

知能作業ロボットのための非等方性全方位視覚

近藤 一晃^{†a)} 八木 康史[†] 谷内田正彦^{††}

Non-isotropic Omnidirectional Imaging System for an Autonomous Mobile Robot

Kazuaki KONDO^{†a)}, Yasushi YAGI[†], and Masahiko YACHIDA^{††}

あらまし 凸型ミラーを用いて自己の周囲 360° 環境を一度に撮像する「全方位視覚」についての研究が数多く行われ、様々な用途に応用されている。これらの全方位視覚は、鉛直軸周りに回転させた回転体ミラーと、鉛直上向きに設置したカメラからなる。このため方位方向に等しい性質をもち、どの方位方向においても観測密度は等しい。しかし、移動ロボットの視覚として用いる場合、自己の運動軸上に現れる障害物の発見や回避が重要であるため、進行軸付近の密な観測が必要とされる場合が多い。そこで本論文では、知能作業ロボットに特化した、方位方向により観測密度が変化する「非等方性全方位視覚」を提案する。

キーワード 知能作業ロボット, 全方位視覚, 大局視と局所視, 解像度分布

1. ま え が き

ここ数年において、自己の周囲 360° を観測する全方位視覚が様々な提案されており、数多くの用途に適用されてきた。全方位の観測を行う手法としては、通常のカメラを回転させる手法 [1]、複数台のカメラを用いる手法 [2]、魚眼レンズなどの特殊レンズを使用する手法、凸型ミラーを利用する手法 [3]~[5] などが提案されている。中でもカメラの光軸上に凸型ミラーを配置した全方位視覚は、自己の周囲をシームレスに実時間で観測できることから、移動ロボットのナビゲーションや人間とのインタラクションに用いられてきた。これは移動ロボットのナビゲーションに必要とされている環境地図作成・自己位置推定・軌道計画・障害物回避などにおいては詳細な解析よりも実時間に即した高速な理解・反応が求められるからである。カメラを回転させる手法ではこのような実時間性が実現できない。また複数台のカメラを用いた手法ではシステムの大きさや重量が移動ロボットに搭載する上で問題となってしまう。凸型ミラーを用いた全方位視覚は 1 台のカメ

ラと一つのミラーから構成されているため、コンパクトな系に収まるという利点も併せ持つ。

全方位視覚は 360° の視野をもつことから、オプティカルフローの周期性や動きの無限遠点の関係を利用した精度の高い自己運動推定手法が提案されている [9]。また勝屋らはシーンにおける垂直エッジが入力画像上で放射状の直線として現れることを利用して、自己位置と環境マップの同時推定を行っている [13]。中村らは床面の直交座標画像を画像処理を行うことなく直接得る全方位視覚を提案し、二次元平面地図作成に用いている [8]。同様に Benosman らはシリンドラ状の双曲面ミラーを用いた全方位視覚により環境地図を作成していた [11]。また Bonarini らは、複数台のロボットが混在する環境としてロボカップサッカーを想定し、その中で対象物を高速に追跡する手法を提案した [7]。更に縦方向に一樣なパノラマ画像を得るために、緯度方向の角度分解能が一定となる全方位視覚が Conroy らによって提案されている [6]。しかしこれらの視覚系や手法は単一のタスクを実現してはいるが、複数のタスクが必要とされる目的には不適切である。

一般的に知能ロボットに必要なタスクは「目的地へ向かうこと」「作業を行うこと」の二つに大別される。目的地へ向かうこと、すなわちナビゲーションには自己の周囲すべての実時間における観測と高速なレスポンスが求められることは前述のとおりである。それに対し、興味物体の発見・認識・物体の操作などの作業

[†] 大阪大学産業科学研究所, 茨木市
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Ibaraki-shi, 567-0047 Japan

^{††} 大阪大学大学院基礎工学研究科, 豊中市
Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka-shi, 560-8531 Japan

a) E-mail: kondo@am.sanken.osaka-u.ac.jp

には詳細で密な情報が必要とされる場合が多い．知能ロボットではこのような大局視と局所視が同時に満たされていることが望ましいが，従来の全方位視覚では自己の周囲すべてを通常の撮像素子内に収めているため解像度が低く局所視が実現されていない．我々の研究チームでは，単一のカメラで大局視である全方位視覚と局所視を融合した複合視覚系（MISS）を過去に提案している [10]．MISS は凸型ミラーを用いた全方位視覚部分と平板ミラーを用いた前方ステレオ部分によって構成されており，各々が周囲の観測と前方の観測を行うことで大局視と局所視を両立させている．しかし，両視覚の視野は全方位視の一部となり，両視野は，別の位置に投影されるため，両視野間で対応関係を計算する必要があった．一方，大局視と局所視を分離してしまうのではなく連続的な分解能変化で両視覚の融合を実現しようとする試みの一つが中心窩の考え方である．國吉らは人間の眼球を模倣し，中心部分が周囲部分よりも高分解能となる撮像系 ESXHeR を特殊レンズにより実現した [12]．ESXHeR は分解能分布が入力画像上で滑らかに変化するため，注視や注目部分の追跡を容易に行うことができるという利点をもつ．ただし，受光系から見てせいぜい半球状の視野しか得られず，ロボットの位置決めなどナビゲーションの目的には，前述の全方位視覚には劣ると思われる．

そこで我々は，全方位視覚に対して滑らかに変化する分解能分布を与え連続的に大局視と局所視を融合させた新しい全方位視覚を提案する．知能ロボットのナビゲーションを考えた場合，一般的にロボットの移動方向は前進がほとんどであり，シーンやその他の動物体との相対運動を考慮すると前方及び後方に回避すべき障害物が現れやすい傾向がある．更にロボットによる作業を考えた場合，認識や作業を行いたい興味物体は前方にある場合がほとんどであり，人によるテレオペレーションに対しても前方高解像な画像提示が有効である．逆に進行軸と直交するような方位に関しては，あまり詳細な観測は必要ない．すなわち，全方位視覚において局所的に高解像とすべき部分は進行軸付近であるといえる．本論文では従来活用されてきた回転対称体からなる凸型ミラーを変形させることで，低解像から高解像への連続的な分布変化を入力画像に与える非等方性全方位視覚を提案する．提案する全方位視覚は，従来どおり，周囲 360° の視野領域を連続して観測できることに加え，進行軸方向の解像度が高いという性質をもつ．

2. 非等方性全方位視覚

2.1 設計概念

本論で扱う全方位視覚は，曲面を下向きにして配置された凸型ミラーとそれを撮像する上向きカメラで構成される．従来提案されてきた全方位視覚では，ミラー曲面がカメラ光軸を軸とした回転対称であり，同一方位に位置する点は入力画像上で画像中心から放射状に伸びる直線として射影される．すなわち方位に関して均一な分解能をもつ等方な性質であった（図 1）．

これに対し我々は非等方な光学系を設計することで分解能の分布に偏りをもたせた．非等方な性質を実現する単純なアイデアの一つとして，ミラー形状を水平方向に引き伸ばすことが考えられる．引き伸ばしを行うことで，円形であったミラーの水平断面は楕円形となり，入力画像に非等方な角度分解能の性質が生まれる．更に一般的なカメラは撮像素子が $4:3$ や $16:9$ などの長方形の形に配置されているため，楕円形にすることで入力画像面を効率良く使用することもできる．しかし，このようなミラー歪曲手法には問題点が二つ存在する．(1) シーンの水平断面が観測できない．移動ロボットにとって，シーンの水平断面を観測することは非常に重要で，様々な手法に用いられてきた．なぜなら，ロボットや対象物が水平二次元運動をする場合，定められた水平断面上の点は同じ水平断面上のみを動くという特徴をもつからである（図 2）．全方位視覚において水平面は円形に射影されるため，シーン中の水平動物体の運動は入力画像上の円上のみに現れ，これは画像処理や種々の推定を行う上で非常に有効である．これまでに提案されてきた等方な全方位視覚では，すべての水平入射光線は方位によらず同一の高度であった．だが，非等方なミラーを用いた場合，方位によってミラー曲率が変化しているため水平入射光線

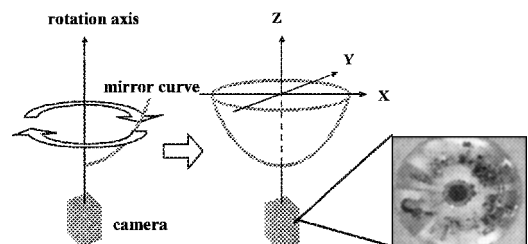


図 1 上向きカメラと凸型ミラーを用いた従来の全方位視覚（左）とその入力画像例（右）

Fig. 1 Omnidirectional imaging so far developed.

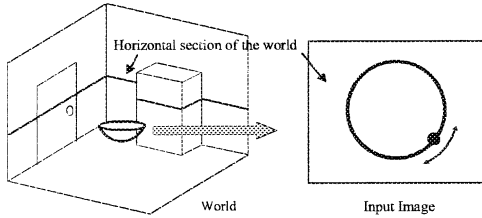


図 2 シーンの水平断面の射影
Fig. 2 Horizontal section of the world.

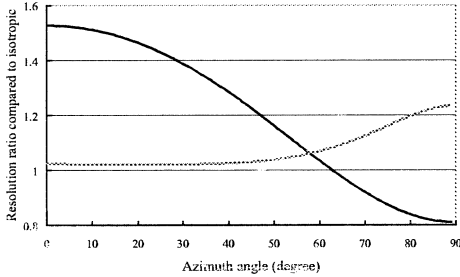


図 3 単純に引き伸ばした凸型ミラーを用いた場合の経度・緯度方向の分解能分布例
Fig. 3 Resolution distribution of a simple stretched mirror as a ratio to isotropic resolution.

は違った高度で受光され、結果としてシーンの水平断面が観測できない。(2) 分解能分布の偏りが少ない。ミラー形状を引き伸ばした全方位視覚は方位方向に関して異なった分解能分布をもつが、経度方向と緯度方向の分解能は図 3 に示されるように逆の分布となる。これは総合して空間分解能と考えた場合、方位方向による分布の偏りが小さいことを表す。すなわち進行軸付近は他の部分に比べあまり高分解能になってはならず局所視に関してあまり効率的でない。

そこで我々はミラーの焦点位置を分布させることで自由度を増やしシーンの水平断面が観測できるように設計している。単純なミラー形状の引き伸ばしでは、各方位におけるミラー曲面の焦点位置はカメラ光軸上を上下していた。提案ミラーではそれら焦点位置をミラー曲面が定義されている放射断面上 (t - Z 平面) の任意の場所とすることで自由度を増やしている (図 4)。また焦点位置を分布させることで空間分解能の偏りが少ないことも同時に解決される (詳しくは図 7 を参照)。本論では上記のミラー引き伸ばしと焦点位置分布の非等方概念を放物面ミラーを用いた全方位視覚に適用する。放物面ミラーの全方位視覚を焦点位置の分布により自由度を増やすと視覚系は以下の式で表される。

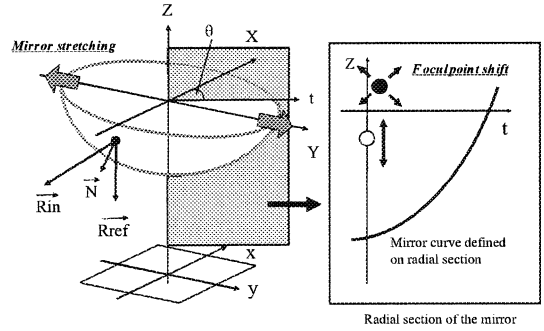


図 4 提案する非等方性全方位視覚 (左) とミラー放射断面における焦点位置分布 (右)
Fig. 4 Geometry of the proposed non-isotropic mirror system.

$$\begin{cases} X = t \cos \theta \\ Y = t \sin \theta \\ Z = At^2 + Bt + C \end{cases} \quad \begin{cases} x = X \\ y = Y \end{cases} \quad (1)$$

これらはカメラ光軸を Z 軸とした XYZ 座標上で定義されたミラー形状 (左) とカメラ (xy) ミラー (XYZ) 間の直交射影 (右) を示している。 t, θ は径と方位角を表す媒介変数、 A, B, C はミラー曲面を決定する放物係数である。非等方なミラーとするために、水平軸に関するミラー引き伸ばしとシーンの水平断面観測の条件下で式 (1) を解き、 A, B, C を決定する。

(条件 1: 水平軸に関するミラー引き伸ばし)

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 1 \quad \text{at } Z = 0 \quad (2)$$

a, b は $Z = 0$ におけるミラーの水平断面楕円の係数を示しており、引き伸ばし量を決定する。

(条件 2: シーンの水平断面観測)

$$\begin{aligned} \vec{R}_{in} &= \vec{R}_{ref} - 2 \frac{\vec{N} \cdot \vec{R}_{ref}}{|\vec{N}|^2} \cdot \vec{N} \\ &= [any, any, 0]^t \quad \text{at } Z = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$\vec{R}_{in}, \vec{R}_{ref}, \vec{N}$ は各々、視覚系への入射光線、ミラーによる反射及び反射点でのミラー法線を示す。

受光系は直交射影であるから $\vec{R}_{ref} = [0, 0, -1]^t$ である。シーンの水平断面を観測するには定められた高さ ($Z = 0$) における \vec{R}_{in} の z 項が 0 となる必要がある。これらの条件化で式 (1) を解くことで、最終的に非等方な性質をもつ以下のミラー形状式を得る。

$$\begin{cases} X = t \cos \theta \\ Y = t \sin \theta \\ Z = \frac{2D(\theta)-a}{2L(\theta)^2} t^2 - \frac{D(\theta)-a}{L(\theta)} t - \frac{a}{2} \\ L(\theta) = ab \sqrt{\frac{\tan^2 \theta + 1}{a^2 \tan^2 \theta + b^2}} \\ D(\theta) = ab \sqrt{\frac{a^2 \tan^2 \theta + b^2}{a^4 \tan^2 \theta + b^4}} \end{cases} \quad (4)$$

$\theta = 0, \pi$ や $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ の場合、すなわち直行する X 軸上と Y 軸上でミラー形状は式 (5) に示すように曲率の違った放物線となるため、この提案ミラーを Horizontal fixed viewpoint Biconical Paraboloidal mirror — HBP ミラーと呼ぶことにする。

$$Z = \begin{cases} \frac{1}{2a} X^2 - \frac{a}{2} & \theta = 0, \pi \\ \frac{2b-a}{2b^2} Y^2 \mp \frac{b-a}{b} Y - \frac{a}{2} & \theta = \pm \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式 (4) を XYZ の直交座標系で書き表し、それらを用いて入力画像上の点 (x, y) と世界座標の点 $W(W_x, W_y, W_z)$ の関係を記述すると以下の式となる。ただし、式中 s は世界座標の点のミラーからの奥行を示す。

$$\begin{cases} Z(X, Y) = \frac{2D(X, Y)-a}{2L(X, Y)^2} (X^2 + Y^2) - \frac{D(X, Y)-a}{L(X, Y)} \sqrt{X^2 + Y^2} - \frac{a}{2} \\ L(X, Y) = ab \sqrt{\frac{X^2 + Y^2}{b^2 X^2 + a^2 Y^2}} \\ D(X, Y) = ab \sqrt{\frac{b^2 X^2 + a^2 Y^2}{b^4 X^2 + a^4 Y^2}} \end{cases} \quad (6)$$

$$W = \begin{bmatrix} x \\ y \\ Z(x, y) \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} \frac{2 \frac{\partial Z}{\partial X}}{(\frac{\partial Z}{\partial X})^2 + (\frac{\partial Z}{\partial Y})^2 + 1} \\ \frac{2 \frac{\partial Z}{\partial Y}}{(\frac{\partial Z}{\partial X})^2 + (\frac{\partial Z}{\partial Y})^2 + 1} \\ -\frac{(\frac{\partial Z}{\partial X})^2 - (\frac{\partial Z}{\partial Y})^2 + 1}{(\frac{\partial Z}{\partial X})^2 + (\frac{\partial Z}{\partial Y})^2 + 1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 試作 HBP ミラー系

我々はロボットへの搭載と収差などの光学的な特性の影響を少なくすることを考慮し、ミラー設計係数 $a = 34 \text{ mm}$, $b = 42 \text{ mm}$ を用い式 (4) に基づいて HBP ミラーを試作した。しかし、 $68 \text{ mm} \times 84 \text{ mm}$ の直交射影系は製作が困難であり現実的でない。そこで平行光線を 1 点に集光させる特性をもつ放物面ミラーを利用し、反射光学系で通常カメラによる直交射影を満たす系を設計した。図 5 に試作 HBP ミラー系の概観図、図 6 にその入力画像例を示す。入力画像例では、像面での分解能・直線性・ひずみなどの幾何学的な性質が視覚的に実感できるように $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ の格子パターンを視覚系から 400 mm 離れた位置に置いて撮像を行った。肉眼で確認する限りではあるが、ぼけ

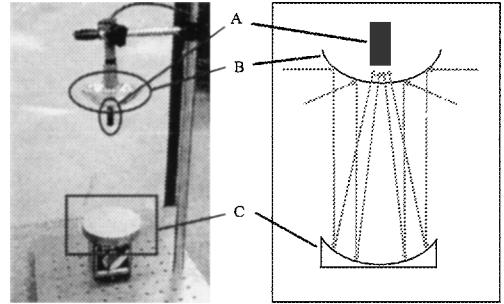


図 5 試作 HBP ミラー系の概観図 (左) と入射光線のレイトレーモデル (右). (A) 通常透視投影カメラ (B) 視覚 HBP ミラー (C) 平行線を一点に集光させるための放物面ミラー

Fig. 5 Overview of our prototype HBP mirror system. (Left) real overview. (Right) ray trace model.

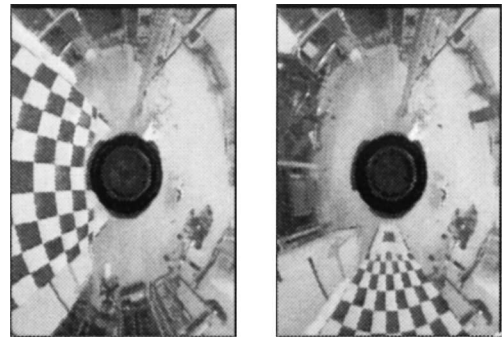


図 6 試作 HBP ミラー系の入力画像例 (左) ミラー短径方位の格子パターン (右) ミラー長径方位
Fig. 6 Example of input images with HBP mirror.

や収差などは十分実用可能であることが見て取れる。シーンでの垂直エッジ (カメラ光軸に平行な直線) は多少ひずんで射影されているが、局所的に見ればほぼ直線とみなしてよい程度である。また短径方向に置いたテストパターンが長径方向に置いたテストパターンよりも大きく射影されていることから、方位方向による解像度の違いが実現できている。

図 7 にシーンの水平断面上での分解能分布をシミュレーション及び実入力画像から算出した結果を示す。分解能の値は図 3 と同様に等方な全方位視覚に対する比で表している。提案した HBP ミラー系は、単純なミラー引き延ばし (図 3) では増減が逆となっていた経度・緯度方向の分解能が同様の変化となっているため、空間分解能において大きな偏りをもつ分布が実現できた。90 degree 付近で HBP ミラー系の解像度が等方な全方位視覚系を下回っているが、移動ロボットの

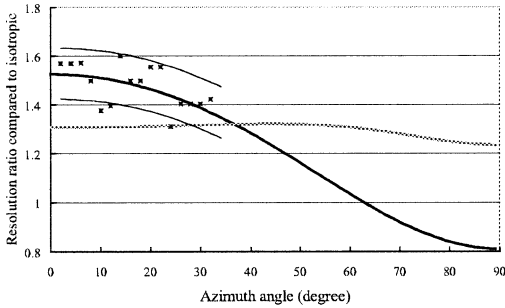


図 7 ミラー係数 $a = 34 \text{ mm}$, $b = 42 \text{ mm}$ とした場合の HBP ミラー系の分解能分布. 太黒線・太灰線はそれぞれシミュレーションによる経度方向・緯度方向の解像度理論値を示す. 細黒線は CCD 画像面素子の大きさによる経度方向解像度の量子化誤差, プロットは試作 HBP ミラーによる実測値

Fig. 7 Resolution distribution with an HBP mirror as a ratio to isotropic resolution.

ナビゲーションではこの方位の観測はそれほど重要ではない. 実入力画像から算出した分解能分布は理論値 \pm 量子化誤差内にほぼ収まっており, 試作機においてもシミュレーションと同様の分布が確認できた.

3. 障害物検知と衝突時間推定

二つの画像間における同一点の動きとして定義されるオプティカルフローは, 移動ロボットに必要とされる, 自己運動量推定 [9], 障害物回避, 奥行推定 [14] など様々なタスクに応用される. しかし, ロボットの進行軸近くに現れる動きの無限遠点付近では, オプティカルフローは非常に小さくなってしまい, 種々の推定に大きな誤差を生じさせてしまう. 我々が提案する HBP ミラー系は直交する軸間に偏りのある分解能分布を与え, 高分解能な軸をロボットの進行軸に合わせることでこれらの推定精度や安定性の向上を目指した. 中でも障害物の発見・回避は移動ロボットの達成すべき重要なタスクである. そこで障害物発見と衝突時間推定の精度向上・安定性について, 等方な全方位視覚系と比較評価を行った. シミュレーションでは, 長さ-画素間の変換係数を $p = 100 \text{ pixel/mm}$ とし半径 35 mm の等方な全方位視覚と $a = 35 \text{ mm}$, $b = 50 \text{ mm}$ の HBP ミラー系を用いた. また実機による実験では 2.2 で試作した HBP ミラー系を使用した. 評価に用いた衝突モデルは図 8 のとおりである. 高解像度方位をロボットの進行軸方位と一致させるため, 非等方全方位視覚のミラー定義座標系における X 軸を图中 Moving path に対応させてロボットに搭載

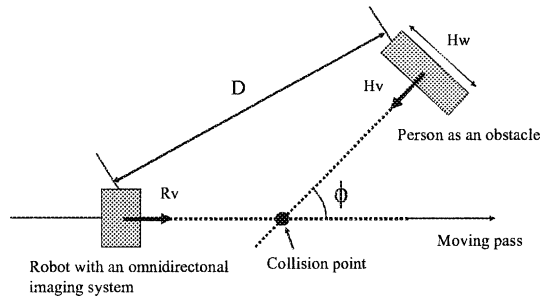


図 8 全方位視覚系を搭載した移動ロボットと接近物体との衝突モデル

Fig. 8 Collision between an omnidirectional imaging system mounted on a mobile robot and an approaching object.

する. 各パラメータは一般的な室内環境を考慮して以下のように設定した. HBP ミラー系は $R_v = 80 \text{ cm/s}$ の速度で前進しており, 幅 $H_w = 70 \text{ cm}$ の板状で速度 $H_v = 150 \text{ cm/s}$ の障害物が直進軌道に現れる状況である. 観測フレームレートは移動ロボットの 실시간制御を考慮して 10 fps とした.

3.1 フロー湧き出し点の検出による障害物発見

自己に接近する物体のオプティカルフローは, 接近方向から湧き出すように観測されるため, その湧き出し点を発見することで, 接近物体, すなわち障害物を発見することができる. しかし, 湧き出し点付近でのオプティカルフローはサイズが小さく検出が困難である. ロボットは直進している場合がほとんどであるため, 湧き出し点は前方及び後方にすなわち進行軸付近に出現することが多い. それゆえ進行軸上の障害物は特に発見が困難で自己と衝突する可能性が高い. 図 9 に正面衝突物体 ($\phi = 0$) のオプティカルフロー感度を示す. 同じ奥行距離において, HBP ミラー系では等方な全方位視覚系よりも大きなフローが得られるため, 接近する物体を安定に検出できる. また同じフローの大きさが観測される場合, HBP ミラー系はより遠くまで検知でき障害物の早期発見が可能である. 試作機を用いた実験でも同様の結果が得られた.

3.2 全方位から接近する物体の検出

HBP ミラー系は全方位視覚系であるから, 正面だけでなく全方位にわたっての観測が可能である. ϕ を変化させ, 全方位から障害物が接近する場合についても評価を行った. 評価では障害物発見とするフローのしきい値を 2.0 pixel と定め, これよりも大きなフローが観測されたときに障害物発見とした.

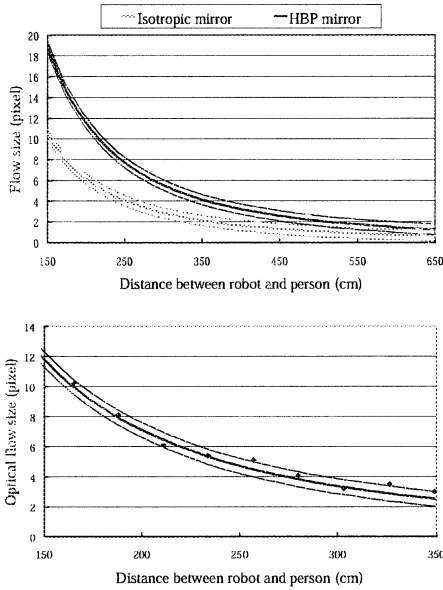


図9 正面衝突 ($\phi = 0$) する物体のフロー観測感度 (上) シミュレーション (下) 試作 HBP ミラー
Fig.9 Optical flow size of an object approaching from a forward angle $\phi = 0$.

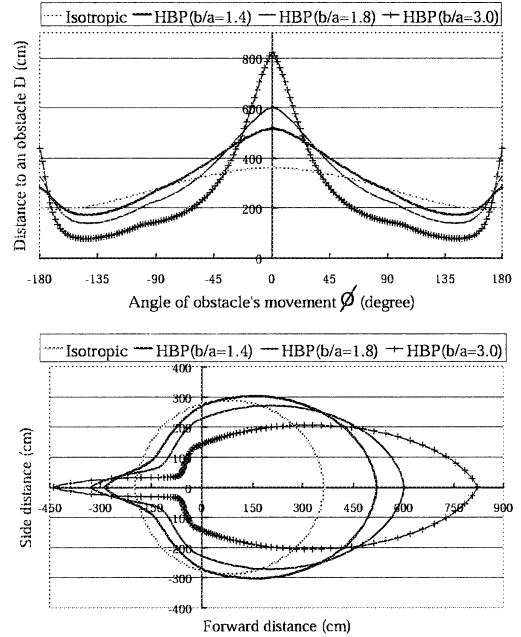


図10 衝突角 ϕ に対する物体検出距離 (D) (上) 直交座標表示 (下) 極座標表示
Fig.10 Obstacle detection distance D relative to collision angle ϕ .

障害物の発見距離は HBP ミラーの楕円比 $K = b/a$ に依存するため、これまでに用いてきた $a = 35 \text{ mm}$, $b = 50 \text{ mm}$ ($K = 1.4$) に加え, $K = 1.8, 3.0$ についても行った. なお, 比較できるようにすべての場合で楕円周囲長は一定に保ち正規化した上で評価した. 衝突進入角 ϕ に対して障害物が発見されたときの相対距離 D を図 10 に示す. HBP ミラーを用いることで, 真正面だけでなく $\phi = 0, \pi$ を中心とした付近の衝突進入角もより長い距離で発見できる. これは正面衝突や追突など日常において比較的頻繁に起こる衝突を未然に防ぐ上で有利な点といえる. 特に $K = 1.4$ の HBP ミラー系では, $-\pi/2 < \phi < \pi/2$ の衝突進入角で等方な全方位を上回っている. このため十字路などにおける出会い頭衝突にも有効である. また $K = 1.8, 3.0$ のような楕円比では, 正面や後方からの衝突に強い反面, 側方からの衝突には弱い. よって配管やダクトのように側方部分に障害物が現れにくい環境に適している. $\phi = \pm 3/4\pi$ 付近での発見距離低下は, 解像度分布の部分で述べた「進行軸に直交する軸付近での解像度低下」が原因である. 視覚系の左右方向でなく斜め後方で低下しているのは, 視覚系が前進しているためで, ミラー側方部分で観測されるのは斜め後方から幅寄せを行ってくる障害物だからである. 幅寄せ衝突の危険

性がある環境下では $K = 1.4$ などのパラメータ設定を行えば, この部分の発見距離をさほど低下させずに進行軸方位での障害物早期発見が可能である. 前述のような配管・ダクト内での利用ではそもそも幅寄せする障害物は存在しないため, 視覚系の斜め後方方位での発見距離低下は問題ないと考える.

3.3 衝突時間の推定

障害物を発見した後は, 障害物までどの程度の距離なのかを知り, それをもとに回避行動の計画が立てられる場合が多い. カメラで撮像した画像は対象の方位を示すのみで距離情報はもたないため, 既知の長さが無い限り障害物までの距離を推定するのは不可能である. しかし, 奥行を相対速度で割った「時間」は距離情報を含まないため推定することが可能であり, 衝突時間と呼ばれている. 衝突時間はオプティカルフローから推定でき, その精度はフローの観測精度に依存する. 提案する HBP ミラー系は進行軸付近を高解像とすることで, 障害物の発見と同時に衝突時間の推定精度の向上も実現した.

衝突時間を推定する手法は Tistarell らにより提案されている [14] が, オプティカルフローを連続関数と

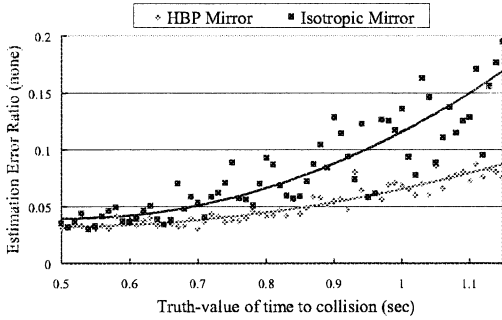


図 11 シミュレーションによる衝突時間推定結果．横軸は実衝突時間，縦軸は推定衝突時間の誤差を示す
Fig. 11 Results of time-to-collision estimation.

して扱っているため移動ロボットなどの離散制御には適さない．そのため，3 フレームにわたって対象物が相対的に等速直線運動したと仮定して，離散的に衝突時間を推定した．図 11 に 3.1 と同様の衝突条件で，正面から接近する障害物 ($\phi = 0$) の衝突時間推定精度を示す．提案 HBP ミラー系で推定誤差の平均が低減されており，更にばらつきも抑えられているため，推定の精度及び推定の安定性の両方が改善されている．

4. 多視点分布問題

移動ロボットは目的地への到達だけではなく目的地で作業を行う必要があり，作業対象物体の認識は必要不可欠である．人物認識，文字認識等のタスクなども要求される場合も多く，高精度な推定のためには分解能の高い画像が好ましい．また，高画質画像は提示系において違和感ない詳細なシーンをユーザに与えることができる．ほとんどの場合，認識したい物体はロボットの前方に現れ，また提示においてもユーザの興味対象は進行方向のシーンである．このため進行軸方向を高分解能とした HBP ミラー系はこれら認識・提示に対しても有効に働く．

一般に対象物の奥行きは未知であるため，全方位視覚を用いた画像認識では入力画像を奥行固定の面に投影した画像を用いることが多い．このとき，環境からの入射光線が 1 点に集光する単一視点系であれば，透視投影系が満たされるため実物体と投影画像の間では奥行によらずスケール以外の幾何関係が保障される (図 12)．そのため従来の全方位視覚では単一視点系を実現していた．一方，我々の提案する HBP ミラー系は前方高解像とするために多視点系としており，投影画像において実物体との間にひずみが生じる．この

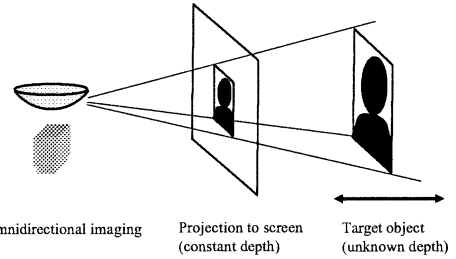


図 12 全方位視覚の入力画像は同心円状にひずんでいるため透視投影画像や円筒画像に変換して利用される場合が多い．対象物の奥行きは未知であるため投影面は固定された奥行に設定される
Fig. 12 Projection of an input image onto a flat plane for image processing.

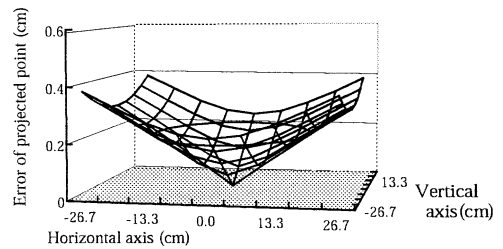


図 13 投影点ずれの絶対量評価．図における底面は投影面を示し，縦軸がずれ量を表す．
Fig. 13 Misalignment of the projection point.

ひずみは画像をテクスチャとして利用する進行方向軸つまり高分解能とした方位で問題となるため，以下の実験を通して提案 HBP ミラーの高分解能方位に射影される対象物に関してひずみの影響を評価した．実験に用いた等方な全方位視覚・シミュレーション値・試作 HBP ミラー系は 3. のとおりである．

4.1 ひずみの絶対量評価

ひずみの量を定量的に扱うために，ひずみなしの投影点位置に対して提案 HBP ミラー系では各点がどれだけ離れた位置に投影されるかを「ずれ」と定義し，その値をもってひずみの評価量とした．ずれの計算では，評価対象の提案 HBP ミラー系及びひずみのない従来の等方性全方位系各々で，奥行 150 cm の対象物を撮像，その入力画像を奥行 100 cm の平面に投影した上で 2 系での対応点間距離を求めている．撮像対象物の奥行 150 cm は一般的な興味物体の奥行距離を想定して決定した．図 13 に算出したずれの分布を示す．投影中心点ではずれは現れないが，中心から離れるにつれすり鉢状にずれが現れる．しかし，物体認識の大きさとしては十分に大きい幅であるおよそ 50 cm の物体に対してわずか 0.4 cm 程度のずれに収まっている．

このずれの大きさを入力画像面上で考えれば、ほとんどの場合 CCD 分解能よりも小さいので、HBP ミラー系によるひずみの影響はほぼ無視できると考えられる。このようにずれ量が無視できるほど小さいのは対象物の奥行きに対して多視点の分布が小さな領域に収まっているからと考えられ、それゆえ光量の問題から視覚系を大きく設計した場合や近接した対象物の認識ではずれが増加すると思われる。しかし、図 6 に示したような集光や光量に関してほぼ問題ない大きさのミラーを用いても、上記で述べた無視できるほどのずれにとどまっているため実用上問題ないひずみと考える。

4.2 物体認識への影響

画像認識においては、各々の点位置のずれよりも全体的にひずみやずれのない投影画像を得ることが重要である場合が多い。総合的なずれの認識への影響を評価するために、投影面奥行 100 cm 固定し格子パターンの奥行を 100 cm から 300 cm の区間で変化させ、対象までの奥行の違いによる物体認識精度の評価を行った。物体認識の精度はあらかじめ用意したテンプレート画像と、等方全方位視覚系及び HBP ミラー系で得られた入力画像を投影面に射影した画像との間で相関値をとることで評価した。このときテンプレート画像は固定サイズであるのに対し、投影面上の画像は奥行に応じて大きさが変化する。大きさの異なる二つの画像間の相関値を計算するため、実験ではテンプレート画像を十分に大きく作成し、投影面上の画像をその大きさに拡大することで二つの画像サイズをそろえた。画像の拡大手法は単純な線形補間を用いている。図 14 に相関値計算の結果を示す。一般的な認識を行う奥行物体を対象とした場合、HBP ミラー系での投影画像が等方全方位視覚での投影画像より大きな相関値を返す結果となった。投影点のずれをもつ HBP ミラー系がより良い相関値となったのは、ずれだけでなく画像分解能も相関に影響を与えるからと思われる。つまり HBP ミラー系は多視点系であるためずれを生じるが、その反面、高分解能であることから対象物の詳細な画像を得ることができ、高い相関値を示したと考える。これは、遠方になると認識対象の射影サイズが小さくなるため実質的なひずみの影響が現れず、解像度の差のみが相関値に影響を与えるようになるからである。したがって、提案する HBP ミラー系は、投影画像にひずみをもつもののその影響は小さく、むしろ高解像化したことで遠くの対象物まで精度良く認識できるようになり、物体認識にとっては適している

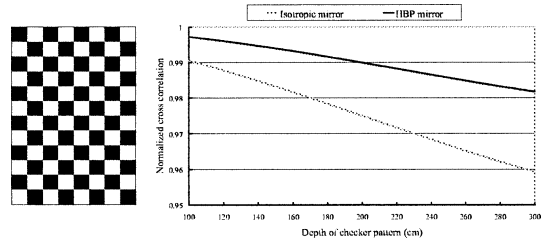


図 14 実験に使用した格子パターン（左）と投影画像と対象物との正規化相互相関値（右）

Fig. 14 Correlation between projected checker image and a template checker.

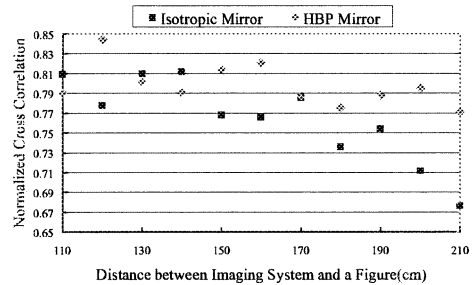


図 15 試作 HBP ミラー系と 20 cm × 23 cm のマスコット人形を対象物とした場合の相関値変化

Fig. 15 Results with the prototype HBP mirror and a toy doll.

いえる。図 15 に試作 HBP ミラーと 20 cm × 22 cm のマスコットキャラクターを用いた場合の実相関値を示す。ミラーパラメータや対象物の大きさが違うためシミュレーションとは違った相関値となっているが、同様の特性は得られている。

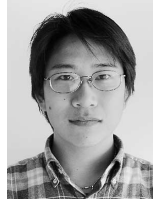
5. む す び

本論文では、知能ロボットの移動・作業という位置決めなどの大局的な情報が有効なタスクから、物体認識や作業などの進行軸方向における高い分解能が望ましいタスクまで、幅広い用途に有用なセンサとして非等方性全方位視覚を提案しそれらの基本特性の解析を行った。提案視覚系は、等方全方位視覚系を水平軸方向に扁平させたような形状をしているが、等方全方位視覚を対象としていた手法も適用可能で、その上で前方・後方の障害物の早期安定発見、衝突時間推定精度の向上を実現している。また単一視点を失っているものの、ミラー系や認識対象物体の実用的な大きさを想定した場合、発生するひずみ量は無視できるほど小さく、むしろ高解像であるためにより遠い対象物の認識を高精度で行えることが確認できた。

文 献

- [1] J.Y. Zheng and S. Tuji, "Panoramic representation of scenes for route understanding," Proc. IEEE ICRA, pp.161-167, 1990.
- [2] T. Kawanishi, K. Yamazawa, H. Iwasa, H. Takemura, and N. Yokoya, "Generation of high-resolution stereo panoramic images by omnidirectional imaging sensor using hexagonal pyramidal mirrors," Proc. ICPR, pp.485-489, 1998.
- [3] Y. Yagi and S. Kawato, "Panorama scene analysis with conic projection," Proc. IEEE Int. Workshop on Intelligent Robotics and Systems, pp.181-187, 1990.
- [4] S.K. Nayer, "Catadioptric omnidirectional camera," Proc. CVPR, pp.482-488, 1997.
- [5] 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦, "移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサ HyperOmni Vision の提案," 信学論 (D-II), vol. J79-D-II, no.5, pp.698-707, May 1996.
- [6] T.L. Conroy and J.B. Moore, "Resolution invariant surfaces for panoramic vision systems," Proc. IEEE ICCV, vol.1, pp.392-397, 1999.
- [7] A. Bonarini, P. Aliverti, and M. Lucioni, "Omnidirectional vision system for fast tracking for mobile robots," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.49, no.3, pp.509-512, 2000.
- [8] T. Nakamura and H. Ishiguro, "Automatic 2D map construction using a special catadioptric sensor," Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robotics and Systems, pp.196-201, Oct. 2002.
- [9] J. Gluckman and S.K. Nayer, "Ego-motion and omnidirectional cameras," Proc. ICCV, pp.999-1005, 1998.
- [10] Y. Yagi, H. Okumura, and M. Yachida, "Multiple visual sensing system for mobile robot," Proc. IEEE ICRA, vol.2, pp.1679-1684, 1994.
- [11] R. Benosman, E. Deforas, and J. Devars, "A new catadioptric sensor for the panoramic vision of mobile robots," Proc. IEEE Workshop on OMNIVIS, pp.112-118, 2000.
- [12] Y. Kuniyoshi, N. Kita, K. Sugimoto, S. Nakamura, and T. Suehiro, "A foveated wide angle lenses for active vision," Proc. IEEE ICRA, pp.2982-2988, 1995.
- [13] Y. Yagi, K. Shouya, and M. Yachida, "Environmental map generation and ego-motion estimation in a dynamic environment for an omnidirectional image sensor," Proc. IEEE ICRA, pp.3493-3498, 2000.
- [14] M. Tistarelli and G. Snadini, "Direct estimation of time-to-impact from optic flow," Proc. IEEE, pp.226-233, 1991.

(平成 16 年 10 月 8 日受付, 17 年 2 月 7 日再受付)



近藤 一晃

2002 阪大・基礎工・システム科学卒 . 2004 同大大学院システム人間系専攻修士課程了 . 2005 現在, 同大大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻博士課程 . 全方位視覚, 知能ロボットに関する研究に従事 . 工修 .



八木 康史 (正員)

1983 阪大・基礎工・制御工学卒 . 1985 同大大学院修士課程了 . 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 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, 同大学院助教授を経て, 2003 より同大学産業科学研究所教授 . 1995~1996 英オックスフォード大学客員研究員, 2002 仏ピカルディー大学招聘助教授, 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 年度本会論文賞, 2003 ACM VRST2003 Honorable Mention Award, IEEE, 情報処理学会, システム制御情報学会, 日本ロボット学会各会員 . 博士 (工学) .



谷内田正彦 (正員)

1971 大阪大学大学院工学研究科修士課程了 . 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 同学部システム科学分野教授 . 1967~1968 デンマーク原子力研究所留学 . 1972~1973 米イリノイ大学にて Research Associate . 1980~1981 西独ハンブルグ大学 Research Fellow . 1982 ミネソタ大学 CDC Professor . 1996 年度本会論文賞, 1998 年度人工知能学会論文賞受賞, ロボット学会, 人工知能学会各会員 . 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) など . 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 . 工博 .