Charalambos D. Aliprantis Kim C. Border

## Infinite Dimensional Analysis

A Hitchhiker's Guide

Third Edition

With 38 Figures and 1 Table



## Contents

Pr	Preface to the third edition			
A	forewo	ord to the practical	xix	
1	Odds	and ends	1	
	1.1	Numbers	1	
	1.2	Sets	2	
	1.3	Relations, correspondences, and functions	4	
	1.4	A bestiary of relations		
	1.5	Equivalence relations	7	
	1.6	Orders and such	7	
	1.7	Real functions	8	
	1.8	Duality of evaluation	9	
	1.9	Infinit¥ies	10	
	1.10	The Diagonal Theorem and Russell's Paradox	12	
	1.11	The axiom of choice and axiomatic set theory	13	
	1.12	Zorn's Lemma	15	
	1.13	Ordinals	18	
2	Торо	logy	21	
	2.1	Topological spaces	23	
	2.2	Neighborhoods and closures	26	
	2.3	Dense subsets	28	
	2.4	Nets	29	
	2.5	Filters	32	
	2.6	Nets and Filters	35	
	2.7	Continuous functions	36	
	2.8	Compactness	38	
	2.9	Nets vs. sequences	41	
	2.10	Semicontinuous functions	43	
	2.11	Separation properties	44	
	2.12	Comparing topologies	47	
	2.13	Weak topologies	47	
	2.14	The product topology	50	
	2.15	Pointwise and uniform convergence		

## Contents

	2.16	Locally compact spaces													55
	2.17	The Stone-Čech compactification									•				58
	2.18	Stone-Čech compactification of a discrete set .						•							63
	2.19	Paracompact spaces and partitions of unity	•					•							65
3	Metri	izable spaces													69
	3.1	Metric spaces													70
	3.2	Completeness													73
	3.3	Uniformly continuous functions													76
	3.4	Semicontinuous functions on metric spaces													79
	3.5	Distance functions													80
	3.6	Embeddings and completions													84
	3.7	Compactness and completeness													85
	3.8	Countable products of metric spaces													89
	3.9	The Hilbert cube and metrization													90
	3.10	Locally compact metrizable spaces													92
	3.11	The Baire Category Theorem													93
	3.12	Contraction mappings													95
	3.13	The Cantor set													98
	3.14	The Baire space $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$													101
	3.15	Uniformities													
	3.16	The Hausdorff distance													
	3.17	The Hausdorff metric topology													
	0 10	1													
	3.18	Topologies for spaces of subsets	•												
	3.18 3.19	The space $C(X, Y)$													
4	3.19	The space $C(X, Y)$													
4	3.19 Meas	The space $C(X, Y)$	•	•		•	• •		•	•	•			•	123 1 <b>27</b>
4	3.19 <b>Meas</b> 4.1	The space $C(X, Y)$		•	· ·	•	•••		•	•	•		•	•	123 <b>127</b> 129
4	<ul><li>3.19</li><li>Meas</li><li>4.1</li><li>4.2</li></ul>	The space $C(X, Y)$			· ·	•	• •	· •	•	• •	• •	· ·			123 <b>127</b> 129 131
4	<ul> <li>3.19</li> <li>Meas</li> <li>4.1</li> <li>4.2</li> <li>4.3</li> </ul>	The space $C(X, Y)$ surabilityAlgebras of setsRings and semirings of setsDynkin's lemma			· ·	•	· ·	· •			• •	  			123 <b>127</b> 129 131 135
4	<ul> <li>3.19</li> <li>Meas</li> <li>4.1</li> <li>4.2</li> <li>4.3</li> <li>4.4</li> </ul>	The space $C(X, Y)$ surability         Algebras of sets          Rings and semirings of sets          Dynkin's lemma          The Borel $\sigma$ -algebra		· · ·	· · ·	•	• •	•		• • •	• •	· ·	•	· · ·	123 127 129 131 135 137
4	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5	The space $C(X, Y)$		• • • •	· · ·	•	• •	•	· · ·	· · · · · · ·	• •	· · ·	· · ·	· · · · · ·	123 <b>127</b> 129 131 135 137 139
4	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	The space $C(X, Y)$		•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	· · ·	•	· · ·	· •	· · ·	· · · · · · ·	• •	· · ·	· · ·	· · · · · ·	123 <b>127</b> 129 131 135 137 139 141
4	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7	The space $C(X, Y)$		· · · · · · · ·	· · ·	•	· · ·	· • •	· · · ·	· · · · · · ·	• • • • • •	· · ·	· · ·	· · · · · · ·	123 <b>127</b> 129 131 135 137 139 141 144
4	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8	The space $C(X, Y)$		· · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	· · ·	· · ·		· · · · · · · ·	· · ·	· · ·	· · · · · · · ·	· · · · · · · ·	123 <b>127</b> 129 131 135 137 139 141 144 147
4	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9	The space $C(X, Y)$		· · · · · · · · · ·	· · ·	•	· · ·	· • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	· · · ·	· · · · · · · ·	• • • • • • • • •	· · ·	· · · ·	· · · · · · · ·	123 <b>127</b> 129 131 135 137 139 141 144 147 148
4	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10	The space $C(X, Y)$		· · · · · · · · · ·	· · ·	•	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	· · · ·	· · · · · · · · · ·	· · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · ·	123 <b>127</b> 129 131 135 137 139 141 144 147 148 153
4	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 4.11	The space $C(X, Y)$		· · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	· · · · ·	· · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · ·	· · · · · · · · · ·		123 127 129 131 135 137 139 141 144 147 148 153 156
4	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10	The space $C(X, Y)$		· · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	· · · · ·	· · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · ·	· · · · · · · · · ·		123 127 129 131 135 137 139 141 144 147 148 153 156
4	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 4.11 4.12	The space $C(X, Y)$		· · · · · · · · · · ·	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · ·	· · · · · · · · · · ·	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·			123 127 129 131 135 137 139 141 144 147 148 153 156 158 <b>163</b>
	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 4.11 4.12	The space $C(X, Y)$		· · · · · · · · · · ·	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · ·	· · · · · · · · · · ·	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·			123 127 129 131 135 137 139 141 144 147 148 153 156 158 <b>163</b>
	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 4.11 4.12 Topo	The space $C(X, Y)$		· · · · · · · · · · ·	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · ·	· · · · · · · · · · ·	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·		123 127 129 131 135 137 139 141 144 147 148 153 156 158 163 166
	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 4.11 4.12 <b>Topo</b> 5.1	The space $C(X, Y)$		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · ·	· · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		123 <b>127</b> 129 131 135 137 139 141 144 147 148 153 156 158 <b>163</b>
	3.19 Meas 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 4.10 4.11 4.12 Topo 5.1 5.2	The space $C(X, Y)$	ns				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		123 <b>127</b> 129 131 135 137 139 141 144 144 147 148 153 156 158 <b>163</b> 166 168 172 175

	5.6	Convex sets	. 181
	5.7	Convex and concave functions	. 186
	5.8	Sublinear functions and gauges	. 190
	5.9	The Hahn–Banach Extension Theorem	. 195
	5.10	Separating hyperplane theorems	. 197
	5.11	Separation by continuous functionals	. 201
	5.12	Locally convex spaces and seminorms	. 204
	5.13	Separation in locally convex spaces	. 207
	5.14	Dual pairs	. 211
	5.15	Topologies consistent with a given dual	. 213
	5.16	Polars	. 215
	5.17	S-topologies	. 220
	5.18	The Mackey topology	. 223
	5.19	The strong topology	. 223
6	Norn	ned spaces	225
	6.1	Normed and Banach spaces	. 227
	6.2	Linear operators on normed spaces	
	6.3	The norm dual of a normed space	. 230
	6.4	The uniform boundedness principle	
	6.5	Weak topologies on normed spaces	. 235
	6.6	Metrizability of weak topologies	
	6.7	Continuity of the evaluation	. 241
	6.8	Adjoint operators	. 243
	6.9	Projections and the fixed space of an operator	. 244
	6.10	Hilbert spaces	. 246
7	Conv	exity	251
	7.1	Extended-valued convex functions	254
	7.2	Lower semicontinuous convex functions	
	7.3	Support points	
	7.4	Subgradients	
	7.5	Supporting hyperplanes and cones	
	7.6	Convex functions on finite dimensional spaces	
	7.7	Separation and support in finite dimensional spaces	
	7.8	Supporting convex subsets of Hilbert spaces	
	7.9	The Bishop–Phelps Theorem	
	7.10	Support functionals	
	7.11	Support functionals and the Hausdorff metric	
	7.12	Extreme points of convex sets	
	7.13	Quasiconvexity	
	7.14	Polytopes and weak neighborhoods	
	7.15	Exposed points of convex sets	
	1.15	Exposed points of convex sets	. 505

8	Riesz	spaces	311
	8.1	Orders, lattices, and cones	312
	8.2	Riesz spaces	313
	8.3	Order bounded sets	315
	8.4	Order and lattice properties	316
	8.5	The Riesz decomposition property	319
	8.6	Disjointness	320
	8.7	Riesz subspaces and ideals	321
	8.8	Order convergence and order continuity	322
	8.9	Bands	324
	8.10	Positive functionals	325
	8.11	Extending positive functionals	330
	8.12	Positive operators	332
	8.13	Topological Riesz spaces	334
	8.14	The band generated by $E'$	339
	8.15	Riesz pairs	340
	8.16	Symmetric Riesz pairs	342
9	Bana	ch lattices	347
	9.1	Fréchet and Banach lattices	348
	9.2	The Stone–Weierstrass Theorem	352
	9.3	Lattice homomorphisms and isometries	
	9.4	Order continuous norms	
	9.5	AM- and AL-spaces	
	9.6	The interior of the positive cone	
	9.7	Positive projections	
	9.8	The curious AL-space $BV_0$	
10	Char	ges and measures	371
	10.1	Set functions	374
	10.2	Limits of sequences of measures	
	10.3	Outer measures and measurable sets	
	10.4	The Carathéodory extension of a measure	
	10.5	Measure spaces	
	10.6	Lebesgue measure	
	10.7	Product measures	
	10.8	Measures on $\mathbb{R}^n$	392
	10.9	Atoms	
		The AL-space of charges	
		The AL-space of measures	
		Absolute continuity	

11	Integr	als	403
	11.1	The integral of a step function	404
	11.2	Finitely additive integration of bounded functions	406
	11.3	The Lebesgue integral	408
	11.4	Continuity properties of the Lebesgue integral	413
	11.5	The extended Lebesgue integral	416
	11.6	Iterated integrals	418
	11.7	The Riemann integral	419
	11.8	The Bochner integral	422
	11.9	The Gelfand integral	428
	11.10	The Dunford and Pettis integrals	431
12	Meas	ures and topology	433
	12.1	Borel measures and regularity	434
	12.2	Regular Borel measures	
	12.3	The support of a measure	441
	12.4	Nonatomic Borel measures	443
	12.5	Analytic sets	446
	12.6	The Choquet Capacity Theorem	456
13	L <sub>p</sub> -sp	aces	461
	13.1	$L_p$ -norms	462
	13.1 13.2	$L_p$ -norms	
			463
	13.2	Inequalities of Hölder and Minkowski	463 466
	13.2 13.3	Inequalities of Hölder and Minkowski	463 466 467
	13.2 13.3 13.4	Inequalities of Hölder and MinkowskiDense subspaces of $L_p$ -spacesSublattices of $L_p$ -spaces	463 466 467 468
	13.2 13.3 13.4 13.5	Inequalities of Hölder and Minkowski	463 466 467 468 469
	13.2 13.3 13.4 13.5 13.6	Inequalities of Hölder and Minkowski	463 466 467 468 469 471
	13.2 13.3 13.4 13.5 13.6 13.7	Inequalities of Hölder and Minkowski	463 466 467 468 469 471 473
	<ol> <li>13.2</li> <li>13.3</li> <li>13.4</li> <li>13.5</li> <li>13.6</li> <li>13.7</li> <li>13.8</li> <li>13.9</li> </ol>	Inequalities of Hölder and Minkowski	463 466 467 468 469 471 473 475
	13.2 13.3 13.4 13.5 13.6 13.7 13.8 13.9 13.10	Inequalities of Hölder and Minkowski	463 466 467 468 469 471 473 475 479
	13.2 13.3 13.4 13.5 13.6 13.7 13.8 13.9 13.10 13.11	Inequalities of Hölder and Minkowski	463 466 467 468 469 471 473 475 475 479 481
14	13.2 13.3 13.4 13.5 13.6 13.7 13.8 13.9 13.10 13.11 13.12	Inequalities of Hölder and Minkowski	463 466 467 468 469 471 473 475 475 479 481
14	13.2 13.3 13.4 13.5 13.6 13.7 13.8 13.9 13.10 13.11 13.12	Inequalities of Hölder and Minkowski	<ul> <li>463</li> <li>466</li> <li>467</li> <li>468</li> <li>469</li> <li>471</li> <li>473</li> <li>475</li> <li>479</li> <li>481</li> <li>483</li> <li>487</li> </ul>
14	13.2 13.3 13.4 13.5 13.6 13.7 13.8 13.9 13.10 13.11 13.12 <b>Riesz</b>	Inequalities of Hölder and Minkowski	<ul> <li>463</li> <li>466</li> <li>467</li> <li>468</li> <li>469</li> <li>471</li> <li>473</li> <li>475</li> <li>479</li> <li>481</li> <li>483</li> <li>487</li> <li>488</li> </ul>
14	13.2 13.3 13.4 13.5 13.6 13.7 13.8 13.9 13.10 13.11 13.12 <b>Riesz</b> 14.1	Inequalities of Hölder and Minkowski	<ul> <li>463</li> <li>466</li> <li>467</li> <li>468</li> <li>469</li> <li>471</li> <li>473</li> <li>475</li> <li>479</li> <li>481</li> <li>483</li> <li>487</li> <li>488</li> <li>491</li> </ul>
14	13.2 13.3 13.4 13.5 13.6 13.7 13.8 13.9 13.10 13.11 13.12 <b>Riesz</b> 14.1 14.2	Inequalities of Hölder and Minkowski	<ul> <li>463</li> <li>466</li> <li>467</li> <li>468</li> <li>469</li> <li>471</li> <li>473</li> <li>475</li> <li>479</li> <li>481</li> <li>483</li> <li>487</li> <li>488</li> <li>491</li> <li>496</li> </ul>
14	<ul> <li>13.2</li> <li>13.3</li> <li>13.4</li> <li>13.5</li> <li>13.6</li> <li>13.7</li> <li>13.8</li> <li>13.9</li> <li>13.10</li> <li>13.11</li> <li>13.12</li> <li>Riesz</li> <li>14.1</li> <li>14.2</li> <li>14.3</li> </ul>	Inequalities of Hölder and Minkowski	463 466 467 468 469 471 473 475 479 481 483 <b>487</b> 488 491 496 498

15	Proba	bility measures	505
	15.1	The weak* topology on $\mathcal{P}(X)$	506
	15.2	Embedding $X$ in $\mathcal{P}(X)$	
	15.3	Properties of $\mathcal{P}(X)$	
	15.4	The many faces of $\mathcal{P}(X)$	517
	15.5	Compactness in $\mathcal{P}(X)$	518
	15.6	The Kolmogorov Extension Theorem	519
16	Space	s of sequences	525
	16.1	The basic sequence spaces	526
	16.2	The sequence spaces $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ and $\varphi$	527
	16.3	The sequence space $c_0$	529
	16.4	The sequence space $c$	531
	16.5	The $\ell_p$ -spaces	533
	16.6	$\ell_1$ and the symmetric Riesz pair $\langle \ell_\infty, \ell_1 \rangle$	537
	16.7	The sequence space $\ell_{\infty}$	538
	16.8	More on $\ell'_{\infty} = ba(\mathbb{N})$	543
	16.9	Embedding sequence spaces	546
	16.10	Banach-Mazur limits and invariant measures	550
	16.11	Sequences of vector spaces	552
17	Corre	spondences	555
17	<b>Corre</b> 17.1	spondences Basic definitions	
17			556
17	17.1	Basic definitions	556 558
17	17.1 17.2	Basic definitions	556 558 563
17	17.1 17.2 17.3 17.4	Basic definitions	556 558 563 566
17	17.1 17.2 17.3 17.4	Basic definitions	556 558 563 566 569
17	17.1 17.2 17.3 17.4 17.5	Basic definitions	556 558 563 566 569 571
17	17.1 17.2 17.3 17.4 17.5 17.6	Basic definitions	556 558 563 566 569 571 574
17	17.1 17.2 17.3 17.4 17.5 17.6 17.7 17.8	Basic definitions	556 558 563 566 569 571 574 577
17	17.1 17.2 17.3 17.4 17.5 17.6 17.7 17.8 17.9	Basic definitions	556 558 563 566 569 571 574 577 581
17	17.1 17.2 17.3 17.4 17.5 17.6 17.7 17.8 17.9 17.10	Basic definitions	556 558 563 566 569 571 574 577 581 585
	17.1 17.2 17.3 17.4 17.5 17.6 17.7 17.8 17.9 17.10 17.11	Basic definitions	556 558 563 566 569 571 574 577 581 585
	17.1 17.2 17.3 17.4 17.5 17.6 17.7 17.8 17.9 17.10 17.11	Basic definitions	556 558 563 566 569 571 574 577 581 585 587 <b>591</b>
	17.1 17.2 17.3 17.4 17.5 17.6 17.7 17.8 17.9 17.10 17.11 <b>Meas</b>	Basic definitions	556 558 563 566 569 571 574 577 581 585 587 <b>591</b> 592
	17.1 17.2 17.3 17.4 17.5 17.6 17.7 17.8 17.9 17.10 17.11 <b>Meas</b> 18.1	Basic definitions	556 558 563 566 569 571 574 577 581 585 587 <b>591</b> 592 597
	17.1 17.2 17.3 17.4 17.5 17.6 17.7 17.8 17.9 17.10 17.11 <b>Meas</b> 18.1 18.2	Basic definitions	556 558 563 566 569 571 574 577 581 585 587 <b>591</b> 592 597 600
	17.1 17.2 17.3 17.4 17.5 17.6 17.7 17.8 17.9 17.10 17.11 <b>Meas</b> 18.1 18.2 18.3	Basic definitions	556 558 563 566 569 571 574 577 581 585 587 <b>591</b> 592 597 600 606

Contents
----------

19	Marl	kov transitions	621
	19.1	Markov and stochastic operators	623
	19.2	Markov transitions and kernels	625
	19.3	Continuous Markov transitions	631
	19.4	Invariant measures	631
	19.5	Ergodic measures	636
	19.6	Markov transition correspondences	638
	19.7	Random functions	641
	19.8	Dilations	645
	19.9	More on Markov operators	650
	19.10	A note on dynamical systems	652
20	Ergo	dicity	655
	20.1	Measure-preserving transformations and ergodicity	656
	20.2	Birkhoff's Ergodic Theorem	659
	20.3	Ergodic operators	
Re	ferenc	res	667

Index

681