

ロボットナビゲーションのための非等方性全方位視覚

近藤 一晃[†] 八木 康史[†] 谷内田正彦^{††}

[†] 大阪大学産業科学研究所

^{††} 大阪大学大学院基礎工学研究科

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ており、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持ち、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得る場合、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。そこで本報告では、移動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ような「非等方な全方位視覚」を提案する。

キーワード 全方位視覚, 解像度分布, 障害物発見, 衝突時間推定

Non-isotropic Omnidirectional Imaging System for Navigating a Mobile Robot

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

[†] The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University.

^{††} Graduate School of Engineering Science, Osaka University.

Abstract A real-time omnidirectional imaging system which can acquire an omnidirectional field of view at video rate using convex mirror have been applied in a vareity of field. The imaging system consist of an isotropic convex mirror and vertically pointing camera toward the mirorr with its optical axis aligned with the mirror optical axis. Because of these optics, angular resolution is independent to an azimuth angle. But it is important for a mobile robot to find and avoid obstacles on its moving pass. We consider that the angular resolution along the moving direction of the robot needs higher resolution than that of lateral view. Therefore, in this papar, we propose a non-isotropic omnidirectional imaging system for navigating a mobile robot.

Key words Omnidirectional imaging system, Distribution of resolution, Discovering obstacles, Time-to-collision estimation

1. はじめに

凸型ミラーを用いて自己の周囲 360°を一度に撮像する全方位視覚系がこれまでに数多く提案されている [1] ~ [4]。これらの視覚系に使用されている凸型ミラーは、鉛直軸周りに回転させてできる回転体の形状をしている。このため、対象物体の方位と入力画像中での回転角が同一であるという性質を持ち、通常の正方格子状に分布する撮像素子を想定すると、方位に依らず分解能は一定となる（等方性）。

ところで、移動ロボットの視覚として全方位視覚を使用する場合、このような等方性は有利な特性なのであろうか。移動のための代表的なタスクは、障害物の発見・回避、自己運動ならびに自己位置の推定、作業場所での物体認識やランドマーク認

識である。自己運動や自己位置の推定では、360度の視野が得られることで、計測の安定性と精度が得られている。また、障害物回避においても、障害物はどの方角にでも存在し得るため、全周を観測できる方が望ましい。しかし、通常、ロボットの移動方向は前進がほとんどであり、その意味では全周を均等に観察するよりも、ロボットの進行軸上の方位分解能が高いセンサの方（以後、非等方と呼ぶ）が実用的と思われる。また、オプティカルフローの情報から自己運動を推定する問題では、全方位画像中の水平大円上に現れるオプティカルフローの周期性や動きの無限遠点 (FOE) の関係が利用されてきた [7] ~ [10]。これらの手法における自己運動の推定精度は、観測されるフローの信頼性に大きく依存する。一般にオプティカルフローの大きさが小さい場合、正確なフロー推定が困難であるため、フロー

サイズが小さくなってしまいう進行軸付近での解像度は高い方が望ましい。すなわち移動ロボットに対しては、自己の全周囲を観測でき、且つ進行方向軸付近に密な観測を行う「非等方な全方位視覚系」が適していると考えられる。

1つの等方な全方位視覚系を用いることとは違ったアプローチとしては、以下のような提案がこれまでになされている。Benemanらは前向き透視投影カメラの視野の一部に双曲線を焦点軸にそって並べたミラーを置くことで、前方の透視投影画像と後方の画像を同時に撮像している[5]。この手法では1つの入力画像で前方と後方を観測できる反面、前方視野が大きく制限されている。またミラーが水平でないため、方位によって俯角の違った観測になってしまっており、限られた範囲の観測のみにとどまっている。金春らは全方位視覚と前向き両眼カメラを組み合わせることで、人物の発見追跡を精度良く行っている[6]。定められた画素面積のなかに全周囲を収めるため、一般に全方位視覚の分解能は通常の透視投影カメラよりも低い。この手法では、周囲のおおまかな観測を全方位視覚で行い、付け加えて前向きカメラを使用することで前方の分解能を向上させている。全方位の観測と前方の密な観測を両立しているため、移動ロボットに対し適切と思われる反面、複数のカメラを組み合わせることは、カメラ間のキャリブレーション・同期・観測情報の統合などの問題を併せ持つ。

そこで我々は室内環境で二次元運動を行う移動ロボットを想定し、自己の全方位を観測でき、且つ進行軸付近に高解像な特性を単一の凸型ミラーで実現する全方位視覚系を提案する。提案する非等方な全方位視覚系は、視点を $Z=0$ の水平面内に固定している。また水平断面を楕円としたため X 軸と Y 軸方向に違った曲率を持つ。よって、水平固定視点双曲率放物面ミラー系(Horizontal fixed viewpoint Biconic Paraboloidal mirror system)HBPミラー系と名付け、評価実験によりその有効性を検証した。

2. 非等方性全方位視覚 HBP ミラー

本論で扱う全方位視覚系は、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。従来の全方位視覚系では、凸型ミラーを鉛直軸に関する回転体とし、回転軸とカメラの光軸を一致させていた。そのため、凸型ミラーの水平断面は円形となっており、幾何学的な特性は等方であった。それに対し、提案する非等方な全方位視覚系は、その水平断面形状が楕円形に近い凸型ミラーを用いている。以下に提案する非等方な全方位視覚の詳細について述べる。

2.1 放物面を用いた等方な全方位視覚

従来の等方な全方位視覚系では、方位方向断面での曲線を鉛直軸周りに回転させることで三次元ミラーを形成している。すなわち、鉛直軸 Z と方位軸 t でできる平面上で方位 θ に依らないミラー断面を定義している。Nayerらはミラー断面に放物線を用い、受光系として直交射影を採用している[3]。以下にその式を示す。

$$\begin{cases} X = t \cos \theta \\ Y = t \sin \theta \\ Z = \frac{1}{2r}t^2 - \frac{r}{2} \end{cases} \quad (1)$$

$$x = X \quad y = Y \quad (2)$$

(1)式はミラー形状を表し、(2)式はミラー座標とカメラ座標との変換を表している。ここで r は $Z=0$ におけるミラー半径で、ミラーのスケールを決定する。入力画像は同心円状となり、等方な性質を持つ。

2.2 水平固定視点双曲率放物面ミラー系(HBPミラー)

(1,2)式で表される等方な全方位視覚系では、鉛直軸 Z と方位方向軸 t でできる放射断面上で、方位角 θ に依らない曲線が定義されていた。それに対して、提案する非等方な視覚系では、方位角 θ に応じた放物曲線を定義することで単純回転な形状とは違った非等方な形状を実現している。提案ミラーでは進行軸方向に高分解能とするために、 $Z=0$ での水平断面を円ではなく楕円とした。

一般に、等方な全方位視覚系は、 Z 軸に回転対象な光学系であることから、視覚系に水平に入射する光線は方位に依らず常に環境内の同一水平面上を観測する。つまり、視覚系の高さで環境の二次元構造を得られることを示しており、この長所を活かした研究が数多く見られる。しかし、非等方な全方位視覚を実現する際に、単純に軸方向へ歪め水平断面を楕円としただけではこのような性質は失われてしまう。そこで提案ミラーでは放物線の焦点位置を放射断面上の任意点とすることで自由度を増やし、 $Z=0$ の同一水平面が観測できるように設計している(視点を $Z=0$ の水平面に固定)。次式に提案する非等方な全方位視覚系を示す。 X, Y, Z, t, θ については(1)式と同様であり、 a, b は楕円形状を与える定数である。また、受光系は平行受光であるため、入力画像座標系とミラー座標系の間には同様に(2)式が成り立つ。

$$\begin{cases} X = t \cos \theta \\ Y = t \sin \theta \\ Z = \frac{2D(\theta)-a}{2L(\theta)^2}t^2 - \frac{D(\theta)-a}{L(\theta)}t - \frac{a}{2} \\ L(\theta) = ab\sqrt{\frac{\tan^2\theta+1}{b^2\tan^2\theta+a^2}} \\ D(\theta) = ab\sqrt{\frac{b^2\tan^2\theta+a^2}{b^4\tan^2\theta+a^4}} \end{cases} \quad (3)$$

さらに、HBPミラー系は、入力画像が同心円状ではなく楕円状となるため、4:3や16:9といった汎用的な撮像素子分布のカメラを用いた場合、入力画像面を効率良く使用できる。すなわち、方位による分解能の偏りに加え、画像面全体を考えた分解能を増加させることができる。

HBPミラー試作機の概観を図1に、入力画像例を図2に示す。試作機では移動ロボットへの搭載を考慮し、ミラーのパラメータを $a=34\text{mm}$ 、 $b=42\text{mm}$ とした。通常の透視投影カメラでは平行射影は満たされないため、平行線を一点に集光させる特性を持つ放物面ミラーを用い、二回反射系で平行射影を実現している。入力画像例では、解像度・直線性・歪みを視覚的に実感できるよう $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ のテストパターンを、ミラーから 300mm 離れた位置に置いて撮像を行った。全体的にぼけ

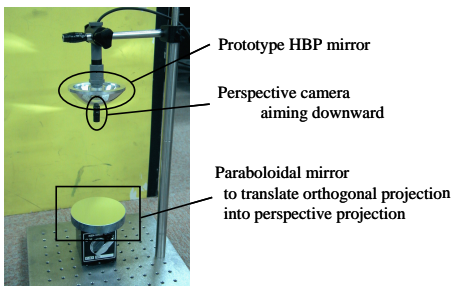


図1 試作HBPミラー系の概観図

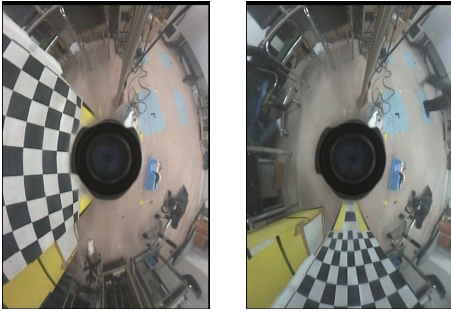


図2 テストパターンを用いた入力画像例。左)短径方向においた場合。右)長径方向においた場合。

など無く十分に実用可能であるとともに、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。シーンでの直線が多少歪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良い程度である。このため、シーン中の垂直エッジを入力画像から検出して自己位置推定を行うような手法[11]などが従来どおり適用可能と考えられる。

提案する HBP ミラー系は上記のような設計であるため、従来の等方な全方位視覚系や他の非等方な全方位視覚系に対して以下の特徴を持つ。

- 等方な全方位視覚系と同様に自己の全周囲をシームレスに観測できる
- 環境の同一水平面を観測でき、自己運動・位置推定などの手法が従来どおり適用できる
- 進行軸付近の解像度が向上しているため、進行方向前方から接近する障害物の発見・衝突時間の推定が精度よく安定に行われる

このように、等方な全方位視覚系の有効な性質を保存しつつ、進行軸付近の高解像度化を実現した。しかし、同時に次のような問題点を合わせ持つ。

- 進行軸付近で高解像な反面、それに直交する軸付近で解像度が低下してしまう
- 単一視点系がくずれ、多視点分布系となるので、実物体と異なる奥行きに投影した場合に歪みが生じる

進行軸に直交する軸付近の解像度に関しては著しく低下しているわけではなく、またこの方位は前進する移動ロボットにとって斜め後ろの観測となるため、この部分の解像度の低下によるナビゲーションへの影響は少ない(4.節を参照)。さらに、多視

点分布系となったために生じる画像歪みの影響は画像認識の観点から見れば問題ない程度であることが確認されている(5.節を参照)。

以下、進行軸付近に高解像な解像度分布、進行軸付近の高解像度化による前方障害物の発見・衝突時間推定の精度向上と安定化、さらに問題点である画像歪みについて、シミュレーション実験、及び試作機を用いた実験によって評価した。シミュレーション実験におけるミラー定数としては、 $r = 35mm, a = 35mm, b = 50mm$ 、撮像素子密度 $100pixel/cm$ を用いて評価を行った。

3. 解像度分布

全方位視覚系を用いた移動ロボットのナビゲーションの多くは、先に述べたようにシーンの同一水平面の観測を利用した手法である。そこでシーンの同一水平面における観測密度を調べることで、進行軸付近の高解像度化を定量的に検証した。

図3は入力画像上での方位角変化に対するシーンの経度方向解像度と緯度方向解像度の変化を、シミュレーションにより算出した結果である。等方な全方位視覚は方位角に依存しない一定の解像度を持っているため、図中ではそれに対する提案 HBP ミラー系の比を示した。提案した HBP ミラー系では、経度方向・緯度方向ともに $90degree$ 付近よりも $0degree$ 付近の解像度を大きくすることに成功している。 $90degree$ 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。この部分の解像度低下によるナビゲーションへの影響は4.節にて述べる。提案する HBP ミラー系のような楕円に歪んだ入力画像は、アナモルフィックレンズ[12]を用いても撮像でき、経度方向の分解能分布は HBP ミラー系を用いた場合と等しくなる。しかし、緯度方向の分解能分布は経度方向のものとは逆(図3下)となり、両者を統合した空間分解能には分布の偏りが現れない。HBP ミラー系は経度・緯度方向で同様な分解能分布であるため、空間分解能を考えた場合でも分布の偏りを実現している。

また、試作機を用いた実験結果を図4に示す。プロット点、実線、破線は各々、実測値、理論値、理論値 $\pm 0.5pixel/degree$ を表す。実測値は量子化誤差を考慮した「理論値 $\pm 0.5pixel/degree$ 」内にほぼ収まっている。

4. 障害物の発見と衝突時間推定

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ブティカルフローは、移動ロボットに必要とされる、自己運動量推定[8]~[10]、障害物回避、奥行き推定[13]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(FOE, FOC)付近では、オブ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 ミラー系は進行軸近くを高解像能とすることで、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

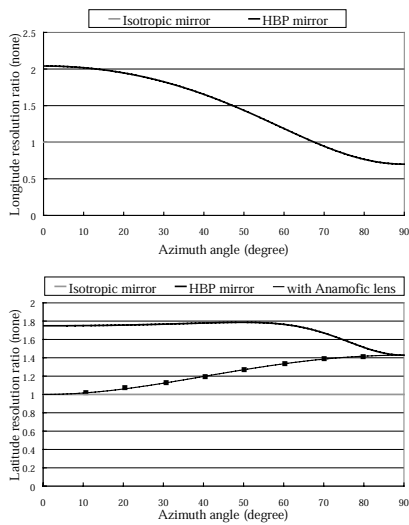


図 3 HBP ミラー系を用いた場合の等方な全方位視覚系に対する解像度比．上) 経度方向解像度 下) 緯度方向解像度

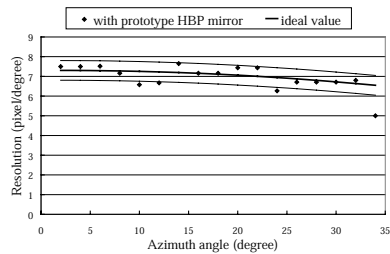


図 4 試作 HBP ミラー系の経度方向解像度分布．プロットは実測値．太線・細線はそれぞれシミュレーション値と量子化誤差．

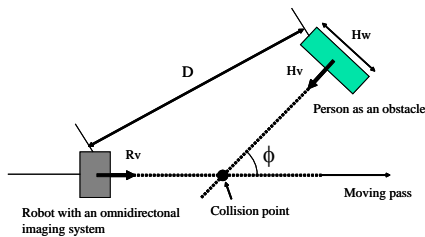


図 5 HBP ミラー系と障害物との衝突モデル

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。評価に用いた衝突モデルは図 5 のとおりである。HBP ミラー系 (移動ロボット) と障害物となる対象物 (人物) についての各パラメータは一般的な室内環境を考慮して設定した。HBP ミラー系は $R_v = 80\text{cm/sec}$ の速度で前進しており、幅 $H_w = 70\text{cm}$ の板状で速度 $H_v = 150\text{cm/sec}$ の障害物が直進軌道 (Moving pass) 上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实時間制御を考慮して 10Hz とした。

4.1 フロー沸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、接近方向から沸き出すように観測されるため、その沸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、沸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。ロボットは前進している場合がほとんど

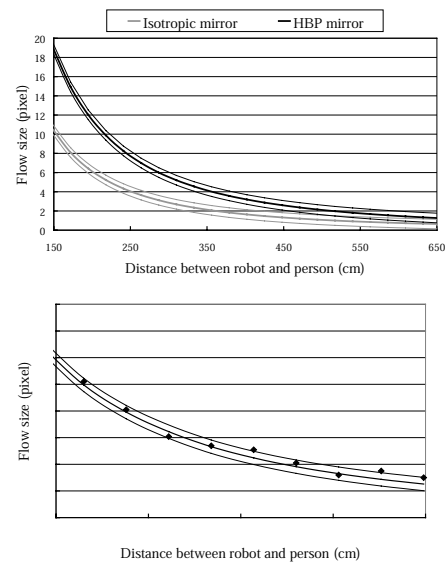


図 6 正面から接近する障害物のオプティカルフローの大きさ．細線は量子化誤差．上) シミュレーションによる等方な全方位と提案 HBP ミラー系．下) 試作 HBP ミラー系．

であるため、沸き出し点は前方に出現することが多い。それゆえ前方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。つまり、前方に現れる沸き出し点をより精度良く安定に検出することが移動ロボットには重要であると言える。

そこで図 5 において $\phi = 0$ とし、正面から近づく障害物に関して、相対距離と観測されるオプティカルフローの大きさを調べた (図 6 上)。同じ奥行き距離において、HBP ミラー系では等方な全方位視覚系よりも大きなオプティカルフローが得られるため、接近する物体をより早く安定に検出できる。特に細線で示された量子化誤差を考慮すると、遠距離における検出の安定性が飛躍的に向上している。また、試作機を用いた実験も行った (図 6 下)。実測値が量子化誤差内に収まっており、試作ミラー系でも同様の特性が得られている。

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。図 5 における 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オプティカルフローの閾値を $F_{threshold} = 2.0\text{pixel}$ と定め、これよりも大きなオプティカルフローが観測されたときに障害物発見とした。

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。尚、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って評価した。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 7 に示す (上部は直交座標系、下部は極座標系表現)。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言える。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

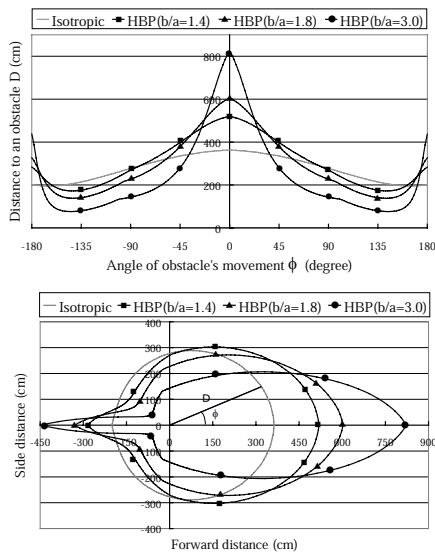


図 7 衝突進入角に対する障害物発見可能距離 上) 直交座標表示 下) 極座標表示

いる．このため前述の衝突に加え，十字路などにおける出会い頭衝突にも有効である．また $K = 1.8, 3.0$ 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．よって廊下のように比較的直線構造が多く見られる環境に適している． $\phi = \pm 3/4\pi$ 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．しかし，このような障害物は日常の室内環境においてほとんど存在しないため，この部分の精度低下は問題ないとする．

4.2 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（奥行き）であるか知る必要があり，その値を元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持たないため，既知の長さ（例えば，視差が与えられればステレオ法で位置を推定可能）がな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，奥行き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（Time-to-impact，もしくは Time-to-collision）と呼ばれている．Time-to-collision はオプティカルフローから推定することができるが，その推定精度はオプティカル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 [13] が，オプティカルフローを連続関数と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 フレームに渡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 8 に 4.1 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．

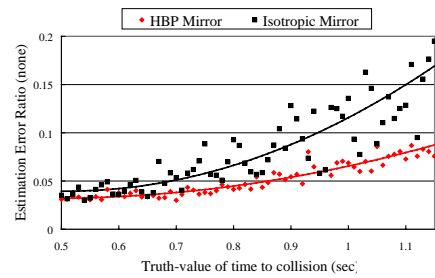


図 8 正面から接近する障害物の衝突時間の推定精度．

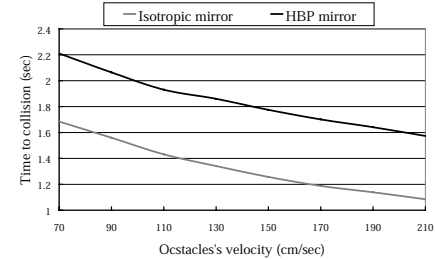


図 9 90% の信頼性を持つ衝突時間．例えば，HBP ミラー系で対象物の速度が 70cm/sec だった場合， 2.2sec より小さな推定衝突時間は 90% 以上の精度を持つ．

(実線はフィッティングカーブ)．提案 HBP ミラー系で推定誤差の平均が低減されており，さら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向上している．ある一定の許容誤差を考えれば，HBP ミラー系ではより長い衝突時間（すなわち時間的遠距離）で誤差が一定値を下回るため，推定の信頼性がより遠方にまで伸びているとも言える．衝突時間の推定は対象物の速度やオプティカルフロー計算の周波数にも依存する．図 9 にオプティカルフローの計算周波数を固定し，障害物の速度を変化させた場合の一例を示す．障害物の速度は $70\text{cm/sec} - 210\text{cm/sec}$ (ゆっくりな足取りから駆け足程度) であり，図はそのときの 90% 信頼衝突時間（許容誤差 10%）を表す．実環境で想定される障害物の速度では信頼衝突時間は等方な全方位視覚に比べおよそ 1.4 倍まで延長される結果となった．

5. 画像歪みの画像認識への影響

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，そのためには作業対象物体の認識は必要不可欠である．また，通常室内環境を対象としているため，人物認識，文字認識等のタスクなども要求される．一般に対象物の奥行きは未知であるため，画像認識では入力画像を奥行き固定の面に投影した画像を用いる場合が多い．このとき，環境からの入射光線が一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スケール以外の幾何関係が保障される．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等方性を崩しており，奥行きに対応した歪みが投影画像に生じる．図 10 は奥行き 150cm の平面を奥行き 100cm の平行な平面に投影した場合のずれ量（真の点位置

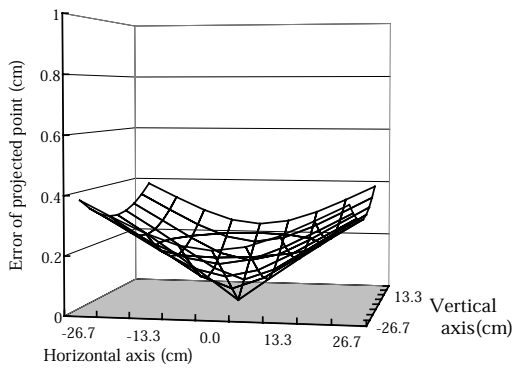


図 10 投影面 (底面) の広がりに対する投影点のずれ。

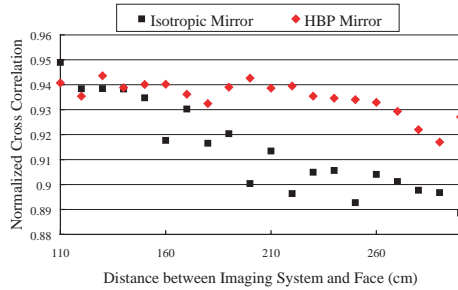


図 11 原顔画像と投影顔画像の正規化相互相関値。

との誤差) を示している。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楕円状にずれが現れる。しかし、物体認識の大きさとしては十分に大きい幅 50cm の物体に対してわずか 0.4cm 程度のずれに収まっているため、HBP ミラー系による歪みの影響はほぼ無視できると考えられる。

また、正方パターンの代わりに人物顔を用い、その奥行きを様々に変化させ、投影画像とテンプレートとした原顔画像との相関値を求めることで、画像認識に関して評価を行った。図 11 は、認識対象までの距離に対する正規化相互相関値である。図からもわかるように、カメラの近傍では、等方なミラー系・HBP ミラー系共に同程度の相関値で、ほとんど差は見られなかった。HBP ミラー系の場合は、解像度が高かわりに画像に歪みが発生することから、両者の性質を総合して等方なミラー系と同程度の結果となったと思われる。一方、遠方になると、認識対象の射影サイズが小さくなるため、実質的な歪みの影響が現れず、解像度の差のみが相関値に影響を与えるようになる。このことにより、解像度を向上させた提案 HBP ミラーでは比較的遠くまで高い相関値となっている。すなわち、提案する HBP ミラー系は投影画像に歪みを持つもののその影響は小さく、むしろ高解像としたためより遠くの対象物まで精度良く認識できると言える。図 12 に試作ミラーと $20\text{cm} \times 22\text{cm}$ 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。

6. ま と め

本論文では、「移動ロボットのナビゲーションへの全方位視覚

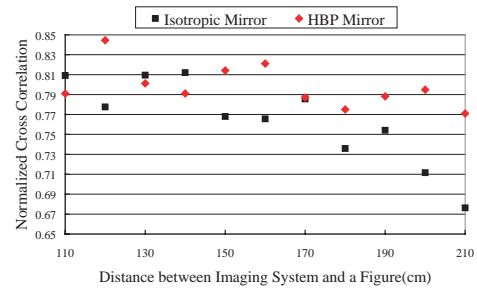


図 12 試作 HBP ミラーとマスコットを用いた正規化相互相関値。

系の利用」という前方方向における高い解像度が望ましいタスクに対し、進行軸方位に高い解像度を有するような非等方な全方位視覚系を提案し、それらの解析を行った。提案視覚系は、等方な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、等方な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。また単一視点系を失っているものの歪み等も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.Hong, X.Tan, B.Pinette, R.Weiss, and E.M.Riseman. "Image-based homing", in Proc. of IEEE on robotics and automation, pp. 910-915, 1991.
- [2] Y. Yagi, S.Kawato, M. Yachida. "Panoramic Scene Analysis with Conic Projection", in Proc. of Int. Conf. on IROS, 1990.
- [3] Shree K. Nayer "Catadioptric Omnidirectional Camera", in Proc. of CVPR, pp. 482-488, 1997.
- [4] K. Yamazawa, Y. Yagi, M. Yachida "Visual Navigation with Omnidirectional Image Sensor HyperOmni Vision", in IEICE Vol.J79 No. 5, pp. 698-707, May 1996.
- [5] R. Benosman, E. Deforas, J. Devars "A New Catadioptric Sensor for the Panoramic Vision of Mobile Robots", in Proc. of IEEE Workshop on OMNIVIS, pp. 112-118, 2000.
- [6] 今春利幸, 八木康史, 谷内田正彦 "全方位視口ロボットと両眼視口ロボットの連携による人物の発見と注視", IPSJ Symposium series, vol. 98, No. 10, pp. 7-12, 1998.7.1.
- [7] Y. Yagi, W. Nishii, K. Yamazawa, M. Yachida "Stabilization for mobile robot by using omnidirectional optical flow", in Proc. of Int. Conf. Intelligent and Systems, pp. 618-625, 1996.
- [8] Joshua Gluckman, Shree K. Nayer "Ego-motion and Omnidirectional Cameras", in Proc. of ICCV, pp. 999-1005, 1998.
- [9] Iren Stratmann "Omnidirectional Imaging and Optic Flow", in Proc. of IEEE Workshop on OMNIVIS, pp. 104-111, 2002.
- [10] Raqual Frizzera Vassallo, Jose Santos-Victor, Hans Jorg Schneebeli "General Approach for Egomotion Estimation with Omnidirectional Images", in Proc. of IEEE Workshop on OMNIVIS, pp. 97-103, 2002.
- [11] 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
- [12] "Handbook of Optics Vol.2", published by McGraw-Hill Inc., pp.2.16.
- [13] M. Tistarelli, G. Snadini "Direct Estimation of Time-to-impact from Optic Flow", in Proc. of IEEE, pp. 226-233, 1991.