

ステレオ視を用いた移動視覚システム

— (I) 実験システムの試作 —

渡 辺 睦 , 小野口 一則 , 星 野 弘

株式会社 東芝 総合研究所

知能移動ロボットの視覚システムのプロトタイプを作成した。本論文ではステレオ視を用いて移動環境のモデルを予め対話的に構築し、これを用いて自己の現在の3次元位置を測定する機能と、モデルに頼らず「視差予測ステレオ法」の原理に基づいて概略の環境把握を行い、自分がこれから進行しようとする空間の移動可能性の判定、移動可能空間の検出を行う機能とを備えたものを提案し、各々の機能の処理内容、及び実験室内の画像を用いて今回試作したシステムの検証実験を行った結果について述べる。

実験の結果、本システムの有効性が確認された。今後は、各機能の内容の充実と共に、LSI利用による高速化を行い、実用的なシステムの実現をめざしていく。

Vision System for Navigation by Stereoscopic Method.

— (I) Construction of Experimental System. —

Mutsumi WATANABE, Kazunori ONOGUCHI, and Hiroshi HOSHINO

Research and Development Center, Toshiba, Japan.

We have been developing a practical stereo vision system for autonomous mobile robots. Our navigation system consists of three principal components : co-operative environment-model-construction block, self-location-detection block to measure the three dimensional position of the robot itself with the aid of the environment model, and free - space - detection block based on the "disparity prediction stereoscopic method" to realize fast collision detection. This paper describes the concepts in each components and the experimental results. The experimental researches show the usefulness of the system.

1. はじめに

近年、視覚を用いて外部の環境を認識し、自律的な移動・作業を行う知能ロボットの研究が盛んになりつつある。我々は、ロボットのための3次元位置計測手段としてステレオ視が有効であると考え、実験装置の試作・研究を行ってきた。^{(1),(2)}

目的地迄ロボットを安全に移動させ、作業を行わせるためには、例えば図1の1～4に示す様な曲り角・段差の後ろ等、進行方向が大きく狂う可能性のある地点において自己の環境内における3次元位置を計測し、必要であれば径路の修正を行う位置確認の機能が不可欠である。このためには、予め環境の3次元モデルを作成し、これと移動時に入力されるシーンとの比較・照合を行い、本来在るべき位置からの変位量を求めればよい。

現在ロボットが実際に用いられるのは、工場・原子力発電所などの屋内に限定されており、ここでは前もって人間が環境内を誘導して環境モデルを対話的に作成することが可能である。

しかし、その他の各地点においては、自己の位置を精密に求めることは必要でなく、自分がこれから進行しようとする空間内に物体があるか無いかの判定、及び移動可能空間の検出が高速に行えればよい。このためには、ステレオカメラの配置をなるべく単純に設定し、処理を容易化するのがよい。

環境モデルを用いた位置確認とモデルに頼らない移動可能空間検出を組み合わせることにより、従来なし得なかった安定かつ効率のよい移動が実現できると思われる。

こうした考えに基づいて、我々は以下に示す3種のサブシステムから成る移動視覚システムを構築した。

(1) 環境教示部

(2) 位置確認部

(3) 移動可能空間検出部

以下、各サブシステムの概要、及び検証実験を行った結果について述べる。

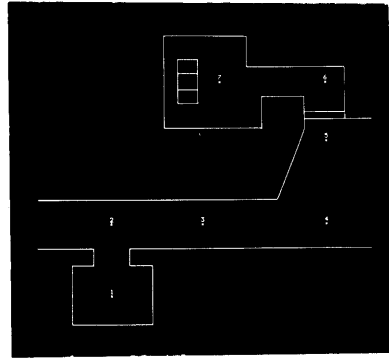


図1 移動視覚システム

2. 移動視覚システム

図2に、今回作成した移動視覚システム全体の構成を示す。位置確認結果及び移動可能空間検出結果を用いて走行制御部に移動量、移動方向の指令を与える「径路決定部」は含まれておらず、今後検討する予定である。

** NAVIGATION VISION SYSTEM **

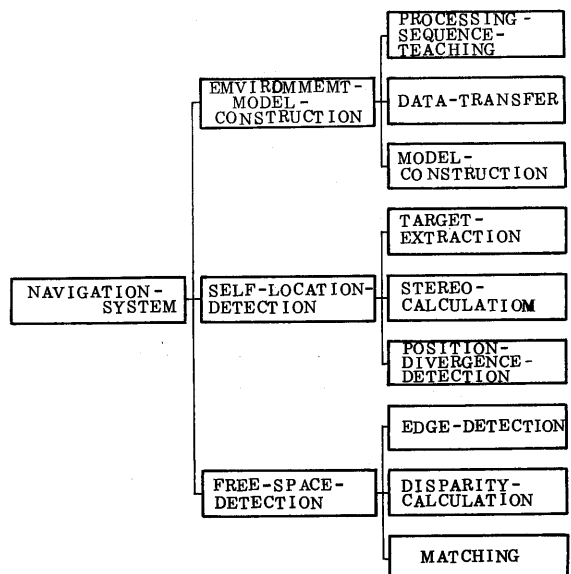


図2 移動視覚システム構成

2.1 環境教示部

移動しながら視覚センサにより外界の環境モデルを自動的に構築し、移動経路の作成を行うロボットはいくつか報告されているが、^{(3), (4)}今回は、作成の容易さ、モジュール性、汎用性などの点から、あらかじめ環境内を誘導して得られた画像列より、位置確認に用いる抽出の容易な目標物を人間が指定し、抽出処理手順の発生・保存を行う、対話的環境教示サブシステムを作成した。教示時の3次元位置は、ステレオ法により求められる。

環境モデルは、位置確認地点名・目標物名、教示時の目標物座標値等のデータ部分と、これを用いて目標物の抽出処理を行う手続き的な部分の2種に大別される。目標物は線分・楕円等の基本図形の集合として表され、視点位置に大きく依存しない特徴量を用いて抽出が行われる。⁽⁵⁾この設計思想は「物体認識システム」のものと基本的には同一であり、処理手順の自動生成迄発展させることが可能である。

画像処理専用装置を用いて作成された抽出処理手順は、データ部と共に記号処理用計算機に転送され(図3参照)、環境モデルとして貯えられる。

モデルの追加・変更はこの記号処理用計算機上で容易に実行できる。

目標物	整数 2byte
地点名称	キャラクタ 12byte
目標物座標値	キャラクタ 12byte
左ウィンドウ	浮動小数点 4byte ×3-12byte
サブ・コマンド数	整数 8byte
サブ・コマンド列総文字数 (サブコマンド列)	整数 2byte
. . . S	整数 2byte (偶数値)
. . . S	一つのサブ・コマンドの終了は S (注)
. . . S	
右画像ウィンドウ	整数 8byte
サブコマンド数	整数 2byte
サブ・コマンド列総文字数 (サブコマンド列)	整数 2byte (偶数値)
. . . S	一つのサブ・コマンドの終了は S (注)
. . . S	
. . . S	

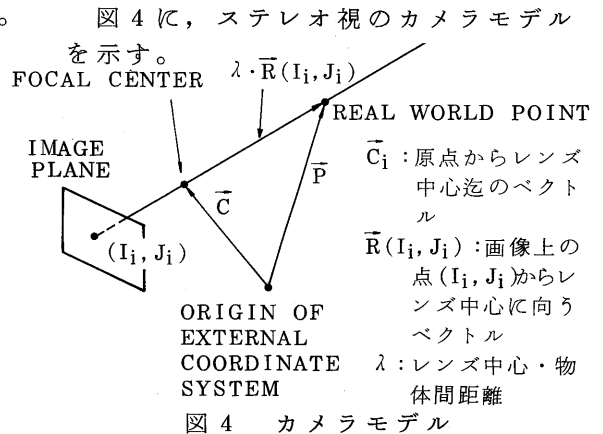
(注) サブ・コマンド：基本画像処理ルーチン

図3 転送フォーマット例

2.2 位置確認部

位置確認部では、まず現地点における入力ステレオ画像対により、環境教示部において作成された処理手順に従って、目標物の左右画像における位置を各々抽出する。

次に、この画像上の位置から、予め求めた校正パラメータを用いて、視点座標系における目標物の3次元位置をステレオ計算する。



系を上図の様に定めると、物体の3次元位置 \vec{P} は、 $\vec{P} = \vec{C}_i + \lambda \vec{R}(I_i, J_i) \dots$ (1)となる ($i = 1, 2$)。

\vec{H}_i : 水平方向ベクトル
 \vec{V}_i : 垂直方向ベクトル
 \vec{A}_i : レンズ光軸方向単位ベクトル を、

$$I_i = \frac{(\vec{P} - \vec{C}_i, \vec{H}_i)}{(\vec{P} - \vec{C}_i, \vec{A}_i)} \dots \dots \dots (2)$$

$$J_i = \frac{(\vec{P} - \vec{C}_i, \vec{V}_i)}{(\vec{P} - \vec{C}_i, \vec{A}_i)} \dots \dots \dots (3)$$

を満たす様に定義する。校正パラメータ $\vec{A}_i, \vec{H}_i, \vec{V}_i, \vec{C}_i$ は、3次元位置が既知のマークを順次ステレオカメラで撮影し、対応する画像上の位置 (I_i, J_i) を抽出し、方程式(2), (3)を最小2乗法を用いて解くことにより得られる⁽⁶⁾。現在、予め校正すべき空間位置を指定すれば、これを等間隔に分割し、多関節型ロボットアーム(SR-606V)に取り付けられたLEDを順

次動かしして校正を行うプログラムが稼働中である。

最後に、求められた各目標物の3次元位置と、教示時と同一のカメラパラメータを用いて得られた3次元座標値との間のズレより、教示位置からの変位量を計算する。図5に教示時と移動時における座標系間の関係を示す。

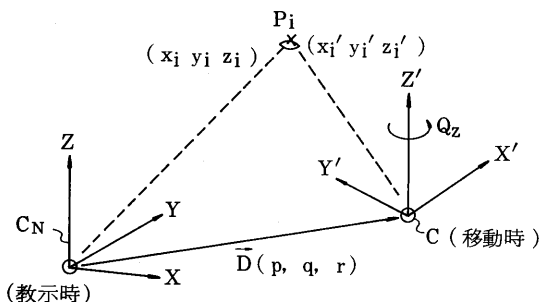


図5 座標系の関係

教示時の座標系を C_N 、移動時の座標系を C とし、各座標系における目標物 P_i の3次元位置を各々 (x_i, y_i, z_i) 、 (x'_i, y'_i, z'_i) とする。平面上の移動を仮定すれば、两座標系間の変位は、平行移動 $\vec{D}(p, q, r)$ 及び z 軸回りの回転 θ_z で表される。座標間には、

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 & k \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & l \\ 0 & 0 & 1 & -r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$k = -p \cos \theta_z - q \sin \theta_z$$

$$l = p \sin \theta_z - q \cos \theta_z \dots \dots \dots (4)$$

の関係が成立するため、各目標物 P_i について(4)式を連立させ、最小2乗法を用いて解くことにより、変位量 p, q, r 及び θ_z が算出される。

目標物は一地点において最低2組あれば変位量が算出できるが、計算精度を向上させるために、処理時間の許す範囲でできるだけ多くの目標物を用いて計算するのが望ましい。

2.3 移動可能空間検出部

1で述べた様に、本サブシステムの目的は移動環境の概略の“depth map”を高速に求め、この結果を用いて自分がこれから進行しようとする空間の移動可能性の判定及び移動可能空間の検出を行うことにある。

両ステレオカメラの光軸を平行・俯角0度で、床面からの取付け高さを等しく設定すれば、光軸に垂直な断面上的の物体 P は、(5)式で与えられる同一の視差 S を有する。図6に視差式(5)の説明図を示す。

$$S = S_1 \sim S_2$$

$$= \frac{L}{D} (\overline{Q_1 P} \sim \overline{Q_2 P})$$

$$= \frac{a \cdot L}{D} \dots \dots \dots (5)$$

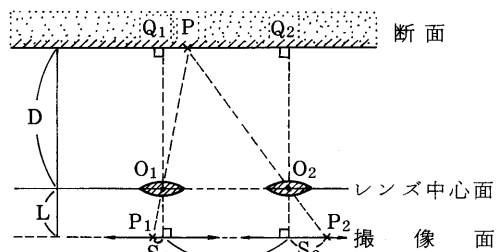


図6 視差式説明図

従って、移動可能性を判定すべき断面上に物体が存在した場合の視差を(5)式により予測し、左右ステレオ画像からこの予測に合った部分を照合、抽出して(視差予測ステレオ法)^{(7),(8)}その大きさを計測することにより、物体の有無が判定できる。

同一物体の同一点でも、観測する位置が異なれば、画像とした時の濃度値は変化する。しかし、カメラ間隔を余り大きく広げなければ、エッジ等の“強い”特徴は保存される。この拘束を利用して、入力画像に sobel operator を施して垂直方向のエッジを抽出・2値化・細線化・ノイズ除去したものを視差を変えて順次重ね合わせ、位置の合

った部分を“等距離断面像”として抽出する。

図7に本サブシステムの処理の流れを示す。

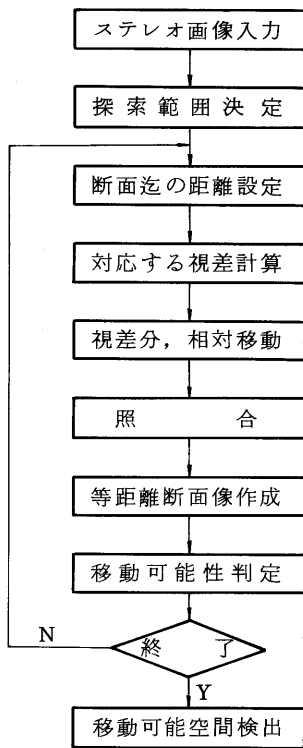


図7 移動可能空間検出処理の流れ

3. 実験結果及び考察

今回作成した移動視覚システムの有効性を検証するため、実験室内を移動環境に模擬して実験を行った。

ステレオ画像入力装置として、2台のCCDカメラを3脚に取付け、カメラ間隔、及び、pan角を可変にできる様にし、これを用いて512×512点、8bitのデジタル画像に変換した。各サブシステムの画像処理実行部は、高速画像処理専用装置TOSPIX-II上に実装した、記号処理用計算機として、リスプマシン(LMI社ラムダ)を用いた。以下、各サブシステムの実験結果について述べる。

3.1 環境教示部実験結果

今回は、位置確認の目標物としてコーナーを選択し、TOSPIX-IIで開発した基本画像処理ルーチンを組み合わせてこれを縦方向・横方向の2組の線分(基本図形)の交点として抽出する処理手順を対話的に作成した。

表1に、現在装備されている基本画像処理ルーチンの一部を示す。

表1 基本画像処理ルーチン例

(コマンド名)	(引数)	(主な機能)
SMT	WI, F	平均化
DIF	WI, F	差分
SLCI	WI, L	領域スライス
ADD	WI, WI2	加算
SUB	WI1, WI2	減算
AND	WI1, WI2	論理積
OR	WI1, WI2	論理和
THN	WI, F, N	閾値化
EPN	WI, F, N	拡大
FLT	WI, IN, OUT, INFLT, BIAS, SFT, NAME	TOSPIXサブルーチンの空間フィルタを実行する。
LFL	WI, F	論理フィルタ
DSP	k	表示画素の切り替え
HST	WI	画素ヒストグラムを計算し表示する。
FLTGV		3×3フィルタをキー入力で作成する。
INI		サブコマンド入力を初期化する。
LST		登録したサブコマンドの一覧表示
END		サブコマンド入力を終了する。

写真1は、空間フィルタリングにより横方向の線分を強調した後、2値化の閾値を7通り変化させて表示した結果である。画面を見て最も適当と判断するものを指定し、登録する。

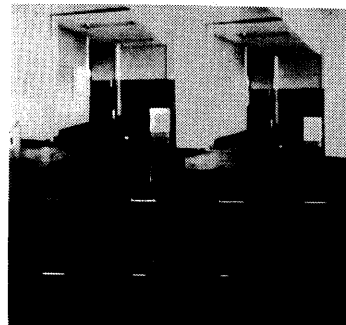


写真1 対話的教示例 (空間フィルタリング後2値化)

本システムを用いて作成されたコーナー抽出処理の履歴を写真2に示す。

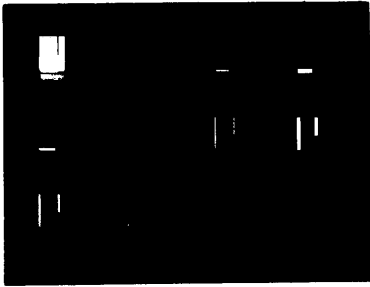


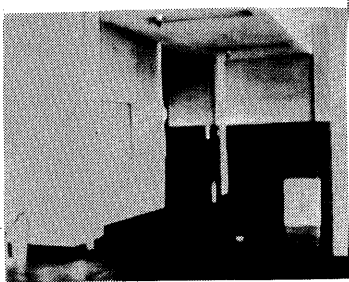
写真2 コーナー抽出例

3.2 位置確認部実験結果

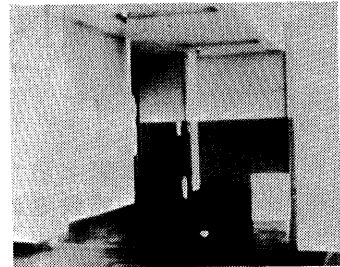
3.1 と同一の環境下で、ステレオカメラを移動して位置確認実験を行った。教示時及び移動時のステレオ画像を写真3, 4に示す。

表2 3次元位置算出結果

	目標点 A		目標点 B	
教示部座標値 (cm)	(-346.3, 37.4, -10.4)		(-338.4, 28.9, -15.4)	
移動時抽出結果 (画素)	左	右	左	右
	369, 397	312, 416	487, 437	422, 457
移動時座標値 (cm)	(-34.5, 42.8, -9.6)		(-334.4, 29.3, -15.4)	

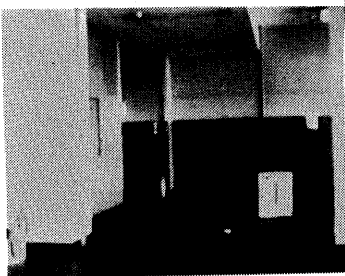


(a) 左カメラ像

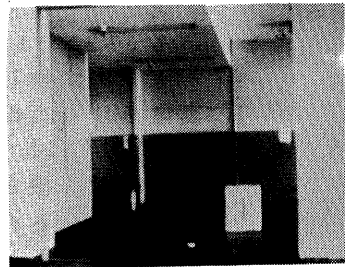


(b) 右カメラ像

写真3 実験環境ステレオ画像 (教示時)



(a) 左カメラ像



(b) 右カメラ像

写真4 実験環境ステレオ画像 (移動時)

図8に示す様に直交座標系を定め、A・B 2個所を目標物として、教示時と移動時の間のロボット位置の変位量の算出を行った。

目標物の3次元位置算出結果を表2に示す。位置の変位量は、この結果を用いて式(5)を計算することにより求めることができる。

3.3 移動可能空間検出部実験結果

現在、移動可能性判定の所迄完成している。

図8の目標物A, Bを含む断面上のエッジを抽出した結果を写真5~9に示す。

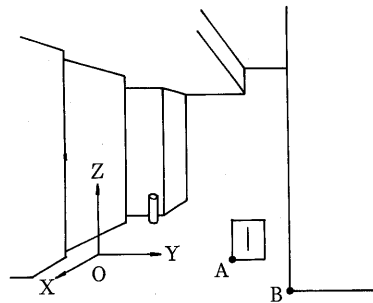
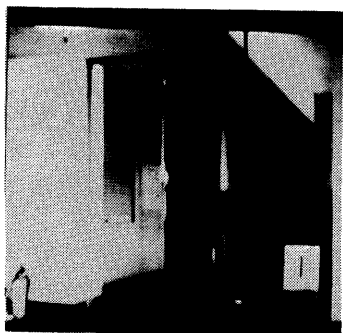
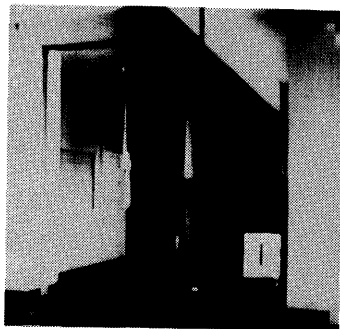


図8 座標系及び目標物の関係

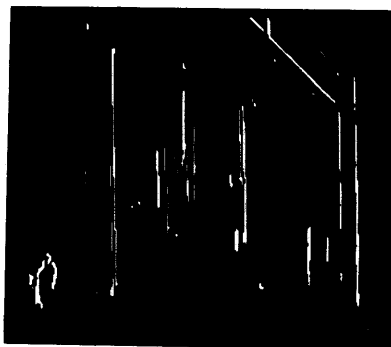


(a) 左カメラ像

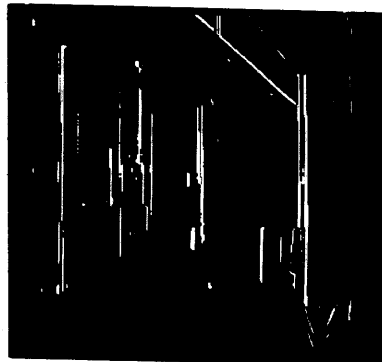


(b) 右カメラ像

写真5 原画像（教示時）

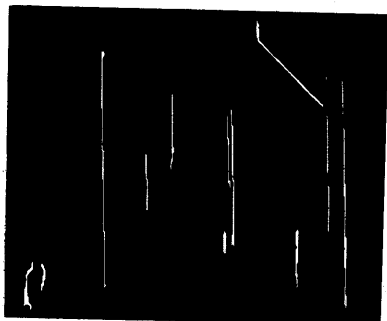


(a) 左カメラ像

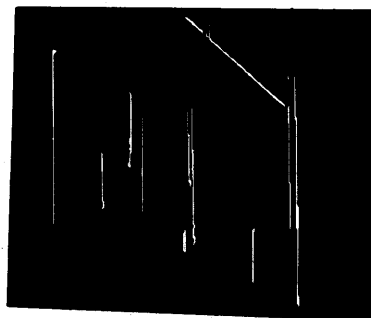


(b) 右カメラ像

写真6 空間フィルタリング後2値化



(a) 左カメラ像



(b) 右カメラ像

写真7 細線化後ノイズ除去結果

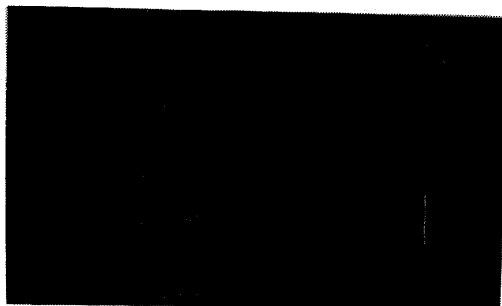


写真8 断面Aのエッジ抽出結果

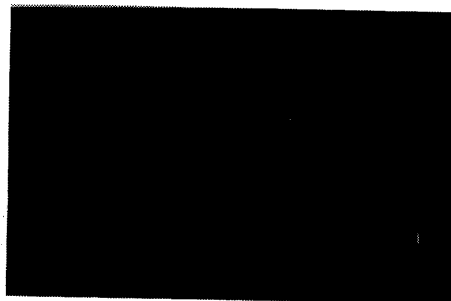


写真9 断面Bのエッジ抽出結果

参 考 文 献

各断面を設定してそこでの視差を計算し照合・抽出を行った結果、目標物 A・Bのエッジが正しく得られており、光軸にほぼ垂直なエッジを有する物体の抽出ができることが示された。

本結果では、写真 8 に示す様に、目標物以外のエッジの一部も出てきているが、これは現在 2 値画像として画素単位の照合を行っており、同一物体のエッジでなくとも、視差分ずらして重ね合わせた時にたまたま位置が合ったものを抽出しているためである。

このエッジの「偽照合」が本方式による移動可能性判定の信頼性に大きく影響するため、現在その解決に向け検討を行っている。

4. む す び

ロボットの移動視覚システムとして、移動環境のモデルを予め作成しておき、これに基づいて自己の位置の変位量の算出を行う位置確認と、モデルに頼らず環境の概略の“depth map”を高速に生成し、これを用いて、これから進行しようとする空間内の物体の有無を判定する移動可能空間検出の 2 種の機能を有するものを提案し、簡単な場合について検証実験を行った。

今回作成したものは未だ初歩的な段階であり、教示用基本画像処理ルーチンの充実、位置測定精度の向上、偽照合の除去等の課題が残されている。

今後、上記の問題点を解決すると共に、現在「極限作業ロボット」プロジェクトの一環として開発を行っている類似領域比較 LSI を用いて、処理の高速化を図っていく予定である。

本研究の一部は、通産省工業技術院大型プロジェクト「極限作業ロボット」研究の一環として行われたものである。

- [1] 久野他, 「ロボットビジョン用可動ステレオカメラ」, 昭和 59 年度電子通信学会総合全国大会予稿集 pp 6-129, 1984.
- [2] 渡辺・久野, 「ステレオ視によるロボット制御一 부품の把み上げ実験」情報処理学会第 30 回全国大会予稿集 pp 1377~1378, 1985.
- [3] H. P. Moravec, 「The Stanford Cart and the CMU Rover」, Proceedings of the IEEE, vol. 71, No. 7, pp 872~884, 1983.
- [4] Y. Kaneyama, 「Concurrent Programming of Intelligent Robots」, IJCAI '83, pp 834~838, 1983.
- [5] 久野・沼上, 「3 次元形状モデルの解析に基づく戦略駆動型物体認識」, 情報処理学会第 31 回全国大会予稿集, pp 1117~pp 1118, 1985.
- [6] Y. Yakimovsky 他, 「A System for Extracting Three-Dimensional Measurements from a Stereo Pair of TV cameras」, Computer Graphics and Image Processing 7, pp 195~210, 1978.
- [7] 渡辺・福井, 「視差予測ステレオ法による物体検出実験」, 情報処理学会第 31 回全国大会予稿集, pp 1119~1120, 1985.
- [8] 有村・金子・増田, 「光線追跡型ステレオマッチング法の 3 眼ステレオ視への適用」, コンピュータビジョン研究会資料, vol. 86, No. 62, 1986.