
Computational Intelligence

Herausgegeben von

Prof. Dr. Wolfgang Bibel, Technische Universität Darmstadt

Prof. Dr. Rudolf Kruse, Otto-von Guericke-Universität Magdeburg

Prof. Dr. Bernhard Nebel, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Die Reihe „Computational Intelligence“ wird herausgegeben von den Professoren Wolfgang Bibel, Rudolf Kruse und Bernhard Nebel.

Aus den Kinderschuhen der „Künstlichen Intelligenz“ entwachsen bietet die Reihe breitgefächertes Wissen von den Grundlagen bis in die Anwendung, herausgegeben von namhaften Vertretern ihres Faches.

Computational Intelligence hat das weitgesteckte Ziel, das Verständnis und die Realisierung intelligenten Verhaltens voranzutreiben. Die Bücher der Reihe behandeln Themen aus den Gebieten wie z.B. Künstliche Intelligenz, Softcomputing, Robotik, Neuro- und Kognitionswissenschaften. Es geht sowohl um die Grundlagen (in Verbindung mit Mathematik, Informatik, Ingenieurs- und Wirtschaftswissenschaften, Biologie und Psychologie) wie auch um Anwendungen (z.B. Hardware, Software, Webtechnologie, Marketing, Vertrieb, Entscheidungsfindung). Hierzu bietet die Reihe Lehrbücher, Handbücher und solche Werke, die maßgebliche Themengebiete kompetent, umfassend und aktuell repräsentieren.

Weitere Bände siehe <http://www.springer.com/series/12572>

Rudolf Kruse • Christian Borgelt
Christian Braune • Frank Klawonn
Christian Moewes • Matthias Steinbrecher

Computational Intelligence

Eine methodische Einführung
in Künstliche Neuronale Netze,
Evolutionäre Algorithmen,
Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Rudolf Kruse
Fakultät für Informatik
OVG Universität Magdeburg
Magdeburg, Deutschland

Christian Borgelt
European Centre for Soft Computing
Mieres (Asturias), Spanien

Christian Braune
Fakultät für Informatik
OVG Universität Magdeburg
Magdeburg, Deutschland

Frank Klawonn
Fakultät für Informatik
Ostfalia Hochschule für
angewandte Wissenschaften
Wolfenbüttel, Deutschland

Christian Moewes
Robert Bosch GmbH
Bamberg, Deutschland

Matthias Steinbrecher
SAP Innovation Center
Potsdam, Deutschland

Georg Ruß war Koautor der 1. Auflage 2011

Computational Intelligence
ISBN 978-3-658-10903-5 ISBN 978-3-658-10904-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-10904-2

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2011, 2015

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. 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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

Vorwort

Das Gebiet *Computational Intelligence* als Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz umfasst Konzepte, Paradigmen, Algorithmen und Implementierungen zur Entwicklung von Systemen, die intelligentes Verhalten in komplexen Umgebungen automatisieren sollen. Dazu werden subsymbolische, vornehmlich naturanaloge Methoden verwendet, die unvollständiges, unpräzises und unsicheres Wissen tolerieren und auf diese Weise approximative, handhabbare, robuste und ressourcengünstige Lösungen ermöglichen.

Die Themenauswahl des Buches spiegelt die wichtigsten Gebiete des Bereichs Computational Intelligence wider. Die klassischen Gebiete *Künstliche Neuronale Netze*, *Fuzzy-Systeme* und *Evolutionäre Algorithmen* werden detailliert beschrieben, zudem werden auch neuere Methoden wie *Schwarmintelligenz* und *Probabilistische Graphische Modelle* in das Buch integriert.

Unser Ziel ist es, mit diesem Lehrbuch eine methodische Einführung in das Gebiet Computational Intelligence zu geben. Uns geht es nicht nur um die Vermittlung fundamentaler Konzepte und deren Umsetzung; es geht auch darum, den theoretischen Hintergrund der vorgeschlagenen Problemlösungen zu erklären und den Lesern die für den fundierten Einsatz dieser Methoden notwendige Sensibilität zu vermitteln.

Dieses Lehrbuch ist als Begleitbuch für Vorlesungen im Gebiet Computational Intelligence nutzbar, es kann aber auch von Praktikern aus Industrie und Wirtschaft für ein Selbststudium verwendet werden. Das Buch basiert auf Aufzeichnungen zu Vorlesungen, Übungen und Praktika, die von den Autoren seit vielen Jahren gehalten werden. Auf der Webseite

<http://www.computational-intelligence.eu>

findet man für die vier Themenbereiche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze Vorlesungsfolien, Übungsaufgaben, Hinweise zu Softwaretools und Ergänzungsmaterial.

Für die vorliegende zweite Auflage dieses Buches wurden alle Kapitel überarbeitet, aktualisiert und zum Teil erheblich erweitert.

Wir bedanken uns beim Springer Vieweg Verlag für die gute Zusammenarbeit.

Magdeburg, Juli 2015

Rudolf Kruse
Christian Borgelt
Christian Braune
Frank Klawonn
Christian Moewes
Matthias Steinbrecher

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Intelligente Systeme	1
1.2	Computational Intelligence	2
I	Neuronale Netze	5
2	Einleitung	7
2.1	Motivation	7
2.2	Biologische Grundlagen	9
3	Schwellenwertelemente	13
3.1	Definition und Beispiele	13
3.2	Geometrische Deutung	15
3.3	Grenzen der Ausdrucksmächtigkeit	17
3.4	Netze von Schwellenwertelementen	18
3.5	Training der Parameter	21
3.6	Varianten	31
3.7	Training von Netzen	31
4	Allgemeine neuronale Netze	33
4.1	Struktur neuronaler Netze	33
4.2	Arbeitsweise neuronaler Netze	36
4.3	Training neuronaler Netze	40
5	Mehrschichtige Perzeptren	43
5.1	Definition und Beispiele	43
5.2	Funktionsapproximation	49
5.3	Logistische Regression	55
5.4	Gradientenabstieg	58
5.5	Fehler-Rückübertragung	62
5.6	Beispiele zum Gradientenabstieg	64
5.7	Varianten des Gradientenabstiegs	69
5.8	Beispiele zu einigen Varianten	74
5.9	Anzahl der versteckten Neuronen	76
5.10	Sensitivitätsanalyse	78

6 Radiale-Basisfunktionen-Netze	81
6.1 Definition und Beispiele	81
6.2 Funktionsapproximation	85
6.3 Initialisierung der Parameter	89
6.4 Training der Parameter	95
6.5 Verallgemeinerte Form	100
7 Selbstorganisierende Karten	103
7.1 Definition und Beispiele	103
7.2 Lernende Vektorquantisierung	106
7.3 Nachbarschaft der Ausgabeneuronen	113
8 Hopfield-Netze	119
8.1 Definition und Beispiele	119
8.2 Konvergenz der Berechnungen	123
8.3 Assoziativspeicher	127
8.4 Lösen von Optimierungsproblemen	132
8.5 Simuliertes Ausglühen	138
9 Rückgekoppelte Netze	141
9.1 Einfache Beispiele	141
9.2 Darstellung von Differentialgleichungen	146
9.3 Vektorielle neuronale Netze	148
9.4 Fehler-Rückübertragung in der Zeit	151
II Evolutionäre Algorithmen	155
10 Einleitung	157
10.1 Metaheuristiken	157
10.2 Biologische Evolution	158
10.3 Simulierte Evolution	163
10.4 Das n -Damen-Problem	172
10.5 Verwandte Optimierungsalgorithmen	177
10.6 Das Problem des Handlungsreisenden	183
11 Bausteine evolutionärer Algorithmen	187
11.1 Kodierung der Lösungskandidaten	187
11.2 Fitness und Selektion	195
11.3 Genetische Operatoren	207
12 Grundlegende evolutionäre Algorithmen	219
12.1 Genetische Algorithmen	219
12.2 Evolutionsstrategien	232
12.3 Genetische Programmierung	243
12.4 Weitere populationsbasierte Ansätze	255

13 Spezielle Anwendungen und Techniken	269
13.1 Verhaltenssimulation	269
13.2 Mehrkriterienoptimierung	276
13.3 Parallelisierung	284
III Fuzzy-Systeme	287
14 Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Logik	289
14.1 Natürliche Sprache und formale Modelle	289
14.2 Fuzzy-Mengen	290
14.3 Repräsentation von Fuzzy-Mengen	293
14.4 Fuzzy-Logik	297
14.5 Operationen auf Fuzzy-Mengen	307
15 Das Extensionsprinzip	313
15.1 Abbildungen von Fuzzy-Mengen	313
15.2 Abbildungen von Niveaumengen	315
15.3 Kartesisches Produkt und zylindrische Erweiterung	316
15.4 Extensionsprinzip für mehrelementige Abbildungen	317
16 Fuzzy-Relationen	321
16.1 Gewöhnliche Relationen	321
16.2 Anwendung von Relationen und Inferenz	322
16.3 Inferenzketten	325
16.4 Einfache Fuzzy-Relationen	326
16.5 Verkettung von Fuzzy-Relationen	330
17 Ähnlichkeitsrelationen	333
17.1 Ähnlichkeit	333
17.2 Fuzzy-Mengen und extensionale Hüllen	334
17.3 Skalierungskonzepte	336
17.4 Interpretation von Fuzzy-Mengen	339
18 Possibilitätstheorie und verallgemeinerte Maße	345
19 Fuzzy-Regelsysteme	347
19.1 Mamdani-Regler	347
19.2 Takagi-Sugeno-Kang-Regler	356
19.3 Mamdani-Regler und Ähnlichkeitsrelationen	358
19.4 Logikbasierte Regler	362
20 Fuzzy-Relationalgleichungen	365
20.1 Lösbarkeit von Fuzzy-Relationalgleichungen	365
20.2 Fuzzy-Regelsysteme und -Relationalgleichungen	366
21 Hybride Systeme	369
21.1 Neuro-Fuzzy-Regler	369
21.2 Evolutionäre Fuzzy-Regler	380

22 Fuzzy Clustering	387
22.1 Fuzzy-Methoden in der Datenanalyse	387
22.2 Clusteranalyse	389
22.3 Voraussetzungen und Notation	389
22.4 Klassisches c -Means-Clustering	390
22.5 Transformation der Zugehörigkeiten	392
22.6 Regularisierung der Zugehörigkeiten	396
22.7 Vergleich der Ansätze	401
IV Bayes-Netze	403
23 Bayes-Netze	405
24 Grundlagen der Wahrscheinlichkeits- und Graphentheorie	411
24.1 Wahrscheinlichkeitstheorie	411
24.2 Graphentheorie	420
25 Zerlegungen	439
25.1 Abhängigkeits- und Unabhängigkeitsgraphen	443
26 Evidenzpropagation	451
27 Lernen Graphischer Modelle	465
28 Anhänge	477
28.1 Geradengleichungen	477
28.2 Regression	479
28.3 Aktivierungsumrechnung	483
Literaturverzeichnis	485
Index	501