

ROBOTICKY ASISTOVANÁ CHIRURGIE

Vojtěch Langer

Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology
Institute of Automation and Computer Science
Technická 2896/2, Brno 616 69, Czech Republic
Vojtech.Langer@vutbr.cz

Abstract: Tato zpráva pojednává o problematice roboticky asistované chirurgie. Jsou uvedeny možnosti, přednosti a úskalí roboticky asistované chirurgie, jací roboti jsou nejčastěji používáni a jaké druhy robotů a technologií jsou vyvíjeny a představovány v současných odborných pracích.

Keywords: minimally invasive surgery, laparoscopic, robot assisted surgery, surgical robotics, da Vinci

1 Úvod

Roboticky asistovaná chirurgie je rychle rozvíjejícím se oborem. Pomocí robotické chirurgie mohou lékaři provádět jemné a složité postupy, které by u jiných metod mohly být velice obtížné. Proto již v roce 1985 byl použit první robot pro přesné navádění nástrojů při operaci. V současnosti se robotů využívá ve většině odvětví chirurgie a to především při minimálně invazivních zákrocích. [1],[2]

Minimally Invasive Surgery (MIS - minimálně invazivní chirurgie) poskytuje stejnou ne-li vyšší kvalitu zákroku, s výrazně menším vstupem oproti klasické otevřené operaci. Jedním z typů roboticky asistované MIS je také laparoskopie - druh břišní chirurgie, při které se na rozdíl od otevřené operace, provádějí úkony pod kontrolou kamery, bez přímého přístupu chirurga. Ze zdravotního pohledu, laparoskopie vyžaduje značnou dovednost, kvůli vnitřním technickým omezením, které mají za následek ztrátu koordinace oko-ruka a sníženou obratnost. Proto je laparoskopie jednou z disciplín moderní chirurgie, kde se s výhodou využívá robotů. [3]

Hlavní výhodou roboticky asistované laparoskopie je jednodušší manipulace s nástroji než jaké může být dosaženo při klasické laparoskopii. Učící křivka pro úplné naučení ovládnutí robota je přibližně 10 provedených robotických zákroků, přičemž se operační doba sníží přibližně na polovinu. Hlavním omezením je velký průměr nástrojů 8mm a omezené množství robotických rukou. Omezený počet robotických rukou a nástrojů je pak obzvlášť poznatelný při zvládání krvácení. [4],[5]

Pro pacienta je možnost MIS zásadní výhodou. Rány vzniklé při robotické operaci jsou mnohem menší a odpadají problémy s jejich hojením. Rekonvalescence a návrat do běžného života jsou po robotickém zákroku velmi rychlé, zatímco po klasické operaci v nezanedbatelné míře hrozí komplikace, například výskyt kýly v jizvě, což si často vyžádá další chirurgický zákrok. Pacienti samozřejmě velmi pozitivně hodnotí také vynikající kosmetický efekt. [6]

2 Řešení robotů

V této kapitole jsou prezentováni moderní roboti, kteří jsou využíváni v praxi či byli představeni ve vědeckých pracích v posledních letech. Prvním příkladem komerčního chirurgického robota, který byl ve větší míře úspěšně aplikován v praxi byl robot da Vinci od společnosti Intuitive Surgical Inc. Da Vinci je v současnosti nejrozšířenějším systémem pro použití v MIS. Další roboti nejsou komerčně dostupní jako systémy od firmy Intuitive nebo nejsou určeny pro klasickou chirurgii s nástroji. Za zmínku stojí pak stojí AESOP (1994), ZEUS (1998) a Sofie (2012) - Surgeon's Operating Force-feedback Interface Eindhoven.[7]

2.1 Intuitive da Vinci

Chirurgické systémy od firmy Intuitive Surgical Inc. byly představeny na trh v roce 2000 a od té doby se staly nejpoužívanějšími robotickými systémy pro MIS. Název da Vinci si zasloužil podle Leonarda da Vinci a jeho zájmu o studium lidské anatomie. Hlavní výhodou chirurgických systémů od Intuitive je samotná velikost firmy, s čímž souvisí pak také lepší možnosti technické podpory jak softwaru tak hardwaru, dostupnost náhradních dílů a případně doplňků na specializované úkony. Navzdory nesporným výhodám, systém Da Vinci je vcelku objemný, drahý a náročný na zřízení v operační místnosti. Systémy od Intuitive jsou používány po celém světě. V ČR například ve Vojenské nemocnici v Praze a v univerzitních nemocnicích v Olomouci a Brně. [1],[8],[9]

Systém da Vinci se skládá ze 3 hlavních podsystémů: Edgonomicky tvarované konzole chirurga, vozíku Vision a vozíku pacienta. Chirurg, který je usazen u konzole chirurga, řídí pohyby nástrojů a endoskopu pomocí dvou ručních ovladačů a sady nožních pedálů. Chirurg sleduje obraz z endoskopu na 2 LCD obrazovkách, což mu poskytuje pohled na anatomii pacienta a na nástroje, společně s ikonami a dalšími prvky uživatelského rozhraní.

Vozík pacienta je umístěn u operačního stolu a má 4 ramena, která jsou umístěna s ohledem na cílovou anatomii pacienta. Endoskop se připojuje na jedno z ramen. Samotný nosný systém má několik stupňů volnosti přičemž ramena samotná mají podle modelu až 5 kloubů.

Vozík Vision obsahuje podpůrné elektronické zařízení, jako je zdroj světla a zařízení zpracovávající video a obraz pro endoskop a hlavní elektronickou a softwarovou výpočetní jednotku. Vozík je také vybaven dotykovou obrazovkou na niž lze sledovat obraz z endoskopu a provádět nastavení systému. [10]

2.2 Minirobot pro zatahovací úkony

V článku *A miniature robot for retraction tasks under vision assistance in Minimally Invasive Surgery* [3] je zkoumán nový přístup laparoskopické chirurgie. V laparoskopii i jednoduché chirurgické úkony jako je vyjmutí orgánu mohou být výzvou, protože jsou prováděny skrz malý vstupní otvor. Z tohoto důvodu je neustálá potřeba vyvíjet nové robotické nástroje pro zatahovací úkony.

Autoři článku navrhli malého robota o průměru 12mm a celkové délce 52mm včetně jeho magnetické základny. Navrhovaný robot má 2 stupně volnosti. Je vybaven bezkartáčovým motorem v magnetické základně a v rameni, pro dosažení jednoduchých pohybů otáčení kolem osy a výklonu 180° . Díky jeho rozměrům může být snadno naváděn k požadovanému orgánu a aplikovat zpětnou výtažnou sílu až $1,53\text{N}$. Robot byl navržen jako sériový kinematický řetězec, jelikož pak může být jednoduše využito chirurgického trokaru (trubicový nástroj pro inserci). Byla navržena také varianta s kamerou $320 \times 240\text{p}$ 30fps místo drapáku.

Byl proveden experiment, při kterém otestovali možnosti tohoto robota. Testovali maximální zdvižnou sílu a sílu drapáku, přičemž byly pohyby monitorovány kamerou. Pro vyhodnocení sil použili snímač síly s rozlišením $3,18\text{mN}$. Maximální naměřená zdvižná síla byla $1,53\text{N}$ a maximální síla drapáku $5,3\text{N}$. Hmotnost robota (12g) mírně ovlivňuje maximální zdvižnou sílu.

Následně byla simulována simulace pro demonstraci proveditelnosti jednoduché procedury. Procedura se skládala z přivedení robotických komponent do břišní dutiny skrz jícen. Demonstraci provedli s úspěchem, a proto doporučují robota k dalšímu testování na živých pacientech.

2.3 Měkký robot

Studie *Intelligent Soft Surgical Robots for Next-Generation Minimally Invasive Surgery* [11] se zabývá možnostmi použití měkkých robotů v MIS. Měkký robot se vyznačuje lepší přizpůsobivostí a bezpečnější interakcí. Proto je měkká robotika označována za velmi slibnou při řešení současných výzev v MIS, které je obtížné řešit současnými prostředky. V článku jsou analyzovány očekávané charakteristiky MIS nové generace z pohledu chirurgů a je komplexně shrnut nedávný pokrok měkkých chirurgických nástrojů ze tří různých aspektů: konstrukční návrh, výrobní techniky a interakce člověk-robot. Následně jsou diskutovány perspektivy měkkých chirurgických robotů nové generace, kde jsou zdůrazněny některé zajímavé možnosti.

Autoři předpokládají, že další vývoj inteligentní měkké robotiky umožní MIS nové generace obratnou a hbitou navigaci k cíli a provádět diagnostické nebo terapeutické postupy bez jakýchkoli kompromisů v invazivnosti a nakonec být vhodným řešením pro budoucí chirurgii.

2.4 Robot s proměnlivou tuhostí

Léčba karcinomů žaludku nad 20mm v průměru může být dosažena provedením endoskopické disekce pomocí flexibilního endoskopu (optický přístroj pro zobrazení vnitřních dutin). Tento postup je však technicky náročný, zákrok vyžaduje delší operační čas a rozsáhlé školení.

Pro usnadnění endoskopické disekce autoři článku *Deployable, Variable Stiffness, Cable Driven Robot for Minimally Invasive Surgery* [12] vytvořili kabelem poháněného robota, který má zvýšit možnosti flexibilního endoskopu a zároveň se snaží minimalizovat dopady chirurgického zákroku. Pomocí nízkoprofilové nafukovací nosné konstrukce ve tvaru dutého šestihranu se robot může složit kolem flexibilního endoskopu a po dosažení cílového místa dosáhnout 73,16% zvýšení objemu a jeho radiální tuhosti. Plášť kolem struktury s proměnnou tuhostí poskytuje řadu kabelů pro přenos síly, které se připojují ke dvěma nezávislým trubicovým koncovým efektorům, na které mohou být ukotveny standartní flexibilní endoskopické nástroje. Pomocí jednoduchého ovládacího schématu založeného na délce každého kabelu lze polohu nástrojů ovládat haptickými ovladači v ruce chirurga. V rámci studie byly změřeny síly vyvíjené jediným přístrojem a podél jedné osy byla pozorována maximální síla $8,29\text{N}$. Toto sestavení bylo použito během zákroku napodobující požadavky endoskopické disekce, kterou úspěšně provedl začínající uživatel.

Autoři si od tohoto řešení slibují usnadnění náročné chirurgických zákroků a možnost jednoduše přizpůsobit robota a následně ho zrychleně vyrobit s nízkými náklady díky programovému přístupu návrhu.

2.5 4-DOF Origami

V článku *A Novel 4-DOF Origami Grasper With an SMA-Actuation System for Minimally Invasive Surgery* [13] je prezentován 4-DOF origami drapák, pro vývoj miniaturizovaného chirurgického nástroje. s drapákem tvoří soustavu se čtyřmi stupni volnosti. Práce v tomto článku zkoumá kinematické mapování paralelní strukturu origami, což vede ke dvěma sadám ovládání, které využívají úhlové a lineární spouštěče. Rozsah ohybu centrální pružiny a statické vlastnosti pružiny jsou simulovány metodou konečných prvků. Simulované výsledky jsou ověřeny experimentálně a jsou použity při návrhu nového ovládacího systému ze slitiny s tvarovou pamětí.

Při výpočtu a simulacích modelu origami byla adresována možnost dalšího zmenšení modelu a velikosti ramena. Se sestaveným fyzickým modelem drapáku byly vyhodnoceny uchopovací síly pomocí experimentálních testů. S výrobním procesem inteligentní kompozitní mikrostruktury byly vyrobeny prototypy modelu origami pro ověření škálovatelnosti navrženého koncepčního návrhu. Po vyhodnocení testů autoři dosáhli slibných výsledků využití origami drapáku k úchytu předmětů.

3 Modely a strojové učení

Stejně jako je hardware a ovládací technika neustále posouvána kupředu tak i software a možnosti výpočetních operací. Proto jsou v této kapitole popsány další zajímavé možnosti chirurgické robotiky, které se úplně ne-soustřeďují na konstrukci robotů samotných jako na metody použití robotů.

3.1 Učení humanoidního robota demonstrací

Tento článek *Toward Teaching by Demonstration for Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery* [14] byl inspirován omezenými možnostmi manipulace při laparoskopické chirurgii při kinematických omezeních v místě vstupu.

Osvojení manipulačních dovedností z otevřené operace poskytuje flexibilnější přístup k orgánům a díky tomu by mohl chirurgický robot pracovat velmi inteligentním způsobem. Během výuky demonstrací je možno přenést manipulační dovednosti člověka na humanoidního robota pomocí aktivního učení během několika demonstrováných zákroků.

Tato práce si klade za cíl přenést pohybové dovednosti z mnoha lidských demonstrací v otevřené chirurgii na robotické manipulátory v roboticky asistované MIS pomocí učení demonstrací. Při provádění naučených dovedností pomocí robota pro MIS by však mělo být respektováno kinematické omezení. Autoři navrhuji novou metodiku integrací technik kognitivního učení a vyvinutých řídicích technik, což umožňuje robotu být vysoce inteligentní, aby se naučil dovednosti starších chirurgů a v budoucnu mohl provádět naučené chirurgické operace v semiautonomní chirurgii. Nakonec byly provedeny experimenty k ověření účinnosti navržené strategie a výsledky demonstrují schopnost systému přenést lidské manipulační dovednosti na robota v MIS.

3.2 Učí se robot pro řízení kamer

Autoři článku *A learning robot for cognitive camera control in minimally invasive surgery* [15] demonstrují autonomního robota pro navádění kamer. Robot se sám učí, je kontextově citlivý a použitelný pro MIS. Většina chirurgických robotů dnes jsou telemanipulátory bez autonomních schopností. Autonomní systémy byly vyvinuty pro laparoskopické navádění kamerou, avšak dodržují jednoduchá pravidla a nepřizpůsobují se chování konkrétním úkolům, postupům nebo chirurgům.

V článku je prezentována metodika, která umožňuje robotům s různou kinematikou vnímat své prostředí, interpretovat je na bázi znalostí a provádět akce s vědomím kontextu. V rámci výcviku bylo jedním chirurgem provedeno dvacet operací s naváděním kamery člověkem. Následně bylo experimentálně vyhodnoceno kognitivní ovládání robotické kamery. Systém VIKY EP a robot KUKA LWR 4 byly trénovány na datech z manuálního navádění kamery po dokončení zaučení chirurga. Podruhé byla k výcviku LWR použita pouze data z VIKY EP a následně data z trénování LWR byly použity na nové učení LWR.

Doba trvání každé operace se s narůstajícími zkušenostmi robota zkracovala z $1704s \pm 244s$ na $1406s \pm 112s$ a $1197s$. Kvalita navádění kamery (dobrá/neutrální/špatná) se zlepšila z 38,6/53,4/7,9 na 49,4/46,3/4,1% a 56,2/41,0/2,8%. Kognitivní kamerový robot tedy zlepšil svůj výkon díky zkušenostem a položil tak základ pro novou generaci kognitivních chirurgických robot, které se přizpůsobí potřebám chirurga.

3.3 Nový inteligentní systém pro semi-automatické MIS

Inteligentní chirurgičtí roboti mají velký potenciál ulevit chirurgům při únavných zákrocích. U MIS přidání inteligentních metod řízení k řízení laparoskopie má velký potenciál. Článek *Development of a novel intelligent laparoscope system for semi-automatic minimally invasive surgery* [16] se tedy věnuje metodám jak přenést část úkonů na robota, aby se chirurg mohl plně soustředit na svou práci. Autoři upravili Jakobiho matici nezávislou na hloubce tak, aby byla vhodná pro vyjádření pohybového omezení insertního nástroje v laparoskopii. Byla navržena metoda inteligentního a autonomního nastavení zorného pole chirurga, která umožňuje sledovat a předvídat trajektorii pohybu chirurgických nástrojů.

Výsledek experimentu ukazuje, že navržená metoda by mohla realizovat sledování chirurgických nástrojů a nastavení zorného pole chirurga při zákroku autonomně. V případě kluzu lze předvídat trajektorii pohybu chirurgických nástrojů. Inteligentní laparoskopický systém by mohl zlepšit inteligentní úroveň systému chirurgického robota. Vzhledem k tomu, že chirurgovi je poskytnuta "třetí ruka" je navrhovaný systém značným vylepšením poloutonomního systému chirurgického robota.

4 Závěr

Tato zpráva slouží jako krátké nastínění roboticky asistované chirurgie. V 2 kapitole je prezentováno současné využití robotů v MIS a několik odborných návrhů z posledních let. V kapitole 3 je pak zmíněno pár softwarových metod řešení či usnadnění chirurgických zákroků.

I přesto, že je dnes trh dominován firmou Intuitive Surgical Inc., vidím v robotické chirurgii velký potenciál, a to právě kvůli množství nově vyvíjených technologií, jak v oblasti konstrukce robotů, tak jejich řídicích metod a vybavení. Se stále menšími součástkami a výkonnější elektronikou je možné se už zamýšlet nad možností plně autonomního "výsadkového" chirurgického robota.

References

- [1] Michal Herman. Robotika v lékařství. <http://hdl.handle.net/11012/190353>, 2020. cit. 2022-03-07.
- [2] Masarykův onkologický ústav [online]. Robotická chirurgie. <https://www.mou.cz/roboticka-chirurgie/t1540>, 2022. cit. 2022-03-07.
- [3] Giuseppe Tortora, Tommaso Ranzani, Iris De Falco, Paolo Dario, and Arianna Menciassi. A miniature robot for retraction tasks under vision assistance in minimally invasive surgery. *Robotics (Basel)*, 3(1):70–82, 2014.
- [4] F Corcione, C Esposito, D Cuccurullo, A Settembre, N Miranda, F Amato, F Pirozzi, and P Caiazzo. Advantages and limits of robot-assisted laparoscopic surgery: preliminary experience. *Surgical endoscopy*, 19(1):117–119, 2005.
- [5] Feng Guo, Dongjie Ma, Shanqing Li, and Mariusz Adamek. Compare the prognosis of da vinci robot-assisted thoracic surgery (rats) with video-assisted thoracic surgery (vats) for non-small cell lung cancer: A meta-analysis. *Medicine (Baltimore)*, 98(39):e17089–e17089, 2019.
- [6] Nemocnice na Homolce [online]. Centrum robotické chirurgie. <https://www.homolka.cz/nase-oddeleni/11635-specializovana-centra/11635-centrum-roboticke-chirurgie>, 2017. cit. 2022-03-07.
- [7] Wikimedia Foundation. Robot-assisted surgery [online]. https://en.wikipedia.org/wiki/Robot-assisted_surgery, 2022. cit. 2022-03-07.
- [8] Intuitive Surgical Inc. [online]. Intuitive. <https://www.intuitive.com>, 2022. cit. 2022-03-07.
- [9] Krajská zdravotní a.s. [online]. Centrum robotické chirurgie. <https://www.kzcr.eu/rop/centrum-roboticke-chirurgie-7/info.aspx>, 2013. cit. 2022-03-07.
- [10] Intuitive Surgical Inc. Uživatelská příručka k systému da vinci xi. <https://manuals.intuitivesurgical.com/home>, 2019. cit. 2022-03-07.
- [11] Jiaqi Zhu, Liangxiong Lyu, Yi Xu, Huageng Liang, Xiaoping Zhang, Han Ding, and Zhigang Wu. Intelligent soft surgical robots for next-generation minimally invasive surgery. *Advanced intelligent systems*, 3(5):2100011–n/a, 2021.
- [12] Mark Runciman, James Avery, Ming Zhao, Ara Darzi, and George P Mylonas. Deployable, variable stiffness, cable driven robot for minimally invasive surgery. *Frontiers in robotics and AI*, 6:141–141, 2020.
- [13] Marco Salerno, Ketao Zhang, Arianna Menciassi, and Jian S Dai. A novel 4-dof origami grasper with an sma-actuation system for minimally invasive surgery. *IEEE transactions on robotics*, 32(3):484–498, 2016.
- [14] Hang Su, Andrea Mariani, Salih Ertug Ovr, Arianna Menciassi, Giancarlo Ferrigno, and Elena De Momi. Toward teaching by demonstration for robot-assisted minimally invasive surgery. *IEEE transactions on automation science and engineering*, 18(2):484–494, 2021.
- [15] Martin Wagner, Andreas Bihlmaier, Hannes Götz Kenngott, Patrick Mietkowski, Paul Maria Scheikl, Sebastian Bodenstedt, Anja Schiepe-Tiska, Josephin Vetter, Felix Nickel, S Speidel, H Wörn, F Mathis-Ullrich, and B. P Müller-Stich. A learning robot for cognitive camera control in minimally invasive surgery. *Surgical endoscopy*, 35(9):5365–5374, 2021.
- [16] Yanwen Sun, Bo Pan, Yili Fu, and Fayi Cao. Development of a novel intelligent laparoscope system for semi-automatic minimally invasive surgery. *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery*, 16(1):e2049–n/a, 2020.