

赤外線カメラを用いた雲領域特定

千川道幸, 加田尚己, 毛馬敏, 平田有香

Determination of Cloud Region with Infrared Camera

Michiyuki CHIKAWA, Naoki KADA, Satoshi KEMA, Yuka HIRATA

The fundamental concepts of image processing method is applied to the digital infrared image in order to determine the cloud region in the dark night sky. Two-dimensional(2D) images taken by an infrared(IR) sensitive camera give information of the coordinate position and the temperature of cloud. Some gradient operators are applied to the discrete level of the image so that 2D image functions as two or more variables. To calculate the gradient magnitude, the integral effect of the infrared radiative energy from atmosphere is taken account. This new algorithm leads to calculate the edge of the cloud efficiently even in the case of a thin cloud. Partial area of the cloud in the region-of-interest is determined by the quantization process to the infrared image.

Keywords : Cloud monitoring, Infrared camera, Edge detection, Gradient operator, Infrared radiative energy

1 序論

本研究で用いた赤外線 (IR) カメラは、内部に非冷却2次元FPA素子を持ち、物体表面が放射、或いは物体表面で反射された赤外線の強度 (温度) を検出する装置である。赤外線強度は光学系 (レンズ等) を通して到来方向に対応した画素上にデジタル値として記録され、その情報を再び黒体放射に対応した温度に変換して色画像を出力できる。赤外線領域の輻射エネルギーを検出する原理なので、夜間の砂漠環境等に於いて様々な物体の画像を検出することが可能である。この IR カメラを用いて夜間に撮像した雲画像をデータ処理し、エッジを検出することで雲領域の定量的な同定を行う。

的な画像フォーマットである TIFF 形式の2種類がある。赤外線カメラの撮影条件は双方とも記録されているが、IRI 形式では温度情報に対応する赤外線強度が 16bit/pixel (内 4bit は空白) のデジタル値で記録されているのに対し、TIFF 形式では変換後の温度の色情報のみが 8bit/pixel のデジタル値で記録されている。温度情報を用いて雲の検出等を行う場合には、IRI 形式を処理する必要がある。IRI 形式と呼ばれる熱画像ファイルはバイナリ形式でデータが保存されている。データファイルの大きさは約 160kB あり、内容はヘッダ情報、タグ情報、画像データである。表示画素数:320(H)×236(V) の温度情報に対応する赤外線検出量が上述のように 16bit で記録さ

2 IR カメラ

2.1 IR カメラ装置

夜間に可視光領域の光を検出して雲の特定を行うことは難しいが、IR カメラを用いて物体 (この場合、水蒸気など) から放出された赤外線を検出することにより、闇夜であっても雲の有無を容易に調べることができる。解析に用いる画像の撮像には、日本アビオニクス株式会社製 Thermo TVS-600 が使用されている。IR カメラの仕様を Table-1 に示す。

2.2 画像データフォーマット

Thermo TVS-600 で取得できる画像データフォーマットには、TVS 独自のフォーマットである IRI 形式 (熱画像ファイル) と一般

Table-1 Specification of the Infra-Red camera

検出器	非冷却2次元FPA (マイクロボロメータ)
検出器素子数	320(H)×240(V) (表示画素数: 320(H)×236(V))
検知波長	8~14μm
視野角	25.8° (H)×19.5° (V)
瞬時視野角	1.4mrad
最小温度分解能	0.1℃以下 (30℃黒体にて)
測定温度範囲	Low-Range: -20~150℃ High-Range: 100~300℃
表示フレーム数	30 フレーム/秒
外部 I/F	RS-232C
VIDEO 出力	出力インピーダンス: 75Ω, 出力振幅: 1.0Vp-p
耐環境性	温度: 0~40℃, 湿度: 90%RH 以下 (結露しないこと) 振動: 1.0G (10~150Hz), 衝撃: 50G (11msec)

平成 22 年 6 月 22 日受理

理学科物理学コース

れている。[1,2]

2.3 デジタルデータの温度変換

検出した赤外線強度からデジタル値への変換に用いられる変換式を、(2.1)式に示す。これらのパラメータは画像データフォーマットに記録されており、適宜必要な変換を行うことができるようになっている。

$$D = A_0 + A_1 \cdot K + A_2 \cdot K^2 + A_3 \cdot K^3 + A_4 \cdot K^4 \quad (2.1)$$

D はデジタル値、 K はKelvin温度を表す。 $A_0 \sim A_4$ は、観測する赤外線波長の種類、フィルター種別、レンズ種別などのカメラの設定状況によって異なる値で、IRI形式で記録された画像ファイル内にシステム情報として書き込まれている。

次に、記録されているデジタル値を対応する温度に変換する際に用いられる変換式を示す。

$$K = \beta + \frac{1}{\varepsilon} \left(B_1 \cdot D^{\frac{1}{4}} + B_2 \cdot D^{\frac{2}{4}} + B_3 \cdot D^{\frac{3}{4}} + B_4 \cdot D^{\frac{4}{4}} \right) \quad (2.2)$$

$$\beta = B_0 + \left(1 - \frac{1}{\varepsilon} \right) \times \left(B_1 \cdot DA^{\frac{1}{4}} + B_2 \cdot DA^{\frac{2}{4}} + B_3 \cdot DA^{\frac{3}{4}} + B_4 \cdot DA^{\frac{4}{4}} \right) \quad (2.3)$$

ここで用いられているパラメータは次のものである。

D : IRI データに記録されるデジタル値

β : 放射率と周囲温度から求められる K の切片

ε : 対象物の放射率 (0.1~1.0), 手動設定

DA : 物体周囲温度から求められる、 D の補正項 (Ambient D)

DA は、撮影時に記録した対象物の周囲温度(TA or TR)を式(2.1)に代入することで求められる。 $B_0 \sim B_4$ は、IRカメラのファームウェアで計算された近似変換係数で、 A 係数と同様に、システム情報に記録されている。解析に使用する画像は、放射率 $\varepsilon=1$ と設定されたものであり、(2.2)式を次式のように扱っている。

$$K = B_0 + B_1 \cdot D^{\frac{1}{4}} + B_2 \cdot D^{\frac{2}{4}} + B_3 \cdot D^{\frac{3}{4}} + B_4 \cdot D^{\frac{4}{4}} \quad (2.4)$$

解析に使用した画像では正確な放射率と物体周囲温度が入力されていないため、出力される温度は正確なものにならないが、温度差を用いて画像解析を行う場合は、検出温度から出力温度へ線形変換されていることが確認されれば良い。データ解析を行う撮像モードLow-Rangeモードでの A 、 B 係数をTable-2に示す。この係数を用いて-20~150°Cで検出温度から出力温度に線形変換されること

を確認した計算結果をFig-1に示す。-20~150°Cの範囲で検出温度から出力温度へ線形変換されることが確認できる。

Table-2 Conversion coefficients of Digital-to-Temperature

Low-Range -20~150°C	定数項 ($i=0$)	1次係数 ($i=1$)	2次係数 ($i=2$)
係数 A_i	649.617	6.82268	5.11354×10^{-2}
係数 B_i	-81743.0	49199.3	-11108.6
Low-Range -20~150°C	3次係数 ($i=3$)	4次係数 ($i=4$)	
係数 A_i	1.47858×10^4	-9.65932×10^8	
係数 B_i	1117.80	-42.1984	

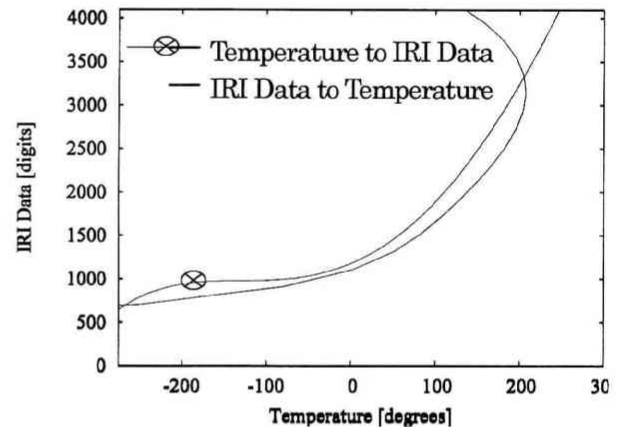


Fig-1 IRI Data vs. calculated temperature

2.4 赤外線画像解析

ここで、IRカメラで撮影した雲画像の例をFig-2に示す。出力される温度画像は画像データに記録された温度情報の高低によって色が割り当てられており、目でみた場合にも雲の存在が確認できる。また、雲の内部では温度の変化があまり無いため、外部との温度差



Fig-2 A sample of Infrared image of the cloud.

This image is an original image taken by IR camera.

による雲の輪郭（エッジ）の認識が容易である。ただし、画像中の不感素子によるノイズが存在するためそのまま解析に用いることはできない。Fig-2 の温度画像から雲の領域を特定し、数値化するための処理は次の手順で行う。[3,4]

1. ノイズ除去
2. 仰角による大気温度の補正
3. エッジの鮮鋭化処理
4. 微分演算によってエッジを認識
5. エッジ部分と周囲の温度の比較による2値化処理

これら処理について以下に説明する。

2.4.1 ノイズ除去

エッジを保存しながら画像中の不感素子によるポットノイズを除去するには、median-filter（中央値変換）が有効である。median-filter は、注目するピクセルとその周囲 8 近傍のピクセルの数値を、昇順あるいは降順に並べ、順列の中央に来る数値を、注目するピクセルの数値とするものである。注目するピクセルの温度情報を $f(x, y)$ とすると、変換後の温度情報 $f'(x, y)$ は、(2.5)式になる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \{g(n) \in X\} \cap \{g(n) \leq g(n+1)\} \\ X = \{f(x+i, y+j) \mid -1 \leq i, j \leq 1\} \\ f'(x, y) = g(5) \quad n = 1, 2, \dots, 9 \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

これを概念図で表すと次の Table-3 ようになる。

Table-3 The 8-neighbourhood median-filter.

2	3	3
2	6	2
1	2	2

⇒ (2,3,3,2,6,2,1,2,2)
 ⇒ (1,2,2,2,2',2,3,3,6)
 ⇒

2	3	3
2	2'	2
1	2	2

Fig-2 に対し median operator を行い、得られた画像を Fig-3 に示す。Fig-2 と比べて、変換後の画像はエッジをほぼ完全に保存したままノイズを除去していることが分かる。

2.4.2 大気温度補正

地表から放出された赤外線の一部は、大気中に存在する分子に



Fig-3 A sample image of the noise reduction : A result of the 8-neighbourhood median operator was applied to Fig-2.

よって散乱される。IR カメラで雲や霧以外の領域を撮像すると、観測点方向への散乱成分を検出することができる。地表の微小面積 dS から放出される赤外線エネルギー I_0 は、(2.6)式となる。

$$I_0 = \omega \cdot (T_s^4 - T^4(h=0)) \cdot \sigma \cdot dS \quad (2.6)$$

ここで、 σ はシュテファン・ボルツマン定数、 ω は放射率、 T_s は散乱点の温度、 h は高度である。

dS から放出された赤外線エネルギー I_0 は、各ピクセルの高度 h における微小体積 dV に到達し、赤外線波長が大気分子径より大きい場合に大気分子によってレイリー散乱を起こす。このとき、大気分子へ入射した赤外線エネルギー I' は、 dS と dV 間の距離を R として、

$$I' = \frac{I_0}{2\pi R^2} \frac{dV}{dh} \cdot \exp\{-k(h)R\} \quad (2.7)$$

で表される。地表を等温の無限平面と考え、 dV への入射角ごとの赤外線エネルギーを算出し、入射角ごとに散乱成分を算出して、IR カメラ方向への赤外線エネルギーを積分することにより dV から IR カメラ方向へ放射する赤外線エネルギー I'' を求める。

ここで、 dV を天頂角 θ 方向にとると、

$$dV = h \cdot (\tan(\theta + d\theta) - \tan \theta) \cdot dh \cdot dL \quad dL \equiv 1 \quad (2.8)$$

$$I''(h, \theta) = \iint_{dS} I'(h, \phi) \cdot F(h, \theta, \phi, \varphi)$$

$$dS = h^2 \frac{\tan \phi}{\cos \phi} d\phi \cdot d\varphi \quad (2.9)$$

$$I'''(\theta) = \int_h I'' N dV \exp\{-k(h)R\} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} N &= \frac{6.02 \times 10^{23} \cdot n}{dV} = \frac{6.02 \times 10^{23}}{RT(h)} P(h) \\ &= \frac{6.02 \times 10^{23}}{RT(h)} A \exp\{-ah\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

ここで、

- F : レイリー散乱に於ける θ 方向への散乱係数
- ϕ : dV から垂直に z 軸を取った時、 z 軸と $dV \cdot dS$ 間の線分が成す角
- φ : 地表面に x 軸、 y 軸を取った時、 x 軸と中心点- dS 間の直線が成す角
- I'' : 天頂角 $\theta \sim \theta+d\theta$ を視野とする検出素子に到達する赤外線領域放射エネルギー
- N : 高度 h での分子数密度である。

(2.10)式より、大気分子によって散乱された地表からの赤外線では、IR カメラの縦視野方向(天頂角)によって到達する赤外線エネルギーが変化することがわかる。これを、視野方向に寄らない一定値に補正することで、雲と大気との温度ヒストグラムを明確に分けることが可能になる。

2.2.3 鮮鋭化処理

鮮鋭化処理を行う目的は、温度画像に median-filter 処理を行うと、温度分布が縮小し全体的にぼやけた状態になってしまうため、コントラストが明瞭な画像にするためである。注目するピクセルのデジタル値を $f(x, y)$ 、変換係数を a とし、次のような変換を行う。

$$\left\{ \begin{array}{l} f'(x, y) = f(x, y) + \sum_{(i,j)} a \{f(x, y) - f(x+i, y+j)\} \\ (i, j) \in \{(1,0), (0,1), (-1,0), (0,-1)\} \end{array} \right\} \quad (2.12)$$

温度補正を行った画像に対して、 $a = 0.12$ として変換処理した例を Fig-4 に示す。



Fig-4 A sample image of the temperature after sharpen correction.

2.4.4 エッジ検出

ピクセルの温度が急激に変化している部分を微分処理を行うことにより勾配を求め、画像に映っている雲の輪郭を抽出することができる。ここでは一次微分である Gradient operator を用いてエッジの検出を行う。Gradient operator は輪郭の強度、濃淡を現すベクト

ルを検出する。注目するピクセル (x, y) における濃度の勾配は、基本的な Gradient operator を用いて、

$$\nabla f(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} f + \frac{\partial}{\partial y} f \quad (2.13)$$

と表されるが、画像のようなデジタルデータを微分する場合には、接するピクセルとの差分をとることになる。これを表すと、

$$\frac{\partial}{\partial x} f(x, y) = f(x+1, y) - f(x, y) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} f(x, y) = f(x, y+1) - f(x, y) \quad (2.15)$$

従って、画像中のエッジの強度のみを求めると、次式となる。

$$\begin{aligned} & \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial x} f(x, y)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} f(x, y)\right)^2} \quad (2.16) \\ & = \sqrt{\{f(x+1, y) - f(x, y)\}^2 + \{f(x, y+1) - f(x, y)\}^2} \end{aligned}$$

解析プログラムでは、Table-3 に Gradient operator の係数をかけ、全てのピクセルについてエッジの強度を計算する。この Gradient operator のあてはめにはいくつかの手法が考案されている。ピクセルの配列が Table-4 である場合の、微分オペレータ Normal, Roberts, Sobel を Table-5 に示す。これら、各オペレータによるエッジ検出結果を Fig-5, Fig-6, Fig-7 に示す。

Table-4 Cell (x, y) and its 8-neighbor pixels

	Normal	Roberts	Sobel
$\frac{\partial}{\partial x} f(x, y)$	0 0 0 0 1 -1 0 0 0	0 0 0 0 0 1 0 -1 0	-1 0 1 -2 0 2 -1 0 1
$\frac{\partial}{\partial y} f(x, y)$	0 0 0 0 1 0 0 -1 0	0 0 0 0 1 0 0 0 -1	-1 -2 -1 0 0 0 1 2 1

Table-5 Three types of Gradient Operators

$f(x-1, y-1)$	$f(x, y-1)$	$f(x+1, y-1)$
$f(x-1, y)$	$f(x, y)$	$f(x+1, y)$
$f(x-1, y+1)$	$f(x, y+1)$	$f(x+1, y+1)$

これら gradient 変換に於いて、画像右端部のカラーバーの値は温度パラメータと表示されているが、実際には温度勾配の大きさを表すパラメータに対応する。Fig-5~Fig-7 を見ると、Sobel では他の operator と比べエッジが強く検出されていることが分かる。また、



Fig-5 Edge detection using by the Gradient-Normal operator.



Fig-7 Edge detection using the Gradient-Roberts operator.

Sobel では微分オペレータの特性からエッジ境界が太くなっている。この特徴を利用しエッジの強い Sobel operator を用いて、以下の様に二値化解析を行う。

1. 温度勾配が設定値 N_g 以下である場合、その値を 0 にする。
本解析では $N_g=6.2$ と設定した。
2. 画像を縦 6、横 8 の区画に分割し、注目するピクセルの温度勾配が 0 ではない場合のみ、注目するピクセルの温度勾配の合計値を区画毎に求める。
3. 合計値が設定値 N_{cr} 以上の場合、エッジ有り。その他、エッジ無しとする。本解析では $N_{cr}=100$ と設定した。

この条件をあてはめた画像を Fig-8 に示す。この画像に対し、以下の二値化処理を行う。

2.2.5 画像に対する二値化処理による雲領域特定

(1) エッジが無い場合

画像の温度情報を用いて温度分布を描画し二値化の閾値を設定する場合には、分布に谷ができればその位置を二値化の閾値に設定する。本解析での分布を Fig-9 に示す。谷の位置は約 1180 である。



Fig-7 Edge detection using the Gradient-Sobel operator.

(2) エッジが有る場合

区画内で温度勾配の値が 0 でなく、且つ注目するピクセルの温度勾配の値が 0 でないピクセルの温度情報を Fig-7 の画像からとり出し、平均値を求める。この値をこの区画での閾値とする。この条件に加え、エッジ無しの場合で示した閾値以上であれば、上記の閾値以下であっても雲の領域とする。ここまでの解析方法を用いて、各区画での閾値と各ピクセルの温度情報を比較し、二値化を行う。雲と判定されたピクセルの数と画像の全ピクセル数から、画像中で雲の占める割合が特定できる。

3 まとめ

赤外線カメラを用いた雲領域を同定する解析を行った。Fig-3 の雲の IR 画像を二値化解析すると、Fig-10 の二値化画像が得られ、雲の占める割合は 45.4%であった。また、各ピクセルの配列から、雲の存在する方角、特に仰角を数値化できるようになった。画像の視野内に於いて角度に関する情報は大気の外赤領域輻射エネルギーを仰角の関数で表される場合に重要になると考えられる。

今回の解析の課題として、温度勾配の閾値 $N_g=6.2$ と合計の閾値 $N_{cr}=100$ の値に不確定な値を使用している。前者の温度勾配の閾値は、雲と大気との温度勾配がどのような状況でもほぼ一定であれば、解析を重ねることで良好な閾値を見出すことができると考えられ

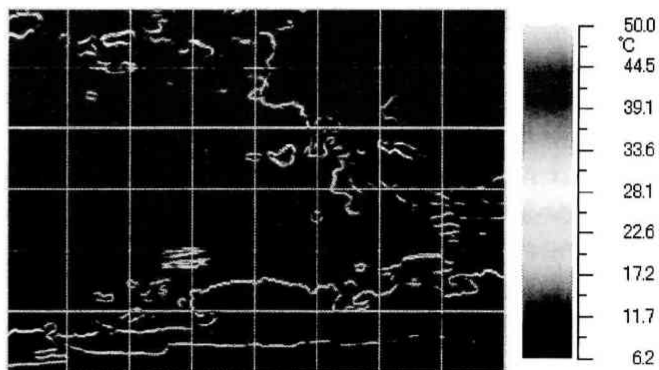


Fig-8 An example of edge detection. Cutoff parameters in this analysis are evaluated $N_g=6.2$ and $N_{cr}=100$, respectively.

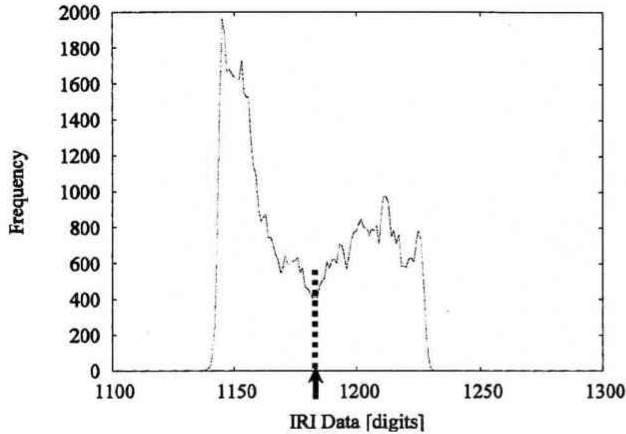


Fig-9 Distribution of the temperature information of the IR image.

るが、薄い霧が連続し、その結果エッジの強度が弱くなってしまふ場合が存在することが予測され、確認されている。このため、エッジの評価方法については今後更なる議論が必要であろう。

又、本解析で行ったエッジ認識法では、全く雲の無い画像や、雲のみの画像の二値化解析を行うことが出来ない。この場合には、周囲の温度を用いて雲の温度を正確に測定することや、更に季節による変動などを考慮しなければならないであろう。

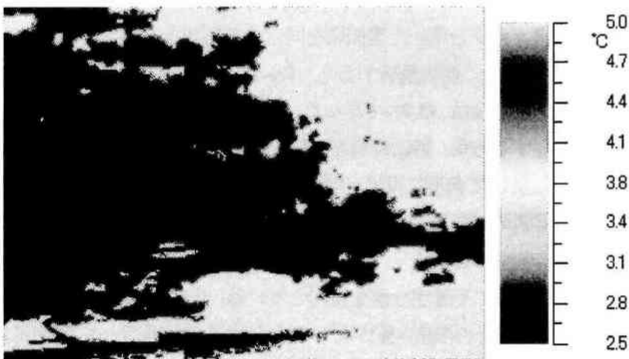


Fig-10 A sample image of the digitize of Fig-3.

最後に、2.4.2で行った大気温度補正について、その必要性について検討する。Fig-11はオリジナルの画像に対し鮮鋭化を行ったものまでのIR画像データに含まれる全ての画素の温度分布を重ねて描画したものである。線1のオリジナルデータ、線2のノイズ除去時点での分布はほぼ同じ分布になっており、線3で表される温度補正後の分布と比較して、分布の谷から閾値を決定することが難しいことが分かる。これは、2.4.2で述べたように、天頂角が大きくなるにつれ、視野内に写る領域が広がり、検出される赤外線エネルギーが増加しているためであると考えられる。即ち視線方向の大気厚さと関連付ける場合に重要なパラメータである。この考察により、IRカメラを用いた大気の画像を解析することにより、雲の存否に拘わ

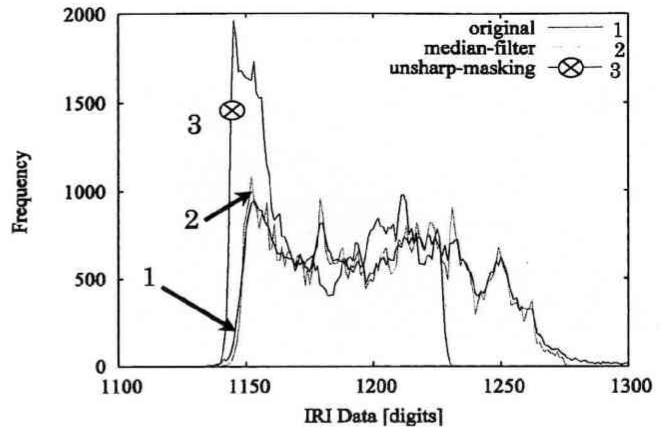


Fig-11 Distributions of the temperature information for an original image, a noise reduction image, and a temperature correction image.

らず赤外領域の輻射エネルギー強度を求める可能性について今後検討する予定である。

参考文献

1. Neo Thermo TVS-600 説明書, 日本アビオニクス
2. Neo Thermo TVS-500 説明書, 日本アビオニクス
3. 森實 有一朗 著, 近畿大学大学院修士論文 (平成 12 年度)
4. 辨野 拓哉 著, 近畿大学大学院修士論文 (平成 17 年度)
5. 藤岡 宏, 中前 幸治 共著, 画像処理の基礎, 昭晃堂 (2002)
6. 越後 富夫 著, 人画像処理, オーム社 (2007)