

計測・制御  
セレクション  
シリーズ

1

計測自動制御学会 編

# 次世代医療 AI

—生体信号を介した人と AI の融合—

藤原 幸一・久保 孝富 編著

山川 俊貴・伊藤 健史

中野 高志・吉本潤一郎 共著

松尾 剛行・藤田 卓仙

桐山 瑤子

コロナ社

## 刊行のことは

近年の科学技術は、情報化・グローバル化の中で驚くべき速さで発展している。計測・制御分野も例外ではなく、次々と新しい概念・理論・技術が発表され、その核心を理解するのに多大な努力を要する状況にある。さらに、各種の技術が単一の分野に閉じることなく、さまざまな分野が横断的に発展・連携・融合し、新たな分野へ多種多様な広がりを見せている。例えば、計測技術の発展は、知的システムを構築するための人工知能やデータサイエンスの発展にも大きく寄与し、両技術分野の融合による技術革新も期待されている。

計測自動制御学会（SICE）が扱う、計測、制御、システム・情報、システムインテグレーション、ライフエンジニアリングといった分野は、もともと分野横断的な性格を備えていることから、SICE が社会において果たすべき役割がより一層重要なものとなってきている。SICE では、2018 年に完結した「計測自動制御学会（SICE）計測・制御テクノロジーシリーズ」の次世代となるシリーズ企画の在り方について模索し、議論を重ねてきた。その結果、めまぐるしく技術動向が変化する時代に活躍する技術者・研究者・学生の助けとなる書籍を、SICE ならではの視点からタイムリーに提供するというシリーズの方針を立てた。

この方針に基づき、従来のシリーズでのテーマや執筆者の選定から出版までのプロセスを見直し、これまでとは異なるプロセスでシリーズ企画を進めていくことにした。ユニークな取り組みとして、SICE がシリーズの執筆者の公募を行い、会誌出版委員会での選考を経て収録テーマを決定している点がある。また、公募と並行して、会誌出版委員会によるテーマ選定や、学会誌「計測と制御」での特集から本シリーズの方針に合うテーマを選定するなどして、収録テーマを決定している。テーマの選定に当たっては、SICE が今の時代に出版

## ii 刊 行 の こ と ば

する書籍としてふさわしいものかどうかを念頭に置きながら進めている。このようなシリーズの企画・編集プロセスを鑑みて、本シリーズの名称を「計測・制御セレクションシリーズ」とした。

本シリーズは、計測、制御、システム・情報、システムインテグレーション、ライフエンジニアリングに関わる多種多様なテーマがタイムリーに収録されていくことをねらっている。本シリーズが変化の大きな時代の中で活躍する研究者・技術者・学生の役に立てば幸いである。最後に、このシリーズ企画を進めるに当たってご尽力いただいたコロナ社の各氏に感謝したい。

2021年5月

計測自動制御学会 会誌出版委員会 出版ワーキンググループ

## ま え が き

近年、人工知能（artificial intelligence; AI）はさまざまな分野で急激に普及し、その勢いは増す一方のように見える。医療分野もその例外ではない。2016年には深層学習研究の大家であるジェフリー・ヒントンの「人工知能のほうが放射線科医よりも賢くなるので、放射線科医の無駄な教育はやめたほうがいい」と発言したともいわれている。実際に、CT 画像や MRI 画像に基づく画像診断分野では AI 技術の活用が急速に進んでおり、米国食品医薬品局（FDA）や日本の医薬品医療機器総合機構（PMDA）の承認を得た医療機器プログラム（Software as a Medical Device; SaMD）がすでに登場している。画像診断分野では、これからも AI 技術に基づいた SaMD が次々と開発され、臨床現場への導入が進むと思われる。

しかし、画像診断は医療における一部の領域に過ぎない。心電図・脳波などの生体信号や血液検査のように、検査・診断に用いられているモダリティは、画像以外にもたくさんある。それにもかかわらず、医療分野における AI の利活用で画像診断だけが突出しているのは、データの取得方法が高度に自動化されており、他のモダリティと比較して質の高い学習データの蓄積が容易だからである。一方で、医用画像以外のモダリティでは、大量のデータの収集が手間であることに加え、その解釈や判読が困難であることもしばしばある。現在の AI 技術のパラダイム、すなわちビッグデータ解析とは、大量のデータを用いた数理的なルールの学習にほかならず、データの収集や解釈の難しさはそのまま AI 開発の足枷となっている。

本書では、あえて「次世代医療 AI —— 生体信号を介した人と AI の融合」と銘打ち、医用画像以外のモダリティ、特に生体信号を用いた AI 技術に焦点を当て、来たるべき新たな医療 AI 開発の時代に備えるために必要な事柄を丁寧

に解説した。前述のとおり、画像以外のモダリティではデータの収集や解釈が難しい場合があるが、本書にはその隘路を乗り越えるためのヒントが散りばめられている。

本書は工学・情報学系および医学系の大学院生や研究者を対象として想定しているが、おそらく工学・情報学系の方は、生物学・医学について勉強したことがないと思われる。一方で、医学系の方は電気回路や機械学習などの工学的な方法については、名前は聞いたことがあっても、その中身まで理解されている方は少ないと思う。そこで、本書では、工学・情報学系、医学系の垣根を越えて医療 AI 開発に必要な知識を習得できるよう、生体の構造や機能などの基礎から生体センシング・信号処理・機械学習まで、幅広い内容をコンパクトにまとめた。また、実際の医療 AI の開発事例も豊富に紹介して、読者が医療 AI についてイメージを持ちやすいように工夫した。

さらに、類書にはない本書の特徴として、医療 AI に関わる法律や倫理、薬事についても解説を試みている。医療 AI 開発はさまざまな面で社会と深い関わりがあり、これらを見逃して開発することはできない。医療に関わる分野では、悪意のない些細なミスであっても、それが法に触れたり、倫理に反したりする事柄であれば、いかに良い技術であってもけっして日の目を見ることはなくなってしまう。さらに、これらを乗り越えて高性能な医療 AI を開発しても、薬事という最大の壁、つまり FDA や PMDA などの規制当局の承認を得ることができなければ、医療 AI システムとして市場に流通させることはできない。本書で医療 AI の開発にあたってあらかじめ知っておくべき法律や倫理、薬事の知識に触れることで、より現実的に医療 AI の開発を進めることができる。

本書の執筆は、青山学院大学 戸辺義人先生、横浜国立大学 白川真一先生、愛知県医療療育総合センター発達障害研究所 伊東保志先生のご助言により、完成にこぎつけることができた。また、出版にあたってコロナ社の皆様にはたいへんお世話になった。この場をお借りしてお礼申し上げる。

なお、本書の執筆分担は以下のとおりである。

### 執筆分担

---

藤原 幸一	1章, 4.1節, 4.2.1項, 4.3節, 5.1節, 6.2節
久保 孝富	4.2.2~4.2.3項, 5.5節, 6.3節, 7章
山川 俊貴	3章
伊藤 健史	2.3~2.4節, 5.4節, 5.6節, 7章
中野 高志	2.1~2.2節, 6.1節
吉本潤一郎	5.2~5.4節
松尾 剛行	8.1節
藤田 卓仙	8.2節
桐山 瑶子	8.3節

---

2021年5月

著者一同

# 目 次

## 1. 序 論

1.1 医療AIとは？ .....	1
1.2 本書の構成 .....	6

## 2. 生体の構造・機能

2.1 神経系 .....	8
2.1.1 神経細胞 .....	8
2.1.2 静止膜電位と活動電位 .....	9
2.1.3 シナプス伝達 .....	10
2.1.4 脳神経回路の構造 .....	11
2.1.5 脳の機能 .....	15
2.2 感覚器系 .....	21
2.2.1 視 覚 .....	21
2.2.2 聴覚と平衡覚 .....	25
2.2.3 嗅覚と味覚 .....	28
2.3 筋骨格系 .....	29
2.3.1 骨 格 .....	29
2.3.2 骨 格 筋 .....	31
2.3.3 筋線維の構造 .....	32
2.3.4 筋線維の収縮原理と神経シグナルによる制御 .....	34

2.3.5 筋収縮の生理学	36
2.4 循環器系	38
2.4.1 循環器系の構成	38
2.4.2 心臓の解剖学的構造	39
2.4.3 刺激伝導系と心筋の収縮	40
2.4.4 循環器系の役割	43
2.4.5 循環の調節	45

### 3. 生体計測

3.1 脳活動	47
3.1.1 電氣的活動	47
3.1.2 脳血流反応	52
3.2 心電図	54
3.3 筋電図	58
3.4 脈波	58
3.4.1 光電式容積脈波記録	59
3.4.2 心弾動図	60

### 4. 生体信号処理

4.1 信号処理の基礎	62
4.1.1 フーリエ解析	62
4.1.2 ウェーブレット解析	75
4.2 行列分解	85
4.2.1 主成分分析	85
4.2.2 独立成分分析	95



4.2.3 非負値行列因子分解	101
4.3 生体信号の特徴量	104

## 5. 生体信号処理に用いられる AI・機械学習

5.1 異常検知	108
5.1.1 多変量統計的プロセス管理 (MSPC)	109
5.1.2 自己符号化器	112
5.2 クラスタリング	113
5.2.1 階層的クラスタリング	114
5.2.2 $k$ 平均法	117
5.2.3 混合ガウス分布モデル	119
5.3 分類	122
5.3.1 最近傍法と $k$ 近傍法	123
5.3.2 ベイズの識別規則と線形判別分析法	124
5.3.3 ロジスティック回帰	126
5.3.4 サポートベクタマシン	127
5.3.5 決定木とランダムフォレスト	131
5.4 回帰	134
5.4.1 線形回帰	135
5.4.2 サポートベクタ回帰	136
5.4.3 $k$ 近傍法とカーネル回帰	138
5.4.4 ガウス過程回帰	139
5.5 因果推論	143
5.5.1 グレンジャー因果性	144
5.5.2 LiNGAM	145

5.6 深層学習	148
5.6.1 フィードフォワードニューラルネットワーク	148
5.6.2 普遍性定理	149
5.6.3 誤差逆伝搬法	150
5.6.4 畳み込みニューラルネットワーク：画像データの処理	153
5.6.5 再帰型ニューラルネットワーク：時系列データの処理	157
5.6.6 その他の話題	158

## 6. 生体信号を用いた医療 AI 技術開発

6.1 脳活動	161
6.1.1 脳機能画像を用いた精神疾患の診断と層別化	161
6.1.2 ブレイン-マシンインタフェース (BMI)	167
6.2 心拍変動	171
6.2.1 自律神経系	172
6.2.2 心拍変動解析	172
6.2.3 時間領域指標	174
6.2.4 周波数領域指標	174
6.2.5 脈波の HRV 解析への利用	175
6.2.6 自律神経系の機能検査法	177
6.2.7 HRV によるてんかん発作予知	178
6.2.8 臨床データへの適用結果	181
6.3 筋電位信号	184
6.3.1 運動単位：筋線維群と $\alpha$ 運動ニューロン	185
6.3.2 筋電位信号とは	185
6.3.3 表面筋電図の計測方法	186
6.3.4 筋電位信号の応用事例	189

## 7. 実社会への実装および今後の展望

7.1 社会実装例	195
7.1.1 心電図または心音を用いる AI デバイス	196
7.1.2 胸部聴診音や呼吸音を用いる AI デバイス	197
7.1.3 その他のバイタルサインを用いるデバイス	199
7.1.4 画像診断	200
7.2 今後の展望	201

## 8. 医療 AI の法律・倫理・薬事

8.1 医療 AI 開発者にとっての法律の意義	203
8.1.1 法的規制の大枠	204
8.1.2 事例検討	212
8.2 医療 AI の法律と倫理	216
8.2.1 AI の倫理	216
8.2.2 医療・医学研究の倫理	220
8.2.3 倫理にどのように対応すればよいのか	224
8.3 医療 AI と薬事	225
8.3.1 医療 AI の医療機器該当性について	226
8.3.2 薬事規制から見た医療 AI 開発	230
8.3.3 AI 医療機器に治験は必要か不要か？	232

引用・参考文献	236
---------	-----

索引	254
----	-----

# 第 1 章

## 序 論

### 1.1 医療AIとは？

本書を執筆している 2020 年現在、人工知能 (artificial intelligence; **AI**) は、その話題をテレビや新聞などのメディアで聞かない日がないぐらい、われわれの生活の一部になりつつある。日常的に Apple の Siri や Amazon の Alexa などの音声アシスタント AI を使っている人も多いだろう。そのほかにも、スマートフォンのカメラアプリの顔認識や外国語の機械翻訳も AI 活用の一部である。わずか 10 年前に、ここまで AI が世界に普及すると予測できたであろうか。2012 年の、深層学習を用いた画像識別用の AI である AlexNet の登場が、すべてを変えてしまったのである<sup>1)†</sup>。昨今の AI ブームは、たった 1 つの技術が世界を変えうるといふ顕著な例である。そして、これからも AI の利活用はますます進むだろう。

AI を活用できる分野は広く、今後も加速度的に広がっていくものと期待されるが、本書では特に**医療 AI**に着目する。医療 AI とは、医療現場で活用される AI のことである。実臨床においては、特定の疾患だけに注目しても、リスク評価、診断・鑑別、治療法の選択、そして予後の予測など、医療者は多くの判断を求められる。判断の誤りは即座に医療過誤に繋がりがねず、その責任は重い。さらに、同一の疾患であっても患者間の差異は大きく、意思決定のフローは複雑である。そこで、これまでに収集された大量の臨床データを AI で学習して、

<sup>†</sup> 肩付きの数字は巻末の引用・参考文献の番号を表す。

患者個々人に最適な治療法を提示できれば、医療者・患者双方のメリットは計り知れないだろう。

AIの歴史がじつは古いことがよく知られているように、医療AIの歴史も同様に古い。第一次ブームの終盤、1970年代にはスタンフォード大学にて、Mycin（マイシン）と呼ばれる医療用AIが開発されている<sup>2)</sup>。Mycinは伝染性血液疾患を診断し、適する抗生物質を推奨する機能があった。これは500程度のルールをif-then方式で書き込んだエキスパートシステムとして実現されており、スタンフォード大学の調査によると、65%の精度で診断が可能であった。この診断精度は感染症専門医でない医師よりは良い成績だが、専門医の診断結果よりは悪かったとされる。

Mycinは臨床では使われなかった。性能面の問題というよりも、むしろ倫理や法律の面で、AIを医療に使うて間違った診断を下した場合に、だれが責任をとるのか不透明であるという問題が大きかったという。これは、現在の医療AIでも解決していない問題である。

また、Mycinの開発では、専門家の知識をどのように引き出してルールとして書き下すのかという困難な問題にも直面した。このような知識表現の問題はエキスパートシステム開発において共通の課題であり、当時はこの課題を十分に解決できていなかった。この結果、その時代のAIブームは終焉を迎え、AI冬の時代へと突入していった。それに伴って、しばらく医療AIの研究開発も下火となった。

一方、現代のAIブームを支えているのは深層学習を含む機械学習技術であり、その根底にはビッグデータがある。つまり、インターネットを通じて安価に大量のデータを収集できるようになり、それを高速に処理できるコンピュータが登場したことで、エキスパートシステムのようなルールベースの知識表現に頼らない、深層学習のような複雑なAIを構築することが可能となった。そして、再度AIブームが到来したことで、医療AIも世間から改めて脚光を浴びるようになった。

それでは、機械学習を基盤とする現代のAIにおいて、医療AIはどのような

領域で活用されているのだろうか。医療 AI の分類についても方法論や適用する疾患、診療科など、さまざまな切り口があると考えられるが、ここでは解析対象とするデータに基づいて、(1) コンピュータ断層撮影 (computed tomography; CT) や核磁気共鳴画像法 (magnetic resonance imaging; MRI) をはじめとする医用画像に基づく画像診断、(2) 自然言語で記述されたカルテデータ、(3) 心電図 (electrocardiogram; ECG) や脳波 (electroencephalography; EEG) に代表される生体信号、の 3 つに分類する。

**画像診断** 最も AI 活用が進んでおり、技術的に成熟しているのは、画像診断分野である。例えば、AI が検査データを読むことで、人間の医療者よりも安価かつ正確に病名を診断し、または病変部を特定するなどの用途が期待されている。特に放射線科領域、つまり CT や MRI 画像を読影するプロセスでは、医師や技師を AI が補助する流れが顕著である。これをコンピュータ支援診断 (computer-aided diagnosis; CAD) と呼ぶ<sup>3)</sup>。日本は人口当りの CT や MRI の台数が他国に比べて多いことが知られているが、医用画像を読影する放射線科医は不足しがちである。そこで、AI が読影を補助できれば、放射線科医の負担軽減に繋がる。

CT や MRI 以外に画像を使った診断では、ECG 信号を画像として扱うことで無症候心疾患を検出する方法や<sup>4)</sup>、眼底画像による糖尿病性網膜症の診断<sup>5)</sup> が知られる。ただし、現状ではほとんどの場合、直接 AI が読影した結果をそのまま診断結果とすることはできない。従来の CAD では、医師はシステムの示す病変位置のマーカーなどを参照することなく読影し、その後、システムの結果を参考にして最終診断を行うというプロセスを踏むものが多い<sup>†</sup>。これは、AI の性能、信頼性だけではなく、AI が誤診した際の責任の所在について、議論が尽くされていないことの表れでもある。

---

<sup>†</sup> これを second reader 型 CAD と呼ぶ。なお、AI の結果を医師が読影の最初から参照するタイプは concurrent reader 型、AI の結果のみで診断するものは first reader 型と分類されている。

**カルテデータ** 日々の診療において、カルテは必ず蓄積されるデータである。なんらかの検査を実施しなくとも問診時の所見は記入され、行われた処置、処方された薬などの情報がカルテには残る。これらを AI 開発に活用しない手はないが、容易ではない。以前は手書きが主流であったカルテも近年では電子化が進み解析が容易になったとはいえ、問診時の所見は自然言語で記入され、また病名や薬剤名の表記揺れも多いためである<sup>6)</sup>。カルテデータはこのように典型的な非構造化データであるが、自然言語処理技術の著しい性能向上に伴って、これを活用したカルテ解析 AI が登場している。例えば、小児患者の症状、病歴、検査結果などのカルテ情報から診断を行う AI システムも、すでに実用化されている<sup>7)</sup>。また、Amazon は Comprehend Medical と呼ばれるカルテ情報向けの自然言語処理システム<sup>8)</sup> をクラウドサービスとして提供している。

**生体信号** ネットワークの発展により、病院内においてもさまざまなセンサやモニタから、患者の生体情報をリアルタイムに収集・解析できるようになった。これにより、患者病態のリアルタイムモニタリングに AI が活用されるようになってきている。例えば、AI によって ECG や血圧などの生体信号をリアルタイムに解析することで、集中治療室 (ICU) における患者の病態変化を予測し事前の治療に繋げられれば、臨床的な意義は大きいだろう<sup>9)</sup>。これはまさに AI による生体情報解析の活用の最たるものであり、EEG によるてんかん発作予知<sup>10)</sup> や、音声からの認知症の早期検出<sup>11)</sup>、心拍変動 (heart rate variability; HRV) による睡眠時無呼吸症候群スクリーニングなど、生体信号解析の活用の幅は広い。

画像診断もカルテデータ解析も、病変部をアノテーションした画像データセットを構築したり、医学用語のコーパスを整備したりするなど特有の作業は必要だが、これらの AI の進歩は、直接的に画像解析技術や自然言語処理技術などの機械学習技術の進歩に負うところが大きい。適当なデータセットやコーパスなどがあれば、人体や対象とする疾患についての医学的な知識を特に活用しな

くても、既存の機械学習アルゴリズムを適用するだけで、ある程度の性能の AI を開発できる場合がある。

生体信号に関しては、必ずしもデータに機械学習技術を適用すれば性能の良い AI が構築できるわけではない。生体信号の背後にはそれぞれ特有の生理学的メカニズムがあり、そのメカニズムを理解していないと、信号の解釈が困難である。また、生体信号を測定するための脳波計や心電図などの原理や特徴を把握しておかなければ、適切な測定ができなかったり、そもそも実験計画が立案できなかったりするという問題に直面する。これらのメカニズムや原理を理解しておかないと、正しく測定できているのか、アーチファクト（信号に混入する体動や電源などに由来するノイズ）が混入しているのかの判断もできないだろう。

なにより、単純に医師による読影や診断の機械への置き換えを狙う画像診断 AI と異なり、生体信号を活用する AI はさまざまな臨床の場面で活用されうる。そのため、対象となる疾患の病態のみならず、臨床現場での診療フローを理解していないと、実用的な AI の開発は困難である。例えば、EEG に基づいててんかん発作を予知する AI を開発しようと考えた場合、てんかんの診断フローや脳波計がどのような装置であるかについての理解が十分でなければ、そもそもどのような場面で患者が脳波計を着用するのかも想像できないだろう。

このように、生体信号を活用する AI の開発には、機械学習技術のみならず、基礎医学から臨床にわたる幅広い医学的な知識が必要になる。その取り組みは始まったばかりであり、次世代の医療 AI の中心となりうる大きなポテンシャルを秘めている。生体信号を活用する AI は、医療・ヘルスケアのあり方を大きく変えていくだろう。



# 索引

<b>【あ】</b>	
アクチン	34
アクティブ電極	48
アーチファクト	5, 54, 56, 60-62, 105, 165, 179
アナログ-デジタル コンバータ	51
安静時脳活動	162
<b>【い】</b>	
イオンチャネル	9, 22, 28, 29
イオンチャネル共役型受容体	11
イオンポンプ	9, 20, 185
一般化線形モデル	164
医療 AI	1
因果推論	143
<b>【う】</b>	
ウィルソン中心電極	57
ウェーブレット解析	75, 106, 171
ウォード法	117
運動	17
運動単位	185
運動ニューロン	34, 185
<b>【え】</b>	
エキスパートシステム	2
<b>【お】</b>	
オイラーの公式	64

<b>【か】</b>	
回帰	122
階層的クラスタリング	114, 166
灰白質	12
ガウス過程回帰	139, 189
化学的シナプス	10
カクテルパーティ効果	95
隠れマルコフモデル	192, 193
画像診断	3, 153, 171, 200
活性化関数	112, 149
活動電位	9, 23, 28, 41, 54, 168, 185
カーネル回帰	138
過分極	10, 22
関節	30, 189
間接路	14
完全連結法	116
間脳	11
<b>【き】</b>	
記憶	16
機械学習	2, 61, 104, 108
擬似相関	144
基準電極導出法	47
機能局在	15
機能結合	163
逆フーリエ変換	66
強化学習	17
教師あり学習	14, 122
教師なし学習	13, 113
凝集型階層的クラスタリング	114

胸部誘導	55
行列分解	85
局所組織酸素飽和度	53
筋原線維	33, 40
近赤外分光分析	52
筋線維	32, 58, 185
筋電位信号	58, 184
筋電音声認識	191
筋電義手	189
筋電図	58

## 【く】

空間分解法	53
クラスタリング	113, 166
グリア細胞	8, 10, 15
グレンジャー因果性	144
訓練データ集合	122

## 【け】

計算論の神経科学	12
計装増幅器	51, 56
血液脳関門	15
血中酸素レベル依存シグナル	20
決定木	131
言語	18

## 【こ】

高周波律動	50
高速フーリエ変換	68
光電式容積脈波記録	59, 175
恒等関数	149
後脳	11
興奮収縮連関	36

国際 10-20 法 47, 105  
 誤差逆伝搬法 150  
 骨 格 29  
 骨格筋 31, 40, 185  
 コラム構造 23, 26  
 混合ガウス分布モデル 119  
 コンピュータ支援診断 3

【さ】

再帰型ニューラルネット  
 ワーク 157  
 最近傍法 123  
 最小二乗法 135, 145  
 再分極 10, 36  
 最尤推定法 127, 145  
 錯 視 24  
 サッケード 25  
 差動増幅 49  
 サポートベクタ回帰 136  
 サポートベクタマシン 129, 192

【し】

シェロング試験 177  
 時間周波数解析 75  
 時間分解法 52  
 識 別 105, 122  
 軸 索 8, 23, 27  
 シグモイド関数 149  
 刺激伝導系 41, 54  
 自己符号化器 112  
 事象関連電位 48, 105  
 システムリファレンス電極 47  
 姿勢保持 32, 187  
 シナプス 10, 35  
 シナプス可塑性 16  
 重心連結法 116  
 終 脳 11  
 終 板 35, 185  
 樹状突起 8  
 主成分 86  
 主成分分析 72, 86, 99  
 受容体 11

受容野 22, 154  
 循環器系 38  
 情 動 16  
 小 脳 13  
 自律神経系 18, 45, 171  
 心 筋 40  
 心筋細胞 40  
 神経筋接合部 35  
 神経細胞 8  
 神経支配帯 185  
 神経修飾物質 17  
 神経伝達物質 11, 35  
 人工知能 1  
 心 臓 39  
 深層学習 1, 148, 170, 191, 192  
 心弾動図 60  
 シンチグラフィ 177  
 心電図 43, 54, 171, 196  
 心 拍 43  
 心拍変動 45, 55, 172

【す】

随意運動 31  
 髄 脳 11  
 睡眠ポリグラフ検査 105  
 スケーリング 75  
 スペクトル 52, 66, 174

【せ】

静止膜電位 9, 185  
 生体信号 4  
 脊 髄 11, 34  
 線形回帰 135, 139

【そ】

双極導出法 47  
 双極誘導 54  
 層別化 162  
 側性化 18  
 ソフトマックス関数 149

【た】

大脳基底核 14  
 大脳皮質 12  
 体部位局在性 15  
 畳み込み 68  
 畳み込み定理 69  
 畳み込みニューラルネット  
 ワーク 153, 171  
 脱分極 9, 22, 35, 41  
 多変量統計のプロセス管理 109, 179  
 単極誘導 54  
 短時間フーリエ変換 73, 106  
 単変量統計のプロセス管理 109  
 単連結法 116

【ち】

中枢神経系 11  
 中 脳 11  
 直接路 14  
 直交ウェーブレット変換 72

【て】

テストデータ集合 122  
 てんかん 178  
 電氣的シナプス 11  
 電力増幅器 51, 56

【と】

頭蓋内脳液 49  
 頭皮脳波 47  
 特徴量 61, 105  
 独 立 95, 97  
 独立成分分析 95  
 トランスレート 75

【に】

二値分類 122  
 ニューラルネットワーク  
 113, 148, 168, 189, 193  
 ニューロフィードバック 170

	<b>【の】</b>	フィルタ 51, 56, 68, 83, 165	ホルター心電図 55, 196
脳	11	不確定性原理 74	<b>【ま】</b>
脳アトラス	163	不関電極 47	マージン最大化原理 128
脳幹	11	ブートストラップ法 133	<b>【み】</b>
脳波 47, 62, 105, 168, 170		ブラインド信号源分離 95	ミオシン 34
脳波計 50		フーリエ解析 63	みにくいアヒルの子定理 104
ノンパラメトリック法 139		フーリエ級数 63	<b>【む】</b>
	<b>【は】</b>	フーリエ係数 63	無相関 87, 97, 99
バイオマーカー 162, 166		フーリエ変換 66	<b>【も】</b>
白質 12		ブレイン-マシンインタ フェース 167	網膜 21
パーセパルの定理 72, 93		分光学的窓 52	モンタージュ 47
パラメトリック法 139		分類 122	<b>【ゆ】</b>
パルスオキシメーター 53, 59		<b>【へ】</b>	誘発電位 48
パルスオキシメトリー 59		平均電位基準法 47	<b>【ら】</b>
判別閾数 126		平均連結法 116	ランダムフォレスト 133
	<b>【ひ】</b>	ベイズ識別規則 125	<b>【れ】</b>
皮質脳波 49, 168		ベイズの公式 124	連合野 15
ビッグデータ 2		ヘプ則 16	<b>【ろ】</b>
非負値行列因子分解 101		ヘモグロビン 20, 44, 52, 176	ロジスティック回帰 126, 127
標準化 87, 165		ヘモダイナミクス 20, 52	
標準肢誘導 55		変形ランベルト-ベール則 52	
標準モニター誘導 55		<b>【ほ】</b>	
表面筋電図 58, 184		方向選択性 23	
	<b>【ふ】</b>	報酬系 17	
フィードフォワードニュー ラルネットワーク 148		ポピュレーションコーディング 169	

	<b>【A】</b>	<b>【C】</b>	EKG 54
AC 結合 50		CNN 153	EM アルゴリズム 120
ADC 51		<b>【D】</b>	<b>【F】</b>
AI 1		DC 結合 50	FDA 196
	<b>【B】</b>	<b>【E】</b>	fMRI 20, 45, 52, 162, 169
BCG 60		ECG 3, 54, 171	fNIRS 53, 170
BMI 167		ECoG 49	<b>【G】</b>
BOLD シグナル 20		EEG 47, 105	Gタンパク質共役型受容体 11
			GLM 164

GMM	119	LFnu	175		
		LiNGAM	145		<b>【R】</b>
<b>【H】</b>		LSTM	158	right leg drive	57
HF	175			R-R 間隔	55, 172
HFnu	175	<b>【M】</b>		RRI	55, 172
HRV	172	MSPC	109, 179		<b>【S】</b>
<b>【I】</b>		<b>【N】</b>		sEMG	58, 184
ICA	95, 106	NASA 誘導	55	STFT	73
		NIRS	52	SVM	129, 184
<b>【K】</b>		NMF	101		<b>【U】</b>
$k$ 近傍法	124				
$k$ 平均法	117, 118	<b>【P】</b>		USPC	109
		PCA	72, 86, 106		
<b>【L】</b>		PPG	59, 175	<b>【数字】</b>	
LF	174	PPI	59	12 誘導心電図	55
LF/HF	175				

—— 編著者・著者略歴 ——

藤原 幸一 (ふじわら こういち)

2004年 京都大学工学部工業化学科卒業  
 2006年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了  
 (化学工学専攻)  
 2006年 トヨタ自動車株式会社勤務  
 2009年 京都大学大学院工学研究科博士後期課程  
 修了(化学工学専攻), 博士(工学)  
 2009年 日本学術振興会特別研究員(PD)  
 2010年 日本電信電話株式会社 NTT コミュニ  
 ケーション科学基礎研究所勤務  
 2012年 京都大学大学院助教  
 2018年 JST さきがけ研究員(兼任)  
 2018年 名古屋大学大学院准教授  
 現在に至る

山川 俊貴 (やまかわ としたか)

2003年 熊本大学工学部電気システム工学科卒業  
 2005年 熊本大学大学院自然科学研究科博士前期  
 課程修了(電気システム専攻)  
 2008年 熊本大学大学院自然科学研究科博士後期  
 課程修了(システム情報科学専攻), 博士  
 (工学)  
 2008年 静岡大学助教  
 2014年 熊本大学大学院助教  
 2019年 熊本大学大学院准教授  
 現在に至る

中野 高志 (なかの たかし)

2005年 大阪大学基礎工学部システム科学科卒業  
 2006年 沖縄科学技術研究基盤整備機構準研究員  
 2010年 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研  
 究科博士後期課程修了(情報生命科学専  
 攻), 博士(理学)  
 2010年 沖縄科学技術大学院大学研究員  
 2014年 沖縄科学技術大学院大学スタッフサイエ  
 ンティスト  
 2016年 広島大学助教  
 2017年 奈良先端科学技術大学院大学特任准教授  
 2020年 藤田医科大学准教授  
 現在に至る

久保 孝富 (くぼ たかとも)

2002年 大阪大学医学部医学科卒業, 医師免許取  
 得, 以後 2007 年まで医師として神経内  
 科診療に従事  
 2012年 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研  
 究科博士後期課程修了(情報生命科学専  
 攻), 博士(工学)  
 2012年 奈良先端科学技術大学院大学助教  
 2017年 奈良先端科学技術大学院大学特任准教授  
 現在に至る

伊藤 健史 (いとう たけし)

2017年 北海道大学医学部医学科卒業, 医師免許  
 取得  
 2019年 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研  
 究科博士前期課程修了(情報科学専攻),  
 修士(工学)  
 2019年 奈良先端科学技術大学院大学先端科学技  
 術研究科博士後期課程(情報科学領域)  
 2019年 日本学術振興会特別研究員(DC1)  
 現在に至る

吉本 潤一郎 (よしもと じゅんいちろう)

1998年 関西大学総合情報学部総合情報科学科卒業  
 2002年 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研  
 究科博士後期課程修了(情報システム学  
 専攻), 博士(工学)  
 2002年 科学技術振興機構 CREST 博士研究員  
 2004年 科学技術振興機構沖縄新大学院大学先行  
 研究事業研究員  
 2005年 沖縄科学技術研究基盤整備機構研究員  
 (2010 年よりグループリーダーに昇格)  
 2011年 沖縄科学技術大学院大学神経計算ユニッ  
 トグループリーダー  
 2015年 奈良先端科学技術大学院大学准教授  
 現在に至る  
 2018年 国際電気通信基礎技術研究所脳情報通信  
 総合研究所客員主幹研究員

松尾 剛行 (まつお たかゆき)

2006年 東京大学法学部卒業  
2007年 最高裁判所司法研修所修了, 弁護士登録  
(第一東京弁護士会)  
2007年 桃尾・松尾・難波法律事務所パートナー  
弁護士  
現在に至る  
2013年 ハーバード・ロー・スクール修了(LL.M.)  
2014年 NY州弁護士登録  
2015年 北京大学法学院法学修士課程修了  
(LL.M.)  
2018年 慶應義塾大学講師(非常勤, 兼任)  
2020年 北京大学法学院博士課程修了(博士(法学))

藤田 卓仙 (ふじた たかのり)

2006年 東京大学医学部医学科卒業  
2011年 東京大学大学院法学政治学研究科修了(法  
曹養成専攻)  
2011年 慶應義塾大学特任研究員  
2012年 慶應義塾大学特任助教  
2015年 名古屋大学寄附講座准教授  
2017年 慶應義塾大学特任助教  
2018年 慶應義塾大学特任講師  
2021年 慶應義塾大学特任准教授  
現在に至る  
2018年 世界経済フォーラム第四次産業革命日  
本センターヘルスケア・データ政策プロ  
ジェクト長(兼任)

桐山 瑤子 (きりやま ようこ)

2008年 京都大学医学部医学科卒業  
2008年 国立国際医療センター病院初期臨床研  
修医  
2010年 国立国際医療研究センター病院救急科レ  
ジデント  
2013年 医薬品医療機器総合機構医療機器審査部  
審査専門員(臨床医学担当)  
2019年 株式会社 MICIN Regulatory Affairs  
Specialist  
現在に至る

# 次世代医療 AI——生体信号を介した人と AI の融合——

Biosignals and Next Generation Medical AI  
—At the Frontier of Human-AI Integration—

© 公益社団法人 計測自動制御学会 2021

2021年7月5日 初版第1刷発行

検印省略

編者 公益社団法人  
計測自動制御学会  
編著者 藤原 幸一  
久保 孝富  
著者 山川 俊貴  
伊藤 健史  
中野 高志  
吉本 潤一郎  
松尾 剛行  
藤田 卓仙  
桐山 山瑶子  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 三美印刷株式会社  
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10  
発行所 株式会社 コロナ社  
CORONA PUBLISHING CO., LTD.  
Tokyo Japan  
振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)  
ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-03381-6 C3353 Printed in Japan

(新宅) G



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。  
購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。  
落丁・乱丁はお取替えいたします。