

VR jako narzędzie wizualizacji i symulacji w fazie prototypowania – przegląd darmowych rozwiązań

Aleksandra Gryc

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

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

Klaudia Tomaszewska 

Politechnika Białostocka, Wydział Inżynierii Zarządzania

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

DOI: 10.65731/az-2026-0068

Streszczenie

W erze Przemysłu 4.0 technologia wirtualnej rzeczywistości (VR) rewolucjonizuje prototypowanie inżynierskie, umożliwiając immersyjne wizualizacje oraz symulacje bez posiadania fizycznych modeli. Niniejsza praca ma na celu krytyczną ocenę porównawczą darmowych rozwiązań VR pod kątem ich funkcjonalności, intuicyjności, wymagań sprzętowych oraz zgodności obsługiwanych formatów plików ze środowiskami CAD. W pracy dokonano przeglądu literatury oraz zaprezentowano ocenę wybranych aplikacji takich jak Spatial, CoSpaces Edu, Engage, czy VRChat. Wyniki badań wskazują na wyraźny podział dostępnych rozwiązań na platformy społecznościowo-edukacyjne, narzędzia wizualizacyjne oraz środowiska do modelowania. Analiza wykazała pewne ograniczenia wersji bezpłatnych, obejmujące między innymi ograniczenia w tworzeniu treści, liczbie uczestników czy też ograniczenia w dostępie technicznym. Sformułowane wnioski wskazują, że technologia wirtualnej rzeczywistości stwarza warunki do wsparcia procesu prototypowania, a dostępność darmowych wersji obniża barierę wejścia dla organizacji z ograniczonym budżetem. Dobór odpowiedniego, darmowego narzędzia musi być powiązane z potrzebami projektowymi, ponieważ nie istnieje uniwersalne darmowe rozwiązanie pasujące do wszystkich oczekiwań użytkownika.

Słowa kluczowe

wirtualna rzeczywistość, prototypowanie, wizualizacja

Wstęp

Współczesna gospodarka światowa znajduje się w fazie intensywnej transformacji cyfrowej, która jest określana mianem czwartej rewolucji przemysłowej (Przemysł 4.0). Opiera się ona na przemianie produkcji w połączonym za pomocą internetu ludzi i przedmiotów umiejscowionych w cyberfizycznym środowisku [Cellary, 2019, s. 48]. W obecnych czasach technologia wirtualnej rzeczywistości (Virtual Reality – VR) nie jest już tylko obiektem branży rozrywkowej, ale stała się kluczowym narzędziem wspierającym projektowanie, optymalizację oraz symulację procesów produkcyjnych. Za pomysłodawcę technologii wirtualnej rzeczywistości uważa się Jarona Laniera [Lanier i Biocca, 1992 s. 151].

Istotnym aspektem jest oddzielenie wirtualnej rzeczywistości od technologii rzeczywistości rozszerzonej (Augmented Reality – AR). Pomimo, że dwa terminy są często ze sobą spajane w termin rozszerzonej rzeczywistości (Extended Reality - XR), to ich rola różni się od siebie. Technologia rzeczywistości rozszerzonej łączy świat realistyczny wraz z obrazem, który jest generowany komputerowo [Billinghamurst i in., 2015]. Wirtualna rzeczywistość pozwala użytkownikowi w pełni zanurzyć się w syntetycznym środowisku. Zostaje on odcięty od bodźców zewnętrznych co umożliwia mu w pełni kontrolowanie symulowanego procesu. Natomiast rozszerzona rzeczywistość umożliwia wizualizację produktu - jego wymiarów, wyglądu oraz jego specyfikację jeszcze przed fizycznym powstaniem. W Przemysle 4.0 umożliwia kreowanie doświadczeń, których nie da się zrealizować tanio i bezpiecznie w czasie rzeczywistym [Azuma, 1997, s. 2].

Niniejszy artykuł koncentruje się na analizie darmowych rozwiązań ze względu na problem, który występuje w sektorze małych i średnich przedsiębiorstw. Wysokie koszty zakupu licencji profesjonalnego oprogramowania uniemożliwiają przedsiębiorstwom korzystania z technologii VR.

Celem niniejszej pracy jest krytyczna analiza i ocena porównawcza ogólnodostępnych narzędzi VR pod kątem funkcjonalności, użyteczności, wydajności oraz zgodności obsługiwanych formatów plików ze środowiskami cyfrowymi (m.in. CAD) wykorzystywanymi w nowoczesnym procesie projektowania.

Szczególny nacisk zostanie nałożony na ocenę przydatności tych narzędzi w zastosowaniach inżynierskich i edukacyjnych ze szczególnym uwzględnieniem cyfrowych bliźniaków (digital twins), wirtualnego testowania procesów produkcyjnych oraz współpracy w środowiskach rozproszonych.

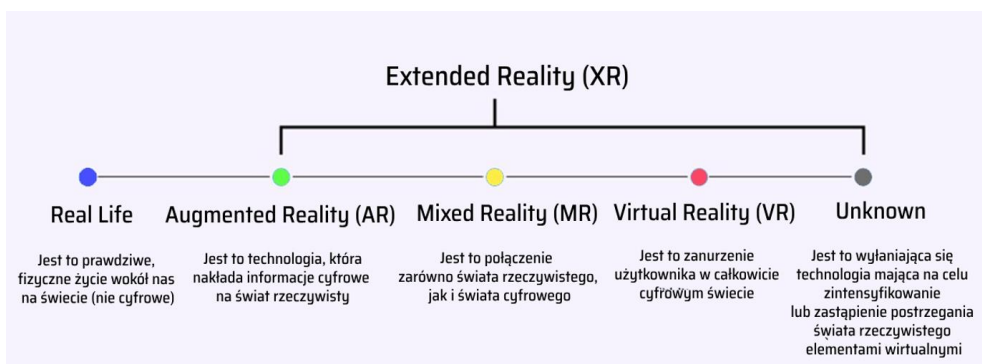
1. Przegląd literatury

Niniejszy rozdział został poświęcony analizie aktualnego stanu wiedzy w zakresie technologii rzeczywistości wirtualnej, rozszerzonej oraz mieszanej.

Kontinuum wirtualności jest punktem wyjściowym dla systematyki wirtualnej rzeczywistości [Milgram i Kishino, 1994], która jest wiązana z pojęciem immersji, czyli całkowitego przeniesienia zmysłów do sztucznej rzeczywistości [Wójcik, 2016, s. 262]. Autorzy definiują przestrzeń między światem rzeczywistym a środowiskiem wykreowanym wirtualnie jako rzeczywistość mieszaną (Mixed Reality – MR). Rzeczywistość mieszana prezentuje połączenie świata rzeczywistego z wirtualnym jako jeden system wyświetlania [Gryc i in., 2026].

Wirtualna Rzeczywistość znajduje się na końcu osi po prawej stronie jako środowisko wirtualne (rys. 1). Pomimo, że rozszerzona rzeczywistość jest bliżej środowiska rzeczywistego, to właśnie wirtualna rzeczywistość charakteryzuje się pełną cyfryzacją i przeprowadza użytkownika w świat wirtualny odizolowując go od bodźców zewnętrznych.

Należy zaznaczyć, że z niniejszego zestawienia wyłączono platformę OpenXr Toolkit, która jako warstwa pośrednicząca API (Application Programming Interface) nie stanowi samodzielnego środowiska pracy dla zespołu projektowego.



Rys. 1. Extended reality spectrum

Źródło: [Tomaszewska, 2025, s. 574].

Analiza porównawcza technologii XR pozwala zidentyfikować wąskie gardła, które determinują tempo cyfrowej transformacji w sektorze przedsiębiorstw. Szczególną uwagę należy zwrócić na zróżnicowanie barier od ograniczeń fizjologicznych,

po bariery ekonomiczne związane z kosztem infrastruktury, oprogramowania. Poniższa tabela prezentuje porównanie kluczowych aspektów funkcjonalnych VR w kontekście przemysłowym.

Tab. 1. Porównanie aspektów funkcjonalnych rzeczywistości wirtualnej (VR), rozszerzonej (AR) oraz mieszanej (MR)

Cecha	VR	AR	MR
Relacja ze światem	Całkowicie zastępuje świat realny	Nakłada dane na świat realny	Integruje obiekty cyfrowe w świecie rzeczywistym
Poziom immersji	Wysoki - całkowite zanurzenie	Niski - użytkownik widzi otoczenie	Średni - interakcja z otoczeniem
Główne bariery	Wysoki koszt, bariera fizjologiczna (choroba lokomocyjna)	Ograniczenie sprzętowe i wydajnościowe, wysokie koszty	Wysoki koszt, ograniczona baza treści
Przykładowe urządzenia	Meta Quest Pro, Valve Index	VUZIX Smartglasses, Google Glass	Microsoft HoloLens Industrial Edition, Meta Quest Pro

Źródło: opracowanie własne na podstawie taksonomii Milgrama i in., 2017.

W tabeli 1 przedstawiono porównanie aspektów funkcjonalnych, która dowodzi, że ekstremalnym wyzwaniem w korzystaniu z nowoczesnych technologii jest wysoki koszt zakupu sprzętu, licencji. Analiza danych podkreśla unikalność nowoczesnych technologii. Mieszana oraz rozszerzona rzeczywistość wspiera pracownika na stanowisku pracy natomiast wirtualna rzeczywistość jest skupiona na bezpieczeństwie oraz optymalizacji.

Wirtualna rzeczywistość znajduje zastosowanie w inżynierii i prototypowaniu umożliwiając symulacje 3D oraz współpracę zespołową bez fizycznych prototypów [Berg i Vance, 2017]. Dzięki takiemu zastosowaniu firmy nie muszą ponosić wysokich kosztów na zakup materiałów, a cały proces przebiega szybciej. Dodatkowo, wirtualne sprawdzanie montażu umożliwia wykrycie błędów na wczesnym etapie. W kontekście Przemysłu 4.0, wirtualna rzeczywistość staje się naturalnym interfejsem dla systemów cyfrowych bliźniaków umożliwiając na intuicyjną wizualizację danych procesowych [Choi i in., 2015].

Pomimo, że rozwój cyfrowej rzeczywistości jest intensywny, to w aktualnej literaturze przedmiotu wciąż są istotne luki w obszarze nisko kosztownych wdrożeń VR. Większość opracowań skupia się na systemach zaawansowanych oraz wysokobudżetowych, które są niedostępne dla sektora małych i średnich przedsiębiorstw z powodu barier finansowych [Berni i Borgianni, 2020].

2. Metodyka badań

W celu realizacji założonego celu badawczego zostały przeprowadzone podejścia badawcze oparte na przeglądzie literatury przedmiotu, analizie porównawczej oraz analizie systemowej. Zastosowanie różnych kryteriów analizy pozwala na obiektywną ocenę darmowych narzędzi, które w literaturze są opisywane w sposób ogólny lub strictly edukacyjny z pominięciem ich zastosowań w środowisku inżynierskim.

Prace rozpoczęto od przeglądu literatury tematu, obejmującego wirtualną rzeczywistość, jej inżynieryjne aplikacje oraz role w Przemysle 4.0. Kolejnym krokiem była identyfikacja bezpłatnych rozwiązań VR. Kryteriami doboru aplikacji były: dostępność wersji bezpłatnej, obsługa platform VR, funkcjonalność wizualizacji 3D/CAD oraz kompatybilność z powszechnymi platformami. Informacje o aplikacjach były pozyskiwane ze strony producenta, portali branżowych oraz dokumentacji technicznej. Do szczegółowej analizy zostały wybrane następujące narzędzia: Spatial, Engage, VRChat, Gravity Sketch, CoSpaces Edu, Sketchfab VR Viewer, A – Frame (WebVR), Unity Personal, Unreal Engine. Trzeci etap polegał na analizie porównawczej aplikacji pod względem: dostępności wersji bezpłatnej, obsługi platform VR, funkcjonalności wizualizacji 3D/CAD, kompatybilności z powszechnymi platformami oraz intuicyjności.

Celem niniejszej pracy jest analiza i ocena możliwości wykorzystania bezpłatnych narzędzi rzeczywistości wirtualnej (VR) do wizualizacji i symulacji w procesie prototypowania. W ramach pracy przeprowadzono przegląd wybranych rozwiązań oraz dokonano ich porównania pod kątem funkcjonalności, możliwości zastosowania, dostępności i ograniczeń. Problem badawczy koncentruje się na określeniu, w jakim stopniu bezpłatne narzędzia VR mogą wspierać proces prototypowania oraz jakie czynniki ograniczają ich praktyczne wykorzystanie.

Artykuł realizuje proces przeglądu i analizy darmowych rozwiązań, opierając wnioski na badaniach jakościowych. Została przeprowadzona analiza literatury przedmiotu w oparciu o zasoby naukowe oraz dane branżowe, uzupełniona o weryfikację środowiska Spatial w trybie przeglądarkowym, który stanowi funkcjonalny odpowiednik interfejsu zarządzania przestrzenią VR bez konieczności posiadania gogli. Pozostałe platformy zostały ocenione na podstawie oficjalnej dokumentacji producentów, portali branżowych oraz dostępnych materiałów testowych. Efekty prac zostały przedstawione w formie opisowej z uwzględnieniem podziału narzędzi na różne grupy (platformy społecznościowo-edukacyjne, narzędzia wizualizacyjne, środowiska do modelowania) oraz wymagań stawianych użytkownikom (obsługi-

wane formaty, wymagania sprzętowe). Analiza celowo pomija aspekty bezpieczeństwa danych i zgodności z RODO, które wymagają osobnego badania z udziałem specjalistów ds. prawa cyfrowego i stanowią kierunek dalszych prac.

3. Wyniki badań

Przetestowano łącznie 10 aplikacji/programów: Spatial, Engage, VRChat, Rec Room, Gravity Sketch, CoSpaces Edu, Sketchfab VR Viewer, A – Frame (WebVR), Unity Personal, Unreal Engine (tab. 2).

Tab. 2. Porównanie techniczne aplikacji pod względem VR

Narzędzie	Trigger wejścia w VR-przejsię użytkownika do trybu VR	Rodzaj interakcji	Silnik/SDK (Software Development Kit)
Spatial	Widoczny awatar, którym można sterować, możliwy wybór perspektywy (z pierwszej lub trzeciej osoby)	Teleportacja awatara poprzez kliknięcie lewym przyciskiem myszy, możliwość obejrzenia otoczenia w 360°	Własny silnik oparty na silniku Unity
Engage	Generowanie awatara, wybranie konkretnej lokalizacji, sterowanie awatarem w przestrzeni 3D za pomocą klawiszy/myszy	Ograniczona liczba obiektów, które można ustawić w przestrzeni oraz można nimi manipulować	Oparty na silniku Unity, ale niedostępny dla użytkownika do edycji kodu
VRChat	Możliwość przejścia do konkretnego świata z menu głównego, załadowanie środowiska 3D oraz sterowanie awatarem przez użytkownika	Możliwość chwytania obiektów oraz sterowania nimi, zaawansowana interakcja z elementami otoczenia przygotowanymi przez autorów konkretnych przestrzeni	Zbudowana na silniku Unity, która udostępnia użytkownikom własne SDK
*Rec Room	Wybór pokoju z menu głównego, a następnie przejście użytkownika do sterowania awatarem	Bezpośrednia manipulacja obiektami - rzucanie, łapanie	Oparty na silniku Unity
Gravity Sketch	Przeniesienie do pustego świata, opcja rysowania w wybranej przez użytkownika skali	Tworzenie poprzez gesty; siła nacisku jest mapowana bezpośrednio np. na grubość linii	Oparty na silniku Unity
CoSpaces Edu	Przejsię użytkownika do obserwacji świata z punktu widza, możliwość interakcji z obiektami, które	Możliwość dodawania obiektów oraz tworzenia ich działań poprzez kodowanie	Silnik działający w oparciu o WebGL, czyli technologie webowe

Narzędzie	Trigger wejścia w VR-przejscie użytkownika do trybu VR	Rodzaj interakcji	Silnik/SDK (Software Development Kit)
	zostały wcześniej zaprogramowane		
Sketchfab VR Viewer	Mechanizm wejścia opiera się na wyzwalaczu w formie ikony VR, który rozpoznaje sprzęt, następnie przenosi użytkownika do sceny 3D	Brak możliwości sterowania obiektami, użytkownik nawiguje po modelu za pomocą zdefiniowanych punktów kontrolnych	Silnik oparty na standardzie WebXR
A-Frame (WebVR)	Triggerem wejścia w VR jest przycisk "Enter VR", czyli domyślny element, który można modyfikować	Wykorzystuje interakcję wzrokową lub wskazywanie laserem; możliwość sterowania elementami, uruchamianie animacji	Opiera się na Entity-Component-System (ECS)
Unity (Personal-VR template)	Wejście w wirtualną przestrzeń, połączenie ze sprzętem, pojawienie się awatara w przestrzeni	Możliwość przesuwania, dotykania, przyciągania przedmiotów	Silnik oparty na XR Interaction Toolkit
Unreal Engine	Opiera się na wywołaniu odpowiedniego triggera, który następnie przenosi użytkownika do wirtualnego świata	Możliwość sterowania przedmiotami – podnoszenie, przyciąganie, przesuwanie	Wykorzystuje standard OpenXR

*Rec Room- platforma zostanie całkowicie zamknięta 01.06.2026 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentacji producentów aplikacji.

Przeprowadzona analiza pokazuje zróżnicowane sposoby wejścia w tryb wirtualny, rodzaje interakcji oraz użyte silniki. Większość aplikacji takich jak Spatial czy Engage opiera się na silniku Unity, co potwierdza jego znaczącą rolę oraz status na rynku w tworzeniu doświadczeń immersyjnych. Z powyższej tabeli można wysunąć wnioski jak zauważalny jest rozwój alternatywnych rozwiązań opartych na standardach WebGL oraz WebXR. Platformy takie jak CoSpaces Edu pozwalają na uruchamianie treści w przeglądarce, co obniża próg wejścia. W rodzajach interakcji można wyróżnić podział na narzędzia służące do komunikacji, prezentacji, gdzie zauważalna jest np. prosta teleportacja. Przeciwnieństwem są platformy kreatywne takie jak Gravity Sketch, która oferuje zaawansowaną manipulację obiektami. Przejscie użytkownika do trybu VR przechodzi od skomplikowanych zasad połączenia ze sprzętem do intuicyjnych ruchów typu "Enter VR" w rozwiązaniach webowych. Ostateczny wybór platformy jest zależny od priorytetów użytkownika, czy

zależy mu na szybkim wdrożeniu przy pewnych ograniczeniach, czy jest on nastawiony na nieograniczone możliwości kosztem wyższego stopnia skomplikowania technicznego.

Tab. 3. Porównanie wymagań stawianych użytkownikom

Narzędzie	Obsługiwane formaty	Wymagania sprzętowe
Spatial	GLB, GLTF, OBJ	Niskie
Engage	PNG, JPG, PDF	Średnie
VRChat	FBX, OBJ, PNG	Niskie
Rec Room	PNG, JPG,	Średnie
Gravity Sketch	OBJ, FBX, IGES, STEP, JPG	Średnie (możliwość korzystania z go-gli lub z urządzenia mobilnego)
CoSpaces Edu	GLB, OBJ, STL, FBX, JPG, PNG	Niskie (działa głównie w chmurze)
Sketchfab VR Viewer	FBX, OBJ, STL, GLTF	Średnie
A-Frame (WebVR)	GLB, OBJ, JPG, PNG	Niskie (można korzystać na dowolnym nowoczesnym urządzeniu)
Unity (Personal-VR template)	FBX, OBJ, GLTF, JPG, PNG	Średnie
Unreal Engine	FBX, OBJ, PNG, JPG, GLB	Średnie

Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentacji producentów aplikacji.

Przedstawiona analiza ukazuje różnice w obsłudze formatów plików oraz wymaganiach sprzętowych. W tabeli 3 można zaobserwować dużą rozpiętość w wymaganiach sprzętowych. Narzędzia takie jak CoSpaces Edu czy A-Frame (WebVR) są odpowiednimi platformami, ponieważ działają w chmurze oraz umożliwiają pracę na słabszym sprzęcie. Unity, Unreal Engine są silnikami bardziej profesjonalnymi i wymagają wydajniejszych modułów, ale w zamian za to oferują szeroką obsługę formatów plików. Większość platform stara się być uniwersalna, oferując obsługę standardowych formatów modeli 3D. Umożliwia to przenoszenie projektów pomiędzy środowiskami. Wybór konkretnego narzędzia powinien zależeć od możliwości sprzętowych użytkowników, a nie tylko od zamierzonych efektów, które chciałby osiągnąć. Dodatkowym atutem jest fakt, iż rynek udostępnia rozwiązania pozwalające na pracę prawie na każdym poziomie zaawansowania technicznego.

Tab. 4. Porównanie finansowe i ograniczenia wersji darmowych

Narzędzie	Cennik	Ograniczenia darmowej wersji	Praca zespołowa	Online/offline
Spatial	Dostępna wersja darmowa, pakiet indywidualny 20\$, pakiety dla uczelni oraz firm wyceniane indywidualnie	Mniejsza liczba uczestników, limity pamięci masowej, niedostępność zaawansowanych funkcji	TAK (główny cel platformy)	Online/offline
Engage	Dostępna wersja darmowa, miesięczna subskrypcja 9,99€, roczna subskrypcja 99,99€	Ograniczenia w tworzeniu treści, ograniczona liczba uczestników, ograniczony dostęp techniczny	TAK	Online/offline
VRChat	Dostępna wersja darmowa, subskrypcja miesięczna 9,99\$, subskrypcja roczna 99,99\$	Ograniczenia w tworzeniu światów, ograniczona liczba awatarów, ograniczenia profilu użytkowników (np. Brak możliwości ustawienia zdjęcia profilowego)	TAK	Online/offline
Rec Room	Dostępna wersja darmowa, subskrypcja miesięczna 7,99\$	Ograniczony dostęp do pokoi, limit liczby znajomych, ograniczenie w posiadaniu ekskluzywnych przedmiotów	TAK	Online/offline
Gravity Sketch	Dostępna wersja darmowa Dla użytkowników indywidualnych: 18,99€/msc; 189€/rok	Formaty eksportu, limit przechowywania danych w chmurze, ograniczenia współpracy w czasie rzeczywistym	TAK	Online/offline
CoSpaces Edu	Dostępna wersja darmowa, wersja Pro od 50€/rok	Ograniczona liczba uczniów, ograniczenia w tworzeniu, ograniczenia możliwości kodowania	TAK (jedna z kluczowych funkcji)	Online/offline
Sketchfab VR Viewer	Dostępna wersja darmowa, wersja Pro 180\$/rok, wersja Premium 948\$/rok	Ograniczenia przesyłanych plików, brak możliwości ukrycia logotypów, ograniczenia opcji VR	NIE	Online/offline
A-Frame (WebVR)	Całkowicie darmowy	Ograniczenia wydajnościowe, ograniczenia sprzętowe, jakość działania zależna jest od przeglądarki	TAK	Online/offline
Unity (Personal-VR template)	Darmowy, subskrypcja Pro 179€, dla firm, które mają przychody roczne większe niż 25\$	Ograniczenia finansowe, brak możliwości ukrycia logotypów, brak dostępu do zaawansowanych usług	TAK	Online/offline

Narzędzie	Cennik	Ograniczenia darmowej wersji	Praca zespołowa	Online/offline
	cena jest ustalana indywidualnie			
Unreal Engine	Dostępna wersja darmowa, nie płaci się nic do momentu aż nie przekroczy się przychodu 1mln \$	Wymagania sprzętowe, ograniczenia finansowe, wymagania techniczne	TAK	Online/offline

Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentacji producentów aplikacji. Cennik obowiązuje z dniem 20.04.2026 r.

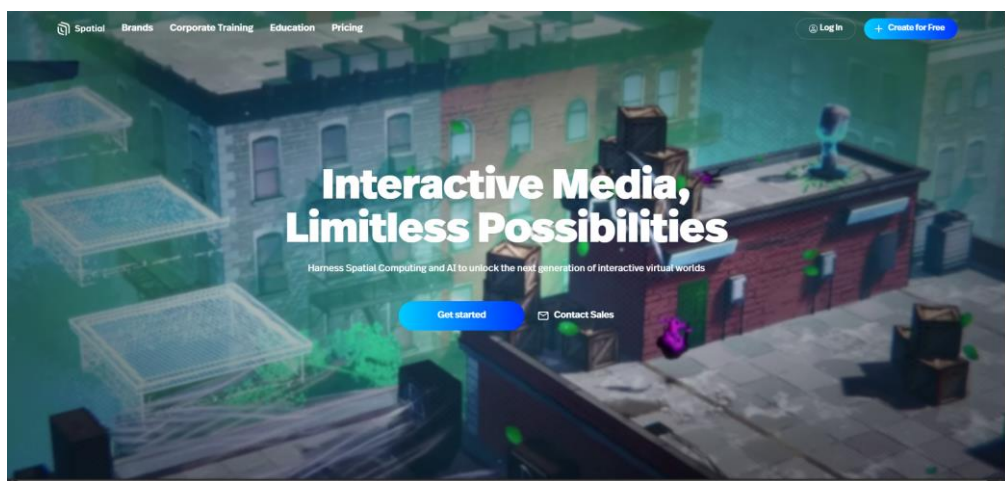
Z przedstawionego zestawienia wynika, że niemal każda aplikacja oferuje użytkownikom darmowe warianty, czyniąc je atrakcyjnymi. W darmowych wersjach najczęściej występującym problemem są limity liczby użytkowników, ograniczone miejsce w chmurze oraz brak dostępu do zaawansowanych funkcji. Narzędzia takie jak VRChat oferują niższą miesięczną opłatę, natomiast korzystanie z platform profesjonalnych takich jak Unity (Personal-VR template) wiąże się z dużo wyższymi opłatami. Aplikacja A-Frame (WebVR) jest atrakcyjną opcją dla uczniów oraz studentów, ponieważ jest narzędziem całkowicie darmowym. Korzystnym rozwiązaniem może być również Unreal Engine ze względu na darmową wersję oprogramowania. Użytkownicy mogą korzystać z pełnej mocy silnika do momentu, aż projekt nie zacznie zarabiać dużych sum pieniężnych. Praktycznie każda z przedstawionych platform pozwala na pracę zespołową poza Sketchfab VR Viewer. Pokazuje to, że aktualne środowisko wirtualnej oraz rozszerzonej rzeczywistości skupia się na projektowaniu głównie z myślą o współpracy. Ostateczny wybór platformy będzie zależał od możliwości finansowych potencjalnego użytkownika.

3.1. Analiza środowiska Spatial w trybie przeglądowym jako punkt wyjścia do wdrożenia VR

Platforma Spatial wykazuje się elastycznym dostępem, oferując pracę w trybie przeglądarki, mobilnym oraz VR z goglami. Ze względu na brak dostępu do sprzętu VR, niniejsza analiza koncentruje się na trybie przeglądarkowym, który stanowi funkcjonalny odpowiednik środowiska VR w zakresie zarządzania przestrzenią i importu modeli 3D. Pomimo, że pełna immersja wymaga gogli typu Meta Quest, to warto zaznaczyć pozycję platformy na kontinuum rzeczywistości (Milgram i Kishino). Spatial ewaluował z narzędzia przeznaczonego rzeczywistości rozszerzonej

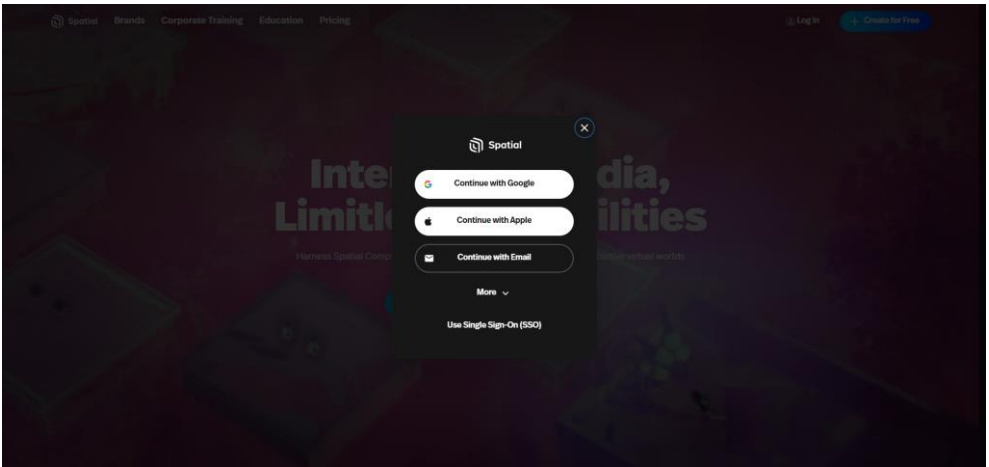
do wersji pracującej w wieloosobowych przestrzeniach 3D, gdzie zespoły mogą pracować nad jednym projektem w czasie rzeczywistym. Jednakże nie jest to klasyczne narzędzie, które izoluje użytkownika od otoczenia. Dzięki swojej konstrukcji, Spatial może wykorzystywać swobodne przesuwanie się pomiędzy światem wirtualnym, a rzeczywistością mieszaną, wykazując przy tym możliwość integracji zasobów cyfrowych z procesami twórczymi.

Podczas testowania platformy Spatial została użyta wersja przeznaczona do celów edukacyjnych. Strona główna po bezpośrednim wejściu na platformę pokazuje kilka zakładek m.in. cennik czy szkolenia (rys. 2). Po dokonaniu wyboru należy założyć konto/zalogować się (rys. 3).



Rys. 2. Strona główna Spatial

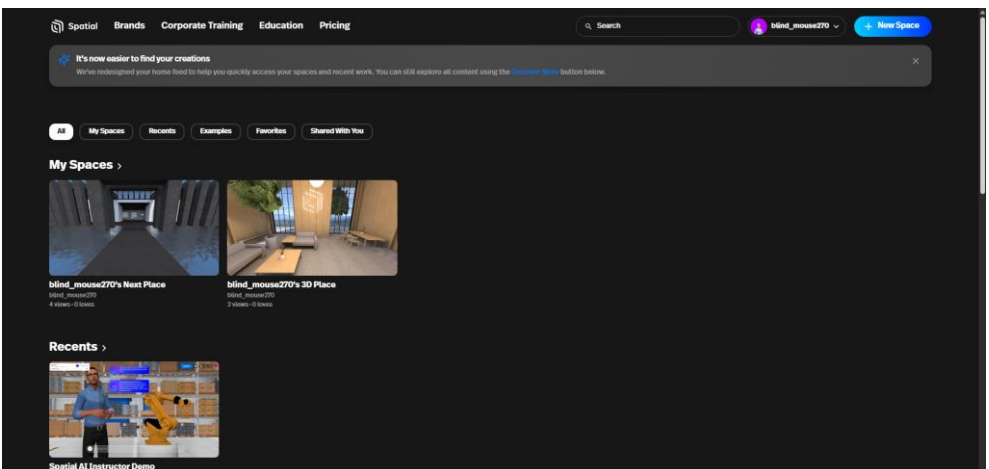
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3. Ekran logowania

Źródło: opracowanie własne.

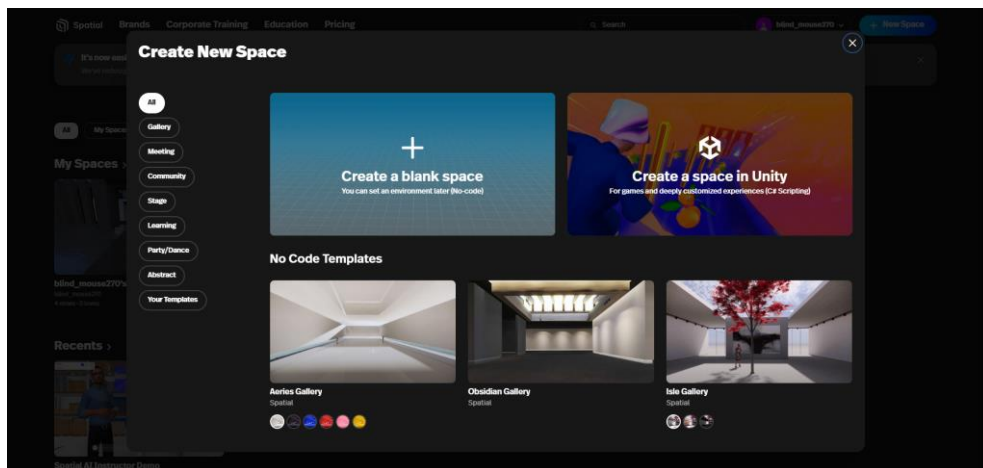
Pierwszym etapem do dostępu do platformy jest zalogowanie się użytkownika. Następnie system przekierowuje nas do głównego panelu sterowania. Użytkownik otrzymuje dostęp do głównego menu (rys. 4).



Rys. 4. Menu po zalogowaniu do platformy

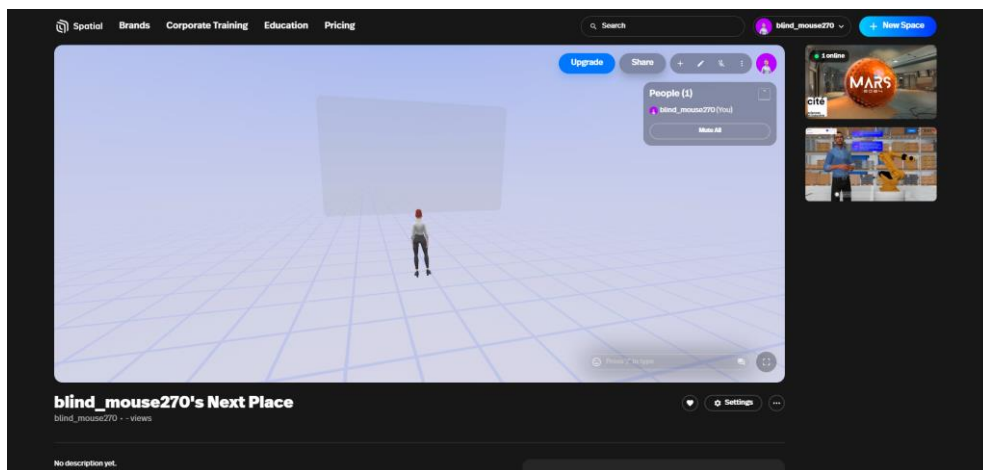
Źródło: opracowanie własne.

Proces tworzenia nowej przestrzeni opartej na siatce geometrycznej (rys.6), następuje po wyborze funkcji “New Space”, a następnie “Create a blank space” (rys. 5). Interakcja użytkownika odbywa się za pośrednictwem cyfrowej postaci – awatara (rys. 6).



Rys. 5. Możliwość kreowania nowej przestrzeni

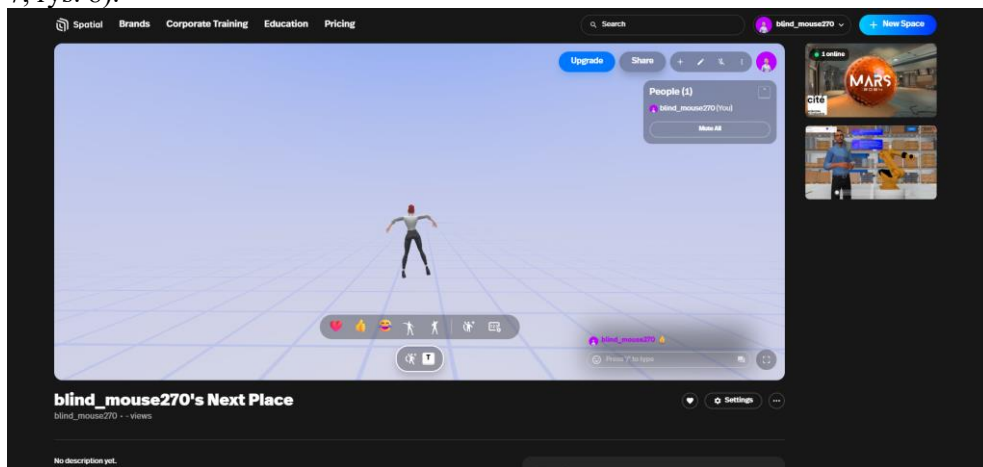
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6. Nowa przestrzeń z awatarem

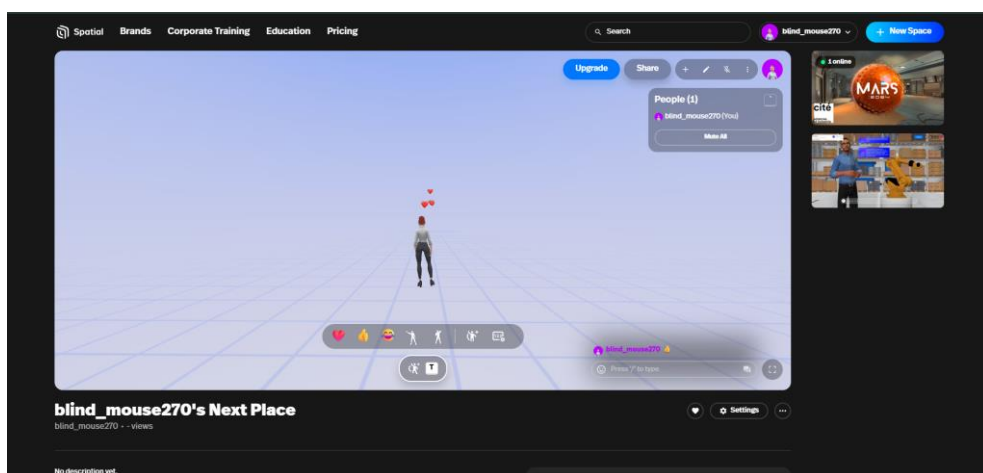
Źródło: opracowanie własne.

Poruszanie się wewnątrz platformy opiera się na intuicyjnym wykorzystaniu klawiszy W, A, S, D oraz sterowaniu kamerą przy użyciu myszy. System oferuje zestaw interakcji niewerbalnych, takich jak wywoływanie animacji oraz gestów (rys. 7, rys. 8).



Rys. 7. Element komunikacji niewerbalnej

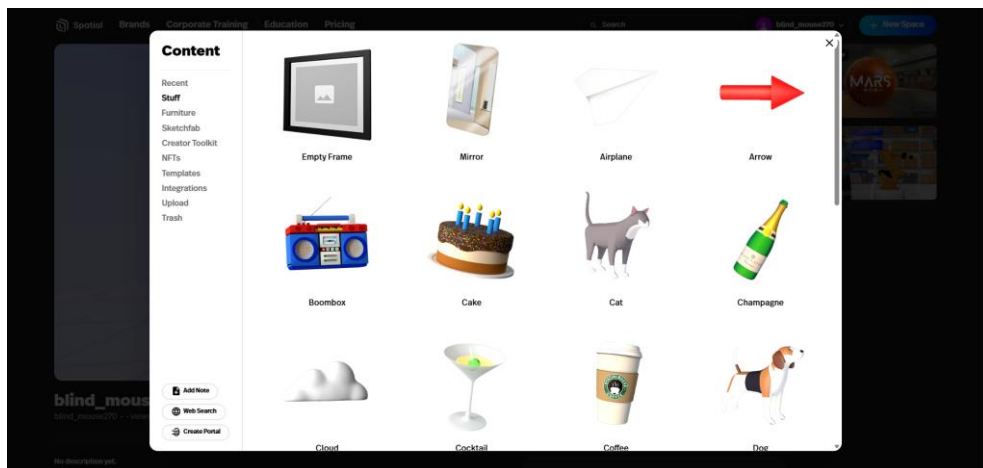
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8. Element komunikacji niewerbalnej c.d

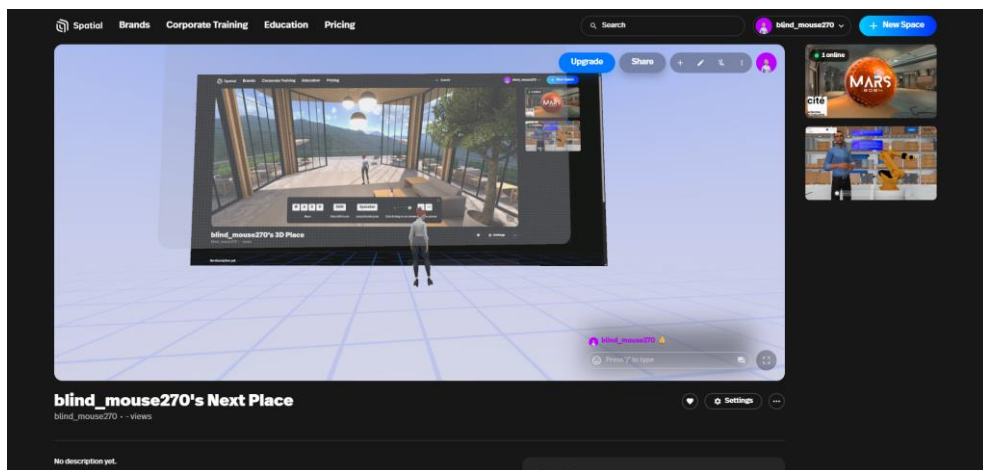
Źródło: opracowanie własne.

Kluczowym elementem budowy sceny jest moduł „Content”, który umożliwia transfer danych do świata wirtualnego (rys. 9). UI pozwala na import plików zewnętrznych (rys. 10) jak i wykorzystania zasobów wewnętrznych m.in gotowych modeli 3D (rys. 11).



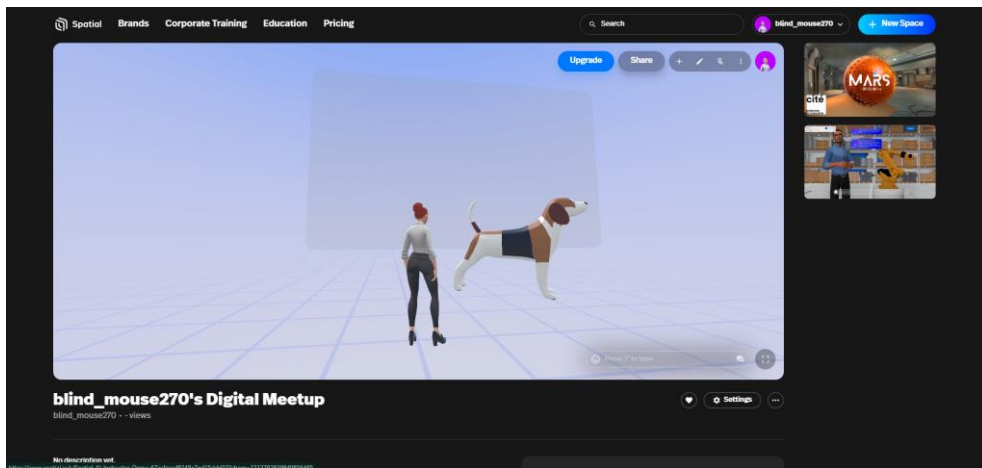
Rys. 9. Moduł „Content”

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 10. Import pliku zewnętrznego

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 11. Gotowy model 3D

Źródło: opracowanie własne.

Ostatnim etapem jest nadanie nazwy stworzonej przestrzeni oraz konfiguracja uprawnień dostępowych. Stworzone środowisko pozwala na przeprowadzenie sesji wieloużytkownikowych znajdujących zastosowanie w celach edukacyjnych jak i badawczych.

4. Dyskusja wyników

Analiza materiału badawczego, obejmującego 10 aplikacji wykorzystujących technologię wirtualnej rzeczywistości, pozwala na wyciągnięcie wniosków dotyczących ich działania oraz przydatności w inżynierii i edukacji. Wyniki badań potwierdzają, że technologia wirtualnej rzeczywistości przestała być tylko domeną branży rozrywkowej, ale staje się kluczowym elementem ekosystemu Przemysłu 4.0. W badaniu wyodrębniono trzy główne grupy narzędzi: platformy społecznościowo-edukacyjne (np. CoSpaces Edu), narzędzia wizualizacyjne (takie jak Spatial, Sketchfab VR Viewer) oraz środowiska do modelowania i tworzenia treści (np. Gravity Sketch). Porównanie tych rozwiązań pokazuje, że rozwój darmowych narzędzi jest odpowiedzią na bariery ekonomiczne, które blokują innowacje w sektorze małych i średnich przedsiębiorstw.

Istotnym aspektem różnicującym technologie XR jest relacja ze światem fizycznym, ponieważ o ile AR i MR wspierają pracownika na stanowisku pracy poprzez nakładanie danych na rzeczywistość, o tyle VR oferuje najwyższy poziom immersji

całkowicie zastępując świat realny ze środowiskiem syntetycznym. Dzięki pełnej izolacji od bodźców możliwe jest tworzenie zaawansowanych cyfrowych bliźniaków zewnętrznych oraz bezpieczne testowanie procesów bez ryzyka uszkodzenia sprzętów fizycznych. Takie rozwiązanie wiąże się również z pewnymi konsekwencjami jakimi są bariery fizjologiczne (choroba lokomocyjna) oraz specyficznymi wymaganiami sprzętowymi w postaci gogli VR.

Analiza techniczna (Tab. 2.) wykazała, że większość badanych aplikacji opiera się na silniku Unity, co zapewnia spójność doświadczeń użytkownika oraz wysoką kompatybilność. W tekście “kontinuum wirtualności” badane narzędzia realizują przekonanie o izolacji od bodźców fizycznych na rzecz całkowitego zanurzenia w środowisku syntetycznym [Milgram i Kishino, 1994]. Jednakże intuicyjność tych rozwiązań jest zróżnicowana. Platformy takie jak Spatial nie powinny sprawiać problemów osobom początkującym, ponieważ ich obsługa jest na tyle intuicyjna, że osoby bez doświadczenia szybko odnajdą się w wirtualnym świecie. Inaczej to wygląda w przypadku np. OpenXR Toolkit, gdzie pomimo możliwości konfiguracji, wymagana jest wiedza techniczna oraz doświadczenie, aby móc swobodnie się w niej odnaleźć. Podsumowując, VR ma przewagę nad AR w obszarach wymagających głębokiej symulacji i optymalizacji ergonomii jeszcze przed powstaniem fizycznego obiektu. Z drugiej strony VR przegrywa w kwestii, gdzie niezbędna jest ciągła interakcja z fizycznym otoczeniem stanowiska pracy.

Pomimo szerokiej dostępności darmowych rozwiązań, głównym wąskim gardłem pozostają ograniczenia funkcjonalne, takie jak wymogi finansowe po przekroczeniu określonego dochodu (Unity Personal wymaga przejścia na Pro po przekroczeniu 200 000 \$, natomiast Unreal Engine pozostaje bezpłatny aż do osiągnięcia 1 mln \$ przychodu z tytułu projektu) lub limity liczby uczestników (Spatial, Engage). Ponadto, wyniki wskazują, że większość badanych aplikacji stawia na współpracę zespołową w trybach online oraz offline. Spośród analizowanych narzędzi szczególne miejsce w kontekście prototypowania inżynierskiego zajmuje Gravity Sketch. Jest to jedyna bezpłatna platforma w zestawieniu, która natywnie obsługuje formaty inżynierskie STEP i IGES, umożliwiając tym samym import geometrii z profesjonalnych środowisk CAD (SolidWorks, CATIA, Fusion 360). Modelowanie odbywa się za pomocą gestów w przestrzeni 3D, radykalnie skracając pętlę iteracji projektowej w porównaniu z tradycyjnym modelowaniem myszą. Ograniczeniem wersji darmowej jest limit przestrzeni chmurowej oraz brak funkcji zarządzania zespołem, utrudniające wdrożenie w środowiskach wieloosobowych bez przejścia na plan płatny. Niemniej jednak, w fazie koncepcji i wczesnej iteracji geometrii, Gravity Sketch nie ma odpowiednika wśród narzędzi bezpłatnych. Unity Personal oraz Un-

real Engine zajmują odmienną pozycję w spektrum analizowanych narzędzi – są pełnoprawnymi silnikami programistycznymi, a nie gotowymi aplikacjami VR. Ich przewaga polega na pełnej kontroli nad środowiskiem wirtualnym, możliwości integracji z zewnętrznymi systemami (np. czujnikami IoT, bazami danych procesowych) oraz zaawansowanym renderowaniu, które umożliwia wierne odwzorowanie materiałów i oświetlenia. Unity oferuje gotowy szablon XR (VR template) oparty na pakiecie XR Interaction Toolkit, natomiast Unreal Engine jest środowiskiem opartym na standardzie OpenXR, zapewniając szeroką kompatybilność z goglami różnych producentów. Barierą wejścia dla obu silników jest wysoka krzywa uczenia się i konieczność posiadania zasobów programistycznych w zespole. Dlatego narzędzia te rekomendowane są na etapie zaawansowanego prototypowania i symulacji, gdy wymagana jest pełna konfigurowalność środowiska, a nie dla użytkowników poszukujących szybkiego wdrożenia.

Z perspektywy zarządzania projektami, wybór konkretnego narzędzia VR jest decyzją strategiczną, która wpływa na cykl życia projektu. Korzystanie z darmowych wersji oprogramowania nakłada na kierownika projektu obowiązek oszacowania budżetu w perspektywie długoterminowej. Kilka badanych aplikacji zbudowana jest na modelu, w którym określa się próg dochodowy, a jeśli użytkownik go przekroczy, wymusza to do przejścia na licencje płatne. Dodatkowo, analiza cyklu życia wybranych narzędzi ukazuje nam zarządzanie ryzykiem. W czerwcu 2026 r. planowane jest zamknięcie platformy Rec Room – na tym etapie jesteśmy w stanie zauważyć w jak dużej skali jest zależność projektu od zewnętrznych dostawców. W przypadku nagłego wyłączenia wsparcia dla danej platformy, projekt staje się bezużytecznym zasobem, co zmusza do kosztownego oraz natychmiastowego przeglądu wcześniej wyznaczonych celów. W inżynierskich procesach projektowych zalecana jest dywersyfikacja narzędzi. Takie podejście zminimalizuje ryzyko ponoszenia dodatkowych kosztów. Dodatkowo, odpowiedni przegląd rozwiązań zwiększa elastyczność oraz bezpieczeństwo projektu jego danych w całym cyklu życia.

Ograniczenia wyników obejmują m.in. szybką ewolucję narzędzi - zamknięcie Rec Room w 2026 r. Wynika to z tego, że obecny rynek zmienia się dynamicznie. Sugeruje to, że nie powinno się zatrzymywać na jednej analizie, a pracować nad dłuższymi wieloetapowymi badaniami. Niemniej jednak, zebrany materiał dowodzi, że darmowe rozwiązania VR mają znaczący wpływ, wypełniając lukę pomiędzy teoretycznymi wizjami VR (Lanier, Biocca, 1992) a praktyką inżynierską.

Tab. 5. Rekomendacja darmowych narzędzi VR w zależności od potrzeb oraz fazy projektu

Faza projektu	Potrzeba	Rekomendowane narzędzie	Najważniejsze ograniczenie darmowej wersji
Prezentacja konceptu klientowi	Szybka wizualizacja modelu 3D, brak wymagań sprzętowych	Spatial	Limity wielkości przesyłanych plików
Projektowanie i iteracja geometrii	Import formatów CAD (STEP, IGES), modelowanie gestem	Gravity Sketch	Brak dostępu do zaawansowanych funkcji np. brak możliwości zarządzania zespołem
Realizacja, szkolenie zespołu i onboarding	Środowisko wieloużytkownikowe, niska krzywa uczenia się	CoSpaces Edu	Ograniczona liczba użytkowników
Realizacja, zaawansowane prototypowanie i symulacja	Pełna kontrola nad środowiskiem, integracja z zewnętrznymi systemami	Unreal Engine	Wysokie wymagania sprzętowe Opłaty licencyjne
Zamknięcie, dokumentacja i prezentacja wyników	Udostępnienie modelu 3D interesariuszom bez instalacji	Sketchfab VR Viewer	Limity w przesyłaniu modeli

Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentacji producentów aplikacji.

Zestawienie ujęte w powyższej tabeli pozwala zauważyć, że w procesie inżynierskim nie ma jednego uniwersalnego rozwiązania, które mogłoby zaspokoić potrzeby we wszystkich fazach prototypowania. Wybór narzędzia musi być powiązany z etapem prac, ponieważ platformy, które mają niski próg wejścia np. Spatial, dobrze sprawdzą się, gdy potrzebujemy szybkiej wizualizacji, lecz minusem jest ograniczenie w wielkości przesyłanych plików. W fazie projektowania i iteracji geometrii dużą rolę odgrywa obsługa formatów CAD, którą oferuje Gravity Sketch. Pomimo, że narzędzie nie posiada funkcji zarządzania zespołem w wersji darmowej, to będzie dobrym rozwiązaniem na tym etapie. CoSpaces Edu jest świetnym rozwiązaniem w momencie przeprowadzenia szkolenia zespołu lub procesu onboarding. Wybrane narzędzie ma niską krzywą uczenia się, a to ułatwia realizację poszczególnych zadań, aczkolwiek wiąże się to z ograniczoną liczbą uczestników. W momencie, gdy potrzebna jest pełna kontrola nad środowiskiem, kluczowe jest wykorzystanie odpowiedniego narzędzia jakim może być silnik Unreal Engine. Pomimo swoich zalet, posiada również pewne wady m.in. wydajność sprzętu oraz opłaty licencyjne. Ostatnim etapem jest faza zamknięcia, dokumentacji oraz prezentacji wyników. Tutaj odpowiednim narzędziem będzie Sketchfab VR Viewer, które posiada możliwość udostępniania modeli 3D bez konieczności instalacji dodatkowego oprogramowania

przez interesariuszy. Pomimo tej możliwości, wadą wersji darmowej aplikacji są limity w przesyłaniu danych modeli. Darmowe rozwiązania VR są alternatywą dla kosztownych systemów. Narzędzia sprawdzą się, jeśli użytkownicy dostosują się do ich ograniczeń, które występują na każdym etapie cyklu życia projektu.

Podsumowanie

Analiza zgromadzonego materiału dowodzi, że darmowe rozwiązania VR nie są tylko “zabawką”, ale stały się realnym rozwiązaniem dla kosztownych systemów w fazie prototypowania. Wnioskiem płynącym z uzyskanych wyników jest istnienie współzależności pomiędzy progiem wejścia, a kontrolą nad środowiskiem. Przeprowadzone badania dotyczące wyboru darmowych narzędzi VR należy uzależnić od potrzeb grupy docelowej. Dla amatorów oraz osób początkujących najlepszym wyborem będą platformy o wysokim poziomie intuicyjności takie jak Spatial czy Engage. Architekci oraz osoby, które są skoncentrowane na szybkiej prezentacji projektów, powinni przykuć swoją uwagę na narzędzia wizualizacyjne i modelarskie takie jak Sketchfab VR Viewer czy Gravity Sketch, które zapewniają szeroką obsługę formatów plików oraz umożliwiają intuicyjne kreowanie przestrzeni poprzez gesty. Z kolei dla inżynierów oraz profesjonalistów dążących do zaawansowanego prototypowania oraz symulacji procesów produkcyjnych rekomendowane są silniki Unity oraz Unreal Engine, które oferują najwyższy stopień synchronizacji z urządzeniami zewnętrznymi oraz zaawansowaną manipulację obiektami. Można zauważyć, że wdrożenie VR w przedsiębiorstwie jest warunkowane zasobami ludzkimi zdolnymi do obsługi danego środowiska, a nie tylko budżetem firmy.

Z perspektywy zarządzania projektami, wybór konkretnego narzędzia musi być decyzją przemyślaną, opartą na cyklu życia projektu. W trakcie szukania najlepszego narzędzia, powinna zostać przeprowadzona odpowiednia dywersyfikacja, aby uniknąć ponoszenia dodatkowych kosztów oraz fiasz. Firmy oraz ich projekty są bardzo zależne od zewnętrznych dostawców, dlatego rzetelna weryfikacja jest kluczem do sukcesu. W momencie wizji pomysłu, zaleca się korzystanie z narzędzi z niskimi wymaganiami sprzętowymi np. Spatial. Natomiast w momencie, gdy projekt jest już na etapie zaawansowanym, to niezbędne jest korzystanie z silników Unity lub Unreal Engine, co należy uwzględnić w budżecie, ponieważ po przekroczeniu progu dochodowego darmowa licencja wygasa.

Pomimo szerokiej rozpiętości zbadanych darmowych rozwiązań, praca posiada pewne ograniczenia. Jednym z nich jest brak bezpośrednich testów w pełnym zanieurzędzeniu w wirtualny świat. Analiza opierała się na pracy w trybie desktopowym, co

mogło mieć wpływ na ocenę intuicyjności interfejsów. Aktualność porównań technicznych w niniejszym artykule jest ściśle ograniczona czasowo, ze względu na dynamiczne zmiany w oprogramowaniach platform. Analiza nie uwzględnia barier fizjologicznych użytkowników, co ma wpływ na wdrożenie VR w zespołach. Ponadto poza zakresem niniejszego przeglądu pozostały kwestie bezpieczeństwa danych i ochrony własności intelektualnej – w szczególności lokalizacja serwerów przechowywujących przesyłane modele 3D, warunki licencji dotyczące praw do treści oraz zgodność platform z wymogami RODO. Aspekty te mają istotne znaczenie dla MŚP operujących chronionymi projektami i powinny stanowić przedmiot odrębnego badania z udziałem specjalistów prawnych.

Dalszy rozwój wieloużytkownikowych środowisk VR/CAD w warunkach przemysłowych wydaje się niezbędny. Pełnią one rolę naturalnego interfejsu dla systemów cyfrowych bliźniaków, ułatwiając wizualizację danych procesowych. Trzeba jednak skupić się na poprawie komfortu użytkownika oraz próbie niwelowania barier fizjologicznych, aby w pełni móc wykorzystywać potencjał wirtualnego testowania w bezpiecznym oraz kontrolowanym środowisku syntetycznym. Podsumowując, darmowe rozwiązania VR są świetnymi narzędziami, które wypełniają lukę między teorią a praktyką inżynierską w dobie Przemysłu 4.0.

Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonej analizy, przyszłe prace badawcze powinny skupić się na trzech kluczowych aspektach, które umożliwią na przejście z etapu przeglądu do momentu wdrożenia. Pierwszym aspektem powinna być weryfikacja odpowiednich urządzeń w pełnej immersji. W momencie rozpowszechnienia się gogli VR drugiej generacji np. Meta Quest 3, zasadne jest przeprowadzenie analogicznego przeglądu wraz z testami w trybie immersyjnym. Umożliwia to weryfikację czy narzędzia wykazujące wysoką intuicyjność w trybie desktopowym, w sposób identyczny będą zachowywały się w środowisku wirtualnym. Kolejnym aspektem jest obiektywizacja użyteczności badanych narzędzi. Ważnym krokiem jest przeprowadzenie badań z udziałem użytkowników końcowych (inżynierów, kierowników projektów, klientów) przy użyciu standaryzowanych narzędzi pomiaru użyteczności np. System Usability Scale. Umożliwia to obiektywną ocenę, czy np. narzędzie, które wykazuje się niską intuicyjnością oferuje tak wysoką kontrolę nad cyfrowym bliźniakiem, że jest on akceptowalny przez profesjonalistów. Z perspektywy menedżerskiej, analiza całkowitego kosztu posiadania darmowych rozwiązań w sektorze małych i średnich przedsiębiorstw jest konieczna. Powinna ona zawierać koszty wyposażenia oraz uwzględniać ryzyko operacyjne – opcja zamknięcia danej platformy (np. zamknięcie Rec Room w czerwcu 2026 r.). Dobrą możliwością byłoby opracowanie techniki, która wyznaczałaby moment, w którym darmowa licencja przestaje być opłacalna, umożliwiłoby to uniknięcie strat finansowych.

ORCID iD

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

Literatura

1. Azuma R.T. (1997), *A Survey of Augmented Reality*, Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6(4), s. 355-385.
2. Berg L.P., Vance J.M. (2017), *Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey*, Virtual Reality 21(1), s. 1-17.
3. Berni A., Borgianni Y. (2020), *Applications of Virtual Reality in Engineering and Product Design: Why, What, How, When and Where*, Electronics 9(7), art. 1064.
4. Billinghurst M., Clark A., Lee G. (2015), *A Survey of Augmented Reality*, Foundations and Trends in Human-Computer Interaction 8(2-3), s. 73-272.
5. Burdea G.C., Coiffet P. (2004), *Virtual Reality Technology*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken.
6. Cellary W. (2019), *Przemysł 4.0 i Gospodarka 4.0*, Biuletyn Polskiego Towarzystwa Ekonomicznego 3(86), s. 48-52.
7. Choi S., Jung K., Noh S.D. (2015), *Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions*, Concurrent Engineering: Research and Applications 23(1), s. 40-63.
8. CoSpaces Edu, CoSpaces Edu, <https://edu.delightex.com/JSU-GRB> [23.09.2026].
9. ENGAGE, ENGAGE, <https://engagevr.io/> [23.09.2026].
10. Ezhil S.L. (2025), *A Comparative Analysis of Unity, Unreal Engine, Godot and CryEngine: Technical Features, Licensing Models, and Suitability for Modern Game Development*.
11. Gravity Sketch, *Gravity Sketch*, <https://gravitysketch.com/> [23.09.2026].
12. Grieves M. (2022), *Intelligent digital twins and the development and management of complex systems*, Digital Twin 1, art. 8.
13. Gryc A., Kucharczyk W., Tomaszewska K. (2026), *AR jako narzędzie wizualizacji modeli CAD w fazie prototypowania – przegląd darmowych rozwiązań*, Akademia Zarządzania 10(1), s. 156-173.
14. Hu-Au E., Lee J.J. (2017), *Virtual reality in education: a tool for learning in the experience age*, International Journal of Innovation in Education 4(4), s. 215-226.
15. Lanier J., Biocca F. (1992), *An Insider's View of the Future of Virtual Reality*, Journal of Communication 42(4), s. 150-172.
16. LaViola J.J. Jr., Kruijff E., McMahan R.P., Bowman D.A., Poupyrev I. (2017), *3D User Interfaces: Theory and Practice*, 2nd ed., Addison-Wesley Professional.

17. Milgram P., Kishino F. (1994), *A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*, IEICE Transactions on Information and Systems E77-D(12), s. 1321-1329.
18. OpenXR Toolkit, OpenXR Toolkit, <https://mbucchia.github.io/OpenXR-Toolkit/> [23.09.2026].
19. Rec Room, Rec Room, <https://recroom.com/> [23.09.2026].
20. Sketchfab, Sketchfab VR Viewer, <https://sketchfab.com/virtual-reality> [23.09.2026].
21. Spatial, Spatial, <https://www.spatial.io/> [23.09.2026].
22. Steuer J. (1992), *Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence*, Journal of Communication 42(4), s. 73-93.
23. Strand I. (2020), *Virtual Reality in Design Processes: A literature review of benefits, challenges, and potentials*, FormAkademisk 13(6), s. 1-19.
24. Tomaszewska K. (2025), *XR Technology in Manufacturing – Exploring of Practical Applications*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie 217, s. 573-592.
25. Unity Technologies, *VR Project Template*, Unity Documentation [23.09.2026].
26. Unreal Engine, Unreal Engine, <https://www.unrealengine.com/> [23.09.2026].
27. VRChat, VRChat, <https://hello.vrchat.com/> [23.09.2026].
28. Wójcik A. (2016), *Wykorzystanie technologii rzeczywistości wirtualnej w procesie kształcenia*, s. 262.
29. Wójcicki T. (2010), *Rzeczywistość rozszerzona w procesie kształcenia ustawicznego*, Edukacja Ustawiczna Dorosłych 1, s. 85-96.

VR as a Visualization and Simulation Tool in the Prototyping Phase – An Overview of Free Solutions

Abstract

In the era of Industry 4.0, virtual reality (VR) technology is revolutionizing engineering prototyping by enabling immersive visualizations and simulations without the need for physical models. This paper aims to provide a critical comparative evaluation of free VR solutions in terms of their functionality, intuitiveness, hardware requirements, and integration with CAD formats. The paper reviews the literature and presents an evaluation of selected applications such as Spatial, CoSpaces Edu, Engage and VRChat. The research results indicate a clear division of available solutions into social-educational platforms, visualization tools, and modeling environments. The analysis revealed certain limitations of the free versions, including, among others, restrictions on content creation, the number of participants, and

technical access. The conclusions confirm that virtual reality technology supports the prototyping process and cost reduction. The selection of an appropriate, free tool must be aligned with project needs, as there is no universal free solution that meets all user expectations.

Key words

virtual reality, prototyping, visualization