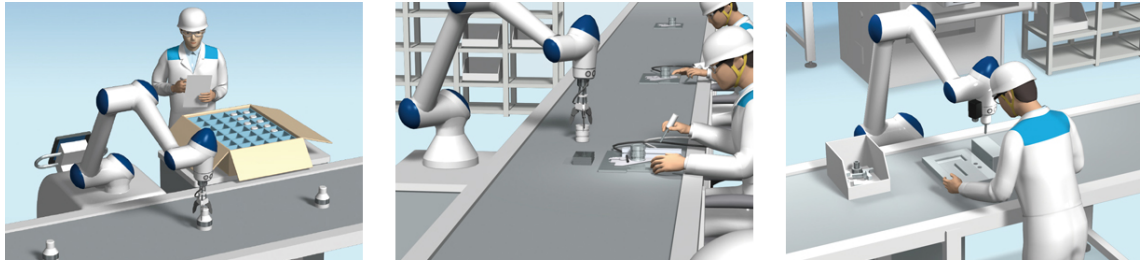
s človekom.

Byť spolupracujúcim pre obsluhujúci personál neznamená len pracovať vedľa robota bez ochranných pomôcok, ale aj v možnosti rýchlej a ľahkej integrácie a optimalizácie. Výrobcovia ich navrhujú v zmysle filozofie Plug and Produce - zapoj a pracuj. Zdĺhavé a náročné vytváranie trajektórií je nahradené intuitívnymi metódami programovania. Najčastejšie sa jedná o nasledovné metódy:

- **programovanie ručným vedením robota** - robot sa v režime učenia podvolí operátorovi, ktorý ho uchopí za zápästie a ručne navádza po požadovaných trajektóriách. Robot si trajektóriu automaticky zapisuje, alebo operátor tlačidlom potvrdzuje jednotlivé body,
- **jednotka ručného riadenia** (Teach pendant) - metóda známa z programovania priemyselných robotov,
- **kombinácia dvoch uvedených metód** - pracovník inštrukcie zadáva prostredníctvom grafického užívateľského rozhrania cez dotykovú obrazovku.

Rovnako, ako pri priemyselných robotoch, aj v prípade cobotov je možné použiť aj metódy programovania mimo robota, a to vytvorením simulácie v softvéri s následným exportovaním zdrojového kódu do robota. Zmysel to má hlavne v prípadoch, keď





Obr. 1.6: Kolaboratívne roboty Yaskawa radu MOTOMAN-HC v nasadení [30].

odstávka pre vytvorenie nového programu nie je možná z ekonomických alebo časových dôvodov.

Kolaboratívne roboty obvykle dosahujú nižšie rýchlosti pohybov a majú nižšie užitočné zaťaženie, ako priemyselné roboty, čo ich robí vhodnejšími pre prácu s jemnejšími a ľahšími materiálmi. Bezpečnosť cobotov je zaručená vnútornými bezpečnostnými snímačmi, ktoré neustále sledujú konštrukčné súčasti robotov aj ich okolie. V prípade priblíženia osoby spomalia alebo sa úplne zastavia. Rýchlosť zastavenia závisí od prevádzkovej rýchlosti.

Pozornosť by sme mali venovať sile, akú dokáže vyvinúť, pretože sila určuje mieru poškodenia alebo zranenia v prípade nehody a je priamo úmerná rýchlosti pohybov robota. Norma ISO 10218-1: 2011 stanovuje pravidlá pre nasadenie robotov v priemyselnom prostredí aj bezpečnostné požiadavky. Nestanovuje limity pre maximálnu prípustnú rýchlosť a silu. Pre každú aplikáciu je povinné vypracovať analýzu rizika, na základe ktorej sa určia povolené parametre sily a rýchlosti pre danú konkrétnu aplikáciu [7].

Priemyselné roboty sa nemusia hodiť na každú aplikáciu, rovnako ako na všetko nestačia kolaboratívne roboty. Ich príchod na trh poskytol veľmi dobrú alternatívu k priemyselnej robotike a otvoril cestu k automatizácii malých a stredných podnikov [7, 21, 1].

### 1.3 Strojové videnie v priemysle

História počítačového spracovania obrazu siaha do konca šesťdesiatych rokov dvadsiateho storočia a postupným vývojom vznikol nový vedný odbor počítačového videnia (z

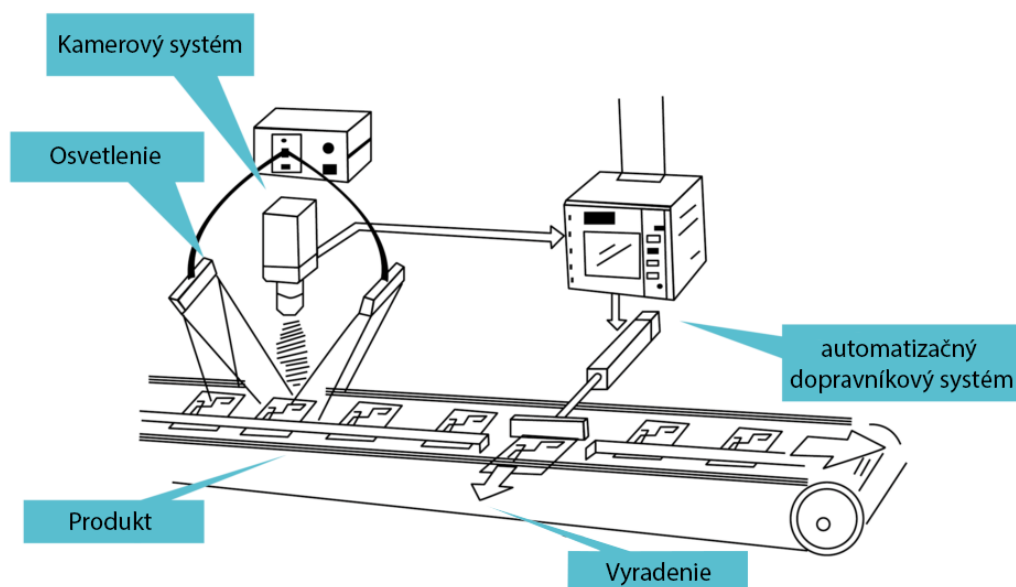
angl. Computer Vision). Počítačové videnie zahŕňa systémy pracujúce automaticky na základe spracovaných informácií získaných z kamery. Počítačové videnie dnes zasahuje do všetkých oblastí bežného života, či už sa jedná o cestnú dopravu, rozpoznávanie tváre alebo procesy priemyselnej výroby. Nasadenie počítačového videnia v priemysle je posledné roky natoľko masívne, že sa vyčlenilo na samostatnú kategóriu, známu pod názvom strojové videnie (z angl. Machine Vision) [10].

Strojové videnie charakterizuje väzba na výrobný proces a orientácia na typické úlohy spojené s riadením výrobného procesu. Radíme sem najmä vizuálnu inšpekciu viditeľných parametrov, počítanie objektov, hľadanie defektov a mnohé iné. Ambíciou pri nasadzovaní počítačového videnia do priemyslu je nahradiť ľudskú schopnosť zrakom vnímať obraz, porozumieť mu a ďalej ho interpretovať. Človek vníma približne 80 % všetkých informácií prostredníctvom zraku a strojové videnie v dnešnej podobe je schopné tieto vizuálne informácie získavať pomocou technických prostriedkov. De facto, strojové videnie dalo strojom oči a schopnosť vidieť. Strojové videnie sa rozvíjalo na základe novej stratégie spoločností s orientáciou na maximálnu kvalitu a kvantitu produkcie pri súčasnom znižovaní nákladov. Práve tu priemysel narazil na limity ľudskej pracovnej sily. Človek je tvor omylný, v prípade monotónnej a neraz namáhavej práce sa chybám nedá vyhnúť. Oproti tomu strojové videnie poskytuje stále rovnakú kvalitu výsledkov s minimálnou chybovosťou. [10, 8] Takto postavené inšpekčné systémy sú rýchle, objektívne, pracujú nepretržite a oproti ľuďom poskytujú konzistentnejšie výsledky.

Metóda videnia strojov je vo svojej podstate veľmi blízka človeku. Kamera zachytí obraz skúmaného objektu, systém obraz prevedenie na digitálnu informáciu, podľa predpísaného algoritmu ju vyhodnotí a výsledok sprostredkuje pre akčný zásah v procese. Z hľadiska meracej metódy sa jedná o bezkontaktnú metódu a jej integrácia do existujúceho procesu je možná aj bez väčších úprav. Výhodou týchto systémov je flexibilita pri integrácii aj prekonfigurovaní existujúcich aplikácií [8].

### 1.3.1 Oblasti použitia strojového videnia

Možnosti uplatnenia strojového videnia v priemysle sú prakticky neobmedzené. Najčastejšie sa však aplikujú v odvetviach ľahkého spracovateľského priemyslu, kde sa využívajú predovšetkým na zaistenie požadovanej kvality, kvantity a riadenie výrobného procesu. Základné inšpekčné systémy poskytujú len jednoduchú informáciu napr. o stave vykonanej kontroly, kedy je daný výrobok označený za bezchybný alebo vadný. Zložitejšie systémy dokážu obsluhu upozorniť na prítomnú chybu alebo pomocou ďalších prvkov automatizácie rovno vyradia vadné kusy z produkcie, tak ako to zobrazuje ilustrácia na Obr. 1.7. Rovnaký princíp je možné uplatniť na triedenie produktov podľa rozpoznateľného parametra [10].

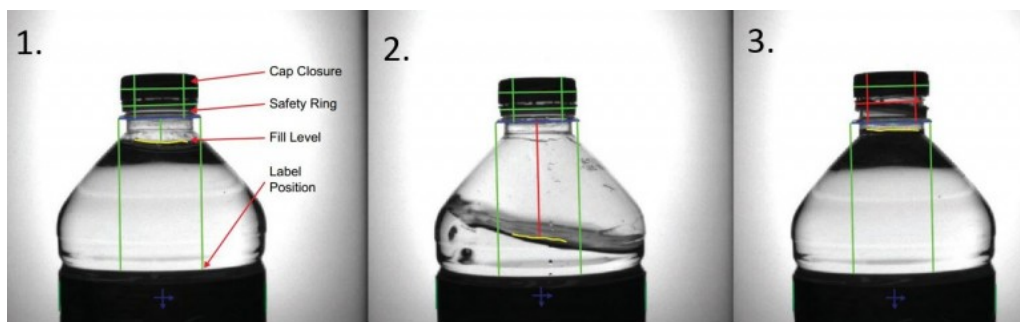


Obr. 1.7: Princíp triedenia produktov pomocou kamerového systému [9].

Najbežnejšie prípady použitia strojového videnia v praxi sú nasledovné [10]:

- **identifikácia farieb** - kontrola potlače, náteru, farebnosti,
- **čítanie čiarových kódov, textu** - pokročilá kontrola pri montáži,
- **meranie objemu produkcie** - počítanie produktov na dopravníkoch,

- **kontrola povrchov** - ostré hrany, škrabance, praskliny, výlisky,
- **kontrola úplnosti** - detekcia celistvosti obalu alebo obsahu balenia,
- **rozpoznanie, polohovanie a triedenie** - montáž správne orientovaných dielov,
- **kontrola a meranie tolerancií** - poloha, rozmer, rozstup dier, veľkosť otvorov,
- **navádzanie robotov** - manipulačné operácie s výrobkami, montáž.



Obr. 1.8: Inšpekcia fliaš pomocou strojového videnia [16].

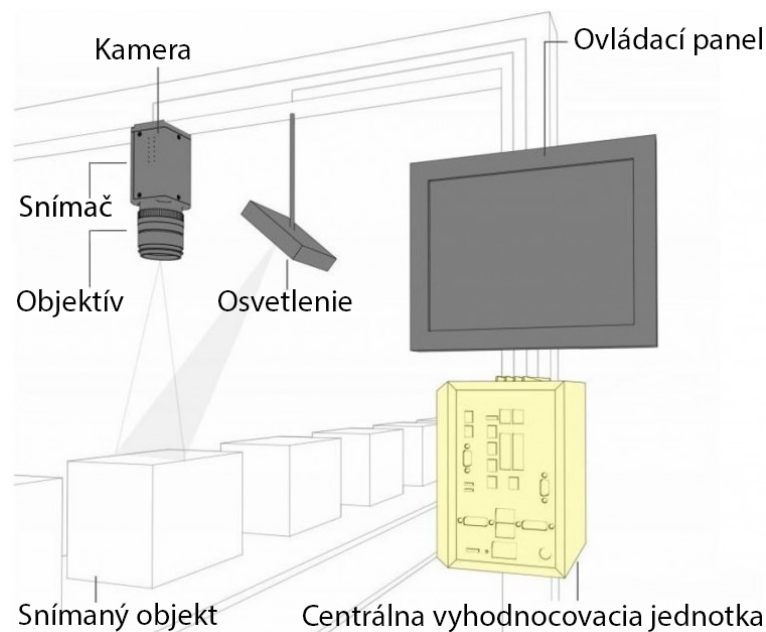
Obrázok 1.8 zobrazuje príklad využitia inšpekčného systému pri výstupnej kontrole fliaš. Kontrola je zameraná na správne osadený uzáver fľaše vrátane bezpečnostného krúžku, hladinu plnenia fľaše a pozíciu etikety (pozícia vľavo). Uprostred je etiketa aj uzáver v poriadku, no fľaša je zle naplnená, na pravej pozícii je zobrazená fľaša so zlým uzáverom.

### 1.3.2 Základné prvky strojového videnia a jeho delenie

Medzi hlavné súčasti systému strojového videnia patria nasledovné funkčné celky, zobrazené na Obr. 1.9 [5]:

- **osvetľovacia jednotka** - zabezpečuje dobré svetelné podmienky pre snímanie kontrolovaného objektu,
- **kamerový systém** pozostávajúci z:
  - **objektív** - zachytáva obraz a sprostredkováva ho snímaču kamery vo forme svetla,

- **snímač obrazu** (Image Sensor) - prijatý obraz prevedie na digitálnu informáciu a odovzdá ju do centrálnej vyhodnocovacej jednotky,
- **centrálna vyhodnocovacia jednotka** (Vision Processing) - spracúva digitálnu informáciu zo snímača, spracovanie môže byť súčasťou kamery alebo externé v počítači,
- **komunikačné členy** - výmena dát s externými zariadeniami (PLC, robot).



Obr. 1.9: Základné funkčné celky pre strojové videnie [5].

Existuje viacero možných spôsobov, ako pristupovať ku konkrétnej úlohe videnia stojov v priemysle. Podľa použitej technológie a oblasti, na akú sa systém bude zameriavať, delíme strojové videnie nasledovne:

1. **Systémy jednorozmerného videnia - 1D:** obsahujú snímač len s jedným radom pixelov citlivých na svetlo. Digitálny signál analyzujú líniovo, čo 1D systémy predurčuje na inšpekciu chýb a defektov pri kontinuálnej výrobe materiálov, ako sú kovy, plechy, plasty, papier a iné netkané látky. Obvykle sú umiestnené nad dopravníkom a líniovo snímajú celú šírku materiálu kolmo na smer pohybu materiálu [4].

2. **Systémy dvojrozmerného videnia - 2D:** snímač 2D systémov zachytí analyzovanú oblasť dvojdimenzionálne, teda plošne. V závislosti od použitého snímača je výsledkom monochromatický obraz, alebo obraz vo farebnej RGB škále. Pre správnosť interpretovaných výsledkov sú kľúčové parametre [6]:

- kvalita a rozlíšenie použitého snímača,
- výber šošoviek a optických prvkov,
- osvetlenie snímanej oblasti.

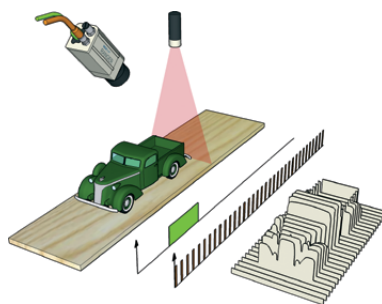
Osvetlenie je kľúčovým parametrom pre úspech použitej 2D metódy. Svetlo zvyrazňuje vlastnosti alebo parametre produktu, ktoré majú byť podrobené analýze, zaisťuje vysokú kvalitu obrazu bez šumu. Napríklad, matné povrchy môžu byť osvetlené priamym svetlom, zatiaľ čo na lesklé povrchy sa používa rozptýlené svetlo, aby sa zabránilo odrazom.

3. **Systémy trojrozmerného videnia - 3D:** sú založené na zachytávaní priestorového obrazu v troch dimenziách. Systémy 3D videnia sú podľa prístupu zachytenia 3D obrazu delené na [6]:

- (a) Skenovanie - priestorový obraz sa získava pohybom objektu cez oblasť merania alebo pohybom skenovacieho zariadenia okolo predmetu. Pohyb musí byť konštantný, plynulý, prípadne kontrolovaný cez enkóder na sledovanie pohybu. Takto zhotovené obrazy sú zvyčajne presné a kvalitné.
- (b) Snímkovanie - obraz sa získa zhotovením jediného záberu. Pohyb objektu alebo skenovacieho zariadenia nie je potrebný, výsledná kvalita obrazov však nedosahuje kvalitu ako pri skenovaní.

Z technologického pohľadu zachytávanie 3D obrazu využíva [6]:

- **Laserová triangulácia:** využíva líniu laserových lúčov a kameru na zhromažďovanie odrazených lúčov. V závislosti od povrchu objektu sa menia aj odrazené lúče a spolu dávajú 3D profil naprieč sledovaným objektom. Laserová triangulácia vyžaduje pohyb objektu (Obr. 1.10).



Obr. 1.10: Získanie 3D obrazu laserovou trianguláciou [6].

- **Doba letu (z angl. Time-of-Flight; ToF):** pre každý bod obrazu sa meria čas letu svetelného signálu medzi zariadením a cieľovým objektom a čas, za aký sa signál vráti späť k zariadeniu. Zo získaného časového rozdielu sa odvodí vzdialenosť medzi zariadením a cieľom, pričom výsledkom je okamžitý 3D obraz cieľového objektu (Obr. 1.11).



Obr. 1.11: Získanie 3D obrazu metódou doby letu (Time-of-Flight) [6].

- **Priestorové zobrazovanie:** podobne ako ľudský zrak, kombinuje dva 2D obrazy zhotovené z dvoch rôznych pozícií a hľadá medzi nimi korelácie. Pre nájdenie korelácií sú potrebné obrazy s dostatočnou kvalitou a úrovňou detailov (Obr. 1.12).

### 1.3.3 Integrácia strojového videnia do robotických pracovísk

V závislosti od aplikácie sa v priemyselnej robotike uplatňujú práve 2D a 3D systémy strojového videnia. Integráciou strojového videnia do robotických pracovísk sa oblasť priemyselnej robotiky posunula na vyššiu úroveň najmä z hľadiska efektivity. Slabou stránkou robotov pri vykonávaní rôznych úloh je potreba zabezpečiť fixné pozície pre

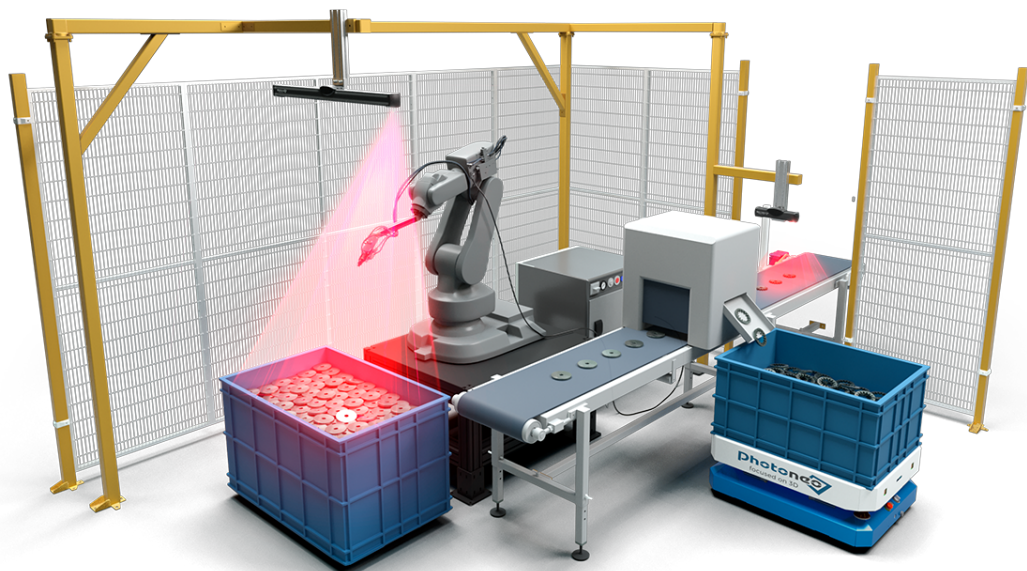


Obr. 1.12: Získanie 3D obrazu metódou priestorového zobrazovania [6].

odoberanie a pokladanie manipulovaných predmetov. Systémy strojového videnia nám umožňujú prejsť z presne definovaného bodu na presne definovanú oblasť, čo značne zjednodušuje a zefektívňuje mnohé operácie. Príkladom môže byť odoberanie z dopravníkového pásu. Kamerový 2D systém identifikuje polohu objektu, kde sa nachádza a aká je jeho orientácia v snímanom priestore voči polohe robota. Potom môže robot upraviť trajektórie a objekt uchopiť.

Technológia 3D videnia je ďalším krokom vpred v zmysle komplexnosti a môže poskytnúť viac informácií o predmete, ktorým musí robot manipulovať. Na tejto technológii je postavená celá metóda, tzv. neusporiadaného odoberania z prepravky (z angl. Bin Picking). Jedná sa o odoberanie neusporiadaných predmetov z prepraviek, transportných nádob, alebo iných priestorov. Nasnímaním oblasti s predmetmi softvér zistí ich rozmiestnenie v priestore a určí, ktorý diel najviac vyhovuje pre odobratie (Obr. 1.13). Odpadá tak potreba ľudskej obsluhy na zabezpečenie presného umiestnenia predmetu pre odobratie robotom.





Obr. 1.13: Integrácia 3D snímania v robotickej bunke (Bin Picking) [17].

## 2 Virtuálne sprevádzkovanie v priemyselných aplikáciách

Koncom šesťdesiatych rokov dvadsiateho storočia boli automatické linky riadené reléovými obvodmi. Množstvo kabeláže, relé, či časovačov zvyšovalo poruchovosť systému a značne komplikovalo možnosť zmeny riadiaceho algoritmu. Príchod programovateľných logických automatov umožnil program meniť rýchlo a plynulo na úrovni riadiacej jednotky a tým vznikli nové možnosti pre vytváranie a testovanie aplikácií. Pri návrhu a integrácii PLC systémov alebo priemyselných robotov do výrobného procesu dnes kľúčovú úlohu zohrávajú programovacie softvérové riešenia, umožňujúce otestovať navrhnutú aplikáciu jej virtuálnym sprevádzkovaním.

Pojem virtuálne sprevádzkovanie vychádza z anglického názvu Virtual Commissioning a pojednáva o spôsobe virtuálneho uvedenia do prevádzky s využitím simulačných metód. Najčastejšie sa jedná o trojdimenzionálne technológie modelovania, pomocou ktorých sa vytvorí simulačný model a doplní sa o funkčné celky s implementovanou riadiacou logikou. Model môže tvoriť samostatné zariadenie alebo automatizovaná výrobná linka, no týmto spôsobom je možné modelovať aj celé výrobné haly. Úlohou virtuálneho sprevádzkovania je vytvoriť a overiť štúdiu realizovateľnosti, implementovať a otestovať riadiacu logiku, dosahy a trajektórie robotov, prípadne týmto spôsobom vytvoriť a otestovať nové aplikácie ešte pred integráciou u zákazníka [12, 3].

Predpokladá sa, že až 70 % oneskorení pri uvedení do prevádzky je v dôsledku chýb v riadiacom softvéri. Výhodou virtuálneho prostredia simulácií je možnosť vložiť softvérové a hardvérové prvky automatizačného procesu a testovať funkcionality aplikácie vrátane výmeny dát medzi použitými zariadeniami. Tým sa výrazne znižuje

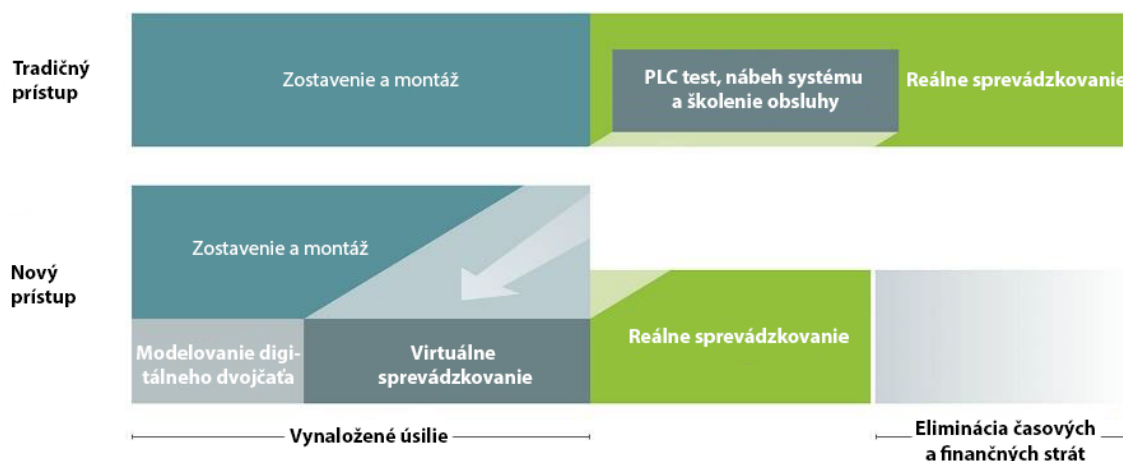
riziko nasadenia programu obsahujúceho chyby. Proces skutočného uvedenia do prevádzky zahŕňa testovanie priamo na skutočnom výrobnom systéme zahŕňajúc stroje, PLC a ďalšie zariadeniach vrátane snímačov a akčných členov. Virtuálne uvedenie do prevádzky využíva virtuálne repliky komponentov systému a má viacero možností konfigurácie. Hlavné benefity virtuálneho sprevádzkovania sú [3]:

- virtuálna validácia mechanických a elektrických komponentov,
- optimalizácia a validácia procesov v bezpečnom, bezkolíznom prostredí,
- eliminácia chýb programu,
- integrovaná simulácia pomocou skutočného kódu PLC a hardvéru,
- podpora spolupráce medzi oddeleniami mechanického dizajnu a riadenia,
- skrátenie času potrebného pre fyzické uvedenie do prevádzky o 30 %.

## 2.1 Virtuálne sprevádzkovanie robotických pracovísk

Robotizované výrobné systémy sa vyznačujú vysokou zložitosťou, veľkou rozmanitosťou a malou štandardizáciou tvoriacich súčastí. V dôsledku toho je vývojový proces takmer jedinečný pre každý jednotlivý robotizovaný výrobný systém. Implementácia nových robotických staníc do skutočných automatizovaných výrobných a montážnych systémov v nepretržitom výrobnom procese vyžaduje určitý čas potrebný na skutočné uvedenie do prevádzky a validáciu PLC programu. Rovnako je problematické zastaviť výrobu, ak sa priemyselný robot programuje online, teda ručne priamo na mieste pomocou metódy učenia.

Obrázok 2.1 zobrazuje rozdiely medzi tradičným a novým spôsobom programovania automatizovaných výrobných systémov, vrátane robotizovaných pracovísk. V oboch prípadoch je doba potrebná na zostavenie a montáž nových prvkov rovnaká, avšak v prípade využitia tradičného prístupu je potrebné rátať s dlhším časovým úsekom pre skutočné uvedenie do prevádzky, ktoré v prípade robotov zahŕňa programovanie online. Nový prístup do vynaloženého úsilia zahŕňa modelovanie virtuálneho dvojčeta



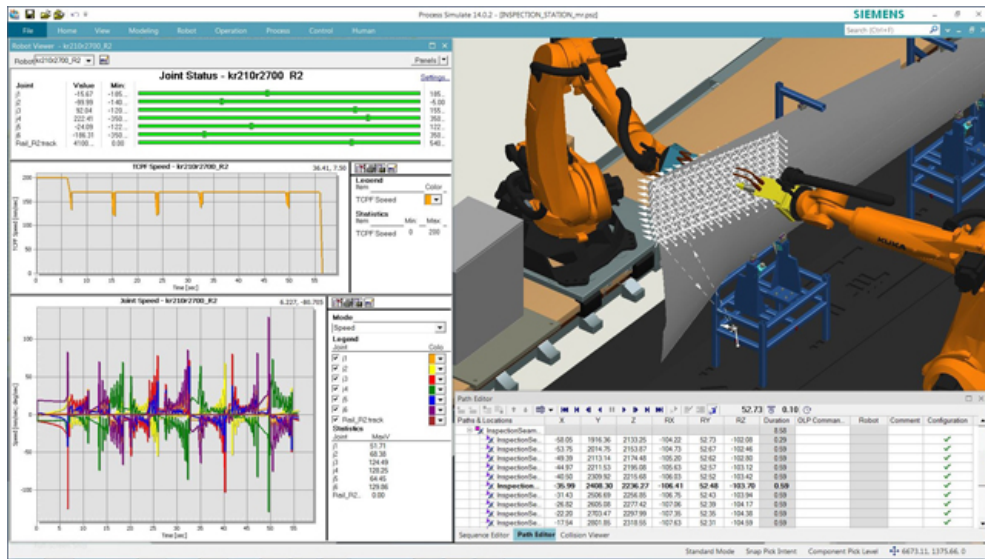
Obr. 2.1: Porovnanie tradičného a nového prístupu k vývoju automatizovaných výrobných systémov [19].

reálnej linky a jej virtuálne prevádzkovanie, teda overenie a validáciu riešenia. Skutočné uvedenie do prevádzky a odladenie riadiaceho systému sa uskutoční na konci vývoja a trvá kratšiu dobu, čo v praxi znamená ušetrný čas odstávky, nábehu automatizovaného výrobného systému a s tým spojenú elimináciu finančných strát [19].

Virtuálne sprevádzkovanie má nezastupiteľné miesto pri návrhu a optimalizácii robotických pracovísk. Vývoji robotických výrobných systémov prebieha v softvérovom prostredí založenom na práci s údajmi, súbormi a plne kinematickými 3D modelmi robotov. Nástroje pre simuláciu robotov sa zaoberajú viacerými úrovňami, od staníc s jedným robotom až po kompletné výrobné linky. Prínosom z hľadiska uvedenia do prevádzky možnosť simulovať výrobné systémy, navrhnuť a overiť trajektórie robotov bez kolízií, optimalizovať ich pohybové a cyklové časy (Obr. 2.2) a týmto efektívne programovať robotov offline spôsobom - programovaním mimo robota vo virtuálnej podobe. Samozrejmosťou je podpora technológií oblúkového alebo odporového bodového zvarovania, lakovania a iných procesov [24].

Základným stavebným kameňom digitálnej a virtuálnej implementácie je vytvorenie digitálneho dvojčata skutočného produkčného systému. Aby sa pri navrhovaní automatizovaných výrobných systémov dosiahli požadované ciele z hľadiska úspory času a efektívnosti vynaloženého úsilia a zdrojov, digitálne modely robotických buniek musia byť navrhnuté podrobne, vrátane všetkých funkčných detailov. Odchýlky

a nepresnosti modelov závisia od inžinierskej práce pri tvorbe podkladovej výrobnéj a technickej dokumentácie. Ak sa inžinierstvo vykoná podrobne a podľa vzorov, výsledné modely budú realistické a odchýlky minimálne. Virtuálne uvedenie do prevádzky poskytuje štandardizovaný prístup a je založené na osvedčených a overených metodikách [19].



Obr. 2.2: Optimalizácia programu robota v prostredí softvéru Tecnomatix Process Simulate [24].

## 2.2 Softvérové riešenia pre návrh robotických pracovišok

V súčasnosti na trhu pôsobí mnoho výrobcov priemyselných robotov s rozdielnym podielom na trhu v závislosti od krajín a kontinentov. Výrobcovia robotov k svojim produktom poskytujú softvér pre potreby offline programovania robotov a simulácie robotických pracovišok. V Tab. 2.1 je uvedených desať najväčších výrobcov priemyselných robotov vrátane poskytovaného softvérového nástroja. Jednotlivé softvérové riešenia sa medzi sebou môžu líšiť funkcionalitou aj možnosťami programovania a optimalizácie, spája ich však jedna vlastnosť. V programovacom nástroji je možné programovať len roboty tej značky, ktorá je aj poskytovateľom softvéru. Napríklad RobotStudio je

Tabuľka 2.1: Popredný výrobcovia priemyselných robotov a simulačný softvér.

	<b>Výrobca</b>	<b>Softvér</b>
1.	ABB	RobotStudio
2.	Yaskawa Electric Corporation	MotoSim
3.	Midea Group (KUKA)	KUKA.Sim
4.	The Fanuc Corporation	ROBOGUIDE
5.	Kawasaki Heavy Industries	K-ROSET, K-SPARC, KCONG
6.	Epson Robots	RC+ 5.0
7.	Stäubli	Stäubli Robotics Suite
8.	Nachi Fujikoshi Corporation	FD On Desk
9.	Comau	RoboSimPro
10.	Omron Adept Technology Inc.	TMFlow

možné použiť výhradne na programovanie robotov ABB a žiadnych iných.

Na trhu existujú aj univerzálne programovacie nástroje pre offline programovanie robotov a návrh komplexných výrobných systémov obsahujúcich robotizované pracoviská, ako napríklad DELMIA Robotics, Visual Components 4.2, RoboDK a iné. Univerzálne softvérové riešenia sú známe aj ako digitálna továreň a umožňujú pracovať s rozličnými robotmi, vytvárať pomocné mechanické modely a ich kinematiku, simulovať logistické alebo technologické procesy, či činnosť ľudskej obsluhy. Pre vypracovanie diplomovej práce sme použili programovací nástroj Tecnomatix Process Simulate od spoločnosti Siemens. Bližšie si ho predstavíme v nasledujúcej časti tejto kapitoly.

### **2.2.1 Softvér Siemens Tecnomatix Process Simulate**

Process Simulate je digitálne výrobné riešenie spoločnosti Siemens pre offline programovanie robotov a virtuálne sprevádzkovanie výrobných procesov a je súčasťou softvérového balíka Tecnomatix. Konkurenčnou výhodou je možnosť vytvárať 3D simulácie procesov výroby pre všetky typy a modely robotov. Ďalším benefitom je integrovaný modul pre detailnú simuláciu ľudskej činnosti (Human modul). Ukážka použitia simulá-

cie ľudskej činnosti na pracovisku je na Obr. 2.3. Process Simulate umožňuje vytvárať jednoduché statické štúdie realizovateľnosti aj dynamické simulácie pre všetky aplikácie používané v priemysle. Natívne podporuje vizualizačný štandard JT, otvorený a široko prijímaný formát 3D dát používaný na vizualizáciu, kolaboráciu a zdieľanie dát. Pri vytváraní robotických pracovísk je dôležité výrobný proces navrhnuť v takej podobe, aby bolo pracovisko po integrácii vo výrobe bezpečné, bezkolízne a efektívne. Programátori majú v softvéri Process Simulate k dispozícii celý rad funkcií. Program umožňuje [25]:

- vhodnú voľbu robotov, zariadení, pracovných nástrojov a hlavíc,
- generovať programy robotov,
- vykonávať dynamickú detekciu kolíznych stavov,
- testovať dosahy robota a nájsť optimálne umiestenie robota (tzv. Smart Place)
- vytvárať a upravovať postupnosť procesných operácií,
- vytvárať a modifikovať trajektórie pohybov,
- modelovať jednoduché 3D objekty,
- definovať kinematické väzby modelov,
- simulovať ľudskú činnosť v procese, vrátane ergonómie pohybov,
- navrhovať, upravovať geometriu a kinematiku pracovných hlavíc a nástrojov,
- simulovať riadiacu logiku interných zdrojov (digitálne a analógové signály),
- prepájať virtuálny model s fyzickým PLC a hardvérom cez rozhranie OPC Server,
- analyzovať časy cyklov jednotlivých operácií aj kompletného výrobného procesu,
- analyzovať vnútorné veličiny robotov počas výkonu operácie a mnohé iné.





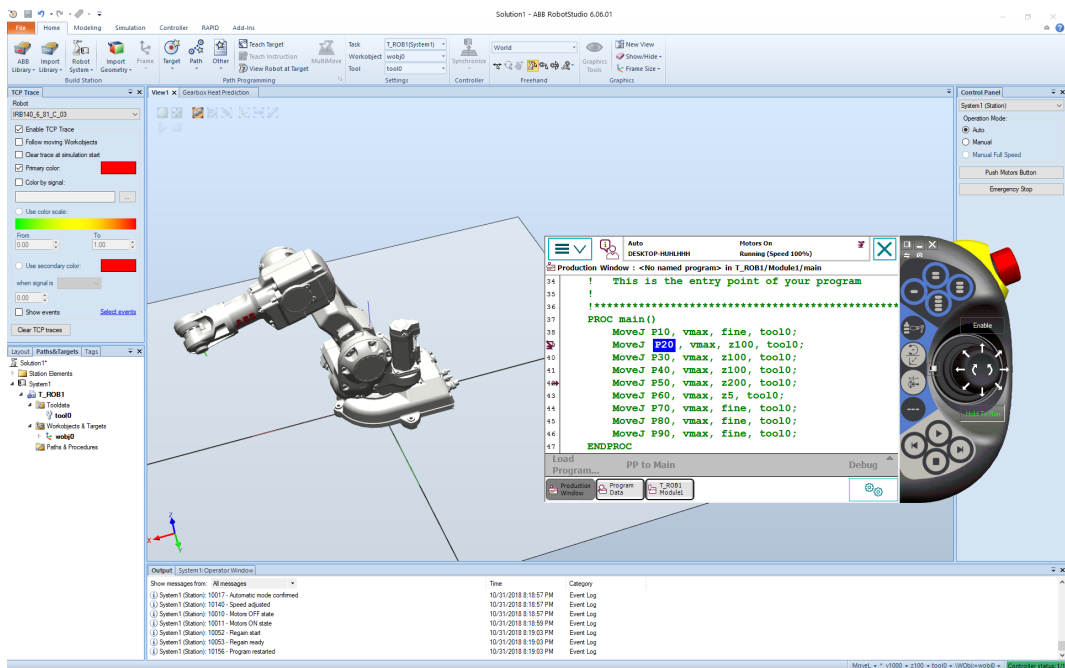
Ako hlavné výhody použitia nástroja Process Simulate môžeme spomenúť výrazné skrátenie času integrácie so súčasným znížením nákladov. Používaním virtuálnej validácie pri návrhu sa znižuje počet potrebných fyzických prototypov na nájdenie optimálneho riešenia. Simulácia procesu pomáha optimalizovať proces a vytvoriť efektívne a ergonomicky bezpečné pracoviská. Integrovaná podpora pre virtuálnu realitu má potenciál vo finálnej fáze dokončovania projektu z hľadiska optimalizácie, ako aj z prezentačného hľadiska pre koncového zákazníka.

V porovnaní s konkurenčnými riešeniami je pridanou hodnotou modul Human pre simuláciu a analýzu ľudskej činnosti na veľmi pokročilej úrovni. Process Simulate má mierne nižšiu úroveň grafického spracovania a interpretácie modelovaného pracoviska. Ďalšou nevýhodou je podpora len jedného formátu pre 3D CAD modely, ktorým je štandard JT a zároveň absencia akejkoľvek vstavanej knižnice modelov. Na vytvorenie simulácie je potrebné mať pripravené modely objektov vo formáte JT a tie následne importovať do štúdie.

### **2.2.2 Softvér ABB RobotStudio**

Programovací softvér RobotStudio spoločnosti ABB patrí medzi najlepšie programovacie nástroje a je určený výhradne na programovanie robotov ABB. Softvér je postavený na technológii ABB Virtual Controller, presnej kópii skutočného softvéru, ktorý spúšťa roboty aj v reálnom svete vo výrobe, vrátane skutočného zdrojového kódu robota a identických konfiguračných súborov. Vďaka tomu je možné dosiahnuť výnimočnú presnosť navrhnutého riešenia pri aplikovaní do reálnej prevádzky. Softvér má integrovanú knižnicu modelov robotov, mechanizmov a základných doplnkov pre modelovanie pracovísk. Zároveň podporuje viacero CAD formátov, čím užívateľovi umožňuje importovať a použiť vlastné modely strojov a objektov. Verné grafické spracovanie uľahčuje prácu systémovým integrátorom pri programovaní aj prezentovaní výsledkov zákazníkovi. Podobne, ako konkurenčné riešenia, aj softvér spoločnosti ABB podporuje zobrazovanie vo virtuálnej realite.

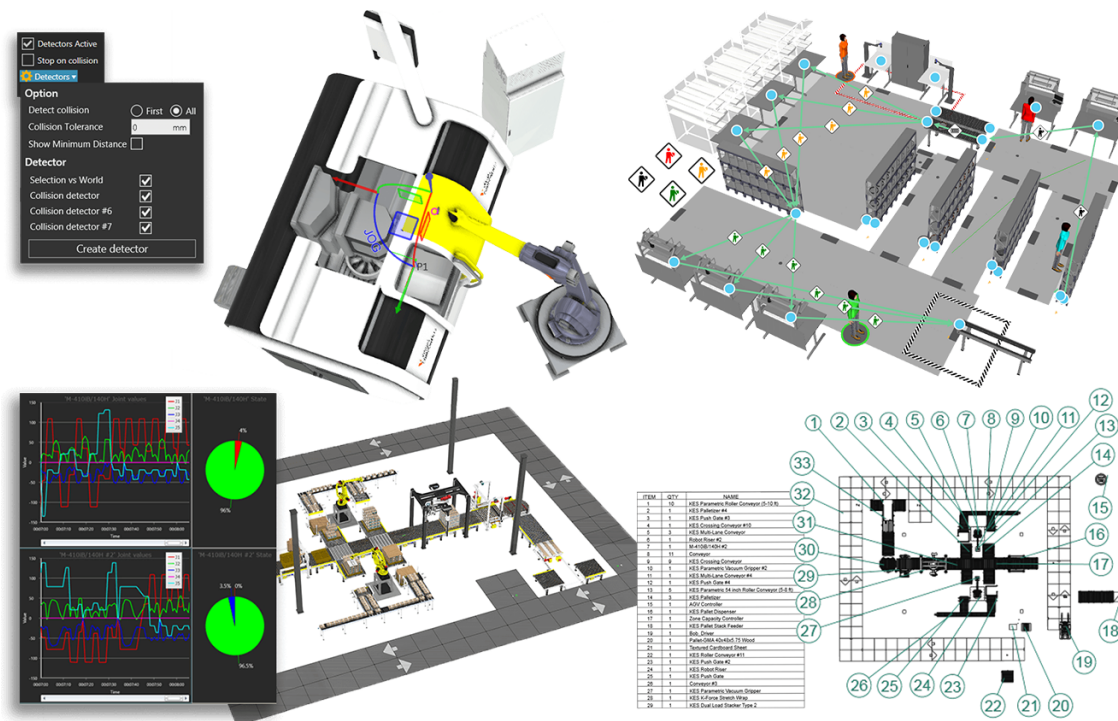
Samozrejmosťou je možnosť vytvárať mechanické komponenty definovaním kinematických vzťahov a osí pohybu, ako aj inteligentné komponenty pomocou logických



Obr. 2.4: Ukážka použitia nástroja FlexPedant v prostredí RobotStudio [2].

blokov pre verné simulovanie pohybových operácií mechanizmov a ich logického správaní cez pripojené signály. Funkcie pre automatické generovanie trajektórie a konfigurácie ramena robota sú založené na analýze geometrie CAD modelu, sledovaním hrán, kriviek a plôch. Analyzátor signálu zaznamenáva a zobrazuje signály z ovládača robota, čo umožňuje optimalizáciu programu robota. Zaznamenáva rýchlosť robota, spotrebu energie, vstupno-výstupné signály, hodnoty TCP a iné. Záznamy signálov je možné exportovať na ďalšiu analýzu. Priemyselné roboty ABB sú programované prostredníctvom programovacieho jazyka RAPID. RobotStudio ponúka viacero nástrojov na editáciu a optimalizáciu RAPID kódu. RobotStudio už v základnej verzii obsahuje bezpečnostný Konfiguračný nástroj Visual SafeMove. Umožňuje konfiguráciu a vizualizáciu bezpečnostných zón pomocou 3D grafického zobrazenia. Softvér natívne podporuje virtuálny FlexPedant, čo je zariadenie na ručné programovanie robota. Virtuálny FlexPedant, zobrazený na Obr. 2.4, umožňuje ovládať riadiaciu jednotku robota rovnakým spôsobom ako skutočný fyzický ovládač a je možné ho použiť na náhľad užívateľských obrazoviek. Pre jednotlivé technologické postupy ponúka rozšírenia ArcWelding, Cutting, Machining, Tending, Painting, Palletizing alebo Picking PowerPac, ktoré urýchľujú a uľahčujú používateľovi prípravu robotizovanej stanice [2].

## 2.2.3 Softvér Visual Components



Obr. 2.5: Ukážky zo softvéru Visual Components [28].

Fínska spoločnosť Visual Components je považovaná za globálneho lídra v oblasti výrobných simulačných systémov so zameraním na 3D simulácie výrobných liniek. Patrí medzi univerzálne softvérové riešenia pre tvorbu digitálnej továrne, umožňuje vytvárať simulácie a programy pre ľubovoľné priemyselné roboty. Náhľad na výstupy zo softvéru Visual Components je zobrazený na Obr. 2.5.

Užívateľovi umožňuje konfigurovať rozloženie prvkov na linke, modelovať materiálový tok a jednotlivé procesy s využitím fyzického správania, ktoré zohľadňuje fyzické sily, kolízie, gravitáciu a vlastnosti materiálu. Veľkou výhodou je výrobcom poskytovaný katalóg prvkov, obsahujúci vyše 2300 preddefinovaných modelov robotov, strojov, zariadení a rôznych doplnkov. Zároveň umožňuje použitie vlastných 3D modelov prostredníctvom širokej škály podporovaných CAD formátov. Pre potreby virtuálneho sprevádzkovania je k dispozícii konektivita s PLC cez priemyselný štandard OPC UA, alebo pomocou podporovaných rozhraní špecifických pre dodávateľa, ako napríklad Siemens S7 PLCSIM. Pre analýzu údajov softvér obsahuje integrované nástroje

pre generovanie rôznych typov štatistických grafov, alebo pre podrobnejšiu analýzu je možný export údajov do formátov PDF a Microsoft Excel. Podpora virtuálnej reality predstavuje nový spôsob pre integrátorov pri návrhu a plánovaní výroby, ale predovšetkým umožní zákazníkovi odprezentovať výsledný projekt vo virtuálnom prostredí s realistickým zážitkom [28].

### 3 Tvorba vlastného robotizovaného pracoviska

V rámci Kap. 1 a 2 sme si priblížili témy strojového videnia a virtuálneho sprevádzkovania robotických pracovísk z teoretického hľadiska. Kapitola 3 čitateľovi priblíži postup pri návrhu a tvorbe signálnej simulácie pripravovaného robotického pracoviska budovaného na ústave. Cieľom praktickej časti tejto práce bolo pomocou softvéru Siemens Tecnomatix Process Simulate vypracovať štúdiu, ktorá poslúži ako podklad pre kompletizáciu budovaného pracoviska v laboratóriu pokročilej priemyselnej robotiky.

Zadanou úlohou bolo navrhnúť robotizované pracovisko s využitím prvkov strojového videnia a s podporou pneumatických prvkov. Nemali sme definovaný typ operácie, aký sa mal vykonávať na pracovisku, ani vstupný materiál a výstupný produkt. Pred samotným začatím realizácie simulácie sme museli pristúpiť k celkovej analýze deja vykonávaného na robotizovanom pracovisku. V tomto sa naša úloha líšila od štandardných zadaní z priemyselnej praxe, kde je vopred známy požadovaný výsledok aj manipulovaný materiál. V takom prípade sa štúdia realizuje s ohľadom na všetky známe aspekty a zadané parametre.

Počas hľadania vhodného riešenia sme navyše museli zohľadniť skutočnosť, že budované pracovisko nemá reálne uplatnenie v praxi, ale je budované ako súčasť laboratória robotiky. Služiť má predovšetkým na vyučovacie potreby a preto ďalšou požiadavkou zohľadnenou pri návrhu bola dostatočná modularita celého návrhu, aby bolo možné s pripraveným riešením ďalej pracovať, inovovať ho, optimalizovať a dopĺňať o ďalšie komponenty a technologické vybavenie. Naším cieľom bolo navrhnúť pracovisko, na ktorom by mohla v nasledujúcich rokoch prebiehať výučba priemyselnej robotiky a

aby zároveň bolo možné počiatočnú ideu ďalej rozvíjať a pracovisko zdokonaľovať aj formou záverečných, či už diplomových, bakalárskych alebo dizertačných prác.

Nami navrhnutý koncept robotizovaného pracoviska tvorí operácia skladania priehľadných okrúhlych kapsúl na mince, do ktorých je umiestnený plastový žetón s logom nášho ústavu, respektíve s logom školy. Inšpiráciu sme našli pri zberateľských minciach, ktoré sú často predávané alebo uchovávané v plastových dvojdielnych obaloch. Plastové obaly na mince sme zvolili pre ľahkú dostupnosť a nízku nákupnú cenu. Zakúpené obaly sú od výroby v požadovanej kvalite a z hľadiska presnosti sú ideálne na opakované procesy skladania a rozoberania počas vyučovacieho procesu. V prípade poškodenia nevznikne takmer žiadna škoda a keďže sú na trhu bežne dostupné, obaly je možné po čase doplniť.

Skladacia bunka je navrhnutá ako platforma s priemyselným robotom KUKA KR 3 R540 s vákuovým manipulátorom vlastnej tvorby. Vstupný materiál predstavujú dva typy plastových žetónov spolu s vrchným a spodným dielom plastového obalu. Pracovisko cez pásový dopravník opúšťa výsledný produkt v podobe skompletizovaného obalu so zvoleným typom žetónu vo vnútri obalu. Režim je plne automatický, program sa spúšťa štartovacím tlačidlom, pričom užívateľ má možnosť voľby medzi dvoma typmi žetónov.

### **3.1 Konceptné návrhy robotizovaného pracoviska**

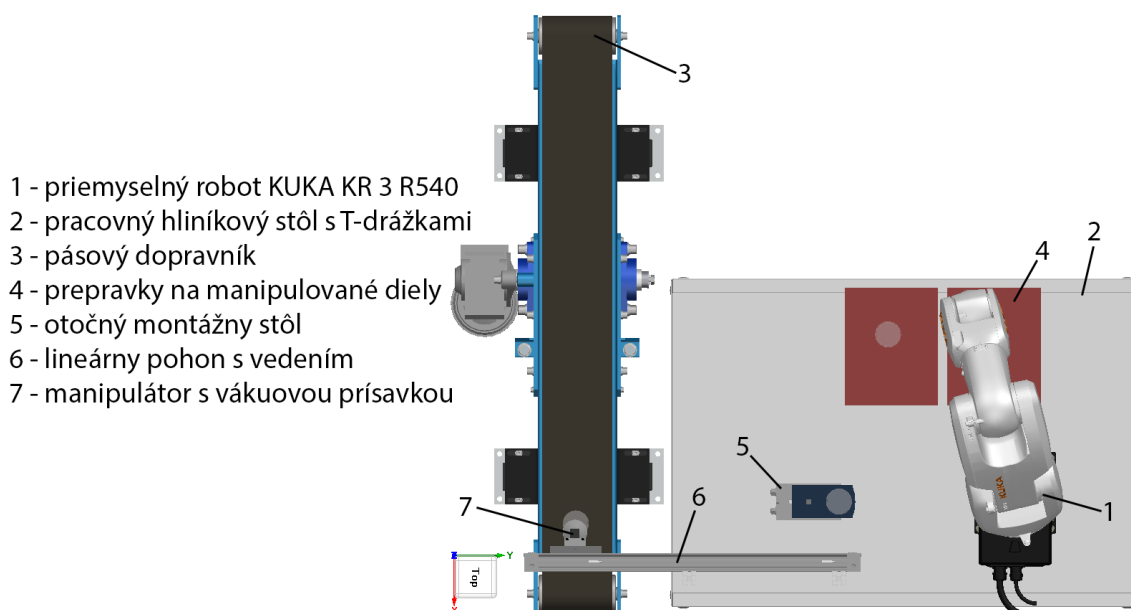
Vhodným zvolením typu operácie aj vstupného materiálu na pracovisko sme získali potrebné informácie o budúcej aplikácii a pristúpili sme k samotnému návrhu robotizovaného pracoviska. Základ každého návrhu aj finálnej verzie tvoria nasledujúce prvky:

- pracovný stôl s T-drážkami,
- priemyselný robot KUKA,
- pásový dopravník,
- kamera Cognex,
- skener Photoneo.

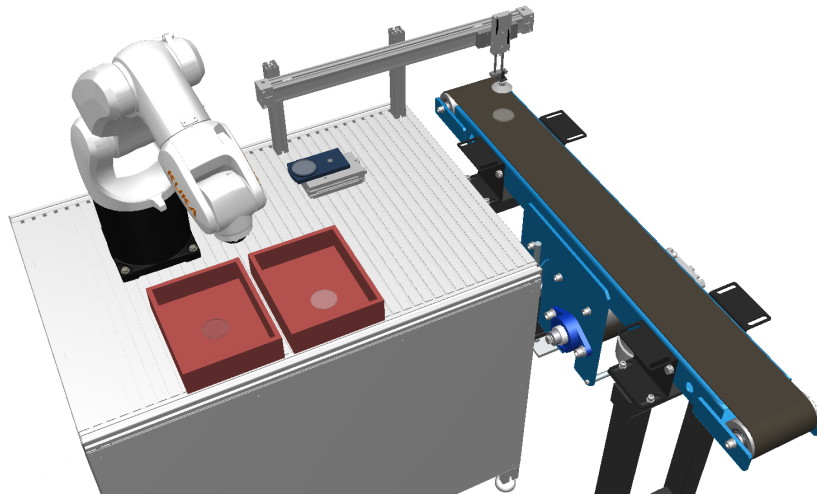
Použitý prvky si podrobne uvedieme v Kap. 3.3. Pomocou softvéru Process Simulate sme pripravili a konzultovali viacero návrhov, ktoré sa líšili predovšetkým v použitých pneumatických prvkoch a rozmiestnení komponentov na pracovisku. Medzi najzaujímavejšie sme vybrali nasledovné varianty:

- **Variant A - s lineárnym pohonom a vákuovým manipulátorom**

Prvé navrhované riešenie je spolu s popisom prvkov zobrazené na Obr. 3.1. Pracovisko obsahuje lineárny pneumatický pohon s pneumatickým manipulátorom a vákuovou prísavkou. Vrchné a spodné diely by boli umiestnené v dvoch samostatných prepravkách, z ktorých by boli odoberané robotom na základe skenovania tejto oblasti 3D skenerom Photoneo. V prvom kroku by bol odoberatý spodný diel a umiestnil by sa na otočný stôl. V druhom kroku by bol do spodného dielu umiestnený žetón. Kompletizácia by prebehla odobratím vrchného dielu obalu, pričom robot by na konci tohto kroku vyvođením prítláčnej sily obal uzavrel. Otočný stôl by zmenil pozíciu rotáciou o 90 stupňov, čím by sa dostal na úroveň vákuovej prísavky manipulátora. Vyvođením podtlaku by sa poskladaný obal presunul na lineárnom pohone na úroveň dopravníka, kde by sa obal uvoľnil a na páse dopravníka by opustil pracovisko.



Obr. 3.1: Variant A - pohľad zhora a popis častí pracoviska.



Obr. 3.2: Variant A - detailný pohľad na pracovisko.

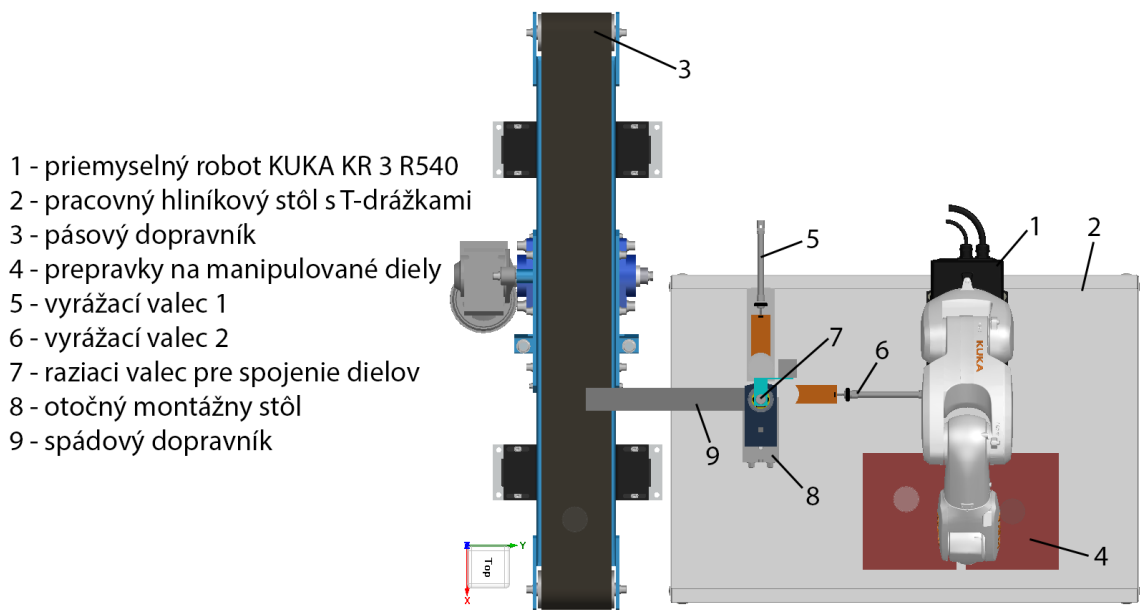
Pri tomto návrhu sme zvažovali prísun žetónov prostredníctvom zásobníkového systému alebo odoberaním z dopravníkového pásu pomocou manipulátora založenom na obrátenom princípe, ako sa presúva hotový produkt na dopravník. Pri testovaní skenera Photoneo sme však narazili na problém, kedy skener nebol schopný s dostatočnou presnosťou rozoznať priehľadné diely obalu umiestnené v preprávkách. Z tohto dôvodu sme od daného návrhu upustili. Detailný pohľad na variant A je na Obr. 3.2.

- **Variant B - s mechanickým skladaním obalu na žetón**

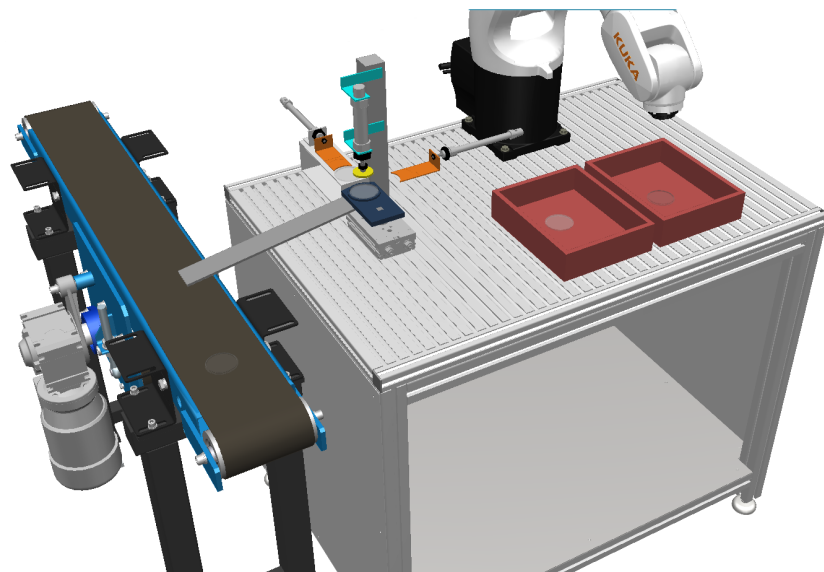
Podstatou pri tomto návrhu je skladanie obalu so žetónom systémom pneumatických prvkov, pričom robot by zabezpečoval manipuláciu so spodným dielom obalu a žetónom. Návrh variantu B sme pripravovali súbežne s návrhom variantu A a po probléme s odoberaním priehľadného dielu cez skener Photoneo sme na tomto návrhu prestali ďalej pracovať. Komplexný pohľad na pracovisko spolu s popisom častí je zobrazený na Obr. 3.3.

Počas vytvárania tohto riešenia sme využili možnosť modelovať jednoduché geometrické modely priamo v softvéri Process Simulate. Uľahčilo nám to tvorbu virtuálneho modelu pracoviska a umožnilo otestovať navrhnutý koncept vrátane dosahov a pohybov mechanických častí. Obrázok 3.4 zobrazuje detailný pohľad na variant B. Návrh počíta s tromi pneumatickými valcami a rotačným stolom. Robot z jed-





Obr. 3.3: Variant B - pohľad zhora a popis častí pracoviska.

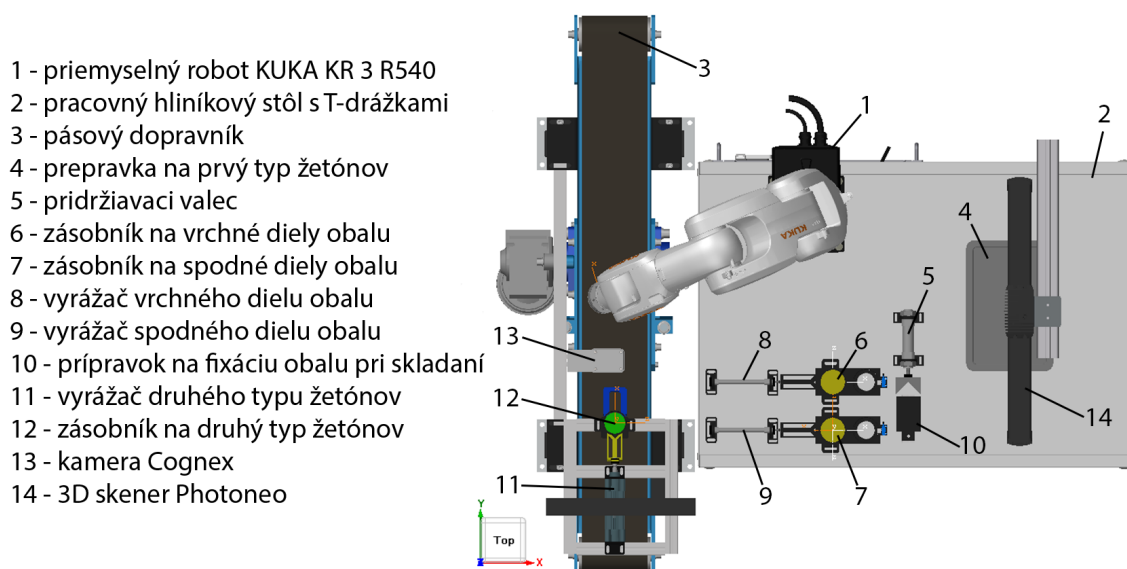


Obr. 3.4: Variant B - detailný pohľad na pracovisko.

nej prepravky odobral spodný diel a umiestnil ho na otočný stôl. Následne by z druhej prepravky odobral žetón a vložil ho do spodného dielu na stole. Vyrážací valec by zo zásobníka vysunul vrchný diel, ktorý by raziaci valec zatlačil oproti spodnému dielu, čím by sa obal uzavrel a vyrážací valec by skompletizovaný obal vytlačil na spádový dopravník. Výsledný produkt by pracovisko opustil po dopravníku.

- **Variant C - so systémom zásobníkov a pneumatických valcov**

Na základe získaných skúseností z testovania skenera Phtotoneo sme dospeli k záveru, že odoberané diely pomocou technológie skenovania budú plastové žetóny. Vytvorili sme nový návrh, ktorý počítal so systémom zásobníkov pre diely obalu a upustili sme od rotačného stola. Konzultovaním sme cez viacero modifikácií vytvorili variant C, ktorý sme označili za finálny. Obrázok 3.5 pri pohľade zhora zobrazuje všetky kľúčové časti a komponenty pracoviska a bližšie si ich rozoberieme v Kap. 3.2 spolu s kompletným opisom pracoviska.



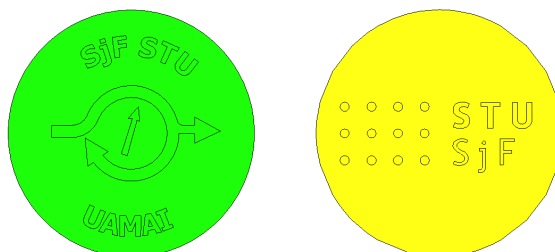
Obr. 3.5: Variant C - pohľad zhora a popis častí pracoviska.

### 3.2 Popis navrhnutej robotizovanej bunky budovanej na ústave

Za finálny návrh pre realizáciu robotizovanej bunky sme určili variant C. Návrh počíta s dvoma typmi žetónov a so zásobníkmi na vrchný a spodný diel obalu. Robot KUKA je vybavený koncovým efektorom s vákuovou prísavkou a zabezpečuje všetky manipulačné operácie s dielmi v rámci bunky. V prvom kroku sa pomocou vyrážacích valcov súčasne vysunie vrchný aj spodný diel zo zásobníkov. Obidva valce budú cez

elektromagnetický ventil ovládané spoločným signálom. Robot odoberie spodný diel a umiestni ho na prípravok, kde jeho pozíciu a pevnú polohu zabezpečí pridržiavaci valec. Následne robot odoberie zvolený typ žetónu, a to buď z dopravníka, alebo z prepravky, a umiestni ho do zafixovanej spodnej časti obalu na prípravku. Robot v ďalšom kroku odoberie vrchný diel obalu, umiestni ho na zafixovaný spodný diel s vloženým žetónom a pohybom smerom kolmo nadol vyvinie silu potrebnú na uzavretie obalu, čím sa ukončí proces skladania. Uzavretý a skompletizovaný obal so žetónom vo vnútri je ďalšou manipulačnou operáciou robota premiestnený na pás dopravníka, na konci ktorého bude umiestnená prepravka na hotové obaly.

Ako sme uviedli, pracovisko počíta s dvoma typmi žetónov. Pripravili sme dve grafické verzie. Zelený s logom Ústavu automatizácie, merania a aplikovanej informatiky (skrátene ÚAMAI) je zobrazené na Obr. 3.6 vľavo, žltý s logom Strojníckej fakulty STU v Bratislave (skrátene SjF STU) je na Obr. 3.6 vpravo. Pre správne fungovanie operácie je potrebné zabezpečiť odobratie vždy len zvoleného typu žetónu. Naše navrhované riešenie obsahuje volič signálu, pomocou ktorého môže užívateľ zvoliť jeden alebo druhý typ, čomu sa prispôsobí činnosť pracoviska, voľba operácií a trajektórií robota.



Obr. 3.6: Grafické návrhy žetónov.

Žetóny SjF STU budú umiestnené v prepravke, ich poloha bude určovaná skenovaním prepravky pomocou 3D skenera Photoneo. V prípade prítomnosti chybného žetónu, napríklad s defektom tvaru, bude tento vadný kus ignorovaný. Pre žetóny ÚAMAI sme navrhli zásobník s dávkovacím vyrážacím pneumatickým valcom, ktoré sú umiestnené na pomocnom ráme ako súčasť dopravníka. Rám je dvojdielny, jedna časť je zváraná oceľová konštrukcia, druhú časť tvoria spojené hliníkové profily s drážkou o rozmere 30 x 30 mm. Žetón sa po Vyrazení zo zásobníka samospádom spustí na pás dopravníka, kde bude inšpekčným kamerovým systémom Cognex snímaný a analyzo-

vaný. Ak kamera rozpozná nevhodný typ žetónu alebo jeho možnú vadu, daný kus je ignorovaný a na dopravníku odchádza preč. Pre správny typ žetónu je zaznamenaná jeho poloha v osiach X a Y. Na základe získanej súradnice o presnej pozícii objektu je prispôbená trajektória robota a žetón je odobratý z dopravníka s určitým známym posunom od miesta snímania kamerou.

### 3.3 Technologické vybavenie pracoviska

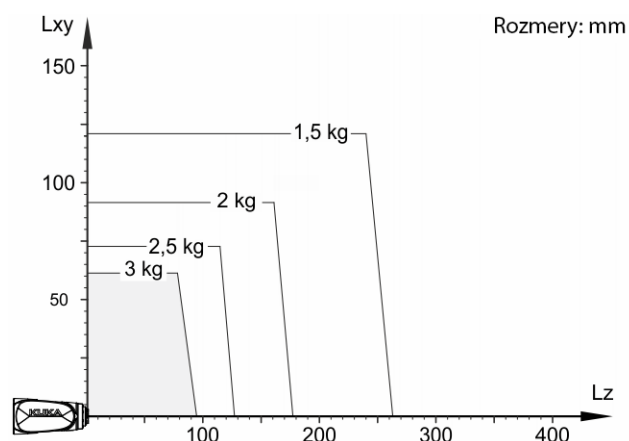
Použité vybavenie pracoviska sme rozdelili do skupín podľa typu použitej technológie na komponenty pneumatického systému, komponenty strojového videnia, pásový dopravník a priemyselný robot KUKA spolu so zariadeniami na riadenie robota a jeho ovládanie. Použité komponenty si opíšeme v nasledujúcich častiach kapitoly.

#### 3.3.1 Priemyselný robot KUKA KR3 R 540

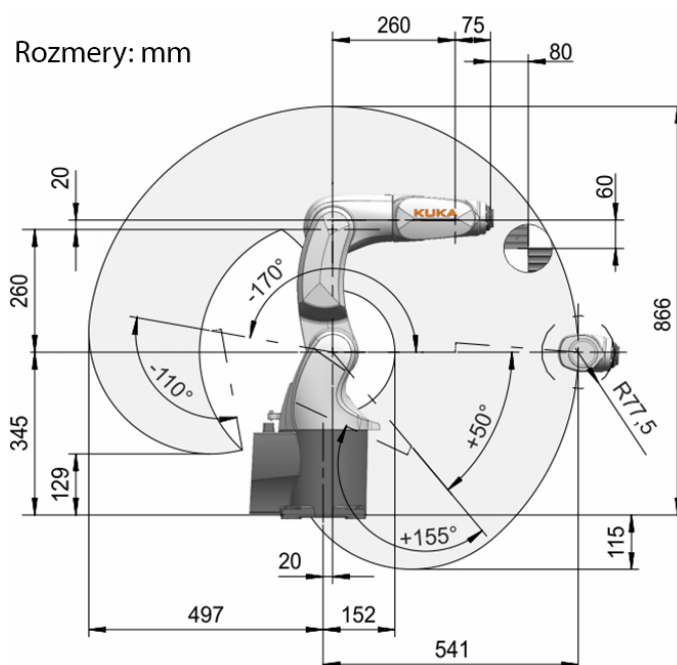
Priemyselný robot KUKA KR 3 R540 je obchodným názvom označovaný aj ako KUKA KR 3 AGILUS. Zobrazený je na Obr. 3.7. Z úplného označenia robota je zrejmé, že maximálna nosnosť robota je na úrovni 3 kg, čo ho radí do triedy kompaktných trojkilogramových robotov. Aby sa optimalizoval dynamický výkon robota, KR 3 R540 je navrhnutý pre menovité užitočné zaťaženie 2 kg [11].



Obr. 3.7: Priemyselný robot KUKA KR 3 AGILUS [11].



Obr. 3.8: Diagram užitočného zaťaženia robota KUKA KR 3 R540 [11].



Obr. 3.9: Pracovná obálka robota KUKA KR 3 R540 [11].

Obrázok 3.8 zobrazuje diagram užitočného pracovného zaťaženia v závislosti od dosahu ramena. Maximálny dosah ramena je 541 mm. Kompletné zobrazenie pracovnej obálky (priestoru) modelu KR 3 R540 je zobrazené na Obr. 3.9. Vďaka svojim kompaktným rozmerom je možné nasadenie vo výrobných bunkách alebo automatizačných jednotkách o rozmere iba 600 x 600 mm. Kompaktné rozmery predurčujú model KR 3 AGILUS na manipuláciu s drobnými dielmi a výrobkami v čo najužšom alebo inak obmedzenom manipulačnom priestore. Vyniká pri aplikáciách zameraných na montáž

malých dielov, skrutkovanie, balenie, lepenie, testovanie, či meranie a všeobecne všade, kde sú požadované najkratšie výrobné cykly pri najvyššom výkone. Robot je antistatickou ochranou štandardne chránený voči elektrostatickému nabitíu alebo výboju a je tak vhodný na bezpečné zaobchádzanie s citlivými elektronickými súčiastkami. Z tohto dôvodu je odvetvie elektroniky typickou oblasťou pre nasadenie modelu KR 3 AGILUS [11]. Tabuľka 3.1 zobrazuje základné technické údaje. Tabuľka 3.2 uvádza rozsahy jednotlivých osí robota. Kompletný technický list je k dispozícii v časti Prílohy na konci práce. Riadenie robota zabezpečuje riadiaca jednotka KR C4 v kompaktnom prevedení, na ručné ovládanie a programovanie robota je určený ručný ovládací panel KUKA smartPAD.

Tabuľka 3.1: Technické údaje robota KUKA KR 3 R540 [11].

maximálny dosah	541 mm
maximálne zaťaženie	3 kg
opakovateľnosť (ISO 9283)	$\pm 0.02$ mm
počet osí	6
montážna pozícia	podlaha, stena, strop
rozmer základne	179 x 179 mm
hmotnosť	cca 26.5 kg
teplota okolia počas prevádzky	5 °C – 45 °C
stupeň ochrany	IP40

Tabuľka 3.2: Rozsah pohybu osí robota KUKA KR 3 R540 [11].

A1	$\pm 170^\circ$
A2	$-170^\circ / 50^\circ$
A3	$-110^\circ / 155^\circ$
A4	$\pm 175^\circ$
A5	$\pm 120^\circ$
A6	$\pm 350^\circ$

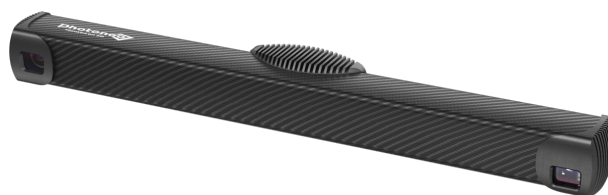
### 3.3.2 Komponenty strojového videnia

Budované robotizované pracovisko je navrhnuté s použitím zariadení strojového videnia. Systémy dvojrozmerného videnia reprezentuje použitý kamerový systém Cognex In-Sight. V čase návrhu pracoviska sme mali prostredníctvom ústavu na testovacie účely zapožičaný model In-Sight série 7000, zobrazený na Obr. 3.10 . Pri reálnom budovaní a finalizovaní pracoviska je predpoklad použitia iného, funkčne adekvátneho modelu inšpekčnej kamery Cognex. Na nastavenie a sprevádzkovanie kamery je určený softvér In-Sight Explorer so vstavaným konfiguračným prostredím EasyBuilder.



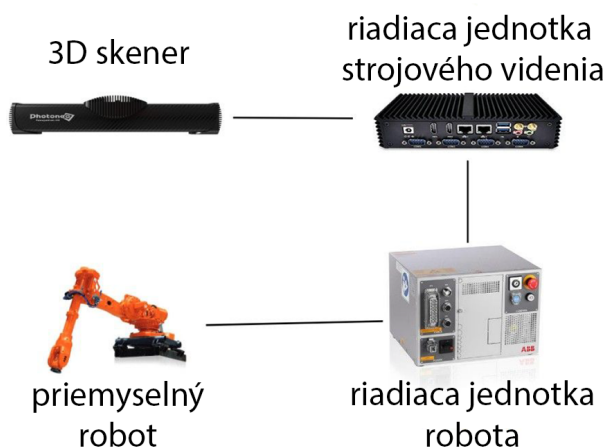
Obr. 3.10: Kamera Cognex In-Sight série 7000.

Séria In-Sight 7000 predstavuje výkonný inšpekčný systém, ktorý vykonáva rýchle a presné kontroly širokého spektra dielov a uplatnenie nájde vo všetkých výrobných odvetviach. Kamera disponuje modulárnym dizajnom umožňujúcim inšpekčný systém prispôbiť presne podľa požiadaviek na aplikáciu. K dispozícii je interné a externé napájanie, ovládanie osvetlenia snímanej scény, či možnosť v obvode tela kamery integrovaného LED indikátora pre vizuálnu odozvu o úspešnosti kontroly. K dispozícii sú monochromatické aj farebné optiky s rozlíšením od VGA po 5 MP. Použitá kamera bude slúžiť na inšpekciu žetónov prichádzajúcich po dopravníkovom páse a zároveň bude navádzať robota na presnú pozíciu žetónu pre jeho odobratie. V prípade, že bude inšpekciou zistený chybný žetón, bude ďalej pokračovať bez zastavenia na koniec dopravníka a spadne do pripravenej nádoby. Pre vyhovujúci žetón sa zaznamená jeho pozícia, kamera určí súradnice v osiach X a Y, na základe ktorých robot prispôbí trajektóriu a odoberie žetón zo zastaveného pásu.



Obr. 3.11: Photoneo PhoXi 3D skener, prevedenie L [18].

Druhým použitým prvkom stojového videnia je 3D skener, ktorý je potrebný na sprevádzkovanie náhodného výberu neusporiadaných žetónov z pripravenej prepravky. Komplexný názov pre použitú technológiu má anglický názov Bin Picking. Podstatou je vyberania náhodne umiestnených objektov z kontajnera alebo iného zásobníka pomocou robota, ktorý odoberá známe predmety s náhodnými pózami pomocou koncového efektora. Skener poskytne informáciu, na základe ktorej robot vie vhodne zvoliť objekt na odobratie a prispôbiť pohyby v jednotlivých osiach pre jeho správne uchopenie.

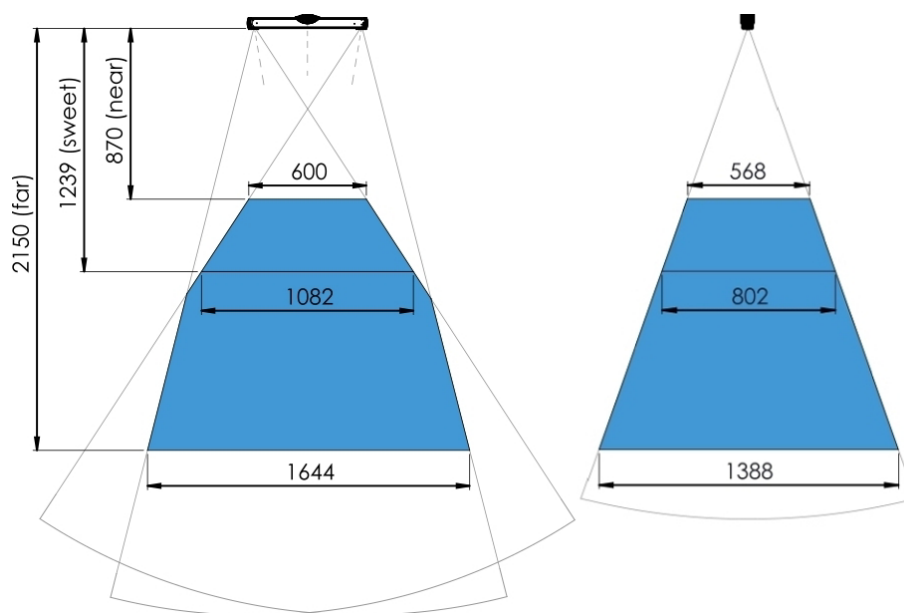


Obr. 3.12: Schematické prepojenie 3D skenera PhoXi a robota.

Použitý bude skener Photoneo PhoXi 3D v prevedení L, zobrazený na Obr. 3.11. Skener pracuje na princípe vysielania svetla štruktúrovaného do formy mriežky na skenovanú oblasť. Optický systém skenera vyhodnocuje deformáciu štruktúrovaného svetla pri dopade na povrchy objektov a na základe získanej informácie určí hĺbku scény, respektíve vzdialenosť povrchov od zdroja svetla. Rozlíšenie skenera sa mení v závislosti od použitého zdroja svetla a snímacej vzdialenosti. Model PhoXi 3D L ponúka pri optimálnej vzdialenosti skenovania 1239 mm maximálne rozlíšenie 3,2 milióna 3D bodov na ploche 1082 x 802 mm. Vďaka tomu je možné získať veľmi presné priestorové



obrazy skenovaného objektu vo forme tzv. oblakov bodov (z angl. point cloud) [18]. Kompletné skenovacie rozsahy sú zobrazené na Obr. 3.13. Na dosiahnutie požadovaného rozlíšenia a presnosti je potrebné, aby bol objekt počas skenovania nehybný. Výrobca uvádza skenovací čas v rozmedzí 250 – 2750 ms. Aplikácia skenera vyžaduje použitie riadiacej jednotky pre systém strojového videnia, ktorá je napojená priamo na riadiacu jednotku robota, tak ako je to schematicky znázornené na Obr. 3.12. V záujme zníženia nákladov všetky rozhrania komunikujú prostredníctvom ethernetovej infraštruktúry.



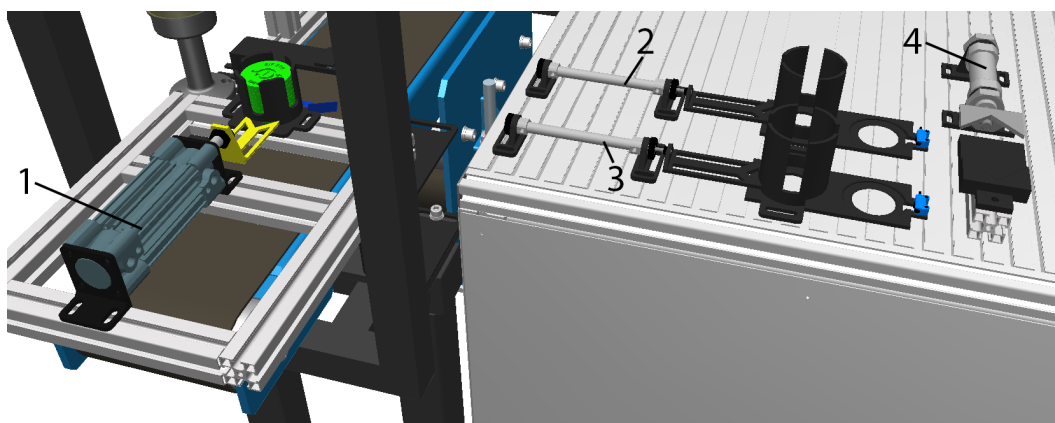
Obr. 3.13: Skenovací rozsah 3D skenera PhoXi L [18].

### 3.3.3 Komponenty pneumatického systému

Laboratórium s budovaným robotizovaným pracoviskom je pripojené na centrálny rozvod stlačeného vzduchu. Stlačený vzduch sa v jednotke na úpravu vzduchu prečistí od nečistôt alebo kondenzovanej vlhkosti a následne je privádzaný na periférie pracoviska. Naše pracovisko je navrhnuté s použitím štyroch pneumatických valcov od výrobcu SMC, zobrazených na Obr. 3.14, popis použitých valcov je v Tab. 3.3.

Ovládanie valcov zabezpečuje elektromagnetický rozvádzač, pozostávajúci z piatich solenoidovo ovládaných ventilov. Nakoľko valce na vysúvanie dielov obalu zo zásobníkov ovláda spoločný signál, prúdenie vzduchu pre ich ovládanie zabezpečuje jeden

spoločný ventil v rozvádzači. Spolu sme použili tri ventily na ovládanie pohybu valcov, jeden ventil rozvádzača je vyhradený na vákuovú prísavku pre koncový efektor robota. Rýchlosť pohybu piestov je regulovaná škrtiacimi ventilmi na vstupných a výstupných portoch pneumatických valcov.



Obr. 3.14: Rozloženie pneumatických valcov v rámci pracoviska.

Tabuľka 3.3: Popis použitých pneumatických valcov na pracovisku.

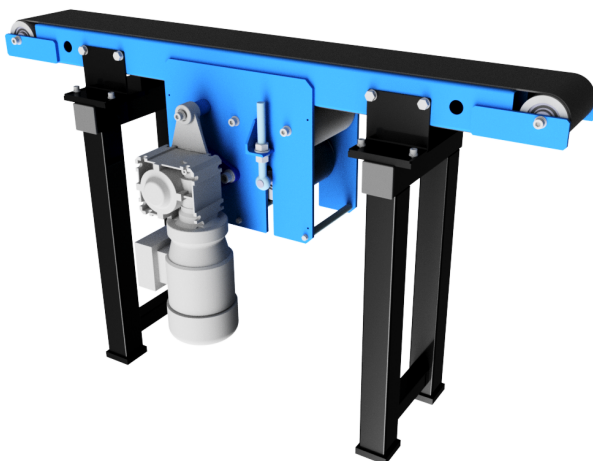
	označenie	zdvih [mm]	účel použitia
1	CP96SDB32-50C	50	vysunutie žetónu zo zásobníka na dopravník
2	C85E10-80	80	vysunutie vrchného dielu obalu zo zásobníka
3	C85E10-80	80	vysunutie spodného dielu obalu zo zásobníka
4	C85E25-25	25	fixácia spodného dielu obalu počas skladania

### 3.3.4 Pásový dopravník Automatica

Pásový dopravník, zobrazený na Obr. 3.15, navrhla a skonštruovala slovenská spoločnosť Automatica s. r. o. sídliaca v Liptovskom Mikuláši. Jedná sa o pásový dopravník poháňaný elektromotorom, obsahujúci prevodovku, napínací valec a remenicu. Nosná konštrukcia je vyhotovená z oceľových profilov. Použitý je vrúbkovaný pás so šírkou 150 mm a celkovou užitočnou dĺžkou 1190 mm, vyrobený z gumotextilu.

Na pracovisku bude slúžiť na posun žetónov zo zásobníka umiestneného na začiatku dopravníka na pozíciu pre odobratie robotom a následný odchod poskladaných

obalov so žetónmi z pracoviska do škatule umiestnenej na jeho konci. Prítomnosť žetónov na páse dopravníka je sledovaná snímačom SICK a kamerou Cognex sa vyhodnocuje ich presná pozícia pre navádzanie robota.

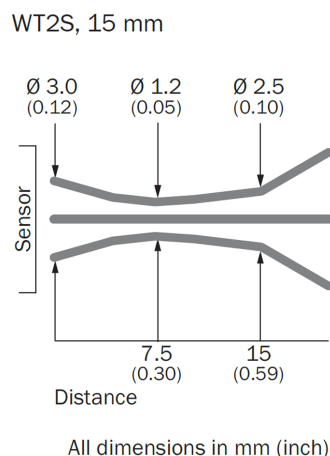


Obr. 3.15: Pásový dopravník Automatica.

### 3.3.5 Optoelektronické snímače SICK

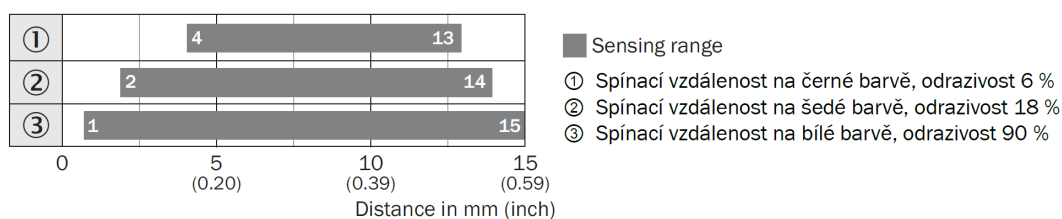
V počiatočnej fáze sme do pracoviska zakomponovali tri optoelektronické snímače SICK. Pomocou nich zisťujeme prítomnosť, respektíve správne vysunutie súčiastok zo zásobníkov. Hodnota signálu zo snímača je dôležitá pre ďalší chod programu. Robot môže diel odobrať až na základe pravdivej hodnoty signálu zo snímača, ktorá znamená že diel bol vysunutý a je pripravený na odobratie. V budúcnosti je možné pracovisko doplniť o ďalšie snímače, napríklad pre kontrolu stavu zaplnenia zásobníkov.

Na Obr. 3.16 je zobrazený použitý typ SICK snímača spolu s diagramom veľkosti svetelného lúča v závislosti od vzdialenosti detegovaného objektu. Použitý typ WT2S-F211 je z modelovej rady W2 Slim. Jedná sa o reflexný svetelný snímač so zatieneným pozadím, využívajúci viditeľné červené svetlo. Maximálna snímacia vzdialenosť je 15 mm. Snímač má zaostrenie vo vzdialenosti 7 mm pri priemere lúča 1,5 mm. Napájacie napätie je v rozmedzí 10 V až 30 V DC. Diagram spínacej vzdialenosti použitého snímača je na Obr. 3.17, pričom vzdialenosť sa mení v závislosti od farby detegovaného objektu [23]. Tento parameter sme museli zohľadniť pri návrhu umiestnenia snímača s ohľadom na snímaný objekt. Umiestnenie snímačov je opísané v rámci Kap. 3.4.1.



Obr. 3.16: Optoelektronický snímač SICK W2 WT2S-F131 [23].

WT2S, 15 mm



Obr. 3.17: Spínacia vzdialenosť snímača SICK WT2S-F211 [23].

### 3.4 Vlastný návrh komponentov pre realizáciu robotizovanej bunky

Ako sme v predchádzajúcich častiach uviedli, naše pracoviisko sme navrhli s rozličným technologickým vybavením. K dispozícii sme mali rôzne komponenty, či už pneumatického systému, strojového videnia alebo snímaciu techniku, no takmer všetky komponenty sme mali bez akejkoľvek upevňovacej techniky. Z tohto dôvodu sme museli pristúpiť k návrhu vlastných dielov pre upevnenie použitých zariadení.

Významný podiel na návrhu pracoviiska má práve vlastný návrh komponentov nevyhnutných na realizáciu robotizovanej bunky a jej funkčné sprevádzkovanie. Patria sem rozličné úchyty pneumatických valcov aj kompletne navrhnuté systémy zásobníkov s dielmi zabezpečujúcimi vysúvanie súčiastok zo zásobníkov. Prevažná väčšina dielov bola navrhnutá pomocou softvéru Autodesk Inventor. Po virtuálnej validácii v simu-

lačnom softvéri Process Simulate boli tieto diely vytlačené z filamentu na 3D tlačiarňi. Pri návrhu sme kládli dôraz na univerzálnosť dielov, aby sa pri eventúálnych zmenách na pracovisku mohli opätovne použiť alebo kombinovať s inými dielmi.

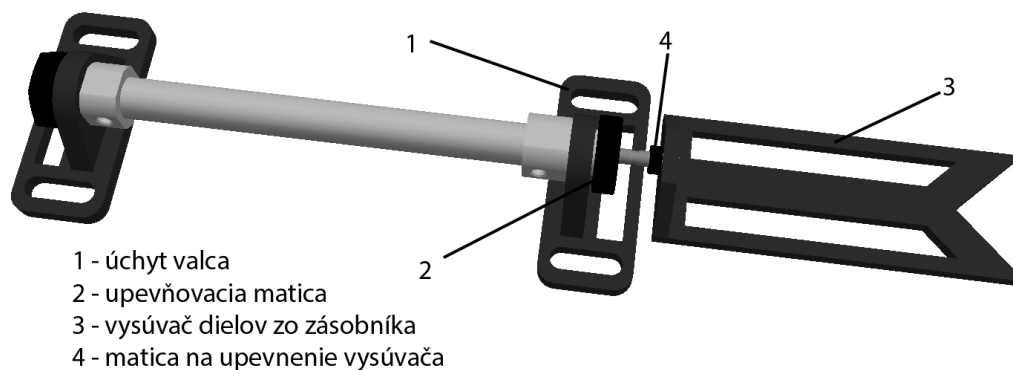
Na montáž systémov strojového videnia sme použili hliníkové profily. Hliníkový profil je použitý aj v koncovom efektore robota. Úplný opis nástroja s použitou vákuovou prísavkou je podrobne opísaný v Kap. 3.4.2.

### 3.4.1 Návrh dielov technologického vybavenia pracoviska

Individuálne navrhnuté komponenty upevňovacej techniky môžeme z hľadiska účelu použitia rozdeliť na nasledovné skupiny:

- úchyty pneumatických valcov,
- zásobníky súčiastok,
- vysúvače súčiastok zo zásobníkov,
- konštrukcie z hliníkových profilov,
- ostatné pomocné komponenty.

Použité pneumatické valce majú montážne závitky na prednej aj zadnej strane tela. Diely pre uchytenie budú k telu valca upevnené pomocou upevňovacích matíc na prednej a zadnej strane. Ako príklad si uvedieme pneumatický valec C85E10-80, zobrazený na Obr. 3.18 spolu s upevneným dielom na vysúvanie súčiastok zo zásobníka.



Obr. 3.18: Pneumatický valec C85E10-80 s uchytením a vysúvačom.

Úchyty sú navrhnuté s oválnymi montážnymi dierami, aby bolo možné valec upevniť na pracovný stôl pomocou skrutiek do T-drážky. Oválny tvar otvorov zabezpečí určitú prispôsobivosť umiestnenia na stole a variabilitu pri nožnej budúcej prestavbe. Piest valca má na konci závit, na ktorý sme pomocou dvoch matíc upevnili vysúvač dielov. Dĺžka vysúvača je daná zdvihom piestu a dráhou, ktorú potrebuje prejsť vysúvač na úplné vysunutie dielu zo zásobníka. Hrot sme cielene navrhli so šípovým vybratím, pretože takto navrhnutý tvar je možné univerzálne použiť na vysúvanie okrúhleho predmetu s ľubovoľným priemerom. Pri budúcej nožnej zmene pracoviska tak nebude potrebné navrhovať nový vysúvač. Z dôvodu šetrenia materiálu a času pri 3D tlači sme na súčiastkach vytvorili vybratia materiálu, ktoré nemajú vplyv na celkovú pevnosť a odolnosť. Na rovnakom princípe sme vyriešili uchytenie všetkých pneumatických valcov.

Pre naše pracovisko sme navrhli dva typy zásobníkov, zobrazené na Obr. 3.19. Vľavo je zobrazený zásobník na diely obalu žetónu s priemerom 56 mm. Tento zásobník je v pracovisku použitý dvakrát, na vrchné a spodné diely obalu. Vnútorňý priemer je 58 mm. Pridaná dvojmilimetrová rezerva znižuje riziko možného vzpriechenia súčiastky v zásobníku. Disponuje montážnymi otvormi pre uchytenie do T-drážky. Na pozícii pre vysunutý diel je vybratie materiálu, ktoré zabezpečuje presné usadenie a fixáciu polohy, dôležitú pre správne odobratie robotom. Aby sme zabránili vypadnutiu dielu z tejto pozície, dodatočne sme pridali dve zarážky. Na konci dielu zásobníka je plocha s montážnymi otvormi pre optoelektronický snímač SICK, ktorý sme si opísali v Kap. 3.3.5.

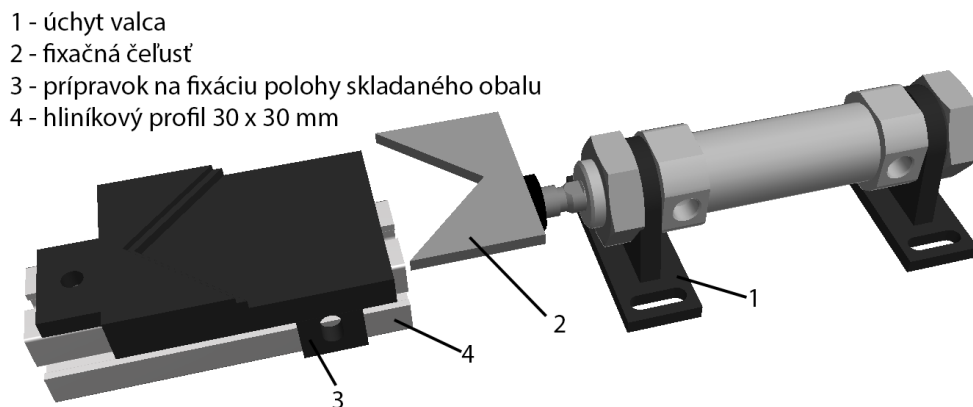
Na Obr. 3.19 vpravo je zobrazený zásobník na žetóny s priemerom 48 mm. Vnútorňý priemer zásobníka je spolu s 2 mm rezervou rovných 50 mm. Uchytenie zásobníka je rovnako realizované prostredníctvom montážnych otvorov do T-drážky. Oba zásobníky majú v zadnej časti otvor prispôsobený na vysúvač, v prednej časti je otvor rozmermi navrhnutý tak, aby bola zo zásobníka vysunutá vždy len jedna súčiastka. Nakoľko sa nejedná o priemyselnú aplikáciu, zásobníky sú navrhnuté s ohľadom na možnosti 3D tlače a kapacita oboch typov je desať kusov príslušnej súčiastky.

Medzi pomocné komponenty patrí montážny prípravok, ktorý spolu s nízkozdvihovým valcom C85E25-25 tvorí systém pre fixáciu spodného dielu obalu počas procesu



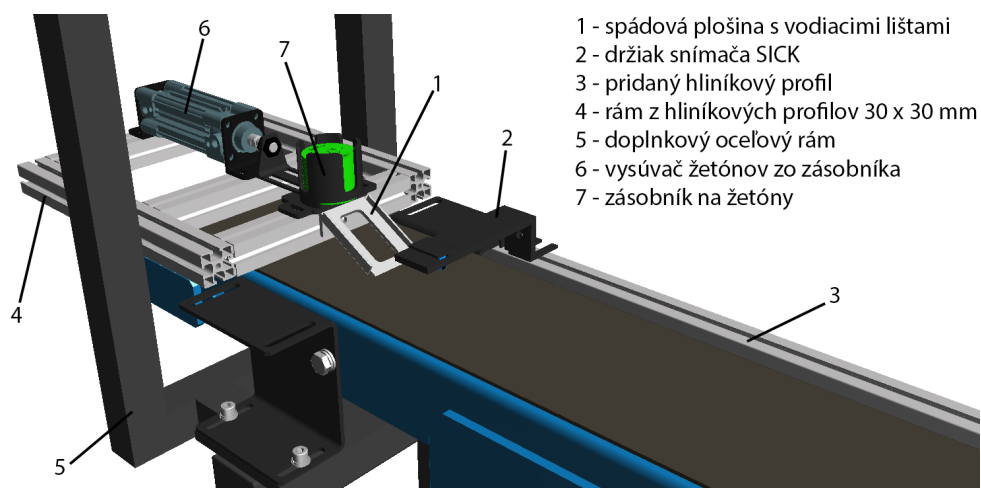
Obr. 3.19: Navrhnuté typy zásobníkov.

skladania robotom. Celok je zobrazený na Obr. 3.20. Fixačná čeľusť sa aktivuje po tom, čo je na prípravok umiestnený spodný diel obalu na žetón a je aktívna počas celej doby skladania. Prítlačná hrana prípravku je navrhnutá tak, aby počas skladania nebránila správne dosadnutiu vrchného dielu obalu a jeho spojeniu so spodným dielom. Prípravok na fixáciu polohy, rovnako ako fixačná čeľusť sú navrhnuté s univerzálnym šíповým tvarom prítlačnej hrany, aby sa tento systém dal použiť na okrúhle diely rozličného priemeru. Na zabezpečenie potrebnej výšky voči použitému pneumatickému valcu sme použili hliníkový profil s rozmerom 30 x 30 mm a dĺžkou 100 mm.



Obr. 3.20: Navrhnutý systém fixácie polohy obalu počas skladania.

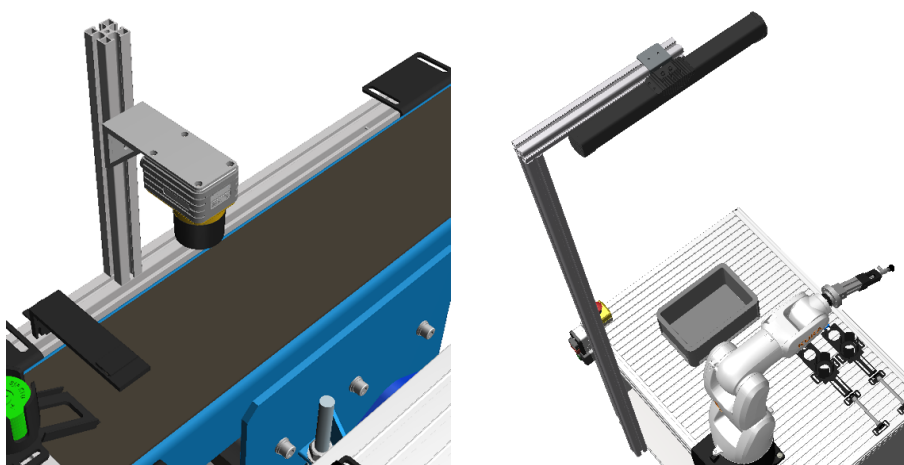
Na začiatku dopravníka sa nachádza doplnkový oceľový rám, na ktorý sme upevnili nosný rám z hliníkových profilov. Hliníkový rám nesie zásobník na žetóny spolu s valcom na ich vysúvanie. Vysúvanie žetónov zo zásobníka sa vykonáva priamo na dopravníkový pás. Pre plynulé dávkovanie sme na rám doplnili krátku spádovú plošinu



Obr. 3.21: Systém pre dávkovanie žetónov na dopravníkový pás.

s vodiacimi lištami, po ktorej žetóny plynulo sklznú na pás. Potvrdenie prítomnosti vysunutého žetónu je realizované prostredníctvom SICK snímača, pre ktorý sme navrhli držiak v tvare L upevnený na okraji dopravníka o hliníkový profil. Uvedené prvky sú spolu s popisom zobrazené na Obr. 3.21. Držiak SICK snímača má v spodnej časti integrované vedenie na kabeláž.

Hliníkové profily sme použili aj pri montáži systémov strojového videnia. Na Obr. 3.22 vľavo je ukážka použitého profilu pre upevnenie kamery Cognex, vpravo je zobrazená konštrukcia na upevnenie skenera Photoneo nad prepravku so žetónmi. Na upevnenie skenera sme použili profil 50 x 50 mm a je pripevnený na rám pracovného stola.

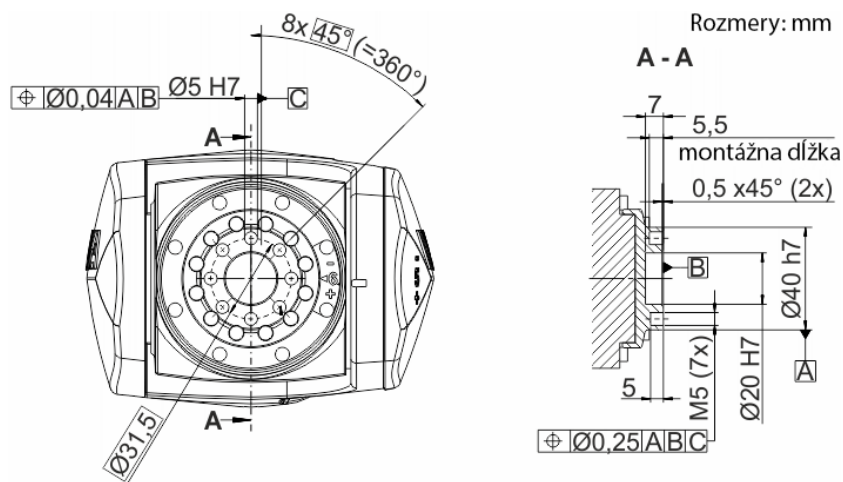


Obr. 3.22: Hliníkové profily použité na montáž systémov strojového videnia.



### 3.4.2 Návrh koncového efektora robota

Pre potreby nášho pracoviska sme navrhli koncový efektor s vákuovou prísavkou. Jedným z dôvodov pre voľbu vákuovej prísavky je skutočnosť, že laboratórium je pripojené na centrálny rozvod stlačeného vzduchu a v návrhu počítame aj s ďalšími pneumatickými prvkami, spomenutými v Kap. 3.3.3. Ďalším dôvodom pre voľbu vákuovej prísavky je jej jednoduchosť a univerzálne použitie na rozličné typy manipulovaných súčiastok. V našom pracovisku sú manipulované diely pomerne malých rozmerov so zlou možnosťou mechanického uchopenia. Pri návrhu efektora sme vychádzali z konštrukčných rozmerov montážnej príruby robota, zobrazených na Obr. 3.23.



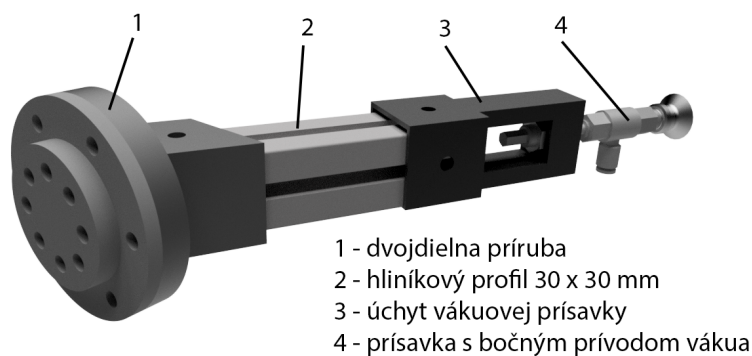
Obr. 3.23: Rozmery montážnej príruby robota KUKA KR 3 R540 [11].

Koncový efektor tvoria štyri základné súčasti, zobrazené na Obr. 3.24. Montážne otvory na dvojdielnej príрубе presne sedia na montážnu prírubu robota. Potrebnú dĺžku efektora sme dosiahli použitím hliníkového profilu. Dostatočná dĺžka efektora je potrebná pre manipulačnú schopnosť robota aj v priestorovo obmedzených pozíciách, alebo pri odoberaní objektov z prepravky s vysokými stenami. V spodnej časti efektora je diel určený na upevnenie prísavky pomocou dvoch matíc.

Použitý je typ prísavky ZPR20USK10-04-A10. Jedná sa o prísavku s odpruženým nastavcom a bočným prívodom vaku kolmo na os. Prísavka má plochý tvar, priemer 20 mm a je vyrobená zo silikónu. Telo disponuje nástrčnou spojkou na hadicu s priemerom 4 mm. Odpruženie tela prísavky so zdvihom 10 mm je významné pri ma-

nipulácii s krehkými dielmi obalu žetónu. Odpruženie dokáže eliminovať potenciálne nebezpečné silové pôsobenie od pohybu robota, čím zabránime znehodnoteniu obalu.

Priemyselný robot KUKA KR 3 AGLUS má kompletne vnútrom vedený systém napájania energiou vrátane rozvodu pre prívod stlačeného vzduchu alebo vákua. Robot je v podstave napojený na rozvod tlakového vzduchu. Na napojenie prísavky sme použili port integrovaný do ramena robota pri štvrtej osi, znázornenej spolu s namontovaným vákuovým efektorom na Obr. 3.25.



Obr. 3.24: Popis častí použitého vákuového efektora robota.



Obr. 3.25: Port rozvodu tlakového vzduchu integrovaný do ramena robota.

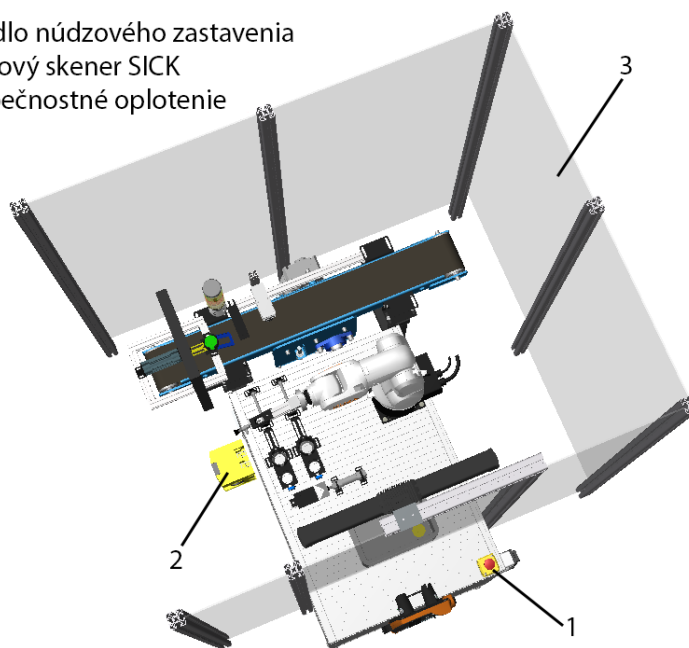
### 3.5 Bezpečnosť navrhnutej robotizovanej bunky

Reálne sprevádzkovanie navrhovanej robotizovanej bunky nie je možné bez prvkov zaisťujúcich bezpečnosť na danom pracovisku. Navrhujeme použitie troch základných bez-

pečnostných prvkov. Ich umiestnenie v rámci robotizovanej bunky je zobrazené na Obr. 3.26 a jedná sa o nasledovné zabezpečovacie zariadenia:

- tlačidlo núdzového zastavenia, tzv. Emergency Stop tlačidlo,
- bezpečnostný laserový skener SICK,
- bezpečnostné oplotenie bunky.

1 - tlačidlo núdzového zastavenia  
2 - laserový skener SICK  
3 - bezpečnostné oplotenie

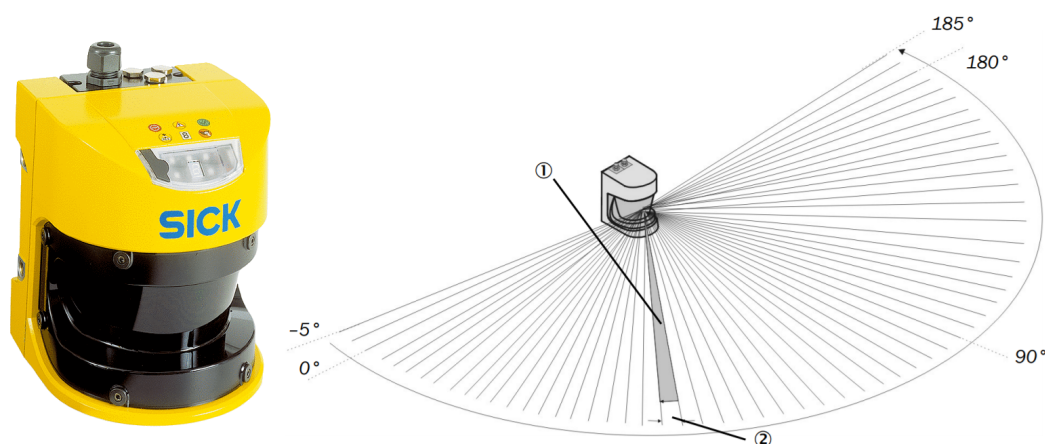


Obr. 3.26: Umiestnenie bezpečnostných prvkov v rámci robotizovanej bunky.

Tlačidlo núdzového zastavenia je umiestnené v zadnej časti stola na hornom okraji nad ostatnými tlačidlami pre riadenie chodu pracoviska. Pozícia tlačidla je dobre prístupná a na dobre viditeľnom mieste. Funkcia núdzového zastavenia okamžite preruší akúkoľvek činnosť prebiehajúcu na pracovisku.

Bezpečnostné oplotenie sa používa v rôznych prevedeniach. Pre pracovisko sme navrhli jednoduché oplotenie pozostávajúce z plexisklových tabúľ upevnených medzi hliníkové profily. Oplotenie je umiestnené len zo zadnej strany pracoviska a po jeho bokoch. Bezpečnosť čelnej strany bunky zaisťuje laserový bezpečnostný skener SICK rady S3000 Standard.

Skener S3000 Standard, zobrazený na Obr. 3.27, predstavuje bezdotykové ochranné zariadenie pre horizontálne zabezpečenie prístupu do nebezpečných priestorov a je určený pre štandardné aplikácie s jedným ochranným poľom. Skener obsahuje optický snímač, ktorý dvojrozmerné sníma svoje okolie infračervenými laserovými lúčmi. Princíp je založený na meraní času letu lúča. Vysielač svetla vysiela veľmi krátke svetelné impulzy a meria čas, za aký sa svetelné impulzy odrazené od objektu vrátia späť k prijímaču. Z časového rozdielu skener vypočíta vzdialenosť objektu od skenera. Dosah skenera je v závislosti od použitej hlavy 4 m, 5,5 m alebo 7 m. V našom prípade je použitá hlava s najkratším 4 m dosahom. V skeneri S3000 sa nachádza rovnomerne rotujúce zrkadlo, ktoré svetelné impulzy vychyľuje s uhlovým rozlíšením  $0,25^\circ$  alebo  $0,5^\circ$ . Pracovná oblasť skenera má tvar kruhového výseku. Celkový rozsah skenovania pokrýva  $190^\circ$ , pričom začiatok skenovanej oblasti je na úrovni  $-5^\circ$  voči zadnej strane skenera, tak ako to je zobrazené na Obr. 3.27 [22].



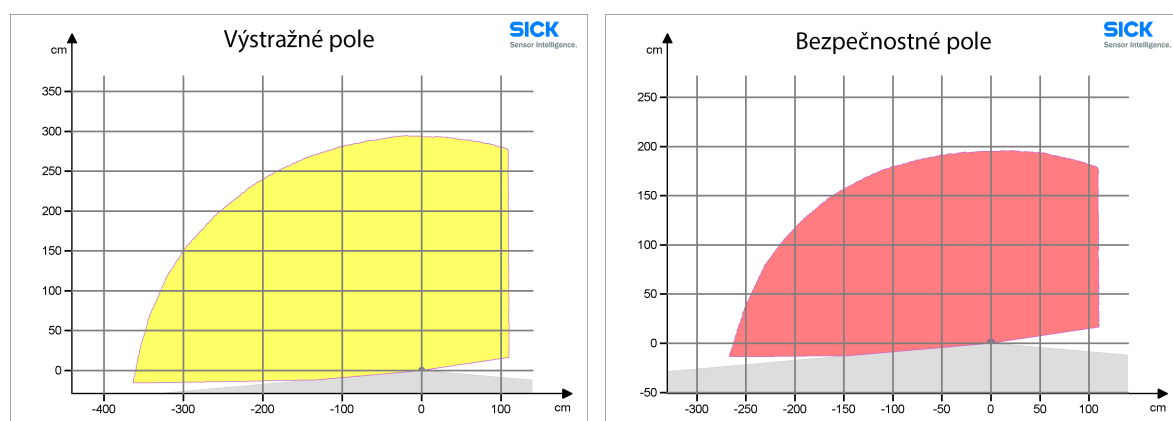
Obr. 3.27: Bezpečnostný skener SICK S3000 Standard a jeho rozsah skenovania [22].

Nasadený skener zabezpečuje priestor na vkladanie objektov do pracovnej stanice robota. Jedná sa o oblasť, kde bude obsluha pristupovať pri dokladaní dielov do zásobníkov. Pomocou konfiguračného a diagnostického SICK softvéru bola pracovná oblasť z ohľadom na nasadenie v laboratóriu rozdelená na dve polia, bezpečnostné a výstražné, zobrazené na Obr. 3.28. Výstražné pole na Obr. 3.28 vľavo má dosah 280 cm od čela snímača. Bezpečnostné pole na Obr. 3.28 vpravo má dosah 180 cm od čela snímača. Na oboch diagramoch polí je v pravej časti viditeľná výrazne orezaná časť,

ktorá v reálnych podmienkach predstavuje fyzickú stenu v miestnosti s laboratóriom priemyselnej robotiky.

Hneď, ako sa zistený objekt alebo obsluha nachádza vo výstražnom poli, skener vydá signál na spomalenie robota. Opustením objektu alebo obsluhy z výstražného poľa sa rýchlosť robota vráti na pôvodnú úroveň.

Ak sa objekt alebo obsluha dostane do bezpečnostného poľa, skener vydá signál na okamžité zastavenie robota aj všetkých použitých mechanizmov na pracovisku, ktoré pre obsluhu predstavujú bezpečnostné riziko. V takomto prípade sa činnosť pracoviska obnoví až po stlačení resetovacieho tlačidla, umiestneného v zadnej časti stola.



Obr. 3.28: Výstražné a bezpečnostné pole skenera SICK S3000 Standart.

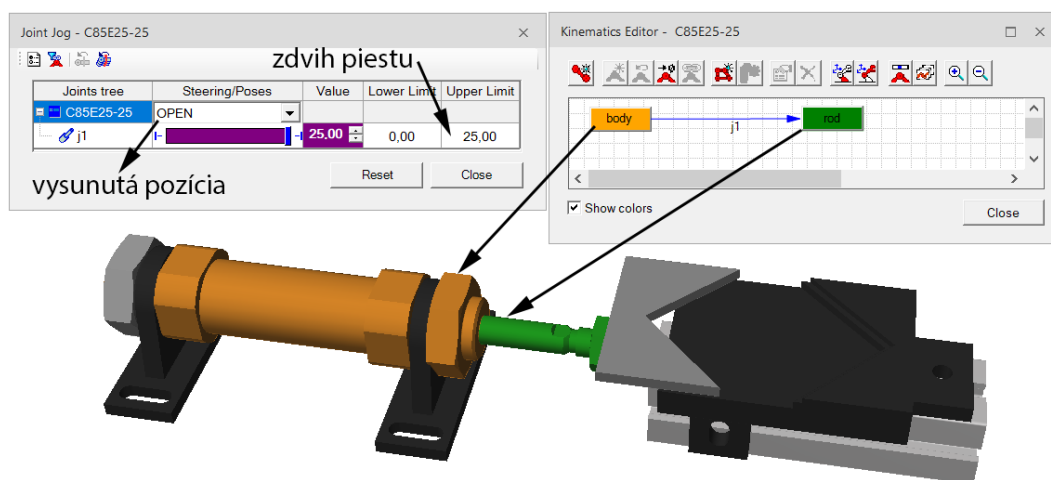
### 3.6 Simulačný model a signálna simulácia navrhnutého robotizovaného pracoviska

Softvér Tecnomatix Process Simulate podporuje CAD modely v univerzálnom JT vizualizačnom štandarde. Modely použité v simulačnom modeli sme získali z viacerých zdrojov. Modely robota, profily, komponenty pneumatických prvkov a snímačov sú výrobcami dostupné na internete. Model pracovného stola z profilov nám poskytla spoločnosť MTS, s.r.o., ktorá pracovný stôl pre naše laboratórium navrhla a skompletizovala. Pásový dopravník poskytla spoločnosť Automatica s. r. o. spolu s 3D modelom. Ostatné použité komponenty sú vlastnej tvorby a boli navrhnuté pomocou softvéru Autodesk Inventor. Simulačný model bol vytváraný vo verzii *Standalone* bez prístupu na server,

vyžadujúc definovanie systémového priečinka s knižnicou modelov. V nasledujúcich častiach kapitoly si opíšeme použité typy operácií a podstatu najdôležitejších krokov pri tvorbe signálnej simulácie.

### 3.6.1 Kinematické väzby komponentov

Model priemyselného robota KUKA sme mali k dispozícii s vopred definovanou kinematikou vrátane rozsahu pohybov v šiestich osiach robota. Simuláciu pohybu pásového dopravníka sme vyriešili jeho modifikáciou na inteligentný komponent. Viac na tému inteligentných komponentov je uvedené v Kap. 3.6.2. Pre správnu činnosť simulačného modelu sme pre použité pneumatiké valce definovali kinematické väzby, vrátane rozsahu pohybov a pracovných pozícií. Na práciu s kinematikou modelov slúži *Kinematics Editor*. Ako príklad je na Obr. 3.29 uvedený pneumatiký valec C85E25-25 na zaistenie polohy obalu žetónu počas skladania.



Obr. 3.29: Editor kinematiky pre pneumatiký valec C85E25-25 (vysunutá pozícia).

V editore sme definovali väzbu medzi telom valca a piestom, rovnako ako aj os pohybu, ktorá charakterizuje lineárny pohyb piestu voči telu. Os posuvného pohybu prechádza geometrickým stredom valca. Ako na Obr. 3.29 ďalej vidíme, editor umožňuje určiť rozsah pohybu a definovanie pracovných pozícií. Uvedený valec má dve polohy, obrázok znázorňuje vysunutú pozíciu s horným limitom 25 mm, ktorý je daný konštrukciou použitého valca.

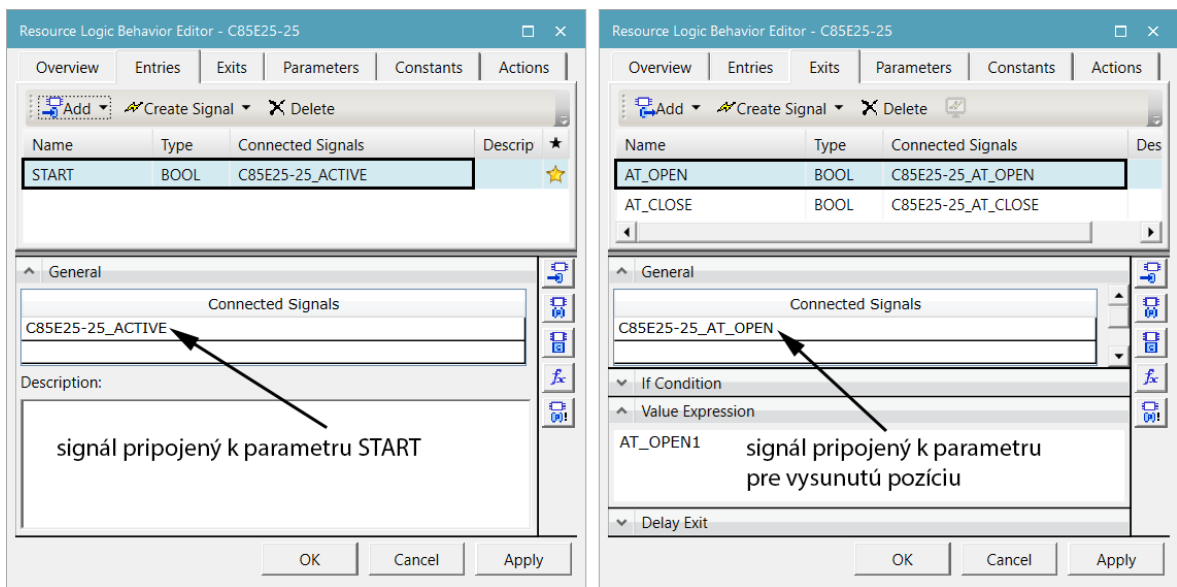
### 3.6.2 Inteligentné komponenty pracoviska

Podstatou použitia štandardných komponentov v simulačnom modeli je ich reprezentačná funkcia. Predstavujú 3D modely použitých objektov. Naproti tomu, inteligentné komponenty (z angl. Smart Component) sa okrem reprezentačnej funkcie priamo podieľajú na chode simulácie a tvoria jednu zo základných súčastí signálmi riadených simulácii. Môže sa jednať o pohyblivé mechanizmy, ale aj o statické modely reprezentujúce snímače s pripojeným signálom.

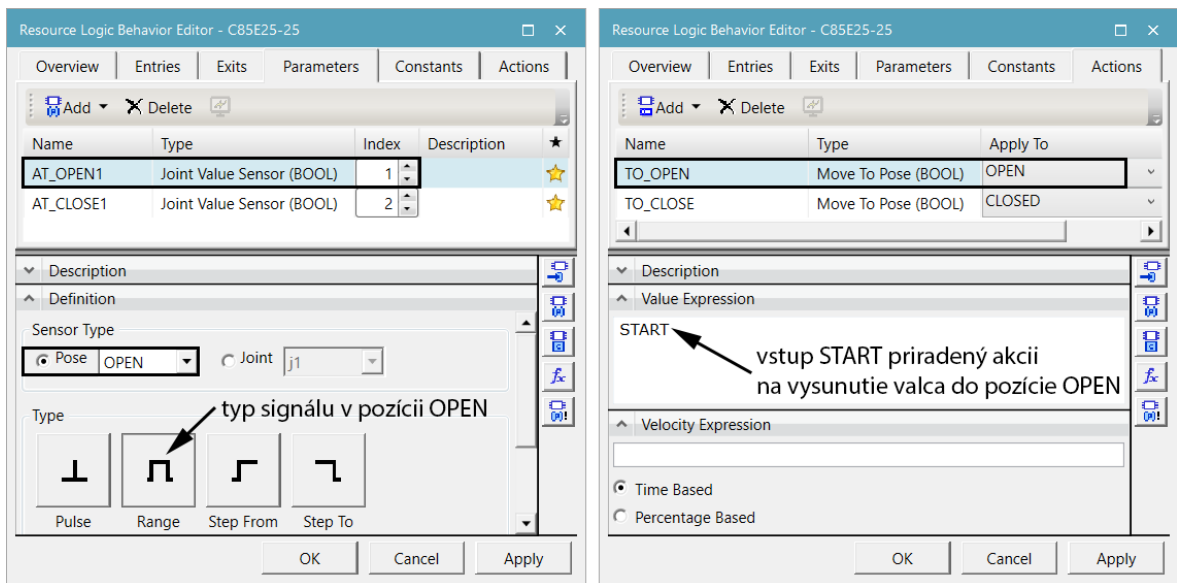
Na vytváranie inteligentných komponentov sú v softvéri určené funkcie *Create/Edit Logic Resource*. Editor pre zvolený model vytvorí prázdny logický blok a následne umožňuje tento blok editovať. Patrí sem vytváranie vstupov, výstupov z bloku, priradenie parametrov a pohybových akcií jednotlivým pozíciám podľa kinematiky modelu.

Obrázok 3.30 zobrazuje vstupy a výstupy logického bloku pneumatického valca C85E25-25, zobrazené parametre sú vrátane pripojených signálov. Obrázok 3.31 zobrazuje editáciu parametrov a pohybových akcií uvedeného pneumatického valca. Vysvetlenie činnosti takto zostavenej logiky pre pneumatický valec C85E25-25 je nasledovné. Činnosť valca ovláda signál *C85E25-25\_ACTIVE*, aktivácia signálu vysunie valec do koncovej polohy *OPEN*, deaktivácia ho vráti do počiatočnej polohy *CLOSED*, pohyb valca do týchto polôh je nastavený cez akcie v logickom bloku. Overenie dvoch koncových polôh je realizované parametrami *AT\_OPEN*, *AT\_CLOSE* s pripojenými signálmi *C85E25-25\_AT\_OPEN* a *C85E25-25\_AT\_CLOSE*.

Dôvod na používanie inteligentných komponentov v signálnych simuláciách vyplýva zo samotnej modelovanej aplikácie a správania sa jednotlivých použitých zariadení. V praxi sú mechanizmy ovládané signálmi z nadradeného riadiaceho systému alebo na základe komunikácie medzi ostatnými zariadeniami. Pneumatické valce sme definovali ako inteligentné komponenty, aby sme ich vedeli ovládať na základe hodnôt riadiacich signálov. Uvedeným spôsobom editácie logického bloku komponentu je možné vytvárať rôzne nastavenia pre činnosť inteligentných komponentov a verne tým simulovať ich správanie v reálnych aplikáciách. Signály je možné prepojiť s externým PLC, ovládať ich manuálne na simulačnom paneli alebo ich spúšťanie riadiť signálnymi udalosťami priradenými k jednotlivým operáciám.



Obr. 3.30: Logický blok valca C85E25-25, vstupy (vľavo) a výstupy (vpravo).



Obr. 3.31: Logický blok valca C85E25-25, parametre (vľavo) a akcie (vpravo).

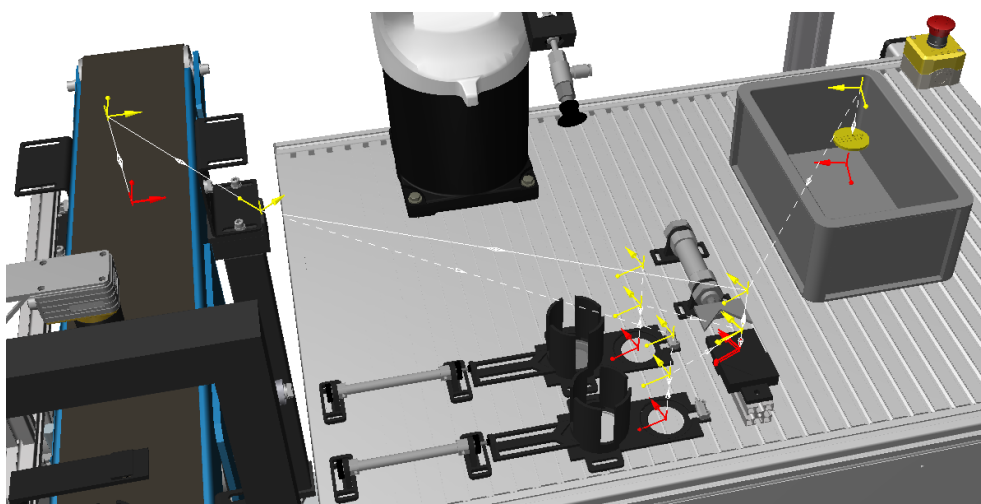
### 3.6.3 Operácie typu uchop a polož (Pick and Place)

Operácie typu uchop a polož (z angl. Pick and Place) sú operácie typicky vykonávané robotom, prípadne iným manipulátorom. Softvér Process Simulate umožňuje operácie Pick and Place vytvoriť len pre modely definované ako robot, s namontovaným manipulačným nástrojom. Obvykle sa jedná o koncový efektor robota, uchopovač a podobne.



Vytváranie rozličných typov operácií sa v softvéri Process Simulate vykonáva cez kartu *Operation* dostupnú na hornej lište.

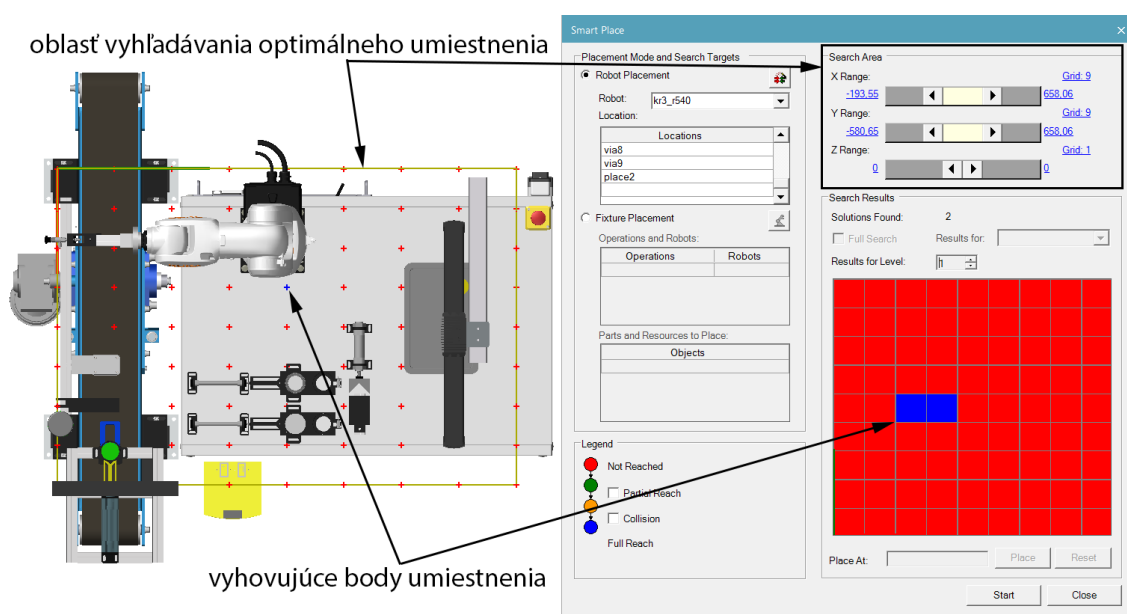
Použitý priemyselný robot KUKA disponuje koncovým efektorom s vákuovou prísavkou (Kap. 3.4.2), pomocou ktorej vykonáva všetky manipulačné operácie typu uchop a polož. Trajektórie robota pre uvedené operácie sú zobrazené na Obr. 3.32, červené body sú pozície pre uchopenie a polozenie objektu, žltou sú vyznačené tzv. *via* body, ktorými robot prechádza. Vytváranie Pick and Place operácií sa vykonáva cez editor, ktorý od užívateľa požaduje vyplnenie niekoľkých polí pre vytvorenie operácie. Základom je zvolenie manipulačného robota, koncový efektor robota pre vykonávanie manipulačnej operácie a presné pozície pre uchopenie objektu a jeho polozenie. Po vytvorení a definovaní všetkých Pick and Place operácií sme pristúpili ku kontrole dosahov robota.



Obr. 3.32: Trajektórie robota pre operácie typu uchop a polož.

Process Simulate má na kontrolu dosahov robota integrované nástroje, ktoré užívateľovi umožní otestovať navrhnuté riešenie z hľadiska dosahov a zároveň prepočíta zóny pre optimálne umiestnenie robota voči požadovaným pozíciám pre manipuláciu s objektami. Jedná sa o test dosahov - *Reach Test* a optimálne umiestnenie robota - *Smart Place*. Tieto funkcionality sú veľmi dôležité z hľadiska virtuálneho sprevádzkovania, pretože hneď v počiatočnom štádiu návrhu pracoviska a vytvárania programu umožnia nájsť optimálne rozmiestnenie prvkov na pracovisku, súvisiacich s operáciami vykonávanými robotom. Obe metódy sú založené na rovnakom princípe, no zatiaľ čo

*Reach Test* testuje, či robot dosiahne alebo nedosiahne danú pozíciu, *Smart Place* pre analyzované pozície navyše zvolí optimálne body umiestnenia robota z hľadiska dosahov. Ukážka *Smart Place* testu je na Obr. 3.32. Body zobrazené červenou farbou predstavujú pozície, odkiaľ robot nemá dosah na všetky analyzované pozície. Naopak, body označené modrou farbou sú vyhovujúce s plným dosahom. Z Obr. 3.33 je zrejmé, že umiestnenie robota na stole je správne. Krátky dosah ramena spolu s pozíciami rozmiestnenými v priestore eliminoval umiestnenie robota na dve možné pozície, zobrazené modrou farbou.



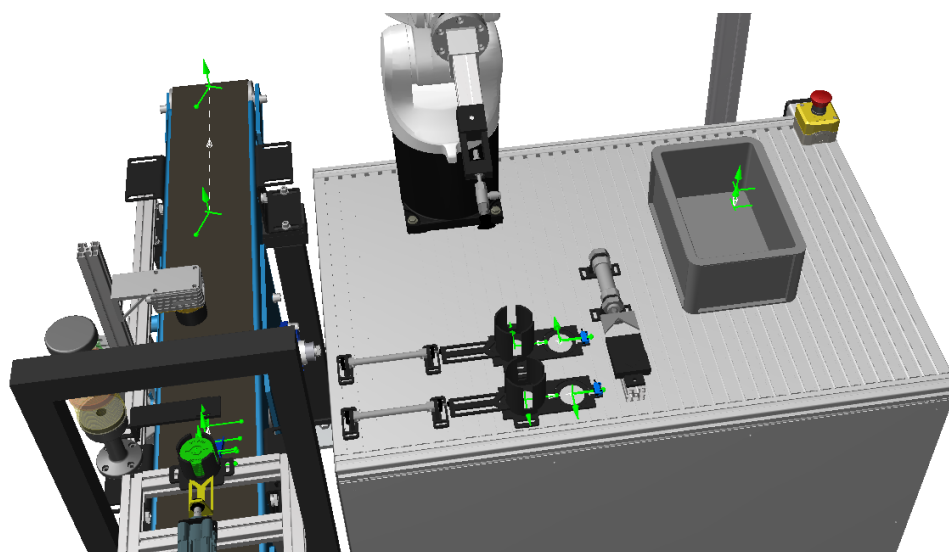
Obr. 3.33: Analýza optimálneho umiestnenia robota - Smart Place.

### 3.6.4 Operácie toku materiálu (Object Flow)

Pohyb komponentov v rámci pracoviska je realizovaný operáciami toku materiálu (z angl. Material Flow). Tento typ operácie sme použili na simuláciu pohybu vysúvajúcich sa súčiastok zo zásobníkov. Zvyčajne sa pre operácie toku materiálu definujú len lineárne trajektórie pohybov s počiatočnou a konečnou pozíciou, prípadne s medzipoložami.

Použitý typ operácie slúži na generovanie súčiastok a simulovanie vysúvania zo zásobníkov do pozícií pre odobratie robotom. Rovnakým spôsobom je na dopravníkovom páse vyriešené opúšťanie zložených obalov so žetónom preč z pracoviska. Editor

na vytváranie operácie pre materiálový tok sa nachádza v rovnakej sekcii, ako editor na operácie typu uchoť a polož, a spôsob vytvárania je veľmi podobný. Na správne vytvorenie *Object Flow* operácie potrebujeme definovať objekt, ktorý sa má presúvať, jeho počiatočnú a konečnú pozíciu. Obrázok 3.34 zobrazuje všetky použité operácie toku materiálu na našom pracovisku, zelené body určujú počiatočné a konečné pozície pohybu objektov.



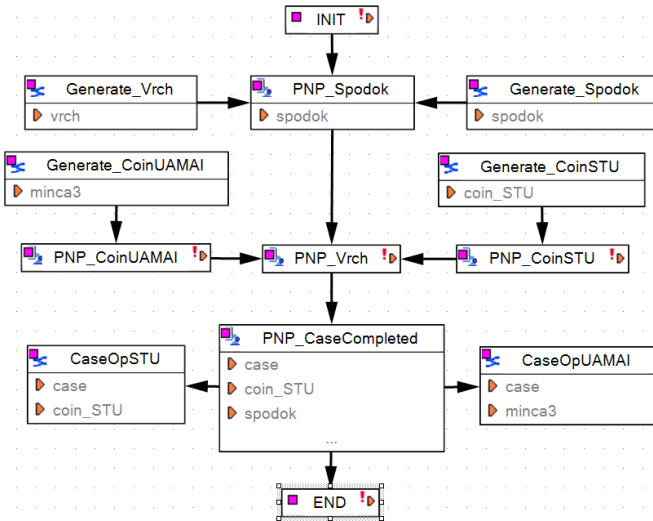
Obr. 3.34: Trajektórie pohybu súčiastok pomocou operácií materiálového toku.

### 3.6.5 Popis toku materiálu na pracovisku

Signálna simulácia beží cyklicky v nekonečnej slučke. Manipulované objekty, v softvéri spadajúce do kategórie *Parts*, nie sú v simulácii prítomné neustále počas celého programového cyklu. Generujú sa na základe operácií, ktoré sú na tieto objekty naviazané. Na konci daného cyklu sú automaticky odstránené, pre nový cyklus sa vygeneruje nová sada súčiastok a cyklus beží od začiatku. Generovanie manipulovaných objektov je v simulácii potrebné zdefinovať, inak simulácia nebude fungovať správne. Slúži na to editor materiálového toku v simulácii, v softvéri označený *Material Flow Viewer*.

Definovaný materiálový tok pre naše pracovisko je zobrazený na Obr. 3.35. Opis materialového toku je nasledovný. Simulácia začína inicializáciou, nasleduje generovanie spodného a vrchného dielu obalu a Pick and Place operácia pre spodný diel obalu.

V ďalšom kroku sú dve navzájom nezávislé vetvy na generovanie žetónov. Podľa zvoleného typu žetónu sa vygeneruje jeho model a robot ho preloží do spodného dielu obalu. Nasleduje Pick and Place operácia pre vrchný diel a ďalšia operácia pre preloženie zloženého obalu na dopravníkový pás, po ktorom zvolený typ žetónu v obale odchádza na koniec dopravníka, čím je ukončený jeden cyklus a simulácia opäť začína inicializáciou.



Obr. 3.35: Definovaný materiálový tok v simulácii.

### 3.6.6 Operácie simulovanej ľudskej činnosti

Softvér Process Simulate obsahuje viacero modulov pre vytváranie simulácií rôznych typov operácií a patrí medzi ne aj modul na vytváranie simulácií činnosti operátorov alebo obsluhy na pracovisku. Pre naše pracovisko sme vytvorili dve operácie simulovanej ľudskej činnosti. Prvou je spustenie pracoviska stlačením štartovacieho tlačidla, druhou o niečo komplexnejšou je doplnenie žetónov do zásobníka a opätovné spustenie pracoviska.

Program nám umožňuje vytvoriť postavu, nastaviť telesné parametre, ako výška, stavba tela, pracovný odev a mnohé iné. Vytvorenému modelu postavy je možné následne priradiť pohybové úlohy a simulovať rôznu činnosť. Editor na vytváranie úloh je spolu s modelom postavy zobrazený na Obr. 3.36. V ľavej časti editora sú predvoľby na rôzne pohybové činnosti a úlohy, ako napríklad *ísť*, *uchopiť*, *položiť*, *zmeniť pozíciu*, *prechýtiť*, *dotknúť sa* a mnohé iné. Okrem prednastavených pozícií je možné model po-

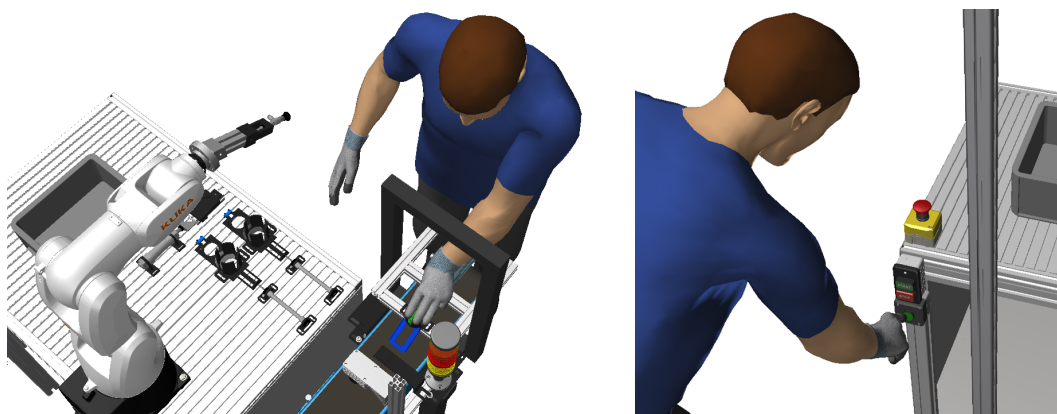
stavy nastavovať do individuálnych póz a pozícií, pohybom vo všetkých kĺboch presne podľa anatómie človeka. Vďaka nim je tvorba simulácie veľmi rýchla a intuitívna. Vytvorené simulácie ľudskej činnosti sa dajú plnohodnotne zakomponovať do signálnej simulácie medzi ostatné operácie vykonávané robotmi alebo mechanizmami v simulačnom modeli. Obrázok 3.37 zobrazuje dve ukážky so simulovanej činnosti modelu postavy. Na Obr. 3.37 vľavo je pozícia pre doplnenie žetónov do zásobníka, pravo je znázornené potvrdenie doplneného zásobníka pre opätovné spustenie programu.



Obr. 3.36: Editor na vytváranie úloh pre model postavy.

### 3.6.7 Ganttov diagram a riadiaci modul simulácie

Operácie, ktoré v softvérovom prostredí vytvárame, sú umiestňované v strome operácií (z angl. Operation Tree). Na spustenie operácie je potrebné vytvoriť Ganttov diagram pozostávajúci z vytvorených operácií. Ganttov diagram je všeobecne známy ako metóda znázornenia aktivít zobrazených v čase. V ľavej časti diagramu je zoznam aktivít, navrchu je časová mierka. Každá aktivita je znázornená obdĺžnikom. Pozícia a dĺžka

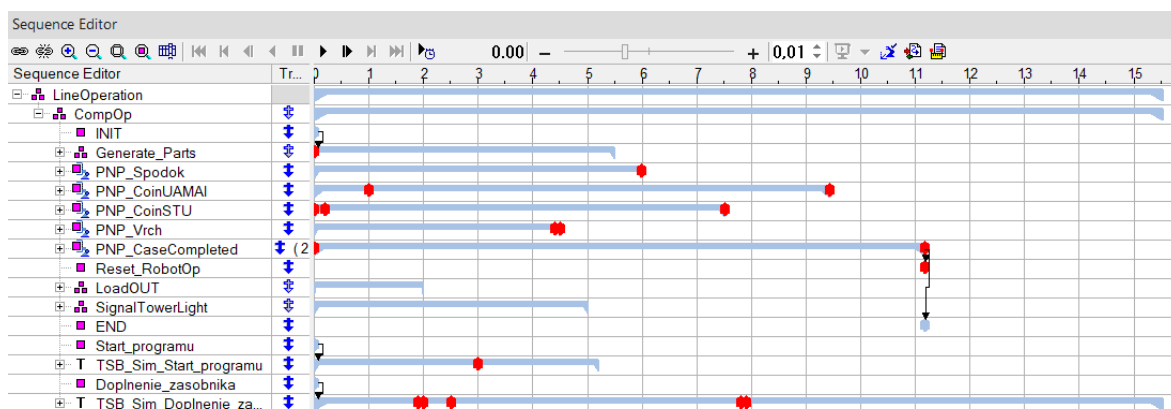


Obr. 3.37: Vytvorené pozície pre doplnenie zásobníka a spustenie programu.

obdĺžnika odráža začiatok, trvanie a koniec danej aktivity.

V prostredí softvéru Process Simulate je Ganttov diagram označovaný ako sekvenčný diagram. Na vytvorenie Ganttovho diagramu zostaveného z operácií slúži editor sekvenčného diagramu (z angl. Sequence editor). Operácie sa umiestnia do sekvenčného diagramu a ich vzájomným prepojením sa vytvorí ich postupnosť počas simulácie. Časovo založená simulácia je neporovnateľne jednoduchšia oproti signálnej, pretože operácie sa vzájomne prepoja v slede, ako za sebou nasledujú. Pri signálnej simulácii môžu byť operácie na prvý pohľad rozmiestnené neusporiadane. Vo veľkej miere sa totiž využíva prechodová podmienka medzi operáciami, takže prechod medzi dvoma operáciami nie je závislý od uplynutého času, ale od hodnoty signálu alebo od vyhodnotenia definovanej podmienky na prechod. Ganttov diagram signálnej simulácie aplikovaný na náš simulačný model je zobrazený na Obr. 3.38. Na diagrame sú červenou farbou zobrazené body, v ktorých sú definované určité typy udalostí. V našej simulácii sú použité udalosti pre aktiváciu/deaktiváciu signálov, aktiváciu/deaktiváciu zobrazovania objektov (napr. aktivácia svetelného lúča počas snímania skenerom Photoneo) a udalosti pre pripojenie alebo odpojenie objektu voči inému objektu.

Process Simulate umožňuje editovať aj samotné operácie, pridávaním medzipozícií alebo v prípade operácií vykonávaných robotom aj OLP príkazy zadávané mimo robota (z angl. OLP - Off-line Programming). Slúži na to editor dráhy pohybu objektu (z angl. Path Editor). Obrázok 3.39 zobrazuje editor pre operáciu typu uchop a polož, vykonávanú robotom KUKA. Umožňuje meniť hodnoty súradníc v jednotlivých bo-



Obr. 3.38: Ganttov diagram signálnej simulácie.

doch, pridávať OLP príkazy, definovať typ pohybu robota do zvolenej pozície a mnohé iné.

Paths & Locati...	Pat..	Att..	X	Y	Z	RX	RY	RZ	Duration	OLP Commands	Robot	i	Zone	Motion Type
PNP_Sp...									5.98		kr3_r540			
via			1918.02	-435.11	983.75	90.00	0.00	-165.00	0.11				fine	PTP
pick			1918.02	-435.11	853.00	90.00	0.00	-165.00	1.73	# Attach PrisavkaGripp			fine	LIN
via2			1918.02	-435.11	923.75	90.00	0.00	-165.00	0.34				fine	LIN
via1			2015.27	-389.75	923.75	90.00	0.00	-157.50	0.75				fine	PTP
place			2015.27	-389.75	891.00	90.00	0.00	-157.50	1.37	# Detach # WaitTime			fine	LIN
via3			2015.27	-389.75	983.75	90.00	0.00	-157.50	0.61				fine	LIN

Obr. 3.39: Editor dráhy pohybu operácie vykonávanej robotom.

Result Signal	Expression / Called Module
kr3_r540_programNumber	1 * PNP_Spodok + 2 * PNP_CoinUAMAI + 3 * PNP_CoinSTU + 4 * PNP_Vrch + 5 * PNP_CaseCompleted
kr3_r540_startProgram	(kr3_r540_programNumber = kr3_r540_mirrorProgramNumber) AND (kr3_r540_mirrorProgramNumber > 0) AND NOT kr3_r540_emergencyStop
kr3_r540_programPause	(kr3_r540_programNumber = 1 AND ((NOT ZasobnikSpodok_OK) OR (NOT ZasobnikUAMAI_OK) OR (NOT ZasobnikVrch_OK))) OR proximity_sensor
PNP_Spodok	(SICK_Sensor_Spodok AND SICK_Sensor_Vrch) AND NOT PNP_SpodokEND
PNP_CoinUAMAI	ZetonUAMAI AND PNP_SpodokEND AND (NOT PNP_CoinUAMAI_END)
PNP_CoinSTU	NOT ZetonUAMAI AND PNP_SpodokEND AND (NOT PNP_CoinSTU_END)
PNP_Vrch	PNP_SpodokEND AND (PNP_CoinSTU_END OR PNP_CoinUAMAI_END) AND (NOT PNP_VrchEND)
PNP_CaseCompleted	PNP_VrchEND AND (PNP_CoinSTU_END OR PNP_CoinUAMAI_END) AND PNP_SpodokEND AND (NOT PNP_CaseCompletedEND)

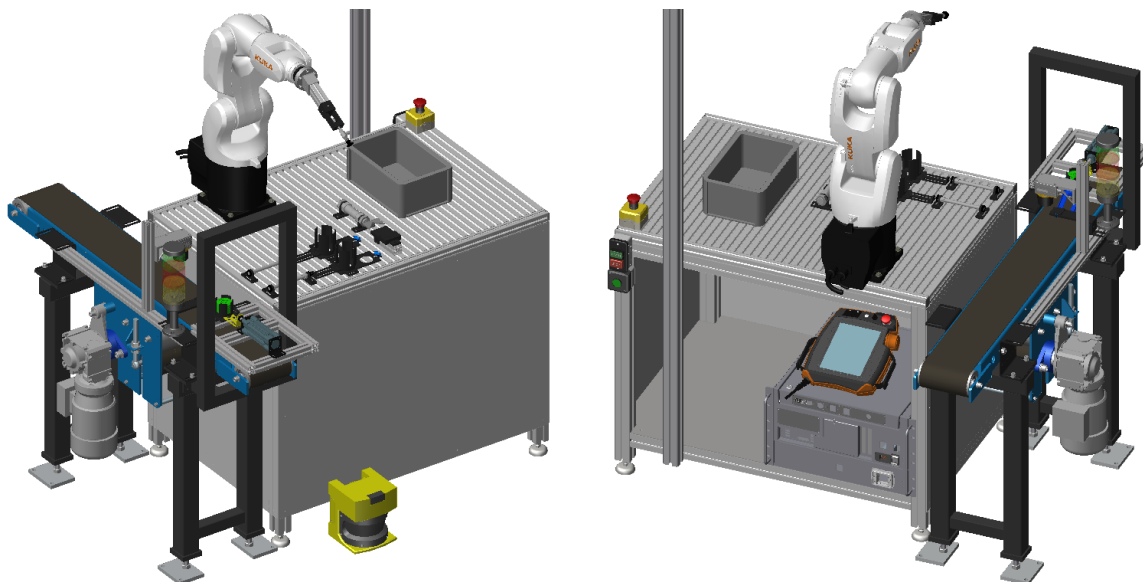
Obr. 3.40: Riadiaci modul operácií robota KUKA.

Modul zobrazený na Obr. 3.40 sme vytvorili na riadenie činnosti priemyselného robota KUKA. Všetky operácie vykonávané robotom majú v rámci programu robota

definované číslo, podľa ktorého sú operácie volené a vykonávané. Každá z operácií má navyše definovanú aktivačnú podmienku pre spustenie.

### 3.7 Výsledný návrh budovaného robotizovaného pracoviska

Simulačný model budovaného robotizovaného pracoviska sme vypracovali na základe návrhu zobrazeného na Obr. 3.5. Pohľad na pracovisko v dvoch pohľadoch je zobrazený na Obr. 3.41 a simulačný model zobrazený spolu s bezpečnostným oplotením a modelmi postáv je vyobrazený na Obr. 3.42.



Obr. 3.41: Pohľady zobrazujúce pracovisko z prednej a zadnej strany.





Obr. 3.42: Konečná podoba simulačného modelu.

## 4 Generovanie riadiaceho kódu na priemyselného robota KUKA

Virtuálnym sprevádzkovaním navrhnutého pracoviska sme si overili funkčnosť navrhnutého riešenia ako celku, vrátane trajektórií a dosahov použitého priemyselného robota KUKA. Ako sme uviedli v Kap. 2.2.1, jednou zo silných stránok softvéru Tecnomatix Process Simulate od spoločnosti Siemens, je možnosť vytvárať simulačné modely pracovísk s použitím takmer akéhokoľvek priemyselného robota. Na generovanie riadiaceho kódu na zvoleného robota je potrebné softvér doplniť o RCS modul (z angl. Robot Controller Simulation). V preklade RCS modul predstavuje virtuálnu riadiacu jednotku robota. Je vyvinutý výrobcom priemyselného robota tak, aby sa použitý robot v simulácii správal ako skutočný systém s reálnou riadiacou jednotkou. Nakoľko je RCS modul odlišný pre každú značku robotov, nie je bežnou súčasťou softvéru Process Simulate a na inštaláciu požadovaného modulu je potrebné zakúpenie licencie.

Po nainštalovaní RCS modulu pre priemyselné roboty KUKA sme pristúpili ku generovaniu riadiaceho kódu. Vygenerovaný kód tvoria tri programové súbory. Prvým je samotný zdrojový kód `KUKA_KR3_R540_Program.src`, doplnený o dátový súbor `KUKA_KR3_R540_Program.dat`. Súbor `KUKA_KR3_R540_Program.olp` obsahujúci OLP programovacie príkazy bol vygenerovaný tiež, nakoľko sme v našej simulácii nepoužili žiadne OLP príkazy, daný súbor je prázdny a neuvádzame ho. Pre názornosť uvedieme ukážku zdrojového kódu spolu s ukážkou dátového súboru pre Pick and Place operáciu spodného dielu obalu.

Ukážka zdrojového kódu `KUKA_KR3_R540_Program.src` pre Pick and Place operáciu spodného dielu obalu:

```

;# ----- START PATH : PNP_Spodok -----
;FOLD PTP via Vel=100 % Pvia Tool[0] Base[0];{%PE}%R8.1.17,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP
    ,%P 1:PTP, 2:via, 3:, 5:100, 7:Pvia
$BWDSTART = FALSE
PDAT_ACT= PPvia
FDAT_ACT= Fvia
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP Xvia
;ENDFOLD
;FOLD LIN pick Vel=0.1 m/s Lpick Tool[0] Base[0];{%PE}%R8.1.17,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%
    VLIN,%P 1:LIN, 2:pick, 3:, 5:0.1, 7:Lpick
$BWDSTART = FALSE
LDAT_ACT= LLpick
FDAT_ACT= Fpick
BAS(#CP_PARAMS,0.1)
LIN Xpick
;ENDFOLD
;SIM # Attach   PrisavkaGripper
;SIM # WaitTime 1
;FOLD LIN via2 Vel=0.1 m/s Lvia2 Tool[0] Base[0];{%PE}%R8.1.17,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%
    VLIN,%P 1:LIN, 2:via2, 3:, 5:0.1, 7:Lvia2
$BWDSTART = FALSE
LDAT_ACT= LLvia2
FDAT_ACT= Fvia2
BAS(#CP_PARAMS,0.1)
LIN Xvia2
;ENDFOLD
;FOLD PTP via1 Vel=100 % Pvia1 Tool[0] Base[0];{%PE}%R8.1.17,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%
    VPTP,%P 1:PTP, 2:via1, 3:, 5:100, 7:Pvia1
$BWDSTART = FALSE
PDAT_ACT= PPvia1
FDAT_ACT= Fvia1
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP Xvia1
;ENDFOLD
;FOLD LIN place Vel=0.1 m/s Lplace Tool[0] Base[0];{%PE}%R8.1.17,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%
    ,%VLIN,%P 1:LIN, 2:place, 3:, 5:0.1, 7:Lplace
$BWDSTART = FALSE
LDAT_ACT= LLplace
FDAT_ACT= Fplace
BAS(#CP_PARAMS,0.1)
LIN Xplace
;ENDFOLD
;SIM # Detach
;SIM # WaitTime 1
;FOLD LIN via3 Vel=0.1 m/s Lvia3 Tool[0] Base[0];{%PE}%R8.1.17,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%
    VLIN,%P 1:LIN, 2:via3, 3:, 5:0.1, 7:Lvia3

```

```

$BWDSTART = FALSE
LDAT_ACT= LLvia3
FDAT_ACT= Fvia3
BAS(#CP_PARAMS,0.1)
LIN Xvia3
;ENDFOLD

```

Ukážka dátového súboru KUKA\_KR3\_R540\_Program.dat pre Pick and Place operáciu spodého dielu obalu:

```

;# ----- START PATH : PNP_Spodok -----
DECL E6POS Xvia={X 494.39,Y 137.15,Z 133.75,A -75,B 0,C 90}
DECL FDAT Fvia={TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPvia={VEL 100,ACC 100,APO_DIST 0}
DECL E6POS Xpick={X 494.39,Y 137.15,Z 3,A -75,B 0,C 90}
DECL FDAT Fpick={TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LLpick={VEL 0.1,ACC 100,APO_DIST 0,APO_FAC 0,ORI_TYP #VAR}
DECL E6POS Xvia2={X 494.39,Y 137.15,Z 73.75,A -75,B 0,C 90}
DECL FDAT Fvia2={TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LLvia2={VEL 0.1,ACC 100,APO_DIST 0,APO_FAC 0,ORI_TYP #VAR}
DECL E6POS Xvia1={X 449.03,Y 234.39,Z 73.75,A -67.5,B 0,C 90}
DECL FDAT Fvia1={TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPvia1={VEL 100,ACC 100,APO_DIST 0}
DECL E6POS Xplace={X 449.03,Y 234.39,Z 41,A -67.5,B 0,C 90}
DECL FDAT Fplace={TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LLplace={VEL 0.1,ACC 100,APO_DIST 0,APO_FAC 0,ORI_TYP #VAR}
DECL E6POS Xvia3={X 449.03,Y 234.39,Z 133.75,A -67.5,B 0,C 90}
DECL FDAT Fvia3={TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LLvia3={VEL 0.1,ACC 100,APO_DIST 0,APO_FAC 0,ORI_TYP #VAR}

```

Dátový súbor obsahuje informácie o pozíciách pre jednotlivé operácie vykonávané robotom. Zdrojový kód obsahuje inštrukcie pre vykonávané pohyby, typy pohybov, rýchlosti pohybov a body na trajektórii, ktoré musí robot opísať. Pre správne vykonanie inštrukcií uvedených v zdrojovom kóde sú načítané údaje z dátového súboru.

# Záver

Cieľom diplomovej práce bolo vypracovanie simulačného modelu robotizovaného pracoviska, budovaného v laboratóriu priemyselnej robotiky na Ústave automatizácie, merania a aplikovanej informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave. Našou úlohou bolo navrhnúť robotizované pracovisko s využitím prvkov strojového videnia a s podporou pneumatických prvkov. Nakoľko na začiatku nebol vytvorený žiaden prvotný návrh, v rámci vytvárania simulačného modelu sme pripravili viacero štúdií budúcej aplikácie a najlepší návrh sme zrealizovali.

Diplomová práca sa teoretickou časťou zameriava na koncepty inteligentného priemyslu so zameraním na systémy strojového videnia v priemysle a virtuálne sprevádzkovanie robotických pracovísk. Práve oblasť strojového videnia je v súčasnosti na masívnom vzostupe a v budúcnosti zaujme stabilné miesto na poli automatizačnej techniky. Dôvodom je možnosť dať strojom schopnosť vidieť a posunúť ich tak bližšie k autonómnej výrobe. V samostatnej kapitole diplomovej práce sme sa zamerali na technológie virtuálneho sprevádzkovania. V priemyselnej praxi majú nezastupiteľné miesto pre možnosť virtuálne overovať navrhnuté automatizačné riešenia ešte pred samotným realizovaním a nasadením vo výrobe, čím výrazne znižujú riziko nasadenia programu obsahujúceho chyby.

Získané teoretické vedomosti sme uplatnili pri práci na praktickej časti a navrhnuté pracovisko sme virtuálne sprevádzkovali formou signálnej simulácie. Simulačný model robotickej bunky sme vypracovali pomocou softvéru Siemens Tecnomatic Process Simulate. Pracovisko slúži na vkladanie žetónov do plastových obalov a ich skladanie pomocou kompaktného priemyselného robota KUKA KR 3. Navrhli sme dva typy žetónov, jeden s logom školy, druhý s logom ústavu. Každý typ je umiestnený v inom zásobníku na inej časti pracoviska. Ich odoberanie a skladanie robotom závisí od voľby

obsluhy pracoviska. Riadiaci program sa prispôsobí požadovanému typ žetónu. Návrh pracoviska počíta s použitím dvoch systémov strojového videnia. Prvým je kamera Cognex, umiestnená na dopravníkovom páse, určená na zameranie pozície žetónu pre jeho odobratie robotom. Druhým systémom je skener Photoneo, umiestnený nad prepravkou s náhodne orientovanými žetónmi. Úlohou skenera je snímaním oblasti zvoliť vhodne orientovaný žetón, ktorý robot odoberie na základe informácie o polohe žetónu zo skenera.

Pri návrhu robotizovaného pracoviska sme zohľadnili skutočnosť, že sa nejedná o priemyselnú aplikáciu s nasadením vo výrobe, ale že sa jedná o pracovisko určené na podporu vzdelávacieho procesu na ústave. Nami navrhnuté pracovisko je preto vo výsledku dostatočne modulárne a je tu veľký priestor pre ďalšie modifikácie a zmeny pri vypracovaní bakalárskych a diplomových prác. Študenti, ktorí budú mať možnosť rozvíjať svoje znalosti v oblasti programovania kompaktných priemyselných robotov, budú mať k dispozícii funkčné pracovisko a svoje úsilie môžu venovať zdokonaleniu procesu, ktorý sme navrhli od základov. Na prvý pohľad málo výrazná, no o to podstatnejšia a zdĺhavá práca spočívala v návrhu všetkých komponentov potrebných na fyzickú montáž pneumatických prvkov alebo ostatných doplnkov pracoviska. Patria sem rôzne úchyty valcov, držiaky snímačov, zásobníky súčiastok, ale aj koncový efektor robota s vákuovou prísavkou. Vlastné diely sme navrhli pomocou softvéru Autodesk Inventor, funkčnosť virtuálne overili pomocou softvéru Process Simulate a na záver vytlačili na 3D tlačiarňi. Tu sa ukázala silná stránka virtuálneho sprevádzkovania, pretože takto navrhnuté vlastné komponenty boli fyzicky inštalované na pracovisku a svoju funkciu plnia bezchybne. V praktickej časti sme uviedli popis kľúčových krokov pri tvorbe signálnej simulácie. V závere práce sme pomocou softvéru Process Simulate vygenerovali riadiaci kód použitého robota KUKA.

# Literatúra

- [1] A. Vojáček. Robot vs. cobot. Online., 2017. 25.4.2020, <https://automatizace.hw.cz/robot-vs-cobot.html>.
- [2] ABB AB Robotics. Robotstudio® the toolbox for industrial robot users. Online., 2017. 29.5.2020, <https://new.abb.com/products/robotics/sk/robotstudio>.
- [3] Ch. Turnbull. What is virtual commissioning? Online., 2019. 1.5.2020, <https://virtualcommissioning.com/what-is-virtual-commissioning/>.
- [4] Cognex Corporation. 1d vision systems. Online. 28.4.2020, <https://www.cognex.com/what-is/machine-vision/system-types/1d-vision>.
- [5] Cognex Corporation. Components of machine vision. Online. 28.4.2020, <https://www.cognex.com/what-is/machine-vision/components>.
- [6] F. Nilsson and A. Murhed. Sick ag whitepaper - select the best technology for your vision application. Online. 28.4.2020, [https://cdn.sick.com/media/docs/2/22/322/Whitepaper\\_SICK\\_AG\\_Whitepaper\\_Select\\_the\\_best\\_technology\\_for\\_your\\_vision\\_application\\_en\\_IM0063322.PDF](https://cdn.sick.com/media/docs/2/22/322/Whitepaper_SICK_AG_Whitepaper_Select_the_best_technology_for_your_vision_application_en_IM0063322.PDF).
- [7] F. Vincent and B. Verlinden. Will your next employee be a cobot? Online., 2016. 26.4.2020, <https://www.sirris.be/blog/will-your-next-employee-be-cobot>.
- [8] O. Havle. Strojové vidění i: Principy a charakteristiky. *AUTOMA*, 5(1), 2008.
- [9] IAI SYSTEMS INSPECTION. Vision systems. Online. 26.4.2020, <http://www.iai-sys.com/inspection.html#>.

- [10] M. Kopcová. Strojové vidění. *MM Průmyslové spektrum*, 23(11):120, 2016.
- [11] KUKA AG. Kr 3 agilus. Online. 4.6.2020, <https://www.kuka.com/en-gb/products/robotics-systems/industrial-robots/kr-3-agilus>.
- [12] T. Lechler, E. Fischer, and M. M. et al. Virtual commissioning – scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. In *52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Erlangen, Nuremberg, 2019.
- [13] M. Rouse. Industrial internet of things (iiot). Online., 2018. 24.4.2020, <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Industrial-Internet-of-Things-IIoT>.
- [14] D. Onofrejová and J. Janeková. Internet vecí v priemyselných činnostiach. *Trendy a inovatívne prístupy v podnikových procesoch*, 2(1), 2017.
- [15] P. Bílik. Průmysl na prahu autonomizace - čtyři klíčové principy inteligentního průmyslu. Online., 2018. 21.4.2020, <https://www.systemonline.cz/rizeni-vyroby/4-klicove-principy-prumysloveho-internetu-veci.htm>.
- [16] P. Marčan. 01 – strojové videnie: Úvod (machine vision). Online. 28.4.2020, <https://www.dailyautomation.sk/01-strojove-videnie-uvod/>.
- [17] Photoneo s. r. o. Photoneo pr. Online. 29.4.2020, <https://www.photoneo.com/>.
- [18] Photoneo s. r. o. Phoxi 3d scanner l. Online. 30.4.2020, <https://www.photoneo.com/products/phoxi-scan-1/>.
- [19] D. D. S. R. RUŽAROVSKÝ, R. HOLUBEK. Virtual commissioning of a robotic cell prior to its implementation into a real flexible production system. *RESEARCH PAPERS, FACULTY OF MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY IN TRNAVA*, 26(41):93–101, 2018.
- [20] Robotic Industries Association. Unimate // the first industrial robot. Online., 2016. 24.4.2020, <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm>.



- [21] S. Musílek. Kedy použiť na automatizáciu kolaboratívne roboty? Online., 2017. 24.4.2020, [https://www.atpjournals.sk/rubriky/exkluzivne-clanky/kedy-pouzit-na-automatizaciu-kolaborativne-roboty.html?page\\_id=25927](https://www.atpjournals.sk/rubriky/exkluzivne-clanky/kedy-pouzit-na-automatizaciu-kolaborativne-roboty.html?page_id=25927).
- [22] SICK AG. Bezpečnostní laserový skener s3000, provozní návod. Online., 2016. 9.6.2020, [https://cdn.sick.com/media/docs/6/56/356/0perating\\_instructions\\_S3000\\_Safety\\_Laser\\_scanner\\_cs\\_IM0067356.PDF](https://cdn.sick.com/media/docs/6/56/356/0perating_instructions_S3000_Safety_Laser_scanner_cs_IM0067356.PDF).
- [23] SICK AG. Dátový hárok - sick wt2s-f131. Online., 2020. 6.4.2020, [https://cdn.sick.com/media/pdf/2/52/152/dataSheet\\_WT2S-F131\\_1025682\\_cs.pdf](https://cdn.sick.com/media/pdf/2/52/152/dataSheet_WT2S-F131_1025682_cs.pdf).
- [24] SIEMENS. Engineer automated production systems using robotics and automation simulation. Online. 1.5.2020, <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/robotics-automation-simulation.html#>.
- [25] SIEMENS. Process simulate - manufacturing process verification in powerful 3d environment. Online., 2011. 1.5.2020, [https://www.plm.automation.siemens.com/en\\_gb/Images/7457\\_tcm642-80351.pdf](https://www.plm.automation.siemens.com/en_gb/Images/7457_tcm642-80351.pdf).
- [26] Universal Robots A/S. Kolaboratívna robotika aj v automobilovom priemysle. Online., 2017. 24.4.2020, [https://www.atpjournals.sk/rubriky/exkluzivne-clanky/kolaborativna-robotika-aj-v-automobilovom-priemysle.html?page\\_id=24730](https://www.atpjournals.sk/rubriky/exkluzivne-clanky/kolaborativna-robotika-aj-v-automobilovom-priemysle.html?page_id=24730).
- [27] J. VACHÁLEK and G. TAKÁCS. *ROBOTIKA*. Nakladateľstvo STU, Bratislava, 2014. ISBN 978-80-227-4163-7.
- [28] Visual Components Oy. Visual components software. Online. 29.5.2020, <https://www.visualcomponents.com/products/visual-components/premium/>.
- [29] Vuzix Corporation. Vuzix smart glasses highlighted in accenture post on airbus aircraft assembly. Online., 2017. 24.4.2020, [http://www.airframer.com/news\\_story.html?release=37269](http://www.airframer.com/news_story.html?release=37269).

- [30] YASKAWA Global. What is a collaborative robot-cobot? Online. 25.4.2020, <https://www.yaskawa-global.com/product/robotics/collaborative>.

# Zoznam príloh

**Príloha A** Dátový hárok robota KUKA KR 3 R540.

**Príloha B** CD médium – záverečná práca v elektronickej podobe, ktorá obsahuje:

- dátové hárky v PDF verzii:
  - priemyselný robot KUKA KR 3 R540,
  - optoelektronický snímač SICK W2 WT2S-F131,
  - bezpečnostný skener SICK S3000 Standard,
  - skener Photoneo PhoXi 3D L,
  - kamera Cognex In-Sight 7000 Series
- video nahrávku simulácie,
- zdrojový projekt vytvorený v softvéri Tecnomatix Process Simulate,
- knižnicu použitých modelov,
- vygenerovaný riadiaci kód robota.



## KR 3 R540



### Technical data

Maximum reach	541 mm
Maximum payload	3 kg
Pose repeatability (ISO 9283)	± 0.02 mm
Number of axes	6
Mounting position	Floor; Ceiling; Wall
Footprint	179 mm x 179 mm
Weight	approx. 26.5 kg

### Axis data

Motion range	
A1	±170 °
A2	-170 ° / 50 °
A3	-110 ° / 155 °
A4	±175 °
A5	±120 °
A6	±350 °

### Operating conditions

Ambient temperature during operation 5 °C to 45 °C (278 K to 318 K)

### Protection rating

Protection rating (IEC 60529)	IP40
Protection rating, in-line wrist (IEC 60529)	IP40

### Controller

Controller	KR C4 compact
------------	---------------

### Teach pendant

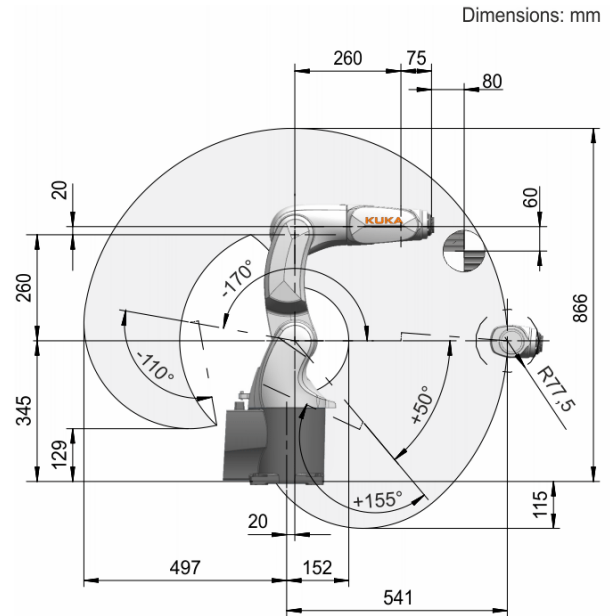
Teach pendant	KUKA smartPAD
---------------	---------------

### Cycle time

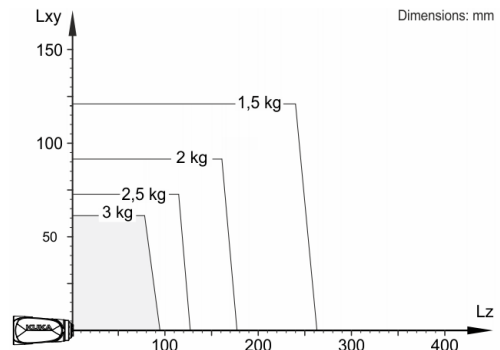
167 cycles per minute (25 mm / 305 mm / 25 mm, 1 kg)



### Workspace graphic



### Payload diagram



The KR 3 R540 is designed for a rated payload of 2 kg in order to optimize the dynamic performance of the robot. With reduced load center distances, higher loads up to the maximum payload may be used. The specific load case must be verified using KUKA.Load. For further consultation, please contact KUKA Support.

### Mounting flange

