

# Sterowanie laparoskopem z zastosowaniem systemu robotycznego na modelu fantomowym

A robot system of laparoscope control, based on a phantom model

Piotr Sauer<sup>1</sup>, Krzysztof Kozłowski<sup>1</sup>, Wojciech Waliszewski<sup>2</sup>, Piotr Hajkowicz<sup>2</sup>, Przemysław Jeziorek<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Sterowania i Inżynierii Systemów, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3a, Poznań

<sup>2</sup>Oddział Chirurgii Ogólnej i Laparoskopowej, Szpital im. Strusia w Poznaniu

Wideochirurgia i inne techniki małoinwazyjne 2006; 1: 13–17

## Streszczenie

W pracy zaprezentowano wielopoziomowy system sterowania manipulatorem do zastosowań w chirurgii minimalnie inwazyjnej, tzn. laparoskopii. Pomiędzy laparoskopem a chirurgiem włączony jest tu system robotyczny – robot Staubli RX60. Pożądzany efekt – ruch na końcówce laparoskopu – uzyskuje się poprzez poruszanie joystickiem. Operującym jest więc chirurg, a robot z całym systemem sterującym pełni funkcje wykonawcze. Wykazano możliwość sterowania w tym systemie ruchami laparoskopu niezbędnymi do wykonania operacji.

**Słowa kluczowe:** telerobotyka, chirurgia laparoskopowa, system sterowania, sprzężenie siłowe.

## Abstract:

This paper presents the concept of a multi-level control system for Minimal Invasive Surgery. The overall system is based on the Staubli robot RX60 which plays the role of a robotic assistant for surgeons performing laparoscopy. The desired movements of the end-effector are obtained by the movements of a joystick.

**Key words:** telerobotic, laparoscopic surgery, control system, force feed-back.

## Wstęp

Laparoskopia jest szczególnym rodzajem endoskopii. Umożliwia zajrzenie do wnętrza ludzkiego ciała. Stało się to możliwe dzięki rozwojowi inżynierii optycznej, a także mechaniki i elektroniki. Początkowo laparoskopię stosowano w diagnostyce wnętrza jamy brzusznej, jednak pod koniec lat 80. zaczęto ją

również wykorzystywać podczas zabiegów operacyjnych. Od tego momentu datuje się rozwój dziedziny chirurgii określanej mianem chirurgii minimalnie inwazyjnej (laparoskopowej). W nowoczesnej medycynie operacje metodą minimalnie inwazyjną zdobywają coraz większą akceptację pacjentów i lekarzy, przede wszystkim ze względu na takie korzyści, jak szybki powrót do zdrowia, a co za tym idzie, mniejszy

### Adres do korespondencji:

Piotr Sauer, Institut Sterowania i Inżynierii Systemów, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, tel. +48 61 665 20 43, e-mail: piotr.sauer@put.poznan.pl

koszt leczenia. Chirurgia laparoskopowa jest techniką operacyjną, w której chirurg nie kontaktuje się bezpośrednio z operowaną tkanką, lecz obserwuje pole operacji na ekranie monitora, wciąż jednak stoi obok operowanego pacjenta. Współpraca lekarzy i inżynierów umożliwiła opracowanie nowej odmiany chirurgii laparoskopowej, określanej mianem telechirurgii. W telechirurgii system łączności (wykorzystujący Internet) umożliwia przekazywanie obrazu do innego pomieszczenia, szpitala, a nawet na inny kontynent. Początkowo telechirurgia umożliwiała monitorowanie postępu operacji przez chirurga znajdującego się w innym miejscu niż chory. Obecnie chirurg może również aktywnie uczestniczyć w operacji na odległość za pomocą robotów chirurgicznych [1]. Najbardziej znanymi, wytwarzanymi seryjnie robotami chirurgicznymi są *Aesop*, *Zeus* i *da Vinci*. Ich ramiona, wyposażone w narzędzia laparoskopowe sterowane za pomocą joysticków (manetek umieszczonych w konsoli z monitorem), kopiają ruchy rąk chirurga. Laparoskop umieszczony na jednym z ramion sterowany jest głosem chirurga [2].

Celem pracy jest opracowanie i uruchomienie na podstawie przyjętych założeń medycznych wielopoziomowego układu sterowania manipulatorem o nazwie ASYSTENT podczas zabiegu laparoskopowego. Należy nadmienić, że nadal chirurg przeprowadza operację, natomiast robot z systemem sterowania pełni funkcje wykonawcze.

## Wielopoziomowy system sterowania laparoskopem

W tradycyjnej chirurgii laparoskopowej obraz pola operacji zależy od chirurga asystenta, kierującego laparoskopem. Asystent-chirurg trzyma w ręku laparoskop, aby utrzymać na ekranie monitora pole operacji. W tym wypadku zdarza się jednak, że obraz na ekranie monitora jest niestabilny. Przyczyną tego są drgania kamery spowodowane drżeniem rąk asystenta. Aby poprawić stabilność obrazu pola operacji, postanowiono zaprojektować wielopoziomowy system telemanipulacji (telerobotyzacji), którego zadaniem jest wspomaganie pracy chirurga. W systemie o nazwie ASYSTENT wykorzystywany jest robot Staubli RX60, wyposażony w czujnik sił i momentów JR3 oraz chwytak z laparoskopem. Zastosowany system laparoskopowy umożliwia chirurgowi wykonywanie precyzyjnych ruchów, które wymagane są przy manewrowaniu laparoskopem w ciele pacjenta, tzn. otrzymanie

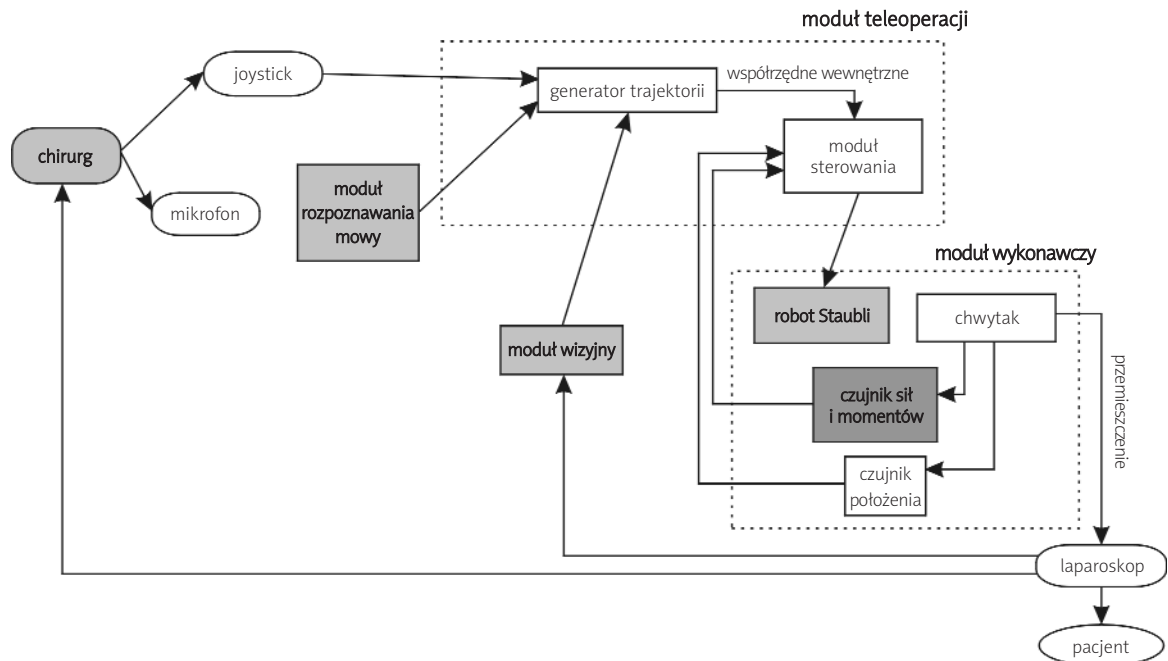
dokładnego i stabilnego (pozbawionego drgań) obrazu z wnętrza jamy brzusznej. Jego zadaniem w pierwszej fazie badań jest przekształcenie ruchu ręki operatora joysticka na odpowiedni ruch końcówki laparoskopu. Chirurg podczas wykonywania zabiegu wycięcia pęcherzyka żółciowego będzie sterował ruchem układu robot – laparoskop początkowo za pomocą joysticka, a następnie za pomocą głosu.

Przyjęto następujące założenia wielopoziomowego systemu sterowania:

1. Układ sterowania systemu *Asystent* powinien zapewnić stabilny obraz pola operacyjnego.
2. Układ robot – laparoskop powinien się cechować dużą sprawnością i precyzją wykonywanych ruchów. Poprzez zastosowanie odpowiedniego algorytmu sterowania wyeliminujemy efekt drżenia rąk operatora (w wypadku sterowania laparoskopu joystickiem).
3. Uzyskanie minimalnego możliwego do zaakceptowania opóźnienia pomiędzy ruchem joysticka (ewentualnie wydaniem instrukcji głosowej) a odpowiednią reakcją układu robot – laparoskop.
4. Zapewnienie komunikacji pomiędzy robotem a *konsolą operatorską* z poziomu komputera PC poprzez łącze szeregowe (RS-232) lub Ethernet (np. wprowadzenie parametrów pracy, monitorowania stanu całego systemu).
5. Zastosowanie pętli siłowego sprzężenia zwrotnego, chroniącego pacjenta przed uszkodzeniem jego narządów wewnętrznych.
6. Zastosowanie pętli wizyjnego sprzężenia zwrotnego, którego zadaniem będzie wyszukanie na obrazie z laparoskopu narzędzia chirurgicznego oraz sterowanie manipulatorem tak, aby układ robot – laparoskop automatycznie śledził ruch narzędzia chirurgicznego.
7. Zastosowanie algorytmów rozpoznawania mowy, w celu zastosowania instrukcji głosowych do sterowania robotem.

Korzystając z przyjętych założeń, opracowano układ sterowania ASYSTENT [3], składający się z następujących modułów (ryc. 1):

1. **Centralny moduł teleoperacji (Master)** – zarządza całym systemem na podstawie komunikatów pochodzących z joysticka, modułu wizyjnego lub modułu rozpoznawania mowy. Generuje on sygnały sterujące ruchem robota, wykorzystując proste i odwrotne zadanie kinematyki. W module tym zaimple-



Ryc. 1. Schemat blokowy systemu sterowania Asistent

mentowano algorytm sterowania siłowego. Bazuje on na siłowym sprzężeniu zwrotnym pochodzącym z czujnika siły i momentów siły, który jest zamontowany między robotem a chwytakiem laparoskopu. System sterowania na podstawie ciągłej kontroli siły i momentów siły wywieranych na końcówkę laparoskopu chroni pacjenta przed niepożądanym ruchem laparoskopu. W wypadku przekroczenia progów siły działających na końcówkę laparoskopu system powoduje zatrzymanie laparoskopu i jego wycofanie.

2. **Moduł wykonawczy (Slave)** – składa się z robota Staubli RX60 wyposażonego w czujnik siły i momentów siły JR3 (ryc. 2.). Robot Staubli RX60 posiada 6 stopni swobody (składa się z 6 ogniw obrotowych). W każdej chwili ruchu robota znane jest jego bezwzględne położenie z dokładnością 0,001 mm oraz 0,01°. W systemie wykorzystano czujnik siły i momentów siły 67M25A amerykańskiej firmy JR3. Czujnik ten umożliwia pomiar przestrzennego rozkładu siły oraz momentów siły w przestrzeni zewnętrznej robota.
3. **Moduł wizyjny** jest modułem pomocniczym, w którym zaimplementowano algorytmy przetwarzania obrazu z laparoskopu. Zadaniem modułu analizy obrazu wizyjnego jest identyfikacja oraz śledzenie narzędzia chirurgicznego. Moduł wizyjny wykorzy-



Ryc. 2. Widok robota Staubli RX60 z zamontowanym czujnikiem siły i momentów siły

stywany jest do automatycznego sterowania ruchem laparoskopu poprzez śledzenie ruchu narzędzia laparoskopowego.

4. **Moduł rozpoznawania mowy** umożliwia sterowanie systemem robotycznego za pomocą komend wypowiedzianych przez chirurga przeprowadzającego operację laparoskopową.
5. **Moduł komunikacyjny** umożliwia komunikację między poszczególnymi modułami, które mogą być uruchamiane na różnych komputerach. Daje to możliwość sterowania laparoskopem na odległość, np. do celów diagnostycznych.

W pierwszej fazie badań opracowano 2 programy symulacyjne, które umożliwiły wstępną weryfikację projektowanego systemu [4]. Następnie przeprowadzono badania na rzeczywistym systemie (ryc. 3). W tym celu zaimplementowano dwie aplikacje:

1. **Program główny**, który zaimplementowano w środowisku Microsoft Visual C++ 6.0. Jego zadaniem jest rejestracja wartości sił z czujnika JR3 oraz komend joysticka, modułu wizyjnego lub modułu rozpoznawania mowy. Na podstawie otrzymanych danych generowana jest trajektoria ruchu robota.
2. **Program sterujący robotem Staubli** (zaimplementowany w systemie V+ – system kontroli, zaprojektowany specjalnie do obsługi robota Staubli). Zadaniem programu sterującego jest odbiór danych konfiguracyjnych wysyłanych z programu głównego poprzez łącze szeregowo RS232. Na podstawie odebranych danych wykonywane jest przemieszczenie chwytaka z laparoskopem.



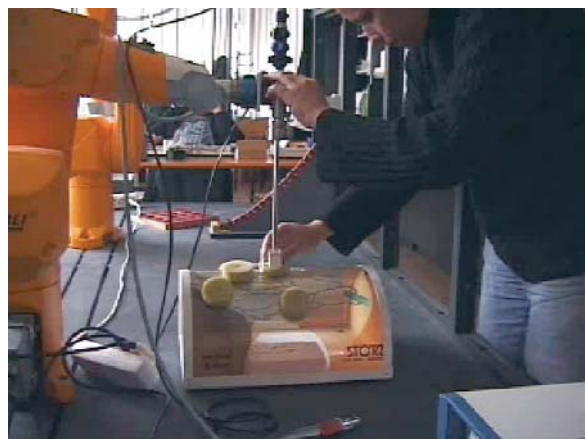
Ryc. 3. Robot Staubli RX60 z zamontowanym laparoskopem oraz modelem fantomowym

## Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne przeprowadzono na modelu laparoskopowym jamy brzusznej. W ich trakcie przetestowano działanie systemu w dwóch trybach. Pierwszy tryb sterowania polega na sterowaniu systemem za pomocą joysticka z uwzględnieniem sprzężenia siłowego. Przy sterowaniu joystickiem siłowe sprzężenie zwrotne pełni funkcję zabezpieczenia. Podczas ruchu laparoskopu rejestrowana jest siła, jaka działa na końcówkę laparoskopu. W momencie, gdy wartość zarejestrowanej siły przekroczy dobrany próg siły, system zatrzymuje ruch laparoskopu. Ruch jest kontynuowany w danym kierunku, jeśli wartość siły zmniejszy się poniżej ustalonego progu.

Natomiast drugi tryb pracy jest sterowaniem siłowym układem robot – laparoskop. W tym wypadku chirurg może ręcznie sterować laparoskopem poprzez wywieranie siły na chwytak z laparoskopem, powodując ruch końcówki robota w kierunku, w którym działa siła (wymagany kierunek poruszania laparoskopu – ryc. 4.). Ten typ pracy umożliwia ustawienie wstępne układu robot – laparoskop, czyli wprowadzenie laparoskopu zamontowanego w chwytaku do trokaru.

Ekspertyzy przeprowadzono dla kilku progów sił. Gdy ustawiono zbyt małą wartość progu siły (poniżej 5 N), podczas ruchu laparoskopu występowały drgania narzędzia wywołane tarcieniem występującym między trokarem a laparoskopem. Przeprowadzone eksperymenty udowodniły, że projektowany system sterowania wielopoziomowego może pracować w trybie sterowania siłowego lub w trybie ze sprzężeniem zwrotnym. Sterowanie siłowe umożliwia chirurgowi



Ryc. 4. Prezentacja sterowania siłowego – ręczne wprowadzanie laparoskopu

ręczne wprowadzanie narzędzia laparoskopowego do ciała pacjenta. Tryb ze sprzężeniem zwrotnym jest natomiast wykorzystywany wtedy, gdy układ robot – laparoskop jest sterowany za pomocą joysticka, modułu wizyjnego lub modułu rozpoznawania mowy. Sprzężenie zwrotne chroni pacjenta poprzez ciągłą kontrolę wartości siły działającej na laparoskop.

## Wnioski

W pierwszym etapie badań opracowano algorytm sterowania manipulatorem za pomocą joysticka. Zaproponowano sterowanie nadążne typu położenie-położenie (ruch manipulatora nadąża za ruchem joysticka), z kontrolą siły działającej na końcówkę laparoskopu. Zastosowane w projekcie algorytmy sterowania spełniają postawione przyjęte założenia. Wyniki badań eksperymentalnych potwierdziły celowość zastosowania robotyki w chirurgii laparoskopowej. Umożliwia ona zwiększenie precyzji ruchów chirurga, ponieważ układ sterowania, wyposażony w elektroniczną filtrację eliminuje drżenie rąk chirurga. Zastosowanie odpowiedniego przetożenia w teleoperatorach sprawia, że kilkucentymetrowy ruch ręki chirurga wywołuje przesunięcie narzędzia laparoskopowego o ułamki milimetra. Zastosowanie robotów polepsza warunki pracy chirurga, gdyż może on siedzieć wygodnie przy konsoli operatorskiej, zamiast garbić się nad stołem operacyjnym.

Doświadczenie zdobyte podczas realizacji projektu umożliwi nam budowę w pełni profesjonalnego systemu do wykonywania operacji laparoskopowych na odległość. Obecnie prowadzimy badania nad opracowaniem nowej metody pomiaru siły działającej na końcówkę narzędzia laparoskopowego wewnątrz ciała człowieka.

Na koniec należy wspomnieć, że opracowywany przez nas system jest jednym z pierwszych takich systemów do zastosowań w laparoskopii jamy brzusznej w Polsce.

*Praca była finansowana w ramach projektu badawczego KBN nr 4T11A 026 22.*

## Piśmiennictwo

1. Waliszewski W. Telesurgery and Robotics on Tomorrow's Surgery. Materiały konferencyjne The Second International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo'01); 2001: 151-152.
2. Marescaux J, Leroy J, Gagner M, Rubino F, Mutter D, Vix M, Butner SE, Smith MK. Transatlantic robot-assisted telesurgery. Nature 2001; 6854: 379-380.
3. Sauer P, Kozłowski K, Waliszewski W. Telerobotic Simulator in Minimal Invasive Surgery. Materiały konferencyjne The Third International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo'02); 2002: 39-44.
4. Sauer P, Kozłowski K, Waliszewski W. First Stage of Research in Telerobotic Surgery. Materiały konferencyjne Computer-Aided Medical Interventions: tools and applications. Surgetica 2002: 97-102.