

Budowa egzoszkieletu kończyny górnej sterowanego za pomocą dwuosiowego sensora o dużej sztywności

Construction of an upper limb exoskeleton controlled by a force joystick

JAROSŁAW JANKOWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.8-9.67>

Opisano budowę funkcjonalnego modelu egzoszkieletu prawej kończyny górnej. Zaprezentowano kluczowe podzespoły, takie jak napędy, zasilanie czy stelaż. Opisano kinematykę mechanizmu. Opracowywany egzoszkielec jest sterowany za pomocą joysticka o dużej sztywności, wykonanego z zespołu tensometrów, i umożliwia intuicyjne prowadzenie efektora przez użytkownika.

SŁOWA KLUCZOWE: egzoszkielec, sterowanie manualne, czujnik tensometryczny

The work describes the construction of a functional exoskeleton model of the right upper limb. Information on the key components used, i.e. drives, power supply and rack, is included. The kinematics of the mechanism are described. The developed exoskeleton is controlled by a special joystick with high rigidity made of two strain gauge sensors and allows the user to intuitively guide the effector.

KEYWORDS: exoskeleton, manual control, strain gauge sensor

Wprowadzenie

Technologia egzoszkieleców gwałtownie się rozwija w ostatnich latach. Należy to tłumaczyć rozwojem inżynierii mechanicznej, inżynierii biomedycznej, elektroniki i sztucznej inteligencji. Publikowane są artykuły przeglądowe na temat konstrukcji i rozwiązań stosowanych w egzoszkielecach kończyny górnej [1–3].

W pracy Rupal i in. [4] scharakteryzowano współczesne egzoskielec, które porównano pod względem wyglądu i funkcjonalności, a także rozwiązań mechanicznych i elektrycznych. Omówiono kluczowe kwestie, takie jak: siłowniki, strategia sterowania, czujniki, metody zasilania, mechanizmy i materiały konstrukcyjne.

Również w pracy Islam i in. [1] dokonano przeglądu osiągnięć w zakresie konstrukcji i rozwiązań stosowanych w egzoszkielecach kończyny górnej. Przeniesienie napędu może być realizowane przez napęd linowy, przekładnie zębate, koło pasowe, napęd z przekładniami harmonicznymi itp.

Badacze opracowali różne typy egzoszkieleców wykorzystujących tradycyjne napędy, np. silniki elektryczne lub siłowniki hydrauliczne (szczegółowy podział zaproponowali Frisoli i zespół [4]). Na uwagę zasługują prace dotyczące zastosowania inteligentnych materiałów, np. płynów elektoreologicznych (ER, ERF), płynów magneto-reologicznych (MR, MRF) oraz stopów metali z pamięcią kształtu (SMA).

Sohn i in. [5] dokonali przeglądu zastosowań inteligentnych materiałów. Zespół skupił się na trzech materiałach i ich właściwościach: ERF, MRF i SMA. Siłowniki (*smart actuators*), w których wykorzystano inteligentne materiały, mają stosunkowo niewielką wagę i objętość w porównaniu z rozwiązaniami konwencjonalnymi. Natomiast napę-

dy z drutu SMA [6] (*SMA wire actuators*) mogą dokładniej naśladować ludzki mięsień.

Materiały, z których wykonuje się konstrukcje egzoszkielec, muszą być stosunkowo lekkie. Rehman [7] zaproponował całe ramię ETS-MARSE z aluminium. Copaci i zespół [8] opracowali egzoszkielec o innowacyjnej konstrukcji, wykorzystującej inteligentne materiały z pamięcią kształtu (kable SMA). Egzoszkielec był kombinacją aluminiowych elementów gotowych oraz wytworzonych techniką druku 3D. Aby zwiększyć komfort użytkownika, wszystkie wewnętrzne części wchodzące w kontakt z pacjentem pokryto miękkim, hipoalergicznym materiałem tekstylnym. Cała konstrukcja z siłownikami ważyła mniej niż 1 kg. Aby dostarczyć siłownikom niezbędną energię, zastosowano zasilanie (24 Vdc / 40 A). Ciężar zasilacza wynosił 1,9 kg.

Również Rupal [4] i jego zespół wskazali, że materiały konstrukcyjne z uwagi na funkcjonalność powinny mieć niską gęstość i wysoką wytrzymałość, jak np. specjalne stopy metali (aluminium 6061-T6), niemetale, elastyczne materiały tekstylne i włókno węglowe.

Na uwagę zasługuje projekt o nazwie Titan Arm [9] – egzoszkielec mający wzmocnić siłę bicepsów – stworzony przez studentów z University of Pennsylvania. Egzoszkielec Titan Arm prawie w całości wykonano z lekkiego stopu aluminium 6061-T6. Elementy, które bezpośrednio nie są narażone na obciążenia, zostały wydrukowane w technologii 3D. Konstrukcja waży ok. 9 kg i jest sterowana manualnie za pomocą joysticka.

Istnieją różne trendy w zakresie technik komunikacji użytkownika z egzoszkieletem, tj. uruchamiania i sterowania. Można je podzielić na:

- intuicyjne (EMG, FMG, EEG),
- manualne (np. joystick, którego budowa zostanie opisana w niniejszej pracy i jest kontynuacją prac opisanych w artykule [10]).

Projektowanie i budowa egzoszkielec kończyny górnej

Budowę egzoszkielec przeznaczonego do testów metod sterowania rozpoczęto od przygotowania i skompletowania elementów bazowych typu: stelaż, sekcja napędów, sekcja sterowania i zasilania oraz elementy konstrukcyjne.

Stelaż

Zgodnie z założeniami opisanymi w artykule [10] egzoszkielec powinien zapewniać mobilność użytkownika. Za tę właściwość odpowiada stelaż. Wybrany model ma część (ramę) z tworzywa sztucznego, dzięki czemu uzyskano niską masę oraz udźwig do 10 kg. Stelaż jest mocowany do tułowia użytkownika poprzez szelki ze

* Dr inż. Jarosław Jankowski, jajan@ciop.pl, <https://orcid.org/0000-0002-4910-7904> – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, Polska

ściągaczem piersiowym oraz pas biodrowy. Oznaczenia firmowe to: High Performance Adjustable Pad Set z ramą 1606-AC Packframe.

Wybór napędów

Wybrano napędy odpowiadające za wspomaganie ramienia (model H54-200-S500-R) oraz przedramienia (model H54-100-S500-R), wykonane przez firmę ROBOTIS (tablica).

TABLICA. Najważniejsze parametry i właściwości napędów zastosowanych w egzoszkieletu

Model napędu	H54-200-S500-R	H54-100-S500-R
Zasilanie, V	24	
Przekładnia	cykloidalna o bardzo małym luzie	
Interfejs komunikacji	RS-485	
Moment pracy ciągłej (przy prędkości obrotowej 29 obr/min), Nm	44	25
Masa, g	855	732
Moc, W	200	100

Silniki te zamknięto w metalowej obudowie o przekroju kwadratowym 54 × 54 mm i całkowitej długości 126 mm (model H54-200-S500-R) lub 108 mm (model H54-100-S500-R). Obsługa napędów odbywa się poprzez udostępnioną bibliotekę z zestawem funkcji pozwalających na programowanie ruchów z wykorzystaniem dedykowanego konwertera USB Virtual COM – RS485 „U2D2”.

Wybór zasilania

Wybór akumulatorów był podyktowany pojemnością prądową ogniów, wagą oraz dostępnością. Wybrany akumulator firmy Stiga o masie 760 g i pojemności 4 Ah dostarcza źródło prądu o napięciu maks. 24 V. Dedykowana ładowarka pozwala na pełne naładowanie akumulatora w ciągu ok. 1,5 h. Podwójny zestaw akumulatorów umożliwia nieprzerwaną pracę egzoszkieletu. Dodatkowe zabezpieczenie przed uszkodzeniem akumulatorów (niski poziom naładowania) stanowi regulator napięcia zastosowany ze względu na zalecenia producenta serwo-motorów.

Komputer zarządzający

Do obsługi systemu sterowania, czujników oraz serwo-silników zastosowano komputer Intel Compute Stick. Wybrany model bazuje na dwurdzeniowym/czterowątkowym procesorze Intel Core m3-6Y30 (taktowanie 0.9–22 GHz). Jest wyposażony w przycisk włączania/wyłączania, gniazdo zasilania (USB 3.1 typu C) oraz jedno gniazdo USB 3.0 do komunikacji z peryferiami. Komputer ma niewielkie rozmiary (tylko 114 mm × 38 mm × 12 mm) oraz masę (65 g). Wszystkie peryferia podłączono do rozdzielacza USB, który z kolei jest podłączony do jednego portu USB w komputerze.

Wybór elementów konstrukcyjnych i metody ich wytwarzania

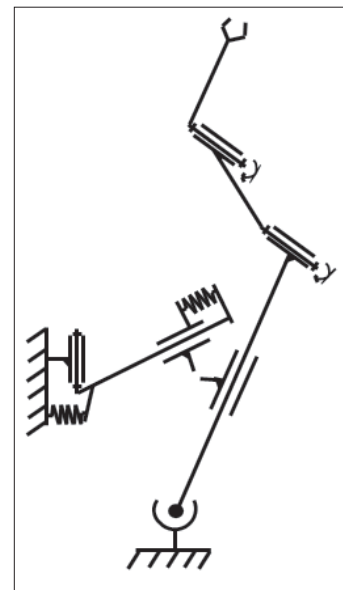
Aby zapewnić jak najmniejszą masę oraz jak największą wytrzymałość opracowywanego egzoszkieletu, główne człony wykonano z rurek z włókna węglowego. Prototypowe

elementy składowe wykonano metodą druku 3D, typu FDM (*fused deposition modelling*), w sposób zapewniający jak największą wytrzymałość projektowanych części. Wybrane elementy wzmocniono dodatkowo połączeniami śrubowymi (przede wszystkim śrubami typu M3 i M4). Elementy zostały zaprojektowane w programie Solidworks Profesjonal.

Schemat kinematyczny egzoszkieletu

W wyniku analizy zaproponowanych założeń oraz testów wczesnych faz tworzonych prototypów egzoszkieletu wypracowano manipulator o schemacie kinematycznym przedstawionym na rys. 1.

Rys. 1. Schemat kinematyczny egzoszkieletu kończyny górnej



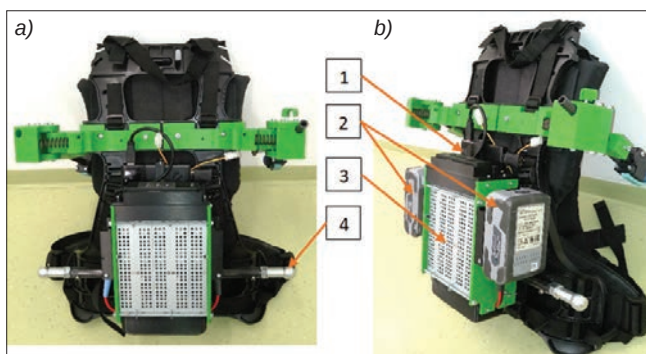
Na schemacie są dwa miejsca zaczepu. Pierwsze, o trzech stopniach swobody, zrealizowane za pomocą przegubu kulowego, oraz drugie, zrealizowane parą kinematyczną piątej klasy, ustawiające stałą pozycję osi obrotu części układu odpowiadającego za docisk szkieletu do ciała użytkownika w okolicach stawu ramienne. W układzie docisku znajdują się: połączenie dwóch par kinematycznych czwartej klasy oraz dwie sprężyny. W części końcowej są dwa napędy: jeden odpowiada za podnoszenie ramienia, a drugi – za podnoszenie przedramienia. Ruchliwość projektowanego układu odpowiada pięciu stopniom swobody, tj.: trzy stopnie swobody położenia kocówki egzoszkieletu oraz dwa stopnie swobody mechanizmu odpowiadającego za docisk „barku” mechanizmu do ciała człowieka.

Egzoszkielet

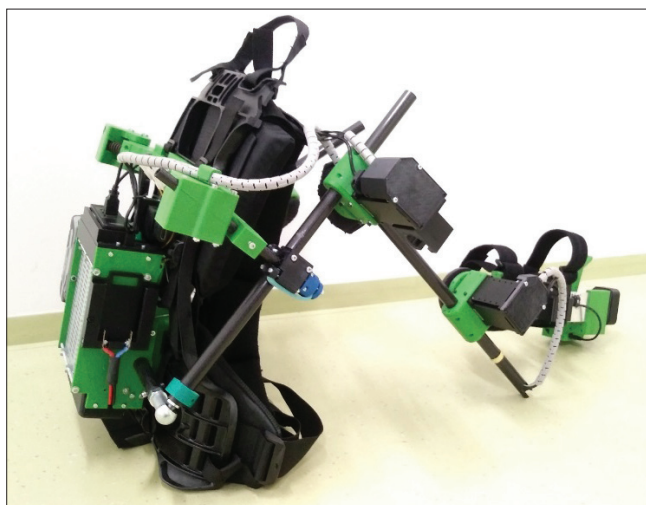
Model funkcjonalny opracowanego egzoszkieletu można podzielić na dwa segmenty: część związaną ze stelażem oraz część ruchomą, czyli manipulator zaczepiony w przegubie kulowym. Do stelaża przymocowano zaczep manipulatora w obrębie pasu biodrowego i osadzono sekcję zasilania oraz sterowania (komputer) (rys. 2).

Manipulator (rys. 3) składa się z dwóch rurek z włókna węglowego. Pierwsza z nich łączy manipulator ze stelażem, a druga pełni rolę ramienia. Przedramię wykonano z aluminiowego płaskownika o przekroju 50 × 5 mm. Przewody poprowadzono wewnątrz rury.

Manipulator wykorzystuje pasy ściągające (w dwóch punktach), utrzymujące przedramię użytkownika w egzoszkielecie. W ręce użytkownik trzyma joystick. Na rys. 3



Rys. 2. Egzoszkielet: a) widok z tyłu, b) widok z boku. 1 – komputer zarządzający, 2 – akumulatory, 3 – sekcja zasilania – regulatory z ażurową, metalową obudową, 4 – głowka ciągnąca

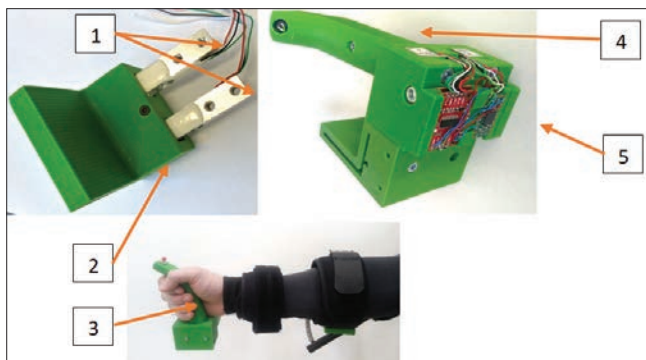


Rys. 3. Model funkcjonalny egzoszkieletu

pokazano połączenie stelażu z manipulatorem wspomagającym.

Ostatnim elementem łączącym użytkownika z egzoszkieletem jest joystick (rys. 4). Składa się on z dwóch tensometrów zamkniętych w obudowie oraz wyprofilowanej rękojeści. W dolnej części joysticka zabudowano dedykowane wzmacniacze sygnału z tensometrów oraz układ z mikrokontrolerem obsługującym przetworniki ADC i portem USB.

Tego typu joystick – dwuosiowy sensor o dużej sztywności – umożliwia sterowanie manipulatorem bez wykonywania dużych ruchów ręką (przedramię użytkownika jest unieruchomione względem przedramienia manipulatora) i odbywa się poprzez próbę naciśnięcia/ciągnięcia rękojeści lub próbę przechylenia rękojeści w kierunku do/od użytkownika.



Rys. 4. Joystick dwuosiowy. 1 – tensometry, 2 – obudowa, 3 – joystick obsługiwany przez użytkownika, 4 – rękojeść, 5 – układy elektroniczne

Działanie metody opartej na sterowaniu manualnym zostało przetestowane. Skrypt zarządzający pracą joysticka po analizie sygnałów (próbki 80 Hz) z tensometrów wnioskuje kierunek i wielkość zmiany położenia końcówki manipulatora względem barku. Po rozwiązaniu zadania odwrotnej kinematyki zadawana jest nowa pozycja efektora manipulatora, uwzględniająca oddziaływanie użytkownika egzoszkieletu na joystick.

Podsumowanie

Nasobne roboty mogą być postrzegane jako technologia, która rozszerza, uzupełnia, zastępuje lub zwiększa ludzkie możliwości. Wspomagana kończyna stanowi również swego rodzaju interfejs kontroli manipulatora. Człowiek może dostarczać do układu sterowania informacje pochodzące z mięśni lub układ sterowania może rejestrować i przetwarzać oddziaływanie mięśni na egzoszkielet.

W pracy zaprezentowano budowę egzoszkieletu wykorzystującego joystick o dużej sztywności do kontrolowania trajektorii robota nasobnego. Kontynuacja prac przewiduje porównanie i ocenę dwóch metod sterowania opracowywanym egzoszkieletem, tj. metody opartej na sygnałach EMG i metody wykorzystującej kontrolę manualną.

Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017–2019 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

LITERATURA

- [1] Islam M.R., Spiewak C., Rahmann M., Fareh R. "A Brief Review on Robotic Exoskeletons for Upper Extremity Rehabilitation to Find the Gap between Research Prototype and Commercial Type". *Adv Robot Autom.* 6 (2017): 177, DOI: 10.4172/2168-9695.1000177.
- [2] Nindhuijs B. van, Heide L.A. van der, Jansen J.W., Gysen B.L.J. "Overview of Actuated Arm Support Systems and Their Applications". *Actuators.* 2 (2013): 86–110, DOI:10.3390/act204008.
- [3] Frisoli A. "Exoskeletons for upper limb rehabilitation". *Rehabilitation Robotics* (2018), <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/exoskeleton-robotics>, DOI: 10.1016/B978-0-12-811995-2.00006-0.
- [4] Baltej Singh Rupal et al. "Lower-limb exoskeletons: Research trends and regulatory guidelines in medical and non-medical applications". *International Journal of Advanced, Robotic Systems.* November-December 2017: 1–27, DOI: 10.1177/1729881417743554.
- [5] Jung Woo Sohn, Gi-Woo Kim, Seung-Bok Choi. "A State-of-the-Art Review on Robots and Medical Devices Using Smart Fluids and Shape Memory Alloys". *Appl. Sci.* 8 (2018): 1928, DOI: 10.3390/app8101928.
- [6] Copaci D., Serrano D., Moreno L., Blanco D. "A High-Level Control Algorithm Based on sEMG Signalling for an Elbow Joint SMA Exoskeleton". *Sensors.* 18 (2018): 2522, DOI:10.3390/s18082522.
- [7] Zia ur Rehman M. et al. "Multiday EMG-based classification of hand motions with deep learning techniques". *Sensors.* 18 (2018): 249, DOI: 10.3390/s18082497.
- [8] Copaci D., Serrano D., Moreno L., Blanco D. "A High-Level Control Algorithm Based on sEMG Signalling for an Elbow Joint SMA Exoskeleton". *Sensors.* 18 (2018): 2522, DOI:10.3390/s18082522.
- [9] <https://materialyinzynierskie.pl/sztuczny-egzoszkielet-wzmocni-sile-miesni/>
- [10] Jankowski J., Ziemek K. "Sterowanie manipulatorem nasobnym w oparciu o sygnały EMG". *Mechanik.* 7 (2018): 582–584, DOI: 10.17814/mechanik.2018.7.90.