

# Endoskop do diagnostyki jelita cienkiego

## – przegląd literatury i obecnie stosowanych metod diagnostycznych

Artykuł recenzowany

ŁUKASZ FRĄCCZAK,  
LESZEK  
PODSEDKOWSKI,  
AGNIESZKA  
KOBIEJSKA,  
PAWEŁ ŻAK,  
KATARZYNA KOTER,  
PIOTR WRÓBLEWSKI  
ADAM SAWICKI

Politechnika Łódzka,  
Instytut Obrabiarek i TBM

**Słowa kluczowe:**

diagnostyka jelit,  
jelito cienkie,  
endoskopia,  
kolonoskopia,  
enteroskopia

**Key words:**

diagnosis,  
small intestine,  
endoscopy,  
colonoscopy,  
enteroscopy

### Streszczenie

Obecnie lekarze mają utrudnione zadanie w leczeniu chorób środkowej części układu pokarmowego, tj. jelita cienkiego. Najczęstszym problemem jest zbyt późne wykrycie choroby, przez co całkowite wyleczenie staje się utrudnione lub wręcz niemożliwe. Lekarze cały czas namawiają ludzi do przeprowadzania badań profilaktycznych. Lecz nawet częste badania bez odpowiedniego sprzętu również nie przyniosą w pełni oczekiwanych rezultatów. Niniejszy artykuł zawiera przegląd obecnie stosowanych metod diagnostycznych jak i postępów w badaniach nowoczesnego sprzętu diagnostyczno-terapeutycznego. W podsumowaniu artykułu są przedstawione najważniejsze cechy jakie powinno posiadać idealne urządzenie przeznaczone do badań całego układu pokarmowego oraz koncepcja takiego urządzenia.

### Abstract

The treatment of disease of the small intestine is not easy. The main problem is often delay in diagnosis making full recovery hard or even impossible. People are regularly encouraged to undergo screening procedures of the colon yet, no easy screening can be performed on the small bowel. This paper is a review of currently used diagnostic methods and a description of advances in this field. In the summary the perfect diagnostic device to evaluate the whole digestive system is proposed.

### KOMENTARZ RECENZENTA...

Dr Sławomir Marecik (Chicago)

W powyższym artykule autorzy przeprowadzili przegląd eksperymentalnych jak i obecnie używanych metod w diagnostyce i leczeniu schorzeń jelita cienkiego, skupiając się na robotowym aspekcie tego zagadnienia. Ich konkluzja o możliwym wykorzystaniu pewnych właściwości pasożyta ludzkiego jest ciekawa i wymaga dalszych badań.

Duża część chorób układu pokarmowego jest powszechnie uznawana za choroby cywilizacyjne. Do najczęściej występujących można zaliczyć:

- choroby zapalne w tym: celiakia, choroba Leśniowskiego-Crohna,
- choroby nowotworowe (najczęściej spotykane): odmiany raka (gruczolaki), chłoniaki, nowotwory neuroendokrynne przewodu pokarmowego,
- uchyłki,
- choroby naczyniowe.

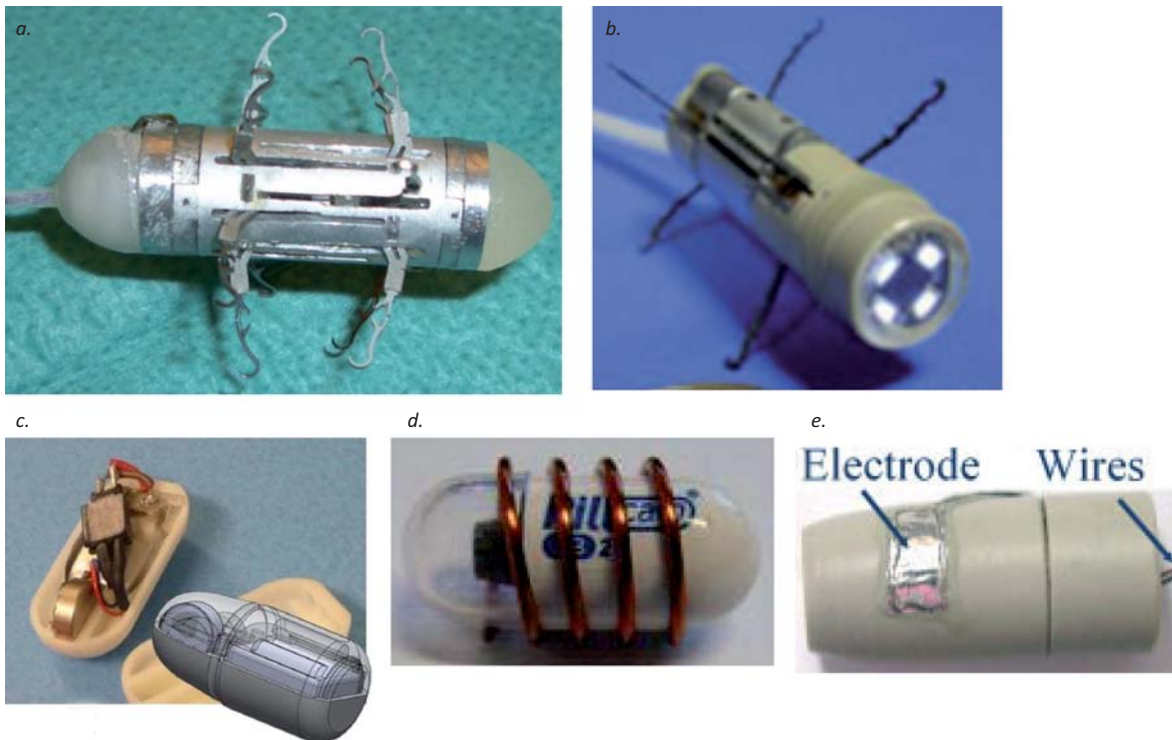
Do najbardziej niebezpiecznej grupy chorób należą choroby nowotworowe (około 30% przypadków powodujących zgony umiejscowione było w układzie pokarmowym). Najczęściej nowotwory można spotkać w okrężnicy, lecz coraz częściej wykrywane są również w jelicie cienkim. Kolejną pod względem niebezpieczeństwa jest choroba Leśniowskiego-Crohna, która obecnie jest uznana za nieuleczalną, choć możliwą do kontroli. Choroba ta jest m.in. związana z zapaleniem końcowego odcinka jelita cienkiego. Głównym problemem przy jej leczeniu jest późne wykrycie objawów. W chwili obecnej lekarze nie są pewni co do przyczyny powstania tej choroby. Zatem podejmowane jest jedynie leczenie objawów.

W większości przypadków ww. choroby są w pełni uleczalne, jednakże aby było to możliwe niezbędne jest ich jak najwcześniejsze wykrycie. Dlatego tak ważna jest prawidłowa i regularna diagnostyka układu pokarmowego. W chwili obecnej najczęstszym

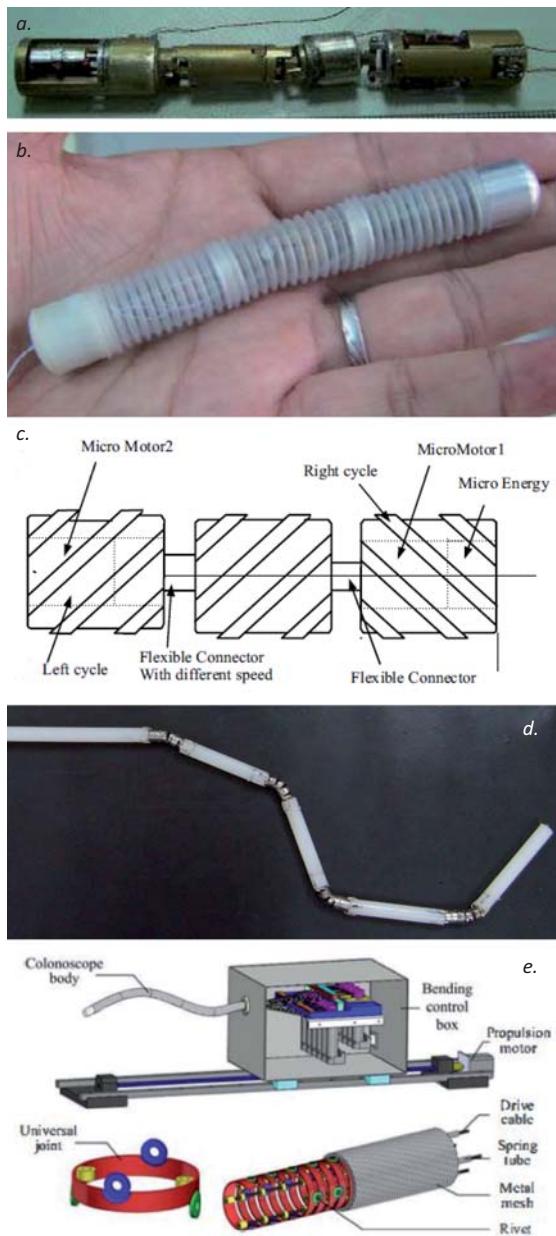
badaniem układu pokarmowego jest kolonoskopia i esofago-gastro-duodenoskopia.

Esofago-gastro-duodenoskopia jest badaniem polegającym na wprowadzeniu poprzez jamę ustną i przełyk endoskopu. W trakcie badań diagnostycznych lekarz może wprowadzić poprzez kanał roboczy narzędzie do obszaru, który należy zbadać. Dzięki temu możliwe jest leczenie punktowe (np. tamowanie krwawień, podanie punktowego leku, usuwanie złożeń, poszerzenia zwężeń przewodu pokarmowego, itp.) a także przeprowadzenie innych interwencji chirurgicznych (wycinanie próbek do badań histopatologicznych, usuwanie polipów, itp.). To uniwersalne narzędzie diagnostyczno-terapeutyczne posiada istotną wadę, którą jest jego zasięg, obecnie ograniczony do badania żołądka i dwunastnicy. Kolejną ważną metodą badawczą jest kolonoskopia. Polega ona na wprowadzeniu kolonoskopu do ciała pacjenta przez odbyt. Budowa kolonoskopu jest zbliżona do endoskopu górnego odcinka przewodu pokarmowego, tak więc ma takie same zalety. Zasięg tej metody diagnostyczno-terapeutycznej ogranicza się do okrężnicy i maksymalnie do 20 cm dolnego odcinka jelita cienkiego. Długość układu pokarmowego jest znacznie większa – samo jelito cienkie u dorosłego człowieka to około 5-6 m, a zatem większość jelita cienkiego nie może być rutynowo badana tą metodą.

Do badań, którymi można diagnozować cały układ pokarmowy można zaliczyć metody radiodiagno-



Rys. 1 Kapsułki diagnostyczne: a) 12-nożna [1], b) 8-nożna [2], c) wibracyjna [3], d) kręcąca się [4], e) elektrostymulująca [6]  
 Fig. 1 Endoscopic capsules: a) 12-legged, b) 8-legged, c) vibration [3], d) twisting [4], e) electrical stimulus [6]



Rys. 2. Roboty do diagnostyki jelit: a) Inch Worm [9], b) Squirm Robot [10], c) Micro Robot [11], d) colonovideoscope [12], e) colonoscop [13]

Fig. 2. Robots for intestine diagnosis: a) Inch Worm [9], b) Squirm Robot [10], c) Micro Robot [11], d) colonovideoscope [12], e) colonoscope [13]

styczne. Do najważniejszych można tutaj zaliczyć: tomografię komputerową (TK) – bardzo ważna przy analizie rozległości choroby Leśniowskiego-Crohna, ultrasonografia (USG) narządów jamy brzusznej oraz rentgenowskie badanie jedno lub dwukontrastowe. Badania te są często kosztochłonne tak jak TK. Z drugiej strony metody te nie umożliwiają wykrycia wszystkich chorób. Często niewielkie zmiany nowotworowe pozostają niewykryte, co skutkuje

przeświadczeniem, że pacjent jest zdrowy i przy kolejnym badaniu często jest za późno na całkowite wyleczenie.

Kolejną ważną metodą diagnostyczną jest endoskopia kapsułkowa. Polega ona na połknięciu przez pacjenta kapsułki, która przechodząc przez cały układ pokarmowy, robi zdjęcia. Kapsułki przemieszczają się zgodnie z ruchami perystaltycznymi jelit. To powoduje ich niejednostajny ruch i możliwość niezdiagnozowania niektórych fragmentów jelita cienkiego. Ten problem próbowano rozwiązać poprzez kontrolę położenia kapsułki. Dzięki temu powstały roboty kapsułki: 12-nożna [1], 8 nożna [2], kapsułka wibracyjna [3], kapsułka kręcąca się [4-5] czy też bazująca na ruchach wywoływanych elektrostymulacjami [6].

Wprowadzenie kontroli położenia kapsułki zwróciło uwagę na kolejny problem – ograniczoną pojemność baterii. Dlatego też w chwili obecnej żadna z tych kapsułek nie została wprowadzona do praktyki klinicznej. Brak kontroli położenia został częściowo skompensowany poprzez możliwość zmiany częstotliwości robienia zdjęć. Kontrolę nad częstotliwością sprawuje lekarz diagnozujący. Dużą wadą diagnostyki kapsułkowej jest brak możliwości przeprowadzenia interwencji chirurgicznej jak również pobrania próbek do badań histopatologicznych. Jednymi z najnowocześniejszych rozwiązań są kapsułki inteligentne [8]. W zależności od wyposażenia i przeznaczenia mogą podać punktowo lek, pobrać próbkę do badań histopatologicznych. Kwestią sporną pozostaje jak ją utrzymać w pozycji do podania leku, lub też jaka będzie jakość pobranej próbki, gdy kapsułka po kilku godzinach opuści ciało człowieka. Kolejnym mankamentem jest konieczność wprowadzenia kolejnych kapsułek w przypadku niepowodzenia przeprowadzonej interwencji lub konieczność pobrania wielu próbek. W artykule opracowanym przez G. Ciuti [7] szerzej zostały omówione aspekty związane z endoskopią kapsułką.

Oprócz endoskopii kapsułkowej naukowcy opracowali szereg różnych robotów służących do badania jelit metodą kolonoskopii. Jako przykład można tutaj wymienić: Inch Worm [9], Squirm Robot [10], Micro Robot [11], colonovideoscope [12] i colonoscope [13].

Zasada poruszania robota Inch Worm (Rys. 2a) polega na kilku fazach. W pierwszej robot zapiera się tylnym członem o jelita, a następnie wydłuża człon środkowy. W kolejnej fazie zapiera się członem początkowym i zwalnia człon końcowy. W fazie ostatniej podciąga człon końcowy, po czym rozpoczyna kolejny cykl ruchu – zapieranie członu tylnego. Metoda poruszania się w założeniu jest dość prosta, lecz zaprojektowanie urządzenia poruszającego się tą metodą jest trudne. Wadą tego robota jest zasi-

lanie elektryczne, które wymaga ciągłego podłączenia do źródła, w wyniku czego robot musi ciągnąć za sobą „pępowinę” złożoną z przewodów. Drugim istotnym czynnikiem przemawiającym na niekorzyść wykorzystania napędów elektrycznych jest wydzielane przez nie ciepło. Po dłuższym czasie pracy może dojść do przegrzania jelit, a w dalszej konsekwencji do ich uszkodzenia. Podobny sposób poruszania się jest wykorzystywany w robocie squirm [10] (Rys. 2b). Robot ten składa się z 3 członów połączonych przegubowo i wykorzystuje silikonowe rurki, które odkształcają się w trakcie oddalania bądź zbliżania się członów. Jego przeznaczeniem jest diagnostyka okrężnicy. Ostatnie badania były przeprowadzone *ex-vivo* na świeżo wypreparowanej świńskiej okrężnicy. Robot ten musi ciągnąć za sobą przewody dostarczające sprężone powietrze do siłowników, co zmniejsza jego zasięg.

Podobnie jak w przypadku kapsułek tak i w robotach wprowadzanych przez odbytnicę pojawiła się koncepcja ze sposobem poruszania się ruchem spiralnym. Takie podejście wykorzystane jest w robocie zbudowanym z trzech modułów połączonych elastycznymi cięgnami [11] (Rys. 2c). Moduły mają śrubowe nacięcia na zewnętrznej powierzchni i są napędzane niezależnymi silnikami. Robot ten jest przeznaczony do poruszania się w środowisku płynnym. Dzięki śrubowym nacięciom siły napędowe są wywoływane wzdłuż robota popychając go do przodu. Ważną zaletą jest brak kontaktu robota ze ściankami jelit. Efekt ten jest wywoływany poprzez powstanie dynamicznego filmu z cieczy pomiędzy powierzchnią spiralną a ściankami jelit. Do wad można zaliczyć konieczność zewnętrznego zasilania oraz możliwość kontaktu robota z jelitami w przypadku spadku prędkości obracania modułów. W literaturze można znaleźć informacje, że dotychczas przeprowadzono badania w szklanej rurze wypełnionej płynem. Zbliżoną zasadę działania wykorzystuje robot colonovideoscope [12]. Jest on zbudowany z elastycznego endoskopu, z umieszczoną spiralą na jego powierzchni bocznej (Rys. 2d – na rysunku przedstawiony bez zewnętrznej powłoki ze spiralą). Cały endoskop jest obracany poprzez silnik umieszczony na końcu – na zewnątrz ciała pacjenta. Obrót w jedną stronę powoduje, że urządzenie wciąga się do ciała pacjenta, natomiast obrót w drugą stronę powoduje jego wyjście. Pokonanie zakrętów w okrężnicy jest możliwe poprzez odpowiednio uformowany człon prowadzący. Do wad urządzenia można zaliczyć ograniczony zasięg oraz problemy z określeniem położenia miejsca chorobowo zmienionego (ze względu na elastyczność urządzenia i kątowne skrócenie głowni względem zewnętrznej części colonovideoscopu).

Zupełnie innym rozwiązaniem jest robot, który zawiera szereg sekcji sterowanych cięgnami [13] (Rys. 2e). Chirurg wprowadzając ten kolonoskop do ciała

pacjenta steruje ruchem jedynie pierwszej sekcji. Pozostałe sekcje kopiują położenie pierwszej. Robot ten teoretycznie nie powinien dotykać ścianek ciała pacjenta, gdyż jego położenie jest utrzymywane cięgnami. Z praktycznego punktu widzenia duże zakłócenia spowodowane cięgnami będą powodowały chwilowy kontakt. Mimo to, robot ten może być stosowany z powodzeniem u pacjentów, u których niemożliwe jest stosowanie tradycyjnych endoskopów.

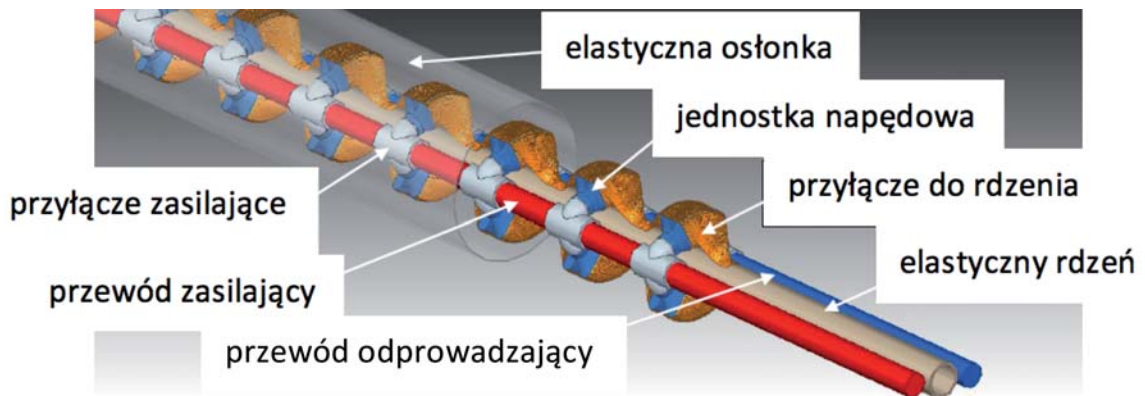
Ważnym badaniem może być endoskopia dwubalonowa [14]. Zasada działania polega na wprowadzeniu urządzenia do przewodu pokarmowego przez jamę ustną. Następnie jeden z balonów (stabilizujący) ustawia się w dwunastnicy i napełnia powietrzem. W dalszej kolejności wprowadza się balon fiksujący do jelita cienkiego najdalej jak to jest możliwe a następnie wypełnia się go powietrzem, utwierdzając tym samym w jelicie po czym spuszcza się powietrze z balonu stabilizującego i doprowadza się go do pierwszego balonu. W kolejnym kroku ponownie pompuje się balon stabilizujący i czynności się powtarza aż do osiągnięcia odpowiedniej głębokości penetracji. Badanie to jest bardzo trudne technicznie do wykonania, a ze względu na duży ból odbywa się pod znieczuleniem ogólnym. Głębokość penetracji rzadko sięga końca jelita cienkiego.

Z przedstawionej analizy wynika, że brak jest obecnie małoinwazyjnych i bezpiecznych narzędzi, które mogłyby dotrzeć w obszar całego jelita cienkiego i wykonywać w nim zabiegi, zarówno diagnostyczne (w tym pobieranie wycinków do badań histopatologicznych), jak i terapeutyczne (usuwanie polipów, tamowanie krwawień, miejscowe podawanie środków leczniczych, itp.).

Biorąc pod uwagę opinie lekarzy i powyżej przedstawioną analizę, otrzymano zestaw najważniejszych cech jakie powinien posiadać idealny endoskop:

- możliwość transmisji obrazu z przestrzeni znajdującej się przed robotem,
- możliwość przeprowadzenia interwencji w obserwowanym polu, w tym:
  - punktowe leczenie,
  - tamowanie krwawień,
  - pobranie próbek do badań histopatologicznych bez ryzyka uszkodzenia próbki,
  - wycinanie polipów,
  - usuwanie zatorów lub możliwość ich ominięcia.
- możliwość diagnostyki całego układu pokarmowego,
- nieprzekraczalną granicą średnicy urządzenia jest 15 mm, jednakże lekarze zalecają aby średnica nie przekraczała 13 mm.

Wykonanie takiego urządzenia wydaje się bardzo trudne. Odpowiedniego wzorca lokomocji można poszukać wśród organizmów żywych. Przykładem mogą być tutaj ruchy jakie wykonuje glista ludzka, która potrafi sprawnie przemieszczać się wewnątrz jelit. Jej



Rys. 3. Przykład robota przeznaczonego do diagnostyki układu pokarmowego  
Fig. 3. The example of the diagnostic robot

gabaryty wynoszą do 40 cm długości i 8 mm średnicy. Wzdłuż jej ciała znajdują się 4 pasma mięśni wzdłużnych, które wyginają ciało w płaszczyźnie grzbietowo-brzuszej. Dzięki temu ruchowi glista wykonuje ruchy sinusoidalne od jej przodu do końca.

Tak więc, jak wynika z anatomii glisty ludzkiej, do napędzania endoskopu wystarczy wprowadzić napęd poprzez generowanie fali poprzecznej wzdłuż urządzenia. Problemem podstawowym do rozwiązania jest stwierdzenie jakie siły napędzają glistę. Czy są to oddziaływania między ciałem glisty a treścią jelitową (zbliżone do pływania w wodzie), wykorzystanie ułożenia jelit i traktowanie ich jak podpór, czy też wykorzystanie zjawiska tłumienia polegającego na tym, że ugięcie jelita zużywa więcej energii niż działanie odwrotne, a powstała w ten sposób różnica sił może napędzać nicienia? W chwili obecnej nie sposób jednoznacznie odpowiedzieć na to pytanie, jednakże natura pokazuje kierunek, w jakim można podążać, by osiągnąć dalekosiężny cel: opracowanie urządzenia, które pomoże lekarzom w leczeniu chorób cywilizacyjnych związanych z układem pokarmowym.

W chwili obecnej najlepszym rozwiązaniem jest umieszczenie szeregu jednostek napędowych w jednej płaszczyźnie, które to będą wywoływały sinusoidalne odkształcenia rdzenia urządzenia. Naprzemienna praca mięśni w odpowiednich sekwencjach pozwoli na wygenerowanie ruchu sinusoidalnego wzdłuż całej długości urządzenia. Przykład takiego rozwiązania przedstawiony jest na rysunku 3.

Przed wprowadzeniem urządzenia do praktyki klinicznej niezbędne jest wykonanie szeregu badań doświadczalnych mających na celu opracowanie: jednostek napędowych, zaworów sterujących i układu sterowania. Niezbędne będzie również przeprowadzenie badań związanych z bezpieczeństwem pracy urządzenia, aby w pełni zrealizować podstawową zasadę „przede wszystkim nie zaszkodzić pacjentowi”.

## BIBLIOGRAFIA:

- [1] C. Quaglia, E. Buselli, R. J. Webster, III, P. Valdastrì, A. Menciasì, and P. Dario, "An endoscopic capsule robot: A meso-scale engineering case study," *J. Micro-mech. Microeng.*, vol. 19, no. 10, pp. 1–11, 2009
- [2] M. Quirini, A. Menciasì, S. Scapellato, P. Dario, F. Rieber, C.-N. Ho, S. Schostek, and M. Schurr, "Feasibility proof of a legged locomotion capsule for the GI tract," *Gastrointest. Endos.*, vol. 67, pp. 1153–1158, 2008.
- [3] R. Carta, M. Sfakiotakis, N. Pateromichelakis, J. Thone, D. P. Tsakiris, and R. Puers, "A multi-coil inductive powering system for an endoscopic capsule with vibratory actuation," *Sensors Actuators A: Physical*, 2011, to be published
- [4] Hao Zhou, Gursel Alici, Trung Duc Than, Weihua Li Modeling and Experimental Characterization of Propulsion of a Spiral-type Microrobot for Medical Use in Gastrointestinal Tract, 2012 IEEE.
- [5] Jie Lu, Hongzhou Li, Yongshun Zhang, Xiuguo Lv, Lai-fa Xiao "Start-up Characteristics of a Capsule Micro Robot Applied in Intestine" 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer August 19-22, 2011, Jilin, China
- [6] S. H. Woo, T. W. Kim, J. H. Lee, P. U. Kim, C. H. Won, and J. H. Cho, "Implemented edge shape of an electrical stimulus capsule," *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.*, vol. 5, pp. 59–65, 2009
- [7] G. Ciuti, Capsule Endoscopy: From Current Achievements to Open Challenges IEEE REVIEWS IN BIOMEDICAL ENGINEERING, VOL. 4, 2011
- [8] P. Valdastrì, C. Quaglia, E. Susilo, A. Menciasì, P. Dario, C.-N. Ho, G. Anhoek, and M. O. Schurr, "Wireless therapeutic endoscopic capsule: In vivo experiment," *Endoscopy*, vol. 40, pp. 979–982, 2008.
- [9] K. Wang, X. Jin, Member, IEEE Inchworm-like Micro Robot for Human Intestine Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics December 11-14, 2012, Guangzhou, China
- [10] Kundong Wang, Zhiwu Wang, Yilu Zhou, Guozheng Yan, "Squirm Robot with Full Bellow Skin for Colonoscopy", Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics December 14-18, 2010, Tianjin, China
- [11] Bin He, Ping Lu and Jiguang Yue, Yingsheng Zhou "Study on a Novel Kind of Micro Robot for Non-Invasive Surgery" Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21 - 23, 2006, Dalian, China
- [12] Liu Qingkai, Xie Tianyu, Study on a New Type of Rotated Insertion Colonovideoscope Robot, 2009 IEEE
- [13] H. Haiyan et al., "Two-Dimension Guidance Control and Simulation of a Colonoscopic Robot", 2011 The 6th International Forum on Strategic Technology
- [14] J. Milewski, G. Rydzewska, „Enteroscopia dwubalonowa – nowa technika diagnostyki i terapii endoskopowej chorób jelita cienkiego”, *Przegląd Gastroenterologiczny*, Vol 1 (1), pp. 54–59, 2006