

## 解説

## 実時間全方位視覚センサ

Real-time Omnidirectional Image Sensors

八木 康史\* \*大阪大学基礎工学部システム工学科

Yasushi Yagi\* \*Faculty of Engineering Science, Osaka University

## 1. はじめに

人間には人間の、蠅には蠅の、魚には魚の目があり、各々その構造、機能は異なる。この観測系と観測情報の処理系の違いは、生存のために必要な行動（捕食など）が、その生物が生息する環境に合わせて異なるためにおきる。即ち、目も生体の機構と考えると、生き物の機構、外界環境、行動目的は切っても切り離せない三つ巴の関係と言えよう。

もうひとつ生物において重要なことは、単一の視覚系（入力系、処理系）を用いるだけでなく、目的に合わせた視覚系を複数持ち、それらの情報の融合により観測を行っている点である。例えば、高等動物の視覚においては、主に網膜の中心付近（視野6度程度）での視力は高く、詳細な情報を獲得する上で適している。それに対し視覚の周辺部は、視力および色を検出する能力は低いとされるが、移動物体の知覚などの情報は、網膜の周辺領域においても低下しない。即ち高等動物は目的に応じて中心視・周辺視といった異なる視覚機能をうまく使い分け、効率よく環境理解を行っている。

このような考え方のもとで、ロボットを考えた場合、機械（ロボット）の目として必要な機能とはどのようなものであろうか。

一般に自律ロボットの作業内容を考えると、目的地までの安全な誘導および目的地での作業、即ち Navigation と Manipulation に大別できる。Manipulation では、観測範囲は局所的であっても対象物体の詳細な情報を獲得する必要がある。それに対し、Navigation では、環境中でのロボットの位置同定や未知障害物の発見、衝突回避とその位置、動きの推定などの機能が要求されるが、これらは、部分的に詳細な情報を必要とすると言うよりも、環境内、環境についての大局的情報を観測できること、さらにリアル

タイムでの応答が要求される。即ち、Navigation の目的には、移動しながら全方位の視野情報を同時に観測できる観測系（実時間全方位視覚）が望ましいと言える。

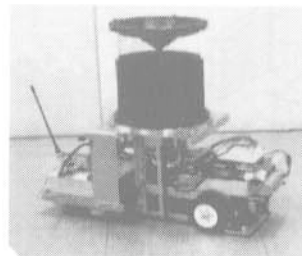
全方位の視野情報を獲得する研究には、大別して、駆動系を用い光学系を回転する方法[1][2]とミラーまたはレンズなど光学系を工夫する方法[3]~[12]がある。光学系を回転する場合、精度のよい全方位画像を得られるが、1シーンの撮像に時間を要するため、リアルタイムでの応答を必要とする Navigation の目的には不向きである。従って、実時間視覚という観点からは、後者の方法が有利と言える。

本解説では、本特集の主旨より、筆者の提案した3種類の実時間全方位視覚センサ COPIS, MISS, HyperOmni Vision について紹介する。これらはすべて光学系を工夫することで（実際には回転体のミラーを利用）、全方位視野情報を実時間観測できる。

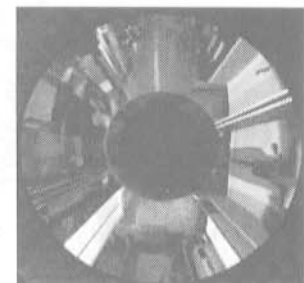
## 2. 全方位を覗く目—COPIS—

筆者の提案した全方位視覚センサ COPIS (COnic Projection Image Sensor) [5][6] は、円錐ミラーを利用することで、周囲360度側方を一度に（ビデオレートで）観測できる（図1(a)）。図1(b)は、入力画像の一例である。

一般にロボットの移動空間は平面上であるため、他の移動物体などは、ロボットの前方、後方また左右に存在す



(a) COPIS の外観



(b) COPIS 入力画像

原稿受付 1995年1月2日

キーワード: Vision, Omnidirectional Imaging, Real-time, Navigation COPIS, MISS, HyperOmni Vision

\*〒560 豊中市待兼山町1-3

\*Machikaneyama-cho, Toyonaka-shi, Osaka

る。従って、ロボットの周り側方の情報が誘導上、最も重要となる。COPIS では、その視野領域が円錐ミラーにより側方中心となっているため、移動ロボットの誘導用として有利と言える(図2)。また図3に示すように入力画像上では、環境内の垂直エッジが放射状に投影されるという特徴がある。距離計測を行う任意の点  $P(X, Y, Z)$  に対する画像面上の写像点を  $p(x, y)$  とすると、次式の関係がある。

$$\tan \theta = Y/X = y/x \quad (1)$$

即ち  $Y/X$  で定まる対象物体の方位角は、 $y/x$  で定まる画像面内の像の回転角を算出することで得られる。このように 360 度パノラマ状の領域を円錐ミラーを介して、撮像面上に投影する本方式では、対象物体の方位角  $\theta$  が、その物体の画像面上の投影の角度として直接現われる。この特徴を利用して、ロボットの移動により撮像された画像から対象物体の方位角を観測することで、未知動物体の発見、その運動推定[7]、また大局的な環境マップ作成[8]やマップに基づく視覚誘導[9]などを容易に行うことができる。例えば、動物体の発見は、物体がだんだんと大きくなり、かつ見かけの観測方位が同じ方向であるか否かを評価することで容易に行うことができる。即ち、時系列間での方位変化を観測すること、また相対運動方向(ロボットに対する物体の相対速度の方向)を観測することで動物体の発見が可能となる。これは、延ばした手を顔に近づけてきた時のことを想像してもらえれば、直感的に理解頂けるかと思う。

全方位視覚センサ COPIS は、このように方位情報が観測しやすい特徴を持つため、視覚誘導に適している。

冒頭で述べたようにロボットの作業内容は、Navigation と Manipulation に大別でき、作業内容により、必要

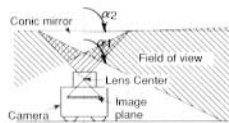


図2 COPISの視野領域

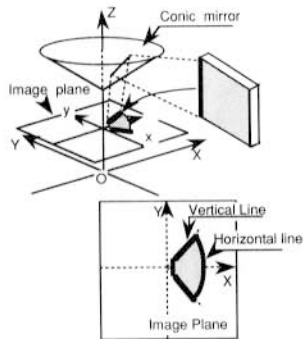


図3 円錐投影

な画像の解像度や観測範囲・処理速度などが異なる。COPIS は Navigation には有用であったが、Manipulation といった詳細に物体形状を解析する目的に、適しているとは言い難い。なぜなら、COPIS には全方位が観測できる利点がある反面、周囲 360 度の環境を限定された解像度 (512×480) の画像に投影するので、入力画像上では光学的歪み(特に画像中心部では光学歪みが大きくなる)が発生するという欠点があるからである。

次章では、COPIS の特徴を活かしつつ、Manipulation にも対応できるセンサとして複合視覚センサ MISS を紹介する。

### 3. 局所視と大局視を統合する目—MISS—

一般に昆虫などの生物においても、その生物が生存する環境に合わせ、捕食行動などに適したセンサとその情報処理系が備わっている。例えばハエトリグモは、ほぼ周囲 360 度を観察できる側方の 4 つの目と注目物体をじっくり観測するための前方の 2 つの目から成る複数の目を持つ(実際にはあと 2 つあるが退化している)。そして、側方の目の視野に動物体が飛び込んできて 1 箇所にとどまると、まず側方の目でその位置を求め、次にその方向に体の正面を向ける。こうして正面にきた注目物体を前方の目で拡大しそれが何であるかをじっくり観察する。その結果、それが餌、仲間、敵のいずれであるかを知り環境に応じた行動を選択する。即ち大局視である側方の目は、注視対象の発見とその位置推定に用いられ、局所視である前方の目は、注視対象の認識に利用され、これら異なった視覚機能を持つことで環境に適応し生存している[10]。

自律移動ロボットにおいても、生物の場合と同様に作業目的に合わせた視覚系を利用する方法(センサフュージョン)が考えられる。実際にロボットに搭載することを考えた場合問題となるのは、可搬重量および処理コストなどの制限である。故に、如何にコンパクトに目的に応じた視覚機能を盛り込むかが重要な課題となる。

図4に示す複合視覚センサシステム MISS (Multiple Image Sensing System) では、前述の COPIS (大局視)と



図4 MISSの外観

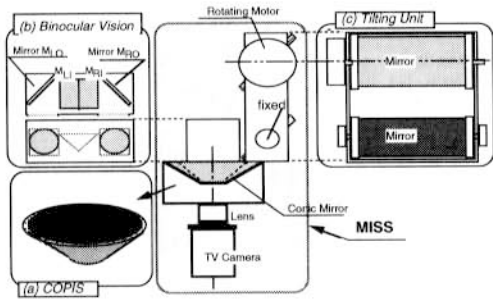
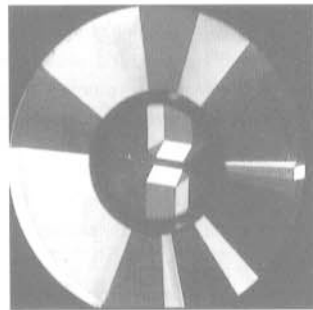


図5 MISSの光学系構成



(a) MISS実験シーン



(b) MISS入力画像

図6

ステレオ視（局所視）といった性質の異なるセンサを単に組み合わせるだけでなく、これらを光学的にまとめ一体化することで大局視，局所視の情報を実時間で獲得できるセンサを実現している（図5）。

COPISの場合，画像面の中心部分では，ミラーによる光学歪みの影響で満足な画像を得ることができない。従って，大局視用には画像面の周辺部が適している。一方，レンズ系の光学歪みは，光軸中心から放射状に現れ，周辺部で最も大きく，画像中心で光学歪みが最も少なくなる。従って，画像面（撮像素子）の中心領域は，局所視として利用するのに最も適した領域と言える。

以上のことから，一体化に当たっては，画像面の周辺部を大局視（全方位視覚），中心部を局所視（ステレオ視）の視野領域となるように光学系を設計し，一つの画像面（カメラ）上で結像させることで，両者の短所を補い合い，また長所を活かしたセンサ造りを行っている。図6(b)は図6(a)のシーンにおける入力画像の一例である。

#### 4. 人にやさしい全方位視覚 —HyperOmni Vision—

HyperOmni Visionは，COPISをよりよくする目的で光学系を改善した全方位視覚センサである[12]。図7は，本センサのプロトタイプである。以下，COPISとの比較結果に関して示す。COPISでは，円錐ミラーを用いることで全方位画像が得ることができ，垂直エッジが画像面

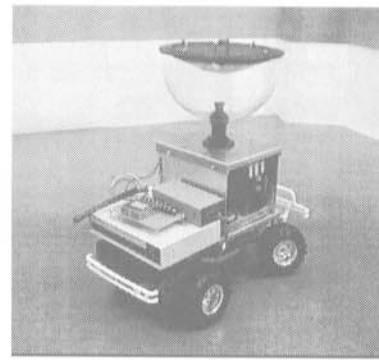
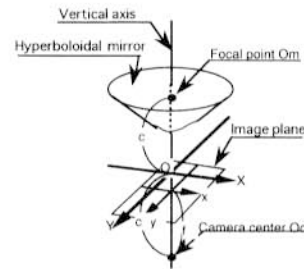
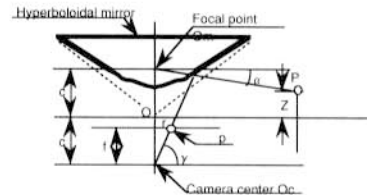


図7 HyperOmni Visionの外観



(a) カメラ座標系



(b) HyperOmni Visionにおける物点Pの射影関係

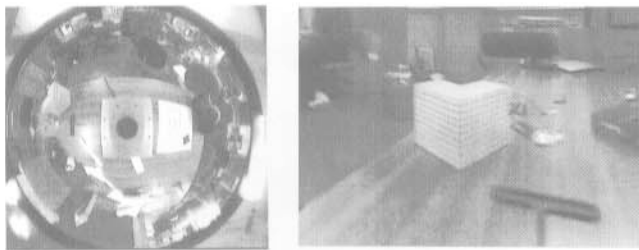
図8 双曲面射影

上で放射状に射影される特徴があった。しかしその反面，他の直線エッジは，非線形な変換となりそれらの検出が困難となる。HyperOmni Visionは，ミラー形状を双曲面とすることで上記の問題を改善している。

図8に示すようにHyperOmni Visionは，鉛直下向きに設置した双曲面ミラーとその下に鉛直上向きに設置したカメラから構成され，違いはミラーの形状とミラーカメラ間の設置位置の制約にある。ここで言う双曲面とは，次式に示す2葉双曲線をZ軸回りに回転させた2葉双曲面のことを指す。

$$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1 \quad (2)$$

なお  $a, b$  は双曲線の形状を定義する定数である。この時，ミラーの焦点  $O_M$  およびカメラのレンズ中心  $O_C$  は各々2葉双曲面の二焦点  $(0, 0, +c)$ ， $(0, 0, -c)$  に位置し，上記  $c$  は  $c = \sqrt{a^2 + b^2}$  で定義される。この時，空間内の任意の点  $P(X, Y, Z)$  に対する画像上での写像点を  $p(x, y)$  とすると，点  $P$  の方位角  $\theta$  は，COPISと同様に  $\tan \theta =$



(a) HyperOmni Vision 入力画像 (b) 透視座標系への変換画像

図9

$Y/X=y/x$  で表現される。また点  $P$  と  $Z$  軸を含む鉛直断面を想定すると、点  $P$  と写像点  $p$  の間には次式の関係が成り立つ。なお  $f$  はカメラの焦点距離とする。

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{X^2 + Y^2} \tan \alpha + c \\ \alpha &= \tan^{-1} \frac{(b^2 + c^2) \sin \gamma - 2bc}{(b^2 - c^2) \cos \gamma} \\ \gamma &= \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

よって、点  $P$  はカメラのレンズ中心  $O_c$  を双曲面の焦点位置にすることで、その位置にかかわらず、方位角  $\theta$  および伏角  $\alpha$  により、ミラーの焦点  $O_m$  から見た画像に変換することができる。このような変換ができると例えば、目的地までのロボット誘導は、入力画像 (図9 (a)) をそのまま利用するのに対し、人間がモニタリングする時は、歪みのない画像の方が人が親しみやすいので、注視したい対象を中心とした中心射影の画像 (図9 (b)) を提示するといった目的に応じた変換が可能となる。

以上、HyperOmni Vision は、観測の効率とか安定性を重視した視覚誘導等のためのセンサとしてだけでなく、人間が外界の変化を不自然なく円滑に観測できるセンサとして活用することもできる。

## 5. おわりに

本解説では、COPIS, MISS, HyperOmni Vision という3種類の性質の異なる全方位視覚センサを紹介した。誌面の都合により、本解説では、概要のみに留めた。各センサを用いた具体的な処理に関しては、参考文献を参照されたい。

当初、これらの全方位視覚センサは、「作業目的に合わせてどのようなセンサが良いか」という工学的立場から生まれてきた。しかし、本稿の中でもいくつか記述したように生物の視覚と対比させてみると、ハエトリグモなど類似した視覚を持つ生物が存在することに驚かされた。外界環境-行動目的に合わせて適合してきた生物の機構 (センサ) は、これからのロボットの視覚を考える上で大きなヒントになるものと感じる。

最後に、ロボットの誘導など実時間性また広域性を必要とする目的に対しては、全方位視覚は有効なセンサであり、工場内の搬送および巡視点検ロボット、宇宙ロボット、HAロボット、車載用ナビゲーションなど幅広いニーズがあると確信する。しかし実世界で安心して働くセンサを実現するためには、高速処理、高信頼性に加え、小消費電力、軽量、コンパクトさはやはり重要な課題である。そのため、デバイスから十分検討する必要があると考える。

## 参考文献

- [1] K. B. Saraclik: "Characterizing an indoor environment with a mobile robot and uncalibrated stereo," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 984-989, 1989.
- [2] H. Ishiguro, M. Yamamoto and S. Tsuji: "Omni-directional stereo for making global map," Proc. IEEE 3rd Int. Conf. Computer Vision, 1990.
- [3] Z. L. Cao, S. J. Oh and E. L. Hall: "Dynamic omnidirectional vision for mobile robots," J. Robotic Systems, vol. 3, no. 1, pp. 5-17, 1986.
- [4] J. Hong, X. Tan, B. Pinette, R. Weiss and E. M. Riseman: "Image-based homing," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 620-625, 1991.
- [5] 八木康史, 川戸慎二郎: "円錐投影による全方位環境認識", 信学技報, PRU 89-46, pp. 47-53, 1989.
- [6] 八木康史, 川戸慎二郎: "円錐ミラーを用いた全方位視覚センサによる位置情報の獲得", 信学論, J 74-D-II 1, pp. 19-26, 1991.
- [7] Y. Yagi, S. Kawato and S. Tsuji: "Real-Time Omnidirectional Image Sensor (COPIS) for Vision Guided Navigation," IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 10, no. 1, pp. 11-22, 1994.
- [8] 西澤義満, 八木康史, 谷内田正彦: "全方位視覚センサ COPIS を搭載した移動ロボットのための環境マップの生成と移動自由空間の推定", 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 6, pp. 100-106, 1993.
- [9] Y. Yagi, Y. Nishizawa and M. Yachida: "Guidance of a Mobile Robot with Environmental Map using Omnidirectional Image Sensor COPIS," IEICE Trans. Information and Systems, E 76-D, 4, pp. 486-493, 1993.
- [10] 清水編: "生物の目とセンサ", 情報調査会, 1985.
- [11] Y. Yagi, H. Okumura and M. Yachida: "Multiple Visual Sensing System for Mobile Robot," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 2, pp. 1679-1684, 1994.
- [12] K. Yamazawa, Y. Yagi and M. Yachida: "Omnidirectional Imaging with Hyperboloidal Projection," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, 2, pp. 1029-1034, 1993.



八木康史 (Yasushi Yagi)

1959年9月27日生。1983年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1985年同大学院修士課程修了後、三菱電機(株)勤務。1990年大阪大学基礎工学部情報工学科助手。1993年より同学部システム工学科講師となり現在に至る。工学博士。ロボットビジョンの研究に従事。IEEE、電子情報通信学会、情報処理学会等の会員。  
(日本ロボット学会正会員)