

## 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<sup>†</sup> , 八木 康史<sup>†</sup> , 谷内田 正彦<sup>†</sup>

<sup>†</sup>大阪大学 大学院基礎工学研究科

近年, 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「全方位視覚系」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系は, 鉛直軸周りに回転させた回転体ミラーの鉛直下にカメラを設置した構造を持つため, 方位方向に等しい性質を持ち, どの方位方向についても観測密度は等しい. しかしながら, 移動ロボットの視覚として利用する場合, 進行軸に直交する方位よりも進行軸方位に関する密度の濃い観測が必要であることが多い. そこで本報告では, 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系」の提案し, いくつかの非等方性全方位視覚系について特性解析, 及び比較検討を行う.

### Non-isotropic omnidirectional imaging system for navigating a mobile robot

Kazuaki Kondo<sup>†</sup> , Yasushi Yagi<sup>†</sup> , and Masahiko Yachida<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Graduate School of Engineering Science, Osaka University

Today, a real-time omnidirectional imaging system which can acquire an omnidirectional field of view at video rate using a convex mirror have been applied in a variety of fields. The imaging system has an isotropic property, because a camera is pointed vertically toward a convex mirror with the optical axis of camera lens aligned with the axis of the mirror. By setting the axis of the camera vertical, we can acquire a  $2\pi$  view around the camera in real time and the angular resolution is independent to an azimuth angle. By the way, what kind of optics is useful for robot navigation? We consider that the angular resolution along the moving direction of the robot needs higher resolution than that of lateral view. Therefore, in this paper, we propose a non-isotropic omnidirectional imaging system for navigating a mobile robot.

#### 1. はじめに

凸面ミラーを用いて自己の周囲 360 度を一度に撮像する全方位視覚系には, さまざまなミラー形状のものがある. 代表的なものは, 球面ミラーを用いる方法[1], 円錐ミラーを用いる方法[2], 放物面ミラーを用いる方法[3], そして双曲面を用いる方法[4]などである. これらのミラーは, 垂直軸周りに回転させてできる回転体の形状をしており(Fig.1), 球面ミラーは円弧, 円錐ミラーは直線, 放物面ミラーと双曲面ミラーは各々, 放物線と双曲線の回転体である. そして, これらのセンサでは, 対象物体の方位角と画像中での回転角が同一であるという性質を持つ.(以後, 等方性と呼ぶ).

ところで, 移動ロボットを考えた場合, 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, 障害物回避, 自己運動ならびに自己位置推定, 作業場所での物体認識やランドマーク認識などである. 自己運動や自己位置の推定では, 360 度のパノラマ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. 障害物の発見方法には, さまざまな方法があるが, 例えば, 八木ら[5]は全方位画像中で対象点の方位変化を観察することで障害物(自己への接近物体)を発見している. しかしこの研究において, センサが等方である必要性はない. 等方であるよりも, ロボットの進行軸方向の解像度が高い方が望ましい.

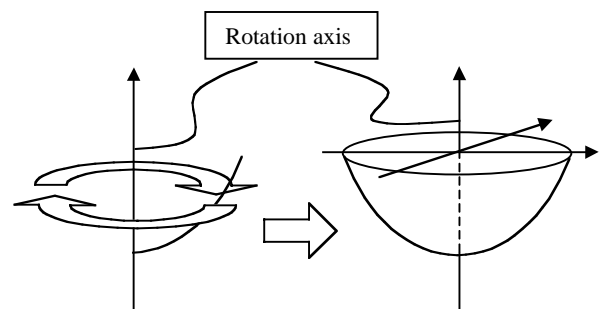


Fig.1 単純回転体としての全方位視覚系

なぜなら，障害物回避の場合ロボットの側方に比べ，ロボットの進行軸上の物体は，方位変化が現れにくいという性質を持つからである．同様に，自己運動では，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)の関係を利用し推定できる [6] [7]．この場合も FOE 付近ではオプティカルフローの大きさが小さいため，正確な情報を提供するためには，進行軸方位の解像度が高い方が望ましい．また移動ロボットは移動するだけでなく，目標地点に到達したり，目標物体を発見したりしたときに固有のタスク（物体を持ち上げるなど）を行う場合が多い．この場合も前方の詳細な画像を得られることは大きなメリットを生む．

このように移動ロボットでは，等方な全方位視覚系よりも進行軸方位に詳細な観測を行う非等方な全方位視覚系の方が適していると考えられる．そこで本報告では，進行軸方位の詳細な観測が可能な全方位視覚系として「非等方性全方位視覚系」を提案し，それらの特性をシミュレーションを通じて解析，さらに各々の視覚系におけるメリット・デメリットを考察する．

## 2. 非等方性全方位視覚系

非等方性全方位視覚系を検討するに当たって，評価が行いやすい平行投影のカメラを受光系として用いる(Fig.2)．そしてミラー形状は，放物面を基準とする凸面ミラー 2 種類と楕円面の長軸を回転軸とする楕円面ミラー 1 種とを評価対象とした．

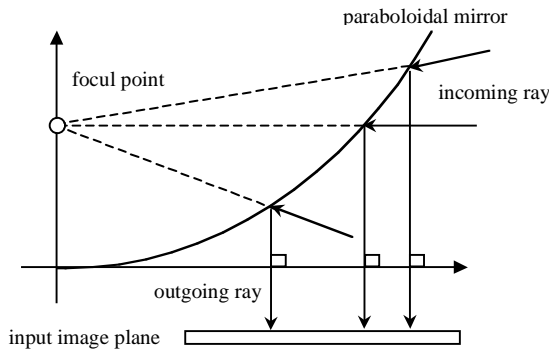


Fig.2 放物面を用いた平行投影系

### 1)放物線回転型

放物線の単純回転体としての等方な全方位視覚系ではミラーの水平切断面は円であった(Fig.3,Eq.1)．これを非等方な全方位視覚系にするために水平断面形状を楕円としたものを放物線回転型の非等方性全方位視覚系とする(Fig.4,Eq.2)．これは放物線の回転曲率を一定ではなく変化させた場合に相当し，放物線焦点がZ軸上に分布する．

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

$$X = t \cos q \quad (\text{Eq.2})$$

$$Y = t \sin q$$

$$Z = \frac{1}{2a} \left\{ \frac{at}{L(q)} \right\}^2 - \frac{a}{2} \quad L(q) = ab \sqrt{\frac{\tan^2 q + 1}{b^2 \tan^2 q + a^2}}$$

### 2)放物線並列型

放物線回転型の非等方全方位視覚は放物線を回転させ，焦点が縦(Z軸上)に分布するものであったのに対して，放物線並列型は放物線を並列に並べ，焦点がX軸上に分布するように設計したものである．これは単純に同じ大きさの放物線を並列したシリンダカルミラー(Fig.5,Eq.3)を元に，放物線の大きさを徐々に小さくしながら並べたものに相当する．放物線の縮小率は楕円に準拠している(Fig.6,Eq.4)．

$$Z = \frac{1}{2a} Y^2 - \frac{a}{2} \quad (\text{Eq.3})$$

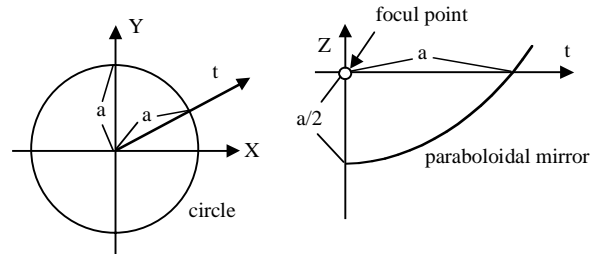
$$Z = \frac{1}{2R(X)} Y^2 - \frac{R(X)}{2} \quad R(X) = a \sqrt{1 - \frac{X^2}{b^2}} \quad (\text{Eq.4})$$

### 3)楕円球型

XY平面での楕円をX軸に関して回転させたミラーを持つ視覚系で，ミラー形状はラグビーボールのような形をしている(Fig.7,Eq.5)．

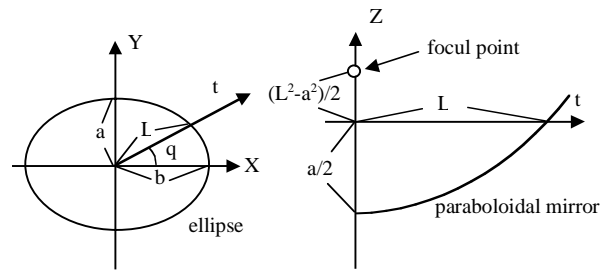
$$Z = \sqrt{R(X)^2 - Y^2} \quad R(X) = a \sqrt{1 - \frac{X^2}{b^2}} \quad (\text{Eq.5})$$

次章以降では，Fig.3 及び Fig.5 で示した放物線を利用した等方性全方位視覚系，シリンダカルミラー系を比較対象として上記3種と同様に性質を解析した．



(a) XY 面図 (水平断面図) (b) tZ 面図 (垂直断面図)

Fig.3 等方性全方位視覚系



(a) XY 面図 (水平断面図) (b) tZ 面図 (垂直断面図)

Fig.4 放物線回転型非等方性全方位視覚系

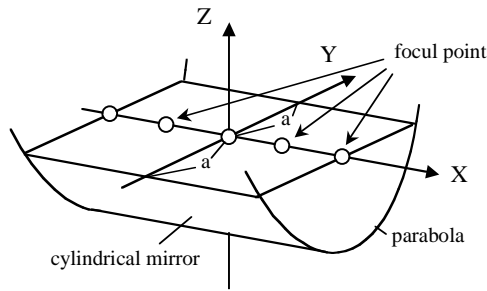
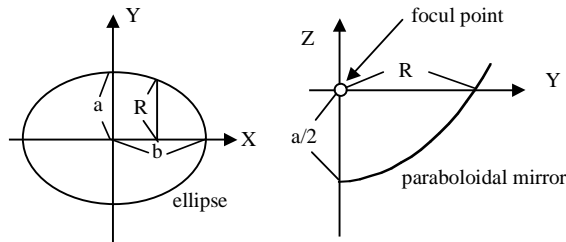


Fig.5 放物線シリンドリカルミラー系



(a) XY 面図 (水平断面図) (b) YZ 面図 (垂直断面図)

Fig.6 放物線並列型非等方性全方位視覚系

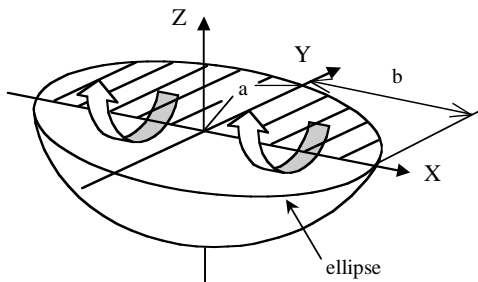


Fig.7 楕円球型非等方性全方位視覚系  
(楕円(斜線部)のX軸に関する回転体)

### 3. 入力画像

実環境の入力画像上への投影を見ることでおおまかな解像度・歪み・視野・直線がどのように現れるかなどを視覚的に把握できる。ここでは仮想世界中の円筒面上に正方形パッチを張り付けたテストパターンを用意し、円筒の軸上中央に視覚系を配置した状態でシミュレーションを行い入力画像を生成している(Fig.8)。入力画像上の対象点  $P(x,y)$  における輝度は、 $P$  から垂直に伸ばした光線をミラー面  $M(m_x, m_y, m_z)$  で反射させることで円筒との交点  $W(w_x, w_y, w_z)$  を求め、その点における輝度を  $P$  の輝度としている。本論で取り上げる視覚系は  $X$  軸及び  $Y$  軸に対して線対称であることから、シミュレーション結果は第一象限( $x>0, y>0$ )のみを表示した。入力画像サイズは NTSC 規格に準じて縦横比 3:4 としている。

生成された入力画像を Fig.9 に示す。黒く塗りつぶされた領域はミラー面が存在しないために入射光線が投影されない領域、黒線は水平入射光線の入力画像上への投影を示している。円筒面までの距離は 3600、パッチサイズは(a)のみ  $20 \times 20$ 、(b)~(e)は  $600 \times 600$  である。

#### a) シリンドリカルミラー系(Fig.9(a))

特定の方位(ここでは  $Y$  軸)からの光線のみを入力画像上へ投影し、仰角方向へは放物線を持つため、全体的に  $y$  軸方向に伸縮した画像を得ることができる。しかし、視野が  $Y$  軸方位に限られる上、 $Y$  軸方位の視野もミラー幅分しかない(この視覚系のみが、他の4つの視覚系と比べ、4分の1の大きさの長方形パッチをテストパターンとして用いている)。

#### b) 等方性全方位視覚系(Fig.9(b))

垂直エッジが放射方向の直線に、水平エッジが円状に現れる。特にこの視覚系は単一視点であるので、垂直エッジは実環境での方位と同じ方位で入力画像上にも現れる。一方、視覚系の水平断面が円形なのに対して NTSC の入力画像は横長なので、入力画像を有効に使い切れていない。

#### c) 放物線並列型(Fig.9(c))

垂直エッジがいびつな曲線に投影されるなど、入力画像の場所によってパッチの歪みが大きく変化しているため、パターンマッチングなどの手法には適さない。また  $X$  軸方位に近付くにつれて仰角が大きい部分の解像度が非常に低いなどが分かる。さらに、入力画像右部分を使用できていないため、この部分を有効に利用できるミラー形状パラメータの調節が必要となっている。 $Y$  軸方位の解像度は  $X$  軸方位の解像度よりも飛躍的に高くなっており、前方を高解像度にするには容易に行える。また水平入射光の投影(黒線)が水平エッジの投影にほぼ一致していることから、どの方位方向の水平入射光もミラー面上のほぼ同一高さで受光されていることがわかる。すなわち、従来の水平大円上のオプティカルフローを利用した手法が適用可能といえる(水平入射光線の高さについては5節で詳しく述べる)。

#### d) 放物線回転型(Fig.9(d))

c) に比べ、入力画像上での場所に関する歪みの変化は比較的少なく、解像度が著しく低い部分も見当たらない。また、b) を  $X$  軸に伸長したような画像であるから入力画像素子を効率良く使用していると言える。

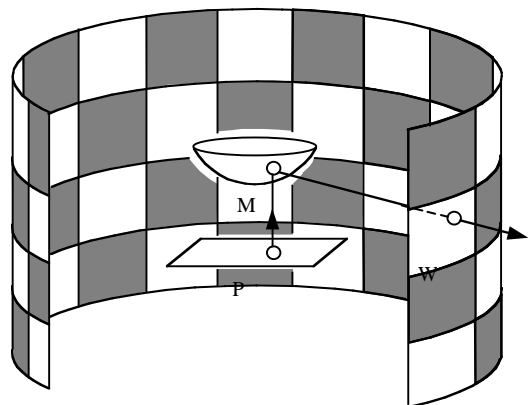
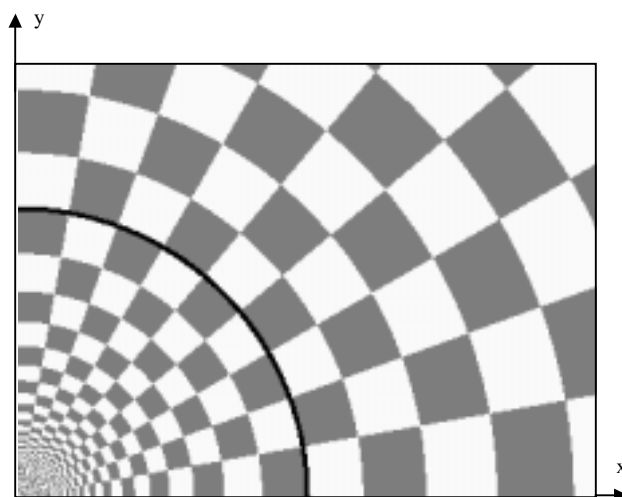


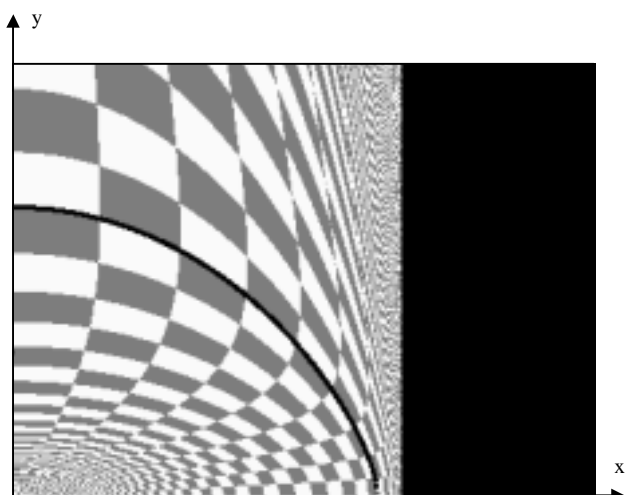
Fig.8 入力画像生成のための仮想シミュレーション環境



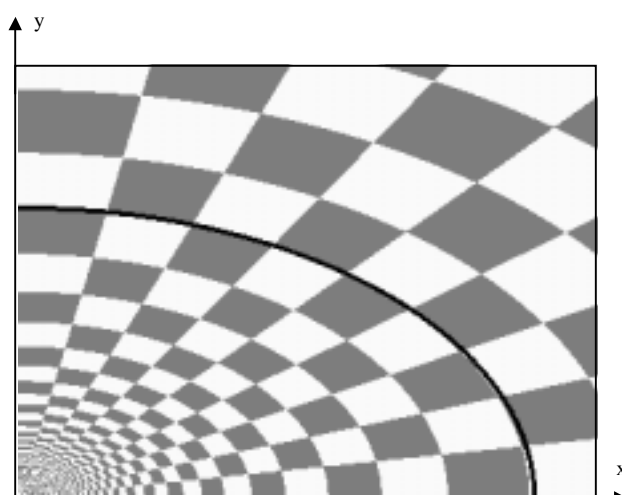
a) シリンドリカルミラー系( $a=90$ )



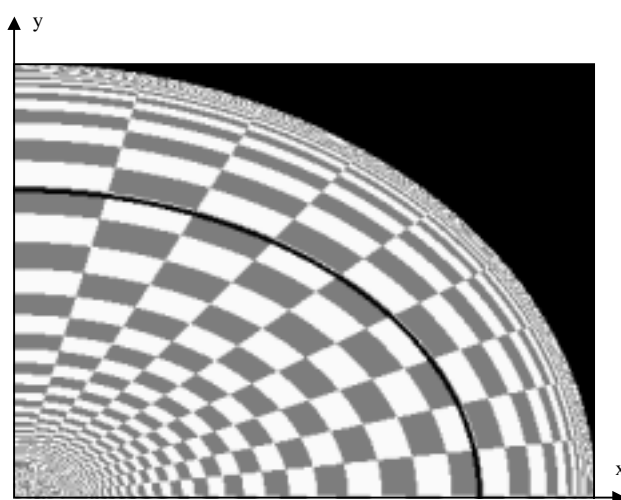
b) 等方性全方位視覚系( $a=90$ )



c) 放物線並列型( $a=90, b=120$ )



d) 放物線回転型( $a=90, b=120$ )



e) 楕円球型( $a=135, b=180$ )

Fig.9 円筒面上にパッチを張り付けたときの様々な視覚系の入力画像

さらに垂直エッジも放射状の直線として現れている，と良い性質ばかりのようであるが，入力画像上での垂直エッジの方位方向と実世界での方位方向が一致しないことや，水平入射光線の高さが方位方向によってずれるという欠点も持つ．

**e) 楕円球型(Fig.9(e))**

d) と良く似た入力画像となっているが，仰角方向の解像度が低い．また，ミラーの性質上どうしても入力画像の右上部分に観測不可能領域や低解像度領域を生じるため使用できない部分が生じてしまう．しかし，水平入射光線の高さ変動は c) よりもさらに小さい．その他，歪み・垂直エッジについては d) とほぼ同じである．

**4 . 解像度分布**

**4 . 1 . 入力画像上での分布**

解像度は一般に角度分解能（単位角度あたりに割り当てられる画素数）で定義されるため，仰角方向の解像度と方位方向の解像度が存在する．しかしこれでは視覚的に分布が知覚しにくいので，ここでは解像度を「単位角度面積あたりに割り当てられる画素面積[8]」として定義し直す(Fig.10)．この解像度は以下のように求めることができる．まず入力画像上での解像度を求めたい点  $P(x,y)$  のミラー面上への投影点  $M$  を求め，この点での反射光線  $L_p$  から単位仰角及び単位方位角ずれた二本の光線  $L_H, L_V$  を算出する．そしてそれら二本の光線が反射されるミラー面上での点  $M_H, M_V$  をさらに入力画面上へ投影して  $P_H, P_V$  を得る．このときにベクトル  $P_H-P$  と  $P_V-P$  によってできる平行四辺形の面積が単位角度面積あたりに割り当てられる画素面積となる．

解像度分布を示した Fig.11 において，黒く塗りつぶされた領域はミラー面が存在しないために入射光線が投影されない領域，黒線は水平入射光線の入力画像上への投影を示す．明るい程解像度が高いことを示すが，各々視覚系間の正規化は行っていないので，直接明るさを比較することはできないが，分布を比較することは可能である．

**a) シリンドリカルミラー系(Fig.11(a))**

X 軸方位に同じ放物線が並んでいるため，x 軸方位に同じ解像度分布に，y 軸方位には放物線の性質に従って仰角とともに解像度が高くなるような分布となる

**b) 等方性全方位視覚系(Fig.11(b))**

中心から外側へ向かう，つまり仰角が大きくなるに従って解像度が高くなるような分布が見て取れる．a) で並列に並べている放物線を b) では回転させているので仰角方向への解像度変化は a) と等しくなっている．

**c) 放物線並列型(Fig.11(c))**

入力画像の部分で述べたように y 軸方位の解像度が x 軸方位の解像度よりも大きくなっている．上部に縦に走る白帯の部分が高解像度となっているが，この部分に割り当てられている画素数自体が少なく，またかなり仰角の大きい方向であるので利用することは難しいと考えられる．

**d) 放物線回転型(Fig.11(d))**

一見すると b) と同じように見えるが，b) では高解像度な部分が右上から右下にかけてであるが，d) では右上から左上

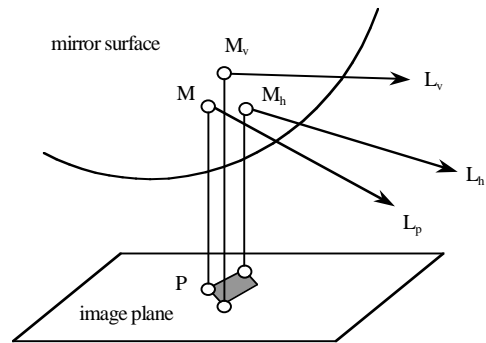


Fig.10 方位方向と仰角方向を考慮した解像度

にかけての分布に変化している．また，右上の高解像度の度合いが b) よりも薄いことから，その分その他の部分の解像度が上昇し，解像度が全体的に分布していると考えられる．

**e) 楕円球型(Fig.11(e))**

他の4つと違って仰角が大きくなるほど解像度が低くなる傾向にある．このため，この視覚系は自己の真横や見上げる方向よりも足下を重点的に観測したい場合（例えば小石が多く散らばっているような環境や段差のある環境）に有効であると思われる．

**4 . 2 . 水平入射光線上の分布**

前記の解像度分布では解像度の全体的な分布をイメージ的に捕らえた．ここでは，ナビゲーションにおいて重要な情報を与える水平入射光上での方位方向解像度を数値で示す(Fig.12)．等方な全方位視覚系では方位方向により解像度は変化しないためフラットラインとなっているが，提案した非等方全方位視覚系は全て側方(0deg 付近)よりも前方(90deg 付近)の解像度を大きくすることに成功している．放物線回転型や楕円球型では前方が側方に対して2倍程度，放物線並列型では5倍程度となっている．非等方系における側方の解像度はそろって等方系を下回ってはいるが，非等方系ではミラー形状が横長で等方系よりも入力画像を有効に使用できるため，等方系と比較して著しく低いと言うことはない．また，ナビゲーションでは，側方の観測はそれほど詳細でなくても良く，側方での解像度の低下は問題ないとする．

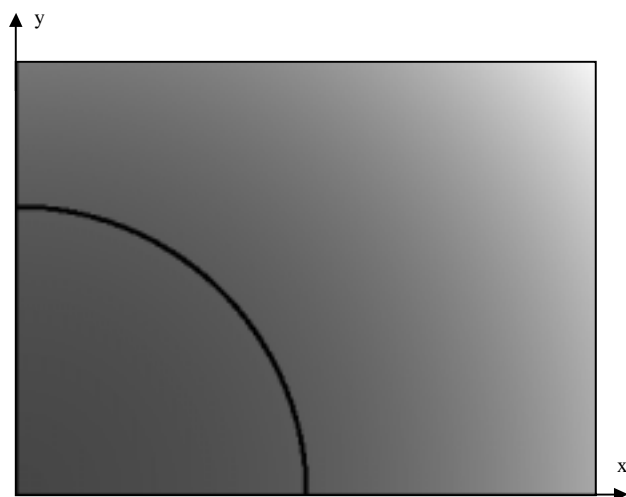
**5 . 水平入射光線の高さ**

等方な全方位視覚系の場合，その等方性から，方位角が異なっても仰角が等しければ，二本の入射光線はミラー面上の同じ高さで反射される．これは，入射光線を通る垂直切断面でのミラー形状が方位によらないからである(Fig.13)．しかし，我々が提案している非等方全方位視覚系は単純な回転体ミラーで構成されてはいないため，たとえ同じ仰角を持つ入射光線であっても水平入射光の高さは方位方向によって変化する(Fig.14)．言い換えれば，同じ仰角方向の光線を受光していても，ミラー面上での反射点の高さが違うので，実世界で異なった高さの点を観測していることになる．

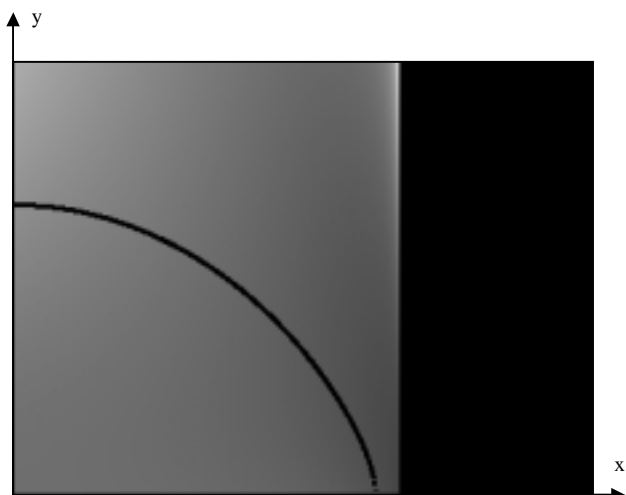
特に水平入射光は，多くの有用な手法が水平入射光線の等高性を仮定としていることから，ミラー面上の同じ高さで受光されることが好ましい．そこで提案した非等方性全方位視覚系に対して，水平入射光線の高度変化を調べた(Fig.15)．



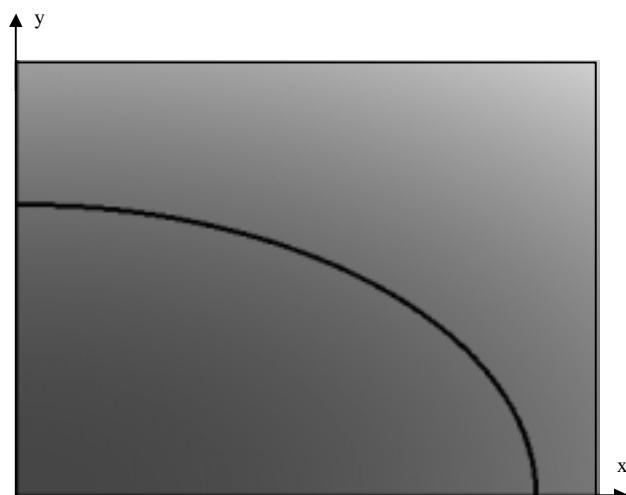
a) シリンドリカルミラー系( $a=90$ )



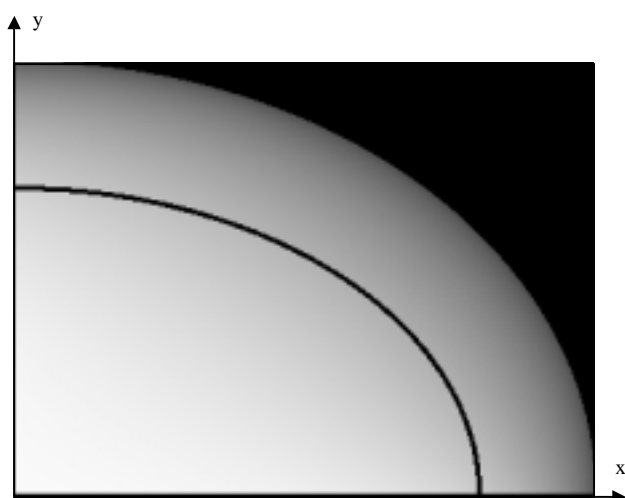
b) 等方性全方位視覚系( $a=90$ )



c) 放物線並列型( $a=90, b=120$ )



d) 放物線回転型( $a=90, b=120$ )



e) 楕円球型( $a=135, b=180$ )

Fig.11 解像度分布

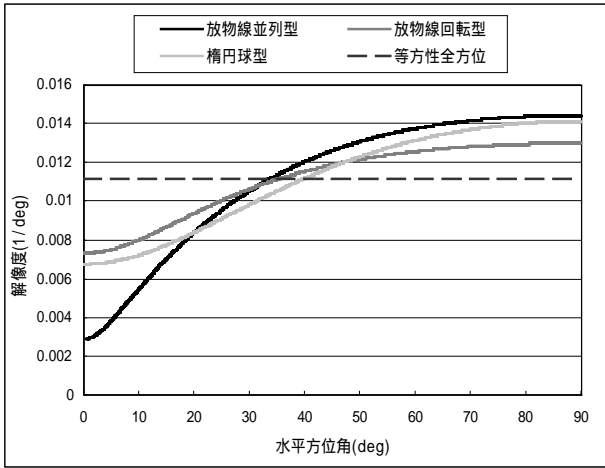
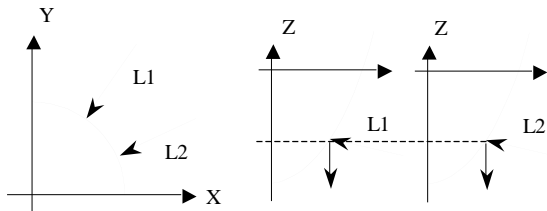
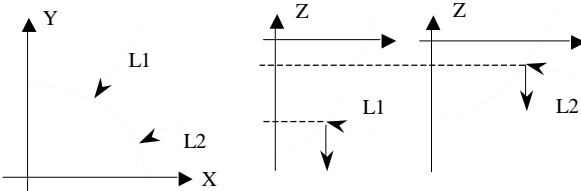


Fig.12 水平入射光線上での方位方向解像度．各視覚系間での比較のため正規化を行っている．それゆえ，解像度の絶対的な値では無く，方位方向に関してどのように解像度が割り振られているかを示している．尚，非等方性全方位視覚系のミラーサイズはすべて縦横比=3:4である．



(a) 異方位からの入射光線 (b) 入射光線を通る垂直切断面  
Fig.13 方位角が異なり仰角が等しい入射光線（等方性全方位）



(a) 異方位からの入射光線 (b) 入射光線を通る垂直切断面  
Fig.14 方位角が異なり仰角が等しい入射光線（非等方性全方位）

図に示すようにおよそ 80deg 付近からずれが現れ始め，放物線並列型と楕円球型では最大で 16~17pixel，放物線回転型では 35pixel までずれが増加する．これらは全てミラーサイズを 135pixel x 180pixel としているため，実際の大きさに変換してみると次のようになる．まず，ここでいうミラーサイズは先に述べたように第一象限のみなので本来は倍の 270pixel x 360pixel であり，製作するミラーサイズを数 cm ~ 十数 cm とすれば，放物線並列型と楕円球型では 3mm~8mm 程度，放物線回転型ではその倍の 6mm~16mm 程度の高度差が最大で生じることになる．通常，我々が日常的に生活している環境であれば 1cm 程度の上下差は無視できる範囲であり，通常の移動ロボット用の視覚としては問題ないものと考えられる．この高度ずれの大きさはミラーサイズを縦横比=3:4 とした場合の値で，一般に縦横比の二乗に比例して大きくなるのが分かっている．

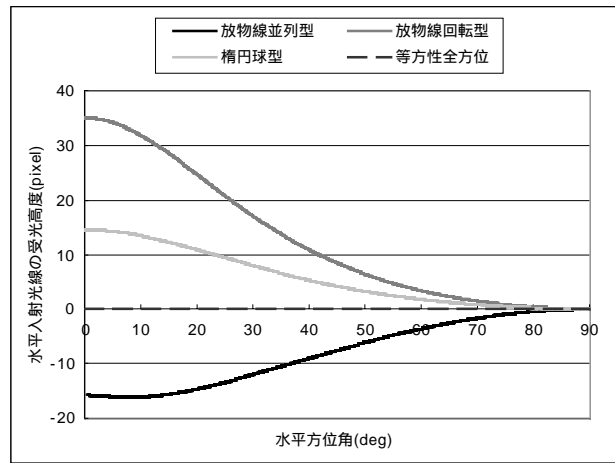


Fig.15 水平入射光のミラー面上における受光高度の変化．水平方位角=90deg のときの高さを 0 としている．非等方性全方位視覚系のミラーサイズは全て，y 軸方向に 135pixel，x 軸方向に 180pixel

## 6 . 比較・検討

以上の解析結果を，各々の視覚系ごとにメリットと思われる事柄とデメリットと思われる事柄に分けて整理したものを Table.1 に示す．

### a) 放物線並列型

入力画像の有効利用のためにパラメータが制約されてしまうという欠点を持つが，反面思いきって前方高解像度に行うことができる．また，水平入射光線の受光高度がほとんど変化しない（~数 mm と予想）ので，日常環境においてならば従来の水平大円上のオプティカルフローを利用した自己運動推定手法などが利用可能と思われる．またパターン認識も前方の仰角水平付近ではある程度の精度で行えるが，その他の部分では歪みが強く対象物の発見などにパターン認識を使用することは困難と思われる

### b) 放物線回転型

垂直エッジが入力画像中で放射状に現れるため，エッジの方位を観測しやすい．ただし，単一焦点の光学系ではないため，観測中心は観測方位によって異なる．画像中での歪み，解像度分布は，比較的均一であるため，パターン認識などは比較的行いやすい．様々な有用な性質を残しつつ，従来の等方全方位視覚系よりも前方に高い解像度を有するため，人間とのインタラクションを行う移動ロボットなど，日常環境に適した視覚系と言え，広い範囲の分野に応用可能と考える．

### c) 楕円球型

垂直エッジが検出できる，歪みが少ない，など b) と似たような性質を持つ また水平入射光線の受光高度の変化も少なく，水平大円上のオプティカルフローを元にした手法が無理なく利用できるであろう．問題点は入力画像全面を有効に使用できない点，前方や側方よりも足元付近の解像度が高い点である．視野との兼ね合いから前者を避けることは困難であるが，後者はむしろ特性として利用し，ロボカップ等の自己より低い位置にある段差や小さな障害物を検知することが重要な場合に使用することや，視覚系自体を高い位置に搭載する等の方法が考えられる．

Table.1 各々の視覚系におけるメリットとデメリット（ただし非等方全方位視覚のミラーサイズの縦横比=3:4）

視覚系	メリット	デメリット
シリンドリカル系	x 軸方位に歪みや伸縮のない画像を得ることができる。	X 軸法方位への視野がミラー幅分しかない。 前後方向の観測しか行えない。
放物線等方全方位	全方位の画像が一度に撮像できる。 単一視点系である。 方位方向について等しい性質を持つ（等方性） 垂直エッジが放射状に現れ、実方位と一致する	横長の入力画面を有効に使い切れない。 いつでも等方性が有用であるとは限らない。
放物線並列型	前方と側方の間に大きな解像度変化を与えることができる。 水平入射光線の受光高度がほとんど変化しない。	垂直エッジが大きく彎曲する。 入力画像上の位置により歪み方が変化する。 入力画像を有効に使うためにはパラメータに制約が与えられてしまう。 側方付近の仰角 0° 以上の部分で解像度が極端に低い。
放物線回転型	前方と側方の間に 2 倍程度の解像度変化を与えることができる。 入力画像を有効に使用できる。 垂直エッジが入力画像上で放射状に現れる。 歪みが比較的少ない。	水平入射光線の受光高度が多少上下する。 垂直エッジの方位は実エッジの方位とは一致しない（算出は可）。
楕円球型	前方と側方の間に 2 倍程度の解像度変化を与えることができる。 垂直エッジが入力画像上で放射状に現れる。 歪みが比較的少ない。 水平入射光線の受光高度がほとんど変化しない。	入力画像の四隅の部分を利用できない（利用しにくい） 水平方向よりも下方付近のほうの解像度が高い（足下の詳細な観測）

## 7. まとめ

本報告では、移動ロボットのナビゲーションにおける全方位視覚系の利用というロボットの進行方向の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全方位視覚系を提案し、それらの解析を行った。提案視覚各々について長所・短所が存在していることが明らかとなったが、上手く短所を補うような環境条件、タスク設定を行うことで様々なタスクに応用できると考えられる。

今後の課題としては、平行投影系だけでなく透視投影系を含め、さらに良い性質を持った非等方全方位視覚系を考案することが挙げられる。今回はある一軸方向にしか分布させなかった放物線の焦点位置を二次元さらには三次元に分布させることや、水平断面を楕円でなく違う形状にするなどを考えている。

また有用であると考えられる非等方性全方位視覚系を試作、移動ロボットに搭載し、その有用性や従来の視覚系を用いたときとの比較等を行うことも予定している。

## 参考文献

- [1] J. Hong, X. Tan, B. Pinette, R. Weiss, and E. M. Riseman, "Image-based homing", in Proc. of IEEE on Robotics and Automation, pp910-915, 1991
- [2] 八木康史, 川戸慎二郎, "Panoramic Scene Analysis with Conic Projection", in Proc. of International Conference on IROS, 1990

[3] Shree K. Nayer, "Catadioptric Omnidirectional Camera", CVPR, pp482-488, 1997

[4] 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦, "移動ロボットのための全方位視覚センサ HyperOmniVision の提案", 電子情報通信学会論文誌(D), Vol.J79D, No5, pp698-707, 1996

[5] 八木康史, 川戸慎二郎, 辻三郎, "全方位視覚センサ COPIS を用いた移動物体との衝突回避", 電子情報通信学会論文誌(D), Vol.J74D, No7, pp908-917, 1991

[6] Irem Stratmann, "Omnidirectional Imaging and Optic Flow", in Proc. of IEEE Workshop on OMNIVIS, pp104-111, 2002

[7] Joshua Gluckman, Shree K. Nayer, "Ego-motion and Omnidirectional Cameras", in Proc. of ICCV, pp999-1005, 1998

[8] Rahul Swaminathan, Michael D. Grossberg, Shree K. Nayer, "Caustic of Catadioptric Cameras", in Proc. of ICCV, pp2-9, 2001