



Wykorzystanie mieszanej rzeczywistości w zakresie wizualizacji obrazowych danych trójwymiarowych

The use of mixed reality in the field of three-dimensional medical image visualization

Andrzej Skalski^{1,2}, Maciej Stanuch^{1,2}, Adriana Złahoda-Huzior^{1,2}, Tomasz Kuszewski³

¹ AGH w Krakowie, Katedra Metrologii i Elektroniki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. +48 12 617 28 28, e-mail: skalski@agh.edu.pl

² MedApp S.A., Al. Putkownika Władysława Beliny-Prażmowskiego 60, 31-514 Kraków

³ Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Stefana Żeromskiego 5, 25-369 Kielce

Wprowadzenie

Mieszana rzeczywistość MR (ang. *Mixed Reality*) znajduje coraz szersze zastosowanie zarówno w życiu codziennym, jak i w medycynie. W przypadku medycyny MR najczęściej jest wykorzystywana do wizualizacji obrazowych danych medycznych, w szczególności trójwymiarowych. Jako przykład można podać tomografię komputerową czy rezonans magnetyczny. Obecnie MR znajduje zastosowanie w planowaniu zabiegów, diagnostyce, wspomaganiu chirurgii (zwłaszcza minimalnie inwazyjnej) czy też szkoleniu studentów medycyny.

Na rysunku 1 przedstawiono porównanie mieszanej rzeczywistości z wirtualną i rozszerzoną. W przypadku rzeczywistości wirtualnej użytkownik jest w pełni zanurzony w sztucznie

wykreowanym świecie bez interakcji ze światem rzeczywistym. Użytkownik może wchodzić w interakcję z elementami świata cyfrowego. W przypadku rzeczywistości rozszerzonej użytkownik widzi świat realny w połączeniu z elementami świata cyfrowego.

Mieszana rzeczywistość pozwala na umieszczenie w otaczającym nas świecie wirtualnych obiektów w postaci hologramu (Rys. 2) (analogicznie jak w przypadku rzeczywistości rozszerzonej). W przeciwieństwie do wirtualnej rzeczywistości, gdzie użytkownik jest odcięty od bodźców zewnętrznych, zarówno wizualnych, jak i dźwiękowych, w MR użytkownik widzi cały otaczający świat, a wyświetlane hologramy są dodatkową informacją wzbogacającą rzeczywistość. Zarówno w pierwszym, jak i w drugim rozwiązaniu możliwa jest interakcja z hologramem, co nie występuje w przypadku rzeczywistości rozszerzonej.

194

Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z mieszaną rzeczywistością. W szczególności skupiono się na wykorzystaniu mieszanej rzeczywistości w kontekście wizualizacji obrazowych danych medycznych. Technologia została szczegółowo omówiona oraz porównana z wirtualną i rozszerzoną rzeczywistością oraz drukiem 3D. Zaprezentowano szerokie spektrum zastosowań, m.in. wykorzystanie mieszanej rzeczywistości w szkoleniu oraz do wizualizacji danych pacjentów onkologicznych zobrazowanych w tomografii komputerowej oraz w technice PET.

Słowa kluczowe: mieszana rzeczywistość, rozszerzona rzeczywistość, wizualizacja, tomografia komputerowa, onkologia, edukacja

Abstract

This article covers the topics related to the use of the mixed reality in the field of medical data visualization. It enables the user to see the data as a 3D hologram that is a part of the users' environment. There is a detailed comparison to the virtual and the augmented reality and the relation to the 3D printing. A wide variety of applications of the mixed reality in education and in visualization of the patients' computed tomography and positron emission tomography data is presented.

Key words: mixed reality, augmented reality, visualization, computed tomography, oncology, education

otrzymano / received:

11.04.2020

poprawiono / corrected:

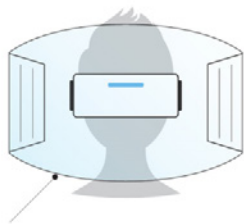
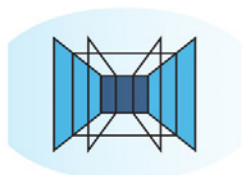
19.04.2020

zaakceptowano / accepted:

05.05.2020

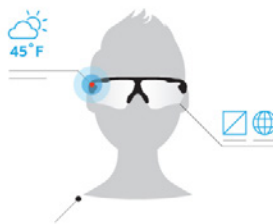


Wirtualna Rzeczywistość (VR)



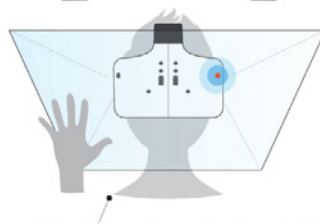
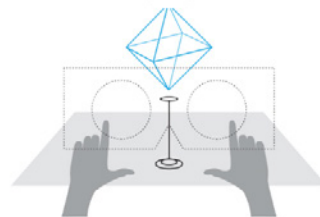
- W pełni wirtualne, zamknięte środowisko.
- Brak interakcji ze światem rzeczywistym.

Rozszerzona Rzeczywistość (AR)



- Cyfrowe elementy zintegrowane z realnym środowiskiem.

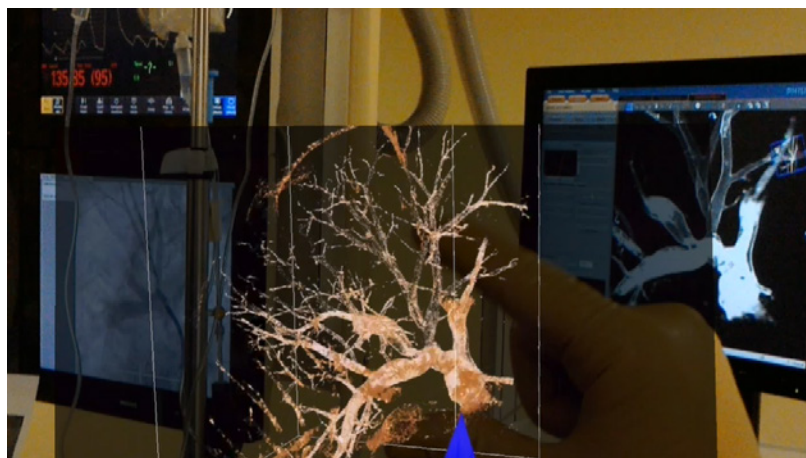
Mieszana Rzeczywistość (MR)



- Pełna interakcja i możliwość manipulacji zarówno elementami środowiska rzeczywistego, jak i wirtualnego.

Rys. 1 Porównanie wirtualnej, rozszerzonej i mieszanej rzeczywistości

Źródło: <http://www.appliedart.com/blog/vr-ar-or-mr-what-s-the-difference-why-should-i-care>.



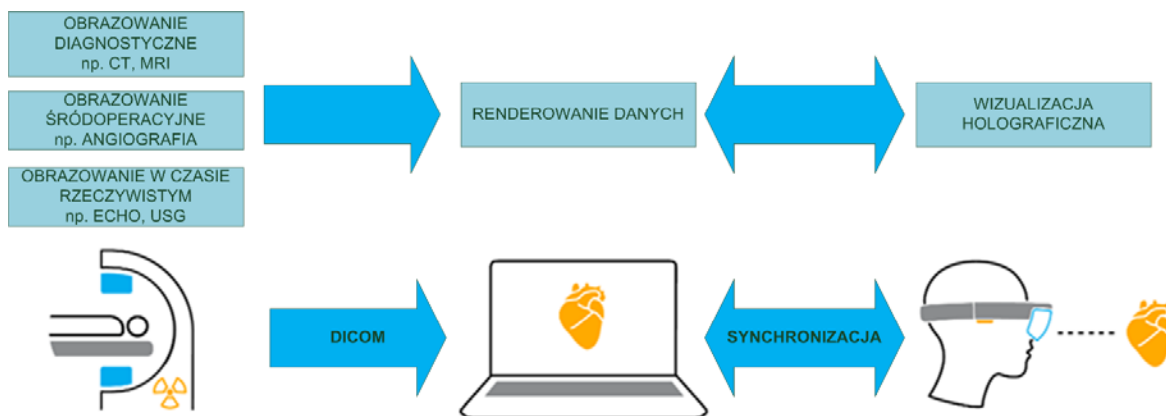
Rys. 2 Hologram umieszczony na sali operacyjnej

Źródło: MedApp S. A., ECZ Otwock.

Wizualizacja danych w mieszanej rzeczywistości

Typowy system do wizualizacji danych umożliwiający interakcję z hologramami przedstawiono na rysunku 3.

Pierwszym elementem jest źródło danych obrazowych zapisanych najczęściej w standardzie DICOM. W zależności od zastosowania klinicznego dane są generowane przez różne techniki obrazowania medycznego. Do celów planowania zabiegów lub w celach diagnostycznych jest to najczęściej tomografia komputerowa, rezonans magnetyczny czy też PET. Śródoperacyjnie wykorzystywane są techniki, które z jednej strony mogą generować obraz w czasie zabiegu (np. angiografia rotacyjna)



Rys. 3 Elementy przykładowego systemu umożliwiającego wizualizację w mieszanej rzeczywistości. CT – Tomografia Komputerowa, MRI – Rezonans Magnetyczny

Źródło: Opracowanie własne.



i/lub dostarczające obraz w czasie rzeczywistym (np. ultrasonografia, echokardiografia).

W zależności od rozwiązań technicznych konkretnego systemu dane są przekazywane do stacji roboczej lub chmury obliczeniowej, gdzie jest przygotowywana wizualizacja. W przypadku wykorzystania stacji roboczej (np. CarnaLife Holo, MedApp S.A., Polska, www.medapp.pl) możliwa jest zarówno wizualizacja danych zapisanych w formacie DICOM, jak i danych ze streamingu bezpośrednio z urządzenia obrazującego (np. echokardiografu). Wykorzystanie zasobów chmurowych ogranicza możliwość wizualizacji w czasie rzeczywistym, ale jest również szeroko stosowane (np. HoloDicom, Hiszpania, <http://holodicom.com/> czy też DicomDirector, USA, www.dicomdirector.com). W kolejnym etapie przygotowywana wizualizacja jest wysyłana do urządzenia wizualizującego w postaci gogli. Gogle do MR, w przeciwieństwie do tych wykorzystywanych w wirtualnej rzeczywistości, nie przysłaniają otaczającego świata. Ze względu na możliwość interakcji z hologramem informacje z czujników zamontowanych w goglach są zwrotnie przekazywane do systemu wizualizacji.

Co nam daje mieszana rzeczywistość w kontekście danych obrazowych

Mieszana rzeczywistość pozwala na wizualizację danych obrazowych w niespotykany dotąd sposób. Do tej pory była możliwość zobaczenia wizualizacji trójwymiarowych jedynie na płaskich ekranach monitorów. Przekładało się to na ograniczenia wielkości oglądanych obrazów poprzez rozmiar monitora, ich jakości poprzez jego rozdzielczość, sposobu interakcji poprzez interfejs (myszka i klawiatura komputerowa), a ostatecznie otrzymywane wizualizacje ograniczone były fizycznie do miejsca, gdzie dany monitor jest umiejscowiony. Mieszana rzeczywistość zdejmuje większość z tych ograniczeń i pozwala na uniezależnienie położenia wizualizacji danych od ekranu monitora LCD. Powoduje to swoistą rewolucję, gdyż w tym momencie wizualizacja może stać się integralną częścią pomieszczenia, np. sali zabiegowej, a wielkość danych może korelować z wymiarami pacjenta. Dzięki zastosowaniu żyroskopów i specjalnych kamer dane wchodzi w interakcję z otoczeniem i mogą reagować na zmieniające się otoczenie (np. ruszający się stół zabiegowy). Interakcja z danymi może być również zainicjowana przez użytkownika poprzez komendy głosowe i gesty. Dzięki temu jest on w stanie dowolnie manipulować obrazem i wpływać na jego parametry, umiejscowienie w przestrzeni, rozmiar, obrót, mapę kolorów i mnóstwo innych parametrów. Co warto zaznaczyć, to wszystko wykonywane jest w sposób w pełni sterylny, gdyż rzucone gesty wykonywane są w powietrzu, co nie zaburza pola sterylności i umożliwia ciągłość pracy lekarzy. Żaden inny typ systemów nie daje takiej swobody działania i pełnego zakresu interakcji bez zastosowania specjalnych środków zapobiegawczych w zakresie sterylności, jak właśnie okulary mieszanej/rozszerzonej rzeczywistości.

Dodatkowo powstałe obrazy holograficzne cechują się również zupełnie inną percepcją głębi niż w przypadku płaskich

monitorów LCD, gdyż wizualizacja, na którą patrzymy, jest w istocie obiektem trójwymiarowym powstałym na specjalnych soczewkach, przez co nasz zmysł wzroku odbiera te obrazy za bardziej naturalne i jest w stanie szybciej zrozumieć ich istotę.

W przypadku urządzeń rzeczywistości mieszanej możliwe jest interpretowanie różnych rodzajów badań obrazowych. Mogą być to zarówno obrazy 2D, jak i 3D z tą jednak różnicą, że w przypadku 2D zwiększona immersja polegająca na poczuciu głębi i możliwości dowolnej manipulacji danych jest ograniczona, dlatego też MR w medycynie skupia się na obrazowaniu trójwymiarowym, takim jak tomografia komputerowa, rezonans magnetyczny, angiografia rotacyjna, ultrasonografia czy też echokardiografia [1, 2].

Mieszana rzeczywistość vs druk 3D

Technologia mieszanej rzeczywistości znajduje również zastosowanie wszędzie tam, gdzie wykorzystywany jest druk 3D jako pomoc w przeprowadzaniu zabiegu. Hologram jest odpowiednikiem „druku światłem”. Można uzyskać bardzo podobny efekt, przy okazji oszczędzając czas i pieniądze konieczne na sam wydruk [3]. Dodatkowo możliwa jest szeroka interakcja z hologramem, np. wizualizacja dowolnych płaszczyzn, umieszczenie markerów na obrazie czy też powiększenie danego obrazu, czego druk 3D nie umożliwia lub wymaga zniszczenia modelu 3D. Wydruki wykorzystywane podczas zabiegu muszą być przechowywane w celach administracyjnych i dokumentacyjnych, do czego potrzebna jest duża powierzchnia magazynowa w sytuacji, gdy wykonuje się wiele zabiegów z wykorzystaniem tej techniki. W przypadku wykorzystania mieszanej rzeczywistości wykorzystywane są tylko dane DICOM i/lub cyfrowe modele struktur otrzymanych podczas procesu segmentacji.

Jak już wspomniano, hologram zapewnia brak utraty sterylności przez operatora podczas jego wyświetlania oraz możliwość wizualizacji dowolnej płaszczyzny danych, co często nie jest możliwe w przypadku wydruków 3D.

Połączenie obrazowych danych medycznych z wysegmentowanymi strukturami umożliwia wykonanie pomiarów powierzchni, czy objętości zmian patologicznych lub dowolnych zdefiniowanych przez użytkownika struktur.

Mieszana rzeczywistość w praktyce

Pomimo faktu, że mieszana rzeczywistość w medycynie jest tematem nowym, jest to dziedzina bardzo intensywnie rozwijana. Wielu medyków postanowiło przetestować możliwości tego typu systemów, wykonując pionierskie zabiegi wspierane przez MR. Jednym z przykładów takiego systemu jest CarnaLife Holo opracowane przez firmę MedApp, które wspomogło wiele procedur medycznych, takich jak zabiegi zamknięcia przetrwałego przewodu tętniczego (Botalla) przy wykorzystaniu danych tomograficznych [4], przeszłokórnej komisurotomii mitralnej przy wykorzystaniu danych echokardiograficznych 3D w czasie



rzeczywistym [5] czy też zabiegów zamknięcia ubytku przegrody międzyprzedsionkowej (ASD), przezcewnikowe wszczepienie zastawki aortalnej (TAVI) [6]. Metody te znalazły swoje zastosowanie i były przetestowane przez różne zespoły z całego świata, m.in. zespół francuski, który wykorzystał rozszerzoną rzeczywistość w laparoskopii lewej hepatektomii z wykorzystaniem danych tomografii komputerowej [7], czy też zespół japoński, który pokazał możliwości w zakresie operacji artroskopii stawu łokciowego [8].

Wiele z tych zabiegów było pierwszymi na świecie próbami wykorzystania mieszanej rzeczywistości w środowisku szpitalnym, ale z upływem czasu świadomość o możliwościach tych technik wzrosła. Skutkuje to coraz częstszymi próbami wsparcia lekarzy poprzez tego typu rozwiązania. Ciągłe pojawiają się nowe możliwości i nowe próby zastosowania MR w różnych przypadkach medycznych na coraz większą skalę.

Mieszana rzeczywistość w edukacji

Techniki mieszanej rzeczywistości wnoszą niebywałą wartość w proces kształcenia nowych pokoleń lekarzy, fizyków czy inżynierów. Tego typu systemy pozwalają na analizę realnych przypadków medycznych zarejestrowanych przy pomocy trójwymiarowego obrazowania medycznego. Podstawowa różnica pomiędzy standardowymi metodami a tymi z wykorzystaniem hologramów polega na tym, że student może zobaczyć obiekt nie jako płaską wizualizację z dodanymi cieniami symulującymi głębię, lecz zapoznać się z badaniem w formie zbliżonej do rzeczywistego pacjenta leżącego na stole operacyjnym. Dodatkowo pozytywnym aspektem edukacyjnym jest możliwość interakcji z danymi w immersyjny sposób, a także sam fakt tego, że na dane pacjenta można spojrzeć dokładnie w ten sam sposób jak na żywego pacjenta, czyli poprzez ruchy głową wokół jego sylwetki. Dodatkowo można zobrazować informację o strukturach wewnątrz pacjenta. Kolejnym ważnym aspektem jest możliwość analizowania tych samych danych przez grupę osób. Rozwiązaniem dającym dodatkową przewagę od strony edukacyjnej jest możliwość transmitowania, jak i nagrywania przebiegu zabiegów razem z komentarzem lekarza prowadzącego, widoku z perspektywy oczu lekarza przeprowadzającego zabieg i dodatkowo widocznym hologramem z danymi, na podstawie których dokonuje się procedury medyczne. Wszystko to prowadzi do unowocześnienia i usprawnienia procesu nauczania studentów kierunków medycznych poprzez wykorzystanie możliwości współczesnej techniki w medycynie.

Istnieją również rozwiązania umożliwiające dodanie dodatkowych urządzeń, które pozwalają na zastosowanie haptyki. Inaczej mówiąc, oddziałują one bezpośrednio m.in. na nasz zmysł dotyku, dając dodatkowe wrażenia immersji. Takie rozwiązania znajdują zastosowanie we wszelkiego rodzaju symulatorach, gdyż są w stanie imitować korzystanie np. z prawdziwych narzędzi chirurgicznych czy też kamer laparoskopowych. Takie podejście również można wykorzystać w połączeniu z technikami

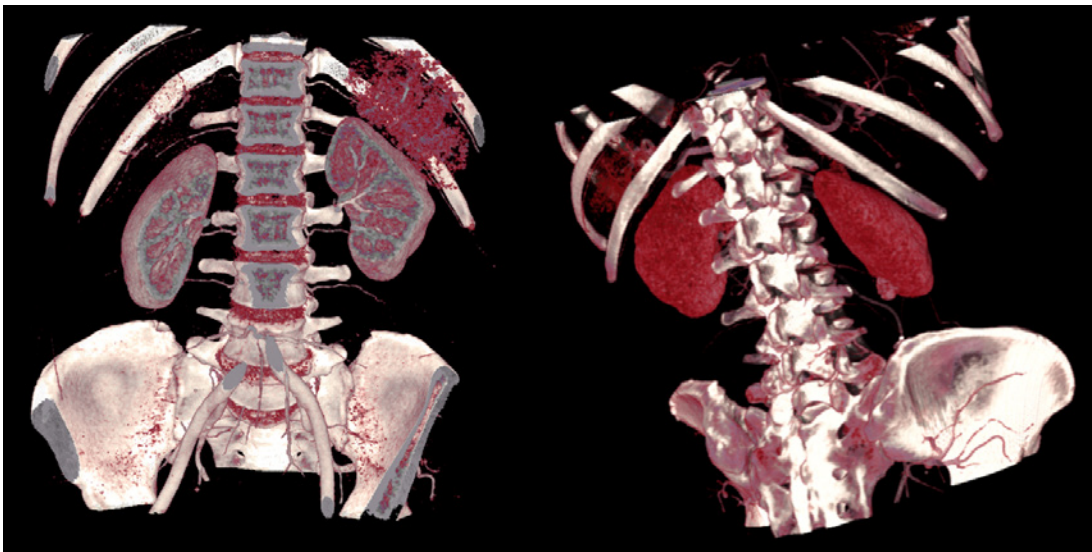
mieszanej rzeczywistości, co znalazło swoje zastosowanie w symulatorze ProMIS [9], gdzie chirurdzy mogą ćwiczyć swoją sprawność w przeprowadzaniu zabiegów, a sam system mierzy i porównuje ich parametry takie jak czas, długość ścieżki ruchu, a także płynność ruchu do tych zarejestrowanych przez doświadczonych ekspertów [10]. Mieszana rzeczywistość może być również zastosowana w zakresie szkolenia tak złożonych specjalności jak neurochirurgia. W tym celu powstało rozwiązanie The Perk Station, które pozwala na wykorzystanie MR w połączeniu z fantomem zabiegowym. Rozwiązanie to, podobnie jak wyżej opisane, mierzy parametry osób ćwiczących na tej platformie takie jak czas procedury, czas wewnątrz fantomu, długość ścieżki, uszkodzenie tkanki i odchylenia od zaplanowanego przebiegu zabiegu [11, 12].

Tego typu systemy są ciągle rozwijane i dają coraz więcej możliwości na szkolenie przyszłej kadry medycznej. Mnogość rozwiązań i przystępna, a zarazem dokładna i powtarzalna forma treningu, jaką zapewnia zastosowanie mieszanej rzeczywistości sprawia, że coraz więcej zespołów pracuje nad wdrożeniem takiego typu szkolenia w różnych częściach treningu młodych lekarzy [13].

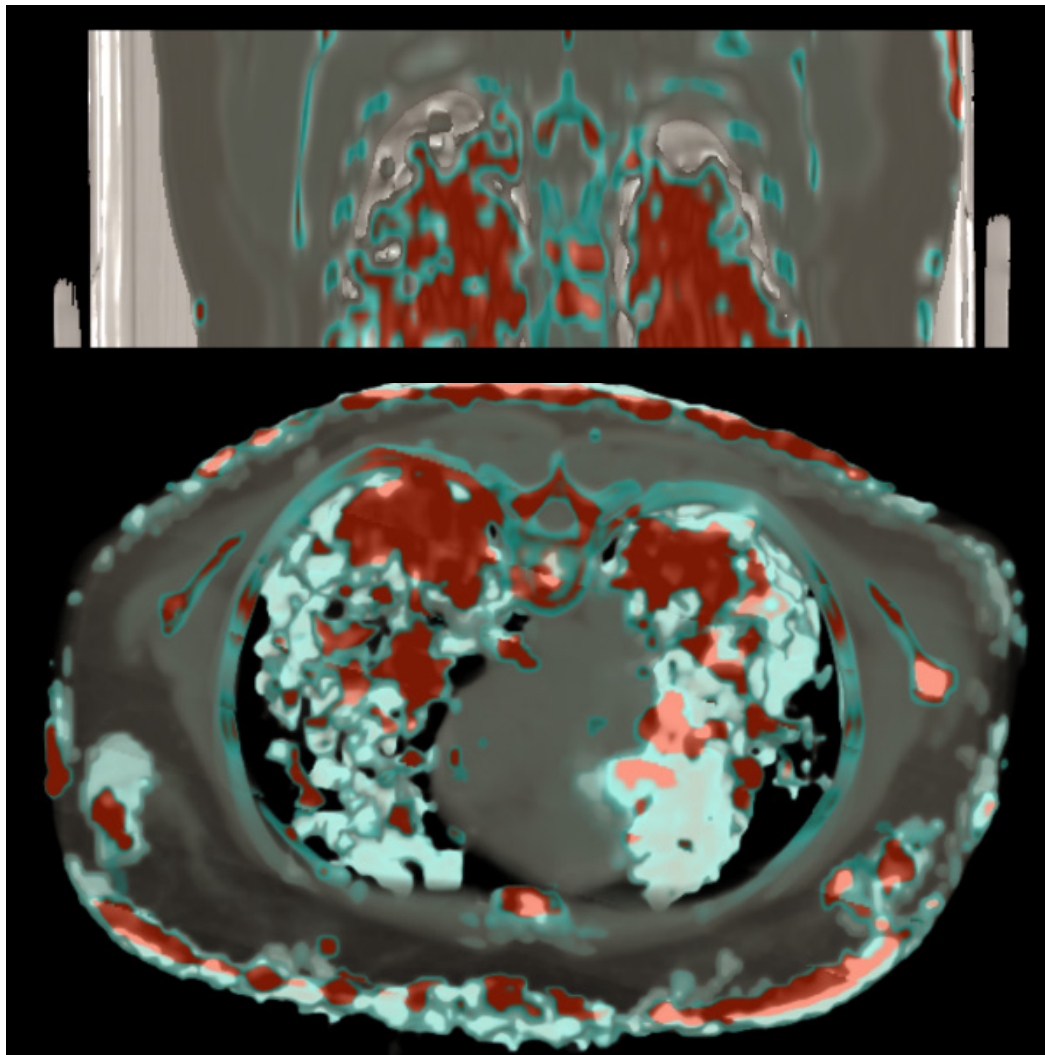
Mieszana rzeczywistość w onkologii

Rzeczywistość mieszana znajduje zastosowanie w różnorodnych dziedzinach medycyny, jedną z nich jest onkologia. Poprawna wizualizacja zmian nowotworowych w obrazach trójwymiarowych pozwala na szybką diagnozę zmian nowotworowych ze względu na naturalne pojmowanie głębi w przypadku obrazów holograficznych. Dodatkowo wpływa to również na zrozumienie zależności przestrzennych pomiędzy zmianą patologiczną a otaczającymi ją tkankami i organami. Obraz w rzeczywistości mieszanej może być dopasowany do wymiarów pacjenta, co skutkuje intuicyjnym zrozumieniem wielkości zmian nowotworowych nawet przez początkujących lekarzy. Takie rozwiązanie pozwala na wsparcie procesu planowania zabiegu dla konkretnego pacjenta, co w konsekwencji może prowadzić m.in. do zmniejszenia czasu zabiegu, a także jego lepszego przygotowania, w szczególności w przypadku skomplikowanych procedur medycznych.

Badania wykazują [14], że wykorzystanie mieszanej rzeczywistości powoduje przyspieszenie procesu diagnostycznego. Jako przykład można podać wykrywanie lokalizacji zmian nowotworowych w obrazach przedstawiających wątrobę. Wyniki testów przeprowadzonych dla 28 radiologów wykazały, że mediana czasu potrzebnego na postawienie poprawnej diagnozy dla obrazów w standardowej projekcji dwuwymiarowej (2D) wynosiła 23,5 s (osiągnięte rezultaty były z zakresu 4-138 s), a dla tego samego zestawu danych wyświetlonego w projekcji trójwymiarowej (3D) przy użyciu mieszanej rzeczywistości ten czas zmalał do 6 s (osiągnięte rezultaty były z zakresu 1-35 s). Pokazuje to, że przedstawienie danych w sposób bardziej zbliżony do naturalnego ułożenia organu w przestrzeni 3D z wykorzystaniem poczucia



Rys. 4 Wizualizacja przecięcia danych i możliwości zobrazowania tkanki nowotworowej w nerce
Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 5 Wizualizacja fuzji PET-CT zwizualizowanej w trójwymiarze
Źródło: Opracowanie własne.



głębi kreowanego w naturalny sposób pozwala na intuicyjne działanie, co przekłada się na zwiększoną szybkość diagnozy i sprawniejsze działanie lekarzy radiologów [14].

Rozwiązanie takie może jednak znaleźć zastosowanie nie tylko w przypadkach nowotworów wątroby, ale również w innych typach nowotworów, takich jak nowotwór nerki (Rys. 4), piersi czy też dowolnego innego miejsca, gdzie dochodzi do tego typu schorzeń. Co ważne, istnieje możliwość, że zmiany patologiczne będą widoczne w innej modalności obrazowej niż tomografia komputerowa. Nie jest to żadnym problemem dla holograficznej wizualizacji trójwymiarowej, której jedynym wymaganiami jest dostarczenie danych 3D w standardzie DICOM. Przykładem wykorzystania innej modalności jest obrazowanie nowotworów w badaniach MRI czy też PET. Nie wyczerpuje to możliwości zastosowania tego typu wizualizacji. Możliwe też jest wykonanie fuzji danych w celu zwiększenia wartości diagnostycznej. Przykład taki został zobrazowany na rysunku 5.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z mieszaną rzeczywistością w kontekście wizualizacji obrazowych danych medycznych. Zaprezentowano budowę typowego systemu MR wraz z omówieniem jego właściwości. Skuteczność i potencjał mieszanej rzeczywistości został pokazany na przykładzie szkolenia przyszłych lekarzy, wizualizacji obrazów trójwymiarowych czy też wykorzystaniu go do planowania zabiegów. Szczegółowo przedstawiono zagadnienia związane z wykorzystaniem omawianego podejścia w onkologii. Dalszy rozwój systemów powinien obejmować możliwość wykorzystania standardu DICOM RT.

Podziękowania

Autorzy chcieliby podziękować dr. n. med. Łukaszowi Kownackiemu z Zakładu Diagnostyki Obrazowej Europejskiego Centrum Zdrowia w Otwocku za udostępnienie zdjęcia przedstawiającego hologram na sali operacyjnej (Rys. 2).

Oświadczenie

Andrzej Skalski, Maciej Stanuch i Adriana Złahoda-Huzior są pracownikami firmy MedApp S.A., która jest producentem systemu CarnaLife Holo, przy wykorzystaniu którego wygenerowano przykładowe wizualizacje przedstawione w artykule.

1. A. Złahoda-Huzior, M. Stanuch, D. Dudek: *Mixed reality techniques in cardiovascular medicine: a new approach towards image-based diagnosis and procedural support*, Digital Health Virtual Journal, 4, 2020.
2. A. Złahoda-Huzior, Ł. Kownacki, M. Stanuch, K. Janc, J. Pawłowski, M. Kurzyńska, S. Darocha, A. Torbicki, D. Dudek, M. Kierepka: *4D CMR in Mixed Reality: an ultimate cardiac imaging tool for a beating heart visualization*, ESC Congress, 2019, France.
3. K. Cheng, P. Mukherjee, I. Curthoys: *Development and use of augmented reality and 3D printing in consulting patient with complex skull base cholesteatoma*, Virtual and Physical Prototyping, 12(3) 2017, 241-248.
4. J.D. Kasprzak et al.: *Percutaneous patent ductus arteriosus closure using intraprocedural mixed reality visualization of 3D computed tomography angiography data: first-in-man experience*, European Heart Journal-Cardiovascular Imaging, 20(7), 2019, 839.
5. J.D. Kasprzak et al.: *First-in-man experience with real-time holographic mixed reality display of three-dimensional echocardiography during structural intervention: balloon mitral commissurotomy*, European Heart Journal, 41(6), 2020, 801.
6. J.D. Kasprzak, M. Kierepka, J.Z. Peruga, D. Dudek, B. Machura, M. Stanuch, A. Złahoda-Huzior, J.I. Kasprzak, D. Sorysz, K. Wdowiak-Okrojek, P. Lipiec: *P4357 Implementation of interactive mixed reality display of three-dimensional echocardiography during percutaneous structural interventions*, European Heart Journal, 40(1), 2019, 745-764.
7. P. Phutane et al.: *Preliminary trial of augmented reality performed on a laparoscopic left hepatectomy*, Surgical Endoscopy, 32(1), 2018, 514-515.
8. M. Yamamoto et al.: *Augmented Reality-enhanced Elbow Arthroscopy: N/A-not a clinical study*, Journal of Hand Surgery, 42(9), 2017, 51-52.
9. S.M. Botden, J.J. Jakimowicz: *What is going on in augmented reality simulation in laparoscopic surgery?*, Surgical Endoscopy, 23(8), 2009, 1693-1700.
10. M.G. Pellen, L.F. Horgan, J.R. Barton, S.E. Attwool: *Construct validity of the ProMIS laparoscopic simulator*, Surgical Endoscopy, 23(1), 2009, 130-139.
11. E. Moulton, T. Ungi, M. Welch, J. Lu, R.C. McGraw, G. Fichtinger: *Ultrasound-guided facet joint injection training using Perk Tutor*, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 8(5), 2013, 831-836.
12. Z. Keri, D. Sydor, T. Ungi, M.S. Holden, R. McGraw, P. Mousavi et al.: *Computerized training system for ultrasound-guided lumbar puncture on abnormal spine models: a randomized controlled trial*, Canadian Journal of Anesthesia, 62(7), 2015, 777-784.
13. E.Z. Barsom, M. Graafland, M.P. Schijven: *Systematic review on the effectiveness of augmented reality applications in medical training*, Surgical Endoscopy, 30, 2016, 4174-4183.
14. E. Pelanis, et al.: *Use of mixed reality for improved spatial understanding of liver anatomy*, Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies, 2019, 1-7.