پردازش سیگنال‌های مغزی

مبانی فیزیک و ریاضی EEG و MEG

ترجمه و تألیف:

دکتر ناصر صمدزاده اقدم

استادیار گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز

ریحانه افغان

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز

ROYAN-PAZHOUH PUBLISHER

انتشارات رویان پژوه

فهرست

◇ **پیشگفتار** **۹**

◇ **فصل ۱: مقدمه** **۱۱**

۱-۱ مغز ۱۲

۱-۲ حالت‌های مغز ۱۶

۱-۳ حالت‌های الکتریکی مغز ۱۷

۱-۴ سیگنال‌های MEG و EEG به عنوان معیاری از حالت‌های مغز ۱۷

۱-۵ پیشینه تاریخی و فنی EEG ۲۲

۱-۶ پیشینه تاریخی و فنی MEG ۲۴

۱-۷ آخرین پیشرفت‌های فناوری MEG و چشم اندازهای آینده ۲۹

۱-۷-۱ مگنتومترهای SQUID با سطح فناوری بالا ۳۰

۱-۷-۲ مگنتومترهای پمپ شونده نوری ۳۰

۱-۷-۳ hyQUIDs ۳۲

۱-۷-۴ سیستم‌های تجمیعی MEG -MRI ۳۲

۱-۷-۵ سیستم‌های MEG جهت اندازه‌گیری در نوزادان و جنین ۳۴

۱-۷-۶ روش‌های حذف مولفه‌های ناخواسته در داده‌ها ۳۶

◇ **فصل ۲: منشا MEG و EEG** **۳۹**

۲-۱ معادلات ماکسول ۳۹

۲-۱-۱ جریان‌های تحت تأثیر و اولیه ۴۱

۲-۲ دوقطبی جریان و لیدفیلد ۴۱

۲-۳ مبانی سلولی میدان‌های الکترومغناطیسی ۴۴

۲-۴ پتانسیل عمل ۴۶

۲-۵ پتانسیل پس‌سیناپسی (PSP) ۴۶
۲-۶ توصیف فعالیت سیناپسی ۴۷
◇ **فصل ۳: مسئله مستقیم ۴۹**
۳-۱ انواع مدل رسانا ۵۱
۳-۲ حالت عمومی ۵۱
۳-۳ میدان در محیط همگن نامتناهی ۵۴
۳-۴ میدان در محیط ناهمگن ۵۶
۳-۵ محاسبه لیدفیلد ۵۹
۳-۶ مدل کروی ۶۰
۳-۷ میدان مغناطیسی در مدل کروی و در مختصات دکارتی ۶۲
۳-۸ میدان مغناطیسی در مدل کروی و در مختصات کروی ۶۳
۳-۹ ساخت مثلث و پتانسیل برداریِ میدان مغناطیسی در مدل کروی ۶۴
۳-۱۰ پتانسیل الکتریکی V در کره‌ی چند لایه و کره همگن ۶۷
۳-۱۱ رسانای همگن نیمه نامتناهی ۶۸
◇ **فصل ۴: جبر خطی و نظریه احتمال در آنالیز داده‌های MEG و EEG ۷۱**
۴-۱ نمادها و اصطلاحات ۷۱
۴-۲ مروری بر جبر خطی در MEG و EEG ۷۳
۴-۳ مروری بر تئوری احتمال مقدماتی ۸۲
۴-۴ حل معادلات خطی دارای نویز ۸۶
۴-۵ حل معادلات نویزی با استفاده از تخمین‌گر ۸۸
۴-۶ راه‌حل MNLS و تنظیم تیخونوف در سایر نُرم‌ها ۹۲
◇ **فصل ۵: آنالیز مؤلفه‌های مستقل (ICA) ۹۵**
۵-۱ اندازه‌گیری داده و فرض ICA ۹۵
۵-۲ پیش پردازش داده در ICA ۹۷
۵-۳ یافتن بردار وزن توسط FastICA ۱۰۰
۵-۴ یافتن تمام بردارهای وزن توسط FastICA (حالت متقارن) ۱۰۶
۵-۴-۱ خلاصه الگوریتم FastICA ۱۰۸
۵-۴-۲ اعمال ICA بر روی داده‌های چند کوششی نایستا ۱۱۰

◇ **فصل ۶: آرتیفکت‌های EEG؛ تشخیص، حذف و تأثیر آن‌ها ۱۱۵**

۶-۱ حذف داده‌ها بر اساس آنالیز مولفه‌های مستقل ۱۱۶

۶-۲ حذف کوشش به دلیل پلک زدن ۱۱۸

۶-۳ حذف کوشش به دلیل حرکت چشم ۱۲۰

۶-۴ حذف کوشش بر اساس EMG در کانال‌های EEG ۱۲۲

۶-۵ حذف کوشش بر اساس عملکرد تکلیف ۱۲۵

۶-۶ حذف کوشش بر اساس EMG دست ۱۲۶

۶-۷ حذف نویز برق شهر ۱۲۸

۶-۸ به افراد مطالعه یاد دهید تا آرتیفکت‌ها را به حداقل رسانند ۱۲۹

◇ **فصل ۷: تفسیر داده‌های MEG و EEG ۱۳۱**

۷-۱ روش‌های تفسیر داده‌های MEG و EEG ۱۳۱

۷-۲ مسئله معکوس ۱۳۳

۷-۳ جواب مسئله معکوس بدون دانش پیشین ۱۳۴

۷-۴ فضای سیگنال و پروجکشن فضای سیگنال (SSP) ۱۳۵

۷-۵ جواب مسئله‌ی معکوس موقع وجود دانش پیشین ۱۳۶

۷-۵-۱ برخی پیش فرض‌های قابل اعمال به منابع مغزی ۱۳۷

۷-۶ داده‌های اندازه‌گیری ۱۴۰

۷-۷ جستجوی یک منبع دوقطبی منفرد ۱۴۴

۷-۸ مسئله معکوس EEG/MEG و جواب آن با روش MNE ۱۴۷

۷-۸-۱ روش‌های MNE نرمال شده به نویز ۱۵۱

۷-۸-۲ تخمین حداقل نُرم با سایر نُرم‌ها ۱۵۳

۷-۹ مسئله معکوس EEG/MEG و جواب آن با الگوریتم LORETA ۱۵۴

۷-۱۰ مسئله معکوس EEG/MEG و جواب آن با الگوریتم sLORETA ۱۵۵

۷-۱۰-۱ بیان sLORETA با فرمول فیلتر مکانی ۱۵۶

۷-۱۱ مسئله معکوس EEG/MEG و جواب آن با الگوریتم FOCUSS ۱۵۹

۷-۱۱-۱ آنالیز و مقداردهی اولیه الگوریتم ۱۶۰

۷-۱۱-۲ تنظیم بایاس ۱۶۱

۷-۱۲ مسئله معکوس EEG/MEG و جواب آن با الگوریتم MCE ۱۶۳

۷-۱۳ مسئله معکوس EEG/MEG و جواب آن با فیلتر مکانی (بیم‌فرمر) ۱۶۴

۷-۱۳-۱ تعیین ضرایب فیلترهای مکانی تطبیقی ۱۶۴

۷-۱۳-۲ پیش نیازهای فرمولاسیون فیلتر مکانی تطبیقی ۱۶۸
۷-۱۳-۳ فیلتر مکانی تطبیقی اسکالر: استخراج جهت بهینه منبع ۱۷۲
۷-۱۳-۴ فیلتر مکانی LCMV ۱۷۵
۷-۱۳-۵ فرمولاسیون برداری فیلتر مکانی تطبیقی ۱۷۶
۷-۱۴ الگوریتم MUSIC در EEG و MEG ۱۸۴
۷-۱۴-۱ داده‌ها در الگوریتم MUSIC ۱۸۵
۷-۱۴-۲ MUSIC برای دوقطبی منابع با جهت ثابت ۱۸۵
۷-۱۴-۳ MUSIC برای دوقطبی منابع با جهت آزاد ۱۸۹
۷-۱۴-۴ سفید سازی معادلات داده ۱۹۱

◇ فصل ۸: مقدمه‌ای بر تحلیل اتصالات شبکه مغزی ۱۹۳

۸-۱ چرا فقط دو مکان (اتصالات دو متغیره)؟ ۱۹۳
۸-۲ مفاهیم مهم مربوط به اتصالات دو متغیره ۱۹۵
۸-۳ از کدام معیار اتصالات باید استفاده کرد؟ ۱۹۶
۸-۴ اتصالات مبتنی بر فاز ۱۹۷
۸-۵ اتصالات مبتنی بر توان ۱۹۸
۸-۶ پیش‌بینی گرانجر ۱۹۹
۸-۷ اطلاعات متقابل ۱۹۹
۸-۸ کوپلینگ بین فرکانسی ۲۰۰
۸-۹ نظریه گراف ۲۰۰
۸-۱۰ رسانایی حجمی، مخدوش‌گر بالقوه ۲۰۱

◇ منابع ۲۰۷

◇ واژه‌نامه انگلیسی به فارسی ۲۳۱

◇ واژه‌یاب ۲۳۹

پیشگفتار

مغز انسان نشانگر وجود، شخصیت، اعمال و سلامت او می‌باشد و درک ساختار و عملکرد آن یک چالش علمی اساسی است. علاوه بر جذابیت فکری موضوع، مطالعه مغز از منظر کاهش اختلالات عصبی و روانپزشکی که منجر به درد و رنج و همچنین بار اقتصادی زیادی برای جامعه می‌باشد، ضروری است. تکنیک‌های متعددی برای مطالعه مغز ایجاد شده است. با این حال، این کتاب بر روی دو تکنیک که مبتنی بر اندازه‌گیری میدان‌های الکترومغناطیسی است تمرکز دارد: الکتروآنسفالوگرافی[1] (EEG) و مگنتوآنسفالوگرافی[2](MEG).

سیگنال‌های اندازه‌گیری شده توسط EEG و MEG اطلاعاتی در مورد فعالیت مغز با مقیاس میلی‌ثانیه ارائه می‌کنند. EEG، علاوه بر اینکه یک روش پایش و تشخیصی معمول در اغلب بیمارستان‌ها است، به طور گسترده در حوزه تحقیقات نیز استفاده می‌شود. از سوی دیگر، MEG پیچیده‌تر و دارای مزایای منحصر به فرد بوده و به ابزار بالینی نیز تبدیل شده است.

MEG برای اولین بار در سال ۱۹۶۸ اندازه‌گیری شد. پس از تلاش‌های سخت و مبتکرانه فیزیکدانان، ریاضیدانان و مهندسان، اولین دستگاه‌های تمام سر در دهه ۱۹۹۰ توسعه یافتند. از آن زمان، روش‌های پیچیده بسیاری برای آنالیز داده‌ها توسعه و منتشر شده است. در مقالات متعددی به جنبه‌های مختلف مبانی فیزیکی، فیزیولوژی عصبی و آنالیز ریاضی سیگنال‌های مغز پرداخته شده است. با این حال، این مقالات در مجلات مختلف و با تنوع گسترده‌ای از اهداف، رویکرد، کیفیت، اصطلاحات و نمادها پراکنده شده‌اند. بنابراین ممکن است یافتن درک مناسبی از اصول اساسی تولید سیگنال MEG و EEG و مبنای آنالیز پیشرفته داده‌ها دشوار باشد.

هدف این کتاب، ارائه یک رویکرد واحد و نقطه شروع محکم برای درک اصول فیزیکی و ریاضی MEG و EEG است.

---

1. Electroencephalography
2. Magnetoencephalography

پیشرفت‌های اخیر نشان داده است زمانیکه EEG و MEG با تصاویر تشریحی دقیق ترکیب شوند، می‌توانند اطلاعات مکانی-زمانی قابل اعتماد و دقیقی در مورد فعالیت مغزی در مقیاس میلی‌ثانیه ارائه دهند. با این حال، عملکرد بالینی کنونی و همچنین استفاده علمی از MEG و EEG از حد مطلوب فاصله زیادی دارد. در این کتاب، تلاش شده است تا درک به روزی از پیچیدگی‌های این تکنیک‌ها ارائه شود تا مسیر آینده را هموار سازد.

خواندن این کتاب برای دانشجویان، محققان و توسعه دهندگان مهندسی پزشکی، علوم اعصاب شناختی و فیزیولوژی عصبی می‌تواند مفید باشد.

فصل ۱

مقدمه

در این کتاب، اصول فیزیکی و ریاضی الکتروآنسفالوگرافی (EEG)[1] و مگنتوآنسفالوگرافی (MEG)[2] ارائه و انواع اطلاعات موجود در میدان عصبی-الکترومغناطیسی[3]، روش‌های اندازه‌گیری و آنالیز سیگنال‌ها توصیف می‌شوند. اساس این کتاب ارائه مبنایی محکم برای کار با داده‌های حاصل از MEG و EEG است. به کارگیری این روش‌ها به همراه درک کامل از اصول پایه‌ای و استفاده از ابزارهای مدرن، موجب افزایش منافع بیماران و پیشرفت علوم اعصاب می‌شود. در این فصل، ابتدا مروری بر مغز انسان و میدان‌های الکترومغناطیسی آن خواهیم داشت، سپس در مورد تاریخچه‌ی EEG و MEG و چشم اندازهای آینده بحث می‌شود. در فصل ۲، مبنای فیزیکی تولید میدان‌های الکترومغناطیسی عصبی شرح داده شده است. فصل ۳ به بحث در مورد مسئله مستقیم و جزئیات محاسبه سیگنال‌های EEG و MEG از منابع جریان مفروض در مدل‌های مختلف رسانای حجمی می‌پردازد. در فصل ۴ تا ۸، در مورد آنالیز داده‌های EEG و MEG بحث شده است که با معرفی جبر خطی و مفاهیم اولیه آمار شروع شده و با ارائه چندین روش آنالیز از جمله: برازش دوقطبی[4]، تخمین می‌نیمم نرم (MNE)[5]، بیم‌فرمر[6]، الگوریتم طبقه بندی سیگنال چندگانه (MUSIC)[7]، آنالیز مولفه‌های مستقل (ICA)[8] و جداسازی کور منابع (BSS)[9] با قطری‌سازی توام[10] ادامه می‌یابد.

در این کتاب، توجه ویژه‌ای به ساختار ریاضی و آماری روش‌ها شده است به نحوی که مخاطبان بدون

1. Electroencephalography
2. Magnetoencephalography
3. Neuroelectromagnetic field
4. Dipole fitting
5. Minimum-norm estimate
6. Beamforming
7. Multiple signal classification
8. Independent component analysis
9. Blind-source separation
10. Joint diagonalization

سردرگمی در تنوع عناوین، بتوانند مفهوم روش‌ها را درک کرده و از آن‌ها استفاده کنند. همچنین برخی از الگوریتم‌ها خلاصه‌بندی شده‌اند تا کدنویسی آن‌ها راحت‌تر شود. اگرچه روش‌های آنالیز در حوزه زمان ارائه شده‌اند اما قابل تعمیم به حوزه‌های دیگر نیز می‌باشند.

۱-۱ مغز

با توجه به اطلاعاتی که تاکنون کسب شده است، بزرگترین اسرار طبیعت در مغز انسان (شکل ۱-۱) نهفته است و عملکرد آن بدون هیچ استثنایی طبق قوانین شناخته شده فیزیک می‌باشد. عملکرد مولکول‌های مغز و اتم‌های آن متناسب با ژنتیک هر فرد موجب پیچیدگی این سیستم قدرتمند در پردازش سیگنال شده است. عملکرد برخی از اتم‌های مغز، با ساختارهای نسبتاً پایداری مانند غشای سلولی یا اندامک‌ها مرتبط است که باعث تغییر آهسته ساختار اندام‌ها و فراهم شدن بستر مناسبی برای آنالیز و ذخیره اطلاعات می‌شود. اتم‌هایی که در ساختار مولکول‌های انتقالی وجود دارند و یا در یون‌های مایع داخل سلولی یا خارج سلولی یافت می‌شوند، مانند پتاسیم، سدیم و کلسیم، باعث ایجاد فعالیت بلادرنگ[1] می‌شوند و عملکرد آن‌هاست که احساسات، افکار و رفتار ما را تولید می‌کند. سیگنالینگ[2] بین نورون‌ها چند میلی‌ثانیه، شناسایی الگو و تبدیل سیگنال به الگو ده‌ها میلی‌ثانیه و تفکر آگاهانه صدها میلی‌ثانیه زمان می‌برد و بسیاری از پردازش‌های دیگر مانند احساسات یا فرآیند یادگیری به زمان بیشتری احتیاج دارند، به ویژه هنگامی که تغییرات ساختاری را شامل می‌شوند.

شکل ۱-۱ مغز انسان که از نمای سمت راست با روشMRI تصویربرداری شده است. ماده خاکستری رنگ تصویر، قشر مغز را نشان می‌دهد که شامل تعداد زیادی نورون است. این نورون‌ها، منبع جریان الکتریکی بافت و میدان‌های الکترومغناطیسی هستند که به صورت غیرتهاجمی قابل اندازه‌گیری می‌باشند. مباحث عمده این کتاب بیشتر از اینکه درمورد مغز باشد، در مورد این سیگنال‌های الکترومغناطیسی است.

1. Real-time
2. Signaling

فعالیت‌های مغزی را که در طول چند میلی‌ثانیه تا چند ثانیه انجام می‌شوند، می‌توان توسط EEG و MEG بررسی کرد. (به عنوان مثال، اطلاعات مربوط به حرکت یون‌ها در مغز توسط اندازه‌گیری و آنالیز میدان‌های الکترومغناطیسی قابل دسترسی می‌باشند). این روش‌ها تنها راه ممکن برای اندازه‌گیری مستقیم فعالیت الکتریکی مغز به صورت غیر تهاجمی هستند. با استفاده از این اندازه‌گیری‌ها، عملکرد مغز افراد سالم و بیماران عصبی یا دارای اختلالات روانی را می‌توان بررسی کرد. با این حال، استفاده از این تکنیک‌ها و تفسیر سیگنال‌های حاصل از آن ساده نیست. از جمله دلایل سختی این تکنیک‌ها عبارت است از:

- به دلیل محدود بودن تعداد کانال‌های ثبت (حداکثر چند صد کانال)، تنها می‌توان یک پروجکشن با بُعد پایین از الگوی فعالیت عصبی با چندین میلیون بُعد به دست آورد.
- در حال حاضر، به دلیل عدم توصیف کافی هندسه‌های اندازه‌گیری و عدم وجود دانش دقیق از نحوه توزیع رسانایی بافت‌های سر، رابطه بین جریان‌های مغزی و میدان الکترومغناطیسی خارج از جمجمه در عمل به صورت دقیق شناخته نشده است.
- نویز ابزارها، تداخلات الکترومغناطیسی، انواع آرتیفکت‌های فیزیولوژیکی و غیرفیزیولوژیکی و تنوع پاسخ مغز به محرک‌های حسی که وابسته به حالات مختلف مغزی هستند،کار محققان را سخت می‌کنند.
- توصیف فعالیت اصلی سلول‌های عصبی از طریق اطلاعات حاصل از سیگنال‌های اخذ شده کار دشواری است. حتی اگر پارادایم آزمایش به خوبی طراحی شده باشد و ثبت سیگنال با دقت و کیفیت بالا انجام شده باشد، تنوع فیزیولوژیکی داده‌ها از یک شخص به شخص دیگر یا از یک کوشش[1] به کوشش دیگر ممکن است مانع از نتیجه‌گیری آماری مفید گردد.
- EEG و MEG ابزارهای بالینی با ارزشی هستند. EEG (شکل ۲-۱) تقریباً در تمام بیمارستان‌ها برای تشخیص و توصیف اختلالات رشد مغز، ضربه، صرع و بسیاری از بیماری‌ها استفاده می‌شود. EEG همچنین می‌تواند نشان‌گر سطح هوشیاری بیمار باشد که در بعضی از موارد به منظور نظارت بر بیهوشی یا برآورد احتمال بهبودی از کما به کار می‌رود. MEG (شکل ۳-۱) برای تعیین مکان فعالیت‌های مغز در بیماری صرع یا تخمین گره‌های شبکه گفتار قبل از جراحی استفاده می‌شود. همچنین MEG در توصیف تشنج‌ها یا الگوهای اتصال[2] در بیماری‌هایی که منجر به تحلیل بافت می‌شوند یا اختلالات روانپزشکی مانند بیماری پارکینسون یا اسکیزوفرنی کاربرد دارد [۱-۳].

1. Trial
2. Connectivity