

Artificial intelligence in the design and production of personalized 3D printed products – conclusions from the project “Things are for People”

Sztuczna inteligencja w projektowaniu i produkcji personalizowanych wyrobów drukowanych 3D – wnioski z projektu „Rzeczy są dla ludzi”

DARIUSZ MIKOŁAJEWSKI
IZABELA ROJEK
MARIUSZ KACZMAREK
PIOTR KOTLARZ
MARCIN KEMPIŃSKI
ZBIGNIEW SZCZEPAŃSKI

JAKUB KOPOWSKI
JOANNA NOWAK
MAREK MACKO
ANDRZEJ SZCZEPAŃCZYK
TOMASZ SCHMIDT
PAWEŁ LESZCZYŃSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2023.4.8>

This article is a development of a paper presented at the International Conference “Intelligent Solutions for Industry – ISI 2022”, under the media patronage of the “Mechanik” journal, which is a platform for the exchange of knowledge, review and discussion of theoretical advances, research results and industrial experience, between academics, researchers, policy makers, practitioners and students working on topics related to Industry 4.0 and Smart Manufacturing. Artificial intelligence (broader: computational intelligence) has been an area of intense research and industrial application for many years, but it continues to open up new areas of exploration and application for researchers, clinicians and industry practitioners. The development of the Industry 4.0 paradigm has further accelerated these processes. A particularly interesting field of application for artificial intelligence is medical devices produced by incremental technologies, popularly known as 3D printing. The cumulative potential of Industry 4.0, 3D printing (or indeed reverse engineering as a whole) and the latest developments in artificial intelligence could realise a breakthrough giving new design and manufacturing technologies in personalised mass production. The article shows selected possibilities in this area based on an overview of in-house solutions developed during the implementation of the NCBR grant “Things are for People” dedicated to a 3D printed arm exoskeleton.

KEYWORDS: computer science, mechatronics, artificial intelligence, medical devices, arm exoskeleton, wearable robot

Artykuł jest rozwinięciem referatu wygłoszonego na Międzynarodowej Konferencji „Inteligentne Rozwiązania dla Przemysłu – ISI 2022”, która odbyła się pod patronatem medialnym czasopisma „Mechanik”, będącej platformą wymiany wiedzy, przeglądu i dyskusji na temat postępów teoretycznych, wyników badań i doświadczeń przemysłowych pomiędzy pracownikami naukowymi, badaczami, decydentami, praktykami i studentami zajmującymi się tematyką związaną z Przemysłem 4.0 i inteligentną produkcją. Sztuczna inteligencja (szerzej: inteligencja obliczeniowa) jest od wielu lat obszarem intensywnych badań i zastosowań przemysłowych, wciąż jednak otwiera przez naukowcami, klinicystami i praktykami z przemysłu nowe obszary zastosowań. Opracowanie paradygmatu Przemysłu 4.0 przyspieszyło jeszcze te procesy. Ciekawym polem zastosowań sztucznej inteligencji są zwłaszcza wyroby medyczne produkowane technologiami przyrostowymi, popularnie nazywanymi drukiem trójwymiarowym. Skumulowany potencjał Przemysłu 4.0, druku 3D (czy wręcz całej inżynierii odwrotnej) oraz najnowszych osiągnięć sztucznej inteligencji może się przyczynić do przełomu, dostarczając nowe technologie projektowania i wytwarzania w personalizowanej produkcji masowej. W artykule zaprezentowano wybrane możliwości w tym obszarze na podstawie przeglądu rozwiązań własnych wypracowanych podczas realizacji grantu NCBR „Rzeczy są dla ludzi”, poświęconego drukowanemu 3D egzoszkieletovi na rękę.

SŁOWA KLUCZOWE: informatyka, mechatronika, sztuczna inteligencja, wyroby medyczne, egzoszkielec na rękę, robot noszony

* Dr inż. Dariusz Mikołajewski – dariusz.mikolajewski@ukw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-4157-2796> – Wydział Informatyki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Polska
Dr hab. inż. Izabela Rojek – izabela.rojek@ukw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-9958-6579> – Wydział Informatyki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Polska
Prof. dr hab. inż. Mariusz Kaczmarek – mkk@ukw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-8253-2435> – Wydział Mechatroniki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Polska
Dr Piotr Kotlarz – piotr.kotlarz@ukw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0001-5004-2928> – Wydział Informatyki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Polska
Mgr Marcin Kempieński – kempinski@ukw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-4891-566X> – Wydział Mechatroniki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Polska
Mgr Zbigniew Szczepański – zszczep@ukw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-0896-5985> – Wydział Mechatroniki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Polska
Mgr inż. Jakub Kopowski – jakub.kopowski@ukw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-5160-1776> – Wydział Informatyki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Polska
Mgr inż. Joanna Nowak – joanna_n@ukw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-8912-1508> – Wydział Mechatroniki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Polska
Dr hab. inż. Marek Macko – mackomar@ukw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-8743-6602> – Wydział Mechatroniki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Polska
Mgr inż. Andrzej Szczepańczyk – as1@ukw.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-4195-0152> – Wydział Mechatroniki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Polska
Tomasz Schmidt – ts@kuduare.eu – EduRewolucje spółka z o.o. z/s w Bydgoszczy, Polska
Paweł Leszczyński – pawel@edurewolucje.eu – EduRewolucje spółka z o.o. z/s w Bydgoszczy, Polska

Wprowadzenie

Wydział Informatyki oraz Wydział Mechatroniki Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy wraz z firmą EduRewolucje Sp. z o.o. z/s w Bydgoszczy w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju „Rzeczy są dla ludzi” w latach 2022–2024 realizują grant „Opracowanie funkcjonalnego egzoszkieletu ręki do aktywnego treningu i rehabilitacji”. Projekt jest interdyscyplinarny – biorą w nim udział informatycy, mechanicy, fizjoterapeuci oraz inni specjaliści w zależności od potrzeb. Kierownikiem projektu ze strony UKW jest dr hab. Izabela Rojek, prof. uczelni.

Celem projektu jest realizacja prac badawczo-rozwojowych prowadzących do opracowania innowacyjnej technologii pozwalającej na samodzielną rehabilitację osób ze szczególnymi potrzebami (przy udziale rehabilitantów i fizjoterapeutów). Projekt obejmuje skonstruowanie prototypu mechanicznego robota rehabilitacyjnego, tzw. egzoszkieletu ręki, który wspomaga proces rehabilitacji osób z jej niedowładem oraz innymi szczególnymi potrzebami dotyczącymi ograniczonej mobilności w obszarze ręki. W ramach projektu powstaje specjalistyczne, dedykowane oprogramowanie, które będzie dostosowywało siłę i rodzaj pracy egzoszkieletu na rękę do potrzeb i celów programu rehabilitacyjnego pacjenta.

Proponowane rozwiązanie wypełnia lukę badawczą i kliniczną w obszarze drukowanych 3D egzoszkieleto- w na rękę. Jego nowość polega na opracowaniu wielu szczegółowych rozwiązań technicznych z obszaru inżynierii mechanicznej i informatyki składających się na funkcjonalny egzoszkielec.

Projekt ten pozwala nie tylko na opracowanie nowatorskiego urządzenia rehabilitacyjnego, ale także na wprowadzenie zautomatyzowanego, niezależnego modelu rehabilitacyjnego samodzielnej, codziennej rehabilitacji domowej osób ze szczególnymi potrzebami w zakresie terapii ręki. Opracowanie tego typu techniki, dzięki zredukowaniu obszaru oddziaływania egzoszkieletu do ręki, pozwoli na optymalizację kosztów produkcji i eksploatacji, a także poprawi dostępność i łatwość codziennej, często żmudnej rehabilitacji.

Zadania w ramach projektu obejmują:

- opracowanie części mechanicznej rozwiązania,
- opracowanie części informatycznej,
- testy laboratoryjne,
- testy kliniczne.

Przewidziane jest również wdrożenie opracowanego egzoszkieletu na rękę.

Projekt został objęty zgłoszeniem patentowym P.442697 – Sztuczny mięsień rękawicy rehabilitacyjnej [WIPO ST 10/C PL442697]. Przedmiotem wynalazku jest sztuczny mięsień rękawicy rehabilitacyjnej wytwarzany techniką druku 3D, który charakteryzuje się jednolitą konstrukcją korpusu. Pozostałe rozwiązania znajdują się w trakcie procedury patentowania.

Tak opracowane rozwiązanie egzoszkieletu na rękę cechują:

- 1) przewagi jakościowe:
 - indywidualne dopasowanie i wykonanie metodą druku 3D,
 - aktywne wspieranie funkcji ręki,
 - możliwość stosowania u dzieci i dorosłych,
 - natychmiastowa poprawa funkcji (sięgania, interakcji z trzymanym obiektem),
 - kształtowanie poprawy funkcji w dłuższym okresie;
- 2) przewagi techniczne:
 - możliwość codziennego wykorzystania w warunkach domowych,
 - stopniowa adaptacja (poprzez regulację lub wymianę elementów) do zmian w stanie zdrowia;
- 3) przewaga ekologiczna:
 - rozwiązanie zmienia się wraz z pacjentem (o elementach regulowanych lub wymiennych);
- 4) przewagi kosztowe:
 - produkcja krajowa, niższe koszty,
 - ochrona patentem, możliwość udzielania licencji;
- 5) przewaga cenowa:
 - dostępność na miejscu (w tym badań i skanowania).

Celem niniejszego artykułu jest identyfikacja, omówienie oraz upowszechnienie roli sztucznej inteligencji w projektowaniu i produkcji personalizowanych wyrobów drukowanych 3D, zwłaszcza egzoszkieleto- w na kończynę górną, w świetle własnych badań.

AI w projektowaniu i produkcji wyrobów drukowanych 3D

AI w projektowaniu i produkcji wyrobów drukowanych 3D na przykładzie egzoszkieletu na kończynę górną znalazło zastosowanie w obszarach:

- doboru materiałów,
- analizy danych do doboru dla pacjenta (obok badania funkcjonalnego),
- projektowania,
- druku 3D,
- analizy szkodliwości druku 3D,
- sterowania egzoszkieletem,
- testowania egzoszkieletu,
- analizy cyklu życia egzoszkieletu.

AI w doborze materiałów na egzoszkielec

W porównaniu z wynikami uzyskanymi z tradycyjnego podejścia ANN, optymalizacja oparta na DL poprawiła szybkość obliczeń nawet 1,5-krotnie z zachowaniem tej samej jakości druku, poprawiła jakość, zmniejszyła MSE, a także pozwoliła zidentyfikować zestaw parametrów druku nie wyznaczonych wcześniej metodą prób i błędów. To świadczy o tym, że DL jest efektywnym narzędziem o znacznym potencjale, do szerokiego zastosowania w planowaniu i optymalizacji właściwości materiałów w procesie druku 3D. Konieczne są dalsze badania nad zastosowaniem tanich, ale bardziej wydajnych obliczeniowo rozwiązań do wielozadaniowego i wielomateriałowego wytwarzania addytywnego, wraz ze wzrostem liczby materiałów, receptur surowców oraz złożonych procesów druku [1, 2].

AI w analizie danych pacjenta do doboru egzozszkieletu

Żyjemy w społeczeństwie informacyjnym, społeczeństwie opartym na wiedzy – cały świat jest oparty na informacji, a informacja stanowi o wartości firmy czy statusie społecznym osoby. Warto więc przykładać dużą wagę do:

- gromadzenia danych w repozytoriach, takich jak bydgoskie repozytorium obrazów medycznych [3],
- audytu danych (w tym na potrzeby ich dalszego wykorzystania przez AI),
- ochrony danych – skutki zaniedbania bezpieczeństwa mogą być katastrofalne dla osób prywatnych czy działania firm,
- analizy danych pacjenta, w tym w ramach paradygmatów Przemysłu 4.0 czy eZdrowia [4, 5].

Proponowane etapy wytwarzania spersonalizowanego wyrobu drukowanego 3D na podstawie doświadczeń własnych z badań nad egzozszkieletem na rękę przedstawiono na rys. 1.

Elementy kluczowe dla produkcji spersonalizowanego egzozszkieletu objęły przede wszystkim:

- podsumowanie zmian dokonanych w obecnej generacji egzozszkieletu,
- wychwycenie niedociągnięć z biomechanicznego punktu widzenia,
- wychwycenie niedociągnięć z technicznego punktu widzenia, ze szczególnym uwzględnieniem elementów trudnych do szybkiego wykonania przy planowanym zwiększeniu skali produkcji,
- opracowanie i zaplanowanie w ramach projektu egzozszkieletu (CAD) propozycji i modernizacji, które zostaną sprawdzone w ostatecznej generacji egzozszkieletu na koniec grantu przedwdrożeniowego,
- próby optymalizacji wypracowanych rozwiązań pod kątem użytkowym i technologicznym,
- przejście do kolejnych etapów niniejszego grantu przedwdrożeniowego dzięki przeprowadzeniu badań

wstępnych, które pokazały zasadność dokonanych modernizacji,

- wykonanie wydruków próbnych elementów egzozszkieletu i ich integrację w działający prototyp (wersję roboczą),
- badania ruchu za pomocą precyzyjnych czujników niezbędne do uszczegółowienia modelu obliczeniowego,
- badania wytrzymałościowe prototypu (na ściskanie, rozciąganie i in.),
- testowanie prototypu w warunkach laboratoryjnych,
- dodatkowe badania eksperymentalne (filmowane w wielu płaszczyznach),
- dodatkowe symulacje numeryczne,
- udoskonalenie projektu,
- poprawienie wydruków,
- poprawienie dopasowania do pacjenta.

AI w projektowaniu egzozszkieletu

Cyfrowy bliźniak to dynamiczna, cyfrowa replika obiektu technicznego (np. systemu fizycznego, urządzenia, maszyny, procesu produkcyjnego) albo żywego organizmu. Wykorzystanie tego typu rozwiązań stało się integralną częścią Przemysłu 4.0, oferując przedsiębiorstwom wymierne korzyści, oprócz tego, że jest skuteczne w kontekście zrównoważonej produkcji i utrzymania ruchu. Kluczowe są pozyskiwanie danych i ich konwersja na wiedzę, wykorzystanie modeli fizycznych do symulacji zadań i procesów oraz wykorzystanie modeli symulacyjnych do doskonalenia zadań i procesów fizycznych. Ponadto monitorowanie procesów i parametrów procesowych pozwala na ciągłe doskonalenie procesów w zakresie inteligentnego ekoprojektowania oraz planowania i monitorowania procesów produkcyjnych z uwzględnieniem zrównoważonej produkcji i konieczności utrzymania ruchu [6].

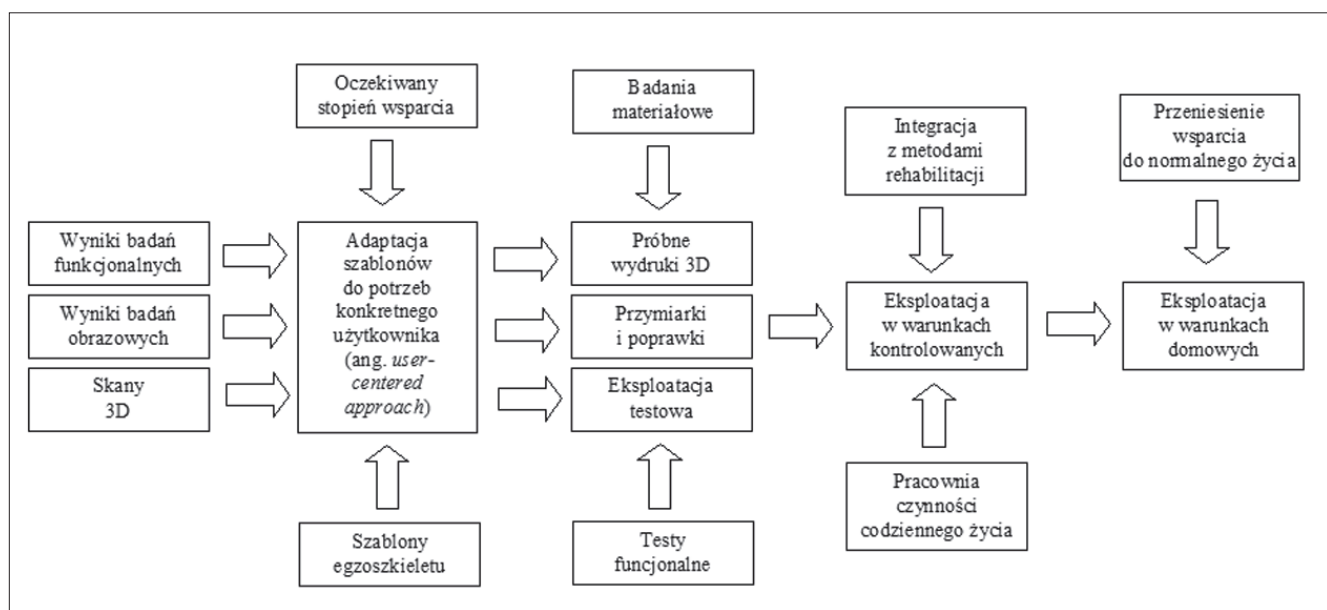


Fig. 1. Manufacturing stages of a personalised 3D printed product (version, own study)

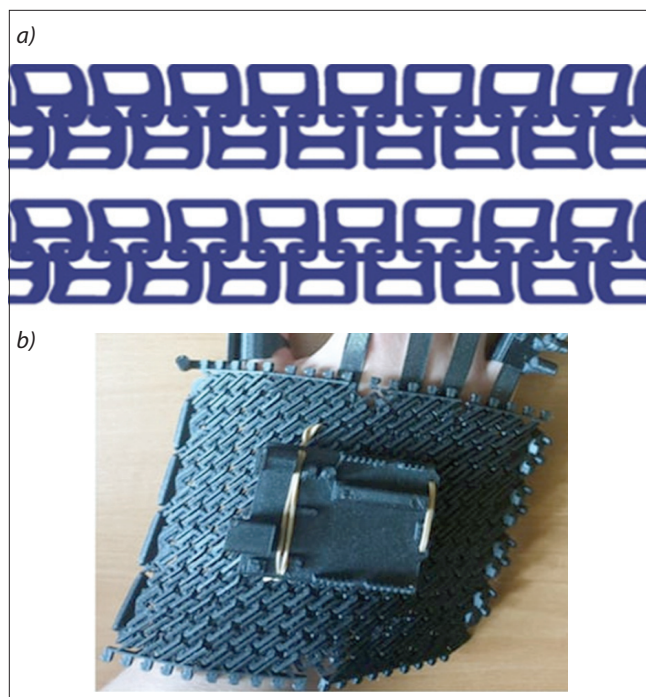
Rys. 1. Etapy wytwarzania personalizowanego wyrobu drukowanego 3D (wariant, opracowanie własne)

AI w druku 3D egzoszkieletu

Ceny tworzyw sztucznych bardzo szybko rosną, podobnie jak ich zużycie. Pożądane jest więc optymalizowanie procedur druku trójwymiarowego, np. poprzez ulepszone projektowanie oparte na sztucznej inteligencji (AI) lub symulację wtrysku, co pozwala na oszczędność materiału poprzez zmniejszenie zużycia filamentu, zmniejszenie ilości odpadów i ograniczenie wpływu procesu na środowisko. Oszczędność czasu i kosztów nie powoduje utraty wysokiej jakości produktów i może stanowić przewagę konkurencyjną, zwłaszcza w przypadku cienko zaprojektowanych produktów masowych. Optymalizacja oparta na AI pozwala na uzyskanie jednego darmowego wydruku po każdym 6,67 wydrukach (czyli z materiałów, które wcześniej były marnowane) [7].

AI w projektowaniu tkanin drukowanych 3D

Możliwe jest zautomatyzowane lub półautomatyczne wydajne i praktyczne projektowanie drukowanych w 3D chainmaili do egzoszkieletoów o zaprogramowanych właściwościach (zmiennej sztywności/ elastyczności w zależności od kierunku), odzwierciedlających indywidualne potrzeby użytkownika, w tym różne rodzaje i stopnie deficytu. Zademonstrowano to na przykładzie zastosowania chainmaila w egzoszkielecie ręki, gdzie wydrukowane w 3D elementy mogą być ułożone w jednowarstwową strukturę o regulowanym jedno- lub dwukierunkowym module zginania. Nowość proponowanego podejścia polega na połączeniu wykorzystania rzeczywistych danych z badań nad egzoszkieletem ręki, nowych metod ich analizy z użyciem głębokich sieci neuronowych, z przejrzystym i skalowalnym projektem pro-



Rys. 2. Tkanina drukowana w 3D: a) projekt, b) tkanina wykorzystana w egzoszkielecie na rękę
Fig. 2. 3D printed chainmail: a) design, b) chainmail used in the hand exoskeleton

duktu z tkaniny drukowanej w 3D, który może być spersonalizowany (parametry mechaniczne, takie jak sztywność i kąty zgięcia w różnych kierunkach) do potrzeb i celów terapii konkretnego pacjenta [8, 9] (rys. 2).

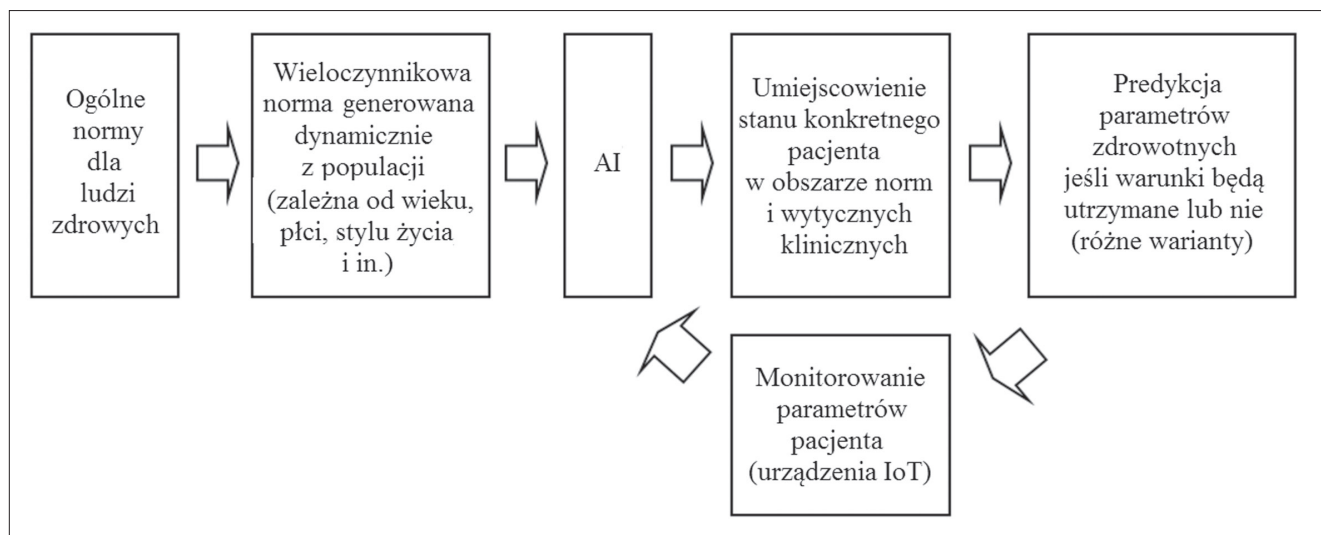
AI w analizie szkodliwości druku 3D

Opracowano nowe oprogramowanie oparte na AI służące do oceny ilości zanieczyszczeń generowanych przez systemy druku 3D. Na podstawie wprowadzonych wartości: techniki druku, materiału, masy wydruku itp. oraz oczekiwanych wyników (oceny ryzyka) program określa, czy i jakie środki ostrożności należy podjąć. W badaniu zastosowano program samouczący się, który będzie się doskonalił w miarę wprowadzania kolejnych danych. Program ten nie zastępuje, ale uzupełnia wcześniej stosowane metryki i oprogramowanie do druku 3D [10].

AI w optymalizacji programu terapii z użyciem egzoszkieletu

Warto zwrócić uwagę, że różne rodzaje i poziomy deficytów umiejętności motorycznych ręki (lub obu rąk) mogą wystąpić jako wynik wielu urazów oraz chorób o podłożu neurologicznym i neurodegeneracyjnym. Zdalne monitorowanie pomaga we wczesnej diagnostyce oraz podjęciu interwencji z wyprzedzeniem w ramach medycyny prewencyjnej (medycyny ludzi zdrowych), również np. u osób uprawiających intensywnie sport. Także kumulowanie się mikrourazów może być monitorowane, postępujące w ich rezultacie stopniowe pogarszanie się zdolności motorycznych – zauważone i zaopiekowane, a szkodliwe zmiany – wyleczone. Do tej pory stanowiło to często wyzwanie w diagnostyce, terapii i opiece. Na Wydziale Informatyki opracowano system medycyny prewencyjnej (rys. 3) [11] oraz systemy do analizy ruchu [12–14], jakości życia [15] czy wypalenia zawodowego [16–19] oparte na AI.

Ważna jest integracja egzoszkieletu w ramach systemów automatyki i robotyki medycznej, w tym na potrzeby telemedycyny [19–22]. Systematyczna ocena, również pacjenta w warunkach domowych, pozwala na zachowanie ciągłości monitorowania stanu zdrowia oraz poprawia wiarygodność diagnostyki, dzięki obserwacji pacjenta w środowisku naturalnym, podczas codziennych czynności. Co ważne, można to osiągnąć przy umiarkowanych nakładach, wykorzystując aplikacje na smartfony i tablety, a także takie urządzenia, jak smartwatche, smart bandy, wagi, inteligentne wkładki do butów czy kije do nordic walkingu. Integracja tego typu rozwiązań w egzoszkielecie i ortezach jest już oczywistością. Podejście zdalne pozwala też na ocenę, na ile jest ono skuteczne w porównaniu z podejściem tradycyjnym czy hybrydowym (przeplatane tygodnie podejścia tradycyjnego i zdalnego). Tendencją badawczą o największym potencjale pozostaje predykcja przyszłego stanu pacjenta oparta na danych obecnych i historycznych – takie systemy predykcyjne już działają, ale potrzeba odpowiedniej jakości danych do ich zasilania.



Rys. 3. System medycyny prewencyjnej [11]
Fig. 3. Preventive medicine system [11]

Obszar zastosowań AI w spersonalizowanej masowej produkcji wyrobów medycznych wciąż się rozwija i potrzeba więcej badań, aby wyciągnąć bardziej ostateczne wnioski. Badania wykorzystujące połączenie różnych metod diagnostycznych z AI do oceny stanu pacjenta oraz akceptowalności i wykonalności interwencji będą cenne w mierzeniu wyników i przewidywaniu skuteczności terapii, rehabilitacji i opieki, również zdalnej.

Wnioski

Wynik projektu może zostać wykorzystywany w branży medycznej (inżynierii biomedycznej, zaopatrzeniu rehabilitacyjnym). Ostatecznymi użytkownikami będą pacjenci z deficytem funkcji ręki, który wystąpił w wyniku schorzenia lub urazu, i/lub osłabieniem siły kończyn górnych (np. w okresie powrotu do zdrowia) i ich rodziny oraz opiekunowie.

Dotychczasowe publikacje (467) pokazały, że AI jest przydatna w wielu obszarach badań nad egzoszkieletemi na rękę, w tym drukowanymi 3D, lecz brakuje dużych badań porównawczych – wynika to m.in. z różnorodności rozwiązań AI i egzoszkieleatów. Większość z dotychczas stosowanych rozwiązań obejmuje głównie podejście oparte na danych (*data-driven*), takich jak uczenie maszynowe (*machine learning*). Brakuje większych systemów gromadzących i analizujących dane, a same dane są często nieuporządkowane. Konieczny jest zatem audyt danych – zarówno już zgromadzonych, jak i nowo powstających – pod kątem ich wykorzystania w systemach opartych na AI. Możliwy i przewidywany jest dalszy rozwój zastosowań AI w projektowaniu i produkcji wyrobów drukowanych 3D ze szczególnym uwzględnieniem obszaru komercjalizacji i fintech (analizy rynku, kosztów, strumieni przychodów, opłacalności produktu i rodziny produktów). Podstawowe problemy w omawianym zakresie to płytkość polskiego rynku inwestorskiego oraz (przy wyrobach medycznych drukowanych 3D) konieczność wdrożenia regulacji MDR [23] i ISO 13485 [24].

Podziękowanie

Badania przedstawione w artykule są finansowane z grantu NCBR „Rzeczy są dla ludzi/0087/2020” pt. „Opracowanie funkcjonalnego egzoszkieletu ręki do aktywnego treningu i rehabilitacji” w ramach Programu Rządowego „Dostępność Plus” Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, finansowanego z dotacji celowej w partnerstwie z Fundacją Aktywnej Rehabilitacji.

LITERATURA

- [1] Rojek I., Mikołajewski D., Dostatni E., Macko M. “AI-Optimized Technological Aspects of the Material Used in 3D Printing Processes for Selected Medical Applications”. *Materials*. 13, 23 (2020): 5437, <https://doi.org/10.3390/ma13235437>.
- [2] Rojek I., Mikołajewski D., Kotlarz P., Tyburek K., Kopowski J., Dostatni E. “Traditional Artificial Neural Networks Versus Deep Learning in Optimization of Material Aspects of 3D Printing”. *Materials*. 14, 24 (2021): 7625, <https://doi.org/10.3390/ma14247625>.
- [3] Macko M., Szczepański Z., Mikołajewska E., Nowak J., Mikołajewski D. “Repository of 3D images for education and everyday clinical practice purposes”. *Bio Algorithms Med Syst*. 13, 2 (2017): 111, <https://doi.org/10.1515/bams-2017-0007>.
- [4] Varoto R., Cliquet A. Jr. “Experiencing Functional Electrical Stimulation Roots on Education, and Clinical Developments in Paraplegia and Tetraplegia With Technological Innovation”. *Artif Organs*. 39, 10 (2015): E187–201, <https://doi.org/10.1111/aor.12620>.
- [5] Coscia M., Wessel M.J., Chaudary U., Millán J.D.R., Micera S., Guggisberg A., Vuadens P., Donoghue J., Birbaumer N., Hummel F.C. “Neurotechnology-aided interventions for upper limb motor rehabilitation in severe chronic stroke”. *Brain*. 142, 8 (2019): 2182–2197, <https://doi.org/10.1093/brain/awz181>.
- [6] Rojek I., Mikołajewski D., Dostatni E. “Digital Twins in Product Lifecycle for Sustainability in Manufacturing and Maintenance”. *Applied Sciences*. 11, 1 (2021): 31, <https://doi.org/10.3390/app11010031>.
- [7] Rojek I., Mikołajewski D., Kopowski J., Kotlarz P., Piechowiak M., Dostatni E. “Reducing Waste in 3D Printing Using a Neural Network Based on an Own Elbow Exoskeleton”. *Materials*. 14, 17 (2021): 5074, <https://doi.org/10.3390/ma14175074>.
- [8] Kopowski J., Mikołajewski D., Kotlarz P., Dostatni E., Rojek I. “A Semi-Automated 3D-Printed Chainmail Design Algorithm with Preprogrammed Directional Functions for Hand Exoskeleton”. *Applied Sciences*. 12, 10 (2022): 5007, <https://doi.org/10.3390/app12105007>.

- [9] Rojek I., Kopowski J., Kotlarz P., Dorożyński J., Dostatni E., Mikołajewski D. "Deep Learning in Design of Semi-Automated 3D Printed Chainmail with Pre-Programmed Directional Functions for Hand Exoskeleton". *Applied Sciences*. 12, 16 (2022): 8106, <https://doi.org/10.3390/app12168106>.
- [10] Rojek I., Mikołajewski D., Macko M., Szczepański Z., Dostatni E. "Optimization of Extrusion-Based 3D Printing Process Using Neural Networks for Sustainable Development". *Materials*. 14, 11 (2021): 2737, <https://doi.org/10.3390/ma14112737>.
- [11] Rojek I., Kozielski M., Dorożyński J., Mikołajewski D. "AI-Based Prediction of Myocardial Infarction Risk as an Element of Preventive Medicine". *Applied Sciences*. 12, 19 (2022): 9596, <https://doi.org/10.3390/app12199596>.
- [12] Burduk R., Rojek I., Mikołajewska E., Mikołajewski D. "Post-Stroke Gait Classification Based on Feature Space Transformation and Data Labeling". *Applied Sciences*. 12, 22 (2022): 11346, <https://doi.org/10.3390/app122211346>.
- [13] Prokopowicz P., Mikołajewski D., Tyburek K., Mikołajewska E. "Computational gait analysis for post-stroke rehabilitation purposes using fuzzy numbers, fractal dimension and neural networks". *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 68, 2 (2020): 191–198, <https://doi.org/10.1515/bwmeta1.element.oai-journals-pan-pl-115170>.
- [14] Mikołajewska E., Prokopowicz P., Mikołajewski D. "Computational gait analysis using fuzzy logic for everyday clinical purposes-preliminary findings". *Bio-Algorithms and Med-Systems*. 13, 1 (2017): 37–42, <https://doi.org/10.1515/bams-2016-002>.
- [15] Prokopowicz P., Mikołajewski D., Mikołajewska E., Kotlarz P. "Fuzzy system as an assessment tool for analysis of the health-related quality of life for the people after stroke". *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries *Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics*). 2017, 10245 LNAI, 710–721.
- [16] Mikołajewski D., Prokopowicz P. "Effect of COVID-19 on Selected Characteristics of Life Satisfaction Reflected in a Fuzzy Model". *Appl. Sci.* 12 (2022): 7376, <https://doi.org/10.3390/app12157376>.
- [17] Prokopowicz P., Mikołajewski D. "Fuzzy Approach to Computational Classification of Burnout – Preliminary Findings". *Appl. Sci.* 12 (2022): 3767, <https://doi.org/10.3390/app12083767>.
- [18] Prokopowicz P., Mikołajewski D., Mikołajewska E. "Intelligent System for Detecting Deterioration of Life Satisfaction as Tool for Remote Mental-Health Monitoring". *Sensors*. 22 (2022): 9214, <https://doi.org/10.3390/s22239214>.
- [19] Mikołajewska E., Mikołajewski D. „Zastosowania automatyki i robotyki w wózkach dla niepełnosprawnych i egzoszkieletach medycznych”. *Pomiary Automatyka Robotyka*. 15, 5 (2011): 58–63.
- [20] Gopal A., Hsu W.Y., Allen D.D., Bove R. "Remote Assessments of Hand Function in Neurological Disorders: Systematic Review". *JMIR Rehabil Assist Technol*. 9, 1 (2022 Mar 9): e33157, <https://doi.org/10.2196/33157>.
- [21] Block V.A., Pitsch E., Tahir P., Cree B.A., Allen D.D., Gelfand J.M. "Remote Physical Activity Monitoring in Neurological Disease: A Systematic Review". *PLoS One*. 11, 4 (2016 Apr 28): e0154335, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154335>.
- [22] Laver K.E., Adey-Wakeling Z., Crotty M., Lannin N.A., George S., Sherrington C. "Telerehabilitation services for stroke". *Cochrane Database Syst Rev* 1, 1 (2020): CD010255, doi: 10.1002/14651858.CD010255.pub3.
- [23] Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council of 5 April 2017 on medical devices. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0745> (dostęp: 17 grudnia 2022 r.).
- [24] ISO 13485:2016 Quality management systems. <https://www.iso.org/standard/59752.html> (dostęp: 17 grudnia 2022 r.).