

AI – Artificial intelligence in prosthetic dentistry – review of literature

AI – sztuczna inteligencja w protetyce stomatologicznej – przegląd piśmiennictwa

Katarzyna Kamalska-Kossuth, Paula Aleksandra Łasica, Teresa Sierpińska

Department of Prosthodontics, Specialist Dental Clinic of the Medical University of Białystok, Poland
Zakład Protetyki Stomatologicznej, Specjalistyczna Lecznica Stomatologiczna Uniwersytetu Medycznego
w Białymstoku

Head: prof. dr hab. n. med. *Teresa Sierpińska*

KEY WORDS:

prosthetic treatment, artificial intelligence, machine learning, reconstructive dentistry, future of medicine

HASŁA INDEKSOWE:

leczenie protetyczne, sztuczna inteligencja, uczenie maszynowe, stomatologia odtwórcza, medycyna przyszłości

Summary

Nowadays, digital technologies are widely used and researched in medicine and dentistry. Digital dentistry (DD) is a tool used to convert physical data into digital one, whereas artificial intelligence (AI) is an innovation primarily concerned with data analysis and interpretation. The aim of the study is to systematize current knowledge on the application of artificial intelligence in prosthodontics. A literature review was conducted using the PubMed and Google Scholar databases. This article presents the possibilities offered by the use of artificial intelligence throughout prosthetic treatment.

Streszczenie

Technologie cyfrowe są obecnie szeroko wykorzystywane i badane w medycynie i stomatologii. Stomatologia cyfrowa (Digital Dentistry, DD) jest narzędziem służącym do przetwarzania danych fizycznych na cyfrowe, natomiast sztuczna inteligencja (Artificial Intelligence, AI), jest innowacją zajmującą się głównie analizą danych oraz ich interpretacją. Celem pracy jest usystematyzowanie wiedzy na temat zastosowań sztucznej inteligencji w protetyce. Dokonano przeglądu piśmiennictwa wykorzystując bazę danych PubMed oraz Google Scholar. Niniejszy artykuł przedstawia możliwości wykorzystania sztucznej inteligencji w leczeniu protetycznym.

Introduction

Artificial Intelligence (AI) allows devices to imitate human knowledge based on input data.^{1,2} A huge amount of information provides them with favourable conditions for what is

Wstęp

Sztuczna inteligencja (Artificial Intelligence, AI) umożliwia urządzeniom naśladowanie ludzkiej wiedzy, na podstawie wprowadzonych danych.^{1,2} Ogrom informacji zapewnia

also known as 'learning'. Machine learning (ML) is defined as computer algorithms that process data and learn from it, without the need for programming. Deep learning (DL) is the use of multi-layer neural networks to enable detailed data analysis through automatic pattern recognition. Convolutional neural networks (CNNs) mimic the complex neural architecture of the human brain. They process images hierarchically. Early layers detect simple features, while deeper layers combine them and analyse them in a more advanced way, minimizing errors.^{2,3} Due to its ability to efficiently process and analyse facts, AI offers advanced diagnostic support used in medicine.^{4,5} The emergence of dental systems based on artificial intelligence has contributed to a revolution in prosthetic practice. AI helps to meet the increasingly high demands and expectations of patients of today. Unfortunately, further research is necessary to assess the clinical effectiveness and safety of using AI in medicine, including prosthetics.⁶⁻⁸ This article focuses specifically on the latest scientific literature concerning the application of AI in prosthetics.

Aim of the study

The aim of this literature review is to present the applications of artificial intelligence to dental prosthetics.

Methods

A review of the PubMed and Google Scholar databases was conducted. These search engines identified the latest research on the application of artificial intelligence in prosthetics. The last search was conducted on August 14, 2025. In the PubMed database the search was limited to the first forty most relevant English-language articles published within the last five years, using the following keywords: artificial intelligence, reconstructive dentistry, prosthetic treatment,

sprzyjające warunki do tzw. „uczenia się”. Uczenie maszynowe (Machine learning, ML) definiuje się jako modele statystyczne i algorytmy komputerowe przetwarzające dane i uczące się na ich podstawie, bez konieczności programowania. Głębokie uczenie (Deep learning, DL) to wykorzystanie wielowarstwowych sieci neuronowych, w celu szczegółowej analizy danych, poprzez automatyczne rozpoznanie wzorców. Splotowe sieci neuronowe (Convolutional neural networks, CNN) naśladują skomplikowaną architekturę neuronów ludzkiego mózgu. Przetwarzają obrazy w sposób hierarchiczny. Wczesne warstwy wykrywają proste cechy, a głębsze łączą je oraz analizują w sposób bardziej zaawansowany minimalizując błędy.^{2,3} Ze względu na możliwość sprawnego przetwarzania i analizowania faktów, AI oferuje zaawansowane wsparcie diagnostyczne, wykorzystywane w medycynie.^{4,5} AI pomaga w spełnianiu coraz wyższych wymagań i oczekiwań naszych pacjentów. Niestety konieczne są dalsze badania w celu oceny skuteczności klinicznej i bezpieczeństwa wykorzystania AI w medycynie.⁶⁻⁸ Niniejszy artykuł koncentruje się szczególnie na najnowszej literaturze naukowej dotyczącej zastosowania AI w protetyce.

Cel pracy

Celem pracy jest przedstawienie zastosowań sztucznej inteligencji w protetyce stomatologicznej.

Metody

Przeprowadzono przegląd bazy danych PubMed oraz Google Scholar. Wyszukiwarki te posłużyły do znalezienia najnowszych badań dotyczących zastosowania sztucznej inteligencji w protetyce. Ostatnie wyszukiwanie przeprowadzono dnia 14.08.2025 r. W przypadku PubMed wyszukiwanie ograniczono do 40

future of medicine, machine learning. Full text analysis was performed for each identified article. English-language publications, focusing on dental diagnostics, treatment planning and treatment methodology were selected. This review included research papers and literature reviews published within the last five years. The twenty-three most recent publications were considered for evaluation.

The following inclusion criteria were used in the review: research papers, literature reviews, articles published in English, articles published within the last five years.

The following exclusion criteria were used: sponsored articles, articles published more than five years previously, articles focusing on AI applications in dental fields other than prosthodontics.

Results

AI has been used relatively rarely in prosthetics, compared to other areas of dentistry, due to complex diagnostics and treatment requiring individual treatment protocols.⁷ Current increase observed in the popularity of systems using AI is related to the dynamic of technological development and the development of digital dentistry.^{4,8,9} The first application of AI in dentistry was the recording and processing of data obtained as a result of intraoral surfaces scanning. Digitally recorded images can be easily transferred to artificial intelligence systems for further analysis. Technology makes it easier for doctors to analyse patients' clinical situations; it also streamlines diagnosis and treatment planning and improves the quality of the prostheses created. The use of artificial intelligence, on the other hand, is associated with the risk of sensitive patient data theft, lack of standardization or legal regulation of AI-based tools as well as higher costs compared to conventional methods.^{7,10}

pierwszych najbardziej trafnych artykułów angielskich opublikowanych w ciągu ostatnich 5 lat, wykorzystując słowa kluczowe: artificial intelligence; reconstructive dentistry, prosthetic treatment, future of medicine, machine learning. Przeanalizowano pełny tekst każdego zidentyfikowanego artykułu. Wybrano publikacje angielskie, koncentrujące się na diagnostyce stomatologicznej, planowaniu leczenia oraz metodach leczenia. W niniejszym przeglądzie uwzględniono prace badawcze oraz przeglądy piśmiennictwa opublikowane w ciągu ostatnich 5 lat. Do oceny zakwalifikowano 23 najnowsze publikacje.

W przeglądzie zastosowano niniejsze kryteria włączenia: prace badawcze, przeglądy piśmiennictwa, artykuły opublikowane w języku angielskim, artykuły opublikowane w ciągu ostatnich 5 lat.

Zastosowano niniejsze kryteria wyłączenia: artykuły sponsorowane, artykuły opublikowane ponad 5 lat temu, artykuły koncentrujące się na zastosowaniu AI innych niż protetyka dziedzin stomatologicznych.

Wyniki

W protetyce, AI była wykorzystywana stosunkowo rzadko, względem innych dziedzin stomatologicznych, ze względu na złożoną diagnostykę i leczenie wymagające indywidualnych protokołów postępowania.⁷ Obecnie obserwowany wzrost popularności systemów wykorzystujących AI, związany jest z dynamicznym rozwojem technologicznym oraz rozwojem stomatologii cyfrowej.^{4,8,9} Pierwszym zastosowaniem AI w stomatologii było rejestrowanie i przetwarzanie danych uzyskanych w wyniku skanowania powierzchni wewnętrznych. Cyfrowo zapisane obrazy można łatwo przenieść do systemów sztucznej inteligencji. Technologia ułatwia lekarzowi analizę sytuacji klinicznej pacjentów, usprawnia diagnostykę i planowanie leczenia oraz udoskonala jakość

The use of artificial intelligence in dental prosthetics

Radiological diagnostics

A correct diagnosis is the foundation of prosthetic treatment. As the demand for 3D scanning and imaging has increased, the generation of data used by artificial intelligence has increased as well. AI is able to process huge amounts of data and extract clinically relevant information faster than a human would. This information is useful in the diagnostic process, in proposing treatment plans and predicting possible difficulties.

AI using software helps in diagnosing the patient faster. This affects the time management optimization and treatment costs reduction. The technology can help in the selection and design of prosthetic restorations and in predicting possible complications or complications that may occur throughout treatment. Visualization of the process' final stage/outcome makes it easier for the patient to take an informed decision about the course of treatment.^{3,4,6,9,11} AI systems based on DL and CNN methods are used to diagnose periapical lesions and caries based on cone beam computed tomography (CBCT) or panoramic radiographs, and then to properly plan treatment.^{5,10} However, the use of AI in radiological image interpretation is limited by image imperfections. Artifacts and patient positioning errors significantly reduce the effectiveness of AI algorithms. Furthermore, AI will only recognize conditions that were previously included in its training sets. This can result in diagnostic errors in the case of less common pathologies.

Designing a smile

Digital smile design (DSD) is defined as the process of creating a smile based on guidelines developed through scientific research and cultural and racial standards that evolved over time. The aesthetics of a smile are influenced by facial shape, lip dynamics and intra- and

wykonanej pracy. Z drugiej strony korzystanie ze sztucznej inteligencji wiąże się z ryzykiem kradzieży wrażliwych danych pacjentów, brakiem standaryzacji i regulacji prawnych narzędzi wykorzystujących AI oraz wyższymi kosztami, względem konwencjonalnych metod.^{7,10}

Wykorzystanie sztucznej inteligencji w protetyce stomatologicznej

Diagnostyka radiologiczna

Prawidłowa diagnoza jest podstawą leczenia protetycznego. Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na wykorzystanie trójwymiarowego skanowania i obrazowania, wzrosło także generowanie danych wykorzystywanych przez sztuczną inteligencję. AI jest w stanie przetworzyć ogromne ilości danych i wyodrębnić istotne klinicznie informacje szybciej, niż zrobiłby to człowiek. Informacje te są przydatne podczas diagnozowania, zaproponowania planów leczenia i przewidywania możliwych trudności.

Oprogramowania wykorzystujące AI pomagają lekarzowi szybciej zdiagnozować pacjenta. Wpływają tym samym na optymalizację zarządzania czasem i redukcję kosztów leczenia. Technologia może pomóc w wyborze i projektowaniu uzupełnienia protetycznego oraz przewidzieć możliwe powikłania bądź komplikacje, które mogą wystąpić podczas leczenia. Wizualizacja końcowego etapu pracy ułatwia pacjentowi podjęcie świadomej decyzji o przebiegu leczenia.^{3,4,6,9,11}

Systemy AI oparte na metodach DL (Deep learning) oraz CNN (Convolutional neural networks) wykorzystywane są do diagnostyki zmian okołowierchołkowych oraz próchnicy na podstawie CBCT (tomografii stożkowej) lub zdjęć pantomograficznych, a następnie prawidłowego zaplanowania leczenia.^{5,10} Ograniczeniem stosowania AI podczas interpretacji zdjęć radiologicznych jest jednak niedoskonałość zdjęć. Artefakty oraz błędy w pozycjonowaniu pacjenta powodują znaczny spadek skuteczności algorytmów AI, ponadto AI

extraoral proportions. Traditional smile design required extensive experience, comprehensive knowledge and an ample imagination from the clinician. Nowadays, software such as Smile Creator, Smilecloud, and exocad DentalCAD create digital smile visualizations based on photographs, intraoral scans, and facial scans. These software programs are examples of digital dentistry, while SmileFy uses artificial intelligence to analyse data such as lip dynamics, facial shape and proportions as well as tooth shape and size. Consequently, it helps dentist in designing a harmonious smile.^{12,13} The smile design can be done in a few minutes, in the presence of the patient, which allows you to better understand their expectations and customize the process. The initial plan can be modified and consulted with other specialists. The ToothBooth phone app uses AI algorithms to simulate the appearance of a smile after whitening, orthodontic treatment or an aesthetic makeover, while the iTero TimeLapse software uses AI to create 3D models that visualize the patient's predicted appearance after treatment. Unfortunately, a virtual smile proposal is sometimes unrealistic to achieve in a clinical setting despite careful treatment. It is also imperative to remember the enormous risk associated with sharing patients' images due to the possibility of a cyberattack.¹³

Optical Scanning (IOS)

Classic intraoral scanners are an example of DD. They display the anatomical situation on a monitor, facilitating and streamlining oral rehabilitation planning.¹⁴ The software also enables occlusal surface design generation for fixed and removable prosthetic works whilst taking into account the existing occlusal surfaces.⁷ The dental technician uses 3D model files from the clinician after optical scanning or from scanned conventional casts. Compared to waxing, the digital design also provides data on the material thickness. The

rozpozna jedynie te schorzenia, które znalazły się wcześniej w jej zbiorach treningowych. Może to skutkować błędami diagnostycznymi w rzadziej występujących patologiach.

Projektowanie uśmiechu

Cyfrowe projektowanie uśmiechu (Digital smile design, DSD) definiuje się jako proces tworzenia uśmiechu w oparciu o wytyczne, opracowane na podstawie badań naukowych oraz wypracowanych na przestrzeni lat standardów kulturowych i rasowych. Na estetykę uśmiechu składa się kształt twarzy, profil, dynamika warg oraz proporcje wewnętrzne i zewnętrzne. Tradycyjne projektowanie uśmiechu wymagało od klinicysty dużego doświadczenia, wszechstronnej wiedzy oraz bogatej wyobraźni. Współcześnie, oprogramowania, takie jak Smile Creator, Smilecloud oraz exocad DentalCAD tworzą cyfrową wizualizację uśmiechu na podstawie zdjęć fotograficznych, skanu wewnątrzustnego i skanu twarzy. Oprogramowania te są przykładem stomatologii cyfrowej, natomiast oprogramowanie SmileFy wykorzystuje sztuczną inteligencję do analizy danych, takich jak dynamika warg, kształt i proporcje twarzy oraz kształt i wielkość zębów. W konsekwencji pomaga lekarzowi zaprojektować harmonijny uśmiech.^{12,13} Projekt uśmiechu można wykonać w kilka minut, przy pacjencie, co pozwala lepiej poznać jego oczekiwania i zindywidualizować pracę. Wstępny plan można modyfikować i konsultować z innymi specjalistami. Aplikacja na telefon ToothBooth wykorzystuje algorytmy AI do symulacji wyglądu uśmiechu po wybieleńniu, leczeniu ortodontycznym lub metamorfizie estetycznej, z kolei oprogramowanie iTero TimeLapse wykorzystuje AI do tworzenia modeli 3D, które wizualizują pacjentowi przewidywany wygląd zębów po zakończeniu leczenia. Niestety, wirtualna propozycja uśmiechu bywa nierealna do osiągnięcia w warunkach klinicznych, pomimo staranności w zakresie

files are saved in the system, which makes it possible to retake the step without the need for an additional dental checkup.¹⁴ The latest intraoral scanners are lightweight and easy to use. In less than a minute they scan large areas of the oral cavity with high attention to detail. The image on the monitor is clear and of high quality. Scanning is comfortable and safe. The main difficulties of the conventional method (the lost wax technique) were incorrect castings and shrinkage losses, which were eliminated in the printing process. In addition, optimization of the manufacturing process, i.e. improvement of the design process, minimization of casting porosity and shortening of the total production time, resulted in an increase in the popularity of intraoral scanning and gradual displacement of analog impressions.^{9,14}

The iTero intraoral scanner is an AI-based system. The software improves scanning through an auto-trimming function that automatically detects and removes soft tissue which distort the scanned area from the image. Unfortunately, sometimes this feature removes key elements of the scan and forces the user to repeat it, resulting in a longer processing times. Scans obtained with the iTero are also less accurate than those obtained with a conventional scanner. The iTero is more susceptible to intraoral conditions such as saliva or metal restorations. Older versions of the device have large, unwieldy probes, which complicate the doctor's work and negatively impact patient comfort. The iTero's advanced technology and the scanner's operation significantly increase the operating costs of the office.

Localizing the final preparation line (Auto Margin Marking)

Properly defining the preparation margin is crucial for periodontal and aesthetic reasons. AI, in tandem with CAD/CAM, assists in the preparation of teeth for fixed prosthetic restorations. The software can automatically

leczenia. Należy też pamiętać o ogromnym zagrożeniu związanym z udostępnieniem wizerunku pacjentów, ze względu na możliwość cyberataku.¹³

Skanowanie optyczne (IOS)

Klasyczne skanery wewnątrzustne są przykładem DD. Ukazują sytuację anatomiczną na monitorze, ułatwiając i usprawniając planowanie rehabilitacji jamy ustnej.¹⁴ Umożliwiają także generowanie projektu powierzchni zwarciowej dla stałych i ruchomych prac protezycznych z uwzględnieniem istniejących powierzchni okluzyjnych.⁷ Technik dentystyczny wykorzystuje pliki modelu 3D pochodzące od klinicysty po skanowaniu optycznym lub z zeskanowanych konwencjonalnych modeli. W porównaniu do woskowania, projekt cyfrowy dostarcza również dane o grubości materiału. Pliki ulegają zapisaniu w systemie, co daje możliwość powtórzenia etapu, bez konieczności dodatkowej wizyty stomatologicznej.¹⁴ Najnowsze skanery wewnątrzustne są lekkie i łatwe w obsłudze. Skanują duże obszary jamy ustnej z dbałością o szczegóły, w mniej niż minutę. Obraz na monitorze jest wysokiej jakości, wyraźny. Skanowanie jest bezpieczne i komfortowe. Głównymi trudnościami metody konwencjonalnej (w technice traconego wosku) były błędne modele i ubytki skurczowe, które zostały wyeliminowane w procesie drukowania. Ponadto, optymalizacja procesu wykonstwa tj. ulepszenie procesu projektowania, minimalizacja porowatości odlewu i skrócenie jego całkowitego czasu, spowodowało wzrost częstości skanowania wewnątrzustnego i stopniowe wypieranie wycisków analogowych.^{9,14} Systemem wykorzystującym AI jest skaner wewnątrzustny iTero. Oprogramowanie usprawnia skanowanie poprzez funkcję auto-trimming zapewniającą automatyczne wykrycie i usunięcie z obrazu tkanek miękkich, które zaburzają obraz skanowanego obszaru. Niestety, funkcja ta czasem usuwa istotne elementy skanu i

identify and mark the preparation margin of teeth.⁴ After contouring the tooth, the AI will highlight preparation irregularities that could be missed with the naked eye, which will facilitate immediate improvement of the work and save time. The literature has drawn attention to the fact that various clinically important variables, such as the type and depth of preparation, are not taken into account. The inability to individualize the preparation is a significant limitation from the clinical point of view, therefore this issue requires further research. Further research is also underway to improve 3D printing accuracy and to minimize distortion in prosthetic restorations. An ML algorithm was used to minimize changes in print shape and size.³ Automation and repeatability of the process reduce the risk of human error during the fabrication of prosthetic restorations.⁴ However, further development is necessary to achieve a system that is capable of learning different tooth geometries and accounting for malocclusions to produce reliable, reconstructed restorations for various, complex clinical conditions.⁹

Implant prosthetics

An increase in the popularity of dental implant treatment has been observed in the past couple of years. Developed in 2018, Diagnocat is the first dental software that uses AI to visualize and analyse 2D and 3D images. Due to its precise imaging of anatomical structures, this software is specifically favoured in implantology.¹⁵ Artificial intelligence overlays intraoral scans on CBCT and enables visualization of hard and soft tissues. This facilitates dental diagnostics, improves communication among doctors, and enables secure storage and transfer of data. Analysis is much faster and more accurate than without AI.^{7,10,15-17}

In the event of implant prosthetic treatment failure, AI-based software provides the necessary information about the implant based on X-ray

wymusza jego powtórzenie, co przekłada się na wydłużenie czasu pracy. Skan uzyskany przez iTero jest też mniej dokładny niż przy użyciu konwencjonalnego skanera. iTero jest bardziej wrażliwy na warunki wewnątrzustne, takie jak ślina czy metalowe uzupełnienia. Starsze warianty urządzenia posiadają duże, niepraktyczne głowice, co utrudnia lekarzowi pracę i negatywnie wpływa na komfort pacjenta. Zaawansowana technologia iTero oraz eksploatacja skanera znacznie podnoszą koszty funkcjonowania gabinetu.

Lokalizowanie linii końcowej preparacji (Auto Margin Marking)

Prawidłowe określenie granicy preparacji jest kluczowe ze względów periodontologicznych i estetycznych. Algorytm AI wraz z CAD/CAM niezwykle pomagają podczas preparacji zębów pod stałe uzupełnienia protetyczne. Oprogramowanie może automatycznie identyfikować i oznaczać margines preparacji zębów.⁴ Po oszlifowaniu zęba, sztuczna inteligencja uwidoczni nieprawidłowości preparacji, możliwe do przeoczenia gołym okiem, co umożliwi natychmiastową poprawę pracy i pozwoli zaoszczędzić czas. W piśmiennictwie zwrócono uwagę na fakt braku uwzględnienia różnych zmiennych, istotnych klinicznie, takich jak rodzaj i głębokość preparacji. Brak możliwości indywidualizowania preparacji stanowi istotne ograniczenie z punktu widzenia klinicznego, dlatego też zagadnienie to wymaga dalszych badań.⁹ Przedmiotem dalszych badań naukowych jest też poprawa dokładności druku 3D i zniwelowanie zniekształceń prac protetycznych. Zastosowano algorytm ML w celu zminimalizowania zmian kształtu i rozmiaru wydruków.³ Automatyzacja i powtarzalność procesu zmniejsza ryzyko błędu ludzkiego podczas wykonawstwa uzupełnień protetycznych.⁴ Konieczne są jednak dalsze prace rozwojowe, aby uzyskać system zdolny do uczenia się różnych geometrii zębów oraz uwzględniający wady zgryzu,

image analysis, enabling its reinsertion.¹⁸ With the development of 3D cone beam imaging and intraoral digital scans, AI-based implant treatment is becoming increasingly popular. AI-analysed data is used in design and fabrication of an implant. AI software selects the desired type of implant using periapical radiographs, panoramic X-rays and CBCT scans. Attempts to predict implant prognosis by analysing osseointegration success, risk factors, and bone anatomy have been made.^{4,8} However, the success rate of AI in predicting implant success has been found to range between 62% and 80%.⁴

AI can also be used to select the size and shape of future teeth and jaw-to-mandible ratio, as well as assist with implant placement by designing a template with an implant hole that takes the patient's detailed anatomy into consideration.^{4,17}

Tooth shade selection

A key role in the aesthetics of a smile is played by the colour of prosthetic restorations, which should be as close as possible to that of natural teeth. Currently, the standard procedure is visual assessment using a shade guide. This method carries a high risk of error due to the physician's subjective judgment.¹⁹ A colorimeter is a device used to precisely match the shade of prosthetic restorations to natural teeth, taking into account enamel translucency, discoloration and cracks. The choice of colour is not subjective or dependent on weather conditions or lighting in the office.

The colorimeter allows one to individualize prosthetic restorations and makes it easier to achieve a natural effect.^{3,9,20,21} It is used especially in the anterior section of the dentition but can also be used when working on molars and premolars. The latest colorimeters are enhanced with an application using artificial intelligence algorithms. It measures colour parameters such as hue and saturation reproducibly. Unfortunately, the

aby wytworzyć wiarygodną, zrekonstruowaną odbudowę dla różnych, skomplikowanych warunków klinicznych.⁹

Implantoprotetyka

W ostatnich latach obserwuje się wzrost metod leczenia z wykorzystaniem implantów. Opracowany w 2018 r. Diagnocat jest pierwszym oprogramowaniem stomatologicznym wykorzystującym AI w celu wizualizacji i analizy obrazu 2D oraz 3D. Ze względu na dokładne obrazowanie struktur anatomicznych, szczególnie często oprogramowanie to, znajduje zastosowanie w implantologii.¹⁵ Sztuczna inteligencja nakłada skan wewnątrzustny na CBCT oraz umożliwia uzyskanie wizualizacji tkanek twardych i miękkich. Ułatwia to diagnostykę stomatologiczną, poprawia komunikację między lekarzami i umożliwia bezpieczne przechwytywanie oraz przekazywanie danych. Analiza odbywa się znacznie szybciej i dokładniej, niż bez pomocy AI.^{7,10,15-17}

W przypadku niepowodzenia leczenia implantoprotetycznego, na podstawie analizy zdjęć rtg, oprogramowanie wykorzystujące AI dostarcza niezbędne informacje o wszczepionym implancie, umożliwiając jego ponowne wprowadzenie.¹⁸ Wraz z rozwojem trójwymiarowego obrazowania wiązką stożkową i wewnątrzustnych skanów cyfrowych wzrasta popularność leczenia implantologicznego z wykorzystaniem AI. Dane analizowane przez AI służą do projektowania, a także wytwarzania implantu. Oprogramowania AI wybierają pożądany typ implantu przy użyciu zdjęć okołowierzchołkowych, pantomograficznych i CBCT. Podjęto próby przewidywania rokowania implantu, poprzez analizę sukcesu osteointegracji, czynników ryzyka i anatomii kości.^{4,8} Stwierdzono jednak, że wskaźnik powodzenia AI w przewidywaniu sukcesu implantu waha się między 62% a 80%.⁴

AI może być również stosowana do wyboru wielkości i kształtu przyszłych zębów i relacji

doctor has no information about the patient group on which the AI training process was performed. Consequently, due to algorithmic bias, colour may not be matched with patient's ethnicity or age. AI-based colorimeters are also more expensive than traditional colorimeters which rely solely on advanced spectrophotometric technology for colour analysis and matching.

The colorimeter can also be used to predict the colour of your teeth after whitening.¹⁹ The Optishade application ensures the security of user data. The colorimeter must be used under the supervision of a doctor in appropriate conditions: the patient should be properly positioned, without access to artificial light, and lips, gums and adjacent teeth may distort the reading if used improperly.²² Due to its price, being disproportionate to the benefits obtained as well as its questionable mode of operation, the colorimeter with an application enriched with an algorithm using artificial intelligence is not yet widely used in everyday dental practice.

Predicting changes in facial features in patients using removable dentures

Individualizing dentures according to the patient's requirements and clinical situation is the most difficult stage of work in the production of removable prosthetic restorations. Digital technology is used to produce dentures that resemble natural teeth and gums as closely as possible, by taking into account the patient's preferences, recognition of their ethnic origin, introduction of facial dimensions and anthropological calculations. DSD enables the creation of various designs of prosthetic restorations and visualization of these designs for the patient. In addition, the technology is able to predict changes in the position of facial soft tissues after treatment.^{2,5} A key factor for successful prosthetic rehabilitation is the correct determination of vertical and horizontal maxillomandibular relations. For this purpose, AI systems use virtual articulators, operating

szczęki do żuchwy oraz wspomagania ustawienia implantu, poprzez zaprojektowanie szablону z otworem na implant, uwzględniający szczegółową anatomię pacjenta.^{4,17}

Dobór koloru zębów

Kluczową rolę w estetyce uśmiechu odgrywa barwa uzupełnień protetycznych jak najbardziej zbliżona do naturalnego uzębienia. Obecnie standardowym postępowaniem jest ocena wizualna, z użyciem kolornika. Metoda ta jest obarczona ryzykiem błędu ze względu na subiektywną ocenę lekarza.¹⁹ Kolorymetr to urządzenie, wykorzystywane w celu dokładnego dopasowania odcienia uzupełnień protetycznych do naturalnych zębów, z uwzględnieniem przezierności szkliwa, przebarwień oraz pęknięć. Wybór koloru nie jest subiektywny ani zależny od warunków pogodowych i oświetlenia w gabinecie.

Kolorymetr pozwala indywidualizować uzupełnienia protetyczne i ułatwia uzyskanie naturalnego efektu.^{3,9,20,21} Stosowany jest szczególnie w przednim odcinku uzębienia, ale może być wykorzystany również podczas pracy przy zębach trzonowych i przedtrzonowych. Najnowsze kolorymetry wzbogacone są o aplikację wykorzystującą algorytmy sztucznej inteligencji. Mierzy ona parametry koloru, takie jak odcień i nasycenie w sposób powtarzalny. Niestety, lekarz nie posiada informacji, w jakiej grupie pacjentów, przebiegał proces szkolenia sztucznej inteligencji. W konsekwencji, ze względu na stroniczość algorytmiczną, kolor może zostać niedopasowany do grupy etnicznej lub wieku pacjenta. Kolorymetry oparte na AI są też droższe, od klasycznych, wykorzystujących jedynie zaawansowaną technologię spektrofotometryczną do analizy i dopasowania koloru.

Kolorymetr może być także używany w celu przewidywania koloru zębów po wybielaniu.¹⁹ Aplikacja Optishade deklaruje bezpieczeństwo danych użytkowników. Korzystanie

on the basis of radiological landmarks marked on CBCT.² In the next stage, AI can create a prototype of a prosthetic restoration for professional control and acceptance by the patient.² Visualization facilitates communication with the patient, but variables such as bone thickness in the facial area or type of occlusion constitute a significant difficulty in predicting the effects of treatment by software using AI.⁵

Conclusion

Artificial intelligence offers enormous potential for use in medicine, including prosthetic dentistry. Through fast and precise data analysis, it facilitates diagnosis and solves complex medical problems.^{1,8,11} The literature presents AI as a modern tool that improves the quality of dental care, saves time for both the dentist and the patient, and increases work comfort.^{3,7,8}

The development of AI is a great convenience, especially for less experienced clinicians, thus increasing patient safety. The versatility of AI in distinguishing anatomical structures makes it a valuable aid in planning treatment using implants.^{1,5,8,10,13} Although AI is a novelty in medicine, it has been recognized as an extremely efficient technology. It has shown promising effectiveness as a tool to assist the doctor during all stages of prosthetic work. On the other hand, numerous limitations are still being pointed out wherever individualization and departure from schematic procedures are necessary.^{3,6,20} Personalized dentistry requires huge amounts of data being taken into account for each patient. Intelligent systems guided by AI are designed to cooperate with dentists, enhancing human potential without replacing human expertise.^{1,8} Highly sensitive data obtained from patients and entered into the system must be handled responsibly and should be secured properly.

Unfortunately, there is a risk that patient

z kolorymetru musi odbyć się pod kontrolą lekarza w odpowiednich warunkach: pacjent powinien być prawidłowo ustawiony, bez dostępu sztucznego światła, a wargi, dziąsła i zęby sąsiednie mogą zaburzyć odczyt podczas nieumiejętnego stosowania.²² Kolorymetr z aplikacją wzbogaconą o algorytm wykorzystujący sztuczną inteligencję ze względu na swoją cenę, niewspółmierną do otrzymanych korzyści oraz wątpliwy sposób działania nie jest jeszcze szeroko wykorzystywany w codziennej praktyce stomatologicznej.

Przewidywanie zmiany rysów twarzy u pacjentów stosujących uzupełnienia ruchome

Indywidualizacja protez zgodnie z wymaganiami pacjentów i ich sytuacją kliniczną to najtrudniejszy etap pracy w wytwarzaniu ruchomych uzupełnień protetycznych. Technologia cyfrowa jest wykorzystywana do wytwarzania protez jak najbardziej przypominających naturalne uzębienie i dziąsła, dzięki uwzględnieniu preferencji pacjenta, rozpoznania jego pochodzenia etnicznego, wprowadzenia wymiarów twarzy i obliczeń antropologicznych. DSD umożliwia tworzenie różnych projektów uzupełnień protetycznych oraz wizualizację tych projektów pacjentowi. Ponadto, technologia jest w stanie przewidywać zmiany ułożenia tkanek miękkich twarzy po zakończeniu leczenia.^{4,9} Kluczowym czynnikiem dla pomyślnej rehabilitacji protetycznej jest prawidłowe ustalenie pionowych i poziomych relacji szczękowo-żuchwowych. Systemy AI wykorzystują w tym celu wirtualne artykulatory, działające na podstawie radiologicznych punktów orientacyjnych naniesionych na CBCT. W kolejnym etapie AI może stworzyć prototyp uzupełnienia protetycznego w celu profesjonalnej kontroli i akceptacji przez pacjenta.⁴

Wizualizacja, ułatwia komunikację z pacjentem, jednak zmienne, takie jak objętość kości w obrębie twarzy lub typ zżarcia, stanowią istotną trudność przewidywania efektów

health data may be used by various institutions in an unethical manner.³ New technologies should be viewed warily, due to the risk of misdiagnosis or incorrect treatment generated by AI algorithms.^{8,23} Currently, AI is not subject to legal liability, regardless of whether it is used in a supervised or unsupervised manner. The doctor still takes full responsibility for the patient and bears the consequences of any errors made by the AI.^{1,3} Additional research is needed for further development and evaluation of the clinical effectiveness of AI in clinical practice.^{3,8,9,11} Currently, the role of AI in prosthetic dentistry is mainly intended to help the doctor to process and analyse data. It is likely that in the future, the role of robotics combined with artificial intelligence will increase, which will allow the machine to perform precise procedures without human involvement. The automatic robotic system is still an underdeveloped area of research in prosthetics.¹ Artificial intelligence should be seen as a tool that relieves dentists and improves the precision of their work. AI is used in prosthetics, primarily as an aid in the diagnosis and treatment of patients. Dentists, with the help of AI software, are able to provide more predictable treatment results and forecast clinical failures. It should be remembered that modern technologies can bring many benefits, but they still require a lot of research and specialist's supervision.

leczenia, przez oprogramowania wykorzystujące sztuczną inteligencję.⁹

Podsumowanie

Sztuczna inteligencja daje ogromne możliwości wykorzystania w medycynie, w tym w stomatologii protetycznej. Poprzez szybką i precyzyjną analizę danych, ułatwia stawianie diagnozy i rozwiązywanie złożonych problemów medycznych.^{1,8,11} Piśmiennictwo pokazuje AI jako nowoczesne narzędzie, które poprawia jakość opieki stomatologicznej, oszczędza czas zarówno lekarza, jak i pacjenta oraz zwiększa komfort pracy.^{3,7,8}

Rozwój AI stanowi duże ułatwienie, szczególnie w przypadku mniej doświadczonych klinicystów, zwiększając tym samym bezpieczeństwo pacjentów. Wszechstronność AI w rozróżnianiu struktur anatomicznych sprawia, że jest ona cenną pomocą w planowaniu leczenia implantologicznego.^{1,5,8,10,13} Chociaż AI jest nowością w medycynie, została uznana za technologię niezwykle wydajną. Wykazała obiecującą skuteczność jako narzędzie służące do pomocy lekarzowi podczas wykonawstwa prac protetycznych na wszystkich etapach. Z drugiej strony, wciąż zwraca się uwagę na liczne ograniczenia wszędzie tam, gdzie konieczna jest indywidualizacja i odejście od schematycznego postępowania.^{3,6,20} Spersonalizowana stomatologia wymaga uwzględniania ogromnej ilości danych dla każdego pacjenta. Inteligentne systemy kierowane przez sztuczną inteligencję są dedykowane do współpracy z lekarzem, zwiększając ludzki potencjał, a nie zastępując ludzką wiedzę specjalistyczną.^{1,8} Wysoce wrażliwe dane uzyskiwane od pacjentów i wprowadzone do systemu muszą być obsługiwane w sposób odpowiedzialny i powinny być prawidłowo zabezpieczone.

Istnieje niestety ryzyko, że dane dotyczące zdrowia pacjentów mogą zostać wykorzystane w sposób nieetyczny przez różne instytucje.³ Nowe technologie należy postrzegać krytycznie,

ze względu na ryzyko mylnej diagnozy lub nieprawidłowego leczenia wytworzonego przez algorytmy AI.^{8,23} Obecnie AI nie podlega odpowiedzialności prawnej, niezależnie od tego, czy jest stosowana w sposób nadzorowany, czy nie nadzorowany. Lekarz wciąż bierze pełną odpowiedzialność za pacjenta i ponosi konsekwencje ewentualnych błędów popełnionych przez AI.^{1,3} Potrzebne są dodatkowe badania, aby dalej rozwijać i oceniać skuteczność kliniczną AI w praktyce klinicznej.^{3,8,9,11} Obecnie rola AI w stomatologii opiera się głównie na pomocy lekarzowi w przetwarzaniu i analizowaniu danych. Prawdopodobnie w przyszłości wzrośnie rola robotyki, połączonej ze sztuczną inteligencją, co

umożliwi wykonywanie precyzyjnych zabiegów maszynie, bez udziału człowieka. Automatyczny system robotyczny jest nadal słabo rozwiniętym obszarem badań w protetyce.¹ Sztuczną inteligencję należy postrzegać jako narzędzie odciążające dentystów i poprawiające precyzję ich pracy. AI wykorzystywana jest w protetyce, przede wszystkim jako pomoc w diagnostyce i leczeniu pacjentów. Stomatolodzy z pomocą oprogramowań AI, są w stanie zapewnić bardziej przewidywalne wyniki leczenia oraz prognozować niepowodzenia kliniczne. Należy pamiętać, że nowoczesne technologie mogą przynieść wiele korzyści, jednak wymagają wciąż wielu badań i nadzoru specjalisty.

References / Piśmiennictwo

1. Shan T, Tay FR, Gu L: Application of Artificial Intelligence in Dentistry. *J Dent Res* 2021; 100(3): 232-244.
2. Limketkai BN, Mauldin K, Maniti N, Jalilian L, Salonen BR: The Age of Artificial Intelligence: Use of Digital Technology in Clinical Nutrition; *Curr Surg Rep* 2021.
3. Pethani F: Promises and perils of artificial intelligence in dentistry; *Aust Dent J* 2021; 66(2): 124-135.
4. Al Hendi KD, Alyami MH, Alkahtany M, Dwivedi A, Alsaqour HG: Artificial intelligence in prosthodontics. 2024; 20(3): 238-242.
5. Orhan K, Bayrakdar IS, Ezhov M, Kravtsov A, Özyürek T: Evaluation of artificial intelligence for detecting periapical pathosis on cone-beam computed tomography scans: 2020; doi: 10.1111/iej.13265
6. Ahmed N, Abbasi MS, Zuberi F, Qamar W, Syahrizal M, Halim B, Maqsood A, Khursheed Alam M: Artificial Intelligence Techniques: Analysis, Application, and Outcome in Dentistry-A Systematic Review. 2021: 2021: 9751564.
7. Selina A Bernauer, Nicola U Zitzmann, Tim Joda: The Use and Performance of Artificial Intelligence in Prosthodontics: A Systematic Rev 2021; 21(19): 6628.
8. Miragall MF, Knoedler S, Kauke-Navarro M, Saadoun R, Grabenhorst A, Grill FD, Ritschl LM, Fichter AM, Safi AF, Knoedler L: Face the Future – Artificial Intelligence in Oral and Maxillofac Surg *J Clin Med* 2023; 12(21): 6843.
9. Revilla-León M, Gómez-Polo M, Vyas S, Basir Barmak A, Gallucci GO, Att W, Özcan M, Krishnamurthy Vinayak R: Artificial intelligence models for tooth-supported fixed and removable prosthodontics: A systematic review. *J Prosthet Dent* 2023; 129(2): 276-292.
10. Zadrożny Ł, Regulski P, Brus-Sawczuk K, Czajkowska M, Parkanyi L, Ganz S, Mijiritsky E: Artificial Intelligence Application in Assessment of Panoramic Radiographs; *Diagnostics* 2022; 12(1): 224. doi: 10.3390/diagnostics12010224

11. *Balaban C, Inam W, Kennedy R, Faiella R*: The Future of Dentistry: How AI is Transforming Dental Practices.; *Compend Contin Educ Dent* 2021; 42(1): 14-17.
 12. *Sabbah A*: Smile Analysis: Diagnosis and Treatment Planning; *Dent Clin North Am* 2022; 66(3): 307-341.
 13. *Alikhasi M, Yousefi P, Kelvin I*: Smile Design: Mechanical Considerations. *Dent Clin North Am* 2022; 66(3): 477-487. doi: 10.1016/j.cden.2022.02.008
 14. *Zitzmann NU, Matthisson L, Ohla H, Joda T*: Digital Undergraduate Education in Dentistry: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health* 2020; 17(9): 3269.
 15. *Shuman L*: Improving Diagnostics, Communication, and Workflow in DSO Practices with AI Technology. *DSOPro* Oct 4, 2024.
 16. *Bayrakdar SK, Orhan K, Bayrakdar IS, Bilgir E, Ezhov M, Gusarev M, Shumilov E*: A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images. *BMC Medical Imaging* 2021; 21, 86.
 17. *Wang J, Wang B, Liu YY, Luo YL, Wu YY, Xiang L, Yang XM, Qu YL, Tian TR, Man Y*: Recent Advances in Digital Technology in Implant Dentistry; *J Dent Res* 2024; 103(8): 787-799.
 18. *Putra RH, Doi C, Yoda N, Astuti ER, Sasaki K*: Current applications and development of artificial intelligence for digital dental radiography; *Dentomaxillofac Radiol* 2022; 51(1): 20210197.
 19. *Machoy ME, Szyszka-Sommerfeld L, Vegh A, Gedrange T, Woźniak K*: The ways of using machine learning in dentistry. *Adv Clin Exp Med* 2020; 29(3): 375-384.
 20. *Aljulayfi IS, Almatrafi AH, Althubaitiy RO, Alnafisah F, Alshehri K, Alzahrani B, Gufran K*: The Potential of Artificial Intelligence in Prosthodontics: A Comprehensive Review. *Med Sci Monit* 2024; 30: e944310.
 21. *Shetty S, Gali S, Augustine D, Sv S*: Artificial intelligence systems in dental shade-matching: A systematic review. *J Prosthodont* 2024; 33(6): 519-532.
 22. *Akl MA, Mansour DE, Zheng F*: The Role of Intraoral Scanners in the Shade Matching Process: A Systematic Review; *J Prosthodont* 2023; 32(3): 196- 203.
 23. *Joda T, Yeung AWK, Hung K, Zitzmann NU, Bornstein MM*: Disruptive Innovation in Dentistry: What It Is and What Could Be Next. *J Dent Res* 2021; 100(5): 448-453.
- Zaakceptowano do druku: 19.03.2026 r.
Adres autorów: 15-369, Białystok,
ul. M. Skłodowskiej-Curie 24A.
© Zarząd Główny PTS 2026.