

Zbigniew MOROŃ, Michał BASZYŃSKI¹, Marcin MASALSKI², Nina TEWEL

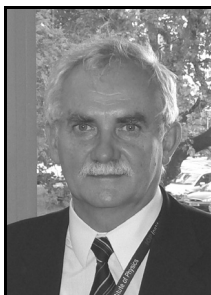
INSTYTUT INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ I POMIAROWEJ, WYDZIAŁ PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI, POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

¹ Obecnie: KORPORACYJNE CENTRUM BADAWCZE ABB, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków

² Także: KATEDRA I KLINIKA OTOLARYNGOLOGII, UNIwersYTET MEDYCZNY IM. PIASTÓW ŚLĄSKICH WE WROCŁAWIU, ul. Borowska 213, 50-556 Wrocław

Elektromagnetyczny system do nawigacji medycznej o poprawionych właściwościach metrologicznych i użytkowych**Dr hab. inż. Zbigniew MOROŃ**

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Tam również uzyskał stopień doktora oraz doktora habilitowanego. Obecnie jest profesorem nadzwyczajnym w Instytucie Inżynierii Biomedycznej i Pomiarowej Politechniki Wrocławskiej. Główne zainteresowania naukowe i dydaktyczne: elektronika medyczna, układy elektroniczne, czujniki i pomiary wielkości nieelektrycznych, pomiary przewodnictwa elektrycznego cieczy.



e-mail: zbigniew.moron@pwr.wroc.pl

Dr inż. Michał BASZYŃSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. W tejże uczelni uzyskał w 2006 r. stopień doktora i do 2012 r. pracował w Instytucie Inżynierii Biomedycznej i Pomiarowej. Zainteresowania naukowe: elektroniczne systemy pomiarowe i diagnostyczne, precyzyjne układy elektroniki analogowej, systemy cyfrowe, elektronika medyczna. Obecnie pracuje w Korporacyjnym Centrum badawczym ABB w Krakowie.



e-mail: michal.baszynski@pwr.wroc.pl

Dr inż., lek. med. Marcin MASALSKI

Mgr inż. informatyk, doktor nauk technicznych, lekarz specjalista otolaryngolog. Prace naukowe: informatyczne wspomaganie diagnostyki i leczenia schorzeń laryngologicznych, zdalna diagnostyka audiologiczna (e-audiologia.pl). Pracuje w Instytucie Inżynierii Biomedycznej i Pomiarowej Politechniki Wrocławskiej oraz w Katedrze i Klinice Otolaryngologii Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu. Specjalizuje się w endoskopowej chirurgii zatok przynosowych.



e-mail: marcin.masalski@pwr.wroc.pl

Mgr inż. Nina TEWEL

Autorka ukończyła w r. 2008 studia na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej, specjalność Inżynieria Biomedyczna. Obecnie jest doktorantką – ma otwarty przewodnik doktorski na Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki tejże uczelni, na temat analizy wpływu obiektów przewodzących i magnetycznych na dokładność działania systemu elektromagnetycznej nawigacji medycznej oraz możliwości ograniczenia tego wpływu.



e-mail: nina.tewel@pwr.wroc.pl

Streszczenie

Przedstawiono projekt, którego głównym celem jest opracowanie systemu do określania położenia i orientacji przestrzennej narzędzi medycznych z wykorzystaniem pola magnetycznego m.c., który w przyszłości mógłby być przygotowany do wdrożenia. Cele pośrednie: opracowanie modeli 3D pola magnetycznego, zbadanie niepożądanych wpływów przedmiotów deformujących rozkład pola magnetycznego oraz budowa stanowiska do badań doświadczalnych systemu. W stosunku do znanych rozwiązań system zawiera szereg usprawnień.

Słowa kluczowe: nawigacja medyczna, nawigacja elektromagnetyczna, system nawigacji.

Electromagnetic system for medical navigation of improved metrological and usable properties**Abstract**

Possibility of tracking position and spatial orientation of diagnostic and surgical instruments in relation to the patient's body is of fundamental importance in modern medicine [1, 2, 3]. It is made possible by medical navigation systems determining current position of instruments and marking it on images of the body structure obtained earlier by the methods of medical imaging. At present optical IR systems dominate in this area, however, electromagnetic navigation (EM) systems operating at low frequencies are getting increased importance. EM navigation is simpler and more convenient in use than the optical systems and also enables navigation of flexible instruments [4]. A project whose main aim is design of a medical navigation system (hardware and full software) using low frequency magnetic field, suitable for entering production in future, is presented in the paper [8]. The project contains also creation of 3D models of the magnetic field, study of the influences of metal and magnetic objects disturbing operation of the EM system and design of a setup for experimental investigations of the system. In comparison to similar known solutions the system has introduced essential improvements that enable: increase in the speed of operation, increase in the number of navigation channels and increase in the range of system operation – with preserving

or even increasing the system sensitivity and accuracy of position determining.

Keywords: medical navigation, electromagnetic navigation, navigation system.

1. Wprowadzenie

Możliwość śledzenia położenia i orientacji przestrzennej urządzeń diagnostycznych i narzędzi chirurgicznych (endoskopy, laparoskopy, itp.) względem struktury biologicznej ciała pacjenta ma zasadnicze znaczenie w nowoczesnej medycynie. Umożliwiają to systemy komputerowej nawigacji medycznej, określające aktualne położenie narzędzi i nanoszące je na obrazy struktury ciała uzyskane wcześniej za pomocą stosowanych w medycynie metod obrazowania [1, 2, 3] (CT, NMR itp.). Korzystanie w medycynie z nawigacji komputerowej daje wiele wymiernych korzyści:

- ułatwia właściwy dobór narzędzi i implantów oraz miejsca ich wprowadzenia,
- poprawia dokładność i bezpieczeństwo zabiegu oraz zmniejsza jego inwazyjność,
- umożliwia skrócenie czasu zabiegu oraz uniknięcie komplikacji,
- umożliwia skrócenie czasu powrotu do zdrowia, skrócenie pobytu w szpitalu i zmniejszenie kosztów leczenia, itp.

Obecnie dominują w tej dziedzinie systemy optyczne pracujące w zakresie podczerwieni (IR) – ze względu na dobrą dokładność i duży zasięg, zgromadzone doświadczenie i bogate oprogramowanie. Mają one jednak bardzo poważną wadę – wymagana jest bezpośrednia widoczność (linia bezpośredniego widzenia), co mocno utrudnia pracę personelowi i uniemożliwia bezpośrednią nawigację wewnątrz ciała oraz stosowanie narzędzi giętkich [4]. Coraz większego znaczenia nabiera nawigacja elektromagnetyczna (EM) realizowana w zakresie częstotliwości od kilku do kilkunastu kHz. Pole magnetyczne o takiej częstotliwości zmian ma zdolność do przenikania przez organizmy żywe, a jest dla nich nieszkodliwe. Umożliwia to badanie wnętrza ciała, umieszczanie czujnika na „końcu dalszym” narzędzia i nawigowanie narzędzi

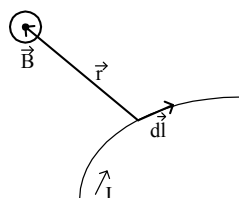
giętkich, a przede wszystkim ułatwia pracę personelu [5]. Dzięki temu można zmniejszyć liczbę popełnianych błędów oraz ograniczyć ich zasięg. Czujniki pola magnetycznego mogą być bardzo małe, uzyskiwane sygnały pomiarowe są łatwe do detekcji, istnieje możliwość budowy potrzebnych w medycynie systemów z wieloma czujnikami. Można w ten sposób określać podczas zabiegu rzeczywiste położenie narzędzi względem struktur anatomicznych niewidocznych z zewnątrz. Prawdopodobnie rozwój nawigacji medycznej będzie zmierzał w tym kierunku.

W artykule przedstawiono opracowanie systemu do określania położenia i orientacji przestrzennej w zastosowaniach medycznych z wykorzystaniem pola magnetycznego m. cz., wykonanie układu próbnego takiego systemu oraz jego badania. Ważnym wątkiem pracy jest zbadanie wpływów przedmiotów wykonanych z metali oraz zawierających elementy magnetyczne, zakłócających działanie systemu.

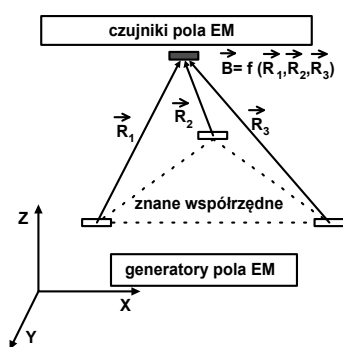
2. Elektromagnetyczny system nawigacji medycznej – zasada działania

Zgodnie z prawem Biota - Savarta wektor indukcji magnetycznej w danym punkcie przestrzeni, w której działa pole elektromagnetyczne, jest funkcją położenia tego punktu, według równania (1):

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \int \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \quad (1)$$



Rys. 1. Oznaczenia stosowane w prawie Biota – Savarta
Fig. 1. Terms used in the Biot – Savart's law



Rys. 2. Zasada określania położenia w systemie nawigacji EM
Fig. 2. Principle of determining position in the EM navigation system

Znając ten wektor można określić odległość punktu od źródła pola. Można to zrobić na kilka sposobów. W omawianej pracy zastosowano rozwiązanie z czujnikiem mierzącym moduł indukcji magnetycznej. Potrzebny jest wtedy zespół co najmniej trzech generatorów pola magnetycznego 3D o dokładnie znanym położeniu (rys. 2) [6, 7]. Trzeba wykonać 9 pomiarów, przy wzbudzeniu pola z 9 niezależnych źródeł, odpowiednio rozmieszczonych w przestrzeni. Wymagana jest przy tym pełna identyfikowalność sygnałów odbieranych przez czujnik z poszczególnych źródeł. Można w tym celu zastosować rozdział sygnałów w dziedzinie czasu lub częstotliwości (w tej pracy zastosowano to drugie).

Warunkiem koniecznym poprawnego określania położenia omawianą metodą jest dokładna znajomość rozkładu pola magnetycznego. Wszelkie uproszczenia przyjęte w opisie rozkładu pola oraz zaburzenia wywołane obecnością przedmiotów przewodzących i ferromagnetycznych deformujących to pole mogą być źródłami błędów określenia położenia.

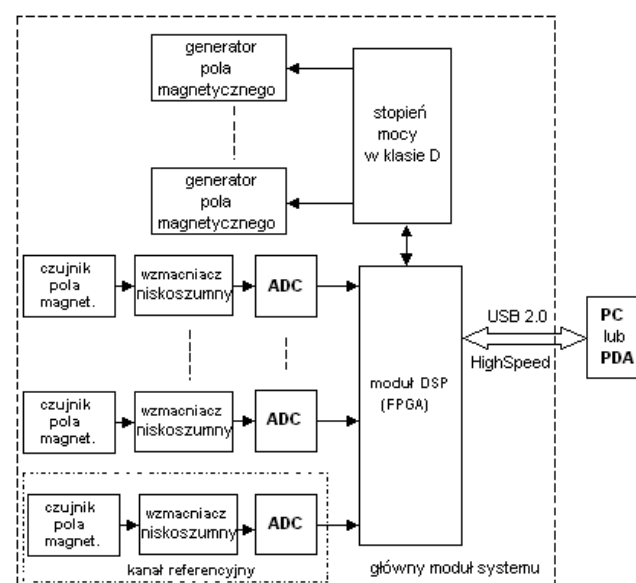
3. Projekt systemu nawigacji EM

Projekt systemu obejmuje komplet działań: od sformułowania założeń, przez modelowanie rozkładu 3D pola magnetycznego, badania skutków deformacji tego pola, opracowanie modułu elektronicznego, opracowanie oprogramowania (obliczeniowego, sterującego i aplikacyjnego), aż po badania systemu na specjalnie zaprojektowanym stanowisku pomiarowym [8, 9]. Cały system został zrealizowany w formie działającego modelu.

Wymagania stawiane systemowi nawigacji medycznej zależą od jego przewidywanych zastosowań. Po konsultacjach ze współpracującymi lekarzami przyjęto następujące założenia na projektowany system:

- bezpieczny w użytkowaniu, łatwy w obsłudze,
- zasięg: 0,5m-0,5m-0,5m – w laryngologii, 1m·1m·1m – w opisie ruchu i chirurgii tkanek miękkich,
- możliwość jednoczesnych pomiarów w wielu punktach (wiele nawigowanych jednocześnie czujników): od min. 2+3 do 24,
- dokładność pomiaru położenia bezwzględnego w przestrzeni: co najmniej ±3mm,
- dokładność pomiaru położenia względnego, między dwoma czujnikami lub zmiany położenia: nie gorsza niż ± 0,2mm,
- lokalizacja czujnika: najlepiej koniec dalszy narzędzia,
- częstość odczytu położenia: minimum 2-3 na sekundę.

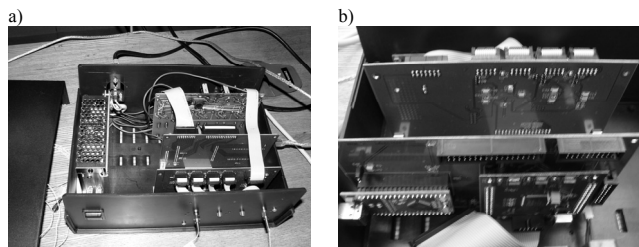
Część elektroniczna systemu obejmuje: generator pola magnetycznego, czujniki z torami wzmacniania i przetwarzania sygnałów, układy sterujące pracą systemu oraz komputer przenośny ze specjalistycznym oprogramowaniem – rys. 3. W wersji próbnej wykonano moduł elektroniczny współpracujący z 4 czujnikami – rys. 4.



Rys. 3. Schemat modułu elektronicznego systemu nawigacji EM
Fig. 3. Scheme of the electronic module of the EM navigation system

Generator pola magnetycznego 3D zawiera zespół trzech cewek ortogonalnych, nawiniętych na sześciennych rdzeniach z drewna, o boku 4cm (rys. 5), umieszczonych na planie trójkąta równobocznego i zasilanych prądem sinusoidalnie zmiennym o częstotliwościach z zakresu ok. 9 – 13 kHz (każda cewka jest zasilana prądem o innej częstotliwości, ponieważ zastosowano rozdział

kanałów w dziedzinie częstotliwości, co umożliwia zwiększenie szybkości działania systemu) i natężeniu ok. 4 A. Sygnały sterujące pracą generatora pola magnetycznego wytwarzane są w układzie FPGA. Po wzmocnieniu we wzmacniaczach pracujących w wysokosprawnej klasie D zasilają one cewki wytwarzające pole magnetyczne, które pracują w warunkach rezonansu. Opracowany został także oryginalny program do obsługi sprzętowej systemu.



Rys. 4. Główny moduł elektroniczny systemu nawigacji EM: widok z przodu (a) oraz widok wnętrza (b)

Fig. 4. The main electronic module of the EM navigation system: front view (a) and inside view (b)



Rys. 5. Cewka generacyjna do generacji pola magnetycznego 3D
Fig. 5. Coil for generation of 3D magnetic field

Zastosowano czujniki indukcji magnetycznej w postaci miniatury cewki solenoidalnej (rys. 6), nawiniętej na rdzeniu ferromagnetycznym.

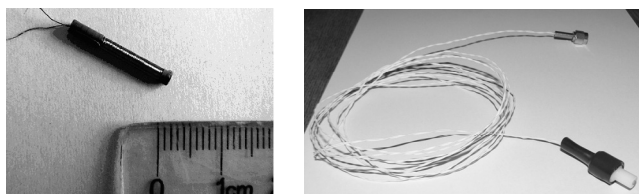


Fig. 6. Czujnik do pomiaru indukcji magnetycznej: bez osłony (a) oraz w osłonie do mocowania w płycie pomiarowej (b)

Fig. 6. Sensor for measurement of magnetic induction: without housing (a) and with housing used for fixing in the test plate (b)

Napięcie indukowane w czujnikach jest wzmocniane w niskoszumnych wzmacniaczach pomiarowych i przetwarzane na sygnał cyfrowy z użyciem 24-bitowych przetworników analogowo - cyfrowych. Pracą całego układu, tj. wytwarzaniem sygnałów do sterowania pola magnetycznego, sterowaniem pracą przetworników

analogowo-cyfrowych, odbieraniem danych z przetworników A/C i przekazywaniem ich za pośrednictwem szybkiego interfejsu USB 2.0 HighSpeed do dalszej obróbki w komputerze, steruje układ FPGA z rodziny Spartan firmy Xilinx.

Na podstawie sygnałów uzyskanych z czujnika obliczane jest w komputerze położenie czujnika w układzie współrzędnych powiązanych z zespołem generatorów. Przedtem trzeba dokonać kalibracji systemu dla znanych położenia czujnika. Został opracowany również program do wizualizacji aktualnego położenia czujnika (czujnik może być umieszczony na „dalszym” lub „bliższym” końcu narzędzia) względem wykonanych uprzednio obrazów TK dużej rozdzielczości. W tym celu przeprowadza się tzw. mapowanie obrazów TK, którego etapami są: rekonstrukcja przekrojów strzałkowych i czołowych, utworzenie modelu 3D obiektu głowy pacjenta, rejestracja obrysu obiektu rzeczywistego oraz dopasowanie modelu 3D do obrysu za pomocą algorytmu Levenberga - Marquarda – rys. 7.

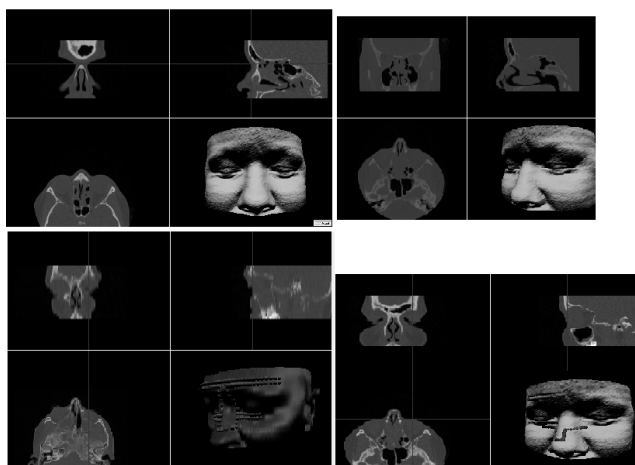


Fig. 7. Mapowanie obrazów TK: rekonstrukcja przekrojów, utworzenie modelu 3D, rejestracja obrysu rzeczywistego, dopasowanie modelu 3D do obrysu
Fig. 7. Mapping of TK images: reconstruction of cross-sections, creation of 3D model, registration of real contour, matching of model to the contour

W stosunku do znanych rozwiązań opracowany system nawigacji EM zawiera szereg usprawnień, w tym:

- pracę z rozdziałem sygnałów w dziedzinie częstotliwości, zamiast dotychczas stosowanego sekwencyjnego przełączania kanałów,
- generator pola magnetycznego 3D o dużej sprawności,
- zastosowanie dodatkowego kanału odniesienia,
- usprawnienie toru sygnałowego oraz cyfrowego przetwarzania sygnałów (zastosowanie algorytmu Goertzela),
- zastosowanie szybkiego łącza USB 2.0 HighSpeed do komunikacji z przenośnym komputerem,
- zastosowanie specjalnego, oryginalnego oprogramowania,
- wskazanie sposobów ograniczenia błędów powodowanych obecnością przedmiotów metalowych i magnetycznych,
- znaczące zmniejszenie wymiarów systemu i poboru mocy.

4. Wpływ przedmiotów zniekształcających pole magnetyczne na dokładność nawigacji

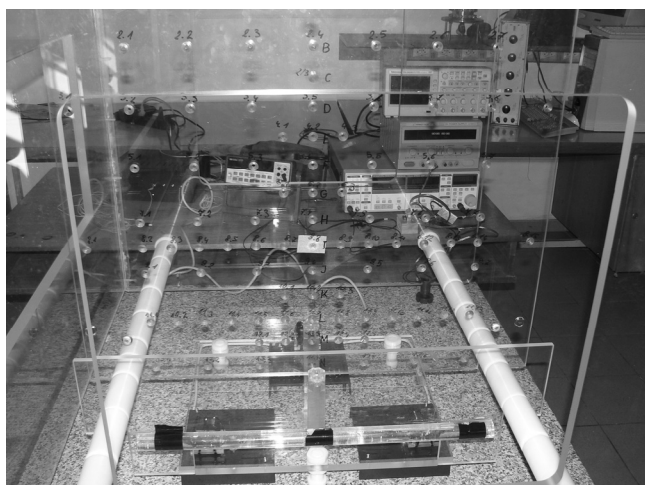
Poważną wadą systemów nawigacji elektromagnetycznej jest ich podatność na zaburzenia rozkładu pola magnetycznego powodowane obecnością przedmiotów przewodzących niemagnetycznych i ferromagnetyków. Obecność tego rodzaju obiektów na sali operacyjnej jest trudna do uniknięcia, co więcej, często występują one bezpośrednio w polu operacyjnym. W przypadku przewodników niemagnetycznych głównym źródłem zaburzeń są prądy wirujące powstające w wyniku zmian pola magnetycznego.

Z prawa indukcji Faradaya wynika, że ich gęstość jest tym większa, czym szybsze są zmiany pola. Z kolei materiały ferromagnetyczne deformują pole magnetyczne wskutek różnic w przenikalności magnetycznej pomiędzy obszarami powietrze – ferromagnetyk.

W badaniach wpływu przedmiotów zaburzających rozkład pola magnetycznego zastosowano modelowanie metodą elementów skończonych (FEM). Korzystano z programu COMSOL Multiphysics 4.2 z rozszerzeniem AC/DC. Zamodelowano m.in. wpływ obiektów deformujących rozkład pola magnetycznego, które mogą się znaleźć w przestrzeni roboczej systemu medycznej nawigacji EM przeznaczonego do zastosowań laryngologicznych (narzędzia i przybory ze stali nierdzewnej magnetycznej i niemagnetycznej). Na tej podstawie sformułowano zalecenia dla użytkowników systemu nawigacji EM. Analiza wpływu obiektów przewodzących i magnetycznych na dokładność działania systemu elektromagnetycznej nawigacji medycznej oraz możliwości ograniczenia tego wpływu zostały szczegółowo przedstawione w [10].

5. Badania doświadczalne, wstępne wyniki

Do badań doświadczalnych opracowanego systemu zaprojektowano i wykonano specjalne stanowisko pomiarowe (rys. 8). Zostało ono zbudowane bez użycia elementów metalowych i magnetycznych. Na drewnianej podporze umieszczona jest płyta granitowa, a na niej konstrukcja z tworzywa sztucznego, która ustala położenie płyty pomiarowej. Płyta, której położenie można zmieniać w sposób bardzo powtarzalny, ma nawiercone ok. 100 otworów umożliwiających umieszczenie czujnika indukcji magnetycznej w dokładnie znanym położeniu w przestrzeni roboczej systemu, o wymiarach około 1500mm x 1000mm x 1000mm. Współrzędne otworów pomiarowych wyznaczono z dokładnością nie gorszą niż 0,2 mm, co sprawdzono za pomocą systemu optycznego Optotrak firmy NDI. Zastosowano tworzywo sztuczne Poliacetal C (żywica zbrojona włóknem), które wyróżnia się dobrą wytrzymałością mechaniczną i małymi zmianami starzeniowymi, bardzo małą rozszerzalnością cieplną oraz nie absorbuje wilgoci. Omawiana konstrukcja zawiera również płytę do mocowania cewek wytwarzających pole magnetyczne oraz wspornik do mocowania czujnika odniesienia, z możliwością zmian jego położenia.



Rys. 8. Stanowisko pomiarowe do badań doświadczalnych systemu nawigacji EM
Fig. 8. The measurement setup for experimental investigations of the EM navigation system

Wykonano wstępne badania doświadczalne opracowanego systemu nawigacji EM, przygotowania do pełnych badań są na ukoń-

czeniu. Uzyskane wyniki odpowiadają w przybliżeniu przewidywaniom teoretycznym, aczkolwiek poprawy wymaga jeszcze procedura kalibracji systemu. W ten sposób można uwzględnić trudne do uniknięcia odstępstwa od teoretycznego modelu systemu, np. niedoskonałości generatorów pola magnetycznego. Dalsze badania wykonywane będą z wykorzystaniem pełnego systemu nawigacji EM wraz z jego oprogramowaniem. Przeprowadzono również wstępne próby z użyciem specjalistycznego oprogramowania aplikacyjnego, z wykorzystaniem fantomu głowy z drogami oddechowymi. W tym celu wykonano tomografię komputerową dużej rozdzielczości tegoż fantomu.

Autorzy dziękują dr inż. Ludomirowi Jankowskiemu oraz dr inż. Krzysztofowi Krysztoforskiemu z Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej za opracowanie mechanicznych części systemu nawigacji EM oraz stanowiska do jego badań doświadczalnych.

Praca powstała w Politechnice Wrocławskiej w ramach realizacji projektu badawczego N N518382637.

6. Literatura

- [1] Ewers R., Schicho K., Untd. G., Wanschitz F., Truppe M., Seemann R., Wagner A.: Basic research and 12 years of clinical experience in computerassisted navigation technology: a review, *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, vol. 34, s. 1 – 8, 2004.
- [2] Hautmann H., Schneider A., Pinkau T., Feussner H.: Electromagnetic catheter navigation during bronchoscopy: Validation of a novel method by conventional fluoroscopy, *Chest* 2005; 128: 382-387.
- [3] Levy E. B., Lindisch D., Glossop N., Banovac F., Cleary K.: Implementation of an Electromagnetic Tracking System for Accurate Intrahepatic Puncture Needle Guidance: Accuracy Results in an IN Vitro Model, *Academic Radiology*, Volume 14, Issue 3, March 2007, Pages 344-354.
- [4] Birkfellner W., Hummel J., Wilson E. and Cleary K.: Chapter 2, Tracking Devices, Image-Guided Interventions Technology and Applications, T. Petters, K. Cleary (ed), s. 23 – 44, 2008.
- [5] Lionberger D. R., Weise J., Ho D. M., Haddad J. L.: How does electromagnetic navigation stack up against infrared navigation in minimally invasive total knee arthroplasties?. *The Journal of Arthroplasty* Vol. 23 No. 4, s. 576 - 580. Elsevier. 2008.
- [6] Bladen J. S., A. P. Anderson, Surgical navigation, US Patent 8 200 314 B2, 2007.
- [7] Baszyński M.: Poprawa właściwości metrologicznych systemu do pomiaru położenia w przestrzeni trójwymiarowej z wykorzystaniem pola magnetycznego małej częstotliwości, Praca doktorska, Politechnika Wroclawska, Wroclaw 2006.
- [8] Baszyński M., Moroń Z., Tewel N.: Electromagnetic navigation in medicine – basic issues, advantages and shortcomings, prospects of improvement, IOP 2010, *Journal of Physics: Conference Series* 238 (2010) 012056, 2010.
- [9] Baszyński M., Moroń Z., Tewel N.: Possibilities of improvement of metrological and usable properties of an electromagnetic navigation system with AC excited field, *Proceedings of the XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth*, 9-14 September 2012 BEXCO, Busan, Republic of Korea / KRIS, KSPE.
- [10] Tewel N., Moroń Z., Analiza wpływu obiektów przewodzących i magnetycznych na dokładność działania systemu elektromagnetycznej nawigacji medycznej oraz możliwości ograniczenia tego wpływu, PAK, vol. 59, s. 473 – 476, 2013.

otrzymano / received: 14.10.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.01.2014

artykuł recenzowany / revised paper