

# 実時間全方位視覚センサ

八木 康史<sup>†</sup> 谷内田 正彦<sup>†</sup>

周囲 360 度 (全方位) の視野映像は、移動ロボットにおける視覚誘導問題、ならびにテレオペレーションや仮想現実感における任意視線映像提示、さらに不審者等の広域監視など、さまざまな場面でその利用価値があり、現在、多くの研究が行われている。本論文では、我々が考案した円錐ミラーを利用した全方位視覚センサ COPIS、双曲面ミラーを利用した全方位視覚センサ HyperOmni Vision、大局視と局所視の機能を統合した複合視覚センサ MISS の特性をまとめるとともに、従来全方位視覚がかかえていた、解像度と小型化の問題に対する新たな提案を示す。さらに、我々が提案した全方位視覚を用いた移動ロボットの経路誘導や環境認識に関する研究、さらに、人間との共存のための人物注視方法やこれらの機能を合わせた案内ロボットシステムについて述べる。

## Real-time Omnidirectional Image Sensors

YASUSHI YAGI<sup>†</sup> and MASAHIKO YACHIDA<sup>†</sup>

Conventional T.V. cameras are limited in their field of view. A real-time omnidirectional camera which can acquire an omnidirectional (360 degrees) field of view at video rate could be applied in a variety of fields such as autonomous navigation, telepresence, virtual reality and remote monitoring. We have developed three different types of omnidirectional image sensors and two different types of multiple image sensing system which consists of an omnidirectional image sensor and binocular vision. In this paper, we introduce the outlines and fundamental optics of our developed sensors and show examples of applications for robot navigation and human-robot interaction.

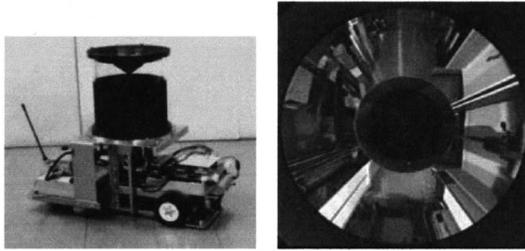
### 1. はじめに

周囲 360 度 (全方位) の視野映像は、移動ロボットにおける視覚誘導問題、ならびにテレオペレーションや仮想現実感における任意視線映像提示、さらに不審者等の広域監視など、さまざまな場面でその利用価値があり、現在、多くの研究が行われている<sup>1)</sup>。全方位画像の取得方法には、大きく分けて、複数の画像を統合する方法と光学系を工夫する方法がある。複数枚の画像の統合とは、カメラの回転運動や並進運動にともなって、空間をスキミングすることでパノラマ画像を獲得する方法である。この方法では、高精細な映像が得られるという利点がある反面、カメラを回転ないし並進運動させるため、全方位観測にかかる計算コストが大きく、さらに同時に観測できる視野領域は用いるカメラレンズの視野角で制限されるといった問題点があった。一方、レンズやミラーの工夫による全方位視覚センサは、同時に全方位画像を観測できるため、

上述のような実時間での広域観測を必要とする応用に適している。ただし、すべての回転体型のミラーでいえることだが、一般に球面収差、非点収差、コマ収差などの影響を受けるため、光学系の設計には十分な注意を要し、小型化、高解像度化の両立が難しいという問題がある。

我々は、1988 年より実時間全方位視覚に関する研究に取り組み、これまでにさまざまなタイプのミラー反射型の全方位視覚センサを提案し、ロボットのナビゲーション問題などに利用してきた<sup>2)~4)</sup>。ここでいう実時間とは、周囲 360 度の視野領域がビデオレートで観測できることである。本論文では、我々が考案した円錐ミラーを利用した全方位視覚センサ COPIS、双曲面ミラーを利用した全方位視覚センサ HyperOmni Vision、大局視と局所視の機能を統合した複合視覚センサ MISS の特性をまとめるとともに、従来全方位視覚がかかえていた、解像度と小型化の問題に対する新たな提案を示す。さらに、我々が提案した全方位視覚を用いた移動ロボットの経路誘導や環境認識に関する研究、さらに、人間との共存のための人物注視方法やこれらの機能を合わせた案内ロボットシステムについ

<sup>†</sup> 大阪大学大学院基礎工学研究科  
Graduate School of Engineering Science, Osaka University



(a) Prototype

(b) Input image

図1 全方位視覚センサ COPIS  
Fig. 1 COPIS.

て述べる．

## 2. 実時間全方位視覚センサ

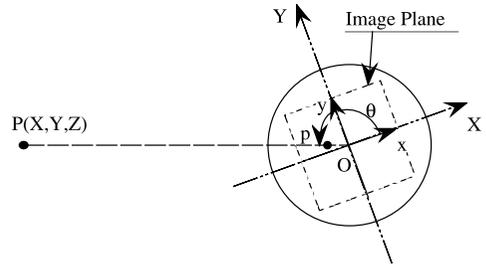
### 2.1 COPIS

全方位視覚センサ COPIS (COnic Projection Image Sensor<sup>5),6</sup>) は、円錐ミラーの鉛直下方にカメラを上向きに設置したシンプル構成で、周囲 360 度側方を一度に (ビデオレートで) 観測できる．図 1 は、我々が試作した COPIS と、その入力画像の一例である．

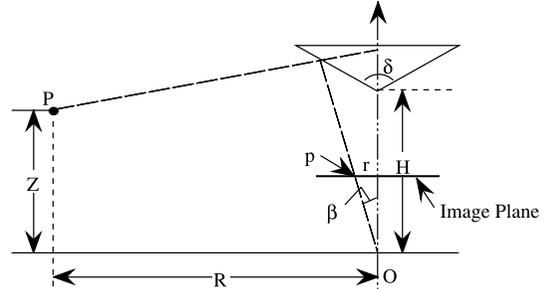
一般にロボットの移動空間は平面上であるため、他の移動物体などは、ロボットの前、後方また左右に存在する．したがって、ロボットの側方情報が誘導上、最も重要となる．図 2 に示すように任意の点  $P(X, Y, Z)$  に対する画像面上の写像点を  $p(x, y)$  とすると、次式の関係がある．

$$\tan \theta = \frac{Y}{X} = \frac{y}{x} \quad (1)$$

すなわち  $Y/X$  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、また大局的な環境マップ作成やマップに基づく視覚誘導などを容易に行うことができる．ロボット誘導への適用事例の詳細は、後述する．また、カメラがピンホールだと仮定すると、図 2 (b) に示すように COPIS の垂直断面形状は直線のため、点  $P$  からの光は、平面ミラーに反射し、単に光路が変更されたのと等価である．すなわち、垂直方向の角度分解能は、入力画像上での分解能と線形関係にあるという利点を持っている．式 (2) は、図 2 に示す点  $P$  の垂直方向の射影関係を表す式である．なお、垂直視野は、カメラの視野角の



(a) Invariability of azimuth angle in COPIS



(b) Linear relation of tilt angle in COPIS

図2 円錐投影  
Fig. 2 Conic projection.

半分で、COPIS では、足下が見えるというよりも側方がよく見える光学系になっている (図 1 (b)) .

$$r = f \tan \beta$$

$$\beta = \delta - \tan^{-1} \left( \frac{R + H \sin \delta}{Z - H(1 - \cos \delta)} \right) \quad (2)$$

$$\left( 0 \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}, \beta < \delta \right)$$

すなわち、物体の位置  $(X, Y)$  が分かれば、その物体の高さ  $Z$  は、天頂角  $\beta$  から一意に求まる．しかし、別の観点から幾何光学系を考えると、図 2 (b) から想像がつくが、ミラー面で反射した後の光路を、そのまま延ばすと点  $O$  に対応した仮想的な視点位置が得られる．この位置は、方位の違いにより異なり、COPIS ではリング状に現れる．このことは、入力画像を透視投影画像に変換することができないということの意味する．すなわち、COPIS は、側方視野、特に方位情報のみ必要な場合、または、垂直視野の角度分解能が重要な場合に有用なセンサで、床面上を移動するロボットを走行制御する問題などに適している．しかし、その光学特性から、詳細に物体形状を解析する目的や人間への映像提示の目的に対しては、あまり適していない．この問題点に対し、我々は、COPIS の特長を生かしつつ、これまでの問題点を改善したセンサとして複合視覚センサ MISS、さらに射影特性の良い全方位視覚センサ HyperOmni Vision を提案した．

## 2.2 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。たと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 つの目からなる複数の目を持つ（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 カ所にとどまると、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。すなわ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。

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。ゆえに、いか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。

我々は、前述の COPIS（大局視）とステレオ視（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複合視覚センサシステム MISS（Multiple Image Sensing System）を提案した（図 3）<sup>7)</sup>。

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。したがって、大局視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。したがって、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いえる。

以上のことから、一体化にあたっては、画像面の周辺部を大局視（全方位視覚）、局所視（ステレオ視）の視野領域として利用、1 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、また長所を生かしたセンサ作りを行っている。具体的には、図 4 に示すように COPIS の円錐ミラーの中心領域を空洞化し、リレーレンズからなる別の光学系を取り付ける。そして、その上部にプリズムミラーを取り付けること



図 3 複合視覚センサ MISS

Fig. 3 MISS.

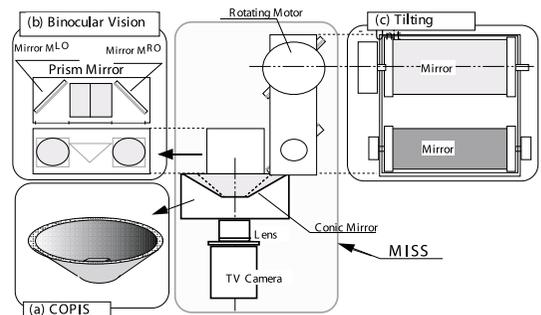
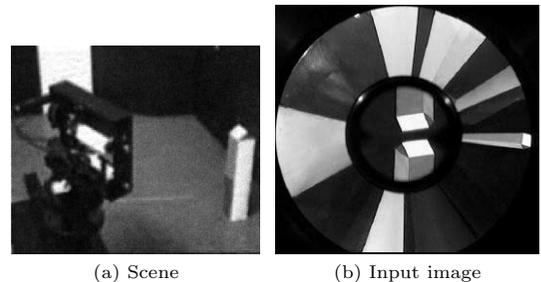


図 4 MISS の光学系の構成

Fig. 4 Optical configuration of MISS.



(a) Scene

(b) Input image

図 5 MISS の入力画像の一例

Fig. 5 An example of MISS input image.

で、空洞領域の視野を左右に分割し、各々の光路上に 90 度光路を変更するための反射ミラーを設置することで、ステレオ視を実現する。図 5 (b) は、同図 (a) のシーンでの入力画像例で、中央のステレオ視の視野には、左右の画像が上下に映し出されている。

## 2.3 HyperOmniVision

COPIS ならびにその発展系の MISS では、ともに

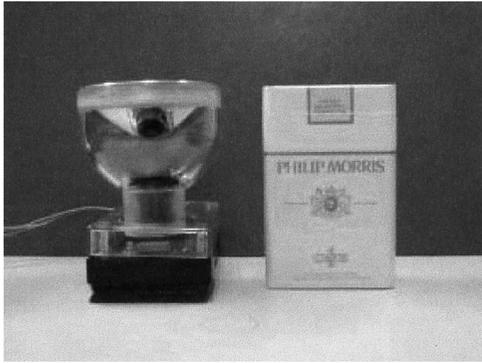
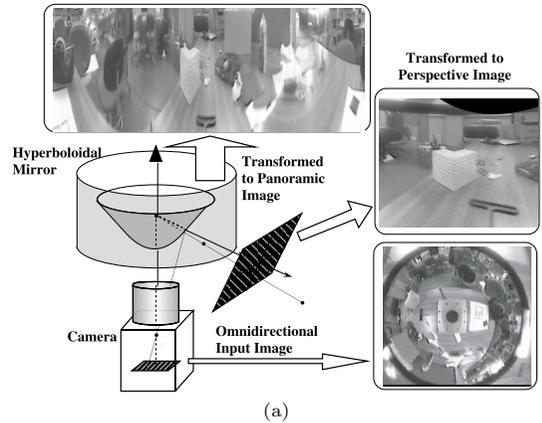


図 6 全方位視覚センサ HyperOmni Vision  
Fig. 6 HyperOmni Vision.



(a)

全方位視覚に円錐ミラーを用いていたため、仮想視点位置がリング状になり、通常の透視投影画像に変換することができない。そこで、新たな全方位視覚センサとして、図 6 に示す双曲面ミラーを用いた全方位視覚センサ HyperOmni Vision を提案した<sup>8)</sup>。HyperOmni Vision は、鉛直下向き双曲面ミラーと鉛直上向きカメラから構成され、従来のミラーを利用した全方位視覚センサと同じくセンサの周囲 360 度の画像を一度に撮像できるうえに、仮想視点が一となることから、入力画像を透視投影画像やパノラマ画像などの自由な座標系に変換することができる利点を持つ (図 7(a))。

ここでいう双曲面とは、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。なお  $a$ ,  $b$  は双曲線の形状を定義する定数である。

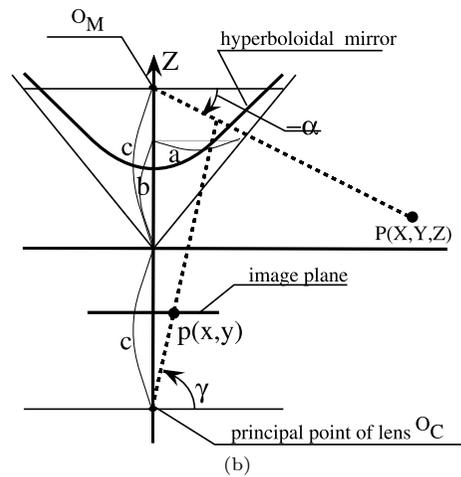
$$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1 \quad (3)$$

図 7(b) に示すようにミラーの焦点  $O_M$  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。このとき、空間内の任意の点  $P(X, Y, Z)$  に対する画像上の写像点を  $p(x, y)$  とすると、点  $P$  の方位角  $\theta$  は、COPIS と同様に  $\tan \theta = Y/X = y/x$  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。

$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2} \tan \alpha + c$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{(b^2 + c^2) \sin \gamma - 2bc}{(b^2 - c^2) \cos \gamma} \quad (4)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f} \right) \quad (5)$$



(b)

図 7 双曲面投影

Fig. 7 Hyperboloidal projection.

よって、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、点  $P$  はその位置にかかわらず、方位角  $\theta$  および俯角  $\alpha$  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、たとえば、目的地までのロボット誘導は入力画像 (図 7 右下) をそのまま利用するのに対し、人間がモニタリングするときは、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 7 右上) を提示するといったように、目的に応じた変換が可能となる。ただし、結像上の問題としては、すべての回転体型のミラーでいえることだが、一般に球面収差、非点収差、コマ収差などの影響を受けるため、光学系の設計では十分注意を要し、小型化、高解像度化の両立が難しいという問題がある。

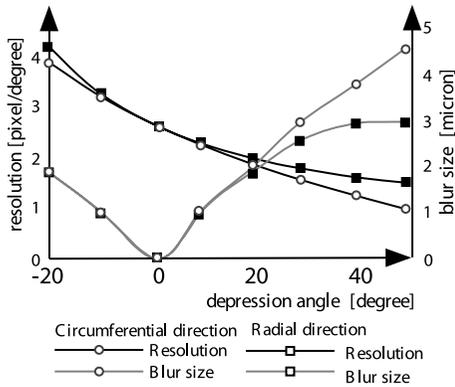


図 8 HyperOmni Vision の解像度と PSF

Fig. 8 Image resolution and point spread function of HyperOmniVision.

### 2.4 多重反射光学系による小型全方位視覚センサ TOM

HyperOmni Vision の画像は、曲面ミラーを介しているの、平面ミラーの場合と異なり 1 点に虚像を結ばず、ぼけが生じる。このぼけの主な原因は、非点収差、コマ収差、球面収差である。非点収差とは、ミラーの断面の曲率が断面の方向によって異なるために生じるぼけのことで、円錐、双曲面、放物面いずれのミラーの場合でも起きる収差である。すなわち、凸面ミラーを用いた全方位視覚系を構成するかぎり、得られる画像に対するこれらのぼけを避けることはできない。図 8 は焦点を俯角 0 度に合わせた際の入力画像の周囲方向と放射方向において俯角に対する波動光学的強度分布特性 PSF ( Point Spread Function ) の大きさをそれぞれ点線により示したものである。これらの収差による影響を軽減する方法としては、カメラの絞りを絞ること、ミラー曲率を小さくすることが考えられる。しかしながら、絞りを絞ることは入射光量を減らすことを意味し、画像のダイナミックレンジを確保する観点からも限度がある。また、ミラー曲率を小さくすることは、垂直視野の減少を意味し、これらの方法では小型化に限界がある。HyperOmni Vision では、曲率の小さい双曲面ミラーと広角レンズを用いることによってぼけを極力抑えている。しかしミラー径を小さくすると、錯乱円の径(画像面上での光線の広がり)が大きくなりぼけが大きくなる。図 9 は、双曲面ミラーを用いた全方位視覚センサ HyperOmni Vision の場合であるが、ミラーサイズが小さくなるにつれ、撮像面上での結像状態を表す Spot Diagram が大きくなっている。

ところで、一般に収差の影響を減らすためには、単一の光学系(ミラーないしレンズ)では難しく、複

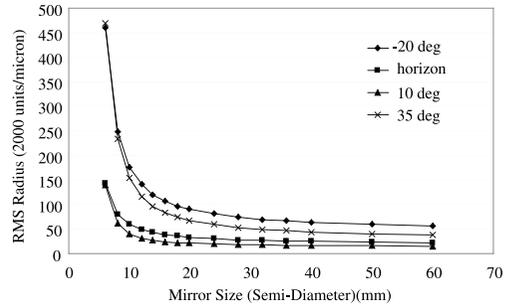


図 9 HyperOmni Vision のスポットダイアグラム  
Fig. 9 Spot diagram of HyperOmni Vision.



図 10 小型全方位視覚センサ TOM  
Fig. 10 Tiny omnidirectional image sensor TOM.

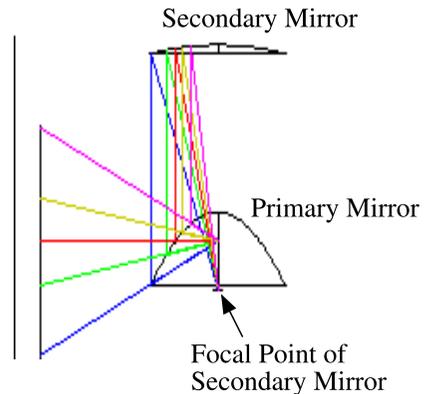


図 11 TOM の光学系の構成  
Fig. 11 Optics of TOM.

数の光学系を組み合わせる必要がある<sup>9),10)</sup>。そこで、我々は、凸面放物面ミラーと凹面放物面ミラーとの 2 枚の放物面ミラーを利用した全方位視覚センサ TOM ( Twin reflective OMnidirectional image sensor ) を新たに提案する<sup>11),12)</sup>。図 10 は、試作した全方位視覚センサ TOM とその入力画像の例である。光学的には、図 11 に示すように凸面放物面鏡の焦点に向かう光が反射後、平行光となり凹面ミラーに向かい、凹面放物面鏡での反射光が凹面側の焦点に向かうことを利用した光学系で、単一の場合に比べ集光特性が良く、同一のスペックの場合、数倍小型化が可能となる。実際に試作した例では、直径 40 mm の HyperOmniVision

と直径 20 mm の TOM が、ほぼ同程度の結像系となり、この結果から、HyperOmni Vision のミラーサイズに対し、TOM のミラーサイズは約 2 分の 1 ですむという結果が得られた。

## 2.5 画素ずらしの考えに基づく高精細全方位視覚センサ

全方位視覚センサ HyperOmniVision は、入力全方位画像を無歪みでシームレスな透視投影画像やパノラマ画像に変換できるため、人への提示目的のための広視野角撮像センサとして適している。しかし、たった 1 枚の固体撮像素子で全方位を撮像するため、角度分解能が全体的に劣るという欠点を持つ。たとえば、図 8 より俯角にともなって角度分解能が低くなることが見てとれる。よって、パノラマや透視変換を行った場合、変換画像下部の解像度の低さはさらに顕著になる。

そこで、我々は、全体の解像度を向上させることはもちろんのこと、この俯角に対する解像度の違いを緩和させることを目指した全方位視覚センサ HyperOmni Vision の高解像度化手法を提案した<sup>13),14)</sup>。本手法では、HyperOmni Vision における撮像過程である、光学過程、CCD の受光特性、さらにパノラマ画像といった対象となる出力画像と全方位入力画像の関係をモデリングすることで、撮像過程の最適化を行う。具体的には、画素ずらしと焦点ずらしによる方法を用いた。画素ずらしでは、HyperOmni Vision を鉛直に設置し、鉛直軸周りに回転することで、各画素の位置を微小に変化させ高解像化を行う。また、HyperOmni Vision の場合、放射方向に解像度やフォーカス位置が異なる。そこで、焦点ずらしに関しては、焦点位置を変化させることで、ぼけのない全焦点画像をつくることできる。実際に提案手法では、二十数枚の入力画像から静止部分の高解像度化を行える（約 5 dB の画質向上）。図 12 は、透視変換面での高解像度化に関する比較結果で、(a) 共一次内挿では、入力画像の中心（透視変換画像の下部）に向かえば向かうほど解像度が低下し文字が判別できないレベルに達しているのに対し、(b) 固定焦点で画像列最近棒内挿を用いた場合は、約 4 dB の画質改善が行えており、また (d) 固定焦点でバックプロジェクションを用いた場合は、さらに 5 dB と向上した。さらに (c) 焦点を可変にする多重焦点では、画像列最近傍内挿でありながら、約 5 dB の改善が行えた。ただし、前述の固定焦点に比べ、フォーカス制御のための機構が必要となる。計算コストの観点からみると、バックプロジェクションでは反復演算を行わなければならないのに対し、画像列最近棒内挿では 1 回の演算で済む。したがって、高速

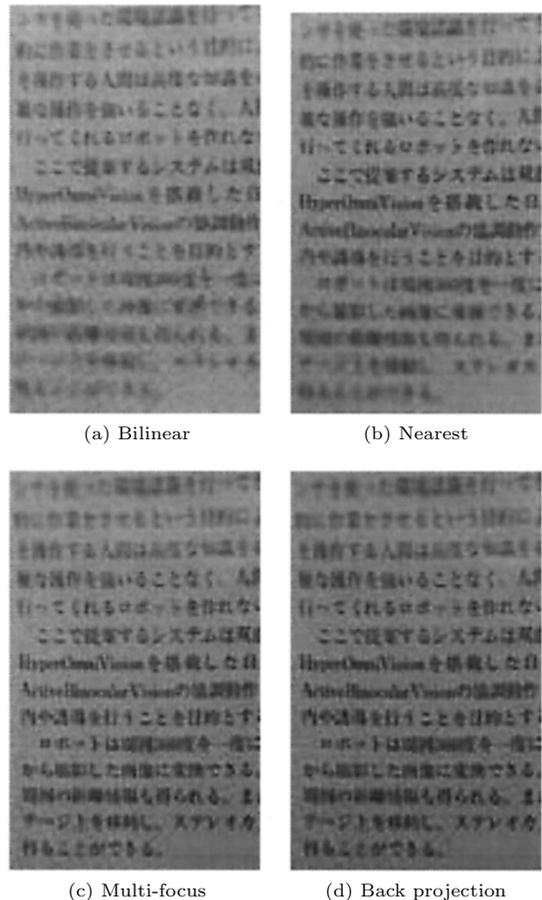


図 12 全方位画像の高精細化の比較結果  
Fig. 12 Super resolution of omnidirectional image.

かつ高解像度という目的に対しては、後者の方が適しているものと考える。

## 3. 移動ロボットと全方位視覚

### 3.1 地図生成と自己位置・姿勢推定

#### 3.1.1 姿勢推定

HyperOmniVision の光学的な性質により、ミラーの焦点から同一俯角にある環境内の点は画像上で同一円周上に射影される。この関係から、ミラー焦点を通る水平面を考えると、水平面内の並進運動と Z 軸周りの回転運動 (Swaying Motion) による画像面上でのオプティカルフローは、それぞれ図 13 (a) に示すように水平線の写像点である円の円周方向にのみ現れる (周囲フロー)。一方、ロボットが床面の凹凸などで Z 軸方向に振動したり roll 軸周りに回転したりする場合 (Rolling Motion と呼ぶ)、点 H の俯角にずれが生じるため、図 13 (b) のように水平線でのオプティカルフローは、画像中心から放射方向にずれたフロー

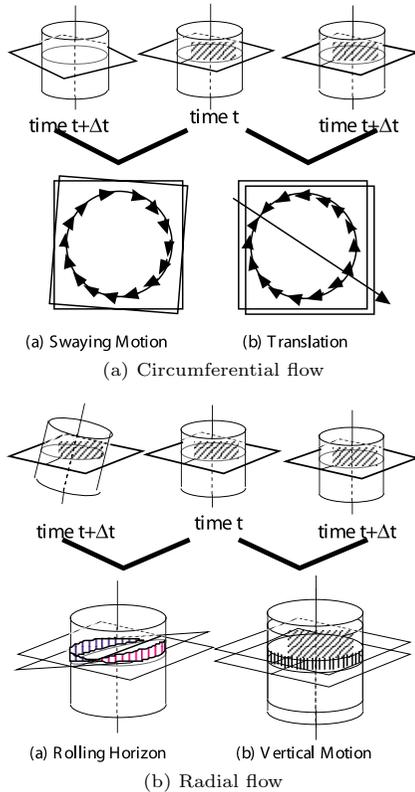


図 13 HyperOmni Vision でのオプティカルフローの現れ方  
Fig. 13 Optical flow in HyperOmni Vision.

成分として現れる (放射フロー (Radial Flow) と呼ぶ)。実際、周囲フローと放射フローは、円筒座標系上で、各々式 (6), (7) に示す関係で定式化される。

$$y_{cyl}(\theta_{it}) = \frac{M_{Ht}}{R_{it}} f \sin(\theta_{it} + \xi_t) + \tan \psi_t \quad (6)$$

$$y_{cyl}(\theta_{it}) = \tan \delta_t \sin \theta_{it} + \gamma_t + \frac{o_t}{R_{it}} f \quad (7)$$

ここで、 $\gamma_t$ ,  $\delta_t$ ,  $o_t$  は、ロボット (センサ) の傾きの軸 (Direction of Rolling Axis) とその周りの回転角 (Roll Angle) ならびに、上下方向 (Z 軸方向) の移動量 (Deviation of Vertical Position) である。また  $\psi_t$ ,  $\xi_t$  は、Z 軸周りの回転角 (Sway Angle) と水平並進方向成分 (Direction of Translational Component of Horizontal Motion) である。 $M_{Ht}$ ,  $R_{it}$  は、並進運動の大きさと物体 i までの距離である。すなわち放射フローは、揺れパラメータのうち Rolling Motion を表す 3 つのパラメータ ( $\gamma_t$ ,  $\delta_t$ ,  $o_t$ ) で表され、このとき周囲フローはゼロである。我々は、この関係を利用し、ミラー焦点を通る水平面のオプティカルフローを式 (7) にあてはめることで、ロボット (センサ) が水平移動するときの床面の凹凸などによる微小振動を推定する手法を提案した<sup>15)</sup>。図 14 は、放射フローの

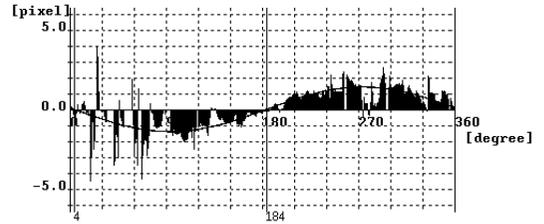


図 14 放射フローモデルによる当てはめ結果  
Fig. 14 An estimated result of radial flow model.

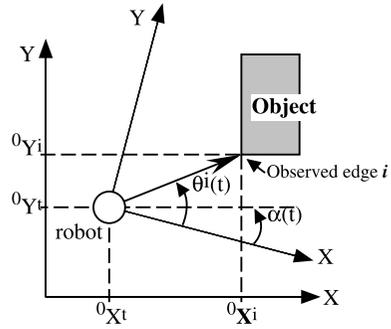


図 15 座標系  
Fig. 15 Coordinate system.

場合の正弦関数の当てはめ結果で、放射フローには観測誤差があるが、すべての方位のフロー情報があるということと周期関数であることから、ロバストな推定が行えた。

### 3.1.2 地図生成

360 度の連続視野が得られることによる広範囲のモデリングの容易さから全方位視覚センサを用いた環境モデルの生成手法が数多く報告されている。我々も、カメラ移動にともなう環境内の垂直エッジの方位変化情報から環境地図を生成する方法、さらに自己位置、姿勢を推定する方法を提案してきた。

一般に図 15 のように時刻  $t$  における観測対象  $i$  の方位角を  $\theta_i(t)$ 、時刻  $t = 0$  の姿勢を基準としたときのロボットの進行方向を  $\alpha(t)$ 、ロボットから見た観測対象との相対位置を  $(X_i(t), Y_i(t))$ 、基準座標系での位置を  $({}^0X_i, {}^0Y_i)$ 、ロボットの基準座標系での位置を  $({}^0X_t, {}^0Y_t)$  とすると、以下のような関係が成り立つ。

$$\tan(\theta_i(t) - \alpha(t)) = \frac{{}^0Y_i - {}^0Y_t}{{}^0X_i - {}^0X_t} \quad (8)$$

ここで、ロボットの自己位置、姿勢が、すべてロボットのエンコーダなどの内界センサより得られるとすると、式 (8) における未知数は、基準座標系での対象物体の位置  $(X_i(t), Y_i(t))$  のみとなり、2 視点での観測方位情報が得られれば、三角測量の原理により、対象物

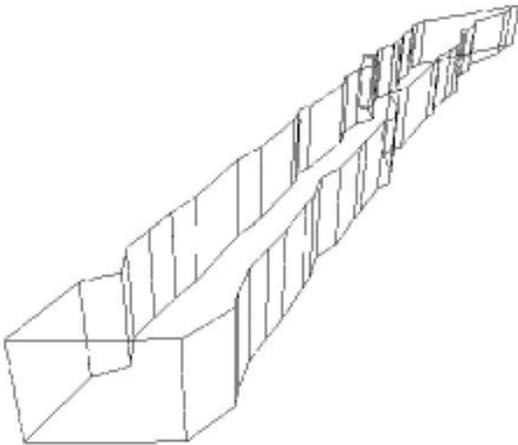


図 16 3次元幾何モデルの推定結果  
Fig. 16 Generated 3D model (corridor).

体の位置を推定することができる<sup>16)~18)</sup>。次にロボットの姿勢のみ既知の場合、式(8)は、左辺が観測方位情報から計算できることから、ロボットの位置と対象物体の位置の4変数が未知数となり、スケールファクタを考慮すると、3点3観測問題として、推定することができる<sup>19),20)</sup>。同様に、ロボットの自己位置・姿勢すべてが未知の場合には、観測対象の数を $i$ 、ロボット移動にともなうロボットの視点位置を $t$ とすると、次の関係を満たす場合に、ロボットの自己位置ならびに姿勢、さらに観測対象の位置が推定可能となる。

$$(i-3)(t-1) \geq 2 \quad (9)$$

ただし、式(8)は非線形なので、Levenberg-Marquardt法などにより最小化問題として求めないといけないが、一般に計算コストがかかり、移動ロボットのような実時間での問題には不向きといえる。そこで我々は、式(8)を2つの線形式により表現することで、実時間推定が可能な手法を提案した。この方法では、観測対象の奥行きを既知とすることで式(6)を線形化した方程式(3点2観測問題)と、前述の姿勢情報を既知とすることによる式(8)の線形方程式(3点3観測問題)とから、姿勢情報と環境地図生成ならびに自己位置情報を交互に推定することで、カメラが移動しながら、すべてのパラメータを高速に推定することができる<sup>21)</sup>。そして、2つの線形式により表現することで、5点3観測、4点4観測の区別なく地図生成を行うことができる。図16は、ロボットの位置姿勢すべて未知の場合の環境地図生成結果に高さ情報を補ったサーフェイスモデルである。ところで複合視覚センサのように、全方位視覚センサにより得られる方位情報以外に、局所視により、距離情報が得られる場合は、

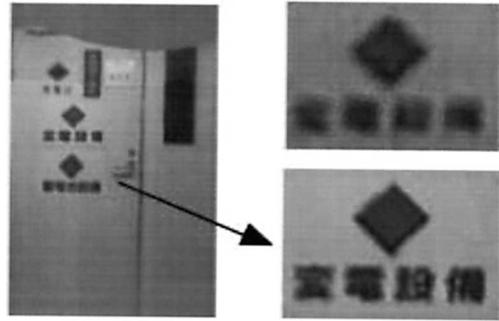


図 17 高精細モデリングの一例  
Fig. 17 An example of high-resolution modeling.

次の関係により、3点3観測以上であれば、自己位置・姿勢が未知の状態から環境地図の生成が可能となる<sup>22)</sup>。

上記の地図生成は、垂直エッジを手がかりに、2次元的地図を生成している。ロボットの誘導目的では、このような地図でもよいが、空間をより正確にモデリングするためには、より一般的な処理を行う必要がある。そこで我々は、すべての直線成分を扱う方法として全方位 Hough 変換という方法を提案した<sup>23)</sup>。この方法では、直方体をした射影面を想定し、入力画像をこの空間に変換することで、高速でかつ精度良く Hough 変換を行うことができる。

また実際の地図生成においてはロボットの移動計画が重要なファクタとなるが、我々は、地図を推定した際の誤差楕円を最小化する行動、さらに誤対応を起こしにくい行動を適時選択することで、屋内環境の地図を生成する手法も提案した<sup>24)</sup>。

ところで、HyperOmni Vision などの全方位視覚センサは、1つの CCD で全方位の視野情報を一度に獲得できる反面、角度分解能が低いという問題があった。そのため上述の方法により環境地図を生成しテキストチャマッピングを行ったとしても、解像度が低く、利用者への提示目的には不十分といえる。そこで、我々は、画素ずらしの考えに基づいた高解像度化の手法と同様に、時系列全方位画像を入力として高解像度化を行った<sup>25)</sup>。この手法は、前述の全方位視覚センサの回転による高解像度化とは異なり、ロボット移動にともない観測視点位置が異なるため、対象面までの奥行きの違いを考慮した撮像過程の最適化を行っている。図17は、3Dモデルのある面のテキストの超解像化を行った結果で、特に拡大図を見ると解像度の改善がよく分かる。

### 3.1.3 屋外の経路地図生成

環境モデリングを行う空間がある範囲に限られてい

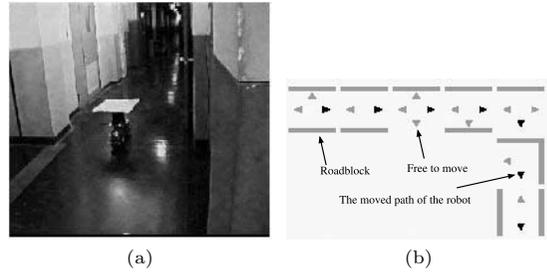
る場合には、3次元モデリングも有効な手段であるが、一般の実世界は、幾何学的に複雑で、計算量と精度の両面から、3次元モデリングが難しい環境が多い。そこで、我々は、市街地環境などを対象とした環境地図の表現方法と環境地図生成方法を提案した<sup>(26),(27)</sup>。この方法では、パノラマ画像を経路表現の単位とし、パノラマ画像を撮影しながら道路を壁伝いに走行し1周以上する。そして、再度同一のテクスチャが現れることから閉ループを発見し、交差点を含めた複数の経路からなる閉ループを基準にモデル化を行う。そして、隣接する閉ループを随時融合することで経路ネットワークを作成し広域環境のモデリングを行う。

### 3.1.4 抽象的空間表現の獲得

ロボット誘導の方法の1つに、空間の抽象的モデルをロボットの内部に保持し、カメラより得られた情報と照合してロボットの位置や姿勢を推定する方法がある。この方法は、環境の幾何学的な構造を直接モデルとして持つ方法と比較して、モデルの記憶容量を抑えることができるだけでなく、ロボットの移動量の累積誤差の影響などを受けにくいなどの特徴を持つ。そこで、我々は、ロボットの移動にともない観測される時系列情報から、遺伝的アルゴリズムを用いてロボットの経路に沿った抽象的な空間表現を生成する方法を提案した<sup>(28)</sup>。この方法では、使用するセンサがロボットの全周を一度に観測できるという特性を生かし、ロボットの周囲の形状を、たとえば、“直進路”、“分岐”、“行き止まり”といったクラスに分類して、抽象的に表現している。そして、ロボットの移動にともなって変化する抽象的モデルを逐次接続していくことにより、経路に沿った空間のトポロジ的地図の生成と、それによる次回訪問時のロボットの誘導を可能にしている。図18(b)は、図18(a)のシーンをトポロジ的地図表現により表した結果で、薄い三角印が移動可能な方向、濃い三角印がトポロジ的地図を生成したときの実際の移動方向、四方の太線がその地点での壁面の有無である。

### 3.2 全方位視覚を用いた経路誘導

移動ロボットが未知経路環境を自律的に移動するためには、障害物や壁、他の移動物体などとの関係から総合的に判断し、安全に目的地に到達する必要がある。我々は、前者のための手法として、経路に沿って走行するための仕組みとさらに目的地までの誘導のための各種全方位画像処理手法を構築してきた<sup>(29)~(31)</sup>。特に目的地までの誘導手法としては、全方位画像を直接記憶する方法、幾何学地図に基づく手法などを構築してきた。以下に各々の手法について述べる。



(a) (b)

図18 抽象的地図表現

Fig. 18 Topological map representation.

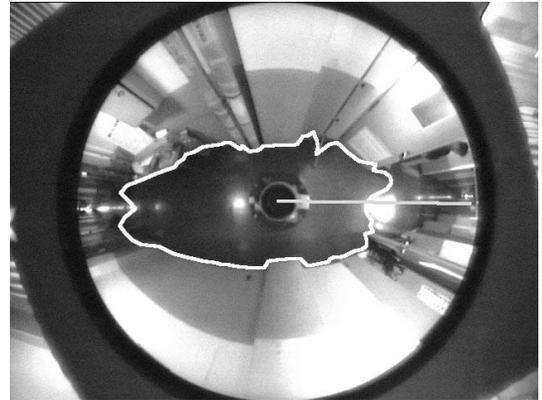


図19 移動可能空間の抽出結果ならびに慣性主軸・重心の推定結果

Fig. 19 Result of extracted free space and principal axis of inertia around the center of gravity.

#### 3.2.1 経路走行のための反射行動

我々は、建物内の廊下といった経路を対象に移動環境の持つ性質を活用することで、障害物回避、経路誘導といったロボットの基本動作を、全方位視覚センサより得られた観測情報から直接表現する方法を提案した<sup>(32)</sup>。具体的には、図19に示すようにロボットが移動可能な空間が、画像中心から放射状に延びた閉領域として現れることを利用し、楕円形状を全体拘束として持つ動的輪郭モデルにより移動可能空間を抽出すると同時に、動的輪郭モデルのコントロールポイントの状態からロボットの走行制御を行っている。ここでいう走行制御とは、分岐のない経路において、経路沿いに走行するためのロボットの操舵(移動方向)制御のことで、「道に沿って進むこと」、「道の中央を進むこと」、「障害物を回避すること」といった基本行動を実現することである。具体的には、動的輪郭モデルのコントロールポイント列から、次の3つの情報(特徴ベクトル)を計算し、ロボットの移動方向を決定する。3つの情報(特徴ベクトル)とは、動的輪郭モデルで囲まれた移動可能空間の慣性主軸を表す慣性主軸方向ベクトル、床面領域の重心と画像中心(=ロボットの

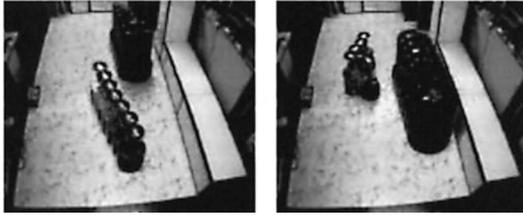


図 20 未知移動物体との衝突回避結果

Fig. 20 A result of collision avoidance against an unknown moving obstacle.

自己位置)とのずれを表す重心方向ベクトル, 画像中心から各コントロールポイントまでの長さにより表される壁からの斥力ベクトルのことである. 図 20 は, 移動障害物を回避しながら, 経路に沿って走行した一例である.

### 3.2.2 画像記憶に基づく誘導

記憶に基づく視覚誘導とは, あらかじめ記憶したパターンを入力パターン列と比較することで, どのパターンかを同定する手法で, 3次元の幾何モデルを復元することなしにロボットの誘導を可能にする. しかし, これまでの記憶に基づく手法は, 記憶パターンから対応するパターンを見つけるという方法で, 正確なロボットの位置・姿勢を推定するものではなかった. それに対し, 我々の提案した手法は, 正確に学習時の経路を走行できる.

具体的には, 2つの異なる手法を構築した. 両手法とも, 図 21 に示すような全方位視覚センサ中で水平面となる部分の映像をロボットが移動しながら記録した全方位ルートパノラマ画像を用いる. 図中の縞模様は, ロボット移動にともなう空間中のテクスチャの観測方位の変化を表しており, この縞模様の周期と傾きは, テクスチャの密度とロボットの移動速度に対するテクスチャの奥行きを表している. すなわち, 全方位を観測していることから, すべてのテクスチャの変化が記憶時のパターンと同じようになるようにロボットを制御した場合にのみ, ロボットは学習時と同じ経路を走行することができる. また, 経路から外れた場合には, その外れた方向と関連して, テクスチャの密度と傾きが規則的に変化することから, 正確に経路に沿った行動を復元することができる. このことを利用し, 我々は, 局所区間内での全方位ルートパノラマ画像をフーリエ変換し, そのスペクトル画像から, テクスチャの密度と傾きを計算し, 記憶時と同じ経路を走行することのできる手法を構築した<sup>33)</sup>. この手法では, 経路に正確に沿った走行はできるが, 経路から外れた場合に正確にどの程度, 記憶時の経路から離れているかを知

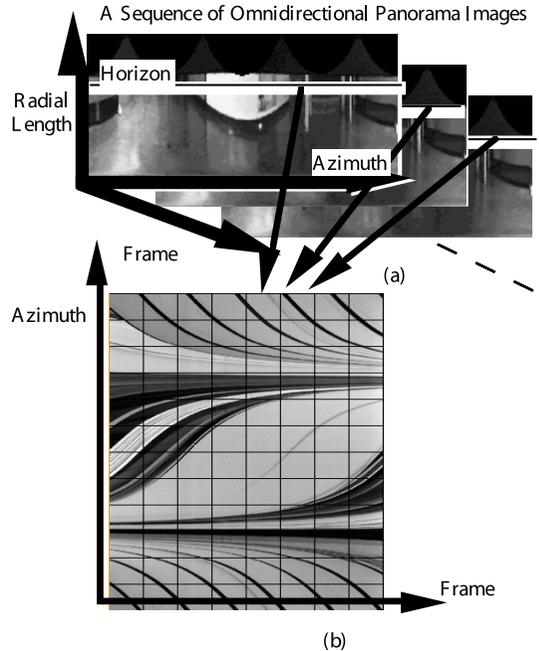


図 21 全方位ルートパノラマ画像

Fig. 21 Omnidirectional route panorama.

ることはできなかった. そこで, 第 2 の手法では, 記憶時の走行経路に対し, どのような位置, 姿勢関係にあるかを推定する手法を提案した<sup>34)</sup>. 一般に直線運動により得られる時空間画像の場合, 任意の視点映像は, 時空間画像のある切断面(視線面)により表すことができる. 我々は, 全方位ルートパノラマでは, この関係が正接曲線として現れることを利用し, ロボットの位置・姿勢を推定する手法を提案している. 具体的には, 正接曲線の形状制約をエネルギー項として持つ動的輪郭モデルにより, 走行時のパターンと同じパターンを記憶時の全方位ルートパノラマから推定する手法である.

### 3.2.3 幾何学地図に基づく誘導

あらかじめ, 環境中にランドマークとなる特徴が存在する場合, それらを手がかりにロボットの自己位置を推定することができる. 本方法では, 環境内の垂直エッジを特徴とし, あらかじめ用意した環境マップとカメラから得られる画像との対応からロボットの自己位置・姿勢を求め, ロボットをスタート位置からゴール位置に自律誘導する<sup>17)</sup>.

まず, あらかじめ与えられた環境マップと大まかな移動量から観測されるエッジの方位が予測できる. 次に入力画像から得られるエッジの観測方位角と環境マップから得られた予想方位角とを対応付ける. 三角測量の原理により, 3力所以上でエッジの対応が得ら

れば、各エッジ位置から観測方位の方向に引いた線分の交点として、ロボットの自己位置、姿勢を推定することができる。実際には、複数のエッジの対応が得られるため、それらのエッジ位置から引いた直線群から最小二乗法により、ロボットの移動誤差、および、画像の量子化誤差の影響を抑えた推定が可能となる。

さらに環境マップとの対応付けができなかった物体は、未知物体として新たに環境マップに登録され、未知物体の位置は、環境マップを生成したときと同様に、ロボット移動にともなう異なった観測点での物体方位角を計測することで、3角測量の原理から求められる。さらに、未知物体が移動物体であった場合は、物体の観測方位変化情報を利用し、衝突危険性を評価し、衝突回避を行うことができる。これらの手法では、360度のパノラマ視野を観測しているため、部分的オクルージョンがおきた場合でも、利用可能な残りの情報を用い誘導することができる。

### 3.3 複数ロボットの協調

複数のロボット間で、相互に通信できると、各ロボットは他のロボットの観測情報を共有でき、そのロボットが行ったことのない環境も認識できるようになる。しかし一般に複数のロボットに共通な絶対座標系を持たせることは困難である。すなわち、複数のロボット間の協調においては、通信相手の特定と相手との相対位置・姿勢の推定が重要な課題となる。それに対し、我々は、環境地図生成問題を対象に、全方位視覚センサ COPIS を搭載した複数台のロボットがお互いの観測情報を通信により相互利用することで、通信相手のロボットを同定し、環境地図を生成する方法を提案した<sup>35)</sup>。

まずはじめに、各ロボットは COPIS により撮像された入力画像から垂直エッジを抽出、垂直エッジの方位角を算出する。算出された方位角を時系列間で対応付けることで、ロボット移動にともなう方位変化情報を得る。次にこの方位変化情報から垂直エッジの位置推定を行い、環境地図を生成する。しかし入力画像中には移動物体のエッジも含まれているため、そのままでは静止環境の地図を生成することはできない。そこで、本手法では、観測方位角の情報からまず静止物体と移動物体との識別を行う。次に通信を行う2台のロボット間で互いの情報を相互利用することで、通信相手のロボットの同定(画像中での方位)ならびに相対位置、姿勢を推定する。両者の位置姿勢関係が分かれば、計測誤差を考慮したうえで両者の環境地図を統合することができる。ここで重要な要素は、いかにして通信相手のロボットと未知移動物体を特定するかであ

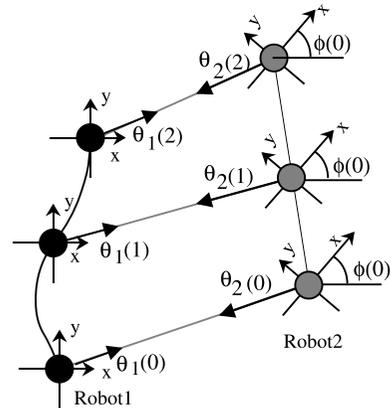


図 22 2 台のロボット間での観測方位角と相対運動方向の関係  
Fig. 22 Observed azimuths & direction of relative velocity between two cooperative robots.

る。通信相手のロボットの特定は、図 22 に示すようにロボット 1, 2 の時刻  $t$  における互いの観測方位角をそれぞれ  $\theta_1(t)$ ,  $\theta_2(t)$ 、ロボット 1 から見たロボット 2 の座標系間の姿勢差を  $\phi(t)$  としたとき、両ロボット座標系が平行関係にある場合(姿勢差  $\phi(\tau) = 0^\circ$ )、ロボットの位置関係にかかわらず、互いの観測方位角の差は、180 度になる。この考えに基づいて、この観測方位角の関係を時系列で評価することで通信相手のロボットを同定する。さらに未知移動物体の識別に関しては、物体の位置情報の信頼性と相対運動方向を評価基準にする。ここで相対運動方向に関して、静止物体の相対運動方向は、物体の位置にかかわらずロボットの移動方向と逆方向(ロボットの移動方向を  $0^\circ$  とすると相対運動方向は  $180^\circ$ )に現れる。それに対し、ロボットと異なる方向に動く物体は、相対運動方向が  $180^\circ$  以下となる。このことを評価基準としている。

## 4. 人間との共存のための全方位画像処理

### 4.1 大局視と局所視からなる複合視覚システム —人物追跡と注視

人間とロボットのコミュニケーションにおいては、ロボットからの情報提示そして人間からロボットへの情報提示の双方向の伝達機能による、人の意図理解が必要不可欠な機能としてあげられている。すなわち、ロボットは、人間の発するさまざまな情報を観察し理解する必要がある。そこで、我々は、人とロボット間コミュニケーションのための基礎技術として、人物を発見し、その人物の頭部(顔)に注視するというタスク(ロボット-人間間コミュニケーション)に対し、大局情報の観測に適した全方位視覚センサ HyperOmni Vision と局所情報の観測に適した両眼能動視覚セン

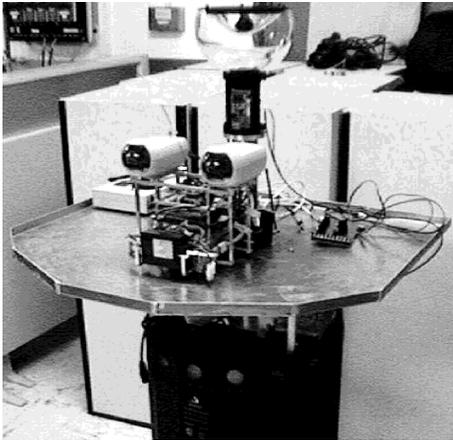


図 23 全方位視覚と両眼視覚の協調による複合センシングシステム  
Fig. 23 Multiple sensing system by cooperating omnidirectional vision and binocular active vision.

サの 2 つのセンサからなる複合センシングシステム (図 23) を提案し、人物追跡ならびに顔への注視を実現した<sup>36)</sup>。具体的には、全方位視覚センサより得られる時系列全方位画像よりオプティカルフロー情報と色情報を抽出し、人物の発見ならびに方位追跡を行う。そしてその方位情報を利用し、両眼視により人物の頭部 (顔領域) への注視動作を行った。一般に能動視覚センサを用いることで、顔への注視行動や人物の追跡が可能となるが、カメラの動作速度ならびに視野範囲には限界があるため、人物が大きく移動する場合や素早く動く場合、注視不可能になることがある。一方、全方位視覚センサは横方向に視野制限がないため、センサの周囲を移動する物体の安定な追跡に適しているが、広い視野を有限の画像上に射影しているため、解像度は低く、人物の顔といった小さな領域の安定な抽出には適さない。そこで、本手法では、ある特定人物の顔への注視動作を、全方位視覚センサと両眼能動視覚センサの連携動作として、より確実に実現している。具体的には、横方向に視野制限のない全方位視覚センサにより、注視人物を実時間追跡し、さらにその方位情報を計測する。そして、全方位視覚により観測された人物方位情報と両眼能動視覚の視野範囲の関係から両眼能動視覚の視線制御を行い、顔への注視動作を実現した。

#### 4.2 案内ロボット

ホームロボットや介護ロボット、案内ロボットなど人間が生活する空間で人間と共存するロボットのための研究がさかに行われている。このような実世界を意識した場合、環境内には、構造物だけでなく人間が存在する。したがって、人間を含む環境内を対象とし

た移動ロボットは、単に環境に対する位置関係を把握するだけでなく、人間-環境-ロボット三者間の関係を考慮に入れた観測、ならびに人との協調行動を行わなくてはならない。

そこで我々は、人間-環境-ロボット三者間の関係に重点をおき、人間とともにロボットが行動することで人間の意図を理解する自律移動ロボットシステムの構築を行った。具体的には、全方位視覚センサ HyperOmni Vision を搭載した自立移動ロボットが、美術館のような建物内に絵などのパネルが複数かかっている環境において、人間とともに歩き回り、ユーザの希望するパネルを推定する案内ロボットシステムである<sup>37)</sup>。このシステムにおける人間との協調動作では、全方位視覚センサから得られる人物の方位情報と、ロボットの全周に配置された超音波距離センサおよび赤外線近接センサなどから得られる距離情報とを統合することで、人物の位置と方向を特定し、両者間の間隔を一定に保つて間隔動作を実現した。そして、ユーザが立ち止まった位置が、パネルの近傍の場合には、ユーザがそのパネルに興味を示しているのではないかという予測のもとに、案内ロボットはその内容についての説明を行った。

#### 5. おわりに

本論文では、我々がこれまでに提案した COPIS, HyperOmni Vision, TOM という 3 種類の性質の異なる全方位視覚センサ、ならびに、複合視覚という観点から全方位視覚と両眼視を一体化した MISS ならびに全方位視覚と両眼視カメラからなる複合センシングシステムについて報告した。視覚系の設計にあたっては、さまざまなアーチファクトを考慮する必要がある、注意深い設計が要求される。特に全方位視の場合、特殊な光学系のため、結像系の設計が難しい。今回新たな全方位視覚の光学系として放物面ミラーを組み合わせた TOM を提案し、従来の半分以下の大きさで設計できることを示した。しかし実用的なセンサを実現するためには、射影特性や光学特性を考慮に入れたうえで、低消費電力、軽量、コンパクトさ、さらに製造のしやすさや価格面からも検討する必要がある。現状 TOM の場合、複数のミラーが必要なため、コスト面では従来のものよりやや不利といえよう。今後、より単純な構成で小型化が可能な光学系の設計を目指すのに加え、デバイス面からも十分検討していきたいと考える。良い射影特性を持つ光学系が構築できれば、さまざまな特徴的な処理が可能となり、信頼性が高く、安定な画像理解が実現しやすくなる。たとえば、全方

位画像には、単に広視野というだけでなく、さまざまな有用な幾何学的射影特性(放射方向の特性、周囲方向の連続性、周期性、対称性、また連続性を拡張すると回転不変性)があり、本論文では、全方位視覚センサの特徴を利用した移動ロボットの視覚誘導技術ならびに人間との共存を考慮に入れた人物の発見、追跡手法、そしてこれらの技術を融合した案内ロボットシステムについて報告した。今後も、実世界におけるさまざまな応用問題を対象に、全方位視覚ならびに複合視覚の特長を生かした視覚情報処理の基盤技術を構築していきたいと考える。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省・科学研究費補助金基盤研究(A)ならびに日本学術振興会未来開拓学研究推進事業(JSPS-RFTF 99P01404)の補助を受けた。

### 参 考 文 献

- 1) Yagi, Y.: Omnidirectional Sensing and Its Applications, *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol.E82-D, No.3, pp.568-579 (1999).
- 2) 谷内田正彦: 移動ロボットの視覚, 生産と技術, Vol.47, No.1, pp.15-20 (1995).
- 3) 八木康史: 実時間全方位視覚センサ, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.3, pp.347-350 (1995).
- 4) Yachida, M.: Omnidirectional Sensing and Combined Multiple Sensing, *Proc. Workshop on Computer Vision for Virtual Reality Based Human Communications*, pp.20-27 (1998).
- 5) 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, 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.J74-D-II, No.1, pp.19-26 (1991).
- 6) Yagi, Y., Kawato, S. and Tsuji, S.: Real-time Omnidirectional Image Sensor (COPIS) for Vision-guided Navigation, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.10, No.1, pp.11-22 (1994).
- 7) 奥村 仁, 八木康史, 谷内田正彦: 大局視と局所視の統合による移動ロボットのための複合視覚センサ MISS の提案, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.10, pp.2263-2276 (1995).
- 8) 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系 Hyper-Omni Vision の提案, 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.J79-D-II, No.5, pp.698-707 (1996).
- 9) Greguss, P.: The Tube Peeper: A New Concept in Endoscopy, *Optics and Laser Technology*, pp.41-45 (1985).
- 10) Chahl, J.S. and Srinivasan, M.V.: Reflective Surfaces for Panoramic Imaging, *Applied Optics*, Vol.36, No.31, pp.8275-8285 (1997).
- 11) 八木康史, 谷内田正彦: 小型全方位視覚センサの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 ROBOMECS99 講演論文集, No.99-9, 2A1-66-060, pp.(1)-(2) (1999).
- 12) Yagi, Y. and Yachida, M.: Development of a Tiny Omnidirectional Image Sensor, *Proc. Asian Conf. on Computer Vision*, pp.23-28 (2000).
- 13) 長原 一, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位画像列からの高解像度化, システム制御情報学会誌, Vol.14, No.6, pp.322-329 (2001).
- 14) 長原 一, 八木康史, 谷内田正彦: 多重焦点全方位画像列を用いた高精細化, 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.J84-D-II, No.8, pp.1882-1890 (2001).
- 15) 西井 渉, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位オプティカルフローからの移動ロボットの揺れ推定, 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.J80-D-II, No.6, pp.1512-1521 (1997).
- 16) Yagi, Y., Nishizawa, Y. and Yachida, M.: Guidance of a Mobile Robot with Environmental Map using Omnidirectional Image Sensor COPIS, *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol.E76-D, No.4, pp.486-493 (1993).
- 17) Yagi, Y., Nishizawa, Y. and Yachida, M.: Map-Based Navigation for a Mobile Robot with Omnidirectional Image Sensor COPIS, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.11, No.5, pp.634-648 (1995).
- 18) 佐藤和也, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位視覚センサ COPIS を用いた環境マップ生成—実環境適用のための処理改善, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6, pp.887-895 (1996).
- 19) 勝屋耕一, 八木康史, 谷内田正彦: 未知並進運動する移動ロボットにおける静止環境マップ生成, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.5, pp.690-697 (1998).
- 20) 勝屋耕一, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位視覚センサによる動環境での静止環境地図および自己位置の同時推定, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3, pp.432-438 (1999).
- 21) Yagi, Y., Hamada, H., Benson, N. and Yachida, M.: Generation of Stationary Environmental Map under Unknown Robot Motion, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1487-1492 (2000).
- 22) Yagi, Y., Egami, K. and Yachida, M.: Map Generation of Multiple Image Sensing Sensor MISS under Unknown Mobile Robots, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol.2, pp.1024-1029 (1997).
- 23) 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦: HyperOmni Vision と全方位 Hough 変換を用いた線分の三次元再構築, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.5,

- pp.652-661 (1998).
- 24) 辻 安彦, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位視覚センサを用いたロボットの環境マップ生成と自己位置推定, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1, pp.59-67 (2001).
- 25) 長原 一, 浜田博昭, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位視覚センサを用いた高解像度 3D 環境モデリング, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU-2000-152, pp.39-46 (2001).
- 26) 越智 亮, 李 仕剛, 八木康史, 谷内田正彦, 林朗: 経路と交差点の観測による環境地図の作成, 電気学会電子情報システム部門誌, Vol.118-C, No.4, pp.510-519 (1998).
- 27) Li, S., Ochi, A., Yagi, Y. and Yachida, M.: Making 2D Map of Environments Based upon Routes Scenes, *Journal of Autonomous Robots*, Vol.8, No.2, pp.117-128 (2000).
- 28) 日浦亮太, 八木康史, 谷内田正彦: 遺伝的アルゴリズムによる異種視覚情報からの抽象的空間表現の獲得, ロボットシンポジウム, pp.151-156 (1995).
- 29) 八木康史, 川戸慎二郎, 辻 三郎: 全方位視覚センサ COPIS を用いた衝突回避, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J74-D-II, No.7, pp.908-917 (1991).
- 30) 魏 世杰, 大澤幸生, 八木康史, 谷内田正彦: 自律走行車の身体に基づく環境表現による定性的移動計画, 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, pp.803-810 (1998).
- 31) Wei, S., Yagi, Y. and Yachida, M.: Building a Local Floor Map by Use of Ultrasonic and Omnidirectional Vision Sensors, *Advanced Robotics*, Vol.12, No.4, pp.433-453 (1998).
- 32) Yagi, Y., Nagai, H., Yamazawa, K. and Yachida, M.: Reactive Visual Navigation based on Omnidirectional Sensing—Path Following and Collision Avoidance, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol.1, pp.58-63 (1999).
- 33) Yagi, Y., Fujimura, S. and Yachida, M.: Route Representation for Mobile Robot Navigation by Omnidirectional Route Panorama Fourier Transformation, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.1250-1255 (1998).
- 34) 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, 情報処理学会研究報告, 2001-CVIM-125, pp.139-145 (2001).
- 35) 出原進一, 八木康史, 谷内田正彦: 複数移動ロボットにより観測された環境マップの統合, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.3, pp.439-447 (1997).
- 36) 金春利幸, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位視

ポットと両眼視口ポットの連携による人物の発見と注視, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.3, pp.957-958 (1997).

- 37) 佐藤和也, 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位視覚を用いた案内ロボットシステム, 電気学会電子情報システム部門誌, Vol.117-C, No.10, pp.1362-1369 (1997).

(平成 13 年 7 月 30 日受付)

(平成 13 年 9 月 11 日採録)

(担当編集委員 村上 和人)



八木 康史 (正会員)

1983 年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業. 1985 年同大学大学院修士課程修了. 同年三菱電機(株)入社. 同社産業システム研究所にてロボットビジョンの研究に従事. 1990 年大阪大学基礎工学部情報工学科助手. 同学部システム工学科講師を経て, 現在, 同大学大学院基礎工学研究科システム科学分野助教授. 1995~1996 年オックスフォード大学客員研究員, 全方位視覚センシング, 画像理解, 知能ロボットに関する研究に従事. 1996 年度電子情報通信学会論文賞, IEEE, 電子情報通信学会, システム制御情報学会, 日本ロボット学会各会員. 工学博士.



谷内田正彦 (正会員)

1971 年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了. 同年同大学基礎工学部制御工学科助手. 同助教授を経て同学部情報工学科教授, 1994 年同学部システム科学分野教授. 1967~1968 年デンマーク原子力研究所留学. 1972~1973 年米イリノイ大学にて Research Associate. 1980~1981 年西独ハンブルグ大学 Research Fellow. 1982 年米ミネソタ大学 CDC Professor. 1996 年度電子情報通信学会論文賞, 1998 年度人工知能学会論文賞, 電子情報通信学会, ロボット学会, 人工知能学会等会員. 著書「ロボットビジョン」(昭晃堂)、「コンピュータビジョン」(丸善, 編著)等. コンピュータ・ビジョン, 画像処理, 人工知能, 移動ロボット等の研究を行っている. 工学博士.