

# Primjena robotike u medicini

---

Jelić, Igor

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:638274>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-27**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**Veleučilište u Karlovcu**

**Strojarski odjel**

Stručni studij Mehatronike

Igor Jelić

# **PRIMJENA ROBOTIKE U MEDICINI**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2016.

**Karlovac University of Applied Sciences**

**Mechanical Engineering Department**

Professional undergraduate study of Mechatronics

Igor Jelić

**APPLICATION OF ROBOTICS IN  
MEDICINE**

FINAL PAPER

Karlovac, 2016.

**Veleučilište u Karlovcu**

**Strojarski odjel**

Stručni studij Mehatronike

Igor Jelić

# **PRIMJENA ROBOTIKE U MEDICINI**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr. sc. Adam Stančić, pr.

Karlovac, 2016



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J.Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni / specijalistički studij:.....**Mehatronika**.....  
(označiti)

Usmjerenje:.....**Mehatronika**.....Karlovac, .....**01.06.2016**.....

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student:.....**Igor Jelić**.....Matični broj:.....**0112609048**.....

Naslov:.....**Primjena robotike u medicini** .....

Opis zadatka:

Za potrebe Završnog rada, u uvodnom dijelu, opisati tehnologije koje su korištene kroz povijest robotike te razvoj istih u medicinske svrhe. Teoretskim dijelom opisati sadašnju primjenu i mogućnosti razvoja i apliciranja u budućnosti. U eksperimentalnom dijelu prikazati moguće i potencijalne primjene nanotehnologije u medicini (nanoroboti). Koristiti stručnu literaturu i konzultacije s mentorom. Rad uskladiti s pravilnikom VUKA.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

...**01.06.2016**....

...**09.09.2016**.....

.....**20.09.2016**.....

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## **PREDGOVOR**

Ovaj Završni rad sam napisao samostalno, koristeći stečeno znanje tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Adamu Stančiću predavaču te komentoru dr. sc. Vladimiru Tudiću višem predavaču na stručnim savjetima koji su mi pomogli pri izradi ovog završnog rada.

Također veliko hvala mojoj obitelji na inspirativnoj podršci tijekom studiranja.

## SAŽETAK

Ovim Završnim radom biti će istaknuta, prije svega, snaga uma koja stvara misao o održivosti ljudskih unutarnjih granica te mogućnost razvoja sustava potrebnog istoj. Obuhvate li se aspekti svih društvenih znanosti, posebno psihološke humane naravi, dolazi se do razvoja i suvremenosti koji prisustvuju unutar čovjeka. Primjena robotike u medicini obuhvaća aspekte održivosti razvoja stoga je vrlo važna tematika koja sjedinjuje budućnost čovječanstva i povijest ispisanu beskonačnim stranicama, ljudskom naprednošću, protivna zloupotrebi pojmova robotike te njenih zakona koji će biti navedeni u uvodnom dijelu.

Povijest robotike, koja dovodi do razvitka medicinske primjene te medicina kao znanost, opisane statističkim primjerima uz slikovitu predodžbu ranijih, sadašnjih te mogućih postignuća u tom polju, biti će prikazani u radu te posebno istaknuta primjena u području neurokirurgije gdje je veliki doprinos stigao sa domaćeg područja uvođenjem "RONNA" robotskog stereotaktičkog sustava za neuronavigaciju. Eksperimentalnim dijelom prikazane će biti mogućnosti potencijalne primjene nanotehnologije u medicini, načine kojim bi se nanoroboti mogli kretati kroz čovjekovo tijelo noseći odgovarajući lijek i alate potrebne za izvršenje svoje dužnosti - liječenje ljudskog organizma.

**Ključne riječi:** suvremenost, robotika, medicina, neurokirurgija, RONNA, neuronavigacija, nanotehnologija, nanoroboti, lijek, alati.

## **SUMMARY**

With this final paper, there will be noted the power of the mind which creates a thought about sustainability of human inner limits and the possibility of needed system development. While comprehending the aspects of all social sciences, especially of the psychological human nature, there is ability to reach the development and modernity within human. Application of robotics in medicine includes the aspects of development sustainability and it is a very important topic, which unites the future of humanity and the endless pages of history written by human progressiveness, contrary to the abuse of robotics application and its laws which will be specified in the introductory part.

Robotics history, which causes the development of medical application, and medicine as a science, described with statistical examples and a picturesque image of the earlier, the present and the possible acquirements in that field, will be shown in this final paper as well as the peculiarly featured application in the domain of neurosurgery, where the great contribution came from domestic territory with the introduction of "RONNA" robotic stereotactic neuronavigation system. With the experimental part, there will be shown the possibilities of the potential applications of nanotechnology in medicine, the ways that nanorobots could potentially move through human body while carrying a compatible cure and the tools necessary for the implementation of their duty - the treatment of the human body.

**Key words:** modernity, robotics, medicine, neurosurgery, RONNA, neuronavigation, nanotechnology, nanorobots, cure, tools.



## SADRŽAJ

<b>ZADATAK ZAVRŠNOG RADA .....</b>	<b>I</b>
<b>PREDGOVOR .....</b>	<b>II</b>
<b>SAŽETAK .....</b>	<b>III</b>
<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>V</b>
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Povijest robotike .....	4
1.2. Povijest robotike u medicini .....	9
<b>2. TEORIJSKI DIO .....</b>	<b>13</b>
2.1. Robotske karakteristike .....	13
2.2. Utjecaj robotike na suvremeni svijet .....	16
2.3. Utjecaj robotike na medicinu .....	21
2.4. Primjena servisnih robota u medicini .....	26
2.4.2. Phoenix egzoskelet .....	29
2.4.3. Armeo spring .....	30
2.4.4. i-limb™ .....	31
2.4.5. Robotiziran sustav invalidskih kolica .....	32
2.4.6. Servisni robot Twendy-One .....	33
2.5. Primjena robotskih sustava u kirurgiji .....	34
2.5.1. Robodoc .....	35
2.5.2. Kirurški sustav da Vinci .....	36
2.5.3. Neuromate .....	37
2.5.4. Rosa.....	38
2.5.5. RONNA (robotska neuronavigacija) .....	39
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO .....</b>	<b>43</b>
3.1. Uvod u nanotehnologiju .....	43
3.2. Nanomaterijali .....	44
3.2.1. Nanocijevi .....	45
3.3. Nanorobotika .....	47
3.3.1. Proizvodnja nanorobota .....	48
3.3.2. Moguća primjena nanorobota .....	49
3.3.3. Vrste nanorobota .....	53

3.3.4. Kretanje nanorobota .....	57
3.4. Prednosti i nedostaci nanotehnologije u medicini .....	58
<b>4. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>61</b>
<b>5. LITERATURA .....</b>	<b>63</b>
<b>POPIS SIMBOLA (KORIŠTENIH KRATICA) .....</b>	<b>64</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>66</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>68</b>

***„Povećaj u meni onu mudrost koja otkriva moj zbiljski interes, pojačaj moju odlučnost da izvršim ono što mudrost nalaže.“***

***– Benjamin Franklin***

## 1. UVOD

Djelovanje razvoja tehnologije uvelike doprinosi medicini koja se njenom primjenom usavršava i dolazi do beskonačnih saznanja. Primjena robotike u prošlosti pokazuje kako se laganim koracima dolazi do smjerova koji izgrađuju suvremeni svijet kakvog ljudsko biće poznaje. Uz sveprisutna odbacivanja takvog razvoja kao poželjnog, zbog straha od nepoznatog i mogućeg iskorištavanja navedene tehnologije u loše svrhe, ipak napredovanje ne posustaje. Nadu pobuđuje olakšavanje životnog ciklusa na tehničko-psihološkoj i anatomsko-fiziološkoj razini.

Tehnologija stvara moralnu dvojbu zbog načina razvijanja koji bi mogao dovesti do same propasti planete iskorištavanjem prirodnih resursa te gomilanjem otpada. George Santayana (1863.-1952.), poznati španjolski filozof, esejist, pjesnik te novelist, rekao je da izumi i organizacija, koji su trebali povećati dokolicu stvarajući sve potrebno za život uz malo rada, jedino su povećali populaciju, degradirali rad i rasprostranili luksuz [1]. Mnogi žele odbaciti složene strojeve jer bi sretnije živjeli i radili bez njih, no bi li se doista velik dio suvremene organizacije i strojeva mogao odbaciti, možda je sporno pitanje, ali mogućnost odbacivanja u najmanju je ruku zamisliva ako se više počnemo zauzimati za stvarni učinak tehnologije na život i sreću ljudi koji su dio organizacije nego za profit koji se gomila na papiru, da bi se u konačnici pretvorio u sve veću hrpu otpada. Razvijanje psihologije uzrokuje razvijanje stvaralačkih mogućnosti koje potpomažu daljnje razvijanje psihologije, i tako dalje u krug beskonačnih granica ljudskog postojanja.

Gledano s anatomsko-fiziološke razine čovjekovo tijelo može se definirati kao nedjeljiv morfološko-funkcionalni sustav koji oblikuju stanice okupljene u pojedina tkiva i organe. Čovjek je potpuna, jedinstvena i ponajprije umna osobnost koja uvelike premašuje puki zbroj sastavnih dijelova što čine njegovo tijelo. Svako odjelito promatranje dijelova čovjeka samo je istraživačke naravi, a temeljno značenje ima sveobuhvatno shvaćanje čovjeka kao psihofizičkog i

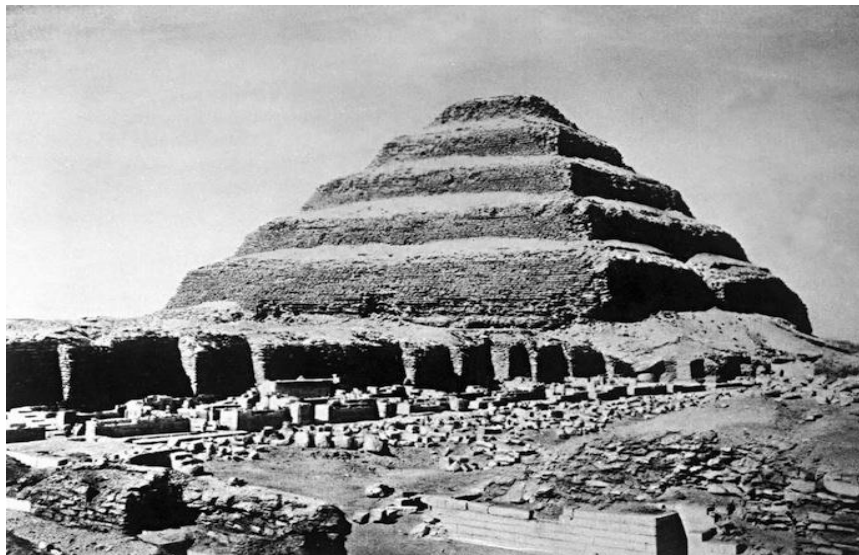
socijalnog bića [2]. Čovjekovo tijelo je ranjivo u raznim okolnostima, a kada je ranjivo ne može kvalitetno funkcionirati, stoga je bitno osigurati kvalitetu zdravlja kako bi se moglo postići više i samim time ugodnije živjeti.

Medicinski roboti zauzimaju sve značajnije mjesto u medicini posebno u kirurgiji, ali i kao roboti za servisiranje, odnosno kao pomoć nepokretnim ili hendikepiranim bolesnicima, za fizikalnu terapiju i slično. Kirurški roboti su najzastupljeniji u području ortopedije, abdominalne kirurgije i transplantacije te u neurokirurgiji. Jedan od poznatijih je teledirigirani robot "Da Vinci" namijenjen prije svega za laparoskopiju (laparoskopija je minimalno invazivna procedura kojom se u trbušnu šupljinu ulazi sa krutim cijevima kroz koje se može u trbušnu šupljinu uvesti teleskop sa malom kamerom i specijalni laparoskopski kirurški instrumenti) kojom se omogućuje izvođenje većine operativnih zahvata uz manje rezove, manju traumu za pacijenta u bolnici, smanjenu opasnost od infekcija te brži oporavak [3]. Tako se postiže kraće zadržavanje pacijenata u bolnici i brži povratak svakodnevnom životu. Istodobno, primjenom robota moguće je nadoknaditi uvijek prisutan manjak različitih specijalnosti potrebnih pri izvođenju kirurških zahvata. Primjena robota u kirurgiji ima dvije razine; asistentsku, pri čemu robot ne obavlja kirurški zahvat već samo funkcije koje su povezane s operacijom; te druga - samostalna razina, u kojoj robot izravno obavlja kirurški zahvat. Širom svijeta uspješno se obavljaju operacije koje planira kirurg, a zatim u samom izvršavanju u pomoć priskače robot. Kirurški zahvati zahtijevaju preciznost koju ljudsko biće nekad nije u stanju postići. Zato se radi na sistemima koji udružuju kirurško znanje i računalnu preciznost. Sve nove tehnologije usavršavaju operacije s minimalnom invazijom na tijelo pacijenta, tj. bez njegovog otvaranja. Roboti danas mogu ući u tijelo kamerom, izvršiti biopsiju i kirurzima daju potpuno novu sliku organizma pacijenta. Roboti su sve više u upotrebi u operacijskim dvoranama i možda će jednog dana potpuno zamijeniti kirurge.

Velika postignuća se očekuju od primjene nanotehnologije u svrhu poboljšanja čovjekovih sposobnosti te očuvanja njegovog zdravlja. Nanotehnologija ima svijetlu budućnost i veliku primjenu u cjelokupnom svijetu kao i u svakodnevnom ljudskom životu. Velika primjena nanotehnologije vidljiva je u medicini (nanomedicini), automobilske industriji, tekstilnoj industriji kao i u mnogim drugim znanstvenim disciplinama. Naime, nanotehnologija je u užem smislu riječi slaganje molekula onako kako mi to želimo. Znanstvenici imaju ideju o slaganju molekulske strukture koju bi integrirali u ljudsko tijelo te čija bi funkcija bila uništavanje virusa i bakterija pa čak i stanica zloćudnih bolesti.

## 1.1. Povijest robotike

Ideje o robotici datiraju još iz davnina, uzme li se u obzir 3. i 4. egipatska dinastija i pretpostavke o prvim inženjerima Imhotepu (2655.-2600.pr.n.e.) i njegovom ocu Kanoferu koji su izgradili, za sada prvu poznatu, stepenastu piramidu zvanu Džozeroova piramida (slika 1.). Izgrađujući kompleksne sigurnosne sustave, suočavali su se također s aktivnostima koje su imale elemente automatizacije. Da bi se obeshrabrilo ili onemogućilo potencijalne pljačkaše grobova izgrađivane su lažne dvorane, zidovi i vrata, provalije i smrtonosne zamke. Izgradnja ovih obrambenih mehanizama suočavala je graditelja sa ozbiljnim logističkim i organizacijskim problemima, a usto je morao biti i izrazito kreativan.



**Slika 1.** Predodžba Džozeroove piramide. Izvor: <http://www.buro247.hr/>

Povjesničari znanosti navode radove dvojice znanstvenika tehničke struke kao značajnije početke vezane za povijest robotike. Radi se o Heronu Aleksandrijskom iz prvog stoljeća i Ismailu Al Jazariju iz 12. stoljeća. Heron Aleksandrijski (10.-70.) je cijenjeni matematičar i znanstvenik tehničke struke. Djelovao je u okviru muzeja u Aleksandriji. U djelu "*Pneumatica*" opisao je 80 uređaja koji rade pomoću pneumatskog, hidrauličkog ili parnog tlaka. Spominju se mehanizmi sa rotirajućim pozicioniranjem, automati za otvaranje i zatvaranje

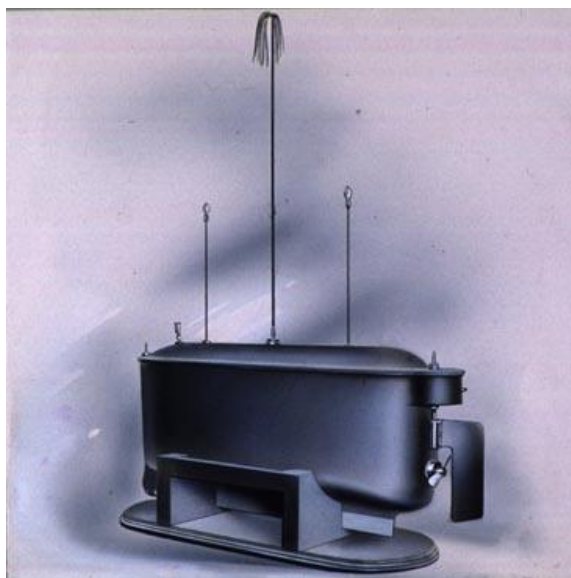
vrata, uređaji za simuliranje grmljavine, te androidi koji sipaju vino [4]. Automatsko kazalište prikazuje predstavu koja traje 10 minuta, a pokreće se na osnovu potencijalne energije utega. Program je zapisan pomoću čvorova u binarnom kodu i mogao se mijenjati. Automat za doziranje svete vode radio je na kovanice i smatra se pionirskim radom na području kibernetike. Ismail Al Jazari (1136.-1206.) vodeći je svjetski strojarski inženjer. Njegove radove iz područja robotike većina povjesničara znanosti smatra vrhuncem znanstvenih postignuća iz područja mehaničkih automata. Bavio se muzičkim automatima, vodenim satovima impresivnog dizajna, humanoidnim robotima za posluživanje, te pumpama i sustavima za izvlačenje vode. Stil njegovog rada je bio prvo nizom pokušaja izraditi uređaj, a zatim to detaljno zabilježiti u obliku prekrasnih minijatura. U svome pismenom radu "Knjiga o genijalnim mehaničkim uređajima" prezentirao je 50 radova sa 174 crteža i ona je bila najvrjedniji dokument za projektiranje, proizvodnju i montažu strojeva sve do modernih vremena [4]. Leonardo da Vinci (1452.-1519.), jedan od najvećih genija renesanse, pored visokih postignuća u umjetnosti plodonosan je bio i kao inženjer. Godine 1495. izradio je humanoidnog robota u obliku oklopljenog viteza (slika 2.), a 1515. godine mehanički automat u obliku lava.



**Slika 2.** Predodžba replike da Vincijevog humanoidnog robota. Izvor: <https://nellacro.wordpress.com/>



Nikola Tesla (1856.-1943.), znanstvenik tehničke struke svjetskog glasa, prezentirao je u New Yorku 1898. godine brod s daljinskim upravljanjem (slika 3.). Ovaj izum je nastao kao nastavak njegova istraživanja o radiju. On je za tu priliku iskoristio par jakih akumulatora, radio signale koji se kontroliraju serijom prekidača, električni motor koji je pokretao brod i seriju svjetla na brodu koja su se napajala iz akumulatora [5] . Ova tehnologija se nije dugo koristila nakon Tesle, no ove Tesline ideje je iskoristila uglavnom vojska s naumom da stvori daljinski upravljanu vojnu tehnologiju. U Drugom svjetskom ratu, Nijemci su napravili prvi tenk na daljinsko upravljanje, i nakon toga su ovakvi izumi preplavili tržište, naročito u domeni ograničavanja ljudskih sloboda. Upravljanje radiovalovima imalo je logički ključ koji je isključivao neovlašteno presretanje signala i bilo je blisko nekim elementima robotike.



**Slika 3.** Predodžba Teslina broda s daljinskim upravljanjem. Izvor: <https://matrixworldhr.com/>

Književnost je značajno utjecala na razvoj robotike. Pojam *robot* prvi puta koristi 1920. god. češki pisac dr. Karel Čapek u svojoj utopističkoj drami "*R.U.R.*" (*Rossum's Universal Robots*) i povezan je sa češkom riječi "*robotnik*" koja se može prevesti kao rob, radnik i sl.

Shvaćajući interferenciju prirode i tehnike slavni je američki pisac znanstvene fantastike Isaac Asimov još davne 1942. godine osmislio u svojim knjigama četiri osnovna zakona robotike koji bi trebali spriječiti moguće probleme [6]:

- **Prvi zakon** - Robot ne smije ozlijediti čovjeka, ni zbog svoje neaktivnosti dopustiti da ljudsko biće bude ozlijeđeno.
- **Drugi zakon** - Robot mora slušati čovjekove naredbe, osim u slučaju kad bi te naredbe kršile prvi zakon.
- **Treći zakon** - Robot mora štiti sebe, osim kada bi to kršilo prvi i drugi zakon.
- **Četvrti zakon** – Robot mora izvršavati radnje za koje je programiran, osim ako su te radnje u sukobu sa zakonima robotike.

U novije vrijeme nastali su i dodatni zakoni:

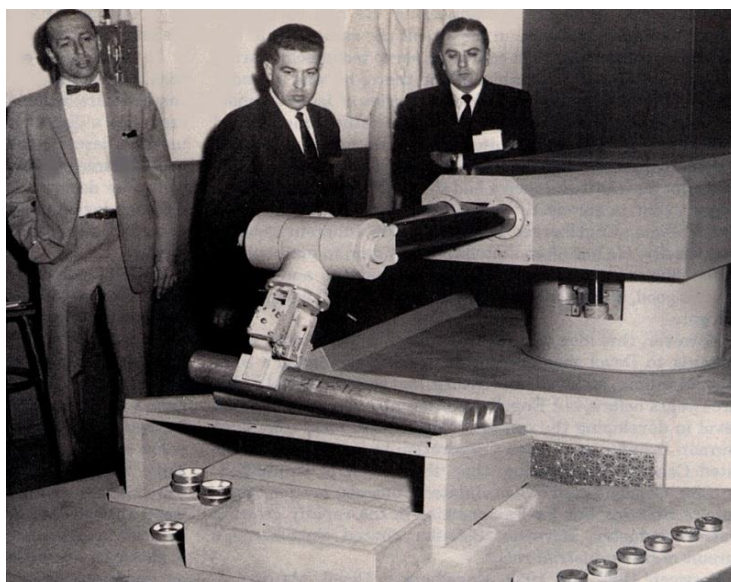
- **Meta zakon** – Robot ne smije djelovati ako to djelovanje nije u skladu sa zakonima robotike.
- **Zakon reprodukcije** – Robot ne smije sudjelovati u konstruiranju i proizvodnji robota, osim ako je ta nova aktivnost u skladu sa zakonima robotike.

Nažalost, koliko god se činili logičnima, predloženi zakoni su teško provedivi u stvarnom svijetu. Već danas brojni napredni roboti primijenjeni u vojne svrhe izravno krše prvi zakon robotike.

Industrijska revolucija potaknuta izumom parnog stroja dovela je do poboljšanja rada strojeva, a potom i do pojave automatskog upravljanja strojevima.

Henry Ford (1863.-1947.) u svojoj tvornici automobila 1914. godine uvodi montažnu vrpcu, koja omogućuje bržu izradu automobila te radnika specijalizira za izradu/montažu samo jednog dijela automobila.

Joseph F. Engelberger (1925.-2015.), inženjer i poduzetnik te jedan od pionira uporabe robota u industrijske svrhe, 1956. godine osnovao je tvrtku "Unimation", gdje je radeći s izumiteljem Georgeom Devolom razvio prvi američki industrijski robot, zbog čega ga se često zove i ocem robotike [3]. Navedeni robot dobio je ime "Unimate" (slika 4.) i 1961. godine postavljen je u jednu tvornicu tvrtke "General Motors". Taj događaj označava početak uporabe robota u industrijske svrhe, od tada pa do danas u različite tvornice u svijetu ugrađeno je preko 3 milijuna industrijskih robota. Engelberger je svojim proizvodom utjecao i na razvoj japanske automobilske industrije poslije Drugog svjetskog rata, 1970. godine. Prvi industrijski robot u Japanu radio je na poslu zavarivača u tvrtki "Nissan". Nakon prodaje "Unimationa" tvrtki "Westinghouse", putem nove tvrtke "HelpMate Robotics" posvetio se izradi robota za primjenu u zdravstvenim ustanovama. Autonomni robot "HelpMate" koristi se kao bolnički asistent u velikom broju zdravstvenih ustanova u cijelom svijetu. Poslije se posvetio razvoju robota koji će poslužiti kao ispomoć starijim osobama te osobama s poteškoćama u kretanju. "The Robotics Industries Association" godišnje predstavlja "Nagradu Joseph F. Engelberger" osobama koje su jako pridonijele unapređivanju znanja i prakse robotike.



**Slika 4.** Predodžba Unimatea. Izvor: <http://spectrum.ieee.org/>

## 1.2. Povijest robotike u medicini

Prvi poznati robot u kirurgiji bio je "Arthrobot" (slika 5.), koji je asistirao 1983. godine pri ugradnji endoproteze kuka.



**Slika 5.** Predodžba Arthrobota. Izvor: <https://i.ytimg.com/>

Godine 1985. robot "Puma 560" upotrijebljen je da postavi iglu za biopsiju mozga koristeći vođenje kompjuterskom tomografijom (CT). Tri godine kasnije "Probot", razvijen na Imperial Collegeu u Londonu, korišten je u operaciji prostate (slika 6.).

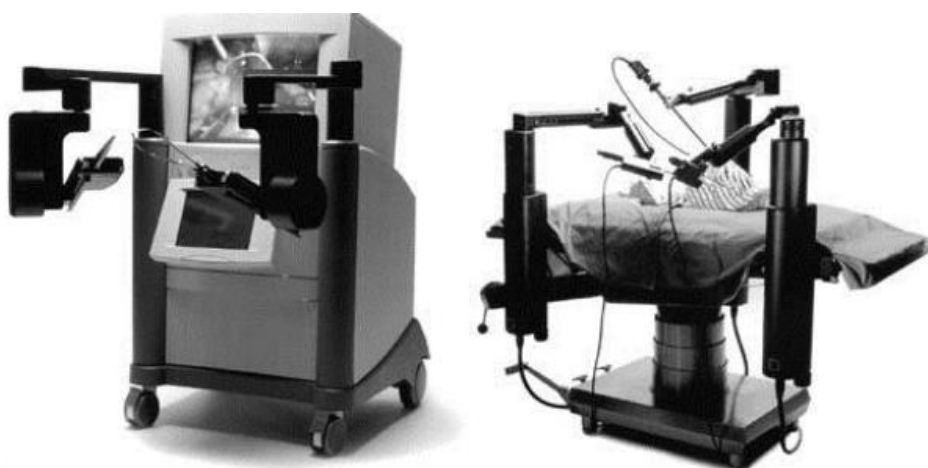


**Slika 6.** Predodžba Probota. Izvor: <http://www.wired.com/>

Integrirani kirurški sustav "Robodoc" (opširnije u odjeljku 2.5.1.) uveden je 1992. za ugradnju preciznih elemenata u bedrenu kost kod zamjene kuka, a daljnji razvoj uslijedio je uvođenjem kirurškog robota "Da Vinci" (opširnije u odjeljku 2.5.2.) tvrtke Intuitive Surgical, te kirurških sustava "Aesop" (slika 7.) i "Zeus" (slika 8.) tvrtke Computer Motion [6]. Intuitive Surgical je kupio Computer Motion 2003. godine i od tada se Zeus više aktivno ne prodaje.



**Slika 7.** Predodžba Aesopa. Izvor: <http://www.terapeak.com/>



**Slika 8.** Predodžba Zeusa. Izvor: <https://www.researchgate.net/>

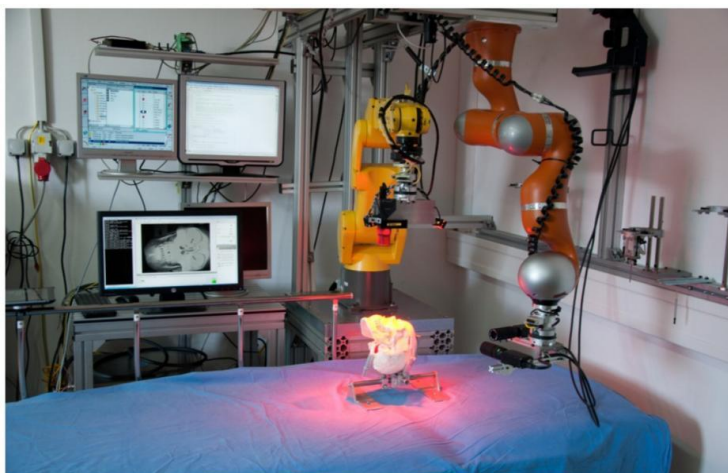
Sistem "NeuroMate" (opširnije u odjeljku 2.5.3.) u neurokirurgiji se koristi kao asistent za biopsiju i otklanjanju tumora [6]. Umjesto predoperativnih slika, NeuroMate prikazuje real-time 3D slike koje kirurgu pokazuju preciznu lokaciju tumora. Prvi robot u komercijalnoj upotrebi koji je 1994. godine asistirao kirurzima bio je Aesop. Bio im je kao treća ruka koja je držala endoskopsku kameru. Zatim su uslijedili roboti koji sami imaju dvije, tri ili četiri ruke. Godine 1998. izvedena je prva ugradnja srčane prenosnice (bajpas), u Njemačkoj, u kojoj je Da Vinci aktivno pomagao kirurzima. Godinu nakon toga slijedi prva ugradnja srčane prenosnice u SAD-u. Prva operacija na daljinu izvršena je 2001. godine putem Zeusa kojim je bilo upravljano u New Yorku dok je pacijent bio u Strasbourgu. 2006. godine izveden je prvi zahvat robotske kirurgije umjetnom inteligencijom bez asistencije za ispravljanje srčane aritmije. Rezultati su ocijenjeni kao bolji od iznad prosječnog kirurga čovjeka. Stroj je imao bazu podataka od 10.000 sličnih zahvata, i tako je, prema riječima dizajnera, bio "više nego kvalificiran za izvođenje zahvata na bilo kojem pacijentu". 2009. godine izvedena je u New Jerseyu prva potpuno robotski asistirana transplantacija bubrega. 2010. godine sa Sveučilišta za tehnologiju Eindhoven objavili su da razvijaju kirurški sustav "Sofie" (slika 9.), prvi kirurški robot koji će imati implementiranu sposobnost povratne sile.



**Slika 9.** Predodžba Sofie. Izvor: <https://www.tue.nl/>



Krajem 2010. godine tim pod vodstvom Boruta Geršaka izveo je prvi robotski zahvat na bedrenom krvožilnom sustavu. Zahvat je izveden na Sveučilišnom medicinskom centru Ljubljana. Korišten je prvi pravi robot, što znači da nije samo replicirao pokrete ljudskih ruku, već je bio upravlján pritiscima na gumbé. Posebno treba istaknuti i doprinos hrvatskih znanstvenika na izradi neurokirurškog autonomnog dvoručnog robota "RONNA" (Robotska neuronavigacija) (slika 10.). Razvijen je 2013. g. na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u suradnji s Kliničkom bolnicom Dubrava. Prva neurokirurška operacija u kojoj je asistirao robot RONNA obavljena je na pacijentu oboljelom od tumora na mozgu, 10. ožujka 2016. godine. Opširnije o robotskom sustavu RONNA u odjeljku 2.5.4. [7].



**Slika 10.** Predodžba RONNA-e (Robotska neuronavigacija). Izvor:

<http://www.ronna-eu.fsb.hr/>

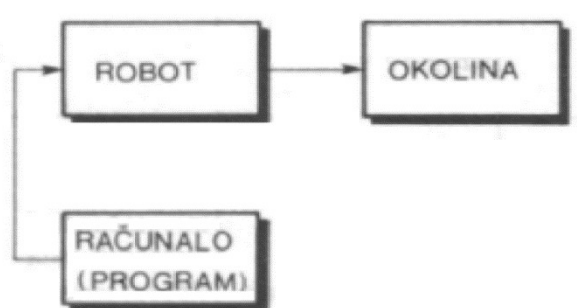
Minimalno invazivna kirurgija znatno je izmijenila sve kirurške grane u zadnja dva-tri desetljeća, a robotska kirurgija u ginekologiji, urologiji i abdominalnoj kirurgiji jedno je od najbrže rastućih područja tog dijela medicine.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Robotske karakteristike

Razvoj robota i robotike odvijao se u nekoliko etapa. Obilježjem robotske generacije smatra se složenost informatičkog sustava robota, što znači njegov funkcionalni sadržaj [8].

- **Roboti prve generacije** - Roboti koji automatski ponavljaju zadani pokret. Njih karakterizira čisto upravljanje. Prema slici 11. to je upravljački lanac (upravljački uređaj - prigon - mehanizam ruke – prihvatnica), pa nema povratne informacije.



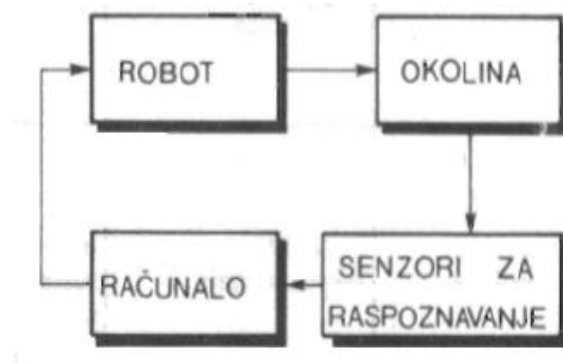
**Slika 11.** Predodžba upravljačkog lanca bez povratne informacije.

Ti su roboti bez osjetila i s vrlo ograničenom inteligencijom, od atributa inteligencije imaju samo pamćenje (memoriju) u koje je pohranjen program. Uz ograničenu inteligenciju i osjete, znatno zaostaju u spretnosti i pokretljivosti u odnosu prema čovjekovoj ruci. Ipak djelotvorno mogu obavljati samo niskokvalificirani rad, pa i okolina mora biti visoko organizirana.



Roboti prve generacije vjerojatno će i ubuduće biti najrašireniji jer zadovoljavajuće rješavaju problem rukovanja u jednostavnijim slučajevima.

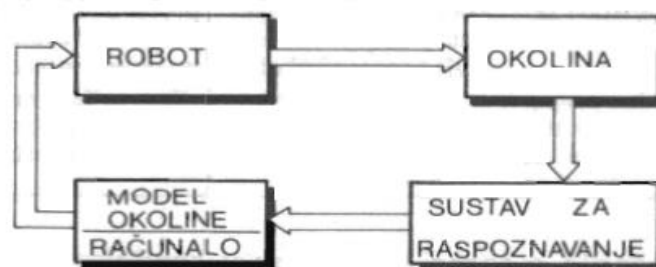
- **Roboti druge generacije** – Roboti opremljeni sensorima koji omogućuju programirano snalaženje u nepredvidljivim okolnostima radnog prostora. Roboti preko senzora dobivaju informacije o stanju okoline, a pomoću jednostavne logike ugrađene u računalo takvi roboti imaju mogućnost reagiranja. U tim je slučajevima već riječ o regulaciji s petljom povratne veze (slika 12.).



**Slika 12.** Predodžba regulacije s petljom povratne veze.

Uz pamćenje, ti roboti imaju mogućnost donošenja jednostavne logičke odluke: da ili ne. Na taj se način kontrolom sile mogu zaštititi uređaji, smanjiti organiziranost okoline (slaganje, orijentacija predmeta), a konačni je cilj da robot može predmete uzimati i odlagati.

- **Roboti treće generacije** – Roboti opremljeni računalima i usavršenim programima koji su primjenom razolikih senzora i umjetnom inteligencijom sposobni prepoznati okolinu, analizirati svoje učinke i učiti iz svojih pogrešaka. Samostalno i inteligentno mijenjaju svoj način rada kako bi se prilagodili uvjetima rada i poboljšali radni učinak. Prema slici 13. to je vođenje multivarijabilnog procesa s više izlaznih i ulaznih varijabli.



**Slika 13.** Predodžba multivarijabilnog procesa robota treće generacije

Cijeli bi sustav trebao imati svojstva višeg stupnja inteligencije, tj. donošenja odluka u determiniranim uvjetima (analiza), učenje i odlučivanje u nedeterminiranim uvjetima (sinteza). Za tu je umjetnu inteligenciju vrlo bitna mogućnost učenja (povezuje nova iskustva s postojećim znanjem). To se može postići modelom vanjskog svijeta ugrađenim u memoriju računala, odnosno datotekom. Uspoređivanjem s dobivenim informacijama iz vanjskog svijeta, robot samostalno reagira na vanjske promjene, tj. donosi odluke bez programske upute.

Roboti s umjetnom inteligencijom još su budućnost, a trebali bi zamijeniti čovjeka u nepovoljnim uvjetima na dnu oceana, u svemiru, u ozračenoj okolini. Određivanje generacije robota može se provesti i s druge točke gledanja. Neki se tehnološki zadatak po pravilu rješava u tri hijerarhijske razine. Na najvišoj, strateškoj razini, postavlja se cilj, razrađuje idejno rješenje razbijanjem na rješenja djelomičnih problema. Na taktičkoj razini djelomični se problemi

algoritmiraju i donose odluke. Na operativnoj razini upravlja se izvođenjem tih algoritama. Kao i čovjek, robot preuzima operativni zadatak upravljanja osnovnim operacijama, a okolina je visoko organizirana (prva generacija). Na taktičkoj se razini donose odluke u složenim operacijama, a iz okoline se stalno dobivaju aktualne informacije (druga generacija). Konačno, na najvišoj, strateškoj razini određuju se ciljno usmjerene operacije, mora postojati složeni model okoline prema kojemu se donose odluke u smislu postavljenog cilja (treća generacija).

## **2.2. Utjecaj robotike na suvremeni svijet**

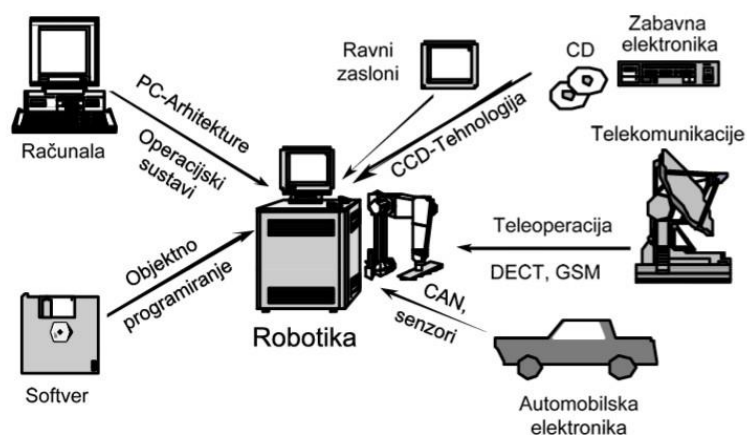
Uz povećanu fleksibilnost i jednostavnost primjene roboti su na prekretnici novog doba, pretvarajući se u sveprisutne pomagače za poboljšanje kvalitete života pružajući učinkovite usluge u našim domovima, uredima, laboratorijima, na javnim mjestima i u ustanovama. Poslovni i potrošački interesi uz tehnološki napredak vode ka širokoj rasprostranjenosti robotske tehnologije i uvode je u ljudski svakodnevni život, od suradnje u proizvodnji do usluga u domovima, od autonomnog transporta do praćenja stanja okoliša. Izgradnja rane svijesti o posljedičnim etičkim, pravnim i društvenim pitanjima, omogućit će pravodobno zakonodavno djelovanje i društvene interakcije, koji će zauzvrat podržati razvoj novih tržišta. Danas kod robota postoji prihvatljiva razina točnosti, brzine, ponovljivosti i spretnosti te se stavlja dodatni naglasak na interakciju čovjeka i robota kao što je pojednostavljeno programiranje, komuniciranje, prepoznavanje namjera, učenje i slično. Napredak strojnog učenja i računalnog vida omogućio je primjenu robota kod potpuno novih zadaća za koje se donedavno mislilo da ih mogu obavljati jedino ljudi. Umjetna inteligencija nastaje u sklopu računalskih znanosti. Antropocentričan pristup stavlja čovjeka u središte razmatranja i ističe inteligenciju kao ljudsku sposobnost. No, još nema općeprihvaćene definicije inteligencije. Robot koji bi trebao biti koristan za ljude kao stroj ili čak suradnik mora biti sposoban komunicirati s ljudima i razumjeti ih do pragmatične razine. Dakako, postoje različite razine razumijevanja koje se mogu definirati, određujući tako odgovarajuću razinu inteligencije. U vezi

robotike postoje velika očekivanja, čak i euforija koja je možda u mnogočemu nerealna i utopijska. Suvremeni razvoj robota usmjeren je na raznovrsne primjene (slika 14.). Gotovo nema područja ljudske djelatnosti gdje roboti već nisu prisutni ili se ne radi na njihovoj primjeni.

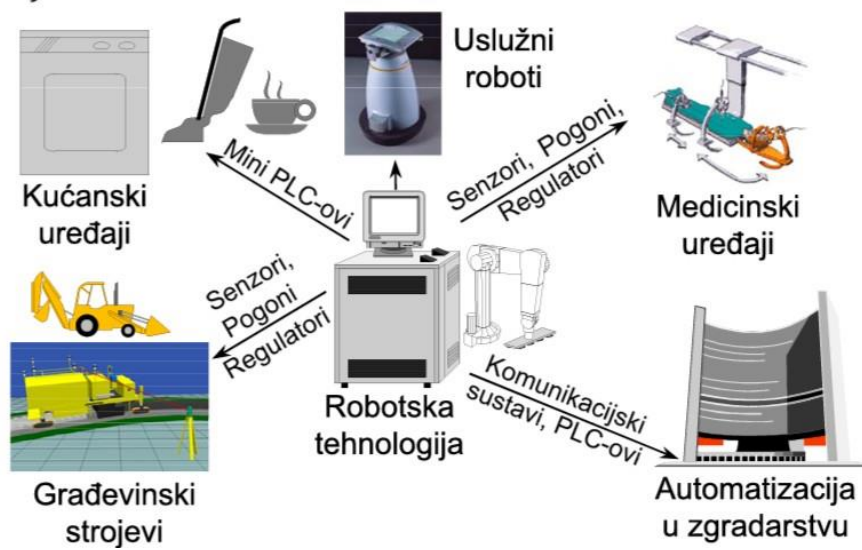


**Slika 14.** Predodžba primjene robota.

Kako druge tehnologije utječu na razvoj robotiku (slika 15.) tako i robotika ima veliki utjecaj na razvoj ostalih tehnologija (slika16.).

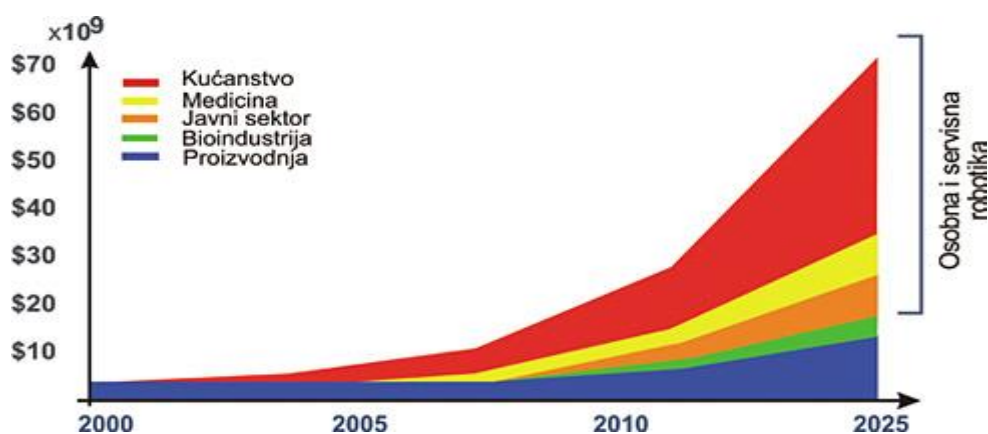


**Slika 15.** Predodžba migracija drugih tehnologija u robotiku.



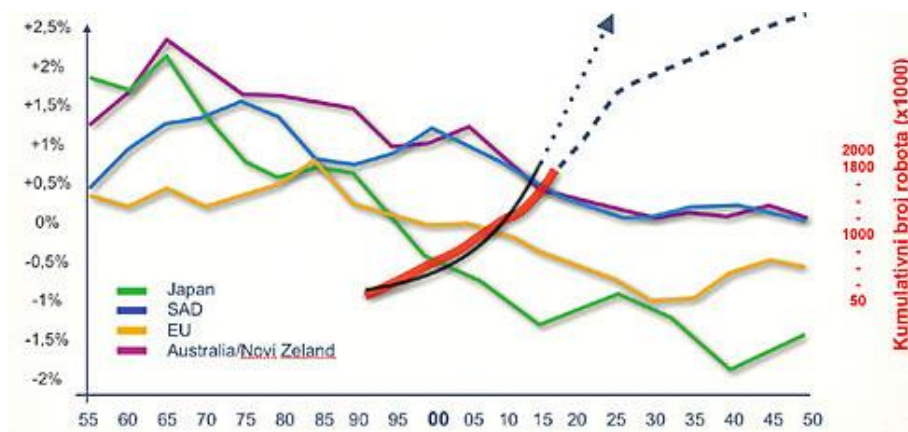
**Slika 16.** Predodžba migracija robotike u druge tehnologije.

Poseban naglasak se pridaje razvoju, istraživanju te primjeni medicinskih i tzv. društvenih robota. Ulažu se golemo financijska sredstva jer se razvojem tih robota očekuje velika materijalna dobit. Veličina ulaganja u pojedine vrste robota prikazana je dijagramom na slici 17.



**Slika 17.** Dijagram ulaganja u pojedine vrste robota.

Globalizacija i tehnološki razvoj značajno su promijenili ekonomske, kulturne, proizvodne i političke značajke modernog društva. Proizvodnja dobara, kao osnova stvaranja nove vrijednosti, suočava se s potpuno novim tehnološkim, sociološkim, demografskim i ekonomskim izazovima. U tom kontekstu, tržište zahtijeva brzu reakciju na nepredvidljive okolnosti, nalažući fleksibilnost i agilnost poduzeća. Istodobno se postavljaju sve oštriji zahtjevi kvalitete, sigurnosni i ekološki propisi, potičući unapređenje tehnologije prema kriterijima održivosti. Ovaj scenarij jasno predstavlja dramatičan pomak u proizvodnji i suvremenoj ekonomiji jer jedino potpuno nove tehnologije, odnosno novi prilagodljivi, evolutivni samoorganizirajući strojevi i proizvodni sustavi mogu u budućnosti kvalitetno poduprijeti očekivani razvoj ljudskog društva u većini njegovih djelatnosti. Stoga će neizbježno doći do smanjivanja broja zaposlenih u neposrednoj proizvodnji dobara, ali i u drugim djelatnostima jer neposredni ljudski rad više neće zadovoljavati zahtjeve suvremene proizvodnje. To potkrepljuju brojna istraživanja koja pokazuju da će se do 2050. godine radna populacija smanjiti za najmanje 16% (slika 18.).



**Slika 18.** Dijagram stope rasta/pada radne populacije (1955.-2050.).

Tu je najvažniji tehnološki odgovor robotika, prepoznata kao ključna znanost 21. stoljeća. Poznato je da roboti smanjuju proizvodne troškove, poboljšavaju kvalitetu proizvoda i uvjete rada, te smanjuju rasipanje resursa. Robotika i mehatronika šire se i na druge inženjerske i neinženjerske znanosti, nudeći nove mogućnosti proizvodnje i primjenu tehnike u svakodnevnom životu. Očekuje se da će robotika u 21. stoljeću imati presudan utjecaj na društveni i ekonomski razvoj, veći nego što je računalna tehnologija odigrala u prošlom stoljeću. Robotika je prekretnica u znanstvenom i tehnološkom smislu. Zrakoplovi su danas potpuno robotizirani i ne bi mogli letjeti bez pomoći računala. Mnoge naprave u kući i uredu upravljane su putem složenih algoritama umjetne inteligencije. Već danas su na tržištu dostupni roboti koji čuvaju ili čiste kuću dok su njihovi vlasnici na poslu. U sjeni vodećih svjetskih laboratorija razvijaju se humanoidni roboti koji s izvjesnim razumijevanjem komuniciraju s okolinom i imitiraju ljudsko ponašanje. Stupanj znanstvenog razvoja u području robotike jasno upućuje na to da će roboti u bliskoj budućnosti postati svakodnevni partneri čovjeku poput računala i mobitela. Zamjena ljudskog rada u neposrednoj industrijskoj proizvodnji je nezaustavljiv proces jer konvencionalne tehnologije više ne mogu konkurirati na globalnom tržištu. U nekim proizvodnim granama, npr. u automobilskoj i elektroničkoj industriji, ljudski je rad gotovo potpuno zamijenjen robotima. Ubrzani razvoj robotskih tehnologija širit će primjenu na sve složenije poslove kojima danas roboti još nisu dorasli. Taj proces ide sve brže pa ljudsko društvo traži temeljite promjene koje će otvoriti prostor za nove djelatnosti i poslove gdje će se ljudi zapošljavati u budućnosti. Takvo novo društvo trebalo bi biti bolje od današnjega jer naporan rad u industrijskim pogonima nije imanentan ljudskoj prirodi. Dok teške i monotone poslove obavljaju roboti ljudi će se moći posvetiti kreativnim i čovjeku dostojnim zanimanjima.

### 2.3. Utjecaj robotike na medicinu

Primjena robota u medicini danas je jedan od najvećih znanstveno-tehnologijskih izazova. Brojni veliki instituti i robotski laboratoriji u svijetu natječu se oko razvoja medicinske robotike. S jedne strane u pitanju su golemi pomaci u pogledu unapređenja medicinske prakse, a s druge sve povezano s medicinom donosi obilnu financijsku dobit. Zahvaljujući svojoj preciznosti i neosjetljivosti na umor i tremor robot može značajno pomoći pri izvođenju posebno delikatnih operativnih zahvata. Usporedno s razvojem komunikacijskih tehnologija napreduju telemedicina i telekirurgija za medicinsku dijagnostiku, liječenje bolesnika i prijenos podataka sada je moguće slati podatke o bolesnicima na velike udaljenosti. Tako stručnjaci na drugom kraju svijeta pomažu u rješavanju određenog problema, što je mnogo brže nego da bolesnik putuje. Telekirurgija kao dio telemedicine razvila se zahvaljujući laparoskopiji u kojoj kirurg ne gleda izravno u operacijsko polje, već na TV-monitor. Tako se digitalna slika može prenijeti u stvarnom vremenu na bilo koje mjesto u svijetu. Operater se može konzultirati s drugim svjetski priznatim stručnjacima koji nisu na mjestu operacije. Telemedicina i laparoskopija najavile su novi korak, robotsku kirurgiju koja se počela razvijati otkako znanstvenici pokušavaju pronaći zamjenu za ljude u neprijateljskim i opasnim okruženjima, kao što je podmorje, svemir ili bojno polje. Robotika je na stupnju razvoja kad se uistinu mogu stvarati inteligentni strojevi koji komuniciraju s ljudima i sa svojom okolinom. Danas se izrađuju upravljačka sučelja putem kojih robot uči temeljem promatranja, dakle ne treba ga više programirati već ga naučiti ponašanjem kao kad se primjerice uči djecu određenim vještinama. Primjena robota u kirurgiji nastala je s težnjom da se prevladaju ograničenja u postojećim kirurškim zahvatima u minimalno invazivnoj kirurgiji. Robotika u kirurgiji, posebno u neurokirurgiji, najsloženije je i najsofisticiranije interdisciplinarno inženjersko područje rada, zbog slojevitosti anatomske građe, visoke osjetljivosti i delikatne funkcionalnosti tkiva, što zahtijeva iznimno precizne zahvate bez pogrešaka. Kako bi se shvatile potencijalne vrijednosti robotike u kirurgiji, važno je razumjeti ključne razlike između čovjeka i robota. Robot koristi velik broj



detaljnih, kvantitativnih informacija na temelju kojih obavlja precizne i ponovljive pokrete, ali ima vrlo ograničenu sposobnost donošenja odluka i kvalitativnu sposobnost procjenjivanja. S druge strane, ljudi su spretniji i imaju dobru koordinaciju očiju i ruku i najvažnije, „mekan“ osjet dodira. Sadašnja uloga robota u kirurgiji je da asistira kirurgu u operaciji u smislu da proširi ili pojača ljudske sposobnosti. Temeljem tih spoznaja i iskustava koje su ostvarene razvojem inteligentnih više agentskih robotskih sustava za industrijske namjene nije bilo teško shvatiti univerzalnost tog pristupa i kad je u pitanju neurokirurgija. Naime, specifičnost neurokirurške operacije je činjenica da neurokirurg u pravilu ne vidi mjesto operacije jer jednostavno ne može otvoriti ljudski mozak. Dakle, jedan od najznačajnijih neurokirurških problema je mogućnost precizne prostorne navigacije instrumenata. Prostorna manipulacija ili navigacija je temeljna funkcija robota. Međutim u slučaju neurokirurgije roboti ne mogu izravno zadovoljiti očekivane preciznosti. Naime, robot je člankasti manipulator sličan ljudskoj ruci i sve se greške u pojedinim zglobovima sustavno zbrajaju.

U slučaju industrijske primjene ti problemi ne dolaze do izražaja jer roboti tamo rade u visoko uređenim uvjetima koji se ne mogu osigurati pri kirurškoj primjeni. Taj se problem može riješiti na dva načina. Prvi je da se pokuša izraditi tehnički savršen robotski sustav s iznimno točnim dimenzijama komponenata, iznimno preciznim enkoderima itd. Takav pristup uzrokuje goleme troškove u razvoju i proizvodnji te je unaprijed predodređen na neuspjeh jer nije moguće izraditi savršen tehnički sustav pa će uvijek biti nekih odstupanja od očekivanih vrijednosti. To je jednostavno suprotno prirodnim zakonima. Drugi je način da se jednostavno prihvate tehnička nesavršenost postojećih robota i da se prione razvoju složenih upravljačkih modela koji će osigurati njihovu prilagodljivost s obzirom na vlastite greške i njihovo automatsko ispravljanje. Na osnovi tih spoznaja istraživački tim s Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB) u Zagrebu, u suradnji s Kliničkom bolnicom Dubrava (KBD) u Zagrebu i Hrvatskim institutom za istraživanje mozga u Zagrebu, razvili su dvoručni robotski neurokirurški sustav, nazvan RONNA. Razvoj je započeo 2011. godine, financirao ga je Hrvatski institut za tehnologiju (sada BICRO) programom TEST, a djelomično i UKF projekt IGRAMO. Ideja projekta je zamijeniti kirurga u

postupku stereotaktičke navigacije robotom, povezujući neuroradiološke snimke pacijenta s robotom. Neurokirurg planira operaciju, a robot temeljem prepoznavanja položaja glave pacijenta u prostoru, postavlja sondu ili elektrodu u zadanu neuroanatomsku strukturu. Primijenjena je dvoručna konfiguracija koja omogućuje oponašanje postojećih kirurških postupaka uz visoku preciznost navigacije. Poseban izazov projekta je primjena robota opće namjene s bitno prihvatljivijom cijenom u odnosu na dosad primjenjivane robote u medicini. Ovakav odabir robota znatno smanjuje cijenu sustava, ali ujedno povećava problem precizne navigacije. U namjeri da se robotski sustav jednostavno primjenjuje, bez temeljnog znanja iz područja robotike, posebna pažnja se posvećuje razvoju inteligentnih i intuitivnih upravljačkih algoritama. Danas je projekt financiran sredstvima Europske unije u sklopu Europskog fonda za regionalni razvoj. Uočeni nedostaci prethodno razvijenih neurokirurških robotskih sustava otklonjeni su nizom tehničkih rješenja novo razvijenim tehnologijama dostupnim na tržištu, od laganih robota sa 7 stupnjeva slobode, senzorskim sustavima za određivanje položaja, sile i momenata te laserskim i optičkim uređajima, ali i novo razvijenim softverima. Za pomoć bolesnicima prilikom rehabilitacije koju moraju proći poslije moždanih udara, prijeloma i drugih oštećenja, te za izvođenje sve većeg broja drugih sličnih zadataka koji se odnose na oporavak bolesnika zaslužni su servisni roboti [9]. Razvoj informacijskih tehnologija, novih materijala i robotske tehnologije daje priliku da se prevladaju problemi koji se prije nisu mogli riješiti, ali i unaprijedi ortopedija i pomogne bolesnicima da vrlo brzo ozdrave i vrate se u normalno stanje u kojemu su bili prije ozljede. Danas servisni roboti zauzimaju značajno mjesto u medicini. Prednosti ovih robota u revolucionarnoj kliničkoj praksi su brojne: olakšavanje medicinskih procesa uz precizno vođenje instrumenata, primjena dijagnostičkih uređaja i alata za dijagnostiku i terapiju, povećanje sigurnosti i ukupne kvalitete operacije, bolja njega o bolesniku, edukacija i osposobljavanje stručnog osoblja izvođena kroz simulaciju, promocija korištenja informacija u dijagnostici i terapiji. Cilj je da se razviju servisni roboti koji zadovoljavaju prave potrebe u području socijalne pomoći i u području njegovanja čovjeka, gdje je potrebna visoka razina tehnologija. Najveći relevantni korisni faktori su velika

kvaliteta rada i produktivnosti, redukcija ručnog rada, povećana sigurnost, odnosno izbjegavanje rizika, porast operativne upotrebljivosti, privremena fleksibilnost, novi, prethodno dostupni sadržaji, stanja itd. U tablici 1. prikazana je procjena relevantnosti faktora za tipove servisnih robota koji se primjenjuju u medicini, sa stupnjem relevantnosti označenim od 0 (nije relevantan) do dvije točke (velika relevantnost).

**Tablica 1.** Procjena relevantnosti faktora za tipove servisnih robota za rehabilitaciju

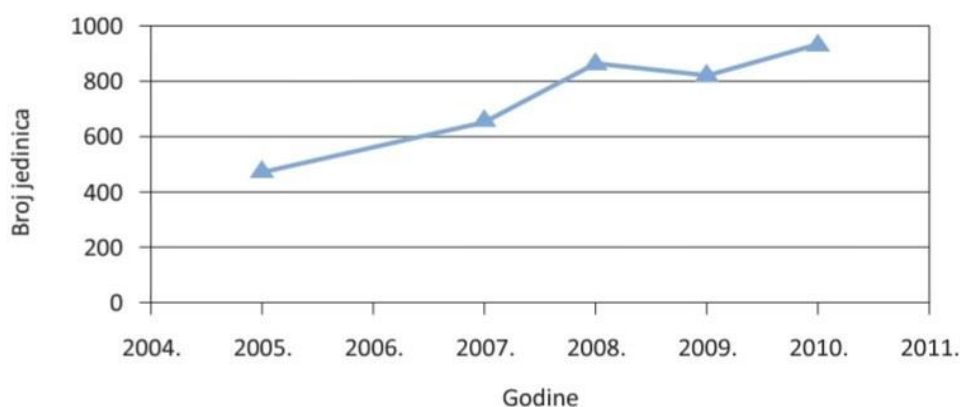
<b>Medicinski servisni roboti</b>	<b>Visoka kvaliteta produktivnosti rada</b>	<b>Redukcija ručnog rada</b>	<b>Povećanje sigurnosti, izbjegavanje rizika</b>
Roboti pomagači	••		•
Rehabilitacijski sustavi	•		•

U tablici 2. i na slici 19. prikazani su statistički podaci koje su UNECE i International Federation of Robotics (IFR) prikupili od proizvođača servisnih robota [9]. Na osnovi tablice 2. i slike 19. Može se zaključiti da od 2005. godine do 2010. godine postoji trend povećanja primjene servisnih robota i robotskih sustava u medicini.

**Tablica 2.** Godišnja primjena servisnih robota u medicini od 2005. do 2010. godine

Primjena/godina	Godišnja primjena servisnih robota				
	2005.	2007.	2008.	2009.	2010.
Medicina	476	651	867	818	932
Ostale primjene	5727	9744	13037	12431	12809
UKUPNO $\Sigma$	6103	10395	13903	13249	13741

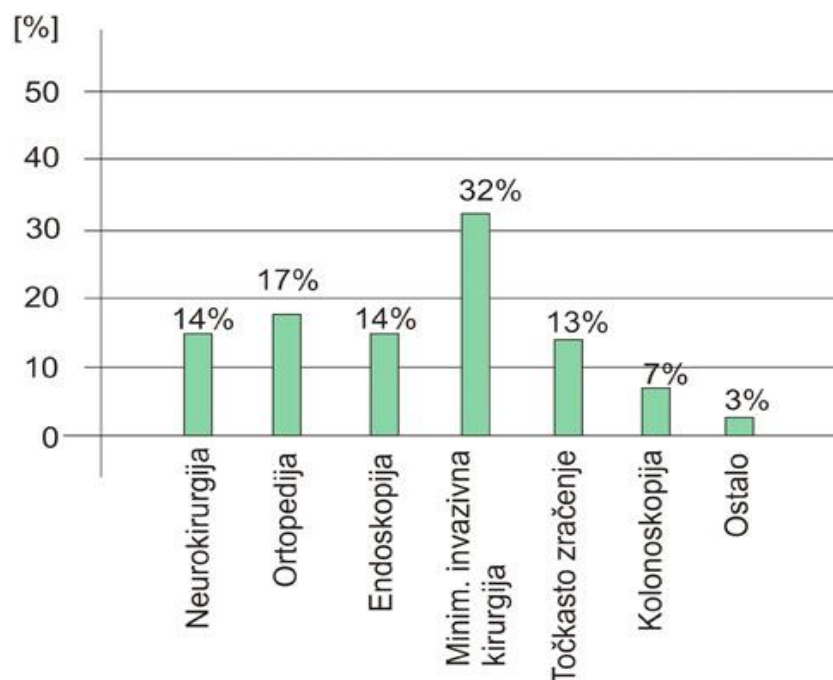
U 2005. Godini na servisne robote u medicini odnosilo se 7,8 % od ukupnog broja servisnih robota u toj godini, dok je u 2010. godini taj postotak iznosio 6,8 %, pa se zaključuje blago smanjenje postotka broja servisnih robota u medicini iz godine u godinu u odnosu na ukupni broj primjene servisnih robota u jednoj godini.



**Slika 19.** Dijagram godišnje primjene servisnih robota u medicini od 2005. do 2010. Godine.

Na osnovi slike 20. vidi se da je najveći broj primjene servisnih robota u medicini kada su u pitanju mali interventni kirurški zahvati, od ukupnog broja robota koristi se 32 %, zatim u ortopediji 17 %, neurokirurgiji i endoskopiji 14 %, točkastom zračenju 13 % i kolonoskopiji 7 % [9] . Ovakav postotak primjene

servisnih robota u različitim granama medicine iz dana u dan se mijenja, a za to je zaslužan tehnološki napredak informatičkih i robotskih tehnologija.



**Slika 20.** Dijagram primjene servisnih robota u medicini po područjima.

#### 2.4. Primjena servisnih robota u medicini

Jedan od ključnih faktora razvoja servisne robotike su identificirani trendovi stanovništva treće dobi. U svijetu postoji trend porasta radnika koji odlaze u mirovinu i starije populacije stanovništva. Servisna robotika pred sobom ima izazov i priliku da nađe rješenja koja će zadovoljiti tu populaciju stanovništva sa stanovišta njihove zdravstvene, socijalne pomoći te im pružiti kompletnu pomoć i njegu. U radu su prikazani primjeri aplikacije servisnih robota i robotiziranih sustava koji pomažu bolesnicima, hendikepiranim osobama pri obavljanju svakodnevnih poslova i pri rehabilitaciji. Cilj robotske tehnologije razviti je servisne robote koji će imati interaktivnu komunikaciju s bolesnikom, pružiti mu pomoć u obavljanju svakodnevnih poslova, njegov život učiniti kvalitetnijim i

sadržajnijim bez stresa. Rehabilitacijski roboti pomažu invalidima u onim aktivnostima koje sami ne mogu izvesti ili su uključeni u terapije za osobe radi poboljšanja njihove fizičke funkcionalnosti. Područja rehabilitacijskih robota generalno su podijeljena na terapiju i pomoć. Pored toga, rehabilitacijski roboti obuhvaćaju proteze (protetike), stimulaciju živca i uređaje za nadgledanje ljudi tijekom svakodnevnih aktivnosti.

Razlikuju se sljedeće kategorije:

- robotska terapija za mobilnost (hodanje)
- robotska terapija gornjeg ekstremiteta
- smart proteze
- osobni rehabilitacijski roboti
- društveni roboti za osobnu njegu, autizam i njegu starijih osoba

Servisni robot može pomoći u dostavi jela i pića, kod obavljanja osobne higijene, rada i slobodnog vremena, mobilnosti i općih poslova. Ovisno o određenom zadatku, robotski manipulator može biti montiran izravno na korisnika invalidskih kolica, s autonomnim napajanjem ili unutar fiksne radne stanice. Treba biti jednostavan za upotrebu za korisnika i prilagoditi se njegovoj sposobnosti manipulacije. Postoji nekoliko činjenica koje govore u prilog brzom dugoročnom rastu na tržištu za pomoćne robotske sustave za starije i nemoćne osobe. Sve je veći broj privremeno i trajno invalidnih osoba, kao i povećan udio starijih osoba u svijetu, što će povećati potrebu za pažnjom prema njima i njihovoj njezi.

### 2.4.1. Lokomat

Lokomat, tvrtke Hocoma AG, je sofisticirani robot napravljen u svrhu vraćanja funkcionalnosti donjih ekstremiteta odraslih pacijenata i djece koji su je djelomično ili u potpunosti izgubili. Lokomat se sastoji od egzoskeletnog robota, sprava za hodanje i ortoza koje su prilagodljive odraslim pacijentima i djeci poviše šest godina (slika 21.). Rad na Lokomatu na zabavan i interaktivan način, kroz video igre, potiče pacijenta da određenu vrstu pokreta napravi više puta što pospješuje njegov oporavak. Četiri motorizirana spoja (dva po nozi) pomiču kukove i koljena, dok je bolesnikova tjelesna težina raspoređena po potrebi dodatnom opremom. Dodatna motivacija pacijenta potiče se i biofeedback-om, točnije preciznim mjerenjima rada putem senzora koji se nalaze na mjestima ortoza koljena i kukova. Na taj način pacijent ima vjerodostojan uvid u njegovo zdravstveno poboljšanje.



**Slika 21.** Predodžba Lokomata. Izvor: <http://irehabphysiotherapy.blogspot.hr/>

## 2.4.2. Phoenix egzoskelet

Phoenix, tvrtke SuitX, poput drugih egzoskeleta izgleda kao motorizirana proteza za donji dio tijela (slika 22.). Pomoću štaka omogućuje hodanje nepokretnim osobama tako što za njih pokreće i savija noge. Phoenix se sastoji od modula za kukove, dva modula za koljena i dva modula za stopala, koji se mogu koristiti ili odvojeno ili zajedno da formiraju potpuni sustav. Ovo ne samo da uklanja bespotrebnu dodatnu težinu, već omogućuje i dulje trajanje baterije. Kada se koriste svi moduli, Phoenix ima energije za četiri sata konstantnog hoda, ili osam sati prosječne uporabe, prije nego što se baterija mora ponovo napuniti. Maksimalna brzina hoda je 0.5 m/s (1.8 km/h), ali parametre može namjestiti trenirani medicinski tehničar preko aplikacije za Android. Korisnici mogu udobno nositi egzoskelet dok sjede u invalidskim kolicima, koristeći nešto što se opisuje kao 'intuitivno sučelje', kako bi prelazili u stanje ustajanja, hodanja i ponovnog sjedanja.



**Slika 22.** Predodžba Phoenixovog egzoskeleta. Izvor: <http://inhabitat.com/>



### 2.4.3. Armeo spring

Armeo spring, tvrtke Hocoma AG, je aparat za rehabilitaciju ruke i šake koji ostvaruje priliku za samostalni trening pacijentima s umjerenom do velikom ozljedom. On omogućuje samoinicijativnu terapiju u prostoru gdje pacijenti izvode 3D pokrete kako bi rehabilitirali oštećenje. Ovaj aparat motivira korisnike na način da im pruža povratnu informaciju o kvaliteti vježbanja te analizira i dokumentira njihov napredak. Armeo spring može se upotrebljavati kod moždanog udara (CVI) u subakutnoj fazi i kroničnoj fazi, multipleskleroze, cerebralne paralize kod djece (CP), spinalnog oštećenja (cervicalno spinalno oštećenje), neurološke lezije (tumor, cista isl.) Za ovakva oštećenja postoje studije o stupnjevima uspješnosti terapije. Armeo je prilagodljiv anatomiji svakog pojedinog odraslog pacijenta jer uz pomoć egzoskeleta s integriranim oprugama obuhvaća cijelu ruku od ramena do šake te pomaže u odrađivanju aktivnih pokreta (slika 23.).



**Slika 23.** Predodžba Armeo springa. Izvor: <http://www.nemcb.cz/>

#### 2.4.4. i-limb™

i-limb™, tvrtke Touch Bionics, je bionička ruka koju karakterizira modularna izrada i decentralizirani pogonski sustav (slika 24.). Umjesto konvencionalnog pristupa s jednim središnjim motornim pogonom, za individualno pokretanje prstiju koriste se DC motori koji tvore samodostatne i neovisne module. Tako pokretani prsti s pokretnim zglobovima u kombinaciji s rotacijom palca i zapešća ciljaju što boljem oponašanju ljudske ruke nudeći široki raspon pokreta i zahvata. Pogonski sustav napajaju dvije litij-ionske baterije kapaciteta 1,300 ili 2,000 mAh i u prosjeku su dostatne za cijeli dan korištenja, nakon čega njihovo punjenje traje približno 90 ili 180 min, respektivno. i-limb™ je prikladan za osobe s urođenim defektima udova i amputacijom na zapešću ili podlaktici, uz preduvjet da ne boluju od neuromuskularnih bolesti i nemaju kognitivnih oštećenja jer se primarno upravljanje odvija mišićnim impulsima, odnosno EMG signalima. Prilikom kontrakcije mišića ruke generiraju se električni signali koji predstavljaju tzv. okidače. Električni impulsi prikupljaju se preko kože dvjema elektrodama postavljenim na optimalne pozicije batrljka ruke te se isti zatim prosljeđuju mikroprocesoru koji će ovisno o kombinaciji primljenih mišićnih signala dalje upravljati DC motorima i ostvarivati željene funkcionalnosti kao što su aktivacija neke vrste zahvata, jačina pritiska itd.



**Slika 24.** Predodžba i-limb™-a. Izvor: <http://www.touchbionics.com/>

## 2.4.5. Robotiziran sustav invalidskih kolica

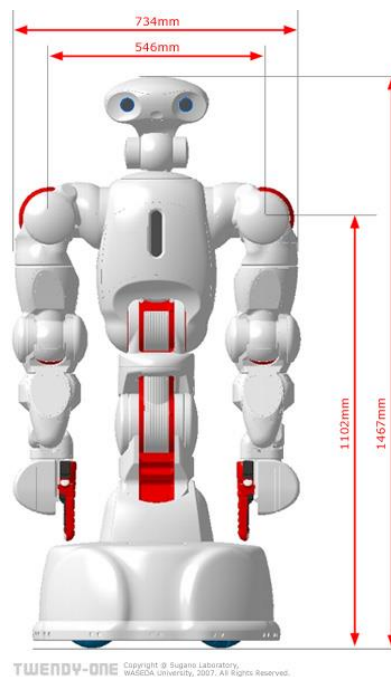
Robotizirani sustav invalidskih kolica sastoji se od električnih invalidskih kolica opremljenih kompjutorom, sensorima te Macintosh Powerbookom korištenim za korisničko sučelje. Robot se može kretati polusamostalno u zatvorenom okruženju. To omogućuje korisniku da izda opće usmjerene naredbe te da se oslanja na robota za obavljanje zadataka niske razine, kao što je izbjegavanje prepreka i praćenje zida. Razvijeno korisničko sučelje omogućuje korisniku da djeluje na tri načina rada: ručno, pomoću upravljačke palice i korisničkog sučelja. Kod manualnog načina upravljanja invalidska kolica funkcioniraju kao normalna električna invalidska kolica. Kod upravljanja upravljačkom palicom korisnik izdaje usmjerene naredbe kroz palicu, dok će pritom robot izbjegavati prepreke na zahtijevanom putu. Kod načina upravljanja korisničkim sučeljem korisnik upravlja robotom isključivo kroz korisničko sučelje. Za osobe s određenim ograničenjima u kretanju različite kompanije su izradile velik broj autonomnih invalidskih kolica, od samohodnih robotskih kolica, kolica kombiniranih robotskom rukom, do robota – kolica (slika 25.) [9]. Ova kolica omogućavaju nepokretnim osobama da se kreću preko neravnih podloga i terena s preprekama, što klasična invalidska kolica ne mogu. Pomoću baterije, vozilo s robotom sposobno je prijeći 21 kilometar pri brzini od 6,4 km/h.



**Slika 25.** Predodžba robotiziranih invalidskih kolica. Izvor: <http://www.hrcak.srce.hr/>

#### 2.4.6. Servisni robot Twendy-One

Servisni robot Twendy-One (slika 26.), izrađen na sveučilištu u Wasedi, zbog svoje mobilnosti te sposobnosti za razumijevanje ljudskih uputa koristi se za pomoć hendikepiranim osobama i predstavlja jedan od najmobilnijih servisnih robota koji se koriste za pomoć ljudima do danas. Veličina i opseg pokreta ruke i šake robota su jednake veličine kao u prosječne odrasle žene. Ruka ima sedam stupnjeva slobode dok šaka ima trinaest stupnjeva slobode za spretno manipuliranje potrebnim stvarima. Zglob na sredini tijela robota ima četiri stupnja slobode gibanja i omogućuje robotu da se sagne i pokupi predmet s poda.



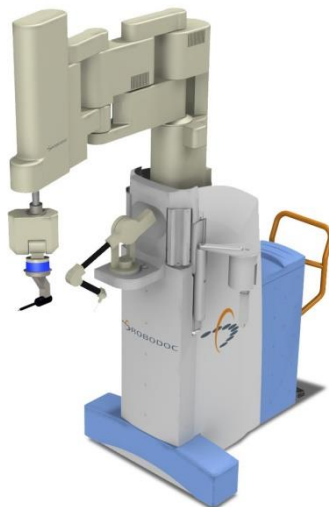
**Slika 26.** Predodžba servisnog robota Twendy-One. Izvor: <http://www.courrierinternational.com/>

## 2.5. Primjena robotskih sustava u kirurgiji

Robotizirana kirurgija definirana je od SAGES-MIRA Robotic Consensus Grupe kao "Kirurški zahvat ili tehnologija koja dodaje uređaj poboljšan kompjuterskom tehnologijom u interakciju između kirurga i pacijenta tijekom operacije i pretpostavlja određeni stupanj slobode kontrole koja je do sada bila u potpunosti rezervirana za kirurge". Ova definicija obuhvaća mikromanipulatore, tele-operirane endoskope i konzolno-manipulatorske uređaje. Robotski sustavi omogućuju obavljanje zahvata na vrlo maloj skali (mikro-kirurgija), omogućuju pristup lokaciji kroz vrlo ograničen prostor (minimalno invazivan zahvat), imaju vrlo precizne pokrete koji mogu biti ponovljivi. Glavni elementi su poboljšanje kirurgovih sposobnosti: vizijski, rukovanje tkivom ili dobivanje povratnih informacija prilikom rukovanja tkivom i izmjena tradicionalnog direktnog lokalnog dodira između kirurga i pacijenta. Neurokirurgija je bila prvo područje primjene robota u intervencijskoj medicini. Tijekom zadnjih desetljeća, deseci istraživačkih projekata fokusiraju se na probleme kirurgije mozga i kralježnice. Mogućnost da se operacije izvedu na manjoj skali pomoću robota čini mikrokirurgiju mogućom. Upotreba mehatroničkih uređaja može povećati stabilnost sustava; upotrebom slika dobivenih iz medicinskih uređaja CT (kompjuterizirana tomografija) i MRI (magnetska rezonanca) može se dobiti povećana preciznost za navigaciju i pozicioniranje kirurškog alata u ciljnu točku. Također postoji i opcija za upotrebu napredne digitalne obrade signala za kontroliranje ili bilježenje prostornih točaka koje su od interesa ili pokreta. To može biti korisno za simulacije operacija i treninga bez opasnosti. U konačnici robotizirana oprema može poboljšati ergonomske zahtjeve tijekom zahvata.

### 2.5.1. Robodoc

Robotski sustav Robodoc, tvrtke Curexo, koristi se kod oblikovanja i zamjene kuka, te kod operacije koljena. Robodoc zajedno sa Orthodoc (radna stanica za planiranje), koristi CT slike pacijenta prije operacije kako bi pomoću tih podataka, u određenom softveru modelirao virtualni 3D model kosti ili zgloba. Pomoću 3D modela, kirurg može neposredno prije operacije precizno definirati specifične točke na kosti, veličinu i poziciju proteze, anatomiju zgloba i gustoću kosti. Robodoc obrađuje kost alatom, bez izravne kontrole kirurga tijekom izvođenja. Stoga točnost aplikacije u takvim (realnim) uvjetima je jedan od najvažnijih faktora. Unutarnja točnost robota je 0.5 mm, dok prosječna točnost u realnim uvjetima iznosi 1.2 mm, a varira u rasponu od 1.0 mm do 3.5 mm.



**Slika 27.** Predodžba Robodoca. Izvor: <http://compassdesign.com/>

### 2.5.2. Kirurški sustav da Vinci

Kirurški sustav da Vinci, tvrtke Intuitive Surgery, se sastoji od tri komponente: kirurške konzole, operacijskih kolica pacijenta s 4 robotske poluge kojima upravlja kirurg (jedna za upravljanje kamerom i tri za upravljanje instrumentima), i 3D vizijskog sustava visoke rezolucije (slika 28.). Zglobni kirurški instrumenti su postavljeni na robotske poluge koje su uvedene u tijelo kroz kanale. Da Vinci osjeća pokrete ruku kirurga i elektronički ih prevodi u skalirane mikro-pokrete specijalnih kirurških instrumenata. Da Vinci također prepoznaje i filtrira podrhtavanja pokreta ruku kirurga, tako da se ne prenose na vrhove instrumenata. Kamera koju koristi sustav daje stvarnu stereo sliku koja se prenosi na kiruršku konzolu. Kirurški sustav da Vinci je odobren od strane američke agencije za hranu i lijekove (FDA) za različite kirurške zahvate uključujući operacije karcinoma prostate, histerektomije i popravke mitralnog zaliska.



**Slika 28.** Predodžba kirurškog sustava da Vinci. Izvor: <http://www.jupitermed.com/>

### 2.5.3. Neuromate

Neuromate, tvrtke Renishaw, se sastoji od industrijskog robota s pet rotacijskih osi i pruža 5 stupnjeva slobode. Robot je postavljen na trokutasto kućište koje sadrži elektroniku za napajanje sustava (slika 29.). Na donjem dijelu kućišta produžuje se ruka. Ta ruka koristi se kako bi se kruto povezala lubanja pacijenta sa stereotaktičkom hvataljkom ili za povezivanje sa stereotaktičkom baznom jedinicom. Sterilnost sustava postiže se omatanjem robotske ruke. Držač alata na izvršnom dijelu robota pogodan je za sterilizaciju. Koristi se najčešće kod biopsije i uklanjanja tumora. Korištenjem slika pacijenta prije operacije, omogućuje vizualizaciju mjesta operiranja u realnom vremenu, kako bi kirurg precizno lokalizirao tumor. Unutarnja točnost je definirana na 0.75mm sa ponovljivošću od 0.15 mm, dok je srednja vrijednost točnosti u realnim uvjetima veća i iznosi 0.95 mm, sa standardnom devijacijom od 0.44 mm.



**Slika 29.** Predodžba Neuromatea. Izvor: <http://www.renishaw.com/>



#### 2.5.4. Rosa

Rosa robot, razvijen i distribuiran od strane Medtech S.A.S, je industrijski robot sa 6 stupnjeva slobode gibanja ugrađen na prijenosni stalak. Stalac sadrži elektroniku za napajanje i kontrolnu jedinicu robota (slika 30.).



**Slika 30.** Predodžba Rosae. Izvor: <http://www.medgadget.com/>

Sustav je samo predviđen za pozicioniranje sonde u prostoru i nije za interakciju s pacijentom. Umetanje alata ili druge interakcije s pacijentom spadaju pod odgovornost kirurga. Kirurški postupak je sljedeći: Uzima se 3D slika pacijenta i trajektorija sonde planira se na temelju dobivenih podataka. Lubanja pacijenta fiksirana je za operacijski stol putem hvataljke. Robot se potom pozicionira u neposrednu blizinu pacijenta i fiksira se za operacijski stol. Kočnice pomične jedinice uključuju se kako bi se minimizirali mogući neželjeni pomaci. Registracija se radi putem laserskog skenera. Skener je učvršćen za izvršni dio robota. On utvrđuje udaljenost od pacijentove glave i time dobiva 3D prikaz površine. Ti 3D podaci registriraju se u preoperativnu sliku pacijentove glave. Za potrebe registracije nisu potrebni markeri za registraciju ni stereotaktički okviri. Sterilnost se omogućuje omatanjem robota. Alat na izvršnom kraju robota pogodan je za

steriliziranje. Robot je opremljen sa senzorom sile i momenata na svom izvršnom dijelu. U tom takozvanom haptičkom surađivačkom načinu rada, kirurg može pomicati robota pomičući izvršni dio rukom. Ovdje se robot samo pomiče po unaprijed definiranoj trajektoriji. Na taj način kirurg može mijenjati i udaljenost od pacijentove glave proizvoljno.

### 2.5.5. RONNA (robotska neuronavigacija)

RONNA robotski stereotaktički sustav za neuronavigaciju razvijen je u Hrvatskoj od strane tima s Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu s katedre za Robotiku i Automatskih proizvodnih sustava u suradnji sa partnerima iz industrije. RONNA sustav sastoji se od programa za planiranje i navigaciju, dva robota (glavni i pomoćni), stereovizijskog sustava, lokalizacijske jedinice (sustava markera), alata za rad (griperi, vodilice, itd.) i napredne programske podrške za donošenje upravljačkih odluka iz nejasne okoline (slika 31.).



**Slika 31.** Predodžba RONNA-e (a – RONNAvision modul s komercijalno dostupnim Polaris sustavom; b – glavni robot na pomičnom stalku s integriranom upravljačkom jedinicom i napajanjem; c – pomoćni robot na pomičnom stalku s integriranom upravljačkom jedinicom i napajanjem; d – ekran za nadzor rada sustava). Izvor: <https://www.fsb.unizg.hr/>

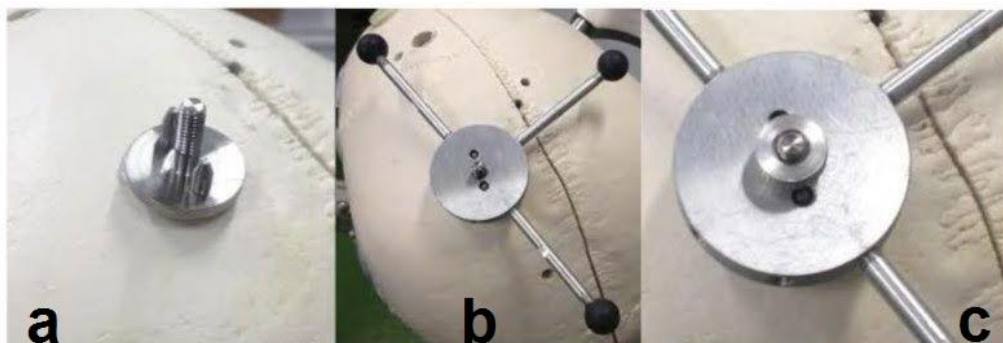
Dvoručni robot sastoji se od glavnog robota sa 6 stupnjeva slobode gibanja i pomoćnog robota sa 7 stupnjeva slobode gibanja (slika 32.). Roboti su standardni industrijski roboti što omogućuje robusnost i manju cijenu razvijenog sustava. Glavni robot (KUKA KR6) je revolutni robot s maksimalnim dosegom 900 mm, nosivošću 6 kg i ponovljivošću od  $\pm 0.03$  mm. Taj robot koristi se kao alternativa klasičnoj stereotaktičkoj metodi zbog svoje čvrstoće i krutosti. Pomoćni robot (Kuka LWR 4+) ima drugačiju strukturu. Pomoćni robot ne može se ponašati kao kruti sustav i posljedično ima nisku apsolutnu točnost. Njegovi motori su opremljeni sa senzorima momenata što osigurava lakše interaktivno ponašanje.



**Slika 32.** Predodžba glavnog (KUKA KR6) i pomoćnog (KUKA LWR 4+) robota.  
Izvor: <http://www.24sata.hr/>

Robot može biti programiran tako da se izbjegne mogućnost ljudske ozljede i opasne kolizije s drugim objektima u prostoru. Glavni robot može se koristiti za preciznu navigaciju instrumenata prema ciljnoj točki operacije koju izvodi pomoćni robot ili kirurg. Lokalizacijska jedinica sastoji se od sustava markera koji se postavljaju u pacijentovu glavu pomoću posebno titanskog vijka (slika 33.) čime se dobiva kruti spoj s lubanjom. Nakon postavljanja vijka sustav markera može se i izvaditi dok se čeka operacija kako bi se pacijent osjećao ugodnije što ne utječe na konačnu točnost sustava. Sustav se sastoji od 3

markera vidljivih na CT-u i MRI-u. Nakon snimanja na CT-u i dobivanja 3D modela pacijenta pomoću tih markera stvara se koordinatni sustav pacijenta.



**Slika 33.** Predodžba sustava za lokalizaciju (sustav markera) za stereotaktički sustav RONNA (a – titanski vijak učvršćen za glavu fantoma; b – sustav markera postavljen na titanski vijak; c – sustav markera kruto povezan putem matice). Izvor: <https://www.fsb.unizg.hr/>

Prvi korak u radu sustava je priprema pacijenta gdje se na pacijenta kruto postavlja sustav za lokalizaciju. Potom pacijent ide na snimanje na CT ili MRI kako bi se dobila 3D slika na temelju koje se u posebno razvijenom programu za kirurško planiranje točno planiraju trajektorije za operaciju. Program za planiranje operacije potom šalje informacije robotima jer da bi sustav radio robot mora identificirati poziciju i orijentaciju markera koji definiraju koordinatni sustav pacijenta. Taj postupak se dijeli u dva koraka: približna i konačna lokalizacija. Prvi korak radi modul RONNAvision. RONNAvision modul standardna je stereovizijska kamera postavljena na pomoćnog robota. Robot lokalizira markere pričvršćene na pacijentovoj glavi i šalje točne informacije o koordinatama glavnom robotu. U drugom koraku lokalizacije glavni robot koristi specijalno razvijeni stereovizijski sustav. Stereovizijski modul (RONNAstereo) sastoji se od dvije kamere velike rezolucije s veoma uskim vidnim poljem. Kamere su međusobno okomite i sjecište optičkih osi im je u fokusu obje kamere. Idući korak je izvršavanje planirane trajektorije. RONNA sustav može raditi u dva načina rada: interaktivnom ili automatskom ovisno o tipu operacije i izboru kirurga. O oba slučaja pacijent je fiksiran na Mayfield hvataljki (slika 34.).



**Slika 34.** Predodžba fiksiranog fantoma lubanje Mayfield hvataljkom. Izvor: <http://stariweb.mef.hr/>

U slučaju interaktivnog rada, robot samo pomaže kirurgu. U tom slučaju pomoćni robot ima zadatak samo da približno odredi lokaciju markera na pacijentu putem svog stereovizijskog sustava. To pomaže glavnom robotu da nađe markere na pacijentovoj glavi. Nakon te lokalizacije i kalibracije, od glavnog robota mogu se odvojiti kamere i on je spreman za operaciju te dolazi s vodicom na planiranu trajektoriju gdje je na kirurgu da stavi sondu ili neki drugi alat rukom u kranijalni prostor. U slučaju automatskog rada obje ruke su aktivne gdje je postupak isti kao prije ali umjesto kirurga pomoćni robot stavlja sondu u lubanju pacijenta prema planiranoj trajektoriji dok glavni robot drži vodicu prema planiranoj trajektoriji. Krutost i vodilica osiguravaju kompenzaciju mogućih pogrešaka pozicioniranja pomoćnog robota. RONNA sustav obavio je prvo kliničko ispitivanje 2016 godine u kliničkoj bolnici Dubrava u Zagrebu gdje je obavljena biopsija tumora u interaktivnom načinu rada. U ovome trenutku klinička ispitivanja su u tijeku pa nema rezultata o ukupnoj točnosti primjene sustava.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

#### 3.1. Uvod u nanotehnologiju

Pojam „nanotehnologija“ danas se koristi kao sveobuhvatan izraz za područja znanosti, inženjerstva i tehnologije koja svoje primjene rada pronalaze unutar nanoskale. Nanoskala predstavlja sve radnje koje uključuju razumijevanje i kontrolu materije na dimenzijama koje se približno kreću između 1 i 100 nanometara (nm). Radi slikovitog prikaza skale, dovoljno je spomenuti da promjer ljudske kose iznosi oko 50 000 nanometara. Nanotehnologija otkriva da materijali pokazuju bitno drugačija svojstva kada su smanjeni u nano veličine. Primjerice, inertni materijali poput platine postaju katalizatori, stabilni materijali poput aluminijska postaju zapaljivi, čvrsti materijal poput zlata na sobnoj temperaturi u nano veličini postaje tekućina, a izolatori postaju vodiči kao što je to slučaj kod silikona. Takve nove mogućnosti mogu se izjednačiti s otkrivanjem novih materijala, a nude ljudskom rodu potpuno nove kombinacije za napredak znanosti. Zbog specifičnog ponašanja elemenata u nano skali, te velikog odnosa između površine nanočestica i njihovog volumena, nanomaterijali se od početka istražuju kao obećavajući alati za napredovanje u poljima dijagnostike (dijagnostički biosenzori), prijenosa lijekova i gena, itd. U usporedbi s većim česticama, nanomaterijali imaju jedinstvena fizička, kemijska i biološka svojstva. Upravo zbog toga mogu značajno utjecati na biomolekule i stanice živih organizama. Nanotehnologija već danas otvara niz mogućnosti za rješavanje akutnih problema sadašnjice. Veliki dio njih posljedica su tehnologija prethodnog industrijskog razdoblja - zagađenje okoliša, klimatske promjene, nove bolesti itd. Krupni koraci su napravljeni u uvođenju novih konstrukcijskih materijala sa bitno unaprijeđenim osobinama, koji zamjenjuju prijašnje materijale čija proizvodnja je zahtijevala grube zahvate u okoliš, ostavljala ekološku pustoš i narušavala biološku ravnotežu. Globalni energetske problemi mogu se umanjiti učinkovitijim iskorištavanjem klasičnih energenata, a produkti izgaranja učiniti neškodljivim uz pomoć nanostrukturnih katalizatora. Obnovljiva

solarna energija će se korištenjem novih nanofaznih materijala puno efikasnije konvertirati u električnu i tako troškovno približiti klasičnim izvorima. Konačno, "čista" energetika vodika također može očekivati ubrzani razvitak kada nanotehnologija ponudi rješenje za energetski prihvatljivu proizvodnju osnovne sirovine - vodika - iz sveprisutne vode, te materijal za odgovarajući spremnik. Sve ovo bi moglo bitno doprinijeti očuvanju okoliša i pomoći povratiti ravnotežu u globalni ekosustav.

### **3.2. Nanomaterijali**

Nanomaterijali su kemijske tvari ili materijali koji se proizvode i koriste u jako malim razmjerima. Njihova se građa kreće u razmjeru od približno 1 do 100 nm u barem jednoj dimenziji [10]. Tako postoje jednodimenzionalni (slojevi, premazi), dvodimenzionalni (nanocijevi) i trodimenzionalni nanomaterijali (nanočestice). Imaju jedinstvene i istaknutije karakteristike u usporedbi s jednakim materijalom bez nanostupanjskih značajki. Stoga imaju i različita fizičko-kemijska svojstva.

Danas postoji širok raspon proizvoda koji sadržavaju nanomaterijale. Primjerice baterije, premazi, antibakterijska odjeća, kozmetika, prehrambeni proizvodi i dr. Iako nanomaterijali otvaraju tehničke i komercijalne prilike, oni mogu predstavljati rizik za okoliš i izazvati zabrinutost u vezi sa zdravljem i zaštitom ljudi i životinja.

Razlikuju se dvije metode za proizvodnju nanomaterijala. Prva je proizvodnja nanomaterijala „atom po atom“ ili „sloj po sloj“ („bottom-up approach“), a druga se sastoji od lomljenja mikrostrukture u nanostrukturu („top-down approach“).

U bottom-up pristup ubrajale bi se sljedeće metode:

- Kondenzacija inertnim plinom (“inert gas condensation” – IGC)
- Elektrodepozicija (“electro-deposition” –ED)
- Magnetsko raspršenje (“magnetron sputtering“)

A u top-down pristup:

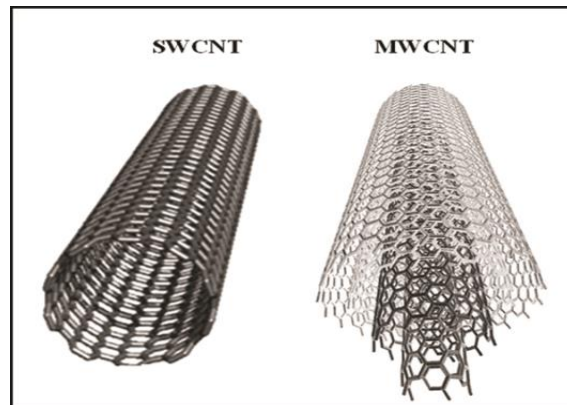
- Mehaničko mljevenje/legiranje
- Kristalizacija iz amorfne faze
- Intenzivna plastična deformacija masivnih uzoraka
- Plastične kemijske metode

Najstarije i najviše korištene su kondenzacija inertnim plinom i mehaničko mljevenje. No već pri samim počecima uočili su se nedostaci pojedinih metoda. Uzorci dobiveni IGC metodom su bili porozni i količine su bile prilično male ako se uspoređi sa skupoćom uređaja. Uzorci proizvedeni mehaničkim mljevenjem su sadržavali prilične količine nečistoća uslijed habanja kuglica i posudica za mljevenje. Zbog navedenih nedostataka pokušavaju se pronaći druge metode za pripremu uzoraka za znanstvena istraživanja. Najviše pažnje se usmjerava na metodu elektrodepozicije i intenzivnu plastičnu deformaciju, koja je jedina metoda gdje se dobiju veliki i nekontaminirani uzorci. Riječ nano pojavljuje se u dvije vrste materijala, bilo da je cijeli uzorak sastavljen iz čestica/kristala nano veličine ili da imamo neku amorfnu matricu u kojoj se pojavljuju ugrađeni nanokristali.

### **3.2.1. Nanocijevi**

Nanocijevi su, kao što im naziv govori, strukture na nanoskali koje izgledom podsjećaju na cijevi. Najpoznatije nanocijevi su: ugljikove nanocijevi, silikonske nanocijevi i nanocijevi od bor nitrida. Ugljikove nanocijevi su najčešće korištene. Strukturno, ugljikove nanocijevi su izgleda kao grafen. Atomi su poredani heksagonalno i tvore uzorak poput saća. Nanocijev se iz sloja grafena dobije tako da se namota u cilindar (slika 35.).





**Slika 35.** Predodžba nanocijevi. Izvor: <http://znanost.geek.hr/>

Nanocijev sa lijeve strane slike 35. pripada skupini jednom namotanih nanocijevi (SWNT – Single-walled nanotubes), dok se na desnoj strani slike 36. vidi više namotanih slojeva grafena koji zatim čine jednu nanocijev (MWNT – Multi-walled nanotubes). Ugljikove nanocijevi su vrlo pogodne jer su čvršće od čelika, laganije od aluminija i bolji vodiči od bakra. Električna svojstva su im toliko dobra da ih znanstvenici vide kao zamjenu za silicijsku mikroelektroniku. Njihova primjena proteže se od ultra-tankih, prozračnih i vodootpornih tkanina pa sve do sjajnih i tankih zaslona za televizore i računalne monitore, a najvažnija je primjena u elektronici. Danas se koriste kako bi se dijelovi opreme bicikla ojačali i učinili lakšima, u sportskoj opremi (reketi, palice za hokej i baseball, daskama za surfanje), u bioinženjeringu (kao građa za rast kostiju). Moguće primjene su u medicini, električnim krugovima (novi tranzistori), za konstrukciju jačih i boljih žica i kablova, u energetici, tekstilnoj industriji i još mnoge druge. Promjenom fizičkih obilježja nanocijevi mogu im se mijenjati fizikalna svojstva što je najvažnija karakteristika nanocijevi kao elektronske naprave.

### 3.3. Nanorobotika

Početna ideja nanorobota došla je iz knjiga i filmova znanstvene fantastike što je znanstvenicima dalo poticaj za razvoj i moguću realizaciju nanorobota. Možda je cijela priča započela sa govorom «Mnogo je mjesta na dnu» (There's Plenty of Room at the Bottom) Richarda P. Feynmana iz davne 1959. godine. Između ostalog, Feynman je rekao: "Principi fizike, barem koliko ja vidim, ne zabranjuju mogućnost manipuliranja jednim atomom unutar stvari. To je nešto što je u principu izvedivo, ali u praksi nije bilo učinjeno jer smo preveliki." U taj govor je umetnuta ideja studenta Richarda P. Feynmana o medicinskoj upotrebi nanorobota, točnije da će u budućnosti biti moguće "progutati doktora". Budući da su nanoroboti na mikroskopskoj skali, vjerojatno bi bio potreban jako veliki broj nanorobota da bi izvodili zadatke na makroskopskoj skali.

Nanoroboti su od posebnog značenja za istraživanja u nanomedicini. Grupa nanorobota mogla bi poslužiti kao antitijela ili antivirusna sredstva kod bolesnika sa komprimiranim imunološkim sustavom, ili kod bolesti koja ne reagira na klasične mjere. Postoje brojne druge potencijalne medicinske aplikacije, uključujući popravak oštećenog tkiva, a možda i izgradnja cjelovitih zamjenskih organa [11]. Jedna od glavnih prednosti nanorobota smatra se da je njihova trajnost. U teoriji, mogu trajati godinama, desetljećima, pa čak i stoljećima. Nanometarski sustavi također mogu djelovati mnogo brže od njihovih kolega na većim skalama jer su im pomaci manji. To omogućuje mehaničkim i električkim događajima pojavljivanje u manje vremena određenom brzinom. Nanorobotika je još uvijek uglavnom teoretska, ali rastuća grana tehnologije stoga još puno truda je potrebno da bi se omogućila u skoroj primjeni.

### 3.3.1. Proizvodnja nanorobota

- **3D tisak**

3D tisak je proces u kojem se trodimenzionalne strukture stvaraju kroz različite procese dodavanja dijelova. Sukladno tome, 3D tisak na nanoskali uključuje mnoge iste procese kao na makroskali, ali ugrađene na puno manjoj skali. Kako bi se mogle tiskati strukture na mikroskali sastavljene od nanostrukture preciznost tehnologije 3D tiska morala je biti znatno poboljšana.

- **3D tisak i lasersko graviranje**

Ova tehnika nastala u Seoulu koristi proces sa dva koraka 3D tiska kombinirajući 3D tisak i lasersko graviranje ploča. Za veću preciznost na nanoskali ovaj proces koristi stroj za lasersko graviranje koji na svakoj ploči vrši detaljno nagrizanje u obliku strukture za nanorobota. Ploča se zatim prenosi na 3D pisač koji ispunjava ugravirane dijelove željenim nanostrukturama. Ovaj proces 3D tiska ima neke prednosti, primjerice povećava ukupnu točnost procesa tiska i ima potencijal za stvaranje funkcionalnih dijelova nanorobota.

- **Dvofotonska litografija**

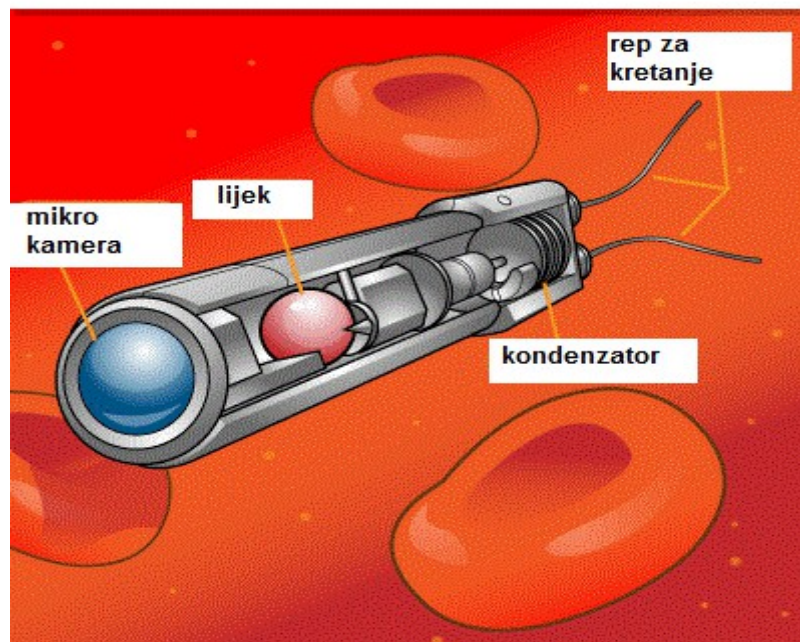
3D pisač koristi tekuću smolu koja je očvrsnuta na točno određenim mjestima pomoću fokusirane laserske zrake. Žarište laserske zrake je navođeno kroz smolu pomoću pomičnih ogledala i ostavlja iza svog prolaska čvrstu liniju polimera debljine oko 100 nanometara. Ovaj proces zbog fine rezolucije omogućuje stvaranje zamršenih struktura manjih od zrna pijeska. Koristi se fotoaktivna smola te je proces brz za pojmove 3D tiska na nanoskali. Zbog nelinearne prirode fotopobude tekuća smola postaje kruta samo na mjestima na kojima je fokusiran laser, dok je dio gel formi naknadno ispran sa ploče. Proizvodnja dijelova ispod 100 nanometara je jednostavna kao i kompleksne strukture sa pokretnim i isprepletenim dijelovima.

### 3.3.2. Moguća primjena nanorobota

Trenutne moguće primjene uglavnom se odnose samo medicinu, za ostala područja su znatno manje istražene mogućnosti. Potencijalne primjene nanorobota u medicini uključuju ranu dijagnozu i ciljano liječenje raka. Primjene u biomedicinskoj instrumentaciji i kirurgiji te mogućnost konstantne zdravstvene skrbi poput praćenja dijabetesa. Sukladno takvim primjenama medicinska nanotehnologija u budućnosti će, očekivano, ubacivati nanorobote u tijelo koji će obavljati liječenje na staničnoj razini. Nanoroboti namijenjeni za upotrebu u medicini trebali bi biti nereplicirajući zato što bi replikacija nepotrebno povećala složenost uređaja i smanjila pouzdanost. Takav uređaj mogao bi se upravljati i kretati ljudskim organizmom i liječiti širok spektar najtežih bolesti. Danas je većina negativnih nuspojava tretmana poput kemoterapije uzrokovana nemogućnošću tretiranja samo bolesnih stanica. Prema istraživanjima provedenima na Harvardu i MIT-u postoji mogućnost da se na nanostrukture dodaju specijalne RNA ispunjene lijekovima za kemoterapiju. Takve RNA privlače stanice raka te kada nanorobot naiđe na stanice raka prihvaća se za njih i otpušta lijek isključivo u zaražene stanice.

Prva demonstracija funkcionalnih nanorobota u živom organizmu provedena je 2014. godine na Sveučilištu California. Trenutna primjena nanorobota u medicini ograničena je na nanokapsule vođene magnetskom rezonancom.

Na slici 36. je prikazan mogući presjek jednog nanorobota. Robot se za kretanje koristi repom, a posjeduje i kameru kako bi osoba koja njime upravlja vidjela u kakvoj se okolini on nalazi [11]. Neki drugi modeli nanorobota imaju i dodatne alate za spajanje na stanice, hvatanje virusa i bakterija, te transport lijekova.



**Slika 36.** Predodžba presjeka nanorobota. Izvor: <http://electronics.howstuffworks.com/>

Vjeruje se da su poluautonomni roboti na vidiku, mogu se implantirati, mogu patrolirati u tijelu i reagirati ako nastane neki problem. Za razliku od akutnog tretmana, u organizmu bi mogli ostati zauvijek. Buduća primjena nanorobota sastojala bi se u ojačavanju organizma kako bi bio otporniji prema bolestima, kako bi mu se povećala snaga, pa čak i inteligencija. Medicinska dijagnostika već osjeća dobrobiti nanotehnologije. Slijede napredci na području tretmana rana i bolesti, od raka i očnih infekcija do slomljenih udova. Doktori već neko vrijeme koriste markere za označavanje virusa i bakterija koje treba identificirati ili nadzirati. Antitijela koja će se vezati na ciljanu ćeliju se markiraju tako da fluorescentno zrače pod svjetlošću određene valne duljine. Mjerenjem fluorescencije mjeri se razina infekcije. Nadzor na razini ćelije omogućio bi vrlo ranu dijagnozu. Naime, kod vrlo agresivnih lijekova, poput kemoterapije, uništavaju se i zdrave i bolesne stanice. Nanoroboti bi omogućili dopremu lijeka na samo bolesne stanice ne oštećujući zdrave.

Premda neki znanstvenici i inženjeri vjeruju da su primjene nanorobota praktički neograničene, navedene su samo neke bolesti koje se mogu liječiti na ovaj način:

- **Ateroskleroza**

Nastaje zbog taloženja štetnih naslaga na zidovima arterija. Nanoroboti mogu ukloniti te naslage, koje potom prelaze u krvotok. Jedna je od važnih prepreka kako osigurati da naslage budu uklonjene i da se ne pojave na drugome mjestu u krvotoku.

- **Razbijanje ugrušaka**

Nanoroboti mogu razbijati ugrušak, ali se, kao i prethodno navedeno, mora osigurati da ugrušci ne izazovu druge komplikacije. Također, nanoroboti moraju biti malih dimenzija kako sami ne bi bili prepreka protoku krvi.

- **Borba protiv tumora**

Nanoroboti mogu napasti tumor pomoću lasera, mikrovalova ili ultrazvuka ili mogu biti dio kemoterapije prenoseći lijek direktno na ugroženo mjesto. Liječnici vjeruju da dovođenje malih, ali preciznih doza lijeka može smanjiti prateće efekte, a sve to bez smanjivanja učinkovitosti.

- **Pomoć pri zgrušavanju krvi**

Posebna vrsta nanorobota nosi sa sobom malu mrežicu koja se u kontaktu s krvnom plazmom rastvara i prelazi u ljepljivu membranu. Ova vrsta nanorobota može se koristiti za tretman hemofilije ili kod pacijenata s otvorenim ranama.

- **Uklanjanje parazita**

Nanoroboti mogu voditi rat na mikrorazini protiv bakterija i sićušnih mikroorganizama. Pri tome se može koristiti više nanorobota za uništavanje parazita.

- **Razbijanje bubrežnih kamenaca**

Liječnici razbijaju kamenac pomoću ultrazvuka, ali to nije uvijek dovoljno učinkovito. Nanoroboti mogu razbiti kamenac upotrebom malih lasera.

- **Čišćenje rana**

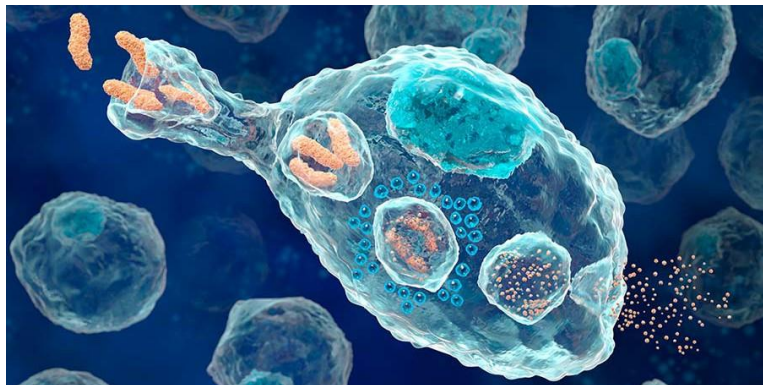
Nanoroboti mogu pomoći pri uklanjanju nečistoća iz rana, što smanjuje mogućnost infekcije, osobito kod rana izazvanih ubodima.

Da bi nanoroboti ispunili svoju medicinsku misiju, moraju imati mikrominijaturne alatke uz pomoć kojih se liječenje ostvaruje. Na primjer, šupljina unutar robota može sadržavati dozu lijeka ili supstancije. Također, potrebne su subminijaturne alatke kao što su sonde, noževi ili dlijeta.

### 3.3.3. Vrste nanorobota

- **Microbivore nanoroboti**

Ovi nanoroboti bi funkcionirali slično bijelim krvnim stanicama u ljudskom tijelu, ali su dizajnirani da budu puno brži od bakterije koju uništavaju. Također bi trebali moći ukloniti bakterijske infekcije u bolesnika unutar nekoliko minuta, za razliku od antibiotika kojima su potrebni tjedni. Microbivore nanoroboti su dizajnirani tako da se njihova antitijela „prilijepe“ određenoj bakteriji koju robot traži. Nakon „priljepljivanja“ bakterije i antitijela, ruka zgrabi bakteriju i stavi je unutar nanorobota koji je uništi (slika 37.). Bakterija se zatim ispušta u krvotok kao bezopasan dio.

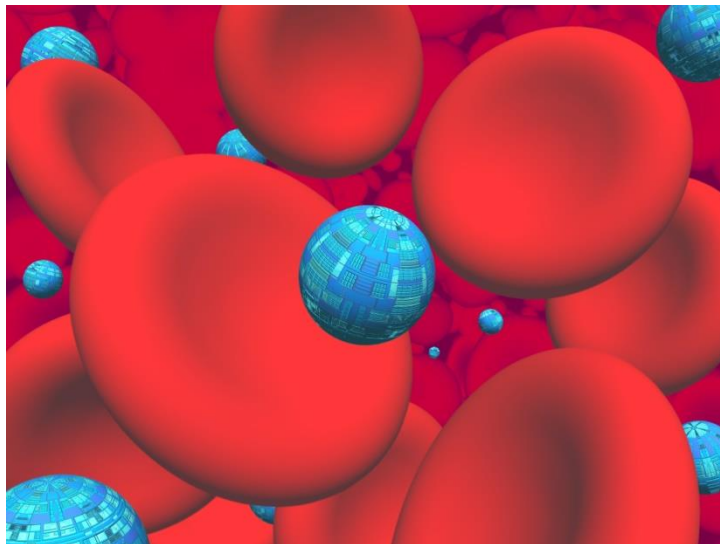


**Slika 37.** Predodžba microbivore nanorobota. Izvor: <https://word6536.wordpress.com/>



- **Respirocyte nanoroboti**

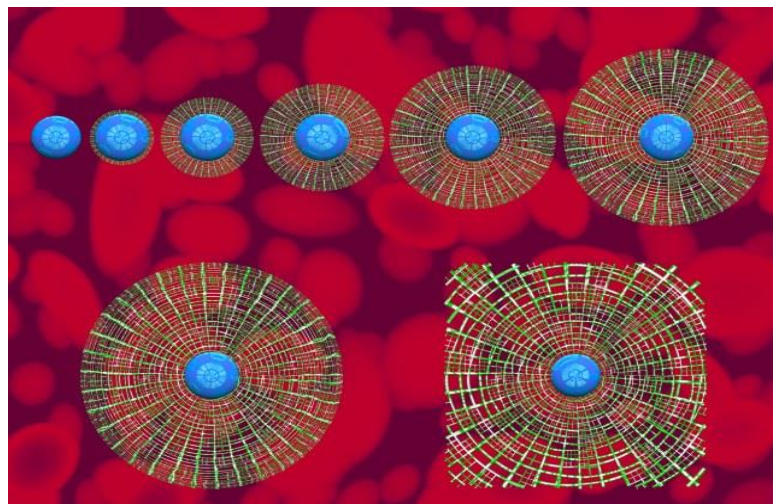
Ovi nanoroboti će funkcionirati na sličan način kao crvene krvne stanice u ljudskom tijelu. Međutim, oni su dizajnirani za nošenje mnogo više kisika nego crvene krvne stanice. Ovaj dizajn može biti vrlo koristan za pacijente koji pate od anemije. Ovi nanoroboti će sadržavati spremnik u kojem se drži kisik pri visokom tlaku, senzore za određivanje koncentracije kisika u krvi, i ventil koji otpušta kisik kada senzori utvrde da je potreban dodatni kisik (slika 38.).



**Slika 38.** Predodžba respirocyte nanorobota. Izvor: <https://www.foresight.org/>

- **Clottocyte nanoroboti**

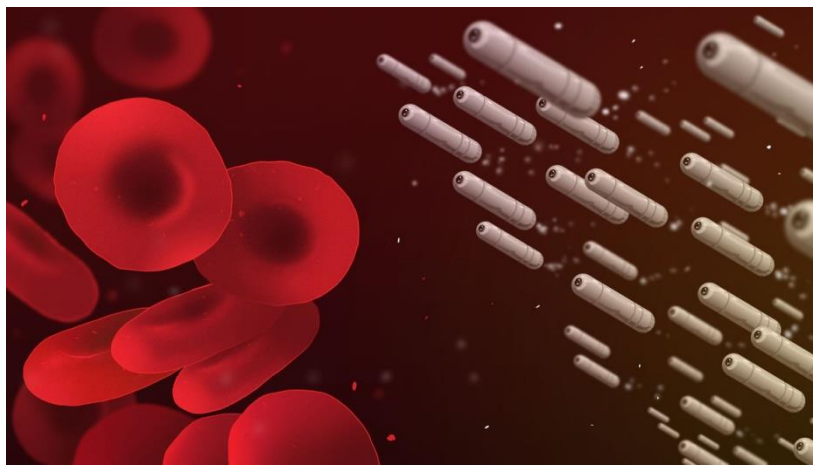
Ovi roboti djeluju slično kao i trombociti u krvi. Trombociti se drže zajedno unutar rane da nastane ugrušak, zaustavljajući protok krvi. Ovisno o veličini rane, značajan gubitak krvi može se dogoditi prije nego što ugrušak nastane. Sustav clottocyte nanorobota će pohraniti vlakna dok ne dođu na ranu. Kad dođu do rane, rasprše vlakna koja se zatim spoje te stvore ugrušak u djeliću vremena (slika 39.).



**Slika 39.** Predodžba clottocyte nanorobota. Izvor: <https://www.foresight.org/>

- **Cellular repair nanoroboti**

Ovi mali roboti bi mogli biti izgrađeni da pomognu u preciznijem izvođenju kirurških zahvata (slika 40.). Radeći na staničnoj razini, takvi nanoroboti bi mogli spriječiti štetu koja bi se uzrokovala skalpelom.



**Slika 40.** Predodžba cellular repair nanorobota. Izvor: <https://www.roboticsbusinessreview.com/>

Načini upravljanja takvim nanorobotima još su u razvoju, a temelje se na komunikaciji ultrazvučnim signalima i nano verzijama postojećih komunikacijskih elemenata u makro svijetu. Kao materijal najpogodniji za izradu sofisticiranih nanorobota uzima se ugljik, a arhitektura robota bila bi po uzoru na građu virusa i bakterija . Za kretanje robota potrebna je energija, koja bi se dobivala iz kisika i glukoze, na sličan način kako ljudsko tijelo dobiva energiju.

### 3.3.4. Kretanje nanorobota

Da bi primjena nanorobota vidjela svijetlo dana, na znanstvenicima je da smisle rješenje za kretanje nanorobota jer bi njihovo kretanje u krvotoku bilo otežano zbog jačine molekularnih sila koje uzrokuju konzistentnost krvi (zbog čega bi kretanje u njoj bilo jednako plivanju u šećernom sirupu). Postoje tri pitanja na koja su se znanstvenici usredotočili kad je u pitanju kretanje nanorobota kroz tijelo. To su: navigacija, napajanje nanorobota energijom i način na koji se kreću kroz krvožilni sustav. Postoji više načina za svaku od spomenutih mogućnosti, koje se mogu svrstati u dvije kategorije: vanjski sustavi upravljanja i sustavi koje nose nanoroboti.

Vanjski sustavi navigacije koriste se različitim metodama za navođenje nanorobota do željenog mjesta u tijelu. Jedan je način koristiti ultrazvučne signale za detekciju položaja nanorobota. Liječnici će na pacijenta usmjeriti signale, koji prolaze kroz tijelo, odbijaju se natrag prema izvoru ili su kombinacija oba slučaja. Nanoroboti mogu emitirati ultrazvučne signale koji se mogu detektirati posebnim uređajima opremljenima ultrazvučnim sensorima, te se tako može njima manevrirati. Pri uporabi magnetsko rezonantnog uređaja (tzv. MRI uređaj) nanoroboti koriste detekciju magnetnog polja. Budući da većina bolnica ima te uređaje, to bi mogao postati industrijski standard jer nije potrebno investirati u novu i skupu tehnologiju. Nanoroboti se mogu kontrolirati i injektiranjem obojenog radioaktivnog rastvora u krvotok te se može koristiti uređaj koji prati tu supstanciju. Trodimenzionalne slike otkrivaju gdje se nalazi nanorobot.

Nanoroboti bi od uređaja mogli koristiti kemijske senzore koji detektiraju i prate tragove posebnih kemikalija da bi stigli do odredišta. Također, mogu imati minijaturne kamere, tako da operater na konzoli može upravljati nanorobotom. Sustavi s kamerom za sada su u fazi razvoja.

Kao kod navigacijskog sustava, i sustavi za napajanje mogu biti vanjski ili se nalaze u sastavu nanorobota. Ovi posljednji mogu dobiti napajanje direktno iz krvotoka. S postavljenim elektrodama na sebi može se stvoriti baterija, pri čemu se koristi elektrolit koji se nalazi u sastavu krvi. Da bi se nanoroboti kretali kroz krvotok, potrebna je potisna sila ili propulzijski sustav. Budući da se nanoroboti trebaju kretati suprotno krvnom toku, moraju biti relativno snažni. Neki inspiraciju za propulziju vide u mikroskopskim organizmima, od kojih se mnogi kreću pomoću vlakana (bičeva) koja vibriraju, pa nanoroboti imaju izgled bakterije koja se pokreće vibriranjem bičeva.

Trenutna ideja, koja je još uvijek u razradi, je da se nanoroboti kreću uz pomoć fizičke, a ne kemijske energije. U eksperimentalnoj fazi uspješno je povezano tri prstena, polimer i dvije nano žice, a aktiviranjem magnetskog polja nanoplivači su se kretali u S obrascu brzinom jedne dužine tijela po sekundi. No, potreban je daljnji razvoj robota te istraživanja s ciljem pronalaska efektivnog rješenja za njihovu mobilnost i mogućnost korištenja za dobrobit čovječanstva.

### **3.4. Prednosti i nedostaci nanotehnologije u medicini**

Primjena nanotehnologije u medicini je vrlo obećavajuća, ali „nano“ je promovirano s toliko entuzijazma da medijska buka oko toga može nadmašiti realnost, naročito kada se ima u vidu ogromni vremenski razmak između otkrića i stvarnih proizvoda u medicinskim naukama. U širem smislu, nanomedicina je primjena tehnologija na nanoskali u medicinskoj praksi i koristi se za dijagnostiku, prevenciju i liječenje bolesti, kao i za stjecanje znanja kompleksnih mehanizama koji su u osnovi bolesti [12]. Iako je nanotehnologija ustanovljena disciplina, komercijalna nanomedicina je još uvijek u početnom stadiju razvoja.

Očekuje se da će u narednim godinama biti značajnih istraživanja u sljedećim pravcima nanomedicine:

- Sinteza i upotreba novih nanomaterijala i nanostrukture (npr. manje antigenski), zatim biomimetičkih nanostrukture (sintetički proizvodi razvijeni na osnovu razumijevanja bioloških sistema), pa izrada multifunkcionalnih bioloških nanostrukture, uređaja i sustava za dijagnosticiranje i isporuku lijekova.
- Razvijanje analitičkih metoda i instrumenata za izučavanje pojedinačnih biomolekula i proizvodnja neinvazivnih „in vivo“ analitičkih nanoalata sa poboljšanom senzitivnošću i rezolucijom za molekulsko snimanje i za ispitivanje patoloških procesa.
- Konstrukcija uređaja i nanosenzora za rano otkrivanje bolesti i patogena.

Krajnji cilj je sveobuhvatno praćenje, popravci i poboljšanje svih humanih bioloških sustava. Saznanja do kojih se došlo su pomakla neke dosada važeće klasične pristupe klasične kemije ka kvantnoj mehanici i informacijskoj fizici. Međutim, treba reći da nam ni klasična, a ni kvantna teorija ne mogu u potpunosti dati odgovore na fenomene koji manifestiraju biomolekule – DNA, proteini, voda. Sa primjenom nanotehnologija u medicini treba biti oprezan, jer ako nanomaterijal ili nanočestica nisu kompatibilni i komplementarni sa biomolekulama, odnosno sigurni za upotrebu, tada se njihovom primjenom povećava opasnost za zdravlje, u odnosu na neželjene efekte koje izazivaju klasični lijekovi [13]. Međutim, ako nanomaterijali i nanočestice zadovoljavaju navedene kompatibilnost i komplementarnost tada njihova primjena u medicini može biti višestruko blagotvornija nego klasični lijekovi. Liječnici neće moći mijenjati svoju ustaljenu biokemijsku praksu u liječenju, sve dok ne budu počeli koristiti kvantne energetsko-informacijske dijagnostičke i terapijske uređaje, koji će pokazati da postoji kvantna energetsko-informacijska mreža tijela nastala u toku embriogeneze. Tehnologija će značajno utjecati na razvoj medicine, jer medicina bez tehnologije je nemoćna, a tehnologija bez medicine slijepa.

Glavni cilj nanomedicine je da uči od prirode, u smislu razumijevanja strukture i funkcije bioloških uređaja i korištenja prirodnih rješenja za unapređenje nauke i tehnologije. Ovaj pristup se naziva „biomimikrijom“. Evolucija je proizvela impresivan broj raznovrsnih bioloških sredstava, spojeva i procesa koji funkcioniraju na nanometarskom ili molekularnom nivou i sa osobinama nenadmašnim od strane sintetičkih tehnologija. Stoga, zbog zanimljivih primjena i utjecaja na buduće generacije, trebalo bi voditi računa o stvaranju ekoloških, društveno prihvatljivih i dostupnih proizvoda i informacija o razvoju nanotehnologije.

#### 4. ZAKLJUČAK

Robotika je strateška tehnologija koja će promijeniti svijet u ekonomskom i društvenom smislu. No, kod nas još ne postoji svijest da robotika nije samo jedna od tehnologija već svojevrsni civilizacijski preokret. Iako je Hrvatska tehnološki zaostala valja istaknuti da još ima temeljne potencijale u sektoru bez kojeg nema napretka, a to je obrazovanje i znanost.

Roboti su strojevi koji po svojim radnim karakteristikama mogu u raznim djelatnostima preuzeti najviše poslova koji su suviše složeni za klasičnu mehanizaciju i automatizaciju. Zato je robotika postala svojevrsni tehnološki imperativ povratka proizvodnji. To znači da je budućnost proizvodnje u 21. stoljeću više neće ovisiti isključivo o ljudskoj radnoj snazi i to treba jasno istaknuti. Proizvodit će strojevi, ali to ne znači i manje posla za ljude. Neki od danas najtraženijih poslova prije samo petnaestak godina nisu ni postojali. Ispravan način razumijevanja budućnosti je stvaranje novih. Među znanstvenicima tehničkih struka, ali i biologima, sociologima, psihologima i pravnicima vode se rasprave o tome što donose nove tehnologije i što će one značiti za čovječanstvo. Postavljaju se pitanja hoće li te nove tehnologije utjecati na razdvajanje i otuđivanje ljudi pa čak i međusobnu netoleranciju. Hoće li se na kraju samo pritiskom tipke ili mišlju ostvarivati sve želje i potrebe? Treba li se toga bojati ili to prihvaćati kao normalni razvoj društva i civilizacije? Slična su se pitanja postavljala i ranije kod novih revolucionarnih tehničkih proizvoda, počevši od automobila, aviona, televizije, računala do mobitela. Uvijek je postojala bojazan od novih tehnologija i strah od mogućeg negativnog utjecaja na postojeći način života. Razvojem novih tehnologija poput društvenih robota sigurno će nestati neki sadašnji poslovi, ali će nastati niz novih kreativnijih. To će omogućiti čovjeku lakše otkrivanje i ostvarivanje vlastite kreativnosti i inovativnosti.



Znanost ima težnju i, kao što bi se moglo dokazati, nuždu da traži objašnjenje svakidašnjih činjenica poopćavanjem drugih činjenica koje su rjeđe i koje čine iznimku. Tako erupcija vulkana oslobađa vrelinu koja stalno djeluje u utrobi zemlje i kojoj zemlja uvelike duguje svoj izgled. Što je, dakle, ispravan način postupanja? Što treba misliti kako bi se osiguralo ono što se zbilja želi? Što svi žele jesu sreća i sklad. Ako netko može biti istinski sretan, imati će ono što mu svijet želi dati. Ako su ljudi sami sretni, mogu i druge učiniti sretnima. Ali ne mogu biti sretni ako nemaju zdravlje, snagu, bliske prijatelje, ugodan okoliš i dovoljno sredstva ne samo da bi se pobrinuli za svoje nužne potrebe nego i da steknu ugodnosti i raskoš na koje imaju pravo.

## 5. LITERATURA

- [1] **Mumford L.:** „Povijest utopija“, Jesenski i Turk, Zagreb (2008.), ISBN 978-953-222-302-6
- [2] **Keros P., Andreis I., Gamulin M.:** „Anatomija i fiziologija“, Školska knjiga, Zagreb (2000.), ISBN 953-0-21620-3
- [3] [http://biomed.brown.edu/Courses/BI108/BI108\\_2005\\_Groups/04/history.html](http://biomed.brown.edu/Courses/BI108/BI108_2005_Groups/04/history.html)
- [4] **Freedman J.:** „Robots Through History“, Rosen Central, New York (2011.), ISBN 1448822505
- [5] **Tesla N.:** „Moji pronalasci“, Znanje, Zagreb (2015.), ISBN 978-953-343-196-3
- [6] **Faust R.:** „Robotics in Surgery: History, Current and Future Applications“, Nova Publishers, New York (2007.), ISBN 1-60021-386-3
- [7] <http://www.ronna-eu.fsb.hr/index.php?lang=en>
- [8] **Kovačić Z., Krajči V., Bogdan S.:** „Osnove robotike“, Grafis, Zagreb (2000.), ISBN 95-6647-29-X
- [9] **Doleček V., Karabegović I.:** „Servisni roboti“, Društvo za robotiku Bihać, Bihać (2012.), ISBN 078-9958-9262-3-9
- [10] <https://echa.europa.eu/hr/regulations/nanomaterials>
- [11] <http://electronics.howstuffworks.com/nanorobot.htm>
- [12] <https://www.hindawi.com/journals/jnt/2012/816184/>
- [13] <http://www.understandingnano.com/medicine.html>

## POPIS SIMBOLA (KORIŠTENIH KRATICA)

RONNA	Robotska NeuroNAvigacija
CT	kompjuterska tomografija
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
CCD	Charge Coupled Device
PLC	programabilni logički kontrolor
FSB	Fakultet strojarstva i brodogradnje
KBD	Klinička bolnica Dubrava
BICRO	poslovno – inovacijska agencija RH
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
IFR	Internacional Federation of Robotics
CVI	moždani udar
CP	cerebralna paraliza
DC	istosmjerna struja
EMG	elektromiografija
MRI	magnetska rezonancija
FDA	Food and Drug Administration
IGC	inert gas condensation
ED	electro-deposition
SWNT	single-walled nanotubes
MWNT	multi-walled nanotubes

MIT Massachusetts Institute of Technology

RNA ribonukleinska kiselina

DNA deoksiribonukleinska kiselina

## POPIS SLIKA

Slika 1. Predodžba Džozero ve piramide. ....	4
Slika 2. Predodžba replike da Vincije voga humanoidnog robota .....	5
Slika 3. Predodžba Teslina broda s daljinskim upravljanjem. ....	6
Slika 4. Predodžba Unimatea .....	8
Slika 5. Predodžba Arthrobota. ....	9
Slika 6. Predodžba Probota. ....	9
Slika 7. Predodžba Aesopa .....	10
Slika 8. Predodžba Zeusa .....	10
Slika 9. Predodžba Sofie .....	11
Slika 10. Predodžba RONNA-e (Robotska neuronavigacija) .....	12
Slika 11. Predodžba upravljačkog lanca bez povratne informacije .....	13
Slika 12. Predodžba regulacije s petljom povratne veze. ....	14
Slika 13. Predodžba multivarijabilnog procesa robota treće generacije .....	15
Slika 14. Predodžba primjene robota .....	17
Slika 15. Predodžba migracija drugih tehnologija u robotiku. ....	17
Slika 16. Predodžba migracija robotike u druge tehnologije. ....	18
Slika 17. Dijagram ulaganja u pojedine vrste robota. ....	18
Slika 18. Dijagram stope rasta/pada radne populacije (1955.-2050.). ....	19
Slika 19. Dijagram godišnje primjene servisnih robota u medicini od 2005. do 2010. godine. ....	25
Slika 20. Dijagram primjene servisnih robota u medicini po područjima. ....	26
Slika 21. Predodžba Lokomata. ....	28
Slika 22. Predodžba Phoenixovog egzoskeleta.....	29
Slika 23. Predodžba Armeo springa .....	30
Slika 24. Predodžba i-limb™-a. ....	31
Slika 25. Predodžba robotiziranih invalidska kolica .....	32
Slika 26. Predodžba servisnog robota Twendy-One .....	33
Slika 27. Predodžba Robodoca. ....	35
Slika 28. Predodžba kirurškog sustava da Vinci. ....	36
Slika 29. Predodžba Neuromatea. ....	37

Slika 30. Predodžba Rosae. ....	38
Slika 31. Predodžba RONNA-e (a – RONNAvision modul s komercijalno dostupnim Polaris sustavom; b – glavni robot na pomičnom stalku s integriranom upravljačkom jedinicom i napajanjem; c – pomoćni robot na pomičnom stalku s integriranom upravljačkom jedinicom i napajanjem; d – ekran za nadzor rada sustava). ....	39
Slika 32. Predodžba glavnog (KUKA KR6) i pomoćnog (KUKA LWR 4+) robota. ....	40
Slika 33. Predodžba sustava za lokalizaciju (sustav markera) za stereotaktički sustav RONNA (a – titanski vijak učvršćen za glavu fantoma; b – sustav markera postavljen na titanski vijak; c – sustav markera kruto povezan putem matice) ....	41
Slika 34. Predodžba fiksiranog fantoma lubanje Mayfield hvataljkom. ....	42
Slika 35. Predodžba nanocijevi ....	46
Slika 36. Predodžba presjeka nanorobota ....	50
Slika 37. Predodžba microbivore nanorobota. ....	53
Slika 38. Predodžba respirocyte nanorobota ....	54
Slika 39. Predodžba clottocyte nanorobota. ....	55
Slika 40. Predodžba cellular repair nanorobota ....	56

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Procjena relevantnosti faktora za tipove servisnih robota za rehabilitaciju .....	24
Tablica 2. Godišnja primjena servisnih robota u medicini od 2005. do 2010. godine .....	25