

Tvorba modulárního interaktivního digitálního dvojčete výrobního úseku pro virtuální realitu

Matěj Dvořák, Petr Hořejší, Miroslav Malaga, Jan Kubr

Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra průmyslového inženýrství a managementu

Univerzitní 8, 306 14, Plzeň, Česká republika

dvor1s@kp.v.zcu.cz

tucnak@kp.v.zcu.cz

malaga@kp.v.zcu.cz

kubr@kp.v.zcu.cz

Anotace: Článek se zabývá tvorbou modulárního interaktivního digitálního dvojčete sestaveného výrobního úseku stavebnice Fischertechnik pro virtuální realitu. Práce je v první části zaměřena na vysvětlení a objasnění pojmů Průmysl 4.0 a digitální dvojče. V druhé části práce obsahuje stručný popis tvorby 3D modelů v softwaru Blender a následnou tvorbu interaktivního digitálního dvojčete včetně jeho napojení na sestavený výrobní úsek stavebnice Fischertechnik.

1 Úvod

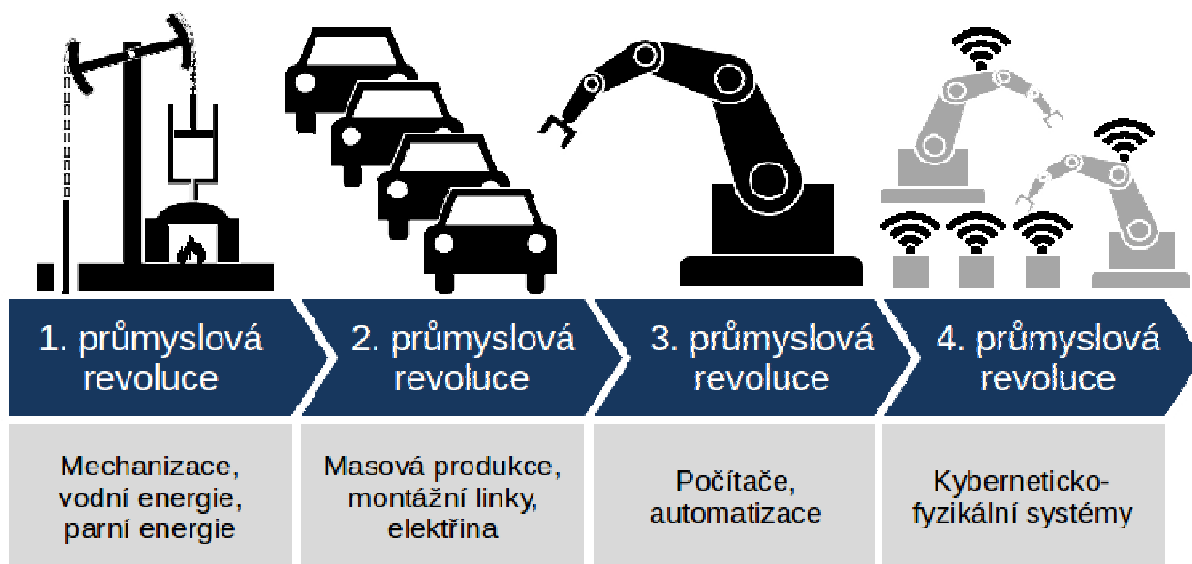
Výrobní model se v této době mění z digitálního na inteligentní v důsledku silného zaměření na rozvoj moderních výrobních, informačních a komunikačních technologií. Aby se zvýšila efektivita, kompetence a konkurenceschopnost podniků, musí se zvýšit jejich úroveň industrializace, automatizace a digitalizace. V souvislosti s tímto probíhajícím vývojem se často používá výraz "Průmysl 4.0", jež vytváří propojenou informační síť s lidmi a stroji ve výrobě. V kontextu s tímto propojením patří mezi klíčové pojmy simulace a digitální dvojčata, tj. virtuální modely fyzického systému, které lze použít k reprezentaci současného stavu podniku nebo k plánování a simulaci nadcházejících změn. Vzhledem k tomu, že komunikace mezi virtuální verzí čehokoli takového a jeho skutečným, fyzickým protějškem je obvykle obousměrná, nabízí sféra digitálních dvojčat nekonečné možnosti firemního růstu.

Práce se zabývá tématem tvorby modulárního interaktivního digitálního dvojčete a jeho napojením na sestavený výrobní úsek, který je pro splnění cílů této práce vytvořen ze stavebnice Fischertechnik. Cílem je úspěšné napojení digitálního modelu skrze sériové porty tak, aby se dosáhlo alespoň jedné podkategorie digitálního dvojčete, které se dle stupňů integrace dělí na – digitální model, digitální stín a digitální dvojče.

2 Průmysl 4.0

V poslední době je Průmysl 4.0 jedním z hojně diskutovaných trendů nejen ve strojním inženýrství. Podniky musejí stále více digitalizovat své prostředí, aby udržely krok s ostatními a trendy Průmyslu 4.0 jsou jim při tom obrovskou podporou.

Průmysl jako takový je považován za část ekonomiky, která vyrábí hmotné statky, jež jsou vysoce mechanizované a automatizované. Od počátku industrializace vedly technologické skoky ke změnám paradigmat, které se dnes ex post nazývají "průmyslové revoluce": v oblasti mechanizace (tzv. 1. průmyslová revoluce), intenzivního využívání elektrické energie (tzv. 2. průmyslová revoluce) a rozsáhlé digitalizace (tzv. 3. průmyslová revoluce). Na základě pokročilé digitalizace v rámci továren se zdá, že kombinace internetových technologií a technologií orientovaných na budoucnost v oblasti "inteligentních" objektů povede k nové zásadní změně paradigmatu průmyslové výroby (viz obrázek 1). [1]



Obrázek 1 – Průmyslová revoluce [2]

2.1 Charakteristika

Cílem Průmyslu 4.0 je dosáhnout vyšší úrovně automatizace, efektivity a produktivity. Mezi nejvýraznější charakteristiky tohoto konceptu se řadí digitalizace, optimalizace, personalizace výroby, interakce člověk-stroj, služby s přidanou hodnotou a další. Tyto charakteristiky nejenže silně korelují s internetovými technologiemi a pokročilými algoritmy, ale také naznačují, že Průmysl 4.0 je průmyslový proces přidávání hodnoty a řízení znalostí.

Ke zvýšení produktivity používá Průmysl 4.0 technologie jako internet věcí (IoT) a služeb (IoS), kybernetické fyzické systémy (CPS), průmyslovou automatizaci, nepřetržitou konektivitu, kybernetickou bezpečnost, inteligentní robotiku, PLM, sémantické technologie, průmyslová big data a počítačové vidění (obrázek 2). Tyto uvedené technologie mohou ovlivnit způsob výroby výrobků a také vnímání hodnoty výrobku zákazníky. Navržené výrobky mají

jedinečnou elektronickou identifikaci, aby bylo možné sledovat životní cyklus výrobku. To umožní dostatečný sběr údajů o jeho používání. Podniky mohou díky tomu lépe porozumět spotřebě jednotlivých výrobků a tím je mohou přizpůsobit specifickým požadavkům zákazníka. Kromě toho budou vazby mezi stroji, zařízeními a prvky dodavatelského řetězce s pomocí společně sdílených informací poskytovat možnost rychle měnit priority zakázek (podle požadavků zákazníků nebo požadavků na údržbu), sledovat a řídit výkonnost montážních linek, sledovat dodávky a také zlepšovat logistické trasy. [3]

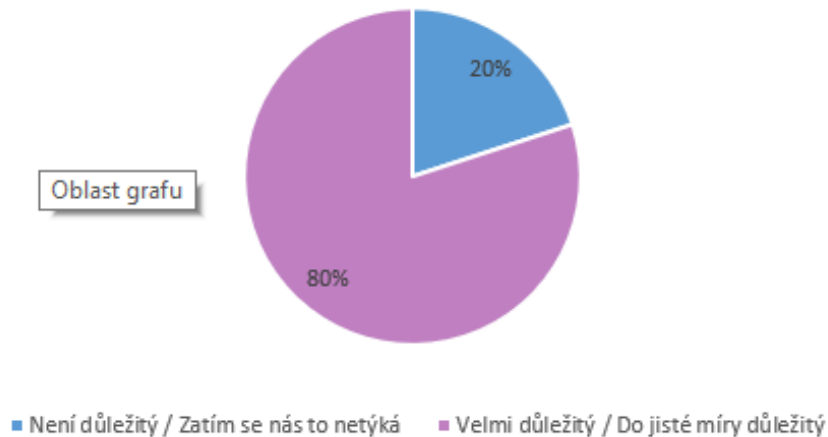


Obrázek 2 – Technologie Průmyslu 4.0 [4]

2.2 Vnímání trendu Průmyslu 4.0

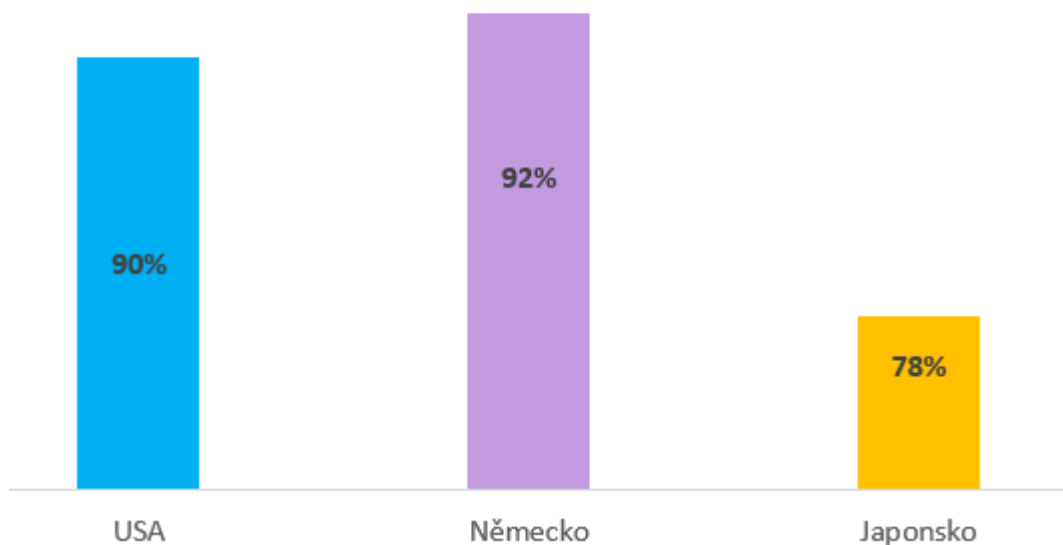
Předpoklady, které jsou uvedeny v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, jednoznačně dokládají příchod 4. průmyslové revoluce (4IR). Již nyní je koncept Průmyslu 4.0 nevyhnutelným budoucím fungováním většiny podniků. Na druhé straně je velmi zajímavou otázkou poznání praktického aspektu vnímání tohoto trendu a možnosti uplatnění jeho nástrojů v činnosti podniků. Výzkum provedený v článku [5] vychází ze sekundárních dat, získaných z mnoha odborných zpráv a studií, realizovaných státními institucemi, konsorcií či podniky.

Význam průmyslu 4.0 pro podniky



Obrázek 3 – Význam průmyslu 4.0 pro podniky [3]

Většina dotazovaných společností si je vědoma významu Průmyslu 4.0. Jak je vidět na obrázku 3, pouze pro 20 % respondentů není 4IR důležitá a dosud neovlivnila jejich provoz. Podniky, pro které je Průmysl 4.0 pro jejich fungování zásadní, mohou vývoj a aplikaci nových technologií vnímat jako příležitost nebo hrozbu pro svou činnost a postavení na trhu. Na obrázku 4 je znázorněn přístup k této problematice ve Spojených státech, Německu a Japonsku. Většina podniků ve všech třech zemích považuje Průmysl 4.0 za příležitost, nikoliv za hrozbu. V USA a Německu takový názor vyjádřilo více než 90 % dotázaných. Podnikatelé z Japonska jsou ve vztahu ke 4. průmyslové revoluci o něco méně nakloněni optimismu, nicméně i mezi nimi většina uznává její pozitivní rozměr. [3]



Obrázek 4 – Průmysl 4.0 jako příležitost, ne jako riziko [3]

3 Digitální dvojče

Jak je již jasné z předchozí kapitoly, digitalizace se nevyskytuje pouze na úrovni továren. Chytré továrny vyrábějí chytré výrobky. Miniaturizace a pokles cen umožňují integraci informačních, komunikačních a sensorových technologií i do těch nejmenších výrobků. Výrobky začínají být schopny vnímat svůj vlastní stav i stav svého okolí. Ve spojení se schopností zpracovávat a komunikovat tato data umožňují vytvářet digitální dvojčata.

Od vzniku konceptu Johna Vickerse a Dr. Michaela Grievese [6] se mnoho autorů pokoušelo definovat pojem digitální dvojče, počínaje leteckým průmyslem se zaměřením na stavební mechaniku, materiálové vědy a dlouhodobé předpovědi výkonnosti leteckých a kosmických plavidel. S nástupem Průmyslu 4.0 se pozornost přesunula na výrobu a chytré výrobky. V této souvislosti může digitální dvojče pomoci při zajišťování kontinuity informací v průběhu celého životního cyklu výrobku, při virtuálním uvádění (výrobních) systémů do provozu a při podpoře rozhodování a předvídání chování systému ve fázi vývoje výrobku i ve všech následujících fázích životního cyklu na základě počítačem podporovaných simulací.

Pro účely této práce je digitální dvojče, které je znázorněné na obrázku 5, chápáno jako komplexní digitální reprezentace jednotlivého produktu. Zahrnuje vlastnosti, stav a chování reálného objektu prostřednictvím modelů a dat. Digitální dvojče je soubor realistických modelů, které mohou simulovat jeho skutečné chování v nasazeném prostředí a je vyvíjeno souběžně s jeho fyzickým dvojčetem a zůstává jeho virtuálním protějškem po celou dobu životního cyklu výrobku. Kromě toho lze digitální dvojče rozdělit do tří podkategorií, dle stupně integrace – konkrétně dle odlišného stupně toku dat a informací, který může nastat mezi fyzickou částí a její digitální kopií. Těmito podkategoriemi jsou digitální model, digitální stín a digitální dvojče. [7]



Obrázek 5 – Digitální dvojče [8]

4 Popis tvorby interaktivních digitálních dvojčat

Tato kapitola obsahuje podrobný popis modelování jednotlivých dílů výrobního úseku v softwaru Blender a následného napojení jednotlivých částí na komunikaci s reálným modelem, který byl vytvořen ze stavebnice Fischertechnik.

4.1 Modelování v softwaru Blender

Pro plynulejší chod cílové aplikace je nutné vymodelovat jednotlivé části výrobního úseku tak, aby byl zajištěn co nejplynulejší chod aplikace ve virtuální realitě podporující platformu Android. Z toho důvodu jsou úseky vymodelovány ze základních geometrických útvarů a poskládány po částech do větších funkčních celků. Dále jsou modely zjednodušeny vynecháním veškerých kabelových svazků, které v reálném modelu zajišťují propojení jednotlivých pracovišť výrobní linky. Kvůli animování¹, které je nezbytnou součástí tvorby digitálního dvojčete, je nutné u každé části výrobního úseku nadefinovat takové prvky, které budou simulovat pohyb reálného modelu. Části jsou z důvodu jednodušší pozdější manipulace v programu Unity 3D rozděleny na 6 úseků:

Senzorová stanice – Obecně zajišťuje komunikaci s ostatními částmi výrobního úseku zobrazuje data, jako je hladina otřesů na pracovišti, úroveň hluku, vlhkost a teplota vzduchu (obrázek 6 – vlevo).

Sklad polotovarů – Sklad obsahující tři druhy polotovarů (pro zjednodušení jsou použity stejné geometrické tvary odlišené barvou – červená, modrá, bílá) v regálech, ze kterých je poté materiál vyskladňován na pásový dopravník (obrázek 6 – vpravo).

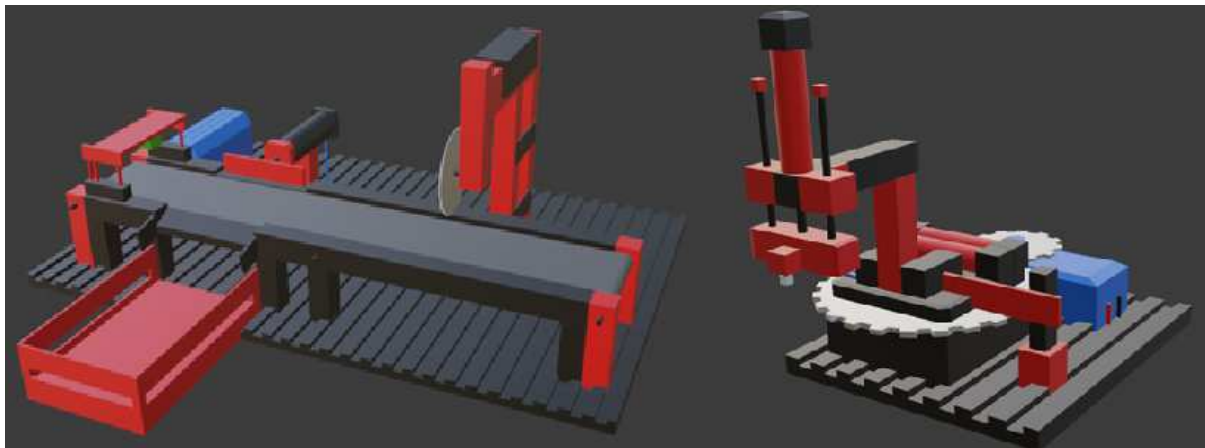


Obrázek 6 – Senzorová stanice a sklad polotovarů

¹ Vytváření zdánlivě se pohybujících věcí ve vybraném softwaru.

Pracoviště s laserovým senzorem a pilou – V tomto úseku (obrázek 7 – vlevo) se nejprve polotovar dostane pod laserový senzor, který na základě vad v materiálu rozhodne, zda se jedná o zmetek, nebo může polotovar pokračovat po pásovém dopravníku dále. Pokud senzor vyhodnotí polotovar jako zmetek, odsune ho do paletky určené pro vadné kusy. V opačném případě putuje na pracoviště pily, kde je simulováno nařezání na menší části a obrobek pokračuje dále k rotačnímu rameni.

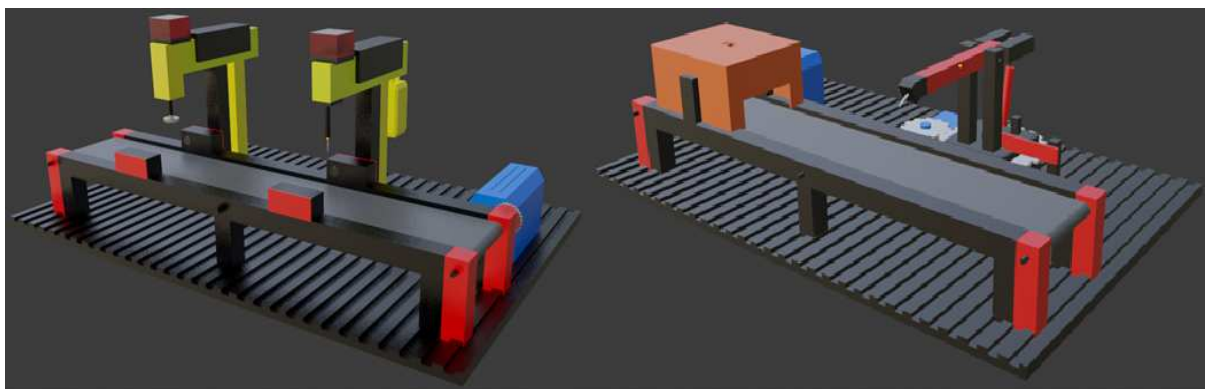
Rotační rameno – Rameno (obrázek 7 – vpravo) sloužící pro přesun opracovaného polotovaru mezi dvěma výrobními úseky, a to mezi pracovištěm pily a frézou.



Obrázek 7 – Laserový senzor, pila a rotační rameno

Frézka a vrtačka – Zde (obrázek 8 – vlevo) se polotovar dostává po pásovém dopravníku nejprve na pracoviště frézky, kde je obroben a dále putuje k vrtačce. Obě tyto pracoviště mají na svých stanovištích světelné senzory pro znázornění poruchy na zařízení.

RGB senzor a svařovací stanice – V posledním výrobním úseku (obrázek 8 – vpravo) se obrobek dostává do RGB senzoru, ve kterém je díky prostupnosti daného materiálu zjištěno, jaký typ obrobku se zpracovává a s touto informací putuje dále do svařovací stanice, kde probíhá finální obrobení součásti a její následný přesun do palety pro hotové výrobky.



Obrázek 8 – Frézka, vrtačka, RGB senzor a svařovací stanice

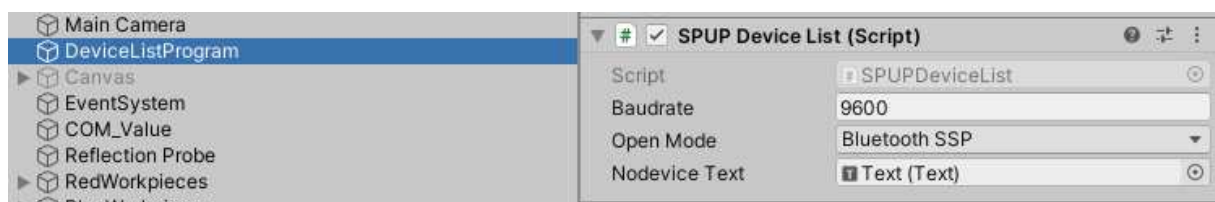
4.2 Propojení digitálního dvojčete s reálným modelem

Tato kapitola popisuje napojení na reálný model. Stavebnice Fischertechnik, která je určena jako vzor simulace vymodelovaného prostředí, je propojena s PC pomocí USB. Po jejím spuštění začne díky USB propojení vypisovat očekávaná data na COM port počítače.

Pro napojení na COM port je do předem zvoleného softwaru Unity 3D naimportován předdefinovaný asset² Serial Port Utility Pro, mezi jehož hlavní funkce patří:

- Snadná implementace komunikace mezi počítači v Unity prostřednictvím sériových portů.
- Implementace komunikace mezi počítačem a mikro kontrolerem (Arduino, Ftdi, Microchip, Cypress, Silicon Labs atd) prostřednictvím sériových portů.
- Multiplatformní použití s operačními systémy Windows, Mac a Android.
- Funkci řízenou událostmi pro příjem dat.
- Detekce chyby při fyzickém odpojení zařízení.
- Podpora fyzického rozhraní USB, PCI a další.
- Podpora Bluetooth SPP (Virtuální COM Port).
- Podpora emulátoru sériového portu TCP (režim serveru a režim klienta). [9]

Do aplikace, která již obsahuje sestavený virtuální model výrobní linky, je v dalším kroku vložen objekt *DeviceListProgram*, který již obsahuje komponentu ve formě skriptu s názvem *SPUP Device List*. Důležitým nastavením pro čtení z virtuálního COM portu je nastavit položku *Baudrate* na stejnou hodnotu, jakou má COM port přijímající data z reálného modelu, tedy 9600. Jelikož model v této fázi přijímá data z počítače, ve kterém se nachází více COM portů, položka *Open Mode* se nastaví na hodnotu *Bluetooth SSP*, čímž je docíleno načítání všech dostupných COM portů nacházející se právě v místním počítači (obrázek 9).



Obrázek 9 – Nastavení objektu *DeviceListProgram*

Po spuštění *Play Modu* v Editoru se automaticky načtou a vygenerují všechny COM porty, které jsou v počítači dostupné. Hlavním cílem je napojení na virtuálně vytvořený COM2, který přijímá data z COM1 skrze virtuální

² Element, který můžete použít ve hře nebo projektu. Tento element může pocházet ze souboru vytvořeného mimo Unity, například 3D modelu, zvukového souboru, obrázku nebo jiného typu souboru, který Unity podporuje.

propojení. Každému z těchto COM portů je assetem Serial Port Utility Pro přiřazen skript *SerialPort Utility Pro*, jehož kód musí být následně upraven.

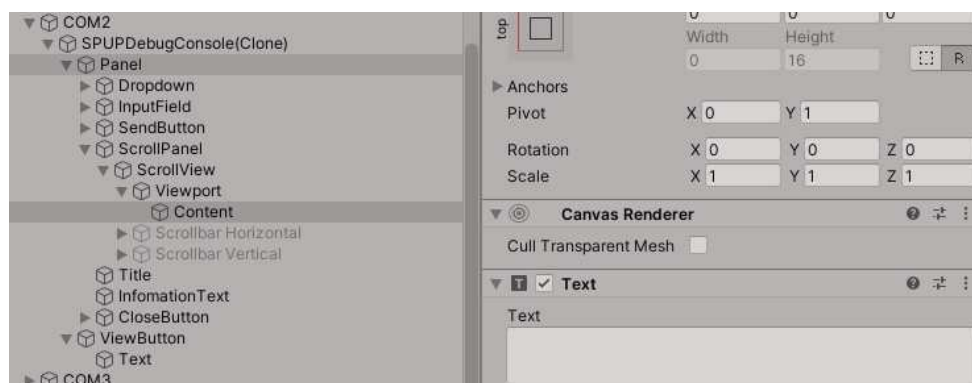
```

public void SerialDebugAddString(string message, bool
send_direction)
{
    if(message.Length > 128) message =
message.Remove(128); //max 128
    string dir = send_direction ? " (SEND)" : "";
    string debug = message;
    //string debug = string.Format("[{0}{1}] {2}\n",
System.DateTime.Now.ToString("MM/dd HH:mm:ss"), dir, message); //
Odebrání data a času na výpisu
    SerialDebugString = message; // Příjem dat
    if
(SerialDebugString.Split("\n".ToCharArray()).Length >=
SerialDebugStringMAX)
    {
        SerialDebugString =
SerialDebugString.Remove(SerialDebugString.LastIndexOf('\n'));
    }
}

```

V kódu je okomentován příkaz *System.DateTime.Now.ToString*, který defaultně vypisuje nejenom přijímaná data na COM portu, ale i datum a čas přijetí, což pro účely této aplikace není potřebné. Místo toho je přidán příkaz *SerialDebugString = message*, který na výstup v Unity 3D posílá úplně stejná data, jaké COM port přijme.

Pod každým objektem portu je vygenerován objekt *SPUPDebugConsole(Clone)*, jenž obsahuje velmi důležitý skript *Debug Console*. Metoda *ViewButtonClick()* totiž otevírá daný COM port a tím i jeho přístup ke čtení dat z počítače. Hierarchicky jsou objektu *SPUPDebugConsole(Clone)* přiřazeny podřazené objekty včetně položky *Content*, jejíž *TextBox* vypisuje přijímané hodnoty z COM portu formou textového řetězce *String* (viz obrázek 10).



Obrázek 10 – Hierarchie generovaných objektů pro daný COM port

Asset Serial Port Utility Pro je předdefinovaný tak, že u každého COM portu generuje několik objektů typu *Canvas*³ a *Button*⁴, které by díky uživatelskému rozhraní překrývaly modely a prostředí aplikace. Z toho důvodu je vytvořen skript *Get COM Value*, zobrazený níže.

```
public class GetCOMValue : MonoBehaviour
{
    public string COMPort = "COM2";
    public GameObject OpenedCOMGO;
    public GameObject SpupDebugConsoleOurCOM;
    public DebugConsole debugConsoleScript;
    GameObject[] SpupConsolesGOs;
    Canvas[] SpupConsolesCanvases;
    public GameObject ContentGO;
    private Text contentText;
    public int ReceivedData; // přijatá data na COM portu ve
formátu string

    public int CheckForIntChange; // int, který kontroluje, zda-
li se změnila hodnota a tudíž nastal nový stav

    public GameObject ManagerGO;
    private WorkpieceFlow workPieceFlowScript;

    void Start ()
    {
        OpenedCOMGO = GameObject.Find(COMPort);
        Invoke(nameof(GetCOMComponentAndRecievedData), 0.01f);
        CheckForIntChange = ReceivedData;
        workPieceFlowScript =
ManagerGO.GetComponent<WorkpieceFlow>();
    }

    private void FixedUpdate ()
    {
        int.TryParse(contentText.text, out ReceivedData);
        if (CheckForIntChange != ReceivedData && (ReceivedData
!= 11 && ReceivedData != 12 && ReceivedData != 14 && ReceivedData !=
```

³ Oblast, ve které se nachází všechny prvky uživatelského rozhraní.

⁴ Tlačítko uživatelského rozhraní

```

15 && ReceivedData != 17 && ReceivedData != 18 && ReceivedData != 19
&& ReceivedData != 33 && ReceivedData != 52 && ReceivedData != 53 &&
ReceivedData != 54))
    {
        CheckForIntChange = ReceivedData;
        workPieceFlowScript.ListOfID.Add(CheckForIntChange);

        if (CheckForIntChange == 10 || CheckForIntChange ==
13 || CheckForIntChange == 16)
        {
            workPieceFlowScript.PerformAnimationMain();
        }
    }
}

```

V úvodu skriptu je deklarován jmenný prostor *namespace SerialPortUtility* z důvodu načítání komponent z assetu Serial Port Utility Pro, který si tuto třídu generuje a připojuje se k ní v každém skriptu. Na 5. řádku je nadefinován *public string COMPort*, jehož hodnotu je možné měnit v závislosti na čísle portu, ke kterému se zrovna reálný model připojuje. Tato hodnota se pak kopíruje v metodě *Start()*, kde je do proměnné *GameObject OpenedCOMGO* načten právě zvolený COM port. Proměnné *ContentGO*, *contentText* slouží k načtení textového řetězce z objektu *Content* (přijímá data ze zvoleného COM portu) a v metodě *FixedUpdate()* je pomocí funkce *int.TryParse(contentText.text, out ReceivedData)* převeden na celočíselný datový typ vypisovaný pomocí proměnné *int ReceivedData*. Protože se však metoda *FixedUpdate()* ve skriptu volá každý frame, je přidána pojišťovací proměnná *int CheckForIntChange*, která se v metodě *Start()* nastaví na stejnou počáteční hodnotu, jako proměnná *int ReceivedData* a přidáním podmínky *if* do metody *FixedUpdate()* kontroluje, v jaký daný moment se změnila hodnota *int ReceivedData*. Druhá část podmínky obsahuje celočíselné hodnoty, které nemají vliv na výsledné animace, a proto jsou díky dané podmínce ignorovány. Ve chvíli splnění zmíněné podmínky se hodnota těchto dvou proměnných (*CheckForIntChange* a *ReceivedData*) znovu synchronizuje a výsledná hodnota je přidána jako poslední prvek do generického listu *ListOfID*, který obsahuje komponenta *workPieceFlowScript*. Ta je načítána z *GameObject ManagerGO* a jejím hlavním úkolem je nadefinování a pouštění jednotlivých animačních stavů skrze generický list tak, aby animace proběhla i při časové prodlevě, kterou může způsobit rozdílná rychlost mezi procesy reálného modelu a jeho digitálního dvojčete.

5 Závěr

Hlavním praktickým výstupem této práce je aplikace, která ve virtuální realitě simuluje procesy reálného modelu stavebnice Fischertechnik, a to včetně komunikace s modelem v reálném světě. Z pohledu definice digitálního dvojčete, tedy dle míry integrace, spadá uvedená aplikace do druhé podkategorie, tedy digitálního stínu. Výstup bude sloužit i jako pomůcka při výuce na Katedře průmyslového inženýrství a managementu na Západočeské univerzitě v Plzni. Dalším využitím je propojení a využití výstupů z této práce Ing. Bc. Miroslavem Malagou ve své disertační práci a pro další vědecké účely (články, publikace, a další). V neposlední řadě bude aplikace obecně používána i pro prezentaci katedry.

Článek obsahuje ve své první části popis pojmů Průmysl 4.0 a digitální dvojče. Ve své druhé části se věnuje popisu tvorby modulárního interaktivního digitálního dvojčete pro virtuální realitu včetně prvotního 3D modelování jednotlivých úseků stavebnice Fischertechnik. Modularita je zajištěna díky jednoznačnému oddělení dílčích výrobních úseků v aplikaci, s tím, že každý tento úsek funguje jako „black box“ se svými vstupy a výstupy. Nebude tedy výrazně problematické tuto aplikaci dále rozšiřovat, či měnit pořadí strojů ve výrobě. Pro další vývoj této aplikace by bylo vhodné zvýšit míru integrace a posunout tak finální aplikaci do první integrační podkategorie. Z toho důvodu je dalším logickým krokem vylepšení komunikace mezi reálným a digitálním modelem, a to nahrazením komunikace přes sériové porty cloudovým serverem. Další podmínkou pro to, aby se zvýšila míra integrace digitálního dvojčete, je vytvoření ovládacího panelu uvnitř digitálního modelu, pomocí kterého bude možné ovlivňovat chování reálného modelu skrze posílané příkazy.

Poděkování

Tento článek byl vytvořen za podpory interního grantu Západočeské univerzity číslo SGS-2021-028 s názvem Vývojové a tréninkové prostředky pro interakci člověka a kyber-fyzického výrobního systému (Developmental and training tools for the interaction of man and the cyber-physical production system).

Použitá literatura

- [1] LASI, Heiner, Peter FETTKE, Hans Georg KEMPER, Thomas FELD and Michael HOFFMANN. Industry 4.0. Business and Information Systems Engineering [online]. 2014, 6(4). ISSN 18670202. Dostupné z: doi:10.1007/s12599-014-0334-4
- [2] Průmysl 4.0: čtvrtá průmyslová revoluce právě probíhá [online]. [Citace: 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.enovation.cz/aktuality/dotace-pro-podnikatele/prumysl-40-ctvrta-prumyslova-revoluce-prave-probiha/>

- [3] ŚLUSARCZYK, Beata. Industry 4.0: are we ready? Polish Journal of Management Studies [online]. 2018, Vol. 17, No. 1(1), 232–248 [Citace: 2021-11-30]. ISSN 2081-7452. Dostupné z: doi:10.17512/PJMS.2018.17.1.19
- [4] STANTON CHASE. 2017 Global Industrial Survey. 2017 Global Industrial Survey. 2017.
- [5] GRIEVES, Michael. Digital Twin : Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication - A Whitepaper by Dr . Michael Grieves. White Paper. 2014, (March).
- [6] HAAG, Sebastian and Reiner ANDERL. Digital twin – Proof of concept. *Manufacturing Letters* [online]. 2018, 15, 64–66 [Citace: 2021-11-30]. ISSN 2213-8463. Dostupné z: doi:10.1016/J.MFGLET.2018.02.006
- [7] DVOŘÁK, M. *Tvorba modulárního interaktivního digitálního dvojčete výrobního úseku pro virtuální realitu*. Plzeň, 2022. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta strojní.
- [8] *Digitální dvojče: Vůdčí technologie inteligentního průmyslu | ANASOFT* [online]. [Citace: 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.anasoft.com/emans/cz/home/Novinky-blog/Blog/digitalni-dvojce-top-technologie-inteligentniho-prumyslu>
- [9] Serial Port Utility Pro for Unity: Device control becomes easy with Unity. [online]. [Citace: 2022-04-14]. Dostupné z: <https://portutility.com/>