

Statistische Informationstechnik

Kristian Kroschel • Gerhard Rigoll
Björn Schuller

Statistische Informationstechnik

Signal- und Mustererkennung,
Parameter- und Signalschätzung

5. Aufl.

 Springer

Prof. Dr.-Ing. Kristian Kroschel
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Elektrotechnik und
Informationstechnik
Kaiserstraße 12
D-76128 Karlsruhe
Deutschland
kristian.kroschel@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rigoll
Technische Universität München
Lehrstuhl für Mensch-
Maschine-Kommunikation
Arcisstraße 21
D-80290 München
Deutschland
rigoll@tum.de

und

Fraunhofer Institut für
Optronik, Systemtechnik und
Bildauswertung (IOSB)
Fraunhoferstraße 1
D-76131 Karlsruhe
Deutschland
kristian.kroschel@iosb-extern.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Björn Schuller
Technische Universität München
Lehrstuhl für Mensch-
Maschine-Kommunikation
Arcisstraße 21
D-80290 München
Deutschland
schuller@tum.de

ISBN 978-3-642-15953-4 e-ISBN 978-3-642-15954-1
DOI 10.1007/978-3-642-15954-1
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1973, 1986, 1996, 2004, 2011

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

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.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

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

Vorwort

Das vorliegende Buch stellt die 5. Auflage des Buches mit dem Titel *Statistische Nachrichtentheorie* dar. Der Inhalt beschränkt sich auf die Kernfragen der Themenbereiche *Detektion* und *Estimation* und berücksichtigt neuere Entwicklungen in der Technik. Dazu zählt die Tatsache, dass Systeme der Informationstechnik wegen der Genauigkeitsanforderungen bei der Realisierung und der daraus folgenden Kosten nur in *digitaler Technik* realisiert werden. Derartige digitale Systeme findet man heute bei vielen Massenanwendungen wie der Mobiltelefonie oder der Fahrzeugnavigation.

Es wird dabei vorausgesetzt, dass der Leser Kenntnisse auf den Gebieten *Systemtheorie* einschließlich Fourier- und Laplace- bzw. z-Transformation besitzt und auch über Grundkenntnisse der *Übertragungstechnik* verfügt. Auf die in diesem Buch benötigten Kenntnisse der *Statistik* wird dagegen etwas ausführlicher eingegangen, auch wenn die im Grundstudium der Informationstechnik vermittelten Grundkenntnisse der Statistik, z. B. [Kre68], [Pap65], [Han83], vorausgesetzt werden.

Das in diesem Buch zusammengefasste Material entstammt Vorlesungen in Karlsruhe, Hamburg und München sowie Vorträgen in der Industrie und an Einrichtungen zur Weiterbildung im Bereich der Ingenieur- und Naturwissenschaften. Inhaltlich wendet es sich an Studierende höheren Semesters der Fachrichtungen Informationstechnik und Informatik sowie der Elektrotechnik und Regelungstechnik oder auch der Technomathematik. Es wird auch für Ingenieure und Naturwissenschaftler von Interesse sein, die aufgrund ihres Arbeitsgebietes einen einführenden Einblick in die statistische Informationstechnik gewinnen wollen.

Für weitergehende Betrachtungen auf diesem Gebiet und spezielle Anwendungen, z. B. in der Radartechnik oder der Spektralschätzung, sei auf die entsprechende Literatur [Sko62], [Woo64], [Ber65], [Nah68], [Pil93] verwiesen.

Im ersten Kapitel werden die hier behandelten Begriffe *Detektion* und *Estimation* eingeführt, wobei immer auf praktische Anwendungen Bezug genommen wird.

Eine Zusammenfassung der hier benötigten Begriffe der *Statistik* stellt das zweite Kapitel dar. Leider gibt es keine allgemein anerkannte Nomenklatur für diese

Begriffe. In der DIN 13 303 wird die Schreibweise für Beschreibungsgrößen von Zufallsvariablen eingeführt, die in diesem Buch auf Zufallsprozesse erweitert wird. Am Schluss stehen Modelle zur Beschreibung stationärer und instationärer gestörter Zufallsprozesse.

Obwohl in diesem Buch vorwiegend zeitdiskrete Signale behandelt werden, die durch *Abtastung* aus analogen Signalen entstehen, so dass bereits eine für Aufgaben der statistischen Informationstechnik geeignete Darstellungsform vorliegt, wird dieses Thema im dritten Kapitel aufgegriffen, um z. B. die auf sinusförmigen Größen beruhende Darstellung von digital modulierten Signalen als Vektoren verstehen zu können.

Die einfache und multiple Detektion mit ihren verschiedenen Optimalitätskriterien werden im vierten Kapitel behandelt. Dazu zählt auch, die Fehlerwahrscheinlichkeit zu minimieren. Bei vorgegebener Signalenergie werden dazu optimale Signalvektorkonfigurationen und deren Entscheidungsgebiete bestimmt.

Aufbauend auf den im vierten Kapitel behandelten Grundlagen für die Detektionstheorie werden im fünften Kapitel Systeme für die Signal- und Mustererkennung dargestellt: Neben dem altbekannten Korrelationsempfänger auch neuere Ansätze wie Entscheidungsbäume, künstliche neuronale Netze, Kernelmaschinen, Ensemblelernen, und Sequenzklassifikation mittels Dynamischer Programmierung und Hidden-Markov-Modellen oder auf der Fuzzy-Logik basierende Systeme sowie Clusterverfahren, die bei der Mustererkennung eingesetzt werden. Als weiterführende Lektüre zu den Problemstellungen der Mustererkennung sei auf [Nie83] verwiesen. Die damit verbundenen Forschungsgebiete des Data Mining und Maschinellen Lernens werden beispielsweise in [Wit05] bzw. [Bis06] umfangreich behandelt.

Während der erste Teil dieses Buches sich mit der Detektion beschäftigt, wird im zweiten Teil auf die *Estimation*, d. h. die Parameter- und Signalschätzung näher eingegangen. Im sechsten Kapitel wird die *Parameterschätzung* behandelt. Hier findet man die *Bayes-* und die *Maximum-Likelihood-Schätzer*. Schließlich werden die Grenzen der Schätzgenauigkeit an Hand der Cramér-Rao-Ungleichung diskutiert.

Das siebte Kapitel stellt eine Einführung in die *lineare* Parameterschätzung dar, die auch bei der Signalschätzung eine Rolle spielt, da in beiden Fällen das Orthogonalitätsprinzip zur Herleitung der Schätzsysteme verwendet wird.

Der Rest des Buches befasst sich mit Problemen der *Signalschätzung*. Im achten Kapitel werden die Wiener-Filter behandelt. Dabei wird auf die drei Formen der Signalschätzung Filterung, Prädiktion und Interpolation eingegangen. Anwendungen dazu sind die Kompression von Quellensignalen mit Hilfe von DPCM und die Geräuschreduktion von gestörten Sprachsignalen.

Das neunte Kapitel ist den Kalman-Filtern als den Systemen zur Schätzung instationärer Prozesse gewidmet.

An dieser Stelle möchten wir all denen danken, die zum Entstehen dieses Buches durch Diskussionen und Hinweise innerhalb und außerhalb von Vorlesungen und Kursen und durch Rezensionen beigetragen haben. Bei der technischen Erstellung, z. B. der Abbildungen, unterstützten u. a. Frau Eva-Maria Schubart und Frau

Angelika Olbrich sowie für die aktuelle Neuauflage Frau Dipl.-Ing. Claudia Tiddia und Herr Fabian Bross.

Den Herren Dipl.-Ing. Dirk Bechler, Dr.-Ing. Martin Heckmann und Dipl.-Ing. Markus Schlosser sowie für die aktuelle Neuauflage den Herren Dipl.-Inf. Felix Weninger, Dipl.-Ing. Florian Eyben und Dipl.-Ing. Martin Wöllmer sei sehr herzlich gedankt für Diskussionen über inhaltliche Darstellungen und die kritische Durchsicht des Textes. Unbeschadet dieser Mitwirkung liegt die Verantwortung für die Form der Darstellung und die Auswahl des Stoffes bei den Autoren. Hinweise auf Unstimmigkeiten und Verbesserungsvorschläge sind stets willkommen und werden bei der nächsten Auflage Beachtung finden.

Besonderer Dank gilt den Ehepartnerinnen, die die vielen Stunden nachsahen, die über die übliche Arbeitszeit hinaus beim Schreiben dieses Buches verbracht wurden. Dem Verlag gilt Dank für die Ermutigung zu dieser neuen Konzeption des Buches und die gute Zusammenarbeit bei seiner Erstellung.

Karlsruhe und München, im November 2010

Kristian Kroschel, Gerhard Rigoll und Björn Schuller

Inhaltsverzeichnis

1	Detektion und Estimation	1
1.1	Detektion	3
1.1.1	Signalerkennung	4
1.1.2	Mustererkennung	5
1.2	Estimation	6
1.2.1	Parameterschätzung	7
1.2.2	Signalschätzung	8
1.3	Entwurfsansätze	10
2	Grundbegriffe der Statistik	13
2.1	Zufallsvariable	13
2.2	Zufallsprozesse	18
2.3	Transformationen	21
2.3.1	Transformation von Zufallsvariablen	21
2.3.2	Transformation von Prozessen	22
3	Signaldarstellung durch Vektoren	27
3.1	Vektordarstellung determinierter Signale	28
3.2	Darstellung von Prozessen durch Vektoren	29
3.2.1	Diskrete Karhunen-Loève-Transformation	30
3.2.2	Diskrete Cosinus-Transformation	33
3.3	Darstellung von instationären Prozessen	35
3.3.1	Definition der Wavelet-Transformation	36
3.3.2	Diskrete Wavelet-Transformation	38
3.3.3	Basisfunktionen für die Wavelet-Transformation	39
3.3.4	Wavelet-Transformation mit Hilfe von Filterbänken	42
3.3.5	Beispiel für ein Analysefilter	43
3.3.6	Implementation der diskreten Wavelet-Transformation	46
3.3.7	Gabor-Transformation	47
3.3.8	Diskrete Gabor-Transformation	50
3.3.9	Berechnung der Diskreten Gabor-Transformation	50

3.4	Vektordarstellung von M Signalen	51
3.4.1	Analyse und Synthese von Signalen	51
3.4.2	Gram-Schmidt-Verfahren	53
3.5	Irrelevante Information	55
3.6	Vektorkanäle	57
3.7	Unabhängigkeitsanalyse und Blinde Quellentrennung	58
4	Signal- und Mustererkennung	63
4.1	Binäre Detektion	63
4.1.1	Bayes-Kriterium	64
4.1.2	Maximum-a-posteriori-Kriterium (MAP)	67
4.1.3	Neyman-Pearson-Kriterium	71
4.1.4	Der Likelihood-Verhältnis-Test	73
4.1.5	Empfängerarbeitscharakteristik	74
4.1.6	Entscheidungsräume bei binärer Detektion	77
4.1.7	Rückweisung	84
4.2	Multiple Detektion	87
4.2.1	MAP-Prinzip für multiple Detektion	89
4.2.2	Entscheidungsregel bei Gaußprozessen	90
4.2.3	Wahl der Signalvektoren	92
4.2.4	Signalvektorkonfigurationen	93
4.2.5	Abschätzung der Fehlerwahrscheinlichkeit	103
4.2.6	Vergleich der Signalvektorkonfigurationen	106
4.3	Klassifikation durch Cluster	109
4.3.1	Vektorquantisierer	114
4.3.2	Cluster mit scharfen Partitionen	117
4.3.3	Cluster mit unscharfen Partitionen	121
4.4	Klassifikation ohne Kenntnis der Dichtefunktion	125
4.4.1	Schätzung der A-posteriori-Wahrscheinlichkeiten	127
4.4.2	Nächster-Nachbar-Klassifikator	129
4.4.3	Klassifikation mittels Mahalanobis-Abstand	131
4.4.4	Parzen-Fenster-Klassifikator	134
4.4.5	Mehrreferenzen-Klassifikation	135
4.4.6	Transformationen im Merkmalsraum	136
4.5	Vergleich der Verfahren	140
5	Systeme für die Signal- und Mustererkennung	143
5.1	Signalerkennung mit Korrelationsempfängern	144
5.2	Polynomklassifikator	152
5.3	Klassifikatoren als neuronale Netze	155
5.3.1	Strukturen künstlicher neuronaler Netze	158
5.3.2	Mehrschichten-Perzeptron	158
5.3.3	Koeffizienten des zweischichtigen Perzeptrons	162
5.3.4	Netze mit radialen Basisfunktionen	167
5.3.5	Koeffizienten des RBF-Netzes	169

5.4	Klassifikation mit Fuzzy-Logik	171
5.4.1	Fuzzifizierung der Eingangsgrößen	174
5.4.2	Fuzzy-Inferenz mit Hilfe einer Regelbasis	176
5.4.3	Defuzzifizierung des Inferenz-Ergebnisses	180
5.5	MAP-Prinzip zur Mustererkennung	182
5.6	Entscheidungsbäume	183
5.7	Klassifikation mittels Support-Vektor-Maschinen	187
5.8	Dynamische Sequenzklassifikation	192
5.8.1	Baum-Welch Schätzung	194
5.8.2	Viterbi-Dekodierung	195
5.8.3	Dynamic-Time-Warping	196
5.9	Entscheidungsregeln	202
5.10	Partitionierung und Balancierung	205
5.11	Ensemble- und Metaklassifikation	208
5.11.1	Bagging, Boosting und MultiBoosting	210
5.11.2	Stacking und Voting	213
5.12	Gütemaße für Klassifikationssysteme	215
5.12.1	Gütemaße für Mehrklassenprobleme	216
5.12.2	Gütemaße für binäre Entscheidungen	219
5.12.3	Signifikanztests	219
5.13	Vergleich der Klassifikationssysteme	223
6	Parameterschätzung (Estimation)	225
6.1	Beurteilungskriterien für Schätzwerte	227
6.2	Parameterschätzung mit A-priori-Information	229
6.2.1	Kostenfunktion des quadratischen Fehlers	232
6.2.2	Kostenfunktion des absoluten Fehlers	233
6.2.3	Kostenfunktion mit konstanter Gewichtung großer Fehler	234
6.2.4	Invarianz des Bayes-Schätzwertes bezüglich der Kostenfunktion	236
6.3	Parameterschätzung ohne A-priori-Information	237
6.4	Minimaler mittlerer quadratischer Schätzfehler	245
6.4.1	Minimale Fehlervarianz bei fehlender A-priori-Dichte	245
6.4.2	Minimaler mittlerer quadratischer Fehler bei bekannter A-priori-Dichte	248
6.5	Multiple Parameterschätzung	250
6.5.1	Schätzverfahren	250
6.5.2	Schätzfehler	252
7	Lineare Parameterschätzsysteme	255
7.1	Gauß-Markoff-Theorem	256
7.2	Additive unkorrelierte Störungen	261
7.3	Parametervektor ohne A-priori-Information	263
7.4	Verbesserung der Schätzwerte	264
7.5	Schätzsystem als lineares Transversalfilter	268

7.6	Adaptive Parameterschätzung	273
8	Wiener-Filter	279
8.1	Zeitkontinuierliche Wiener-Filter	282
8.1.1	Aufgabenstellung und Annahmen	282
8.1.2	Die Wiener-Hopf-Integralgleichung	284
8.1.3	Lösung der Wiener-Hopf-Integralgleichung	285
8.2	Eigenschaften von Wiener-Filtern	289
8.2.1	Schätzung einfacher Signalprozesse	289
8.2.2	Wiener-Filter und konventionell entworfene Filter	298
8.3	Zeitdiskrete Wiener-Filter	302
8.3.1	Minimaler mittlerer quadratischer Schätzfehler	305
8.4	Anwendungen von Wiener-Filtern	306
8.4.1	DPCM-Codierer zur Redundanzreduktion	306
8.4.2	Geräuschreduktion bei Sprachübertragung	313
9	Kalman-Filter	319
9.1	Aufgabenstellung und Annahmen	320
9.2	Prädiktion	321
9.2.1	Prädiktion um einen Schritt	322
9.2.2	Prädiktion für beliebig viele Schritte	333
9.3	Filterung	339
9.4	Interpolation	343
9.4.1	Interpolation von einem festen Zeitpunkt aus	345
9.4.2	Interpolation für einen festen Zeitpunkt	352
9.4.3	Interpolation über einen festen Zeitabstand	358
	Literaturverzeichnis	361
	Index	367