

Michał BASZYŃSKI

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, ZAKŁAD INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ I POMIAROWEJ

Poprawa właściwości metrologicznych systemu przeznaczonych do pomiaru położenia z wykorzystaniem pola magnetycznego małej częstotliwości

dr inż. Michał BASZYŃSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Podczas studiów doktoranckich realizował projekt badawczy na University of Newcastle upon Tyne jako Guest Member of Staff. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 2006 roku na Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej. Obecnie zatrudniony na etacie asystenta w Zakładzie Inżynierii Biomedycznej i Pomiarowej Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej.

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

W artykule opisano modyfikacje wprowadzone do istniejącego systemu służącego do pomiaru położenia, wykorzystującego pole magnetyczne małej częstotliwości. Gruntowne zmiany objęły wszystkie elementy systemu, przede wszystkim zmieniony został algorytm wyznaczania położenia, przeprojektowano całkowicie tor analizy sygnału oraz zespół generatorów pola magnetycznego. Zastosowane modyfikacje zapewniły znaczną poprawę parametrów metrologicznych systemu, w szczególności zaś zwiększenie szybkości pracy, poprawę dokładności oraz poszerzenie zasięgu pomiarowego. Zredukowane zostały także wymiary fizyczne systemu oraz jego energochłonność.

Słowa kluczowe: elektronika medyczna, pomiar położenia z wykorzystaniem pola magnetycznego.

Improvement Of Metrological Properties Of The System For Measurement Of 3D Position Using Low Frequency Magnetic Field**Abstract**

This article describes modifications introduced to the principles and the implementation of a 3D imaging system using low frequency magnetic field. Modifications to the imaging algorithm, the construction of magnetic field generators and the whole signal-processing path have been applied. These modifications entail significant improvements to several metrological properties; particularly increased accuracy, speed and range. The dimensions and power consumption of the imaging system are also reduced.

Keywords: medical electronics, position measurement systems

1. Wstęp

Pomiar położenia w przestrzeni 3D stanowi dynamicznie rozwijający się dział metrologii i jego znaczenie ciągle wzrasta wraz z rozwojem techniki. Szczęólnego znaczenia pomiary położenia nabrały w nowoczesnej technice medycznej, gdzie podstawowym celem stało się wykonanie niezbędnej diagnostyki i zabiegów przy minimalnej ich inwazyjności, zgodnie ze starożytną łacińską dewizą – „*primum non nocere*”.

Jednym z jej przykładów jest zastępowanie tam, gdzie to jest możliwe zabiegów chirurgicznych metodami endoskopowymi, które oprócz znacznie mniejszego ryzyka dla pacjenta pozwalają na skrócenie czasu jego leczenia, co bezpośrednio przekłada się

na aspekty ekonomiczne. Warunkiem szybkiego i bezpiecznego przeprowadzania tego typu zabiegów jest znajomość w czasie rzeczywistym dokładnego położenia znajdujących się w ciele pacjenta narzędzi. Dotychczasowe techniki wykorzystywały najczęściej promieniowanie rentgenowskie, które jednakże jest szkodliwe zarówno dla pacjenta jak i personelu wykonującego zabieg. Stąd też powstają alternatywne techniki pomiaru położenia i obrazowania przestrzennego, będące znacznie bezpieczniejsze i prostsze w stosowaniu.

Jedną z najbardziej obiecujących metod wykorzystuje analizę wytworzonego wokół pacjenta pola magnetycznego, które uważane jest za bezpieczne. Dodatkową zaletą korzystania z pola magnetycznego jest to, że nie jest ono w sposób znaczący zakłócanie przez ciało człowieka. W chwili obecnej istnieje wiele rozwiązań systemów do pomiaru położenia wykorzystujących pole magnetyczne produkowanych między innymi przez firmy JBS, Olympus oraz Polhemus. Każdy z nich ma jednak pewne niedoskonałości wynikające z tego, że są to systemy optymalizowane pod kątem dość specyficznych zastosowań.

Z tego też powodu autor podjął próbę poprawienia parametrów metrologicznych istniejącego systemu obrazowania położenia kolonoskopu, opracowanego z inicjatywy prof. Duncana G. Bella przez firmę John Bladen Medical Systems [1]. Podstawowymi wadami tego systemu ograniczającymi jego zastosowanie w innych dziedzinach (np. stomatologii [2], diagnostyce choroby Parkinsona [3]) są niewielka szybkość pracy (10 pomiarów/s), mały zasięg pomiarowy (ok. 80 cm), ograniczona dokładność oraz niewielka liczba obsługiwanych jednocześnie czujników pomiarowych.

2. Podstawy pomiaru położenia

Metoda pomiaru położenia wykorzystująca pole magnetyczne małej częstotliwości polega na analizie indukowanego w czujniku położenia sygnału, którego źródłem jest sam system. Powodami, dla którego w tego typu systemach stosuje się wolnozmiennne (tzn. o częstotliwościach akustycznych) pole magnetyczne, są przede wszystkim łatwość zarówno generacji jak i detekcji takiego pola oraz niewrażliwość na zakłócenia.

Sygnał indukowany w czujniku położenia (czyli czujniku pola magnetycznego) proporcjonalny jest do stałej czujnika k_s oraz iloczynu skalarnego wektora indukcji magnetycznej B i wektora \hat{a}_s czułości czujnika:

$$V_s = k_s (\hat{B} \cdot \hat{a}_s) \quad (1)$$

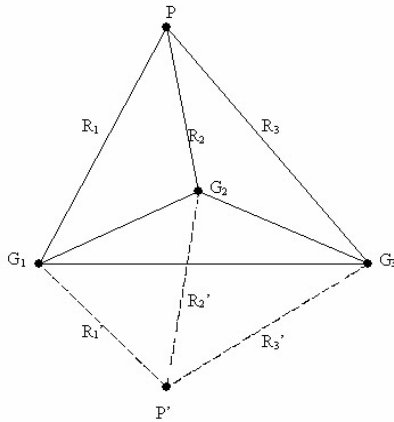
Oznacza to, że w celu jednoznacznego opisanego położenia takiego czujnika w przestrzeni trójwymiarowej konieczne jest użycie pięciu parametrów określających położenie – oprócz klasycznych współrzędnych X, Y, Z konieczne jest wprowadzenie kątów Θ, Φ opisujących orientację przestrzenną czujnika.

Klasyczna metoda analityczna wynikająca z równań opisujących pole magnetyczne wymaga rozwiązywania układu co najmniej pięciu niezależnych równań nieliniowych. Jego poprawne rozwiązanie nie jest zadaniem trywialnym i stosowane metody numeryczne często prowadzą do otrzymania wyników błędnych, wynikających głównie ze znajdowania minimów lokalnych, a nie globalnych funkcji.

Z tego też powodu w opisywanym systemie zastosowano metodę polegającą na wyznaczeniu położenia czujnika poprzez

pomiar odległości dzielącej go od punktów odniesienia, którymi są źródła pola magnetycznego G_i (Rys. 1.).

Co prawda w wyniku wynik otrzymuje się dwa położenia czujnika P i P' , jednakże błędny wynik P' można łatwo zidentyfikować i odrzucić.

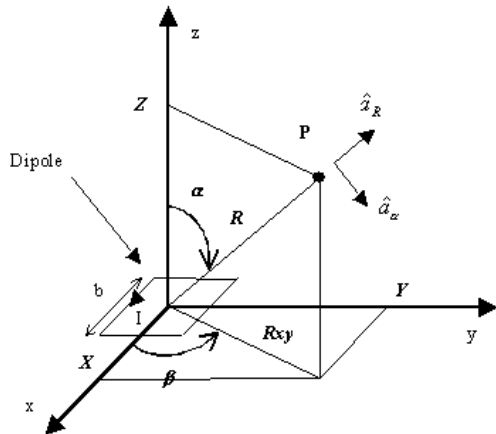


Rys. 1. Wyznaczanie położenia punktu P przy znanych odległościach od punktów odniesienia G
 Fig. 1. Point P 3D positional setting for known distances of the reference points G

Odległości R_i wyznaczone są na podstawie przekształconego, uproszczonego równania [4] (Rys. 2):

$$|B| = \frac{k_G}{R^3} \left(\sqrt{3 \cos^2 \alpha + 1} \right) \quad (2)$$

Równanie to jest słuszne jednakże jedynie wtedy, gdy $b \ll R$.



Rys. 2. Wyznaczanie indukcji magnetycznej w punkcie P według wzoru (2)
 Fig. 2. Calculation of the magnetic field induction according to equation (2)

W opisywanym systemie źródłami pola magnetycznego G_i są kwadratowe cewki o boku długości 40 mm.

3. Wyniki prac

W celu usunięcia niedoskonałości stwierdzonych w systemie JBS niezbędne okazało się wprowadzenie do nowego systemu szeregu modyfikacji. Najważniejsze z nich zostały przedstawione poniżej.

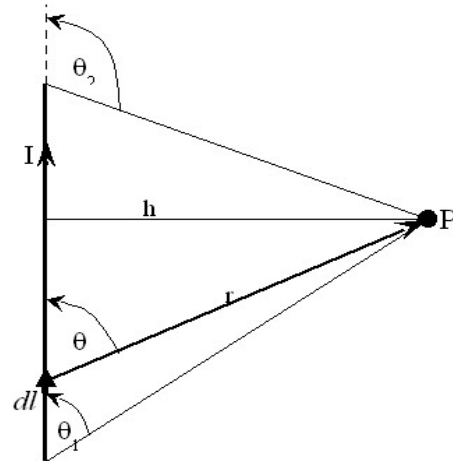
3.1. Poprawa dokładności

Podstawowym źródłem błędów pomiarowych systemu JBS jest zastosowanie w nim do modelowania rozkładu pola magnetycznego uproszczonego równania empirycznego (2).

Do sprawdzenia wpływu zastosowanego uproszczenia na dokładność systemu opracowany został przez autora model rozkładu pola magnetycznego bazujący na prawie Biota-Savarta. Zgodnie z nim indukcja magnetyczna B w punkcie P jest dana równaniem:

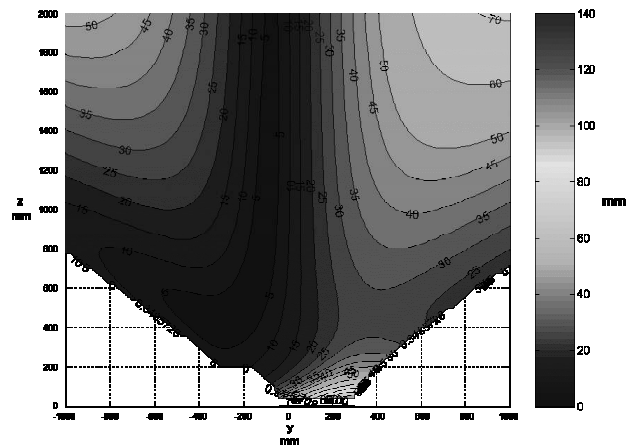
$$B = \frac{\mu I}{4\pi h} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu I}{4\pi h} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (3)$$

W celu porównania obu algorytmów, bazującego na równaniu uproszczonym oraz wykorzystującego prawo Biota-Savarta, wyznaczono różnicę wyników generowanych przez oba algorytmy dla obszaru 2m x 2m x 2m, w siatce o oczku 2cm.



Rys.3. Wyznaczanie wektora indukcji magnetycznej z prawa Biota-Savarta
 Fig. 3. Calculation of the magnetic field induction according to the Biot-Savart Law.

Różnice wyników generowanych przez oba algorytmy okazały się znaczne (Rys.4). Późniejsze pomiary wykonane z użyciem prototypu nowego systemu z wykorzystaniem nowo opracowany modelu matematycznego wykazały jego poprawność i pozwoliły na znaczną poprawę dokładności.



Rys.4. Błąd algorytmu bazującego na równaniu uproszczonym
 Fig. 4. Measurement errors for the systems based on simplified equation

Próba zastosowania w sposób bezpośredni modelu wykorzystującego prawo Biota-Savarta do algorytmu wyznaczania położenia spowodowała jednakże istotny spadek szybkości działania systemu i znaczną komplikację algorytmu wyznaczania położenia. Najlepszym kompromisem pomiędzy uzyskiwaną dokładnością, a szybkością pracy okazał się algorytm hybrydowy, w którym połączono oba rozwiązania – do wyników

z dotychczas stosowanego algorytmu dodawane są poprawki, które są wyliczane z prawa Biota-Savarta.

Dalszą poprawę dokładności systemu uzyskano poprzez wprowadzenie pętli sprzężenia zwrotnego. W celu jej realizacji jeden z czujników pola magnetycznego został umieszczony na stałe w punkcie o dokładnie znanych współrzędnych. Sygnał z niego służy do korekcji wyników otrzymywanych z innych czujników pola magnetycznego.

W celu poprawy dokładności systemu oraz jego rozdzielczości przy pomiarach w dużych odległościach czujników pola magnetycznego od jego źródła w porównaniu z systemem oryginalnym zastosowane zostały przetworniki analogowo-cyfrowe o większej rozdzielczości. Zamiast dotychczas używanych przetworników 16-bitowych firmy Cirrus Logic zastosowane zostały układy PCM1804 firmy Burr-Brown, posiadające długość słowa równą 24 bity. Ich efektywna rozdzielczość, wynikająca ze stosunku sygnał/szum, wynosi jednakże 18,5-bitów.

3.2. Zwiększenie zbyt niskiej szybkości pracy

Niewielka szybkość pracy systemu firmy John Bladen Medical Systems wynika przede wszystkim z powodu przyjętej w nim zasady dokonywania pomiarów. Przyjęto w nim bowiem metodę sekwencyjnego załączania cewek G_i , czyli metody z podziałem w dziedzinie czasu. Zwiększenie szybkości pracy możliwe było poprzez zastosowanie metody z podziałem w dziedzinie częstotliwości, czyli równoczesnej pracy wszystkich cewek na różnych częstotliwościach.

Wymagało to oczywiście zmodyfikowania modułu analizy sygnału z czujnika pomiarowego, gdyż stosowany wcześniej procesor DSP nie posiadał wystarczającej wydajności. Najbardziej naturalnym rozwiązaniem tego problemu wydawało się zastosowanie nowszego, wydajniejszego procesora DSP.

W opisywanym rozwiązaniu zdecydowano się jednakże na zbudowanie sprzętowego modułu DSP. Do jego realizacji wykorzystano programowany układ logiczny FPGA z rodziny Spartan firmy Xilinx (Rys.6).

Powodów dla którego zdecydowano się na zaimplementowanie modułu DSP z użyciem układu FPGA zamiast procesora sygnałowego DSP było kilka. Przede wszystkim zgodnie z wymaganiami zlecniodawcy w systemie miało istnieć kilkadziesiąt równoległych działających kanałów pomiarowych, każdy z nich miał zawierać jeden moduł DFT i obsługiwać jeden czujnik pola magnetycznego. Po zaprojektowaniu pojedynczego bloku realizującego DFT łatwiejsze jest ich zwielokrotnienie z zachowaniem odpowiednich zależności czasowych w układzie FPGA, niż w procesorze DSP. Zastosowanie układu FPGA uprościło także znacznie konstrukcję urządzenia - każdy szybki procesor DSP wymaga pewnych układów otoczenia i szybkich pamięci, FPGA zaś nie. Kolejną zaletą wykorzystania układu FPGA jest to, że można było w nim zaimplementować niezbędne kompletne układy logiczne oraz układy sterujące generatorami pola magnetycznego.

Tak więc do zadań układu FPGA należą:

- wytworzenie sygnałów sterujących generatorami pola magnetycznego (9 różnych częstotliwości),
- wytworzenie synchronicznych sygnałów zegarowych dla całego systemu,
- obsługa 16 stereofonicznych przetworników analogowo-cyfrowych (PCM1804 firmy Burr-Brown) z interfejsem I2S,
- analiza widmowa sygnałów z 32 niezależnych czujników pola magnetycznego, dla każdego z nich wykonywanych jest przynajmniej 50 analiz na sekundę,
- sterowanie diagnostycznym wyświetlaczem LCD (2x20 znaków) i niewielką klawiaturą.

W celu uproszczenia konstrukcji modułu DSP i jednoczesnego zwiększenia jego wydajności do analizy widmowej sygnałów zastosowano w nim zmodyfikowany algorytm DFT, wyznaczający wartości tylko niezbędnych do dalszych obliczeń położenia prążków widma, a nie jego całości.

W systemie testowym systemu pierwotnie zastosowany został uproszczony algorytm z definicji DFT (wyznaczane było tylko 9 prążków widma), potem zaś założono zaimplementowanie algorytmu Goertzela.

3.3. Zwiększenie zasięgu pomiarowego

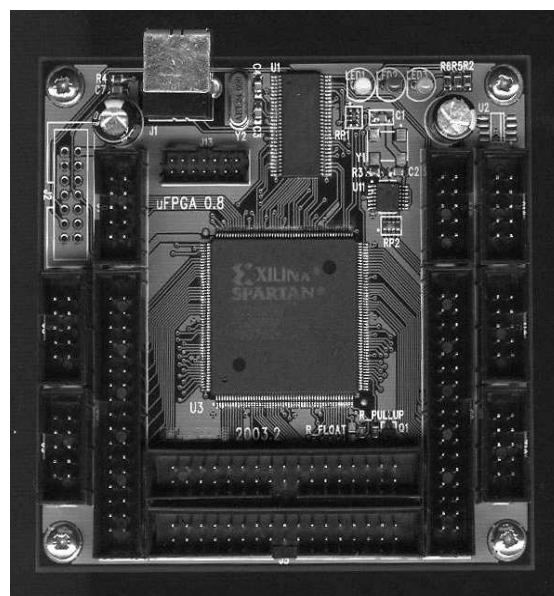
W celu zwiększenia zasięgu pomiarowego konieczne okazało się zaprojektowanie nowego modułu generatora pola magnetycznego, który oprócz zapewnienia odpowiednio silnego, ale jednocześnie mieszczącego się w obowiązujących prawnie limitach [5] pola magnetycznego, musi zapewnić pożądaną czystość widmową (praca jednoczesna wielu generatorów) oraz posiadać wysoką sprawność energetyczną.

Spośród wielu możliwych rozwiązań do dokładniejszej analizy wybrano układy generatora z bezpośrednią cyfrową syntezą (DDS) i liniowym wzmacniaczem mocy, generatora z szeregowym obwodem rezonansowym LC i stopniem mocy w klasie D oraz bezpośrednio synchronizowanego generatora LC mocy.

Z przebadanych rozwiązań najwięcej zalet w tym zastosowaniu wykazał bezpośrednio synchronizowany generator mocy LC. Został on zaprojektowany w klasycznym układzie Colpittsa z tranzystorem mocy MOSFET i dławikiem w obwodzie zasilania. Sygnał synchronizujący generator wprowadzany jest w nim bezpośrednio na bramkę tranzystora MOSFET.

Jako czujniki pola magnetycznego w systemie zastosowane zostały miniaturowe cewki z rdzeniem ferromagnetycznym. Z uwagi na łatwość ich uszkodzenia, zwłaszcza przez pacjentów w zaawansowanych stadiach choroby Parkinsona, sprawdzona została także możliwość użycia innych czujników pola magnetycznego. Pod uwagę były brane bardzo czułe hallotrony typu CYH-21 szwajcarskiej firmy Sentron oraz czujniki magnetorezystancyjne typu KMZ10A1 firmy Philips. Niestety pomimo zastosowania specjalnych hallotronów ze zintegrowanymi, wewnętrznymi koncentratorami pola magnetycznego, ich czułość okazała się niewystarczająca.

W przypadku czujników MR ich największą wadą jest mała stabilność parametrów, wymagająca stosowania specjalnych układów kompensacyjnych.



Rys. 6. Moduł DSP z układem FPGA
Fig. 6. Assembled DSP board based on FPGA.

3.4. Zwiększenie liczby czujników pomiarowych, zmniejszenie wymiarów i energochłonności systemu

Zwiększenie liczby czujników pomiarowych wiąże się przede wszystkim z koniecznością znacznego wzrostu mocy obliczeniowej modułu analizy częstotliwościowej. Również tutaj potwierdziła się słuszność rozwiązania ze sprzętowym modułem DSP zbudowanego na układzie FPGA, ponieważ zwiększanie liczby kanałów polega w tym przypadku na prostym dodawaniu do projektu układu nowego, równoległego potoku analizy częstotliwościowej dla każdego z dodanych czujników.

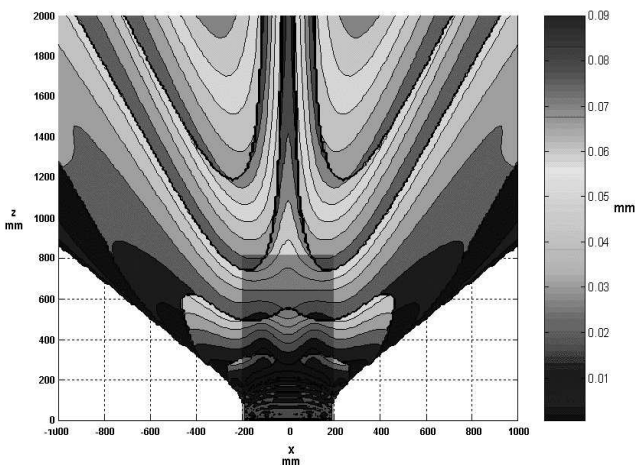
Transmisja danych do komputera PC realizującego obliczenia położenia oraz wizualizację wyników pomiarów odbywa się poprzez łącze USB 2.0.

Do obsługi interfejsu USB pracującego w trybie „Hi-Speed”, czyli z prędkością 480 Mbit/s, użyty został procesor CY7C68013 firmy Cypress.

Przeprowadzone zostały także wstępne prace dotyczące bezprzewodowego podłączenia czujników pomiarowych do systemu w celu wyeliminowania grubej wiązki przewodów łączącej system z czujnikami. Nie zostały jednakże one doprowadzone do końca z powodu braku zainteresowania zleceniodawcy tą tematyką oraz bardzo napiętego harmonogramu prac nad opisywanym systemem.

4. PODSUMOWANIE

Wykonane prace wykazały możliwość opracowania nowego systemu o znacznie poprawionych w stosunku do pierwowzoru parametrach metrologicznych.



Rys.7. Zasięg pomiarowy systemu oryginalnego (szary obszar) oraz zmodyfikowanego

Fig. 7. Measurement range of original JBS (shaded area) and modified system.

W porównaniu z wyrobami innych firm zmodyfikowany system pomiaru położenia posiada następujące zalety:

- pełna informacja o położeniu i orientacji czujnika (6 DOF). Inne systemy (np. Aurora firmy NDI lub bardzo podobny do niej system firmy Polhemus) przedstawiają natomiast standardowo informację o parametrach dla 5 DOF. Do wyznaczenia pozycji czujnika o 6 DOF konieczne jest w nich zastosowanie specjalnych czujników, które nie zawsze są dostępne (zgodnie z informacją firmy NDI takie czujniki dla systemu Aurora są jeszcze w trakcie opracowywania),
- ograniczona liczba czujników. Opisywany zmodyfikowany system zaprojektowany został do jednoczesnego określania położenia 31+1 niezależnych czujników (jeden z nich służy do poprawy dokładności systemu) i możliwe jest dalsze zwiększenie ich liczby. Systemy firm konkurencyjnych

umożliwiają użycie znacznie mniejszej liczby czujników. Przykładowo system Aurora pozwala na użycie zaledwie 8 czujników o 5 DOF, w przypadku czujników o 6 DOF ich liczba maleje do zaledwie 4 sztuk,

- Szybkość pracy. Zmodyfikowany system pozwala na niezależne wykonywanie 50 pomiarów położenia na sekundę dla każdego z 32 czujników, podczas gdy oryginalny system firmy JBS wykonuje tylko 10 pomiarów na sekundę dla każdego z 16 czujników. Systemy konkurencyjne są znacznie wolniejsze, ich szybkość pracy podawana jest bowiem zazwyczaj jako szybkość pracy modułu analizy sygnału, co w praktyce odpowiada przypadkowi używania tylko jednego czujnika. Użycie ich większej liczby niż jeden lub czujników o większej liczbie stopni swobody powoduje proporcjonalne zmniejszenie liczby wykonywanych na sekundę pomiarów dla każdego z użytych czujników,
- zasięg pomiarowy. W przypadku oryginalnego systemu firmy JBS wynosi on ok. 400x400x800 mm, w przypadku prototypu systemu zmodyfikowanego przekracza 800x800x1500 mm (Rys.7). Dla porównania zasięg systemu Aurora podawany jest jako 500x500x500 mm,
- dokładność wszystkich tych systemów maleje wraz ze wzrostem odległości czujnika od źródła pola magnetycznego i dla wszystkich systemów w porównywalnym obszarze pomiarowym (500x500x500 mm) jest bardzo zbliżona. Modyfikacje wprowadzone do systemu (dokładniejsze przetworniki analogowo-cyfrowe) oraz algorytmu wyznaczania położenia (poprawki wyznaczone z prawa Biota-Savarta oraz czujnika referencyjnego) pozwoliły na zachowanie dobrej dokładności oraz rozdzielczości systemu także dla dużych odległości czujników od źródła pola magnetycznego.

Prace nad opisywanym systemem nie zostały jeszcze zakończone, wskazane jest między innymi dalsze dopracowanie algorytmu wyznaczania położenia w celu zwiększenia szybkości pracy i jego dokładności.

Pomimo tego, że wykonane dotychczas pomiary potwierdzają słuszność opracowanego modelu pola magnetycznego opartego na prawie Biota-Savarta, konieczne jest zbadanie rozkładu pola magnetycznego systemu w przypadkach niemożliwych do rozwiązania metodami analitycznymi. Dotyczy to w szczególności analizy wpływu niepożądanych przedmiotów metalowych w zasięgu systemu na dokładność pomiarów. W zasadzie jedyną metodą analizy tego problemu jest zastosowanie modelowania pola magnetycznego z zastosowaniem metody elementów skończonych.

Badania nad tym problemem będą przeprowadzane w najbliższym czasie we współpracy z City University w Londynie.

5. Literatura

- [1] Bladen J.S.: Imaging Medical Endoscopes in Three Dimensions Using Magnetic Field, A Thesis Presented in Candidature for the Degree of Doctor of Philosophy at The University of Sheffield. Department of Electronic and Electrical Engineering, September 1995.
- [2] Baszyński M., Allen C.R., Moroń Z., Heasman P.A.: 3D posture Measurements In Detal Applications. Proc. IEEE VIMS 2002, Mt. Aleyka Resort, AK, USA, 18-20 May 2002.
- [3] Yu S.: Quantitative Assesment for Parkinson's Disease and Analysis on Applications Applying 3D Electromagnetic Motion system, A Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical, Electronic and Computer Engineering. University of Newcastle 2003.
- [4] Zahn M. : Electromagnetic Field Theory. J. Wiley and Sons, 1979.
- [5] Dz. U. 2003, nr 192, poz. 1883: Załącznik do rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003r.

Artykuł recenzowany