

ロボットナビゲーションのための非等方性全方位視覚

Non-isotropic omnidirectional imaging system for navigating a mobile robot

近藤一晃†
Kazuaki Kondo

八木康史†
Yasushi Yagi

谷内田正彦†
Masahiko Yachida

1. はじめに

凸型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[1-4]。これらのミラーは、鉛直軸周りに回転させてできる回転体の形状をしており、これらの視覚系では、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。この性質から、正方格子の撮像素子を想定すると、方位によらず方位分解能は一定となる（等方性）。

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の推定、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、障害物はどの方向にでも存在し得るため、全周を観測できる方が望ましい。このため、全方位画像からの障害物発見方法が数多く提案されてきたが、それらにおいて全方位視覚系は必ずしも等方である必要はない。むしろ等方であるよりも、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。なぜなら、一般に障害となる物体は、ロボットの進行軸上に現れることが多く、この方向における衝突回避の信頼性を向上させるためには、ロボットの左右に比べ、前方の観測を密に行うことが望ましいからである。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[5][6]。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。

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向に詳細な観測を行うことができる非等方な全方位視覚系の方が適していると考えられる。本論文では、角度分解能の分布が方位によって異なる非等方全方位視覚系の考えを示すと共に、シミュレーションを通じてそれらの特性評価を行う。

2. 非等方性全方位視覚

従来の全方位視覚系は、鉛直軸に関する回転体凸型ミラーを用いていたため、そ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、提案する非等方性全方位視覚系は、その水平断面形状が楕円形に近い凸型ミラーと平行受光系からなる。従って、4 : 3 や 16 : 9 といった汎用的な撮像素子を使用した場合、入力

画像面を効率良く使用することができるという特長を合わせ持つ。本論文では、球面ミラーの水平断面を楕円形にした凸型ミラーを 1 種、放物面と楕円を基準とした凸型ミラー 2 種を提案する。なお、シミュレーションによる評価では、提案する非等方性全方位視覚系が平行受光系を用いていることから、放物面ミラーを用いた等方性全方位視覚センサを比較対象とした。以下に各ミラー形状の定義式を示す。

2.1 放物面を用いた等方性全方位視覚

従来の等方性全方位視覚系[1-4]は、鉛直軸と方位方向軸でできる平面上でミラーの断面を定義し、それを鉛直軸周りに回転させることで三次元ミラー形状を定義している。ここで a は放物面ミラーの形状を与える定数である。

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

2.2 楕円球ミラー

最も単純な全方位視覚は半球ミラーを用いたものであり、その半球ミラーを X 軸方向に伸長したミラーが楕円球ミラーである。これはちょうどラグビーボールのような形をしている。ここで a, b は楕円パラメータである。

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

2.3 Biconic 放物面ミラー (BP ミラー)

BP ミラーは、 XZ 断面、 YZ 断面で異なる円錐曲率を持つ。すなわち次式に示すように、放物面ミラーを、水平断面が楕円になるように X 軸方向に伸長したミラーで、放物線の円錐曲率を変化させながら回転させた回転体ミラーである。ここで q は Z 軸周りの回転角、 a, b は水平断面形状を与える楕円パラメータ、 tZ 座標系は、 Z 軸を含む鉛直断面を表している。このミラーでは、放物線の焦点が鉛直軸である Z 軸上に分布するという特性があり、方位に関しては入力画像中での画像中心からの角度として観測できる。しかし、上下方向には焦点位置が変化するため単一視点とはならない。

$$\begin{aligned} X &= t \cos q \\ Y &= t \sin q \\ Z &= \frac{1}{2a} \left\{ \frac{at}{L(q)} \right\}^2 - \frac{a}{2} \end{aligned} \quad L(q) = ab \sqrt{\frac{\tan^2 q + 1}{b^2 \tan^2 q + a^2}} \quad (3)$$

2.4 水平固定視点 Biconic 放物面ミラー (HBP ミラー)

等方性全方位視覚は、 Z 軸周りに対象な光学系であることから、水平入射光線が方位に依らず同一平面上を観測することになり、その長所を生かした研究が数多く見られる。それに対し BP ミラーでは、放物線の焦点が上下してしまうこともあり、水平入射光線の高さが方位によって変化してしまう。そこで、第 3 の提案 HBP ミラーでは、BP ミラーを定義する放物線の焦点位置を、鉛直軸と方位方向軸

† 大阪大学大学院基礎工学研究科

でできる平面上の任意点とすることで，方位によらず同一水平面内を観察できるように設計を工夫している．以下にHBP ミラー形状の定義を示す．各軸，及びq,a,bの示すところはBP ミラーと同様である．

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

3. 射影特性の比較

画像認識の観点から考えれば，シーンがどのように射影されるのかは重要な問題である．特にここでは解像度・歪み・視野・直線性に関して，シミュレーションによって生成した入力画像を用いた定性的な評価を行う．シミュレーションでは，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，円筒の軸上中央に全方位視覚系を配置した状態で入力画像を生成している．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(Fig.1)．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．

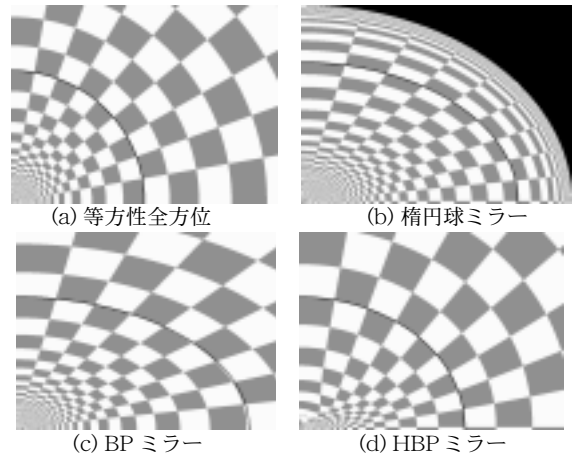


Fig.1 射影特性

4. 非等方性の評価

4.1 水平入射光線上での解像度変化

全方位視覚系を用いたナビゲーションの多くは，自己の水平周囲である水平入射光線を利用した手法である．そこで，水平入射光線の方位方向への解像度変化を調べることで非等方性を評価した(Fig.2)．

等方性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一定となっているが，提案した非等方全方位視覚系では全て側方（90deg 付近）よりも前方（0deg 付近）の解像度を大きくすることに成功している．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面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．

4.2 オプティカルフロー感度特性

オプティカルフローは二枚の画像から得られる，自己・対象物・環境等の中で生じた相対運動を示すものであり，移動ロボットでは奥行き推定・障害物回避・自己運動推定など多岐に渡って使用される．しかしながら，消失点(FOE)付近でのオプティカルフローはロボットの進行軸に近く最も衝突の危険が大きいにも関わらず，フローサイズが小さく観測されにくいという特性を持つ．そこで，消失点付近でのオプティカルフローの感度がどれだけ改善されたのかを，等方性全方位視覚に対してのフローサイズの増加比で評価した(Fig.3)．どの提案視覚系でも等方性全方位視覚に対して数十%フローサイズが向上しており，特に衝突までの時間が長い場合，すなわち，より早い時刻においての障害物発見が容易に行えることを示している．

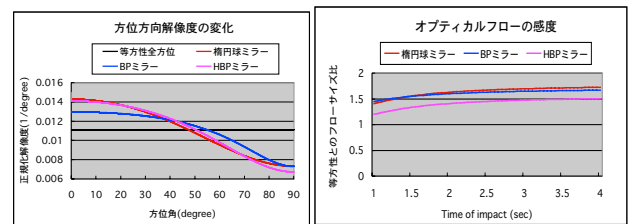


Fig.2 解像度変化

Fig.3 フロー感度比

5. まとめ

本報告では，「移動ロボットのナビゲーションへの全方位視覚系の利用」というロボットの進行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．また現段階での試作に加え，有効なミラーを試作，移動ロボットに搭載することで，その有用性を実証していきたいと考える．

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,川戸, „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,八木,谷内田, “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(DII), Vol.J79D II, No5, pp698-707, 1996
- [5] Irem Stratmann, „Omnidirectional Imaging and Optic Flow.,” in Proc. of IEEE Workshop on OMNIVIS, pp104-111,2002
- [6] Joshua Gluckman,Shree K. Nayer, „Ego-motion and Omnidirectional Cameras.,” in Proc. of ICCV, pp999-1005, 1998