

# 目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	コンピュータビジョンとは？	2
1.2	コンピュータビジョンの歴史	9
1.3	本書の概要	17
1.4	シラバスの例	22
1.5	本書の記法	23
1.6	さらに学ぶために	24
第 2 章	画像生成	25
2.1	幾何プリミティブと幾何変換	27
2.1.1	幾何プリミティブ	28
2.1.2	2次元変換	31
2.1.3	3次元変換	34
2.1.4	3次元回転	35
2.1.5	3次元から2次元への射影	40
2.1.6	レンズ歪み	50
2.2	測光学的な画像生成過程	52
2.2.1	照明	53
2.2.2	反射とシェーディング	53
2.2.3	光学	59
2.3	デジタルカメラ	64
2.3.1	サンプリングとエイリアシング	67
2.3.2	色	70
2.3.3	圧縮	79
2.4	さらに学ぶために	80
2.5	演習	81
第 3 章	画像処理	85
3.1	点演算子	87
3.1.1	画素値変換	89
3.1.2	色変換	90
3.1.3	合成とマッピング	91
3.1.4	ヒストグラム均一化	93
3.1.5	応用：トーン調整	96

3.2	線形フィルタリング . . . . .	96
3.2.1	分離可能フィルタ . . . . .	100
3.2.2	線形フィルタの例 . . . . .	101
3.2.3	帯域通過フィルタとステアラブルフィルタ . . . . .	102
3.3	その他の近傍演算 . . . . .	106
3.3.1	非線形フィルタ . . . . .	106
3.3.2	モルフォロジ . . . . .	111
3.3.3	距離変換 . . . . .	112
3.3.4	連結成分 . . . . .	114
3.4	フーリエ変換 . . . . .	115
3.4.1	フーリエ変換対 . . . . .	118
3.4.2	2次元フーリエ変換 . . . . .	120
3.4.3	ウィナーフィルタ . . . . .	121
3.4.4	応用：鮮鋭化，ボケ，ノイズ除去 . . . . .	124
3.5	ピラミッドとウェーブレット . . . . .	125
3.5.1	補間 . . . . .	125
3.5.2	縮小 . . . . .	128
3.5.3	多重解像度表現 . . . . .	130
3.5.4	ウェーブレット . . . . .	134
3.5.5	応用：画像ブレンディング . . . . .	138
3.6	幾何変換 . . . . .	139
3.6.1	パラメトリック変換 . . . . .	140
3.6.2	メッシュに基づく変形 . . . . .	146
3.6.3	応用：特徴に基づくモーフィング . . . . .	149
3.7	大域的最適化 . . . . .	150
3.7.1	正則化 . . . . .	150
3.7.2	マルコフ確率場 . . . . .	155
3.7.3	応用：画像修復 . . . . .	165
3.8	さらに学ぶために . . . . .	166
3.9	演習 . . . . .	167
<b>第4章</b>	<b>特徴検出とマッチング</b> . . . . .	<b>177</b>
4.1	点とパッチ . . . . .	180
4.1.1	特徴点検出 . . . . .	181
4.1.2	特徴量記述子 . . . . .	191
4.1.3	特徴マッチング . . . . .	195
4.1.4	特徴点追跡 . . . . .	203
4.1.5	応用：演技に基づくアニメーション . . . . .	205
4.2	エッジ . . . . .	206
4.2.1	エッジの検出 . . . . .	206
4.2.2	エッジの連結 . . . . .	212

	4.2.3	応用：エッジの編集と強調	215
4.3		直線	215
	4.3.1	漸進的な直線近似	216
	4.3.2	ハフ変換	216
	4.3.3	消失点	219
	4.3.4	応用：矩形の検出	221
4.4		さらに学ぶために	222
4.5		演習	223
<b>第 5 章</b>		<b>領域分割</b>	<b>231</b>
5.1		動的輪郭	234
	5.1.1	スネーク	234
	5.1.2	動的スネークとコンデンセーション	239
	5.1.3	シザーズ	242
	5.1.4	レベルセット法	244
	5.1.5	応用：輪郭追跡とロトスコープ	245
5.2		分割と併合	246
	5.2.1	ウォータージェット法	246
	5.2.2	領域の分割（分割型クラスタリング）	247
	5.2.3	領域の併合（凝集型クラスタリング）	247
	5.2.4	グラフに基づく領域分割	248
	5.2.5	確率的併合法	249
5.3		平均値シフト法と最頻値検出	250
	5.3.1	k 平均法と混合ガウス分布	250
	5.3.2	平均値シフト法	253
5.4		正規化カット	256
5.5		グラフカットとエネルギーに基づく手法	259
	5.5.1	応用：医用画像の領域分割	263
5.6		さらに学ぶために	264
5.7		演習	265
<b>第 6 章</b>		<b>特徴に基づく位置合わせ</b>	<b>267</b>
6.1		特徴に基づく 2 次元と 3 次元の位置合わせ	269
	6.1.1	最小二乗法を用いた 2 次元位置合わせ	269
	6.1.2	応用：パノグラフィ	271
	6.1.3	反復アルゴリズム	272
	6.1.4	ロバスト最小二乗法と RANSAC	275
	6.1.5	3 次元の位置合わせ	277
6.2		姿勢推定	278
	6.2.1	線形アルゴリズム	279
	6.2.2	反復アルゴリズム	281
	6.2.3	応用：AR	282

6.3	幾何学的カメラ校正 . . . . .	283
6.3.1	校正パターン . . . . .	283
6.3.2	消失点 . . . . .	285
6.3.3	応用：単視点測量 . . . . .	286
6.3.4	回転運動 . . . . .	287
6.3.5	歪曲収差 . . . . .	289
6.4	さらに学ぶために . . . . .	290
6.5	演習 . . . . .	291
<b>第 7 章</b>	<b>運動からの形状復元</b> . . . . .	<b>297</b>
7.1	三角測量の原理 . . . . .	299
7.2	2 フレームからの形状復元 . . . . .	301
7.2.1	射影復元 (未校正復元) . . . . .	306
7.2.2	自己校正 . . . . .	307
7.2.3	応用：視点モーフィング . . . . .	309
7.3	因子分解法 . . . . .	309
7.3.1	透視投影因子分解法および射影因子分解法 . . . . .	312
7.3.2	応用：疎な 3D モデルの構築 . . . . .	313
7.4	バンドル調整 . . . . .	314
7.4.1	疎性の利用 . . . . .	315
7.4.2	応用：マッチムーブと AR . . . . .	318
7.4.3	不確実性と不定性 . . . . .	320
7.4.4	応用：インターネット上の画像を用いた復元 . . . . .	321
7.5	制約付き SfM . . . . .	323
7.5.1	線分に基づく手法 . . . . .	323
7.5.2	平面に基づく手法 . . . . .	325
7.6	さらに学ぶために . . . . .	325
7.7	演習 . . . . .	326
<b>第 8 章</b>	<b>密な運動推定</b> . . . . .	<b>329</b>
8.1	並進の位置合わせ . . . . .	331
8.1.1	階層的運動推定 . . . . .	335
8.1.2	フーリエ変換を用いた位置合わせ . . . . .	336
8.1.3	反復的修正 . . . . .	339
8.2	パラメトリック運動 . . . . .	344
8.2.1	応用：映像の手ブレ補正 . . . . .	348
8.2.2	運動モデルの学習 . . . . .	348
8.3	スプラインに基づく運動モデル . . . . .	349
8.3.1	応用：医用画像の位置合わせ . . . . .	352
8.4	オプティカルフロー . . . . .	353
8.4.1	複数フレームを用いた運動推定 . . . . .	357
8.4.2	応用：映像のノイズ除去 . . . . .	358

	8.4.3 応用：インターレース除去 . . . . .	358
8.5	レイヤー状の運動 . . . . .	358
	8.5.1 応用：フレーム補間 . . . . .	361
	8.5.2 透明レイヤーと反射 . . . . .	362
8.6	さらに学ぶために . . . . .	363
8.7	演習 . . . . .	364
<b>第 9 章</b>	<b>画像の貼り合わせ</b>	<b>369</b>
9.1	運動モデル . . . . .	372
	9.1.1 平面射影運動 . . . . .	373
	9.1.2 応用：ホワイトボードと文書のスキャン . . . . .	374
	9.1.3 回転パノラマ . . . . .	374
	9.1.4 隙間の修正 . . . . .	377
	9.1.5 応用：映像の要約と圧縮 . . . . .	378
	9.1.6 円筒座標系と球面座標系 . . . . .	379
9.2	大域的な位置合わせ . . . . .	382
	9.2.1 バンドル調整 . . . . .	382
	9.2.2 視差の除去 . . . . .	385
	9.2.3 パノラマの認識 . . . . .	387
	9.2.4 輝度に基づく位置合わせと特徴に基づく位置合わせ . . . . .	389
9.3	合成 . . . . .	391
	9.3.1 合成画像面の選択 . . . . .	391
	9.3.2 画素値の選択と重み付け（ゴースト除去） . . . . .	393
	9.3.3 応用：フォトモンタージュ . . . . .	398
	9.3.4 プレンディング . . . . .	398
9.4	さらに学ぶために . . . . .	401
9.5	演習 . . . . .	402
<b>第 10 章</b>	<b>コンピューショナルフォトグラフィ</b>	<b>405</b>
10.1	フォトメトリック校正 . . . . .	408
	10.1.1 放射応答関数 . . . . .	408
	10.1.2 ノイズレベル推定 . . . . .	411
	10.1.3 周辺光量低下 . . . . .	411
	10.1.4 光学的なボケ（空間応答）推定 . . . . .	413
10.2	ハイダイナミックレンジ画像 . . . . .	415
	10.2.1 トーンマッピング . . . . .	422
	10.2.2 応用：フラッシュ写真 . . . . .	429
10.3	超解像とボケ除去 . . . . .	431
	10.3.1 カラー画像のデモザイキング . . . . .	435
	10.3.2 応用：グレースケール画像のカラー化 . . . . .	437
10.4	画像のマッピングと合成 . . . . .	438
	10.4.1 ブルースクリーンマッピング . . . . .	439

10.4.2	自然画マッピング	441
10.4.3	最適化に基づくマッピング	444
10.4.4	スモーク, シャドウ, フラッシュマッピング	447
10.4.5	ビデオマッピング	448
10.5	テクスチャの解析と合成	449
10.5.1	応用: 穴埋めとインペインティング	451
10.5.2	応用: ノンフォトリアリスティックレンダリング	452
10.6	さらに学ぶために	454
10.7	演習	455
<b>第 11 章</b>	<b>ステレオ対応</b>	<b>461</b>
11.1	エピポーラ幾何	465
11.1.1	平行化	465
11.1.2	平面スイープ	467
11.2	疎な対応付け	469
11.2.1	3D 曲面と輪郭曲線	470
11.3	密な対応付け	471
11.3.1	類似度尺度	472
11.4	局所的な手法	474
11.4.1	サブピクセル推定と不確実性	476
11.4.2	応用: ステレオに基づく頭部追跡	477
11.5	大域的最適化	478
11.5.1	動的計画法	479
11.5.2	領域分割に基づく手法	481
11.5.3	応用: z キーイングと背景合成	483
11.6	多視点ステレオ	484
11.6.1	ボリュームと 3D サーフェスの復元	487
11.6.2	シルエットからの形状復元	492
11.7	さらに学ぶために	493
11.8	演習	494
<b>第 12 章</b>	<b>3 次元復元</b>	<b>499</b>
12.1	X からの形状復元	502
12.1.1	陰影からの形状復元と照度差ステレオ	502
12.1.2	テクスチャからの形状復元	504
12.1.3	フォーカスからの形状復元	505
12.2	能動的距離計測	506
12.2.1	距離データの統合	509
12.2.2	応用: デジタル遺跡	511
12.3	表面の表現	512
12.3.1	表面の補間	512
12.3.2	表面の単純化	514

12.3.3	ジオメトリ画像	514
12.4	点による表現	515
12.5	ボリューム表現	516
12.5.1	陰関数曲面とレベルセット	516
12.6	モデルベースの再構成	518
12.6.1	建築物	518
12.6.2	頭部と顔	521
12.6.3	応用：顔のアニメーション	522
12.6.4	全身のモデリングと追跡	524
12.7	テクスチャマップとアルベドの復元	529
12.7.1	BRDF の推定	530
12.7.2	応用：3次元写真	532
12.8	さらに学ぶために	532
12.9	演習	534
<b>第 13 章</b>	<b>イメージベースレンダリング</b>	<b>537</b>
13.1	視点補間	539
13.1.1	視点依存テクスチャマップ	541
13.1.2	応用：フォトツーリズム	542
13.2	レイヤードデプスイメージ	543
13.2.1	インポスタ、スプライト、レイヤー	544
13.3	光線空間とルミグラフ	545
13.3.1	非構造化ルミグラフ	549
13.3.2	表面光線空間	549
13.3.3	応用：コンセントリックモザイク	550
13.4	環境マップ	551
13.4.1	高次元光線空間	553
13.4.2	モデリングからレンダリングへ	553
13.5	ビデオベースのレンダリング	554
13.5.1	ビデオベースのアニメーション	555
13.5.2	ビデオテクスチャ	556
13.5.3	応用：アニメーション写真	558
13.5.4	3D ビデオ	559
13.5.5	応用：ビデオベースのウォークスルー	561
13.6	さらに学ぶために	563
13.7	演習	564
<b>第 14 章</b>	<b>認識</b>	<b>569</b>
14.1	物体検出	572
14.1.1	顔検出	573
14.1.2	歩行者検出	578

14.2	顔認識	581
14.2.1	固有顔	582
14.2.2	動的外観モデルと 3D 形状モデル	590
14.2.3	応用：個人写真コレクション	593
14.3	特定物体認識	594
14.3.1	幾何的位置合わせ	595
14.3.2	大規模データベース	596
14.3.3	応用：場所認識	601
14.4	カテゴリ認識	603
14.4.1	Bag-of-words	604
14.4.2	部品に基づくモデル	608
14.4.3	領域分割を伴った認識	611
14.4.4	応用：知的写真編集	614
14.5	文脈とシーン理解	616
14.5.1	学習と大規模画像集合	619
14.5.2	応用：画像検索	620
14.6	認識データベースとテストセット	622
14.7	さらに学ぶために	626
14.8	演習	629
第 15 章 おわりに		633
付録 A 線形代数と数値計算手法		635
A.1	行列分解	636
A.1.1	特異値分解	636
A.1.2	固有値分解	637
A.1.3	QR 分解	640
A.1.4	コレスキー分解	640
A.2	線形最小二乗法	641
A.2.1	全最小二乗法	643
A.3	非線形最小二乗法	644
A.4	直接的疎行列手法	645
A.4.1	変数の再順序付け	646
A.5	反復的手法	647
A.5.1	共役勾配法	647
A.5.2	前処理	649
A.5.3	マルチグリッド法	650
付録 B ベイズモデリングと推論		651
B.1	推定理論	652
B.1.1	多変数ガウスノイズのための尤度	653
B.2	最尤推定と最小二乗法	654

---

B.3	ロバスト統計	656
B.4	事前モデルとベイズ推論	657
B.5	マルコフ確率場	658
B.5.1	勾配降下法と焼きなまし法	660
B.5.2	動的計画法	660
B.5.3	確率伝播法	662
B.5.4	グラフカット	664
B.5.5	線形計画法	666
B.6	不確実性推定 (誤差解析)	668
付録 C	副教材	671
C.1	データセット	672
C.2	ソフトウェア	674
C.3	スライドと講義	681
C.4	参考文献	682
付録 D	日本語版補遺	683
D.1	日本語の参考文献	683
D.2	日本における情報源	706
D.3	世界的な情報源	709
参考文献		717
欧文索引		799
和文索引		819