

Vizuális kameravezérlés da Vinci sebészeti robotrendszerre

Visual servoing for da Vinci surgical system

MOLNÁR Cecília¹, NAGYNÉ ELEK Renáta³,
NAGY Tamás Dániel³, KISS Rita², HAIDEGGER Tamás^{3,4}

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Budapest, 1111, Műegyetem rkp. 3.
cecilia.molnar@irob.uni-obuda.hu

² Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Budapest, 1111, Műegyetem rakpart 3.

³ Bejczy Antal iRobottechnikai Központ, Egyetemi Kutató és Innovációs Központ, Óbudai Egyetem, Budapest,
1034 Bécsi út 96/b, {haidegger, renata.elek, tamas.daniel.nagy}@irob.uni-obuda.hu

⁴ Neumann János Informatikai Kar, Óbudai Egyetem, Budapest, 1034 Bécsi út 96/b

Kivonat

A da Vinci sebészeti robotrendszert elsősorban laparoszkoós műtétekre használják, mely során kamerakép alapján tájékozódik a sebész a hasüregben belül. A biztonságos beavatkozáshoz elengedhetetlen, hogy az orvosi eszközök a kamera látóterében legyenek. Az orvosi műhiba kockázatát csökkenteni lehet autonóm irányítás segítségével. Ebben a cikkben bemutatásra kerül egy lehetséges nyílt forráskód alapú megoldás automatizált kameravezérlésre teleoperaációs rendszerekre.

Kulcsszavak: vizuális irányítás, sebészeti robotika, vizuális kameravezérlés, DVRK, IROB-SAF

Abstract

The da Vinci surgical system is mainly used for laparoscopic surgeries, in which the surgeon has to navigate and intervene based on endoscopic camera images. For safety, it is vital that the surgical tools are always in the field-of-view of the camera. An autonomous capability of a da Vinci type surgical robot to optimize the camera holding arm's position can reduce the risk of medical malfunction. In this paper, we propose a possible method based on visual servoing for a telerobotic surgical system for automated camera positioning.

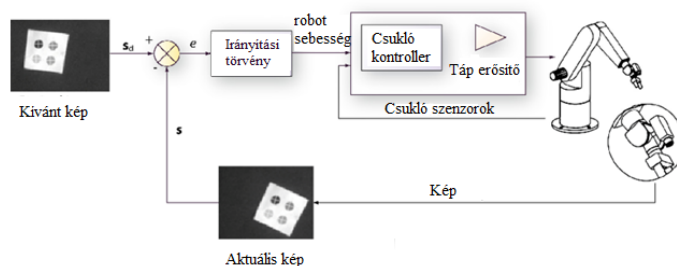
1. BEVEZETÉS

Minimál invazív beavatkozás (Minimally Invasive Surgery – MIS) során kis bemetszéseken végzik el a műtétet endoszkópos kamerakép alapján [1]. Az orvosok helyzetét nehezítik a hagyományos MIS esetén a rossz látási viszonyok, ergonómiailag nem ideális testhelyzet, a tapintás hiánya, és a megnövekedett koncentráció-igény [2]. Ezek kiküszöbölésének egyik elterjedt megoldása a Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery (RAMIS), a da Vinci teleoperációs sebészrobotok használata [3, 4]. Használatuk számos előnnyel jár, ilyenek a mozgás átskálázása, ergonómikusabb munkakörnyezet, és 3D látvány biztosítása [5] (1. ábra).

Sebészrobotikai gyakorlatban adódhatnak abból problémák, hogy kicsi a rendelkezésre álló mozgástér. Ennek ellenére létrejöhet olyan szituáció, hogy az orvosi eszköz véletlenül kikerül a kamera látóteréből, ezáltal károsíthatja a lágy szöveteket. Megoldást jelenthet erre a problémára az automatikus kameramoogatás, ami megvalósítható visual servoing algoritmusokkal. Ez lehetővé teszi a kamera autonóm mozgását, tetszőleges célfüggvényt (elvárt látványt) megadva, így véve le a kamera manuális moogatásának a terhet a sebész válláról [6] (2. ábra). Ebben a cikkben bemutatásra kerül egy lehetséges megoldás vizuális kameravezérlésre da Vinci sebészeti robotrendszerre.



1. ábra *Da Vinci sebészeti robotrendszer*
S generációs robotra



2. ábra *Klasszikus kép irányítás módszere*

A kutatás során a cél a Bejczy Antal iRobottechnikai Központja (BARK) által fejlesztett iRob Surgical Automation Framework szoftver keretrendszer bővítése volt valós idejű vizuális irányítással [7]. A bővítés első lépése a vizuális irányítás szerkezetének felépítése, a kommunikáció csatorna problémamentes létrehozása volt, mely során egy orvosi eszközt tartó kar mozgását vizsgáljuk. A vizuális irányítás képfeldolgozása marker segítségével történik. Az eszköztartó karra elhelyezett ArUco-kódot kell a robot kameratartó karjának követnie úgy, hogy az a látóterében maradjon [8]. E folyamat során szükség volt a képfeldolgozó program és a robot közötti kommunikációra, melyet a Robot Operating System (ROS) segítségével lett megvalósítva. A roboton való alkalmazáshoz nélkülözhetetlen egy da Vinci Research Kit (DVRK), melyhez hozzáférést biztosított a kutatás helyszínénél szolgáló Bejczy Antal iRobottechnikai Központ laborja [9, 10]. A DVRK által az implementásra került rendszer felülírta a sebészrobot eredeti irányítását.

2. MÓDSZEREK

2.1 Felhasznált keretrendszerek

2.1.1 Robot Operating System (ROS)

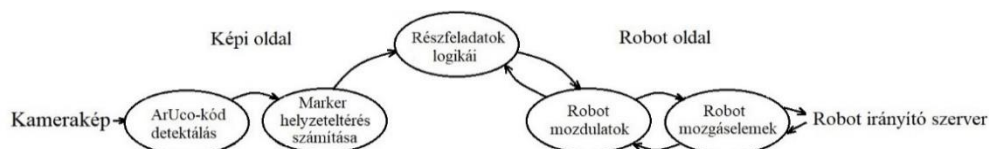
A Robot Operating System (ROS) alkalmazásával lehetőség nyílik arra, hogy a robot és a számítógép kommunikáljon, és a robot irányítását is lehetővé teszi [11]. A ROS egy lazán kapcsolt rendszer, amelyben egy adott folyamat, vagyis csomópont (node) egy adott feladatért felel. A csomópontok logikai csatornákon keresztül kommunikálnak egymással, témáknak (topic) nevezett üzeneteken keresztül. Ezek az üzenetek különböző adatstruktúrák, amit a csomópontok töltöttek fel adattal. Számos ilyen adatstruktúra létezik, a kutatásban kiemelt szerep jut a geometriai pont üzenetnek.

2.1.2 iRob Surgical Automation Framework (IROB-SAF)

Az Bejczy Antal iRobottechnikai Központban fejlesztett iRob Surgical Automation Framework, azaz IROB-SAF célja, hogy a kisebb sebészeti mozgásokat automatizálja. Jelen kutatás a keretrendszer bővítésével foglalkozik. Két részre tagolódik, egy vizuális részre, és egy mozgató részre. A két részt a részfeladatok logikai nevű node fogja össze, a két ág ezen keresztül tud kommunikálni (3.ábra).

A mozgató rész hierarchikus alegységekre tagolódik, legfelső szinten a surgeme szerver áll. Megfelelő surgeme mozdulatok szekvenciái alkotnak egy részfeladatot. A hierarchiában a surgeme szerver alatt áll a robot mozgáscsomag, mely a mozgáselemeket tartalmazza, például a trajektóriakövetést. Ezen mozgáselemekből épül fel egy surgeme mozdulat. A legalsó szinten található a robot irányító szerver, melyben már robot által értelmezhető adatok vannak. Ezáltal egy szerver-kliens rendszert alkotnak, valamint akciókon keresztül kommunikálnak, így párhuzamosan több tevékenység is végrehajtható.

A fő fejlesztés a vizuális oldal bővítése volt. Ezen kerül feldolgozásra az aktuális kamerakép. Az IROB-SAF része egy ArUco-kód detektáló program, amely publikálja a detektált marker sarkainak képi koordinátáit. Erre a node-ra iratkozik fel a Python programnyelven írt marker helyzetének eltérését publikáló program. Az eltérésből számítható ki a DVRK szintjén is értelmezhető elvégzendő mozgás. Ehhez a program által kiküldött koordinátákat rotációs egységmátrixszá, majd maximum három elemű vektorra kell transzformálni.



3. ábra Az IROB-SAF stilizált folyamatábrája

2.2 Marker helyzeteltérését publikáló kód

Ha talált ArUco-kódot a képen a marker helyzeteltérését publikáló program, meghatározza a kód négy sarkának koordinátáit pixelekből, majd számtani átlag alapján kiszámítja a marker középpontjának helyét pixelekből. Emellett kiszámítja számtani átlagolással a beolvasott képkocka abszolút középpontját is. Ezen két pont különbségével számít előjeles távolságot, melyet normalizálással tovább egyszerűsít. A marker középpontjának az abszolút középpontba helyezett koordináta-rendszerben értelmezett koordinátáit eltárolja egy ROS-ban használatos geometriai pont üzenet (`geometry_msgs/Point`) típusnak első két koordinátájaként. A mélységet a legegyszerűbben geometriai úton lehet kinyerni. A kamera tartó kar mozgatása egyszerűsítve lett, a z irányú elmozdulást nullának tekinti, mivel minimál invazív műtétek során nincsenek nagy mélységi elmozdulások.

A három adatból (x irányú eltérés normalizálva, y irányú eltérés normalizálva, z irányú eltérés nullának tekintve) álló geometriai pontot publikálja a megfelelő ROS témába. A kamerát tartó kar úgy fog mozogni, hogy az összes irányú eltérés minimális legyen.

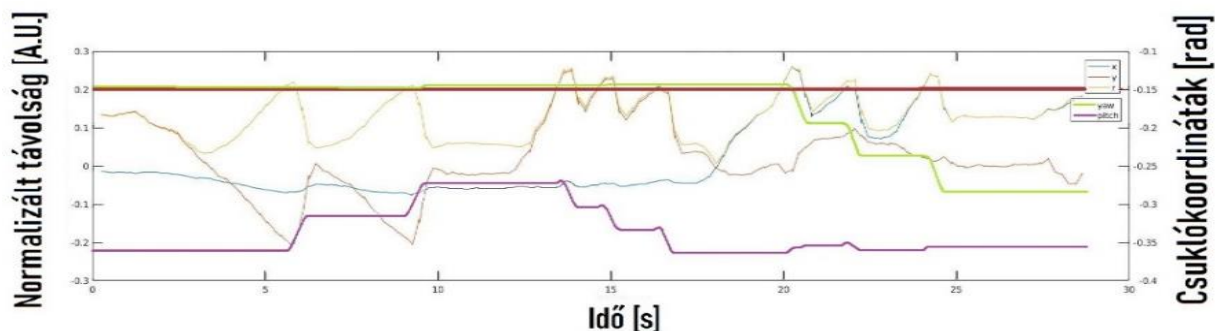
2.3 Tesztelés szimulátor használatával és a Vinci sebészeti robotrendszeren

A szimulátoron való tesztelés folyamata során biztosítani kellett a zavartalan kommunikációt, illetve olyan problémákat kellett eliminálni, mint a túl sok információ vagy a túl gyors követés. Az ideális kamera felvételi gyorsaságot 5 képkocka/másodperc jelentette. Az adatok empirikus úton kerültek meghatározásra. A robot mozgatása csak egy adott, minimális elmozdulás felett valósul meg. A konstans küszöbérték optimalizáció során 0,2 értékű lett. Ez a szám meghatározza a körnek a sugarát, melyen ha belül van a marker középpontja, a kamera tartó kar helyzetét nem változtatja.

A szimulátoron optimálisan működő rendszert a BARK robotlaborjában található a Vinci sebészeti robotrendszeren klinikai üzemmódban fantommal teszteltük. A klinikai üzemmódban a robot összes karját kizárólag a mesteroldalról lehet irányítani. A DVRK segítségével a kameratartó kar alapbeállítását a DVRK-n keresztül futó program írja felül.

3. EREDMÉNYEK

A pozicionálás pontosságának mérése során az x- és az y-irányú, valamint az abszolút elmozdulásokat vizsgáltuk. Az adatokat idő függvényében lettek ábrázolva (4. ábra). Ugyanezen adatokhoz tartoznak az endoszkópot tartó kamerakar szögelfordulásai. Ezek az adatok is idő függvényében lettek ábrázolva. Az x koordináta-hoz tartozik a yaw szögelfordulás, az y koordináta-hoz a pitch. Látható, hogy a threshold konstans érték (0,2) alatt csuklók nem lépnek mozgásba. Amennyiben y irányban történt elmozdulás, azt szignifikáns mértékben a yaw irányú, minimális mértékben pedig a pitch irányú elfordulás korrigálta.



4. ábra Pozicionálás pontosságának meghatározásához mért eredmények

A válaszdő méréséhez felhasználtuk a detektálás időpillanatának pontos értékét, illetve az endoszkópot tartó kamerakar erre adott szögelfordulásának kezdeti időpillanatának pontos értékét. Ezek az adatok a rosbag parancs segítségével exportálásra kerültek. A megfelelő tevékenységek időpillanatbeli értékének különbségét vizsgálva a mért adatok átlaga 0,0083 másodperc lett. Látható, hogy ez az érték elhanyagolható nagyságú, vagyis a tervezett rendszer klinikai szempontból közel valós idejűnek tekinthető.

4. KONKLÚZIÓ

A tervezett rendszer előnye, hogy a gyors detektálás valós idejű vizuálisan irányított rendszert biztosít, ami fontos szempont esetleges gyakorlati alkalmazáshoz. A mért eredmények alapján a pontossága kifejezetten kedvező. Hátránya, hogy a kameratartó kar mozgása nem optimális, pillanatnyi szünetek jellemzik a mozgását. Ez további fejlesztések megfelelő alapja, amellyel a da Vinci sebészeti robotrendszerrel klinikai gyakorlatban is használható lesz és az orvosi műhiba kockázata csökkenthető.

5. FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

Az ArUco-kód detektáláson alapuló vizuálisan irányított rendszer egyik fejlesztési lehetősége a képfeldolgozás, mert a marker alapú képfeldolgozás a gyakorlatban nem fog elterjedni higiéniai és gazdasági okokból. Ehelyett alkalmazható képjellemző detektáláson alapuló képfeldolgozó algoritmus vagy neurális háló általi orvosi eszköz felismerés. Jelenleg a rendszer mélységgel nem foglalkozik. A koncepció működik, így a módszer három szabadsági fokra, valamint két karra is kiterjeszhető.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] L. J. Freemann, Method for minimally invasive surgery in the digestive system, U.S. Patent, 2002, 6,543,456
- [2] T. Haidegger, A robotsebészet hódítása–sikerek, kudarcok, kihívások, Orvosi Hetilap, 2010, 151. évf. 41.sz. pp.1690-1696.
- [3] G. S. Guthart és J. K. Salisbury, The intuitive telesurgery system: Overview and application. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 2000, 1. évf. pp. 618–621.
- [4] Y. S. Kwok, A robot with improved absolute positioning accuracy for CT-guided stereotactic brain surgery, IEEE Trans. Biomed. Eng., 1988, 35. évf. 2.sz. pp. 153–160. ISSN
- [5] T. Haidegger, Autonomy for Surgical Robots: Concepts and Paradigms, IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics 1, 2019, 2.sz. pp 65-76.
- [6] M. Azizan, Visual servoing in medical robotics: a survey. Part I: endoscopic and direct vision imaging – techniques and applications, The international journal of medical robotics and computer assisted surgery, 2014, 10. évf. 3. sz. pp. 263-274.
- [7] T. D. Nagy, A DVRK-based Framework for Surgical Subtask Automation. Acta Polytechnica Hungarica, 2019, pp. 61-78.
- [8] S. G.-Jurado, Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion, Pattern Recogn, 2014, 47.évf. 6.sz. pp. 2280-2292.
- [9] John Hopkins University DVRK controller git repositories. [Online]. Elérhető: <https://github.com/jhu-dvrk> 2020.02.08.
- [10] da Vinci Research Kit wiki community. [Online]. Elérhető: https://research.intusurg.com/index.php/Main_Page 2020.02.08.
- [11] Robot Operating System [Online]. Elérhető: <https://www.ros.org/> 2020. 02. 09.
- [1. ábra] T. D. Nagy, A DVRK-based Framework for Surgical Subtask Automation. Acta Polytechnica Hungarica, 2019, pp. 61-78.
- [2. ábra] P. Gil. [Online]. Elérhető: https://www.researchgate.net/figure/Classical-image-based-visual-servoing-scheme_fig1_259082500 2020.02.08.