ریز سیستم های قابل کاشت درمغز: چالش ها ، کاربرد ها و اصول اخلاقی

احمدرضا محمدی

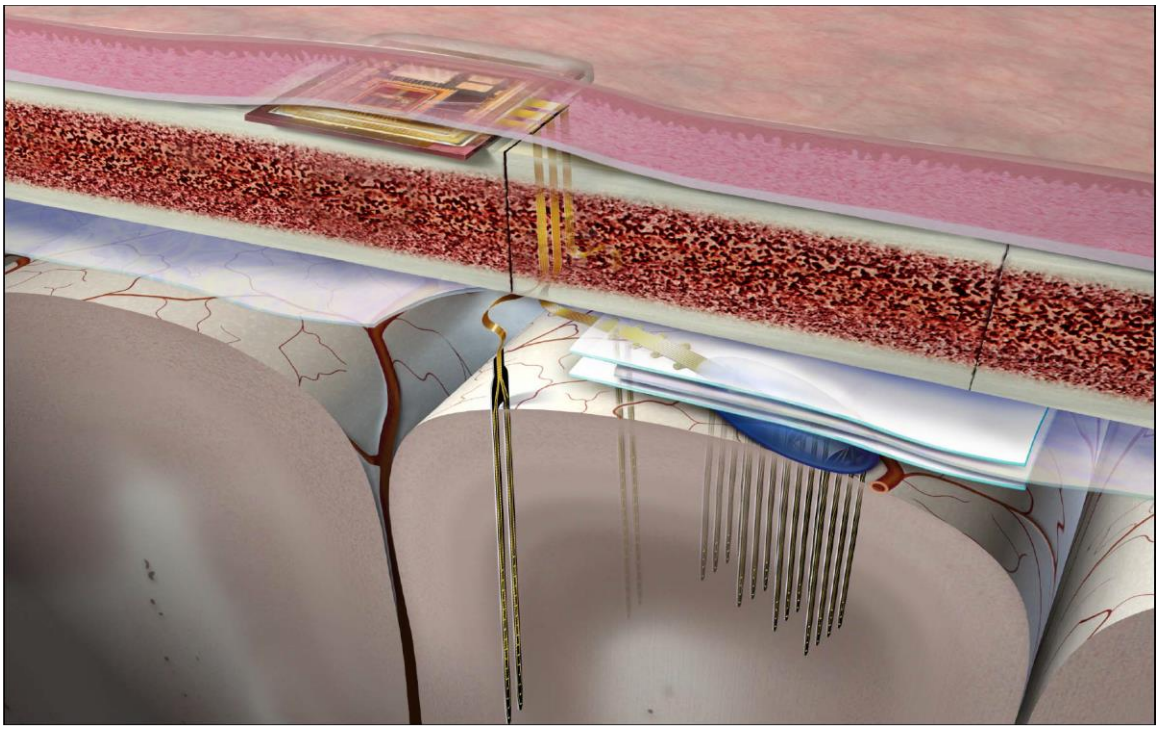
مقدمه :

ایمپلنت‌های مغزی از لحاظ به کارگیری در کاربر، به دو دسته‌ی مهم تقسیم می‌شوند: تهاجمی و غیرتهاجمی. در روش تهاجمی، الکترودهای رابط‌های مغز-کامپیوتر یا مغز-ماشین از طریق عمل جراحی در بدن فرد قرار می‌گیرند. این رویکرد سیگنال‌های الکتریکی نورون‌ها را با وضوح و دقت بالایی استخراج می‌کند. روش تهاجمی به دو دسته ضبط تک منطقه‌ای و چند منطقه‌ای تقسیم می‌شود. در روش ضبط تک منطقه‌ای فعالیت نورون‌ها تنها در یک منطقه‌ی خاص ثبت می‌شود. در روش ضبط چند منطقه‌ای فعالیت نورون‌ها به صورت هم زمان و توزیع شده ثبت می‌شوند.

در روش غیر تهاجمی، سیگنالهای مورد نیاز از طریق دستگاه‌هایی مانند EEG استخراج و سپس آنالیز و درنهایت به دستگاه‌های خروجی ارسال می‌شوند.

ایمپلنت در سال های اخیر با پیشرفت قابل توجهی همراه بوده که از نمونه های آن ، ایمپلنت شنوایی ، بینایی و درمان بیماری هایی مانند پارکینسون و صرع قابل اشاره است .

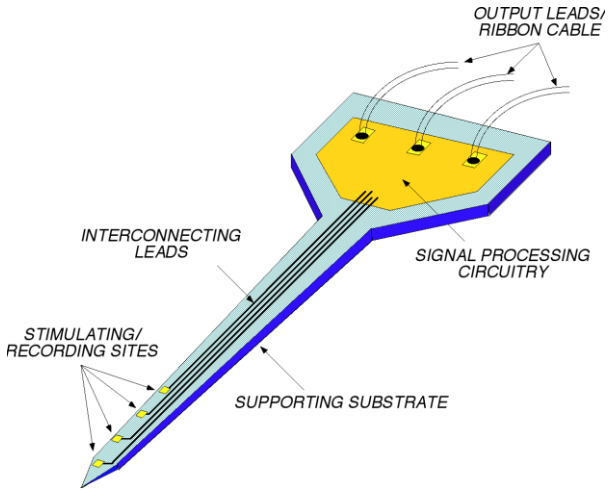
استفاده دیگر آن در ساخت دست رباتیک ، که در آن با استفاده از رمز گشایی أمواج مغزی محققان توانستند دست مصنوعی را به حرکت در آورند.



یک میکروسیستم عصبی متشکل از آرایه های D-۲ و D-۳ از الکترودهای کاشته شده قشر با کابل های روبان که آنها را به یک بسته الکترونیکی زیر جلدی متصل می کند که شامل مدارهای تقویت ، تشخیص و رمزگذاری اسپایک نورونی و انتقال بی سیم نیرو و داده های دو طرفه است.

تکنولوژِی میکروالکترود ها :

یک پیکربندی ممکن را برای چنین سیستمی نشان می دهد ، جایی که آرایه های الکترود دو و سه بعدی با قشر مرتبط می شوند و با استفاده از کابل های فوق انعطاف پذیر به یک بسته الکترونیکی زیر قشر مغز متصل می شوند. در این بسته ، سیگنال های عصبی تقویت ، تفسیر و به صورت بی سیم با دنیای خارج ارتباط برقرار می کنند. در اثر ارتباط از راه دور میکروچیپ در قشر ، هرگونه افزایش دما بر اثر جریان القائی به میکروچیپ ، باید کنترل و کمتر از ۲ درجه سانتیگراد باشد تا از آسیب جلوگیری کند.. بافت جابجا شده توسط آرایه الکترود باید به اندازه کافی کوچک باشد تا از اختلال قابل توجهی در سیستم فیزیولوژیکی جلوگیری کند . ارتفاع عمودی آن از سطح قشر مغز باید کمتر از ۱ میلی متر باشد تا آرایه از جمجمه خارج شود و در بافت شناور باشد.



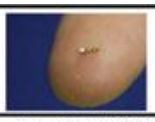
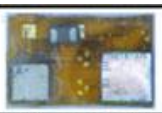
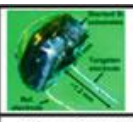
ساختار اساسی یک پروب مولتی الکترود میکروماشین برای ضبط یا تحریک در سیستم عصبی مرکزی.

در قالب اشاره به قطعات الکترونیکی و توضیح در مورد قابل کاشت بودن آن ها ، میتوان به مدارات مجتمع یاASIC ها ، FPGA ها و در کل به CMOS ها اشاره کرد .

سیستم های BCI معمولاً پیچیده هستند و برای پردازش سیگنال های EEG باید امواج مغزی را به رایانه شخصی یا میکروکنترلر تک تراشه ارسال کنند. به عنوان مثال یک سیستم ساده BCI با دو کانال و یک مدار مبتنی بر FPGA برای کنترل موتور DC می تواند به بیماران فلج کمک کند تا بتوانند ویلچر برقی را به راحتی برانند. ماژول جذب سیگنال فیزیولوژیکی و واحد پردازش سیگنال برای استخراج EEG و نوسان سیگنال از امواج مغزی طراحی شده اند که می توانند مستقیماً به سیگنال های کنترل تبدیل شوند تا صندلی های چرخدار برقی را هدایت کنند.

در تحقیقی دیگر ، کنترل حلقه بسته (closed-loop) یک استراتژی امیدوار کننده برای سرکوب اختلالات غیرطبیعی

نورون ، مانند صرع و بیماری های پارکینسون است.. در عوض سیستم عامل های ریزپردازنده مانند میکروکنترلرها و پردازنده های سیگنال دیجیتال قابلیت برنامه ریزی بسیار خوبی را ارائه می دهند. اما ممکن است هزینه آن از نظر انرژی مصرفی در هر چرخه فرآیند بسیار بالا باشد. آرایه های قابل برنامه ریزی میدانی (FPGA) می توانند قابلیت برنامه ریزی مجدد در سطح مدار را فراهم کنند اما به طور فزاینده ای انرژی مصرف میکنند . به بیان دیگر ، شبیه سازی و بستن مدار با FPGA صورت گرفته و بعد از تایید اولیه ، مدار روی ASIC های پر هزینه سوار میشود. در تصویر زیر به اختصار برخی میکروچیپ های قابل کاشت اشاره شده است.

					
Reference	**[Muller R et al 2018**	**[Seo D et al, 2016]**	**[Johnson B et al 2018]**	**[Yeon P et al [2018]**	**Brown/UCSD work**
Applications	Recording (CNS)	Recording (PNS)	Stimulation (PNS)	Recording (CNS)	**Record./Stim. (CNS)**
Number of Ch	64	1	1	1	**Up to 800**
IC Area [mm^2]/Ch	**0.09 (Note A)**	**0.032 (Note B)**	1	1.1	0.25
Total Volume [mm^3]	-	2.4	2.2	<1	**<0.0075 (note C)**
Power Consumption [uW]/Ch	3.4	120	9.7	<300	**<30**
Input Ref.Noise [uVrms]	1.3	180	-	3.78	1.6
Wireless Powering	300MHz RF	1.85MHz *Ultrasonic*	1.85MHz *Ultrasonic*	131 MHz RF	915 MHz RF
Telemetry	LSK	Backscattering	Backscattering	IR-UWB	**BPSK (TDMA)**
Data rate (Mbps)	1	0.5	-	0.8	**10**
Power supply (V)	0.5	-	3 V	1.8	0.7
ADC	VCO	-	-	VCO	SAR
ADC Resolution	15	8	-	10	8
Technology	65 nm CMOS	Discrete	65 nm CMOS	0.35 um CMOS	65 nm CMOS
Hermetic Sealing	?	?	?	?	**ALD > 10 years**

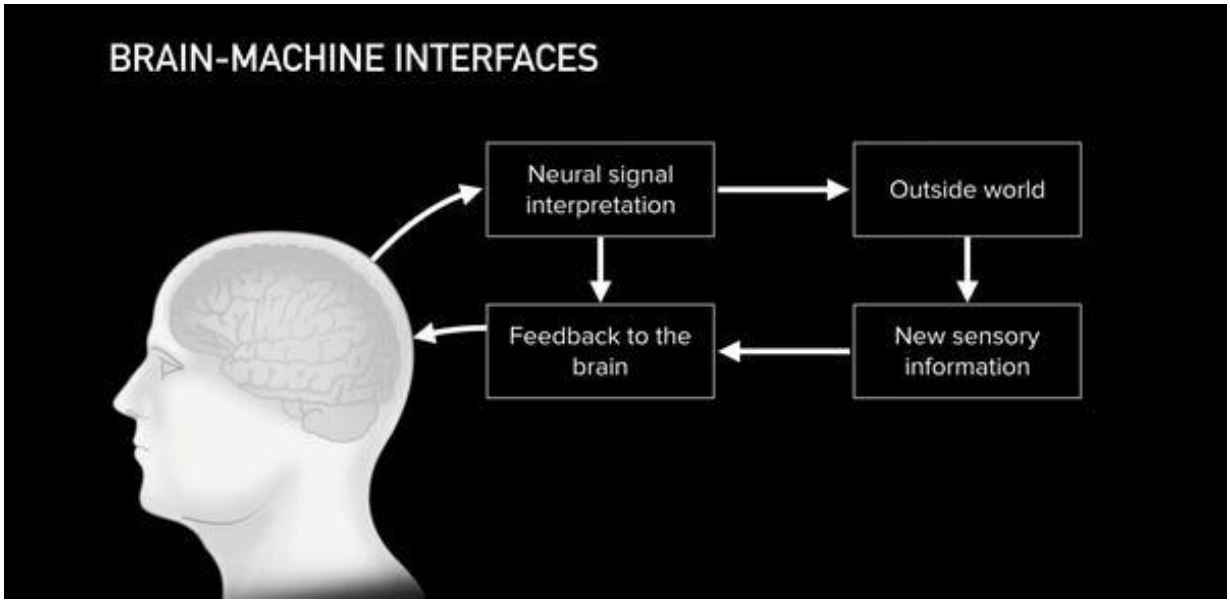
Note A: A multichannel system that shares many of the components across the channels
Note B: The ASIC an incomplete system – many of area savings come from using external components such as piezoelectric transducers
Note C: Volume savings include thin substrate but includes hermetic seals.

مقایسه برخی از دستگاه های عصبی در مقیاس میلی متر الکتریکی و / یا آلتراسون

منبع تغذیه میکروچیپ ها :

دغدغه ی اصلی محققین کاهش توان مصرفی تراشه ی تحریک کننده به موجب کاهش ابعاد کویل متصل به ایمپلنت می باشد که به این ترتیب باعث کاهش فضای مورد نیاز برای ایمپلنت تحریک کننده می شود. همچنین، کاهش توان مصرفی از افزایش دمای تحریک کننده و آسیب به بافت های اطراف آن جلوگیری می کند. در برخی از مقالات بر بهینه بودن شکل موج هایی از جمله نمایی و گوسی از نظر مصرف توان اشاره شده است، با این وجود، از آنجا که تولید پالس مربعی در سادگی طراحی موثر می باشد، کماکان در بسیاری از طراحی ها ، تحریک کننده هایی تنها با قابلیت تولید پالس های مربعی طراحی می شود.

رابط مغز- کامپیوتر (brain-computer interface) یا به اختصار BCI، سیستمی است که از طریق آن سیگنال‌های مغزی دریافت و سپس آنالیز می‌شوند و در نهایت برای انجام دادن کار مشخصی، به صورت مجموعه‌ای از دستورات به دستگاه‌های خروجی مورد نظر انتقال میابند. ذهنیت‌های نادرست بسیاری از رابط‌های مغز – کامپیوتر وجود دارد. برای مثال، بر خلاف تصور رایج، رابط مغز- کامپیوتر اطلاعات مورد نیاز خود را از مسیرهای خروجی سیستم عصبی محیطی دریافت نمی‌کند بلکه آن‌ها را از سیستم عصبی مرکزی استخراج می‌نماید. به عنوان نمونه، سیستم‌هایی که از طریق صدا یا عضلات فرد فعال می‌شوند، جزء رابط‌های مغز- کامپیوتر به شمار نمی‌روند. تصور نادرست دیگر از رابط‌های مغز- کامپیوتر این است که سیستم‌های مذکور با هدف



شماتیک کلی واسط های مغز و رایانه

استخراج اطلاعات مورد نیاز خود، دست به خوانش ذهن افراد و بدون رضایت آن‌ها می‌زنند یا آن‌ها را مجبور به انجام افعالی علیرغم میل باطنی‌شان می‌نمایند.

رابط مغز-کامپیوتر و کاربر آن، به صورت مشترک در یک سیستم واحد ایفای نقش می‌کنند؛ کاربر از طریق انجام تمرین‌های مشخصی، سیگنال‌های مغزی مربوط به مقاصد مورد نظر را تولید می‌کند و رابط مغز-کامپیوتر این سیگنال‌ها را دریافت و سپس کدگشایی می‌نماید. در آخرین مرحله، سیگنال‌های کدگشایی شده، به صورت یک سری از دستورات و برای انجام یک هدف خاص به دستگاه‌های خروجی ارسال می‌شوند.

به طور خلاصه رابط مغز-کامپیوتر، دارای چهار مشخصه‌ی اصلی است: ۱. دریافت سیگنال، ۲. استخراج ویژگی‌های مورد نظر، ۳. بازگردانی و رمزگشایی ویژگی‌های مورد نظر ، ۴. ارسال به دستگاه‌های خارجی. هماهنگی و کنترل چهار مشخصه‌ی ذکر شده، توسط یک پروتکل اجرایی انجام می‌شود که زمان‌بندی و جزییات مربوط به پردازش سیگنال‌ها را بر عهده دارد. کارایی بالاتر این پروتکل باعث افزایش بهره وری و سهولت استفاده‌ی رابط‌های مغز-کامپیوتر توسط کاربر خواهد شد.

رابط‌های مغز-کامپیوتر تکنولوژی در حال پیشرفت و رو به جلویی‌ست. این فناوری در آینده می‌تواند عملکرد افرادی که از ناتوانی‌های جسمی شدیدی رنج می‌برند را بهبود ببخشد یا در توان‌بخشی به بیماران درگیر با آسیب‌های ناشی از سکته، تروما وغیره مفید واقع شود.

رابط مغز-ماشین (brain-machine interface) یا اختصاراً BMI، تکنولوژِی‌ایست که در آن از فعالیت مغز جهت فعال کردن یک دستگاه خروجی به صورت مستقیم و بدون هیچ واسطه‌ای استفاده می‌شود. سیستم رابط مغز-ماشین به طور عمده در بیماران ALS، فلج حرکتی و سکته‌های حاد به منظور تسهیل فعالیت و تعاملات آن‌ها در محیط، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

رابطهای مغز-ماشین انواع مختلفی دارند و در مقاصد مختلفی نیز به کار گرفته می‌شوند. به طور کلی این سیستم‌ها به دو دسته‌ی کلی تهاجمی و غیرتهاجمی تقسیم می‌شوند. در روش تهاجمی، الکترودهایی بر روی قشر مغز کاشته می‌شوند. در روش غیر تهاجمی، از EEG، MEG و fMRI به منظور ثبت فعالیت مغزاستفاده می‌شود.

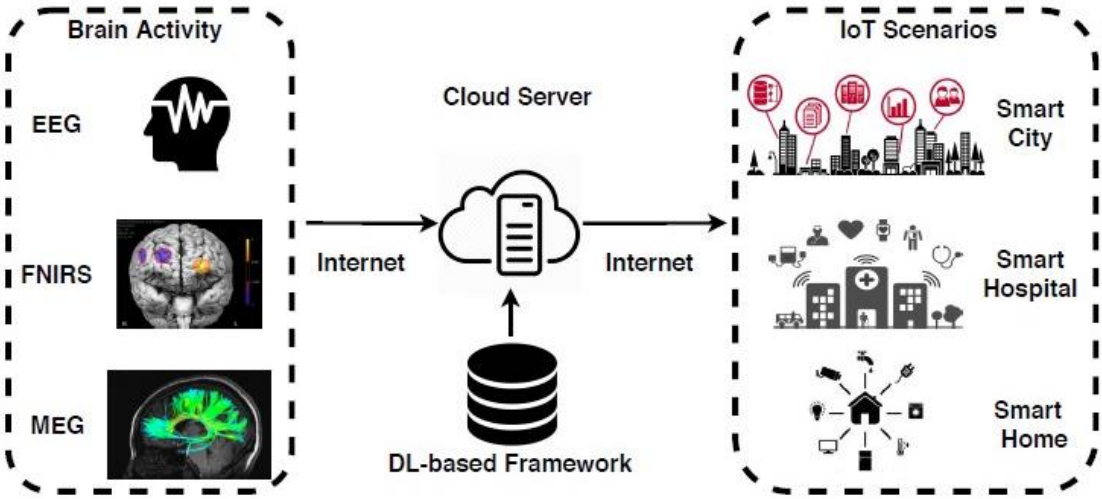
رمز گشایی سیستم عصبی :

رابط های Brain-Machine (BMI) یک مسیر مستقیم برای ارتباط و کنترل بین مغز و دستگاه های خارجی ایجاد می کنند ، که به معنای استفاده از سیگنال های عصبی برای کنترل دستگاه های خارجی برای انجام عمل مورد نظر است . این مسیر تعامل مستقیم بین مغز و دستگاههای خارجی را مستقل از نخاع / سیستم عصبی عضلانی محیطی امکان پذیر می کند..BMI عمدتاً از جمع آوری سیگنال ، پردازش سیگنال ، رمزگشایی سیگنال و ماژول کنترل دستگاه خارجی تشکیل شده است . ماژول های جذب سیگنال مثل (EEG)، سیگنال های مغناطیسی و سیگنال های تصویری که می توانند فعالیت های عصبی در مغز را منعکس میکند دریافت میکنند. پردازش سیگنال با تقویت و فیلتر کردن سیگنال اصلی ، در نتیجه افزایش سیگنال های موثر و مهار سیگنال های نامعتبر مانند نویز اشاره دارد. رمزگشایی سیگنال فرایندی است که فعالیت های عصبی را به پارامترهای حرکت ترسیم می کند ، که می تواند بیشتر به دستورات کنترل دستگاه های خارجی تبدیل شود. هدف دستگاه های خارجی کمک یا تقویت عملکرد حرکتی افراد است. برخی از موارد رایج ، ماوس کامپیوتر ، صندلی چرخدار برقی و بازوی رباتیک است.
BMI یک طرفه به استخراج سیگنال عصبی از قشر مغز حیوانات ، ترجمه سیگنال های عصبی به دستورات حرکت با توجه به نقشه برداری بین آنها و کنترل دستگاه خارجی برای انجام کار اشاره دارد. در BMI یک طرفه ، اطلاعات از سیستم عصبی به دستگاه خارجی در مسیر مصنوعی منتقل می شود. این حیوان فقط می تواند از طریق سیستم حسی طبیعی خود نظیر بینایی ، شنوایی ، لمس و غیره بازخورد دستگاه خارجی را دریافت کند ، BMI یک طرفه ، اولین سیستم رابط مغز و ماشین است.
سازگاری زیست محیطی و پایداری طولانی مدت الکترودها ، کلیدی است که تعیین می کند آیا فناوریBMI می تواند به طور گسترده در کلینیک استفاده شود یا خیر. در حال حاضر ، سازگاری زیستی میکروالکترودهای کاشته شده چندان قابل تعریف نیست و با افزایش زمان کاشت ، به راحتی می توان رد تخریب بافت بیولوژیکی را دید. بافت هایپر پلاستیک سطح الکترود را می پوشاند و در نتیجه کیفیت سیگنال ثبت شده توسط الکترودها کاهش می یابد. همزمان ، تغییرات امپدانس ناشی از خوردگی و تخریب مواد الکترود نیز بر پایداری طولانی مدت ضبط تأثیر می گذارد.

اینترنت اشیا (IoT) و BCI :

رابط مغز و رایانه (BCI) سیگنال های مغزی را بدست می آورد ، آنها را تجزیه و تحلیل می کند و آنها را به دستوراتی تبدیل می کند که به دستگاه های فعال کننده برای انجام اقدامات دلخواه منتقل می شوند. با اتصال گسترده وسایل روزمره که با ظهور اینترنت اشیاء (IoT) درک شده است ، BCI می تواند افراد را قادر سازد تا اشیاء مانند لوازم خانگی هوشمند یا روبات های کمکی را مستقیماً از طریق افکار خود کنترل کنند. با این حال ، تحقق این چشم انداز با چالش های متعددی روبرو است ، از همه مهمتر مسئله تفسیر دقیق مقصود فرد از سیگنال های خام مغزی است که اغلب نویزی هستند.

مکانیسم توجه انتخابی (SAM) را برای کشف ویژگی های متمایز سیگنال های ورودی مغز بسیار مهم هستند.



نمودار شماتیک اینترنت اشیا شناختی

انتظار می رود که گسترش اینترنت اشیاء (IoT) کارایی را بهبود بخشد و بر حوزه های مختلف از جمله اتوماسیون خانگی ، تولید و صنایع ، حمل و نقل و مراقبت های بهداشتی تأثیر بگذارد . افراد این امکان را خواهند داشت که طیف وسیعی از اشیاء روزمره را از طریق ابزارهای مختلف تعامل از جمله برنامه های کاربردی در تلفن های هوشمند خود یا دستگاه های پوشیدنی ، صدا و حرکات را کنترل کنند. رابط مغز و کامپیوتر (BCI) به عنوان یک جایگزین جدید برای تعامل بین اشیاء و افراد در حال ظهور است. BCI یک مسیر ارتباطی مستقیم بین مغز انسان و یک دستگاه خارجی ایجاد می کند و بنابراین نیاز به روشهای معمولی ارائه اطلاعات را از بین می برد روندهای اخیر در تحقیقات BCI شاهد تبدیل قابلیت های تفکر انسان به اقدامات فیزیکی مانند ویلچرهای کنترل شده با ذهن و لوازم مجهز به اینترنت اشیا ، است. این مثالها نشان می دهد که BCI یک فناوری کمک کننده اصلی در تعامل بین انسان و چیز خواهد بود .

تعامل شناختی مبتنی بر BCI چندین مزیت را ارائه می دهد. یکی حریم خصوصی ذاتی ناشی از این واقعیت است که فعالیت مغز نامرئی است و بنابراین مشاهده و تکثیر آن غیرممکن است . مورد دیگر راحتی و زمان واقعی تعامل است ، زیرا انسان فقط باید به تعامل بیندیشد و نه به انجام حرکات فیزیکی مربوطه (مانند صحبت ، اشاره و ...) .

سیگنال های خام مغزی از طریق دسترسی به اینترنت به سرور ابری ارسال می شوند. سرور ابری از یک مدل یادگیری عمیق از پیش تعیین شده وابسته به شخص برای تجزیه و تحلیل سیگنال های خام استفاده می کند. نتایج تجزیه و تحلیل سیگنال های تفسیری را می توان برای فعال کردن عملکردها در طیف وسیعی از متقاضیان اینترنت اشیا مانند شهر هوشمند (به عنوان مثال ، کنترل حمل و نقل ، برنامه دستور کار) ، بیمارستان هوشمند ، (به عنوان مثال ، تماس اضطراری ، راهنمایی ناهنجاری) و خانه

هوشمند ، (به عنوان مثال ، کنترل لوازم خانگی ، کنترل ربات کمکی). سعی بر این است به متمایزترین اطلاعات دست پیدا کنیم .

مسائل اخلاقی :

با پیشرفت دانش و تکنولوژی، فناوری‌های جدیدی مانند ایمپلنت‌های مغزی این امکان را فراهم کرده که انسان قابلیت‌ها و توانایی‌های خود را ارتقا ببخشد. در کنار استفاده‌های توان‌بخشی و تسهیلی برای افراد ناتوان و بیمار، افراد سالم نیز می‌توانند از این ابزارها به منظور افزایش کارایی خود بهره گیرند. اما در کنار مزایای بسیار زیاد آن‌ها، این تکنولوژِی‌ها اثر چشمگیری و قابل بحثی بر روی آینده‌ی بشریت ایجاد خواهند کرد.

یکی از اساسی‌ترین تفاوت‌های ایمپلنت‌های مغزی با عمل‌های پیوند اعضای بدن در این است که جراحی‌های مربوط به پیوند اعضا تنها منحصر به افراد بیمار است در صورتی که ایمپلنت‌ها قابل استفاده برای تمامی افراد می‌باشند. ارتقا و افزایش کارایی انسان‌ها از جمله مهم‌ترین چالش‌های اخلاقی پیش روی تکنولوژِی ایمپلنت‌های مغزی است. یکی از بنیادی‌ترین سوالات مربوط به مسائل اخلاقی ارتقای کارایی ویژگی انسان این است که آیا در آینده انسان‌ها باهوش‌تر وقوی‌تر از ما خواهند شد؟

ارتقای کارایی و توانایی‌های انسان، چالش‌های مهمی در باب فرهنگ نیز ایجاد می‌کند. برای نمونه، این ارتقا می‌تواند به تغییر معنای نرمال بودن در جامعه نیز منجر شود و در نتیجه افرادی که خود را ارتقا نداده‌اند، غیر نرمال محسوب شوند.

به طور کلی هرچند تکنولوژی ایمپلنت‌ها از مزایای بسیار زیادی برخوردارند و آینده‌ی روشنی درانتظار آن‌هاست، اما باید توجه داشت که اثرات منفی و مخاطرات آن‌ها بر اشخاص و فرهنگ‌ها هنوز شناخته شده نیست و نیاز به تحقیق و بررسی دقیق و طولانی مدت دارد. اگر سیگنال ها بتوانند از راه دور از مغز به رایانه منتقل شوند و دوباره به عقب برگردند ، چه کسی مسئول اقدامات آن شخص است ، به ویژه اگر مرتکب جرمی شود؟

آینده :

رابط های تهاجمی به افراد معلول کمک می کند تا دستگاه های خارجی را کنترل کرده و با افراد دیگر ارتباط برقرار کنند. ما بر این باوریم که فناوری های ارتباطی آینده مبتنی بر رابط های مغز و رایانه خواهند بود که سیگنال های مغزی را خوانده و آنها را به پیام ترجمه می کنند ، سپس به تلفن های همراه یا سایر دستگاه ها ارسال می شوند. بعلاوه ، رابطهای تهاجمی مغز و ماشین امکان برقراری ارتباط مستقیم بین افراد را با افکار آنها فراهم می کند.

توانایی فنآوری برای به دست آوردن فعالیت الکتروفیزیولوژیکی جمعیت های سلولهای عصبی قشر مغز از طریق دستگاه های قابل کاشت مزمن منجر به پیشرفت های چشمگیری در زمینه رابط های مغز و رایانه شده است. پیشرفت های اخیر در این زمینه با پیشرفت های میکرو الکترونیک یکپارچه ، ارتباطات بی سیم ، علوم مواد و علوم اعصاب محاسباتی صورت گرفته است.