

Gibanje



Ste se kdaj čudili spretnostim teniške igralke, ko je dosegla as, ali virtuoznosti pianistke, katere prsti plešejo skozi zapletene skladbe? Take gibe dojemamo kot izredno posebne in spretno. Vendar pa vsak od nas v vsakdanjem življenju izvaja zbirko zapletenih, spretnih gibov, ki so prav tako izjemni – od hoje in govorjenja do podpisovanja imena ali pošiljanja sporočil. Svoje mišice uporabljamo celo, da razkrijemo svoje razpoloženje in čustva; nasmeh in mahanje sta univerzalno razumljiva.

Gibanje je izredno pomemben del našega vsakdanjika, vseeno pa se velikokrat zgodi, da zapletene sisteme, ki omogočajo ta dejanja, jemljemo za samoumevne. **Osrednje živčevje**, sestavljeno iz možganov in **hrbtenjače**, nadzoruje usklajeno delovanje več sto mišic, ki nam omogočajo gibanje. Naše gibanje se nato izpopolnjuje in krepi s prilagoditvijo na spreminjajoče se okoliščine v svetu in pa z vadbo, s katero lahko celo izboljšujemo svoje motorične sposobnosti.

HOTENO GIBANJE

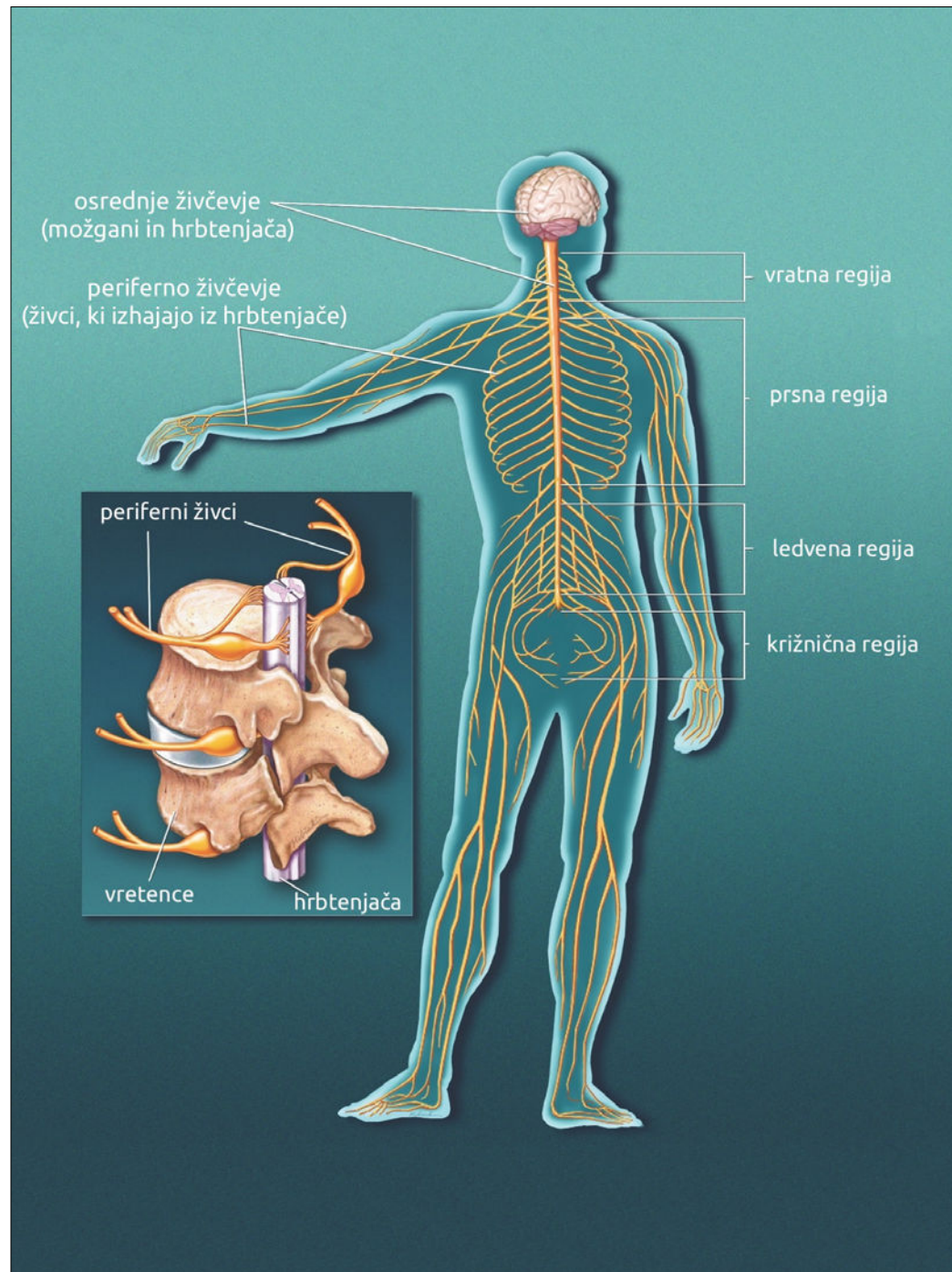


Da bi dodobra razumeli, kako živčni sistem uravnava gibanje, začnimo z mišicami, organi za proizvodnjo gibanja. Večina mišic je tesno pritrjenih na okostje in premošča sklepe, ki jih poznamo kot dele telesa, kjer se združita dve ali več kosti. Zaradi svoje tesne povezave z okostjem ali skeletom se imenujejo skeletne mišice. Aktivne mišice lahko krčijo ali iztegujejo sklep, s katerim so povezane. Mišice, ki krčijo sklep in tako približajo kosti, se imenujejo fleksorji; mišice, ki iztegujejo sklep in tako povečajo kot med kostmi, se imenujejo ekstenzorji. Fleksorji in ekstenzorji delujejo v nasprotju, kar

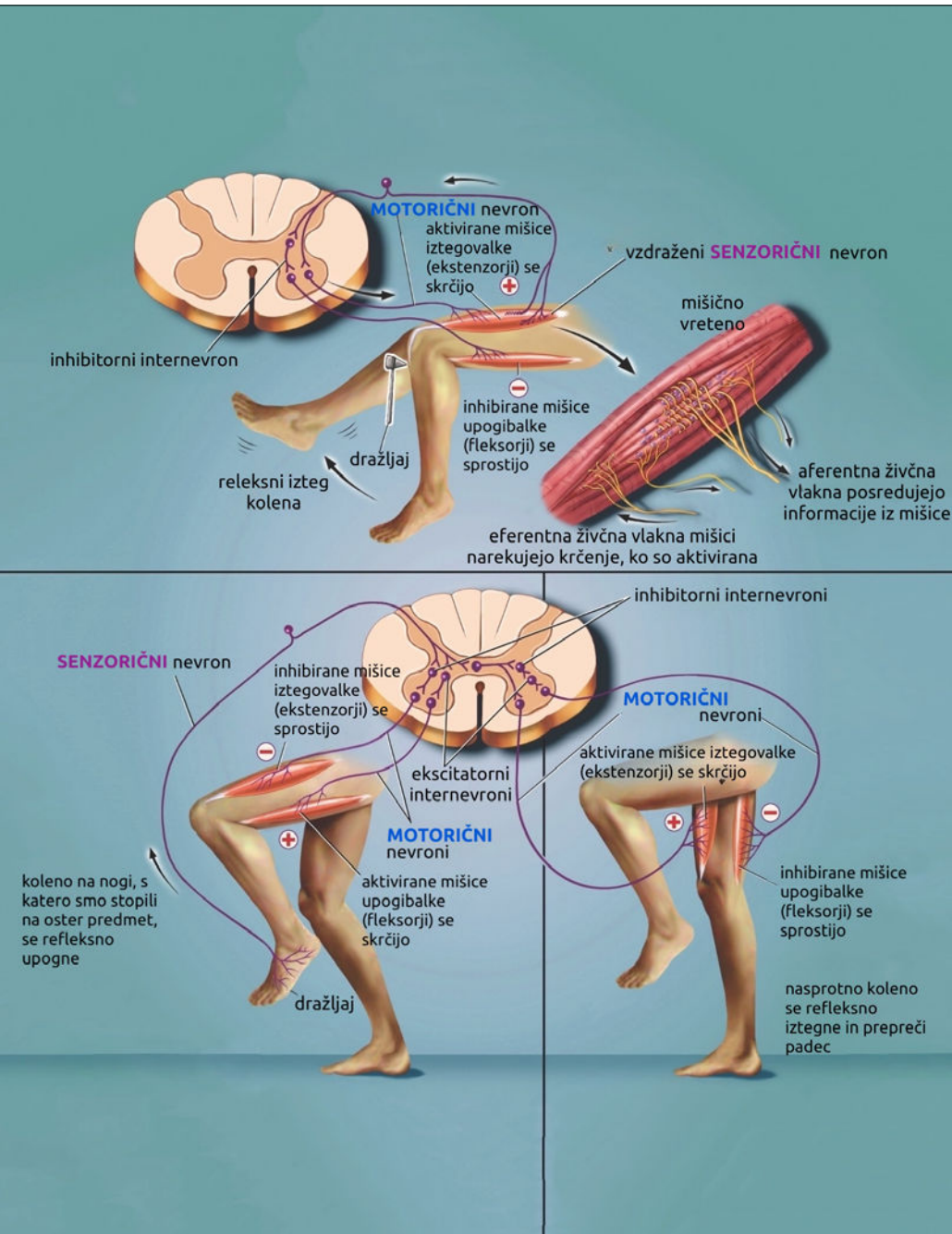
pomeni, da se ob krčenju ene skupine mišic druga skupina sprosti. Upogibanje komolca na primer zahteva krčenje bicepsa (fleksor) in sprostitev tricepsa (ekstenzor). Pri takih gibih se mišice, ki spodbujajo gibanje, imenujejo agonisti, tiste, ki nasprotujejo ali zavirajo gibanje, pa antagonisti. Izkušene, hitre gibe, kot je metanje kopja, začnejo agonisti in ustavijo antagonisti, kar omogoči hiter pospešek, natančnost in hitro ustavljanje uda. Pri nekaterih gibih se agonisti in njihovi antagonisti skrčijo hkrati, kar imenujemo kokontraktacija. Taka sočasna dejanja lahko stabilizirajo ali nadzorujejo gibanje, na primer pri stabilizaciji negibnega sklepa med izometričnimi vajami.

Gibanje vseh skeletnih mišic nadzira osrednje živčevje, ne glede na to, ali gre za fleksijo ali ekstenzijo. Skeletna mišica je sestavljena iz več tisoč posameznih mišičnih celic, imenovanih mišična vlakna. Vsako mišično vlakno nadzira en sam alfa motorični nevron, ki izvira iz hrbtenjače ali možganov. Po drugi strani pa ima en alfa motorični nevron nadzor nad številnimi mišičnimi vlakni (od nekaj do 100 ali več mišičnih vlaken). Alfa motorični nevron in vsa mišična vlakna, ki jih nadzoruje, tvorijo funkcionalno enoto, imenovano **motorična enota**. Ta predstavlja ključno povezavo med osrednjim živčevjem in skeletnimi mišicami. Če motorični nevroni odmrejo, kar se recimo zgodi pri boleznih, kot je **amiotrofična lateralna skleroza (ALS)**, lahko bolniki izgubijo sposobnost gibanja.

Nekatere mišice ne narekujejo dejavnosti sklepov, ampak mehkega tkiva. Primer takih mišic so mišice v glavi in vratu, ki nam omogočajo premikanje oči, žvečenje in požiranje hrane, govorjenje in nadzor



Živčni sistem je sestavljen iz osrednjega živčnega sistema, ki ga sestavljajo možgani in hrbtenjača, ter perifernega živčnega sistema, ki je sestavljen iz živcev in majhnih zgostitev sive možganovine, imenovanih gangliji. Možgani pošiljajo sporočila perifernim živcem, ki nadzorujejo mišice in notranje organe.



Refleks na nateg, prikazan na vrhu slike, se pojavi, ko zdravnik z majhnim gumijastim kladivcem udari po tetivi pod kolonom. To aktivira mišična vretena, ki pošljejo val impulzov v hrbtenjačo, aktivirajo motorične nevrone in sprožijo krčenje mišic. Umik s pomočjo fleksije, prikazan na dnu te slike, pa se pojavi, ko stopimo na oster predmet, pri čemer se noga takoj dvigne stran od vira morebitne poškodbe. Nasprotna noga se odzove s povečanim iztegom, kar imenujemo refleks križnega iztegovanja. Ta služi predvsem za ohranitev ravnotežja.

obraznih izrazov. Te mišice delujejo na približno enak način kot tiste, ki se pritrjujejo na kosti, saj jih prav tako nadzoruje osrednje živčevje.

NEHOTENO GIBANJE



Veliko vrst gibanja je izvedenih brez našega zavestnega nadzora. Med najpreprostejšimi in najbolj temeljnimi vrstami **nehoteni gibov** so **reflexi**. Ti so razmeroma stereotipni, samodejni odzivi mišic na določene dražljaje, kot je recimo hiter umik roke po dotiku nečesa vročega, in vključujejo aktivacijo senzoričnih receptorjev v koži, sklepih ali celo v samih mišicah. Odzivi so hitri in se zgodijo brez vpletenosti možganov ali zavestne pozornosti. Namesto tega so odvisni od omrežij nevronov, ki se nahajajo v sami hrbtenjači ali blizu nje.

Eden najbolj znanih je refleksni izteg kolena, ki spada med refleksne na nateg oz. miotatične refleksne. Pojavi se, ko zdravnik z majhnim gumijastim kladivom udari po tetivi tik pod kolonom. Ta udarec povzroči rahel razteg mišice iztegovalke kolena, kar zaznajo mišični receptorji, imenovani mišična vretena (angl. *muscle spindles*). Ta zaznavajo obseg in hitrost raztezavanja ter stimulirajo senzorične nevrone, ki pošiljajo val impulzov v hrbtenjačo. Tam signali aktivirajo alfa motorične nevrone, katerih naloga je raztegnjeno mišico pokrčiti. Da noga brčne naprej, se mora hkrati še sprostiti antagonist oz. v tem primeru fleksor. Pravzaprav isti dražljaj, ki neposredno aktivira motorične nevrone za nadzor ekstenzorja, posredno zavira tudi motorične nevrone za nadzor antagonističnega fleksorja. Tako vzajemno zaviranje se doseže preko povezovanja nevronov, ki v celoti ležijo v hrbtenjači. Ko se ti inhibitorni interneuroni aktivirajo zaradi prvotnega senzoričnega dražljaja,

pošljejo inhibitorne signale motoričnim nevronom, ki oskrbujejo fleksor.

Tako tudi najpreprostejši refleksi vključujejo sinhrono aktivacijo (in inaktivacijo) več sklopov motoričnih nevronov, ki nadzorujejo agonistične in antagonistične mišice.

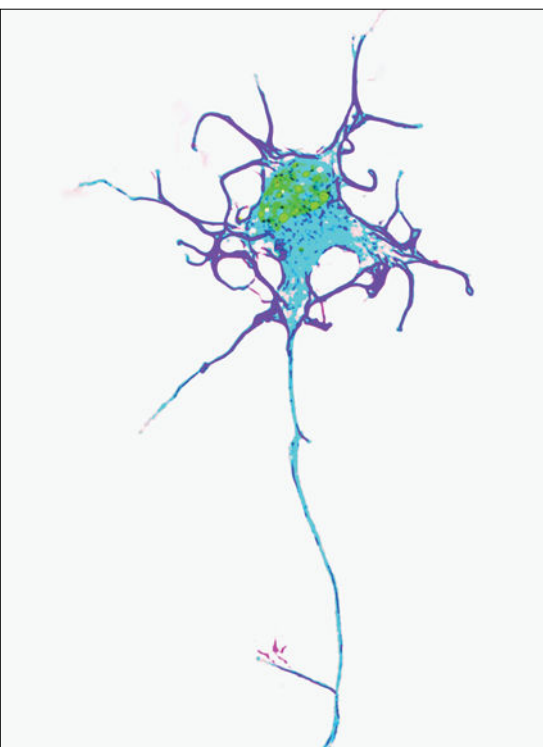
Številni refleksi ščitijo pred poškodbami. Ko sedimo v zdravniški ordinaciji, kolenski refleks povzroči kratek nihaj spodnjega dela noge naprej. V primeru skoka s stola ali izvedbe še bolj zahtevnega gimnastičnega elementa, bi ta isti refleks spodbudil krčenje močnih mišic, ki izravnavajo kolena, kar spodbudi ustrezen pristanek brez poškodbe. Drug zaščitni refleks je refleks umika s pomočjo fleksorja, ki se pojavi recimo ob dotiku ostrega predmeta z boso ного. V tem primeru

receptorji za bolečino v koži pošljejo sporočilo v hrbtenjačo, nakar se aktivirajo alfa motorični nevroni in noga se takoj dvigne. Ker je naša telesna teža podprta na obeh nogah, se morajo hkrati aktivirati tudi ekstenzorji v nasprotni nogi. Brez te dodatne reakcije, imenovane refleks navzkrižne ekstenzije, bi izgubili ravnotežje in padli, ko bi stopili na oster predmet.

Ob vseh omenjenih gibih vključene mišice možganom posredujejo povratne informacije o lokaciji različnih delov telesa in njihovi hitrosti premikanja. Prej omenjena mišična vretena zagotavljajo informacije o spremembah v dolžini mišic. Možgani nato prilagajajo občutljivost sistema z uporabo ločenega sklopa gama motoričnih nevronov, ki ohranjajo

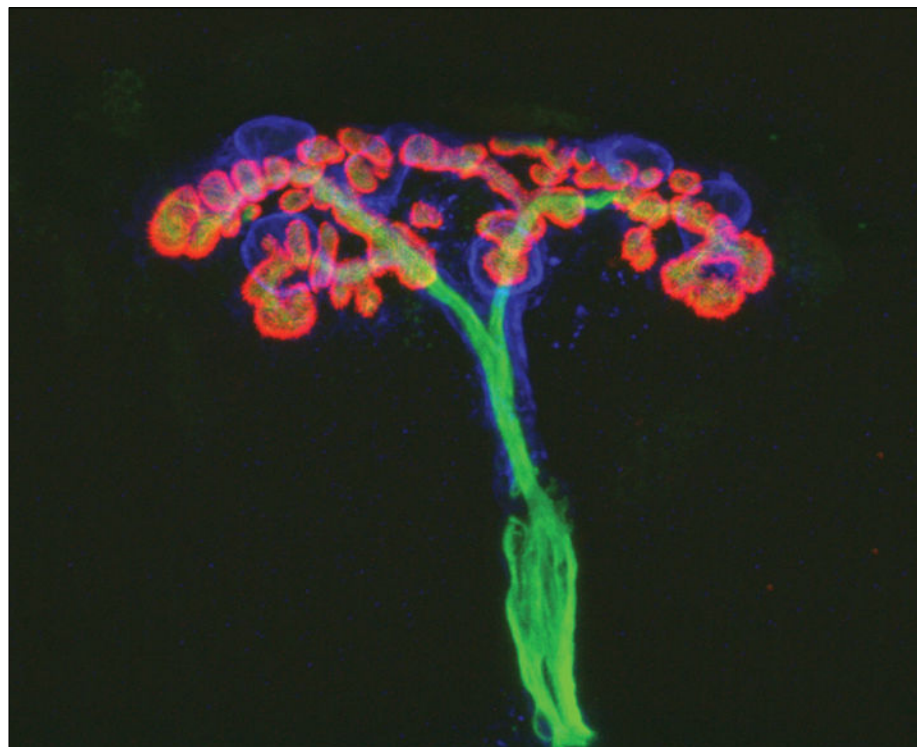
mišična vretena napeta. Drugi specializirani receptorji pa se imenujejo Golgijevi tetivni organi. Nahajajo se ob spoju mišičnih vlaken s tetivo, kar jim pomaga pri zaznavanju jakosti sile ali napetosti, ki deluje na mišico med trenutnim gibanjem. Opisani proces poveča natančnost gibanja. Ti povratni sistemi niso edinstveni le za reflekse, ampak omogočajo možganom, da natančno prilagajajo delovanje mišic med številnimi gibalnimi nalogami – od tistih, ki zahtevajo obvladovanje položaja in koordinacije, recimo srkanje iz čisto polne skodelice čaja, do tistih, ki vključujejo spretno uporabo moči in hitrosti, kot je met kopja na atletskem mitingu.

HOTENO IN KOMPLEKSNO GIBA-



Fallini, et al. The Journal of Neuroscience, 2016.

Specializirane celice, imenovane motorični nevroni, prenašajo navodila iz možganov vzdolž dolgih aksonov, ki se raztezajo od hrbtenjače do mišic v rokah in nogah. Te celice so lahko najdaljše celice v našem telesu, pri čemer se nekatere raztezajo po celotni dolžini noge, da nadzorujejo mišice stopal.



Wright, et al. The Journal of Neuroscience, 2009.

Nevroni z mišicami komunicirajo na točno določenih mestih, imenovanih živčno-mišični stiki. Slika prikazuje živčno-mišični stik pri miši. Motorični nevron je obarvan zeleno, receptorji za neurotransmiterje na mišičnih celicah pa so označeni z rdečo.

NJE

Hrbtenjačna vezja (omrežja nevronov znotraj hrbtenjače) igrajo ključno vlogo tudi pri nadzoru bolj prefinjenih, hotenih gibalnih vzorcev, kot je recimo izmenično gibanje nog med hojo. Tako pri štirinožcih kot pri ljudeh ritmične vzorce aktivacije mi-

uspešno izvedbo takega gibanja morajo možgani torej posredovati ukaze ustreznim hrbtenjačnim vezjem.

Z eksperimenti na živalih znanstveniki šele začenjajo razumeti usklajen niz interakcij med različnimi možganskimi regijami, ki potekajo med hotenim gibanjem. Področje

uravnavanju hotenega gibanja namreč v obliki vzporednih vezjih ali "zank" sodeluje več drugih možganskih regij. Te regije, vključno z bazalnimi gangliji, talamusom, malimi možgani in velikim številom nevronov v srednjih možganih ter možganskem deblu, prav tako vplivajo na aktivnost motoričnih nevronov v hrbtenjači. Že sami bazalni gangliji obsegajo dve ločeni poti. Zdi se, da ena spodbudi želeni motorični program, medtem ko druga zavira neželena, konkurenčna dejanja. Skupaj s talamusom imajo bazalni gangliji tako široko razširjene povezave z motoričnimi in senzoričnimi področji možganske skorje, kar jim posledično omogoča spremljanje in prilagajanje motoričnih zmogljivosti.

Disfunkcija bazalnih ganglijev lahko povzroči resne motnje gibanja. **Parkinsonova bolezen** se pojavi ob napredujočem propadu (degeneraciji) nevronov v predelu možganov, imenovanem **substantia nigra**. Od tam nevroni z uporabo neurotransmiterja dopamina, ključne kemikalije, ki sodeluje pri nadzoru gibanja, posredujejo signale bazalnim ganglijem. Upad količine dopamina privede do značilnih simptomov in znakov Parkinsonove bolezni, med drugim do tremorja, rigidnosti in v nekaterih primerih akinezije, ki se nanaša na nezmožnost gibanja. Nasprotno pa se pri posameznikih s **Huntingtonovo boleznijo** pogosto pojavljajo nenadzorovani trzljaji (zgbiki), zlasti na obrazu in okončinah. Ti simptomi in znaki izvirajo iz selektivne izgube inhibitornih nevronov v bazalnih ganglijih, kar pomeni, da naključni nehotni gibi niso več ustrezno zavrti.

Še ena regija možganov, ključna za usklajevanje in natančno

Najbolj zapleteni izvedeni gibi, vključno s tistimi, ki zahtevajo zavestno načrtovanje, vključujejo informacije iz možganov.

šic, ki proizvajajo gibanje, ustvarjajo nevroni, ki se nahajajo v hrbtenjačnih vezjih in vezjih možganskega debla. Ko se ta nevrnska vezja, imenovana tudi centralni generatorji vzorcev, aktivirajo, proizvajajo ritmične vzorce, ki se pojavijo pri hoji, letenju, plavanju ali dihanju. Omenjena vezja so se najprej razvila pri primitivnih vretenčarjih, proučujemo pa jih, da bi ugotovili, v kolikšni meri je mogoče vključiti hrbtenjačno vezje za obnovitev osnovne sposobnosti vzdrževanja telesne drže in ponovne uporabe paraliziranih udov po hudi **paralizi**.

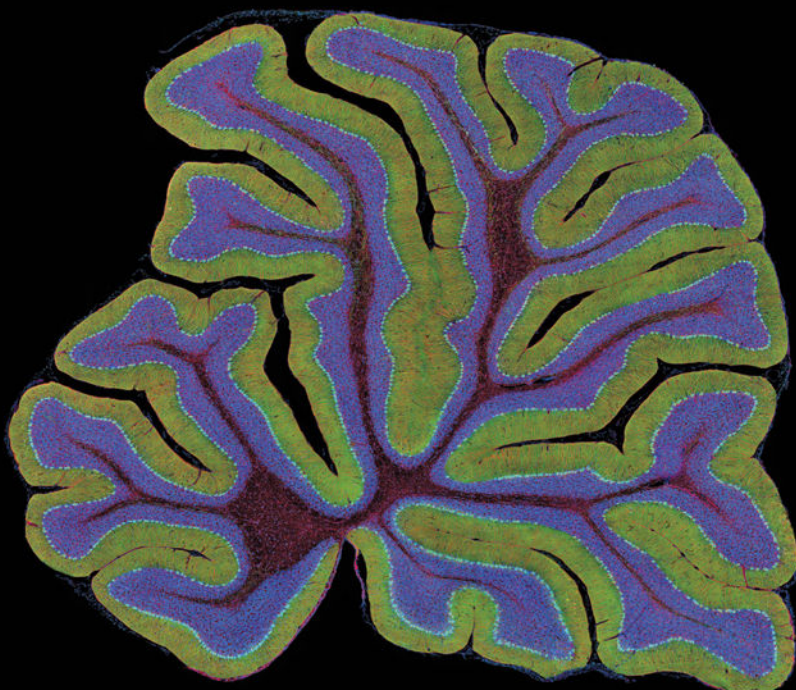
Najbolj zapleteni izvedeni gibi, vključno s tistimi, ki zahtevajo zavestno načrtovanje, vključujejo informacije iz možganov. Višje možganske regije sprožijo hoteno gibanje, usklajujejo kompleksna zaporedja gibanja in prilagajajo vedenjske rezultate glede na specifično situacijo. Za

možganov, ki je bistveno za tako gibanje, je **motorična skorja (motorični korteks)**. Od tam nevroni pošiljajo signale, ki neposredno nadzorujejo aktivacijo alfa motoričnih nevronov v hrbtenjači. Nekateri od teh kortikalnih nevronov, ki so pomembni za natančno uglasene motorične sposobnosti, nadzorujejo gibanje funkcionalno povezanih mišic v posameznem delu telesa, recimo dlan ali roka. Drugi nevroni v motorični skorji pa lahko usmerjajo usklajeno gibanje posamezne okončine na točno določeno točko v prostoru, na primer približevanje rok ustom, da lahko zagrizemo v okusen košček hrane.

Regije, ki uravnavajo hoteno gibanje



Motorični korteks pri nadzoru zapletenih ali spretnih hotenih gibov ne deluje sam. Pri



Thomas Deerinck, National Center for Microscopy and Imaging Research, University of California, San Diego.

Mali možgani, ki so povezani z gibanjem, so predel v zadnjem delu možganov. Na sliki so prikazani mišji mali možgani.

uravnavanje spretnega gibanja, so mali možgani. Ti prejemajo informacije neposredno od senzoričnih receptorjev v okončinah in glavi, hkrati pa tudi informacije iz možganske skorje. Nevroni v malih možganih združijo te senzorične informacije, kar zagotovi pravilen časovni potek mišičnega delovanja. To omogoči bolj ali manj samodejno izvajanje

tekočih gibov. Mali možgani so torej bistveni za širok spekter motoričnega učenja in koordinacije, vse od nadzora gibov udov in oči do pravilnega prijema predmetov.

Motnje v delovanju malih možganov vodijo do slabše koordinacije, motenj ravnotežja in celo do težav pri govoru, ki je ena najbolj zapletenih oblik nadzora gibanja.

Dolgotrajna zloraba alkohola je pogost vzrok za pridobljeno degeneracijo malih možganov. Tipični znaki zajemajo slabo koordinacijo, nestabilno ali spotikajočo se hojo, spremembe v govoru in težave s fino motoriko, vključno s prehranjevanjem, pisanjem ter oblačenjem.

Mali možgani nam prav tako omogočajo, da se prilagodimo nepričakovanim okoliščinam, kar recimo zasledimo pri prilagoditvi gibov ob dvigu škatle, za katero smo pričakovali, da bo veliko težja. Omenjena regija hkrati igra pomembno vlogo pri motoričnem učenju, na primer med učenjem hoje, govora, igranja inštrumenta ali plesne koreografije. Pri tem izpopolni in izostri motorične programe, ki nam omogočajo opravljanje teh nalog z vedno večjo natančnostjo in spretnostjo.

Številni izsledki kažejo, da nam mali možgani pomagajo tudi pri ponovni umeritvi gibov ob spremembi lastnega telesa, recimo med rastjo, pridobivanjem ali izgubljanjem telesne mase, maščobe ali mišic in med spopadanjem z boleznijo. Na ta način omogočajo spretno gibanje skozi nenehno spreminjajoči se svet med odraščanjem in staranjem. ■