

Revolucija robotske kirurgije u medicini

The Revolution of Robotic Surgery in Medicine

TVRTKO HUDOLIN

Klinika za urologiju, KBC Zagreb

SAŽETAK ____Roboti su uređaji koji kontinuirano obavljaju jednostavne zadatke s minimalnom mogućnošću pogreške. Posljednjih nekoliko desetljeća svjedočimo sve široj upotrebi robota u različitim područjima ljudske djelatnosti, od svemirske tehnologije preko autoindustrije pa sve do jednostavnih robotskih sustava koji se rabe u kućanstvu za olakšavanje svakodnevnih poslova. Medicina kao jedno od najvažnijih, pa možemo reći i najdinamičnijih, tehnološki najzahtjevnijih područja, postala je ključna za razvoj i upotrebu različitih robotskih sustava s ciljem što neinvazivnije, ali i što preciznije te sigurnije dijagnostike i terapije različitih bolesti sa što boljim ishodima liječenja. U ovom radu prikazat ćemo neke od najvažnijih robotskih platformi, kao i neka od najvažnijih područja njihova djelovanja.

KLJUČNE RIJEČI: robot, robotska kirurgija, robotska radikalna prostatektomija, da Vinci, Senhance

SUMMARY ____Robots are devices that continuously perform simple tasks with minimal probability of error. Over the last few decades, we have witnessed the increasingly widespread use of robots in various areas of human activity, from space technology and the automotive industry, to simple robotic systems used in households to facilitate daily chores. Medicine, as one of the most important, and arguably the most dynamic and technologically demanding fields, has become central to the development and application of various robotic systems. The goal is to achieve diagnostics and therapy for various diseases that are as non-invasive, precise, and safe as possible, resulting in better treatment outcomes. This paper will present some of the most important robotic platforms as well as some of the key areas of their application.

KEY WORDS: robot, robotic surgery, robotic radical prostatectomy, Da Vinci, Senhance



Uvod

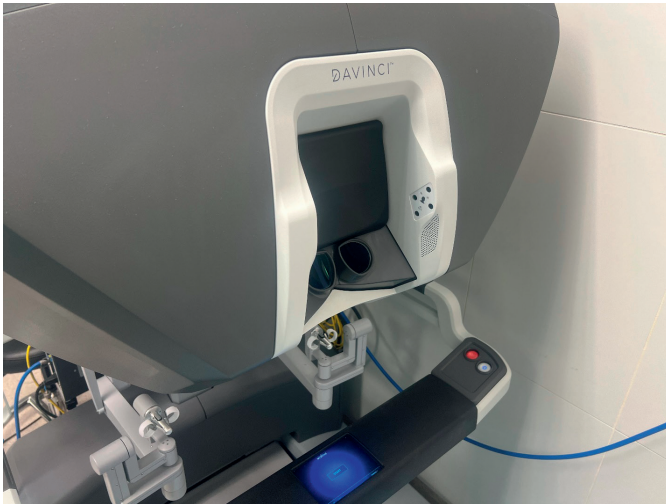
Riječ robot dolazi od češke riječi *robota*, a znači prisilan, odnosno ponavljajući rad. Prvi put je predstavljena u drami češkog pisca Karela Čapeka 1920. godine (1). Rani razvoj robotike u medicini započinje u osamdesetim i devedesetim godinama prošlog stoljeća. Većina tih uređaja ima svoje korijene u vojnoj tehnologiji, inicijalno s idejom telekirurgije, odnosno pomoći/izvođenju zahvata na ozlijeđenim vojnicima sa sigurne udaljenosti kombiniranjem računalne tehnologije i preciznih mehaničkih sustava. Robotski sustav PUMA 560 (engl. *Programmable Universal Machine for Assembly*) smatra se prvim robotskim sustavom primijenjenim u medicini 1985. godine za izvođenje stereotaktičke biopsije mozga (2). Otvorio je put drugim robotskim sustavima dokazujući da roboti mogu biti kirurški instrumenti te da mogu imati neke prednosti u odnosu na određene nedostatke ljudske ruke, ali i određena ograničenja. Naime, ovaj sustav je bio velik i nezgrapan te je zahtijevao dugo vrijeme postavljanja. Zanimljivo je također da su među prvim robotskim sustavima u medicini bili i robotski sustavi za transuretralnu resekciju prostate (3, 4, 5) koji nisu ušli u širu primjenu, ali su dokazali princip i postavili temelj za ulazak robotike, kako će budućnost pokazati, na velika vrata.

Moderna robotika

Značajan i najvažniji napredak postignut je u devedesetim godinama prošlog stoljeća pojavom sustava ZEUS, odnosno da Vinci. Ovi su sustavi bili bazirani na kvalitetnoj vizualizaciji, robotskim rukama i konzolom pod kontrolom kirurga. ZEUS je razvila tvrtka Computer Motion (Santa Barbara, SAD), a da Vincija Intuitive Surgical (Sunnyvale, SAD). Jedan od osnivača Intuitive Surgicala dr. Moll je kao specijalizant kirurgije bio na određeni način šokiran veličinom reza i ozljedom koja je nanesena pacijentu samo da bi se došlo do organa unutar tijela, smatrajući takav pristup zastarjelim. Korištenjem platforme ZEUS 2001. godine napravljena je prva transatlantska robotski asistirana operacija, čime je zapravo započelo novo područje u razvoju medicine jer se pokazalo da je moguće izvesti operativni zahvat s kirurgom na jednom, a pacijentom na sasvim drugom, udaljenom mjestu (6).

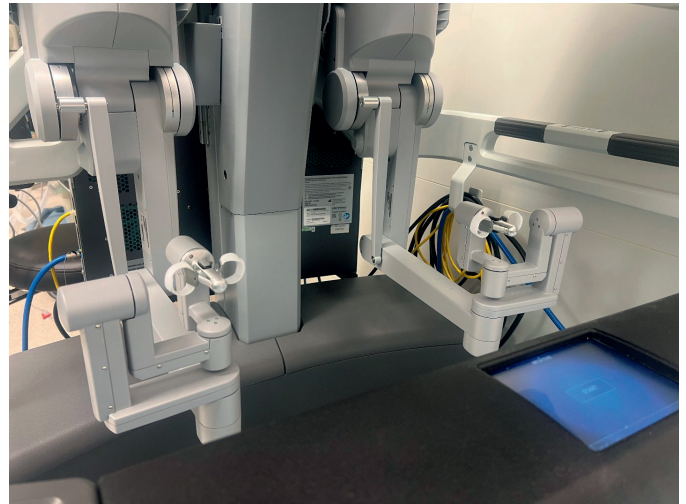
Da Vinci je 2000. godine dobio odobrenje američke Agencije za hranu i lijekove (FDA) i otad pa do danas smatra se najvažnijom, odnosno najkorištenijom i najprodavanijom platformom za robotsku kirurgiju u svijetu. Naime, zahvaljujući boljim karakteristikama, ali i boljoj tržišnoj implementaciji, da Vinci je brzo preuzeo primat robotske kirurgije te 2003. godine i preuzeo glavnog konkurenta, tvrtku Computer Mo-

SLIKA 1.A Zatvorena konzola



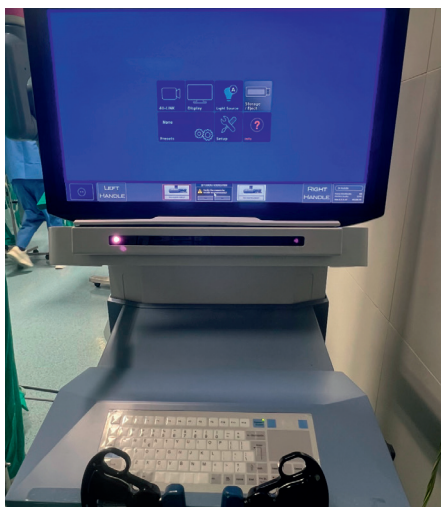
tion, te postao glavni lider na tržištu medicinske robotike. Danas se većina modernih robotskih platformi dijeli na integrirane (jedinствена struktura, da Vinci) i modularne (zasebne cjeline, Medtronic Hugo RAS, CMR Versius, Senhance), a sastoje se od nekoliko najvažnijih dijelova: 1. konzola, 2. robotska ruka, 3. vizualni sustav i 4. centralna/računalna komponenta. Postoje dva osnovna modela kirurških konzola, otvorene i zatvorene. Kod otvorenih, kako im samo ime kaže, pogled kirurga nije usmjeren na binokular, nego na monitor koji se nalazi ispred, bitno je širi i olakšava uvid u ostala zbivanja u sali (slika 1.), dok je kod zatvorene konzole pogled izoliran od okoline i maksimalno usmjeren u kirurško polje (slika 2.). Kirurška konzola funkcionira po principu *master-slave* (engl.). Kirurg koji je „gospodar“ postavlja prste na ili u specijalne otvore u konzoli koja je „izvršitelj“ te se pokreti šake, zglobova i prstiju digitaliziraju, filtriraju, skaliraju i na kraju izvršavaju s visokom preciznošću od strane robotskih instrumenata/ruku. Nožne pedale konzola omogućavaju funkcije kao što su aktivacija/pokretanje sustava, kontrola kamere, prebacivanje kontrole/upotrebe instrumenata, ali i korištenje elektrokirurških instrumenata. U načelu postoje do četiri robotske ruke koje služe za upravljanje instrumentima, odnosno kamerom. Robotske ruke imaju zglobove u nekoliko točaka/razina koji im omogućavaju široki raspon i izvođenje vrlo složenih pokreta. Vizualni sustav smatra se ključnom komponentom robotskog sustava. Naime, u načelu robotski sustavi ne pružaju taktilni osjet pa je slika jedini izvor informacija za operatera. Vizualni sustav omogućava sliku operativnog polja korištenjem endoskopskih kamera visoke rezolucije s 3D prikazom (naočale ili binokularna konzola, percepcija dubine) te mogućnošću uvećanja i do 10 puta, često kombinirane s dodatnim tehnologijama (fluorescentna i infracrvena tehnologija) s ciljem boljeg prikaza vaskularnih i limfnih struktura, kao i samih tumora. Najnoviji sustavi, kao što je

SLIKA 1.B Komande – da Vinci



da Vinci 5, nude mogućnosti integracije slika dobivenih računalnom tomografijom, odnosno magnetskom rezonancijom dodatno podižući kvalitetu prikaza/slike, a samim time i kvalitetu rada kirurga. Centralna računalna komponenta predstavlja „mozak“ robotskog sustava koji koordinira sve komponente robotskog sustava obavljajući čitavi niz složenih funkcija kao što su transformacija pokreta, upravljanje vizualizacijom, kontrolu sigurnosti, ali i upotrebu naprednih algoritama (umjetna inteligencija i strojno učenje), kao i prikupljanje informacija o samim operativnim zahvatima, ali i operaterima (slika 3.). Tijekom operativnog zahvata da Vinci sustav kontinuirano prenosi i obrađuje tisuće podataka u sekundi o položaju, kretanju i funkciji instrumenata. Do danas je prodano više od 10 000 različitih modela da Vincija i napravljeno je više od 17 milijuna različitih operacija u različitim zemljama svijeta. Kompanija ima najveći udio tržišta robotskih sustava s ukupnim godišnjim prihodima od oko 8,3 milijardi američkih dolara te kontinuirano raste (zadnji dostupni podatci na mrežnoj stranici kompanije) (7). Tako veliki brojevi posljedica su niza prednosti koje nudi sustav da Vinci, od poboljšane vizualizacije (3D prikaz u visokoj rezoluciji) koja omogućava odličnu percepciju detalja, ali i dubine prostora, preko instrumenata visoke pokretljivosti, čak i veće od ljudskih zglobova što posebno dolazi do izražaja kod operacija organa/struktura koje su smještene duboku u ljudskom tijelu, do eliminacije tremora, ali i skaliranja pokreta, odnosno pretvaranja velikog pokreta kirurga u mali, precizni pokret instrumenta. Nakon odobrenja za područje opće kirurgije i kardiorakalne, da Vinci sustav je vrlo brzo ušao u područje urologije, posebno u područje radikalne prostatektomije (RP) i danas mu se daje prednost kao operativnoj metodi liječenja karcinoma prostate (8, 9, 10). Radi se o minimalno invazivnom pristupu koji ima usporedivu, odnosno poboljšanu funkcionalnu i onkološku ishodu u odnosu na otvorenu kirurgiju, pogotovo

SLIKA 2.A Otvorena konzola

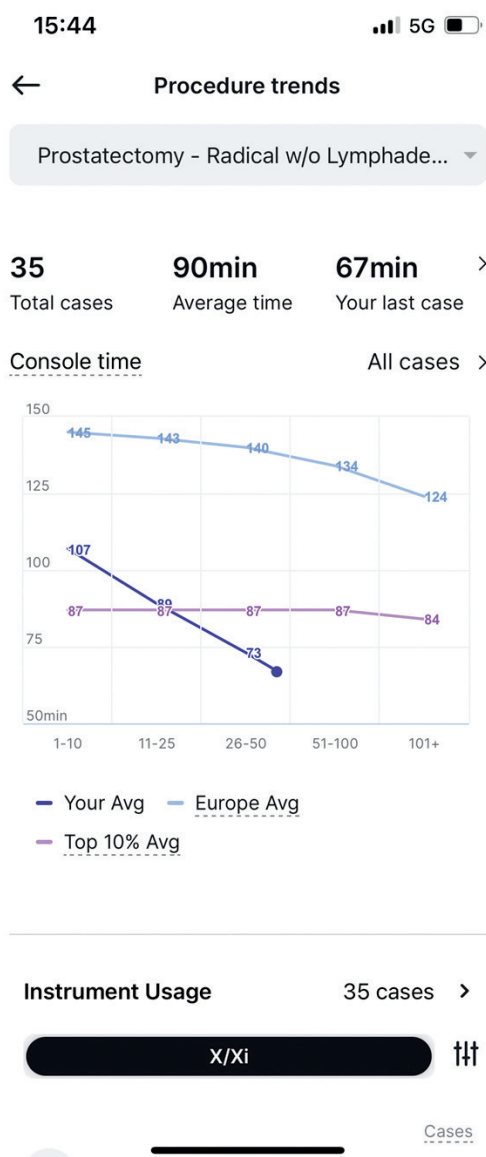


SLIKA 2.B Komande – Senhance



kod visoko volumnih, iskusnih kirurga (11, 12). Intuitive Surgical zahtijeva da svi članovi tima (kirurg, asistent, instrumentarke, anesteziolozi) prođu propisanu obuku u četiri faze da bi se osigurala visoka razina obučivosti cijelog osoblja. Prva i druga faza (pretklinička) sastoje se od upoznavanja i obuke na samom sustavu (instruktori, videozapis, simulator, trening na tkivnim modelima). Druga i treća faza (klinička) sastoje se od promatranja slučajeva (engl. *case observation*) te mentoriranih slučajeva (engl. *proctoring*). Osim toga, postoji i daljnja kontinuirana edukacija, ovisno o iskustvu (broj napravljenih zahvata), sposobnosti i željama kirurga. Takav pristup omogućava kontinuirano usavršavanje kirurga i značajno poboljšava njegov doživljaj cijelog procesa, ali i smanjuje vjerojatnost neželjenih ishoda liječenja. Kao i kod svake druge nove metode potrebno je određeno vrijeme i iskustvo da bi se ona uspješno implementirala i da bi rezultati bili dobri. Koliko vremena/slučajeva je za to potrebno, ovisi o više faktora, među kojima su ranije kirurško iskustvo, manualna sposobnost, ali i najvažniji – motivacija kirurga. Broj zahvata koji je potrebno da bi se postigla određena razina kvalitete varira i u literaturi iznosi od manje od 100, pa čak do 300 i više slučajeva, ali jasno je da se s povećanjem njihova broja povećava i kvaliteta zahvata, odnosno procedure (13, 14). Senhance robotska platforma inicijalno razvijena od talijanske kompanije (TransEnterix), kasnije preuzeta od američke kompanije Asensus Surgical i nedavno kupljena od Storza, ima maleni udio tržišta, < 5%. Radi se o robotskoj platformi s četirima odvojenim robotskim rukama, otvorenim konzolama, a najvažnija prednost su niži troškovi po zahvatu i kraća krivulja učenja za urologe koji već imaju iskustva u laparoskopiji. Naša je ustanova bila među prvim centrima u svijetu koji su počeli rabiti ovu platformu i do sada smo napravili više od 800 zahvata, uglavnom RP na Senhance robotskom sustavu (15).

SLIKA 3. Praćenje podataka operacije/kirurga – da Vinci



Robotski sustavi nisu jeftini, pored nabavne cijene samih platformi (kapitalni troškovi) koje iznose i nekoliko milijuna eura (ovisno o proizvođaču, modelu, opremljenosti te dodatnim komponentama kao što su edukacija, *proctoring* itd.), postoji trošak instrumenata (operativni troškovi) koji imaju određeni vijek trajanja (određeni broj života), troškovi potrošnog materijala, tome treba još dodati i redovito servisiranje kao i nadogradnje sustava, ali i određene druge troškove vezane uz korištenje ovako sofisticirane tehnologije. S druge strane, postoje i značajne uštede kroz smanjenje boravka u bolnici (u velikom broju bolnica u SAD-u RP napravljen s da Vinci sustavom je jednodnevna procedura, gdje bolesnik već sljedeći dan napušta bolnicu), smanjenje/izostanak transfuzija krvi, smanjenje upotrebe lijekova protiv bolova, manji broj infekcija, kao i ranija mobilnost i raniji povratak prijašnjim aktivnostima, odnosno smanjivanje dana bolovanja. Povećanjem broja operativnih zahvata, kao i maksimalnom iskorištenošću robotskih sustava uz već navedene uštede, troškovi se mogu značajno smanjiti, odnosno svesti na prihvatljivu razinu. Pokazano je da se povećanjem iskoristivosti fiksni troškovi mogu smanjiti za 30 – 50 % (16, 17). Štoviše, smatra se da će dolaskom novih robotskih platformi doći do pada cijena. Naime, prema nekim procjenama šira dostupnost konkurentskih robotskih sustava (Medtronic Hugo, CMR Surgical Versius, TransEnterix Senhance) mogla bi značajno smanjiti cijenu robotskih operacija, čak za 15 – 30 %, a samim time i širu dostupnost ovih metoda što je u konačnici dobro za sve sudionike u procesu robotske kirurgije (28, 19, 20).

Zaključak

Robotska kirurgija predstavlja najsuvremeniji oblik minimalno invazivnog liječenja. U ovom radu uglavnom smo se bavili da Vinci platformom u urologiji, odnosno u RP-u. Da Vinci je bio prvi robotski sustav u širokoj upotrebi i dandanas je predvodnik ove tehnologije (80 – 85 % tržišta) mada će s vremenom nove platforme vjerojatno imati sve veću ulogu. Možemo reći da su to sve zapravo dosta slične tehnologije, a principi opisani kod da Vincija se na ovaj ili onaj način mogu primijeniti i na druge platforme, jasno s određenim specifičnostima. Isto tako, principi robotskog RP-a su primjenjivi na druge urološke operacije, ali i operacije drugih specijalnosti kao što su ginekologija, abdominalna kirurgija ili kardiotorakalna kirurgija, jasno i ovdje s određenim specifičnostima. Robotska kirurgija bez obzira na platformu trebala bi omogućiti bolje liječenje naših bolesnika s različitim bolestima nudeći sve prednosti minimalno invazivnog pristupa zasad s još relativno visokom cijenom. Međutim, njezinom širom primjenom u hrvatskim bolnicama, kao i većim brojem različitih platformi, vjerojatno će se i troškovi robotskih operacija bitno smanjiti, a našim bolesnicima omogućiti širu dostupnost ovih suvremenih metoda liječenja koje pružaju bolje rezultate i brži oporavak.

LITERATURA

1. Brassetti A, Ragusa A, Tedesco F, Prata F, Cacciatore L, Iannuzzi A i sur. Robotic Surgery in Urology: History from PROBOT® to HUGOTM. *Sensors* (Basel). 2023 Aug 11;23(16):7104. doi: 10.3390/s23167104. PMID: 37631641
2. Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayati S. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1988 Feb;35(2):153-60. doi: 10.1109/10.1354.
3. Davies BL, Hibberd RD, Coptcoat MJ, Wickham JE. A surgeon robot prostatectomy--a laboratory evaluation. *J Med Eng Technol.* 1989 Nov-Dec;13(6):273-7. doi: 10.3109/03091908909016201.
4. Davies BL, Hibberd RD, Ng WS, Timoney AG, Wickham JE. The development of a surgeon robot for prostatectomies. *Proc Inst Mech Eng H.* 1991;205(1):35-8. doi: 10.1243/PIME_PROC_1991_205_259_02.
5. Harris SJ, Arambula-Cosio F, Mei Q, Hibberd RD, Davies BL, Wickham JE, Nathan MS, Kundu B. The Probot--an active robot for prostate resection. *Proc Inst Mech Eng H.* 1997;211(4):317-25. doi: 10.1243/0954411971534449.
6. Marescaux J, Leroy J, Gagner M, Rubino F, Mutter D, Vix M, Butner SE, Smith MK. Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature.* 2001 Sep 27;413(6854):379-80. doi: 10.1038/35096636. Erratum in: *Nature* 2001 Dec 13;414(6865):710.
7. Intuitive Surgical [pistupljeno 2.11.2025]. Dostupno na: <https://isrg.intuitive.com/static-files/500ff989-ad91-4b32-a59e-f94a34d75997>.
8. Binder J, Kramer W. Robotically-assisted laparoscopic radical prostatectomy. *BJU Int.* 2001 Mar;87(4):408-10. doi: 10.1046/j.1464-410x.2001.00115.x.
9. Alemozaffar M, Sanda M, Yecies D, Mucci LA, Stampfer MJ, Kenfield SA. Benchmarks for operative outcomes of robotic and open radical prostatectomy: results from the Health Professionals Follow-up Study. *Eur Urol.* 2015 Mar;67(3):432-8. doi: 10.1016/j.eururo.2014.01.039.
10. Wang J, Hu K, Wang Y, Wu Y, Bao E, Wang J, Tan C, Tang T. Robot-assisted versus open radical prostatectomy: a systematic review and meta-analysis of prospective studies. *J Robot Surg.* 2023 Dec;17(6):2617-2631. doi: 10.1007/s11701-023-01714-8.
11. Coughlin GD, Yaxley JW, Chambers SK, Occhipinti S, Samarantunga H, Zajdlewicz L i sur. Robot-assisted laparoscopic prostatectomy versus open radical retropubic prostatectomy: 24-month outcomes from a randomised controlled study. *Lancet Oncol.* 2018 Aug;19(8):1051-1060. doi: 10.1016/S1470-2045(18)30357-7.
12. Gershman B, Psutka SP, McGovern FJ, Dahl DM, Tabatabaei S, Gettman MT i sur. Patient-reported Functional Outcomes Following Open, Laparoscopic, and Robotic Assisted Radical Prostatectomy Performed by High-volume Surgeons at High-volume Hospitals. *Eur Urol Focus.* 2016 Jun;2(2):172-179. doi: 10.1016/j.euf.2015.06.011.
13. Perera S, Fernando N, O'Brien J, Murphy D, Lawrentschuk N. Robotic-assisted radical prostatectomy: learning curves and outcomes from an Australian perspective. *Prostate Int.* 2023 Mar;11(1):51-57. doi: 10.1016/j.prn.2022.10.002.
14. Tamhankar A, Spencer N, Hampson A, Noel J, El-Taji O, Arianayagam R, McNicholas T, Boustead G, Lane T, Adshead J, Vasdev N. Real-time assessment of learning curve for robot-assisted laparoscopic prostatectomy. *Ann R Coll Surg Engl.* 2020 Nov;102(9):717-725. doi: 10.1308/rcsann.2020.0139.



ADRESA ZA DOPIŠIVANJE:

prof. dr. sc. Tvrtko Hudolin, dr. med.
Klinika za urologiju, KBC Zagreb
Kišpatićeva 12, 10 000 Zagreb
e-mail: tvrtkohudolin@gmail.com

PRIMLJENO/RECEIVED:

24. studenoga 2025./November 24, 2025

PRIHVAĆENO/ACCEPTED:

7. prosinca 2025./December 7, 2025

