

A Review of the Relationship between Autonomous Intelligent Vehicles and Human-Computer Vision Interactions

Ali Rahimighasemabadi¹, Mohammadreza Zabihi², Farzad Cheraghpour Samavati³

Master's Graduate, Department of Mechanical Engineering, Intelligent Mechanical Systems
Research Laboratory, Pardis Science and Technology Branch, Islamic Azad University,
Tehran, Iran

alirahimi69.irn@gmail.com

Master's Student, Department of Mechanical Engineering, Intelligent Mechanical Systems
Research Laboratory, Pardis Science and Technology Branch, Islamic Azad University,
Tehran, Iran

mohammadreza.zabihi@iau.ir

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Pardis Branch, Islamic Azad
University, Tehran, Iran

farzad.samavati@iau.ac.ir

Abstract

Smart and autonomous vehicles are a smart transportation tool for the well-being of the elderly, patients and people with limited mobility. They connect cars using various technologies, including brain-computer interfaces. In order to receive information about the surrounding environment and examine the data by the embedded computer and make decisions using artificial intelligence and send appropriate commands to the sensors, in order to navigate, detect fixed and moving obstacles, the person with mobility problems does not need to have a companion or manually control the vehicle. The user personalizes all the desired commands and settings. Safe, effective and accurate routing is completely done by the calculations of the embedded computer artificial intelligence tool and sending commands to the sensors.

Keywords

Artificial intelligence, smart transportation, brain-computer interface (BCI), assistive devices, human-computer vision interactions.

مروری بر ارتباط وسایل نقلیه هوشمند خودمختار با تعاملات بینایی انسان و کامپیوتر

علی رحیمی قاسم آبادی^۱، محمدرضا ذبیحی^۲، فرزاد چراغپور سموتی^۳

^۱ دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک آزمایشگاه تحقیقاتی سامانه های مکانیکی
هوشمند، واحد علوم و فناوری پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

alirahimi69.irn@gmail.com

^۲ دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک آزمایشگاه تحقیقاتی سامانه های مکانیکی هوشمند،
واحد علوم و فناوری پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

mohammadreza.zabihi@iaui.ac.ir

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

farzad.samavati@iaui.ac.ir

چکیده

وسایل نقلیه هوشمند و خودمختار، یک ابزار هوشمند حمل و نقل جهت رفاه حال سالمندان، بیماران و افرادی که دارای محدودیت حرکتی هستند میباشد. با استفاده از تکنولوژی های مختلف از جمله ارتباط های ارتباطی مغز و رایانه ها با ماشین ها متصل می کنند. جهت دریافت اطلاعات محیط اطراف و بررسی داده ها توسط رایانه ی تعبیه شده و تصمیم گیری با استفاده از هوش مصنوعی و ارسال فرمان های متناسب به سنسور ها، به منظور جهت یابی، تشخیص موانع ثابت و متحرک، فرد دچار مشکل حرکتی را از داشتن همراه و یا کنترل دستی وسیله نقلیه بی نیاز میکند. مصرف کننده تمام فرمان ها و تنظیمات مورد نظر را شخصی سازی میکند. مسیر یابی ایمن، موثر و دقیق کاملاً توسط محاسبات ابزار هوش مصنوعی کامپیوتری تعبیه شده و ارسال فرامین به سنسور ها انجام میشود.

کلمات کلیدی

هوش مصنوعی، حمل و نقل هوشمند، رابط مغز و کامپیوتر (BCI)، ابزار کمکی، تعاملات بینایی انسان و کامپیوتر.

۱- مقدمه

مستقیماً یک محرک خارجی را کنترل کند. مانند یک بازوی رباتیک. به این معنا که کاربران به طور فعال از سیگنال های مغزی خود استفاده می کنند، چه به صورت ارادی یا از طریق پتانسیل های برانگیخته محرک، برای کنترل یک دستگاه بهره می جویند.

دریافت سیگنال در ابتدا به سیگنال های الکتروانسفالوگرافی (EEG) متکی بود، اما همانطور که در [1] مشخص شد، در طول سال ها، چندین روش دیگر مانند مغناطیسی مغزی، طیف سنجی عملکردی مادون قرمز نزدیک (fNIRS)، تصویربرداری رزونانس مغناطیسی عملکردی (fMRI) مورد بررسی قرار گرفته است. در [2] مروری بر روش های سیگنال مورد استفاده برای BCI ها ارائه می دهد.

رابط های مغز و رایانه (BCIs)، یا به طور کلی، رابط های مغز و ماشین (BMI)، همانطور که از نام ها پیداست، رابط هایی هستند که داده های مربوط به مغز را به رایانه ها یا ماشین ها متصل می کنند. در این فناوری، مغز (معمولاً انسان، اما نه همیشه) به دستگاه های خارجی متصل میشود تا سیگنال های عصبی را به دستوراتی قابل اجرا برای کنترل رایانه ها، اندام های مصنوعی یا سایر تجهیزات تبدیل کند. همانطور که در ابتدا در اواخر دهه ۱۹۹۰ و اوایل دهه ۲۰۰۰ پیشنهاد شد، BCIs/BMI به عنوان فناوری های کمکی مورد هدف قرار گرفتند که کانال های ارتباطی و کنترل عادی بدن انسان (یعنی اعصاب و عضلات محیطی) را دور زده و به ضبط از مغز اجازه می دهد تا

متقابل نامیده می شود و به تفصیل در [9] توضیح داده شده است. این به شدت دقت BCI های واکنشی را بر اساس، به عنوان مثال پتانسیل های برانگیخته بصری در طیف وسیعی از افراد [10]، بهبود بخشیده است. در اوایل دهه ۲۰۱۰، تعریف BCI گسترش یافت تا به اصطلاح "BCI های غیرفعال" را نیز شامل شود. در این مورد، فعالیت عصبی با استفاده از اکتساب سیگنال و مازول های پردازش و تجزیه و تحلیل سیگنال نظارت می شود، اما لزوماً نیازی به بازخورد فعال بلادرنگ از طریق محرک ها ندارند، بلکه به خواندن وضعیت ذهنی ضمنی کاربر (مثلاً سطح توجه) نیاز دارند. خط چین سبز در شکل ۱ بلوک های درگیر در یک BCI غیرفعال را نشان می دهد. این تعریف اصلاح شده به این صورت است: «رابط مغز و رایانه سیستمی است که فعالیت سیستم عصبی مرکزی (CNS) را اندازه گیری می کند و آن را به خروجی مصنوعی تبدیل می کند که جایگزین، بازایی، تقویت، مکمل یا بهبود خروجی طبیعی CNS می شود و در نتیجه تعاملات مداوم بین دستگاه های عصبی مرکزی را تغییر می دهد» [11].

در این فصل، پیش زمینه مختصری از BCI های فعال/واکنشی، غیرفعال و ترکیبی ارائه می کنیم، و پس از آن شرحی از پیشرفته ترین فناوری های امروزی در هر یک از این حوزه ها نیز ارائه می کنیم. به عنوان کاربردهای نوظهور و چالش های تحقیقاتی. هدف از این بحث ارائه دیدگاهی مختصر از این موضوعات به خواننده و در صورت لزوم، ارجاع خواننده علاقه مند به آثار منتشر شده است که دید عمیق تری در مورد مفاهیم و ایده های مختلف ارائه می دهد.

۲- تاریخچه

با اختراع الکتروانسفالوگرام (EEG) در اوایل قرن بیستم توسط هانس برگر [12] تخیل انسان را از ارتباط از طریق فعالیت مغزی روشن کرد. عبارت "رابط مغز و کامپیوتر" برای سیستمی که مغز انسان و کامپیوتر را به هم متصل می کند توسط ویدال در سال ۱۹۷۷ معرفی شد، که اولین برنامه BCI را با یک شیء مکان نما بر روی صفحه نمایش کامپیوتر که با استفاده از EEG کنترل می شود، ارائه کرد. از آن زمان به بعد، EEG روش اصلی مورد استفاده برای به دست آوردن سیگنال های مغزی باقی مانده است، علیرغم این واقعیت که سیگنال های EEG نویز، غیر ثابت، پیچیده و با ابعاد بالا هستند [13]. در ادامه، درک بشر از ارتباط الکتریسته با عملکرد مغز به تدریج عمیق تر شد [14]. در این میان، سه مطالعه مهم در آغاز قرن بیستم انجام گرفت:

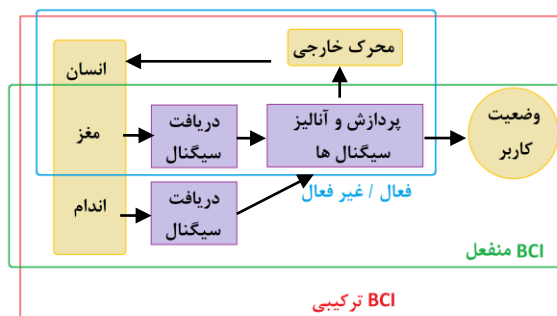
نخستین پژوهش توسط ولادیمیر ولادیمیریوچ پراویدچ-نمینسکی در سال ۱۹۱۳ صورت گرفت که اولین عکس از پتانسیل های الکتریکی درون مغز یک حیوان را ثبت کرد.

بلوک بعدی در یک سیستم BCI شامل مازول پردازش و تجزیه و تحلیل سیگنال است که در آن مصنوعات سیگنال حذف می شوند، بینش های مرتبط از سیگنال ها استخراج می شوند، و سپس با استفاده از یک الگوی یادگیری ماشین به یک تصمیم نگاشت می شوند. پارامترهای استخراج شده اغلب «ویژگی ها» نامیده می شوند و به روش سیگنال مورد استفاده بستگی دارند [3] و [4]. اخیراً، با پیشرفت در یادگیری عمیق و شبکه های عصبی عمیق، این مراحل با یک شبکه عصبی عمیق جایگزین شده اند. یک بررسی را می توان در [5] یافت.

رابطهای مغز-رایانه بر اساس نحوه تعامل با مغز به دو دسته تقسیم میشوند:

تهاجمی (Invasive): شامل الکترودهایی است که با جراحی روی سطح یا داخل مغز کار گذاشته میشوند.

غیرتهاجمی (Non-invasive): از حسگرهای خارجی مانند الکترودهای EEG برای ثبت سیگنالهای مغزی استفاده میکنند. با وجود ایمنی و کاربردی بودن بیشتر، این روشها با مشکلاتی مانند افت کیفیت سیگنال و نویزهای محیطی مواجه اند که دقت تفسیر و کاربرد را کاهش میدهد.

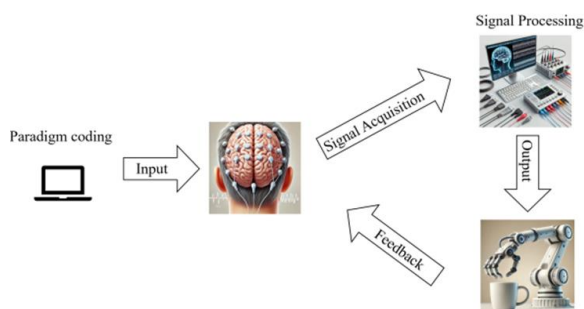


شکل (۱): بلوک دیاگرام انواع مختلف BCI، از جمله فعال/غیر فعال (آبی)، غیرفعال (سبز)، و ترکیبی (قرمز).

در نهایت، خروجی های طبقه بندی کننده می توانند اهداف متعددی را انجام دهند. در BCI های فعال/غیر فعال کلاسیک، برای کنترل محرک هایی که به عنوان بازخورد به کاربر عمل می کنند، استفاده می شود. اینها معمولاً شامل اسکلت های بیرونی روباتیک، نشانگرهای رایانه، اندام های روباتیک، هواپیماهای بدون سرنشین، صندلی های چرخدار [6] و با کمک تحریک الکتریکی عملکردی، ماهیچه های کاربر هستند. همانطور که در [7] مشخص شد، کنترل قابل اعتماد یک BCI برای همه مناسب نیست و اصطلاح BCI بی سواد برای توصیف کسانی که قادر به کار با BCI نیستند استفاده شده است. این اصطلاح مورد انتقاد قرار گرفته است زیرا فرض می کند که این موضوع مربوط به عدم برخورداری کاربران از ویژگی های فیزیولوژیکی یا عملکردی مورد نیاز برای عملکرد BCI است. ادبیات جدیدتر نشان داده است که کاربران و BCI ها باید با هم "یاد بگیرند" [8]، مفهومی که یادگیری

۲-۱- اجزای سیستم های BCI

شکل 3 نمای شماتیک یک سیستم رابط مغز و رایانه (BCI) را نشان می دهد. اجزای سیستم های BCI را می توان به چهار بخش اصلی تقسیم کرد:



شکل (۳): معماری سیستم BCI

۲-۱-۱- دریافت سیگنال

کارایی یک سیستم BCI عمدتاً به ماژول دریافت سیگنال آن وابسته است؛ همچنین این ماژول نقش کلیدی ایفا می کند، چرا که این سیستم وظایف ذهنی یا محرک های خارجی مورد استفاده برای ایجاد الگوهای متمایز سیگنال مغز و ثبت سیگنال های مغزی را تعریف می کند.

۲-۱-۲- پردازش

این بخش با استفاده از روش ها و الگوریتم های تخصصی، فعالیت مغزی ثبت شده را تحلیل کرده و عملیات مورد نظر کاربر را تفسیر می کند.

۲-۱-۳- خروجی

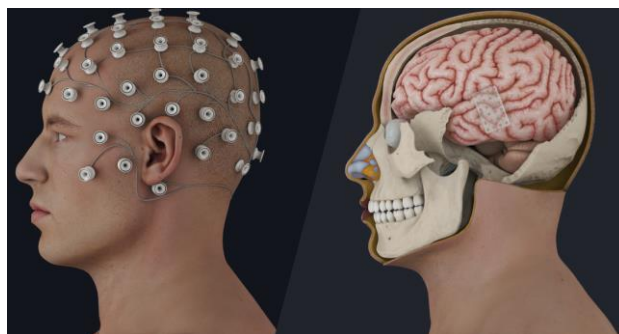
هدف این بخش، اجرای عملیات مورد نظر کاربر است که معمولاً از طریق یک بازوی رباتیک یا صفحه کلید مجازی با استفاده از اطلاعات پردازش شده در مرحله قبل محقق می شود.

۲-۱-۴- فیدبک

این بخش، کاربر را از تفسیر سیستم نسبت به عملیات مورد نظرش آگاه می کند و نتایج نهایی اجرا را از طریق اشکال مختلف حسی مانند بازخورد بصری یا شنیداری انتقال می دهد. این ویژگی امکان تنظیم و اصلاح را فراهم کرده و از طراحی حلقه بسته (closed-loop) پشتیبانی می کند.

۲-۲- BCI های فعال / واکنشی

BCI فعال خروجی های خود را از فعالیت مغزی که به طور مستقیم و آگاهانه توسط کاربر کنترل می شود، مستقل از رویدادهای خارجی، برای کنترل یک برنامه به دست می آورد. رایج ترین کار ذهنی مورد استفاده، تصویرسازی حرکتی است، جایی که فرد تصور می کند دست ها و پاهای خود را حرکت می دهد و این حرکات تصویری یک پاسخ مرتبط با رویداد (ERP) روی



شکل (۲): سیستم ۱۰-۲۰ قرار گیری الکتروود های EEG

دومین مطالعه توسط هانس برگر انجام شد که در سال ۱۹۲۹ موفق به کشف امواج آلفا و بتا در مغز شد [15].

سومین مطالعه مهم در سال ۱۹۴۷ انجام شد. در این پژوهش، سیستم ۱۰-۲۰ برای قرارگیری الکتروود های EEG معرفی گردید که امروزه به صورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش، الکتروودها بر روی پوست سر به گونه ای قرار می گیرند که فاصله هر یک از دیگری ۱۰ یا ۲۰ درصد از کل فاصله طولی یا عرضی سر باشد. [16]

اولین BCI ها عمدتاً به عنوان ابزارهای ارتباطی برای حمایت از بیماران شدیداً آسیب دیده توسعه داده شدند، اما برنامه های کاربردی مدرن BCI همچنین ممکن است برای جایگزینی، بازبایی، تقویت، تکمیل یا بهبود خروجی های طبیعی سیستم عصبی مرکزی استفاده شوند. سیستم های BCI مدرن را می توان به روش های مختلفی دسته بندی کرد، به عنوان مثال. وابسته/مستقل، برون ز/ا درون ز، همزمان/ناهمزمان، یا تهاجمی/غیر تهاجمی، افراد علاقه مند برای اطلاع از جزئیات بیشتر به [17] مراجعه کنند.

در اینجا، ما بر طبقه بندی نوع مدالیته مورد استفاده و کاربرد هدفمند تمرکز می کنیم و آنها را فعال/واکنشی، غیرفعال و یا ترکیبی می سازیم. جدول ۱ چند نمونه معرف و حوزه های کاربردی برای این انواع مختلف BCI را خلاصه می کند.

جدول (۱) : نمونه های معرف، کاربردهای موجود و در حال ظهور انواع

مختلف BCI.

BCI type	Emerging applications	Existing applications	Representative examples
Active	Exoskeletons	Wheelchair control, stroke rehabilitation, gaming	Mental imagery: motor, word generation, mental rotation, subtraction, singing, navigation, and face imagery; ErrPs
Passive	Affective neurofeedback, VR gaming	Neuromarketing, quality assessment, neuroeconomics, arts, adaptive interfaces, BCI error correction	Mental workload, stress, attention, fatigue, engagement, ErrP
Hybrid	Aviation, VR gaming	Environment robustness, improved BCI accuracy, wheelchair control	Pure (e.g. SSVEP and hemoglobin concentration), physiological (e.g. heart rate/P300), mixed (e.g. joystick/ERP)

در کانون توجه قرار داده است، زیرا مزایایی را نسبت به سیستم های مبتنی بر EEG ارائه می دهد، مانند کاهش حساسیت به مصنوعات حرکتی. در چند سال گذشته، تعدادی از سیستم های BCI غیرفعال مبتنی بر fNIRS پیشنهاد شده اند [28]. با این حال، اغلب اوقات، با توجه به وضوح زمانی ضعیف سیستم های fNIRS، آنها در ترکیب با سیستم های EEG استفاده می شوند که وضوح فاصله زمانی خوب (اما فواصل فضایی ضعیف) ارائه می دهند. این سیستم های ترکیبی "هیبرید" نامیده می شوند و تمرکز بخش بعدی هستند.

۲-۴- BCI های ترکیبی

BCI های ترکیبی (hBCI) به روش های متعددی متکی هستند که حداقل یکی از آنها BCI است [29]. BCI های ترکیبی را می توان بر اساس روش های مورد استفاده طبقه بندی کرد، از جمله (الف) hBCI خالص، که در آن از روش های مختلف سیگنال عصبی استفاده می شود (مانند SSVEP و ERP از EEG یا P300 از EEG و غلظت هموگلوبین اکسیژنه از fNIRS)، (ب) hBCI فیزیولوژیکی، که در آن یک مدالیته عصبی با یک روش غیر عصبی دیگر (مانند ضربان قلب، EMG و نگاه چشم) همراه است. (پ) hBCI مختلط، که در آن یک سیگنال غیر روانی فیزیولوژیکی با یک سیگنال عصبی همراه است (مثلاً پاسخ جوی استیک یا سیگنال شتاب سنج). BCI های ترکیبی معمولاً ترکیبی از دو BCI فعال یا یک فعال و یک غیرفعال هستند، اگرچه hBCI های غیرفعال - غیرفعال وجود دارند و برای بهبود استحکام نظارت بر وضعیت ذهنی با استفاده از مکمل بودن روش های سیگنال مختلف پیشنهاد شده اند.



شکل (۴): جمع آوری داده های EEG (الکتروانسفالوگرافی) [30]

در رویکردهای "مکمل"، سیگنال ها در سطوح ویژگی یا تصمیم ترکیب می شوند تا دقت و یا استحکام BCI را بهبود بخشند. به عنوان مثال، در [19]، ویژگی های EEG و fNIRS برای بهبود دقت کلی فعال BCI ترکیب شدند، از این رو، منجر به یک hBCI خالص شد. در [31]، به نوبه خود، سیگنال های fNIRS با سیگنال های قلبی و تنفسی ترکیب شدند تا سیستم فعال BCI را در برابر عوامل حواس پرتی و محیطی قوی تر کنند. این یک hBCI فیزیولوژیکی تشکیل می دهد. علاوه بر این، در [32]، hBCI های فیزیولوژیکی به ترتیب برای نظارت بر وضعیت ذهنی منفعل بر حجم کار

قشر حسی حرکتی ایجاد می کند. فعال سازی توسط BCI شناسایی می شود و بازخورد مستقیم از طریق تحریک عضلانی، برای تأیید تصمیم به کاربر داده می شود [18]. انواع دیگر تصویرسازی ذهنی نیز رایج است، از جمله تولید کلمه، چرخش ذهنی، تفریق، آواز خواندن و مسیریابی، و تصویرسازی چهره [19].

یک BCI واکنشی، به نوبه خود، خروجی های خود را از فعالیت مغز ناشی از واکنش به تحریک خارجی می گیرد، که به طور غیرمستقیم توسط کاربر برای کنترل یک برنامه مدوله می شود. به عنوان مثال، پتانسیل های برانگیخته P300 و پتانسیل های برانگیخته بصری حالت پایدار (SSVEP)، پرکاربردترین رویکردهای BCI واکنشی هستند [20].

BCI SSVEP ها به نوبه خود بر این اصل تکیه می کنند که وقتی شبکه توسط یک محرک بصری که با فرکانس خاصی چشمک می زند برانگیخته می شود، مغز فعالیت الکتریکی را در همان فرکانس تولید می کند، که سپس می تواند توسط یک BCI با قرار دادن اشیاء روی یک صفحه، که هر کدام با سرعت متفاوتی سوسو می زنند، می توان تشخیص فرکانس های مختلف را به دستورات مختلف تبدیل کرد. به عنوان مثال، چهار فلش که با سرعت های مختلف چشمک می زند می تواند برای هدایت یک ربات به یکی از چهار جهت مختلف استفاده شود [21]. اخیراً، پتانسیل های برانگیخته بصری حرکت حالت پایدار (SSMVEP) نیز به عنوان یک روش BCI مورد بررسی قرار گرفته اند. چنین BCI هایی مشابه نمونه های SSVEP عمل می کنند، اما با این تفاوت اصلی که محرک SSMVEP به آرامی از نظر ظاهری با یک حرکت پیوسته تغییر می کند (بر خلاف فلاش های سریع)، و نشان داده شده است که این باعث کاهش خستگی کاربر می شود [22].

۲-۳- BCI های غیرفعال

BCI های غیرفعال الگوهای فعالیت ذهنی را کنترل می کنند که به کنترل ارادی مانند BCI های فعال مربوط نمی شود، بلکه در عوض به حالات ذهنی ضمنی کاربر برای بهبود تعامل انسان و ماشین مربوط می شود. از چنین رابط هایی به عنوان BCI های عاطفی یا شناختی نیز یاد می شود و خواننده علاقه مند برای جزئیات بیشتر میتواند به [23] مراجعه کند.

پتانسیل های مرتبط با خطا (ErrP)، به عنوان مثال امضاهای عصبی نماینده پردازش خطا (به عنوان مثال کاربر یک انتخاب اشتباه را درک می کند) نیز توسط برخی به عنوان یک روش BCI غیرفعال طبقه بندی شده است که برای نظارت استفاده می شود، به عنوان مثال حالات انسان در تعاملات انسان و ربات [24]. یا برای پیش بینی خطاهای توجه شنوایی در خلبانانی در طول پرواز [25]. با این حال، در برنامه های دیگر، آنها به عنوان یک روش BCI فعال در نظر گرفته می شوند، زیرا ErrP های شناسایی شده برای پاک کردن خودکار خطاهای ایجاد شده توسط BCI فعال استفاده می شوند که همچنین می تواند منجر به بهبود نرخ انتقال اطلاعات BCI شود. مروری بر استفاده از ErrPs برای BCI ها را می توان در [26]، و استفاده از آنها در برنامه های کاربردی فعال و غیرفعال را می توان در [27] یافت.

در حالی که EEG هنوز روش اصلی مورد استفاده برای BCI های غیرفعال باقی می ماند، ظهور دستگاه های fNIRS قابل حمل این روش را

برای سوالات ساده بله/خیر پاسخ دهد و نشان داده شده است که با موفقیت در بیماران مبتلا به اختلالات هوشیاری آزمایش شده است [37]. علاوه بر سیستم های اصلی P300 و SSVEP، انواع دیگری مانند c-VEP، RVSP نیز وجود دارند که هر کدام پایه عصبی-فیزیولوژیکی خاص خود را دارند [38,39].

۳-۲- BCI های غیرفعال

BCI های غیرفعال در دهه گذشته به عنوان دستگاه های بی سیم محبوبیت پیدا کرده اند و گسترده تر شده اند. BCI غیرفعال بر تشخیص و تفسیر حالت های غیرارادی عاطفی یا شناختی کاربر تمرکز دارند، نه دستورات عمدی آنها. امروزه ما شاهد کاربردهایی در هوانوردی، دریایی، حمل و نقل، نظارت بر عملکرد انسانی، بازاریابی، مدل سازی کیفیت تجربه چندرسانه ای و در محیط های کار هستیم. علاوه بر این، سیستم های EEG به دلیل هزینه نسبی کم، قابل حمل بودن و پیشرفت های اخیر مشاهده شده، محبوب ترین باقی مانده اند. در فناوری "الکتروکسک" با وجود این، سیستم های fNIRS قابل حمل در طول پنج سال گذشته پدیدار شده اند، بنابراین این روش اخیراً گسترش یافته است، به ویژه در شرایطی که مصنوعات حرکتی ممکن است عملکرد سیستم را مختل کنند. مروری بر BCI های غیرفعال برای نوروفیدبک عاطفی را می توان در [40] مشاهده کرد.

همچنین حالت های مختلف دیگری از BCI های غیر فعال علاوه بر نوروفیدبک عاطفی وجود دارد:

سیستم های نظارتی حالت توجه، سیگنال های مغزی کاربر را به صورت بلادرنگ تحلیل می کنند تا سطح توجه فعلی آنها را تعیین کنند [41]. تکنیک های مورد استفاده معمولاً شامل اندازه گیری پتانسیل های وابسته مانند موج P300 است که فرآیندهای توجهی را منعکس می کند.

سیستم های نظارتی حالت خواب به طور پیوسته سیگنال های مغزی کاربر را برای ارزیابی مراحل خواب و کیفیت کلی آن تحلیل می کنند. این سیستم ها می توانند تشخیص دهند کاربر در کدام چرخه خواب (REM یا non-REM) قرار دارد و همچنین رویدادهای مختلف خواب را شناسایی کنند [42]. این اطلاعات برای بهبود کیفیت خواب و تشخیص اختلالات خواب ارزشمند است.

سیستم های نظارتی حالت خستگی، خستگی ذهنی کاربر را با تحلیل بلادرنگ سیگنال های مغزی ارزیابی می کنند. شاخص های خستگی شامل افزایش قدرت موج تتا (۷-۴ هرتز) و کاهش قدرت موج آلفا (۱۳-۸ هرتز) در EEG [43] است. با نظارت بر این تغییرات، سیستم می تواند به بهبود کارایی، پیشگیری از حوادث و بهینه سازی انتخاب های سبک زندگی کمک کند.

سیستم های نظارتی حالت بیهوشی در حین عمل، سیگنال های مغزی بیمار را به صورت لحظه ای تحلیل می کنند تا عمق و حالت بیهوشی را به طور پیوسته ارزیابی کنند. این سیستم ها به متخصصان بیهوشی در نظارت بر سطح هوشیاری بیمار کمک می کنند و ایمنی و اثربخشی بیهوشی در حین عمل را تضمین می کنند [44]. ویژگی های کلیدی EEG شامل الگوهای سرکوب انفجاری و تغییرات در قدرت طیفی است.

۳-۳- BCI هیبریدی

ذهنی و استرس استفاده شد. در نهایت، در [33]، سیگنال های EEG مبتنی بر P300 برای کنترل جهت حرکت ویلچر استفاده شد، در حالی که حسگرهای ناوبری تعبیه شده در خود صندلی برای توقف و یا اصلاحات اضطراری استفاده می شود.

از سوی دیگر، رویکردهای متوالی به عنوان «سوئیچ ها» یا «انتخاب کننده ها» عمل می کنند و به ترتیب برای فعال کردن/غیرفعال کردن یا انتخاب از بین گزینه های چندانگانه از سایر روش ها، به یک مدالیت BCI متکی هستند. به عنوان مثال، در [34]، بسیاری از روش هایی را که برای کنترل ویلچر پیشنهاد شده است، برجسته می کند. به عنوان مثال، کار در [35] یک روش سوئیچ متوالی را پیشنهاد کرد که در آن سیگنال های P300 برای تحریک حرکت ویلچر و به دنبال آن یک BCI مبتنی بر ERP که برای کنترل سرعت استفاده می شود، استفاده شده، بنابراین، یک hBCI متوالی را تشکیل می دهد. در [36]، سیگنال ERD برای کنترل جهت ویلچر (به جلو یا عقب) استفاده شده، که سپس یکی از سه سیستم مکمل ممکن را فعال می کند: ERD/ERS برای چپ/راست، P300 برای شتاب دادن/کاهش سرعت و روشی مبتنی بر پلک زدن برای توقف صندلی چرخدار. از این رو، یک hBCI فیزیولوژیکی را تشکیل می دهد.

۳- پیشرفت ها و برنامه های کاربردی اخیر

پیشرفت در فناوری های حسگر، ابزارهای یادگیری ماشین و خطوط پردازش سیگنال منجر به پیشرفت های بزرگی در فناوری های BCI در دهه گذشته شده است. آخرین ستون جدول ۱ برخی از برنامه های در حال ظهور را فهرست می کند. در اینجا، جزئیات بیشتری در مورد تعدادی از این نوآوری ها ارائه می شود.

۳-۱- BCI های فعال/واکنش

BCI های مبتنی بر تصویرسازی حرکتی اغلب برای توانبخشی سکتی مغزی اندام های فوقانی و تحتانی استفاده می شوند. در این حالت به فرد دستور داده می شود که حرکت خاصی را تصور کند و سیستم BCI آن را تشخیص می دهد. سپس تحریک الکتریکی عملکردی یا یک حرکت اسکلت بیرونی توسط سیستم BCI برای ارائه بازخورد به کاربر ایجاد می شود. این فرآیند بارها برای ایجاد پلاستیسیته مغز، کاهش اسپاستیسیته و بازگرداندن حرکات بیماران تکرار می شود. BCI ها بر اساس توانایی طبیعی مغز در پردازش و پاسخ به اطلاعات بصری طراحی شده اند و از پاسخ های مغزی خاصی که به طور قابل اعتماد با EEG قابل اندازه گیری هستند، بهره می برند. علاوه بر کاربردهای املائی که قبلاً توضیح داده شد، سیستم های BCI مبتنی بر P300 در حال حاضر به عنوان ابزار ارزیابی برای بیماران مبتلا به اختلالات هوشیاری استفاده می شود. در این حالت از تحریکات لمسی ارتعاشی در مچ دست چپ و راست استفاده می شود. به بیمار دستور داده می شود تا ارتعاشات مچ دست چپ یا راست را بشمارد و هنگامی که ارتعاش در دست هدف اتفاق می افتد سیگنال P300 تولید می شود، در حالی که یک پتانسیل استاندارد مرتبط با رویداد برای دست غیرهدف مشاهده می شود. بسته به نتایج، یک BCI می تواند

چارچوب دو بعدی با هم وجود داشته باشند. از آنجا که رانندگان و مسافران در وسایل نقلیه دید محدودی دارند. وسایل نقلیه هوشمند باید به آنها در درک دنیای خارج از وسایل نقلیه کمک کنند. همچنین خودروهای هوشمند نیاز به دریافت دستورالعمل از انسان و برآوردن خواسته های آنها دارند.

۴-۱- بازخورد اطلاعاتی از وسایل نقلیه هوشمند

چرخه عمر وسایل نقلیه هوشمند را می توان به چهار مرحله تقسیم کرد: توسعه وسیله نقلیه، ساخت خودرو، تنظیم اولویت و استفاده از وسیله نقلیه. برای جستجوی وسایل نقلیه هوشمند قابل اعتماد، ایمن و قابل اعتماد، باید از تعاملات تصویری انسان و رایانه استفاده کرد. وسایل نقلیه هوشمند می توانند اطلاعات را از طریق کانال های متعدد مانند تصاویر، صداها و دما به انسان بازخورد دهند. در میان آنها، تصاویر کارآمدترین راه برای نمایش اطلاعات پیچیده هستند. در [51] یک روش برچسب گذاری خارجی برای بهینه سازی نمایش POI در یک صفحه کوچک پیشنهاد می کند.

۴-۲- رانندگی با هدایت انسان

دستورات انسان به ماشین ممکن است نادرست باشد، به خصوص زمانی که انسان هوشیار نیست یا وحشت زده است. با افزایش سطح اتوماسیون، برای ارائه کمک متناسب، وسایل نقلیه هوشمند باید اهداف رانندگان را درک کنند. وسایل نقلیه هوشمند موجود می توانند دستورالعمل های ساده بیان شده توسط صدا یا زبان بدن را درک کنند [52]. در شرایط خاص که راننده قادر به هدایت وسیله نیست، وسایل نقلیه هوشمند باید به سرعت کنترل را به دست گیرند. محققان تلاش کرده اند با نظارت بر حرکات چشم رانندگان وضعیت آنها را استنباط کنند [53].

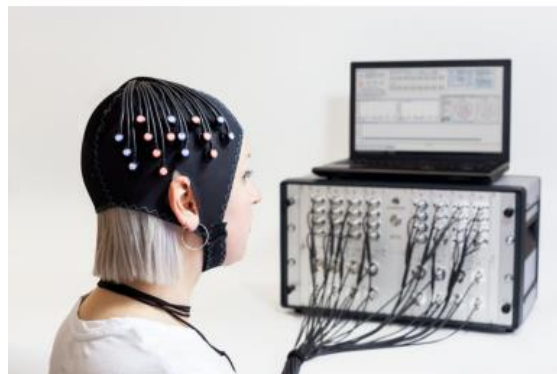
۴-۳- VHCI در وسایل نقلیه

هر وسیله نقلیه هوشمند می تواند از یک سیستم حمل و نقل هوشمند سازمان یافته (ITS) بهره مند شود. داده های ترافیکی عظیم جمع آوری شده توسط حسگرهای مختلف برای ساخت یک سیستم حمل و نقل هوشمند کارآمد به کار گرفته می شود. درک و تجزیه و تحلیل چنین داده هایی نیاز به پشتیبانی تکنیک های تجسم دارد. به عنوان مثال، در [54] یک رویکرد تحلیل بصری برای نظارت بر تراکم ترافیک و جستجوی راه حل های مربوطه پیشنهاد کرد. محققان در [55] یک رابط بصری ایجاد کردند که از برنامه ریزی ترافیک پشتیبانی می کند که بر اساس آن استقرار بیدرنگ وسایل نقلیه هوشمند می تواند در سطح کلان پیاده سازی شود.

۴-۴- VHCI و هوش مصنوعی

فراتر از وسایل نقلیه، رویکردهای هوش مصنوعی (AI) برای کارهای مختلف مرتبط با وسیله نقلیه، از جمله تشخیص چراغ راهنمایی، اجتناب از موانع، و برنامه ریزی مسیر اعمال می شود. با این حال، اکثر رویکردهای هوش مصنوعی به عنوان جعبه سیاه در نظر گرفته می شوند که درک آنها دشوار است. برای ارزیابی عملکرد مدل و درک مکانیک مدل، از رویکردهای

ساخت BCI با یک مدالیتی واحد دارای محدودیت های متعددی است، اما نه محدود به دقت پایین تر، سرعت تشخیص آهسته تر، افزایش حساسیت به برخی مصنوعات (مانند حرکت یا محیط مرتبط)، و تأثیر بیشتر آشفتگی های مختلف (مانند فعالیت و خستگی). رویکردهای ترکیبی با در نظر گرفتن یک دیدگاه چندوجهی در تلاش برای غلبه بر این محدودیت ها هستند. hBCI های خالص مبتنی بر دو یا چند روش EEG همچنان محبوب ترین هستند، به ویژه برای BCI های فعال/واکنش. EEG و fNIRS به نوبه خود نشان داده اند که در مورد BCI های ترکیبی خالص برای هر دو برنامه فعال و غیرفعال محبوب ترین ها هستند. در واقع، برخی از کارها پیشنهاد کرده اند که از EEG و fNIRS در یک رویکرد غیرفعال hBCI فیزیولوژیکی استفاده می شود که در آن اطلاعات ضربان قلب مشتق شده از سیگنال fNIRS به عنوان روش سوم استفاده می شود که دقت بهبود یافته را در اندازه گیری واکنش های احساسی کاربر نشان می دهد. برنامه های کاربردی در هوانوردی، BCI های فعال خارج از آزمایشگاه، کنترل ویلچر و بازی های واقعیت مجازی نمونه ای از کاربردهای اخیر hBCI هستند. [45]



شکل (۵): جمع آوری داده های fNIRS [46]

۴-تاریخچه تعاملات بینایی انسان و کامپیوتر (VHCI)

وسایل نقلیه هوشمند از جنبه های مختلف از جمله اجتناب از برخورد با عابر پیاده، و شناسایی علائم راهنمایی و رانندگی به رانندگان کمک می کنند. تکنیک های پیشرفته، مانند هوش مصنوعی [47] و بلاک چین [48]، برای بهینه سازی خدمات خودکار وسایل نقلیه هوشمند و جایگزینی نیروی انسانی به کار گرفته می شود. با این حال، افزایش سطح خودمختاری و اتوماسیون بالا ممکن است هوشیاری رانندگان را کاهش دهد و باعث تصادف شود. برای پرداختن به این موضوع، حمایت از ارتباط بین وسایل نقلیه هوشمند و انسان ها ضروری است. تعاملات بینایی انسان و کامپیوتر (VHCI) می تواند با بهره گیری از کانال شناخت بصری انسان، تعاملات موثر و کارآمدی را تسهیل کند. دخالت انسان و استقلال وسایل نقلیه هوشمند ابتدا به عنوان متضاد در نظر گرفته شد. با افزایش اتوماسیون، نقش انسان به تدریج جای خود را به وسایل خودمختار داد [49]. این دیدگاه در سال ۲۰۲۰ رد شد. با در نظر گرفتن اینکه انسان و رایانه دارای نقاط قوت مکمل هستند اشنایدرمن [50] امکان جدیدی را پیشنهاد کرد که مشارکت انسانی و استقلال رایانه می توانند در یک

- [4] Lotte F, Bougrain L, Cichocki A, Clerc M, Congedo M, Rakotomamonjy A, Yger F. A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10 year update. *Journal of neural engineering*. 2018 Apr 16;15(3):031005.
- [5] Roy Y, Banville H, Albuquerque I, Gramfort A, Falk TH, Faubert J. Deep learning-based electroencephalography analysis: a systematic review. *Journal of neural engineering*. 2019 Aug 14;16(5):051001.
- [6] Trambaiolli LR, Falk TH. Hybrid brain-computer interfaces for wheelchair control: a review of existing solutions, their advantages and open challenges. *Smart wheelchairs and brain-computer interfaces*. 2018 Jan 1:229-56.
- [7] Allison B, Graimann B, Pfurtscheller G. *Brain-Computer Interfaces: Revolutionizing Human-Computer Interaction*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer; 2010.
- [8] McFarland DJ, Wolpaw JR. Brain-computer interface use is a skill that user and system acquire together. *PLoS biology*. 2018 Jul 2;16(7):e2006719.
- [9] Perdikis S, Millan JD. Brain-machine interfaces: a tale of two learners. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*. 2020 Jul 15;6(3):12-9.
- [10] Volosyak I, Rezeika A, Benda M, Gembler F, Stawicki P. Towards solving of the Illiteracy phenomenon for VEP-based brain-computer interfaces. *Biomedical Physics & Engineering Express*. 2020 Apr 30;6(3):035034.
- [11] Wolpaw JR. Brain-computer interfaces. In *Handbook of clinical neurology* 2013 Jan 1 (Vol. 110, pp. 67-74). Elsevier.
- [12] Berger H. Über das elektroencephalogramm des menschen. *Archiv für psychiatrie und nervenkrankheiten*. 1929;87(1):527-70.
- [13] Lotte F, Congedo M, Lécuyer A, Lamarche F, Arnaldi B. A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces. *Journal of neural engineering*. 2007 Jan 31;4(2):R1.
- [14] Brazier MA. Pioneers in the discovery of evoked potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*. 1984 Feb 1;59(1):2-8.
- [15] Kawala-Sterniuk A, Browarska N, Al-Bakri A, Pelc M, Zygarlicki J, Sidikova M, Martinek R, Gorzelanczyk EJ. Summary of over fifty years with brain-computer interfaces—a review. *Brain sciences*. 2021 Jan 3;11(1):43.
- [16] Silverman D. The rationale and history of the 10-20 system of the International Federation. *American Journal of EEG Technology*. 1963 Mar 1;3(1):17-22.
- [17] Rezeika A, Benda M, Stawicki P, Gembler F, Saboor A, Volosyak I. Brain-computer interface spellers: A review. *Brain sciences*. 2018 Mar 29;8(4):57.
- [18] Marquez-Chin C, Popovic MR. Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review. *Biomedical engineering online*. 2020 May 24;19(1):34.
- [19] Banville H, Gupta R, Falk TH. Mental task evaluation for hybrid NIRS - EEG brain - computer interfaces. *Computational intelligence and neuroscience*. 2017;2017(1):3524208.

VHCI برای تفسیر رویکردهای هوش مصنوعی استفاده می شود. مربع ها خروجی مدل های طبقه بندی چند طبقه را خلاصه می کنند، که به انسان اجازه می دهد عملکرد مدل را مقایسه کرده و نقاط ضعف خود را شناسایی کند. به دنبال بهبود عملکرد، انسان ها نیاز به بهینه سازی معماری مدل دارند. برای حمایت از انسان در بازرسی معماری های پیچیده شبکه های عصبی، TensorFlow Graph Visualizer [56] رابطی را توسعه می دهد که از تکنیک های پیشرفته برای طرح بندی نمودار استفاده می کند. CNN Explainer [57] بیشتر توضیح می دهد که چگونه داده ها در یک شبکه عصبی کانولوشن تبدیل می شوند.

۵- نتیجه

در این مقاله پیشرفت های اخیر در حوزه ی رابط های فعال، واکنشی، غیرفعال و ترکیبی مغز و رایانه (BCIs) را مرور کردیم و برخی از برنامه های موجود و در حال ظهور به نمایش گذاشته شد. BCI ها با استفاده از سیگنال های عصبی، امکان کنترل مستقیم دستگاه های خارجی را فراهم می کنند و در حوزه های پزشکی، توانبخشی، و حتی صنایع پیشرفته مانند رباتیک و هوانوردی کاربرد دارند. از سوی دیگر، VHCI با بهره گیری از پردازش تصویر و هوش مصنوعی، تعامل طبیعی تر و کارآمدتری بین انسان و سیستم های کامپیوتری ایجاد می کند، به ویژه در زمینه هایی مانند وسایل نقلیه هوشمند و سیستم های حمل و نقل. پیشرفت های اخیر در یادگیری ماشین، پردازش سیگنال های عصبی، و فناوری های حسگر، دقت و کارایی این سیستم ها را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده است. با این حال، چالش هایی مانند کاهش نویز سیگنال های غیرتهاجمی، افزایش سرعت پردازش، و بهبود تعامل متقابل انسان و ماشین همچنان باقی است. در آینده، ادغام BCI و VHCI با فناوری های نوظهور مانند واقعیت مجازی و اینترنت اشیا می تواند افق های جدیدی را در تعامل انسان و فناوری بگشاید و زمینه را برای کاربردهای پیشرفته تر در پزشکی، صنعت، و زندگی روزمره فراهم کند. ما با چشم اندازی از جهت های تحقیقاتی آینده، از جمله ارتباطات مغز به مغز و هدست های واقعیت توسعه یافته ادغام شده با BCI، نتیجه گیری می کنیم.

۶- منابع

- [1] Lebedev MA, Nicolelis MA. Brain-machine interfaces: from basic science to neuroprostheses and neurorehabilitation. *Physiological reviews*. 2017 Apr;97(2):767-837.
- [2] Ramadan RA, Vasilakos AV. Brain computer interface: control signals review. *Neurocomputing*. 2017 Feb 5;223:26-44.
- [3] Meinel A, Castaño-Candamil S, Blankertz B, Lotte F, Tangermann M. Characterizing regularization techniques for spatial filter optimization in oscillatory EEG regression problems: Guidelines derived from simulation and real-world data. *Neuroinformatics*. 2019 Apr 15;17(2):235-51.

- [34] Trambaiolli LR, Falk TH. Hybrid brain-computer interfaces for wheelchair control: a review of existing solutions, their advantages and open challenges. *Smart wheelchairs and brain-computer interfaces*. 2018 Jan 1:229-56.
- [35] Rebsamen B, Burdet E, Zeng Q, Zhang H, Ang M, Teo CL, Guan C, Laugier C. Hybrid P300 and Mu-Beta brain computer interface to operate a brain controlled wheelchair. In *Proceedings of the 2nd International Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology 2008 May 13* (pp. 51-55).
- [36] Wang H, Li Y, Long J, Yu T, Gu Z. An asynchronous wheelchair control by hybrid EEG-EOG brain-computer interface. *Cognitive neurodynamics*. 2014 Oct;8(5):399-409.
- [37] Guger C, Spataro R, Pellas F, Allison BZ, Heilinger A, Ortner R, Cho W, Xu R, La Bella V, Edlinger G, Annen J. Assessing command-following and communication with vibro-tactile P300 brain-computer interface tools in patients with unresponsive wakefulness syndrome. *Frontiers in neuroscience*. 2018 Jun 29;12:423.
- [38] Bin G, Gao X, Wang Y, Li Y, Hong B, Gao S. A high-speed BCI based on code modulation VEP. *Journal of neural engineering*. 2011 Mar 24;8(2):025015.
- [39] Wang Z, Healy G, Smeaton AF, Ward TE. A review of feature extraction and classification algorithms for image RSVP based BCI. *Signal processing and machine learning for brain-machine interfaces*. 2018:243-70.
- [40] Trambaiolli LR, Tiwari A, Falk TH. Affective neurofeedback under naturalistic conditions: a mini-review of current achievements and open challenges. *Frontiers in Neuroergonomics*. 2021 May 24;2:678981.
- [41] Nirmala Devi A, Rathna R. EEG data based human attention recognition using various machine learning techniques: a review. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*. 2024 Jan 19;11(7):2299096.
- [42] Ackermann S, Rasch B. Differential effects of non-REM and REM sleep on memory consolidation?. *Current neurology and neuroscience reports*. 2014 Feb;14(2):430.
- [43] Peng Y, Wong CM, Wang Z, Rosa AC, Wang HT, Wan F. Fatigue detection in SSVEP-BCIs based on wavelet entropy of EEG. *Ieee Access*. 2021 Jul 26;9:114905-13.
- [44] Rimbart S, Riff P, Gayraud N, Schmartz D, Bougrain L. Median nerve stimulation based BCI: a new approach to detect intraoperative awareness during general anesthesia. *Frontiers in Neuroscience*. 2019 Jun 19;13:622.
- [45] Gupta R, Banville HJ, Falk TH. Multimodal physiological quality-of-experience assessment of text-to-speech systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2016 Dec 12;11(1):22-36.
- [46] Wikipedia contributors. (2024). Functional near-infrared spectroscopy. In Wikipedia. Retrieved November 17, 2024, from https://en.wikipedia.org/wiki/Functional_near_infrared_spectroscopy
- [20] Volosyak I, Guger C, Gräser A. Toward BCI Wizard-best BCI approach for each user. In *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology 2010 Aug 31* (pp. 4201-4204). IEEE.
- [21] Volosyak I, Schmidt M. Asynchronous control of a spherical robot by means of SSVEP-based brain-computer interface. In *2019 E-Health and Bioengineering Conference (EHB) 2019 Nov 21* (pp. 1-4). IEEE.
- [22] Stawicki P, Rezeika A, Volosyak I. Effects of Training on BCI Accuracy in SSMVEP-based BCI. In *International Work-Conference on Artificial Neural Networks 2021 Jun 16* (pp. 69-80). Cham: Springer International Publishing.
- [23] Mühl C, Allison B, Nijholt A, Chanel G. A survey of affective brain computer interfaces: principles, state-of-the-art, and challenges. *Brain-Computer Interfaces*. 2014 Apr 3;1(2):66-84.
- [24] Ehrlich SK, Cheng G. Human-agent co-adaptation using error-related potentials. *Journal of neural engineering*. 2018 Sep 28;15(6):066014.
- [25] Dehaes F, Rida I, Roy RN, Iversen J, Mullen T, Callan D. A pBCI to predict attentional error before it happens in real flight conditions. In *2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC) 2019 Oct 6* (pp. 4155-4160). IEEE.
- [26] Chavarriaga R, Sobolewski A, Millán JD. Errare machinale est: the use of error-related potentials in brain-machine interfaces. *Frontiers in neuroscience*. 2014 Jul 22;8:208.
- [27] Mousavi M, de Sa VR. Spatio-temporal analysis of error-related brain activity in active and passive brain-computer interfaces. *Brain-computer interfaces*. 2019 Oct 2;6(4):118-27.
- [28] Derosière G, Mandrick K, Dray G, Ward TE, Perrey S. NIRS-measured prefrontal cortex activity in neuroergonomics: strengths and weaknesses. *Frontiers in human neuroscience*. 2013 Sep 19;7:583.
- [29] Pfurtscheller G, Allison BZ, Bauernfeind G, Brunner C, Solis Escalante T, Scherer R, Zander TO, Mueller-Putz G, Neuper C, Birbaumer N. The hybrid BCI. *Frontiers in neuroscience*. 2010 Apr 21;4:1283.
- [30] NBC News learn. (2020, May 5). *Mysteries of the Brain: Brain-Computer Interface* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=p1XQ4uxqxZI>
- [31] Falk TH, Guirgis M, Power S, Chau TT. Taking NIRS-BCIs outside the lab: towards achieving robustness against environment noise. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2010 Sep 27;19(2):136-46.
- [32] Albuquerque I, Tiwari A, Parent M, Cassani R, Gagnon JF, Lafond D, Tremblay S, Falk TH. Wauc: a multi-modal database for mental workload assessment under physical activity. *Frontiers in Neuroscience*. 2020 Dec 1;14:549524.
- [33] Lopes A, Rodrigues J, Perdigao J, Pires G, Nunes U. A new hybrid motion planner: Applied in a brain-actuated robotic wheelchair. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2016 Nov 15;23(4):82-93.

- [47] Xing Y, Lv C, Wang H, Wang H, Ai Y, Cao D, Velenis E, Wang FY. Driver lane change intention inference for intelligent vehicles: Framework, survey, and challenges. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019 Mar 6;68(5):4377-90.
- [48] Von Landesberger T, Brodkorb F, Roskosch P, Andrienko N, Andrienko G, Kerren A. MobilityGraphs: Visual analysis of mass mobility dynamics via spatio-temporal graphs and clustering. IEEE transactions on visualization and computer graphics. 2015 Aug 12;22(1):11-20.
- [49] Li L, Wang FY. Advanced motion control and sensing for intelligent vehicles. Boston, MA: Springer US; 2007 Nov 24.
- [50] Shneiderman B. Human-centered artificial intelligence: Reliable, safe & trustworthy. International Journal of Human-Computer Interaction. 2020 Apr 2;36(6):495-504.
- [51] Gedicke S, Bonerath A, Niedermann B, Haunert JH. Zoomless maps: external labeling methods for the interactive exploration of dense point sets at a fixed map scale. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2020 Oct 13;27(2):1247-56.
- [52] C. T. M. a. K. J. Ackad, "Skeletons and silhouettes: Comparing user representations at a gesture-based large display," in Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2016.
- [53] Ackad C, Tomitsch M, Kay J. Skeletons and silhouettes: Comparing user representations at a gesture-based large display. In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems 2016 May 7 (pp. 2343-2347).
- [54] Lee C, Kim Y, Jin S, Kim D, Maciejewski R, Ebert D, Ko S. A visual analytics system for exploring, monitoring, and forecasting road traffic congestion. IEEE transactions on visualization and computer graphics. 2019 Jun 12;26(11):3133-46.
- [55] Bi H, Mao T, Wang Z, Deng Z. A deep learning-based framework for intersectional traffic simulation and editing. IEEE transactions on visualization and computer graphics. 2019 Jan 3;26(7):2335-48.
- [56] Wongsuphasawat K, Smilkov D, Wexler J, Wilson J, Mane D, Fritz D, Krishnan D, Viégas FB, Wattenberg M. Visualizing dataflow graphs of deep learning models in tensorflow. IEEE transactions on visualization and computer graphics. 2017 Aug 29;24(1):1-2.
- [57] Wang ZJ, Turko R, Shaikh O, Park H, Das N, Hohman F, Kahng M, Chau DH. CNN explainer: learning convolutional neural networks with interactive visualization. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2020 Oct 13;27(2):1396-406.