

OPRACOWANIE METOD I ALGORYTMÓW  
DO KOMPUTEROWEGO MODELOWANIA I AUTOMATYCZNEJ  
OCENY LOKOMOCJI DWUNOŻNEJ CZŁOWIEKA I CZTERONOŻNEJ  
MASZYNY KROCZĄCEJ  
(grant KBN 3 3001 9203)

dr inż. Krzysztof Jaworek  
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej  
Politechniki Warszawskiej  
Zespół Robotyki i Biomechaniki Technicznej

\* Grant realizowany w zespole prof. A. Moreckiego (kier. grantu), dr K. Jaworek, dr T. Zielińska (główni wykonawcy) i mgr inż. A. Ferenc.

### 1. Rys historyczny i stan wiedzy: wybór metody oceny lokomocji dwunożnej.

Już w starożytności wielu autorów usiłowało rozwiązać trudne zagadnienia ruchu kręgowców i zwierząt i znaleźć podstawowe zależności obowiązujące podczas ich lokomocji w wodzie, na lądzie i w powietrzu. Znanie jest dzieło Arystotelesa (334-330 r. p.n.e.) zatytułowane "O ruchu zwierząt" i "O przestrzennym poruszaniu się zwierząt". W II-gim rozdziale dzieła pt.: "O poruszaniu się przestrzennym zwierząt" ("De animalium incessu") Arystoteles pisał: "Natura nie tworzy niczego na próżno, lecz zawsze jedynie to, co jest najlepsze, biorąc pod uwagę naturalną organizację każdego rodzaju zwierzęcia". Traktat Arystotelesa to arcydzieło w swoim rodzaju. Jakaż finezja w obserwacji zwierząt, to - dodajmy zaraz - należących do najróżniejszych typów i gatunków. Wiele twierdzeń Arystotelesa zasługuje jeszcze dzisiaj na poważną uwagę. A gdy się doda, że Arystoteles był pozbawiony narzędzi do precyzyjnej obserwacji jakimi dysponują dzisiaj badacze, to podziw nasz dla jego badań i sprostżeń jeszcze więcej wzrośnie. Znajdujemy u niego wszystkie zasadnicze pojęcia dotyczące mechaniki chodzenia, pływania i latania w powietrzu, chociaż wyrażone często za pomocą jemu właściwych formuł.

W XVII w. G.A. Borelli (Włoch) w dziele zadedykowanym królowej Krystynie pt.: "De motu animalium" pisał, że już "wielu bardzo autorów zarówno starożytnych jak i współczesnych usiłowało rozwiązać trudne zagadnienia fizjologii ruchu zwierząt, że żaden jednak z nich nawet nie dotknął niezliczonych problemów, które one obejmuje". W 200 lat później badacz, fizjolog francuski E.J. Marey uskarża się na to, że "sposób w jaki ludzie i zwierzęta ssące przenoszą się z miejsca na miejsce na lądzie, jest jeszcze bardzo niedokładnie znany. Wielka to szkoda! - ciągnie dalej tenże autor. Bo przecież z Natury czerpał człowiek aspiracje do tworzenia różnych narzędzi" (patrz dzieło Mareya - "La machine animale. Locomotion terrestre et aerienne", Paris, 1873).

Zarówno Arystoteles, Borelli jak i Marey zajmowali się przede wszystkim lokomocją kręgowców w wodzie, na lądzie i w powietrzu. Tematyka ta jest żywa aż do dnia dzisiejszego. W prowadzonych co dwa lata Międzynarodowych Kongresach Biomechaniki pod aspiracją Międzynarodowego Towarzystwa Biomechaniki (ISB) przewidziano sesję Environmental Biomechanics in Human and Animals Terrestrial, Water and Air Locomotion.

Lokomocją kręgowców zajmowało się wielu badaczy. W czasach Marey'a dobrze były znana praca badacza amerykańskiego E. Muybridge'a. Od czasów Marey'a, chociaż znane są wcześniejsze prace Weberów z Getyngii (1836r.) przyjmuje się, że rodzaje badań nad lokomocją kręgowców (w tym przede wszystkim człowieka) dotyczą:

- rejestracji przemieszczeń, sił i sygnałów elektromiograficznych (Marey - 1874, Muybridge - 1887, Brau i Fisher - 1890, Bernstein - 1930, Amar - 1916, Luru - 1957, Bigland i Lippold - 1953),
- wyznaczania prędkości, przyspieszeń i sił poszczególnych segmentów ciała (Braune i Fisher - 1890, Bernstein - 1930, Paul - 1967, Leo, Capozzo i Pedotti - 1974, McGhee - 1981),
- określenia mas poszczególnych segmentów ciała (Demster - 1955, Drillis - 1958, Drillis i Contini - 1966, Zatsiorski)
- modelowania ruchu (Bracia Weberowie - 1836, Meyer - XIXw, Leo, Capozzo i Pedotti - 1974, Hatze - 1980, Havannan - 1975, Paul - 1967, Verhulst - 1974, Pedotti - 1974, McGhee i Koozekanani - 1981),

- budowy systemów pomiarowych do rejestracji kinematycznej i dynamicznej ruchu (Marey - 1874, Hill - 1938, Bernstein - 1930, Furné - 1967, Winter - 1974, Pedotti i Ferrigno - 1985, McGhee - 1979, Lanshammer - 1977 i 1981, Lamoreux - 1971, Gola - 1987),  
 - redukcji danych do postaci syntetycznych wskaźników (Gabrielli i von Karman - 1950, Santambrogio i Ferrigno - 1985, Smoljaninov - 1984, Hildebrandt - 1965, Schmidt i Nielsen - 1972, Pennycuick - 1990, 1992 i 1993).

W ramach prac prowadzonych w granice, rejestrację ruchu człowieka prowadzono za pomocą układów pomiarowych skonstruowanych tak, że umożliwiały one kinematyczną i dynamiczną analizę ruchu. Ponadto prowadzono prace umożliwiające redukcję danych (pomiarowych i komputerowo przetworzonych) do postaci syntetycznych wskaźników. Te dwa kierunki badań są obecnie rozwijane w renomowanych, światowych laboratoriach i ośrodkach badawczych lokomocji dwunożnej człowieka i zwierząt.

## 2. Wskaźnikowa metoda oceny lokomocji dwunożnej człowieka.

Większość badaczy lokomocji dwunożnej człowieka przedstawia wyniki badań w postaci wykresów lub tabel wartości mocy chwilowych  $P_i(t)$  rozwijanych w stawach biodrowych, kolanowych i skokowych. Naszym zdaniem taka prezentacja wyników badań lokomocji dwunożnej jest mało przydatna do różnicowania osób badanych.

W tej pracy zaproponowano pewien sposób uśredniania przebiegów mocy chwilowych  $P_i(t)$  w czasie trwania fazy podporowej stopy z podłożem.

Postać wzoru uśredniającego wartości mocy chwilowych  $P_i(t)$  dla wszystkich głównych stawów nogi w fazie podporowej jest następująca:

$$P_M = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{T_-} \int_{t_1}^{t_2} |P_i(t)|^p dt \right]^{1/p}, \quad (1)$$

gdzie:

$P_i(t)$  - przebieg mocy chwilowej rozwijanej w i-tym głównym stawie nogi człowieka,

$T_- = t_2 - t_1$  - czas trwania fazy podporowej,

$p$  - parametr oceny; Jeżeli  $p=2$ , to  $[P_M]$ =Waty.

Wyznaczniki mocy chwilowych  $P_i(t)$  rozwijanych w fazie wymachu (przemieszczenia) kończyny dolnej nie jest dotąd zbadane.

Przeprowadzone badania [1] pokazują, że w fazie wymachu (przemieszczenia) nogi moc średnia stanowi w normie zaledwie 20% wartości mocy średniej liczonej dla całego cyklu chodu (tj. czasu trwania fazy podporowej  $T_-$  i czasu trwania fazy wymachu  $T_+$ ).

Przydatność wzoru (1) sprawdzono w Centro di Bioingegneria w Mediolanie (początkowo dla biegu) i w kraju dla chodu człowieka. Wyniki badań zamieszczono w rozprawie [1].

Wzoru (1) nie można bezpośrednio wykorzystać do różnicowania osobników o różnych masach i prędkościach chodu lub biegu. Dzieląc moc  $P_M$  przez wyrażenie  $m \bar{v}_M$  otrzymujemy:

$$\epsilon_M = \frac{P_M}{m \cdot \bar{v}_M} \quad , \quad \frac{J}{\text{kg} \cdot \text{m}} \quad (2)$$

gdzie:

$m$  - masa całego ciała osoby badanej,

$\bar{v}_M$  - wartość średniej prędkości chodu lub biegu osoby badanej. W naszych badaniach przyjęto, że jest to średnia prędkość w stawie biodrowym rozwijana w kierunku linii chodu lub biegu w płaszczyźnie strzałkowej. Wskaźnik  $\epsilon_M$  przyjęto nazywać wskaźnikiem ruchu rzędu drugiego dla ruchu w płaszczyźnie strzałkowej.

Wzór (2) można przekształcić do innej postaci. Dzielać wyrażenie (2) przez  $\bar{E}_{kM} = \frac{1}{2} m \bar{v}_M^2$  otrzymujemy wyrażenie:

$$\epsilon_M = 0.5 \frac{P_M}{\bar{E}_{kM}} \cdot \bar{v}_M \quad (3)$$

gdzie wskaźnik:

$$k_v = 0.5 \frac{P_M}{\bar{E}_{kM}} \quad , \quad \text{s}^{-1} \quad (4)$$

nazywany jest współczynnikiem ruchu człowieka.

Podane dotąd wskaźniki oceny lokomocji nie uwzględniają częstotliwości lokomocji  $f$ , którą można wyznaczyć ze wzoru:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_+ + T_-} \quad , \quad \text{Hz} \quad (5)$$

gdzie:

$T_+$  - czas wymachu nogi,

$T_-$  - czas trwania fazy podporowej stopy.

Dla chodu można zaproponować wskaźnik oceny lokomocji  $\eta$  w następującej postaci:

$$\eta = \frac{\bar{E}_{kM} \cdot f}{P_M} \quad , \quad \% \quad (6)$$

gdzie:

iloczyn  $\bar{E}_{kM} \cdot f$  jest to średnia moc rozwijana przez osobę badaną w kierunku linii chodu, co najmniej w jednym cyklu ruchu.

Jeżeli skojarzymy wzór (6) ze wzorem (4) to wskaźnik oceny lokomocji podczas chodu przyjmie postać:

$$\eta = 0.5 \frac{f}{k_v} \quad , \quad \% \quad (7)$$

co oznacza, że dla stałoczęstotliwościowego i stałoprędkościowego chodu (tzn. kroczenia ze stałą długością kroku) wskaźnik  $\eta$  jest funkcją tylko dwóch parametrów, a mianowicie: częstotliwość lokomocji  $f$  i współczynnik ruchu  $k_v$ . Wskaźnik oceny lokomocji podczas biegu  $\eta$  można określić jako

iloraz średniej mocy rozwijanej przez osobę badaną (podczas wykonywania  $n$  pojedynczych kroków w jednostce czasu) i iloczynu  $n$  wykonywanych pojedynczych kroków oraz średniej mocy rozwijanej przez zespoły

mięśniowe obsługujące główne trzy stawy nogi w fazie podporowej stopy.  
Dla założonej pełnej symetrii ruchu i stałej prędkości biegu mamy:

$$\eta^* = \frac{\bar{E}_{kM} \cdot S_R^*}{\eta \cdot P_M}, \% \quad (8)$$

gdzie:

$S_R^*$  - jest to tzw. rytm biegu biegacza, czyli liczba pojedynczych kroków  $n$  wykonywana w jednostce czasu np.: sekundzie.

Przydatność wskaźnika mocy  $P_M$ , ruchu  $\epsilon_M$  i wskaźników oceny lokomocji  $\eta$  oraz  $\eta^*$  w badaniach chodu i biegu człowieka sprawdzano za pomocą systemu rejestracji ruchu ELITE i HLS [1]. Wyniki pomiarów i obliczeń podano w [1]. Badania biegu człowieka przeprowadzono w Centro di Bioingegneria w Mediolanie, w Instytucie Sportu, Politechnice Warszawskiej i Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych w Warszawie.

2.1. Interpretacja fizyczna proponowanych syntetycznych wskaźników oceny lokomocji dwunożnej człowieka (chodu i biegu).

Proponowane wskaźniki oceny dotyczą lokomocji po względnie płaskiej i utwardzonej powierzchni podczas chodu lub biegu ze względnie stałą prędkością i częstotliwością lokomocji, czyli ze względnie stałą długością pojedynczych kroków.

2.1.1. Wskaźnik mocy  $P_M$ .

Jest to suma algebraiczna średnich (geometrycznych) mocy rozwijanych przez zespoły mięśniowe obsługujące trzy główne stawy nogi (biodrowy, kolanowy i skokowy) człowieka w fazie podporowej stopy z podłożem.

2.1.2 Wskaźnik ruchu -  $\epsilon_M$ .

Jest to koszt transportu biomasy człowieka za pomocą kończyn dolnych w polu grawitacyjnym Ziemi po względnie płaskiej i utwardzonej powierzchni. Po raz pierwszy pojęcie kosztów transportu zaproponowało trzech badaczy lokomocji: Fedaler, Taylor i Jayes w 1982 [2].

2.1.3. Współczynnik ruchu -  $k_v$ .

Jest to częstotliwość rozwijania średniej mocy w fazie podporowej stopy z podłożem w celu podtrzymania rozwijanej średniej energii kinetycznej, co najmniej w jednym cyklu, w ruchu płaskim po względnie równej i utwardzonej powierzchni w polu grawitacyjnym Ziemi.

2.1.4. Wskaźnik oceny lokomocji  $\eta$ .

Jest to współczynnik skorelowany ze sprawnością lokomocji dwunożnej człowieka w polu grawitacyjnym Ziemi rozumiany jako iloraz średniej mocy rozwijanej przez człowieka w płaszczyźnie strzałkowej, co najmniej w jednym cyklu, do średniej mocy rozwijanej przez zespoły mięśniowe obsługujące główne stawy nogi (biodrowy, kolanowy, skokowy) w fazie podporowej stopy z podłożem.

## 2.2. Badania doświadczalne.

### 2.2.1. Stosowana aparatura.

Do badań wykorzystano z:

- systemu rejestracji ruchu człowieka,
- systemów ELITE-3D i ELITE-2D produkowanych przez włoską firmę Bioengineering Technology and System (BTS) a zainstalowane w Centro di Bioingegneria w Mediolanie,
- HLS (opracowanie własne [1]),
- szybkobieżnych kamer filmowych,
- platform dynamometrycznych własnej konstrukcji i platform piezoelektrycznych szwajcarskiej firmy Kistler,
- urządzenia typu NAC, K202/CPO-2, stereokomparatorów, do odczytywania współrzędnych ortokartezjańskich znaczników umieszczonych na wybranych osiach głównych stawów np.: nogi osób badanych,
- bezprzewodowego elektrogoniometru własnej konstrukcji do rejestracji dynamicznej lokomocji wielokrokowej człowieka [3,4,5].

### 2.2.2. Materiał doświadczalny.

W zbiorczej tabeli przedstawiono liczbę osób badanych. Korzystano tutaj zarówno z badań własnych jak i wyników innych autorów. Ze względu na trudność uzyskiwania danych liczby podane w tabeli można uznać za reprezentatywne.

Rodzaj badań	Chód normalny	Badania chodu klinicznego	Bieg sportowców	Suma
Własne	7	1	3	11
Obce	19	7	11	37
Wspólne	2	8	6	16

### 2.2.3. Metody opracowania wyników.

Do opracowania wyników pomiarów stosowano:

- rachunek wyrównawczy (metoda jedenastopunktowa),
- funkcje sklepane (tzw. splajny),
- płaszczyznę i przestrzeń fazową,
- metodę funkcji opisującej,
- metody empiryczno-statystyczne.

## 2.3. Uzyskane wyniki.

Na podstawie przeprowadzonych badań chodu i biegu człowieka można wnioskować, że proponowana metoda wskaźnikowa wskazuje na:

- korelację między koordynacją nerwowo-mięśniową biegacza a wartością wskaźnika mocy  $P_M$  (im wartość wskaźnika mocy  $P_M$  mniejsza, tym koordynacja nerwowo-mięśniowa biegacza w fazie podporowej jest lepsza),
- zależność wartości wskaźników oceny od wieku osób badanych,
- znacznie większe wartości wskaźników oceny chodu w patologii niż w normie (wzrost nawet o kilkaset procent),

- bezpośredni związek wskaźników oceny z fizyczną wydolnością organizmu osób badanych (tj. prędkością, częstotliwością lokomocji oraz długością pojedynczych kroków),
- okresowo-zmienne wartości wskaźników oceny w normalnej lokomocji wielokrokowej po płaskiej i utwardzonej powierzchni.

2.4. Zastosowanie metody wskaźnikowej w praktyce (w rehabilitacji, sporcie, robotyce).

2.4.1. Zastosowanie w badaniach sportowych.

- Do oceny koordynacji nerwowo-mięśniowej biegacza w fazie podporowej nogi (nóg) - można wyliczyć wskaźniki  $P_M$  oraz  $\eta=f(\bar{v})$ ;
- Do oceny wydolności fizycznej organizmu biegacza na długich dystansach - można wyliczyć  $k_v=f(\bar{v})$ .

2.4.2. Rehabilitacja.

W procesie rehabilitacji można mieć wyznaczone parametry kinematyczne chodu (prędkość, częstotliwość i długość pojedynczych kroków) w celu ustalenia ekstremalnej wartości wskaźników podczas lokomocji osób badanych tzn. minimalnej wartości współczynnika ruchu  $k_v$  wyznaczamy maksymalną wartość wskaźnika oceny lokomocji  $\eta$ , a następnie prędkości i częstotliwości lokomocji oraz odpowiadającej im długości kroku.

2.4.3. Robotyka (dynamiczna ocena ruchu wielonożnych maszyn kroczących).

2.4.3.1. Zmodyfikowany wskaźnik ruchu (czyli wskaźnik kosztów transportu masy maszyny kroczącej w polu grawitacyjnym Ziemi) można przedstawić w postaci:

$$\epsilon_M^* = \frac{P_- + P_+}{m \cdot \bar{v}} ; \frac{J}{\text{kg} \cdot \text{m}} \quad (9)$$

gdzie:

$P_-$  - średnia moc rozwijana w fazie podporowej nóg maszyny,

$P_+$  - średnia moc rozwijana w fazie wymachu (przeniesienia) nóg maszyny,

$m$  - masa maszyny,

$\bar{v}$  - średnia prędkość lokomocyjna, ca najmniej w jednym cyklu ruchu.

2.4.3.2. Zmodyfikowany współczynnik ruchu.

$$k_v^* = 0.5 \frac{P_- + P_+}{\bar{E}_{kM}} , \text{ s}^{-1} \quad (10)$$

Zastosowanie: optymalizacja parametrów kinematycznych ruchu maszyny kroczącej:

- dobór prędkości średniej lokomocji maszyny  $\bar{v}$ ,
- dobór częstotliwości kroczenia,
- dobór długości pojedynczych kroków maszyny w celu minimalizacji mocy potrzebnej do wykonania zadania ruchowego, np.: dla uzyskania maksymalnego dystansu przy zadanych (skończonych) zasobach energetycznych.

## 2.4.3.3. Zmodyfikowany wskaźnik oceny lokomocji.

$$\eta^* = \frac{\bar{E}_{kM}}{P_- + P_+} f^* \quad , \quad \% \quad (11)$$

gdzie:  
 $E_{kM} = 0.5 m v_M^{-2}$  - średnia energia kinetyczna rozwijana przez maszynę krocząca w płaszczyźnie strzałkowej,  
 $f = n/t$  - częstotliwość lokomocji ( $n$  - liczba pojedynczych kroków wykonywanych w czasie  $t$  przy względnie stałej prędkości ruchu i długości pojedynczych kroków maszyny).

## 2.5. Wnioski końcowe.

Na podstawie prowadzonych badań można sformułować następujące wnioski i propozycje dalszych badań.

- Celowa wydaje się budowa stacji diagnostycznej chodu człowieka, szczególnie w patologii,
- Opracowanie metody wskaźnikowej dla chodu przestrzennego,
- Prowadzenie badań doświadczalnych (za pomocą bezprzewodowego elektrogoniometru własnej konstrukcji [3,4,5]) osobników zdrowych w wieku młodzieńczym i dojrzałym, płci obojga, w celu weryfikacji następującej hipotezy badawczej:

"Chód człowieka przedstawia sobą następstwo okresowo-zmiennych mocy średnich rozwijanych przez zespoły mięśniowe obsługujące główne stawy nogi w fazie podporowej podczas normalnej, wielokrokowej lokomocji dwunożnej w płaszczyźnie strzałkowej".

## 3. Pismiennictwo.

- [1] Jaworek K.: Indices Method of Assessing Human Gait and Run. Prace Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej nr 32, Warszawa, 1992.
- [2] C.J.Pennycuick: Newton rules Biology. A physical approach to biological problems. Pergamon Press, Glasgow, 1992.
- [3] Jaworek K., Ferenc A.: A simplified assessment's method of human gait. Second Polish-Italian Seminar, Torino, April 20- 21, 1993, Ed. by G.Belingardi & F.A.Raffa, Editrice Levorotto & Bella, Torino, Italy 1993, pp. 89-96.
- [4] Jaworek K., Ferenc A., Kudelski R., Józko M., Talar J.: A simplified human gait measurement and assessment method. Abstract Book of XIV International Congress on Biomechanics, Paris, 4-8 July, 1993, Vol. I, pp. 632-633.
- [5] Jaworek K., Morecki A.: Metody badania lokomocji człowieka. Materiały sesji naukowej nt.: Teoria i praktyka w postępowaniu rehabilitacyjnym. Poznań, 21-22.X.1993r (w przygotowaniu do druku).