



Zastosowanie technik rzeczywistości wirtualnej w zdalnej kontroli pracy robota inspekcyjnego

Jarosław Jankowski

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań prowadzonych w celu jakościowego i ilościowego porównywania różnych interfejsów zdalnego sterowania, w szczególności określenia wpływu struktury interfejsu na wydajność operatora zdalnie sterowanego inspekcyjnego robota mobilnego. Stanowisko badawcze to mobilny robot inspekcyjny wyposażony w manipulator zakończony chwytakiem oraz wyposażony w obrotowy układem kamer w konfiguracji stereoskopowej. Główny interfejs sterowania składa się z hełmu rzeczywistości wirtualnej (HMD) i rękawicy technik rzeczywistości wirtualnej (Data Gloves). Wszystko to uzupełnia system śledzenia ruchu orientacji głowy oraz pozycji dłoni względem barku, dodatkowo zastosowano joystick i komputer wraz z odpowiednim oprogramowaniem. W celu porównania różnych interfejsów sterowania został przygotowany alternatywny system oparty wyłącznie na ekranie LCD i joysticku.

Słowa kluczowe: teleoperacja, rzeczywistość wirtualna, robot mobilny

DOI: 10.14313/PAR_203/112

1. Wprowadzenie

Do głównych zadań teleoperacji mobilnymi robotami należy wykonywanie zróżnicowanych zadań w środowisku nieznanym i często niebezpiecznym dla człowieka. Mogą być to prace prowadzone pod wodą, w miejscach skażonych chemicznie [1], podczas akcji ratowniczych [2] ale również w akcjach militarnych czy interwencyjnych. Przy tego typu zastosowaniach mobilnych robotów bardzo ważnym jest rodzaj użytego interfejsu sterowania. Ruch robota najczęściej kontrolowany jest przez operatora na podstawie przekazywanego do pulpitu sterowniczego obrazu z zamontowanych na konstrukcji robota kamer. Standardowy pulpit sterowniczy oprócz głównego wyświetlacza może mieć dodatkowe monitory, które w znacznej mierze absorbują uwagę operatora wykonujących często bardzo odpowiedzialne zadania. Oprócz kontrolowania zdalnej przestrzeni poprzez obserwowanie obrazu, operator steruje ruchem poszczególnych członów robota poprzez oddziaływanie na zamontowane na pulpicie sterowniczym joysticki oraz inne elementy sterownicze. Stosowanie tego

typu interfejsu, w którym wzrokowo kontrolujemy wiele elementów sterowniczych, może niekorzystnie wpływać na poczucie obecności operatora w zdalnej przestrzeni, co z kolei powodować może obniżenie efektywności operatora. Wspomniane niedogodności można ograniczyć przez zastosowanie w interfejsie sterowania aparatury zanurzeniowej techniki rzeczywistości wirtualnej. Technika ta opiera się głównie na wykorzystaniu następującego sprzętu: hełm rzeczywistości wirtualnej do odbioru obrazu stereoskopowego (ang. *Head Mounted Display*), rękawice rzeczywistości wirtualnej do śledzenia ruchów palców oraz system śledzenia ruchów poszczególnych członów człowieka i samego człowieka w przestrzeni. Technika immersyjna rzeczywistości wirtualnej znajduje głównie zastosowanie w systemach szkoleniowych, np. górników w celu wyćwiczenia prawidłowej procedury postępowania przy przeprowadzeniu robót strzałowych [3], ale również przy wspomaganiu projektowania i przetestowania stanowisk pracy dla osób niepełnosprawnych [4]. Główną zaletą tej techniki jest możliwość przeniesienia osoby w świat wirtualny bądź świat zdalny (obszar pracy robota) z dodatkową informacją o głębi dzięki zastosowaniu hełmu z wyświetlaczami w konfiguracji stereoskopowej. Dodatkowo możliwość naturalnej zmiany perspektywy widoku poprzez ruchy głowy znacząco zwiększa poczucie zanurzenia, zwiększa się świadomość możliwości oddziaływania w przedstawianym zdalnym świecie. Wykorzystanie tego rozwiązania obserwacji zdalnego środowiska połączone z możliwością sterowania ramieniem robota nadążającym za ruchem ręki operatora oraz chwytakiem sterowanym zaciśnięciem dłoni sprawia, że interfejs ten staje się bardziej intuicyjny co może wpłynąć na szybkość, precyzję wykonywania zadań oraz skrócić proces adaptacji operatora do interfejsu sterowania.

Opisany przykład interfejsu był przedmiotem badań, których wyniki zostały przedstawione w niniejszym artykule.

Omawiany temat realizowany był w ramach dwuletniego projektu badawczego, prowadzonego w Centralnym Instytucie Ochrony – Państwowym Instytucie Badawczym. Poprzednie prace [7, 8] zawierają przegląd literatury nt. użycia aparatury technik rzeczywistości wirtualnej w sterowaniu inspekcyjnymi robotami mobilnymi.

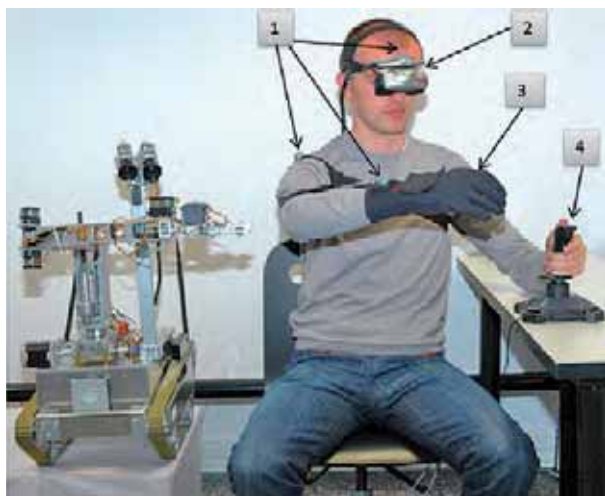
2. Stanowisko badawcze

W celu realizacji zadania badawczego, opracowano stanowisko składające się z interfejsu teleoperacji o następujących konfiguracjach:

1. Hełm rzeczywistości wirtualnej z rękawicą rzeczywistości wirtualnej, system śledzenia ruch głowy i ręki oraz joystick – dalej nazywany jako interfejs „VR”,
2. Monitor LCD z wyświetlanym obrazem w trybie stereo oraz joystick – w dalszej części artykułu nazywany jako interfejs „STEREO”,
3. Monitor LCD z wyświetlanym obrazem w trybie mono oraz joystick – w dalszej części artykułu nazywany jako interfejs „MONO”.

Zastosowany w stanowisku interfejs sterowania wykorzystujący aparaturę technik rzeczywistości wirtualnej (rys. 1) składa się z następujących elementów:

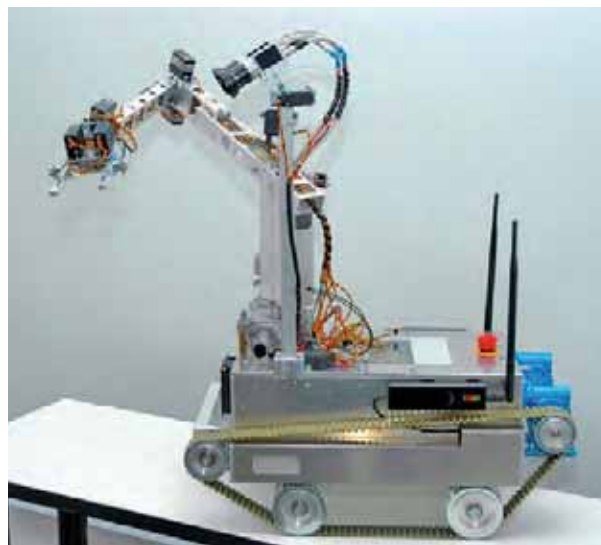
- Hełm rzeczywistości wirtualnej – Z800 3DVisor firmy eMagin charakteryzuje się wyświetlaczami o rozdzielczości 800×600 pracujący z częstotliwością 60 Hz. Kąt widzenia to 40° (dla przekątnej obrazu).
- Rękawica rzeczywistości wirtualnej – rękawica DG5 VHand 2.0 Bluetooth. Rękawica wyposażona jest w 5 czujników zgięcia palców dłoni. Częstotliwość pomiaru to 50 Hz.
- Magnetyczny system śledzenia Liberty firmy Polhemus umożliwiający pomiar w czasie rzeczywistym pozycji oraz orientacji czujników (markerów) z częstotliwością 120 Hz. Do celów badawczych wykorzystano czujniki rejestrujące informacje o lokalizacji dłoni względem barku oraz orientację głowy. Oprócz wyżej wymienionego sprzętu wykorzystano joystick firmy Logitech oraz monitor LCD z możliwością wyświetlania obrazu stereoskopowego.



Rys. 1. Interfejs wykorzystujący aparaturę techniki rzeczywistości wirtualnej: 1 – system śledzenia, 2 – hełm rzeczywistości wirtualnej, 3 – rękawica rzeczywistości wirtualnej, 4 – joystick

Fig. 1. The „VR” interface utilizing the virtual reality techniques: 1 – motion tracking, 2 – HMD, 3 – data glove, 4 – joystick

Hełm oraz monitor stosowane są do prezentacji obrazu rejestrowanego przez kamery robota mobilnego w trybie stereoskopowym (około 2×14 klatek/s) i monoskopowym (14 klatek/s). W interfejsie tym informacja o stopniu zaciśnięcia dłoni rejestrowana przez rękawicę wirtualną wykorzystywana jest do kontroli zacisku chwytaka. System śledzenia ruchu dłoni względem barku oraz orientacji głowy służy do kontroli ruchu manipulatora oraz układu kamer, natomiast joystick steruje ruchem platformy.



Rys. 2. Funkcjonalny model mobilnego robota inspekcyjnego
Fig. 2. Functional model of inspection mobile robot

W celu lepszego określenia wpływu stosowanego interfejsu przygotowano również alternatywny system oparty na ekranie LCD prezentującym obraz w trybie stereoskopowym (z wykorzystaniem okularów systemu Nvidia 3DVision) oraz monoskopowym i manipulatorze typu joystick.

W interfejsach bez HMD (tzn. gdy obraz był wyświetlany na ekranie komputera) ruch układu kamer, platformy, manipulatora oraz chwytaka całkowicie kontrolowany jest przez joystick.

Kolejnym elementem stanowiska badawczego jest funkcjonalny model mobilnego robota inspekcyjnego, wyposażony w zakończony chwytakiem manipulator oraz ruchomy zestaw kamer. Informacje nt. robota zawarto w artykule [5].

3. Metodyka badań

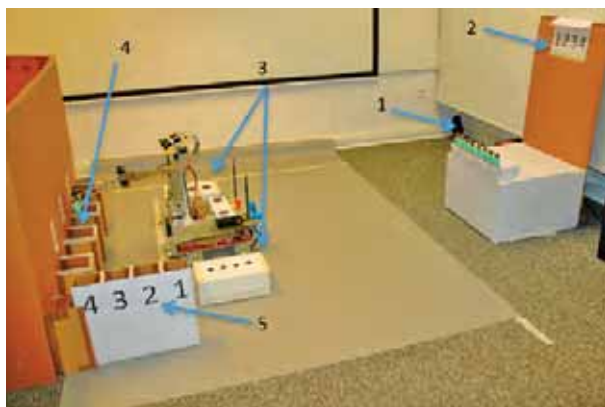
3.1. Uczestnicy badań

Badania prowadzone były z udziałem 30 ochotników (mężczyzn) w wieku 20–25 lat, deklarujących brak skłonności do chorób lokomocyjnych. Dodatkowo zgodnie z opinią komisji bioetycznej każdy z uczestników dokonał konsultacji okulistycznej.

3.2. Procedura badań

Badania podzielone zostały na 3 cykle (3×30 min) poprzedzone 30 min treningiem. W każdym cyklu uczestnicy badań wykonywali te same zadania z zastosowaniem jednego z wymienionych interfejsów sterowania robotem mobilnym. Zadania składały się z następujących etapów:

- pobranie elementów (rys. 3, strzałka z nr 1) o rozmiarach $4 \times 2,5$ cm i 10 cm wysokości osadzonych w pudełku. Przy pobieraniu elementów należało ustawić robota w pozycji tak, aby lewa gąsienica robota była naprzeciwko elementu pobieranego. Pobierany był zawsze pierwszy dostępny element z prawej strony względem robota,
- naciśnięcie przycisku na joysticku powodowało zmianę zapalenia diody na wyświetlaczu (rys. 3, strzałka z nr 2). Cyfra przy której zapaliła się dioda stanowiła informację, do którego pojemnika przedmiot powinien trafić. Czas wykonania zadania mierzony był między kolejnymi naciśnięciami przycisku joysticka,
- przemieszczenie się robotem po obszarze $2 \times 2,3$ m odpowiednio omijając przeszkody (rys. 3, strzałka z nr 3) oraz linie ograniczające strefę pracy robota,
- umiejscowienie elementów odpowiednio w dwóch typach pojemników. Cztery pojemniki z otworami 16×16 cm rozmieszczono wzdłuż ściany (rys. 3, strzałka z numerem 4). Cztery pojemniki z otworami 14×12 cm rozmieszczono w rzędzie (rys. 3, strzałka z numerem 5). W celu wrzuceniu elementu do trzech pierwszych pojemników rozmieszczonych wzdłuż ściany należało ustawić robota między przeszkodami w najmniejszej odległości od pojemnika nie przekraczając linii przed pojemnikami. Natomiast w celu wrzucenia



Rys. 3. Stanowisko pracy funkcjonalnego modelu mobilnego robota mobilnego

Fig. 3. The workspace of the functional model of inspection mobile robot

do czwartego pojemnika należało ustawić robota za przeszkodą umiejscowioną naprzeciwko tego pojemnika oraz jak najbliżej pojemnika nie przekraczając linii. W celu wrzuceniu elementów do pojemnika z mniej-

szymi otworami należało ustawić się równolegle przed tym pojemnikiem

- powrót do miejsca pobierania elementów.

3.3. Badania ankietowe

Omówione metody sterowania zostały również porównane za pomocą narzędzi ankietowych w których badani ocenili subiektywnie poszczególne interfejsy.

Po zakończeniu każdego cyklu badań osoba wypełniła kwestionariusz obecności przestrzennej, który jest często stosowany m.in. do oceny środowisk wirtualnych i teleobecności. Zastosowany kwestionariusz opracowano w toku realizacji międzynarodowego projektu badawczego „MEC: Measurement, Effects, Conditions”, a następnie opublikowano w 2004 r. [7, 8]. Kwestionariusz składa się z ośmiu następujących elementów:

- zaangażowanie uwagi,
- sytuacyjny model przestrzeni,
- obecność przestrzenna: autolokacja,
- obecność przestrzenna: możliwe zachowania,
- zaangażowanie poznawcze,
- podtrzymanie niedowierzania,
- zainteresowanie treścią medium,
- wyobraźnia przestrzenna.

Na potrzeby opisywanych badań, wykorzystana została polska adaptacja opisanego kwestionariusza. Badani odnosili się do stwierdzeń przy pomocy pięciostopniowej skali o wartościach: „zupełnie się nie zgadzam”, „nie zgadzam się”, „nie mam zdania”, „zgadzam się”, „zupełnie się zgadzam”. Zgodnie ze stworzonymi przez autorów zasadami, kwestionariusz był wypełniany bezpośrednio po kontakcie osoby badanej ze źródłem stymulacji.

Wraz z kwestionariuszem obecności przestrzennej po każdym cyklu uczestnicy wypełniali ankietę dotyczącą oceny użyteczności, intuicyjności oraz komfortu użytkowania poszczególnych interfejsów sterowania funkcjonalnym modelem robota mobilnego zawierająca następujące pytania:

- Instrukcje, polecenia wykonania zadań są jasne.
- Zadanie, które miałem wykonać wydają się być zadaniami prostymi.
- Interfejs sterowania robotem mobilnym umożliwił mi wykonanie zadań sprawnie i szybko.
- Potrzebowałem stosunkowo mało czasu do dostosowania się do interfejsu sterowania robotem.
- Sposób sterowania ramieniem robota wydawał się intuicyjny.
- Sposób sterowania układem kamer robota wydawał się intuicyjny.
- Interfejs sterowania robotem mobilnym wydawał się intuicyjny.
- Interfejs sterowania robotem mobilnym jest komfortowy.
- Interfejs sterowania robotem mobilnym był łatwy w użyciu.

Badani odnosili się do powyższych stwierdzeń również przy pomocy pięciostopniowej skali o wartościach: „zupełnie się nie zgadzam”, „nie zgadzam się”, „nie mam zda-

nia”, „zgadzam się”, „zupełnie się zgadzam”. Dodatkowo po zakończeniu ostatniego cyklu uczestnicy zostali poproszeni o wypełnienie ankiety zawierającej następujące stwierdzenia:

- Interfejs sterowania robotem mobilnym umożliwił mi wykonanie zadań najsprawniej i najszybciej.
- Potrzebowałem stosunkowo najmniej czasu do dostosowania się do interfejsu sterowania robotem.
- Sposób sterowania ramieniem robota wydawał się najbardziej intuicyjny.
- Sposób sterowania układem kamer robota wydawał się najbardziej intuicyjny.
- Interfejs sterowania robotem mobilnym wydawał się najbardziej intuicyjny.
- Interfejs sterowania robotem mobilnym jest najbardziej komfortowy.
- Interfejs sterowania robotem mobilnym jest najłatwiejszy w użyciu.

Badana osoba wybierała interfejs spośród trzech testowanych dla każdego z powyższych stwierdzeń.

3.4. Hipotezy i metody statystyczne

W zadaniu tym postawiono trzy podstawowe hipotezy:

- Czy użycie technik rzeczywistości wirtualnej wpływa na wydajność pracy operatora?
- Czy użycie technik rzeczywistości wirtualnej wpływa na ocenę poziomu obecności przestrzennej?
- Czy użycie technik rzeczywistości wirtualnej wpływa na subiektywną oceną dotyczącą komfortu, intuicyjności używania?

Do testowania postawionych hipotez zastosowano:

- test Shapiro-Wilkes, test Lilliefors, test Levene,
- jednoczynnikowa analiza wariancji (ANOVA), test Kruskal-Wallis, test Tukey, test U Mann-Whitney

We wszystkich wymienionych testach stosowany poziom istotności statystycznej wynosił 0,05.

4. Wyniki badań

Wyniki badań obejmują analizę próbek czasowych stanowiących czas wykonania zadania, analizę popełnionych błędów polegających na nietrafnym wrzuceniu elementu do odpowiedniego pojemnika przez niepoprawne wystereowanie manipulatorem robota. Dodatkowo przeprowadzono analizę ankiet, subiektywnych ocen zastosowanych interfejsów sterowania robotem mobilnym.

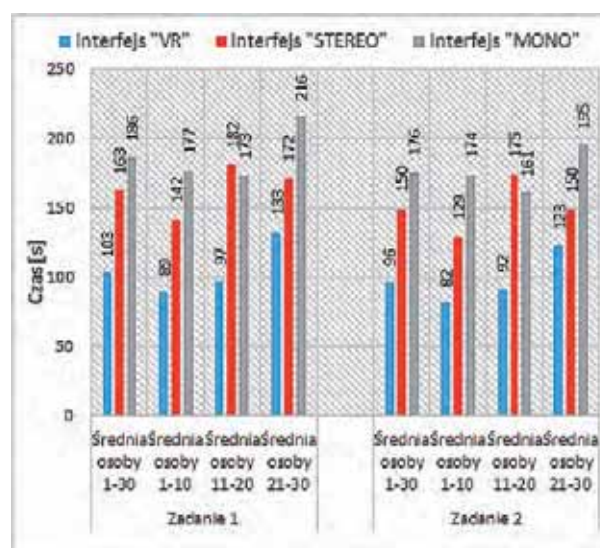
4.1. Analiza wskaźników obiektywnych

W trakcie badań prowadzony był pomiar czasu wykonania zadań (pomiar wyrażony w sekundach). Łącznie od wszystkich osób dla zadania 1, zanotowano: 151 pomiarów (czas wyrażony w sekundach potrzebny na wykonanie danego zadania) podczas testowania interfejsu „MONO”, 165 pomiarów podczas testowania interfejsu „STEREO” oraz 253 pomiarów podczas testowania interfejsu „VR”. Natomiast dla zadania 2, zebrano: 138 próbek podczas testowania interfejsu „MONO”, 163 próbek podczas testowania interfejsu „STEREO” oraz 268 pomiarów podczas

testowania interfejsu „VR”. Na podstawie tych pomiarów na rys. 4 został przedstawiony wykres średnich wartości czasu ukończenia zadania z podziałem na interfejsy, zadania, oraz grupy osób: wszystkich osób 1–30, podgrupa osób 1–10, w której interfejsy testowane były w kolejności „MONO”, „STEREO”, „VR”, podgrupa osób 11–20, w której interfejsy testowane były w kolejności „STEREO”, „MONO”, „VR” oraz podgrupa osób 21–30, w której interfejsy testowane były w kolejności „VR”, „MONO”, „STEREO”.

Z przedstawionych informacji na rys. 4 wynika że:

- niezależnie od zadania najmniejsze wartości średnie czasu występują podczas pracy z wykorzystaniem interfejsu „VR” około 100 s,



Rys. 4. Średnie arytmetyczne zebranych próbek czasowych – czasu wykonania zadań

Fig. 4. Mean duration time of completing a task

- niezależnie od zadania wartości średnie czasu pracy z wykorzystaniem interfejsu „STEREO” i „MONO” są większe od wartości średnich czasu pracy z interfejsem „VR” odpowiednio o około 60 s i 80 s,
- niezależnie od zadania występują różnice w wartości średnie czasu w podgrupach.

Podgrupy 1–10 oraz 21–30 wykonywały zadania najszybciej podczas pracy z interfejsem „VR” oraz najwolniej podczas pracy z interfejsem „MONO”. Zauważono również stosunkowo duże różnice pomiędzy średnimi wartościami czasu wykonania zadania „MONO” i „VR” oraz „MONO” i „STEREO”. Wartości średnich czasu w podgrupie 20–30 są wyższe od zaobserwowanych średnich czasów w podgrupie 1–10 oraz 11–20. Zauważono również, że w grupie 21–30 najwyższy czas zanotowano dla pracy z interfejsem „STEREO” oraz nieznaczną różnicę między średnimi wartościami czasu wykonania zadania „MONO” i „STEREO”.

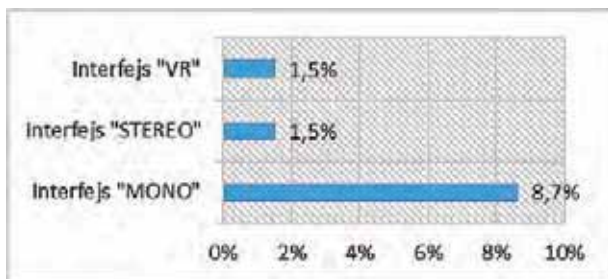
W celu przeprowadzenia statystycznej analizy porównawczej, oceny wpływu jednego czynnika, (tzn. interfejsu na średni czas wykonania zadania) zebrany zestaw danych

poddano dalej jednoczynnikowej analizie wariancji (tab. 1) oraz nieparametrycznym teście rangowym Kruskal-Wallis. Zbieżne wyniki otrzymano dla analiz parametrycznych oraz nie parametrycznych.

Tab. 1. Jednoczynnikowa analiza wariancji, test Tukeya test dla poszczególnych interfejsów zadania 1 i zadania 2

Tab. 2. One-way ANOVA with Tukey for particular interface of task 1 and task 2

Grupy badanych	Zadanie 1	
	One-way Anova	Tukey test
1-30	$F(2,87) = 27,41;$ $p < 0,001$	MONO<>VR $p < 0,001$ STEREO<>VR $p < 0,001$
1-10	$F(2,27) = 12,56;$ $p < 0,001$	MONO<>VR $p < 0,001$ STEREO<>VR $p < 0,05$
1120	$F(2,27) = 12,26;$ $p < 0,001$	MONO<>VR $p < 0,01$ STEREO<>VR $p < 0,001$
2130	$F(2,27) = 9,91;$ $p < 0,001$	MONO<>VR $p < 0,001$ MONO<>STEREO $p < 0,05$
Zadanie 2		
130	$F(2,87) = 25,02;$ $p < 0,001$	MONO<>VR $p < 0,001$ STEREO<>VR $p < 0,001$ MONO<>STEREO $p < 0,05$
110	$F(2,27) = 15,9;$ $p < 0,001$	MONO<>VR $p < 0,001$ STEREO<>VR $p < 0,05$ MONO<>STEREO $p < 0,05$
1120	$F(2,27) = 7,31;$ $p < 0,001$	MONO<>VR $p < 0,05$ STEREO<>VR $p < 0,01$
2130	$F(2,27) = 9,98;$ $p < 0,001$	MONO<>VR $p < 0,001$ MONO<>STEREO $p < 0,05$



Rys. 5. Procentowy udział błędów we wszystkich podjętych próbach wykonania zadań

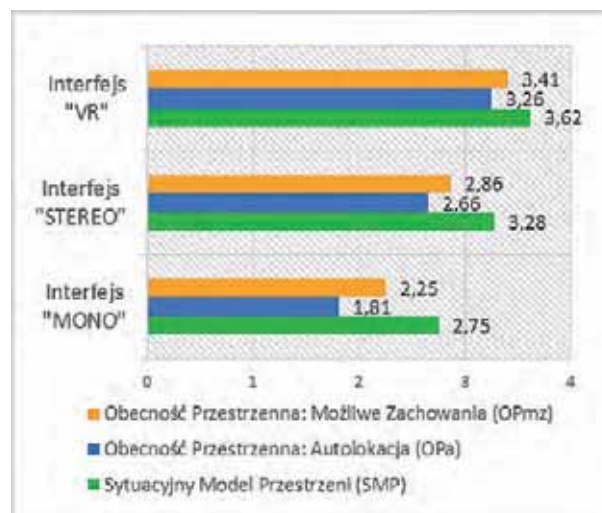
Fig. 5. The percentage of error in all undertaken tests

W trakcie badań zanotowano błędy badanych polegające na nie trafieniu do odpowiedniego pojemnika, wynikające przede wszystkim z błędnej oceny odległości (rys 5). Zauważono że najczęściej błędów zanotowano podczas sterowania robotem za pomocą interfejsu „MONO” 8,65 % podjętych prób zakończyło się niepowodzeniem, natomiast podczas sterowania robotem z użyciem interfejsu „VR” tylko 1,54 % wszystkich prób zakończyło się niepowodzeniem. Podobną wartość odnotowano w przypadku interfejsu „STEREO”: 1,52 % podjętych prób wykonania zadania zakończyły się nieprawidłowym ułożeniem przenoszzonego elementu.

4.2. Analiza wskaźników subiektywnych

4.2.1. Kwestionariusz obecności przestrzennej

Analiza statystyczna udzielonych odpowiedzi na pytania zawarte w kwestionariuszu obecności przestrzennej pokazała brak wpływu stosowania różnych interfejsów



Rys. 6. Kwestionariusz obecności przestrzennej – średnia otrzymanych odpowiedzi

Fig. 6. Spatial presence questionnaire – mean of responses

na następujące składowe omawianego kwestionariusza: zaangażowanie uwagi, zaangażowanie poznawcze, podtrzymanie niedowierzania, zainteresowanie treścią medium, wyobraźnia przestrzenna. Natomiast zauważono statystycznie istotne różnice w poniższych składowych kwestionariusza:

- obecności przestrzennej – autolokacji oraz możliwości zachowania tj. ogólnej świadomości uczestniczenia, poruszania się i interakcji w przedstawionej przestrzeni. Najwyższą ocenę tego stanu odnotowano po stosowaniu interfejsu „VR” (rys. 6). Na poziom ocen wpłynąć mogła przede wszystkim możliwość odbierania obrazu stereoskopowo dającego dodatkowy wymiar głębi względem obrazu monoskopowego oraz możliwość naturalnego sterowania manipulatorem robota,
- sytuacyjnego modelu przestrzeni, tj. ogólnego wyobrażenia i ocenienia odległości w przedstawionej prze-

strzeni. Najwyższą ocenę tego stanu odnotowano po stosowaniu interfejsu „VR” (rys. 6). Na poziom ocen wpłynąć mogła przede wszystkim możliwość poczuć głębi względem obrazu monoskopowego.

4.2.2. Ankieta dotycząca oceny użyteczności, intuicyjności oraz komfortu użytkownika poszczególnych interfejsów sterowania funkcjonalnym modelem robota mobilnego

Uczestnicy badań po zakończeniu każdego cyklu wyrazili opinię dotyczącą każdego z interfejsów sterowania robotem mobilnym. Respondenci z pośród odpowiedzi „Zdecydowanie nie”, „Raczej nie”, „Nie mam zdania”, „Raczej tak”, „Zdecydowanie tak” wybierali jedną najbardziej odpowiadającą poszczególnym zdaniom. Wyniki przedstawiono na rys. 7. Respondenci wskazali interfejs „VR” jako ten, który jest najbardziej intuicyjny pod względem sterowania ruchem ramienia robota i układem kamer oraz pod względem komfortu.

4.2.3. Ankieta podsumowująca

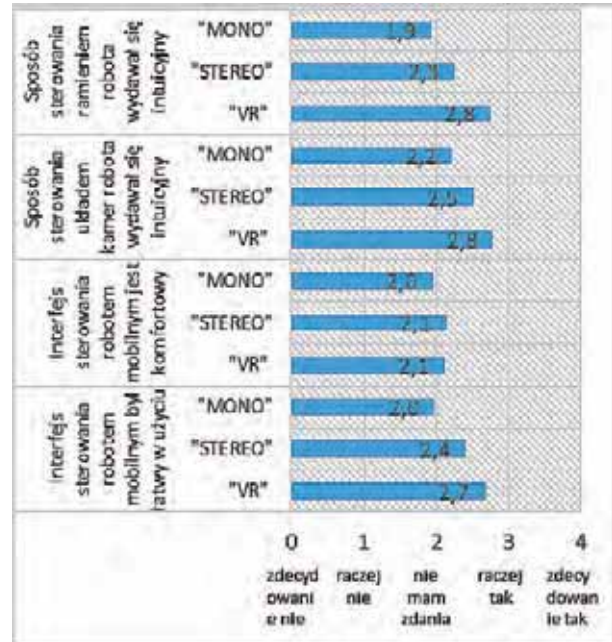
Dodatkowo po zakończeniu ostatniego cyklu uczestnicy zostali poproszeni o wypełnienie ankiety pojedynczego wyboru w której należało wybrać interfejs najlepiej odpowiadający zawartym w niej stwierdzeniom. Wyniki ankiety podsumowującej zostały przedstawione na rys. 8.

5. Wnioski

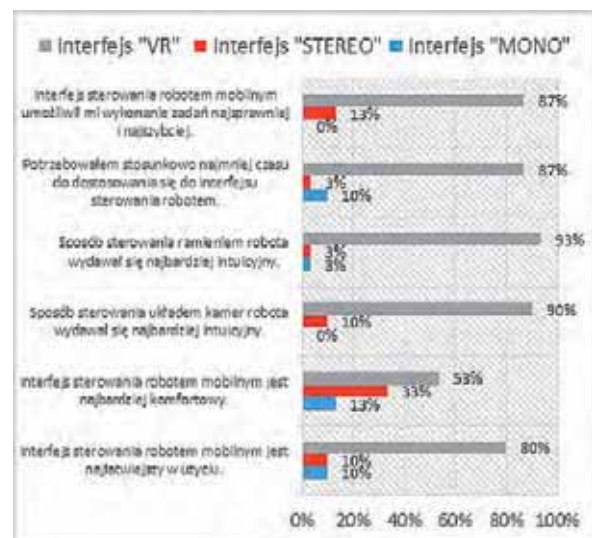
Podczas pracy z funkcjonalnym modelem mobilnego robota inspekcyjnego wydajność operatorów (badanych) była istotnie największa przy użyciu interfejsu „VR” bo ok. 1,8 razy większa niż przy użyciu interfejsu „MONO”. Wydajność operatorów przy użyciu interfejsu „STEREO” była również większa w porównaniu do wydajności operatorów używających interfejs „MONO”. Z jednoczynnikowej analizy wariancji oraz nieparametrycznej metody „Kruskal-Wallisa” wynikało że stosowanie różnych interfejsów sterowania spowodowało istotne statystyczne różnice w średnich wartościach czasu wykonania zadania. Natomiast testy porównawcze Tukeya oraz U Mann-Whitneya wskazują dla całej grupy i wszystkich podgrup iż średnia czasu wykonania zadania z użyciem interfejsu „VR” jest istotnie różna (wartość poziomu prawdopodobieństwa $p < 0,003$) od średnich czasu osiągniętych przy użyciu interfejsu „MONO” i „STEREO”. Testy porównawcze wykazały również statystycznie istotne różnice (poniżej granicy wartości prawdopodobieństwa $p = 0,05$) w analizowanych wartościach średnich czasu wykonania zadania z użyciem interfejsu „STEREO” i „MONO”. Zaobserwowane błędy wskazują na słabość interfejsu „MONO”, w którym obraz monoskopowy mocno wpłynął na procentowy udział błędów we wszystkich podjętych próbach wykonania zadań. Natomiast liczba błędów popełniona w trakcie sterowania przy użyciu interfejsu „STEREO” i „VR” była średnio pięciokrotnie mniejsza niż w podczas stosowania interfejsu „MONO”.

Analiza badań ankietowych kwestionariusza obecności przestrzennej, pokazała że stosowany interfejs istot-

nie wpływa na określenie poziomu obecności przestrzennej rozumianej jako ogólnej świadomości uczestnictwa, poruszania się i interakcji w prezentowanej zdalnej przestrzeni. Najwyższą ocenę tego stanu odnotowano po stosowaniu interfejsu „VR”, nieco mniejszą po stosowaniu inter-



Rys. 7. Wartości średnie otrzymanych ocen
Fig. 7. Average values of all grades received



Rys. 8. Ankieta podsumowująca
Fig. 8. Summary survey

nie wpływa na określenie poziomu obecności przestrzennej rozumianej jako ogólnej świadomości uczestnictwa, poruszania się i interakcji w prezentowanej zdalnej przestrzeni. Najwyższą ocenę tego stanu odnotowano po stosowaniu interfejsu „VR”, nieco mniejszą po stosowaniu inter-

grupa pytań odnosząca się do pojęcia sytuacyjnego modelu przestrzeni, tj. ogólnego wyobrażenia i oceny odległości w prezentowanym zdalnym środowisku. Zauważono również, że stosowany interfejs istotnie nie wpłynął m.in. na różnice poziomu zaangażowania uwagi oraz podtrzymywania niedowierzania, tj. ogólnego zainteresowania błędami, nieprawidłowymi działaniami w stosowanych interfejsach.

Analiza ankiet z grupą pytań dotyczącą oceny użyteczności, intuicyjności oraz komfortu użytkownika poszczególnych interfejsów oraz analiza ankiety podsumowującej mocno wskazują na interfejs „VR” jako interfejs posiadający cechy intuicyjnego sterowania (ramieniem robota oraz układem kamer), który ułatwia realizację zadań, usprawnia i przyspiesza wykonywanie zadań, skraca czas dostosowania się operatora do interfejsu sterowania oraz komfortu użytkownika (na niższym poziomie niż poprzednie cechy).

6. Podsumowanie

Podsumowując wnioski wyciągnięte z wyników przeprowadzonych badań, zastosowanie technik rzeczywistości w metodzie sterowania mobilnymi robotami inspekcyjnymi zwiększa wydajność operatora, poziom obecności przestrzennej i oceny odległości, ułatwia realizację zadań, usprawnia i przyspiesza wykonywanie zadań, skraca czas operatora do dostosowania się do interfejsu sterowania dzięki podwyższonemu poziomowi intuicyjności sterowania przy zapewnieniu komfortu użytkownika.

Opracowano na podstawie badań zrealizowanych w latach 2011–2012 w ramach działalności statutowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego, sfinansowanych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Bibliografia

1. Kui Qian, Aiguo Song, Jiatong Bao, Huatao Zhang, *Small Teleoperated Robot for Nuclear Radiation and Chemical Leak Detection*. Int J Adv Robot Syst, 2012, 9:70, DOI: 10.5772/50720.
2. Casper J., Murphy R.R., *Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center*, Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on, 367–385 Vol. 33, Issue: 3, June 2003.
3. Grabowski A., *Subiektywnie postrzegana przydatność zastosowania zmysłu dotyku w aplikacjach szkoleniowych wykorzystujących techniki rzeczywistości wirtualnej*, Mechanik [CD-ROM] 2013;7:213-220.
4. Budziszewski P., Grabowski A., Milanowicz M., Jankowski J., Dźwiarek M., *Designing a workplace for workers with motion disability with computer simulation and virtual reality techniques*, Int J Disabil Hum Dev 10(4), 2011.
5. Jankowski J., *Wykorzystanie technik rzeczywistości wirtualnej do teleoperacji robota mobilnego*, „Pomiary Automatyka Robotyka” [CD-ROM] 2012;2: 265-269
6. Jankowski J., *Stanowisko do badań nad możliwością wykorzystania technik rzeczywistości wirtualnej do*

teleoperacji robota mobilnego, Mechanik [CD-ROM] 2012;7:273-280.

7. Böcking S., Gysbers A., Wirth W., Klimmt C., Hartmann T., Schramm H., Laarni J., Sacau A., Vorderer P., *Theoretical and empirical support for distinctions between components and conditions of Spatial Presence*. [in:] Alcaniz M., Rey B. (Eds.) Proceedings of the VII. International Workshop on Presence Presence 2004, Valencia, 224–231. Valencia: Universidad Politécnic de Valencia.
8. Vorderer P., Wirth W., Gouveia F., Biocca F., Saari T., Jäncke L., Böcking S., Schramm H., Gysbers A., Hartmann T., Klimmt C., Laarni J., Ravaja N., Sacau A., Baumgartner T., Jäncke P., 2004, Development of the MEC Spatial Presence Questionnaire (MEC-SPQ). Unpublished report to the European Commission, Information, Society & Technology (IST) Programme, Project Presence: MEC (IST-2001-37661). Hannover, München, Helsinki, Porto, Zürich. ■

The use of virtual reality techniques in the remote control of the inspection robot

Abstract: This article presents a research for qualitative and quantitative comparison of different remote control interfaces, in particular, determine an effect of interface structure on efficiency of the operator remotely controlled mobile inspection robot. The robot is equipped with a manipulator ended with gripper and a rotatable set of stereo-cameras. The main control interface consist of head-mounted display (HMD) and data glove. All of it is supplemented by a motion tracking system for measuring orientation and position of HMD and data gloves, joystick and PC along with proper software. In order to compare different control interfaces an alternative system based on the LCD screen and joystick was prepared.

Keywords: teleoperation, virtual reality, mobile robot

Artykuł recenzowany, nadesłany 21.11.2013 r., przyjęty do druku 20.12.2013 r.

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

