

Edyta SACHA, Koło Naukowe Biomechaniki przy Katedrze Mechaniki Stosowanej,
Politechnika Śląska, Gliwice

METODY TRÓJWYMIAROWEJ ANALIZY RUCHU CZŁOWIEKA

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały główne techniki pomiarowe, stosowane w trójwymiarowej analizie ruchu człowieka, jako alternatywa dla systemów optoelektronicznych. Artykuł ma charakter poglądowy, przedstawia ogólną charakterystykę i zasadę działania metod badawczych.

1. WSTĘP

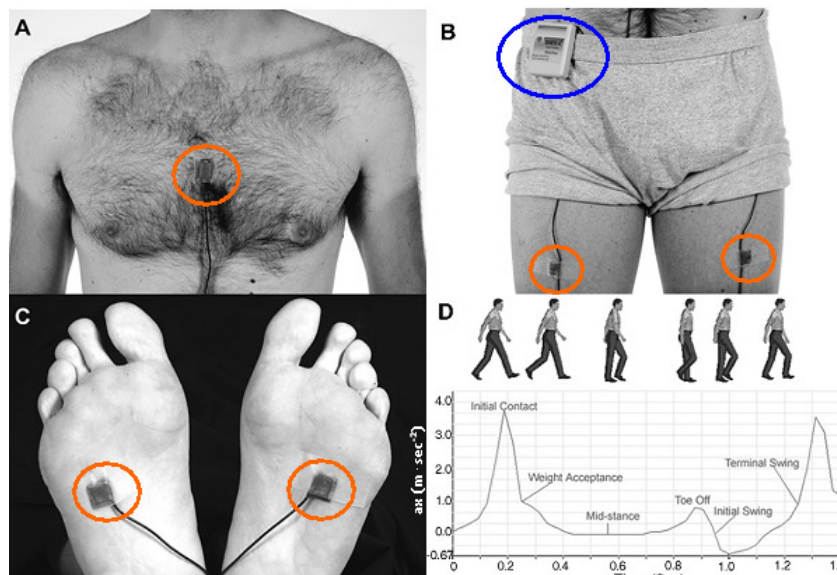
Analiza ruchu, uwzględniająca odzwierciedlenie przemieszczeń wybranych punktów oraz wyznaczanie na tej podstawie innych parametrów ruchu, w obecnych czasach staje się istotnym elementem z punktu widzenia biomechaniki. Początki badań sięgają XIX wieku, gdy po raz pierwszy wykorzystano sekwencję zdjęć, wykonaną za pomocą 12 aparatów fotograficznych, by na ich podstawie rozrysować trajektorię ruchu [8]. Obecnie w metodach optycznych wykorzystuje się kamery cyfrowe, o częstotliwości 60 ÷ 120 Hz, a trajektorię ruchu oraz pochodne jej wartości wyznaczane są za pomocą programów komputerowych. Należy jednak zauważyć, że w ostatnich latach pojawiły się inne techniki pomiaru parametrów ruchu. Celem niniejszego referatu jest przedstawienie nowoczesnych metod, odmiennych niż optyczne, służących do badań ruchu.

2. METODY BADAŃ RUCHU

Współczesne systemy optoelektroniczne, mimo że są świetnie przystosowane do wielu różnych badań i ciągle udoskonalane, nadal posiadają pewne ograniczenia, jak choćby pole widzenia kamer, błędy pomiarowe wynikające z nieprawidłowego naklejenia markerów, a także z ruchów skóry i tkanek miękkich. Wadą jest również kosztowny sprzęt i oprogramowanie oraz czasochłonność nie tyle samego badania, ile przygotowania stanowiska pomiarowego oraz osoby badanej [1], [6], [10]. Istotne jest więc, aby znaleźć odmienną metodę analizy ruchu, która mogłaby być tańsza, mniej czasochłonna, wygodniejsza, jeśli chodzi o samo przeprowadzanie badań, przy jednoczesnym zachowaniu dokładności wyników porównywalnej lub nawet lepszej, niż w systemach optoelektronicznych.

2.1. System IDEEA (*Intelligent Device for Energy Expenditure and Activity*)

System IDEEA składa się z pięciu dwuosioowych akcelerometrów, które umieszczone są na mostku, udach (w środku odległości pomiędzy rzepką a kolcem biodrowym przednim) oraz na podszewkach stóp badanej osoby.



Rys. 1. Czujniki przyśpieszeń naklejone na A) mostek, B) uda C) podszewy stóp.
D) Sygnał z czujników zarejestrowany w płaszczyźnie przednio-tylnej, z zaznaczonymi fazami chodu, zidentyfikowanymi przez program [3]

Ponadto wyposażony jest w potężny algorytm oparty na metodach sztucznej inteligencji oraz ciągle powiększającą się bazę danych, dzięki czemu może automatycznie rozpoznawać i obliczać takie wielkości, jak: czas trwania faz podporowej i wymachowej [ms], czas trwania kroku [ms], czas cyklu chodu [s], długość kroku, długość cyklu chodu [m], prędkość chodu [m/s], częstotliwość stawiania kroków [step/min] [12]. Badania prowadzone były w taki sposób, że celem porównania wyników oprócz pomiarów przyśpieszeń, wykonano jednocześnie pomiar z użyciem platformy dynamometrycznej firmy Kistler.

W rezultacie uzyskano wartości parametrów bardzo zbliżone do wyników otrzymanych z platformy Kistlera. Wystąpiły jednak pewne uchybienia, związane zarówno z możliwościami czujników jak i z czynnikami zewnętrznymi [3].

Podobne badania, ale z wykorzystaniem trójosiowych akcelerometrów, połączonych radiowo za pomocą sieci Bluetooth przeprowadzono w Griffith University (Queensland, Australia) Czujniki zamocowano na głowie, wyrostku kolczystym kręgu C7, wyrostku kręgu L3 oraz ok. 3 cm nad kostkami bocznymi obu kończyn. Wyniki sprawdzano przede wszystkim pod względem powtarzalności w kolejnych przejściach oraz po powtórnych badaniu. Rezultaty nie wykazały znaczących różnic [2].

Do podstawowych wad akcelerometrów należą zakłócenia, wynikające z ruchu tkanek miękkich oraz konieczność precyzyjnego określenia położenia czujnika, w celu odróżnienia składowej przyśpieszenia wynikającej z bezwładności członu od grawitacji [2], [3]. Charakteryzując ten system pomiarowy należy jeszcze zauważyć, że wielkościami wejściowymi, otrzymanymi z przeprowadzonych doświadczeń są przyśpieszenia. Zatem aby otrzymać prędkości i przemieszczenia należy scałkować numerycznie te dane, co niestety wiąże się z pewnymi trudnościami oraz może generować kolejne błędy.

Niewątpliwymi zaletami akcelerometrów są jednak niski koszt, małe rozmiary i waga urządzeń, łatwość użytkowania, zdolność zbierania danych dla wielu cykli chodu podczas jednego badania, możliwość stosowania w różnych warunkach, a więc może być badany nie tylko chód, ale też inne formy lokomocji, w warunkach najbardziej naturalnych [12].

2.2. System *Aurora*TM – elektromagnetyczny system śledzenia ruchu

Śledzenie ruchu wybranych punktów z użyciem urządzeń elektromagnetycznych odbywa się poprzez pomiar intensywności pola magnetycznego. System pomiarowy składa się z kontrolera, generatora pola magnetycznego oraz czujników [6]. Przykładem tego typu sprzętu jest urządzenie *Aurora*TM firmy NDI (Kanada). Badania nad wykorzystaniem takiego systemu do analizy chodu przeprowadzono w Griffith University. Otrzymano wyniki zbliżone do tych, uzyskanych za pośrednictwem metod optycznych [4].

System ETS jest stosunkowo niedrogi, ale występuje tu podstawowa wada, mianowicie system jest bardzo podatny na wpływ zakłóceń pola magnetycznego wywołany np. elementami metalowymi znajdującymi się w pobliżu pola badania. Są też pewne ograniczenia jeśli chodzi o długość rejestrowanych danych i czas badania. Jednakże po wykluczeniu tych czynników, system zapewnia uzyskanie wyników porównywalnych lub nawet lepszych niż systemy optoelektroniczne [4].

2.3. Zestaw *Xbus Kit* oraz system *Moven* firmy *Xsens*

Kolejną metodą uzyskania parametrów kinematycznych w czasie ruchu może być pomiar z użyciem czujników inercyjnych, które dodatkowo posiadają wbudowane akcelerometry, żyroskop oraz miernik pola magnetycznego, dzięki czemu możliwy jest pomiar we wszystkich płaszczyznach z określoną dokładnością. Tego typu urządzenia, przeznaczone m.in. do badań biomechanicznych opracowała firma *Xsens* (Holandia) (Rys. 2).



Rys. 2. Czujnik inercyjny MTx firmy Xsens oraz wizualizacja on-line odzwierciedlająca jego ruchy [13]

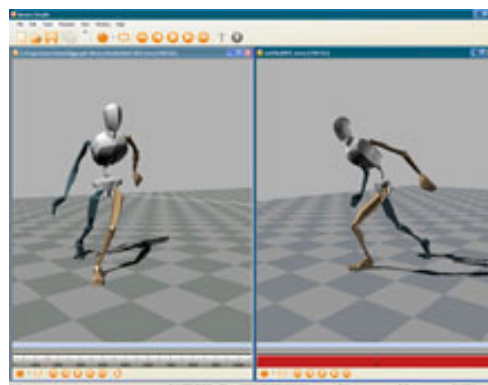


Rys. 3. Zestaw *Xbus Kit* firmy Xsense [13]

Firma proponuje zestaw *Xbus Kit* złożony z pięciu czujników połączonych z mikroprocesorem. Dzięki różnym konfiguracjom można za ich pośrednictwem analizować ruch zarówno dolnej jak i górnej części ciała. Czujniki z komputerem łączą się bezprzewodowo używając sieci Bluetooth [13].

Do zaawansowanych badań zaprojektowany został specjalny kombinezon „*Moven*” (Rys. 4), wykonany z elastycznego, przylegającego do ciała materiału. Posiada 16 czujników inercyjnych, śledzących ruch. Pomiar może odbywać się na dowolnej przestrzeni, bez ograniczeń, dane zapisywane są w czasie rzeczywistym. Wizualizację można oglądać na

bieżący w programie *Moven Studio*. Dane pobierane są z częstotliwością 60/100/120 Hz. Na wyjściu otrzymuje się położenie obiektu w przestrzeni, jak również opcjonalnie prędkości i przyspieszenia liniowe i kątowe obiektu [10]. W porównaniu z systemami optycznymi, niewątpliwą zaletą powyższego systemu jest krótki czas badania (brak konieczności naklejania markerów i wyszukiwania punktów anatomicznych) oraz możliwość rejestracji kilku cykli chodu jednocześnie. Ponadto ciekawym rozwiązaniem jest przylegający do ciała kostium, dzięki któremu dane przekazywane są praktycznie bezpośrednio z obiektu badanego.



Rys. 4.A) Kombinezon *Moven* z wbudowanymi czujnikami inercyjnymi,
B) okno programu *Moven Studio*

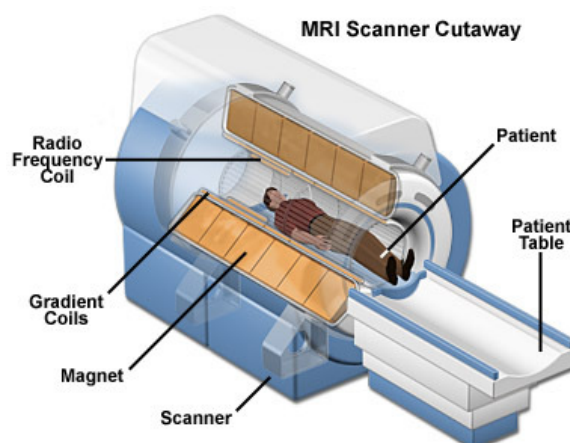
2.4. Ultradźwiękowy system do analizy ruchu CMS-HS firmy Zebris

Metoda ta wykorzystuje zjawisko opóźnienia w propagacji fali dźwiękowej w powietrzu. Dzięki temu program wychwytuje położenie obiektu. Niewielkich rozmiarów odbiorniki ultradźwiękowe są umiejscowione na ciele obiektu badanego. W skład systemu wchodzi również nadajnik fal, przetwornik A/C oraz komputer.

Parametry chodu takie jak długość faz podporowej i wymachowej, a kolejno ściślej z nimi związane parametry przestrzenne takie jak długość kroku i długość cyklu chodu można wyznaczyć poprzez przedstawienie w czasie przemieszczenia stóp podczas chodu i ich kontaktu z podłożem [1].



Rys. 5. Ultradźwiękowy system CMS-HS firmy Zebris [14]



Rys. 6. Ogólna budowa skanera MRI [9]

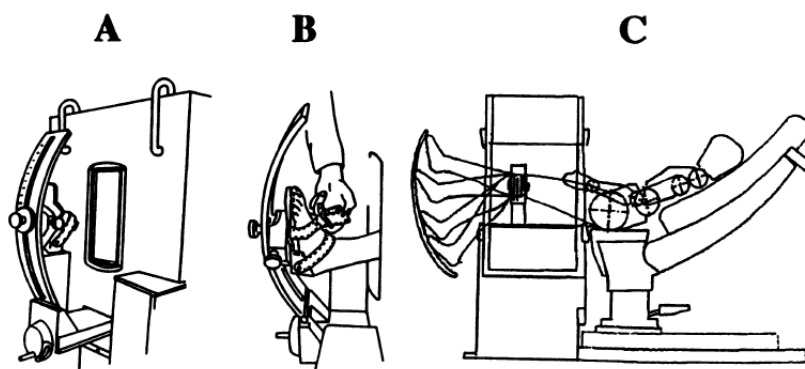
Jednym z systemów, który opiera się na metodzie ultradźwiękowej jest System CMS-HS (Rys. 5) firmy Zebris. W podstawowym modelu obliczeniowym potrójne markery

umieszczone są w okolicy połączenia L₅S₁, na udach oraz stopach. Sygnały rejestrowane są z częstotliwością 50 Hz. Całość sprzężona jest z komputerem i specjalnym oprogramowaniem. Jako wynik uzyskuje się raporty z wykresami wielkości kinematycznych w dziedzinie czasu lub cyklu chodu [14].

2.5. Rezonans magnetyczny

Procedura przeprowadzania badań ruchu z pomocą wyżej wymienionych metod niestety ciągle opiera się na umieszczaniu na ciele pacjenta różnego typu znaczników (czujników), zatem różnica pomiędzy metodami optoelektronicznymi, w których konieczne są pasywne lub aktywne markery jest niewielka i ciągle występuje ryzyko błędów wywołanych ruchem skóry. Należy się zatem zastanowić nad opracowaniem techniki, pozwalającej badać ruch segmentów ciała bez użycia dodatkowych, zewnętrznych elementów. Obiecującą wydaje się być metoda wykorzystująca zjawisko rezonansu magnetycznego (MRI).

Okazuje się, że prowadzone są eksperymenty *in vivo*, badające kinematykę ruchu, z wykorzystaniem tego typu aparatury medycznej. Przykładowo w University of Southern California School of Medicine w Los Angeles, przeprowadzono badania stawu kolanowego, a właściwie kinematyki połączenia rzepki z kością udową stosując właśnie obrazowanie MRI.



Rys. 7. Stanowisko pomiarowe do badania stawu kolanowego, wykorzystujące skaner MRI. A) mechanizm blokujący kończynę, B) schemat pozycjonowania stopy pacjenta podczas przygotowania do badania, C) schemat ulokowania pacjenta oraz zmienne położenia podudzia w czasie badania [7]

Stanowisko pomiarowe przedstawione na Rys. 7 składało się z fotela, aparatu MRI oraz prowadnicy, z elementem mocującym stopę pacjenta. Zarejestrowano cztery pozycje zgięcia kolana w zakresie ok. 36°. Z otrzymanych zdjęć można było określić położenie rzepki względem kości udowej w poszczególnych fazach ruchu [7].

Powyższe doświadczenie ukazuje możliwość stosowania obrazowania trójwymiarowego struktur wewnętrznych w czasie ruchu. Można zatem spodziewać się dalszego postępu w tego typu eksperymentach, który doprowadzi być może do sprzężenia z sobą systemów pomiarowych z zewnętrznymi urządzeniami oraz aparatów do obrazowania struktur wewnętrznych, które będą wykorzystane np. do analizy chodu.

3. PODSUMOWANIE

Stosowanie obiektywnych metod oceny chodu oraz innych form ruchu oraz dokładne odzwierciedlenie przemieszczeń poszczególnych tkanek i kinematyki ruchu jest z całą pewnością potrzebne zarówno w medycynie, przykładowo w celu zwiększenia efektywności

rehabilitacji, jak i w biomechanice sportu do optymalizacji treningów sportowych, w ergonomii i innych dziedzinach gdzie systemy do trójwymiarowej analizy ruchu są stosowane (np. tworzenie animacji). Celowe jest zatem ciągłe udoskonalanie istniejących technik oraz próby wykorzystania nowych systemów pomiarowych.

LITERATURA

- [1] Huitema R., Hof A., Postema K.: Ultrasonic motion analysis system - measurement of temporal and spatial gait parameters. „Journal of Biomechanics”, 2002, nr 35, str. 837–842.
- [2] Kavanagh J. i in.: Reliability of segmental accelerations measured using a new wireless gait analysis system „Journal of Biomechanics”, 2006, nr 39, str. 2863–2872.
- [3] Maffiuletti N. i in.: Concurrent validity and intrasession reliability of the IDEEA accelerometry system for the quantification of spatiotemporal gait parameters, „Gait & Posture”, 2008, nr 27, str. 160–163.
- [4] Mills P. i in.: Repeatability of 3D gait kinematics obtained from an electromagnetic tracking system during treadmill locomotion, „Journal of Biomechanics”, 2007, nr 40, str. 1504–1511.
- [5] O’Donovan K. I in.: An inertial and magnetic sensor based technique for joint angle measurement, „Journal of Biomechanics”, 2007, nr 40, str. 2604–2611.
- [6] Schuler N. B. i in.: Evaluation of an electromagnetic position tracking device for measuring in vivo, dynamic joint kinematics, „Journal of Biomechanics”, 2005, nr 38, str. 2113–2117.
- [7] Shellock F. G. i in.: Kinematic Magnetic Resonance Imaging of the Effect of Bracing on Patellar Position: Qualitative Assessment Using an Extremity Magnetic Resonance System, „Journal of Athletic Training”, 2005, nr 35, str. 44-49.
- [8] http://americanhistory.si.edu/muybridge/htm/htm_sec1/sec1.htm.
- [9] <http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/magnetacademy/mri/index.html>.
- [10] http://www.moven.com/en/home_moven/product/product_overview.php.
- [11] <http://www.ndigital.com/medical/technology-em.php>.
- [12] <http://www.portablegaitlab.com/data.asp?pg=1>.
- [13] http://www.xsens.com/index.php?mainmenu=products&submenu=human_motion&subsubmenu=MTx.
- [14] http://www.zebris.de/english/pdf/e_Technische_Daten_WinGait.pdf.

THE METHODS OF THREE DIMENSIONAL HUMAN MOTION ANALYSIS

Summary. This paper is a general demonstration of the newest, non-optical method, used in 3D motion analysis. It contains a few main measuring techniques, like electromagnetic tracking system, accelerometer system, ultrasound method and the other, which are the alternatives for video-based optical method of human motion analysis. There is also a notice about using the Magnetic Resonance Imaging for kinematic analysis in the future.