視覚センサのオフラインプログラミングを 支援するハンドアイシミュレータ[†]

坂 根 茂 幸*・石 井 優*・柿 倉 正 義*

Hand-Eye Simulator for Off-Line Programming of Visual Sensors

Shigeyuki SAKANE*, Masaru ISHII* and Masayoshi KAKIKURA*

Model-based approaches are essential to the development of robots with high adaptability to various environments. We propose the concept of a Hand-eye simulator: a simulator for a hand-eye coordinating system as a basic tool for off-line programming of visual sensors. The simulator provides useful functions to assist the hand-eye coordinating system in visual recognition and monitoring of the robot environment. Two of these functions, one for eliminating the appearance of the manipulator from the input images to reduce unnecessary image features and another for assisting cameras in occlusion avoidance to get adequate image data without occlusion are described. Solving the problems in effective use of multiple and various kinds of sensors, based on the simulators as described in this paper, will become a key issue for making intelligent hand-eye coordinating systems.

Key Words: robot simulator, hand-eye coordinating system, 3D modeling, model-based robot vision, sensor strategy, robot programming

1. ま え が き

従来のティーチングに代るロボット言語を用いたロボットの教示システム,すなわち,オフラインプログラミングのシステムでは,実際のロボットを動かさずにプログラム作成を行うので,作成したプログラムによるロボットの動作確認をするためのシミュレータが必要になる。ロボットシミュレータでは,単に機構動作を模擬して表示する機能以外にも,マニピュレータの動的特性や環境条件を含む物理的な特性のシミュレ

ション等へも拡張できることが望ましい。マニピュレータが環境内にある物体と衝突を起こさないかどうかを調べる干渉チェック機能などが,その例である。このようなシミュレータ機能の高度化に伴うロボット環境モデル管理機能の拡大は,必然的に“作業レベル”のロボット言語によるプログラミングの基礎技術を形成する。

一方,ロボットが環境に対する適応性・柔軟性を高めるためには,各種のロボットセンサの利用,中でも視覚センサの利用が重要である。そして,マニピュレータにおけるロボットシミュレータの利用と同様に,視覚センサにおいてもそのシミュレータの利用が考えられる。従来,ハンドリング対象物を含めた認識のための環境の3次元モデルの構成と利用という側面では多くの試みが行われているが,これらもロボットの視覚のためのシミュレータ機能のカテゴリに含めることができる。ロボットの自律機能を高めていく上では,これ以外にも,視覚センサの効果的な運用を図るためのシミュレータの開発が重要な課題である。しかしながら,これらに関する研究は,まだ殆ど行われていない。

本論文では,ハンドアイシステムにおける視覚センサのオフラインプログラミングを支援するためのロボットシミュレータの概念を提案する。つぎに,実際のハンドアイシステムに即して開発したシミュレータシステムの基本的構成と,その特徴的機能である視野内マニピュレータ像の消去機能,および,オクルージョン回避の支援機能について述べる。

2. 視覚センサとロボットシミュレータ

ロボットセンサは,一般に,作業あるいは環境内の不確定な要素に対処するために用いられる。その果たす主な役割には,

[†] 第24回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭60・7)

* 電子技術総合研究所 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

* Electrotechnical Laboratory, Niihari-gun, Ibaraki
(Received August 6, 1985)

- (1) ロボット動作の起動と停止
- (2) 選択可能な行動がある場合の行動決定
- (3) 対象物の同定と位置決め
- (4) 外部の拘束に対する適応

がある¹⁾。ロボットの視覚では、この中の(3)の課題について多くの研究と実用化が進められている。これに関連するロボットシミュレータの課題には、認識すべき対象物のモデルの構成と利用がある。対象物の同定などを行うロボット視覚装置が市販されているが、これらの装置の大部分は、同定する対象物のモデルの教示のために実物を提示し、画像処理により特徴パラメータを求めて認識アルゴリズムにおけるモデルとする方式を採用している。しかし、このような実例による教示方式と2次元の画像特徴に基づく認識方式には限界があり、高度化するロボット作業に要求される視覚機能には、対象の3次元モデルの利用が本質的に必要となる²⁾。

一方、視覚センサの(2)の課題に関しては、例えば、視点が移動可能であったり、多種類、複数個の視覚センサが利用可能な場合に、どのような状況でどのセンサを用いるべきかという計画を決定していくことが必要になる。この場合においても、(3)の場合と同様に、ロボットの環境の3次元モデルに基づいた視覚センサ用シミュレータの構成が重要な役割を果たす。このようなシミュレータの開発は、ロボットビジョンのための言語開発^{3),4)}などと共に、今後、作業レベルのロボットプログラミングを実現していくために必要不可欠である⁵⁾。

3. ハンドアイシミュレータ

3.1 ハンドアイシミュレータの概念と基本的仕様

Fig. 1 のように、モデルベースドなハンドアイシステムは、マニピュレータを制御するための行動系、環境を理解するための認識系、および、それらにロボットの世界モデルを与えるためのモデル系から構成される。ハンドアイシミュレータは、このモデル系の中で、マニピュレータ、視覚系(撮像カメラ、照明、距離センサ等)、そして作業対象物を含む作業環境の実世界を動的にシミュレートする。ここでの『動的』と

Fig. 1 Structure of a model-based hand-eye coordinating system

は、マニピュレータによる物体の操作で生じた環境の変化が、モデルの世界でも並行して管理されているという意味である。

従来のロボットシミュレータは Table 1 中の*印で示すように、複数のマニピュレータ間、マニピュレータと環境の間などの干渉問題を扱うものであり、シミュレーションの課題として視覚系との関連については特に関心が払われていなかった。また、ユーザの設定するカメラも、アームの動作のみを見るものでしかない。これに対してハンドアイシミュレータでは、ロボットの環境の認識・監視に使用するカメラがモデル化されており、表の(1), (2), (3)で示すように、ハンドアイシステムにおける視覚系とマニピュレータ、視覚系と環境、および、複数の視覚系の相互関係の問題を取扱うことに特長がある。

(1)の視覚系とマニピュレータの関係では、例えば、マニピュレータを移動したときに、カメラの視野のどの位置にその像が現れるかをシミュレートし、実画像中のマニピュレータ像を消去して画像理解を援助する。この応用については、第4章で述べる。

(2)では視覚系と環境の関係を扱う。例えば、ハン

Table 1 Relations of components in a hand-eye coordinating system and the subjects of the simulator

manipulator	robot environment	vision devices	
*	*	(1)	manipulator
	*	(2)	robot environment
		(3)	vision devices

ド装着型カメラの場合には、すでにモデル化されている環境において、マニピュレータの移動に伴って変化するカメラの視野モデルを生成しながら実環境の確認を行うこと、また、認識・監視に適した視点にマニピュレータを移動するためのシミュレーションなどへの応用がある。この例として、第5章では、オクルージョン回避の支援機能について述べる。

(3)では、複数の視覚系間の関係を扱う。これには、カメラと照明の関係をシミュレートすることや、複数・多種類（距離、明暗等）の視覚センサをシミュレートし、作業目的に合致した視覚系の総合的編成を支援することなどが考えられる。

また、ハンドアイシミュレータと推論機能を結合することにより、認識系にプランニング機能をもたせ、適応性・柔軟性に富んだハンドアイシステムを構成することが可能になると思われる。

このようなハンドアイシミュレータを実現していく上での必要となる基本的な機能をまとめると、つぎのようになる。

- ① マニピュレータ、カメラ、照明等の3次元位置・姿勢などの幾何学的モデリング機能
 - ② 作業対象物を含むロボット環境の幾何学的モデリング機能
 - ③ カメラからの視野モデルの生成機能
 - ④ 生成した視野モデルに基づく、実シーンとの照合に必要な画像特徴の抽出機能
 - ⑤ 推論機能をもつプランニングシステムとの結合機能
- これらの中で最も基本的なものは①②③である。以下3.2, 3.3では、このインプリメンテーションの概要を述べる。

3.2 基礎部分のインプリメンテーション

実際の対象としたハンドアイシステムのブロック構

Fig. 2 Block-diagram of the hand-eye coordinating system

成図を Fig. 2 に、システムの外観を Photo. 1 に示す。本システムでは、ホスト計算機 (VAX 11/780)、ミニコン (PDP 11/40)、マイクロプロセッサ (LSI 11/23) が、主な CPU である。5 自由度のアームは、ホスト計算機からコントローラを介して制御される。環境の明暗画像入力には2台の固定型の CCD カメラ、および、ハンド部に装着可能な CCD カメラ (Photo. 2) が用いられる。画像データは、A/D 変換されて画像メモリに格納され、ホスト計算機に転送される⁶⁾。2台の固定型カメラは、明暗画像入力の他に、He・Ne レーザスポットの走査を行う1組のミラー系と共にレーザスポット方式のレンジファインダを構成し、環境の3次元データ入力にも用いられている。画面内の輝点の2次元位置計測には、専用のハードウェア (図中の bright spot detector) を使用している⁷⁾。

ハンドアイシミュレータを構築するための基本的なツールとしては、3次元の幾何モデリングシステムである GEOMAP⁸⁾を利用している。前述の仕様⑤を考慮して、シミュレータの機能は LISP⁹⁾上の関数で実行

Photo. 1 Overview of the hand-eye coordinating system

Photo. 2 A CCD camera mounted on the robot hand

Fig. 3
Example movements of
a manipulator model

ができるようになっている。マニピュレータの幾何モデルは、実際のマニピュレータを駆動している動作レベルの言語¹⁰⁾により全く同様に駆動できる。例えば、

(ARM 'MVC-DIR '(X Y Z α β γ))

などの (ARM...) という形式の一連のマニピュレータ制御用関数は、あらかじめ (V-ARM-ON) を実行しておけばシミュレータのマニピュレータモデルを駆動し、また、(R-ARM-ON) を実行しておけば、実際のマニピュレータを駆動するプログラムとなる。Fig. 3 に、マニピュレータモデルの動作例を示す。

撮像カメラをモデル化する透視変換のパラメータは、カメラの光学中心位置 (X_c, Y_c, Z_c)、画像面の回転角 (A_x, A_y, A_z)、スケール変換係数 F の 7 個である。これらのパラメータは、ハンドに取付けた LED (赤外発光素子) を用いたキャリブレーションによりマニピュレータ座標系で得られる。すなわち、LED の 3 次元位置とカメラ画面上での 2 次元位置から、

Newton 法を用いた計算¹¹⁾、または非反復解法¹²⁾を用いてカメラパラメータを求める。ハンド装着型のカメラのモデル化機能について、以下にその概略を述べる。

3.3 ハンド装着型カメラのモデル化

ハンド装着型のカメラを用いるハンドアイシステムのシミュレータでは、このカメラモデルのパラメータもマニピュレータ座標系で求める必要がある。このために、すでにマニピュレータ座標系でのパラメータを求めてある 2 台のカメラにより、キャリブレーション用の可動板上に装着した発光素子による輝点の 3 次元位置を求め、同時にこの輝点をハンド装着型カメラで観測する。このデータによりカメラモデルのパラメータを推定する。このときのマニピュレータの位置・姿勢の状態、生成したカメラモデルをハンドのモデルに幾何学的に接続する。また、マニピュレータモデルの移動に伴い、カメラモデルのパラメータを自動的に更新する機能をもたせている。したがって、作業環境の 3 次元モデルが得られていれば、マニピュレータの移動に伴い変化する視野のモデルを生成できる。この機能を確認するために、直方体の 3 次元モデルを用いた基礎実験を行った。

最初の直方体の 3 次元モデル生成には、前述のレーザースポット光方式のレンジファインダを用いたインタラクティブな教示方法を用いた。Photo. 3(a) は、最初のマニピュレータの位置で撮像した実画像と生成モデルとをスーパーインポーズした画像である。

Photo. 3(b) は、別の位置にマニピュレータを移動したときの実画像と生成モデルを示している。マニピュレータの移動に伴うカメラパラメータの自動的な更新処理により、撮像した画像が変化しても、カメラモデルに射影した 3 次元モデルは常に重なった状態を保

(a) Superimposed display of an object and the model at initial camera position

(b) The object and the model after moving the manipulator toward the object

Photo. 3 Example of view models generated by the camera-in-hand model

っていることがわかる。

4. 視野内マニピュレータ像の消去への適用

4.1 視野内マニピュレータ像問題

視覚による認識では、処理しても無駄な画像データの処理は初めから行わず、注目したい部分の処理のみを行うような効率的な機能が望まれる。

ハンドアイシステムの視覚では、その構成及び作業の性質上、視野内にマニピュレータ像が現われることが多く、対象の認識過程ではこの像も処理対象となる。これを避けるためには、マニピュレータを視野外に移動し、対象のみ撮像した画像を処理するのが1つの対策である。しかし、このようなマニピュレータの動きは一般の作業にとっては冗長であり、また場合によっては円滑な作業の実行を妨げる。そこで本システムでは、ハンドアイシミュレータを用いて入力画像に現れるマニピュレータ像を消去する機能を実現し、この問題を解決するための一手法とした。これは、ハンドアイシミュレータにおいて、あらかじめ視野内のど

の位置・姿勢にマニピュレータ像ができるかを求めることができるという機能を利用したものである。

4.2 視野内マニピュレータ像の消去

視野内マニピュレータ像の消去処理の手順は、以下のように実現している。

- ① 実マニピュレータとシミュレータを同時に駆動する。
- ② 実マニピュレータを駆動した後、シミュレータ側では実際にシーンを撮像するカメラのモデルから見えるモデルマニピュレータ像のシルエット2値画像を生成する。
- ③ モデルと実画像の位置ずれの誤差を吸収するために、この2値画像に膨張処理を施してマスク画像を得る。
- ④ 実画像又は前処理を行った画像に対してこのマスクをかけ、マニピュレータ像を消去する。

この中で、②の処理は、可視面に対してスキャンコンバージョンを行い、2値画像配列上で塗りつぶしを行う方法を採用している。また、③における膨張処理と

(a) Wire-frame model of the manipulator superimposed on the input image

(b) Binary mask pattern of the manipulator by expansion processing

(c) Edge image of the input image

(d) The results of eliminating the manipulator in Photo (c) using the mask of (b)

Photo. 4 Experimental results of eliminating the manipulator from an input image

は、 3×3 の局所領域で8連結（または4連結）の近傍画素が一つでも値1をもてば中心画素を1にする処理である。②～④の処理は、ハードウェアによる高速化が可能である。

4.3 実験

Photo. 4(a)～(d)に、この実験例を示す。Photo. 4(a)は、実マニピュレータとシミュレータのマニピュレータを共に初期位置から相対変位 ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) = (300, 0, 200) (mm) の点に動かし、マニピュレータ像を含むシーンを撮像した画像にシミュレータの線画出力（隠線消去なし）を重ね合せた結果である。デジタル画像の大きさは 512×460 である。シミュレータ出力が実際のマニピュレータ位置と一致しているのがわかる。Photo. 4(b)は、マニピュレータモデルのシルエット2値画像に膨張処理を施した結果である。ここでは8連結近傍を用い、処理を5回反復している。本実験では、この程度の反復回数で位置ずれ誤差が充分吸収されている。Photo. 4(c)は、入力画像に対して Sobel オペレータによる空間微分を行った結果で、マニピュレータ像も微分画像中に現われている。なお、エッジ画像を見易くするために、白黒は反転している。Photo. 4(d)は、Photo. 4(c)のエッジ画像に対して Photo. 4(b)のマスク画像のマニピュレータの領域の値を0とし、マニピュレータ像を消去した結果である。これにより、対象物の特徴抽出に処理を集中することが可能となり、視覚センサのオフラインプログラミングとしての認識プログラムの作成も容易になる。また、この例では、マニピュレータ像を消去したが、この他にも、例えば、対象の認識・監視などにおいて、画像情報としては必要のない固定治具などの像についても、同様な方法で消去することができる。

5. オクルージョン回避の支援機能

5.1 オクルージョン回避の概念

ロボットが、カメラで撮像した画像に基づいてある対象物を認識・監視するとき、環境内の他物体やマニピュレータにより視野がさげられること（オクルージョン）が生じる。このオクルージョンを避けるために、カメラが環境に固定される場合には初めから良く見える位置に設置したり、また、カメラがハンドに装着されている場合にはカメラを対象が良く見える位置に移動したりする必要がある。このようなロボットの視覚系の合理的配置に関する概念を、“オクルージョン回避 (occlusion avoidance)” と呼ぶことにする。従来のロボットシミュレータでは、マニピュレータと環境内の物体との衝突を回避する軌道を決定する機能

の実現¹³⁾が一つの課題となるが、ここで考えるオクルージョン回避は視覚センサ系にとって丁度この双対概念に相当する。従来このような場合には、オペレータが現場で実際の画面を見ながら、カメラの適切な位置を定める必要があった。しかし、ハンドアイシミュレータのモデリング機能に基づいたシステム構成により、ある注視対象を与えたときに他物体によるオクルージョンを回避するカメラの位置を自動的に求めることが可能となる。すなわち、視覚センサのオフラインプログラミングを支援することができる。

オクルージョン回避問題には、見る対象（ここでは『注視対象』と呼ぶ）の分類と得られる情報の種類によるレベル分けが考えられる。見たい注視対象は(1)点、(2)線、(3)領域に分類される。また、得られる情報については、つぎの2レベルに分けられる。

(a) 注視対象を環境の物体によりオクルージョンなしにカメラから見ることをできるかを調べるオクルージョン判定機能

(b) 注視対象を与えるとオクルージョンが生じる3次元空間内領域が求められ、この空間を回避して適切なカメラの位置を決定する機能

この問題をマニピュレータの衝突回避問題に対応させると、(a)はアームと物体間の干渉チェック、(b)は自由空間記述に基づくアプローチに対応する。つまり、オクルージョンの生じない空間（以下では、OFS: occlusion-free space と呼ぶ）の記述と利用が課題となる。問題の複雑さは、(1) < (2) < (3)、および、(a) < (b) の順である。

衝突回避問題では、ゴールとして手の移動地点が与えられている。しかし、オクルージョン回避の場合には、例えば、『ナットをボルト軸方向に対して斜めの方向から、はめあい部分が良く見えるような距離で見たい』というように複雑化し、ゴールの指定の仕方は一般的に問題に依存する。このような点を考慮して、現在までにハンドアイシミュレータに組み込んだ機能は、領域を注視対象としたオクルージョン判定の機能と、点を注視対象とした OFS の抽出機能である。以下に、これらについて述べる。

5.2 オクルージョン判定機能

ハンドアイシミュレータに組み込んだオクルージョン判定 (occlusion check) 機能は、以下のような処理手順で実現している。

- (1) 注視領域を、カメラ画面上に射影して得られる領域 R_1 の各点におけるカメラ中心からの奥行値を求める。
- (2) オクルージョン物体を、カメラ画面上に射影し

て得られる領域 R_2 の各点における奥行値を求める。

- (3) 領域 R_1 と R_2 の論理積領域 $R_3=R_1 \cap R_2$ を求めて、この領域内の各点における R_1 と R_2 の奥行値を比較し、

$$\text{depth}(p_1) > \text{depth}(p_2),$$

(p_1, p_2 はそれぞれ領域 R_1, R_2 内の点を、また $\text{depth}(p)$ は点の奥行値を表わす)

となる領域の面積と R_1 の面積との比 σ を求める。

σ の値からオクルージョンの判定が得られる。すなわち、 $\sigma=0$ は、オクルージョンなしを意味し、また、 $\sigma=1.0$ は、注視対象領域がすべて隠されているオクルージョンが生じていることを意味している。

5.3 オクルージョン空間の生成機能

注視対象に仮想の点光源、線光源、あるいは面光源を置き、環境内の他の物体に関して生じる影の空間 (shadow volume)¹⁴⁾ を求める。これを『オクルージョン空間 (occlusion volume)』と呼ぶことにする。前述した OFS は、環境内の各物体によるオクルージョン空間の和空間を、マニピュレータの作業空間から除いた補空間となる。

注視対象が3次元空間内の点の場合には、その点に仮想点光源を置き、各物体に関して仮想の影空間すなわちオクルージョン空間を生成する。この処理は、以下の手順で行う。

- (1) 注視点に仮想カメラを定義する。
- (2) このカメラより見たオクルージョン物体のシルエット形状を求める。
- (3) シルエットの多角形を底面とし、注視点を頂点とするような多角錐を生成する。
- (4) この多角錐とロボット作業空間との積の立体を求める。

また、注視対象が領域の場合には、同様な考え方で仮想の面光源を置くことにより、オクルージョン空間を求めることができる。現在のハンドアイシミュレータでは、前者の注視対象が点の場合についてのみ実現しており、これに関する実験を以下に述べる。

5.4 実験

Fig. 4(a) に環境の物体の配置例を示す。今、注視対象はバルブ上面の中心であると仮定する。オクルージョンを起す物体は、マニピュレータとバルブの間にあるパイプである。このオクルージョン空間を求めた例を、**Fig. 4(b), (c)** に示す。**Fig. 4(b)** は、注視点に置いた仮想カメラからみたパイプのシルエット領域形状を底面とし、注視点を頂点としてオクルージョン空間を生成したものである。この例では角錐の高さ

(a) An example of robot environment

(b) An example of generated occlusion volume with height of 1.5 m

(c) An occlusion volume and a view volume of a camera-in-hand

Fig. 4 An example of generating occlusion volumes

を 1.5m として生成しているが、実際には作業空間との交差を求めるので、この高さを十分高くとって生成する。**Fig. 4(c)** は、このようにして生成した多角錐と、1 辺が 4 m の立方体として与えた作業空間との交差から求められたオクルージョン空間を示したものである。この図では、実際のカメラキャリブレーションにより得られたハンド装着型カメラのパラメータに基づいて、このカメラが捕える視野空間 (view volume) を四角錐体として同時に表示している。

OFS の記述に基づいて、実際に対象を撮像するのに適した空間点を決めるためには、マニピュレータの

可動範囲や注視対象の状態に関する指定など、種々の条件を考慮する必要がある。また、環境との衝突回避を行うための自由空間記述系との結合なども行う必要があると考えられる。

6. 結 論

本論文では、ハンドアイシステムを対象として、そのビジョン機能を支援するためのロボットシミュレータの概念を提案し、実際のシステムについて開発したハンドアイシミュレータの基本構成について述べた。

つぎに、ハンドアイシミュレータの特徴的機能として、視野内に現われるマニピュレータ像を消去する機能、および、ハンド装着型のカメラなどが対象を撮像する際に自動的にオクルージョンを回避するための支援機能について述べ、視覚センサのためのシミュレータシステムの有効性を明らかにした。

ロボットのセンサはロボット環境の不確定な要素を取扱う目的で用いられるために、そのシミュレーションは一般論として困難視されていた向きがある。しかしながら、ロボットの視覚のためのシミュレータには、環境認識を信頼性良く効率的に行うための対象モデルの供給を始め、本論文で指摘したようなセンサ系の効果的運用を支援するためのシミュレーション等、重要な課題が多数存在する。すなわち、ロボット環境のモデルに基づき種々の拘束条件をシミュレーションで充分利用することにより、より柔軟で適応性のあるロボットの視覚機能を実現することが可能になると考えられる。

マニピュレーションの教示においてティーチングからロボット言語とシミュレータによるオフラインプログラミングへと発展したのと同様に、ロボット視覚センサの利用についても、従来の現場での試行錯誤による方法から、センサシミュレーションを十分に利用したモデルベースなオフラインプログラミングへ発展させていく必要がある。

ハンドアイシミュレータをさらに拡張していくべき今後の課題としては、

- (1) 認識対象物のモデル供給機能との結合
- (2) オクルージョン回避行動の実現

(3) プランニングシステムとの結合

などがある。

最後に、当所、情報制御研究室・佐藤知正主任研究官、システム制御研究室・末広尚士技官をはじめ、ハンドアイシミュレータの作成にあたり御協力を頂いた電総研ロボットグループの方々、また、本研究の機会を与えて下さいました白井良明制御部長に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) T. Lozano-Pérez: Robot Programming, Proc. of IEEE, 71-7, 821/841 (1983)
- 2) 白井: モデルベースドビジョン, 日本ロボット学会誌, 2-6, 89/94 (1984)
- 3) Y. Baolin: Combining Vision Verification with a High Level Robot Programming Language, Ph. D. Thesis, Dept. of Artificial Intelligence, Univ. of Edinburgh (1984)
- 4) 松下: 3次元物体の検出・測定を行うためのロボットビジョン言語, 日本ロボット学会誌, 2-6, 32/39 (1984)
- 5) R. W. Daniel and P. G. Davey: Two Key Problems in Robotics Research, Proc. ISRR '84, 273/278 (1984)
- 6) 画像処理システム VIEW 小特集, 電総研集報, 49-4, 45/86 (1985)
- 7) 坂根, 松下, 石井, 佐藤, 柿倉: ハンドアイシステムの基本構成, 電気学会システム・制御研究会資料, SC-84-18 (1984)
- 8) M. Hosaka and F. Kimura: An Interactive Geometrical Design System with Hand-Writing Input, Information Processing 77, 167-172, North Holland, Amsterdam (1977)
- 9) 小笠原: ロボット制御に要求される LISP の機能, 電気学会システム・制御研究会資料, SC-84-19 (1984)
- 10) 末広, 高瀬: 構造的動作記述に基づくロボット用言語, 昭和57年電気学会全国大会講演会論文集, 1630/1631 (1982)
- 11) D. G. Lowe: Solving for the Parameters of Object Models from Image Descriptions, Proc. of ARPA Image Understanding Workshop, 121/127, April (1980)
- 12) S. Ganapathy: Decomposition of Transformation Matrices for Robot Vision, Proc. IEEE Conf. on Robotics, 130-138 (1984)
- 13) T. Lozano-Pérez: Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements, IEEE, Trans. SMC-11-10, 681/698 (1981)
- 14) F. C. Crow: Shadow Algorithms for Computer Graphics, Computer Graphics, ACM Siggraph, 11-2, 242/248 (1977)