

# Streszczenie rozprawy doktorskiej

## *Reinterpretacja parametrów czasoprzestrzennych chodu*

mgr inż. Klaudia Kozłowska

Promotor: dr hab. inż. Mirosław Łątka

Ludzie z łatwością modyfikują swój chód przy wykonywaniu jednoczesnych zadań lub aby dopasować się do zmieniających się warunków otoczenia. Adaptacja chodu może być osiągnięta, na przykład, przez dostosowywanie: jego szybkości, wysokości podniesienia stopy lub przez wykonywanie ruchów ramion i tułowia. Co interesujące, parametry czasowo-przestrzenne chodu takie jak długość dwukroku (ang. *stride length* – SL), czas dwukroku (ang. *stride time* – ST) i szybkość dwukroku (ang. *stride speed* – SS) fluktuują podczas jednostajnego, prostoliniowego chodzenia czy nawet w ruchu na bieżni. Takie fluktuacje stały się przedmiotem badań naukowych czterdzieści lat temu, lecz pierwsze empiryczne badania nad zmiennością ruchów zostały przeprowadzone znacznie wcześniej, już pod koniec XIX wieku. Zaskakujące jest to, że analiza zmienności motorycznej przyczyniła się do lepszego zrozumienia kontroli ruchów i ich uczenia.

Na przełomie XX i XXI wieku 3-4% fluktuacje ST/SL/SS były uważane za nieskorelowany proces losowy. W 1995 roku Hausdorff i in. odkryli długozasięgowe, persystentne korelacje ST. Ich wybór ułamkowego ruchu Browna do modelowania takich korelacji miał decydujący wpływ na sposób analizy zmienności chodu w kolejnych latach. W swojej rozprawie, Hausdorff i in. zastosowali technikę *detrended fluctuation analysis* (DFA) do wyznaczenia wykładnika skalowania (Hurst), charakteryzującego własności fraktalnych szeregów czasowych. Przez ostatnie ćwierćwiecze, DFA była powszechnie używana do analizy szeregów czasowych chodu oraz innych parametrów fizjologicznych. W tej metodzie zakłada się, że szereg czasowy jest superpozycją dwóch niezależnych elementów: wielomianowego trendu i fluktuacji (sygnału). Jednakże wynik DFA nie pozwala sam w sobie na walidację słuszności założenia o dekompozycji. W większości prac problem ten był ignorowany. Przykładowo, w środowisku badaczy chodu istniał konsensus głoszący, że szereg ST składa się z persystentnych (wykładnik skalowania większy od 0.5), fluktuacji nałożonych na, nieistotne z punktu widzenia źródła korelacji, trendy.

W DFA sygnał jest dzielony na okna różnych długości, w których trend (najczęściej wielomian o wybranym a priori stopniu) jest usuwany. Nie ma jednak żadnej gwarancji, że wielomian taki dobrze modeluje trendy dla każdego okna. W tej rozprawie zastosowałam bardziej ogólną metodę Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) do wyznaczenia trendów w szeregach parametrów czasowo-przestrzennych chodu podczas ruchu na bieżni. Wykładniki skalowania reszt (uzyskanych po odjęciu od eksperymentalnych szeregów ich trendów) obliczyłam za pomocą DFA i madogramu. Przeprowadzona przeze mnie analiza pokazała, że czasy trwania trendów ST i SL były niezależne od szybkości bieżni, a ich rozkłady miały wykładnicze ogony. Trendy ST i SL były silnie skorelowane i statystycznie niezależne od ich reszt. Średnia wykładników skalowania dla reszt ST i SL była nieznacznie mniejsza niż 0.5. Zatem, w przeciwieństwie do interpretacji rozpowszechnionej w literaturze, statystyczne właściwości szeregów czasowych ST i SL wynikały z superpozycji długoczasowych trendów i krótkoczasowych reszt. Trendy są manifoldami, wokół których fluktuują ST i SL. Ponadto, szybkość trendu, zdefiniowana jako iloraz chwilowych wartości trendów SL i ST, jest ściśle kontrolowana wokół szybkości bieżni. Silna korelacja między trendami ST i SL gwarantuje, że ich jednoczesne zmiany ograniczone są do manifoldy stałej szybkości. To sprzężenie jest automatycznym sposobem kontroli szybkości chodu i jest manifestacją reguły minimalnej interwencji (ang. *minimum intervention principle*) kontroli chodu. W obecności losowych perturbacji szybkości pasa bieżni, silnie anypersystentne fluktuacje wokół długich i łagodnych trendów mogą prowadzić do słabej persystencji/antypersystencji szeregów czasowych ST/SL.

Optymalizacja kosztu energetycznego determinuje średnie wartości ST/SL/SS. Jednak podczas chodzenia ludzie muszą ciągle adaptować te parametry w odpowiedzi na egzo- i endogenne perturbacje. Pomimo dokonanych postępów, jesteśmy dalecy od pełnego zrozumienia zasad rządzących taką adaptacją. Na przykład, aby pozostać na bieżni, iloraz długości kroku i czasu jego trwania musi być bliski szybkości bieżni. Doświadczenia z chodzeniem na bieżni z dwoma pasami pokazały złożoność takiej agregacji. W szczególności, przestrzenna i czasowa kontrola lokomocji jest wykonywana przez osobne obwody nerwowe. Kontrola parametrów intralateralnych i interlateralnych jest w dużym zakresie niezależna. W rozprawie zbadałam dynamikę szeregów czasowych ST/SL/SS, następujących po nagłych, znacznych odchyleniach od wartości średniej. W szczególności, zademonstrowałam, że kiedy wartość parametru chodu była dużo większa (mniejsza) od średniej wartości, był ona natychmiastowo kompensowana przez mniejszą (większą) wartość nogi kontralateralnej (kontrola interlateralna) lub odchylenie od średniej malało w kolejnym kroku nogi ipsilateralnej (kontrola intralateralna). Innymi słowy, błędy podczas chodzenia na bieżni nie są stopniowo tłumione przez długoczasowe korekcje, ale są natychmiastowo korygowane przez tę samą lub przeciwną nogę. Odkryłam, że krótkoczasowa kontrola parametrów czasowo-przestrzennych chodu dla osób z preferencją prawej nogi była silniejsza dla nogi prawej.

Podstawowy problem, który pozostał dotąd niezbadany, dotyczy wkładu fluktuacji SL i ST do zmienności SS. Dlatego dokonałam aproksymacji wariancji SS za pomocą liniowej kombinacji: wariancji SL, wariancji ST i kowariancji SL-ST. Następnie wy-

korzystałam ją do wyjaśnienia kontroli chodu na bieżni, której szybkość była zaburzona przez silny, wysokoczęstotliwościowy szum – najprostszy model ciągłej adaptacji chodu. Współczynniki kombinacji są nieliniowymi funkcjami średnich wartości ST i SL, a w konsekwencji są zależne od szybkości. Dokładność zaproponowanej aproksymacji jest dobra zarówno dla zwykłego, jak i zaburzonego chodu. W pierwszym przypadku, prawie 80% wariancji SS pochodziła od fluktuacji SL. W obecności perturbacji, wkład SL maleje wraz ze wzrostem szybkości i amplitudy szumu. Jednakże, jego najniższa wartość jest ciągle dwukrotnie większa od wkładu wariancji ST i kowariancji SL-ST. Tak więc, kontrolowanie szybkości chodzenia odbywa się głównie poprzez zmiany SL. Taka strategia kontrolna jest korzystna ze względu na słabą zależność od szybkości wkładu SL do wariancji SS.

Klaudia Kortowska

27.09.2021