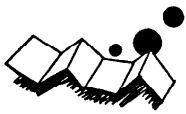


解説



米国における画像理解研究†

大田 友一** 金出 武雄***

1. ま え が き

本年6月にワシントンで開かれた Computer Vision and Pattern Recognition 会議(昨年までの Pattern Recognition and Image Processing 会議を改称)は350名の参加者を集めた。比較的ローカルな、しかも限られた専門分野に関する会議であることを考えれば、米国でのこの分野の研究者の層の厚さを端的に示すものといえよう。

米国におけるコンピュータビジョンの研究は大学を中心として行われているが、それ以外では、SRI (SRI International) や JPL (Jet Propulsion Laboratory) などの非営利研究機関、NBS (National Bureau of Standards) や NIH (National Institute of Health) などの政府機関の研究所在所である。研究費の主なスポンサは、やはり政府機関である。我が国の文部省科学研究費にあたるが、NSF (National Science Foundation) がコンピュータビジョン関係の研究に150万ドル/年程度提供している。また、NBS, NIH, NASA なども、それぞれ50~100万ドル程度をこの分野の研究費として使用している。しかし、最も主要なものは DARPA (Defence Advanced Research Project Agency) の画像理解プロジェクト (Image Understanding Research Program) である。DARPA は、このプロジェクトに250万ドル/年程度提供していると見積られている¹⁾。

2. DARPA 画像理解プロジェクト

2.1 プロジェクトの経緯

DARPA は画像理解プロジェクトを1975年に開始した。前身は画像処理プロジェクトであり、画像の強

調、復元、帯域圧縮などの研究を支援していた。これに対して、画像理解プロジェクトでは、コンピュータビジョン研究のうちでも、特に、画像からもとの3次元シーンと結びついた情報を引き出す技術の研究に重点を置いている。

このプロジェクトの前のプログラム責任者であった Druffel のレポート²⁾によれば、画像理解プロジェクトの目標は、先験知識を応用して、シーン中の物体間の関係を理解するための研究をすすめることにある。ここで「理解」とは、一口で言えば、写真解析の専門家が行うのと同じレベルの理解である。この目標に向けて、画像理解プロジェクトでは、画像理解を画像処理の延長としてではなく、画像から情報を引き出すという目標に寄与しうる様々の分野を結びつける触媒的なものとして捉えている。図-1は、この考え方を示したものである。外側の円は、何らかのかたちで画像に関係のある分野を示す。内側の円で示されるように、画像理解プロジェクトは、これらの分野を少しずつ包含するべく構成されている。

プロジェクトは当初5年間の計画で始められたが、画像理解研究の重要性に鑑み、期間を延長されて現在に至っている。その間、半年から1年に1度の割で研究会が開かれ、本年6月の研究会で14回を数えた。1977年4月の第5回研究会からは論文集も出版されている。プロジェクトは今後も当面は継続され、研究

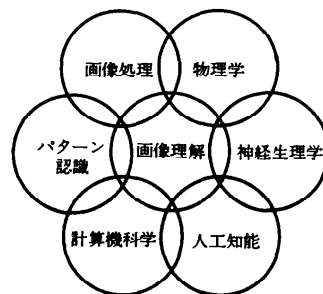


図-1 画像理解プロジェクトの構成

† Image Understanding Research in the United States by Yuichi OHTA (Institute of Information Sciences and Electronics University of Tsukuba) and Takeo KANADE (Computer Science Department, Carnegie-Mellon University).

** 筑波大学電子情報工学科

*** カーネギーメロン大学計算機科学科

会も年に1回程度開かれていく予定である。

2.2 プロジェクトの組織

1983年現在、プロジェクトに参加している研究機関を表-1に示す。

6つの大学とSRIが研究の中心であるが、大学との共同研究というかたちで企業の研究所も参加している。大学と企業の役割分担は、大ざっぱにいうと、大学がアルゴリズムを研究し、企業がそのハードウェア化、VLSI化を行うというものであった。表には各研究機関における代表的な研究内容を示すキーワードも記入した。プロジェクト開始からすでに8年間を経過しており、多様にわたる研究を網羅することはできないので、キーワードは著者の主観で選択した。

プロジェクト開始から5年間を経過した時点で、研究成果をデモンストレーションするためのテストベッドが計画された。スポンサはDARPAとDMA(Defence Mapping Agency)が共同であり、テーマは地図作成の自動化と航空写真等の写真解析に設定された。このDARPA/DMA画像理解テストベッドはSRI内に設置され、各研究機関で開発されたソフトウェアを持ちよることにより構成されている。

テストベッドのハードウェア構成は図-2のようで、各研究機関のハードウェアの最小公倍数的なものである³⁾。プログラム言語は、UNIX-C、FRANZLISPそ

表-1 DARPA 画像理解プロジェクト

研究機関*	主な研究テーマ	テストベッドへの寄与
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	zero crossing, shape from shading, photometric stereo, human stereo, optical flow, motion, interpolation	Marr-Poggio-Grimson stereo system
Carnegie-Mellon University (CMU)	ARGOS IU system, shape from texture, 3D shape recovery, 3D mosaic, stereo, MAPS, shadow geometry, theory of generalized cylinder	CMU graphics/image package, PHOENIX segmentation package, stereo/correlation system (Moravec)
Stanford University	ACRONYM 3D model-based vision system, stereo	ACRONYM system
University of Southern California (USC)	linear feature extraction, texture analysis, symbolic matching	Nevatia-Babu line finder, Laws texture analysis
University of Maryland	relaxation, quad tree, FLIR image processing	relaxation package
University of Rochester	generalized Hough transform, parameter networks	Hough transform package
SRI International	Road Expert	Road Expert, RANSAC image-to-database correspondence package
Huges Research Laboratory	CCD smart sensor, RADIUS processor, port monitoring system	
Lockheed Palo Alto Research Laboratory	passive navigation system, bootstrap stereo	
Westinghouse Electric Corporation	CCD histogram sortor, FLIR image processing, mobile robot	

* (1983年より, Columbia大, Massachusetts大 が加わっている.)

れに MAINSAIL が使われている。各研究機関のテストベッドへの寄与は表-1に示した。このテストベッドは現在も維持されており、米政府や大学の研究機関の要請に応じて、システムのコピーを移植することも行われている。

一方、画像理解プロジェクトの成果の実用化研究も新たに開始されており、ヒューズ社がスタンフォード大学で開発されたACRONYM³⁰⁾をもとに、港湾監視システムの研究をすすめている⁴⁾。

3. 研究動向

画像理解は難しい問題であり、現在に至るまで、プロジェクトの初期の目標にかかげた意味での「理解」が十分実現できていないことは言うまでもない。しかし、DARPA 画像理解プロジェクトにおける研究は、画像理解の理論的側面の追求から、応用システムの構成、ハードウェア化に至るまで多岐にわたっている。特に、研究組織の中心が大学であるため、応用システム指向の研究よりも、画像から情報を引き出すという画像理解の基本に正面から取り組む研究が多いのは注目される。

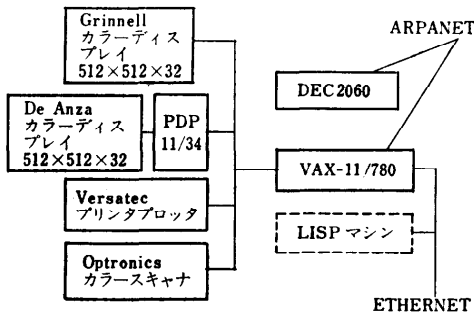


図-2 DARPA/DMA 画像理解テストベッドのハードウェア構成

3.1 画像理解の理論

画像理解に「理論」と称するものを誕生させたのは、DARPA 画像理解プロジェクトの大きな功績であろう。それまで画像に関する理論としては、フーリエ変換や、2次元画像の画素を処理する際の幾何学的扱いや計算量など、画像処理の理論しかなかった。しかし、画像理解の理論とは、画像から3次元情報を再構成するための理論である。

MIT の Marr は、コンピュータビジョンの過程には図-3に示した3つの表現が必要だとした。primal sketch は画像に記録されている明るさの変化の情報を明確にした表現である。2¹/₂D sketch は対象物体の面の向き表現である。3D model は対象物体の形状の表現である。これらの表現を求めるための処理を、その出力の抽象化の度合いに応じて、順に、低レベル、中間レベル、高レベル処理と呼ぶことにすれば、現在、画像理解の理論と呼ばれているのは、主にこの中間レベル処理のためのものである。

MIT の Horn は、明暗から面の向きを求める shape from shading と呼ばれる方法を開発した⁶⁾。さらに、異なった入射光により同じシーンを撮影した2枚以上の画像の明暗情報を利用する photometric stereo 法も開発された⁹⁾。最近、MIT の Ikeuchi らは、積み重なった物体を1つずつ積み上げるロボットの視覚として、この技術を応用している⁷⁾。

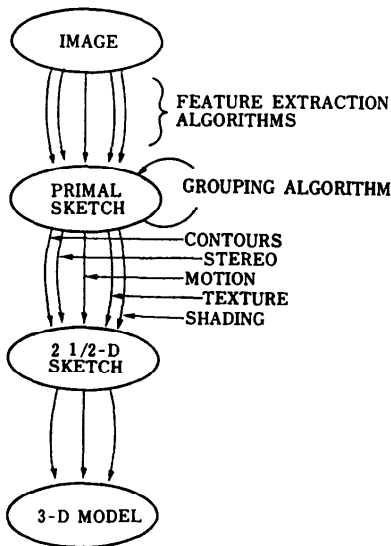


図-3 コンピュータビジョンの過程

CMU の Kender は、テクスチャから面の向きを求める shape from texture と呼ぶ方法を提案した⁹⁾。CMU の Kanade は、skewed symmetry なる概念を提案し、2次元画像上の形状が3次元の形状をいかに拘束しうるかを幾何学的に明らかにした⁹⁾。CMU の Shafer は影の形の情報が3次元の面の向きに与える拘束を求めた¹⁰⁾。

センサと物体の位置関係が相対的に変化する条件下で撮影された一連の画像上で、物体の各部分の移動を示すベクトル群を optical flow と呼ぶ。MIT の Horn は、物体自身の明るさは時間的に変化しないという仮定の下に optical flow を求める方法を開発した¹¹⁾。CMU の Cornelius は、物体の明るさの変化を条件つきで許す仮定の下に optical flow を求める方法を提案し、X線写真から心臓の動きを求める問題に応用した¹²⁾。物体は固定と考え、optical flow からセンサの動きを求めることは航空機などの passive navigation (3.4節参照)に有用で、MITなどで研究されている¹³⁾。

画像から primal sketch を得るための低レベル処理の研究も行われている。MIT の Hildreth は、画像を $I(x, y)$ とすると、 $\nabla^2 G(x, y) * I(x, y)$ の零交差 (zero-crossing) を primal sketch として用いている。G は2次元ガウス分布、 ∇^2 はラプラシアンである。 $\nabla^2 G$ は一種のバンドパスフィルタであり、Gの広がりを変化させることにより、異なる零交差を得ることができる¹⁴⁾。

3D モデルの表現法としては一般化円筒 (generalized cylinder) が一般的であるが、その性質について理論的な検討はされていなかった。CMU の Shafer は、一般化円筒の1クラスとして、軸は直線、断面は形固定・大きさ可変という straight homogeneous generalized cylinder を定義し、その性質について検討している¹⁵⁾。

3.2 ステレオ

ステレオは画像から3次元情報を抽出する手段として有力で、古くから研究されている。ステレオ画像の解析は、①撮像 ②カメラモデルの決定 ③特徴抽出 ④対応探索 ⑤距離計算 ⑥内挿の6つの問題に分けることができる¹⁶⁾。現在、研究の中心課題となっているのは対応探索である。対応法は、対応の対象として何を用いるかにより、①エリア対応 ②頂点/interest 点対応 ③エッジ対応に分けることができる。

エリア対応は最も古くから知られている方法で、各

画素を中心とする一定近傍を対応単位とし、相関法により対応点を求める手法である。隣接する画素では距離の変化は小さいという連続性の仮定 (continuity assumption) に強く依存する。山間部の航空写真のように、テクスチャに豊んだゆるやかな起伏の解析には有効である。しかし、対象が人工物体の場合にはテクスチャのない部分が多く、不連続な距離変化も多いので、うまく働かない。

スタンフォード大の Moravec は、interest 演算子により、画像上で明るさが局所最大または最小になる部分の特徴点として抽出し、ステレオ対応に用いた¹⁷⁾。CMU の Herman らは、航空写真中の建物の頂点を特徴点として抽出し、ステレオ対応に用いている¹⁸⁾。これらの手法は、対応の対象として豊富な情報を持つ少数の特徴点を採用することにより、あいまいな対応が起るのをさけている。しかし、対応結果として距離が求められる点の密度が小さいのが難点である。

これに対して、エッジを対応の対象として用いれば、より高い密度で対応結果が得られるが、対応におけるあいまいさは増大する。したがって、エッジ対応法では、対応探索に取り入れる制約を充分考慮する必要がある。撮像時のカメラモデルが判っている場合には、対応するエッジの探索は epipolar line 上に限定できる。epipolar line とは、図-4 に示すように2つのカメラのレンズ中心と画像面上の一点とで決定される平面と、もう一方の画像面との交線である。実際には、epipolar line が走査線に一致するように画像を変換できるので、2つの画像上の互いに相対な走査線上で対応を考えればよい。エッジに基づくステレオは、すべてこの条件を用いている。他に考慮すべき制約としては、先に述べた連続性の仮定や、対応する点

の順序が両走査線上で入れ替らないとする単調性の仮定 (monotonicity assumption) が用いられている。

MIT の Grimson は、Marr と Poggio による多階層の画像を用いる人間のステレオ視の理論¹⁹⁾をプログラム化し、その有効性を示した。1対1の対応が決定できないエッジに関しては、複数個の候補を保存しておき、弛緩法で1対1の対応を求めている²⁰⁾。スタンフォード大の Baker は、相対な走査線上でのエッジの対応探索に動的計画法 (DP) を用いている²¹⁾。さらに、エッジの連続性から、各走査線における対応の矛盾を検出し、その解消に弛緩法を用いた。しかし弛緩法では最適解が求められる保障はない。CMU の Ohta は、エッジの対応探索を連続エッジ同志の対応探索と、その制約下での孤立エッジの対応探索の組合せと考え、DP により最適解を求めている²²⁾。

エッジ対応によるステレオでは、対応のとれたエッジの場所でしか距離情報が得られない。したがって、画像上のすべての点において距離情報を求めるには、内挿を行う必要がある。内挿法について、MIT の Terzopoulos は、多階層データに基づく効率的な方法を開発している²³⁾。

3.3 スマートセンサ

膨大な計算量を必要とする画像理解の実用化には、処理速度の向上が必須である。特に、低レベル処理では、単純な計算を画素数だけ繰り返すという性質の処理が多い。スマートセンサとは、このような処理を画像の撮像時に、(概念的には) 撮像面上で完了してしまおうというものである。

ヒューズ社では1976年に CCD (Charge-Coupled Device) でソーベル1次微分オペレータを実現した²⁴⁾。このチップは5MHzのデータ速度で動作した。同じ時期にウェスティングハウス社では、やはりCCDでヒストグラムソータを実現した²⁵⁾。これは、入力ヒストグラムをソートして頻度の大きいものから順に出力するものである。ヒューズ社では、その後、1つのCCDチップに多種類の演算子を組込むことを試み、表-2に示す3種類のチップを試作した²⁶⁾。しかし、精度、動作速度は期待どおりにはいかなかった。ヒューズ社ではCCDによるアナログ演算に見切りをつけ、RADIUSと呼ぶデジタル演算による5×5の積和演算回路を試作した。これは、留数演算法 (residue arithmetic) を用い、乗算を表参照に置換えているのが特徴である。表参照はメモリ読出しに他ならずVLSI化に適している。留数演算部をVLSI化

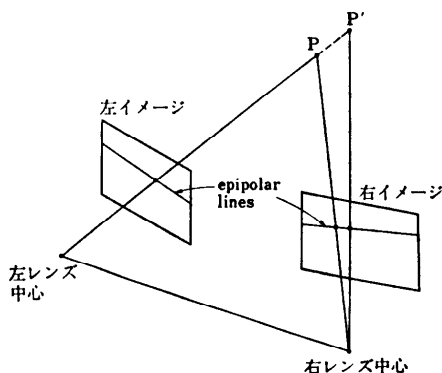


図-4 epipolar geometry

表-2 多機能 CCD チップ

TEST CHIP NUMBERS	ALGORITHMS IMPLEMENTED	KERNEL SIZE
I	EDGE DETECTION	3×3
	HIGH-PASS SPATIAL FILTER	3×3
	LAPLACIAN	3×3
	12 dB/APERTURE CORRECTOR	3×3
II	SOBEL	3×3
	MEAN	3×3
	UNSHARP MASKING	3×3
	BINARIZATION	3×3
	ADAPTIVE STRETCH	3×3
III	LAPLACIAN	3×3
	MASK PROGRAMMABLE	7×7
	PROGRAMMABLE	5×5
	PLUS SHAPED MEDIAN	
	BIPOLAR CONVOLUTION	26×26

することにより、入力 8 bit、内部演算精度 18 bit、データ速度 10 MHz を得た²⁷⁾。テキサスインスツルメント社でも、メディアン演算と積和演算のデジタル VLSI 化を検討し、積和演算 VLSI を試作した²⁸⁾。最近、CMU では、シストリックアレイ²⁹⁾を画像処理に応用することを試みている。

3.4 画像理解システム

これまでに述べた個々の技術の総合として、画像理解システムの構築が行われている。これらのシステムは次の3つに大別できる。

a) 画像理解のための一般的な枠組みを明らかにしようとするもの…ACRONYM³⁰⁾, VISIONS³¹⁾, 3D モザイク^{18), 32)}

b) 地図と画像を対応させ航空写真解析に役立てようとするもの…Road Expert^{33), 34)}, MAPS³⁵⁾

c) 視覚を航空機などの誘導に応用しようとするもの…passive navigation^{36), 37)}, target cueing³⁸⁾

スタンフォード大で Brooks が開発した ACRONYM³⁰⁾は、3D モデルとして図-5(a)に示したような一般化円筒を用いているのが特徴である。3D のモデルと 2D の画像とのギャップを埋めるため、3D モデルから見え方のモデル(2D)を生成する機能を持っている。例題として用いたのは、図-5(b)のような空港に停っている飛行機の航空写真という比較的簡単なシーンであったが、ACRONYM は、一般性を持つ画像理解システムの枠組みとして評価されている。

マサチューセッツ大の VISIONS³¹⁾は、階層的モデルを持つのが特徴であるが、最近では、画像理解研究において開発された個々の技術のテスト・評価のための道具としての性格が強い。

CMU の 3D モザイクシステムは、入力画像から抽出した 3D 情報に基づいて 3次元の記述を作成する。タスクは都市部の航空写真であり、建物を多面体とし

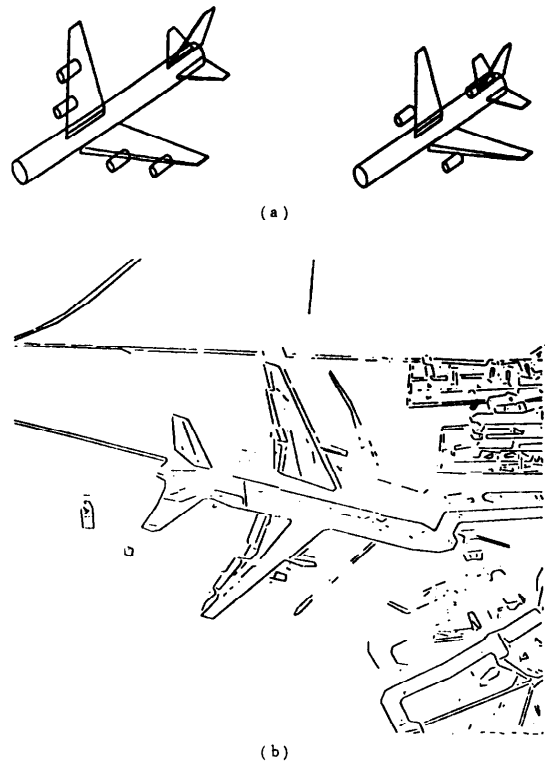


図-5 ACRONYM の 3D モデル (a) と入力航空写真 (b) (エッジ抽出結果)

て表現している。「モザイク」の意味するところは、複数の視点から得られる情報により、複雑な都市部の 3D 記述を除々に構築していくということにある。これは、1つの視点からでは、かくれたりしてうまく得られない情報も、他の視点からは容易に得られることが多いという考察に基づいている。画像からの 3D 情報抽出部としては、現在のところ、頂点情報に基づくステレオ¹⁸⁾と、頂点が水平線と鉛直線で構成されているという仮定を用いた単眼視によるものがある³²⁾。

図-6 に処理例を示す。

SRI の Road Expert は、データベースとして持っている地図の情報に基づいて航空写真中の道路を抽出する³³⁾。道路の抽出後は、道路上の物体の識別を行うことができる³⁴⁾。地図という強力な事前情報が、航空写真解析に有効なことを示した例である。地図と画像を組合わせた総合的なデータベースシステムとしては、CMU の MAPS (Map Assisted Photo-interpretation System) がある。ワシントン地域を例に、航空写真、SKYLAB 写真など種々の画像データと、地勢データ、大型建造物のデータ、および、地名・建

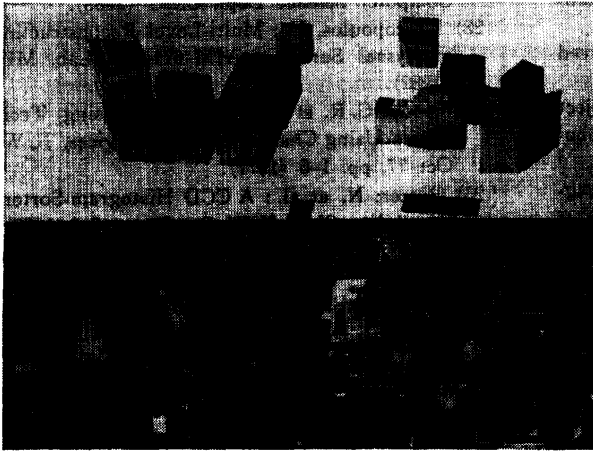


図-6 3D モザイクシステムの処理例
(上) 3D 記述から再構成した透視図
(下) 航空写真 (ステレオ対の片側)

造物名などの相互関係を階層構造にした概念地図 (concept map) が有機的に組合わされており、画像データや地図に関する種々の検索に応じたり、3D 透視図を生成することが可能である³⁵⁾。

レーダなどの能動的センサを用いず、受動的に観測できる画像をセンサとして航空機などの誘導に利用すれば、他からの防衛を受けにくい。これを passive navigation と呼んでいる。ロッキード社では、画像理解技術を passive navigation に応用する研究を行っている³⁶⁾。システムの信頼性を上げるため、複数の画像理解モジュールから得られる情報と、既存のセンサからの情報とを組合わせ、冗長性を持たせている。このシステムで中心となるのは、時間的に連続する画像間の相関により移動量を求め、速度対高度比を出力するイメージ速度センサと、高度を出力するステレオ解析部³⁷⁾である。誤差の積算を防ぐため既知のランドマークとの照合を行う位置確認部も用意されている。

夜間に、熱源を手がかりに目標を定める (target cueing) ための FLIR (Forward Looking InfraRed) 画像解析の研究も行われている³⁸⁾。

4. む す び

DARPA 画像理解プロジェクトの開始から8年を経過した現在、研究の焦点は、ステレオを含めて、2次元画像から3次元情報を抽出するための理論的側面に向けられている。しかし、これら理論的成果は、実際の画像理解システムに、まだ有効に取入れられてい

るとはいえない。これは、理論と現実とのギャップによるためともいえるが、現存する画像理解システムが、理論的成果が豊富に得られ始める以前に計画されたためとする方が妥当であろう。本年6月の画像理解研究会のパネル討論でも、「理論の充実とシステム化」が今後2～3年の最重要課題とされた。

我が国におけるコンピュータビジョンの研究も、米国に決して劣るものではなく、個々の研究をとれば、米国の研究者から参照されるすぐれたものも多い。それと同時に、初期の非常に漠然とした目標から、理論的側面の追求やシステム化といったコンピュータビジョンの本流を形成してきた米国での体系的な研究の進め方には、参考にするべき点が多いといえよう。

参 考 文 献

DARPA 画像理解研究会の論文集は下記で入手可能である。各論文集の参照番号も上げておく。

Defence Technical Information Center
Cameron Station, Bldg. #5
Alexandria, Virginia 22314
Apr-77 (ADA 052900), Oct-77 (ADA 052901),
May-78 (ADA 052902), Nov-78 (ADA 064765),
Apr-79 (ADA 069515), Nov-79 (ADA 077568),
Apr-80 (ADA 084764), Apr-81 (ADA 098261),
Sep-82 (ADA 120072)

文献リスト中、下記の省略を用いた。

IUW: Proceedings of Image Understanding
Workshop.
IJCAI: Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence.
AI: Artificial Intelligence.
CVGIP: Computer Vision Graphics and Image Processing.

- 1) Gevarter, W. B.: An Overview of Computer Vision, NBSIR 82-2582, National Bureau of Standards (1982).
- 2) Druffel, L. E.: Summary of the DARPA Image Understanding Research Program, SPIE Vol. 281, Techniques and Applications of Image Understanding, pp. 2-10 (1981).
- 3) Hanson, A. J. and Fischler, M. A.: The DARPA/DMA Image Understanding Testbed, IUW-Sep-82, pp. 342-351 (1982).
- 4) Bullock, B. L. et al.: Image Understanding Application Project: Status Report, IUW-Sep-82, pp. 29-41 (1982).

- 5) Horn, B.K.P.: Understanding Image Intensities, AI, Vol. 8, pp. 201-231 (1977).
- 6) Woodham, R.J.: Analyzing Images of Curved Surfaces, AI, Vol. 17, pp. 117-140 (1981).
- 7) Ikeuchi, K. et al.: Picking Up An Object from A Pile of Object, Proc. Int. Sym. Robotics Research (1983).
- 8) Kender, J.R.: Shape from Texture: An Aggregation Transform That Maps A Class of Textures into Surface Orientation, IJCAI, pp. 475-480 (1979).
- 9) Kanade, T.: Recovery of The Three-Dimensional Shape of An Object from A Single View, AI, Vol. 17, pp. 409-460 (1981).
- 10) Shafer, S. A. and Kanade, T.: Using Shadows in Finding Surface Orientations, CVGIP, Vol. 22, pp. 145-176 (1983).
- 11) Horn, B. K. P. and Schunk, B. G.: Determining Optical Flow, AI, Vol. 17, pp. 185-203 (1981).
- 12) Cornelius, N. and Kanade, T.: Adapting Optical-Flow to Measure Object Motion in Reflectance and X-ray Image Sequences, IUW-June-83, pp. 257-265 (1983).
- 13) Bruss, A. R. and Horn, B. K. P.: Passive Navigation, CVGIP, Vol. 21, pp. 3-20 (1983).
- 14) Hildreth, E. C.: The Detection of Intensity Changes by Computer and Biological Vision Systems, CVGIP, Vol. 22, pp. 1-27 (1983).
- 15) Shafer, S. A. and Kanade, T.: The Theory of Straight Homogeneous Generalized Cylinders, IUW-June-83, pp. 210-218 (1983).
- 16) Barnard, S. T. and Fischler, M. A.: Computational Stereo, Computing Surveys, Vol. 14, pp. 553-572 (1982).
- 17) Moravec, H.: Visual Mapping by A Robot Rover, IJCAI, pp. 598-600 (1979).
- 18) Herman, M. et al.: Incremental Acquisition of A Three-Dimensional Scene Model from Images, IUW-Sep-82, pp. 179-192 (1982).
- 19) Marr, D. and Poggio, T.: A Theory of Human Stereo Vision, AIM 451, AI Lab. MIT (1977).
- 20) Grimson, W. E. L. and Marr, D.: A Computer Implementation of A Theory of Human Stereo Vision, IUW-Apr-79, pp. 41-47 (1979).
- 21) Baker, H. H. and Binford, T. O.: Depth from Edge and Intensity Based Stereo, IJCAI, pp. 631-636 (1979).
- 22) Ohta, Y. and Kanade, T.: Stereo by Intra- and Inter-Scanline Search Using Dynamic Programming, Tech. Report (in preparation), Computer Science Dept. CMU (1983).
- 23) Terzopoulos, D.: Multi-Level Reconstruction of Visual Surfaces, AIM 671, AI Lab. MIT (1982).
- 24) Nudd, G. R. et al.: Image-Processing Techniques Using Charge-Transfer Devices, IUW-Oct-77, pp. 1-6 (1977).
- 25) Bluzer, N. et al.: A CCD Histogram-Sorter: Feasibility Chip, IUW-Oct-77, pp. 7-8 (1977).
- 26) Nudd, G. R. et al.: Development of Custom-Designed Integrated Circuits for Image Understanding, IUW-Nov-79, pp. 1-9 (1979).
- 27) Fouse, S. D. and Nudd, G. R.: RADIUS: A Progress Report, IUW-Sep-82, pp. 42-48 (1982).
- 28) Eversole, W. L. and Mayer, D. J.: Investigation of VLSI Technologies for Image Processing, IUW-Apr-80, pp. 182-189 (1980).
- 29) Fisher, A. L. et al.: Design of the PSC: A Programmable Systolic Chip, Proc. 3rd Caltech Conf. on VLSI, pp. 287-302 (1983).
- 30) Brooks, R. A. et al.: ACRONYM Model-Based Vision System, IJCAI, pp. 105-113 (1979).
- 31) Hanson, A. and Riseman, E.: VISIONS: A Computer System for Interpreting Scenes, in Computer Vision Systems, Hanson & Riseman Eds., Academic Press, pp. 303-333 (1978).
- 32) Herman, M.: Monocular Reconstruction of A Complex Urban Scene in The 3D MOSAIC System, IUW-June-83, pp. 318-326 (1983).
- 33) Bolles, R. C. et al.: The SRI Road Expert: Image-to-Database Correspondence, IUW-Nov-78, pp. 163-174 (1978).
- 34) Agin, G. J.: Knowledge-Based Detection and Classification of Vehicles and Other Objects in Aerial Images, IUW-Apr-79, pp. 66-71 (1979).
- 35) McKeown, D. M.: MAPS: The Organization of A Spatial Database System Using Imagery, Terrain, and Map Data, IUW-June-83, pp. 105-127 (1983).
- 36) Firschein, O. and Pearson, J. J.: Artificial Intelligence Concepts Applied to Navigation Using Passively Sensed Images, IUW-Nov-78, pp. 66-72 (1978).
- 37) Hannah, M. J.: Bootstrap Stereo, IUW-Apr-80, pp. 201-208 (1980).
- 38) Schachter, B. J.: A Survey and Evaluation of FLIR Target Detection/Segmentation Algorithms, IUW-Sep-82, pp. 49-57 (1982).

(昭和 58 年 7 月 26 日受付)

