



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**NÁVRH UNIVERZÁLNÍHO DIGITÁLNÍHO DVOJČETE PRO
ROBOTICKOU BUŇKU EDUSET ONE**

DESIGN OF A UNIVERSAL DIGITAL-TWIN FOR THE EDUSET ONE ROBOTIC CELL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Hrubý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Branislav Lacko, CSc.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Bc. Tomáš Hrubý**
Studijní program: Aplikovaná informatika a řízení
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Branislav Lacko, CSc.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh univerzálního digitálního dvojčete pro robotickou buňku EDUset ONE

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zahrnovat řešerši v oblasti využití digitálních dvojčat s důrazem na koncept Průmyslu 4.0. Teoretická část práce bude zahrnovat také řešerši dostupných simulačních prostředí pro tvorbu digitálních dvojčat v oblasti průmyslové robotiky a automatizace. Předmětem práce bude řešerše současného stavu robotické buňky EDUset ONE, výběr simulačního prostředí (Unity3D, Unreal Engine, apod.) pro tvorbu fyzikální simulace, návrh a implementace digitálního dvojčete pro jednotlivé mechanismy robotické buňky (kolaborativní robot, EDU frézka, senzorický systém, apod.), a v neposlední řadě systémová integrace s programovatelným logickým automatem (PLC) prostřednictvím komunikačního protokolu OPC UA. Závěr práce bude věnován ověření funkčnosti navrženého řešení prostřednictvím simulace a také v interakci s reálnou robotickou buňkou.

Práce předpokládá aktivní přístup studenta a nutnost práce v laboratoři. Práce také předpokládá základní znalost OOP (zejména v jazyce C# a C++14/17) a prostorovou představivost.

Práce bude realizována ve spolupráci s firmou Intemac Solutions s.r.o., která poskytne řídicí prostředky a část know-how v pojednávané oblasti.

Cíle diplomové práce:

- Proveďte rešerši v oblasti využití digitálních dvojčat s důrazem na koncept Průmyslu 4.0.
- Analyzujte dostupné simulační prostředí pro tvorbu digitálních dvojčat v oblasti průmyslové robotiky a automatizace.
- Proveďte rešerši současného stavu robotické buňky EDUset ONE.
- Zvolte simulační prostředí (Unity3D, Unreal Engine, apod.) pro tvorbu fyzikální simulace.
- Navrhněte a implementujte digitálního dvojčete pro jednotlivé mechanismy robotické buňky (kolaborativní robot, EDU frézka, senzorický systém, apod.)
- Navrhněte systémovou integraci digitálního dvojčete s programovatelným logickým automatem (PLC) prostřednictvím komunikačního protokolu OPC UA.
- Ověřte funkčnost vytvořeného řešení prostřednictvím simulace a také v interakci s reálnou robotickou buňkou.

Seznam doporučené literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk, Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

SICILIANO, Bruno a KHATIB, Oussama, ed. Springer handbook of robotics. 2nd edition. Berlin: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-32550-7.

Collins, John James, Shelvin Chand, Anthony Vanderkop and David Howard, A Review of Physics Simulators for Robotic Applications. IEEE Access 9 (2021): 51416-51431.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá tématem tvorby digitálního dvojčete pro robotickou buňku EDUSet ONE, která je součástí výzkumného centra Intemac. Teoretická část seznamuje s problematikou konceptu Průmyslu 4.0 a popisuje jeho dílčí prvky. Dále se věnuje digitálnímu dvojčeti, jeho historii, definici a druhům. Součástí je také uvedení příkladů využití v několika odlišných odvětvích lidské činnosti. Další kapitola zkoumá dostupná vizualizační prostředí pro tvorbu robotických aplikací. Poslední teoretická část práce se věnuje robotické buňce a jejím součástem, které tvoří zejména kolaborativní robotické rameno UR10e a 5-osá CNC frézka. Vlastní řešení obsahuje tvorbu dvojčete, kterou tvoří úprava CAD modelů a vývoj v programu Unity. Nedílnou součástí praktické realizace digitálního dvojčete je návrh scény robotické buňky, implementace široké škály dílčích programů, uživatelsky přívětivého rozhraní a řešení OPC UA klienta pro systémovou integraci s programovatelným logickým automatem (PLC) od společnosti Siemens.

ABSTRACT

This thesis focuses on the creation of a digital twin for the EDUSet ONE robotic cell, which is part of the Intemac research centre. The theoretical part introduces the concept of Industry 4.0 and describes its sub-elements. The following part of the theory is dedicated to the digital twin, its history, definition and types. It also includes examples of applications in several different sectors of human activity. The next chapter explores the available visualization environments for creating robotic applications. The last theoretical part of the thesis focuses on the robotic cell and its components, which consist mainly of the UR10e collaborative robotic arm and a 5-axis CNC milling machine. The actual solution includes the creation of the twin, which consists of the modification of CAD models and development in Unity. Integral to the practical implementation of the digital twin is the design of the robotic cell scene, the implementation of a wide range of subroutines, a user-friendly interface and an OPC UA client solution for system integration with a Siemens programmable logic controller (PLC).

KLÍČOVÁ SLOVA

Digitalní dvojče, Blender, Unity, TIA Portal, Universal Robots, testbed, simulační prostředí, grafické rozhraní, OPC UA

KEYWORDS

Digital twin, Blender, Unity, TIA Portal, Universal Robots, testbed, simulation environment, graphical interface, OPC UA



ÚSTAV AUTOMATIZACE
A INFORMATIKY



2024

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRUBÝ, Tomáš. *Návrh univerzálního digitálního dvojčete pro robotickou buňku EDUset ONE*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/156949>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, Vedoucí práce: doc. Ing. Branislav Lacko, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků.

V Brně dne 21. 5. 2024

.....

Tomáš Hrubý

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu docentu Ing. Branislavovi Lackovi CSc., vedoucímu této diplomové práce, za vypsání zajímavého tématu pro zpracování. Dále bych chtěl rovněž poděkovat Ing. Romanu Parákovi a Ing. Peteru Janusovi za konzultace, odborné rady a vždy lidský přístup. Za podporu v průběhu celého studia chci také poděkovat své rodině a všem mým přátelům.

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	SOUČASNÝ STAV PRŮMYSLU 4.0.....	17
2.1	Historie Průmyslových revolucí	17
2.2	Model RAMI 4.0.....	18
2.3	IoT Internet věcí.....	20
2.4	Cloud Computing	21
2.5	Edge Compusting	22
2.6	Umělá inteligence	22
2.7	Komunikační technologie.....	24
2.7.1	Komunikační standard OPC UA	25
3	DIGITÁLNÍ DVOJČATA	27
3.1	Definice Digitálního dvojčete	27
3.2	Historie digitálních dvojčat	27
3.3	Druhy digitálních dvojčat	29
3.3.1	Digitální model	29
3.3.2	Digitální stín	29
3.3.3	Digitální dvojče.....	29
3.3.4	Rozdělení dle objektu zájmu.....	30
3.4	Aplikace digitálních dvojčat	30
3.4.1	Digitální továrna.....	30
3.4.2	Digitální dvojče člověka	31
3.4.3	Digitální dvojčata pro zemědělství.....	33
3.4.4	Smart Cities	34
4	VIZUALIZAČNÍ PROSTŘEDÍ PRO TVORBU ROBOTICKÝCH APLIKACÍ.....	37
4.1	Visual Components	37
4.2	RoboDK	38
4.3	Nvidia Isaac Sim	38
4.4	PolyScope od Universal Robots	39
4.5	Gazebo	40
4.5.1	Alternativy ke Gazebo	41
4.6	Unreal Engine	42
4.7	Unity	42
5	Robotická buňka EDUset ONE	45
5.1	Inovační centrum Intemac	45
5.2	Kolaborativní robotika	46
5.2.1	Universal Robots UR10e	47

5.3	Pětiosá CNC frézka	49
6	VLASTNÍ ŘEŠENÍ	51
6.1	Návrh scény	51
6.2	Úprava modelů	52
6.2.1	Implementace gripperu	54
6.3	Unity 3D - import a grafická úprava prostředí	55
6.4	Skripty pro ovládání akčních prvků	55
6.4.1	Funkce pro zajištění plynulosti pohybu	56
6.4.2	Generování kostky polotovaru	57
6.4.3	Přemísťování kostky v simulaci	57
6.5	Uživatelské rozhraní	58
6.5.1	Přepínání kamery	59
6.5.2	Rozhraní pro OPC UA připojení	60
6.5.3	Přehled UR10e robota	60
6.5.4	Přehled CNC frézky SLV EDU.....	60
6.5.5	Ostatní tlačítka hlavního menu	61
6.6	OPC UA a propojení PLC s modelem	62
6.7	Postup tvorby serveru OPC UA v programu Siemens	63
7	ZÁVĚR	65
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67
	SEZNAM PŘÍLOH	75

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá problematikou digitálních dvojčat jako zásadního pojmu v konceptu Průmyslu 4.0. Nejprve zkoumá teorii, definici a využití digitálních dvojčat v širším kontextu. Následně analyzuje implementační strategie digitálních dvojčat v různých odvětvích lidské činnosti a poskytuje příklady a výhody jejich aplikací v praxi. Teoretická část práce má také za cíl nabídnout řešerši současných programů s možností simulací digitálních dvojčat a postupně vysvětlit části robotické buňky, které jsou nutné k pochopení praktického řešení diplomové práce.

Praktická část s vlastním řešením poté představuje ukázkou procesu tvorby návrhu simulace pro univerzální digitální dvojče robotické buňky EDUset ONE. Fyzická část robotické buňky se nachází ve výzkumném a inovačním centru INTEMAC v Kuřimi, se kterým probíhala spolupráce na této diplomové práci. Práce je koncipována tak, aby byla dále využitelná. Skládá se primárně ze simulace robotického ramene UR10e od Universal Robots a 5-osé CNC frézky SLV EDU v prostředí Unity. Se svým reálným fyzickým protějškem je schopna komunikovat díky systémové integraci s programovatelným logickým automatem (PLC) prostřednictvím komunikačního protokolu OPC UA.

2 SOUČASNÝ STAV PRŮMYSLU 4.0

Průmysl 4.0, neboli Industrie 4.0 je v posledních desetiletích velmi často skloňovaný pojem v oblasti výroby. Představuje nástup nových technologií a snahu co nejvíce zefektivnit procesy, které vedou k vytváření nových výrobků od organizace výroby, práce s daty, individualizace, až po údržbu, inovace výrobku a komunikaci se zákazníkem. [1, 2]

Tato kapitola se zabývá současným stavem poznání v právě probíhající čtvrté průmyslové revoluci. Nejprve zmiňuje historii předešlých revolucí, na které navazuje, poté představuje model RAMI 4.0, kde lze názorně představovat části Průmyslu 4.0 a jejich vzájemné propojení. V následujících sekcích se kapitola zabývá některými hlavními dílčími částmi jako Internetem věcí, umělou inteligencí, cloud a edge computingem a komunikačními technologiemi.

2.1 Historie Průmyslových revolucí

V průběhu vývoje lidstva došlo ke čtyřem takzvaně průmyslovým revolucím. Každá změnila to, jakým způsobem byly vytvářeny nové produkty a významně změnila vývoj lidské společnosti.

První revoluce pozvolna nastala na počátku 19. století s objevem parního stroje, kdy lidská a zvířecí práce byla podpořena silou vzniklou spalováním uhlí. Parní stroje byly tehdy používány v továrnách a zejména v textilním průmyslu, to mělo za následek masivní stěhování populace do měst a změnu orientace společnosti z primárně agrární na průmyslovou činnost. Revoluce původně začala v Británii a poté se brzy rozšířila. [2, 1]

Druhá průmyslová revoluce nastala na přelomu 19. a 20. století. Jejím znakem byl rychlý vývoj technologií, zejména v oblasti mechanizace a například nových dopravních prostředků. Hlavní součástí této revoluce bylo objevení nových a účinnějších spalovacích motorů a zejména elektrifikace a vše co je s ní spojené. Toto období, mezi lety 1867 a 1914, se někdy také nazývá *Věk synergie*. [1, 3]

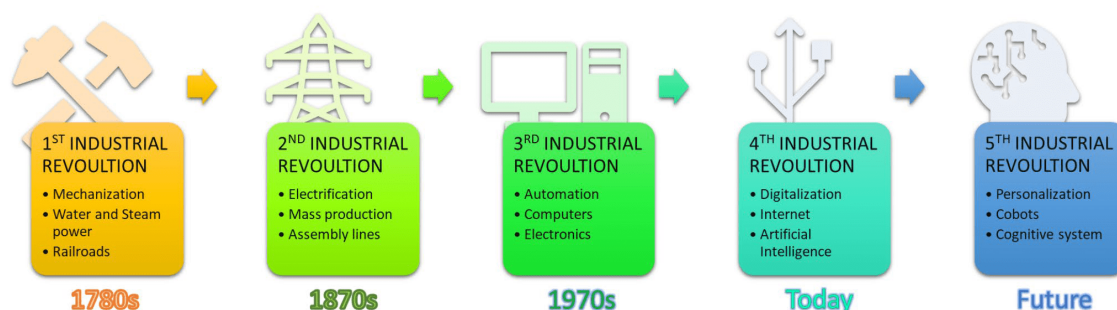
V pořadí **třetí průmyslová revoluce** je úzce spojena s elektronikou a výpočetní technikou. Její počátek se udává na počátek 50.let dvacátého století. Právě v té době byly poprvé úspěšně použity první tranzistory (představeny v roce 1948). Druhým významným datem je rok 1971, kdy byl společností Intel veřejnosti představen první komerčně dostupný mikroprocesor. Od této doby nastal boom ve vývoji výpočetní techniky a počítačů obecně. Důsledkem byla jejich implementace v automatizaci výroby. [4, 1]

Samotný pojem **Industry 4.0** pochází z roku 2011, kdy byl poprvé vysloven profesorem Wolfgangem Wahlsterem na veletrhu, který se konal v Hannoveru. Jeho

cílem bylo uceleně označit nové výzvy a digitální transformaci, která v procesu výroby probíhá, aby se na tomto základě mohl průmysl systematicky rozvíjet. [1]

Jednotlivé dílčí komponenty, které tvoří Průmysl 4.0, jako internet věcí, cloud a edge computing, umělá inteligence, digitální dvojčata apod., jsou rozebrány v následujících pod kapitolách.

Někteří autoři rovněž zmiňují **pátou průmyslovou revoluci**, která má nastat a která se bude orientovat především na individuální potřeby člověka, na užší komunikaci a spolupráci člověka se strojem (koboty). Dále bude kladen důraz na udržitelnost, ekologii, zvýšenou výdrž produktů a omezení nadprodukce. Zejména má jít o přechod od masivní výroby k masivní personalizaci a přizpůsobení produkce na míru, přesně podle potřeb, které reálně existují. [5, 1, 6]



Obr. 1: Přehled průmyslových revolucí [1]

2.2 Model RAMI 4.0

Pro lepší vysvětlení rozsahu toho, čím se koncept Průmyslu 4.0 zabývá a čím vším prostupuje, bylo vytvořeno mnoho grafik a názorných modelů. Jedním z nejcitovanějších a zároveň nejvíce názorných je takzvaný Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Jedná se o souřadnicový systém vytvořený Německým sdružením elektrotechnického a digitálního průmyslu.[7]

RAMI 4.0 mapuje všechny účastníky propojeného průmyslu na tři níže uvedené definiční osy:

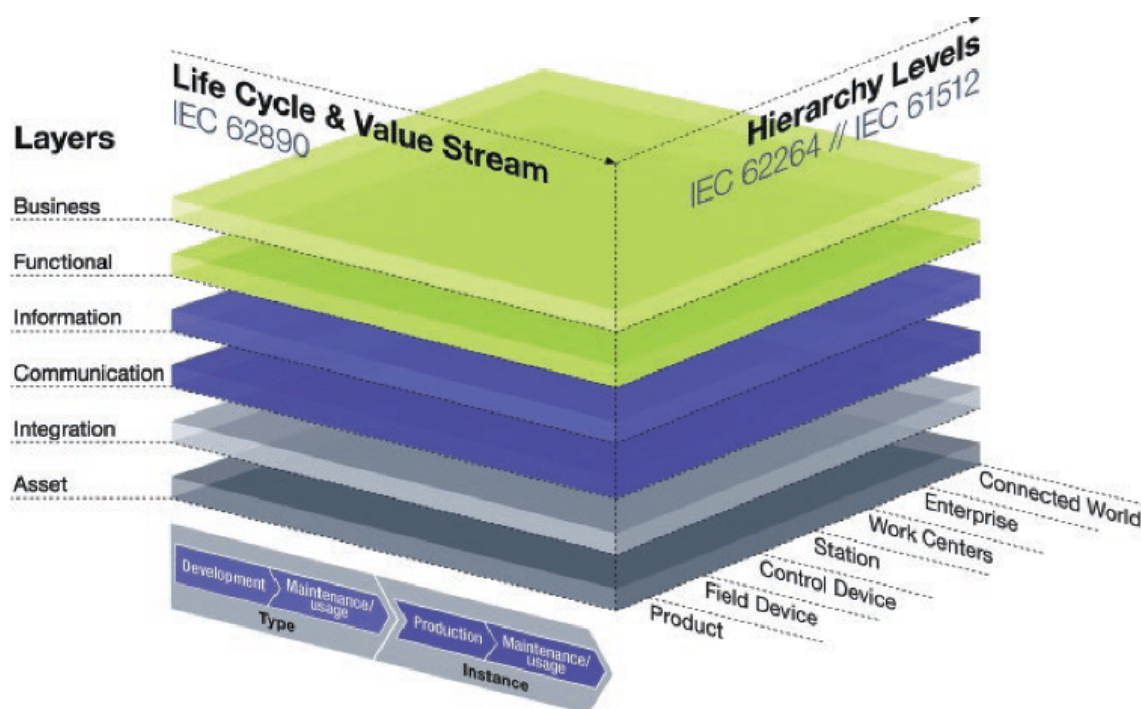
- **Vrstvy architektury:** Vrstva obsahuje dílčí vrstvy, jako jsou obchodní, funkční, informační, komunikační, integrační a majetková.
- **Hodnotový tok životního cyklu:** Vrstva obsahuje vrstvy, jako je použití při vývoji, výrobě a údržbě.
- **Úrovně hierarchie:** Tato vrstva obsahuje podvrstvy jako Produkt, Pole, Zařízení, Řídicí zařízení, Stanice, Pracovní střediska, Podnik a Propojený svět.

[7]

Osa hodnotového toku životního cyklu je rozdělena na Typ a Instanci. Typ představuje počáteční myšlenku vývoje výrobku a dělí se dále na vývoj a údržbu/užívání, zatímco každý vyrobený kus představuje instanci a skládá se z výroby a rovněž z údržby/užívání. Na hodnotový tok ve zcela digitalizované výrobě lze nahlížet jako na spojení s procesy přidávání hodnoty, protože umožňuje propojení nákupu, plánování výroby, logistiky, kvality, zákazníků a dodavatelů. Zjednodušeně řečeno, pokud je výrobek ve stavu vývoje, pak jej označujeme jako "Typ". Jakmile přejde do výroby, stává se z něj "Instance". Kdykoli se výrobek přepracovává nebo se do něj přidává nová funkce, pak se jeho stav opět mění na "Typ". [7]

Osa hierarchie pomáhá v orientaci ve struktuře z hlediska funkce ve výrobním procesu. Každý komponent má svou roli a je podle ní začleněn v horizontální ose v modelu. Tyto role se logicky propojeny. [8]

Vrstvy architektury jsou v modelu řazeny vertikálně. Reprezentují propojení a integraci součástí v rámci průmyslového systému. Vrstvy usnadňují výměnu dat a celkovou komunikaci mezi odlišnými prvky modelu. Souvisí také s digitalizací součástí systému [8]

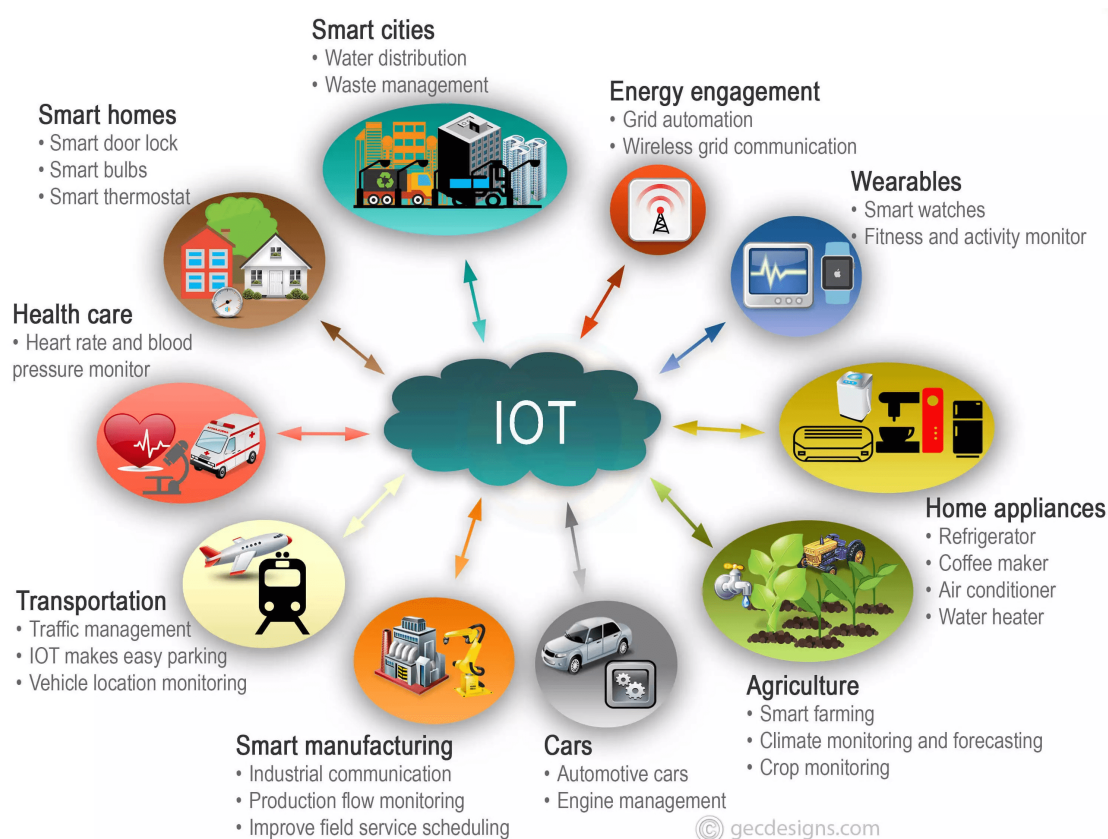


Obr. 2: RAMI 4.0 model [7]

2.3 IoT Internet věcí

Internetem věcí se nazývá síť fyzických zařízení, která jsou vzájemně mezi sebou systematicky zapojena přes internetové připojení. Takto mezi sebou zapojená zařízení využívají snímače a akční členy ke sběru a výměně dat ze svého prostředí a s ostatními zařízeními si navzájem sdílí informace, které mohou zlepšovat jejich funkci. Rozsah různých druhů zařízení, která mohou být k IoT připojena, je velký. Od chytrých telefonů, televizí, tabletů, dopravních prostředků, chytrých hodinek po kamery, dveřní zámky, roboty, chytré osvětlení a zásuvky. Podmínkou je pouze schopnost zařízení připojit se k internetu a nějaký druh snímače nebo aktuátoru.[9]

Zařízení, která jsou schopná se připojit na IoT (Internet věcí), jsou klíčovou součástí chytrých továren průmyslu 4.0. Stroje v tovární hale jsou připojeny k internetu a jsou vybaveny vlastní IP adresou, která umožňuje zařízením se mezi sebou na dálku poznat a komunikovat. Tato mechanizace a konektivita umožňují shromažďovat, analyzovat a vyměňovat velké množství cenných dat, které je možné dále zpracovávat. [10]



Obr. 3: Ukázka oborů, kde se smart senzory IoT používají [9]

2.4 Cloud Computing

Cloud Computing ve výpočetní technice označuje rozsáhlou síť počítačů nebo serverů umístěných na jednom místě (obvykle označovaném jako datové centrum Cloud), ke kterým uživatel přistupuje na dálku. Je masivně škálovatelný a globálně dostupný na vyžádání, přičemž kapitálové náklady jsou mnohem nižší než u tradičních hostingových center pro podnikové aplikace a služby.[11]

Nasazení aplikací je možné podle potřeby a díky tomu, že je cloud datové centrum navrženo od počátku tak, aby bylo vysoce automatizované, vyplatí se díky sníženým provozním nákladům a redundantním systémům, takže neexistuje jediný bod selhání. [11]

Služby cloud computingu mají mnoho podob, včetně úložišť, serverů, databází, softwaru, sítí, zpravodajství a analytiky.[11]

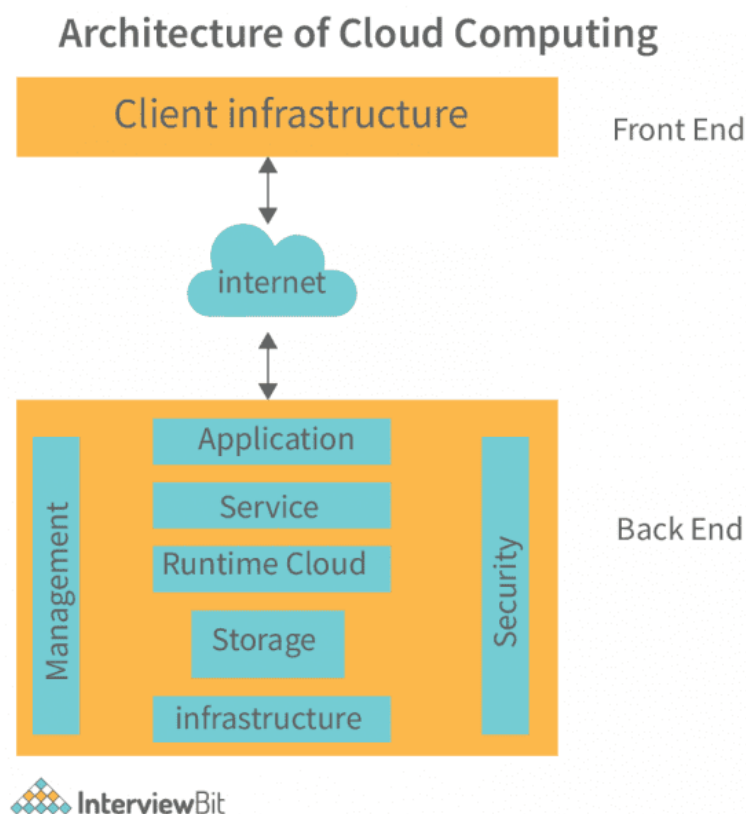
Cloud computing může také snížit počáteční náklady pro malé a střední podniky, které mohou přizpůsobit své potřeby a rozšiřovat je podle toho, jak jejich společnost roste.[10]

Architektura Cloud computing se skládá ze dvou částí, frontend a backend. V tomto návrhu je frontend klientem a ke komunikaci s datovým centrem backendem využívá síťové nebo internetové připojení. Klientská strana architektury cloud computingu je zřejmá ostatním subjektům, zatímco backend zůstává skrytý před vnějším kontaktem a může komunikovat přímo se svým klientem prostřednictvím předem definovaného protokolu.[11]

Architektura backendu se skládá z:

- **Aplikace** - Tato vrstva se zabývá jejich požadavky a žádostmi přicházejícími od frontendu. Součástí je uživatelské rozhraní.
- **Server** - Umožňuje provádět každou úlohu běžící v cloudu. Například správa a programování aplikací, úložiště a webové služby.
- **Runtime Cloud** - funguje jako operační systém cloudu a umožňuje kdykoliv přistupovat k bezpočtu síťových serverů.
- **Úložiště** - Příkladem mohou být disky SSD (solid-state drive), pevné disky HDD (hard disk drive), flash disky a v malé části polovodičová úložiště.
- **Management** - software, který přiděluje každému existujícímu úkolu různé zdroje
- **Bezpečnost** - pravidelné zálohování, software firewall, vyhledávání chyb v bezpečnostní infrastruktuře.

[11]



Obr. 4: Komponenty architektury Cloud Computing [11]

2.5 Edge Compusting

Edge computing označuje postup zpracování dat blíže ke zdroji jejich vzniku, místo aby se při výpočtech spoléhalo čistě na centralizovaný cloudový server. Při edge computingu se výpočetní úlohy provádějí na okraji sítě, a to na datech pro cloudové služby a na datech pro služby internetu věcí (IoT). [12]

Cílem tohoto přístupu je snížit latenci, zlepšit dobu odezvy, ušetřit náklady na šířku pásma, zvýšit soukromí a bezpečnost dat a řešit omezení, jako je výdrž baterie, a umožnit tak účinné zpracování a analýzu dat.[12]

Důraz je kladen právě na real-time aplikace, kdy je potřeba rychlé zpracování dat v co nejkratších časových intervalech tak, aby odezva IoT zařízení byla co nejrychlejší. Dále je důležitá bezpečnost toku informací a snížení rizika narušení dat při přenosu. [10, 12]

2.6 Umělá inteligence

Nedílnou součástí Průmyslu 4.0 je, kromě získávání velkého množství dat, také jejich efektivní zpracování a využití. Algoritmy umělé inteligence se využívají k hledání

vzorů v datech a k trénování. Na základě zjištěných dat jsou stroje s prvky umělé inteligence schopny vyhodnocovat, navrhovat a činit různé závěry a rozhodnutí, které lze následně implementovat. Výhodou umělé inteligence je její rychlost práce s daty, nacházení korelace a skrytých vzorů v datech.[13]

Obtíže umělé inteligence spočívají v tom, že se zpětně těžko získává informace, jakým způsobem se dospělo ke konkrétnímu výstupu a jak efektivně přeučit již vytvořený model na novou úlohu.

Strojové učení může vytvářet poznatky poskytující přehled, předvídatelnost, automatizaci operací a rozhodování. Průmyslové stroje jsou například během výrobního procesu náchylné k poruchám. Využití dat shromážděných z těchto dat může podnikům pomoci provádět prediktivní údržbu, což vede k větší provozuschopnosti a vyšší efektivitě.[10]

Častým využitím umělé inteligence je mimo jiné i v robotice, kde učící algoritmy slouží například k trénování pohybu k určitému cíli. V tomto případě se zpravidla jedná o takzvaný Reinforcement learning, neboli zpětnovazební učení, což je technika strojového učení, která spočívá v postupném zlepšování výsledků. V každé nové iteraci pohybu je chování vyhodnoceno. Pokud se zlepšuje cesta k cíli, je vazba posílena. Vazby, které vedou k neodpovídajícímu chování, nebo chybné akci, vstupují do budoucí iterace s menší hodnotou. Problematikou je zde úloha zpětné kinematiky [14], kdy jde o to získat správné nastavení kloubů robota, u nohy nebo například robotického ramene, tak aby koncový bod byl ve zvolené pozici. Nejedná se o triviální úlohu a má více možností řešení. Dalšími úlohami je třeba udržování stability, chůze v terénu, orientace v prostředí nebo strojové vidění [15, 16]

Příležitosti pro využití umělé inteligence ve výrobním průmyslu mohou být:

- Modelování a výkonnostní analýza
- Rozhodování a řízení
- Monitorování procesů, diagnostika, prognostika
- Prediktivní údržba
- Řízení výrobních procesů

[1]



Obr. 5: Ukázka z trénování chůze v NVIDIA Isaac Sim [17]

2.7 Komunikační technologie

Aby všechny komponenty v Průmyslu 4.0 mohly navzájem spolu interagovat, je klíčová existence odpovídající komunikační technologie. Požadavky na přenos dat, jejich objem a rychlost se neustále navyšují.

Z hlediska bezdrátové komunikace jsou zásadním pojmem takzvané 5G sítě. Jde o pátou generaci mobilních sítí, která umožňuje rozsáhlé možnosti v použití zařízení s IoT technologií. Oproti generaci 4G LTE poskytuje desetkrát až stokrát větší kapacitu. Má schopnost přenosu rychlostí 10Gb/s a vyšší, což například umožňuje aplikace virtuální reality s ultra vysokým rozlišením. Zpožděním přenosu je u 5G pod 1 milisekundou, podporuje tedy využití realtime aplikací. [1]

Síť 5G se softwarově definovanou architekturou umožňuje dynamické programování v samostatných vrstvách pro odlišné aplikace. Síťová architektura je tedy modifikovatelná, díky tomu lze rychle zavádět škálovatelné služby, které mají nižší náklady. [1]

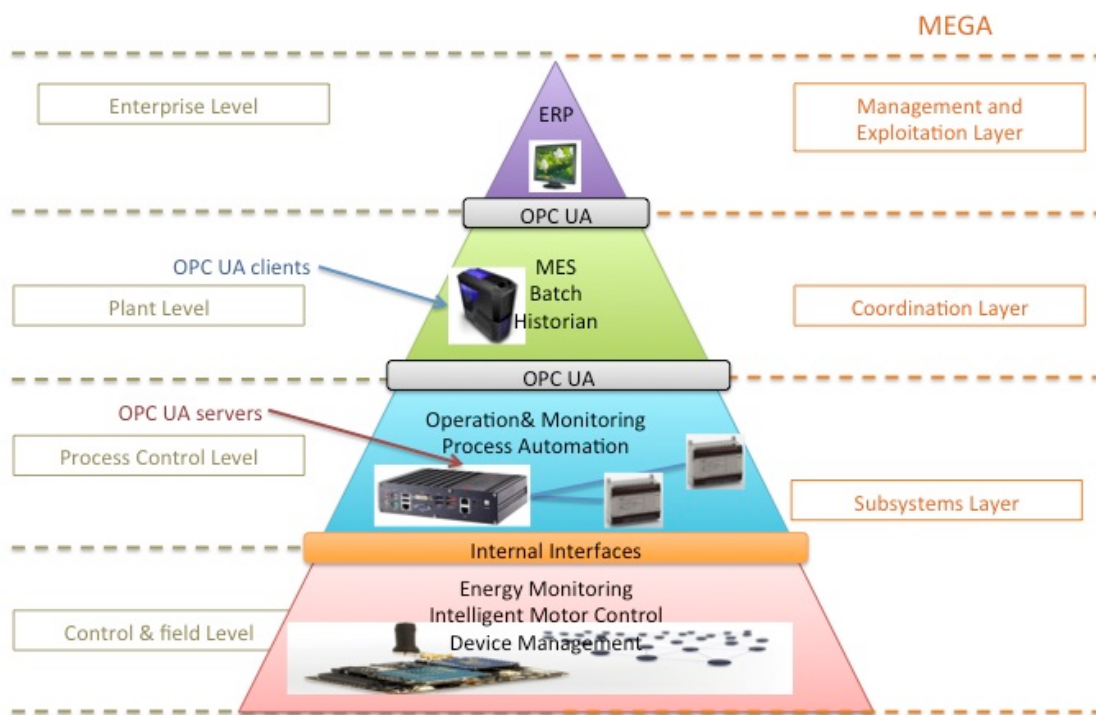
Pro komunikaci se používá mnoho komunikačních standardů. Příkladem některých standardů v IoT komunikaci jsou MQTT (Message Queue Telemetry Transport), AMQP (Advanced Message Queuing Protocol), XMPP (eXtensible Messaging and Presence Protocol) [2] Nejrozšířenější model komunikace pro průmyslové využití je OPC UA, který je dále rozvinut v následující podsekcí.

2.7.1 Komunikační standard OPC UA

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) je standard komunikace pro průmyslové automatizační systémy. Jedná se o otevřený a platformově nezávislý protokol, který umožňuje komunikaci a výměnu dat mezi různými zařízeními v průmyslovém prostředí. Je výsledkem snahy vytvořit univerzální komunikační platformu, která umožňuje sjednotit sdílení dat navzdory odlišnostem u různých výrobců v průmyslu. [18]

Základním principem komunikace je vztah klient - server. V tomto modelu existuje jeden server, který poskytuje zabezpečené prostředí pro výměnu dat. Klientů bývá zpravidla více a jejich činnost spočívá v zasílání požadavků na sever. [19]

Komunikační standard je koncipován tak aby umožňoval výměnu dat napříč celou pyramidou řízení od podniku viz obrázek 6 [19]



Obr. 6: OPCU UA v automatizační pyramidě [19]

OPC UA svým rozsahem přesahuje průmyslový Ethernet a zahrnuje zařízení následující zařízení:

- Provozní zařízení, která pracují s reálnými daty, jako jsou senzory, akční členy a motory
- SCADA (systémy pro dohledové řízení a sběr dat)
- MES (systémy pro řízení výroby)
- ERP (podnikové plánování zdrojů)

- Cloudové služby a webová rozhraní

[18]

OPC UA nabízí, kromě sady základních služeb, také doplnění volitelnými službami (Přístup k datům, Přístup k historickým datům, Příkazy, Alarmy a Události, Výměna dat a Zabezpečení). [19]

3 DIGITÁLNÍ DVOJČATA

Tato kapitola se zabývá problematikou digitálních dvojčat, zkoumá jejich definici a druhy. Krátce se zabývá jejich historií. V závěru kapitoly jsou přidány příklady jejich využití napříč spektrem různých oborů. V rámci toho jsou nastíněny výhody jejich použití a možný vývoj v budoucnosti, kde budou digitální dvojčata hrát významnou roli.

3.1 Definice Digitálního dvojčete

Definice co je to digitální dvojče není zcela jednoznačná a mnoho autorů se v ní liší. Od počátku je obecně přijímáno, že každé digitální dvojče se skládá ze 3 částí, z fyzického produktu, virtuálního produktu a jejich spojení neboli komunikace, která umožňuje vzájemnou interakci.[20]

Zakladatel pojmu Dr. Michael Grieves popsal definici takto: „*Digitální dvojče je soubor virtuálních informačních konstrukcí, které plně popisují potenciální nebo skutečný fyzický vyráběný produkt od mikroatomové úrovně až po makrogeometrickou úroveň. V optimálním případě lze z digitálního dvojčete získat veškeré informace, které lze získat při kontrole fyzického vyráběného výrobku.*“[21]

V roce 2012 NASA přišla s konkrétnější definicí, kde uvádí, že *digitální dvojče je multifyzikální, víceškálová, pravděpodobnostní, ultravěrná simulace, která včas odráží stav odpovídajícího dvojčete na základě historických dat, dat ze senzorů v reálném čase a pomocí fyzického modelu.* [20]

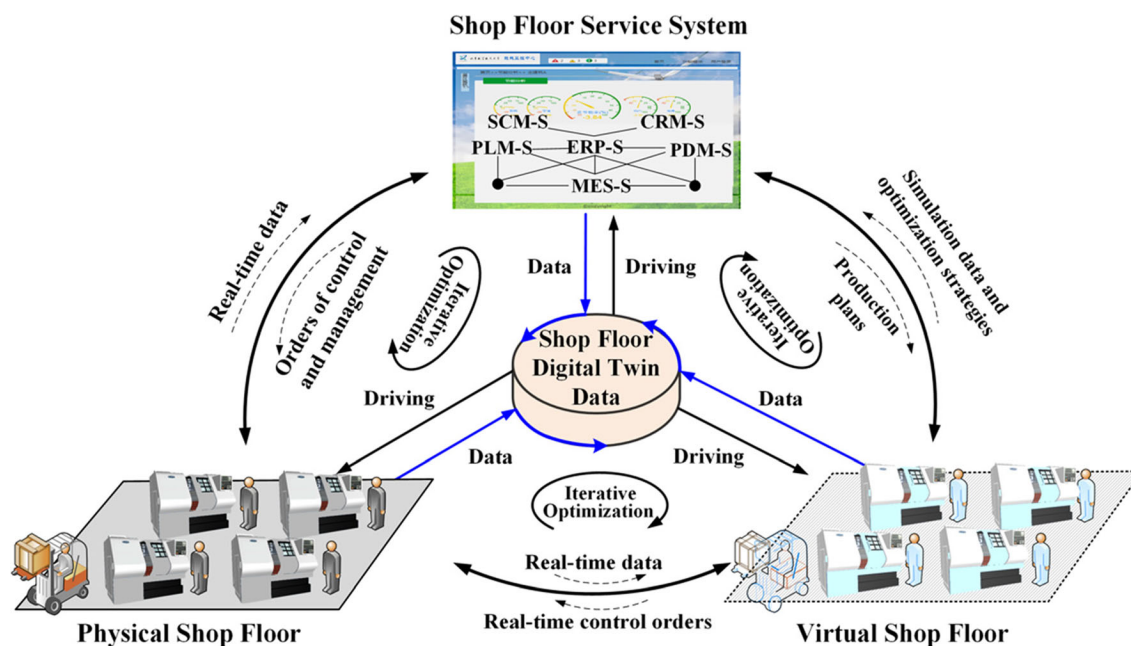
Kromě modelu se třemi částmi je pro obecný popis digitálního dvojčete v poslední době využíván i model s pěti částmi, který navrhnul čínský výzkumník Fei Tao viz příklad na obr. 7, kde se jedná o obecný model, v tomto případě pro návrh prodejní haly [22]

Tento model se skládá z původní fyzické, virtuální a komunikační (spojovací) části a je dále doplněn o část servisní a část reprezentující data.[20]

Servisní část se stará o provoz fyzické a virtuální části. Část s daty je zodpovědná za tvorbu nových znalostí pomocí interakce s ostatními prvky modelu. Leží uprostřed modelu. Virtuální část je zodpovědná za simulaci, tvorbu rozhodnutí, a ovládání fyzické části svými pokyny. [20]

3.2 Historie digitálních dvojčat

Ačkoliv jednotlivé součásti a prvky, ze kterých se digitální dvojče skládá, mají svou historii delší, samotná historie pojmu a užití digitálního dvojčete je poměrně krátká. Je to dáno technickými omezeními v počátečních fázích vývoje.



Obr. 7: Konceptní příklad modelu digitálního dvojčete prodejní haly [22]

Prvním, kdo zahájil diskuzi a definici pojmu digitální dvojče, byl Dr. Michael Grieves. Jeho přednáška z roku 2003 bývá mnohdy považována za oficiální počátek. Pojednává o product lifecycle management, neboli o řízení životního cyklu produktu.[20]

Ve skutečnosti však vědecký článek na toto téma byl napsán až o 8 let později, v roce 2011. Jednalo se o práci *"Reengineering předpovědi životnosti letadla pomocí digitálního dvojčete"* [23], která posléze zaznamenala úspěch v NASA, kde byly výsledky použity v praxi při vývoji designu v leteckém průmyslu. Vznikla zde i nová konkrétnější definice.[20]

Zajímavostí je, že podle oficiálních zdrojů[21], NASA s myšlenkami digitálního dvojčete pracovala již mnohem dříve například v programu Apollo 13 v 60. letech minulého století, kde bylo testováno 15 simulací například k testování podmínek na palubě. [24]

Po roce 2014 se tyto myšlenky začali více rozvíjet jako možnost jak obecně podpořit vývoj ve více odvětvích průmyslu i mimo oblast letectví.[20]

Přibližně od roku 2017 se vývoj digitálních dvojčat znatelně zrychlil hlavně díky rozvoji technologií jako jsou cloud computing, big data, IoT, sensorové technologie a mnoho dalších, které se k digitálním dvojčatům váží.[20]

3.3 Druhy digitálních dvojčat

Digitální dvojčata mají mnoho druhů a variant, pro porozumění o jaké dvojče jde je užitečné znát následující názvosloví:

3.3.1 Digitální model

Jedná se o virtuální reprezentaci fyzického objektu, procesu nebo celého systému. Má mnoho forem. Zpravidla se skládá z CAD (computer-aided design) 3D modelů a matematických algoritmů, které spolu tvoří simulaci. [25]

Nedochází zde k automatizaci a neprobíhá žádná výměna dat mezi fyzickým systémem a digitálním modelem, jsou tedy na sobě nezávislé. Vstupy do modelu jsou získávány manuálně. [26]

3.3.2 Digitální stín

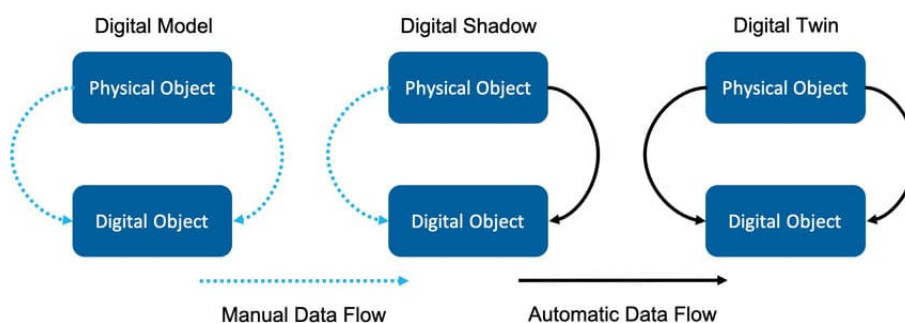
Oproti digitálnímu modelu jsou zde data pro digitální stín získávána z fyzického objektu. Změny v digitálním stínu ale zpátky neovlivňují to, co se děje v reálném objektu. [26]

Data jsou obdržena pomocí senzorů a přístrojů s technologií pro internet věcí. Data putují v ideálním případě v reálném čase s minimální časovou prodlevou. Digitální stín umožňuje monitorovat fyzický proces a díky toku dat jsou nepřesnosti použitých algoritmů korigovány. [25]

3.3.3 Digitální dvojče

Tok dat probíhá oběma směry, fyzický svět ovlivňuje ten digitální a naopak. Oba objekty jsou plně integrovány.

Příkladem interakce může být například, když digitální dvojče analýzou zjistí, že dochází u modelu k většímu opotřebení, než bylo původně plánováno. Může své fyzické zařízení korigovat tak, aby svůj úkol plnilo s jiným nastavením a díky tomu tak prodloužilo svoji vlastní životnost. [25]



Obr. 8: Digitální model, stín a dvojče [27]

3.3.4 Rozdělení dle objektu zájmu

Další možností dělení je podle toho, co digitální dvojče simuluje, to lze rozdělit na následujících 5 typů (pro jednoznačnost jsou názvy uvedeny anglicky):

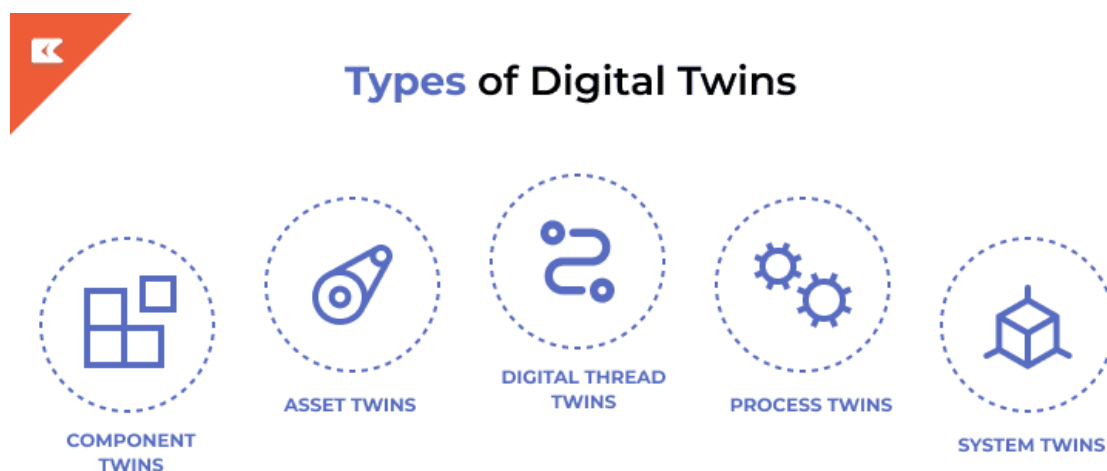
Component Twin: simulace konkrétní součástky, která patří do většího celku. Příkladem může být převodovka nebo šroub. Chování součástky je sledováno a replikováno, objektem zájmu je například její výkon a výdrž. [28]

Asset Twin: někdy označováno jako dvojče produktu. Soustřeďuje se na větší celek složený z komponentů a interakce, které mají mezi sebou. [28]

System Twin: tvořeno několika produkty (objekty). Velikost dvojčete může být i na úrovni továrny nebo její části. [29]

Process Twin: Nejvyšší forma digitálního dvojčete, v průmyslu zpracovává celý výrobní proces a veškeré položky, které se na procesu podílejí. [29]

Digital Thread Twin: neboli digitální vlákno se zaměřuje na produkt z hlediska jeho životního cyklu. Záměrem je sběr dat a stálé sledování produktu. V případě nehody lze poté vysledovat příčiny a opravit přesně to, co je třeba, nebo lze také nehodám předcházet. Získaná data lze pak využít pro optimalizaci nových produktů. [30]



Obr. 9: 5 Druhů digitálního dvojčete [29]

3.4 Aplikace digitálních dvojčat

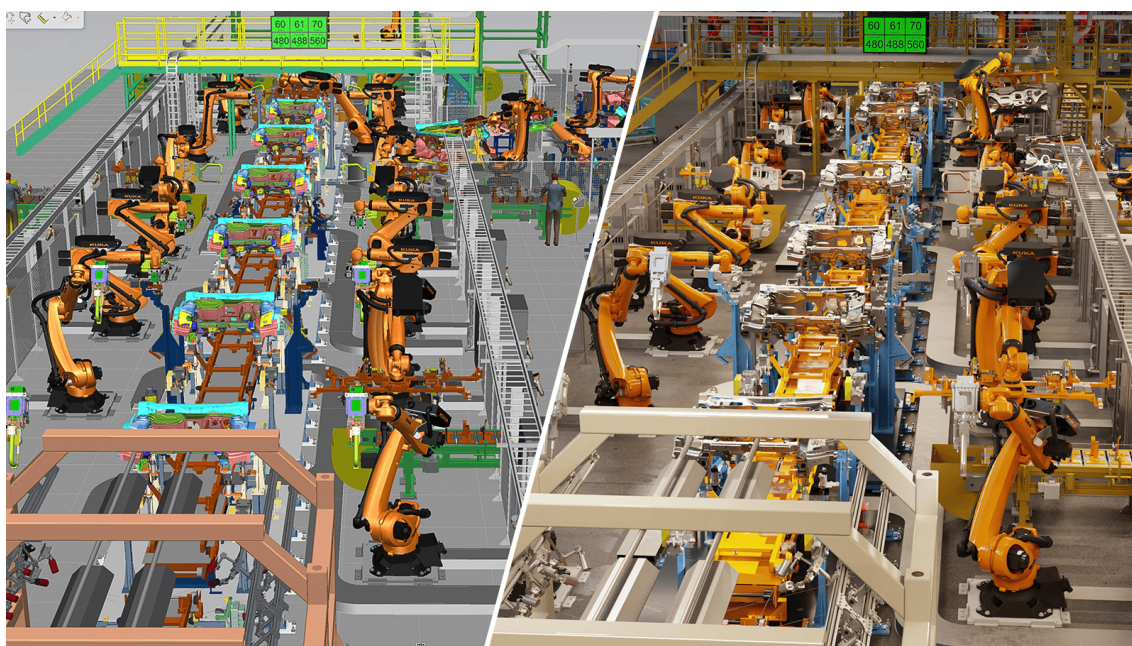
3.4.1 Digitální továrna

Obecně nejrozšířenější obor, ve kterém jsou digitální dvojčata aplikována, je výrobní průmysl. Důvodem je, že u výroby produktů je od samého počátku kladen

důraz na ekonomiku výroby, kvalitu produkce, minimalizaci nákladů a maximalizaci zisku. Průmyslové prostředí je velice kompetitivní a klade neustále důraz na inovace. Podniky, které zaostávají ve vývoji a které se nedokáží přizpůsobit měnícím se podmínkám na trhu, upadají a jsou nahrazeny podniky s efektivnějšími technologiemi.

Využití digitálních dvojčat nachází uplatnění napříč celou strukturou výrobního řetězce od řízení podniku, komunikaci se zákazníkem, logistikou po všechny detaily produkce, které je potřeba správně zaznamenat a neustále vyhodnocovat. Digitální dvojče tak může tento proces zpřehlednit, zoptimalizovat a v dlouhodobém měřítku ušetřit množství prostředků.

V rámci udržení konkurenceschopnosti firmy na produkci digitálních dvojčat mnohdy spolupracují. Příkladem je spojení Siemens Xcelerator a NVIDIA Omniverse [31], kde jsou kombinovány mechanické, elektrotechnické, softwarové a IoT řešení s fotorealistickým zobrazením a možnostmi AI.



Obr. 10: Propojený Siemens Process Simulate a NVIDIA Omniverse [31]

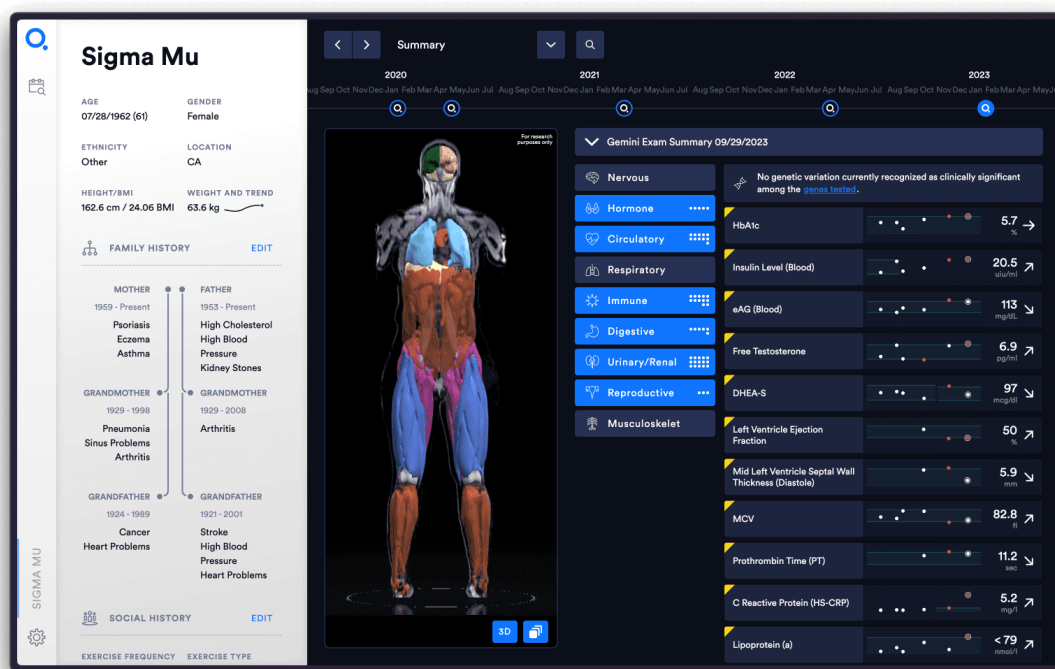
3.4.2 Digitální dvojče člověka

Člověk jako takový je velice složitým a vytvoření komplexní simulace, která by postihla všechny aspekty chování, fyzického a duševního stavu, je nemožné.

S rozvojem digitálních dvojčat a s nimi propojených technologií roste poptávka po jejich využití i v medicíně. Každý člověk je jedinečný a mít k dispozici komplexní informace a model s přehlednou simulací, může být v budoucnu běžná záležitost.[32]

Co se týče toho, jak teorie o digitálních dvojčatech nahlíží na správu životního cyklu výrobku, lze tyto principy aplikovat i na člověka. Každá lidská bytost má svůj vývoj, v průběhu od narození, dětství až po stáří a smrt se člověk vyvíjí a mění všechny své vlastnosti, rozměry a fyzikou stavbu těla. Tak, jak dítě roste, je třeba, aby jeho digitální dvojče rostlo s ním. Každá událost, nemoc, fyzická námaha a cvičení má vliv na zdraví, schopnosti a rezistenci člověka. To vše je možné v průběhu lidské života monitorovat a predikovat. Díky tomu je tak možné předvídat zdravotní komplikace, optimalizovat prevenci a snadnější individualizaci potřebné léčby.[32]

K tomu, aby byl medicínský model věrný, je zapotřebí zapojit co nejvíce možných technologií ke sledování biomarkerů neboli dílčích parametrů popisujících stav a rozměry těla. Od typických informací jako věk, váha, pohlaví po bezmála všechny informace ze zdravotnických záznamů a databází, jako například údaje o vyšetření, léčbě a očkování. Se souhlasem pacienta jsou zahrnuty údaje jako obrazy z elektrokardiogramu, krevní tlak, puls a hladina glukózy v krvi. K aktualizaci dat, která se v průběhu dne nejvíce mění, mohou sloužit nositelná sledovací zařízení, jako jsou například chytré hodinky. Součástí mohou být i zdánlivě nemedicínská data, jako emoční změny nebo nákupní a stravovací zvyklosti. [32]



Obr. 11: Model Gemini od QBio společnosti, 3D rekonstrukce těla s biomarkery [33]

Objem dat a jejich citlivost klade také mnoho etických otázek ohledně soukromí každého člověka a potenciální možnosti zneužití dat. Přístup k záznamu by měla mít pouze prověřená osoba, která s daty jedince pracuje. Pro ostatní pracov-

níky je třeba všechna data anonymizovat. K zajištění konzistence záznamu by mohla sloužit blockchainová technologie, kde každá změna je na předchozí pevně navázána a je tak snadno dohledatelná.[32]

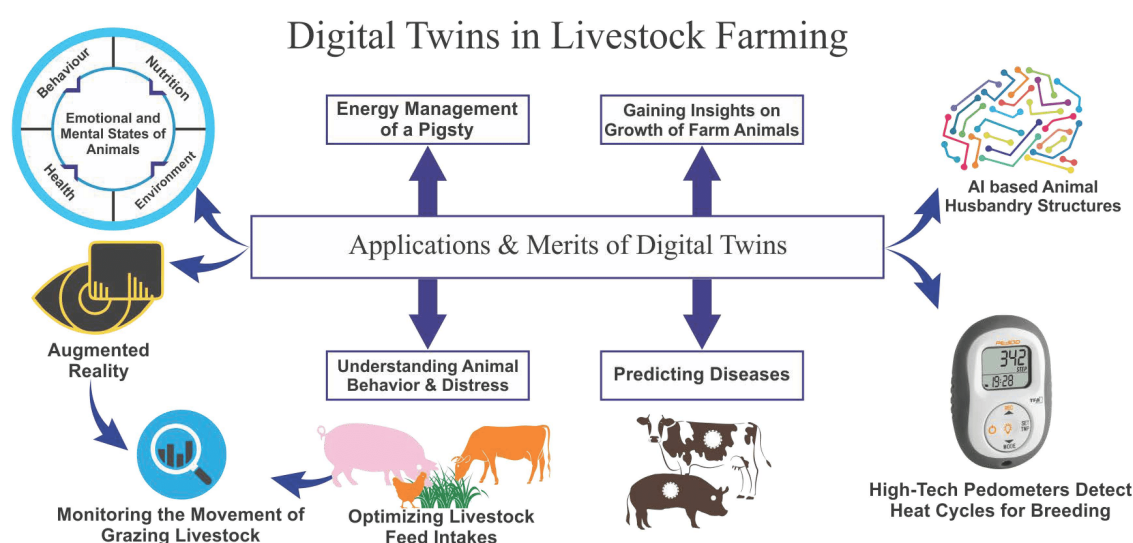
Jedna z prvních společností, která je schopna vytvoření digitálního dvojčete člověka, je Qbio. Základem jejich tvorby, je kromě integrace části lékařských záznamů, také vyšetření magnetickou rezonancí (MRi). Ta zahrnuje více než 350 anatomických měření s deklarovanou přesností přes 90%, včetně podrobných dat objemů orgánů a svalů, rozložení tuku a železa.[33]

Příkladem jak může vypadat uživatelské prostředí, kde lze digitální dvojče zobrazit a podrobně zkoumat, je obrázek 11

3.4.3 Digitální dvojčata pro zemědělství

Kromě člověka lze podobné principy tvorby digitálního dvojčete aplikovat i na zvířatech. Ekonomicky výhodný potenciál lze najít v simulaci hospodářských zvířat. Vyspělé intenzivní hospodaření farem je svou snahou pro optimalizaci výroby srovnatelné se strojírenským průmyslem a nabízí proto mnoho možností pro vylepšování. Simulace mohou výrobu usnadnit a dále posunout.[34]

Každé hospodářská zvíře má své individuální parametry, které lze monitorovat a na základě historických dat, znalostí a predikce lze v rámci možností přizpůsobit podmínky pro maximalizaci zisku z živočišné výroby. Na míru je možné přizpůsobit velikost a složení krmné směsi, pomocí senzorů lze sledovat aktuální stav zvířat v reálném čase. Dále lze zohledňovat změny počasí a na základě algoritmů s prvky umělé inteligence získat další informace pro kvalifikovaná rozhodnutí.[34]



Obr. 12: Koncepty digitálního dvojčete chovu hospodářských zvířat [34]

Zemědělská produkce je především také o pěstování rostlin. Digitální dvojče plodin může pomoci k získání lepšího přehledu s obhospodařováním pole. Druhy plodin mají své specifické vlastnosti. Samotné pole se liší ve svém složení prvků půdy, ve tvaru strmosti terénu a orientaci na světové strany. Významný prostor pro zlepšení lze najít v distribuci vody a živin v podobě hnojiv. Tématům této problematiky se věnuje takzvané precizní zemědělství. Precizní zemědělství zkoumá stav pole pomocí vícespektrálních kamer, které jsou umístěny na dronech. Ty jsou schopny provádět pravidelné inspekce v časových intervalech a vytvořit isometrické mapy za pomoci principů fotogrametrie. Zavlažování je potom praktikováno tak, aby se voda dostala na místa, kde je její nedostatek. [35]

Správný model digitálního dvojčete pro farmu může být dalším logickým krokem ve vývoji precizního zemědělství.

3.4.4 Smart Cities

Populárním způsobem, jak rozvíjet města ve 21. století, je takzvaný koncept Smart Cities, neboli koncept chytrých měst. Jedná se o snahu optimalizovat rozvoj infrastruktury měst pomocí nových metod založených na principu digitalizace a monitorování různých funkcí města. Účelem je optimalizace dalšího rozvoje měst s ohledem na ekologii, ekonomii, bezpečnost, dopravu, funkce veřejných budov apod.[36]

Dalším zásadním předmětem, kterým se koncepty chytrých měst zabývají, je distribuce energií ve městě. Výroba elektrické energie, a především její spotřeba, dále pitná voda, kanalizace, odvod dešťové vody, plynová soustava. Podobně jako s energií lze nakládat i s transportem osob, veřejnou a osobní dopravou. V ideálním případě lze s předstihem zmírnit negativní důsledky způsobené dopravními zácpami či jim dokonce předcházet. V plánování lze digitálními dvojčaty takto zjednodušit proces rozhodování při řízení města a nacházet souvislosti, které nejsou na první pohled zřejmé.[36]

Součástí digitálního dvojčete města také může být informační systém pro komunikaci s občany například pro zasílání výstrahy při výjimečných událostech.[36]

Cílem je vytvoření ideálního místa pro život a minimalizaci negativních vlivů spojených s urbanizací a s ohledem na člověka i na životní prostředí. [36]

Pro vývoj Smart Cities je tedy ideální použití digitálních dvojčat. Jeden z největších těchto projektů vzniká v Číně, kde je vyvíjen model jejího největšího města Šanghaje. Model je vytvořen v prostředí Unreal Engine a pokrývá oblast téměř čtyř tisíc kilometrů čtverečních. Digitální dvojče umožňuje operátorovi monitorovat dopravu ve městě, plánovat stavební úkony nebo například simulovat přírodní katastrofy, jako jsou například záplavy. Hlavní výhodou simulačního prostředí dvojčete je v tom, že je na něm možno vyhodnocovat důsledky změn v plánování města dříve,

než reálná změna nastane. Podobné projekty vznikají pro mnoho velkých měst, jako jsou Helsinky, Singapur, New York nebo Wellington na Novém Zelandě [37]



Obr. 13: Ukázka z modelu digitálního dvojčete města [38]

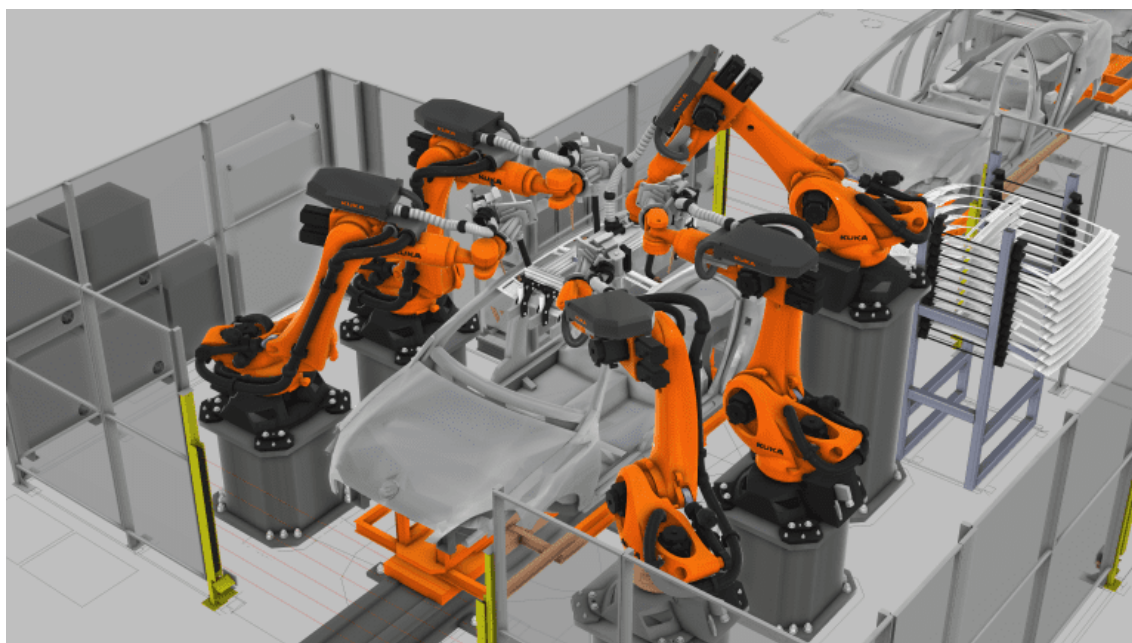
4 VIZUALIZAČNÍ PROSTŘEDÍ PRO TVORBU ROBOTICKÝCH APLIKACÍ

Existuje velké množství programů, které umožňují vytvoření digitálního dvojčete. Různé druhy simulačních prostředí jsou rozebrány v následujících sekcích

4.1 Visual Components

Visual Components funguje od roku 1999 a je v současné době jeden z lídrů na trhu se simulačními softwary. Jeho zaměření je primárně na robotiku, CNC systémy a aplikace obrábění, sváření, montáž.[39]

Knihovna Visual Components disponuje velkým množstvím modelů napříč různými firmami z výrobního průmyslu. Nechybí AGV (Automatizovaná řízená vozidla) a AGC (Automatizované řízené vozíky), ASRS (Automatizované systémy skladování a vyzvedávání), řídicí jednotky, dopravníky, podavače, lineární pohony či obsluha strojů. Výsledkem je, že díky tomu lze vytvořit simulaci celé výrobní robotické linky, a to relativně rychle, někdy i v jednotkách hodin. [39]

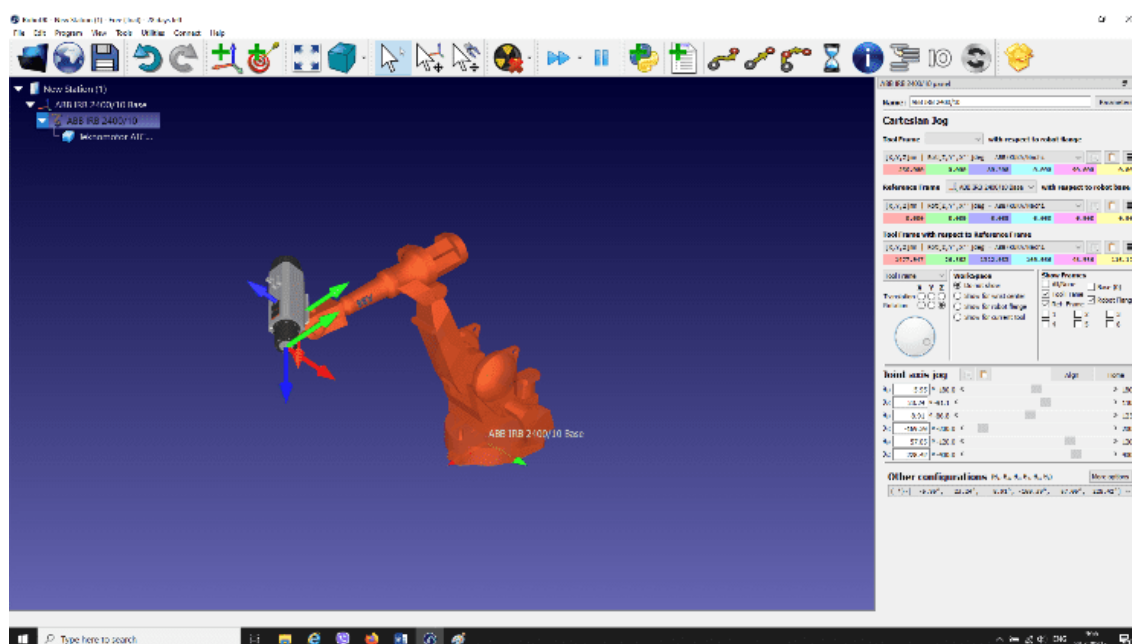


Obr. 14: Robotická linka pro montáž aut ve Visual Components [39]

4.2 RoboDK

RoboDK je simulační software pro robotiku, pochází z CoRo laboratoře na ETS University v kanadském Montreálu. Je to univerzální offline programovací nástroj, který usnadňuje programování velké škály typů robotů, také umožňuje tvorbu programů, které jsou specifické pro danou značku.[40]

RoboDK se specializuje na aplikace robotických ramen průmyslu, poskytuje knihovnu s modely od desítek výrobců v tomto oboru. Software není určen pro simulaci mobilní robotiky. RoboDK poskytuje verzi pro akademické účely a placenou verzi pro komerční užití. K dispozici je i časově omezená zkušební verze s omezeným funkcemi. [40]



Obr. 15: Hlavní rozhraní RoboDK [40]

4.3 Nvidia Isaac Sim

Nvidia je technologická firma, která se primárně zabývá tvorbou grafických karet, datovou vědou a umělou inteligencí. Jejich čipy pro umělou inteligenci v současné době ovládají přibližně 95 procent trhu pro strojové učení. [41]

Pro tvorbu digitálních dvojčat má vlastní software s názvem NVIDIA Isaac Sim. Jedná se rozšiřitelnou simulační platformu pro robotiku, umožňující navrhování, testování a trénování robotů s umělou inteligencí. Isaac Sim pracuje s technologií Omniverse, která poskytuje fotorealistickou a fyzikálně přesnou virtuální projekci pro vytváření vysoce věrných simulací. [17]

Isaac Sim využívá plně funkční skriptování v jazyce Python. Modely robotů v systému mohou být ve formátu Universal Scene Description (USD). Dále Isaac Sim Umožňuje snadné připojení mozku robota k virtuálnímu světu prostřednictvím sady Isaac SDK (Software Developer Kit) a rozhraní ROS/ROS2 (Robot Operating System). [42]



Obr. 16: Ukázka z NVIDIA Isaac Sim Omniverse [42]

4.4 PolyScope od Universal Robots

Polyscope je software společnosti Universal Robots, který byl vyvinut pro kolaborační roboty. Slouží k jejich programování na požadované úkoly. Existují dvě verze PolyScope 5 se všemi možnostmi a zjednodušený PolyScope X určený čistě pro operátory. [43]

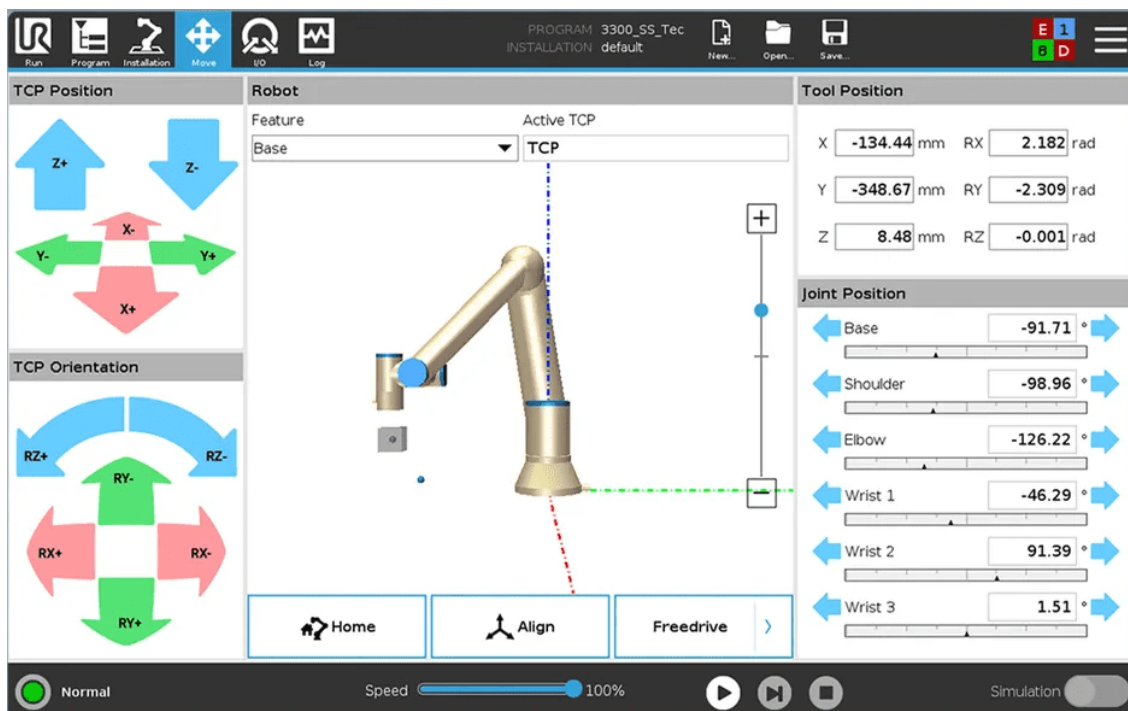
Výhoda PolyScope je v přednastaveném uživatelském rozhraní, kde může programátor nebo operátor přehledně sledovat pozice os robota a kde také má možnost do nastavení zasahovat podle potřeby. [43]

Programování pohybu robota zde může být prováděno pomocí několika možností:

- Skripty v programovacím jazyce URScript
- Programování uzlů se stromovou hierarchií
- Režim Freedrive, který umožňuje interakci s robotem pomocí ručního pohybu ramene pro rychlé polohování
- Režim Force, kde jsou senzory v učícím režimu zaznamenány točivé momenty a ty jsou pak užity v provozním režimu

[43]

Podstatným omezením je, že PolyScope není vhodný pro simulace jiných zařízení než od Universal Robots. Dále bohužel neposkytuje možnost simulace celé robotické linky se všemi potřebnými komponenty.

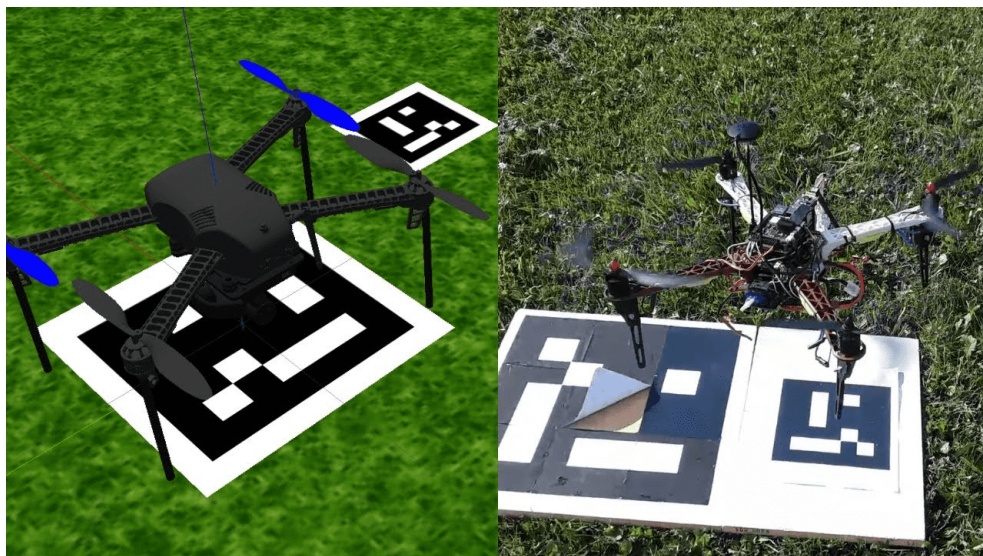


Obr. 17: Uživatelské rozhraní UR PolyScope [43]

4.5 Gazebo

Gazebo je open source simulační platforma, která se zaměřuje na tvoření simulací pro robotické aplikace. Své uplatnění nachází mimo jiné především v mobilní robotice u kolových robotů, robotů s různým počtem nohou ale i v simulaci dronů pro létání. Zde figuruje systém Ardupilot, který umožňuje ovládání množství bezpilotních zařízení jako multikoptéry, tradiční vrtulníky, letadla s pevnými křídly, lodě i ponorky. [44, 45]

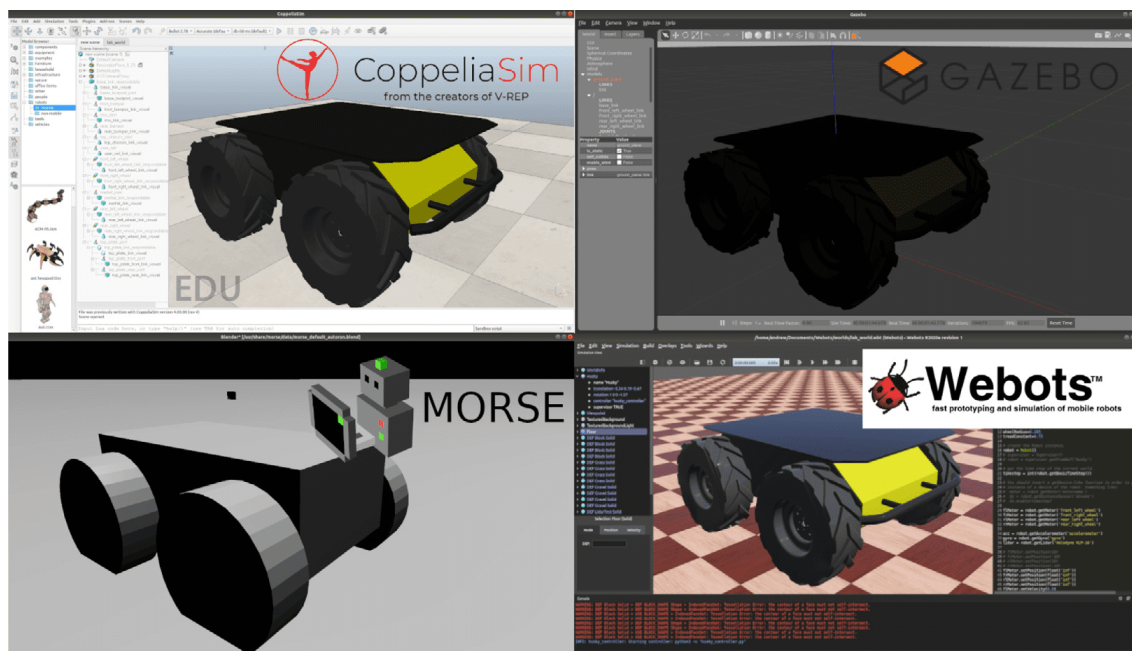
Díky tomu, že je zdarma, její software je volně přístupný a má širokou komunitu. Gazebo je častou volbou pro malé firmy, start-upy a akademické prostředí. Často se používá v kombinaci s ROS (Robot Operating System). [44] Programovacím jazykem je zde C++, případně Python.



Obr. 18: Simulace kvadrokoptéry v Gazebo Sim [46]

4.5.1 Alternativy ke Gazebo

Bezplatnou alternativou ke Gazebo jsou platformy Webots, MORSE nebo Coppelia Sim (dříve znám jako V-REP). Ve srovnávacím testu s důrazem na fyziku a přesnost pohybu modelu v článku[47] vyšla simulace v programu Coppelia jako mírně lepší než v Gazebo a ostatních srovnávaných platformách. Výběr simulačního prostředí podle zvolených požadavků usnadňuje článek [48]



Obr. 19: Uživatelská rozhraní a ukázka modelu HUSKY v CoppeliaSim 4.0.0, Gazebo 9.0.0, MORSE 1.4 a Webots R2020b [47]

4.6 Unreal Engine

Unreal Engine je jedním z nejčastěji používaných herních engineů pro vývoj her. První jeho verze vznikla v roce 1998 a v současnosti je vlastněn společností Epic Games.[49]

Software je open-source a multiplatformní. Také je široce modulovatelný a existuje mnoho vývojových prostředí, které z něj vycházejí. Programovacím jazykem pro tvorbu skriptů je C++, podporuje programování pomocí uzlů (nodes).

Jedním z hlavních výhod Unreal Engineu jsou jeho možnosti kvalitně renderovat fotorealistické modely. Bývá často využíván i pro účely filmového průmyslu.[49]

V oblasti digitálních dvojčat nachází Unreal Engine uplatnění v netradičních projektech jako jsou simulace staveb, měst, dopravy apod. V současnosti je leadelem v této problematice společnost 51WORLD. Příkladem je její síť stanic metra v městě Changsha (provincie Hunan v Číně), kde se každý den transportuje 280 tisíc obyvatel. Dalšími příklady jsou digitální dvojčata vodních nádrží a toků nebo dvojče přístavu Mawan v sousedství Hongkongu.[50]

4.7 Unity

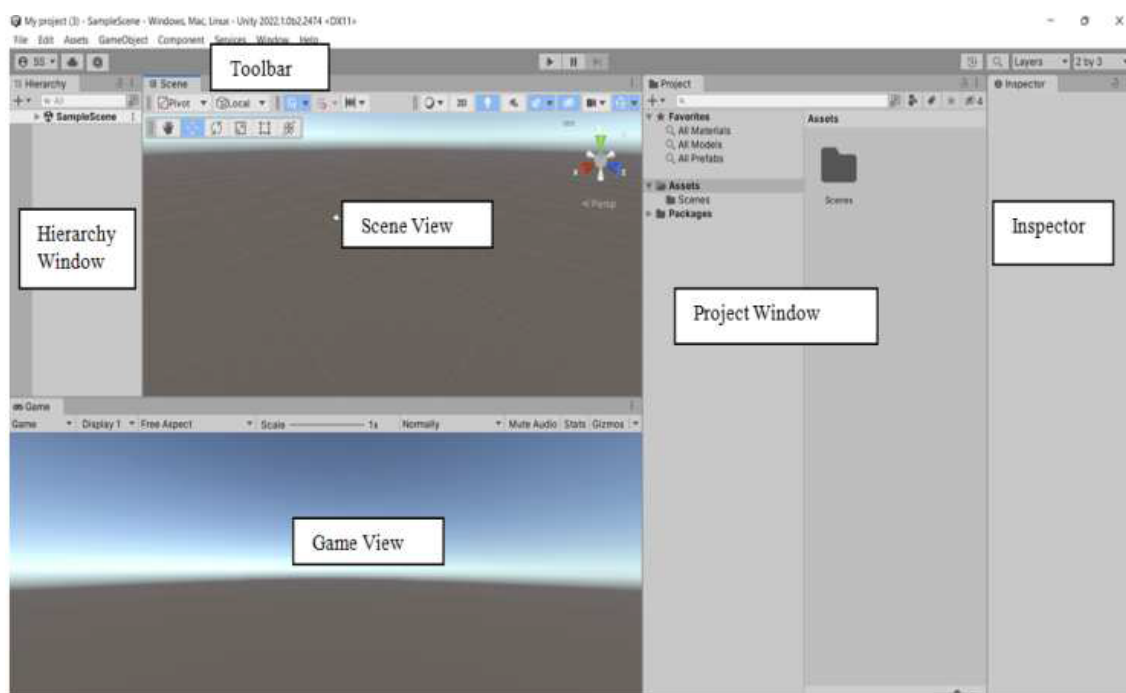
Unity je vývojové prostředí pro tvorbu her a filmových efektů. Umožňuje univerzální tvorbu více platformních aplikací. Výhodou pro volbu tohoto engineu je jeho rozsáhlá komunita uživatelů a relativní jednoduchost pro začínající tvůrce her. Unity disponuje rozsáhlými možnostmi pro práci se zvukem, videem, grafikou, světelnými a fyzikálními efekty včetně funkce tuhého tělesa, to vše dokáže věrně simulovat reálný fyzický svět. [51]

Pro psaní skriptů je využíván jazyk C#, který je pro začínající programátory jednodušší oproti C++, které se používá v konkurenčních vývojových prostředích. Jednoduchost C# umožňuje rychlejší vývoj, to je ale vykoupeno horším výkonem, který je způsoben méně efektivní prací s pamětí. Unity bývá často srovnáváno s konkurenčním Unreal Enginem, který je preferován u firem, které vyžadují projekty s náročným grafickým výkonem.[52, 53]

Unity umožňuje multiplatformní vývoj aplikací, kde lze tvořit aplikace pro celou škálu až dvou desítek platforem. Podporuje Linux, Windows, macOS, řadu herních konzolí, mobilní aplikace, různé aplikace pro brýle s virtuální realitou a rozšířenou realitou. [53]

Obrázek 20 ukazuje náhled jak vypadá typické rozvržení rozhraní pro tvorbu v Unity. Editor Unity se skládá z několika dílčích oken. Z nich se běžně používají [51]

- **Hierarchie s objekty**, které mohou být na sobě navázané



Obr. 20: Vývojové prostředí unity [51]

- **Zobrazení scény**, umožňuje drag and drop manipulaci
- **Herní zobrazení** ukazuje co bude vidět po zapnutí aplikace
- **Toolbar s nástroji**
- **Prohlížeč projektu**, se všemi skripty, prefabrikovanými objekty a všemi ostatními součástmi projektu
- **Inspektor**, zobrazuje detaily po rozkliknutí jednotlivého prvku scény, například objektu, kamery apod.

[51]

5 Robotická buňka EDUset ONE

Buňka EDUset ONE je víceúčelové robotické pracoviště. Účelem jeho vzniku je poskytnout možnost podílet se na vývoji a získávání dovedností s výrobními prostředky Průmyslu 4.0. Primárním záměrem buňky je sloužit jako výukový nástroj pro studenty středních a vysokých škol s možností získání praxe a testování nových technologií formou bakalářských a diplomových prací.

Celá robotická buňka se skládá hlavně z pěti-osé frézky SLV EDU a kolaborativního robota UR10e s uchopovačem (dále gripper) a kamerou od společnosti RobotiQ. Software pro ovládání komponentů je od společnosti Siemens.

Tato kapitola se dále zabývá základním popisem robotické buňky. Krátce seznamuje se společností Intemac, kde se nachází a popisuje potřebnou teorii a realie, které se týkají robotického ramene a CNC frézky.

5.1 Inovační centrum Intemac

Intemac je výzkumné a inovační centrum, které má sídlo v Kuřimi. Specializuje se na pokročilé výrobní technologie a digitalizaci výroby. Činnost centra spočívá ve spolupráci s výrobními a technologickými firmami a jejich integraci do Průmyslu 4.0. Díky tomu pomáhá firmám zlepšovat jejich produktivitu a snižovat náklady. Zaměření společnosti je především oblast obráběcích strojů, strojírenství a výrobní techniky. [54]

Firma poskytuje poradenské a vzdělávací programy jako například program DIGIMAT, kde vzdělává zájemce v oblasti digitalizace, ERP a MES systémů, optimalizace procesů, robotizaci a automatizaci. [54]

Pro výzkum a demonstraci konceptů Průmyslu 4.0 slouží v Intemacu takzvaný Testbed. Jedná se o otevřenou laboratoř, kde se k tomuto účelu nachází řada přístrojů a robotických buněk. Výhodou tesbedu je, že poskytuje firmám prostor k vývoji a možnost vytvářet a testovat výrobní buňku na jednom místě. [55]

Intemac Solution je členem zájmového sdružení JIC (Jihomoravské inovační centrum). Součástí sdružení jsou další výzkumné a podnikatelské inkubátory jako biotechnologický inkubátor JIC INBIT, digitální dílna FABLab, dále JIC INTECH, JIC VENTURES, platforma Brno.AI. Za dvacet let své existence sdružení podpořilo více než 1500 firem. [56]



Obr. 21: Testbed EDUset ONE v Intemac

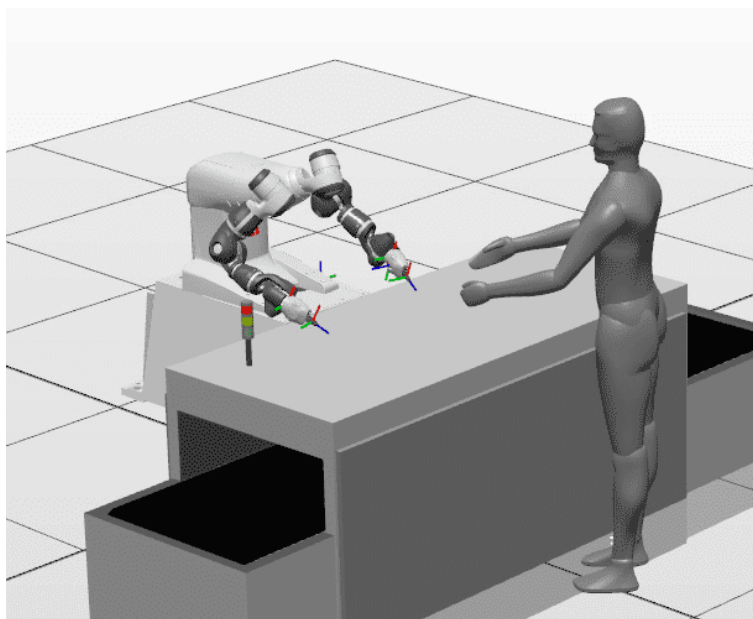
5.2 Kolaborativní robotika

Kobot, neboli kolaborativní robot, je druh robota, který je navržen tak, aby byl schopen bezpečné práce s lidmi. Na rozdíl od klasických robotických ramen, které musí být uzavřené v bezpečně chráněných klecích, aby při své práci nemohli poranit člověka, kolaborativní robot je schopen provádět svou činnost v otevřeném prostoru a společně sdílet svůj pracovní prostor v koexistenci s lidmi. Systémy řízení kolaborativní robota jsou navrženy tak, aby nedošlo k nepříjemné kolizi s člověkem. Kolaborativní robot je vybaven pokročilou technikou složenou z řady senzorů monitorujících okolní prostředí robota a softwarem, který v reálném čase dokáže vyhodnocovat situaci, a tak umožňuje bezpečný plynulý chod kobota. Dalším opatřením, které napomáhá bezpečnosti, je jak jsou vyrobeny mechanické části. Klíčem je omezení síly a točivého momentu pro zmírnění rizik. [57]

Kolaborativní roboti by měli splňovat bezpečnostní normy jako je například standard ISO 10218, který mimo jiné definuje scénáře jako:

- 1) Bezpečně ohodnocené monitorované zastavení
- 2) Ruční navádění
- 3) Rychlost a sledování separace
- 4) Omezení síly točivého momentu

[57]

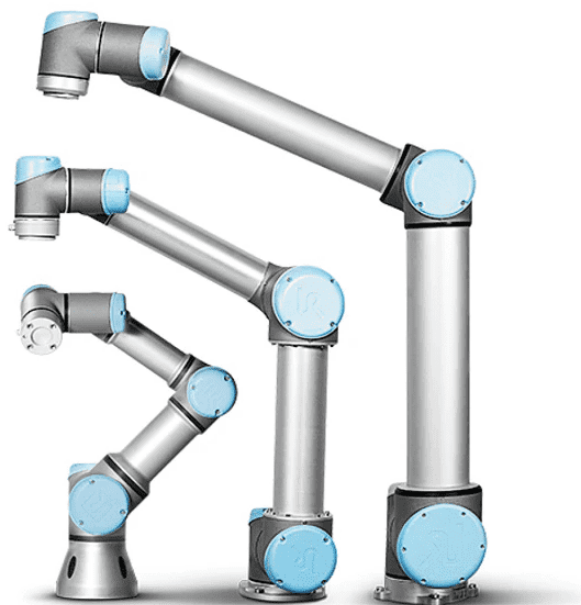


Obr. 22: Ukázka bezpečné spolupráce operátora s kolaborativní robotem [57]

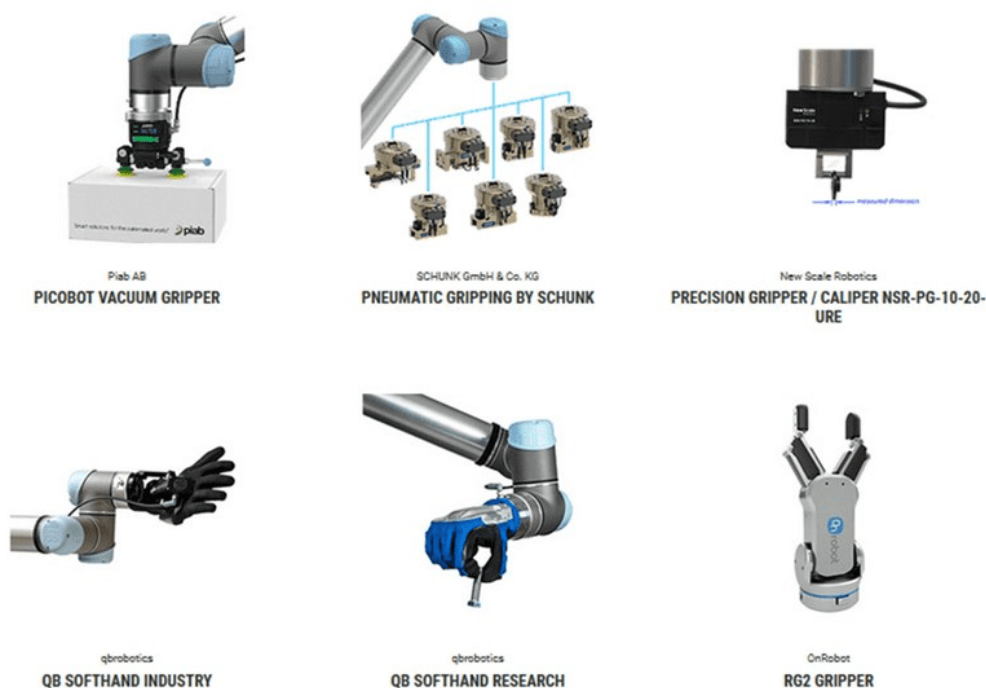
5.2.1 Universal Robots UR10e

Robotické rameno UR10e, kterým je vybavena robotická buňka EDUset ONE, je jedním z velkých kolaborativních robotických ramenem společnosti Universal Robot, disponuje pracovním prostorem o rozsahu poloměru 1300 mm. Robot sám váží přibližně třicet kilogramů a je vyroben tak, aby dokázal spolehlivě zvedat předměty o celkové váze 12.5 kilogramů. Tento kolaborativní robot je vhodný k náročným úkolům, které kladou požadavky na celkovou robustnost robota. Mezi takové úkoly patří například paletizace, balení, montáž výrobků nebo práce na principu pick-and-place. [58, 59, 60]

Přes svou velikost je schopený provádět činnosti, které vyžadují a přesnost a to do 0,1 mm. Robotické rameno lze poměrně snadno programovat, a to vícero způsoby. Všechny modely společnosti Universal Robots, jako jsou UR3, UR5, UR10, UR20 a další, jsou zkonstruovány jako šesti-osé s šesti stupni volnosti. [58]



Obr. 23: Porovnání velikosti kolaborativních robotů UR3, UR5 a Ur10 [61]



Obr. 24: Ukázka několika možných typů uchopovacích nástrojů [62]

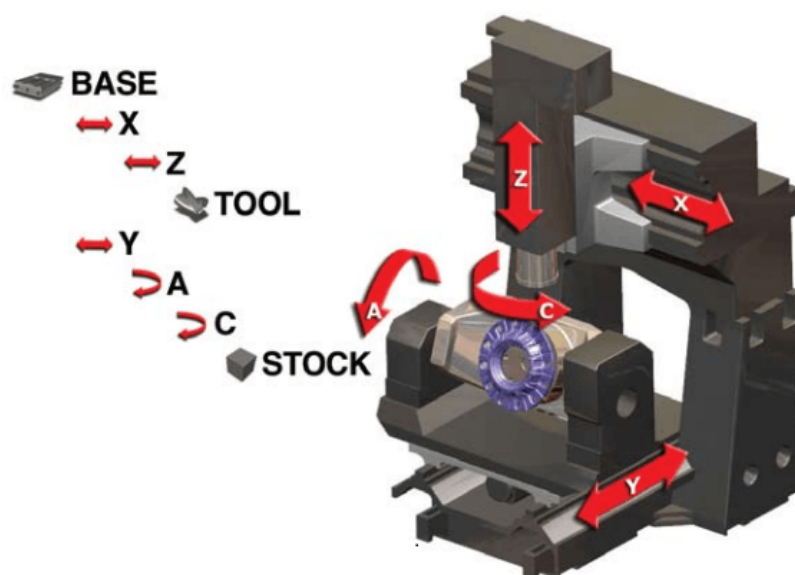
Na svém konci disponují roboty přírubou, kde lze připojit libovolný uchopovač neboli gripper podle požadavků zvolené úlohy pro robota. Gripperů mohou fungovat na celé řadě různých principů, jako jsou vakuové přísavky nebo na pneumatickém, hydraulickém a elektrickém principu. Kromě gripperu lze na konec robotického ra-

mene přidávat i jiné nástroje, které se souhrnně označují jako „End-of-arm Tooling“ (EOAT) neboli také „end effector“. Takovým koncovým efektem může být například kamera pro provádění inspekce a poskytující dodatečné obrazové informace pro orientaci a činnosti robota. Dále může být konec ramene opatřen například nástroji pro svařování nebo třeba dávkovacím přístrojem, který je navržen pro přesnou dodávku středně viskózních kapalin (např. plastických maziv a silikonu) ve výrobních zařízeních. [62]

Pro úlohu diplomové práce je robot UR10e vybaven Robotiq 2F-85. Jedná se o gripper s obdobnou uchopovací funkcí jako dva protilehlé prsty lidské ruky (pozn. odtud i název 2F-85). Číslo 85 pak odkazuje na maximální uchopovací rozpětí gripperu, které je 85 mm. Robot opatřený tímto gripperem dokáže zvedat objekty do hmotnosti 5 kg. Gripper Robotiq má také několik přizpůsobitelných konfigurací úchopu (vnitřní, vnější, paralelní a objímající), díky nim je tento gripper multifunkční a může provádět širokou škálu různých operací.[63]

5.3 Pětiosá CNC frézka

CNC neboli Computer Numerical Control jsou počítačem řízené stroje používané pro obrábění dílů se složitými tvary s volným tvarem povrchu, jako lopatky turbín, součásti letadel, zápustky a jiné formy. [64]



Obr. 25: Znázornění pěti os CNC frézky [65]

Obrábění pomocí pěti-osých CNC frézek je hojně užívanou technologií v moderním průmyslu. Je složitější v nárocích na přípravu a návrh před zahájením činnosti než obrábění se třemi osami, poskytuje ale mnoho výhod. Snižuje časovou

náročnost obrábění, odstraňuje nutnost dodatečného seřizování, zvyšuje efektivitu výroby a vytváří kvalitní komplexní díly.[65]

Proces obrábění probíhá tak, že počítač, odpovědný za chod CNC frézky, získává data o poloze všech pěti os frézky. Dráha nástroje je poté generována systémem CAM (Computer-Aided Manufacturing) a data jsou přenášena do CNC jako série malých lineárních segmentů dráhy nástroje, které zahrnují polohu hrotu nástroje a orientaci osy nástroje.[66]

Kvalita obrábění se odvíjí od toho, jak dobře je dráha vytvořena. Pohyb hrotu mezi vygenerovanými segmenty dráhy musí být nejlépe co nejplynulejší, aby se minimalizovaly nežádoucí efekty spojené s nespojitostí rychlosti, se zrychlením a trháním pohybu. K tomu účelu se podobně jako v robotice obecně vyvíjejí algoritmy, jeden takový je řešen v následující citaci.[66]

Robotická buňka EDUset ONE disponuje 5-osou frézku CNC SLV EDU, která je od společnosti SolidVision. Toto obráběcí CNC zařízení je určeno pro obrábění hliníkových slitin, kovů, dřeva, plastů a kompozitů. Pět os stroje a přesnost, jakou stroj poskytuje umožňuje výrobu náročných dílů s vysokými požadavky na zpracování jejich složitých tvarů. Stroj je určen pro výuku na středních a vysokých školách, dále pro prototypové dílny, obrábění tištěných spojů a tvorbu forem a modelů. CNC ovládá řídicí systém Sinumerik ONE, má servomotory značky Siemens. Maximální rozměr polotovaru činní 200 x 200 x 160 mm, maximální hmotnost polotovaru je 10 kg.[67]



Obr. 26: CNC frézka SLV Edu [67]

6 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

Tato kapitola s vlastním řešením je koncipována tak, aby čtenáře postupně provedla praktickou částí řešení návrhu digitálního dvojčete pro robotickou buňku EDUset ONE v testbedu společnosti Intemac. Začíná seznámením s návrhem buňky a cílem úlohy. Následující sekce nastiňují postup od úpravy počátečních CAD modelů (příprava kloubů a gripperu robota UR10e, zpracování objektů 5-osé frézky CNC SLV EDU), dále import do simulačního vývojového prostředí Unity, kde byly v jazyce C# vytvořeny skripty pro oživení modelů s možností plynulého pohybu dle zadaných proměnných. Nedílnou součástí řešení je také vytvoření interaktivního grafického rozhraní, které umožňuje některé prvky simulace ovládat a zároveň lépe pozorovat činnost digitálního dvojčete robotické buňky. Závěrem je potom samotné propojení pomocí komunikačního standartu OPC UA s PLC, které je schopno ovládat skutečné robotické rameno a CNC frézku v robotické buňce.

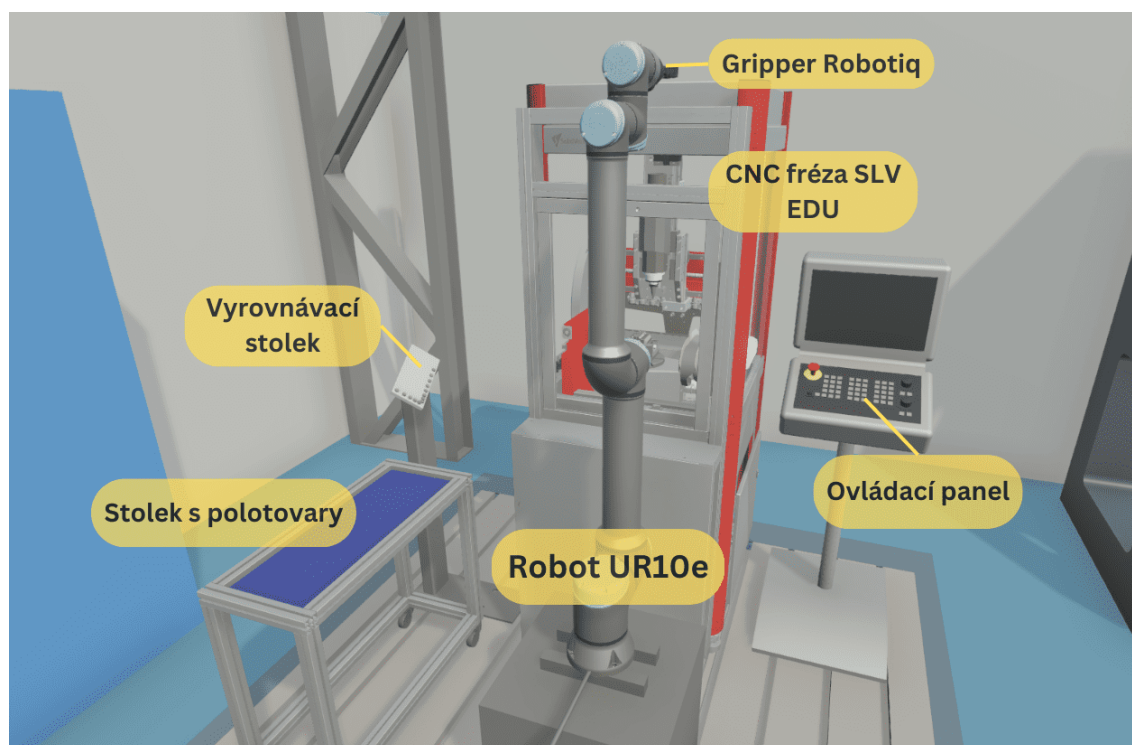
6.1 Návrh scény

Robotická buňka EDUset ONE se skládá z CNC 5-osé frézky SLV EDU a z robotického ramene UR10e. Dalšími prvky, ze kterých se pracoviště skládá, jsou srovnávací stanice a stolek s polotovary, v budoucnu dopravník. Všechny akční prvky CNC a robotického ramene jsou ovládány z jednoho PLC Siemens.

Robotická buňka vykonává úlohu Pick-and-place. Plánem pro aplikaci je, že pásový dopravník přepraví polotovary do buňky před kameru se systémem se strojovým viděním, který se bude nacházet nad koncem pásu. Po zastavení kamera získá obraz, obraz se zpracuje a systém nalezne objekty polotovarů, získá parametry jejich rozměrů a pozice na pásu, data jsou předána do PLC, robotické rameno uchopí jeden z polotovarů, zvedne jej a přemístí nad srovnávací stanici. Polotovar je upuštěn a vyrovnán (takto je zajištěno přesnější uchopení). Rameno polotovar přemístí do CNC frézky, CNC opracuje polotovar do zvoleného tvaru například kostky, po skončení činnosti rameno vyzvedne výrobek, odloží na zvolené místo a celý proces lze zopakovat.

Je třeba uvést, že robotická buňka má prozatím místo pásu stolek na umístění polotovaru. Jelikož systém se strojovým viděním nebude součástí simulace bude jeho funkci potřeba nahradit generování polotovaru uvnitř simulace.

Pro vytvoření digitálního dvojčete a jeho simulaci bylo jako hlavní vývojové prostředí zvoleno Unity. Důvody k volbě jsou následující. Unity je multifunkčním nástrojem, umožňuje tvorbu pro vícero platforem, vzhledem k širokému využití v oblasti vývoje her poskytuje mnoho možností v realizaci grafiky, animace a ovládání scény. Má neomezené možnosti v tvorbě uživatelského rozhraní, řadu vestavěných



Obr. 27: Robotická buňka EDUset ONE s popisem komponentů

funkcí pro usnadnění tvorby skriptů pro animaci a jazyk C#, který je přívětivým pro začínající programátory. Úlohou diplomové práce je také dokázat, že digitální dvojče lze vytvořit i na platformě, která není primárně určena pro průmyslové prostředí, není čistě proprietární a je zdarma.

Postup tvorby digitálního dvojčete v úloze:

- 1) Úprava step modelu v Inventoru do formátu obj.
- 2) Příprava modelu v programu Blenderu, export v fbx.
- 3) Umístění v Unity 3D, tvorba skriptů pro pohyb os CNC, robota, dveří, griperů
- 4) Skripty pro generování polotovaru (kostky), kinematika a logika pohybu kostky
- 5) Grafická úprava prostředí (osvětlení, barvy, materiály)
- 6) Tvorba uživatelského rozhraní
- 7) Vytvoření skriptu klienta pro připojení k PLC Siemens OPC UA serveru

6.2 Úprava modelů

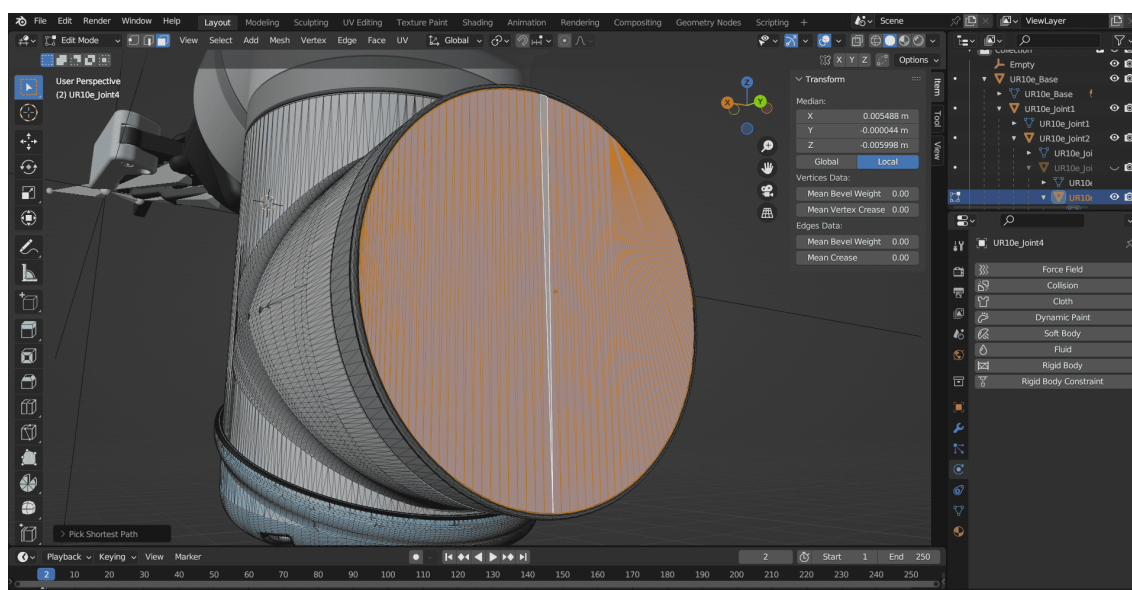
Pro každou robotickou simulaci je nejprve potřeba získat, vytvořit a zpracovat CAD modely. Pro diplomovou práci byly staženy CAD modely ze stránek oficiálních výrobců ve formátu step, některé modely bylo třeba vytvořit a upravit. Bylo zapotřebí tyto modely převést do formátu, který by umožňoval lepší manipulaci. Proto byly

nejprve soubory spuštěny v programu Inventor. V Inventoru byly všechny modely převedeny do obj formátu. Veškerá následná práce probíhala v programu Blender, který umožňuje lépe objekty upravovat.

Práce v Blenderu spočívala v pospojení dílčích objektů ve větší celky, nastavení os pro rotaci robota a frézky a úprava barev komponentů. Pospojování v programu Blender probíhá tak, že se zvolí dva a více objektů, výsledný spojený objekt převezme počátek souřadnic z posledního zvoleného objektu. Takto bylo spojeno několik desítek částí především v CNC stroji.

Pokud chceme, aby pohybem spodní osy robota se pohybovaly i ostatní vrchní navázané části, je potřeba tyto části navzájem propojit v hierarchii. Tato vazba se nazývá parent-child. Pokud změníme pozici nebo rotaci parent objektu, společně s ním se posunou i všechny objekty v hierarchii pod objektem. Tímto způsobem byly na sebe navázány klouby robotického ramene. Stejnou hierarchii mají pohyblivé části CNC frézky. Osy X,Y,Z, které pohybují s nástrojem pro obrábění a rotační osy A a C se svérákem na umístění polotovaru.

U rotace kloubů robota bylo také potřeba přesně najít střed otáčení. I když se jedná o jednoduché nalezení středu v kruhu, viz obrázek 28, je tento kruh v modelu tvořen polygonovou sítí. Je tedy nutné manuálně vybrat ty, které potřebujeme a osu otáčení umístit do jejich středu.



Obr. 28: Vývojové prostředí Blender a získání středu osy pro otáčení kloubu

Jedním z posledních kroků bylo vizuálně zlepšit grafickou stránku modelů a nastavit barvy, které lépe odpovídají realitě. Kromě barev bylo také třeba upravit sklo CNC frézky, v původním .step modelu CNC byla totiž skla neprůhledná.

Před samotným importováním modelů do simulačního prostředí Unity3D bylo zapotřebí tyto modely upravit do formátu, který by byl vhodný. Byl zvolen formát

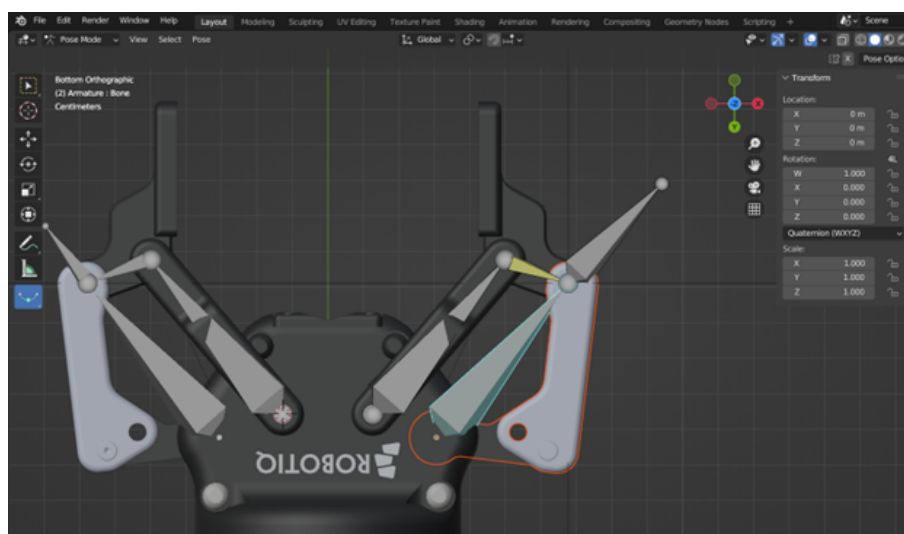
fbx, který dobře udržuje informace o textuře materiálu a je určený pro animace, tedy i realtime simulační aplikace.

6.2.1 Implementace gripperu

V úpravě modelu robotického ramene bylo, kromě navázání kloubů a ramen na sebe, nutno počítat i s gripperem a způsobem jak jej upravit tak, aby se mohl model gripperu Robotiq 2F-85 pohybovat přesně podle skutečnosti.

Problém, který je zde nutno řešit, se nazývá Four-bar linkage, kdy jde o vzájemně propojený řetězec čtyř článků. V mechanice se jedná o způsob převodu rotačního pohybu na translační. V tomto případě rotace servomotoru otevírá a zavírá uchopovací mechanismus.

V rámci prostředí Blenderu lze problematiku vzájemně propojených vazeb řešit pomocí funkce jaké poskytuje takzvaná armatura. Armatura v Blenderu umožňuje vytvoření kostry uvnitř objektu. Účel kostry spočívá v tom, že definuje jak se může objekt pohybovat a ohýbat. Armatury se používají například v animaci k oživení modelů postav při vytváření videí.



Obr. 29: Ukázka použití armature v Blenderu pro gripper Robotiq 2F-85, řešící problém Four-Bar Linkages vazby

Po následném importu do prostředí Unity je další manipulace s kostrou armatury obtížná. Pro další manipulaci je nutno spočítat otevírání gripperu, neboli otočení dvou servomotorů, kde každý servomotor ovládá jednu stranu. Oba motory se otáčejí stejně a zrcadlově obráceně, míra velikosti otočení závisí na velikosti požadované mezery. Mezeru a rychlosti motoru by bylo nutno počítat.

Z důvodu časové náročnosti a způsobu jak toto bude řešit PLC, se kterým bude digitální dvojče komunikovat, byl pro tuto problematiku použit skript [68].

6.3 Unity 3D - import a grafická úprava prostředí

Z Blenderu byly všechny modely přemístěny jako jeden fbx soubor do Unity. Globální souřadnice v Unity jsou na úrovni podlahy pod středem osy robota, který je v centru buňky.

Po importu z programu Blender modely částečně ztratili některé grafické parametry a část ze své barvy. V Unity bylo nutné tyto parametry doplnit, zejména pak renderování kovových komponentů a to úpravou povrchu (Metallic Map a Smoothness). Takto bylo vytvořeno několik prefabrikovaných materiálů, které se přidělily k daným modelům.

Proto, aby simulace lépe vypadala, bylo třeba pozměnit některé grafické parametry. Bylo pozměněno renderování pro vykreslování barev z gamma na lineární. Dále bylo v rámci renderování použito post procesingu a antialiasing. Následujícím důležitým bodem v grafice je způsob osvětlení, který má vliv na tvorbu stínů. Zde byl změněn typ stínu na jemný, aby se lépe blížil realitě. Posun zdroje světla byl nastaven tak, aby stíny zůstaly ale nepřekážely. Také byl snížen kontrast stínů a zvýšena jejich kvalita. Co se týče světla, byla upravena jeho teplota. Saturace barev ve spektru byla modifikována tak, aby příliš tmavé a příliš světlé části měly menší saturaci barvy.

6.4 Skripty pro ovládání akčních prvků

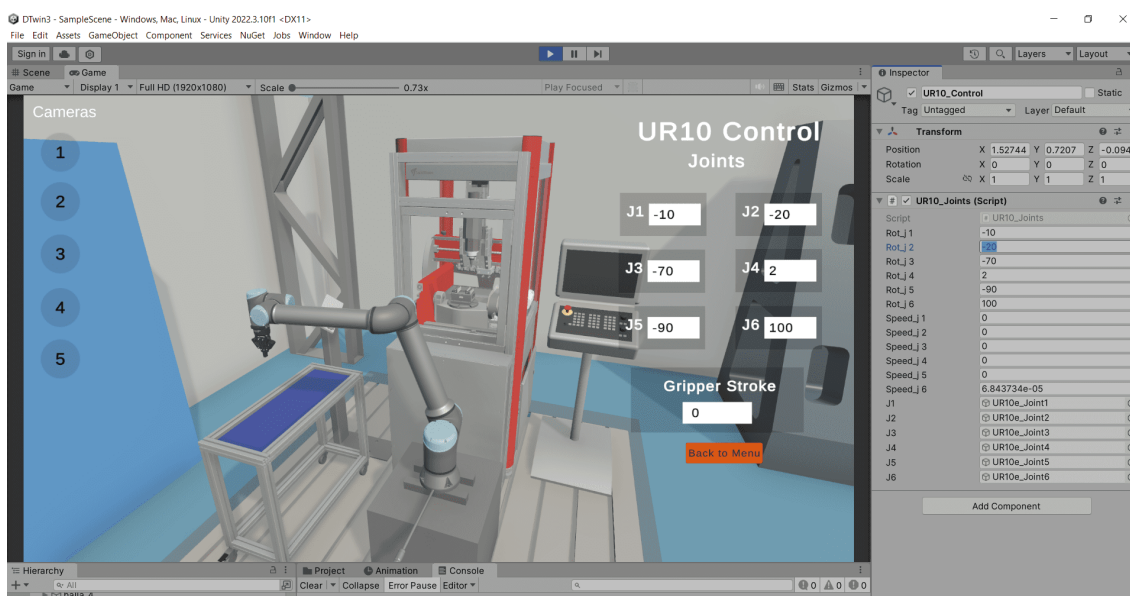
Klíčovou úlohou této práce bylo vytvoření funkčních skriptů pro ovládání simulace. A to zejména dosažení optimálního pohybu všech komponent. Skriptů je celkem patnáct. Šest skriptů se týká implementace pohybu. Podstatnou část tvoří skripty pro ovládání uživatelského rozhraní.

Všechny modely byly importovány s výchozím nastavením, osy CNC a robota UR10e jsou v základní pozici. Pohyb os pomocí skriptů je implementován tak, aby se měnila rotace objektu v lokálních souřadnicích tak, jak byla nastavena v Blenderu. Osy x,y,z CNC stroje se také pohybují vzhledem ke svým lokálním souřadnicím, jsou nastaveny tak, aby základní pozice byla uprostřed. Proměnná přiřazená k jejich pohybu je pak s kladným nebo záporným znaménkem. Pro případ, že by byla zadaná hodnota omylem nastavena příliš vysoká, je v programu nastavena maximální a minimální hodnota, aby ovládané modely neopustily svůj pracovní prostor v CNC. Toto je zajištěno funkcí Mathf.Clamp, kde je zadaná aktuální hodnota proměnné a maximální a minimální dovolená hodnota. Pokud zadaná hodnota bude mimo ohraničené spektrum, bude pohyb proveden do jednoho z odpovídajících krajních bodů.

Důležitým prvkem vývoje v Unity je propojení skriptů a objektů v simulaci. Skript lze připojit přímo k objektu stejně jako jakoukoliv jinou vlastnost (fyzika, barva, atd). Poté se bude například napsaný pohyb týkat pouze tohoto daného tělesa. Připojovat více objektů lze tak, že se do skriptu napíše více proměnných typu objekt, tyto proměnné pak musí být globální (public) nebo musí být označeny jako [SerializeField]. V obou případech jsou takto přístupné v inspektoru v hlavním prostředí Unity. U každé této proměnné se pak drag-and-drop manipulací spojí v inspektoru daný objekt s jeho vytvořeným názvem ve skriptu.

Stejně jako u jiných programů, lze proměnné mezi skripty v Unity sdílet, pokud se nastaví jako globální. Jednoduše se přidá odkaz na daný skript a kde jsou potřebné globální proměnné, ty lze pak použít napříč skripty.

Po zapnutí simulace lze hodnotu proměnné měnit přímo v inspektoru Unity. Musí ale být označeny jako [SerializeField] nebo přímo public. To umožňuje snadno hodnotu testovat.



Obr. 30: Ovládání rotace v kloubech z inspektoru Unity

6.4.1 Funkce pro zajištění plynulosti pohybu

V úloze je nutno počítat s tím, že PLC bude se simulací komunikovat s určitým krátkým zpožděním podle možností a nastavení komunikace. Zpoždění může být například 100 ms a nastavuje se v komunikaci. Jedná se o krátkou latenci, přesto je vhodné s ní počítat i ve funkcích řídících pohyb v simulaci. Proto byly použity matematické funkce z knihovny Mathf z Unity.

- **MoveTowards** - pro dřeve, kde chceme plynulý pohyb bez zrychlení a zpomalení.

- **SmoothDampAngle** - pro rotaci při otáčení os A a C v CNC stroji a pro 6 os robotického ramene údržbě.
- **SmoothDamp** - plynulý pohyb pro osy X,Y a Z frézky

SmoothDamp a SmoothDampAngle funguje tak, že se vektor rychlosti v průběhu pohybu plynule mění, na začátku pohyb zvolna zrychluje a na konci plynule zpomalí. Těmto funkcím je předávána cílová pozice, referenční rychlost a čas do kterého musí být rotace či translace v již v zadané pozici.

6.4.2 Generování kostky polotovaru

Úlohou robotické buňky je práce s polotovary. V reálné úloze se počítá s tím, že se na stůl umístí několik objektů s různými tvary, polohou a velikostmi. Úkolem vestavěné kamery nad stolem bude tyto objekty snímat. Systém s algoritmy strojového vidění tyto objekty vyhodnotí a odešlou informace do PLC, které přizpůsobí kinematiku vyzvednutí a úchop robota. Ze strojového vidění bude posílána velikost objektu a umístění. V simulaci je potřeba toto nějakým způsobem nahradit a polotovary reprezentovat. Vzhledem k povaze polotovaru není důležitým jeho tvar, ale pouze velikost a umístění. Proto bylo přistoupeno k tomu, že pro účely simulace bude polotovar reprezentovat náhodně vygenerovaná kostka.

Kostka je generována jako nový objekt, který se po stisknutí tlačítka objeví na scéně simulace. Objekt kostky je vytvořen dopředu jako takzvaný prefabrikát. Mechanismus vytvoření obstarává samostatný skript. Rozmezí souřadnic v osách x a z odpovídá rozměrům stolu tak, aby ale nedošlo k přesahu. Vertikální osa y je neměnná, nachází se na ploše stolu. Generovaná kostka má také náhodné otočení v ose y a její velikost je v zadaném rozmezí. Generování v Unity obstarává vestavěná funkce Instantiate a každé nové generování původní kostku smaže. Úhly natočení se do funkce předávají po převodu z Eulerových úhlů(stupňů) na kvaterniony, které počítač lépe zpracovává.

6.4.3 Přemísťování kostky v simulaci

Pro aplikaci toho, jak bude interagovat gripper s kostkou, bylo třeba vymyslet řešení simulace úlohy. V úvahu připadalo použít v Unity vestavěný způsob vytváření fyzikálního modelu. Princip by byl v tom, že kostka a všechny modely, se kterými by přišla do kontaktu, by byly definovány jako tuhá tělesa. Kostka, gripper robota a CNC svěrák by navíc musely být fyzikálně definované. Toto je v Unity možno vytvořit. Vzhledem k tomu, že při uchopování by mohlo dojít k nepřesnostem, bylo přistoupeno k jednoduššímu řešení také i z toho důvodu, že základní manipulace s polotovarem v simulaci fyziku nevyžaduje.

Místo fyziky modelu bylo použito funkcí takzvané kolize. Ta funguje tak, že se vytvoří kolizní objekt, který se naváže na model. Současně je potřeba mít takzvané tuhé těleso, které se v momentě dotyku detekuje.

V této úloze chceme, aby manipulovaným tuhým tělesem byla právě vygenerovaná kostka. Kolizní objekty jsou umístěné tam, kde bude docházet k interakci s kostkou, tedy na plochách gripperu robota a svěráku uvnitř CNC. Funkce ve skriptu detekuje, zda se kostka dotýká kolizního objektu a pokud jsou splněny tyto podmínky, spustí se obsah funkce.

V úloze dochází k interakci pouze tehdy, když gripper kostku uchopuje a přemísťuje ji do CNC frézky. Poté je upevněn do uchopovacího zařízení CNC.

Logika skriptu spočívá v tom, že kostka mění svoji pozici v hierarchii objektů. V momentě vytvoření je umístěna samostatně. V okamžiku přiblížení kolizního modelu uchopování gripperu robota se zařadí do hierarchie pod gripper, v tomto stavu se jako jeho součást pohybuje společně s klouby robotického ramene. Kostka je přemísťována do frézky na místo, kde kostku převezme svěrák se svým kolizním modelem, kostka opustí hierarchii gripperu a je umístěna do hierarchie s C osou CNC.

6.5 Uživatelské rozhraní

V rámci vytvoření vhodného grafického uživatelského rozhraní (GUI) bylo potřeba navrhnout co vše se bude zobrazovat. Dále bylo třeba zohlednit několik dílčích požadavků tak, aby bylo přehledné, snadno ovladatelné a mělo dostatek možností a interaktivních prvků.

Primárním úkolem rozhraní je umožnit operátorovi sledovat proces v simulaci, aby měl dostatečný přehled o dění v robotické buňce. Proto je potřeba, aby co největší část, která se na displeji zobrazuje, obsahovala samotné vykreslení modelů a toho, jak se v průběhu procesu pohybují. Tlačítka pro přepínání nesmí zabráňovat ve výhledu a musí zobrazovací pole zmenšovat jen minimálně. Zároveň je třeba zohlednit, aby byly tlačítka a včetně ostatních interaktivních prvků dostatečně čitelná. Velikost tlačítka musí odpovídat tak, aby nebylo pochyb o tom, na co operátor kliká a s čím interaguje.

Řada používaných uživatelských rozhraní také musí počítat s tím, že zobrazování bude probíhat na displeji s rozdílnými velikostmi displeje. Proto je vhodné GUI implementovat ve vektorové grafice, která se formátu na displeji přizpůsobí. Také je třeba v ideálním případě počítat s tím, aby bylo rozhraní možno provozovat na odlišných operačních systémech jako Windows, Linux, macOS, průmyslových panelech ale i na tabletu či v mobilním telefonu.

Pro tvorbu GUI bylo v této práci použito přímo prostředí Unity. To umožňuje právě tvorbu vektorového rozhraní i jeho následné multiplatformní použití. Hlavním

prvkem je jeho programovatelnost a možnosti přímo navázat na proměnné v ostatních vytvořených skriptech.

Tvorba probíhá tak, že se pro každou zobrazovanou stránku GUI vytvoří samostatné plátno (Canvas) a na něj se pomocí drag-and-drop manipulace myší postupně přidávají tlačítka, obrázky, pole pro texty a například posuvníky a rozbalovací menu. Poté se upravují konkrétní rozměry a velikost. Probíhá zde úprava textu, navázání proměnných je řešeno ve skriptu.

Na každém plátnu jsou tyto prvky hierarchicky navázány. Posunem nadřazeného prvku se posunou všechny pod ním.

Vytvořené GUI obsahuje pět pláten rozhraní, kde se některé navzájem překrývají. Přepínání ve skriptu Unity pracuje stejně jako u jakéhokoli jiného objektu a to tak, že objekt je po stisknutí tlačítka deaktivován nebo aktivován. Nově aktivované plátno překryje původní a je možno s ním interagovat.

Rozhraní pro aplikaci je navrženo tak, aby působilo jednoduše a uživatel viděl jen to, co potřebuje. Tlačítka jsou umístěna po stranách, aby nepřekážela v pozorování simulace. Většina prvků je z důvodu lepšího zobrazení volena jako částečně průhledná, přitom jsou dostatečně kontrastní, aby bylo vše dobře čitelné. Primární část prvků je v pravé části a rozměry tlačítek umožňují interakci pro menší displeje, tablety a mobilní zařízení.

Vytvořené uživatelské rozhraní obsahuje následující funkce:

- 1) Přepínání zobrazení kamery
- 2) Manuální připojení přes OPC UA
- 3) Přehled robota UR10e (6 os a gripper)
- 4) Přehled CNC frézky SLV EDU (5 os a pozice svěráku)
- 5) Zavírání a otevírání dveří CNC
- 6) Generování kostky pro jako polotovaru
- 7) Reset Scény

[57]

6.5.1 Přepínání kamery

Po levé straně je 5 kruhových tlačítek pro přepínání kamery, jsou dostupná vždy během práce v GUI. Jejich princip je v tom, že po kliknutí se změní pohled hlavní kamery. Přepínání kamer umožňuje pozorovat celý proces z více úhlů a také detailně sledovat stůl s polotovary a proces obrábění uvnitř CNC frézky.

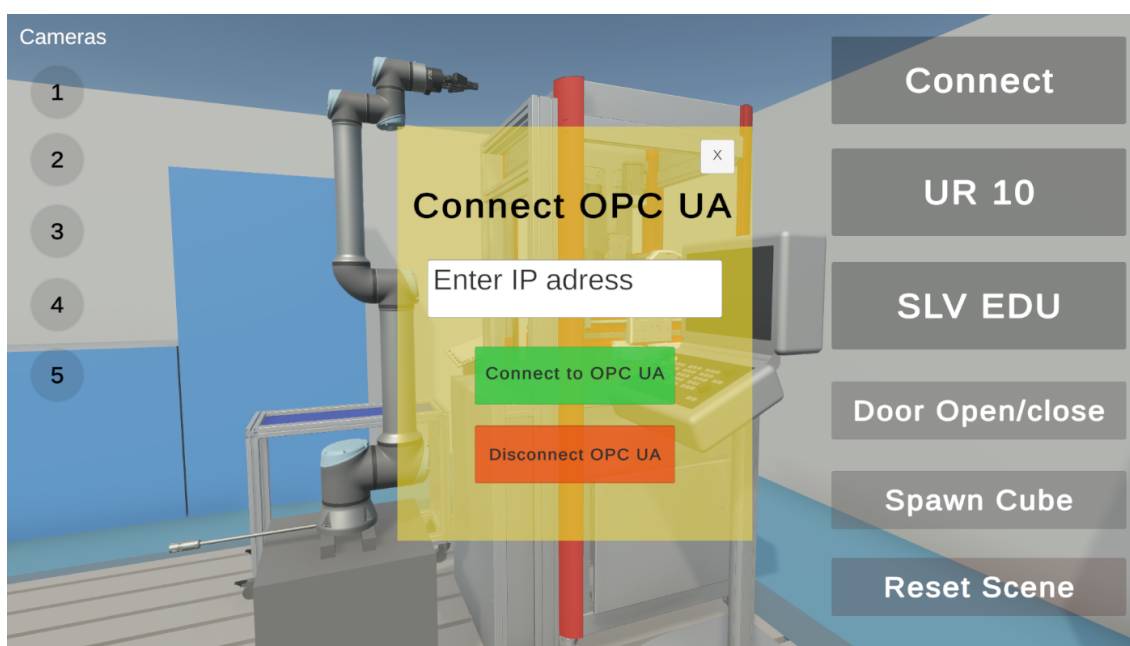
Kromě tlačítek kamer bylo zvažováno implementovat i možnost pomocí tlačítek manipulovat napřímo s pozicí kamery a to pohybem v osách a rotací. Vzhledem k tomu, že přednastavené pozice kamer u tlačítek poskytují dostatečný přehled o ději v robotické buňce, bylo od tohoto plánu upuštěno. Dalšími z důvodů je zmenšení

přehlednosti rozhraní, možná latence a zpomalení simulace při interakci a to, že by přidání pohybu obrazu nepřinesl množství přidané hodnoty.

6.5.2 Rozhraní pro OPC UA připojení

Po stisknutí tlačítka se otevře uprostřed obrazovky nové okno a operátor má možnost zadat IP adresu klienta přístroje s PLC robotické buňky, se kterým se chce spojit přes OPC UA. Následně jsou zde tlačítka pro připojení a odpojení zařízení. Všechny tyto prvky jsou napojeny na skript s implementací serveru s OPC UA viz následující sekce o připojení k PLC.

Okno lze vypnout dvěma způsoby, buďto stisknutím křížku v pravém horním rohu nebo kliknutím na původní tlačítko, kterým se okno prvně otevřelo.



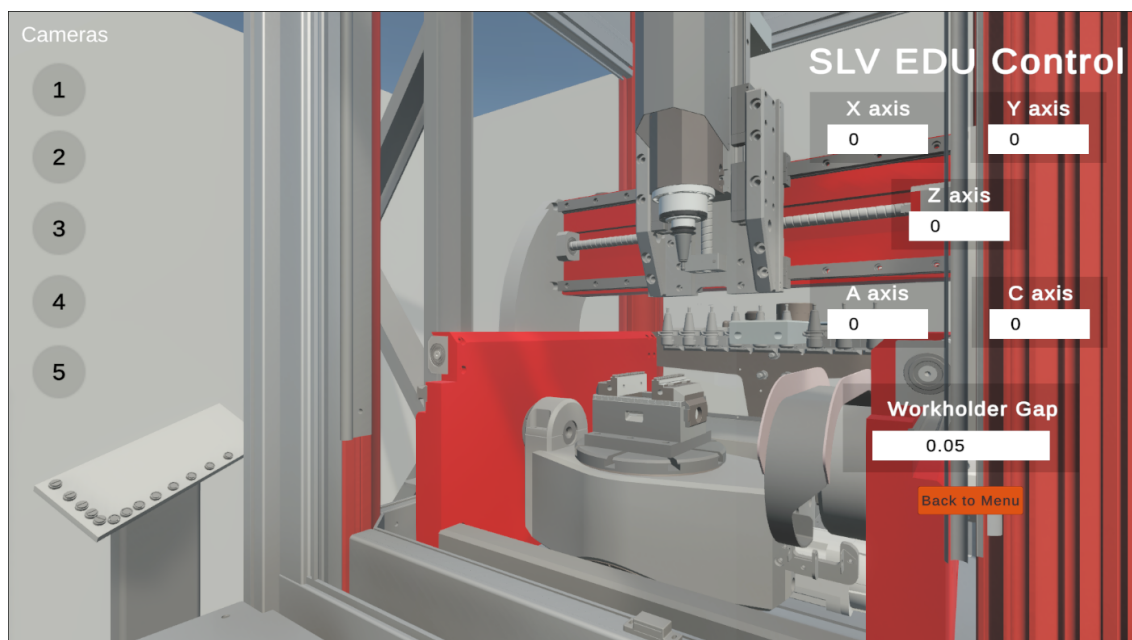
Obr. 31: Rozhraní pro připojení přes OPC UA

6.5.3 Přehled UR10e robota

Po kliknutí toto rozhraní překryje pravou část hlavního GUI s tlačítky. Zobrazí se nadpis a tabulka s přehledem poloh všech šesti os robota tak, jak jsou posílány z PLC do simulačního programu. Další zobrazovanou informací je velikost aktuálního otevření koncového gripperu robota.

6.5.4 Přehled CNC frézky SLV EDU

Zobrazení funguje stejně jako u předešlého UR10e. K dispozici je přehled poloh 5 os frézky a je zobrazována velikost aktuální mezery ve svěráku, kde se umísťuje polotovár. Do hlavního menu se vrací tlačítkem.



Obr. 32: Přehled nastavení CNC

6.5.5 Ostatní tlačítka hlavního menu

Tyto tlačítka doplňují hlavní menu a umožňují přidanou interakci. Jedná se o otevírání/zavírání dveří, zde se jedním kliknutím přepíná stav dveří do druhé polohy než je aktuální stav. Tlačítko dveří slouží spíše pro demonstrační účely práce, v realitě provozu se dveře otevírají přes řídicí program PLC nebo mechanickými prvky přímo na pracovišti. Dalším ovládacím prvkem je generování kostky, která se umístí do simulace na stůl pro polotovary, jako nový objekt s náhodnými rozměry, polohou a rotací. S každým novým kliknutím se původní kostka smaže a objeví se nová.

Posledním, ale nikoliv méně důležitým tlačítkem, je resetování scény. Stisknutí má za následek kompletní zastavení činnosti a restartování programu tak, jako při novém spuštění.



Obr. 33: Vygenerovaná kostka a hlavní menu rozhraní

6.6 OPC UA a propojení PLC s modelem

Aby digitální dvojče bylo kompletní, je třeba po vytvoření všech náležitých částí týkajících se simulace robotické buňky přidat i část starající se o komunikaci s PLC. K tomuto účelu byl od počátku zvolen komunikační standard OPC UA.

Jako první byl vytvořen skript pro klienta. Kód je součástí ostatních vytvořených skriptů a stará se o propojení proměnných, které si klient se serverem navzájem posílají. Bylo třeba také stáhnout takzvaný Nuget balíček pro knihovnu OPC UA pro Unity. Aby jej bylo možné použít, byl projekt v Unity přesunut na stránky Github [69].

Použitý skript pro klienta je modifikací kódu [70], kde tento klient byl použit již pro komunikaci se zařízením společnosti B&R Automation. Modifikace spočívá v použití vlastních proměnných pro čtení a psaní, v úpravě pro komunikaci se Siemens zařízením a v navázání na uživatelské rozhraní a jeho proměnné pro zadání IP adresy a připojení a odpojení od serveru.

Ve skriptu jsou proměnné pro komunikaci součástí jedné společné třídy. Každá tato proměnná je globální a má své dvě varianty. Jednu ve stejném datovém typu jako v ostatních skriptech, kde je použita. Druhá varianta je datového typu `NodeId`, která je typem posílaným mezi serverem a klientem. Každá `NodeId` proměnná musí být definována přesně tak, aby odpovídala struktuře svého umístění v OPC UA serveru PLC.

Hlavní funkce programu se zakládá na jednoduchém stavovém automatu. Nachází se zde 2 stavy: stav, který je odpojený a čeká na spojení a stav připojený, kde aktivně probíhá interakce mezi zařízeními. Připojením se inicializují vlákna serveru pro komunikační funkce zapisování a čtení proměnných mezi serverem a klientem. Odpojením zařízení jsou spuštěny funkce Abort pro přerušení komunikace.

Na počátku spojení je ve skriptu potřeba nastavit IP adresu a port. Číslo adresy portu je nastaveno staticky na 4840, což je výchozí hodnota pro připojení přes OPC UA. Nastavení IP adresy, připojení a odpojení jsou globálními proměnnými a jsou měněny z uživatelského rozhraní.

Proměnné os robota UR10e a CNC frézky jejich aktuální polohy a rychlosti, se kterými se v reálném čase pohybují, jsou proměnné, které posílá řídicí jednotka PLC Siemens do simulace. Kromě toho PLC řídí polohy gripperu robota a svěráku CNC stroje, tato komunikace je pro server a simulaci v Unity vstupní informací a je na straně serveru čtena.

Aby digitální dvojče bylo úplné a nebylo pouze stínem fyzického zařízení, viz druhy digitálních dvojčat 3.3, musí také nějaká data posílat zpátky do připojeného serveru PLC zařízení. Tuto roli plní informace o vygenerované kostce v simulaci a ovládání posuvných dveří CNC frézky. V budoucnosti může být toto provedení v robotické buňce Intemacu nahrazeno. Ovládání dveří bude součástí hlavního programu v PLC. Místo generování kostky a informací o ní bude celý tento proces nahrazen integrací systému se strojovým viděním, který bude vyhodnocovat místo kostek polotovary na stolku a data bude posílat do PLC a případně do simulace.

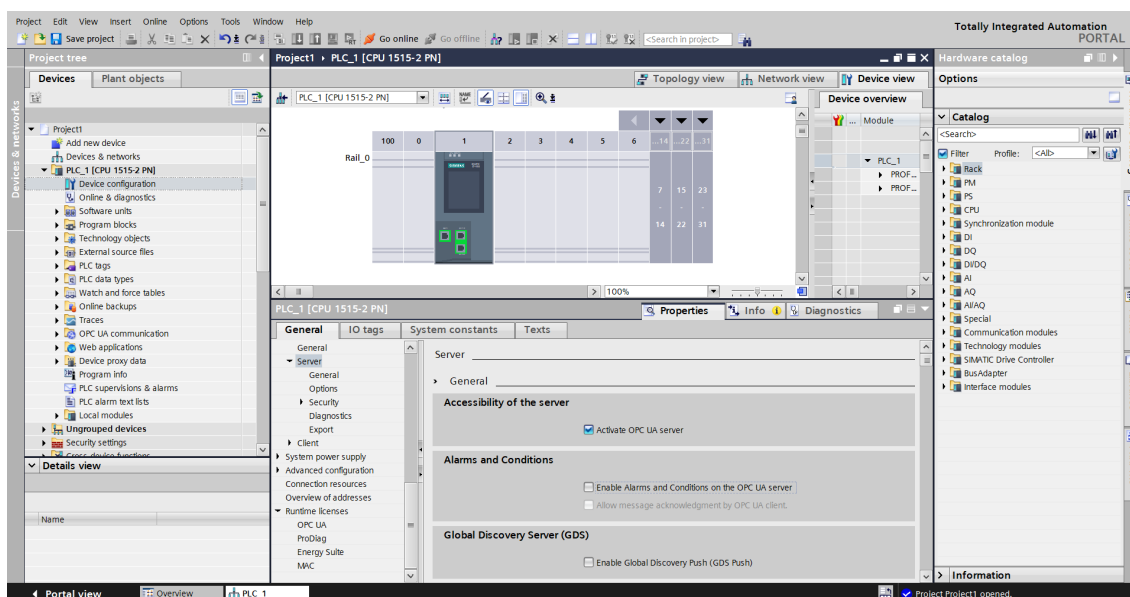
6.7 Postup tvorby serveru OPC UA v programu Siemens

Tvorba serveru pro OPC UA napsáním celého nového skriptu je oproti vytváření klienta složitější proces. Naštěstí v softwaru pro PLC od Siemens lze dodržáním správného postupu server vytvořit poměrně snadno. Tvorba serveru i programu pro PLC probíhá na jednom místě v programu TIA Portal. Proces spojení a komunikace lze ověřit a simulovat na virtuálním PLC. K tomu slouží SIMATIC S7-PLCSIM Advanced.

Postup tvorby serveru je ve zjednodušené formě následující:

- 1) Spustit TIA Portal, v nabídce vybrat PLC zařízení s možností spojení pomocí OPC UA
- 2) Povolit v projektu simulovat PLC virtuálně
- 3) Aktivovat OPC UA server, nastavit příslušnou Runtime licenci, nastavit adresu IP serveru pro komunikaci
- 4) Nastavit vzorkovací (sampling) interval a odpovídající zveřejňovací (publishing) interval (v tomto případě například 100ms a 200ms)

- 5) Vytvoření databloku s proměnnými, které chceme sdílet s klientem
- 6) Nastavit server interface, kde vybereme dané proměnné a přiřadíme ke každé potřebný Node(uzel) a nastavíme oprávnění pro přístup (psaní/čtení)
- 7) Spustíme virtuální PLC v PLCSIM Advanced a spojíme s programem v TIA Portálu.
- 8) Spustíme vhodně nastavený skript s klientem a propojíme se serverem na dané IP adrese
- 9) Pokud vše funguje, server a klient spolu komunikují. V případě, že není v PLC plnohodnotný program, lze hodnoty proměnných měnit a ověřovat v jejich seznamu.



Obr. 34: Aktivace serveru pro OPC UA v Siemens TIA Portal

Zmíněným postupem byl server OPC UA vytvořen. Prostřednictvím uživatelského rozhraní v Unity bylo realizováno spojení klient-server. Změnou hodnot na obou stranách byly otestovány funkce pro čtení a zápis oběma směry.

7 ZÁVĚR

Touto diplomovou prací bylo úspěšně vytvořeno digitální dvojče pro robotickou buňku EDUSet ONE v Intemacu. Postupně byly splněny všechny body zadání.

V první části byla provedena rešerše současného stavu Průmyslu 4.0, byly zmíněny jeho dílčí komponenty, které pomáhají k pochopení jeho významu. Byl zmíněn například RAMI model, Internet věcí, cloud a edge computing, role umělé inteligence a 5G sítí. Následná část teorie blíže rozvedla do kontextu digitální dvojčata, jejich definici, historii a druhy. Význam a výhody digitálních dvojčat byly dále zmíněny v souvislosti s jejich širokými možnostmi aplikací ve výrobním průmyslu, medicíně, zemědělství a digitalizaci měst. Podstatná část rešerše byla provedena také v oblasti simulačních prostředí pro tvorbu robotických aplikací. Byly zmíněny komerční softwary společně s bezplatnými platformami a byla uvedena některá jejich specifika a typická využití. Poslední teoretickou částí bylo představení testbedu, ke kterému byla tvořena jeho simulace. Pro pochopení úlohy byly blíže představeny informace o jeho komponentech, a to o CNC a robotickém ramenu UR10e.

Pro vlastní implementaci digitálního dvojčete bylo zvoleno prostředí Unity. Jedním z cílů práce, který se podařilo ukázat je, že vývojové prostředí Unity je možnou alternativou k běžně používaným simulačním prostředím pro robotické aplikace.

Ve srovnání s ostatními nástroji může být tvorba průmyslových aplikací v Unity zdlouhavá, protože dedikované programy pro robotiku mají své vlastní modely robotů, fyziku a optimalizované aplikace. Málom který program ale může nabídnout tak velkou míru multifunkčnosti a tvůrčí svobody.

Samotná tvorba dvojčete probíhala od základu. Počínala úpravou získaných modelů pro simulaci, pokračovala importem, psaním skriptů pro pohyb jednotlivých akčních prvků, grafickou úpravou prostředí, navržením a tvorbou uživatelského rozhraní a implementací generování a manipulace s polotovarem.

Závěr praktické části práce byl o vytvoření komunikace s PLC pomocí standardu OPC UA. Spojení na principu klient-server bylo připraveno a ověřeno se simulací serveru PLC zařízení. K interakci s reálnou robotickou buňkou bohužel zejména z časových důvodů nedošlo. Skript pro spojení je ale funkční a lze předpokládat, že by spojení proběhlo úspěšně.

Vzhledem k rozsahu funkcí, jaké digitální dvojčata poskytují, lze pro možné návazné pokračování této práce najít mnoho podnětů pro zlepšení a další vývoj. Samotné simulace lze v budoucnu implementovat fyziku objektů. Možné zlepšení se dá nalézt v simulaci obrábění frézky, kde lze implementovat změny tvaru polotovaru při kontaktu s obráběcím nástrojem, včetně efektu odpadávání materiálu. Co se týče uživatelského rozhraní a simulace, dá se 3D prostředí v budoucnu využít pro virtuální nebo rozšířenou realitu. Důležitým prvkem pro zlepšení může představovat také

integrace se systémem strojového vidění, který by v simulaci generoval polotovary s odpovídajícím tvarem, velikostí a pozicí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SANTHI, A. R. a MUTHUSWAMY, P. Industry 5.0 or industry 4.0S? Introduction to industry 4.0 and a peek into the prospective industry 5.0 technologies. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2023, sv. 17, s. 947 – 979. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:256623448>.
- [2] ACETO, G., PERSICO, V. a PESCAPÉ, A. A Survey on Information and Communication Technologies for Industry 4.0: State-of-the-Art, Taxonomies, Perspectives, and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019, sv. 21, s. 3467–3501. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:202780103>.
- [3] RAO, S. K. a PRASAD, R. Impact of 5G Technologies on Industry 4.0. *Wireless Personal Communications*. 2018, sv. 100, s. 145 – 159. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:4757131>.
- [4] SHIRRIFF, K. *THE SURPRISING STORY OF THE FIRST MICROPROCESSORS* [online]. 2016 [cit. 2024-5-9]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/the-surprising-story-of-the-first-microprocessors>.
- [5] COMMISSION, E., RESEARCH, D.-G. for, INNOVATION, RENDA, A., SCHWAAG SERGER, S. et al. *Industry 5.0, a transformative vision for Europe – Governing systemic transformations towards a sustainable industry*. Luxembourg: Publications Office of the European Union: Publications Office of the European Union, 2021. ISBN 978-92-76-43352-1.
- [6] ALVES, J., LIMA, T. M. a GASPAR, P. D. Is Industry 5.0 a Human-Centred Approach? A Systematic Review. *Processes*. 2023. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:255650326>.
- [7] KAVIRAJU. *RAMI 4.0 (Reference Architectural Model Industry 4.0): Explained with example* [online]. 2021 [cit. 2024-3-31]. Dostupné z: <https://industry40.co.in/rami-reference-architecture-model-industry-4-0/>.
- [8] BINDER, C., HÜNECKE, P., NEUREITER, C. a LÜDER, A. Towards flexible production systems engineering according to RAMI 4.0 by utilizing PPR notation. *2023 IEEE 21st International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. 2023, s. 1–6. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:261105774>.

- [9] RAJANARTHAGI. *What is IoT? Role of IoT in digital marketing* [online]. 2023 [cit. 2024-4-15]. Dostupné z: <https://gecdesigns.com/blog/role-of-iot-in-digital-marketing>.
- [10] IBM. *What is Industry 4.0?* [online]. 2024 [cit. 2024-4-15]. Dostupné z: <https://www.ibm.com/topics/industry-4-0>.
- [11] INTERVIEWBIT. *Cloud Computing Architecture – Detailed Explanation* [online]. 2024 [cit. 2024-4-15]. Dostupné z: <https://www.interviewbit.com/blog/cloud-computing-architecture/>.
- [12] SHI, W., CAO, J., ZHANG, Q., LI, Y. a XU, L. Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*. 2016, sv. 3, s. 637–646. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:4237186>.
- [13] ROH, Y., HEO, G. a WHANG, S. E. A Survey on Data Collection for Machine Learning: A Big Data - AI Integration Perspective. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2018, sv. 33, s. 1328–1347. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:53211000>.
- [14] SICILIANO, B. a KHATIB, O., ed. *Springer Handbook of Robotics*. 2nd. Berlin: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-32550-7.
- [15] DARAPUREDDY, N., KURNI, M. a K., S. A Comprehensive Study on Artificial Intelligence and Robotics for Machine Intelligence. *Methodologies and Applications of Computational Statistics for Machine Intelligence*. 2021. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:236742504>.
- [16] MURPHY, R. R. *Introduction to AI robotics*. MIT press, 2019.
- [17] NVIDIA *Isaac Sim* [online]. 2024 [cit. 2024-5-13]. Dostupné z: <https://developer.nvidia.com/isaac/sim>.
- [18] COLLINS, D. *What is OPC UA and how does it compare with Industrial Ethernet?* [online]. 2015 [cit. 2024-5-13]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/what-is-opc-ua-and-how-does-it-compare-with-industrial-ethernet/>.
- [19] ROBLES, T., ALCARRIA, R., ANDRÉS, D. M. de, CRUZ, M. N. de la, CALERO, R. et al. An IoT based reference architecture for smart water management processes. *J. Wirel. Mob. Networks Ubiquitous Comput. Dependable Appl.* 2015, sv. 6, s. 4–23. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:3525022>.

- [20] TAO, F., ZHANG, H., LIU, A. a NEE, A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019, sv. 15, s. 2405–2415. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:68170459>.
- [21] ALLEN, B. D. *Digital Twins and Living Models at NASA* [online]. 2021 [cit. 2024-4-8]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210023699>.
- [22] TAO, F., CHENG, J., QI, Q., ZHANG, M., ZHANG, H. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, sv. 94, s. 3563 – 3576. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:114484028>.
- [23] TUEGEL, E., INGRAFFEA, A., EASON, T. a SPOTTSWOOD, S. Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin. *International Journal of Aerospace Engineering*. Leden 2011, sv. 2011. DOI: 10.1155/2011/154798.
- [24] MISKINIS, C. *The history and creation of the digital twin concept* [online]. 2019 [cit. 2024-4-8]. Dostupné z: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-history/>.
- [25] MARTINESCU, L. *Exploring the concepts of digital twin, digital shadow, and digital model* [online]. 2023 [cit. 2024-5-12]. Dostupné z: <https://oxfordinsights.com/insights/exploring-the-concepts-of-digital-twin-digital-shadow-and-digital-model/>.
- [26] ANDRADE, A. *The 3 Levels of the Digital Twin Technology - 2023* [online]. 2022 [cit. 2024-5-12]. Dostupné z: <https://vidyatec.com/blog/the-3-levels-of-the-digital-twin-technology-2/>.
- [27] FULLER, A., FAN, Z., DAY, C. a BARLOW, C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*. 2020, sv. 8, s. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [28] VOELP, D. *The types of digital twins used in process manufacturing* [online]. 2022 [cit. 2024-5-12]. Dostupné z: <https://precog.co/blog/types-of-digital-twins/>.
- [29] VYAS, I. *Digital Twins Product Development: The Future of SaaS* [online]. 2023 [cit. 2024-5-12]. Dostupné z: <https://citrusbug.com/blog/digital-twin-product-development>.
- [30] MISKINIS, C. *What does a digital thread mean and how it differs from digital twin* [online]. 2018 [cit. 2024-5-12]. Dostupné z: <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-and-digital-thread/>.

- [31] *Siemens and NVIDIA to Enable Industrial Metaverse* [online]. 2022 [cit. 2024-5-14]. Dostupné z: <https://nvidianews.nvidia.com/news/siemens-and-nvidia-to-enable-industrial-metaverse>.
- [32] WEI, S. Is Human Digital Twin possible? In:. 2021. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:236722757>.
- [33] *Gemini Digital Twin Platform* [online]. 2024 [cit. 2024-4-8]. Dostupné z: <https://www.q.bio/gemini-platform>.
- [34] NEETHIRAJAN, S. a KEMP, B. Digital Twins in Livestock Farming. *Animals : an Open Access Journal from MDPI*. 2021, sv. 11. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:232290091>.
- [35] ZHANG, Q. *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015. ISBN 978-1-4822-5107-4.
- [36] CATHELAT, B. *Smart cities: shaping the society of 2030*. 7 place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France: UNESCO, 2019. ISBN 978-92-3-100317-2.
- [37] SAVAGE, A. *How China Cloned Shanghai* [online]. 2020 [cit. 2024-4-8]. Dostupné z: <https://www.theb1m.com/video/how-china-cloned-shanghai/>.
- [38] KASIRAJAN. *Digital cities-digital twins for connected city infrastructure* [online]. 2021 [cit. 2024-4-8]. Dostupné z: <https://www.geospatialworld.net/blogs/digital-cities-digital-twins-for-connected-city-infrastructure/>.
- [39] MCMORRIS, B. *VISUAL COMPONENTS 4.2: EFFICIENT PLANT AND MACHINE DESIGN AND SIMULATION* [online]. 2019 [cit. 2024-5-13]. Dostupné z: <https://futura-automation.com/2019/12/19/visual-components-4-2-efficient-plant-and-machine-design-and-simulation/>.
- [40] GARBEV, A. a ATANASSOV, A. Comparative analysis of robodk and robot operating system for solving diagnostics tasks in off-line programming. In: IEEE. *2020 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*. 2020, s. 1–5.
- [41] ZOE CORBYN, B. M. *Nvidia: The chip maker that became an AI superpower* [online]. 2023 [cit. 2024-5-13]. Dostupné z: <https://www.bbc.com/news/business-65675027>.

- [42] ANDREWS, G. *NVIDIA Isaac Sim on Omniverse Now Available in Open Beta* [online]. 2021 [cit. 2024-5-13]. Dostupné z: <https://developer.nvidia.com/blog/nvidia-isaac-sim-on-omniverse-now-available-in-open-beta/>.
- [43] *PolyScope 5 Make complex tasks possible* [online]. 2024 [cit. 2024-5-13]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/products/polyscope-5/>.
- [44] *Gazebo, Features and Benefits* [online]. 2024 [cit. 2024-5-13]. Dostupné z: <https://gazebo.org/features>.
- [45] *ARDUPILOT Versatile, Trusted, Open* [online]. 2024 [cit. 2024-5-13]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/>.
- [46] BERGQUIST, C. *Gazebo Drone / Advanced ArduPilot SITL Simulation* [online]. 2022 [cit. 2024-5-13]. Dostupné z: <https://dojofordrones.com/gazebo-drone/>.
- [47] FARLEY, A., WANG, J. a MARSHALL, J. A. How to pick a mobile robot simulator: A quantitative comparison of CoppeliaSim, Gazebo, MORSE and Webots with a focus on accuracy of motion. *Simul. Model. Pract. Theory*. 2022, sv. 120, s. 102629. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:261286434>.
- [48] COLLINS, J. J., CHAND, S., VANDERKOP, A. a HOWARD, D. A Review of Physics Simulators for Robotic Applications. *IEEE Access*. 2021, sv. 9, s. 51416–51431, [cit. 2024-5-14]. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:233197454>.
- [49] PUKKI, E. Unreal Engine 4 for Automation. 2021, [cit. 2024-5-14]. Dostupné z: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/496971/Pukki_Evgeny.pdf?sequence=2.
- [50] *Remapping China's morning commute with digital twins* [online]. 2024 [cit. 2024-5-13]. Dostupné z: <https://www.unrealengine.com/en-US/spotlights/remapping-china-s-morning-commute-with-digital-twins>.
- [51] SINGH, S. a KAUR, A. Game Development using Unity Game Engine. In: *2022 3rd International Conference on Computing, Analytics and Networks (ICAN)*. 2022, s. 1–6. DOI: 10.1109/ICAN56228.2022.10007155.
- [52] BARCZAK, A. a WOŹNIAK, H. Comparative Study on Game Engines. *Studia Informatica*. 2020. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234404952>.

- [53] SALAMA, R. a ELSAYED, M. A live comparison between Unity and Unreal game engines. *Global Journal of Information Technology: Emerging Technologies*. 2021. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:261313564>.
- [54] INTEMAC. *Testbed* [online]. 2024 [cit. 2024-5-12]. Dostupné z: <https://www.intemac.cz/o-nas/>.
- [55] INTEMAC. *Testbed* [online]. 2024 [cit. 2024-5-12]. Dostupné z: <https://www.intemac.cz/co-nabizime/test-before-invest/testbed/>.
- [56] JIC o nás [online]. 2024 [cit. 2024-5-12]. Dostupné z: <https://www.jic.cz/cz/o-nas>.
- [57] TAESI, C., AGGOGERI, F. a PELLEGRINI, N. COBOT Applications - Recent Advances and Challenges. *Robotics*. 2023, sv. 12, s. 79. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259228454>.
- [58] ROBOTS, U. *General catalogue, Automate your tasks and increase efficiency with collaborative robots* [online]. 2023 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: https://www.rarukautomation.com/wp-content/uploads/2024/02/12_2023_General-Product-Catalogue_A4_WEB.pdf.
- [59] WORKERS, W. *Universal Robots UR10* [online]. 2024 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://www.wiredworkers.io/cobot/brands/universal-robots/ur10/>.
- [60] ALHAM, R. a HAMMADI, M. Developing a Digital Twin Framework for Monitoring the Trajectory of the UR10 Robot Using an Extended Kalman Filter. *2023 6th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE)*. 2023, s. 86–91. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:267257410>.
- [61] LLC, T. S. *Universal Robots UR10 - Long-Reach Basic Cobot* [online]. 2024 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://thinkbotsolutions.com/products/universal-robots-ur10>.
- [62] ROBOTS, U. *TYPES OF GRIPPERS USED IN MANUFACTURING* [online]. 2020 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/fi/blogi/types-of-grippers-used-in-manufacturing/>.
- [63] SOLUTIONS, T. *Robotiq 2F-85 - Powerful Adaptive Gripper for Universal Robots* [online]. 2024 [cit. 2024-4-23]. Dostupné z: <https://thinkbotsolutions.com/products/robotiq-2f-85>.

- [64] SOORI, M. a AREZOO, B. Dimensional, geometrical, thermal and tool deflection errors compensation in 5-Axis CNC milling operations. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2023. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:257937679>.
- [65] MASTERCAM. *What are the Axes in 5-Axis Machining?* [online]. 2024 [cit. 2024-12-04]. Dostupné z: <https://www.mastercam.com/news/blog/what-are-the-axes-in-5-axis-machining/>.
- [66] SUN, S. a ALTINTAS, Y. A G3 continuous tool path smoothing method for 5-axis CNC machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Dostupné z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234287271>.
- [67] *SLV EDU 5axis Siemens, 5osá frézka* [online]. 2022 [cit. 2024-5-20]. Dostupné z: <https://www.cncstroj.cz/stroje/slv-edu-5axis-siemens/>.
- [68] PARAK, R. *A digital-twins in the field of industrial robotics integrated into the unity3d development platform* [https://github.com/rparak/Unity3D_Robotics_Overview]. GitHub, 2020-2023 [cit. 2024-5-12].
- [69] HRUBÝ, T. *DigitalTwin Unity* [online]. 2024 [cit. 2024-4-20]. Dostupné z: <https://github.com/hrubyt/DigitalTwin>.
- [70] PARAK, R. *Unity3D Industrial Robotics: Sorting Machine (BR Automation, SMC)* [https://github.com/rparak/Unity3D_Robotics_Sorting_Machine/blob/main/Sorting_Machine_OPCUA_Unity_App/Assets/Scripts/Sorting_machine/br_data_processing.cs]. GitHub, 2020-2021 [cit. 2024-5-23].

SEZNAM PŘÍLOH

Elektronické přílohy:

Projekt Unity v Github repozitáři dostupný na adrese github.com/hrubyt/DigitalTwin