

移動のためのビジョンセンサー技術

武野 純一(明治大学)

抄録: 筆者は移動用の2眼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開発した。本論文はこれらの2種のステレオ視覚システムを紹介し、関連のある研究の成果を示している。本論文はさらに新型のステレオ視覚システムの提案を明らかにするとともに、研究の発展について述べている。

Vision Sensor Technology for Mobile Robots.

Jun'ichi TAKENO: Meiji University,

Abstract:

The author has been studying binocular stereovision system for 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 research by the author, including a proposal for a new system to enhance sophisticated intellectual functions, and examples of applications.

Key Words: Stereovision, Mobile Robot, Real-Time Processing

1 はじめに

移動ロボットが未知な移動環境を移動することを可能とするためには、移動ロボット自身が移動方向に障害物が存在しているか、どのくらいの大さの障害物があるのか、あるいはどの方向に移動すれば衝突せずに移動できるかという情報を逐次取り入れなければならない。ロボットの移動ダイナミズムの計算が本来必要であろうが、筆者の目的としては人間が移動するダイナミズムの規模を基礎として、最大でも5m程度を計測範囲と考えている。移動ロボット用の視覚システムは、CMUのH. P. Movarec等のスライドと移動を用いたステレオ視覚の成功¹⁾以来、多くの研究がなされてきた。その中でレーザ測距器の原理を利用したレーザ・レンジ・ファインダの研究²⁾、CCDカメラを機械的な構造によって動的に移動させる研究³⁾、CCDカメラを多数配置した多眼ステレオ視覚の研究⁴⁾そしてトラッキング・ビジョンの研究⁵⁾などの注目すべき研究が行なわれてきた。

筆者が開発した視覚システムは二種類ある。それぞれをPRPSそしてLDMと呼んでいる。その両者は基本的に、機械的に動く部分がなく、受光型のステレオ視覚であり、人間の大きさ程度の障害物をほぼ実時間で検出できる。異なる部分は機構にある。すなわち前者は二つの対物レンズを用いてはいるが、CCDカメラを一つしか使用していない。後者は、標準的ステレオ視覚と同様に二つのCCDカメラを用いているが内部での画像処理手法に差分積層法と呼ぶ独特な手法を用いている。著者はすでにこれらの視覚システムを移動ロボットに搭載して、障害物を発見し、よけながら移動する実験に成功している。前者は、ドイツ・カールスルーエ大学の移動ロボットKAMROに搭載して、障害物の検知に成功している図1、図2、図3、6)。また後者は、明治大学工学部の移動ロボットAFVに搭載して、同様に障害物の検知に成功している図4、7)。本報告では、この二種の視覚システムの紹介とその改良の道程とその結果、および移動ロボット用の高機能視覚システムの開発について紹介する。

2 PRPS ステレオ視覚システム

カメラ部は二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、

光学器類および一台の CCD カメラである。二つの対物レンズは、視線方向を平行に、ある基線距離を隔てて設置されている 8) 図 5。特種マスクは左右の対物レンズに対応して二種類ある。一つは基準視野マスク、他を参照視野マスクと呼んでいる。二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夫々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、最終的に一つの 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夫々多数のウインドからなり、ウインドの各々を基準視野、参照視野画像と呼ぶ。

CCD 面に結像した基準視野、参照視野画像の配置は図 6 のようになる。左右に並ぶ一对の両視野画像は、共に共通した走査線を持ち、かつその走査線はエピポーラ面と一致していることが保証されている。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測量の原理から算出できる。この一对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对になった両視野画像が多数存在しているので、CCD 一面で多数方向の距離が計測可能となる。例えばある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を推定法を用いて改善に成功した 6)。図 7 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 9 cm、512 x 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 5 m 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 30 cm 程度の誤差生じた。それに反して、改善の処理を加えた場合では、誤差は最大でも 17 cm 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。しかし、実験の結果は明らかな改善を示している。

3 LDM ステレオ視覚システム

この視覚は二つの 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た。二つの CCD カメラは左右一对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 9)。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、筆者等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 画素ずらして画素毎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てみると、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。またこの時のずらし値 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物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って、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 8 のようになる。この時、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。これは全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

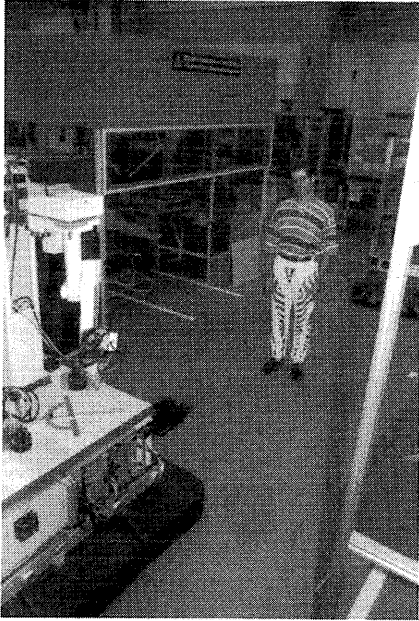


図1 KAMRO と実験の風景

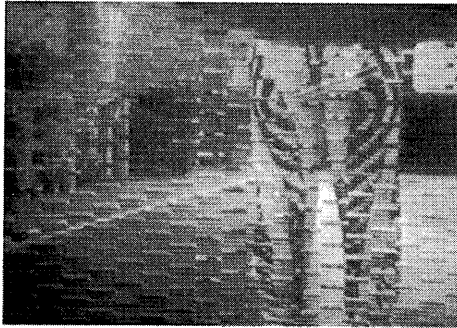


図2 撮像データ

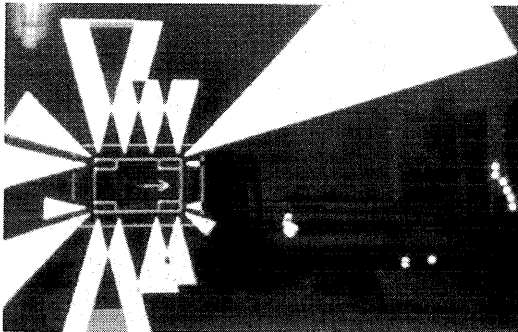


図3 検出データ



図4 明治大学の野外自律移動車 AFV

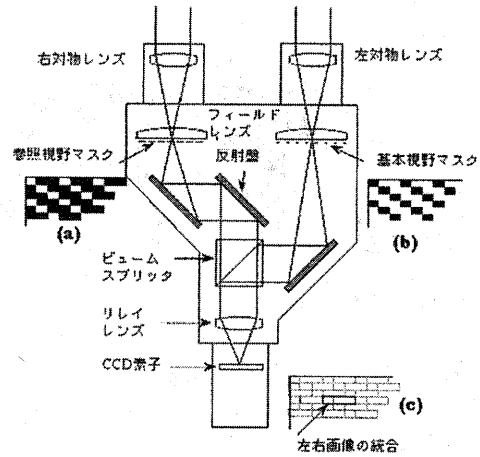


図5 PRPS の構造

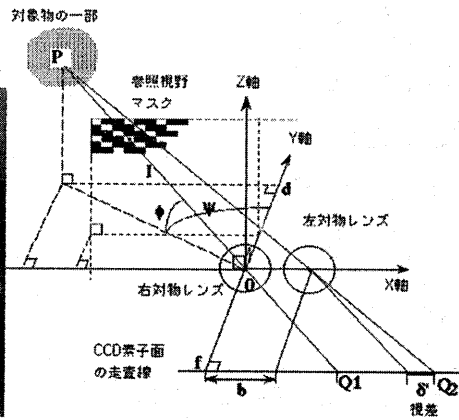


図6 マスクと視差の関係

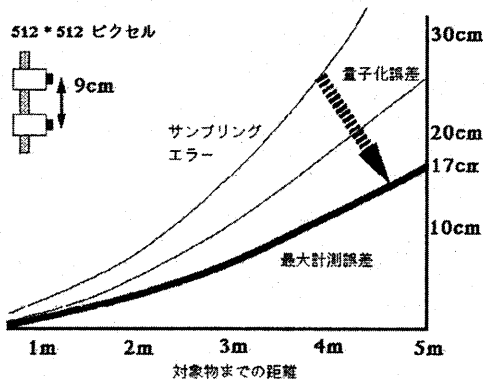


図7 距離計測の改善

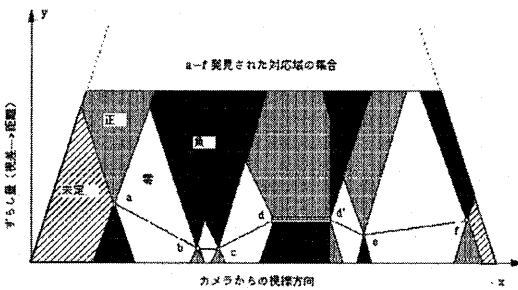


図8 LDMにおける差分積層配列

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	

表1 対応点検定のための評価

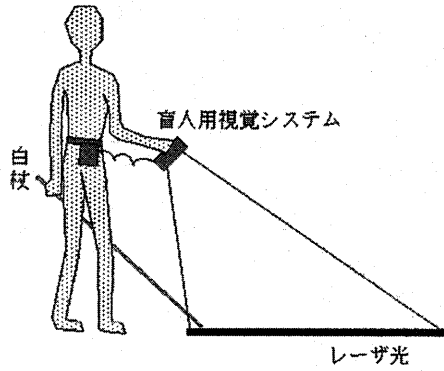


図9 視覚障害者用の視覚システム

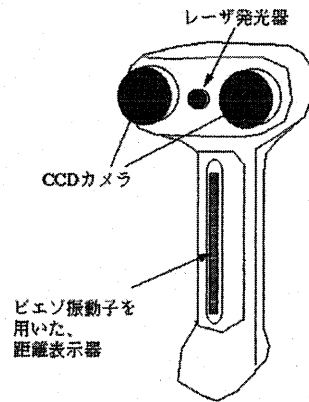


図10 完成予想図

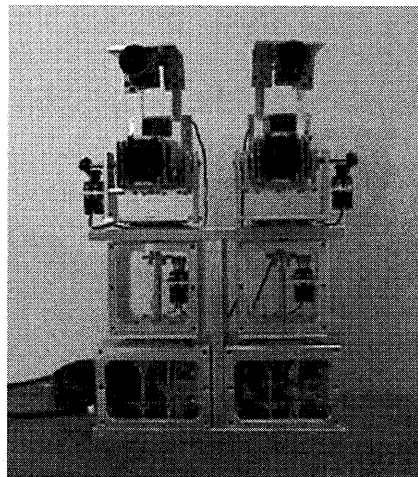


図11 回転視差メカニズム

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 8)。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関係上、処理速度に問題があり五本程度の走査線のみ処理を可能としている。しかし、処理速度の向上と共に全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。この視覚は、左右画像の照合を画素毎としているため、原理的にオクリュージョン問題が存在しないという利点がある。

4 PRPS 視覚の単純化と知的処理法の採用

筆者は、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、その単純化の代わりに 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、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に成功した。新しい PRPS 視覚を nPRPS と呼ぶ。すなわち、nPRPS は構造的に LDM と同一となった。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 における基準視野画像、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。その後の処理は従来とほぼ同様であるが、著者は現在 nPRPS 視覚の画像処理部をより知能化するための試みを行な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照合することである。画像照合の方法には、画像相関法を初めとした種々の方法が提案されているが、最近で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(10)。筆者もステレオ視覚の盲点と言われてきたオクリュ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ない、成果を得た(11)。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一であるが、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なわれていない点を無視できないと考えられる。しかしながら、それでもニューラルネットワークの技術が画像照合やオクリュージョン問題の解決に有効であることは理論的に明白である。私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(12)。

5 視覚障害者用視覚システムの開発

筆者は、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 9、図 10)。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がピエゾ振動子を利用して視覚障害者に伝えられる手法をとっている。ステレオ視覚は手に持てる程度の大きさや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線上のレーザ光線を照射して、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、地下鉄のプラットホ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。このシミュレーションで用いた距離情報は実際の環境から採取したデータであることを申し添える。

6 高機能ステレオ視覚の開発

筆者は現在、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アクティブステレオ装置を開発している、図11。その装置の動作は、並列トランスピ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、俊敏性を実現する。この装置は2眼の中心視覚と2眼の周辺視を持つ、4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と周辺視のカメラにおいて後者が前者の周囲を高速に回転する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ルージョンへの対応を研究対象とすることを可能とした。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を示している14)

7 おわりに

PRPS 視覚は(元)キャノンの反町誠宏氏の開発であり、画像処理部は著者が担当した。またLDM 視覚は著者の独自開発であることを付記する。

参考文献

- 1) H. P. Moravec: Robot Rover Visual Navigation, pp.19-24, UMI Research Press (1980).
- 2) E. Thorpe, T. Kanade: Vision and Navigation The Carnegie Mellon Navlab, pp.117-186, Kluwer A. P. (1990).
- 3) A. J. Wavering, J. C. Fiala, K. J. Roberts and R. Lumia: TRICLOPS: A High-Performance Trinocular Active Vision System, Proc. of Internat. Conference on Robotics and Automation, pp.410-417, IEEE (1993).
- 4) T. Kanade: Development of a Video-Rate Stereo Machine, Proc. of DARPA Image Understanding Workshop, pp. 549-558 (1994).
- 5) H. Inoue, T. Tachikawa and M. Inaba: Robot Vision System with a Correlation Chip for Real-time Tracking, Proc. of Internat. Conference on Robotics and Automation, pp.1621-1626, IEEE (1992).
- 6) J. Takeno and U. Rembold: Stereovision Systems for Autonomous Mobile Robots, Robotics and Autonomous Systems, Vol 18, pp. 355-363, Elsevier Science (1996).
- 7) S. Kato, S. Nishiyama, J. Takeno: Stereo vision system on mobile robots for measuring road surfaces, Advanced Robotics, Vol. 9 No. 4, pp. 383-397, The Internat. Journal of RSJ (1995).
- 8) J. Takeno, Y. Shin'ogi, S. Nishiyama, N. Mizuguchi and K. Sorimachi: Realzation of a 3D vision mobile robot that can avoid collision with moving obstacles, Proc. of Internat. Conference on Robotics and Automation, pp.2010-2023, IEEE (1991).
- 9) J. Takeno, S. Hachiyama: A Collision-Avoidance Robot mounting LDM Stereo Vision, Proc. of Internat. Conference on Robotics and Automation, pp.1740-1752, IEEE (1992).
- 10) H. C. Jung: Visual navigation for a mobile robot using landmarks, Advanced Robotics, Vol. 9 No. 4, pp. 429-442, The Internat. Journal of RSJ (1995).
- 11) A. Schmitt, J. Takeno: Matching with a neural net to measure the distance with stereo vision systems, Proc. of Annual Meeting for RSJ, pp. 1001-1002, The RSJ (1995).
- 12) A. Kino, J. Takeno: Study of Stereovision with AI technology Part. 2, Proc. of Annual Meeting for RSJ, The RSJ (1996).
- 13) J. Takeno, K. Sorimachi: Passive Stereovision for Autonomous Mobile Robots, Proc. of Annual Meeting for RSJ, The RSJ (1996).
- 14) J. Takeno, Zichuan Xu: New Binocular Vision System for Human-Robot Communication, Proc. of the IEEE Int. Work. On Robot and Human Interaction, IEEE 99TH8483, pp.416-420, (1999)