

Wykorzystanie technik rzeczywistości wirtualnej do teleoperacji robota mobilnego

Jarosław Jankowski

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa

Streszczenie: W dzisiejszych czasach roboty niejednokrotnie zastępują ludzi w pracach monottonnych, w których ruchy można zaprogramować. Istnieją jednak zadania, które należy wykonać w środowisku nieznanym oraz niebezpiecznym dla człowieka. W takich przypadkach możliwe jest wykorzystanie teleoperacji, czyli sterowania maszyną na odległość. Wizualne sprzężenie zwrotne najczęściej realizowane za pomocą prezentacji obrazu monoskopowego pochodzącego z kamery umieszczonej na manipulatorze robota mobilnego często bez możliwości zmiany orientacji kamery wprowadza duże trudności w sterowaniu jak również ogranicza zdolność operatora do postrzegania przestrzennego. Wady te można zminimalizować wykorzystując technikę rzeczywistości wirtualnej. Info-helm wyświetlający obraz stereoskopowy dostarcza operatorowi poczucie głębi, zwiększając precyzję manipulowania. Natomiast użycie info-rękawic oraz systemu śledzenia ruchu dłoni i głowy umożliwia stworzenie bardziej intuicyjnego interfejsu sterowania. W pracy przedstawiono budowę funkcjonalnego modelu robota mobilnego, który zostanie wykorzystany do przeprowadzenia badań mających na celu porównanie trzech typów interfejsów sterowania robotem mobilnym.

Słowa kluczowe: teleoperacja, rzeczywistość wirtualna, robot mobilny

1. Wprowadzenie

Przedstawiony temat wpisuje się w zagadnienia dotyczące rzeczywistości wirtualnej, teleoperacji i teleobecności. Badania naukowe dotyczące nowych rozwiązań technicznych wykorzystujące techniki rzeczywistości wirtualnej do teleoperacji były prowadzone głównie na potrzeby astronautyki oraz do zastosowań militarnych (np. do zdalnego operowania bezzałogowymi pojazdami). Malejący koszt urządzeń wykorzystywanych w technikach rzeczywistości wirtualnej sprawia, że opłacalne staje się ich wykorzystanie do nowych zastosowań.

Techniki Rzeczywistości Wirtualnej (VR) są coraz powszechniej wykorzystywane w różnych dziedzinach nauki, głównie ze względu na szeroki zakres możliwości oferowanych przez tego typu systemy. Zwłaszcza interesujące są aplikacje tych technik przy zetknięciu z przemysłem, gdzie często mają one bardzo konkretne i praktyczne zastosowanie. VR znalazło zastosowanie również w dziedzinie bezpieczeństwa i ergonomii [1–3]. Prace w tym zakresie prowadzone są m.in. na potrzeby elektrowni nuklearnych, gdzie systemy VR dają możliwość szkolenia personelu w sytuacjach awaryjnych. Prowadzone są też badania

z wykorzystaniem technik VR obejmujące obsługę specjalistycznych maszyn, np. w zastosowaniach górniczych [4]. Postęp w dziedzinie technik komputerowych obserwowany w ostatnich latach sprawił, że systemy umożliwiające tworzenie wirtualnego środowiska stawały się coraz powszechniejsze. Z tego też względu prowadzone były badania dotyczące opracowania metody wykorzystywania techniki VR do projektowania stanowiska pracy w aspekcie bezpieczeństwa i ergonomii [5]. Jednym z najpowszechniejszych zastosowań VR są szkolenia. Zastosowanie technik VR wydaje się być szczególnie korzystne w sytuacjach, gdy szkolenia w warunkach rzeczywistych wiążą się z zagrożeniem zdrowia i życia człowieka. Z tego względu szkolenia w wirtualnym środowisku najczęściej związane są z dziedzinami takimi jak medycyna (np. wirtualne operacje [6]) oraz energetyka atomowa (np. ograniczenie narażenia pracownika na promieniowanie jonizujące [7]). Innym ciekawym przykładem zastosowania technik rzeczywistości wirtualnej do poprawy bezpieczeństwa jest możliwość bezpiecznego testowania efektywności działania sygnałów alarmowych [8] lub symulacji wypadków celem poprawienia efektywności podejmowanych decyzji w warunkach rzeczywistych [9].

Inspekcja, nadzór oraz rejestracja należą do głównych zadań robotów mobilnych, stosowanych w miejscach niebezpiecznych dla człowieka bądź do których dostęp jest utrudniony. Coraz częściej roboty te wykorzystywane są w środowisku o nieznanym topografii, np. w przeszukiwaniu budynków po trzęsieniu ziemi. W takich sytuacjach najlepiej sprawdza się teleoperacja jako metoda sterowania robotem mobilnym. Teleoperacja, czyli zdalne sterowanie maszyną, to dziedzina intensywnie rozwijana w ostatnich latach. Wykorzystanie teleoperacji umożliwia uniknięcie kosztów związanych z narażeniem człowieka (operatora) na niebezpieczne warunki. Ma to szczególne znaczenie w zastosowaniach militarnych [10], w górnictwie [11], jak również w przypadku prac podwodnych [12]. Zdalnie sterowane roboty mobilne zastępują człowieka w sytuacjach zagrożenia życia lub zdrowia, czego dobrym przykładem jest antyterrorystyczny robot inspekcyjno-interwencyjny Inspektor produkowany w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP [13]. Dynamicznie rozwijającą się w ostatnich latach dziedziną wykorzystania teleoperacji są zastosowania medyczne. Zdalne sterowanie ramieniem robota może być niezmiernie przydatne, gdy istnieje potrzeba zwiększenia precyzji zadań manualnych wykonywanych przez człowieka. Przykładem takiego zastosowania są roboty chirurgiczne (np. rozwijana w Polsce rodzina robotów

medycznych Robin Heart [14]). W przypadku teleoperacji operatorowi musi być przekazana informacja dotycząca położenia i stanu zdalnie sterowanej maszyny. W tym celu najczęściej stosuje się przekaz obrazu wideo. Obraz z kamery lub kamer zamontowanych bezpośrednio na maszynie (np. na ramieniu robota) lub w jej pobliżu jest wyświetlany na jednym bądź też wielu monitorach. Taki sposób prezentacji zdalnego obrazu jest obecnie najpowszechniejszy (m.in. [11, 13–15]), ma on jednak wady wynikające z braku możliwości widzenia przestrzennego (stereowizji), a również ograniczenia związane z utrudnionymi możliwościami rozglądania się – sterowanie położeniem kamer, jeżeli w ogóle możliwe, odbywa się zazwyczaj za pomocą obsługiwanego ręcznie kontrolera. Wady te można ograniczyć poprzez zastosowanie technik rzeczywistości wirtualnej (VR) [12, 16–18].

Wykorzystanie info-helmu prezentującego operatorowi stereoskopowy obraz, którego ruchy sprzężone są z ruchami układu kamer może znacząco wpłynąć na podniesienie poczucia zdalnej obecności, a tym samym zwiększenie możliwości i poprawę wydajności prowadzonej zdalnie pracy. Urządzenia typu info-rękawice (rejestrujące ruchy palców oraz całych dłoni) coraz powszechniej wykorzystywane są do zdalnego sterowania robotami [8–9] oraz urządzeniami przemysłowymi. Dzięki możliwości sterowania za pomocą ruchu palców oraz całej dłoni człowieka, info-rękawice w połączeniu z systemem śledzenia ruchu dłoni stanowią naturalny, a tym samym intuicyjny interfejs użytkownika, zasadniczo zwiększając poczucie obecności.

Podejście takie może mieć ogromne znaczenie przy zdalnym sterowaniu maszynami, dlatego w Pracowni Rzeczywistości Wirtualnej w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym podjęto temat badawczy mający na celu opracowanie oprogramowania oraz narzędzi bazujących na technice rzeczywistości wirtualnej do zdalnego sterowania robotami mobilnymi.

W ramach realizacji zadania badawczego, w pierwszym etapie opracowano stanowisko badawcze składające się z interfejsu teleoperacji oraz funkcjonalnego modelu zdalnie sterowanego robota inspekcyjnego. Umożliwi ono prowadzenie badań nad zdalnym sterowaniem robotem w warunkach symulowanych. Wchodzący w skład stanowiska interfejs sterowania składa się z info-helmu, info-rękawic oraz joysticka. Całość uzupełniona jest systemem rejestracji położenia info-helmu oraz info-rękawic, komputerem PC wraz z niezbędnym oprogramowaniem. W celu porównania różnych interfejsów sterowania przygotowany został również alternatywny system bazujący na ekranie LCD i manipulatorze typu joystick. Kolejnym elementem stanowiska badawczego jest funkcjonalny model mobilnego robota inspekcyjnego, wyposażony w manipulator zakończony chwytakiem oraz ruchomy zestaw kamer. Wykonywane przy jego pomocy prace obejmowały będą poruszanie się oraz nawigację w środowisku pełnym przeszkód, odnajdowanie przedmiotów oraz manipulację nimi. Przy jego pomocy badane będzie poczucie obecności oraz wygoda użytkowania interfejsu.

2. Funkcjonalny model robota mobilnego

Podstawowym celem pierwszego etapu realizowanego zadania badawczego było opracowanie założeń oraz wykonanie niskobudżetowego funkcjonalnego modelu robota mobilnego.

2.1. Założenia konstrukcyjne oraz koncepcja

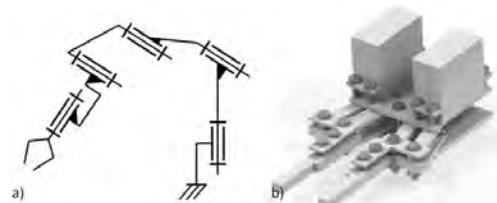
Przyjęte założenia dotyczące przebiegu badań z udziałem ochotników determinują konstrukcję modelu robota inspekcyjnego:

- mobilność z możliwością skrętu wokół własnej osi,
- platforma o wymiarach umożliwiające swobodne poruszanie się w przestrzeni pracy robota (4 m × 4 m),
- manipulator umieszczony na platformie mobilnej o 6 stopniach swobody, zakończony chwytakiem,
- udźwig manipulatora nie mniejszy niż 3 N,
- ramię i przedramię o długości odpowiadającej wymiarom antropometrycznym 50-centylowej osoby wynikające z eliminacji długiego procesu adaptacji osoby badanej do wirtualnego stanowiska w przypadku gdy wymienione człony zostałyby przeskalowane,
- zasilanie akumulatorowe o dużej pojemności,
- zastosowanie komputera z systemem operacyjnym Microsoft Windows,
- rejestracja obrazu w trybie stereo i mono,
- sterowanie oraz transfer obrazu realizowane poprzez połączenie bezprzewodowe.

Po analizie założeń możliwości technologicznych i kosztów opracowano koncepcje funkcjonalnego modelu robota mobilnego.

Robot przeznaczony do zadań inspekcyjnych, składający się z platformy mobilnej oraz manipulatora o 6 stopniach swobody. Manipulator z ramionami o rozmiarach odpowiadających długości ramienia oraz przedramienia osoby 50-centylowego mężczyzny. Platforma mobilna napędzana dwoma silnikami z układem jezdnym gąsienicowym. Chwytnak ze szczękami zamykanymi z zastosowaniem mechanizmu równoległowodowego. Inspekcja realizowana poprzez zastosowanie układu dwóch kamer zamocowanych na mechanizmie o trzech stopniach swobody. Sterowanie oraz transmisja obrazu realizowane poprzez połączenie bezprzewodowe. Zasilanie akumulatorowe.

Następnie, po opracowaniu struktury kinematycznej manipulatora oraz chwytaka (rys. 1) został wykonany projekt całego robota w systemie CATIA V5 (rys. 2).



Rys. 1. a) Struktura kinematyczny manipulatora, b) Model bryłowy chwytaka

Fig. 1. a) Kinematic structure of a manipulator, b) Solid model of a gripper

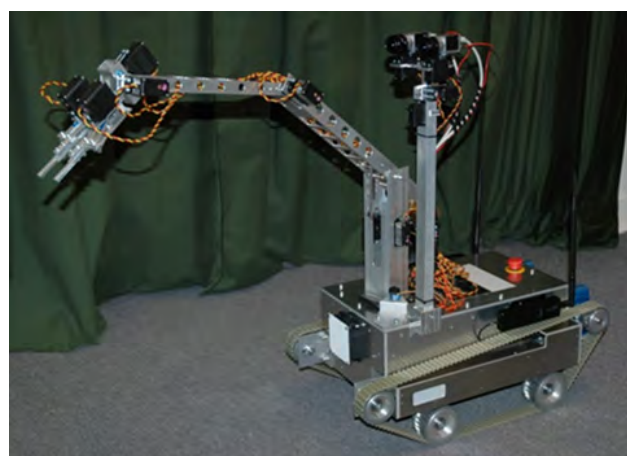


Rys. 2. Model brytowy robota mobilnego w systemie CATIA V5

Fig. 2. Solid model of mobile robot in CATIA V5

2.2. Specyfikacja techniczna

Wynikiem realizacji opracowanej koncepcji jest model funkcjonalny robota (rys. 3) o następującej specyfikacji technicznej:

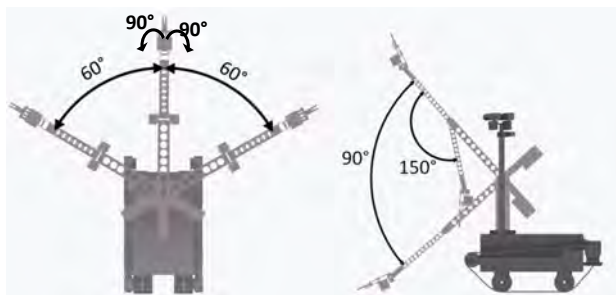


Rys. 3. Funkcjonalny model robota mobilnego

Fig. 3. Functional model of a mobile robot

1. Wymiary platformy mobilnej
 - długość 530 mm,
 - szerokość 400 mm,
2. Wymiary manipulatora
 - wysokość obrotowej kolumny 240 mm,
 - długość pierwszego ramienia 330 mm,
 - długość drugiego ramienia 305 mm,
3. Układ jezdny
 - gąsienicowy
4. Prędkość liniowa platformy mobilnej
 - 0,5 m/s,
5. Udźwig
 - do 3 N,
6. Napęd platformy robota
 - 2 × silnik bezszczotkowy
 - moc 92 W,
 - napięcie 24 V,
 - przekładnia 25:1,
 - moment 2,9 Nm,

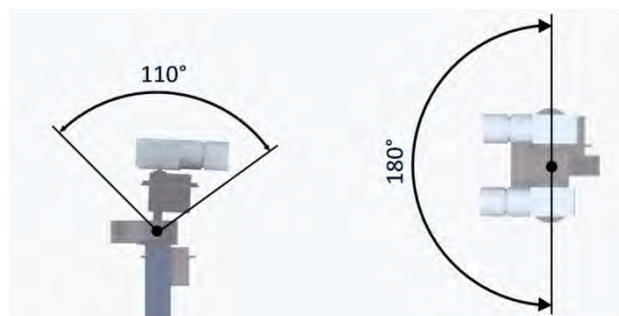
7. Napęd manipulatora
 - serwomechanizmy cyfrowe,
 - silnik krokowy,
8. Napęd wysięgnika z kamerami
 - serwomechanizmy cyfrowe,
9. Liczba stopni swobody,
 - 11 (2 platforma, 6 manipulator, 3 układ kamer),
10. Kątowe zakresy ruchu ramion manipulatora,



Rys. 3. Zakresy kątowe ramion manipulatora

Fig. 3. Angular range of motion of a manipulator arm

11. Kątowe zakresy ruchu układu kamer,



Rys. 4 Zakresy kątowe układu kamer

Fig. 4 Angular range of cameras' configuration

12. Zasilanie
 - akumulator 25,6 V 20 Ah (pakiet ogniw 3,2 V), pobór ciągły do 50 A, pobór chwilowy (do 10 s) do 100 A: zasilają wszystkie napędy,
 - akumulator 12,8 V (pakiet ogniw 3,2 V): zasilają komputer i urządzenia peryferyjne komputera,
 - opcjonalny zasilacz DC 24 V,
 - przetwornice napięcia DC-DC,
 - zasilacz komputerowy,
13. Materiał
 - aluminium.

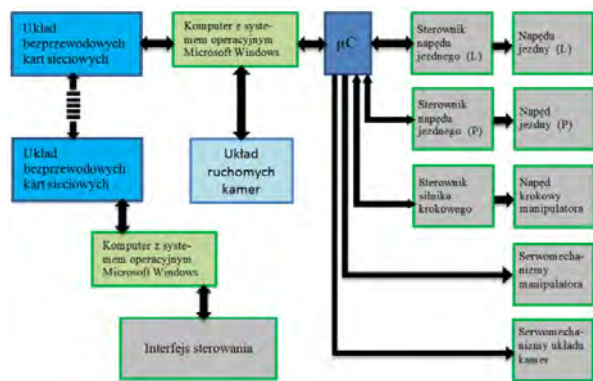
2.3. Układ sterowania

W skład układu sterowania wchodzi następujące elementy:

1. Komputer zdalny umieszczony na platformie mobilnej
 - SuperMicro X7SPA-HF-O – płyta główna Mini-ITX z procesorem Atom D510 Dual Core. Płyta wyposażona jest w podwójny kartę sieciową GLAN z układem Intel 82574L, oraz w 6 złączy USB. System operacyjny Microsoft Windows.
2. Sterownik – mikrokontroler 8-bitowy Atmega 2560 firmy *Atmel* z zegarem 16 MHz, połączony z komputerem zdalnym za pomocą interfejsu USB,

główną zaletą wybranego mikrokontrolera to 16 wyjść 16-bitowych PWM oraz 16 przetworników analogowo-cyfrowych.

3. Sterowniki napędu jezdnego oraz sterownik napędu manipulatora realizujący obrót w płaszczyźnie poziomej.
4. Karty bezprzewodowe WiFiStation Ext pracujące w standardzie 802.11n (2,4 GHz).
5. Układ dwóch kamer acA 1300m firmy *Basler* z interfejsem transferu obrazu typu Gigabit Ethernet. Rejestruje obraz w kolorze z maksymalną rozdzielczością 1296×966 z częstotliwością 30 k/s. Zastosowana optyka to obiektywy LM3NCM firmy Kowa o ogniskowej $3\frac{1}{2}$ mm i kącie widzenia $66,9^\circ \times 52,7^\circ$.



Rys. 6. Schemat blokowy układu sterowania
Fig. 6. Block diagram of the control system

3. Interfejs sterowania

Na potrzeby realizacji badań przygotowano trzy różne interfejsy sterowania pracą robota mobilnego. Pierwszy wykorzystuje sprzęt stosowany w technice rzeczywistości wirtualnej oraz joystick (rys. 7). Drugi interfejs składa się wyłącznie z joysticka oraz monitora, na którym wyświetlany jest obraz z kamer umieszczonych na platformie mobilnej w trybie stereo (wymagane okulary 3DVision). Trzeci interfejs składa się z joysticka oraz monitora pracującego w trybie mono.

Do sprzętu techniki rzeczywistości wirtualnej wykorzystanej w pierwszym interfejsie wchodzi:

1. Info Hełm – Z800 3DVisor firmy *eMagin* charakteryzuje się wyświetlaczami wykonanymi w technologii OLED o rozdzielczości 800×600 pracujący z częstotliwością 60 Hz. Kąt widzenia to 40° (po przekątnej obrazu).
2. Info-rękawica – rękawica DG5 VHand 2.0 Bluetooth. Rękawica wyposażona jest w 5 czujników zgięcia palców dłoni. Informacje z rękawicy przesyłane są drogą radiową w standardzie Bluetooth. Częstotliwość pomiaru to 50 Hz.
3. Magnetyczny system śledzenia Liberty firmy *Polhemus* umożliwiający pomiar w czasie rzeczywistym pozycji oraz orientacji ośmiu czujników (markerów) z częstotliwością 120 Hz. Do celów badawczych wykorzystano trzy czujniki rejestrujące

informacje o lokalizacji i orientacji dłoni, głowy oraz barku.

Oprócz wyżej wymienionego sprzętu wykorzystano joystick firmy *Logitech* oraz monitor LCD z funkcją wyświetlania obrazu stereoskopowego.



Rys. 7. Interfejs sterowania. 1 – magnetyczny system śledzenia, 2 – info-Hełm, 3 – info-rękawica, 4 – monitor 3D, 5 – joystick
Fig. 7. Control interface. 1 – magnetic tracking system, 2 – HMD, 3 – data gloves, 4 – monitor 3D, 5 – joystick

Podczas gdy operator wykorzystuje pierwszy interfejs sterowania, obraz stereoskopowy wyświetlany jest na wyświetlaczach info-Hełmu. Obroty zestawu kamer nadążają za wykonywanymi obrotami głowy teleoperatora wykorzystując informacje o orientacji z czujnika umieszczonego na info-Hełmie. Dzięki temu rozwiązaniu osoba wykonująca zadanie teleoperacji ma możliwość swobodnego rozglądania się w przestrzeni pracy robota mobilnego. Ruchy dłoni operatora (orientacje oraz pozycje) odczytujemy z czujnika systemu śledzenia umieszczonego na info-rękawicy mierzone względem czujnika umieszczonego na barku w układzie systemu śledzenia. Każdy obrót dłoni powoduje odpowiedni obrót chwytaka, natomiast jego położenie realizowane jest poprzez rozwiązanie zadania odwrotnego bazując na informacji o położeniu dłoni operatora względem jego barku. Dane pochodzące z info-rękawicy o stopniu zgięcia kciuka oraz palca wskazującego sterują ruchem chwytaka. Natomiast joystick służy do sterowania ruchem platformy.

Operator wykorzystujący drugi i trzeci typ interfejsu do sterowania ruchem platformy, manipulatora, chwytaka oraz zespołu kamer używa wyłącznie joysticka. W zależności od typu interfejsu obraz wyświetlany na monitorze jest w trybie stereo lub mono.

4. Podsumowanie

W ramach realizacji pierwszego etapu zadania badawczego mającego na celu zbadanie możliwości wykorzystania technik rzeczywistości wirtualnej do zdalnego sterowania robotem mobilnym został zaprojektowany i wykonany model funkcjonalny zdalnie sterowanego robota mobilnego składającego się z platformy mobilnej, manipulatora zakończonego chwytakiem oraz układu kamer. Oprócz stanowi-

ska badawczego, którym jest wspomniany robot, opracowano interfejs sterowania wykorzystujący sprzęt techniki zanurzeniowej rzeczywistości wirtualnej (info-helm, info-rękawice, magnetyczny system śledzenia) oraz joystick.

Praca wykonana w ramach działalności statutowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym nt. „Zbadanie możliwości wykorzystania technik rzeczywistości wirtualnej do zdalnego sterowania mobilnymi robotami inspekcyjnymi”, 2011–2012 r.

5. Bibliografia

1. Nivolianitou Z., Aneziris O. N., Nasios K.: *Virtual Reality applications for improving safety in the process industry, Safety and Reliability for Managing Risk* – Guedes Soares & Zio (eds.), 2006 Taylor & Francis Group, London.
2. Mujber T.S., Szecsi T., Hashmi M.S.J.: *Virtual reality applications in manufacturing process simulation*, „Journal of Materials Processing Technology”, 155–156 (2004) 1834–1838.
3. Duffy V.G., Wu F.F., Parry P.W. Ng: *Development of an Internet virtual layout system for improving workplace safety*, „Computers in Industry” 50 (2003) 207–230.
4. Ambrose D.H., Bartels J.R., Kwitowski A. *et al.*: *Mining Roof Bolting Machine Safety: A Study of the Drill Boom Vertical Velocity*, „Information Circular” 9477/2005.
5. Budziszewski P., Grabowski A., Milanowicz M. *et al.*: *Designing a workplace for workers with motion disability with computer simulation and virtual reality techniques*, „Int J Disabil Hum Dev” 2011;10(4) 355–358.
6. Gallagher A.vG., Cates C.: *Virtual reality training for the operating room and cardiac catheterisation laboratory*, „The Lancet”, Volume 364, Issue 9444, October 2004, 1538–1540.
7. Mól A.C.A., Jorgea C.A.F., Coutob P.M. *et al.*: *Virtual environments simulation for dose assessment in nuclear plants*, „Progress in Nuclear Energy”, 2008.
8. Duarte M.E.C., Rebelo F.: *Virtual Reality in the Study of Warnings Effectiveness* [w:] *idem, Ergonomics and Health Aspects of Work with Computers*, Springer, Berlin 2007.
9. Duffy V.G., Parry P.W. Ng; Ramakrishnan A., *Impact of a simulated accident in virtual training on decision-making performance*, „International Journal of Industrial Ergonomics”, Volume 34, Issue 4, October 2004, 335–348.
10. Valois J., Herman H., Bares J., Rice D.: *Remote operation of the Black Knight unmanned ground combat vehicle*, [w] *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* 6962, art. no. 69621A (2008).
11. Hainsworth D.W.: *Teleoperation User Interfaces for Mining Robotics*, „Autonomous Robots” 11, 2001, 19–28.
12. Lin Qingping, Kuo Chengi: „Virtual tele-operation of underwater robots”, [w] *Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation* 2, 1997, pp. 1022-1027.
13. http://www.antyterroryzm.com/robot_antyterrorystyczny.php
14. Z. Nawrat, P. Kostka, W. Dybka: *et al.*, „Nowe mechatroniczne narzędzia chirurgiczne - Robin heart Uni System”, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 2/2009, 532-538.
15. M. Anvari: „Remote telepresence surgery: the Canadian experience”, *Surg Endosc*, 21, 2007, 537–541.
16. Cheng-Peng Kuan, Kuu-Young Young: „VR-Based Teleoperation for Robot Compliance Control”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 30, 2001, 377–398.
17. Philippe Fuchs, Fawzi Nashashibi, Didier Maman: „Assistance for Telepresence by Stereovision-Based Augmented Reality and Interactivity in 3D Space”, *Presence*, Vol. 11, No. 5, October 2002, 525–535.
18. Jussi Suomela, Aarne Halme: „Tele-Existence Techniques of Heavy Work Vehicles”, *Autonomous Robots*, 11, 29–38, 2001.

The use of virtual reality techniques for teleoperation of mobile robot

Abstract: Nowadays robots are widely used to replace human in monotonous works which movements can be programmed. However, there are tasks that have to be performed in unknown and hazardous environments. In such cases it is reasonable to use teleoperation, i.e. to operate a machine from a distance. Implementation of visual feedback by the monoscopic presentation of images taken from cameras, which are mostly stationary placed on a robot's manipulator, introduces difficulties in controlling and limits operator's spatial perception. These defects can be minimized by using virtual reality technology. The use of stereoscopic visualization and head-mounted display (HMD) may provide higher perception of environment depth that can increase precision of manipulation. Data gloves and system tracking used for registration movement of hand and head allow to create more intuitive control interface. The paper presents a construction of a functional model of a mobile robot, which will be used to conduct a study aimed at comparing the three types of human-robot interfaces.

Keywords: teleoperation, virtual reality, mobile robot

mgr inż. Jarosław Jankowski

Zatrudniony w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym od 2009 r. Realizuje prace badawcze dotyczące wykorzystania technik rzeczywistości wirtualnej m.in do teleoperacji robotów mobilnych.

e-mail: jajan@ciop.pl

