

Stuart Russell Peter Norvig

INTELLIGENZA ARTIFICIALE

Un approccio moderno

Terza edizione

Edizione italiana a cura di Francesco Amigoni
Politecnico di Milano



© 2010 Pearson Italia, Milano-Torino

*Authorized translation from the English language edition, entitled: **Artificial Intelligence: A Modern Approach**, 3rd edition, by Russell, Stuart; Norvig, Peter, published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice-Hall, Copyright © 2010*

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

Italian language edition published by Pearson Italia S.p.A., Copyright © 2010.

Le informazioni contenute in questo libro sono state verificate e documentate con la massima cura possibile. Nessuna responsabilità derivante dal loro utilizzo potrà venire imputata agli Autori, a Pearson Italia S.p.A. o a ogni persona e società coinvolta nella creazione, produzione e distribuzione di questo libro.

Per i passi antologici, per le citazioni, per le riproduzioni grafiche, cartografiche e fotografiche appartenenti alla proprietà di terzi, inseriti in quest'opera, l'editore è a disposizione degli aventi diritto non potuti reperire nonché per eventuali non volute omissioni e/o errori di attribuzione nei riferimenti.

I diritti di riproduzione e di memorizzazione elettronica totale e parziale con qualsiasi mezzo, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, sono riservati per tutti i paesi.

LA FOTOCOPIATURA DEI LIBRI È UN REATO Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633.

Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da AIDRO, corso di Porta Romana n. 108, 20122 Milano, e-mail segreteria@aidro.org e sito web www.aidro.org.

Curatore per l'edizione italiana: Francesco Amigoni

Traduzione della precedente edizione: Stefano Gaburri

Aggiornamento alla nuova edizione e copyediting: Infostudio – Monza

Realizzazione editoriale: TOTEM di Andrea Astolfi

Grafica di copertina: Simone Tartaglia

Stampa: Tip.Le.Co. – San Bonico (PC)

Tutti i marchi citati nel testo sono di proprietà dei loro detentori.

978-88-7192-593-6

Printed in Italy

1^a edizione: giugno 2010

Ristampa

00 01 02 03 04

Anno

10 11 12 13 14

La struttura dell'opera

| | | Volume | | | |
|-------------------------|--|--------|---|----|---|
| | | 1 | 2 | | |
| Parte I | Intelligenza artificiale | ✓ | ✓ | 1 | Introduzione |
| | | ✓ | ✓ | 2 | Agenti intelligenti |
| Parte II | Risoluzione di problemi | ✓ | | 3 | Risolvere i problemi con la ricerca |
| | | ✓ | | 4 | Oltre la ricerca classica |
| | | ✓ | | 5 | Ricerca con avversari |
| | | ✓ | | 6 | Problemi di soddisfacimento di vincoli |
| Parte III | Conoscenza, ragionamento e pianificazione | ✓ | | 7 | Agenti logici |
| | | ✓ | | 8 | Logica del primo ordine |
| | | ✓ | | 9 | Inferenza nella logica del primo ordine |
| | | ✓ | | 10 | Pianificazione classica |
| | | ✓ | | 11 | Pianificazione e azione nel mondo reale |
| | | ✓ | | 12 | Rappresentazione della conoscenza |
| Parte IV | Conoscenza incerta e ragionamento | | ✓ | 13 | Incertezza |
| | | | ✓ | 14 | Ragionamento probabilistico |
| | | | ✓ | 15 | Ragionamento probabilistico nel tempo |
| | | | ✓ | 16 | Decisioni semplici |
| | | | ✓ | 17 | Decisioni complesse |
| Parte V | Apprendimento | | ✓ | 18 | Apprendimento dalle osservazioni |
| | | | ✓ | 19 | Conoscenza e apprendimento |
| | | | ✓ | 20 | Metodi di apprendimento statistico |
| | | | ✓ | 21 | Apprendimento per rinforzo |
| Parte VI | Comunicazione, percezione e azione | | ✓ | 22 | Comunicazione |
| | | | ✓ | 23 | Elaborazione probabilistica del linguaggio |
| | | | ✓ | 24 | Percezione |
| | | | ✓ | 25 | Robotica |
| Parte VII | Conclusioni | ✓ | ✓ | 26 | Fondamenti filosofici |
| | | ✓ | ✓ | 27 | Presente e futuro dell'intelligenza artificiale |
| | Appendici | ✓ | ✓ | A | Basi matematiche |
| | | ✓ | ✓ | B | Cenni sui linguaggi e sugli algoritmi |
| Bibliografia | | | | | |
| Indice analitico | | | | | |

Nota dell'Editore

L'edizione italiana presenta, rispetto a quella inglese, alcune importanti modifiche quali la suddivisione dell'opera originale – veramente enciclopedica – in due volumi, e la parziale riorganizzazione strutturale degli argomenti presentati. Lo schema qui sopra riportato illustra sinteticamente le caratteristiche della nostra pubblicazione: i box di spunta indicano in quale dei due volumi sarà presente ciascun capitolo; come è possibile vedere, i Capitoli 1-2, 26-27 e le Appendici saranno presenti in entrambi i volumi.

Sono nati così due testi, autonomi e autoconsistenti, che rendono non solo più agevole la consultazione ma consentono anche una migliore fruibilità dei contenuti sia da parte degli studenti (che trovano gli argomenti strutturati secondo la nuova organizzazione dei corsi di laurea di primo e secondo livello) sia da parte dei professionisti che vogliono estendere le conoscenze al di fuori dal proprio campo specialistico. Crediamo, in questo modo, di fornire un prezioso contributo per promuovere la conoscenza, la ricerca e la passione nei confronti di una disciplina così vasta e affascinante come l'intelligenza artificiale.

Segnaliamo, inoltre, che al momento solamente il Volume 1 è stato aggiornato alla terza edizione inglese, pertanto si potrebbero riscontrare alcune differenze tra i capitoli in comune ai due volumi.

Sommario

Parte Prima **Intelligenza artificiale**

Capitolo 1 **Introduzione**

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1.1 | Cos'è l'intelligenza artificiale? | 4 |
| 1.1.1 | Agire umanamente: l'approccio del test di Turing | 4 |
| 1.1.2 | Pensare umanamente: l'approccio della modellazione cognitiva | 6 |
| 1.1.3 | Pensare razionalmente: l'approccio delle "leggi del pensiero" | 6 |
| 1.1.4 | Agire razionalmente: l'approccio degli agenti razionali | 7 |
| 1.2 | I fondamenti dell'intelligenza artificiale | 8 |
| 1.2.1 | Filosofia | 8 |
| 1.2.2 | Matematica | 11 |
| 1.2.3 | Economia | 13 |
| 1.2.4 | Neuroscienze | 14 |
| 1.2.5 | Psicologia | 17 |
| 1.2.6 | Ingegneria informatica | 19 |
| 1.2.7 | Teoria del controllo e cibernetica | 20 |
| 1.2.8 | Linguistica | 21 |
| 1.3 | La storia dell'intelligenza artificiale | 22 |
| 1.3.1 | La gestazione dell'intelligenza artificiale (1943–1955) | 22 |
| 1.3.2 | La nascita dell'intelligenza artificiale (1956) | 23 |
| 1.3.3 | Primi entusiasmi, grandi aspettative (1952–1969) | 24 |
| 1.3.4 | Una dose di realtà (1966–1973) | 27 |
| 1.3.5 | Sistemi basati sulla conoscenza: la chiave per il potere? (1969–1979) | 29 |
| 1.3.6 | L'IA diventa un'industria (1980–presente) | 31 |
| 1.3.7 | Il ritorno delle reti neurali (1986–presente) | 32 |
| 1.3.8 | L'IA adotta il metodo scientifico (1987–presente) | 32 |
| 1.3.9 | La comparsa degli agenti intelligenti (1995–presente) | 34 |
| 1.3.10 | La disponibilità di insiemi di dati molto grandi (2001–presente) | 35 |
| 1.4 | Lo stato dell'arte | 36 |
| 1.5 | Riepilogo | 38 |
| | Note storiche e bibliografiche | 39 |
| | Esercizi | 40 |

Capitolo 2 Agenti intelligenti

| | | |
|------------|--|-----------|
| 2.1 | Agenti e ambienti | 43 |
| 2.2 | Comportarsi correttamente: il concetto di razionalità | 46 |
| 2.2.1 | Razionalità | 47 |
| 2.2.2 | Onniscienza, apprendimento e autonomia | 48 |
| 2.3 | La natura degli ambienti | 50 |
| 2.3.1 | Specificare un ambiente | 50 |
| 2.3.2 | Proprietà degli ambienti | 53 |
| 2.4 | La struttura degli agenti | 57 |
| 2.4.1 | Programmi agente | 58 |
| 2.4.2 | Agenti reattivi semplici | 60 |
| 2.4.3 | Agenti reattivi basati su modello | 62 |
| 2.4.4 | Agenti basati su obiettivi | 64 |
| 2.4.5 | Agenti basati sull'utilità | 66 |
| 2.4.6 | Agenti capaci di apprendere | 68 |
| 2.4.7 | Funzionamento dei componenti dei programmi agente | 70 |
| 2.5 | Riepilogo | 72 |
| | Note storiche e bibliografiche | 73 |
| | Esercizi | 75 |

Parte Seconda Risoluzione di problemi

Capitolo 3 Risolvere i problemi con la ricerca

| | | |
|------------|---|------------|
| 3.1 | Agenti risolutori di problemi | 82 |
| 3.1.1 | Problemi ben definiti e soluzioni | 84 |
| 3.1.2 | La formulazione dei problemi | 86 |
| 3.2 | Problemi esemplificativi | 87 |
| 3.2.1 | Problemi giocattolo | 88 |
| 3.2.2 | Problemi reali | 91 |
| 3.3 | Cercare soluzioni | 94 |
| 3.3.1 | Strutture dati per algoritmi di ricerca | 98 |
| 3.3.2 | Misurare le prestazioni nella risoluzione di problemi | 99 |
| 3.4 | Strategie di ricerca non informata | 100 |
| 3.4.1 | Ricerca in ampiezza | 101 |
| 3.4.2 | Ricerca a costo uniforme | 103 |
| 3.4.3 | Ricerca in profondità | 105 |
| 3.4.4 | Ricerca a profondità limitata | 108 |
| 3.4.5 | Ricerca ad approfondimento iterativo | 109 |
| 3.4.6 | Ricerca bidirezionale | 111 |
| 3.4.7 | Confronto tra le strategie di ricerca non informata | 112 |
| 3.5 | Strategie di ricerca informata o euristica | 113 |
| 3.5.1 | Ricerca best-first greedy o "golosa" | 113 |
| 3.5.2 | Ricerca A*: minimizzare il costo totale stimato della soluzione | 115 |
| 3.5.3 | Ricerca euristica con memoria limitata | 121 |
| 3.5.4 | Imparare a cercare meglio | 124 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 3.6 | Funzioni euristiche | 125 |
| 3.6.1 | Effetto dell'accuratezza dell'euristica sulle prestazioni | 126 |
| 3.6.2 | Generare euristiche ammissibili da problemi rilassati | 127 |
| 3.6.3 | Generare euristiche ammissibili da sottoproblemi: database di pattern | 129 |
| 3.6.4 | Apprendere euristiche dall'esperienza | 130 |
| 3.7 | Riepilogo | 131 |
| | Note storiche e bibliografiche | 133 |
| | Esercizi | 137 |

Capitolo 4 Oltre la ricerca classica

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.1 | Algoritmi di ricerca locale e problemi di ottimizzazione | 146 |
| 4.1.1 | Ricerca hill climbing | 147 |
| 4.1.2 | Simulated annealing | 151 |
| 4.1.3 | Ricerca local beam | 152 |
| 4.1.4 | Algoritmi genetici | 153 |
| 4.2 | Ricerca locale in spazi continui | 156 |
| 4.3 | Ricerca con azioni non deterministiche | 160 |
| 4.3.1 | Il mondo dell'aspirapolvere erratico | 161 |
| 4.3.2 | Alberi di ricerca and-or | 162 |
| 4.3.3 | Prova, prova ancora | 164 |
| 4.4 | Ricerca con osservazioni parziali | 165 |
| 4.4.1 | Ricerca in assenza di osservazioni | 166 |
| 4.4.2 | Ricerca con osservazioni | 170 |
| 4.4.3 | Risoluzione di problemi parzialmente osservabili | 172 |
| 4.4.4 | Un agente per ambienti parzialmente osservabili | 173 |
| 4.5 | Agenti per ricerca online e ambienti sconosciuti | 176 |
| 4.5.1 | Problemi di ricerca online | 177 |
| 4.5.2 | Agenti di ricerca online | 179 |
| 4.5.3 | Ricerca locale online | 180 |
| 4.5.4 | Apprendimento nella ricerca online | 183 |
| 4.6 | Riepilogo | 184 |
| | Note storiche e bibliografiche | 184 |
| | Esercizi | 188 |

Capitolo 5 Ricerca con avversari

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.1 | Giochi | 193 |
| 5.2 | Decisioni ottime nei giochi | 195 |
| 5.2.1 | L'algoritmo minimax | 197 |
| 5.2.2 | Decisioni ottime nei giochi multiplayer | 198 |
| 5.3 | Potatura alfa-beta | 200 |
| 5.3.1 | Ordinamento delle mosse | 202 |
| 5.4 | Decisioni imperfette in tempo reale | 204 |
| 5.4.1 | Funzioni di valutazione | 205 |
| 5.4.2 | Tagliare la ricerca | 207 |
| 5.4.3 | Potatura in avanti | 209 |
| 5.4.4 | Ricerca e ricerca in tabelle | 210 |
| 5.5 | Giochi stocastici | 211 |
| 5.5.1 | Funzioni di valutazione per giochi con elementi casuali | 212 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.6 | Giochi parzialmente osservabili | 215 |
| 5.6.1 | Kriegspiel: scacchi parzialmente osservabili | 215 |
| 5.6.2 | Giochi di carte | 218 |
| 5.7 | Lo stato dell'arte dei programmi di gioco | 220 |
| 5.8 | Approcci alternativi | 224 |
| 5.9 | Riepilogo | 226 |
| | Note storiche e bibliografiche | 226 |
| | Esercizi | 233 |

Capitolo 6 Problemi di soddisfacimento di vincoli

| | | |
|------------|--|------------|
| 6.1 | Definizione dei problemi di soddisfacimento di vincoli | 242 |
| 6.1.1 | Un problema di esempio: colorazione di una mappa | 242 |
| 6.1.2 | Un problema di esempio: programmazione di un lavoro | 244 |
| 6.1.3 | Varianti del formalismo CSP | 245 |
| 6.2 | Propagazione di vincoli: inferenza nei CSP | 248 |
| 6.2.1 | Consistenza di nodo | 248 |
| 6.2.2 | Consistenza d'arco | 249 |
| 6.2.3 | Consistenza di cammino | 251 |
| 6.2.4 | K-consistenza | 251 |
| 6.2.5 | Vincoli globali | 252 |
| 6.2.6 | Un esempio: il Sudoku | 253 |
| 6.3 | Ricerca con backtracking per CSP | 255 |
| 6.3.1 | Ordinamento di variabili e valori | 257 |
| 6.3.2 | Alternanza di ricerca e inferenza | 258 |
| 6.3.3 | Backtracking intelligente: guardarsi indietro | 260 |
| 6.4 | Ricerca locale per problemi di soddisfacimento di vincoli | 262 |
| 6.5 | La struttura dei problemi | 264 |
| 6.6 | Riepilogo | 269 |
| | Note storiche e bibliografiche | 270 |
| | Esercizi | 274 |

Parte Terza **Conoscenza, ragionamento e pianificazione**

Capitolo 7 Agenti logici

| | | |
|------------|---|------------|
| 7.1 | Agenti basati sulla conoscenza | 280 |
| 7.2 | Il mondo del wumpus | 282 |
| 7.3 | Logica | 286 |
| 7.4 | Logica proposizionale: una logica molto semplice | 290 |
| 7.4.1 | Sintassi | 290 |
| 7.4.2 | Semantica | 292 |
| 7.4.3 | Una semplice base di conoscenza | 294 |
| 7.4.4 | Una semplice procedura di inferenza | 294 |
| 7.5 | Dimostrazione di teoremi nella logica proposizionale | 296 |
| 7.5.1 | Inferenza e dimostrazioni | 298 |
| 7.5.2 | Dimostrazione per risoluzione | 300 |
| 7.5.3 | Clausole di Horn e clausole definite | 305 |
| 7.5.4 | Concatenazione in avanti e concatenazione all'indietro | 306 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 7.6 | Model checking proposizionale efficiente | 309 |
| 7.6.1 | Un algoritmo con backtracking completo | 309 |
| 7.6.2 | Algoritmi di ricerca locale | 312 |
| 7.6.3 | Il panorama dei problemi SAT casuali | 314 |
| 7.7 | Agenti basati sulla logica proposizionale | 315 |
| 7.7.1 | Lo stato corrente del mondo | 315 |
| 7.7.2 | Un agente ibrido | 319 |
| 7.7.3 | Stima dello stato con la logica | 321 |
| 7.7.4 | Creazione di piani mediante inferenza proposizionale | 323 |
| 7.8 | Riepilogo | 326 |
| | Note storiche e bibliografiche | 327 |
| | Esercizi | 332 |

Capitolo 8 Logica del primo ordine

| | | |
|------------|--|------------|
| 8.1 | Ancora sulla rappresentazione | 339 |
| 8.1.1 | Il linguaggio del pensiero | 341 |
| 8.1.2 | Mettere insieme il meglio dei linguaggi formali e naturali | 343 |
| 8.2 | Sintassi e semantica della logica del primo ordine | 345 |
| 8.2.1 | Modelli per la logica del primo ordine | 346 |
| 8.2.2 | Simboli e interpretazioni | 347 |
| 8.2.3 | Termini | 350 |
| 8.2.4 | Formule atomiche | 350 |
| 8.2.5 | Formule complesse | 351 |
| 8.2.6 | Quantificatori | 351 |
| 8.2.7 | Uguaglianza | 355 |
| 8.2.8 | Una semantica alternativa? | 356 |
| 8.3 | Usare la logica del primo ordine | 357 |
| 8.3.1 | Asserzioni e query nella logica del primo ordine | 358 |
| 8.3.2 | Il dominio della parentela | 358 |
| 8.3.3 | Numeri, insiemi e liste | 360 |
| 8.3.4 | Il mondo del wumpus | 363 |
| 8.4 | Ingegneria della conoscenza nella logica del primo ordine | 365 |
| 8.4.1 | Il processo di ingegneria della conoscenza | 365 |
| 8.4.2 | Il dominio dei circuiti elettronici | 367 |
| 8.5 | Riepilogo | 372 |
| | Note storiche e bibliografiche | 372 |
| | Esercizi | 374 |

Capitolo 9 Inferenza nella logica del primo ordine

| | | |
|------------|--|------------|
| 9.1 | Inferenza proposizionale e inferenza del primo ordine | 382 |
| 9.1.1 | Regole di inferenza per i quantificatori | 382 |
| 9.1.2 | Riduzione all'inferenza proposizionale | 383 |
| 9.2 | Unificazione e lifting | 385 |
| 9.2.1 | Una regola di inferenza del primo ordine | 385 |
| 9.2.2 | Unificazione | 386 |
| 9.2.3 | Memorizzazione e recupero di informazioni | 388 |
| 9.3 | Concatenazione in avanti | 390 |
| 9.3.1 | Clausole definite del primo ordine | 390 |
| 9.3.2 | Un semplice algoritmo di concatenazione in avanti | 392 |
| 9.3.3 | Concatenazione in avanti efficiente | 394 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 9.4 | Concatenazione all'indietro | 399 |
| 9.4.1 | Un algoritmo di concatenazione all'indietro | 399 |
| 9.4.2 | Programmazione logica | 401 |
| 9.4.3 | Implementazione efficiente di programmi logici | 402 |
| 9.4.4 | Inferenza ridondante e cicli infiniti | 405 |
| 9.4.5 | Semantica dei database di Prolog | 406 |
| 9.4.6 | Programmazione logica con vincoli | 407 |
| 9.5 | Risoluzione | 408 |
| 9.5.1 | Forma normale congiuntiva per la logica del primo ordine | 408 |
| 9.5.2 | La risoluzione come regola di inferenza | 410 |
| 9.5.3 | Alcuni esempi di dimostrazione | 411 |
| 9.5.4 | Completezza della risoluzione | 414 |
| 9.5.5 | L'uguaglianza | 418 |
| 9.5.6 | Strategie di risoluzione | 419 |
| 9.6 | Riepilogo | 422 |
| | Note storiche e bibliografiche | 423 |
| | Esercizi | 426 |

Capitolo 10 Pianificazione classica

| | | |
|-------------|---|------------|
| 10.1 | Definizione di pianificazione classica | 434 |
| 10.1.1 | Esempio: trasporto aereo di merci | 437 |
| 10.1.2 | Esempio: il problema della ruota di scorta | 438 |
| 10.1.3 | Esempio: il mondo dei blocchi | 438 |
| 10.1.4 | La complessità della pianificazione classica | 440 |
| 10.2 | Algoritmi di pianificazione con ricerca nello spazio degli stati | 441 |
| 10.2.1 | Ricerca in avanti (progressione) nello spazio degli stati | 442 |
| 10.2.2 | Ricerca all'indietro (regressione) nello spazio degli stati | 442 |
| 10.2.3 | Euristiche per la pianificazione | 444 |
| 10.3 | Grafi di pianificazione | 448 |
| 10.3.1 | Grafi di pianificazione per la stima euristica | 451 |
| 10.3.2 | L'algoritmo Graphplan | 452 |
| 10.3.3 | Terminazione di Graphplan | 455 |
| 10.4 | Altri approcci classici alla pianificazione | 457 |
| 10.4.1 | Pianificazione classica come problema di soddisfacibilità booleana | 457 |
| 10.4.2 | Pianificazione come deduzione logica del primo ordine: calcolo delle situazioni | 459 |
| 10.4.3 | Pianificazione come soddisfacimento di vincoli | 461 |
| 10.4.4 | Pianificazione come raffinamento di piani parzialmente ordinati | 461 |
| 10.5 | Analisi degli approcci alla pianificazione | 463 |
| 10.6 | Riepilogo | 464 |
| | Note storiche e bibliografiche | 465 |
| | Esercizi | 468 |

Capitolo 11 Pianificazione e azione nel mondo reale

| | | |
|-------------|--|------------|
| 11.1 | Tempo, scheduling e risorse | 473 |
| 11.1.1 | Rappresentazione di vincoli temporali e di risorse | 474 |
| 11.1.2 | Risoluzione di problemi di scheduling | 475 |
| 11.2 | Pianificazione gerarchica | 478 |
| 11.2.1 | Azioni di alto livello | 479 |
| 11.2.2 | Ricerca di soluzioni primitive | 481 |
| 11.2.3 | Ricerca di soluzioni astratte | 483 |

| | |
|---|------------|
| 11.3 Pianificazione e azione in ambienti non deterministici | 489 |
| 11.3.1 Pianificazione senza sensori | 491 |
| 11.3.2 Pianificazione di contingenza | 496 |
| 11.3.3 Ripianificazione online | 497 |
| 11.4 Pianificazione multiagente | 501 |
| 11.4.1 Pianificazione con più azioni simultanee | 502 |
| 11.4.2 Pianificazione con agenti multipli: cooperazione e coordinamento | 504 |
| 11.5 Riepilogo | 507 |
| Note storiche e bibliografiche | 508 |
| Esercizi | 512 |

Capitolo 12 Rappresentazione della conoscenza

| | |
|---|------------|
| 12.1 Ingegneria ontologica | 515 |
| 12.2 Categorie e oggetti | 518 |
| 12.2.1 Composizione fisica | 520 |
| 12.2.2 Misure | 523 |
| 12.2.3 Oggetti: cose e roba | 524 |
| 12.3 Eventi | 525 |
| 12.3.1 Processi | 527 |
| 12.3.2 Intervalli temporali | 527 |
| 12.3.3 Fluenti e oggetti | 529 |
| 12.4 Eventi e oggetti mentali | 529 |
| 12.5 Sistemi di ragionamento per categorie | 534 |
| 12.5.1 Reti semantiche | 534 |
| 12.5.2 Logiche descrittive | 537 |
| 12.6 Ragionare con informazione di default | 539 |
| 12.6.1 Circostrizione e logica di default | 539 |
| 12.6.2 Sistemi di mantenimento della verità | 542 |
| 12.7 Il mondo dello shopping su Internet | 544 |
| 12.7.1 Seguire collegamenti | 546 |
| 12.7.2 Confrontare le offerte | 548 |
| 12.8 Riepilogo | 550 |
| Note storiche e bibliografiche | 551 |
| Esercizi | 557 |

Parte Settima Conclusioni

Capitolo 26 Fondamenti filosofici

| | |
|---|------------|
| 26.1 IA debole: le macchine possono agire in modo intelligente? | 567 |
| 26.1.1 L'argomentazione derivante dall'incapacità | 569 |
| 26.1.2 L'obiezione matematica | 570 |
| 26.1.3 L'argomentazione derivante dall'informalità | 572 |
| 26.2 IA forte: le macchine possono veramente pensare? | 574 |
| 26.2.1 Gli stati mentali e il cervello nella vasca | 576 |
| 26.2.2 Il funzionalismo e l'esperimento della sostituzione del cervello | 578 |
| 26.2.3 Il naturalismo biologico e la stanza cinese | 580 |
| 26.2.4 Coscienza, qualia e la lacuna esplicativa | 582 |

| | | |
|--|---|-----|
| 26.3 | L'etica e i rischi dello sviluppo dell'intelligenza artificiale | 583 |
| 26.4 | Riepilogo | 590 |
| | Note storiche e bibliografiche | 591 |
| | Esercizi | 593 |
| Capitolo 27 Presente e futuro dell'intelligenza artificiale | | |
| 27.1 | Componenti per agenti | 596 |
| 27.2 | Architetture di agenti | 599 |
| 27.3 | Stiamo andando nella giusta direzione? | 600 |
| 27.4 | E se l'IA avesse successo? | 603 |
| Appendice A Basi matematiche | | |
| A.1 | Analisi di complessità e notazione $O()$ | 605 |
| A.1.1 | Analisi asintotica | 605 |
| A.1.2 | NP e problemi intrinsecamente difficili | 606 |
| A.2 | Vettori, matrici e algebra lineare | 608 |
| A.3 | Distribuzioni di probabilità | 610 |
| | Note storiche e bibliografiche | 612 |
| Appendice B Cenni sui linguaggi e sugli algoritmi | | |
| B.1 | Definire i linguaggi con la forma di Backus-Naur (BNF) | 613 |
| B.2 | Descrivere gli algoritmi con lo pseudocodice | 614 |
| B.3 | Supporto online | 616 |
| Bibliografia | | 617 |
| Indice analitico | | 663 |

Prefazione all'edizione italiana

Dalla sua nascita, più di 50 anni fa, l'intelligenza artificiale continua a suscitare attenzione e curiosità, e ciò contribuisce a farne una disciplina effervescente e interessante da approfondire e da studiare. Una veloce ricerca mostra che nel 2009 sono stati pubblicati sui due maggiori quotidiani italiani circa 100 articoli nei quali compare il termine "intelligenza artificiale". Segno che l'argomento riscuote un certo interesse anche presso il pubblico non specialista, probabilmente grazie al fascino esercitato dal nome e alla giovane età della disciplina, i cui confini e contenuti appaiono ancora sfumati. Anche i numerosi corsi universitari sull'intelligenza artificiale o su temi a essa riconducibili (73, secondo un rapporto del 2006 dell'Associazione Italiana per l'Intelligenza Artificiale) sono un ulteriore segno dell'interesse, in questo caso degli studenti, nei confronti della disciplina.

L'aggiornamento della versione italiana del libro di Russell e Norvig, ora allineata alla recentissima terza edizione, si inserisce in questo quadro e si pone come un'opportunità per i docenti e gli studenti universitari e per i lettori non specialisti, che più difficilmente hanno accesso alla letteratura in lingua inglese. Infatti, la dimensione enciclopedica permette al libro di soddisfare sia le esigenze di una divulgazione approfondita, sia quelle didattiche (al primo e al secondo livello degli studi universitari), fornendo, da un lato, un utilissimo riferimento per il professionista o il semplice curioso che vuole approfondire le basi teoriche e gli sviluppi più recenti di una particolare tematica e, dall'altro lato, un testo strutturato per il docente che deve organizzare un corso universitario (e per gli studenti che lo seguono).

Dal punto di vista didattico, è apprezzabile lo sforzo degli autori di fornire una visione unificata dell'intelligenza artificiale, che ha vissuto una crescita spesso tumultuosa, a volte più guidata dall'eccitazione della scoperta che da un rigido programma di ricerca. Tale visione unificata è presente nell'idea centrale di agente, intorno a cui ruotano le presentazioni dei diversi argomenti, e nel tentativo di fare emergere concetti (come le diverse rappresentazioni degli stati: atomica, fattorizzata e strutturata) trasversali alle varie sotto-discipline che spesso "parlano" linguaggi diversi. Inoltre, la fitta ragnatela di collegamenti e rimandi fra le diverse parti del testo rinforza l'idea di una disciplina che sta maturando una sua più piena identità teorica.

Dal punto di vista della divulgazione approfondita, gli autori sono molto attenti nel presentare non solo le tecniche più aggiornate per affrontare i vari problemi, ma anche gli importanti impieghi di queste tecniche nelle applicazioni reali. Emerge un quadro in cui le tecniche di intelligenza artificiale sono parte di innumerevoli sistemi senza che nessun sistema (a parte alcune eccezioni, come ad esempio quelle relative ai giochi per computer) sia esplicitamente identificato come "sistema di intelligenza artificiale".

Un altro aspetto che a mio avviso è importante sottolineare è la scelta di non trascurare, accanto alla discussione tecnica, gli aspetti filosofici che sono legati alla natura stessa della disciplina e che la caratterizzano, paradossalmente, da molto prima della sua nascita. Pur con le ovvie

semplificazioni, la trattazione degli aspetti filosofici arricchisce il contesto della presentazione fornendo al lettore gli strumenti per ragionare criticamente sul contenuto tecnico-scientifico dell'intelligenza artificiale.

All'inizio degli anni '70, Bertram Raphael espresse l'idea secondo cui l'intelligenza artificiale è un nome che accomuna i problemi che non sappiamo ancora come risolvere con un computer. Questa idea, cara a Marco Somalvico, che è stato uno dei pionieri dell'intelligenza artificiale in Italia fornendo un notevole contributo alla diffusione della disciplina nel nostro paese, ha come conseguenza che, una volta che un problema è stato risolto, non fa più parte dell'intelligenza artificiale. La nuova edizione del libro di Russell e Norvig si aggiunge ai molti sforzi che sono stati fatti per superare questa posizione provocatoria, rafforzando le basi teoriche e definendo meglio la struttura, i confini e le possibilità della disciplina che, per fortuna, non ha del tutto perso il carattere rivoluzionario delle origini.

Infine, desidero ringraziare per il supporto i colleghi dell'AILab (Laboratorio di Intelligenza Artificiale e Robotica) del Politecnico di Milano, in particolare Viola Schiaffonati che ha riletto molte parti del testo fornendo preziosi consigli.

Milano, giugno 2010

*Francesco Amigoni
Dipartimento di Elettronica e Informazione
Politecnico di Milano*

Prefazione¹

L'intelligenza artificiale (IA) è un argomento molto vasto, e questo è un libro ponderoso. Abbiamo cercato di presentare l'intero panorama della disciplina, che racchiude la logica, la probabilità e la matematica del continuo, la percezione, il ragionamento, l'apprendimento e l'azione, nonché tutto ciò che va dai dispositivi microelettronici ai robot per l'esplorazione planetaria. Le dimensioni del libro sono dovute anche alla profondità della trattazione.

Il sottotitolo di questo volume è "Un approccio moderno". Il senso è che abbiamo cercato di presentare tutti gli argomenti in un contesto comune, invece di limitarci a esporre ogni aspetto dell'intelligenza artificiale nella sua specifica cornice storica. Chiediamo scusa agli specialisti dei singoli campi dell'IA se, in questo modo, le loro specifiche aree di ricerca dovessero risultare meno riconoscibili.

Novità di questa edizione

Questa edizione comprende i cambiamenti riscontrati nell'intelligenza artificiale a partire dal 2003, anno dell'edizione precedente. Ci sono state importanti applicazioni della tecnologia dell'IA, quali l'ampia diffusione del riconoscimento vocale, della traduzione automatica, dei veicoli autonomi e della robotica domestica. Anche nel campo degli algoritmi ci sono state novità importanti, quale la soluzione del gioco della dama. Inoltre sono stati compiuti notevoli progressi a livello teorico, particolarmente in campi quali il ragionamento probabilistico, l'apprendimento automatico e la visione artificiale. Dal nostro punto di vista, l'aspetto più importante è la continua evoluzione nel modo di pensare alla disciplina, che si è tradotta nella struttura di questo libro. Le principali modifiche sono descritte di seguito.

- ◆ Abbiamo posto maggiore enfasi sugli ambienti parzialmente osservabili e non deterministici, soprattutto negli scenari non probabilistici di ricerca e pianificazione. I concetti di *stato-credenza* (un insieme di mondi possibili) e *stima dello stato* (mantenere lo stato-credenza) sono introdotti in questi scenari. Nel prosieguo del libro si aggiungono le probabilità.
- ◆ Oltre a discutere i tipi di ambienti e di agenti, trattiamo in modo più approfondito i tipi di *rappresentazioni* che un agente può utilizzare. Distinguiamo tra rappresentazioni *atomiche* (in cui ogni stato del mondo è considerato come una scatola nera), *fattorizzate* (in cui uno stato è un insieme di coppie attributo/valore) e *strutturate* (in cui il mondo è costituito da oggetti e relazioni tra di essi).
- ◆ Nel trattare la pianificazione approfondiamo la pianificazione di contingenza in ambienti parzialmente osservabili, inoltre consideriamo un nuovo approccio alla pianificazione gerarchica.

¹ Abbiamo scelto di riportare integralmente in queste pagine il testo della Prefazione dell'edizione originale – che fornisce una panoramica sulla struttura dell'opera e sul contenuto di tutti i capitoli – per offrire al lettore una visione complessiva del testo di Stuart Russell e Peter Norvig. L'edizione italiana è stata suddivisa in due volumi, come dettagliato a pagina V (N.d.E.).

- ◆ Abbiamo aggiunto nuovo materiale sui modelli probabilistici del primo ordine, tra cui modelli *a universo aperto* per casi in cui vi è incertezza su quali oggetti esistano.
- ◆ Abbiamo completamente riscritto il capitolo introduttivo sull'apprendimento automatico, mettendo in evidenza una più ampia varietà di algoritmi di apprendimento più moderni e rafforzando le corrispondenti basi teoriche.
- ◆ Abbiamo ampliato la trattazione delle ricerche e dell'estrazione di informazioni dal web, oltre che delle tecniche per l'apprendimento da insiemi di dati molto grandi.
- ◆ Il 20% delle citazioni riportate in questa edizione riguarda lavori pubblicati dopo il 2003.
- ◆ Secondo le nostre stime, circa il 20% dei contenuti è del tutto nuovo; il rimanente 80% riflette un lavoro precedente, ma è stato in gran parte riscritto per presentare un quadro più unificato della disciplina.

Una visione d'insieme

Il principale tema unificante è l'idea di **agente intelligente**. Nella nostra definizione, l'IA è lo studio degli agenti che ricevono percezioni dall'ambiente ed eseguono azioni. Ogni agente implementa una funzione che mette in corrispondenza sequenze percettive e azioni, e il nostro scopo è presentare diverse tecniche per rappresentare tali funzioni: alcune di queste sono gli agenti reattivi, i pianificatori in tempo reale e i sistemi basati sulla teoria delle decisioni. Verrà inoltre spiegato il ruolo dell'apprendimento nell'estendere il campo d'azione del progettista in territori sconosciuti e illustrato come tale ruolo rappresenti un vincolo sulla progettazione degli agenti, favorendo la rappresentazione esplicita della conoscenza e del ragionamento. La robotica e la visione non sono trattati come problemi indipendenti, ma nella loro funzione al servizio del raggiungimento degli obiettivi. Viene inoltre posto l'accento sull'importanza dell'ambiente nel determinare l'architettura di agente più appropriata.

Il nostro scopo principale è trasmettere le *idee* emerse negli ultimi cinquant'anni di ricerca nel campo dell'IA e nei due precedenti millenni di pensiero. Abbiamo cercato di evitare eccessivi formalismi nella presentazione dei concetti, mantenendo tuttavia la precisione. Per dare maggiore concretezza alle idee esposte, abbiamo incluso gli algoritmi sotto forma di pseudocodice; quest'ultimo è descritto nell'Appendice B.

Il libro è principalmente rivolto a un corso o a una serie di corsi universitari; ha 27 capitoli, ognuno dei quali richiede circa una settimana di lezioni, perciò in tutto richiede due semestri. Un corso di un solo semestre può utilizzare capitoli selezionati secondo gli interessi del docente e degli studenti. Il libro può anche essere adottato in un corso di dottorato (eventualmente integrato con alcune delle fonti principali suggerite nelle note bibliografiche). Presso il sito web di riferimento, aima.cs.berkeley.edu, sono disponibili alcuni programmi di corsi di esempio. L'unico prerequisito è la familiarità con i concetti di base dell'informatica (algoritmi, strutture dati, complessità) a livello del secondo anno di studi universitari. Conoscenze di analisi matematica e algebra lineare (a livello del primo anno) sono utili per alcuni degli argomenti. Le nozioni matematiche di base sono fornite nell'Appendice A.

Al termine di ogni capitolo sono riportati gli esercizi; quelli che richiedono una certa quantità di programmazione sono contrassegnati con l'icona di un mouse e per risolverli si può

ricorrere al nostro repository di codice presso aima.cs.berkeley.edu. Alcuni esercizi sono abbastanza complessi da poter essere considerati veri e propri progetti. Alcuni richiedono di svolgere una ricerca nella letteratura e sono contrassegnati con l'icona di una pila di libri.

In tutto il libro, i concetti fondamentali sono evidenziati da una lente d'ingrandimento. Abbiamo anche incluso un indice dettagliato. Ogni volta che un **termine nuovo** è definito per la prima volta, è riportato a margine, in modo da facilitarne il ritrovamento.

Come usare il sito web

aima.cs.berkeley.edu, il sito web del libro, contiene:

- ◆ implementazioni degli algoritmi descritti nel libro in diversi linguaggi di programmazione;
- ◆ un elenco di oltre 1000 istituzioni scolastiche che hanno utilizzato questo libro, in molti casi con collegamenti a materiali e syllabi dei corsi;
- ◆ un elenco commentato di oltre 800 collegamenti a siti web con contenuti utili nel campo dell'IA;
- ◆ un elenco di materiali supplementari e di collegamenti riferiti ai singoli capitoli;
- ◆ istruzioni su come partecipare a un gruppo di discussione relativo al libro;
- ◆ istruzioni su come contattare gli autori per sottoporre domande o commenti;
- ◆ istruzioni su come segnalare eventuali errori rilevati nel libro;
- ◆ slide e altri materiali per i docenti.

Ringraziamenti

Non sarebbe stato possibile realizzare questo libro senza le molte persone che hanno dato il loro contributo e i cui nomi non compaiono in copertina. Jitendra Malik e David Forsyth hanno scritto il Capitolo 24 (visione artificiale) e Sebastian Thrun ha scritto il Capitolo 25 (robotica). Vibhu Mittal ha scritto parte del Capitolo 22 (linguaggio naturale). Nick Hay, Mehran Sahami ed Ernest Davis hanno scritto alcuni degli esercizi. Zoran Duric (George Mason), Thomas C. Henderson (Utah), Leon Reznik (RIT), Michael Gourley (Central Oklahoma) ed Ernest Davis (NYU) hanno rivisto il manoscritto e fornito utili suggerimenti. Ringraziamo Ernie Davis in particolare per la capacità di leggere varie bozze e l'aiuto fornito per migliorare il libro. Nick Hay ha dato forma alla bibliografia e in prossimità della scadenza ha lavorato anche di notte per scrivere codice destinato a migliorare il libro. Jon Barron ha formattato e migliorato i diagrammi riportati in questa edizione, mentre Tim Huang, Mark Paskin e Cynthia Bruyns hanno contribuito con diagrammi e algoritmi nelle edizioni precedenti. Ravi Mohan e Ciaran O'Reilly hanno scritto gli esempi di codice Java presenti sul sito web, per cui provvedono alla manutenzione. John Canny ha scritto il capitolo sulla robotica per la prima edizione e Douglas Edwards ha lavorato sulle note storiche. Tracy Dunkelberger, Allison Michael, Scott Disanno e Jane Bonnell di Pearson hanno fatto del loro meglio per farci rispettare le scadenze e hanno fornito molti suggerimenti utili. Ringraziamo in particolare Julie Sussman, P.P.A., che ha letto ogni capitolo apportando notevoli miglioramenti. Nelle edizioni precedenti abbiamo lavorato con

correttori di bozze che ci segnalavano ogni virgola mancante e ogni piccolo difetto di stile; Julie ha continuato sulla stessa strada, correggendo anche gli errori nelle formule e nelle notazioni. Per ogni refuso o spiegazione poco chiara rimasti nel libro, state certi che Julie ne ha corretti almeno cinque. Ha continuato anche quando un blackout l'ha costretta a lavorare alla luce di una lanterna anziché con il bagliore dello schermo LCD.

Stuart desidera ringraziare i suoi genitori per il supporto e l'incoraggiamento e sua moglie, Loy Sheflott, per la grande pazienza e l'infinita saggezza. Si augura che Gordon, Lucy, George e Isaac leggeranno presto questo libro, dopo averlo perdonato per averci lavorato così a lungo. Il RUGS (Russell's Unusual Group of Students) è stato insolitamente utile, come sempre.

Peter vuole ringraziare i suoi genitori (Torsten e Gerda) per averlo avviato agli studi e sua moglie (Kris), i figli (Bella e Juliet), colleghi e amici per averlo incoraggiato e sopportato nelle lunghe ore passate a scrivere e in quelle ancora più lunghe della riscrittura.

Entrambi ringraziamo i bibliotecari di Berkeley, Stanford e della NASA e gli sviluppatori di CiteSeer, Wikipedia e Google, che hanno rivoluzionato il nostro modo di fare ricerca. Non possiamo ringraziare tutte le persone che hanno utilizzato il libro e fornito suggerimenti, ma vorremmo segnalare i commenti particolarmente utili di Gagan Aggarwal, Eyal Amir, Ion Androutsopoulos, Krzysztof Apt, Warren Haley Armstrong, Ellery Aziel, Jeff Van Baalen, Darius Bacon, Brian Baker, Shumeet Baluja, Don Barker, Tony Barrett, James Newton Bass, Don Beal, Howard Beck, Wolfgang Bibel, John Binder, Larry Bookman, David R. Boxall, Ronen Brafman, John Bresina, Gerhard Brewka, Selmer Bringsjord, Carla Brodley, Chris Brown, Emma Brunskill, Wilhelm Burger, Lauren Burka, Carlos Bustamante, Joao Cachopo, Murray Campbell, Norman Carver, Emmanuel Castro, Anil Chakravarthy, Dan Chisarick, Berthe Choueiry, Roberto Cipolla, David Cohen, James Coleman, Julie Ann Comparini, Corinna Cortes, Gary Cottrell, Ernest Davis, Tom Dean, Rina Dechter, Tom Dietterich, Peter Drake, Chuck Dyer, Doug Edwards, Robert Egginton, Asma'a El-Budrawy, Barbara Engelhardt, Kutluhan Erol, Oren Etzioni, Hana Filip, Douglas Fisher, Jeffrey Forbes, Ken Ford, Eric Fosler-Lussier, John Fosler, Jeremy Frank, Alex Franz, Bob Futrelle, Marek Galecki, Stefan Gerberding, Stuart Gill, Sabine Glesner, Seth Golub, Gosta Grahne, Russ Greiner, Eric Grimson, Barbara Grosz, Larry Hall, Steve Hanks, Othar Hansson, Ernst Heinz, Jim Hendler, Christoph Herrmann, Paul Hilfinger, Robert Holte, Vasant Honavar, Tim Huang, Seth Hutchinson, Joost Jacob, Mark Jelasity, Magnus Johansson, Istvan Jonyer, Dan Jurafsky, Leslie Kaelbling, Keiji Kanazawa, Surekha Kasibhatla, Simon Kasif, Henry Kautz, Gernot Kerschbaumer, Max Khesin, Richard Kirby, Dan Klein, Kevin Knight, Roland Koenig, Sven Koenig, Daphne Koller, Rich Korf, Benjamin Kuipers, James Kurien, John Lafferty, John Laird, Gus Larsson, John Lazzaro, Jon LeBlanc, Jason Leatherman, Frank Lee, Jon Lehto, Edward Lim, Phil Long, Pierre Louveaux, Don Loveland, Sridhar Mahadevan, Tony Mancill, Jim Martin, Andy Mayer, John McCarthy, David McGrane, Jay Mendelsohn, Risto Miikkulanien, Brian Milch, Steve Minton, Vibhu Mittal, Mehryar Mohri, Leora Morgenstern, Stephen Muggleton, Kevin Murphy, Ron Musick, Sung Myaeng, Eric Nadeau, Lee Naish, Pandu Nayak, Bernhard Nebel, Stuart Nelson, XuanLong Nguyen, Nils Nilsson, Illah Nourbakhsh, Ali Nouri, Arthur Nunes-Harwitt, Steve Omohundro, David Page, David Palmer, David Parkes, Ron Parr, Mark Paskin, Tony Passera, Amit Patel, Michael Pazzani, Fernando Pereira, Joseph Perla, Wim Pijls, Ira Pohl, Martha Pollack, David Poole, Bruce Porter, Malcolm Pradhan, Bill Pringle, Lorraine Prior, Greg Provan, William Rapaport, Deepak Ravichandran, Ioannis Refanidis, Philip Resnik, Francesca Rossi, Sam Roweis, Richard Russell, Jonathan Schaeffer, Richard Scherl, Hinrich Schuetze, Lars Schuster, Bart Selman,

Soheil Shams, Stuart Shapiro, Jude Shavlik, Yoram Singer, Satinder Singh, Daniel Sleator, David Smith, Bryan So, Robert Sproull, Lynn Stein, Larry Stephens, Andreas Stolcke, Paul Stradling, Devika Subramanian, Marek Suchenek, Rich Sutton, Jonathan Tash, Austin Tate, Bas Terwijn, Olivier Teytaud, Michael Thielscher, William Thompson, Sebastian Thrun, Eric Tiedemann, Mark Torrance, Randall Upham, Paul Utgoff, Peter van Beek, Hal Varian, Paulina Varshavskaya, Sunil Vemuri, Vandí Verma, Ubbo Visser, Jim Waldo, Toby Walsh, Bonnie Webber, Dan Weld, Michael Wellman, Kamin Whitehouse, Michael Dean White, Brian Williams, David Wolfe, Jason Wolfe, Bill Woods, Alden Wright, Jay Yagnik, Mark Yasuda, Richard Yen, Eliezer Yudkowsky, Weixiong Zhang, Ming Zhao, Shlomo Zilberstein e del nostro stimato collega Revisore Anonimo.

Gli autori

Stuart Russell è nato nel 1962 a Portsmouth, in Inghilterra. Si è laureato in fisica *cum laude* alla Oxford University nel 1982 e ha ottenuto il Ph.D. in informatica a Stanford nel 1986. In seguito è passato alla University of California a Berkeley, dove è professore di informatica, direttore del Center for Intelligent Systems e titolare della cattedra Smith-Zadeh in ingegneria. Nel 1990 ha ricevuto il Presidential Young Investigator Award della National Science Foundation e nel 1995 ha conseguito il Computers and Thought Award. Nel 1996 è stato Miller Professor alla University of California e ha ricevuto una Chancellor's Professorship nel 2000. Nel 1998 ha tenuto le Forsythe Memorial Lectures alla Stanford University. È Fellow ed ex componente del consiglio esecutivo dell'American Association for Artificial Intelligence. Ha pubblicato oltre 100 articoli su una vasta gamma di argomenti di intelligenza artificiale. Tra gli altri suoi libri vi sono *The Use of Knowledge in Analogy and Induction* e (con Eric Wefald) *Do the Right Thing: Studies in Limited Rationality*.

Peter Norvig è Director of Research presso Google, Inc., ed è stato il direttore responsabile per gli algoritmi di ricerca web dal 2002 a 2005. È Fellow dell'American Association for Artificial Intelligence e dell'Association for Computing Machinery. In passato è stato a capo della Computational Sciences Division presso l'Ames Research Center della NASA, dove era supervisore delle attività di ricerca e sviluppo in intelligenza artificiale e robotica, e *chief scientist* presso Jun-gee, dove ha aiutato a sviluppare uno dei primi servizi di estrazione delle informazioni da Internet. Ha conseguito la laurea in matematica applicata alla Brown University e un Ph.D. in informatica all'University of California a Berkeley. Ha ricevuto i riconoscimenti Distinguished Alumni ed Engineering Innovation da Berkeley e l'Exceptional Achievement Medal dalla NASA. È stato docente all'University of Southern California e professore con incarichi di ricerca a Berkeley. Tra gli altri libri che ha scritto vi sono *Paradigms of AI Programming: Case Studies in Common Lisp* e *Verbmobil: A Translation System for Face-to-Face Dialog and Intelligent Help Systems for UNIX*.