AR jako narzędzie wizualizacji modeli CAD w fazie prototypowania – przegląd darmowych rozwiązań

Aleksandra Gryc

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: 94924@student.pb.edu.pl

Wojciech Kucharczyk

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: 94927@student.pb.edu.pl

Klaudia Tomaszewska

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

e-mail: k.tomaszewska@pb.edu.pl

DOI: 10.65731/az-2026-0009

Streszczenie

W dobie cyfrowej transformacji procesów wytwórczych (Przemysł 4.0), technologie rzeczywistości rozszerzonej (Augmented Reality) zyskują na znaczeniu jako kluczowy element technologii wspierający procesy naukowo-badawcze. Celem niniejszej pracy jest analiza darmowych narzędzi rozszerzonej rzeczywistości wspierających wizualizację modeli wspomagania komputerowego. W pracy dokonano przeglądu literatury oraz zaprezentowano ocenę wybranych aplikacji AR takich jak Planner 5D, eDrawings, Onshape czy Shapr 3D. Wyniki badań wskazują na wyraźny podział dostępnych rozwiązań na aplikacje konsumencko-wizualizacyjne, cechujące się wysoką intuicyjnością i obsługą formatów siatkowych (mesh), oraz profesjonalne narzędzia inżynierskie, oferujące precyzję i obsługę formatów bryłowych (solid) takich jak STEP, lecz wymagające specjalistycznej wiedzy. Analiza wykazała istotne ograniczenia wersji bezpłatnych, obejmujące między innymi limity eksportu plików, brak możliwości zapisu czy wymuszoną jawność projektów. Sformułowane wnioski potwierdzają, że technologia rozszerzonej rzeczywistości wspiera proces prototypowania i redukcję kosztów. Dobór darmowego narzędzia musi być ściśle powiązany z konkretnymi potrzebami

projektowymi, gdyż nie istnieje uniwersalne bezpłatne rozwiązanie spełniające wszystkie wymogi użytkownika, bez względu na stopień jego zaawansowania w projektowaniu.

Słowa kluczowe

rzeczywistość rozszerzona, modele CAD, prototypowanie

Wstęp

Rozszerzona rzeczywistość (Augmented Reality w dalszej części określana skrótem AR) staje się coraz bardziej popularnym podejściem na ukazanie otoczenia w sposób innowacyjny. AR jest systemem łączącym świat rzeczywisty z obrazem generowanym komputerowo [Billinghurst i in., 2015]. Zazwyczaj w rozwiązaniach tego typu wykorzystuje się obraz z kamery, na który w czasie rzeczywistym nakładana jest grafika trójwymiarowa. Rozszerzona rzeczywistość stała się niezwykle pomocnym narzędziem w projektowaniu oraz inżynierii. Pozwala ona na wizualizację produktu, jego wymiarów, specyfikacji oraz wyglądu jeszcze przed jego fizycznym wyprodukowaniem. Dzięki temu inżynierowie mogą w immersyjny sposób przeanalizować różnego rodzaju prototypy i w szybki sposób dokonać zmian czy poprawek bez konieczności czekania na wytworzenie nowej części. Kluczowym elementem rozszerzonej rzeczywistości jest CAD (Computer-Aided Design) – komputerowe projektowanie wspomagane, polegające na wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania do tworzenia precyzyjnych modeli dwuwymiarowych i trójwymiarowych [Nowak i Ziętak, 2023]. W procesie projektowym umożliwia przeprowadzenie analizy, wizualizację oraz szybkie wprowadzenie zmian w projekcie. Takie udogodnienia prowadzą do skrócenia czasu projektowania i obniżenia kosztów dzięki elastyczności, dokładności oraz wydajności projektowania CAD.

Zaawansowana technologia rozszerzonej rzeczywistości jest coraz częściej wykorzystywana w przestrzeni przemysłowej [Caudell i Mizell, 1992], projektowej, produkcyjnej. Dla zwykłego konsumenta wciąż może być czymś niedostępnym lub trudnym w użyciu. Na rynku pojawia się coraz więcej programów i aplikacji, przeznaczonych do użytkowania w życiu codziennym. Wiele z tych rozwiązań pozwala użytkownikom na wygodne korzystanie z AR, lecz nie wszystkie spełniają swoje funkcje w odpowiednim stopniu. Dlatego przeprowadzono badanie, którego celem była analiza darmowych narzędzi rzeczywistości rozszerzonej wspierających wizualizację modeli CAD [Azuma, 1997, s. 356; Nee i in., 2012, s. 658-660]

1. Przegląd literatury

Niniejszy rozdział stanowi przegląd literatury przedmiotu, mający na celu przybliżenie aktualnego stanu wiedzy w zakresie systemów rzeczywistości rozszerzonej, wirtualnej oraz mieszanej. Dotychczasowy dorobek naukowy koncentruje się przede wszystkim na fundamentach teoretycznych, takich jak kontinuum wirtualności [Milgram i Kishino, 1994] oraz prace [Azuma, 1997], definiujące kryteria niezbędne do poprawnej integracji obu światów w czasie rzeczywistym. Pomimo licznych studiów przypadków dotyczących wydajności sprzętowej [Zhou i in. 2008], wciąż zauważalne są istotne luki badawcze, szczególnie w zakresie interfejsów angażujących zmysły dotyku, węchu czy smaku oraz ich wpływu na ergonomię pracy.

Rzeczywistość rozszerzona stanowi zaawansowane rozwiązanie informatyczne, którego celem jest wzbogacenie naturalnego pola percepcji użytkownika o elementy generowane komputerowo. W przeciwieństwie do systemów w pełni wirtualnych, technologia AR nie zastępuje środowiska fizycznego, lecz nakłada na nie cyfrowe warstwy informacyjne, tworząc spójną i interaktywną przestrzeń hybrydową. Ważnym punktem odniesienia w literaturze przedmiotu pozostaje klasyczna definicja Ronalda Azumy. Według autora, system rzeczywistości rozszerzonej musi spełniać trzy fundamentalne kryteria: łączenie świata realnego z wirtualnym, zapewnienie interakcji w czasie rzeczywistym oraz precyzyjną rejestrację obiektów w przestrzeni trójwymiarowej [Azuma, 1997, s. 356].

Wirtualna rzeczywistość (Virtual Reality; VR) jest rzeczywistością, która nie istnieje w sposób fizyczny, natomiast jest stworzona wirtualnie, lecz tak realistycznie, że wydaje się rzeczywista. Mieszana rzeczywistość (Mixed Reality; MR) jest rzeczywistością, w której obiekty świata rzeczywistego i wirtualnego są prezentowane wspólnie w obrębie jednego systemu wyświetlania. Rzeczywistość wirtualna oraz rzeczywistość mieszana wchodzą w skład rozszerzonej rzeczywistości. Każda z nich różni się od siebie, natomiast mają wspólny cel – wytworzenie efektów cyfrowych pozwalających na zetknięcie się z wirtualnym światem [Nikolay i in., 2023, s. 4-6]

Relację zachodzącą pomiędzy środowiskiem rzeczywistym, a wirtualnym najlepiej obrazuje model kontinuum wirtualności (rys. 1). Pokazuje on, w jaki sposób technologie rzeczywistości rozszerzonej i mieszanej wypełniają przestrzeń pomiędzy bezpośrednią obserwacją otoczenia a całkowitym pochłonięciem w świecie cyfrowym. Schemat ukazuje, że rzeczywistość rozszerzona jest bliżej świata realnego niż wirtualnego.



Rys. 1. Kontinuum rzeczywistość - wirtualność (Reality – Virtuality Continuum)
Źródło: opracowanie własne na podstawie Paul Milgram, Fumio Kishino [1994] „A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays", s. 2-4

Współczesna inżynieria oraz procesy projektowe stają przed wyzwaniem skrócenia czasu wprowadzenia produktu na rynek przy jednoczesnym zachowaniu najwyższych standardów jakości. Tradycyjne metody opierające się na fizycznych modelach testowych są coraz częściej zastępowane przez zaawansowane systemy wizualizaji cyfrowej. W tym kontekście technologie rzeczywistości rozszerzonej stają się kluczowym narzędziem wspierającym cykl życia produktu.

AR definiowane jako zaawansowane rozwiązanie informatyczne umożliwiające połączenie świata realnego z wirtualnym, oddziałując na zmysły wzroku i słuchu w czasie rzeczywistym, odgrywa ważną rolę w procesach projektowych oraz inżynierskich. W inżynierii umożliwia zapisanie wiedzy w formie modelu geometrycznego CAD bezpośrednio na fizycznych obiektach (przykładowo montaż skomplikowanych maszyn). Z kolei, rzeczywistość wirtualna, generująca w pełni cyfrowy świat, znajduje zastosowanie w sytuacjach wymagających całkowitej immersji na przykład symulacje niebezpiecznych zdarzeń. Relację między tymi technologiami najlepiej obrazuje koncepcja „kontinuum wirtualności", gdzie rzeczywistość mieszana stanowi obszar łączący realność z wirtualnością.

Wiedza ekspercka zgromadzona w powstających modelach umożliwia łatwiejsze zastosowanie [Linowes i Babiński, 2020] w projektowaniu, przenosząc ciężar operacyjny do interaktywnej przestrzeni trójwymiarowej. Wykorzystanie technologii immersyjnej umożliwia efektywne oddanie charakteru przestrzeni danego modelu w skali 1:1. Umożliwiają nakładanie wirtualnych elementów na makiety fizyczne, co pozwala na szybkie i bezkosztowe testy bez konieczności wytwarzania fizycznego egzemplarzu. Omówione technologie umożliwiają pracę nad jednym projektem osobom rozmieszczonych geograficznie oraz manipulowanie tym samym modelem. Co więcej, realizują założenie uzupełniania rzeczywistości o interaktywne elementy, bezpośrednio wspierając proces projektowy.

Szczegółowe zestawienie parametrów omawianych rozwiązań zostało zaprezentowane w tabeli 1. ozwala to na identyfikację różnic w podejściu do interakcji z modelem cyfrowym – od prostych systemów opartych na urządzeniach mobilnych po zaawansowane gogle VR, zapewniające pełną izolację od bodźców zewnętrznych. Z perspektywy inżynierskiej istotne jest rozróżnienie metod wizualizacji oraz wymaganych czujników, które warunkują precyzję nakładania modeli CAD na obiekty rzeczywiste.

Tab. 1. Porównanie technologii rozszerzonej rzeczywistości (AR), mieszanej (MR) i wirtualnej (VR)

Cecha	**Smartfony i tablety (Mobile AR)**	**Okulary AR/MR (np. HoloLens, Magic Leap)**	**Gogle VR (np. Meta Quest, HTC Vive)**
Główny cel	Masowy dostęp, proste instrukcje serwisowe	Praca inżynierska "hands-free"	Prototypowanie wirtualne, symulacje, szkolenia
Metoda wizualizacji	Ekran urządzenia (widok przez kamerę)	Wyświetlacze przezierne (optyczne nakładanie na świat rzeczywisty)	Nieprzezroczyste ekrany
Wymagane czujniki	Kamera RGB, akcelerometr, żyroskop, GPS	Kamery głębi (LiDAR/ToF), IMU, śledzenie dłoni i wzroku	Zewnętrzne stacje bazowe lub inside-out (kamery śledzące), kontrolery
Wymagania programowe	Android (ARCore), iOS (ARKit)	Windows Holographic/Mixed Reality, Unity/Unreal Engine	Android/Windows, SteamVR, OpenXR, Unity/Unreal
Stopień swobody (DoF)	6 DoF (z SLAM w nowszych modelach)	Pełne 6 DoF + mapowanie przestrzenne	6 DoF (głowa + kontrolery)
Przykłady urządzeń	iPhone 15+, Samsung Galaxy S24, iPad Pro	Microsoft HoloLens 2, Magic Leap 2, Apple Vision Pro	Meta Quest 3, HTC Vive Pro 2, Valve Index

Źródło: opracowanie własne na podstawie taksonomii Milgrama i Kishino.

W tabeli 1 przedstawiono porównanie współczesnych technologii rozszerzonej rzeczywistości. Została ona opracowana na podstawie analizy specyfikacji technicznych wiodących platform sprzętowych oraz klasyfikacji systemów rzeczywistości

mieszanej. Zestawienie uwzględnia aspekty konstrukcyjne, takie jak wymagane sensory oraz standardy programowe, które determinują poziom zanurzenia użytkownika w środowisku cyfrowym.

2. Metodyka badań

Proces badawczy przeprowadzony na potrzeby niniejszego artykułu składał się z trzech głównych etapów: przeglądu literatury przedmiotu, selekcji i analizy narzędzi AR oraz syntezy wyników.

W pierwszym etapie dokonano przeglądu literatury naukowej dotyczącej technologii AR i systemów CAD. Poszukiwano publikacji związanych z tematyką rozszerzonej rzeczywistości, aplikacji AR w inżynierii oraz wizualizacji modeli trójwymiarowych. Szczególną uwagę zwrócono na prace definiujące fundamenty teoretyczne AR [Azuma, 1997; Milgram i Kishino, 1994] oraz współczesne zastosowania w procesach projektowych i prototypowych. Drugi etap obejmował identyfikację i selekcję darmowych narzędzi AR wspierających wizualizację modeli CAD. Kryteriami doboru aplikacji były: dostępność wersji bezpłatnej, obsługa formatów CAD (STEP, STL, OBJ), funkcjonalność AR oraz dostępność na platformach mobilnych lub webowych. Informacje o aplikacjach pozyskiwano ze stron producentów, oficjalnej dokumentacji technicznej oraz portali branżowych. Do szczegółowej analizy wybrano następujące narzędzia: Planner 5D, eDrawings, Onshape, Shapr3D, Assemblr, AR Code, BIMx, SketchUp, uMake oraz Vectorworks. Trzeci etap polegał na analizie porównawczej wybranych aplikacji pod kątem następujących parametrów: obsługiwane formaty plików, dostępne funkcje w wersji darmowej, ograniczenia bezpłatnego użytkowania, intuicyjność interfejsu oraz wymagania sprzętowe. Dane pozyskiwano z dokumentacji producenta, testów praktycznych oraz specyfikacji technicznych dostępnych na stronach internetowych aplikacji.

Celem niniejszej pracy jest analiza darmowych narzędzi AR wspierających wizualizację modeli CAD w prototypowaniu z naciskiem na rozwiązania darmowe, które uwzględnią potencjał oraz ograniczenia. Głównym elementem problemu badawczego jest weryfikacja wyselekcjonowanych narzędzi. Szczegółowe cele obejmują identyfikację darmowych narzędzi AR, ocenę ich kompatybilności z formatami CAD (STEP, STL, OBJ), analizę funkcji wizualizacyjnych oraz wskazanie braków funkcjonalnych w opcjach bezpłatnych.

Artykuł ma charakter przeglądowo-analityczny i opiera się na badaniach jakościowych. Przeprowadzono systematyczną analizę literatury przedmiotu z baz naukowych (Google Scholar) oraz źródeł branżowych dotyczących AR w CAD. Wyniki analizy zostały usystematyzowane i przedstawione w formie opisowej

z podziałem na kategorie użytkowników (konsumenci, profesjonaliści) oraz zastosowań (wizualizacja, projektowanie, prezentacja).

3. Wyniki badań

Przetestowano łącznie 12 aplikacji/programów: Assemblr, AR Code, Shapr 3D, SketchUp, AutoCAD (Mobile App), eDrawings, Onshape, BIMx, Fu-sion 360 (Mobile), Vectorworks Nomad, uMake, Planner 5D.

Tab. 2. Porównanie możliwości techniczne aplikacji pod względem AR

Aplikacja	AR Trigger – czynnik wyzwalający model CAD w przestrzeni	Interakcja AR	Wsparcie AR
Assemblr	Wykrywanie płaszczyzny w otoczeniu lub kodu QR, markera	Proste modele i ich animacje; możliwość wyświetlania wideo oraz tekstu w przestrzeni; interaktywne przyciski funkcyjne	Własny silnik oparty na silniku Unity
AR Code	Kod QR lub specjalny symbol tzw. AR Logo	Wyświetlanie modelu, tekstu lub wideo z możliwością obracanie i przesuwania w każdej płaszczyźnie	WebAR
Shapr3D	Wykrywanie płaszczyzny w otoczeniu	Modelowanie w AR w czasie rzeczywistym; widok materiałów PBR (Physically Based Rendering); okluzja otoczenia (symulacja realistycznego cieniowania)	ARKit - LiDAR
SketchUp	Wykrywanie płaszczyzny w otoczeniu	Skalowanie 1:1 (dopasowanie modelu do otoczenia w jego realnych wymiarach); warstwy (możliwość przechodzenia między warstwami projektu), sceny – dodatkowe opcje zmiany realnego otoczenia; realistyczne cienie słoneczne wywołane przez model 3D	ARKit, ARCore, HoloLens poprzez Trimble Connect)
AutoCAD-aplikacja mobilna	Wykrywanie płaszczyzny w otoczeniu	Podgląd 2D/3D (szybkie przełączanie między wymiarami); pomiary - możliwość zwymiarowania modelu podczas projekcji AR; warstwy	ARKit, ARCore
eDrawings	Kod QR umieszczony na płaszczyźnie - marker / wykrywanie płaszczyzny w otoczeniu	Eksplodowanie, rozstrzelenie – rozbicie modelu na małe elementy; przekroje - możliwość wizualizacji przekrojów elementu; obracanie modelu w każdej płaszczyźnie	ARKit, ARCore

Aplikacja	AR Trigger – czynnik wyzwalający model CAD w przestrzeni	Interakcja AR	Wsparcie AR
Onshape	Wykrywanie płaszczyzny w otoczeniu	Podgląd aktualizacji na żywo - wprowadzane zmiany modelu od razu są widoczne w otoczeniu AR; mate connectors – technologia pozwalająca na łatwe określenie w jaki sposób elementy łączą się ze sobą np. połączenie sworznia z tuleją	ARKit, ARCore
BIMx	Wykrywanie płaszczyzny w otoczeniu	Wirtualny spacer – model pozostaje na swoim miejscu nawet w przypadku ruchu użytkownika co pozwala na obejście go; informacje o obiekcie w formie prostych i zrozumiałych tagów; suwak 2D/3D pozwalający na szybką zmianę widoku	ARKit, ARCore, Google Cardboard
Fusion 360 – wersja mobilna	Wykrywanie płaszczyzny w otoczeniu	Podgląd elementu w każdej płaszczyźnie; komentarze (szpilki) wyświetlane bezpośrednio na modelu; właściwości- możliwość sprawdzenia parametrów elementu np. materiałów z jakich ma być wykonany	ARKit, ARCore
Vectorworks Nomad	Wykrywanie płaszczyzny w otoczeniu	Skalowanie modelu CAD; Multi-user AR - możliwość oglądania modelu przez wielu użytkowników jednocześnie (model pozostaje w tym samym miejscu bez względu na wielu użytkowników)	ARKit, ARCore
uMake	Wykrywanie płaszczyzny w otoczeniu	Szkicowanie w AR – model tworzy się na zasadzie rysowania w przestrzeni; teksturowanie – możliwość zmieniania materiału modelu; proste bryły - program przystosowany jest do sprawnego modelowania niezłożonych brył	ARKit – tylko iOS (iPhone Operating System)
Planner 5D	Skanowanie pomieszczenia - technologia LiDAR	Umeblowanie – program pozwala na wyświetlenie pełnego umeblowania pomieszczenia (wiele elementów jednocześnie); skanowanie ścian – możliwość automatycznego utworzenia wirtualnego skanu pomieszczenia; zmiana tekstur – szybka zmiana np. materiałów, z którego wykonane są meble	ARKit - LiDAR, ARCore

Źródła: opracowanie własne na podstawie dokumentacji producentów aplikacji

Zestawione aplikacje demonstrują szerokie spektrum zastosowań technologii AR oraz modelowania CAD [Skórska, 2017]. Istotną różnicą między aplikacjami jest metoda osadzenia modelu w przestrzeni (od markerów do technologii LiDAR,

Light Detection and Ranging, czyli wykrywania i pomiaru odległości za pomocą światła). Kolejną różnicą jest poziom interakcji użytkownika, różne narzędzia oferują zróżnicowane rozwiązania. Wspólnym mianownikiem aplikacji pozostaje dążenie do jak najbardziej realistycznej prezentacji obiektów poprzez między innymi symulację oświetlenia, zwiekszając wartość poznawczą modelu.

Tab. 3. Porównanie wymagań stawianych użytkownikom

Aplikacja	Obsługiwane formaty	Wymagania sprzętowe	Intuicyjność obsługi
Assemblr	FBX, OBJ	Niskie	Bardzo wysoka (osoby, które nie miały styczności z tego typu oprogramowaniem poradzą sobie z obsługą)
AR Code	GLB, USDZ, STL, OBJ, FBX.	Niskie (przeglądarka internetowa)	Wysoka
Shapr3D	STEP, IGES, X_T, STL, DXF	Wysokie (iPad Pro z czipem M1/M2 - zalecenie producenta)	Średnia (wymaga nauki modelowania CAD)
SketchUp	SKP, DWG, DXF	Średnie	Wysoka (bardzo intuicyjny, użytkownik nie ma problemu z obsługą aplikacji)
AutoCAD-aplikacja mobilna	DWG, DXF, PDF	Niskie / Średnie	Średnia
eDrawings	SLDPRT, SLDASM, STEP	Niskie	Wysoka (kontrola za pomocą prostych gestów)
Onshape	Native (Cloud), STEP	Średnie (wymaga wydajnego procesora (CPU) do renderingu)	Niska (wymaga wiedzy z modelowania na poziomie inżynierskim)
BIMx	BIMx Hyper - model pochodzący z Archicad	Wysokie (dla dużych obiektów)	Wysoka (obsługa programu przypomina grę komputerową)
Fusion 360 – wersja mobilna	F3D, STEP, USDZ	Średnie	Niska (obsługa wymaga profesjonalnej znajomości modelowania CAD)
Vectorworks	VWX, PDF	Średnie	Średnia
uMake	OBJ, STEP, IGES	Średnie (iPad)	Średnia (użytkownik musi posiadać wiedzę z zakresu rysunku)
Planner 5D	Własny format	Wysokie (ze względu na skanowanie pomieszczenia)	Bardzo wysoka (aplikacja przystosowana dla amatorów w zakresie modelowania oraz AR)

Źródła: opracowanie własne na podstawie dokumentacji producentów aplikacji

Analiza dostępnych rozwiązań AR pokazała, że można wyodrębnić trzy główne grupy: profesjonalne edytory – wymagają wydajnego sprzętu i dużych umiejętności (Shapr3D, uMake); narzędzia wizualizacyjne – narzędzia o wysokim stopniu intuicyjności (BIMx, eDrawings); platformy amatorskie/edukacyjne – narzędzia o bardzo niskim progu wejścia (Assemblr, Planner 5D).

Tab. 4. Porównanie finansowe ograniczeń oprogramowań

Aplikacja	Platforma	Cennik /zakres	Ograniczenia darmowego konta	Obsługa zespołowa	Online /offline
Assemblr	Web, aplikacja mobilna	Freemium (subskrypcja ~200zł/mc)	Znaki wodne występujące w wielu miejscach; mało miejsca na dysku internetowym do zapisywania projektów	TAK (współdzielone projekty)	Online/ Offline
AR Code	Web, Web AR	Płatna aplikcja (dostępny darmowy okres próbny)	Skanowanie ze znakiem wodnym; ograniczona ilość skanów kodów QR	TAK (dashboard)	Online
Shapr3D	iOS (iPad), Windows, MacOS	Freemium / Subskrypcja (~1500 zł/rok)	Max 2 projekty, brak eksportu CAD, niska jakość tekstur	TAK (chmura)	Offline
SketchUp	Web, iOS, Android, PC	Freemium (Viewer Free; Go ~500 zł/rok)	Viewer tylko podgląd; Web brak AR; iPad płatny po trialu	TAK (chmura, komentarze)	Online/ Offline
Auto-CAD-aplikacja mobilna	Web, iOS, Android, PC	Subskrypcja (~250 zł/rok za mobile)	Tryb „Tylko do odczytu" (brak edycji i zapisu zmian)	TAK (chmura)	Offline
eDrawings	iOS, Android, PC	Płatna aplikacja (jednorazowo ~50 zł)	Viewer: Darmowy (bez AR/przekrojów	NIE	Offline
Onshape	Web, iOS, Android	Całkowicie darmowa (Public) / Pro	Free - wszystkie projekty są jawne (Public);	TAK (zmiany w czasie rzeczywistym)	Online
BIMx	iOS, Android, Web, Desktop	Całkowicie darmowa	Free - pełna nawigacja; Pro- Tylko dla subskrybentów Graphisoft	TAK (chmura)	Offline

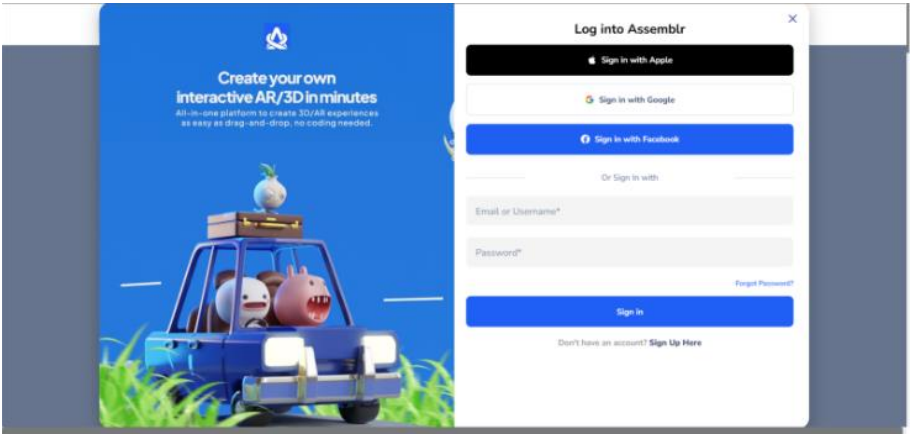
Aplikacja	Platforma	Cennik /zakres	Ograniczenia darmowego konta	Obsługa zespołowa	Online /offline
Fusion 360 – wersja mobilna	PC, Mac, iOS, Android	Darmowa (Hobby) / Pro (~2700 zł/rok)	Limit aktywnych dok., brak zaaw. symulacji CAM	TAK (komentarze)	Online/ Offline
Vector-works	iOS, Android	Darmowa (wymaga licencji Desk-top)	Aplikacja bezuży-teczna bez pliku z wer-sji Desktop (płatnej)	TAK (udostęp-nianie AR)	Online/ Offline
uMake	iOS (iPad/iPhone)	Freemium (~400 zł/rok)	Limit eksportu, ogranicz-one narzędzia edycji	NIE	Offline
Planner 5D	Web, iOS, Mac, Win-dows	Freemium (~30-50 zł/mc)	Mały katalog mebli, brak renderów HD, brak edycji tekstur	TAK (chmura)	Online

Źródła: opracowanie własne na podstawie dokumentacji producentów aplikacji

Zestawienie wskazuje, że technologia rozszerzonej rzeczywistości jest powszechnie dostępna, lecz jej profesjonalne wykorzystanie jest znacząco ograniczone poprzez płatne licencje. Darmowe wersje oprogramowania w większości służą demonstracji podstawowych funkcji narzędzia i nie nadają się do komercyjnego wykorzystania, które wymaga rozszerzonych funkcji.

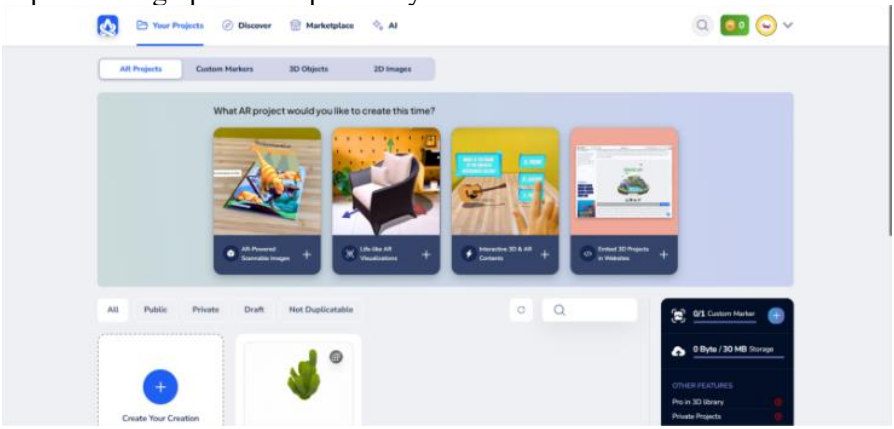
4. Wygląd i sposób użytkowania aplikacji AR na przykładzie Assemblr Studio

Po wejściu na stronę internetową producenta użytkownik dokonuje wersji programu. Podczas badania została użyta wersja przeznaczona do celów edukacyjnych. Po dokonaniu wyboru należy założyć konto (rys. 2).



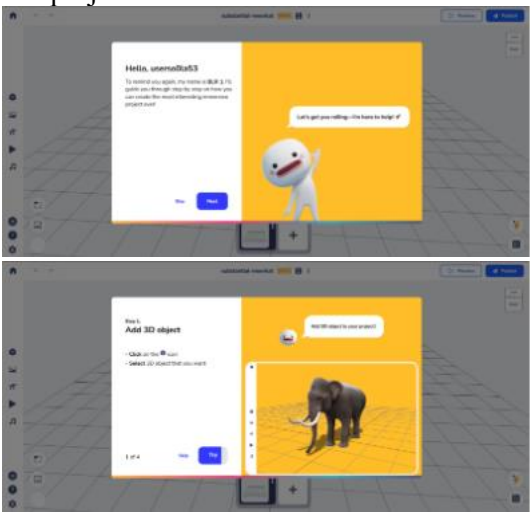
Rys. 2. Ekran logowania lub zakładania nowego konta
Źródło: opracowanie własne.

Po uprzednim zalogowaniu się użytkownik otrzymuje dostęp do menu głównego aplikacji, w którym może nawigować między zakładkami. Zakładka ”Your Projects” (rys. 3) prezentuje wszystkie wykonane projekty z możliwością ich sortowania. W tym miejscu widoczne jest również okno pokazujące ograniczenia darmowego konta. Zakładka „Discover” umożliwia wyszukiwanie inspiracji do kolejnych projektów; tutaj swoje prace zamieszczają inni użytkownicy. Zakładka „Marketplace” pozwala na zakup gotowych modeli trójwymiarowych. Z kolei zakładka „AI” stanowi narzędzie sztucznej inteligencji, które jest w stanie utworzyć model po wpisaniu odpowiedniego polecenia przez użytkownika.



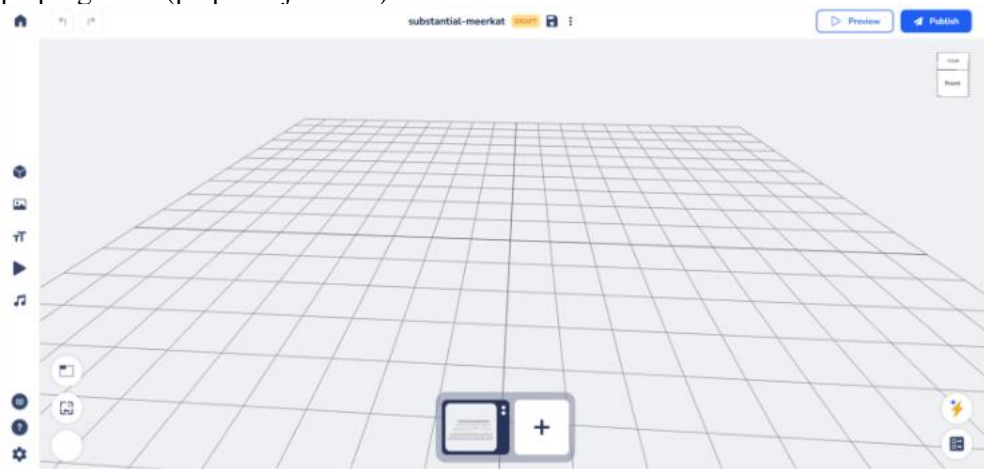
Rys. 3. Ekran menu głównego aplikacji
Źródło: opracowanie własne.

Po utworzeniu nowego projektu za pomocą odpowiedniego przycisku użytkownik przechodzi to okna projektu.



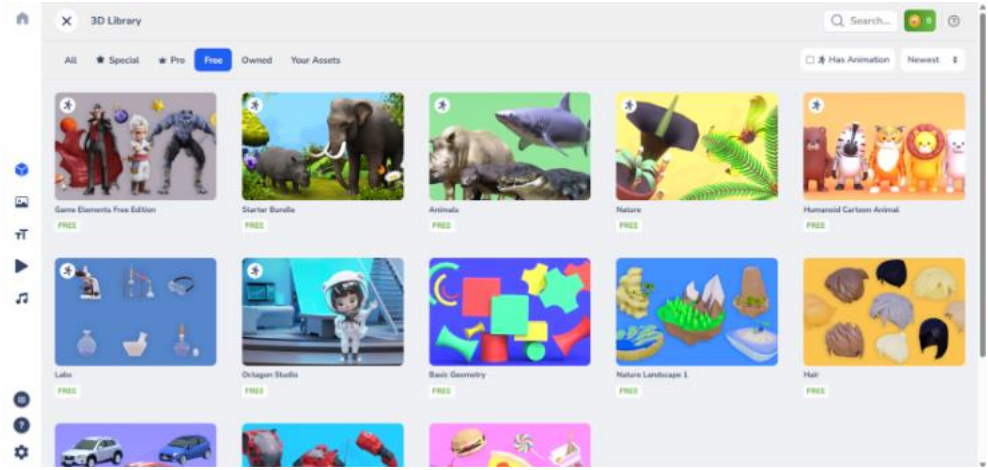
Rys. 4. Okno powitalne
Źródło: opracowanie własne.

Okno powitalne (rys. 4) (po lewej stronie) oraz samouczek, krótki przewodnik po programie (po prawej stronie).

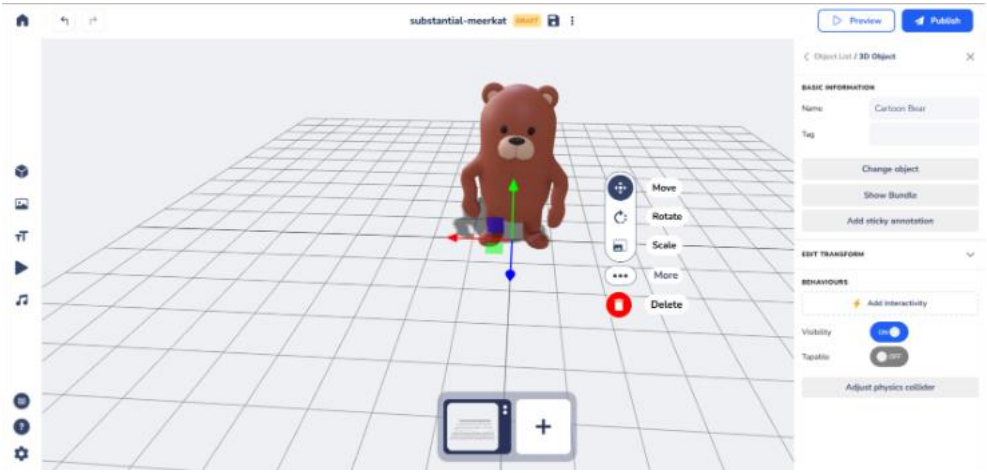


Rys. 5. Pole projektowania modelu trójwymiarowego
Źródło: opracowanie własne.

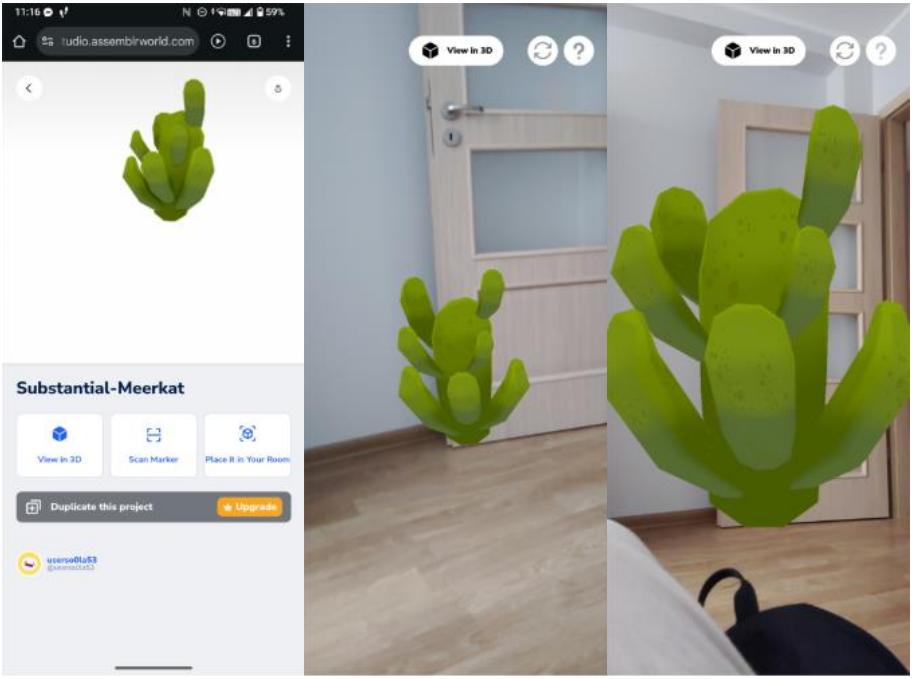
Widok pola projektowania modelu (rys. 5), dostępna biblioteka według kategorii (rys. 6) oraz okno projektowe z przykładowym modelem (rys. 7).



Rys. 6. Biblioteka z dostępnymi tematycznymi katalogami modeli 3D
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7. Okno projektu ze wstawionym modelem wraz z polem wyboru opcji odnośnie do modelu
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8. Wizualizacja
Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 8 po lewej stronie przedstawiono widok aplikacji na smartphonie (okno wyboru opcji wizualizacji modelu 3D); na środku: wizualizacja AR modelu w kształcie kaktusa; po prawej: wizualizacja modelu kaktusa, lecz w zwiększonej skali.

5. Dyskusja wyników

Analiza materiału badawczego, w którego skład wchodzi 12 aplikacji wspierających technologię rzeczywistości rozszerzonej, pozwala na sformułowanie licznych wniosków dotyczących ich przydatności w życiu codziennym, jak i w procesach projektowych oraz inżynierskich.

Przeprowadzona analiza oraz ocena porównawcza, uwzględniająca parametry techniczne, wymagania użytkowania i model licencjonowania, ujawnia wyraźne zróżnicowanie w ogólnodostępnych narzędziach AR, szczególnie podział na aplikacje stricte konsumenckie (wizualizacyjne) oraz profesjonalne (inżynierskie).

Pierwszym wnioskiem płynącym z analizy funkcjonalności testowanych aplikacji jest wyraźna różnica pomiędzy narzędziami służącymi wyłącznie do wyświetlania modeli CAD w przestrzeni (tzw. przeglądarkami modeli), a środowiskami umożliwiającymi ich aktywną edycję w czasie rzeczywistym podczas projekcji AR [Skórska, 2017]. Przeprowadzone badania wykazały, że znaczna część darmowych programów, takich jak eDrawings, AR Code czy BIMx, oferuje jedynie pasywną formę interakcji. Aplikacje te pozwalają na przeglądanie wybranego modelu bez możliwości jego bieżącej modyfikacji. Tego rodzaju funkcjonalność jest wystarczająca na etapie wizualnej weryfikacji projektu lub jego prezentacji, na przykład w celach marketingowych, jednak okazuje się niewystarczająca w fazie aktywnego prototypowania inżynierskiego.

Z drugiej strony aplikacje pokroju Shapr3D, Onshape czy uMake, które wprowadzają pełnoprawne narzędzia modelowania CAD do wizualizacji AR [Harrington Au i Gertz, 2016]. Program Sharp3D szczególnie wyróżnia się przez wykorzystanie silnika Parasolid oraz wsparcia dla materiałów PBR (Physically Based Rendering – renderowanie oparte na fizycznych właściwościach) i okluzji otoczenia. Takie połączenie technologii pozwala na realistyczną symulację modelu w przestrzeni wraz z cieniowaniem, co jeszcze zwiększa immersyjność prezentacji rzeczywistości rozszerzonej. Z kolei Onshape, którego struktura opiera się na działaniu w chmurze, wprowadza unikalną funkcję aktualizacji na żywo, czyli zmiany w modelu widoczne w czasie rzeczywistym. To znacznie ułatwia proces projektowania elementów, gdyż zmiany są widoczne na bieżąco, umożliwiają szybkie udoskonalanie projektu. Czas prototypowania jest kluczowy w procesie projektowym, więc narzędzia AR tego typu stanowią istotne ułatwienie. Owa funkcjonalność skraca nie tylko czas projektowania, ale również obniża koszty poprzez eliminację konieczności wytwarzania fizycznych prototypowych części.

Analiza wymagań sprzętowych wykazuje korelację między ilością i zaawansowaniem funkcji, a mocą obliczeniową, jaką musi posiadać sprzęt obsługiwany przez użytkownika. Aplikacje internetowe (działające w przeglądarce), takie jak AR Code czy Assemblr, charakteryzują się najniższą barierą wejścia, działając w oparciu o przeglądarkę i niewymagające markery (kody QR). Jest to rozwiązanie optymalne dla masowego odbiorcy, jednak wiąże się z niższą precyzją pozycjonowania modelu w przestrzeni. Takie narzędzia nie nadają się do profesjonalnego projektowania inżynierskiego.

Zaawansowane narzędzia modelowania CAD i projekcji AR odpowiednie dla inżynierów i architektów, wymagających precyzji, wydajności oraz wielu specjalistycznych narzędzi, to Shapr3D, Planner 5D, BIMx. Polegają one na sensorach głębi, takich jak technologia LiDAR. To rozwiązanie oparte o skan otoczenia, lecz

wymaga on bardzo wydajnego sprzętu, co wiąże się z dużymi kosztami dla użytkownika. W przypadku użycia tej technologii można liczyć na znacznie większą precyzję niż w przypadku markerów. W wizualizacji AR wysoka precyzja, rozdzielczość modelu oraz możliwości jego edytowania ściśle łączą się z koniecznością wykorzystania bardziej zaawansowanego technologicznie sprzętu, który jest znacznie droższy od standardowych urządzeń biurowych.

Kolejnym czynnikiem technicznym determinującym użyteczność inżynierską jest obsługa natywnych formatów plików. Badanie wykazało, że aplikacje konsumenckie (Assemblr, Planner 5D, uMake) operują głównie na formatach siatkowych (mesh), takich jak OBJ czy FBX. Formaty te, choć lekkie i łatwe w renderowaniu, pozbawione są inżynierskiej precyzji i historii operacji, przez co stają się one nieprzydatne w produkcji przemysłowej (CAM – Computer-Aided Manufacturing, czyli wspomagane komputerowo wytwarzanie; CNC – Computer Numerical Control, czyli numeryczne sterowanie komputerowe). Formaty siatkowe idealnie nadają się dla użytkownika, który chce mieć szybki dostęp do pojedynczych modeli poglądowych, które nie muszą być bardzo dokładne.

Dla inżyniera kluczowa jest obsługa formatów bryłowych (solid), takich jak STEP, IGES czy plików natywnych (SLDPRT, DWG). Aplikacje takie jak Shapr3D, eDrawings oraz Onshape zapewniają wsparcie dla tych standardów, pozwalajac na zachowanie ciągłości cyklu życia produktu (Product Life-cycle Management). Należy jednak zauważyć, że darmowe wersje często limitują możliwości eksportu tych formatów (np. Shapr3D, uMake), zmuszając użytkownika do przejścia na model subskrypcyjny w momencie chęci przekazania projektu do produkcji. Taka polityka stawia użytkownika przed wyborem – porzucenia projektu lub wykupienia zazwyczaj drogiej licencji ograniczonej czasowo. Formaty bryłowe są niezbędne w procesie produkcji, gdyż charakteryzują się bardzo dużą dokładnością.

Większość testowanych aplikacji posiada różnego rodzaju ograniczenia finansowe tj. wymagają wykupienia licencji lub subskrypcji w celu uzyskania dostępu do wszystkich funkcji lub zniesienia ograniczeń. Wiele narzędzi początkowo wydaje się być całkowicie darmowa, posiadać nieistotne zablokowane funkcje, lecz po chwili użytkowania konsument dostrzega wiele różnorakich ograniczeń, którymi są m.in.:

1. Ograniczenia prywatności/własności intelektualnej. Idealnym przykładem jest aplikacja Onshape, która w swojej darmowej wersji wymusza jawność wszystkich utworzonych na koncie projektów. Każdy inny użytkownik może obejrzeć dany model. To dyskwalifikuje z korzystania z programu w celach komercyjnych, ponieważ jawność np. prototypów nowych części nie zapewnia w żadnym

stopniu tajności i dyskrecji elementom wymagającym ochrony w przedsiębiorstwie. Pomimo wielu użytecznych funkcji tego typu program wymusza zakup subskrypcji, jeśli użytkownik potrzebuje zachowania prywatności swoich prac.

2. Ograniczenia funkcjonalne tj.:
    - wiele aplikacji w tym AutoCAD Mobile w swojej bezpłatnej wersji nie pozwala na zapisywanie i edycję projektu, ale jedynie na jego od-czyt. Użytkownik ma możliwość wczytania modelu 3D do aplikacji, a następnie obejrzenia go podczas projekcji AR, lecz nie może edytować elementu oraz zapisać projektu w celu późniejszego obejrzenia ponownie. Musi znów powtarzać czynność wczytania gotowego modelu, aby móc dokonać jego ponownej wizualizacji;
    - ograniczenia formatu – każdą z testowanych aplikacji wyróżniały formaty, w których użytkownik może zapisać swoje prace. Nie każdy program spełnia wymagania konsumenta odnośnie do zapisu; niektóre z aplikacji w bezpłatnej wersji nie pozwalają na swobodny wybór formatu zapisu. Dopiero po zakupie subskrypcji bądź licencji zostaje odblokowana możliwość wyboru formatu w jakim projekt ma zostać zapisany. Część programów nie pozwala na wielokrotny zapis prac w wielu rożnych formatach, co jest nierzadko potrzebne podczas projektowania, gdyż każdy format zapisu posiada inne, odrębne cechy, które wykorzystuje się na różnych płaszczyznach, przykładowo w druku 3D;
    - znaki wodne – aplikacje takie jak np. AR Code, Assemblr w bezpłatnej wersji oferują wiele funkcji, ale do każdej z prac dołączają wiele znaków wodnych tzn. na utworzonych przez użytkownika modelach bez względu na to jakich narzędzi użyje zostaną dodane elementy graficzne, których nie będzie mógł się pozbyć, dopóki nie wykupi wersji premium;
    - limit aktywnych dokumentów – aplikacja Fusion 360 stosuje w swojej darmowej wersji ograniczenie jakim jest limit dokumentów, na których użytkownik może pracować, dopiero po wykupieniu subskrypcji otrzymuje dostęp do nielimitowanych projektów. Tego typu ograniczenie jest znaczne, jeśli konsument chce projektować wiele odseparowanych elementów.

Istotnym aspektem korzystania z aplikacji do modelowania wspomaganego projektowania komputerowego i wspierających rozwiązania rzeczywistości rozszerzonej jest intuicyjność, ergonomia oraz wrażenia użytkownika z korzystania z programu. Projektowanie modeli trójwymiarowych jest wymagającą czynnością, ponieważ konsument pracuje w przestrzeni trójwymiarowej, gdzie liczy się orientacja w wymiarze długości, szerokości i wysokości. Wiele z przetestowanych programów

znacznie ułatwia rozeznanie się w tym procesie. Nowoczesne rozwiązania i funkcje pomagają w sprawnym projektowaniu nawet zaawansowanych elementów.

Badania wykazały zróżnicowany poziom intuicyjności. Narzędzia, takie jak SketchUp czy Planner 5D cechują się wysoką intuicyjnością, ponieważ są skierowane do architektów wnętrz i hobbystów, a więc osób, które chcą od razu przejść do ustalania jak ma wyglądać dane pomieszczenie. Tacy konsumenci nie potrzebują i nie chcą spędzać dużych ilości czasu na tworzeniu modelu pomieszczenia samego w sobie. Producenci wzięli tą potrzebę pod uwagę, więc program jest bardzo prosty w obsłudze, a użytkownik po kilku chwilach może zająć się np. planowaniem wystroju pokoju korzystając z dostępnych modeli, bez konieczności tworzenia własnych. To sprawia, że nawet osoby niedoświadczone w przestrzeni wspomaganego projektowania komputerowego oraz projekcji rzeczywistości rozszerzonej są w stanie obsłużyć program.

Aplikacje przeznaczone głównie dla zwykłego użytkownika, nieposiadjącego wiedzy z zakresu projektowania inżynierskiego wymagają niskiego progu wejścia, jeśli chodzi o zaznajomienie z modelowaniem 3D. Większość dostępnych na rynku ogólnodostępnych narzędzi pozwala w krótkim czasie opanować obsługę różnych funkcji i możliwości aplikacji, co zdecydowanie wpływa na popularność takich rozwiązań w czynnościach związanych z codziennym życiem np. zaplanowanie wyglądu pokoju po remoncie lub prezentacja nowego rozwiązania w przedsiębiorstwie. Wysoka intuicyjność przekłada się na większe zainteresowanie konsumentów bez dużej wiedzy inżynierskiej, gdyż w prosty sposób mogą zwizualizować coś co kiedyś zajmowało wiele godzin pracy lub w ogóle nie było osiągalne.

Poza aplikacjami stricte hobbystycznymi mamy programy pokroju Fusion 360, Onshape, które charakteryzują się wysokim progiem wejścia, ponieważ wymagają posiadania wiedzy na poziomie inżynierskim w zakresie projektowania. Te rozwiązania oferują znacznie bardziej zaawansowane funkcje jak przykładowo łączniki dopasowania w Onshape, co wymaga większego rozeznania w tematyce CAD. Większe możliwości bardzo często idą w parze z koniecznością poświęcenia czasu na naukę obsługi programu. Początkujący użytkownik prawdopodobnie będzie miał problemy z utworzeniem bardziej zaawansowanych modeli, szczególnie jeśli chodzi o bezpośrednią edycję w środowisku AR.

W obecnych czasach cyfryzacji, obecności wielu narzędzi każdy użytkownik jest w stanie znaleźć program odpowiadający swoim potrzebom i kompetencjom. W przypadku, kiedy musi skorzystać z aplikacji wykraczającym poza jego wiedzę Internet oferuje mnóstwo poradników czy kursów dzięki którym można poznać działanie nawet tych bardziej skomplikowanych narzędzi.

Podsumowując dyskusję wyników badania można sformułować szereg wniosków. Technologia AR wykroczyła z fazy eksperymentalnej i testowej, przestała być wyłącznie ciekawostką, lecz stała się pełnoprawnym narzędziem, które można wykorzystać w wielu dziedzinach. W przemyśle stała się definicyjnym rozwiązaniem stosowanym w przemyśle 4.0. Natomiast dla zwykłego użytkownika AR jest ułatwieniem oraz urozmaiceniem codziennych czynności w pracy czy w życiu prywatnym. Ważnym elementem jest wybór odpowiedniego narzędzia:

- do szybkiej wizualizacji marketingowej najlepiej nadadzą się łatwe w obsłudze narzędzia oparte na pracy w przeglądarce web, takie jak AR Code czy Assemblr;
- do prezentacji wizji architektonicznej idealnie nadadzą się BIMx i Planner 5D, ponieważ zintegrowane są z technologiami BIM oraz LiDAR, które znacznie ułatwią, usprawniają pracę w takim pro-gramie;
- do projektowania na poziomie inżynierskim nadadzą się Onshape, eDrawings, ponieważ opierają się one na zaawansowanych technologiach STEP/CAD.

Cała analiza skupia się jedynie na wizualnym, żadna z aplikacji nie angażuje innego zmysłu niż wzrok. Wizualizacja AR zapewniająca doświadczenia haptyczne (dotykowe) byłaby o wiele bardziej angażująca i wpływająca na postrzeganie wirtualnych obiektów. Być może wprowadzenie zaawansowanych systemów wykorzystujących nie tylko aspekt wizualny, ale również pobudzających inne zmysły będzie przyszłością prężnie rozwijającej się branży aplikacji wspierających modelowanie CAD oraz wizualizację rozszerzonej rzeczywistości.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza darmowych narzędzi rozszerzonej rzeczywistości wspierających wizualizację modeli CAD potwierdza, że ta technologia staje się kluczowym elementem nowoczesnego projektowania inżynierskiego i prototypowania. Analiza badanych platform ukazała wyraźny podział między narzędziami nastawionymi na prostą, intuicyjną prezentację modeli 3D a zaawansowanymi platformami wymagającymi wiedzy inżynierskiej, lecz oferującymi bardziej rozbudowane funkcje techniczne. W trakcie przeprowadzanych badań wykazano, że ważnym czynnikiem warunkującym użyteczność oprogramowania AR jest przede wszystkim kompatybilność z formatami takimi jak STEP, STL czy OBJ oraz intuicyjność interfejsu.

Analiza wybranych rozwiązań pozwala na wyraźny podział rynku oprogramowania ze względu na grupę docelową. Narzędzia, takie jak Assemblr czy Planner 5D, cechują się bardzo wysoką intuicyjnością, sprzyjając dostępności dla amatorów

i osób bez przygotowania technicznego. Z kolei aplikacje, takie jak Onshape oraz Shapr3D, stanowią profesjonalne systemy inżynierskie, które umożliwiają wizualizację w rozszerzonej rzeczywistości wraz z zaawansowanym cyklem projektowym i modelowaniem CAD w czasie rzeczywistym.

Z punktu widzenia użytkownika istotną rolę odgrywają m.in. wymagania sprzętowe, koszt licencji danego narzędzia oraz ograniczenia wersji darmowych, które często mają powiązanie z jakością importowanych plików, ilością wytworzenia projektów. Wszystkie ograniczenia wpływają na możliwość korzystania z danych narzędzi w fazach powstawania projektu, w środowisku akademickim, ale nie tylko. Przede wszystkim w miejscach, w których budżet jest mocno ograniczony.

Powyższe badania wskazują, że nie istnieje jedno darmowe narzędzie rzeczywistości rozszerzonej spełniające wszystkie wymagania. Dobór odpowiednich rozwiązań powinien być idealny do naszych oczekiwań oraz potrzeb. Wybór narzędzi do edukacji lub tworzenia prostych rzeczy powinien odznaczać się wysoką intuicyjnością, natomiast w pracy inżynierskiej powinny być zintegrowane z systemem wspomaganego projektowania komputerowego.

Rozszerzona rzeczywistość przestała być wyłącznie dodatkiem, a stała się realnym narzędziem redukującym koszty produkcji, poprawiającym komunikację techniczną oraz zwiększającym bezpieczeństwo przy pracy. Wybór konkretnego oprogramowania musi być poprzedzony rzetelną analizą potrzeb projektowych, gdyż różnice w dostępności funkcji inżynierskich między poszczególnymi aplikacjami są kluczowe, aby proces projektowy zakończył się powodzeniem.

Z perspektywy rozwoju rozszerzonej rzeczywistości w przemyśle, uzyskane wyniki wskazują na rosnący potencjał bezpłatnych narzędzi, ale także na wyraźne luki funkcjonalne. Dla badań, które zostaną wykonane w przyszłości, istotne jest wypełnienie tych luk w zakresie interfejsów angażujących nie tylko wzrok i słuch, ale też dotyk lub węch.

ORCID iD

Klaudia Tomaszewska: https://orcid.org/ 0000-0002-0233-5707

Literatura

1. AR Code, https://ar-code.com/ [26.01.2026].
2. Assemblr World, https://assemblrworld.com/ [26.01.2026].
3. Autodesk Fusion 360, https://www.autodesk.com/pl/products/fusion-360/ [26.01.2026].
4. Autodesk, https://www.autodesk.com/pl/ [26.01.2026].

5. Azuma R. T. (1997), *A Survey of Augmented Reality*, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4), s. 355-385.
6. Billinghurst M., Clark A., Lee G. A. (2015), *A Survey of Augmented Reality*, Foundations and Trends in Human-Computer Interaction, 8(2-3), s. 73-272.
7. Caudell T. P., Mizell D. W. (1992), *Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes*, Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences, s. 659-669.
8. Dudycz H. (red.) (2024), *Informatyka w biznesie, Debiuty studenckie*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu.
9. eDrawings Viewer, https://www.edrawingsviewer.com/ [26.01.2026].
10. Harrington Au J., Gertz E. (2016), *3D CAD i Autodesk 123D. Modele 3D, wycinanie laserowe i własnoręczne wytwarzanie*, Helion, Gliwice.
11. Linowes J., Babiński K. (2020), *Augmented Reality for Developers*, Packt Publishing, Birmingham.
12. Milgram P., Kishino F. (1994), *A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*, IEICE Transactions on Information and Systems, E77-D(12), s. 1321-1329.
13. Nee A. Y. C., Ong S. K., Chryssolouris G., Mourtzis D. (2012), *Augmented reality applications in design and manufacturing*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 61(2), s. 657-679.
14. Neshov N. N., Tonchev K., Manolova A., Poulkov V., Zaharis Z. D. (2023), *Application of a 3D Talking Head as Part of Telecommunication AR, VR, MR System: Systematic Review*, Applied Sciences, 13(2), artykuł 745.
15. Nowak M., Ziętak W. (2023), *Projektowanie wirtualne z wykorzystaniem systemów CAD*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
16. Onshape, https://www.onshape.com/ [26.01.2026].
17. Planner 5D, https://planner5d.com/ [26.01.2026].
18. Shapr3D, https://www.shapr3d.com/ [26.01.2026].
19. SketchUp, https://sketchup.com.pl/ [26.01.2026].
20. Skórska H. K. (2017), *Systemy i zastosowania rzeczywistości rozszerzonej*, Przegląd Mechaniczny, 76(7-8), s. 48-52, DOI: 10.15199/148.2017.7-8.7.
21. uMake, https://www.umake.com/ [26.01.2026].
22. Vectorworks, https://www.vectorworks.net/ [26.01.2026].
23. Wichniarek R., Zawadzki P., Górski F., Buń P., Hamrol A., Kuczko W. (2016), *Wspomaganie projektowania koncepcyjnego mebli z zastosowaniem aplikacji rzeczywistości wirtualnej i technik opartych na wiedzy*, Katedra Zarządzania i Inżynierii Produkcji, Politechnika Poznańska.

24. Zhou F., Been-Lirn Duh H., Billinghurst M. (2008), *Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction, and Display: A Review of Ten Years of ISMAR*, Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, s. 193-202.

AR as a Tool for Visualizing CAD Models in the Prototyping Phase – an Overview of Free Solutions

Abstract

In the era of digital transformation of manufacturing processes (Industry 4.0), Augmented Reality (AR) technologies are gaining importance as a key element supporting scientific and research processes. The aim of this paper is to analyze free AR tools that support the visualization of CAD models. The paper reviews the literature and presents an evaluation of selected AR applications such as Planner 5D, eDrawings, Onshape, and Shapr3D. The results of the study indicate a clear division of available solutions into consumer applications; characterized by high intuitiveness and support for mesh formats, and professional engineering tools, offering precision and support for solid formats such as STEP but requiring specialist knowledge. The analysis revealed significant limitations of the free versions including file export limits, inability to save, and forced disclosure of projects. The conclusions confirm that AR technology effectively supports the prototyping process and cost reduction. However, the selection of a free tool must be closely linked to specific design needs, as there is no universal free solution that meets all user requirements, regardless of their level of design expertise.

Key words

Augmented Reality, CAD models, prototyping