

## Badanie stabilności lokomocyjnej człowieka z wykorzystaniem metod stosowanych w robotyce

Jerzy Mrozowski, Jan Awrejcewicz  
Politechnika Łódzka, Katedra Automatyki i Biomechaniki

### 1. WSTĘP

Chodzenie jest jedną z podstawowych form aktywności fizycznej człowieka. Ponieważ jest to czynność wykonywana rutynowo, a ponadto w sposób nieuświadomiony, postrzegana jest powszechnie jako działanie proste, nieskomplikowane. W rzeczywistości stopień złożoności tego procesu jest tak duży, iż mimo kilkudziesięciu lat intensywnych badań wiele jego aspektów nadal nie jest do końca wyjaśnionych. Z kolei nawet w tych obszarach, gdzie nasza wiedza jest już znacząca, trwają prace nad znalezieniem nowych, bądź udoskonaleniem już istniejących, metod jego analizy [4].

Jedną z definicji chodu mówi, że jest to proces ciągłego tracenia i odzyskiwania równowagi. W świetle tej definicji wydaje się, że jednym z głównych zadań stojących przed badaczami zajmującymi się chodem powinna być analiza jego stabilności.

W przedstawianej pracy proponowana jest metoda badania stabilności chodu człowieka bazująca na kryteriach wywodzących się z robotyki. Kryteria te z powodzeniem zostały przetestowane i są stosowane w odniesieniu do robotów kroczących.

### 2. KRYTERIA STABILNOŚCI

#### 2.1. GCOM (Ground projection of the Center Of Mass)

O robocie dwunożnym mówimy, że jest statycznie stabilny, jeżeli rzut jego środka masy (GCOM) na płaszczyznę podparcia znajduje się wewnątrz wielokąta podparcia [1].

Wyjście GCOM poza obszar tego wielokąta oznacza powstanie niezrównoważonego momentu powodującego obrót robota względem punktu leżącego na krawędzi obszaru podparcia, a w konsekwencji jego upadek. Jest to kryterium statyczne stosowane przy niewielkich prędkościach lokomocji, kiedy zaniedbać można siły dynamiczne działające na model. W kartezjańskim układzie współrzędnych położenie punktu GCOM wyznacza się za pomocą następujących zależności:

$$x_{GCOM} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{xi}}{\sum_{i=1}^n F_{xi}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_{ci}}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad y_{GCOM} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{yi}}{\sum_{i=1}^n F_{yi}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_{ci}}{\sum_{i=1}^n m_i},$$

gdzie:  $m_i$  - masa  $i$ -tego elementu,  $x_{ci}$ ,  $y_{ci}$  - współrzędne środka ciężkości  $i$ -tego elementu.

#### 2.2. ZMP (Zero Moment Point)

Koncepcja ZMP została wprowadzona w 1969 r. przez Vukobratovica i in. [5] i od tamtego czasu jest wykorzystywana przy sterowaniu i projektowaniu ruchu robotów.

ZMP jest to punkt na podłożu, w którym składowe wypadkowego momentu sił bezwładności i sił ciężkości działających na obiekt, względem osi leżących w płaszczyźnie podparcia, są równe zero.

Współrzędne punktu ZMP określone są zależnościami [2]:

$$X_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z) x_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^n (\dot{T}_y)_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)}$$

$$Y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z) y_i - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^n (\dot{T}_x)_i}{\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{z}_i + g_z)}$$

gdzie:  $m_i$  - masa  $i$ -tego elementu,  $x_i, y_i, z_i$  - współrzędne środka ciężkości  $i$ -tego elementu,  $\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i$  - składowe przyspieszenia  $i$ -tego elementu,  $\dot{T}_{xi}, \dot{T}_{yi}$  - składowe pochodnej krętu.

Robot/człowiek jest dynamicznie stabilny, kiedy punkt ZMP nie wykracza poza powierzchnię wielokąta podparcia.

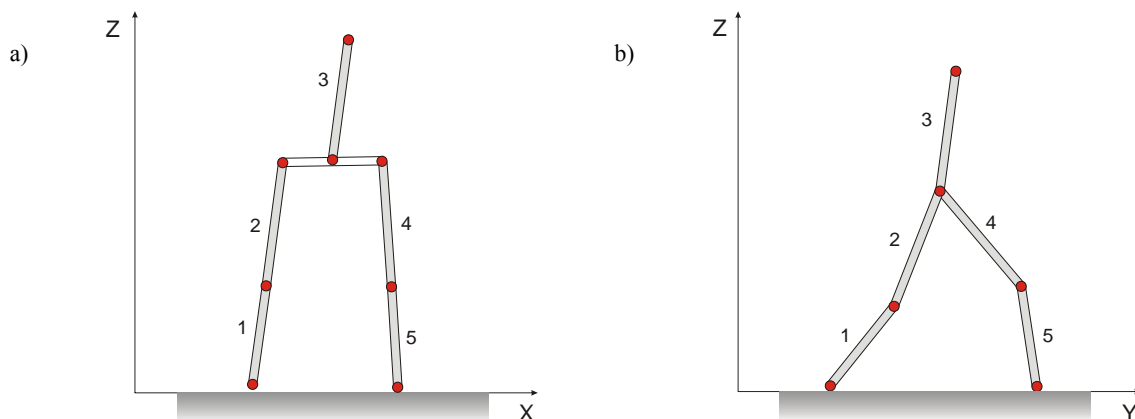
### 3. PRZEBIEG BADAŃ

Przeprowadzone badania obejmowały następujące etapy:

- przyjęcie uproszczonego modelu człowieka i przyporządkowanie mu właściwych parametrów antropometrycznych,
- rejestracja filmowa trajektorii wybranych punktów ciała (odpowiadających węzłom kinematycznym) za pomocą kamer cyfrowych,
- stworzenie na podstawie zarejestrowanych trajektorii pliku danych wejściowych dla programu komputerowego do analizy stabilności chodu,
- opracowanie programu komputerowego do oceny stabilności chodu według kryteriów ZMP i GCOM,
- przeprowadzenie niezbędnych obliczeń i wizualizacja otrzymanych wyników.

#### 3.1. Schemat kinematyczny modelu

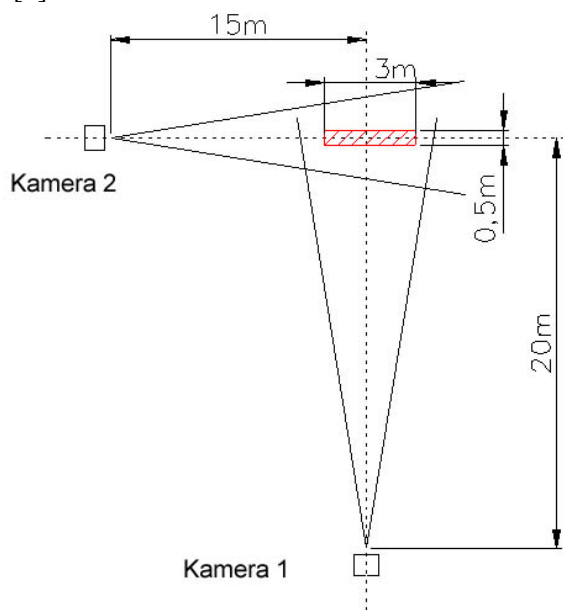
Na rys. 1 przedstawiono uproszczony model człowieka w postaci 6-elementowego łańcucha kinematycznego. Element odpowiadający miednicy jest bezmasowy. Górną część ciała reprezentuje element 3 o masie równej sumie mas głowy, klatki piersiowej i kończyn górnych. Elementy 1 i 5 zastępują podudzia, zaś elementy 2 i 4 zastępują uda. Z uwagi na cel i charakter prowadzonych badań w odwzorowaniu kończyn dolnych nie uwzględniono stóp, dołączając ich masy do mas podudzi. Segmenty zamodelowano jako jednorodne pręty połączone przegubowo. Przyjęto, że środek masy każdego elementu leży w połowie jego długości.



Rys. 1. Model człowieka przyjęty do badań: a) widok w płaszczyźnie czołowej, b) widok w płaszczyźnie strzałkowej

### 3.2. Rejestracja trajektorii węzłów kinematycznych

Do zapisu trajektorii wybranych punktów użyte zostały dwie kamery cyfrowe ustawione prostopadle względem siebie (rys. 2). W celu wyeliminowania nierównomierności chodu towarzyszących fazom jego rozpoczynania (przyspieszania) i kończenia (hamowania), do analizy wykorzystano niewielki fragment filmu pokazujący środkowy odcinek drogi. Czas otwarcia migawki w obu kamerach ustawiono na  $1/1000$  s, zdjęcia wykonywane były z szybkością 25 klatek na sekundę. W celu zminimalizowania zniekształceń obiekt filmowano z dużej odległości przy użyciu teleobiektywów. Obraz uzyskany taką metodą charakteryzuje się spłaszczonym oddaniem perspektywy i jest pozbawiony głębi. W świetle słonecznym białe markery wystarczająco wyraźnie kontrastują z otoczeniem [3].



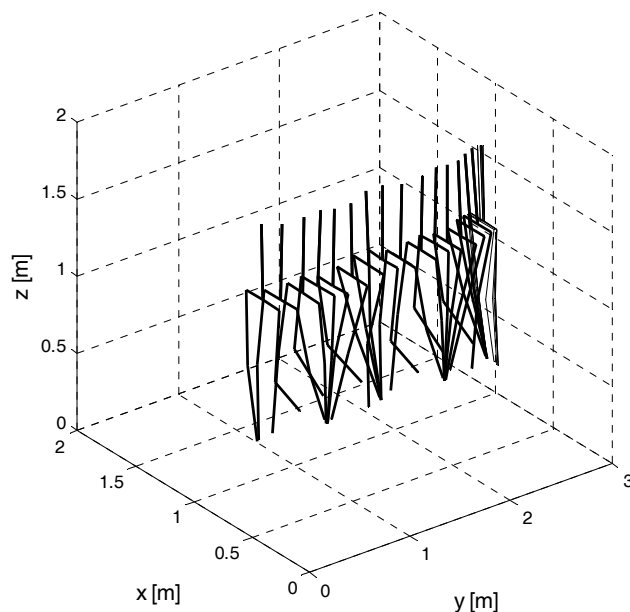
Rys. 2. Usytuowanie kamer do rejestracji chodu

### 3.3. Konwersja zarejestrowanej trajektorii chodu do postaci pliku danych cyfrowych

Dalsza część analizy została przeprowadzona w programie *Icarus*. Program ten jest narzędziem służącym do analizy obrazów. Pozwala na rekonstrukcję przestrzenną obiektów, których ruch został zarejestrowany przy użyciu co najmniej dwóch kamer. Wybrane punkty na ciele człowieka kojarzone są z markerami w programie. Dane o położeniu markerów, pochodzące z procesu automatycznego śledzenia oznaczonych punktów, zapisywane są w pliku tekstowym. Ponieważ proces automatycznego śledzenia obrazu nie zawsze jest wystarczająco dokładny, konieczne jest niekiedy ręczne wprowadzanie poprawek.

Dalsza faza obróbki danych polegała na synchronizacji obrazów pochodzących z obu kamer oraz konwersji jednostek.

Efekt zapisu kolejnych położenia ciała, uzyskanych z analizy filmu za pomocą programu *Icarus*, widoczny jest na rys. 3.



Rys. 3. Położenie segmentów modelu w poszczególnych fazach chodu

### 3.4. Opis programu do analizy stabilności chodu

Program analizujący trajektorie wybranych punktów człowieka podczas chodu został napisany przy użyciu pakietu obliczeniowego MATLAB/SIMULINK. Pakiet ten zawiera interpreter języka wysokiego poziomu umożliwiającego implementację algorytmów numerycznych do obliczania m.in. położenia segmentów ciała, środka ciężkości, punktów GCOM i ZMP. Dzięki zawartym w środowisku MATLAB/SIMULINK bogatym funkcjom graficznym możliwa była bezpośrednia wizualizacja otrzymanych wyników obliczeń w postaci wykresów i animacji.

Schemat działania programu do analizy chodu przedstawia rys. 4.

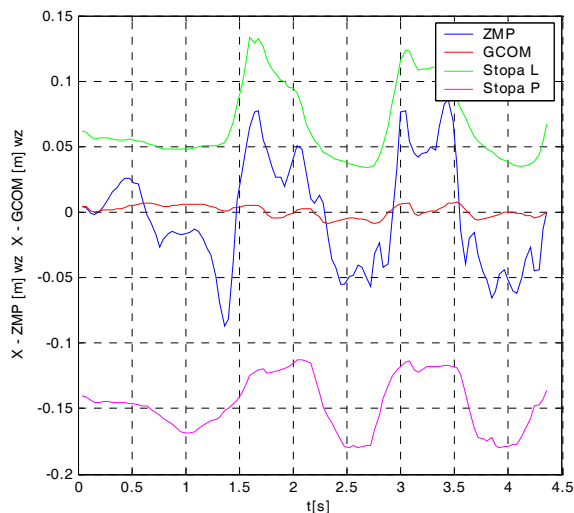


Rys. 4. Struktura programu do analizy stabilności chodu

#### 4. WYNIKI

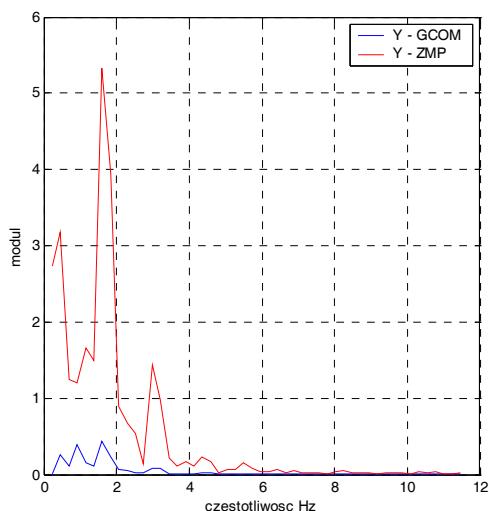
Efektom obliczeń, przeprowadzonych za pomocą stworzonego na potrzeby omawianych badań programu komputerowego, było uzyskanie danych o przebiegu punktów GCOM i ZMP podczas chodu.

Rys. 5 przedstawia krzywe GCOM i ZMP w płaszczyźnie czołowej. Ich odległość od zewnętrznych krzywych (zielonej i fioletowej), będących obwiednią wielokąta podparcia, jest miarą zapasu stateczności przy wychyleniach na boki.

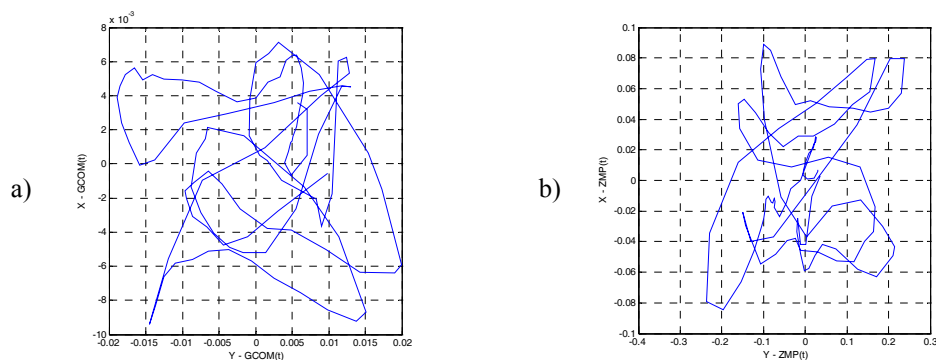


Rys. 5. Przebiegi GCOM i ZMP w rzucie na płaszczyznę czołową

Wykres zamieszczony na rys. 6 przedstawia analizę widmową przebiegów GCOM i ZMP w płaszczyźnie strzałkowej. Dla obu przebiegów można zauważyć dominującą składową harmoniczną, co świadczy o stabilności chodu, a pośrednio o prawidłowym funkcjonowaniu aparatu ruchowego.



Rys. 6. Analiza widmowa przebiegów GCOM i ZMP w płaszczyźnie strzałkowej



Rys. 7. Stabilogramy przebiegów a) GCOM i b) ZMP

Rys. 7 prezentuje stabilogramy sygnałów GCOM i ZMP. Wykazują one dość zwarty i równomierny względem osi rozkład, co świadczy o dobrej stabilności osoby badanej.

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych stabilności osoby z prawidłowo działającym aparatem ruchowym, kroczącej ze stałą prędkością po płaskiej, poziomej powierzchni. Badania te prowadzone były pod kątem weryfikacji przydatności metod znanych i stosowanych w robotyce do oceny stabilności lokomocyjnej człowieka.

Stwierdzono, że trajektorie GCOM i ZMP w każdej fazie chodu znajdowały się wewnątrz wielokąta podparcia.

Położenie punktów charakterystycznych wykresów (punktów przecięcia się GCOM i ZMP, szczytów trajektorii GCOM, punktów przecięcia się linii określających granice wielokątów podparcia) było równomierne i symetryczne, co potwierdzało stabilność statyczną i dynamiczną osoby badanej.

Maksyma przebiegów ZMP w stosunku do GCOM wykazywały niewielkie stałe opóźnienie.

Zanotowane spostrzeżenia pozwalają stwierdzić, że stosowane w robotyce kryteria stabilności GCOM i ZMP mogą być użyte do oceny stabilności chodu człowieka.

Analiza przesunięcia fazowego wartości szczytowych przebiegów GCOM i ZMP może stanowić podstawę do oszacowania szybkości reakcji nerwowo-mięśniowej osoby badanej.

## Bibliografia

- [1] Goswami A.: Postural stability of biped robots and the foot rotation indicator (FRI) point. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 18, No. 6, 1999.
- [2] Jinhun Kim, Wan Kyun Cung, Youngil Youm: Real time ZMP compensation method using null motion for mobile manipulators. *Proc. 2002 IEEE*, Washington, May 2002.
- [3] Mrozowski J., Awrejcewicz J., Bamberski P.: Analysis of stability of the human gait. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 45 (1), 91-98, 2007.
- [4] Tejszerska D., Michnik R., Jurkojć J., Jureczko P.: Modelling of human gait. *Proceedings of the 13th Conference of European Society of Biomechanics*, Wrocław, 2002.
- [5] Vukobratovic M., Juricic D.: Contribution to the synthesis of biped gait. *IEEE Trans. Bio-Med. Eng.* BME-16 (1), 1-6, 1969.

## Summary

An analysis of the gait stability of the man moving along an even surface with a constant velocity is presented. The stability criteria applied to biped robots, namely: the ZMP (Zero Moment Point) and the GCOM (Ground projection of the Center Of Mass) have been employed in the investigations. The analysis has been carried out on the basis of the measurement data obtained from the human gait recorded with a digital camera.