

## ステレオ視を用いた障害物検出システム

Obstacle Detection System with  
Stereo Vision.

渡辺 睦      小野口 一則      麻田 治男  
Mutumi WATANABE    Kazunori ONOGUCHI    Haruo ASADA

東芝(株) 総合研究所

TOSHIBA Research and Development Center

あらかし 本論文では、ステレオ視を用いた移動ロボットのための障害物検出の手法について述べる。視覚制御により移動する場合、毎時シーン全体の記述を作成、認識していたのでは効率が悪い。我々は、ロボットが次に進行する空間をカメラ光軸に垂直な複数の断面に分割し、これらの断面に対応した視差を持つ特徴エッジをステレオ照合することにより障害物の候補を高速に得る手法(視差予測ステレオ法)を開発した。ヒューリスティクスを用いて通路領域を抽出し、これと照合エッジとの干渉を判定することにより、背景部での偽照合による誤検出を減少させた。数種類の屋内シーンにおける実験を行い、本手法の有効性を確認した。

**ABSTRACT** This paper describes an obstacle detection technique with stereo vision for mobile robots. In order to achieve efficient navigation a mobile robot does not need a depth map for the whole scene. We propose a "Disparity Prediction Stereopsis Method" which extracts the feature edges with given disparities which correspond to the space where the robot is due to move. Judgement of the interference in the passable region greatly decreases the error of obstacle detection caused by the mismatching. Experimental results show the effectiveness of the algorithm.

### 1. はじめに

近年、視覚を用いて周囲の環境を認識し、自律的に移動するロボットの研究が盛んに行われている。1), 2), 3) 我々は、ロボット用の視覚としてステレオ視が有効であると考え、原子力発電所の保守・点検作業を行うロボットの移動視覚システムの開発を行ってきた。4)

本システムは、予め教示した環境モデルを用いて、三角測量の原理により自己の位置を測定する位置確認部 5) と、進行方向に物体が存在するかどうか検出する障害物検出部とから構成されている。本稿では後者について、この開発思想、及びアルゴリズムの詳細を述べる。

人間は、未知の環境においても、特に意識すること無く円滑に歩行することができる。

これは、視野に入るシーン全体を毎時認識しているのではなく、予め大雑把に領域分割した後、必要な部分のみを予測し、詳しく観る、という処理によるものと考えられる。しかし、未知のシーンを高速、且つ高精度に領域分割することは困難なため、我々は、ステレオ画像から特徴エッジを抽出し、これからロボットが進行しようとする空間に対応する視差を有するもののみをステレオ照合、探索することにより、障害物の候補を検出する手法(視差予測ステレオ法)を開発してきた。6), 7)

以下、移動視覚情報処理、本システムの構成、実験結果、考察の順に述べる。

## 2. 移動視覚情報処理について

あらゆる生物にとって、エサ、母親、等の目に見える目標物への到達、障害物回避などの移動行動は、最も基本的な能力の一つである。

しかし、基本的であるがゆえに、このメカニズムを明確にするのは容易ではない。

我々が歩行する場合について考えてみよう。通路上に何も存在しない間は、注意をほとんど払わずとも円滑に歩くことができる。これから進行しようとする空間に干渉すると判断された物体が視野に入った瞬間、これを素早く検出した後、暫く意識を集中し、静止している（危険）かどうか判断する。静止していると判断した場合には、これを回避する径路を頭の中に描き、再び無意識裡にこの径路に倣って歩き続ける。動きのある場合には、その速さ、物体の大きさなどに応じて、停止する、歩行を続けつつ回避する、後戻りする、等の行動を選択、実行する。

片目をつむると、奥行き情報が不明確になるため、円滑に移動することは困難になるが、障害物の有無に関しては両眼視の時と同様、迅速に検知することができる。

この障害物検出の迅速性は、シーンの大雑把な把握、過去の移動経験などに基づいた予測により確保されていると思われる。

## 3. 障害物検出システムの構成

2. で述べた知見を考慮して定めた障害物システム全体の処理の流れを、図1に示す。

全体は、エッジ・通路領域抽出部と視差予測照合部の2つに大きく分れている。

### 3.1 特徴エッジによるシーンの記述

前述の様に、人間はシーン全体を大雑把に領域分割することにより概略の記述を作成していると思われるが、今回我々は、ハードウェア化、ステレオ照合の容易性を考慮し、シーンを構成する強い特徴であるエッジを抽出した後、セグメント化（折線近似）したものをを用いた。

エッジ強調は、図2に示す4種の微分型空間フィルタを施すことにより行った。

セグメント記述結果より傾きを計算し、しきい値以上のものを縦エッジセグメントとして選出した。

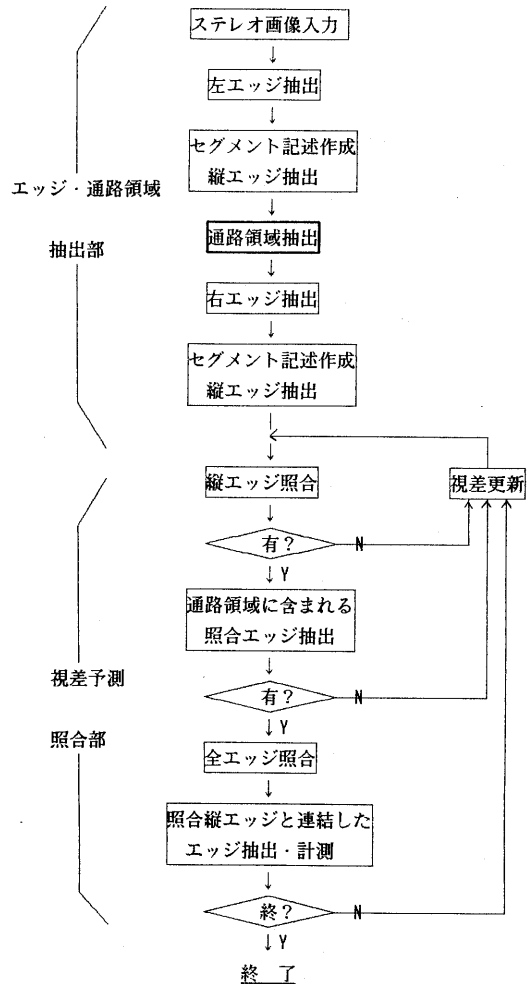


図1 障害物検出処理の流れ

1 1 1	-1 -1 -1	1 0 -1	-1 0 1
0 0 0	0 0 0	1 0 -1	-1 0 1
-1 -1 -1	1 1 1	1 0 -1	-1 0 1
水平	水平	垂直	垂直
(明→暗)	(暗→明)	(明→暗)	(暗→明)

図2 エッジ強調フィルタ

### 3.2 通路領域の予測

“通路”の意味する所は、歩道、屋内の床、階段、土の地面、芝生など様々であり、我々は、色、テクスチャ等の濃度情報に対する並列処理結果と経験に基づく推論（例えば、手前の部分に日が当たって光っているも、その先がつながっていれば、通路と判断する、など）を組み合わせて、巧みに通路抽出を行っている。

自律移動車の分野において、例えば、米国DARPA プロジェクトに於けるALV 1), 8) では、屋外の道路に限定して、カラー情報と予測により得られたウィンドウから抽出した道路端エッジを組み合わせて抽出に用いている。又、晴信4号機 9) では、面積による領域の分類後、カラー、重心、形状による判定を行っている。

今回、我々は、更に広い意味での通路領域の予測に用いられていると思われるヒューリスティクスを幾つか抽出し、プログラム化することとした。

#### 通路の予測に用いるヒューリスティクス

a) 空間的連続性 : 画像の下方にある面積の大きい連結領域を、通路の候補と予測する。

b) 通路端の存在 : 画像の下方にある長いエッジは通路の境界の候補となる。

この仮定は、野原の様な所では成立たないが、屋内環境で側方に壁が見える場合に成立すれば、通路を予測する際の強い手掛かりとなる。

c) 縦エッジの非存在 : 下面から立っている物体は障害物であり、通路領域から排除される。従って、視線方向が下面に平行な場合、縦エッジを含む領域は通路の可能性が小さい。

d) 均一性 : 通路領域内の隣接した部分の濃度特性（色、平均濃度、テクスチャ等）は大きく変化しない。この仮定は、格子縞の入った床や、影・反射のある場合には成立せず、比較的弱い拘束条件であるが、単色の床の場合には有効である。

これらの他に、“時系列的に入ってくる画像間の連続性”も有力な手掛かりであるが、まず“静止位置に於けるステレオ画像を用いた障害物検出”を目標としているため、今回はプログラム化を行わなかった。

通路領域抽出では、上述したヒューリスティクス a) ~ d) を考慮し、画像内の局所マスク単位で“通路可能性”を反映した得点を計算、加算していく、という手法を採った。図3にこのアルゴリズムを示す。

まず局所マスク内にエッジが含まれるかどうかで類別した後 -b), c)、含まれない場合には、マスク内の平均濃度、濃度分散値を計算し、基準値との差が小さいものに高い得点を与える -d) 処理を、画像の下方から上方に向かって行う。カメラ光軸が床面に平行な場合、通路は光軸中心から下方のみ投影されるため、画像の下半分のみを処理している。通路領域の基準値（平均濃度、濃度分散値）は、移動開始前に予め左画像中に対話的に指定した例示領域において計算した値を用いることにより、通路の種類の変化に対応している。ロボットが移動する場合は、抽出した通路領域全体の計算値で随時基準値を更新する。最後に、得点がしきい値以上の部分を抽出した後、面積が最大の連結領域 -a) を求めた。

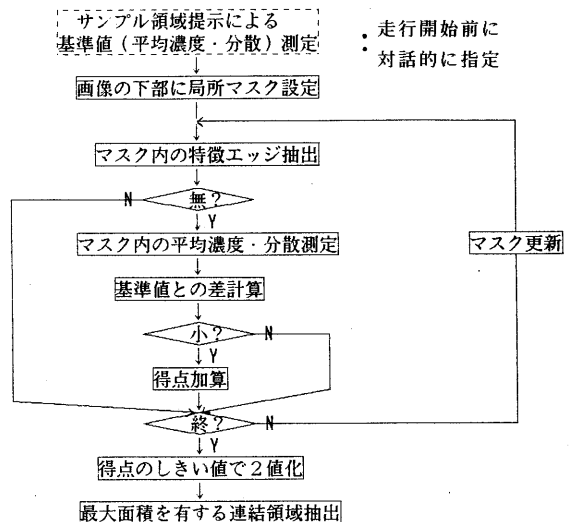


図3 通路領域抽出アルゴリズム

### 3.3 視差予測ステレオ法

3.1 で得られた特徴エッジセグメントから障害物の候補を高速に予測するため、次の時点にロボットが進行する空間をカメラ光軸に垂直な複数の断面に分割し、カメラから断面までの距離に対応した視差を有するものを順次ステレオ照合により抽出した。対応探索を単純にするため、ステレオカメラの光軸は平行に設定した。図4にカメラ系を模式的に示す。距離D離れた段面上の物体の視差は、式(1)で与えられる。

類似指標として、式(2)に示す、左右原画像の対応探索領域内の正規化された濃度差を採り、セグメント単位で照合を行った。全エッジセグメントに対して縦エッジセグメントの数が大幅に少ないため、照合を2段階に分け、通路領域に含まれる縦エッジセグメントが存在する場合のみ全エッジセグメントを照合することにより、効率の向上を図った。

$$\begin{aligned} \text{視差 } S &= S1 \sim S2 \\ &= L \times (Q1P \sim Q2P) \\ &= (\varepsilon \times A \times L) / D \quad \dots (1) \\ &\quad \varepsilon : \text{変換比 (定数)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma |L_{ij} - R_{ij}| / (\Sigma L_{ij} \times \Sigma R_{ij}) \quad \dots (2) \\ L_{ij}, R_{ij} : \text{左右原画像濃度} \end{aligned}$$

### 3.4 障害物位置の算出

照合した縦エッジセグメントの下端点に連結した通路領域内の照合エッジの最下位置を求める。縦エッジと判定するしきい値に幅を持たせることにより、直方体のみならず、円筒、三角板、3脚形状の障害物も検出できる。

上記の最下位置、及び、自己位置確認結果、照合時の視差から求まるカメラ・障害物間距離D(式1)を用いて、環境座標系に於ける障害物の位置を計算する。

## 4. 実験結果

本手法による障害物抽出の性能を評価するため、ワークステーション(AS4260)に画像処理及び線分追跡のハードウェアを付加したイメージプロセッサに実装し、数種類の屋内シーンをを用いた障害物抽出実験を行った。通路抽出の際の局所マスクサイズは5画素×5画素と定めた。

写真1～10は、実験室に敷いた絨毯上に障害物としてファイルボックスを置いたシーンを処理した結果である。カメラ・障害物間距離は約3m(視差188～164)である。

写真1は左右原画像、写真2はエッジ抽出結果(2値化しきい値:30)、写真3は縦エッジセグメント抽出結果である。表1にエッジ数を示す。写真4は左画像から通路領域を抽出した結果である。現在、領域の整形化を行っていないため、障害物の影、境界エッジのどぎれのある箇所は不正確であるが、これらの部分を除けばほぼ正しく抽出されていることが確認できる。

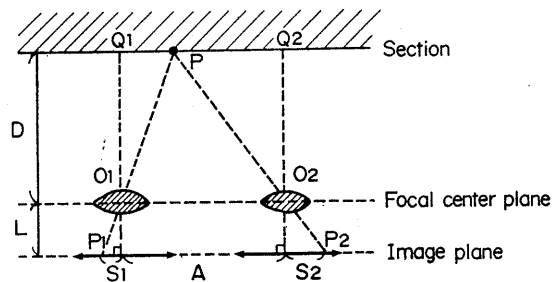


図4 カメラ系模式図

写真5は、ファイルボックスの前面に対応した視差(188)における縦エッジの照合結果である。背景の配管部分で偽照合が発生している。写真6は、写真5の結果から通路領域に含まれるものを取り出した結果である。偽照合エッジが除かれ、障害物の輪郭のみ抽出されている。写真7は、通路領域に含まれ、写真6のエッジに連結した照合エッジを抽出した結果である。ファイルボックスの下底が取り出せ、障害物までの距離が求められた。

写真8~10は、同じシーンで、ファイルボックスの後部に対応した視差(164)での照合結果である。

次に、原子力発電所を模擬した環境に直方体状の障害物を置いたシーンを処理した結果を写真11~22に示す。通路は緑色のタイルであり、背景に位置確認用目標物(配電ボックス、メータ)、バルブなどが含まれている。

障害物はカメラ前方約3m~4m(視差90~63)に置いた。写真11は左右原画像、写真12はエッジ抽出結果(2値化しきい値:6)である。ステレオカメラの絞りが異なるため、原画像の明るさはかなり変化している。更に、環境全体が暗く、背景が複雑、且つ、床面での反射、影の影響が大きいいため、確実に障害物を抽出するのは困難な環境になっている。

写真13は縦エッジセグメント抽出結果、写真14は、通路領域の抽出結果である。表2にエッジの本数を示す。障害物の下部分の特徴エッジが影により欠けているため、箱の内部まで領域が進入している。

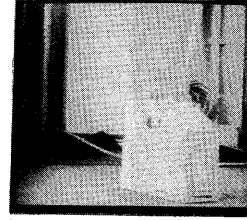
写真15は、障害物を含む断面(視差65)における縦エッジセグメント照合結果である。背景の配電ボックス部分等で偽照合が発生している。

写真16は、障害物を構成すると判定された縦エッジと左原画像(写真11)を重ねて表示した結果である。写真15にあった偽照合エッジは除去することができた。この場合、障害物の下底辺は取り出すことができなかつたが、直方体の場合、縦エッジ位置のみから障害物の位置が計算できるため、回避径路が策定できる。

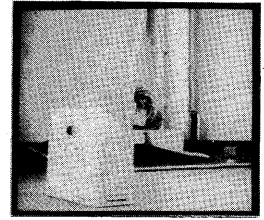
写真17~22は、ステレオカメラが更に障害物に接近した場合(視差87)の結果である。

表3にエッジの本数を示す。左画像における障害物の右端は視野の外にある。この場合も、写真22に示す様に、障害物の左端が正しく抽出された。

これらのシーンに於ける処理時間は、約17秒であった。

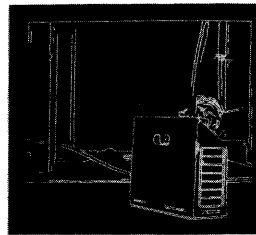


(左画像)

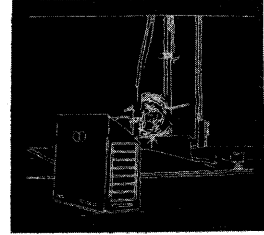


(右画像)

写真1 原画像  
(実験室)



(左エッジ)



(右エッジ)

写真2 エッジ抽出結果

表1 エッジ抽出結果(実験室)

	左画像	右画像
全エッジ数	412	336
特徴エッジ数	93	86
特徴セグメント数	447	578
縦エッジ数	26	25

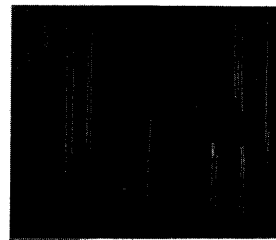


写真3 縦エッジセグメント抽出結果

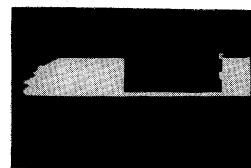


写真4 通路抽出結果

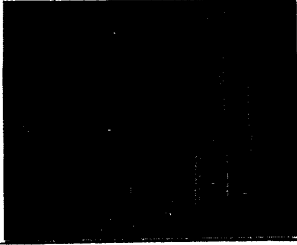
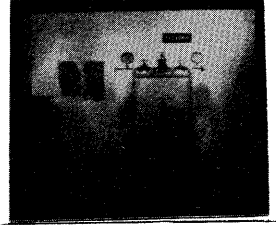
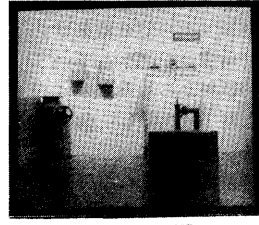


写真5 縦エッジ照合結果  
(視差: 188)



(左画像) (右画像)  
写真11 原画像  
(原子力発電所模擬環境-1)



写真6 通路に含まれる  
縦エッジ

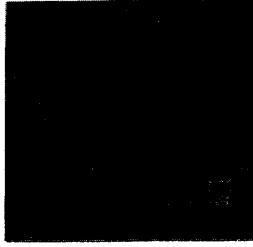
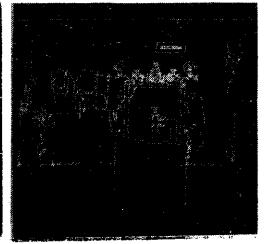
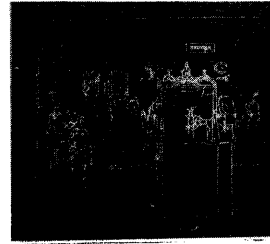


写真7 連結した  
照合エッジ



(左エッジ) (右エッジ)  
写真12 エッジ抽出結果

表2 エッジ抽出結果 (模擬環境-1)

	左画像	右画像
全エッジ数	674	481
特徴エッジ数	59	72
特徴セグメント数	2458	1780
縦エッジ数	33	33

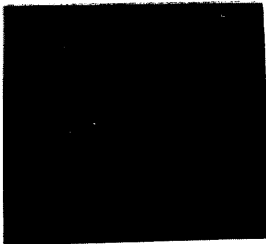


写真8 縦エッジ照合結果  
(視差: 164)



写真9 通路に含まれる  
縦エッジ

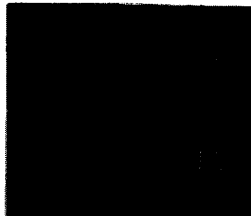


写真10 連結した  
照合エッジ

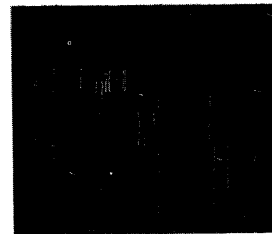


写真13 縦エッジセグメント抽出結果

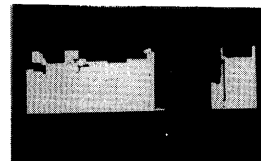


写真14 通路抽出結果

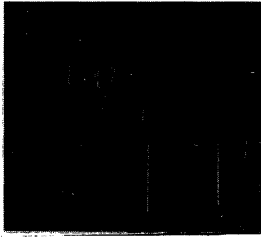


写真15 縦エッジ照合結果  
(視差: 65)

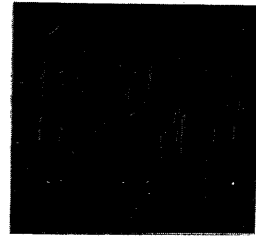


写真19 縦エッジセグメント抽出結果

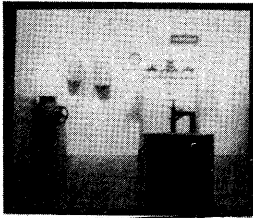


写真16 障害物を構成する縦エッジ  
(左原画像と重ね表示)

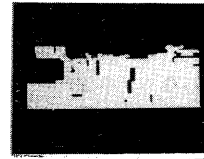
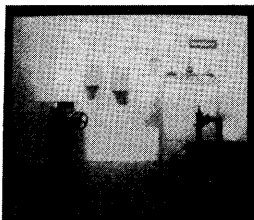
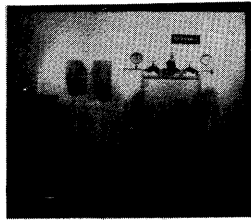


写真20 通路抽出結果



(左画像)

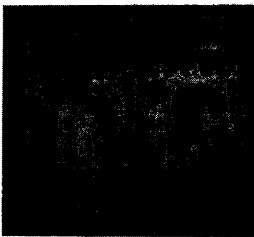


(右画像)

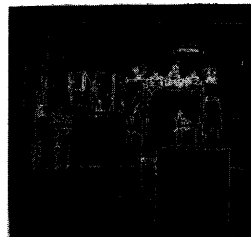
写真17 原画像  
(原子力発電所模擬環境-2)



写真21 縦エッジ照合結果  
(視差: 87)



(左エッジ)



(右エッジ)

写真18 エッジ抽出結果



写真22 障害物を構成する縦エッジ  
(左原画像と重ね表示)

表3 エッジ抽出結果 (模擬環境-2)

	左画像	右画像
全エッジ数	724	531
特徴エッジ数	70	73
特徴セグメント数	2479	1859
縦エッジ数	28	28

## 5. 考察

屋内シーンでの実験により、単色の床の場合は、3.2で述べたヒューリスティクスを用いて通路領域がほぼ正しく抽出でき、この領域との干渉判定により、視差予測法で得られた照合エッジに含まれる偽照合部分が排除されるため、安定に障害物が検出できることが確認された。

今回、通路領域抽出は、近傍マスクの“通路可能性”に応じた得点の加算→しきい値処理→ラベリング、ヒストグラムを用いた、最大面積を有する連結領域抽出→外接長方形計測により行った。この方法は、現状のハードウェア（局所処理をパイプラインで高速に行う型）に適しており、今回の実験で用いた単色の床面では有効であったが、通路上に強い影、テクスチャがあると、障害物と判定する可能性がある。判定に用いているヒューリスティクスが不十分であり、又、マスクサイズ、得点の付け方を通路に応じて実験的に設定しなければならず、拡張性が無い。つまり、人間の知覚する“通路”を直接求めているのではなく、この近似に過ぎない。我々は、常時通路領域全体を見ているのではなく、時間的に変化した部分のみを注視していると思われる。この部分は本技術の中核を成す所であり、今後も続けて検討を行う予定である。

2. で述べた様に、人間はまず視野を大雑把に領域分割し、通路や障害物候補の検出に用いていると思われる。しかし、現在領域分割を高速、且つ高精度に行うことが困難であるため、本手法では、視差予測法による縦エッジ照合により、障害物候補の検出を代用している。イメージプロセッサの活用により、1断面あたりの照合は高速（0.2秒）に実行できる。しかし、現在通路領域抽出に時間が掛かっているため、走行開始時に障害物を検出し回避経路を策定する場合はよいが、走行中に常時行うには未だ処理時間が長すぎる。この処理時間の短縮も今後の課題である。

今回は、通路領域との干渉判定により、偽照合による障害物検出の失敗は大巾に減らすことができたが、横に張られた電線のように、視差情報が得られず、従ってエッジ照合できない物体の検出は原理的に不可能である。又、障害物の輪郭の抽出であるため、照合エッジのどちら側に障害物が存在するか、という情報は得られない。（ただし、障害物が存在しない領域としての通路は得られる。）更に、時間的に変化する画像から得られる自己の移動情報を用いた障害物の検証も行っていない。これらは、“静止画像に対する高速処理”の範囲を越えた基本的な問題であり、将来に向け解決を図っていく。

## 6. ま と め

移動ロボットの障害物検出システムに於いて、通路領域の抽出と視差予測法によるエッジ照合を組み合わせた方式を提案し、屋内シーンをを用いた実験により、有効性を確認した。

今後は、他の移動視覚の技術と合わせ、自律移動車に実装し、環境適応・対応視覚技術の一環として研究開発を続けていく予定である。

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

### [参 考 文 献]

- 1) Kanade, T. et al., "3-D Vision for an Autonomous Vehicle", Proc. of International Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence, pp. 375-386 (1987.2).
- 2) Turk, M. A. et al., "VITS - A Vision System for Autonomous Land Vehicle Navigation", IEEE, Trans. PAMI, Vol. 10-3, pp. 342-361 (1988.5).
- 3) Dickmans, E. D. et al., "Guiding Land vehicles along Roadways by Computer Vision", Proc. Congress Automatique (1985).
- 4) 渡辺、小野口、星野、「ステレオ視を用いた移動視覚システム—実験システムの試作」、コンピュータビジョン研究会資料、42-2 (1986.5).
- 5) 小野口、渡辺、麻田、「移動ロボットの位置確認システム」、コンピュータビジョン研究会資料、57-3 (1988.11).
- 6) 渡辺、小野口、「視差予測法による障害物抽出」、情報処理学会第35回全国大会予稿集、pp. 2067-2068 (1987.9).
- 7) Watanabe, M. et al., "Obstacle Detection Method for Mobile Robots with Stereo Vision", Proc. of the 5-th SCIA, pp. 325-334 (1987.6).
- 8) Waxman, A. M. et al., "Visual Navigation System for Autonomous Land Vehicle", Technical Report, CAR-TR-138/CS-TR-1536, The Univ. Maryland (1985.7).
- 9) 石黒、森、他、「視覚移動ロボット「暗信4号機」の開発」、情報処理学会第36回全国大会予稿集、pp. 1711-1712 (1988.3).