

## **Egzoszkielec na rękę - koncepcja i rozwój w ramach grantu "Rzeczy są dla ludzi"**

**Izabela Rojek<sup>1\*</sup>, Mariusz Kaczmarek<sup>2</sup>, Piotr Kotlarz<sup>1</sup>, Marcin Kempniński<sup>2</sup>, Dariusz Mikołajewski<sup>1</sup>,  
Zbigniew Szczepański<sup>2</sup>, Jakub Kopowski<sup>1</sup>, Joanna Nowak<sup>2</sup>, Marek Macko<sup>2</sup>, Tomasz Schmidt<sup>3</sup>,  
Paweł Leszczyński<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Instytut Informatyki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, ul. Kopernika 1, 85-074 Bydgoszcz  
\*e-mail: izabela.rojek@ukw.edu.pl

<sup>2</sup> Wydział Mechatroniki, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, ul. Kopernika 1, 85-074 Bydgoszcz

<sup>3</sup> Edurewolucje Sp. z o.o., ul. Braci Bażańskich 5/1, 85-799 Bydgoszcz

**Streszczenie:** Instytut Informatyki oraz Wydział Mechatroniki Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego wraz z firmą Edurewolucje Sp. z o. o. z/s w Bydgoszczy w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju "Rzeczy są dla ludzi" otrzymali dofinansowanie na realizację przedsięwzięcia pn. „Opracowanie funkcjonalnego egzoszkieletu ręki do aktywnego treningu i rehabilitacji”. 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 przewiduje skonstruowanie prototypu mechanicznego robota rehabilitacyjnego tzw. egzoszkieletu ręki, który wspomogłoby proces rehabilitacji osób z jej niedowładem oraz innymi szczególnymi potrzebami dotyczącymi braku mobilności w obszarze ręki. W ramach projektu powstanie specjalistyczne, dedykowane oprogramowanie, które będzie dostosowywało siłę i rodzaj pracy egzoszkieletu na rękę do aktualnych potrzeb i celów programu rehabilitacyjnego pacjenta. Celem niniejszej pracy jest przybliżenie powstania i rozwoju ww. koncepcji w ramach zespołu projektowego podczas dotychczasowych prac projektowych.

**Słowa kluczowe:** ręka; druk 3D; biomechanika; projektowanie wspomagane komputerowo; egzoszkielec

## **Arm exoskeleton - concept and development under the grant "Things are for people"**

**Abstract:** The Institute of Computer Science and the Faculty of Mechatronics at Kazimierz Wielki University, together with Edurewolucje Sp. z o. o. z/s in Bydgoszcz, received funding under the 'Things are for people' competition of the National Centre for Research and Development for the project entitled 'Development of a functional arm exoskeleton for active training and rehabilitation'. The aim of the project is to carry out research and development work leading to the development of an innovative technology allowing for the independent rehabilitation of people with special needs (with the participation of rehabilitators and physiotherapists). The project envisages the construction of a prototype of a mechanical rehabilitation robot, the so-called hand exoskeleton, which will support the process of rehabilitation of people with paresis and other specific needs regarding lack of mobility in the hand area. The project will develop specialised, dedicated software that will adapt the strength and type of work of the hand exoskeleton to the current needs and goals of the patient's rehabilitation programme. The aim of this paper is to provide an insight into the origins and development of the above concept within the project team during the project work to date.

**Keywords:** hand; additive manufacturing; biomechanics; computer-aided design; exoskeleton.

### **1. Wprowadzenie**

Problem naukowy, kliniczny, gospodarczy i społeczny dotyczący badań, zaprojektowania i wykonania egzoszkieletu na rękę (tj. część kończyny górnej od nadgarstka do czubków palców) możliwego do masowej produkcji i powszechnego wykorzystania skupia uwagę

inżynierów, naukowców i klinicystów od wielu już lat. Ze względu na złożone funkcje manipulacyjne kończyny górnej i precyzję ruchów tego najdoskonalszego naturalnego narzędzia człowieka badania naukowe w tym obszarze dotyczą zarówno ręki zdrowej, jak i ręki z różnymi rodzajami i stopniami deficytów, zarówno motorycznych (w obszarze układu ruchu), jak i o podłożu

neurologicznym (w obszarze czucia i sterowania ruchem oraz koordynacji ruchowej). Wynika to też z faktu, że epidemię schorzeń cywilizacyjnych udało się nam zatrzymać, a nie cofnąć, a częstymi skutkami udarów, uszkodzeń czaszkowo-mózgowych czy uszkodzeń rdzenia kręgowego są deficyty ruchowe skutkujące mniejszą samodzielnością pacjentów, w tym w czynnościach życia codziennego wymagających sprawności ręki (mycie, czesanie, ubieranie, przygotowywanie i spożywanie posiłków itp.), ale również w nauce i pracy [1-4].

W ostatnich dekadach postępy w praktyce klinicznej w rehabilitacji i fizjoterapii są ułatwione przez innowacje technologiczne wykorzystujące wiedzę neurofizjologiczną na temat zaburzonej kontroli motorycznej. Nowe kierunki badań, takie jak egzoszkielety, protezy i ortezy drukowane 3D [5], neuroprotezy, interfejsy mózg komputer [6], modele obliczeniowe pacjentów [7], diagnostyka prewencyjna, terapia personalizowana i medycyna precyzyjna [8-11] zwiększają efektywność dotychczasowych interwencji, jak również umożliwiają zastosowanie nowych metodologii i synergii technologicznych [12].

Wpisując się w ww. kierunki badań Instytut Informatyki oraz Wydział Mechatroniki Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego wraz z firmą Edurewolucje Sp. z o. o. z/s w Bydgoszczy w ramach konkursu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju "Rzeczy są dla ludzi" otrzymali dofinansowanie na realizację przedsięwzięcia pn. „Opracowanie funkcjonalnego egzoszkieletu ręki do aktywnego treningu i rehabilitacji”. 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 przewiduje skonstruowanie prototypu mechanicznego robota rehabilitacyjnego tzw. egzoszkieletu ręki, który wspomże proces rehabilitacji osób z jej niedowładem oraz innymi szczególnymi potrzebami dotyczącymi braku mobilności w obszarze ręki. W ramach projektu powstanie specjalistyczne, dedykowane oprogramowanie, które będzie dostosowywało siłę i rodzaj pracy egzoszkieletu na rękę do aktualnych potrzeb i celów programu rehabilitacyjnego pacjenta. Projekt ten pozwoli nie tylko na opracowanie nowatorskiego urządzenia rehabilitacyjnego, ale pozwoli również na wprowadzenie zautomatyzowanego niezależnego modelu rehabilitacyjnego samodzielnej, codziennej rehabilitacji domowej osób ze szczególnymi potrzebami w zakresie terapii ręki. Opracowanie tego typu technologii, dzięki

zredukowaniu obszaru oddziaływania egzoszkieletu do ręki, pozwoli na optymalizację kosztów produkcji i eksploatacji, a także poprawi dostępność i łatwość codziennej, często żmudnej rehabilitacji. Proponowane rozwiązanie wypełnia istniejąca lukę badawczą i kliniczną, a jego nowość polega na opracowaniu szeregu szczegółowych rozwiązań technicznych z obszaru inżynierii mechanicznej i informatyki składających się na funkcjonalny egzoszkielet na rękę. Celem niniejszej pracy jest przybliżenie powstania i rozwoju ww. koncepcji w ramach zespołu projektowego podczas dotychczasowych prac projektowych.

## 2. Obecny stan wiedzy w zakresie medycznych egzoszkieletów na rękę

Przegląd 4 wiodących bibliograficznych baz danych za pomocą wyspecyfikowanych słów kluczowych ("hand exoskeleton" + "medical application" i podobnych oraz ich kombinacji w j. angielskim) przyniósł 103 publikacje opublikowane w latach 1997-2022, z czego 64 (61,14%) zostały opublikowane w ciągu ostatnich 5 lat, a 90 (87,38%) w ciągu ostatnich 10 lat. Większość (52, tj. 50,49%) stanowiły publikacje poświęcone wykorzystaniu egzoszkieletu na rękę u pacjentów po udarze. Problem zastosowań medycznych egzoszkieletów na rękę jest więc stosunkowo nowy, ponadto pomimo wysiłków żadne z dotychczasowych rozwiązań nie znalazło się w produkcji masowej. Ważne jest również to, że spośród publikacji zakwalifikowanych do przeglądu jest tylko jedna praca przeglądowa oraz brak jest meta analiz, co pozwoliłoby na choćby częściowe odniesienie się do obecnego stanu badań.

W świetle analiz własnych badania w obszarze pięciopalczastych (tj. wspierających wszystkie chwytły) egzoszkieletów na rękę zakończyły się na etapie wczesnych prototypów, a na rynku technologii medycznych i w praktyce klinicznej brak jest obecnie produktu gotowego do komercjalizacji i produkcji choćby w ramach personalizowanej produkcji masowej. Taka produkcja jest możliwa w ramach paradygmatów Przemysłu 4.0 i eZdrowia [13-15]. Uważa się, że docelowo do zapewnienia efektywnego i bezpiecznego dostarczania usług zdrowotnych, edukacji online i środowiska Work from Home (WFH) (w tym w warunkach pandemii) wystarczą druk 3D, sztuczna inteligencja, przetwarzanie w chmurze, autonomiczne roboty, biosensory, usługi telemedyczne, Internet Rzeczy (IoT), wirtualna rzeczywistość (VR) i holografia [14]. Zastosowanie egzoszkieletu na rękę ma częściowo przezwyciężyć czasowy (w procesie powrotu do zdrowia)

lub długotrwały deficyt w obszarze funkcji ruchowych ręki wykorzystując do tego nieinwazyjne interfejsy człowiek-maszyna dostosowywane do konkretnych populacji pacjentów (osoby po udarach, uszkodzeniach czaszkowo-mózgowych, amputacjach, z deficytami wrodzonymi). Wykorzystanie ww. rozwiązań niemal 24 godziny na dobę przez 7 dni w tygodniu w naturalnym środowisku pacjenta w miejsce dotychczasowych sesji terapeutycznych oraz wspomaganie ruchu może poprawić nie tylko uczenie się ruchu i generowanie powtórzeń ruchowych, ale również przyspieszyć adaptację egzoszkieletu do użytkownika dzięki algorytmom sztucznej inteligencji połączonym z szybszą elektroniką i zestawami czujników. Z klinicznego punktu widzenia ma to kluczowe znaczenie dla przywracania lub zastępowania utraconej funkcji kończyny górnej, wzmacniania lub poprawiania fizjologicznego sterowania ruchem, czy też pobudzania neuroplastyczności [1-4].

### **3. Wpływ medycznych egzoszkieletów na rękę na zdrowie pacjenta**

Zrozumienie, w jaki sposób medyczne egzoszkielety na rękę wpływają na (neuro)fizjologię oraz biomechanikę ruchów człowieka ma zasadnicze znaczenie dla określenia wymagań na egzoszkielety, oceny ich przydatności w różnych przypadkach klinicznych oraz ciągłego doskonalenia projektu. W dotychczasowych badaniach ruchy wspomagane cechowały się znaczącą degradacją dokładności i płynności w porównaniu z ruchami nie wspomaganymi, ponadto towarzyszyła temu średnia redukcja do 60% biologicznego momentu obrotowego i spadek wysiłku mięśniowego do 65% (opóźnienie wystąpienia zmęczenia mięśni) [12]. Z ww. względów spadek wydajności kinematycznej może być uważany za techniczne ograniczenie egzoszkieletów na rękę [12], pozwalają one jednak zminimalizować zmęczenie, utrzymać obciążenie oraz zmniejszyć ryzyko urazów, co stanowi ich dużą zaletę. W kolejnym badaniu egzoszkieletu na kończynę górną [16] stwierdzono zmniejszenie aktywności mięśniowej o 50%, tempa metabolizmu netto o 61% oraz zmęczenia o 99% już przy stosunkowo niewielkim wspomaganie, a przypuszczalnie z jeszcze większymi korzyściami przy zwiększonym momencie wspomaganie. Ponadto może to zapobiegać zmęczeniu mięśni, zmniejszać ryzyko zwyrodnienia stawów i bólu w wyniku podnoszenia, trzymania lub przenoszenia, również u osób zdrowych [16]. Poprawa sprawności ręki i wspomaganie funkcjonalnych chwytów podczas sesji rehabilitacyjnych może być osiągnięte efektywniej przy niższym poziomie wysiłku i zmęczenia

odczuwanych przez pacjenta. Z ww. względów rehabilitacja robotyczna za pomocą egzoszkieletu na rękę przyspiesza proces rehabilitacji, eliminuje potrzebę stałego nadzoru terapeuty [17].

### **4. Egzoszkielety na rękę wytwarzane z użyciem druku 3D**

Parametryczne podejście do modelowania i wytwarzania [18,19] zapewnia dopasowanie wymiarów i cech egzoszkieletu na rękę do wymiarów indywidualnej ręki, rodzaju

i poziomu deficytu oraz indywidualnych celów procesu rehabilitacji. Sterowanie w czasie rzeczywistym w połączeniu z technologią druku 3D przekłada się na lepsze dopasowanie egzoszkieletu do ręki, a jednocześnie zapewnia metodykę uniwersalnego stosowania aktywnych egzoszkieletów wspomagających ruchy ręki [17]. Ponadto druk 3D zapewnia tańsze i szybsze iteracje rozwoju prototypów egzoszkieletów o stałej jakości. Z ww. względów w literaturze pojawia się coraz więcej drukowanych 3D egzoszkieletów na rękę wspomagających funkcje ręki lub poprawiających efektywność rehabilitacji osób po udarze lub innych przyczyn deficytu ruchowego w obrębie ręki. Ich ograniczeniem jest wczesność prototypu oraz niewielka liczba badanych użytkowników (poniżej 10). Efektywność egzoszkieletu na rękę mogą w tej sytuacji obniżyć nieoptymalne kombinacje parametrów druku i cech materiału czy brak dopracowania metodyki doboru egzoszkieletu do potrzeb pacjenta i celów terapii. Drukowany w 3D, miękki egzoszkielet ręki - HEXOES (ang. Hand Exoskeleton with Embedded Synergies) zapewnił maksymalne kąty zgięcia w stawach śródrečno-paliczkowych i międzypaliczkowych bliższych odpowiednio  $53,7 \pm 16,9^\circ$  i  $39,9 \pm 13,4^\circ$  oraz maksymalne prędkości kątowe odpowiednio  $94,5 \pm 41,9$  stopni/s i  $74,6 \pm 67,3$  stopni/s [20]. W badaniu Dudleya i wsp. drukowany 3D egzoszkielet na rękę poprawił wyniki testu Fugl-Meyera oraz testu Box and Block użytkowników, ponadto zaobserwowano zwiększoną aktywność elektromiograficzną (EMG) w mięśniach prostowników podczas noszenia egzoszkieletu. W projekcie do druku 3D zastosowano nowe antybakteryjne polimery, co może zapobiegać infekcjom skóry podczas rehabilitacji [21]. Yoo

i wsp. zaprojektowali drukowany 3D egzoszkielet na rękę sterowany sygnałami EMG do wspomaganie funkcji chwytania dla pacjentów z uszkodzeniem rdzenia kręgowego

w odcinku szyjnym (w tym z porażeniem czterokończynowym). Zaobserwowano poprawę funkcji ręki badanych odzwierciedloną w wynikach Toronto Rehabilitation Institute Hand Function Test (TRI-HFT), uczestnicy uzyskali natychmiastową funkcjonalność podczas jedzenia po założeniu ortezy, a większość uczestników była zadowolona z egzoszkieletu, wskazując na jego intuicyjność i łatwość użycia. Nie zaobserwowano żadnych skutków ubocznych stosowania egzoszkieletu [22]. Optymalizacja obliczeniowa procesu druku 3D pod kątem cech i doboru materiału

w celu uzyskania maksymalnej siły rozciągającej komponentu egzoszkieletu ręki może być realizowana w oparciu o optymalizację sztuczną siecią neuronową (ANN) wspomaganą algorytmami genetycznymi (GA) [23]. Może to odgrywać kluczową rolę w personalizacji, zwiększaniu wydajności i bezpieczeństwa wyrobu medycznego jakim jest egzoszkielet na rękę oraz spełnianiu ograniczeń w rozwiązaniach dostosowanych do potrzeb konkretnego pacjenta [23]. W celu zwiększenia efektywności procesu rehabilitacji możliwe jest połączenie stymulacji haptycznej opuszków palców ze wspomaganą egzoszkieletem rehabilitacją ręki. Ćwiczenie chwytania szklanek (150g, 300g) pokazało wyższy poziom uwagi i zaangażowania użytkowników przy dodatkowej stymulacji haptycznej w porównaniu z zastosowaniem samego egzoszkieletu, podobnie jak przy większym ciężarze szklanki [24]. Hand Exoskeleton for Rehabilitation Objectives (HERO) łączy w sobie druk 3D (w tym siłowników) i testy oraz sterowanie sygnałem elektroencefalograficznym (EEG) w celu odzyskania ruchów wyprostu i zgięcia palców. Moment obrotowy silników prądu stałego był przekształcany w siłę liniową przekazywaną przez cięgna Bowdena dla pasywnego ruchu palców. Przy wadze egzoszkieletu 102 g, uczestnik był w stanie kontrolować egzoszkielet z dokładnością klasyfikacji 91,5% [25]. Egzoszkielety na rękę wspierają nawet 10 czynności codziennego życia ze znaczną redukcją aktywności mięśniowej (tj. o 12-32%) bez znaczącej degradacji działania innych agonistycznych mięśni zdrowych [26].

## 5. Dyskusja

Z dotychczasowych badań wynika, że egzoszkielety na rękę mogą pomóc użytkownikom z deficytami funkcji ręki poprzez wspieranie wykonywania czynności życia codziennego oraz poprawę efektywności procesu rehabilitacji. W ostatniej dekadzie urządzenia te, szczególnie drukowane 3D, stały się bardziej popularne ze

względu na ich duże właściwości adaptacyjne, niską wagę, bezpieczeństwo i ergonomię.

### 5.1. Ograniczenia rozwoju egzoszkieletów na rękę

Ograniczenia technologiczne w obszarze egzoszkieletów na rękę dają się przewyżczyć w miarę rozwoju inżynierii mechanicznej i informatyki. Jednak istotne ograniczenia rozwoju egzoszkieletów na rękę wynikają wciąż z niewiedzy i niewielkiej akceptacji tej grupy urządzeń zarówno przez pacjentów i ich rodziny, jak i klinicystów. Panuje też pogląd o wysokim koszcie tego typu urządzeń.

### 5.2. Kierunki rozwoju egzoszkieletów na rękę

Wyzwanie o charakterze globalnym stanowią nie tylko choroby cywilizacyjne skutkujące deficytami funkcji ręki, ale również coraz wyższa średnia długość życia, skutkująca zmianami neurodegeneracyjnymi, a co za tym idzie kolejną grupą dysfunkcji ręki. Nie ulega wątpliwości, że zarówno w krajach rozwiniętych, jak i rozwijających się aktywność fizyczna spada wraz z wiekiem, przekładając się na ograniczenie zdolności podejmowania czynności codziennego życia, co skutkuje pogorszeniem zdrowia fizycznego i psychicznego, obniżeniem jakości życia i niesamodzielnością. Rynek egzoszkieletów na rękę jest bardzo duży: na świecie żyje ok. 1 mld osób w wieku powyżej 60 lat. Brak wystarczającej liczby specjalistów medycznych i opiekunów powoduje, że odwołanie się do monitorowania, diagnostyki, rehabilitacji i opieki robotycznej jest koniecznością. Coraz częściej wykorzystuje się do tego metody sztucznej inteligencji (przede wszystkim uczenia maszynowego i głębokiego uczenia do rozpoznawania ludzkich aktywności, klasyfikacji, wnioskowania i predykcji). Służą do tego m.in. dane żyroskopowe i akcelerometryczne zebrane ze smartfonów użytkowników. W badaniu Hayata i wsp. [26] smartfony były używane do monitorowania aktywności osób z niepełnosprawnością: leżenia, siedzenia, stania, chodzenia, wchodzenia i schodzenia po schodach i pochylniach, itp. za pomocą metod sztucznej inteligencji (m.in. k-Nearest Neighbors, Random Forest, Support Vector Machine i Long Short-Term Memory Network). Long Short-Term Memory (rekurencyjna odmiana sztucznych sieci neuronowych do analizy sekwencji czasowych) osiągnęła najlepszą dokładność (95,04%), a Support Vector Machine dała wysoką dokładność 89,07% przy krótkim czasie obliczeń (0,42 minuty) [26]. Efektywność połączenia terapii zrobotyzowanej z analizą

opartą na sztucznej inteligencji znalazły potwierdzenie w kolejnych badaniach [27-32]. Kolejne kierunki badań wytyczane przez globalne tendencje rozwojowe to Przemysł 4.0 [33] oraz eco-design i zrównoważony rozwój [34].

## 6. Wnioski

Koncepcja egzoszkieletu na rękę w ramach opisywanego grantu łączy szereg podejść projektowych i symulacyjnych, sprawdzanych eksperymentalnie rozwiązań mechanicznych (różne techniki druku 3D i materiały, różnego typu efekторы, wspomagane czujnikami) i informatycznych (nowatorskie algorytmy sterowania) z weryfikacją przyjętych założeń z grupą specjalistów medycznych, w tym w warunkach laboratoryjnych i klinicznych. Ww. podejście całościowe pozwoli na wypracowanie jednego, wiodącego rozwiązania najlepiej spełniającego szereg wymogów technicznych i operacyjnych, co ułatwi jego przyszłościową produkcję.

## Źródła finansowania

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

## Literatura

1. Nizamis K, Athanasiou A, Almpanti S, Dimitrousis C, Astaras A. Converging Robotic Technologies in Targeted Neural Rehabilitation: A Review of Emerging Solutions and Challenges. *Sensors* 2021;21(6):2084.
2. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Roboty rehabilitacyjne. *Rehabil. Prakt* 2010;4:49-53.
3. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Zastosowania automatyki i robotyki w wózkach dla niepełnosprawnych i egzoszkieleciech medycznych. *Pomiary Automatyka Robotyka* 2011;15(5), 58-63.
4. Gandolfi M., Valè N., Posteraro F., Morone G., Dell'orco A., Botticelli A., Dimitrova E., Gervasoni E., Goffredo M., Zenzeri J., Antonini A., Daniele C., Benanti P., Boldrini P., Bonaiuti D., Castelli E., Draicchio F., Falabella V., Galeri S., Gimigliano F., Grigioni M., Mazzon S., Molteni F., Petrarca M., Picelli A., Senatore M., Turchetti G., Giansanti D., Mazzoleni S., Italian Consensus Conference on Robotics in Neurorehabilitation (CICERONE). State of the art and challenges for the classification of studies on electromechanical and robotic devices in neurorehabilitation: a scoping review. *Eur J Phys Rehabil Med.*, 2021;57(5):831-840.
5. Macko, M., Szczepański, Z., Mikołajewski, D., Mikołajewska, E., Listopadzki, S. The Method of Artificial Organs Fabrication Based on Reverse Engineering in Medicine. In: Rusiński, E., Pietrusiak, D. (eds) *Proceedings of the 13th International Scientific Conference RESRB 2016. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham 2017.
6. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Ethical considerations in the use of brain-computer interfaces. *Central European Journal of Medicine* 2013; 8(6):720-724.
7. Rojek I., Mikołajewski D., Dostatni E. Digital twins in product lifecycle for sustainability in manufacturing and maintenance. *Applied Sciences* 2021; 11(1):31.
8. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Informatyka afektywna w zastosowaniach cywilnych i wojskowych. *Zeszyty Naukowe/Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. gen. T. Kościuszki* 2013; 2: 171-184.
9. Gojanovic B., Fourchet F., Gremeaux V. Cognitive biases cloud our clinical decisions and patient expectations: A narrative review to help bridge the gap between evidence-based and personalized medicine. *Ann Phys Rehabil Med.* 2021;65(4): 101551.
10. Pastorino R., Loreti C., Giovannini S., Ricciardi W., Padua L., Boccia S. Challenges of Prevention for a Sustainable Personalized Medicine. *J Pers Med.* 2021;11(4): 311.
11. W. Wang, Y. Yan, Z. Guo, H. Hou, M. Garcia, X. Tan, E.O. Anto, G. Mahara, Y. Zheng, B. Li, T. Kang, Z. Zhong, Y. Wang, X. Guo, O. Golubnitschaja, "Suboptimal Health Study Consortium and European Association for Predictive, Preventive and Personalised Medicine. All around suboptimal health - a joint position paper of the Suboptimal Health Study Consortium and European Association for Predictive, Preventive and Personalised Medicine", *EPMA J.*, vol. 12, no. 4, :pp. 403-433, 2021.
12. Xiloyannis M., Chiaradia D., Frisoli A., Masia L. Physiological and kinematic effects of a soft exosuit on arm movements. *J Neuroeng Rehabil.* 2019 Feb 22;16(1):29.
13. Rojek I., Jagodziński M. Hybrid Artificial Intelligence System in Constraint Based Scheduling of Integrated Manufacturing ERP Systems 7th International Conference on Hybrid Artificial Intelligent Systems (HAIS), *Hybrid Artificial Intelligent Systems*, 2012; PT II 7209:229-240.

14. Chandra M., Kumar K., Thakur P., Chattopadhyaya S., Alam F., Kumar S. Digital technologies, healthcare and Covid-19: insights from developing and emerging nations. *Health Technol.* 2022;12(2):547-568.
15. Görtz M., Byczkowski M., Rath M., Schütz V., Reimold P., Gasch C., Simpfendörfer T., März K., Seitel A., Nolden M., Ross T., Mindroc-Filimon D., Michael D., Metzger J., Onogur S., Speidel S., Mündermann L., Fallert J., Müller M., von Knebel Doeberitz M., Teber D., Seitz P., Maier-Hein L., Duensing S., Hohenfellner M. A Platform and Multisided Market for Translational, Software-Defined Medical Procedures in the Operating Room (OP 4.1): Proof-of-Concept Study. *JMIR Med Inform.* 2022;10(1):e27743.
16. Nassour J., Zhao G., Grimmer M. Soft pneumatic elbow exoskeleton reduces the muscle activity, metabolic cost and fatigue during holding and carrying of loads. *Sci Rep.* 2021 Jun 15;11(1):12556.
17. Lei Cui, Phan A., Allison G. Design and fabrication of a three dimensional printable non-assembly articulated hand exoskeleton for rehabilitation. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2015; 2015:4627-30.
18. Kaczmarek M., Nowak J., Olszewski W.L., Zaleska M. Estimation of hydromechanical parameters of limb lymphedematous tissue with the use of chamber tests. *Acta of Bioengineering and Biomechanics* 2021;23(1): 149-161.
19. Kaczmarek M., Nowak J., Olszewski W.L., Zaleska M. Simulation-based reasoning of residual tissue deformations in a two-chamber test of a lymphedematous leg. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering* 2022;38(1):e3537.
20. Burns M.K., Van Orden K., Patel V., Vinjamuri R. Towards a wearable hand exoskeleton with embedded synergies. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2017 Jul;2017:213-216.
21. Dudley D.R., Knarr B.A., Siu K.C., Peck J., Ricks B., Zuniga J.M. Testing of a 3D printed hand exoskeleton for an individual with stroke: a case study. *Disabil Rehabil Assist Technol.* 2021 Feb;16(2):209-213.
22. Yoo H.J., Lee S., Kim J., Park C., Lee B. Development of 3D-printed myoelectric hand orthosis for patients with spinal cord injury. *J Neuroeng Rehabil.* 2019 Dec 30;16(1):162.
23. 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 (Basel).* 2020 Nov 29;13(23):5437.
24. Li M., Chen J., He G., Cui L., Chen C., Secco E.L., Yao W., Xie J., Xu G., Wurdemann H. Attention Enhancement for Exoskeleton-Assisted Hand Rehabilitation Using Fingertip Haptic Stimulation. *Front Robot AI.* 2021 May 21;8:602091.
25. Araujo R.S., Silva C.R., Netto S.P.N., Morya E., Brasil F.L. Development of a Low-Cost EEG-Controlled Hand Exoskeleton 3D Printed on Textiles. *Front Neurosci.* 2021 Jun 25;15:661569.
26. Noronha B., Ng C.Y., Little K., Xiloyannis M., Kuah C.W.K., Wee S.K., Kulkarni S.R., Masia L., Chua K.S.G., Accoto D. Soft, Lightweight Wearable Robots to Support the Upper Limb in Activities of Daily Living: A Feasibility Study on Chronic Stroke Patients. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2022;30:1401-1411.
27. Hayat A., Dias M., Bhuyan B.P., Tomar R. Human Activity Recognition for Elderly People Using Machine and Deep Learning Approaches. *Information* 2022; 13, 275.
28. Monoscalco L., Simeoni R., Maccioni G., Giansanti D. Information Security in Medical Robotics: A Survey on the Level of Training, Awareness and Use of the Physiotherapist. *Healthcare* 2022;10(1):159.
29. Goffredo M., Pournajaf S., Proietti S., Gison A., Posteraro F., Franceschini M. Retrospective Robot-Measured Upper Limb Kinematic Data From Stroke Patients Are Novel Biomarkers. *Front Neurol.* 2021; 12: 803901.
30. Giang C., Pirondini E., Kinany N., Pierella C., Panarese A., Coscia M., Miehlabradt J., Magnin C., Nicolo P., Guggisberg A., Micera S. Motor improvement estimation and task adaptation for personalized robot-aided therapy: a feasibility study. *Biomed Eng Online* 2020;19(1):33.
31. Vélez-Guerrero M.A., Callejas-Cuervo M., Mazzoleni S. Design, Development, and Testing of an Intelligent Wearable Robotic Exoskeleton Prototype for Upper Limb Rehabilitation. *Sensors* 2021; 21(16):5411.
32. Kopke J.V., Ellis M.D., Hargrove L.J. Determining User Intent of Partly Dynamic Shoulder Tasks in Individuals With Chronic Stroke Using Pattern Recognition. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2020; 28(1); 350-358.
33. Rojek, I. Neural Networks as Performance Improvement Models in Intelligent CAPP Systems. *Control Cybern.* 2010; 39(1):55-68.
34. Rojek I., Dostatni E., Hamrol A. Ecodesign of Technological Processes with the Use of Decision Trees Method. In: *International Joint Conference SOCO'17-CISIS'17-ICEUTE'17* León, Spain, September 6-8, 2017, Proceeding. SOCO 2017, CISIS 2017, ICEUTE 2017. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 649, pp. 318-327, eds. H. Pérez García, J. Alfonso-

Cendón, L. Sánchez González, H. Quintián and E.  
Corchado, Springer, Cham, 2018.