

## Bydgoski egzoszkielec na rękę - koncepcja i wyniki wstępne

Jakub Kopowski<sup>1</sup>, Izabela Rojek<sup>2</sup>, Dariusz Mikołajewski<sup>2</sup>, Marek Macko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Wydział Psychologii, Uniwersytet Kazimierze Wielkiego w Bydgoszcz, <sup>2</sup> Instytutu Informatyki, Uniwersytet Kazimierze Wielkiego w Bydgoszcz, <sup>3</sup> Wydział Mechatroniki, Uniwersytet Kazimierze Wielkiego w Bydgoszcz

**Streszczenie:** *Możliwość chwytu oraz manipulacje różnymi obiektami stanowią podstawowe umiejętności funkcjonalne umożliwiające dalsze przejście do korzystania z narzędzi, pisania i innych czynności codziennego życia. W niniejszym artykule skupiono się na koncepcji egzoszkielec na rękę dorosłego człowieka oraz wstępnych wynikach w obszarze poprawy parametrów ręki dysfunkcyjnej w porównaniu z ręką zdrową. Pozwala to nie tylko na natychmiastową poprawę funkcji, ale również na kształtowanie jej w dłuższym okresie czasu podczas dalszych faz rehabilitacji.*

**Słowa kluczowe:** *funkcje ręki, model mechaniczny ręki, egzoszkielec.*

### Bydgosian hand exoskeleton – concept and preliminary findings

**Abstract:** *Possibility of grasping and manipulation of various object constitute basic functional abilities allowing for further development toward use of tools, hand writing, and other activities of daily living. This paper focuses on the concept of the hand exoskeleton for adult patients as far as preliminary findings in the area of improvement of the parameters of hand with deficit compared to parameters in healthy hand. It causes not only immediate functional recovery but also shapes this recovery during next phases of the rehabilitation.*

**Key words:** *hand function, mechanical model of the hand, exoskeleton.*

## 1. Wprowadzenie

Egzoszkielec (ang. *exoskeleton*) jako urządzenie mechaniczne służy pasywnemu (w oparciu o elementy sprężyste) lub aktywnemu (w oparciu o zestawy czujników i siłowników) wsparciu ruchów użytkownika. Szczególnym obszarem zastosowania egzoszkielec są funkcje ręki jako najbardziej wielofunkcyjnego naturalnego narzędzia człowieka. Deficyt w tym obszarze wpływa na jakość życia pacjenta, jego zdolność do nauki i pracy, a u dzieci – nauki i zabawy, sprzyjając stygmatyzacji w grupie rówieśniczej oraz dalszym opóźnieniom rozwojowym [1].

Rozwiązania robotyczne stanowią ważną część technicznego wsparcia nauk medycznych oraz praktyki klinicznej, stąd każdy postęp w tej dziedzinie stanowi ważny krok w terapii personalizowanej pacjentów z deficytem w obszarze kończyn górnych – nie tylko z deficytem neurologicznym, ale również z deficytem neurodegeneracyjnym w procesie starzenia się czy – docelowo - amputacjami w wyniku urazów [2-4].

Rozwijając koncepcję bydgoskiego egzoszkielec na rękę wypracowano wszystkie etapy opracowania i wdrożenia: od badania biomechaniki ręki i rozwinięcia jej modelu mechanicznego, poprzez skanowanie, modelowanie, modyfikowanie

parametrów modelu aż po dopasowanie ich do konkretnego pacjenta i praktyczne wykorzystanie w codziennym życiu [5-7]. W niniejszym artykule skupiono się na koncepcji egzoszkielec na rękę dorosłego człowieka oraz wstępnych wynikach w obszarze poprawy parametrów ręki dysfunkcyjnej w porównaniu z ręką zdrową.

## 2. Szczegółowy opis

### 2.1. Zarys koncepcji

Działający egzoszkielec zakładany na rękę użytkownika powinien spełniać następujące wymagania:

- budowa modułowa, dzięki czemu da się dostosować wielkość paliczek modelu do długości, szerokości oraz kształtu paliczek ręki użytkownika i innych wymagań użytkownika,
- “zatrzaski”, które w przypadku niektórych chorób umożliwią utrzymanie prawidłowej kształtu dłoni, w przypadku skurczów,
- kanały od pasków naciągowych, które umożliwią pasywną (jeśli są elastyczne) lub aktywną (jeśli są podłączone do serwo mechanizmów) regulację siły naciągu danego palca,

- możliwość zakładania całej "rękawicy" na dłoń człowieka bądź poszczególnych jej modułów na poszczególne człony (palczki) po kolei [5].

Podczas pracy nad egzoszkieletem wykorzystano pracę wieloetapową - inżynierię odwrotną (ang. *reverse engineering*). Skanowanie 3D, modyfikacje szablonu oraz druk 3D elementów egzoszkielec umożliwiły dokładne wytworzenie modelu 3D. Należy jednak zaznaczyć, że ta technologia nie jest pozbawiona wad i wymaga spełnienia rygorystycznych założeń, m.in. obiekt skanowany powinien być całkowicie nieruchomy, by w modelu nie było żadnych artefaktów/błędów. W tym celu wykorzystano przezroczyste trzymadła do utrzymania ręki w pozycji nieruchomej.

Na rysunku 1 pokazano skanowaną rękę z już zeskanowanym modelem. Na podstawie skanu 3D ręki

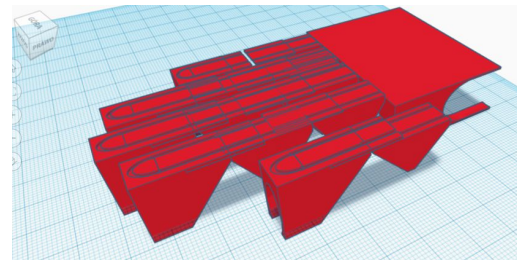
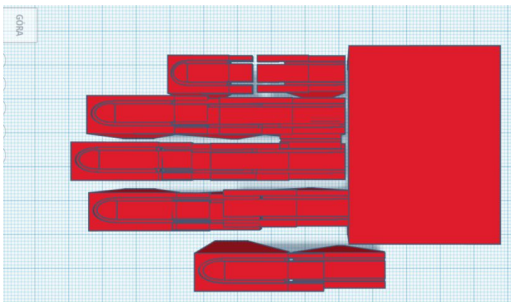
z dysfunkcjami wyznaczono długość poszczególnych elementów ręki (palczków oraz całych palców), potrzebnych do obliczeń i konstrukcji egzoszkielec. Wyniki wykorzystano później do wykonania symulacji oraz potrzebnych obliczeń.

## 2.2. Opis najważniejszych parametrów

Egzoszkielec ma być zakładany na rękę (tj. odcinek kończyny górnej od palców do nadgarstka) dorosłego człowieka. Każda para kinematyczna (para kości palców) ma swoje odzwierciedlenie w egzoszkielecie jak przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 1. Zeskanowana ręka. Lewy kadr przedstawia przed obróbką, prawy po obróbce i koloryzacji.



Rysunek 2. Koncepcja egzoszkielec na rękę (rzut z góry i z boku).

Palec ręki interpretuje się jako układ otwarty połączonych ciał o określonej masie i rozmiarach. Każde z tych ciał składa się z:

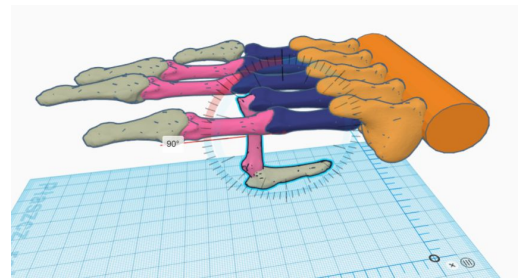
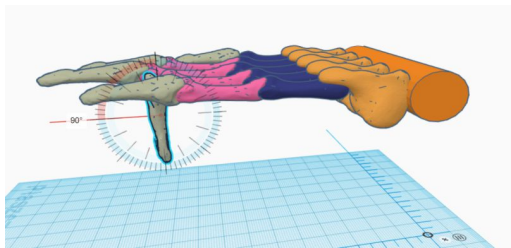
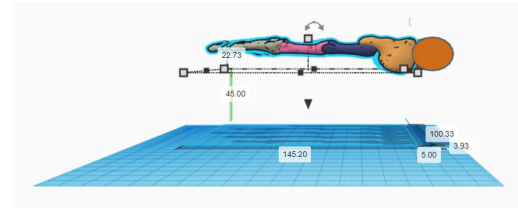
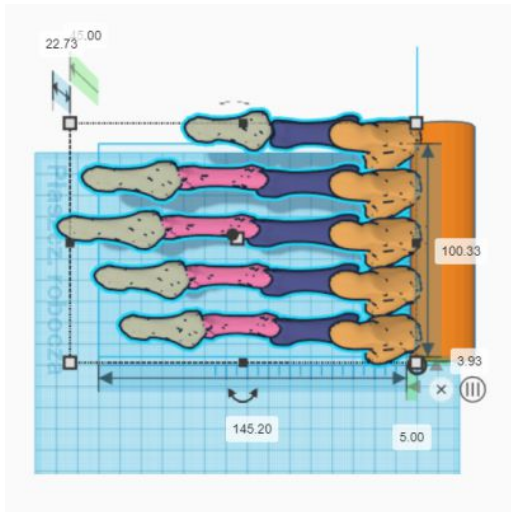
- kości - stanowiącej rusztowanie,
- układu mięśniowo-ścięgnowego - stanowiącego siłownik wprawiający w ruch pary kinematyczne palczków,
- tkanki łącznej - łączącej wszystkie elementy, zapewniającej niezbędne paliwo do działania (tlen, węglowodany, tłuszcz) oraz materiały do budowy/naprawy całego mechanizmu.

W omawianym przypadku każdy palczek to osobny element w sensie mechanicznym, a każda para palczków bądź śródrezcze-palczek to para kinematyczna. Najistotniejszymi z parametrów są:

- kąty zginania poszczególnych par kinematycznych, z których oblicza się przebyta drogę,
- czas pomiaru, który uzyskuje się z metadanych przy pobieraniu wektora danych z urządzenia pomiarowego,
- wymiary, a w szczególności długości palczków,

– masa poszczególnych paliczków, która potrzebna jest do obliczenia siły, z jaką palce zginają

i rozginają się.



Rysunek 3. Ręka jako układ mechaniczny z przedstawionym przykładem zginania palca oraz wyszczególnionymi paliczkami.

### Prędkość chwilowa

Dla ruchu wzdłuż prostej prędkość definiuje się jako pochodną drogi po czasie, czyli granicę przyrostów przesunięcia do przyrostu czasu, w jakim nastąpił ten przyrost, dla nieskończenie małego przyrostu czasu. Droga  $s$  jest rozumiana jako długość odcinka krzywej (toru), po której porusza się ciało, od punktu początkowego do końcowego ruchu. Jeżeli prędkość zmienia się, to droga jest równa sumie małych odcinków drogi, na których uznaje się, że prędkość jest stała i jest określana jako prędkość chwilowa

$$v = \frac{s'}{t'} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (\text{wzór 1})$$

Ww. definicja została wybrana z powodu zasady działania urządzenia oraz programu pomiarowego. Karta i czujnik pomiarowy wysyłają w jak najmniejszym możliwym odstępie czasowym dane do programu pomiarowego. Program zapisuje dane dla wszystkich stawów oraz czas. Masa i długość paliczków jest wprowadzana osobno.

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (\text{wzór 2})$$

gdzie:

$\Delta t$  - czas między odczytami czujnika,

$\Delta s$  - obliczone przemieszczenie (droga) pomiędzy odczytami czujnika, za pomocą wzoru na drogę po okręgu.

### Zmiana prędkości

$$V \Delta = v - v_{\text{poprzednie}} \quad (\text{wzór 3})$$

gdzie:

$v$  - aktualna wartość prędkości chwilowej

$v$  poprzednie - poprzedni pomiar prędkości chwilowej

### Przyspieszenie dośrodkowe

Przyspieszenie dośrodkowe (przyspieszenie normalne) - rodzaj przyspieszenia, w którym ciało doznaje na skutek działania siły lub jej składowej prostopadłej do wektora prędkości ciała. Kierunek i zwrot tego przyspieszenia jest zgodny z kierunkiem i zwrotem tej siły.

W wyniku przyspieszenia normalnego nie zmienia się wartość prędkości, tylko jej kierunek

$$a_d = \frac{v^2}{r} \quad (\text{wzór 4})$$

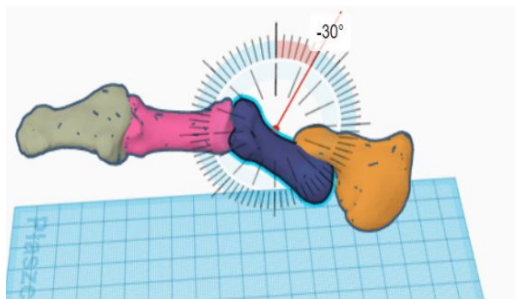
Przyspieszenie dośrodkowe pozwala określić kierunek działania siły czy w naszym przypadku kierunek zginania się danego paliczka. Na podstawie tego można określić czy i jaki kierunek ma ciało (paliczek). Ta informacja pozwala określić kierunek zmiany ruchu, nawet jeśli ręka porusza się ruchem jednostajnym. W przypadku nagłych zmian wartości przyspieszenia normalnego dostajemy informację, że nastąpiła nagle zmiana kierunku ruchu np. skurcz w parze paliczków (parze kinematycznej). Dzięki tej informacji egzozsokielet/komputer może zawnoczu przewidzieć i zastosować odpowiednie środki zaradcze, które zniwelują anomalie w ruchu. Dzięki informacji o nagłych zmianach wartości oraz wiedzy o maksymalnych i minimalnych zakresach ruchów stawów można określić algorytm/ zestaw działań zaradczych w celu zniwelowania przegięć jak i w przypadkach problemu, kiedy ręką nie może być pełni zgjęta.

Przyspieszenie styczne

Przyspieszenie styczne to składowa styczna do toru ruchu obiektu równoległa do prędkości stycznej, która charakteryzuje zmianę wartości prędkości.

$$a_d = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (\text{wzór 5})$$

Umożliwia określenie wartości przyspieszenia całkowitego. W przypadku zmian tego parametru dowiadujemy się o wartości przyspieszenia. Co wpływa na zmianę wartości siły.



Rysunek 4. Nieprawidłowe wyprostowane kolejnych segmentów/członów (par kinematycznych) palca.

Kolejnym problemem są wahania w wartościach przyspieszenia, czasu i kąta, pod jakim zginają

Przyspieszenie właściwe całkowite

$$A_c = \sqrt{a_d^2 + a_s^2} \quad (\text{wzór 6})$$

Siły

Siła dośrodkowa – siła powodująca zakrzywienie toru ruchu ciała, skierowana wzdłuż normalnej (prostopadle) do toru, w stronę środka jego krzywizny.

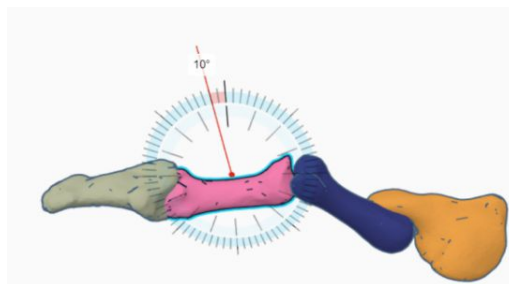
$$f_d = m \cdot a_d \quad (\text{wzór 7})$$

Siła styczna do prędkości (chwilowej) - siła styczna do toru ruchu i równoległa do przyspieszenia stycznego. Zmiana jej wartości powoduje zmianę wartości prędkości jak i przyspieszenia, ale nie zmienia kierunku.

$$f_s = m \cdot a_s \quad (\text{wzór 8})$$

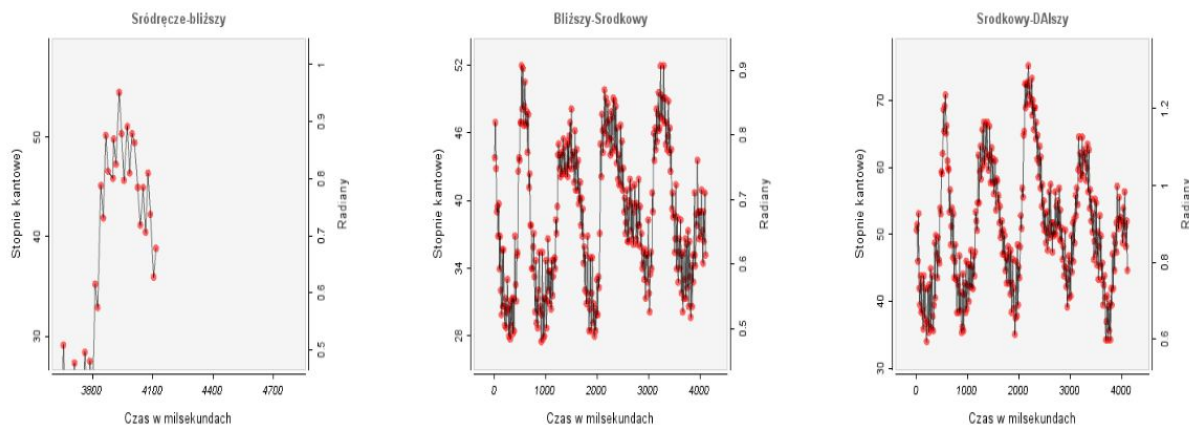
**3. Opis przypadku**

Jako pacjentkę do zbadania i zbudowania egzozsokieletu na rękę wybrano 23-letnią osobę z mózgowym porażeniem dziecięcym (MPD, ang. *cerebral palsy - CP*). Palce ręki lewej badano w następującej kolejności: palec wskazujący, palec środkowy, palec serdeczny, palec mały, kciuk. Ochotniczka z racji swej dysfunkcji miała problemy z prawidłowymi kątami zginania palców, co prezentuje najlepiej para kinematyczna paliczek środkowy dalszy (rys. 4). Należy zwrócić uwagę, że każda para np. śródrezcze-bliższy zgina się prawidłowo.



i prostują się poszczególne pary kinematyczne w palcu (pary paliczków) (na rys. 5 i rys. 7).





Rysunek 5. Zakres kątów w czasie dla poszczególnych stawów, par kinematycznych paliczków.

Jak przedstawiono na rysunku 5 wartości zmian kątów poszczególnych par kinematycznych są stosunkowo duże w czasie: dla osoby z dysfunkcją ręki wahają się 25° do 50°. Pacjentka ma problemy z utrzymaniem ręki w określonej pozycji, w określonym chwycie i ma problem ze świadomym kontrolowaniem swojej ręki.

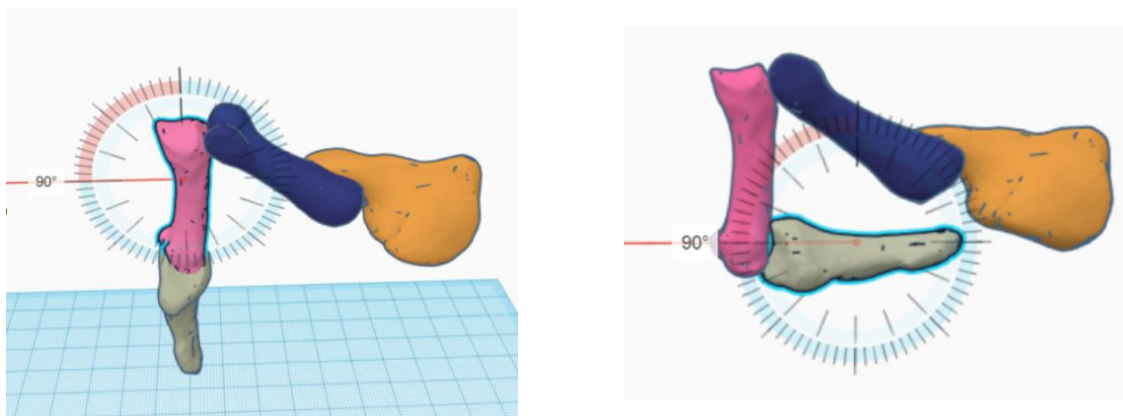
Takie nagłe zmiany wartości kąta w czasie przekładają się na zmiany w prędkościach i przyspieszeniach, które później przekładają się na siłę. Nagłe zmiany przyspieszeń statycznych i dośrodkowych w krótkich jednostkach czasu uniemożliwiają prawidłowe funkcjonowanie ręki.

Tabela 1 Przykładowe wyniki dla palca wskazującego w zakresie zginania palców (w stopniach)

| Para kinematyczna | Dla zdrowej osoby |                    | Dla osoby z deficytem |                    |
|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
|                   | Wyprostowana ręka | Zaciśnięta w pięść | Wyprostowana ręka     | Zaciśnięta w pięść |
| Środkowy -Dalszy  | 0                 | 90                 | 0                     | 90                 |
| Bliższy-Środkowy  | 0                 | 90                 | 10                    | 90                 |
| Śródrecze-Bliższy | 0                 | 90                 | -30                   | -30                |

W tabeli 1 pokazano wartości krańcowe dla ręki zdrowych oraz deficytem. W dwóch przypadkach, pierwszym osoba miała być maksymalnie wyprostowaną ręką i położyć ją na płaskiej powierzchni, drugim natomiast miała zaciśnąć rękę w pięść. Dla osoby zdrowej ręka wszystkie paliczki przyjmowały wartość 0°, czyli pozycję wyprostowaną. Natomiast dla osoby z deficytem funkcjonowania ręki zaobserwowano duże zmiany wartości w porównaniu z ręką zdrową, np. para śródrecze-bliższy wyginała się w tym miejscu w sposób patologiczny w przeciwnym kierunku niż u ręki zdrowej oraz kącie 30 stopni

przeciwnie do kierunku zginania ręki zdrowej. Taka anomalia wynika z długotrwałego nieprawidłowego wzrostu kości oraz systemu mięśniowego. Należy zwrócić uwagę, że pacjentka jest chora ma MPD od urodzenia, w okresie dojrzewania następowały nieprawidłowe ukształtowania kości oraz stawów, czyli elementów niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania ręki człowieka. W parze kinematycznej paliczek bliższy-środkowy są też anomalie, ręka uniemożliwia wyprostowanie się do prawidłowej pozycji.



Rysunek 7. Anomalne zginanie palców

W przypadku zginania palców u osoby z deficytem występują również braki, szczególnie w przypadku pary śródręcze-bliższy występuje w tej parze uniemożliwienie zginania prawidłowego.

Czas i zakres kąta nie są całkowicie poza kontrolą pacjentki, ale w chwilach np. stresu ręka pacjentki zgina się i uniemożliwia jej wyprost albo wykonanie chwytu.

Egzozskielet na obecnym etapie pomaga ograniczyć nieprawidłowe kąty, ale nadal pozostały nagłe zmiany wartości i kierunku przyspieszeń o różnej nieregularnej częstotliwości. Trwają prace nad ulepszeniem egzozskieletu, by zniwelować niekontrolowane wahania wartości i kierunku przyspieszeń, co spowoduje zwiększenie jakości życia pacjentki. Dużą pomocą okazało się stworzenie autorskiego oprogramowania, które umożliwia lepsze zilustrowanie i zrozumienie przyczyn takiego stanu rzeczy.

#### 4. Dyskusja

Następnymi krokami są:

- ulepszenie przyrządów pomiarowych, narzędzi oraz procedur badawczych w celach bardziej precyzyjnego oraz mniej czasochłonnego przeprowadzania badań,
- budowa bardziej ergonomicznego egzozskieletu tak by osoba z dysfunkcjami mogła sama go zakładać,
- dopracowanie środowiska programistycznego w celu łatwiejszego i precyzyjniejszego współdziałania ręki z egzozskieletem
- opracowanie nowych systemów sterowania, w tym opartych na interfejsach mózg-komputer [8, 9], z uwzględnieniem oddziaływania emocji [10-12].

Odrębną kwestią jest dobór parametrów technologii oraz materiałów właściwych dla optymalnego wykonania elementów egzozskieletu [13,14], tak by spełniały one wymogi stawiane robotom rehabilitacyjnym [15,16]. Ww. badania są

przebiegane, a wyniki na skalę przemysłową są oczekiwane w najbliższych latach.

#### Wnioski

Obecnie zrealizowano prace w zakresie opisanego podstawowych parametrów biomechanicznych takich jak ich masa, szerokość długość poszczególnych palców, zakresy ruchu poszczególnych par (palczków) kinematycznych w palcach, a także czas, w jakim jest wykonywany ruch. Umożliwia to obliczenie przyspieszenia statycznego, dynamicznego oraz siły statycznej, dynamicznej i prędkości dla poszczególnych par kinematycznych dla poszczególnych elementów egzozskieletu, co pozwoli lepiej dopasować egzozskielet do potrzeb pacjenta, a przyszłościowo: opracować i zoptymalizować procedurę w tym obszarze.

#### Literatura

1. Mikołajewska E. Terapia ręki. Diagnostyka i terapia. Soyer, Warszawa 2016.
2. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Exoskeletons in neurological diseases – current and potential future applications. *Advances in Clinical and Experimental Medicine* 2011; 20(2):227–233.
3. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Zastosowania automatyki i robotyki w wózkach dla niepełnosprawnych i egzozskieletach medycznych. *Pomiary Automatyka Robotyka* 2011; 5: 58–64.
4. Mikołajewska E. Egzozskielety. W: Przeździecki B., Woźniowski M., Gieremek K., Janicki S. (red.). *Wyroby medyczne. Zaopatrzenie indywidualne*. Warszawa: PZWL, 2016.
5. Kopowski J., Mikołajewski D., Rojek I., Macko M. Bydgoski egzozskielet na rękę – aspekty mechaniczne. *Mechanik* 2019; 4: 271-274.
6. Kopowski J., Rojek I., Mikołajewski D., Macko M. 3D Printed Hand Exoskeleton - Own Concept W: Trojanowska J., Ciszka O., Mendes Machado J., Palenko I. *Advances in Manufacturing II. Vol. 1 - Solutions for Industry 4.0*. Springer, Cham 2019

- Seria: Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2195-4356, ss. 298-306
7. Kopowski J., Mikołajewski D., Macko M., Rojek I. Bydgosian hand exoskeleton - own concept and the biomedical factors. *Bio-Algorithms and Med-Systems* 2019, 15(1):20190003.
  8. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Non-invasive EEG-based brain-computer interfaces in patients with disorders of consciousness. *Military Medical Research* 2014; 1(1):14.
  9. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Ethical considerations in the use of brain-computer interfaces. *Central European Journal of Medicine* 2013; 8(6):720-724.
  10. 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.
  11. Picard R.W., *Affective computing*, MIT Press, Massachusetts 1997.
  12. Marechal C., Mikołajewski D., Tyburek K., Prokopowicz P., Bougueroua L., Ancourt C., Wegrzyn-Wolska K. Survey on AI-based multimodal methods for emotion Detection. *High-Performance Modelling and Simulation for Big Data Applications* 2019, pp. 307-324.
  13. Macko M., Mikołajewska E., Szczepański Z., Augustyńska B., Mikołajewski D. Repository of images for reverse engineering and medical simulation purposes. *Medical and Biological Sciences*, 2016; 30(3):23-29.
  14. Macko M., Szczepański Z., Mikołajewski D., Mikołajewska E., Listopadzki S. The method of artificial organs fabrication based on reverse engineering in medicine. *1st Renewable Energy Sources-Research and Business (RESRB-2016)*, June 22-24 2016, Wrocław, Poland pp. 353-365 Springer, Cham 2016.
  15. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Roboty rehabilitacyjne. *Rehabil. Prakt* 2010; 4:49-53.
  16. Gorgey A. S. Robotic exoskeletons: The current pros and cons. *World J Orthop.* 2018; 9(9):112-119.