

doi:10.15199/48.2023.11.34

Wykorzystanie ruchu dłoni w przestrzeni do sterowania urządzeniami mechatronicznymi - projekt systemu

Streszczenie. Praca poświęcona jest zagadnieniu sterowania dowolnym urządzeniem mechatronicznym poprzez ruch dłoni, który monitorowany jest układem sensorów. Sygnały z sensorów przekazywane są do układu mechatronicznego bezprzewodowo, z wykorzystaniem interfejsu bluetooth. Na obecnym etapie badań założonym celem było opracowanie układu śledzenia położenia dłoni, poprzez czujniki akcelerometryczne i żyroskopowe. Opracowany został układ rejestracji i transmisji sygnałów z czujników pomiarowych zamontowanych na rękawicy. Sygnały te po wstępnym przetworzeniu przekazywane są do układu wykonawczego, którym na obecnym etapie badań jest układ akustyczny. W pracy przedstawiany jest zrealizowany układ oraz wyniki wykonanych testów.

Abstract. The work is devoted to the issue of controlling any mechatronic device by hand movement, which is monitored by a system of sensors. The signals from the sensors are transmitted to the mechatronic system wirelessly, using the bluetooth interface. At the current stage of research, the assumed goal was to develop a hand position tracking system through accelerometer and gyro sensors. A system for recording and transmitting signals from measuring sensors mounted on the glove has been developed. These signals, after initial processing, are transferred to the executive system, which at the present stage of research is the acoustic system. The work presents the implemented system and the results of the tests performed. (*The use of hand movement in space to control mechatronic devices - system design*).

Słowa kluczowe: sterowanie ruchem dłoni, czujnik MPU6050, bluetooth, system mechatroniczny.

Keywords: hand motion control system, MPU6050 sensor, bluetooth, mechatronic system.

Wstęp

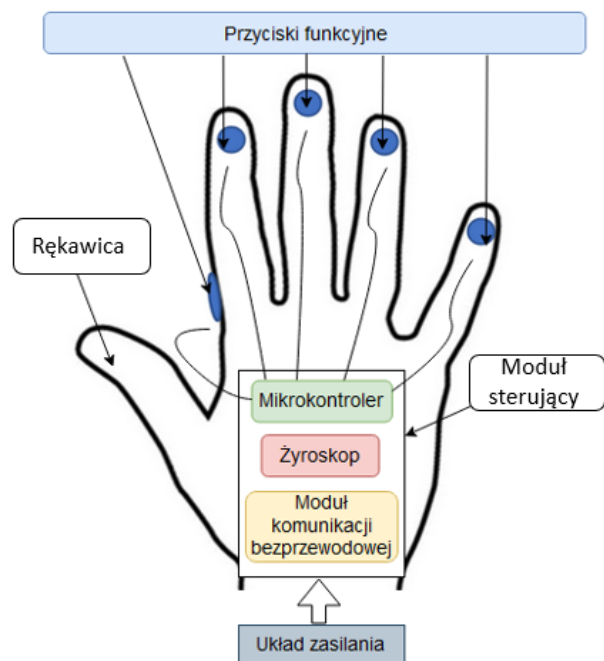
Rozwój informatyki, mikroelektroniki i systemów mikroelektromechanicznych (*microelectromechanical systems*, MEMS) otwiera nowe możliwości w zakresie sterowania pracą różnych urządzeń [4,10]. Z lotnictwa wojskowego znane jest wykorzystanie ruchu gałki ocznej pilota do sterowania urządzeniami pokładowymi. Znane jest również wykorzystanie ruchu gałki ocznej osoby niepełnosprawnej do sterowania kursorem na ekranie monitora komputera [5,6,7]. Innym możliwym rozwiązaniem sterowania pracą urządzeń jest wykorzystanie ruchu dłoni. Przypadkiem bardziej złożonym jest wykorzystanie gestów. Sterowanie poprzez gesty może być wykorzystany w przypadku robotów [1,3], czy urządzeń codziennego użytku, takich jak komputery, smart TV, czy konsole do gier. Ten sposób komunikacji użytkownika z urządzeniami pozwala wyeliminować klawiaturę, pilota czy joystick'a, których użycie w pewnych sytuacjach wymaga zbyt dużej koncentracji jego uwagi.

Sterowanie urządzeniem poprzez gesty wymaga; obserwacji ruchów dłoni, przetworzenia wyników obserwacji na sygnały (położenia kątownego oraz przyspieszenia liniowego) i przesłania ich do układu wykonawczego, w którym realizowane są funkcje przypisane odpowiednim gestom. Zatem sterowanie urządzeniem np. manipulatorem poprzez gesty wiąże się z koniecznością ich interpretacji i uwzględnieniem tego w stosowanych algorytmach przetwarzania sygnałów [2].

Cechą wspólną wszystkich tych rozwiązań jest są dwa bloki funkcyjne. Pierwszy, blok czujnikowy wyposażony jest w odpowiednie czujniki, śledzące ruch gałki ocznej bądź dłoni oraz układ przetwarza zebranych informacji, które przesyła w czasie rzeczywistym do drugiego bloku, pełniącego rolę wykonawczą. W przypadku sterowania gestami zadaniem bloku czujnikowego jest zbieranie na bieżąco informacji o położeniu bądź ruchu poszczególnych części dłoni.

W bloku wykonawczym odebrane informacje przetwarzane są na sygnały, które sterują zamontowanymi w nim aktuatorami. W ten sposób urządzenie wykonawcze realizuje wydawane mu polecenia.

Zagadnieniem przedstawianym w tym artykule jest wykorzystanie ruchu dłoni, a w szczególności gestów do sterowania pracą urządzeń mechatronicznych. Jest to próba wyjścia naprzeciw rosnącemu zainteresowaniu wykorzystywaniu gestów, jako intuicyjnego sposobu obsługi interfejsów. Każdemu gestowi można przyporządkować określone z góry funkcje sterowanego urządzenia. Interfejsy gestów są opracowywane w postaci pierścieni, opasek czy też specjalnych rękawic („Wired glove”, „Data glove” lub „Cyber glove”), nakładanych na dłoń operatora. My w naszym opracowaniu stosujemy rękawicę (rys.1), która pełni funkcję platformy dla modułu sterującego zbudowanego z bloku czujników, mikrokontrolera, układu komunikacji bezprzewodowej, zasilania bateryjnego, oraz przycisków funkcyjnych.

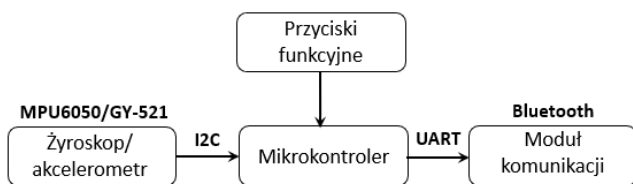


Rys. 1. Koncepcja rękawicy z modułem sterowania

W artykule przedstawiono etapy projektowania, implementacji oraz testowania opracowanego systemu wykorzystującego ruch dłoni w przestrzeni do sterowania urządzeniami mechatronicznymi. Głównym założeniem projektu było wdrożenie systemu prezentującego możliwości sterowania poprzez ruch dłoni w przestrzenie wygenerowaną w urządzeniu fają akustyczną. Obrót dłoni wokół jednej z osi obrotu powoduje zmianę wysokości generowanego dźwięku. Modulacja częstotliwości generowanego dźwięku pozwala na „usłyszenie zmian położenia dłoni”, gdyż obrót ręki wokół jednej z osi obrotu spowoduje zmianę wysokości generowanego dźwięku. Wysokość dźwięku jest atrybutem, który pozwala uszeregować dźwięki w skali od niskich do wysokich. [11].

Projekt modułu sterowania

Głównym elementem całego urządzenia jest moduł sterowania, który realizuje m.in. odczyt danych o położeniu dłoni w przestrzeni. Zarejestrowane dane są następnie przesłane do modułu wykonawczego, które przetwarza otrzymane informacje na sygnały sterujące. W układzie zastosowano sensor MEMS zawierający zarówno akcelerometr oraz żyroskop. Sensory MEMS to mikro-mechaniczne urządzenia do pomiaru prędkości kątowej obiektów obracających się wokół jednej z osi X (roll), Y (pitch) lub Z (yaw). Aby uzyskać pozostałe parametry ruchu należy posłużyć się całkowaniem, które pozwoli na pomiar wielkości kąta obrotu, oraz różniczkowaniem pozwalającym wyznaczyć przyspieszenie kątowe. Ze względu na niewielki rozmiar oraz dostępność zdecydowano się na użycie mikroelektronicznego układu MPU6050/GY-521 [8,9]. Wbudowana w układzie MEMS sprzętowa jednostka DMP (Digital Motion Processor) dokonuje fuzji danych z wszystkich czujników, co umożliwi określenie konkretnego położenia względem Ziemi. Dzięki temu mikrokontroler jest mniej obciążony. Jednostkę DMP można zaprogramować tak, aby wykorzystywała do swoich obliczeń również zewnętrzny magnetometr. Wykorzystanie jednostki DMP pozwala również na niwelację zjawiska dryfu żyroskopowego pojawiającego się w przypadku obserwacji zmian następujących w powolny sposób. Komunikacja mikrokontrolera z układem MEMS realizowana jest z użyciem magistrali I2C. Tor komunikacyjny przedstawiony został na rysunku 2.



Rys. 2. Tor komunikacyjny podzespołów modułu sterującego

Zastosowanie modułu żyroskopu zapewniło określenie położenia dłoni w przestrzeni. Jest to jednak możliwe tylko w przypadku umieszczenia żyroskopu na dłoni. W tym celu opracowano rękawicę, pełniącą jednocześnie rolę platformy dla zaprojektowanego modułu sterującego. Poglądowy schemat takiego rozwiązania przedstawiono na rysunku 1. Układ elektroniczny został umieszczony na płytce PCB, którą zamocowano na rękawicy. W module sterowania zastosowano mikrokontroler Arduino Nano. Mikrokontroler ten cechują niewielkie rozmiary, odpowiednia dla projektu ilość wejść cyfrowych, oraz interfejsy komunikacyjne, pozwalające na przesyłanie danych do modułu wykonawczego, ale również odczyt informacji o położeniu dłoni z żyroskopu. Moduł sterujący zasilany jest z akumulatora litowo-polimerowego o napięciu nominalnym 3,7V. Ważną kwestią jest napięcie pracy mikrokontrolera

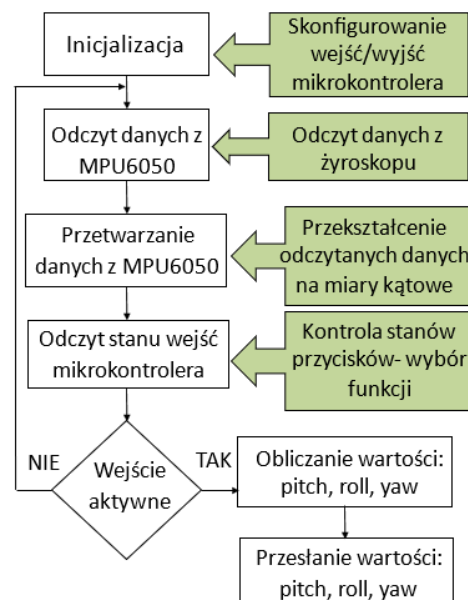
oraz urządzeń zewnętrznych. Zasilanie mikrokontrolera powinno odbywać się ze źródła napięcia w przedziale 7-12V. W celu zapewnienia odpowiedniej wartości napięcia, konieczne jest więc zastosowanie odpowiedniej przetwornicy pozwalającej na podwyższenie napięcia z akumulatora.

Rękawica sterująca została wyposażona dodatkowo w pięć przycisków funkcyjnych, z których każdy posiada swoją własną, odmienną funkcjonalność:

- 1 – określa stan gotowości układu do przesyłania danych, tylko po jego naciśnięciu dane są wysyłane, dzięki czemu każdy ruch, który ma zostać odczytany, musi zostać najpierw potwierdzony.
- 2 – przesyłania danych kąta yaw.
- 3 – przesyłania danych kąta pitch.
- 4 – przesyłania danych kąta roll.
- 5 – zresetowanie pamięci, ustawienie wartości z kątów yaw, pitch, roll na wartości domyślne.

Przesyłanie danych pomiędzy modułem sterującym, a modułem wykonawczym zrealizowano przy użyciu bezprzewodowej technologii bluetooth. Jest to technologia, która nie wymaga specjalistycznego sprzętu. W projekcie rozważano również komunikację Wi-Fi, która pozwala na transmisję na większe odległości, jednak jest bardziej energochłonna, przez co konieczne byłoby stosowanie większych akumulatorów zasilających układ rękawicy. Moduły opracowanego systemu należało początkowo ze sobą skomunikować oraz sparować na podstawie wpisanych adresów. Kolejne parowania podczas włączenia układu następowały już samoczynnie. Użyty układ Bluetooth wymienia dane z mikrokontrolerem poprzez interfejs komunikacji UART i może pracować w trybie zarówno Master oraz Slave. Wykorzystuje logikę 3,3V.

W ramach projektu opracowano również program realizujący zestaw funkcji obsługi zastosowanych układów oraz zestaw algorytmów obliczeniowych. Opracowany program sterujący, którego struktura została pokazana na rysunku 3, został zaimplementowany w mikrokontrolerze.



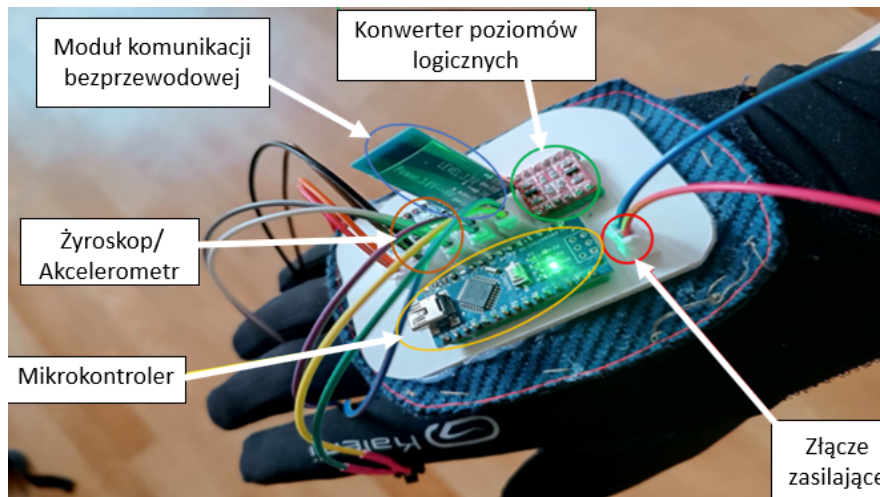
Rys. 3. Struktura programu sterującego

Program składa się z kilku części. Na początku wykonane są czynności inicjalizacyjne, takie jak skonfigurowanie wejść oraz wyjść mikrokontrolera. Rozpoczęcie transmisji I2C oraz UART oraz właściwa parametryzacja komunikacji. W kolejnym kroku realizowana

jest cykliczna pętla, w której następuje odczyt wartości z żyroskopu. Odczytane dane następnie przeliczone są na odpowiednie wartości kątowe, pozwalające obliczyć względne położenie dłoni. Jako pozycja początkowa przyjmowana jest pozycja, w której układ zostaje uruchomiony. Następnie względem tej pozycji obliczane jest położenie dłoni. Uwarunkowane jest to jednak naciśnięciem przycisku pozwalającego na przesłanie danych. Dane więc przesyłane są tylko w momencie naciśnięcia przycisku pozwalającego na transmisję danych. Brak naciśnięcia przycisku powoduje pracę w pętli zamkniętej, gdzie układ sprawdza aktualne położenie, jednak nie przesyła danych

do układu wykonawczego. Dzięki takiemu rozwiązaniu nie zostaną przesłane żadne dane bez odpowiedniego potwierdzenia, dzięki temu układ jest bardziej niezawodny i jest odporny na niechciane ruchy operatora. Zapewnia to również możliwość ruchu ręką bez zmiany stanu modułu wykonawczego.

Zaprojektowana oraz wykonana rękawica została przedstawiona na rysunku 4. Płytkę PCB umieszczono na odpowiedniej warstwie materiałowej stanowiącej dodatkową izolację. Materiał został przy pomocy rzepu połączony z rękawicą.



Rys.4. Rękawica – platforma dla modułu sterowania

Układ zasilający

Układ zasilający składa się z: akumulatora, przetwornicy, modułu do ładowania akumulatora oraz wyłącznika zasilania. Jako akumulator energii wybrany został akumulator Litowo-Polimerowy Akyga TP4056. Jest to akumulator łatwo dostępny na rynku, który cechuje bardzo wysoka wydajnością oraz powolne tempo samoistnego rozładowania się ogniów. Posiada również optymalną pojemność w stosunku do masy oraz wymiarów akumulatora. Pojemności zastosowanego akumulatora wynosi 650 mAh. Akumulator zabezpieczony jest przed nadmiernym rozładowaniem, przed przeladowaniem oraz przed zwarcie. Układ zasilania został zamknięty w obudowie wykonanej z filamentu PLA (kwas polimlekowy) w technologii druku 3D i umieszczony został na przedramieniu, celem odciążenia nadgarstka.

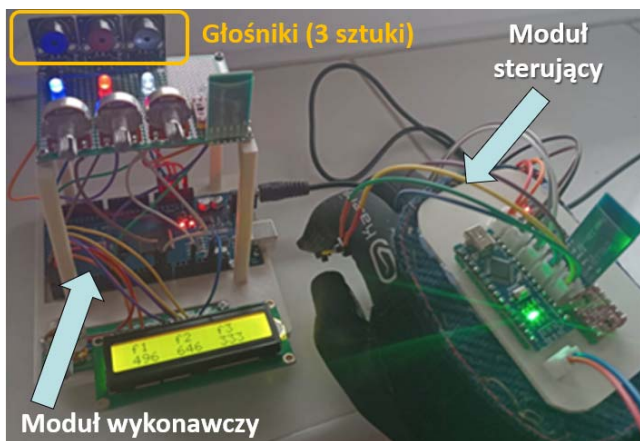
Projekt modułu wykonawczego

Moduł wykonawczy realizuje przetwarzanie odczytanych danych oraz steruje podłączonymi do mikrokontrolera urządzeniami. Opracowany moduł wykonawczy został przedstawiony na rysunku 5. Jako urządzenia wykonawcze zastosowano zestaw głośników, pozwalający na podstawie przebiegu prostokątnego o zadanej częstotliwości, generować falę dźwiękową o takiej samej częstotliwości. Ponadto moduł wykonawczy wyposażony jest w wyświetlacz LCD, na którym wyświetlana jest aktualna częstotliwość. Główną częścią modułu wykonawczego jest mikrokontroler. Układ pozwala na regulację częstotliwości sygnału prostokątnego dla trzech różnych urządzeń, dzięki czemu konieczne było wykorzystanie mikrokontrolera zawierającego przynajmniej 3 różne timery. Mikrokontroler Arduino Mega posiada wbudowanych 6 różnych timerów w konfiguracjach 8 lub 16 bitowych. Płytkę zawiera mikrokontroler ATmega2560, wyposażony w 54 cyfrowych

wejść/wyjść z czego 15 można wykorzystać jako wyjścia PWM (np. do sterowania silnikami) oraz 16 analogowych wejść. Układ taktowany jest sygnałem zegarowym o częstotliwości 16 MHz, posiada 256 kB pamięci programu Flash oraz 8 kB pamięci operacyjnej SRAM. Po przeanalizowaniu dostępnych mikrokontrolerów zdecydowano się na użycie Arduino Mega 2560, ze względu na możliwość dalszego rozwoju układu dzięki większej ilości timerów i w konsekwencji możliwości niezależnego sterowania większą ilością urządzeń.

W układzie użyto modułu głośnika pasywnego, które różnią się od głośników aktywnych tym, że za pomocą sygnału prostokątnego umożliwiają generowanie dźwięków o zmiennej częstotliwości.

Głównym zadaniem modułu wykonawczego jest odczyt odpowiednich informacji przesłanych z modułu sterującego. Następnie dane zostają przetworzone na sygnał prostokątny, który umożliwia wystawianie urządzeń wykonawczych. Odczytany zostaje również stan przycisków, które odpowiadają za uruchomienie danego głośnika. Wysterowana zostaje również odpowiednia dioda sygnalizacyjna. Moduł wykonawczy został umieszczony w obudowie wykonanej w technologii druku 3D z filamentu PLA. Podczas rozważań dotyczących materiału do druku wzięto pod uwagę przede wszystkim wymaganą wytrzymałość mechaniczną oraz wytrzymałość termiczną. Układ nie będzie obciążony dużymi siłami oraz nie będzie się nagrzewał, przez co PLA jest wystarczającym materiałem. Dzięki wykonaniu obudowy możliwe było umieszczenie w niej mikrokontrolera oraz wyświetlacza LCD. W górnej części umieszczona została płytkę prototypowa z otworami, do montażu układu elektronicznego. Układ komunikacji bezprzewodowej został umieszczony daleko od głośników celem zniwelowania potencjalnych zakłóceń pracy.



Rys. 5. Opracowany systemu, w którym wykorzystano ruch dłoni do sterowania urządzeniami mechatronicznymi

Każdy stopień obrotu dłoni odpowiada zmianie częstotliwości generowanego dźwięku o 1 Hz.

Testowanie opracowanego systemu

W trakcie realizacji kolejnych etapów projektowania systemu, testowano poprawność działania poszczególnych układów, z których zbudowano moduł sterujący oraz wykonawczy. Wyniki testów umożliwiły wprowadzanie modyfikacji zarówno sprzętowej, jak również programowej. Gotowy system testowano pod kontem weryfikacji działania każdego głośnika osobno, w tym regulację głośności dzięki funkcjom przycisków. Następnie przetestowano działanie wszystkich trzech osi, łącząc osie w pary. Sprawdzone również działanie układu oraz poprawność komunikacji z większej odległości. Na podstawie wyników testów stwierdzono, że opracowany system działa w sposób poprawny. Każda z osi powoduje sterowanie jednym z głośników. Ponadto sygnał jest utrzymywany niezależnie od pozostałych wskazań. Zmiana orientacji ręki przy wyłączonym głośniku nie wpływa na generowaną częstotliwość. Kolejnym etapem testów było sprawdzenie poprawności generowania fali pod względem dokładności generowanej częstotliwości. W tym celu użyto aplikacji na urządzeniu mobilnym. Poniżej przedstawiono tabelę, w której przedstawiono odchyłkę pomiarów pomiędzy wskazaniem, a wartością wyświetloną na urządzeniu mobilnym (tab. 1).

Tabela 1. Porównanie częstotliwości generowanej z rzeczywistością

Częstotliwość z aplikacji	Częstotliwość sygnału głośnika	Odchyłka
117 Hz	118 Hz	1 Hz
334 Hz	337 Hz	3 Hz
711 Hz	718 Hz	7 Hz
925 Hz	933 Hz	8 Hz
980 Hz	989 Hz	9 Hz

Podsumowanie

Opracowany system wykorzystujący ruchu dłoni w przestrzeni do sterowania urządzeniami mechatronicznymi działa zgodnie z założeniami. Zaprojektowana i wykonana rękawica wraz z modułem sterującym pozwala na określenie aktualnej pozycji dłoni w przestrzeni. Zastosowany w projekcie Arduino Mega zawiera sześć niezależnych timerów do generowania przebiegów o zmiennej częstotliwości, dzięki czemu możliwe jest sterowanie większą ilością urządzeń bez zmiany mikrokontrolera. Dodatkowo w projekcie rękawicy można użyć czujników tensometrycznych do pomiarów zgięcia palca w celu zniwelowania przycisków funkcyjnych. Pozwoli

to również na pełniejsze sterowanie systemem wyjściowym. Takie działanie pozwalałoby zwiększyć funkcjonalność urządzenia tworząc bazę gestów (różnych kombinacji ułożenia palców oraz dłoni).

Obecnie generowane przebiegi wykorzystywane są do sterowania układem akustycznym, ale wskazania odczytanych kątów można również przetworzyć na sygnał PWM o zadanym wypełnieniu. Opracowany system, uzupełniony o układ końcówki mocy, może zostać użyty do sterowania innym urządzeniem mechatronicznymi.

Dzięki wykorzystaniu ruchu dłoni do sterowania nie ma konieczności stosowania dużej ilości przycisków na urządzeniu wykonawczym, sterowanie może odbywać się tylko z wykorzystaniem ruchu dłoni. Komunikacja między człowiekiem, a urządzeniami elektronicznymi pozwala zbudować bogatszą interakcję między człowiekiem, a sterowanym układem. Maszyna będzie mogła przetworzyć mowę ludzkiego ciała na odpowiednie sygnały sterujące. Układy sterowania ręcznego mogą w niektórych rozwiązaniach zostać zastąpione sterowaniem bezprzewodowym, bez fizycznego kontaktu z maszyną.

Autorzy: dr inż. Paweł Kielan, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Mechatroniki ul. Akademicka 3, 44-100 Gliwice, E-mail: pawel.kielan@polsl.pl; inż. Jakub Krzus, E-mail: jakukrz516@student.polsl.pl.

LITERATURA

- [1] K. Divya, Sk. Sana., H. Bhavana, V. Vasanthi, K. Praveen Kumar, *Robotic Vehicle Control by Hand Gestures of Authorized Users*, In book: Proceedings of Third International Conference on Intelligent Computing, Information and Control Systems, DOI: 10.1007/978-981-16-7330-6_73.
- [2] R. Verma, R. Agrawal, N. Thuwal, N. Bohra, P. Saxena, *Human-to-Computer Interaction Using Hand Gesture Tracking System*, Proceedings of International Conference on Recent Trends in Computing, DOI: 10.1007/978-981-19-8825-7_43.
- [3] P. Kielan, T. Jastrzębski, *Zastosowanie akcelerometrów oraz czujników siły do sterowania manipulatorem zgodnie z ruchem dłoni*, Modelowanie Inżynierskie nr 53, ISSN 1896-771X, 2014.
- [4] F. Utaminigrum, P. P. Adikara, Y. A. Sari, D. Syauqy, and A. G. Hapsani, *Left-right head movement for controlling smart wheelchair by using centroid coordinates distance*, J. Theor. Appl. Inf. Technol., vol. 96, no. 10, pp. 2852–2861, 2018.
- [5] J. Sreedevi, M. Shreya Reddy, Dr. B. Satyanarayana, *EyeBall Movement based Cursor Control using Raspberry Pi and OpenCV*, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering 9(7):392-395, DOI: 10.35940/ijitee.G5187.059720.
- [6] Chandra B., Kanaga Suba Raja S., Rohit M., R. Sriram Vignesh, *EyeBall Movement Cursor Control Using OpenCV*, 2022 ECS - The Electrochemical Society, ECS Transactions, Volume 107, DOI: 10.1149/10701.10005ecst.
- [7] Gusti Pangestu, *EyeBall Movement Detection To Control Smart Wheelchair Using Eye Aspect Ratio (EAR)*, MATICS Vol 13, No 2 (2021): MATICS Department of Informatics Engineering DOI: 10.18860/mat.v13i2.12963.
- [8] A.Б. Буслаев, H.H. Кошелева, С.С. Белокопытов, *MPU6050 module control unit on the IC BUS based on a Microcontroller*, DOI: 10.36622/VSTU.2021.17.2.010.
- [9] Juwita Mohd Sultan, Nurul Huda Zani, Mohd Azuani, Siti Zuraidah Ibrahim, Azdiana Md Yusop, *Analysis of Inertial Measurement Accuracy using Complementary Filter for MPU6050 Sensor*, Jurnal Kejuruteraan 34(5):959-964, DOI: 10.17576/jkukm-2022-34(5)-24.
- [10] Seiji Hayashi, He Muxin, *Implementation of Remote Control of a Robot Arm by Hand Gestures*, 24th International Conference on Human-Computer Interaction, HCI 2022, DOI: 10.1007/978-3-031-06388-6_3.
- [11] Ozimek E. *Dźwięk i jego percepcja. Aspekty fizyczne i psychoakustyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Poznań (2002).