

# 移動のためのロボット・ビジョン技術

武 野 純 一†

著者は自律移動ロボット用の2眼式ステレオ視覚システムの研究を行ってきた。そして PRPS と LDM という2種の視覚システムを実現した。本論文は今までに行われてきた自律移動を目的とした移動ロボット用の視覚関連の研究を紹介するとともに、著者が開発を進めてきた2種のステレオ視覚システムを紹介し、その研究に関連のある応用的な研究の成果も示す。本論文はさらに新型のステレオ視覚システムの提案を示すとともに、研究の展望について述べている。

## Robot Vision Technology for Mobile Robots

JUNICHI TAKENO†

The author has been studying binocular stereovision system for autonomous mobile robots. Two types of visual systems, PRPS and LDM, were therefore developed. This paper introduces these two visual systems and the results of relevant research. The paper also discusses recent topics of the research by the author, including a proposal for a new system to enhance sophisticated intellectual functions, and examples of applications.

### 1. はじめに

著者は、自律型移動ロボットのための移動障害物との衝突回避を可能とする実時間ステレオビジョンシステムの開発と、そのシステムを搭載したロボットによる衝突回避の実現という研究を行った。

移動ロボットの第1の目的は、ロボット自身に与えられた目的を達するためのスムーズな移動である。この目的を達成するために移動ロボットは、未知環境の中をロボットが利用する地図を獲得しつつ移動したり、そして獲得した地図を利用しつつ、移動計画を立案して、計画どおりの移動を実現しようとしたりする。しかし現実において、移動ロボットは獲得した地図をすでに保持していたとしても、人や他の移動ロボットまたは地図上に記述のない未知の物体を障害物として検知し、地図情報をさらに獲得、更新したり、その物体に対し学習するとともに何らかの回避動作を行ったりする必要がある。

著者は1983年に移動ロボット用ロボットビジョンの開発を始めた。

障害物を回避するために、移動ロボットはロボットビジョンによる障害物の検知、および回避アルゴリズム

ムなどの手法を研究する必要がある。

著者は、視覚システムを用いた移動ロボットに、静止障害物はもちろんのこと、移動障害物に対して、回避行動をとらせる基礎的な研究を行った。

まず著者は1985年に、障害物との回避行動を実現するアルゴリズムの研究を発表した<sup>1)</sup>。次いで、移動障害物を検知する視覚システムの研究<sup>2)</sup>および衝突回避のアルゴリズムは1986年に紹介し<sup>3)</sup>、全体システムの提案は1988年に示した<sup>4)</sup>。そして1989年のICARにおいて、超音波センサのみを用いた自律した移動ロボットによる移動障害物との衝突回避実験について発表した<sup>5)</sup>。

視覚システムにおいては、1987年に本論文で述べている視覚システムの基本的原理を確立した<sup>6)</sup>。そして1988年に明治大学の構内において視覚システムを用いた移動障害物(ヒト)に対する衝突回避実験を試みた<sup>7),8)</sup>。

その後、LDMとPRPSという2種のロボットビジョンをそれぞれ搭載した移動ロボット Meros と CanBoy を開発して、異なるロボットビジョンを搭載した移動ロボットどうしによる衝突の回避を実現した。著者はそれぞれを LDM ロボットビジョン、PRPS ロボットビジョンと呼んだ。

著者は、受光型ステレオ視覚のかかえる問題の1つである虚像の削除を試みるために3眼を使ったLDM

† 明治大学理工学部

The School of Science and Technology, Meiji University

ステレオ視覚の開発を行った<sup>9)</sup>。

さらに、著者は1989年より電気自動車(ゴルフカート)にLDMロボットビジョンを搭載し、大学構内において無人運転による直線走行と障害物回避や自動停止、および他の移動車を追尾させる研究と実験を行った<sup>10)</sup>。

また、惑星探査移動ロボットを想定したコントラストのきわめて少ない移動環境において受光型の視覚システムを効果的に機能させるため、またエネルギー消費をできるだけ避けるために鏡面における太陽光の反射を利用してランダムパターンを環境に照射するロボットビジョンを開発した<sup>11)</sup>。

次いで、ニューラルネットワークの柔軟な学習性能に着目して3次元空間の距離測定を試みた研究を行った。そこではオクリュージョンに頑強なロボットビジョンの実現を目的とした<sup>12),13)</sup>。

さらに著者は、ロボットビジョンの研究成果を利用した応用の研究を始めた。視覚障害者が利用する人工視覚である。それは視覚障害者が懐中電灯を持つように利用する装置で椅子や柱などの比較的大きな障害物はもちろんのこと5cm程度の床面にある障害物も検知する機能を持つ。その装置はレーザ光を補助光として利用するものの基本的には受光型のロボットビジョンである<sup>14),15)</sup>。

その後、著者は受光型ロボットビジョンでの解決が困難といわれている問題である「虚像の問題」「オクリュージョンの問題」の解決を試みた。その研究は人間の眼球回転という現象からヒントを得た回転視差メカニズムを持つロボットビジョンである<sup>16),17)</sup>。

## 2. ロボットビジョン技術に関する研究の経緯

ロボットビジョン技術は、距離センサとしての超音波式、レーザレンジファインダ、電磁波レーダ、そしてビジョンセンサとしてのCCDカメラおよび光学式ステレオ法がある。著者の研究に関係の深い光学式ステレオ法のみを紹介しても、Man-Paggio-Grimsonのステレオ法<sup>18),19)</sup>、Nishiharaら<sup>20)</sup>、Brooks<sup>21)</sup>、Hildreth、Ullmanのグループ<sup>22)</sup>、Horn-Bradyのグループ<sup>23)~25)</sup>、CMUのKanadeとそのグループ<sup>26)~28)</sup>、谷内田、八木ら<sup>29),30)</sup>、Inoue、Inabaら<sup>31),32)</sup>そしてIshiguro<sup>33)</sup>、Kagesawa、Ikeuchiらのグループ<sup>34)</sup>などの重要で歴史的な研究がある。

また近年、人工網膜の開発を目指したビジョンチップでの直接的に画像処理を実現した石川の研究は注目すべき発展を見せている<sup>35)</sup>。

ロボットビジョン技術は、アクティブ型かパッシブ

型かによって2大別できる。前者はエネルギー照射型で、後者は受光型との意味とする。

超音波式はハードウェア構成が簡単であり、比較的近傍の計測に向いている、また比較的広い空間で指向性が問題視されない場合に有効である。

レーザレンジファインダは実時間性、指向性や精度が比較的に高く、移動ロボット研究に利用されることが多い<sup>36),37)</sup>。

またミリ波レーダに代表される電磁波レーダはすでに近年精度の向上、小型化が実現し自動車の衝突回避の目的で実用化されている。この装置は、ロボット周辺の環境を検出する目的よりも比較的遠方の障害物を検出する能力に優れている。

アクティブ光学的ステレオは、なんらかのパターンやエネルギーを対象物に照射し、そのパターンの変形やエネルギーの反射の状況を検知して対象物までの距離、形、大きさを計測しようとする手法である。この手法は移動ロボット研究に多く利用されてきたが、超音波式と同様に、比較的近傍の対象物を計測することに向いている。

パッシブ型は、受光した信号のみを用いて対象物を計測しようとする手法である。特にパッシブ型はアクティブ型の持つ本質の問題点、すなわち何らかのエネルギーを対象物に照射し続けるという問題や、移動ロボットどうしの照射パターンによる干渉という問題が生じないため、あるいは人間が用いている手法でもあるため、衝突回避のための視覚システムとしては実現に期待が大きい。

しかしながら、パッシブ型ステレオ法は、原理的に視差計測法を用いるため、左右画像における画像対応に関する相関をとる必要があり、種々の手法が提案<sup>38),39)</sup>されているが、あらゆる問題に対して実時間性を比較的保ちつつ、有効に機能する手法はいまのところ存在しない。ただ、近年3つ以上のカメラを利用して3次元空間に対して距離計測をほぼ実時間で実施する装置の開発がなされているものの、確実な情報を取得するためにはまだ環境条件の整備が必要とされている<sup>40)</sup>。

八木、谷内田らはコーン型ミラーを使った、全方向視覚システムCOPISを開発した。これは基本的にパッシブ型の単眼による視覚システムであるが、360度の視野を持ち、実時間性に優れた特長など、全方向視覚のロボットビジョンへの道を切り開いた。

## 3. 自律移動のためのロボットビジョン技術に関する研究の経緯

過去において大きな成功を収めた、ビジョンセンサ

を搭載した移動ロボットは、Moravecの“CMU rover”である。このロボットは、平坦な床に存在する比較的単純な構造を持つ静止した障害物を、ビジョンセンサを利用して回避しつつ移動した。ここで使われた視覚システムは、スライドステレオと移動ステレオである<sup>41),42)</sup>。この研究は、実時間性の追及よりも、研究システムの提案性に対して評価が高い。

その後の研究では、CMUのNavlab (Navigation Laboratory)の研究が有名である。カラーカメラを用いた屋外における道路面の認識や、レーザレンジファインダを用いた障害物の検知などの研究が行われた<sup>43)</sup>。

Yutaは「山彦」というロボットに超音波センサを搭載して衝突回避を実現する研究をはじめ、単一の画像カメラを搭載して静止した障害物との衝突回避の研究など各種の3Dセンサを利用して研究を行っている<sup>44)</sup>。

Moriは「晴信」というロボットにカラーカメラを搭載し、サインパターンを発見しつつ移動し、静止した障害物を回避する行動を研究している<sup>45)</sup>。近年、この研究を進め盲人用のガイドロボットを開発している<sup>46)</sup>。

また西ドイツ(当時)のミュンヘン軍事大学(Universitaet der Bundeswehr Muenchen)<sup>47)</sup>その他が行った視覚システムを用いた自動車の自動運転の研究が有名である<sup>48),49)</sup>。

そして、同じくカールスルーエ大学のDillmannは2眼の輻輳角を可変にできる人工視覚の研究開発を行った<sup>50)</sup>。

さらに、イタリア、ジェノバ大学のFerrariのグループがパッシブ型ステレオ法を用いた視覚システムを搭載したロボット“MOBY DIST”によって実時間で静止した障害物を回避する実験を発表した<sup>51)</sup>。この実験では、ロボットは平坦な床面を移動すること、また床面は意図的に模様付け(カレンダなどの風景写真が一面に散布)されていること、そして障害物の検知は障害物を直接的に計測するのではなく、障害物の位置をカメラから床面までの距離データから推定する手法とっているなどの実時間性を確保するために効果的な拘束条件を考案している。

4. LDMロボットビジョンに関する研究

本章では、著者の開発である自律型移動ロボットのための2眼式ステレオ視覚LDMについて紹介する<sup>52)</sup>。

この視覚は2つのCCDカメラをある基線距離隔てて平行に設置した構造を有するが、内部処理に新しい処理法を採用している。2つのCCDカメラは左右一

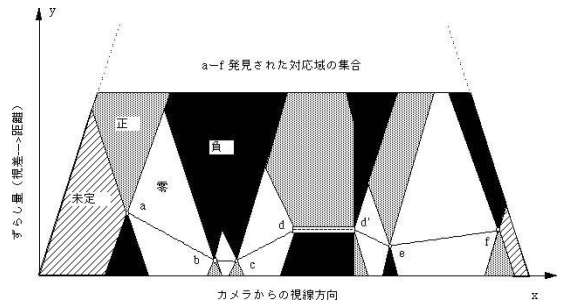


図1 差分積層配列  
Fig. 1 The laminated difference matrix.

表1 判定表

Table 1 The decision table.

要素の変化			性質
負	零	正	対応域
正	零	負	
正	零	正	論理的に存在せず
負	零	負	
零	零	零	コントラスト無し
正	正	正	対応関係なし
負	負	負	

対の走査線をエピポーラ面が一致するように設置している。この拘束条件によって、左右一对の走査線上のみで視差情報を検出すればよい。この検出法として、著者は差分積層法と呼ぶ新しい処理法を考案した。この手法の根本的原理は、エピポーラ面が一致している左右走査線の画像情報を  $n$  画素ずらしながら画素ごとの差分を計算することである。差分計算の結果は一次元配列に格納する。この配列の要素を考えると、もし要素の値がゼロに近い値であればそこでは画像が一致している可能性を示唆していることとなる。またこのときのずらし値  $n$  は視差値として考えることができる。しかし、ゼロ値には、コントラストが一定あるいは希薄なために生ずる場合も含まれているため、このような場合を排除する必要がある。このために、 $n$  値をゼロから  $k$  まで変化させながら差分配列を計算し、積層して差分行列を作り、行列の性質を検索する。この行列を差分積層配列と呼ぶ。その配列は図1のようになる。このとき、カメラの各視線方向でずらし値を初期値ゼロから増加させながら、その要素の値を検索すると表1に示す場合に集約される。これは

すべてのパターンを尽くしているので、配列からコントラストの希薄な場合を排除して、真の対応域を発見できる。この対応域には、単なる物体の縁などで生ずるコントラストが急激に変化する地点 ( a ~ f ) に限らず、コントラストが緩やかに変化するような物体領域の場合が含まれていることに注意すべきである ( 線分 dd' )。そして、発見された対応域を直線で接続すればよい ( 図 1 )。この直線接続は、コントラストが一定である領域はそこには物体が存在するという自然的拘束条件を使っている。この処理によって左右一対になった走査線上にある対象物までの距離情報が計算できる。現在は、ほとんどの処理がソフト上で実現されているため、処理速度に問題があり 5 本程度の走査線のみでの処理を可能としている。しかし、処理速度の向上とともにすべての走査線で処理が可能となるならば、この提案する手法は、三次元の奥行き計算が可能である。また、LDM で用いているアルゴリズムはニューラルネットワークを用いた大規模並列処理に適した手法であると考えている。

#### 4.1 LDM ロボットビジョンを搭載した移動ロボット AFV の実現

LDM を搭載したロボットが、移動するヒトの状況を判断して衝突を回避する実験をはじめて成功させたときは 1987 年である。そのときの実験の様子を図 2 に示す。移動障害物がロボットと衝突するかいなかの判断は、LDM による障害物検知によって「障害物がたえず同一方向に観測できて、かつその障害物との距離が接近している場合が最も衝突の可能性が高い」というヒューリスティックな手法を用いている。このとき、移動障害物である人 ( 女子 ) はロボットのステップ的な移動に同期してステップ移動を行って実験した。なお本視覚システムの処理時間は、画像取り入れから、視野方向の奥行きを計測結果を得るまで、10 MHz の NEC PC、Pascal 言語を用いて、水平 256 方向の場合で 1.7 秒 ( 1 走査線 ) であった。

これは決して実時間処理とは呼べない状況であった。その後そのロボットは PC を改善しつつ Meros というロボットとして完成した ( 図 3 )。

また、LDM は 1989 年より電動自動車を利用した無人自動車のための人工視覚として利用し、障害物の検知や回避の実験を大学構内の野外地において実現した。その無人自動車は AFV ( Autonomous Field Vehicle ) と呼び、実験の様子は明治大学で開催された日本ロボット学会講演会においてデモとして公開した ( 図 4、図 5 )。

図 4 は実験を行う AFV の様子であり、図 5 は木の

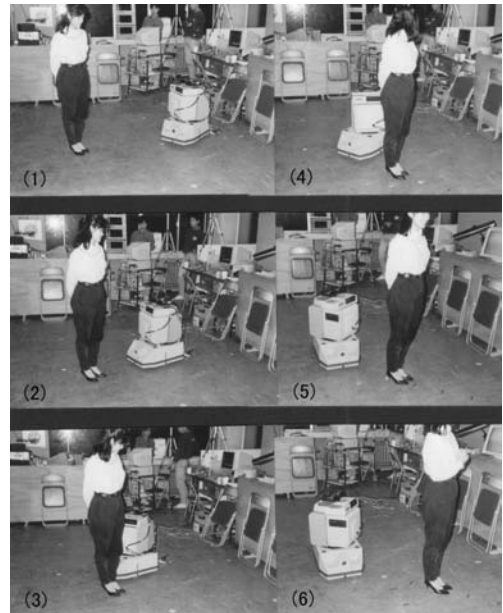


図 2 人を避けるロボットの試験

Fig. 2 The robot could avoid a moving female.

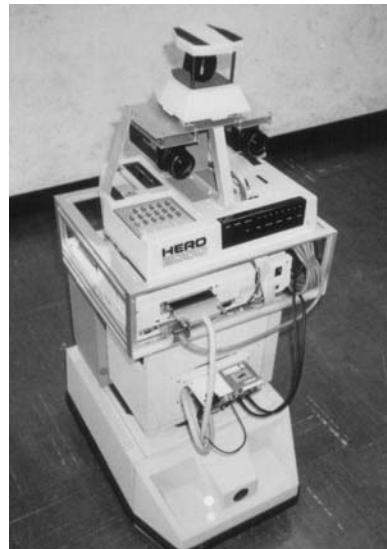


図 3 LDM ロボットビジョンを搭載したロボット MEROS  
Fig. 3 The MEROS implemented LDM robot vision.

幹を検出したときの試験結果である。実験は夜間に行われて、AFV から夜間照明としてランダムなパターンを照射している。図 5 の中央にある大きな直方体が木の幹であり、その他岩や草の障害物が検出されていることが分かる。

#### 5. PRPS ロボットビジョンに関する研究

本章では、著者と元キャノン ( 株 ) の反町氏<sup>53)</sup>と共



図 4 明治大学 野外自律移動車 AFV  
Fig. 4 The Meiji Autonomous Field Vehicle.

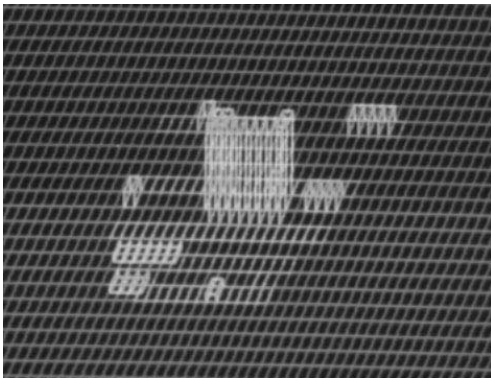


図 5 夜間ランダムパターン照射による木の幹の検出結果  
Fig. 5 A result about big trunk detection by LDM vision at night.



図 6 PRPS ロボットビジョン  
Fig. 6 The PRPS robot vision.

同で開発した自律型移動ロボットのための 2 眼式ステレオ視覚 PRPS を紹介する<sup>54)~57)</sup>。カメラ部は 2 つの対物レンズとレンズ背面に設置された特殊なモザイク状スリットマスク、光学器類および 1 台の CCD カメラである。2 つの対物レンズは、視線方向を平行に、ある基線距離を隔てて設置している ( 図 6, 図 7 )。特殊マスクは左右の対物レンズに対応して 2 種類ある。

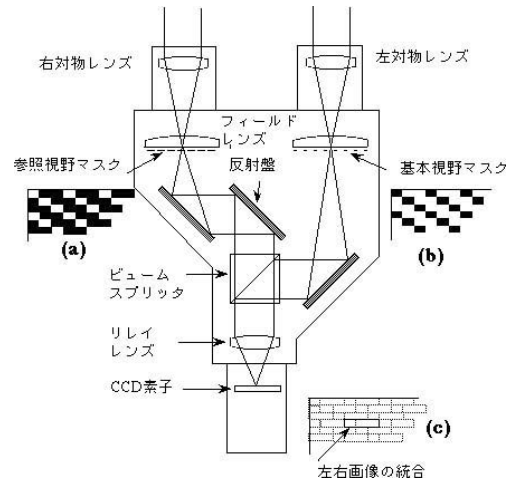


図 7 PRPS ロボットビジョンの内部構造  
Fig. 7 The optical design of PRPS robot vision.

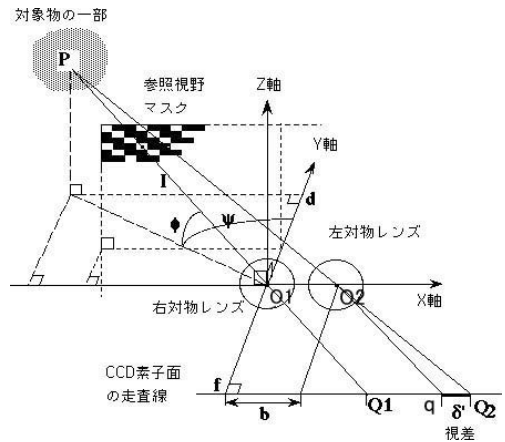


図 8 PRPS の光学的原理  
Fig. 8 Explanation about the optical principle of PRPS.

1 つは基本視野マスク、他を参照視野マスクと呼んでいる。2 種のマスクを透過する画像はそれぞれがネガ・ポジの関係となっている。左右のレンズから入る画像はそれぞれのマスクによって必要な情報のみが透過され、光学器類を経て合成され、最終的に 1 つの CCD 面に結像する仕組みとなっている。各マスクを透過した画像はそれぞれ多数のウインドからなり、ウインドの各々を基本視野、参照視野画像と呼ぶ。

CCD 面に結像した基本視野、参照視野画像の配置は図 8 のようになる。左右に並ぶ一対の両視野画像は、ともに共通した走査線を持ち、かつその走査線はカメラの構造から同一のエピポーラ面と一致している。すなわち両視野画像はその画像情報の中に同一物体が存在していることが保証されていることになる。左右の画像情報から同一の物体を検出できるならば、その

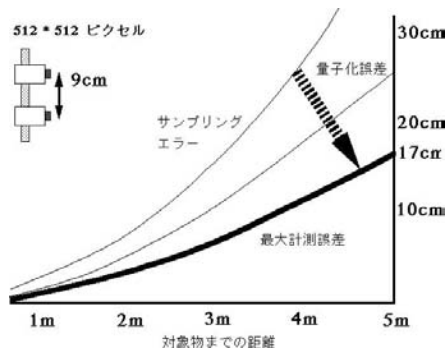


図9 距離計測精度の向上

Fig. 9 An improvement about the precision of distance measurement.

結果から視差の値を計算でき、最終的にその物体までの距離を三角形の相似の原理から算出できる。すなわち  $\triangle P.O1.O2$  と  $\triangle O2.q.Q2$  は相似であり、さらに  $O1$  と  $O2$  間の距離は  $b$  (既知) であるため、カメラから対象物  $P$  までの距離が計算可能となる。この一対になった両視野画像は、あたかもカメラからのある一方向に関する距離計のように働く。CCD 面にはこのような一対になった両視野画像が多数存在しているので、CCD1 面で多数方向の距離が計測可能となる。たとえば本システムではカメラから 288 方向の距離が一度に計測可能である。画像処理部では、カメラ部を移動ロボットに実際に搭載して、人間の身体サイズを想定した規模の物体を実時間で計測できることを処理目標とした。画像処理部では、量子化誤差に原因している距離の 2 乗で増大する測定誤差や画像素子の不均一性に起因していると考えられるサンプリングエラーの解消を試みている。量子化誤差はスプライン関数を用いた補間法によって、またサンプリングエラーは同一方向の計測から生じた複数の距離情報から推定法を用いて改善に成功した<sup>58),59)</sup>。図9は実験によって得た改善の証拠である。それによると、基線距離(カメラ間距離)9cm, 512×512 画素であるステレオ視覚を考えた場合、上記改善の処理を加えずに 5m 先の対象物を計測する場合、量子化誤差とサンプリングエラーによって 30cm 程度の誤差生じていた。それに対して、改善の処理を加えた場合では、誤差は最大でも 17cm であった。この改善処理の手法は理論的には mm オーダの誤差のみと推定できるが、実際の実験では上記の値となった。その原因は対象物コントラストの不安定性と考えられる。しかし、実験の結果は明らかな改善を示している。著者は PRPS ロボットビジョンを搭載した自律移動ロボット CanBoy を開発した(図10)。

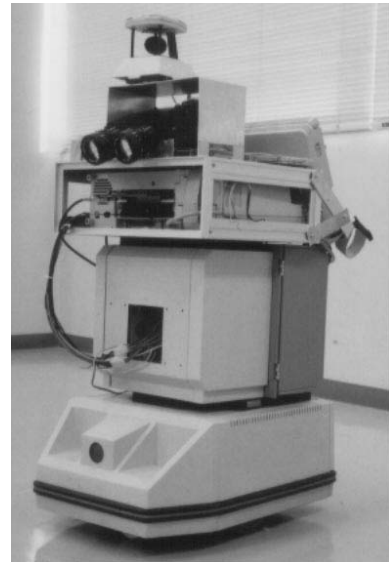


図10 PRPS ロボットビジョンを搭載したロボット CanBoy  
Fig. 10 The CanBoy implemented PRPS robot vision.

### 5.1 PRPS ロボットビジョンを搭載した移動ロボット KAMRO の実現

KAMRO とは西ドイツ(当時)カールスルーエ大学(Karlsruhe University)の Rembold が開発した知能自律移動ロボットである。KAMRO は 1985 年から研究開発が始まり、10 年後の 1995 年にプロジェクトの所期の開発を終了した。このロボットは、2つのコンピュータを持ち、視覚システムを使って組立部品を識別しながら組立作業を自律的に実行できる。さらにこのロボットは 4 輪の全方向移動機構を持ち、作業プラットフォーム間を移動できる。この移動のために必要となる環境の情報は、ロボットの周囲に配置した 16 個の超音波センサおよび 1 つの前方注視型視覚から撮取る。前方注視型視覚システムのためにさまざまな種類の研究がなされたが、最終的には著者が開発した PRPS ロボットビジョンを KAMRO の前方注視型視覚として採用して、1989 年よりその共同研究が始まった。

PRPS ロボットビジョンは KAMRO の前方を注視するように、ロボット本体からみて前方右側に高さ 80cm の位置で進行方向に対し 3.8 度左方に傾けて設置している(図11)。PRPS ロボットビジョンから得た画像情報は KAMRO 上の画像処理装置で処理している。PRPS ロボットビジョンを含む画像処理装置は VMS バスに接続されているオンボードマルチプロセッサシステムによって処理されている。詳しくは図12に示す。

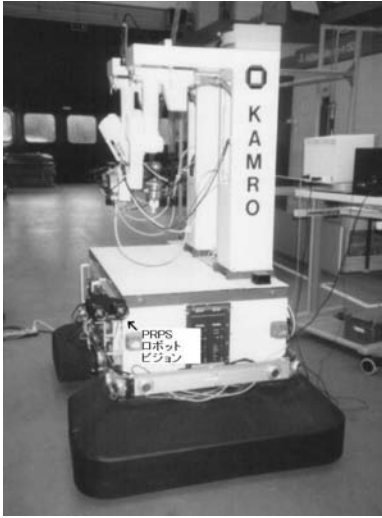


図 11 カールスルーエ大学自律移動ロボット KAMRO と PRPS ロボットビジョン

Fig. 11 Karlsruhe Autonomous Robot KAMRO and PRPS Robot Vision.



図 13 KAMRO と衝突回避すべき人  
Fig. 13 KAMRO must avoid a human.

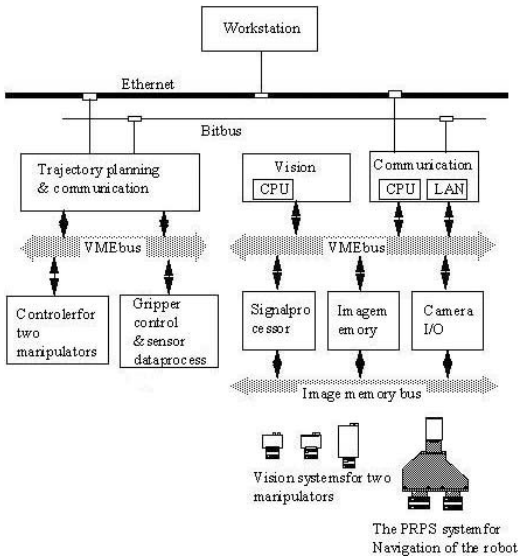


図 12 KAMRO の画像処理機構

Fig. 12 The image processing modules of KAMRO.

PRPS ロボットビジョンから取り入れた視覚情報はこの画像処理装置を用いて、水平 16 方向の距離情報に変換する。この計算結果は、KAMRO の行動制御部に渡され、ロボットの衝突回避とナビゲーションシステムに利用する。

5.2 実験結果と考察

PRPS ロボットビジョンを搭載した KAMRO を用いて、障害物検知の実験を行った。実験の場所はカールスルーエ大学内の WBK である。WBK とは同大学

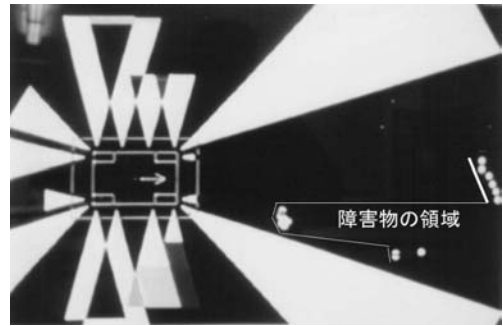


図 14 障害物の検出結果

Fig. 14 Result example of detected obstacles by PRPS.

に属する疑似自動化工場の略称である。

なお、障害物は人間であり、KAMRO の右前方に直立させている。

障害物のそのときの様子を図 13 に示す。

実験結果を図 14 に示す。写真左側にある二重の長方形が KAMRO の位置を表している。外側の長方形はロボットの衝突緩衝材を表し、内側の長方形は KAMRO の本体を表している。KAMRO 本体の大きさは 80 cm × 120 cm × 80 cm である。長方形内の矢印はロボットの進行方向を示す。ロボットを取り巻くように大小の三角形が表現されているが、これは超音波センサから得た距離測定結果である。進行方向の前方にある 16 個の点は PRPS ロボットビジョンから得た障害物の位置を検出した結果である。ロボットは移動しつつ PRPS ロボットビジョンから約 1 秒ごとに

障害物を検出できる．図 14 では，KAMRO の前方右側約 1.4 m のところに障害物を検出している．障害物を検出することにより KAMRO は，その障害物を回避するような行動が可能である．

実験の結果，以下の点が明確になった．

本視覚システムは，WBK の環境において，1.4 m から 4 m 以内の距離にある障害物の位置検出が可能であった．しかし，工場内における環境において，コントラストの希薄な部分，たとえば照明が十分でない工作機械下部などの距離測定は困難な場合があった．このような場合には，本システムが検知しやすいように環境に対し若干の加工を行った，たとえば白色ストライプや黒色のストライプを適所に添付することによって，かなり測定精度が向上したことを付記する．

また，ガラスや鏡などの障害物は，PRPS ロボットビジョンと超音波センサとのデータ融合技術を用いて解決できる．以上の結果，PRPS ロボットビジョンは環境に比較的明瞭なコントラストがあるような自動化工場においてナビゲーション用の視覚システムとして利用可能であると結論できる．

## 6. PRPS 視覚の単純化・ハード化と知的処理法の採用

著者は，PRPS 視覚の複雑な光学装置をできるだけ単純化することを試みた．しかしながら，その単純化によって CCD カメラを 2 台にする必要が生じた．光学装置の中でも特殊な光学式マスクの製作は精密加工を必要としたため，これは実用化への障害であった．この単純化によって，光学装置の大部分と特殊マスクの削除を行った．新しい PRPS 視覚を nPRPS と呼ぶ．すなわち，nPRPS は構造的に LDM と同一である．nPRPS は 2 台のカメラ上にある CCD 面に投影されている画像情報において，従来の PRPS における基本視野画像，参照視野画像に対応する部分をソフト的に抽出する方法を採用した．これを特殊マスクのソフト化と呼ぶ．

その後の計算処理は従来とほぼ同様である．しかしソフト化とともに生じた処理時間の増大に対して，著者は距離計算の部分をハード化するステレオビジョンボードの開発を実施したがこの計画はいまだ完成していない．

次に著者は現在 nPRPS 視覚の画像処理部をより柔軟な処理を可能とするための試みを行っているのでここで紹介する．nPRPS における，画像処理部の基本的処理は左右画像の一部を画像照合することである．画像照合の方法には，画像相関法をはじめとした種々

の方法が提案されているが，最近は柔軟性に富む手法としてニューラルネットワークを利用するものもある<sup>60)</sup>．著者もステレオ視覚の盲点といわれてきたオクルージョンの問題にニューラルネットワークの技術が効果的であるとの認識に基づいていくつかの研究を行い，成果を得た<sup>12)</sup>．その結果によると，対象物を限定すればニューラルネットワークの学習が可能であったが，一般的な対象物については学習の収束がほとんど不可能であった．これは，もちろんニューラルネットワークが計算する能力の非力さに起因することが第 1 であるが，学習すべき対象物の複雑さとニューラルネットワークの能力に関する比較検討の研究がまだ一般的に十分行われていない点が無視できないと考えられる．しかしながら，ニューラルネットワークの技術が画像照合やオクルージョン問題の解決に有効であることは原理的に明白である．著者の研究は対象物の限定をできるだけ一般性を保つように考慮しつつニューラルネットワークを実用的規模で組織化する方向で進めている<sup>61)</sup>．

## 7. 視覚障害者用視覚システムの開発

著者は，研究したステレオ視覚システムを視覚障害者のための代替視覚として応用ができると考え 1 つの視覚障害者用視覚システムを開発した(図 15)．このシステムはステレオ視覚で得た対象物までの距離情報をピエゾ振動子を利用して視覚障害者に伝える手法をとっている<sup>14)</sup>．ステレオ視覚は手に持てる程度の大きさと重さがあるが主たるシステムを腰部に取り付ける方法を考えている．このステレオ視覚は視覚の中央部からラインレーザ光線を障害者の視点から考えほぼ垂直方向(図 15 V)に照射して，暗闇や日陰における距離情報を摂取する困難性を軽減している．昼間の太

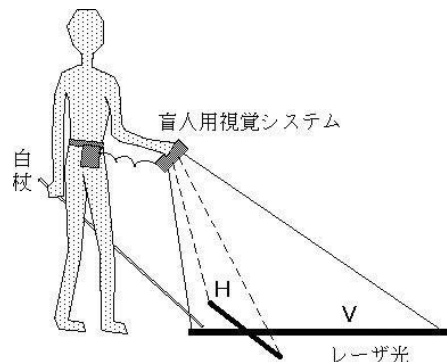


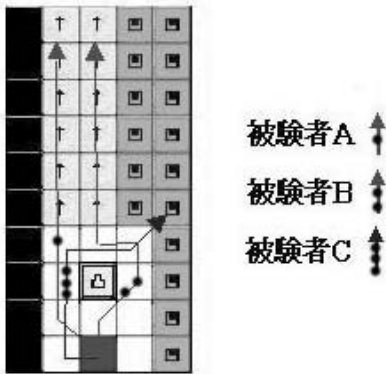
図 15 レーザ光を補助光源とした盲人用視覚システム

Fig. 15 The vision system for the blind person which made laser light an assistant illuminant.





駅構内の上り階段



実験結果

図 16 シミュレーション実験による実用性に関する検証  
Fig. 16 An verification about the practical use by the simulation experiment.

陽光による反射はステレオ視覚にとってきわめて距離計測が困難であるが、その場合は視覚障害者がコントラストの明確な領域を歩行することを選ぶことによって解決することを考えている。このシステムは、地下鉄のプラットフォームを視覚障害者が歩行することを想定したシミュレーション実験によってその有効性を示した<sup>15)</sup> (図 16 参照)。図 16 は比較的複雑な地下鉄構内から得た実際のデータを利用したシミュレーション実験の結果である。この実験では 3 名のうち、1 名がプラットフォームから転落した (被験者 C)。この 1 名は実験の前に行われた訓練を実施していない学生であった。この学生は他の環境の実験では転落していないが、この装置を安全に利用するためには訓練が必要であることを示している。

この実験結果より、この視覚システムを利用することによって、ビルディングの柱や椅子、ゴミ箱などという比較的大きな障害物を発見しつつ回避できるだけでなく、階段の上りや下りの勾配、またプラットフォームの縁を発見することができることなどが分かった。

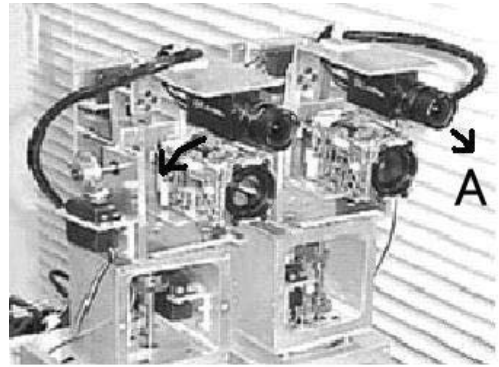


図 17 回転視差機構を採用した新型のステレオ視覚  
Fig. 17 The new stereovision which installed the Rotation Disparity Mechanism.

現在は、開発した盲人用視覚システムを横方向に 90 度傾けて利用するとともにカメラの持つズーム機能を併用して、盲人の足元が安全に歩行可能であるかを検出する手法を開発している<sup>62)</sup>。したがって、このときは視覚システムが足元に向けられ、ラインレーザ光線は水平方向 (図 15 H) に照射される。すなわち、盲人用の視覚システムは 2 種の利用方法を提案している。ラインレーザ光線を垂直方向に照射する場合、または水平方向に照射する場合である。前者は盲人の歩行する環境に関する大まかな把握であり、後者は足元の安全確保である。両者の同時利用も可能であるが装置の複雑化をもたらすこととなる。

### 8. 高機能ステレオ視覚の開発

著者は現在、人工視覚が人間のような眼球移動・頭部の移動を模擬するような動的移動を可能にした可動ステレオ装置を開発している (図 17)。その装置の動作は、並列トランスペュータと独自開発したマイクロプロセッサ制御システムを同時に稼働させ、俊敏性を実現している。この装置は 2 眼の中心視覚と 2 眼の周辺視を持つ、4CCD カメラによる 2 眼のステレオ視覚である。よく似た構造を持つ従来の 4 眼ステレオとの異なりは、一対となった中心視 (下方) と周辺視のカメラ (上方) において後者が前者の周囲を高速に回転する (図 17 の A) という回転視差機構を持っていることである。この回転機構によって、ステレオ視覚の持つ本来的問題点である虚像の削除やオクリュージョンへの対応を研究対象とすることを可能としている。虚像の削除については回転視差メカニズムが有効に機能することが明白である<sup>17)</sup>。すなわち、原理的には眼球の回転機構によって実像と虚像を識別する手法である。なお坪井は虚像の削除とオクリュージョン領域の発見

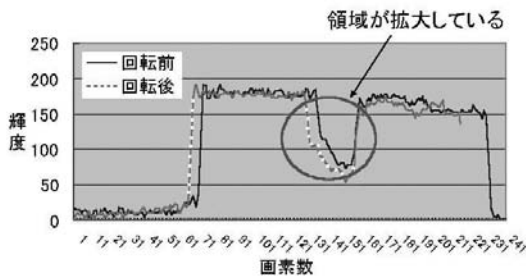


図 18 オクリュージョン領域の検出結果

Fig. 18 Detection of visually occluded area by the Rotation Disparity Mechanism.

が回転視差の微小変化という手法を用いて効果的に検出できることを示した<sup>63)</sup>。図 18 は回転視差メカニズムを用いてオクリュージョン領域を発見する実験の結果である。本手法によって明らかにオクリュージョン領域の変化が観測できた。

## 9. おわりに

本論文において著者は、2種のロボット用視覚システム PRPS ロボットビジョンと LDM ロボットビジョンの研究開発および実際のロボットへの搭載について紹介した。PRPS ロボットビジョンは双腕型移動ロボット KAMRO (Karlsruhe Autonomous Mobile RObot with two arms) の移動ナビゲーション用の視覚システムとして実現化した<sup>64)</sup>。KAMRO の公開実験は、1994 年 10 月 10 日から 12 日にかけてドイツのカルスルー工大学の疑似自動化工場 (WBK) において行い、多くの研究者をはじめ一般者の参加があった。さらにこのときの様子はドイツテレビ SÜD-WEST の夜のニュース番組で放映されたことを付記する。

また LDM ロボットビジョンは、野外移動車 AFV (Autonomous Field Vehicle) の走行路面を注視するための視覚システムとして実現化した。著者はすでに AFV を用いて、路面上にある障害物の検知を行いつつ走行させることに成功している。さらに夜間においては、干渉性の少ない特殊なランダムパターンを照射することにより、より良い成果を得ている。

また著者は、開発したロボットビジョンを視覚障害者のための人工視覚として利用する技術開発を試みた。その人工視覚は夜間やコントラストの希薄な環境においてラインレーザ光線を補助光源として利用するものの、原理的に受光型のステレオ視覚である。ラインレーザを垂直方向に照射する場合は比較的大きな障害物を、また水平方向に照射する場合は歩行面が安全であるかを検出することができる。

さらに、著者は、ステレオ視覚システムを持つ本質

的問題である虚像の削除やオクリュージョン領域の発見を行う人工視覚を、複数の視覚カメラを固定された位置に配置する手法ではなく、視覚カメラを高速に回転させる手法、回転視差メカニズムを提案した。

なお PRPS ロボットビジョンは(元)キャノン株式会社の反町誠宏との共同開発であり、LDM ロボットビジョンは著者の独自開発であることを付記する。

謝辞 ここで、著者ととも研究を行ったすべての学生に感謝の言葉を述べる。特に、八山信一、水口直人、加藤 晋、Zichuan Xu、池谷大吾の各氏には特別に感謝をしたい。彼らなくして本研究の進展はありえないことであった。最後に著者の研究を支えてくれたすべての人々に感謝の意を述べます。特に、現在明治大学理工学部学部長・同教授である向殿政男先生、東京電機大学教授の柿倉正義先生、明治大学名誉教授の西山榮枝先生に感謝いたします。また、東京大学教授である井上博允先生、名古屋大学教授の福田敏男先生、筑波大学の油田信一先生には日頃からご指導をいただきました。また、海外においては特に、ドイツ、カールスルーエ大学の Rembold 教授と、ロシア、ウファ航空技術大学 (UFA Aviation Technology University) の Yussupova 教授、Ilyasov 教授そして Vasilyev 教授に感謝いたします。残念であります。Rembold 教授は 2002 年 9 月 1 日に病気で亡くなりました。心から哀悼の意をここで表します。なお本研究は、明治大学の重点研究費 (1991-1992) および特別研究費 (1994) の援助を受けている。またさらに、本研究はドイツのカルスルー工大学より研究費 (A scholarship fund of Karlsruhe University 1992 and 1993) および A fund as a guest professor of Karlsruhe University という援助を受けました。そして、回転視差を持つ新型の人工視覚については文部省の助成を受けたハイテクリサーチセンターにおける研究として実施したこと、また AFV の研究およびステレオビジョンボードの開発に関しては文部省科学研究費重点領域研究「知能ロボット (略称)」より助成を受けたことを申し添えます。

## 参考文献

- 1) 武野純一、柿倉正義：移動ロボットの衝突回避に関する基礎研究その 1、日本自動制御学会第 24 回 SICE 学術講演会、No.11012, p.339 (1985).
- 2) 八山信一、武野純一：移動ロボットのための衝突回避に関する基礎研究その 1、第 4 回日本ロボット学会学術講演会、No.2613 (1986).
- 3) 武野純一、柿倉正義：移動ロボットの移動障害物に対する衝突回避問題について (研究速報)、日

- 本ロボット学会, Vol.4, No.5, pp.33-37 (1986).
- 4) 武野純一, 柿倉正義ほか: 移動ロボットの衝突回避に関する基礎研究その2, 衝突回避アルゴリズム, 衝突回避のための視覚システムおよび移動ロボットによる衝突回避の実現, 第4回移動ロボットシンポジウム, 日本機械学会, No.203, pp.79-84 (1988).
  - 5) Takeno, J. and Kakikura, M.: Fundamental Problems of Collision Avoidance Problems between a Robot and a Moving Obstacle Part 1 Heuristic collision avoidance techniques and fundamental experiments with a real robot, *ICAR* (1989).
  - 6) 八山信一, 武野純一: 移動ロボットのための衝突回避に関する基礎研究その2, 第34回情報処理学会学術講演会, No.6D-3 (1987).
  - 7) 八山信一, 武野純一: 移動ロボットのための衝突回避に関する基礎研究その10, 第6回日本ロボット学会学術講演会, No.3402 (1988).
  - 8) Takeno, J. and Hachiyama, S.: New Technology on Stereo Vision for Mobile Robots, *International Conference on Advanced Robotics (ICAR)* (1991).
  - 9) 武野純一, 浜田和浩: 移動ロボットのための視覚システムに関する研究 三眼視を用いた実像の検出と虚像の除去に関する考察, 第11回日本ロボット学会学術講演会, No.2344 (1993).
  - 10) Kato, S., Nishiyama, S. and Takeno, J.: Stereo vision system on mobile robots for measuring road surfaces, *Advanced Robotics, The International Journal of RSJ Advanced Robotics*, Vol.9, No.4, pp.383-397 (1995).
  - 11) Takeno, J., K.S. and S.H.: Stereovision for Real-Time Measurement of the Depth of Non-contrastive 3-D Space by Projecting Random Patterns, *EURISCON '91*, pp.341-348, Kluwer Academic Publishers (1991).
  - 12) Schmitt, A. and Takeno, J.: Matching with a neural net to measure the distance with stereo vision systems (英文), 第13回日本ロボット学会学術講演会, 5A1-7-3, pp.1001-1002 (1995).
  - 13) Arai, K., Nishiyama, S. and Takeno, J.: Research Report on Using Multiplexing Neural Networks in a Stereo Vision System for 3D Distance Measurement, *30th Inter. Symposium on Robotics*, pp.221-226, International Federation of Robotics (IFR) (1999).
  - 14) Ikeya, D. and Takeno, J.: Research and Development of a Hand-held Vision System for the Visually Impaired, *8th IEEE Int. Work. On Robot and Human Interaction, RO-MAN '99*, pp.13-17 (1999).
  - 15) Takeno, J. and Ikeya, D.: Practicability Verification of a Visual aid system for the Visually Impaired, *IEEE Int. Work. On Robot and Human Interactive Communication*, 0-7803-7222-0/01IEEE, pp.600-605 (2001).
  - 16) Takeno, J. and Xu, Z.: New Binocular Vision System for Human-Robot Communication, *Proc. IEEE Int. Work. On Robot and Human Interaction*, IEEE 99TH8483, pp.416-420 (1999).
  - 17) Takeno, J. and Xu, Z.: Virtual Image Cancellation in a New Binocular Stereovision System, *Int. Con. On Recent Advances in Mechatronics*, pp.117-122 (1999).
  - 18) Marr, D. and Hildreth, E.: Theory of Edge Detection, *Proc. R. Soc. Lond. B*, 207 (1980).
  - 19) Grimson, W.E.L.: *From Image to Surface*, MIT Press, Cambridge (1981).
  - 20) Nishihara, H.K. and Poggio, T.: Stereo Vision for Robotics, *Proc. International Symposium of Robotic Research* (1983).
  - 21) Brooks, R.: Planning Collision Free Motions for Pick and Place Operations, *Proc. International Symposium of Robotic Research* (1983).
  - 22) Hildreth, E.C. and Ullman, S.: The Measurement of Visual Motion, *MIT AI memo 699* (1982).
  - 23) Horn, B.K.P.: Understanding Image Intensities, *Art. Intelligence 8* (1977).
  - 24) Horn, B.K.P., et al.: Determining Optical Flow, *Art. Intelligence 17* (1981).
  - 25) Bruss, A. and Horn, B.K.P.: Passive Navigation, *MIT AI memo 662* (1981).
  - 26) Herman, M., Kanade, T., et al.: Incremental Acquisition of Three-D Scene Model from Images, *CMU-CS-82-139* (1982).
  - 27) Lucas, B.D. and Kanade, T.: An Iterative Technique of Image Registration and its Application to Stereo, *Proc. IJCAI-7* (1981).
  - 28) Kanade, T.: Development of a Video-Rate Stereo Machine, *Proc. DARPA Image Understanding Workshop*, pp.549-558 (1994).
  - 29) 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦: 移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサー Hyper Omnivision の提案, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J79, 8.5, pp.698-707 (1996).
  - 30) 今井康介, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位画像列の記憶に基づくロボット誘導, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.43, No.SIG11(CVIM5), pp.80-87 (2002).
  - 31) Inoue, H., Tachikawa, T. and Inaba, M.: Robot Vision System with a Correlation Chip for Real-time Tracking, *Proc.Int.Conference on Robotics and Automation*, pp.1621-1626, IEEE (1992).
  - 32) Inoue, H.: Vision Based Robot Behavior:

- Tools and Testbeds for Real World AI Research, *Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp.767-773 (1993).
- 33) Ishiguro, H.: Multiple vision agents navigating a mobile robot in a real world, *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation* (1993).
- 34) Kagesawa, M., Ueno S., Ikeuchi, K. and Kashiwagi, H.: Recognizing Vehicles in Infrared Images Using IMAP Parallel Vision Board, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.2, No.1, pp.10-17 (2001).
- 35) 石川正俊: センサ情報の並列処理技術, 電子情報通信学会論文誌 C-II, Vol.J74-C-II, No.5, pp.255-266 (1991).
- 36) Hebert, M.: Outdoor Scene Analysis Using Range Data, *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation* (1986).
- 37) Nashashibi, F.: 3D Incremental Modeling and Robot Localization in a Structural Environment using a Laser Range Finder, *IEEE Proc. of Int. Con. on Robotics and Automation*, pp.20-27 (1993).
- 38) Pratt, W.K.: Correlation techniques of image registration, *IEEE Trans.*, AES-10, 3 (1974).
- 39) Barnea, D.I. and Silverman, H.F.: A class of algorithms for fast digital image registration, *IEEE Trans.*, C-21, 2 (1972).
- 40) Wavering, J., Fiala, C., Roberts, K. and Lumia, R.: TRICLOPS: A High-Performance Trinocular Active Vision System, *Proc. Int. Conference on Robotics and Automation*, pp.410-417, IEEE (1993).
- 41) Moravec, H.P.: *Robot Rover Visual Navigation*, UMI research press (1980).
- 42) Moravec, H.P.: The Stanford Cart and the CMU Rover, *Proc. IEEE*, 71, 7 (1983).
- 43) Thorpe, C., Shafer, S. and Kanade, T.: Vision and Navigation for the Carnegie Mellon Navlab, *Proc. Image Understanding Workshop* (1987).
- 44) Yuta, S.: 3-D Range Sensor using fiber grating for recognition of autonomous mobile robot's passage space, *Proc. Int. Con. on Intelligent Robots and Systems (IROS'94)*. pp.1759-1763 (1994).
- 45) Mori, H.: Active Sensing in Vision-Based Stereotyped Motion, *IEEE Int. Workshop on Intelligent Robot and Systems (IROS)* (1990).
- 46) Mori, H.: A robotic travel aid "HITOMI", *IEEE Int. Conference on Intelligent Robot and Systems (IROS'94)*, pp.1716-1723 (1994).
- 47) Graefe, V.: Feature-based Motion Stereo Vision for Mobile Robots, *Proc. Int. Conference on Advanced Mechatronics (ICAM'93)*, pp.704-709 (1993).
- 48) Mysliwets, B. and Dickmann, E.D.: A Vision with Active Gaze Control for Real-Time Interpretation of Well Structured Dynamic Scenes, *Proc. Autonomous Intelligent Systems* (1986).
- 49) Kuhnert, K.: Comparison of Intelligent Real Time Algorithm for Guiding an Autonomous Vehicle, *Proc. Image Understanding Workshop* (1987).
- 50) Dillmann, R.: KASTOR An active stereo vision system for mobile robot navigation, Technical report of University Karlsruhe (1992).
- 51) Ferrari, F.: A Stereo Vision System for Real Time Obstacle Avoidance in Unknown Environment, *IROS* (1990).
- 52) Takeno, J. and Hachiyama, S.: A Collision-Avoidance Robot mounting LDM Stereo Vision, *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, pp.1740-1752, IEEE (1992).
- 53) 反町誠宏: 移動ロボット用3次元視覚センサー, 第3回日本ロボット学会学術講演会, No.3102 (1985).
- 54) 水口直人, 武野純一, 西山栄枝: 衝突回避のための視覚システムに関する基礎研究その3, 第5回日本ロボット学会学術講演会, No.1405 (1987).
- 55) 水口直人, 武野純一, 西山栄枝: 衝突回避のための視覚システムに関する基礎研究その4, 第6回日本ロボット学会学術講演会, No.3401 (1988).
- 56) Takeno, J., Shin'ogi, Y., Nishiyama, S., Mizuguchi, N. and Sorimachi, K.: Realization of a 3D vision mobile robot that can avoid collision with moving obstacles, *Proc. Int. Conference on Robotics and Automation*, pp.2010-2023, IEEE (1991).
- 57) Takeno, J., Shin'ogi, Y., Nishiyama, S., Mizuguchi, N. and Sorimachi, K.: New Methods for Detecting Moving Obstacles Using A Passive 3-D Visual Sensor, *SYROCO'91*, IFAC (1991).
- 58) Takeno, J. and Rembold, U.: Stereovision Systems for Autonomous Mobile Robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol 18, pp. 355-363, Elsevier Science (1996).
- 59) 小宮 悟, 反町誠宏, 武野純一: 自律移動ロボットのための視覚システムに関する研究その2, 第14回日本ロボット学会学術講演会, No.2A2-5-2 (1996).
- 60) Jung, H.: Visual navigation for a mobile robot using landmarks, *Advanced Robotics, The International Journal of RSJ*, Vol.9, No.4, pp.429-442 (1995).
- 61) 紀野晃樹, 武野純一: 知的技法によるステレオ視覚システムの研究その2, 第14回日本ロボット

学会学術講演会, No.3M1-5-2 (1996).

- 62) 金 龍壽：レーザを補助光源として用いた盲人用視覚システムに関する研究, 明治大学理工学研究科修士論文 (2002).
- 63) 坪井勇政：回転視差を用いた新型視覚システムの開発, 明治大学理工学研究科修士論文 (2002).
- 64) Takeno, J. and Rembold, U.: Stereovision System for Autonomous Mobile Robots (invited paper), *Inter. Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-4)*, Intelligent Autonomous Society, IOS Press (ISBN9051993986) (1995).

(平成 15 年 5 月 5 日受付)

(平成 15 年 9 月 9 日採録)

(担当編集委員 山澤 一誠)



武野 純一 (正会員)

昭和 25 年生。昭和 54 年明治大学大学院工学研究科博士課程電気工学専攻修了, 工学博士。同年明治大学工学部助手。昭和 57 年明治大学工学部専任講師, 平成元年明治大学理工学部専任助教授, 平成 6 年ドイツ, カールスルーエ大学客員教授, 平成 10 年明治大学理工学部情報科学科教授。グラフ理論とその応用に関する研究, 自律移動ロボットと人工視覚に関する研究, ロボットビジョンに関する研究, 遠隔立体視に関する研究, ロボットの意識に関する研究に従事。日本機械学会 100 周年記念功労賞受賞。HMM アジア地区プレジデント, IEEE R&A, 日本ロボット学会, 日本機械学会, 日本計測自動制御学会各会員。