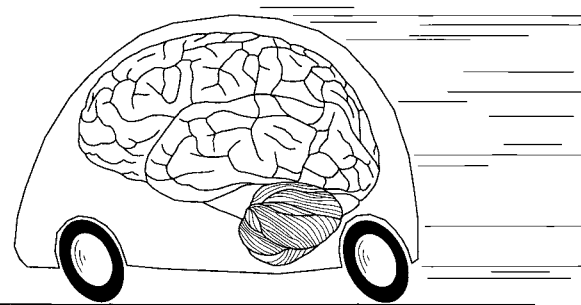


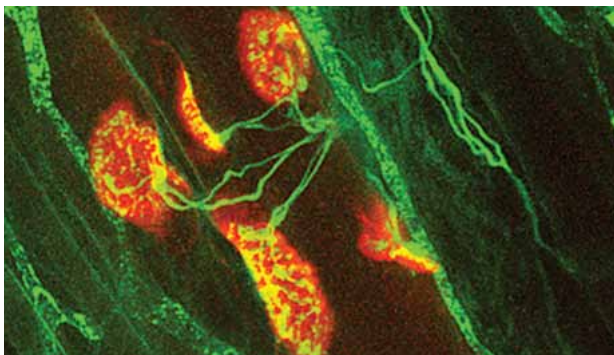
Gibanje



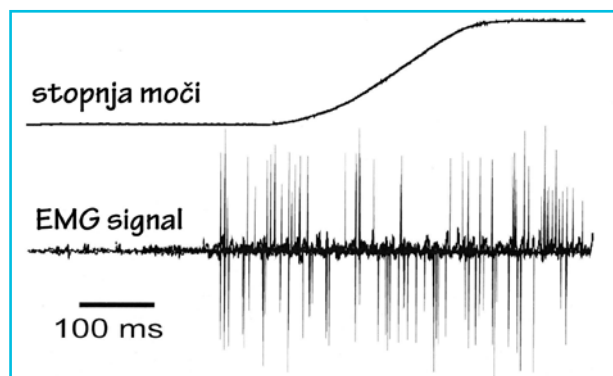
Pomisi na lovljenje žoge. Enostavno? Morda se tako zdi, vendar morajo tudi za izvedbo tako enostavnega giba vaši možgani izvesti nekaj izrednih stvari. Zdi se samoumevno, pa vendar je tukaj načrtovanje: je žoga lahka ali težka? Iz katere smeri prihaja in kako hitra je? Tukaj je usklajevanje: kako avtomatično uskladiti svoje ude za lovljenje in kako to najbolje storiti? In tu je še izvedba: bo prišla roka na pravo mesto in se bodo prsti skrčili v pravem trenutku? Nevroznanstveniki zdaj vedo, da je vpletenih veliko možganskih področij. Živčna (nevronska) aktivnost v teh področjih oblikuje ohlapno zaporedje ukazov – motorično hierarhijo – ki poteka od možganske skorje in bazalnih ganglijev do malih možganov in hrbtenjače.

Živčno-mišični stik

Na najnižji stopnji motorične hierarhije v hrbtenjači stotine specializiranih živčnih celic, imenovanih motorični nevroni, poveča pogostost proženja. Aksoni teh nevronov se priraščajo na mišice, kjer aktivirajo mišična vlakna za krčenje. Končni odrastki aksonov vsakega motoričnega nevrona tvorijo poseben **živčno-mišični stik** z omejenim številom mišičnih vlaken znotraj ene mišice (glej sliko spodaj). Vsak akcijski potencial v motoričnem nevronu povzroči sprostitvev neurotransmitorja (živčnega prenašalca) iz živčnih končičev, kar izzove akcijski potencial v mišičnih vlaknih. Iz znotrajceličnih zalog vsakega mišičnega vlakna se sprostijo Ca^{2+} -ioni, kar sproži krčenje mišičnih vlaken ter ustvarja silo in gibanje.



Da bi skrčili mišico, nevroni tvorijo posebne povezave s posameznimi mišičnimi vlakni v živčno-mišičnem stiku. V času razvoja več različnih živčnih vlaken oživčuje vsako mišično vlakno, zaradi tekmovanja med nevroni se kasneje izločijo vsi razen enega. Zadnji uspešni živec je tisti, ki sprosti svoj neurotransmitor acetilholin specializiranim molekularnim sprejemnikom na "motorični ploščici" (obarvano z rdečo). Slika je bila narejena s pomočjo konfokalnega mikroskopa.



Zapis električne aktivnosti, povezane z mišicami (elektromiografska aktivnost).

Električne dogodke v mišicah roke je možno zabeležiti s pomočjo ojačevalnika, celo preko kože, tovrstne elektromiografske zapise (EMG-je) pa je nato možno uporabiti za merjenje stopnje aktivnosti v vsaki mišici (glej sliko zgoraj).

Hrbtenjača igra pomembno vlogo pri nadzoru mišic preko več različnih refleksnih poti. Med njimi so refleks umika, ki nas varuje pred ostrimi in vročimi predmeti, in miotatični refleks na nateg mišice, ki igra vlogo pri drži. Dobro poznan patelarni (kolenski) refleks je primer miotatičnega refleksa, ki je nekaj posebnega, saj vključuje le dve vrsti živčnih celic - senzorične in motorične nevrone; senzorični nevroni sporočajo dolžino mišice in so preko sinaps povezani z motoričnimi nevroni, ki povzročajo gibanje. Ti refleksi se združujejo z bolj kompleksnimi v hrbtenjačnih vezjih, ki organizirajo bolj ali manj dovršena delovanja, kot je ritmično premikanje udov pri hoji ali teku. Oboje zahteva usklajeno vzburjanje in inhibiranje motoričnih nevronov.

Motorični nevroni tvorijo **končno skupno pot** k mišicam, ki premikajo kosti. Kljub temu pa so možgani tisti, ki opravljajo izredno nalogo nadzora aktivnosti teh celic. Katere mišice bi morali premakniti, da bi dosegli določen gib, za koliko in v kakšnem zaporedju?

Vrh hierarhije - motorična skorja

Na nasprotnem koncu motorične hierarhije, v možganski skorji, desetstisoče celic izvaja neverjetno število izračunov za vsak element giba. Ti izračuni zagotavljajo, da je gibanje izvedeno tekoče in spretno. Med možgansko skorjo in motoričnimi nevroni hrbtenjače združujejo kritična področja možganskega debla ascendentne (prihajajoče) informacije o



Posamezne regije v možganih, ki so udeležene pri kontroli gibanja.

udih in mišicah iz hrbtenjače z descendnimi (odhajajočimi) informacijami iz možganske skorje.

Motorna skorja je ozek pas tkiva, ki poteka preko površine možganov, tik pred somatosenzorčno skorjo (glej stran 12). V njej je celotni zemljevid telesa: nevroni, ki sprožijo premikanje v različnih udih (preko povezave z motornimi nevroni v hrbtenjači), so topografsko urejeni. S pomočjo snemalne elektrode lahko v kateremkoli delu tega zemljevida najdemo nevrone, katerih aktivnost zaznamo približno 100 milisekund pred aktivnostjo v ustrezni mišici. Kaj natančno je zapisano v motorni skorji, je bil predmet dolgih razpravljanj – ali celice v skorji kodirajo gib, ki ga želimo narediti, ali posamezno mišico, ki jo moramo skrčiti, da gib lahko izvedemo. Izkazalo se je, da je odgovor nekoliko drugačen – posamezen nevron ne kodira nič od tega. Uporablja se **populacijsko kodiranje**, s pomočjo katerega so dejanja določena s proženjem zbora nevronov.

Tik pred motorno skorjo ležijo pomembna premotorna področja, ki so vključena v načrtovanje gibov, pripravo hrbtenjačnih zank za gib in v procese, ki vzpostavljajo povezave med vidno zaznavo gibov in razumevanjem kretenj. Osupljiva nova spoznanja vključujejo odkritje **zrcalnih nevronov** v opicah. Slednji se odzivajo tako takrat, ko opica vidi premik roke, kot tudi takrat, ko sama izvaja enak gib. Zrcalni nevroni so verjetno pomembni pri posnemanju in razumevanju gibov. Za motornim predelom skorje, v skorji temenskega režnja, so številna področja, vključena v prostorsko predstavo telesa ter vidnih in slušnih ciljev okrog nas. Kot kaže, hranijo prostorsko karto položaja naših udov in lokacije zanimivih objektov glede na naše telo. Poškodbe teh področij, na primer po možganski kapi, lahko povzročijo neuspešno seganje po predmetih ali celo zanemarjanje ali zanikanje delov sveta okrog nas. Bolniki s tako imenovanim prostorskim **temenskim zanemarjanjem**, kjer gre za okvaro temenskega režnja, ne opazijo predmetov (pogosto na svoji

„Zrcalni nevroni bodo za psihologijo naredili, kar je DNA naredila za biologijo: podali bodo enoten okvir in pomagali pojasniti vrsto miselnih sposobnosti, ki so doslej ostale skrivnostne in eksperimentom nedostopne. Predstavljajo velik skok naprej v evoluciji primatskih možganov.“ V.S.Ramachandran



Preizkus gibanja

Kdo me premika? S prijateljem poskusite naslednje: na dlan desne roke položite precej težko knjigo. Zdaj dvignite knjigo z desne roke s svojo levo roko. Desno roko držite pri miru! To bi moralo biti lahko. Sedaj poskusite ponovno, a namesto vas naj knjigo z desne roke dvigne vaš prijatelj, svojo roko pa ponovno skušajte držati popolnoma pri miru. Slednje uspe le malemu številu ljudi. Naj vas ne skrbi. Potrebno je veliko poskusov, da bi bili lahko približno tako uspešni, kot ko ste knjigo dvigovali sami.

Ta eksperiment prikazuje, da je senzomotornim področjem vaših možganov na razpolago mnogo več informacij, kadar gibanje izvajate popolnoma sami, kot pa, kadar skušate uskladiti svoje gibanje z enakimi dejanji drugih.



levi strani) in nekateri celo ignorirajo levo stran svojega telesa.

Bazalni gangliji

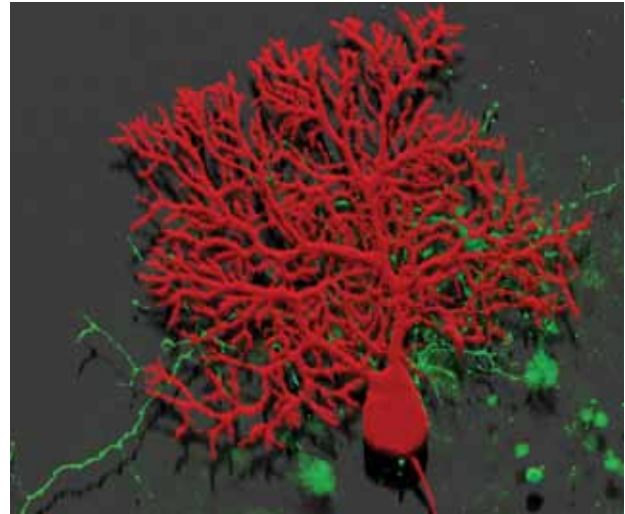
Bazalni gangliji (globoka jedra) so skupina med seboj povezanih področij, ki se nahajajo pod skorjo, v globini možganskih polobel. So odločilni pri začenjanju gibanja, čeprav še zdaleč ni popolnoma jasno, na kakšen način. Izgleda, da globoka jedra delujejo kot zapleten filter, ki izbira izmed velikega števila raznolikih informacij, ki jih dobi iz sprednje

polovice skorje (iz senzoričnih, motoričnih, prefrontalnih in limbičnih regij). Izhodni signal bazalnih ganglijev se nato vrača v motorična področja skorje.

Parkinsonova bolezen je pri ljudeh pogosta motorična motnja, za katero sta značilna tresenje (tremor) in težava pri začenjanju gibanja. Zdi se, kot bi bil selektivni filter v bazalnih ganglijah blokiran. Težava je v propadu nevronov v področju možganov, imenovanem črna substanca (substantia nigra - ime je dobila zaradi svojega črnega izgleda), iz katere se izraščajo dolgi projekcijski aksoni, ki sproščajo nevrottransmitor dopamin v bazalne ganglije (več v raziskovalnih obzorjih v spodnjem okviru). Natančna razporeditev **dopaminskih** aksonov na njihovih tarčnih nevronih v bazalnih ganglijah je zelo zapletena, kar kaže na pomembno interakcijo med različnimi nevrottransmitorji. Zdravljenje z zdravilom L-DOPA, ki se v možganih pretvori v dopamin, obnovi raven dopamina in popravi gibanje (več v 16. poglavju: Umetni možgani in nevronske mreže).

Za bazalne ganglije se domneva, da so pomembni tudi pri učenju. Omogočali naj bi izbiro dejanj, ki vodijo k nagradi.

vključuje skorajda vse stopnje vaše motorične hierarhije - od načrtovanja dejanja v povezavi s premikajočim se objektom, programiranja gibov vaših udov, do prilagajanja reflektov, ki nadzorujejo držo vaše roke. Na vseh stopnjah je potrebno združevanje senzoričnih informacij v tok signalov, ki vodijo v vaše mišice.



Purkynejeva celica v malih možganih kaže obsežno "razvejanost" svojega dendritskega drevesa. To služi sprejemanju neštetihi vhodnih signalov, ki so potrebni za natančno časovno usklajenost večših gibov, ki se jih učimo.

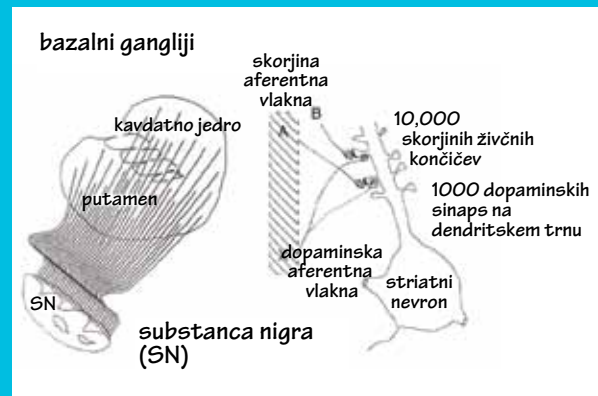
Mali možgani

Mali možgani so ključnega pomena za spretno, tekoče gibanje. So krasen nevronski stroj, katerega zapletena celična zgradba je izrisana do potankosti. Mali možgani so podobno kot bazalni gangliji gosto povezani tako s področji skorje, ki so zadolžena za nadzor gibanja, kot tudi s strukturami možganskega debla. Okvare malih možganov vodijo k slabi usklajenosti gibanja, izgubi ravnotežja, nejasni izgovorjavi in k številnim kognitivnim težavam. Se vam zdi znano? Alkohol ima močan vpliv na male možgane.

Mali možgani so ključni tudi za motorično učenje in prilagajanje. Skoraj vsi hoteni gibi se zanašajo

na fini nadzor motoričnega vezja, pri čemer so mali možgani pomembni za njihovo optimalno prilagoditev, kot je na primer časovna usklajenost gibov. Za male možgane je značilna zelo urejena organizacija skorje in zdi se, da so se razvili z namenom združevanja ogromnih količin informacij iz senzoričnega sistema, motoričnih predelov skorje, hrbtenjače in možganskega debla. Osvajanje večših gibov je odvisno od mehanizma celičnega učenja, imenovanega dolgoročno upadanje (LTD - iz angleškega termina long-term depression), ki zmanjšuje moč nekaterih sinaptičnih povezav (več v 10. poglavju: Plastičnost). Obstaja več teorij o delovanju malih možganov; številne temeljijo na zamisli, da mali možgani ustvarjajo „model“ delovanja motoričnega sistema - da so nekakšen virtualno-resničnostni simulator vašega lastnega telesa znotraj vaše glave. Ta model gradijo z uporabo sinaptične plastičnosti, ki je vpletena v njegovo kompleksno omrežje. Ko boste ponovno lovili žogo, se zavedajte, da to

Raziskovalna obzorja



Nepričakovana zgodba o dopaminu.

Kemija, ki tvori osnovo dejanj in navad, vključuje neurotransmitor dopamin. Slednji se sprošča v bazalnih ganglijah, kjer deluje na metabotropne receptorje (več v 3. poglavju: Kemični obveščevalci). Tam ima dve nalogi: vzpodbujanje dejanj in nagrajevanje za ustrezne odzive. Zanimivo je odkritje, da je sprostitvev dopamina največja, ko je nagrada nepričakovana. Dopaminski nevroni so torej najbolj aktivni v tisti fazi učenja, ko je močna ojačitev ustreznega odziva motoričnega sistema najbolj potrebna. Posamezne gibe je nato možno povezati v zaporedje preko zaporednih sprostitvev dopamina. Kasneje, posebej če kompleksna gibanja prerastejo v navado, sistem teče brez dopaminske nagrade. Tu začnejo igrati pomembno vlogo mali možgani, še posebej, ko je potrebno gibe natančno časovno uskladiti.



Izvejte več o zgodovini spoznavanja kontrole gibanja v nevroznanosti na spletni strani: <http://www.pbs.org/wgbh/aso/tryit/brain/>