

Wielofunkcyjne urządzenia haptyczne – projekt chwytaka antropomorficznego²

Streszczenie

W artykule przedstawiono budowę chwytaka antropomorficznego opracowanego jako prototyp przemysłowego urządzenia haptycznego. Mechanizm chwytaka odwzorowuje budowę kostną ludzkiej dłoni, której poruszanie zapewnia zastosowanie systemu ścięgowego we współpracy z jednostkami napędowymi. Siłownikiem, na którym skoncentrowano budowę prototypu, jest mięsień pneumatyczny, znany jako mięsień McKibbena. W projekcie zbadano układ dziewięciu mięśni, których właściwości poddano analizie statycznej. Do sterowania chwytakiem przez operatora skonstruowano i wykonano szkielet nakładany na dłoń, zwany fantomem, który dostarcza informacji o kątach zgięcia poszczególnych stawów dłoni użytkownika. Zaimplementowano także układ imitujący zmysł dotyku. Za jednostkę sterującą odpowiada zespół mikroprocesorów ATmega328P, który pozwala na gromadzenie sygnałów pomiarowych i ich odpowiednie przetwarzanie w celu generacji sygnałów sterowania na wyjściach, które gwarantują poprawną oraz stabilną pracę chwytaka.

¹ Autor, obecnie doktorant na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki w Katedrze Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć Politechniki Gdańskiej, jest laureatem XV edycji organizowanego przez Państwowy Fundusz Rehabilitacji Osób Niepełnosprawnych Ogólnopolskiego Konkursu na najlepsze prace magisterskie i doktorskie, których tematem badawczym jest zjawisko niepełnosprawności w wymiarze zdrowotnym, zawodowym lub społecznym – 2018 r. Jego praca magisterska zatytułowana „Chwytnak antropomorficzny napędzany mięśniami pneumatycznymi” napisana pod kierunkiem dr. inż. Łukasza Dolińskiego zajęła 3 miejsce w kategorii prac magisterskich z zakresu rehabilitacji medycznej. Aktualnie autor prowadzi badania w ramach przewodu doktorskiego w obszarze systemów rehabilitacyjnych, a celem przygotowywanej pracy doktorskiej jest wykorzystanie zdobytej wiedzy i projekt nowej zrobotyzowanej dłoni, która nie tylko swoją konstrukcją dokładnie odwzorowywałaby mechanikę i sposób działania ludzkiej dłoni, lecz także przy użyciu nowego rodzaju sztucznych mięśni uczyniłaby całe urządzenie w pełni mobilnym. Taka dłoń mogłaby znaleźć szerokie zastosowanie w robotach humanoidalnych, zdalnych pracach w niebezpiecznym środowisku, a także zaawansowanej protetyce. [przypr. red.].

² Oryginalny artykuł naukowy napisany na podstawie pracy magisterskiej nagrodzonej w 2018 roku w XV edycji organizowanego przez Państwowy Fundusz Rehabilitacji Osób Niepełnosprawnych Ogólnopolskiego Konkursu na najlepsze prace magisterskie i doktorskie poświęcone problematyce niepełnosprawności „OTWARTE DRZWI”. PRACA MAGISTERSKA, III MIEJSCE W KATEGORII REHABILITACJI MEDYCZNEJ; tytuł pracy: „Chwytnak antropomorficzny napędzany mięśniami pneumatycznymi”; autor pracy: Jacek Szkopek, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki; promotor pracy: dr inż. Łukasz Doliński, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki [przypr. red.].

Dokumentację efektywności rozwiązania stanowią wyniki testów właściwości motorycznych urządzenia.

Słowa kluczowe: urządzenia haptyczne, chwytak antropomorficzny, fantom, sztuczny mięsień, mięsień pneumatyczny, mięsień McKibbena

Multifunctional Haptic Devices – Project of Anthropomorphic Gripper

Summary

This paper presents construction of an anthropomorphic gripper developed as a prototype of an industrial haptic device. The gripper's mechanism is based on the human hand bone structure and is driven by a tendon system operated by McKibben muscles. Nine such muscles were tested and their properties, verified by static analysis, are presented in the paper. The gripper is controlled by a custom-built on-hand wearable, called the phantom, which provides information about exact hand joints angles. Both the gripper and the phantom possess a tactile system, which imitates the sense of touch. The device is controlled by ATmega328P microcontrollers that collect measurements and process them in order to generate dedicated output control signals. The efficiency of the system is proven by tests of its motor properties.

Keywords: haptic devices, anthropomorphic gripper, phantom, anthropomorphic muscle, pneumatic muscle, McKibben muscle

Wstęp

Szeroko pojęty rozwój technologiczny oraz zyskująca na popularności, szczególnie w ostatnich latach, biomimika, przyczyniły się do znacznego rozpowszechnienia konstrukcji chwytaków antropomorficznych i rozwiązań haptycznych. Zainteresowanie to wynika nie tylko z powstawania wciąż nowych technologii, przekładających się na dynamiczny rozwój techniki, czy zapotrzebowanie przemysłu, ale także z niezaspokojonego zapotrzebowania w zakresie protetyki i tym samym konieczność tworzenia niedrogich, a zarazem efektywnych systemów wspomagających liczne i różnorodne procesy rehabilitacyjne. Stąd też obecnie – w przykładowej grupie osób z amputowaną dłonią – dostępny jest szeroki wybór protez, poczynając od w pełni profesjonalnych i zaawansowanych konstrukcji, posiadających nawet 10 niezależnych napędów; poprzez rozwiązania klasyczne, a skończywszy na układach protez do samodzielnego montażu, wyposażonych w układy napędów i elementy typu *open-source*, powstałe przy użyciu drukarek 3D, o uproszczonej funkcjonalności ludzkiej dłoni^{3,4}.

³ www.jhuapl.edu/prosthetics/medical/default.asp, [dostęp z dnia: 28.01.2019]

⁴ www.openhandproject.org, [dostęp z dnia: 28.01.2019]

Powyższe konstrukcje chwytaków lub protez są wyposażone z reguły w serwo-mechanizmy zawierające silniki elektryczne prądu stałego⁵, co podyktowane jest korzystnym rozmiarem i mocą takich jednostek napędowych, ich wysoką niezawodnością i powtarzalnością działania oraz wysoką sprawnością warunkującą wielkość zasobnika energii i czas ładowania. Wszystkie te czynniki odgrywają kluczową rolę w funkcjonowaniu urządzeń mobilnych, do których niewątpliwie należy zaliczyć rozpatrywane chwytaki lub protezy, gdyż warunkują one m.in. cenę wspomnianych produktów i formują sposób ich postrzegania na rynku.

Wskazywane konstrukcje mogą także korzystać z alternatywnych układów napędów, do których zalicza się m.in: sztuczne mięśnie, tzw. miękkie siłowniki (ang. *soft actuators*), materiały z pamięcią kształtu czy elastomery dielektryczne⁶. Rozwiązaniom tym towarzyszą jednak inne właściwości dynamiczne, czy konieczność zastosowania pojemniejszych źródeł energii – często o większym rozmiarze. Z tego względu najpowszechniejszymi napędami tego rodzaju w chwytakach antropomorficznych są obecnie mięśnie pneumatyczne. Wyróżnia je szeroki zakres generowanych sił lub momentów oraz sprężystość czynnika roboczego (zwykle powietrza), która chroni konstrukcję chwytaka, jak i siłownika przed uszkodzeniami spowodowanymi udarami przeciążeń. Do koronnych argumentów, przemawiających za wyborem tego rodzaju rozwiązań w systemach chwytaków, zalicza się elastyczność konstrukcji i efektywność sterowania⁷.

Zaletą dzisiejszych chwytaków antropomorficznych są ich szerokie możliwości działania w różnych warunkach pracy. Kinematyka wzorowana na ludzkiej dłoni umożliwia nie tylko chwytanie przedmiotów o złożonych kształtach, lecz także precyzyjne manipulowanie tymi przedmiotami^{8,9}. Powyższe cechy czynią zrobotyzowane dłonie narzędziem o uniwersalnym zastosowaniu. Z tego też względu urządzenia, takie jak chwytaki antropomorficzne czy roboty humanoidalne, stanowią obiecującą alternatywę dla branży przemysłowej¹⁰, szczególnie podczas zadań żmudnych, mogących stwarzać zagrożenie dla człowieka (środowisko toksyczne, radioaktywne, o podwyższonej temperaturze, etc.) lub też podczas prac precyzyjnych, wymagających licznych powtórzeń (linie produk-

⁵ M. Ariyanto, Munadi, G. D. Haryadi i in., *A low cost anthropomorphic prosthetic hand using DC micro metal gear motor*, „8th IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering” 2008, s. 42–46

⁶ T. R. Redman, *The design of a robotic hand with multiple actuators for children*, www.eprints.soton.ac.uk, s. 34–38, [dostęp z dnia: 28.01.2019]

⁷ F. Daerden, D. Lefeber, *Pneumatic artificial muscles: Actuator for robotics and automation*, „European Journal for Mechanical and Environmental Engineering” 2002, vol. 47, s. 10–11

⁸ I. M. Bullock, A. M. Dollar, *Classifying human manipulation behavior*, „IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)” 2011, s. 508–513

⁹ M. R. Cutkosky, *On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks*, „IEEE Trans. Robot. Autom.” 1989, s. 269–275

¹⁰ P. S. Kumar, *Top three predictions for humanoid robots in 2019*, www.yourstory.com/2018/12/top-three-predictions-humanoid-robots-2019, [dostęp z dnia: 28.01.2019]

cyjne, prace magazynowe, etc.). W przypadku linii produkcyjnych, na których występują pracownicy oraz maszyny, w celu zapewnienia bezpieczeństwa często konieczne jest ich rozdzielanie na część obsługiwaną przez roboty oraz na część obsługiwaną przez człowieka lub wstrzymywanie pracy maszyn na czas działań operatora¹¹. Wymienione wyżej rozwiązania mogłyby nie tylko wykluczyć konieczność rozdzielania linii produkcyjnej, lecz przede wszystkim skrócić czas wykonywanych czynności, co w przypadku automatyzacji procesów przemysłowych jest czynnikiem krytycznym.

Powyższe argumenty, w sposób naturalny, zachęcają twórców linii produkcyjnych do stosowania chwytaków antropomorficznych. Osiągane wówczas usytuowanie operatora poza strefą pracy maszyn czyni pracę człowieka całkowicie bezpieczną, ale i znacznie mniej wymagającą fizycznie. Stąd też, po użyciu odpowiedniego układu sterowania, w pełni wydajnym operatorem takiej linii może być również osoba niepełnosprawna (wyjście naprzeciw założeniom idei Przemysłu 4.0). Uwarunkowanie to dla autora artykułu stanowiło punkt wyjścia do opracowania i wykonania demonstratora chwytaka antropomorficznego, do którego napędu zastosowano system cięgien mechanicznych napędzanych za pomocą mięśni McKibbena. Podstawę układu sterującego chwytaka stanowi szkielet nakładany na dłoń operatora, zwany fantomem, przystosowany do pomiarów kątów zgięcia stawów palców – rozwiązanie to daje tym samym możliwość obsługi przez osoby z dysfunkcjami, takimi jak niedowład, a nawet spastyczność. Komunikacja pomiędzy chwytakiem a fantomem odbywa się przewodowo. Pomiar i formowanie sygnałów sterujących są realizowane w układzie z mikrokontrolerami, które na podstawie różnicy kątów w przegubach palców sterują pracą mięśni McKibbena. W systemie demonstratora chwytaka zaimplementowany został również układ imitujący zmysł dotyku – nakładki na opuszki, które odwzorowują siłę nacisku opuszków chwytaka na manipulowany obiekt.

Konstrukcja chwytaka

Konstrukcja mechaniczna chwytaka w uproszczeniu odwzorowuje budowę kostną ludzkiej dłoni. Stąd też w każdym z palców można wyróżnić ogniwa odpowiadające paliczkom oraz kościom śródreżca¹², które służą za mocowanie palców chwytaka do podstawy z poliwęglanu. Wymienione ogniwa tworzą łańcuchy kinematyczne, w których wszystkie węzły umożliwiają ruchy zginania i prostowania w tej samej płaszczyźnie. Przyjmując z kolei za pozycje bazowe miejsca, w których płaszczyzny górne par są ułożone równolegle, to każdy przegub może zginać się o 95° oraz wykonywać tzw. przeprost o 5°. Ze względu na złożoną bu-

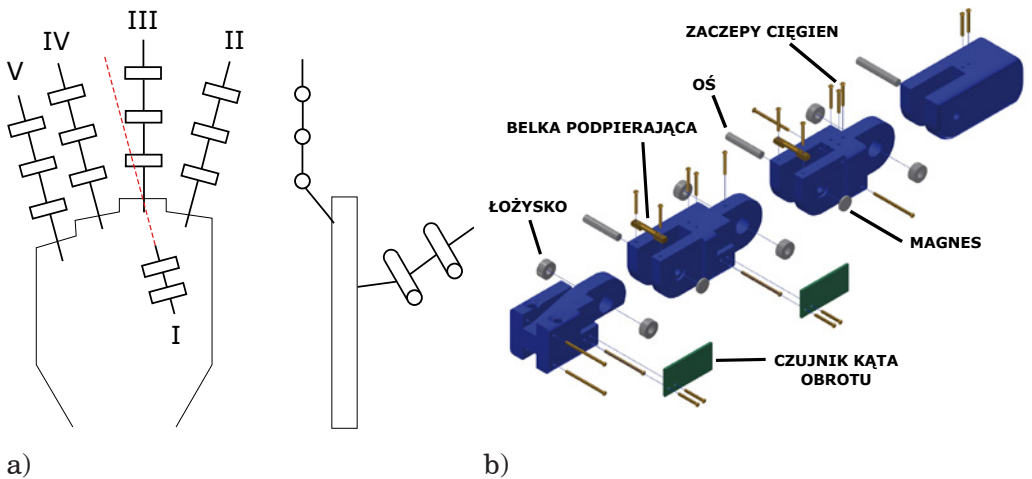
¹¹ T. Malm, *Guidelines to make safe industrial robot systems*, www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2017/VTT-R-01109-17.pdf, s. 11–13, [dostęp z dnia: 28.01.2019]

¹² Vogl Wayne, W. M. Mitchell Adam, R. Tibbit i in., *Gray. Anatomia. Podręcznik dla Studentów*, t. I, Edra Urban & Partner, 2016, s. 313–319

dowę kciuka ludzkiego zdecydowano się zrezygnować z odwzorowania w chwytaku ruchów przeciwstawiania i ich pochodnych. Jednak w celu zachowania satysfakcjonujących właściwości chwytanych chwytaka, łańcuch kciuka, został umieszczony w pozycji odwodzenia dłoniowego (rys. 1a). Takie usytuowanie kciuka pozwala na wykonywanie podstawowych rodzajów chwytów, przy czym chwyt opuszkowy tworzony jest wówczas wyłącznie z palcem środkowym (III).

Układ sensoryczny chwytaka podzielono na dwie części – odpowiedzialne za: pomiary kątów zgięcia przegubów i dostarczanie informacji haptycznych.

Rys. 1. Konstrukcja chwytaka: a) schemat kinematyczny dłoni, b) rysunek złożeniowy palca chwytaka, c) zbudowany chwytak



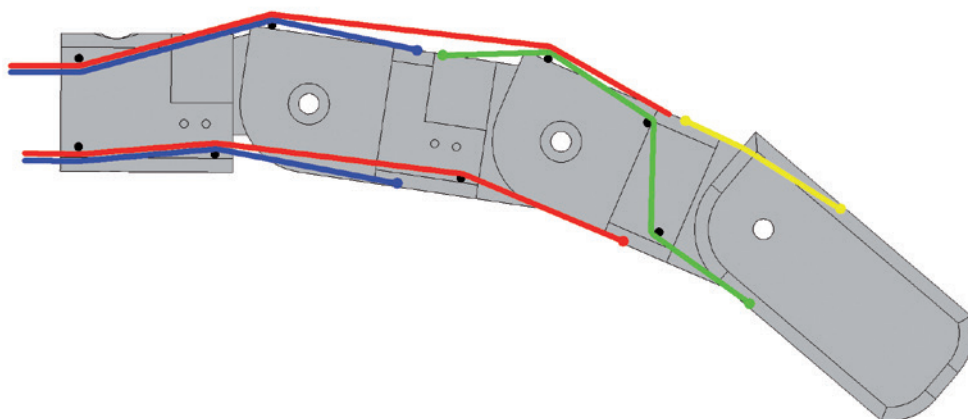
c)

Źródło: opracowanie własne autora

Pomiar kątów zgięcia w przegubach bazuje na zastosowaniu czujników magnetycznych wykorzystujących zjawisko Halla. W tym celu, w osi zginanego ogniwa, stawy: MCP i PIP, umieszczany jest magnes (namagnesowany prostopadle do osi), który poruszając się wraz z ogniwem, względem nieruchomego, zamontowanego współosiowo czujnika kąta obrotu AS5600, powoduje zmianę napięcia na jego wyjściu (rys. 1). Należy podkreślić, że zastosowany czujnik kąta obrotu, poza zaletami wynikającymi z bezkontaktowego pomiaru kąta zgięcia, cechuje się: wysoką dokładnością rzędu 0,01V oraz stabilnością pomiaru, która przekłada się bezpośrednio na jakość sterowania pracą urządzenia.

Pomiar siły nacisku pomiędzy paliczkami dalszymi a manipulowanym obiektem odbywa się za pośrednictwem czujników piezorezystywnych umieszczonych na końcach palców chwytaka. Elementy te zostały osłonięte czarnym materiałem tapicerskim w celu ich zabezpieczenia przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz ułatwienia równomiernego rozkładu sił nacisku na powierzchnię aktywną czujnika (rys. 1). Pomiar siły nacisku stanowi najistotniejszą, z punktu widzenia rozwiązań mobilnych, cechę odwzorowującą zmysł dotyku, która odpowiada za prawidłową funkcjonalność chwytnej dłoni i umożliwia łatwe, precyzyjne oraz efektywne sterowanie pracą całego układu.

Rys. 2. Usytuowanie i interpretacja ruchu cięgien palców II-V chwytaka: niebieskie dolne – zginanie paliczka bliższego, niebieskie górne – prostowanie paliczka bliższego, czerwone dolne – zginanie paliczka środkowego, czerwone górne – prostowanie paliczka środkowego, zielone – zginanie paliczka dalszego, żółte – prostowanie paliczka dalszego; czarne punkty – belki mocujące i rozprowadzające system cięgien



Źródło: opracowanie własne autora

Do precyzyjnego poruszania konstrukcją chwytaka zastosowano system ciągnowy (rys. 2). Każdy z palców (od II do V) napędzany jest poprzez dwa cięgna z zaczepami w paliczkach bliższym i środkowym. W przypadku kciuka przewidziano pojedyncze cięgno umocowane w paliczku bliższym. Paliczki dalsze poruszane są w sposób pośredni. Zgięcie paliczka środkowego (lub bliższego w przypadku kciuka) powoduje ruch cięgna umocowanego pomiędzy paliczkiem bliższym a dalszym, a tym samym obrót paliczka dalszego o odpowiedni kąt. Do odwzorowania reakcji skurczu mięśni zastosowano siłowniki jednostronnego działania, a do odwzorowania biernego ruchu powrotnego mięśni sprężyny (z wyjątkiem paliczków dalszych, których prostowanie odbywa się za pomocą gumowego paska, zamocowanego pomiędzy paliczkiem środkowym a dalszym).

Układ napędowy

Jednostkę napędową chwytaka stanowi (rys. 3) zespół dziewięciu mięśni pneumatycznych McKibbena. Mięśnie te, odzwierciedlając działanie mięśni organizmów żywych, zachowują się jak elastyczne siłowniki jednostronnego działania. Ich budowa ogranicza się do elastycznego przewodu o siatce nierozciągliwych, romboidalnie ułożonych włókien. Przewód ten z jednej strony jest szczelnie zamknięty, zaś z drugiej posiada otwór wlotowy czynnika roboczego – z reguły powietrza. Wzrost ciśnienia powietrza skutkuje zwiększeniem średnicy mięśnia i jego skróceniem, a spadek powrotem do maksymalnej naturalnej długości. Toteż konstruując mięśnie, na potrzeby budowy demonstratora chwytaka, wykonano serie eksperymentów, podczas których brano pod uwagę:

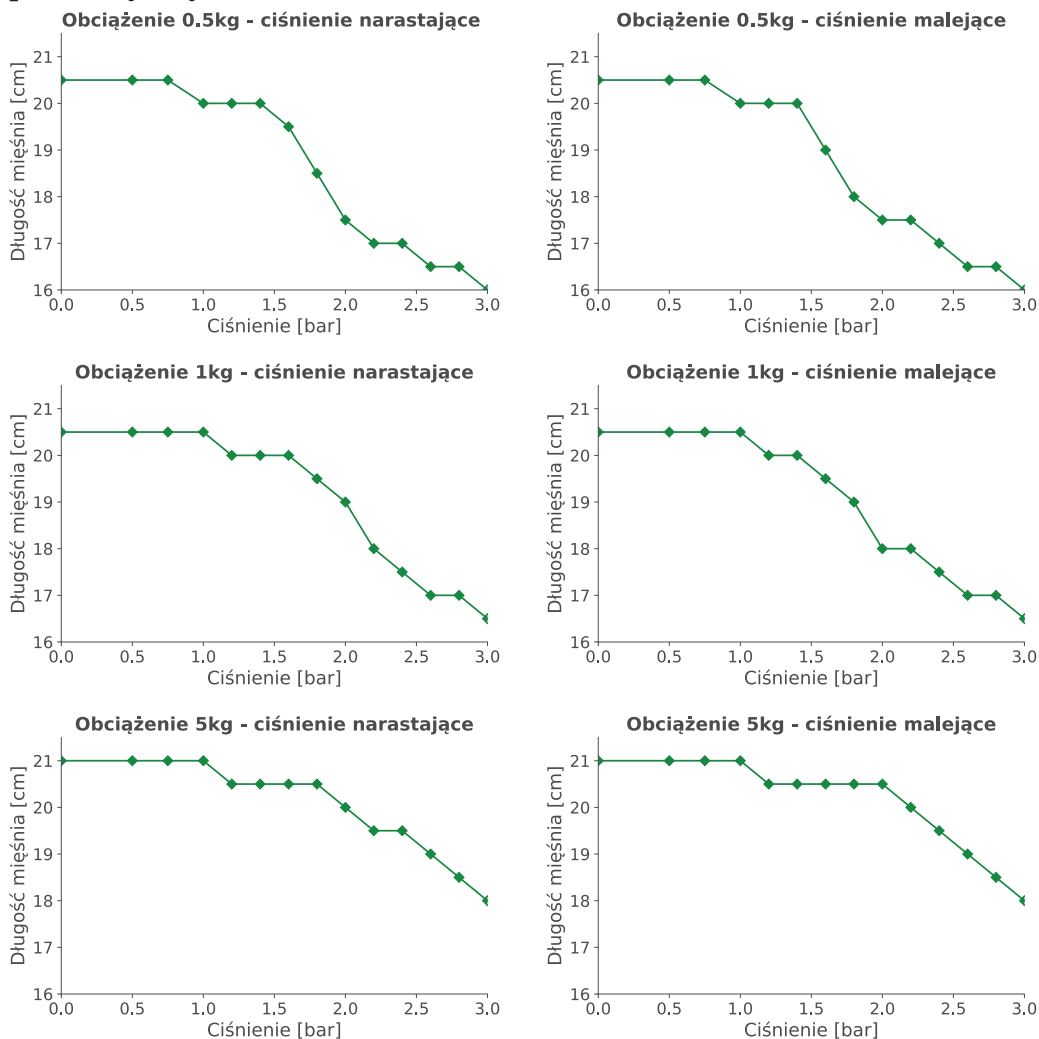
- zakres ruchu, zmianę długości cięgien oraz wartość siły spoczynkowej,
- dynamikę mięśni – mniejsze mięśnie charakteryzowała wyższa siła napięcia, zaś większe – wzrost objętości i powolniejsze działanie.

Rys. 3. Przykład jednego z opracowanych i wykonanych mięśni pneumatycznych



Źródło: opracowanie własne autora

Rys. 4. Charakterystyki statyczne opracowanych i wykonanych mięśni pneumatycznych



Źródło: opracowanie własne autora

Bazując na wynikach ww. eksperymentów, wykonano mięśnie o długości przewodu 17,5 cm i oplotu 20,5 cm, które po przyłożeniu siły o wartości początkowej 5 N zapewniały ruch roboczy 4 cm. Stanowiło to gwarancję prawidłowego ruchu cięgien chwytaka i pozwalało na bezpieczną pracę układu przy ciśnieniach roboczych do 3 barów.

W celu udokumentowania poprawności funkcjonowania opracowanych i wykonanych mięśni, na rys. 4 przedstawiono wyniki testów statycznych, podczas których do mięśnia usytuowanego pionowo przykładano obciążenia wynoszące

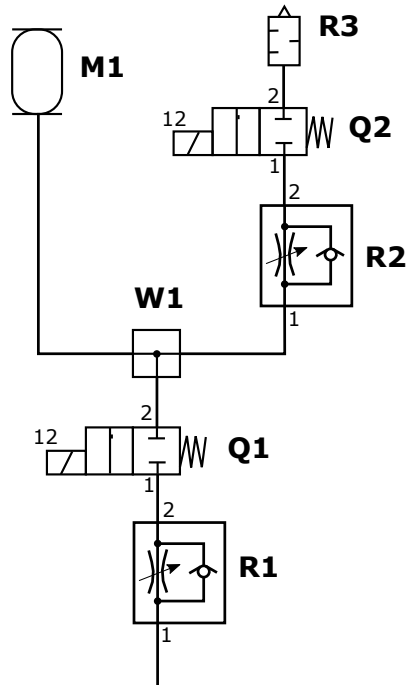
odpowiednio: 0,5 kg, 1 kg, 2 kg i 5 kg. Następnie za pomocą manualnego reduktora ciśnienia zwiększano lub redukowano ciśnienie wewnątrz mięśnia w zakresie od 0 do 3 barów, jednocześnie mierząc jego długość (eksperymenty wykonano przy rozdzielczości ciśnienia roboczego powietrza, wynoszącego 0,2 bara).

Zespół dziewięciu mięśni McKibbena wraz ze sprężynami prostującymi palce chwytaka, został zamontowany u podstawy opracowywanego chwytaka (rys. 5). W celu prawidłowego napięcia cięgien mięśnie te zostały połączone z jednostkami ruchowymi za pomocą śrub rzymskich, ułatwiając tym samym kalibrację mechaniczną urządzenia. Do sterowania pracą mięśni użyto elektrozaworów dwudrożnych kontrolujących przepływ powietrza do (lub od) siłowników. Ze względu na znaczne stałe czasowe dla pojedynczego cyklu pracy elektrozaworu układ wyposażono w dodatkowe elementy – zawory dławiąco-zwrotne, które pozwalają na precyzyjne sterowanie pracą mięśni pneumatycznych.

Rys. 5. Konstrukcja mechaniczna: a) układ napędowy chwytaka, b) układ pneumatyczny mięśnia



a)



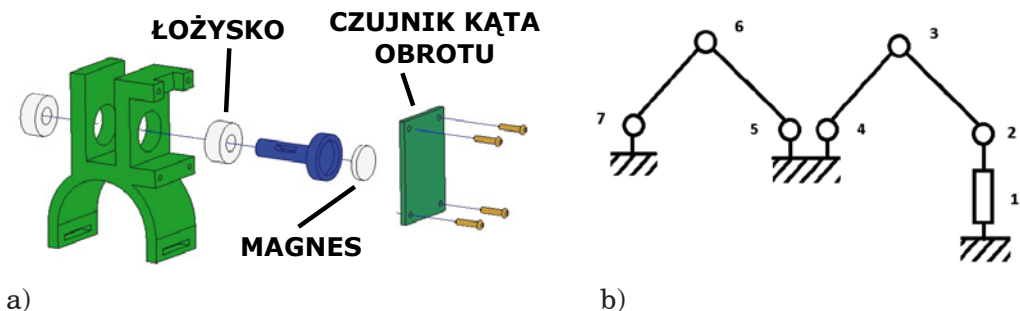
b)

Źródło: opracowanie własne autora

Fantom

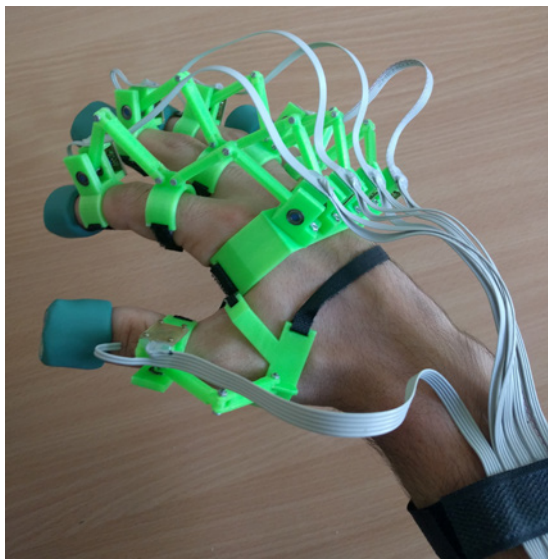
Urządzeniem kontrolującym pracę chwytaka jest fantom. Stanowi on szkielet umieszczany na dłoni operatora, który za pomocą odpowiednio rozmieszczonych czujników dokonuje pośredniego pomiaru kątów zgięcia w stawach. Fantom

Rys. 6. Struktura fantomu: a) mechanizm pomiarowy, b) łańcuch kinematyczny palca



Źródło: opracowanie własne autora

Rys. 7. Konstrukcja fantomu nakładanego na dłoń operatora



Źródło: opracowanie własne autora

zaprojektowany do obsługi chwytaka składa się z pięciu łańcuchów kinematycznych. Łańcuch zilustrowany na rys. 6 dotyczy palców II-V i rozpoczyna się

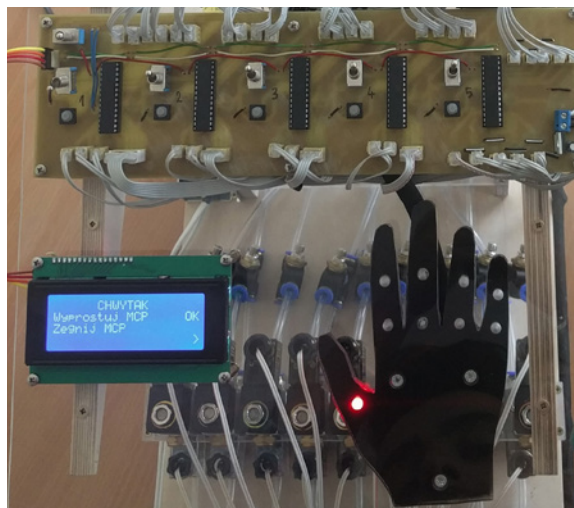
w węźle 1. (łańcuch kciuka obejmuje węzły 5–7). Węzeł 1. zamontowany jest do podstawy umieszczanej na śródreczu (rys. 7). Pozwala to na dostosowanie kąta obrotu w trakcie czynności odwiedzenia lub przywiedzenia palców. Pozostałe węzły pozwalają na ruchy zależne od stanu zgięć stawów palców, przy czym elementy 4. i 5. znajdują się na paliczku bliższym, a element 7. na paliczku środkowym. W węzłach 2. i 7. umieszczone zostały magnetyczne czujniki kąta obrotu, działające identycznie jak zastosowane w chwytaku (rys. 6). Ze względu na fakt, iż tym razem mierzony kąt nie jest bezpośrednim kątem zgięcia danego stawu, lecz kątem zgięcia ramion fantomu, układ sterujący przeskalowuje wartości z pomiarów na zbiór wartości względnych, odwzorowujących kinematykę fantomu i palca.

W celu odwzorowania zmysłu dotyku zastosowano specjalne nakładki, zakładane na opuszki palców operatora – rys. 7. Umieszczone w nich mikrosilniki imitują zmysł dotyku poprzez sterowanie amplitudą wibracji, w zależności od wartości sił zmierzonych na opuszkach chwytaka.

Interfejs użytkownika i algorytm sterujący

Ze względu na różnice anatomiczne w budowie ludzkiej dłoni, w całej populacji, a przede wszystkim różne długości kości, przewidziano możliwość kalibracji zarówno chwytaka, jak i fantomu. Służy do tego celu interfejs użytkownika, którego widok przedstawiono na rys. 8. Nadrzędny algorytm sterujący (zaimplementowany na mikrokontrolerze sprzężonym z czujnikami i elementami sterującymi) formuje dla operatora kolejne sygnały zginania lub prostowania stawów

Rys. 8. Widok interfejsu użytkownika w procesie kalibracji chwytaka

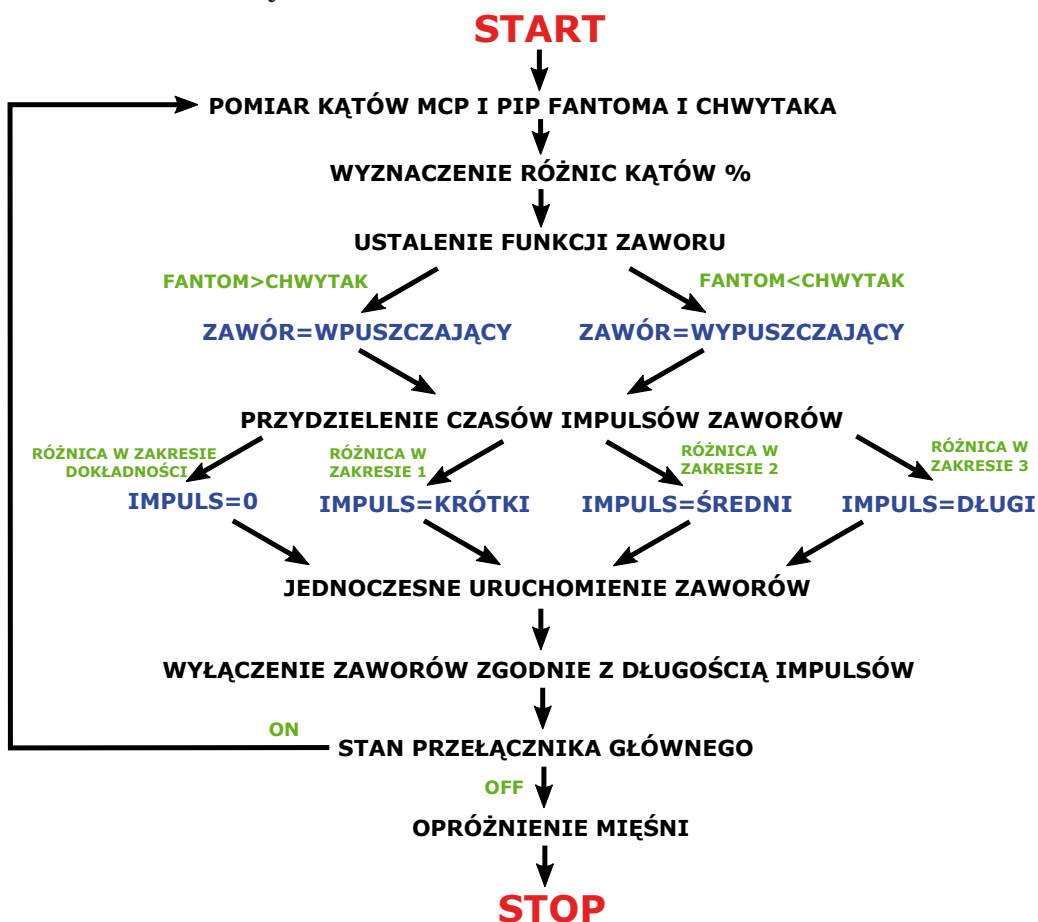


Źródło: opracowanie własne autora

palców, które z reguły wystarczy zatwierdzić za pomocą odpowiednich przycisków, umieszczonych na płycie wyświetlacza. Widoczny na rys. 7 i oznaczony kolorem czarnym element w obrysie dłoni ma za zadanie ułatwienie procesu kalibracji urządzeń, poprzez wizualizację kalibrowanych stawów.

Cały proces kalibracji polega na zginaniu i prostowaniu kolejnych stawów, zarówno dłoni, jak i chwytaka, w pełnym zakresie kątów zgięcia. Zakresy ruchów, zapisywane w układzie z mikrokontrolerami, są następnie odpowiednio przeskalowywane, w celu odwzorowania ruchów chwytaka i ich skorelowania z ruchami fantomu. Dodatkową zaletą procesu kalibracji jest możliwość ograniczenia poszczególnych zakresów ruchów chwytaka, co – w odniesieniu do pełnego zakresu ruchów fantomu – skutkuje poprawą rozdzielczości sterowania.

Rys. 9. Bazowy algorytm sterujący zaimplementowany w mikroprocesorze demonstratora chwytaka



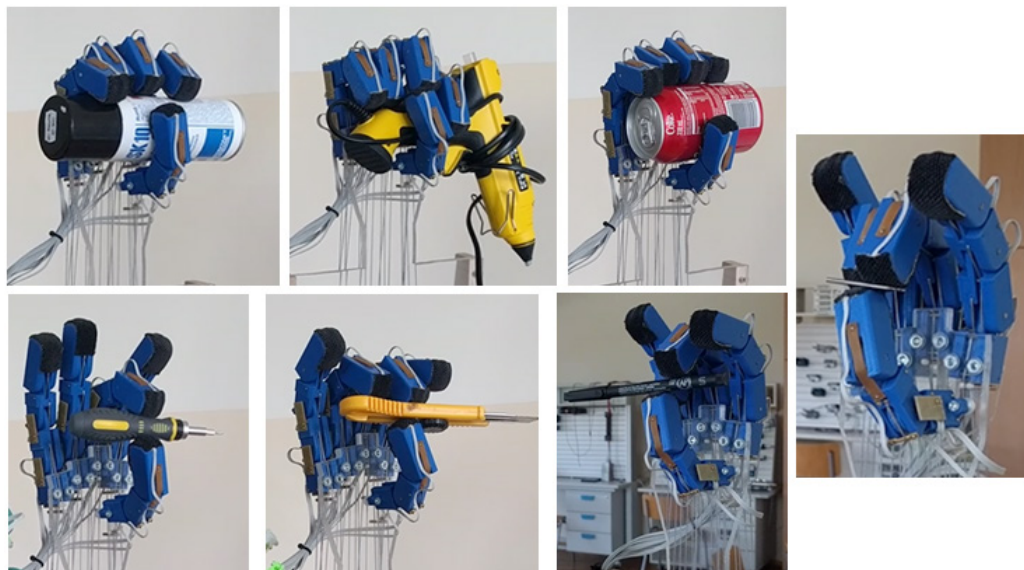
Źródło: opracowanie własne autora

W celu umożliwienia pracy demonstratora chwytaka został również opracowany, a następnie zaimplementowany w mikrokontrolerze, bazowy algorytm sterujący (rys. 9). Działanie algorytmu ogranicza się do gromadzenia sygnałów z czujników kąta obrotu chwytaka i fantomu, przy czym mierzone wartości są przeskalowywane w taki sposób, aby można było je wyrazić w procentach. Kolejnym krokiem, wynikającym z algorytmu, jest porównanie zakresów kątów zgięcia stawów i przegubów, w celu ustalenia parametrów startowych elektrozaworów – w tym przypadku przepływu czynnika roboczego (w kierunku do wejścia lub od wyjścia mięśni pneumatycznych). Następnie, na podstawie wyników analizy porównawczej zakresów kątów, ustalany jest czas impulsu złączającego poszczególne zawory, po upływie którego wskazane zawory są wyłączane. Selektywne wyłączanie elektrozaworów jest wykonywane przy użyciu wewnętrznych przerwań mikrokontrolerów, co pozwala na znaczące skrócenie czasu obsługi układu pneumatycznego.

Wyniki

Przedstawiony w artykule, a zrealizowany w ramach pracy dyplomowej, chwytak antropomorficzny posiada zdolności ruchowe wysoce odwzorowujące funkcjonowanie ludzkiej dłoni. Jego praca pozwala na płynną manipulację

Rys. 10. Dokumentacja graficzna operacji chwytania w trakcie testów urządzenia



Źródło: opracowanie własne autora

przedmiotami o różnych kształtach i rozmiarach – szczególnie satysfakcjonujące rezultaty uzyskuje się podczas operacji chwytania (rys. 10). Zaimplementowany w mikrokontrolerze, bazowy algorytm sterujący, gwarantuje dokładność sterowania na poziomie $\pm 2,5^\circ$. Wynik ten jest jednak wysoce uzależniony od jakości zastosowanych elektrozaworów, których m.in. czasy w różnych cyklach pracy wynikają w dużej mierze od uwarunkowań ekonomicznych oferowanych produktów. Użyte zawory dławiająco-zwrotne zwiększyły precyzję pracy poszczególnych palców chwytaka, lecz jednocześnie zmniejszyły prędkość działania zastosowanych mięśni pneumatycznych. Stąd też należy podkreślić, że uzyskany wynik jest pewnego rodzaju kompromisem, pomiędzy wskazanymi parametrami kalibracji układu pneumatycznego. Niemniej jednak – z punktu widzenia założeń demonstratora – może on zostać uznany za w pełni satysfakcjonujący.

Uzupełniając powyższe stwierdzenia, warto podkreślić, że zastosowanie sprzężenia zwrotnego od siły nacisku palców, dostarcza do operatora serię dodatkowych informacji, w zakresie rodzaju kontaktu chwytaka z obiektem manipulowanym (odpowiedni, zbyt wysoki, zbyt niski, etc.), co znacząco wpływa na precyzję, niezawodność i pewność wykonywanych ruchów, która rozwijana jest znacząco, wraz z czasem nabywania przez operatora doświadczenia na stanowisku pracy.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono opracowane i wykonane stanowisko demonstratora układu z chwytakiem antropomorficznym, napędzanego za pomocą mięśni pneumatycznych McKibbena i wysterowywanego przy użyciu fantomu. Przedstawiono konstrukcję mechaniczną oraz zasadę poruszania poszczególnymi palcami chwytaka za pośrednictwem układu ciągnowego. Zgodnie z założeniem, jako jednostkę napędową wykorzystano zbudowane oraz poddane testom statycznym, mięśnie pneumatyczne. Zaproponowano również prostą regułę układu imitującego zmysł dotyku opracowanego i wykonanego fantomu. Przedstawiono i wyjaśniono bazowy schemat działania algorytmu sterującego stanowiskiem demonstratora, jak również wyniki testów, w zakresie właściwości motorycznych chwytaka, które okazały się w pełni satysfakcjonujące z punktu widzenia koncepcji zastosowanych rozwiązań. W artykule wskazano również na potencjalne obszary kolejnych badań naukowych i prac rozwojowych usprawniających układ demonstratora, do których zaliczono:

1. testy porównawcze różnych rodzajów napędów z grupy sztucznych mięśni,
2. określenie wpływu regulatorów rozmytych, sztucznych sieci neuronowych i innych metod na pracę chwytaka,
3. badania celowości wykorzystania niekonwencjonalnych sygnałów pomiarowych do sterowania pracą chwytaka, takich jak EMG, EEG, etc.

Podsumowując, należy podkreślić, że przedstawiony chwytak antropomorficzny może znaleźć szerokie zastosowanie na licznych stanowiskach pracy

z udziałem osób niepełnosprawnych, których dysfunkcja polega na znacznym osłabieniu siły ich układu mięśniowego. Użycie opracowanego i wykonanego chwytaka antropomorficznego umożliwi wykorzystanie go w procesach wymagających różnej precyzji i siły działania, przy nadrzędnym i bezwarunkowym kryterium zachowania bezpieczeństwa operatora/pracownika. Konstrukcja fantomu nie obciąża – co niesłychanie ważne – dłoni użytkownika, tym samym pozostawiając jej pełną swobodę ruchową, nie zwiększając jej dysfunkcji. Dodatkowo, możliwość kalibracji czyni urządzenie uniwersalnym pod względem różnic anatomicznych wynikających z budowy ciała osób je użytkujących.

Warto podkreślić, że opisane rozwiązania w sposób zdecydowany (lub wręcz konieczny) powinny zostać wdrożone do wybranych procesów przemysłowych, dając osobom niepełnosprawnym możliwość ich zatrudnienia w miejscach, w których do tej pory nie mogły być nawet brane pod uwagę ze względu na swoje dysfunkcje. Należy więc zwrócić uwagę, że uniwersalność i elastyczność w zakresie modyfikacji urządzenia z całą pewnością mogłyby poszerzyć liczbę opisanych zastosowań, a tym samym stać się jeszcze bardziej użytecznymi dla osób z dysfunkcjami pragnącymi znaleźć pracę w przemyśle.

Bibliografia

- Ariyanto M., Munadi, Haryadi G. D. i in., *A low cost anthropomorphic prosthetic hand using DC micro metal gear motor*, „8th IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering” 2008
- Bullock I. M., Dollar A. M., *Classifying human manipulation behavior*, „IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)” 2011
- Cutkosky M. R., *On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks*, „IEEE Trans. Robot. Autom.” 1989
- Daerden F., Lefeber D., *Pneumatic artificial muscles: Actuator for robotics and automation*, „European Journal for Mechanical and Environmental Engineering” 2002, vol. 47
- Kumar P. S., *Top three predictions for humanoid robots in 2019*, www.yourstory.com/2018/12/top-three-predictions-humanoid-robots-2019, [dostęp z dnia: 28.01.2019]
- Malm T., *Guidelines to make safe industrial robot systems*, www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2017/VTT-R-01109-17.pdf, s. 11–13, [dostęp z dnia: 28.01.2019]
- Redman T. R., *The design of a robotic hand with multiple actuators for children*, www.eprints.soton.ac.uk, s. 34–38, [dostęp z dnia: 28.01.2019]
- Vogl Wayne, Mitchell Adam W. M., Tibbits R. i in., *Gray. Anatomia. Podręcznik dla Studentów*, t. I, Edra Urban & Partner, 2016

Netografia

www.jhuapl.edu/prosthetics/medical/default.asp, [dostęp z dnia: 28.01.2019]

www.openhandproject.org, [dostęp z dnia: 28.01.2019]