

Využití rozšířené reality pro inspekci a detekci objektů

Jakub Němec

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jakub Němec
Osobní číslo:	T22026
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Využití rozšířené reality pro inspekci a detekci objektů

Zásady pro vypracování

- zpracování teoretické rešerše k tématu práce
- zprovoznění iPad + Twyn View a Twyn Studio od Visometry
- vytvoření podkladů pro detekci a tracking objektů
- vytvoření jednoduché úlohy pro inspekci za pomoci rozšířené reality

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Learning Twyn. *Overview: Visometry Docs – Visometry* [online]. [no date] [viewed 8 August 2024]. Available from: <https://docs.visometry.com/twyn/tutorials/v2.0/>

NEE, Andrew YC, et al. Augmented reality applications in design and manufacturing. *CIRP annals*, 2012, 61.2: 657-679.

DE SOUZA CARDOSO, Luís Fernando; MARIANO, Flávia Cristina Martins Queiroz; ZORZAL, Ezequiel Roberto. A survey of industrial augmented reality. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 139: 106159.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Rozšířená realita (AR) se stává stále více rozšířenou technologií v průmyslu, zejména v oblasti inspekce a detekce objektů. Cílem této bakalářské práce bylo prozkoumat možnosti implementace AR v této oblasti a vytvořit praktickou aplikaci využívající technologie Twyn Studio a Twyn View na zařízení iPad Pro. Práce se zaměřila na přípravu 3D modelů a návrh inspekční úlohy. Testování prokázalo schopnost systému detekovat nesrovnalosti s vysokou přesností. Výsledky ukazují, že AR může významně zlepšit efektivitu a kvalitu inspekčních procesů a nabízí potenciál pro budoucí rozvoj v oblasti průmyslové automatizace.

Klíčová slova: Rozšířená realita (AR), Twyn, Visometry

ABSTRACT

Augmented Reality (AR) is becoming a key technology in the industry, particularly in the areas of object inspection and detection. The aim of this bachelor's thesis was to explore the possibilities of implementing AR in this field and to develop a practical application using Twyn Studio and Twyn View technologies on the iPad Pro device. The work focused on preparing 3D models and designing an inspection task. Testing demonstrated the system's ability to detect discrepancies with high accuracy. The results indicate that AR can significantly improve the efficiency and quality of inspection processes and offers potential for future development in the field of industrial automation.

Keywords: Augmented reality (AR), Twyn, Visometry

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 ROZDĚLENÍ IMERZIVNÍCH TECHNOLOGIÍ	13
1.1 VIRTUÁLNÍ REALITA	14
1.2 ROZŠÍŘENÁ REALITA	14
1.3 SMÍŠENÁ REALITA	14
1.5 DEFINICE A PRINCIPY AR	16
1.6 TECHNOLOGIE A PLATFORMY PRO AR.....	17
1.7 APLIKACE AR V PRŮMYSLU	19
2 INSPEKCE A DETEKCE OBJEKTŮ POMOCÍ AR	21
2.1 METODY DETEKCE A TRACKINGU OBJEKTŮ	21
2.1.1 Metody založené na obrazu.....	21
2.1.2 Metody založené na modelech	22
2.1.3 Metody využívající strojové učení	24
2.2 VÝZVY A OMEZENÍ PŘI INSPEKCI POMOCÍ AR.....	26
2.3 BUDOUCÍ TRENDY V AR PRO INSPEKCI.....	27
3 VYUŽITÍ AR PŘI KONTROLE KVALITY	28
4 INSPEKCE A ŘÍZENÍ KVALITY VE VÝROBĚ	29
5 ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI.....	30
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	31
6 ÚVOD PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	32
7 NÁSTROJE POUŽITÉ V PROJEKTU	33
7.1 iPad Pro jako zařízení pro rozšířenou realitu	33
7.2 Příprava 3D modelu pro inspekci.....	34
7.3 Twyn Software od Visometry	35
7.3.1 Twyn Studio	36
7.3.2 Twyn View	37
8 INSTALACE A KONFIGURACE PROSTŘEDÍ	39
8.2 TESTOVÁNÍ A ŘEŠENÍ PROBLÉMŮ.....	39
8.3 NASTAVENÍ AUTOMATICKÉ KONTROLY OBJEKTU V TWYN STUDIO	40
8.4 NASTAVENÍ TRACKINGU A OPTIMALIZACE MODELŮ V TWYN STUDIO	42
9 VÝVOJ A TESTOVÁNÍ INSPEKČNÍ ÚLOHY	43
9.1 NÁVRH INSPEKČNÍ ÚLOHY	43
9.2 IMPLEMENTACE INSPEKČNÍ ÚLOHY V TWYN STUDIO	44

9.3	TESTOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ ÚLOHY	45
ZÁVĚR.....		48
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		49
SEZNAM OBRÁZKŮ		52
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		53

ÚVOD

Rozšířená realita (Augmented Reality, AR) se stává stále důležitější technologií v mnoha oblastech lidské činnosti. Podle Azumy [1] AR kombinuje reálný svět s virtuálními prvky v reálném čase, což otevírá nové možnosti pro interakci, vzdělávání a zpracování informací. V průmyslovém sektoru nachází AR uplatnění zejména v oblasti inspekce a detekce objektů, kde může výrazně zvýšit efektivitu a přesnost procesů.

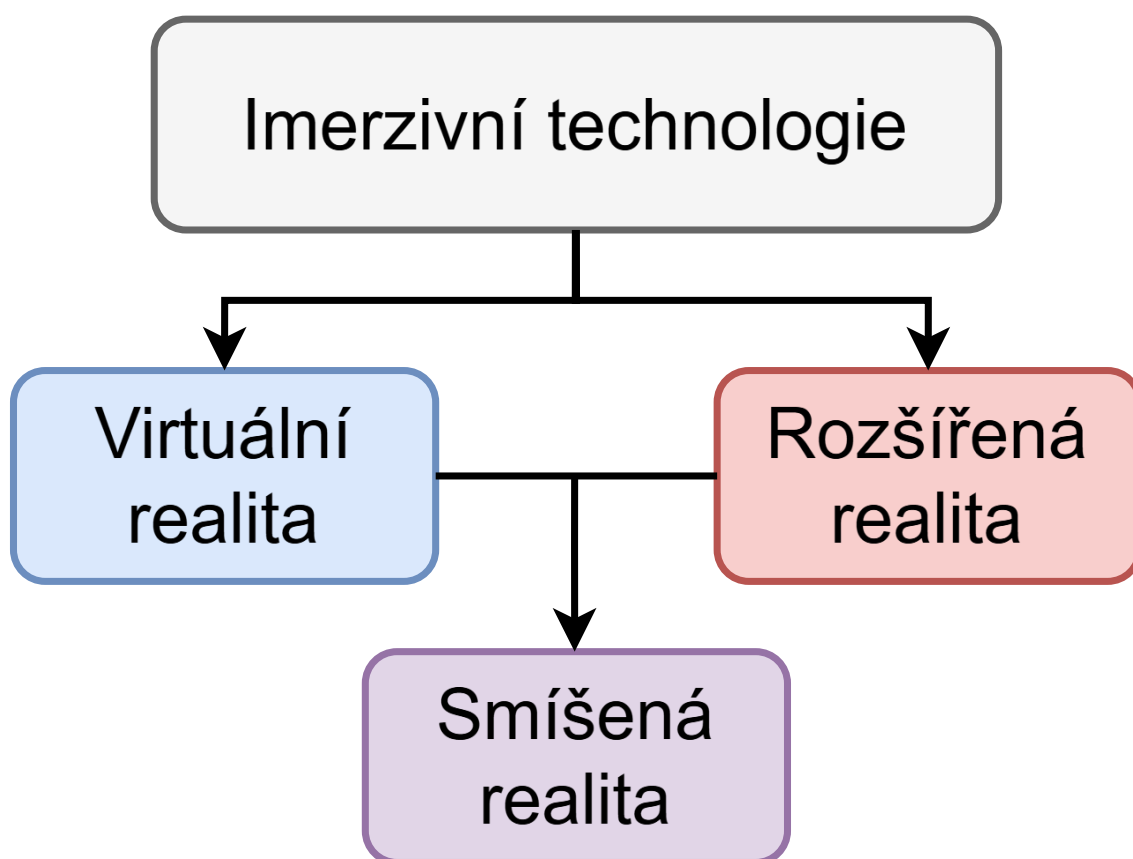
Cílem této bakalářské práce je prozkoumat možnosti využití rozšířené reality pro inspekci a detekci objektů a prakticky demonstrovat její aplikaci pomocí nástrojů Twyn View a Twyn Studio na zařízení iPad. Práce se zaměřuje na zprovoznění těchto technologií, vytvoření podkladů pro detekci a tracking objektů a vývoj jednoduché úlohy pro inspekci s využitím AR.

Práce je rozdělena do teoretické a praktické části. V teoretické části jsou popsány základní principy rozšířené reality, technologie a platformy pro AR, metody detekce a trackingu objektů a jejich aplikace v průmyslu. Praktická část se zabývá zprovozněním potřebných nástrojů, tvorbou podkladů pro detekci a tracking objektů a vývojem inspekční úlohy a vyhodnocením výsledků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZDĚLENÍ IMERZIVNÍCH TECHNOLOGIÍ

Imerzivní technologie se dělí na tři hlavní kategorie: virtuální realitu (VR), rozšířenou realitu (AR) a smíšenou realitu (MR). Každá z těchto technologií má své specifické vlastnosti a aplikace, které je odlišují od ostatních. Jak uvádí Suh, imerzivní technologie, včetně AR a VR, se stávají stále více rozšířenými v našich každodenních životech a nacházejí uplatnění v různých oblastech, jako je vzdělávání, marketing a zábava [2]. Výzkum ukazuje, že uživatelé mohou zažívat různé úrovně angažovanosti a emocionální odezvy v závislosti na designu a obsahu imerzivních aplikací [2].



Obrázek 1 Rozdělení imerzivních technologií

(zdroj: [2])

1.1 Virtuální realita

Virtuální realita (VR) je technologie, která vytváří plně simulované prostředí, do kterého se uživatelé mohou ponořit pomocí specializovaných zařízení, jako jsou VR brýle (headsety). Tato technologie umožňuje uživatelům interagovat s 3D prostředím, které je generováno počítačem, a poskytuje tak intenzivní zážitek, který může být využit v různých oblastech, jako je vzdělávání, zábava nebo medicína [3]. VR se ukazuje jako efektivní nástroj pro trénink a simulaci, zejména v oblastech, kde je potřeba realistické prostředí pro rozvoj dovedností, jako je například chirurgické školení [4].



Obrázek 2 Headset pro virtuální realitu Meta Quest 2

(zdroj: vlastní)

1.2 Rozšířená realita

Rozšířená realita (AR) se liší od VR tím, že kombinuje digitální obsah s reálným světem, aniž by ho nahrazovala. Uživatelé mohou vidět a interagovat s virtuálními objekty, které jsou umístěny do jejich skutečného prostředí, což umožňuje aplikace v oblastech jako je průmyslová výroba, údržba a vzdělávání [5]. AR technologie se ukazuje jako užitečná při poskytování kontextových informací a instrukcí přímo v zorném poli uživatele, což může zlepšit efektivitu a přesnost pracovních procesů [6].

1.3 Smíšená realita

Smíšená realita (MR) kombinuje prvky VR a AR, čímž vytváří interaktivní prostředí, kde mohou uživatelé manipulovat s virtuálními objekty, které reagují na skutečné prostředí. Tato technologie umožňuje uživatelům vidět a interagovat s digitálními objekty, které jsou

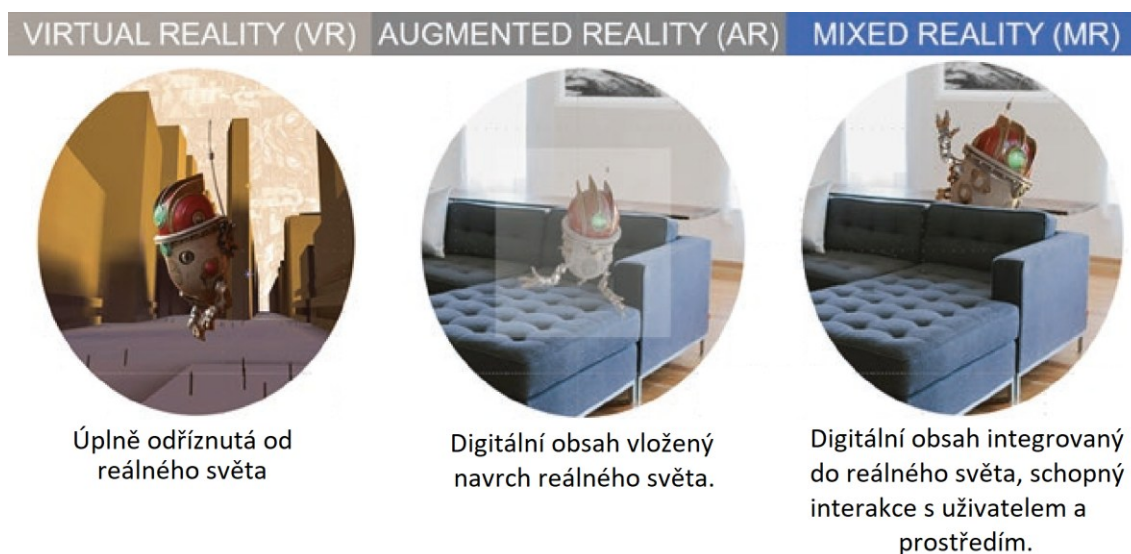
integrovány do jejich reálného světa, což otevírá nové možnosti pro aplikace v medicíně, architektuře a vzdělávání [7].



Obrázek 3 Headset pro smíšenou realitu Microsoft HoloLens 2

(zdroj: vlastní)

Smíšená realita se ukazuje jako slibná technologie pro zlepšení tréninkových metod a zefektivnění pracovních procesů, zejména v chirurgii, kde může poskytovat důležité anatomické informace v reálném čase [8].



Obrázek 4 Rozdělení imerzivních technologií s názorným příkladem

(zdroj: [9])

1.4 Rozšířená realita (AR)

Rozšířená realita (Augmented Reality, AR) představuje technologii, která propojuje digitální informace s reálným světem. Na rozdíl od virtuální reality (Virtual Reality, VR), která uživatele zcela ponoří do počítačem generovaného prostředí, AR obohacuje skutečné prostředí o virtuální prvky, aniž by ho nahrazovala. Tato technologie umožňuje interaktivní zážitek, kde jsou virtuální objekty a informace integrovány do vnímání reálného světa.



Obrázek 5 Ukázka inspekce zařízení pomocí rozšířené reality

(zdroj: [9])

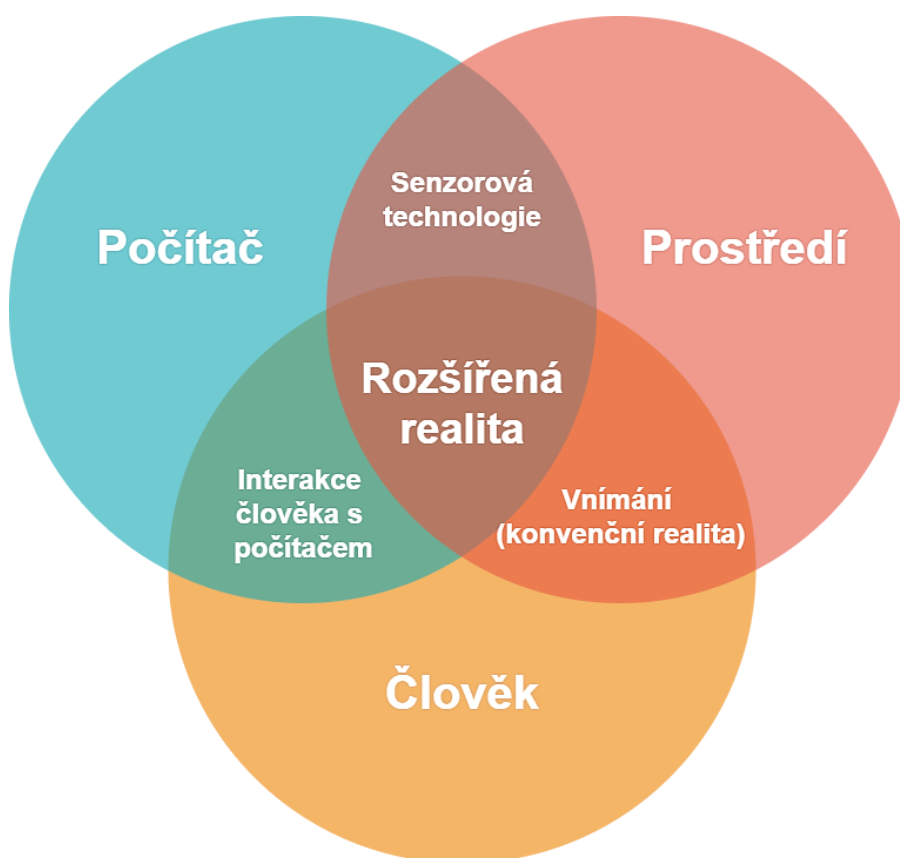
Rozvoj AR je poháněn pokrokem v oblasti výpočetní techniky, senzorů, kamer a zobrazovacích technologií. Díky těmto pokrokům se AR stává dostupnější a nachází uplatnění v různých oblastech, jako je vzdělávání, zdravotnictví, zábavní průmysl a průmyslová výroba.

1.5 Definice a principy AR

Rozšířená realita je definována jako technologie, která umožňuje překrývání digitálních informací, jako jsou obrázky, videa nebo 3D modely, s reálným světem v reálném čase. Hlavními principy AR jsou integrace virtuálních a reálných prvků, interaktivita v reálném čase a 3D registrace.

Integrace virtuálních a reálných prvků znamená, že virtuální objekty jsou umístěny do reálného prostředí tak, aby působily jako jeho součást. Interaktivita v reálném čase umožňuje uživateli interagovat s virtuálními objekty prostřednictvím gest, pohybu nebo hlasových

příkazů. 3D registrace zajišťuje, že virtuální objekty jsou přesně umístěny v prostoru a sledují pohyb zařízení nebo uživatele.



Obrázek 6 Interakce rozšířené reality s člověkem, počítačem a prostředím

(zdroj: [10])

Technologie AR vyžaduje kombinaci hardwaru a softwaru. Hardwarová část zahrnuje zařízení s kamerami, senzory pohybu, akcelerometry, gyroskopy a zobrazovacími jednotkami. Softwarová část se stará o zpracování obrazu, rozpoznávání vzorů, sledování polohy a vykreslování virtuálních objektů.

1.6 Technologie a platformy pro AR

Technologický pokrok v oblasti rozšířené reality (AR) vedl k rozvoji různých platforem a nástrojů, které umožňují efektivní vývoj AR aplikací. Klíčovými technologiemi, které podporují AR, jsou senzory, zpracování obrazu a počítačové vidění. Senzorové systémy, jako jsou kamery, gyroskopy, akcelerometry a LiDAR skenery, hrají zásadní roli při snímání okolního prostředí a sledování pohybu uživatele [11; 12]. Tyto technologie umožňují zařízení interagovat s reálným světem a poskytovat uživatelům relevantní informace v reálném čase.

Zpracování obrazu a počítačové vidění zahrnuje algoritmy pro rozpoznávání objektů a detekci markerů, které jsou nezbytné pro efektivní fungování AR aplikací [13; 14]. Tyto algoritmy umožňují AR systémům identifikovat a sledovat objekty v reálném čase, což je klíčové pro poskytování interaktivních a uživatelsky přívětivých zážitků. Zobrazovací technologie, jako jsou displeje s vysokým rozlišením a projekční systémy, dále zvyšují kvalitu vizuálního zážitku uživatelů [15].

Mezi nejpoužívanější platformy pro vývoj AR aplikací patří ARKit od společnosti Apple, který umožňuje vývoj AR aplikací pro zařízení s operačním systémem iOS [16] a ARCore od společnosti Google, určený pro vývoj AR aplikací na platformě Android [12; 14]. Tyto platformy poskytují vývojářům robustní nástroje pro integraci AR do mobilních aplikací, což přispívá k rozšíření AR do různých odvětví, včetně průmyslu, vzdělávání a zdravotnictví [17]. Herní engine jako Unity a Unreal Engine také hrají důležitou roli v AR vývoji, neboť umožňují multiplatformní nasazení a snadnou integraci AR funkcí do herních aplikací [12; 14].



Obrázek 7 Apple Vision Pro – MR headset s podporou ARKit

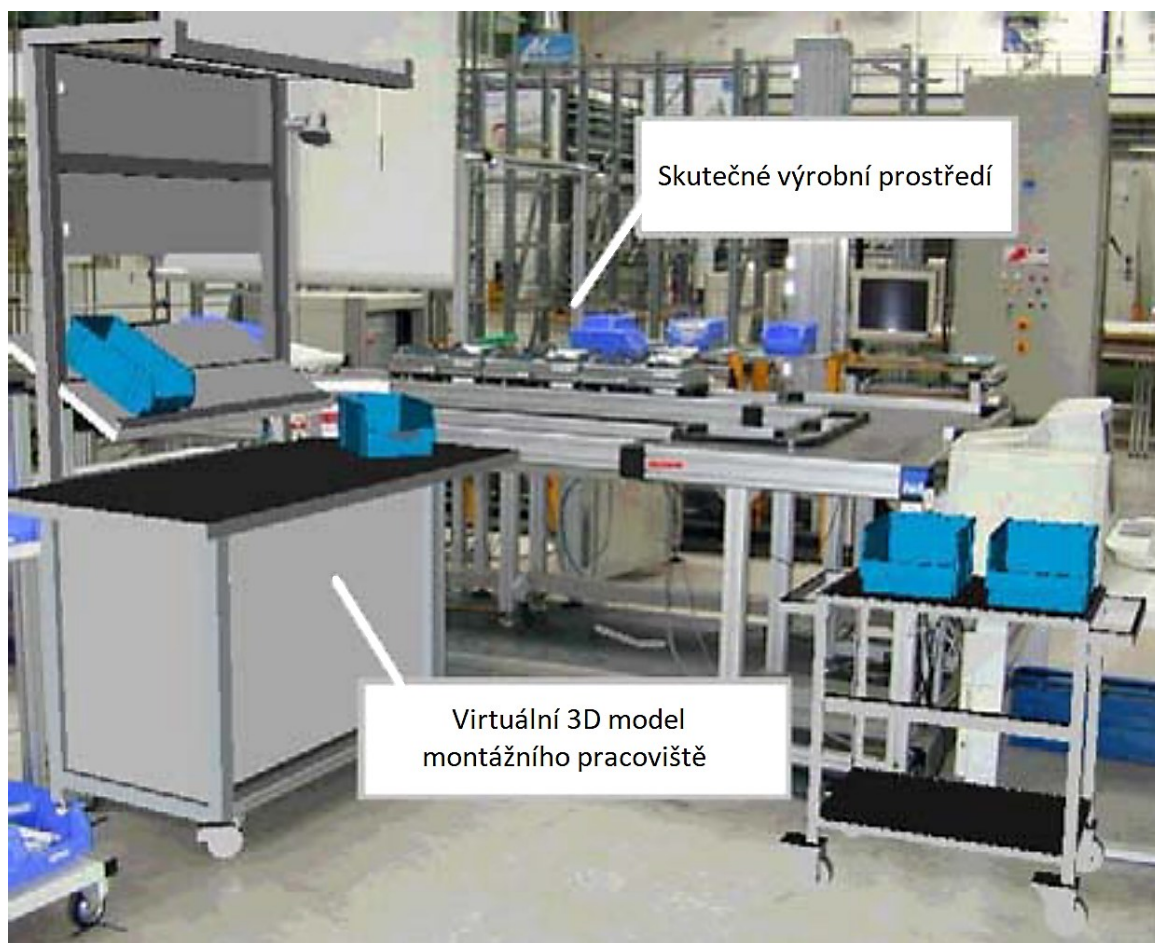
(zdroj: [18])

V průmyslovém sektoru nachází AR široké uplatnění díky své schopnosti zlepšit efektivitu a přesnost procesů. Například v oblasti údržby a servisu mohou technici pomocí AR vidět instrukce a schémata přímo na zařízení, což urychluje opravy a snižuje riziko chyb [15; 19]. V oblasti výroby AR poskytuje pracovníkům krok za krokem návody, které usnadňují montáž složitých komponent [17; 15]. Dále, AR technologie umožňuje porovnávat skutečné produkty s digitálními modely v reálném čase, což usnadňuje odhalování vad a odchylek [15; 14]. Implementace AR v průmyslu vede k snížení nákladů,

zvýšení produktivity a zlepšení kvality výrobků a služeb [12; 15]. Vzdělávání a školení také těží z AR, neboť interaktivní simulace umožňují novým zaměstnancům rychleji získat potřebné dovednosti [17; 15]. Tímto způsobem AR přispívá k rozvoji pracovních sil a zvyšuje konkurenceschopnost v globálním měřítku [17; 15].

1.7 Aplikace AR v průmyslu

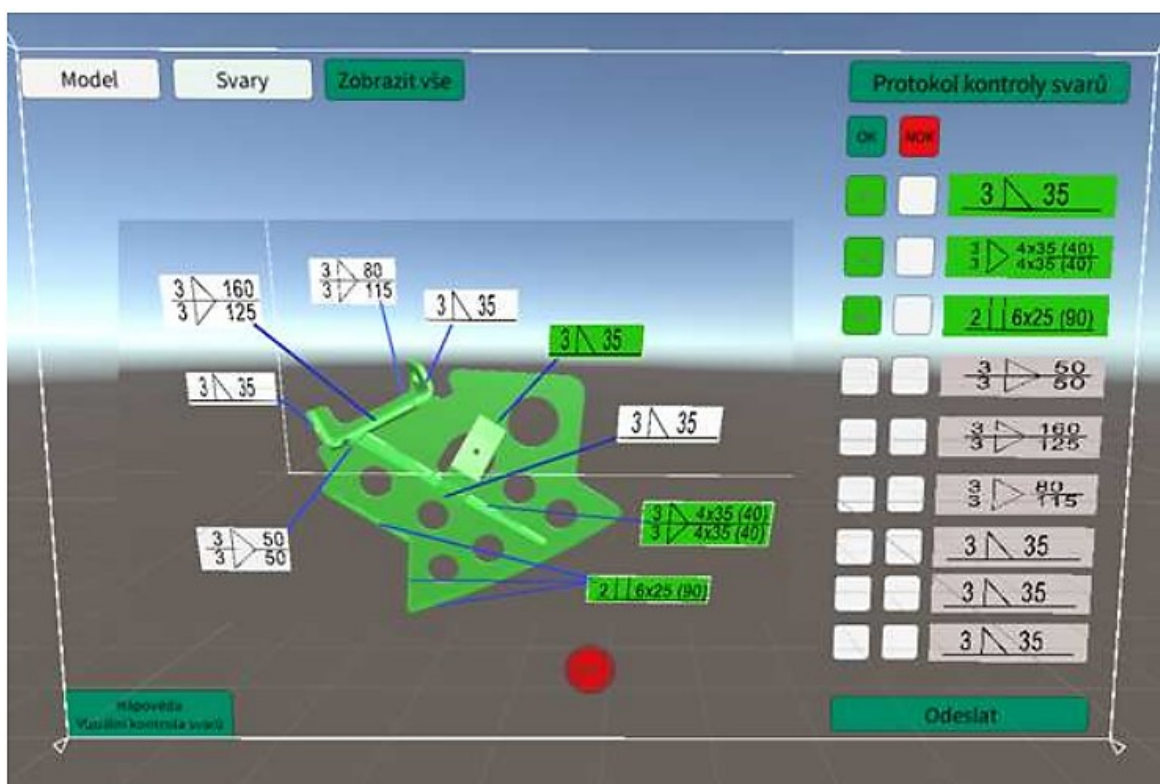
Aplikace AR se stává stále důležitější součástí moderních výrobních a montážních procesů. Tato technologie umožňuje operátorům a technikům interagovat s digitálními informacemi v reálném čase, což zvyšuje efektivitu a přesnost jejich práce. Například v oblasti kontroly kvality AR poskytuje imerzní rozhraní, které podporuje operátory při vykonávání kontrolních úkolů, čímž se zvyšuje jejich výkon a přesnost [20]. Tato technologie může být využita k vizualizaci dat, která by jinak byla obtížně dostupná, a to jak v procesu montáže, tak při údržbě strojů a zařízení, což může přispět ke konkurenceschopnosti [21].



Obrázek 8 Vizualizace 3D montážního pracoviště v prostředí továrny

(zdroj: [22])

Podle Havlíkové a jejích kolegů [20] rozšířená realita v kombinaci s umělou inteligencí představuje inovativní přístup k podpoře kontroly kvality, zejména v oblastech, kde je vyžadována vysoká míra koncentrace. Tento asistenční systém dokáže rozpoznat kontrolovaný díl a interaktivně podpořit proces kontroly, což přispívá k efektivnějšímu provádění kontrolních operací. Dále, Kubr et al. [21] uvádějí, že virtuální návodky jsou smysluplným nástrojem pro zaškolování pracovníků, což ukazuje na potenciál AR pro zefektivnění výrobních procesů.



Obrázek 9 Virtuální návodka pro kontrolu svarových spojů

(zdroj: [20])

Vzhledem k těmto přínosům se AR stává stále více důležitým prvkem v koncepci Průmyslu 4.0, kde se očekává, že její implementace povede k vyšší kvalitě a minimální chybovosti ve výrobních procesech [23]. V oblasti údržby a servisu mohou technici pomocí AR vidět instrukce a schémata přímo na opravovaném zařízení, což urychluje opravy a snižuje riziko chyb [12]. Tímto způsobem AR nejen zefektivňuje pracovní procesy, ale také zvyšuje bezpečnost a kvalitu výrobků.

2 INSPEKCE A DETEKCE OBJEKTŮ POMOCÍ AR

Použití rozšířené reality pro inspekci a detekci objektů představuje významný pokrok v oblasti kontroly kvality a údržby. AR poskytuje nástroje pro vizualizaci skrytých částí, zvýraznění problémových oblastí a poskytování okamžitých informací o kontrolovaném objektu.

2.1 Metody detekce a trackingu objektů

V rozšířené realitě se používá několik přístupů, které umožňují sledování (tracking) a detekci objektů v reálném čase. Tyto metody se liší především v tom, zda pracují s fyzickými markery, spoléhají na přirozené rysy prostředí či využívají 3D modely a fúzi senzorů. Následující podkapitoly podrobně představují jednotlivé postupy a jejich uplatnění v průmyslové inspekci a kontrole kvality. V první řadě se zaměříme na metody založené na obrazu, následně na techniky pracující s 3D modely, a nakonec i na přístupy založené na umělé inteligenci.

2.1.1 Metody založené na obrazu

Metody založené na obrazu zahrnují tradiční přístupy v rozšířené realitě, přičemž klíčovými přístupy jsou **marker-based tracking** a **markerless tracking**.

- **Marker-based tracking:** Marker-based tracking je metoda, která spoléhá na fyzické markery sloužící jako referenční body. Tyto markery mohou mít podobu QR kódů nebo jiných specifických vzorů, které kamera snadno rozpozná. Výhodou této metody je její spolehlivost v kontrolovaných prostředích, kde je důležité udržet pevné referenční body.

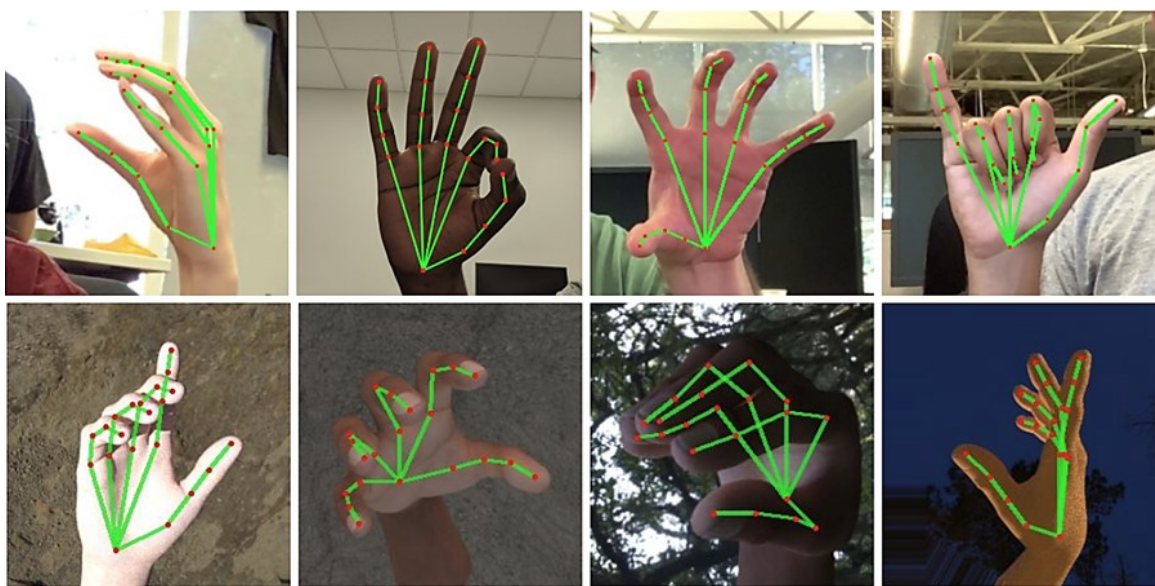
Díky tomu se často používá v průmyslových aplikacích, například při kontrole montážních bodů nebo při kalibraci strojů. Na druhou stranu omezením této metody je nutnost fyzické přítomnosti markerů a jejich viditelnosti za různých světelných podmínek, což může být problematické v dynamických prostředích.

Aplikace této metody zahrnují průmyslové inspekce, kde markery zajišťují přesnou lokalizaci a umožňují porovnat reálné objekty s požadovanými parametry.

- **Markerless tracking:** Markerless tracking je pokročilá metoda sledování objektů v rozšířené realitě, která eliminuje nutnost fyzických markerů. Místo toho se tato metoda opírá o přirozené charakteristiky prostředí, jako jsou hrany, textury či rohy, čímž získává

větší flexibilitu při sledování objektů v dynamických situacích, kde tradiční markery často selhávají.

„Markerless technologie AR extrahují charakteristické rysy ze scén, aby identifikovaly vztah mezi kamerou a reálným prostředím. Tato metoda je zvláště vhodná pro složitá prostředí, kde je obtížné použít tradiční markery.“[24]



Obrázek 10 Detekce bodů ruky pomocí markerless tracking metody

(zdroj: [25])

Přestože markerless tracking nabízí značné výhody, jako je snadnější nasazení v reálných podmínkách, může být náročný na výpočetní výkon a přesnost v prostředích s nedostatkem výrazných vizuálních rysů. Moderní aplikace této metody zahrnují mobilní AR aplikace, například navigační systémy nebo vzdělávací platformy.

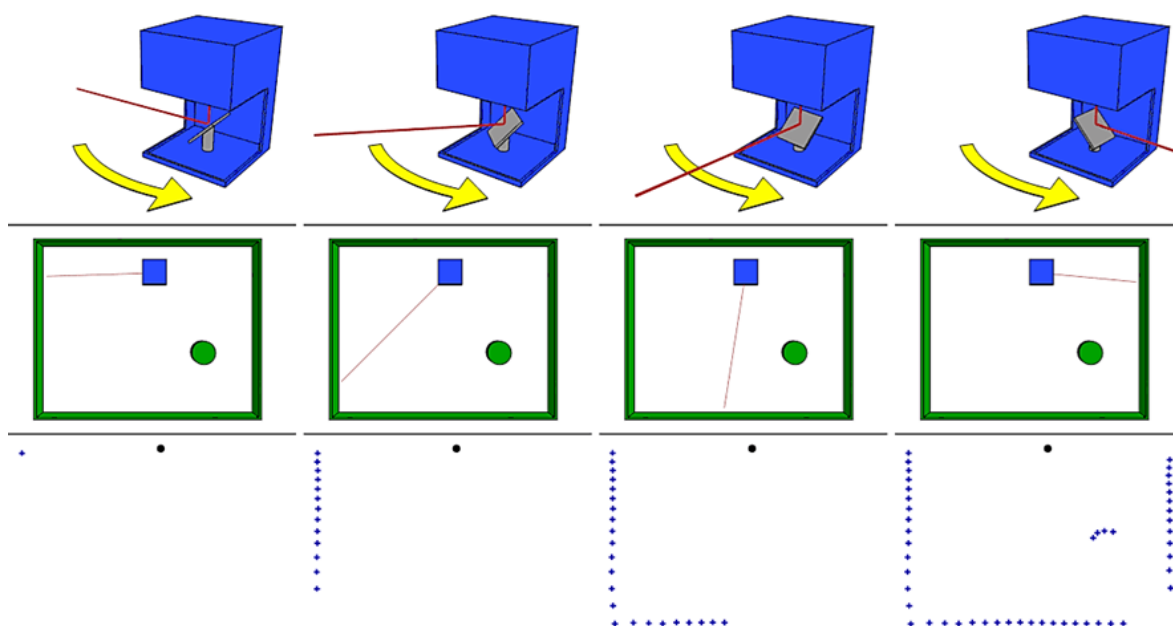
2.1.2 Metody založené na modelech

Metody založené na modelech využívají přesných 3D modelů objektů, které slouží jako reference při sledování a analýze reálného prostředí. Hlavními přístupy jsou **model-based tracking** a **fúze senzorů**.

- **Model-based tracking:** Model-based tracking je přístup, který porovnává reálný objekt s jeho digitálním 3D modelem. Tato metoda umožňuje dosáhnout vysoké přesnosti sledování a identifikace odchylek mezi fyzickým a digitálním modelem. Významnou výhodou tohoto přístupu je jeho využití v průmyslových aplikacích, kde je kladen důraz na detailní kontrolu kvality výrobků.

Na druhou stranu může být implementace této metody náročná na výpočetní výkon a vyžaduje kvalitní 3D modely, což zvyšuje nároky na přípravu dat. Tyto náklady se však vyplatí v aplikacích, kde je klíčová preciznost a opakovatelnost.

• **Fúze senzorů:** Fúze senzorů je metoda, která kombinuje data z různých zdrojů, například z kamer, gyroskopů a LiDAR skenerů. Tento přístup zvyšuje robustnost a přesnost sledování, což je zvláště důležité v náročných podmínkách, například při nízkém osvětlení nebo rychlém pohybu sledovaných objektů.



Obrázek 11 Princip a vizualizace dat LiDAR senzoru s jedním paprskem

(zdroj: [26])

Na obrázku nahoře (Obrázek 11) je znázorněn princip fungování LiDAR senzoru s jedním paprskem. Horní část obrázku ukazuje mechaniku skenovacího mechanismu, kde je paprsek laseru směřován do scény pomocí rotačního zrcadla nebo jiného mechanismu. Střední část znázorňuje dráhu laserového paprsku ve scéně, který interaguje s objekty a odrazí se zpět k senzoru. Spodní část obrázku ilustruje výstupní data senzoru po převodu z polárních souřadnic na kartézské souřadnice. Výsledkem je bodový mrak, který reprezentuje rozmístění objektů ve skenované scéně. Tento proces je velmi důležitý pro aplikace v robotice, autonomních vozidlech nebo mapování prostředí [26].

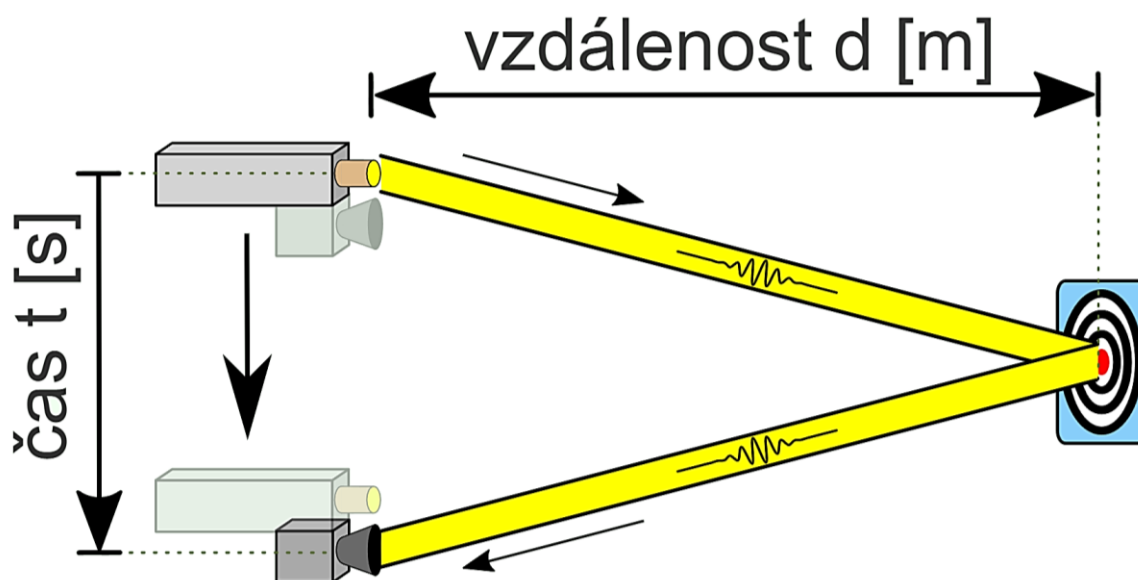
Využití LiDARu pro měření vzdálenosti spočívá v principu měření doby (čas letu světla) mezi vysláním laserového paprsku a přijetím jeho odrazu. Tato metoda je známá jako

Time of Flight (ToF), kde se vzdálenost určuje na základě doby, za kterou se světelný impuls dostane k objektu a zpět. Základní vzorec pro výpočet vzdálenosti k objektu je:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1)$$

kde:

- c je rychlost světla [m/s]
- d je vzdálenost [m]
- t je doba měřeného letu [s]



Obrázek 12 Diagram znázorňující princip měření vzdálenosti pomocí LiDARu – metoda doby letu (ToF)

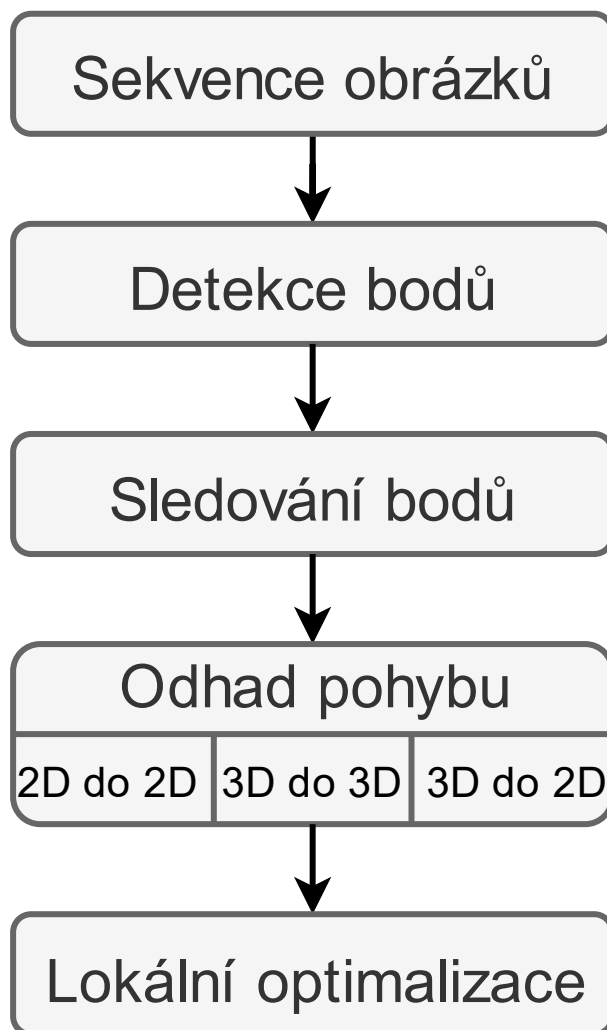
(zdroj: [27])

2.1.3 Metody využívající strojové učení

Pokročilé metody využívají principy umělé inteligence, aby umožnily efektivnější detekci a analýzu objektů. Mezi tyto přístupy patří **visual odometry** a **AI-based tracking**.

- **Visual odometry:** Vizuální odometrie je metoda sledování pohybu založená na analýze sekvenčních snímků pořízených kamerou. Tato metoda je oblíbená zejména v robotice a mobilních aplikacích, protože nevyžaduje externí senzory a umožňuje sledování pohybu zařízení pouze na základě obrazových dat. Její hlavní nevýhodou je citlivost na rychlé změny prostředí, což může ovlivnit přesnost sledování.

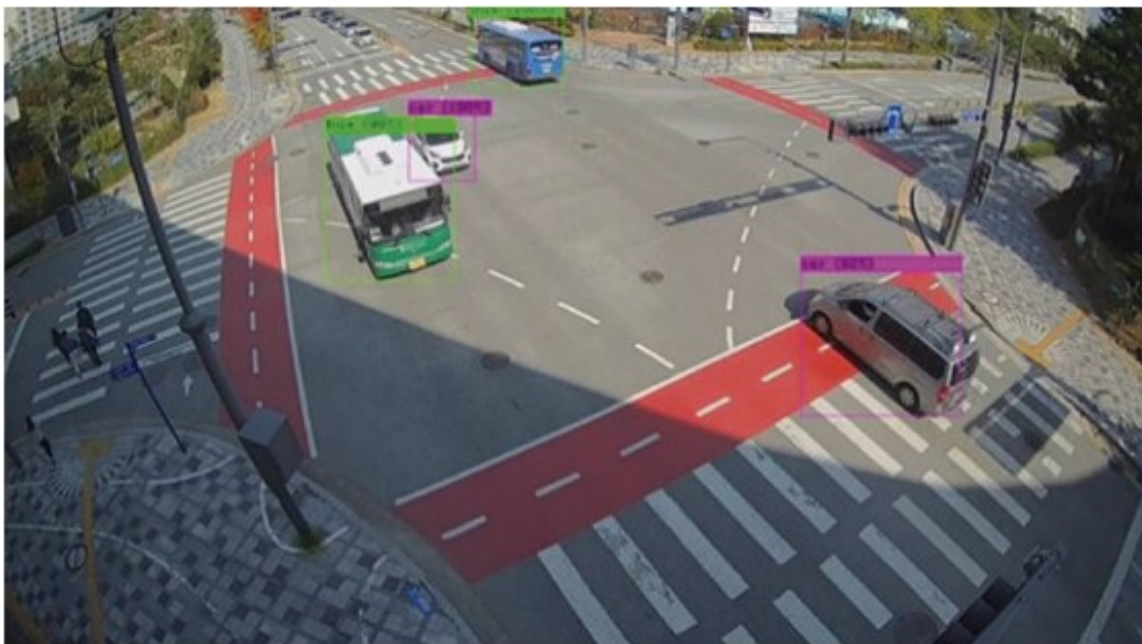
Příkladem využití visual odometry je sledování autonomních vozidel, která analyzují okolí pomocí kamer, aby určily svou polohu a pohyb v prostoru.



Obrázek 13 Hlavní kroky vizuální odometrie

(zdroj: [28])

- **AI-based tracking:** AI-based tracking představuje nejmodernější přístup v oblasti detekce a sledování objektů. Tento přístup využívá algoritmy strojového učení a neuronových sítí k identifikaci objektů, sledování jejich pohybu a predikci potenciálních odchylek. Významnou výhodou této metody je schopnost se neustále zlepšovat na základě nových dat a tréninkových procesů. V průmyslovém prostředí je AI-based tracking využíván například při automatizované kontrole výrobních linek, kde detekuje odchylky nebo defekty s vysokou přesností. AI-based tracking najde své uplatnění také i v dopravním průmyslu, kde dokáže rozeznat objekty na dopravních komunikacích [29], jak je znázorněno na obrázku dole (Obrázek 14).

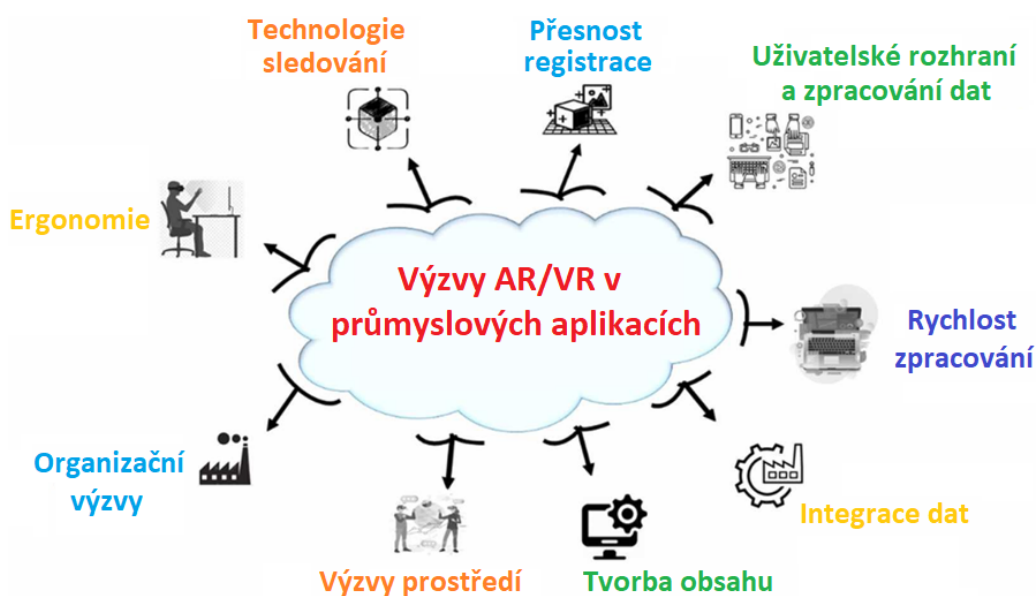


Obrázek 14 Využití AI based trackingu „YOLOv4“ pro detekci vozidel v dopravě

(zdroj: [29])

2.2 Výzvy a omezení při inspekci pomocí AR

Implementace rozšířené reality (AR) v inspekčních procesech přináší řadu výzev a omezení, které ovlivňují její efektivní využití v průmyslové výrobě. Podle Eswarana a Bahubalendruniego [30] lze tyto výzvy rozdělit do tří hlavních kategorií: **technologické**, **organizační** a **environmentální**.



Obrázek 15 Hlavní výzvy AR/VR v průmyslových aplikacích

(zdroj: [30])

Technologické výzvy zahrnují sledování a registraci objektů, které jsou klíčové pro sladění reálných a virtuálních modelů. Využívají se metody markerového sledování, které jsou přesné, ale nepraktické pro složité objekty. Alternativou je bezmarkerové sledování, například pomocí SLAM nebo senzorů jako LiDAR, což však vyžaduje vysoký výpočetní výkon [30].

Ergonomické výzvy se týkají komfortu uživatelů, zejména při dlouhodobém používání AR headsetů. Problémy jako únava očí, omezené zorné pole (FOV) nebo citlivost na světlo mohou snižovat efektivitu práce

Organizační výzvy zahrnují školení zaměstnanců, přijetí nových technologií a otázky bezpečnosti dat. Rezistence k inovacím a nedostatečné dovednosti personálu mohou zpomalit implementaci AR [30].

Environmentální faktory jako je osvětlení, odrazy nebo vibrace, mohou ovlivnit spolehlivost AR systémů. Tyto vlivy vyžadují přesné nastavení a pravidelnou kalibraci.

Navzdory těmto výzvám má AR potenciál zlepšit efektivitu inspekci. Další vývoj, například pokročilé algoritmy pro sledování a integrace cloud computingu, může rozšířit možnosti jejího nasazení [30].

2.3 Budoucí trendy v AR pro inspekci

Budoucí trendy v oblasti rozšířené reality (AR) pro inspekci směřují k integraci s umělou inteligencí (AI) a strojovým učení, což umožní automatickou detekci vad a efektivnější zpracování dat. Pokročilé senzory, jako termokamery a hyperspektrální kamery, rozšíří schopnosti AR díky přesnějším informacím o stavu zařízení a materiálů. Využití cloudového a edge computingu zlepší výpočetní efektivitu a sníží zátěž na hardware uživatelů [31].

Dalším trendem je spolupráce a sdílení dat v reálném čase prostřednictvím AR, což zjednoduší rozhodování a týmovou práci. Klíčová bude také standardizace a interoperabilita pro širší nasazení AR v průmyslových aplikacích. Jak uvádí Mekni, AR může zásadně zkrátit dobu potřebnou k detekci a opravě problémů [31].

Závěrem lze říct, že budoucnost AR v inspekci bude charakterizována integrací AI, pokročilými senzory a lepší spoluprací mezi uživateli. Tyto inovace zlepší efektivitu inspekčních procesů a kvalitu výroby [31].

3 VYUŽITÍ AR PŘI KONTROLE KVALITY

Rozšířená realita (AR) může výrazně zefektivnit proces kontroly kvality ve výrobních podnicích. Umožňuje rychlou identifikaci odchylek a chyb tím, že vizuálně porovnává fyzické produkty s jejich digitálními modely. To usnadňuje detekci vad a umožňuje včasnou nápravu. Použití AR snižuje chybovost tím, že poskytuje inspektorům vizuální instrukce a upozorňuje na kritické oblasti. Inspektoři mohou přímo v AR aplikaci zaznamenávat nálezy, pořizovat fotografie a generovat reporty, což usnadňuje dokumentaci a sdílení informací. Vzdělávání a školení inspektorů mohou být také zlepšeny prostřednictvím AR, která umožňuje interaktivní a realistické simulace kontrolních procesů.

Reinhart a Patron [22] ve své studii ukázali, že použití AR může zkrátit čas potřebný na kontrolu montážních procesů a zlepšit přesnost detekce vad. Tyto výsledky podporují využívání AR ke zlepšení kvality finálních produktů a potvrzují její přínos při zavádění efektivnějších kontrolních mechanismů.

4 INSPEKCE A ŘÍZENÍ KVALITY VE VÝROBĚ

Tradiční postupy kontroly kvality ve výrobě často zahrnují vizuální kontrolu, měření pomocí nástrojů nebo automatizované systémy. Tyto metody mohou být časově náročné, závislé na zkušenostech inspektorů a náchylné k lidským chybám [32; 33]. Integrace rozšířené reality (AR) do inspekčního procesu umožňuje překonat některá omezení tradičních metod. AR technologie mohou zlepšit efektivitu a přesnost inspekcí tím, že poskytují inspektorům interaktivní a kontextové informace přímo v jejich zorném poli, což snižuje pravděpodobnost chyb [34; 35].

AR může být začleněna do stávajících procesů pomocí mobilních zařízení nebo chytrých brýlí, které poskytují inspektorům interaktivní a kontextové informace přímo v jejich zorném poli. Použití AR v inspekci přináší výhody, jako je zlepšení přesnosti a rychlosti kontroly, snížení nákladů díky včasné detekci vad a možnost vzdálené podpory a spolupráce. Postup inspekčního procesu s využitím AR popisuje Obrázek 16.



Obrázek 16 Postup inspekčního procesu s využitím AR

(zdroj: vlastní)

Jak znázorňuje obrázek nahoře (Obrázek 16), celý inspekční proces začíná přípravou digitálních podkladů, kde jsou vytvořeny nebo získány 3D modely kontrolovaných objektů a nastaveny parametry inspekční úlohy. Následuje přenos projektu do AR zařízení a příprava inspekčního prostředí. Po spuštění AR aplikace na zařízení a inicializaci systému dochází k samotné inspekci, během níž jsou identifikovány a zaznamenány případné nesrovnalosti. Výsledky jsou poté analyzovány a archivovány pro budoucí použití.

Implementace AR však může čelit překážkám, jako jsou náklady na technologie, potřeba školení personálu a nutnost přizpůsobení stávajících procesů. Přes tyto výzvy se AR stává stále důležitějším nástrojem pro moderní výrobní podniky, které usilují o zvýšení kvality a efektivitu svých procesů.

5 ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI

Rozšířená realita (AR) představuje inovativní technologii s významným potenciálem pro modernizaci průmyslových procesů, zejména v oblasti inspekce a kontroly kvality. Analýza základních principů AR ukázala, že propojení digitálních informací s reálným světem umožňuje zlepšit efektivitu, přesnost a bezpečnost těchto procesů. Klíčové technologie, jako je modelově založený tracking, markerless tracking či fúze senzorů, se stávají nedílnou součástí aplikací zaměřených na inspekci, protože umožňují flexibilní a přesné sledování objektů v dynamickém prostředí.

Přestože implementace AR přináší určité technologické i organizační výzvy, jako jsou nároky na kvalitní modely, kompatibilitu zařízení či vyšší počáteční náklady, budoucí trendy naznačují výrazný pokrok v integraci pokročilých senzorů, cloudových řešení a algoritmů strojového učení. Tyto technologie rozšíří možnosti aplikací AR a umožní jejich jednodušší nasazení i v prostředích s vysokými nároky na přesnost a spolehlivost.

V praktické části této práce budou získané poznatky aplikovány při návrhu a implementaci inspekční aplikace využívající technologie Twyn View a Twyn Studio na zařízení iPad Pro. Praktická realizace zahrne přípravu 3D modelů, nastavení parametrů pro automatickou kontrolu a následné testování inspekčních scénářů v laboratorních podmínkách. Tato část práce se zaměří na ověření schopností AR technologie zlepšit proces inspekce a nabídnout řešení, která překonají omezení tradičních přístupů.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 ÚVOD PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem této praktické části je demonstrovat využití rozšířené reality (AR) při inspekci a detekci objektů s využitím softwarových nástrojů Twyn Studio a Twyn View na zařízení iPad Pro. Experiment se zaměřuje na vytvoření podkladů pro detekci a tracking objektů, přípravu 3D modelů a implementaci jednoduché inspekční úlohy simulující kontrolu montážního procesu.

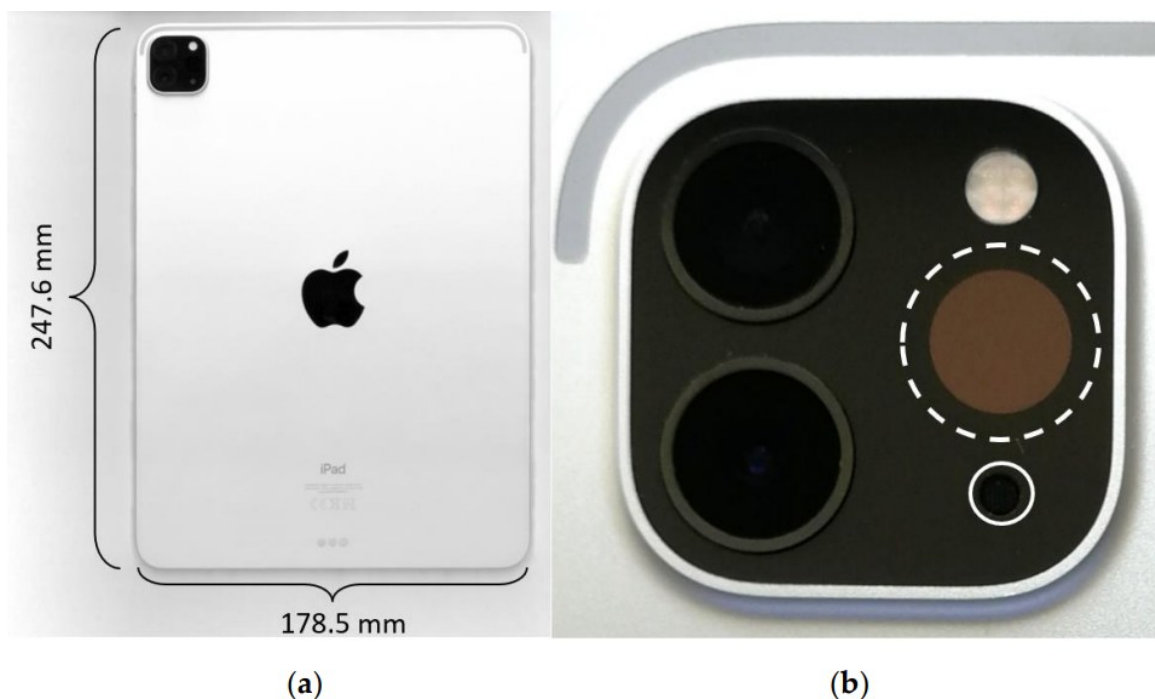
Práce byla rozdělena do několika fází: zprovoznění softwaru, příprava 3D modelů, konfigurace parametrů inspekce v programu a testování vytvořeného systému. Očekává se, že výsledky ukážou, jak technologie AR může zefektivnit procesy přejímky vstupních součástí, kontroly kvality a zvýšit přesnost detekce odchylek. Tento experiment poskytne základní poznatky o aplikaci AR v průmyslovém prostředí a identifikuje možné výzvy spojené s implementací této technologie.

7 NÁSTROJE POUŽITÉ V PROJEKTU

V této kapitole jsou představeny hardwarové a softwarové nástroje použité při realizaci projektu. Je popsán výběr zařízení a aplikací, které umožnily vytvoření a implementaci AR aplikace pro průmyslovou inspekci.

7.1 iPad Pro jako zařízení pro rozšířenou realitu

V tomto projektu byl zvolen iPad Pro (2021) s úhlopříčkou 12,9 palce a integrovaným LiDAR skenerem jako hlavní zařízení pro zobrazení AR obsahu. Podle společnosti Visometry je iPad Pro nejlepším zařízením pro provádění inspekci pomocí softwaru Twyn, díky své výkonné hardwarové konfiguraci a pokročilým sensorům.



Obrázek 17 Zadní pohled na iPad Pro 11" (a), zadní kamera s LiDAR senzorem (b)

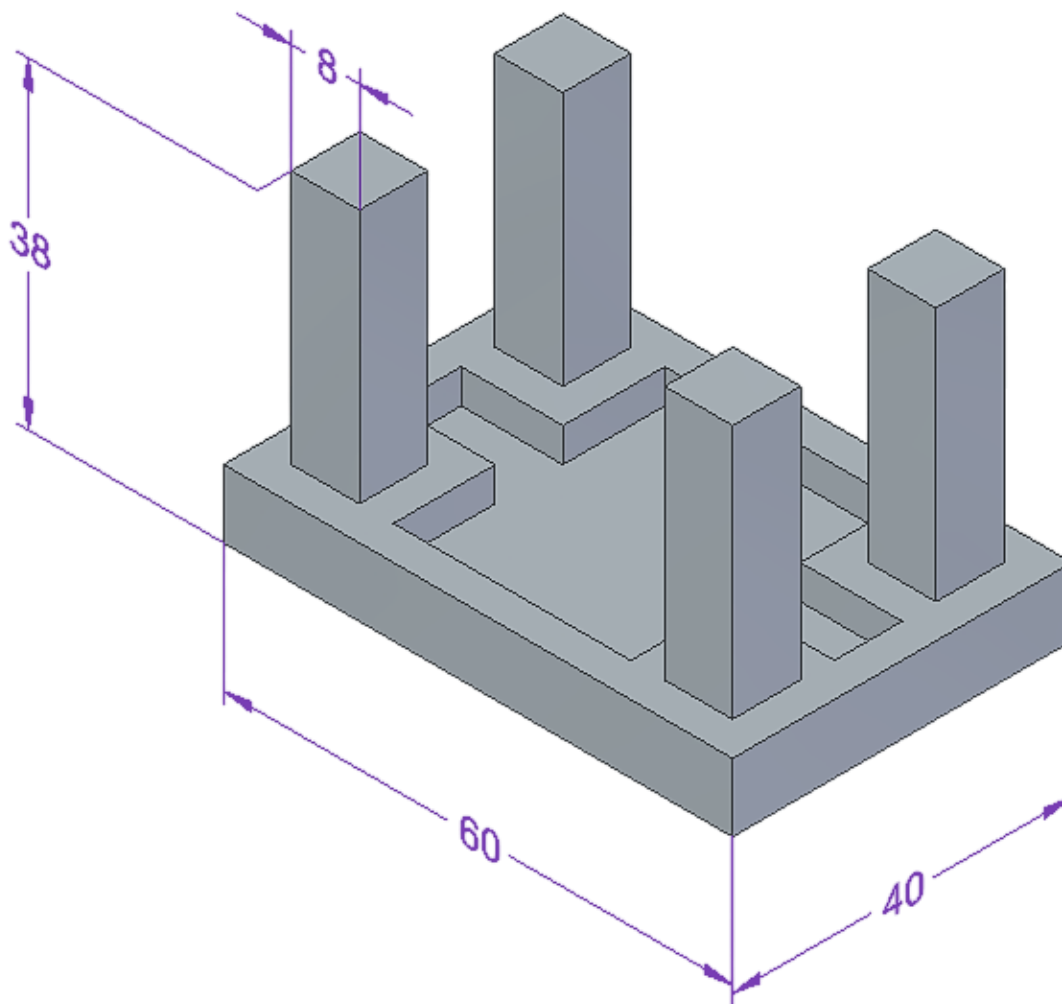
(zdroj: [36])

iPad Pro je vybaven výkonným čipem Apple M1, který poskytuje vysoký výkon pro náročné grafické aplikace. Liquid Retina XDR displej zajišťuje vysokou kvalitu obrazu, což je důležité pro přesnou vizuální inspekci. Integrovaný LiDAR skener výrazně zlepšuje sledování okolí díky přesnému měření hloubky a mapování okolního prostředí. To umožňuje přesný tracking objektů a umístování virtuálních prvků v reálném čase, což je naprosto nezbytné při použití softwaru Twyn pro provádění inspekci.

7.2 Příprava 3D modelu pro inspekci

Pro přípravu inspekce jsem v programu SolidEdge 2024 vytvořil jednoduchou desku o rozměrech $60 \times 40 \times 8$ mm se čtyřmi nohami (každá $38 \times 8 \times 8$ mm), která slouží jako kontrolní celek pro inspekci. Díky základní geometrii lze snadno vyhodnotit, zda systém správně detekuje polohu i velikostní odchylky jednotlivých nohou.

Model jsem vyexportoval ve formátu STEP a přímo naimportoval do Twyn Studio, kde bylo možné bez dalších úprav definovat inspekční body a nastavit toleranční charakteristiky pro každou nohu. Tato jednoduchá příprava šetří čas a zajišťuje, že se při testování soustředíme čistě na funkčnost AR detekce.



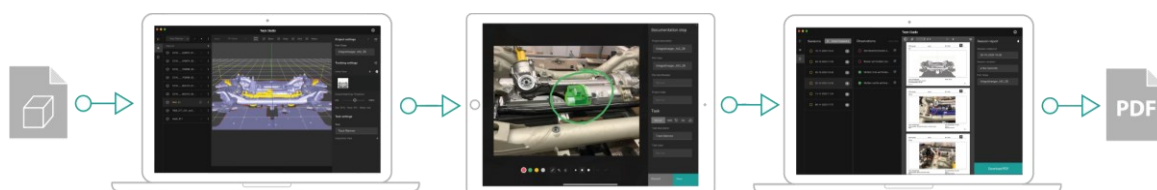
Obrázek 18 Vytvořený model pro inspekci

(zdroj: SolidEdge 2024)

7.3 Twyn Software od Visometry

Podle společnosti Visometry je Twyn výkonná softwarová platforma pro kontrolu kvality vylepšenou rozšířenou realitou. Pomáhá průmyslovým podnikům plnit sliby ohledně kvality rychleji a efektivněji. Díky využití AR umožňuje vytvářet a provádět inspekce dílů nebo sestav: inspekce jsou prováděny rychleji, s vyšší frekvencí, přímo na místě – což významně snižuje zmetkovitost, prostoje a následné náklady [37]

Platforma Twyn navíc nabízí pokročilé funkce, které nejsou běžně dostupné v jiných AR řešeních. Díky své integraci s průmyslovými standardy a schopnosti využívat technologii LiDAR pro přesný tracking objektů splňuje Twyn klíčové požadavky specifických průmyslových aplikací. Podle Peddieho [9] je právě přizpůsobení AR nástrojů konkrétním průmyslovým potřebám rozhodující, což Twyn výrazně odlišuje od jiných platforem.

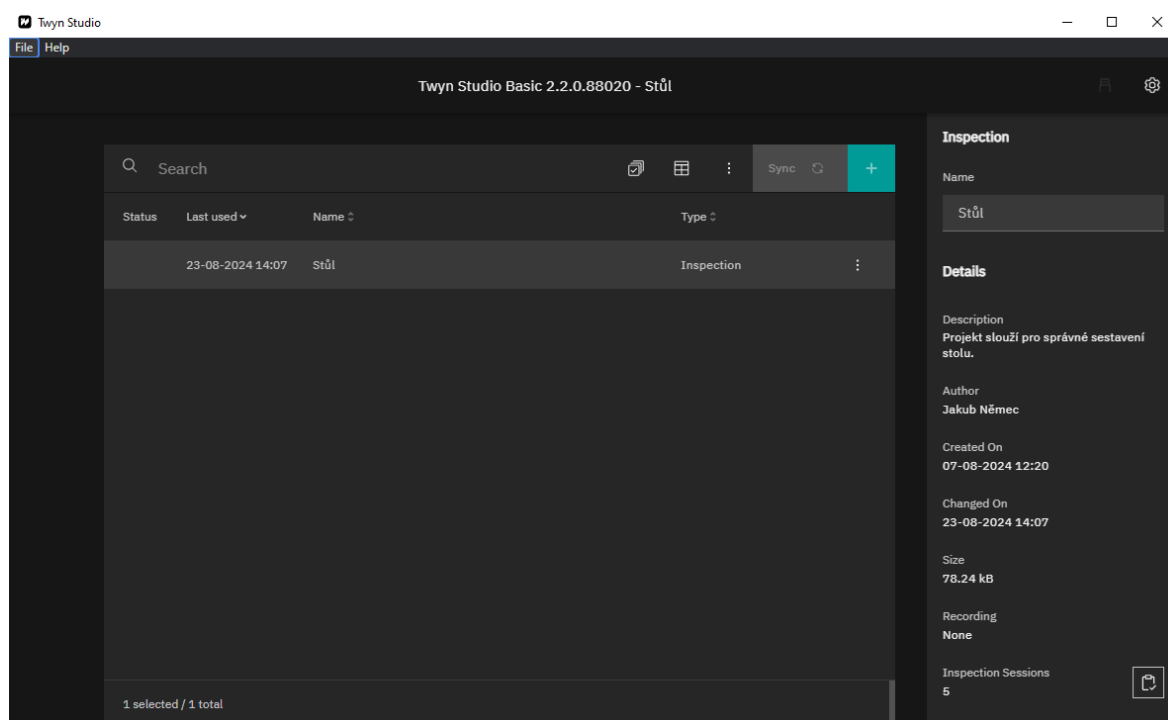


Obrázek 19 Proces inspekce a generování dokumentace v Twyn Studio a Twyn View

(zdroj: [38])

7.3.1 Twyn Studio

Twyn Studio je komplexní softwarový nástroj určený k tvorbě a konfiguraci inspekčních úloh. Umožňuje import 3D modelů ve formátech jako OBJ, FBX nebo STEP, které následně připraví pro použití v aplikaci Twyn View. Díky svému intuitivnímu uživatelskému rozhraní lze projekty rychle konfigurovat bez nutnosti programování, což usnadňuje integraci existujících CAD modelů a definování inspekčních scénářů, včetně nastavení kroků, tolerancí a kontrolních bodů pro různé typy úloh. Tím Twyn Studio poskytuje robustní a flexibilní prostředí, které vyhovuje specifickým požadavkům průmyslové kontroly kvality.

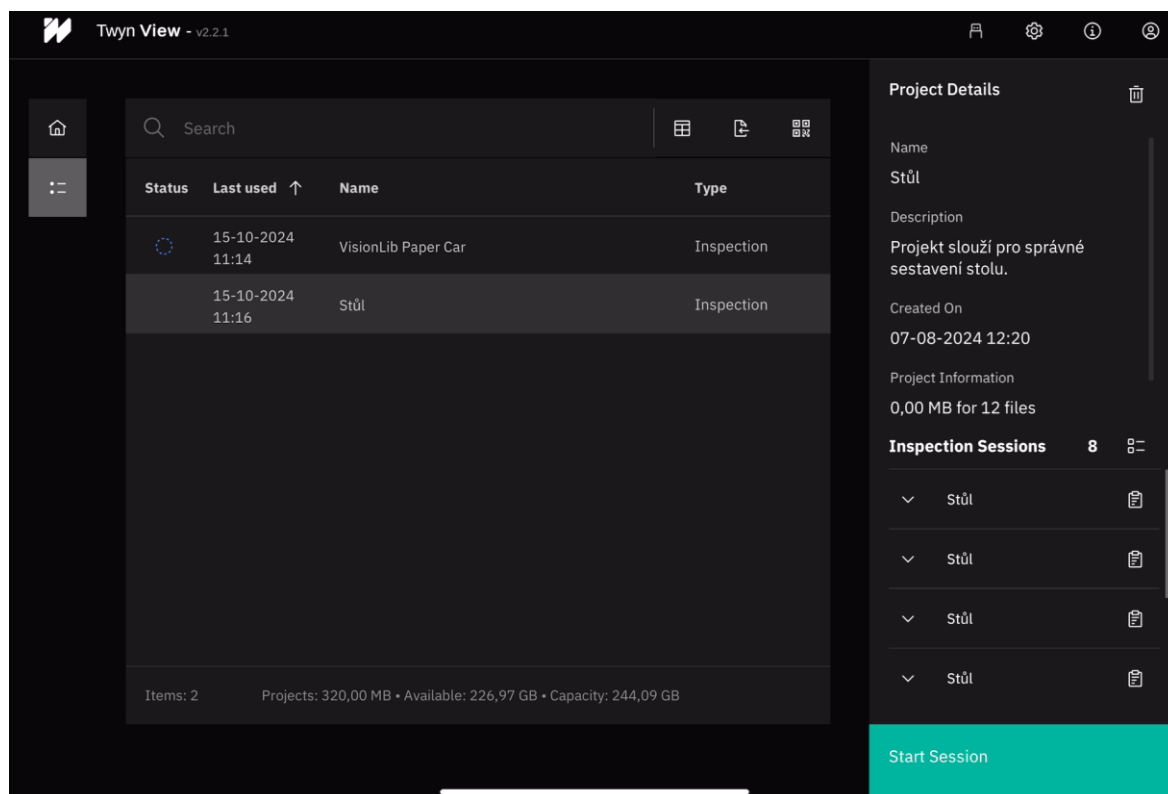


Obrázek 20 Úvodní strana aplikace Twyn Studio

(zdroj: Twyn Studio)

7.3.2 Twyn View

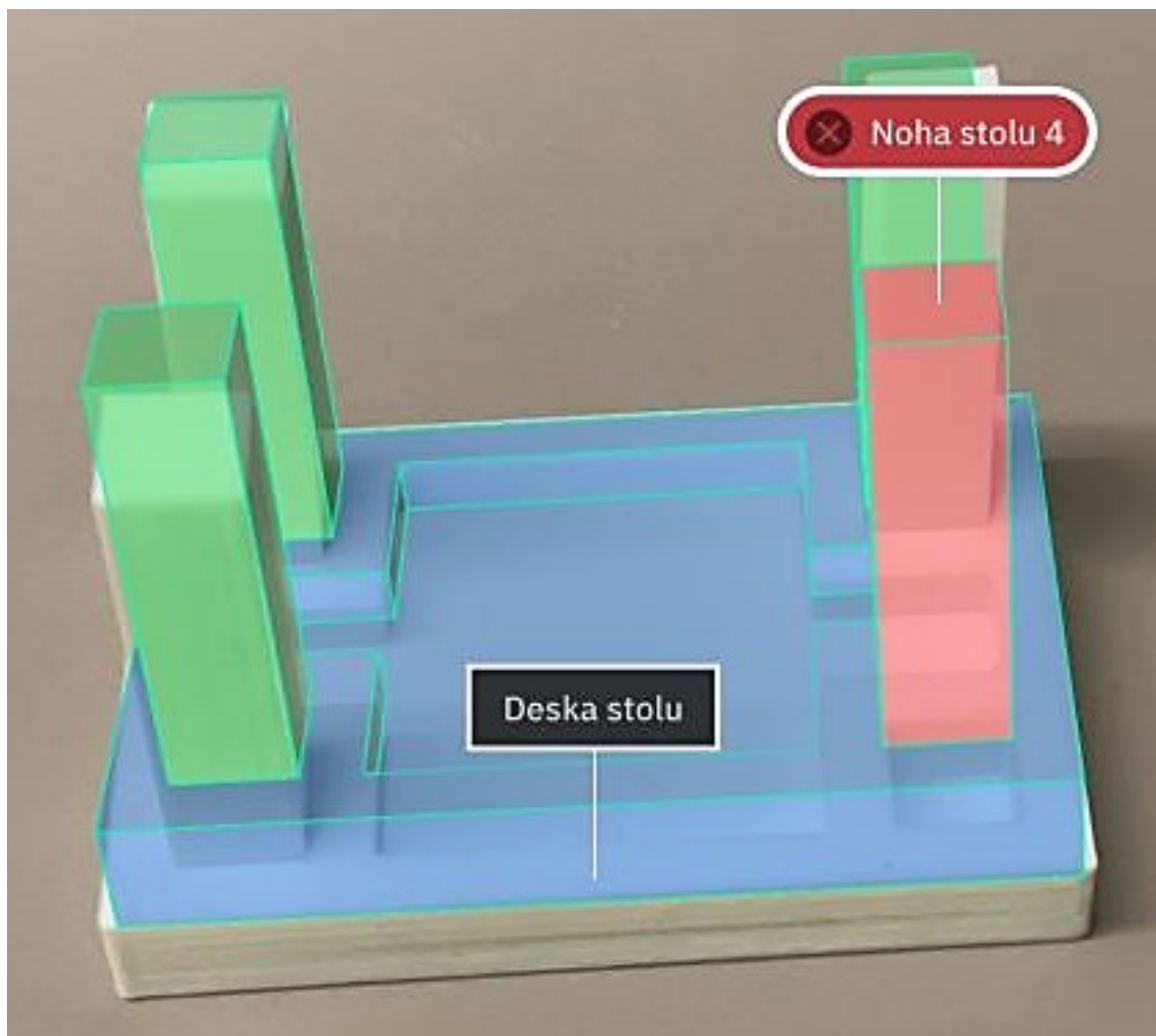
Twyn View je mobilní aplikace pro iPad určená k zobrazení a interakci s AR obsahem vytvořeným v Twyn Studio. Umožňuje inspektorům provádět kontrolu kvality přímo ve výrobě s využitím rozšířené reality.



Obrázek 21 Úvodní strana aplikace Twyn View

(zdroj: Twyn View)

Hlavní funkcí aplikace je zobrazení AR inspekce, které umožňuje překrytí 3D modelů na fyzické objekty v reálném čase. Uživatelé tak mohou snadno identifikovat odchylky nebo vady. Aplikace rovněž podporuje zaznamenávání nálezů, přidávání poznámek a vytváření reportů přímo v rozhraní aplikace, což zjednodušuje dokumentaci i sdílení dat.



Obrázek 22 Zobrazení modelu při inspekci v prostředí Twyn View

(zdroj: Twyn View)

Výhodou je podpora offline režimu – projekty lze synchronizovat a uložit v zařízení, což umožňuje práci bez internetového připojení. Twyn View zároveň plně využívá schopnosti iPadu, včetně LiDAR skeneru pro přesný tracking, výkonného procesoru pro plynulé zobrazení a kvalitního displeje pro detailní vizualizaci.

Díky intuitivnímu rozhraní je aplikace snadno ovladatelná i pro uživatele bez předchozích zkušeností s AR technologiemi. Integrace s Twyn Studio navíc umožňuje rychlé nasazování nových projektů a aktualizací, čímž zvyšuje flexibilitu a efektivitu inspekčních procesů.

8 INSTALACE A KONFIGURACE PROSTŘEDÍ

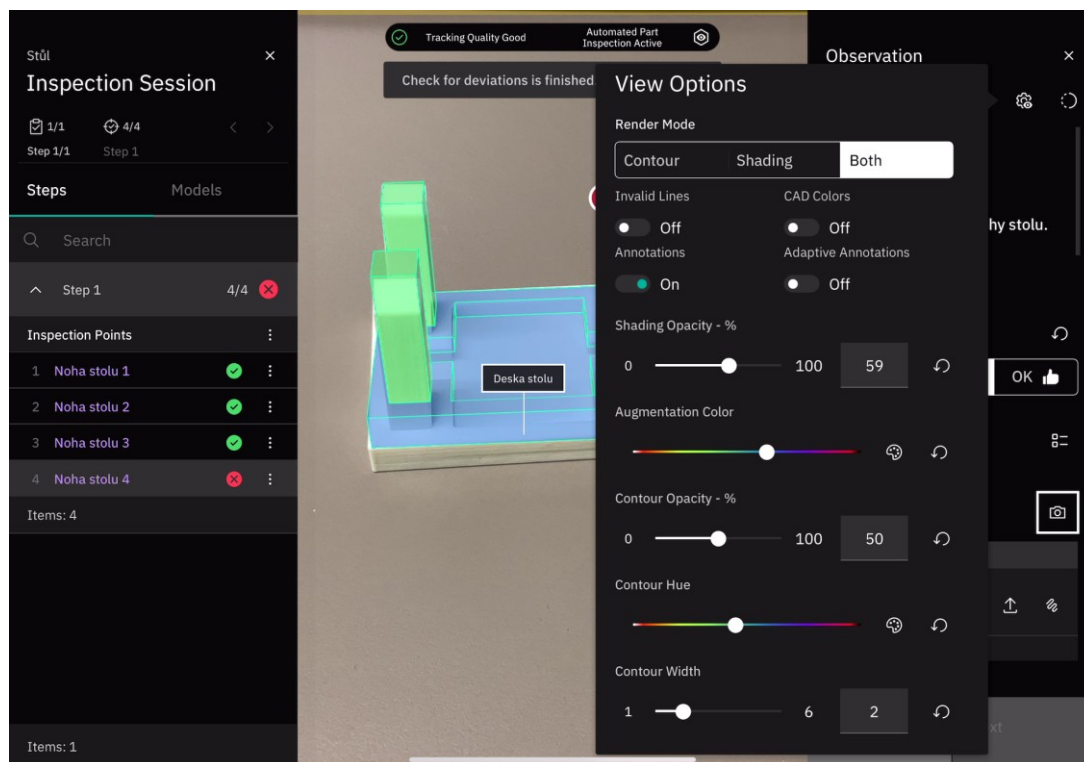
Proces zprovoznění iPadu s Twyn View a Twyn Studio zahrnoval několik kroků, které byly nezbytné pro správné fungování celého systému.

8.1 Instalace softwaru

Nejprve bylo nutné stáhnout Twyn Studio z oficiálních stránek společnosti Visometry a provést instalaci na PC s operačním systémem Windows. Následně jsem z Apple App Store nainstaloval aplikaci Twyn View na iPad Pro, který jsem využil pro zobrazení a testování rozšířené reality. Po instalaci obou aplikací jsem aktivoval licenci Twyn Studio, čímž jsem zpřístupnil všechny potřebné funkce softwaru.

8.2 Testování a řešení problémů

Během zprovoznění mohly nastat různé technické problémy, jako například nesprávné zobrazení modelů, potíže s kalibrací nebo problémy s trackingem objektu aplikací. Tyto problémy byly řešeny namířením kamery mimo objekt nebo úpravou nastavení v aplikaci Twyn View.



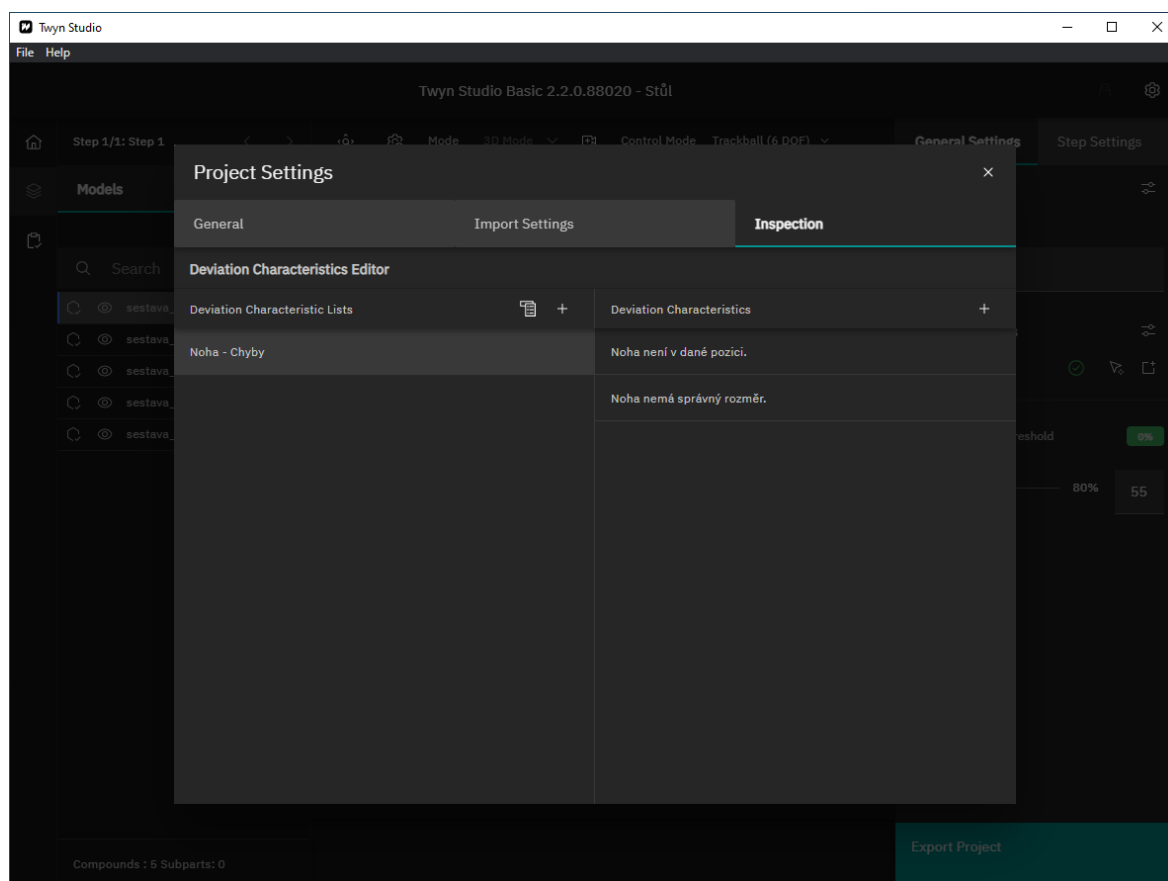
Obrázek 23 Nastavení zobrazení funkcí při inspekci na iPadu

(zdroj: Twyn View)

8.3 Nastavení automatické kontroly objektu v Twyn Studio

Aby inspekce správně detekovala a kontrolovala fyzický objekt, nastavil jsem v Twyn Studio automatickou kontrolu založenou na porovnání 3D modelu s reálným objektem. Twyn Studio umožňuje využít model-based tracking, který nepotřebuje žádné dodatečné kontrolní body nebo markery.

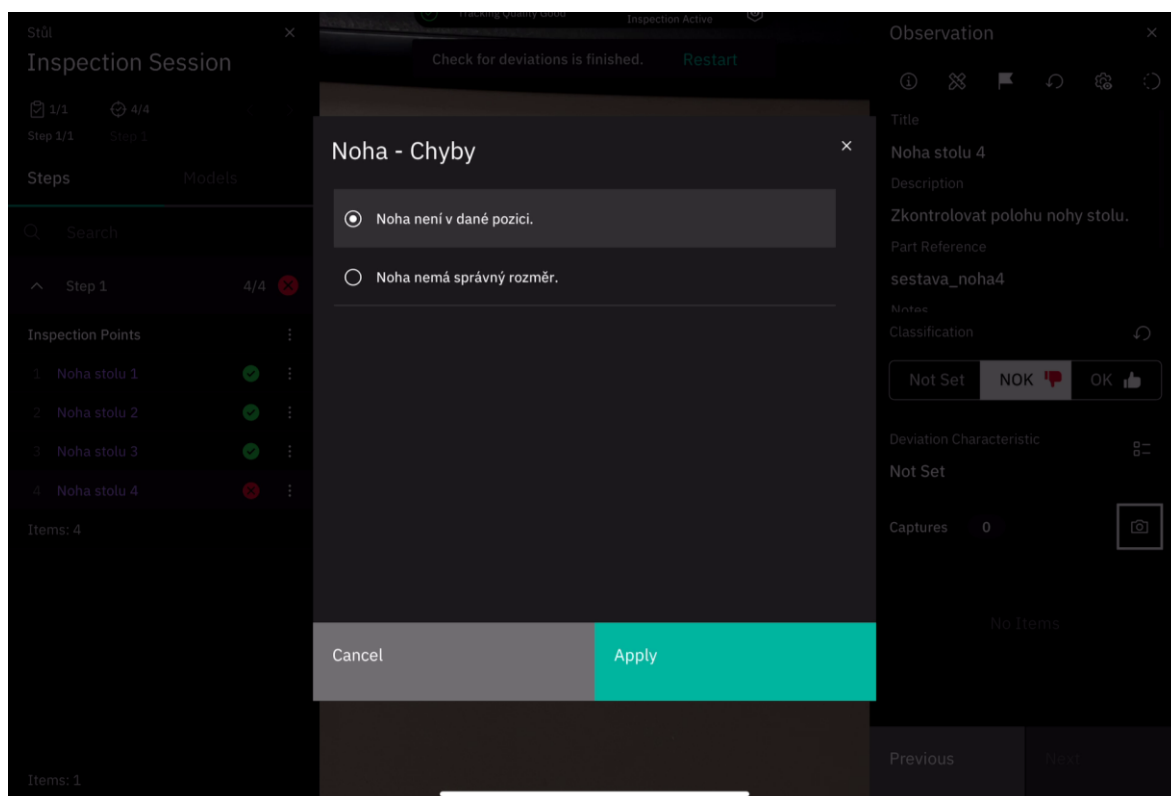
Součástí této konfigurace je definice inspekčních parametrů pomocí tzv. Deviation Characteristics, které jsou zobrazeny na obrázku dole (Obrázek 24). Tyto charakteristiky umožňují specifikovat, jaké odchylky od požadované pozice a rozměrů by měly být detekovány během inspekčního procesu. Pro každý klíčový prvek objektu, který má být kontrolován, lze přiřadit konkrétní kritéria, jako je například správná pozice nebo rozměr dané části.



Obrázek 24 Nastavení parametrů automatické kontroly objektu pomocí Deviation Characteristics v Twyn Studio

(zdroj: Twyn Studio)

V mém případě jsem vytvořil dvě specifické charakteristiky pro kontrolu správného umístění a rozměrů jednotlivých nohou objektu. Obě tyto varianty jsem vytvořil přímo v aplikaci Twyn Studio, kde jsem přidal možnosti na výběr, zda „noha nemá správný rozměr“ nebo „noha není v dané pozici“. Díky této volbě dokáže aplikace při inspekci vizuálně zvýraznit nesrovnalosti, pokud některá z nohou neodpovídá požadovaným parametrům. Tento krok je zásadní pro dosažení přesných výsledků inspekce, protože zajišťuje, že software může automaticky rozpoznat a upozornit na nesrovnalosti mezi fyzickým objektem a jeho digitálním modelem.

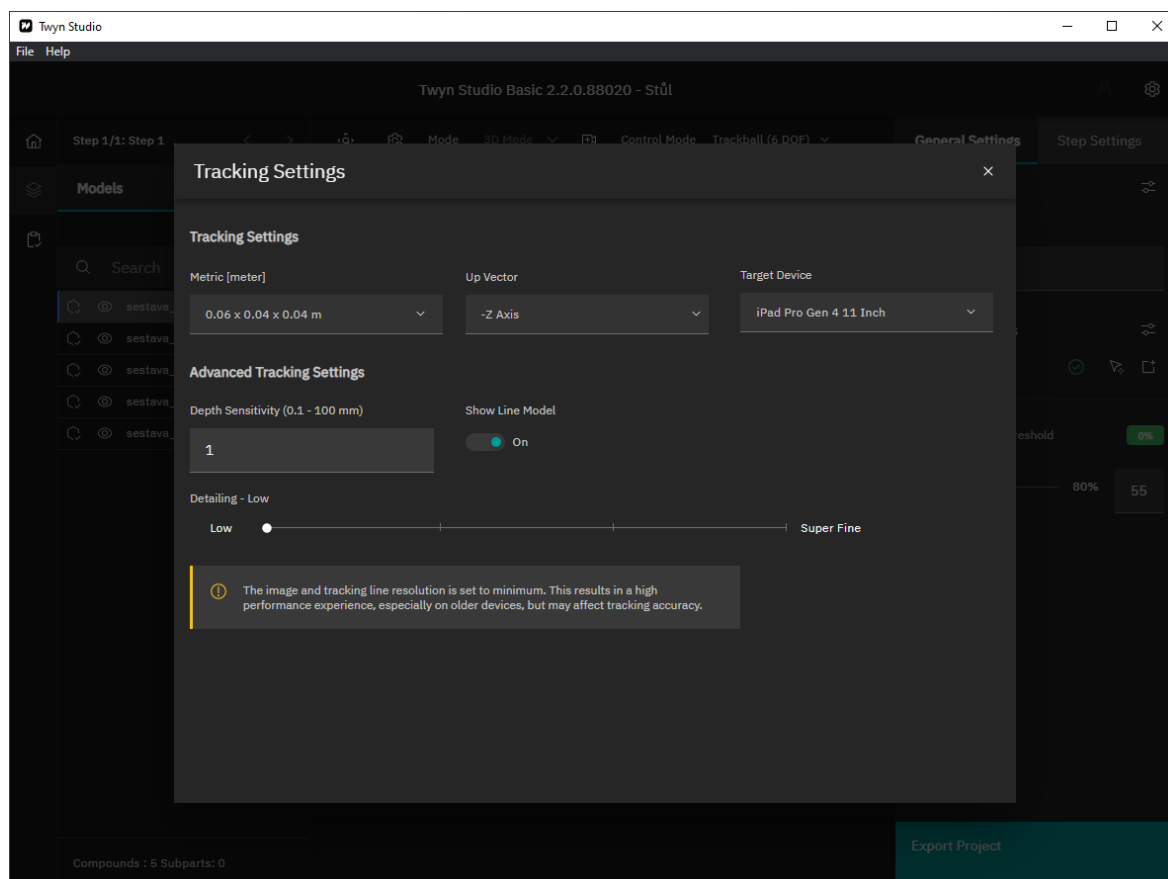


Obrázek 25 Ukázka volby charakteristiky odchylek při probíhající inspekci

(zdroj: Twyn View)

8.4 Nastavení trackingu a optimalizace modelů v Twyn Studio

V Twyn Studio jsem využil vestavěný modelově založený tracking, který umožňuje automatickou detekci a sledování objektu na základě jeho 3D modelu. Nemusel jsem nastavovat žádné dodatečné kontrolní body nebo markery, protože software automaticky porovnává reálný objekt s digitálním modelem.



Obrázek 26 Nastavení bodů trackingu

(zdroj: Twyn Studio)

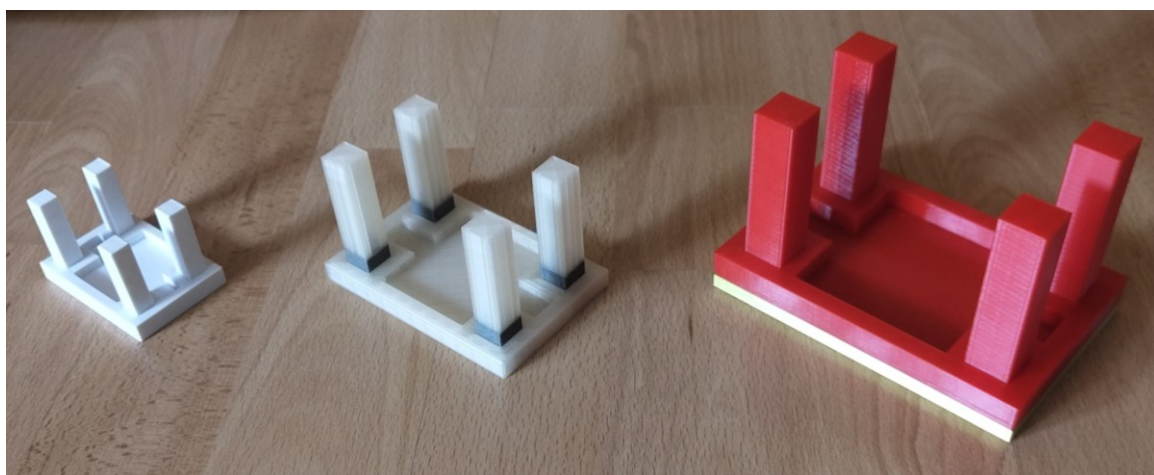
Pro zajištění plynulého chodu aplikace na iPadu jsem ověřil, že 3D modely mají přiměřenou velikost a složitost. Vzhledem k jednoduchosti modelu nebylo nutné provádět další optimalizaci, protože iPad Pro zvládal jejich zpracování bez problémů.

9 VÝVOJ A TESTOVÁNÍ INSPEKČNÍ ÚLOHY

V této kapitole je popsán kompletní postup od návrhu inspekční úlohy až po její experimentální ověření. V podkapitole 9.1 představím cíle a základní principy navržené kontroly montáže, v 9.2 ukážu, jak byla úloha implementována v prostředí Twyn Studio, a v 9.3 pak rozepíšu průběh testování, jeho podmínky a vyhodnocení dosažených výsledků.

9.1 Návrh inspekční úlohy

Cílem úlohy bylo ověřit správnou montáž nohou do desky a zkontrolovat, zda jsou nohy umístěny ve své pozici a zda mají správný rozměr. Bylo také důležité detekovat případné chybějící nebo nesprávně instalované nohy.

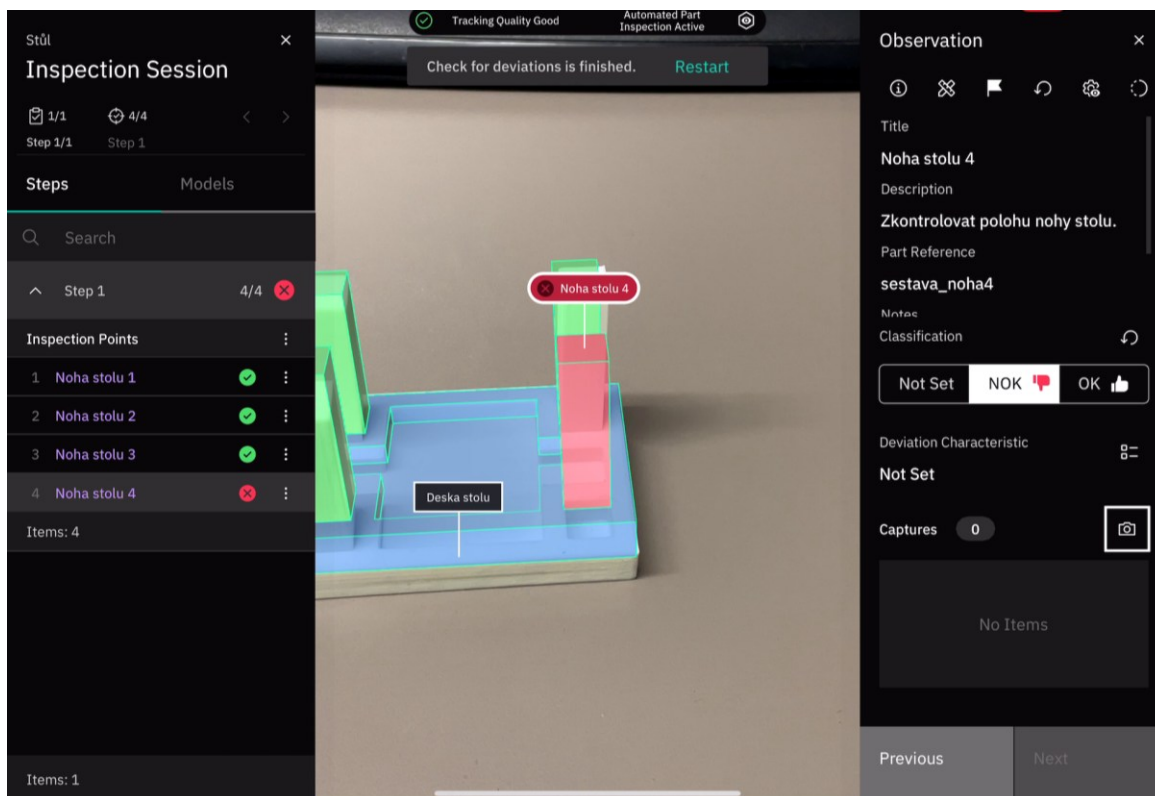


Obrázek 27 Modely pro inspekci (zleva: základní velikost 1×, zvětšeno 1,5×, zvětšeno 2×)

(zdroj: vlastní)

9.2 Implementace inspekční úlohy v Twyn Studio

Jak bylo uvedeno již v kapitole 8.3 a 8.4, Twyn Studio využívá modelově založený tracking, díky kterému nebylo nutné nastavovat žádné dodatečné kontrolní body nebo tolerance. Při implementaci inspekční úlohy jsem proto pouze importoval 3D modely sestavy a definoval vizuální indikátory výsledků kontroly. Tato nastavení umožnila rychlou přípravu aplikace bez nutnosti specifických úprav.

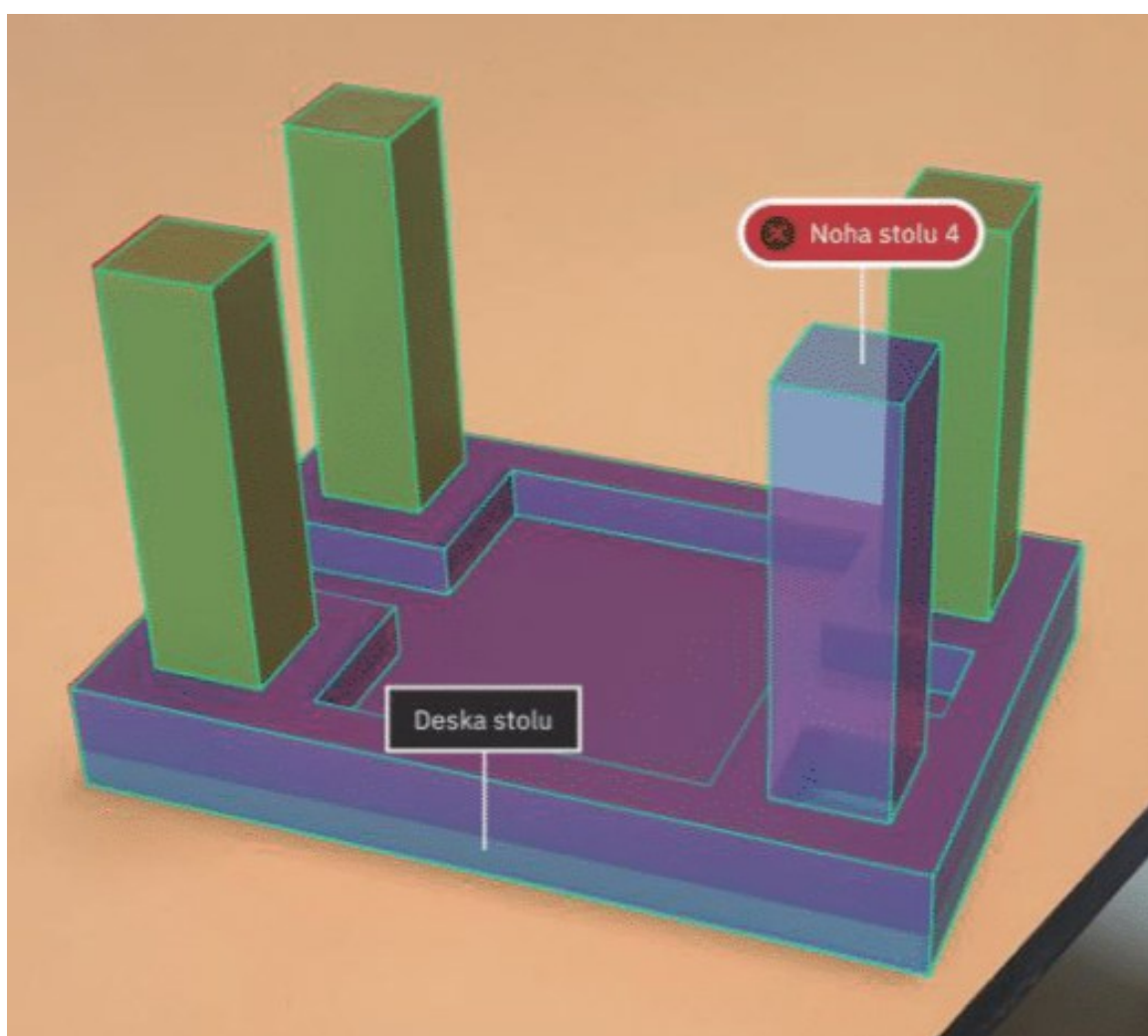


Obrázek 28 Zobrazení vizuálního indikátoru neúspěšné detekce

(zdroj: Twyn View)

9.3 Testování a vyhodnocení úlohy

Testování inspekční úlohy proběhlo na třech velikostních variantách testovacího dílu ($1\times$, $1,5\times$ a $2\times$) za stejných podmínek, kterými byli běžné kancelářské osvětlení a vzdálenost modelu od iPadu 0,5 m. Ve všech třech případech inspekční systém spolehlivě odhalil nesprávné usazení či chybějící nohu a při správné montáži nevygeneroval falešné poplachy. Změna měřítka neměla žádný vliv: výsledky pro $1,5\times$ i $2\times$ model byly shodné s originálem, detekce zůstala konzistentní a vizuální indikace (červené zvýraznění pro chybu, zelené pro úspěch) fungovala bez výpadků.



Obrázek 29 Zobrazení inspekce 2x zvětšeného modelu

(zdroj: Twyn View)

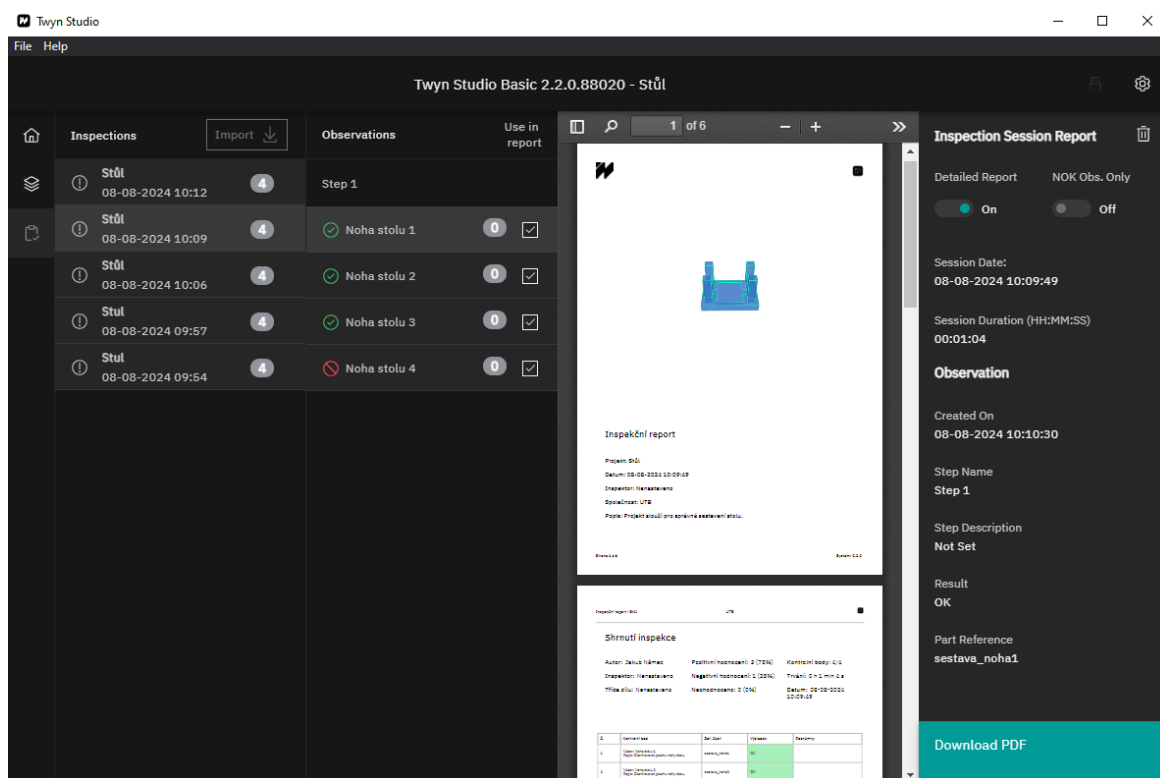
Při testování jsem také ověřoval vliv intenzity osvětlení. K měření intenzity světla byl použit luxmetr Voltcraft MS-1300 zobrazený na obrázku dole (Obrázek 30). Prováděním inspekce v různých světelných podmínkách jsem zjistil, že intenzita osvětlení v rozsahu přibližně 200 až 2000 lx nemá žádný významný vliv na spolehlivost ani přesnost detekce. Systém fungoval stejně spolehlivě při slabém osvětlení (200 lx), jako při intenzivnějším kancelářském osvětlení (2000 lx).



Obrázek 30 Použitý luxmetr Voltcraft MS-1300

(zdroj: vlastní)

Jak je vidět na obrázku dole (Obrázek 31), Twyn Studio umožňuje uživateli zobrazit všechny provedené inspekce a jejich výsledky v přehledném seznamu přímo uvnitř aplikace. Inspekční report poskytuje detailní přehled o každém kroku inspekce, včetně informací, zda každá část splňuje stanovené parametry. Celý report lze poté exportovat do PDF pro archivaci a sdílení.



Obrázek 31 Přehled inspekčních výsledků v Twyn Studio

(zdroj: Twyn Studio)

Je však nutné upozornit, že navržený inspekční systém provádí pouze tvarovou kontrolu bez přímého ověřování rozměrů, takže i při správném rozpoznání tvaru může být součástí rozměrově nevyhovující.

Dále systém nereflektuje barevné odchylky kontrolovaných dílů – ačkoli to poskytuje flexibilitu při inspekci výrobků různých barev, znamená to omezení tam, kde barva indikuje materiálové vlastnosti nebo technický stav komponenty.

ZÁVĚR

Realizace bakalářské práce potvrdila, že navržené řešení inspekce montáže stolové konstrukce s využitím aplikací Twyn Studio a Twyn View efektivně naplňuje stanovené cíle. Modelově založený tracking umožnil spolehlivou detekci chybného usazení či chybějících komponentů a vizuální indikátory v reálném čase výrazně zjednodušily identifikaci nesrovnalostí. Testování na třech velikostních variantách modelů ($1\times$, $1,5\times$ a $2\times$) ukázalo, že systém pracuje konzistentně bez potřeby úpravy parametrů, a to i při zvětšeném měřítku modelu. Díky tomu lze Twyn Software považovat za robustní nástroj pro průmyslovou kontrolu kvality, který zkracuje dobu inspekce a snižuje riziko lidské chyby.

V rámci práce byla také ověřena robustnost řešení vůči různým intenzitám osvětlení. Prováděné experimenty prokázaly, že intenzita osvětlení v rozsahu od 200 do 2000 lux nemá vliv na přesnost či kvalitu detekce, což podtrhuje stabilitu systému v běžných průmyslových podmínkách.

Při testování však bylo identifikováno i několik omezení, která je nutné při aplikaci Twyn Software zohlednit. Především systém provádí pouze tvarovou kontrolu a absence přímé kontroly rozměrů znamená, že součásti, které jsou tvarově podobné, ale rozměrově neodpovídají požadavkům, mohou být chybně označeny za vyhovující. Tato skutečnost může v praxi znamenat významné omezení v aplikacích, kde je kritická rozměrová přesnost. Dalším omezením je absence kontroly barevných odchylek, což na jedné straně umožňuje flexibilitu při inspekci různobarevných výrobků, ale zároveň představuje omezení v případech, kdy barva komponentu indikuje jeho správnost nebo stav.

Jako další krok se proto nabízí validace tohoto řešení v reálných výrobních provozech, kde bude možné ověřit jeho dlouhodobou spolehlivost, uživatelskou přívětivost a celkovou efektivitu v každodenním použití. Do budoucna by bylo přínosné integrovat pokročilé senzory a algoritmy strojového učení, které by mohly umožnit automatickou kalibraci, adaptaci parametrů sledování a detekci složitějších inspekčních scénářů. Tímto způsobem může Twyn Software v průmyslové inspekci dále zvyšovat kvalitu, produktivitu a transparentnost kontrolních procesů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AZUMA, Ronald T. A Survey of Augmented Reality. *Presence: teleoperators and virtual environment*. 1997, roč. 6, č. Journal Article, s. 355-385. ISSN 1054-7460. Dostupné z: <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>.
- [2] SUH, Ayoung a PROPHET, Jane. The State of Immersive Technology Research: A Literature Analysis: A Literature Analysis. *Computers in Human Behavior*. 2018, roč. 86, s. 77-90. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.04.019>.
- [3] BIAN, Dongxiao; LIN, Zhipeng; LU, Hao; ZHONG, Qunjie; WANG, Kaifeng et al. The Application of Extended Reality Technology-Assisted Intraoperative Navigation in Orthopedic Surgery. *Frontiers in Surgery*. 2024, roč. 11. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fsurg.2024.1336703>.
- [4] MISHRA, Rakesh; NARAYANAN, Krishna; UMANA, Giuseppe Emmanuele; MONTEMURRO, Nicola; CHAURASIA, Bipin et al. Virtual Reality in Neurosurgery: Beyond Neurosurgical Planning: Beyond Neurosurgical Planning. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, roč. 19, č. 3, s. 1719. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijerph19031719>.
- [5] WONG, Kwok Chuen; SUN, Yan Edgar a KUMTA, Shekhar Madhukar. Review and Future/Potential Application of Mixed Reality Technology in Orthopaedic Oncology. *Orthopedic Research and Reviews*. 2022, roč. 14, s. 169-186. Dostupné z: <https://doi.org/10.2147/orr.s360933>.
- [6] YAHANDA, Alexander T.; MOORE, E.Howard; RAY, Wilson Z.; PENNICOOKE, Brenton; JENNINGS, Jack W. et al. First in-Human Report of the Clinical Accuracy of Thoracolumbar Percutaneous Pedicle Screw Placement Using Augmented Reality Guidance. *Neurosurgical Focus*. 2021, roč. 51, č. 2, s. E10. Dostupné z: <https://doi.org/10.3171/2021.5.focus21217>.
- [7] LU, Lin; WANG, Honglin; LIU, Pengran; LIU, Rong; ZHANG, Jiayao et al. Applications of Mixed Reality Technology in Orthopedics Surgery: A Pilot Study: A Pilot Study. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022, roč. 10. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.740507>.
- [8] JAIN, Swati; GAO, Yujia; YEO, Tseng Tsai a NGIAM, Kee Yuan. Use of Mixed Reality in Neuro-Oncology: A Single Centre Experience: A Single Centre Experience. *Life*. 2023, roč. 13, č. 2, s. 398. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/life13020398>.
- [9] PEDDIE, Jon. *Augmented Reality: Where We Will All Live: Where We Will All Live*. 1;1st 2017. Cham: Springer International Publishing, 2023;2017;. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54502-8>.
- [10] MAHARJAN, D; AGÜERO, M; MASCARENAS, D; FIERRO, R a MOREU, F. Enabling human–infrastructure interfaces for inspection using augmented reality. *Structural Health Monitoring*. 2020/12/15, roč. 20, č. 4, s. 1980-1996. ISSN 1475-9217. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1475921720977017>.
- [11] LI, Wenkai; NEE, A. Y. C. a ONG, S. K. A State-of-the-Art Review of Augmented Reality in Engineering Analysis and Simulation. *Multimodal Technologies and Interaction*. 2017, roč. 1, č. 3, s. 17. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/mti1030017>.
- [12] HAVLÍKOVÁ, Kristýna. Augmented Reality in Context of Industry 4.0. 2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.24132/pi.2020.09693.044-061>.
- [13] CRUZ-CARRIZALES, Camilo-Andrés; BAUTISTA, Luis a PEDRAZA, Gabriel. Evaluation of User Interfaces Description Languages to Augmented Reality. *Revista*

- Facultad De Ingeniería*. 2021, roč. 30, č. 57, s. e13304. Dostupné z: <https://doi.org/10.19053/01211129.v30.n57.2021.13304>.
- [14] BOTTANI, Eleonora a VIGNALI, Giuseppe. Augmented Reality Technology in the Manufacturing Industry: A Review of the Last Decade: A Review of the Last Decade. *Iise Transactions*. 2019, roč. 51, č. 3, s. 284-310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>.
- [15] ETONAM, Amelessodji Kokougan; GRAVIO, Giulio Di; KULOBA, Patrick W a NJIRI, Jackson G. Augmented Reality (AR) Application in Manufacturing Encompassing Quality Control and Maintenance. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019, roč. 9, č. 1, s. 197-204. Dostupné z: <https://doi.org/10.35940/ijeat.a1120.109119>.
- [16] FEINER, Zhou; HENRY B.-L., Duh a MARK, Billinghamst. Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction and Display: A Review of Ten Years of ISMAR. In: . S. 193-202. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2008.4637362>.
- [17] BILLINGHURST, Mark; CLARK, Adrian a LEE, Gun. A Survey of Augmented Reality. *Foundations and Trends® in Human-computer Interaction*. 2015, roč. 8, č. 2-3, s. 73-272. Dostupné z: <https://doi.org/10.1561/1100000049>.
- [18] WAISBERG, Ethan; ONG, Joshua; MASALKHI, Mouayad; ZAMAN, Nasif; SARKER, Prithul et al. The future of ophthalmology and vision science with the Apple Vision Pro. *Eye*. 2024, roč. 38, č. 2, s. 242-243. ISSN 1476-5454. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41433-023-02688-5>.
- [19] COSTA, Gabriel de Moura; PETRY, Marcelo Roberto a MOREIRA, António Paulo. Augmented Reality for Human-Robot Collaboration and Cooperation in Industrial Applications: A Systematic Literature Review: A Systematic Literature Review. *Sensors*. 2022, roč. 22, č. 7, s. 2725. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s22072725>.
- [20] HAVLÍKOVÁ, Kristýna; HOŘEJŠÍ, Petr a KOPEČEK, Pavel. Interaktivní Aplikace Rozšířené Reality Pro Zlepšení Procesu Kontroly Kvality Ve Výrobě – Pilotní Studie. 2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.24132/pi.2022.11146.034-042>.
- [21] KUBR, Jan; HOŘEJŠÍ, Petr a KLEINOVÁ, Jana. Praktická Implementace Virtuálních Návodů. 2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.24132/pi.2020.09693.093-109>.
- [22] REINHART, G. a PATRON, C. Integrating Augmented Reality in the Assembly Domain - Fundamentals, Benefits and Applications. *CIRP annals*. 2003, roč. 52, č. Journal Article, s. 5-8. ISSN 0007-8506. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60517-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60517-4).
- [23] HAVLÍKOVÁ, Kristýna; HOŘEJŠÍ, Petr a KOPEČEK, Pavel. Rozšířená Realita v Průmyslové Kontrole Kvality. 2023, s. 1-10. Dostupné z: <https://doi.org/10.24132/pi.2023.11986.001-010>.
- [24] Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction. Online. *Automation in Construction*. 2013, roč. 33, č. 1, s. 116-122. ISSN 0926-5805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.017>. [cit. 2024-11-23].
- [25] *On-Device, Real-Time Hand Tracking with MediaPipe*. Online. Google Research. 2019. Dostupné z: <https://research.google/blog/on-device-real-time-hand-tracking-with-mediapipe/>. [cit. 2024-12-23].
- [26] COMMONS CONTRIBUTORS, Wikimedia. *File:LIDAR-scanned-SICK-LMS-animation.gif*. Online. In: Wikimedia Commons. 2020. Dostupné z:

- <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:LIDAR-scanned-SICK-LMS-animation.gif&oldid=451853123>. [cit. 2025-01-05].
- [27] , RCraig09. *Diagram illustrating the concept of Time of flight*. Online. In: Wikimedia Commons. 2020, s. 1. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20200501_Time_of_flight.svg. [cit. 2024-12-22].
- [28] SCARAMUZZA, D. a FRAUNDORFER, F. Visual Odometry [Tutorial]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2011, roč. 18, č. 4, s. 80-92. ISSN 1558-223X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MRA.2011.943233>.
- [29] TAK, Sehyun; LEE, Jong-Deok; SONG, Jeongheon a KIM, Sunghoon. Development of AI-Based Vehicle Detection and Tracking System for C-ITS Application. *Journal of Advanced Transportation*. 2021, roč. 2021, č. 1, s. 1-15. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/4438861>.
- [30] ESWARAN, M a BAHUBALENDRUNI, M V A Raju. Challenges and opportunities on AR/VR technologies for manufacturing systems in the context of industry 4.0: A state of the art review: A state of the art review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022, roč. 65, s. 260-278. ISSN 0278-6125. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.016>.
- [31] MEKNI, Mehdi a LEMIEUX, André. *Augmented Reality: Applications , Challenges and Future Trends: Applications , Challenges and Future Trends*. 2014. Dostupné také z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15436826>.
- [32] HAVLÍKOVÁ, Kristýna; HOŘEJŠÍ, Petr a KOPEČEK, Pavel. Effect of Augmented Reality Support on Quality Inspection of Welded Structures. *Applied Sciences*. 2023, roč. 13, č. 21, s. 11655. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app132111655>.
- [33] PALMARINI, Riccardo; ERKOYUNCU, John Ahmet; ROY, Rajkumar a TORABMOSTAEDI, Hosein. A Systematic Review of Augmented Reality Applications in Maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018, roč. 49, s. 215-228. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>.
- [34] KESHAV KOLLA, Sri Sudha Vijay a PLAPPER, Peter. Interaction Modalities for Augmented Reality Applications in Manufacturing. 2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.3233/atde230063>.
- [35] LI, Shufei; ZHENG, Pai a ZHENG, Lianyu. An AR-Assisted Deep Learning-Based Approach for Automatic Inspection of Aviation Connectors. *Ieee Transactions on Industrial Informatics*. 2021, roč. 17, č. 3, s. 1721-1731. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/tii.2020.3000870>.
- [36] GOLLOB, Christoph; RITTER, Tim; KRASSNITZER, Ralf; TOCKNER, Andreas a NOTHDURFT, Arne. Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology. Online. *Remote Sensing*. 2021, roč. 13, č. 16. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs13163129>. [cit. 2025-03-29].
- [37] *MI31.1 Digital Twin Marketplace*. Online. CHANGE2TWIN. Change2Twin Marketplace. 2024. Dostupné z: <https://marketplace.change2twin.eu/items/MI31.1/>. [cit. 2024-11-22].
- [38] VISOMETRY GMBH. *Twyn Documentation*. Online. Twyn Documentation. 2024. Dostupné z: <https://docs.visometry.com/twyn/release/2.2.0/#/en/at-a-glance/at-a-glance>. [cit. 2024-12-03].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Rozdělení imerzivních technologií	13
Obrázek 2 Headset pro virtuální realitu Meta Quest 2.....	14
Obrázek 3 Headset pro smíšenou realitu Microsoft HoloLens 2	15
Obrázek 4 Rozdělení imerzivních technologií s názorným příkladem	15
Obrázek 5 Ukázka inspekce zařízení pomocí rozšířené reality	16
Obrázek 6 Interakce rozšířené reality s člověkem, počítačem a prostředím.....	17
Obrázek 7 Apple Vision Pro – MR headset s podporou ARKit	18
Obrázek 8 Vizualizace 3D montážního pracoviště v prostředí továrny.....	19
Obrázek 9 Virtuální návodka pro kontrolu svarových spojů	20
Obrázek 10 Detekce bodů ruky pomocí markerless tracking metody	22
Obrázek 11 Princip a vizualizace dat LiDAR senzoru s jedním paprskem	23
Obrázek 12 Diagram znázorňující princip měření vzdálenosti pomocí LiDARu – metoda doby letu (ToF)	24
Obrázek 13 Hlavní kroky vizuální odometrie.....	25
Obrázek 14 Využití AI based trackingu „YOLOv4“ pro detekci vozidel v dopravě	26
Obrázek 15 Hlavní výzvy AR/VR v průmyslových aplikacích.....	26
Obrázek 16 Postup inspekčního procesu s využitím AR.....	29
Obrázek 17 Zadní pohled na iPad Pro 11" (a), zadní kamera s LiDAR senzorem (b)	33
Obrázek 18 Vytvořený model pro inspekci	34
Obrázek 19 Proces inspekce a generování dokumentace v Twyn Studio a Twyn View	35
Obrázek 20 Úvodní strana aplikace Twyn Studio	36
Obrázek 21 Úvodní strana aplikace Twyn View	37
Obrázek 22 Zobrazení modelu při inspekci v prostředí Twyn View	38
Obrázek 23 Nastavení zobrazení funkcí při inspekci na iPadu.....	39
Obrázek 24 Nastavení parametrů automatické kontroly objektu pomocí Deviation Characteristics v Twyn Studio	40
Obrázek 25 Ukázka volby charakteristiky odchylek při probíhající inspekci	41
Obrázek 26 Nastavení bodů trackingu.....	42
Obrázek 27 Modely pro inspekci (zleva: základní velikost 1×, zvětšeno 1,5×, zvětšeno 2×)	43
Obrázek 28 Zobrazení vizuálního indikátoru neúspěšné detekce.....	44
Obrázek 29 Zobrazení inspekce 2x zvětšeného modelu	45
Obrázek 30 Použitý luxmetr Voltcraft MS-1300	46
Obrázek 31 Přehled inspekčních výsledků v Twyn Studio.....	47

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

2D dvojrozměrný

3D trojrozměrný

AI Umělá inteligence

AR Rozšířená realita

CAD Computer-Aided Design (počítačem podporované konstruování)

OK V pořádku

MR Smíšená realita

NOK Není v pořádku

ToF Time Of Flight

VR Virtuální realita

