

Agnieszka MOLGA¹, Mikołaj PŁACHTA²

¹ ORCID: 0000-0002-0857-5111. Dr, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Transportu, Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Informatyki, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom; e-mail: agnieszka19216@wp.pl

² Student, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Transportu, Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Informatyki, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom; e-mail: mikolajplachta@gmail.com

MODELOWANIE TRÓJWYMIAROWE THREE-DIMENSIONAL MODELING

Słowa kluczowe: modele 3D, wizualizacje architektoniczne, grafika komputerowa.

Keywords: 3D models, architectural visualizations, computer graphics.

Streszczenie

W pracy przedstawiono wybrane problemy dotyczące grafiki trójwymiarowej. Przedstawiony został problem modelowania modelowania 3D: ogólny opis, czym jest grafika trójwymiarowa, jej zastosowania, wpływ tej technologii na wiele dziedzin przemysłu oraz przyszłe plany na jej wykorzystanie i dalszy rozwój. Artykuł zakończony jest omówieniem znaczenia modelowania 3D w architekturze.

Abstract

The paper presents selected problems related to the generation of three-dimensional graphics. The problem of modeling modeling was presented: a general description of what 3D graphics is, its applications, the impact of this technology on many industries and future plans for its use and further development. The article ends with a discussion of the importance of 3D modeling in architecture.

Wstęp

Grafika komputerowa trójwymiarowa (w przeciwieństwie do grafiki komputerowej dwuwymiarowej) to grafika wykorzystująca trójwymiarową reprezentację danych geometrycznych, które przechowywane są w komputerze w celu

wykonywania obliczeń oraz renderowania dwuwymiarowych obrazów. Obrazy 2D mogą być przeznaczone do późniejszego wyświetlania lub przeglądania w czasie rzeczywistym. Pomimo tych różnic, grafika komputerowa trójwymiarowa w modelu szkieletowym opiera się na wielu tych samych algorytmach co grafika wektorowa 2D, zaś w finalnie wyrenderowanym obrazie na tych samych co dwuwymiarowa grafika rastrowa.

W oprogramowaniu służącym do grafiki komputerowej rozróżnienie między geometrią 2D i 3D jest czasami rozmyte, aplikacje do pracy z grafikami dwuwymiarowymi mogą wykorzystywać techniki 3D w celu uzyskania efektów takich jak oświetlenie, a przede wszystkim programy do obróbki trójwymiarowej korzystają z dwuwymiarowych technik renderowania. Trójwymiarowe grafiki komputerowe są często nazywane modelami 3D. Oprócz renderowanego obrazu model także jest zapisywany w graficznym formacie pliku. Istnieją jednak różnice. Model 3D to matematyczna reprezentacja dowolnego trójwymiarowego obiektu (nieożywionego lub żywego).

Model, projekt nie jest technicznie grafiką, dopóki nie zostanie wizualnie wyświetlony. Ze względu na drukowanie 3D modele trójwymiarowe nie poprzestają wyłącznie na przestrzeni wirtualnej. Obraz można wyświetlić wizualnie jako dwuwymiarowy model w procesie zwanym renderowaniem 3D lub zastosować w niegraficznych symulacjach komputerowych i obliczeniach¹.

Modele trójwymiarowe w programach komputerowych zbudowane są z siatek wielokątów. Taka siatka to zbiór wierzchołków, krawędzi, powierzchni, który określa kształt obiektu wielościennego w grafice 3D i modelowaniu bryłowym. Powierzchnie zwykle składają się z trójkątów, czworokątów i innych prostych wielokątów wypukłych (n-kątów), ponieważ upraszcza to renderowanie, ale model może składać się z wielokątów wklęsłych, a nawet wielokątów z dziurami.

Zastosowanie modelowania 3D

Rozwój technologii na przestrzeni dwóch pierwszych dekad XXI wieku przyczynił się do tego, że modele trójwymiarowe znalazły szerokie zastosowanie w wielu różnych dziedzinach. Jest to możliwe poprzez znaczne zwiększenie możliwości obliczeniowych komputerów w tym czasie, co z kolei przyczynia się między innymi do opracowania narzędzi generujących trójwymiarowe modele obiektów statycznych ze zdjęć.

¹ G. Cesaretti, *Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology*, Acta Astronautica 93/2014, Oxford 2014.

W Tece Komisji Ochrony i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego opublikowanej w 2013 roku opisano zastosowanie modelowania trójwymiarowego w projektowaniu krajobrazu. Powodem, dla którego zrealizowania wykonywano model, była rearanżacja terenów zielonych wokół zabytkowej, drewnianej cerkwi Świętego Ducha w Potyliczu na Ukrainie. Zdecydowano się na niego, ponieważ to rozwiązanie bardzo ułatwiło prace projektantów, między innymi poprzez umożliwienie dokładnej wizualizacji zaprojektowanych zmian bez potrzeby przebywania na miejscu. Do wykonania modelu korzystano zarówno ze zdjęć fotogrametrycznych, jak i cyfrowych fotografii².

W czasopiśmie „Management and Production Engineering Review” z 2014 roku znaleźć można artykuł przedstawiający wykorzystywanie modelowania 3D w planowaniu operacji plastycznych. Model generowany był poprzez zeskanowanie twarzy nieruchomego pacjenta za pomocą skanera 3D, a następnie wizualizowano na nim docelowe efekty planowanych zabiegów. Plastyka twarzy nie jest jedynym obszarem, gdzie wykorzystywane są modele trójwymiarowe. W artykule tym znajdują się odwołania do prac naukowych, w których opisane jest wykorzystywanie modelowania 3D w chirurgii trzewioczaszki, rinoplastyce, ortopedii, a także w rekonstrukcji twarzy lub piersi³.

Druk 3D

W opublikowanym w 2014 roku miesięczniku „Chemical Engineering Process” zamieszczony jest artykuł, w którym opisane zostało produkowanie protez za pomocą drukowania 3D. Dobra jakość protezy w użytkowaniu zależy od tego, jak bardzo przypomina element ciała, który zastępuje oraz jak dobrze i komfortowo przylega na punktach styku z ciałem. Dane konieczne do generowania modeli protez są uzyskiwane z obrazów uzyskanych podczas tomografii komputerowej oraz rezonansu magnetycznego. Następnie uzyskane wstępne modele są transformowane, aż osiągną planowany dla nich kształt. Produkowane są w ten sposób z tworzyw sztucznych zamienniki uszu, sieci naczyń krwionośnych, tchawicy, kości, kończyn (rys. 1) oraz protezy dentystyczne. Aby stworzyć sieć naczyń krwionośnych, najpierw wydrukowano sztywny szablon przy użyciu tzw. filamentu ze szkła węglowego, a następnie naniesiono na niego żywe, wyhodowane w laboratorium tkanki. Dokonując kolejnego podziału przy-

² H. Kozak, *Holy Spirit Church reconstruction and formation of its surrounding lanscape using three-dimension visualization techniques*, Teka Komisji Ochrony Kształtowania Środowiska Przyrodniczego 10/2013, Lublin 2013, s. 193–199.

³ K. Jamrozik, *Application of computer modeling for planning plastic surgeries*, „Management and Production Engineering Review” 2014, No. 4.

mowały one cylindryczny kształt formy, który może zostać wyłożony komórkami śródbłonna i perfundowany krwią pod wysokim ciśnieniem o pulsacyjnym przepływie⁴.



Rys. 1. Protezy wykonane przy użyciu druku 3D

Źródło: <https://entuity.com/3d-printed-prosthetics-lending-a-helping-hand/>

Zaczynając od druku 3D figurek i zabawek, szybko zauważono ogromny potencjał tej technologii i zaczęto ją wykorzystywać między innymi w medycynie, motoryzacji lub aeronautyce. W 2014 roku holenderskie studio architektoniczne Dus Architects postanowiło wybudować dom, drukując wszystkie elementy, z których miał się składać na drukarce 3D. W Europie miał być to pierwszy projekt, który miał zostać w całości wykonany za pomocą technologii druku 3D. Projekt o nazwie „3D Print Canal House” rozpoczął się w Amsterdamie i miał potrwać około trzy lata, jednak przez różne nieprzewidziane na początku elementy, do końca 2019 roku nadal nie stworzono finalnego produktu. Architekci z Dus Architects chcieli udowodnić, że drukując elementy domu bezpośrednio na terenie budowy, będą mieli możliwość całkowicie wyeliminować odpady budowlane, zminimalizować koszty transportu oraz koszty związane ze składowaniem materiałów. Założeniem projektu uczyniono to, że jedynymi niezbędnymi do budowy narzędziami miała być wielka, ale mobilna, drukarka 3D oraz pojemniki z używanym filamentem. Według planu, projekt finalny miał się

⁴ S.K. Bhatia, 3D – Printed prosthetics roll off the presses, “Chemical Engineering Progress” 2014, No. 5.

składać z 13 pokoi, które połączone tworzyłyby dom, ale nadal byłyby łatwe do rozłączenia i przewiezienia do innej lokacji, co uczyniłoby ten budynek niejako mobilnym. Termin realizacji projektu był szacowany na trzy lata, co miało dać czas zarówno na badania, mające na celu określenie optymalnego materiału do produkcji planowanej budowli, a także chciano, by przez ten czas otwarta była wystawa dla zwiedzających, pokazująca potencjał druku trójwymiarowego. Materiałem wykorzystywanym do realizacji tego projektu miał być biodegradowalny plastik, którego dokładny skład miał zostać opracowany w trakcie badań⁵.

Stereolitografia nie jest ograniczona do korzystania z plastików jako jedyne- go surowca, przez co wiele firm zdecydowało się na wykorzystywanie tej technologii w budownictwie, używając jako surowca specjalnie spreparowanych mieszanek cementu. Chińska firma budowlana WinSun w 2015 roku, w ramach pokazu sił, wyprodukowała przy użyciu drukarki 3D sześciokondygnacyjny budynek mieszkalny oraz rezydencję o powierzchni 1100 m². Wykorzystany materiał składał się między innymi ze zmielonego gruzu pozostałego z tradycyjnie prowadzonych projektów oraz ze środka powodującego szybkie zastyganie mieszanek. Wykonawca szacował, że wykorzystanie tej metody pozwoliło na oszczędzenie 60% kosztów związanych z materiałami, a także na realizację inwestycji zaledwie w 30% czasu, który byłby potrzebny, aby postawić te budynki tradycyjnymi metodami. Było to możliwe dzięki temu, że stawiane tak ściany nie potrzebują szalunków, nie generują odpadów, a pompująca cement dysza drukarki, w przeciwieństwie do robotników, pracuje przez całą dobę, cały tydzień. Druk jednego piętra zajmował tylko jeden dzień, co przyczyniło się do ukończenia konstrukcji w niecały tydzień. Ta sama chińska firma, już w 2016 roku zrealizowała inwestycję w Dubaju, polegającą na wydruku wolnostojących biur dla organizacji, która zajmuje się rozwojem technologii druku 3D w Zjednoczonych Emiratach Arabskich⁶.

Biura zostały złożone z modułów wykonanych w Chinach, a następnie przewiezionych kontenerowcami. Posiadają zaokrąglony kształt nie przez przypadek. Służy to jako przykład, że w przeciwieństwie do dotychczasowych praktyk budowlanych, druk trójwymiarowy zakrzywionych kształtów nie jest problematyczny i nie wiąże się z żadnymi dodatkowymi kosztami. Znany w budownictwie jest fakt, że prostokątne bryły nie są optymalnymi kształtami oraz że przyczyniają się do marnotrawstwa materiałów. Są stosowane, ponieważ osiągnięcie innych kształtów jest o wiele trudniejsze i kosztowniejsze, potrzebne są specjalnie spreparowane formy i szalunki, które po zrealizowaniu konkretnej inwestycji nadają się tylko do wyrzucenia. Najlepszymi kształtami pod względem wytrzy-

⁵ I. Hager, *Application 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?*, "Procedia Engineering" 2016, No. 151.

⁶ <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>

małości materiału oraz rozkładu sił są łuki, których produkcja dla drukarek 3D nie stanowi różnicy, co produkcja czegokolwiek innego⁷.

Rosyjska firma Apis Cor w 2017 roku także zrealizowała projekt pokazowy (rys. 2). W czasie 24 godzin wydrukowali i doprowadzili do stanu końcowego budynek mieszkalny. Był to okrągły, jednokondygnacyjny dom o powierzchni 38 m². Kształt zawdzięczał wykorzystaniu do jego produkcji obrotowego ramienia robota, osadzonego na środku budynku, co skutkowało tym, że zaokrąglenie ścian przyczyniło się do maksymalizacji przestrzeni użytkowej. Całkowity koszt budowy to 10 134 dolary amerykańskie. Firma rosyjska, tak samo jak WinSun, realizuje takie projekty, aby pokazać, jakie możliwości daje druk trójwymiarowy w budownictwie tanich domów⁸.



Rys. 2. Dom mieszkalny wydrukowany przez Apis Cor

Źródło: <https://www.apis-cor.com/>

Jednak wraz z rozwojem tej technologii rodzą się też pewne obawy. Ograniczone są nie tylko koszty i ilość odpadów, ale również zapotrzebowanie na pracowników. Według aktualnych obliczeń, produkcja prostokątnych kształtów jest tańsza przy użyciu tradycyjnych metod, lecz wraz ze wzrostem skomplikowania formy wytwarzanych projektów, koszty związane z wytwarzaniem ich metodami druku 3D nie zmieniają się, natomiast koszty wynikające z wykorzystania do-

⁷ G. De Schutter, *Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials*, "Cement and Concrete Research" 2018, No. 112.

⁸ <https://3dprint.com/166389/apis-cor-3d-printed-house-russia/>

tychczasowych metod budownictwa, drastycznie rosną. Pozwala to na większą wolność przy projektowaniu, lecz jednocześnie skutkuje zmianami w strukturach zatrudnienia, zmniejszy się zapotrzebowanie na pracowników fizycznych, a zwiększy na specjalistów i ludzi z branży IT⁹.

Budynki powstałe do 2019 roku przy użyciu druku 3D są albo drukowane we fragmentach, które następnie są składane na placu budowy, albo za pomocą wielkich drukarek, które muszą być większe niż budowle, które produkują. Są jednak prowadzone badania, mające na celu wyeliminowanie tego ograniczenia. Grupa konstruktorów w 2018 roku opublikowała artykuł, w którym zaprezentowała opracowane przez siebie roboty. Maszyny nie były umieszczone na żadnej szynie, lecz były w pełni mobilne. Pracowały jednocześnie nad elementem większym, niż zasięg ramienia każdego z osobna na to pozwalał. Technologia ta wymaga jednak jeszcze dopracowania, które pozwoli na pracę w warunkach odmiennych niż specjalnie spreparowane przestrzenie wewnątrz budynków, ale już teraz dostrzega się ogromny potencjał tej technologii¹⁰.

Możliwości, jakie daje druk 3D, poruszają wyobraźnię, co już zaowocowało takimi projektami, jak plany wykonania przy użyciu cementu wytworzonego z księżycowego regolitu i umieszczenia przez w pełni mobilne roboty bazy na księżycu¹¹. W taki oto sposób, ta technologia może być kolejnym kamieniem milowym w podróży człowieka przez kosmos. Wszystkie powyżej opisane przykłady łączy jeden wspólny, niezbędny element – model 3D. Przy każdej większej inwestycji, zanim przejdzie się do realizacji, inwestor zazwyczaj chce zobaczyć, jak będzie wyglądała jego budowla, gdy już zostanie zakończona. Do tego niezbędne są wizualizacje architektoniczne.

Wizualizacje architektoniczne

W ujęciu historycznym wizualizacją architektoniczną można określić szkice oraz rysunki poglądowe budowli, wykonane na podstawie planów konstrukcyjnych. Obecnie, przez rozwój technologii, pojęcie to dotyczy głównie wygenerowanych cyfrowo dwu- lub trójwymiarowych reprezentacji przestrzeni lub budynków. Identyczne dla rozwoju znaczenia tego pojęcia było zrozumienie, jak ważną rolę odgrywa możliwość zobaczenia planowanego obiektu przed jego wybudowaniem.

⁹ G. De Schutter, *Vision of 3D...*

¹⁰ X. Zhang, *Large-scale 3D printing by a team of mobile robots*, "Automation in Construction" 2018, No. 95.

¹¹ G. Cesaretti, *Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology*, "Acta Astronautica" 2014, No. 93.

Postrzeganie otoczenia przez człowieka jest bardzo zróżnicowane w zależności od tego, czy doświadczamy go fizycznie, poprzez fotografię czy wizualizację. Wizualny aspekt otoczenia odgrywa kluczową rolę w naszym postrzeganiu świata, ponieważ człowiek w większości informacje uzyskuje za pomocą wzroku, jednak inne czynniki sensoryczne, fizjologiczne i psychologiczne również wpływają na postrzeganie miejsca¹². Istnieją istotne różnice w doświadczaniu wizualnym środowiska, pomiędzy obserwowaniem go na miejscu a oglądaniem wizualizacji. W pierwszym przypadku dynamiczne granice pola widzenia przez człowieka nie są ograniczone. Połączenie ruchów głowy i przypadkowych ruchów oczu dostarcza ważnych wskazówek dla mózgu – informacji dotyczących skali, odległości i prędkości. Dodatkowo, dzięki zjawisku akomodacji, możliwa jest zmiana pomiędzy obserwowaniem planów bliskich i dalekich. Natomiast oglądając wizualizację lub fotografię obserwujący jest ograniczony przez fizyczne właściwości przygotowanych obrazów, takie jak dobór kadru, ogniskowej oraz format.

Do końca pierwszej dekady XXI wieku, większość pojawiających się na rynku wizualizacji było płaskimi grafikami, często zbudowanymi na zasadzie kolażu (rys. 3), składającego się z wyrenderowanej bryły budynku oraz dodanych w późniejszej obróbce mebli, ludzi i otoczenia.



Rys. 3. Wizualizacja składana z różnych obrazów

Źródło: Origo Group.

¹² M. Downes, *What you see is not always what you get: A qualitative, comparative analysis of ex ante visualizations with ex post photography of landscape and architectural projects*, "Landscape and Urban Planning" 2015, No. 142.

Taki typ produkcji był podyktowany wysokimi wymaganiami oprogramowania względem stacji roboczych. W celu minimalizacji czasu generowania grafik renderowano tylko najistotniejsze minimum – wnętrza pozbawione mebli, dla których obliczanie odbić światła znacznie spowolniłoby cały proces, również całe otoczenie dodawano dopiero w postprodukcji, ponieważ wtyczki umożliwiające tworzenie wysokiej jakości zieleni były drogie i zasobożerne. Spowodowało to wiele niedoskonałości końcowych obrazów. Oprócz braku jednolitej jakości różnych elementów składowych, często w sposób zamierzony, wizualizacje wprowadzały odbiorcę w błąd, poprzez zaniedbywanie wielkości i odległości elementów otoczenia. Obiekty nieatrakcyjne wizualnie były mniejsze niż powinny być, a drzewa, krzewy i kwietniki znajdowały się bliżej budowli, również w ilościach niemożliwych do osiągnięcia przy uwzględnieniu rozmieszczenia terenów zielonych.

Większość takich problemów zniknęła wraz z rozwojem technologii, pozwalając silnikom renderującym na szybszą produkcję złożonych projektów, a także na wzbogacanie scen o generowane przez oprogramowanie niebo i otoczenie. Zwiększona także została dostępność opcji tworzenia wizualizacji wideo, składających się z płaskich renderów, które pochodziły z wirtualnych kamer, wykonujących w zadanym czasie określone ruchy po scenie. Nie jest to jednak rozwiązanie idealne. Pozwala ono na osiągnięcie efektów równych fotografiom lub nagraniom rzeczywistych miejsc, lecz jednocześnie zachowując wszystkie mankamenty tych mediów. Dla większości zainteresowanych na rynku, taka jakość jest w zupełności satysfakcjonująca, lecz ciągle poszukiwanie dróg na udoskonalenie metody, a także na umożliwienie odbiorcy dokładnego obejrzenia nieistniejących obiektów zaowocowało nowym podejściem do problemu.

Kiedy zobaczenie stworzonego cyfrowo miejsca przestało być problematyczne, następnym krokiem było umożliwienie zwiedzenia go wewnątrz. Stało się to realne dzięki wykorzystaniu silników gier wideo. Rozwój tej technologii spowodował, że są one w stanie wyświetlać fotorealistyczne obrazy w czasie krótszym, niż taki, jaki byłby wymagany przez silnik renderujący, by wygenerować wideo zawierające taką samą ilość modeli¹³. Taka forma zaprezentowania wizualizacji pozwala odbiorcy na większą swobodę działania, każdy obiekt można zaobserwować z dowolnie wybranego kąta, w dowolnie wybranym momencie. Może być też forma interaktywna, ponieważ pozwala na implementację animacji modeli, takich jak np. otwieranie szafek i drzwi, przenoszenie przedmiotów, włączanie i wyłączanie światła lub aktywowanie urządzeń, np.: ekranów lub wiatraków¹⁴.

¹³ J. Hyungwoo, *Architectural VR Realization using Game Engine*, "Advanced Science and Technology Letters" 2015, No. 96.

¹⁴ J. Ratcliffe, *How Can 3D Game Engines Create Photo-Realistic Interactive Architectural Visualizations?*, E-Learning and Games: 11th International Conference, Edutainment 2017, Bournemouth 2017.

Takie zwiedzanie wizualizacji może być zrealizowane za pomocą tradycyjnych urządzeń peryferyjnych, jak i przy użyciu okularów VR. Dla projektantów i architektów budynków atrakcyjność rzeczywistości wirtualnej jest oczywista. Pozwala na zaprezentowanie odbiorcom niezabudowanego projektu dzięki częściowo interaktywnemu doświadczeniu, które pozwala swobodnie się poruszać i oglądać, jak będzie wyglądać gotowy budynek po ukończeniu. To poziom komunikacji, którego nie można osiągnąć za pomocą słów, obrazów, ani nawet fantazyjnej animacji wyświetlanej na ekranie – to możliwość spacerowania po miejscu, które jeszcze nie istnieje¹⁵.

Umożliwienie zwiedzania budynków w wirtualnej rzeczywistości wyczerpuje temat prezentacji klientowi wizualizacji architektonicznych, ponieważ według aktualnych możliwości techniki komputery nie są już w stanie zapewnić więcej przydatnych doświadczeń sensorycznych. Nie wyczerpuje to jednak możliwości wykorzystania samych wizualizacji i modeli, które je tworzą. W 2014 roku opublikowano artykuł, w którym twórcy aplikacji opisują jej działanie i zastosowania. Program pozwalał na nakładanie na zdjęcia wykonane na placach budowy, modeli obiektów, które są tam wznoszone. Z wykonanych zdjęć odczytywana była lokalizacja aparatu fotograficznego, a następnie nanoszony na nie model trójwymiarowy, obserwowany z tej samej perspektywy co swój rzeczywisty, budowany odpowiednik. Uzyskany obraz w założeniu miał pomóc wyobrazić sobie końcowy efekt prac na tle otoczenia oraz pomóc w kontrolowaniu postępów robót, przez możliwość selektywnego wyświetlania na zdjęciu kolejnych porcji modelu celem sprawdzenia, czy zostały dotrzymane terminy budowy tychże partii¹⁶.

Zakończenie

Intensywny rozwój technologii (narzędzia modelarskie, silniki renderujące, silniki gier) wizualizacje architektoniczne rokrocznie zyskują na istotności i popularności. Zarówno kupujący detaliczni, jak i korporacje zauważają ogromny potencjał wykorzystywania modeli trójwymiarowych na potrzeby projektów budowlanych, jak i nowoczesnych technologii związanych z wirtualną rzeczywistością. Jak przedstawiają analitycy z agencji badawczej Tractica¹⁷, rynek gogli VR, akcesoriów i aplikacji VR, który jeszcze w 2014 roku był wart jedynie

¹⁵ B. Martinez, *Adapting Architectural Models for Visualization Using Virtual Reality Headsets*, „Honors Theses” 2015, No. 128.

¹⁶ K. Karsch, *ConstructAide: Analyzing and Visualizing Construction Sites through Photographs and Building Models*, „ACM Transactions on Graphics” 2014, No. 33.

¹⁷ <https://www.tractica.com/research/virtual-reality-for-consumer-markets/>

108,8 mln dolarów, już 4 lata później, w roku 2018, był wart 9 mld dolarów, a sama technologia jest coraz częściej wykorzystywana na potrzeby medycyny, obrotu nieruchomościami, rozrywki, edukacji oraz wojska. Dane jasno wskazują, że w następnych latach powinno oczekiwać się coraz większego znaczenia wirtualnych budowli w rzeczywistym świecie.

Zdaniem autorów niniejszego tekstu przedyskutowane w nim zagadnienia powinny stanowić uzupełnienie w procesie dydaktycznym w ramach zajęć dotyczących grafiki komputerowej.

Bibliografia

- Bhatia S.K., *3D – Printed prosthetics roll off the presses*, “Chemical Engineering Progress” 2014, No. 5.
- Cesaretti G., *Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology*, “Acta Astronautica” 2014, No. 93.
- De Schutter G., *Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials*, “Cement and Concrete Research” 2018, No. 112.
- Hager I., *Application 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?*, “Procedia Engineering” 2016, No. 151.
- Hyungwoo J., *Architectural VR Realization using Game Engine*, “Advanced Science and Technology Letters” 2015, No. 96.
- Jamrozik K., *Application of computer modeling for planning plastic surgeries*, “Management and Production Engineering Review” 2014, No. 4.
- Karsch K., *ConstructAide: Analyzing and Visualizing Construction Sites through Photographs and Building Models*, “ACM Transactions on Graphics” 2014, No. 33.
- Kozak H., *Holy Spirit Church reconstruction and formation of its surrounding lanscape using three-dimension visualization techniques*, Teka Komisji Ochrony Kształtowania Środowiska Przyrodniczego 10/2013, Lublin 2013.
- Martinez B., *Adapting Architectural Models for Visualization Using Virtual Reality Headsets*, “Honors Theses” 2015, No. 128.
- Ratcliffe J., *How Can 3D Game Engines Create Photo-Realistic Interactive Architectural Visualizations?*, E-Learning and Games: 11th International Conference, Edutainment 2017, Bournemouth 2017.
- Zhang X., *Large-scale 3D printing by a team of mobile robots*, “Automation in Construction” 2019, No. 95.

Netografia

- <https://www.tractica.com/research/virtual-reality-for-consumer-markets/>
<https://3dprint.com/166389/apis-cor-3d-printed-house-russia/>
<https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>