

マシンビジョンの実利用を促進するための技術展望

正 員 輿水 大和* 正 員 長田 典子**
 正 員 栗田多喜夫*** 非会員 加藤 邦人****
 正 員 坂上 勝彦*** 正 員 山本 和彦****

Prospect on Current Topics of Machine Vision Technologies

Hiroyasu Koshimizu*, Member, Noriko Nagata**, Member, Takio Kurita***, Member, Kunihito Kato****, Non-member,
 Katsuhiko Sakaue***, Member, Kazuhiko Yamamoto****, Member

A variety of cameras is becoming ready to be utilized at several scenes of both daily and special uses due to their improvements in cost and performance. Simultaneously general purpose processors installed on PC could be a device as an image processor due to their high performance in speed. From these positive backgrounds, abundant kinds of applications of image processing are rising up to cope with many kinds of social expectations in image processing. Consequently to these circumstances, further expectations to the basic algorithms of the basic image processing methods are becoming urgent. Here in this survey paper, we selected 6 subjects of image processing technologies such as sampling and quantization, robust image understanding, Hough transform, color Kansei processing, ubiquitous distributed vision and current status of cameras, and presented the brief surveys for the respective subject in an omnibus configuration.

キーワード：画像離散化，ロバスト画像理解，Hough 変換，カラー感性情報，ユビキタス視覚，新カメラ事情

Keywords: sampling and quantization, robust image understanding, Hough transform, color Kansei processing, ubiquitous distributed vision, current status of cameras

1. まえがき

画像取得のカメラは多様化，低価格化した高性能化している。同時に，汎用 PC に搭載されているプロセッサは，画像処理のような重い処理の実用にも十分耐え得るまでになり，ますます高速化の一途を突き進んでいる。このよう

な背景からマシンビジョン適用分野が拡大して，そして改めて画像処理アルゴリズムを中心とした画像技術に対する期待が再び高まっている。

このような観点から本論文では，画像離散化の原理，ロバスト画像理解と特徴抽出，大局的特徴抽出の Hough 変換，カラー処理と感性情報処理，ユビキタス視覚と分散視覚，新しいカメラの登場と波及効果に焦点をあてて解説を行う。本解説は，マシンビジョン実利用に活路を与えてくれそうな話題を厳選したもので，それらの厳選テーマの実利用に様々な立場から関わっている 6 名が集まってオムニバス形式で執筆することになったものである。いずれのテーマも必ずや関係分野の諸賢のお役にたつものと信じている。

2. 実利用のための画像離散化の話題

画像 $f(x)$ の離散化は，定義域 (x) に対する標本化と値域 (f) に対する量子化で構成される。前者には理論的裏づけとしてシャノンの標本化定理⁽¹⁾⁽²⁾ (ST) が知られているが，これに相当するレベルでの後者に対する理論的基盤がない^{(3)~(5)(9)}。すなわち従来，ベクトル量子化など符号化法 (JPEG, MPEG) が議論されて rate-distortion 理論, Lloyd-max 量子化器, 最

* 中京大学情報科学部
 〒470-0393 豊田市貝津町床立 101
 Chukyo University
 101 Tokodate, Kaizu-cho, Toyota 470-0393
 E-mail : hiroyasu@secs.chukyo-u.ac.jp
 ** 関西学院大学
 〒669-1337 兵庫県三田市学園 2-1
 Kwansei Gakuin University
 2-1 Gakuen, Sanda, Hyogo 669-1337
 E-mail : nagata@ksc.kwansei.ac.jp
 *** 産業技術総合研究所
 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第 2
 AIST
 Tsukuba Central 2, Tsukuba 305-8568
 E-mail : takio-kurita@aist.go.jp
 k.sakaue@aist.go.jp
 **** 岐阜大学
 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1
 Gifu University
 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193
 E-mail : kkato@info.gifu-u.ac.jp
 yamamoto@info.gifu-u.ac.jp

適密度関数 (Gersho and Gray's book), 磯道の逆量子化法などが知られているが, 離散濃度値から連続濃度値を復元する意味の量子化原理は論じられていない。これを克服することは, デジタル技術の基本問題解消につながると同時に, 実用への波及効果も極めて大きい。ここでは, 濃度値の発生頻度を支配する確率密度関数の復元問題として量子化をモデル化する数学的方法, 量子化定理 (Oteru-Koshimizu Quantization Theorem; 以下特に OK 量子化と呼ぶ) について, 今後の課題とあわせて解説する。

〈2・1〉 量子化のモデル化と OK 量子化定理—濃度確率密度関数の再現問題— OK 量子化定理は, 量子化における離散値から連続値の再現問題の対象を, 濃度値の生起確率密度関数であるとしたものである。

(1) 標本化定理

標本化定理は, 式(2.1)により Δx なる標本点間隔でサンプリングされたデジタル画像 $f=(f_i)$ から画像 $f(x)$ の波形の復元を保証するものである。

$$f_i = f(\Delta x \cdot i), i = \dots, -1, 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.1)$$

このとき, 画像 $f(x)$ とそのフーリエ変換 $F(u)$ が式(2.2) (二乗可積分), 式(2.3) (帯域制限, カットオフ周波数 u_c) なる二つの性質を満たすとき,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx < \infty \quad (2.2)$$

$$F(u) = 0 \quad u \geq u_c \quad (2.3)$$

標本点間隔を式(2.4)のように選ぶと, そのときに限って,

$$\Delta x \leq 1/2u_c \quad (2.4)$$

デジタル画像 $f=(f_i)$ から画像 $f(x)$ は式(2.5)によって完全に復元される。

$$f(x) = \sum_{-\infty}^{\infty} f(i \cdot \Delta x) \cdot \text{Sinc}(2\pi(x - i \cdot \Delta x)) \quad (2.5)$$

(2) 量子化定理 OK 量子化定理の導入

OK 量子化定理では, 画像濃度値の発生頻度を支配する確率密度関数の復元問題として次のように量子化をモデル化する。画像 $f(x)$ の濃度確率密度関数を $p(f)$, そのフーリエ変換を $P(v)$ とする。確率密度関数 $p(f)$ は, 式(2.6)のように $P(v)$ が v_c で帯域制限されていると, 式(2.7)のような量子化間隔 Δf とした場合に限って, 式(2.8)のように離散化データから完全に復元される。

$$P(v) = 0 \quad v \geq v_c \quad (2.6)$$

$$\Delta f \leq (1/2v_c) \quad (2.7)$$

$$p(f) = \sum_k p(\Delta f \cdot k) \cdot \text{Sinc}\{2\pi(f - k \cdot \Delta f)\} \quad (2.8)$$

この Δf がこの画像 $f(x)$ の確率密度関数 $p(f)$ を完全に復元できる量子化間隔である。

〈2・2〉 量子化定理の運用法 濃度値の生起確率密度

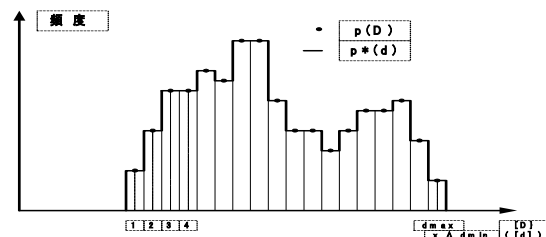


図 2.1 ヒストグラム $h(f)$ と推定した確率密度関数 $p^*(f)$

関数 $p(f)$ は, 次のような方法で推定, ないし仮定する必要がある。画像 $f(x)$ から観測されたデジタル画像 $f=(f_i)$ の濃度ヒストグラム $h(f)$ は, 確率密度関数 $p(f)$ を推定する手がかりを与える。濃度ヒストグラム $h(f)$ は, 有限離散(整数)空間上に分布しているものとし, その最小量子化間隔 $\Delta f_{\min}$ を 1, 最大濃度値を $f_{\max}$ として, 基底となる解析関数として rect 関数を用いて, 式(2.9)にて求められる。

$$p^*(f) = \frac{\sum_{n=1}^{f_{\max}} p(\Delta f_{\min} \times n) \times \text{rect}(f - n)}{\sum_{n=1}^{f_{\max}} p(\Delta f_{\min} \times n) \times \Delta f_{\min}} \quad (2.9)$$

これによって, $h(f)[f: 0, f_{\max}]$ は, 実空間上の関数 $p^*(f)[f: -\infty, +\infty]$ として表された。図 2.1 に $h(f)$ と推定された確率密度分布関数 $p^*(f)$ との関係を模式的に示す。また, $p^*(f)$ のフーリエ変換 $P^*(v)$ は, 式(2.10)によって解析的に求めることができる。

$$\begin{aligned} P(v) &= \text{Fourier}[p^*(f)] \\ &= \frac{1}{S} \sum_{n=1}^{f_{\max}} p(\Delta f_{\min} \times n) \exp(-2\pi j n v) \frac{\sin(\pi v)}{\pi v} \\ S &= \sum_{n=1}^{f_{\max}} p(\Delta f_{\min} \times n) \times \Delta f_{\min} \quad (2.10) \end{aligned}$$

〈2・3〉 実験的検証 実験用の SEM 画像 (濃度階調数 256), その濃度ヒストグラム $h(f)$, この PDF $p^*(f)$ のフーリエ変換 $P^*(v)$ を, それぞれ図 2.2, 図 2.3, 図 2.4 に示す。これから, カットオフ周波数 $v_c = 0.055$ [line pairs/mm] が選択され, この画像の量子化間隔 Δf は,

$$\Delta f \leq 1/(2v_c) = 1/(0.11) = 9.09 \div 9$$

(量子化レベル数 = 256/9 = 28 階調) であると予測された。

〈2・4〉 考 察

(1) 確率密度関数の復元性と目視評価

OK 量子化定理は, 画像の目視評価 (目でみて劣化がないか) を直接的に保証するものではない。しかし, この 32 階調の SEM 画像は, 図 2.2 とほとんど区別できず (ほとんど劣化は見られず), OK 量子化定理の実用上の意義が示唆された。しかし例えば 8 階調に削減した場合は, 省察すると擬似輪郭が発生して, 図 2.5 のように劣化が明らかであった。

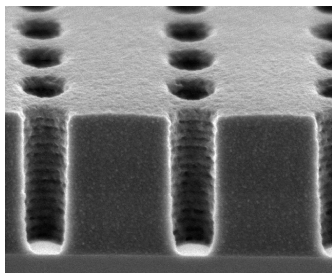


図 2.2 実験用レジスト SEM 画像 (256 階調)

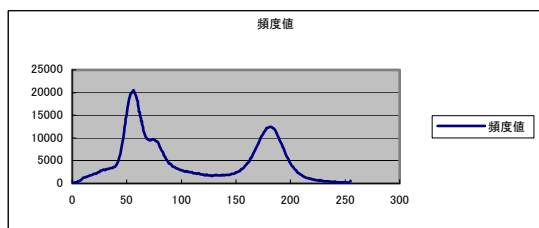


図 2.3 実験用レジスト SEM 画像のヒストグラム

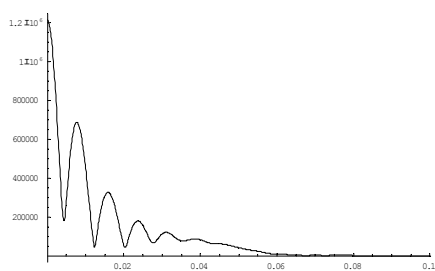
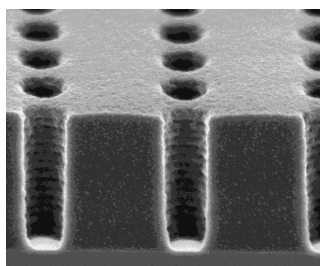


図 2.4 $P^*(f)$ のフーリエ変換 $P^*(v)$ (レジスト SEM 画像)



8 濃度階調の画像 (below QT)

図 2.5 レジスト SEM 画像の実験結果

(2) 画像上の濃度値の再現について

画像伝送や画像符号化では画像上での濃度値の再現が必要である。一旦削減した濃度階調から元の階調を復元するには、磯道の逆量子化に代表されるような、何らかの近似手法が要請される。

(3) 差画像と QT と ST の干渉問題

画像の標本化と量子化は、独立ないし直交した操作では

なく、一種の干渉が生じるはずである。原理的に、カットオフ周波数 u_c を持つ画像を先に量子化を行うと明らかにその u_c は増大するからである。この意味で⁽⁸⁾, $S(Q(f(x))) \approx Q(S(f(x)))$ となるような ST・QT 統一定理を見出すことが次の基本問題として要請される⁽¹¹⁾。

〈2・5〉 むすび この章では、画像濃度階調の離散化のための量子化定理を紹介した。これは、濃度階調の生起確率密度関数の復元を数学的に保証することを述べている。本話題は、標本化定理との非直交性問題、画像上での濃度階調の再現手法への要請などの興味ある課題が残されているが、多様なカメラ映像、多様な画像・映像コンテンツ、それらの多角的な活用に溢れる、現実の画像離散化においても十分に新規な指標を与えるものと期待できる。

文 献

- (1) C.E. Shannon and W. Weaver : The Mathematical Theory of Communication, Univ. Illinois Press (1949)
- (2) 長谷川淳・井上光弘訳：コミュニケーションの数学的理論，明治図書 (1969)
- (3) 中田和男：「音声・画像のベクトル量子化」，計測と制御，Vol.25, No.6, pp.517-52 (1986-6)
- (4) 磯道義典：情報理論演習，pp.53-55 (コロナ社) (1983)
- (5) 奥水大和・鳥脇純一郎・福村晃夫：「デジタル画像処理における折り返し誤差の実際の評価の一方法」，通信学論誌，61-D, 6, pp.443-444 (1978-6)
- (6) 奥水大和・本田和広・中村奈津子：「量子化定理の提案—画像グレースケール離散化の数理的考察—」，検査の自動化ワークショップ VIEW2002, 101, (2002-12) (横浜) 2002 年外観検査の自動化ワークショップ (2002-12)
- (7) 大照 完：基礎電気計測，pp.236-237, オーム社 (1966-8)
- (8) 飯島泰蔵 (私信)：量子化定理の例題による検討 (2003-2)
- (9) H.Koshimizu : On A Mathematical Theory of Quantization – How should image gray value be digitized ? -, FCV2003, Invited paper (Feb.6, 2003) (Jeju, Korea)
- (10) 奥水大和：「量子化定理の提案と実験的検証—画像グレースケール離散化の理論—」，通学技報 (PRMU2003-66) (2003-5)
- (11) 奥水大和・飯島泰蔵・田中祐司・M.Juhanne：「量子化と標本化の関係の一考察—量子化定理の基礎的性質—」，ビジョン技術の実利用ワークショップ VIEW2003, 1-1 (2003-12)

奥 水 大 和 (正員) (1 章, 2 章, 8 章) 1948 年 2 月 7 日生。1975 年名古屋大学大学院博士課程了。工学博士。その後，名古屋大学助手，名古屋市工業研究所，中京大学教養部教授を経て，1990 年，同情報科学部教授。画像処理の基礎，産業応用の研究，特に，Hough 変換アルゴリズム，画像量子化の理論的研究，画像検査応用，似顔絵生成・顔研究，などに従事。2002 年度小田原賞 (精密工学会) 受賞。電子情報通信学会，精密工学会，日本顔学会，各会員。

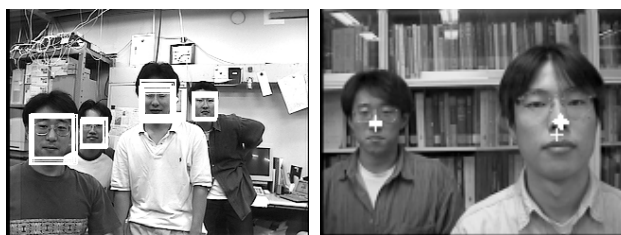


3. ロバスト画像理解と特徴抽出

マシンビジョンを撮影条件や対象の向き・大きさなどが変化する実環境でも利用可能にするためには，実環境の

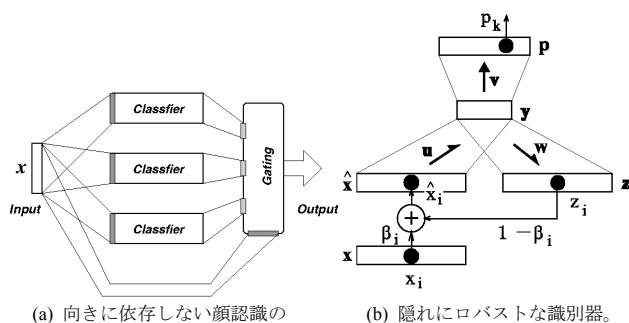
様々な変動に対してロバストな認識手法を開発することが重要である。人間は、そうした様々な変動に対しても安定な視覚機能を持っている。本稿では、顔検出・顔認識を例として、そうした人間の視覚情報処理を参考にする事で、ロバストな認識を実現しようとする試みについて紹介する。

〈3・1〉 環境の変化にロバストな顔検出 我々人間は眼球運動により特徴的な点に注意を向け、重要で無い情報を無視することで環境の変化に対して頑健な認識を実現している。また、網膜ではコントラストを強調する特徴抽出が行われており、第1次視覚野では方向選択性を持ったエッジ特徴が抽出されている。こうした人間の視覚系で行われている特徴抽出法を模倣することで照明条件の変動などにロバストな認識が可能となると期待できる。そこで、著者等は、顔検出課題に対して、網膜のガングリオン細胞の受容野特性に類似したコントラストフィルタ⁽¹⁾と第1次視覚野の単純型細胞の受容野特性に類似した Gabor フィルタ⁽²⁾を用い、未知画像の識別率の観点から顔検出に有効な特徴点を選択し、選択した特徴点のみを用いて顔検出を行う手法を提案した⁽³⁾。図 3.1(a) に選択された特徴点を用いた顔検出例を示す。コントラストフィルタと Gabor フィルタを組み合わせることで、照明条件等の変動に影響を受けにくい顔検出が可能となった。また、未知の画像に対する識別性能（汎化性能）の点では、画像内のすべての特徴点を用いる場合に比べて、選択した特徴点のみを用いる手法の方が高い認識率が得られた。これらの結果は、人間の視覚情報処理を模倣することで環境の変化に対してロバストな認識が実現できる可能性を示唆していると考えられる。



(a) 選択された特徴点を用いた顔検出 (b) 大きさの変化にロバストな手法を用いた顔検出

図 3.1 顔検出の例



(a) 向きに依存しない顔認識のための識別器の統合。

(b) 隠れにロバストな識別器。

図 3.2 識別器

〈3・2〉 大きさの変化にロバストな顔検出・顔認識

人間の網膜では、中心窩付近では視細胞（錐体）の密度が高く、中心から外側に離れると次第にその密度が低下する。この構造を反映して、網膜から第1次視覚野へは Log-Polar 変換と呼ばれる変換が行われていると考えられている。Log-Polar 変換された画像（Log-Polar 画像）上では、対象の大きさの変化や回転が平行移動として表現される。筆者等は、この性質を利用して、画像中の顔の大きさの変化に影響を受けにくい顔検出・識別手法を開発した⁽⁴⁾。

具体的には、Log-Polar 画像から平行移動に不変な特徴として、自己相関特徴、パワースペクトル特徴、PARCOR 特徴等の特徴を抽出し、その特徴を用いた識別器を構成した。図 3.2 (b) に、検出窓の大きさを変えないでこの手法を用いて顔を探索した結果を示す。

〈3・3〉 向きの変動にロバストな顔認識

人間は異なった向きの顔を容易に認識することが出来る。脳の下側頭葉にある IT 野では3次元対象の向きに選択的に反応するニューロンが見つかり、それらのニューロンは対象の回転に対して系統的な反応を示すことが知られている⁽⁶⁾。Poggio 等は、任意の向きの見えが小数の代表的な見えの補間を実現するニューラネットを用いて再現できることを示した⁽⁷⁾。顔認識に関しても、顔の向きに選択的に反応するニューロンが見つかり⁽⁸⁾⁽⁹⁾。それらのニューロンは $\pm 40^\circ$ 程度の比較的広い角度に対して反応する。著者等は、このような人間の認識方式を真似て、向きに選択的に反応する識別器を統合することにより、向きに依存しない認識システムを構成することを試みた⁽¹⁰⁾。具体的には、図 3.2 (a) のように向きに依存した識別器を gating network により入力画像の顔の向きに応じて適切に選択することで、顔の向きに依存しない認識を実現した。様々な向きの 10 名の顔画像の識別実験を行った結果、98%以上の認識率が得られている。

〈3・4〉 部分的な隠れにロバストな顔認識

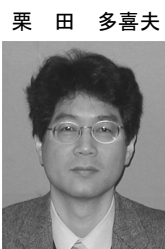
人間はマスクやサングラスなどで顔の一部が隠されていてもある程度顔を識別することができる。部分的な隠れや背景等の認識対象以外のものを自動的に検出し、欠損部分を補って識別できるようになれば、マシンビジョンの適用範囲をさらに拡大できると期待される。人間の視覚系にはボトムアップの情報の流れだけでなく、トップダウンの情報の流れがあることが知られている。現時点では、トップダウンの情報がどのような役割を担っているかについての明確な回答は得られていないが、入力情報を修飾するための何らかの情報処理が行われていると考えられる。そこで、著者等は、抽出した特徴量から元の入力を再構成するトップダウンの処理により自己連想記憶の機能を実現し、それを識別器に付加することで、部分的に隠れた顔画像に対しても認識性能を落とさない識別手法を提案した⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。図 3.2 (b) に提案した識別器の構造を示す。自己連想記憶により想起された画像と入力画像を比較することで、隠れ部分を推定し、その部分を連想された情報で置き換えることで、隠れの影響

を受けにくい識別が可能となる。評価実験では、この方法を用いると画像の 30%程度がランダムな矩形で隠されていても識別率をそれほど下げることなく識別可能であることが確かめられた。

〈3・5〉 あとがき 本稿では、顔検出・顔認識を例に、人間の視覚系を参考にすることで、実環境の様々な変動に対してロバストな認識手法が開発可能であることを示した。21 世紀は、生命科学の時代と言われており、脳科学はその目玉の一つである。実環境での使用に耐える、様々な状況で利用可能な人工視覚システムを実現するためには、脳研究の成果をうまく利用することがますます重要となってくると確信している。

文 献

- (1) J.J.Atick and A.N.Redlich : “What does the retina know about natural scenes ?”, *Neural Computation*, Vol.4, No.2, pp.196-210 (1992)
- (2) J.G.Daugman : “Complete discrete 2-D Gabor transforms by neural network for image analysis and compression”, *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol.36, No.7, pp.1169-1179 (1988)
- (3) 堀田一弘・三島健徳・栗田多喜夫:「未知の画像に対する識別率を用いた顔検出のための特徴点の順序付け」, 信学論誌, **J84-D-II**, 8, pp.1781-1789 (2001-8)
- (4) 栗田多喜夫・堀田一弘・三島健徳:「Log-Polar 画像の高次局所自己相関特徴を用いた大きさに変化しない顔画像の認識」, 信学論誌, **J80-D-II**, 8, pp.2209-2217 (1997-8)
- (5) K.Hotta, T.Mishima, and T.Kurita : “Scale invariant face detection and classification method using shift invariant features extracted from log-polar image”, *IEICE Trans. on Inf. & Syst.*, Vol.E84-D, No.8 (2001)
- (6) J.Pauls, E.Bricolo, and N.Logothetis : “View invariant representations in monkey temporal cortex: position, scale, and rotational invariance”, in S.K.Nayer and T.Poggio ed. {*From Early Visual Learning*}, Oxford (1996)
- (7) T.Poggio and S.Edelman : “A network that learns to recognize three-dimensional objects”, *Nature*, Vol.343, pp.263-266 (1990)
- (8) D.Perrett, A.Mistlin, and A.Chitty : “Visual neurons responsive to faces”, *Trends Neurosci.*, Vol.10, pp.358-364 (1989)
- (9) M.Hasselmo, E.Rolls, G.Baylis, and V.Nalwa : “Object-centered encoding by face-selective neurons in the cortex in the superior temporal sulcus of the monkey”, *Exp. Brain Res.*, Vol.75, pp.417-429 (1989)
- (10) T.Kurita and T.Takahashi : “Viewpoint independent face recognition by competition of the viewpoint dependent classifiers”, *Neurocomputing*, Vol.51, pp.181-195 (2003)
- (11) 高橋隆史・栗田多喜夫・池田幸史:「画像の隠れ部分を補正する前処理機構をもったニューラルネット識別器」, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002)論文集, Vol.I, pp.433-438 (2002)
- (12) T.Kurita, T.Takahashi, and Y.Ideda : “A neural network classifier for occluded images”, *Proc. of Inter. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.III, pp.45-48 (2002)



栗田 多喜夫 (非会員) 1958 年生。1981 年 3 月名古屋工業大学工学部電子工学科卒業。1981 年電子技術総合研究所入所。1990 年～1991 年 カナダ国立科学研究協議会, (NRC) 招聘研究員。現在, 産業技術総合研究所脳神経情報研究部門副研究部門長。工学博士。統計的パターン認識及び脳型情報処理手法の研究に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE CS, 日本神経回路学会, 行動計量学会, 日本顔学会各会員。

4. Hough 変換と大局的特徴抽出

〈4・1〉 はじめに 一般的な画像処理手法は、フィルタ処理に代表されるように局所的な画素集合にのみ注目する。そのため、ノイズにより誤った情報が抽出されたり、隠蔽などの情報量の不足に対処し難いという基本的な問題がある。現在、これらを克服する信頼性の高い大局的な解析・認識手法が数多く検討されている。中でも Hough 変換(ハフ変換)は、画像情報を大局的に調べることが可能であり、これらの問題を解決することができる有望な画像処理手法の一つである。

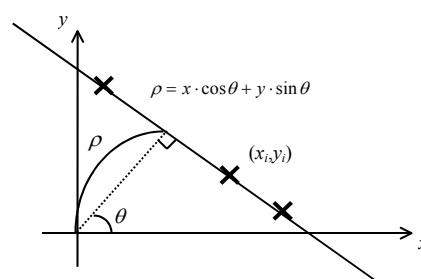
本稿では、はじめに Hough 変換の基本原則を紹介し、次に、Hough 変換の実用化において有益な高速化、効率化、高精度化アルゴリズムを紹介する。

〈4・2〉 基本原理 Hough 変換の基本原則は、P.V.C.Hough により提唱された⁽¹⁾。その後、Duda と Hart が、式(4.1)のように極座標表現することを提案した⁽²⁾。現在では一般に、この・・・パラメータ表現を用いる。

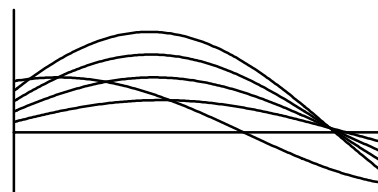
$$\rho = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad (0 \leq \theta < \pi) \quad \cdots \cdots (4.1)$$

これは、図 4.1 に示すように一つの直線を垂角・・・距離・パラメータで表現したものである。

可能なすべての ρ , θ の組み、 (ρ, θ) の描く軌跡は 1 本の正弦曲線となる。したがって、 xy 座標上の点 (x_i, y_i) $i=1, 2, \dots, N$ は、・・・パラメータ平面では、 N 本の曲線で表される。ここで、 (x_i, y_i) $i=1, 2, \dots, N$ が 1 本の直線上に乗っている場合、・・・パラメータ平面では、これらの N 本の直線は、 (ρ_0, θ_0) の 1 点で交差する。この性質を利用することにより、 xy パラメータ平面上で最も多くの点を通過する直線を求めるためには、 $\rho - \theta$ パラメータ平面上で最も多く曲線が交差しているピーク点を見つければよい。



(a) x-y pattern space



(b) $\rho - \theta$ parameter space

図 4.1 垂角距離 (ρ, θ) パラメータの Hough 変換
Fig. 4.1. Hough transform by using (ρ, θ) parameters.

Hough 変換を用いた直線検出を実現するには、一般的に (1)Hough 変換投票処理, (2)ピーク抽出, (3)Hough 逆変換というプロセスをとる。さらに実際には、ピーク抽出前に非極大点抑制処理等の前処理を必要とし、また、逆変換後セグメント切り出し処理等、必要な線分に分類する後処理が必要である⁽³⁾。

コンピュータ上で Hough 変換を実現する場合、一般に・・・パラメータ平面は 2 次元配列で表現されるが、この 2 次元配列のサイズ、すなわちパラメータ平面の量子化サイズにも注意が必要であり、原理的に上限があることが知られている⁽⁴⁾。

〈4・3〉 高速化アルゴリズム Hough 変換の問題点として、計算コストが古くから議論されている。そのため、現在でも高速化アルゴリズムや専用ハードウェアの開発が盛んに行われている^{(5)~(7)}。

Hough 変換を行う上での計算量とは一般に投票処理の計算量に帰着する。この投票処理の改良は、投票数を削減するアプローチと、投票処理自体を高速化するアプローチの 2 つに大別される。

後者のアプローチはパラメータ変換式の軌跡描画の改良方法が主である⁽⁸⁾⁽⁹⁾。しかし、これらは投票変換式が変化すると、例えば直線検出から円検出に拡張されると応用できない場合が多いため、前者のアプローチの方が報告例は多い。

最近では、特徴点をランダムに選択し、投票を行うエッジ点を限定することで投票数を減らす手法が数多く提案されている⁽¹⁰⁾。代表的なものとして RHT⁽¹¹⁾や、確率的 Hough 変換 (PHT)⁽¹²⁾などが提案されている。さらに、これらのランダムなエッジ点選択、逐次的直線検出、ブロック分割などを更に推し進めた RVHT⁽¹³⁾, MRHT⁽¹⁴⁾なども提案されている。これらについては Kalvianinen らの報告⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾, または Leavers の報告⁽¹⁷⁾により詳しく述べられている。

〈4・4〉 高精度化アルゴリズム 画像平面、パラメータ空間の量子化は Hough 変換によるパターン検出精度悪化の原因ともなる。このような問題を解決するため、高精度化アルゴリズムが多数開発されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。多くはパラメータ空間への投票パターンの改良および図形のパラメータ表現の改良による。

直線検出の分解能はパラメータ空間の分割数によるため、分割数が少ないと、本来区別すべき直線が同一の要素に投票されて、その結果、重要なセグメントが直線として検出されなくなる、いわゆる精度問題が内在している。この精度問題では、Hough 変換関数を決定したときに一種のパターン平面の位置に対して非均一な直線検出精度を自動的に決定してしまうという潜在的問題もある。この検出精度非均一性の扱いについて、流れは大きく二つに別れ、和田らによる・・・Hough 変換⁽¹⁸⁾や森本らによる可変フィルタによる高精度 Hough 変換⁽¹⁹⁾など、これを抑制する立場と、逆に奥水らの拡張 Hough 変換 (EHT) のように⁽²⁰⁾, 非均一な検出特性を積極的に作り出す立場がある。特に後者の拡

張 Hough 変換は、変換関数設計法の一方針であり、この設計方針にしたがって設計することにより、効率化、特に高精度化について、所望の変換関数を得ることができる。

最近では、パラメータ平面をカウンターとしてではなく、信頼度の分布として用いる LMedS Hough 変換などは新しいアプローチとして期待される⁽²¹⁾。

〈4・5〉 まとめ 本稿では、画像情報を大局的に調べることができる、有望な画像処理手法の一つである Hough 変換の実現方法、高速化、効率化、高精度化アルゴリズムを紹介した。現在まで Hough 変換処理は、そのメモリコスト、計算コストから応用例は限られたものになっていた。最近では改良アルゴリズムを用いることで、十分実用に耐えうる結果を得ることができるようになった。しかし、アルゴリズムの改良の研究は現在でも多数存在するが、それらを実際に応用した場合に起こる問題点などの議論はほとんど行われていない。今後は、応用を見据えたアルゴリズム開発が期待される。

文 献

- (1) P.V.C. Hough : "Method and means for recognizing complex patterns", U.S.Patent, 306954 (1962)
- (2) A. Rosenfeld : "Picture Processing by Computer", Academic Press, New York (1969)
- (3) 加藤邦人 : 「Hough 変換の高性能化と画像処理」, 第 6 回画像センシングシンポジウム SSII2000 チュートリアル講演, pp.15-25 (2000-6)
- (4) 後藤英昭・阿曾弘具 : 「ハフ変換におけるパラメータの効率的なサンプリング間隔」, 信学論 (D-II), **J81-D-II**, 4, pp.697-705 (1998-4)
- (5) 松山隆司・奥水大和 : 「Hough 変換とパターンマッチング」, 情報処理, **30**, 9, pp.1035-1046 (1989-9)
- (6) 奥水大和 : 「Hough 変換に関する最近の研究動向 (2)」, 信学会技術研究報告, PRU91-15, pp.25-32 (1991)
- (7) 森本正志・奥水大和 : 「Hough 変換に関する最近の研究・開発動向」, 計測自動制御学会(SICE), 第 32 回パターン計測部会資料, pp.1-10 (1995)
- (8) 奥水大和・沼田宗敏 : 「区分的 Hough 直線による高速 Hough 変換法 PLHT について」, 信学論, **J72-D-II**, 1, pp.56-65 (1989-1)
- (9) 沼田宗敏・奥水大和 : 「インクリメンタルな高速 Hough 変換 FIHT」, 信学技報, PRMU88-107, pp.88-107 (1988)
- (10) H. Kalvianinen, P.Hirvonen, L.Xu, and E.Oja : "Probabilistic and non-probabilistic Hough transforms: Overview and comparisons", *Image and Vision Computing*, Vol.13, No.4, pp.239-252 (1995-4)
- (11) L.Xu and E.Oja : "Randomized Hough transform (RHT) : Basic mechanisms, algorithms, and computational complexities", *IU*, **57**, 2, pp.131-154 (1993-2)
- (12) N. Kiriati, Y. Eldar, and A. M. Bruckstein : "A probabilistic Hough transform", *PR*, **24**, 4, pp.303-316 (1991-4)
- (13) 加藤邦人・山崎 秀・遠藤利生・村上和人・鳥生 隆・奥水大和 : 「エッジ点のランダムな投票による Hough 変換に関する考察」, 電学論 C, **117**, 1, pp.81-86 (1997-1)
- (14) 加藤邦人・遠藤利生・村上和人・鳥生 隆・奥水大和 : 「エッジ点対と選択ブロックの多重選択による高速化 Hough 変換アルゴリズム MRHT の提案」, 電学論 D, **119**, 1, pp.58-66 (1999-1)
- (15) H. Kalvianinen, P.Hirvonen, L.Xu, and E.Oja : "Comparisons of probabilistic and non-probabilistic Hough transforms", *ECCV, volume B*, pp.229-234 (1994)
- (16) H. Kalvianinen, P.Hirvonen, L.Xu, and E.Oja : "Probabilistic and non-probabilistic Hough transforms: Overview and comparisons", *Image and Vision Computing*, Vol.13, No.4, pp.239-252 (1995-4)
- (17) V. Leavers : "Which Hough transform?", *IU*, **58**, 2, pp.250-264 (1993)
- (18) A.Rosenfeld : "Picture Processing by Computer", Academic Press, New York (1969)

- (18) T. Wada and T. Matsuyama : “.....Hough transform”, *Proc. ICPR'92*, pp.272-275 (1992)
- (19) 森本正志・尺長 健・赤松 茂・末永康仁 : 「可変フィルタによる高精度 Hough 変換」, 信学論誌, **J75-D-II**, 9, pp.1548-1556 (1992-9)
- (20) H. Koshimizu and M. Numada : “On the Extensive Reconstruction of Hough Transform”, *Proc. of ICCV'90*, pp.740-743 (1990)
- (21) 加藤邦人・奥水大和 : 「評価基準にロバスト統計量を持つ Hough 変換の提案 -LMedS Hough 変換-」, 信学技報 PRMU2000-123, pp.27-32 (2000)

加 藤 邦 人 (非会員) 1971 年 2 月 18 日生。1996 年中京大学大学院情報科学研究科修士課程修了。同年, 同大学院博士課程入学。現在, 岐阜大学工学部助手。博士(情報科学)。画像処理, コンピュータビジョン, 特に Hough 変換による直線検出とその応用の研究に従事。電子情報通信学会会員。



5. カラー画像と感性情報処理

ここ数年のマシンビジョン技術において, 「カラー化」は大きなトレンドの 1 つに挙げられる。色の変化を画像としてとらえ認識や判断に利用するカラー画像処理は, 医用画像やリモートセンシングなどでは早くから成果をあげてきたが, 工業応用への導入には時間を要した。その理由はモノクロ画像処理に比べて価格面と処理コスト面での不利があるのに加えて, 色にはいわゆる色感性の問題があり, 色の定量化にさまざまな課題が付随するためと考えられる。

しかしながら最近では, 製造ラインにおいて製品のマルチカラー化など多様な色の利用が急速に進むのと相まって, 色の品質管理のニーズが増大した。また色感性の問題についても感性情報処理の分野などで, 従来の官能検査の方法に加えて学習型アルゴリズム・CG・VR 技術などもとりいれ, 人の感じ方を定量化する技術開発が進んだ。本章では色感性の定量化という観点から, 4 つの技術動向に整理・展望し, その手法と応用について解説を行う。

〈5・1〉 視覚特性の組み込み 人の視覚には, 背景によって形や大きさが違って見えたり, 色相によって弁別の感度が異なったりという特徴がある。そのため物理量と人の心理量の対応付けが難しい, すなわちカメラ信号と人の視覚特性との間に線形関係が成り立たないという問題がある。

これを解決するため, 人間の初期視覚の特性をシステムに組み込む工夫が行われるようになった。当初はカメラ信号に対してマッハ効果や対数視感度に相当する補正をかける⁽¹⁾などの処理の工夫が行われた。

またカメラ信号から取り出した種々の情報に対して, あらかじめ実験などにより求めた人の視覚特性を用いて変換を行う方法が効果をあげた。例えば CRT 画面の色むら評価において, 色むらに関係する物理量と, 人が評価する色む

ら不良グレードの間の関係を明らかにしたものがある⁽²⁾。同じコントラストの不良であっても, 色相が黄色・青色の場合は, 赤色・緑色の場合に比べてグレードが良いと評価されるなどの傾向が明らかになっている。他にも液晶表示素子 (LCD) の輝度むらの検査で, 人が感じるむらに関して, 輝度の変化率である grad 値の面内平均値および最大値のいずれかと人の評価との間に高い相関があることが確認されている⁽³⁾。

最近では, 人の初期視覚をアルゴリズムに実現しようという研究も盛んに行われており, 多重解像度画像を用いた欠陥検出や GA による群の認識をベースに欠陥の集まりを評価する例⁽⁴⁾などがある。このような処理は以前では計算コストの問題で実利用は難しいとの認識が一般的だったが, 計算機パワーの増大に伴い現在では実用可能なアルゴリズムになっている。

さらに H/W の面からシステムを人の視覚に近づける動きが成果を挙げている。従来のカラー画像処理では RGB 画像を SVC 値 (明度・彩度・色相) や L*a*b* 値 (輝度・赤緑軸・黄青軸) に変換し処理を行っていたが⁽⁵⁾, これに対して XYZ カメラ⁽⁶⁾が製品化されている。これは 12 ビットのラインセンサを用いて, 従来の RGB より人の視感特性に近づけたセンサで, XYZ 値 (分光分布をベースとする値) が直読みできる。視点の変わったところでは, 色抽出装置⁽⁷⁾はカラー画像をモノクロ画像に変換するコンパクトな前処理アダプターであり, L*a*b* と色相の 4 パラメータから計算される色差の大きさを濃淡輝度に変換するもので, 従来の濃淡画像処理がそのまま適用できる利点がある。

〈5・2〉 心理測定法の利用 濁り・光沢感・深み感といった感覚は, 単一の物理量として測定できるものでなく, 複数の物理量が関係した量 (複合感覚あるいは心理量) であることが知られている。このような感覚量を定量化し物理量と対応付けを行う手法の 1 つに心理学的測定法の利用がある。

以前より官能検査の分野でよく用いられていたのが SD 法 (複数の形容詞による段階評価) と因子分析法 (形容詞から共通的な因子を抜き出す) の組み合わせによって, 潜在的な因子をみつけるという方法である。研究例では車の内装用シボパターンに「しっとり感」が重要であることを示した例⁽⁷⁾や, 真珠の品質には「深み感」「輝き感」「きめ感」が関係していることを明らかにした例⁽⁸⁾など, 多くの事例がある。この方法は複合感覚をモデル化する手法として古くから体系化が進められてきた。ただし線形モデルを仮定しており, 一般に感覚・感性にみられる非線形性を表現するには, もっと柔軟な方法が望まれていた。

最近の興味深い試みとしては, 小林らが提案する帯関数型一対比較法 (BMPC 法) で, 人の判断を帯関数 (幅を持った単調関数) で表すものである。帯の幅によって人の曖昧さを表現し, また自由な単調関数で感覚の非線形性を表している。さらに帯幅を利用して判断のばらつきや分解能という評価指標を定義している。これをパネルの識別能力の

分析などにも応用できることが示されている⁽⁸⁾。例えば官能検査では、検査員は素人と違って十分に高い検査能力が要求される。したがって、検査員の適性をこのような評価指標が調べることができる。

〈5・3〉 ビジュアルライゼーション技術の利用 これまで述べてきたいわば解析的な手法の逆の方法として、合成的手法（シンセシス）技術がある。種々の検査サンプルを物理モデルに則ってCGなどで合成してディスプレイに表示し、これを検査員に評価してもらい、検査基準やエキスパティーズを抽出する。あるいはメタリック塗装など複雑な光学現象や、照明など検査環境の光学現象のシミュレーションを行って最適な条件を求めるなどのいわゆるビジュアルライゼーションまたは物理ベースCGと呼ばれる技術である。

先行研究では、自動車塗装のカラーシミュレータ⁽⁹⁾では、ディスプレイ上に様々な塗装の色の見えをCGで表示し、塗装深み感という心理量が、色相がY（茶色）の時に最も大きく、また明度が低い時にさらに深み感が大きくなることなどを明らかにした。またキズの見え方を検証したり⁽¹⁰⁾、検査サンプルの映像を合成したりする⁽¹¹⁾などの事例がある。

また塗装部品の色の見えを評価するため、質感を持つ実物の物体にCRTディスプレイとハーフミラーを用いて透過的に色をかぶせ、あたかも物体表面が着色されたかのように仮想的に見せるといったMRの応用研究もある⁽¹²⁾。こうしたシミュレータの利点は、実物の塗装を作らなくていいためコスト低減が図れるだけでなく、製造技術にとらわれない新しい塗装を模索できることが挙げられる。

こうした技術の一部は、エンドユーザ向けのサービスとして実用されている。デジタルカメラで家の外観を撮影し、リフォームのシミュレーションを行う⁽¹³⁾といったカラーシミュレータが、インテリア・エクステリア・ファッション関連企業から提供・販売されている。中でもリアルタイムメークアップシミュレーション⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾は、リアルタイム動画像処理によって顔画像から各部位を認識し、CGによって自動的にメークアップを行うシミュレータでありマシンビジョン技術の結集とも言える。今後も製品の品質やユーザの感性といった主観的評価が重視されるにつれて、こうした技術が進展すると思われる。

〈5・4〉 マルチスペクトルイメージング ハードウェアの高速化・低価格化により、最近では分光スペクトルそのものの計測・処理が現場で利用できるようになった⁽¹⁸⁾。スペクトルを画像として得るスペクトルカメラの開発も活発である。複数のフィルタを通ったスペクトルバンド画像を、CCD面を分割した部分エリアに同時に結像させるタイプ⁽¹⁷⁾などがすでに製品化されている。プリズムと回折格子の組み合わせでスペクトル画像（空間軸-波長軸）を得るタイプ⁽¹⁸⁾では5nmの空間分解能を実現している。

これに伴いいわゆるマルチスペクトルイメージングの分野が急速に立ち上がっている。例えば数枚のスペクトルバ

ンド画像から分光スペクトルを推定する方法などが数多く提案されている。重回帰分析を用いる方法⁽¹⁹⁾、ニューラルネットワークを用いる方法、独立成分分析を用いた方法⁽²⁰⁾などがある。これによって少ない枚数の画像からでも元のスペクトルデータが復元できるため、安価なH/Wで高精度の解析・分析に応用することができる。研究例に、デジタルカメラを用いて照明を3色に変化させた顔画像を取り、そこからメラニン・ヘモグロビンなど肌の色素成分を抽出し、美白剤の効果を調べたものなどがある。

こうしたマルチスペクトルイメージングの研究分野はここ数年で飛躍的に進展しており、今後も世の中の色に対するニーズの拡大にあわせてますます有用な成果が生み出されると期待される。

文 献

- (1) 平岡規之・肥塚哲男・中島雅人・稲垣雄史：「画像品質の官能検査」，第3回産業における画像センシング技術シンポジウム講演論文集，pp.119-124 (1988)
- (2) 浅野敏郎・川目啓介・望月 淳・福原信雄：「カラーCRT ディスプレイの白色均一性定量評価」，信学論 D-II, **J73-D-II**, 6, pp.830-839 (1990-6)
- (3) 棚澤 信・鈴木俊彦・下藪裕明：「液晶表示素子の表示むら評価技術の開発」，精密工学会誌, **67**, 1, pp.152-156 (2000-1)
- (4) 斉藤文彦：「近接と連続性に基づくGAを用いた画像内不連続曲線の抽出」，第4回画像センシングシンポジウム講演論文集，pp.209-213 (1998)
- (5) 福田和彦：「食品検査における画像処理」，非破壊検査, **48**, 11, pp.734-738 (1999-11)
- (6) http://www.kurabo.co.jp/el/af/afita_01.html
- (7) http://www.kurabo.co.jp/el/ka/ka50_01.html
- (8) 鳥海不二夫・高山潤也・大山真司・小林 彬：「帯関数を用いたパネルの比較判別能力の分析」，SICE論文集, **39**, No.8 (2003)
- (9) 川澄未来子・内山祐司・大山真司・小林 彬：「カラーシミュレータによる塗装深み感の評価と設計への応用」，映像情報メディア学会誌, **52**, 4, pp.528-534 (1998-4)
- (10) 高本健治・伊藤正弥・福井厚司・高田和政・西井完治：「浸み出し光を用いたセラミックのクラック検出」，SICE第12回センシングフォーラム資料，pp.85-90 (1995)
- (11) 長田典子・宇佐美照夫・眞鍋佳嗣・井上征士：「品質評価のためのビジュアルシミュレーションによる真珠の表現」，信学論(D-II), **J80-D-II**, 1, pp.206-214 (1997-1)
- (12) 川澄未来子・鈴木和彦・山川みゆき：「物体表面色に対する人間の視感度特性の測定手法」，第5回画像センシングシンポジウム講演論文集，pp.275-276 (1999)
- (13) <http://www.kokoroiki.com/siki.html>
- (14) 古川貴雄・坂口嘉之・塚田 章：「リアルタイムメークアップシミュレータ」，第19回センシングフォーラム (2002)
- (15) http://www.dressingsim.com/new/product/make_up/index.html
- (16) N. Nagata, et al. : "Color Inspection by Spectral Imaging for Coated Surface", *Proc. FCI2002*, pp.150-155 (2002)
- (17) Specim, <http://www.specim.fi/>
- (18) Multi-spectral cameras: <http://www.redlake.com/spectral/index.html>
- (19) 大野隼人・梶岡英之・藤田尊圭・浅野敏郎・玉野和保：「マルチバンド画像を用いた分光特性推定とその応用」，第14回外観検査の自動化ワークショップ，pp.67-72 (2002)
- (20) 清水秀人・植月啓次・津村徳道・小島伸俊・三宅洋一：「独立成分分析を用いた肌の色素成分分離計測法による美白剤効果の測定」，*Digital Biocolor Journal*, No.2, pp.4.1-4.6 (2002)

長 田 典 子



(正員) 1983 年京都大学理学部数学系卒業。同年三菱電機(株)入社。産業システム研究所などにおいて、色彩情報処理、感性情報処理の計測システムへの応用に関する研究に従事。1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。2003 年より関西学院大学理工学部情報科学科助教授。工学博士。1993 年電気学会論文発表賞, 1994 年日本映像処理研究会特別賞受賞。情報処理学会, 電子情報通信学会, IEEE 各会員。

6. ユビキタス視覚

〈6・1〉 知的なユビキタス視覚を目指して ユビキタス視覚とは、コンピュータのさらなる高速化と低価格化、ネットワークの大容量化が進む IT 分野の進展過程において、特にその計算能力とネットワーク能力を利用した多地点カメラによる画像認識技術である。近年、実環境世界での安全管理の立場や、ユビキタス情報化社会でのヒューマンインタフェース等、いろいろな場面においてユビキタス視覚を用いたビデオサーベイランス技術やヒューマンインタフェース技術の進展に期待がかかっている。これらの基礎技術の発祥は決して新しくはないが、特に高い計算能力と巨大な記憶容量が必要とされるため、現実シーンで、かつリアルタイムに実働させることは従来極めて困難であった。しかし現在、ようやく現実シーン中で利用できる計算環境が整いつつある。

単にカメラを多数配置し、その映像をモニタ上に表示あるいはストレージに蓄積し、人間が監視するシステムはすでに実用化が進んでいる。また、防犯を目的として街角に多数の CCD カメラが設置され始めている。今後の技術的な発展は、特に人の存在や、その顔の自動認識、意図した(あるいは無意識の)ジェスチャのリアルタイム認識技術、多数の人間の状態や行動を正確に自動把握する技術、及び実際に利用する場に適応できるような適応型の視覚技術である。これらが実現されて初めて、単に多数カメラを接続したシステムを超えた知的なユビキタス視覚環境が現実のものとなるであろう。

〈6・2〉 ユビキタスステレオビジョンの発想 しかし、多様で動的に変化する照明条件、多種多様な色彩の対象物という状況で人間の状態を把握するためには、単眼 CCD による手法では本質的に無理がある。そこで、広い範囲において 3 次元情報をリアルタイムで獲得し、それを利用することを考える必要がある。そのための技術として、ユビキタスな環境(多地点)、また大容量ネットワーク(ギガビット)上で利用されることを前提とし、1 台 1 台独立したステレオカメラ(両眼立体視による 3 次元奥行きセンサ)を高速ネットワークで複数台接続し、広いエリアでの 3 次元情報を統合し、そこに写ったものを認識するシステム「ユビキタスステレオビジョン」^{(1)~(4)}が提案されている。本章の後半でその応用例を紹介する。

分散、協調、能動をキーとした要素技術を中心とする視覚システムに関する研究も多数存在する⁽⁵⁾。特にカメラを能動的に制御する方式は、実際に人が自然な速度で動く場合への応答性に難しさがあると思われるが、知的な首振りカメラの協調動作という点で非常に興味深い。

また、分散型の視覚を用いた 3 次元の再構成への取り組みでは、多数のカメラからシーンの 3 次元構造を再構成する多視点動画画像処理の研究^{(6)~(8)}が盛んである。これら研究の目的の多くは、多視点画像を利用して、対象シーンの状況をそこにいるかの如く理解できるような臨場感コンテンツ生成へと向かっており、新しいタイプの映像メディアへの期待が高まっている。ただし、特定の対象物の情報をできる限り多面的に得るために多数のカメラを利用するという発想であり、ユビキタス視覚の概念として重要な、多数のカメラにより広い範囲の 3 次元情報を得るという考え方は少ない。

ステレオカメラから得られた距離情報を単純に人の状態把握に使う技術も数多く研究されている。文献⁽⁹⁾では、室内の人の位置を把握するためにステレオカメラを室内環境に合わせて複数配置し、人の位置を認識している。この研究ではビジョンセンサは位置情報取得のためのツールとしての位置づけが強く、他のセンサ(例えばソファの接触センサ)等と併用されている。

〈6・3〉 ユビキタスステレオビジョンとその応用 ユビキタスステレオビジョンとは、1 台 1 台独立したステレオカメラ(両眼立体視による 3 次元奥行きセンサ)を高速ネットワークで複数台接続し、広いエリアでの 3 次元情報を捉え(図 6.1, 図 6.2)、そこに写ったものを認識するシステムである。3 次元情報をきれいに撮影するのではなく、認識した情報を用いて、人間の生活の利便性や安全性に役に立てることが目標とされている。

2 次元映像では実現できなかった機能を実現・実証することにより、ユビキタスステレオビジョンが従来の CCD カメラに置き換わって室内外に多数設置されるようになると期待されている。応用としては、



図 6.1 実験室に設置されたユビキタスステレオビジョン(ネットワーク接続された 5 台のステレオカメラを利用)

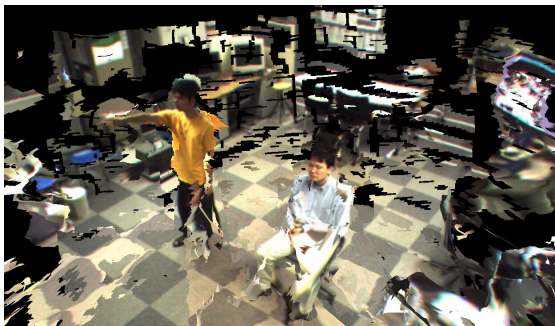


図 6.2 ユビキタスステレオビジョンによる 3 次元再構成（ネットワークで接続された数台のステレオカメラからの 3 次元映像を使って 12 フレーム/秒で統合された室内全体の 3 次元映像）



図 6.3 個人識別機能を有するヒューマンインタフェース（人間の立体的な形によって体の向きや腕さし動作を認識。同時に、個々の人物毎に最も正面に近い顔画像が自動的に選ばれ、それを使って顔認識が行われる。）

- (a) 利便を追求した「位置フリー・非装着・非接触なヒューマンインタフェース」
- (b) 安心を追求した「高度ビデオサーベイランス」の両面が考えられている。

(a) 位置フリー・非装着・非接触なヒューマンインタフェース

従来、動作等を用いたヒューマンインタフェース研究は、一人の人物による特定の場所でのインタフェースが中心であった。それに対し、ユビキタスステレオビジョンでは、ネットワーク接続されたステレオカメラを用いた人物追跡、動的顔認識、動作認識を行うことによってこの問題を解決し、広いエリアでの複数人物に対する位置フリー・非装着・非接触なヒューマンインタフェースを実現することができる。

例えば部屋の中を自由に歩き回る複数人物の動きをユビキタスステレオビジョンでリアルタイムに追跡し、顔を認識し、個人を識別した上で室内での位置フリーな腕さし動作を認識し、室内の家電製品をコントロールすることができる。つまり、誰がどこで何を腕さしているかをコンピュ



図 6.4 駅プラットフォーム上の 3 次元再構成（5 台のステレオカメラで捉えた 3 次元映像のある瞬間の画面。人間の姿が立体的な形で得られているため、位置・身長・動く方向を自動的に算出可能。）

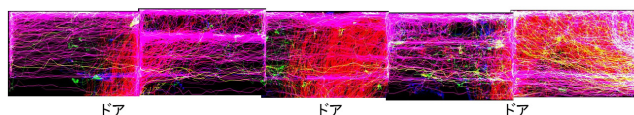


図 6.5 乗降客の動線（電車 10 本分の乗降客の動線を累積して動きの向きで色分けした図。車両ドアから降りた人の動き、右階段付近での混雑がよく分かる。）

ータが理解できることになる（図 6.3）。

何も持たず、何もさわらずに、寝ながらも、その人に合わせて機器をコントロールできるので、お年寄りや、体の不自由な方、衛生条件の厳しい設備でのインタフェース等への応用が期待される。

(b) 高度ビデオサーベイランス

複数人物の動きをリアルタイムに追跡する機能を利用した知的な映像監視システムであり、人がモニタを見て監視するのではなく、コンピュータが自動的に監視することが目指されている。新大久保駅で起こったような転落事故は最近も多発している。また、踏切で歩行者や自転車巻き込まれる事故なども多い。広いエリアを抜けなくカバーすることのできる高度なビデオサーベイランスシステムへの期待は大きい。ユビキタスステレオビジョンでは、広いエリアで人間を立体的に見守ることにより、人間の安全・安心のために役立つことができると考えられる。

3 次元情報を使うので、服装、照明、日照、影、背景、混雑など、通常の CCD カメラでは、難しい状況を克服し、安定に人間を抽出・追跡することが可能となる。また、多数のステレオセンサを使うので、死角無く広い範囲をカバーすることができる。さらに、落ちる前の危険な状態を検知することも可能となる。

実際に駅プラットフォーム上の始発から終電までの動線の解析に成功しており（図 6.4、図 6.5）、危険な場所にいる人間に警報を発することも技術的に可能である。最近の痛ましい事件等からも、監視カメラの重要性はさらに増すであろう。ユビキタスステレオビジョンは、単に、後から解析して犯人を割り出すだけでなく、日頃から人間を見守る高度ビデオサーベイランスシステムの基盤技術として期待されている。

- (1) 依田育士・坂上勝彦：「ユビキタスステレオビジョンによる実時間実環境ヒューマンセンシング」，第9回画像センシングシンポジウム予稿集，pp.397-402 (2003)
- (2) 佐藤洋平・依田育士・坂上勝彦：「実環境における自由姿勢を考慮した顔認識手法の提案」，第9回画像センシングシンポジウム予稿集，pp.89-94 (2003)
- (3) 山本 雄・依田育士・坂上 勝彦：「ユビキタスステレオビジョンによる腕さしジェスチャインタフェース」，第9回画像センシングシンポジウム予稿集，pp.391-396 (2003)
- (4) 細谷大輔・依田育士・坂上勝彦：「ユビキタスステレオビジョンによる駅ホーム端安全管理」，第9回画像センシングシンポジウム予稿集，pp.385-390 (2003)
- (5) 松山隆司：「分散協調視覚による動的3次元理解」，日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究成果報告書 (2001)
- (6) T. Kanade, et al. : "Virtualized Reality: Constructing Virtual Worlds from Real Scenes", *IEEE Multimedia*, Vol.4, No.1, pp.34-47 (1997)
- (7) 北原 格ほか：「大規模空間における多視点映像の撮影と自由視点映像生成」，映像情報メディア学誌，56, 8, pp.1328-1333 (2002)
- (8) W. Matusik, C. Buehler, R. Raskar, S. J. Gortler, and L. McMillan : "Image-Based Visual Hulls", *Proc. of SIGGRAPH 2000* (2000)
- (9) J. Krumm, et al. : "Multi-Camera Multi-Person Tracking for EasyLiving", *International Workshop on Visual Surveillance*, pp.3-10 (2000)

坂 上 勝 彦



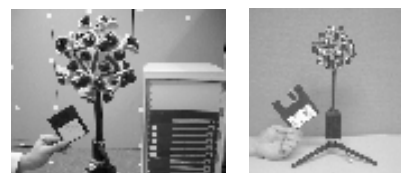
(正員) 1976年東大・工・電子卒。1981年同大大学院博士課程了。同年電子技術総合研究所入所。2001年4月より，組織改編により独立行政法人産業技術総合研究所知能システム研究部門総括研究員。画像処理，コンピュータビジョンなどの研究に従事。筑波大学連携大学院教授（併任）。工博。1979年度電子通信学会学術奨励賞。1985年度情報処理学会論文賞各受賞。

7. 新しいカメラと波及効果

〈7・1〉 まえがき 従来から当然の制約条件と考えられてきた「カメラシステムにおける視野の制限」を完全に排した状態からの発想を可能にすること，これが Stereo Omni-directional System (SOS) シリーズ開発に着手する動機であった。本稿では，開発開始から現在に至るまでに得られた知見と，その新しいコンセプトが生み出す可能性について述べる。

〈7・2〉 新しいカメラシステムの検討 画像から実環境中の情報を推定するという逆問題を（しかもより少ない情報に基づいて）解くことは，学問的な見地に立てば非常に興味深いテーマであると言える。しかしながら一方で，マシンビジョンの実応用を検討する場合には旧来のカメラシステムの概念に捕らわれる必要はなく，カメラシステムそのものから見直すというアプローチも検討することが出来る。

このような観点から我々は SOS シリーズを開発し，カメラシステムが可能な限り多くの情報を処理系に提供するというモデルを原点に，マシンビジョン技術分野における新しい発想の創生を狙った。また収集する情報は，単に量的



(a) SOS (b) mini SOS

図 7.1 SOS シリーズの外観

Fig. 7.1. The SOS series.

な向上を図るだけでなく，完全に死角のない球状の視野を実現し，センサ自体の回転成分を物理的に吸収可能とすることなどを最優先事項として設計を行った。

〈7・3〉 SOS シリーズ 図 7.1 に SOS⁽¹⁾および miniSOS⁽²⁾の外観をそれぞれ示した。SOS は正 20 面体，miniSOS は正 12 面体の各面上に 3 眼ステレオユニットが配置された構造により，完全に死角のない全方向のカラー画像と距離情報をリアルタイムに取得する。このようなシステムを検討する場合，例えば球面上に多数のカメラを配置し，近接するカメラがステレオ対を構成するような構造も検討できるが，SOS シリーズでは各カメラの光軸が平行，かつセンタカメラを中心としてベースラインが直交するように配置された 3 眼ステレオユニットを多面体上に配置する構造をとることにより，各ステレオ対がそれぞれ水平・垂直のエピポーラ拘束を満たし，対応点探索のコストを低減させている。また，3 眼ユニットをアームにマウントし，隣りあうステレオユニットがなす基準平面が互いに交差するように配置することで，ベースラインと面のサイズを独立させる手法を考案し⁽¹⁾，ベースラインを十分に確保しながらもシステムのダウンサイジングを行うことを可能にした。各ステレオユニットのキャリブレーションは，従来手法によって行うことが出来るが，システム全体のキャリブレーションについては，並進パラメータを設計パラメータに固定した上で，その他のパラメータを同時に最適化する方法⁽³⁾を提案し用いた。

〈7・4〉 SOS シリーズの特長と応用展開 現在我々は SOS シリーズの応用展開として，

- (1)新しいコンテンツを生み出すための撮像機器
- (2)知的サーベイランスシステム用のセンサ
- (3)移動体ビジョンセンサ

という 3 つの役割を軸に検討を進めている。

紙面の都合で詳しくは文献に譲るが，まず(1)については，岐阜県生産情報技術研究所で開発された 6 面没入型立体映像システム (COSMOS) に 3 次元情報も含めた映像をリアルタイムに配信する試みを行っている。また，インターネット経由でソフトピアジャパンの映像をリアルタイムに北京に配信するデモを行った⁽⁴⁾。

(2)についてはパンチルトカメラなどを利用して監視対象を追跡するシステムに対し，カメラを固定したまま全方向の追跡が可能であるため，例えば固定背景を用いたシンプルな手法により，全方向のイベント検出・追跡が可能にな



(a) Original image



(b) Slant vecovered image

図 7.2 センサ回転成分の補正

Fig. 7.2. Slant recovery.

る点で優位性がある。またリアルタイムに得られる距離情報が利用可能であるため、人物の動線やジェスチャの解析も容易である⁽⁵⁾。

現在特に注力しているのが(3)の移動体ビジョンセンサとしての役割の検討である。SOS は完全に球状の視野を持つため、撮像する方向に指向性を持たず、センサ自身に回転が加わった場合においても、取得される情報が変化しない「無指向性画像センサ」と位置付けることが出来る。

図 7.2 は、この性質を活用し、ジャイロセンサとグローバル座標系における垂直軸を全方向画像中における垂直エッジの方向の投票によって推定する方法⁽⁶⁾を併用することにより、リアルタイムにセンサの傾きを求め、補正している例である。(b)の補正後の映像は、(a)の右上に示したようにセンサに任意の回転を与えても常に水平を保つ。このような性質はヒューマノイドやウェアラブル機器などにおいては特に重要で、センサの動揺により視野に入る情報が激しく変化してしまう従来の指向性カメラシステムで発生する様々な問題を、撮像の段階で解決することが出来る。また積極的にセンサに傾きを与えるようなケースにも有効で、位置感覚の把握が難しいとされる閉所への挿入検査への応用や、災害地復旧活動などで遠隔操作されるパワーショベルのアームにマウントし、広範囲かつ傾き補正した映像を操縦者に提供するなど幅広い応用の創出が検討できる。

〈7・5〉 むすび ビジョンシステムをカメラのコンセプトの段階から再考し、従来の概念に捕らわれない新しい発想を生み出すための試みについて述べた。マシンビジョンの実利用促進を検討するための1つのヒントとなれば幸いである。

文 献

- (1) K.Yamamoto, H.Tanahashi, S.Kuwashima, and Y.Niwa: "Sensing of Real Environment by Stereo Ominidirectional System(SOS)", *T.IEE Japan*, Vol.121-C, No.5, pp.876-881 (2001-5) (in Japanese)

山本和彦・棚橋英樹・桑島茂純・丹羽義典:「実環境センシングのための全方向ステレオシステム(SOS)」, 電学論誌 C, **121**, 5, pp.876-881 (2001-5)

- (2) Y.Satoh, K.Yamamoto, S.Kuwashima, H.Tanahashi, C.Wang, and Y.Niwa: "Development of Mobile-oriented Stereo Omni-directional System (miniSOS)", *Proc. SSI03*, pp.311-316 (2003-6) (in Japanese)
佐藤雄隆・山本和彦・桑島茂純・棚橋英樹・王 彩華・丹羽義典:「移動体ビジョンを指向した小型全方向ステレオシステム (miniSOS) の開発」, 第9回画像センシングシンポジウム(SSII03)講演論文集, pp.311-316 (2003-6)
- (3) H.Tanahashi, J.Satoh, C.Wang, Y.Niwa, and K. Yamamoto: "A Calibration Method of Stereo Omnidirectional System (SOS)", *ITE Trans.*, Vol.56, No.4, pp.603-610 (2002-4) (in Japanese)
棚橋英樹・佐藤 淳・王 彩華・丹羽義典・山本和彦:「全方向ステレオシステム(SOS)のキャリブレーション手法」, 映像情報メディア学誌, **56**, 4, pp.603-610 (2002-4)
- (4) H.Tanahashi, C.Wang, Y.Niwa, and K.Yamamoto: "Live Events Accessing for Multi Users with Free Viewpoints Using Stereo Omni-Directional System", *Proc. IEEE Pacific-Rim Conference on Myltimeidia (PCM2001)*, pp.166-173 (2001-10)
- (5) H.Watanabe, H.Hongo, H.Tanahashi, Y.Niwa, M.Yasumoto, and K.Yamamoto: "Detection of a Pointing Target in a Real Environment", *Proc. 7th Int. Conf. on Control, Automation, Robotics And Vision (ICARCV'02)*, pp.286-291 (2002-12)
- (6) C.Wang, H.Tanahashi, Y.Satoh, H.Hirayu, Y.Niwa, and K.Yamamoto: "Pose Estimation for Active Vision Using Edge Directions of Omni-directional Images", *Proc. CVIM136-II*, pp.75-82 (2003-1) (in Japanese)
王 彩華・棚橋英樹・佐藤雄隆・平湯秀和・丹羽義典・山本和彦:「全方向画像のエッジ方向を用いたセンサの姿勢推定」, 情処研報, CVIM136-11, pp.75-82 (2003-1)

山 本 和 彦



(正員) 1944年6月20日生。1971年、東京電大大学院修士課程了。同年電子技術総合研究所入所。1979年～1980年、米国メリーランド大学にて並列分散型画像理解の研究。1986年～1994年、電子技術総合研究所知能情報部画像研究室室長。現在、岐阜大学工学部応用情報学科教授。博士(工学)。人工知能、パターン認識、特に図形の柔軟な対応付けの研究に従事。

8. むすび

本論文では、カメラや汎用プロセッサの革新的な機能向上に後押しされて拡大しているマシンビジョンを背景に、特に注目すべき画像処理アルゴリズムの技術テーマを取り上げて、その意義や動向を概説した。マシンビジョンに係わる諸兄の参考になれば幸いである。

謝 辞

本解説は、電気学会マシンビジョン調査専門委員会における議論に多くを支えられている。記して感謝申し上げる。

〔参考〕 読みやすさを考えて、各章ごとに分けて記載した。