

Yapay Göze Doğru

TOVVARDS AN ARTIFICIAL EVE

Dilek GÜVEN*

*Uz.Dr.,Ankara Numune Hastanesi 3. Göz Kliniği, ANKARA

Özet

Günümüzde, oftalmoloji, biyoloji ve bilgisayar mühendisliği dalları, az görenlere daha iyi görme sağlama ve kör olan insana da bir görüş sağlayabilme amacıyla yoğun çalışma içerisinde. Biyolojik örnekten yola çıkılarak, bir çip üzerine retina inşa edilmeğe çalışılmakta ve uörömorfik görme devreleri oluşturulmaktadır. Retina ve kortikal implantlar ile Yapılan laboratuvar ve az sayıdaki klinik çalışmalar, gelecek için umut vaatmektedir.

Anahtar Kelimeler: Arttırılmış görme, Protezi görme, Yapay göz, Retinal implant, Kortikal implant,-Silikon retina

T Klin Oftalmoloji 1998, 7:214-221

Yüzyıllardır, kör bir insanın yeniden görmesini sağlamak fikri bir hayal olarak görülmekteydi. Ancak günümüzde, bilgisayar mühendisliği, oftalmoloji ve biyoloji bunu başarabilmek için birlikte çaba sarfetmeye başlamışlardır.

Gelişmekte olan ülkelerde, körlük nedenleri arasında, katarakt, malnütrisyon (Vitamin A eksikliği) veya enfeksiyon (trahom, onkoserkiyazis) mevcuttur, ayrıca tüberküloz, pnömoni ve cinsel yolla geçen enfeksiyonlar az görmeye ve körlüğe yolaçabilmektedir. Gelişmiş ülkelerde ise, körlük ve az görme, retina, optik sinir veya görme korteksmdede dokuyu hasarlayan yaşa bağlı makiiiler dejeneresans (YBMD), retinitis pigmentosa (RP), glokom, diabet ve görme korteksini etkileyen serebrovaskiiler olay gibi hastalıklar sebebiyle olmaktadır.

Gelecek yüzyılda, görmesi hiç olmayanlara elektronik görüş sağlanması, düşük görmesi olanlara da elektronik yardımcı aletlerin geliştirilmesi mümkün olacaktır.

Geliş Tarihi: 13.05.1997

Yazışma Adresi: Dr.Dilek GÜVEN
Ankara Numune Hastanesi
3. Göz Kliniği, ANKARA

Summary

Today, ophthalmology, biology and computer engineering branches are uniting in an effort to achieve restoring sight for the blind and giving an enhanced vision to people with low-vision. According to the biological system, retina is redesigned on a chip and neuromorphic vision chips are being built. Laboratory and rare clinical studies using retinal and cortical implants represent hopeful results for the future advancements.

Key Words: Enhanced vision, Prosthetic vision, Artificial eye, Retinal implant, Corti implant, Silicon retina

T Klin J Ophthalmol 1998, 7:214-221

tır (1). Kendi hedefi ve geliştirme yolları olan 3 çeşit görme rehabilitasyonundan bahsedilebilir:

1. Arttırılmış görme (Enhanced vision): Maksimum görüş sağlanabilmesi için görüntü yardımcı bir cihazla işleme tabi tutulur ve bilgi retinanın halen canlı, sağlıklı bölgelerine sunulur.

2. Protezli görme (Prosthetic vision): Canlı nöronların elektriksel uyarımı ile iç retina katlan veya görme yollarına işlenmiş görsel bilgiyi sunar.

3. Yapay görme (Artificial vision): Görsel bilgiyi işleyip değerlendirdikten sonra bireye bir başka duyu şeklinde sunar.

Temel fonksiyonlar

Arttırılmış, protezli ve yapay görme sistemleri, sağlam insan gözünden daha az performans gösterse de, yararlı olabilir. Gelecekteki herhangi bir çeşit gelişmiş sistem şu fonksiyonları içerecektir:

Göz pozisyonu takibi: Bakış yönü ile ilgili, doğru, gerçek zaman bilgisi, kamerayı kontrol etmek, görüntüyü başka bir bölgeye aktarmak (remapping) ve görüntüyü bir retinal proteze göndermek için kullanılabilir.

Dinamik ulun koupresyonu: Sistem, parlak günışığı ile en azından loş yapay aydınlatma arasında değişen aydınlanma seviyelerinde çalışabilmesini sağlayan adapte edici mekanizmaya ihtiyaç duyar. Halen mevcut olan analog ve sayısal tekniklerle bir görüntünün luminansı veya renk kontrastı otomatik olarak sıkıştırılabilir veya genişletilebilir.

Lokal kontrast artırma: Kontrast sadece kısa aralıklarla arttırılmalıdır, aksi takdirde lokal kontrastı görünür yapmak, kontrastı daha kuvvetli olan alanları satüre ederek görünmez hale getirebilir.

Görüntü aktarına (remapping): Cihaz, kör noktadaki bilgi, gören retina üzerine yerleştirilecek şekilde görüntüyü distorsiyona uğratabilmelidir.

Özelleştirme: Sistem, kabiliyet ve fonksiyonları ne olursa olsun, kullanıcının ihtiyaçlarına ve mevcut görme kabiliyetine adapte edilebilmelidir.

Arttırılmış görme konusunda, yüksek çözünürlük, yüksek kontrast, cm-m boyutlarında ekrana sahip flat-panel gösterge teknolojisi gelişme yolundadır.

Hatıf başa monteli geliştirilmiş görme sistemlerinde, holografik optik elementler ve difraktif optikler, yeni formlarda görüntü projeksiyonu oluşturabileceklerdir.

Arttırılmış görme ile canlı kalmış fotoreseptörler kullanılabilir, protezi görmede ise, retina veya daha yüksek nöronlar elektriksel olarak uyarılabilir. Eğer kişi, oryantasyon ve mobilite gerektiren işler için yeterli görmeye sahipse, görsel işler için uygun bir şekilde paketlenmiş ışık inputunun retinaya iletilmesi yeterli olacaktır. Günümüzde, ekzantrik izleme, tarama ve takip etme gibi özel fiksasyon teknikleriyle eğitim, işlerin daha rahat yapılmasına yardımcı olmaktadır. Gelecekte, göz hareketi takibi ve biyo-geribesleme gibi tekniklerle bu tip eğitimlerle birleştirilebilecektir.

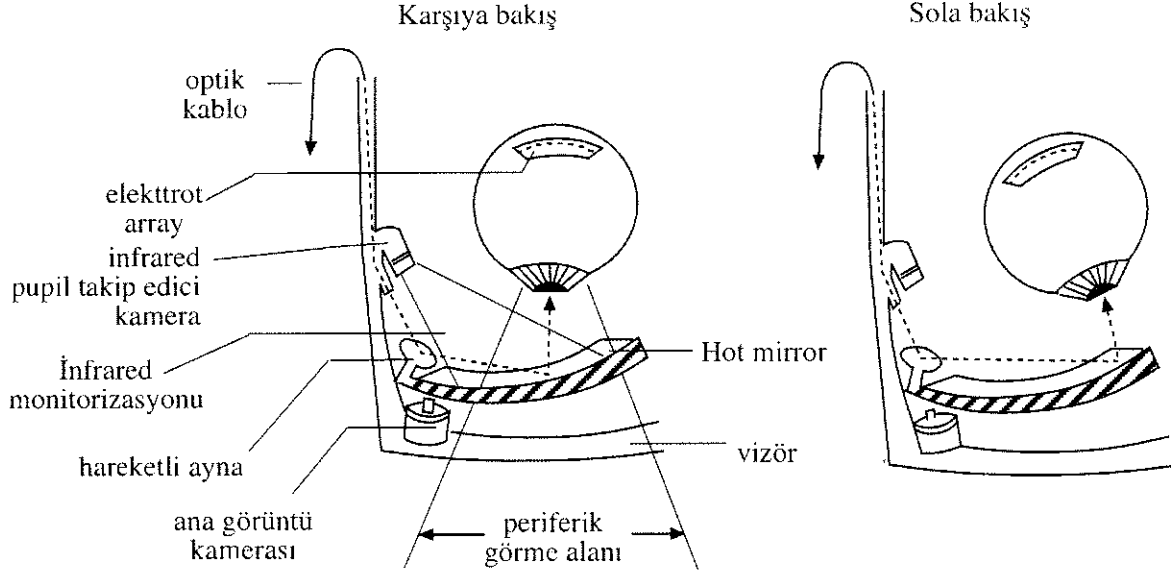
Retinada görüntünün işlenmesi birkaç seviyede gerçekleşmektedir, bu işleme genikulat ve görme korteksi için de geçerlidir ki, bunlarda hassas geribesleme mekanizmaları da mevcuttur. Görme yolunun devamında, gerçeğe yakın input sinyali oluşturmak için gerekli ön işlem karmaşıklığı artmaktadır. Daha önemlisi, sinyal görme yolunda ilerledikçe ve görüntü özellikleri paralel olarak işlendikçe hücreler daha çok özelleşmektedir. Dolayısıyla bir arabirim elemanının hedef hücre veya hücrelere, önceden cevap vermeyi öğrendikleri bir bilgi tipini sağlama ihtimali azalmaktadır. Korlekteki hücrelere belki tekrar öğretiler, ancak, bu kapasitenin ne kadar esnek olduğu ve ileri yaşlarda ne kadarının korunduğu belirgin değildir. Sistemin alt seviyesinde, eğer uyarana cevap yeteneği önemli ölçüde kaybedilmişse, daha üst seviyelerle ilgilenmek uygun olacaktır.

Her iki gözde skotomları olan bir insanda arttırılmış görme sistemi, fonksiyon gören retina bölgelerine bilgiyi remapping veya diğer metotlarla yoğunlaştırır. Bu, canlı retinaya olan görsel yol bağlantılarının daha çok iş yapmasını gerekli kılar, Protezli görmede ise, görsel sistem, belki de doğumdan beri kullanılmayan alanların aniden işlenmesi için zorlanmaktadır.

Göz hareketi kompensasyonu

Normal görmesi olan kişilerde, gözlerin hareketiyle retina üzerindeki görüntü yer değiştirir. Bu arttırılmış görme sistemi kullanan kişide de aynıdır. Eğer kamera yapay veya doğal göz küresinin içine yerleştirilmişse, normal görmede olduğu gibi, yer değiştirme olur, ancak eğer kamera eksternal vizör veya tripod üzerine monte edildiyse, göz hareketi görüntünün yer değiştirmesine yolaçmaz. Retinada sabitlenmiş hareketsiz bir görüntü, hızlı bir şekilde kaybolduğu halde, hareketli olan görüntü kaybolmaz. 'Flicker' (titreme) ve diğer temporal modülasyon formları, kullanıcı aynı zamanda kamerayı taşıyorsa, baş veya vücut hareketleri de, bu kaybolmayı engelleyecektir.

Uyarıcı elektrot array üzerinden görüntünün beklenen yer değiştirmesini sağlamak için, görüntüyü yakalayan kameranın kızılötesi ışıkla (IR) aydınlatma altında, gözün ön kısmını gözleyerek kullanıcının gözünü veya pupil hareketlerini takip etmesi gerekmektedir (Şekil 1). Göz hareketinin izlenmesi sonucunda, görüntü kamerasının yönlendirilmesi kontrol edilir. Retina! protez, pupilden giren IR ışını yoluyla, gözün dışından güç veya sinyal girdisi alacaksa, transmitörün intraküler çip ile aynı doğrultuda olması gerekmektedir. Işının 2 rolü vardır: Güç gönderir ve görüntü bilgisini iletmek için darbe veya genlik modülasyonludur. Her iki göz için görüntü oluşturuca kamera, göz hareketi kontrolü altında, her yöne dönebilir ve her ikisi de kişinin kalan periferik görmesini bloke etmemek için, kullanıcının görme alan dışına yerleştirilmiştir. Bu kamera, dış dünyadaki görüntüyü yakalar, vücut üzerinde taşınabilen sinyal işleyici bilgisayara, optik kablo yoluyla bilgi aktarımını sağlar. Işın doğrultusunu gözün pozisyonuna uydurmak için, biri büyük, sabit ve eğimli ayna, diğeri ile küçük ve hareketli ayna tasarlanmıştır. Büyük olan ayna, 'İrot mirror' olarak ta adlandırılır, pupil takip edici kameraya gözün ön kısmının IR görüntüsünü ve pupile optik kablodan gelen dar bilgi ve güç ışını yansıtır, dışarıdan gelen ışığın ise geçmesini sağlar. Bilgi ve güç ışını, küçük hareketli ayna ile 'hot mirror' doğru döndürülür. Pupil takip edici kamera ve bilgisayar ünitesi göz pozisyonunda bir değişiklik tespit ettiğinde, ana kameranın servomotor denetleyicilerine ve çevirici aynaya sinyal yollar.



Şekil 1. Göz hareketi kompensasyonu.

Bugünkü durum

Avrupa Topluluğu'nca fman.se edilen taşınabilir optik görme artırıcı sistem projesi gibi az sayıda çalışmalar mevcuttur.

Optelec firmasının (Westford, MA), 'Bright Eyes' isimli ürünü, göstergelerin minyatürleşmesi, taşınabilirliğin artırılması ve başa monteli göstergelerin üretilmesi imkanlarından yola çıkılarak gerçekleştirilmiştir(2). Bir batarya paketi ile, elde tutulan bir kamera ve bir LED (ışık yayan diyot) göstergeden oluşmaktadır, baş bandına veya gözlük çerçevesine monte edilmiştir. LED gösterge, monokülerdir ve siyah üzerine kırmızı veya kırmızı üzerine siyah görüntü oluşturur. Monoküler olduğu için, kullanıcı görme ile ilgili dikkatini gösterge ile çevresi arasında değiştirebilmektedir. Bu gösterge, bakanın önünde duran sanal bir görüntü sunmaktadır. Ayarlamaya ve LED gösterge ile kullanıcının gözleri arasındaki mesafeye bağlı olarak 2 kat büyütme seviyesine sahiptir.

Yeni geliştirilen bir diğer cihaz da, Maryland Baltimore, The Johns Hopkins Üniversitesi Wilmer Göz Enstitüsü'nde gerçekleştirilen LVES (low vision enhancement system)'dir (1,2). Görüntü üç ayrı CCD (charge coupled device) kameradan gelir, başa monte edilir, iki uzak veya yönlendirici kamera ve bir yakın görüş kamerasından oluşur. Kameralar, 1.5-9 kat arasında değişen büyütme imkanına sahiptir. CCD kamera teknolojisi kullandığı için, gece körlüğü olan hastalara da yarar sağlayabilecek şekilde düşük ortam aydınlatma durumlarında da çalışabilir. Aletin önemli bir özelliği, hem gezinme, hem de yakın görme için olan artırımı-

larmın aynı cihazla sağlanmasıdır. İki ayrı görüntü oluşturularak, doğala yakm binoküler disparité sağlarlar. Belirli bazı dalgalı boylarındaki ışığın seçici olarak artırımı yapılabilir, seçilmiş bölgelerde dijital sinyal işleme çipi vasıtasıyla kenar keskinliği artırılabilir.

Hesaplayın ve İşleyici Göz (3)

Retinadan bilgi transferi rektilineardır, yani sinyaller doku içerisinde yatay ve dikey olarak hareket ederler. Fotoreseptörler, 'spike' kullanmaksızın, diğer nöron katı olan horizontal hücreler ile sinaptik ilişki oluştururlar. Horizontal hücre ağı, elektriksel olarak büyük bir direnç ağıdır, alanın bir noktası aktive olduğunda, aktivite horizontal olarak yayılır. Bu safhada, göreceli olarak fotoreseptörlerden geçen görüntü yavaşlar, dış hatlar bulanıklıktan Nöral görüntü, hem zaman, hem de uzay açısından orjinalin bulanık bir versiyonudur.

Retinanın daha derin katında bulunan bipolar hücreler, belli bir alanda işlev görürler ve yoğunluğa karşı hassasiyet için koşullanmışlardır. İç retinaya bipolar hücreler tarafından iletilen sinyaller, görsel manzarda bulunan aydınlık-karanlık sınırların varlığı ile ilgili bilgilerdir. Sonra daha ileri fonksiyonlar olan, kenarların artırımı ve keskinleştirilmesi, ardısıra gelen görüntü sinyallerinin zaman analizini içeren, hareket tespiti ve bir görüntü içerisindeki ayrıntıların tespitine sıra gelir. İç retinadaki amakrin hücre katı, görsel değişikliğe cevap, bir inhibisyon dalgasını retinanın geniş alanı boyunca yayar.

Sonuçta bütün transformasyonlar, retinanın outputu olarak, ganglion hücrelerinde farklı patentlerin bir dökümü haline getirilmektedir. Bu patentler yüksek beyin merkezlerine 'spiking transmission' ile taşınmaktadır.

Bir çip üzerine tekrar dizayn edilebilir retina

Berkeley'de California Üniversitesi'nde Nonlinear Electronics laboratuvarında, 'cellular nonlinear network' (CNN) adı verilen, bir çip üzerinde süper bilgisayar formunda olan bir görüntü işleme sistemi geliştirilmiştir. Bu cipin çalışmaları, retinanın çoğu işleme ve hesaplama özelliklerini paylaşmaktadır. Her ikisi de analog sinyalleri aynı elemanların mozayiginden oluşan düzlemsel araylerde (düzenek) işleme tabi tutar.

Çip, elektronik arrayler arasında interaksiyonlar içinde yoğun paralel hesaplama yapar. Her bir piksel bir nöron seti oluşturacak şekilde, her array bir bütün olarak, tek bir resim elemanı olarak düşünülebilir. Çip tekrar programlanabilir, bir işlemde sonra tamamlanan görüntü saklanabilir ve çipi terketmeksizim ileri bir işlem için kullanılabilir.

CNN'nin oluşturduğu şekillerin, beyinde nereye ve nasıl yönlendirileceği ve daha önemlisi cip ile hizmet vereceği insan arasında nasıl uygun bir bağlantı sağlanaacağı önemli bir konudur,

Nöromorfik Görme Cipleri (4)

On yıldır birçok üniversite laboratuvarında, sinekler, kurbağalar, kediler ve insanların görmesi ve görmeye dayalı davranışlarının altında yatan biyolojik devre ve prensiplerin anlaşılabilmesi için çalışmalar sürdürülmüştür. Aynı zamanda, tek bir silikon cipin karşılayabileceği devrenin karmaşıklığı oldukça ileriye götürülmüştür. California Teknoloji Enstitüsü'nden bazı araştırmacılar, görsel işlem ile ilgili nörobiyolojik devreleri taklit eden elektronik cipler oluşturarak, bunları nöromorfik entegre devreler olarak adlandırmışlardır.

Bir nöromorfik görüntüleme sensörü, her bir resim elemanındaki (piksel) analog devre ile kombine olmuş fotoreseptör arraylerinden oluşmaktadır. Bu sensör, retina gibi lokal olarak aydınlanma değişikliklerine adapte olabilir, kenarları tespit edebilir, temporal değişiklikleri bildirebilir ve hareketi tespit edebilir. Biyolojik sinir sistemine benzerlikleri sebebiyle nöromorfik sistemler, retina veya serebral korteksin tahrip olan kısımları için doğal bir vekil olabilirler. Nöromorfik sistemler, sinir sistemleri gibi, yoğun olarak paralel, analog, kollektif işlemi kullanırlar, yapay akıl ve konvansiyonel makine görüşü için temel olan sayısal ve sembolik işlemi kullanmazlar. Adaptif fotoreseptörlerin, ay ışığı ile öğle vakti arasındaki doğal aydınlanma aralığı olan, 8 se-

viyeden fazla görüntü yoğunluğunu hissedebilmeleri gereklidir.

Görüntü çözünürlüğü, yapay ve doğal görme sistemleri arasındaki önemli bir başka farklılıktır. İnsanlar, birçok görsel işlev daha az piksele ihtiyaç gösterse de, yüksek çözünürlüklü görüntüleri görmeye alışmışlardır.

Silikon retina, omurgalı retinasının dizayn prensiplerini izler, lokal kazancı, lokal görüntü yoğunluğu ile ters orantılı ayarlanmıştır, outputu, lokal kontrastla orantılıdır.

Yapısal olarak beyin ve bilgisayar arasında, hafıza kullanma konusunda göze çarpıcı bir farklılık mevcuttur. Retinadan, daha yüksek korteks bölgelerinde, adaptasyon ve öğrenme sinir sisteminin her seviyesinde olmaktadır. Açıkça hiçbir nöronal eleman öğrenme veya hesaplayıcı olarak tek başına özel olarak kullanılmamaktadır.

Gelecek

Silikon retinalar, görülebilir ışık aralığı ile sınırlı değildir. İnfrared oda sıcaklığı hisseden yeni teknolojiler birleştirildiğinde, bu gelişme infrared silikon sensörlerinin jenerasyonuna götürmektedir. Özel direnç ağları polimerlerden yapılarak ve dirençli tabakalara bağlanarak, daha kompakt olan 'plastik retina'nın yapılması sağlanabilir.

Körler İçin Oküler İmplantlar

Retina, genel olarak erişkin sinir sisteminde olduğu gibi, hasar veya bozılmayı iyi bir şekilde kompanse edememektedir. Özellikle rod ve konlar, Y B M D, retinitis pigmentosa, savaş veya işe bağlı laser yaralanması durumlarında olduğu gibi, hasara daha yatkındır.

Peyman ve ark. son safha Y B M D hastalarında submaküler skar dokusunu eksizye ederek, otolog ve homolog retina pigment epitel (RPE) hücresi transplantasyonu yapmışlar, otolog greft kullanılan olguda, 2 ay sonra EHS'den 20/4(0)'e çıkan görme keskinliği elde edilmiştir, homolog greft ise, subretinal membran ile enkapsüle olmuştur (5), Silverman ve Hughes, ışık ile hasarlanmış rat retinalarına neonatal ratlardan fotoreseptör transplantasyonu uygulamışlar, transplantlar 6 hafta boyunca canlı kalmış, opsine reaktif olmuşlardır (6).

Retinal hasar, çoğunlukla görmeyi devamlı olarak azaltır, rehabilitasyon için gösterilen çabalar, çok yüz, güldürücü değildir. Dejeneratif hastalıklarda, özel optik cihazlar yardımcı olabilir, ancak kullanımı pratik değildir. Moleküller genetik tedavi, hasarı sınırlama ve fonksiyonu onarmada önemli görünmektedir. Günümüzde besinsel ve tıbbi tedaviler sadece kısıtlı yardım sağlamaktadır. Dolayısıyla yakın zamanda elektronik implantlar, retinal distresin tedavisinde en iyi

umul olabilir, yapay retinal cihaz veya protez, hayatı daha yaşanabilir hale yetirebilir.

1977'de Davson ve Radtke, yüzey monopolar stimülasyon ile, 2 normal kedinin retinalarını stimüle etmişler, görsel kortikal cevap almışlardır(7). YBMD ve RP'da önemli olan, ganglion hücrelerinin yeterli sayıda canlı olmaları ve retinal cihazın amaçlarına hizmet edecek hassasiyette olup olmamalarıdır. Retinitis pigmentosada dış retinal dejenerasyon olmakta, iç retina korunmaktadır, son dönemde, %80 oranında iç kat, %30 oranında ganglion hücresi fonksiyoneldir. 1993'te Hümayun ve ark. RP'li hastalar için, iç retinayı elektriksel olarak stimüle eden intraoküler protezin görme sağlayabileceği düşüncesinden yola çıkarak yaptıkları hayvan deneylerinde, kurbağanın iç retinal katım, bipolar platin tel elektrotlarla elektriksel olarak stimüle etmişlerdir (8). RPH toksini olan sodyum iyodat ile hasarladıkları tavşan gözlerini de stimüle etmişlerdir. Normal gözlerde ve dış retinal dejenerasyon oluşturulan gözlerde, yüzey elektriksel stimülasyon, retinal ganglion hücre cevabına benzeyen devamlı 'spike' depolarizasyon potansiyeller tarzında lokalize retinal cevap oluşturmuştur. Oldukça azalmış ERG genlik cevabına rağmen, yüzey elektriksel stimülasyonu ile, retinal cevabın ölçülebilmesi, hasarlı dış retinayı atlayıp iç retinayı stimüle ederek fonksiyon gören görsel protez fikrini desteklemektedir.

Fonksiyonel kapasitenin korunduğu. 1996'da Hümayun ve ark.'nın Johns Hopkins'teki çalışmalarıyla da gösterilmiştir (9). Lokal anestezi altında, skleradan girilen küçük probalar kullanarak, 3'ünde retinitis pigmentosa, Emde YBMD'ye bağlı masif subretinal hemoraji ve l'inde de bir çeşit konjenital retinal dejenerasyon bulunan 5 hastanın retinal yüzeyine fokal elektriksel stimülasyon uygulamışlardır. Elektrotların büyük olmasına ve retinadan uzaklıklarının en az 0.5 mm olmasına rağmen, hastalar kibrit başı büyüklüğünde iyi tariflenmiş ışık spotları hissettiklerini söylemişlerdir. Daha önce kullanışlı görmesi olanlar, stimüle edilen retinal alana göre fostenleri doğru olarak lokalize edebilmişlerdir. 2 olgu, stimüle eden elektrodun hareketiyle fosfen hareketini söyleyebilmiş, iki elektrotla bağımsız 2 stimülasyonu, 2 simültane fosfen olarak algılamışlardır. Işık hissi olmayan bir olgu, 4/200 görme keskinliğine tekabül eden bir fosfen çözünürlüğü gösterebilmiştir. Stimulus kuvveti ve tekrarlama oranı, retinal elektriksel stimülasyonda, fosfen parlaklığını belirlemek için parametreler olabilir. Multielektrot stimülasyon sonuçlarına göre, en az 5/200 çözünürlük sağlanabilmektedir, büyük harfler gibi formlar ve şekiller oluşturulabilir.

Yazarlar, retinal yüzey üzerini örtecek, implante olabilen, stimüle edici bir elektrot matrisi tasarlamaktadırlar. Matris en az, bir fotosensitif kat ve bir

stimülasyon katından oluşmalıdır. Bu iki kat arasındaki bir safha, horizontal ve bipolar hücrelerin normalde yaptığı bazı işlemleri içerebilir.

North Carolina State Üniversitesi'nden Elektrik Mühendisliği Profesörü Dr. VVentai Liu ve UNC-Chapel Hill'de doktora öğrencisi olan Elliot McGucken, Hümayun ve de Juan'm istediği özellikler doğrultusunda, bir yapay retina çipi (ARCC) üretmişlerdir, 2mm' genişliğindedir ve fotosensör hücre ve elektrotlar bu ince silikon mikroçipe gömülmüşlerdir (10). Liu'nun laboratuvarında test edildikten sonra cipler, biyokompatibilite testleri için Johns Hopkins'e gönderilecek (tahminen 1997 baharında) ve sonra insanlarda denenmesi için FDA onayı gerekecektir.

Chicago'da özel çalışan Dr. Alan Chovv, tavşan gözünde subretinal olarak, bir fotodiyot arraye entegre edilmiş elektrot arrayini yerleştirerek deneyler yapmaktadır (11). Fotodiyot array üzerine odaklanan ışık sinyalleri retinadaki nöral elemanları stimüle edecek düzeyde elektrotlarda akım oluşturmaktadır. Ancak, retina epitel hücreleri subretinal implantın devamlı varlığına karşı reaksiyon geliştirirse veya retinaya besin akışında engellenme olursa, zorluklar ortaya çıkabilecektir.

Bir prototip olan MIT-Harvard cihazı sisteminde, enerji kaynağı olan 820nm dalgaboylu küçük laser ve görsel bilgi kaynağı olan küçük CCD kamerası gözlüğe monte edilir(11). Kameradan gelen çıkış sinyali ile laser ışınının genliği modüle edilir. Laser ve kamera telleri, hastanın cebinde bulundurulmuş, değiştirilebilen bataryaya gider. İmplantın kendisi bir fotodiyot array, ince ve bükülebilir polyimid stripin bir ucunun çevresinde sandviç edilmiş bir stimulatör cipten oluşmuştur. Modüle edilmiş laser ışını 12 fotodiyotluk arraye çarptığında, bu ince sistem hem güç hem de sinyal açısından beslenmiş olur. Rizzo ve ark.'nın çalışmasında, epiretinal yaklaşım tercih edilmiş ve penetre olmayan, düzlem şeklinde elektrot array, ganglion hücrelerini direkt olarak stimüle etmiştir. Ganglion subtipleri çeşitli olmakla birlikte, 5-50 mikron çapında küçük bir elektrotla elektriksel stimülasyonun, ganglion hücresinin reseptif alanına gelen küçük bir ışık spotu ile benzer olması beklenmektedir.

Prensip olarak kör hasta, görme yolunun üzerinde herhangi bir bölge elektriksel olarak uyarıldığında bir şey görmelidir. Optik sinir konnektif doku ile çevrili demetleri oluşturan kabaca bir milyon liften oluşmuştur ve çevresindeki membrana hasar vermeden çıkarılamaz, yine de sinire cerrahi olarak ulaşıp, üzerine elektrot implante etmek ve siniri uyarmak mümkündür. Shandurina ve Lyskov'un bir çalışmasında, optokiyazmal araknoidit, kransiyerebral travma ve masif supratentorial tümör nedeniyle beyin cerrahisi geçiren parsiyel veya total op-

tik atrolili 11 hastanın optik sinirlerinin intrakraniyal kısımlarına, operasyon esnasında elektrot ile girilerek, sonrası için terapötik amaçlı elektriksel stimülasyon verilmiştir, 19 optik sinirde VEP gözlenmiştir(12). Bu vakalarda, kesin bazı parametrelerle kontakt elektriksel stimülasyon, aksionlarda eksitasyonun iletimini ve amplitüd-zamau özellikleri bakımından fotik stimülasyona olan cevaba benzer bir santral cevabın gelişmesini sağlamıştır. Fazla sayıda lifin aktivasyonu sırasında, VEP'te spesifik duyuşsal unsurlar oluşmuş, sübjektif olarak Ibsfenler gözlenmiştir.

Optik sinirdeki lifler, retinadaki hücrelerin aksine, görme alanındaki oryantasyonlarıyla ilişkili bir şekilde rijit olarak organize değildirler. Sadece istenen liflerin stimülasyonu için doğru elektrik alanını odaklamak oldukça zordur.

Almanya'da da. Federal Araştırma Bakanlığı tarafından nöroprotez geliştirilmesi için oldukça büyük miktarda maddi destek ayrılmıştır. 1994'te hastalar, bilimadamları ve sponsorlar, retinal ganglion hücrelerle bağlantı kurulan retinal implantlar geliştirilmesinde, ABD'deki araştırmalara paralel olarak önemli bir hızlanma sağlamak amacıyla Retinal Implant Association'ı kurmuşlardır (13)..

Tubingen'li Eberhart Zrenner'in projesinde, tahrip olmuş fotoreseptörlerin yerine, subretinal çip yerleştirilmekte, 7000 küçük hücreden oluşan çip üzerine düşen ışıkla uyarıldığında akım oluşmakta ve sinir hücreleri uyarılmaktadır, bu şekilde, en azından karaltı hissedilebileceği öngörülmektedir (14). Nöroinformatik uzmanı Rolf Eckmiller ve ekibi ise, sinir dokusu ve fotoreseptörleri bir mikroçip üzerinde taklit etmek üzerine çalışmaktadırlar (14). Bu, bir gözlüğe monte edilecek, ufak bir transmittör yoluyla görme bilgisi, hastalıklı retina üzerindeki ikinci bir cipe aktarılacaktır, böylece işlenmiş sinyaller doğrudan optik sinire ve beyne iletilecektir. Eckmiller, 4 yıl içinde, bunu insanlara implante etmeyi planlamaktadır, büyük cisimlerin ve insanların konturlarının hissedilebileceğini düşünmektedir.

Implant cerrahisinden sonraki ilk soru, implant ve retinanın ameliyattan sonra beyne sinyal gönderip gönderemeyeceğidir, sonra da algılama ile problemlerle karşılaşılacaktır. Sağırılarda, kohlear implant raporları, erişkin insanda dahi beynin elektronik sinyallerdeki eksiklikleri bir yere kadar kompanse etmeyi öğrenebildiğini göstermektedir. Sinyal işleme ve sunumu konusundaki ilerlemeler, günümüz sistemlerinin başarılı olmalarına yardımcı olmuştur. Tarihin retinal protez konusunda tekerür edeceğine kuşku yoktur. İndüklenmiş persepsiyon ilk başta kullanışlı olmayabilir ancak, retina ile nasıl iletişim kurulacağına öğrenilebileceği bir psikofiziksel substrat sağlayacaktır.

Körler İçin Kortikal İmplantlar

Görme yolları (15)

Primat sinir sisteminde, spesifik ve mental fonksiyonlar genellikle beynin spesifik bölgelerine lokalize edilmiş, haritalanmıştır. Öncelikle, görüntü iki boyutlu elektriksel paterne, retinadaki fotoreseptör array yoluyla çevrilir. Retina, görüntü üzerinde uzaysal, temporal ve kromatik işlem yapar ve bunu nöral impıllslerden oluşmuş sayısal forniata çevirir. Diğer işlem merkezi olan lateral genikülat nükleusta (LGN), her iki gözden gelen bilgiler, görme uzayının binoküler representasyonu için entegre edilir. Daha sonra primer görme korteksi gelir, buradan bilgi, belli sayıda yüksek kortikal merkezlere dağılır. Şaşırtıcı olarak, görme yolunda sinyal akımı tek yönlü değildir. Gerçekte LGN'ye olan inptütün büyük çoğunluğu primer görme korteksinden orijin almaktadır. Bu geri besleme yolu, açıkça görsel sinyalin paralel işlenmesine katkıda bulunur, ancak, fonksiyonu tam olarak anlaşılmış değildir.

Fonksiyonel İnritalınna ve retinoropi (H>15)

Görme sisteminde, nöral yollar retinotopik bir organizasyona sahiptir, yani retinadaki komşu hücreler, beyinde hedef oluşumlardaki aşağı-yukarı komşu hücrelere bilgi sağlar. Retinotopik organizasyonun bu geleneksel yorumu, retinal otitputim görme korteksi üzerinde rasyonel, uygun bir yansımalarının olduğu ve burada iki düzlemli bir nöral aktivite paterni oluşturduğu şeklindedir. Kortikal temelli protezli görmenin orijinal fikri bu retinotopi oluşumu üzerine dayanmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar, bu görüşün çok kabaca bir yaklaşım olduğunu, görme alanındaki noktalar ile görme korteksinde karşılık gelen yerler arasındaki ilişkinin çok kompleks olduğunu göstermektedir. Son görüşler, görsel objelerin nöronal aktivitenin hem uzaysal, hem de temporal özellikleriyle kodlanmış olduğu yönündedir.

Bir tek optik sinir lifi, sadece görme uzayının spesifik bir alanındaki ışığın varlığı değil, onun renk ve formu hakkında da bilgi içermektedir. Bu kompleksiteier. görme korteksindeki görsel uzayın spesifik özelliklerinin, multipl temsillerinin ve haritalarının üstüste çakıştırılmalarını yansıtmaktadır. Bunlar, en azından bir uzaysal harita, bir renk haritası, bir oryantasvon haritası ve bir oküler dominans haritası içermektedir.

Öğrenme ve plastisite (17,15)

Hesaplayıcı (computational) modeller ve nörobiyolojik buluşlar, insan yüzü gibi objeleri tanımanın, öğrenmeyi gerektirdiğini göstermektedir, bu işlem süresince görme korteksindeki sinir hücreleri arasındaki bağlantılar selektif olarak değişmektedir. Aynı derecede önemli olan bir konu da nöronal plastisitedir. Sinir hücrelerinin özellik ve bağlantılarının, görsel tecrübenin

bir fonksiyonu olarak dakikalar ve saniyeler için değişebileceği bulunmuştur. Bu adaptasyon, görsel duyuya ve mantığa güç vermektedir.

Primer görme korteksi, görsel stimülasyondaki uzun veya kısa dönem değişikliklere uyum sağlayabilen oldukça dinamik bir sistemdir. Görme korteksine görsel uzayın kaba bir temsili gönderilse bile, kör kişi bunu kullanarak kendini çevreleyen fiziksel dünya İrisini sağlayacak bir görüntüyü oluşturabilir. Bu plastisite için önerilen bir mekanizma, görme merkezlerindeki lokal nöron devrelerinin kuvvetlendirilmesi veya azaltılmasıdır.

Elektrottan perspeksiyona

1968'de Cambridge Üniversitesi'nde Giley Brindley ve Lewin, glokom ve retina dekolmanı nedeniyle kör olan bir hastanın beyninin görme korteksi yüzeyine, 180 platin disk elektrodundan oluşan radyo alıcı array implante etmiştir, uygun radyo sinyalleri verildiğinde hasta, sol görme alanında fosfenler hissetmiştir (18). Tek bir elektrot stimülasyonu ile genelde görme alanının sabit bir yerinde küçük tek beyaz ışık noktası görülmüş, fakat bazı elektrotlarla 2 veya daha çok nokta veya bulut algılanmıştır. Stimülasyon kesildiğinde, fosfenler de hemen kesilmiş, sadece kuvvetli stimülasyon sonrasında bazen 2 dakikaya kadar sürmüştür. Birçok elektrodun simültane stimülasyonu ile hasta basit şekiller görebilmiştir. İstekli göz hareketleri sırasında, fosfenler de gözlerle birlikte hareket etmiştir, vestibüler reflekste ise sabit kalmışlardır. Oluşturulan fosfenlerin uzaysal lokalizasyonlarının görme korteksi üzerindeki elektrotların geniş alana yerleşmiş pozisyonlarına göre aşağı-yukarı rasyonel bir şekilde haritalanmış olduğu tespit edilmiştir.

1974'te de Utah Üniversitesi'nde, William Harvey Dobbelle ve grubu, oksipital lob cerrahisi geçiren şuuru açık hastalarda, benzer deneyler yapmışlardır (19). Stimülasyon için en etkili yerin 17 numaralı alan olduğunu belirtmişlerdir. Elektrot büyüklüğü ve konfigürasyonu veya stimülusun parametrelerindeki değişiklikler, subjektif his üzerine az miktarda etkili olmuştur. Eşik üzerindeki stimülasyon, ikinci bir konjuge fosfene yolaçmış, ayırıcı bir sınır olmaksızın tek bir elektrot stimülasyonu da multipl fosfene yolaçmıştır. Fosfenlerin görme alanındaki pozisyonları, görme alanım kortekse yansıtan klasik haritalara dayalı beklentilere sadece kabaca karşılık gelmiştir.

Utah Üniversitesi'ndeki bilimadamları, beynin görme kısmındaki çok sayıda sinir hücresi ile doğrudan haberleşmeye olanak sağlayan bir cihaz geliştirmişlerdir (17). Bir silikon elektrot array olan cihazın tamamen kör

olan insanlara yararlı bir görme hissi sağlayabileceği düşünülmektedir.

Kişinin önündeki görsel manzara, gözlüğe iştirilmiş minyatür video kamera ile kodlanır. Video sinyalleri özel elektronik devre yoluyla işlem görür ve işlenmiş sinyaller, kafatasmdan geçerek, primer görme korteksine implante edilmiş elektrot arrayine ulaşır. Pikselleştirilmiş protezli görme sisteminin kullanışlı olması için ne kadar görme bilgisi pikselinin gerekli olduğunu anlamak için, Utah Üniversitesi'nden Kichulcha ve Kenneth Horch'un, gören gönüllülere pikselize görme gözlüğü takarak yaptıkları çalışmada, yeni bir ortamda gezinme ve okuma gibi günlük işler için gerekli kullanışlı görmeyi 625 pikselin sağlayabileceğini göstermişlerdir. Retinotopik haritadaki düzensizlikleri kompanse etmek için, yüksek düzeyde işleme, lokal otomatik kazanç kontrolü, kenar arttırımı, kontrast kontrolü ve piksel haritalanması, 32'ye 32 piksel array ile oluşturulmuş göreceli olarak küçük miktardaki veri ile kolaylıkla yapılabilir. Elektriksel sinyallerin kortikal implanta ulaştırılması için indüktif metot tercih edilmektedir. İndüktif metotta, bir bobin deri altında, diğeri dışarıda olacak şekilde oluşturulur.

Utah Üniversitesi Moran laboratuvarlarında, saç fırçası figürasyonunda yeni elektrot dizaynları üzerinde çalışılmaktadır. Bu dizaynda elektrotlar birbirinden 400 mikron aralıktadır ve kortekse 1.5-2.0 mm penetre olmaktadır. 32'ye 32 array, 400 mikron aralıklı yaklaşık 13 cm²'lik bir alan kaplar. Bu array kullanılarak başarılı hayvan deneyleri yapılmıştır.

Yararlı bir görsel protez, yüzlerce hatta binlerce elektroda ihtiyaç gösterebilir, yüzey elektrotlarının implantasyonu sonucu oluşan akımlar nöbete sebebiyet verecek kadar büyük olabilir. Bu etki 'kindling' olarak adlandırılır, önemli bir potansiyel problemdir, araştırılmalıdır.

Körlere olan görme protezlerinin kabul edilebilirliği ve çekiciliği abartılmamalıdır. Çünkü, tamamen kör olan insanlar, durumlarıyla bağdaşabilmek için mükemmel stratejiler geliştirmişlerdir ve eğer çok emin değilse ve yararlı görme duyusu sağlamıyorsa ve elde edilmesi zorsa, protez konusuna olumlu bakmayabilirler.

Görme arttırımı, retinal ön işleme ve görsel protezler konusundaki yoğun çalışmalarda bulunan araştırmacılar, 2010 yıllarında retinal ve kortikal protezlerin prototiplerinin kullanıma girmesini planlamaktadırlar.

Teşekkür: Elektronik mühendisi Sayın Erdal Çakmak'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

1. Dagnelie (i. Massof RW. Toward an artificial eye. IEEE Spectrum ;096 May; 20-9,
2. Goodrich GL. Applying video and microcomputer technology in a low vision selling. In: Colenhrander A, Fletcher DC. editors. Ophthalmology Clinics of Nonh America (Low vision and vision rehabulalion); 1994; 7: 177-185.
3. W'erblm F, Jacobs A, Teeters J. The computational eye. IEEE Spectrum 1996 May; 30-7.
4. Koch C, Mathur B. Neuromorphic vision chips. 11:1:1: Spectrum 1996; May 46.
5. Peyman GA, Blinder KJ, Paris CL, Allurki W, Nelson NC, Desui U. A technique for retinal pigment epithelium transplantation for age related macular degeneration secondary to extensive stibfoveal scarring. Ophthalmic Surgery 1991 ; 22:102-8.
6. Silverman MS, Hughes SB. Transplantation of photoreceptors to light-damaged retina. Invest Ophthalmol Vis Sci 1989; 30:1684-90.
7. Dawson WW. Radtke NT). The electrical stimulation of (he retina by indwelling elecrodcs. Inve.sl Ophthalmol Vis Sci ;977; 16:249-52,
8. Hümayun M, Props! R. de Juan L, Mc Cormick K, Hickingbotham D. Bipolar surface electrical stimulation of the vertebrate retina. Arch Ophthalmol 1994; 1 ;2:110-6.
9. Hümayun MS, de Juan I. Dagnclie G. Greenberg RJ, Propst RH, Phillips H. Visual pcrsception elicited by electrical stimulation of retina in bund humans. Arch Ophthalmol 1996; 114:40-6.
10. http://www.coc.ncsu.edu/news_releases/liu_retina.html Engineer works on artificial retina design. 1996 November, 20.
11. Wyatt J, Rizzo J. Ocular implants for the blind. IEEE Spectrum 1996 May; 47-53.
12. Shandurina AN, Lyskov EB. Evoked potentials to contact electrical stimulation of the optic nerves. Hum Physiol 1986; 12:9-16.
13. <http://www.ncro.uni-bonn.de/ri/rccpub.html> The Retina Implant Association and its goals.
14. Neurochips ersetzen Augen und Rückenmark. Blinde sehen, lahme gehen. Der Spiegel 1996; 17: 188-90.
15. Normann RA, Maynard EM, Guillory KS, Warren DJ.-Cortical implants for the blind. IEEE Spectrum 1996 May; 54-9.
16. Glaser .IS, Sadun AA. Anatomy of the visual sensory system.In: Glaser .IS, cd. Ncuro-ophthalmology. 2nd cd. Philadelphia: JB Lippincolt Company, 1990: 61-82.
17. Poggio T, Beymcr D. Learning to sec. IEEE Spectrum 1996 May; 60-9.
18. Brindley GS, Lewin WS. The sensations produced by electrical stimulation of the visual cortex. ,1 Physiol 1968: 196:479-93.
19. Dobbelle WH, Mladejovsky MG. Phosphencs produced by electrical stimulation of human occipital cortex, and their application to the development of a prosthesis for the blind. .1 Physiol 1974; 243:553-76.