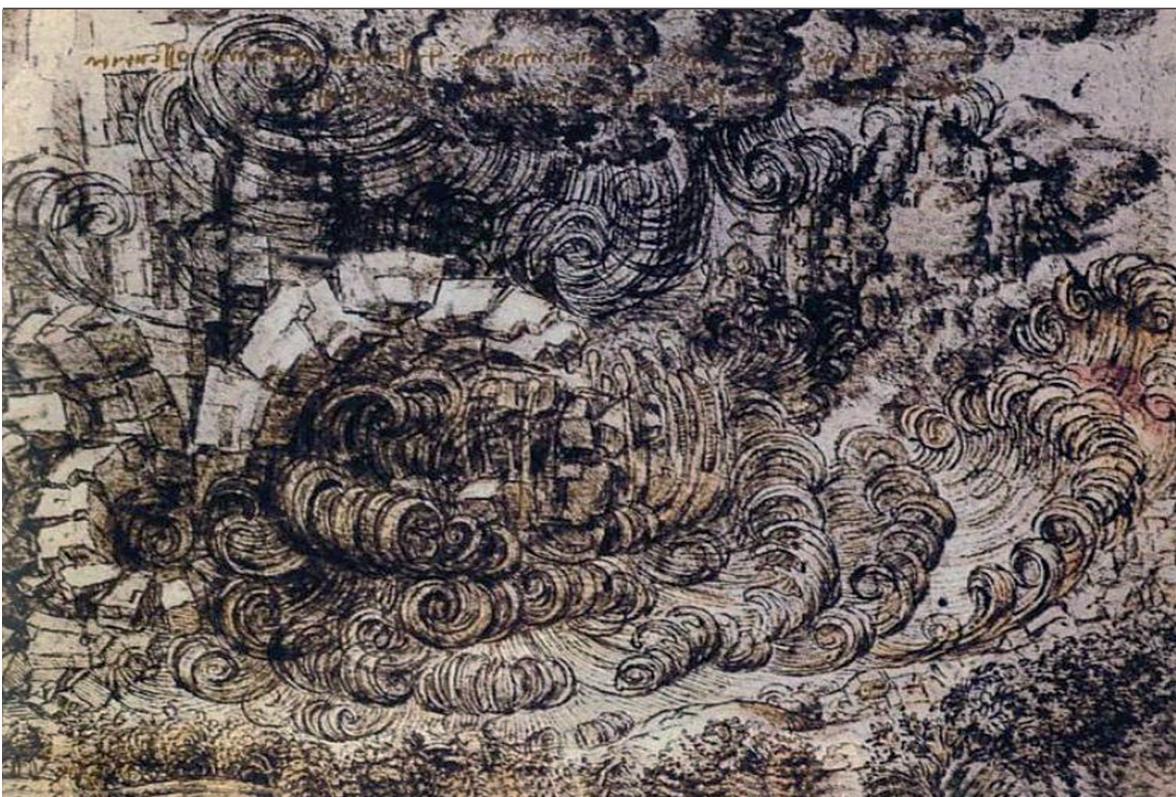


EDILIZIA

MARIO DE GRASSI, BERARDO NATICCHIA,
ALBERTO GIRETTI, ALESSANDRO CARBONARI

**RETI BAYESIANE
CON APPLICAZIONI
ALL'EDILIZIA
E ALLA GESTIONE
DEL TERRITORIO**



FRANCOANGELI

I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati possono consultare il nostro sito Internet: www.francoangeli.it e iscriversi nella home page al servizio "Informatemi" per ricevere via e.mail le segnalazioni delle novità.

MARIO DE GRASSI, BERARDO NATICCHIA,
ALBERTO GIRETTI, ALESSANDRO CARBONARI

RETI BAYESIANE
CON APPLICAZIONI
ALL'EDILIZIA
E ALLA GESTIONE
DEL TERRITORIO

FRANCOANGELI

Le ricerche presentate in questo volume sono state finanziate con fondi del progetto di ricerca PRIN: *Ricerca e sperimentazione di nuovi modelli e tecnologie informatiche per la formazione dell'Architetto* - Anno 2006, prot. 2006084077.

Alberto Giretti ha curato i capitoli 1, 2, 8 e 10. Alessandro Carbonari ha curato i capitoli 4, 5, 6. Alberto Giretti ed Alessandro Carbonari e Berardo Naticchia hanno curato i capitoli 3 e 11. Alessandro Carbonari e Mario De Grassi hanno curato il capitolo 9. Alberto Giretti e Berardo Naticchia hanno curato il capitolo 7.

In copertina: Leonardo Da Vinci, *Studio di diluvio* (1515 circa), Windsor, Royal Library.

Copyright © 2008 by FrancoAngeli s.r.l., Milano, Italy.

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d'autore. L'Utente nel momento in cui effettua il download dell'opera accetta tutte le condizioni specificate nel sito www.francoangeli.it

Indice

| | | |
|--|------|----|
| Prefazione | pag. | 11 |
| Ringraziamenti | » | 14 |
| Parte Prima | | |
| Aspetti teorici | | |
| 1. I modelli probabilistici nell'ingegneria | » | 17 |
| 1. Modelli di sistemi fisici | » | 17 |
| 1.1. Modelli impliciti, modelli espliciti | » | 18 |
| 1.2. Modelli qualitativi | » | 19 |
| 1.3. Spazio delle quantità | » | 20 |
| 1.4. Ontologie | » | 21 |
| 2. Modelli probabilistici | » | 24 |
| 3. Modelli decisionali | » | 27 |
| 3.1. Funzioni di utilità | » | 28 |
| 3.2. Funzioni multi-attributo | » | 29 |
| 2. Le Reti Bayesiane | » | 31 |
| 1. Inferenza probabilistica | » | 32 |
| 1.1. Inferenza Bayesiana | » | 34 |
| 1.2. Complessità ed indipendenza condizionale | » | 37 |
| 2. Reti Bayesiane | » | 38 |
| 2.1. Indipendenza condizionale | » | 42 |
| 3. Costruzione di Reti | » | 43 |
| 3.1. Sintesi diretta totale | » | 44 |
| 3.2. Sintesi diretta parziale | » | 48 |
| 3.3. Sintesi indiretta | » | 50 |
| 3.4. Adattamento | » | 51 |
| 4. Inferenze | » | 53 |
| 4.1. Probabilità dell'evidenza | » | 55 |

| | |
|---|---------|
| 4.2. Probabilità di combinazioni di stati | pag. 56 |
| 4.3. Evidenza incerta | » 56 |
| 5. Reti Object Oriented | » 57 |
| 6. Reti dinamiche | » 59 |
| 6.1. Stati, osservazioni e processi | » 59 |
| 6.2. Inferenze temporali | » 61 |
| 7. Reti di decisione | » 65 |
| 7.1. Reti di decisione semplici | » 65 |
| 7.2. Reti di decisione sequenziali | » 68 |
| 3. Inferenza | » 71 |
| 1. Inferenza Bayesiana | » 71 |
| 2. L'inferenza nelle reti Bayesiane discrete | » 77 |
| 2.1. Strutture a catena | » 77 |
| 2.2. Strutture ad albero | » 81 |
| 2.3. Strutture ad albero multiplo | » 83 |
| 2.4. Reti multiconnesse | » 88 |
| 3. L'inferenza esatta nelle reti Bayesiane continue | » 92 |
| 4. L'inferenza approssimata nelle reti Bayesiane | » 95 |
| 4. Apprendimento | » 98 |
| 1. Apprendimento strutturale | » 99 |
| 1.1. L'algoritmo PC | » 100 |
| 1.2. Esempio di applicazione dell'algoritmo PC | » 101 |
| 1.3. Il test di indipendenza condizionale | » 104 |
| 2. Apprendimento di relazioni lineari | » 107 |
| 3. Apprendimento di relazioni non lineari | » 110 |
| 3.1. Apprendimento delle probabilità condizionate | » 114 |
| 3.2. Il caso di database completi | » 119 |
| 3.3. Il caso di database non completi | » 120 |
| 4. Relazioni deterministiche | » 123 |
| 5. Elicitazione di modelli | » 126 |
| 1. La modellazione probabilistica della conoscenza soggettiva | » 126 |
| 1.1. Sorgenti di errore nella stima | » 127 |
| 1.2. Minimizzazione dell'errore nella stima | » 130 |
| 1.3. La modellazione delle distribuzioni di probabilità | » 132 |
| 2. Distribuzioni di probabilità per la stima soggettiva | » 133 |
| 2.1. Le distribuzioni non parametriche | » 133 |
| 2.2. Le distribuzioni parametriche | » 135 |

Parte Seconda Applicazioni

| | |
|--|----------|
| 6. La progettazione energetica dei sistemi Roofpond | pag. 141 |
| 1. La tecnologia dei sistemi Roofpond | » 141 |
| 1.1. Roofpond vetrati a falda inclinata | » 142 |
| 2. Modelli analitici | » 144 |
| 2.1. Il comportamento termico in regime transitorio | » 145 |
| 2.2. La previsione delle oscillazioni di temperatura interna | » 150 |
| 2.3. Definizione del modello bayesiano | » 152 |
| 3. Il modello Bayesiano | » 154 |
| 3.1. Le reti del primo livello | » 155 |
| 3.2. Le reti del secondo livello | » 159 |
| 3.3. Sviluppo delle reti del terzo livello | » 163 |
| 3.4. Il modello bayesiano complessivo | » 166 |
| 4. Stima delle tabelle di probabilità condizionata | » 167 |
| 4.1. Stima delle tabelle di probabilità (primo livello) | » 170 |
| 4.2. Stima delle tabelle di probabilità (secondo livello) | » 172 |
| 4.3. Stima delle tabelle di probabilità (terzo livello) | » 177 |
| 5. La progettazione energetica | » 181 |
| 5.1. Scelta della soluzione migliore | » 181 |
| 5.2. Dimensionamento ottimo dei parametri dell'edificio | » 183 |
| 5.3. Dimensionamento approssimato in condizioni di incertezza | » 183 |
| | |
| 7. La progettazione acustica delle grandi sale | » 187 |
| 1. I parametri acustici delle grandi sale | » 187 |
| 1.1. Il tempo di riverberazione | » 188 |
| 1.2. L'indice di chiarezza | » 190 |
| 2. Un modello Bayesiano dell'acustica di una grande sala | » 191 |
| 2.1. Il comportamento acustico di una grande sala | » 191 |
| 2.2. La struttura della rete | » 193 |
| 2.3. Sintesi del modello | » 199 |
| 3. Correzione acustica di un palazzetto dello sport | » 201 |
| | |
| 8. La diagnosi dell'inquinamento da Radon | » 207 |
| 1. L'inquinamento da Radon | » 207 |
| 2. Un modello qualitativo della generazione e diffusione del Radon | » 209 |
| 2.1. Il Radon nel Terreno | » 210 |
| 2.2. Interfaccia Terreno-Edificio | » 211 |
| 2.3. Effetti di diffusione | » 213 |
| 2.4. Ventilazione | » 214 |
| 3. Un modello bayesiano della propagazione del radon negli edifici | » 216 |
| 3.1. Concentrazione al Piano Terra | » 218 |

| | |
|---|----------|
| 3.2. Infiltrazione alla base dell'edificio | pag. 220 |
| 3.3. Fenomeni di estrazione | » 221 |
| 4. Valutazione della concentrazione di Radon alla Scuola Mancino di Palermo | » 224 |
| 9. Valutazione della sostenibilità ambientale | » 235 |
| 1. L'azione di controllo della pianificazione esercitata dalla VAS | » 236 |
| 1.1. La VAS di un piano strutturale intercomunale | » 236 |
| 1.2. Gli ambiti di valutazione della VAS | » 237 |
| 2. Il modello Bayesiano | » 239 |
| 2.1. Il modello Bayesiano per la qualità delle acque | » 241 |
| 2.2. Il modello bayesiano per la biodiversità | » 244 |
| 2.3. Gli altri modelli Bayesiani | » 249 |
| 3. La verifica delle scelte di pianificazione | » 258 |
| 3.1. Valutazione dell'inquinamento delle acque | » 258 |
| 3.2. Valutazione della biodiversità | » 259 |
| 10. La valutazione del rischio di incendio nelle zone boschive | » 264 |
| 1. Il fenomeno | » 264 |
| 1.1. Le fasi della combustione | » 265 |
| 1.2. La velocità dell'incendio | » 266 |
| 1.3. La classificazione tipologica degli incendi | » 266 |
| 1.4. Fattori biofisici | » 270 |
| 1.5. Il fuoco in foresta | » 274 |
| 1.6. L'intensità dell'incendio | » 275 |
| 2. Un Modello Bayesiano della propagazione del fuoco | » 278 |
| 2.1. I modelli di Rothermel | » 278 |
| 2.2. Il calore d'ignizione | » 278 |
| 2.3. L'infiammabilità della cella | » 284 |
| 2.4. L'intensità del fronte di fiamma | » 284 |
| 2.5. La velocità di propagazione | » 285 |
| 2.6. Il contenuto d'acqua | » 286 |
| 2.7. La lotta attiva | » 287 |
| 2.8. La direzione di propagazione | » 287 |
| 2.9. Discretizzazione spazio-temporale | » 288 |
| 2.10. La rete bayesiana | » 292 |
| 2.11. Il simulatore | » 294 |
| 3. La Comunità montana Esino-Frasassi | » 296 |
| 3.1. L'area di studio | » 296 |
| 3.2. L'area di saggio | » 296 |
| 3.3. Simulazione e valutazione dei rischi | » 298 |
| 11. La valutazione del rischio operativo | » 305 |

| | | |
|---|------|-----|
| 1. Il rischio operativo | pag. | 305 |
| 1.1. Pianificazione delle grandi opere e riferimenti legislativi | » | 306 |
| 1.2. Definizione e modellazione del rischio operativo | » | 308 |
| 2. La modellazione del rischio operativo nella costruzione di un parcheggio multi-piano | » | 311 |
| 2.1. Sviluppo del modello Bayesiano | » | 314 |
| 2.2. Rete bayesiana elementare degli output del modello | » | 315 |
| 2.3. Rete bayesiana elementare dell'onere economico giornaliero | » | 317 |
| 2.4. Rete bayesiana elementare sul rischio di rinvenimento archeologico | » | 318 |
| 2.5. Rete bayesiana elementare sul rischio di presenza di sottoservizi | » | 320 |
| 2.6. Rete bayesiana elementare sul rischio di blocco della viabilità | » | 322 |
| 2.7. Rete bayesiana elementare sul rischio di adeguamento delle opere stradali | » | 324 |
| 2.8. Il reperimento dei dati per la quantificazione delle probabilità condizionate | » | 326 |
| 2.9. Integrazione del modello con il GIS della città di Ancona | » | 326 |
| 3. Applicazioni | » | 329 |
| 3.1. L'analisi di scenario | » | 329 |
| 3.2. Analisi di sensibilità | » | 333 |

Appendici

| | | |
|---|---|-----|
| A. Elementi di calcolo delle probabilità | » | 339 |
| 1. Assiomi della teoria delle probabilità | » | 340 |
| 2. Le operazioni fondamentali del calcolo delle probabilità | » | 341 |
| 3. Indipendenza degli eventi | » | 343 |
| 3.1. Calcolo di probabilità nell'ipotesi di eventi indipendenti | » | 344 |
| 4. La revisione delle probabilità: il teorema di Bayes | » | 345 |
| 5. Eventi congiunti e marginalizzazione | » | 346 |
| 6. Indipendenza condizionata di eventi | » | 348 |
| 6.1. La descrizione dello spazio campione: la regola del prodotto | » | 349 |
| 7. Variabili casuali e distribuzioni di probabilità | » | 350 |
| B. Cenni sull'algebra degli intervalli | » | 353 |
| Bibliografia | » | 355 |
| Capitoli 1-5 | » | 355 |
| Capitolo 6 | » | 356 |
| Capitolo 7 | » | 357 |
| Capitolo 8 | » | 357 |

| | | |
|-------------------|------|-----|
| Capitolo 9 | pag. | 357 |
| Capitolo 10 | » | 358 |
| Capitolo 11 | » | 359 |
| Gli Autori | » | 361 |

Prefazione

Nella biografia del periodo di Chicago Giulio Maltese¹ narra che: “Enrico Fermi sosteneva di essere capace di stimare qualunque cosa con un’approssimazione del 10-20% in un’ora o giù di lì, ma che gli serviva poi molto tempo per una stima più precisa. Riteneva che ogni fisico dovesse essere sempre capace di fare rapide stime di qualsiasi cosa, e di ottenere una risposta corretta a meno di un ordine di grandezza. Un pomeriggio, a Los Alamos, durante il tè, chiese ai suoi collaboratori di stimare il numero di locomotive esistenti negli Stati Uniti”. Altri aneddoti narrano che Fermi, durante gli esami di fisica, chiedesse ai suoi studenti di stimare, ad esempio, il numero dei meccanici d’auto a Chicago e che in seguito controllasse la risposta sulle pagine gialle. Problemi analoghi ai quesiti di Fermi sono molto frequenti nella pratica dell’ingegneria. La capacità di stimare delle quantità con buona approssimazione richiede la costruzione di modelli approssimati di calcolo, molto spesso basati solo sulle proprie esperienze, come nel caso dei meccanici di Chicago. Il problema dei meccanici d’auto si può affrontare stimando il numero di meccanici che si incontra negli spostamenti giornalieri nel proprio quartiere; quindi, da una stima del numero di quartieri in Chicago è possibile risalire facilmente ad una stima del numero di meccanici². La caratteristica importante di questo tipo di calcoli è che essi sono affetti da incertezza. Non si è sicuri del numero di meccanici incontrati perché nei propri spostamenti non si presta sufficiente attenzione o perché non si ricorda in modo del tutto esatto. L’incertezza che ne risulta comporta la formulazione di giudizi approssimati. L’approssimazione è sicuramente un valore negativo del giudizio, tuttavia, quando questa situazione è inevitabile, è ancora possibile gestire con un po’ di metodo il grado di esattezza. Ad esempio ricomponendo con attenzione i ricordi è possibile in certo qual modo quantificare l’incertezza, magari delimitandola entro un range e fornendo il valore più probabile. Nell’esempio di Fermi potremmo dire che nel quartiere di sicuro ci sono almeno tre meccanici perché, ad esempio, il primo è sotto casa, il secondo è il proprio

1. Maltese G. (2003), *Enrico Fermi in America*, Zanichelli, Bologna.

2. Il problema delle locomotive è un po’ più complesso. La traccia fornita da Maltese è la seguente: si stima il numero medio di miglia da percorrere con la macchina prima di incontrare una ferrovia; da qui si può ottenere una stima della lunghezza delle ferrovie e si può stimare il numero di miglia per locomotiva. Si lascia al lettore il conveniente esercizio.

meccanico ed il terzo è vicino al secondo. Quindi si può stimare il numero massimo di meccanici poiché si ricorda che nei propri spostamenti si incontra un meccanico con una certa frequenza, da cui, data una stima della lunghezza media dello spostamento, si ottiene una densità ed alla fine il numero. Infine, il valore più probabile può essere definito come il numero di meccanici che si ricorda di aver incontrato. Alla fine di questo sforzo si è ottenuta una statistica che permette di controllare l'incertezza del calcolo. Infatti, per calcolare il numero di meccanici dell'intera città è necessario estendere la stima a tutti i quartieri. Se si è in possesso di una statistica del quartiere e di un'analoga statistica relativa al numero di quartieri, è possibile comporre le due statistiche ottenendo sia una stima del valore più probabile che una stima dell'incertezza con cui tale valore è conosciuto.

Questo libro tratta di una tecnica molto efficace, chiamata Reti Bayesiane, che consente di condurre in modo corretto ragionamenti basati su informazione affetta da incertezza, anche in casi molto più complessi dei problemi di Fermi che abbiamo appena discusso. Le Reti Bayesiane hanno una natura molteplice. Esse sono nate negli anni '80 come un modello di calcolo probabilistico che limita la complessità computazionale dell'inferenza statistica, permettendo di applicare il calcolo automatico anche a problemi di complessità reale. Da un altro punto di vista, la costruzione di una Rete Bayesiana richiede una preventiva concettualizzazione ed una quantificazione in termini probabilistici del problema in esame. In questa prospettiva le Reti Bayesiane possono essere viste come strumenti di *knowledge representation* estremamente efficaci su cui basare la costruzione di sistemi di supporto alle decisioni. Le reti, infatti, permettono di condurre inferenze sia di tipo deduttivo, valutando le conseguenze delle decisioni prese, che di tipo diagnostico, identificando le cause più probabili di eventi osservati o previsti. I sistemi di supporto alle decisioni trovano applicazione in svariati ambiti dell'ingegneria edile, dalla progettazione architettonica, alla diagnostica, all'analisi del rischio. Un'ulteriore caratteristica delle Reti Bayesiane sta nella loro flessibilità. Le Reti Bayesiane sono dei formidabili integratori di conoscenza. Una Rete Bayesiana può essere costruita sulla base di conoscenza soggettiva, alla stregua delle stime nei problemi di Fermi, sulla base di sistemi di equazioni, direttamente da serie storiche di dati relativi al problema in esame³, o da una loro qualsiasi combinazione. Le Reti Bayesiane rappresentano quindi uno degli strumenti attualmente più efficienti ed efficaci con cui affrontare in modo sistematico la soluzione di problemi complessi. Nonostante gli esempi del presente testo siano relativi all'ambito civile-edile ed alla gestione del territorio, le soluzioni proposte sono facilmente generalizzabili ed applicabili a tutti i settori tecnologici, oltre che della medicina e dell'economia. Nella redazione gli autori hanno cercato di mantenere una trattazione il più possibile semplice ed intuitiva, favorendo la comprensione dei concetti che sono alla base delle numerose tecniche e strategie esposte. La trattazione delle complessità analitiche relative agli algoritmi di inferenza, apprendimento ed alla modellazione della conoscenza soggettiva sono state concentrate in tre capitoli facoltativi.

Il presente testo è pertanto diviso in due parti. La prima parte, che comprende i

3. In tal senso le Reti Bayesiane sono un eccellente strumento di *data mining*.

capitoli dall'uno al cinque, tratta la teoria delle Reti Bayesiane. I primi due capitoli espongono in modo intuitivo i contenuti necessari per la costruzione delle reti. Il primo capitolo introduce il lettore al concetto di modello probabilistico e fornisce alcune semplici tecniche per la corretta definizione delle strutture concettuali che regolano la rappresentazione dei problemi. Il secondo capitolo descrive in modo semplice le Reti Bayesiane. La lettura di questo capitolo richiede alcuni concetti elementari del calcolo delle probabilità e del calcolo intervallare, che sono forniti in appendice. La lettura dei primi due capitoli fornisce il lettore di tutte le conoscenze necessarie per l'utilizzo dei numerosi pacchetti software per la gestione delle reti e per la comprensione degli esempi contenuti nella seconda parte del testo. I capitoli dal tre al cinque trattano in modo analitico più rigoroso rispettivamente gli algoritmi di inferenza, di apprendimento e le tecniche di modellazione della conoscenza soggettiva. I capitoli richiedono una buona conoscenza del calcolo delle probabilità e dell'inferenza statistica. La loro lettura è consigliata al lettore esperto che vuole approfondire gli aspetti algoritmici delle reti, la cui trattazione non è sempre di facile accesso nella letteratura scientifica. In questa prima parte si è anche cercato di favorire la comprensione attraverso l'utilizzo di esempi ormai standard nella letteratura scientifica internazionale, ma rivisitati in funzione delle esigenze della trattazione teorica.

La seconda parte del libro contiene sei capitoli relativi ad altrettanti esempi derivanti dall'esperienza professionale e di ricerca degli autori. Gli esempi sono relativi a casi reali. Ogni capitolo della seconda parte ha una doppia peculiarità. Da un lato costruisce la soluzione ad un problema ingegneristico complesso e di ampia rilevanza, dall'altro espone in modo dettagliato l'applicazione delle tecniche di modellazione ed inferenza delle reti. Pertanto ogni capitolo inizia con un'ampia sezione che descrive nel dettaglio il problema in esame. Questo permette al lettore di entrare profondamente nella pratica delle Reti Bayesiane ripercorrendo le tracce, a volte tortuose, che hanno condotto alla soluzione dei problemi. Nel suo complesso il testo si propone quindi come uno strumento per l'apprendimento delle competenze necessarie all'utilizzo delle Reti Bayesiane per la soluzione di problemi reali, evidenziandone di volta in volta le potenzialità ed i limiti e, così sperano gli autori, fornendo un supporto per lo sviluppo delle nuove tecnologie.

Infine, può essere utile spiegare che la copertina, che riproduce lo "Studio di diluvio" di Leonardo Da Vinci, è secondo gli autori un illustre esempio di analisi della complessità con metodi qualitativi.

Ancona, 15 giugno 2008

Ringraziamenti

Questo lavoro non poteva essere svolto senza il prezioso ed originale contributo di molti colleghi. Un sentito ringraziamento va alla Prof.ssa Cristina Cocchioni per i contributi offerti al capitolo 8 e la puntuale revisione dei manoscritti; al Prof. Giuseppe Alaimo per i dati delle ricerche relativi all'inquinamento da Radon; all'ing. Diego Centanni per il lavoro svolto sui modelli di propagazione al fuoco; all'ing. Marco Masi per i lavori sui modelli di rischio operativo; all'ing. Guido Bonanni per i modelli di progettazione acustica di grandi sale; all'ing. Federica Marinelli per il supporto fornito nei lavori sui modelli di gestione del territorio; al prof. Alfredo Fernandez-Gonzalez per aver fornito i dati sperimentali a supporto del modello bayesiano relativo alla progettazione energetica dei Roofpond.

Infine gli autori esprimono riconoscenza ai membri dell'ISTeA (*Italian Society of Science, Technology and engineering of Architecture*), che con il loro apprezzamento dei lavori eseguiti in questo ambito e con i loro suggerimenti hanno di fatto contribuito ad incoraggiare la realizzazione del presente volume.

Parte Prima
Aspetti teorici

1. I modelli probabilistici nell'ingegneria

Wikipedia definisce l'ingegneria come “la scienza applicata alla risoluzione di problematiche che concorrono alla soddisfazione dei bisogni umani”, in altre parole la “scienza delle soluzioni”. La competenza fondante dell'ingegneria è quindi la capacità di creare soluzioni, cioè la capacità di interagire in modo efficace ed efficiente con il mondo fisico e sociale in modo da fornire metodi, progetti e procedure per la produzione di beni fisici, di prodotti e di servizi che soddisfino ben definite esigenze. La difficoltà del problema ingegneristico nasce dal riflesso che la complessità del mondo fisico e sociale proietta nella formulazione del problema e nella determinazione delle soluzioni. L'ingegnere opera costantemente sulla base di un insieme finito e necessariamente incompleto di conoscenze. Ciononostante, ed in modo tutto sommato sorprendente, egli giunge alla formulazione di soluzioni di provata efficacia.

In questo capitolo ci occuperemo degli aspetti principali che regolano la rappresentazione dei problemi ingegneristici. Utilizzeremo il concetto di modello come linea guida per porre ordine nella grande quantità di tecniche in uso nella rappresentazione dei problemi ingegneristici. Non è obiettivo del capitolo una trattazione esaustiva del problema. Piuttosto si porranno in evidenza i concetti e le tecniche di rappresentazione più rilevanti per la costruzione di modelli probabilistici dei problemi tecnici al fine di fornire al lettore le conoscenze fondamentali per la corretta costruzione delle reti Bayesiane.

1. Modelli di sistemi fisici

Un *modello* è una rappresentazione analogica di un fenomeno reale, che è strutturata in forma tale da soddisfare ben definite esigenze conoscitive ed operative. Un modello nasce quindi da un'analisi di rilevanza delle proprietà dei fenomeni reali, in funzione di una precisa finalità conoscitiva od operativa. Consideriamo, ad esempio, il problema della rappresentazione del sistema planetario terra-luna-sole. Se fosse nostro unico scopo conoscere le caratteristiche dell'orbita della luna intorno alla terra e della terra intorno al sole, allora sarebbe sufficiente descrivere la ter-

ra, la luna ed il sole in termini di masse puntuali, di posizioni, di velocità e di forze agenti sulle masse. Se, al contrario, volessimo creare una rappresentazione che dia conto anche delle fasi lunari e delle possibilità di eclisse, allora sarebbe necessario far cadere l'approssimazione relativa alla massa puntuale, e trattare masse estese introducendo forma e diametro dei tre corpi. Se infine volessimo capire il perché la luna appare all'occhio nudo come un disco piuttosto che come una sfera, sarebbe necessario considerare anche le proprietà di riflessione e rifrazione della polvere lunare e dell'atmosfera terrestre.

La capacità di selezionare solamente le caratteristiche dei fenomeni in esame rilevanti per gli scopi conoscitivi dati è chiamata *astrazione*. L'astrazione è un processo di selezione significativa, esso permette di utilizzare un numero limitato di parametri, ad esempio il baricentro della massa lunare o terrestre, per descrivere sinteticamente strutture altresì ben più complesse, nel nostro esempio la distribuzione spaziale della massa. L'astrazione di strutture e funzioni complesse in un limitato numero di parametri significativi è quindi il processo che qualifica il processo di modellazione. La qualità di un modello sta proprio nel grado di rilevanza che i parametri selezionati hanno per le finalità conoscitive ed operative a cui il modello è preposto. Il concetto di rilevanza può essere definito in modo più oggettivo introducendo le nozioni di *correttezza*, *completezza* e *precisione*. Un modello è corretto se i risultati delle inferenze o dei calcoli condotti in base alla sua struttura sono concordi con l'osservazione della realtà che descrive. Il modello è detto preciso se il grado di dettaglio che offre nella descrizione della realtà in esame soddisfa le esigenze conoscitive od operative a cui è preposto. Infine un modello è completo se l'insieme delle inferenze o dei calcoli possibili soddisfa tutto l'insieme delle esigenze conoscitive ed operative. Un modello è quindi adeguato per un determinato scopo conoscitivo se è corretto, completo e sufficientemente preciso. Di conseguenza l'astrazione se da un lato garantisce l'efficacia dei modelli in relazione alle loro specifiche finalità, dall'altro impone necessariamente dei limiti alla loro validità. I modelli potranno essere applicati solo nei contesti in cui essi sono sufficientemente corretti, completi e precisi¹.

1.1. Modelli impliciti, modelli espliciti

L'approccio alla modellazione più frequentemente adottato in ingegneria tende a rappresentare le caratteristiche rilevanti del fenomeno in esame alla massima precisione possibile e a correlarle attraverso relazioni espresse secondo formalismi ben fondati. I sistemi di equazioni differenziali che descrivono l'evoluzione di un qualsiasi fenomeno fisico o economico sono un tipico esempio. Questa classe di modelli fornisce soluzioni con elevata precisione, ma, a causa della natura implicita della loro forma analitica, tendono a mascherare la struttura del sistema fisico che l'ha prodotta. Ad esempio un modello agli elementi finiti per l'analisi dei flussi

1. In tal senso l'ingegneria è fondamentalmente la scienza del controllo dei limiti di applicabilità dei modelli.

termici di una parete ventilata produce una puntuale rappresentazione della distribuzione spaziale dei vettori che descrivono intensità e direzione dei flussi in gioco e dei valori delle temperature. Tuttavia esso non dà direttamente le informazioni, determinanti per il progetto, concernenti il rapporto tra la struttura fisica della parete (dimensione e disposizione dei componenti) e stato termodinamico dell'ambiente. La ricostruzione di queste informazioni è lasciata ad un lento e talvolta infruttuoso processo di prova ed errore.

I modelli la cui struttura non riflette in parte od in toto la struttura della realtà da essi rappresentata sono detti *impliciti*. I modelli impliciti forniscono previsioni di solito molto precise sull'evoluzione dello stato della realtà in esame, ma non offrono in modo diretto spiegazioni sulle cause di tale evoluzione.

I modelli la cui struttura riflette in modo diretto la struttura della realtà rappresentata sono detti *espliciti*. L'analogia strutturale tra modello e realtà permette al modello esplicito di fornire sia una previsione sull'evoluzione del fenomeno in esame sia di rapportarla alla particolare struttura del fenomeno. I modelli espliciti manifestano tipicamente due importanti caratteristiche:

- *modularità*: la rappresentazione è formata di parti autocontenute ed autonome interconnesse da interfacce espresse in modo funzionalmente chiaro;
- *semantica*: esiste un rapporto biunivoco tra le componenti del modello e le componenti della realtà rappresentata.

Rispetto ai modelli impliciti, i modelli espliciti sono più facilmente mantenibili ed adattabili a diverse condizioni d'utilizzo. Tuttavia nella pratica a parità di complessità del fenomeno fisico, i modelli espliciti sono in media strutturalmente più complessi dei modelli impliciti.

1.2. Modelli qualitativi

Nell'ingegneria si è spesso costretti a operare in situazioni in cui non si possiede sufficiente informazione sul fenomeno in esame, oppure in cui è opportuno per efficienza di calcolo utilizzare quantità e relazioni approssimate. Ad esempio molti sistemi di controllo degli impianti tecnici degli edifici (es. il controllo della temperatura ambiente), operano in conformità a modelli approssimati del comportamento dell'impianto, in cui i parametri sono definiti in funzione di un insieme di punti critici (es. temperatura di comfort) e le relazioni in termini di transizioni nello spazio di stato (es. impianto acceso - spento). I modelli espliciti che sono basati su di una rappresentazione approssimata delle quantità e della struttura delle relazioni sono detti *modelli qualitativi* (Kuipers 1994). I modelli qualitativi, solo apparentemente meno nobili dei corrispettivi modelli analitici che utilizzano formulazioni matematiche non approssimate, sono in realtà molto utilizzati nell'ingegneria. Vi presterebbe particolare attenzione perché essi sono alla base delle tecniche di modellazione Bayesiana. Ad essi sarà dedicato il resto del presente capitolo. L'essenza della modellazione qualitativa può essere riassunta in due caratteristiche fondamentali:

- *la strutturazione del dominio delle variabili* in modo da evidenziare i valori di soglia che delimitano le tipologie possibili di comportamento;