

# Rozdział 3

## Mechanizmy kontroli równowagi

Do osiągnięcia przez człowieka pozycji dwunożnej przyczyniły się złożone procesy posturalne, między innymi uwolnienie kończyn górnych z funkcji podporowej.

Wielostawowy układ mięśniowo-szkieletowy, wysoko położony środek ciężkości ciała (na poziomie trzeciego kręgu lędźwiowego) oraz zmniejszony czworobok podparcia powodują stałe narażenie ciała na utratę równowagi.

Mechanizm kontroli równowagi ciała, dotyczący zarówno jej utrzymania, jak i natychmiastowego odzyskania, jest na tyle skuteczny, że stabilność posturalna jest traktowana jako coś oczywistego. Dopiero w przypadku zmian chorobowych, inwolucyjnych lub w razie uszkodzenia jej składowych jest dostrzegana złożoność tego procesu.

W kontroli posturalnej są wykorzystywane korekcje antycypacyjne i reaktywne w celu utrzymania lub przywrócenia typowej pozycji ciała w przestrzeni (w spoczynku lub w trakcie wykonywania ruchu).

Kontrola postawy składa się z działania wielu mechanizmów: receptorów, układów sensorycznych oraz systemów zbierających i przekazujących informacje, a także stanowi system otwarty, będący w stałej interakcji z otoczeniem.

### Równowaga stała czy równowaga chwiejna

Paradoksalnie człowiek w pozycji stojącej ulega ciąglemu chwianiu, które podlega jednak kontroli. Terminem równowagi chwiejnej określa się stałe wychwiania ciała utrzymywane w czworoboku

podparcia. Badania na platformie stabilometrycznej wykazały wychwiania postawy rzędu 100 mm<sup>2</sup> na osobę zdrową (Gagey 1999).

Mechanizmy kontroli utrzymują położenia środka ciężkości ciała w czworoboku podparcia oraz zapewniają ekonomiczne działanie pozwalające na szybkie zapobieganie zakłóceniom lub ich korygowanie.

Stabilność można podzielić na strukturalną, zwaną również stabilnością mechaniczną, i funkcjonalną.

Stabilność strukturalna dotyczy powierzchni stawowych i ich zdolności do przenoszenia obciążeń. Drugi rodzaj stabilności obejmuje informacje sensoryczne, ich przyswojenie przez układ nerwowy oraz odpowiedzi dostarczone drogą eferentną.

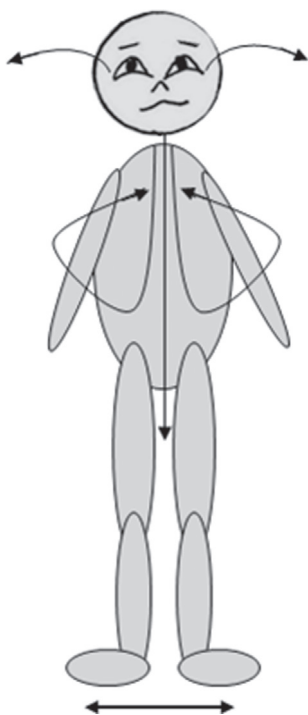
Do stabilności funkcjonalnej przyczyniają się tkanki o właściwościach włóknisto-sprężystych, kontrola mięśniowa oraz wypadkowa działających sił (Johansson i wsp. 1991).

Stabilność strukturalna jest podstawowym warunkiem zachowania równowagi, natomiast stabilność funkcjonalna jest niezbędna do jej regulacji.

#### ● **Ogólne zasady**

Kontrola postawy i równowagi przestała być uważana za prostą sumę różnych odruchów, opisuje się ją teraz jako złożony mechanizm oparty na interakcjach procesów dynamicznych, czuciowych i ruchowych.

Głównym celem kontroli postawy jest pionowa orientacja głowy i tułowia względem rzutu środka ciężkości. Osiąga się to, uwzględniając otoczenie, informacje wewnętrzne oraz zmienne powierzchnie podparcia (ryc. 3.1). Najistotniejszą rolę odgrywa tu napięcie nerwowo-mięśniowe.



**Ryc. 3-1.** Utrzymanie pionowej postawy zależy od powierzchni podparcia, informacji wzrokowych i somatosensorycznych.

## Unerwienie aferentne

Ciało wyposażone jest w różne sensory i receptory, które dostarczają informacji o sile grawitacji (układ przedsionkowy), otoczeniu (informacja wzrokowa lub pochodząca z siatkówki), powierzchni podparcia (podeszwa stóp) oraz układzie mięśniowo-szkieletowym (układzie somatosensorycznym).

Znaczenie tych różnorodnych źródeł informacji zmienia się w zależności od osoby, wieku, czynników indywidualnych oraz środowiskowych. W ciemności niezbędne okazują się informacje pochodzące z układu przedsionkowego i somatosensorycznego. Natomiast w przypadku ciężkiego obustronnego uszkodzenia błędnika bodźce mogą pochodzić z informacji wzrokowej lub proprioceptywnej.

Mechanizmy integracji informacji pochodzących z poszczególnych źródeł nie zostały do tej pory w pełni poznane.

## Wzrok – układ przedsionkowy – układ somatosensoryczny

Impuls wzrokowy pochodzący z fotoreceptorów siatkówki biegnie przez nerw wzrokowy i dociera do kory potylicznej.

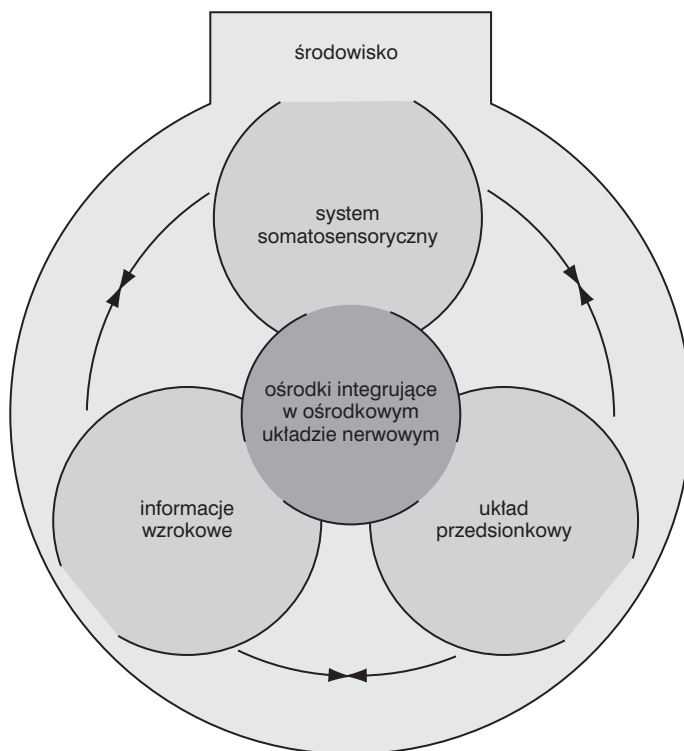
Centrum siatkówki, a dokładnie jego obrzeża, dostarcza precyzyjnych i obszernych informacji o otoczeniu. Dla utrzymania równowagi jest ważny system wzrokowy, jednak nie jest on wystarczający. Mózg postrzega ruch jako ruch własny, mogą więc wystąpić problemy z odróżnieniem ruchu obiektów od ruchów własnych, np. siedząc w stojącym pociągu i widząc inny poruszający się pociąg, mamy wrażenie, że to my poruszamy się. Konieczne jest więc dostarczenie przez układ somatosensoryczny informacji korygującej lub kontrastowej.

Szczególnie wrażliwa na ruch jest siatkówka, która – wysyłając impulsy do receptorów mięśni gałki ocznej – ułatwia uzyskiwanie informacji wizualnej z otoczenia. Proprioceptory szyi dostarczają informacji o ruchu głowy, natomiast receptory z reszty ciała sygnalizują ruchy ciała. Mózg przez cały czas przetwarza informacje wzrokowe i proprioceptywne (Roll 1987).

Receptory łagiewki i woreczka wysyłają informacje dotyczące przyspieszenia liniowego głowy, natomiast receptory kanałów półkolistych reagują na przyspieszenia kątowe.

Włókna nerwowe przewodzą impulsy do jąder przedsionkowych, ważnego centrum kontroli równowagi, oraz ośrodka odruchów jeszcze przed zauważalnym ruchem głowy. Jest to układ pierwotny i uprzywilejowany.

Jednak sama informacja przedsionkowa nie jest wystarczająca. Pochylenie głowy powoduje bodziec równoznaczny z pochyleniem tułowia lub nawet całego ciała. Receptory mięśniowe i stawowe szyi wysyłają sygnały odróżniające je



**Ryc. 3-2.** Informacje przedsionkowe, wzrokowe i somatosensoryczne stanowią układ otwarty.

od informacji proprioceptywnych pochodzących z reszty ciała. Odgrywają one nadrzędną rolę w mechanizmach kontroli, nie działając indywidualnie. Ich funkcja sprawia, że są angażowane podczas zaburzeń równowagi (Jull i wsp. 2008) (ryc. 3.2).

### ● **Ogólne zasady**

Układ somatosensoryczny dostarcza wielu bardzo cennych informacji niezbędnych do integracji sensorycznej.

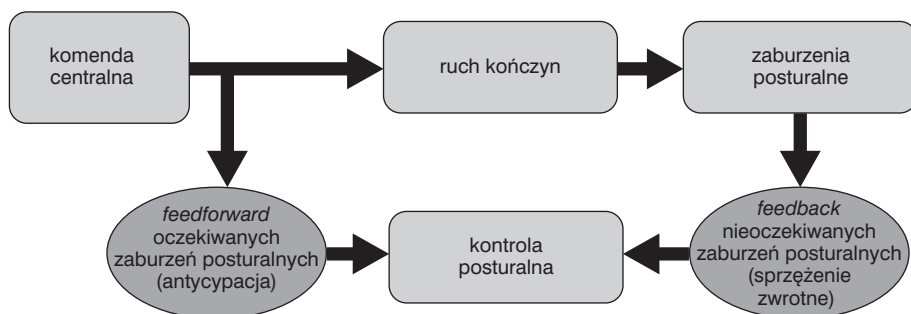
Sterując naprzemiennie jednym, dwoma lub trzema układami (przedsionkowym, wzrokowym oraz somatosensorycznym), Simoneau zmierzył przemieszczenia punktu przyłożenia wypadkowej siły reakcji podłoża, COP. Utrata informacji z układu somatosensorycznego prowadzi do znacznego zwiększenia wychwiał ciała niż w przypadku deficytu układu wzrokowego lub przed-

sionkowego czy obu tych układów (Simoneau i wsp. 1995).

## **Kontrola wychwiał postawy – korekcje antycypowane i reaktywne**

Prawie każda czynność zwiększa zdolności adaptacyjne organizmu do ograniczenia lub zneutralizowania zaburzeń postawy. Są to mechanizmy mięśniowe korygujące postawę w sposób antycypowany – *feedforward* lub reaktywny – *feedback* (ryc. 3.3).

Reakcje równoważne występują nie tylko w przypadku nieprzewidzianych sytuacji, lecz także w ramach ruchu wyuczonego. Każdy prosty ruch, np. odwiedzenie kończyn górnych w pozycji stojącej, powoduje zaburzenie równowagi, które należy kontrolować (Nashner 1979; Hay i Redon 2001).



Ryc. 3-3. Kontrola posturalna – mechanizm *feedback* i *feedforward*.

W przypadku ruchów dobrowolnych korekty postawy – jak się wydaje – są organizowane w ramach jednego programu ruchowego (Lee i wsp. 1987; Zattara i Bouisset 1988).

W trakcie wykonywania wyuczonych działań ruchowych podczas stabilizacji posturalnej są przewidywane zaburzenia równowagi (mechanizm sprzężenia wyprzedzającego). Te antycypacyjne korekty posturalne można określić w następujący sposób: modyfikacja czynności mięśni posturalnych, zapewniających kontrolę posturalną, jest wykonywana przed rozpoczęciem spodziewanego ruchu (Belen’Kii i wsp. 1967; Mardsden i wsp. 1979; Cordo i Nashner 1982; Krishnamoorthy i wsp. 2005).

### ● Ogólne zasady

Antycypowane korekty postawy dotyczą wyuczonych czynności ruchowych.

Korekty posturalne, zwane reaktywnymi, dotyczą działań nieprzewidzianych.

Podczas rozwoju ruchowego dziecka reaktywne korekty postawy pojawiają się między 7 a 9 miesiącem życia, a antycypowane po ukończeniu 4 roku życia. Rozwój obydwu rodzajów korekt postawy jest kontynuowany aż do okresu dojrzewania (Hass i wsp. 1989).

Zaburzenia równowagi docierają do świadomości, jednak to obszary podkorowe są głównymi strukturami odpowiedzialnymi za zarządzanie informacjami dotyczącymi postawy.

Kontrola obejmuje zasadniczo trzy obszary: rdzeń, pień mózgu i korę mózgową (Diener i Dichens 1986; Schmidt 1991; Schmidt i Lee 1999; Nashner 2001) (tab. 3.1).

Tabela 3.1 Kontrola równowagi (na podstawie Nashner, 2001)

Właściwości układu	Układ motoryczny		
	odruchowy	automatyczny	zależny od woli
Drogi nerwowe	rdzeń	pień mózgu	kora mózgowia
Aktywacja	czynniki zewnętrzne	czynniki zewnętrzne	czynniki zewnętrzne autogenerowane
Odpowiedź	miejscowa – w punkcie stymulacji, i stereotypowa	skoordynowana i stereotypowa	nieograniczona zmienność
Rola w równowadze	regulacja siły mięśniowej	wytrzymałość na zaburzenia	ruchy dobrowolne
Okres utajenia zapisany na poziomie kończyn dolnych	stały 35–45 ms	stały, okres utajenia średni (średnia 95 ms) lub długi (średnia 120 ms)	zmienny (powyżej 150 ms)