

# KRYTERIA KONSTRUKCYJNE EGZOSZKIELETU PALCÓW RĘKI

Paweł Maćkowiak<sup>1</sup>, Maciej Kotyk

## 1. WSTĘP

Choroby układu krążenia oraz udary mózgu są chorobami cywilizacyjnymi, które dotykają coraz liczniejszej grupy pacjentów. Choroby te są przyczyną dysfunkcji układu ruchu, przyczyniając się do niepełnosprawności ruchowej, zawodowej i społecznej. Rozwój urządzeń medycznych wspomagających leczenie i rehabilitację wychodzi na przeciw oczekiwaniom pacjentów, lekarzy oraz terapeutów.

Największe efekty usprawniania leczniczego uzyskuje się w pierwszych miesiącach leczenia. Stwierdzenie to dotyczy udarów mózgu i chorób powodujących dysfunkcje centralnego układu nerwowego. Leczenie niedowładów polega na wykonywaniu przez terapeutę ruchów biernych kończynami pacjenta. Ma to na celu zreorganizowanie systemu nerwowego i rozumiane pod tym pojęciem, przejęcie przez aktywne neurony funkcji, jakie pełniły neurony uszkodzone. W późniejszym etapie rehabilitacji wprowadza się ćwiczenia czynne ze wspomaganie ruchu, polegające na wykonywaniu ruchu kończyny przez pacjenta z pomocą terapeuty. Ostatnim etapem rehabilitacji mogą być ćwiczenia czynne z dodatkowym oporem w trakcie ruchu, podczas których pacjent musi pokonać dodatkowy opór w trakcie wykonywanego ruchu. Obecne zapotrzebowanie na rozwój robotów i innych rozwiązań technicznych zastępujących funkcje terapeutów jest generowane potrzebą długotrwałych ćwiczeń oraz niedoborem personelu w placówkach medycznych. Odpowiedzią na wskazany popyt są między innymi egzoszkielety.

Zainteresowanie rozwojem egzoszkieleatów wykazują również misje kosmiczne i wojsko. Wspomaganie astronautów podczas prac w przestrzeni kosmicznej przez egzoszkieleaty jest wynikiem utrudnień, jakie stawia noszony osprzęt. Ogranicza on zakres ruchów, siłę rąk, komfort, zręczność, zwiększając tym samym zmęczenie astronauty [Wege *et al.* 2005].

Specyficzną grupę egzoszkieleatów stanowią egzoszkieleaty palców ręki. Ręka człowieka przy stosunkowo małych wymiarach pełni ważne funkcje chwytne siłowe i precyzyjne.

W publikacji przedstawiono wiedzę z zakresu anatomii i biomechaniki ręki niezbędną podczas projektowania oraz tworzenia kryteriów konstrukcyjnych egzoszkieleatów palców ręki. Dokonano przeglądu oraz analizy istniejących rozwiązań konstrukcyjnych pod kątem ich zalet i wad. Sformułowano problemy i perspektywy dotyczące konstrukcji egzoszkieleatów ręki.

Celem pracy jest określenie kryteriów projektowych egzoszkieleatu palców.

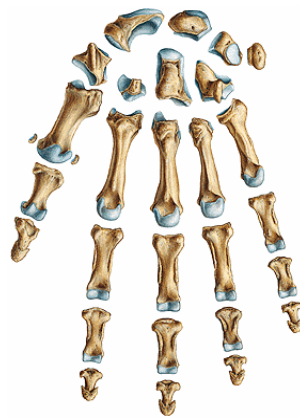
---

<sup>1</sup> Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz,  
e-mail: pawel.mackowiak@utp.edu.pl

## 2. RĘKA CZŁOWIEKA

### 2.1. Anatomia ręki

Kościec ręki składa się z dwudziestu siedmiu kości (rys. 1), funkcjonalnie podzielonych na trzy odcinki: nadgarstek, śródreżce i palce. Nadgarstek zbudowany jest z ośmiu kości, których cechą jest nieregularnie sześcienny kształt. Powierzchnie dłoniowe i grzbietowe kości stanowią przyczepy mięśni i więzadeł, boczne zaś mają liczne powierzchnie stawowe dla połączeń pomiędzy kośćmi nadgarstka oraz między nimi a kośćmi przedramienia i śródreżca. Śródreżce zbudowane jest z pięciu kości, mających cechy wspólne w postaci trzonu końca bliższego oraz końca dalszego [Jiting *et al.* 2011].



Rys. 1. Kości ręki [Sobotta 2012]

Kości palców stanowią paliczki. Kciuk ma tylko dwa paliczki, bliższy i dalszy, natomiast pozostałe palce mają dodatkowo paliczki środkowe. Paliczek bliższy jest najdłuższy, a najkrótszy jest paliczek dalszy. W budowie paliczków wyróżnia się trzon, koniec bliższy i koniec dalszy. Koniec bliższy paliczka bliższego ma dołek poprzecznie wydłużony dla połączenia z kością śródreżca, pozostałe paliczki w tym miejscu mają wklęsłe powierzchnie stawowe przedzielone wzniesieniem w środku [Bochenek i Reicher 2010].

Stawy ręki dzieli się na dwa zespoły funkcjonalne stawów bliższych i dalszych ręki. Do zespołu funkcjonalnego stawów bliższych ręki zalicza się staw promieniowo-nadgarstkowy, staw śródnadgarstkowy i stawy międzynaadgarstkowe. W stawach tych odbywa się ruch ręki względem przedramienia. Staw promieniowo-nadgarstkowy jest stawem kłykciowym o eliptycznych powierzchniach stawowych, łączącym rękę z przedramieniem. Staw śródnadgarstkowy łączy szereg bliższy i dalszy kości nadgarstka. Szczelina stawu jest nieregularna – w kształcie litery S, co sprawia, że obie powierzchnie są zarówno główką, jak i panewką stawu [Marecki 2004, Bochenek i Reicher 2010].

Opisując ruch ręki wyróżnia się: ruchy obrotowe w stawach promieniowo-łokciowych, zwane nawracaniem i odwracaniem, zgięcie dłoniowe i grzbietowe, odwodzenie łokciowe i promieniowe. Sumując ruchy odwodzenia i zgięcia, otrzymuje się ruch obwodzenia występujący w stawach kulistych [Marecki 2004, Bochenek i Reicher 2010].

W ruchu zgięcia dłoniowego i grzbietowego czynny udział biorą: staw promieniowo-nadgarstkowy oraz śródnadgarstkowy. Zakres zgięcia grzbietowego wynosi około 70°, przy czym 25° jest realizowane w stawie promieniowo-nadgarstkowym, a 45° – śródnadgarstkowym. Ruch zgięcia dłoniowego odbywa się w zakresie 50° w pierwszym stawie i 30° w drugim stawie, czyli łączny zakres wynosi 80°. Ruchy odwodzenia łokciowego i promieniowego mają znacznie mniejszy zakres, odpowiednio: 45° i 15-20° [Marecki 2004, Bochenek i Reicher 2010].

Do zespołu funkcjonalnego stawów dalszych zalicza się stawy nadgarstkowo-śródręczne, międzyśródręczne, stawy śródręczno-paliczkowe i stawy międzypaliczkowe. W stawach tych odbywają się ruchy palców ręki [Jiting *et al.* 2011].

Stawy nadgarstkowo-śródręczne oraz międzyśródręczne wszystkich palców poza kciukiem są stawami płaskimi o niewielkiej ruchomości, wzmocnionymi mocno napiętą torebką stawową i krótkimi więzadłami. Staw nadgarstkowo-śródręczny kciuka jest stawem dwuosiowym, w którym dwie powierzchnie stawowe mają kształt wklęsłowypukły, zwany siodełkowatym. Ruchomość stawu jest niemal równa ruchomości stawu kulistego. Ruch w obrębie stawu stanowi odwodzenie i przywodzenie wokół osi grzbietowo-dłoniowej w zakresie 35-40° oraz przeciwstawianie i odprowadzanie wokół osi promieniowo-łokciowej w zakresie 45-60° [Marecki 2004, Bochenek i Reicher 2010].

Stawy śródręczno-paliczkowe zalicza się do stawów dwuosiowych. Są to stawy kłykciowe, kuliste, o ograniczonej ruchomości. Ruch zginania i prostowania dookoła osi poprzecznej można wykonać w zakresie 110°, natomiast ruchy odwodzenia i przywodzenia są uzależnione od stopnia zgięcia palców. Przy maksymalnym zgięciu ruchomość jest zerowa, zaś w pozycji neutralnej różna dla różnych palców. Palec wskazujący ma około 60° ruchomości w obie strony, mały palec 50°, a palce serdeczny i środkowy po 40° [Jiting *et al.* 2011].

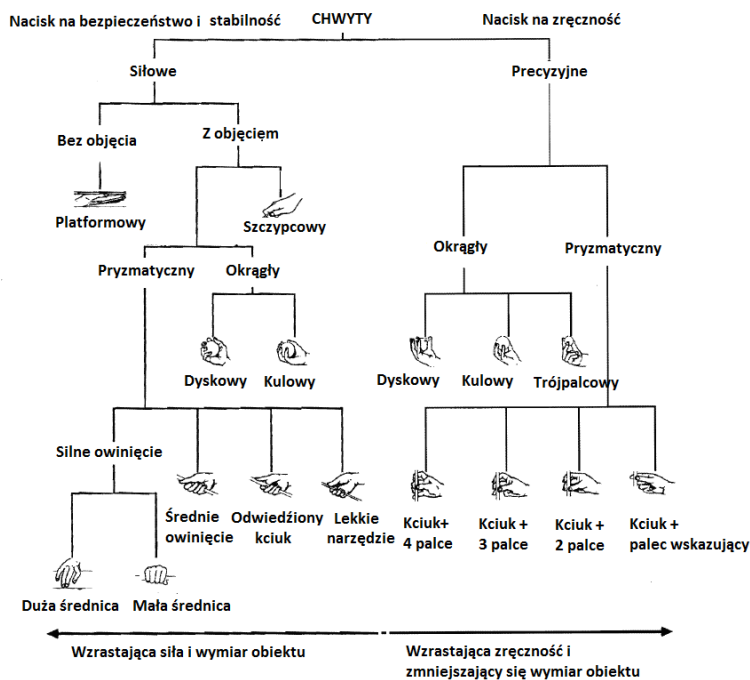
Stawy śródręczno-paliczkowy kciuka są stawami zawiasowymi o budowie zbliżonej do stawów międzypaliczkowych, z mocno ograniczoną możliwością zgięcia bocznego [Jiting *et al.* 2011].

Stawy międzypaliczkowe są stawami zawiasowymi, czyli jednoosiowymi, w których odbywać się mogą tylko ruchy zginania i prostowania. Zakres ruchów w stawie bliższym wynosi 120°, w stawie dalszym 70°, natomiast w stawie kciuka 90° [Jiting *et al.* 2011].

## 2.2. Chwyty ręki

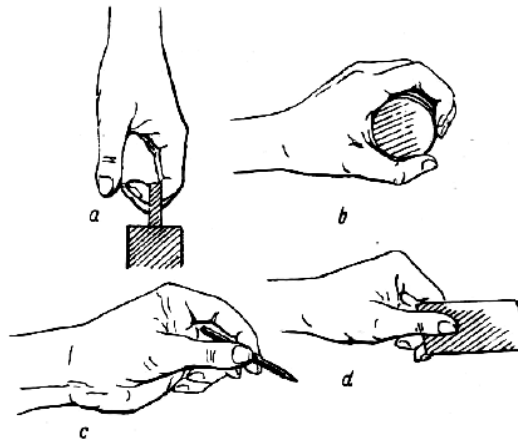
Z analizy czynności naturalnych fizjologicznych wynika, że kończyna górna pełni funkcję dźwigu, a sama ręka funkcję narzędzia chwytowego. Ręka jest to część kończyny górnej obejmująca nadgarstek oraz palce. Zadaniem ręki jest chwycenie, manipulacja lub przeniesienie przedmiotu. Reszta kończyny górnej pełni rolę dźwigu zmieniającego przestrzenne usytuowanie ręki. Ruchy te są niezbędne do wykonywania czynności codziennych, takich jak: picie, jedzenie, praca. Badacze zajmujący się tematyką zdolności chwytnych ludzkiej ręki wyodrębniali różne ilości możliwych chwytów. Schlesinger wyróżnił ich 18, w tym 4 podstawowe. Taylor i Schwarz zaproponowali 6 chwytów podstawowych, natomiast Cutkosky – 16 (rys. 2). Schemat klasyfikacji i podziału na chwyt siłowe i precyzyjne wprowadził Napier. Chwyty siłowe cechują się dużą powierzchnią kontaktu pomiędzy przedmiotem trzymanym a ręką oraz małą różnorodnością ruchów wykonywanych przez palce. Chwyty precyzyjne wymagają zręczności i różnorodności ruchów wykonywanych przez poszczególne palce. Przedmioty trzyma-

ne są pomiędzy opuszkami palców i kciuka, co zapewnia dokładne ich czucie [Cutkosky i Howe 1990, Dega 2004].



Rys. 2. Schemat i klasyfikacja funkcjonalna chwytów ręki zaproponowana przez Cutkosky'ego i Wrighta [Cutkosky i Howe 1990]

Spośród wszystkich rodzajów skomplikowanych czynności chwytynych wyróżnia się cztery podstawowe czynności niezbędne pod względem funkcjonowania człowieka. Czynność haka zapewnia chwyt hakowy (rys. 3a), podczas którego palce są częściowo zgięte względem ręki. Czynność pierścienia zapewnia chwyt cylindryczny (rys. 3b), czyli zetknięcie się palców z dłonią bądź z kciukiem. Czynność kleszczy zapewnia chwyt opuszkowy (rys. 3c), niezbędny podczas wykonywania ruchów precyzyjnych, powstający poprzez złączenie opuszków kciuka i palców wskazującego i środkowego. Czynność szczypiec zapewnia chwyt szczypcowy (rys. 3d). Jest on silniejszy od poprzedniego, ale mniej precyzyjny. Powstaje poprzez przywiedzenie kciuka do bocznej powierzchni palca wskazującego [Dega 2004]. Do chwytów podstawowych, niektórzy badacze, dołączają dodatkowo dwa chwytów: platformowy i koncentryczny. W chwycie platformowym palce są wyprostowane, a ręka pełni funkcję półki do przenoszenia i podtrzymywania przedmiotów. Chwyt koncentryczny jest ułożeniem rozsuniętych palców obejmujących kulę z kciukiem ustawionym w opozycji.



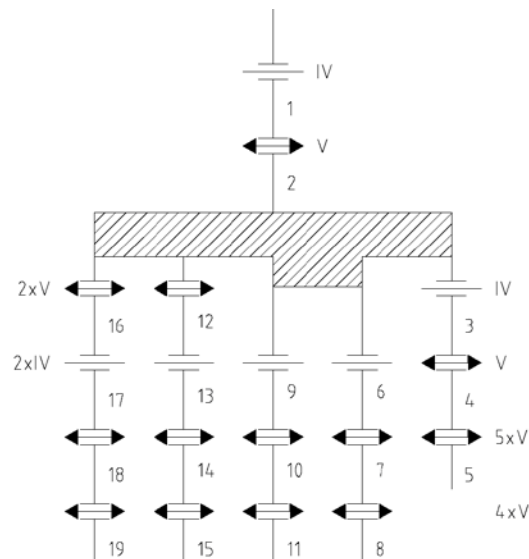
Rys. 3. Podstawowe chwytaki ręki wg Schlesingera: a – chwyt hakowy, b – chwyt cylindryczny, c – chwyt opuszkowy, d – chwyt szczypcowy [Dega 2004]

### 2.3. Biomechanika ręki

Kości w szkieletcie można traktować jako człony sztywne połączone stawami, tworzące złożony łańcuch kinematyczny, zwany biomechanizmem. Poszczególne człony – kości połączone w stawach stanowią pary kinematyczne. W powstałym mechanizmie uwzględnia się tylko połączenia, w których występuje stały chociaż jeden punkt styku, zakres ruchu kąтового wynosi więcej niż  $5^\circ$ , a zakres ruchu postępowego więcej niż 3 mm. Ze względu na brak spełnienia wszystkich powyższych kryteriów niektórych połączeń kości nie uznaje się za pary kinematyczne. Na ruchliwość stawu największy wpływ ma typ jego budowy i kształt powierzchni stawowych. Stawy kuliste i panewkowe tworzą pary o 3 stopniach swobody. Dwa stopnie swobody mają stawy eliptyczno-kłykciowe i siodełkowate, a 1 stopień swobody stawy zawiasowe i bloczkowe [Bober i Zawadzki 2003].

Schemat struktury ręki według Mareckiego (rys. 4) składa się z 19 członów ruchomych względem przedramienia (kości promieniowej). Staw promieniowo-nadgarstkowy jest stawem eliptyczno-kłykciowym, a więc 2 stopnie swobody, staw śród-nadgarstkowy – jeden stopień swobody.

Stawy nadgarstkowo-śródręczne palca wskazującego i środkowego są traktowane jako stawy nieruchome, palca serdecznego i małego jako zawiasowe o jednym stopniu swobody. Staw nadgarstkowo-śródręczny kciuka jest stawem siodełkowatym mającym dwa stopnie swobody. Stawy śródręczno-paliczkowe są stawami kłykciowymi o dwóch stopniach swobody, wyjątkiem jest staw kciuka będący stawem zawiasowym o jednym stopniu swobody. Stawy międzypaliczkowe są typowymi stawami mającymi jeden stopień swobody [Bober i Zawadzki 2003].



Rys. 4. Schemat strukturalny ręki człowieka [opracowanie własne]

Klasa pary kinematycznej jest definiowana jako liczba stopni swobody, jaką odbiera jednemu członowi współpraca z drugim członem. Ruchliwość łańcucha kinematycznego jest to liczba stopni swobody, jakie mają ruchome człony łańcucha względem nieruchomej podstawy. W przypadku ręki za nieruchomy człon można przyjąć kość promieniową przedramienia. W takim przypadku liczbę stopni swobody łańcucha kinematycznego oblicza się ze wzoru:

$$R = 6 \cdot n - 5 \cdot p_5 - 4 \cdot p_4 - 3 \cdot p_3 - 2 \cdot p_2 - p_1 \quad (1)$$

gdzie:

- $n$  – ilość brył,
- $p_5$  – ilość par kinematycznych klasy V,
- $p_4$  – ilość par kinematycznych klasy IV,
- $p_3$  – ilość par kinematycznych klasy III,
- $p_2$  – ilość par kinematycznych klasy II,
- $p_1$  – ilość par kinematycznych klasy I.

Podstawiając do wzoru (1) dane z analizy struktury ręki, otrzymuje się:

$$R = 6 \cdot 19 - 5 \cdot 13 - 4 \cdot 6 - 3 \cdot 0 - 2 \cdot 0 - 0 = 25 \quad (2)$$

Niektórzy autorzy nie uwzględniają ruchomości w stawach nadgarstkowo-śródręcznych palców małego i serdecznego, ponieważ zakres ruchu w tych stawach wynosi zaledwie kilka stopni. Wówczas liczba członów czynnych spada do 17, a liczba stopni swobody łańcucha kinematycznego wynosi 23. Czynności chwytne ręki wymagają przede wszystkim odpowiedniego ułożenia się palców względem pozostałej części dłoni. Traktując kości śródręcza jako człony sztywne, oprócz kości śródręcza kciuka, palce mają dwa stawy pary kinematycznej klasy V oraz jedną parę klasy IV. Liczba stopni swobody łańcucha kinematycznego palców wynosi 4 [Bober i Zawadzki 2003].

Funkcję napędu dla łańcuchu kinematycznego ręki pełnią mięśnie. Na stawy bliższe ręki oddziałuje 13 mięśni leżących na przedramieniu. Większość z nich posiada początkowy przyczep na przedramieniu, niektóre tylko rozpoczynają się na kości ramiennej. Zlokalizowane w przedramieniu brzoście mięśni w kierunku ręki przechodzą w ścięgna. Przyczepy końcowe stanowią kości nadgarstka, śródrezcza i paliczki. Na stawy dalsze ręki oddziałują mięśnie długie, działające również na stawy bliższe ręki oraz mięśnie krótkie zaopatrujące tylko stawy palców. Łącznie wyróżnia się 19 mięśni oddziałujących na stawy palców [Jiting *et al.* 2011].

Szkielet kostny traktuje się jako system dźwigni, do którego przykładane są siły wyzwalane w mięśniach. Siła przykładana jest w punkcie przyczepu mięśnia i ma kierunek zgodny z przebiegiem ścięgna końcowego. Mięsień można porównać do siłownika, zaś ścięgno do cięgna, które może tylko przenosić siły powodujące ich rozciąganie. Każde ścięgno przyczepione jest na pewnej odległości od stawu, co powoduje, że działająca przez nie siła wytwarza moment tej siły względem stawu. Moment ten jest przyczyną ruchu dwóch członów (kości) względem siebie. Nierównomierność momentu generowanego przez mięsień nie jest tylko i wyłącznie wynikiem zmiany kąta pomiędzy ścięgnem końcowym a dźwignią kostną, ale również różnicy generowanej siły przez mięsień podczas zmiany jego długości. W całym układzie ruchu jeden ruch stawu zapewnia cała grupa mięśniowa, a określone działanie jest wypadkową działania poszczególnych mięśni z tej grupy. W związku z powyższym trudno rozpatrywać działanie pojedynczych mięśni. Dla uproszczenia dokonuje się pomiaru momentów sił grup mięśniowych. W przypadku stawów ręki liczba dostępnych danych jest niewielka. Często przeprowadzane są pomiary siły ścisku dłoni dynamometrem dłoniowym. Podczas badań [Łopatka i in. 2012] średnia wartość siły ścisku dłoni wyniosła dla mężczyzn około 280 N, a dla kobiet 170 N. Osobno zmierzono siłę ścisku kciuka, która dla mężczyzn wyniosła 155 N, a dla kobiet około 100 N. Maksymalne momenty zginające stawy palca wskazującego według badań niepublikowanych Instytutu Rehabilitacji w Chicago wynoszą: dla stawu śródreczno-paliczkowego 4 Nm, dla stawu międzypaliczkowego bliższego 1,5 Nm, dla dalszego 0,5 Nm [Jones *et al.* 2012].

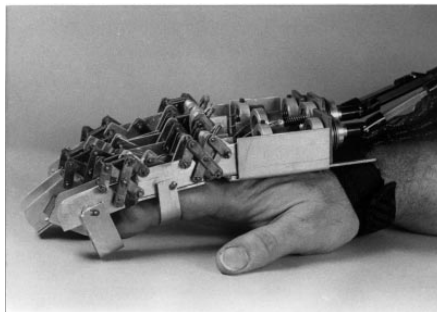
### 3. ANALIZA ISTNIEJĄCYCH ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH

#### 3.1. Urządzenie Shieldsa

Konstrukcja trójpalcową Shieldsa (rys. 5) gwarantuje niezależne ruchy palca wskazującego, środkowego oraz jeden połączony ruch palca serdecznego i małego. Odzworowanie ruchów w stawach śródreczno-paliczkowych i bliższych stawach paliczkowych jest realizowane w każdym z palców egzozszkieletu.

W celu zmniejszenia liczby stopni swobody staw paliczkowy bliższy sprzężono poprzez mechanizm transmisyjny ze stawem śródreczno-paliczkowym. Rezultatem tego było powiązanie ze sobą ruchów w dwóch stawach [Wege *et al.* 2005].

Połączenia ruchowe nad każdym stawem złożone są z mechanizmu składającego się z 4 dźwigni. Ruch odbywa się jednocześnie w stawie śródreczno-paliczkowym i między paliczkowym bliższym. Każdy mechanizm jest tak projektowany, aby oś jego obrotu pokrywała się z osiami stawów palców, nad którymi ma być noszony. Wadą tego egzozszkieletu jest konieczność doboru długości dźwigni i kątów między nimi indywidualnie dla każdego palca. W związku z tym egzozszkielet musi być projektowany pod daną osobę. Kolejną wadą jest brak ruchu w stawie międzypaliczkowym dalszym.

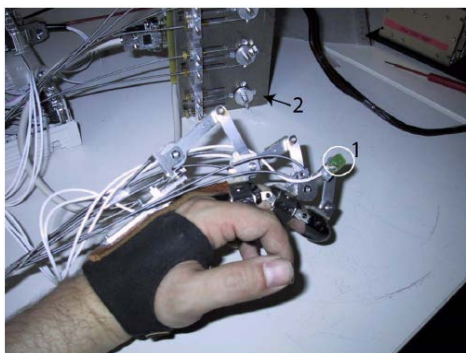


Rys. 5. Fotografia urządzenia Shieldsa w pozycji wyprostowanej [Wege *et al.* 2005]

Moment obracający pierwszą dźwignię przykładany jest poprzez linkę wejściową osobną dla każdego palca w odległości 1 cm od osi obrotu. Linka ta jest pociągana przez śrubę pociągową osadzoną w korpusie urządzenia. Napęd na śrubę przenoszony jest wałami Cardana z trzech osobnych, dla każdego palca, silników prądu stałego, zamontowanych na przedramieniu. Taki sposób napędu pozwala tylko na zamknięcie palców urządzenia – zgięcie stawów. Wyprost (otwarcie) odbywać się może na zasadzie sprężystości dodatkowej rękawicy. Moment zapewniający zgięcie palca w miejscu wejścia wynosi 3,8 Nm. Czas od całkowitego otwarcia ręki do całkowitego jej zamknięcia wynosi 2 sekundy [Wege *et al.* 2005].

### 3.2. Urządzenie Wege

Egzoszkielec palca opracowany przez Andreama Wege (rys. 6) zapewnia oddzielną realizację ruchów w każdym z trzech stawów palca. W odróżnieniu od pierwszego prezentowanego egzoszkieletu umożliwia pełen zakres ruchów palca: zginanie, prostowanie oraz odwodzenie i przywodzenie w stawie śródrečno-paliczkowym. Urządzenie jest przewidziane tylko dla palca wskazującego.



Rys. 6. Egzoszkielec Andreas Wege [Wege *et al.* 2005]

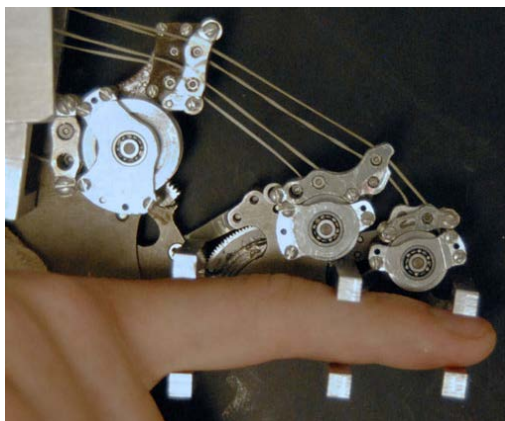
Poruszanie palcem jest zapewnione poprzez dźwignie połączone z ręką za pomocą zaopatrzenia ortopedycznego. Na końcu każdej dźwigni znajdują się koła, na których owinięte są końcówki stalowych linek (rys. 6). Drugi koniec każdej linki owinięty jest na kole umieszczonym na wale motoreduktora. Osłony linek znajdują się pomiędzy



miejszem ich mocowań na palczkach z jednej strony oraz urządzeniem utrzymującym ich napięcie z drugiej strony. Autor egzozszkieletu nie przewidział docelowego miejsca montażu części napędowej urządzenia. Wady egzozszkieletu to: masa jednostki zasilającej, która dla czterech palców musiałaby składać się aż z 14 silników, oraz stopień skomplikowania. Wynika pośrednio z jego największej zalety, jaką jest możliwość realizacji wszystkich fizjologicznych ruchów palca [Wege *et al.* 2005].

### 3.3. Urządzenie Instytutu Rehabilitacji w Chicago

CAFE opracowany przez Instytut Rehabilitacji w Chicago (rys. 7) jest również egzozszkieletem jednego palca. Cechuje go indywidualny ruch w każdym ze stawów palca oraz siła i prędkość odpowiadające normalnemu funkcjonowaniu ludzkiej ręki.



Rys. 7. Egzozszkielet palca wskazującego CAFE Instytutu Rehabilitacji w Chicago [Jones *et al.* 2012]

Moment przykładany do poszczególnych stawów wynosi połowę średniej wartości naturalnie występujących momentów u zdrowej osoby. Zakres ruchów w kolejnych stawach wynosi:  $-15-75^\circ$ ,  $0-90^\circ$ ,  $0-90^\circ$ . Prototyp mocowany jest na promieniowej stronie palca wskazującego. Koła ślizgowe prowadzą linkę napędzającą ponad stawami do docelowych punktów umocowania [Jones *et al.* 2012].

Części egzozszkieletu wykonano z aluminium i ze stali. Masę części bezpośrednio poruszającej palcem zredukowano do 138 g. Szerokość urządzenia wynosi 8 mm [Jones *et al.* 2012].

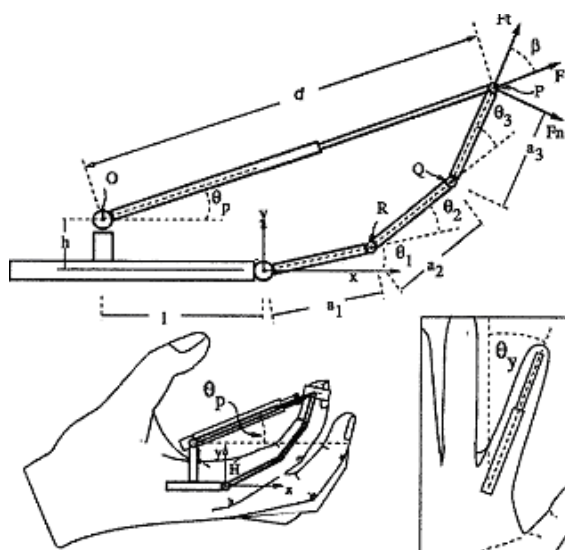
Napęd jest przekazywany za pomocą linek, czego konsekwencją jest potrzeba zastosowania aż dwóch linek, jednej zginającej i drugiej prostującej staw. Każdy staw ma osobny napęd w postaci pary serwomechanizmów prądu stałego. Silnik zamontowano na płycie umieszczonej na przedramieniu. Przekładnie redukujące zamocowane są bezpośrednio nad stawem. Całość napędu jednego palca stanowi zatem sześć silników i sześć linek. Zespoły łożysk i kół ślizgowych mają za zadanie przeprowadzić linki przez bliższe stawy do docelowych kół poruszających bezpośrednio stawami [Jones *et al.* 2012].

Poprzez zastosowanie wymiennych łączników poszczególnych części egzozszkieletu uzyskano możliwość dopasowania go do szerokiego zakresu populacji.

### 3.4. Rękawiczka RMII

Rękawiczka RMII (rys. 8) to egzoskielet wykorzystujący lekkie siłowniki pneumatyczne. Siła przykładana jest bezpośrednio do paliczków dalszych, każdego palca po stronie dłoniowej. W egzoskielecie wykorzystano bezkontaktowy czujnik do określenia pozycji palca względem dłoni. Siła przykładana do każdego z palców może wynieść nawet do 16N przy ciśnieniu 100 PSI (0,689 MPa) oddziaływującym na tłoki siłowników [Jack *et al.* 2011].

Wadą egzoskieletu jest zajęcie dłoniowej części ręki przez siłowniki. Dłoniowa część ręki odpowiedzialna jest za czynności chwytne i percepcję. Niepełny zakres ruchów w stawach oraz niekontrolowane zgięcie w poszczególnych stawach palca może przyczynić się do urazów.



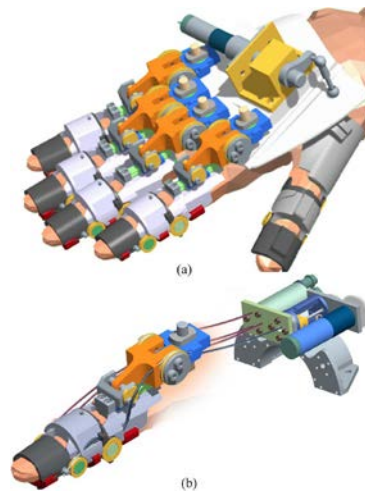
Rys. 8. Schemat budowy i działania rękawiczki RMII [Jack *et al.* 2011]

### 3.5. Urządzenie Handexos

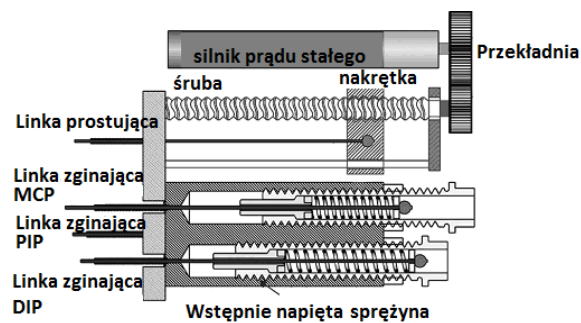
Handexos składa się z pięciu modułów, po jednym na każdy palec. Moduł złożony jest z trzech członów (rys. 9). Człony mają strukturę skorupy, która jest dopasowana do grzbietowej części palców użytkownika. Trzy osłony protetyczne stanowią podparcie dla dłoniowych części palców. W nich są umiejscowione trzy sensory siły, po jednym dla każdego paliczka. Sensory monitorują siłowe relacje: człowiek – egzoskielet. Tkanina Velcro, nazywana potocznie „rzepem”, łączy osłonę grzbietową i dłoniową, utwierdzając egzoskielet na danym paliczku [Chiri *et al.* 2011].

W przypadku odległości pomiędzy stawami palczkowymi bliższymi i dalszymi występuje możliwość regulacji długości w zakresie 23-33 mm [Chiri *et al.* 2011].

System napędowy (rys. 10) jest zaprojektowany tak, aby zminimalizować wagę, uzyskać prostą modułową budowę łatwą w konfiguracji i demontażu, z możliwością zlokalizowania jej w pewnej odległości od ręki. Przy tych założeniach wprowadzono koncepcję aktywnego wyprostu i pasywnego zgięcia modułów palców [Chiri *et al.* 2011].



Rys. 9. Model 3D złożeniowy Handexos: a) egzoskielet całej ręki, b) egzoskielet jednego palca z układem napędowym [Chiri *et al.* 2011]



Rys. 10. Schematy układu napędowego egzoskieletu Handexos [Chiri *et al.* 2011]

Transmisja energii odbywa się za pomocą stalowych linek. Tarcie, które występuje między linką a osłoną, jest przyczyną strat przesyłanej energii. Umożliwia to zredukowanie przeciążeń dynamicznych spowodowanych bezwładnością noszonych i poruszających się części [Chiri *et al.* 2011].

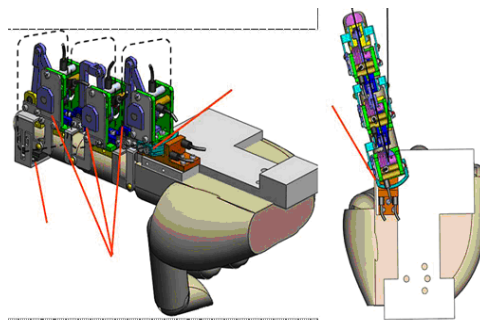
Zespół prostujący palec składa się z pojedynczego siłownika prostującego stawy palców. Palec prostowany jest przez jedną linkę stalową, owiniętą wokół trzech luźno mocowanych kół umieszczonych w pobliżu stawów. Linka ta przyczepiona jest do paliczka dalszego. Ciężno w postaci linki jest ciągnięte przez liniowy suwak napędzany silnikiem prądu stałego za pośrednictwem przekładni. Moment obrotowy przekazywany jest przez śrubę na nakrętkę, która stanowi suwak ciągnący ciężno z określoną siłą [Chiri *et al.* 2011].

Zespół zginający palec składa się z trzech linek, jednej na każdy segment palca. Każda z linek jest owinięta wokół trzech kół zginających umieszczonych po przeciwnej stronie palca względem kół prostujących. Linki zginające są połączone z trzema ściśniętymi sprężynami doprowadzającymi do zgięcia palca wówczas, gdy nie występuje za-

mierzone, celowe działanie wykonane przez użytkownika. Wstępne napięcie sprężyn można regulować za pomocą śrub [Chiri *et al.* 2011].

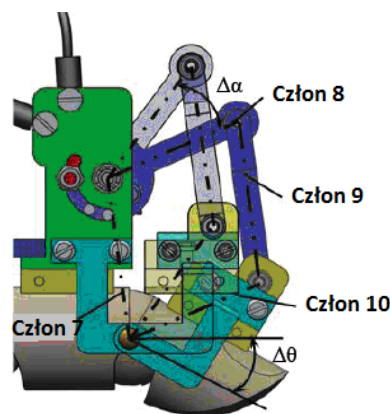
### 3.6. Urządzenie Li Jiting

Egzoszkielec palca wskazującego zaprojektowany przez LI Jiting jest urządzeniem montowanym, składającym się z trzech modułów. Każdy z nich umożliwia wykonanie jednego ruchu (rys. 11). Ruchy te odpowiadają zginaniu i prostowaniu w stawach: śródrečno-paliczkowym, międzypaliczkowym bliższym i dalszym oraz odwodzeniu i przywodzeniu w stawie śródrečno-paliczkowym [Jiting *et al.* 2011].



Rys. 11. Rysunek 3D złożeniowy egzoszkieletu LI Jitinga [Jiting *et al.* 2011]

Rysunek 12 przedstawia pojedynczy moduł zginający. Składa się on z 4 członów. Człon 7 jest przymocowany do paliczka środkowego, jest więc względnie utwierdzony (nie przemieszcza się względem paliczka środkowego). Człon 8 jest członem napędzającym poruszającym przez linkę. Człon 10 jest utwierdzony względem paliczka dalszego. Kąt rotacji członu 10 jest również kątem zgięcia stawu ( $\Delta\theta$ ) (rys. 12) i jest zawsze równy kątowi obrotu członu 8 ( $\Delta\alpha$ ), który może być bezpośrednio zmierzony poprzez czujnik kąta zainstalowany na wale członu 8. Moduły pozostałych stawów wykonane są analogicznie.



Rys. 12. Rysunek przedstawiający budowę pojedynczego przegubu egzoszkieletu LI Jitinga [Jiting *et al.* 2011]

Przy projektowaniu członów uwzględnia się długości paliczków i konieczność pozostawienia wolnych przestrzeni dla uniknięcia kolizji poszczególnych modułów. Przywodzenie i odwodzenie w stawie śródrečno-paliczkowym realizowane jest poprzez bezpośredni obrót koła odwodzącego, do którego przymocowano moduł zginający ten staw.

Egzoszkieleł wykonano głównie z aluminium, z zastosowaniem łożysk kulkowych. Masa całości wyniosła 160 gram i według autorów była akceptowalna dla ręki człowieka [Jiting *et al.* 2011].

Dostosowanie egzoszkieletu do użytkowników o różnych długościach paliczków jest możliwe poprzez przemieszczanie dwóch śrub pomiędzy różnymi gniazdami. Zakres długości dla paliczka środkowego wynosi 22-30 mm, a dla paliczka bliższego od 40-50 mm [Jiting *et al.* 2011].

Szereg zabezpieczeń mechanicznych i programowych gwarantuje bezpieczeństwo użytkownika w szczególności pacjentom z objawami utraty czucia i zdolności motorycznych ręki. Do zabezpieczeń mechanicznych należy stworzeń poruszający się w łukowej szczelinie koncentrycznej z osią obrotu danego połączenia oraz suwak zatrzymujący, który można dowolnie przesuwac w szczelinie. Suwak ten ogranicza zakres ruchu w połączeniu, umożliwiając dostosowanie parametrów ruchu do potrzeb danego pacjenta [Jiting *et al.* 2011].

Układ napędzający zlokalizowany jest z dala od ręki pacjenta w celu ograniczenia obciążenia. Układ ten składa się z 4 silników zamontowanych w panelu, zapewniających siłę i ruch czterem połączeniom poprzez reduktor i linkę [Jiting *et al.* 2011].

#### 4. PODSUMOWANIE

Ręka człowieka ma skomplikowaną anatomię i wiele stopni swobody. Pełni ona funkcje chwytne: siłowe i precyzyjne. Stawia to przed konstruktorami egzoszkielełów duże wyzwanie.

Na podstawie przeglądu literatury dotyczącej konstrukcji urządzeń umożliwiających rehabilitację i powrót do sprawności osób z dysfunkcjami czynności chwytnej ręki wnioskować można o dużym popycie na urządzenie spełniające wymagania pacjentów, lekarzy i terapeutów.

Analizując ofertę dostępnych na rynku urządzeń medycznych, można stwierdzić brak egzoszkielełów powszechnie wytwarzanych i stosowanych przez pacjentów z dysfunkcjami czynności chwytnej ręki. Istniejące koncepcje i prototypy cechują się skomplikowaną budową, dużym kosztem wykonania lub ich gabaryty, masa utrudniają użytkowanie podczas codziennie wykonywanych czynności.

Istotnym problemem stanowi również zasilanie urządzenia. Akumulatory energii elektrycznej lub sprężonego powietrza mają znaczną masę, zatem urządzenie musi cechować się małym jej zużyciem.

Ze względu na wiele stopni swobody, jaką ma ludzka ręka, konieczne jest uproszczenie urządzenia poprzez rezygnację z niektórych stopni swobody i sprzężenie ruchów w kilku stawach. Ruchy, które odbywać będą się jednocześnie, powinny umożliwić wykonanie wszystkich podstawowych chwytów ręki.

Zawarte w literaturze dane umożliwiają opracowanie listy kryteriów, które spełniać musi urządzenie, aby odwzorować fizjologiczny zakres wartości kątów i momentów zginających poszczególne stawy, czasu trwania cyklu pracy itp. Projektując urzą-

dzenia stosowane bezpośrednio przez człowieka, należy uwzględnić mechanizmy zabezpieczające przed przekroczeniem fizjologicznych zakresów ruchu.

Podsumowując, zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne powinno cechować się:

- prostą budową i możliwie tanim wykonaniem,
- łatwością adaptacji całości do różnych wymiarów palców,
- niską masą i gabarytami umożliwiającymi mobilność urządzenia,
- małym poborem energii,
- nieograniczeniem czynności chwytnej ręki,
- odwzorowaniem fizjologicznych parametrów ludzkiej ręki.

## LITERATURA

Bober T., Zawadzki J., 2003. Biomechanika układu ruchu człowieka. BK Wrocław.

Bochenek A., Reicher M., 2010. Anatomia człowieka. T. I, PZWL Warszawa.

Chiri A. *et al.*, 2011. Mechatronic design and characterization of the index finger module of a hand exoskeleton for post stroke rehabilitation. *Mechatronics on Database Eng.* 17(5), 884-894.

Cutkosky M., Howe R., 1990. Human grasp choice and robotic grasp analysis. [w:] *Dextrous Robot Hands*, USA, 5-31.

Dega W., 2004. Ortopedia i rehabilitacja. T. I-II, PZWL Warszawa.

Jack D. *et al.*, 2011. Virtual reality-enhanced stroke rehabilitation. [w:] *Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, IEEE Database Eng. 9(4), 308-317.

Jiting L. *et al.*, 2011. Development of a hand exoskeleton system for index finger rehabilitation. *Chinese journal of mechanical engineering* 24(5), 1-12.

Jones C. *et al.*, 2012. Design and development of the cable actuated finger exoskeleton for hand rehabilitation following stroke. [w:] *Transactions on mechatronics*, USA, 1-10.

Łopatka M. i in., 2012. Badania antropometryczne kończyny górnej oraz pomiar siły ścisku dłoni i kciuka. *Aktualne problemy biomechaniki* 6, 93-98.

Marecki B., 2004. Anatomia funkcjonalna w zakresie studiów wychowania fizycznego i fizjoterapii. Wyd. AWF Poznań.

Paleari M. *et al.*, 2012. Hexec: A hand exoskeleton designed to be embedded in the astronaut's eva glove. [w:] *Center od Space Human Robotics*, Italy.

Sarakoglou I. *et al.*, 2007. Exoskeleton-based exercisers for the disabilities of the upper arm and hand. [w:] *Rehabilitation robotics*, Austria, 499-522.

Shields B. *et al.*, 1997. An anthropomorphic hand exoskeleton to prevent astronaut hand fatigue during extravehicular activities. [w:] *System and humans*, USA, 668-673.

Sobotta J., 2012. Atlas anatomii człowieka. T. I, Wyd. Medyczne Urban&Partner Warszawa.

Wege A. *et al.*, 2005. Mechanical design and Motion Control of a hand exoskeleton for rehabilitation. [w:] *Mechatronics and automation*, Germany, 155-159.