

Sterowanie ruchem dwuramiennego robota mobilnego za pośrednictwem technik rzeczywistości wirtualnej

Controlling the motion of a two-arm mobile robot through virtual reality techniques

ANDRZEJ GRABOWSKI
JAROSŁAW JANKOWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.66>

W wielu sytuacjach korzystne może być zastąpienie wykonującego pracę człowieka mobilnym robotem. Dotyczy to zwłaszcza przypadków związanych z przebywaniem w strefie zagrożenia i narażeniem na szkodliwe substancje chemiczne lub promieniowanie jonizujące. Niestety rozwój technik sztucznej inteligencji nie pozwala jeszcze na budowanie w pełni autonomicznych robotów. W związku z tym uzasadnione jest wykorzystanie dwuramiennych robotów mobilnych, pełniących rolę awatara sterujących nimi człowieka. Jako interfejs sterowania dla teleoperatora robota można z powodzeniem zastosować aparaturę typową dla interaktywnych środowisk wirtualnych.

SŁOWA KLUCZOWE: roboty mobilne, rzeczywistość wirtualna, teleobecność, zdalne sterowanie

In many situations it may be beneficial to replace a worker with mobile robot. Especially in the case of a possible entry into the danger zone, related to, for example, exposure to harmful chemicals or ionizing radiation. Unfortunately, the development of artificial intelligence techniques does not yet allow the construction of fully autonomous robots. Therefore, it may be justifiable to use two-armed mobile robots acting as an avatar of the human being. As a human-machine interface for the tele-operator, the equipment typical of interactive virtual environments can be successfully used.

KEYWORDS: mobile robots, virtual reality, telepresence, remote control

Zrozumienie istoty poszczególnych elementów budowania wrażenia teleobecności nie jest możliwe bez znajomości zastosowań technologii teleoperacji. Do najczęściej wymienianych w literaturze można zaliczyć: eksplorację przestrzeni kosmicznej, przemysł, medycynę, wojsko, niebezpieczne zawody, a także edukację czy przemysł rozrywkowy. Do pełniejszego zrozumienia zagadnienia teleoperacji konieczne jest zdefiniowanie i przeanalizowanie jej rozmaitych elementów.

Architektura kontrolna

Jest to sposób, w jaki lokalne stanowisko do teleoperacji komunikuje się z odległą lokalizacją. Podstawowym problemem jest tu informacyjne sprzężenie zwrotne między operatorem a urządzeniem, ponieważ od tego zależą sposób i jakość kontroli, jaką operator sprawuje za pośrednictwem systemu. Takie czynniki, jak opóźnienie czy precyzja efektorów, muszą być brane pod uwagę na etapie projektowania systemu, aby stworzyć moż-

liwość komunikacji w czasie rzeczywistym i zapewnić prawidłowe wykonywanie zadań. Naturalnie czas reakcji operatora również wpływa na komunikację. Badania dowodzą, że ten czas w prostym zadaniu, polegającym na naciskaniu klawisza w odpowiedzi na bodziec, wynosi średnio 215 ms [1]. Próżno jednak szukać prostych zadań w przypadku teleoperacji. Czas reakcji operatora na złożony bodziec w przypadku wykonywania lub nadzorowania wieloetapowego zadania może się wydłużyć do kilku, a nawet kilkunastu sekund (zależnie od zadania). Teleoperacja jest zazwyczaj niezbędna i wykorzystywana w sytuacjach, gdy dystans między operatorem i urządzeniem (manipulatorem) jest bardzo duży. Są to zwykle zadania w środowisku niosącym niebezpieczeństwo dla ludzi, np. w głębi oceanu, kosmosie czy elektrowni jądrowej. To oznacza, że nie ma ucieczki przed opóźnieniem w pętli operator–manipulator.

Haptyczne sprzężenie zwrotne

Haptyka odnosi się do zmysłu dotyku, a zwłaszcza do odbierania wrażeń dotykowych i manipulacji obiektami, używania zmysłów dotyku i propriocepcji w celu prawidłowego wykonania zadania. Jeżeli haptyczne sprzężenie zwrotne jest nieprawidłowe, wtedy brak jest np. wrażenia oporu stawianego przez przedmioty i siły koniecznej do ich przemieszczenia. Skutkuje to wydłużeniem czasu realizacji zadania [2] i zwiększeniem siły nacisku w porównaniu z bezpośrednią manipulacją [3]. Zwrotne przekazanie operatorowi informacji o tych siłach umożliwia prawidłowe wykonanie zadania [4].

Interfejs człowiek–maszyna

Jego funkcją jest takie przekazywanie operatorowi informacji o odległym środowisku (w którym znajduje się manipulator), aby umożliwić prawidłowe i komfortowe wykonanie zadania. Interfejs zamienia informacje z sensorów zdalnego urządzenia na sygnały, które później odbierane są przez zmysły operatora. Wzmoczenie wrażenia teleobecności jest możliwe tylko wtedy, gdy operator korzysta z wygodnego i ergonomicznego interfejsu.

Opis procedury badawczej

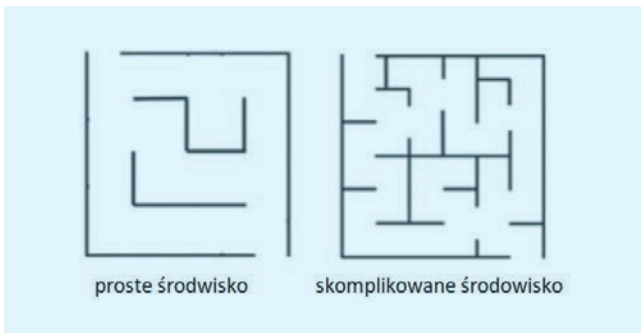
Celem planowanych badań jest ocena wpływu takich cech systemu, jak opóźnienie sprzężenia zwrotnego, poziom wrażenia teleobecności oraz złożoność zadania na funkcjonowanie poznawcze i fizjologiczne operatora, a także na poziom wykonania zadania. Do tego celu zostanie zaadaptowana metoda badania zaproponowana przez Yanga i Dorneicha [5]. Zmiany w środowisku

* Dr hab. inż. Andrzej Grabowski, prof. CIOP-PIB (angra@ciop.pl); dr inż. Jarosław Jankowski (jajan@ciop.pl) – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

badawczym będą wprowadzane poprzez zmianę złożoności zadania oraz presję czasową. Przyjęte zostaną dwa poziomy złożoności środowiska, w którym operuje zdalnie robot (rys. 1). Zadaniem badanych osób będzie odnalezienie i zebranie 14 obiektów rozmieszczonych w labiryntach. Odniesienie do presji czasowej przewiduje się dwa poziomy: ograniczenie czasu bądź jego brak. Ograniczenie czasu zostanie wyznaczone na podstawie prób pilotażowych.

W trakcie badania planuje się zbierać dane dotyczące takich zmiennych, jak:

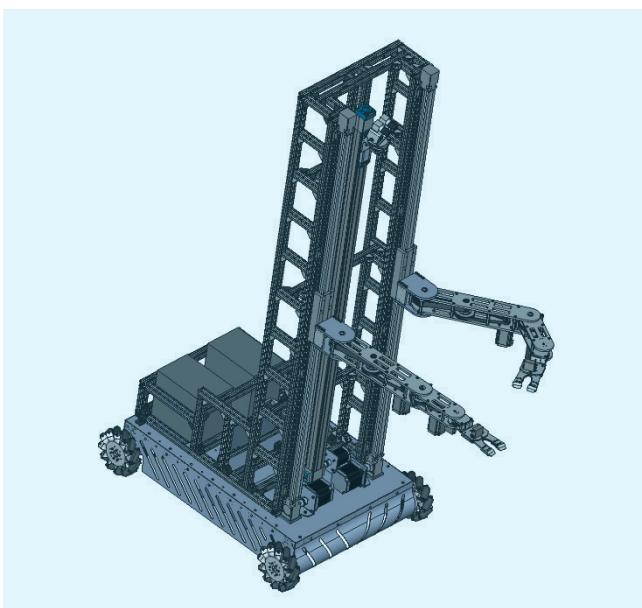
- postrzegana trudność zadania – sprawdzenie skuteczności manipulacji,
- stan emocjonalny (skala odczuwanych emocji i podskala frustracji NASA TLX),



Rys. 1. Przykładowa realizacja zmiany trudności zadania poprzez wymuszenie realizacji bardziej skomplikowanych torów ruchu w trakcie nawigacji po laboratorium



Rys. 2. Ruch osoby biorącej udział w badaniach (z lewej) zostanie przeniesiony na odpowiedni ruch robota w sąsiedniej sali (z prawej)



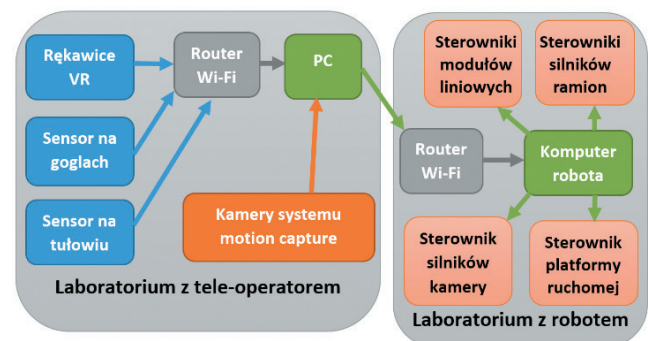
Rys. 3. Projekt dwuramiennego robota, który zostanie wykorzystany w badaniach

- obciążenie poznawcze (podskala wysiłku umysłowego NASA-TLX i czas reakcji),
- poziom wykonania zadania (podskala poziomu wykonania NASA TLX i liczba zlokalizowanych celów),
- użyteczność,
- poziom obecności przestrzennej,
- poziom akceptacji technologii.

Badania będą prowadzone w dwóch pomieszczeniach (rys. 2). W pierwszym, o powierzchni 154 m² (11 m × 14 m), będzie się przemieszczał ochotnik. Jego ruch będzie rejestrowany za pomocą wizyjnego systemu pozycjonowania typu *motion capture* (28 kamer Oqus 7+ firmy Qualisys) oraz metod inercyjnych (do pomiaru ruchu: głowy – poprzez elektronikę wbudowaną w gogle VR, dłoni – poprzez bezprzewodowe rękawice rzeczywistości wirtualnej). Zdalnie sterowany robot (jego projekt, dokładniej opisany w [6], przedstawiono na rys. 3), którego ruch będzie odwzorowywał ruch teleoperatora (ochotnika), zostanie umieszczony w sąsiednim pomieszczeniu o większej powierzchni.

Transmisja danych

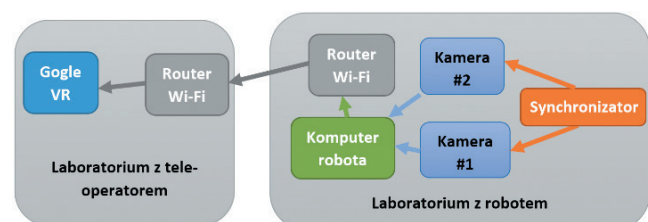
W ramach systemu transmisja danych musi się odbywać dwutorowo. Z jednej strony muszą być stale wysyłane dane sterujące ruchem robota (rys. 4), a z drugiej – teleoperator musi być stale informowany o tym, co się dzieje w otoczeniu robota (osiąga się to przez prezentację w czasie rzeczywistym obrazu z pary kamer zamontowanych na robocie – rys. 5).



Rys. 4. Schemat transmisji danych do robota. Dane pomiędzy laboratoriami będą przesyłane za pośrednictwem sieci Ethernet

Rejestrowane dane o ruchu teleoperatora dotyczą położenia oraz orientacji dłoni, głowy i tułowia w trójwymiarowej przestrzeni, a także stopnia zgięcia palców.

Dane o położeniu są rejestrowane przez wizyjny system typu *motion capture*, natomiast dane o orientacji – przez układy elektroniczne typu AHRS zamocowane na tułowiu, rękawice oraz gogle rzeczywistości wirtualnej typu HMD. Stopień zgięcia palców jest rejestrowany przez rękawicę komunikującą się z komputerem klasy PC przez sieć bezprzewodową Wi-Fi. Dane te są następnie integrowane



Rys. 5. Schemat transmisji danych do teleoperatora

i wysyłane do komputera sterującego ruchem elementów robota. Tam są zamieniane na sygnały sterujące dla poszczególnych silników w taki sposób, aby odwzorować ruch teleoperatora. Ruch platformy kołowej będzie odtwarzał trajektorię tułowia teleoperatora z uwzględnieniem jego orientacji, co oznacza, że robot będzie się obracał w miejscu, gdy teleoperator będzie się obracał wokół własnej osi. Obroty głowy względem tułowia będą odtwarzane przez silniki sterujące ruchem obu kamer zainstalowanych na robocie. Planuje się zastosowanie dwóch stopni swobody w zakresie obrotu kamery. Ruch głowy w osi pionowej będzie odtwarzany za pomocą modułu liniowego, na którym zainstalowana jest para kamer wraz z silnikami odtwarzającymi obroty głowy. Jeżeli operator z jakiegoś powodu zniży głowę (np. kucnie), moduł liniowy obniży położenie kamer, tak aby znajdowały się na tej samej wysokości co wyświetlający obraz HMD. Podobnie ruch dłoni będzie odwzorowywany za pomocą ruchu modułów liniowych, na których zamocowane są ramiona, oraz silników powodujących obroty dookoła osi odpowiadających poszczególnym stawom kończyny górnej (barkowemu, łokciowemu, nadgarstkowemu). Położenie chwytaka robota względem pary kamer będzie ustawiane możliwie blisko miejsca, gdzie znajduje się śródreżcze teleoperatora, względem gogli rzeczywistości wirtualnej typu HMD. To zadanie jest stosunkowo proste, ponieważ przesunięcie w osi pionowej nie zależy od ruchu w pozostałych wymiarach, tzn. wysokość, na jakiej znajduje się ramię robota, jest wprost zależna od wysokości, na jakiej znajduje się rękawica rzeczywistości wirtualnej. Dzięki temu rozwiązanie zadania odwrotnego jest znacznie ułatwione. Zacisk chwytaka będzie regulowany stopniem zgięcia palców, rejestrowanym przez rękawice rzeczywistości wirtualnej. Planuje się zabezpieczenie silników chwytaka przed potencjalnym uszkodzeniem poprzez monitorowanie siły nacisku.

Osobnym problemem jest transmisja danych wizyjnych pochodzących z pary kamer zainstalowanych na robocie do teleoperatora. Przesyłany będzie obraz stereoskopowy, umożliwiający percepcję głębi i prawidłowe określenie relacji przestrzennych pomiędzy przedmiotami, w tym pomiędzy chwytakiem robota a planowanym do przeniesienia przedmiotem. Dane te powinny być przesyłane z jak najmniejszymi opóźnieniami. Obrazy z kamer będą przesyłane do komputera, którego zadaniem będzie ich połączenie w sposób zapewniający ich wyświetlenie w goglach rzeczywistości wirtualnej. Zastosowanie kamer ze złączem odpowiedzialnym za synchronizację ich pracy pozwala na rejestrację obu obrazów w tym samym czasie. W innym przypadku obrazy mogłyby się różnić, co powodowałoby dyskomfort u teleoperatora. Następnie obrazy będą kompresowane i przesyłane drogą bezprzewodową w celu ich wyświetlenia za pomocą gogli rzeczywistości wirtualnej.

Podsumowanie

Dokonano przeglądu zastosowań połączonych technik rzeczywistości wirtualnej i teleoperacji. Wykazano, że teleoperacja może skorzystać na włączeniu i doskonaleniu technik rzeczywistości wirtualnej. Kluczowe jest tu zagadnienie teleobecności. Doskonalenie technologii rzeczywistości wirtualnej dzięki aplikacji wyników badań nad zwiększaniem immersyjności środowisk wirtualnych przełoży się na lepsze funkcjonowanie systemów teleoperacji. Odbędzie się to poprzez zwiększenie wrażenia teleobecności operatora w odległym środowisku za spr-

wą interfejsu VR. Stereoskopowe widzenie, swoboda ruchów, naturalne odzwierciedlanie ruchów, sprzężenie zwrotne czasu rzeczywistego, w tym haptyczne sprzężenie zwrotne, zwiększają wrażenie teleobecności, a przez to pozwalają dokładniej wykonywać powierzone zadania. Przyszłość teleoperacji leży właśnie w integracji z technologią rzeczywistości wirtualnej.

Podsumowując, przeanalizowane zastosowania to:

- **Przemysł.** Główne zalety teleoperacji i teleobecności w przemyśle to malejące koszty związane z utrzymaniem oraz zwiększenie wydajności i niezawodności poprzez zastąpienie ludzi robotami, a tym samym wyższe dochody w celu zagwarantowania zwrotu.
- **Medycyna.** Zdalnie obsługiwane roboty mogą wykonywać operacje chirurgiczne w oddalonych miejscach – takich jak pole walki czy stacja kosmiczna – lub w skali komórkowej. Ponadto dzięki wirtualnej rzeczywistości zapobieganie i leczenie chorób można osiągnąć za pomocą powszechnie używanych urządzeń opartych na VR.
- **Edukacja.** Metody nauczania zmieniają się dzięki postępowi technologicznemu, co pozwala osiągnąć lepsze efekty kształcenia.
- **Drony.** Wciąż rośnie liczba ich potencjalnych zastosowań, takich jak unikanie niebezpieczeństw w pracy czy wykonywanie zadań automatycznie. Kolejne zastosowania będą opracowywane, aby zwiększyć bezpieczeństwo i komfort życia.
- **Wrocie środowiska i niebezpieczne miejsca pracy.** Dzięki teleoperacji, teleobecności i wirtualnej rzeczywistości dokonuje się postęp w eksploracji kosmosu i głębi oceanów oraz wzrasta skuteczność działań w przypadku klęsk żywiołowych, pożarów lub innych nagłych wypadków. Szczególna rola wirtualnej rzeczywistości polega jednak na radykalnej zmianie życia osób niepełnosprawnych, np. dzięki rehabilitacji zaburzeń motorycznych [7] lub wspomaganie wykonywania prac fizycznych za pośrednictwem zdalnie sterowanych robotów.

Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017–2019, w zakresie prac naukowych, przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

LITERATURA

1. Kosinski R.J. "A literature review on reaction time". South Carolina: Clemson University, 2008.
2. Salcudean S., Ku S., Bell G. "Performance measurement in scaled teleoperation for microsurgery". *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 1205. Springer, 1997: s. 789–798.
3. Wagner C., Stylopoulos N., Howe R.D. "The role of force feedback in surgery: analysis of blunt dissection". *Proceedings of the 10th symposium on haptic interfaces for virtual environments and teleoperator systems*. 2002: s. 68–74.
4. Zandsteege C.J., Bruijnen D.J.H., van de Molengraft M.J.G. "Haptic tele-operation system control design for the ultrasound task: A loop-shaping approach". *Mechatronics*. 20 (2010): s. 767–777.
5. Euijung Yang, Dorneich M.C. "The emotional, cognitive, physiological, and performance effects of variable time delay in robotic teleoperation". *International Journal of Social Robotics*. 9, 4 (2017): s. 491–508.
6. Grabowski A. „Projekt dwuramiennego robota sterowanego przez teleoperatora z wykorzystaniem technik rzeczywistości wirtualnej”. *Napędy i Sterowanie*. 226 (2018): s. 46–50.
7. Keshner E.A. "Virtual reality and physical rehabilitation: a new toy or a new research and rehabilitation tool?". *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 1(1):8 (2004).