

視覚応用技術の現状とその動向

池 内 克 史* 佐 藤 洋 一*

1. は じ め に

1960年代に米国で人工知能研究の一分野として始められた画像情報処理の研究も、現在では日本、ヨーロッパにおいても盛んに研究が進められるようになり、数多くの理論や手法が開発されてきた。その結果、その研究分野は非常に多岐にわたり、それら従来の研究成果は数々の本にまとめられている^{1),2),6),10)}。

本稿では、画像情報処理研究を大きく三分野、1:インスペクションのための視覚、2:マニピュレーションのための視覚、3:ナビゲーションのため視覚に分類して、各々の分野で、現在活発に研究され今後もその規模が拡大していくものと思われる幾つかの話題について、具体的な研究例を挙げながら解説する。

2. インスペクションの視覚

我々が物体を観察する際に、物体表面反射や物体形状など、その視覚機能への入力には必ず何らかの物理法則に基づいて決定されているはずであるという概念に基づき、近年、コンピュータビジョン、特に低レベル・コンピュータビジョンの研究では、多岐にわたる科学、工学分野

から物理法則を応用することで、画像処理技術の新しい方向を見いだそうとする動きが強まっている^{5),11),12)}。コンピュータビジョンのロボット工学における応用を考えた場合、特にインスペクションなどでは、視覚機能への入力から物体形状などの他に、物体表面の材質、表面荒さ等の属性までも知りたいという要求がある。そこで、物体表面反射の物理モデルを利用して、観察される画像入力から、様々な属性をあらわすパラメータを得ることを目標として、物体反射メカニズムに関する研究が盛んに行なわれている。

物体反射のメカニズムとして、いくつかのモデルが提案され画像処理技術に応用されている。CMUのShaferは物体反射は鏡面反射成分と拡散反射成分の二つの成分の線形結合で記述できるとする2色性反射モデル(dichromatic reflection model)(図1)を提唱した²⁶⁾。このモデルは物体の表面層が媒体と色素の粒から構成されるような物体に適用されるモデルである。鏡面反射は物体と空気との境界の物体表面で反射されて起こる。一方、拡散反射は物体表面層内部の色素などの粒による光散乱により生じる。このモデルに従う物体としてはプラスチックや陶器などがある。金属のように均質物質から表面層が構成される物体表面での反射においては、このモデルは成り立たない。鏡面反射成分は光源と同じスペクトラルを持ち、拡散反射成分は、物質により決定

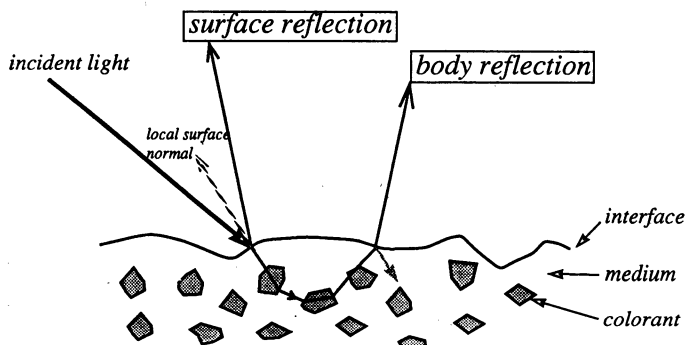


図1 2色性反射モデル

原稿受付 1992年11月4日

Computer Vision Research in Robotics

* カーネギーメロン大学

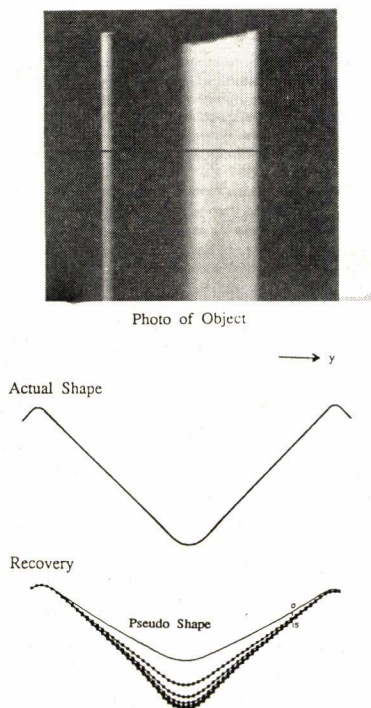


図 2 相互反射存在下における形状復元

入力白黒画像(上), 黒線(入力画像内)における実際の断面形状(中), 反復法により断面形状が復元される様子(下)

されるスペクトラル(即ち, その物質の色)を持つ。このため, 鏡面反射成分の色(r, g, b)と拡散反射成分の色は RGB 色空間内で, 2つの別々のベクトルで表現される。従って, 鏡面反射部分(ハイライト)をもつ物体画像を各ピクセルごとに色空間内にプロットした場合, その分布は鏡面反射成分と拡散反射成分よりなる T 字型になる。Klinker はこの事実を利用して, 一枚のカラー画像を RGB 色空間に分布させること(ヒストグラム)により, 反射二成分の分離を行なった^{13), 14)}。これは, 従来のカラー画像領域分割で問題となっていた, 鏡面反射成分(ハイライト)による外乱に影響されないという点に特徴がある。

同様なカラー画像の領域分割としては, ペンシルバニア大学の Lee のスペクトル差分法によるものがある¹⁷⁾。このアルゴリズムは, 光源方向の異なる何枚かのカラー画像を観察した場合, 拡散反射成分のみ存在する場合と拡散反射成分と鏡面反射成分の両方が存在する場合では, そのスペクトラルが異なるという事実に基づいている。この他にもフネルの反射法則に基づき偏光を用いて反射成分を分離する手法も開発されている^{31), 32)}。

2色性反射モデルでの鏡面反射成分と拡散反射成分を各々基底ベクトルとして考えた場合, 観察される反射光

はそれら基底ベクトルにより張られる部分空間内に存在する。そこで2つの異なった色の物体を観察した場合, 各々の部分空間の交線ベクトルが, 鏡面反射成分すなわち光源の色を表しているに他ならない。このようにして, 富永は複数種の物体を観察することで, 鏡面反射成分のスペクトル分布を特異値分解により求めている^{4), 30)}。

物体表面反射メカニズムをより詳細に記述する物理モデルとしては, 幾何学的な考察から導出される Torrance-Sparrow モデル³¹⁾と電磁気学により導出される Beckmann-Spizzichino モデル⁷⁾が良く知られている。CMU の Nayar (現コロンビア大学) らはこれら二つの反射モデルを詳細に比較し, 非常に広い範囲で等価であることを示した²⁰⁾。そして, その結果にもとづき, Photometric Sampling と呼ばれる技術を開発し, 光源方向を変化させることで, 物体の表面反射率などを一切仮定することなしに形状と反射率を求めた¹⁸⁾。この他にも Nayar らは鏡面反射が存在しないという限定のもとに, 相互反射(interreflection)の存在する場合にも反復法により物体の形状復元に成功している¹⁹⁾(図 2)。

最近では, CMU の佐藤らが新たに, 時系列色空間(Temporal-Color Space)という概念を提案し, そのカラー画像解析への応用を試みている²⁵⁾。時系列色空間とは従来の RGB 色空間の三次元に, 時間軸の一次元を加えた四次元空間である。RGB 色空間では物体の色を表現することができるのに対し, この時系列色空間では, 物体の色がどのように変化していくのが表現できる点に特徴がある。佐藤は, 時系列色空間解析の具体例の一つとして, 時間軸として光源方向を考え, この RGB+光源方向空間内でカラー画像の解析を行なった。Shafer

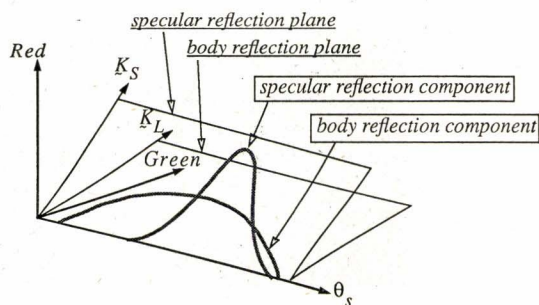


図 3 拡散反射成分空間(specular reflection plane)と鏡面反射成分空間(body reflection plane)

視覚化のために, 4次元の時系列空間を Blue 軸を無視して, 3次元空間として表現していることに注意。

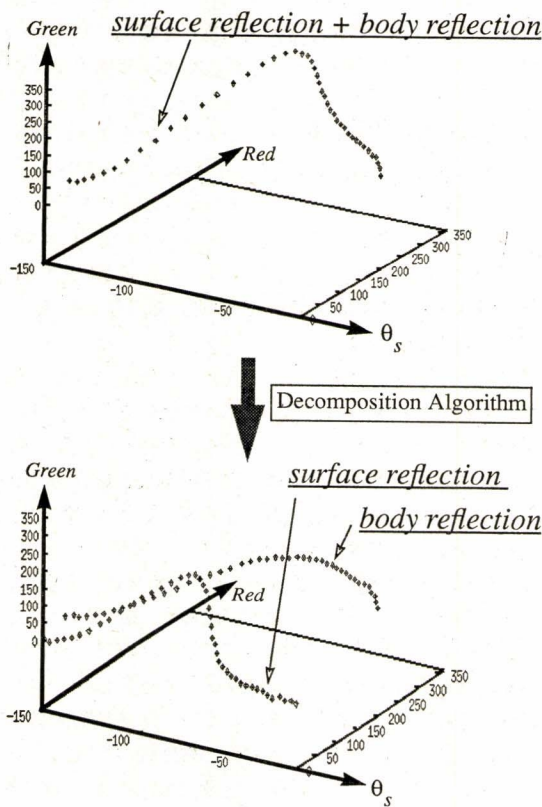


図 4 時系列空間における反射二成分の分離
(実データの処理結果)

の2色性反射モデル²⁶⁾と Nayar の Hybrid reflection model¹⁸⁾によれば、拡散反射成分と鏡面反射成分はこの空間内で別々の部分空間を構成する(図 3)。この事実に基づいて、特異値分解により、拡散反射成分と鏡面反射成分の分離(図 4)、表面反射特性の計測、物体形状の復

元などに成功している²⁵⁾。

3. マニピュレーションのための視覚

従来、CSG モデル、B-Rep モデルなどの CAD モデルや、一般化円筒モデル、拡張ガウス像、Oct Tree などのモデルがコンピュータビジョンシステムの物体形状モデルとして利用されてきた^{1),6)}。これらのモデルは、平面や曲面で構成される人工物体の表現に有利であるが、複雑な形状の物体の表現に対しては必ずしも有効であるとはいえない。一方で、現在進められている火星岩石採集ミッションなどに代表されるように、マニピュレーションの対象物体が、従来の人工物だけでなく、岩などの自然物体を含む段階に入ろうとしている。このような経過から、複雑な自然物体を表現するために、従来の物体表現モデルに加え、有限要素法を基本とする弾性、粘性などの物理的属性を有した物体形状モデルが利用されるようになってきた。単に有限要素モデルを物体表現に利用しようとする、必要とされる計算の複雑さの為に、実用的でなくなってしまう。トロント大学の Terzopoulos らのモデルでは、3次元レンジデータにより入力された物体の形状を表現するのに、パラメータ表現物体として超楕円体(superquadrics)がグローバルな形状に、有限要素法がローカルな形状に用いられているのが特徴である。この組み合わせにより、物体細部の表現能力を損なうことなく計算効率を向上させている²⁷⁾。この他に、MIT の Pentland らは、有限要素モデルに Modal Analysis を用いることにより、物体形状をスケーリングや曲げなどに対応する自由振動モードの組み合わせとして表現している。この物体形状モデルの最大の特徴は、基底ベクトルとなる自由振動モードのうち高周波成分を任意に削減することにより、通常、拘束条件不足となるレンジデータからの物体形状復元問題を一意解が求まる

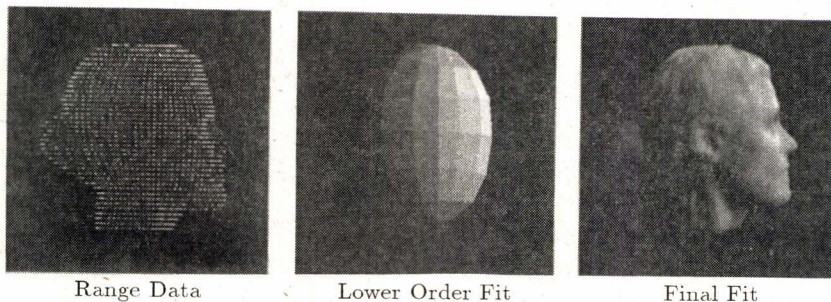


図 5 低周波自由振動モードのみによる形状表現と、高周波自由振動モードまで含めた形状表現入力レンジデータ(左)、低周波自由振動モードのみを利用して入力データから形状を復元した結果(中)、高周波自由振動モードまで含めて形状を復元した結果(右)。低周波自由振動モードの場合、物体形状の細部が表現されていないことに注意。

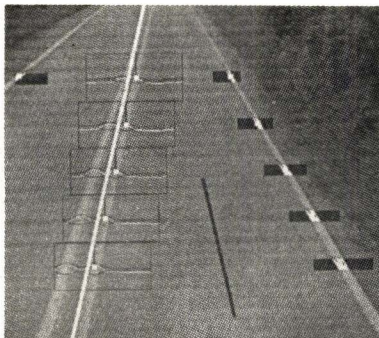


図 6 YARF により抽出された道路モデル

形にすることができるという点である(図5)。また、平行移動、回転、スケーリングに対応する自由振動モードを、モデルから削除することにより、それら、平行移動、回転、スケーリングに影響されない物体認識が可能である²²⁾。この他にも、Pentland らは、自由振動モードをへらすことで、計算効率をあげ、実時間で実行可能なモデリングシステム(Thing World Modeling System)を実現している²¹⁾。

4. ナビゲーションのための視覚

コンピュータビジョンの一分野として、移動ロボットの視覚機能の研究が盛んに行なわれており、その研究内容は想定される移動ロボットの周辺環境に応じ多岐にわたっている。本稿では、特に道路環境内と未整地環境内での移動ロボットの視覚機能を、米国において、DARPA の ALV (Autonomous Land Vehicle) プロジェクトや NASA の Mars Rover プロジェクトなどの大規模プロジェクトを中心として進められている研究を例にとり解説する。

4.1 道路環境内

本格的なテストベッドを用いた自律走行車の研究としては、CMU (Carnegie Mellon University) の NAVLAB²⁵⁾、NAVLAB II、や NASA JPL (Jet Propulsion Laboratory) の Planetary Rover などがよく知られている。自律走行車による道路追従の為に視覚機能は、幾何情報や色情報などの道路モデルを明確に計算機内に保持したものと、そうでないものに分類される。道路モデルによる道路追従システムとしては、CMU において Thorpe らにより開発された SCARF (Supervised Classification Applied to Road Following)⁸⁾ や YARF (Yet Another Road Follower)²⁸⁾ があげられる。SCARF では、道路領域と非道路領域における色に関する知識をもとにベイズの定理により画像内の各ピクセルが道路領域である確率を求めたのち、一般化ハフ変換に

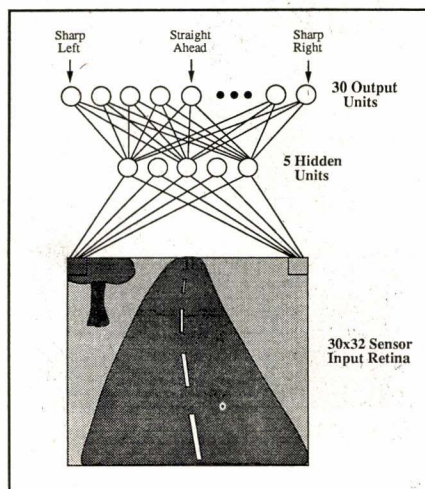


図 7 ALVINN システムの構成

より道路の方向と境界を推定する。このアルゴリズムを用いて影などの外乱に対して安定な結果を得ている⁸⁾。

YARF では、SCARF の持つ画像の領域分割が不完全な場合に不安定になるという欠点を改良することを目的として、システムに出来るかぎり様々な形態の道路の幾何情報(高速道路は中央に黄色い線が存在するなど)を持たせることにより、更に道路追従の精度を向上させることに成功している(図6)。この他にもドイツでの研究例として Dickmanns らの VaMoRs システム⁹⁾がある。

このシステムでは限られた種類の道路用に特別に開発したコントロールハードウェアと制御回路を利用することにより自律走行車の高速化、周囲に他の車が存在する環境下での自動走行、追い越し車の認識などに成功している。最近では同システムの航空機自動着陸への応用を目指し、着陸時の飛行機から滑走路を認識することなどにも成功している。

一方、道路モデルを明確に持たない道路追従システムの成功例としては Pomerleau により CMU の NAVLAB で実現された ALVINN (Autonomous Land Vehicle In a Neural Network) があげられる²⁴⁾²⁸⁾(図7)。このシステムは前処理を施した 30×32 画素のカメラからの入力画像を5つの Hidden Units と 30 の Output Units を持つニューラルネットワークに入力するという形態をとっている。このネットワークの教示は人間のハンドル操作をカメラからの道路画像と共に数分間ネットワークへ教示信号として入力すること(On The Fly)で行なっている。この他、ALVINN では、ニューラルネットワークによる道路追従や障害物回避といった低レベルのコントロールに加え、目的地までのナビゲーション

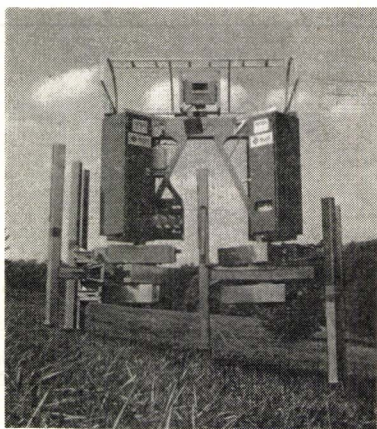


図 8 屋外でテスト中の CMU Ambler

などの高レベルのコントロールを実現するためにシンボリックな知識の導入も試みられている^{23),29)}。

4.2 未整地環境内

火星表面や砂漠などの荒れ地では、一般の道路上などの環境とは異なり、特徴点抽出に適した構造体が少ないため、環境内での自己の位置決めに道路標識などの特徴物の位置を利用することは困難である。そこで、NASA の Mars Rover プロジェクトの一環として開発が進められている CMU の Ambler (石の採集などを目的とする火星探査ロボットのプロトタイプ) (図 8)¹⁵⁾ では、ERIM 社製走査型レーザー距離計を使って、距離画像から周辺環境の高さ地図 (elevation map) を生成し、その地図を予め入力された高さ地図と比較することで、ロボットの位置決めやパス・プランニングなどを行なっている。この際に、レーザー距離計のセンサ座標系と高さ地図の世界座標系との間の座標系変換行列を求めるために、Ambler の脚を画像視野内に移動させ、その画像内での脚の位置を計測するというキャリブレーションを行なっている。高さ地図は位置 (x, y) とその地点での高さ (z) で表現される。ここで必要とされるのは x - y 平面上の等格子点での z 軸方向の高さであるが、センサ座標系 (r, q, f) での等間隔格子は必ずしも世界座標系 (x, y, z) の等間隔格子に対応しないために、locus アルゴリズム¹⁶⁾と呼ばれる手法が用いられている。このようにして得られた個々の高さ地図を、ロボット内部の位置センサの出力と最小二乗誤差によるマッチングにより繋ぎ合わせることでロボット周辺環境全体の高さ地図を得る (図 9)。

この他にもレーザー距離計の不確かさモデルに基づき、高さ地図の z 軸方向の不確かさ解析なども行なわれている¹⁶⁾。

本稿では、視覚応用技術の現状とその動向を、インス

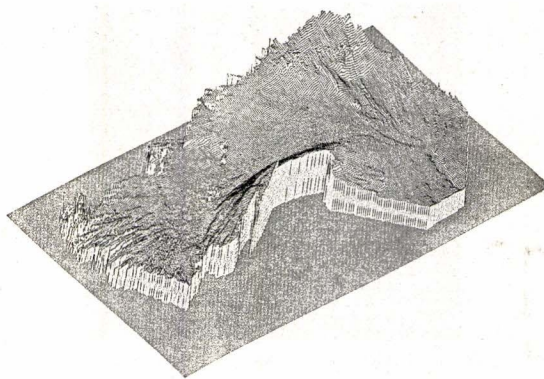


図 9 レンジデータから合成された環境地図

ペクション、マニピュレーション、ナビゲーションのための視覚機能という三つの視点から捉えて解説した。ナビゲーションの視覚機能はハードウェアの進歩と共に、その処理能力も年々向上しており、自律移動自動車が実際に道を走る日もそれ程遠くないように思う。未整地環境内での自律移動ロボットに関しては、現在、92年度末のミッションに向けて、CMU ロボット工学研究所において開発が行なわれている、南極エラバス火山火口に送る蜘蛛型歩行ロボットや、今世紀中に実現予定の NASA の火星探査ロボットプロジェクトなどをみると、実現時期に入りつつあるようである。インスペクションの視覚機能における、物体表面反射メカニズムの物理モデルに基づく画像処理研究に関しては、かなり精密な物理モデルが得られるようになってきているが、工業的な実用化には、ノイズなどの外乱に対する問題点の解決にもう少し時間が必要であろう。自然物体のマニピュレーションのための deformable model としては、多くのモデルが提唱され、特に最近では、物体変形の物理モデルを考慮した自然物体形状モデルも利用されるようになった。しかし、複雑な自然物体を正確に表現でき、かつ計算効率の良い形状モデルは未だに実現されておらず、今後の研究に期待される。

参 考 文 献

- 1) 谷内田著：ロボットビジョン，丸善，1990。
- 2) 江尻，大田，池内著：マシンビジョン，昭晃堂，1990。
- 3) 越川：“反射偏光を利用する面方向検出法”，計測自動制御学会論文集，18，10，pp.1031-1033，1982。
- 4) 富永，大橋：“物体のカラー反射モデル”，情報処理学会論文誌，Vol.33，No.1，January 1992。
- 5) P. K. Allen, J. R. Kender, T. E. Boulton, S. K. Nayar, “Image Understanding Research at Columbia University”, Proceedings: Image Understanding Workshop, January 1992。
- 6) D. H. Ballard, C. M. Brown, Computer Vision, Prentice Hall, 1982。

- 7) P. Beckmann, A. Spizzichino, The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, New York, Pergamon, 1963.
- 8) J.D. Crisman, C. Thorpe, "Color Vision for Road Following", Proc. of SPIE Conference on Mobile Robots, Cambridge, November 1988.
- 9) E. Dickmanns, A. Zapp, "A Curvature-Based Scheme for Improving Road Vehicle Guidance by Computer Vision" Proce. 10th IFAC, Munich, July 1987.
- 10) B. K. P. Horn, Robot Vision, McGraw Hill, 1986.
- 11) T. Kanade, "Computer Vision as a Physical Science", in CMU Computer Science : a 25th Anniversary Commemorative, ACM Press, 1991.
- 12) T. Kanade, K. Ikeuchi, "Introduction to the Special Issue on Physical Modeling in Computer Vision", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13, No.7, July 1991.
- 13) G. J. Klinker, S. A. Shafer, T. Kanade, "The Measurement of Highlight in Color Images", International Journal of Computer Vision (IJCV), Vol.2, No.1, pp.7-32, 1988.
- 14) G. J. Klinker, S. A. Shafer, T. Kanade, "A Physical Approach to Color Image Understanding", International Journal of Computer Vision (IJCV), Vol.4, pp.7-38, 1990.
- 15) E. Krotokov, R. Simmons, W. Whittaker, "1991 Year End Report Autonomous Planetary Rover", CMU-RI-TR-92-02, The Robotics Institute, CMU, February 1992.
- 16) I. S. Kweon, T. Kanade, "High-Resolution Terrain Map from Multiple Sensor Data", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.2, February 1992.
- 17) S. W. Lee, "Understanding for Surface Reflections in Computer Vision by Color and Multiple Views", Ph. D. Thesis, University of Pennsylvania, 1991.
- 18) S. K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade, "Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surfaces by Photometric Sampling", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.6, No.4, August 1990.
- 19) S. K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade, "Shape from Interreflection", International Journal of Computer Vision (IJCV), Vol.6, No.3, pp.173-196, August, 1991.
- 20) S. K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade, "Surface Reflection : Physical and Geometrical Perspectives", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13, No.7, July 1991.
- 21) A. Pentland, I. Essa, M. Friedmann, B. Horowitz, S. Sclaroff, "The Thing World Modeling System : Virtual Sculpting by Modal Forces", Computer Graphics, Vol.24, No.2, pp.143-144, 1990.
- 22) A. Pentland, S. Sclaroff, "Closed-Form Solutions for Physically Based Shape Modeling and Recognition", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13, No.7, July 1991.
- 23) D. A. Pomerleau, J. Gowdy, C. E. Thorpe, "Combining Artificial Neural Networks and Symbolic Processing for Autonomous Robot Guidance", Engineering Application Artificial Intelligence, Vol.4, No.4, pp.279-285, 1991.
- 24) D. Pomerleau, "Neural Network Based Perception for Mobile Robot Guidance", Ph.D. Dissertation, CMU Department of Computer Science, Tech. Report, CMU-CS-92-118, 1992.
- 25) Y. Sato, K. Ikeuchi, "The Temporal-Color Space Analysis of Reflection", Technical Report, CMU-CS-207, Department of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1992.
- 26) S. A. Shafer, "Using color to separate reflection components", COLOR Research and Application, Vol.10, No.4, pp.210-218, 1985.
- 27) D. Terzopoulos, D. Metaxas, "Dynamic 3D Models with Local and Global Deformations : Deformable Superquadrics", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13, No.7, July 1991.
- 28) C. Thorpe, M. Hebert, T. Kanade, S. Shafer, "Toward Autonomous Driving : The CMU Navlab. Part I : Perception", IEEE Expert, Vol.6, No.4, pp.31-42, August, 1991.
- 29) C. Thorpe, J. Gowdy, "Annotated Maps for Autonomous Land Vehicles", Proceedings DARPA Image Understanding Workshop, Pittsburgh, 1990.
- 30) S. Tominaga, B. Wandell, "Standard surface-reflectance model and illuminant estimation", J. Opt. Soc. Am. A, Vol.6, No.4, April 1989.
- 31) K. Torrance, E. Sparrow, "Theory for off-specular reflection from roughened surfaces", J. Opt. Soc. Amer., No.57, pp.1105-1114, 1967.
- 32) L. B. Wolff, T. E. Boult, "Constraining Object Features Using a Polarization Reflectance Model", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13, No.7, July 1991.



池内克史 (Katsushi IKEUCHI)

1949年5月29日生。1973年京大工機
械卒。1978年東大工情報博士了(工学博士。
MIT 人工知能研究所, 電総研を経て1986
年 CMU 計算機科学科 (CS Division) 兼
ロボティクス学科 (Robotics Institute) 研
究準教授 (Senior Research Scientist) 人
間の視覚機能, 明るさ解析, 物体認識, ハンドアイの研究に従
事。D. Marr 賞 (ICCV : 1990), IEEE 優秀論文賞 (CVPR :
1991), 最多引用論文賞 (AI Journal : 1992) 等授賞。



佐藤洋一 (Yoichi SATO)

1967年1月10日生。1990年東京大学
機械工学科卒業。東京大学情報工学科修士
課程を経て, 1991年よりカーネギーメロ
ン大学 (CMU) ロボティクス学科にて
Ph. D. Program に在学中。現在, コンピ
ュータビジョンの研究に従事。人工知能学
会学生会員。
(日本ロボット学会学生会員)