

# Raport – zdalne sterowanie robotem Robin Heart pomiędzy Zabrzem a Dubajem

Artykuł recenzowany

**DARIUSZ KRAWCZYK<sup>1,2</sup>**  
**ZBIGNIEW NAWRAT<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniewa Religi w Zabrzu  
<sup>2</sup>Szkoła Doktorska Nauk Medycznych, Katedra Biofizyki, Wydział Nauk Medycznych w Zabrzu, Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach  
<sup>3</sup>Wydział Nauk Medycznych w Zabrzu, Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach

*Słowa kluczowe:*  
roboty medyczne,  
telemanipulatory chirurgiczne,  
teleoperacje

*Keywords:*  
medical robots,  
surgical telemanipulators,  
teleoperations

## Streszczenie

*Zdalne sterowanie narzędziami chirurgicznymi stanowi do dzisiaj wyzwanie. Badania różnych metod sterowania na odległość, w różnych warunkach technicznych i na różnych dystansach, pozwalają określić granice skuteczności i bezpieczeństwa telechirurgii. Zdobyta wiedza będzie wykorzystywana do doskonalenia wyposażenia, konstrukcji i oprogramowania, a w efekcie: optymalizacji celu wprowadzenia robotyki do medycyny. Celem wprowadzenia robotów jest poprawa skuteczności, precyzja, powtarzalność (standaryzacja) i zmniejszenie inwazyjności zabiegów chirurgicznych. W tym artykule autorzy opisali eksperyment podjęty w styczniu 2022 r. – demonstracja zdalnego sterowania robotem Robin Heart Pelikan wykorzystując ogólnodostępny Internet. Opracowano, zastosowano i przetestowano kilka różnych metod sterowania na odległość: pomiędzy Instytutem Protez Serca w Zabrzu (konsola sterowania) a robotem Robin Heart umieszczonym w halach targowych ArabHealth 2022 w Dubaju. Na podstawie pomiarów oceniono, która z metod transmisji sygnałów i obrazów jest najbardziej optymalna, czyli zapewnia zarówno niewielkie opóźnienia (latencja) w transmisji sygnałów jak i odpowiednią jakość oraz kontrolę przesyłanych informacji.*

## Abstract

*The remote control of surgical instruments is still a challenge today. Research on various methods of remote control, in different technical conditions and at different distances, allows to define the limits of effectiveness and safety of telesurgery. The acquired knowledge will be used to improve equipment, construction and*

*software and, as a result: optimize the goal of introducing robotics into medicine. The purpose of introducing robots is to improve the efficiency, precision, repeatability (standardization) and reduce the invasiveness of surgical procedures. In this article, the authors describe an experiment undertaken in January 2022 - a demonstration of the remote control of the Robin Heart Pelikan robot using the public Internet. Several different methods of remote control from Zabrze, a robot located in Arab-Health2022 exhibition halls in Dubai, were developed, applied and tested. Based on the measurements, it was assessed which of the methods of signal and image transmission is the most optimal, i.e. it ensures both low delays (latency) in signal transmission and appropriate quality and control of the transmitted information.*

## ■ WPROWADZENIE

W Fundacji Rozwoju Kardiologii im prof. Zbigniewa Religi w Zabrzu (FRK) w ramach pionierskich prac nad robotami chirurgicznymi z rodziny Robin Heart powstało kilkanaście modeli i prototypów innowacyjnych narzędzi chirurga [1].

Obecnie opracowywane roboty należą do grupy telemanipulatorów. Umiejętność skutecznej interwencji lekarza w miejscu i czasie, tam i wtedy kiedy jest konieczna, stanowi wyzwanie telemedycyny aktywnej, w tym telechirurgii. W 2009 wykonano w FRK pierwszą teleoperację

na modelu układu kostnego człowieka z naturalnym sercem świni w jego klatce piersiowej: kardiolog Joanna Śliwka (pracownik Śląskiego Centrum Chorób Serca w Zabrzu) z konsoli Robin Heart Shell umieszczonej w FRK w Zabrzu sterowała robotem umieszczonym w Katowicach w Centrum Medycyny Doświadczalnej Śląskiego Uniwersytetu Medycznego (CMD SUM). W tej samej sali operacyjnej kilka miesięcy wcześniej wykonano eksperyment na świni, stosując najnowszego robota Robin Heart mc<sup>2</sup>. W ramach współpracy z FRK firma Emitel zestawiała system komunikacji złożony z bezprzewodowego łącza radiowego punkt-punkt (13 km), systemu transmisji danych, sygnału audio-wideo z kilku źródeł wraz z konwersją sygnału analogowego na cyfrowy. Opóźnienia wynosiły odpowiednio: dla sygnału sterowania pomiędzy katowickim CMD SUM z FRK w Zabrzu robotem (1 ms) oraz dla obrazu (280 ms) [1,2]. Robin Heart Team, wykorzystując rozwijającą się sieć internetową wykonał następnie testy zdalnego sterowania robotem na odległość pomiędzy Meksykiem i Zabrzem oraz serię eksperymentów teleoperacji z FRK w Muzeum Górnictwa w kopalni

Guido (poziom -320m). Przygotowywane są kolejne eksperymenty w tym zakresie, również wykorzystujące sieć 5G z partnerem – jednym z wiodących na rynku polskim dostawców usług telekomunikacyjnych.

Teleoperacja może być wykonywana dzięki aktywnej teleobecności chirurga i możliwości jego interakcji z pacjentem za pomocą robota. Kontrola położenia i działania narzędzi zostaje zapewniona obecnie przez dostęp do aktualnego obrazu miejsca operacyjnego. Prowadzone są prace badawcze nad wdrożeniem do praktyki klinicznej robotów przekazujących operatorowi również dane dotyczące reakcji siłowych. W pętli sprzężenia układu sterowania znajduje się człowiek [3]. Lekarz-operator robota chirurgicznego, może być traktowany jako element systemu sterowania powiązany przez system informatyczny i działanie układu elektromechanicznego robota z narzędziem wykonawczym (bierzemy tu pod uwagę zarówno przetwarzanie informacji w mózgu, jak i zależną od niego koordynację ruchową precyzyjnego sterowania poprzez interfejsy robota) [2].

Rozwój technologii telekomunikacyjnych inspiruje postępy w zakresie teleoperacji. Systemy telemedyczne zostały przygotowane i po raz pierwszy zastosowane przez NASA. Podczas lotu kosmicznego amerykańskiego astronauty Johna Glenna zdalnie monitorowano parametry fizjologiczne, a wyniki przekazywano na Ziemię. W 1965 roku przez interaktywne połączenie wykorzystujące interkontynentalnego satelitę Early Bird (TV link-up), M. DeBakey wykonał operację zastawki aortalnej w Methodist Hospital (Houston, Texas, USA), utrzymując stały kontakt wizyjny z uniwersytetem w Genewie w Szwajcarii. Naturalnym następstwem tych pionier-

skich doświadczeń było wprowadzenie do medycyny różnorodnych technologii telekomunikacyjnych, które umożliwiały pośredni kontakt lekarza z pacjentem. Znaczenie i możliwości telemedycyny wzrosły dopiero w momencie pojawienia się masowego dostępu do globalnej sieci teleinformatycznej [1].

Możliwość operowania na odległość była główną przyczyną powstania robotów chirurgicznych. Stosowane klinicznie roboty chirurgiczne wywodzą się z zarzuconego programu wojen gwiazdnych, prowadzonego w latach 70. i 80. przez NASA (firma Computer Motion CMI produkująca robota Zeus) oraz Pentagon (firma Intuitive Surgical IS produkująca robota da Vinci). W 1986 r. Phil Green z Stanford Research Institute (SRI) otrzymał grant na opracowanie zdalnie sterowanego robota chirurgicznego. Pierwszy robot testowany był przez waszyngtońskiego chirurga – Richarda Satawę. Dobre wyniki testów jednego ramienia spowodowały, że DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) sfinansowała wykonanie pierwszego robota (na platformie wozu wojskowego) [1].

Procedury telechirurgiczne wprowadzono do praktyki wykorzystując połączenie satelitarne między Europą i USA oraz kabel światłowodowy USA–Europa. Fabrizio i wsp. [4] prowadzili badania wpływu opóźnienia obrazu i oceniali, że poniżej 700 ms jeszcze można operować, natomiast przy większym opóźnieniu liczba błędów jest nieakceptowalna. Większość badaczy za graniczną wielkość opóźnienia przyjmuje 300 ms [1].

Postępy telechirurgii wymagają rozwiązania problemów technicznych związanych z opóźnieniem przekazu informacji, głównie obrazu wideo. Podejmowano różne próby określenia i kompensacji wpływu latencji na zabiegi telechirurgiczne. Pierwsze teleoperacje prototypem robota da Vinci (opracowanym w stanfordzkim SRI) wykonali Richard Satava i John Bowersox w 1996 roku [5]. Pierwszym spektakularnym sukcesem telechirurgii była Operacja Lindbergh we wrześniu 2001 roku, w której sygnały sterujące robotem przekazywane były na odległość 7 tys. km, z Nowego Jorku do szpitala w Strasburgu (Francja). Jacques Marescaux ze swoim zespołem IRCAD za pomocą robota Zeus usunął pęcherzyk żółciowy 68-letniej pacjentce. Była to pierwsza operacja typu RARTS (Robot-Assisted Remote Telepresence Surgery). Opóźnienie podmorskiej sieci światłowodowej ATM OC-3 o przepustowości 10 Mb/s przesyłającej sygnały nie przekraczało 155 ms (ze względów bezpieczeństwa opóźnienie nie może przekraczać 200 ms) [6]. Operację na człowieku poprzedzały testy telechirurgiczne na zwierzętach, badania źródeł opóźnień i ich wpływu na jakość operacji. Transmisję sygnałów pomiędzy konsolą

i robotem w laboratorium przeprowadzono odtwarzając na terenie Francji sieć długości 3000 km (całkowita latencja  $11 \pm 3$  ms). To było zbyt mało, więc w kolejnych eksperymentach wprowadzono sztuczne (programowe) opóźnienia w celu wyznaczenia maksymalnej tolerowalnej latencji.

W roku 2002 przeprowadzono kolejną operację, tym razem w Berlinie (rak prostaty). W lutym 2003 roku przeprowadzono pierwszą teleoperację szpital-szpital. Mehran Anvari z Kanady przeprowadził operację, fundoplikację sposobem Nissana na odległości 350 km (między McMaster University w Hamilton – Ontario, Kanada i North Bay) robotem Zeus (opóźnienie do 150 ms) [7].

W 2005 roku Hanly i Broderick opracowali wytyczne umożliwiające przeprowadzenie teleoperacji nawet przy latencji rzędu 1000 ms [8]. Oto główne zalecenia dla chirurga: wykonywanie spokojnych, wolnych ruchów, w procesie przygotowania doskonałości umiejętności przewidywania zmiany pozycji narzędzi chirurgicznych. Autorzy docenili również rolę chirurga asystującego na sali operacyjnej oraz zastosowanie synchronizacji obrazów.

W 2009 roku japońscy lekarze prototypowym robotem wykonali na zwłokach pierwszą próbę teleoperacji typu NOTES (natural orifice transluminal endoscopic surgery) na odległości 3,750 km. Opóźnienie sieci ethernetowej na trasie Japonia–Tajlandia wynosiło 65 ms, obrazu od 160 do 210 ms w jedną stronę [9].

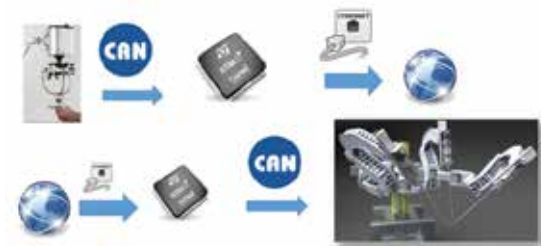
Najważniejszym czynnikiem wpływającym na postęp w dziedzinie teleoperacji jest zmniejszenie opóźnień w transmisji sygnału związanych z odległością między operatorem a robotem, czyli lekarzem i pacjentem. Jedną z takich możliwości jest wprowadzenie standardu 5G. Pierwszym dowodem tej tezy są doniesienia o eksperymencie na zwierzętach przeprowadzonym w Chinach. Operację przeprowadzono z odległości 30 mil przy użyciu połączenia 5G z opóźnieniem zaledwie 100 milisekund [10]. Również w naszym zespole planujemy przeprowadzić eksperymenty z wykorzystaniem sieci 5G.

Jednak w tym roku postanowiliśmy wykorzystać okazję – pokazy naszego najłżejszego robota Robin Heart Pelikan na targach ArabHealth w Dubaju – by sprawdzić możliwości kontrolowania pozycji robota wykorzystując ogólnodostępną sieć internetową. W tej publikacji podsumowujemy nasze doświadczenia sterowania robotem na odległość Zabrze-Dubaj i Dubaj – Zabrze.

Prace nad doskonaleniem technicznym, metodologicznym, czy prawnym teleoperacji prowadzone są obecnie w wielu wiodących w dziedzinie robotyki ośrodkach. Mamy nadzieję, że również nasze doświadczenia wnoszą znaczący wkład w ten proces rozwoju teleoperacji.







Rysunek 5. Schemat systemu przesyłania sygnałów sterowania robotem z minimalizacją opóźnień



Rysunek 6. Topologia optymalnego połączenia zdalnego robot chirurgiczny – konsola operatora

- Brak jakiegokolwiek możliwości synchronizacji transmisji obrazu do transmisji sygnałów sterowania.

Szybki transfer sygnałów sterowania:

- Szybka transmisja sygnałów sterowania (minimalizacja opóźnień w torze sterowania)

Zgodnie ze schematami blokowymi (rys. 4) zarówno zadajnik ruchu po stronie konsoli sterowania, jak i robot kontrolowane są za pomocą mikrokontrolerów STM 32 F7. W wersji zdalnie sterowanej zamieniono mikrokontrolery jednorzeniowe STM32 F7 na dwurzeniowe STM32 H7, w takiej konfiguracji, że rdzeń nr 1 obsługuje sterowanie robotem lub zadajnikiem ruchu ( obliczenie kinematyk itp.) natomiast rdzeń nr 2 odpowiada za komunikację z siecią Ethernet.

W rozwiązaniu przedstawionym na rys. 5 mamy do czynienia z minimalizacją opóźnień w torze sterowania (oprogramowania na bardzo szybkie wysyłanie ramek TCP). Uzyskany czas transmisji zadajnik-robot ~10 ms.

Ten sposób sterowania chociaż pozwala na transmisję z minimalnym opóźnieniem posiada pewne wady:

- Ograniczona możliwość konfiguracji sieci po stronie mikrokontrolerów.
- Usługi typu VPN i szyfrowanie transmisji muszą być zapewnione przez zewnętrzne dodatkowe urządzenia.
- Połączone urządzenia konsola – robot muszą znajdować się w jednej klasie adresów IP i w jednej podsieci.
- Brak możliwości synchronizacji obraz – sterowanie.

## ■ ROBOTY

**DUBAJ:** W eksperymencie wykorzystano ultralekiego, jednoramiennego robota toru wizyjnego Ro-

bin Heart Pelikan (4 stopnie swobody) opisanego w publikacji [11].

**ZABRZE:** W eksperymencie wykorzystano robota Robin Heart Tele opisanego w publikacji [12], zmodyfikowanego przez Dariusza Krawczyka. Robot w obecnej wersji stanowi pełny system chirurgiczny na który składa się: robot trójramienny wyposażony w dwa narzędzia produkcji Intuitive Surgical (producent robota da Vinci) oraz tor wizyjny kontrolowany z konsoli Robin Heart Stiff Flop. W tym modelu (7 stopni swobody ) zainstalowano 6 czujników siły do testów sprzężenia siłowego. Wyniki zostaną opublikowane wkrótce.

## ■ JAK BEZPIECZNIE PRZEPROWADZIĆ TELEOPERACJĘ ?

Przygotowania do zdalnego sterowania z wykorzystaniem ogólnodostępnej sieci internetowej na dystansie Zabrze-Dubaj-Zabrze.

### PRZYPADK OPTYMALNY

Optymalny typ połączenia zdalnego robot – konsola to taki, który przy akceptowalnym poziomie opóźnień (<100ms) pozwala na:

- Synchronizację danych obrazu z danymi sterowania – aby nie dochodziło do sytuacji zmiennego opóźnienia obrazu względem sterowania.
- Kontrolę przepływu danych z automatyczną retransmisją pakietów w przypadku wystąpienia błędów lub utraty części danych.
- Ustandaryzowaną strategię postępowania na wypadek utraty pakietów, zbyt dużego opóźnienia, zerwania połączenia.

Topologia optymalnego połączenia jest przedstawiona na rys 6.

Komputer konsoli sterowania powinien mieć zapewniony dostęp do Internetu z statycznym publicznym adresem IP, na którym można zainstalować serwer VPN. Po stronie konsoli sterowania należy wprowadzić sygnał informacji o pozycji dłoni chirurga z zadajnika ruchu szybką magistralą np. USB wprost do komputera PC z zainstalowaną specjalną aplikacją. Rola komputera i aplikacji jest następująca:

- Uruchomienie serwera open-VPN
- Uruchomienie po stronie aplikacji konsoli serwera TCP.

Po stronie robota również należy wykorzystać komputer PC z specjalną aplikacją, do którego napędy robota oraz kamera endoskopowa zostaną podłączone szybkim interfejsem np. USB. Po zestawieniu połączenia VPN komputer konsoli – komputer robota następuje wymiana informacji między dwiema specjalnymi aplikacjami. Aplikacja Serwer – TCP po stronie konsoli i aplikacja Klient TCP po stronie robota. Aplikacja po stronie konsoli sterowania pobiera informację o położeniu i orientacji dłoni chirurga-operatora, a następnie pakuje te dane w pakiet TCP i wysyła do

aplikacji po stronie robota. Aplikacja po stronie robota, po nawiązaniu połączenia TCP z aplikacją konsoli odbiera dane dotyczące ruchu dłoni chirurga oraz zapytania o obraz. Dane dotyczące ruchu są „wyciągane” z ramek TCP i transmitowane po magistrali USB do robota. Na odebrane dane odnoszące się do sterowania robot odpowiada danymi związanymi ze sprzężeniem siłowym tworząc dwukierunkowy kanał transmisji sygnału sterowania. Równoległe do sygnału sterowania konsola wysyła zapytania o transmisję obrazu, na każde takie zapytanie aplikacja robota odpowiada transmisją jednej klatki obrazu. Aplikacja po stronie konsoli sterowania jest aplikacją główną typu MASTER. To ona zawiera serwer VPN, TCP i kontroluje całość przepływu danych. Monitoruje na bieżąco czas wysłania danych oraz czas uzyskania odpowiedzi na dany pakiet. Dzięki czemu w czasie rzeczywistym jest w stanie mierzyć opóźnienie w torze sterowania i w torze obrazu. Kolejną funkcjonalnością aplikacji to synchronizacja danych, która polega na manipulowaniu ilością wysyłanych zapytań o obraz oraz danych sterowania z konsoli, w taki sposób, aby zachować stały czas opóźnienia np. na 10 transmisji danych przypada jedna transmisja obrazu. Dlatego możemy uniknąć desynchronizacji transmisji obrazu względem sygnałów sterowania robotem.

#### Zalety:

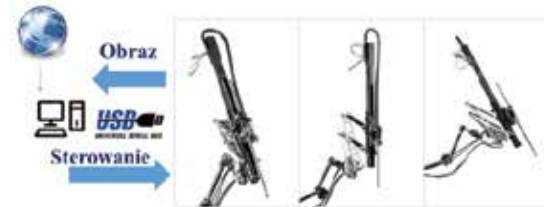
- I konsola i robot posiadają komputer PC dedykowany do zdalnego połączenia, dzięki czemu istnieje dowolna możliwość konfiguracji sieci, dostawców VPN i innych systemów np. szyfrowania danych.
- Możliwość synchronizacji danych obraz sterowania.
- Gdy całość danych zostaje zgrupowana w 1 aplikacji istnieje możliwość zastosowania sztucznej inteligencji, która będzie analizować transmisję i zapewniać jej bezpieczeństwo wraz z odpowiednią reakcją na sytuacje awaryjne np. zerwanie połączenia, utrata pakietów, zmienne warunki obciążenia łącza, niekontrolowany wzrost opóźnień danych.

#### Wady:

- Konwersja danych magistrali CAN -> USB po stronie zadajnika ruchu i robota wprowadza kolejne opóźnienia w torze sterowania.
- Konwersja obrazu z kamery za pomocą *video-grabera* HDMI-USB wprowadza dodatkowe opóźnienia w torze obrazu.
- Aplikacje dodatkowe po obu stronach sieci i synchronizacja danych w raz z ich analizą przez sieć AI wprowadzają dodatkowe największe opóźnienia.
- Video-grabber służy do przechwytywania sygnału ze źródła analogowego (kamera) i zapisywania go na dysku twardym



Rysunek 7. Model teleoperacji Zabrze-Dubaj-Zabrze w czasie targów ArabHealth 2022



Rysunek 8. Sprzęt wykorzystywany w testach w Dubaju (Robin Heart Pelikan połączony z komputerem 2 magistralami USB: 1 do kamery endoskopowej i 2 do sterowania)



Rysunek 9. Sprzęt testowy używany po stronie FRK – konsola sterowania z 2 zadajnikami ruchu, specjalistycznym oprogramowaniem i robot Robin Heart Tele (dla testów teletransmisji całość komunikacji z komputerem realizowana przez protokoły USB)

## TESTY MODELU SYSTEMU TELEOPERACYJNEGO ZABRZE-DUBAJ-ZABRZE

Testy opracowanego, wielowariantowego systemu, przeprowadzono w styczniu 2022 r. podczas targów ArabHealth w Dubaju. Pokaz zdalnego sterowania robotem Robin Heart Pelikan (ultralekki robot toru wizyjnego o 4 stopniach swobody [11]) był wpisany w plan promocji polskiego stanowiska innowacji medycznych.

Rozpoczynając planowanie eksperymentu przyjęto następujące ograniczenia:

- brak dedykowanego łącza
  - brak VLAN
  - brak dedykowanego IP
  - brak publicznego IP
  - wyłącznie ogólnodostępny publiczny Internet
- Uwzględniając ograniczenia wybrano topologię sprzętową zgodnie z rys 8:

Zaproponowano 4 alternatywne rozwiązania programowe wykorzystujące serwery chmurowe (Cloud-Serwer).

## PROJEKT 1

Opis projektu nr 1

- Komputer PC jest podłączony poprzez komercyjną sieć do Internetu



Rysunek 10. Projekt nr 1



Rysunek 11. Projekt nr 2



Rysunek 12. Projekt nr 3



Rysunek 13. Projekt nr 4

- Aplikacja real VNC jest podłączona do Cloud-Serwera po stronie FRK;
- Aplikacja real VNC jest podłączona do Cloud-Serwera po stronie Dubai;
- Obie aplikacje przesyłają dane między sobą przez Cloud-Serwer;
- Sterowanie odbywa się poprzez aplikację umożliwiającą wykonywanie ruchów robota uruchomioną na komputerze zdalnym.

Takie rozwiązanie umożliwia zestawienie połączenia zdalnego dla komputerów nie posiadających publicznych adresów IP (będących za NATem). Jest to najszybszy sposób nawiązania połączenia tele – minimum konfiguracji sieci, nie jest wymagany publiczny adres IP – transmisja działa od razu po uruchomieniu systemu. Główna wada tego rozwiązania to Cloud-Serwer, który wprowadza dodatkowe opóźnienia transmisji i sieć tego typu posiada obniżone bezpie-

czeństwo (całość danych transmitowana przez serwer zewnętrznej firmy).

## PROJEKT 2

Po stronie FRK znajduje się komputer z publicznym adresem IP w strefie DMZ. Po drugiej stronie, w Dubaju znajduje się komputer z dostępem do Internetu poprzez sieć GSM nieposiadającym publicznego adresu IP.

Plan działania w ramach projektu nr 2:

- W komputerze po stronie polskiej (z publicznym adresem IP) instalujemy serwer OPEN-VPN;
- Nawiązujemy połączenie zdalnym pulpitem za pośrednictwem Cloud-Serwera z modułu 1;
- Zdalnie na komputerze w Dubaju instalujemy klienta VPN i uruchamiamy szyfrowane połączenie VPN DUBAI – POLSKA;
- Rozłączamy zdalny pulpit podłączony poprzednio poprzez Cloud-Serwer;
- Uruchamiamy zdalny pulpit ponownie ale już bez Cloud-Serwera, tylko bezpośrednio poprzez VPN
- Rozpoczynamy sterowanie poprzez dedykowaną aplikację na komputerze zdalnym;
- Testujemy opóźnienia i dwa konkurencyjne oprogramowania do zdalnego pulpitu.

Tego typu połączenie posiada zapewnione bezpieczeństwo za pośrednictwem szyfrowanego połączenia VPN, lecz brak synchronizacji opóźnień sterowanie – obraz.

## PROJEKT 3

Plan działania w projekcie nr 3:

- Instalujemy na obydwu komputerach sterownik służący do tunelowania portu USB za pośrednictwem VPN;
- Po stronie Dubaju podłączamy wirtualnie w oprogramowaniu dwa porty USB (od kamery i od sterowania robotem do portu VPN);
- Po stronie polskiej podłączamy dwa wirtualne interfejsy USB z połączenia VPN;
- Dzięki temu komputer po stronie polskiej zachowuje się tak, jakby były do niego wpięte bezpośrednio kamera i robot;
- Uruchamiamy aplikacje do sterowania robotem lokalnie w Polsce i sterujemy za jej pomocą robotem w Dubaju;
- Następnie rozłączamy sesję USB i zestawiamy ponownie połączenie w drugą stronę – interfejs USB z robota po stronie polskiej podłączamy jako tunel VPN i po stronie Dubaju jako wirtualny interfejs;
- Takie połączenie umożliwia sterowanie w odwrotnym kierunku, osoba z Dubaju steruje zdalnie robotem w Polsce.

Jest to najbardziej skomplikowany rodzaj połączenia. Bezpieczeństwo również zapewniane jest za pośrednictwem szyfrowania VPN.

**Zalety:**

- Pełna możliwość sterowania konfiguracją robota, łącznie ze zdalną aktualizacją oprogramowania (z punktu widzenia konsoli sterowania robot podłączony jest lokalnie)

**Wady:**

- Oprócz transmisji obrazu i sygnału sterowania przesyłamy bardzo dużą liczbę danych nadmiarowych odpowiedzialnych za transmisje tunelowanego portu USB - powoduje nie akceptowalne opóźnienia.
- Błąd w połączeniu TCP-IP powoduje rozłączenie tunelowanego połączenia USB i wyłączenie całego systemu.

**PROJEKT 4**

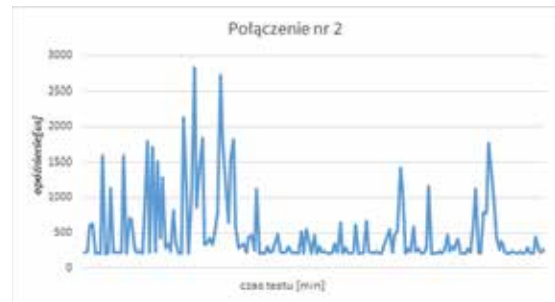
W komputerze w Dubaju zainstalowana jest dedykowana aplikacja połączona przez VPN do komputera w Polsce. Aplikacja po stronie robota w Dubaju odbiera strumień danych TCP, które są przetwarzane na ruch robota. Odpowiadając na zapytania wysyła dane obrazu zgodnie z opisem przypadku optymalnego wymienionego na początku artykułu (rys 6).

**WNIOSKI I PODSUMOWANIE**

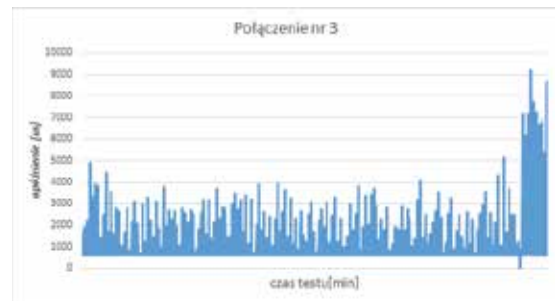
Połączenie nr 1 – Opóźnienie najbardziej zależy od wydajności Cloud-Serwera zewnętrznej firmy i może być zmienne w sposób całkowicie niekontrolowany – zależy od ilości osób podłączonych do cloud-serwera – dyskwalifikacja podczas teleoperacji z uwagi na niekontrolowane ryzyko wystąpienia niedopuszczalnego opóźnienia.



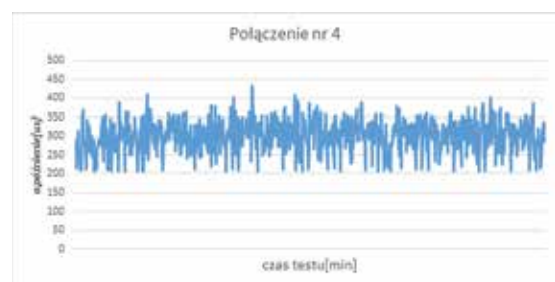
Połączenie nr 2 - Opóźnienie zależy od wydajności komputera po stronie konsoli sterowania oraz od sposobu kompresji obrazu protokołem zdalnego pulpitu. Może ulegać niekontrolowanej zmianie w zależności od tego, jaki obraz jest aktualnie wyświetlany (transmitowane są tylko piksele, które się zmieniły, a nie cały obraz) – dyskwalifikacja podczas teleoperacji z uwagi na niekontrolowane ryzyko wystąpienia niedopuszczalnego opóźnienia.



Połączenie nr 3 – Praktyczna dyskwalifikacja ze względu na słabą stabilność łącza i największe opóźnienia – największa ilość przesyłanych danych nadmiarowych. Ten typ połączenia nadaje się jedynie do celów serwisowych.



Połączenie nr 4 - Opóźnienie najbardziej zależy od optymalizacji i jakości aplikacji dedykowanej po stronie konsoli i robota oraz dostawcy oprogramowania VPN. Jedyny z testowanych sposobów połączenia umożliwiający kompensację zmienności opóźnień obraz – sterowanie wydaje się optymalny do teleoperacji.



Wykonane eksperymenty dowodzą możliwości i ograniczeń wykorzystania standardowych sieci komunikacyjnych wykorzystujących Internet. Oczywiście zakładamy dla planowych teleoperacji wykorzystanie szeregu specjalizowanych urządzeń i odpowiednich zabezpieczeń zapewniających szybkość i jakość przesyłanych informacji, obrazów i sygnałów pomiędzy lekarzem-operatorem a robotem na sali operacyjnej. Badania alternatywnych sposobów komunikacji mają znaczenie dla robotów stosowanych w procesie doradztwa, czy edukacji albo dla zapewnienia awaryjnych łączy podczas operacji.



## ■ PODZIĘKOWANIA

Przedstawiona praca została wykonana w ramach doktoratu wdrożeniowego Dariusza Krawczyka w Szkole Doktorskiej Śląskiego Uniwersytetu Śląskiego finansowanego przez Ministerstwo Edukacji i Szkolnictwa Wyższego – dziękujemy. Autorzy składają podziękowania swoim współpracownikom i wszystkim, którzy w jakikolwiek sposób wsparli projekt. Projekt Robin Heart był finansowany przez Fundację Rozwoju Kardiochirurgii, sponsorów i wykonywany w ramach grantów krajowych: KBN 8 T11E 001 18, PW-004/ITE/02/2004, R1303301, R13 0058 06/2009, NCBR: R1303301 and R13 0058 06/2009, Robin PVA – nr 178576, TeleRobin – nr181019, LIDER /32/0175/L-8/16/NCBR/2017, oraz europejskich STIFF-FLOP FP7 European project FP7/ICT-2011-7-287728, ENIAC “INCITE” project No.621278. Robin Heart Team jest autorem wszystkich rozwiązań pokazanych w publikacji. Szczególne podziękowania kieruję dla Krzysztofa Lisa, Krzysztofa Lehricha, Łukasza Muchy, którzy odegrali kluczową rolę w projektowaniu i wykonaniu modelu Pelikan. Specjalne podziękowania dla wolontariusza – Michała Fronia – studenta Politechniki Śląskiej, który uczestniczył w wielu pracach przygotowawczych w ostatnich dwóch latach w FRK. Bardzo dziękujemy Śląskiemu Urzędowi Marszałkowskiemu za wsparcie finansowe naszego uczestnictwa w ArabHealth 2022 w Dubaju, co umożliwiło wykonanie testów opisanych w artykule.

## ■ BIBLIOGRAFIA

- [1] Nawrat Z.: Robot chirurgiczny – projekty, prototypy, badania, perspektywy, Rozprawa habilitacyjna, Katowice 2011
- [2] Nawrat Z.: Roboty Medyczne w systemach teleinformatycznych. Inżynieria Biomedyczna Podstawy i Zastosowania red: W.Torbicz, R.Maniewski, A.Liebert. Tom 7 Informatyka w medycynie. Red tomu. M.Kurzyński, L.Bobrowski, A.Nowakowski, J.Rumiński, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2019, Str 727-760
- [3] Zbigniew Nawrat, Dariusz Krawczyk: Robin Heart czyli jak pokonać odległość i wykorzystać człowieka jako element układu sterowania telemanipulatora. Medical Robotics Reports 8/9/ 2019, str 48-55
- [4] Fabrizio M.D., Lee B.R., Chan D.Y., Stoianovici D., Jarrett T.W., Yang C., Kavoussi L.R.: Effect of time delay on surgical performance during telesurgical manipulation. J. Endourol. 2000; 14: 133–138.
- [5] Bowersox J.C., Shah A., Jensen J., Hill J., Cordts P.R., Green P.S.: Vascular applications of telepresence surgery: initial feasibility studies in swine. J. Vasc. Surg. 1996; 23: 281–287.
- [6] Marescaux J., Leroy J., Rubino F., Smith M., Vix M., Simone M., Mutter D.: Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: feasibility and potential applications. Ann. Surg. 2002; 235(4): 487–492.
- [7] Anvari M.: Remote telepresence surgery. The Canadian experience. Surg. Endosc. 2007; 21(4): 537–541
- [8] E.J.Hanly, M.R.Marohn, N.S.Schenkman, B.E.Miller, G.R.Moses, R.Marchessault, T.J.Broderick; Dynamics and organizations of telesurgery. European Surgery.vol.37, pp 274-278 (2005)
- [9] Suzuki N., Hattori A., Ieiti S., Konishi K., Maeda T., Fujono Y., Ueda Y., Navicharen P., Tanoue K., Hashizume M.: Tele-control of an endoscopic surgical robot system between Japan and Thailand for tele-NOTES. Medicine Meets Virtual Reality 17. Eds. J.D. Westwood, S.W. Westwood, R.S. Haluck et al. IOS Press 2009.
- [10] Humphries M., China Performs First 5G Remote Surgery Matthew Humphries January 15, 2019 <https://www.pcmag.com/news/365992/china-performs-first-5g-remote-surgery>
- [11] Lis Krzysztof, Lehrich Krzysztof, Mucha Łukasz, Nawrat Zbigniew. Concept of application of the light-weight robot Robin Heart ("Pelikan") in veterinary medicine: a feasibility study. Med.Weterynaryjna 2017 : Vol.73, No.2, p.88-91
- [12] Nawrat Zbigniew, Mucha Łukasz, Lis Krzysztof, Lehrich Krzysztof, Rohr Kamil, Kostka Paweł: Robot chirurgiczny Robin Heart Tele – następca Robin Heart mc2. Medical Robotics Reports – 5/2016, s.27-33

Wspiera nas Śląskie!



Województwo  
Śląskie