
1. WSTĘP

Jednym z kluczowych zagadnień biomechanicznej analizy chodu jest pomiar przemieszczeń ogólnego środka ciężkości ciała (OSC) oraz określenie jego wpływu na zjawisko transformacji energii w mechanizmie odwróconego wahadła.

Przestrzenny schemat przemieszczania OSC z jednego miejsca do drugiego jest naturalnym elementem dwunożnej lokomocji. Wykorzystywano go zarówno w matematycznym modelowaniu chodu (Onyshko i Winter 1980; Caldwell i Forrester 1992; Zatsiorsky i wsp. 1994; Berbyuk i wsp. 1999; Vaughan i wsp. 1999; Neptune i wsp. 2004), jak i eksperymentalnej analizie chodu na potrzeby kliniczne oraz sportu (Thirunarayan i wsp. 1996; Whittle 1997; Sutherland 2002; Cavagna i wsp. 2002; Chwała i wsp. 2007; Winter 2009; Tesio i wsp. 2010). Badacze stosowali ją do oceny stopnia symetrii chodu (Cavagna i wsp. 1983a, 1983b; Crowe i wsp. 1992; Gard i wsp. 1996) czy też jako wielkość charakteryzującą jakość chodu (Saunders i wsp. 1953; Bowker i Hall 1975). Oscylacje OSC wykorzystywano także do obliczania wydajności chodu (Saunders i wsp. 1953; Cavagna i wsp. 1983a, 1983b) czy analizowania zmian składowych energii kinetycznej i potencjalnej podczas chodu (Cavagna i wsp. 1975; Tesio i wsp. 1985; Iida i Yamamuro 1987; Tesio i wsp. 1998a, 1998b). Zmianami położenia OSC w cyklu posługiwano się również w celu określenia wartości pracy wewnętrznej i zewnętrznej wykonywanej podczas chodu (Cavagna i wsp. 1963; Cavagna i Margaria 1966; Donelan i Kram 2000; Donelan i wsp. 2002a, 2002b).

Analizę zakresów zmian położenia OSC przedstawiano powszechnie także w pracach dotyczących lokomocji zwierząt (Cavagna i Margaria 1966; Heglund i wsp. 1982; Full 1989; Farley i Ko 1997; Griffin i Kram 2000; Main i wsp. 2000). Często wnioski i spostrzeżenia poczynione w trakcie obserwacji lokomocji różnych gatunków zwierząt były później wykorzystywane do przygotowywania pomiarów z udziałem ludzi czy też modelowania chodu dwunożnych robotów.

Badania zmian położenia OSC podczas chodu prowadzono w licznych ośrodkach i za pomocą różnorodnych metod, a uzyskane wyniki prezentowano w wieloraki sposób.

Przeprowadzona analiza literatury wykazała jednak brak w prezentowanych publikacjach jednoznacznych i kompleksowych wyników, dotyczących oceny zmian położenia OSC w funkcji rosnącej prędkości chodu. Uwaga dotyczy zwłaszcza szerokiego zakresu zmian prędkości chodu w reprezentatywnych grupach badanych osób (Saunders i wsp. 1953; Murray i wsp. 1964; Perry 1992; Inman i wsp. 1994; Kerrigan i wsp. 1995, 2000; Eames i wsp. 1999; Gard i Childress 1999; Smith i wsp. 2002; Gard i wsp. 2004; Orendurff i wsp. 2004; Ortega i Farley 2005, 2007; Hernandez i wsp. 2009; Tesio i wsp. 2010, 2011).

Jak udało się bezsprzecznie przedstawić w cytowanych powyżej pracach, zakresy zmian położenia środka ciężkości w cyklu chodu uzależnione są od długości i częstotliwości kroków. Nad pozostałymi istotnymi czynnikami, mogącymi mieć wpływ na oscylacje OSC, nadal prowadzona jest ożywiona dyskusja.

Zróznicowanie wyników podawanych przez poszczególne zespoły badaczy jest wyraźne, a powszechne przedstawianie uzyskanych rezultatów w wartościach bezwzględnych przemieszczeń środka ciężkości – z pominięciem ich standaryzacji, która eliminuje wpływ budowy somatycznej na uzyskane wyniki – utrudnia w sposób zasadniczy ich obiektywną interpretację (Gard i wsp. 2004).

Jedynie w niewielu pracach wyniki zmian położenia OSC były standaryzowane (Abel i Damiano 1996; Smith i wsp. 2002; Bennett i wsp. 2005, 2012). W pracach, w których dokonano takiej standaryzacji, w przeprowadzonych obliczeniach stosowano różne kryteria, począwszy od wysokości ciała, przez długość kończyny, na długości kroku kończąc. Standaryzacja wyników zmian położenia OSC posiada wyjątkowe znaczenie, zwłaszcza wtedy, gdy mamy do czynienia z wyraźnym zróżnicowaniem budowy somatycznej badanych osób, wskutek czego ich kroki mają indywidualną długość i częstotliwość.

Wyniki zmian położenia OSC podczas chodu analizowane były dotąd najczęściej jedynie w płaszczyźnie strzałkowej względem osi pionowej podczas chodu z preferowaną prędkością, a badania prowadzono w małych grupach, które liczyły zaledwie kilka osób (Pandy i Berme 1989a, 1989b; Kerrigan i wsp. 1995, 2000; Gard i Childress 1999; Della Croce i wsp. 2001; Pandy 2003; Winter 2009). Zmiany prędkości, w których badano oscylacje środka ciężkości, najczęściej zawierały się w granicach od ok. 1 do 1,5 m·s⁻¹. Dotyczyły zatem dość wąskiego zakresu zmian prędkości chodu, znacznie odbiegającego od wartości obserwowanych w chodzie szybkim i sportowym.

Widoczny jest również brak w cytowanych już pracach pełnego spektrum zmian położenia OSC względem obu kierunków ruchu, w pełnym zakresie zmian prędkości chodu fizjologicznego, opartego na reprezentatywnych grupach pomiarowych, w których badane osoby chodziły po płaskiej nawierzchni z naturalną i zwiększoną prędkością chodu. Spełnienie powyższych warunków rejestracji i analizy chodu pozwoliłoby w konsekwencji na zastosowanie wiarygodnych narzędzi statystycznych do ich porównania. Formułowane w cytowanych pracach wnioski z konieczności musiały się zatem odnosić do małych liczebnie zbiorowości badanych, a ich szerszych uogólnień dokonano jedynie w nielicznych pracach.

Dodatkowym elementem, mającym istotny wpływ na wartość naukową prowadzonych dotychczas badań, dotyczących zmian położenia OSC podczas chodu, był sposób realizacji eksperymentów pomiarowych. W pracach, w których autorzy przedstawiali zmiany położenia OSC w funkcji zmian prędkości chodu, w zdecydowanej większości posługiwano się metodologią opartą na wymuszaniu określonej prędkości chodu w badaniach na bieżni ruchomej. Wiadomo jednak, że nie został dotąd jednoznacznie rozstrzygnięty spór dotyczący różnic wzorca chodu na bieżni ruchomej

i chodu swobodnego na płaskiej nawierzchni (Riley i wsp. 2007; Zanetti i Schieppati 2007; Mahaudens i wsp. 2009). Wyniki analizy zmian położenia OSC podczas chodu z wykorzystaniem bieżni ruchomej mogą różnić się od tych uzyskanych podczas chodu rejestrowanego na płaskiej nawierzchni, a tym samym powodować różnice w ich interpretacji (Zanetti i Schieppati 2007; Mahaudens i wsp. 2009). Konsekwencją przedstawionych faktów były trudności w porównywaniu, systematyzowaniu i prawidłowej analizie wyników badań zamieszczanych w różnych pracach, do których uzyskania wykorzystywano zróżnicowaną metodologię badań.

Wiemy jednak zdecydowanie mniej na temat prawidłowości dotyczących zmian położenia środka ciężkości czy mechanizmu odzyskiwania energii w obszarze badań chodu sportowego niż w przypadku chodu fizjologicznego. Analizując literaturę, nie natrafiono na istotne zagraniczne publikacje na temat analizy trajektorii ruchu środka ciężkości ciała chodźcy sportowych. Wyjątkiem okazała się praca Murraya i wsp. (1983), w której podano jedynie zakresy pionowych oscylacji środka ciężkości dwóch chodźcy, z pominięciem wnikliwej analizy zmian jego położenia w cyklu. W Polsce natomiast powstało kilka prac na ten temat (Ruchlewicz i wsp. 2006a, 2006b; Klimek i Chwała 2007; Chwała i wsp. 2009; Chwała 2009). W pierwszych z nich posłużono się przedstawieniem toru ruchu OSC przykładowego chodźcy do wskazania jego możliwego wpływu na wielkość rozwijanej energii potencjalnej (Ruchlewicz i wsp. 2006a, 2006b; Klimek i Chwała 2007). Dopiero w ostatniej pracy poruszającej ten temat zamieszczono uśrednione wykresy przebiegów OSC względem obu kierunków ruchu dla kilkunastoosobowej grupy sportowców (Chwała i wsp. 2009).

Specyfika chodu sportowego skłania do umiejscowienia go pomiędzy szybkim chodem fizjologicznym a biegiem. Pojawia się wiele istotnych pytań z tym związanych. Wyjątkowo interesujące jest to, czy OSC zachowuje swój charakter zmian podczas zwiększania prędkości chodu i przejścia od chodu fizjologicznego do chodu sportowego? W jakim zakresie zwiększają się pionowe zmiany położenia OSC przy rosnącej prędkości ruchu i czy ich wzrost jest liniowy? Czy przejście od szybkiego chodu swobodnego do chodu sportowego charakteryzuje się nagłą zmianą mechanicznego wzorca odzyskiwania energii w mechanizmie odwróconego wahadła, czy też jest kontynuacją pozafazowej fluktuacji energii kinetycznej i potencjalnej? Niestety, do tej pory nie znamy odpowiedzi na te pytania.

Zamierzeniem autora było uzyskanie wiarygodnych odpowiedzi na te i inne pytania przez przeprowadzenie analizy uśrednionego schematu pionowych i bocznych zmian położenia środka ciężkości ciała w cyklu oraz analizę sprawności mechanizmu odzyskiwania energii w grupach osób poruszających się z rosnącą prędkością chodu fizjologicznego oraz sportowego.

Na podstawie uzyskanych wyników, które odzwierciedlały średni schemat zmian położenia OSC podczas rozwijania określonej prędkości, postanowiono również sprawdzić, czy pionowe i boczne oscylacje środka ciężkości standaryzowane względem wysokości ciała i przebytego dystansu istotnie różnią się między przebiegami

charakteryzującymi obie formy lokomocji. Istotnym uzupełnieniem wiedzy byłoby także wskazanie wzajemnych relacji występujących między pionowym i bocznym torem ruchu OSC w poszczególnych fazach chodu fizjologicznego i sportowego, uzyskanych podczas zwiększania prędkości chodu.

Przestrzenne zmiany położenia OSC oraz rozwijana prędkość chodu stanowią podstawę do obliczania wartości rozwijanej energii potencjalnej środka ciężkości ciała, energii kinetycznej czy jej składowych w poszczególnych kierunkach ruchu. Zmiany poszczególnych rodzajów energii pociągają za sobą z kolei konieczność wykonywania zróżnicowanej pracy zewnętrznej przez mięśnie współpracujące z siłami pola grawitacyjnego, których zadanie polega na kontroli zarówno prędkości przemieszczania, jak i schematu zmian położenia OSC.

Na wzajemnych relacjach między energią potencjalną i kinetyczną środka ciężkości ciała oparty jest mechanizm ich przetwarzania w cyklu, umożliwiający oszczędzanie energii podczas chodu. Znane są prace, w których szacowano sprawność mechanizmu przetwarzania energii podczas chodu za pomocą wskaźnika odzyskiwania energii i kąta przesunięcia fazowego. Dokonywane analizy opierały się jednak tylko na wartości średniej wskaźnika odzyskiwania energii, nie charakteryzując jego zmian w poszczególnych fazach cyklu chodu, a badania będące ich podstawą prowadzono zazwyczaj w grupach o małej liczebności, obejmujących od kilku do kilkunastu osób (Cavagna i wsp. 1976, 1977, 1983; Maloij i wsp. 1986; Tesio i wsp. 1998a, 1998b; Griffin i wsp. 1999).

Jak pisali Geyer i wsp. (2005), niewiele wiadomo na temat przebiegu mechanizmu zjawiska transformacji składowych energii OSC podczas zwiększania prędkości chodu swobodnego do wartości prędkości granicznej i przechodzenia do biegu. Stwierdzić natomiast wypada, że daje się zauważyć brak opracowań na temat przebiegu tego zjawiska podczas wyraźnego przekroczenia prędkości granicznej chodu fizjologicznego przy jednoczesnym zachowaniu struktury chodu (występowanie fazy dwupodporowej). Takim schematem ruchu charakteryzuje się właśnie prawidłowy chód sportowy i to odróżnia go od biegu.

Analizując literaturę, nie natrafiono na znaczące prace porównujące w tym zakresie wzorce chodu z naturalną prędkością, chodu szybkiego i chodu sportowego, co należy uznać za istotny brak wiedzy z zakresu analizy lokomocji. Stanowił on jedną z przesłanek do zgłębienia tego tematu w niniejszym opracowaniu.

Nie natrafiono również na opracowania prezentujące eksperymentalne wyniki zmian w mechanizmie odzyskiwania energii w poszczególnych wąskich przedziałach względnego czasu cyklu chodu. Do tej pory jedynie w pracach, których autorami byli Cavagna i wsp. (2002) oraz Minetti i wsp. (2011), zaprezentowano próbę przewidywania zmian wartości wskaźnika w fazie podporowej na podstawie średnich wartości krzywych Lissajous, lecz – jak podaje jeden z przytoczonych autorów (Minetti i wsp. 2011) – metoda ta nie należy do dokładnych ze względu na możliwość niedoszacowania lub przeszacowania wartości pracy zewnętrznej przez przyjęcie w obliczeniach zbyt dużej lub zbyt małej liczby harmonicznych.

Najczęściej podawano jedynie średnią wartość wskaźnika odzyskiwania energii w całym cyklu, lecz takie podejście nie charakteryzuje przebiegu mechanizmu transformacji energii podczas realizacji zróżnicowanych zadań układu ruchu w poszczególnych fazach chodu. Jest to zagadnienie niezwykle istotne, gdyż pozwala na zidentyfikowanie w cyklu okresów o wysokim i niskim poziomie przetwarzania składowych energii, co z kolei pozwoli na właściwą interpretację zadań realizowanych przez układ ruchu w kolejnych fazach chodu.

Wychodząc naprzeciw tym oczekiwaniom, w przedmiotowej pracy podjęto próbę oszacowania i zaprezentowania zmian wskaźnika odzyskiwania energii w jednoprotentowych przedziałach względnego czasu cyklu, co umożliwiłoby w znacznym stopniu uwiarygodnić przebieg jego chwilowych zmian i odnieść go do zmian trajektorii OSC.

Poznanie tego mechanizmu w wąskich przedziałach względnego czasu cyklu może być wykorzystane w przyszłości do identyfikacji zaburzeń występujących w różnych rodzajach schematów chodu patologicznego, a na ich podstawie do tworzenia skutecznych programów terapeutycznych czy też do wieloaspektowej oceny schematów chodu osób zdrowych. W chodzie sportowym znajomość tego mechanizmu pozwoli na poszukiwanie takich rozwiązań technicznych, które zaowocują podniesieniem jego efektywności.

Niestety, niewiele do tej pory wiadomo o mechanizmie przetwarzania energii w chodzie sportowym. Nie powstała dotąd żadna, nawet wstępna, praca na ten temat, która byłaby dostępna w naukowych bazach danych. Znane są częściowe doniesienia, wskazujące na przebieg tego procesu podczas chodu fizjologicznego i biegu, natomiast chód sportowy, usytuowany pod względem wskaźnika *duty factor* na pograniczu obu form lokomocji, nie został do tej pory pod tym kątem zbadany. Stanowiło to kolejną istotną przesłankę skłaniającą autora do podjęcia tego tematu i dokładnego opisanie mechanizmu transformacji energii zarówno w chodzie fizjologicznym z rosnącą linio-wo średnią prędkością chodu, jak i w chodzie sportowym.

Istotnym zagadnieniem z punktu widzenia oceny techniki obu rodzajów chodu jest nie tylko określenie istotnych różnic między średnimi standaryzowanymi zakresami zmian położenia OSC, wartości poszczególnych rodzajów energii czy wskaźnika jej odzyskiwania, odnotowanymi dla rosnących prędkości chodu, ale także udzielenie odpowiedzi na pytanie, czy przebiegi różnią się między sobą kształtem w całym cyklu chodu.

Średnie wartości zmiennych w badanych grupach mogą zasadniczo nie wykazywać istotnych różnic statystycznych w całym cyklu, ale mogą jednocześnie się różnić w poszczególnych jego względnych przedziałach czasowych, co z kolei może istotnie wpłynąć na ostateczną ocenę realizowanego przez poszczególne osoby schematu chodu. Dlatego analizy statystyczne prowadzono dwuetapowo. W celu weryfikacji postawionych hipotez zastosowano analizę wariancji, uzupełnioną analizą podobieństwa profili przebiegów. Ta ostatnia służyła ustaleniu, czy przebiegi standaryzowanych chwilowych wartości zmiennych w cyklu chodu są do siebie podobne w poszczególnych fazach chodu, czy też różnią się między sobą. Zamierzeniem autora

było sporządzenie dokładniejszego opisu zmian analizowanych zmiennych w cyklu w celu lepszego zrozumienia opisywanych mechanizmów, rządzących zmianami ich chwilowych wartości, oraz zweryfikowanie dotychczasowej fragmentarycznej wiedzy na ten temat.

Dzięki postawionym hipotezom autor spodziewa się uzyskać charakterystykę podobieństwa i różnic między chodem fizjologicznym i sportowym w aspekcie schematów zmian położenia OSC oraz przebiegu mechanizmu odzyskiwania energii w obu formach lokomocji, zdeterminowanych rosnącą prędkością chodu. Stworzy to płaszczyznę do praktycznego ich wykorzystania w przyszłości w różnych dziedzinach aktywności człowieka.

Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawione mankamenty, dotyczące zarówno stosowanych metodologii badań, jak i prezentacji uzyskanych wyników, dają obraz niepełnego stanu wiedzy na temat wpływu prędkości chodu na zmiany pionowego i bocznego położenia środka ciężkości ciała oraz przebiegu mechanizmu wzajemnej transformacji energii kinetycznej i potencjalnej w chodzie fizjologicznym, a zwłaszcza sportowym. Przedstawione rzeczowe argumenty stały się przesłanką do podjęcia tematu pracy i zweryfikowania oraz usystematyzowania dotychczasowych spostrzeżeń badaczy na ten temat.