

全方位ビジョン：センサ開発と応用の最新動向

八木 康史[†] 横矢 直和^{††}

自律移動ロボット、テレプレゼンス、バーチャルリアリティ、遠隔監視などの応用分野で、観測地点の周囲 360 度のシーン映像を対象とした全方位視覚情報処理に関する研究がさかんに行われるようになった。特に、単一視点の光学特性を持つ全方位カメラシステムは、入力画像を自由な視線方向の透視投影画像に変換できるという性質を持つことから注目されている。本解説では、この十数年間に提案された全方位視覚センサならびにそれらのセンサを用いた応用事例について総評する。

Omnidirectional Vision: A Survey on Sensors and Applications

YASUSHI YAGI[†] and NAOKAZU YOKOYA^{††}

The area of vision application such as autonomous robot navigation, telepresence and virtual reality is expanding by use of a camera with a wide angle of view. In particular, a real-time omnidirectional camera with a single center of projection is suitable for analyzing and monitoring, because we can easily generate any desired image projected on any designated image plane, such as a pure perspective image or a panoramic image, from the omnidirectional input image. In this paper, we review designs and principles of existing omnidirectional cameras, which can acquire an omnidirectional (360 degrees) field of view, and their applications in fields of autonomous robot navigation, telepresence, remote surveillance and virtual reality.

1. はじめに

馬などの草食動物、ハエトリグモなどの昆虫など、自然界には、人間とは異なり、左右 ± 170 度といった広角視野を持つ生物が生存する。このような広角視野は、危険の察知、捕食行動などの目的に対し外界情報を効率的に観測する手段として、進化の過程で各々の生物に備わったものである。また、芸術の世界では、レオナルド・ダ・ビンチの時代より、周囲 360 度のパノラマ視野を対象とした作品が作られ、その後のアーティストたちも、写真や絵画を円筒面に反射させる技法により数多くの作品を残している。このように我々の周りでは、視野の広さは大きな意味を持つ。

自然界やアートだけでなく、画像計測・コンピュータビジョンさらにはバーチャルリアリティ、セキュリティ、ロボティクスなどの分野でも、周囲 360 度の視野情報を利用した研究がさかんに行われている。その

要因は、マルチメディア社会の到来によるニーズ側からの要求の高まりに加え、全方位を観察できるカメラ（多くは魚眼レンズを用いたもの）が市販され比較的容易に入手できるようになったこと、計算機能力の飛躍的向上により全方位動画を高速に処理できるようになったことなどが考えられる。

本解説では、情報処理としての全方位視覚研究に關したこの十数年の歩みを概説するとともに、この数年の最新研究を紹介する。なお、1999 年以前の研究に關しては、参考文献 1) のサーベイがあるのでこれも参照されたい。

2. 全方位視覚センサ

2.1 従来の全方位視覚センサとその問題点

全方位の視野情報を獲得する研究には、大別して、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。初期の全方位視覚研究においては、計算機の能力があまり高くなかったこともあり、カメラの回転や複数台のカメラを用いる方法など計算機コストのかかる研究はあまり行われず、すでに商品レベルで広角視野がとれる魚眼レンズが、最もポピュラーな実時間全方位視覚として利用されていた。その代表ともいえる研究に米国の Cincinnati 大学における 80 年代中

[†] 大阪大学大学院基礎工学研究科
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{††} 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

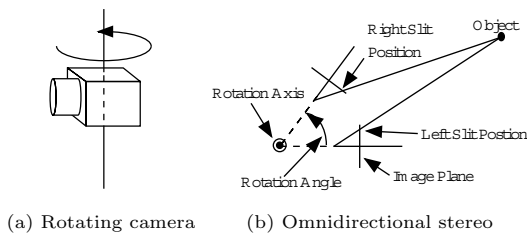


図1 回転型全方位視覚

Fig. 1 Rotating camera system.

期の全方位研究があげられる²⁾。彼らは、F マウント 35 mm 一眼レフ用魚眼レンズにリレーレンズを取り付け、ビジコンカメラに接続し、魚眼レンズを鉛直上向きに向けることで、上方半球の視野領域を一度に撮像することができる全方位視覚を提案した。そして、彼らは、ビーコンを利用する方法で、作業領域にあらかじめ LED などの光源を複数個取り付け、これらをランドマークとしてロボットの位置制御を行った³⁾。国内においても森田らが、カメラ移動にともない得られた時系列入力画像を球面空間に射影し、ハフ変換的アプローチで 3 次元情報を獲得する方法に魚眼レンズを利用していた⁴⁾。

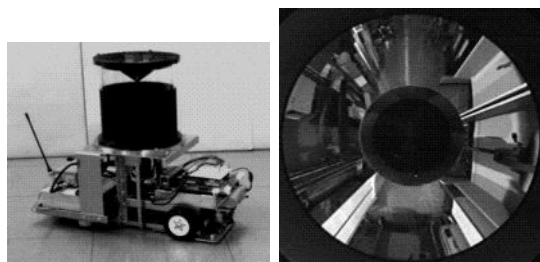
80 年代後半になると、計算機も高速となり、動画や時系列画像が比較的扱いやすくなった。そのようななか、カメラの回転運動や並進運動にともなって得られる、全方位パノラマ画像やルートパノラマ画像に関する研究が行われ始める(図 1)。画像の分解能は、カメラの回転分解能として考えることができるため、方位分解能に優れた全方位画像を得ることができる利点がある。その最も初期の研究は、大阪大学の鄭、辻らにより行われたパノラミックビューに関する一連の研究である^{5),6)}。その後、全方位ステレオや視点固定型のパンチルトズームカメラなど単にパノラマであるだけでなく、パノラマ画像の持つ幾何的性質に焦点を当てた研究へと広がりを見せた^{7)~13)}。

一般にカメラの回転動作には、時間を要するため、リアルタイムでのパノラマ撮影が難しいという問題がある。その問題に対する 1 つの解決策が複数台の固定カメラを利用する方法である。辻らにより試作された 8 台のカメラを放射状に設置した全方位視覚システム¹⁴⁾や、AT&T Bell 研でアトランタ五輪用に開発された 4 角錐ミラーの各ミラー面にカメラを設置することで、4 台のカメラで全方位を観測可能にしたシステムがある。特に、後者は単に全方位の情報が獲得できるだけでなく、4 台のカメラの光学中心を一致させることで、すべての画像を同じ座標系(球面座標系)で表現できる利点を持つ。さらにその発展として、横

矢らは¹⁵⁾、六角錐ミラーを用いた、6 台のカメラによる全方位光学系を上下に配置した全方位ステレオ画像センサを提案している。ただし、そのためには、すべてのカメラの光学中心が 1 点で交わるように、カメラ間の位置関係を合わせる必要がある。さらに、撮像素子の特性には、ばらつきがあるため、単に、カメラ間のアライメントができて、映像上問題がある。したがって、複数のカメラを用いる場合には、すべてのカメラ間のアライメントとキャリブレーションを正確に行う必要が生まれる。また、複数のカメラの映像信号を同時に取り込むためには、カメラの台数分の画像入力用の AD コンバータを必要とするため、システムの全体規模が大きくなるといった欠点がある。

光学系を工夫した手法の代表は、凸面鏡を利用した全方位視覚センサで、リアルタイムでのパノラマ観測手段として注目を集めた。凸面鏡の利用の歴史は古く、35 mm 写真の世界では、日照の測定目的や山岳でのパノラマ写真の撮影手段として、放物凸面鏡や球面鏡が利用されてきた。たとえば、Globoscope では、放物凸面鏡と 35 mm カメラを組み合わせで正射影となる撮像系を実現しており、OT スコープは、球面鏡と非球面鏡との組合せによる全天観測用カメラである¹⁶⁾。しかし、Globoscope や OT スコープなどは、日照の測定目的で作られていたため、水平面を中心としたパノラマ視野ではなく、半球状の視野領域であった。半球状の視野領域の撮影では、魚眼レンズが支柱などもなく優れていたこともあり、魚眼レンズの出現とともに反射光学系は用いられなくなっていく。

側方視野を意識した反射光学系に関する特許は、1900 年代中頃よりある¹⁷⁾、実際に試作を行い、コンピュータビジョンやロボティクスなどの分野で活用され始めたのは、1990 年前後になってからで、円錐ミラー^{18),19)}(図 2)や球面ミラー^{20),21)}がその初期のものである。その後、双曲面ミラー^{22),23)}(図 3)、放物面ミラー^{24),25)}を利用したものなどが提案されている。どのタイプも回転体の凸面側を鏡面とし、カメラの鉛直上方に回転体ミラーを設置した構造となる。これらのセンサの最大の特徴は、周囲 360 度側方を一度に(ビデオレートで)観測できる点にある。ただし、図 4 に示すように、垂直方向の視野特性は、ミラーの形状によって異なる。これらの提案された全方位視覚のうち、双曲面ミラーと放物面ミラーを用いた全方位視覚は、ミラーの焦点を仮のレンズ中心とする座標系に正確に変換することができる。すなわち、双曲面ミラーと放物面ミラーを用いた全方位視覚は、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



(a) A prototype (b) An example of input image

図2 円錐ミラーを用いた全方位視覚 COPIS
Fig. 2 COPIS.

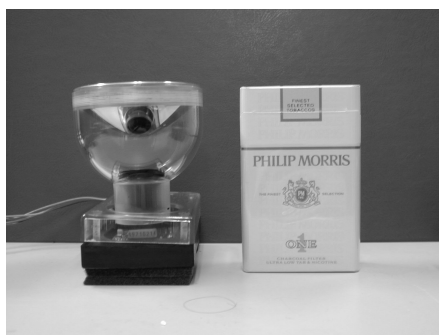


図3 全方位視覚センサ HyperOmni Vision
Fig. 3 HyperOmni Vision.

活用することもできる。たとえば、QuickTimeVR やテレプレゼンス、テレビ会議システムなどメディアの世界で効果的に利用できると考えられる。ただし、結像上の問題としては、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。各ミラー形状の違いによる幾何光学特性の詳細に関しては、参考文献 26) に詳しく述べられている。また、Daniilidis らは、単一焦点の反射光学系による全方位視覚の射影において、球面射影を基本とする考えについて報告している^{27),28)}。参考文献 29), 30) には、八木、谷内田らによる一連の全方位視覚センサならびに複合視覚センサが紹介されている。

以上のように、従来よりさまざまなタイプの全方位視覚センサが提案されてきた。最近の研究では、単に全方位視野が実時間観測できるだけでなく、射影特性の工夫や高解像度化、小型軽量化などを同時に実現することが課題の 1 つとなっている。さらに通常のカメラと同様に距離計測が可能であるステレオ視に関する全方位ビジョンの研究もさかんに行われている。次節以降では、上述の小型化、視野特性、高解像度、をキーワードとして最近の研究をまとめ、さらにステレ

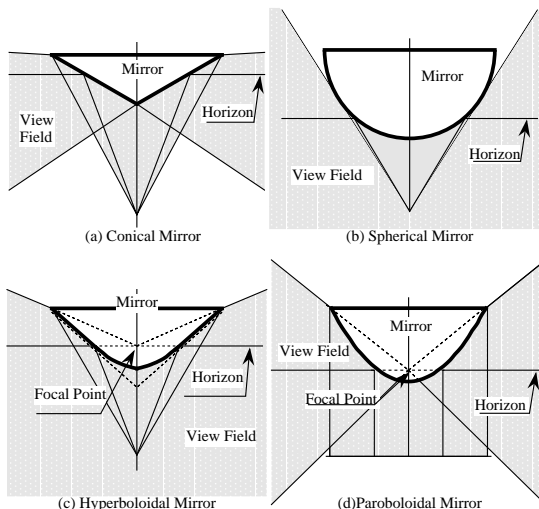


図4 視野領域の比較
Fig. 4 Field of view.

オ応用と画像処理技術に関してまとめ、紹介する。

2.2 反射光学系と小型化

すべての凸面ミラーを用いた全方位視覚でいえることだが、一般に非点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する。ちなみに、双曲面ミラーを用いた全方位視覚の場合であるが、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 が大幅に大きくなる。これは、双曲面で代表される単一回転体ミラーを用いた全方位視覚の場合、像面全体で鮮明な像を得るためには、小型化に限界があることを意味する(ただし、観察したい俯角の範囲を限定すれば、小型化は可能)。

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、複数の光学系を組み合わせる必要がある。全方位視覚においても、光学特性に優れた光学系として複数の反射光学系を組み合わせた全方位視覚が考案されている^{31)~41)}。Greguss らは、図 5、図 6 に示すような 2 つの反射面からなる Panoramic Annular Lens (PAL) というガラスレンズブロックを提案している^{31),32)}。このレンズは、4 つの光学面(凸面レンズ、凹面ミラー、凸面ミラー、平面)が一体化されたものであり、垂直画角のうち、俯角がとりにくいという短所を持つものの、4 つの光学面間での位置合わせが不要であるという利点を持つ。また、三菱電機では、収差の影響を最小限にするために、最適な曲率を持つ 2 枚の凸面ミラーを利用する反射型望遠鏡のような光学系を提案した(図 7、図 8)³³⁾。具体的には、2 次元トーラス状の主鏡を介し、副鏡により結像される虚像を通常の CCD カメラ

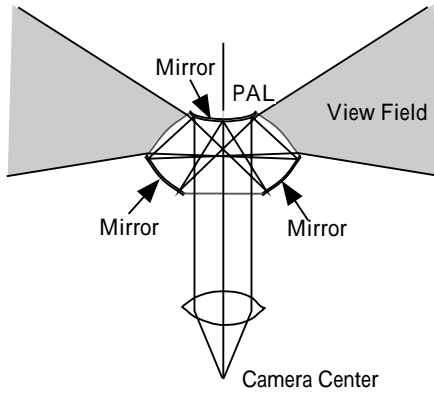
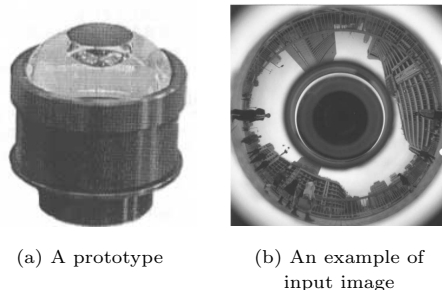


図5 PAL光学系

Fig. 5 An optical relation of PAL.



(a) A prototype

(b) An example of input image

図6 PAL (提供: 立山 R&D)

Fig. 6 PAL.

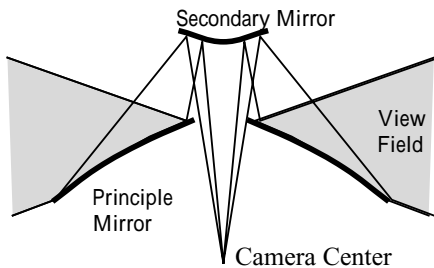
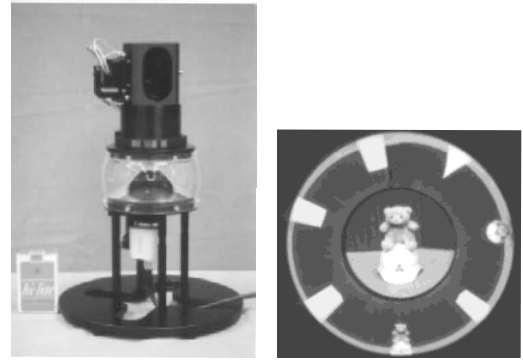


図7 リフレクションカメラ 360の光学系

Fig. 7 Optics of Reflection Camera 360.

で撮像する方法で、これもまた実用上、有用な手法といえる。ただしこのセンサは、双曲面や放物面ミラーを用いた全方位視覚のような射影中心が1点となるという特性を持っていない。

上記以外に、1999年に発表されたユニークな全方位視覚がある。これは凸面放物面ミラーと凹面放物面ミラーの2枚の放物面ミラーを利用した全方位視覚で、大阪大学とコロビア大学でほぼ同時期に別々に提案された^{39)~41)}。図9は、大阪大学で試作された全方位視覚 TOM の写真である。光学的には、図10に示す



(a) A prototype

(b) An example of input image

図8 リフレクションカメラ 360のプロトタイプ (提供: 三菱電機)

Fig. 8 Prototype of Reflection Camera 360.

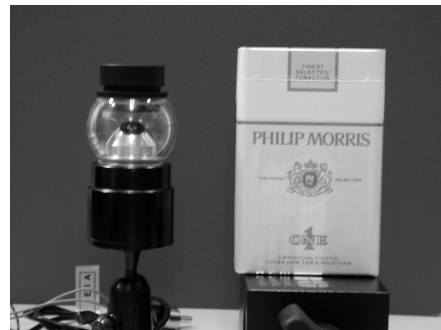


図9 TOM

Fig. 9 TOM.

ように凸面放物面ミラー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、凹面放物面ミラー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、集光特性が、単一の場合に比べよく、同一のスペックの場合、数分の一に小型化が可能となる。なおコロビア大学で試作された全方位光学系では、加工のしやすさから、凹面放物面ミラーの部分に通常の球面ミラーを近似的に用いている。また2000年には、同様の考えに基づく全方位視覚センサの考えが、Bell研のグループからも報告された。ただし、試作されたとの報告はない⁴²⁾。単一射影中心を持つ他の2回反射光学系としては、図11に示すように楕円面ミラーや双曲面ミラーを組み合わせたものがある^{41),43)}。

そのほかに反射光学系のタイプとしては、従来の単一反射面の光学系に分類されるが、Derrienらは、サーベイランスなどを目的に、平面ミラーにより光路を折り返すことで小型化した球面ミラーを用いた全方位視覚を試作している^{44),45)}。ただし、球面ミラーを用いているため単一焦点の性質がない。そのため、入力画

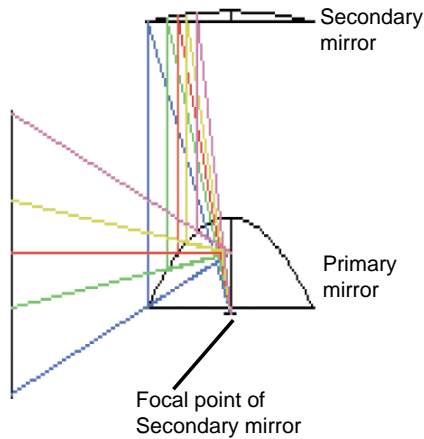


図 10 TOM の光学系
Fig. 10 Optics of TOM.

像に対し、補正を行うことで疑似的に歪みのない画像を生成している。

2.3 視野特性と解像度特性

広視野化に関しては、反射型光学系をベースに反射鏡の形状を工夫することで、限りなく全天球に近い視野領域を単一のカメラで実時間撮影できるシステムがオーストラリア国立大学の Chahl, Srinivasan らにより提案されている³⁴⁾。ただし視野角が広いかわりに視点の位置は視線方向により異なる。一方視点固定型での広角視野に関する研究には、和田、松山らの行ったパンチルトズームカメラの研究¹³⁾がある。このシステムでは、高解像度で全天球に近い視野領域が撮影できるが、カメラを回転させるための可動部を持つ点と実時間での全天球撮影はできない点があり、上記のうちどちらが良いかはタスク依存ということになる。NHK では、和田らのシステムと類似したシステムを試作し、1000 枚の画像から 16000 × 16000 画素の高精細全方位画像を生成している⁴⁶⁾。また Maryland 大学からは 64 台のカメラを放射状に配置することで全天球像を撮像するシステムも提案されている⁴⁷⁾、カメラ間のキャリブレーションの問題と映像システムの規模の点で課題があると思われる。また、山本らは、SOS と呼ぶ、60 個のカメラを正 20 面体に配置した全方位ステレオシステムを開発している⁴⁸⁾。

視野分解能の特性を意識した研究としては、Conroy らによる研究がある⁴⁹⁾。この研究では、垂直視野特性が俯角によらず一定になるという特長を持つ。そのほかにも Hicks ら、Benosman らなどにより、幾何特性の異なる反射鏡を用いた全方位視覚センサが提案されている^{50),51)}。Benosman らの場合は、シリンダ状の双曲面鏡ミラーを用いることで、左右のパノラマ像を

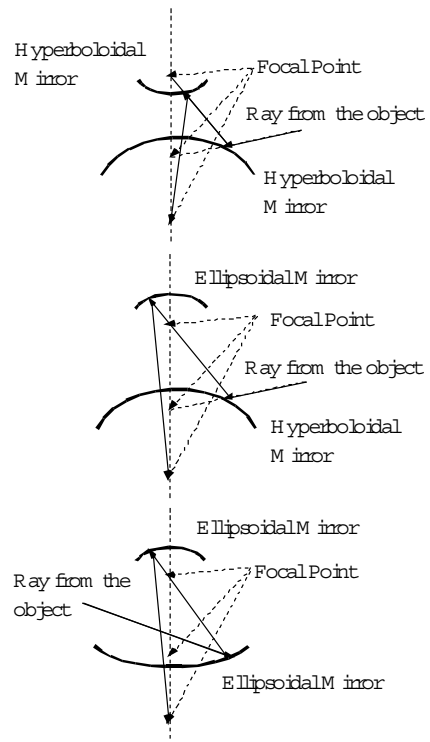


図 11 単一射影中心を持つ他の 2 回反射光学系
Fig. 11 Optics of other dual reflective omnidirectional image sensors.

得ることができるシステムである。

次に、高解像度という観点では、ラインスキャンカメラを用いた手法、マルチカメラによる手法、従来の単一ミラーによる全方位視覚を回転する手法がある。一般にラインスキャンセンサは画素サイズが大きいため、高感度であるという特徴を持つ。UCSB の Barth らは、256 画素の 1 次元 CCD を高速に回転し、約 3 分で 37500 × 256 画素のパノラマ画像が撮影可能なカメラシステムを構築している⁵²⁾。一方、マルチカメラという面からは、上述の横矢らの六角錐ミラーとカメラ 6 台からなる全方位光学系があり¹⁵⁾、このシステムでは、水平約 3000 画素、垂直 330 画素のパノラマ映像がビデオレートで撮影できる。しかしこれらのシステムで得られるパノラマ画像の場合、垂直方向の解像度が低いという欠点がある。それに対し、Nayer らは、凸面反射光学系の全方位視覚センサを横にし、鉛直軸周りに回転することで、640 × 480 画素の撮像素子でありながら、4000 × 2000 画素の画像を撮影できるシステムを構築した⁵³⁾。しかし実時間で撮影可能な従来型の全方位視覚を用いてはいるが、カメラの回転に 3 分を要し、パノラマ状の視野領域の同時観測を行うことはできない。それに対し、長原らは、従来の

双曲面ミラーを用いた全方位視覚を鉛直に設置し、鉛直軸周りに回転することで、画素ずらしの考え方に基づき高解像化を行う手法を提案している^{54)~56)}。この手法では、数十枚の入力画像から1秒以内で高解像度化(5dBの画質向上)が行える。この手法の利点は、360度パノラマ視野がつねに観測できる点で、監視などの目的に有効な手法といえよう。

上記以外の方法として、デジタルカメラやハイビジョンカメラといった高解像度素子を用いたシステムが最近、製品化ならびに試作されている。現時点では、デジタルカメラで500万画素以上の静止画像が撮影可能である。一方ハイビジョンの場合、1000×1000画素の全方位画像が撮影できるが、システム全体のコストは大変高価なものとなる。しかし、デジタルカメラ、ハイビジョンとも普及にともないデジタルカメラの高速撮影や、ハイビジョンのコストダウンなどが期待できるのではないと思われる。

2.4 全方位ステレオ

全方位が観測できるだけでなく、全方位の奥行き情報が得られれば、利用価値がさらに高まる。図1(b)に示すように石黒、辻は、回転中心がレンズ中心と一致しない回転型全方位カメラシステムにおいて、画像中で2カ所垂直なスリットを想定し、各々のスリット位置で観測した同一物体の方位角の違いから、移動ステレオの原理により全方位の距離情報を獲得した⁵⁷⁾。横配置の回転型の全方位ステレオに関する最近の研究の多くは、仮想現実感などにおける応用を想定したものが多く、カメラの台数を3台にしたもの^{58),59)}や、ステレオカメラのシステムに対し、回転軸を1台のカメラ中心にするシステム⁶⁰⁾など、全方位のモザイク処理を容易にする工夫を凝らしたものが多く。しかしこれらのシステムは、カメラを回転するため、同時に全周を観測できているわけではなく、動的な環境への適用はできない。それに対し、イスラエルのPelegらは、カメラを回転することなく、平行全方位ステレオ画像を獲得できるOMNISTEROと呼ぶ大変興味深いシステムを提案した^{61)~64)}。彼らは、スパイラルミラーとスパイラルレンズと呼ぶ特殊な光学系を用いているが、現時点では提案段階であり、完全に360度のパノラマ像が観測できる光学系ではない。今後が期待される。

上下の視差によるステレオシステムに関しては、ラインスキャンセンサを回転するタイプ^{65),66)}や六角錐ミラーと6台のカメラからなる高精細全方位カメラシステムを上下に配置した高精細全方位ステレオシステム¹⁵⁾などがある。これらのセンサシステムでは、高精

彩な映像が得られるが、前者は観測時間、後者はセンサの大きさが問題として残り、高速化ならびに小型化が期待される。1台のカメラで全方位の実時間ステレオを実現したシステムとしては、球面または双曲面の反射ミラーの内側にさらに曲率半径の小さな反射部を用意した鏡餅状のセンサが提案されている^{67)~69)}。光学系としては、ユニークであるが、実用上は内側の凸面ミラー部分の映像が小さく、十分な解像度が得られないという問題がある。この問題を解決できれば、実時間全方位ステレオとして期待できると思われる。

たくさんのカメラを用いて、全天球の映像を撮影しようとする試みがあるが、そのステレオ版に相当するシステムを岐阜大学を中心としたグループが開発した。このシステム(SOSと呼ぶ)は、60個のカメラを正20面体に配置した全方位ステレオシステムで、特徴としては、3つのカメラを1つのユニットとして、3眼視の原理により距離計測を行っている⁴⁸⁾。全方位画像を撮像する系は、いずれの系を用いたとしても、歪み、ボケ、映像間のつながりあわせ部の色ずれ、反射光学系の場合のアライメントなどその系固有の問題がある。モザイクングでは、光学的な歪みの影響が大きく、正確に歪み補正ができないと画像間のつながりあわせができないという問題がある。それに対し、KangらやSwaminathanらは、光学系のモデル化を行い、歪みの影響を分析し、ひずみパラメータを推定する手法を提案している^{70),71)}。

また、反射光学系に関しては、パノラマ状の視野が単一のCCD面に射影されているため、入力画像の位置によって空間分解能が異なる。そのためにフィルタリング処理などを通常のカーネルサイズで行うと、空間に対して均一な処理ができない。それに対し、Chahlらは、球面座標系の緯度を縦軸に、経度を横軸にとった座標系に入力画像を変換すると、空間分解能がほぼ均一になることを利用し、この空間上でフィルタリング処理を行うことを提案した⁷²⁾。またNagaharaらは、全方位視覚センサの高解像度化の際にBackProjectionのためのカーネルサイズを俯角に対して変化させており、このことは空間分解能の違いを意識した処理といえる^{55),56)}。

3. 自律移動ロボット

全方位視覚センサは、単に360度の視野領域が観測できるだけでなく、通常のカメラにはない特徴がある。具体的には、放射性、周期性、対称性、連続性などの性質である。放射性とは、カメラ光軸と平行なシーン中の直線は、画像中で放射状に現れるという性質であ

る．周期性とは，単一焦点の性質を持つ全方位視覚センサが傾斜した場合，焦点を通る面は円筒座標系では正弦曲線となるという性質である．このような性質を利用することで，移動ロボットの誘導を効果的に行うことができる⁹⁴⁾．以下，用いる地図のタイプごとに視覚誘導の方法を紹介する．

3.1 環境の幾何モデル生成と位置・姿勢推定

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．最も一般的な地図とは，カメラ運動を水平面（床面）のみに限定した場合の2次元幾何地図で，ロボットの移動にともなう垂直エッジの方位変化を観測することで，観測できたすべての垂直エッジから環境地図の生成を行う．初期の研究では，ロボットの移動量がエンコーダなどの内界センサより得られるとの仮定のもとに，三角測量の原理により環境地図の生成ならびに地図を用いたロボットの位置・姿勢推定，さらには，移動物体の発見とその位置・運動の推定⁷³⁾を行っていた．

しかし，一般に内界センサには，誤差が含まれることから，自己運動量を必要としない手法，いいかえると，地図生成と同時に自己位置を推定する手法が好ましいと考えられる．八木らは，ロボットの姿勢は与えられるものとして，3つの物体を3視点から観測することで，ロボットの自己位置と環境地図を同時に推定する手法を提案した⁷⁴⁾．その後，物体までの奥行き情報が得られている場合に方位変化からカメラの姿勢が推定できることを利用し，姿勢推定と環境地図の推定を交互に行うことでカメラ運動に制約のない解法を示した⁷⁵⁾．また榮藤らは，ロボットの自己位置・姿勢すべてが未知の場合に，未知数となる環境地図とロボットの位置姿勢の関係が，非線形観測方程式で表現されることを示し，Levenberg-Marquardt法により地図生成とロボットの位置・姿勢推定を行った⁷⁶⁾．

このようにカメラの動きに制約をおかない手法が提案される一方で，カメラに対し，積極的に動きの制約をおくことで，ロバストに推定する手法も提案されている．Hicksらは，カメラ運動が円軌道を描くときに観測情報が周期的になることを利用し，計算の単純化と安定な推定を実現している⁷⁷⁾．

映像提示のための3次元幾何モデル生成という観点では，川崎ら⁷⁸⁾や長原ら⁷⁹⁾が，カメラ移動にともない得られた時空間情報を利用し，生成された幾何モデルの各面に貼り付けるテキスチャの高解像度化を行っている．

ところで，ロボットを誘導するためには，幾何モデ

ルとの対応によりロボットの自己位置を推定する必要がある．最も一般的な方法は，自己運動量の連続性を仮定し，線形予測やカルマンフィルタなどを用い，エッジの位置（観測方位）を予測して，対応付けのための探索範囲を限定する方法である^{19),80)}．またモデルと観測情報の対応付けを行う場合，想定されるすべての位置・姿勢の組合せを計算すると計算コストが高く現実的でない．それに対し，Mouaddibらは，隣接エッジの観測方位を制約としたヒューリスティックな探索手法を提案している⁸¹⁾．また，Dempster-Shafer理論に基づき，全方位視覚センサの画像情報に距離センサなどの異なる情報を統合することでロボットの位置推定をロバストに行った研究もある^{82)~84)}．

3次元幾何モデルの生成という観点では，山澤らにより，全方位画像中のエッジ情報を立方体状の射影面を仮定し，そのうえでHough変換によりエッジを検出し，その位置・姿勢を推定する手法が示された⁸⁵⁾．他にも木室らは，正20面体による全方位画像の表現方法を提案しており，計算コストはかかるが，角度分解能という点では立方体よりも優れている⁸⁶⁾．

移動視からの3次元構造の復元ということでは，エビポーラ幾何が一一般的であるが，全方位においても，双曲面ミラー，放物面ミラーなどの全方位視覚センサを用いた場合の射影幾何の特性が解析されている^{87),88)}．Kangらは，動きからの3次元復元問題として，8点問題の手法を用い3次元構造復元を行った⁸⁹⁾．オプティカルフローの解析も含めていえば，3次元構造の復元だけでなく，3次元運動の推定問題に関する研究が行われている^{90)~92)}．特に全方位の特性を生かした手法では，単に視野の広さを利用するだけでなく，球面座標系では，動きの無限遠点が，座標原点に対し点対称の位置に現れ，オプティカルフローの流れは，一方の無限遠点からもう一方に向かうという関係が全方位視覚では同時に観測できることを利用している^{93)~95)}．生物の世界においても，オプティカルフローから奥行き情報を推定するという説があり，Iidaらは，その行動を全方位視覚を持つ飛行船で模擬し，飛行船の誘導を行った⁹⁶⁾．

またエビポーラ幾何に基づいた解析手法としては，時空間画像であるEPIの解析が考えられるが，川崎らは，全方位カメラで得られたEPIの特性を解析し，都市環境のモデリング手法に用いた⁹⁷⁾．またZhuらは，EPIに対し，フーリエ変換を施すことで奥行きを推定する手法を提案した⁹⁸⁾．

3.2 記憶に基づくロボット誘導，経路走行

記憶に基づくロボット誘導とは，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。初期の研究としては、Zhengらによるパノラマ表現の研究が代表的である^{100),101)}。この研究ではロボットが走行しながら、経路に沿った側方の映像を記録し、その映像をなぞる形でロボットの誘導を可能にする手法である。その後、パノラマ表現による空間のモデリング手法は、奥行き情報を付加したモデル¹⁰²⁾や、市街地などの広域環境のグラフ表現によるモデル化などへと発展していった¹⁰³⁾。

全方位画像列の記憶という観点からは、ロボット移動にともない得られる全方位画像列を直接そのまま記憶し、相関演算により記憶時の経路のどの位置かを判断しながらロボットを誘導する手法が提案されている¹⁰⁴⁾。しかし直接全方位画像を記憶する場合、記憶量が大きくなり現実的ではない。石黒ら¹⁰⁵⁾や粟飯原ら¹⁰⁶⁾は、記憶量を圧縮し、さらにノイズに対してもロバストなフーリエ変換や固有空間法により、全方位視覚センサの軸周りの回転に不変な特徴記述を行った。さらにJoganらは、固有空間法を用い、オクルージョンを含む場合に関して適応できる手法を提案している¹⁰⁷⁾。また簡単なカラーヒストグラムによる空間記述により、屋内環境、屋外環境問わず、実時間で位置推定ができる手法も報告されている¹⁰⁸⁾。この研究は、ICRA2000において、Best Vision Paperに選ばれた。上記の空間の記述方法は、どれもある視点位置での見かけの映像を記憶するもので、奥行きも含めた記憶ではない。八木らは、時空間全方位画像の空間中で水平となる面を全方位ルートパノラマと呼び、窓付きフーリエ変換のパワースペクトラムを記憶する方法を提案した¹⁰⁹⁾。パワースペクトラムには、記憶時の運動パターンを基準とした奥行き情報が含まれている。

屋外環境の記憶では、ロボットの自己位置がある程度分かると効率的に誘導を行うことができる。李らは、GPSの情報とパノラマ画像とを融合することで、広域のモデリングを行う手法を提案した¹¹⁰⁾。またGPSを利用したという点では、加藤らにより、離散的に観測した全方位画像間をGPSの情報をもとに位置づけることで、広域空間のモデリングを行った研究がある。ただし、この研究は、市街地環境での疑似移動体験を目的としている¹¹¹⁾。

ロボットの誘導においては、まわりの障害物にぶつからず、経路に沿った行動ができることも重要な課題である。前出のIidaらは、昆虫の行動を模擬した手法により、このような反射行動を実現した⁹⁶⁾。八木

らは、移動ロボットにおいて、全方位視覚では、床面領域が画像中心を含む閉空間として現れることを利用し、閉空間を動的輪郭モデルにより抽出し、反射行動のための情報として用いた¹¹²⁾。Zhuらは、経路を走行した時の見え方をニューラルネットにより学習し、ロボットの経路走行を可能にした¹¹³⁾。この研究では、全方位独特の性質として、直線路の場合、画像中で床面が前後に現れる(角度差が180度になる)というロボットの姿勢に対する不変な特徴を利用した点が興味深い。

3.3 マルチロボットシステム

複数のロボット間での位置決めや運動推定は、共有した観測方位情報に特別な幾何拘束があることから、全方位視覚センサが有効に利用できるタスクの1つといえる。八木らは、2台のロボット間での互いの観測方位が、ちょうど相対することを利用し、ロボットが移動しながら、データを共有した相手のロボットを同定するとともに、相手の位置・運動速度を推定する手法を提案し、さらに未知移動物体を発見したり、複数のロボットによる地図生成問題へと発展させた^{114),115)}。また、Zhuらも2台のロボットの協調により移動物体の位置推定を行う手法を提案している¹¹⁶⁾。加藤らは、3台のロボットが互いに観測可能な場合に、他の2台のロボットの観測方位間の角度に、一定の関係があることを利用し、静止状態からでも互いの関係を推定できる手法を提案し、ロボカップにおける位置決め問題などに利用した¹¹⁷⁾。この制約とは、3台のロボットが個々に観測した他のロボット間の角度の総和を計算すると180度となる関係で、彼らはこの関係を三角制約と呼んだ。

ロボカップでは、ゴールキーパーロボットの場合も、フィールドを動くロボットの場合も、360度がビデオレートで観測できていることの利点が直接チームの強さに反映されることから、多くのチームで全方位視覚センサが入力手段として利用された^{118)~120)}。このことは、マルチロボットシステムのセンシング手段として全方位視覚が有効であることを実践的なシステム上で評価したともいえる。

4. 仮想・複合現実感

仮想現実(VR)においては、リアルタイム・コンピュータグラフィックス(CG)技術によって、3次元映像空間を構築することが多い。多くのVRシステムでは、3次元CGモデルに対して自由視点画像のリアルタイム描画を実現することによって、視線・視点を自由に変える仮想映像空間のインタラクティブ探訪を

可能にしている。しかし、CGによる描画は仮想空間の写実性と臨場感に限界があり、実写に基づく映像空間構築の必要性が指摘されるようになり、実写とCGのシームレスな融合を目指す複合現実が注目されている¹²¹⁾。パノラマ撮影と全方位画像センサは、このような複合現実における実写ベースの仮想空間構築のための有力な手段になりつつある¹²²⁾。

4.1 パノラマ画像のインタラクティブな観察

実写画像に基づき利用者の全周を取り囲む仮想環境の構築を実現した代表的なものに、ChenによるQuick-Time VR¹²³⁾がある。この手法では、あらかじめ全周パノラマ画像を作成しておき、利用者の視線方向の平面透視投影画像を生成することによって、上下・左右方向の見回しを可能にしている。全周パノラマ画像はカメラを回転して撮影した複数のスチル写真をつなぎ合わせて作成する。

このようなスチル写真からのパノラマ画像生成のほかに、ビデオ映像からパノラマ画像を生成するビデオモザイクの研究もあり、画像・ビデオ映像からパノラマ画像を自動生成する手法が数多く提案されている^{124)~126)}。しかし、これらの方法では、通常の視野角を有するカメラの移動によって全周視野を撮影するため、一般に、動的な環境の実時間パノラマ撮影は難しい。廣瀬らの回転カメラを用いたVirtual Dome¹²⁷⁾は動的なイベントを表現可能であるが、画像の更新レートが遅いという問題がある。

カメラの移動や回転によってパノラマ画像を取得する方法、特に手持ちカメラによる方法では、動的環境の実時間撮影の問題に加えて、1点中心投影の単一視点制約を満たすパノラマ画像の生成が難しいという問題がある。単一視点制約を満たさないパノラマ画像からは、厳密には人間に提示するための特定視点での平面透視投影画像を生成することができない。単一視点制約を満たすためには、カメラの投影中心と回転中心を一致させた視点固定型のカメラ¹³⁾が必要である。

4.2 全方位ビデオを用いたテレプレゼンス

空間的あるいは時間的に離れた遠隔世界にあたかも実際にいるかのような没入感を与える技術にテレプレゼンスがある。没入感が得られるための大きな要因の1つは、観察視点・視線の自由な変更に従った画像の時間遅れの少ない実時間提示である。側方360度の視野を実時間撮影できる全方位ビデオカメラの中でも特に、単一視点制約を満たす全方位ビデオカメラは、撮影された全方位画像から任意方向・任意形状のディスプレイ・スクリーン面への透視投影画像を計算によって生成できることから、観察視線の自由な変更が可能

なインタラクティブ観察によって没入感を与えるテレプレゼンスシステムへの応用が容易である^{128)~132)}。

全方位ビデオ映像から視線に追従した画像を実時間で生成・提示するテレプレゼンスシステムにおける処理は以下のステップからなる。

- (1) 全方位ビデオ映像を計算機に取り込む。
- (2) ユーザがどの方向を見ているかという視線情報を与える。
- (3) 計算機でユーザの視線に対応した平面透視投影画像を生成・提示する。

ユーザに没入感を与えるためには、これらの処理をすべて、実時間で行う必要がある。ステップ(1)において、ビデオ映像を全方位ビデオカメラから直接伝送するか、記録ビデオを再生するかで、実時間型システムと蓄積再生型システムに分かれる。ステップ(2)における視線情報は、マウス、ジョイスティック、3次元磁気トラッカなどで与えることができる。ステップ(3)での画像提示デバイスとしては、通常のTVモニタ^{128),129)}、頭部搭載型画像表示装置(HMD)^{130),132)}、没入型投影ディスプレイ(IPD)^{133)~136)}などが用いられる。また、全方位ビデオの伝送形態の違いによって、スタンドアロン型、ネットワーク型、放送型の各システムを構築することができる。奈良先端大の横矢らのグループは、入力デバイスと画像提示デバイスのさまざまな組合せについて、実際にシステムを試作している¹³⁴⁾。

全方位ビデオを用いたテレプレゼンスシステムは、遠隔地の回転カメラなどを操作する従来のシステムと比べて、ビデオ映像の実時間伝送、取り込みが可能である限り、(i)カメラを機械的に動かすための時間遅延が生じない、(ii)通信時間および画像伝送時間がユーザの視線変更から画像提示までの時間遅延に影響を与えないため自然な見回しができる、(iii)複数ユーザが同時に独立に仮想カメラ操作を行うことができる、という優れた特長を持っている。ただし、実時間型システムにおいても、ユーザは通信時間と画像伝送時間に応じた過去の情景を見ていることになる。このため、ロボットの遠隔操縦¹³⁷⁾のように遠隔地に対して何らかの操作を行う応用では、撮影場所と観察場所の間の距離が大きくなると、通信時間と画像伝送時間を無視できなくなる。

全方位ビデオカメラは通常、1台のカメラで広視野を撮影するため、その一部分を切り出して幾何学的に変換した提示画像は解像度が低いという問題があり、没入感の低下につながる。この問題を解決するために角錐ミラーと複数カメラの組合せによって単一視点制

約を満たす高解像度な全周パノラマ画像撮影^{15),138)}も行われているが、複数カメラ画像間の幾何学的補正と光学的補正という新たな問題が発生する。現状では、全方位ビデオカメラのカメラ部をハイビジョンカメラなどの高解像度カメラにするのが最も簡便な高解像度化である¹³⁹⁾。

単一視点制約を満たす1台の全方位カメラで撮影した全方位画像は視点が固定されているため、仮想空間内での自由な視点移動ができない。この問題を解決するために、移動経路が既知の全方位ビデオカメラで取得した全方位画像系列から、光線情報¹⁴⁰⁾を利用して任意視点画像を疑似的に生成するイメージベースレンダリング手法がいくつか開発されている^{141)~144)}。この手法を用いて移動経路上での両眼ステレオ画像の実時間生成を行う、ステレオテレプレゼンスシステムも開発されている^{141),142)}。

4.3 全方位映像の提示系

既存のHMDの利用に加えて、全周パノラマ映像を意識したディスプレイ開発も行われている。ユーザの全周を囲む直方体面スクリーンに対する複数プロジェクタでの分割投影からなるCAVE¹⁴⁵⁾が最も有名であるが、この方式では円筒面スクリーンを用いたものも開発されている。また最近では、全方位ビデオ映像を1台のプロジェクタで投影する方式も考えられている。岩田ら^{146),147)}は、平面主ミラーと凸面副ミラーで反射させた全方位ビデオ映像を球面スクリーンに投影する没入型ディスプレイを開発している。また、Courchesne¹⁴⁸⁾は、錐面主ミラーで反射した全方位ビデオ映像を錐面スクリーンに背面投影し、投影像の錐面副ミラーでの反射像を観察するパノラマディスプレイを試作している。これらはいずれも観察者の頭部を被う比較的小さな構造になっており、観察者はその場で頭を回すことによって全周映像を観察することができる。

これらの全周型投影ディスプレイのほかに、広視野映像を投影する球面型没入ディスプレイがいくつか開発されており¹⁴⁹⁾、市販されているものもある。

5. ヒューマンインタラクションとサーベイランス

5.1 ヒューマンインタラクション

人間同士あるいは人間とコンピュータのインタフェース部に全方位ビデオカメラを利用する試みがある。横山ら¹⁵⁰⁾は、個人識別に全方位画像系列の利用を提案している。側方360度の視野を撮影できる全方位ビデオカメラはテーブルを囲む形で会議の状況把握に有

効である¹⁵¹⁾。また、4.2節で述べた全方位カメラを用いた実時間テレプレゼンス機能は、遠隔テレビ会議における遠隔地間での相互状況認識のための有効な手段となる。この種の目的には、平面回転ミラーを用いた全方位センサ¹⁵²⁾も用いられている。

電総研(現、産総研)のグループは、着用型の拡張現実感システムにおいて、現実環境に対するアノテーションを行うための位置合わせに全方位センサで取得した全周パノラマ画像を用いている^{153),154)}。このシステムでは通常のカメラによる入力映像と全周パノラマ画像のマッチングによって位置合わせを行っているが、全方位ビデオカメラの小型化が進めば、着用型システムのセンサとして全方位カメラを用いることもできよう。

5.2 ビデオサーベイランス

ビデオカメラを用いて広範囲の環境をつねに監視し続けるサーベイランスにおいては、通常のカメラでは全視野を撮影するためには多数のカメラが必要になるため、側方360度の視野を有する全方位ビデオカメラが適していることは容易に想像がつく¹⁵⁵⁾。サーベイランス研究ではイベントの自動検出を目指すことが多いが、現状の実用的なシステムでは安全のために人間の監視者が存在していることが前提になる。この場合には、一般に次のような機能が必要になる。

- (1) 監視者が遠隔地の情景を自分の意志で自由に見回すことができる機能
- (2) システムが不法侵入、異常事態発生などにかかわる重要なイベントを自動検出し、遠隔地の状態を認識・記録する機能
- (3) 重要なイベントが発生した場合には、監視者に注意喚起を行い、イベントが発生している場所の映像を監視者に提示する機能

機能(1)の実現には、4.2節で述べたテレプレゼンス機能が利用できる。機能(2)に関しては、全方位画像に対して背景差分、時間差分などの既存の画像処理手法を適用することによって移動物体を自動的に検出・追跡する試みがある¹⁵⁶⁾。イベントの発生している3次元位置を特定するためには2台の全方位ビデオカメラを用いた全方位ステレオ¹⁵⁷⁾が有効であるが、2台のカメラの基線上の物体の位置を特定できないという問題がある。さらに、一般的な環境では障害物が存在し、監視範囲が限定されるという問題がある。このため、3台以上の全方位ビデオカメラを環境中に設置したシステム構成がとられている^{158)~161)}。機能(3)は、上記(2)で検出された全方位画像内でのイベント発生位置から観察視線情報を決定し、4.2節の方法で

透視投影画像を実時間で生成・提示することによって実現できる。この場合、複数のイベントが発生していれば、それらすべてをすべてのセンサ位置から眺めた映像の同時提示が可能である。

これまでは環境中に複数の全方位ビデオカメラを固定した設定での研究が多いが、移動ロボットや飛行体に全方位カメラを搭載して環境を能動的に監視する能動的サーベイランスへの応用も有望である。

通常のカメラ1台からなる全方位ビデオカメラでは、イベントの検出はできるが、空間解像度の低さから、それが何か(何が起きているか、だれがいるのかなど)の認識は難しいことが多い。このため、全方位カメラとアクティブカメラの連携によるサーベイランスシステムも考えられている^{162),163)}。すなわち、全方位カメラで全周視野をつねに監視し、イベントの発生が検出されると、アクティブカメラでそれを詳細に観察するというアプローチである。

6. おわりに

本解説では、過去十数年に研究が大きく進展した全方位ビジョンについて、センサ開発と具体的な応用事例を概観した。全方位センサ開発に関しては基本的なアイデアがほぼ出尽くした感があるが、本解説で紹介したように、応用分野は急拡大している。今後は、センサの小型化、高解像度化が期待され、それによって従来、研究の域にとどまっていた試みの実用化と、応用分野のさらなる発掘が進むと思われる。本解説が、全方位ビジョン研究の現状を把握するうえでの一助となれば幸いである。

謝辞 最後に、全方位ビジョン研究について日頃より有益なご討論をいただいている大阪大学の谷内田正彦教授と奈良先端科学技術大学院大学の山澤一誠助手に感謝します。

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) Cao, Z.L., Oh, S.J. and Hall, E.L.: Dynamic Omnidirectional Vision for Mobile Robots, *Proc. SPIE Intelligent Robots and Computer Vision*, Vol.579, pp.405-414 (1985).
- 3) Cao, Z.L., Oh, S.J. and Hall, E.L.: Dynamic Omnidirectional Vision for Mobile Robots, *J. Robotic Systems*, Vol.3, No.1, pp.5-17 (1986).
- 4) Morita, T., Yasukawa, Y., Inamoto, Y., Uchiyama, T. and Kawakami, S.: Measurement in Three Dimensions by Motion Stereo and

- Spherical Mapping, *Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.422-434 (1989).
- 5) Zheng, J.Y. and Tsuji, S.: Panoramic Representation of Scenes for Route Understanding, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, pp.161-167 (1990).
- 6) Zheng, J.Y. and Tsuji, S.: From Anorthoscope Perception to Dynamic Vision, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1154-1160 (1990).
- 7) Saraclik, K.B.: Characterizing an Indoor Environment with a Mobile Robot and Uncalibrated Stereo, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.984-989 (1989).
- 8) Godber, S.X., Petty, R., Robinson, M. and Evans, J.P.: Panoramic Line-scan Imaging System for Teleoperator Control, *Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems*, Vol.2177, pp.247-257 (1994).
- 9) Ishiguro, H., Yamamoto, M. and Tsuji, S.: Analysis of Omni-Directional Views at Different Location, *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.659-664 (1990).
- 10) 石黒 浩, 山本雅史, 辻 三郎: 能動的全方位視覚を用いた環境構造の復元, *日本ロボット学会誌*, Vol.9, No.5, pp.541-550 (1991).
- 11) Ishiguro, H. and Tsuji, S.: Active Vision by Multiple Visual Agents, *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2195-2202 (1992).
- 12) Ishiguro, H. and Tsuji, S.: Omni-directional Stereo, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.257-262 (1992).
- 13) 和田俊和, 浮田宗伯, 松山隆司: 視点固定型パンチルトズームカメラとその応用, *電子情報通信学会論文誌 (D-II)*, Vol.J81-D-II, No.6, pp.1182-1193 (1998).
- 14) 辻 三郎, 加藤浩仁: 環境構造変化の認知, 平成7年度科研重点知能ロボット成果報告書, pp.98-101 (1996).
- 15) Kawanishi, T., Yamazawa, K., Iwasa, H., Takemura, H. and Yokoya, N.: Generation of High-resolution Stereo Panoramic Images by Omnidirectional Imaging Sensor Using Hexagonal Pyramidal Mirrors, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.I, pp.485-489 (1998).
- 16) 日照の測定・検討の方法, 日本建築学会東北大会環境工学部門研究協議会資料 (1973).
- 17) Ayres, W.A.: Projecting Device, US Patent 2304434 (1942).
- 18) 八木康史, 川戸慎二郎: 円錐投影による全方位環

- 境認識，電子情報通信学会技術研究報告，PRU89-46, pp.47-53 (1989).
- 19) 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).
 - 20) Hong, J., Tan, X., Pinette, B., Weiss, R. and Riseman, E.M.: Image-based Navigation Using 360 Views, *Proc. Image Understanding Workshop*, pp.782-791 (1990).
 - 21) Hong, J., Tan, X., Pinette, B., Weiss, R. and Riseman, E.M.: Image-based Homing, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.620-625 (1991).
 - 22) Yamazawa, K., Yagi, Y. and Yachida, M.: Omnidirectional Imaging with Hyperboloidal Projection, *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, No.2, pp.1029-1034 (1993).
 - 23) 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).
 - 24) Peri, V. and Nayar, S.K.: Omnidirectional Video System, *Proc. U.S.-Japan Graduate Student Forum in Robotics*, pp.28-31 (1996).
 - 25) Nayar, S.K.: Catadioptric Omnidirectional Camera, *Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.482-488 (1997).
 - 26) Baker, S. and Nayar, S.K.: A Theory of Single-Viewpoint Catadioptric Image Formation, *Int. J. Computer Vision*, Vol.35, No.2, pp.1-22 (1999).
 - 27) Daniilidis, K. and Geyer, C.: Omnidirectional Vision: Theory and Algorithms, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.I, pp.89-96 (2000).
 - 28) Geyer, C. and Daniilidis, K.: Equivalence of Catadioptric Projections and Mappings of the Sphere, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.91-96 (2000).
 - 29) 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).
 - 30) Yachida, M.: Omnidirectional Sensing and Combined Multiple Sensing, *Proc. Workshop on Computer Vision for Virtual Reality Based Human Communications*, pp.20-27 (1998).
 - 31) Greguss, P.: The Tube Peeper: A New Concept in Endoscopy, *Optics and Laser Technology*, pp.41-45 (1985).
 - 32) Greguss, P.: PAL-optic based Instruments for Space Research and Robotics, *Laser and Optoelektronik*, Vol.28, pp.43-49 (1996).
 - 33) Takeya, A., Kuroda, T., Nishiguchi, K. and Ichikawa, A.: Omnidirectional Vision System using Two Mirrors, *Proc. SPIE*, Vol.3430, pp.50-60 (1998).
 - 34) Chahl, J.S. and Srinivasan, M.V.: Reflective Surfaces for Panoramic Imaging, *Applied Optics*, Vol.36, No.31, pp.8275-8285 (1997).
 - 35) Powell, L.: Panoramic Lens, US Patent 5473474 (1995).
 - 36) Rees, W.D. and Mich, W.: Panoramic Television Viewing System, US Patent 3505465 (1970).
 - 37) Rosendahi, G.R. and Dykes, W.V.: Lens System for Panoramic Imagery, US Patent 4395093 (1983).
 - 38) Davis, J.E., Todd, M.N., Ruda, M., Stuhlinger, T.W. and Castle, K.R.: Optics Assembly for Observing a Panoramic Scene, US Patent 5627675 (1997).
 - 39) 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 ROBOMECH99 講演論文集，No.99-9, 2A1-66-060, pp.(1)-(2) (1999).
 - 40) Yagi, Y. and Yachida, M.: Development of a Tiny Omnidirectional Image Sensor, *Proc. Asian Conf. on Computer Vision*, pp.23-28 (2000).
 - 41) Nayar, S.K. and Peri, V.: Folded Catadioptric Cameras, *Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.II, pp.217-223 (1999).
 - 42) Bruckstein, A. and Richardson, T.: Omniview Cameras with Curved Surface Mirrors, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.79-84 (2000).
 - 43) 八木康史，谷内田正彦：全方位視角センサ，特開平 11-331654 (1999).
 - 44) Derrien, S. and Konolige, K.: Approximating a Single Viewpoint in Panoramic Imaging Devices, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol.4, pp.3931-3938 (2000).
 - 45) Derrien, S. and Konolige, K.: Approximating a Single Viewpoint in Panoramic Imaging Devices, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.85-90 (2000).
 - 46) Yamanouchi, Y., Mitsumine, H., Inoue, S. and Shimoda, S.: Construction of omnidirectional images for Image-Based Virtual Studio, *Proc. SPIE*, Vol.4067, No.III, pp.1517-1524 (2000).
 - 47) Fermuller, C., Aloimonos, Y., Baker, P., Pless, R., Neumann, J. and Stuart, B.: Multi-camera Networks: Eyes from Eyes, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.11-

- 18 (2000).
- 48) 棚橋英樹, 山本和彦, 桑島茂純, 丹羽義典: 全方向ステレオシステムの開発, 第6回画像センシングシンポジウム SSII2000, pp.145-150 (2000).
- 49) Conroy, T.L. and Moore, J.B.: Resolution Invariant Surfaces for Panoramic Vision Systems, *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, Vol.1, pp.392-397 (1999).
- 50) Hicks, R.A. and Bajcsy, R.: Catadioptric Sensors That Approximate Wide-angle Perspective Projections, *Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.1, pp.545-551 (2000).
- 51) Benosman, R., Deforas, E. and Devars, J.: A New Catadioptric Sensor for the Panoramic Vision of Mobile Robots, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.112-116 (2000).
- 52) Barth, M. and Barrows, C.: A Fast Panoramic Imaging System and Intelligent Imaging Technique for Mobile Robots, *Proc. IEEE/RSJ Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.626-633 (1996).
- 53) Nayar, S.K. and Karmarkar, A.: 360 × 360 Mosaics, *Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.II, pp.388-395 (2000).
- 54) 長原 一, 八木康史, 谷内田正彦: エッジ情報に基づく高解像度全方位画像の生成, 日本ロボット学会学術講演会, Vol.3, No.3B12, pp.785-786 (1999).
- 55) Nagahara, H., Yagi, Y. and Yachida, M.: Super-resolution for an Omnidirectional Vision Sensor, *J. Advanced Robotics*, Vol.14, No.5, pp.427-430 (2000).
- 56) 長原 一, 八木康史, 谷内田正彦: 多重焦点全方位画像からの超解像度化, 日本ロボット学会学術講演会, Vol.2, pp.783-784 (2000).
- 57) Ishiguro, H., Yamamoto, M. and Tsuji, S.: Omni-directional Stereo, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.257-262 (1992).
- 58) Yamada, K., Ichikawa, T., Naemura, T., Aizawa, K. and Saito, T.: High Quality Stereo Panorama Generation Using a 3 Camera System, *Proc. SPIE*, Vol.4067, No.1, pp.419-428 (2000).
- 59) 山田邦男, 斎藤隆弘, 苗村 健, 相澤清晴, 市川忠嗣: 3眼周囲環境入力装置を用いた高品質ステレオパノラマ画像の生成, 映像情報メディア学会誌, Vol.55, No.1, pp.151-158 (2001).
- 60) Huang, H.C. and Hung, Y.P.: Panoramic Stereo Imaging System with Automatic Disparity Warping and Seaming, *Graphical Models and Image Processing*, Vol.60, No.3, pp.196-208 (1998).
- 61) Peleg, S., Moshe, B.E. and Pritch, Y.: Omnistereo: Panoramic Stereo Imaging, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.23, No.3, pp.279-290 (2001).
- 62) Peleg, S., Pritch, Y. and Moshe, B.E.: Cameras for Stereo Panoramic Imaging, *Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.1, pp.208-214 (2000).
- 63) Pritch, Y., Moshe, B.E. and Peleg, S.: Automatic Disparity Control in Stereo Panoramas (OmniStereo), *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.54-61 (2000).
- 64) Peleg, S. and Moshe, B.E.: Stereo panorama with a Single Camera, *Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.1, pp.395-401 (1999).
- 65) Maniere, T., Benosman, R., Gastanda, C. and Devars, J.: Vision System Dedicated to Panoramic Three-dimensional Scene Reconstruction, *J. Electronic Imaging*, Vol.7, No.3, pp.672-676 (1998).
- 66) Petty, R.S., Robinson, M. and Evans, J.: 3D Measurement Using Rotating Line-scan Sensors, *Measurement Science and Technology*, Vol.9, No.3, pp.339-346 (1998).
- 67) Southwell, D., Reyda, J., Fiala, M. and Basu, A.: Panoramic Stereo, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition* (1996).
- 68) Basu, A. and Sahabi, H.: Analysis of Cylindrical Stereo Imaging, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.I, pp.366-369 (2000).
- 69) Baldwin, J. and Basu, A.: 3d Estimation Using Panoramic Stereo, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.I, pp.97-100 (2000).
- 70) Kang, S.B. and Weiss, R.: Characterization of Errors in Compositing Panoramic Images, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.73, No.2, pp.269-280 (1999).
- 71) Swaminathan, R. and Nayar, S.K.: Nonmetric Calibration of Wide-angle Lenses and Polycameras, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, No.10, pp.1172-1178 (2000).
- 72) Chahl, J.S. and Srinivasan, M.V.: Filtering and Processing of Panoramic Images Obtained Using A Camera and A Wide Angle Imaging Reflective Surface, *J. Optical Society of America*, Vol.17, No.7, pp.1172-1176 (2000).
- 73) 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).
- 74) Yagi, Y., Shouya, K. and Yachida, M.: Environmental Map Generation and Egomotion Estimation in a Dynamic Environment for an Omnidirectional Image Sensor, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol.4, pp.3493–3498 (2000).
- 75) 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).
- 76) Etoh, M., Aoki, T. and Hata, K.: Estimation of Structure and Motion Parameters for a Roaming Robot That Scans the Space, *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, Vol.1, pp.579–584 (1999).
- 77) Hicks, R.A., Pettet, D., Daniilidis, K. and Bajcsy, R.: Closed form Solutions for Reconstruction via Complex Analysis, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, Vol.13, No.1 pp.57–70 (2000).
- 78) 川崎 洋, 池内克史, 坂内正夫: 時空間画像解析を用いた全方位カメラ映像の超解像度化, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84–D-II, No.8, pp.1891–1902 (2001).
- 79) 長原 一, 八木康史, 谷内田正彦: 全方位時空間画像からの超解像度化, 情報処理学会研究報告, 00-CVIM-121, pp.97–104 (2000).
- 80) Brassart, E., Delahoche, L., Cauchois, C., Drocourt, C., Pegard, C. and Mouaddib, M.: Experimental Results Got with the Omnidirectional Vision Sensor: SYCLOP, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.145–160 (2000).
- 81) Mouaddib, E.M. and Marhic, B.: Geometrical Matching for Mobile Robot Localization, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.16, No.5, pp.542–552 (2000).
- 82) Drocourt, C., Delahoche, L., Pegard, C. and Cauchois, C.: Localization Method Based on Omnidirectional Stereoscopic Vision and Deadreckoning, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol.2, pp.960–965 (1999).
- 83) Drocourt, C., Delahoche, L., Pegard, C. and Clerentin, A.: Mobile Robot Localization Based on an Omnidirectional Stereoscopic Vision Perception System *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol.2 pp.1329–1334 (1999).
- 84) Clerentin, A., Delahoche, L., Pegard, C. and Gracy, E.B.: Localization Method Based on Two Omnidirectional Perception Systems Cooperation, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol.2, pp.1219–1224 (2000).
- 85) Yamazawa, K., Yagi, Y. and Yachida, M.: 3D Line Segment Reconstruction by Using HyperOmni Vision and Omnidirectional Hough Transforming, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.3, pp.487–490 (2000).
- 86) 木室義彦, 長田 正: 球面六角形画像ピラミッドを用いた球面投影による全方位画像処理, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6, pp.809–819 (1996).
- 87) Svodoba, T.P.T. and Hlavac, V.: Epipolar Geometry for Panoramic Cameras, *Proc. European Conf. on Computer Vision*, pp.218–232 (1998).
- 88) Chang, P. and Hebert, M.: Omni-Directional Structure from Motion, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.127–133 (2000).
- 89) Kang, S.B. and Szeliski, R.: 3-D scene Data Recovery Using Omnidirectional Multibaseline Stereo, *Int. J. of Computer Vision*, Vol.25, No.2, pp.167–183 (1997).
- 90) Glucjman, J. and Nayer, S.K.: Ego-motion and Omnidirectional Cameras, *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, pp.999–1005 (1998).
- 91) Lee, J., You, S. and Neumann, U.: Large Motion Estimation for Omnidirectional Vision, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.161–168 (2000).
- 92) Lee, J. and Neumann, U.: Motion Estimation with Incomplete Information Using Omnidirectional Vision, *Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing* (2000).
- 93) Nelson, R.C. and Aloinomos, J.: Finding Motion Parameters from Spherical Motion Fields, *Biological Cybernetics*, 58, pp.261–273 (1988).
- 94) Yagi, Y., Nishii, W., Yamazawa, K. and Yachida, M.: Stabilization for Mobile Robot by using Omnidirectional Optical Flow, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.618–625 (1996).
- 95) Chahl, J.S. and Srinivasan, M.V.: Visual Computation of Egomotion Using an Image Interpolation Technique, *Biological Cybernetics*, 74, pp.405–411 (1996).
- 96) Iida, F. and Lambrinos, D.: Navigation in An Autonomous Flying Robot by Using A Biologically Inspired Visual Odometer, *Proc. SPIE*, Vol.4196, pp.86–97 (2000).
- 97) Kawasaki, H., Ikeuchi, K. and Sakauchi, M.: EPI Analysis of Omni-camera Image, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.1, pp.379–383 (2000).
- 98) Zhu, Z., Xu, G. and Lin, X.: Panoramic EPI Generation and Analysis of Video from a Moving Platform with Vibration, *Proc. IEEE Com-*

- puter Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol.2, pp.531–537 (1999).
- 99) Winters, N., Gaspar, J., Lacey, G. and Santos-Victor, J.: Omni-Directional Vision for Robot Navigation, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.21–28 (2000).
- 100) Zheng, J.Y. and Tsuji, S.: Panoramic Representation for Route Recognition by a Mobile Robot, *Int. J. Computer Vision*, Vol.9, No.1, pp.55–76 (1992).
- 101) Zheng, J.Y. and Tsuji, S.: Generating Dynamic Projection Images for Scene Representation and Understanding, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.72, No.3, pp.237–256 (1998).
- 102) Li, S. and Tsuji, S.: Qualitative Representation of Scenes Along Route, *Image and Vision Computing*, Vol.17, No.9, pp.685–700 (1999).
- 103) Li, S., Ochi, A., Yagi, Y. and Yachida M.: Making 2D Map of Environments based upon Routes Scenes, *Autonomous Robots*, Vol.8, No.2, pp.117–128 (2000).
- 104) Matsumoto, Y., Inaba, M. and Inoue, H.: Memory-based Navigation Using Omni-view Sequence, *Proc. Int. Conf. Field and Service Robotics*, pp.184–191 (1997).
- 105) Ishiguro, H. and Tsuji, S.: Image-based Memory of Environment, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.634–639 (1996).
- 106) Aihara, N., Iwasa, H., Yokoya, N. and Take-mura, H.: Memory-based Self-Localization Using Omnidirectional Images, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, pp.1799–1803 (1998).
- 107) Jogan, M. and Leonardis, A.: Robust Localization Using Panoramic View-based Recognition, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.IV, pp.136–139 (2000).
- 108) Ulrich, I. and Nourbakhsh, I.: Appearance-based Place Recognition for Topological Localization, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol.2, pp.1023–1029 (2000).
- 109) Yagi, Y., Fijimura, S. and Yachida, M.: Route Representation for Mobile Robot Navigation by Omnidirectional Route Panorama Fourier Transformation, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol.2 pp.1250–1255 (1998).
- 110) Li, S. and Hayashi, A.: Robot Navigation in Outdoor Environments by Using GPS Information and Panoramic Views, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol.1, pp.570–575 (1998).
- 111) Kato, K., Ishiguro, H. and Barth, M.: Town Digitizing : Recording of Street Views by Using Omnidirectional Vision Sensors, *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pp.2571–2576 (2000).
- 112) Yagi, Y., Nagai, H., Yamazawa, K. and Yachida, M.: Reactive Visual Navigation Based on Omnidirectional Sensing—Path Following and Collision Avoidance, *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol.1, pp.58–63 (1999).
- 113) Zhu, Z., Yang, Sh, Xu, G., Lin, X. and Shi, D.: Fast Road Classification and Orientation Estimation Using Omni-view Images and Neural Networks, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.7, No.8, pp.1182–1197 (1998).
- 114) Yagi, Y., Lin, Y. and Yachida, Y.: Detection of Unknown Moving Objects by Reciprocation of Observed Information between Mobile Robot, *Proc. IEEE/RSJ/GI Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol.2, pp.996–1003 (1994).
- 115) Yagi, Y., Izuhara, S. and Yachida, M.: The Integration of an Environmental Map Observed by Multiple Mobile Robots with Omnidirectional Image Sensor COPIS, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol.2, pp.640–647 (1996).
- 116) Zhu, Z., Rajasekar, K.D., Riseman, E.M. and Hanson, A.R.: Panoramic Virtual Stereo Vision of Cooperative Mobile Robots for Localizing 3D Moving Objects, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.29–36 (2000).
- 117) Kato, K., Ishiguro, H. and Barth, M.: Identifying and Localizing Robots in a Multi-robot System Environment, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol.2, pp.966–971 (1999).
- 118) Asada, M., Suzuki, Sh., Takahashi, Y., Uchibe, E., Nakamura, M., Mishima, Ch., Ishizuka, H. and Kato, T.: TRACKIES: RoboCup-97 Middle-size League World Co-champion, *AI Magazine*, Vol.19, No.3, pp.71–78 (1998).
- 119) Bonarini, A., Aliverti, P. and Lucioni, M.: Omnidirectional Vision Sensor for Fast Tracking for Mobile Robots, *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, Vol.49, No.3, pp.509–512 (2000).
- 120) Bonarini, A., Aliverti, P. and Lucioni, M.: Omnidirectional Vision Sensor for Fast Tracking for Mobile Robots, *Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, Vol.1, pp.151–155 (1999).
- 121) Ohta, Y. and Tamura, H. (Eds.): *Mixed*

- Reality—Merging Real and Virtual Worlds*, Ohmsha & Springer-Verlag, Tokyo (1999).
- 122) 横矢直和：3D パノラマ画像合成技術，映像情報メディア学会誌，Vol.54, No.3, pp.338–342 (2000).
- 123) Chen, S.E.: QuickTime VR—An Image-Based Approach to Virtual Environment Navigation, *Proc. ACM SIGGRAPH'95*, pp.29–38 (1995).
- 124) Szeliski, R.: Video Mosaics for Virtual Environments, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.16, No.2, pp.22–30 (1996).
- 125) Szeliski, R. and Shum, H.Y.: Creating Full View Panoramic Image Mosaics and Environment Maps, *Proc. ACM SIGGRAPH'97*, pp.251–258 (1997).
- 126) 千葉直樹，蚊野 浩，美濃導彦，安田昌司：画像特徴に基づくイメージモザイクング，電子情報通信学会論文誌（D-II），Vol.J82-D-II, No.10, pp.1581–1589 (1999).
- 127) Hirose, M., Yokoyama, K. and Sato, S.: Transmission of Realistic Sensation: Development of Virtual Dome, *Proc. IEEE VRAIS'93*, pp.125–131 (1993).
- 128) Der, K., Basu, A. and Reyda, J.: Interactive Viewing of Panoramic Images, *Proc. Vision Interface '97*, pp.162–169 (1997).
- 129) Peri, V.N. and Nayar, S.K.: Generation of Perspective and Panoramic Video from Omnidirectional Video, *Proc. DARPA Image Understanding Workshop*, Vol.1, pp.243–245 (1997).
- 130) 山澤一誠，尾上良雄，横矢直和，竹村治雄：全方位画像からの視線追従型実時間画像生成によるテレプレゼンス，電子情報通信学会論文誌（D-II），Vol.J81-D-II, No.5, pp.880–887 (1998).
- 131) Boulton, T.E.: Remote Reality via Omnidirectional Imaging, *ACM SIGGRAPH'98 Conference Abstracts and Applications*, p.253 (1998).
- 132) Onoe, Y., Yamazawa, K., Takemura, H. and Yokoya, N.: Telepresence by Real-time View-dependent Image Generation from Omnidirectional Video Streams, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.71, No.2, pp.154–165 (1998).
- 133) Manabe, Y., Sato, K., Yamazawa, K., Yokoya, N. and Chihara, K.: Reproduction of Motion for Immersive Mixed Environments, *Proc. 1st Int. Conf. on Image and Graphics*, pp.673–676 (2000).
- 134) 横矢直和，山澤一誠，竹村治雄：全方位ビデオカメラを用いた視覚情報メディア，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.42, No.SIG14 (CVIM3) (2001). (本特集号).
- 135) Shimamura, J., Yokoya, N., Takemura, H. and Yamazawa, K.: Construction of an Immersive Mixed Environment Using an Omnidirectional Stereo Image Sensor, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.62–69 (2000).
- 136) 島村 潤，山澤一誠，竹村治雄，横矢直和：全周パノラマステレオ画像とCGモデルの合成による複合現実環境の構築，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.42, No.SIG6 (CVIM2), pp.44–53 (2001).
- 137) 米田美里，山澤一誠，竹村治雄，横矢直和：全方位動画からの両眼ステレオ画像生成による移動ロボットの遠隔操縦，電子情報通信学会技術研究報告，PRMU2000-107 (2000).
- 138) Nalwa, V.: A True Omnidirectional Viewer, Tech. Report, Bell Laboratories, Holmdel, NJ (1996).
- 139) 山澤一誠，竹村治雄，横矢直和：全方位 HD カメラを用いたテレプレゼンスシステム，電子情報通信学会技術研究報告，PRMU2001-68 (2001).
- 140) Adelson, E.H. and Bergen, J.: The Plenoptic Function and The Elements of Early Vision, *Computational Models of Visual Processing*, Landy, M. and Movshon, J.A. (Eds.), pp.3–20, MIT Press, Cambridge, MA (1991).
- 141) Yamaguchi, K., Takemura, H., Yamazawa, K., and Yokoya, N.: Real-time Generation and Presentation of View-dependent Binocular Stereo Images Using a Sequence of Omnidirectional Images, *Proc. 15th IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.4, pp.589–593 (2000).
- 142) 山口晃一郎，山澤一誠，竹村治雄，横矢直和：全方位動画をういた両眼ステレオ画像の実時間生成によるテレプレゼンス，電子情報通信学会論文誌（D-II），Vol.J84-D-II, No.9, pp.2048–2057 (2001).
- 143) Takahashi, T., Kawasaki, H., Ikeuchi, K. and Sakauchi, M.: Arbitrary View Position and Direction Rendering for Large-scale Scenes, *Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol.2, pp.296–303 (2000).
- 144) Aliaga, D.G. and Carlbom, I.: Plenoptic Stitching: A Scalable Method for Reconstructing 3D Interactive Walkthroughs, *Proc. ACM SIGGRAPH'01*, pp.443–450 (2001).
- 145) Cruz-Neira, C., Sandin, D.J. and DeFanti, T.A.: Surround-screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, *Proc. ACM SIGGRAPH'93*, pp.135–142 (1993).
- 146) 橋本 涉，岩田洋夫：凸面鏡を用いた球面没入型ディスプレイ：Enspahed Vision, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.4, No.3, pp.479–486 (1999).

- 147) 岩田洋夫：全方位映像呈示技術，情報処理学会研究報告，CVIM125-25 (2001).
- 148) Courchesne, L.: Panoscope 360°, *ACM SIG-GRAPH2000 Conference Abstracts and Applications*, p.93 (2000).
- 149) 柴野伸之，畑中智行，中西弘泰，星野 洋，長濱龍一郎，澤田一哉，野村淳二：都市環境ヒューマンメディアにおける球面型没入ディスプレイ，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.4, No.3, pp.549-554 (1999).
- 150) 横山太郎，小原ゆう，八木康史，谷内田正彦：全方位画像列からの個人識別，情報処理学会研究報告，CVIM125-16 (2001).
- 151) Nishimura, T., Yabe, H. and Oka, R.: Indexing of Human Motion at Meeting Room by Analyzing Time-varying Images of Omni-directional Camera, *Proc. 4th Asian Conf. on Computer Vision*, Vol.I, pp.1-4 (2000).
- 152) 中尾敏康，柏谷 篤，兼吉昭男：回転鏡を用いた広視野カメラの試作，情報処理学会研究報告，CVIM115-16 (1999).
- 153) Kouroggi, M., Kurata, T., Sakaue, K. and Muraoka, Y.: A Panorama-based Technique for Annotation Overlay and Its Real-time Implementation, *Proc. IEEE Int. Conf. on Multimedia and Expo*, TA2-05 (2000).
- 154) 興梠正克，蔵田武志，坂上勝彦，村岡洋一：入力映像とパノラマ画像の射影変換を用いた位置合わせパラメータの高速推定手法—パノラマベースド注釈提示手法の拡張として，電子情報通信学会技術研究報告，PRMU2000-153 (2001).
- 155) Nayar, S.K. and Boulton, T.E.: Omnidirectional VSAM System: PI Report, *Proc. DARPA Image Understanding Workshop*, Vol.1, pp.55-61 (1997).
- 156) Onoe, Y., Yokoya, Y., Yamazawa, K. and Takemura, H.: Visual Surveillance and Monitoring System Using an Omnidirectional Video Camera, *Proc. 14th IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.I, pp.588-592 (1998).
- 157) Miki, R., Yokoya, N., Yamazawa, K. and Takemura, H.: A Real-time Video Surveillance and Monitoring System Using Multiple Omnidirectional Video Cameras, *Proc. 4th Asian Conf. on Computer Vision*, Vol.I, pp.528-534 (2000).
- 158) Ng, K.C., Ishiguro, H., Trivedi, M. and Sogo, T.: Monitoring Dynamically Changing Environments by Ubiquitous Vision System, *Proc. Workshop on Visual Surveillance*, pp.67-73 (1999).
- 159) Sogo, T. and Ishiguro, H.: Real-time Target Localization and Tracking by N-ocular Stereo, *Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pp.153-160 (2000).
- 160) 十河卓司，石黒 浩，モーハン M.トリベディ：複数の全方位視覚センサによる実時間人間追跡システム，電子情報通信学会論文誌 (D-II)，Vol.J83-D-II, No.12, pp.2567-2577 (2000).
- 161) 寺沢征彦，山澤一誠，竹村治雄，横矢直和：複数の全方位画像センサを用いた遠隔監視システムにおける複数移動物体の存在領域推定，電子情報通信学会技術研究報告，PRMU2000-195 (2001).
- 162) Huang, Q., Cui, Y., Samarasekera, S. and Greiffenhagen, M.: Auto Cameraman via Collaborative Sensing Agents, *Proc. 3rd Asian Conf. on Computer Vision*, Vol.I, pp.418-425 (1998).
- 163) Gutchess, D., Jain, A.K. and Chen, S.W.: Automatic Surveillance Using Omnidirectional and Active Cameras, *Proc. 4th Asian Conf. on Computer Vision*, Vol.I, pp.228-233 (2000).

(平成 13 年 9 月 11 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受賞。工学博士。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。



横矢 直和(正会員)

1974年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1979年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年通産省電子技術総合研究所(現、産業技術総合研究所)入所。1986~1987年カナダ・マギル大学知能機械研究センター客員教授。1993年奈良先端科学技術大学院大学情報科学センター教授。現在、同大学情報科学研究科教授、情報科学センター長(併任)。画像処理、コンピュータビジョン、複合現実などの研究に従事。平成元年度情報処理学会論文賞受賞。工学博士。IEEE, 電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, 画像電子学会, 人工知能学会, 日本認知科学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。
