

Neurala gränssnitt

Robin Eklind

2013-10-27

“Any sufficiently advanced technology is indistinguishable from magic.” -
Arthur C. Clarke [1]

Innehåll

1	Introduktion	3
1.1	Syfte	3
2	Neurala gränssnitt	3
2.1	Kodning och avkodning av nervsignaler	4
2.2	Algoritmer för neural kodning och avkodning	4
3	Envägskommunikation	4
3.1	Brain-computer interfaces	5
3.1.1	Ytelektroder	5
3.1.2	Elektroencefalografi	5
3.1.3	Magnetencefalografi	5
3.2	Computer-brain interfaces	6
3.2.1	Högintensivt fokuserat ultraljud	6
3.3	Brain-brain interfaces	6
4	Tvåvägskommunikation	6
5	Diskussion	7
5.1	Potential och framtida användningsområden	7
5.1.1	Provsmaakning av recept via Internet	7
5.1.2	Ultraportabla enheter	7
5.1.3	Kollektivt minne	7
5.1.4	Utökad sinnesrepertoar	8
5.1.5	Överföring av känslor och sinnestillstånd	8
5.2	Etiska och moraliska aspekter	9

1 Introduktion

Vi lever i en tid där informationsutbyte blomstrar och vetenskapliga upptäckter skapar interdisciplinära synergieffekter. Banbrytande framsteg kommer med allt tätare intervall och inom många områden är utvecklingshastigheten exponentiell [2].

På Sahlgrenska Universitetssjukhuset utfördes tidigare under året en operation där en patient förseddes med en permanent muskel- och nervstyrd armprotes. Eftersom protesens elektroder ansluts direkt till nerverna är det möjligt att både skicka och ta emot nervsignaler. Hjärnan kan intuitivt kontrollera protesens rörelser genom att skicka motoriska nervimpulser. Ännu mer sensationellt är att känselintryck kan förmedlas tillbaka till hjärnan genom stimulering av nerverna [3].

I pressmeddelandet poängteras det etablerade samarbetet mellan de olika disciplinerna:

“Samverkan mellan flera olika områden (medicin, biomaterial, mekatronik, analog och digital elektronik, artificiell intelligens, biomekanik etc.) är en förutsättning för detta komplexa projekt.” [3]

Nervstyrda proteser har möjliggjorts tack vare så kallade *neurala gränssnitt* som skapar en kommunikationskanal mellan elektroniska komponenter och hjärnan. Genom detta gränssnitt länkas våra sinnen och tankar samman med den digitala världen. Vi står inför en spännande tid framöver då neurala gränssnitts sanna potential börjar utforskas.

1.1 Syfte

Syftet med denna rapport är att grovt sammanfatta hur dagens neurala gränssnitt fungerar och används, resonera kring deras framtida potential samt belysa teknikens etiska och moraliska aspekter.

2 Neurala gränssnitt

Syn, hörsel, känsel och motoriska färdigheter är så fundamentala för våra liv att vi ofta tar dem för givet. Dessa förmågor är så djupt integrerade i vår vardag att de personer som förlorar någon av dem ofta drabbas av depression [4]. Med hjälp av neurala gränssnitt har det visat sig vara möjligt att återställa både sensoriska [5, 6, 7] och motoriska förmågor [3], och därmed förbättra livskvaliteten hos de drabbade.

Neurala gränssnitt är ett tvärvetenskapligt område som drar nytta av framsteg inom såväl data- och neurovetenskap som maskininlärning och materialvetenskap. Centralt för området är dock studierna kring hur hjärnan kommunicerar med resten av kroppen.

Generellt sett så skickar hjärnan ut motoriska kommandon och tar emot sensorisk stimuli. All information som skickas till och från hjärnan måste omkodas innan den kan överföras i form av nervsignaler. Denna omkodning kan liknas med den översättning, mellan olika tecken och unika sekvenser av ettor och nollor, som sker inom datorer. Neurala gränssnitt skapar en länk mellan hjärnan och elektroniska komponenter som gör det möjligt att skicka och ta emot nervsignaler. För att kunna kommunicera med hjärnan måste nervsignalerna i sin tur kodas och avkodas på ett korrekt sätt; mer om detta i sektion 2.1.

Det finns en rad olika neurala gränssnitt med respektive för- och nackdelar. En del neurala gränssnitt ansluts direkt till nerverna eller direkt till hjärnan och kräver därför kirurgiska ingrepp. Andra neurala gränssnitt kan på avstånd mäta de magnetfält som alstras av nervimpulser i hjärnan, och kräver därför inga kirurgiska ingrepp; mer om detta i sektion 3.1.3.

Vissa neurala gränssnitt är begränsade till envägs kommunikation; de kan antingen skicka eller ta emot nervsignaler. Andra neurala gränssnitt har möjlighet att kommunicera i båda riktningarna, det vill säga de kan både skicka och ta emot nervsignaler.

2.1 Kodning och avkodning av nervsignaler

Ögonproteser [8] och cochleaimplantat [6] skickar visuell respektive auditativ stimuli till hjärnan och förser således användaren med syn respektive hörsel. För att hjärnan ska kunna förstå de stimuli som skickas, måste informationen omkodas på ett korrekt sätt.

Genom att studera de nervsignaler som normalt sett skickas från ögat via synnerven till hjärnan har en lyckats härleda hur den visuella informationen ska omkodas. Istället för att skicka hela synintrycket vid varje tillfälle så skickas bara de förändringar som registrerats. På så sätt kan vi lättare reagera på förändringar i vår omgivning och slipper samtidigt belasta hjärnan med onödig information [5]. Detta kan liknas vid hur olika filmformat endast lagrar förändringar mellan bildsekvenser, så kallade frames, för att minska filstorleken och öka överföringshastigheten. Liknande forskning har bedrivits för att studera hur auditativ stimuli från örat omkodas innan de överförs via hörselnerven till hjärnan.

Studier av nervimpulser som skickas från hjärnan via motoriska nerver till muskler i armar och ben har lyckats härleda hur rörelsekommandon kan avkodas. Tack vare denna kunskap har tankestyrda arm- och benproteser kunnat utvecklas [3].

2.2 Algoritmer för neural kodning och avkodning

Utvecklandet av algoritmer är ett viktigt forskningsområde inom neurala gränssnitt. Det är algoritmer som sköter kodningen och avkodningen av nervsignaler, vilket ställer höga krav på korrekthet och till viss del hastighet.

Inkorrekt avkodning av nervsignaler skulle resultera i att arm- och benproteser utför felaktiga motoriska kommandon. Inkorrekt kodning av nervsignaler skulle resultera i en felaktig varseblivning då hjärnan inte kan tolka de stimuli som överförs. Hos ögonproteser och cochleaimplantat skulle detta medföra kaotiska syn- och hörselintryck.

Algoritmer används även för att filtrera bort ointressant information och korrigera mätstörningar. Till exempel kan algoritmer känna igen mönster för blinkningar och på så sätt filtrera bort dem från mätdata.

3 Envägs kommunikation

En rad olika neurala gränssnitt kan etablera envägs kommunikation med hjärnan, där de antingen skickar eller tar emot nervsignaler. De neurala gränssnitt som läser av nervsig-

nalerna från hjärnan kallas brain-computer interfaces medan de som skickar nervsignaler till hjärnan kallas computer-brain interfaces. Dessa redovisas mer ingående nedan.

3.1 Brain-computer interfaces

Neurala gränssnitt som läser av hjärnaktivitet eller tar emot nervsignaler möjliggör kommunikation från hjärnan till digitala komponenter. Dessa gränssnitt kallas för brain-computer interfaces (BCI) och används i bland annat arm- och benproteser som behöver ta emot motoriska nervsignaler från hjärnan.

Nedan redovisas några olika typer av brain-computer interfaces samt för- och nackdelar hos respektive typ.

3.1.1 Ytelektroder

Genom att fästa ytelektroder på huden kan de motoriska nervsignalerna som skickas från hjärnan avläsas i form av elektrisk muskelaktivitet. För att fästa dessa ytelektroder krävs inga kirurgiska ingrepp, vilket gör att de lätt kan användas av vem som helst.

Denna teknik har länge använts av arm- och benproteser, men antalet unika rörelsemönster som kan förmedlas via gränssnittet är begränsat. När huden rör på sig så förflyttas ytelektroderna vilket påverkar avläsningen av impulsen. Även svett påverkar impulsen vilket kan göra avläsningarna mindre pålitliga [3].

3.1.2 Elektroencefalografi

Elektroencefalografi (EEG) använder sig också av ytelektroder, men istället för att fästa dem på musklerna så placeras de ut i ett rutnmönster på skalpen. Där mäter elektroderna den elektriska aktiviteten som uppstår i samband med nervsignalerna i hjärnan. Resultatet brukar ofta presenteras i form av hjärnvågor.

Fördelen med EEG är att inga kirurgiska ingrepp krävs för att fästa elektroderna på skallen. Samtidigt finns det en del nackdelar med EEG. Att applicera den gel som håller elektroderna på plats brukar vara en tidskrävande process. Det finns risk för att EEG ger missvisande resultat på grund av olika mätstörningar som kan orsakas av bland annat ögonrörelser. Precisionen hos EEG-resultat är inte särskilt hög och det kan vara svårt att härleda exakt vilket område i hjärnan som gav upphov till en viss elektrisk aktivitet. Däremot kan nya mätvärden avläsas flera hundra gånger per sekund.

Idag kombineras ofta resultat från EEG och funktionell magnetresonanstomografi (förkortas fMRI på engelska) för att få ut det bästa av två världar. De kompletterar varandra väl eftersom fMRI kan ta ett fåtal mätvärden per sekund med väldigt hög precision [9].

3.1.3 Magnetencefalografi

Enligt ett av elektromagnetismens postulater så ger rörelsen av elektriska laddningar upphov till magnetfält [10]. Magnetencefalografi utnyttjar detta fenomen för att mäta magnetfälten som alstras av elektriska nervsignaler i hjärnan. På så sätt kan utsprunget till nervaktivitet i hjärnan lokaliseras.

Magnetencefalografi kräver inga kirurgiska ingrepp och kan på många sätt liknas med EEG. Samtidigt finns en del skillnader mellan teknikerna. Medan EEG mäter elektriska

nervimpulser så mäter magnetencefalografi de magnetfält som alstras av de elektriska nervimpulserna. Precisionen hos magnetencefalografi är lika hög eller högre än den hos EEG och mätvärden kan tas lika ofta. Däremot har EEG möjlighet att mäta av nervaktivitet från fler områden i hjärnan [11].

3.2 Computer-brain interfaces

Neurala gränssnitt som möjliggör kommunikation från digitala komponenter till hjärnan kallas för computer-brain interfaces (CBI). I sektion 3.3 redovisas ett exempel på användning av CBI.

3.2.1 Högintensivt fokuserat ultraljud

Högintensivt fokuserat ultraljud kan användas för att stimulera specifika nervceller i hjärnan med hög precision. Genom att aktivera olika områden i hjärnan är det till exempel möjligt att kontrollera muskelrörelser [12]. Läs mer om hur högintensivt fokuserat ultraljud kan användas i brain-brain interfaces under sektion 3.3.

3.3 Brain-brain interfaces

Brain-brain interfaces (BBI) skulle kunna ses som envägskommunikation i två steg. I första steget överförs motoriska kommandon från hjärnan hos en individ via BCI till en dator. I andra steget överförs sedan dessa motoriska kommandon från datorn via CBI till hjärnan hos en annan individ.

Tidigare under året redovisade forskare från Harvard ett experiment där en människa genom enbart tankar kunde kontrollera svansrörelserna hos en råtta [12]. Det spektakulära är att inga kirurgiska ingrepp krävdes för att utföra experimentet.

I experimentet analyserades personens tankar med hjälp av BCI och överfördes sedan till datorns i form av ”uppåt-” och ”nedåtkommandon”. Sedan användes högintensivt fokuserat ultraljud för att stimulera de motoriska områden i hjärnan som kontrollerar antingen ”uppåt-” eller ”nedåtrörelser” med svansen.

4 Tvåvägskommunikation

Neurala gränssnitt med stöd för tvåvägskommunikation kan både skicka och ta emot nervsignaler från hjärnan. I inledningen såg vi ett exempel på hur dessa gränssnitt kan användas för att både ta emot motoriska kommandon från hjärnan samt skicka sensorisk stimuli till hjärnan.

Det är extremt viktigt med känsel för att kunna greppa föremål utan att antingen tappa eller krossa dem. Känselintryck är dessutom fundamentala för att personen ska acceptera proteserna som en del av sin kropp¹ [3].

¹I dagsläget väljer ungefär hälften av personer med protes att ta av sig proteserna när den inte används, då proteserna inte känns som en del av deras kropp

5 Diskussion

Alla tekniska framsteg kan användas för såväl gott som ont. Ett känt citat på temat från Marie Curie lyder:

“I am one of those who think like Nobel, that humanity will draw more good than evil from new discoveries.” - Marie Curie [13]

Även om framsteg inom vetenskap och forskning kommer resultera i mer gott än ont, så är det vårt etiska och moraliska ansvar att försöka föreställa oss teknikens framtida roll och användningsområden. Vilken potential har tekniken och hur kan den missbrukas?

5.1 Potential och framtida användningsområden

Endast vår fantasi och uppfinningsriktighet begränsar potentialen hos neurala gränssnitt. Eftersom neurala gränssnitt visats kapabla att överföra sinnesintryck för syn [5, 8], hörsel [6] och känsel [7] bör det ses som en tidsfråga innan alla sorters stimuli kan överföras. Nedan redovisas exempel på några framtida användningsområden.

5.1.1 Provsmaakning av recept via Internet

Tänk om det vore möjligt att gå in på en hemsida och provsmaka olika recept. De stimuli som ger upphov till en smakupplevelse kunde då överföras via Internet till användarens neurala gränssnitt.

5.1.2 Ultraportabla enheter

Föreställ dig en ultraportabel laptop utan skärm, mus, tangentbord och högtalare där all interaktion sker via neurala gränssnitt.

Neurala gränssnitt har möjligheten att revolutionera hur vi interagerar med digitala enheter. Redan 2003 användes neurala gränssnitt för att kontrollera muspekare med hjälp av tankarna [14]. Sedan dess har tekniken fortsatt att utvecklas. Genom förbättrade algoritmer lyckades forskare från Stanford förra året fördubbla hastigheten hos tankestyrda muspekare [15].

Ögonproteser använder sig av neurala gränssnitt för att överföra visuell stimuli till hjärnan [3]. Informationen som normalt sätt representeras med hjälp av en bildskärm skulle istället kunna överföras via neurala gränssnitt.

5.1.3 Kollektivt minne

Med ökad förståelse för hur minnen lagras och återkallas borde det vara möjligt att överföra minnen via neurala gränssnitt och på så sätt digitalisera dem. Detta skulle utöka vår minneskapacitet och göra det möjligt att ta säkerhetskopior av viktiga minnen.

Självklart finns det många integritetsaspekter att ta hänsyn till och känsliga minnen måste kunna skyddas på ett säkert sätt. Samtidigt ger denna teknik oss nya kraftfulla kollaborationsverktyg.

Tänk om användare kunde välja att dela med sig av specifika minnen och lagra dessa i en kollektiv minnesdatabas. Genom att efterlikna hur hjärnan lagrar minnen vore det

möjligt att associativt länka samman informationen. Via neurala gränssnitt kan sedan vem som helst ansluta sig till och använda sig av det kollektiva minnet.

Genom det kollektiva minnet vore det möjligt att minnas en plats du aldrig besökt och ta del av dess unika kultur, smakupplevelser och andra sinnesintryck.

5.1.4 Utökad sinnesrepertoar

Dagens neurala gränssnitt kan återställa sinnesintryck för syn [5], hörsel [6] och känsel [7]. Morgondagens neurala gränssnitt skulle kunna utöka kapaciteten hos våra nuvarande sinnen.

Tänk om vi kunde utöka vårt synliga ljusspektra så det inkluderade infrarött och ultraviolett ljus. Det finns så mycket vackert här i världen som vi då skulle kunna ta del av! Bland annat skulle vi få bevittna de unika ultraviolette mönster som finns hos korallrevsfiskar [16] och blommor.

Utöver vanliga sinnesintryck har det visat sig möjligt att överföra stimuli för sinnen vi ännu inte besitter. Hjärnan arbetar först hårt med att analysera de okända sinnesintrycken men lär sig efter ett tag hur de ska tolkas. Att lära sig tolka nya sorters stimuli kan jämföras med att förstå sig på nya språk, det är svårt i början men känns så småningom intuitivt [17].

Så vilka sinnen vill vi berikas med? Nedan ges exempel på några av de fascinerande sinnen som finns representerade i djurriket:

- *Magnetoreception* utgörs av förmågan att känna av magnetfält. Flyttfåglar använder detta sinne för att navigera.
- *Sonar* utgörs av förmågan att varsebli sin omgivning genom att tolka reflekterande ljud. Fladdermöss är kända för att navigera med hjälp av sonar.
- *Elektroreception* utgörs av förmågan att upptäcka elektriska fält i sin omgivning. Hajar använder denna förmåga för att lokalisera byten.

Utöver redan befintliga sinnen vore det möjligt att överföra sinnesintryck för helt artificiella sinnen. Till exempel skulle GPS-koordinaterna för ens nuvarande position kunna överföras via det neurala gränssnittet. Så småningom lär sig hjärnan att tolka den nya information och vi berikas då med ett sinne för positionering.

5.1.5 Överföring av känslor och sinnestillstånd

Vårt språk är begränsat när det gäller att överföra en exakt representation av vårt sinnestillstånd eller känslorna vi känner i ett givet ögonblick. Tänk om det vore möjligt att överföra känslor eller sinnestillstånd till en annan person och låta dem känna exakt det du känner.

Uttryck som “om du bara visste hur starkt jag känner inför dig” kunde istället överföras och känslorintrycken kunde fullkomligt omsvepa personen i fråga. Självklart behöver en ta hänsyn till etiska och moraliska aspekter. T.ex. borde det endast vara möjligt att överföra en känsla eller ett sinnestillstånd med mottagarens samtycke.

5.2 Etiska och moraliska aspekter

Med neurala gränssnitt ges vi för första gången möjligheten att kontrollera inte bara aspekter av vår omvärld utan även de mest fundamentala aspekterna av vad det innebär att vara människa.

Kan vi förutsäga hur tekniken kommer användas? De flesta anser nog att neurala gränssnitt borde få användas för att återställa syn, hörsel och rörelseförmågor hos handikappade personer. Något svårare är det att enhetligt säga om vi bör få utöka och förbättra våra förmågor.

Självklart borde varje person fritt få bestämma över sin egen kropp och sitt eget sinne. Det moraliska dilemmat uppstår ifall normen skulle bli att utöka sin sinnesrepertoar och förbättra sina mentala och till viss del fysiska förmågor. Efter ett tag tas det fria valet bort från minoriteten om de vill fortsätta att leva ett "normalt" liv, eftersom normen blivit att vara ansluten till det kollektiva minnet. Utan att själv ansluta dit så går det inte längre att konkurrera inom vissa områden [18, 19]. En parallell kan dras till dagens ökade användande av smarta mobiltelefoner och Facebook, vilket kan leda till en distansering mellan anslutna och icke-anslutna personer.

En annan etisk och moralisk aspekt att ta hänsyn till är i vilken mån vi har rätt att bedriva experiment på djur. Till exempel så har vi utfört experiment som gör det möjligt att fjärrstyra skalbaggar och andra insekter [20]. Det är svårt att dra en gräns mellan vad som ska vara tillåtet inom forskning. Framstegen kan underlätta och minska lidandet för så många, men samtidigt borde vissa etiska grundprinciper krävas inom forskning.

Referenser

- [1] A. C. Clarke, *Profiles of the Future: An Enquiry Into the Limits of the Possible*. Harper & Row, 1973.
- [2] D. Kraft, "Medicine's future? There's an app for that". TEDx talk, april 2010. [Online] Tillgänglig: http://www.ted.com/talks/daniel_kraft_medicine_s_future.html. [Hämtad: 19 okt, 2013].
- [3] Chalmers universitet, "Världspremiär för muskel- och nervstyrd armprotes", februari 2013. [Online] Tillgänglig: <http://www.chalmers.se/sv/nyheter/Sidor/Varldspremiar-f%C3%B6r-muskel--och-nervstyrd-armprotes.aspx>. [Hämtad: 19 okt, 2013].
- [4] J. Shepherd, "A broken body isn't a broken person". TEDx talk, oktober 2012. [Online] Tillgänglig: http://www.ted.com/talks/janine_shepherd_a_broken_body_isn_t_a_broken_person.html. [Hämtad: 23 okt, 2013].
- [5] S. Nirenberg, "A prosthetic eye to treat blindness". TED talk, oktober 2011. [Online] Tillgänglig: http://www.ted.com/talks/sheila_nirenberg_a_prosthetic_eye_to_treat_blindness.html. [Hämtad: 19 okt, 2013].
- [6] B. S. Wilson och M. F. Dorman, "Cochlear implants: a remarkable past and a brilliant future", *Hearing research*, vol. 242, s. 3–12, augusti 2008. [Online] Tillgänglig: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3707130/>. [Hämtad: 19 okt, 2013].
- [7] G. S. Dhillon, S. M. Lawrence, D. T. Hutchinson, och K. W. Horch, "Residual function in peripheral nerve stumps of amputees: implications for neural control of artificial limbs", *Journal of Hand Surgery*, vol. 29, s. 605–615, juli 2004. [Online] Tillgänglig: [http://www.jhandsurg.org/article/S0363-5023\(04\)00203-5/abstract](http://www.jhandsurg.org/article/S0363-5023(04)00203-5/abstract). [Hämtad: 19 okt, 2013].
- [8] S. Nirenberg, "Retina prosthesis". US Patent US 20130110236 A1, augusti 2012. [Online] Tillgänglig: <https://www.google.com/patents/US20130110236>. [Hämtad: 19 okt, 2013].
- [9] S. Sanei, S. Ferdowsi, K. Nazarpour, och A. Cichocki, "Advances in Electroencephalography Signal Processing", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, s. 170–176, januari 2013. [Online] Tillgänglig: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6375941>. [Hämtad: 27 okt, 2013].
- [10] T. Eriksson, "Elektromagnetism". Nationalencyklopedin. [Online] Tillgänglig: <http://www.ne.se/lang/elektromagnetism>. [Hämtad: 21 okt, 2013].
- [11] D. Cohen och B. N. Cuffin, "Demonstration of useful differences between magnetoencephalogram and electroencephalogram", *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 56, s. 38–51, juli 1983. [Online] Tillgänglig: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6190632>. [Hämtad: 27 okt, 2013].
- [12] S.-S. Yoo, H. Kim, E. Filandrianos, S. J. Taghados, och S. Park, "Non-Invasive Brain-to-Brain Interface (BBI): Establishing Functional Links between Two Brains", *PLoS ONE*, vol. 8, nr. 4, s. e60410, 2013. [Online] Tillgänglig: <http://www.plosone.org/article/info:doi/10.1371/journal.pone.0060410>. [Hämtad: 27 okt, 2013].

- [13] R. B. Taylor, “White Coat Tales: Medicine’s Heroes, Heritage, and Misadventures”, s. 140–141, 2008.
- [14] M. J. Black, E. Bienenstock, J. P. Donoghue, M. Serruya, W. Wu, och Y. Gao, “Connecting Brains with Machines: The Neural Control of 2D Cursor Movement”, *First International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering*, s. 580–583, mars 2003. [Online] Tillgänglig: <http://cs.brown.edu/~black/Papers/blackCapri.pdf>. [Hämtad: 20 okt, 2013].
- [15] K. Servick, “Stanford researchers advance the performance of thought-controlled computer cursors”, november 2012. [Online] Tillgänglig: <http://news.stanford.edu/news/2012/november/thought-control-cursor-111812.html>. [Hämtad: 20 okt, 2013].
- [16] U. E. Siebeck, “Communication in coral reef fish: the role of ultraviolet colour patterns in damselfish territorial behaviour”, *Animal Behaviour*, vol. 68, s. 273–282, augusti 2004. [Online] Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003347204001666>. [Hämtad: 27 okt, 2013].
- [17] J. E. O’Doherty, M. A. Lebedev, P. J. Ifft, K. Z. Zhuang, S. Shokur, H. Bleuler, och M. A. L. Nicolelis, “Active tactile exploration enabled by a brain-machine-brain interface”, *Nature*, vol. 479, s. 228–231, oktober 2011. [Online] Tillgänglig: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3236080/>. [Hämtad: 27 okt, 2013].
- [18] S. Rodotà och R. Capurro, “Ethical aspects of ICT implants in the human body”. Opinion of the European Group on Ethics in Science and New Technologies to the European Commission, mars 2005. [Online] Tillgänglig: http://ec.europa.eu/bepa/european-group-ethics/docs/avis20_en.pdf. [Hämtad: 27 okt, 2013].
- [19] E. M. McGee och G. Q. Maguire, “Ethical Assessment of Implantable Brain Chips”, *The Proceedings of the Twentieth World Congress of Philosophy*, augusti 1998. [Online] Tillgänglig: <http://www.bu.edu/wcp/Papers/Bioe/BioeMcGe.htm>. [Hämtad: 27 okt, 2013].
- [20] P. R. Wolpe, “It’s time to question bio-engineering”. TEDx talk, november 2010. [Online] Tillgänglig: http://www.ted.com/talks/paul_root_wolpe_it_s_time_to_question_bio_engineering.html. [Hämtad: 27 okt, 2013].