

## 二足歩行ロボットのための全方位画像からの自己位置推定手法

五十嵐 大斗<sup>†1</sup> 神原 利彦<sup>†1</sup> 関 秀廣<sup>†1</sup>

ロボットに搭載されたカメラから得られる画像から、ロボットの自己位置や姿勢を推定する研究は、数多く行われている。だが、単眼の画像から位置と姿勢を求めることは困難とされている。そこで本研究では、ジャイロでロボットの姿勢を計測し、その姿勢情報と画像情報とを併用することで高精度な自己位置の推定を目指す。

### An Estimation Method of Position from an Omnidirectional Image for a Two-leg Walking Robot

HIROTO IGARASHI,<sup>†1</sup> TOSHIHIKO KANBARA<sup>†1</sup>  
and HIEDHIRO SEKI<sup>†1</sup>

In the intelligent robotics field, many estimation methods of robot position and orientation have been proposed from images which are captured by a camera attached to the robot. Generally, it is difficult to estimate them from a monocular image. Espacially, it is too difficult to estimate range data. Thus, stereo vision methods or motion stereo methods are used for the range estimation in many papers. On the other hand, we try to estimate position of the robot from only one monocular omnidirectional image.

#### 1. 序 論

##### 1.1 研究目的

ロボットに搭載されたカメラから得られる画像から、ロボットの自己位置や姿勢を推定す

る研究は、数多く行われている。だが、単眼の画像から位置3次元、姿勢3次元のすべてを求めるのは困難とされている。特に、位置情報では奥行距離が推定しにくい。そのため、多くの研究では2台以上のカメラで同時に撮影したり、1台のカメラで時間差をつけて撮影することで、視差を発生させて、視差から奥行距離を推定し、自己位置の推定へと導いている。それに対し本研究では、あくまで単眼の画像から自己位置の推定を行う手法の提案を目指す。

具体例として、図1のような二足歩行ロボットが床に敷かれた太線に沿って歩くタスクを考える。まっすぐ歩いているつもりでも、左や右に逸れることがあるので、線からどれだけ逸れた位置にいるかを計測できなければ、このタスクを実行できない。ロボットの頭部には全方位カメラが搭載され、床に敷かれた二本の太線を画像で計測する。その一方で胸部に取り付けられたジャイロセンサがロボット(カメラ)の傾き角度を計測する。画像計測とジャイロでの計測を統合することで、高精度な自己位置の推定を目指す。

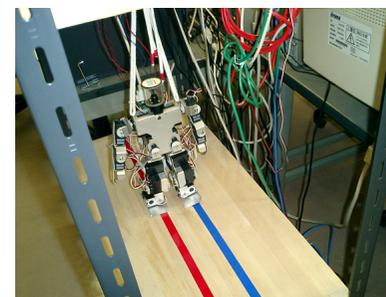


図1 頭部に全方位カメラを搭載した二足歩行ロボットと床に敷かれた二本の太線

Fig.1 A Two-leg Walking Robot with an Omnidirectional Camera and Two Thick Lines on the Ground

##### 1.2 関連研究

単眼の画像から3次元的な物体計測を行うことは、一般に難しいとされている。その理由は、画像は2次元であり水平方向と垂直方向の情報は記録されるものの、奥行の情報が失われているからである。そのため、なんらかの仮定や知識を使うことで3次元的な情報を推定している。例えば、平行で幅が既知の道路を単眼のカメラで観測すれば、画像処理で左右両側の境界線が抽出できる。それら境界線の交点が消失点となり、消失点の位置から自己姿勢が推定できる。さらに、画像上での境界線の傾き具合から、境界線に対して垂直な自己位置

<sup>†1</sup> 八戸工業大学大学院工学研究科

Graduate school of Engineering, Hachinohe Institute of Technology

も推定できる．当然ながら，カメラの焦点距離やカメラ高さなどの固定された情報が既知でなければならないが，運転者がいなくても自動的に走行できるシステムを構築するための基礎技術とされている．画像処理技術の発達にともない，頑健に境界線を抽出し精度良く消失点を推定しようという研究も多い．例えば，数井ら<sup>1)</sup>の手法が挙げられる．その他にも，中心射影カメラの単眼視を用いた研究例は多いが，全方位カメラの単眼視を用いた研究例は少ない．

一方で，2台以上のカメラから撮影した画像から自己位置を推定する手法や，ロボットが動く前と動いた後の2枚の画像を使って自己位置を推定する手法も多数提案されている．だが，これらの手法では1枚目の画像に写っている点が2枚目の画像のどこに写っているかを見つけ出す「対応付け」と呼ばれる処理が不可欠である．この処理では，誤った点に対応付けたり，手前の物体に隠されてしまい対応点が存在しない問題点などが発生する．単眼視であれば，対応付けの必要はない．全方位カメラを用いた自己位置・姿勢推定の研究としては，山澤ら<sup>2)</sup>や畑ら<sup>3)</sup>の研究がよく知られているが，彼らの研究でも複数枚の全方位画像の対応付けを行って，自己位置を推定している．本研究のように，全方位カメラで撮影した画像1枚のみ(単眼)で，対応付けを行わず自己位置を推定している研究例はほとんど存在しない．

沼沢ら<sup>4)</sup>は，ジャイロで姿勢を推定するという前提はあるものの単眼視で，同一平面上に乗っている平行な4線から自己位置を推定する手法を提案した．だが，この手法の検証はシミュレーションで行ったのみで，実機を使った実験をしていなかった．また，4本の平行線から拘束円という円を2個作成する際に，どのように選ぶのが最適であるかを検証していなかった．そこで，本研究では沼沢ら<sup>4)</sup>の研究を引き継いで，実機実験を行うための手法を提案し，最適な拘束円を作る組み合わせについて検証した結果を示す．

## 2. 手 法

### 2.1 問題設定

頭部に全方位カメラを搭載した二足歩行ロボットが，床平面に敷かれた2本の太い平行線を観測し，その観測結果から自己位置を推定する．そして，その位置が太線から外れていれば太線の方へ歩みを戻すように歩行制御する．全方位カメラは双曲面ミラーと上向きカメラを組み合わせたものを使用し，そのミラーの形状パラメータやカメラの焦点距離を既知とする．また，太線の幅や太線同士の間隔(図2参照)も既知とする．ロボットのボディ内部のジャイロセンサでカメラの傾き角度を計測する．

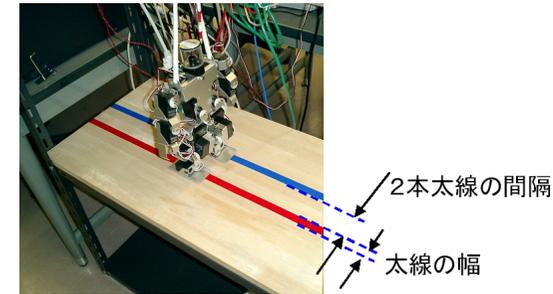


図2 既知の幅と間隔

Fig. 2 Thick lines whose width and interval are known

### 2.2 全方位カメラの撮像系

全方位カメラの撮像系を図3に示す．ミラー焦点を原点とし，鉛直軸を $Z_c$ とした座標系 $X_c - Y_c - Z_c$ を全方位カメラ基準の座標系とする．このカメラで， $(X_a, Y_a, Z_a)$ にある物体点を撮影すると， $(X_a, Y_a, Z_a)$ から放たれた光のうち，原点 $(0, 0, 0)$ に向かう光だけがミラー曲面で反射した後，カメラ焦点 $(0, 0, -2c)$ を通る．逆に言えば，原点 $(0, 0, 0)$ に向かわない光線は，たとえミラーに当たって反射しても反射光がカメラ焦点 $(0, 0, -2c)$ を通らないので撮影されない．焦点距離が $f$ の上向きカメラは，カメラ焦点が正確に $(0, 0, -2c)$ の位置に来るように設置されている．ミラー曲面上での反射点を $(X_m, Y_m, Z_m)$ とすると， $(X_m, Y_m, Z_m)$ と $(0, 0, -2c)$ を通る直線が反射光の光線となり，その光線と画像平面との交点が結像点 $(u_a, v_a)$ となる．

双曲面の式は，以下の式で表される．

$$\frac{X_c^2 + Y_c^2}{a^2} - \frac{(Z_c + c)^2}{b^2} = -1 \quad (1)$$

ここで， $a$ と $b$ は双曲面の形状を表すパラメータで $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ である．点 $(X_a, Y_a, Z_a)$ から放たれて原点 $(0, 0, 0)$ に向かう光線の式は，

$$\frac{X_c}{X_a} = \frac{Y_c}{Y_a} = \frac{Z_c}{Z_a} = \lambda \quad (2)$$

で表される．式(1)(2)の連立方程式を解いて，媒介変数 $\lambda$ の解 $\lambda_m$ は次式で求められる．

$$\lambda_m = \frac{a^2 c Z_a \pm a^2 b \sqrt{X_a^2 + Y_a^2 + Z_a^2}}{b^2 X_a^2 + b^2 Y_a^2 - a^2 Z_a^2} \quad (3)$$

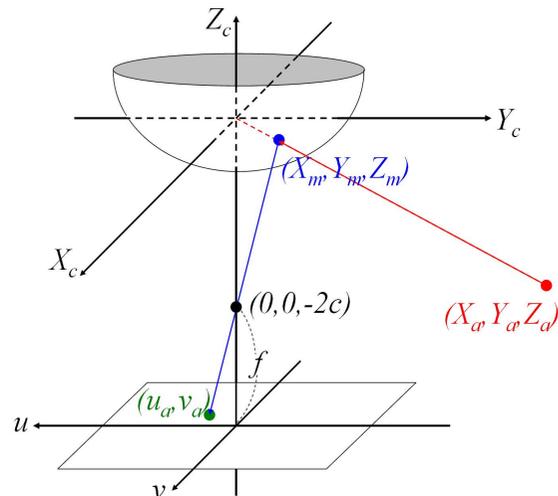


図3 全方位カメラの撮像系

Fig.3 Image Capturing System from an Ominidirectional Camera

上記の  $\lambda_m$  を使って反射点の座標位置  $(X_m, Y_m, Z_m)$  は  $(X_a \lambda_m, Y_a \lambda_m, Z_a \lambda_m)$  と求められる．それと焦点距離  $f$  を用いて，画像平面上での結像点  $(u_a, v_a)$  を求めると

$$u_a = \frac{f X_a \lambda_m}{Z_a \lambda_m + 2c}, \quad v_a = \frac{f Y_a \lambda_m}{Z_a \lambda_m + 2c} \quad (4)$$

となる．以上で，太線の境界線4本の上にある点  $(X_a, Y_a, Z_a)$  は画像上の点  $(u_a, v_a)$  で撮影されることが分かるが，画像上では小数点以下の座標値が丸められ，整数となる．例えば，2.34 という座標値は2に量子化され，3.72は4に量子化される．そのため，カメラでの撮影時には，最大で  $\pm 0.5[\text{pixel}]$  の量子化誤差が発生する．図4に全方位画像の例を示す．この画像を処理して，赤い線や青い線の境界線を構成する画素を検出して  $(u_{ij}, v_{ij})$  というの整数座標の系列が得られる．ただし， $i = 1, 2, 3, 4$  であり， $j = 1, 2, \dots, N_i$  とする．

### 2.3 境界線を構成する画素の抽出方法

本研究では，赤い太線と青い太線の境界線となる画素を抽出し，その座標値  $(u_{ij}, v_{ij})$  を記録して，推定計算に用いる．そのため，実画像から境界線を構成する画素を抽出できなければならない．境界線のように，色が急激に変化する部分を抽出する方法のひとつとして，パーティクル・フィルター（以下PFと略）が挙げられる．PFは，動画画像処理の一種であ

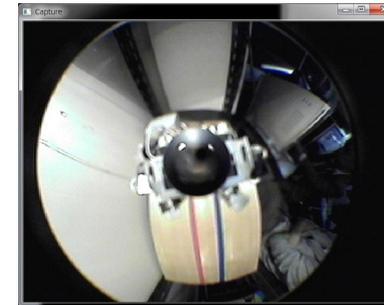


図4 全方位画像の例

Fig.4 Example of an Omnidirectional Image

り，多くの粒子（パーティクル）を画像上にランダムに散布した初期状態から，尤度を高めていく方向へそれぞれの粒子を移動させていく手法である．動画画像上で動く物体の境界線を追跡していく処理などに使われた例がある．

PFの尤度には，目的に応じた関数が使われるが，本研究では赤い太線の境界線と青い太線の境界線を抽出したいので，別々の尤度関数を用いる．画像上の点を  $(u, v)$  とし，その画素点における赤の輝度成分を  $r(u, v)$ ，緑の輝度成分を  $g(u, v)$ ，青の輝度成分を  $b(u, v)$  とすると，赤い境界線に近ければ近いほど大きな値となる尤度関数  $p_r(u, v)$  は次式で表される．

$$p_r(u, v) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_u(r(u, v) - r(u-1, v))^2 + 2\sigma_v(r(u, v) - r(u, v-1))^2}\right)$$

ただし，これは赤い太線の境界線を検出する尤度なので，青い境界線を検出するパーティクルに対しては，式の  $r(u, v)$  の部分を  $b(u, v)$  に置き換えた式を  $p_b(u, v)$  として定義し，組み込んでいく．

### 2.4 世界座標系と全方位カメラ座標系との関係

世界座標系を  $X_w - Y_w - Z_w$  とし，全方位カメラ基準の座標系を  $X_c - Y_c - Z_c$  とする．これらの2つの座標系の幾何学的な関係を図5に示す．世界座標系から，水平方向に  $x_0$ ，奥行方向に  $y_0$ ，垂直方向に  $z_0$  だけ並進させた場所に座標系  $X_c - Y_c - Z_c$  の原点があり，世界座標系からオイラー角  $\alpha, \beta, \gamma$  を使って座標軸を回転させたものがカメラ基準の座標系  $X_c - Y_c - Z_c$  である． $Z$  軸を中心に  $\alpha$  回し， $X$  軸を中心に  $\beta$  回し， $Y$  軸を中心に  $\gamma$  回したものである．この場合の  $X_w - Y_w - Z_w$  座標系と  $X_c - Y_c - Z_c$  座標系との関係は次式

で表される．

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$$

ただし， $\mathbf{R}$  は  $3 \times 3$  の回転行列であり，オイラー角  $\alpha, \beta, \gamma$  を用いて次式で表される．

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

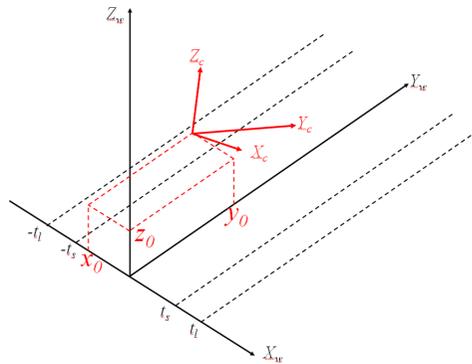


図 5 世界座標系を基準とした場合のカメラ座標系

Fig. 5 The camera coordinate system which is based on the world coordinate system

本手法では，カメラ座標系を基準として推定を行うのでカメラ座標系を基準とした形に変換すると，

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_w - x_0 \\ Y_w - y_0 \\ Z_w - z_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる．ここで， $\mathbf{R}^{-1}$  は回転行列の逆行列である．床面に敷かれた 2 本の太線の境界線は，媒介変数  $s$  を用いて世界座標系において  $(-t_l, s, 0)$ ， $(-t_s, s, 0)$ ， $(t_s, s, 0)$ ， $(t_l, s, 0)$  で表される．これを式 (5) に代入すれば，カメラ座標系を基準とした床面境界線の位置が算出でき

る．算出した例を図 6 に示す．

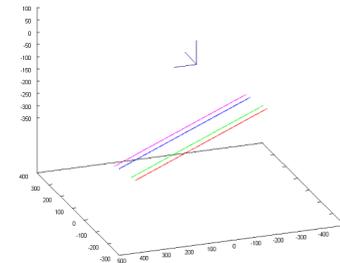


図 6 カメラ座標系を基準とした場合の床面上境界線

Fig. 6 Four boundary lines on the ground which are based on the camera coordinates

## 2.5 平面を用いた推定手法概要

前述のように，上向きカメラで撮影されるのはミラー焦点に向かってくる光線のみである．1 本の境界線上の点群から放たれてミラー焦点に向かう光線の集合は平面となる．そこで，本手法では境界線とミラー焦点とで張る平面について考慮する．図 7 に平面の概念を示す．太線の左右 2 本の境界線とミラー焦点で張られる平面が 2 枚生成され，その 2 枚の平面の交線は，境界線に対し平行である．

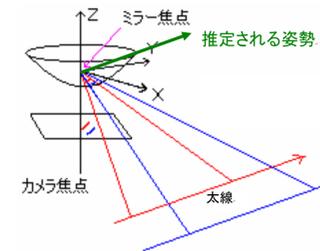


図 7 ミラー焦点と境界線が張る平面

Fig. 7 A Plane which is Spanned by a Mirror Focal Point and a Boundary Line

床面に敷かれた 4 本の境界線は世界座標系上で互いに平行な直線であり，焦点とそれぞれの境界線が張る 4 枚の平面に含まれている．これらの条件から 4 枚の平面の交線は 1 本

であり、その線の方向は境界線の方向と等しいと言える。任意の平面であれば、4枚の平面には6本の交線が存在するはずだが、4枚の平面すべてが4本の平行線を含むという条件と、4枚の平面がすべてミラー焦点という一点を通るという条件から、交線が唯一となり、ミラー焦点もその交線上に含まれる。このような拘束条件の下にある平面を4枚使うことで、自己位置を推定する。手法概要を以下に示す。

- (1) ロボット本体に搭載したジャイロで、世界座標を基準とした全方位カメラ座標系の傾き角度  $(\alpha, \beta, \gamma)$  を計測する。座標変換の式より、全方位カメラ座標系を基準とした境界線の単位方向ベクトル  $e$  を算出する。
- (2) その単位方向ベクトル  $e$  に直交するという条件で、4枚の平面の法線ベクトル  $n_1 \sim n_4$  を探索により推定する。平面とミラー曲面との交線（曲線）を画像平面上に投影した曲線と、画像処理によって検出された点の系列  $(u_{ij}, v_{ij})$  との位置ずれが最小となるように4枚の平面の法線ベクトルを探索で求める。
- (3) 4枚の平面のなす角度から、円周角一定の法則を用いて、 $x_0$  の推定値と  $z_0$  の推定値を求める。

上記手法 (1)(2) の詳細については、文献<sup>4)</sup> に示しているので、省略する。

### 2.6 円周角一定の定理による位置推定手法

系列  $(u_{ij}, v_{ij})$  に対して、 $i$  番目の平面が最も適合するように探索した結果を  $\hat{\theta}_i$  とする。この  $\hat{\theta}_i$  を用いて位置を推定する。前述のように、境界線を含む平面2枚の交線はミラー焦点を通り、その交線の方向は境界線の方向と一致する。その関係を図8に示す。青い境界線  $l_1$  と赤い境界線  $l_2$  がそれぞれ平面1と平面2に含まれる。そして、それらの平面2枚の交線は  $l_1$  と  $l_2$  という平行な線の方向と等しい。前節の手法で、平面1と平面2がなす角度  $|\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2|$  が計測され、 $l_1$  と  $l_2$  の間の距離も「既知の幅」としてわかっているが、 $l_1$  と  $l_2$  を基準として、ミラー焦点がどこにあるのかはわかっていない。それを推定するために、境界線の方向に対して垂直な断面で切断した断面図を考える。図9に、その断面図を示す。断面図においては、2本の境界線が2つの点で表される。そして、境界線に含まれる平面は、それぞれの点を通る直線で表される。それら2つの直線のなす角度が  $|\theta_1 - \theta_2|$  となるような「2直線の交点」の位置が推定位置となる。図9左に示したように、「円周角一定の法則」に基づきある固定された2点のそれぞれを通る2直線の交点のうち、その2直線のなす角が常に等しいのであれば、その交点位置はある円周上に拘束される。この位置を拘束する円周のことを、本手法では「拘束円」と呼ぶ。図9右に示したように、2つの境界線が座標系  $X_w - Z_w$  上で、 $(t_s, 0)$  と  $(t_l, 0)$  で表される場合、その中点  $(\frac{t_s+t_l}{2}, 0)$  を通って  $Z_w$  に垂直

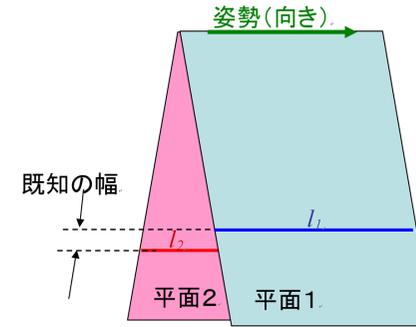


図8 平面の交線と2本の境界線との関係  
 Fig. 8 Relation Between a Cross Line and Two Boundary Lines

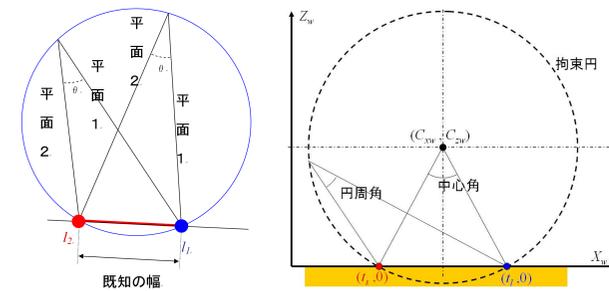


図9 断面上で位置を拘束する円弧  
 Fig. 9 Circle Curve which Constrains Robot Position on a Profile Plane

な軸上に拘束円の中心はある。中心の位置は、次式で求められる。

$$C_{wx} = \frac{t_s + t_l}{2}, \quad C_{wz} = \frac{t_l - t_s}{2 \tan |\theta_1 - \theta_2|}$$

拘束円の半径は  $\frac{t_l - t_s}{2 \sin |\theta_1 - \theta_2|}$  で求められる。以上の計算から、1つの拘束円を描くことが可能になる。同様に、2本目の太線の境界線  $l_3$  を含む平面3と  $l_4$  を含む平面4とのなす角度  $|\theta_3 - \theta_4|$  が求められ、境界線  $l_3$  と  $l_4$  の位置が既知であるから、2つ目の拘束円を描くことができる。図10に、左側の赤い太線の両端の境界線2本から描いた左側の拘束円と、右側の青い太線の両端の境界線2本から描いた右側の拘束円を示す。これら2つの拘束円の交点

が推定位置となる。

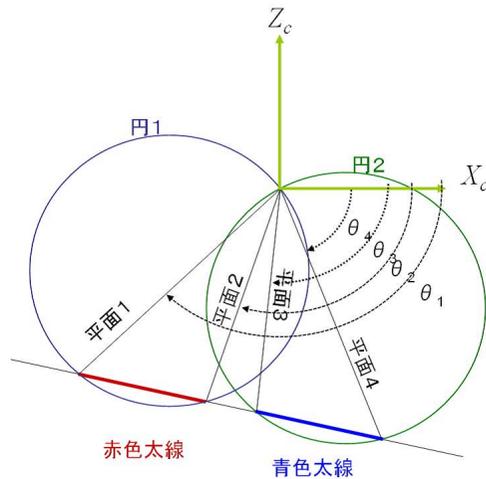


図 10 2つの拘束円の交点で求められる推定位置

Fig.10 Two Positions which are Estimated from Two Crossing Points of Two Constraint Circles

交点は2つ存在するが、推定された位置から、平面2と平面3のなす角度  $|\theta_2 - \theta_3|$  を計算すれば、2つのうち片方が、推定された  $|\theta_2 - \theta_3|$  よりも大きく異なる角度となるので、真の推定値を選ぶことができる。

### 2.7 拘束円を作る組み合わせ

平面の推定で得られる4つの回転角度  $\theta_1 \sim \theta_4$  のうち、2つの回転角度を用いて拘束円2つを作ることになるが、当然ながらその組み合わせは  ${}_4C_2 = 6$  であり、その半分は選ばれていない組み合わせに等しくなるので、3通りできる。この組み合わせの例を図11に示す。

境界線  $l_1$  を A、境界線  $l_2$  を B、境界線  $l_3$  を C、境界線  $l_4$  を D で示している。この場合、図11左に示したような、AとBで拘束円1を、CとDで拘束円2を作る組み合わせ (Case-1) と、図11中央に示したような、AとCで拘束円1を、BとDで拘束円2を作る組み合わせ (Case-2) と、図11右に示したような、AとDで拘束円1を、BとCで拘束円2を作る組み合わせ (Case-3) の3通りの組み合わせが存在する。本論文では、この3つの組み合わせのうち、推定精度を最良にする組み合わせについて検討する。

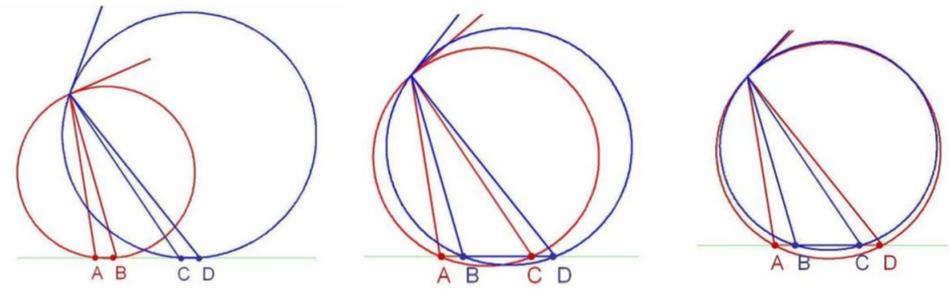


図 11 拘束円2つを作る3通りの組み合わせ

Fig.11 Three Combinations for Generation of Two Constraint Circles

前提として、どの組み合わせでも拘束円には半径方向の誤差を含んでおり、その誤差が等しいと仮定する。この場合に推定誤差を最小にする組み合わせは、推定値 (拘束円の交点) における、拘束円の接線2つがなす角度が影響すると考えられる。この角度が  $90^\circ$  に近いほど誤差は小さく、この角度が  $0^\circ$  に近いほど誤差が大きいと考えられるからである。その例を、図12に示す。

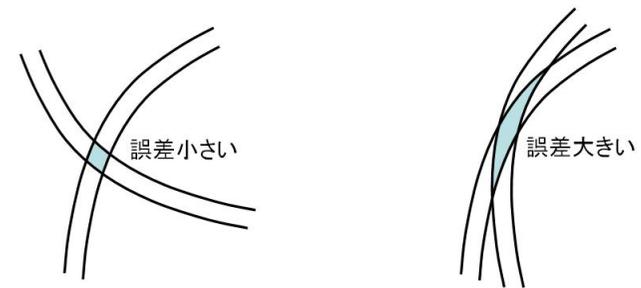


図 12 同じ誤差幅を持つ曲線の交点における誤差領域

Fig.12 Error Region of Crossing Curves with Same Width

図12左は曲線の交点における接線2本がなす角度が  $90^\circ$  に近い場合を示している。この場合は、交点における誤差領域は正方形に近い形となり誤差が小さい。図12右は曲線の交点における接線2本がなす角度が  $0^\circ$  に近い場合を示している。この場合は、交点における

誤差領域は細長い菱形に近い形となり長手方向の誤差が大きくなる．以上が，誤差幅が等しいという前提での誤差の大小が発生する根拠である．それを，前述の Case-1 ~ Case-3 にあてはめて考えるために，2つの拘束円の交点からの2本の接線を右斜め上に向けて引いてみた例を図11に示す．拘束円1の接線を赤い直線で拘束円2の接線を青い直線で示す．図から明らかなように，Case-1が最も90°に近く，次いで，Case-2，Case-3の順に角度が小さくなっていく．つまり，最も精度の良い組み合わせはCase-1だと予測される．

### 3. 実験

#### 3.1 実験機器

実験に用いた機器を以下に示す．二足歩行ロボットには，近藤科学製 KHR-1 を使用した．全方位カメラには，グイストン製 VS-14N を使用した．ジャイロには，NEC トーキン製 MDP-A3U9S-DK を使用した．画像入力には，恵安製画像キャプチャケーブル VS-USB2800D/JP1 を使用した．式(1)の形状パラメータには，VS-14Nの $a$ の値10.9407と， $b$ の値12.1500を使用した．VS-14Nの焦点距離 $f$ を予備実験で調べた結果，328.75[pixel]として，以降の計算を進めた．計算機には，CPUにCore-i5(3.2GHz)でRAM8GBのデスクトップPCを使用した．OSは64bit版Windows7である．画像処理には，ライブラリOpenCV 2.3.4を使用した．

#### 3.2 シミュレーション実験

図5に示した座標系で， $t_s$ を60[mm]， $t_l$ を100[mm]として，シミュレーション実験を行った．まず，ロボットの姿勢 $\alpha, \beta, \gamma$ と位置 $x_0, y_0, z_0$ を既知として，4本の境界線の画像点列 $(u_{ij}, v_{ij})$ を生成した．そして， $\alpha, \beta, \gamma$ はジャイロで計測できるものとして， $\phi$ と $\psi$ を算出した．本手法における誤差を最小とする探索で， $\hat{\theta}_1 \sim \hat{\theta}_4$ を推定した．さらにその推定値から円周角一定の法則に従い，拘束円2つを求めてその交点から推定位置 $(\hat{x}_0, \hat{z}_0)$ を導いた．

角度の探索では，まず第一段階として-90°から90°まで1°刻みで変化させて最小値を選び出した．次に第二段階として，その選び出された角度を中心に $\pm 1^\circ$ の範囲で，0.001°刻みで変化させて最小値を選び出した．図13にその変化の例を示す．図の左側に，第一段階の探索例を示す．横軸が角度で縦軸が誤差を表す．図の例では，77°が最小値と導出された．図の右側に，第二段階の探索例を示す．横軸が角度で縦軸が誤差を表す．図の例では，77.080°が最小値と導出された．

上記の推定実験においては，図13の左に示したように二箇所極小値が発生するが，第

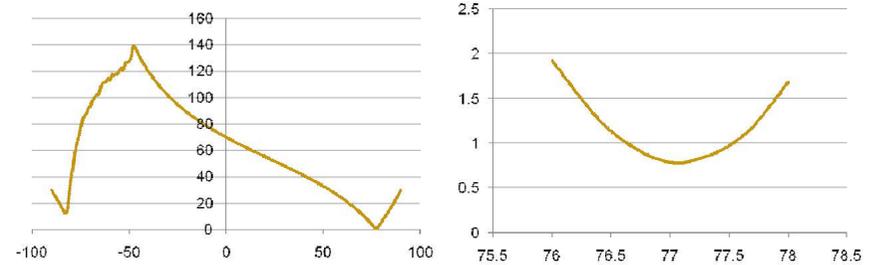


図13 誤差の変化の例  
Fig.13 Example of Changing Errors

一段階の粗い探索では，この2箇所評価値がほぼ等しい値となる場合があることが実験でわかった．その場合は，最小値でない側が粗い探索で選ばれるため，細かい探索を進めても最小値とはならない値を推定値と誤ってしまう可能性がある．文献<sup>4)</sup>でも，それが原因で推定誤差が極端に大きいはずれ値が発生することが確認されている．そこで，第一段階の粗い探索では，最小値だけでなく，二番目に小さい値を示す場所も記録しておき，第二段階の細かい探索でも，その両方で探索を進め，結果的に最小値どうしを比較して小さい方を選ぶように改良した．その結果，平面の推定誤差が大きくなることは無くなり，はずれ値の存在も確認されなくなった．

次に，様々な位置・姿勢における推定誤差の計測実験を行った．姿勢 $\alpha, \beta, \gamma$ は，-20°，-10°，0°，10°，20°の5通りについて，水平方向位置 $x_0$ は，-100[mm]，-50[mm]，0[mm]，50[mm]，100[mm]の5通りについて，垂直方向位置 $z_0$ は，250[mm]，275[mm]，300[mm]，325[mm]，350[mm]の5通りについて，推定のシミュレーションを行った．その結果， $5^5 = 3125$ 通りの推定結果が導かれた．その推定結果から，正解の $x_0$ と $z_0$ をそれぞれ引き算したものを誤差として評価した．その誤差の分布を図14に示す．横軸が $x_0$ の誤差，縦軸が $z_0$ の誤差をそれぞれ表す．ただし，これらの結果はCase-1の組み合わせで作成した拘束円から求めた推定値である．

#### 3.3 誤差の比較実験

最も，推定誤差を小さくする拘束円を作るための組み合わせを選ぶために，誤差の比較実験を行った．前述の，3125回の推定実験を，Case-1だけでなく，Case-2とCase-3に対しても行った．そして，それぞれの絶対誤差量を算出し，引き算を行うことで，どの組み合わせが適しているのかを確認した．絶対誤差とは， $x_0$ 方向の誤差の自乗と $z_0$ 方向の誤差の

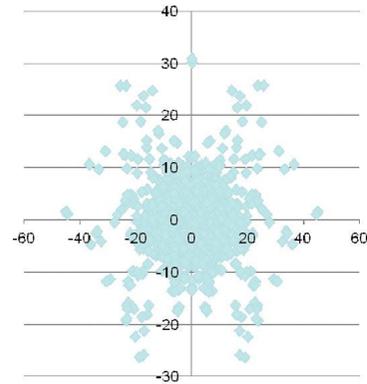


図 14 3125 回の推定誤差の分布

Fig. 14 Distribution of Estimation Errors under 3125 situations

自乗との和の平方根で求めたものである．その算出結果を図 15，図 16，図 17 にそれぞれ示す．

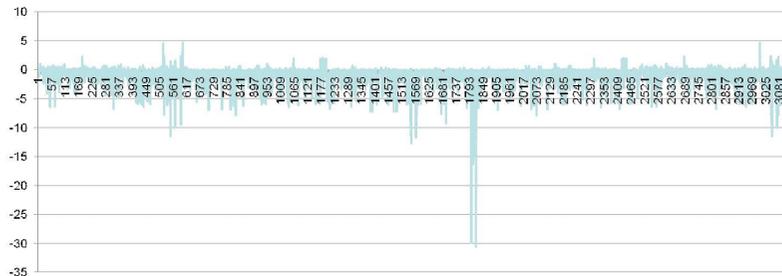


図 15 Case-1 と Case-2 の誤差の比較

Fig. 15 Comparing between case-1 and case-2

図からも明らかなように，Case-1 と Case-2 の比較では，多くの場合で Case-2 の推定誤差の方が小さいという結果になった．Case-1 と Case-3，Case-2 と Case-3 の比較では，いずれも Case-3 の方が誤差が大きかった．したがって，前述の予測とは異なり Case-2，Case-1，

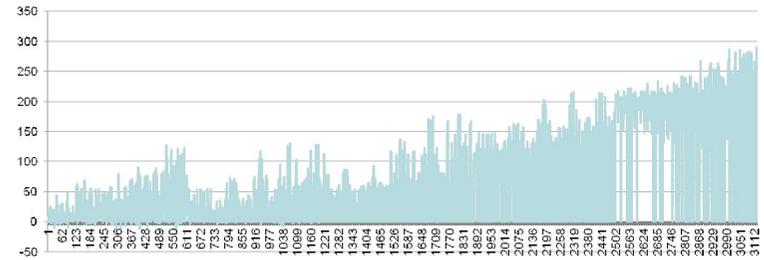


図 16 Case-1 と Case-3 の誤差の比較

Fig. 16 Comparing between case-1 and case-3

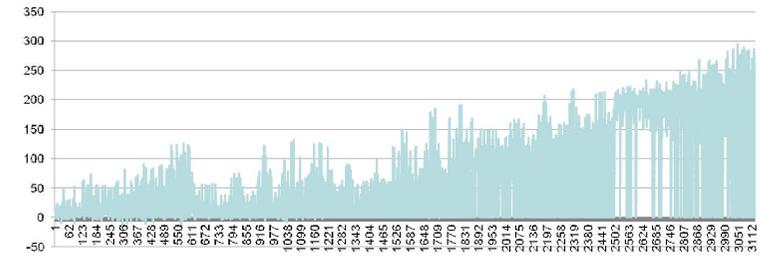


図 17 Case-2 と Case-3 の誤差の比較

Fig. 17 Comparing between case-2 and case-3

Case-3 の順に精度が良いという結果になった．

### 3.4 実機実験

画像処理用ライブラリ OpenCV を用いて，PF を実装した．実験で写した例を図 18 に示す．赤い色の境界線を自動検出して欲しかったのだが，尤度をいくら調整しても境界線には乗らず，色領域にパーティクルが集中する結果となった．尤度の定義式を変更するなどの改良を必要とする．

## 4. 結 論

二足歩行ロボットが床面に敷かれた線に沿って歩けるようにするため，単眼の全方位画像計測と，ジャイロによる姿勢計測からロボットの位置を高精度で推定する手法を提案した．シミュレーション実験で，推定誤差を最小にする拘束円を生成する組み合わせを見つけ出す



図 18 PF の実装例  
Fig.18 Imprimentation Example of Particle Filter

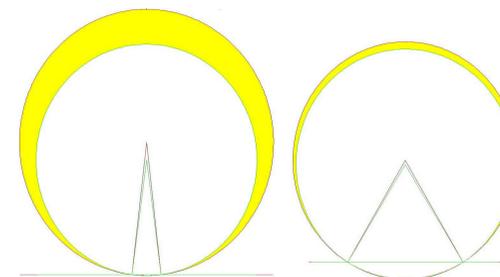


図 19 Case-1 と Case-2 の誤差領域  
Fig.19 Error regions of Case-1 and Case-2

ことができた。実機実験では、PF による画素点列の検出がうまくいかず、推定手法の実装には至らなかった。

誤差を最小にする組み合わせが Case-1 ではなく、Case-2 となった原因について考察した。拘束円の交点における円の接線のなす角が  $90^\circ$  に近い方が高精度というのは、あくまで拘束円の太さ（誤差幅）が一定であるという前提での予測である。図 19 に示したように、拘束円の半径が Case-1 と Case-2 において同じであったとしても、その挟角に同じ  $2^\circ$  の推定誤差が加わっていれば、図の黄色で示したような誤差領域が発生することになる。この場合は、左側の Case-1 の方が右側の Case-2 の場合よりも誤差領域が広く、大きな推定誤差の原因となり得る。つまり、拘束円の誤差幅を一定とした前提は成り立たないので、円の接線が  $90^\circ$  に近いほど高精度という理論も成り立たないことになる。

今後は、未解明の誤差の発生原因をさらに調べていくとともに実機実験の実装を進めていき、本手法の妥当性を検証する。

### 参 考 文 献

- 1) 数井誠人, 長谷山美紀, 北島秀夫: 複比を用いた自動走行システムのための消失点推定, 信学論 D-II, Vol. J84-D-II, No.7, pp.1319-1327, (2001).
- 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, 信学論 D-II, Vol. J79-D-II, No.5, pp.698-707, (1996).
- 3) 畑幸一, 青木利道, 栄藤稔: 全方位画像を用いた移動ロボットの運動パラメータ推定,

- 信学論 D-II, Vol. J84-D-II, No.3, pp.448-458, (2001).
- 4) 沼沢祐一郎, 神原利彦, 関秀廣: 二足歩行ロボットのための全方位カメラからの自己位置推定手法, 情報処理学会東北支部研究会資料, (2009).