

画像情報処理の基礎

田中 敏幸【著】

コロナ社

まえがき

近年、多くの分野で画像を扱った研究や仕事が増えてきているように思われる。以前から、画像処理や画像解析の研究者は多かったが、パターン計測、AI (artificial intelligence)、深層学習 (deep learning; ディープラーニング) など、最近の流行と融合してさらに多くの人から注目されるようになったことが一つの要因だと思われる。また、OpenCV などのフリーのライブラリが充実してきたことや、これらのフリーのライブラリを C 言語だけでなく、MATLAB や Python などのプログラミング言語で扱うための手引書が多数刊行されたことも、研究などに画像処理を取り入れる契機となっている。しかし、実際に研究を行う場合、手引書では情報が不十分な場合が多く、画像処理・画像解析の専門書を読むことになる。

本書は、情報系の大学院で行う画像解析の教科書として書かれたものである。また同時に、画像解析に興味を持った大学学部生が最初の文献として利用できるように心がけて執筆されている。画像解析の基礎的なテキストは多くの方が執筆しているが、それらはおもに執筆者が所属する大学などの教科書向けのものである。したがって、それらの書籍で扱っている内容は、それを利用する大学での卒業研究や大学院での研究に必要な内容に特化していることが多い。そのため、画像処理の数学的・理論的な内容を中心としたものや、コンピュータ言語によるプログラミングに焦点を絞った章立てになっているものが多く見受けられる。研究に必要な画像解析を勉強するとき、数学的な処理やプログラミングではなく、まず必要としている処理はどのような手法により実現できるのかを理解し、その手法を処理に合わせて調整していく必要がある。

数学的には非常に似ている処理でも、画像解析としての用途がまったく違う場合もあり、行いたい処理に対してどのような手法があるのかを見つけることは

意外に難しい。そのようなことを念頭に置き、本書では処理を中心とした章立てを心がけることにした。数学的に似ている処理が複数の章に分かれてしまったところもあるが、研究初期の段階ではそのほうが効率が良いように思われる。また、画像解析の内容についても、1枚の画像から情報を取り出す場合と、複数枚の画像から情報を取り出す場合がある。本書の構成では、1章から10章までは単独画像を解析する手法をおもに説明し、11章から14章は複数の画像から情報を得る手法を説明している。

画像解析手法そのものを研究の対象としていない多くの分野では、本書に書かれた内容を理解すれば研究に利用できると思われる。著者が専門としている医用画像解析の分野の基礎としても役に立つ内容となっている。一方、画像解析手法自体を対象とした専門的な研究では、本書の内容を基礎として、さらに発展的な手法を学ばなければならない。本書が、これから画像解析を勉強しようとする読者の一助になれば幸いである。

2019年3月

田中敏幸

目 次

1. 画像処理の基礎知識

1.1 画像解析に必要な処理	1
1.2 色の表現方法	2
1.2.1 3 原 色	2
1.2.2 加法混色と減法混色	2
1.2.3 色 温 度	2
1.3 表 色 系	3
1.3.1 RGB 表 色 系	3
1.3.2 YIQ 表 色 系	3
1.3.3 HSI 表 色 系	3
1.3.4 XYZ 表 色 系	6
1.3.5 CIE-L*a*b* 表色系	7
1.3.6 CMY 表 色 系	8
1.3.7 CMYK 表 色 系	9
1.3.8 YC_bC_r 表 色 系	9
1.4 画像の描画方式	9
1.4.1 ラスタスキャン方式	9
1.4.2 インターレース方式	10
1.4.3 プログレッシブ方式	10
1.5 画像ファイルの基本要素	11
1.5.1 圧 縮 形 式	11

1.5.2	ファイルフォーマット	11
1.5.3	画像フォーマットの課題	12
1.6	画像の解像度と階調数	13
1.6.1	解像度と階調数	13
1.6.2	グレースケール画像	14

2. 画像の変換と濃度値の補正

2.1	濃度・明度の調整	16
2.1.1	画像データの表現	16
2.1.2	グレースケール化処理	17
2.1.3	輝度反転処理	18
2.1.4	ポスタリゼーション	19
2.1.5	バイアス変更による明度の調整	19
2.1.6	ガンマ補正	20
2.1.7	1次関数による濃淡補正	21
2.2	ヒストグラムを用いた処理	21
2.3	画素位置の変換	23
2.3.1	拡大縮小処理	24
2.3.2	平行移動	25
2.3.3	回転変換	25
2.3.4	せん断（スキュー）変換	26
2.3.5	反転変換	27
2.4	アフィン変換に伴う濃度値の補正	28
2.4.1	最近傍補間による補正	28
2.4.2	双1次補間による補正	29
2.4.3	双3次補間による補正	30

3. 空間フィルタ

3.1 雑音除去のための平滑化フィルタ	32
3.1.1 2次元線形システム	32
3.1.2 移動平均フィルタ	33
3.1.3 加重平均フィルタ	34
3.1.4 バイラテラルフィルタ	35
3.2 順序統計に基づく非線形フィルタ	36
3.2.1 メディアンフィルタ	36
3.2.2 加重メディアンフィルタ	37
3.2.3 ランクオーダフィルタ	38
3.3 エッジを抽出するフィルタ	39
3.3.1 微分フィルタ	39
3.3.2 雑音を抑えた微分フィルタ	41
3.3.3 2次微分フィルタ	43
3.3.4 キャニーフィルタ	44
3.3.5 鮮鋭化フィルタ	46

4. フーリエ変換とフィルタリング

4.1 フーリエ変換	48
4.1.1 2次元フーリエ変換	48
4.1.2 周波数空間における特徴量	49
4.1.3 フーリエ変換の性質	49
4.2 高速フーリエ変換 (FFT)	51
4.2.1 1次元時間間引き型 FFT	51

4.2.2	2次元高速フーリエ変換	55
4.3	周波数空間におけるフィルタリング	56
4.3.1	低域通過フィルタによる雑音除去	56
4.3.2	高域通過フィルタによるエッジ抽出	58

5. 多重解像度による画像処理

5.1	画像ピラミッド	60
5.1.1	ガウシアンピラミッド	60
5.1.2	ラプラシアンピラミッド	61
5.2	短時間フーリエ変換	62
5.3	1次元ウェーブレット変換	63
5.3.1	1次元連続ウェーブレット変換	64
5.3.2	1次元直交ウェーブレット変換	67
5.3.3	1次元離散ウェーブレット変換	70
5.4	2次元ウェーブレット変換	73
5.4.1	2次元連続ウェーブレット変換	73
5.4.2	2次元離散ウェーブレット変換	74

6. 2値化とモルフォロジー演算

6.1	固定閾値法による2値化	78
6.2	自動閾値決定法による2値化	79
6.2.1	pタイル法	79
6.2.2	モード法	79
6.2.3	判別分析による2値化	80
6.2.4	大津の2値化の応用	83

6.3 動的閾値決定法	83
6.3.1 移動平均法	84
6.3.2 部分画像分割法	84
6.4 ラベリング	85
6.5 モルフォロジー演算	86
6.5.1 膨張処理と収縮処理	86
6.5.2 オープニングとクロージング	87

7. 線分と輪郭の抽出

7.1 直線成分の抽出	89
7.2 Watershed 法による領域分割	91
7.3 動的輪郭モデルによる境界の抽出	92
7.3.1 Snakes	92
7.3.2 レベルセット法	94
7.4 前景と背景の分離	96
7.4.1 グラフカット	96
7.4.2 グラブカット	98
7.4.3 グローカット	101
7.5 領域拡張法	102
7.5.1 単純領域拡張法	102
7.5.2 反復型領域拡張法	102
7.5.3 分離・統合法	103

8. 特徴量の算出

8.1 形状特徴量	104
8.2 テクスチャ特徴量	107

8.2.1	濃度ヒストグラム法	107
8.2.2	同時生起行列法	109
8.2.3	ランレングス行列法	112
8.3	高次局所自己相関特徴	114

9. 特徴量による分析法

9.1	特徴量の検定	116
9.1.1	F 検定	116
9.1.2	t 検定	117
9.2	重回帰分析	118
9.3	主成分分析	121
9.3.1	分析の手順	122
9.3.2	主成分の寄与率	123
9.4	判別分析	124
9.5	クラスタ分析	126
9.5.1	階層的クラスタリング	127
9.5.2	k-means 法	129

10. 機械学習による分析

10.1	ニューラルネットワーク	131
10.1.1	パーセプトロン	131
10.1.2	誤差逆伝搬法	132
10.2	サポートベクトルマシン	135
10.2.1	最大マージン分類器	135
10.2.2	重なりのあるクラス分布	139
10.2.3	カーネルトリック	142

11. 画像の位置合わせ

11.1	フーリエ変換の性質	144
11.1.1	1次元相関積分のフーリエ変換	144
11.1.2	離散時間における1次元相関とフーリエ変換	145
11.1.3	2次元相関積分のフーリエ変換	145
11.1.4	離散時間における2次元相関とフーリエ変換	146
11.2	位相限定相関法	147
11.2.1	位相限定相関法による移動量の算出	148
11.2.2	サブピクセル化による画像移動量の高精度推定	149
11.2.3	回転・拡大への対応	152

12. オプティカルフロー

12.1	基本式によるブロックマッチング法	154
12.2	Lucas-Kanade 法	158
12.3	オプティカルフローの応用	161
12.3.1	画像中の移動物体の認識	162
12.3.2	ロボットビジョン	162
12.3.3	顔の表情の変化の追跡	162
12.3.4	流体の動きの可視化	163

13. ステレオ画像処理

13.1	3次元画像計測の種類	164
13.2	カメラモデル	166

13.2.1	ピンホールカメラモデル	166
13.2.2	画像解析におけるカメラモデル	167
13.2.3	画像の投影法	167
13.3	座標間の幾何学的関係	168
13.4	空間位置の計測	171
13.5	ステレオビジョン	173

14. 画像超解像

14.1	単純拡大	176
14.2	線形補間	177
14.3	FCBI方式	180
14.4	厳密な意味での超解像	185
14.5	超解像の画像縮小	186
14.6	超解像の応用	187

引用・参考文献	188
---------	-----

索引	189
----	-----

1

画像処理の基礎知識

この章では、画像解析を行う際に必要な画像処理の基礎知識について説明する。医用や美容の分野における画像解析では、染色の色や肌の色など、色の情報が重要な特徴となる場合が多い。医用・美容画像に限らず、情報系の他の分野で行われている画像処理においても、色情報は基礎知識として必要である。本章では、色情報、特に表色系について多くの紙面を割く。また、画像の描画方式やファイルフォーマットなどについても言及する。実際の研究では、これらの情報を基本としてどのような処理を行うかを考えていく必要がある。

1.1 画像解析に必要な処理

画像解析では、つぎの三つのステップが必要となる。おもに画像の前処理の部分を画像処理と呼び、その後の分析を含めたものを画像解析と呼ぶことが多い。

1. 画像の前処理：画像から必要な情報を精度良く得るために、画像のコントラスト修正、雑音除去などを行う。
2. 画像の特徴量解析：画像中で注目している対象の形状や模様の数値化を行う。
3. 特徴量の判別：2. で得られた特徴量に対して統計解析や機械学習を行うことにより、画像中の対象の判別分析を行う。

1.2 色の表現方法

1.2.1 3 原 色

物体に照射する電磁波の波長が異なると、知覚する色が異なる。可視光は波長が 380~810 nm の電磁波であり、波長が 380 nm よりもやや短い電磁波を紫外線、810 nm よりもやや長い電磁波を赤外線と呼ぶ。互いに独立した三つの色のことを 3 原色あるいは 3 原刺激という。可視光は赤、緑、青の 3 色に対応する波長の混ざった電磁波となっている。

1.2.2 加法混色と減法混色

パソコンのモニタなどのように光を用いて色を表現する場合、基本となるのは RGB 表色系である。

表色系は混色系と顕色系に分けられる。CIE-RGB 表色系と CIE-XYZ 表色系は代表的な混色系であり、マンセル表色系は代表的な顕色系である。

混色系は、さらに加法混色と減法混色に分けられる。RGB は加法混色における代表的な 3 原色であり、CMY は減法混色における代表的な 3 原色である。モニタなどのように光を使う場合は加法混色 RGB であり、プリンタなどのようにインクを使う場合は減法混色 CMY である。

1.2.3 色 温 度

黒体の絶対温度を基準として色を温度で表したものを色温度といている。色温度が低いと長波長側で相対エネルギーが高い分光分布となり、黄色っぽい色になる。また、色温度が高いと短波長側で相対エネルギーが高くなり、青色がかかった色になる。JIS (Japanese Industrial Standards; 日本工業規格) では、標準光をつぎのように規定している。K は絶対温度の単位を表す。

- (1) 白熱灯：2856 K (標準光 A)

- (2) 紫外線を含む昼光：6 500 K（標準光 D65）
- (3) 昼間の平均光：6 770 K（標準光 C）

1.3 表 色 系

1.3.1 RGB 表 色 系

3 原色を R（赤, 700 nm）, G（緑, 546.1 nm）, B（青, 435.8 nm）とする表色系を CIE-RGB 表色系という。これは現在のパソコンで最も多く用いられる表色系である。CIE（Commission Internationale de l'Éclairage; 国際照明委員会）によって定められている。

1.3.2 YIQ 表 色 系

YIQ 表色系はカラーテレビに採用された表色系である。カラー以前の旧モノクロ受信機でカラー電波を受信でき、再生できるという条件に合った表色系となっている。アナログテレビ時代の表色系なので、カラーテレビに利用されることはないが、YIQ それぞれの色成分は、画像解析に利用することができる。RGB 表色系との変換公式は、つぎのように表すことができる。これは、日本および米国のビデオ信号規格（NTSC 信号規格）として使用されている。

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.522 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

1.3.3 HSI 表 色 系

RGB 色空間では、人間の感覚に合った色彩に関する処理を行うことは難しい。そこで、RGB 表色系を、直観的にわかりやすいマンセル表色系に近い色相 (hue) H, 彩度 (saturation) S, 明度 (intensity) I に変換して解析することがある。HSI は HSV (hue, saturation, value), HSB (hue, saturation,

brightness) などと呼ばれることもある。RGB 空間から HSI 空間への変換を HSI 変換という。変換の方法にはいくつかあるが、代表的なものとして、6 角錐モデルを利用したものと双 6 角錐モデルを利用したものがある。

(1) **6 角錐モデル** 6 角錐モデルを図 1.1 に示す。6 角錐モデルでは、次式を用いて RGB 表色系の画像を HSI 表色系に変換することができる。

$$I_{\max} = \max\{R, G, B\}$$

$$I_{\min} = \min\{R, G, B\}$$

$$I = I_{\max} \quad (1.2)$$

$$S = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \quad (1.3)$$

$$r = \frac{I_{\max} - R}{I_{\max} - I_{\min}}$$

$$g = \frac{I_{\max} - G}{I_{\max} - I_{\min}}$$

$$b = \frac{I_{\max} - B}{I_{\max} - I_{\min}}$$

$$H = \frac{\pi}{3}(b - g) \quad (R = I_{\max}) \quad (1.4)$$

$$H = \frac{\pi}{3}(2 + r - b) \quad (G = I_{\max}) \quad (1.5)$$

$$H = \frac{\pi}{3}(4 + g - r) \quad (B = I_{\max}) \quad (1.6)$$

また、 $H < 0$ のときは H に 2π を加える。 $I_{\max} = 0$ のときは $S = 0$, $H = \text{indefinite}$ となる。

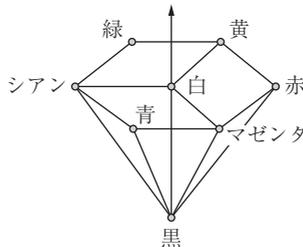


図 1.1 6 角錐モデル

(2) 双6角錐モデル 双6角錐モデルを図1.2に示す。双6角錐モデルでは、次式を用いてRGB表色系の画像をHSI表色系に変換する。

$$I_{\max} = \max\{R, G, B\}$$

$$I_{\min} = \min\{R, G, B\}$$

$$I = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \tag{1.7}$$

$$S = (I_{\max} - I_{\min})(I_{\max} + I_{\min}) \quad (I \leq 0.5 \text{ のとき}) \tag{1.8}$$

$$S = (I_{\max} - I_{\min})(2 - (I_{\max} + I_{\min})) \quad (I > 0.5 \text{ のとき}) \tag{1.9}$$

$$r = \frac{I_{\max} - R}{I_{\max} - I_{\min}}$$

$$g = \frac{I_{\max} - G}{I_{\max} - I_{\min}}$$

$$b = \frac{I_{\max} - B}{I_{\max} - I_{\min}}$$

$$H = \frac{\pi}{3}(b - g) \quad (R = I_{\max}) \tag{1.10}$$

$$H = \frac{\pi}{3}(2 + r - b) \quad (G = I_{\max}) \tag{1.11}$$

$$H = \frac{\pi}{3}(4 + g - r) \quad (B = I_{\max}) \tag{1.12}$$

また、 $H < 0$ のときは H に 2π を加える。 $I_{\max} = I_{\min}$ のときは $S = 0$, $H = \text{indefinite}$ となる。

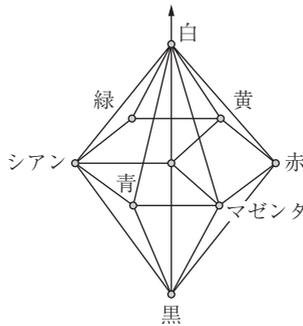


図1.2 双6角錐モデル

索引

【あ】	
アクティブステレオ法	165
圧縮形式	11
アフィン変換	23
アンシャープマスキング	47
【い】	
位相限定相関関数	148
位相限定相関法	147
移動平均フィルタ	33
移動平均法	84
色温度	2
因子負荷量	124
インターレース方式	10
インパルス性雑音	36
【う】	
ウェーブレット変換	63
【お】	
大津の2値化法	81
オプティカルフロー	154
オプティカルフロー速度	156
オープニング	87
【か】	
階層的クラスタリング	127
回転変換	25
ガウシアンピラミッド	60
ガウシアンフィルタ	34
拡大縮小処理	24
加重メディアンフィルタ	37
画素	13

カーネルトリック	142
カメラキャリブレーション	171
カメラ座標系	166
ガンマ補正	20
【き】	
輝度反転処理	18
キャニーフィルタ	44
寄与率	123
均等色空間	7
【く】	
空間的局所最適化法	157
空間的大域最適化法	157
クラスタ分析	126
グラディエント法	156
グラフカット	96
グラフカット	98
グレースケール画像	15
グローカット	101
クロージング	88
群平均法	129
【け】	
形状特徴量	104
顕色系	2
【こ】	
高次局所自己相関特徴	114
高速フーリエ変換	51
誤差逆伝搬法	133
混色系	2
コントラスト伸長	22

【さ】	
最近傍補間	28
最短距離法	127
最長距離法	128
サブピクセル	149
サポートベクトルマシン	135
三角測量法	164
【し】	
時間的局所最適化法	158
時間間引き型 FFT	51
重回帰式	119
重回帰分析	119
収縮処理	86
重心法	129
主成分得点	122
主成分分析	121
受動的計測法	164
深層学習	134
【す】	
スケーリング関数	68
ステップワイズ法	120
ステレオ画像処理	164
ステレオビジョン	173
【せ】	
正規化画像座標	170
鮮鋭化フィルタ	46
せん断変換	26
【そ】	
相違度	156

<p>[C]</p> <p>CMY 表色系 8</p> <p>CMYK 表色系 9</p> <p>Coiflet ウェーブレット 69</p> <p>[D]</p> <p>Daubechies ウェーブレット 69</p> <p>[F]</p> <p>F 検定 116</p> <p>FCBI 方式 180</p> <p>[H]</p> <p>Haar ウェーブレット 69</p> <p>HLAC 114</p> <p>HSI 表色系 3</p> <p>[J]</p> <p>JPEG 12</p>	<p>[K]</p> <p>k-means 法 129</p> <p>[L]</p> <p>Lucas-Kanade 法 158</p> <p>L*a*b* 色空間 7</p> <p>[P]</p> <p>p タイル法 79</p> <p>PNG 11</p> <p>[R]</p> <p>RGB 表色系 3</p> <p>[S]</p> <p>Snakes 92</p> <p>[T]</p> <p>t 検定 117</p>	<p>[W]</p> <p>Ward 法 129</p> <p>Watershed 法 91</p> <p>[X]</p> <p>XYZ 表色系 6</p> <p>[Y]</p> <p>YCbCr 表色系 9</p> <p>YIQ 表色系 3</p> <p>~~~~~</p> <p>[数字]</p> <p>2 次元線形システム 32</p> <p>2 次微分フィルタ 43</p> <p>2 値化 78</p> <p>3 原刺激 2</p> <p>3 原色 2</p> <p>6 角錐モデル 4</p>
---	---	--

—— 著者略歴 ——

1982年 慶應義塾大学工学部計測工学科卒業
1989年 慶應義塾大学大学院博士課程修了（計測工学専攻），工学博士
1989年 慶應義塾大学助手
1993年 慶應義塾大学専任講師
2003年 慶應義塾大学助教授
2007年 慶應義塾大学准教授
2009年 慶應義塾大学教授
現在に至る

画像情報処理の基礎

Fundamentals of Image Information Processing

© Toshiyuki Tanaka 2019

2019年6月13日 初版第1刷発行



検印省略

著者 田中敏幸
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844 ・ 電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-02895-9 C3055 Printed in Japan

(新宅) G



< 出版者著作権管理機構 委託出版物 >

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。