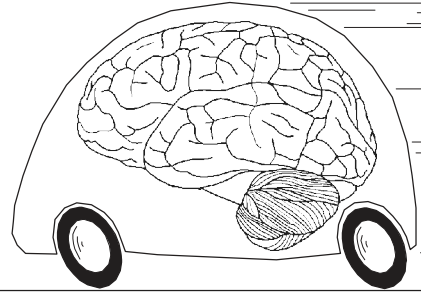


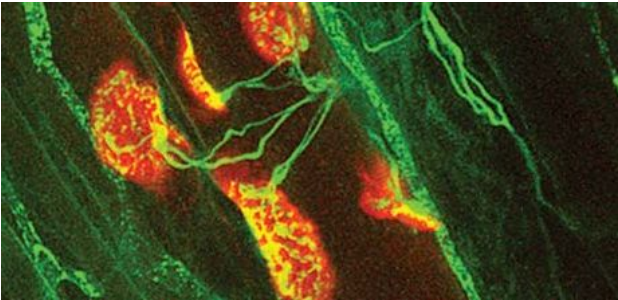
Hareket



Bir topu yakaladığınızı düşünün. Kolay mı? Öyle gibi görünebilir, fakat bu basit hareketi yapmak için bile beyniniz bazı önemli işleri yapmak zorundadır. Kolay olduğunu kabul etsek bile beynimiz topun hafif mi yoksa ağır mı olduğu, hangi yönden geldiği ve ne kadar hıza sahip olacağı gibi konularda bir planlama yapar. Bir koordinasyon söz konusudur. Topu yakalamaya çalışan birisi kollarını nasıl kendiliğinden birbiriyle uyumlu olarak hareket ettirir ve topu yakalamak için hangi konum ve biçim en iyisi olacaktır? Kollarınız doğru konuma ulaşacak mı ve parmaklarınız topu yakalamak için doğru zamanda mı kapanacak gibi konularda bir planlama vardır. Sinirbilimciler, günümüzde bu olaylarda rol alan birçok beyin alanı olduğunu bilmektedirler. Bu alanlardaki nöral aktivite, serebral korteks ve bazal gangliyonlardan beyincik ve omurilikte uzanan bir motor hiyerarşide bir emir zinciri oluşturmak için bir araya gelir.

Sinir-kas kavşağı

Motor hiyerarşinin en alt düzeyi olan omurilikte motor nöronlar olarak adlandırılan yüzlerce özelleşmiş hücre impuls oluşturma hızlarını artırır. Bu nöronların aksonları, kasılabilen lifleri aktifleştirmek için kaslara kadar uzanır. Her bir motor nöronun akson sonlanmaları, bir kasta bulunan sınırlı sayıda kas liflerinin üzerinde özelleşmiş **sinir-kas kavşağı** oluşturur (aşağıdaki Şekle bakınız). Bir motor nörondaki her bir aksiyon potansiyeli, sinir sonlanmalarından nörotransmitter salınmasına neden olur ve kas liflerinde bir aksiyon potansiyeli oluşturur. Bunun sonucu, her bir kas lifindeki hücre içi depolardan Ca^{2+} iyonlarının salınması gerçekleşir. Bu ise kuvvet ve hareket oluşturan kas liflerinin kasılmasını tetikler.



Kasların kasılmasını sağlamak amacıyla sinirler, sinir-kas kavşağında kas lifleri ile özelleşmiş değmeler oluştururlar. Onlar gelişirken her bir kas lifine çoklu sinir lifi gider, fakat nöronlar arasındaki yarışma nedeni ile biri dışında hepsi yok edilir. Geriye kalan başarılı sinir, nörotransmitteri olan asetilkolini "motor son plak" ta (kırmızı boyalı) bulunan özelleşmiş moleküler detektörler üzerine boşaltır. Bu görüntü konfokal mikroskop kullanılarak elde edilmiştir.

Kuvvet düzeyi

EMG sinyali

100 ms

Kaslarla ilgili elektriksel aktivite kayıtları (elektromiyografik aktivite).

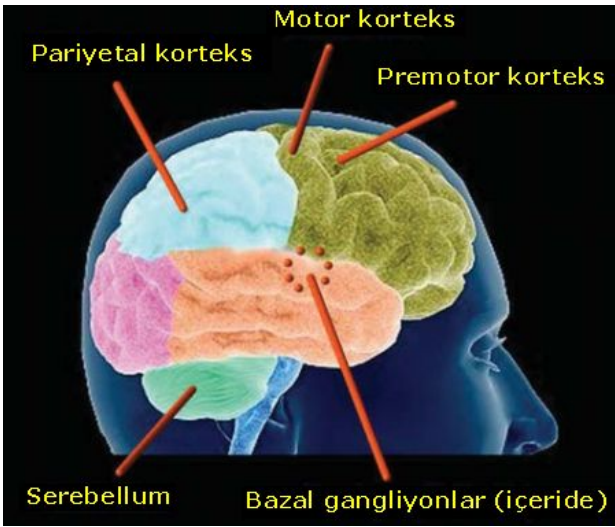
Kol kaslarındaki elektriksel olaylar, deri üzerinden bile bir amplifikatör ile kayıtlanabilir ve bu elektromiyografik kayıtlar (**EMG**), her bir kastaki aktivite düzeyini ölçmek üzere kullanılabilir (bakınız yukarıdaki Şekil).

Omurilik, birçok farklı refleks yolları aracılığı ile kasların kontrolünde önemli bir bölümü temsil eder. Keskin veya sıcak cisimlerden kendimizi korumaya yönelik geri çekme refleksi ve vücut pozisyonunun sağlanmasında rol alan gerilme refleksleri bunlar arasındadır. İyi bilinen "diz refleksi", kas uzunluğu bilgisini gönderen duyuşal nöronlar ile bunların sinapslarla bağlandığı ve hareketi sağlayan motor nöronlar olmak üzere sadece iki tip sinir hücrelerini içerir. Bu refleksler, örneğin yürürken veya koşarken kol ve bacakların ritmik hareketleri gibi az veya çok bütün bir davranışı düzenleyecek şekilde, omurilikteki devrelerde daha karmaşık olanlarla bir araya toplanırlar. Bütün bunlar motor nöronların koordine edilmiş eksitasyon ve inhibisyonunu gerektirir.

Motor nöronlar, kemiklerinizi hareket ettiren kaslara giden **son ortak yoldur**. Bununla birlikte beyin, bu hücrelerin aktivitesini kontrol etmede önemli bir probleme sahiptir. Özel bir eylemi yapabilmek için hangi kaslar, ne kadar ve hangi sırayla hareket etmelidir?

Hiyerarşinin en üst noktası - motor korteks

Motor hiyerarşinin zıt ucu olan serebral kortekste, hareketin her bir ögesi için, on binlerce hücre tarafından hayret verici sayıda hesaplama yapılmak zorundadır. Bu hesaplamalar hareketlerin düzgün ve ustaca yürütülmesini sağlar. Serebral korteksle omuriliğin motor sinirleri arasındaki beyin sapında bulunan kritik alanlar, serebral korteksten inen bilgiyle, omurilikten yukarı çıkan kaslar ve uzuvlar hakkındaki bilgiyi birleştirir.



Hareket kontrolünde yer alan çeşitli beyin bölgeleri.



Hareket üzerine bir deney

Beni hareket ettiren ne? Bu deneyi bir arkadaşınızla yapın. Oldukça ağır bir kitabı sağ avucunuzun üzerinde tutun. Şimdi sağ elinizdeki kitabı sol elinizle kaldırın. Göreviniz sağ elinizi hareketsiz tutmaktır. Bunu kolay buluyor olmalısınız. Şimdi, arkadaşınız kitabı sizin elinizden kaldırıp alırken elinizi tamamen hareketsiz tutmayı yeniden deneyin. Çok az kişi bunu yapabilir. Üzülmeyin; onu kendi kendinize yaptığınızda basit bulduğunuz bir harekete yakın olanı becermek bile çok fazla sayıda denemeyi gerektirecektir.

Bu deney, beyninizin sensorimotor alanlarının, eylemi tamamen kendi kendinize yaparken kazandığı bilginin, bir başkasını izlerken kazandığı bilgiden daha fazlasına sahip olduğunu gösterir.

Motor korteks, somatosensöriyel korteksin (bakınız s.12) hemen önünde yer alan ve beyin yüzeyini bir yandan diğer yana kadar kaplayan ince, şerit halinde bir dokudur. Burası, farklı uzuvlardaki (omurilikteki motor nöronlar üzerindeki bağlantılar yoluyla) hareketlere neden olan sinir hücrelerinin topografik olarak düzenlendiği vücudun tamamının mükemmel bir haritasıdır. Kayıt elektrotu kullanılarak, bu haritanın herhangi bir kısmındaki nöronların ilgili kastaki aktiviteden yaklaşık 100 milisaniye kadar önce aktif oldukları gösterilebilmektedir. Motor kortekste neyin kodlandığı, hücrelerin bir kişinin gerçekleştirmek istediği eylemleri mi yoksa bu eylemi gerçekleştirmek için kasılmak zorunda olan bireysel kasları mı kodladığı uzun zamandır tartışılan bir konudur. Bu sorunun cevabı, bireysel nöronların her ikisini de kodlamadığı şeklinde, biraz farklı bir şekilde ortaya çıkmıştır. Onun yerine, eylemlerin bir nöron grubunun impuls üretmesiyle belirlendiği **popülasyon kodu** kullanılmaktadır.

Motor korteksin tam önünde, eylemlerin planlanmasında, omurilik devrelerinin hareket için hazırlanmasında, görme ile hareketler arasında bağlantılar kurulmasında ve kol hareketlerinin anlaşılması süreçlerinde görev alan pre-motor alan bulunur. Çarpıcı yeni bulgular, maymunlarda, maymunun hem bir el hareketini gördüğü hem de aynı hareketi gerçekleştirdiği sırada yanıtta bulunan **ayna nöronların** keşfini kapsamaktadır. Ayna nöronlar, eylemlerin anlaşılmasında ve taklit edilmesinde önemlidir. Motor korteksin arkasında yer alan pariyetal kortekste bir dizi farklı kortikal alan, vücudumuzun ve çevremizde bulunan görsel ve işitsel hedeflerin uzaysal temsiliyle ilgilidir. Bunlar, uzuvlarımızın ve bize göre ilginç olan hedeflerin nerede olduklarının haritasını saklıyor görünmektedir. Örneğin, bir inmeden sonra bu alanlara yönelik olarak gerçekleşecek bir hasar, nesnelere ulaşmamıza veya etrafımızdaki dünyanın bir



bölümünün ihmal veya inkar edilmesine bile neden olabilir. **Pariyetal ihmal**'li hastalar, cisimleri (sıklıkla sol taraflarındaki) fark edemezler ve bazıları kendi vücutlarının sol tarafını bile göz ardı ederler.

Bazal gangliyonlar

Bazal gangliyonlar, beyin yarıkürelerinin derinlerinde korteksin altında konumlanmış birbirini ile bağlantılı yapılar kümesidir. Nasıl yaptıkları çok açık olmasa da hareketlerin başlatılmasında yaşamsal öneme sahiptirler.

"...DNA biyoloji için ne yaptıysa, ayna nöronlar da psikoloji için onu yapacaktır: onlar birleştirici bir çerçeve sağlayacak ve şimdiye kadar gizemli kalan ve deneylerle erişilemeyen bir çok mental yeteneğin açıklanmasına yardımcı olacaktır. Onlar, primat beyin evriminin ileriye doğru mükemmel sıçrayışlarıdır".
V.S. Ramachandran

Bazal gangliyonlar, korteksin ön yarısından (duyusal, motor, prefrontal ve limbik bölgeler) aldığı çok sayıdaki değişik girdiler arasından bilgi seçimi yapan karmaşık bir filtre gibi davranıyor görünmektedir. Bazal gangliyonların çıktısı motor kortikal alanlara geri bildirimde bulunur.

Yaygın bir insan motor bozukluğu olan **Parkinson hastalığı**, titreme ve hareketin başlangıcında karşılaşılan güçlükle karakterizedir. Bazal gangliyonlardaki seçici filtre engellenmiş gibidir. Sorun, uzun, çıkıntılı aksonları bazal gangliyonların (bakınız Araştırmada Geline Son Nokta Kutusu) içine **dopamin** nörotransmiteri salan ve substantia nigra (siyah görünümü nedeniyle böyle adlandırılmıştır) olarak adlandırılan beyin alanındaki nöronların dejenere olmasından kaynaklanır. **Dopamin** aksonlarının bazal gangliyonlardaki kendi hedef nöronları üzerindeki düzenlenimi, farklı nörotransmitterler arasındaki önemli etkileşim olduğunu ima edecek şekilde çok karmaşıktır. Beyinde dopamine dönüşen L-Dopa ilacıyla yapılan tedavi, dopamin düzeylerini ve hareketi eski haline getirir (bakınız Bölüm 16).

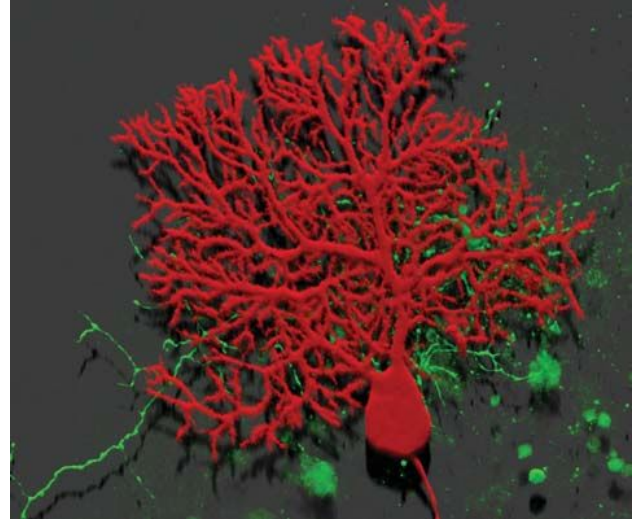
Bazal gangliyonların, ödülle sonuçlanan eylemlerin seçimini olanaklı kılan öğrenmede de önemli olduğu düşünülmektedir.

Beyincik

Beyincik, ustalık isteyen düzgün hareketlerin yapılmasında çok önemlidir. Karmakarışık hücresel yapısı büyük incelikle planlanmış olan beyincik, harika bir nöronal makinedir. Aynen bazal gangliyonlar gibi, motor kontrolün yanısıra beyin sapı yapılarıyla da ilgili olan kortikal alanlarla yoğun bir biçimde bağlantılıdır. Beyinciğin zarar görmesi hareketlerin koordinasyonunda başarısızlığa, denge kaybına, kötü telaffuz ve ayrıca bir takım bilişsel güçlükler yol açar. Bu size tanıdık geliyor mu? Alkol, beyincik üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir.

Beyincik, aynı zamanda, motor öğrenme ve adaptasyon için de önemlidir. Hemen hemen bütün istemli hareketler motor devrelerin incelikli kontrolüne dayanır ve beyincik, örneğin onların zamanlamasının en uygun şekilde ayarlanmasında önemli role sahiptir. Beyincik çok düzgün bir kortikal düzene sahiptir ve zaman içinde duyu sistemlerinden, kortikal motor alanlardan, omurilik ve beyin sapından gelen büyük miktardaki bilgiyi bir araya toplamak için gelişmiş gibi görünmektedir. Uсталık gerektiren hareketlerin kazanımı, uzun dönemli depresyon (long-term depression LTD) olarak adlandırılan ve bazı sinaptik bağlantıların dayanıklılığında (Plastisite bölümümüne bakınız) azalma oluşturan bir hücresel öğrenme mekanizmasına bağlıdır. Beyincik ile ilgili olarak, başınızın içinde vücudunuzun bir tür bir sanal gerçeklik benzeştiricisi olan ve çoğu motor sistemlerin nasıl çalıştığına bir "modeli" ni oluşturma düşüncesiyle ilişkili olan çok sayıda teori vardır. Beyincik bu modeli, karmakarışık ağının içinde gömülü bulunan sinaptik plastisiteyi kullanarak oluşturur. Böylece, kollarınızın duruş reflekslerini ayarlayarak ve uzuvlarınızın hareketlerini programlayarak, hareketli görsel hedef ile ilgili eylem planlanmasını yaparak hemen hemen her düzeydeki motor hiyerarşinizin farkına vararak topu tekrar yakalarsınız.

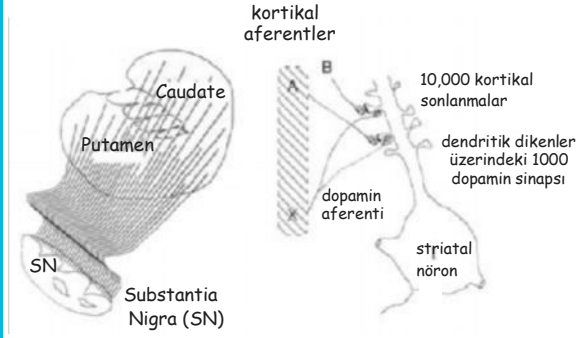
Bütün bu evrelerde, duyu bilgilerini kaslarınıza giden sinyal akıntısı ile bütünleştirmek zorunda kalırsınız.



Dendritik ağacının yaygın 'dallanma'larının gösterildiği bir beyincik Purkinje hücresi. Bu dallanma öğrendiğimiz ustalık isteyen hareketlerin kusursuz zamanlaması için gerekli sayısız girdilerin alınmasında görev alır.

Araştırmada Geline Son Nokta

Bazal gangliyonlar



Dopamin ile ilgili beklenmedik bir hikaye

Eylemlerin ve alışkanlıkların altında yatan kimyasal süreç, metabotropik reseptörlere etki edecek şekilde bazal gangliyonlardaki nöronlar üzerine serbestleştirilen dopamin nörotransmiteri ile ilişkilidir (Bölüm 3). Dopamin orada, hem eyleme teşvik edici hem de eylemin uygun biçimde olması için bir ödül sinyali olarak çalışır. Dopamin serbestleşmesinin ödüllendirme beklenmediği zaman en yüksek değerde olması şaşırtıcı yeni bir buluştur. Yani dopamin nöronları, doğru faaliyet oluşturmak için motor sisteme gerçekten güçlü bir destek verdikleri öğrenme sırasında çok güçlü impuls oluştururlar. O zaman hareket, dopaminin ardışık boşalmalar şeklinde serbestleşmesiyle bir sıraya göre dizilir. Daha sonra, özel olarak karmaşık hareketler alışkanlığa dönüştüğünde, sistem dopamin ödülü olmaksızın serbestçe işleyecektir. Bu noktada, özellikle hareketler doğrulukla zamanlanabilmişse, beyincik rol almaya başlayacaktır.