

Χτίζοντας το Βιονικό Σώμα: Αποκατάσταση κίνησης σε ανάπηρους μέσω διασύνδεσης εγκεφάλου-μηχανής*

Michael Black

Καθηγητής στο Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών,
Πανεπιστήμιο Brown, ΗΠΑ



α ήθελα να ευχαριστήσω το Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών για την πρόσκληση. Είμαι ενθουσιασμένος διότι θα αναφερθώ σε κάποια πράγματα που αλλάζουν τον τρόπο σκέψης μας σχετικά με την αντιμετώπιση των δυσλειτουργιών του νευρικού συστήματος.

Κατ' αρχάς θα μιλήσω για το Brown, καθώς και για τους συνεργάτες από άλλα ιδρύματα, ώστε να κατανοήσετε ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών που έχουν διερευνηθεί, με σκοπό την αντιμετώπιση πληθώρας ασθενειών. Σε κάθε περίπτωση, το κύριο στοιχείο σε αυτές τις τεχνολογίες είναι η χρησιμοποίηση μιας μορφής υπολογισμού για να αντικαταστήσουν, να επιδιορθώσουν ή να προσυζητήσουν κατεστραμμένα μέρη του νευρικού συστήματος.

* Απομαγνητοφωνημένη ομιλία του Καθ. Μ. Black, *Building the bionic body: Restoring movement to the severely disabled with a brain-machine interface.*

Μετάφραση - επιστημονική επιμέλεια: Παναγιώτης Αρτεμιάδης, μηχανολόγος-μηχανικός ΕΜΠ.

Μέρος αυτής της δουλειάς σχετίζεται με την εταιρεία Cyberkinetics. Δύο από τους συνεργάτες μου μετέχουν σε αυτήν, ενώ εγώ όχι.

Θέλω να ξεκινήσω όμως με μια ιστορία, αυτό είναι ένα πανέμορφο μικρό βιβλίο με τίτλο *Το βυθιζόμενο κουδούνι και η πεταλούδα (The Diving Bell and the Butterfly)** γραμμένο από τον Jean-Dominique Bauby, ο οποίος ήταν ο επιμελητής έκδοσης του περιοδικού *Elle* στη Γαλλία. Ήταν ένας δυναμικός νεαρός άνδρας, και ήταν 43 χρονών όταν διέγνωσαν κάκωση του νωτιαίου μυελού.

Ο νωτιαίος μυελός, γι' αυτούς στους οποίους δεν είναι γνωστός, εισέρχεται στον διάδρομο μεταξύ του φλοιού και του υπόλοιπου σώματος. Επομένως, η κάκωση αυτού του σημείου του εγκεφάλου είναι αρκετά καταστροφική. Αφήνει ανέπαφο τον εγκέφαλο, ο οποίος είναι ενεργός, δηλαδή μπορεί το άτομο να σκεφτεί φυσιολογικά, αλλά είναι ανίκανο να αλληλεπιδράσει με το σώμα του.

Ο Bauby, λοιπόν, το μόνο πράγμα που μπορούσε να ελέγξει στο σώμα του ήταν το αριστερό του βλέφαρο, και χρησιμοποιώντας το, έγραψε όλο το βιβλίο. Είχε κάποια γυναίκα να στέκεται δίπλα του και να απαγγέλει το αλφάβητο στα γαλλικά, και όποτε έφτανε στο γράμμα που εκείνος ήθελε, έκλεινε το μάτι του και εκείνη το κατέγραφε. Έγραψε όλο το βιβλίο με αυτό τον τρόπο και αποτελεί μια πανέμορφη εσωτερική όψη της ζωής. Και δεν είναι τόσο λυπηρό όσο μπορεί να φαίνεται. Ο άνθρωπος αυτός είχε το λεγόμενο σύνδρομο «εγκλωβισμού» («locked-in» syndrome). Ήταν νοητικά ακέραιος αλλά εγκλωβισμένος στο σώμα του.

Μέχρι και τη στιγμή του ατυχήματος δεν είχε ποτέ ακούσει για τον νωτιαίο μυελό, αλλά είπε ότι εφόσον είναι ένα σημαντικό μέρος του εσωτερικού μας υπολογιστή, είναι ένας αδιαχώριστος σύνδεσμος μεταξύ του εγκεφάλου και της σπονδυλικής στήλης. Και τονίζω τη λέξη του εσωτερικού υπολογιστή επειδή αυτή θα αποτελέσει τη βάση αυτών που θα αναφέρω στη συνέχεια. Είναι η επιδιόρθωση αυτού του υπολογιστή κατά μία έννοια και η ουσιαστική απελευθέρωσή του ώστε να αλληλεπιδρά και πάλι με τον κόσμο.

* Το βιβλίο γυρίστηκε σε ταινία η οποία προβάλλεται στην Αθήνα από τον Νοέμβριο του 2007, με τον τίτλο: «Το σκάφανδρο και η πεταλούδα».

Το πρώτο μέρος αυτής της ομιλίας θα εσιιάσει στη νευροκινητική προσθήκη και στον σχεδιασμό της ώστε να αντιμετωπίσει πολλά είδη δυσλειτουργιών του νευρικού συστήματος. Υπάρχουν πολλά είδη συμβάντων επιπρόσθετα στην κάκωση, τα οποία μπορούν να αφήσουν τον εγκέφαλο ακέραιο αλλά το άτομο ανίκανο να κινηθεί ή να επικοινωνήσει.

Ο τραυματισμός της σπονδυλικής στήλης στις ΗΠΑ αριθμεί 250.000 περιπτώσεις, με 11.000 νέες περιπτώσεις κάθε χρόνο. Η τετραπληγία, δηλαδή η παράλυση των τεσσάρων άκρων συμβαίνει σε ποσοστό 34% των παραπάνω περιπτώσεων και το κόστος περίθαλψής της είναι πολύ ψηλό. Επιπλέον υπάρχουν πολυάριθμες ασθένειες, όπως η αμυοτροφική πλευρική σκλήρυνση (ALS), η μυϊκή δυστροφία, ποικιλία παραγόντων που μπορούν να καταστρέψουν τις διασυνδέσεις μεταξύ του εγκεφάλου και του κόσμου. Όταν αλληλεπιδρούμε με το περιβάλλον, πάντοτε αισθανόμαστε ή δρούμε σε αυτό. Πολλές ασθένειες μπορούν είτε να καταστρέψουν ολοκληρωτικά, είτε να φθείρουν την ικανότητα να αισθάνεται και να δρα κάποιος στον κόσμο. Προφανώς, μέσω υπολογιστικών αλγόριθμων μεταξύ του εγκεφάλου και του έξω κόσμου θα πρέπει να αποκαταθούν αυτοί οι κατεστραμμένοι δίοδοι. Η συγκεκριμένη ιδέα απαντάται συχνότερα στην επιστημονική φαντασία παρά στην επιστήμη. Το 1972, ο Michael Crichton έγραψε, γι' αυτή την ιδέα, δηλαδή ότι ο υπολογιστής σε αυτή την περίπτωση είναι η προσθετική συσκευή. Όπως στην περίπτωση που ένας άνθρωπος έχει χάσει τον βραχίονά του μπορεί να δεχθεί ένα μηχανικό ανάλογο για το χαμένο του άκρο, έτσι και ένας άνθρωπος με εγκεφαλική βλάβη μπορεί να δεχθεί μια μηχανική βοήθεια για να υπερνικήσει τις συνέπειες της βλάβης.

Για να πραγματοποιηθεί κάτι τέτοιο πρέπει να απαντήσουμε σε έναν αριθμό πολύ βασικών ερωτήσεων:

- 1) Τι μπορούμε να μετρήσουμε από τον εγκέφαλο;
- 2) Πώς θα το αναζητήσουμε;
- 3) Ποια πληροφορία αφορά την κίνηση; (Διότι θα εσιιάσουμε στην αποκατάσταση της κίνησης).
- 4) Ποια πληροφορία σχετικά με την κίνηση μπορούμε να εξαγάγουμε από τον εγκέφαλο ενός ατόμου;

- 5) Τι είδους επεξεργασία σήματος πρέπει να κάνουμε ώστε να εξαγάγουμε αυτή την πληροφορία και με ποια πληροφορία πρέπει να αρχίσουμε;
- 6) Πώς ο εγκέφαλος απεικονίζει την κίνηση;
- 7) Με ποιο τρόπο τα σήματα που καταγράφουμε από τον εγκέφαλο κωδικοποιούν την κίνηση αυτή;

Αν καταλάβουμε τα παραπάνω, τότε μπορούμε να σχεδιάσουμε αλγόριθμους, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν από έναν υπολογιστή ώστε να αποκωδικοποιήσει τα σήματα και να τα μετατρέψει σε ένα εκούσιο σήμα ελέγχου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο τέτοιων συσκευών.

Παράλληλα, πρέπει να επισημανθεί ο τρόπος με τον οποίο θα εκπαιδευθούν οι άνθρωποι να χρησιμοποιούν τέτοια είδη συσκευών.

Αυτά τα είδη συσκευών είναι συνήθως κέρσρες υπολογιστών σε μια οθόνη· ένας πολύ γενικός τύπος μέσου διασύνδεσης. Υπάρχουν επίσης οι ρομποτικοί βραχίονες και μέθοδοι διέγερσης των μυών ενός παράλυτου ατόμου.

Στο βιβλίο *Ο εγκέφαλος του Donovan (Donovan's Brain)*, ο Donovan ανακαλύπτει ότι ο εγκέφαλος δεν είναι σημαντικός. Βάζει τον εγκέφαλο σε ένα ενυδρείο, τον συνδέει με ηλεκτρόδια και παρατηρεί ότι οι καταγραφές έχουν πρότυπα. Συμπεραίνει λοιπόν ότι «...αν μπορούσα να φτιάξω έναν κώδικα που μεταφράζει τη σχέση μεταξύ αυτών των ηλεκτρικών σημάτων και της νοητικής εικόνας του εγκεφάλου, θα μπορούσα να επικοινωνώ». Στην πραγματικότητα αυτή η φράση, περιγράφει το θέμα για το οποίο θα μιλήσω εδώ.

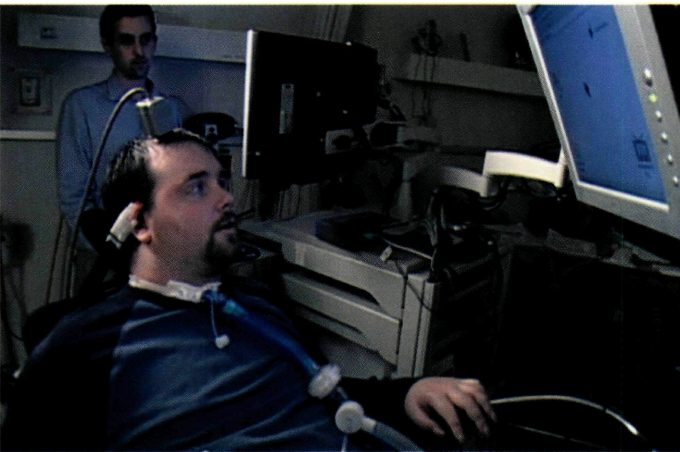
Το ζητούμενο είναι η κατανόηση του κώδικα, της απεικόνισης που χρησιμοποιεί ο εγκέφαλος για την κίνηση. Πρέπει να βρεθούν αλγόριθμοι που να μπορεί να χρησιμοποιήσει ο υπολογιστής ώστε να μεταφράσει τον κώδικα. Ουσιαστικά, έτσι αποκαθίσταται η επικοινωνία στους ανθρώπους.

Αυτό το σενάριο επιστημονικής φαντασίας, που μόλις σας περιέγραψα, είναι γεγονός από τον Ιούλιο του 2004. Ο πρώτος ασθενής είναι ο Matthew Nogle, ο οποίος πήρε μέρος σε πιλοτική δοκιμή που εγκρίθηκε από τη διεύθυνση τροφίμων και φαρμάκων των ΗΠΑ (βλ. εικόνα 1). Σήμερα έχουν υπο-

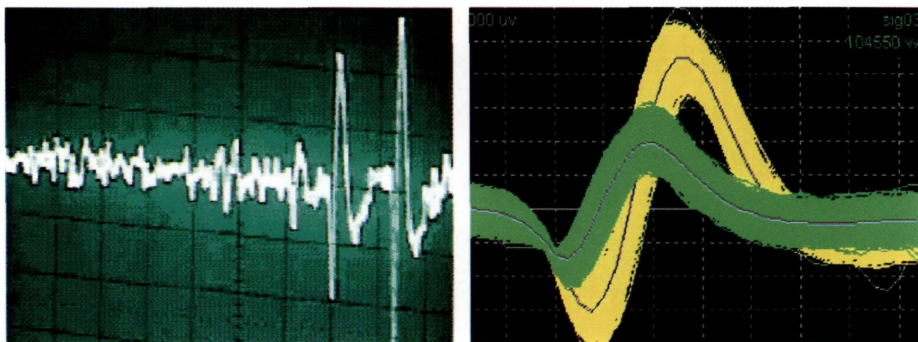
βληθεί σε εμφύτευση τέσσερα άτομα, δύο με τραυματισμό σπονδυλικής στήλης, ένα με κάταγμα νωπιαίου μυελού και ένα με αμυοτροφική πλευρική σκλήρυνση (ALS). Τα μέρη του συστήματος είναι τα εξής: η συσκευή για την καταγραφή από τον εγκέφαλο, το υλισμικό για την επεξεργασία του σήματος, οι υπολογιστές για τη μετάφρασή του και ο άνθρωπος ο οποίος ελέγχει τον κέρσορα του υπολογιστή στην οθόνη χρησιμοποιώντας μόνο τη σκέψη του. Για να φτάσουμε στο σημείο αυτό, πρέπει να αναρωτηθούμε τι μπορούμε να μετρήσουμε. Στον ανθρώπινο εγκέφαλο υπάρχουν 100.000.000.000 κύτταρα που ονομάζονται νευρώνες· αυτοί αποτελούν το πιο βασικό υπολογιστικό στοιχείο.

Στην εικόνα 2 διακρίνεται ο νευρώνας από τον φλοιό. Με αυτά τα 100.000.000.000 κύτταρα στον εγκέφαλό μας ελέγχουμε οτιδήποτε κάνουμε. Πώς, όμως λειτουργούν αυτά τα κύτταρα;

Αν πάρουμε ένα μονωμένο κομμάτι καλωδίου, ένα μικροπλεκτρόδιο, και το εισάγουμε στον εγκέφαλο και φέρουμε την άκρη του ηλεκτροδίου κοντά στο σώμα του κυττάρου, θα παρατηρηθεί αλλαγή στην ηλεκτρική δραστηριότητα. Αυτά ονομάζονται αιχμές και συμβαίνουν σε διάστημα περίπου ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου. Το κύτταρο έχει μια γρήγορη αλλαγή στην ηλεκτρική του κατάσταση όπως στο γράφημα όπου καταγράφεται η ηλεκτρική δραστηριότητα από την άκρη ενός ηλεκτροδίου (βλ. εικόνα 2).



Εικόνα 1.
Ο Matthew Nogle οδηγεί έναν κέρσορα σε μια οθόνη χρησιμοποιώντας μόνο τη σκέψη του.



Εικόνα 2. Ένα νευρικό κύτταρο και το δυναμικό ενέργειας (action potential) ή αιχμή (spike)

Η περιοχή M1 του εγκεφάλου έχει μια προσεγγιστική σωματοτοπία, είναι χαρτογραφημένη σύμφωνα με διαφορετικά μέρη του σώματος. Δεν είναι ακριβής, αλλά προσεγγιστικά υπάρχει μια περιοχή στόχευσης, διότι όταν σκέφτεσαι να κινείς τον κέρσορα για να ελέγξεις έναν υπολογιστή, αυτό που κάνεις είναι να κινείς το χέρι σου. Αυτή η περιοχή είναι αρκετά προσβάσιμη. Τυχάνει να είναι στην επιφάνεια του φλοιού, οπότε η εγχείριση της εμφύτευσης είναι αρκετά απλή.

Μία υπόθεση είναι ότι για να χτίσεις ένα τεχνητό κινητικό σύστημα θα ήταν πιο φυσικό να καταγράψεις από μια περιοχή του εγκεφάλου που έχει να κάνει με την κίνηση, στη φυσική της έννοια. Κάτι άλλο που είναι γνωστό εδώ και αρκετό καιρό είναι ότι αυτή η περιοχή σχετίζεται με την κίνηση του χεριού. Στους παράλυτους ασθενείς, το υπόλοιπο μέρος του εγκεφάλου τους είναι ακόμη ενεργό για να υλοποιούν πράγματα. Συνεπώς, αν στην εγχείριση κάτι πάει στραβά, υπάρχει ενδεχόμενο να καταστρέψεις κάποια ικανότητα που ήδη έχουν, αφού η επέμβαση γίνεται σε άλλη περιοχή.

Για την καταγραφή σημάτων από τον εγκέφαλο, αιχμών ή ενεργών δυναμικών χρησιμοποιούμε μια πολύ μικρή σιθιάδα μικροηλεκτροδίων, στο μέγεθος ενός αμερικανικού σεντ (βλ. εικόνα 3). Καθένα από αυτά τα νευροηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένο από σιλικόνη, οι άκρες από πλατίνα, και είναι μονωμένο ώστε να σχηματίζει ιδανικό ηλεκτρόδιο καταγραφής.

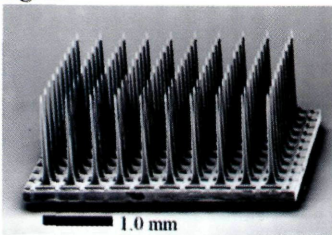
Υπάρχουν μερικά καλώδια στο πίσω μέρος του, τα οποία θα οδηγηθούν σε ένα βύσμα που θα βιδωθεί στο κρανίο. Αποτελεί μια πολύ μικρή εγχείριση εγκεφάλου με πολύ μικρό κίνδυνο. Βέβαια, αυτή η μικρή συσκευή προεξέχει από το κεφάλι. Δεν είναι αισθητικά όμορφο αλλά κάποιοι χειρουργοί απομωώνουν την περιοχή της εμφύτευσης.

Επομένως καταγράφεται η ηλεκτρική δραστηριότητα των κυττάρων: στην προκειμένη περίπτωση δύο διαφορετικά κύτταρα, το ένα με μεγάλη κυματομορφή και το άλλο με μικρότερη. Είναι ένα δείγμα από όλα τα είδη των κυττάρων που μπορούν να καταγραφούν. Καθένα από αυτά είναι μια μεγέθυνση του ενεργού δυναμικού ή αιχμής και μπορούμε να καταγράψουμε δεκάδες ή εκατοντάδες κύτταρα από μια στιβάδα εκατό ηλεκτροδίων.

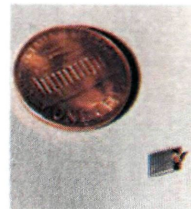
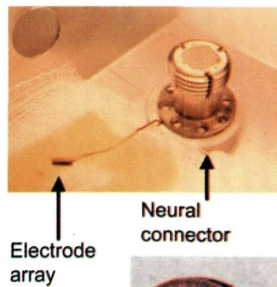
Μερικές φορές παίρνουμε πολλαπλά κύτταρα ανά ηλεκτρόδιο και μερικές φορές κανένα. Ο όγκος των δεδομένων προς επεξεργασία είναι μεγάλος. Το βιβλίο *Αιχμές (Spikes)* δίνει μια πολύ λεπτομερή μαθηματική αντιμετώπιση του τι μπορεί να σημαίνουν όλα τα δεδομένα. Χαρακτηρίζει τις αιχμές γλώσσα του εγκεφάλου.

Επανερχόμαστε στην έννοια της μετάφρασης ενός κώδικα ώστε να καταλάβουμε τι σκέφτεται ο εγκέφαλος. Πώς γίνεται αυτό; Πώς περνάμε από τις αιχ-

Bionic Technologies:



100 electrodes,
400µm separation
4x4 mm



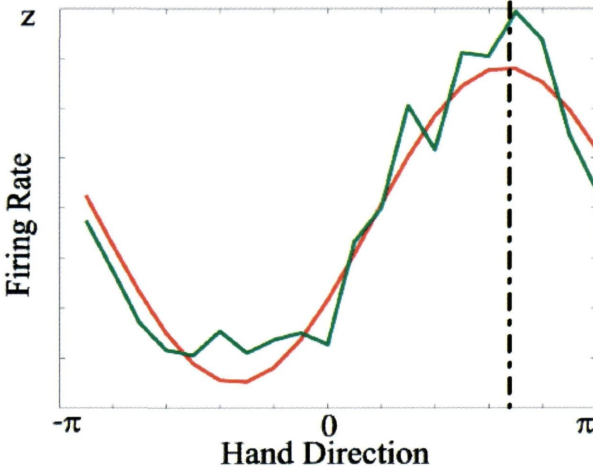
Εικόνα 3.
Στιβάδα ηλεκτροδίων καταγραφής σημάτων από νευρικά κύτταρα.

μές στην κίνηση; Οι αιχμές είναι σαν άσοι, ενώ οι μη αιχμές είναι σαν μηδενικά. Παρόλο που άσοι και μηδενικά αποτελούν το εσωτερικό ενός υπολογιστή, προκύπτει ότι ο κώδικας είναι πολύ διαφορετικός από αυτόν ενός υπολογιστή.

Για να τον μεταφράσουμε ανατρέχουμε στη δεκαετία του '80, σε μια εργασία του Γεωργόπουλου και των συνεργατών του, οι οποίοι έκαναν έρευνες σε μαϊμούδες. Τις εκπαίδευσαν να κινούν με ένα χειριστήριο τον κέρσορα στην οθόνη ενός υπολογιστή από μια θέση, σε έναν από τους οκτώ περιφερειακούς στόχους τοποθετημένους πάνω σε κύκλο. Τους έδειχναν τον στόχο και κουνούσαν το χέρι τους προς αυτόν ώστε να λάβουν μια επιβράβευση. Ο Γεωργόπουλος, ο Andy Schwartz και άλλοι κατέγραφαν σήματα από τον εγκέφαλο κατά τη διάρκεια αυτού του πειράματος. Οι παρατηρήσεις αναφέρονται παρακάτω: Η μαϊμού μπορούσε να κινηθεί προς οκτώ διευθύνσεις από 0, σε 90, σε 180 μοίρες κ.λπ. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα πείραμα όπου η μαϊμού κινήθηκε στη συγκεκριμένη διεύθυνση. Κάθε τελεία αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή όπου ένα κύτταρο παρουσιάζει αιχμή στο σήμα του. Κι αυτό που παρατηρείται είναι ότι σε κάθε πείραμα, όταν η μαϊμού κουνούσε το χέρι προς τα αριστερά, τα κύτταρα παρουσίαζαν αιχμή στο σήμα τους πιο συχνά. Όταν κουνούσε το χέρι της προς τα δεξιά, όχι μόνο δεν υπήρχε αιχμή στο σήμα, αλλά έδινε την εντύπωση ότι αδρανοποιούνταν.

Στους ενδιαμέσους στόχους υπήρχαν αιχμές στο σήμα αλλά όχι αρκετές.

Επομένως δύο ιδέες προέκυψαν: 1) Υπάρχει μια προτιμώμενη διεύθυνση, το κύτταρο αυτό προτιμά την κίνηση προς τα αριστερά ή καλύτερα είναι υπεύθυνο για την κίνηση προς τα αριστερά. Σε αυτή την περίπτωση έχει να κάνει με τη διεύθυνση της κίνησης του χεριού στο επίπεδο. 2) Το ακριβές πρότυπο των αιχμών δεν φαίνεται να είναι παίζει ρόλο στη συγκεκριμένη περίπτωση. Είναι ελάχιστα διαφορετικά. Είναι όλα με ακρίβεια ευθυγραμμισμένα στην ίδια χρονική στιγμή. Επομένως δεν είναι σαν ένας κώδικας υπολογιστή. Εδώ αυτό που φαίνεται να παίζει ρόλο είναι ο αριθμός των άσων στη μονάδα του χρόνου, επομένως η συχνότητα των αιχμών του συγκεκριμένου κυττάρου. Αυτό οδηγεί στο γεγονός ότι μπορεί κάποιος να περιγράψει αυτή τη συμπεριφορά με μια πολύ απλή μαθηματική συνάρτηση.



Εικόνα 4. Σχέση διεύθυνσης κίνησης και συχνότητας αιχμών

Επομένως, αυτό που έκαναν ο Γεωργόπουλος και οι συνεργάτες του, σε αυτή την περίπτωση, ήταν να σχεδιάσουν τις 0 έως 360 μοίρες στον έναν άξονα και τη συχνότητα των αιχμών των κυτάρων στον άλλο. Προέκυψε μια λεία καμπύλη, η οποία αντιστοιχεί σε μια συνάρτηση συνημιτόνου. Κάθε κύτταρο το οποίο ερεύνησαν είχε διαφορετικό συντονισμό σε σχέση με τη διεύθυνση της κίνησης (βλ. εικόνα 4). Έτσι γεννήθηκε η ιδέα για έναν πληθυσμιακό κώδικα. Όταν υπάρχει ένας πληθυσμός από κύτταρα, κάθε καμπύλη κάνει κάτι ελάχιστα διαφορετικό από τις άλλες, συντονισμένα σε διαφορετική διεύθυνση, και έπειτα ο συνδυασμός αυτών των καμπυλών και των συχνοτήτων στις οποίες παρουσιάζονται αιχμές εξηγεί πώς συμβαίνει η κίνηση.

Προκύπτει ότι τα συμπεράσματα ήταν μερικώς ορθά, ωστόσο ήταν πιο πολύπλοκο από το παραπάνω. Τα κύτταρα επιπρόσθετα ανταποκρίνονται στην ταχύτητα με την οποία κινείται το χέρι και είναι ελάχιστα συντονισμένα στη θέση του χεριού στον χώρο και στην ταχύτητα κ.ο.κ. Η βασική ιδέα όμως ισχύει. Αυτό που μπορούμε είναι να κατασκευάσουμε ένα πολύ απλό μαθηματικό μοντέλο το οποίο να λέει ότι η συχνότητα των αιχμών του κάθε κυτάρου είναι μια συνάρτηση συνημιτόνου, μια συνάρτηση της ταχύτητας του χεριού και όχι μόνο της διεύθυνσης, αλλά της διεύθυνσης και της ταχύτητας.

Συνεπώς, αν έχουμε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο περιγράφει πώς ο εγκέφαλος κωδικοποιεί αυτή την πληροφορία σε συχνότητα αιχμών των κυττάρων, πώς τελικά μπορούμε να το αποκωδικοποιήσουμε; Έχουμε μια πολύ βασική μαθηματική μεθοδολογία που λέγεται *bayesian inference*, βάσει της οποίας η ταχύτητα του χεριού δεδομένου ενός ιστορικού από συχνότητες αιχμών που καταγράφουμε από τον εγκέφαλο μπορεί να υπολογιστεί. Η βασική ιδέα είναι η απλοποίηση του προβλήματος σε ένα γινόμενο δύο απλούστερων κατανομών πιθανότητας και μετά στην εφαρμογή μιας μεθοδολογίας συμπεράσματος πιθανότητας.

Αναζητούμε την κίνηση η οποία είναι πιο πιθανή να συμβεί, δεδομένης της συχνότητας αιχμών που παρατηρούνται στον εγκέφαλο. Και προκύπτει ότι μπορεί κάποιος να το διαμορφώσει με απλούστερο τρόπο, ο οποίος είναι πιο προσεγγιστικός αλλά καταλήγει σε μια πολύ αποτελεσματική μέθοδο. Αυτό ήταν γνωστό στη δεκαετία του '50, το φίλτρο Kalman, και μπορεί να υλοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο. Το θέμα είναι να γνωρίζουμε τη διεύθυνση κίνησης του χεριού της μαϊμούς. Ο Γεωργόπουλος την ήξερε επίσης καθώς και τη συχνότητα των αιχμών στο σήμα.

Όταν έχουμε ένα παράλυτο άτομο, δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε την κίνηση. Επομένως πρέπει να του ζητήσουμε να φανταστεί την κίνηση. Χρησιμοποιήσαμε λοιπόν την ιδέα του Γεωργόπουλου, δείχνοντας όμως στον άνθρωπο μια οθόνη υπολογιστή στην οποία υπήρχε ένα αριθμός από στόχους, τοποθετημένους σε περιφέρεια κύκλου. Το έργο του ήταν να φανταστεί ότι κινεί τον κέρσορα από το κέντρο προς έναν στόχο στην περιφέρεια. Στη διάρκεια καταγράψαμε τη νευρική δραστηριότητα χρησιμοποιώντας τη σιβάδα των ηλεκτροδίων έχοντας δε την κίνηση που φανταζόταν, κατασκευάσαμε το μαθηματικό μοντέλο. Δεδομένου αυτού μπορούμε να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα της αποκωδικοποίησης. Για παράδειγμα, ο Matthew είχε χτυπήσει στον λαιμό στην παρέλαση της 4ης Ιουλίου και η σπονδυλική στήλη του είχε ολοκληρωτικά θρυμματιστεί στην περιοχή C4. Αυτό τον άφησε τετραπληγικό και με αναπνευστήρα, ήταν όμως ικανός να μιλήσει και θαρραλέος ώστε να ενταχθεί στην έρευνα.

Πέραν του πειράματος με την κίνηση του κέρσορα η εταιρεία Cyberkinetics έκανε και άλλο πείραμα. Του ζήτησαν να ανοιγοκλείσει ένα ρομποτικό χέρι και βραχίονα. Πολλοί από τους παράλυτους ασθενείς έχουν δυσκολία να φανταστούν την κίνηση. Αν σηκώσεις τον δικό τους βραχίονα είναι ευκολότερο γι' αυτούς. Το να κοιτούν κάτι φυσικό σαν το δικό τους σώμα μπορεί να είναι ευκολότερο και προτείνει μελλοντικές κατευθύνσεις.

Αυτό που συμβαίνει είναι ότι παίρνουμε κάποιον του οποίου ο φλοιός είναι ακόμη ενεργός, ενώ όλα κάτω από αυτόν δεν χρησιμοποιούνται πια, του δίνουμε ένα τεχνητό κινητικό σύστημα, στο οποίο τα πάντα κάτω από τον φλοιό αναπαριστώνται από λογισμικό. Κατ' αυτό τον τρόπο μπορείς να αλλάξεις το κινητικό σύστημα.

Αυτό μπορεί να γίνει με τρόπο ώστε να καταλάβουμε ποιο είναι το σωστό κινητικό σύστημα για ένα άτομο, ποιο είναι το σωστό μαθηματικό μοντέλο. Σε ένα άλλο διάγραμμα, από διαφορετικό ασθενή χρησιμοποιείται ο ίδιος αλγόριθμος για την αποκωδικοποίηση του εγκεφάλου του. Αυτός ο αλγόριθμος υποθέτει ότι η θέση του κέρσορα είναι συνάρτηση της συχνότητας των αιχμών των κυττάρων και της προηγούμενης θέσης του κέρσορα. Αυτό είναι ένα σενάριο κίνησης από το κέντρο προς τα έξω, και αυτή είναι η κίνηση του κέρσορα. Μπορεί να τον κινήσει αλλά η τροχιά δεν είναι λεία. Υπάρχουν περίπου 180 κύτταρα. Μπορούμε να αλλάξουμε την εξίσωση και να κοιτάξουμε για την ταχύτητα του κέρσορα ως συνάρτησης της συχνότητας των αιχμών των κυττάρων, και κάποιων προηγούμενων τιμών της ταχύτητας του κέρσορα. Μόλις αλλάξουμε το κινητικό σύστημα παίρνουμε δραματικά καλύτερα είδη κίνησης.

Ο αριθμός των κυττάρων αλλάζει κατά τη διάρκεια του χρόνου και αυτό είναι κάτι που απομένει να ερευνηθεί: πώς δηλαδή μπορείς να έχεις έναν μεγάλο και σταθερό πληθυσμό κυττάρων επί πολλά χρόνια. Στην παρούσα φάση ασθενείς έχουν υποβληθεί σε εμφύτευση για μέχρι και 19 μήνες με καταγράψιμη κυτταρική δραστηριότητα αλλά υπάρχει μείωση της ποιότητας του σήματος όσο περνάει ο χρόνος.

Στην πραγματικότητα σήμερα ο νευρωνικός έλεγχος μιας εξωτερικής συσκευής, όπως ένας κέρσορας υπολογιστή, αποτελεί σπουδαίο εγχείρημα. Με αυτό το επίπεδο ελέγχου υπάρχει πληθώρα πραγμάτων που μπορεί κάποιος να κάνει. Μπορεί, για παράδειγμα, κάποιος να ελέγχει πολλά είδη εμπορικών μέσων διασύνδεσης, όπως το σύστημα Rawtalk, το οποίο είναι ήδη διαθέσιμο για τα άτομα με ειδικές ανάγκες. Πολλοί έχουν χτίσει ποικίλα μέσα διασύνδεσης πάνω στο Rawtalk για τον έλεγχο πραγμάτων, όπως αναπηρικές καρέκλες, και με αυτό το είδος ελέγχου μπορεί κάποιος να κινήσει την αναπηρική καρέκλα μπροστά-πίσω ή δεξιά-αριστερά. Η εταιρεία Cyberkinetics έχει ήδη παρουσιάσει την ικανότητα των ασθενών της να κάνουν κάτι τέτοιο.

Δεν είναι ακόμα αρκετά πεπεισμένοι ώστε να βάλουν τους ασθενείς τους σε μια αναπηρική καρέκλα, αλλά αυτό πρόκειται να γίνει στο μέλλον. Επομένως γενικά ολόκληρο το θέμα της επιδιόρθωσης του εγκεφάλου με ηλεκτρονικά μέσα είναι πλουσιότερο από αυτά που αναφέρθηκαν. Αν και αρκετά διαφορετικό θέμα αλλά ίσως το πιο σύνθετο μέσο διασύνδεσης μηχανής-εγκεφάλου, είναι το εμφύτευμα του ακουστικού κοχλίου του αφιού. Η ιδέα του ακουστικού κοχλίου έχει πολλές ομοιότητες. Πρόκειται για μεγάλη σιβάδα από ηλεκτρόδια η οποία τοποθετείται στον κοχλίο, στον οποίο διεγείρει κύτταρα που στέλλουν ακουστικά σήματα στον εγκέφαλο.

Υπάρχει ένα εξωτερικός επεξεργαστής ο οποίος μεταδίδει τα δεδομένα ασύρματα διαμέσου του κρανίου σε ένα εμφύτευμα στο κεφάλι. Επιπλέον, μια άλλη πρωτοποριακή τεχνολογία έχει αναπτυχθεί εκτενώς στο Πανεπιστήμιο Case Western και ονομάζεται λειτουργική ηλεκτρική διέγερση. Πρόκειται για εμφύτευση ηλεκτροδίων στους μύες, ενώ μερικές φορές χρησιμοποιούνται και στα νεύρα. Μια σειρά από λειτουργίες στέλλουν ηλεκτρικούς παλμούς στους μύες ή στα νεύρα, κάνοντας τους να συστέλλονται, συνεπώς παράλυτοι άνθρωποι κινούνται και πάλι. Δεν έχουν αίσθηση της κίνησης, αλλά μπορούν να σηκώσουν το χέρι τους, να πιάσουν ένα ποτήρι ακόμα και να σταθούν όρθιοι. Οι παράλυτοι άνθρωποι συνήθως έχουν τέλεια χρησιμοποίησιμα σώματα και μόνο η σύνδεση μεταξύ του εγκεφάλου και του σώματος είναι σπασμένη. Αν επαναδραστηριοποιήσουμε αυτή τη σύνδεση δίνοντάς τους ένα νέο ηλεκτρικό

σύστημα για να ελέγχουν τα σώματά τους, θα ήταν μια πολλά υποσχόμενη θεραπεία. Υπάρχει βέβαια και η βαθεία διέγερση εγκεφάλου. Πρόκειται για μια αρκετά γνωστή τεχνική στην οποία ένα μακρύ ηλεκτρόδιο εμφυτεύεται βαθιά στον εγκέφαλο.

Οι άκρες των ηλεκτροδίων διεγείρουν τον νευρικό ιστό, και κατ' επέκταση κάποια κύτταρα στον εγκέφαλο. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται εκτενώς για τη θεραπεία της νόσου Parkinson, κάποιων ειδών τρέμουλου, και πειραματικά για τη θεραπεία της επιληψίας και του σύνδρομου ανήσυχων κάτω άκρων. Ο μηχανισμός εμφυτεύεται στον εγκέφαλο, αλλά συμπληρώνεται με ένα πακέτο στη μέση, με μια μπαταρία και μια συσκευή διέγερσης, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί έξω από το σώμα, και ο ασθενής να την ενεργοποιήσει ή να την απενεργοποιήσει χρησιμοποιώντας τον διακόπτη που υπάρχει στο ύψος της μέσης.

Αυτό είναι αρκετά σημαντικό για τους ασθενείς που δεν ανταποκρίνονται σε φάρμακα, αφού αυτός ο διεγέρτης αλλάζει δραματικά τα συμπτώματα της νόσου Parkinson, την ανικανότητα εκκίνησης της κίνησης και το τρέμουλο. Η αλλαγή είναι άμεση και δραματική. Υπάρχουν περίπου 35.000 εμφυτεύματα παγκοσμίως για τη διέγερση του εγκεφάλου και ο αριθμός εξακολουθεί να αυξάνεται.

Οι εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας διευρύνονται. Μήπως χρησιμοποιούνται υπολογιστικές και ηλεκτρικές μέθοδοι για την επιδιόρθωση ψυχιατρικών διαταραχών; Αναμφισβήτητα η φαρμακευτική θεραπεία είναι η πιο συνήθης τεχνική και απευθύνεται σε μεγάλο πληθυσμό ατόμων, επηρεάζοντας και άλλα.

Κάποιος λαμβάνει PROSAK και αυτό επιδρά σε όλα τα κύτταρα στον εγκέφαλο του, ενώ το πρόβλημα του ίσως οφείλεται σε μερικά μόνο κύτταρα. Επιπλέον, πολλοί ασθενείς δεν ανταποκρίνονται στα φάρμακα. Η θεραπεία εθιστικών ηλεκτροδίων σταμάτησε να χρησιμοποιείται, αν και ήταν σημαντική για ασθενείς με σοβαρή κατάθλιψη οι οποίοι δεν ανταποκρίνονται σε φάρμακα. Μια ολική λύση που παρέχει ηλεκτρική διέγερση σε ολόκληρο τον εγκέφαλο σε αντίθεση με τα κύτταρα που ενδέχεται να προκαλούν το πρόβλημα μπορεί να έχει πολλές παρενέργειες, ειδικότερα αμνησία και άλλα προβλήματα μνήμης.

Επιπλέον, χρησιμοποιούνται τεχνικές εγχείρισης εγκεφάλου για την αντιμετώπιση της κατάθλιψης και της ψυχαναγκαστικής εθιστικής δυσλειτουργίας, οι οποίες είναι ανθεκτικές σε άλλες θεραπείες. Επομένως, όταν ένας πληθυσμός κυττάρων έχει πρόβλημα, αφού διαγνωστεί, θα πρέπει να εισαχθούν συσκευές καταγραφής ή διέγερσης και οι δύο, ώστε να αλλάξει ο τρόπος που ο πληθυσμός των κυττάρων συμπεριφέρεται.

Πρέπει να παρέμβουμε στη συμπεριφορά του, είτε να το εκτρέψουμε και να το αλλάξουμε σε κάποιον βαθμό. Μερικοί συνάδελφοι στο Brown είναι πρωτοπόροι στη χρήση διέγερσης εγκεφάλου για την ψυχαναγκαστική εθιστική δυσλειτουργία με αξιοθαύμαστα αποτελέσματα. Έχουν, επίσης, επεκτείνει τη χρήση της θεραπείας στην αντιμετώπιση της κατάθλιψης. Άλλες ομάδες ασχολούνται με την ημικρανία και τις διαταραχές του ύπνου. Εν γένει, εισερχόμαστε σε μια νέα εποχή αντιμετώπισης προβλημάτων του κεντρικού νευρικού συστήματος με νέες τεχνολογίες.

Αντί να στοχεύουμε σε όλα τα κύτταρα στον εγκέφαλο, η ελπίδα είναι ότι θα έχουμε αρκετά εντοπισμένες διαδικασίες οι οποίες στην ουσία θα επιδιορθώνουν τη βλάβη. Είναι ενδιαφέρον ότι κανένας δεν καταλαβαίνει ουσιαστικά πώς αυτό δουλεύει. Αυτά τα ηλεκτρόδια εισέρχονται στον εγκέφαλο και αντί να καταγράφουν, διεγείρουν ένα πλήθος κυττάρων, αλλά ο ακριβής μηχανισμός είναι άγνωστος. Υπάρχουν πολλά ενδιαφέροντα ερωτήματα όταν κάποιος αρχίζει να το κάνει αυτό.

Στην περίπτωση μιας γυναίκας με Σύνδρομο Τουρέτ, η οποία ήταν καλλιτέχνης, έδωσαν έναν διεγέρτη. Η γυναίκα δήλωσε ότι ήταν πιο δημιουργική όταν ο διεγέρτης ήταν ενεργοποιημένος. Αυτό γέννησε έναν αριθμό από ηθικά ζητήματα στον τομέα, με την έννοια ότι όταν διορθώνεις κατεστραμμένα μέρη του εγκεφάλου ενδέχεται να καταλήξει στην επαύξηση κάποιων φυσικών χαρακτηριστικών. Αυτό είναι σίγουρα κάτι που πρέπει να σκεφτούμε.

Επομένως τι επιφυλάσσει το μέλλον; Θα έχετε έναν επεξεργαστή INTEL μέσα στο κεφάλι σας; Πιθανώς όχι αν είστε υγιείς. Θα ήθελα να το αντιπαραθέσω με το σημείο στο οποίο είμαστε τώρα με το νευροπροσθετικό πρόγραμμα, και

αυτή είναι η αιχμή της τεχνολογίας σήμερα. Είναι νωρίς, είναι η πρώτη καταγραφή με σιβάδα πολλαπλών ηλεκτροδίων σε ανθρώπους και όλο το λογισμικό είναι εξωτερικό εκτός από τα ηλεκτρόδια τα ίδια. Επιπλέον εφαρμόζεται σε έναν ασθενή σε νοσοκομειακό χώρο. Το 1950, ο πρώτος ηλεκτρονικός βηματοδότης που αναπτύχθηκε στον κόσμο έμοιαζε με αυτό. Σήμερα ο βηματοδότης εμφυτεύεται, διαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα και είναι μια συνήθης διαδικασία. Παλιά υπήρχαν καλώδια τα οποία έβγαιναν από το στήθος και συνδέονταν με μια συσκευή αρκετά όμοια με την οθόνη ενός μικρού παλμογράφου. Σήμερα, ο βηματοδότης είναι μικροσκοπικός και εμφυτεύεται σε σύνθητες σημείο.

Επομένως, μπορεί κανείς να σκεφτεί ότι βρισκόμαστε σε πρώιμα στάδια σε αυτό τον τομέα, και άρα μπορεί να έχουμε παρόμοια εξέλιξη σαν αυτή του τεχνητού βηματοδότη. Στο Brown, μια ομάδα με επικεφαλής τον Arto Nurmikko, έναν από τους συναδέλφους μου στον τομέα της μηχανικής, δουλεύει εκεί με τον Bill Patterson, με στόχο την ανάπτυξη μιας πλήρους εμφυτευμένης συσκευής. Η ιδέα αντιτίθεται στην λογική μιας απλής σιβάδας αισθητήρων στον εγκέφαλο. Υπάρχει ένα υλιστικό υπολογισμού το οποίο εκτελεί κάποια επεξεργασία σήματος, η οποία στέλνει ψηφιακά σήματα σε ένα καλώδιο οπτικής ίνας μέσα στο σώμα, στο στήθος, όπου η πληροφορία επεξεργάζεται και στέλνεται έξω ασύρματα.

Μόλις διαθέτουμε αυτό το είδος συσκευής, και υποπεύομαι ότι στα επόμενα δύο χρόνια θα έχουμε την τεχνολογία για να το επιτύχουμε, θα γίνει μια πολύ πιο πρακτική εγχείριση. Στην δική μας ομάδα κοιτάμε πέρα από τον έλεγχο του κέρσορα, σε πιο πολύπλοκα πράγματα φυσικών συσκευών στον κόσμο, για παράδειγμα ρομποτικά χέρια και βραχιόνες, προσδοκώντας να δώσουμε στους ανθρώπους την ικανότητα να ξεπεράσουν προβλήματα της καθημερινής ζωής, να πιάνουν αντικείμενα, να κτενίζουν τα μαλλιά τους, να βουρτσίζουν τα δόντια τους, να τρέφονται μόνοι τους και να γίνουν περισσότερο αυτοεξυπηρετούμενοι.

Γίνεται, επίσης, μια ιδιαίτερη προσπάθεια στις ΗΠΑ· μερικώς επειδή υπάρχουν τόσοι πολλοί Αμερικάνοι στρατιώτες που γυρίζουν από το Ιράκ έχοντας

χάσει άκρα. Προσπαθούν να αναπτυχθεί μια νέα γενιά από προσθετικά άκρα τα οποία θα ενσωματώνονται στο οστό και θα έχουν έναν μαλακό ιστό ο οποίος επίσης θα ενσωματώνεται. Στη συνέχεια αυτές οι συσκευές θα ελέγχονται είτε από ηλεκτρόδια με καταγραφή από τα περιφερικά νεύρα είτε με καταγραφή ηλεκτροδίων από το κεντρικό νευρικό σύστημα.

Ακόμη δεν είναι σίγουρο ποια μέθοδος θα λειτουργήσει. Κάτι για το οποίο δεν μίλησα σήμερα, αλλά πάνω στο οποίο εργάζονται πολλοί. Δεν συμβαίνει στο Brown, παρόλο που θα ήθελα να γίνεται, αλλά αφορά τον σχεδιασμό οπτικής πρόσθεσης για τους ανθρώπους με σοβαρή οπτική βλάβη, και υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη οπτικής πρόσθεσης σε ανάπτυξη αυτή τη στιγμή. Ένα από αυτά, από το Πανεπιστήμιο John Hopkins και τώρα στο USE, χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια στον αμφιβληστροειδή για διέγερση στα κύτταρα του αμφιβληστροειδούς, και στη συνέχεια χρησιμοποιεί την υπόλοιπη διαδρομή της όρασης όπως είναι τώρα. Υπάρχουν επίσης ομάδες που δουλεύουν στην απευθείας διέγερση του οπτικού φλοιού, καθώς και ομάδες που δουλεύουν στη διέγερση του οπτικού νεύρου. Μια ομάδα που εργάζεται στη διέγερση του πλευρικού οπτικού νεύρου, ο οποίος είναι δύσκολο προσβάσιμος αλλά υπάρχει πολλή δουλειά σε εκείνο το μέρος. Τέλος, η ομάδα μας και κάποιες άλλες ομάδες, μερικές από τις οποίες ανέφερα εδώ, αναπτύσσει αυτά που θα ήθελα να σκέφτομαι ως βιολογικά ενσωματωμένα συστήματα.

Αυτά είναι υβριδικά, δεν είναι όλα υπολογιστές, δεν είναι όλα ανθρώπινα, αλλά ένας συνδυασμός. Έχουμε ήδη παρουσιάσει τη δυνατότητα διασύνδεσης με τη χρήση οδήγησης και κλικ για τετραπληγικούς. Υπάρχει ακόμα πολλή δουλειά να γίνει πριν να βρεθεί μια πραγματικά πρακτική συσκευή που θα θέλατε να σας εμφυτευτεί σε περίπτωση που ήσασταν σε μια τέτοια κατάσταση. Αλλά αυτή η δουλειά ανοίγει όλες εκείνες τις ενδιαφέρουσες ευκαιρίες για την έρευνα της απεικόνισης και της επεξεργασίας πληροφοριών από τον εγκέφαλο. Έχουμε την ικανότητα να κοιτάζουμε στον ανθρώπινο εγκέφαλο όσο μαθαίνει να προσαρμόζεται σε ένα νέο κινητικό σύστημα, και πιστεύω, γενικότερα ελπίζω, ότι σας έδωσα μια γεύση από αυτό τον τομέα, ο οποίος πιστεύω

ότι υπόσχεται ένα νέο μοντέλο για τη θεραπεία ασθενειών και τραυματισμών του κεντρικού νευρικού συστήματος.

Και τελειώνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Gerhard Friehs, έναν νευροχειρουργό που δουλεύει σε αυτό. Επίσης, πληθώρα συνεργατών στο Brown και στην εταιρεία Cyberkinetics καθώς και πολλούς χορηγούς για την μεγάλη οικονομική τους υποστήριξη.