

101 . . . . . 5.2.1 . . . . .	Complexity of Model Checking	3.5.4 . . . . .	282
101 . . . . . 5.2.2 . . . . .	CTL Satisfiability and Validity	3.6 . . . . .	291
101 . . . . . 5.3 . . . . .	Summary	3.6.1 . . . . .	294
101 . . . . . 5.4 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.2 . . . . .	294
101 . . . . . 6 . . . . .	Model Checking	3.6.3 . . . . .	296
101 . . . . . 6.1 . . . . .	Introduction	3.6.4 . . . . .	296
101 . . . . . 6.2 . . . . .	Computation Tree Logic	3.6.5 . . . . .	309
101 . . . . . 6.2.1 . . . . .	Syntax	3.6.6 . . . . .	313
101 . . . . . 6.2.2 . . . . .	Semantics	3.6.7 . . . . .	313
101 . . . . . 6.2.3 . . . . .	Equivalence of CTL Formulas	3.6.8 . . . . .	313
101 . . . . . 6.2.4 . . . . .	Model Checking for CTL	3.6.9 . . . . .	313
101 . . . . . 6.2.5 . . . . .	Summary	3.6.10 . . . . .	313
101 . . . . . 6.2.6 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.11 . . . . .	313
101 . . . . . 6.3 . . . . .	Exercises	3.6.12 . . . . .	313
101 . . . . . 6.4 . . . . .	Answers	3.6.13 . . . . .	313
101 . . . . . 6.5 . . . . .	Summary	3.6.14 . . . . .	313
101 . . . . . 6.6 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.15 . . . . .	313
101 . . . . . 6.7 . . . . .	Exercises	3.6.16 . . . . .	313
101 . . . . . 6.8 . . . . .	Summary	3.6.17 . . . . .	313
101 . . . . . 6.9 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.18 . . . . .	313
101 . . . . . 6.10 . . . . .	Exercises	3.6.19 . . . . .	313
101 . . . . . 6.11 . . . . .	Summary	3.6.20 . . . . .	313
101 . . . . . 6.12 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.21 . . . . .	313
101 . . . . . 6.13 . . . . .	Exercises	3.6.22 . . . . .	313
101 . . . . . 6.14 . . . . .	Summary	3.6.23 . . . . .	313
101 . . . . . 6.15 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.24 . . . . .	313
101 . . . . . 6.16 . . . . .	Exercises	3.6.25 . . . . .	313
101 . . . . . 6.17 . . . . .	Summary	3.6.26 . . . . .	313
101 . . . . . 6.18 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.27 . . . . .	313
101 . . . . . 6.19 . . . . .	Exercises	3.6.28 . . . . .	313
101 . . . . . 6.20 . . . . .	Summary	3.6.29 . . . . .	313
101 . . . . . 6.21 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.30 . . . . .	313
101 . . . . . 6.22 . . . . .	Exercises	3.6.31 . . . . .	313
101 . . . . . 6.23 . . . . .	Summary	3.6.32 . . . . .	313
101 . . . . . 6.24 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.33 . . . . .	313
101 . . . . . 6.25 . . . . .	Exercises	3.6.34 . . . . .	313
101 . . . . . 6.26 . . . . .	Summary	3.6.35 . . . . .	313
101 . . . . . 6.27 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.36 . . . . .	313
101 . . . . . 6.28 . . . . .	Exercises	3.6.37 . . . . .	313
101 . . . . . 6.29 . . . . .	Summary	3.6.38 . . . . .	313
101 . . . . . 6.30 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.39 . . . . .	313
101 . . . . . 6.31 . . . . .	Exercises	3.6.40 . . . . .	313
101 . . . . . 6.32 . . . . .	Summary	3.6.41 . . . . .	313
101 . . . . . 6.33 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.42 . . . . .	313
101 . . . . . 6.34 . . . . .	Exercises	3.6.43 . . . . .	313
101 . . . . . 6.35 . . . . .	Summary	3.6.44 . . . . .	313
101 . . . . . 6.36 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.45 . . . . .	313
101 . . . . . 6.37 . . . . .	Exercises	3.6.46 . . . . .	313
101 . . . . . 6.38 . . . . .	Summary	3.6.47 . . . . .	313
101 . . . . . 6.39 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.48 . . . . .	313
101 . . . . . 6.40 . . . . .	Exercises	3.6.49 . . . . .	313
101 . . . . . 6.41 . . . . .	Summary	3.6.50 . . . . .	313
101 . . . . . 6.42 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.51 . . . . .	313
101 . . . . . 6.43 . . . . .	Exercises	3.6.52 . . . . .	313
101 . . . . . 6.44 . . . . .	Summary	3.6.53 . . . . .	313
101 . . . . . 6.45 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.54 . . . . .	313
101 . . . . . 6.46 . . . . .	Exercises	3.6.55 . . . . .	313
101 . . . . . 6.47 . . . . .	Summary	3.6.56 . . . . .	313
101 . . . . . 6.48 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.57 . . . . .	313
101 . . . . . 6.49 . . . . .	Exercises	3.6.58 . . . . .	313
101 . . . . . 6.50 . . . . .	Summary	3.6.59 . . . . .	313
101 . . . . . 6.51 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.60 . . . . .	313
101 . . . . . 6.52 . . . . .	Exercises	3.6.61 . . . . .	313
101 . . . . . 6.53 . . . . .	Summary	3.6.62 . . . . .	313
101 . . . . . 6.54 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.63 . . . . .	313
101 . . . . . 6.55 . . . . .	Exercises	3.6.64 . . . . .	313
101 . . . . . 6.56 . . . . .	Summary	3.6.65 . . . . .	313
101 . . . . . 6.57 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.66 . . . . .	313
101 . . . . . 6.58 . . . . .	Exercises	3.6.67 . . . . .	313
101 . . . . . 6.59 . . . . .	Summary	3.6.68 . . . . .	313
101 . . . . . 6.60 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.69 . . . . .	313
101 . . . . . 6.61 . . . . .	Exercises	3.6.70 . . . . .	313
101 . . . . . 6.62 . . . . .	Summary	3.6.71 . . . . .	313
101 . . . . . 6.63 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.72 . . . . .	313
101 . . . . . 6.64 . . . . .	Exercises	3.6.73 . . . . .	313
101 . . . . . 6.65 . . . . .	Summary	3.6.74 . . . . .	313
101 . . . . . 6.66 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.75 . . . . .	313
101 . . . . . 6.67 . . . . .	Exercises	3.6.76 . . . . .	313
101 . . . . . 6.68 . . . . .	Summary	3.6.77 . . . . .	313
101 . . . . . 6.69 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.78 . . . . .	313
101 . . . . . 6.70 . . . . .	Exercises	3.6.79 . . . . .	313
101 . . . . . 6.71 . . . . .	Summary	3.6.80 . . . . .	313
101 . . . . . 6.72 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.81 . . . . .	313
101 . . . . . 6.73 . . . . .	Exercises	3.6.82 . . . . .	313
101 . . . . . 6.74 . . . . .	Summary	3.6.83 . . . . .	313
101 . . . . . 6.75 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.84 . . . . .	313
101 . . . . . 6.76 . . . . .	Exercises	3.6.85 . . . . .	313
101 . . . . . 6.77 . . . . .	Summary	3.6.86 . . . . .	313
101 . . . . . 6.78 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.87 . . . . .	313
101 . . . . . 6.79 . . . . .	Exercises	3.6.88 . . . . .	313
101 . . . . . 6.80 . . . . .	Summary	3.6.89 . . . . .	313
101 . . . . . 6.81 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.90 . . . . .	313
101 . . . . . 6.82 . . . . .	Exercises	3.6.91 . . . . .	313
101 . . . . . 6.83 . . . . .	Summary	3.6.92 . . . . .	313
101 . . . . . 6.84 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.93 . . . . .	313
101 . . . . . 6.85 . . . . .	Exercises	3.6.94 . . . . .	313
101 . . . . . 6.86 . . . . .	Summary	3.6.95 . . . . .	313
101 . . . . . 6.87 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.96 . . . . .	313
101 . . . . . 6.88 . . . . .	Exercises	3.6.97 . . . . .	313
101 . . . . . 6.89 . . . . .	Summary	3.6.98 . . . . .	313
101 . . . . . 6.90 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.99 . . . . .	313
101 . . . . . 6.91 . . . . .	Exercises	3.6.100 . . . . .	313
101 . . . . . 6.92 . . . . .	Summary	3.6.101 . . . . .	313
101 . . . . . 6.93 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.102 . . . . .	313
101 . . . . . 6.94 . . . . .	Exercises	3.6.103 . . . . .	313
101 . . . . . 6.95 . . . . .	Summary	3.6.104 . . . . .	313
101 . . . . . 6.96 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.105 . . . . .	313
101 . . . . . 6.97 . . . . .	Exercises	3.6.106 . . . . .	313
101 . . . . . 6.98 . . . . .	Summary	3.6.107 . . . . .	313
101 . . . . . 6.99 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.108 . . . . .	313
101 . . . . . 6.100 . . . . .	Exercises	3.6.109 . . . . .	313
101 . . . . . 6.101 . . . . .	Summary	3.6.110 . . . . .	313
101 . . . . . 6.102 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.111 . . . . .	313
101 . . . . . 6.103 . . . . .	Exercises	3.6.112 . . . . .	313
101 . . . . . 6.104 . . . . .	Summary	3.6.113 . . . . .	313
101 . . . . . 6.105 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.114 . . . . .	313
101 . . . . . 6.106 . . . . .	Exercises	3.6.115 . . . . .	313
101 . . . . . 6.107 . . . . .	Summary	3.6.116 . . . . .	313
101 . . . . . 6.108 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.117 . . . . .	313
101 . . . . . 6.109 . . . . .	Exercises	3.6.118 . . . . .	313
101 . . . . . 6.110 . . . . .	Summary	3.6.119 . . . . .	313
101 . . . . . 6.111 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.120 . . . . .	313
101 . . . . . 6.112 . . . . .	Exercises	3.6.121 . . . . .	313
101 . . . . . 6.113 . . . . .	Summary	3.6.122 . . . . .	313
101 . . . . . 6.114 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.123 . . . . .	313
101 . . . . . 6.115 . . . . .	Exercises	3.6.124 . . . . .	313
101 . . . . . 6.116 . . . . .	Summary	3.6.125 . . . . .	313
101 . . . . . 6.117 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.126 . . . . .	313
101 . . . . . 6.118 . . . . .	Exercises	3.6.127 . . . . .	313
101 . . . . . 6.119 . . . . .	Summary	3.6.128 . . . . .	313
101 . . . . . 6.120 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.129 . . . . .	313
101 . . . . . 6.121 . . . . .	Exercises	3.6.130 . . . . .	313
101 . . . . . 6.122 . . . . .	Summary	3.6.131 . . . . .	313
101 . . . . . 6.123 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.132 . . . . .	313
101 . . . . . 6.124 . . . . .	Exercises	3.6.133 . . . . .	313
101 . . . . . 6.125 . . . . .	Summary	3.6.134 . . . . .	313
101 . . . . . 6.126 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.135 . . . . .	313
101 . . . . . 6.127 . . . . .	Exercises	3.6.136 . . . . .	313
101 . . . . . 6.128 . . . . .	Summary	3.6.137 . . . . .	313
101 . . . . . 6.129 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.138 . . . . .	313
101 . . . . . 6.130 . . . . .	Exercises	3.6.139 . . . . .	313
101 . . . . . 6.131 . . . . .	Summary	3.6.140 . . . . .	313
101 . . . . . 6.132 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.141 . . . . .	313
101 . . . . . 6.133 . . . . .	Exercises	3.6.142 . . . . .	313
101 . . . . . 6.134 . . . . .	Summary	3.6.143 . . . . .	313
101 . . . . . 6.135 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.144 . . . . .	313
101 . . . . . 6.136 . . . . .	Exercises	3.6.145 . . . . .	313
101 . . . . . 6.137 . . . . .	Summary	3.6.146 . . . . .	313
101 . . . . . 6.138 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.147 . . . . .	313
101 . . . . . 6.139 . . . . .	Exercises	3.6.148 . . . . .	313
101 . . . . . 6.140 . . . . .	Summary	3.6.149 . . . . .	313
101 . . . . . 6.141 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.150 . . . . .	313
101 . . . . . 6.142 . . . . .	Exercises	3.6.151 . . . . .	313
101 . . . . . 6.143 . . . . .	Summary	3.6.152 . . . . .	313
101 . . . . . 6.144 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.153 . . . . .	313
101 . . . . . 6.145 . . . . .	Exercises	3.6.154 . . . . .	313
101 . . . . . 6.146 . . . . .	Summary	3.6.155 . . . . .	313
101 . . . . . 6.147 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.156 . . . . .	313
101 . . . . . 6.148 . . . . .	Exercises	3.6.157 . . . . .	313
101 . . . . . 6.149 . . . . .	Summary	3.6.158 . . . . .	313
101 . . . . . 6.150 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.159 . . . . .	313
101 . . . . . 6.151 . . . . .	Exercises	3.6.160 . . . . .	313
101 . . . . . 6.152 . . . . .	Summary	3.6.161 . . . . .	313
101 . . . . . 6.153 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.162 . . . . .	313
101 . . . . . 6.154 . . . . .	Exercises	3.6.163 . . . . .	313
101 . . . . . 6.155 . . . . .	Summary	3.6.164 . . . . .	313
101 . . . . . 6.156 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.165 . . . . .	313
101 . . . . . 6.157 . . . . .	Exercises	3.6.166 . . . . .	313
101 . . . . . 6.158 . . . . .	Summary	3.6.167 . . . . .	313
101 . . . . . 6.159 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.168 . . . . .	313
101 . . . . . 6.160 . . . . .	Exercises	3.6.169 . . . . .	313
101 . . . . . 6.161 . . . . .	Summary	3.6.170 . . . . .	313
101 . . . . . 6.162 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.171 . . . . .	313
101 . . . . . 6.163 . . . . .	Exercises	3.6.172 . . . . .	313
101 . . . . . 6.164 . . . . .	Summary	3.6.173 . . . . .	313
101 . . . . . 6.165 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.174 . . . . .	313
101 . . . . . 6.166 . . . . .	Exercises	3.6.175 . . . . .	313
101 . . . . . 6.167 . . . . .	Summary	3.6.176 . . . . .	313
101 . . . . . 6.168 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.177 . . . . .	313
101 . . . . . 6.169 . . . . .	Exercises	3.6.178 . . . . .	313
101 . . . . . 6.170 . . . . .	Summary	3.6.179 . . . . .	313
101 . . . . . 6.171 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.180 . . . . .	313
101 . . . . . 6.172 . . . . .	Exercises	3.6.181 . . . . .	313
101 . . . . . 6.173 . . . . .	Summary	3.6.182 . . . . .	313
101 . . . . . 6.174 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.183 . . . . .	313
101 . . . . . 6.175 . . . . .	Exercises	3.6.184 . . . . .	313
101 . . . . . 6.176 . . . . .	Summary	3.6.185 . . . . .	313
101 . . . . . 6.177 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.186 . . . . .	313
101 . . . . . 6.178 . . . . .	Exercises	3.6.187 . . . . .	313
101 . . . . . 6.179 . . . . .	Summary	3.6.188 . . . . .	313
101 . . . . . 6.180 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.189 . . . . .	313
101 . . . . . 6.181 . . . . .	Exercises	3.6.190 . . . . .	313
101 . . . . . 6.182 . . . . .	Summary	3.6.191 . . . . .	313
101 . . . . . 6.183 . . . . .	Bibliographic Notes	3.6.192 . . . . .	313
101 . . . . . 6.184 . . . . .			

3.2.4	Trace Equivalence and Linear-Time Properties . . . . .	101
3.3	Safety Properties and Invariants . . . . .	104
3.3.1	Invariants . . . . .	105
3.3.2	Safety Properties . . . . .	109
3.3.3	Trace Equivalence and Safety Properties . . . . .	113
3.4	Liveness Properties . . . . .	118
3.4.1	Liveness Properties . . . . .	118
3.4.2	Safety vs. Liveness Properties . . . . .	120
3.5	Fairness . . . . .	124
3.5.1	Fairness Constraints . . . . .	126
3.5.2	Fairness Strategies . . . . .	134
3.5.3	Fairness and Safety . . . . .	137
3.6	Summary . . . . .	139
3.7	Bibliographic Notes . . . . .	140
3.8	Exercises . . . . .	142
<b>4</b>	<b>Regular Properties</b>	<b>149</b>
4.1	Automata on Finite Words . . . . .	149
4.2	Model-Checking Regular Safety Properties . . . . .	157
4.2.1	Regular Safety Properties . . . . .	157
4.2.2	Verifying Regular Safety Properties . . . . .	161
4.3	Automata on Infinite Words . . . . .	167
4.3.1	$\omega$ -Regular Languages and Properties . . . . .	168
4.3.2	Nondeterministic Büchi Automata . . . . .	171
4.3.3	Deterministic Büchi Automata . . . . .	185
4.3.4	Generalized Büchi Automata . . . . .	189
4.4	Model-Checking $\omega$ -Regular Properties . . . . .	195
4.4.1	Persistence Properties and Product . . . . .	196
4.4.2	Nested Depth-First Search . . . . .	202
4.5	Summary . . . . .	214
4.6	Bibliographic Notes . . . . .	215
4.7	Exercises . . . . .	216
<b>5</b>	<b>Linear Temporal Logic</b>	<b>225</b>
5.1	Linear Temporal Logic . . . . .	225
5.1.1	Syntax . . . . .	227
5.1.2	Semantics . . . . .	231
5.1.3	Specifying Properties . . . . .	235
5.1.4	Equivalence of LTL Formulae . . . . .	243
5.1.5	Weak Until, Release, and Positive Normal Form . . . . .	247
5.1.6	Fairness in LTL . . . . .	253
5.2	Automata-Based LTL Model Checking . . . . .	265

5.2.1	Complexity of the LTL Model-Checking Problem . . . . .	282
5.2.2	LTL Satisfiability and Validity Checking . . . . .	291
5.3	Summary . . . . .	294
5.4	Bibliographic Notes . . . . .	294
5.5	Exercises . . . . .	296
<b>6</b>	<b>Computation Tree Logic</b> . . . . .	<b>309</b>
6.1	Introduction . . . . .	309
6.2	Computation Tree Logic . . . . .	313
6.2.1	Syntax . . . . .	313
6.2.2	Semantics . . . . .	316
6.2.3	Equivalence of CTL Formulae . . . . .	325
6.2.4	Normal Forms for CTL . . . . .	328
6.3	Expressiveness of CTL vs. LTL . . . . .	330
6.4	CTL Model Checking . . . . .	336
6.4.1	Basic Algorithm . . . . .	337
6.4.2	The Until and Existential Always Operator . . . . .	342
6.4.3	Time and Space Complexity . . . . .	350
6.5	Fairness in CTL . . . . .	353
6.6	Counterexamples and Witnesses . . . . .	368
6.6.1	Counterexamples in CTL . . . . .	371
6.6.2	Counterexamples and Witnesses in CTL with Fairness . . . . .	375
6.7	Symbolic CTL Model Checking . . . . .	376
6.7.1	Switching Functions . . . . .	377
6.7.2	Encoding Transition Systems by Switching Functions . . . . .	381
6.7.3	Ordered Binary Decision Diagrams . . . . .	387
6.7.4	Implementation of ROBDD-Based Algorithms . . . . .	402
6.8	CTL* . . . . .	417
6.8.1	Logic, Expressiveness, and Equivalence . . . . .	417
6.8.2	CTL* Model Checking . . . . .	422
6.9	Summary . . . . .	425
6.10	Bibliographic Notes . . . . .	426
6.11	Exercises . . . . .	428
<b>7</b>	<b>Equivalences and Abstraction</b> . . . . .	<b>443</b>
7.1	Bisimulation . . . . .	445
7.1.1	Bisimulation Quotient . . . . .	450
7.1.2	Action-Based Bisimulation . . . . .	457
7.2	Bisimulation and CTL* Equivalence . . . . .	461
7.3	Bisimulation-Quotienting Algorithms . . . . .	469
7.3.1	Determining the Initial Partition . . . . .	471
7.3.2	Refining Partitions . . . . .	473

285	7.3.3 A First Partition Refinement Algorithm . . . . .	479
285	7.3.4 An Efficiency Improvement . . . . .	480
285	7.3.5 Equivalence Checking of Transition Systems . . . . .	486
285	<b>7.4 Simulation Relations . . . . .</b>	489
285	7.4.1 Simulation Equivalence . . . . .	497
285	7.4.2 Bisimulation, Simulation, and Trace Equivalence . . . . .	503
285	7.5 Simulation and $\forall$ CTL* Equivalence . . . . .	507
285	7.6 Simulation-Quotienting Algorithms . . . . .	513
285	7.7 Stutter Linear-Time Relations . . . . .	520
285	7.7.1 Stutter Trace Equivalence . . . . .	521
285	7.7.2 Stutter Trace and LTL $\setminus\Diamond$ Equivalence . . . . .	525
285	7.8 Stutter Bisimulation . . . . .	527
285	7.8.1 Divergence-Sensitive Stutter Bisimulation . . . . .	535
285	7.8.2 Normed Bisimulation . . . . .	542
285	7.8.3 Stutter Bisimulation and CTL $\setminus\Diamond$ Equivalence . . . . .	551
285	7.8.4 Stutter Bisimulation Quotienting . . . . .	558
285	7.9 Summary . . . . .	570
285	7.10 Bibliographic Notes . . . . .	571
285	7.11 Exercises . . . . .	573
<b>8</b>	<b>Partial Order Reduction . . . . .</b>	<b>585</b>
8.1	Independence of Actions . . . . .	588
8.2	The Linear-Time Ample Set Approach . . . . .	595
8.2	8.2.1 Ample Set Constraints . . . . .	596
8.2	8.2.2 Dynamic Partial Order Reduction . . . . .	609
8.2	8.2.3 Computing Ample Sets . . . . .	617
8.2	8.2.4 Static Partial Order Reduction . . . . .	625
8.3	The Branching-Time Ample Set Approach . . . . .	640
8.4	Summary . . . . .	651
8.5	Bibliographic Notes . . . . .	651
8.6	Exercises . . . . .	653
<b>9</b>	<b>Timed Automata . . . . .</b>	<b>663</b>
9.1	Timed Automata . . . . .	667
9.1	9.1.1 Semantics . . . . .	674
9.1	9.1.2 Time Divergence, Timelock, and Zenoness . . . . .	680
9.2	Timed Computation Tree Logic . . . . .	688
9.3	TCTL Model Checking . . . . .	695
9.3	9.3.1 Eliminating Timing Parameters . . . . .	696
9.3	9.3.2 Region Transition Systems . . . . .	698
9.3	9.3.3 The TCTL Model-Checking Algorithm . . . . .	722
9.4	Summary . . . . .	727

---

9.5 Bibliographic Notes . . . . .	728
9.6 Exercises . . . . .	730
<b>10 Probabilistic Systems</b>	<b>735</b>
10.1 Markov Chains . . . . .	737
10.1.1 Reachability Probabilities . . . . .	749
10.1.2 Qualitative Properties . . . . .	760
10.2 Probabilistic Computation Tree Logic . . . . .	769
10.2.1 PCTL Model Checking . . . . .	774
10.2.2 The Qualitative Fragment of PCTL . . . . .	777
10.3 Linear-Time Properties . . . . .	785
10.4 PCTL* and Probabilistic Bisimulation . . . . .	794
10.4.1 PCTL* . . . . .	795
10.4.2 Probabilistic Bisimulation . . . . .	797
10.5 Markov Chains with Costs . . . . .	805
10.5.1 Cost-Bounded Reachability . . . . .	807
10.5.2 Long-Run Properties . . . . .	816
10.6 Markov Decision Processes . . . . .	821
10.6.1 Reachability Probabilities . . . . .	839
10.6.2 PCTL Model Checking . . . . .	854
10.6.3 Limiting Properties . . . . .	857
10.6.4 Linear-Time Properties and PCTL* . . . . .	868
10.6.5 Fairness . . . . .	871
10.7 Summary . . . . .	882
10.8 Bibliographic Notes . . . . .	884
10.9 Exercises . . . . .	887
<b>A Preliminaries</b>	<b>897</b>
A.1 Frequently Used Symbols and Notations . . . . .	897
A.2 Formal Languages . . . . .	900
A.3 Propositional Logic . . . . .	903
A.4 Graphs . . . . .	908
A.5 Computational Complexity . . . . .	913
<b>Bibliography</b>	<b>919</b>
<b>Index</b>	<b>953</b>