VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

# VERIFIKACE STAVU REÁLNÉ VÝROBNÍ LINKY POMOCÍ VIRTUÁLNÍ REALITY

## VERIFICATION OF REAL THE STATE OF THE REAL PRODUCTION LINE USING VIRTUAL REALITY

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE Ing. ZDENĚK TŮMA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. RADEK KNOFLÍČEK, Dr.
SUPERVISOR

BRNO 2014

## Abstrakt

Disertační práce je zaměřena na verifikaci stavu reálného pracoviště pomocí virtuální reality. Práce se tématem zabývala obsáhleji a brala v potaz dílčí proces návrhu výrobního pracoviště. Od posouzení samotného místa, kde budoucí výrobní pracoviště bude stát, přes ergonomické, rizikostní a jiné analýzy. Dále pak spotřebě energií pracoviště (elektrická energie, spotřeba vzduchu apod.) při reálném provozu. V rámci analýzy připravenosti aplikací virtuální reality byla vybrána pro následující práci rozšířená realita. Největší výhodou rozšířené reality je implementace virtuálního modelu a možnost řešit analýzy v reálném prostředí, což je přínosné zejména v případě výrobních podniků. Pro sestavení a optimalizaci navržených řešení je využito systémového přístupu.

V první fázi řešení byla provedena analýza současného stavu výrobního pracoviště, kde vznikly požadavky na návrh nového pracoviště. Následovala fáze přípravy konstrukce v 3D modeláři, v tomto případě Autodesk Inventor. Právě v této fázi se jevilo jako výhodné využít aplikace virtuální reality, jelikož v průběhu návrhu dochází k pravidelným schvalovacím řízením odborného týmu (management, konstrukce, kvalita, …), což klade na připravenost týmu vysoké kvalifikační požadavky.

V rámci této fáze byl 3D návrh nového pracoviště vložen do aplikace s podporou rozšířené reality a byly naznačeny možnosti při řešení ergonomických analýz a analýz rizik. Z navrženého řešení také plyne nasazení v oblasti štíhlé výroby v návrhové fázi, kdy je možné řešit analýzu procesu pomocí metody nepřímého měření standardních časů (MOST).

Výsledkem disertační práce je zejména rozšíření možností při navrhování a analyzování výrobních pracovišť a strojů v multidisciplinárních týmech. Navrhované řešení popsané v disertační práci umožňuje zjednodušení a celkové snížení časové a finanční náročnosti celkového procesu od navrhování výrobního pracoviště až po jeho uvedení do provozu.

## Klíčová slova

Virtuální realita, rozšířená realita, návrh výrobních pracovišť

## Abstract

The doctoral thesis focuses on the verification of state real work using virtual reality. Working with the theme dealt with more comprehensively, taking into account the sub-process of the production line design. From the assessment of the actual place where the future production line will be locate, through ergonomic, risk and other analysis. Furthermore, energy consumption of production line (electricity, air consumption, etc.) in real process. In analysing the readiness of virtual reality applications were selected for the following work augmented reality. The biggest advantage of augmented reality is the implementation of a virtual model and the opportunity to deal with the analysis in a real environment, which is particularly beneficial in the case of manufacturing companies. For the composition and optimization of the proposed solution was used a system approach.

In the first phase of the solution was made analysis the current state of the work, which created requirements for the design of the new production line. This was followed by the preparation phase of construction in 3D, in this case, Autodesk Inventor. In this phase it was appeared to be advantageous to use the application of virtual reality, as in the design process leads to regular approval procedure of the experts team (management, design, quality, etc.), which puts on the readiness of the team high skills requirements.

In this phase, the 3D design of the new production line was inserted into the support augmented reality application and outlined several opportunities to deal ergonomic and risk analysis. The proposed solution also follows the deployment in lean production area in the design phase, where it is possible to solve the analysis process using indirect methods of standard time (MOST).

The result of the doctoral thesis is the extension options in designing and analysing production lines and machines in multidisciplinary teams. The proposed solution described in the thesis allows to simplification and reduce the overall time and costs of the overall process from design phase of production line to its commissioning.

## Keywords

Virtual reality, augmented reality, design of production lines

Bibliografická citace

TŮMA, Z. Verifikace stavu reálné výrobní linky pomocí virtuální reality. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 77s. Vedoucí disertační práce doc. Dr. Ing. Radek Knoflíček.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Verifikace stavu reálné výrobní linky pomocí virtuální reality vypracoval samostatně a jen na základě citovaných zdrojů a za podpory školitele.

V Brně dne 28. 3. 2014 ……

Ing. Zdeněk Tůma

Poděkování

Tímto děkuji školiteli doc. Dr. Ing. Radkovi Knoflíčkovi za vedení této práce, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat za pomoc a spolupráci svým kolegům. V neposlední řadě pak děkuji za podporu svým blízkým a rodině.

Poděkování patří také všem kolegům brněnského pracoviště Výzkumného centra pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (VCSVTT) a rovněž i dalším pracovníkům Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně za jejich pomoc.

Vypracování této dizertační práce bylo podporováno Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci projektu výzkumu a vývoje 1M0507 – Výzkum strojírenské výrobní techniky a technologie, Technologickou agenturou České republiky v rámci řešeného projektu TE01020075 – Centrum kompetence - Strojírenská výrobní technika a Evropským fondem regionálního rozvoje prostřednictvím Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/01.0002 s názvem „NETME Centre – Centrum nových technologií pro strojírenství“.

# OBSAH


**OBSAH** ..... **7**

**1 ÚVOD** ..... **9**

**2 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU ZE STUDOVANÉ PROBLEMATIKY V OBORU VIRTUÁLNÍ REALITY** ..... **9**

2.1 HISTORIE ..... 9
2.2 VIRTUÁLNÍ REALITA ..... 9
*2.2.1 Charakteristiky virtuální reality* ..... *10*
2.3 ROZDĚLENÍ VIRTUÁLNÍ REALITY ..... 11
*2.3.1 Pohlcující virtuální realita (immersive VR)* ..... *11*
*2.3.2 Rozšířená realita (augmented reality - AR)* ..... *11*
*2.3.3 Jednoduchá virtuální realita (desktop VR, low-end VR)* ..... *13*

**3 EFEKTIVNÍ STAVBA VÝROBNÍCH LINEK VE VÝROBNÍCH PODNICÍCH** ..... **14**

3.1 POŽADAVKY PRO STAVBU VÝROBNÍCH LINEK ..... 14
3.2 ANALÝZA RIZIK ..... 14
*3.2.1 Management rizik* ..... *14*
3.3 ŠTÍHLÁ VÝROBA ..... 17

**4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE** ..... **19**

4.1 DEFINICE PROBLÉMU ..... 19
4.2 CÍLE ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE ..... 20
4.3 OČEKÁVANÝ PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE ..... 20
4.4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE ..... 20
4.5 ETAPY ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE ..... 21

**5 TEORETICKÝ ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY** ..... **21**

5.1 SYSTÉMOVÁ VĚDA ..... 21
*5.1.1 Teorie systémů* ..... *21*
*5.1.2 Systémová analýza a syntéza* ..... *22*
*5.1.3 Systémový přístup* ..... *22*
*5.1.4 Technický objekt jako systém* ..... *24*
*5.1.5 Struktura technických objektů* ..... *27*

**6 NAPLNĚNÍ VYTYČENÝCH CÍLŮ ŘEŠENÍ LABORATORNÍM EXPERIMENTEM** ..... **29**

6.1 DÍLČÍ CÍL PRVNÍ ČÁSTI ŘEŠENÍ - SKENOVÁNÍ HALY PRO UMÍSTĚNÍ NOVÉ NEBO STÁVAJÍCÍ VÝROBY ..... 29
*6.1.1 Použité technické vybavení první části řešení* ..... *29*
*6.1.2 Prostorové skenování objektů* ..... *30*
*6.1.3 Jednotlivé kroky řešení prvního dílčího cíle* ..... *30*
*6.1.4 Závěr první části řešení* ..... *32*
6.2 DÍLČÍ CÍL DRUHÉ ČÁSTI ŘEŠENÍ - APLIKACE VIRTUÁLNÍ REALITY V NÁVRHU A ANALÝZÁCH VÝROBNÍHO PRACOVIŠTĚ ..... 32
*6.2.1 Použité technické vybavení druhé části řešení* ..... *32*
*6.2.2 Software pro práci v imerzní virtuální realitě (CAVE, POWERWALL)* ..... *34*
*6.2.3 Software pro práci v rozšířené virtuální realitě s nasazením v reálném prostředí* ..... *35*
*6.2.4 Typy modelů* ..... *42*
*6.2.5 Formát VRML (Virtual Reality Modeling Language)* ..... *44*
*6.2.6 Formát X3D* ..... *47*
*6.2.7 Profily X3D a rozšířené API* ..... *47*
*6.2.8 Jednotlivé kroky řešení druhého dílčího cíle* ..... *48*
*Závěr druhé části řešení* ..... *57*
6.3 DÍLČÍ CÍL TŘETÍ ČÁSTI PRÁCE - ZOBRAZENÍ SPOTŘEBY ENERGIÍ REÁLNÉHO VÝROBNÍHO PRACOVIŠTĚ (STROJE) ..... 57
*6.3.1 Použité technické vybavení třetí části řešení* ..... *57*
*6.3.2 Jednotlivé kroky řešení třetího dílčího cíle* ..... *58*

**7 ZÁVĚR** ..... **60**

7.1 SHRNUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ ..... 60
7.2 TEORETICKÝ PŘÍNOS PRÁCE ..... 61
7.3 PRAKTICKÝ PŘÍNOS PRÁCE ..... 61
7.4 PEDAGOGICKÝ PŘÍNOS PRÁCE ..... 61

**POUŽITÁ LITERATURA: ..... 63**

**SEZNAM OBRÁZKŮ ..... 66**

**SEZNAM TABULEK A GRAFŮ ..... 67**

**VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST ..... 68**

**TVŮRČÍ AKTIVITY ..... 69**

**SPOLUPRÁCE NA PROJEKTECH SPECIFICKÉHO VÝZKUMU VUT ..... 70**

# 1 Úvod

Hlavním důvodem a motivací, proč se tímto tématem zabývat, je vysoká cena projekčních a konstrukčních prací, zejména při vývoji a výrobě prototypu technického objektu (stroje nebo zařízení). Neméně důležitým se jeví i úspora času a značná výhoda pracovat s virtuálním modelem dříve, než je realizován ve výrobě. V rámci řešení konstrukcí a projektů je možno využít technologií virtuální reality v několika fázích. Zejména v přípravných fázích projektů se snaží průmyslová praxe snižovat časovou a tedy i finanční náročnost v etapách výzkumu, vývoje, zkoušení a výroby technického objektu. Mezi další značně nákladné části projektů patří právě zmiňovaná fáze tvorby prototypů, kde technologie virtuální reality nabízí veliké možnosti uplatnění, jak ve fázi sestavování samotného prototypu, tak i ve fázi simulací a testování prototypu.

# 2 Shrnutí současného stavu ze studované problematiky v oboru virtuální reality

Virtuální realita prodělala v posledních deseti letech bouřlivý rozvoj v souvislosti s růstem výkonu a poklesem ceny počítačů. Dnes už o ní slyšel téměř každý člověk, hlavně díky stálému zájmu médií o novinky v této oblasti. Vše, co souvisí s virtuální realitou má nádech něčeho tajemného, podobně jako například výsledky umělé inteligence, která si prodělala období svého rozmachu a popularity v 70. letech. Přes obrovské prostředky investované do výzkumu umělé inteligence (nejvíce v Japonsku a USA) se počáteční nadšení zastavilo a ukázalo se, že tyto peníze sice nejsou vyhozené, ale původní ambiciózní projekty svou náročností o desítky let předbíhají možnosti výpočetní techniky i stupeň rozvoje vědy.[1]

## 2.1 Historie

Historie virtuální reality spadá do konce šedesátých a začátku sedmdesátých let dvacátého století. Úvahy o podobných systémech byly spojeny s rozvojem počítačové grafiky. V této době byly předvedeny první vstupní prostředky pro interaktivní grafiku. Obraz vytvářely dvě obrazovky umístěné po stranách, které přenášely obraz uživateli jednoduchou optikou přes speciální brýle. Bylo možné sledovat jednoduché geometrické obrazce na pozadí obrazu skutečného okolí. K dalšímu vývoji došlo díky NASA počátkem osmdesátých let. Bylo to umožněno růstem výkonu grafických systémů a dostupností levných displejů. Jaron Lanier svým přilbovým displejem a kontaktní rukavicí vzbudil v roce 1989 velký komerční zájem. Pro potřeby internetu vyvinula firma Silicon Graphics v roce 1995 tzv. VRML (Virtual Reality Modeling Language).[1]

## 2.2 Virtuální realita

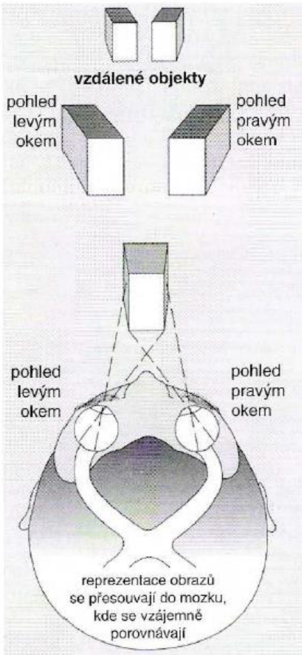
Virtuální realita (VR) pomocí počítačových zařízení umožňuje napodobovat reálný prostor a činnosti člověka v něm. Je tvořena počítačovým modelem trojrozměrného prostředí, přičemž účastník virtuální reality se v tomto prostředí zdánlivě reálně pohybuje. Jedná se o uživatelské rozhraní, jehož cílem je pokud možno co nejvíce přiblížit počítačové prostředí skutečnosti tak, jak ji zachycují naše smysly. Uživatel by měl být do tohoto prostředí co nejvíce vtažen (ponořen)[2]. Prostředím se rozumí svět existující výhradně v paměti počítače. Může to být např. model stroje, domu. Prostředí lze zkoumat mnoha různými metodami včetně virtuální reality.

Systémy virtuální reality můžeme rozdělit do tří stupňů podle virtuálního prostředí a podle obtížnosti jejich realizace:

- Pasivní – můžeme pozorovat, poslouchat, případně také hmatem vnímat virtuální okolí. Okolí se mění, můžeme mít dojem pohybu, ale pohyb nelze řídit.[3]
- Aktivní – máme možnost prostředí zkoumat. Hlavní odlišností proti prvnímu stupni je, že můžeme pohyb řídit (létání, chůze, atd.). Ve virtuálním domě se rozhlížíme, prohlížíme předměty, přecházíme mezi místnostmi.
- Interaktivní – nejdokonalejší stupeň. Systém nám dovoluje dokonce prostředí měnit, např. uchopit předměty a pracovat s nimi, přemísťovat je, tvarovat, atd.[4]

### 2.2.1 Charakteristiky virtuální reality

- Reálný čas – zobrazování a interakce s uživatelem se provádějí takovou rychlostí, při níž se pohyb na obrazovce jeví jako plynulý.
- Interakce – scéna obsahuje interaktivní objekty. S některými uživatel přímo manipuluje, jiné jsou animovány podle předem daných scénářů či s ohledem na aktivitu uživatele.
- Vnoření (imerze) – uživatel neprohlíží scénu jen zvenčí, ale vstupuje do ní a prochází v ní po drahách (chodí, létá, přesouvá – teleportuje se). Při pohybu může na uživatele působit gravitace a jsou vyhodnocovány kolize při nárazu do objektů.
- Stereoskopické zobrazení – pocit, že se člověk nachází v trojrozměrném prostoru, je nejvíce ovlivněn zrakem. Zornice lidských oči jsou od sebe vzdáleny přibližně 7 cm, a proto do mozku přicházejí dva mírně rozdílné pohledy. Ty jsou následně skládány a z jemných rozdílů mezi nimi je odvozena hloubka (prostorovost). Přesvědčivost systémů pro VR je často založena právě na využití tzv. stereoskopických pohledů (Obr. 1). Každý stereoskopický pohled je tvořen dvojicí obrazů vzniklých perspektivním promítáním ze dvou bodů ležících vedle sebe ve vzdálenosti cca 7 cm.




**Obr. 1: Fyziologické principy procesu vidění – tvorba a vnímání obrazu**[5]

## 2.3 Rozdělení virtuální reality

Prvním hlediskem pro rozdělení virtuálních systémů je množství skutečných a umělých prvků prezentovaných prostřednictvím VR uživateli. Klasifikace je pak dána postupným přechodem od skutečného světa do plně počítačového prostředí.[6] Jedno z takových členění, nazýváme kontinuum RV (reality-virtuality continuum) viz Obr. 2.

**Obr. 2: Kontinuum reality – virtuality**

Druhým hlediskem pro rozdělení je technické vybavení.

### 2.3.1 Pohlcující virtuální realita (immersive VR)

Pohlcující virtuální realita je vždy spjata se speciálními technickými zařízeními, která mají v co největší míře oprostit (odříznout) uživatele od vjemů skutečného světa a dodat mu zdání, že je zcela ponořen do světa virtuálního. Mezi typická periferní zařízení patří helma se stereoskopickými brýlemi a sluchátky, snímače detekující prostorovou polohu uživatele nebo datová rukavice nahrazující jednodušší vstupní zařízení. Často je k navození vjemu uživatel umístěn v simulátoru, kabině, která se naklání a vyvolává pocit pádu či odstředivé síly. Mezi zajímavé technické součásti patří dotyková zařízení (tactile, force feedback), která jsou schopna měnit odpor či tlak vyvíjený proti ruce uživatele, který tak fyzicky pociťuje mechanické vlastnosti virtuálního materiálu.

### 2.3.2 Rozšířená realita (augmented reality - AR)

Informace ze skutečného, okolního světa mohou být kombinovány s doplněnými prvky virtuální reality [7],[8]. Součástí systému bývá kamera, jejíž pozice a orientace je synchronizována s pohybem uživatele. Příkladem je použití ve vojenských letadlech a vozidlech, kde je venkovní obraz snímaný kamerou přenášen na obrazovku a okamžitě doplněn výraznými symboly pro nepřátelské a spřátelené objekty.

**Obr. 3: Vuzix - he Tac-Eye LT**

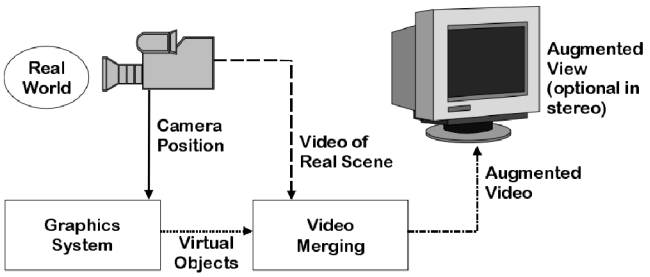
Z civilní oblasti uveďme použití rozšiřující AR při instalaci elektrických rozvodů o celkové délce mnoha desítek kilometrů v letadlech Boeing. Montážní dělníci mají nasazeny

polopropustné brýle (Obr. 3), přes které normálně vidí, ale do nichž jsou jim současně promítány doplňující informace pro montáž zařízení. Mezi další příklad patří využití mobilních telefonů a tabletů, např. aplikace Layar umožňující při průhledu přes vestavnou kameru doplňovat informace o okolí nebo aplikace iOnRoad, která při řízení automobilu vyhodnocuje vzdálenost od ostatních aut a uživatele včas varuje, že se nachází v nebezpečné zóně.
Rozšířená realita existuje v následujících typech:

## Typy rozšířené reality

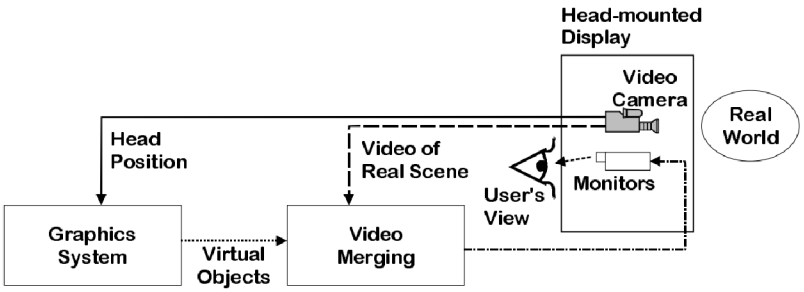
Rozdělení rozšířené reality dle technického vybavení:

- **Rozšířená realita s pomocí klasického monitoru** (Monitor-based augmented reality) – pro práci je využit monitor a kamera (Obr. 4), která zjišťuje orientaci v prostoru. Nevýhodou tohoto řešení je nízký stupeň vnoření uživatele do virtuálního světa.



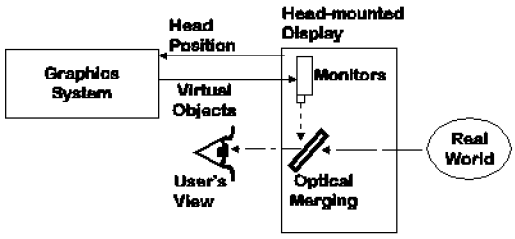

**Obr. 4: Monitor-based augmented reality** [9]

- **Rozšířená realita s pomocí neprůhledového head-mounted displeje** (Video see-through augmented reality display) – tento typ zařízení pro rozšířenou realitu dopomáhá uživateli navodit vjem vnoření. Jako technické vybavení je použita helma s integrovanými displeji a kamerou. Uživatel pozoruje okolí skrz obraz zprostředkovaný kamerou (Obr. 5).




**Obr. 5: Video see-through augmented reality display** [9]

- **Rozšířená realita s pomocí průhledového head-mounted displeje** (Optical See-through Augmented Reality Display) – helma oproti předešlému případu využívá polopropustné zrcadlo (Obr. 6) přes, které uživatel sleduje okolí, a současně jsou mu na zrcadlo zobrazovány doplňkové informace.




**Obr. 6: Optical See-through Augmented Reality Display**[10]

Dále se principiálně rozšířená realita dělí na aplikace:

- S použitím vodicích značek – pro zjištění pozice využívá nejčastěji 2D značky viz Obr. 7.
    - Frame markers – značka obsahuje sledovací rámeček, do kterého je umístěn libovolný obrázek, který není započten do výpočtu pozice.
    - Split markers – značka je rozdělena na dvě sledovací zóny, proto aplikace neztrácí komunikaci během zakrytí jedné ze zón. Značka může být opět doplněna o obrázek, který nezasahuje do výpočtu.
    - Dot markers – používá se, pokud potřebujeme znak co nejvíce potlačit. Znak je vytvořen pomocí sítě černých bodů a bílých kruhů.
    - DataMatrix markers – znaky dle (ISO/IEC16022)
    - ID markers – odvozeno z DataMatrix markers.
    - Template markers – znaky používané v aplikacích ARToolkit.
    - Picture marker – značku tvoří obrázek.
- Bez použití vodicích značek – využívá např. GPS signál pro zjištění pozice výhledu kamery.

**Obr. 7: Typy vodicích značek a) frame marker b) split marker c) dot marker d) datamatrix marker e) ID marker f) template marker g) picture marker**

### 2.3.3 Jednoduchá virtuální realita (desktop VR, low-end VR)

Do této skupiny řadíme aplikace, které nevyužívají speciální technická zařízení. K iluzi práce nebo pohybu ve virtuálním světě poslouží obyčejná obrazovka, představující „kukátko“ do jiného prostoru. Stereofonní reproduktory dodají zdání prostorového zvuku, myš nahradí složité ukazovací a uchopovací zařízení. Aplikace jednoduché virtuální reality lze provozovat na většině běžných počítačů, a proto je jejich škála skutečně rozmanitá – od zábavy (počítačové hry) přes vzdělávání (např. simulace pohybu planet ve vesmíru) až po profesionální aplikace (výzkum, trénink, simulace).

# 3 Efektivní stavba výrobních linek ve výrobních podnicích

## 3.1 Požadavky pro stavbu výrobních linek

Mezi významné požadavky pro návrh a stavbu výrobních linek je možné na základě zkušeností a konzultací s pracovníky z praxe lze přibližně zahrnout následující body.
Jsou to technicko-ekonomické požadavky na:

- funkčnost a provozuschopnost,
- bezpečnost – splnění všech bezpečnostních kritérií, posouzení rizika - analýza rizik
- štíhlou výrobu (lean manufacturing) – snižování plošné rozlohy výrobní linky, skladu, plýtvání – viz dále
- atd.

## 3.2 Analýza rizik

### 3.2.1 Management rizik [11]

Základní filozofie managementu rizika vychází z konstatování, že u žádného reálného procesu nelze dosáhnout absolutní bezpečnosti, a je-li průběh jakéhokoli procesu zatížen rizikem, které je vyšší než mezní riziko, musí se předpokládat, že dříve či později dojde k výskytu nebezpečné události a vzniku škody, pokud nebudou realizována žádná bezpečnostní a ochranná opatření.

### Všeobecné základy managementu rizik

Riziko vyjadřuje míru ohrožení a je vždy dáno dvěma základními prvky, kterými jsou jednak závažnost škody, která může vzniknout v důsledku výskytu nebezpečné události při nezvládnutí specifikované nebezpečné situace v rámci konkrétního procesu, jednak pravděpodobnost vzniku této škody. Jako management rizik nazýváme systematický proces, při kterém se riziko identifikuje, analyzuje, odhaduje, posuzuje a minimalizuje během celého životního cyklu zařízení při současném respektování systémových cílů podniku. Management rizik je součástí strategického managementu podniku a lze jej rovněž dělit na strategický a operativní.

**Obr. 8: Management rizik** [11]

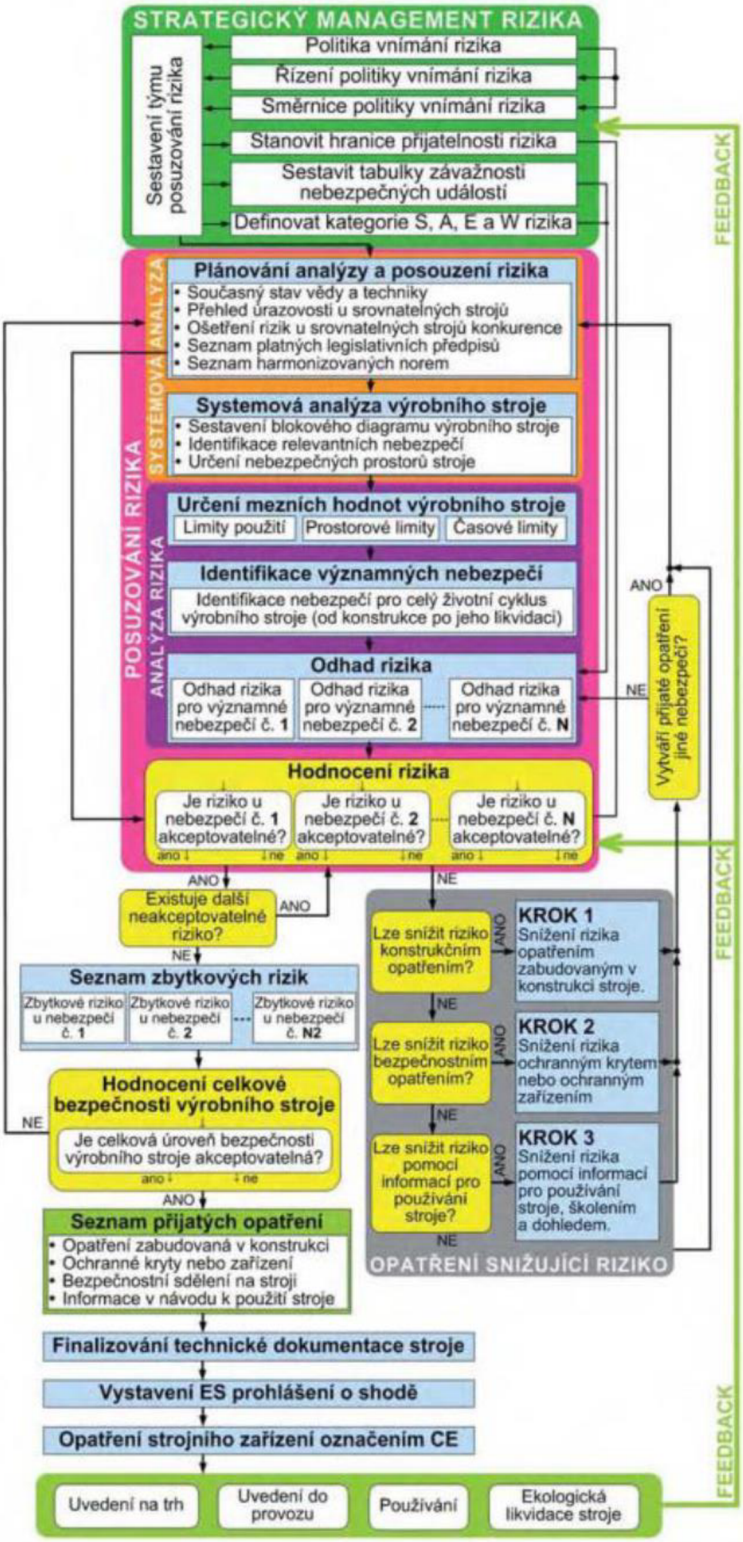
Mezi úkoly strategického managementu rizik patří zejména stanovení přístupu podniku k rizikům, řízení politiky vnímání rizik, vydávání směrnic politiky vnímání rizik pro operativní management, stanovení hranic velikosti rizik pro hodnocení jejich závažnosti, definice kategorií pravděpodobnosti výskytu rizik, sestavování tabulek významu rizik a v neposlední řadě sledování a optimalizování poměru náklady/efekt. Požadavky na ochranu zdraví a bezpečnost by měly být ze strany strategického managementu stanoveny rozumně, s ohledem na stav techniky v době konstrukce a na technické a ekonomické možnosti. Redukce rizik má být prováděna až do okamžiku, kdy náklady na další redukci rizik již nejsou úměrné efektu této redukce (tzv. požadavek na docílení rentabilního řešení). Operativní (provozní) management má za úkol provádět činnosti identifikace, posuzování, plánování, sledování a ošetřování rizik viz Obr. 8.

**Obr. 9: Oblast managementu technických rizik** [12]

Všechny činnosti spojené s vývojem strojního zařízení, zabezpečování jeho jakosti, bezpečnosti, hygieny a ekologie jsou spojeny s riziky. Úkolem managementu těchto technických rizik (rizik vyplývajících z konstrukce stroje, jeho řízení, ustavování, údržby, provozu, likvidace apod.) je tato rizika včas detekovat, ohodnotit (posoudit), a v případě potřeby navrhnout a zrealizovat nápravná opatření. Obr. 9 prezentuje rozsáhlé pole působnosti technického managementu rizik [11].

## Management technických rizik u výrobních strojů a výrobních pracovišť

Obr. 10 na následující straně popisuje formou postupového diagramu systémový přístup pro posouzení rizik a stanovení preventivních opatření k předcházení poruch a snižování rizik s využitím standardních metod a nástrojů pro řízení jakosti v konstrukci, výrobě, montáži a provozu výrobních strojů. Tato metodika byla v rámci výzkumného projektu číslo 2.4.1 – Analýza rizik a bezpečnost strojů vyvinuta na brněnském pracovišti Výzkumného centra pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (VCSVTT). Jak je z obrázku patrné, jedná se o komplexní iterativní (opakovací) proces tvořený řadou na sebe navazujících kroků, umožňujících systematicky identifikovat, analyzovat a odhadnout riziko pro specifickou nebezpečnou situaci, vyhodnotit odhadnuté riziko, rozhodnout o nutnosti jeho ošetření, a v případě, že je to zapotřebí, vybrat a realizovat vhodné bezpečnostní a ochranné opatření ke snížení rizika.




**Obr. 10: Postupový diagram managementu technických rizik** [13]

## 3.3 Štíhlá výroba

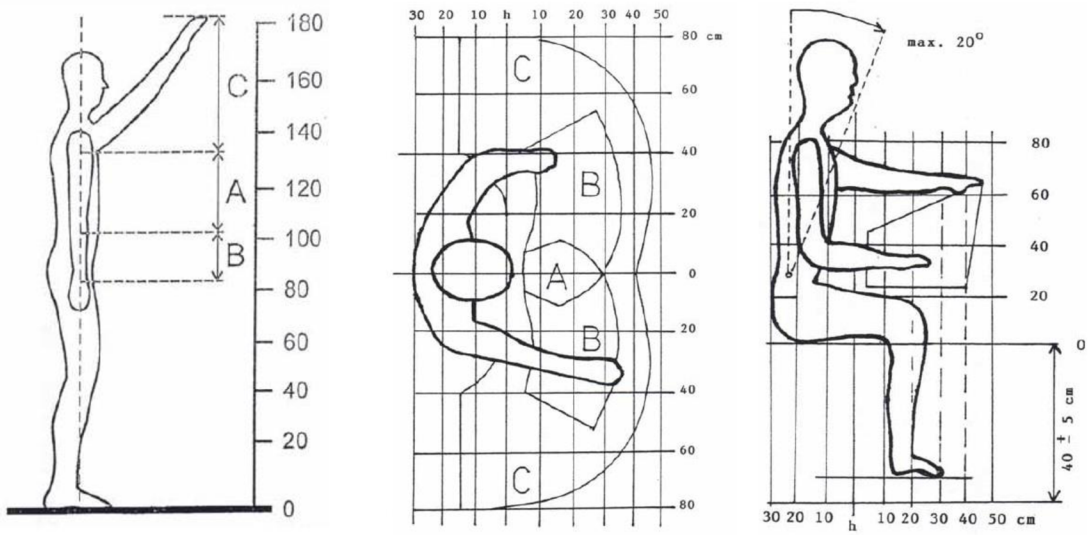
Štíhlá výroba je soubor nástrojů a principů, kterými se soustřeďujeme na výrobu – výrobní pracoviště, linky, strojní zařízení, výrobní pracovníky. Cílem je mít standardizovanou výrobu. [14][15]

- 5S (Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke) – je souhrn pěti základních kroků, které vedou k odstranění plýtvání na pracovišti. Jde hlavně o odstranění nepotřebných předmětů z pracoviště, udržování pořádku na pracovišti, standardizace uspořádání a organizace pracoviště.
- Analýza pracoviště – kvantifikuje, popíše a definuje potenciály ke zlepšení, zvýšení produktivity, kvality a snížení plýtvání.
- VSM (Value stream mapping) – mapování hodnotového toku je grafický nástroj k analýze současného stavu procesu s cílem navrhnout stav budoucí.
- Stop linka – je využívána při projektování a optimalizaci výrobních linek. Jde o systém standardizace a vizualizace při vzniku problému na lince.
- Analýza a měření práce – zahrnuje soubor nástrojů a metod, jejichž cílem je zanalyzovat a změřit vykonávanou práci. Je to jedna ze základních znalostí průmyslového inženýra.
- MOST (Maynard Operation Sequence Technigue) a jeho aplikace [16] – metoda nepřímého měření spotřeby času pracovní činnosti viz Obr. 11. Vychází ze skutečnosti, že jakákoliv práce je vlastně přemisťování hmoty či objektu a můžeme tuto práci popsat jedním ze čtyř sekvenčních modelů.

| Stroj | Operace | VZOREC | | | | | | | | | | | | | Opakování | TMU | sekund |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Lisování filtrů | levá ruka - vložení filtru do lisu | A | B | G | A | B | P | A | | | | | | | | | |
| | | | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | | | | | | | 40 | 1,44 |
| | pravá ruka - vložení těla do lisu | A | B | G | A | B | P | A | | | | | | | | | 0 |
| | | | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | | | | | | | 20 | 0,72 |
| | práce s lisem | A | B | G | M | X | I | A | | | | | | | | | 0 |
| | | | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | | | | | | | 40 | 1,44 |
| | vyjmutí dílu z lisu | A | B | G | A | B | P | A | | | | | | | | | 0 |
| | | | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | | | | | | | 40 | 1,44 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | 5,04 |

**Obr. 11: Příklad MOST**

- Ergonomie – je vědecká disciplína, optimalizující interakci mezi člověkem a dalšími prvky systému. Využívá teorii, poznatky, principy, data a metody k optimalizaci polohy člověka a výkonnosti systému, viz Obr. 12 [14][17].




a) b) c)

**Obr. 12: Dosahy horních končetin a)ve svislé rovině při práci vstoje b) ve svislé rovině při práci vsedě i vstoje c) ve svislé rovině při práci vsedě. Včetně zón dosahu A (časté a přesné pohyby), B (přijatelný dosah), C (maximální dosah, nepřijatelné pro časté pohyby)** [18]

- SMED (Single-Minute Exchange of Die) – je jednou z mnoha metodik štíhlé výroby pro snižování plýtvání ve výrobním procesu. Je to rychlý a účinný způsob přestavení výrobního procesu z aktuálního produktu na další produkt. Cílem této metodiky je zkrátit čas přetypování (seřízení) pod 10 minut.
- Optimalizace pracoviště – v praxi se často optimalizace pracoviště zaměňuje se zavedením metody 5S. Aby bylo pracoviště optimalizováno, měli bychom eliminovat veškerá plýtvání.
- Optimalizace linky – je systematický proces vedoucí ke zvýšení výkonu linky, zvýšení kvality vyráběného produktu, úspoře plochy a zlepšení pracovního prostředí a podmínek při práci.
- TPM (Total Productive Maintenance) – management produktivity výrobních zařízení je souhrn činností, které uvedou strojní zařízení do optimálních podmínek, a to včetně nastaveného systému udržování!
- FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) – analýza možných vad a jejich důsledků. Je to metoda, jejímž cílem je definovat všechny možné vady související s daným výrobkem či procesem.
- 7 nových nástrojů kvality – abychom mohli efektivně plánovat, zlepšovat jakost produktů i procesů, nemůžeme se v dnešní době spoléhat pouze na klasické nástroje kvality. Byly vytvořeny další nástroje, které pomáhají řešit danou problematiku, a to afinní diagram, relační diagram, stromový diagram, maticový diagram, diagram maticové analýzy dat, šipkový diagram a PDPC diagram.
- 7 klasických nástrojů kvality – klasické nástroje jsou využívány v oblasti zlepšování procesů. Mezi tyto nástroje patří stratifikace, datová (frekvenční) tabulka, histogram, Paretova analýza, diagram příčin a následků (Ishikawův diagram), analýza rozptylu a trendu dat, kontrolní diagram.
- QFD (Quality function deployment) – základním nástrojem QFD pro plánování nového výrobku je Dům JAKOSTI.
- Systém zlepšování – Efektivní systém zlepšování zapojuje a motivuje pracovníky k tomu, aby sami přicházeli s nápady, jak zvýšit efektivitu procesu a snížit plýtvání.
- Poka-yoke – zabránění vzniku neshod ve výrobním, ale i nevýrobním procesu.

- Takt time – je tempo, kterým zákazník odebírá daný výrobek nebo službu.
- One-piece flow (Tok jednoho kusu) – výroba, při které výrobek prochází jednotlivými operacemi procesu bez přerušování a čekání. V daný časový okamžik je tedy vyráběn na příslušné operaci pouze jeden výrobek, který je bezprostředně předán na operaci následující. Protikladem toku jednoho kusu je výroba v dávkách [19], viz Obr. 13.
    - snižuje rozpracovanost ve výrobě, nadvýrobu
    - zviditelňuje problémy a včas odhaluje nekvalitu
    - usnadňuje plánování a organizaci práce
    - redukuje výrobní plochy
    - identifikuje úzká místa v procesu

**Obr. 13: Výroba v dávkách vs. Tok jednoho kusu**

- Vizuální pracoviště – je jasně uspořádané, řízené, organizované pracoviště a všechny procesy jsou popsány a definovány. Vizuální pracoviště dosahuje své autonomnosti díky standardům, ukazatelům a vizuálnímu řízení.
- Ukazatel OEE (Overall Equipment Effectiveness) – udává využití strojů a zařízení. Dle tohoto ukazatele je možné usoudit, zda stroje a zařízení fungují účinně a efektivně.

# 4 Cíle disertační práce

## 4.1 Definice problému

Jak vyplývá z předchozí kapitoly zabývající se analýzou současného stavu řešené problematiky, efektivní stavba výrobních linek a pracovišť zahrnuje početnou skupinu činností, od počátečního návrhu pracoviště přes analýzu rozmístění pracoviště (layout), identifikace rizik, ergonomickou studii až po časové navržení práce na pracovišti. Jde o natolik složitou a komplexní úlohu, že pro celkový vývoj pracoviště je nezbytná vysoce kvalifikovaná tvůrčí mezioborová spolupráce. Právě využitím technologie virtuální reality je, dle autorova názoru, možno významnou měrou zjednodušit komunikaci v interdisciplinárním týmu zabývajícím se návrhem i realizací výrobní linky a tím i časově snížit náročnost celkového řešení. Vzhledem k tomu, že se jedná o technologii relativně moderní, tak doposud schází v této problematice využití jejího teoretického nasazení právě v oblasti identifikace rizik, ergonomie a toku jednoho kusu v životním cyklu návrhu a realizace výrobních linek a pracovišť.

## 4.2 Cíle řešení dizertační práce

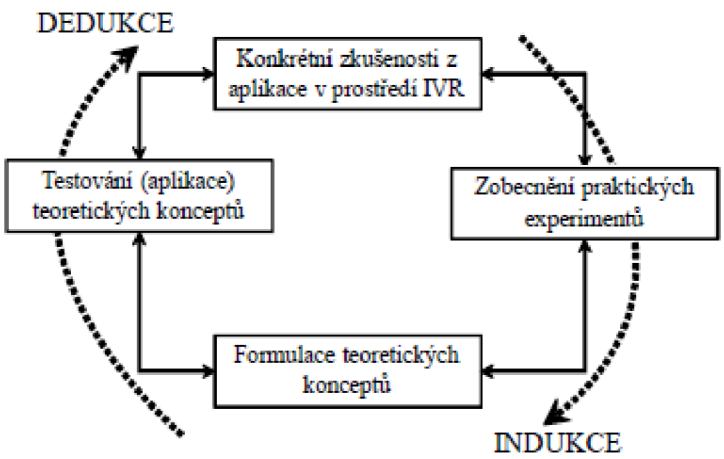
**Koncepčním cílem** dizertační práce s názvem **Verifikace stavu reálné výrobní linky pomocí virtuální reality** je **analyzovat** a **prověřit** možné způsoby pro integraci vizualizačních a interakčních technik virtuální reality do oblasti identifikace rizik, ergonomie a toku jednoho kusu v životním cyklu návrhu a realizace výrobních linek a pracovišť.

## 4.3 Očekávaný přínos dizertační práce

Modifikací současného přístupu při návrhu výrobních pracovišť o technologie virtuální reality bude možné, kromě již zmiňovaných a v praxi velmi podstatných finančních úspor i možnost odhalovat chyby již v rané fázi vývoje stroje (pracoviště), tj. v analýzách rizik, ergonomických analýzách a jiných analýzách. To umožní docílit také zefektivnění práce konstruktéra a zkrátit časovou (a potažmo i finanční) náročnost návrhu a zvýšit transparentnost celého procesu, což s sebou přinese i vyšší kvalitativní úroveň vstupů pro nastavení pracoviště a odhad rizika, který je v systému managementu rizika dalším navazujícím krokem při identifikaci rizika.

## 4.4 Zvolené metody zpracování dizertační práce

Na výše definovanou problematiku začlenění technologie virtuální reality do oblasti návrhu výrobních pracovišť je nahlíženo pomocí systémového přístupu. Existující metodické postupy zaměřené na návrh pracoviště, identifikaci nebezpečí a analýzu rizik zde tvoří měkké systémy, kde vstupuje do interakce celá řada faktorů, z nichž ne všechny jsou jasně kvantifikovatelné. K analýze potenciálních možností nasazení technologie virtuální reality do oblasti návrhu výrobních linek a pracovišť bude použit deskriptivní analytický přístup založený na empirickém rozboru stávajících metod návrhu výroby. Výsledky této analýzy budou sloužit pro následný návrh způsobů integrace vizualizačních a interakčních technik virtuální reality do oblasti identifikace rizik a ergonomie a jiných analýz. Tohoto návrhu bude dosaženo syntézou obou systémů. Navržené způsoby budou experimentálně ověřeny na virtuálních modelech výrobního pracoviště v různých fázích vývoje návrhu. Další část práce je věnována modifikaci navržených metodických postupů, při kterých se využívá párových metod indukce a dedukce. Metody indukce a dedukce spolu velmi úzce souvisejí. Tuto souvztažnost dobře vystihuje tzv. Kolbův experimentální cyklus (Kolb, Rubin, McIntyre: Organizational Psychology. An experimental Approach. 1979) – viz Obr. 14.




**Obr. 14: Kolbův experimentální cyklus**

Z experimentálních ověření na praktických aplikacích následně vyplynou i další doporučení týkající se využití metodiky návrhu výrobních pracovišť modifikované o technologie virtuální reality.

## 4.5 Etapy řešení dizertační práce

Následující body shrnují nejvýznamnější etapy řešení předložené dizertační práce.

- Analytický rozbor možných způsobů integrace vizualizačních a interakčních technik virtuální reality do oblasti identifikace rizik, ergonomie a toku jednoho kusu v životním cyklu návrhu a realizace výrobních linek a pracovišť.
- Rozdělení do tří samostatných součástí tvořících celek řešení návrhu výrobních pracovišť.
- Formulace závěrů a doporučení pro využití technologie virtuální reality v oblasti identifikace rizik, ergonomie a toku jednoho kusu v životním cyklu návrhu a realizace výrobních linek a pracovišť.

Následující kapitola obsahuje teoretický rozbor řešené problematiky, přičemž podkapitola 5.1 Systémová věda popisuje zvolenou metodu zpracování cílů této dizertační práce.

# 5 Teoretický rozbor řešené problematiky

## 5.1 Systémová věda [6]

Cílem předložené dizertační práce je analyzovat a prověřit možné způsoby pro integraci vizualizačních a interakčních technik virtuální reality do oblasti identifikace rizik, ergonomie a toku jednoho kusu v životním cyklu návrhu a realizace výrobních linek a pracovišť.
**Z pohledu vědeckých metod bude tedy použit deskriptivní analytický rozbor založený na systémovém přístupu.**

### 5.1.1 Teorie systémů [20]

O teorii systémů se poprvé hovořilo již v roce 1949, od té doby vzniklo velké množství jejích definic. Na věcné a velmi obecné úrovni lze teorii systémů vymezit takto:
„Teorie systémů je teoreticko-filozofická vědní disciplína, která se na obecné úrovni a komplexně zabývá vším, co souvisí s existencí, strukturou, vlastnostmi, ovlivňováním a chováním strukturovaných reálných i abstraktních objektů“.[21]
Obecná teorie systémů se především zabývá:

- vytvářením obecné systémové terminologie tím, že logicky vymezuje pojmy jako systém, soustava, prvek, vazba, interakce, struktura, okolí soustavy či systému atd.;
- vyšetřováním podmínek existence soustav či systémů a jejich vlastností, jako ovladatelnost, řiditelnost, stabilita, spolehlivost, možnost testování, chování atd.;
- vymezením cílového chování soustav, možnostmi vzniku odchylek od cílového chování a jim odpovídajícím různým typům chování;
- studiem matematického izomorfizmu mezi různými systémy či soustavami;
- vytvářením nehmotných systémů na hmotných soustavách;
- studiem cílů soustav a metodami jejich chování;
- a studiem mnoha dalších aspektů na soustavách a systémech.

### 5.1.2 Systémová analýza a syntéza [20]

Systémová analýza a syntéza (dále SAS) představuje soubor logických a formalizovaných postupů pro zkoumání struktury a chování složitých soustav. Je to metodologicko-aplikační disciplína pro řešení mnohokriteriálních problémů na strukturně a procesně složitých reálných nebo abstraktních objektech.

SAS jako jedna ze základních disciplín systémové vědy má tyto charakteristiky [21]:

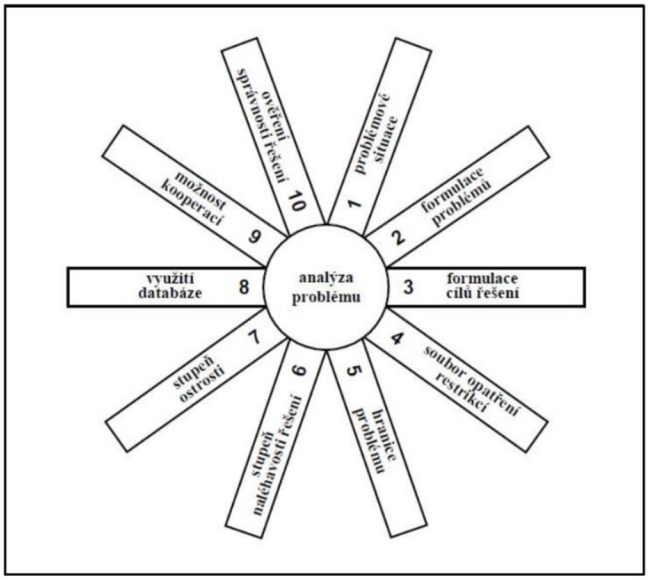
- Předmětem zkoumání mohou být nejrůznější typy objektů, pro které je charakteristická strukturní, procesní a problémová složitost.
- Problémy, které se řeší na výše uvedených objektech, se týkají jejich aktivace, struktur, vlastností a chování a je pro ně charakteristické to, že jsou:
    - mohutné – problémy s mnoha proměnnými, mezi nimiž jsou složité vazby;
    - interdisciplinární – řešení problémů vyžaduje spolupráci mnoha různých oborů;
    - neostré z hlediska formulace a cílů problémů, metodik řešení;
    - nestabilní, což znamená, že v procesu řešení problémů mohou nastávat změny ve výchozích předpokladech, vyžadující novou reformulaci problémů.
- Pro řešení problémů s využitím SAS je typické, že:
    - procesy řešení mají iterativní charakter a řešení se realizuje na různých rozlišovacích úrovních;
    - složitost a interdisciplinárnost problémů vyžaduje řešitelské týmy složené z odborníků různého zaměření, takže je důležitá pojmová a terminologická ujasněnost;
    - jako metody řešení se využívají metodologicky rozpracované „úlohy SAS“, modelování, optimalizační a statistické metody, expertní systémy apod.
- Charakter přístupu k řešení problému a volba metod jsou výrazně ovlivněny typem objektu a typem problému, který se na něm řeší. To znamená, že ne všechny typizované „úlohy SAS“ jsou nutné a vhodné pro řešení každého problému.
- Úkolem SAS vzhledem k řešitelům problému je:
    - zvyšovat znalosti řešitelů o strukturách objektu a o procesech na nich probíhajících, k čemuž slouží strukturní úlohy SAS a úlohy o chování objektů;
    - napomáhat řešitelům analyzovat a formulovat problémové situace;
    - přispět k výběru nejvhodnějších metod pro řešení problémů;
    - zvyšovat úroveň analýzy výsledků řešení problémů a napomáhat při jejich implementaci a realizaci.

### 5.1.3 Systémový přístup

Systémový přístup je nástroj vědeckého i praktického poznání, přispívající k efektivní realizaci poznávacích procesů a tím i k řešení problémových situací na strukturně a procesně složitých entitách, nezávisle na jejich oborových podstatách [22].
Systémový přístup je takový tvůrčí způsob a proces myšlení, aplikovaný na lidské činnosti spojené s řešením problémů, který respektuje charakteristické systémové znaky, které lze formulovat dle následujících bodů [20]:

1. Obsahově (významově) správné vymezení pojmů týkajících se objektů, procesů, jevů apod., vyskytujících se v činnostech, na něž se aplikuje systémový přístup, tedy např. v řešení problémů apod.
2. Prioritu má analýza problémové situace a problému, zejména z následujících hledisek: definice problému a jeho vytyčených cílů, vymezení hranic problému a následujících analýz – soubor omezení, naléhavosti řešení, stupňů ostrosti, využití databází,

použitelných metod řešení, možností kooperací a verifikačních možností pro ověření správnosti řešení, viz Obr. 15.



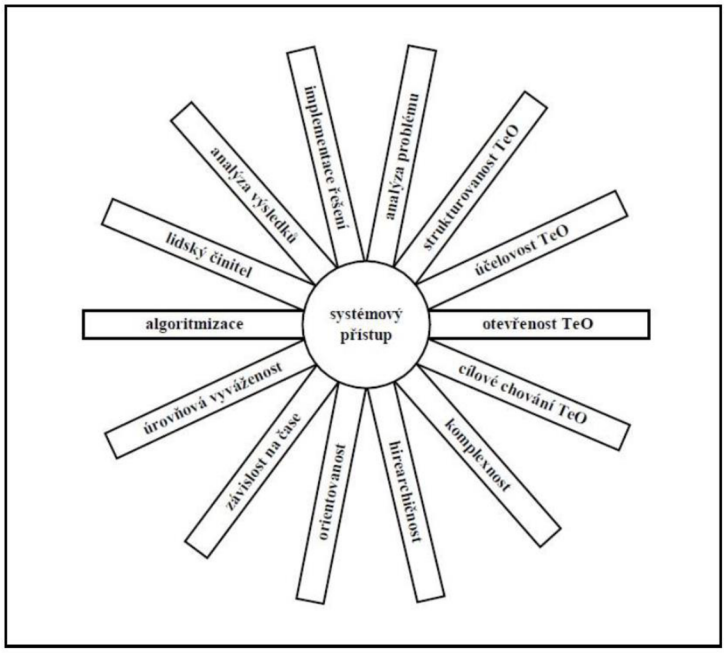

**Obr. 15: Analýza problému** [21]

3. Objekty (tělesa, soustavy, jejich vlastnosti, metody řešení, problémy, atd.) a na nich probíhající procesy jsou chápány strukturovaně, tedy jako soubory prvků, vazeb mezi nimi a interakcí probíhajících na vazbách.
4. Objekty jsou posuzovány účelově – při výběru prvků struktur objektů, jejich vlastností, působení na objekt a jeho chování, z nichž se pak vytváří systém na objektu, je zásadní posuzování jejich podstatnosti (důležitosti) z hlediska řešeného problému.
5. Objekty se vyšetřují jako otevřené (neizolované) soustavy, u nichž existují vazby a interakce s okolím. Jejich podstatnost se analyzuje na potřebné a efektivní rozlišovací úrovni ve vztahu k řešenému problému.
6. Sleduje se cílové chování objektů – jednání či řešení problémů se realizuje a posuzuje z hlediska cílů hierarchicky nadřazené struktury (zadavatel, uživatel).
7. Problémy jsou chápány a řešeny komplexně – upřednostňuje se interdisciplinární přístup k řešení problémů v podobě mezioborové spolupráce a týmového charakteru řešení problémů.
8. Objekty jsou chápány hierarchicky – z hlediska řešeného problému se vytváří hierarchie důležitosti zejména z hlediska působení na objekt, prvků a vazeb ve struktuře objektu, vlastností jednotlivých prvků a vazeb, jednotlivých projevů objektu, to vše s příslušnou klasifikací a kvantifikací parametrů.
9. Objekty se vyšetřují orientovaně – tzn., že se vědomě sledují relace příčina-následek, vstup-výstup, dílčí řešení - nadřazené řešení apod.
10. Objekty se vyšetřují jako soustavy závislé na čase – v pojetí teorie systémů „dynamicky“. Jako časově proměnné se uvažují podmínky, v nichž se problém řeší, cíle řešení, působení na objekt, ale také parametry objektu, které je potřeba zajistit takovým způsobem, aby měly úroveň a kvalitu, která bude požadována v době, kdy bude problém vyřešen, resp. objekt realizován.
11. V jednáních a řešeních problémů se musí sledovat úrovňová vyváženost, což znamená, že přístupy k řešení dílčích problémů, použité metody řešení, výpočetní, technické a měřící prvky, apod., by měly mít efektivní úroveň. Převyšuje-li úroveň jednoho prvku úrovně ostatních prvků, je to zbytečný přepych s různými důsledky, např.

finančními. Nízká úroveň některého z prvků zase může znehodnotit úroveň řešení problému.

12. Vytvářejí se podmínky pro tvorbu algoritmů činností, které by měly mít prvky hromadnosti a zobecnění. Tím by se mělo dosáhnout, že výsledek řešení bude méně závislý na jednání jedince a zobecněný přístup bude aplikovaný pro řešení obdobných problémů.
13. Zdůrazňuje se nenahraditelnost lidského činitele při řešení nestandardních situací, dále efektivnost a progresivnost jeho heuristických činností, asertivita řešitele, atd.
14. Proces myšlení, jednání či řešení problému by měl být zakončen analýzou a ověřením dosažených řešení.
15. Závěrečnou fází je implementace řešení, tj. včlenění do konkrétních podmínek, v nichž má být řešení použito a realizace řešení.

Grafické znázornění základních systémových atributů zachycuje Obr. 16.




**Obr. 16: Systémový přístup** [21]

## 5.1.4 Technický objekt jako systém

### Základní pojmy

Technický objekt (dále TeO) je objekt materiální povahy cílevědomě vytvořený člověkem za účelem plnění předem určené funkce na základě společenské potřeby a společenské poptávky. Vytváření TeO je organizováno a řízeno tak, aby bylo efektivní, a jeho vznik postupuje v orientované časové posloupnosti: příprava, návrh, výroba, provoz, likvidace. V prvních třech fázích se plně využívá zkušeností z tvorby předchozích podobných TeO. Zkušenosti a nové znalosti ze všech fází tvorby TeO jsou zahrnuty do duševního majetku tvůrce, případně do teorie oboru. TeO je hierarchická soustava vytvořená z jednodušších ucelených a samostatně vytvářených částí. Základním prvkem TeO je součást, nadřazené struktury jsou: agregáty, konstrukční celky, montážní uzly, stroje, strojní linky a strojní komplexy. TeO má dva typy životnosti – morální, omezenou koncepčním resp. funkčním zestárnutím a technickou, která je při vhodné údržbě a opravách u většiny TeO prakticky neomezená.

Tvorba TeO má výrazně právní aspekty typu chyba → možnost sankce, takže tvůrce je za tvorbu nejen morálně, ale i právně odpovědný.[20]

## Vlastnosti technických objektů

Abychom mohli zkoumat problémy spojené s TeO (jeho vlastnostmi a souvislostmi) obecně i v detailech, musíme postupovat systémově. Pojem systém je základním pojmem systémových teorií a přístupů a jeho definice dle FILKORNA (1960) zní následovně: „Systém je množina předmětů, jevů, dějů a poznatků, které spolu souvisejí přesně vymezeným způsobem, a mezi jednotlivými prvky systému existuje aktivní vazba“ [20].
Pojem systém má dva odlišné významy. [21]

- Objekt je systémem, tzn., že objekt má systémové vlastnosti.
- Na abstraktním objektu jsme vytvořili systém.

V češtině je často pojem systém používán jako synonymum k termínu soustava. Dnes se ukazuje jako nevhodné používat slova systém – soustava jako synonyma a doporučuje se tyto pojmy takto rozlišovat.

- Soustava je reálný nebo abstraktní objekt se systémovými vlastnostmi, na němž má člověk-řešitel řešit vymezený problém.
- Systém je abstraktní objekt vytvořený na soustavě z hlediska vymezeného řešitelem a vymezené úrovně rozlišování, abstrakce, zobecnění a formalizace. Je tedy nadřazen pojmu soustava.

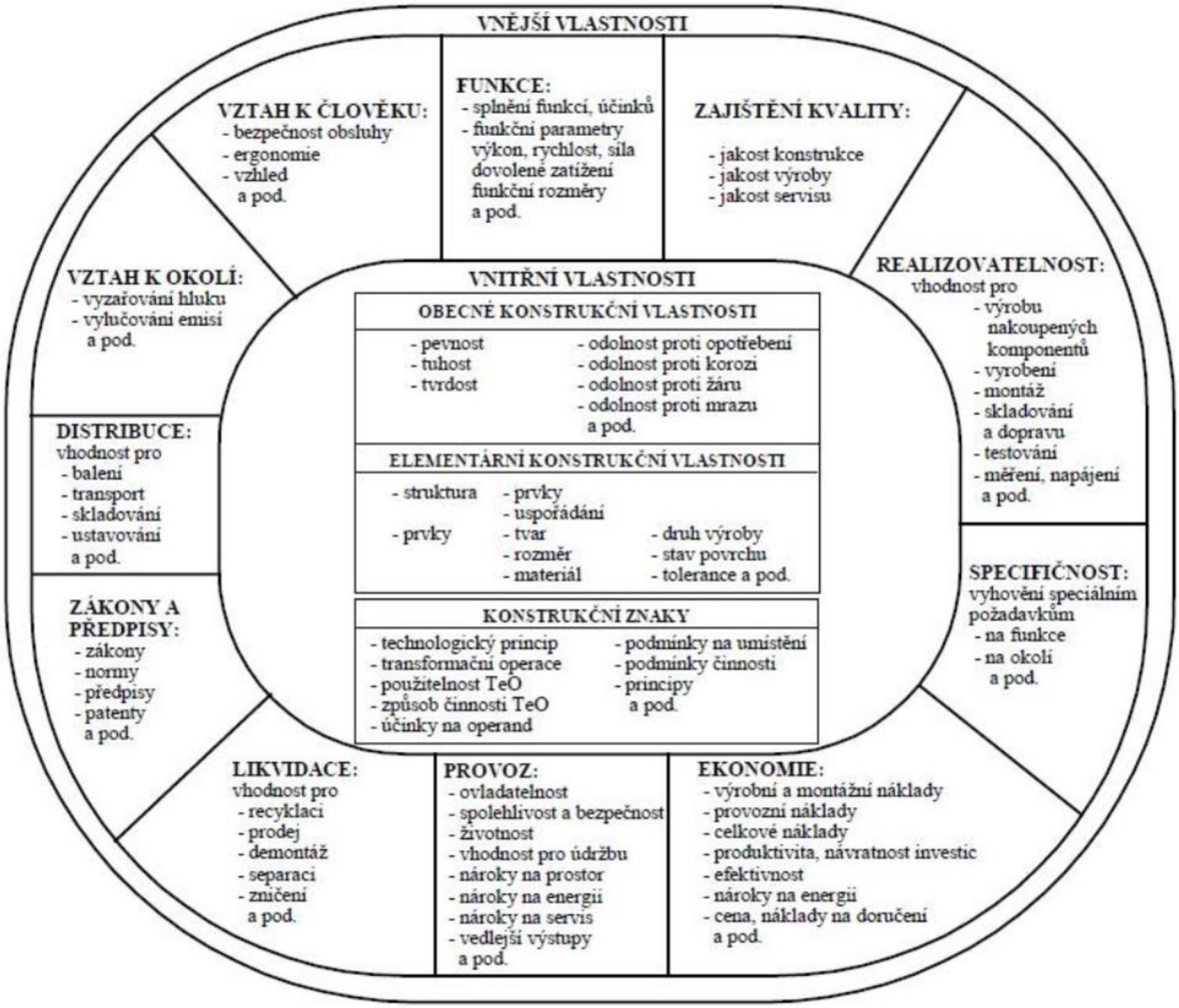
Základní vlastnosti obecného systému jsou:

- systém je jistá ohraničená část reálné skutečnosti nebo odraz reálné skutečnosti;
- existují interakce (vzájemná působení) mezi systémem a jeho okolím;
- systém má určitou strukturu;
- systém má nějakou funkci.

V literatuře lze nalézt řadu přístupů, jak dosáhnout úplného výčtu vlastností TeO. Ukazuje se, že pro konstruktéra je nejvhodnější uspořádání tříd v závislosti na etapách vzniku a existence TeO. Příklad takového uspořádání obsahuje Tab. 1. Dále členíme vlastnosti TeO na vnitřní vlastnosti charakterizující jeho konstrukci a vnější vlastnosti charakterizující TeO jako celek (Obr. 17 na následující straně).

**Tab. 1: Třídy vlastností technických objektů** [23]

| Číslo třídy | Třída vlastností TeO | Dotaz | Příklady dílčích vlastností |
|---|---|---|---|
| 1 | Funkce<br>Účinky | Co TeO dělá, co umí?<br>Jaké má TeO schopnosti? | pracovní funkce<br>pomocné funkce<br>pohonné funkce<br>řídicí a regulační funkce<br>spojovací a nosné funkce |
| 2 | Funkční parametry | Jaké mají jednotlivé funkce TeO stavy a hodnoty? | výkon<br>rychlost<br>velikost<br>hmotnost<br>únosnost |
| 3 | Provozní vlastnosti | Jak je TeO vhodný pro provoz? | spolehlivost<br>životnost<br>vhodnost pro údržbu<br>potřeba místa a energie |
| 4 | Ergonomické a ekologické vlastnosti | Jak je TeO vhodný pro člověka, obsluhu a okolí? | funkčnost<br>ovladatelnost<br>bezpečnost<br>ekologičnost |
| 5 | Vzhledové vlastnosti | Jak TeO vypadá, jak působí? | estetický dojem |
| 6 | Distribuční vlastnosti | Jak se TeO prodává, dopravuje, skladuje, instaluje? | vhodnost pro:<br>- balení<br>- dopravu<br>- skladování |
| 7 | Vhodnost pro rychlé dodání | Kdy může být TeO dodán? | lhůta dodání<br>typ výroby<br>(kusová / sériová) |
| 8 | Respektování zákonů, předpisů a norem | Respektuje TeO zákony a předpisy, směrnice, normy příslušné oblasti? | patentová čistota<br>soulad s předpisy<br>soulad s normami |
| 9 | Vhodnost pro výrobu | Jak (ekonomicky) lze TeO vyrobit? | možnost vyrobení<br>ekologičnost výroby |
| 10 | Ekonomické vlastnosti | Jak efektivní jsou procesy TeO? | výrobní náklady<br>provozní náklady<br>efektivnost a cena |
| 11 | Vhodnost pro likvidaci | Jak snadno lze TeO likvidovat?<br>Existuje recyklace? | demontovatelnost<br>recyklovatelnost |
| 12 | Konstrukční vlastnosti | Jakými vnitřními vlastnostmi se docílí vnější vlastnosti (1 až 11)? | struktura<br>prvky, tvary, rozměry<br>materiál, stav povrchu<br>druh výroby, tolerance |




**Obr. 17: Vlastnosti technických objektů** [23]

## 5.1.5 Struktura technických objektů

Struktura je obecně množina prvků (elementů) a jejich vztahů, které tvoří určitý celek. U TeO rozlišujeme tyto tři druhy struktury [20]:

- Stavební struktura – hierarchicky uspořádaná množina stavebních prvků (např. šroub, hřídel, ložisko, elektromotor, atd.), které jsou nositelem požadovaných účinkových řetězců. Tyto stavební prvky většinou tvoří stavební (montážní) podskupiny, ty potom stavební skupiny, které se montují do vyšších celků.
- Orgánová struktura – uspořádaná množina „funkčních jednotek“ – orgánů (analogie s funkčním ústrojím organismu v biologii oproti jeho anatomické – stavební struktuře), které tvoří jednotlivé funkční řetězce.
- Orgánová struktura TeO se obecně nekryje se stavební strukturou, např. u soustruhu tvoří příčné saně montážní jednotku, ve které je funkce (orgán) „příčné vedení“ obsažena jen z části. Další část účinkové dvojice tohoto příčného vedení je na podélných saních, které opět tvoří další montážní skupinu. Jednotlivé orgány (nositele funkcí) TeO lze uspořádat do tříd, které se vyskytují na všech stupních složitosti, jsou to zejména:
    - pracovní (transformační) orgány, které vykonávají v technickém procesu požadované pracovní (hlavní) účinky;

- pomocné orgány, které dodávají pro transformační orgány potřebné pomocné účinky (např. mazání);
- pohonné nebo energetické orgány, které v požadovaném místě a čase transformují a dodávají potřebnou energii v požadované formě z energie, která je k dispozici pro účinky ostatních částí TeO;
- řídicí, regulační a automatizační orgány, jejichž úloha spočívá ve zpracování informací a v přenosu řídících povelů;
- spojovací a nosné orgány, které zajišťují vnitřní spojení všech typů mezi jednotlivými orgány včetně vnitřních přenosů účinků na výstup (např. energie, pohybů). Dále zahrnují prostředky, které zajišťují prostorovou jednotu TeO a které realizují nosné funkce.

- Funkční struktura – uspořádaná množina dílčích úkolů (funkcí), které musí daný TeO splňovat.

# 6 Naplnění vytyčených cílů řešení laboratorním experimentem

V průběhu analýzy cílů disertační práce „Verifikace stavu reálné výrobní linky pomocí virtuální reality“ bylo navrženo několik řešení těchto cílů uplatňujících náhled na celou problematiku návrhu výrobních linek a pracovišť. **Proto se praktické řešení rozdělilo na tři samostatné dílčí úkoly, které doposud nebyly touto cestou řešeny, tvořící celek (komplet).** Prvním úkolem při návrhu výrobních linek a pracovišť je zohlednění stávající infrastruktury v případě implementace nové výrobní linky. V první části praktického řešení bylo provedeno nasnímání stávající infrastruktury (výrobní haly) pomocí fotoaparátu. V druhém úkolu byly implementovány procesní analýzy (ergonomická apod.) při návrhu výrobní linky. Třetí úkolem bylo provedení vizualizace energetické náročnosti výrobní linky.

Celkové řešení se proto rozdělilo na dílčí cíle:

1. skenování haly pro umístění nové nebo stávající výroby;
2. vložení modelu do stávající naskenované nebo reálné haly pomocí rozšířené reality a implementace podpory pro tvorbu analýzy rizik, toku jednoho kusu a ergonomické analýzy;
3. vizualizace energetické náročnosti pracoviště pomocí rozšířené virtuální reality na vytvořeném pracovišti.

## 6.1 Dílčí cíl první části řešení - skenování haly pro umístění nové nebo stávající výroby

Dílčím cílem bylo vytvoření digitálního modelu reálné výrobní haly, do kterého je dále možné umísťovat virtuální objekty. Výstupní model bude vyhotoven ve dvou provedeních, naskenovaný 3D model a 3D model s texturou pro možnosti prezentace. Naskenovaný 3D model místnosti bude sloužit pro analýzu kolizí při instalacích nového zařízení v podobě 3D modelů.

### 6.1.1 Použité technické vybavení první části řešení

V této kapitole bude představeno technické vybavení, které bylo využito při tvorbě první části disertační práce. Pro skenování haly bylo použito fotoaparátu Canon EOS 7D s výměnným objektivem, viz Obr. 18, doplňkovým softwarem Photomodeler 6.0 a Agisoft Photoscan pro vyhodnocení fotografií a skenovací prostorové hlavy.
Photomodeler 6.0 a Agisoft Photoscan jsou fotogrammetrické systémy určené k bezdotykovému 2D a 3D měření [26]. Jsou založeny na principech metody průsekové fotogrammetrie. Kombinují snímky a umístění bodů ve trojrozměrném prostoru. Výsledkem je 3D model, který může být exportován do jiných grafických programů.

**Obr. 18: Průběh skenování místnosti**

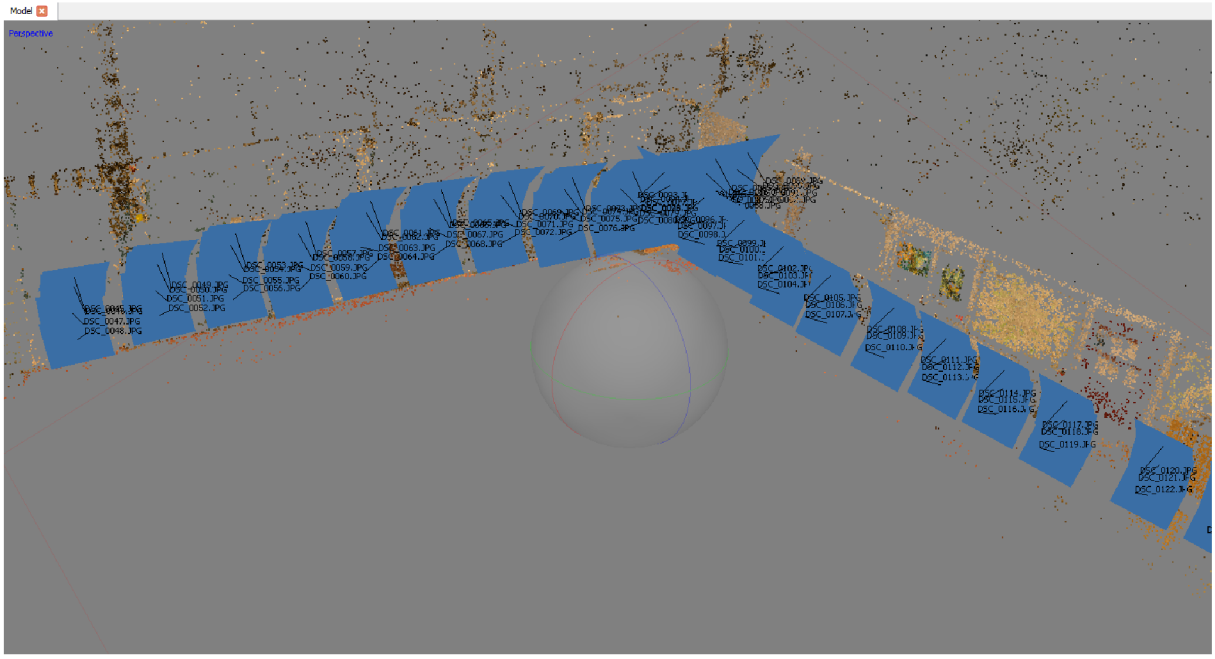
### 6.1.2 Prostorové skenování objektů

Pro vytvoření trojrozměrného modelu z existující scény musíme využít skenování. V případě malých objektů je možno využít zařízení MS Kinect, který je vybaven infračerveným sensorem vzdálenosti a software Scenect. Pokud bychom ovšem snímaly např. průmyslovou halu pomocí zařízení MS Kinect, došli bychom k závěru, že pro tento typ aplikace není zařízení vhodné. Hlavními důvody, proč nebylo zařízení MS Kinect použito, jsou vysoký datový tok při tvorbě modelu v reálném čase a kabeláž. Vhodnější pro snímání větších objektů se doporučuje použití digitálního fotoaparátu nebo 3D scanneru, jelikož zařízení pracují s vyšší kvalitou obrazu. 3D Scanner nebyl pro práci využit z důvodů vysoké pořizovací ceny. Systém skenování probíhal v následujících krocích.

### 6.1.3 Jednotlivé kroky řešení prvního dílčího cíle

#### Krok 1

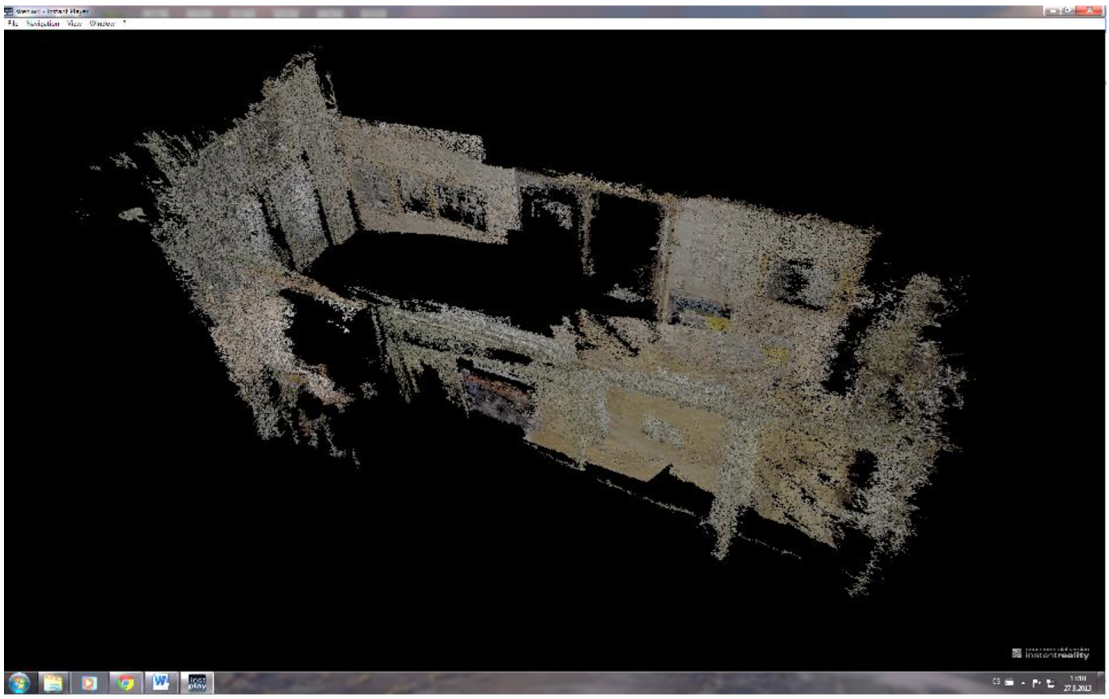
Vytvoření jednotlivých fotografií haly nebo objektu. Důležité bylo při této fázi vytvářet fotografie, tak aby obsáhly celý skenovaný prostor a mezi fotografiemi docházelo k dostatečnému překrytí. Pro vytváření jednotlivých snímků bylo také nutné využít fotoaparát vybavený objektivem s pevnou ohniskovou vzdáleností, abychom jednoznačně určili pozici fotoaparátu v prostoru.




**Obr. 19: Zobrazení jednotlivých snímků pomocí software Agisoft**

#### Krok 2

Zpracování fotografií softwarem Agisoft (Obr. 19) a Photomodeler 6.0. Softwarové prostředí po vložení fotografií vytváří dle podobnosti hran a známé ohniskové vzdálenosti prostorový objekt, tzv. mrak bodů.



**Obr. 20: Mračno bodů z prostorového scanu**

## Krok 3

Vytvořený prostorový mrak (Obr. 20) bylo zapotřebí očistit od šumu vzniklého při focení a překrývání jednotlivých snímků. Důvodem je taktéž značná datová velikost modelu.

**Obr. 21: Model místnosti s texturou**

## Krok 4

Dále bylo zapotřebí vyčištěný mrak obalit barevnou texturou (Obr. 21) pro případy prezentace. Umístění textury bylo provedeno v prostředí Deep Exploration 6.5 CE.

### 6.1.4 Závěr první části řešení

V první části řešení bylo uvažováno se stávající infrastrukturou ve výrobním podniku nebo v nově navržené hale. Po nasnímání byl vytvořen prostorový model místnosti, ve které bude následně umístěna řešená výrobní linka a podrobena analýzám. Zvláště hodnotné pro praktické účely je využití takto nasnímané haly pro umístění výrobního pracoviště. V tomto případě můžeme uvažovat nejen plošné rozložení pracoviště (layout), ale i prostorové. Zejména můžeme naplánovat průběh stěhování a usazení pracoviště na požadované místo. Tímto vyřešíme otázky, jako např.:

- Bude možné projít s výrobním pracovištěm (strojem) skrz vstupní prostor?
- Nebudou v plánované cestě překážky v podobě ostatních pracovišť?
- Nebudou v plánované cestě umístěny technologické zařízení (rozvody elektrické energie, vzduchu)?
- Atd.

## 6.2 Dílčí cíl druhé části řešení - aplikace virtuální reality v návrhu a analýzách výrobního pracoviště

Dílčím cílem bylo vytvoření modelového případu výrobní linky, ze kterého plyne doporučení k vytvoření rizikostní a ergonomické analýzy a toku jednoho kusu. Dále bude provedena diskuze nad navrhovaným řešením a reálným provozem výrobní linky. Důvodem řešení je nedostatečná názornost při využití CAD modelářů v návrhové části projektů. V této fázi musí mít celý projektový tým jasnou představu o návrhu pracoviště, proto je výhodné využít takových zobrazovacích zařízení, aby byl celkový obraz více zřejmý. Pokud je nalezena neshoda je ji možno touto aplikací snáze odhalit.

### 6.2.1 Použité technické vybavení druhé části řešení

V kapitole bude představeno vybavení pro vložení a analýzu virtuálního modelu ve scéně. Scéna v tomto případě může být jak reálná, tak i virtuální. Virtuální scéna byla použita z předchozí kapitoly jako mrak bodů a využita v prostředí imerzní virtuální reality pomocí zařízení CAVE nebo POWERWALL – mobilní stereoskopická stěna.

#### CAVE

Třístěnná virtual CAVE (Obr. 22), vybudovaná na pracovišti Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky, je zařízení určené pro verifikaci trojrozměrných digitálních modelů zobrazených v měřítku 1:1 v prostředí imerzní virtuální reality. Jedná se o projekční systém, využívající zadní pasivní stereoskopické projekce, sestávající ze tří vertikálně orientovaných projekčních stěn. Systém je doplněn o čtvrtou projekční plochu, která je realizována přímou projekcí na podlahu. Pro vzájemné oddělení kanálů je zde použita technologie interferenčních filtrů Infitec. O vykreslování obrazů na všechny projekční plochy se stará klastr složený z osmi výpočetních stanic, z nichž každá je napojena na jeden projektor. Funkce přímé interakce s virtuálním prototypem a ovládání systému v imerzním režimu zajišťuje optický trackovací systém se šesti infračervenými kamerami včetně obslužného trackovacího software. Pro vlastní ovládání může uživatel systému zvolit až dvě bezdrátová vstupní zařízení typu Flystick nebo dvě bezdrátová vstupní zařízení Nintendo Wii s vibrační zpětnou vazbou.

**Obr. 22: Třístěnná virtual CAVE**

Základní technické údaje:

- rozměry CAVE 3,7 x 2,3 x 3,1 m;
- pasivní stereo projekce INFITEC s osmi digitálními projektory (1920 x 1200 pixelů);
- jedna řídicí a osm renderovacích grafických stanic s GK nVidia Quadro 5000;
- optický tracking značky ART.

## POWERWALL – mobilní stereoskopická stěna

Mobilní stereoskopická stěna (Obr. 23) je zařízení určené pro zobrazování trojrozměrných digitálních modelů v měřítku 1:1 v prostředí imerzní virtuální reality. Celý tento systém je možné snadno složit a přepravit v osobním automobilu typu kombi. Jde tedy o ideální variantu, jak prezentovat virtuální prototypy přímo u průmyslových partnerů a na akcích, jako jsou veletrhy a konference. Jedná se o projekční systém, využívající zadní pasivní stereoskopické projekce založené na technologii polarizace světla. O řízení virtuální scény, výpočet a vykreslování obrazů na projekční plochu se stará mobilní renderovací klastr složený ze dvou vysoce výkonných notebooků. Funkci přímé interakce s virtuálním prototypem a ovládání systému v imerzním režimu zajišťuje optický trackovací systém se čtyřmi infračervenými kamerami včetně obslužného trackovacího software. Pro vlastní ovládání může uživatel systému zvolit bezdrátové vstupní zařízení typu Flystick nebo dvě bezdrátová vstupní zařízení Nintendo Wii s vibrační zpětnou vazbou.

**Obr. 23: Powerwall - mobilní stereoskopická stěna**

Základní technické údaje:

- rozměry projekční plochy 2,6 x 1,9 m;
- pasivní stereo projekce se dvěma digitálními projektory (1400 x 1050 pixelů);
- jeden řídicí a jeden renderovací notebook s grafickou kartou nVidia Quadro 4000M;
- optický tracking značky ART.

### 6.2.2 Software pro práci v imerzní virtuální realitě (CAVE, POWERWALL)

VDP – IC:IDO (Visual Decision Platform) je software pro interaktivní vizuální rozhodování využívající technologie virtuální reality. VDP umožňuje realistické zobrazení virtuálních produktů v reálném čase a ve skutečné velikosti pro rychlejší a spolehlivější procesy rozhodování. Zhotovené digitální produkty v tomto softwarovém prostředí je možné nejen stereoskopicky prohlížet, nýbrž také s těmito objekty v reálném čase interagovat – například s nimi otáčet, manipulovat nebo měnit nejrůznější konstrukční varianty a ty následně vyhodnocovat. Jde o vizualizační a komunikační platformou pro oborově se prolínající diskusi expertů z jednotlivých odvětví od konstrukce přes technologii, plánování výroby a obsluhy až po zaškolování a marketing [27].

Strukturně se software VDP skládá z následujících modulů.

- IDO.Explore je soubor nástrojů pro vstup do světa virtuální reality. Data z různých zdrojů lze sloučit a získat tak konzistentní vizualizaci jakéhokoliv produktu. Mezi funkce tohoto modulu patří tvorba řezů virtuálním prototypem a jeho měření;
- IDO.Package umožňuje přímou interakci s virtuálním výrobkem, který lze prohlížet, upravovat a analyzovat ze všech stran. Díky integrovaným dynamickým výpočtům

kolizí v reálném čase lze provádět simulace montážních a demontážních procesů virtuálních produktů;

- IDO.Ergonomics umožňuje kontrolu ergonomických parametrů prototypu pomocí 3D modelu člověka s reálným rozsahem kloubů;
- IDO.Flexible pomáhá při plánování a ověřování umístění všech flexibilních součástí, tj. hadic, kabelů a kabelových svazků na vyvíjeném prototypu;
- IDO.Reflect umožňuje realistickou vizualizaci produktů. Umožňuje v reálném čase měnit umístění světelných zdrojů, materiály, simulovat průběh denní doby atd.;
- IDO.Cooperate umožňuje vizualizaci produktu v reálném čase na různých pracovištích prostřednictvím síťového propojení;
- IDO.MultiInteract umožňuje připojení dalších ovládacích prvků a vstupních zařízení. Je tak možná například obouruční interakce s ovladači Nintendo Wii;
- IDO.Behave-Animation umožňuje vytváření animací pohybů jednotlivých částí virtuální scény;
- IDO.SpecialTrack je určen k integraci reálných objektů do virtuální scény. Je tak možné například vyhodnocovat kolize mezi skutečnými nástroji a nářadím a virtuálními objekty;
- IDO.Connect je modul pro přímý import 3D dat z různých CAD modelářů a PLM systémů do prostředí VDP;
- IDO.Pointcloud slouží k přímé vizualizaci bodových mraků;
- IDO.Capture převádí 3D data včetně pohybu z grafické karty a přenáší je bez nutnosti exportu přímo do VDP. Není tedy zapotřebí žádná konverze dat. Modul je založen na nejnovější MultiThreading technologii a tím celý proces vizualizace značně urychluje;
- IDO.Present je určen pro prezentaci, dokumentaci a archivaci výsledků práce ve výše uvedených modulech. Výstup této prezentace je možný ve formě videosekvencí.

Jak již bylo zmíněno výše, analýza virtuálního modelu může být řešena i v reálné scéně. V tomto případě je nutné použít odlišného způsobu zobrazování, jelikož prakticky virtuální model zobrazujeme do reálného prostředí. Proto byla pro další práci využita rozšířená realita. Použité vybavení pro zobrazování modelů pomocí rozšířené reality se skládá z počítačové stanice nebo tabletu a webové kamery. Pomocí počítačů je zobrazován výsledný obraz a webová kamera slouží pro orientaci v prostoru. Pro tvorbu aplikací byl použit software Instant Reality.

### 6.2.3 Software pro práci v rozšířené virtuální realitě s nasazením v reálném prostředí

Pro vytváření aplikací rozšířené reality založené na sledování vodicích značek bylo zapotřebí využívat programového rozhraní. Mezi možný software, který umožňuje propojení sledování vodicí značky pomocí kamery a vkládání modelů na tuto vodicí značku spadá knihovna ARToolkit. Díky této otevřené (opensource) knihovně lze využít programovacích jazyků pro využití této knihovny. Knihovnu lze využít v (Matlab, C++, C). Následně tuto knihovnu rozvíjí a využívají další knihovny a software – NyARToolkit, SLARToolkit, osgART, Vuforia… a další. Mezi další softwarové prostředí, které bylo pro další práci využito, je i Instant Reality. Principiálně je funkce rozšířené reality vysvětlena na knihovně Artoolkit.

#### ARToolKit

ARToolKit je softwarová knihovna (SDK – software development kit), která umožňuje tvorbu aplikací rozšířené reality pomocí níž lze vložit virtuální objekty do skutečného světa

[28]. Za tímto účelem využívá možnosti sledování videa a výpočtu skutečné pozice a orientace kamery ve vztahu k fyzické čtvercové značce v reálném čase. Jakmile je známa poloha reálné kamery, virtuální kamera může být umístěna na stejném místě a 3D grafické modely jsou vloženy na skutečnou značku. ARToolKit řeší dva problémy v augmented reality – zorný úhel trekování a virtuální interakce objektů. ARToolKit původně vyvinul Hirokazu Kato v roce 1999. V současné době je veden jako opensource projekt, umístěn na SourceForge s možností komerční licence - ARToolWorks. Principiálně ostatní knihovny a software pro tvorbu aplikací rozšířené reality vycházejí z této knihovny.

## Vlastnosti ARToolKitu

- jednoduché pozicování kamery/orientace,
- použití jednoduchých vodicích značek,
- možnost naprogramovat vlastní značky,
- jednoduchý kalibrační kód kamery,
- schopnost práce v reálném čase,
- open source.

## Hardware

Pro vytváření aplikací rozšířené reality není zapotřebí nákladných technických zařízení. K práci využijeme stolní počítač nebo notebook. Pro práci je nejdůležitější výběr vhodné kamery dané jejími parametry (rozlišení, frekvence snímkování, zkreslení optiky). Nejefektivnějším řešením je použití karty a kamery s PAL (phase alternating line) nebo NTSC (National Television System Committee) standardem. Signál je poskytován v RGB (barvách), které snižují hardwarové nebo softwarové ztráty při konverzi. Tradiční volba je USB nebo Firewire kamera. U těchto kamer jsou snímkovací frekvence a barvy (RGB, YUV, YUV komprese) závislé hlavně na šířce pásma technologie. USB kamery obecně používají komprimovaný formát, jako je přenos YUV: 04:02:02, YUV: 04:01:01 (ztrátová komprese). Firewire kamery nabízejí lepší řešení, avšak kamery s úplnou paletou barev RGB jsou obecně dražší.

### Parametry kamery [29]

Každá kamera se skládá z optické části, která zajišťuje zobrazení snímaného obrazu na světlocitlivý čip a z elektronické části, která zajišťuje vyčítání obrazové informace, její případnou úpravu, kompresi a přenos do počítače. Následuje popis základních optických a elektronických parametrů běžně dostupných kamer.

- Ohnisková vzdálenost – je vzdálenost mezi středem čočky a rovinou, na kterou jsou zaostřeny objektivem soustředěné paprsky (kde se protínají všechny přímky, které projdou čočkou). Udává se v milimetrech. Pro digitální přístroje se používá přepočet, při kterém se přepočítává velikost čipu na šířky kinofilmu (35mm).
- Sférické zkreslení – je zobrazovací vada čoček projevující se v přenosu přímek. Např. obdélník se v důsledku toho zobrazí soudkovitým tvarem, (pokud příčné zvětšení optické soustavy klesá se vzdáleností bodu od osy) nebo poduškovitým (pokud je tomu naopak). Vada bývá větší při krátkých ohniskových vzdálenostech (širokoúhlé objektivy). U objektivu typu rybího oka se zkreslení nebrání a vzniká tím zajímavé prostorové zkreslení. U klasických objektivů to ovšem představuje nedostatek. Pro využití v aplikacích rozšířené reality je sférické zkreslení podstatným kritériem. Je možné jej odstranit vhodnou kombinací dvou čoček, pokud je soudkovité zkreslení

první čočky vykompenzováno poduškovitým zkreslením čočky druhé. Druhou možností je softwarová korekce.

- Optický střed – je místo na čipu (resp. odpovídající pixel v obraze), kam se promítá osa čočky. Umístění čipu nemusí odpovídat umístění optické části kamery, a proto může být optický střed ve značné vzdálenosti od fyzického středu čipu.
- Rozlišení kamery – Rozlišení kamery se udává v obrazových bodech (pixelech) a udává počty pixelů na výšku a na šířku, kterými bude obraz reprezentován v digitální podobě. Rozlišení kamery je podstatné při aplikacích pro kontrolu rozměrů, kdy jeden obrazový bod je nejmenší rozlišitelný rozměr. Pixel tedy udává přesnost měření. Rozlišení kamer jsou dána použitým senzorem a mřížkou pixelů. Velikost senzoru je podstatná pro volbu objektivu.

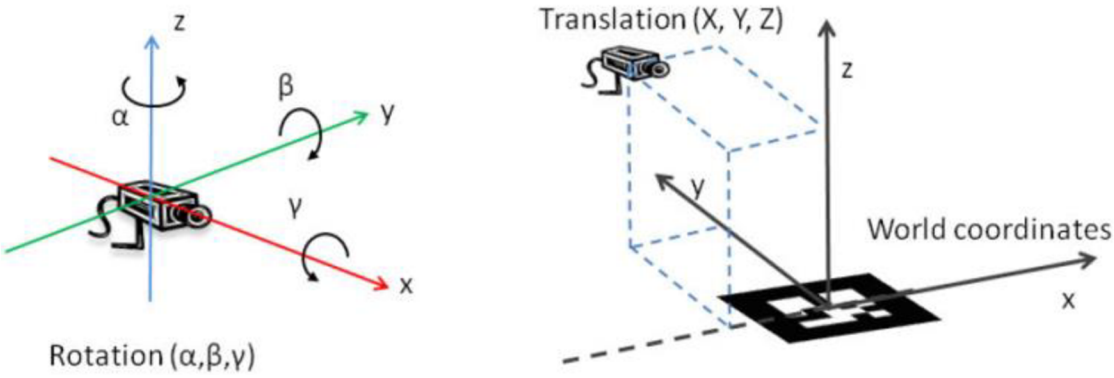
### Kalibrace kamery [30]

Virtuální objekty, které vkládáme do scény, by měly co nejlépe přiléhat na reálné objekty. Pro dosažení dobrých výsledků aplikací rozšířené reality je proto třeba, aby vstupní zařízení dodávalo co nejméně zkreslený obraz, avšak ani drahý přístroj není zárukou, že v použité optice nedojde ke zkreslení. U levnějších přístrojů se ani výrobci optické vlastnosti použité čočky nesnaží kompenzovat. V podstatě jsou dvě možnosti, jak řešit tento problém. Buď je zapotřebí vhodným způsobem deformovat virtuální objekty anebo kompenzovat zkreslení vzniklé v optické části kamery. V prvním případě hledáme funkci převádějící získaný snímek na snímek pro tzv. ideální obrazovku. V druhém případě je třeba najít funkci inverzní. V případě použití „video see-through augmented reality display“ je nutné využít druhého způsobu, protože zdravý člověk svým zrakem vidí nedeformovaný obraz. Kamera dodává zkreslený obraz, virtuální objekty promítané na obrazovku však musí být správně umístěny. Také pro většinu technik používaných při vyhledávání a sledování značky (značek) v obraze je důležité, aby byl obraz nedeformovaný. To platí především pro vyhledávání pomocí technik pattern matching, hraničních přímek i Houghovy transformace. Pro další práci s kamerou je nutné získat parametry kamery pro kompenzaci deformovaného obrazu kamery.

- cx - x souřadnice optického středu,
- cy – y souřadnice optického středu,
- fx - ohnisková vzdálenost kamery v ose x,
- fy - ohnisková vzdálenost kamery v ose y,
- s - zkosení světločivných buněk na čipu,
- k1, k2, k3, k4, k5 - radiální a tangenciální zkreslení objektivu.

Pro zjištění těchto parametrů je možné využít software Instant Reality – InstantVision. Parametry jsou zjištěny pomocí porovnání kalibračního obrazce a nasnímaných snímků kamerou.

Na základě kalibrace kamery můžeme řešit pozici značky. Pozice značky odkazuje na jeho translaci a rotaci (Obr. 24). Umístění může být vyjádřeno třemi translačními souřadnicemi (x, y, z) a třemi úhly rotace ($\alpha$,$\beta$,$\gamma$) okolo tří souřadných os. Z toho plyne, že pozice má 6 stupňů volnosti.



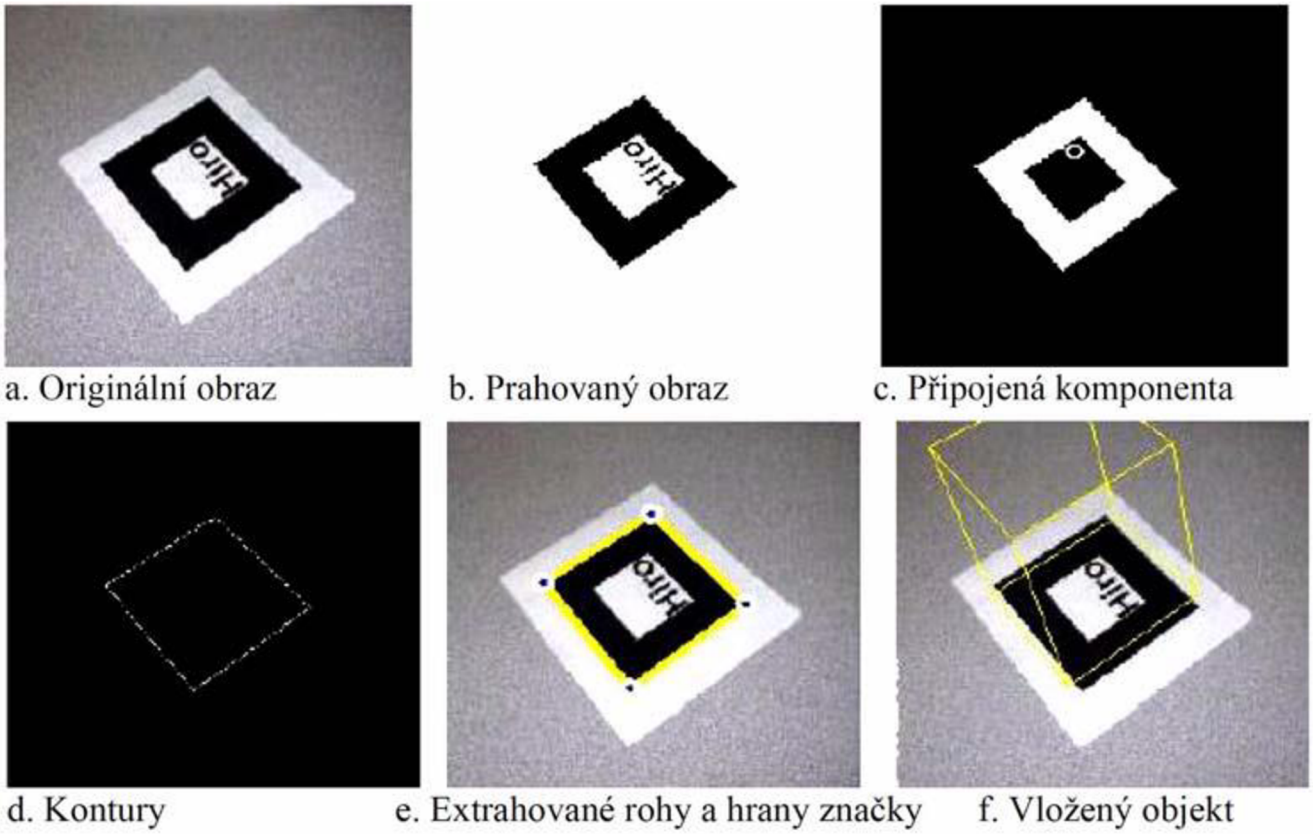

**Obr. 24: Souřadný systém**

Pozice kalibrovaného fotoaparátu může být jednoznačně určena minimálně ze čtyř koplanárních (ležících v jedné rovině), ale nekolineárních (neležících na jedné přímce) bodů. Tudíž systém může spočítat pozici vodicí značky (relativně ke kameře) v 3D souřadnicích.

## Způsob fungování ARToolKitu

Kamera snímá reálné prostředí a informace, tj. obraz je posílán do počítače a software v počítači hledá při každém snímku, jestli se nenachází v prostoru vodicí značka. Pokud je vodicí značka nalezena, software vypočítá pozici kamery relativně ke značce (Obr. 25). Jestliže je známá pozice kamery, zobrazí se počítačový 3D model na stejné pozici, tj. Na vodicí značce. Model je zobrazen v popředí vůči reálnému prostředí na vodicí značce. Konečným výstupem na displeji je pohled na reálné prostředí obohacené o počítačový 3D model (Obr. 26).

**Obr. 25: Algoritmus programu ARToolKit**

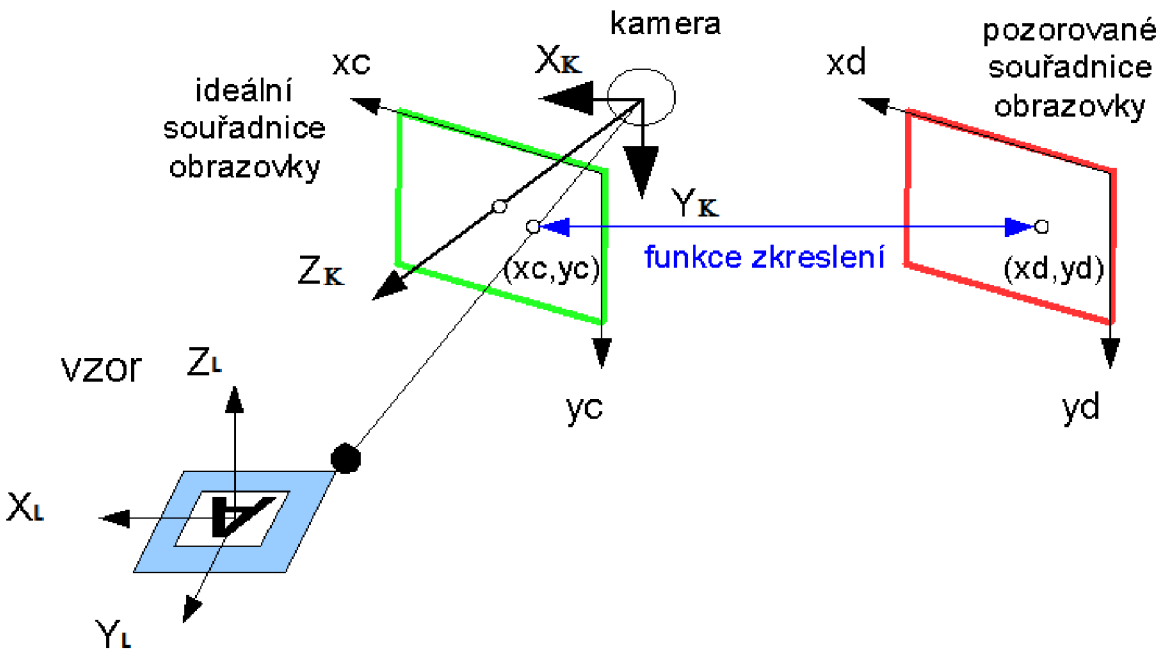



**Obr. 26: Vkládání prostorového modelu na vodicí znak**

## Pozice vodicí značky [30]

V jednotlivých fázích pracujeme s různými souřadnými systémy. Uživatel sleduje obrazovku, což je dvojrozměrný prostor s osami $X_d$ a $Y_d$. Na tyto souřadnice jsou převáděny ideální souřadnice obrazovky. Vzájemný vztah popisuje funkce zkreslení. Osy souřadnicového systému kamery označujeme $X_k$, $Y_k$, $Z_k$ – přičemž osa $Z_k$ je orientována ve směru pohledu. Prochází tedy plochou, kterou označujeme jako ideální obrazovku. Souřadnice ideální obrazovky označujeme $x_c$ a $y_c$.

Transformace – vyjadřuje vzájemnou polohu kamery a vodicí značky. Vodicí značky leží na jiném místě než kamera a jsou jinak natočeny (Obr. 27). Tyto dvě transformace můžeme vyjádřit pomocí matice 4x4. Parametry translace a rotace nejsou známé a musí být vypočteny z dvojrozměrného obrazu snímaného kamerou. Další použitou transformací je perspektivní projekce, která přepočítává pohled na reálnou scénu z bodu umístění kamery na body plochy ideální obrazovky. Pro výpočet tedy není použit přímo obraz z kamery, ale obraz transformovaný pomocí transformační matice, která je výsledkem kalibrace kamery. Na základě nedeformovaného obrazu se snažíme vypočítat umístění kamery.




**Obr. 27: Souřadné systémy ARToolkit**

## Limity aplikací rozšířené reality

Existují určitá omezení při zobrazování pomocí systémů rozšířené reality. Mezi první omezení patří přirozeně nutnost viditelnosti vodicí značky, z čehož plyne omezení z hlediska velikosti a pohybu virtuálních objektů. Taktéž mezi tato omezení může spadat případ, kdy uživatel zakryje rukou nebo jinými předměty značku. Mezi další problém a omezení je nastavení správné velikosti vodicí značky viz Tab. 2.

| Velikost znaku (palce) | Použitelný rozsah (palce) |
|---|---|
| 2,75 | 16 |
| 3,5 | 25 |
| 4,25 | 34 |
| 7,37 | 50 |

**Tab. 2: Rozsah pro různou velikost značky**

Tento rozsah je též ovlivněn složitostí znaku na vodicí značce. Platí pravidlo, že čím je jednodušší znak, tím je lépe zabezpečeno sledování značky. Znaky s velkými černými a bílými místy jsou nejvíce efektivní. Zjednodušením znaku můžeme využít výhody zmenšování vodicí značky. Sledování pozice je také závislé na orientaci kamery vůči vodicí značce. Jestliže je úhel mezi kamerou a vodicí značkou velmi malý, dochází k nespolehlivému sledování pozice a zániku obrazu. Mezi další problém aplikací rozšířené reality s použitím vodicích značek je zajištění dostatečné světelnosti. Pokud světlo svítí přímo na značku, může docházet k odrazům a pro kameru je mnohem náročnější vyhledat vodicí znak. Tomuto problému je možné předejít použitím antireflexních materiálů umístěných na značku např. samet, avšak vliv materiálu se neprojevuje nijak výrazně.[30]

## Instant Reality

Instant Reality je výkonný Mixed-Reality (MR) software, který kombinuje různé vizualizační složky tak, aby poskytovaly jednoduché a logické rozhraní pro vývojáře v oblastech virtuální reality a rozšířené reality. Tyto komponenty byly vyvinuty na Fraunhofer IGD Darmstadt v úzké spolupráci s průmyslovými partnery a oborově zaměřenými organizacemi jako např. OpenSG (Open-source Scene-Graph renderings system).
Struktura tohoto softwaru nabízí komplexní soubor funkcí pro podporu klasické virtuální reality, stejně jako pokročilé rozšířené reality. Cílem vývoje bylo poskytnout velmi jednoduché aplikační rozhraní respektující zároveň poslední výsledky výzkumu na poli vysoce realistického renderování, 3D interakčních a plně imerzních zobrazovacích technologií [31].

Mezi další programová řešení, která mohou výše uvedený problém vyřešit, patří:

## NyARToolkit

NyARToolkit je knihovna Visual AR třídy odvozená z ARToolKit-2.72.1. Tato knihovna poskytuje API (Application Programming Interface) pro Visual Augmented Reality.

## SLARToolKit

SLARToolkit je flexibilní knihovna podporující rozšířenou realitu pro Silverlight (platforma určená pro tvorbu dynamického online obsahu a interaktivní práce s ním, kombinuje text, vektorovou i bitmapovou grafiku, animace a video) a Windows Phone (mobilní operační systém firmy Microsoft). Cílem je vytvoření AR aplikace fungující v reálném čase využívající API webové kamery nebo jiného prostředí. Knihovna je postavena na NyARToolkit a ARToolkit využívající duální licence.

## osgART

osgART je knihovna programovacího jazyka C a C++ pro renderování, interakci a vývoj aplikací. Knihovna integruje ARToolkit tracking s výkonnou grafickou knihovnou OpenSceneGraph.

## Vuforia

Softwarová platforma pro vytváření aplikací rozšířené reality pomocí mobilních zařízení. Podporuje operační systémy iOS, Android, a Unity 3D. Platformy bylo využito při práci na společném projektu s fakultou informačních technologií. Cílem byla příprava software pro detekci kolizí mezi prostorovými objekty pro možné využití v průmyslu, avšak dále již nebylo využito z důvodů nekompatibility s ostatními operačními systémy (Windows).

Nedílnou součástí pro provedení systémové analýzy navrhovaného stroje, popřípadě pracoviště, ve virtuální realitě je virtuální model. Model vzniká nejčastěji pomocí CAD modelářů, nebo druhou možností je již zmíněná možnost prostorového skenování pokud se jedná např. o reverzní inženýrství. Pro analýzu ve virtuální realitě musí model splňovat určitá pravidla.

- Veškeré děje se provádějí v reálném čase, tedy pokud možno s okamžitou odezvou na vstupní aktivitu uživatele,

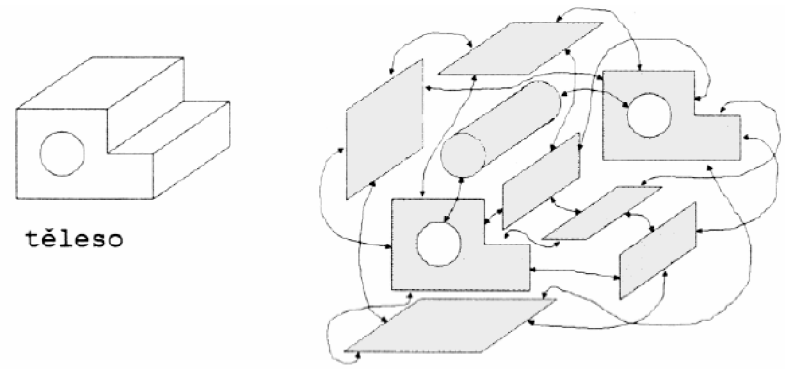
- umělý svět a objekty v něm mají trojrozměrný charakter nebo alespoň vytvářejí jeho iluzi,
- uživatel může kromě pozorování zvnějšku vstupovat do modelu podle určených scénářů,
- možnost manipulace s objekty a interakce mezi objekty a uživatelem.

### 6.2.4 Typy modelů

Pro zobrazování vytvořených 3D modelů výrobních linek a zařízení je zapotřebí zvolit typ modelu, který dokáže nést informaci o navrhovaném zařízení a je kompatibilní se zobrazovací technologií virtuální reality. Projekce dostatečně splňuje charakteristiky pro virtuální realitu. Mezi typy modelů patří:

#### Hraniční (stěnové) modely

Tato reprezentace (boundary reprezentace) patří k nejpoužívanějším typům při geometrickém popisu objektů. Hraniční model je tvořen seznamem stěn, které daný objekt ohraničují.
Například model trojbokého hranolu je určen pěti stěnami. Obecně mohou být stěny rovinné i obecné. Rovinné stěny jsou určeny hraničními hranami (Obr. 28) stěny (lomenou čarou nebo rovinnými křivkami). Nerovinné stěny mohou být jednak analytické plochy (vyjádřené funkcí nebo parametricky) nebo plochy, které vzniknou některou interpolační nebo aproximační metodou. Dříve se nejčastěji používala boundary reprezentace s rovinnými stěnami, které byly ohraničeny rovinnými n-úhelníky. Tato reprezentace se používala i pro objekt, jehož hranice byla tvořena obecnými (nerovinnými) plochami. Tyto plochy pak byly aproximovány vhodným počtem n-úhelníků a model daného objektu pak byl mnohostěnem. Dnešní CAD systémy používají i boundary reprezentaci s obecnými plochami [32].



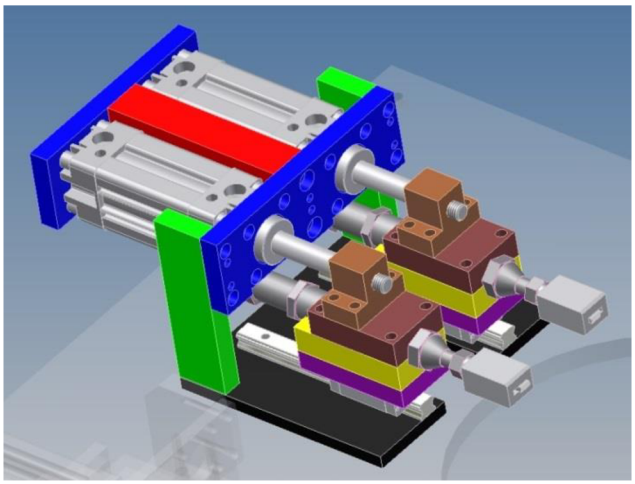

**Obr. 28: Hraniční model**

#### Objemové modely

Objemový model (solid model, volume model) je model, který v sobě zahrnuje informace o části prostoru, kterou těleso zaujímá (Obr. 29). Pro popis objemového modelu se používají tyto způsoby:

- B-reprezentace s orientovanými stěnami – objemový model může být určen seznamem orientovaných stěn (B-reprezentace), které dané těleso ohraničují (stěny mohou být rovinné i nerovinné-viz hraniční modely). Stěna je orientována, jestliže můžeme jednoznačně určit, která strana stěny je vnitřní a která je vnější vzhledem k danému tělesu.

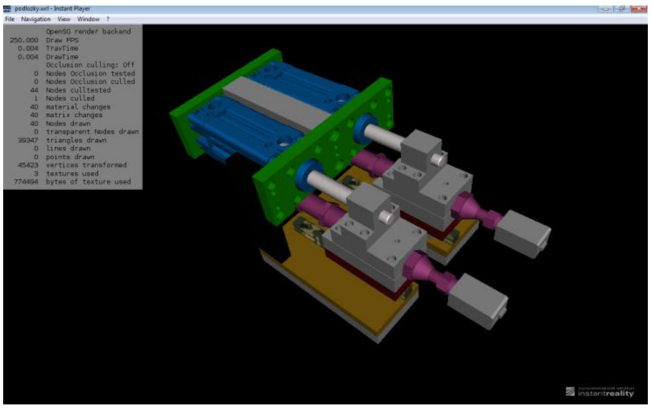
- CSG reprezentace – modelované těleso je reprezentováno binárním stromem, jehož vnitřní uzly představují množinové operace nebo geometrické transformace a listy představují elementární tělesa (primitiva). V poslední době se staly více užívané hybridní modely, které v sobě uchovávají současně CSG i B reprezentaci.
- Dekompoziční reprezentace – model je určen seznamem objemových elementů (např. krychliček), které dané těleso vyplňují, např. Octree reprezentace.[33]



**Obr. 29: Objemový model**

## Polygonální model

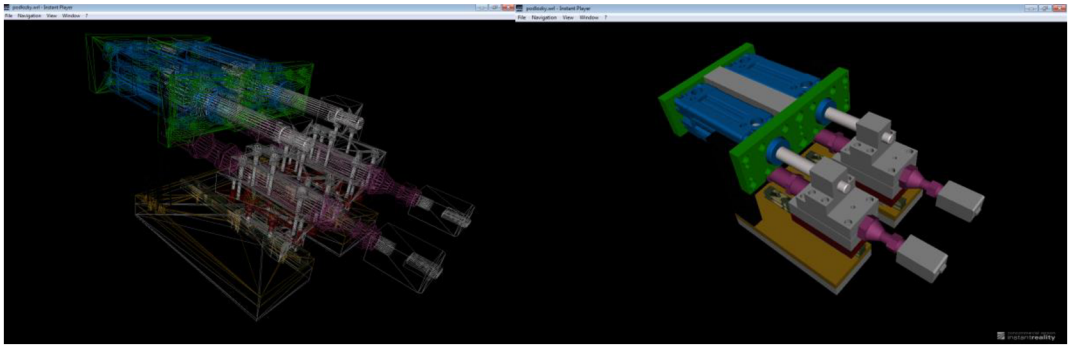
Nejrozšířenější hraniční reprezentací je definice trojrozměrného objektu pomocí polygonální sítě. Každý polygonálně definovaný prostorový objekt se skládá z uspořádané skupiny spojených rovinných n-úhelníků, neboli polygonů [34]. Ty jsou tvořeny minimálně trojicí bodů, jelikož nejjednodušším plošným útvarem je trojúhelník. Častěji se ovšem využívají obdélníky. U polygonů s větším počtem vrcholů vzniká problém v případě, že body neleží v jedné rovině. Tyto příliš deformované polygony je třeba eliminovat kvůli jejich nekorektnímu nebo nemožnému zobrazení. Řešením tohoto problému se jeví rozdělit příliš deformované polygony na trojúhelníky. Dalším problémem můžou být polygony s dírou. Polygonální model (Obr. 30) bývá uložen jako tři lineární seznamy vrcholů (vertexů), hran a polygonů. Z tabulky polygonů se odkazují do tabulky hran a odtud na jednotlivé vrcholy.



**Obr. 30: Polygonální model [19]**

Polygony jsou definovány jako posloupnost hran, musí začínat a končit stejným vrcholem. Hrana je orientovaná úsečka tvořená počátečním a koncovým vrcholem. Pro větší efektivitu může každý vrchol obsahovat zpětný ukazatel na hranu, které náleží a hrana zase zpětný ukazatel na polygon, kterému náleží. Tato definice pomocí tří tabulek může být omezena jen

na tabulku vrcholů a polygonů, ale při renderování drátového modelu můžou být některé hrany renderovány zbytečně dvakrát. Dalším zjednodušením je úplné vynechání tabulky vrcholů a hran. Zde nastává problém několikanásobného uložení souřadnic některých vrcholů. Každý z těchto základních prvků může nést nějaké další informace. V polygonu bývá uložena informace o jeho normále pro rychlejší zobrazení. Vrcholy často obsahují UV souřadnice textur, kterých může být více vrstev a několik druhů jako třeba barva, průhlednost, odrazivost anebo pro speciální efekty: optické nerovnosti povrchu (bump mapping), detailní posunutí vrcholů (displacement mapping). Někdy může vrchol tyto informace obsahovat přímo a není nutné je uchovávat v externí textuře, ale rozlišení této informace bude záležet na detailnosti sítě (Obr. 31).



**Obr. 31: Polygonální model (vlevo – síť, vpravo – vystínovaný, texturovaný)**

Nedílnou součást tvorby analýz virtuálních modelů tvoří jejich zápis. Pro zápis modelů je využito datových formátů. Mezi datové formáty, které byly použity pro vypracování disertační práce, patří:

- IAM, IPT (Inventor assembly, inventor part) – nativní formát – Autodesk
- STEP (Standard for the Exchange of Product Data) – ISO standard – standardní exportní formát
- IGES (Initial Graphics Exchange Specification) – ANSI standard – exportní formát
- JT - exportní formát
- VRML (Virtual Reality Modeling Language), X3D – zápis polygonálních modelů

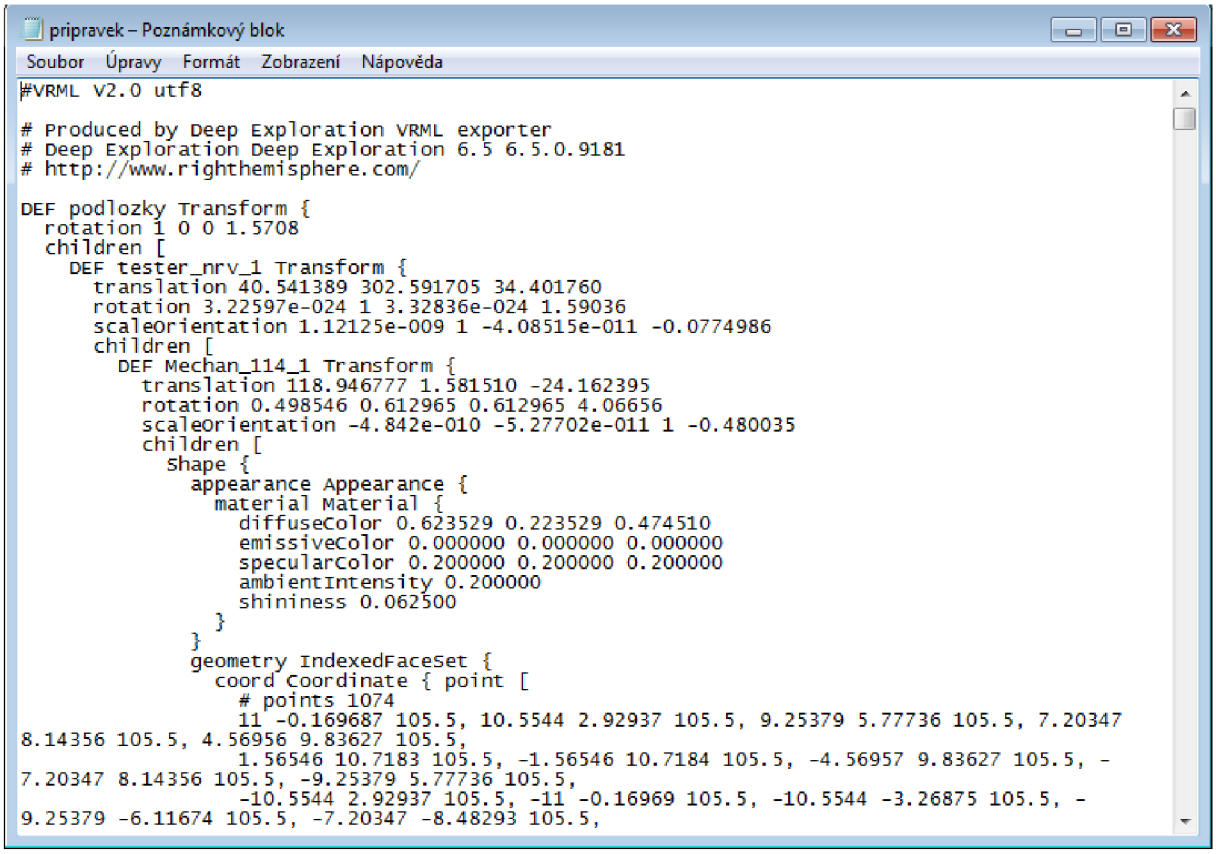
Průběh práce s jednotlivými formáty je následující:

### 6.2.5 Formát VRML (Virtual Reality Modeling Language)

Jedná se o jazyk určený pro popis trojrozměrných scén i aktivních objektů použitých v aplikacích virtuální reality. Prostorová tělesa lze v tomto formátu popsat pomocí seznamu souřadnic vrcholů a plochami specifikovanými indexy svých vrcholů. Pro základní geometrická tělesa, mezi něž patří krychle, koule, kužel apod., i pro objekt typu text jsou definována vlastní klíčová slova reprezentující uzly modelu, takže je není nutné rozkládat na trojúhelníky, což by bylo prostorově náročné [35].

## Zápis prostorové scény do VRML

Jazyk VRML 97, který je mezinárodní normou ISO pro popis statických a dynamických světů (ISO/IEC 14772-1:1997). Ve VRML je celá trojrozměrná scéna popsaná pomocí objektů (Obr. 32), které jsou hierarchicky uspořádány ve stromové struktuře. Celá stromová struktura 3D scény je reprezentovaná uzly zapisovanými způsobem "jméno_uzlu {vnitřní obsah}". Uvnitř uzlu se mohou nacházet další uzly a také atributy uzlů, což jsou číselné, řetězcové, pravdivostní a další hodnoty, které určují například tvar objektů. Pomocí uzlu pojmenovaného Separator a Group lze uzly sdružovat.



```
#VRML V2.0 utf8

# Produced by Deep Exploration VRML exporter
# Deep Exploration Deep Exploration 6.5 6.5.0.9181
# http://www.righthemisphere.com/

DEF podlozky Transform {
  rotation 1 0 0 1.5708
  children [
    DEF tester_nrv_1 Transform {
      translation 40.541389 302.591705 34.401760
      rotation 3.22597e-024 1 3.32836e-024 1.59036
      scaleOrientation 1.12125e-009 1 -4.08515e-011 -0.0774986
      children [
        DEF Mechan_114_1 Transform {
          translation 118.946777 1.581510 -24.162395
          rotation 0.498546 0.612965 0.612965 4.06656
          scaleOrientation -4.842e-010 -5.27702e-011 1 -0.480035
          children [
            Shape {
              appearance Appearance {
                material Material {
                  diffuseColor 0.623529 0.223529 0.474510
                  emissiveColor 0.000000 0.000000 0.000000
                  specularColor 0.200000 0.200000 0.200000
                  ambientIntensity 0.200000
                  shininess 0.062500
                }
              }
              geometry IndexedFaceSet {
                coord Coordinate { point [
                  # points 1074
                  11 -0.169687 105.5, 10.5544 2.92937 105.5, 9.25379 5.77736 105.5, 7.20347
8.14356 105.5, 4.56956 9.83627 105.5,
                  1.56546 10.7183 105.5, -1.56546 10.7184 105.5, -4.56957 9.83627 105.5, -
7.20347 8.14356 105.5, -9.25379 5.77736 105.5,
                  -10.5544 2.92937 105.5, -11 -0.16969 105.5, -10.5544 -3.26875 105.5, -
9.25379 -6.11674 105.5, -7.20347 -8.48293 105.5,
```

**Obr. 32: Ukázka VRML kódu přípravku**

Charakteristika zápisu pomocí formátu VRML.

- Podporuje se hraniční reprezentace objektů.
- Scéna je organizována do stromové struktury tzv. zhroucený strom (umožnuje dědění).
- Lze tvořit zcela nové parametrické objekty.
- Scénu můžou tvořit jak prvky umístěné v lokálních souborech, tak i na vzdálených počítačích v internetu.
- Virtuální světy lze vkládat do stránek HTML.
- Jsou podporovány prostředky pro popis animace objektů a interakce s uživatelem.
- Kromě prostorových objektů je možné vkládat i multimediální prvky (video, obraz, zvuk).
- Je textovým formátem nezávislým na výpočetní platformě.
- Obsahuje prostředky pro řízení rychlosti zobrazování v závislosti na konkrétním výkonu počítače.

Základní vlastnosti jazyka VRML jsou:

- virtuální světy tvořené prostorovými objekty jsou kombinovány s multimediálními prvky, jakými jsou obraz, video, zvuk,
- při tvorbě virtuálních světů lze využívat prvky zapsané jak lokálně v souborech, tak kdekoliv v síti Internet. Stejně tak lze mezi různými světy plynule přecházet podobně, jako přecházíme mezi stránkami WWW,
- animace, interakce a manipulace s virtuálními objekty je zajištěna jednotným a přehledným způsobem. Stejné prostředky se používají pro popis statických i dynamických světů. Statické světy lze snadno rozšířit na dynamické a obráceně,
- součástí jazyka jsou definice způsobů pohybu uživatele (chůze, let, zkoumání objektů), podpora automatické navigace ve virtuálním prostředí, popis reakce na chování uživatele,
- virtuální světy lze vkládat do WWW stránek či rámů,
- jazyk VRML umožňuje spolupráci s dalšími programovacími jazyky (Java, JavaScript) i aktivaci jiných programů, typicky prohlížečů WWW stránek,
- popis virtuálních světů je ukládán pouze v textovém, tedy snadno čitelném tvaru. Velikost souborů je pak možno výrazně snížit kompresí pomocí programu gzip, aniž bychom se museli explicitně starat o jejich zpětné dekódování,
- prohlížení souborů VRML.

## Struktura souboru VRML

V každém souboru, obsahujícím popis světa v jazyce VRML, můžeme nalézt několik logicky odlišných částí. Na prvním řádku je vždy umístěna hlavička souboru, jejíž tvar je neměnný. Podle ní rozpoznávají aplikační programy, o jaký typ souboru a jakou verzi jde. V hlavičce souborů VRML je dokonce zapsán i způsob kódování znaků tak, aby jeden soubor mohl obsahovat písmena z několika různých národních abeced současně. Zkratka utf8 říká, že je použito kódování UTF-8 (jinak známé též pod názvem Unicode), které pro zápis základní sady znaků využívá běžným způsobem osm bitů, pro znaky národních abeced pak dvojice až šestice bytů pro jeden znak.

#VRML V2.0 utf8 Hlavička souboru VRML.
WorldInfo { ... }
Viewpoint { ... }Úvodní, všeobecné informace o virtuálním světě.
Transform { ... }
Group { ... }
PositionInterpolator { ... } Popis těles, jejich vlastností, definice prvků potřebných pro animace a interakci.
ROUTE ... TO ... Propojení dynamických a statických prvků z předchozí části.

Hned za hlavičkou jsou údaje, které popisují celkové vlastnosti virtuálního světa. Jsou to informace o souboru a jeho tvůrci (WorldInfo), seznam míst uvnitř světa (Viewpoint) a způsob procházení světem (NavigationInfo). Třetí, většinou nejrozsáhlejší část souboru je tvořena popisem virtuálních těles, definicí jejich tvaru, barvy a dalších vlastností. Patří sem i zápis prvků, s jejichž pomocí bude statický virtuální svět „rozhýbán“. Do poslední části VRML souboru se pak zapisují propojení mezi aktivními a statickými prvky. Uvedené pořadí logických částí souboru není závazné, avšak zvyšuje celkovou přehlednost. Soubory, které obsahují VRML světy, mají příponu wrl (z anglického world). Tuto příponu mají i v případě, že jejich obsah byl nejprve zkomprimován programem gzip (aplikační software užívaný pro

kompresi dat). Prohlížeče jsou schopny podle obsahu souboru rozpoznat, zda jde o textový či komprimovaný tvar.

### 6.2.6 Formát X3D

Extensible 3D je XML (Extensible Markup Language) formát na ukládání 3D scén (geometrie a chování 3D objektů). Koncepcí vychází z VRML97, důležitou změnou oproti VRML je možnost přejít z VRML syntaxe na XML syntaxi, avšak norma připouští obojí. Též definuje binární kódování X3D dat[36].

#### Charakteristika formátu X3D

Grafický formát X3D z velké části vychází z formátu VRML (ostatně proto je také někdy nazýván „VRML 3.0“), ovšem opravuje některé jeho nedostatky a především umožňuje – kromě původní syntaxe odvozené od Open Inventoru – použít i syntaxi zápisu založenou na XML. To s sebou nese celou řadu předností, především jednoduché zpracování celého dokumentu pomocí velkého množství knihoven a programových API pro práci s XML (SAX a DOM existující snad pro všechny významné programovací jazyky), možnost poloautomatické serializace a deserializace prostorové scény do X3D, relativně snadné převody mezi X3D a dalšími formáty apod.
Volba XML byla v tomto případě, podobně jako u dříve popsaného vektorového grafického formátu SVG (Scalable Vector Graphics) poměrně přirozená, protože trojrozměrné scény jsou i ve VRML 97 popsány stromovou strukturou, která má svůj jasný obraz ve struktuře XML dokumentu. Pro uživatele či programátory, kteří z různého důvodu preferují původní syntaxi VRML (například již mají napsané vstupní a výstupní rutiny), je tato možnost dále zachována, i když u nově vytvářených aplikací je většinou vhodnější se přidržet XML.

### 6.2.7 Profily X3D a rozšířené API

Poměrně důležitou a přitom praktickou součástí X3D jsou takzvané profily. Zjednodušeně řečeno se jedná o to, že v některých případech není nutné či dokonce možné, aby nějaký prohlížeč implementoval celou normu X3D, ale pouze její určitou podmnožinu. Aby bylo zcela zřejmé, o jakou podmnožinu se jedná, měl by být na začátku každého dokumentu uloženého ve formátu X3D zapsán profil, který je vyžadován pro plnohodnotné prohlédnutí tohoto souboru. Například se dá předpokládat, že mobilní zařízení či jednoduché set-top boxy budou z paměťových i rychlostních hledisek implementovat pouze některé méně náročné profily (vypnutý výpočet osvětlení, snížená velikost textur atd.), zatímco aplikace určené pro výkonné osobní počítače a rychlé grafické karty by v ideálním případě měly či mohly podporovat profily všechny.

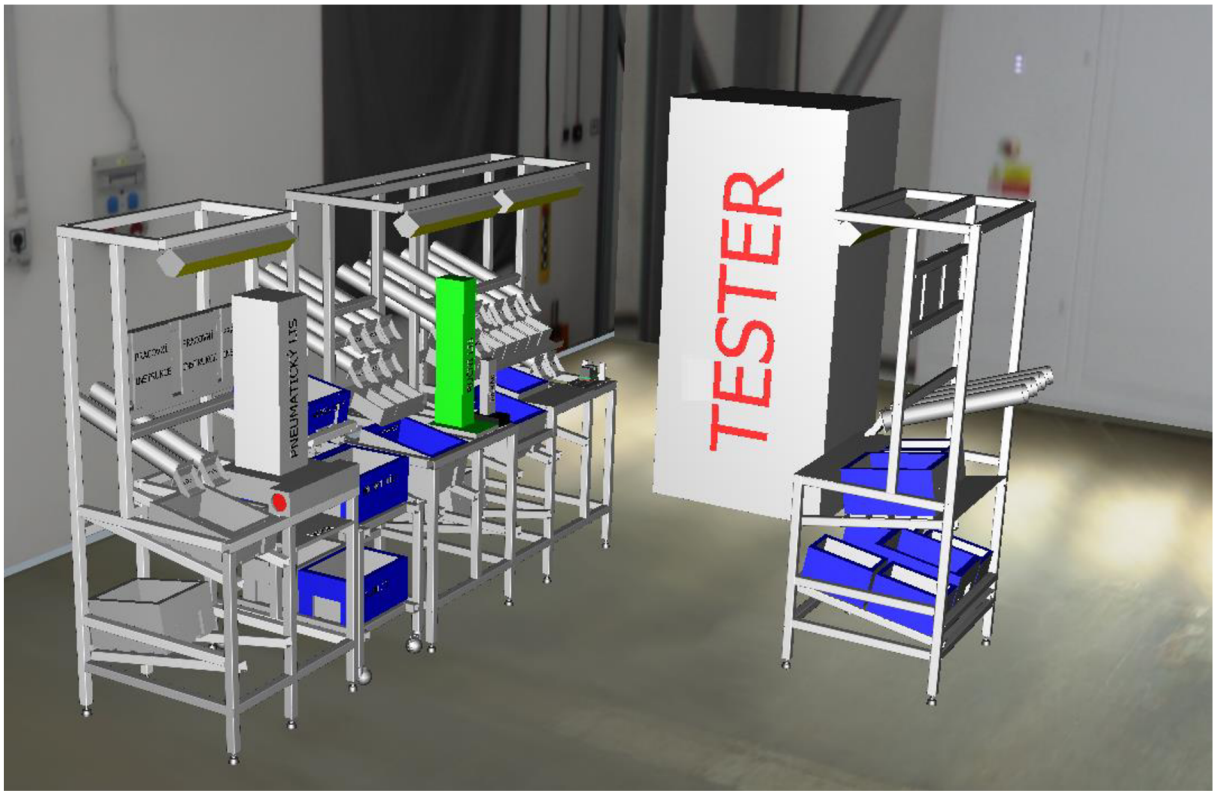
### Trojrozměrná scéna popsaná pomocí X3D (XML syntaxe)

```
<Transform>
    <Shape>
        <Appearance>
            <Material diffuseColor="0 1 0"/>
        </Appearance>
        <Cylinder height="0.1" radius="0.5"/>
    </Shape>
</Transform>
```

## 6.2.8 Jednotlivé kroky řešení druhého dílčího cíle

### Krok 1

V první fázi řešení je nutné seznámit se s výrobním procesem a stávající výrobní linkou a stanovit postup pro návrh nového pracoviště dle zadaných parametrů. Taktéž musela proběhnout diskuze nad časovým a prostorovým rozvržením stávajícího a nového pracoviště. Z těchto vstupních informací bylo možné vytvořit prvotní 3D návrh pracoviště (Obr. 33) pro výrobu pneumatických komponent.




**Obr. 33: Prvotní návrh pracoviště**

### Krok 2

Dalším krokem řešení byla analýza prvotního návrhu nově navrženého pracoviště. Během rozpravy vznikly problémy, které dosavadní technologie nedokázaly dostatečně vyřešit. Konstruktér a multidisciplinární tým nemohl relevantně rozhodnout o správnosti řešení. Hlavním problémem byla nedostatečná interpretace prostorového CAD modelu a jeho

vypovídací schopnost pro týmovou spolupráci. Bylo nutné vyřešit otázky týkající se bezpečnosti a ergonomie pracoviště. Otázky, které vznikly během diskuze:

1. Bude možné vložit nové pracoviště do vymezeného prostoru?
2. Nebude pracoviště zasahovat do jiného pracoviště?
3. Nebudou pohyblivé části pracoviště ohrožovat obsluhu a ostatní?
4. Jsou všechna místa dosažitelná pro operátora? (hlavní vypínače, materiál…)
5. Splňuje návrh ergonomické standardy pro práci?
6. Jakým způsobem bude vypadat budoucí tok materiálu pracovištěm?

Pro vyřešení těchto otázek byla pro vyšší názornost a vypovídací hodnotu využita technologie virtuální reality.

## Krok 3

V tomto kroku bylo nutné připravený CAD model převést na polygonální z důvodů plynoucích z technologie virtuální reality. Převod byl proveden v software Deep Exploration 6., který přímo podporuje vložení CAD modelu ze software Autodesk Inventor. Model byl následně obarven, vloženy animace pohyblivých částí a popřípadě byla vložena textura. Pro zápis polygonálního modelu byl zvolen formát VRML.

## Krok 4

V předchozím kroku připravený polygonální model byl importován do dvou prostředí virtuální reality pro srovnání výhodnosti řešení v jednotlivých prostředích. Do prostředí imerzní virtuální reality (software IC:IDO) a rozšířené reality. Výhody a nevýhody jednotlivých řešení:

**Imerzní virtuální realita - IC:IDO – VDP 9.1**

Výhody

- Import polygonálních modelů ve formátu VRML, JT, FBX.
- Uživatelsky přívětivé prostředí.
- Možnost přímo řešit ergonomické analýzy pomocí antropometrického modelu (Obr. 34) člověka.
- Zobrazení modelu v měřítku 1:1.

Nevýhody

- Nemožnost zobrazení v reálném prostředí.
- Ekonomicky náročné.

**Rozšířená realita (AR) - obecně**

Výhody

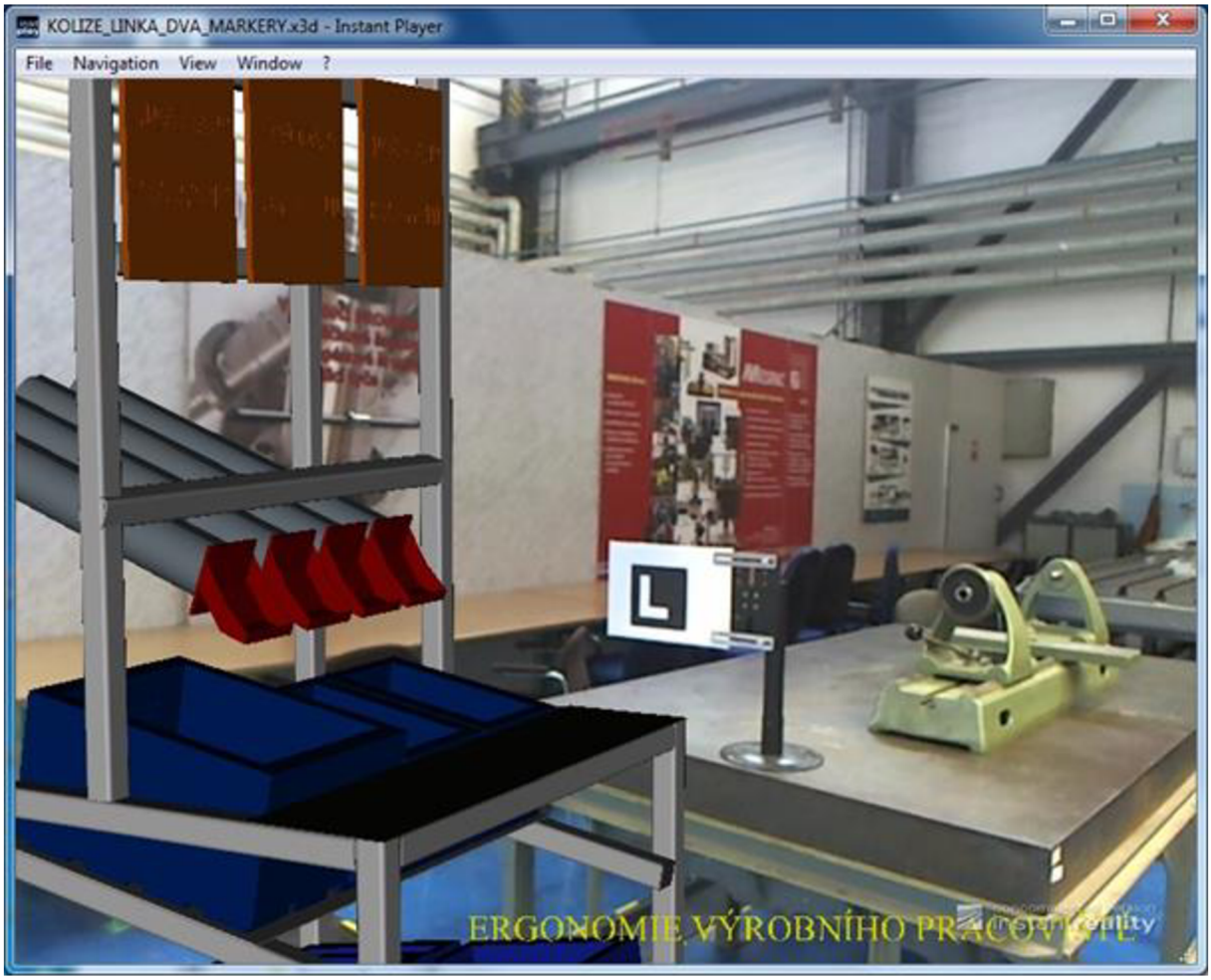
- Možnost zobrazení v reálném prostředí.
- Možnost integrace jiných modulů – volný programovací jazyk.
- Import polygonálních modelů ve formátu VRML, X3D.
- Ekonomicky nenáročné – open source.

Nevýhody

- Nutnost programátorského povědomí.
- Uživatelsky nepřívětivé.
- Omezené zobrazení měřítka 1:1.

**Obr. 34: Model výrobního pracoviště pro výrobu pneumatických komponent v prostředí VDP 9.1 - ergonomická analýza**

Jak bylo řečeno výše, software VDP 9.1 obsahuje modul pro řešení ergonomických studií. Pro tyto studie využívá vložené modely člověka s rozsahem končetin a kloubů. Taktéž je v prostředí zakomponována identifikace kolizí a je možné řešit procesní analýzy.




**Obr. 35: Model výrobního pracoviště (kompletace) v reálném prostředí pomocí technologie AR**

V případě aplikace rozšířené reality (Obr. 35) pro řešení ergonomické analýzy, analýzy kolizí a jiné musíme tento způsob dotvořit.

Samotným začátkem je programování zobrazení pomocí kamery a nanesení objektu na požadovanou vodicí značku. Tento prvotní problém byl vyřešen pomocí návodu poskytnutého bezplatně na webu[31]. Řešení se skládá ze dvojice souborů (pm a x3d). V souboru s příponou (.pm) je zapsáno pomocí xml kódování jakým způsobem bude načítána značka, velikost zobrazovacího okna a zkreslení kamery. Druhý soubor s příponou (*.x3d) obsahuje informaci, jakým způsobem bude načítán model.

V případě řešených studií bylo zapotřebí kód obohatit a doplnit kolizní funkce mezi objekty. Mezi hlavní parametry, které x3d (příloha 1) a pm (příloha 2) kód musel splňovat, aby dostatečně otestoval pracoviště, patřily:

1. zobrazení modelu v požadovaném meřítku
2. možnost vložení modelu pro dílčí ergonomické studie
3. možnost zobrazení kolizí
4. možnost vyřešit kritická místa
5. podpora plánování toku jednoho kusu

## Zobrazení modelu v požadovaném měřítku

Model výrobní linky byl navržen v prostředí Autodesk Inventor, který již modelu přiřadil měřítko (mm). Tento model po exportu do jazyka VRML (v příloze 1 - Linka_95_3.wrl) uchoval toto měřítko. Následným vložením na vodicí značku toto měřítko muselo být uzpůsobeno vůči velikosti vodicí značky. Velikost modelu v jazyce VRML/x3d bylo možno upravit v prvku SCALE. Další úprava a nastavení musí vycházet z velikosti značky, která musí být po vytištění změřena a tím upraven poměr VELIKOST ZNAČKY:VELIKOST MODELU.

## Možnost vložení modelů pro dílčí ergonomické studie a zobrazení kolizí

Pro řešení tohoto problému byl vložen do prostředí model virtuální ruky (Hand-mit-Arm-5d.wrl) v příloze 1. Tato paže byla vložena na kostku opatřenou vodicími značkami. Kostka byla vybrána z důvodů možnosti zobrazení 3D modelu paže ze všech stran. Virtuální ruka byla dále nastavena, aby překrývala ruku reálnou. Na další vodicí značku byla vložena celá výrobní linka. Mezi další opatření pro řešení studie dosahu horních končetin byla zavedena kolize mezi objekty v tomto případě mezi virtuální ruku a výrobní linku. V případě kolize dochází k rozsvícení nápisu „KOLIZE“ na monitoru.

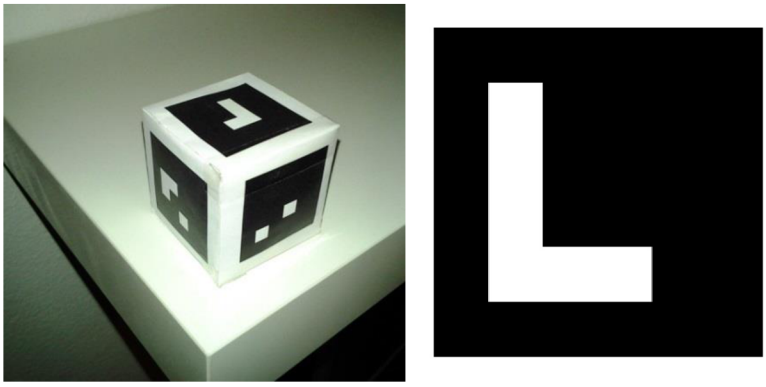
Dalším krokem bylo otestování celkového řešení v reálném provozu. Před zahájením byla nutná celková kalibrace virtuálního pracoviště.

### Kalibrace řešení

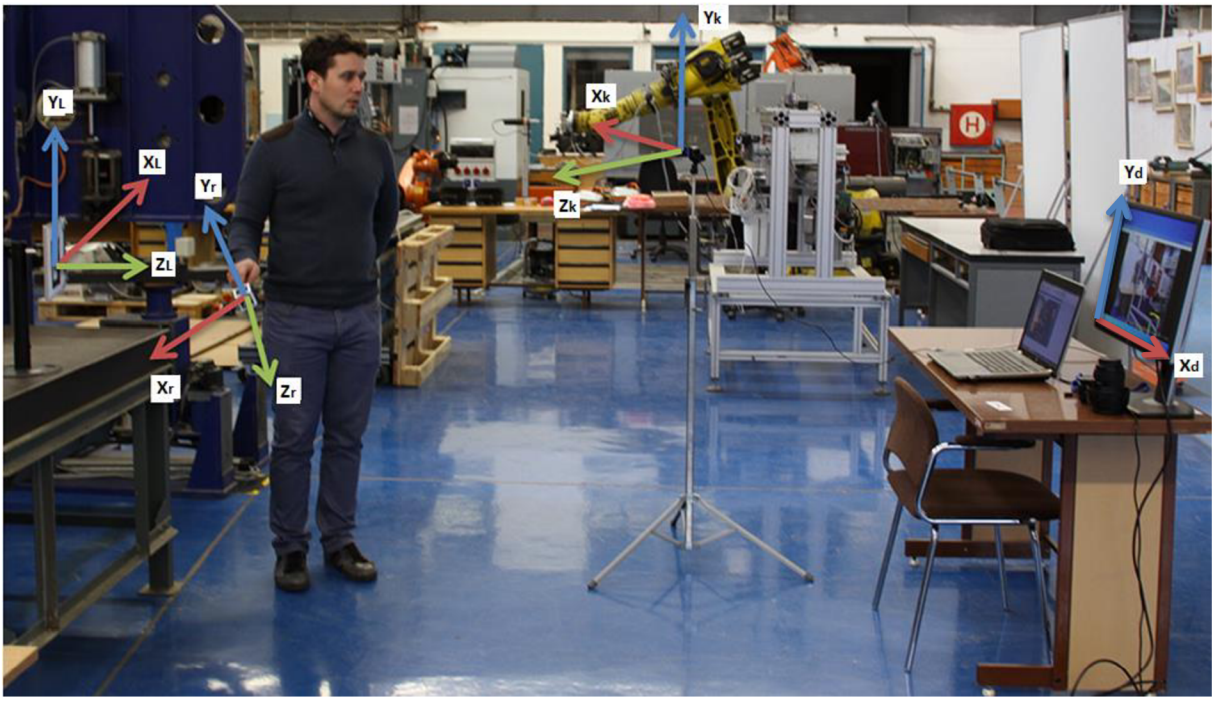
V případě uskutečnění relevantní ergonomické analýzy bylo zapotřebí provést kalibraci virtuálního pracoviště. Úkolem je srovnání měřítek modelů umístěných vůči sobě na vodicích značkách. Je zapotřebí brát v potaz velikost značek, jelikož změna velikosti značky vede k přímo úměrné změně měřítka modelu. Důvodem rozdílných velikostí značek je viditelnost pomocí vybrané kamery. Větší značka (vzdálenější) byla využita na umístění pracoviště, menší pro umístění virtuální ruky (Obr. 38). Při testování scény (Obr. 37) se projevil efekt fokusování kamery a tím pádem byl obraz linky umístěný na značce značně roztřesený, proto byla zvětšena velikost značky pro snazší identifikovatelnost pomocí kamery. Hlavním limitem

tohoto řešení se ukázala využitá zobrazovací technika v tomto případě webová kamera. V případech, kdy byl zobrazován model pomocí kamery na kratší vzdálenost, nejevil obraz zásadních problémů, avšak pokud kamera byla oddálena, docházelo k vymizení komunikace mezi značkou a kamerou. V tomto případě bylo vhodné využít větší značky (Obr. 36) a přizpůsobit velikost modelu. Přizpůsobení modelu na požadovanou vodicí značku je patrné v přiloženém xml kódu. Změna velikosti a umístění je v uzlu Transform (scale, translation, rotation). Pro virtuální paži byla použita vodicí kostka o rozměrech 5x5x5 cm. Model byl rozmístěn zvlášť na všechny strany kostky a uzpůsoben, aby při natočení kostky docházelo k jeho umístění na další strany kostky. Docílili jsme toho, že 3D model virtuální paže bylo možné natáčet ze všech stran.

Vodicí značky:
Výrobní pracoviště: 15x15 cm
Virtuální ruka: 5x5 cm
Poměr mezi značkami (1:3)



**Obr. 36: Vodicí značky - virtuální ruka, pracoviště**



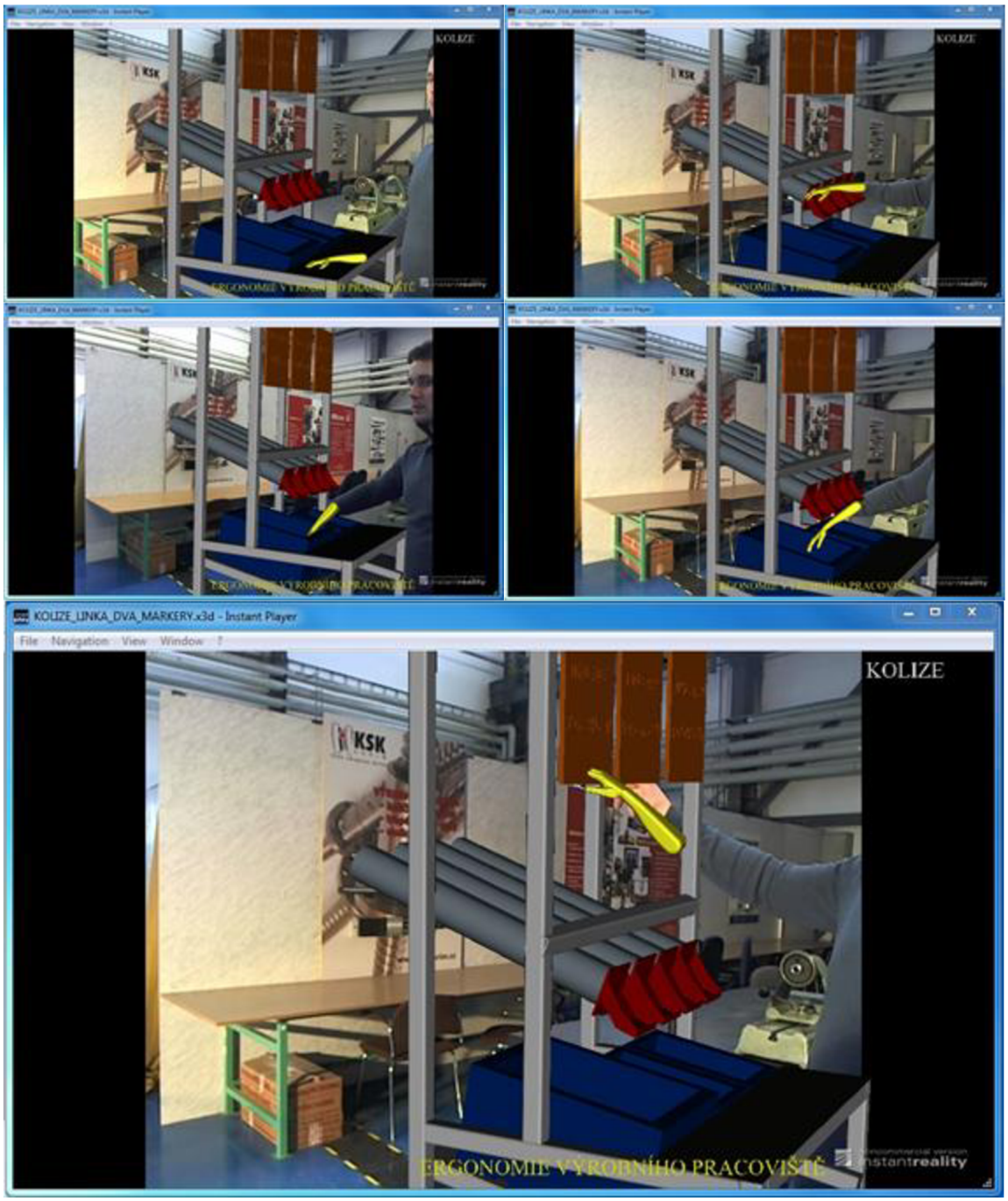

**Obr. 37: Testování nastavení montážního pracoviště – souřadné systémy (výrobní pracoviště, virtuální paže, webová kamera, zobrazovací zařízení)**

**Obr. 38: Jednotlivé pozice jsou 1: TZ - výrobní pracoviště, 2: TZ - virtuální paže, 3: Webová kamera, 4: Zobrazovací a výpočetní zařízení**

## Řešení dosahů a kritických míst

Pro řešení tohoto kroku bylo zapotřebí exportovat model výrobní linky do prostředí Autodesk 3D Max. V tomto softwaru byly vytvořeny animace pohybů jednotlivých v reálu pohybujících se objektů. Takto upravený model byl opět exportován do prostředí jazyka VRML a takto exportovaný model programově vložen na vodicí značku. Pro další pokračování práce byla využita virtuální ruka použitá v bodech 2 a 3.

**Obr. 39: Průběh dílčí ergonomické analýzy pomocí využití aplikace AR z vnějšího pohledu**

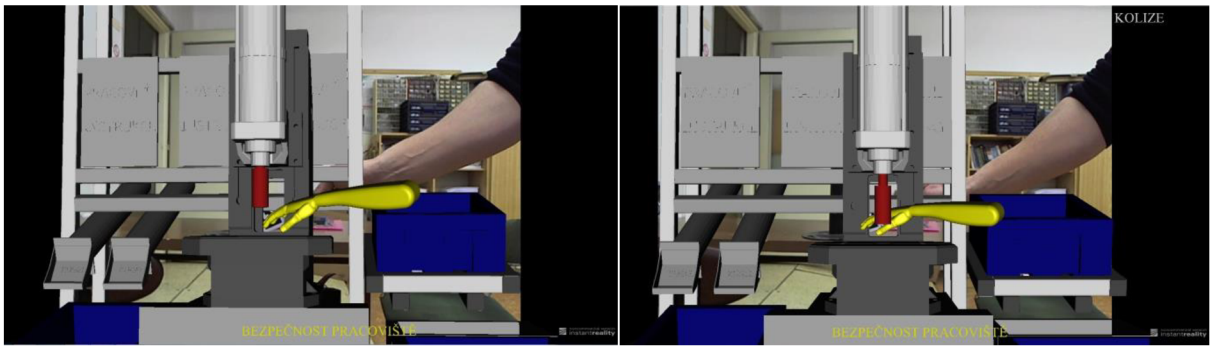



**Obr. 40: Průběh dosahové analýzy pomocí využití aplikace AR z pohledu webové kamery na kompletačním stole linky pro výrobu pneumatických komponent.**

V rámci ergonomické analýzy (Obr. 39) byly řešeny dosahy vůči startovací pozici (Obr. 40) vlevo nahoře, což představuje montážní plochu. Nalezení startovací pozice v prostoru bylo řešeno jako dotyk virtuální paže na montážní plochu a hlášky „KOLIZE“ signalizující kolizi v pravém horním rohu. Dle obrázku je patrné, že montážní plocha je v zóně dosahu A (časté a přesné pohyby). Následovalo prověření dosahu do umístěných tub a krabic (vpravo nahoře a uprostřed) odkud operátor při výrobě odebírá materiál dále pak maximální dosah, který je naznačen kolizí s vyvěšenými pracovními instrukcemi (dole).

Dalším úkolem bylo prověření kolizních situací pohyblivých částí pracoviště s paží operátora a jejich identifikace. Příkladem je pohyb beranu pneumatického lisu po zmáčknutí obouručního ovládání. V tomto případě samotné obsluze nehrozí nebezpečí, jelikož lis je

vybaven obouručním ovládáním, avšak může docházet k ohrožení např. operátora jiné linky, pokud vloží do prostoru lisovacího trnu paži (Obr. 41). Zdvih pneumatického lisu je 50 mm, což umožňuje vložit paži do pracovního prostoru. Jako jedno z doporučení, plynoucí z této analýzy, může být zakrytování lisovacího prostoru.




**Obr. 41: Simulace lisování pomocí rozšířené reality – kolizní stav**

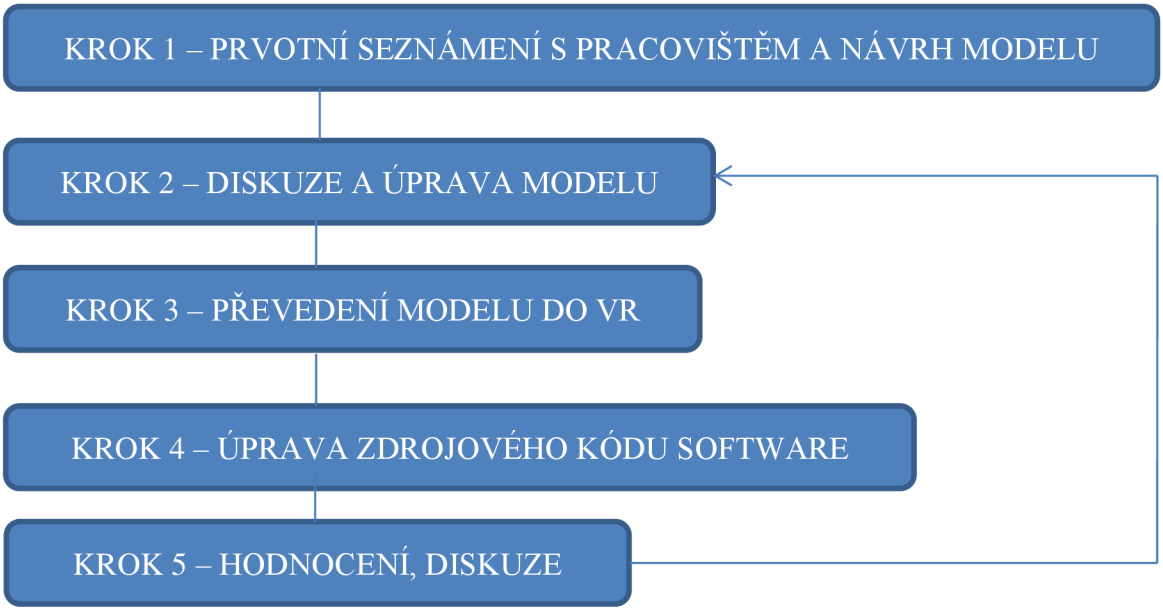
## Tok jednoho kusu

V tomto kroku bylo možné využít připravené virtuální pracoviště z předchozího kroku pro řešení analýz toku jednoho kusu. Vzniklá aplikace umožní odhalit pohyby rukou a nástrojů při plánované výrobě. V tomto případě bylo možné vytvořit relevantní MOST analýzu připravovaného pracoviště, procesu.

**Dílčí závěr**: parametry 1 až 5, definované na začátku kroku 2, byly splněny.

## Krok 5

V tomto kroku bylo již možné provést analýzu rizik pracoviště, celkové nastavení a závěrečnou diskuzi nad správností zvoleného řešení. Pokud v rámci diskuze byly odhaleny nedostatky, následovaly opět kroky 2 až 5 v rámci zobrazeného algoritmu řešení.



## Závěr druhé části řešení

V druhé části řešení byl proveden metodický postup návrhu výrobního pracoviště s využitím virtuální reality. Pro práci bylo vybráno programové prostředí Instant Reality, které již obsahuje řešení pro aplikace rozšířené reality. Toto prostředí bylo upraveno tak, aby jej bylo možné nasadit při ergonomických, rizikostních analýzách a jiných procesních analýzách. Takto analyzované pracoviště je dále možné realizovat bez nadbytečných úprav po sestavení (Obr. 42). Na základě závěrečné rozpravy s odborným týmem z výrobního podniku je takto navržené řešení shledáno v praxi v budoucnu využitelné a zajímavé.
Jako námětem pro další řešení se autorovi jeví budoucí využití zařízení Head-mounted display obohacené o vodicí zařízení a kameru, které by pozorovateli dokázalo zprostředkovat nový vizuální vjem s pracovištěm bez použití projekce typu CAVE. V další kapitole bude řešeno zobrazení energetických toků na již realizované výrobní lince.

**Obr. 42: Zrealizované pracoviště na výrobu pneumatických komponent**

## 6.3 Dílčí cíl třetí části práce - zobrazení spotřeby energií reálného výrobního pracoviště (stroje)

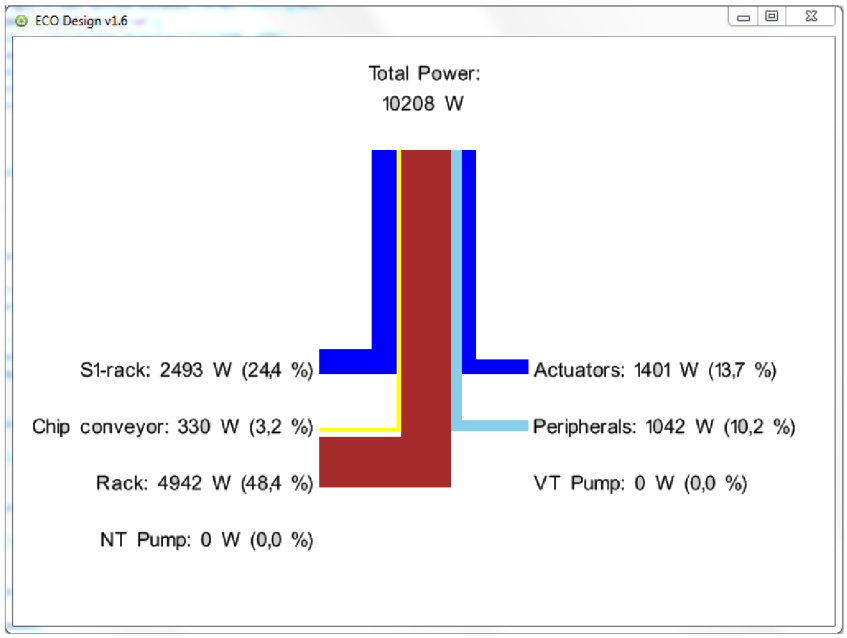
Cílem třetí části řešení je vytvoření programového prostředí pro zobrazení 3D Sankey diagramu z naměřených dat. Důvodem řešení dílčího cíle je možnost navázat na spolupráci s týmem, který provádí měření na reálném stroji nebo pracovišti. Tím by byl vytvořen úplný obraz řešeného pracoviště i z pohledu energetické spotřeby.

### 6.3.1 Použité technické vybavení třetí části řešení

Pro tvorbu energetické analýzy bylo využito prostředí rozšířené virtuální reality, tudíž technické vybavení pro zobrazování se shoduje s druhou částí řešení.

## Sankey diagram

Je specifický druh diagramu, kde zobrazená šířka šipky vyjadřuje kvantitu toku. Typické využití je při zobrazení energetického nebo materiálového toku. Diagram jasně zobrazuje hlavní a vedlejší toky (Obr. 43).




**Obr. 43: Sankey diagram** [37]

## 6.3.2 Jednotlivé kroky řešení třetího dílčího cíle

Cíle pro výrobní linku byly vyřešeny v přechozích kapitolách. V tomto nadstavbovém řešení bylo uvažováno s postprodukční částí výrobního pracoviště (stroje). Byla uvažována reálná spotřeba energií pracovišť, jelikož tvoří nezanedbatelnou součást provozních nákladů výrobního podniku. V případě navrženého modelového případu výrobního pracoviště spotřeba nebyla uvažována. Hlavním důvodem proč nebyla uvažována, byla nákladnost experimentálního měření a jeho výsledný efekt v praxi. Vytyčený cíl byl proto řešen náhradním modelovým případem a to na obráběcím stroji z produkce TOS Kuřim. Data z měření stroje byla poskytnuta v rámci spolupráce s ČVUT. Pro následnou vizualizaci toků energií byl využit stroj MAS Kovosvit umístěný v prostorách Ústavu výrobních strojů systémů a robotiky v Brně.

## Krok 1

První fází samotné vizualizace energetických toků je sběr dat z měření stroje. Pro vizualizaci byla použita data ze stroje FU EFEKTIV(Obr. 44), jelikož nebyla dostupná žádná data z jiných strojů.

**Obr. 44: Horizontální frézovací stroj FU EFEKTIV**

## Krok 2

Důležitou částí řešení bylo vytvoření programového prostředí, které se skládá ze dvou částí. První částí je aplikace rozšířené virtuální reality, která dokáže umístit zvolený objekt na značky. Druhou části je programové prostředí, které zajistí komunikaci mezi rozšířenou virtuální realitou a výpočtem spotřeby stroje jednotlivých komponent (pohony, vřeteno apod.). Zároveň je nutné, aby tento software v reálném čase překresloval zvolené objekty, v tomto případě válce (VALEC 1, VALEC 2, VALEC 3), viz příloha 2, které představovaly jednotlivé komponenty (pohony, vřeteno) dle vypočtených parametrů.

## Krok 3

V této fázi řešení byla provedena testovací kalibrace v laboratoři (Obr. 45) a následně finální na stroji, tj. správné umístění objektů (válců) k relevantním komponentám (Obr. 46). Pro příklad byl použit dostupný stroj na ÚVSSR, tj. MAS Kovosvit 754 QUICK. Vodicí značka byla využita z řešení procesních studií výrobního pracoviště, tj. větší značka pro umístění pracoviště. Hlavní důvod této volby je současné snímání prostoru obráběcího stroje a vizualizace.

**Obr. 45: Testování zobrazení energetických toků**

**Obr. 46: Zobrazení energetických toků na stroji MAS Kovosvit**

### Krok 4

V tomto kroku řešení byla prováděna validace výsledků metody pro zobrazení energetických toků. V případě nedostatků se pokračovalo krokem 2.

### Krok 5

Dalším budoucím krokem řešení bude možnost propojení výpočtového prostředí s měřicím zařízením. V tomto případě bude vykreslována okamžitá spotřeba z naměřených dat.

# 7 Závěr

Předložená disertační práce se zabývala otázkou možné integrace vizualizačních a interakčních technik virtuální reality do oblasti identifikace rizik, ergonomie a toku jednoho kusu (one piece flow) v životním cyklu návrhu a realizace výrobních linek a pracovišť. Nosná část práce spočívala ve vytvoření podpůrné platformy pro identifikaci potencionálního rizika a odhalení ergonomických chyb již v předvýrobní fázi výrobní linky (pracoviště). Práce se zabývala šířeji tématem návrhu výrobních pracovišť a obsahuje možná nasazení od integrace do reálného prostředí přes testování v reálném prostředí až po simulaci spotřeby na již sestaveném pracovišti.

## 7.1 Shrnutí dosažených výsledků

Jak již bylo psáno v kapitole 3, výsledkem této dizertační práce je uvedení přehledu současného stavu vědecko-technického poznání, jak z oblastí týkajících se technologií

virtuální reality, tak i návrhu pracovišť. Z analýzy vyplývá mnoho činností, které mají být v průběhu návrhu splněny, a lze konstatovat, že byly autorem této disertace postupně plněny.

## 7.2 Teoretický přínos práce

Důležitým teoretickým výstupem je započetí práce na výzkumných projektech velmi moderními výpočetními prostředky v rámci využití virtuální reality.
Mezi hlavní přínos práce patří nová aplikace virtuální reality v navrhování strojů a pracovišť ve strojírenské výrobě, s možností řešení ergonomických analýz bez pomoci vícestěnné projekční techniky a specializovaného softwaru.

## 7.3 Praktický přínos práce

Největší důraz práce byl kladen na cíle, jejichž dosažení má výrazné teoretické i praktické využití, jelikož práce vychází z požadavků od průmyslového partnera IMI International. Důvody pro použití metod rozšířené reality byly následující:

- nedostatečná rozhodovací platforma při návrhu výrobních pracovišť;
- v případě závěrečné inspekce dle bezpečnostních požadavků, by musel být proveden opětovný proces navrhování, což by zvyšovalo časovou náročnost celkového řešení od návrhu k výrobě pracovní stanice;
- instalace (usazení) nového pracoviště do již existující zástavby v hale a tím zabránění kolizí při transportu nového pracoviště z míst, kde bylo vytvořeno;
- plošné rozložení jednotlivých pracovišť (layout), včetně prostorového umístění pracoviště vůči ostatním zařízením, pracovištím;
- zobrazení spotřeby energií (elektrická energie, vzduch…).

Práce se zabývala celkově navrhováním pracovišť a snažila se najít úzká místa při procesu navrhování a analýzách. Předložená práce odpovídá na otázky typu:

- Jak bude pracoviště veliké?
- Nebude docházet k nebezpečným situacím při provozu pracoviště?
- Splňuje pracoviště ergonomické normy?
- Nejsou na pracovišti nevyužité prostory?
- Jaký bude výrobní takt výrobního pracoviště?
- Kde bude nové pracoviště umístěno?
- Jaká vypadá rozložení spotřeby pracoviště?

Autor se domnívá, že přiložená práce přispěje ke kvalitativnímu posunu při návrhu výrobních pracovišť v raných fázích vývojového cyklu, což s sebou přináší jak časovou tak i finanční úsporu, zejména při překreslování návrhu výrobního pracoviště, tak i z důvodu zefektivnění rozhodování v multidisciplinárních týmech, kde je kladen důraz na jasné vysvětlení technicko-provozního problému. Z hlediska dizertability (tedy vědeckého přínosu ve sledované oblasti) se jedná o práci, která přináší nové poznání vlastností a charakteristik nově konstruovaných strojů a zařízení nebo projektování pracovišť za pomocí prostředků virtuální reality.

## 7.4 Pedagogický přínos práce

Přínos v oblasti pedagogické praxe je rovněž zřejmý. Dílčí, již vyřešené části této dizertace, byly v průběhu doby logicky zakomponovány do výuky technologií virtuální reality v předmětu bakalářského studia Stavba výrobních strojů a robotů a magisterského studia 3D modelování a virtuální realita.
Dosažené výsledky dále přispějí ke vzniku dalších disertačních a diplomových prací, uskutečňovaných na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky FSI, jako např. kolegů

doktorandů Ing. Jana Augsteho, zabývajícího se využitím technologie Motion Capture a Ing. Kamila Šubrta, s jeho tématem práce „Využití potenciálů imerzní virtuální reality při vývoji automatizovaných pracovišť“.
Mezi další činnosti v rámci pedagogického přínosu bylo zpracování článku „Využití augmented reality (AR) ve výuce robotiky“, zabývající se možným nasazením rozšířené reality ve výuce robotiky (Obr. 47), nejen na mateřském ústavu autora této dizertační práce. Spoluprací na evropském projektu Vitralab [38] byla nedávno vytvořena databáze průmyslových robotů, která slouží pro vzdělávání jak zaměstnanců malých a středních podniků, tak i pro odborné školitele.

**Obr. 47: Příklady zobrazení virtuálních modelů průmyslových robotů ve skutečném prostředí – kanceláři pracovníka SME podniku využívajícího výstupy projektu Vitralab bez nutnosti užití CAVE.**

# Použitá literatura


[1] P. Škrob, "Vznik, rozvoj a perspektivy virtuální reality," 2000. [Online]. Available: http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2000/skrob.html. [Accessed: 02-Mar-2014].

[2] P. Skřiváčková, "Virtuální tělo v tvorbě Diane Gromala a Char Davies," Masarykova Univerzita, 2009.

[3] A. Špačková, "Možnosti aplikačního softwaru pro rozšířenou realitu v kontextu poznávání reality," Masarykova universita, 2012.

[4] "Rozdělení VR." [Online]. Available: http://virtualni-realita.webovareseni.cz/rozdeleni-virtualni-reality.

[5] M. Ambros, "Binokulární vidění," Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011.

[6] T. Novotný, "Využití technologie virtuální reality v analýze rizik a bezpečnosti výrobních strojů," Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Strojního inženýrství, 2013.

[7] Á. Di Serio, M. B. Ibáñez, and C. D. Kloos, "Impact of an augmented reality system on students' motivation for a visual art course," *Comput. Educ.*, vol. 68, pp. 586–596, Oct. 2013.

[8] K.-E. Chang, C.-T. Chang, H.-T. Hou, Y.-T. Sung, H.-L. Chao, and C.-M. Lee, "Development and behavioral pattern analysis of a mobile guide system with augmented reality for painting appreciation instruction in an art museum," *Comput. Educ.*, vol. 71, pp. 185–197, Feb. 2014.

[9] "Introduction to Augmented Reality." [Online]. Available: http://www.se.rit.edu/~jrv/research/ar/introduction.html.

[10] J. Vallino, "Interactive Augmented Reality," University of Rochester Rochester, New York, 1998.

[11] P. . M. Hlinovský, J.; Marek, J.; Blecha, *Management rizik v konstrukci výrobních strojů*. MM spůmyslové spektrum, speciální vydání, 2009, p. 90.

[12] R. . Blecha, P.; Bradáč, F.; Blecha, "Závěrečná zpráva projektu 2.4.1 – Analýza rizik a bezpečnost strojů," Praha, 2006.

[13] P. Blecha, "Management rizik při zajišťování bezpečnosti strojních zařízení.," *Svět strojírenské Tech.*, vol. ročník VII, 2009.

[14] S. r. o. Akademie produktivity a inovací, "Štíhlá výroba," 2014. [Online]. Available: http://e-api.cz/page/67819.stihla-vyroba/. [Accessed: 04-Feb-2014].

[15] Kaizen Institute Ltd., "KAIZEN Slovník," 2014. [Online]. Available: http://cz.kaizen.com/kaizen-slovnik.html?no_cache=1&tx_contagged[source]=default&tx_contagged[uid]=2320&cHash=e8368d0b0568a2bd2cb3b46157a9ac7f. [Accessed: 04-Feb-2014].

[16] J. Krišťak, "MOST - Maynard Operation Sequence Technique." [Online]. Available: http://www.ipaczech.cz/cz/ipa-slovnik/most-maynard-operation-sequence-technique. [Accessed: 02-Mar-2014].

[17] O. Sláma, "Vybrané kapitoly z obecné a školské ergonomie," 2014. [Online]. Available: http://www.kteiv.upol.cz/uploads/soubory/kropac/2.pdf. [Accessed: 04-Feb-2014].

[18] *Sbírka zákonů č.361/2007 částka 111*. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, p.o., 2007, pp. 138–140.

[19] Akademie produktivity a inovací, "Co je OPF?," 2014. [Online]. Available: http://e-api.cz/page/68413.one-piece-flow/. [Accessed: 04-Feb-2014].

[20] P. Blecha, "Využití moderních metod řízení a zabezpečování jakosti při konstrukci obráběcích center," Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,, 2003.

[21] E. Janíček, P.; Ondráček, *Řešení problémů modelováním. Téměř nic o téměř všem.* Brno: Real, PC-DIR, 1998, p. 335.

[22] P. Janíček, *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky hledání souvislostí.* 2007, p. 1230.

[23] V. Hubka, *Konstrukční nauka. Obecný model postupu při konstruování.* 1995, p. 118.

[24] G. Z. Antonino Gomes de Sá, "Virtual Reality as a Tool for Verification of Assembly and Maintenance Processes," *Comput. Graph.*, vol. 23, no. 3, pp. 389–403, 1999.

[25] W. Dangelmaier, M. Fischer, J. Gausemeier, M. Grafe, C. Matysczok, and B. Mueck, "Virtual and augmented reality support for discrete manufacturing system simulation," *Comput. Ind.*, vol. 56, no. 4, pp. 371–383, May 2005.

[26] S. Knorr, M. Kunter, and T. Sikora, "Stereoscopic 3D from 2D video with super-resolution capability," *Signal Process. Image Commun.*, vol. 23, no. 9, pp. 665–676, Oct. 2008.

[27] A. Krynycká, "Virtuální realita přináší správná rozhodnutí," *MM Průmyslové spektrum, Software pro strojaře / CAD/CAM/CAE*, 2013. [Online]. Available: http://www.mmspektrum.com/clanek/virtualni-realita-prinasi-spravna-rozhodnuti.html. [Accessed: 04-Feb-2014].

[28] H.-L. Chi, S.-C. Kang, and X. Wang, "Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction," *Autom. Constr.*, vol. 33, pp. 116–122, Aug. 2013.

[29] R. Janoušek, “Návrh řízení výrobní linky s kontrolou rozměrů výrobků,” Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2013.

[30] L. Matěna, “Parametry systému pro rozšířenou virtuální realitu,” Masarykova universita, Fakulta informatiky, 2007.

[31] F. Institut, “InstantLabs,” 2014. [Online]. Available: http://doc.instantreality.org/tutorial/marker-tracking/.

[32] “Geometrie/Geometrické modelování.” [Online]. Available: http://cs.wikibooks.org/wiki/Gehttp://cs.wikibooks.org/wiki/Geometrie/Geometrick%C3%A9_modelov%C3%A1n%C3%AD.

[33] “Geometrie/Geometrické modelování.” [Online]. Available: http://cs.wikibooks.org/wiki/Geometrie/Geometrické_modelování. [Accessed: 02-Mar-2014].

[34] “Základy reprezentace trojrozměrného prostoru v počítači.” [Online]. Available: http://wikisofia.cz/index.php/Z%C3%A1klady_reprezentace_trojrozm%C4%9Brn%C3%A9ho_prostoru_v_po%C4%8D%C3%ADta%C4%8Di.

[35] J. Žára, *VRML 97 Laskavý průvodce virtuálními světy*. Brno: Computer Press, 1999, p. 238.

[36] P. Tišnovský, “XML + 3D = X3D,” 2014. [Online]. Available: http://www.root.cz/clanky/xml-3d-x3d/. [Accessed: 04-Feb-2014].

[37] Wikipedia, “Sankeysteam,” 2014. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sankeysteam.png. [Accessed: 04-Feb-2014].

[38] Z. Knoflíček, R.; Tůma, “Leonardo da Vinci Project Vitralab,” *MM Průmyslové spektrum,Výroba / Vzdělávání*, 2011. [Online]. Available: http://www.mmspektrum.com/clanek/leonardo-da-vinci-project-vitralab.html. [Accessed: 04-Feb-2014].

# Seznam obrázků

Obr. 1: Fyziologické principy procesu vidění – tvorba a vnímání obrazu[5] ..... 10
Obr. 2: Kontinuum reality – virtuality ..... 11
Obr. 3: Vuzix - he Tac-Eye LT ..... 11
Obr. 4: Monitor-based augmented reality [9] ..... 12
Obr. 5: Video see-through augmented reality display [9] ..... 12
Obr. 6: Optical See-through Augmented Reality Display[10] ..... 13
Obr. 7: Typy vodicích značek a) frame marker b) split marker c) dot marker d) datamatrix marker e) ID marker f) template marker g) picture marker ..... 13
Obr. 8: Management rizik [11] ..... 14
Obr. 9: Oblast managementu technických rizik [12] ..... 15
Obr. 10: Postupový diagram managementu technických rizik [13] ..... 16
Obr. 11: Příklad MOST ..... 17
Obr. 12: Dosahy horních končetin a)ve svislé rovině při práci vstoje b) ve svislé rovině při práci vsedě i vstoje c) ve svislé rovině při práci vsedě. Včetně zón dosahu A (časté a přesné pohyby), B (přijatelný dosah), C (maximální dosah, nepřijatelné pro časté pohyby) [18] ..... 18
Obr. 13: Výroba v dávkách vs. Tok jednoho kusu ..... 19
Obr. 14: Kolbův experimentální cyklus ..... 20
Obr. 15: Analýza problému [21] ..... 23
Obr. 16: Systémový přístup [21] ..... 24
Obr. 17: Vlastnosti technických objektů [23] ..... 27
Obr. 18: Průběh skenování místnosti ..... 29
Obr. 19: Zobrazení jednotlivých snímků pomocí software Agisoft ..... 30
Obr. 20: Mračno bodů z prostorového scanu ..... 31
Obr. 21: Model místnosti s texturou ..... 31
Obr. 22: Třístěnná virtual CAVE ..... 33
Obr. 23: Powerwall - mobilní stereoskopická stěna ..... 34
Obr. 24: Souřadný systém ..... 38
Obr. 25: Algoritmus programu ARToolKit ..... 38
Obr. 26: Vkládání prostorového modelu na vodicí znak ..... 39
Obr. 27: Souřadné systémy ARToolkit ..... 40
Obr. 28: Hraniční model ..... 42
Obr. 29: Objemový model ..... 43
Obr. 30: Polygonální model [19] ..... 43
Obr. 31: Polygonální model (vlevo – síť, vpravo – vystínovaný, texturovaný) ..... 44
Obr. 32: Ukázka VRML kódu přípravku ..... 45
Obr. 33: Prvotní návrh pracoviště ..... 48
Obr. 34: Model výrobního pracoviště pro výrobu pneumatických komponent v prostředí VDP 9.1 - ergonomická analýza ..... 50
Obr. 35: Model výrobního pracoviště (kompletace) v reálném prostředí pomocí technologie AR ..... 50
Obr. 36: Vodicí značky - virtuální ruka, pracoviště ..... 52
Obr. 37: Testování nastavení montážního pracoviště – souřadné systémy (výrobní pracoviště, virtuální paže, webová kamera, zobrazovací zařízení) ..... 52
Obr. 38: Jednotlivé pozice jsou 1: TZ - výrobní pracoviště, 2: TZ - virtuální paže, 3: Webová kamera, 4: Zobrazovací a výpočetní zařízení ..... 53
Obr. 39: Průběh dílčí ergonomické analýzy pomocí využití aplikace AR z vnějšího pohledu ..... 54

Obr. 40: Průběh dosahové analýzy pomocí využití aplikace AR z pohledu webové kamery na kompletačním stole linky pro výrobu pneumatických komponent. ..... 55
Obr. 41: Simulace lisování pomocí rozšířené reality – kolizní stav..... 56
Obr. 42: Zrealizované pracoviště na výrobu pneumatických komponent..... 57
Obr. 43: Sankey diagram [37] ..... 58
Obr. 44: Horizontální frézovací stroj FU EFEKTIV..... 59
Obr. 45: Testování zobrazení energetických toků..... 59
Obr. 46: Zobrazení energetických toků na stroji MAS Kovosvit ..... 60
Obr. 47: Příklady zobrazení virtuálních modelů průmyslových robotů ve skutečném prostředí – kanceláři pracovníka SME podniku využívajícího výstupy projektu Vitralab bez nutnosti užití CAVE. ..... 62

# Seznam tabulek a grafů

Tab. 1: Třídy vlastností technických objektů[23] ..... 26
Tab. 2: Rozsah pro různou velikost značky ..... 40

# Vlastní publikační činnost


[I] NOVOTNÝ, T.; TŮMA, Z.; BLECHA, P.: *Transformace CAD modelů strojů na data pro imerzní virtuální realitu a jejich verifikace.* Podpora vývoje způsobilých strojů. Brno: NETME Centre, 2012, 43 s. Z-12-015. Výzkumná zpráva.

[II] NOVOTNÝ, T.; TŮMA, Z.; BLECHA, P.; BLECHA, R.; BRADÁČ, F.; PAVLÍK, J.: *Identifikace požadavků na efektivní práci v prostředí 3D imerzní virtuální reality*. Centrum kompetence – Strojírenská výrobní technika. Brno: NETME Centre, 2012, 38 s. V-12-083. Výzkumná zpráva.

[III] TŮMA, Z.; NOVOTNÝ, T.; KNOFLÍČEK, R.: *Simulation Tools for the Delta Robot Using Augmented Reality.* MM Science Journal. 2011, MM publishing, s.r.o., Ročník 2011, Číslo Říjen, s. 259 – 261. ISSN 1803-1269. Článek v časopise.

[IV] NOVOTNÝ, T.; BLECHA, P.; BLECHA, R.; TŮMA, Z.; PAVLÍK, J.; BRADÁČ, F.; KOLÍBAL, Z.: *Závěrečná zpráva projektu 2.4.1: Využití 3D - virtuální reality v analýze rizik a bezpečnosti strojů.* Výzkum strojírenské výrobní techniky a technologie. Praha: VCSVTT, 2011, 54 s. V-11-071. Výzkumná zpráva.

[V] TŮMA, Z.; NOVOTNÝ, T.; KNOFLÍČEK, R.: *Use Augmented Reality (AR) in Teaching Robotics.* Book of Abstracts International Conference ROBTEP 2010. Košice: KVTaR, SjF, TU v Košiciach, 2010, s. 349 – 350. Akce: Robtep 2010, Bardejov - Bardejovské kůpele, 07. 06. 2010 - 09. 06. 2010. Článek ve sborníku.

[VI] TŮMA, Z.; TŮMA, J.; KNOFLÍČEK, R.; BRADÁČ, F.; BLECHA, P.: *The proces simulation using by virtual reality*. Annals of DAAAM, 2013, roč. 24, č. 1, s. 137-143. ISSN: 2304- 1382. Článek ve sborníku

[VII] TŮMA, Z.; TŮMA, J.; KNOFLÍČEK, R.; BRADÁČ, F.; BLECHA, P.: *The proces simulation using by virtual reality*. Procedia Engineering, 2014, Volume 69C, s. 1015-1020, DOI: 10.1016/j.proeng.2014.03.084, ISSN: 1877-7058. Článek ve sborníku,

[VIII] TŮMA, Z.; KNOFLÍČEK, R. *Leonardo da Vinci Project Vitralab.* MM Průmyslové spektrum, 2011, roč. 21, č. 11, s. 86-87. ISSN: 1212- 2572. Článek v časopise

# Tvůrčí aktivity


[I] TŮMA, Z.; TŮMA, J.; SELINGEROVÁ, S.; AUGSTE, J.; HRBÁČEK, J.: SimJedn-VR- 1; Zkušební jednotka pro testování virtuální reality ve výrobním procesu. VUT v Brně, FSI, Technická 2896/2, Brno, Místnost: B1/ 305. URL: http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id= 1383. (funkční vzorek)

[II] TŮMA, Z.; TŮMA, J.; HOUŠKA, P.: MORPEHUS_ 1; Rotační osa experimentálního zubního rentgenu. VUT v Brně, FSI, Technická 2896/2, Brno, Místnost: B1/ 305. URL: http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id= 1381. (funkční vzorek)

[III] TŮMA, Z.; TŮMA, J.; HOUŠKA, P.: MORPHEUS 2; Kinematika zkušebního zařízení pro dentální medicínu. VUT v Brně, FSI, Technická 2896/2, Brno, Místnost: B1/ 305. URL: http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id= 1378. (funkční vzorek)

[IV] BRADÁČ, F.; HOLUB, M.; PAVLÍK, J.; OPL, M.; NOVOTNÝ, T.; TŮMA, Z.: DeltaRobot; Manipulátor na bázi paralelní kinematiky - delta robot s třemi osami. VUT FSI, Technická 2, B1/ 305. URL: http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id= 991. (funkční vzorek)

[V] TŮMA, J.; HOLUB, M.; BRADÁČ, F.; NOVOTNÝ, T.; TŮMA, Z.: VOT v1. 0; Software pro vyhodnocení opakovatelnosti najetí posuvových os. VUT v Brně, FSI. Technická 2/ 616 69, Brno, UVSSR. URL: http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id= 1257. (software)

[VI] PAVLÍK, J.; BRADÁČ, F.; TŮMA, Z.: Vibrační dopravník; Šikmý vibrační dopravník. GIFOS, s.r.o., Kšírova 263c/733, 619 00 Brno - Horní Heršpice. URL: http://www.gifos.eu. (prototyp)

## Spolupráce na projektech specifického výzkumu VUT

[I] FSI-J-13-2129; Využití rozšířené virtuální reality – augmented reality v strojírenských aplikacích; 2013

[II] FSI-J-12-9; Moderní přístupy v řešení robotických aplikací; 2012

[III] FEKT/FSI-S-11-3; Bezpečnostní aspekty vývoje, výroby a provozu strojů v návaznosti na ecodesign strojů; 2011

[IV] FSI-S-11-5; Enviromentální a bezpečnostní aspekty vývoje, výroby a provozu strojů; 2011

[V] FSI-S-10-27; Výzkum a vývoj (VaV) nekonvenčních manipulátorů a robotů (NMaR]; 2010

[VI] EU-Projekt No. LLP/LDV/TOI/2009/SK/93100530; VITRALAB – Virtual Training Laboratory in Automated and Robotized Manufacturing Systems; 2009 – 2011.

## Ostatní činnosti

Vedení bakalářských a diplomových prací:

[I] Augste Jan: Měření deformací komponent motocyklů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Obhájeno.

[II] Trusina Tomáš: Posouzení pracoviště výrobní linky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Rozpracováno.

[III] Obritzhauser Filip: Posouzení pracoviště výrobní linky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Odevzdáno.

[IV] Juřicová Vendula: Návrh výrobní linky pro montáž pneumatických snímačů pomocí virtuální reality. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Rozpracováno.

**Příloha 1: KOLIZE_LINKA_DVA_MARKERY.x3d**

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<X3D>
    <Engine DEF='engine'>
        <TimerJob DEF='timer'/>
        <SynchronizeJob DEF='synchronize'/>
        <RenderJob DEF='render'>
            <WindowGroup>
                <Window position='10 50' size='800,600' fullScreen='false' />
            </WindowGroup>
        </RenderJob>
    </Engine>
  <Scene>
      <IOSensor                    DEF='VisionLib'                    type='VisionLib'
configFile='MarkerTracking_TwoMarkers.pm'>
            <field accessType='outputOnly' name='VideoSourceImagee' type='SFImage'/>
            <field    accessType='outputOnly'    name='TrackedObject1Camera_ModelView'
type='SFMatrix4f'/>
                <field                                          accessType='outputOnly'
name='TrackedObject1Camera_FOV_horizontal' type='SFFloat'/>
                <field                                          accessType='outputOnly'
name='TrackedObject1Camera_FOV_vertical' type='SFFloat'/>
            <field  accessType='outputOnly'  name='TrackedObject1Camera_PrincipalPoint'
type='SFVec2f'/>
            <field    accessType='outputOnly'    name='TrackedObject1Camera_CAM_aspect'
type='SFFloat'/>
            <field    accessType='outputOnly'    name='TrackedObject2Camera_ModelView'
type='SFMatrix4f'/>
        </IOSensor>
        <PerspectiveViewpoint DEF='vp' position='0 0 0' fovMode='VERTICAL'/>
        <PolygonBackground fixedImageSize='640 480' mode='VERTICAL'>
            <Appearance>
                <PixelTexture2D DEF='tex' autoScale='false'/>
                <TextureTransform scale='1 -1'/>
            </Appearance>
        </PolygonBackground>
    <Viewspace DEF="Nazev_sceny" translation="-6.5 -0.1 0">
      <transform  DEF="nazev" translation="5.8 -2 -10" scale="0.2 0.2 0.2" >
        <Shape>
          <Text string="ERGONOMIE VÝROBNÍHO PRACOVIŠTĚ" />
          <Appearance>
            <Material diffuseColor='1 1 0'/>
          </Appearance>
        </Shape>
      </transform>
    </Viewspace>
    <Group>
      <!--Značkovací těleso pro detekci kolizí-->

      <Transform DEF='KOLIZNI' translation='15 10 -50' >
        <Shape DEF='TELESO'>
          <Appearance>
            <Material diffuseColor='0.1 0 0'/>
          </Appearance>
          <Text string="KOLIZE" />
        </Shape>
      </Transform>
           <Script DEF='PREVOD' directOutput='true'>
        <field accessType='initializeOnly' name='objekt' type='SFNode'>
          <Shape USE='TELESO'/>
        </field>
        <field accessType='inputOnly' name='set_highlight' type='SFBool'/>
```

```
        <field accessType='initializeOnly' name='zjasneni' type='SFColor' value='0 0
     <!—JavaScript pro zdůraznění kolize mezi objekty-->
0'/><![CDATA[javascript:
        function set_highlight (hodnota) {
          if (hodnota) zjasneni[0]=zjasneni[1]=zjasneni[2]= 1;
                  else zjasneni.r =zjasneni.g =zjasneni.b = 0;
          objekt.appearance.material.diffuseColor = zjasneni;
        }]]>
      </Script>
    </Group>
<!—Vložení modelu výrobního pracoviště-->
        <MatrixTransform DEF='TransfObj1RelativeToCamPosition'>
          Transform    DEF='transfObj1RelativeToMarker'    translation='40    -40    10'
rotation='0 0 0 1.57'  scale='0.1 0.1 0.1'>
              <Transform translation='0 0 0'scale='0.5 0.5 0.5'rotation='0 1 0 -1.57'>
              <Inline render='TRUE'
                      bboxSize='0.1 0.1 0.1'
                      bboxCenter='0 0 0'
                      downloadMode='auto'
                      load='TRUE'
                      usingNameSpace='AA'
                      url='Linka_95_3.wrl'
                      exportNameSpace='FALSE'
                      nameSpaceName='AA' />
              </Transform>

              <PlaneSensor DEF='Plane001-SENSOR'/>
            </Transform>
        </MatrixTransform>

   <!—Vložení modelu virtuální ruky-->
    <MatrixTransform DEF='TransfObj2RelativeToCamPosition'>
      <Transform DEF='transfObj2RelativeToMarker' translation='-1.5 -4 0' rotation='1
0 0 3,14' scale='0.05 0.05 0.05'>
        <Transform translation='0 0 0' scale='0.5 0.5 0.5' rotation='0 90 0 0'>
        <Inline render='TRUE'
                bboxSize='0.1 0.1 0.1'
                bboxCenter='0 0 0'
                downloadMode='auto'
                load='TRUE'
                usingNameSpace='AA'
                url='Hand-mit-Arm-5d.wrl'
                exportNameSpace='FALSE'
                nameSpaceName='AA' />
      </Transform>
        <PlaneSensor DEF='Plane002-SENSOR'/>
      </Transform>
   </MatrixTransform>
<!—Kolizní senzor-->
    <CollectionCollisionSensor DEF='NAME'>
      <Transform USE='transfObj1RelativeToMarker'/> <!—virtuální pracoviště-->
      <Transform USE='transfObj2RelativeToMarker'/> <!—virtuální ruka-->
    </CollectionCollisionSensor>
    <ROUTE     fromNode='VisionLib'     fromField='VideoSourceImage'     toNode='tex'
toField='image'/>
        <ROUTE   fromNode='VisionLib'   fromField='TrackedObject1Camera_PrincipalPoint'
toNode='vp' toField='principalPoint'/>
        <ROUTE    fromNode='VisionLib'    fromField='TrackedObject1Camera_FOV_vertical'
toNode='vp' toField='fieldOfView'/>
        <ROUTE     fromNode='VisionLib'     fromField='TrackedObject1Camera_CAM_aspect'
toNode='vp' toField='aspect'/>
        <ROUTE     fromNode='VisionLib'     fromField='TrackedObject1Camera_ModelView'
```

```
toNode='TransfObj1RelativeToCamPosition' toField='matrix'/>
        <ROUTE     fromNode='VisionLib'     fromField='TrackedObject2Camera_ModelView'
toNode='TransfObj2RelativeToCamPosition' toField='matrix'/>

    <ROUTE          fromNode='Plane001-SENSOR'          fromField='translation_changed'
toNode='transfObj1RelativeToMarker' toField='set_translation'/>
    <ROUTE          fromNode='Plane002-SENSOR'          fromField='translation_changed'
toNode='transfObj2RelativeToMarker' toField='set_translation'/>
    <ROUTE         fromNode='NAME'         fromField='collide'         toNode='PREVOD'
toField='set_highlight'/>
    </Scene>
 </X3D>
```

## Příloha 2: MarkerTracking_TwoMarkers.pm

```
<?xml version='1.0' encoding='UTF-8' standalone='no' ?>
<VisionLib2 version='2.0'>

  <ActionPipe category='Action' name='main'>
    <VideoSourceAction__ImageT__RGB_Frame category='Action' enabled='1'
name='VideoSourceAction'>
      <Keys size='2'>
        <key val='VideoSourceImage' what='image live, Image*, out'/>
        <key val='' what='intrinsic parameters to be modified, out'/>
      </Keys>
      <ActionConfig source_url='ds'/>
    </VideoSourceAction__ImageT__RGB_Frame>
    <ImageConvertActionT__ImageT__RGB_FrameImageT__GREY_Frame category='Action'
enabled='1' name='ImageConvertActionT'>
      <Keys size='2'>
        <key val='VideoSourceImage' what='source image, in'/>
        <key val='ConvertedImage' what='target image, out'/>
      </Keys>
    </ImageConvertActionT__ImageT__RGB_FrameImageT__GREY_Frame>
    <MarkerTrackerAction category='Action'>
      <Keys size='7'>
        <key val='ConvertedImage' what='input image, ImageGREY*, in'/>
        <key val='IntrinsicDataPGRFlea8mm' what='IntrinsicDataPerspective,
IntrinsicDatra*, in'/>
        <key val='World' what='World of TrackedObjects, World*, in/out'/>
        <key val='MarkerTrackerInternalContour' what='Contour, Contour*, out'/>
        <key val='MarkerTrackerInternalSquares' what='GeometryContainer of corner
points, GeometryContainer*, out'/>
        <key val='MarkerTrackerInternalCorresp' what='internal use'/>
        <key val='MarkerTrackerInternalPose' what='internal use'/>
      </Keys>
      <ActionConfig ContourExtractor='0' MTASilThresh='140' MTAThresh='140'
MTAcontrast='1' MTAlogbase='10' RefineCorners='0' WithPoseNlls='1'/>
    </MarkerTrackerAction>
    <TrackedObject2CameraAction category='Action' enabled='1'
name='TrackedObjectToCamera'>
      <Keys size='3'>
        <key val='World' what='world, World*, in'/>
        <key val='IntrinsicDataPGRFlea8mm' what='intrinsic CameraPerspective
parameters, IntrinsicDataPerspective*, in'/>
        <key val='Camera' what='suffix string for the CameraPerspective, out'/>
      </Keys>
    </TrackedObject2CameraAction>
  </ActionPipe>


  <DataSet key=''>
```

```
    <IntrinsicDataPerspective calibrated='1' key='IntrinsicDataPGRFlea8mm'>
      <!--Image resolution (application-dependant)-->
      <Image_Resolution h='480' w='640'/>
      <!--Normalized principal point (invariant for a given camera)-->
      <Normalized_Principal_Point cx='5.0037218855e-01' cy='5.0014036507e-01'/>
      <!--Normalized focal length and skew (invariant for a given camera)-->
      <Normalized_Focal_Length_and_Skew fx='1.6826109287e+00' fy='2.2557202465e+00'
s='-5.7349563803e-04'/>
      <!--Radial and tangential lens distortion (invariant for a given camera)-->
      <Lens_Distortion k1='-1.6826758076e-01' k2='2.5034542035e-01' k3='-
1.1740904370e-03' k4='-4.8766380599e-03' k5='0.0000000000e+00'/>
    </IntrinsicDataPerspective>
    <World key='World'>
      <TrackedObject key='TrackedObject1'>
        <ExtrinsicData calibrated='0'>
          <R rotation='1 0 0'/>
          <t translation='0 0 0'/>
          <Cov covariance='0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0'/>
        </ExtrinsicData>
      <!——Vodící značka pro umístění výrobní linky)-->
        <Marker BitSamples='2' MarkerSamples='6' NBPoints='4'
key='MarkerOfTrackedObject1'>
          <Code Line1='1000' Line2='1000' Line3='1000' Line4='1110'/>
          <Points3D nb='4'>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3='0  0  0  0  0  0  0  0  0  ' w='1' x='0' y='5'
z='0'/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3='0  0  0  0  0  0  0  0  0  ' w='1' x='5' y='5'
z='0'/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3='0  0  0  0  0  0  0  0  0  ' w='1' x='5' y='0'
z='0'/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3='0  0  0  0  0  0  0  0  0  ' w='1' x='0' y='0'
z='0'/>
          </Points3D>
        </Marker>
<!——Vodící značka pro umístění virtuální paže)-->
      </TrackedObject>
      <TrackedObject key='TrackedObject2'>
        <ExtrinsicData calibrated="0">
          <R rotation="1 0 0 &#xA;"/>
          <t translation="0 0 0 &#xA;"/>
          <Cov covariance="0  0  0  0  0  0  &#xA;0  0  0  0  0  0  &#xA;0  0  0  0  0
0  &#xA;0  0  0  0  0  0  &#xA;0  0  0  0  0  0  &#xA;0  0  0  0  0  0  &#xA;"/>
        </ExtrinsicData>
        <Marker BitSamples="2" MarkerSamples="6" NBPoints="4" key="Marker" is="1">
          <Code Line1="0000" Line2="0010" Line3="0000" Line4="0001"/>
          <Points3D nb="4">
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="-0.75" y="0.75" z="-0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="-0.75" y="0.75" z="0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="-0.75" y="-0.75" z="0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="-0.75" y="-0.75" z="-0.75"/>
          </Points3D>
        </Marker>
        <Marker BitSamples="2" MarkerSamples="6" NBPoints="4" key="Marker2" is="2">
          <Code Line1="0000" Line2="1001" Line3="0001" Line4="0000"/>
          <Points3D nb="4">
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="-0.75" y="0.75" z="0.75"/>
```

```
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="0.75" y="0.75" z="0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="0.75" y="-0.75" z="0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="-0.75" y="-0.75" z="0.75"/>
          </Points3D>
        </Marker>
        <Marker BitSamples="2" MarkerSamples="6" NBPoints="4" key="Marker2_0" is="3">
          <Code Line1="0011" Line2="0110" Line3="0000" Line4="0001"/>
          <Points3D nb="4">
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="0.75" y="0.75" z="0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="0.75" y="0.75" z="-0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="0.75" y="-0.75" z="-0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="0.75" y="-0.75" z="0.75"/>
          </Points3D>
        </Marker>
        <Marker BitSamples="2" MarkerSamples="6" NBPoints="4" key="Marker2_1" is="4">
          <Code Line1="0000" Line2="1110" Line3="0010" Line4="0000"/>
          <Points3D nb="4">
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="0.75" y="0.75" z="-0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="-0.75" y="0.75" z="-0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="-0.75" y="-0.75" z="-0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="0.75" y="-0.75" z="-0.75"/>
          </Points3D>
        </Marker>
        <Marker BitSamples="2" MarkerSamples="6" NBPoints="4" key="Marker2_1" is="5">
          <Code Line1="0000" Line2="0000" Line3="0110" Line4="0001" />
          <Points3D nb="4">
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="0.75" y="0.75" z="-0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="0.75" y="0.75" z="0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="-0.75" y="0.75" z="0.75"/>
            <HomgPoint3Covd Cov3x3="0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;0  0  0  &#xA;" w="1"
x="-0.75" y="0.75" z="-0.75"/>
          </Points3D>
        </Marker>
      </TrackedObject>
    </World>
  </DataSet>

</VisionLib2>
```


**Příloha 3: Sankey.x3d**


```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<X3D>
    <Engine DEF='engine'>
        <TimerJob DEF='timer'/>
        <SynchronizeJob DEF='synchronize'/>
        <RenderJob DEF='render'>
            <WindowGroup>
                <Window position='10 50' size='800,600' fullScreen='false' />
```

```
            </WindowGroup>
        </RenderJob>
    </Engine>
    <Scene DEF='scene'>
        <IOSensor DEF='VisionLib' type='VisionLib' configFile='MarkerCube.pm'>
            <field accessType='outputOnly' name='VideoSourceImage' type='SFImage'/>
            <field    accessType='outputOnly'    name='TrackedObject1Camera_ModelView'
type='SFMatrix4f'/>
            <field  accessType='outputOnly'  name='TrackedObject1Camera_FOV_horizontal'
type='SFFloat'/>
            <field   accessType='outputOnly'   name='TrackedObject1Camera_FOV_vertical'
type='SFFloat'/>
            <field  accessType='outputOnly'  name='TrackedObject1Camera_PrincipalPoint'
type='SFVec2f'/>
            <field    accessType='outputOnly'    name='TrackedObject1Camera_CAM_aspect'
type='SFFloat'/>

        </IOSensor>
        <PerspectiveViewpoint DEF='vp' position='0 0 0' fovMode='VERTICAL'/>

        <PolygonBackground fixedImageSize='640 480' mode='VERTICAL'>
            <Appearance>
                <PixelTexture2D DEF='tex' autoScale='false'/>
                <TextureTransform scale='1 -1'/>
            </Appearance>
        </PolygonBackground>

        <MatrixTransform DEF='TransfObj1RelativeToCamPosition'>
            <Transform   DEF='transfObj1RelativeToMarker'   translation='-2.5   0   0'
rotation='1 0 0 1.57'>
       <!--VALEC 1 -->
    <Transform DEF='1' translation='0 2 0' scale='1 1 1'>
                <Shape>
                <Appearance>
                 <Material DEF='material1' diffuseColor='0 1 0'/>
                </Appearance>
                    <Cylinder height='4' radius='0.3' solid='false' top='true'/>
               </Shape>
              </Transform>

       <!--VALEC 2 -->
  <Transform DEF='2' translation='1.5 0 0' scale='1 1 1' rotation='0 0 -1 -1.571'>
                <Shape>
                <Appearance>
                 <Material DEF='material2' diffuseColor='1 0 0'/>
                </Appearance>
                    <Cylinder height='3' radius='0.3' solid='false' top='true'/>
               </Shape>
              </Transform>
      <!--VALEC 3 -->

   <Transform DEF='3' translation='0 0 2.5' scale='1 1 1' rotation='0 3.14 3.14 3.14'>
                <Shape>
                <Appearance>
                 <Material DEF='material3' diffuseColor='0 0 1'/>
                </Appearance>
                    <Cylinder height='5' radius='0.3' solid='false' top='true'/>
               </Shape>
              </Transform>
            </Transform>
        </MatrixTransform>
        <ROUTE    fromNode='VisionLib'    fromField='VideoSourceImage'    toNode='tex'
```

```
toField='image'/>
        <ROUTE   fromNode='VisionLib'   fromField='TrackedObject1Camera_PrincipalPoint'
toNode='vp' toField='principalPoint'/>
        <ROUTE    fromNode='VisionLib'    fromField='TrackedObject1Camera_FOV_vertical'
toNode='vp' toField='fieldOfView'/>
        <ROUTE     fromNode='VisionLib'     fromField='TrackedObject1Camera_CAM_aspect'
toNode='vp' toField='aspect'/>
        <ROUTE     fromNode='VisionLib'     fromField='TrackedObject1Camera_ModelView'
toNode='TransfObj1RelativeToCamPosition' toField='matrix'/>

    </Scene>
</X3D>
```