

Rozšířená realita v průmyslové kontrole kvality

Kristýna Havlíková ¹, Petr Hořejší ¹, Pavel Kopeček ¹

¹ Západočeská univerzita v Plzni
Univerzitní 2762/22, 306 14, Plzeň, Česká republika

khavliko@fst.zcu.cz

tucnak@fst.zcu.cz

kopecek@fst.zcu.cz

Anotace: Rozšířená realita se řadí mezi klíčové technologie koncepce Průmyslu 4.0. S časem se stále vyvíjí a díky tomu umožňuje podporu různých procesů ve výrobních systémech, mezi které patří také kontrola kvality. Výrobní procesy vyžadují stále vyšší úroveň kvality a minimální chybovost. Rozšířená realita může být jedním ze způsobů podpory operátorů při kontrolních úkolech díky poskytnutí imerzního rozhraní pro zvýšení výkonnosti a přesnosti v oblasti kvality. Cílem této práce je představení přehledu využití rozšířené reality pro oblasti kontroly kvality v průmyslových aplikacích.

1 Úvod

Průmyslové podniky čelí v dnešní době rostoucí konkurenci a dynamicky se rozvíjejícímu ekonomickému prostředí. V důsledku toho jsou nuceny neustále usilovat o zvyšování efektivity a flexibility výrobních procesů. Jedním ze způsobů, které pomáhají tohoto cíle dosahovat, je využití pokročilých digitálních technologií. Vlna automatizace a digitalizace, která se v současné době rozvíjí, je označována jako čtvrtá průmyslová revoluce, nebo také jako „Průmysl 4.0“. Hlavním cílem této transformace je zvýšit provázanost celého výrobního systému využitím rychlého sdílení dat a jednotné komunikace, využití rychlé výměny dat a jednotné konektivity k dosažení větší provázanosti celého výrobního systému.

Mezi moderní technologie podporující rozvoj koncepce Průmyslu 4.0 se řadí rozšířená realita (Augmented Reality – AR). Dále je to například umělá inteligence (Artificial Intelligence – AI) nebo pokročilé techniky informačních a komunikačních technologií (ICT). Kombinace těchto moderních nástrojů umožňuje podnikům poskytovat uživatelům relevantní soubory dat v reálném čase.

Od doby, kdy se ve výrobním prostředí projevuje koncepce Průmyslu 4.0, je stále více výrobních systémů obohaceno o digitální identitu v rámci tzv. „Internet of Things“ (IoT). Tento systém informací je využíván k monitorování a optimalizaci výrobních operací a zajištění vysoké kvality výrobků. Pojem IoT „Industrial Internet of Things“ poté popisuje způsob, jakým by měly být stroje, zařízení, senzory a systémy informačních technologií provázány, aby vytvářely koordinovaný inteligentní výrobní systém.

Lidská pracovní síla hraje ve výrobním procesu nicméně stále zásadní roli a optimální interakce mezi kybernetickým fyzickým systémem a lidskou obsluhou je pro bezproblémový průběh výroby klíčová. Zkoumaná inovativní řešení mají proto za cíl zvýšit transparentnost informací ve výrobním prostředí.

Rychlé a výrazné změny však také mohou zároveň vést k vyšším nárokům na technologické znalosti a zvyšovat míru složitosti úkolů nebo variabilitu úkolů pro operátory [1]. To vede k požadavkům na systémy, které intenzivně využívají technologie umožňující Průmysl 4.0, aby tuto zátěž pro operátory snížily.

Důležitým aspektem Průmyslu 4.0 je syntéza fyzického prostředí a virtuálních prvků. Rozšířená realita je inovativní technologie, která rozšiřuje fyzický reálný svět o vrstvu virtuálních informací. Obecně má potenciál poskytovat lidskému operátorovi správné informace, ve správný čas a na správném místě. Rozvoj rozšířené reality, který se výrazně projevuje zejména v posledních letech, otevírá nové flexibilní možnosti komunikace a interakce mezi člověkem a strojem.

Cílem této práce je podat přehled o rostoucím zájmu o využití rozšířené reality jako podpůrné technologie pro oblast kvality v kontextu Průmyslu 4.0.

2 Rozšířená realita

Ačkoli se zájem o technologie AR v posledních 20 letech rychle rozvíjí a intenzivně zkoumá, první prototyp imerzní reality lze datovat do roku 1968. V tomto roce vynalezl Ivan Sutherland [2] první zařízení HMD (Head-mounted display) připojené k počítači, které poskytlo první zkušenost lidstva s rozšířenou realitou.

Způsob, jakým dnes lidé komunikují s průmyslovou rozšířenou realitou, je ovlivněn tímto vynálezem. Termín rozšířená realita však poprvé oficiálně formuloval až o několik let později v roce 1992 Thomas Caudell, který byl výzkumným pracovníkem společnosti Boeing [2].

Z technického hlediska je rozšířená realita technologie, která překrývá digitální, počítačem generované informace na fyzický svět a obohacuje tak lidský pohled na okolní prostředí. To přináší inovace týkající se interakce člověka s digitálními informacemi a reálným světem.

V literatuře existuje řada definic rozšířené reality. Jednou z nejčastěji používaných definic je pojetí Paula Milgrama, který teoreticky předpokládá existenci různých typů reality, které vytvářejí kontinuum počínající reálným světem a vedoucí ke zcela virtuálnímu světu.

V této definici jsou rozlišována následující prostředí, která schematicky zobrazuje obrázek 1:

- Reálné prostředí (Real Environment – RE)
- Rozšířená realita (Augmented Reality – AR) – jedná se o fyzickou realitu rozšířenou o virtuální prvky.

- Rozšířená virtualita (Augmented Virtuality – AV) – jedná se o virtuální realitu, která je obohacena o reálné prvky.
- Virtuální realita (Virtual Reality – VR) – představuje simulovaný svět, ve kterém je uživatel zcela pohlcen do virtuálního prostředí.



Obrázek 1: Schéma kontinuum realita – virtualita [3]

V roce 1997 Azuma definoval tři hlavní technické charakteristiky rozšířené reality, kterými jsou kombinace reálných a virtuálních objektů, interakce s reálnými a virtuálními objekty v reálném čase a zarovnání virtuálních objektů s reálnými objekty [4].

Z technického hlediska je obecný systém AR sestaven ze systému postaveného na výběru čtyř základních hardwarových komponent: výpočetní jednotky, trackovacího zařízení, zobrazovacího zařízení a vstupního zařízení. Výpočetní jednotka vytváří augmentované modely, řídí připojení zařízení a upravuje polohu překrývaných informací do reálného světa s ohledem na pozici a polohu uživatele s využitím informací pocházejících ze vstupního a trackovacího zařízení. Trackovací zařízení se používá ke sledování přesné polohy a orientace uživatele, aby bylo možné přesně zarovnat augmentace do požadovaných pozic. Vstupní zařízení slouží k získání podnětů z prostředí nebo od uživatelů ke spuštění funkcí augmentace.

Zpracovávaná data jsou vizualizována na zobrazovacím zařízení prostřednictvím uživatelského rozhraní, které posiluje obousměrnou komunikaci mezi uživatelem a systémem. V závislosti na výběru zařízení se může lišit technika překrývání augmentací na scénu uživatele.

V současné době existují tři základní techniky překrývání. Při první technice lze augmentaci promítnout přímo do zorného pole uživatele. Tato metoda se nazývá OST (Optical See Through) a je realizována pomocí optického průhledového HMD. Druhá technika je známá jako VSM (Video See Through). Scéna uživatele je snímána kamerou a zpracovávána počítačem. Po vložení augmentací na zpracovanou scénu se výsledek zobrazí na zobrazovacím zařízení, na kterém uživatel nepřímo sleduje skutečnou scénu. Poslední technikou je projekce obrazu, která přímo promítá augmentace na fyzické objekty [5].

Sledování a registrace jsou zásadními a náročnými aspekty aplikací rozšířené reality. Přesnost sledování a registrace určuje kvalitu zarovnání augmentací. Algoritmy sledování a registrace se dělí do tří skupin: [6]

- algoritmy založené na značkách
- algoritmy bez značek (nebo algoritmy založené na reálných rysech)
- algoritmy založené na modelu.

U sledování založeného na značkách se na skutečné objekty, na které mají být překryty digitální informace, umísťují 2D značky s jedinečnými vzory. Každému markeru na pracovišti je programově přiřazeno digitální rozšíření. Když kamera rozpozná značky, zobrazí se na značce předem přiřazené rozšíření. V některých situacích mohou být značky zakryté a vznikat problémy s rozpoznáváním. Proto se ve sledování založeném na počítačovém vidění často používá sledování založené na přirozených prvcích. Tato technika extrahuje charakteristické body v obrazech, aby bylo možné trénovat detekci těchto bodů systémem AR v reálném čase. Přestože poskytuje bezproblémovou integraci augmentací do reálného světa, sledování přirozených rysů intenzivně závisí na výpočetním výkonu a je pomalejší a méně efektivní na velké vzdálenosti. Proto se ke zmírnění nevýhod používají malé umělé značky, označované jako fiduciální značky, které urychlují počáteční rozpoznávání, snižují výpočetní nároky a zlepšují výkonnost systému. Algoritmy sledování založené na modelech využívají předem definovaný seznam modelů, které jsou následně porovnávány s prvky získanými v reálném čase.

Obecně se základní sestava systému AR skládá ze snímání obrazu, zpracování digitálního obrazu, sledování, zpracování interakce, správy informací, vykreslování a zobrazování. Začíná zachycením snímku kamerou zařízení. Poté následuje krok digitálního zpracování obrazu v softwaru AR, který zpracovává zachycený obraz s cílem odhadnout polohu kamery vzhledem k referenčnímu objektu. Při tomto odhadu lze využít i interní senzory, které pomáhají sledovat referenční objekt. Přesnost určení polohy kamery je pro zobrazování obsahu rozšířené reality zásadní. Poté je zpracovaný obraz vykreslen na příslušnou perspektivu a zobrazí se uživateli na zobrazovacím zařízení. V některých případech, kdy jsou vyžadovány určité vzdálené nebo místní informace, je za přístup k nim zodpovědný modul správy informací. Modul pro zpracování interakcí má umožnit interakci uživatelů s obrazem [2], [7].

3 Kontrola kvality

Vedle nákladů, času a flexibility je kvalita jedním z klíčových rozměrů výrobních atributů, pokud jde o výrobky a procesy. Jejím cílem je zajistit, aby služba nebo konečný výrobek splňovaly specifikace a uspokojovaly požadavky zákazníků.

V současném výrobním prostředí je kvalita výrobků pro výrobce klíčovým aspektem. Nedostatečná kvalita může mít dopad na různých úrovních, včetně přímých finančních ztrát, zvýšeného dopadu na životní prostředí a plýtvání zdroji. Řízení kvality má proto zásadní význam pro výrobní podniky, které si chtějí udržet nebo zlepšit svou provozní a finanční výkonnost [8]. Neuspokojivá kvalita může mít také negativní dopady na pověst společnosti a nespokojenost zákazníků.

Moderní výrobní průmysl navíc musí upřednostňovat udržitelnost svých výrobních procesů a systémů. Tato udržitelnost vyžaduje, aby společnosti

kromě životního prostředí vyvažovaly také ekonomické, sociální a environmentální faktory.

Výrobní systémy často v rozporu s cíli udržitelnosti produkují značné množství ztrát a plýtvání. Týká se to zejména materiálů, výrobního času, energie a dalších zdrojů.

Komplexní řízení kvality (Total Quality Management) je současná nejvyšší úroveň přístupu ke kvalitě v kontextu organizace, která holisticky zohledňuje potřeby interních a externích zákazníků, náklady na kvalitu a rozvoj systému s cílem organizovat a napomáhat zlepšování kvality. Součástí TQM je kontrola kvality (Quality Control), která hraje zásadní roli při plnění technických specifikací [9], [10]. Naproti tomu zajišťování kvality (Quality Assurance) se soustřeďuje spíše na předvýrobní fáze, jako je plánování, návrh, výroba prototypů s cílem zajistit dosažení požadavků na kvalitu výrobních produktů. Mezinárodní norma ISO 9001:2015 popisuje konkrétní standardy systému řízení kvality [10]. Mnoho organizací využívá různé metody a přístupy ke zlepšování výkonnosti kvality, jako jsou TQM, Lean Six-Sigma, analýza FMEA, nebo benchmarking [11].

4 Kontrola kvality s podporou AR

Výrobní podniky musejí používat metody zlepšování kvality, aby vyráběli vysoce kvalitní výrobky s malými ztrátami výkonu. Pro zvýšení produktivity, zlepšení kvality výrobků a procesů, snížení chybovosti nebo vyšší ergonomii v různých fázích výroby může být pro podporu transformace Průmyslu 4.0 použita rozšířená realita. Prostřednictvím AR je možné kombinovat odborné znalosti lidských inspektorů kvality a možnosti strojů, které jsou dostupné například díky automatizovaným systémům zavedeným v moderních výrobních linkách [12], [13].

AR je účinným prostředkem umožňujícím spolupráci člověka a stroje v reálném čase. Využití rozšířené reality je slibným přístupem, který umožní efektivnější a flexibilnější průmyslovou kontrolu kvality [14].

V dostupné literatuře se objevují studie použití AR v oblasti kvality, které ukázaly potenciální výsledky při zvyšování výkonnosti člověka v úlohách technické kontroly kvality, podpoře celkového řízení kvality (TQM) a autonomizaci rozhodování operátorů. Navzdory zmíněným výhodám jsou příklady konkrétní implementace AR ve výrobě, zejména v odvětví kvality, stále omezené [15].

Dostupné výzkumy zkoumaly potenciál rozšířené reality pro průmyslové činnosti především se zaměřením na montážní a údržbové úkoly [16]. Méně pozornosti bylo dosud věnováno průmyslové kontrole kvality. Poznatky z jedné oblasti výrobních činností však nelze snadno přenést na jiné oblasti z důvodu jejich individuálních a odlišných charakteristik. Nedostatek výzkumů zkoumajících inspekci kvality založenou na AR je v kontrastu s jejím prokazatelným významem a výzvami.

Provádění vizuální kontroly je úkol, který vyžaduje značné fyzické a mentální úsilí [17]. AR je účinným prostředkem umožňujícím spolupráci člověka a stroje v reálném čase. Využití rozšířené reality je proto potenciálně přístup, který může umožnit efektivnější a flexibilnější kontrolu kvality v průmyslovém prostředí.

Stávající výzkum zkoumá, jak může rozšířená realita zvýšit kvalitu dílů nebo hotových výrobků. AR lze využít k poskytování obecných pokynů krok za krokem, které mají zaručit kvalitu výrobku. Může být také použita k asistenci při specifické práci kontrolorů kvality, kteří mají za úkol vizuálně zkontrolovat hotový díl nebo výrobek. Vizualizuje pak potenciální vady výrobku a vede pozornost pracovníka na tato místa.

Rozšířená realita (AR) se výrazně prosadila v průmyslu jako přirozené a flexibilní rozhraní pro interakci člověka se strojem. Modely, animace a rozšířená data lze vizualizovat prostřednictvím zařízení rozšířené reality, aby se zlepšil tok práce, zajistila se bezpečnost nebo usnadnit nácvik dovedností. Díky vestavěným pokročilým algoritmům, jako je hluboké učení (Deep Learning) a počítačové vidění (Computer Vision), může rozšířená realita podporovat rozhodovací činnosti a přeměnit pracovníky na smart pracovníky nebo smart operátory [18].

Ferraguti a kol. [15] vyvíjeli rozhraní pro AR HDM k hodnocení kvality leštících procesů. Navržený systém promítal metrologická data přímo na fyzický výrobek. Systém tak umožňoval posoudit kvalitu povrchu výrobku a proces leštění. V této studii nebylo provedeno žádné hodnocení týkající se výkonnosti provedení úkolu nebo lidského faktoru.

Munoz a kol. [12] používali AR HMD k překrytí výsledků systému detekce vad na panelech karoserie automobilu. Autoři testovali systém AR ve srovnání s tabletem. Řešení AR prokazatelně zvýšilo přesnost zadávání nových závad, výsledky ale také naznačily, že varianta s tabletem byla přínosnější pro identifikaci stávajících závad. Vzhledem k tomu, že chybí statistická analýza simulovaného testu v terénním výzkumu, poskytují tyto výsledky pouze východiska pro další výzkum.

Práce Runjiho a kol. [13] se zaměřovala na způsob zobrazení informací o kvalitě. Tento výzkum se zabývá osazováním desek s plošnými spoji. Autoři vyvinuli systém AR HMD, který překrýval výsledky optických kontrol a porovnával je s mobilními systémy AR.

Li a kol. [19] použili AR ke zvýraznění neshodných montážních prvků v letectví. Systém automaticky varoval obsluhu o chybě, nicméně výzkum nehodnotil systematicky dopady na výkonnost uživatelů.

Související výzkum provedli také Antonelli a Astanin [20], kteří překrývají obrazy svarů a jejich vlastností na obraz z kamery tabletu. Podobně Hube a kol. [21] navrhuje rozhraní pro mobilní zařízení AR, které promítá informace související s kvalitou na povrch součástí vozidel. Ani jedna z těchto dvou studií však nehodnotí výkonnost nebo lidský faktor.

Marino a kol. [22] vyvíjeli, testovali a hodnotili mobilní systém rozšířené reality, který vizualizuje nesrovnalosti mezi návrhem a realizací průmyslových potrubních systémů. Podobný přístup představil Mascarenas a kol., kteří se však zaměřovali na oblast stavebnictví [23]. AR zařízení byla také úspěšně kombinována s metodami computer vision pro detekci a vizualizaci poškození konstrukcí [24].

5 Závěr

Cílem této práce bylo přispět k současnému výzkumu poskytnutím pohledu na systémy rozšířené reality a aplikace založené na rozšířené realitě ve výrobě, zejména se zaměřením na procesy zaměřené na kontrolu kvality.

Z provedené rešerše literatury ve zkoumané oblasti kontroly kvality s podporou rozšířené reality vyplynulo, že byla navržena, vyvinuta a zkoumána řada systémů rozšířené reality v průmyslových aplikacích. Kontrole kvality byla však zároveň v dostupné odborné literatuře věnována jen omezená pozornost a řada autorů vyzývá k rozšíření dostupného výzkumu v této oblasti [25].

Kontrola kvality a činnosti související s kvalitou jsou důležité pro zajištění specifikací zákazníka. Kvalita je však zároveň odvětví, které patří k činnostem, které nepřidávají hodnotu výrobku. Čím kratší je doba trvání kontrolních činností, tím více zdrojů je možné ušetřit a zvýšit efektivitu celého výrobního procesu.

Technologie AR dosáhla stupně vspělosti, kdy je možné ji z hlediska software i hardware zapojovat pro reálná průmyslová řešení. Rozšířená realita má potenciál efektivně podpořit snižování počtu lidských chyb a času výrobního procesu.

Z dostupných výzkumů vyplývá, že použitelnost a úspěšnost zavedení inovativních systémů AR podpory kontroly kvality závisí na úrovni znalostí uživatelů. Jejich schopnosti, dovednosti a znalosti této technologie a souvisejících relevantních principů jsou zásadní pro návrh a vývoj vhodných systémových funkcí pro aplikace AR v oblasti průmyslové kvality. S touto skutečností souvisí také obecně úspěch AR v průmyslové kvalitě v dlouhodobém horizontu.

Poděkování

Příspěvek byl vytvořen za podpory projektu SGS-2021-028 s názvem "Vývojové a tréninkové prostředky pro interakci člověka a kyber-fyzického výrobního systému" řešeného v rámci Interní grantové agentury Západočeské univerzity v Plzni.

Použitá literatura

- [1] J. Egger and T. Masood, "Augmented reality in support of intelligent manufacturing – A systematic literature review," *Comput Ind Eng*, vol. 140, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.CIE.2019.106195.
- [2] R. Azuma, "Overview of Augmented Reality Definition of Augmented Reality (1) Definition of Augmented Reality (1)", Accessed: Nov. 27, 2021. [Online]. Available: <http://www.cs.unc.edu/~azuma/>
- [3] P. Milgram, "A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration Augmented Reality through Graphic Overlays on Stereoscopic video View project," 2001, doi: 10.1007/978-3-642-87512-0_1.
- [4] R. T. Azuma, "A survey of augmented reality," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355–385, 1997, doi: 10.1162/PRES.1997.6.4.355.
- [5] J. P. Rolland and H. Fuchs, "Optical versus Video See-Through Head-Mounted Displays," *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*, pp. 129–172, Nov. 2001, doi: 10.1201/9780585383590-10.
- [6] A. Y. C. Nee and S. K. Ong, "Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 9, pp. 15–26, Jan. 2013, doi: 10.3182/20130619-3-RU-3018.00637.
- [7] T. Masood and J. Egger, "Adopting augmented reality in the age of industrial digitalisation," *Comput Ind*, vol. 115, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.COMPIND.2019.07.002.
- [8] V. K. Pathak, A. K. Singh, M. Sivadasan, and N. K. Singh, "Framework for Automated GD&T Inspection Using 3D Scanner," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 99, no. 2, pp. 197–205, Apr. 2018, doi: 10.1007/s40032-016-0337-7.
- [9] A. V. Gurjanov, V. I. Babenkov, A. V. Shukalov, I. O. Zharinov, and O. O. Zharinov, "Total quality control of the cyber-physical production using machine vision technologies," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, May 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1889/5/052014.
- [10] R. Sanchez-Marquez, J. M. Albarracín Guillem, E. Vicens-Salort, and J. Jabaloyes Vivas, "Diagnosis of quality management systems using data analytics – A case study in the manufacturing sector," *Comput Ind*, vol. 115, p. 103183, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.COMPIND.2019.103183.
- [11] N. D. M. Phan, Y. Quinsat, S. Lavernhe, and C. Lartigue, "Scanner path planning with the control of overlap for part inspection with an industrial robot," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018 98:1, vol. 98, no. 1, pp. 629–643, Jun. 2018, doi: 10.1007/S00170-018-2336-8.

- [12] A. Muñoz, X. Mahiques, J. E. Solanes, A. Martí, L. Gracia, and J. Tornero, "Mixed reality-based user interface for quality control inspection of car body surfaces," *J Manuf Syst*, vol. 53, pp. 75–92, Oct. 2019.
- [13] J. M. Runji, Y. J. Lee, and C. H. Chu, "Systematic Literature Review on Augmented Reality-Based Maintenance Applications in Manufacturing Centered on Operator Needs," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 2022 10:2*, vol. 10, no. 2, pp. 567–585, Jun. 2022, doi: 10.1007/S40684-022-00444-W.
- [14] D. K. Baroroh, C. H. Chu, and L. Wang, "Systematic literature review on augmented reality in smart manufacturing: Collaboration between human and computational intelligence," *J Manuf Syst*, vol. 61, pp. 696–711, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2020.10.017.
- [15] F. Ferraguti *et al.*, "Augmented reality based approach for on-line quality assessment of polished surfaces," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 59, pp. 158–167, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2019.04.007.
- [16] E. Bottani and G. Vignali, "Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade," *IISE Trans*, vol. 51, no. 3, pp. 284–310, Mar. 2019, doi: 10.1080/24725854.2018.1493244.
- [17] S. Howard *et al.*, "Visual inspection with augmented reality head-mounted display: An Australian usability case study," *Hum Factors Ergon Manuf*, vol. 33, no. 3, pp. 272–296, May 2023, doi: 10.1002/hfm.20986.
- [18] Y. Yin, P. Zheng, C. Li, and L. Wang, "A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic human-centric industry transformation," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 81, p. 102515, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.RCIM.2022.102515.
- [19] S. Li, P. Zheng, and L. Zheng, "An AR-Assisted Deep Learning-Based Approach for Automatic Inspection of Aviation Connectors," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 17, no. 3, pp. 1721–1731, Mar. 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3000870.
- [20] D. Antonelli and S. Astanin, "Enhancing the quality of manual spot welding through augmented reality assisted guidance," *Procedia CIRP*, vol. 33, pp. 556–561, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.06.076.
- [21] N. Hube, M. Müller, J. Wojdziak, F. Hannß, and R. Groh, "Towards Augmented Reality in Quality Assurance Processes," 2018, doi: 10.1145/3210438.3210442.
- [22] E. Marino, L. Barbieri, B. Colacino, A. K. Fleri, and F. Bruno, "An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments," *Comput Ind*, vol. 127, p. 103412, May 2021, doi: 10.1016/J.COMPIND.2021.103412.
- [23] D. D. L. Mascareñas *et al.*, "Augmented reality for next generation infrastructure inspections," *Struct Health Monit*, vol. 20, no. 4, pp. 1957–1979, Sep. 2020, doi: 10.1177/1475921720953846.

- [24] Z. Wang *et al.*, “User-oriented AR assembly guideline: a new classification method of assembly instruction for user cognition,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 112, no. 1–2, pp. 41–59, Jan. 2021, doi: 10.1007/S00170-020-06291-W.
- [25] U. Urbas, D. Ariansyah, J. A. Erkoyuncu, and N. Vukašinović, “Augmented reality aided inspection of gears,” *Tehnicki Vjesnik*, vol. 28, no. 3, pp. 1032–1037, 2021, doi: 10.17559/TV-20200728151912.