

# 全天球オプティカルフローからの3次元自己運動推定

岩間晴之<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

<sup>††</sup>大阪大学産業科学研究所

**概要** 本報告では、自己運動に伴い、全方位視覚センサにより得られたオプティカルフローからカメラ運動を推定する手法を提案する。単一視点の特性を持つ全方位視覚センサでは入力画像を球面座標系に変換できることに加え、球面座標系の大円上のオプティカルフローは周期関数により定義できる。この特性に着目し、提案手法では、互いに直交な3つの大円上のオプティカルフローから、カメラの3次元運動を推定する。

## Ego-motion Estimation from Spherical Optical Flows

Haruyuki Iwama<sup>†</sup> Yasushi Yagi<sup>††</sup> Masahiko Yachida<sup>†</sup>

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

<sup>††</sup>The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

**Abstract** Described here is a method for estimating 3D ego-motions using optical flows, which observed by an omnidirectional image sensor. To estimate egomotion with 6DOF, the proposed method use optical flows on three orthogonal great circles on spherical coordinates. Optical flow on a great circle has a periodic characteristic. The proposed method makes use of this characteristic to estimate 3D ego-motion of the omnidirectional image sensor.

### 1. はじめに

視覚センサは外界情報を獲得するセンサの1つとして利用され、ナビゲーション問題においても、エピポーラ幾何の拘束を利用するものや、画像中のオプティカルフローを利用するものなど、様々な自己運動の推定法が報告されている。一般的なカメラをモデルとした手法として、時系列画像中の8点以上の対応を得ることにより、それらのエピポーラ幾何の拘束を利用して自己運動を復元する手法が代表的である[1]。この手法では未知の観測点からの運動推定が可能で、さらに全ての運動成分を同一の観測方程式から推定できる。ただし、一般に多くの未知数を同一の観測方程式で同時に推定した場合、観測誤差の影響が相互に影響し合

うため、安定な推定が行いにくい。

ところで、視覚センサの中でも全方位視覚センサは周囲360度が1度に観測可能で、ナビゲーションに対して特に有効なセンサであるといえる[2][3]。運動の推定という点からいっても、その特性を利用して全方位ならでの効果的な推定を行うことができる。

全方位の特性を利用した従来の手法[4][5][6]としては、単一焦点の全方位視覚センサでは全天球という赤道上のオプティカルフローが経度方向成分と緯度方向成分がそれぞれ正弦曲線として近似できる、という周期的な特性を利用した推定方法が数多く提案されている。これらの手法では各運動成分を、オプティカルフローの経度方向成分と緯度方向成分からそれぞれ独立かつ線形に推定できるという特徴がある。しかし、環

境中の観測点は全てセンサ中心から等距離にあるという仮定をおいてる。

本研究では、視覚センサとして単一焦点の全方位視覚センサを想定し、そこから得られる全天球画像上の互いに相直交するような3つの大円上に現れるオプティカルフローに着目する。そしてそれぞれのオプティカルフローを経度方向成分・緯度方向成分に分離、利用することによって、それらのフロー情報から独立性が強く、かつ環境に依存せずに精度良く安定に自己運動（環境に対する自己の回転運動と並進運動）を推定する手法を提案する。独立性が強いとは、個々のフロー情報のもつ誤差の影響を受けにくいということである。本手法においては運動対象はセンサ系そのものとし、センサ系の運動は6自由度の運動で、局所的に一定かつ微小であるとする。またオプティカルフローは周囲360度から連続的に得られるものとしている。

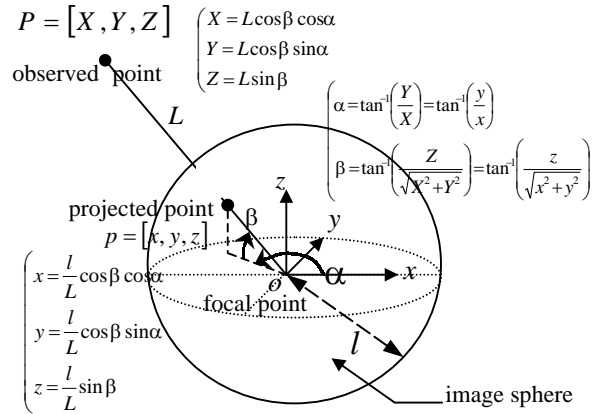


図 2.1.1：球面座標系

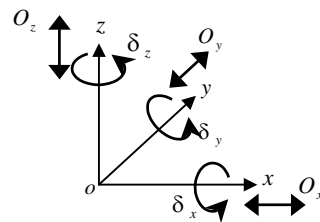


図 2.2.1：運動パラメータの定義

## 2. 自己運動とオプティカルフロー

### 2.1 センサ座標系の定義

全方位視覚センサはその特性から、観測点の画像面への投影を、ミラー焦点を原点とした球面スクリーン上への投影として考えることができる。本研究では図2.1.1のようにセンサの座標系を定義する。ここにおいて、空間中の任意の観測点  $P$  の経度・緯度は、画像面上のその点の投影の経度・緯度として直接現れる。即ち、点  $P$  の経度  $\alpha$ 、緯度  $\beta$  は、その投影点  $p$  の球面上での経度・緯度を計算することで得ることができる。

### 2.2 大円上のオプティカルフローと運動の関係

前節で示した座標系のもとで、センサ系の運動を、

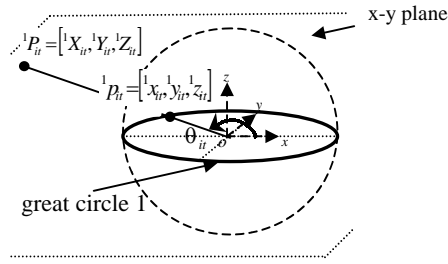
各軸方向への並進移動量： $O_x, O_y, O_z$

各軸回りの回転角度： $\delta_x, \delta_y, \delta_z$

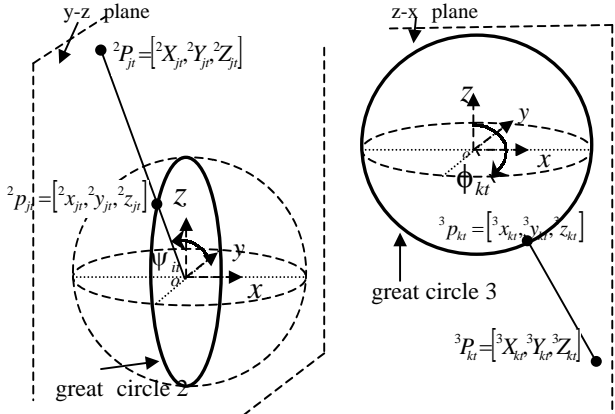
の6つのパラメータで定義する(図2.2.1)。このパラメータの下で、センサ系が微小運動したときに観測される各観測点のオプティカルフローは、投影点の経度変化・緯度変化の組み合わせで表現することができる。球面上でのオプティカルフローの内、図2.2.2に示す3

つの大円(great circle)上のオプティカルフローだけに着目するとその現れ方は、例えば  $x$  軸方向への並進運動であれば図2.2.3のようになる。即ち、この運動においては各大円上に投影される点はそれぞれ経度変化又は緯度変化が生じるだけである。これは他の運動についても同様で、大円上に投影される点の経度変化と緯度変化はそれぞれ特定の運動の影響を強く受け、他のパラメータの影響をほとんど受けない。この性質は大円特有のものであり、運動を独立に推定する上で有効な性質であるといえる。本研究ではこれらの直交する大円上のオプティカルフローを水平方向成分の周囲フロー(circumferencial flow)と、鉛直方向成分の放射フロー(radial flow)に分割し、センサ系の運動パラメータを推定する。以下、本節では大円上のオプティカルフローとセンサ系の運動の関係について説明する。

前節で述べた全方位の特性から、放射フロー・周囲フローは観測点の運動前後での経度差・緯度差として直接現れる。従って観測点の運動(座標変換)による運動前後の空間中での座標変化を得れば、そこから放射フロー・周囲フローを運動パラメータで定式化することができる。



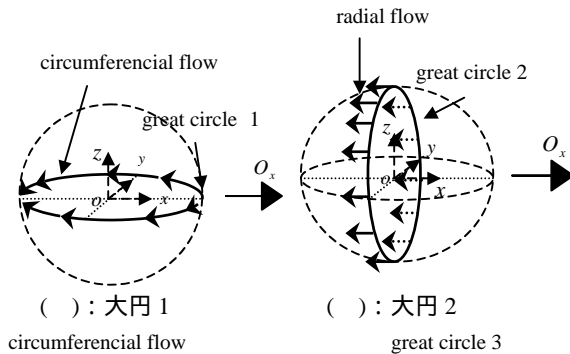
(a) : 大円 1



(b) : 大円 2

(c) : 大円 3

図 2.2.2 : 大円の定義

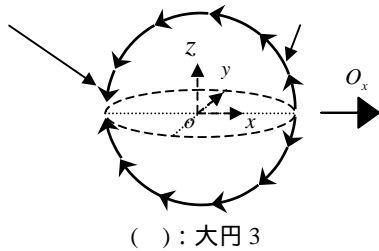


( ) : 大円 1

( ) : 大円 2

circumferential flow

great circle 3



( ) : 大円 3

図 2.2.3 : 並進運動(x 軸方向)によるオプティカルフロー

大円 1 上の点について考えると、第 t フレームにおいて大円 1 上に投影されている点の個数を  $N_1$  個とし、各点を  ${}^1P_{it} = ({}^1X_{it}, {}^1Y_{it}, {}^1Z_{it})$  ( $i=1, 2, \dots, N_1$ ) とすると、それはその方位  $\theta_{it}$  と距離  ${}^1L_{it}$  を用いて次式で表される。

$${}^1P_{it} = \begin{bmatrix} {}^1X_{it} \\ {}^1Y_{it} \\ {}^1Z_{it} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1L_{it} \cos \theta_{it} \\ {}^1L_{it} \sin \theta_{it} \\ 0 \end{bmatrix} \quad - (2.2.1)$$

この点  ${}^1P_{it}$  が第 t フレーム 第 t+1 フレームにおいて先に定義したパラメータで運動したとすれば、各観測点が相対的な運動(大きさが同じで符号が反対の運動)をしたと考えることができ、運動の大きさが十分に微小であれば、点  ${}^1P_{it}$  の第 t+1 フレームでの座標  $({}^1X_{it+1}, {}^1Y_{it+1}, {}^1Z_{it+1})$  は、次のように近似できる[7] [8]。

$$\begin{aligned} {}^1P_{it+1} = \begin{bmatrix} {}^1X_{it+1} \\ {}^1Y_{it+1} \\ {}^1Z_{it+1} \end{bmatrix} &\approx \begin{bmatrix} 1 & \delta_z & -\delta_y \\ -\delta_z & 1 & \delta_x \\ \delta_y & -\delta_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1X_{it} \\ {}^1Y_{it} \\ {}^1Z_{it} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -O_x \\ -O_y \\ -O_z \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} {}^1L_{it}(C_{\theta_{it}} + S_{\theta_{it}}\delta_z) - O_x \\ {}^1L_{it}(S_{\theta_{it}} - C_{\theta_{it}}\delta_z) - O_y \\ {}^1L_{it}(C_{\theta_{it}}\delta_y - S_{\theta_{it}}\delta_x) - O_z \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_{\theta_{it}} = \sin \theta_{it} \\ C_{\theta_{it}} = \cos \theta_{it} \end{pmatrix} \quad - (2.2.2) \end{aligned}$$

大円 2・大円 3 上に投影されている点の t フレーム t+1 フレームにおける座標も同様に、対称的に表される。従って、これらの座標から、第 t フレームから第 t+1 フレームの運動に伴い各大円上で観測される周囲フロー・放射フローは、各観測点の空間中での経度変化・緯度変化として、次のように定式化される。

#### 大円 1 (t フレーム t+1 フレーム)

・周囲フロー :

$$\begin{aligned} {}^1F_{C_{t+1}}(\theta_{it}) &= \tan^{-1} \left( \frac{{}^1Y_{it}}{{}^1X_{it}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{{}^1Y_{it+1}}{{}^1X_{it+1}} \right) \\ &= \theta_{it} - \tan^{-1} \left( \frac{{}^1L_{it}(S_{\theta_{it}} - C_{\theta_{it}}\delta_z) - O_y}{{}^1L_{it}(C_{\theta_{it}} + S_{\theta_{it}}\delta_z) - O_x} \right) \quad - (2.2.3) \end{aligned}$$

・放射フロー :

$$\begin{aligned} {}^1F_{R_{t+1}}(\theta_{it}) &= -\tan^{-1} \left( \frac{{}^1Z_{it+1}}{\sqrt{{}^1X_{it+1}^2 + {}^1Y_{it+1}^2}} \right) \\ &= -\tan^{-1} \left( \frac{{}^1L_{it}(-S_{\theta_{it}}\delta_x + C_{\theta_{it}}\delta_y) - O_z}{{}^1L_{it} - (C_{\theta_{it}}O_x + S_{\theta_{it}}O_y)} \right) \quad - (2.2.4) \end{aligned}$$

ただし、 $\sqrt{{}^1X_{it+1}^2 + {}^1Y_{it+1}^2} \approx {}^1L_{it} - (C_{\theta_{it}}O_x + S_{\theta_{it}}O_y)$

#### 大円 2 (t フレーム t+1 フレーム)

・周囲フロー :

$${}^2F_{C_{t+1}}(\psi_{jt}) = \tan^{-1} \left( \frac{{}^2Z_{jt}}{{}^2Y_{jt}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{{}^2Z_{jt+1}}{{}^2Y_{jt+1}} \right)$$

$$= \psi_{jt} - \tan^{-1} \left( \frac{{}^2L_{\psi_{jt}} (S_{\psi_{jt}} - C_{\psi_{jt}} \delta_x) - O_z}{{}^2L_{\psi_{jt}} (C_{\psi_{jt}} + S_{\psi_{jt}} \delta_x) - O_y} \right) - (2.2.5)$$

・放射フロー：

$$\begin{aligned} {}^2Fr_{t,t+1}(\psi_{jt}) &= -\tan^{-1} \left( \frac{{}^2X_{jt+1}}{\sqrt{{}^2Y_{jt+1}^2 + {}^2Z_{jt+1}^2}} \right) \\ &= -\tan^{-1} \left( \frac{{}^2L_{jt} (-S_{\psi_{jt}} \delta_y + C_{\psi_{jt}} \delta_z) - O_x}{{}^2L_{jt} - (C_{\psi_{jt}} O_y + S_{\psi_{jt}} O_z)} \right) - (2.2.6) \end{aligned}$$

ただし,  $\sqrt{{}^2Y_{jt+1}^2 + {}^2Z_{jt+1}^2} \approx {}^2L_{jt} - (C_{\psi_{jt}} O_y + S_{\psi_{jt}} O_z)$

### 大円3 (t フレーム t+1 フレーム)

・周囲フロー：

$$\begin{aligned} {}^3Fc_{t,t+1}(\phi_{kt}) &= \tan^{-1} \left( \frac{{}^3X_{kt}}{{}^3Z_{kt}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{{}^3X_{kt+1}}{{}^3Z_{kt+1}} \right) \\ &= \phi_{kt} - \tan^{-1} \left( \frac{{}^3L_{\phi_{kt}} (S_{\phi_{kt}} - C_{\phi_{kt}} \delta_y) - O_x}{{}^3L_{\phi_{kt}} (C_{\phi_{kt}} + S_{\phi_{kt}} \delta_y) - O_z} \right) - (2.2.7) \end{aligned}$$

・放射フロー：

$$\begin{aligned} {}^3Fr_{t,t+1}(\phi_{kt}) &= -\tan^{-1} \left( \frac{{}^3Y_{kt+1}}{\sqrt{{}^3Z_{kt+1}^2 + {}^3X_{kt+1}^2}} \right) \\ &= -\tan^{-1} \left( \frac{{}^3L_{kt} (-S_{\phi_{kt}} \delta_z + C_{\phi_{kt}} \delta_x) - O_y}{{}^3L_{kt} - (C_{\phi_{kt}} O_z + S_{\phi_{kt}} O_x)} \right) - (2.2.8) \end{aligned}$$

ただし,  $\sqrt{{}^3Z_{kt+1}^2 + {}^3X_{kt+1}^2} \approx {}^3L_{kt} - (C_{\phi_{kt}} O_z + S_{\phi_{kt}} O_x)$

3 つの大円での周囲フロー・放射フローは(2.2.3)から(2.2.8)に示した6つの観測方程式で定式化できる。ここで、各大円での観測点の方位 $\theta_{it}$ ,  $\psi_{jt}$ ,  $\phi_{kt}$ , 周囲フロー ${}^1Fc_{t,t+1}(\theta_{it})$ ,  ${}^2Fc_{t,t+1}(\psi_{jt})$ ,  ${}^3Fc_{t,t+1}(\phi_{kt})$ , 及び放射フロー ${}^1Fr_{t,t+1}(\theta_{it})$ ,  ${}^2Fr_{t,t+1}(\psi_{jt})$ ,  ${}^3Fr_{t,t+1}(\phi_{kt})$ の計9個のパラメータは画像中で観測できるのに対し、未知数は観測点までの距離 ${}^1L_{it}$ ,  ${}^2L_{jt}$ ,  ${}^3L_{kt}$ と運動パラメータ $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_z$ ,  $O_x$ ,  $O_y$ ,  $O_z$ の合計9個となる。よって、観測方程式の数Nと未知数の数Mの間に、

$$M \leq N - (2.2.9)$$

が満たされれば、すべての未知数を推定することができる。しかし、上式を満たしただけでは未知数は独立に推定できるとは限らない。そこで本報告では未知数をいくつかのグループに分けて推定する方法を示す。

## 3. 運動パラメータの推定

### 3.1 3フレーム間のフロー情報の利用

大円1上のある1点 ${}^1P_{it}$ の周囲フロー・放射フローに着目する。すると、各々の式に含まれる項は以下のようになる。

$$\text{周囲フロー} : {}^1L_{it}, O_x, O_y, \delta_z$$

$$\text{放射フロー} : {}^1L_{it}, O_x, O_y, O_z, \delta_x, \delta_y$$

となっている。今、大円1上の点がs個あったとすると、周囲フロー・放射フローで式の数と未知数の数の関係は以下のようになっている。

$$\text{周囲フロー} : \text{式の数 } s < \text{未知数の数 } s+3$$

$$\text{放射フロー} : \text{式の数 } s < \text{未知数の数 } s+5$$

つまり、何点あろうと(2.2.9)式が満たされることがなく、方程式は解けない。これは、観測点の距離項が各点で違うために点の個数だけ未知数が増えるからである。従ってこの観測点の距離項を削除し、未知数が運動パラメータだけの方程式を得れば、それらを解くことでパラメータの推定ができる。そのために、提案手法では、各観測点の1フレーム前へのオプティカルフローに着目し、3フレーム間のフロー情報を利用することを考える。

センサ系の運動が微小かつ局所的に一定であると考えれば、隣接2フレーム間で運動は同じであると考えることができる。よって第tフレームを基準フレームとし、そこからの1フレーム前・後の3フレーム間でのフローは同じパラメータで定式化される。具体的に、第tフレームにおいて各大円上に投影されている点のt-1フレームへの周囲フロー・放射フローは以下のように定式化することができる。

### 大円1 (t フレーム t-1 フレーム)

・周囲フロー：

$$\begin{aligned} {}^1Fc_{t-1}(\theta_{it}) &= \tan^{-1} \left( \frac{{}^1Y_{it}}{{}^1X_{it}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{{}^1Y_{it-1}}{{}^1X_{it-1}} \right) \\ &= \theta_{it} - \tan^{-1} \left( \frac{{}^1L_{it} (S_{\theta_{it}} + C_{\theta_{it}} \delta_z) + O_y - O_z \delta_x + O_x \delta_z}{{}^1L_{it} (C_{\theta_{it}} - S_{\theta_{it}} \delta_z) + O_x - O_y \delta_z + O_z \delta_y} \right) - (3.1.1) \end{aligned}$$

・放射フロー：

$${}^1F_{r_{i-1}}(\theta_{it}) = -\tan^{-1}\left(\frac{{}^1Z_{i-1}}{\sqrt{{}^1X_{i-1}^2 + {}^1Y_{i-1}^2}}\right)$$

$$= -\tan^{-1}\left(\frac{{}^1L_{it}(S_{\theta_{it}}\delta_x - C_{\theta_{it}}\delta_y) + O_z - O_x\delta_y + O_y\delta_x}{{}^1L_{it} + (C_{\theta_{it}}O_x + S_{\theta_{it}}O_y)}\right) \quad (3.1.2)$$

ただし,  $\sqrt{{}^1X_{i-1}^2 + {}^1Y_{i-1}^2} \approx {}^1L_{it} + (C_{\theta_{it}}O_x + S_{\theta_{it}}O_y)$

### 大円2 (t フレーム t-1 フレーム)

・ 周囲フロー :

$${}^2F_{C_{i-1}}(\psi_{jt}) = \tan^{-1}\left(\frac{{}^2Z_{jt}}{{}^2Y_{jt}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{{}^2Z_{j-1}}{{}^2Y_{j-1}}\right)$$

$$= \psi_{jt} - \tan^{-1}\left(\frac{{}^2L_{jt}(S_{\psi_{jt}}\delta_x + C_{\psi_{jt}}\delta_z) + O_z - O_x\delta_z + O_z\delta_y}{{}^2L_{jt}(C_{\psi_{jt}} - S_{\psi_{jt}}\delta_x) + O_y - O_x\delta_x + O_x\delta_z}\right) \quad (3.1.3)$$

・ 放射フロー :

$${}^2F_{r_{j-1}}(\psi_{jt}) = -\tan^{-1}\left(\frac{{}^2X_{j-1}}{\sqrt{{}^2Y_{j-1}^2 + {}^2Z_{j-1}^2}}\right)$$

$$= -\tan^{-1}\left(\frac{{}^2L_{jt}(S_{\psi_{jt}}\delta_y - C_{\psi_{jt}}\delta_z) + O_x - O_y\delta_z + O_z\delta_y}{{}^2L_{jt}(C_{\psi_{jt}}O_y + S_{\psi_{jt}}O_z)}\right) \quad (3.1.4)$$

ただし,  $\sqrt{{}^2Y_{j-1}^2 + {}^2Z_{j-1}^2} \approx {}^2L_{jt} + (C_{\psi_{jt}}O_y + S_{\psi_{jt}}O_z)$

### 大円3 (t フレーム t-1 フレーム)

・ 周囲フロー :

$${}^3F_{C_{i-1}}(\phi_{kt}) = \tan^{-1}\left(\frac{{}^3X_{kt}}{{}^3Z_{kt}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{{}^3X_{k-1}}{{}^3Z_{k-1}}\right)$$

$$= \phi_{kt} - \tan^{-1}\left(\frac{{}^3L_{kt}(S_{\phi_{kt}}\delta_x + C_{\phi_{kt}}\delta_y) + O_x - O_y\delta_z + O_z\delta_y}{{}^3L_{kt}(C_{\phi_{kt}} - S_{\phi_{kt}}\delta_y) + O_z - O_x\delta_y + O_y\delta_x}\right) \quad (3.1.5)$$

・ 放射フロー :

$${}^3F_{r_{i-1}}(\phi_{kt}) = -\tan^{-1}\left(\frac{{}^3Y_{k-1}}{\sqrt{{}^3Z_{k-1}^2 + {}^3X_{k-1}^2}}\right)$$

$$= -\tan^{-1}\left(\frac{{}^3L_{kt}(S_{\phi_{kt}}\delta_z - C_{\phi_{kt}}\delta_x) + O_y - O_z\delta_x + O_x\delta_z}{{}^3L_{kt} + (C_{\phi_{kt}}O_z + S_{\phi_{kt}}O_x)}\right) \quad (3.1.6)$$

ただし,  $\sqrt{{}^3Z_{k-1}^2 + {}^3X_{k-1}^2} \approx {}^3L_{kt} + (C_{\phi_{kt}}O_z + S_{\phi_{kt}}O_x)$

上記(3.1.1)式 ~ (3.1.6)式と前記の(2.2.3)式 ~ (2.2.8)式の合計 12 式から観測点の距離項を削除した式を導く。以下は 3 つの大円の各観測点について, 3 フレーム間での周囲フローから距離項を削除した式, 放射フローから距離項を削除した式である。

・ 大円1・周囲フローから距離項を削除した式

$${}^1fc_{it}(O_x, O_y, O_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z) = 0 \quad (3.1.7)$$

・ 大円1・放射フローから距離項を削除した式

$${}^1fr_{it}(O_x, O_y, O_z, \delta_x, \delta_y) = 0 \quad (3.1.8)$$

・ 大円2・周囲フローから距離項を削除した式

$${}^2fc_{jt}(O_x, O_y, O_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z) = 0 \quad (3.1.9)$$

・ 大円2・放射フローから距離項を削除した式

$${}^2fr_{jt}(O_x, O_y, O_z, \delta_y, \delta_z) = 0 \quad (3.1.10)$$

・ 大円3・周囲フローから距離項を削除した式

$${}^3fc_{kt}(O_x, O_y, O_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z) = 0 \quad (3.1.11)$$

・ 大円3・放射フローから距離項を削除した式

$${}^3fr_{kt}(O_x, O_y, O_z, \delta_z, \delta_x) = 0 \quad (3.1.12)$$

以上の(3.1.7)式 ~ (3.1.12)式までの 6 式を組み合わせることによって, 各パラメータの独立性が高い推定式を導出していく。

## 3.2 推定式の導出

本節では前節までで示した 12 式から運動パラメータを推定する解法について説明する。なお, 各軸方向の並進移動量は, スケールファクターが存在しないためそれぞれある軸の移動量に対する比でしか求めることができない。

### 3.2.1 推定法 1

まず 1 つめの推定法では以下の表のフローの組み合わせから各パラメータを推定する。

表 3.2.1.1 : 推定法 1

	推定する運動パラメータ
大円1 周囲フロー & 大円2 放射フロー	$\frac{O_x}{O_y}, \delta_z$
大円2 周囲フロー & 大円3 放射フロー	$\frac{O_y}{O_z}, \delta_x$
大円3 周囲フロー & 大円1 放射フロー	$\frac{O_z}{O_x}, \delta_y$

大円1の周囲フローからの(3.1.7)式, 大円2の放射フローからの(3.1.10)式に着目する。大円1上の複数の点について(3.1.7)式と同様の観測方程式を得るので, それらの連立から $\delta_x$ を消去した次式を得る。

$${}^1fc_{i-i+1}(O_x, O_y, O_z, \delta_y, \delta_z) = 0 \quad (3.2.1.1)$$

さらに複数の点に関して(3.2.1.2)式, (3.1.10)式と同様の式が導かれるので, それらを連立し変数を消去していくと, 最終的に次のような線形方程式を得る。

$$\begin{aligned}
&g_{i-i+m, j-j+n, l} (O_x/O_y, \delta_z) \\
&= a_1 (\theta_{ii} \dots, \psi_{jj} \dots, {}^1Fc(\theta_{ii}) \dots, {}^2Fr(\psi_{jj}) \dots) \frac{O_x}{O_y} \\
&\quad + a_2 (\theta_{ii} \dots, \psi_{jj} \dots, {}^1Fc(\theta_{ii}) \dots, {}^2Fr(\psi_{jj}) \dots) \delta_z \\
&\quad + a_3 (\theta_{ii} \dots, \psi_{jj} \dots, {}^1Fc(\theta_{ii}) \dots, {}^2Fr(\psi_{jj}) \dots) = 0 \quad - (3.2.1.2)
\end{aligned}$$

これは大円1・周囲フローと大円2・放射フローを入力情報とした  $O_x/O_y, \delta_z$  についての線形な推定式である。

他のパラメータの推定式についても同様に、対称的に導出でき、表 3.2.1.1 のような推定が可能となる。

実際にこれらの線形推定式からパラメータを解くには大円1上で最低3個、及び大円2上で最低4個の観測点が必要で、そしてそれに加えてさらにどちらかの観測点3個の合計10点が最低限必要となる。

### 3.2.2 推定法2

次に2つめの推定法として以下の表のフローの組み合わせから各パラメータを推定する。

表 3.2.2.1 : 推定法2

	推定する運動パラメータ
大円1 周囲フロー & 大円2 放射フロー	$\frac{O_x}{O_y}, \delta_y$
大円2 周囲フロー & 大円3 放射フロー	$\frac{O_y}{O_z}, \delta_z$
大円3 周囲フロー & 大円1 放射フロー	$\frac{O_z}{O_x}, \delta_x$

推定法1で示した大円1上の複数の点の周囲フローから得られる(3.2.1.1)式、及び大円2上の複数の点についての放射フローからの(3.1.10)式を連立し、変数消去をしていくと最終的に次のような線形方程式を得る。

$$\begin{aligned}
&h_{i-i+m, j-j+n, l} (O_x/O_z, O_y/O_z, \delta_y) \\
&= b_1 (\theta_{ii} \dots, \psi_{jj} \dots, {}^1Fc(\theta_{ii}) \dots, {}^2Fr(\psi_{jj}) \dots) \frac{O_x}{O_z} \\
&\quad + b_2 (\theta_{ii} \dots, \psi_{jj} \dots, {}^1Fc(\theta_{ii}) \dots, {}^2Fr(\psi_{jj}) \dots) \frac{O_y}{O_z} \\
&\quad + b_3 (\theta_{ii} \dots, \psi_{jj} \dots, {}^1Fc(\theta_{ii}) \dots, {}^2Fr(\psi_{jj}) \dots) \delta_y \\
&\quad + b_4 (\theta_{ii} \dots, \psi_{jj} \dots, {}^1Fc(\theta_{ii}) \dots, {}^2Fr(\psi_{jj}) \dots) = 0 \quad - (3.2.2.1)
\end{aligned}$$

この(3.2.2.1)式は  $O_x/O_z, O_y/O_z, \delta_y$  の3変数の線形式となっている。即ち、これら3パラメータの線形な推定式

となっている。さらにここで、

$$\frac{O_x/O_y}{O_z/O_z} = \frac{O_x}{O_y} \quad - (3.2.2.2)$$

という関係があるので、この式から大円1の周囲フローと大円2の放射フローを入力情報として  $O_x/O_y, \delta_y$  の2パラメータが推定される。

他のパラメータの推定式についても同様に、対称的に導出でき、表 3.2.2.1 のような推定が可能となる。

実際にこれらの線形推定式からパラメータを解くには、大円1上で最低4個、大円2上で最低3個の観測点が必要で、それに加えてさらにどちらかの大円上の観測点2個の合計9点が最低限必要となる。

## 4. シミュレーション実験

### 4.1 シミュレータ概要

シミュレーションの流れを図 4.1.1 に示す。また、センサ系が運動する仮想的な環境として表 4.1.1 に示す環境を設定した。

表 4.1.1 : シミレーション環境

	距離	分布	個数
環境	ランダム( )	一様	320

( ) 大円1上 600[mm] ~ 1800[mm]

大円2上 1000[mm] ~ 2000[mm]

大円3上 800[mm] ~ 2400[mm]

また入力運動データセットとして下表 4.1.2 の2種類を設定する。

表 4.1.2 : 入力データセット

	運動パラメータ	
	角度成分 [deg]	並進成分 [mm]
データ a	$\delta_x = \delta_y = \delta_z = 0.05 \sim 1.0$ (0.05 刻みで変化)	$O_x = O_y = O_z = 20.0$ (一定)
データ b	$\delta_x = \delta_y = \delta_z = 0.5$ [deg] (一定)	$O_x = O_y = O_z = 2.0 \sim 100.0$ (2.0 刻みで変化)

以上の環境・データセットを用いて、推定法1・推定法2について次の実験を行った。

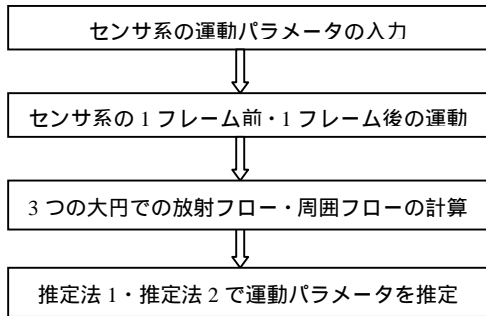


図 4.1.1：シミュレーションの流れ

### 実験

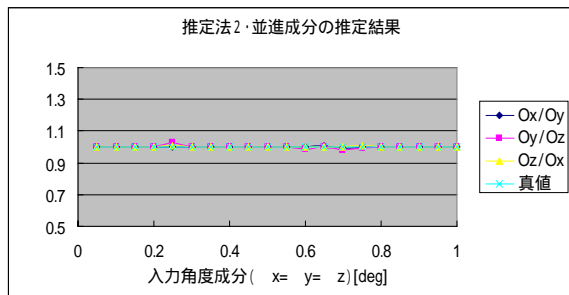
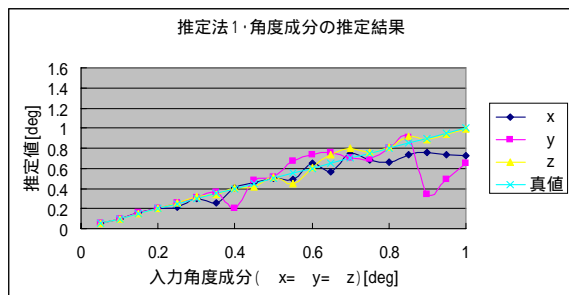
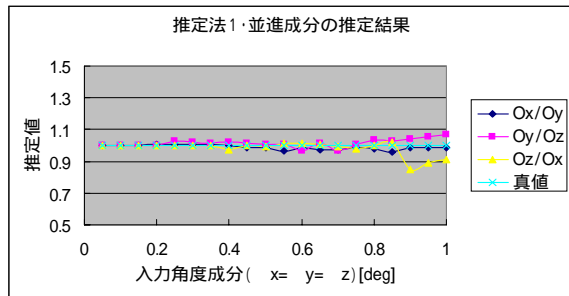
設定環境のもとで入力データ a、入力データ b を与え、観測フローに誤差をのせずに推定を行う。観測点の分布が一様で、かつフローの観測誤差が生じない環境下でセンサ系の運動を回転・並進でそれぞれについて大きくしていった場合に、どれくらいの大きさまでの回転運動・並進運動に対して提案推定方法が有効であるのかを検証する。

### 4.2 実験結果と考察

推定法 1 と推定法 2 について、前節で示した実験を行った。実験結果を図 4.2.1、図 4.2.2 に示す。

図 4.2.1 より、並進運動の大きさ一定の下で回転運動を大きくしていった場合、推定法 1 では各軸周りの回転運動が  $0.05[\text{deg}] \sim 0.5[\text{deg}]$  の区間であれば、回転・並進両成分ともに精度良く推定ができた。また、推定法 2 では各軸周りの回転運動が  $0.05[\text{deg}] \sim 1.0[\text{deg}]$  の区間で、回転・並進両成分ともに精度良く推定できた。これを実際の環境で考えた場合、画像のフレームレートを  $30[\text{Hz}]$  とした場合、各軸回りの角速度が推定法 1 では約  $15[\text{deg}/\text{sec}]$ 、推定法 2 では約  $30[\text{deg}/\text{sec}]$  の大きさまでの運動であれば、推定は精度良く行え、これは実際の移動ロボットを想定した場合、十分に現実的な値であるといえる。また図 4.2.2 より、回転運動の大きさ固定の下で並進運動を大きくしていった場合、推定法 1 では各軸方向の並進運動の大きさが  $30[\text{mm}/\text{frame}]$  以下で、推定法 2 では  $6[\text{mm}/\text{frame}]$  以下で、推定の精度が悪くなっている。これは、並進運動が小さいとフローが極めて小さく推定が不安定になっていたためだと

考えられる。また推定法 1 に比べて推定法 2 は観測フローサイズに対して許容範囲が広いということがいえる。推定法 1 においては各軸方向約  $30[\text{mm}] \sim 100[\text{mm}]$ 、推定法 2 においては各軸方向約  $6[\text{mm}] \sim 80[\text{mm}]$  までの大きさの並進運動であれば推定はロバストに行われていることがわかる。これを実際の環境で考えると、フレームレートが  $30[\text{Hz}]$  だとすれば、各軸方向への並進速度が推定法 1 では約  $90[\text{cm}/\text{sec}]$  以上、推定法 2 では約  $18[\text{cm}/\text{sec}]$  以上でなければロバストな推定が行えないということになる。推定法 1 に関しては、これは一般的な移動ロボットの移動速度を考えた場合、非現実的な速度であるといえるので、フレームレートを下げ、かつセンサ系の運動を緩やかに変化させるなどの措置をとれば、実環境での適用も可能であると考えられる。これら入力データ a、入力データ b に対する推定結果から設定環境下では推定法 2 の方が有効だといえる。



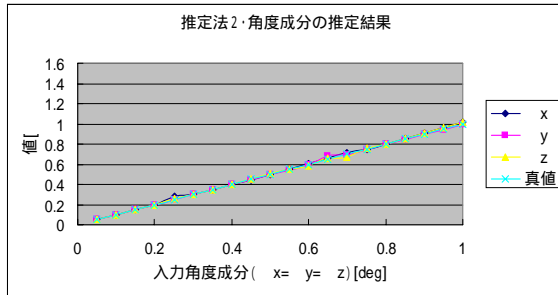


図 4.2.1：実験結果 1(入力データ a)

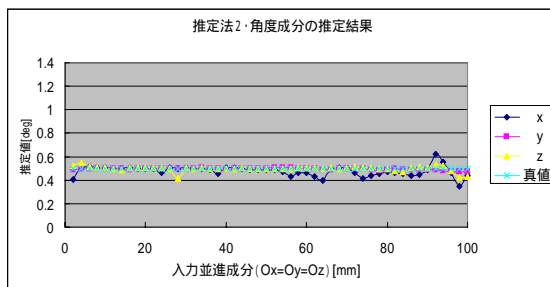
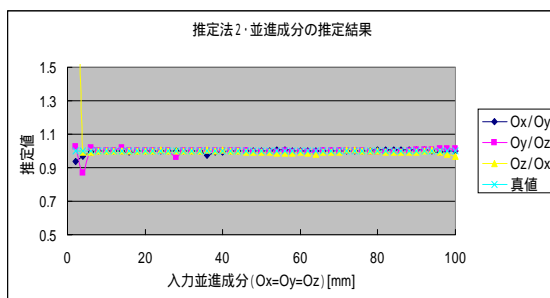
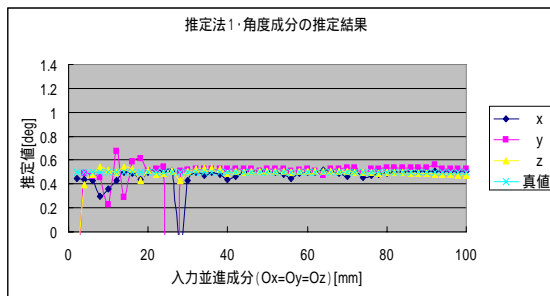
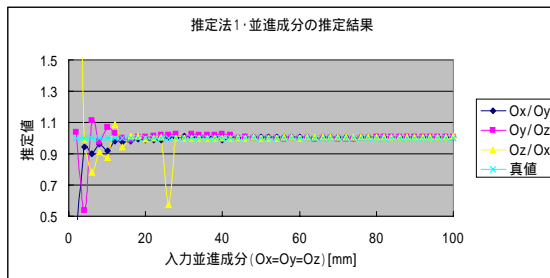


図 4.2.2：実験結果 2(入力データ b)

## 5 . おわりに

本研究では、全天球上の互いに直交する3つの大円上のオプティカルフローを周囲フローと放射フローに分離し、3フレーム間での周囲フロー・放射フロー情報からセンサ系の6自由度の自己運動を推定する手法を提案した。本手法の特徴は環境に何の拘束も与えていない点、推定の独立性、即ち相異なるフロー情報から相異なる運動パラメータを推定している点にある。

シミュレーション実験を通して本手法の評価を行った。今後は、計算アルゴリズムを見直すと共に、観測誤差の影響についても評価する予定である。

## 参考文献

- [1] 徐剛, 辻三郎著, “3次元ビジョン”, 共立出版
- [2] 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 HyperOmniVision の提案”, 電子情報通信学会論文誌, VolJ79-D2, No5, pp698-707, 1996
- [3] 勝屋耕一, 八木康史, 谷内田正彦: “未知並進運動する移動ロボットにおける静止環境マップ生成”, 日本ロボット学会誌, 16.5, pp.690-697, 1998
- [4] R.C. Nelson and J. Aloimonos, “Finding Motion Parameters from Spherical Motion Fields”, Biological Cybernetics, vol.58, pp.261-273, 1988
- [5] 榎本雅幸, 三橋渉: “全方位画像からの自己運動と3次元構造の復元”, 信学技法 PRU91-126, 1-8, 1991
- [6] 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
- [7] K.S.Fu, R.C.Gonzalez, C.S.G.Lee: “ROBOTICS” McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS
- [8] 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳編: “コンピュータビジョン”, 新技術コミュニケーションズ