

一般化全天球オプティカルフロー評価環境の開発

近藤一晃* 八木康史* 谷内田正彦*

*大阪大学 大学院基礎工学研究科

オプティカルフローは、運動や位置姿勢の推定ならびに動領域の抽出などさまざまな目的で利用されてきたが、全方位視覚センサにおいても、フローの現れ方に周期性があるなど、利用価値が高い。しかし、全方位視覚に関する研究は、単一視点の性質を持つ双曲面ミラーや放物面ミラーを利用したものから、多眼カメラからなるシステムまで多岐に渡る。そのためのフローの性質も、これらのセンサの持つ光学特性に左右される。そこで、本稿では、さまざまな全方位視覚系で観測されるオプティカルフローを統一的に評価するための一般化全天球センサ系ならびに一般化全天球オプティカルフローを提案すると共に、さまざまな仮想画像面上での現れ方を解析可能な全天球フローシミュレータを構築した。

Development of An Environment for Evaluating Generalized Spherical Optical Flow

Kazuaki Kondo* Yasushi Yagi* Masahiko Yachida*

* Graduate School of Engineering Science, Osaka University

Optical flow on the omnidirectional image sensor has several characteristics such as periodicity and symmetry. These characteristics are useful for computer vision applications. However, approaches for obtaining omnidirectional images can be classified roughly according to structure into the following three types; use of multiple images, use of special lenses and use of convex mirrors. Another criterion of omnidirectional sensor classification is whether it has a single center of projection or not. Visual specification of each sensor depends on sensor classification. In this paper, we propose the general representation of omnidirectional optical flow, named generalized spherical optical flow. Furthermore, we develop the spherical flow simulator that can observe optical flows on different types of sensor systems.

1. はじめに

オプティカルフローは、自己に対する観測点の相対的な位置変化をカメラスクリーン上に投影したものであり、コンピュータビジョンにおける重要な研究要素であり、古くから様々な用途に使用されてきた。具体的な例としては、自己の位置姿勢推定[1][2][7]・揺れ推定[3]・障害物回避[4]・対象物の追跡[6]・形状推

定[5]などがある。そして、カメラの周囲 360 度が観測可能な全方位視覚センサにおいても、観測の連続性が保証されていることから、フローパターンに周期性や対称性といった特徴があらわれることで、移動ロボットのナビゲーション[2]や徘徊動作・目標物体の追跡などのタスクに対して高い信頼性が期待でき、多くの研究が行われてきた。例えば、Nelson らは、均一なオプティカルフローが計測できるという条件下で、直交する三軸周りの大円周上でのオプティカルフロー

から、カメラの姿勢を推定する一般的手法を提案している[1]。また、Nayer ら[8]や西井ら[3]などは、放物面ミラーや双曲面ミラーなどを持つ全方位視覚センサの場合に関して、オプティカルフローからカメラの自己運動成分を推定する手法を提案している。ところで、観測系の特性から、これらの研究を見ると、これらの研究は、単一視点の性質を持つ全方位視覚センサ系を前提としている。ところが、一般に全方位の視野情報を取得するシステムには、カメラを回転させる方法や多数のカメラを用いる方法、さらには魚眼レンズやその他の特殊な光学系を利用する方法などがあり、それらの多くは視点位置が観測方向に依存している。

そこで本研究では、観測方向の違いにより視点位置の変化を生じる観測系のための表現方法として、一般化全天球センサ系を提案すると共に、このカメラ座標系上でのオプティカルフローを「一般化全天球オプティカルフロー」として幾何学的に定義し、さらにそれらを仮想的に算出する「全天球フローシミュレータ」を開発する。このシミュレータでは、双曲面ミラー・放物面ミラー・円錐ミラー・球面ミラー・魚眼レンズなどこれまでに考案されたほぼ全ての全方位センサ系が表現可能であるため、これらのカメラ間でのオプティカルフローの現れ方の違いを比較することができる。また、センサの視点系を決定するパラメータを変動させることで、オプティカルフローに現れる性質を調節することも可能であるから、本研究における提案は、新たなセンサ系・制御アルゴリズムの開発を行う上でも有用であると考えられる。なお、さまざまな全方位視覚センサを統一的に扱うアプローチは、Grossbergらにより General Imaging Model と呼ぶ方法が提案されている[11]。本研究で用いる一般化全天球センサ系も彼らのモデルと類似する考えであるが、彼らはオプティカルフローの表現ならぶにその解析には至っていない。

具体的に本報告では、一般化全天球オプティカルフローを取得・解析する環境として、「全天球フローシミュレータ」について述べ、さらに、開発したシミュレータを用いて、様々なセンサ系で観測されるオプティカルフローの分布を算出し、それを対象とした解析例を示す。

2. 一般化全天球オプティカルフロー

2-1. 一般化全天球センサ系

一般化全天球センサ系 (Generalized Spherical Sensor System) とは、任意の分布で配置した「視点群」と各視点ごとに視線方向が定義されたセンサ系である。

これは、Fig.1 のように世界座標系 Σ_0 上にセンサ座標系 Σ_s が定義され、 Σ_s に対して周りに任意の分布で視点座標系 Σ_c が定義されることを示している。そして、各視点座標系 Σ_c に対し、任意の視線ベクト

ルが定義され、観測対象 P はその視線上に存在する。このとき、視点座標系上で表された観測対象 P_c と正解座標上で表された観測対象 P_0 との間には以下のような関係が成り立つ。

$$P_c = M_c \cdot M_s \cdot P_0 \quad (1)$$

ただし、 M_s は世界座標系に対するセンサ系の座標系を、 M_c はセンサ座標系に対する視点座標系を位置と方向により表した座標変換行列である。

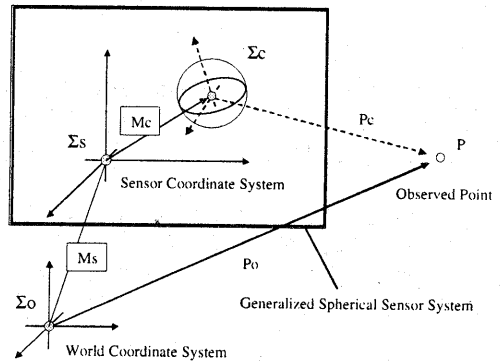


Fig.1 Generalized Spherical Sensor System

このように定めた一般化全天球センサ系では、

- 視点を分布させることで多視点系の表現が可能である
- 複数視点の位置を一点に固定することで単一視点系の表現が可能である
- 複数視点の位置ならびに方向を自由に配置できるため、特殊な光学系の設計が可能である

などの特徴を持つ。Fig.2 は、単一視点からなる「双曲面ミラーを用いた全方位視覚センサ HyperOmni Vision」を一般化全天球センサ系で表現した例で、すべての視点位置は、焦点に位置し、それらの視線方向の分布は双曲面ミラーの曲率に依存した分布となる。

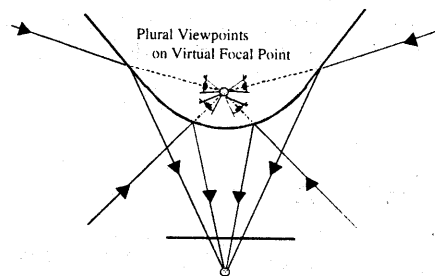


Fig.2 HyperOmni Vision represented on a Generalized Spherical Sensor System

2-2. 一般化全天球オブティカルフロー

本研究では、前節で定義した一般化全天球センサ系において、微小な自己運動をした場合に各視点で観測されるオブティカルフロー全体のことを一般化全天球オブティカルフロー (Generalized Spherical Optical Flows) と呼ぶ。各視点で観測されるオブティカルフローは、微小運動後の視点座標系上での観測点の位置ベクトルを球面スクリーン (ガウス球面) 上へ投影したときの経度・緯度の組み合わせで表現する (Fig.3)。

上記のように考えれば、一般化全天球オブティカルフローは、一つの視点座標系 (視点位置: $[X, Y, Z]$ 視線方向: $[\theta, \phi, \psi]$) に対して、二つのフロー成分 (F_{lon}, F_{lat}) で定義されることになり、一般化全天球センサ系の微小運動から生成される一般化全天球オブティカルフロー $Of = (F_{lon}, F_{lat}, 1)$ は、次式の観測対象の相対移動ベクトル Vf をガウス球面に投影したものととして、(3)式で定義される。

$$Vf = Mc \cdot Mv \cdot Ms \cdot Po \quad (2)$$

$$Of = (F_{lon}(X, Y, Z, \theta, \phi, \psi), F_{lat}(X, Y, Z, \theta, \phi, \psi), 1) \\ = \text{Projection to Gauss Plane}(Vf) \quad (3)$$

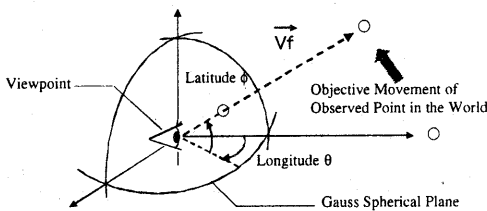


Fig.3 Definition of Generalized Spherical Optical Flow

ここで、 Ms , Mc は一般化全天球センサ系で定義された行列、 Mv は世界座標上でのセンサ系の微小運動である (Fig.4)。

以後本報告で扱うオブティカルフローは、この一般化全天球オブティカルフローとする。

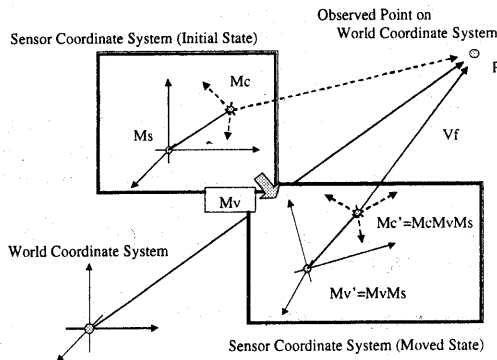


Fig.4 Relationship of Coordinate Systems & Matrices

3. 全天球フローシミュレータの開発

前節までの定義に基づき、一般化全天球センサ系を用いた時に現れるフロー分布を算出する「全天球シミュレータ」を開発した。以下にその構成について述べる。

3-1. シミュレーション環境 (入力)

前節の式で示されるように、オブティカルフローを算出するには、各座表系を表す行列 (Ms , Mc , Mv) と観測対象 Pc が必要である。前者はそのまま与えればよいが、後者は視線上に存在する環境内の一点であるので、これは環境モデルを与えることが必要である。

つまりシミュレーション環境として

- センサ系の世界座標に対する初期位置姿勢 (Ms)
- センサ系に対する視点の位置姿勢 (Mc)
- センサ系の微小運動量 (Mv)
- 仮想環境モデル

の4パラメータをシミュレータに与えることで、オブティカルフローの算出を行う。

3-2. フロー提示法 (出力)

本シミュレータでは、特にフローの大きさに注目し、次に示す三通りのオブティカルフロー提示法を解析を行う上での環境として用意した。

i) パノラマフロー

Fig.5 に示すようにパノラマフローとは、視点位置を経度と緯度で表し、経度を横軸、緯度を縦軸とする2次元座標上で、オブティカルフローも同様に経度・緯度で表されるベクトルで表現する方法で、本モデルを最も直接的に表現した方法で、次式のように示される。

$$\text{Panoramic Flow}(\theta, \phi) = (F_{lon}, F_{lat})$$

Fig.6 は、パノラマフローの一例である。

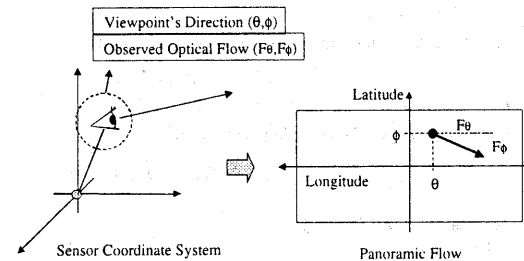


Fig.5 Panoramic Flow

ii) 直交リングフロー

次に、より解析的な特徴を観察できるような提示法を示す。これまでの全方位オブティカルフローを扱った研究からも、特徴的なフローは、3つの直交する大

円に現れる。そこで、並進運動の方向ベクトルを含む水平面上のフロー、垂直平面上のフロー、並びに並進運動の方向ベクトルに鉛直な平面上でのフローの3つの大円上でのフロー成分を対象とする。

具体的には、一般化全天球オプティカルフローでは水平視線で観測されるオプティカルフローに相当する。水平視線は視線の仰角が一定値 0° であるため、視線の方位角変化によるフローの変化を知ることができる。これを「水平リングフロー(Horizontal Ring Flow)」と呼び、この水平リングフローの経度と緯度の各々のフロー成分を「水平リング周囲フロー(Horizontal Ring Circumferential Ring Flow)」「水平リング放射フロー(Horizontal Radical Ring Flow)」と定義する。

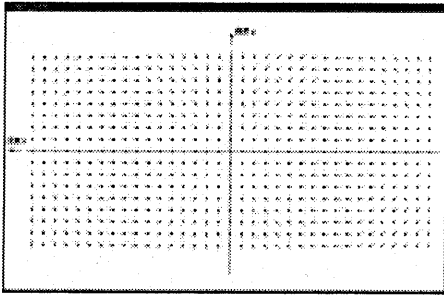


Fig.6 Example of Panoramic Flows

さらに、続く垂直平面上のフロー及び鉛直平面上のフローは、方位角がある値に固定された視線で観測されるオプティカルフロー群に相当する。具体的に言うと、前者は方位角を前後方向(0 もしくは $-\pi/2$)に固定した視線でのフロー、後者は方位角を左右方向($-\pi/2$ もしくは $\pi/2$)に固定した視線でのフローである。よって、前者を「垂直リング(Verticial Ring)」, 後者を「鉛直リング(Plumb Ring)」と定義し、水平リングと同様にしてフローを表現する。

これら6系統のフローを総称して「直交リングフロー(Cross Ring Flows)」と呼ぶ。直交リングフローの式を以下に、水平リングフローの例を Fig.7/8 に示す。

【水平リングフロー】

周囲フロー:

Horizontal Circumferential Ring Flow(θ)

$$= F_{lon}(X, Y, Z, \theta, \phi, \psi) \mid \phi=0$$

放射フロー:

Horizontal Radical Ring Flow(θ)

$$= F_{lat}(X, Y, Z, \theta, \phi, \psi) \mid \phi=0$$

【垂直リングフロー】

周囲フロー:

Vertical Circumferential Ring Flow(ϕ)

$$= F_{lon}(X, Y, Z, \theta, \phi, \psi) \mid \theta=0, -\pi$$

周囲フロー:

Vertical Radical Ring Flow(ϕ)

$$= F_{lon}(X, Y, Z, \theta, \phi, \psi) \mid \theta=0, -\pi$$

【鉛直リングフロー】

周囲フロー:

Plumb Circumferential Ring Flow(ϕ)

$$= F_{lon}(X, Y, Z, \theta, \phi, \psi) \mid \theta=-\pi/2, \pi/2$$

周囲フロー:

Plumb Radical Ring Flow(ϕ)

$$= F_{lon}(X, Y, Z, \theta, \phi, \psi) \mid \theta=-\pi/2, \pi/2$$

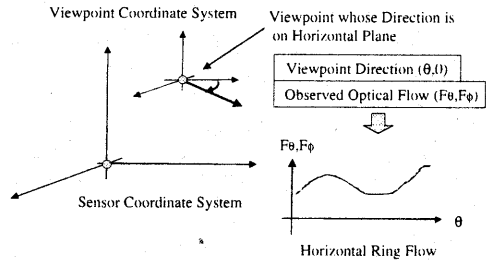


Fig.7 Horizontal Ring Flow

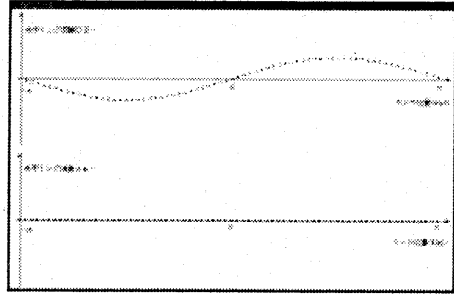


Fig.8 Example of Cross Ring Flow (Horizontal)

iii) カメラスクリーンフロー

上記で述べたようなフロー提示法は、本研究で提案した一般化全天球センサシステム上で観測されるフローである。しかし、実際に得られるのはカメラによって撮像された画像上に現れるフローであり、また、同じ単視点系のセンサシステムである双曲面ミラー系・放物面ミラー系などでは、一般化全天球オプティカルフローは同じ分布だがミラー形状が異なるため、実際に得られる画像には大きな差異が現れる。

このため、想定したセンサ系で実際に得られるフロー画像としてフロー提示を行うことも必要であると考え、センサ系固有のミラー形状やレンズ形状を考慮した上で、カメラで撮像されるフローを提示する「カメラスクリーンフロー(Camera Screen Flow)」を提案する。カメラスクリーンフローはセンサ系に依存したものであるため、ここでは、例として、双曲面ミラー系についての定義を示す。

Camera Screen Flow $(X, Y) = (F_x, F_y)$

$X = f \tan \alpha_\phi \cos \theta$

$$Y = f \tan \alpha_\phi \sin \theta$$

$$F_x = f \tan \alpha_{\phi+F_{slat}} \cos(\theta + F_{s_{lon}})$$

$$F_y = f \tan \alpha_{\phi+F_{slat}} \sin(\theta + F_{s_{lon}})$$

但し

$$[F_{s_{lon}}, F_{s_{lat}}, 1]^T = M c^{-1} O f$$

$$\phi = -\tan^{-1} \left[\frac{(b^2 + c^2) \sin \alpha_\phi - 2bc}{(b^2 - c^2) \cos \alpha_\phi} \right]$$

である (cf. Fig.9).

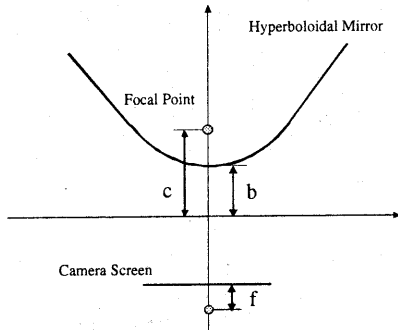


Fig.9 Parameter of Hyperboloidal Mirror Sensor

ところが、カメラスクリーンフローではパノラマフローと同様に細かなフローの変化を捕らえることができない。そこで、先に定義した「直交リングフロー」がスクリーン上に投影された部分のフローを取り出して示す手法も合わせて提案する。双曲面ミラー系では、中心軸に対して対象であるため、水平・垂直・鉛直の各フローは Fig.10 に示すように現れる。このため、各々、フローの位置の方位角変化・x 値変化・y 値変化、に対するフロー変化を示すこととなる。

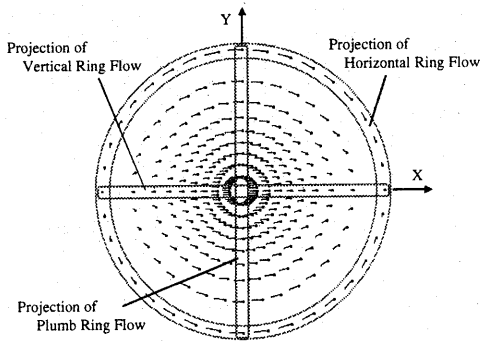


Fig.10 Example of Optical Flow on Image Plane (Hyperboloidal Mirror Sensor)

3-3. 全天球フローシミュレータの構成

3-1, 3-2 で述べた事柄を元に開発したフローシミュレータを Fig.11 に示す。シミュレータは大きく二つの部分に分かれており、一方は与えられたパラメータからオプティカルフローを算出する部分、もう一

方はオプティカルフローを提示する部分である。前者はパラメータを GUI 的に入力できるように設計されており、シミュレート開始ボタンを押すことでオプティカルフローの算出を行う (シミュレータ上部)。そして後者は 3-3 で構築したフロー提示方法に基づいてオプティカルフローを表示する (シミュレータ下部)。

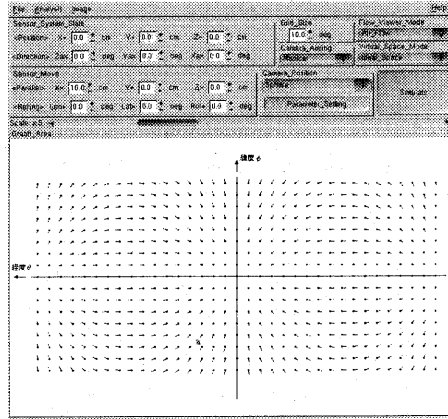


Fig.11 Appearance of Flow Simulator

4. シミュレート実験と考察

4-1. 視点分布変化

一般化全天球センサ系として球面上に分布した放射方向視線を持つ視点群を想定し、さらに仮想世界として球を想定したパラメータをシミュレータに与えた。このとき、視点分布する球面の半径をいろいろに変化させ、その変化に応じて生じるオプティカルフロー分布変化について解析を行った。シミュレータに与えたパラメータを Table.1 に示す。

Table.1 Simulation Parameter with Variation of Radius

	センサ系初期位置姿勢		センサ系運動量		視点分布
	位置 (cm)	姿勢 (deg)	並進 (cm)	回転 (deg)	
X	0	0	10	0	球面上視点分布 (球面ミラー系)
Y	0	0	0	0	
Z	0	0	0	0	

Table.1 で示した条件の元でシミュレートを行った結果の中で顕著な特徴が表れた直交リングフローを Fig.12/13 に示す。実験結果より、水平リング周囲フローにおいては、視点分布半径の増加に伴い、正弦波のフロー分布から、位相は変化しないが、振幅が非線形に増加した。また、鉛直リング放射フローでは一定値を示すグラフが得られたが、そのオフセット値の絶対値が増加した。このとき、半径増加に対してほぼ線形にオフセットの値が増加した (Fig.14)。この結果より、視点とセンサ中心との距離が得られるフローの大きさには、線形な関係があることがわかる。つまり、ある方向のフローの応答性能を変えたい場合は、その方向を観測する視点のセンサ中心からの距離を調節し

てやれば良いことがわかる。

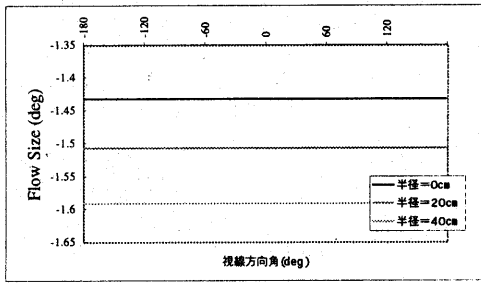


Fig. 12 Horizontal-Circumferential Ring Flow

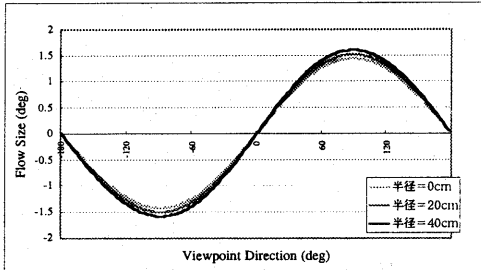


Fig. 13 Plumb-Radical Ring Flow

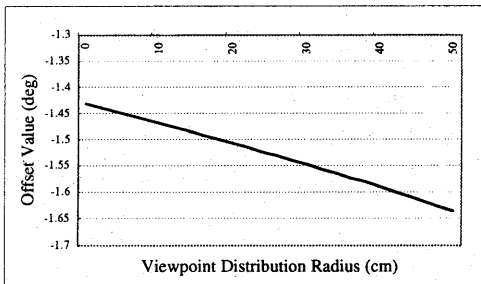


Fig. 14 Offset Value Variation in Viewpoint Distribution Radius Variation

4-1. ミラー形状変化

次にセンサ系を変えた場合、フローにどのような変化が現れるのかをシミュレートした。具体的には形状の違った二つのミラーを用いた全方位センサ系である「双曲面ミラー系」と「放物面ミラー系」を想定し、各々のセンサ系において観測されるフローをシミュレートした。各センサ系のミラー形状パラメータをTable.2に、方部面ミラー系の光学系をFig.15に示す。

Table.2 Simulation Parameter about Mirror Figure

	Para m etarc (ca.)	Para m eterb (ca.)	Para m eterf (ca.)	Figure
Hyperbola1	10	4		2 Figure 16
Parabo la1	6	Nbne		Nbne. Figure 17
Parabo la2	1	Nbne		Nbne. Figure 18

まず、ミラー形状を決定するパラメータのうち、焦点の位置を決定するパラメータを一致させてシミュレートを行った（両者ともミラー底面から4cmの位置に焦点を設定した）ところ、カメラスクリーン上にスケールの大きく違うフロー分布が現れた（Fig.16/17）。

このような差異が現れた原因として、放物面ミラー系においてはミラーで反射された光線がカメラスクリーンに対して垂直に入射してくるため（Fig.15）、ミラー上でのフローがそのまま像面上に投影されるのに対し、双曲面ミラー系では反射した光線が外部焦点に集約するため射影カメラ系となり、ミラー上でのフローが縮小されてカメラスクリーン上に現れることが考えられる。

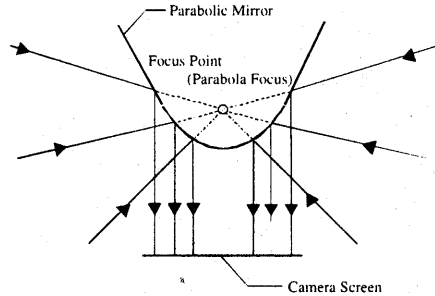


Fig. 15 Parabolic Mirror Sensor

次に、このままでは両者に現れたフローを比較することができないため、放物線ミラー系のパラメータを変化させ、双曲面ミラー系と同じ観測領域が像面内に収まるようにした（Fig.18）。この段階では、二つのフロー分布の間に大きな差異は見られない。よって、より細かく違いを比較するために、カメラスクリーンフローにおける直交リングフローに相当する部分のフローサイズを取り出した（Fig.19/20/21）。

視線方向が水平（仰角0°）である水平フローに関しては、スケール差はあるものの、放物面と双曲面の間にフローサイズ変化に違いは見られない（Fig.19）。

大きな差異が現れたのは垂直フロー（Fig.20）と鉛直フロー（Fig.21）である。先に述べたように、放物面ミラーではミラー上でのフローがそのままカメラスクリーンに投影されるので、ミラー形状の変化に応じた滑らかな曲線となっているが、双曲面ミラーでは原点付近の山ができています。これは反射点が中心に近づくにつれて、カメラスクリーンにも近づくため、本来よりも大きくフローが現れるためだと考えられる。

また、鉛直フローに関しては、一般化全天球センサ系では一定値を示すのに対し、カメラスクリーン上ではお椀のような形である点に注目できる。これは、セン中心軸から遠ざかるにつれ、ミラー面が観測対象に近づくことにより大きなフローが現れるためである。さらに、垂直フローと同様の理由から、双曲面ミラーのグラフにおいて原点付近で増加の山が見られる。

5. おわりに

本研究では、オプティカルフローをより一般的に捕らえて解析を行うために、一般化全天球センサ系・一般化全天球オプティカルフローを提案した。さらに一般化全天球オプティカルフローを仮想的に算出するようなシミュレータを開発し、その有用性を評価するために簡単なシミュレート実験と解析を行った。その結

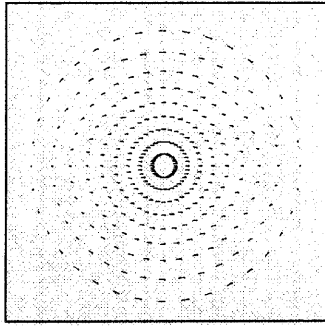


Fig.16 Camera Screen Flow of Hyperbola

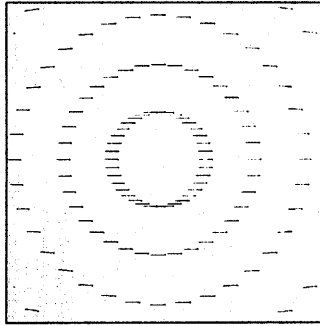


Fig.17 Camera Screen Flow of Parabola

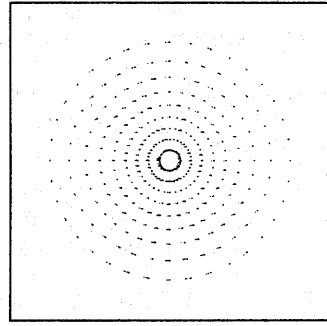


Fig.18 Camera Screen Flow of Parabola (adjusted)

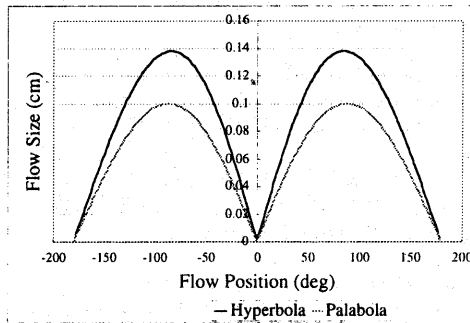
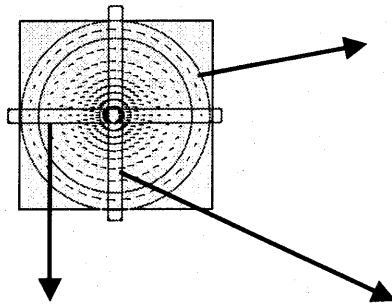


Fig.19 Flow Size Variation (Horizontal)

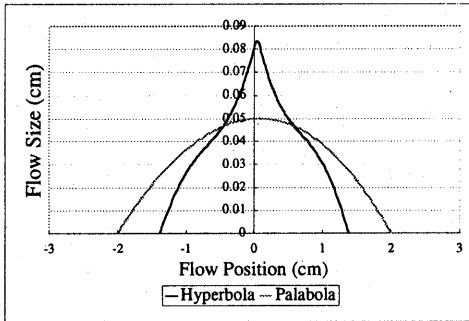


Fig.20 Flow Size Variation (Vertical)

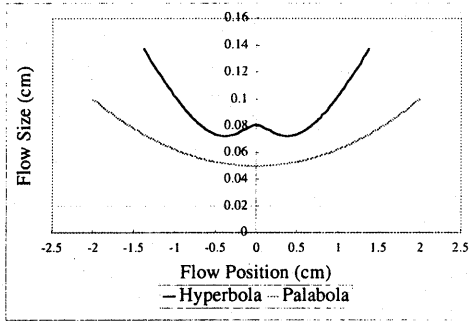


Fig.21 Flow Size Variation (Circumferential)

果、フローシミュレータを用いて観測されるオプティカルフローの大きさや形状の特徴を利用することで、オプティカルフローの解析を行うことが可能であることが実証された。よって、本研究で提案する一般化全天球オプティカルフローの概念、及びそれを元に開発されたオプティカルフロー解析環境は、自己の周囲で観測されるオプティカルフローの解析を行う手段として有用であると言える。

参考文献

- [1] R.C.Nelson and J.Aloimonous. Finding Motion Parameters from Spherical Motion Fields. *Biological Cybernetics* 58, pp261-273, 1998
- [2] Fumiya Iida. Goal-Directed Navigation of an Autonomous Flying Robot Using Biologically Inspired Cheap Vision. In *Proc. of ISR* 32, pp1404-1409, 2001
- [3] 西井 渉, 八木 康史, 谷内 田正彦. 全方位オプティカルフローからの移動ロボットの揺れ推定. *電子情報通信学会論文誌*. VolJ80-D2.No6, pp1512-1521. 1997
- [4] 八木 康史, 川戸 真二郎, 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 VolJ74-D2.No7,pp908-917,1991

[5]太田直哉,齋藤佳明.オプティカルフローの再検出による高精度な形状復元.電子情報通信学会論文誌 VolJ81-D2.No6,pp1123-1131,1998

[6]岡田隆三,白井良明,三浦純,久野義徳.オプティカルフローと距離情報に基づく動物体追跡.電子情報通信学会論文誌 VolJ80-D2.No.6,pp1530-1538,1997

[7]畑幸一,青木利道,柴藤稔.全方位嗅画像を用いた移動ロボットの運動パラメータ推定.電子情報通信学会論文誌 VolJ84-D2.No.3,pp448-458,2001

[8] Joshua Gluckman and Shree K.Nayer.Ego-Motion and Omnidirectional Cameras.In Proc.Int.Conf. on Computer Vision.pp999-1005,1998

[9] Shishir Shah and J.K. Aggarwal.Mobile robot navigation and scene modeling using stereo fish-eye lens system. Machine Vision & Applications.vol10,pp159-173,1997

[10]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,電子情報通信学会論文誌.VolJ79-D2.No5,pp698-707.1996

[11]Michael D. Grossberg and Shree K. Nayar : A General Imaging Model and a Method for Finding its Parameters, Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision, 2001.