

Bydgoski egzoszkielec na rękę – aspekty mechaniczne

Hand exoskeleton from Bydgoszcz – mechanical issues

JAKUB KOPOWSKI
DARIUSZ MIKOŁAJEWSKI
MAREK MACKO
IZABELA ROJEK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.4.35>

Prezentowana jest własna konstrukcja egzoszkielec na rękę. Omówiono ją z mechanicznego punktu widzenia: wychodząc od ograniczeń narzucanych przez biomechanikę zdrowego człowieka poprzez możliwe deficyty funkcjonalne i ich kompensację z użyciem mechaniki egzoszkielec aż po ograniczenia materiałowe i technologiczne. Opisano wykorzystanie inżynierii odwrotnej w celu zachowania indywidualizacji własności mechanicznych przy silnym zindywidualizowaniu mechaniki ręki, zwłaszcza patologicznej. **SŁOWA KLUCZOWE:** technologia wspomagająca, egzoszkielec, mechanika ruchu, własności materiałowe, współdziałanie ręka–urządzenie, funkcje motoryczne

The own study on hand exoskeleton is presented. It is described from mechanical point of view: starting from constraints caused by healthy human biomechanics, through possible functional deficits and their compensation by exoskeleton's biomechanics, up to material and technological limitations. There is described an application of the reverse engineering aiming at personalization of the mechanical features taking into consideration huge individualization of the hand mechanics, including pathological changes.

KEYWORDS: assistive technology, exoskeleton, mechanics of movement, material features, hand-device co-operation, motor functions

Wprowadzenie

Egzoszkielec (szkielet zewnętrzny, *exoskeleton*) w ujęciu mechanicznym to urządzenie zakładane na ciało lub część ciała, wspomagające wykonanie ruchu przez jego użytkownika w sposób pasywny (przez częściowe odciążenie i wsparcie ruchu za po-

mocą gum, sprężyn) lub w sposób aktywny (za pomocą serwomechanizmów, siłowników hydraulicznych lub pneumatycznych itd.).

Próby skonstruowania egzoszkielec były podejmowane od dawna – znane są rozwiązania Nikolaja Yagna z końca XIX w. czy opracowane w firmie General Electric w latach 60. XX w. egzoszkielec przemysłowy Hardiman (doprowadzony do stanu prototypu elementu na kończynę górną). Dynamiczny rozwój tej koncepcji rozpoczął się na przełomie XX i XXI w. wraz z projektami finansowanymi przez Agencję Zaufanych Projektów Badawczych Departamentu Obrony USA (DARPA), zmierzającymi do opracowania egzoszkielec na potrzeby bezpieczeństwa i obronności państwa, oraz rozwojem egzoszkielec medycznych [1–4].

Do największych wyzwań należy opracowanie funkcjonalnego egzoszkielec na rękę – jedno z najbardziej precyzyjnych i wszechstronnych narzędzi, jakim dysponuje człowiek – wspierającego przede wszystkim palce i ich możliwości manipulacyjne. Deficyty w tym obszarze obniżają jakość życia związaną ze zdrowiem i stanowią przedmiot badań zarówno w dziedzinie rehabilitacji i fizjoterapii, jak i biomechaniki [4–6]. Kluczowe wymagania obejmują:

- wsparcie wszystkich chwytów: hakowego, cylindrycznego, szczypcowego, trójpunktowego, obustronnego i oburęcznego [3, 8],
- zachowanie chwytu czteropunktowego polegającego na obejmowaniu przedmiotu trzema palcami z jednoczesnym oparciem na wewnętrznej powierzchni dłoni [9],
- zachowanie normalnych odruchów.

Z mechanicznego punktu widzenia projektowane rozwiązanie musi:

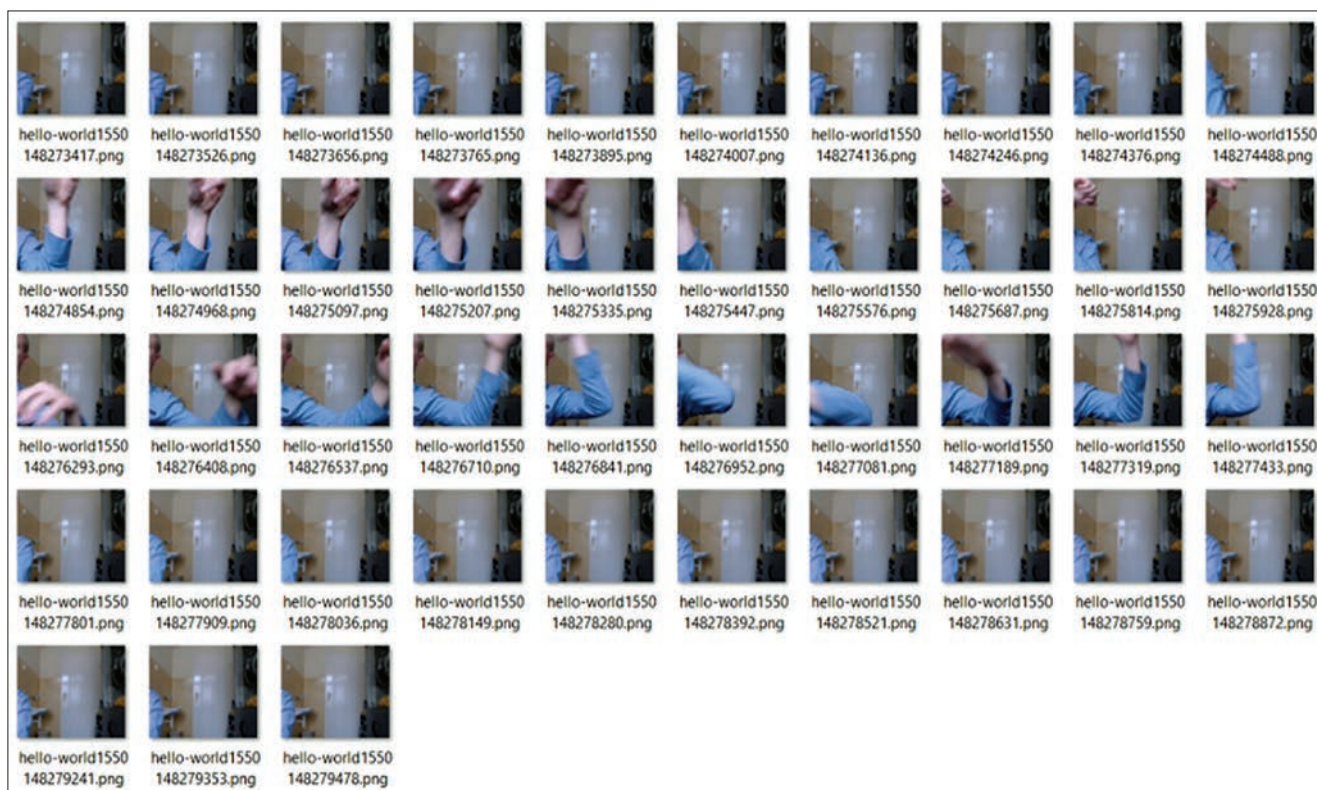
- uwzględniać naturalną motorykę człowieka, w tym wymiary poszczególnych elementów ruchomych, kąty, 18 stopni swobody (DOF) dla ręki pięciopalczastej, w tym 3–4 stopnie swobody dla każdego palca,
- zapewniać prędkość paliczek do 0,2 m/s oraz przyspieszenia do 2 m/s² [10],
- zapewniać odpowiednią ruchomość kciuka, odrębną od ruchomości pozostałych palców,
- uwzględniać założenie wykorzystania doświadczeń z opisem łańcucha kinematycznego ręki, przy założeniu że poszczególne elementy tego łańcucha są sztywne i nieodkształcalne,
- zapewniać trajektorie ruchu zgodne z trajektoriami obiektów rzeczywistych,
- umożliwiać sterowanie poszczególnymi palcami i ich współpracę czasowo-przestrzenną,
- mieć jak najmniej sterowanych napędów [9, 10].

W obszarze protez kończyn górnych dla dzieci w wieku powyżej 3 lat z zachowanym nadgarstkiem i/lub łokciem działa społeczny ruch e-NABLE. Jest to grupa wolontariuszy, którzy projektują i wykonują protezy (niebędące wyrobami medycznymi) techniką druku 3D [11].

Rozwiązanie własne

Podczas opracowywania egzoszkielec na rękę wykorzystano doświadczenia własne z prac nad egzoszkieletem pasywnym dla dzieci z osłabieniami w obszarze kończyn górnych, wydrukowanym techniką 3D, oraz nad elementem wspomagającym

* Mgr inż. Jakub Kopowski (kopowski@ukw.edu.pl) – Wydział Psychologii, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz, Polska
Dr inż. Dariusz Mikołajewski (dmikolaj@ukw.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0003-4157-2796> – Instytut Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz, Polska
Dr hab. inż. Marek Macko prof. nadzw. (mackomar@ukw.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0002-8743-6602> – Instytut Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz, Polska
Dr hab. inż. Izabela Rojek prof. nadzw. (izarojek@ukw.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0002-9958-6579> – Instytut Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz, Polska



Rys. 1. Analiza poklatkowa położenia ręki

funkcjonowanie stawu łokciowego [11]. Ponadto na potrzeby optymalizacji i personalizacji konstrukcji egzoszkieletu zastosowano nowoczesne technologie: stanowisko do analizy układu ruchu człowieka, skanowanie 3D, analizę numeryczną oraz druk 3D. Przyczyniło się to do skrócenia czasu przechwytywania charakterystycznych cech kończyny górnej oraz przełożenia ich na język mechaniki, a następnie ich implementowania w charakterystyce spersonalizowanego egzoszkieletu bez pośrednictwa fizycznych odlewów czy form, a jedynie z użyciem modeli cyfrowych.

W trakcie projektowania wspomniano się:

- systemem ProEngineer do zaprojektowania części mechanicznej,
- programem ADAMS do wstępnej oceny metodami symulacji komputerowej, aby oszacować poprawność przyjętych założeń i podstawowych charakterystyk oraz je zoptymalizować zgodnie z założonymi kryteriami, w tym rozwiązać zadanie proste/odwrotne kinematyki/dynamiki kluczowe dla prawidłowego działania egzoszkieletu przy różnych rodzajach oraz poziomach deficytów użytkownika.

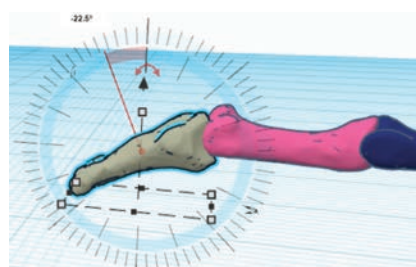
Do analizy ruchu ręki opracowano stanowisko umożliwiające nie tylko skanowanie 3D, lecz także robienie zdjęć poklatkowych, potrzebnych do

obliczenia wzajemnego położenia i prędkości poszczególnych elementów ręki (rys. 1). W analizie zastosowano autorskie oprogramowanie.

Z myślą o zmniejszeniu ciężaru rozwiązania przy projektowaniu założono integrację komponentów mechanicznych i elektronicznych (układów napędowych, przekładniowych i transmisyjnych, czujników itp.). Praca nad komponentem mechanicznym objęła:

- oszacowanie obciążeń: masa przedmiotów manipulowanych do 500 g, największy wymiar tych przedmiotów: do 100 mm,
- dobór typu i struktury mechanizmu,
- dobór parametrów geometrycznych (rys. 2).

Dla każdego paliczka opracowano element wspierający jego ruch oraz współdziałający z elementami na innych palczkach tego samego palca w sposób zapewniający fizjologiczne, indywidualne dla każdego pacjenta kąty zgięcia oraz realizację sekwen-



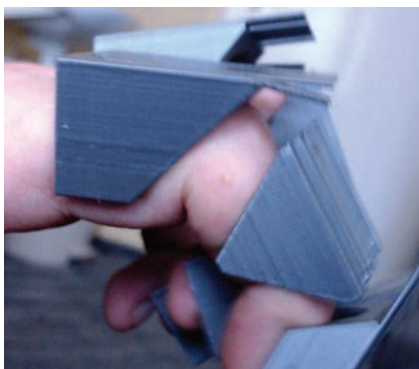
Rys. 2. Analiza ruchu paliczka (przykład)

cji zgięcia całego palca (w tym w ramach złożonego ruchu wszystkich palców): stopniowo od czubka palca aż do paliczka najbliższego do nadgarstka. Konstrukcja części na palce umożliwia zachowanie odległości między palcami pozwalających na niezależne manipulowanie nimi. Przyczynia się to dodatkowo do korzystnej redukcji liczby napędów.

Do wytworzenia wymienionych elementów wykorzystano dwie technologie druku z tworzyw sztucznych: osadzania topionego materiału (FDM) oraz stereolitografię o podwyższonej dokładności (SLA). W prototypie wykorzystano gotowe elementy metalowe (głównie łączeniowe). Docelowo będą one drukowane z metali reaktywnych (aluminium, tytanu) w technologii laserowego spiekania proszków metalicznych (DMLS) – aby obniżyć wagę egzoszkieletu, a jednocześnie zachować parametry wytrzymałościowe (rys. 3). Łączenie tych technologii było konieczne, ponieważ różne elementy egzoszkieletu miały spełniać określone wymagania



Rys. 3. Wydrukowany element na palec wskazujący



Rys. 5. Współdziałanie gotowych elementów egzozszkieletu wspomagających ruch palców

Egzozszkielet na rękę badany przez Kim i wsp. [5] pozwalał na funkcjonalne wsparcie zginania palców, w tym niezależnie, oraz synergii ruchów palcami przy realizacji chwytów ze wsparciem stawów u osób zdrowych. Podobne rozwiązanie zaprezentowali Zhang i wsp. [6].

Quasi-objektywną (tj. za pomocą skali klinimetrycznej FMA) ocenę efektów wykorzystania egzozszkieletu ręki w rehabilitacji pacjentów z deficytem w obszarze funkcji kończyny górnej przedstawił Wang i wsp. [13]. Badanie Triolo i wsp. pokazało efektywność wsparcia przez egzozszkielet na rękę funkcji chwytu, ale już nie funkcji manipulacji samymi palcami kończyny górnej [8].

Badanie Heo i Kima [14] pokazało, że wsparcie funkcji chwytu za pomocą egzozszkieletu na rękę nie zawsze jest wystarczające. Sama konstrukcja egzozszkieletu nie oznacza jeszcze wzrostu możliwości funkcjonalnych czy efektywności rehabilitacji. Kluczowe etapy obejmują:

- ocenę możliwości funkcjonalnych (co użytkownik faktycznie robi),
- identyfikację i analizę potrzeb funkcjonalnych (co pacjent mógłby robić i jakie wsparcie ze strony egzozszkieletu na rękę jest do tego wymagane,
- implementację tych ustaleń w szablonie egzozszkieletu,
- testy i poprawki,
- przeniesienie eksploatacji egzozszkieletu ze środowiska kontrolowanego do środowiska naturalnego (rys. 4).

Docelowym efektem jest wsparcie rehabilitacji oraz samodzielnego funkcjonowania pacjenta w normalnych warunkach domowych. Nie zawsze da się osiągnąć pełną sprawność. Część wsparcia może wymagać modyfikacji w miarę zmian stanu funkcjonalnego pacjenta.

Na rys. 5 pokazano współdziałanie elementów egzozszkieletu wspomagających ruch palców.

Zaobserwowano ograniczenia badań własnych w zakresie:

- procedur dopasowania: wskazań i przeciwwskazań, w tym zdefiniowanych na podstawie badania fizykalnego, sprawdzonych na dużej grupie pacjentów,
- procedur wykonania: quasi-przemysłowej technologii skanowania, modyfikowania i drukowania na bazie prefabrykowanych szablonów,
- wsparcia: wsparcia ruchów palców dłoni na potrzeby realizacji czynności życia codziennego (zachowania samodzielności); potrzeba dopracowania ruchów precyzyjnych, np. pisania na klawiaturze komputera,
- efektywności działania: w ramach randomizowanych badań klinicznych.

Kierunki dalszych badań obejmują podwyższenie stopnia gotowości wdrożeniowej (TRL). W kontekście rozwoju znacznie szerszych badań międzynarodowych zupełnie nowe rozwiązania mogą zostać wypracowane w ramach badań nad wykorzystaniem egzozszkieletów w stanie nieważkości [15].

Wnioski

Projektowanie konstrukcji mechanicznej egzozszkieletu na rękę z wykorzystaniem skanowania 3D oraz druku 3D pozwala na lepsze dopasowanie gotowego rozwiązania do potrzeb pacjenta w ramach tzw. terapii personalizowanej oraz umożliwia prowadzenie prac nad rozwojem projektu w wersji w pełni cyfrowej (w ramach oprogramowania do obliczeniowego wspomaganie projektowania). Proces konstrukcyjny jest efektywny i może stanowić szablon dla kolejnych rozwiązań w technologii egzozszkieletów.

LITERATURA

- [1] Mikołajewska E., Mikołajewski D. "Exoskeletons in neurological diseases – current and potential future applications". *Advances in Clinical and Experimental Medicine*. 20, 2 (2011): 227–233.
- [2] Mikołajewska E., Mikołajewski D. „Zastosowania automatyki i robotyki w wózkach dla niepełnosprawnych i egzozszkieletach

medycznych”. *Pomiary Automatyka Robotyka*. 5 (2011): 58–64.

- [3] Mikołajewska E. „Egzozszkielety”. W: Przeździecki B., Woźniowski M., Gieremek K., Janicki S. (red.). *Wyroby medyczne. Zastrzeżenie indywidualne*. Warszawa: PZWL, 2016.
- [4] Burns M.K., Van Orden K., Patel V., Vinjamuri R. „Towards a wearable hand exoskeleton with embedded synergies”. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society 2017*. (2017): 213–216.
- [5] Kim S., Lee J., Park W., Bae J. “Quantitative evaluation of hand functions using a wearable hand exoskeleton system”. *Proceedings of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR) 2017*. (2017): 1488–1493.
- [6] Zhang F., Fu Y., Zhang Q. “Experiments and kinematics analysis of a hand rehabilitation exoskeleton with circuitous joints”. *Bio-Medical Materials and Engineering*. Supplement 1 (2015): S665–S672.
- [7] Mikołajewska E. „Terapia ręki. Diagnostyka i terapia”. Warszawa: Soyer, 2016.
- [8] Triolo E.R., Stella M.H., BuSha B.F. “A force augmenting exoskeleton for the human hand designed for pinching and grasping”. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering, Medicine and Biology Society 2018*. (2018): 1875–1878.
- [9] Mianowski K. „Nowe rozwiązanie chwytaka wielopalcowego z podatnością do obsługi specjalnych procesów manipulacji”. *Pomiary Automatyka Robotyka*. 2 (2010): 519–526.
- [10] John A., Musiolik A. „Analiza kinematyczna palców ręki”. *Modelowanie Inżynierskie*. 40 (2010): 111–116.
- [11] <http://e-nable.pl> (dostęp: 22.03.2019 r.).
- [12] Mikołajczyk T., Kłodowski A., Mikołajewska E., Walkowiak P., Berjano P., Villafane J.H., Aggogeri F., Borboni A., Fausti D., Petrogalli G. “Design and control of system for elbow rehabilitation: preliminary findings”. *Advances in Clinical and Experimental Medicine*. 27, 12 (2018): 1661–1669.
- [13] Wang D., Meng Q., Meng Q., Li X., Yu H. “Design and development of a portable exoskeleton for hand rehabilitation”. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 26, 12 (2018): 2376–2386.
- [14] Heo P., Kim J. „Power-assistive finger exoskeleton with a palmar opening at the fingerpad”. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 61, 11 (2014): 2688–2697.
- [15] Villoslada Á., Rivera C., Escudero N., Martín F., Blanco D., Moreno L. “Hand exo-muscular system for assisting astronauts during extravehicular activities”. *Soft Robotics*. (2018): DOI: 10.1089/soro.2018.0020. ■