

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・姿勢推定

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

○沼沢祐一郎^{*}、神原利彦^{*}、関秀廣^{*}

Yuuichirou Numasawa^{*}, Toshihiko Kanbara^{*}, and Hidehiro Seki^{*}

^{*}八戸工業大学大学院

^{*}Hachinohe Institute of Technology

キーワード: 全方位画像(omnidirectional image), 位置推定(position estimation), 姿勢推定(orientation estimation), 平面あてはめ(plane fitting), 拘束(constraint)

連絡先: 〒031-8501 八戸市大字妙字大開88-1八戸工業大学電子知能システム学科神原研究室
神原利彦, Tel.: (0178)25-8133, Fax.: (0178)25-1430, E-mail: kanbara@hi-tech.ac.jp

1. はじめに

近年、二足歩行ロボットに自律的な動きをさせる研究が盛んに行われている。カメラのような外界センサから3次元的な情報を獲得して、ロボットの歩行に役立っている。例えば、1) では二足歩行ロボットにステレオカメラを搭載している。

その一方で、全方位カメラは水平方向360°の広範囲な視野を持つカメラとして注目されている。特に、歩行動作で上下左右に激しい振動を発生させる二足歩行ロボットでは、たとえ振動が発生しても対象物が視野の外に飛び出すことなく、常に視覚でとらえ続けることができるので、全方位カメラを搭載することが望ましい。

そこで、本研究では頭部に全方位カメラを搭載した二足歩行ロボットに、床面に敷いた2本の平行な太い直線に沿って歩かせることを目指す。実験環境をFig. 1左に示す。頭部の全方位カメラでは、Fig. 1右に示したような円形の画像が撮影される。

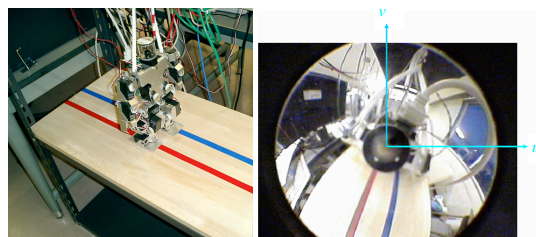


Fig. 1 二足歩行ロボットと全方位画像

この研究の独創的な点は、単眼の全方位画像から自己位置2次元と自己姿勢2次元の合計4次元の情報を推定することにある。ロボカップで知られている二足歩行ロボットVisiONも頭部に全方位カメラを搭載しているが、ボールを認識するためにモーションステレオで2枚以上の画像を使っているので、単眼ではない。また、目的もボールの位置検出なので、本研究とは異なる。

筆者らは、2) にて、床面に敷かれた1本の太い直線から自己姿勢を推定する手法を提案した。だが、位置を推定できない欠点があったので、3) にて、床面の平行線を2本に変更して自己位置・姿勢を推定する手法を提案した。だが、推定精度が悪いという問題点があった。4) にて、最尤推定を用いて推定精度の改善を試みたが、わずかな精度向上しか確認できなかった。

本研究では、従来手法で推定精度が悪くなる問題点を究明し、問題点を解決する新たな推定手法を提案する。本手法の一部は5)で述べている。

2. 推定手法

2・1 問題設定

全方位カメラは、双曲面ミラーと上向きのカメラで構成されている。このカメラで、床面に敷かれた赤い太線と青い太線を検出する。床面は平面とする。これらの太線の幅と太線どうしの間隔を既知とする。さらに、双曲面ミラーの形状パラメータ a 、 b や焦点距離 f などの内部パラメータも既知とする。双曲面は次式で表される。

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

2・2 従来手法

2・2.1 姿勢の推定

3)で提案した手法について述べる。双曲面の性質から、ミラー焦点に向かってくる光線だけが、反射してカメラ焦点を通過して結像する。逆に言えば、カメラ焦点と画像平面上の結像点を延長してミラー曲面と交わる点が反射点であり、反射点とミラー焦点とを結ぶ3次元直線上に必ず物体点が存在する。この拘束を使って、推定を行う。

最初に、色情報を手がかりにして2本の太線領域を全方位画像から抽出し、その左右境界線をなす画素データ (u_j, v_j) を得る。Fig.1 右に示したように、円形画像の中心を原点とし、水平軸を u 、垂直軸を v で表す。境界線は4つあるので、 $i = 1, 2, 3, 4$ である。それぞれの境界線をなす画素数を N_i として $j = 1, 2, \dots, N_i$ で表す。

次に、カメラ焦点 $(0, 0, -c)$ と $(u_j, v_j, f-c)$ を結ぶ直線とミラー曲面との交点 (x_j, y_j, z_j) を求める。

ただし $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ である。この点が光線の反射点である。ミラー曲面は双曲面(2次曲面)なので、2つ交点が求まるが、ミラー焦点 $(0, 0, c)$ に近い

方の交点を使う。さらに、ミラー焦点 $(0, 0, c)$ と i 番目の境界線の反射点 N_i 個を使ってFig.2 左のように平面を張る。

Fig.2 右に示したように、2枚の平面で太線を挟み込むような形になる。 i 番目の平面の法線ベクトルを $n_i = (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ とする。計測が正確であれば、これらの4つの平面の交線は唯一の線となる。その線方向ベクトルが床面に敷かれた平行線の向きと等しい。したがって、交線の向きは、法線ベクトル2つの外積で計算される。求まった姿勢を (φ, ψ) で表す。ここで、 φ は垂直軸を回転軸とするパン角で、 ψ は水平軸を回転軸とするチルト角である。

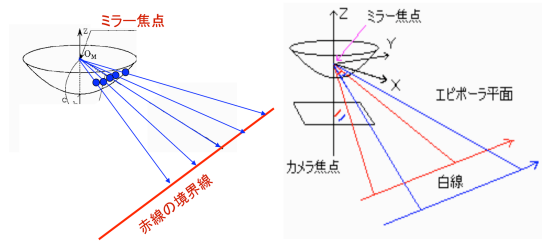


Fig.2 張られる平面と平面の交線

2・2.2 位置の推定

太線の幅と、2つの太線の間隔が既知という前提から、カメラの自己位置を推定する。求まった4つの平面のうち、任意の2つの平面 k, l のなす角度 θ_{kl} と、その2つの平面に含まれる2つの平行直線の間隔 d_{kl} からカメラ焦点の位置を逆算すると、円周角一定の法則より、その位置は円周角が θ_{kl} となる円周上のどこかに拘束される。この円のことを拘束円と呼ぶ。拘束円が2つあれば、2つの円の交点は2つあるので、それら2つに限定される。Fig.3に2つの拘束円の交点を示す。3つ以上の拘束円があれば、それらの円の交点から唯一の位置を求めることができる。

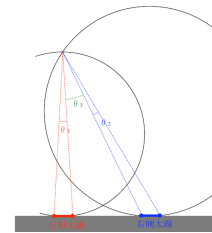


Fig.3 2つの拘束円の交点

2・2.3 従来手法の問題点

従来手法では、量子化誤差のみを加えた推定シミ

ュレーションでも推定精度が悪かった。この原因としては、まず4枚の平面それぞれを別々に求めたことと、反射点 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) に大きな誤差があったことが挙げられる。

位置の推定では、4つの中から選んだ2つの平面 k, l のなす角度 θ_{kl} を使って拘束円を作るが、角度の誤差が大きいために、拘束円の半径や中心位置の誤差も大きくなり、これらの誤差が伝播して大きな位置誤差になった。

2・3 改良手法

2・3.1 仮決めした姿勢を含む平面の推定

以上の問題点を解決するために、本論文では以下の改良を行う。(1) 姿勢方向 (ϕ, ψ) を仮決めし、この「姿勢方向を含む平面」の法線ベクトル $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3, \mathbf{n}_4$ を画像点に最も適合するように求める。つまり、法線ベクトルは「姿勢方向と直交する」という拘束の下で決められる。ここで、法線ベクトル \mathbf{n}_i は長さ1で、姿勢方向 (ϕ, ψ) を軸として、角度 θ_i だけ回転させた単位ベクトルである。そして、それらを使って (ϕ, ψ) の誤差 $E(\phi, \psi)$ を評価する。

(2) 姿勢方向を少し動かし $(\phi+\Delta\phi, \psi+\Delta\psi)$ として、手順(1)と同様にこの姿勢方向を含む4平面の法線ベクトルを求めて誤差を評価する。(3) 手順(2)を繰り返し、誤差の評価値が最小となる姿勢を数値探索法で求める。(4) 従来手法と同様に、求まった姿勢における法線ベクトル $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3, \mathbf{n}_4$ から円周角一定の定理より位置を推定する。

従来手法では、4つの平面を何の拘束もなく求めていたため、誤差を含んで交線が唯一にならなかった。上記の改良で、4つの平面の交線は唯一となる。また、1つの平面に対し、あてはめで推定すべき未知変数の数は回転角度 θ_i のみとなる。従来手法では、1つの平面の推定に3変数を使っていた。

2・3.2 誤差の評価方法

姿勢 (ϕ, ψ) と直交するという拘束条件で4つの平面の法線ベクトル $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3, \mathbf{n}_4$ が画像データと最も適合するように決める方法について述べる。まず、ミラー焦点を通る法線ベクトル \mathbf{n}_i の平面とミラー曲

面との交線の式を求め、この交線を画像平面上に投影する。投影した曲線の式は、 $u = g_i(z)$ と $v = h_i(z)$ のように、垂直軸に沿った変数 z を媒介変数とする2式で表される。この曲線と画像上の点 (u_{ij}, v_{ij}) との最小距離を計算する。距離の自乗関数 $L_{ij}(z)$ を次式で表し、

$$L_{ij}(z) = (u_{ij} - g_i(z))^2 + (v_{ij} - h_i(z))^2 \quad (2)$$

で評価し、この距離が最小になる z の値を

$$\frac{\partial L(z)}{\partial z} = 0 \text{ を満たすように求める。こうして求めた}$$

値を z_{ij} とする。このとき、回転角度 θ_i における誤差を次式で評価する。これは画像点1つあたりの誤差距離を表している。

$$E_i(\phi, \psi, \theta_i) = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \sqrt{L_{ij}(z_{ij})} \quad (3)$$

次に、回転角度 θ_i を少し変えて $\theta_i + \Delta\theta_i$ とし、法線ベクトル \mathbf{n}_i を変更する。この変更によって、 $u = g_i(z)$ と $v = h_i(z)$ の式も変わる。これらを用いて(2)式を最小化する z_{ij} を求め、(3)式を計算する。(3)式が最小になる回転角度 θ_i を数値探索で求める。

最後に、姿勢 (ϕ, ψ) で画像点列すべてに平面あてはめを行った評価値を以下の式で求める。

$$E(\phi, \psi) = \sum_{i=1}^4 E_i(\phi, \psi, \theta_i) \quad (4)$$

この誤差の評価値 $E(\phi, \psi)$ が最小になるように姿勢 (ϕ, ψ) を数値探索で求める。そして、求まった姿勢における、4つの平面あてはめ計算に使った回転角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ で4つの平面の法線ベクトル \mathbf{n}_i を求める。以降は、従来手法と同様に2つの拘束円の交点から位置を推定する。

3. 実験

3・1 実験装置

実験装置について述べる。実験に使用した二足歩行ロボットシステムをFig.1左に示す。画像処理を行ったり、ロボットへ歩行情報を送ったりするPCには、Aopen製のペアボンキットPC(Pentium4 2.8GHz, RAM 1GB)を用いた。PC以外のシステムは2)3)

の研究に用いたものと同じである。2)の研究とは、地面に敷かれている太線の本線が異なる。

シミュレーション実験では、前述の PC で推定計算を行った。

3・2 シミュレーション実験

シミュレーション実験について述べる。双曲面ミラーの形状パラメータ a, b は実機と同じもの計算に用いた。シミュレーションでの環境の寸法を図 14 に示す。X-Y-Z 世界座標系があり、その中で、赤色太線と青色太線が X-Y 平面上に敷かれている。X-Y 平面が床面を表しており、Z 軸がロボットの高さ方向を表している。

シミュレーションでは、まず正解の位置と姿勢を与える。次に、その位置と姿勢で全方位カメラを撮影した場合に、境界線画素が写るはずの座標を計算する。このとき、実際に画像で計測すると整数の座標値しか得られない。つまり、小数点以下の値が切り捨てられる。このように、小数点以下を切り捨てて整数化する処理は、量子化と言われている。量子化を行い、同じ整数座標値となる点を省いていくことで、約 200 点に減る。この減った座標値が求められたデータを基に、推定計算を行う。

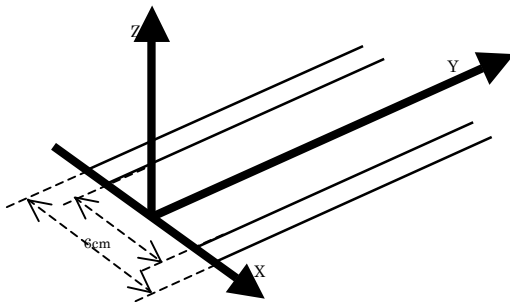


Fig.4 実験環境の寸法

3・3 シミュレーション 1(画像点列の生成)

実際に、正解の位置と姿勢を設定して画像点列を生成する。まず、正解の位置を $X=50, Z=300$ と設定し、正解の姿勢を ($\varphi=45^\circ \psi=10^\circ$) と設定する。次に、設定した位置と姿勢を使い、4本の境界線が写るはずの座標位置を計算する。そして、ここで求めた座標位置を量子化して、画素の位置を生成する。この

結果を図に示す。

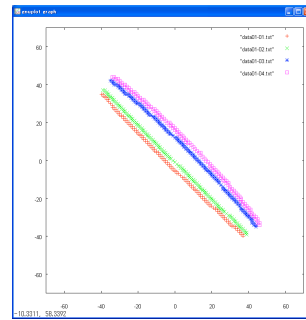


Fig.5 生成された画像点列(左右境界線画素)

この図で求められた、一つの境界線に存在する画像点列は、赤色の境界線は 148 点、緑色の境界線は 149 点、青色の境界線は 151 点、紫色の境界線は 145 点の画像点列が存在している。ここでの表示には、グラフ表示用ソフトウェアの gnuplot を用いた。

3・4 シミュレーション 2(回転角度の推定)

前項で述べた画像点列の生成が完了したら、次は回転角度の推定をする。まず、姿勢方向を仮決めする。次に、仮決めした姿勢方向に直交するという拘束の下で、回転角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ を画像点列に最もよくあてはまるように決める。このとき、姿勢方向が真値からはずれていると、あてはまりも悪くなる。

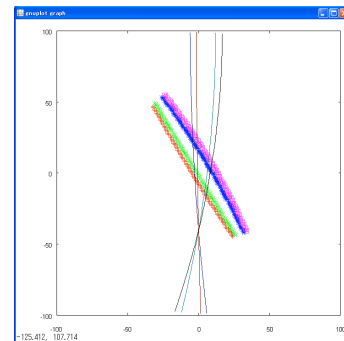


Fig.6 不正解の姿勢で正解の角度をあてはめた結果

Fig.6 に、 $\varphi=0^\circ \psi=0^\circ$ と仮決めした場合の正解の角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ を使って求められた空間曲線 4 本を示す。姿勢を仮決めすることで、4本の曲線の交点の位置が決まることがわかる。

3・5 シミュレーション 3(姿勢の探索)

前項で述べた回転角度の推定が完了したら、次は姿勢の探索をする。まず、姿勢を少しずつ変えて、 $\theta_1 \sim \theta_4$ をあてはめて、あてはまる度合を計算する。次

に画像点列に、あてはまる度合が最良になるような姿勢を探索で見つける。この手順を行うことにより、ロボットの姿勢が求まる。現在、探索を実装中である。

4. 考察

実験で述べた推定結果について考察した。まず、姿勢については、従来の手法にあった「平面の推定誤差が大きい」という問題点を、姿勢を先に推定し、その姿勢に基づく拘束を使うことで解決する手法を提案した。

次に、手法の妥当性を証明するために、推定シミュレーション実験を行った。空間曲線を求めて誤差を評価するところまで実装できた。

Fig.7に、正解の姿勢と、正解の角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ を使って求められた空間曲線4本を示す。正解の姿勢からは、距離の誤差を使えば正解の角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ を求められるが、不正解の姿勢から距離の誤差だけで、正解の角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ を求められるとは考えにくい。山登り法での探索では、局所解に陥る可能性があるため、曲線のあてはまりを評価するには、距離以外の別の誤差評価方法も検討する必要がある。

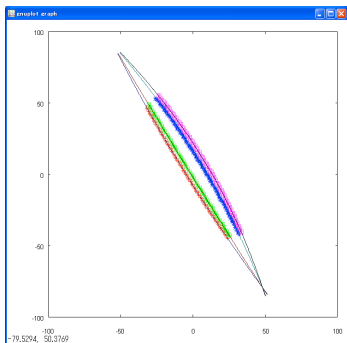


Fig. 7 正解の姿勢と正解の角度で求めた曲線

5. まとめ

まず、角度 θ の探索と姿勢の探索を実装し、推定シミュレーション実験を完成させ、位置と姿勢の推定値を求める必要がある。そして、この推定シミュレーション実験から求めた推定値と正解値を比較して、推定誤差が従来手法よりも改良されたかどうかを確認することが今後の課題である。

もし、推定精度が改良されていれば、本手法を二

足歩行ロボットに搭載し、実機実験を行う。ここで、ロボットが線を検出しながら、二本の赤色と青色の太線に沿って正しく歩行できるかを確認する。また、線からはずれている場合には、2本線へ歩みを戻すような自律移動を行えるかを確認する。これらの確認も今後の課題とする。

参考文献

- 1) トランジスタ技術編集部：「ロボットの目をつくる」CQ出版, (2006)
- 2) 神原利彦, 林朗, 末松伸朗：二足歩行ロボットのための自己位置・姿勢推定, 平成18年電子情報通信学会総合大会論文集, p. 231 (2006)
- 3) 神原利彦：「全方位画像からの二足歩行ロボットのための自己位置・姿勢の推定手法」電子情報通信学会総合大会, (2007).
- 4) 神原利彦, 谷川翼：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・姿勢の計測, 計測自動制御学会 東北支部 第236回研究集会資料番号236-18, (2007)
- 5) 神原利彦, 沼沢祐一郎：拘束された平面による二足歩行ロボットの自己位置姿勢の推定手法, 電子情報通信学会総合大会, (2009).