

Funktionelles Zusammenspiel von Gehirn und Herz

Vincenzo Catrambone · Gaetano Valenza

Funktionelles Zusammenspiel von Gehirn und Herz

Von der Physiologie zur fortgeschrittenen
Methodik der Signalverarbeitung
und -modellierung

 Springer

Vincenzo Catrambone
Department of Information Engineering
University of Pisa, Bioengineering &
Robotics Research Center “E. Piaggio”
Pisa, Italy

Gaetano Valenza
Department of Information Engineering
University of Pisa, Bioengineering &
Robotics Research Center “E. Piaggio”
Pisa, Italy

ISBN 978-3-031-37568-2 ISBN 978-3-031-37569-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-37569-9>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Übersetzung der englischen Ausgabe: „Functional Brain-Heart Interplay“ von Vincenzo Catrambone und Gaetano Valenza, © The Editor(s) (if applicable) and The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2021. Veröffentlicht durch Springer International Publishing. Alle Rechte vorbehalten.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Nature Switzerland AG 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Merry Stuber

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Nature Switzerland AG und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland

Geleitwort

Seit vielen Jahren wird die Kognitionswissenschaft von der *Computermetapher* dominiert, bei der das Gehirn als CPU betrachtet wird, zerebrale Arbeitsspeichersysteme entsprechen dem RAM und die zerebralen Speichersysteme entsprechen Festplatten- oder Solid-State-Speichern. Gemäß dieser Metapher sind alle Aspekte der Kognition, Emotionen, Erinnerungen usw. im Gehirn lokalisiert, während die Rolle des Körpers eher mit Peripheriegeräten vergleichbar ist, zum Beispiel Eingabegeräten (Hände), Sensoren (Auge, Haut usw.) oder Stromversorgung (Herz). Obwohl Letztere wichtig sind, wirken sie sich nicht direkt auf die CPU aus, das heißt, in der Metapher beeinflussen sie nicht, wie/was wir denken, fühlen oder entscheiden. Im Gegensatz zu dieser Ansicht gibt es jetzt eine Fülle von Beweisen, die darauf hindeuten, dass es eine starke gegenseitige Wechselwirkung zwischen Körper und Gehirn gibt, die sich tiefgreifend auf unsere geistigen Aktivitäten auswirken kann. Der stärkste Fall kann für Emotionen gemacht werden, die sehr wahrscheinlich gegenseitige Gehirn-Körper-Interaktionen widerspiegeln. Die Rolle des Körpers könnte jedoch weit über Emotionen hinausgehen, wie zum Beispiel in Konzepten wie *verkörperte Kognition* vorgeschlagen. Während wir noch auf endgültige Antworten für die genaue Rolle der Gehirn-Körper-Interaktionen in unserem *Denken, Fühlen und Handeln* warten, sind dringend testbare – idealerweise mathematische oder rechnerische – Modelle erforderlich, um die Forschung zu diesen Themen voranzutreiben.

Dieses Buch von zwei Pionieren und herausragenden Experten auf diesem Gebiet bietet eine wunderbare Zusammenfassung und Perspektive zur Modellierung von Gehirn-Herz-Interaktionen (BHI). Neben der Überprüfung aller wichtigen BHI-Modellierungsansätze bieten die Autoren auch faszinierende Zusammenfassungen und Perspektiven zu Anwendungen in Bereichen wie Emotionsforschung, psychiatrische und neurologische Störungen, Schlaf und motorische Kontrolle.

Ein besseres Verständnis von BHI und Gehirn-Körper-Interaktionen im Allgemeinen wird tiefgreifende Auswirkungen haben. In der Grundlagenforschung wird es dazu beitragen, unsere derzeitige gehirnzentrierte Sichtweise zu überwinden und uns möglicherweise sogar näher an die Lösung einiger der rätselhaftesten

Konzepte/Forschungsthemen wie das *Selbst* und das *Bewusstsein* heranzuführen. Darüber hinaus – und von praktischerer Relevanz – wird es viele Bereiche der Medizin beeinflussen, wie Kardiologie, Neurologie, Psychiatrie und Psychosomatik. In der Medizin geht die Vorstellung von Gehirn-Körper-Interaktion über die klassischen medizinischen Disziplinen hinaus und fordert eine ganzheitlichere Sichtweise auf das Konzept der Krankheit. Als Arzt (und Neurologe) bin ich überzeugt, dass keine menschliche Krankheit auf ein Organ oder Körperteil beschränkt ist, sondern alle Krankheiten gleichzeitig Geist, Gehirn und Körper betreffen. Dies sollte stärker in unserer Forschung sowie in unserer täglichen praktischen Medizin berücksichtigt werden!

Ob Sie Ingenieur, Physiker oder Mathematiker sind, der sich für die Anwendung Ihrer Fachkenntnisse in den Lebenswissenschaften interessiert, oder ob Sie Biologe, Psychologe, Neurowissenschaftler oder Arzt sind: Sie werden von der Lektüre dieses Buches profitieren.

Arno Villringer
Direktor, Abteilung für Neurologie, Max-Planck-Institut
für Kognitions- und Neurowissenschaften Leipzig, Deutschland
Direktor, Abteilung für Kognitive Neurologie, Universitätsklinikum
Leipzig, Leipzig, Deutschland
Professor für Kognitive Neurologie,
Universität Leipzig, Leipzig, Deutschland
Sprecher, (nationale) Max-Planck-Schule für
Kognition, Leipzig, Deutschland
Direktor, MindBrainInstitute, Berliner Schule für Geist
und Gehirn, Berlin, Deutschland

Vorwort

Würden Sie die Leistung eines Fußballspielers beurteilen, indem Sie ihn alleine auf dem Spielfeld spielen sehen? Sicherlich würden Sie allgemeine Informationen über seine Spielfähigkeiten und seinen Gesundheitszustand erhalten, aber das kann weit entfernt von der tatsächlichen Leistungsbewertung sein, die auf umfassende Weise durchgeführt werden sollte, indem man mehrere Spieler betrachtet, die während der Spielzeit miteinander interagieren. Das ist es, was wir vor vielen Jahren erkannten, was in der Mehrheit der Forschungs- und klinischen Aktivitäten in multidisziplinären Bereichen, die das zentrale und autonome Nervensystem betreffen, das alle Körperorgane innerviert, vor sich ging. Biologische Systeme wie Gehirn und Herz sind „komplex“, was bedeutet, dass das System als Ganzes aufgrund der Interaktion vieler Teilkomponenten Eigenschaften aufweist, die die einzelnen Komponenten alleine nicht aufweisen können.

Tatsächlich wies die klinische Evidenz auf das funktionelle Zusammenspiel zwischen Gehirn und Körper hin, aber ein solider umfassender Datenmodellierungs-/Verarbeitungsrahmen, der die sehr unterschiedlichen physiologischen Dynamiken verknüpft, die jedoch auf die gleichen systemischen biologischen Reaktionen trotz Zeitskalenunterschiede zurückzuführen sind, war bis vor wenigen Jahren schwer zu finden.

Mit diesem Buch möchten wir den an dem ganzheitlichen und zeitgemäßen Forschungsfeld des funktionellen Gehirn-Herz-Zusammenspiels interessierten Lesern einen Überblick über die systemische Gehirn-Herz-Physiologie geben, der neue Ad-hoc-Mathematik vorantreibt und Wissen aus Kardiologie und Neurologie zusammenführt, um neue komplexe physiologische Dynamiken in einer multivariaten, kontinuierlichen Art und Weise zu entdecken. Obwohl die Methodenbeschreibung in der Tat technisch zugeschnitten ist, sind der wissenschaftliche Hintergrund, die Ergebnisse und die Diskussion auf Gehirn-Herz-Ebene auch für ein nichttechnisches Publikum gedacht.

Es versteht sich von selbst, dass Gehirn und Herz auf vielfältige Weise interagieren können, einschließlich biochemischer und elektrischer Wege, die anatomisch oder funktionell miteinander verbunden sein können. Zum Beispiel ist uns bewusst, dass Gehirnzellen, die keine Neuronen sind, wie Gliazellen, ebenfalls

an der Aufrechterhaltung der kardiovaskulären und respiratorischen Homöostase beteiligt sind.

In diesem Buch beziehen wir uns immer auf das „funktionelle“ Gehirn-Herz-Zusammenspiel, um die makroskopischen Veränderungen zu berücksichtigen, die gleichzeitig in den rechnerischen Gehirn- und Herzschlagserien beobachtet werden können, unabhängig von ihren besonderen und spezifischen anatomischen Ursprüngen. In den folgenden Kapiteln wird die Gehirnaktivität hauptsächlich auf die kortikale elektrische Aktivität der Pyramidenneuronen bezogen, gemessen durch Elektroenzephalografie, und auf hämodynamische Reaktionen, gemessen durch funktionelle Magnetresonanztomografie. Von der Herzseite aus wird der Schwerpunkt auf der autonomen Kontrolle der Herzschlagdynamik liegen und die vielen anderen kardiovaskulären Funktionen vernachlässigen, die möglicherweise nicht direkt mit der synergistischen sympathischen-parasympathischen Aktivität zusammenhängen.

Obwohl eine erschöpfende Beschreibung jedes auf das Gehirn und das Herz bezogenen Themas mehr als ein Buch an sich erfordern würde, sind wir sicher, dass dieses Buch die Grundlage bilden kann, durch die viele interessierte Wissenschaftler und Leser mehr über CNS-ANS-Messungen erfahren und eine erneuerte Sichtweise auf Neuro-/Psycho-Kardiologie und die außerordentlich komplexe Ätiologie darin formulieren können.

Pisa, Italien
März 2021

Vincenzo Catrambone
Gaetano Valenza

Inhaltsverzeichnis

Teil I Grundlagen des funktionalen

Gehirn-Herz-Zusammenhangs (BHI)

1 BHI-Physiologie auf einen Blick	3
1 Anatomische und physiologische Grundlagen	5
2 Beispielhafte BHI-bezogene Elicitationen	11
3 BHI-bezogene Pathologien	17
2 BHI-Schätzmethode	23
1 Allgemeiner Analyserahmen	25
1.1 Synchronisationswahrscheinlichkeit	25
1.2 Kohärenz	26
1.3 Maximaler Informationskoeffizient	27
1.4 Gemeinsame Symbolische Analyse	27
1.5 Zeitverzögerungsstabilität	29
1.6 Konvergente Kreuzabbildung	31
1.7 Informationsübertragung und Transferentropie	32
1.8 Granger-Kausalität	36
1.9 Normalisierte Kurzzeit-Partial-Directed-Coherence	36
2 Ad-hoc-Funktionsanalyse-Framework für BHI	38
2.1 Herzschlag-evozierte Potenziale	38
2.2 BHI-Synthesedatengenerierungsmodellierung	40
2.3 Bivariate Punktprozess-Modellierung	45
2.4 Jenseits des Zeit-Frequenz-Bereichs: Ein BHI-spezifischer multifraktaler Ansatz	48
2.5 Netzwerkphysiologie	52
3 Taxonomie für eine funktionelle BHI-Schätzung	53

Teil II Anwendungen

3 Sympathovagale Veränderungen	59
1 Experimenteller Datensatz	60

2	Signalvorverarbeitung.....	60
3	Ergebnisse.....	61
3.1	Eine maximale Informationskoeffizientenanalyse.....	61
3.2	Synthetische Datengenerierungsmodell-Analyse.....	62
3.3	Bivariate Punktprozess-Modellanalyse.....	70
3.4	Multifraktale Analyse.....	80
4	Emotion	87
1	Emotionale Bilder.....	90
1.1	Maximal Information Coefficient-Analyse.....	91
1.2	Granger-Kausalitätsanalyse.....	98
2	Emotionale Videos.....	104
5	Psychiatrische und neurologische Störungen	123
1	Leichte Depression.....	123
2	Epilepsie.....	134
3	Schizophrenie.....	137
3.1	Normalisierte Kurzzeit-Partial Directed Coherence-Analyse.....	141
3.2	Eine multivariate Transferentropie-Analyse.....	144
6	Schlaf	151
1	Eine Informationsübertragungsanalyse.....	154
2	Eine Zeitverzögerungsstabilitätsanalyse.....	158
7	Motorsteuerung	165
1	Eine Analyse des synthetischen Datengenerierungsmodells.....	174
2	Ein maschinelles Lernverfahren.....	180
	Anhang A	187
	Anhang B	199
	Literatur	211