



**Stuart Russell
Peter Norvig**

Künstliche Intelligenz

Ein moderner Ansatz

3., aktualisierte Auflage

Künstliche Intelligenz

Künstliche Intelligenz

Inhaltsverzeichnis

Künstliche Intelligenz

Inhaltsübersicht

Vorwort 13

Teil I - Künstliche Intelligenz

Kapitel 1 - Einführung 21

Intelligente Agenten 59

Teil II - Problemlösen

Kapitel 3 - Problemlösung durch Suchen 97

Über die klassische Suche hinaus 159

Adversariale Suche 205

Probleme unter Rand- oder Nebenbedingungen 251

Teil III - Wissen, Schließen und Planen

Kapitel 7 - Logische Agenten 289

Logik erster Stufe First-Order-Logik 345

Inferenz in der Logik erster Stufe 387

Klassisches Planen 437

Planen und Agieren in der realen Welt 477

Wissensrepräsentation 517

Teil IV - Unsicheres Wissen und Schließen

Kapitel 13 - Unsicherheit quantifizieren 567

Probabilistisches Schließen 601

Probabilistisches Schließen über die Zeit 661

Einfache Entscheidungen 711

Komplexe Entscheidungen 751

Teil V - Lernen

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 18 - Aus Beispielen lernen 807

Wissen beim Lernen 889

Lernen probabilistischer Modelle 927

Verstärkendes (Reinforcement-)Lernen 959

Teil VI - Kommunizieren, Wahrnehmen und Handeln

Kapitel 22 - Verarbeitung natürlicher Sprache 995

Natürliche Sprache für die Kommunikation 1027

Wahrnehmung 1071

Robotik 1119

Teil VII - Schlussfolgerungen

Kapitel 26 - Philosophische Grundlagen 1175

KI: Gegenwart und Zukunft 1203

Mathematischer Hintergrund 1213

Hinweise zu Sprachen und Algorithmen 1221

Bibliografie 1225

Personenregister 1271

Register 1283

Bibliografie 1225

Personenregister 1271

Register 1283

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 13

Neu in dieser Auflage 13

Überblick über das Buch 14

Die Website 15

Danksagungen 16

Die Autoren 18

Teil I - Künstliche Intelligenz

Kapitel 1 - Einführung 21

1.1 Was ist KI? 22

Inhaltsverzeichnis

1.2 Die Grundlagen der künstlichen Intelligenz 26

1.3 Die Geschichte der künstlichen Intelligenz 39

1.4 Die aktuelle Situation 52

Intelligente Agenten 59

2.1 Agenten und Umgebungen 60

2.2 Gutes Verhalten: das Konzept der Rationalität 63

2.3 Die Natur der Umgebungen 66

2.4 Die Struktur von Agenten 73

Teil II - Problemlösen

Kapitel 3 - Problemlösung durch Suchen 97

3.1 Problemlösende Agenten 98

3.2 Beispielprobleme 104

3.3 Die Suche nach Lösungen 110

3.4 Uninformierte Suchstrategien 116

3.5 Informierte (heuristische) Suchstrategien 128

3.6 Heuristikfunktionen 139

Über die klassische Suche hinaus 159

4.1 Lokale Suchalgorithmen und Optimierungsprobleme 160

4.2 Lokale Suche in stetigen Räumen 170

4.3 Suchen mit nichtdeterministischen Aktionen 173

4.4 Mit partiellen Beobachtungen suchen 179

4.5 Online-Suchagenten und unbekannte Umgebungen 189

Adversariale Suche 205

5.1 Spiele 206

5.2 Optimale Entscheidungen in Spielen 208

5.3 Alpha-Beta-Kürzung 212

5.4 Unvollständige Echtzeitentscheidungen 216

5.5 Stochastische Spiele 223

5.6 Teilweise beobachtbare Spiele 226

5.7 Hochklassige Spielprogramme 232

5.8 Alternative Ansätze 235

Probleme unter Rand- oder Nebenbedingungen 251

6.1 Probleme unter Rand- und Nebenbedingungen Definition 252

6.2 Beschränkungsweitergabe: Inferenz in CSPs 258

Inhaltsverzeichnis

6.3 Backtracking-Suche für CSPs 265

6.4 Lokale Suche für Probleme unter Rand- und Nebenbedingungen 272

6.5 Die Struktur von Problemen 274

Teil III - Wissen, Schließen und Planen

Kapitel 7 - Logische Agenten 289

7.1 Wissensbasierte Agenten 291

7.2 Die Wumpus-Welt 292

7.3 Logik 296

7.4 Aussagenlogik: eine sehr einfache Logik 300

7.5 Theoreme der Aussagenlogik beweisen 305

7.6 Effektive aussagenlogische Inferenz 316

7.7 Agenten auf der Basis von Aussagenlogik 321

Logik erster Stufe First-Order-Logik 345

8.1 Wiederholung der Repräsentation 346

8.2 Syntax und Semantik der Logik erster Stufe 352

8.3 Anwendung der Logik erster Stufe 363

8.4 Wissensmodellierung in Logik erster Stufe 370

Inferenz in der Logik erster Stufe 387

9.1 Aussagen- und prädikatenlogische Inferenz 388

9.2 Unifikation und Lifting 391

9.3 Vorwärtsverkettung 396

9.4 Rückwärtsverkettung 404

9.5 Resolution 413

Klassisches Planen 437

10.1 Definition der klassischen Planung 438

10.2 Planen mit Zustandsraumsuche 445

10.3 Planungsgraphen 452

10.4 Andere klassische Planungskonzepte 460

10.5 Analyse von Planungsansätzen 466

Planen und Agieren in der realen Welt 477

11.1 Zeit, Zeitpläne und Ressourcen 478

11.2 Hierarchisches Planen 482

11.3 Planen und Agieren in nicht deterministischen Domänen 493

11.4 Multiagenten-Planen 504

Inhaltsverzeichnis

Wissensrepräsentation 517

- 12.1 Ontologisches Engineering 518
- 12.2 Kategorien und Objekte 521
- 12.3 Ereignisse 527
- 12.4 Mentale Ereignisse und mentale Objekte 532
- 12.5 Deduktive Systeme für Kategorien 535
- 12.6 Schließen mit Defaultinformation 540
- 12.7 Die Internet-Shopping-Welt 545

Teil IV - Unsicheres Wissen und Schließen

Kapitel 13 - Unsicherheit quantifizieren 567

- 13.1 Handeln unter Unsicherheit 568
- 13.2 Grundlegende Notation für die Wahrscheinlichkeit 572
- 13.3 Inferenz mithilfe vollständig gemeinsamer Verteilungen 580
- 13.4 Unabhängigkeit 583
- 13.5 Die Bayessche Regel und ihre Verwendung 585
- 13.6 Eine erneute Betrachtung der Wumpus-Welt 589

Probabilistisches Schließen 601

- 14.1 Wissensrepräsentation in einer unsicheren Domäne 602
- 14.2 Die Semantik Bayesscher Netze 605
- 14.3 Effiziente Repräsentation bedingter Verteilungen 610
- 14.4 Exakte Inferenz in Bayesschen Netzen 615
- 14.5 Annähernde Inferenz in Bayesschen Netzen 623
- 14.6 Relationale Wahrscheinlichkeitsmodelle und Modelle erster Stufe 632
- 14.7 Weitere Ansätze zum unsicheren Schließen 640

Probabilistisches Schließen über die Zeit 661

- 15.1 Zeit und Unsicherheit 662
- 15.2 Inferenz in temporalen Modellen 666
- 15.3 Hidden-Markov-Modelle 675
- 15.4 Kalman-Filter 681
- 15.5 Dynamische Bayessche Netze 688
- 15.6 Verfolgen mehrerer Objekte 698

Einfache Entscheidungen 711

- 16.1 Glauben und Wünsche unter Unsicherheit kombinieren 712
- 16.2 Grundlagen der Nutzentheorie 713

Inhaltsverzeichnis

- 16.3 Nutzenfunktionen 717
- 16.4 Nutzenfunktionen mit Mehrfachattributen 725
- 16.5 Entscheidungsnetze 730
- 16.6 Der Wert von Information 732
- 16.7 Entscheidungstheoretische Expertensysteme 737

Komplexe Entscheidungen 751

- 17.1 Sequentielle Entscheidungsprobleme 752
- 17.2 Wert-Iteration 759
- 17.3 Taktik-Iteration 764
- 17.4 Partiiell beobachtbare MEPs 766
- 17.5 Entscheidungen mit mehreren Agenten: Spieltheorie 775
- 17.6 Mechanismenentwurf 789

Teil V - Lernen

Kapitel 18 - Aus Beispielen lernen 807

- 18.1 Lernformen 809
- 18.2 Überwachtes Lernen 811
- 18.3 Lernen von Entscheidungsbäumen 814
- 18.4 Die beste Hypothese bewerten und auswählen 825
- 18.5 Theorie des Lernens 831
- 18.6 Regression und Klassifizierung mit linearen Modellen 835
- 18.7 Künstliche neuronale Netze 845
- 18.8 Parameterfreie Modelle 856
- 18.9 Support-Vector-Maschinen 863
- 18.10 Gruppenlernen 868
- 18.11 Maschinelles Lernen in der Praxis 873

Wissen beim Lernen 889

- 19.1 Eine logische Formulierung des Lernens 890
- 19.2 Wissen beim Lernen 899
- 19.3 Erklärungsbasiertes Lernen 902
- 19.4 Lernen mit Relevanzinformation 907
- 19.5 Induktive logische Programmierung 910

Lernen probabilistischer Modelle 927

- 20.1 Statistisches Lernen 928
- 20.2 Lernen mit vollständigen Daten 932

Inhaltsverzeichnis

20.3 Lernen mit verborgenen Variablen: der EM-Algorithmus 943

Verstärkendes (Reinforcement-)Lernen 959

21.1 Einführung 960

21.2 Passives verstärkendes Lernen 962

21.3 Aktives verstärkendes Lernen 969

21.4 Verallgemeinerung beim verstärkenden Lernen 975

21.5 Strategiesuche 979

21.6 Anwendungen des verstärkenden Lernens 981

Teil VI - Kommunizieren, Wahrnehmen und Handeln

Kapitel 22 - Verarbeitung natürlicher Sprache 995

22.1 Sprachmodelle 996

22.2 Textklassifizierung 1001

22.3 Informationsabruf 1004

22.4 Informationsextraktion 1011

Natürliche Sprache für die Kommunikation 1027

23.1 Phrasenstrukturgrammatiken 1028

23.2 Syntaktische Analyse (Parsing) 1032

23.3 Erweiterte Grammatiken und semantische Interpretation 1037

23.4 Maschinelle Übersetzung 1047

23.5 Spracherkennung 1054

Wahrnehmung 1071

24.1 Bildaufbau 1073

24.2 Frühe Operationen der Bildverarbeitung 1080

24.3 Objekterkennung nach Erscheinung 1088

24.4 Rekonstruieren der 3D-Welt 1093

24.5 Objekterkennung aus Strukturinformationen 1103

24.6 Computervision im Einsatz 1107

Robotik 1119

25.1 Einführung 1120

25.2 Roboter-Hardware 1122

25.3 Roboterwahrnehmung 1128

25.4 Bewegung planen 1136

25.5 Planung unsicherer Bewegungen 1143

25.6 Bewegung 1147

Inhaltsverzeichnis

25.7 Software-Architekturen in der Robotik 1154

25.8 Anwendungsbereiche 1157

Teil VII - Schlussfolgerungen

Kapitel 26 - Philosophische Grundlagen 1175

26.1 Schwache KI: Können Maschinen intelligent handeln? 1176

26.2 Starke KI: Können Maschinen wirklich denken? 1182

26.3 Ethik und Risiken bei der Entwicklung künstlicher Intelligenz 1191

KI: Gegenwart und Zukunft 1203

27.1 Agentenkomponenten 1204

27.2 Agentenarchitekturen 1207

27.3 Gehen wir in die richtige Richtung? 1209

27.4 Was passiert, wenn die KI erfolgreich ist? 1211

Mathematischer Hintergrund 1213

A.1 Komplexitätsanalyse und $O()$ -Notation 1214

A.2 Vektoren, Matrizen und lineare Algebra 1216

A.3 Wahrscheinlichkeitsverteilungen 1218

Hinweise zu Sprachen und Algorithmen 1221

B.1 Sprachen mit Backus-Naur-Form (BNF) definieren 1222

B.2 Algorithmen mit Pseudocode beschreiben 1223

B.3 Online-Hilfe 1224

Bibliografie 1225

Personenregister 1271

Register 1283

Bibliografie 1225

Personenregister 1271

Register 1283

Vorwort

Teil I - Künstliche Intelligenz

Kapitel 1 - Einführung

1.1 Was ist KI?

1.1.1 Menschliches Handeln: der Ansatz mit dem Turing-Test

Inhaltsverzeichnis

1.1.2 Menschliches Denken: der Ansatz der kognitiven Modellierung

1.1.3 Rationales Denken: der Ansatz der Denkregeln

1.1.4 Rationales Handeln: der Ansatz der rationalen Agenten

1.2 Die Grundlagen der künstlichen Intelligenz

1.2.1 Philosophie

1.2.2 Mathematik

1.2.3 Wirtschaftswissenschaft

1.2.4 Neurowissenschaft

1.2.5 Psychologie

1.2.6 Technische Informatik

1.2.7 Regelungstheorie und Kybernetik

1.2.8 Linguistik

1.3 Die Geschichte der künstlichen Intelligenz

1.3.1 Der Reifungsprozess der künstlichen Intelligenz (1943/1955)

1.3.2 Die Geburt der künstlichen Intelligenz (1956)

1.3.3 Früher Enthusiasmus, große Erwartungen (1952/1969)

1.3.4 Ein bisschen Realität (1966/1973)

1.3.5 Wissensbasierte Systeme: der Schlüssel zum Erfolg?
(1969/1979)

1.3.6 KI wird zu einem Industriezweig (1980 bis heute)

1.3.7 Die Rückkehr der neuronalen Netze (1986 bis heute)

1.3.8 KI wird zu einer Wissenschaft (1987 bis heute)

1.3.9 Das Entstehen intelligenter Agenten (1995 bis heute)

1.3.10 Die Verfügbarkeit sehr großer Datenmengen (2001 bis heute)

1.4 Die aktuelle Situation

Kapitel 2 - Intelligente Agenten

2.1 Agenten und Umgebungen

2.2 Gutes Verhalten: das Konzept der Rationalität

2.2.1 Rationalität

2.2.2 Allwissenheit, Lernen und Autonomie

Inhaltsverzeichnis

2.3 Die Natur der Umgebungen

2.3.1 Spezifizieren der Aufgabenumgebung

2.3.2 Eigenschaften von Aufgabenumgebungen

2.4 Die Struktur von Agenten

2.4.1 Agentenprogramme

2.4.2 Einfache Reflexagenten

2.4.3 Modellbasierte Reflexagenten

2.4.4 Zielbasierte Agenten

2.4.5 Nutzenbasierte Agenten

2.4.6 Lernende Agenten

2.4.7 Wie die Komponenten von Agentenprogrammen funktionieren

Teil II - Problemlösen

Kapitel 3 - Problemlösung durch Suchen

3.1 Problemlösende Agenten

3.1.1 Wohldefinierte Probleme und Lösungen

3.1.2 Probleme formulieren

3.2 Beispielprobleme

3.2.1 Spielprobleme

3.2.2 Probleme aus der realen Welt

3.3 Die Suche nach Lösungen

3.3.1 Infrastruktur für Suchalgorithmen

3.3.2 Leistungsbewertung für die Problemlösung

3.4 Uninformierte Suchstrategien

3.4.1 Breitensuche (Breadth-first)

3.4.2 Suche mit einheitlichen Kosten (Uniform-cost-Suche)

3.4.3 Tiefensuche (Depth-first)

3.4.4 Tiefenbeschränkte Suche (Depth-limited)

3.4.5 Iterativ vertiefende Tiefensuche (iterative deepening depth-first search)

3.4.6 Bidirektionale Suche

3.4.7 Vergleich uninformatierter Suchstrategien

Inhaltsverzeichnis

3.5 Informierte (heuristische) Suchstrategien

3.5.1 Gierige Bestensuche (Greedy Best-first)

3.5.2 A*-Suche: Minimierung der geschätzten Gesamtkosten für die Lösung

3.5.3 Speicherbegrenzte heuristische Suche

3.5.4 Lernen, besser zu suchen

3.6 Heuristikfunktionen

3.6.1 Die Wirkung heuristischer Genauigkeit auf die Leistung

3.6.2 Zulässige Heuristikfunktionen aus gelockerten Problemen generieren

3.6.3 Zulässige Heuristiken aus Unterproblemen generieren: Musterdatenbanken

3.6.4 Heuristiken aus Erfahrung lernen

Kapitel 4 - Über die klassische Suche hinaus

4.1 Lokale Suchalgorithmen und Optimierungsprobleme

4.1.1 Hillclimbing-Suche (Bergsteigeralgorithmus)

4.1.2 Simulated-Annealing simuliertes Abkühlen

4.1.3 Lokale Strahlsuche (Local Beam Search)

4.1.4 Genetische Algorithmen

4.2 Lokale Suche in stetigen Räumen

4.3 Suchen mit nichtdeterministischen Aktionen

4.3.1 Die erratische Staubsaugerwelt

4.3.2 AND-OR-Suchbäume

4.3.3 Immer wieder versuchen

4.4 Mit partiellen Beobachtungen suchen

4.4.1 Suchen ohne Beobachtung

4.4.2 Suchen mit Beobachtungen

4.4.3 Partiiell beobachtbare Probleme lösen

4.4.4 Ein Agent für partiell beobachtbare Umgebungen

4.5 Online-Suchagenten und unbekannte Umgebungen

Inhaltsverzeichnis

- 4.5.1 Online-Suchprobleme
- 4.5.2 Online-Suchagenten
- 4.5.3 Lokale Online-Suche
- 4.5.4 Lernen bei der Online-Suche

Kapitel 5 - Adversariale Suche

- 5.1 Spiele
- 5.2 Optimale Entscheidungen in Spielen
 - 5.2.1 Der Minimax-Algorithmus
 - 5.2.2 Optimale Entscheidungen in Mehrspieler-Spielen
- 5.3 Alpha-Beta-Kürzung
 - 5.3.1 Zugreihenfolge
- 5.4 Unvollständige Echtzeitentscheidungen
 - 5.4.1 Bewertungsfunktionen
 - 5.4.2 Abbrechen der Suche
 - 5.4.3 Vorabkürzung
 - 5.4.4 Suche und Nachschlagen
- 5.5 Stochastische Spiele
 - 5.5.1 Bewertungsfunktionen für Zufallsspiele
- 5.6 Teilweise beobachtbare Spiele
 - 5.6.1 Kriegspiel: teilweise beobachtbares Schach
 - 5.6.2 Kartenspiele
- 5.7 Hochklassige Spielprogramme
- 5.8 Alternative Ansätze

Kapitel 6 - Probleme unter Rand- oder Nebenbedingungen

- 6.1 Probleme unter Rand- und Nebenbedingungen Definition
 - 6.1.1 Beispielproblem: Färben von Karten
 - 6.1.2 Beispielproblem: Fertigungsablaufplanung
 - 6.1.3 Variationen des CSP-Formalismus
- 6.2 Beschränkungsweitergabe: Inferenz in CSPs

Inhaltsverzeichnis

- 6.2.1 Knotenkonsistenz
- 6.2.2 Kantenkonsistenz
- 6.2.3 Pfadkonsistenz
- 6.2.4 k-Konsistenz
- 6.2.5 Globale Beschränkungen
- 6.2.6 Sudoku-Beispiel

6.3 Backtracking-Suche für CSPs

- 6.3.1 Reihenfolge von Variablen und Werten
- 6.3.2 Suche und Inferenz verknüpfen
- 6.3.3 Intelligentes Backtracking: rückwärts schauen

6.4 Lokale Suche für Probleme unter Rand- und Nebenbedingungen

6.5 Die Struktur von Problemen

Teil III - Wissen, Schließen und Planen

Kapitel 7 - Logische Agenten

- 7.1 Wissensbasierte Agenten
- 7.2 Die Wumpus-Welt
- 7.3 Logik
- 7.4 Aussagenlogik: eine sehr einfache Logik
 - 7.4.1 Syntax
 - 7.4.2 Semantik
 - 7.4.3 Eine einfache Wissensbasis
 - 7.4.4 Eine einfache Inferenzprozedur
- 7.5 Theoreme der Aussagenlogik beweisen
 - 7.5.1 Inferenz und Beweise
 - 7.5.2 Beweis durch Resolution
 - 7.5.3 Horn-Klauseln und definitive Klauseln
 - 7.5.4 Vorwärts- und Rückwärtsverkettung
- 7.6 Effektive aussagenlogische Inferenz

Inhaltsverzeichnis

7.6.1 Ein vollständiger Backtracking-Algorithmus

7.6.2 Lokale Suchalgorithmen

7.6.3 Die Landschaft zufälliger SAT-Probleme

7.7 Agenten auf der Basis von Aussagenlogik

7.7.1 Der aktuelle Zustand der Welt

7.7.2 Ein hybrider Agent

7.7.3 Logische Zustandsschätzung

7.7.4 Pläne durch aussagenlogische Inferenz erstellen

Kapitel 8 - Logik erster Stufe First-Order-Logik

8.1 Wiederholung der Repräsentation

8.1.1 Die Sprache des Denkens

8.1.2 Die Vorzüge der formalen und natürlichen Sprachen vereinen

8.2 Syntax und Semantik der Logik erster Stufe

8.2.1 Modelle für die Logik erster Stufe

8.2.2 Symbole und Interpretationen

8.2.3 Terme

8.2.4 Atomare Sätze

8.2.5 Komplexe Sätze

8.2.6 Quantoren

8.2.7 Gleichheit

8.2.8 Eine alternative Semantik?

8.3 Anwendung der Logik erster Stufe

8.3.1 Zusicherungen und Abfragen in der Logik erster Stufe

8.3.2 Die Verwandtschaftsdomäne

8.3.3 Zahlen, Mengen und Listen

8.3.4 Die Wumpus-Welt

8.4 Wissensmodellierung in Logik erster Stufe

8.4.1 Der Prozess der Wissensmodellierung

8.4.2 Die Domäne der elektronischen Schaltkreise

Kapitel 9 - Inferenz in der Logik erster Stufe

Inhaltsverzeichnis

9.1 Aussagen- und prädikatenlogische Inferenz

9.1.1 Inferenzregeln für Quantoren

9.1.2 Reduzierung auf aussagenlogische Inferenz

9.2 Unifikation und Lifting

9.2.1 Eine Inferenzregel der Logik erster Stufe

9.2.2 Unifikation

9.2.3 Speichern und Abrufen

9.3 Vorwärtsverkettung

9.3.1 Definite Klauseln erster Stufe

9.3.2 Ein einfacher Algorithmus für die Vorwärtsverkettung

9.3.3 Effiziente Vorwärtsverkettung

9.4 Rückwärtsverkettung

9.4.1 Ein Algorithmus für die Rückwärtsverkettung

9.4.2 Logikprogrammierung

9.4.3 Effiziente Implementierung von Logikprogrammen

9.4.4 Redundante Inferenz und Endlosschleifen

9.4.5 Datenbanksemantik von Prolog

9.4.6 Logikprogrammierung mit Randbedingungen

9.5 Resolution

9.5.1 Konjunktive Normalform für die Logik erster Stufe

9.5.2 Die Resolutions-Inferenzregel

9.5.3 Beispielbeweise

9.5.4 Vollständigkeit der Resolution

9.5.5 Gleichheit

9.5.6 Resolutionsstrategien

9.5.7 Praktische Verwendung von Resolutions-Theorembeweisern

Kapitel 10 - Klassisches Planen

10.1 Definition der klassischen Planung

10.1.1 Beispiel: Luftfrachttransport

10.1.2 Beispiel: das Ersatzreifenproblem

Inhaltsverzeichnis

10.1.3 Beispiel: die Blockwelt

10.1.4 Die Komplexität der klassischen Planung

10.2 Planen mit Zustandsraumsuche

10.2.1 Vorwärts-(Progressions-)Zustandsraumsuche

10.2.2 Rückwärts-Zustandsraumsuche

10.2.3 Heuristiken für die Planung

10.3 Planungsgraphen

10.3.1 Planungsgraphen für heuristische Schätzung

10.3.2 Der Graphplan-Algorithmus

10.3.3 Terminierung von Graphplan

10.4 Andere klassische Planungskonzepte

10.4.1 Klassisches Planen als boolesche Erfüllbarkeit

10.4.2 Planen als logische Deduktion erster Stufe: Situationskalkül

10.4.3 Planen als Problem unter Rand- und Nebenbedingungen

10.4.4 Planen als Verfeinerung von partiell geordneten Plänen

10.5 Analyse von Planungsansätzen

Kapitel 11 - Planen und Agieren in der realen Welt

11.1 Zeit, Zeitpläne und Ressourcen

11.1.1 Zeit- und Ressourceneinschränkungen darstellen

11.1.2 Scheduling-Probleme lösen

11.2 Hierarchisches Planen

11.2.1 Höhere Aktionen

11.2.2 Primitive Lösungen suchen

11.2.3 Abstrakte Lösungen suchen

11.3 Planen und Agieren in nicht deterministischen Domänen

11.3.1 Sensorloses Planen

11.3.2 Kontingenzplanen

11.3.3 Online-Neuplanen

11.4 Multiagenten-Planen

11.4.1 Planen mit mehreren simultanen Aktionen

Inhaltsverzeichnis

11.4.2 Planen mit mehreren Agenten: Kooperation und Koordination

Kapitel 12 - Wissensrepräsentation

12.1 Ontologisches Engineering

12.2 Kategorien und Objekte

12.2.1 Physische Zusammensetzung

12.2.2 Maße

12.2.3 Objekte: Dinge und Stoffe

12.3 Ereignisse

12.3.1 Prozesse

12.3.2 Zeitintervalle

12.3.3 Fluenten und Objekte

12.4 Mentale Ereignisse und mentale Objekte

12.5 Deduktive Systeme für Kategorien

12.5.1 Semantische Netze

12.5.2 Beschreibungslogiken

12.6 Schließen mit Defaultinformation

12.6.1 Circumscription und Defaultlogik

12.6.2 Truth Maintenance Systems (Wahrheitserhaltungssysteme)

12.7 Die Internet-Shopping-Welt

12.7.1 Links folgen

12.7.2 Angebote vergleichen

Teil IV - Unsicheres Wissen und Schließen

Kapitel 13 - Unsicherheit quantifizieren

13.1 Handeln unter Unsicherheit

13.1.1 Unsicherheit zusammenfassen

13.1.2 Unsicherheit und rationale Entscheidungen

13.2 Grundlegende Notation für die Wahrscheinlichkeit

13.2.1 Das Wesen von Wahrscheinlichkeiten

13.2.2 Die Sprache der Aussagen in Wahrscheinlichkeitsbehauptungen

Inhaltsverzeichnis

13.2.3 Warum Wahrscheinlichkeitsaxiome sinnvoll sind

13.3 Inferenz mithilfe vollständig gemeinsamer Verteilungen

13.4 Unabhängigkeit

13.5 Die Bayessche Regel und ihre Verwendung

13.5.1 Die Anwendung der Bayesschen Regel: der einfache Fall

13.5.2 Verwendung der Bayesschen Regel: Evidenzen kombinieren

13.6 Eine erneute Betrachtung der Wumpus-Welt

Kapitel 14 - Probabilistisches Schließen

14.1 Wissensrepräsentation in einer unsicheren Domäne

14.2 Die Semantik Bayesscher Netze

14.2.1 Darstellung der vollständigen gemeinsamen Verteilung

14.2.2 Bedingte Unabhängigkeiten in Bayesschen Netzen

14.3 Effiziente Repräsentation bedingter Verteilungen

14.4 Exakte Inferenz in Bayesschen Netzen

14.4.1 Inferenz durch Aufzählung

14.4.2 Der Algorithmus zur Variableneliminierung

14.4.3 Die Komplexität exakter Inferenz

14.4.4 Clustering-Algorithmen

14.5 Annähernde Inferenz in Bayesschen Netzen

14.5.1 Direkte Sampling-Methoden

14.5.2 Inferenz durch Markov-Ketten-Simulation

14.6 Relationale Wahrscheinlichkeitsmodelle und Modelle erster Stufe

14.6.1 Mögliche Welten

14.6.2 Relationale Wahrscheinlichkeitsmodelle

14.6.3 Wahrscheinlichkeitsmodelle im offenen Universum

14.7 Weitere Ansätze zum unsicheren Schließen

14.7.1 Regelbasierte Methoden für unsicheres Schließen

14.7.2 Unwissen darstellen: Dempster-Shafer-Theorie

14.7.3 Repräsentation von Vagheit: Fuzzy-Mengen und Fuzzy-Logik

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 15 - Probabilistisches Schließen über die Zeit

15.1 Zeit und Unsicherheit

15.1.1 Zustände und Beobachtungen

15.1.2 Übergangs- und Sensormodelle

15.2 Inferenz in temporalen Modellen

15.2.1 Filtern und Vorhersage

15.2.2 Glättung

15.2.3 Die wahrscheinlichste Folge finden

15.3 Hidden-Markov-Modelle

15.3.1 Vereinfachte Matrixalgorithmen

15.3.2 Beispiel für Hidden-Markov-Modell: Positionierung

15.4 Kalman-Filter

15.4.1 Gaußsche Verteilungen aktualisieren

15.4.2 Ein einfaches eindimensionales Beispiel

15.4.3 Der allgemeine Fall

15.4.4 Anwendbarkeit der Kalman-Filterung

15.5 Dynamische Bayessche Netze

15.5.1 DBNs erstellen

15.5.2 Exakte Inferenz in DBNs

15.5.3 Annähernde Inferenz in DBNs

15.6 Verfolgen mehrerer Objekte

Kapitel 16 - Einfache Entscheidungen

16.1 Glauben und Wünsche unter Unsicherheit kombinieren

16.2 Grundlagen der Nutzentheorie

16.2.1 Einschränkungen rationaler Prioritäten

16.2.2 Prioritäten führen zu Nutzen

16.3 Nutzenfunktionen

16.3.1 Nutzeneinschätzung und Nutzenskalen

16.3.2 Der Nutzen von Geld

Inhaltsverzeichnis

16.3.3 Erwarteter Nutzen und Enttäuschung nach einer Entscheidung

16.3.4 Menschliches Urteilsvermögen und Irrationalität

16.4 Nutzenfunktionen mit Mehrfachattributen

16.4.1 Dominanz

16.4.2 Prioritätsstruktur und Nutzen mit Mehrfachattributen

16.5 Entscheidungsnetze

16.5.1 Darstellung eines Entscheidungsproblems mithilfe eines Entscheidungsnetzes

16.5.2 Auswertung von Entscheidungsnetzen

16.6 Der Wert von Information

16.6.1 Ein einfaches Beispiel

16.6.2 Eine allgemeine Formel für perfekte Information

16.6.3 Eigenschaften des Informationswertes

16.6.4 Implementierung eines Agenten, der Informationen sammelt

16.7 Entscheidungstheoretische Expertensysteme

Kapitel 17 - Komplexe Entscheidungen

17.1 Sequentielle Entscheidungsprobleme

17.1.1 Nutzer über der Zeit

17.1.2 Optimale Taktiken und die Nutzen von Zuständen

17.2 Wert-Iteration

17.2.1 Die Bellman-Gleichung für Nutzen

17.2.2 Der Algorithmus für die Wert-Iteration

17.2.3 Konvergenz der Wert-Iteration

17.3 Taktik-Iteration

17.4 Partiell beobachtbare MEPs

17.4.1 Definition von partiell beobachtbaren MEPs

17.4.2 Wert-Iteration für partiell beobachtbare MEPs

17.4.3 Online-Agenten für partiell beobachtbare MEPs

17.5 Entscheidungen mit mehreren Agenten: Spieltheorie

17.5.1 Ein-Zug-Spiele

Inhaltsverzeichnis

17.5.2 Wiederholte Spiele

17.5.3 Sequentielle Spiele

17.6 Mechanismenentwurf

17.6.1 Auktionen

17.6.2 Gemeinsame Güter

Teil V - Lernen

Kapitel 18 - Aus Beispielen lernen

18.1 Lernformen

18.2 Überwachtes Lernen

18.3 Lernen von Entscheidungsbäumen

18.3.1 Entscheidungsbäume als Leistungselemente

18.3.2 Ausdruckskraft von Entscheidungsbäumen

18.3.3 Entscheidungsbäume per Induktion aus Beispielen ableiten

18.3.4 Auswahl von Attributtests

18.3.5 Verallgemeinerung und Überanpassung

18.3.6 Die Anwendbarkeit von Entscheidungsbäumen erweitern

18.4 Die beste Hypothese bewerten und auswählen

18.4.1 Modellauswahl: Komplexität gegenüber Anpassungsgüte

18.4.2 Von Fehlerraten zum Verlust

18.4.3 Regularisierung

18.5 Theorie des Lernens

18.5.1 Beispiel für PAC-Lernen: Entscheidungslisten lernen

18.6 Regression und Klassifizierung mit linearen Modellen

18.6.1 Univariate lineare Regression

18.6.2 Multivariate lineare Regression

18.6.3 Lineare Klassifizierer mit Schwellenwertfunktion

18.6.4 Lineare Klassifizierung mit logistischer Regression

18.7 Künstliche neuronale Netze

18.7.1 Strukturen neuronaler Netze

18.7.2 Einschichtige neuronale Feedforward-Netze (Perzeptrons)

Inhaltsverzeichnis

18.7.3 Mehrschichtige neuronale Feedforward-Netze

18.7.4 Lernen in mehrschichtigen Netzen

18.7.5 Strukturen neuronaler Netze lernen

18.8 Parameterfreie Modelle

18.8.1 Nächste-Nachbarn-Modelle

18.8.2 Die nächsten Nachbarn mit k-d-Bäumen suchen

18.8.3 Ortsabhängiges Hashing

18.8.4 Parameterfreie Regression

18.9 Support-Vector-Maschinen

18.10 Gruppenlernen

18.10.1 Online-Lernen

18.11 Maschinelles Lernen in der Praxis

18.11.1 Fallstudie: handschriftliche Ziffernerkennung

18.11.2 Fallstudie: Wortsinn und Hauspreise

Kapitel 19 - Wissen beim Lernen

19.1 Eine logische Formulierung des Lernens

19.1.1 Beispiele und Hypothesen

19.1.2 Aktuell-beste-Hypothese-Suche

19.1.3 Geringste-Verpflichtung-Suche

19.2 Wissen beim Lernen

19.2.1 Einfache Beispiele

19.2.2 Einige allgemeine Schemata

19.3 Erklärungsbasiertes Lernen

19.3.1 Allgemeine Regeln aus Beispielen extrahieren

19.3.2 Effizienzverbesserung

19.4 Lernen mit Relevanzinformation

19.4.1 Den Hypothesenraum festlegen

19.4.2 Lernen und Verwenden von Relevanzinformation

19.5 Induktive logische Programmierung

19.5.1 Ein Beispiel

Inhaltsverzeichnis

19.5.2 Induktive Top-down-Lernmethoden

19.5.3 Induktives Lernen mit inversem Schließen

19.5.4 Entdeckungen mit induktiver logischer Programmierung

Kapitel 20 - Lernen probabilistischer Modelle

20.1 Statistisches Lernen

20.2 Lernen mit vollständigen Daten

20.2.1 ML-Parameterlernen: diskrete Modelle

20.2.2 Naive Bayes-Modelle

20.2.3 ML-Parameterlernen: stetige Modelle

20.2.4 Bayessches Parameterlernen

20.2.5 Strukturen Bayesscher Netze lernen

20.2.6 Dichteabschätzung mit parameterfreien Modellen

20.3 Lernen mit verborgenen Variablen: der EM-Algorithmus

20.3.1 Nicht überwachtes Clustering: Gaußsche Mischungen lernen

20.3.2 Bayessche Netze mit verborgenen Variablen lernen

20.3.3 Hidden-Markov-Modelle lernen

20.3.4 Die allgemeine Form des EM-Algorithmus

20.3.5 Bayessche Netzstrukturen mit verborgenen Variablen lernen

Kapitel 21 - Verstärkendes (Reinforcement-)Lernen

21.1 Einführung

21.2 Passives verstärkendes Lernen

21.2.1 Direkte Nutzenschätzung

21.2.2 Adaptive dynamische Programmierung

21.2.3 Lernen mit temporaler Differenz

21.3 Aktives verstärkendes Lernen

21.3.1 Exploration

21.3.2 Lernen einer Aktion/Wert-Funktion

21.4 Verallgemeinerung beim verstärkenden Lernen

21.5 Strategiesuche

Inhaltsverzeichnis

21.6 Anwendungen des verstärkenden Lernens

21.6.1 Anwendungen beim Spielen

21.6.2 Anwendung auf Robotersteuerung

Teil VI - Kommunizieren, Wahrnehmen und Handeln

Kapitel 22 - Verarbeitung natürlicher Sprache

22.1 Sprachmodelle

22.1.1 N-Gramm-Zeichenmodelle

22.1.2 N-Gramm-Modelle glätten

22.1.3 Modellauswertung

22.1.4 N-Gramm-Wortmodelle

22.2 Textklassifizierung

22.2.1 Klassifizierung durch Datenkomprimierung

22.3 Informationsabruf

22.3.1 IR-Bewertungsfunktionen

22.3.2 IR-Systembewertung

22.3.3 IR-Verbesserungen

22.3.4 Der PageRank-Algorithmus

22.3.5 Der HITS-Algorithmus

22.3.6 Beantworten von Fragen

22.4 Informationsextraktion

22.4.1 Endliche Automaten für die Informationsextraktion

22.4.2 Probabilistische Modelle für die Informationsextraktion

22.4.3 Bedingte Zufallsfelder für die Informationsextraktion

22.4.4 Ontologieextraktion aus großen Korpora

22.4.5 Automatisierte Vorlagenkonstruktion

22.4.6 Maschinelles Lesen

Kapitel 23 - Natürliche Sprache für die Kommunikation

23.1 Phrasenstrukturgrammatiken

23.1.1 Das Lexikon von e0

23.1.2 Die Grammatik von e0

Inhaltsverzeichnis

23.2 Syntaktische Analyse (Parsing)

23.2.1 Wahrscheinlichkeiten für PCFGs lernen

23.2.2 Kontextfreie und Markov-Modelle vergleichen

23.3 Erweiterte Grammatiken und semantische Interpretation

23.3.1 Lexikalisierte PCFGs

23.3.2 Formale Definition erweiterter Grammatikregeln

23.3.3 Fallkongruenz und Subjekt-Verb-Kongruenz

23.3.4 Semantische Interpretation

23.3.5 Komplikationen

23.4 Maschinelle Übersetzung

23.4.1 Maschinelle Übersetzungssysteme

23.4.2 Statistische maschinelle Übersetzung

23.5 Spracherkennung

23.5.1 Akustisches Modell

23.5.2 Sprachmodell

23.5.3 Einen Spracherkenner erstellen

Kapitel 24 - Wahrnehmung

24.1 Bildaufbau

24.1.1 Bilder ohne Linsen: die Lochkamera

24.1.2 Linsensysteme

24.1.3 Skalierte orthographische Projektion

24.1.4 Licht und Schatten

24.1.5 Farbe

24.2 Frühe Operationen der Bildverarbeitung

24.2.1 Kantenerkennung

24.2.2 Textur

24.2.3 Optischer Fluss

24.2.4 Segmentierung von Bildern

24.3 Objekterkennung nach Erscheinung

24.3.1 Komplexe Erscheinungs- und Musterelemente

Inhaltsverzeichnis

24.3.2 Fußgängererkennung mit HOG-Merkmalen

24.4 Rekonstruieren der 3D-Welt

24.4.1 Bewegungsparallaxe

24.4.2 Binokulares Sehen

24.4.3 Mehrere Ansichten

24.4.4 Textur

24.4.5 Schattierung

24.4.6 Konturen

24.4.7 Objekte und die geometrische Struktur von Szenen

24.5 Objekterkennung aus Strukturinformationen

24.5.1 Die Geometrie von Körpern: Arme und Beine suchen

24.5.2 Kohärente Erscheinung: Personen im Video verfolgen

24.6 Computervision im Einsatz

24.6.1 Wörter und Bilder

24.6.2 Rekonstruktion von vielen Ansichten

24.6.3 Computervision für die Bewegungssteuerung

Kapitel 25 - Robotik

25.1 Einführung

25.2 Roboter-Hardware

25.2.1 Sensoren

25.2.2 Effektoren

25.3 Roboterwahrnehmung

25.3.1 Lokalisierung und Zuordnung

25.3.2 Weitere Wahrnehmungstypen

25.3.3 Maschinelles Lernen in der Roboterwahrnehmung

25.4 Bewegung planen

25.4.1 Konfigurationsraum

25.4.2 Zellzerlegungsmethoden

25.4.3 Modifizierte Kostenfunktionen

25.4.4 Skelettierungsmethoden

Inhaltsverzeichnis

25.5 Planung unsicherer Bewegungen

25.5.1 Robuste Methoden

25.6 Bewegung

25.6.1 Dynamik und Steuerung

25.6.2 Potentialfeldregelung

25.6.3 Reaktive Steuerung

25.6.4 Reinforcement-Learning-Regelung

25.7 Software-Architekturen in der Robotik

25.7.1 Subsumptions-Architektur

25.7.2 Drei-Schichten-Architekturen

25.7.3 Pipeline-Architektur

25.8 Anwendungsbereiche

Teil VII - Schlussfolgerungen

Kapitel 26 - Philosophische Grundlagen

26.1 Schwache KI: Können Maschinen intelligent handeln?

26.1.1 Das Argument ... aus Unfähigkeit

26.1.2 Der mathematische Einwand

26.1.3 Das Argument der Formlosigkeit

26.2 Starke KI: Können Maschinen wirklich denken?

26.2.1 Mentale Zustände und das Gehirn im Tank

26.2.2 Funktionalismus und das Gehirnprothesenexperiment

26.2.3 Biologischer Naturalismus und das Chinesische Zimmer

26.2.4 Bewusstsein, Qualia und die Erklärungslücke

26.3 Ethik und Risiken bei der Entwicklung künstlicher Intelligenz

Kapitel 27 - KI: Gegenwart und Zukunft

27.1 Agentenkomponenten

27.2 Agentenarchitekturen

27.3 Gehen wir in die richtige Richtung?

27.4 Was passiert, wenn die KI erfolgreich ist?

Inhaltsverzeichnis

Kapitel A - Mathematischer Hintergrund

A.1 Komplexitätsanalyse und $O()$ -Notation

A.1.1 Asymptotische Analyse

A.1.2 NP und inhärent harte Probleme

A.2 Vektoren, Matrizen und lineare Algebra

A.3 Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Kapitel B - Hinweise zu Sprachen und Algorithmen

B.1 Sprachen mit Backus-Naur-Form (BNF) definieren

B.2 Algorithmen mit Pseudocode beschreiben

B.3 Online-Hilfe

Bibliografie

Personenregister

Register

!

Numerisch

15-Puzzle 106

3-nächste-Nachbarn 874

5. Generation 48

8-Damen-Problem 106, 162, 272

8-Puzzle 105, 106, 139

A

A*-Algorithmus

IDA* 135

iterativ vertiefender 135

A*-Suche 130

Abbruchtest 216

ABC 36

abfallender MCMC-Filter 704

Abfragen 363

Inhaltsverzeichnis

Abfragesprache 1004
Abfragevariablen 615
Abhängigkeiten
 funktionale 907
 weitreichende 1045
Abhängigkeits- grammatik 1061
Abkühlung
 simulierte 160, 165
Ablehnungs-Sampling 625
ABO (asymptotisch begrenzte Optimalität) 1211
Abrufen 394
Abrundung 107
Abschluss 411
absoluter Fehler 134
Absolver 143
Abstraktion 102, 787
Abstraktionsgrad 103
Abstraktionshierarchie 510
Abstrips 510
Abtastrate 1055
Abtrennung 642
Abwärtsverfeinerung 487
Abzugsschach 227
AC-3 259
ACT 403, 485
Actions 189
Ada 37
AdaBoost 869
Adalines 44
Adaptive Dynamische Programmierung 964
Add 440

Inhaltsverzeichnis

ADP-Agent 964

Advice Taker 42

AFSM 1154

Agenten 25, 28

- ADP- 964

- Architektur 74, 1207

- Attribute 86

- Aussagenlogik 321

- Darstellung, strukturierte 87

- einfache Reflex- 76

- Einzel- 69

- entscheidungs- theoretische 772

- gierige 970

- hybride 326

- intelligente 51, 60

- Komponenten 1204

- lernende 83

- modellbasierte 78

- nutzenbasierte 81, 772

- Nutzenfunktion 81

- partiell beobachtbare Umgebungen 186

- planende 98

- problemlösende 98

- rationale 25, 60, 63, 64

- Struktur 73

- Variablen 86

- Werte 86

- wissensbasierte 290

- zielbasierte 80

Agentenentwürfe 961

Agentenfunktion 60

Agentenprogramme 61, 73

Aggregation 479

AGTC 170

Inhaltsverzeichnis

aima.cs.berkeley.edu 73
Aktion/Wert-Funktion 973
Aktionen 28, 71, 101, 104, 506, 776
 Act 485
 höhere 483
 Informationsermittlung 1144
 primitive 483
 simultane 505
Aktionausschlussaxiome 330
Aktionsschemas 439
Aktionsüberwachung 501
aktive Sensoren 1072, 1122
Aktivierung 846
Aktivierungsfunktion 847
Aktoren 505
Aktuatoren 60, 66, 67, 1120
Aktuell-beste-Hypothese- Suche 892
akustisches Modell 1055
Albedo 1078
Algorithmen
 Anytime 1208
 Boyer-Moore 425
 Clustering 622
 CYK 1033
 Davis-Putman- 317
 Decision-Tree- Learning 817
 DPLL 317
 Expectiminimax 774
 Factored-Frontier 704
 gemeinsame Baum- 622
 genetische 45, 160, 167
 Graphplan 456
 GSAT 334

Inhaltsverzeichnis

hierarchische Lookahead-	493
HITS (Hyperlink-Induced Topic Search)	1008, 1022
Hybrid A*	1141
Inside-Outside	1036
konstruktive Induktion	913
Local Beam Search	166
MAC (Maintaining Arc Consistency)	269
Markov Chain Monte Carlo	629
Metropolis	197
Metropolis-Hastings-	660
Min-Conflicts	319
minimaler Spielraum	482
Minimax	210
Monte-Carlo-	623
optimale	161
optimale Hirn- schädigung	856
PageRank	1022
PC-2	261
ProbCut	221
randomisiert gewichtete Mehrheits-	872
Rete	402
RSA	425
SATPlan	329
Skelettierung	1142
SPI (Symbolische Probabilistische Inferenz)	647
Stemming-	1007
strukturelle EM	952
Tiling	856
Value-Iteration	1139
variableneliminierende	618
Viterbi	675
vollständige	161
Vorwärts-Rückwärts-	672
Vorwärtsverkettung	398
Algorithmus	30

Inhaltsverzeichnis

Allais-Paradoxon 722
Alldiff 256, 262
Allianzen 211
Allmendeklemme 794
Allquantor 357
Allwissenheit 65
Alpha-Beta-Kürzung 212
Alpha-Beta-Search 219
Alpha-Beta-Suche 214
Alvey-Bericht 48
Analogie
 derivationale 922
Analogy 43
Analyse
 asymptotische 1214, 1215
 mathematische 1214
And 849
AND-OR-Baum 175
AND-OR-Graphen 315
And-Or-Graph-Search 177
AND-Parallelität 409
And-Search 177
angelic 488
Angelic-Search 491
Ankereffekt 724
Ankertext 546, 1008
Annahme
 eindeutige Namen 362, 634
 Weltabgeschlossenheit 362
Annealing
 simulated 165
anreizkompatibel 791

Inhaltsverzeichnis

Ansätze

regelbasierte 641

Ansichten

mehrere 1096

Anspruchserfüllung 32

Antezedenz 300

Antrieb

hydraulischer 1127

pneumatischer 1127

Antwortliterale 418

anwendbar 101, 440, 447

Anytime-Algorithmus 1208

Aortaverengung 738

A-posteriori-Wahrscheinlichkeit 573

Appearance Model 1105

Append 368, 408

append 406

Apprenticeship Learning 988

A-priori-Hypothese 929, 937

A-priori-Wahrscheinlichkeiten 573

Äquivalenz

inferentielle 389

logische 305

Äquivalenzklassen 217

Arbeitsraum-Repräsentation 1136

Architektur 74

Drei-Schichten- 1155

hybride 1154, 1207

kognitive 403

Pipeline- 1156

reflexive 1209

Software- 1154

Subsumptions- 1154

Inhaltsverzeichnis

Arch-Learning 895
Arität 353
ARPAbet 1056
Arten
 natürliche 524
Artificial General Intelligence 51
Artificial Life 197
Ask 291, 363
AskMSR 1009, 1023
AskVars 363
ASPEN 510
Assoziativspeicher 882
asymptotisch begrenzte Komplexität 1211
asymptotische Analyse 1215
atmost-Beschränkung 262
ATMS 544
atomare Darstellung 86, 98
atomare Ereignisse 597
atomarer Satz 300
Attribut 86, 890
 mehrwertiges 824
attributbasiertes Extraktionssystem 1011
Attribut-Grammatik 1060
Attributtest
 Auswahl 820
Aufgabennetze 468
Aufgabenumgebungen 66, 69
Auflösung der Mehrdeutigkeit 1047
Aufrollen 638, 694
Aufteilungspunkt 824
Aufzählung

Inhaltsverzeichnis

- Inferenz 615
- Augmented Finite State Machines 1154
- Auktion 790
 - mit versiegelten Geboten 792
 - mit versiegelten Geboten und zweithöchstem Preis 792
- Aura 424, 428
- Ausblick 1204
- Ausdrücke
 - reguläre 1011
- Ausdrucksfähigkeit 87
- ausführende Schicht 1156
- Ausführung 100
- Ausführungsüberwachung 501
- Ausgabeattribute
 - stetigwertige 824
- Ausgangszustand 104, 207, 441
- ausgeglichen 454
- Ausgleichsknoten 611
- Ausnutzung 970
- Ausrichtungsmethode 1101
- Aussagen 573
- Aussagenlogik 29, 290, 300
 - Agenten 321
 - Grammatik 300
 - Semantik 301
 - Syntax 300
 - Überführen in 388, 638
- aussagenlogische Standpunkte 532
- Aussagensymbol 300
- Auswahlpunkte 407
- Auswertung
 - partielle 921

Inhaltsverzeichnis

Auswertungsfunktionen 207
Auszahlungsfunktion 776
Authority 1009
Autoclass 954
Automaten
 erweiterte endliche 1154
automatische Montageablaufsteuerung 109
Automatisches logisches Schließen 23
autonome Datenverarbeitung 88
Autonomie 66
AUV 1120
Axiome 291, 364
 Aktionsausschluss- 330
 Nachfolgerzustands- 324
 Peano- 366
 Percept 494
 Vorbedingungs- 330
Axon 33

B

backed-up value 136
Backgammon 223, 233, 241
Backjumping 270
 konfliktgesteuertes 271
Backmarking 280
Back-Off 999
Backpropagation 48, 852
Backpropagation-Lernalgorithmen 45
Backtrack 266
Backtracking 193
 abhängigkeits- gesteuertes 280
 chronologisches 269
 dynamisches 281

Inhaltsverzeichnis

- intelligentes 269
- Backtracking-Algorithmus 317
- Backtracking-Search 265, 304
- Backtracking-Suche 123, 265
 - CSP 265
- Backus-Naur-Form 1222
- Bag of Words 1002
- Bagging 880
- Banditenproblem 970
- Bang-Bang-Steuerung 982
- Baseball 1062
- Basisfunktionen 976
- Batch-Gradientenabstieg 838
- Baum
 - AND-OR- 175
- Baum-Algorithmen, gemeinsame 622
- Baumbank 1035
- Baumbreite 278
- Baum-Suchalgorithmus 111
- Baumzerlegung 277
- Bayes-Klassifizierer 589
- Bayes-Modell
 - naives 589, 934, 947
- Bayes-Nash-Gleichgewicht 788
- Bayessche Ansicht 579
- Bayessche Netze
 - Gibbs-Sampling 629
- Bayessche Netzstrukturen
 - verborgene Variablen 951
- Bayessche Regel 585
- Bayessches Lernen 871
- Bayessches Netz 50

Inhaltsverzeichnis

Ablehnungs-Sampling	625
annähernde Inferenz	623
bedingte Unabhängig-keit	609
dynamisches	688, 753, 772
Erstellung	606
exakte Inferenz	615
hybrides	612
Semantik	605
stetige Variablen	612
Strukturen	940
Topologie	603
verborgene Variablen	947
Bayessches verstärkendes Lernen	966
Beantworten von Fragen	1009
Bedauern	723, 872
bedingender Fall	604
bedingte Gaußsche Verteilung	614
bedingte Unabhängigkeit	587
bedingte Wahrscheinlich-keit	573
bedingte Wahrscheinlichkeitstabelle	604
bedingter Effekt	497
Bedingung der logischen Konsequenz	899
Bedingungen	
fallen lassen	894
begrenzte Rationalität	26
Begriffsschrift	332, 376
Behauptungen	
logische	572
probabilistische	572
Behaviorismus	35
Beispiel	
falsch negativ	891
falsch positiv	891

Inhaltsverzeichnis

- Regeln extrahieren 903
- bekannt 71, 100
- Belief Revision 543
- Belief State 179, 200, 227, 327, 453, 666, 733, 766
 - konservative Näherung 328
- Belief-States-Raum 181
- Belle 240
- Bellman-Aktualisierung 760
- Bellman-Gleichung 759
- Belohnung 85, 960
- Benchmarks 1214
- BenInq 555
- beobachtbar 100
 - nicht 69
 - partiell 766
 - teilweise 69
 - vollständig 69, 752
- Beobachtbarkeit
 - teilweise 226
- Beobachtung 809
- Beobachtungsmodell 665
- Beobachtungssätze 28
- berechenbar 30
- Bereich 1086
- Bergrücken 163
- Bergsteigen
 - mit erster Auswahl 164
 - mit zufälligem Neustart 164
 - stochastisches 164
- Bergsteigen-Suche 193
- Bergsteigeralgorithmus 161
- Bergsteiger-Such- algorithmus 162

Inhaltsverzeichnis

beschränkte Optimierung 173

Beschränkungen

Alldiff 256

atmost 262

binäre 256

disjunktive 255

globale 256

Hypergraph 257

Lernen 271

lineare/nichtlineare 255

Prioritäts- 258

Ressourcen- 262

Symmetrie brechende 278

unäre 256

Beschränkungsgewichtung 273

Beschränkungsoptimierungsproblem 258

Beschränkungssprache 255

Beschränkungsweitergabe 258

beschreibende Theorie 722

Beschreibungen

optimistische 490

PEAS- 66

pessimistische 490

probabilistische 32

Beschreibungslänge

minimale 831, 878, 931

Beschreibungslogiken 535, 539

Bestätigung 594

Bestätigungstheorie 28

Bestensuche 128

gierige 128

heuristischer Pfadalgorithmus 157

Best-First 128

Inhaltsverzeichnis

Bestimmtheit 907

 konsistente 909

Bestrafung

 fortlaufende 783

Betaverteilungen 938

Bewegungen

 ausführen 1147

 konforme 1136, 1145

 Punkt-zu-Punkt 1136

 überwachte 1145

 unsichere 1143

Bewegungsmodell 1129

Bewegungsunschärfe 1076

Beweise

 nichtkonstruktive 418

Bewertungsfunktionen 216, 225

Bewusstsein 34, 1182, 1190

Bezeichner 177

Beziehungen

 noisy 611

 Unterkategorie 1018

 verrauschte 611

BGBLitz 241

Bias

 deklarative 910

Bias-Gewicht 839

Bi-Implikation 300

Bikonditional 300

Bild 1074

Bildaufbau 1116

Bildstrukturmodell 1104

Bildsynthesemodell 1072

Inhaltsverzeichnis

Bildverarbeitung 1116
Billiards 242
binäre Beschränkung 256
binäre Entscheidungsdiagramme 470
binäre Resolutionsregel 415
Bindungen
 epistemologische 351
 ontologische 350
Bindungsliste 363
biologischer Naturalis- mus 1188
Blackbox 252, 469
Blattknoten 111
blinde Suche 116
Blockwelt 43, 442
Blog 640, 651
Blue Gene 34
Bluffen 231
BM25-Bewertungs- funktion 1005
B-Matrix 677
BNF 1222
BNF-Notation 300
Boid 509
Boltzmann-Maschinen 882
boolesches Schlüsselwortmodell 1004
Boosting 869
Bootstrapping 52
 Korpus 1020
 TextRunner 1020
Boss 53, 1159, 1165
Boxes 983
Boyer-Moore-Algorithmus 425

Inhaltsverzeichnis

Branching Factor 116
Breadth-first 116
Breadth-First-Search 117
Breiman 880
Breite
 Hyperbaum 281
 induzierte 281
Breitensuche 116
Brennebene 1076
Bridge 230, 234, 242
Bridge Baron 234
British National Corpus 1063
Bucket-Eliminierungs- Algorithmus 279
Bugs 650, 953
Build 555
Bündel 523
BWT 604

C

Cache 327
Carmel 1165
Center 789
Cerebellar Model Articulation Controller 985
CFG 1029
Chaff 334
Chart 1033
Chart-Parser 1033
Chatbots 1177
Chemical Markup Language 552
Chess 4.5 147
Child-Node 114
Chill 1043

Inhaltsverzeichnis

Chinook 233, 241
Chomsky-Normalform 1034
Choose-Literal 915, 916
cHUGIN 648
Chunking 921
Church-Turing-These 30
Cigol 922
Circumscription 540, 541
 priorisierte 542
City-Block-Distanz 140
Classic 539, 554
Clint 923
Closures 1223
CLP (Constraint-Logikprogrammierung) 412
Clustering
 nicht überwachtes 944
Clustering-Algorithmus 622, 672
Clustering-Methoden 673
CMAC 985
Code zum Buch 73
Colbert 1165
Colossus 36
Competitive Ratio 190
Computational Linguistics 1023
Computational Neuroscience 846
Computer 36
Computer-Lerntheorie 831
Computerlinguistik 39
Computervision 24
Conditional Random Field 1016
co-NP 1216

Inhaltsverzeichnis

co-NP-Vollständigkeit 1216
Cons 368
cons 1224
Consistent-Det? 909
Constraint Learning 271
Constraint Logic Programming 280
Constraint Optimization Problem (COP) 258
Constraint Propagation 254
Constraint Satisfaction Problem (CSP) 252
Constraint Weighting 273
Constraint-Graph 253
Constraint-Logikprogrammierung 280, 412
Constraints 252
Controller 87, 1148
Convince 646
COP
 (Constraint Optimization Problem) 258
Coq 279, 427
Cortex 33
Cournot-Wettbewerb 788
Cox 704
CPlan 470
Critical Path Method (CPM) 480
Crossover 168
CSP
 (Constraint Satisfaction Problem) 252
 Backtracking-Suche 265
 lokale Suchalgorithmen 272
 verteilt 282
Current-Best-Learning 893, 894
Cutoff 135
Cutoff-Test 216, 219

Inhaltsverzeichnis

cutoff-Wert 124

CyberLover 1177

CYK-Algorithmus 1033

D

DAG (Directed Acyclic Graph) 602

Dalton 923

Dame 233

DarkThought 240

DARPA 53

DARPA Grand Challenge 1165

Darstellung 1004

- atomare 98

- faktorierte 98, 810

- strukturierte 98

Darstellungen

- atomare 86

- faktorierte 86, 574

- geliftete 439

- strukturierte 87

DART 53

Datalog 397

Data-Mining 50

Daten 928

- fehlende 823

- Wahrscheinlichkeit 929

Datenbank

- deduktive 388, 403, 426

- relationale 87

Datenbanksemantik 362

Datendichte

- geringe 1028

datengesteuertes Schließen 316

Inhaltsverzeichnis

Datenkomplexität	401
Datenkomprimierung	1003
Datenverarbeitung	
autonome	88
Datenzuordnung	698
Dauer	479
Davis-Putman-Algorithmus	317
DBN	688
annähernde Inferenz	695
exakte Inferenz	693
DBpedia	520, 551
DCG (Definite Clause Grammar)	1038
DDN	772
de Kleer	555
De Morgansche Regeln	360
Decayed MCMC-Filter	704
Decision-Tree-Learning	817, 909
Deduktionstheorem	306
deduktive Datenbanken	403, 426
deduktive Synthese	425
Deep Blue	53, 232
Deep Fritz	240
Deep Thought	240
Deep-Belief-Netze	1207
Default Values	538
Defaultinformation	
Schließen	540
Defaultlogik	540, 542
Defaultregeln	542
Default-Schließen	641
Definite Clause Grammar	1038

Inhaltsverzeichnis

definite Klausel- Grammatik 1038
Definition 364
 rationaler Agenten 64
definitive Klausel 313
deklarativ 292, 346
Dekomposition 451
Del 440
deliberative Schicht 1156
Delta-Regel 977
Demodulation 422
demonic 488
Dempster-Shafer-Theorie 641, 643
Dendral 46, 551
Dendral, Meta- 898
Denken 24, 32, 38
depth 116
Depth-first 121
 rekursiv 122
Depth-Limited-Search 123
detailliertes Gleichgewicht 631
deterministisch 70, 100
deterministische Knoten 611
Deviser 510
dezentralisiertes Planungsproblem 504
Diagnoseregeln 381
diagnostisch 585
Dichte
 Gleichverteilung 938
Dichteabschätzung
 parameterfreie 941
Dichteschätzung 932

Inhaltsverzeichnis

Differentialantrieb	1126
Differentialgleichungen	1147
Differential-GPS	1124
Differenz	
temporale	967
Differenzmaschine	37
diffuse Albedo	1078
diffuse Reflexion	1077
Dinge	526
Diophant	279
DIPRE (Dual Iterative Pattern Relation Extraction)	1023
Directed Acyclic Graph (DAG)	602
Dirichlet	938
Dirichlet-Prozess	954
Discovery-Systeme	923
disjunkt	144
disjunkte Musterdatenbanken	144
Disjunkten	300
Disjunktion	300
Prinzip von Inklusion und Exklusion	577
disjunktive Beschränkung	255
disjunktive Normalform (DNF)	341
Diskontierungsfaktor	963
diskret	71, 100
diskrete Domänen	255
diskrete Ereignisse	529
Diskretisierung	171, 612
Diskriminanzmodell	1016
DLV	554
DNA	170
DNF (disjunktive Normalform)	341

Inhaltsverzeichnis

Domänen 352, 363

diskrete 255

endliche 255, 412

stetige 256

unendliche 255

Variablen 574

Wissen 374

Domänenabgeschlossen- heit 362

Domänenelemente 352

Dominanz 141, 550

stochastische 726

strenge 725

dominieren

streng/schwach 777

dominiert 770

DPLL 317

Dragon 1063

Drehgelenke 1125

Drehimpulsgeber 1124

Drehmomentsensoren 1124

Dreiecksungleichung 131

Dreifarbigekeit 1079

Drei-Schichten- Architektur 1155

Drohnen 1160

d-Separation 609

duale Graphen 257

Dualismus 27, 1184

Duplikaterkennung 650

Durchmesser 124

Dynamic Decision Network 772

dynamisch 71

dynamisch stabil 1127

Inhaltsverzeichnis

dynamische Programmierung 411

dynamisches Backtracking 281

E

Ebene

maximale 455

Ebenenkosten 455

Ebenensumme 455

EBL 901, 924

Echtzeitentscheidungen

unvollständige 216

Echtzeit-KI 1208

Echtzeitsuche 199

EEG 34

Effekte 439

bedingte 497

externe 794

fehlende 501

nichtdeterministische 516

effektiver Verzweigungs- faktor 140

Effektivwert 1220

Effektoren 1120, 1124

effizient 790

Eigenschaften 350

Einbettung in niedrigerer Dimension 1135

eindeutige Aktionsaxiome 464

einfache Reflexagenten 76

Einflussdiagramm 602, 712, 730

Eingabeattribute

stetige und ganz- zahlige 824

Eingaberesolution 424

Einheiten 846

verborgene 847

Inhaltsverzeichnis

Einheitenfunktion 525
Einheitsklausel 309, 317, 423
Einheitspriorität 423
Einheitspropagierung 317
Einheitsresolution 309, 423
Einrückungen 1223
Einzelagenten 69
Ein-Zug-Spiele 776
EKF 687
Elektroencephalograph 34
Elektromotor 1127
Element 522
Eliza 1177, 1193
Ellsberg-Paradoxon 723
EM-Algorithmus 667, 943
 allgemeine Form 951
 Schätzungen ver- bessern 1054
Embodiment 1182
emergentes Verhalten 509
empirischer Gradient 172
Empirismus 28
Empty 115
EMW 719
Endetest 207
endlastige Verteilung 196
endliche Domänen 255
Endlosschleifen 409
Endzustände 207
enger Inhalt 1185
Engineering
 ontologisches 518

Inhaltsverzeichnis

- Entailment 296
- entfernte Punktlicht- quelle 1078
- Entfernungsmesser 1122
- Entropie 820
- Entscheidung
 - einfache 712
 - komplexe 752
 - optimale 207
 - rationale 569
- Entscheidungsanalyse 737
- Entscheidungsanalytiker 737
- Entscheidungsbäume 814
 - Anwendbarkeit 823
 - Induktion 814
 - Kürzung 822
 - per Induktion aus Beispielen 816
- Entscheidungsdiagramme
 - binäre 470
- Entscheidungsgrenze 842
- Entscheidungsknoten 731
- Entscheidungslisten 833
- Entscheidungsnetz 602, 712, 730, 772
 - Auswertung 732
 - dynamisches 772
- Entscheidungsprobleme
 - Optimalität 755
 - sequentielle 752
- Entscheidungsprozesse
 - Markov'sche 32
- Entscheidungstheorie 32, 571
- Enttäuschung nach der Entscheidung 741
- Enumeration-Ask 616
- Epiphänomen 1187

Inhaltsverzeichnis

- episodisch 69, 71
- EQP 428
- Ereigniskalkül 527
- Ereigniskategorien
 - fließende 529
- Ereignisse 527, 573, 615
 - atomare 597
 - diskrete 529
 - exogene 501
 - mentale 532
- erf() 1219
- Erfüllbarkeit 306
 - Schwellenwert- Phänomen 321
- Erfüllbarkeitsproblem
 - schwieriges 320
- Ergebnis 570, 776
- Ergebnismenge 1004
- ergodisch 630
- Erkennung 1073
- Erklärung 545
 - wahrscheinlichste 667
- erklärungsbasierte Verallgemeinerung 234
- Erklärungslücke 1191
- erkundbar
 - sicher 191
- Erlösäquivalenz, Satz über die 793
- erratische Staubsaugerwelt 175
- erreichbare Menge 488
- Erreichbarkeitsrelationen 533
- Erscheinung 1088
- Erscheinungsmodell 1105
- erschöpfende Zerlegung 522

Inhaltsverzeichnis

Ersetzbarkeit 714
erwarteter Gesamtgewinn 963
erwarteter Minimax-Wert 224
erwarteter Nutzen 82
Erwartung 1220
Erwartung-Maximierung 943, 1054
Erwartungsmaximierungs- Algorithmus 667
Erwartungswert 217, 224
erweiterte Grammatik 1038
Erweiterung 542
 singuläre 220
Erziehung
 belohnende 986
euklidischer Raum 1217
Eulerscher Graph 199
Eurisko 923
Eval 216
Eventualitäten 206
Evidenz 928
Evidenzfusion 1111
Evidenzumkehr 703
Evidenzvariablen 615
Evolution 170
evolutionäre Psychologie 724
Evolutionsbiologie 160
Evolutionsstrategien 197
Existential Graphs 536
Existentielle Einführung 430
Existentielle Instanziierung 389
Existenzquantor 357, 358
Existenzunsicherheit 635

Inhaltsverzeichnis

exogene Ereignisse 501
Expand-Graph 456
Expandieren 111
Expansion
 iterative 148
Expansionsfokus 1094
Expectation-Maximization 943
Expectiminimax 225, 239, 774
Expectiminimax-Wert 224
Expertensysteme 47
 entscheidungs- theoretische 737
Exploration 65, 160, 961, 969, 970
Explorationsfunktion 972
Explorationsproblem 189
Extend-Example 915
Extension 891
Extensivform 784
Extract-Solution 456
Extraktionssysteme
 attributbasierte 1011
 Ontologie 1017
 relationale 1012
 Transduktoren, kaskadierte endliche 1012
extrinsisch 527

F

G

H

I

J

K

L

Inhaltsverzeichnis

M
N
O
P
Q
R
S
T
U
V
W
X
Y
Z

Z-3 36

zählbare Substantive 526

Zählbarkeit 526

Zahlen 366

natürliche 366

Zahlentheorie 366

Zähler

virtuelle 938

Zeichen 997

Zeichenfolgenvergleich 425

Zeilensuche 172

Zeit 71, 530, 662, 1043

Intervalle 530

Zeitform 1043

Zeitkomplexität 115

zeitliche Projektion 335

Inhaltsverzeichnis

zeitlose Variablen	322
Zeitplan	481
Zeitplanen	53
Zeitplanung	478
Zeitscheiben	663
Zellen-Layout	109
Zellkörper	33
Zellzerlegung	1139
exakte	1141
zentraler Grenzwertsatz	1220
Zerlegbarkeit	715
Zerlegung	451
erschöpfende	522
Ziel	80, 98, 363, 441
Zielformulierung	99
Zielfunktion	38, 161
zielgerichtetes Schließen	316
Zielprädikat	814
Zieltest	102, 104
Zielüberwachung	501
Ziffernerkennung	873
Zipfsches Gesetz	1025
Zufall	223
Zufälligkeit	78
Zufallsknoten	223, 730
Zufallsmengen	646
Zufallssurfer-Modell	1008
Zufallsvariablen	574
indizierte	650
Zufallsverhalten	69
Zugänglichkeitsrelationen	533

Inhaltsverzeichnis

- zugreifbar 69
- zulässige Heuristik 131
- Zuordnung
 - prozedurale 538
- Zurückführen 852
- zusammengesetzte Objekte 523
- Zusammenschlüsse 211
- Zusammensetzung
 - sequenzielle 631
- Zusicherungen 363
- Zustand 104
 - dynamischer 1125, 1147
 - intentionaler 1184
 - interner 78
 - kanonische Form 115
 - kinematischer 1125
 - Merkmale 145
 - relevanter 446
 - wahrscheinlichster 1144
 - wiederholter 112
- Zustandsabschätzung 227, 666
- Zustandsabstraktion 450
- Zustandsformulierung
 - vollständige 107, 162
- Zustandsinformationen 78
- Zustandsraum 101, 252
 - Metaebene 139
 - Objektebene 139
 - stetiger 170
 - unendlicher 107
- Zustandsraum-Landschaften 161
- Zustandsschätzung 187, 327
- Zustandsvariablen 501

Inhaltsverzeichnis

zuverlässig	298
Zuweisung	252
konsistente	252
Mehrfach-	1223
partielle	253
vollständige	252
zweisprachiger Korpus	1051
Zwillingserden	1200
Zwingen	179
zwingend	494
Zwischensprache	1049
zyklische Lösung	177
zyklische Schnittmenge	276
Zylinder	
verallgemeinerte	1114

Ins Internet: Weitere Infos zum Buch, Downloads, etc.
Copyright

Copyright

Daten, Texte, Design und Grafiken dieses eBooks, sowie die eventuell angebotenen eBook-Zusatzdaten sind urheberrechtlich geschützt. Dieses eBook stellen wir lediglich als **persönliche Einzelplatz-Lizenz** zur Verfügung!

Jede andere Verwendung dieses eBooks oder zugehöriger Materialien und Informationen, einschließlich

- der Reproduktion,
- der Weitergabe,
- des Weitervertriebs,
- der Platzierung im Internet, in Intranets, in Extranets,
- der Veränderung,
- des Weiterverkaufs und
- der Veröffentlichung

bedarf der **schriftlichen Genehmigung** des Verlags. Insbesondere ist die Entfernung oder Änderung des vom Verlag vergebenen Passwortschutzes ausdrücklich untersagt!

Bei Fragen zu diesem Thema wenden Sie sich bitte an: info@pearson.de

Zusatzdaten

Möglicherweise liegt dem gedruckten Buch eine CD-ROM mit Zusatzdaten bei. Die Zurverfügungstellung dieser Daten auf unseren Websites ist eine freiwillige Leistung des Verlags. **Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.**

Hinweis

Dieses und viele weitere eBooks können Sie rund um die Uhr und legal auf unserer Website herunterladen:

<http://ebooks.pearson.de>