

**Justyna KĘDZIOREK<sup>1</sup>, Michalina BŁAŻKIEWICZ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Katedra Nauk Przyrodniczych, Wydział Rehabilitacji, Akademia Wychowania Fizycznego Józefa Piłsudskiego, Warszawa

## **OCENA STABILNOŚCI POSTURALNEJ W FUNKCJI RÓŻNEGO USTAWIENIA STÓP NA PODŁOŻU PRZY WYKORZYSTANIU MIAR DYNAMIKI NIELINIOWEJ**

**Streszczenie:** Celem pracy była ocena stabilności posturalnej w różnych warunkach podparcia: stanie obunóż, jednonóż i w tandemie przy oczach otwartych. W badaniach wzięła udział grupa trzydziestu trzech zdrowych osób w wieku  $21.88 \pm 1.65$  lat. Badania zostały przeprowadzone przy użyciu platformy AMTI AccuSway (30 sekund – każda próba). Do obliczeń eksportowano położenia środka nacisku stóp na podłoże (CoP) w płaszczyznach x i y. Następnie została policzona długość drogi CoP i współczynniki dynamiki nieliniowej: entropia próbkowa, wymiar fraktalny i wykładnik Lapunowa. Wykazano, że zmniejszenie pola powierzchni podparcia powoduje istotny wzrost współczynnika entropii próbkowej i wymiaru fraktalnego.

**Słowa kluczowe:** stabilność posturalna, miary nieliniowe, biomechanika

### 1. WSTĘP

Kontrola posturalna jest złożonym zjawiskiem polegającym na prawidłowym funkcjonowaniu i przekazywaniu informacji pomiędzy układami: somatosensorycznym, przedsionkowym i wzrokowym [1]. Ocena przemieszczania się środka nacisku stóp na podłoże (CoP) jest najczęściej używaną metodą oceny stabilności posturalnej. Natomiast, od momentu odkrycia chaotycznego charakteru sygnału CoP, zaczęto stosować miary dynamiki nieliniowej do oceny złożoności systemu kontroli posturalnej [2]. Miary nieliniowe ewaluują czasową zmienność ruchu CoP w odniesieniu do zachowania motorycznego, co pozwala na ocenę regularności i złożoności systemu kontroli postawy, oraz ilości uwagi poświęconej na zadanie motoryczne [3]. Miarami nieliniowymi używanymi do opisywania sygnału CoP są: współczynnik entropii próbkowej, wymiar fraktalny, wykładnik Lapunowa. Współczynnik entropii próbkowej opisuje nieregularność sygnału CoP, informuje o ilości uwagi poświęconej na zadanie, określa automatyzm tej regulacji. Wysokie wartości świadczą o zdrowym, czujnym systemie, adaptującym się naturalnie do zakłócających bodźców zewnętrznych. Niskie wartości mogą świadczyć o dużej regularności sygnału, co wskazuje na niezdolności do adaptowania się do nagłych zmian i spadku automatyzmu [5]. Wykładnik Lapunowa ocenia szybkość reakcji na zakłócenia zewnętrzne. Niższe wartości świadczą o większej „sztywności” układu, wyższe o większej elastyczności i szybszej reakcji na bodziec destabilizujący. Wymiar fraktalny pokazuje samo podobieństwo i złożoność sygnałów fizjologicznych. Większe wartości wymiaru fraktalnego świadczą o większych zdolnościach

adaptacyjnych układu kontroli posturalnej. Niższe wartości mówią o mniejszej złożoności mechanizmów uczestniczących w regulacji równowagi. Celem pracy była ocena stabilności posturalnej u osób zdrowych przy zmieniającym się polu powierzchni podparcia wynikającego z różnego ustawienia stóp za pomocą miar liniowych i nieliniowych.

## 2. MATERIAŁ I METODY

W badaniach wzięły udział 33 młode, zdrowe osoby, uprawiające amatorsko sport, bez chorób ze strony układu nerwowego oraz mięśniowo-szkieletowego a także dolegliwości bólowych w dniu pomiaru. Charakterystyka grupy badanej znajduje się w Tabeli 1.

**Tabela 1. Charakterystyka grupy badanej**

Grupa	Masa ciała [kg]	Wiek [lata]	Wysokość ciała [cm]
(n = 33)	67.85 ± 11.53	21.88 ± 1.65	174.21 ± 7.67

Badania zostały przeprowadzone przy użyciu platformy AMTI AccuSway (Advanced Mechanical Technology, Inc. USA). Częstotliwość rejestracji została ustalona na 100 Hz. Wykonano 3 pomiary w warunkach oczu otwartych: stanie obunóż (2oo), stanie jednonóż (1oo), stanie w tandemie - stopa za stopą (too). Czas trwania każdej próby wynosił 30 sekund. W przypadku utraty równowagi lub przemieszczenia się stopy w trakcie nagrania, próba była powtarzana maksymalnie 3 razy. Każdy z badanych w trakcie stania na jednej kończynie dolnej wybierał kończynę dominującą. Stanie w tandemie było ustalane na podstawie pytania: Którą nogą kopnąłbyś piłkę? W przypadku odpowiedzi dotyczącej prawej kończyny dolnej – w tandemie jako pierwszą ustawiano stopę przeciwną. Dla każdej osoby badanej eksportowano osobno współrzędne x i y drogi CoP, w celu przeprowadzenia analizy miarami liniowymi i nieliniowymi. Na podstawie wzoru (1) została policzona długość drogi CoP (Path length), w każdej próbie osobno.

$$Path\ length = \sum_{i=2}^n \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (1)$$

Przy użyciu programu MatLab (MathWorks, USA) został policzony współczynnik entropii próbkowej – SampEn (m, r, N) (2), w kierunkach (x, y), gdzie: x – ruchy boczno - przysrodkowe, y – ruchy przód – tył. Entropia oblicza prawdopodobieństwo, że sekwencja m punktów, powtarzających się w granicach tolerancji r, również powtarza się dla m + 1 punktów.

$$SampEn(m, r, N) = -\ln \frac{A^m(r)}{B^m(r)} \quad (2)$$

gdzie:  $B^m(r) = (N - m)^{-1} \sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r)$  - oznacza prawdopodobieństwo, że dwie sekwencje danych będą do siebie podobne dla m punktów;  $A^m(r) = (N - m)^{-1} \sum_{i=1}^{N-m} A_i^m(r)$  - prawdopodobieństwo, że będą do siebie podobne również dla m + 1 punktów [4]. Wartości r = 0.2, m = 2 są wartościami umownymi i najczęściej stosowanymi do analizy sygnału CoP [6].

Wykładnik Lapunowa (LyE) został policzony, aby zidentyfikować chaos w badanym systemie. Mówi on, że jeśli średnia odległość między punktami (trajektoriami) wzrasta w tempie wykładniczym, to system jest wrażliwy na zmianę warunków początkowych i wartość wykładnika Lapunowa jest większa od 0. Parametr obliczono z równania (3), gdzie: d(t) - średnia dywergencja w czasie, c - stała.

$$d(t) = Ce^{LyEt} \quad (3)$$

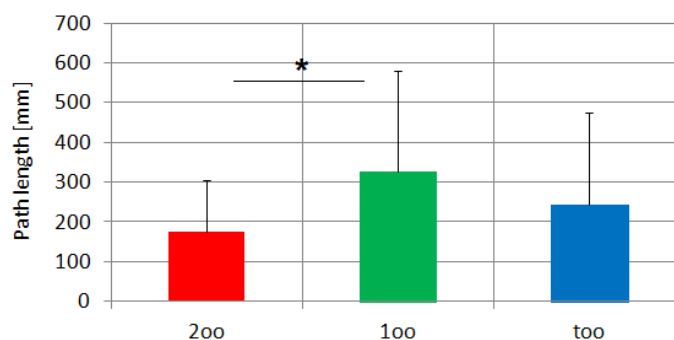
Wartości  $LyE > 0$  - oznaczają, że układ jest chaotyczny,  $LyE = 0$  - oznaczają system w stanie stabilnym,  $LyE < 0$  - układ dążący do stanu stabilnego. Istnienie dodatniego  $LyE$  to warunek konieczny dla potwierdzenia obecności chaosu w układzie. Wymiar fraktalny (FD) został policzony według algorytmu Higuchi (1988) [6]. Następnie dla wszystkich parametrów nieliniowych została policzona wartość średnia uwzględniająca dwie płaszczyzny (x, y), co umożliwiło spójną interpretację wyników. Analiza statystyczna została wykonana w programie Statistica v.12 (StatSoft, PL), dla poziomu istotności  $p \leq 0.05$ . Sprawdzono normalność rozkładu wszystkich parametrów testem Shapiro-Wilka. Wykonano nieparametryczny test ANOVA dla prób niezależnych Kruskal-Wallis. Następnie wykonano test post-hoc wielokrotnych porównań średnich rang dla wszystkich prób.

### 3. WYNIKI

Analiza wyników została opisana w pięciu kolejnych podrozdziałach, gdzie pokazano w jaki sposób parametr liniowy (długość drogi CoP) oraz parametry nieliniowe: SampEn, LyE oraz FD reagują na modyfikację zadania stabilnościowego, polegającego na zmianie pola powierzchni podparcia ze stania obunóż, na stanie jednoonóż i mało naturalne - stanie w tandemie. Dane zostały przeanalizowane osobno w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej. Ostatni rozdział stanowi podsumowanie analiz miarami nieliniowymi, gdzie zostały porównanie wartości średnie z płaszczyzny x i y.

#### 3.1 Długość ścieżki

W teście Shapiro-Wilka dla parametru Path length uzyskano rozkład różny od normalnego dla wszystkich prób. Przy użyciu testu Kruskal-Wallis wykazano różnice istotną statystycznie:  $H(2, N = 99) = 9.94, p = 0.0069$ .



Rys.1 Wartości średnie i odchylenia standardowe długości drogi CoP podczas wykonywanych prób 2oo, 1oo i too, gdzie: \* - różnice istotne statystycznie  $p \leq 0.05$

Po przeprowadzeniu testu post-hoc wielokrotnych porównań średnich rang pokazano, że istnieją różnice istotne statystycznie tylko między próbami 1oo i 2oo ( $p = 0.0063$ ). Wykazano, że długość drogi parcia stóp na podłoże była najdłuższa dla próby 1oo, następnie dla próby too. Najkrótszą drogę uzyskano w próbie 2oo (Rys. 1).

### 3.2 Entropia próbkowa

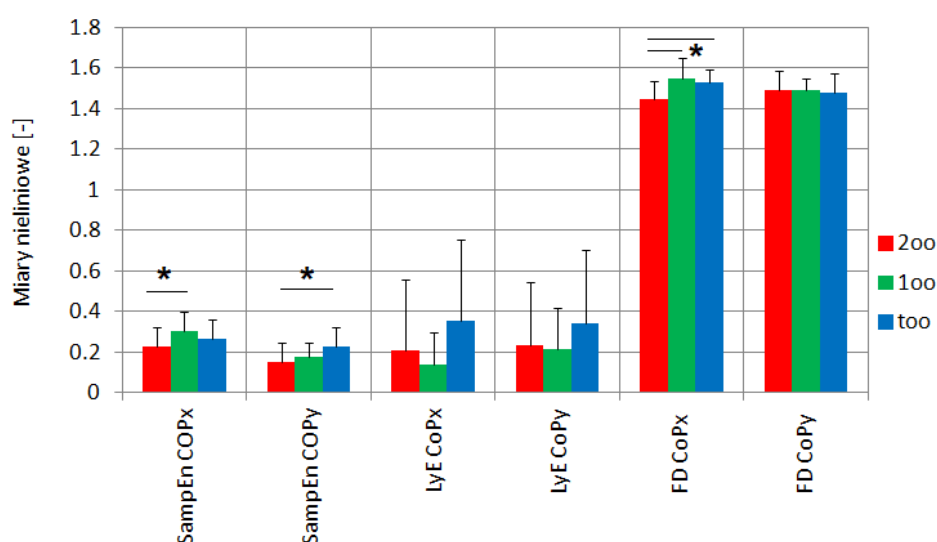
Po przeprowadzeniu testu normalności Shapiro-Wilka rozkłady różne od normalnych uzyskano dla: SampEn CoPx\_200, SampEn CoPy\_200 oraz SampEn CoPy\_100. Dla parametru SampEn CoPx i SampEn CoPy wykazano różnice istotne statystycznie odpowiednio:  $H(2, N = 99) = 49.49, p = 0.0082$ , oraz  $H(2, N = 99) = 15.24, p = 0.0005$ . Po przeprowadzeniu testu post-hoc wielokrotnych porównań średnich rang, wykazano, że istnieją różnice istotne statystycznie dla SampEn CoPx między próbami 100 (SampEn =  $0.30 \pm 0.08$ ) i 200 (SampEn =  $0.23 \pm 0.09$ ). Dla SampEn CoPy – między próbami 100 (SampEn =  $0.22 \pm 0.09$ ) i 200 (SampEn =  $0.15 \pm 0.09$ ) (Rys. 2).

### 3.3 Wykładnik Lapunowa

Po przeprowadzeniu testu normalności Shapiro-Wilka rozkłady różne od normalnych uzyskano dla wszystkich wykładników Lapunowa liczonych dla wszystkich prób i w każdym kierunku. Nie wykazano różnic istotnych statystycznie dla poszczególnych prób. W obydwu kierunkach, dla poszczególnych prób LyE uzyskiwał podobne wartości. Najwyższą wartość wykładnik LyE osiągnął w próbie 200 w obydwu kierunkach, która była odpowiednio o 154% (dla x) i 59% (dla y) większa niż ta najniższa uzyskana dla próby 100 (Rys. 2).

### 3.4 Wymiar fraktalny

Po przeprowadzaniu testu normalności Shapiro-Wilka, wykazano, że wszystkie zmienne mają rozkład normalny. Dla parametru FD CoPx wykazano różnice istotne statystycznie:  $H(2, N = 99) = 19.69, p = 0.0001$ . Po przeprowadzeniu test post-hoc wielokrotnych porównań średnich rang, wykazano, że istnieją różnice istotne statystycznie dla FD CoPx między próbami: 100 ( $1.52 \pm 0.06$ ) i 200 ( $1.44 \pm 0.09$ ) oraz między 100 ( $1.54 \pm 0.10$ ) i 200 ( $1.44 \pm 0.09$ ) (Rys.2). Przy czym wymiar fraktalny był najwyższy dla 100 i najniższy dla 200 (w obydwu kierunkach).



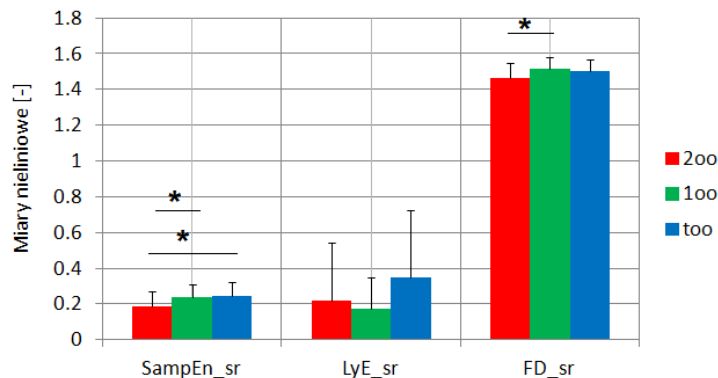
Rys.2 Wartości średnie i odchylenie standardowe dla parametrów nieliniowych w badanej grupie podczas przeprowadzania prób dla każdej z płaszczyzn (x- płaszczyzna czołowa, y- płaszczyzna poprzeczna), gdzie: \* - różnice istotne statystycznie  $p \leq 0.05$

Podsumowując, uzyskane wyniki (Rys. 2) pokazują, że współczynnik entropii próbkowej oraz wymiar fraktalny wydają się być nośnikami nowych informacji. Obydwa wskaźniki

SampEn (dla płaszczyzny y) i FD (dla płaszczyzny x) pokazały istnienie różnic istotnych statystycznie między próbą 200 oraz 100, czego nie wykazała miara liniowa – długość drogi CoP. W związku z taką informacją zdecydowano się na policzenie średnich z płaszczyzn. Analiza została przedstawiona w rozdziale 3.5.

### 3.5 Zestawienie średnich wartości współczynników nieliniowych

Po wykonaniu testu Shapiro-Wilka uzyskano rozkład różny od normalnego dla LyE\_sr dla wszystkich prób. Następnie po przeprowadzeniu testu Kruskal-Walisa wykazano różnice istotnie statystycznie dla SampEn\_sr:  $H(2, N = 99) = 10.95, p = 0.0042$  oraz FD\_sr:  $H(2, N = 99) = 8.24, p = 0.0162$  (Rys. 3). Po przeprowadzeniu testu post-hoc wielokrotnych porównań średnich rang, wykazano, że istnieją różnice istotne statystycznie dla FD\_sr dla prób 200 i 100,  $p = 0.1620$ ; SampEn\_sr dla prób 200 i 100 oraz 200 i 100. Takie wyniki wskazują, że entropia jest jedynym współczynnikiem, który uchwycił różnice między stanem na dwóch kończynach dolnych w różnej konfiguracji ustawienia stóp.



Rys. 3 Średnie wartości i odchylenia standardowe współczynników nieliniowych dla prób 200, 100 i 100, gdzie: \* - różnice istotne statystycznie  $p \leq 0.05$

Najwyższe wartości entropii oraz wykładnika Lapunowa uzyskano dla próby stania w tandemie. Najwyższe wartości wymiaru fraktalnego notuje się dla próby stania na jednej kończynie dolnej. Najniższe wartości entropii i wymiaru fraktalnego uzyskano w próbie stania na dwóch kończynach dolnych. Wykładnik Lapunowa osiągnął najniższe wartości przy próbie stania na jednej kończynie dolnej.

## 4. DYSKUSJA

Stabilność posturalna oceniana jest metodami liniowymi i nieliniowymi. Miary liniowe wydają się dawać tylko ilościową informację o zachowaniu sygnału CoP. Analiza miarami nieliniowymi pozwala na szerszą i bardziej kompleksową ocenę zachowania sygnału CoP próbując odpowiedzieć na pytanie jak dobrze kontrolowany jest ruch. Wykazano, że zmniejszenie pola płaszczyzny podparcia powoduje wzrost współczynnika entropii próbkowej w płaszczyznach x i y, wymiaru fraktalnego w płaszczyźnie x. Ustawienie stóp w tandemie spowodowało wzrost wykładnika Lapunowa dla płaszczyzn x i y. Wysoką entropię obserwuje się dla stania w tandemie w płaszczyźnie y. Wyższe wartości entropii otrzymywane w próbach stania w tandemie i na jednej kończynie dolnej świadczą, o bardziej złożonej kontroli równowagi w trakcie tego pomiaru i dużej nieregularności sygnału CoP badanych. Wysoki wykładnik Lapunowa dla stania w tandemie dla obydwu płaszczyzn wskazuje na zdolność szybkiej reakcji układu na wychwiania zewnętrzne oraz destabilizację; co mówi o dobrej

kontroli posturalnej. Natomiast wysokie wartości wymiaru fraktalnego w zdaniach 100 i too świadczą o wysokiej złożoności kontroli posturalnej. Najwyższa wartość długości ścieżki wystąpiła podczas stania na jednej kończynie dolnej. Osoby młode, zdrowe cechują się ogólnie wyższymi wartościami ww. współczynników co potwierdzają badania innych autorów [7, 8]. Osoby zdrowe osiągają wyższe wartości współczynników, w porównaniu z chorującymi na choroby aparatu ruchu czy neurologiczne [8]. Porównując średnie wartości współczynników dla danych prób okazuje się, że najwyższe wartości otrzymano w staniu na jednej kończynie dolnej (SampEn\_sr i FD\_sr). Najwyższą wartość LyE\_sr otrzymano dla próby stania w tandemie. Najniższe wartości SampEn\_sr i FD\_sr otrzymano dla stania na dwóch kończynach dolnych. Najniższą wartość LyE\_sr w staniu na jednej kończynie dolnej. Dla zdrowych, młodych osób wysoki poziom współczynników przy zmniejszonym polu powierzchni podparcia sugeruje bardzo dużą nieregularność, dobrą kontrolę postawy, elastyczne dostosowywanie się do warunków zewnętrznych a także wysoki poziom automatyzmu w danej sytuacji. Niski poziom współczynników otrzymany przy staniu na dwóch kończynach (najłatwiejsze warunki) pokazuje, że osoby nie musiały poświęcać dużo uwagi na zadanie równoważne, tym samym tę pozycję cechowała większa regularność sygnału. Stanie w tandemie, jako niecodzienna pozycja, zmuszała do większego poświęcenia uwagi na zadanie równoważne, cechowała się wysokim poziomem złożoności zdania (wysoka wartość FD CoPy, LyE CoPx i CoPy). Podsumowując, używając miary liniowej wykazano tylko istotnie statystycznie wyższe wartości drogi CoP dla stania na jednej kończynie dolnej w porównaniu do stania na dwóch kończynach dolnych. Użycie miar nieliniowych spowodowało, pojawienie się nowych informacji. Obydwa wskaźniki SampEn (dla płaszczyzny y) i FD (dla płaszczyzny x) pokazały istnienie różnic istotnych statystycznie dodatkowo między próbą 200 oraz too, czego nie wykazała miara liniowa. Analiza średnich miar z płaszczyzn pokazała, że entropia jest jedynym współczynnikiem, który uchwycił istotne różnice między staniami na dwóch kończynach dolnych w różnej konfiguracji ustawienia stóp (200 oraz too), dlatego też wydaje się że stanowi ona dobre uzupełnienie miar liniowych.

## LITERATURA

- [1] Horak FB.: Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age Ageing*, 35, vol.2,2006, p. ii7-ii11.
- [2] Yamada M.: Natura of variability in rhythmical movement. *Human Movement Science*, vol. 14, 1995, p.371-384.
- [3] Ghorfani M., Olyaei G., Talebian S., et al.: Test-retest reliability of linear and nonlinear measures of postural stability during visual deprivation in healthy subjects. *The Journal of Physical Therapy Science*, vol.29(10), 2017, p.1766-1771.
- [4] Masedu F., Angelozzi M., Di Giminiani R., et al. : The use of fractal dimension methods in clinical epidemiology: an application for postural assessment. *Epidemiology Biostatistics and Public Health*, vol. 10 (1), 2013, p.e8735-1 – e8735-8.
- [5] Hansen C., Wei Q., Shieh J., et al.: Sample Entropy, univariate and multivariate multi-scale entropy in comparison with classical postural sway parameters in young healthy adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, vol.11, 2017, p.1-10. Ichi T.,
- [6] Hiugichi T.: Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol.31, 1988, p. 277-283.
- [7] Raffalt P.C., Chrysanthou G.N., et al.: Dynamics of postural control in individuals with ankle instability: Effect of visual input and orthotic use. *Comput Biol Med.*, vol.110,2019,p.120-126.
- [8] Raffalt P.C., Spedden M.E., Geertsen S.S.: Dynamics of postural control during bilateral stance- effect of support area, visual input and age. *Human Movement Science*, vol.67, 2019,p.1-10.

## ASSESSMENT OF POSTURAL STABILITY AS A FUNCTION OF CHANGING SUPPORT SURFACE

**Abstract:** The aim of the study was to assess postural stability under different base of support: both foot standing, one-leg standing and tandem with eyes open. A group of thirty-three healthy persons aged  $21.88 \pm 1.65$  years participated in the study. The tests were carried out using the AMTI AccuSway platform. The locations of the center of foot pressure (CoP) in the X and Y planes were exported. Then the CoP path length and nonlinear dynamics coefficients were calculated: sample entropy, fractal dimension and Lapunov exponent. It has been shown that the reduction of the support surface area causes a significant increase in the sample entropy factor and the fractal dimension.

\* Praca realizowana w ramach Szkoły Naukowej „Diagnostyka narządu ruchu w wybranych dysfunkcjach jako podstawa planowania procesu rehabilitacji” AWF Warszawa.