

JANUSZ W. BŁASZCZYK

Instytut Biologii Doświadczalnej im M. Nenckiego PAN
Warszawa

KONTROLA STABILNOŚCI POSTAWY CIAŁA

WSTĘP

Charakterystyczną cechą sylwetki ludzkiej jest pionowe ustawienie osi ciała względem płaszczyzny podparcia. Taka orientacja ciała w polu grawitacyjnym powoduje, że człowiek ustawicznie jest narażony na utratę równowagi. Jedynie dzięki procesom nerwowym związanym z aktywną kontrolą równowagi postawy kompensowane są skutki niestabilności. Oznacza to, że kontrola ta zapewnia optymalny margines stabilności, pozwalający skutecznie realizować wszelką aktywność ruchową z lokomocją włącznie. Sterowanie ruchem i postawą odbywa się poprzez ten sam aparat wykonawczy. Nic więc dziwnego, że dla utrzymania stabilnej postawy jest konieczne ściśle współdziałanie mechanizmów sterowania ruchem i postawą ciała. Dlatego rozdzielenie tych dwóch mechanizmów kontroli jest, nawet w warunkach laboratoryjnych, bardzo trudnym zadaniem. Celem tej pracy jest zapoznanie Czytelnika z najnowszymi koncepcjami dotyczącymi mechanizmów kontroli stabilności postawy ciała oraz metodami jej oceny w celach diagnostycznych.

POSTAWA I JEJ STABILNOŚĆ

Prawidłowa postawa ciała jest niezbędna dla wszelkich czynności czuciowych i ruchowych. Z tej perspektywy kontrola stabilności postawy ma podstawowe znaczenie dla organizmu. Człowiek potrafi sprawnie poruszać się lub wykonywać skomplikowane ruchy manipulacyjne bez narażania się na utratę równowagi. Nie oznacza to jednak, że stabilność jest immanentną cechą postawy pionowej. Wprost przeciwnie, utrzymanie stabilnej postawy pionowej jest związane ze złożonymi procesami zachodzącymi w ośrodkowym układzie nerwowym.

Kontrola postawy i utrzymanie równowagi dotyczą dwóch jakościowo różnych zagadnień. Sterowanie postawą sprowadza się do nadania ciału określonej

sylwetki. Natomiast kontrola stabilności postawy dotyczy zagadnień dynamicznych związanych z utrzymaniem lub przywróceniem postawy ciała w przypadku utraty równowagi. Zakłócenie stabilności postawy może być wywołane zarówno własną aktywnością ruchową organizmu, jak i wynikać z interakcji z otoczeniem.

Wielosegmentowa budowa ciała ludzkiego oraz znaczna jego wysokość w stosunku do niewielkich rozmiarów pola podstawy powodują, że postawa stojąca jest tylko warunkowo stabilna. Oznacza to, że stabilność postawy musi być kontrolowana w sposób ciągły na równi z innymi procesami biologicznymi zachodzącymi w organizmie. Taka ciągła kontrola równowagi posturalnej stanowi swoisty dialog układu nerwowego z otoczeniem. Oznacza to także, że kontrola stabilności musi zapewnić maksimum efektywności przy minimalnych nakładach energetycznych na utrzymanie danej postawy. Musi więc ona spełniać warunki sterowania optymalnego.

Zgodnie z najbardziej ogólną definicją stabilności, równowagę postawy możemy zdefiniować jako zdolność organizmu do odzyskiwania wyznaczonej pozycji w przestrzeni po ustaniu działania bodźca destabilizującego. Traktując ciało jako obiekt czysto geometryczny można stwierdzić, że postawa pionowa jest stabilna tak długo, jak rzut środka ciężkości ciała pozostaje wewnątrz pola podstawy. W tym kontekście, stabilność postawy zależałaby przede wszystkim od cech fizycznych osobnika a w szczególności od jego ciężaru, wysokości oraz od rozmiarów pola podstawy wyznaczonego wielkością i rozstawem stóp. Doskonałą ilustracją tego zagadnienia są walki zapaśników. Ich zmagania można sprowadzić do kolejnych prób destabilizacji postawy przeciwnika. Wiemy, że w tym przypadku ciężar zawodnika oraz jego sylwetka w czasie walki mają zasadnicze znaczenie. Walczący zawodnicy poruszają się na szeroko rozstawionych nogach i mocno ugiętych kolanach w celu obniżenia środka ciężkości.

Wysokość osobnika oraz wielkość pola podstawy nie są jedynymi wyznacznikami stabilności posturalnej. Aktywna rola układu nerwowego w kontroli stabilności wprowadza dodatkowe czynniki decydujące o efektywności utrzymania postawy. Stabilność postawy zależy więc od szybkości z jaką układ nerwowy potrafi wykryć i skorygować zakłócenie stabilności oraz wykonać program ruchowy przeciwdziałający utracie równowagi. Cechy te zależą przede wszystkim od szybkości przetwarzania informacji w układzie nerwowym oraz sprawności aparatu ruchowego. Wszystkie zmiany patologiczne lub funkcjonalne, upośledzające działanie układu sterującego lub wykonawczego, znajdują swoje odbicie w zmianach stabilności postawy.

Zrozumienie procesów związanych z utrzymaniem równowagi wymaga omówienia kilku zagadnień związanych z mechaniką ciała. Przede wszystkim ciało ludzkie posiada budowę o złożonej charakterystyce mechanicznej. Biomechanika ciała a tym samym warunki kontroli stabilności postawy zależą silnie od kierunku działania bodźca destabilizującego. Wynika to, przede wszystkim, z nierównomiernego rozkładu masy mięśniowo-kostnej ciała ludzkiego oraz ze zróżnicowa-

nego zakresu ruchliwości stawów w różnych płaszczyznach. Istotne znaczenie ma też kierunkowość układów sensorycznych, które dostarczają informacji na temat otoczenia oraz stanu w jakim znajduje się organizm. Zależy to, między innymi, od kierunkowości niektórych receptorów, na przykład wzrokowego oraz znacznych różnic w rozmieszczeniu i czułości receptorów czucia głębokiego.

Powszechnie uważa się, że postawa jest wynikiem równowagi pomiędzy aktywnością odpowiednich grup mięśni przeciwstawnych, stabilizujących poszczególne stawy (Feldman 1966). Efektem takiej równowagi jest ściśle określone położenie środka ciężkości ciała w polu postawy (Błaszczyk i in. 1992a, 1993b). Tak więc, sterowanie stabilnością postawy można rozpatrywać jako kontrolę położenia środka ciężkości w obszarze zamkniętym obwiednią stóp. Potwierdza to obserwacja, że u ludzi stojących swobodnie środek ciężkości utrzymywany jest w dość wąskim obszarze, tak że jego rzut na płaszczyznę podparcia znajduje się około 5 cm do przodu od osi stawu skokowego (Hellebrandt i in. 1940). Centralne położenie środka ciężkości w polu postawy potwierdzałoby hipotezę, że kontrola równowagi postawy sprowadza się do utrzymania maksymalnej odległości środka ciężkości od granicy stabilności odpowiadającej długości stóp (Błaszczyk i in. 1992a). Powyższa hipoteza pomija jednak wpływ wielu innych czynników anatomicznych i fizjologicznych mających decydujące znaczenie w tworzeniu rzeczywistej granicy stabilności.

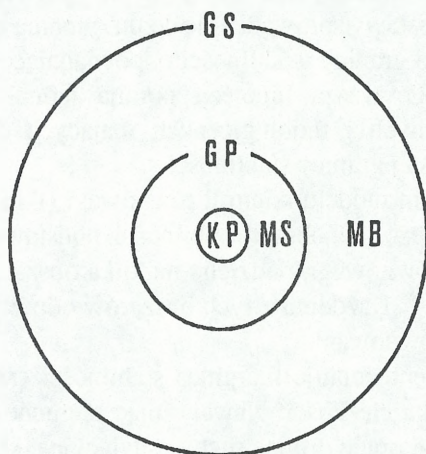
W zaproponowanym modelu kontroli równowagi (Błaszczyk i in. 1993b) przedstawiliśmy hipotezę, że obszar stabilności podstawy stojącej można, ze względu na kontrolę równowagi, podzielić na kilka obszarów pokazanych schematycznie na rysunku 1. Każdemu z tych obszarów odpowiada jakościowo inna strategia utrzymania równowagi.

Pierwszy zakres reprezentuje margines stabilności (MS). W jego centrum znajduje się rzut środka ciężkości. Nawet stojąc nieruchomo ciało, poza naszą świadomą kontrolą, wykonuje drobne ruchy oscylacyjne, które możemy rejestrować za pomocą posturografu. Zjawisko to nosi nazwę kołysania postawy (KP). Wielkość kołysania zależy między innymi od czułości układów czuciowych biorących udział w utrzymaniu postawy. Parametry kołysania są czułym wskaźnikiem stanu układu kontroli równowagi i mogą być wykorzystane do wykrywania i oceny zmian patologicznych. W Polsce badania posturograficzne są wykonywane w celach diagnostycznych i doświadczalnych w Klinice Otolaryngologicznej Wojskowego Instytutu Medycyny Lotniczej. Badania te mają na celu wykrywanie u pilotów uszkodzeń błędnika, decydujących o ich orientacji przestrzennej, a tym samym o bezpieczeństwie lotu.

W wyniku zjawiska kołysania rzut środka ciężkości na podstawę oscyluje w sposób przypadkowy w promieniu 5 milimetrów. Wielkość kołysania jest silnie zależna od wieku osoby badanej i jest większa zarówno u dzieci, jak i osób starszych (Pyykko i in. 1988). W ramach obszaru nazwanego marginesem stabilności, przemieszczenia środka ciężkości wywołane aktywnością motorycz-

ną, są korygowane bez potrzeby przerywania bieżącej aktywności ruchowej. Odbyna się to poprzez programy korekcyjne będące integralną częścią wykonywanego programu ruchowego (Massion 1992).

Znaczne zakłócenie równowagi i związane z tym przemieszczenie środka ciężkości poza margines stabilności, wymaga przerwania realizowanego programu ruchowego i wykonania odpowiedniego programu korekcyjnego. Obszar, w którym przywrócenie równowagi postawy poprzez wykonanie programu korekcyjnego jest możliwe, nazwaliśmy marginesem bezpieczeństwa (MB). Przykładem takiego programu naprawczego jest „strategia kroku”, która sprowadza się do zwiększenia pola podparcia poprzez wykonanie kroku w odpowiedzi na znaczne przemieszczenie środka ciężkości (Die ner i in. 1988). Jeśli w wyniku zakłócenia środek ciężkości przekroczy margines bezpieczeństwa, to odzyskanie równowagi staje się niemożliwe i osobnik przewraca się. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że przedstawiona na rysunku 1 granica stabilności (GS) może wykraczać poza obszar objęty obwiednią stóp.



Rys. 1. Zakresy kontroli stabilności postawy stojącej. Płaszczyzna zamknięta granicą stabilności (GS) jest podzielona na dwa obszary: MS — margines stabilności, oraz MB — margines bezpieczeństwa. Wzajemne relacje pomiędzy tymi obszarami zależą od stanu funkcjonalnego układu kontroli równowagi postawy. Zmiany normalnego położenia środka ciężkości są wywołane kołysaniem postawy (KP) oraz ruchami dowolnymi, na przykład maksymalnym wychyleniem ciała (MW).

Stwierdzenie, że anatomiczne granice pola podstawy stanowią granice stabilności jest coraz częściej kwestionowane. Nasze badania nad maksymalnym przemieszczeniem środka ciężkości w postawie stojącej pokazały, że granice stabilności postawy są wypadkową czynników anatomicznych i funkcjonalnych (Błaszczyk i in. 1993b). Test maksymalnego odchylenia środka pozwala na oszacowanie położenia pierwszej granicy stabilności rozdzielającej margines stabilności od marginesu bezpieczeństwa. U ludzi młodych zakres maksymalnego przemieszczenia środka ciężkości jest mniejszy od 80% długości stopy. Z kolei u osób starszych zakres ten nie przekracza 50% długości stopy. Położenie drugiej granicy

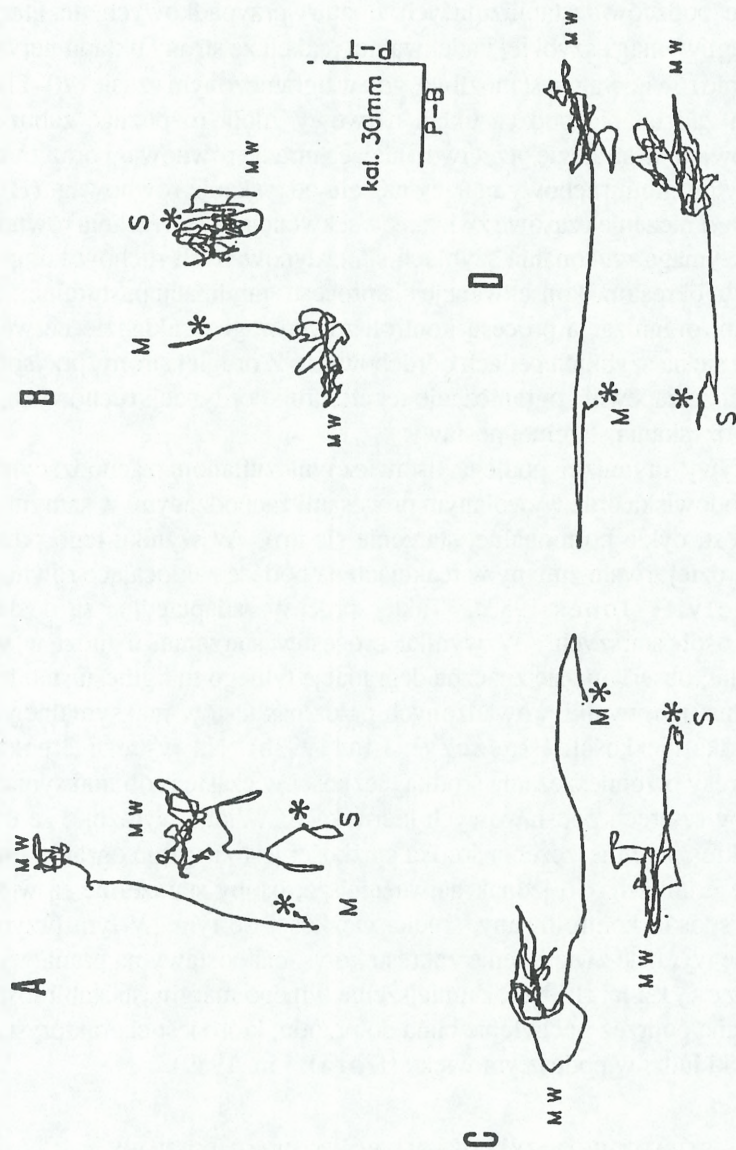
stabilności obejmującej margines bezpieczeństwa zależy, między innymi, od szybkości reakcji na bodźce destabilizujące oraz od sprawności ruchowej osoby badanej.

Działanie bodźców destabilizujących, z natury przypadkowych, dla utrzymania równowagi wymaga szybkiej i adekwatnej reakcji ze strony układu nerwowego. Utrzymanie równowagi jest możliwe, gdy w ograniczonym czasie (70–110 ms) od momentu zadziałania bodźca układ nerwowy zdoła rozpoznać zaburzenie, wybrać odpowiednią strategię przeciwdziałającą utracie równowagi oraz zrealizować wybrany program ruchowy mający na celu odzyskanie równowagi (Horak i in. 1989). Ograniczenie czasowe związane z sekwencją przywracania równowagi posturalnej wymaga wykonania szybkich skoordynowanych ruchów kompensacyjnych. Ma to określone konsekwencje dla procesu stabilizacji posturalnej. Przede wszystkim, organizacja procesu kontroli równowagi w układzie nerwowym musi opierać się na szybkich pętach odruchowych. Z drugiej strony, przyspieszenie reakcji może zapewnić ograniczenie repertuaru koordynacji ruchowych, używanych do odzyskania stabilnej postawy.

Każdy żywy organizm podlega ustawicznym zmianom zachodzącym pod wpływem środowiska oraz wywołanym procesami zachodzącymi w samym organizmie (wzrost, cykle hormonalne, starzenie się itp). W wyniku tego powstają mniej lub bardziej trwałe zmiany w reakcjach na bodźce zakłócające równowagę postawy (Melvill Jones 1983). Takie procesy adaptacyjne są doskonale widoczne u osób starszych. W wyniku procesów starzenia, u ludzi w wieku powyżej 65 lat, obserwuje się znaczną degradację tylnego marginesu stabilności. Proces ten ilustrują wyniki prowadzonych przez nas testów maksymalnego wychylenia środka ciężkości (Błaszczyk i in. 1993b). Na rysunku 2 pokazano typowe wykresy przemieszczenia środka ciężkości w czasie prób maksymalnego wychylenia w czterech podstawowych kierunkach. Widać wyraźnie, że u osób starszych zakres przemieszczenia środka ciężkości jest znacznie ograniczony we wszystkich kierunkach. Co jednak najważniejsze, osoby starsze nie są w stanie odchylić, w sposób kontrolowany, środka ciężkości do tyłu. W tym przypadku obserwuje się wyraźne zwiększenie zakresu kołysania postawy na granicy stabilności (Błaszczyk i in. 1993c). Zmniejszenie tylnego marginesu stabilności jest kompensowane poprzez pochylenie ciała do przodu, które jest charakterystyczną cechą sylwetki ludzi w podeszłym wieku (Horak i in. 1989).

STRATEGIE ODZYSKIWANIA RÓWNOWAGI POSTAWY

Istnieje skończony zbiór koordynacji ruchowych, używanych do odzyskiwania równowagi, nazywanych strategiami posturalnymi. Przede wszystkim wymienia się trzy podstawowe strategie odzyskiwania równowagi w odpowiedzi na niewielkie zakłócenie stabilności (Nashner 1983). W czasie nieznacznego zachwiania równowagi pojawia się charakterystyczna ruchowa sekwencja dystalno-proksy-



Rys. 2. Zmiany położenia rzutu środka ciężkości w płaszczyźnie podparcia w czasie próby maksymalnego wychylenia (MW) w czterech podstawowych kierunkach: do przodu (A), do tyłu (B), w prawo (C), w lewo (D). Jest widoczne znaczne ograniczenie wychylenia u osoby starszej (S) w porównaniu z młodą osobą badaną (M). Początek ruchu wyznacza normalne położenie środka ciężkości, oznaczone na rysunku gwiazdką.

malna, rozpoczynając się aktywnością mięśni stawu skokowego. Sekwencję tę nazwano „strategią stawu skokowego”. W wyniku pobudzenia głównie mięśni stabilizujących stawu skokowego środek ciężkości wraca do swego normalnego położenia.

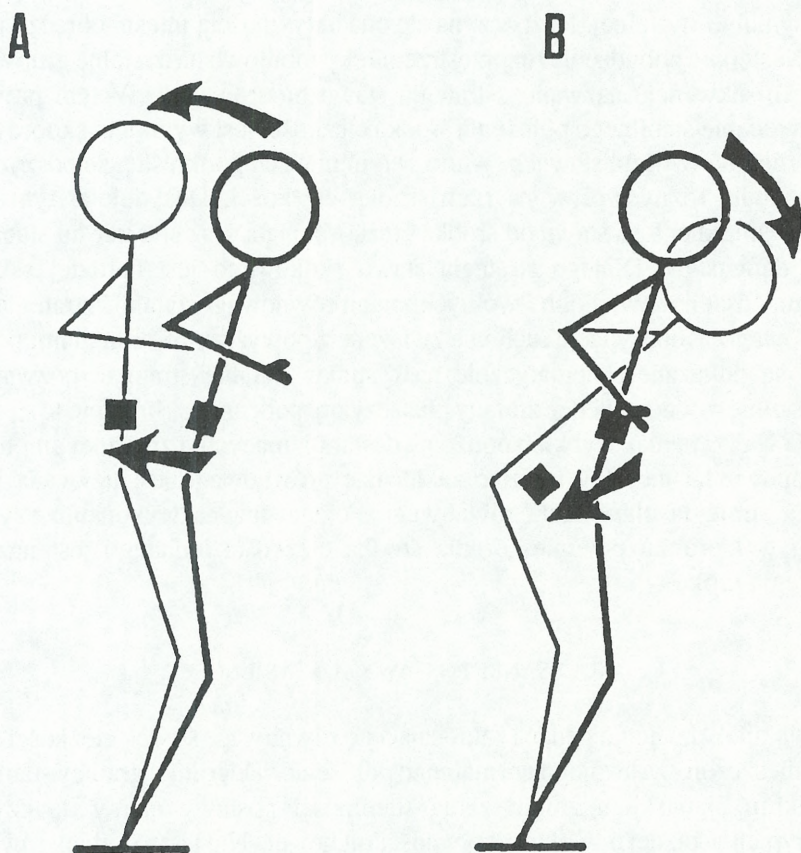
Nieco inną strategię przywracania równowagi obserwuje się u osób stojących na bardzo wąskim podłożu. W tych warunkach działanie takiego samego jak poprzednio bodźca destabilizującego jest kompensowane za pomocą sekwencji proksymalno-dystalnej. Rozpoczyna się ona aktywnością mięśni obręczy biodrowej. Następnie pobudzenie rozprzestrzenia się stopniowo na dystalne grupy mięśni nóg. Tę sekwencję nazwano „strategią stawu biodrowego”. W tym przypadku przywrócenie stabilnego położenia środka ciężkości jest wynikiem skoordynowanych ruchów w wielu stawach. Warto w tym miejscu podkreślić, że poszczególne stawy mają różny wpływ na ruch środka ciężkości. Decyduje o tym przede wszystkim odległość stawu od środka ciężkości ciała oraz siła mięśni stabilizujących dany staw. Dlatego strategia stawu skokowego jest bardziej skuteczna w kompensacji niewielkich i wolnych zmian równowagi ciała niż strategia stawu biodrowego. Koordynacje ruchowe związane z powyższymi strategiami posturalnymi są pokazane schematycznie na rysunku 3. Obie strategie pozwalają na odzyskanie równowagi bez zmiany płaszczyzny podparcia. Strategie te są nieskuteczne w przypadku szybkich bodźców destabilizujących o znacznej amplitudzie. W odpowiedzi na silny bodziec zakłócający równowagę jest używana jeszcze trzecia strategia utrzymania równowagi. Polega ona na wykonaniu szybkiego kroku w kierunku przemieszczania środka ciężkości i dlatego jest nazywana „strategią kroku”.

KOŁYSANIE POSTAWY A STABILNOŚĆ

Wskutek działania bodźca zakłócającego równowagę środek ciężkości zostaje przemieszczony ze swojego normalnego położenia w kierunku granicy stabilności. Z takim zjawiskiem zmniejszenia stabilności postawy mamy do czynienia w przypadku każdej dowolnej aktywności ruchowej. Nie jest to jednak równoznaczne z ciągłymi przypadkami utraty równowagi. Dopiero gdy środek ciężkości ciała wykroczy poza margines stabilności, jest konieczna akcja przywrócenia równowagi. Dlatego wykrycie faktu przekroczenia granicy stabilności oraz określenie parametrów zakłócenia (szybkości i kierunku ruchu środka ciężkości w momencie przekroczenia granicy) decydują o skuteczności strategii przywracania stabilności postawy. W procesie starzenia układu nerwowego powstają rozległe zmiany degeneracyjne, które są przyczyną między innymi podwyższenia progów czułości układów sensorycznych i zmniejszenia szybkości przewodnictwa nerwowego. Ma to decydujący wpływ na szybkość wykrywania faktu utraty równowagi. Z drugiej strony, zmiany progów czułości układów sensorycznych

powodują również znaczne podwyższenie zakresu kołysania postawy (Błaszczyk i in. 1993c, Pyykko i in. 1988).

Ruchy środka ciężkości wywołane kołysaniem mają charakter przypadkowy. Ruch kołysania jest źródłem podprogowej informacji dla układu wzrokowego i przedsionkowego. Wykrywany jest natomiast przez układ receptorów somatosensorycznych (Diener i in. 1984, Droulez i in. 1983). Ten sam układ ma decydu-



Rys. 3. Strategia stawu skokowego (A) oraz strategia stawu biodrowego (B) jako przykłady koordynacji ruchów ciała w przypadku zaburzenia równowagi, wywołanego działaniem bodźca destabilizującego o małej amplitudzie. Prawidłowe położenie środka ciężkości jest przywracane, w pierwszym przypadku, poprzez aktywności mięśni stawu skokowego oraz dzięki złożonej sekwencji ruchów stawowych inicjowanych ugięciem bioder (B). Strzałki pokazują ruchy ciała inicjujące koordynację ruchową niezbędną do odzyskania równowagi.

jący wpływ na kontrolę postawy (Horak i in. 1989, Roll i in. 1989). Ruch związany z kołysaniem posturalnym pojawia w postaci przypadkowych zmian kąta stawowego i napięcia mięśni. Jest to równoznaczne z pojawieniem się szumu na wejściu systemu kontroli stabilności postawy związanym z receptorami somatosensorycznymi. Z tego względu zwiększone kołysanie postawy oraz drżenie

mięśni mogą być dodatkowymi przyczynami zmniejszenia czułości percepcji odchylenia środka ciężkości od jego normalnego położenia (Welford 1981). Badania nasze wykazały, że zakres kołysania postawy osiąga maksimum na granicy stabilności. Ma to niewątpliwie istotne znaczenie dla zmniejszenia stabilności postawy u osób starszych (Błaszczuk i in. 1993c).

REGULACJA RÓWNOWAGI POSTAWY

Kontrola stabilności postawy oraz jej adaptacja do zmieniającej się ciągle charakterystyki otoczenia opiera się na działaniu szeregu łuków odruchowych, których receptory są rozmieszczone w różnych częściach ciała. Łuki odruchowe zaangażowane w utrzymaniu i stabilizacji postawy mogą mieć zasięg lokalny lub obejmować całe ciało. Badania wykonywane na zwierzętach pozwoliły na stwierdzenie, że główne ośrodki sterujące zintegrowanymi reakcjami posturalnymi znajdują się w rdzeniu przedłużonym. Nawet odmóżdżone zwierzę po zniszczeniu błędników potrafi utrzymać postawę stojącą, gdy jest postawione w odpowiedniej pozycji (Altman 1970). Kontakt stóp z podłożem jest w tym przypadku wystarczającym bodźcem do przekształcenia kończyn w sztywne podpory. Preparat taki nie posiada jednak sprawnych mechanizmów stabilizujących i nie jest w stanie utrzymać postawy w przypadku zakłócenia równowagi. Jądra przedsionkowe i struktury rdzenia przedłużonego są więc ośrodkami kierującymi utrzymaniem postawy ciała. Kontrola stabilności postawy zależy od wyższych ośrodków układu nerwowego, a przede wszystkim od śródmózgowia (Ganong 1973). Dzięki nim zwierzę może przeciwstawiać się zakłóceniu normalnej postawy ciała i reagować czynnościami kompensacyjnymi.

Podstawowe znaczenie dla utrzymania postawy pionowej ma orientacja przestrzenna głowy w stosunku do kierunku działania siły grawitacji. Utrzymanie normalnego położenia głowy możliwe jest dzięki błędnikowym odruchom poprawczym. W tej reakcji bodźcem jest pochylenie głowy względem linii sił pola grawitacyjnego, które pobudza narządy otolitowe. W odpowiedzi następuje kompensacyjny skurcz mięśni szyi. Ponieważ toniczne odruchy szyjne zapewniają dostosowanie pozycji ciała do pozycji głowy, przedsionkowy odruch utrzymywania właściwego położenia głowy reguluje także położenia ciała jako całości (Altman 1970).

W postawie stojącej kontrola położenia poszczególnych segmentów ciała odbywa się poprzez integrację sterowania centralnego i obwodowego. Trzy podstawowe układy czuciowe: wzrokowy, przedsionkowy i somatosensoryczny (proprioceptywny i skórny) dostarczają do układu nerwowego informacji niezbędnych dla utrzymania równowagi (Nashner 1983). Wejścia sensoryczne o określonej modalności sygnalizują zmiany orientacji ciała względem różnych układów odniesienia. Informacja wzrokowa pozwala na określenie przestrzenne pozycji ciała względem otaczających nas obiektów. Z kolei system przedsionkowy sygnalizuje

zmianę pozycji ciała względem pola grawitacyjnego, a system somatosensoryczny jest związany z wykrywaniem zmian położenia ciała względem powierzchni podparcia.

Informacja somatosensoryczna spełnia główną rolę w utrzymaniu równowagi w postawie stojącej, natomiast układy wzrokowy i przedsionkowy pełnią rolę wspomagającą (Nashner 1983). Powyższa hierarchia ma charakter dynamiczny. Uszkodzenie jednego z wejść czuciowych wywołuje zmiany kompensacyjne w kontroli stabilności postawy i z reguły deficyt równowagi jest niezauważalny.

Kontrola stabilności postawy odbywa się w oparciu o zewnętrzny układ odniesienia tworzony przez pole grawitacyjne oraz bodźce wzrokowe (Massion 1992). Drugi układ odniesienia jest układem wewnętrznym. Koncepcja wewnętrznego układu referencyjnego opiera się na założeniu istnienia w układzie nerwowym tak zwanego schematu ciała (body schema). Postulat istnienia takiej reprezentacji został pierwotnie wysunięty w 1920 r. przez Head'a (Massion 1992) i następnie znalazł potwierdzenie w wynikach licznych prac doświadczalnych. Dotyczy to głównie badań nad utrzymaniem postawy w stanie nieważkości. Pomimo braku grawitacyjnego układu odniesienia kosmonauci są w stanie odtworzyć ogólną sylwetkę postawy wyprostowanej. Uważa się, że stabilna, centralna reprezentacja ciała jest częściowo zdeterminowana genetycznie oraz częściowo nabywana w procesie uczenia się.

Przestrzenna reprezentacja ciała w układzie nerwowym jest tworzona w oparciu o sygnały z receptorów wrzeczonowych mięśni. Receptory te obejmują swym zasięgiem całe ciało i rejestrują zmiany napięcia i długości mięśni (Roll i in. 1989). Tą drogą przekazywane są do centralnego układu nerwowego informacje na temat relacji przestrzennych między poszczególnymi częściami ciała oraz parametrów ruchów czynnych i biernych.

Istnienie wewnętrznej reprezentacji ciała jest podstawą do precyzyjnego określenia pionowego położenia ciała względem płaszczyzny podparcia. Układ nerwowy w oparciu o wejścia przedsionkowe, proprioceptywne i wzrokowe jest w stanie utrzymać pionową sylwetkę pomimo zmieniającego się nachylenia płaszczyzny podparcia. Pozwoliło to nam na wysunięcie hipotezy roboczej, że ludzie musi cechować wysoka zdolność do wykrywania zmian pochylenia podłoża w oparciu o wewnętrzną koncepcję kierunku pionowego. Hipoteza ta znalazła potwierdzenie w wynikach przeprowadzonych przez nas badań (Błaszczyk i in. 1993b, d, e). Osoby badane, stojące na platformie doświadczalnej, musiały rozpoznać jej pochylenie. Zadanie doświadczalne polegało na przywróceniu platformy do poziomu za pomocą sterowania ręcznego. Każdorazowo wstępne, katowe przemieszczenie platformy zadawane było przez komputer, a wielkość nachylenia miała wartość przypadkową z przedziału $\pm 4^\circ$. Wykazaliśmy, że nawet bez bezpośredniej kontroli wzrokowej osoby badane były w stanie przywrócić platformę pomiarową do położenia poziomego z dokładnością poniżej $0,1^\circ$. Zaskoczeniem był jednak fakt, że ludzie starsi, ze znacznym ubytkiem w zakresie utrzymania równowagi, są

również w stanie precyzyjnie określić pochylenie podłoża w postawie stojącej. Jednakże ich subiektywny poziom płaszczyzny podparcia odpowiadał pochyleniu do przodu ciała w stawie skokowym o około $0,8^\circ$. Zjawisko to jest związane prawdopodobnie z opisywanym poprzednio uszkodzeniem tylnej granicy stabilności u ludzi starszych. Kompensacja tego ubytku opiera się na przesunięciu środka ciężkości do przodu. Dlatego u osób starszych obserwuje się charakterystyczne pochylenie sylwetki (Horak i in. 1989). Odbywa się to głównie poprzez zmniejszenie kąta stawu skokowego.

STABILNOŚĆ POSTAWY A AKTYWNOŚĆ RUCHOWA

Aktywność ruchowa wpływa destabilizująco na postawę z dwóch powodów. Przede wszystkim do wykonania ruchu są wykorzystywane często te same grupy mięśni, które stabilizują postawę. Z drugiej strony zmiany położenia różnych części ciała wpływają na wypadkowe położenie środka ciężkości. Dla utrzymania stabilnej postawy musi więc istnieć ścisłe współdziałanie sterowania ruchem i postawą. Stwierdzenie to jest pochodną hipotezy Hessa (Hess 1943), który wyróżniał w każdym akcie ruchowym składową teleokinetyczną, czyli ruch celowy, oraz komponentę posturalną zapewniającą postawę ciała, dzięki której możliwe jest utrzymanie równowagi.

Układ nerwowy przeciwdziała zmniejszeniu stabilności posturalnej poprzez minimalizację przemieszczeń środka ciężkości. Istnieją tutaj dwa podstawowe mechanizmy kompensacyjne. Pierwszy z nich polega na przyjęciu postawy przygotowawczej (anticipatory postural adjustment) (Massion 1992). Działanie tego mechanizmu kompensacyjnego opiera się na wykorzystaniu nabywanej poprzez uczenie informacji o wielkości zakłócenia równowagi wywołanego przez dany bodziec. W przewidywaniu określonego zaburzenia równowagi (na przykład wywołanego podniesieniem znanego ciężaru), układ nerwowy powoduje wstępne przemieszczenie środka ciężkości w kierunku przeciwnym do zakłócenia wywołanego zamierzoną akcją ruchową. W tym przypadku rozpoczęcie właściwego ruchu jest opóźnione o czas niezbędny na zmiany posturalne. I tak na przykład, w czasie zadania polegającego na wznoszeniu ramion obserwowano, że jako pierwsze aktywowane są posturalne mięśnie nóg, a dopiero po nich z opóźnieniem 50–100 ms pojawiała się aktywność mięśni ramion (Belenkiy i in. 1967).

W przeciwieństwie do postawy przygotowawczej, drugi mechanizm kompensacji niestabilności postawy sprowadza się do bieżących korekty położenia środka ciężkości w czasie wykonywania ruchu. Informacja na temat destabilizującego wpływu wykonywanego ruchu jest zbierana na bieżąco. W oparciu o te sygnały są wykonywane niezbędne korekty postawy bez przerywania programu ruchowego. Korekty te, zwane reaktywnymi, cechują fazy naprzemiennej aktywności mięśni antagonistycznych (Friedli i in. 1988).

Ścisła współzależność pomiędzy wykonywanym ruchem a stabilnością postawy pozwala na ocenę jakości kontroli posturalnej na podstawie szybkości i zakresu ruchów dowolnych. Sekwencyjny charakter i wzajemne przeplatanie się tych dwóch systemów kontroli znajduje odzwierciedlenie w szybkości ruchów dowolnych. U osób starszych strategia wolnych ruchów o zmniejszonej amplitudzie pozwala na utrzymanie przemieszczeń środka ciężkości w zakresie podobnym, jak u ludzi młodych (Błaszczyk i in. 1993a, b, f). Zakładając, że sterowanie stabilnością postawy musi zapewnić utrzymanie środka ciężkości ciała w wąskim obszarze wyznaczonym granicą równowagi, mamy do czynienia z klasycznym zwiększeniem precyzji kontroli kosztem jej szybkości ujętym prawem Fittsa (Fitts 1954).

ZAKOŃCZENIE

Utrata równowagi posturalnej jest związana z potencjalnymi urazami ciała. Na całym świecie są prowadzone prace badawcze mające na celu znalezienie wszelkich przyczyn niestabilności posturalnej. W raporcie międzynarodowego zespołu roboczego Kellogg (Kellogg 1987) zewidencjonowano ponad sto różnych przyczyn utraty równowagi. Jednak w dalszym ciągu daleko od wyjaśnienia wszystkich zagadek procesu stabilizacji postawy. Dotyczy to, między innymi, wykrycia źródeł zmian stabilności posturalnej u ludzi w podeszłym wieku, u których utrata równowagi jest przyczyną znacznego ograniczenia ich aktywności życiowej. W tym przypadku badania stabilności posturalnej są prowadzone pod kątem wykrycia najsłabszych ogniw w systemie utrzymania równowagi. Dzięki temu, mamy nadzieję, stanie się możliwe opracowanie skutecznych technik rehabilitacyjnych pozwalających na poprawienie jakości życia osób w starszym wieku.

POSTURAL STABILITY CONTROL

Summary

The most characteristic feature of human posture is the verticality of axial body segments in reference to the ground. Such positioning of the body in the gravitational field provides an only quasistable equilibrium requiring active control of balance. Upright posture provides a neutral state of readiness that allows for an efficient transition from quiet stance to a broad repertoire of human motor behaviour. The necessary margin of stability within which the stance, the transition and the motor task can safely occur is defined by the postural control system *via* temporal and spatial relationships between axial and distal body segments. These relationships determine the nature of equilibrium control and mode of corrective strategies required for stability. Difficulties in the theoretical analysis of human body stability resulted in the development of a broad variety of empirical approaches which are presented in the paper. The age-related decline in stability of the upright posture is also discussed. Gaining a better understanding of changes in postural control and compensatory mechanisms appearing with age is imperative if the quality of life in the elderly is to be maintained or improved.

LITERATURA

- Altman J. 1970. *Biologiczne podstawy zachowania*. PWN. Warszawa.
- Belenkiy V. E., Gurfinkel V. S., Paltsev E. I., 1967. *On elements of control of voluntary movements*. Biofizika, 12, 135–141.
- Błaszczyk J. W., Lowe D. L., Hansen P. D., 1992a. *A heuristic model of postural stability*. [W:] M. Woollacott, F. Horak (red.), *Posture and gait: control mechanisms*. Oregon Univ. Books. Portland, 2, 228–231.
- Błaszczyk J. W., Lowe D. L., Hansen P. D., 1992b. *Ability to detect the level of the support surface in elderly and young subjects*. [W:] M. Woollacott, F. Horak (red.), *Posture and gait: control mechanisms*. Oregon Univ. Books, Portland, 2, 232–234.
- Błaszczyk J. W., Hansen P. D., Lowe D. L., 1993a. *Evaluation of the postural stability in man: movement and posture interaction*. Acta Neurobiol. Exp. 53(1), 155–160.
- Błaszczyk J. W., Lowe D. L., Hansen P. D., 1993b. *Ranges of postural stability and their changes in the elderly*. Gait & Posture, 1(4) (w druku).
- Błaszczyk J. W., Hansen P. D., Lowe D. L., 1993c. *Postural sway and perception of the upright stance stability borders*. Perception, (w druku).
- Błaszczyk J. W., Hansen P. D., Lowe D. L., 1993d. *Accuracy of the passive ankle joint positioning during quiet stance in young and elderly subjects*. Gait & Posture 1(4), (w druku).
- Błaszczyk J. W., Hansen P. D., Lowe D. L., 1993e. *Age-related changes in perception of support surface inclination during quiet stance*. Gait & Posture, 1(3) (w druku).
- Błaszczyk J. W., Hansen P. D., Lowe D. L., 1993f. *Movement and posture interaction in man: age-related deficit in the performance of a cyclic arm movement*. Maszynopis złożony w Acta Neurobiol. Exp.
- Diener H. C., Horak F. B., Nashner L. M., 1988. *Influence of stimulus parameters on human postural responses*. J. Neurophysiol., 59(6), 1888–1905.
- Diener H. C., Dichgans J., Guschlbauer B., Mau H., 1984. *The significance of proprioception on postural stabilization as assessed by ischemia*. Brain Res., 296, 103–109.
- Droulez J., Berthoz A., Vidal P. P., 1983. *Use and limits of visual and vestibular interaction in the control of posture*. [W:] M. Igarashi, F. O. Black (red.), *Vestibular and visual control on posture and locomotor equilibrium*, 7th Int. Symp. Int. Soc. Posturography, Houston, Tex (Karger, Basel 1985), 14–21.
- Feldman A. G., 1966. *Functional tuning of the nervous system during control of movement and maintenance of a steady posture II. Controllable parameters of the muscle*. Biofizika, 11, 498–508.
- Fitts P. M., 1954. *Information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement*. J. Exp. Psychol., 67, 103–112.
- Friedli W. G., Cohen L., Hallet M., Stanhope S., Simon S. R., 1988. *Postural adjustments associated with rapid voluntary arm movements*. J. Neurol. Neurosurg. Psych., 51, 232–243.
- Ganong W. F., 1973. *Fizjologia lekarska*. PZWL. Warszawa.
- Hess W. R., 1943. *Teleokinetisches und Ereismatisches Kraftesystem in Biomotorik*. Helv. Physiol. Pharm. Acta., 1, C62–63.
- Hellebrandt F. A., Brogdon E., Tepper R. H., 1940. *Posture and its cost*. Am. J. Physiol., 129, 773–781.
- Horak F. B., Shupert C. L., Mirka A., 1989. *Components of Postural Dyscontrol in the Elderly: A Review*. Neurobiol. Aging, 10, 727–738.
- Kellogg International Work Group, 1987. *The prevention of falls in later life. A report of the Kellogg International Work Group on the Prevention of falls by the elderly*. Dan. Med. Bull., 34 (suppl 4), 1–24.

- Massion J., 1992. *Movement, Posture and Equilibrium: Interaction and Coordination*. Prog. Neurobiol., 38, 35–56.
- Melville Jones G., 1983. *Behavioral control of central plasticity: fact and fiction?* [W:] M. Igarashi, F. O. Black (red.), Vestibular and visual control on posture and locomotor equilibrium, 7th Int. Symp. Int. Soc. Posturography, Houston, Tex (Karger, Basel 1985), 9–13.
- Nashner L. M., 1983. *Strategies for organization of human posture*. [W:] M. Igarashi, F. O. Black (red.), Vestibular and visual control on posture and locomotor equilibrium, 7th Int. Symp. Int. Soc. Posturography, Houston, Tex (Karger, Basel 1985), 1–8.
- Pyykko I., Aalto H., Hytonen M., Starck J., Jantti P., Ramsay H., 1988. *Effect of age on postural control*. [W:] B. Ambler, A. Berthoz, F. Clarac (red.), Posture and gait: development, adaptation and modulation. Elsevier Science Publishers, New York, 95–104.
- Roll J. P., Vedel J. P., Roll R., 1989. *Eye, head and skeletal muscle feedback in the elaboration of body references*. Prog. Brain Res., 80, 113–123.
- Welford A. T., 1981. *Signal, noise, performance, and age*. Hum. Factors, 23, 97–109