

MINIJATURNI ROBOTI ZA ENDOSKOPIJU

MINIATURE ROBOTS FOR ENDOSCOPY

Prof. dr. sc. Gojko Nikolić

Tekstilno tehnološki fakultet

SAŽETAK

Minijaturizacija elemenata elektronike, optike, kao i mikromehanička izrada dijelova omogućili su primjenu minijaturnih robotiziranih uređaja u različitim područjima ljudskih djelatnosti. Možda najinteresantnije i najkorisnije je područje primjene u medicini. Početkom stoljeća sve više se primjenjuju bežične endoskopske kapsule za dijagnozu i ograničene intervencije u probavnom traktu. Dijagnoza cjelokupnog probavnog trakta s tim minijaturnim robotiziranim kapsulama je bezbolna i sigurna, a mogu obuhvatiti i područja koja se do sada nisu mogla endoskopski pregledavati. Sve se više usavršavaju ne samo u pogledu većeg broja, kvalitete i prijenosa snimljenih slika tokom svog kretanja, već im se dodaju i druge mogućnosti poput usmjeravanja kretanja, zaustavljanje te obavljanje raznih medicinskih intervencija.

Ključne riječi: *endoskopske kapsule, WCE, minijaturni roboti, doziranje lijeka u GI traktu*

ABSTRACT

Miniaturization of electronics' elements, optics, as well as micromechanical parts' production have enabled the use of miniature robotic devices in various fields of human activity. Their use in the field of medicine is perhaps the most interesting and useful. At the turn of the century, wireless endoscopic capsules were increasingly used for diagnosis and limited interventions in the digestive tract. Diagnosis of the entire digestive tract with these miniature robotic capsules is painless and safe, and may include areas that have not been able to be examined endoscopically so far.

They are becoming more and more advanced not only in terms of the number, quality and transmission of captured images during their movement, but also they add other possibilities such as directing movement, stopping and performing various medical interventions.

Keywords: *endoscopic capsules, wireless endoscopic capsules (WCE), miniature robots, drug dosing in GI tract*

1. UVOD

1. INTRODUCTION

Početkom ovog stoljeća započelo je doba primjene minijaturnih endoskopskih robota u obliku kapsula koje prolaze kroz ljudsko tijelo te obavljaju dijagnostiku a ponekad i potrebnu medicinsku intervenciju. Mogu li se te endoskopske kapsule nazivati robotima? Današnja definicija robota odstupa od nekadašnjih kao i od uobičajenog poimanja ljudi što je robot. Robot je prema suvremenoj, slobodno interpretiranoj definiciji, svaki uređaj koji obrađenu informaciju pretvara u neki koristan (upotrebljivi) rad¹. Nužni su senzori za prikupljanje informacija, koji se obrađuju računalnim sustavom, te izvršni elementi ili aktuatori, bilo koje vrste, koji realiziraju naloge dobivene procesiranjem informacija. Danas se robotima može nazvati najveći broj automatskih uređaja koji nas okružuju od automata za kavu, bankomata, do kućnih uređaja za čišćenje.

¹ „Robot je informatički stroj koji ima fizičku stranu, odnosno robot je fizičko proširenje računalne tehnologije koji pretvara informaciju u rad neposredno utječući na nas i našu okolinu“, prof. dr. sc. Bojan Jerbić sa FSB. [Jerbić B.: Robotika u medicini, izazov 21. stoljeća, 2014.]

Opravan je naziv robot i za minijaturne automatske uređaje koji se koriste u medicini za endoskopiju.

Više od 50 godina radi se na smanjenju dimenzija robota. Za smanjenje dimenzija robota i njegovu primjenu najvećaje potrebu medicini, svemirskim istraživanjima i vojsci. Medicina je vjerojatno najznačajnije utjecala na taj trend minijaturizacije. Osim smanjenja robota prema milimetarskim, nastavilo se i prema mikronskim, odnosno nano veličinama.

2. MINIJATURNI ROBOTI

2. *MINIATURE ROBOTS*

Veličina minijaturnih robota igra značajnu ulogu na koncepciju konstrukcije, vrsti primijenjenih materijala, namjeni i mogućnostima. Njihovi nazivi su povezani s veličinom. Roboti ≤ 10 cm nazivaju se *centirobotima (centibots)*, oni veličine ≤ 3 mm su *miniroboti (mini robots)*, roboti veličine 30 – 500 μm su *mikroroboti (microrobots)*, a najmanji *nanoroboti (nanobots)* su manji od 1 μm . [1]

Za izrada centirobota i njihovih dijelova, koriste se postojeće mikro-tehnološke obrade, kao i za izradu MEMS-ova (Mikro-elektro-mehanički sustavi). Ugrađuju se minijaturni optički, elektronički i telekomunikacijski elementi. Bez obzira na današnje mogućnosti izrade još uvijek postoje mnogo tehničkih problema koji se rješavaju na domišljat način.

U medicini centiroboti se primjenjuju u obliku kapsula za dijagnostiku probavnog trakta. Dovoljno su mali da se mogu progutati. Neki su razvijeni i za određene medicinske zahvate poput biopsije te za manje intervencije (kauterizacija, dostava lijeka na oboljelo mjesto, zaustavljanje krvarenja i sl.). [2]

Kod mini i mikro robota, a pogotovo nano robota, dimenzije su izrazito male te se mijenja koncepcija konstrukcije i korišteni materijali. Osim mehaničkih robota, koriste se i biološki kao i kombinacije mehaničkih i bioloških robota. Problema u njihovoj realizaciji ima mnogo od potrebe za velikim brojem jedinki, dostavi energije, usmjeravanje kretanja, pronalaženje

oboljelog mjesta, obavljanje zadataka, upravljačkog i komunikacijskog sustava, međusobnog usklađivanja rada (kolektivna inteligencija), načina njihovog odstranjivanja iz tijela, opasnost od kvarova itd. [1] U osmišljavanju i rješavanju konstrukcije uključeni su stručnjaci iz raznih grana znanosti. Provode se intenzivna istraživanja jer postoji uvjerenje da će se tek s njima riješiti najznačajnije bolesti čovjeka, usporiti starost, te povećati psihičke i fizičke mogućnosti čovjeka.

3. MINIJATURNI PASIVNI ROBOTI ZA ENDOSKOPIJU

3. *MINIATURE PASSIVE ROBOTS FOR ENDOSCOPY*

Centiroboti oblika kapsule veličina 2 – 3 cm koriste se već duže vrijeme u dijagnostici probavnog trakta. Gutanjem se unose u tijelo i većina ih se pasivno kreće peristaltikom kroz probavni trakt i snimaju njegove stijenke. Pomoću dobivenih slika može se dijagnosticirati: krvarenja, čir i tumori u ranim fazama što povećava šanse za izlječenje. Danas se u medicinskoj praksi za te slučajeve koriste razne dijagnostičke tehnologije kao što su angiografija, ultrazvuk, X-radiografija (uključujući CT) i scintigrafija. [3]

Neke robotske endoskopske kapsule (WCE – Wireless Capsule Endoscopy) imaju i mala ticala (hvataljke, noge) ili peraje za usmjereno kretanje. Dosadašnjim pretragama kolonoskopijom i ezofagogastroduodenoskopijom (EGD) dijagnosticiraju se promjene u dijelu probavnog trakta, ali tim metodama nedostupno je tanko crijevo. Endoskopske kapsule mogu ispitati cjelokupni probavni trakt uključivo i tanko crijevo. Osim toga postojeći endoskopski postupci su neugodni za pacijente, a kod kolonoskopije uključuju i mogući rizik perforacije crijeva. [3]

Na tržištu su dostupne razne vrste tih kapsula. Imaju biokompatibilno kućište, elektronički sklop i mehanizme za snimanje i prijenos slika, senzore za mjerenje temperature i pH vrijednosti. Neke mogu isporučiti lijekove na točno određeno mjesto.

Tablica 1. Pregled dijela endoskopskih kapsula (modificirana tablica iz lit [6])**Table 1.** Overview of the part of endoscopic capsules (modified table from literature [6])

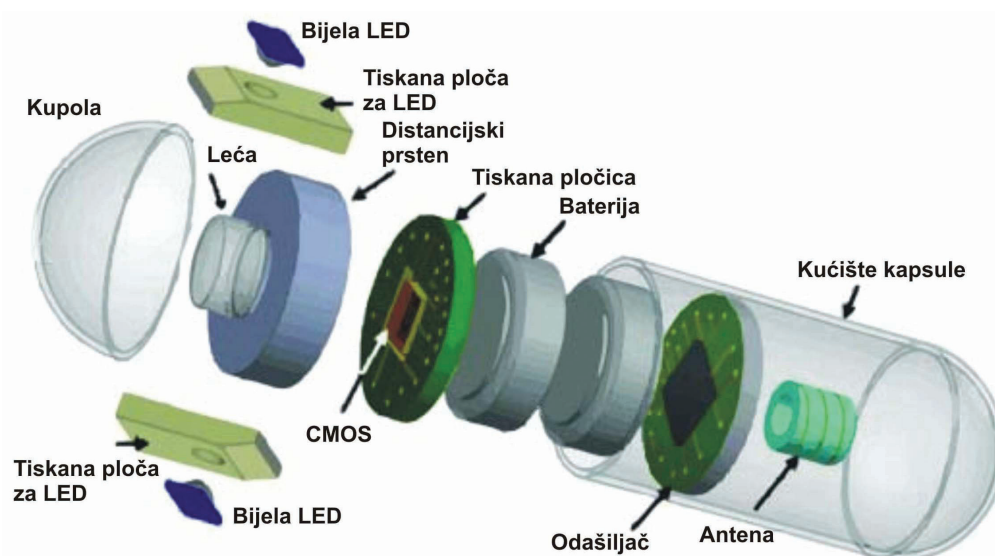
Tvrtka	Model- posebna namjena	Dimenzije [mm]	Rezolucija slike [piksel]	Kut gledanja [°]	Trajanje [h]	Broj slika [f/s]	Prikaz slike	Odobre-no
Given Imaging	PillCam SB, slika 3a)	26 × 11	256 × 256	140	6–8	2	Offline	FDA, 2001
Company Yokneamu	PillCam ESO 2 za jednjak, slika 3b)	26 × 11	256 × 256	169	0,3	18	Offline	FDA, 2007
Chongqing Jingshan	OMOM Jinshan, slika 3c)	27.9 × 13	640 × 480	140	7–9	2	Real time	CE, 2007
Olympus Optical Company	EndoCapsule Olympus, slika 3d)	26 × 11	1920 × 1080	145	8–12	2	Real time	FDA, 2007
Laboratorij RF System	Sayaka RF system Lab. slika 3e)	23 × 9	410000	360	WPT	30	Offline	2005

*WPT - bežično napajanje energijom

Još uvijek nije kvalitetno riješeno napajanje električnom energijom, kontrola nad oslobađanjem lijeka, veličina prostora za skladištenje lijeka u kapsuli, nedovoljna sigurnost i još uvijek nepouzdan mehanizam za aktivno kretanje i zaustavljanje na točno određenom mjestu. [4]

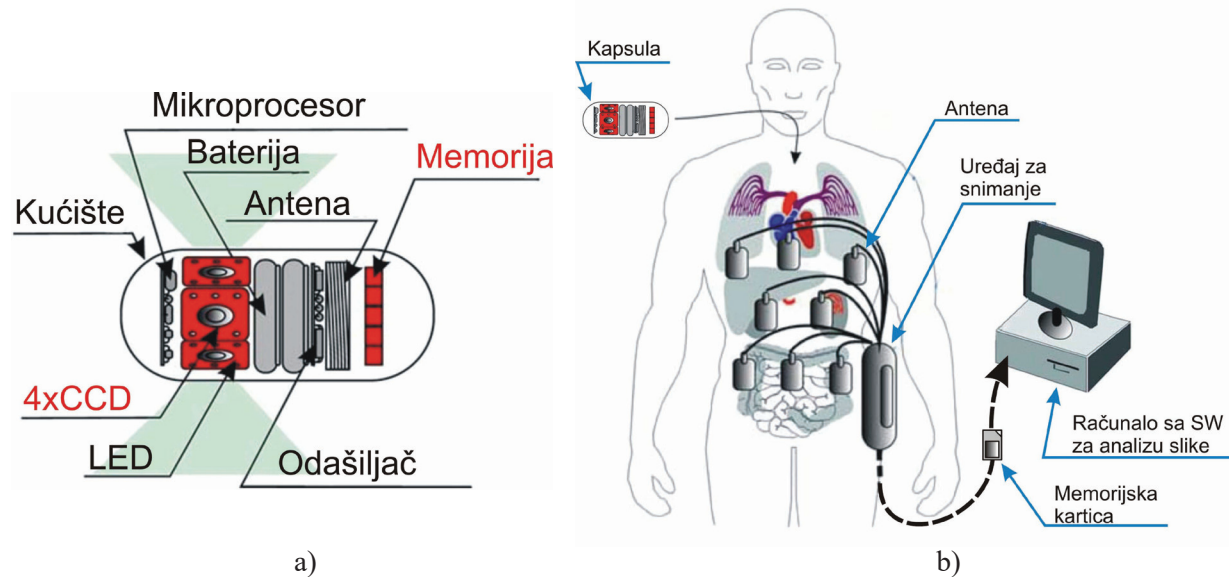
Primijenjeni elementi u endoskopskim kapsulama su različiti jer proizlaze iz koncepcije svakog proizvođača, a danas ih je veliki broj. Za opis dijelova uobičajene kapsule poslužiti će jedna od prvih endoskopskih kapsula u primjeni.

To je kapsula WCE M2A tvrtke Given Imaging Company Yokneamu, iz Izraela. Dimenzije su joj promjer 11 mm i duljina 26 mm. Za uporabu u kliničkoj praksi dobila je 2001. odobrenje od FDA (Food and Drug Administration). Ova endoskopska kapsula ima dijelove: prozirnu kupolu, objektiv s kratkim fokusom (leća), CMOS senzor slike, RF – radio frekvencijski odašiljač, MCU (mikroupravljačku jedinicu) – odašiljač, LED rasvjetu, bateriju i antenu, slika 1. [3, 4] S tom endoskopskom kapsulom moguće je snimanje cijelog gastrointestinalnog (GI) trakta i obaviti dijagnozu.



Slika 1 Dijelovi robotske endoskopske kapsule WCE M2A [4]

Figure 1 Parts of robotic endoscopic capsule WCE M2A [4]



Slika 2 a) Kapsula CapsoCam SV-1, b) Osnovni set za korištenje endoskopske kapsule, s opremom [5]

Figure 2 a) CapsoCam SV-1 capsule, b) Basic set for the use of an endoscopic capsule, with equipment [5]

Kako je vidljivo iz podataka prikazanih u Tablica 1 razvoj endoskopskih kapsula usmjeren je prema kvaliteti slike, području snimanja (kut snimanja), brzini prijenosa slika u sekundi, kao i mogućnosti pohranjivanja podataka na memorijsku kartici. Neke od kapsula su projektirane i opremljene senzorima za snimanje samo pojedinih segmenata probavnog trakta.

One namijenjene za bebe i starije pacijente koji imaju uski gastrointestinalni trakt, dimenzionalno su još smanjene poput endoskopske kapsule NORIKA Jr. Njene dimenzije su 15 x 5,8 mm, što je za 27% manje od originalne verzije. [Hanlon M., 2004]

Endoskopske kapsule se već primjenjuju u klinikama za dijagnozu bolesti probavnog trakta. Za sada najveća primjena je u SAD i Kanadi ali sve je veća i u Indiji i Kini. Kapsule su jednokratne i ne smiju se ponovno koristiti.

4. SAMOHODNE ROBOTSKE ENDOSKOPSKE KAPSULE

4. SELF-DRIVEN ROBOTIC ENDOSCOPIC CAPSULES

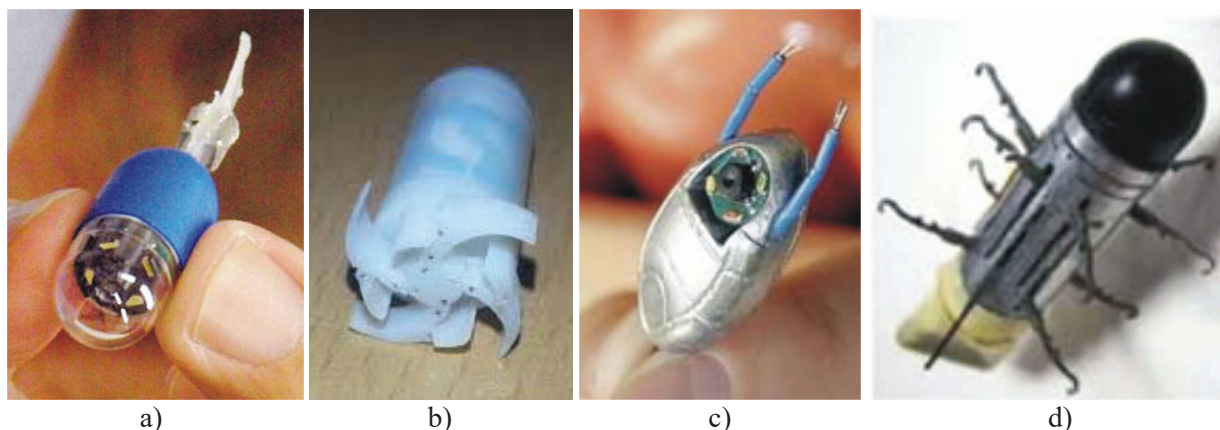
Naziv „samohodni“ se odnosi na različite načine upravljanog kretanja kapsule u probavnom sustavu s dodatnim elementima za kretanje. Ostvaruju se djelovanjem vanjskim magnetom, pokretnim perajama, nožicama, izdancima, lopaticama, propelerima i gusjenicama. Samohodni robot kapsula može ići naprijed, natrag ili stajati na mjestu, prema nalogu liječnika. Istraživači su u posljednjih 20 godina razvili nekoliko uspješnih prototipova, slika 4a,b. [3]

Da bi se moglo utjecati na kretanja kapsula vanjskim elektromagnetskim poljem unutar kapsule nalaze se zavojnice elektromagneta u tri osi. To omogućuje da kapsula može izvoditi gotovo svako kretanje (naprijed/natrag, lijevo/desno, gore/dolje, rotiranje).



Slika 3 Pregled robotskih endoskopskih kapsula na tržištu (naziv kapsula i njihovi podaci dani su u tablici 1)

Figure 3 Overview of robotic endoscopic capsules on the market (capsules' names and their data are given in Table 1)



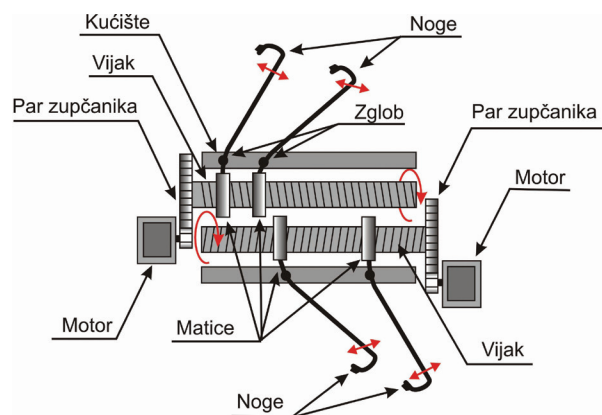
Slika 4 Robotske samohodne endoskopske kapsule i s izdancima, a) Kapsula Mermaid (sirena), Osaka Medical College Hospital, b) Endoskopska kapsula s propelerom, c) Ritsumeikan Univerzitet u Japanu, d) Valdastr i sur.

Figure 4 Robotic self-driven endoscopic capsules and with shoots, a) Mermaid capsule, Osaka Medical College Hospital, b) Endoscopic propeller capsule, c) Ritsumeikan University of Japan, d) Valdastr et al.

Vanjski 3D elektromagnet (snage 300 mW, radne frekvencije 125 kHz i veličine $10 \times 10 \times 10$ mm), jedan je od načina upravljanja, a drugi način je s vanjskim stacionarnim elektromagnetskim poljem. [5]

Osmišljeni su raznoliki mehanizmi i izdanci za kretanje, zaustavljanje i hvatanje, slika 4. Jedna od prvih kapsula imala je male hvataljke ili pincete za „opću kirurgiju“ kako ju je opisao prof. Makoto Hashizume. Kapsula veličine 2 cm i promjera 1 cm, opremljena je CCD kamerom. Upravlja se izvana te može uklanjati manje tumorske izrasline u želucu, tankom i debelom crijevu.

Upravljanja kretanjem kapsula tehnički je zahtjevan proces. Postoje, kako je prikazano, više različitih rješenja.

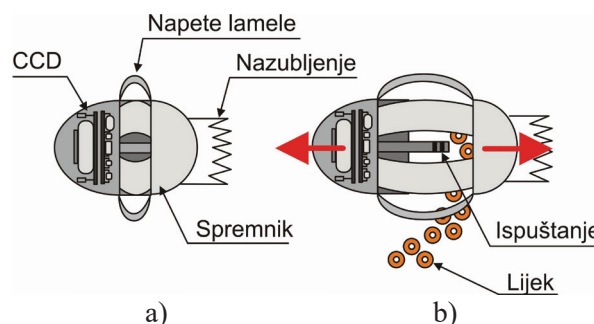


Slika 5 Blok shema samohodne kapsule s dva para nogu [5]

Figure 5 Block diagram of a self-driven capsule with two pairs of legs [5]

Jedno od njih je mehanizam s nogama (izdancima) kojih može biti 4, 6 ili 8. Brzina kretanja kapsule iznosi oko 0,5 cm/min u oba smjera. Blok shema na slici 5 prikazuje idejno rješenje s dva nezavisna para nogu pokretana s motorom, zupčanikom te vijkom s dvije matice. [5]

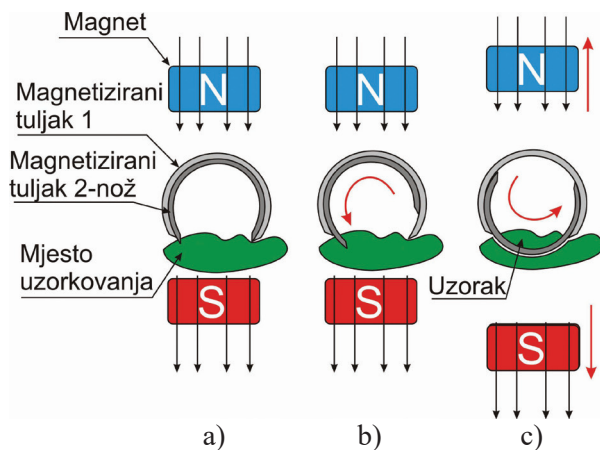
Razrađena su razna tehnička rješenja za ispuštanje ili ubrizgavanje lijeka na oboljelo mjesto. Jedno od rješenja su lamele veličine $1 \times 2 \times 1$ mm od legure koja pamti oblik (SMA). One su u napetom položaju i u trenutku kada dodirnu stjenku crijeva s povišenom temperaturom, vraćaju se u „zapamćeni“ otpušteni oblik i dolazi do otvaranja spremnika, slika 6. Vanjskim magnetskim poljem se upravlja kapsulom, a učinkovitost točnog pozicioniranja mjesta za ispuštanje lijeka je oko 22%. [5]



Slika 6 Shematski prikaz kapsule za isporuku lijeka, a) Zatvoreni spremnik, b) Otvoreni spremnik – ispuštanje lijeka [5]

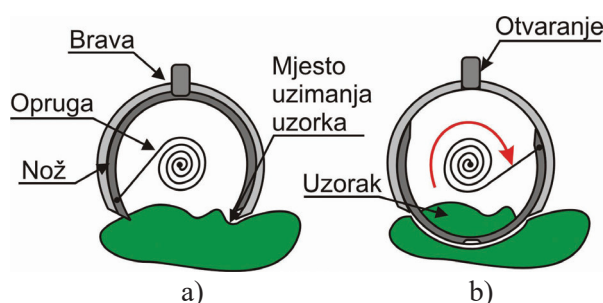
Figure 6 A schematic diagram of the drug delivery capsule, a) Closed container, b) Open container - drug discharge [5]

Za biopsiju osim igala za usisavanje biološkog materijala koriste se i rješenja sa zaokretnim nožem. Oni odrezuje uzorak i spremaju ga u hermetičku komoru, slike 7 i 8. Dva cilindrična magnetizirana tuljka (1 i 2) ili prstena predstavljaju noževe (pokretni i fiksni) koji se aktiviraju vanjskim elektromagnetskim poljem, slika 7. Moguće je također umjesto magneta koristiti silu u opruzi koja kada je otpuštena pomiče nož (tuljak) i izrezuje uzorak, pohranjujući ga u komoru, slika 8. [5] Uspješnost biopsije ovisi o: 1. pronalaženju mjesta biopsije, 2. približavanju noža (odnosno opreme za uzorkovanje) na točno mjesto, 3. biopsiji i 4. Zaštiti uzetog materijala od kontaminacije. Lokacija mjesta biopsije omogućena je kamerom na kapsuli. [5]



Slika 7 Vanjsko magnetsko polje aktivira nož, a) otvorena komora e, b) uzimanja uzorka, c) spremanje uzorka u komoru [5]

Figure 7 An external magnetic field activates the knife, a) open chamber e, b) sampling, c) storage sample in the chamber [5]



Slika 8 Uzimanje uzorka, a) otvorena komora, opruga je napregnuta, b) otpuštanje opruge, izrezivanje uzorka i pohranjuje u komoru. [5]

Figure 8 Sampling, a) open chamber, spring is tensioned, b) spring release, cutting sample and storage in the chamber. [5]

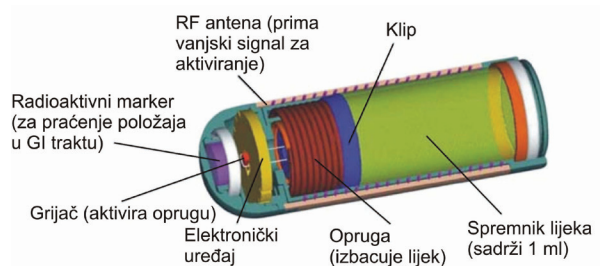
Zaustavljanje daljnjeg kretanja endoskopske kapsule, u cilju isporuke lijeka na određeno mjesto, ostvaruje se „sidrenom nogom“ (slika 9) [Woods i Constandinou]. Lijek je smješten u volumen od 200 mm³. Ugrađeni mehanizam omogućava i izvlačenje igle do 1,5 mm izvan tijela kapsule. [7]

Za isporuku lijeka koristi se kapsula Enterion tvrtke Phaeton Research iz Nottinghama, Velika Britanija. Dimenzije kapsule su 32 x 11 mm, a spremnik lijeka iznosi 1 ml. Lijek (prah, polukruti ili otopine) se istiskuje kroz promjer od 9 mm pritiskom opruge na klip dolaskom na oboljelo mjesto. Radioaktivni marker postavljen na vrhu kapsule omogućuje da se gama scintigrafijom očitava točan položaj kapsule, slika 10. [7]



Slika 9 Sidrena noga za stabilizaciju pozicioniranja kapsule [7]

Figure 9 Anchor leg for stabilizing capsule positioning [7]

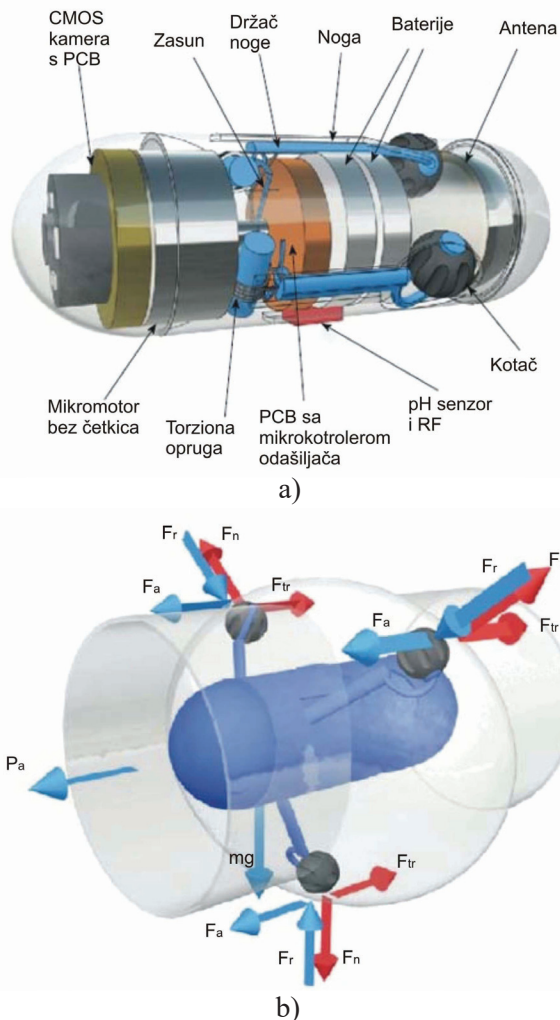


Slika 10 Kapsula Enterion za isporuku lijeka [7]

Figure 10 Enterion capsule for drug delivery [7]

Tehnički interesantno rješenje iz 2020. godine je OdoCaspula (sinteza riječi odmetar i capsule) koja je opremljena s tri minijaturne noge s kotačima, slika 11. Noge se mogu izvući iz kapsule posebnim mikro motorima.

Okretanjem kotača mjeri se pređeni put, te se može ustanoviti gdje se nalazi lezija u tankom crijevu. Ujedno omogućuje zaustavljanje daljnjeg kretanja te snimanje tog mjesta. [7]



Slika 11 OdoCapsula, a) Komponente, b) Simulacija kretanja nogu unutar crijeva [7]

Figure 11 OdoCapsule, a) Components, b) Simulation of leg movement inside the intestine [7]

5 ZAKLJUČAK

5. CONCLUSION

Bežične endoskopske kapsule (WCE) omogućuju neinvazivni način dijagnosticiranja cijelog GI trakta. U odnosu na klasične endoskopske metode imaju određene prednosti. Prije svega taj način je prihvatljiviji pacijentima jer je bezbolan i nema rizika. Može se pregledati cijeli probavni trakt uključivo i tanko crijevo. Pacijent nakon što je WCE izašla iz želudca može otići i bolnice, a snimke preuzima prsluk kojeg nosi.

Pohranjene snimke kasnije obrađuje liječnik. Iako je kapsula jednokratno upotrebljiva cijena nije pretjerano velika i kreće se od 100 do 300 USA dolara. Uz sve prednosti u ovoj fazi razvoja WCE postoje i određeni nedostaci. U usporedbi s klasičnim žičanim endoskopijama, imaju ograničeno radno vrijeme, malu brzinu snimanja i nižu razlučivost slike, što se stalno poboljšava. [3]

Kod novih generacija kapsula sve je bolja pokretljivost i usmjeravanje kretanja WCE. Za sve te nove ili poboljšane funkcije potrebno je mnogo više energije koju male baterije ne mogu podmiriti. Zato se sve više koristi bežični sustav za prijenos električne energije zasnovan je na elektromagnetskoj indukciji.

6. REFERENCE

6. REFERENCES

- [1.] Nikolić G.: Budućnost razvoja robota u području mikro i nano veličina, Zborniku radova 2. Znanstveno-stručnog savjetovanja KULTURNO NASLJEĐE UJEVIĆ, Krivodol, 2013., strana 193-220.
- [2.] Nikolić G.: Minijaturni roboti umedicini, Liječničke novine br. 190, lipanj 2020., str. 86-87
- [3.] Pan G., Wang L.: Swallowable Wireless Capsule Endoscopy: Progress and Technical Challenges, dostupno na <https://www.hindawi.com/journals/grp/2012/841691/>, objavljeno 27.12.2011.
- [4.] Mapara S.S., Patravale B.V.: Medical capsule robots: A renaissance for diagnostics, drug delivery and surgical treatment, dostupno na <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168365917307034>, pristup 30.3.2020.
- [5.] Koprowski R.: Overview of technical solutions and assessment of clinical usefulness of capsule endoscopy, Biomedical Engineering Online (Vol. 14, 2015, art. no. 111) dostupno na https://rebus.us.edu.pl/bitstream/20.500.12128/207/7/Koprowski_Overview_of_technical_solutions_and_assessment_of_clinical_usefulness_of_capsule_endoscopy1.pdf, objavljeno 2015.

- [6.] Basar M. R., Malek F., Juni M. K., Idris M. S., Saleh M. I.: Ingestible Wireless Capsule Technology: A Review of Development and Future Indication, dostupno na <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2012/807165/>, objavljeno 31.12. 2012.
- [7.] Koulaouzidis A., Kiakovidis D., Karargyris A., Rondonotti E.: Wireless endoscopy in 2020: Will it still be a capsule?, World Journal of Gastroenterology, 2015 May 7; 21(17): 5119–5130, dostupno na <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4419052/>

AUTOR · AUTHOR

• **Gojko Nikolić** - nepromjenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design Vol. 3, No. 2, 2015.

Korespondencija · Correspondence
gojko.nikolic@ttf.hr