



Rękawica rzeczywistości wirtualnej. Budowa systemu śledzenia ruchu ręki oraz palców wykorzystywanego w technice rzeczywistości wirtualnej

Jarosław JANKOWSKI*, Hubert WELENC, Andrzej GRABOWSKI

*Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy,
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
* autor korespondencyjny, e-mail: jajan@ciop.pl*

Artykuł wpłynął do redakcji 08.05.2017 r.

Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 06.11.2017 r.

DOI 10.5604/01.3001.0011.7188

Streszczenie. System śledzenia ruchu ręki oraz palców jest powszechnie stosowany w immersyjnych aplikacjach rzeczywistości wirtualnej umożliwiając użytkownikowi symulacji interaktywne uczestnictwo poprzez manipulację wirtualnymi przedmiotami. W artykule zaprezentowano ww. system w postaci rękawicy wyposażonej w czujniki typu MEMS w celu rejestracji orientacji oraz marker wizyjnego systemu ruchu (przemieszczeń) w przestrzeni trójwymiarowej. Rękawica rzeczywistości wirtualnej została zintegrowana z oprogramowaniem Unity 3D do pracy w czasie rzeczywistym oraz przetestowana.

Słowa kluczowe: rękawica rzeczywistości wirtualnej, system śledzenia ruchu, rzeczywistość wirtualna, interfejs człowiek - komputer

1. WSTĘP

Rękawice rzeczywistości wirtualnej są naturalnym interfejsem komunikacji człowiek – komputer i w szczególności znajduje zastosowanie w aplikacjach rzeczywistości wirtualnej. Rękawica jako urządzenie śledzące ruch ręki i palców posiada ważną cechę jaką jest intuicyjność użytkowania, wymagana w interfejsie interakcji z wirtualnym światem. Główną zaletą tego typu urządzeń jest brak konieczności przyuczania do nowego sposobu interakcji powiększając poczucie obecności w symulowanym środowisku a tym samym prowadzi do zmniejszenia objawów choroby symulatorowej. Rękawice VR (ang. *Virtual Reality*) wykorzystywane są między innymi w aplikacjach szkoleniowych [1], do celów badawczych nad opracowywaniem interfejsów sterowania manipulatorami [2], w rehabilitacji [3] oraz w pracach nad dostosowywaniem stanowisk pracy do potrzeb osób niepełnosprawnych [4].

Komercyjnymi przykładami tego typu urządzeń są urządzenia CyberGlove II oraz CyberGlove III [5] firmy CyberGlove Systems LLC. Rękawice te wyposażone są w specjalne rezystancyjne sensory zgięcia (od 18 do 22 sensorów). Rękawica o największej liczbie sensorów dostarcza informacje m.in. o kącie zgięcia palców w trzech stawach oraz ich odwodzenia. Do bezprzewodowej komunikacji rękawice te wykorzystują technologię WiFi 2.4GHz, a częstotliwość odświeżania informacji o stanach sensorów osiąga 120Hz w najnowszej generacji rękawicy. Innego rodzaju czujników zgięcia palców wykorzystują rękawice 5DT Data Glove [6] (5 oraz 14 czujnikowa) firmy Fifth Dimension Technologies. Stosowane sensory poprowadzone wzdłuż palców (nad stawami) wykorzystują właściwości światłowodów.

Innym przykładem pobierania informacji o zgięciu palców jest zastosowanie kamer. Urządzenie o nazwie Leap Motion [7] firmy Leap Motion, Inc. wykorzystuje kamery pracujące w podczerwieni o kącie widzenia $180^{\circ} \times 180^{\circ}$. Urządzenie o niewielkich rozmiarach zamocowane na okularach projekcyjnych 3D poprawnie rozpoznaje ruchy wyłącznie widocznych członów kończyny górnej (przedramię, rękę, palce). Zastosowanie rękawicy z polami o różnych kolorach [8] bądź śledzenie kamerą przemieszczających się elementów ciągniętych przez palce [9] lub markerów umieszczonych na końcach palców również umożliwia rejestrację informacji o ruchach ręki.

Pomimo dużego zestawu możliwości, tylko najdroższe rękawice spełniają szczególne przypadki w których informacje o zgięciu palców w poszczególnych stawach oraz odwodzeniu dla każdego palca są potrzebne. Ze względu na ograniczone i sprecyzowane potrzeby co do funkcjonalności rękawicy VR pracownia rzeczywistości wirtualnej w CIOP-PIB opracowała, bezprzewodową rękawicę o niewielkim koszcie wytworzenia umożliwiającą interakcję z wirtualnymi przedmiotami w immersyjnych środowiskach.

2. RĘKAWICA RZECZYWISTOŚCI WIRTUALNEJ

2.1. Założenia do opracowania systemu śledzenia ruchu ręki i palców

Główne założenia dotyczące funkcjonalności rękawicy, które postawiono przed budową prototypu to:

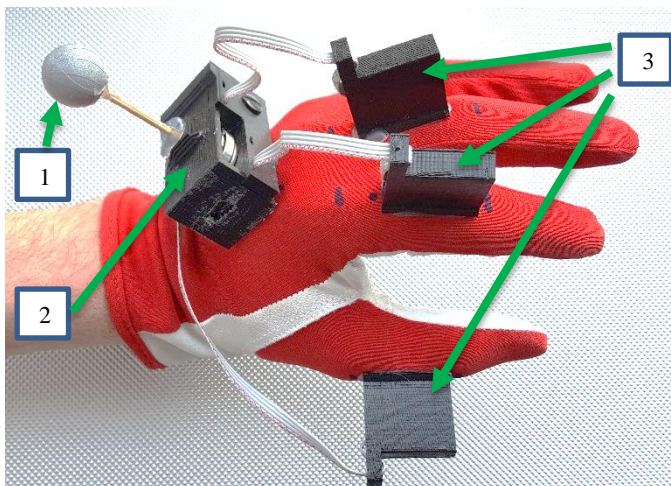
- dostarczenie informacji o podstawowych gestach: ręka otwarta, ręka zaciśnięta, wskazanie palcem wskazującym (palec wskazujący wyprostowany)
- zastosowanie zasilania akumulatorowego,
- zapewnienie łączności bezprzewodowej,
- dostarczanie nowych informacji o stanie ręki i palców co najmniej z częstotliwością 60Hz,
- użycie elementów, które nie powinny ograniczać ruchów palców oraz ręki,
- zamocowanie składowych elementów na wybranej rękawicy roboczej – zapewnienie komfortu użytkownika, zakładania oraz zdejmowania z ręki,
- integracja z wizyjnym systemem śledzenia ruchu,
- niewielki koszt wytworzenia.

2.2. Budowa rękawicy – systemu śledzenia ruchu ręki oraz palców

W celu spełnienia wymagań opracowano rękawicę (Rys. 1), którą wyposażono w 4 czujniki orientacji. Trzy czujniki zamocowano na paliczkach bliższych kciuka, palca wskazującego oraz palca środkowego. Dodatkowo czujnik orientacji umieszczono na zewnętrznej części śródreżca.

Poszczególne elementy elektroniczne zostały ukryte w przygotowanych i dopasowanych obudowach, których modele zostały przygotowane w darmowym oprogramowaniu Blender 3D i wykonanych w technologii druku 3D używając materiału ABS. Ze względu na wielkość zastosowanego czujnika orientacji wynika konieczność ułożenia czujnika w pozycji pionowej. Czujniki zostały połączone z układem sterującym rękawicy za pomocą elastycznej, czterożyłowej taśmy. Układ sterujący rękawicą umieszczony na śródreżcu składa się z mikrokontrolera oraz modułu Bluetooth. Całość została zasilona akumulatorem. Częstotliwość wysyłania informacji o stanie rękawicy wynosi 115Hz.

W celu integracji rękawicy z wizyjnym systemem śledzenia opisanym w publikacji [10] zamocowano marker pokryty odblaskowym materiałem odsuniętym od obudowy w celu zminimalizowania prawdopodobieństwa przesłonięcia markera przez samą obudowę.



Rys. 1. Rękawica rzeczywistości wirtualnej – system śledzenia ruchu ręki oraz palców.

- 1) Marker wizyjnego systemu śledzenia ruchu ręki w celu rejestracji przemieszczeń,
- 2) Układ sterujący systemem śledzenia ruchu ręki oraz palców wraz zasilaniem akumulatorowym oraz modulem czujników 9 DoF, 3) Moduły czujników 9 DoF umieszczone na paliczkach bliższych.

Fig. 1 Data Glove – hand and finger motion capture. 1) marker of visual motion capture for tracking displacement in 3d space, 2) Main control board of hand and finger motion capture equipped with battery and 9 DoF module sensor 3) 9 DoF sensor units placed on the proximal phalanges.

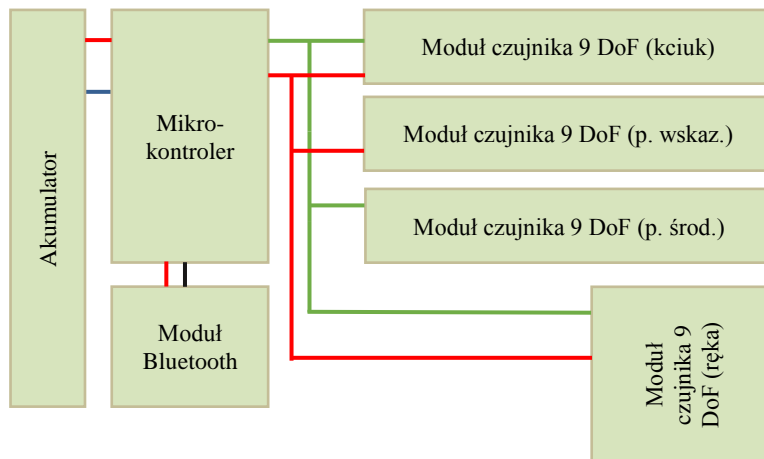
Wszystkie wymienione elementy zostały zamocowane na roboczej rękawicy wykonanej z elementów skóropodobnych oraz elastycznego i oddychającego materiału zapewniając komfort użytkowania, dodatkowo umiejscowienie wszystkich elementów na rękawicy znacznie skraca czas potrzebny na przygotowanie uczestnika do interaktywnej symulacji.

2.3. Aparatura

Do budowy układu sterującego rękawicą wykorzystano mikrokontroler 32 bitowy ARM Cortex-M4 kompatybilny z oprogramowaniem i bibliotekami popularnego środowiska programistycznego Arduino [11].

Mikroprocesor ten oprócz możliwości taktowania procesora do 120MHz, posiada wymagane dwie magistrale I2C (ang. *Inter-Integrated Circuit*), interfejs UART (ang. *Universal Asynchronous Receiver and Transmitter*) do komunikacji z modulem bezprzewodowym, wejścia analogowe do pomiaru poziomu naładowania akumulatora oraz port USB służący do programowania układu. Komunikację bezprzewodową zapewnia moduł Bluetooth o niewielkich rozmiarach z protokołem komunikacji SPP (ang. *Serial Port Profile*), zgodny napięciowo z zastosowanym mikrokontrolerem.

Moduł ten poprzez komendy AT ma możliwość zmiany konfiguracji pracy modułu, jego nazwy, kodu dostępu oraz prędkości transmisji (max. 921600 bps - baud per second).



Rys. 2. Schemat blokowy rękawicy rzeczywistości wirtualnej. Kolorem czerwonym oznaczono zasilanie, kolorem czarnym oznaczono linie RX oraz TX interfejsu UART pomiędzy mikrokontrolerem a modułem Bluetooth, kolorem zielonym oznaczono linie SCL oraz SDA magistrali I2C.

Fig. 2. Schema of data glove. Red color – power line, black color - RX and TX line of UART interface between Bluetooth module and microcontroller, green color – SCL and SDA line of I2C bus.

Akumulator w obudowie guzikowej o niewielkich rozmiarach napięciu 3,6V i pojemności 180mAh pozwala na ponad godzinną pracę układu. Czujnik orientacji 9 DoF (ang. Degrees of Freedom) jest modułem zawierającym magnetometr tj. czujnik pola elektromagnetycznego oraz zintegrowany czujnik akcelerometru i żyroskopu (wszystkie dokonują wybranego pomiaru w trzech osiach). Najważniejsze właściwości użytego magnetometru HMC5883L to komunikacja z wykorzystaniem magistrali I2C, zakres pomiarowy ± 8 Gaussów (regulowany w 8 stopniach), rozdzielczość 12 bitowa ze znakiem oraz max. częstotliwość odczytu równa 160Hz. Układ pomiaru przyspieszenia oraz prędkości kątowej MPU6050 [12] charakteryzuje się 16 bitową rozdzielczością dla każdej osi, niskim poborem prądu, interfejsem komunikacji I2C oraz konfigurowalnymi zakresami pomiaru.

Zakres pomiaru akcelerometru to $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$, natomiast żyroskopu to ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 $^{\circ}/s$. Schemat blokowy rękawicy został przedstawiony na Rys. 2.

2.4. Kalibracja czujników

Przed montażem czujników na rękawicy wymaganym jest przeprowadzenie kalibracji akcelerometrów, a następnie po umocowaniu na rękawicy, kalibracji żyroskopów oraz magnetometrów. Kalibracja akcelerometru polega na znalezieniu wartości przesunięcia pomiaru na wybranej osi tak, aby mierzone przyspieszenie ziemskie przyjmowało równe wartości w zakresie ujemnym oraz dodatnim czujnika. Kalibracja żyroskopu służy do wyznaczenia składowych stałych uchybu czujnika i jest wyliczana ze średniej n pomiarów przy zapewnieniu możliwie stabilnego ułożenia czujnika żyroskopu. Na końcu dokonujemy kalibracji magnetometru najlepiej w środowisku w którym rękawica będzie użytkowana i podobnie jak dla akcelerometru wyznaczamy stałą odchyłkę kalibracji zer dla każdej z trzech osi pomiaru. Wszystkie wyliczone przesunięcia dla poszczególnych czujników wprowadzone są do programu jako stałe parametry.

2.5. Oprogramowanie mikrokontrolera

Oprogramowanie sterownika zostało przygotowane w środowisku programistycznym Arduino. W programie mikrokontrolera można wyróżnić następujące elementy:

- deklaracja zmiennych i stałych parametrów (przypisane odpowiednie wartości kalibracyjne),
- konfiguracja magistrali I2C (uruchomienie dwóch magistral z prędkością taktowania linii SCL 400kHz),
- konfiguracja interfejsu UART (460800 bps),
- konfiguracja poszczególnych czujników: akcelerometr $\pm 4g$, żyroskop ± 2000 °/s, magnetometr $\pm 1,3$ Ga),
- ciągły odczyt z czujników z częstotliwością 330 Hz, uruchomienie filtra Madgwicka [13] wyznaczającego orientację w postaci kwaternionu dla każdego z czujnika orientacji oraz wysyłanie poprzez interfejs UART do modułu Bluetooth co drugiej wyliczonej ramki informacji o orientacji wszystkich czujników uzupełnione o informację poziomu napięcia na akumulatorze.

Zastosowany filtr Madgwicka którego kod został upubliczniony do darmowego wykorzystania jest oparty na kwaternionowej reprezentacji obrotów (eliminując ograniczenia Euler'owej reprezentacji rotacji).

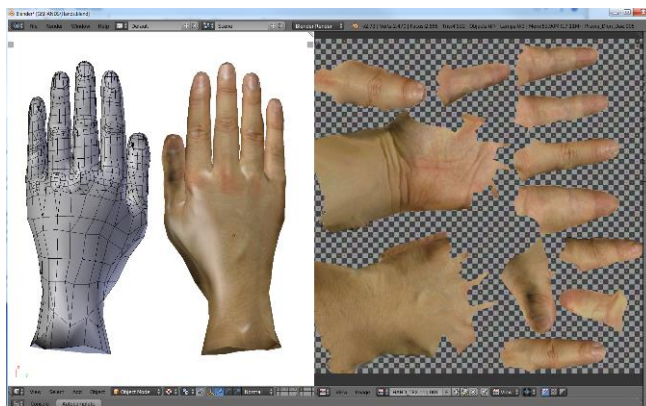
Zawiera on elementy odpowiedzialne za kompensację zniekształceń dla magnetometru oraz dryftu żyroskopu. Wykorzystuje analitycznie wyprowadzony i zoptymalizowany algorytm najszybszego spadku w celu wyznaczenia kierunku błędu żyroskopu przez różniczkowanie kwaternionu.

Główną zaletą jest poprawność działania przy niewielkiej częstotliwości pobierania danych z czujników.

2.6. Adaptacja rękawicy rzeczywistości wirtualnej w środowisku Unity 3D

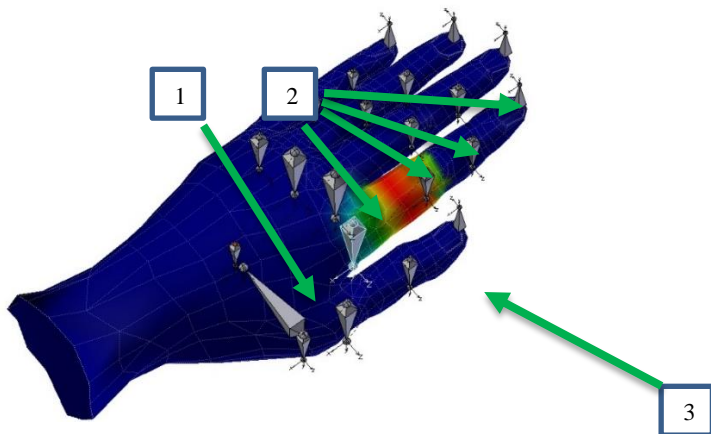
Rękawicę rzeczywistości wirtualnej podłącza się bezprzewodowo do komputera wyposażonego w moduł Bluetooth poprzez utworzenie wirtualnego portu szeregowego (COM). Po nawiązaniu połączenia z modułem Bluetooth rękawicy odczytując nową linię w buforze portu szeregowego mamy dostęp do informacji o orientacji poszczególnych czujników 9 DoF zamocowanych na rękawicy w postaci znaków ASCII. Ramka składa się z kolejno wypisanych rotacji (kciuk, palec wskazujący, palec środkowy oraz ręka) w postaci składowych kwaternionów rozdzielonych znakiem tabulatora (qw, qx, qy, qz). Ostatnimi elementami ramki jest informacja o stanie poziomu naładowania akumulatora (wartość od 1 do 100) numer ramki od rozpoczęcia kolejnej sekundy uruchomienia rękawicy oraz czas od uruchomienia rękawicy wyrażony w milisekundach.

W celu wizualizacji ruchu dłoni użytkownika opracowano model 3D ręki wraz z nałożoną teksturą o naturalnym kolorze (rys. 3). Model ten uzupełniono o szkielet animacji z przypisanymi odpowiednio werteksami do poszczególnych kości (rys. 4).



Rys. 3. Trójwymiarowy model ręki z nałożoną teksturą po lewej stronie. Przygotowana tekstura ręki po prawej stronie.

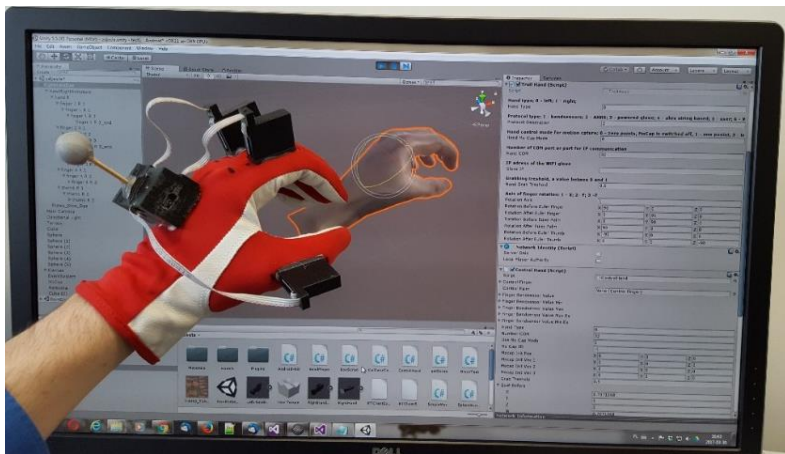
Fig. 3. 3D model of hand with texture (left side). Prepared texture of hand (right side).



Rys. 4. Szkielet ręki przypisany do modelu 3d ręki. 1) trójwymiarowy model lewej ręki, 2) poszczególne kości szkieletu małego palca, 3) kość do paliczka bliższego palca wskazującego wraz z przypisanymi werteksami modelu z zmienną wagą przypisania.

Fig. 4. 3D model of hand with armature. 1) 3D model of left hand, 2) bones of little finger, 3) bone of the proximal phalanges with vertex group

Zintegrowanie z oprogramowaniem Unity 3D [14] wymagało opracowania skryptu pozwalającego na dokonywanie konfiguracji parametrow rękawicy np. wybór pomiędzy lewą a prawą rękawicą, numer portu szeregowego pod którym znajduje się dodana rękawica, poziom wartości przy której mamy informację o zaciśnięciu dłoni, orientacje pomocnicze do prawidłowego ustawienia reprezentacji graficznej ręki.



Rys. 5 Integracja rękawicy rzeczywistości wirtualnej z środowiskiem Unity 3D

Fig. 5. Integration of virtual reality glove into the Unity 3D.

3. PODSUMOWANIE

W artykule została zaprezentowana rękawica rzeczywistości wirtualnej opracowana w oparciu o czujniki orientacji wykorzystujące zagregowane informacje z akcelerometru, żyroskopu oraz magnetometru. Możliwość integracji urządzenia z oprogramowaniem Unity 3D, praca w czasie rzeczywistym oraz współdziałanie z wizyjnym systemem śledzenia umożliwia tworzenie aplikacji rzeczywistości wirtualnej o wysokiej immersji dzięki naturalnemu interfejsowi komunikacji z wirtualnym światem jakim jest ubrana w rękawicę ręka użytkownika.

Prowadzone są dalsze prace nad rozwojem rękawicy rzeczywistości wirtualnej. Najważniejszymi elementami które zostaną zmienione lub dodane to zastosowanie czujnika orientacji o małych rozmiarach (umożliwiająca ułożenie w pozycji leżącej na palcach oraz ręce), zastosowanie dodatkowego czujnika orientacji na przedramieniu, wymiana modułu Bluetooth na moduł Wi-Fi, zmniejszenie obudowy sterownika.

Publikację opracowano na podstawie wyników realizacji projektu numer DOB – BIO7/22/02/2015 pn.: „Symulatory szkoleniowe w zakresie zwalczania pożarów wewnętrznych” (CYBERFIRE) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w latach 2015-2018.

LITERATURA

- [1] Grabowski Andrzej. 2014. „Sesje szkoleniowe górników, w wirtualnej kopalni”. *Edukacja Ustawiczna Dorosłych* 3 : 113-121.
- [2] Jankowski Jarosław, Andrzej Grabowski. 2015. “Usability Evaluation of VR Interface or Mobile Robot Teleoperation”. *International Journal of Human-Computer Interaction* 31 (12) : 882-889.
- [3] Joon-Ho Shin, Kim Mi-Young, Lee Ji-Yeong, Jeon Yu-Jin, Kim Suyoung, Lee Soobin, Seo Beomjoo, Choi Younggeun. 2016. “Effects of virtual reality-based rehabilitation on distal upper extremity function and health-related quality of life: a single-blinded, randomized controlled trial”. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 13 (17) DOI: 10.1186/s12984-016-0125-x.
- [4] Budziszewski Paweł, Andrzej Grabowski, Marcin Milanowicz, Jarosław Jankowski. 2016. „Workstations for people with disabilities: an example of a virtual reality approach”. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 22 (3) : 367-373.
- [5] <http://www.cyberglovesystems.com/cyberglove-iii/> (2017)
- [6] <http://www.5dt.com/data-gloves/> (2017)
- [7] <https://www.leapmotion.com/> (2017)

- [8] Wang Y. Robert, Jovan Popović. 2009. “Real-time hand-tracking with a color glove”. *ACM transactions on graphics* 28 (3) : 63.
- [9] Pereira C. Lukas, Rafael V. Aroca, Rummenigge R. Dantas. 2013. FlexDGlove: A Low Cost Dataglove with Virtual Hand Simulator for Virtual Reality Applications. In *Proceedings of the XV Symposium on Virtual and Augmented Reality*, Cuiaba, 2013, 260-263. DOI: 10.1109/SVR.2013.34.
- [10] Grabowski Andrzej, Monika Myśliwiec. 2016. „Wykorzystanie wizyjnych systemów pomiarowych do porównania trajektorii osób w środowisku rzeczywistym i wirtualnym”. *Mechanik*, 7 : 692-693.
- [11] <https://www.arduino.cc/> (2017).
- [12] <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf> (2017).
- [13] <http://x-io.co.uk/open-source-imu-and-ahrs-algorithms/> (2017).
- [14] <https://unity3d.com/> (2017).

Construction of Hand Motion Capture System Used for Virtual Technology

Jarosław JANKOWSKI, Hubert WELENC, Andrzej GRABOWSKI

*Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy,
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa*

Abstract. Hand and finger motion capture system is commonly used in immersive virtual reality applications allowing the user of simulation to interactively participate by manipulating virtual objects. The article presents the above mentioned system construction as glove equipped with 9 DoF MEMS sensors for orientations and a marker of visual motion capture for displacement in 3D space.

Keywords: data glove, finger motion capture, virtual reality, human–computer interaction