خواندن ذهن با کمک امواج اولتراسوند، تکنیکی کم تهاجمی جهت رمز گشایی از فعالیت‌های مغز

مقدمه :

هنگامیکه در حال مطالعه این مقاله هستید در مغز شما چه اتفاقاتی رخ می‌دهد؟ به عبارتی دیگر، کدام نواحی از مغز شما فعال است، کدام نورون‌ها با کدامین نورون‌های دیگر در تعامل هستند و چه سیگنال‌هایی به عضلات شما میفرستند؟. رابط‌های مغز و ماشین (BMI)، دستگاه‌هایی قدرتمند جهت بازگرداندن عملکرد افراد کم توان و فلج می‌باشند. امروزه با بهره‌گیری از پیشرفت‌های قابل توجه در فناوری ثبت عصبی، قدرت محاسباتی و درک سیگنال‌های عصبی و ترکیب این پیشرفت‌ها در طراحی رابط‌های مغز و ماشین، باعث گردیده است تا افراد معلول با درجه‌های شدید معلولیت، قادر باشند تا دستگاه‌هایی مانند رایانه‌ها و یا اندام‌های روباتیک را کنترل نمایند.با این حال، رابط-های مغز و ماشین رایج به تکنیک‌های ثبت تهاجمی نیاز دارند و بنابر این فقط برای جمعیت‌های خاص در دسترس می‌باشند. در این مقاله، یک رویکرد تصویر برداری عصبی با حداقل میزان تهاجمی بودن و مبتنی بر تصویر برداری اولتراسوند عملکردی (fUS) ، می‌تواند برای شناسایی و رمزگشایی سیگنال‌های عصبی که جهت ایجاد حرکت تولید می‌شوند، در رابط‌های مغز و ماشین موجود به کار گرفته شود. در این پژوهش از گروه پستانداران غیر انسان، شامل گروه میمون‌ها، جهت آموزش استفاده گردیده است تا این حیوانات حرکات هدایت شده با حافظه را انجام دهند، در حالیکه از تصویر برداری fUS برای ثبت تغییرات در حجم خون مغز، از ناحیه Posterior Parietal Cortex استفاده شده است. با استفاده از سیگنال‌های همودینامیک به دست آمده در طول برنامه ریزی حرکت، حرکات نشاندار چپ و راست را طبقه بندی نموده‌اند و امکان ایجاد رابط مغز و ماشین اولتراسونیک را فراهم نموده‌اند.

این نتایج نشان می‌دهند که رابط عصبی مبتنی بر fUS از رزولوشن، حساسیت و میدان دید اولتراسوند بالایی برخوردار است و دیگر نیاز به باز نمودن و شکست استخوان جمجه از جمله Dura و یا نفوذ به صورت فیزیکی به بافت مغز نمی‌باشد.

بخش اصلی:

نگاشت فعالیت عصبی به رفتارهای متناظر، هدف اصلی دانشمندان علوم اعصاب است که رابط‌های مغز و ماشین (BMI) را توسعه می‌دهند. رابط‌های مغز ماشین، دستگاه‌هایی هستند که فعالیت مغز را می‌خوانند و تفسیر می‌کنند و دستورالعمل‌ها را به رایانه و یا ماشین منتقل می‌کنند. اگرچه ممکن است این امر به یک داستان علمی - تخیلی شبیه باشد اما امروزه، رابط‌های مغز و ماشین موجود می‌توانند یک فرد فلج را به یک بازوی رباتیک متصل نمایند. این دستگاه‌ها فعالیت عصبی و اهداف فرد را تفسیر می‌کنند و بازوی رباتیک را به همین ترتیب حرکت می‌دهند.

اصلی‌ترین محدودیت برای توسعه‌ی BMI این است که دستگاه‌های مذکور برای خواندن فعالیت‌های عصبی به اعمال جراحی تهاجمی مغز احتیاج دارند. اما اخیرا در سال ۲۰۲۱ نوع جدیدی از BMI با حداقل میزان تهاجمی بودن برای خواندن فعالیت مغز، در اهداف مرتبط با برنامه ریزی حرکت، ایجاد شده اند.

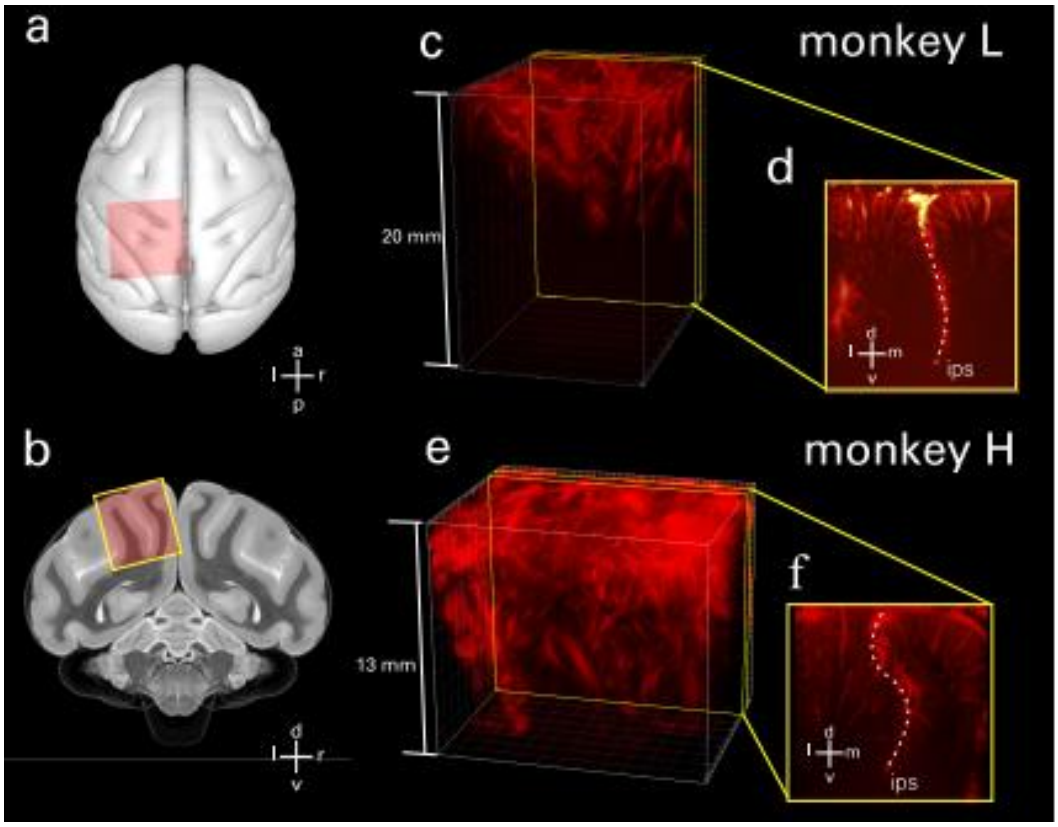
در این روش با استفاده از فناوری اولتراسوند عملکردی (fUS)، میتوان با دقت ۱۰۰ میکرومتر (اندازه یک نورون تقریبا ده میکرومتر است) فعالیت مغز را از مناطق دقیق اعماق مغز ترسیم نمود. فناوری جدید fUS گامی مهم در ایجاد رابط‌های مغز و ماشین (BMI) کم تهاجمی و در عین حال بسیار قدرتمند است. Summer Norman [1] ، محقق فوق دکتری در آزمایشگاه اندرسن و مسئول این مطالعه جدید می‌گوید: ((انواع مختلف BMI های تهاجمی می‌توانند حرکت را به افرادی که توانایی حرکت خود را به دلیل آسیب‌های ناشی از حوادث و یا بیماری‌های عصبی، از دست داده‌اند، بازگرداند.)). متاسفانه تنها تعداد محدودی که دارای شدیدترین انواع ناتوانی‌ها می‌باشند، واجد شرایط می‌باشند و مایل به کاشت الکترود در مغز خود می‌باشند. روش اولتراسوند عملکردی یک روش جدید فوق‌العاده هیجان انگیز برای ثبت فعالیت دقیق مغز، بدون آسیب رساندن به بافت مغز است.

از ویژگی‌های مهم این فعالیت پژوهشی این است که این تیم از دانشمندان توانسته‌اند محدودیت‌های تصویر برداری عصبی اولتراسوند (UltraSound Nueroimaging) را پشت سر بگذارند و از اینکه در این روش می‌توانند حرکت (movement) را پیش‌بینی کنند، باعث شگفتی شده‌اند. هیجان‌انگیز تر این است که fUS یک تکنیک جدید با پتانسیل بسیار زیاد است و به عنوان نخستین قدم در ارائه‌ی BMI با عملکرد بالا و اثر تهاجمی کمتر برای جامعه افراد بیشتر، قابل ارائه می‌باشد.

به طور کلی، همه‌ی ابزارهای اندازه‌گیری فعالیت مغز، دارای ایرادات و اشکالاتی هستند. الکترودهای کاشته شده (الکتروفیزیولوژی) می‌توانند به طور بسیار دقیق فعالیت را در سطح تک نورون‌ها اندازه‌گیری نمایند، اما باید به این نکته توجه داشت که نیاز به کاشت این الکترودها در مغز انسان، می‌باشد. تکنیک‌های غیر تهاجمی مانند تصویر برداری تشدید مغناطیسی عملکردی (fMRI) می‌توانند از تمام مغز تصویر برداری نمایند اما به ماشین‌آلات حجیم و گران قیمت نیاز دارند. الکتروانسفالوگرافی (EEG) نیازی به اعمال جراحی ندارند، اما فقط می‌تواند فعالیت را در رزولوشن فضایی پایین (Low Spatial Resolution) ، اندازه‌گیری نمایند. اولتراسوند با انتشار پالس‌هایی با فرکانس بالا و اندازه‌گیری چگونگی انعکاس ارتعاشات صوتی در سراسر یک ماده، مانند بافت‌های مختلف بدن انسان، فعالیت می‌نماید. صوت با سرعت‌های متفاوتی از این بافت‌ها عبور می‌کند و در مرزهای بین آن‌ها منعکس می‌شود. در این تکنیک معمولا برای عکسبرداری از جنین در رحم مادر و سایر تصویربرداری‌های تشخیصی استفاده می‌گردد. اولتراسوند همچنین می‌تواند حرکت داخلی اندام‌ها را نیز آشکار نماید و به صورت حس شنوایی، این حرکات را به پزشک انتقال دهد. برای مثال، گلبول‌های قرمز خون با نزدیک شدن به منبع امواج اولتراسوند، باعث افزایش گام صدا می‌شوند و با دور شدن آن‌ها این صدا کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری این پدیده به محققان این امکان را می‌دهد که تغییرات کوچک در جریان خون مغز را تا مقیاس ۱۰۰ میکرومتر (در مقیاس عرض موی یک انسان) ثبت نمایند.هنگامی که بخشی از مغز فعال‌تر می‌شود، جریان خون به آن ناحیه افزایش می‌یابد.

سوال کلیدی در این پژوهش این است که اگر تکنیکی مانند اولتراسوند عملکردی (fUS) داشته باشیم که تصاویری با وضوح بالا در فضا و در طول زمان از دینامیک جریان خون مغز به ما دهد، آیا اطلاعات کافی از این روش تصویربرداری برای رمزگشایی اطلاعات مفید در مورد رفتار (Behavior) به دست خواهد آمد یا خیر؟.

جواب این پرسش مثبت است. این تکنیک تصاویر دقیقی از دینامیک سیگنال‌های عصبی در ناحیه مورد نظر ما تولید می‌کند که با سایر تکنیک‌های غیر تهاجمی مانند روش fMRI قابل مشاهده نبوده است. این فناوری با آزمایش بر روی گونه پستانداران از خانواده میمون‌ها توسعه یافت، که به این حیوانات آموزش داده شد تا کارهای ساده‌ای را انجام دهند که شامل حرکت دادن چشم یا بازوها در جهت‌های خاص در هنگام ارائه‌ی نشانه ها و علامت‌های ویژه و مخصوص بوده است. هنگامیکه این حیوانات وظایف محوله را به صورت کامل انجام دادند، به کمک فناوری اولتراسوند عملکردی، فعالیت مغز را در منطقه Posterior Parietal Cortex (ناحیه‌ای از مغز که در برنامه‌ریزی حرکت نقش دارد.) اندازه‌گیری می‌نمایند.



تصویر ۱. نمایش تصاویر آناتومیکال کرانیوتومی در محورهای آگزیال و کرونال. چمبرهای ۲۴*۲۴ میلی‌متری در سطح نرمال مغز در بالای جمجه کرانیوتومی شده قرار گرفته‌اند. نقشه‌های سه بعدی عروق برای دو گونه میمون آموزش دیده مشاهده می‌گردد.[۱].

محققین در آزمایشگاه تحقیقاتی Anderson به مدت چندین دهه مناطق Posterior Parietal Cortex را مورد مطالعه و پژوهش قرار داده‌اند و قبلا با استفاده از الکتروفیزیولوژی، نقشه‌هایی از فعالیت مغز در منطقه مورد مطالعه، ایجاد نموده‌اند. جهت ارزیابی صحت اولتراسوند عملکردی، محققان فعالیت تصویربرداری مغز به کمک روش fUS را با داده‌های الکتروفیزیولوژی دقیقی که قبلا به دست آمده مقایسه نمودند.

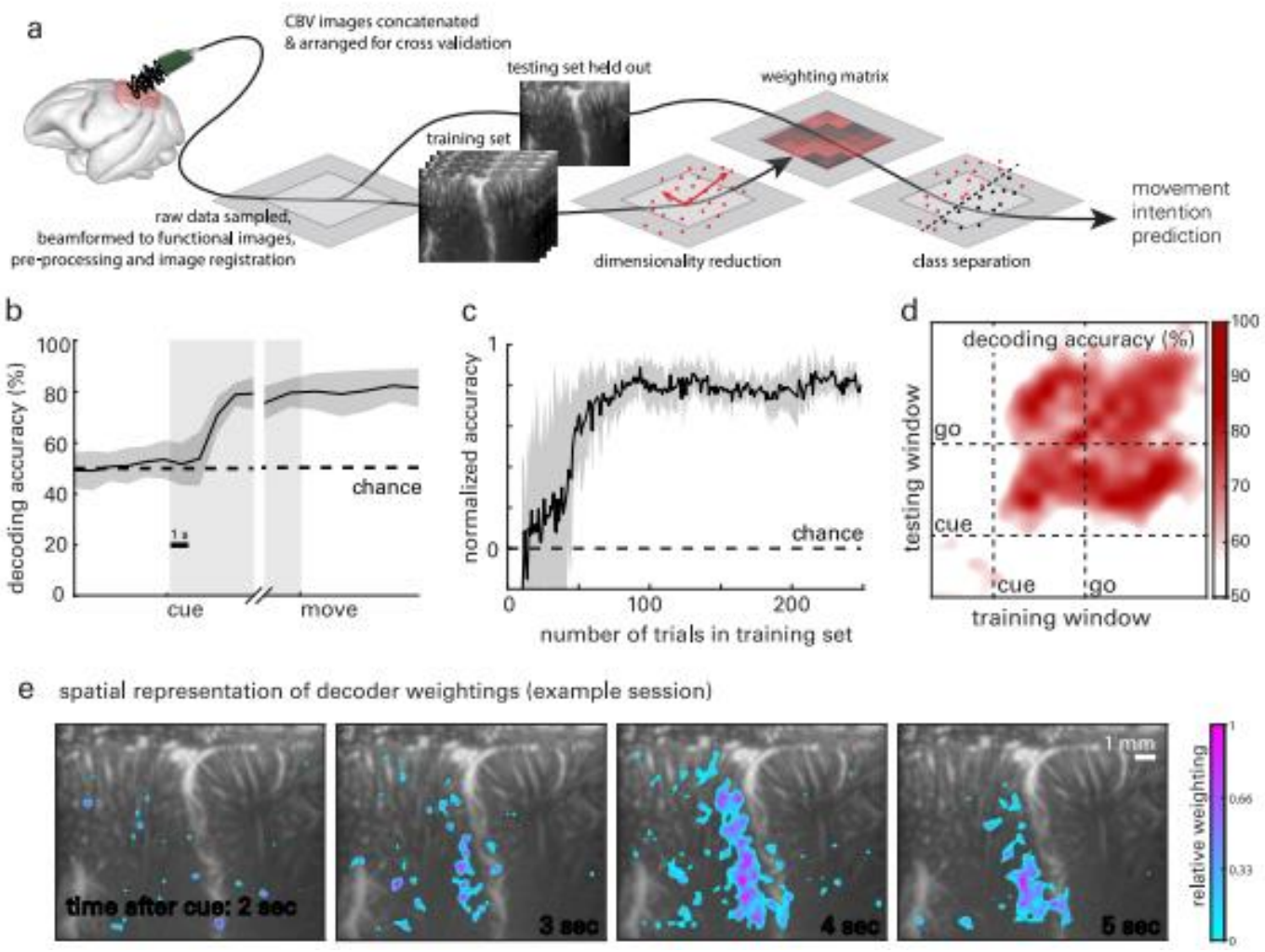
هدف بعدی تیم تحقیقاتی، بررسی این امر بود که آیا می‌توان از تغییرات ایجاد شده ناشی از فعالیت (Activity)، در تصاویر اولتراسوند عملکردی، جهت رمزگشایی تفکرات و ذهن دسته‌ی حیوانات مورد مطالعه، حتی قبل از اینکه این تفکرات باعث ایجاد شروع حرکت شود، استفاده کرد یا خیر؟.

بدین جهت داده‌های تصویر برداری اولتراسوند و Task های مربوطه، توسط یک الگوریتم یادگیری ماشین پردازش شدند، بدین جهت که متوجه شوند که الگوهای فعالیت مغز با کدام Task مرتبط است. هنگامیکه الگوریتم آموزش داده شد، این الگوریتم بر روی داده‌های اولتراسوند زمان حقیقی (Real - Time) جمع‌آوری شده از گروه حیوانات مورد مطالعه، اجرا گردید. این الگوریتم در عرض چند ثانیه پیش‌بینی می‌کرد که گروه حیوانات مورد مطالعه قرار است چه رفتاری انجام دهند. به عنوان مثال نمونه‌ای از این رفتارها عبارتند از: حرکت چشم، جهت حرکت به سمت راست یا چپ و زمان دقیق قصد انجام حرکت در این گروه حیوانات.

از دیگر محققین این گروه،دکتر Maresca می‌باشد که متخصص تصویربرداری اولتراسوند می‌باشد، ایشان در ارتباط با این پژوهش بیان میدارد: ((نخستین نقطه عطف در این پژوهش، نشان دادن این بود که اولتراسوند می‌تواند سیگنال‌های مغز مربوط به تفکر برنامه‌ریزی یک حرکت فیزیکی را ثبت نماید. تصویربرداری الوتراسوند عملکردی قادر است این سیگنال‌ها را با حساسیت ۱۰ برابر بیشتر و رزولوشن بهتر تسبت به fMRI ثبت نماید.)).

رابط‌های مغز و ماشین با رزولوشن بالا که در زمان حال رایج می‌باشند، از آرایه‌های الکترودی استفاده می‌نمایند که نیاز به اعمال جراحی مغز دارند. در این اعمال جراحی نیاز به باز نمودن سخت شامه (Dura Mater) و کاشت الکترودها به صورت مستقیم در مغز می‌باشد. [Dura ، غشای فیبری قوی بین جمجه و مغز می‌باشد]. این امر درحالی است که سیگنال‌های اولتراسوند می‌توانند از Dura و بافت مغز به صورت غیر تهاجمی عبور نمایند. در این روش تنها نیاز است تا یک پنجره کوچک و با قابلیت عبور اولتراسوند (Ultrasound Transparent Window) در جمجه کاشته شود. این جراحی به طور قابل توجهی نسبت به کاشت الکترود، کم تهاجمی تر است.

اگرچه این تحقیق و پژوهش بر روی گروه پستانداران غیر انسان، انجام شده است اما دکتر Charles Liu ، جراح مغز و اعصاب در USC ، در حال بررسی نحوه انجام و اعمال این تکنولوژی بر روی داوطلبان انسانی است که به دلیل آسیب‌های مغزی تروماتیک ، بخشی از جمجه آن‌ها برداشته شده است. از آنجائیکه امواج اولتراسوند می‌توانند بدون تاثیر از ((پنجره‌های صوتی)) عبور کنند، می‌توان بررسی نمود که چگونه اولتراسوند عملکردی می‌تواند فعالیت مغز را در این افراد اندازه‌گیری و رمز گشایی نماید.



تصویر ۲. فلوچارت مراحل رمزگشایی تصور حرکت در مغز حیوان مورد مطالعه[۱].

منابع :

[1]. Norman, Sumner L., et al. "Single-trial decoding of movement intentions using functional ultrasound neuroimaging." *Neuron* 109.9 (2021): 1554-1566.

[2]. https://authors.library.caltech.edu/.

[3]. Di Ianni, Tommaso, and Raag D. Airan. "Deep-fUS: functional ultrasound imaging of the brain using deep learning and sparse data." *bioRxiv* (2021): 2020-09.

تهیه و تنظیم: مهندس محمدحسین مسعودی