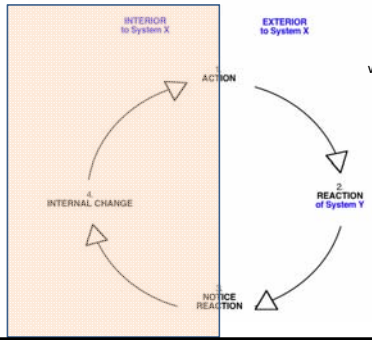
Modelowanie systemów biologicznych
ze sprzężeniem zwrotnym

Wykład nr 8 z kursu Biocybernetyki
dla Inżynierii Biomedycznej
prowadzonego przez
Prof. Ryszarda Tadeusiewicza

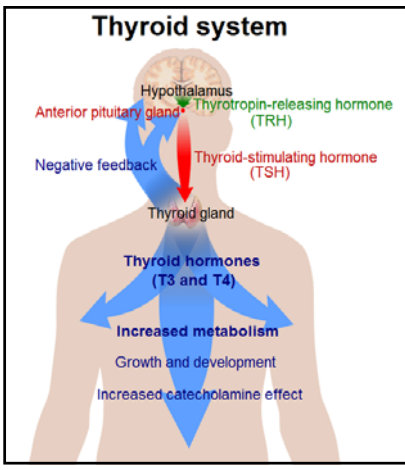
Przykłady biologicznych systemów
ze sprzężeniem zwrotnym

Przykłady sprzężeń zwrotnych
w systemach biocybernetycznych



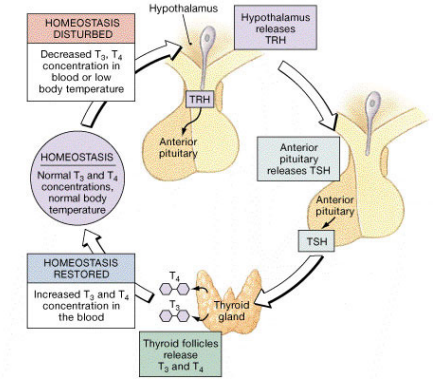
Każdy żywy obiekt
pozostaje stale
w sprzężeniu zwrotnym
ze swym otoczeniem

Najprostszym (jak się wydaje)
systemem ze sprzężeniem zwrotnym
jest system regulacji wydzielania
hormonów

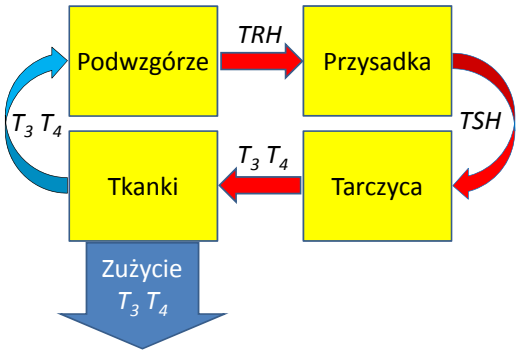


Regulacja
pracy
tarczycy
- sprzężenie
zwrotne
ujemne

Regulacja wydzielania hormonów tarczycy
w oczach fizjologa:

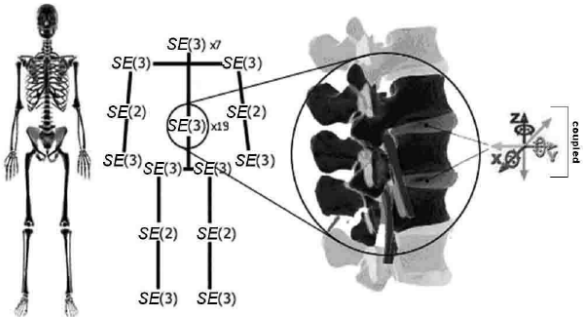


Biocybernetyk narysuje to tak:



Przykładem systemu biocybernetycznego ze sprzężeniem zwrotnym jest system sterowania ruchem

Możliwości motoryczne człowieka i sterowanie ruchem



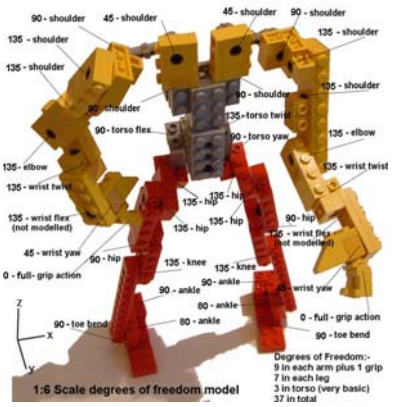
Ruchomość całego szkieletu ludzkiego wynosi 240 stopni swobody.

Ruchliwość jest związana z budową stawu:

Stawy kuliste i panewkowe mają 3 stopnie swobody,

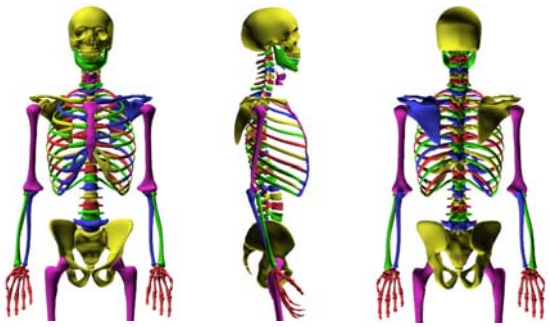
stawy eliptyczno-kłykciowe posiadają 2 stopnie swobody,

stawy zawiasowe posiadają jeden stopień swobody



Szkielet człowieka może być modelowany na różne sposoby.

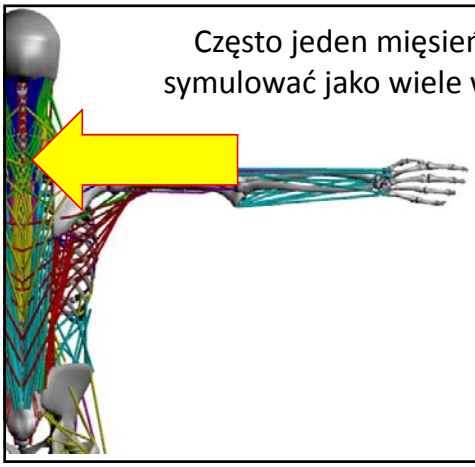
Model może być bardzo wierny anatomicznej budowie człowieka

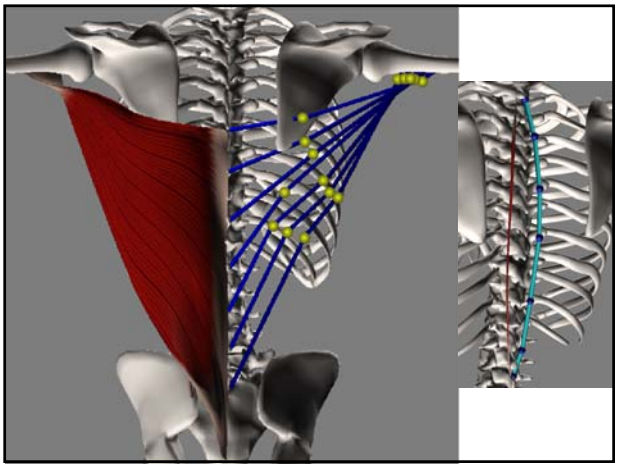


Można teraz dodać modele mięśni

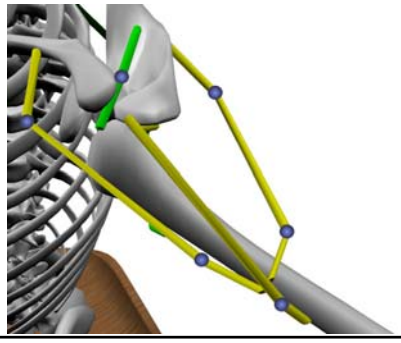
Najpierw ustala się przyczepy mięśni i ich przebieg

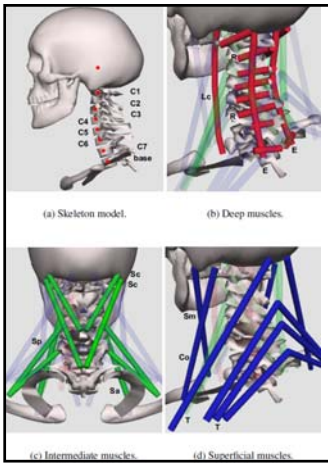
Często jeden mięsień trzeba symulować jako wiele włókien





Czasem trzeba też modelować punkty pośrednie mięśni – nawet jeśli nie są one związane z przyczepami





Skomplikowany przebieg mają mięśnie szyi i karku

Potem uwzględnia się rzeczywisty kształt anatomiczny mięśni

Zastępując linie przebiegu mięśni (od przyczepu do przyczepu) ich trójwymiarowymi modelami otrzymuje się bryłę muskulatury człowieka

Trzeba się przy tym natrudzić, bo mięśni jest bardzo dużo: dokładnie 814 (bez modelowania nóg!)

Tabelka mięśni głowy i szyi

Head/Neck muscles (300)
Iliocostalis thoracis (2), Interspinalis (12), Intertransversi (28), Rotatores (10), Semispinalis thoracics (4), Trapezius (4), Masseter (2), Iliocostalis cervicis (10), Longissimus capitis (16), Longissimus cervicis (10), Semispinalis cervicis (12), Splenius capitis (10), Semispinalis capitis (18), Longus capitis (8), Geniohyoid (2), Longus colli (14), Obliquus capitis (4), Omohyoid (2), Rectus capitis posterior (4), Rectus capitis anterior (2), Scalenes (50), Sternocleidomastoid (4), Sternohyoid (2), Sternothyroid (2), Stylohyoid (2), Rectus capitis lateralis (2), Levator scapulae (16), Multifidus (36), mylohyoid (2), Splenius cervicis (8), Rhomboid minor (2)

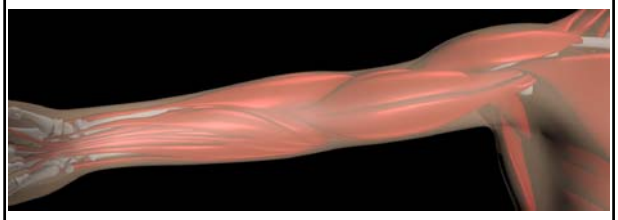
Mięśnie grzbietu

Trunk muscles (432)
External/Internal obliques (22), Rectus abdominis (6), Iliocostalis lumborum (24), Iliocostalis thoracis (18), Interspinalis (14), Intertransversi (34), Multifidus (116), Rotatores (30), Semispinalis thoracics (8), Spinalis thoracis (16), Trapezius (10), External intercostal (20), Pectoralis minor (6), Serratus anterior (16), Rhomboid major (2), Quadratus lumborum (10), Subclavius (2), Iliocostalis cervicis (2), Longissimus thoracis (48), Serratus posterior inferior (8), Internal intercostal (20)

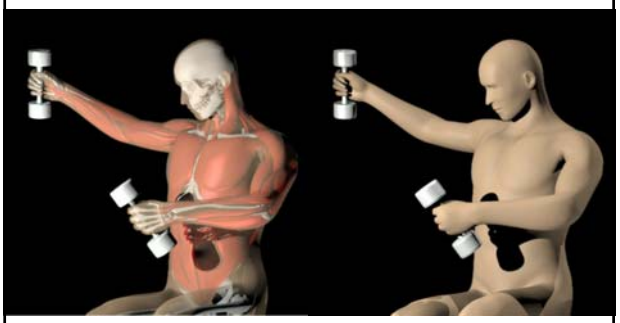
Mięśnie ręki

Arm muscles (41)
Pectoralis major (6), Latissimus dorsi (7), Biceps brachii (2), Brachioradialis (1), Brachialis (1), Coracobrachialis (1), Triceps Brachii (3), Infraspinatus (1), Deltoid (3), Supraspinatus (1), Teres major (1), Extensor carpi radialis brevis (1), Extensor carpi radialis longus (1), Extensor carpi ulnaris (1), Supinator (1), Flexor carpi ulnaris (1), Flexor digitorum superficialis (4), Palmaris longus (1), Pronator quadratus (1), Pronator teres (2), Extensor pollicis longus (1)

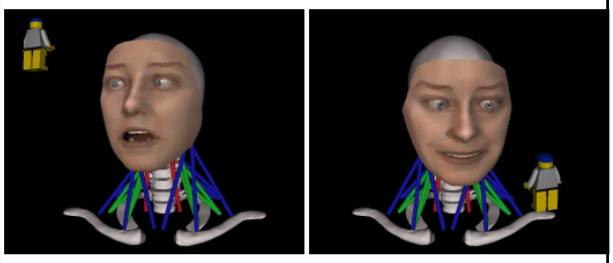
Powstające modele mogą odwzorowywać całe kończyny



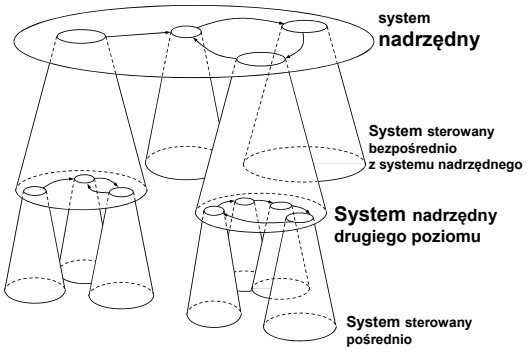
W wybranych zastosowaniach model szkieletu i muskulatury może być uzupełniony modelem powłoki skórnej (z odpowiednim renderingiem)



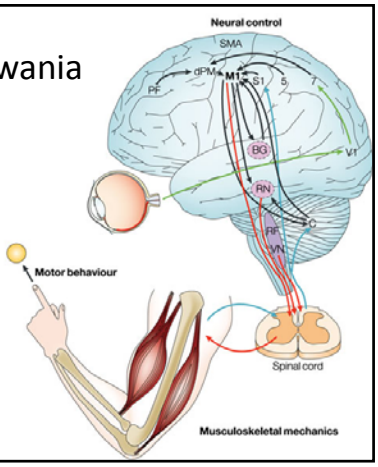
Dla celów specjalnych możliwe jest połączenie mimiki twarzy i ruchu gałek ocznych



Hierarchiczna organizacja systemu sterowania ruchami ciała

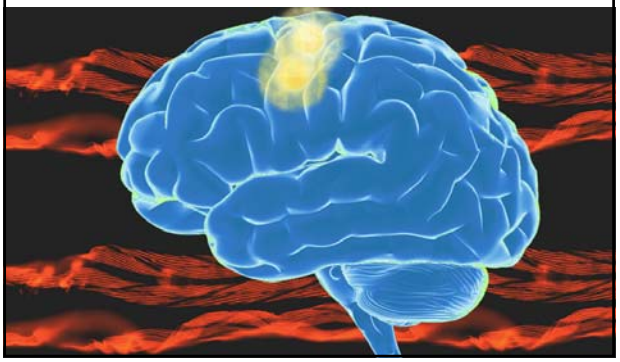


Schemat sterowania ruchami ciała

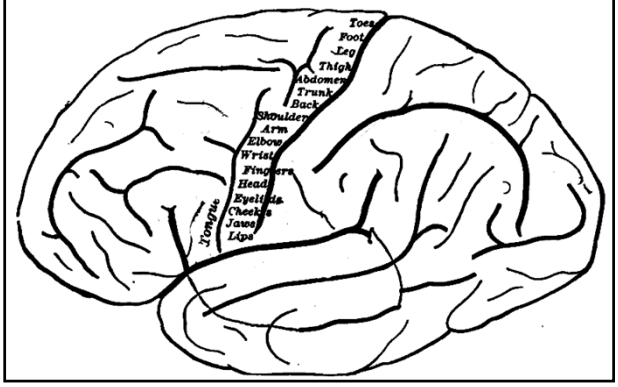


Zasadniczy wpływ na wykonywanie ruchów ma oczywiście mózg

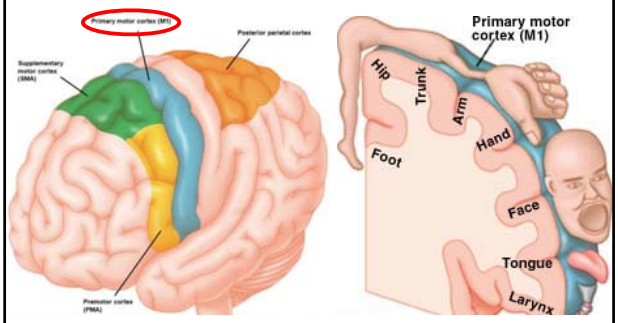
Decyzja o wykonaniu ruchu rodzi się w zwoju przedcentralnym



Jest tam dokładna mapa całego ciała, określająca, które neurony sterują którymi częściami ciała

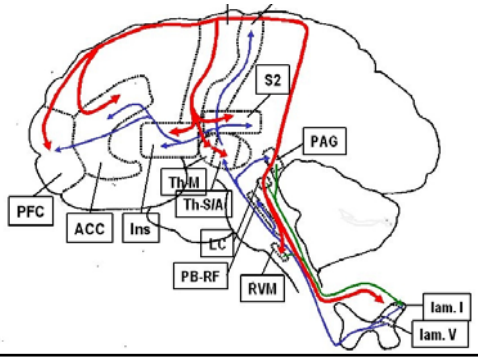


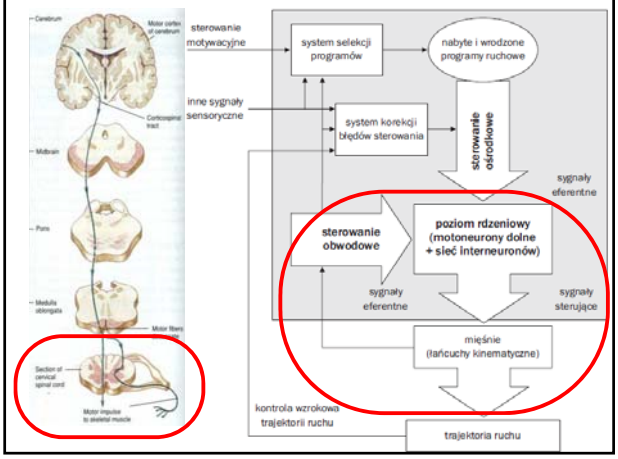
Lokalizacja obszaru w mózgu przeznaczonego do sterowania ruchem

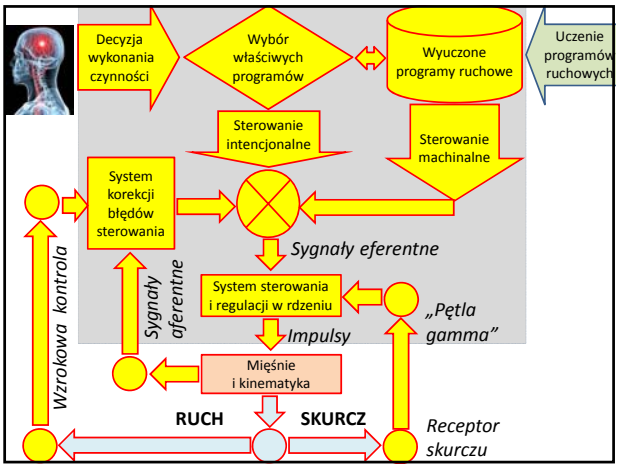


Ilość miejsca w mózgu, jaka jest poświęcona na sterowanie różnych części ciała jest całkiem nieproporcjonalna do ich rozmiarów.

O mózgowych mechanizmach sterowania ruchem będzie jednak mowa osobno, bo tu chodzi o ilustrację działania sprzężenia zwrotnego

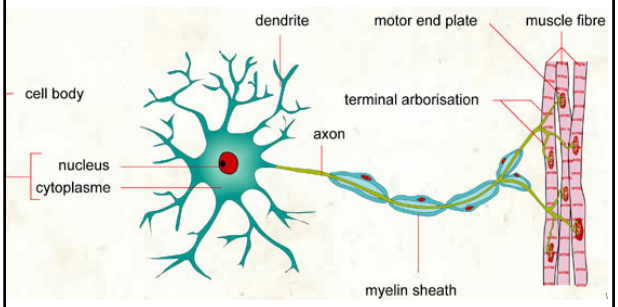




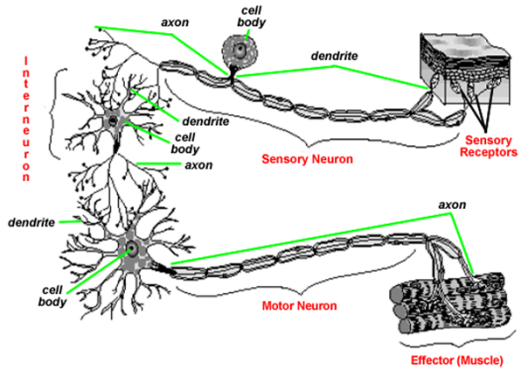


Teraz trochę szczegółów

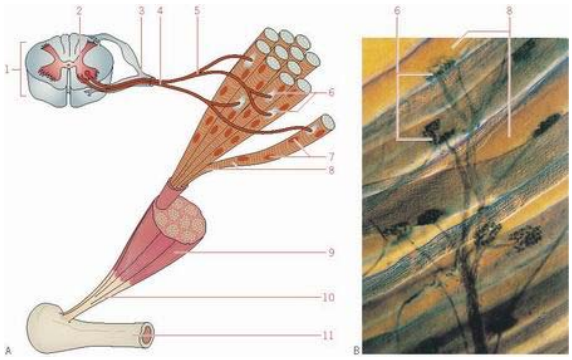
Skurcz mięśnia następuje pod wpływem sygnału sterującego pochodzącego z neuronu nazywanego w związku z tym motoneuronem



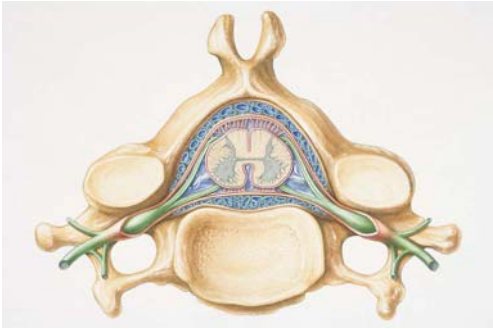
Elementy sterujące prostym odruchem



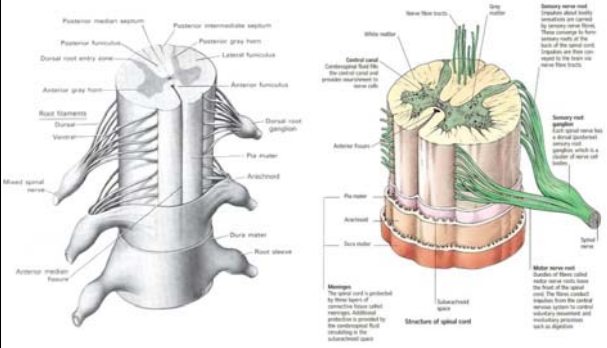
Sterowanie mięśnia z motoneuronu alfa



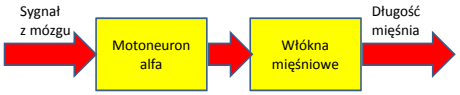
Ośrodki sterowania mięśni mieszczą sie w rdzeniu kręgowym



Anatomia nerwów rdzeniowych



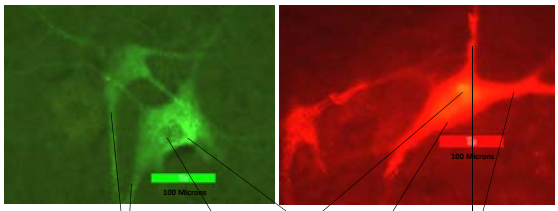
Bezpośrednie wpływanie przez mózg na pracę mięśni za pomocą motoneuronów alfa to jest sterowanie proste



Fotografie motoneuronów alfa

Biceps Femoralis

Tibialis Anterior



20x magnification of 40 micrometer thick sections of spinal cord

Primary Dendrites

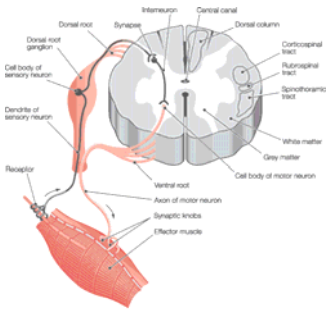
Nucleus

Cell body or soma

Primary Dendrites

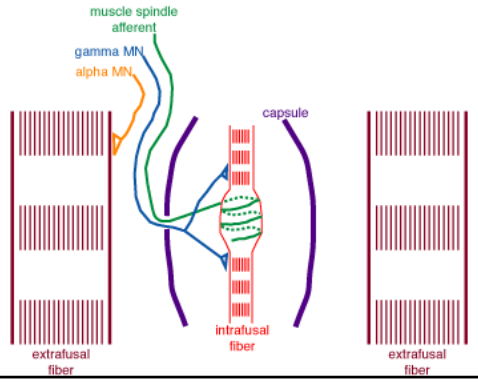
Dla sprawnej regulacji pracy mięśni zwykle przy ich sterowaniu używana jest pętla sprzężenia zwrotnego

Pętla regulacyjna na pojedynczym motoneuronie alfa

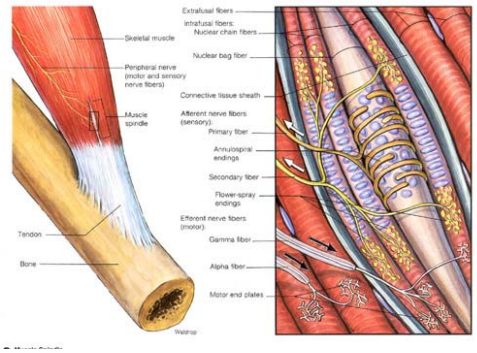


Pętla ta dostosowuje wielkość siły rozwijanej przez mięsień do oporów napotykanych w ruchu

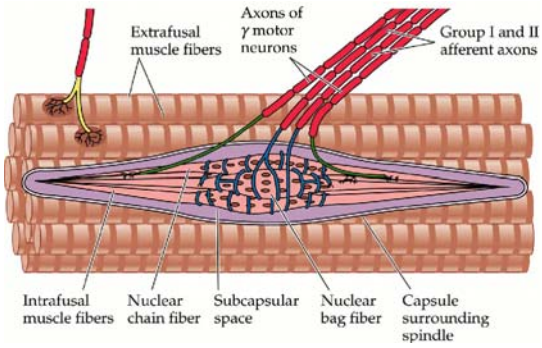
Przy regulacji wielkości siły rozwijanej przez mięsień istotną rolę odrywają wrzeciona mięśniowe



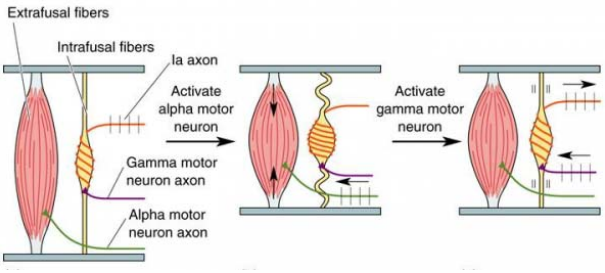
Anatomiczny obraz wrzeciona



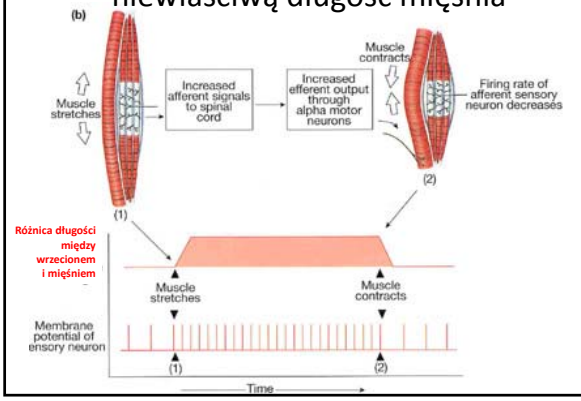
Unerwienie wrzecion jest zarówno eferentne jak i aferentne



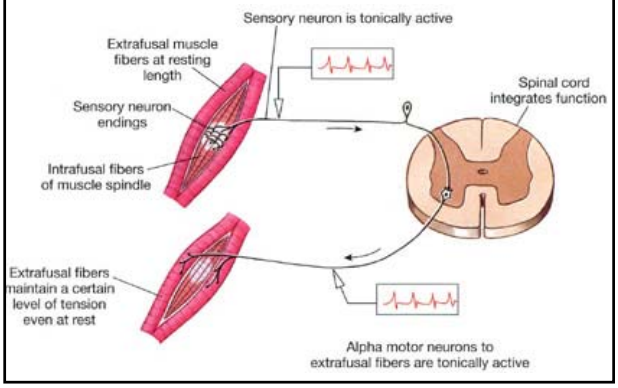
Działanie wrzeciona w zależności od aktywności mięśnia

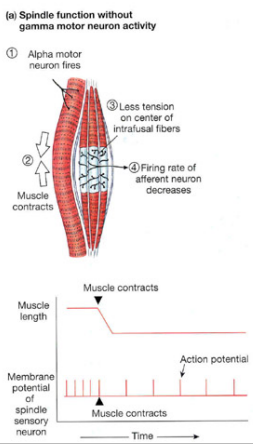


Wrzeciono jako element sygnalizujący niewłaściwą długość mięśnia



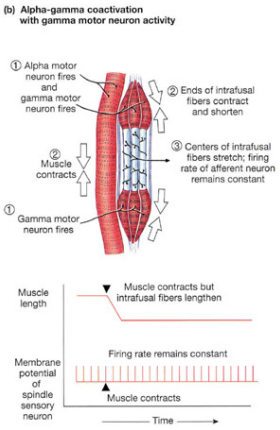
Stymulacja neuronów alfa z wrzeciona



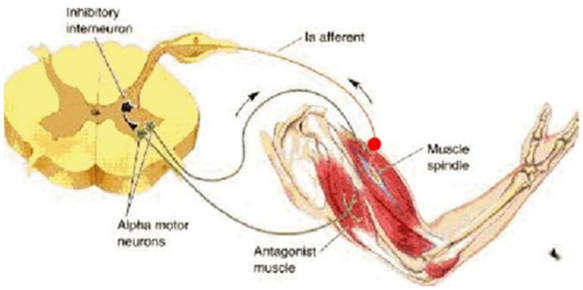


Związek między impulsacją wrzeciona i skurczem mięśnia (gdy główne włókna mięśniowe zaczynają skracać mięsień do długości wynikającej z wcześniejszego skurczu wrzeciona.

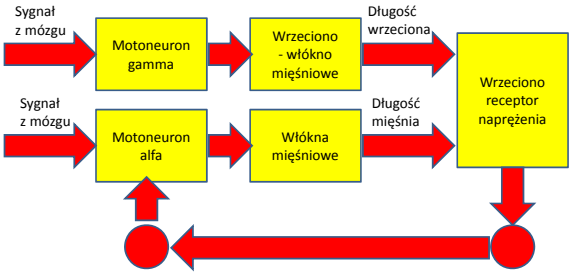
Wpływ sygnałów z motoneuronów gamma przy równoczesnym skurczu mięśnia i wrzeciona.

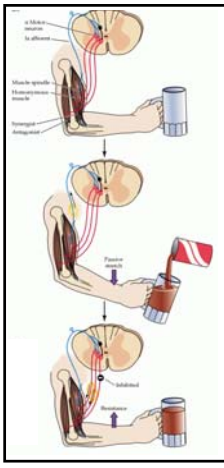


Zamknięta pętla z wrzecionem mięśniowym



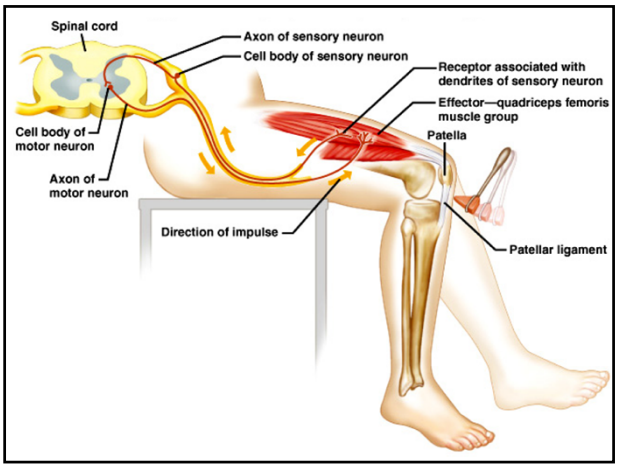
To jest klasyczna pętla sprzężenia zwrotnego



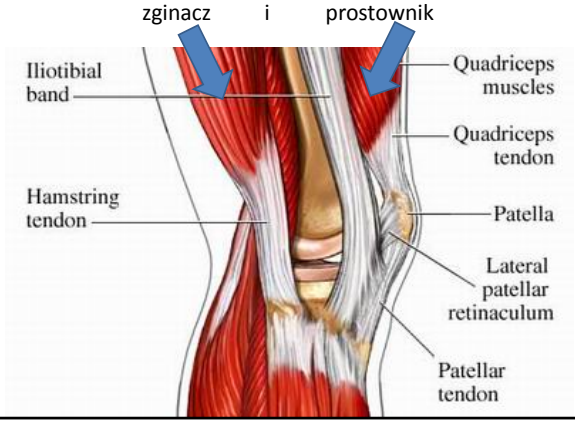


Dzięki obecności pętli gamma nasze mięśnie automatycznie dostosowują wielkość siły do zmiennego obciążenia

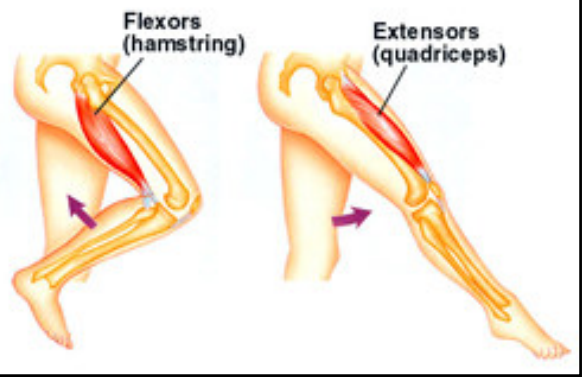
Badanie całkowitego wzmocnienia w pętli gamma odbywa się podczas badania odruchu kolanowego



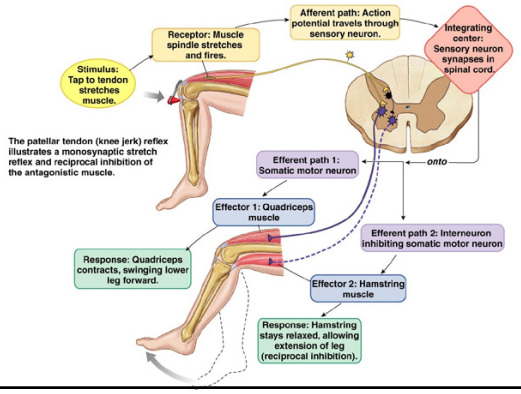
Kolano (jak prawie każdy staw) obsługuje para mięśni:
zginacz i prostownik



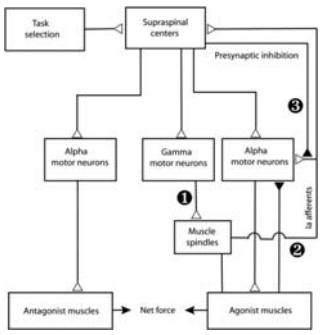
Ich działanie jest przeciwstawne



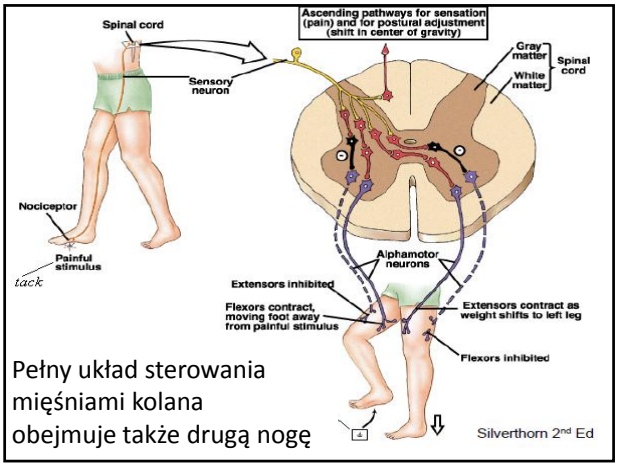
W związku z tym przy odruchu kolanowym aktywizującym mięsień-prostownik w rdzeniu blokowane są impulsy pobudzające mięsień-zginacz



Tak zawsze pracuje układ sterowania mięśni antagonistycznych



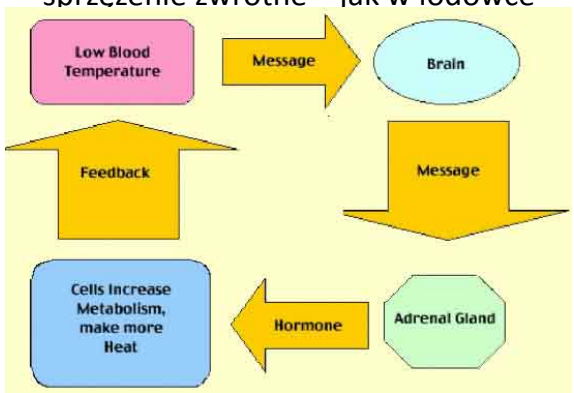
Odpowiednim wysiłkiem woli można spowodować równoczesny skurcz zginacza i prostownika

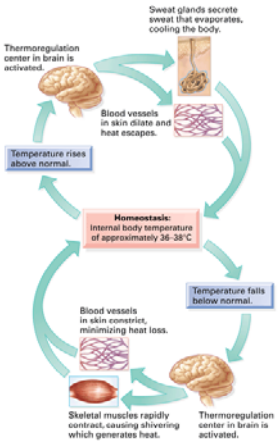


Pełny układ sterowania mięśniami kolana obejmuje także drugą nogę

Ciekawym przykładem biologicznego układu ze sprzężeniem zwrotnym jest system termoregulacji czyli stabilizacji temperatury ciała

Na pozór jest to proste ujemne sprzężenie zwrotne – jak w lodówce

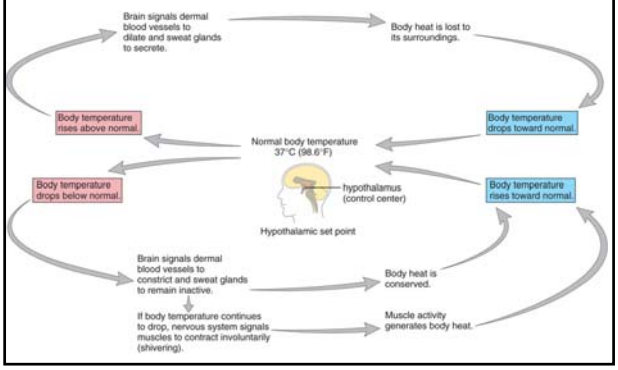


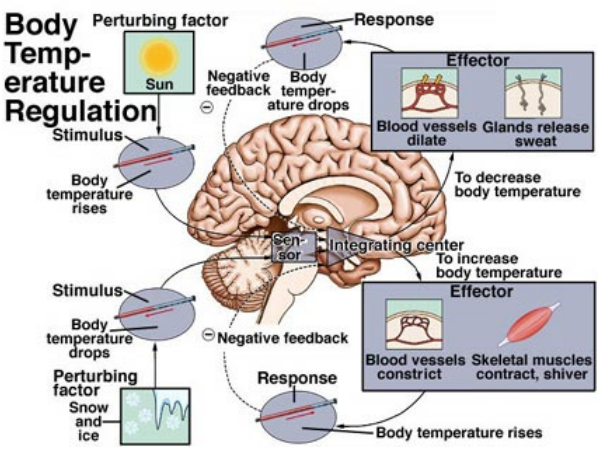


W istocie jest to jednak bardziej złożone, bo biologiczny system termoregulacji musi mieć dwie komponenty:

Pierwszą związaną z zabezpieczeniem przed przegrzaniem i 2. z zabezpieczeniem przed wychłodzeniem

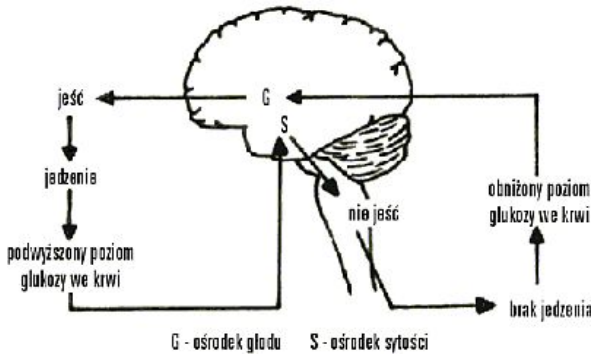
Te same termoregulacyjne dwie pętle sprzężenia zwrotnego inaczej narysowane



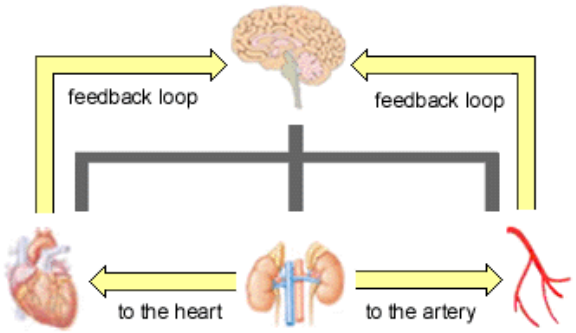


Dalsze przykłady sprzężeń zwrotnych

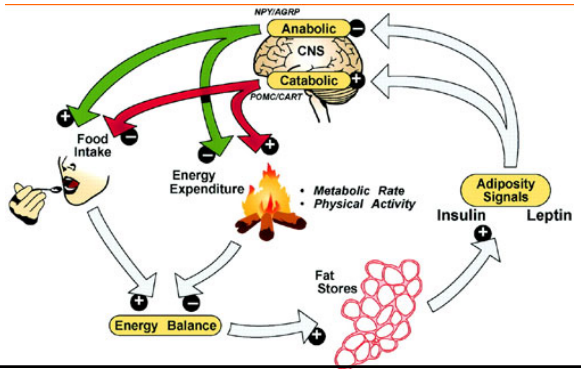
Regulacja jedzenia – sprzężenie ujemne

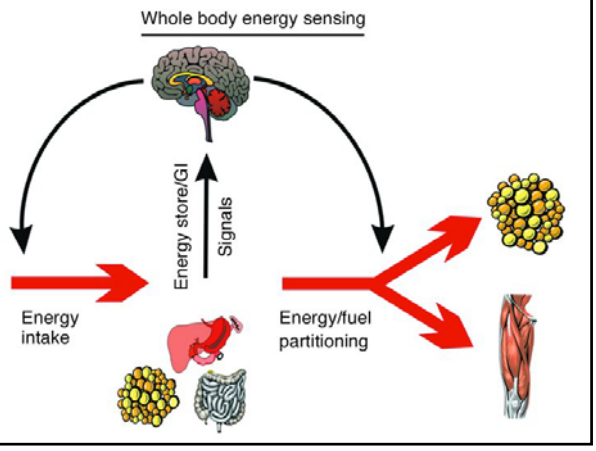


Stabilizacja ciśnienia krwi
dwa ujemne sprzężenia zwrotne

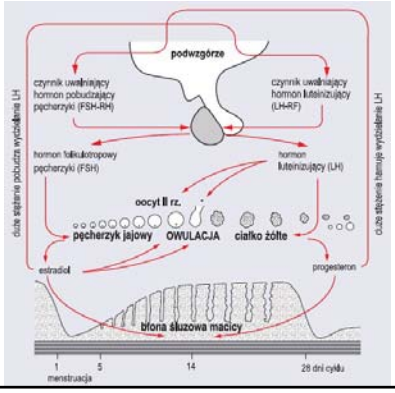


Procesy anaboliczne i kataboliczne
tworzą szereg sprzężeń zwrotnych





Systemem ze sprzężeniem zwrotnym jest mechanizm hormonalny cyklu miesiączkowego kobiet



To były wszystko biologiczne przykłady sprzężenia zwrotnego ujemnego.

A dodatnie?

Też istnieje i napędza każdy wzrost.

Na przykład wzrost populacji

Model rozwoju populacji

Model rozwoju populacji – prawo, które dla danego gatunku pozwala przewidzieć rozwój w czasie wielkości populacji tego gatunku

Czas mierzony jest w sposób dyskretny (minuty, godziny, dni, miesiące, lata)

Liczebność populacji może zależeć od wielu parametrów. Naturalne podejście do modelowania polega na zamrożeniu jak największej liczby parametrów populacji.

Najprostszy model rozwoju populacji

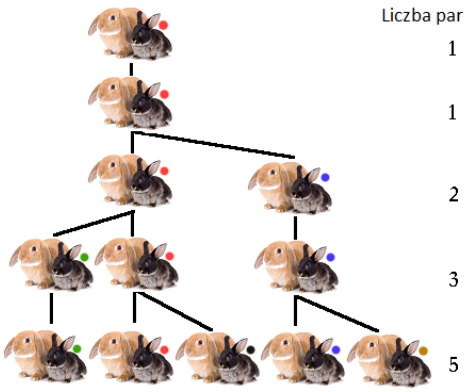
Pierwsze próby modelowania rozwoju populacji – Leonardo z Pizy (Fibonacci; ur. około 1175 r. - zm. 1250 r.)

Model rozmnażania się populacji królików

Pierwsze próby modelowania

Założenia:

- Para królików staje się dojrzała w miesiąc po urodzeniu
- Każda para dojrzałych królików wydaje na świat co miesiąc dokładnie jedną nową parę potomstwa
- Króliki nie umierają i nie uciekają
- Cały proces rozmnażania rozpoczyna się od jednej pary



Pierwsze próby modelowania

Pytanie: Ile par króliczych pojawi się w k-tym miesiącu?

Odpowiedź: Wynikiem są wartości tzw. *Ciągu Fibonacciego*

$$F_1 = F_2 = 1$$
$$F_K = F_{K-1} + F_{K-2}$$
$$K > 3$$

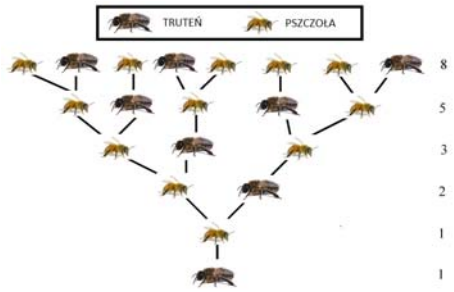
Wartość $\mathbf{F_k}$ możemy także uzyskać za *wzoru Bineta*:

$$F_K = \frac{1}{\sqrt{5}} * \left[\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^K - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^K \right]$$

Ciąg Fibonacciego

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144 . . .

ma wiele zastosowań w biologii. Pozwala na przykład odpowiedzieć na **niebanalne** pytanie, ilu przodków we wcześniejszych pokoleniach ma **truteń**



Dla nas jest tu istotne tylko to, że **wszystkie modele rozwoju w biologii są oparte na działaniu dodatniego sprzężenia zwrotnego**.

Dotyczy to między innymi rozwoju raka i innych nowotworów, czym zajmiemy się w przyszłym tygodniu