A4-2 マルチ全方位ビジョンシステムを用いた自律移動ロボットの自己位置同定に関する研究 福井大学大学院 工学研究科 知能システム工学専攻

清水平 涉 (指導教官:前田 陽一郎 助教授)

1 緒言

RoboCup 等の複数台の自律移動ロボットを対象とする研究においては、全方位カメラ(360 度のパノラマ画像が取得できるカメラ)を用いたものがいくつか発表されている [1]。しかしながら、これらの研究では一般に単眼で全方位カメラを用いているため、対象物体のロボットからの方位は比較的正確に計測可能であるが、距離に関してはミラー上で物体画像が圧縮される上、対象物体の高さが不明な場合、正確な距離計測は不可能となる。

一方、複数の全方位カメラを用いて距離情報を得るためにステレオ視を行なった研究もあり、茶園ら [2] や Gluckmanら [3] のように鉛直方向に 2 つの全方位カメラを並べたものや、三木ら [4] のように水平に 2 つの全方位カメラを用いた方法などが提案されている。

これに対し、本論文では3台の全方位カメラをロボット上に水平に正三角形状に配置したマルチ全方位ビジョンシステム (MOVIS: Multiple Omnidirectional VIsion System)を提案する [5, 6, 7]。MOVISでは、それぞれの全方位カメラより得られる計測物体の精度の高い方位情報のみを用いて、三角測量の原理によりステレオ視を各2台のカメラで行なわせ、ロボット全周の位置計測を比較的精度良く実時間で行なう。MOVISを用いることにより、ビジョンセンサのみの計測によって全周にわたる距離と方位の情報を得ることが可能となる。また本研究では MOVIS の計測結果に対してファジィ推論を用いた測定誤差補正行なうことにより、MOVIS の計測精度を向上させる。さらに、2つのランドマークに対するMOVIS の計測結果を用いた自律移動ロボットの自己位置同定手法を提案する。また、MOVIS を実際に製作し、計測実験を行ったのでこの結果についても報告する。

2 マルチ全方位ビジョンシステム:MOVIS

本研究で提案する MOVIS では全方位カメラを 3 台使用しており、それぞれ同一性能を持つビジョンを M_1 、 M_2 、 M_3 とする (図 1、図 2 参照)。本システムは、移動ロボット上に床面と水平に正三角形状に配置する。この時、ロボットの重心と 3 つの全方位ビジョンが作る正三角形の重心は垂直方向に対し同一点に存在するように設置する。

正三角形の重心より各頂点を延長した線を考え、各 2台のカメラの画像取得範囲を 120 度ずつ 3 等分した領域に分割し、各領域をそれぞれ 2台のカメラ対 (図 1 の場合、 M_1 と M_2 によりエリア A、 M_2 と M_3 によりエリア B、 M_3 と M_1 によりエリア C)を用いてステレオ視による三角測量を行なう。



図 1. MOVIS の概観

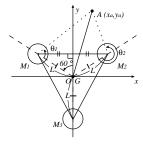


図 2. MOVIS の構造

3 物体位置計測および自己位置同定手法

本節では MOVIS を用いた物体の位置計測および自己位置 同定手法を述べる。ここで行なう処理手順を図3に示す。

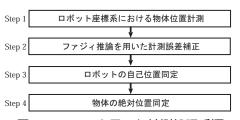


図 3. MOVIS を用いた計測処理手順

3.1 ロボット座標系における物体位置計測

位置計測は、例えば図 2 において計測物体 $A(x_a,y_a)$ を全方位ビジョン M_1 、 M_2 を用いて三角測量を行い、結果を重心におけるロボット座標系で求める。x 軸に水平にある $\overline{M_1M_2}$ に対し、 M_1 における物体 A の傾きは $(\theta_1-\frac{\pi}{6})[=\lambda_1$ とおく]、 M_2 における物体 A の傾きは $(\theta_2-\frac{5\pi}{6})[=\lambda_2$ とおく] であり、ロボットの重心からビジョンまでの距離を L とする。ビジョン M_1 、 M_2 の中心座標は既知であるため、ロボット座標系における物体 A の位置 (x_a,y_a) は、(1) 式、(2) 式で求められる。

$$x_a = \frac{\sqrt{3}}{2} L \cdot \frac{\tan \lambda_2 + \tan \lambda_1}{\tan \lambda_2 - \tan \lambda_1} \tag{1}$$

$$y_a = \frac{1}{2}L + \sqrt{3}L \cdot \frac{\tan \lambda_2 \cdot \tan \lambda_1}{\tan \lambda_2 - \tan \lambda_1}$$
 (2)

3.2 ファジィ推論を用いた測定誤差補正

本手法では、MOVIS を中心とした格子状の大まかな計測ポイントに計測物体を配置した実際の物体位置計測データ Δ (計測値-理想値)を基にファジィ推論を用いることにより、全計測ポイントに対して物体位置の誤差補正を行なった。

 MOVIS により式 (1) および (2) で求めた物体 A の計測位置 (x_a,y_a) 、方位 θ に対して、距離における誤差補正値を Δd 、方位における誤差補正値を $\Delta \phi$ とすると、次式によって誤差補正後の物体 A の位置 (x_a',y_a') を得ることができる。

$$x_a' = x_a - \Delta d \cdot \cos(\theta - \Delta \phi) \tag{3}$$

$$y_a' = y_a - \Delta d \cdot \sin(\theta - \Delta \phi) \tag{4}$$

簡略化ファジィ推論を用いた推論において、前件部には格子状計測ポイントであるX座標とY座標を用いている。後件部シングルトンには誤差の補正値 Δd および $\Delta \phi$ を用いるが、実測値を使用するため、実際の値は次章にて説明する。

3.3 ロボットの自己位置同定

本研究では、 ${
m RoboCup}$ 中型ロボットリーグを想定したミニチュアフィールドを計測実験に用いたが、自己位置同定にはゴール端をランドマークとして使用した。絶対座標系における座標軸を図 4 に示す。絶対座標系におけるゴールポスト左側 P、右側 Q の座標は既知であり、原点よりそれぞれ幅Fw、奥行き Fd であるとする。また、ロボットの重心座標を (X_r,Y_r) とし、ロボット座標の x 軸と絶対座標系の x

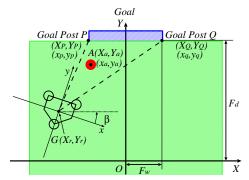


図 4. 絶対座標系における自己位置同定

の傾き角を β とおく。ロボット座標系において、位置計測より得たゴール端 P、Q の座標をそれぞれ $p(x_p,y_p)$ 、 $q(x_q,y_q)$ とした時、傾き角を β は (5) 式のようになる。

さらに、絶対座標系におけるロボットの重心座標 (X_r,Y_r) は (6)、(7) 式のように求まり、これらの (x_p',y_p') にロボット座標系で計測したランドマーク P の値を代入し、(5) 式で両方のランドマーク情報を用いて β を求めれば自己位置 (X_r,Y_r) が同定できる。

$$\beta = \tan^{-1} \frac{y_q' - y_p'}{x_p' - x_q'} \tag{5}$$

$$X_r = -x_p' + Fw \cdot \cos \beta + Fd \cdot \sin \beta \tag{6}$$

$$Y_r = -y_p' - Fw \cdot \sin \beta + Fd \cdot \cos \beta \tag{7}$$

3.4 物体の絶対位置同定

絶対座標系における物体 A の座標を (X_a,Y_a) とする。ロボット座標系における物体 A の測定誤差補正後の位置 (x_a',y_a') は (3)、(4) 式より、ロボット座標系の x 軸と絶対座標系の x 軸の傾き角 y および自己位置 (X_r,Y_r) は (5) (7) 式より 求まるため、絶対座標系における物体 x の位置 (X_a,Y_a) は (8)、(9) 式より同定することができる。

$$X_a = (x_a' + X_r)\cos\beta - (y_a' + Y_r)\sin\beta \tag{8}$$

$$Y_a = (x_a' + X_r)\sin\beta + (y_a' + Y_r)\cos\beta \tag{9}$$

4 物体位置計測実験

計測対象物にはオレンジ色のサッカーボール (直径約 $22\mathrm{cm}$) を用いており、原点を除く $800\mathrm{cm} \times 800\mathrm{cm}$ の $50\mathrm{cm}$ 格子点を 288 ポイントに設定して実験を行なった。また、比較実験として全方位ビジョン単眼と垂直全方位ステレオビジョンについても実験を行なった。さらに、計測結果を基に誤差補正用のファジィルールを作成し (表 1 参照)、測定誤差補正後の計測実験も行なった。

各実験結果は、計測ポイントごとに観測される Δ (計測値理想値) を求め、極座標系における距離と方位に対する誤差の計測値 $\Delta {
m Dist}({
m cm})$ および $\Delta {
m Dire}({
m degree})$ を示す。

4.1 全方位ビジョン単眼を用いた実験結果

実験結果を図5に示す。 $\Delta Dist$ について比較すると、誤差の絶対値の平均は92.63cmとかなり大きな誤差であった。一方、 $\Delta Dire$ については距離や方位に関係なく極めて精度良く観測されている。方位の誤差における絶対値の平均は0.61度であった。

4.2 垂直全方位ステレオビジョンを用いた実験結果

実験結果を図 6 に示す。 $\Delta Dist$ については、誤差の絶対値の平均は 55.13cm の誤差であった。全方位カメラ単眼に比べると、精度良く距離が計測されていることがわかる。 $\Delta Dire$ における誤差の絶対値の平均は 0.59 度であり単眼の計測とほぼ同様な結果であった。

表1 誤差補正のファジィルール

a) 距離

$\Delta \mathrm{Dist}$		X(cm)									
		-400	-300	-200	-100	0	100	200	300	400	
	400	225.7	123.6	107.6	159.4	78.4	66.2	136.7	130.3	103.0	
	300	143.9	31.4	136.3	142.4	-10.2	57.6	97.4	36.2	-7.8	
	200	-7.9	44.0	60.7	51.9	36.2	44.8	43.0	-3.6	65.6	
	100	53.3	39.9	28.8	33.1	1.0	-0.9	83.5	34.6	76.4	
Y	0	37.5	16.3	0.3	-1.9	0.0	9.0	54.3	30.4	52.8	
(cm)	-100	49.3	14.2	10.2	4.4	-1.7	18.5	46.4	115.7	65.1	
	-200	-1.2	26.4	4.9	-9.4	16.0	49.7	70.9	67.1	40.9	
	-300	44.6	14.9	10.4	20.7	38.2	76.3	102.1	51.1	129.5	
	-400	22.0	-30.6	61.5	28.1	25.4	51.2	85.6	137.1	153.3	

b) 方位

$\Delta \mathrm{Dire}$		X(cm)									
		-400	-300	-200	-100	0	100	200	300	400	
	400	-0.9	-1.7	-1	-1.7	-1.7	-1.4	-1.4	-1.1	0.2	
	300	-0.8	-1	-0.8	-1.6	-1.6	-0.8	-1.4	-1.5	-1	
	200	-1.4	0.6	-1.1	-0.7	-1.7	-0.5	-1.4	-0.9	-1.4	
	100	-0.8	-1.2	-1.5	-1.6	1	1.3	-1.3	-1.2	-1.7	
Y	0	-1.2	-1.6	-1.7	0.9	0	0.3	-1.1	-0.9	-1.1	
(cm)	-100	-1.1	-0.9	-0.9	0.1	-0.9	0.2	-0.4	-0.8	-0.5	
	-200	-0.9	-0.3	-0.3	0	-0.4	0.3	-0.5	-0.9	-0.1	
	-300	-0.2	-0.9	0	-1.2	0.6	-0.5	-0.4	-0.4	0.1	
	-400	-0.9	0	-0.2	-0.4	-1.4	-1.1	-0.9	-0.3	-0.1	

4.3 MOVIS を用いた計測実験結果

実験結果を図 7 に示す。 $\Delta Dist$ について誤差の傾向を判断すると全体的に遠方になるほど距離が大きく計測されている。この誤差の傾向は垂直全方位ステレオビジョンにも出ていたが、MOVIS では一様に距離が増大するという規則性が見られる。距離誤差の絶対値の平均は 51.69 cm であり、全方位ビジョン単眼に比べるとおよそ 45 %誤差を軽減して距離が計測されていることがわかる。また、垂直全方位ビジョンに対しても比較的計測精度が向上していることが確認できる。

 $\Delta {
m Dire}$ については誤差の範囲はおよそ $-1.8 \sim 0.8$ 度ほどであり、比較実験である全方位ビジョン単眼や垂直全方位ビジョンに比べると誤差が計測されているが、特に問題となるほどの誤差ではなかった。方位について誤差の絶対値の平均は 0.95 度であり、1 度未満で計測された。

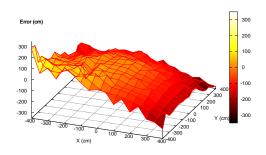
4.4 測定誤差補正後の実験結果

実験結果を図 8 に示す。 $\Delta Dist$ についてはロボットが配置されている原点周辺でははほとんど誤差が計測されておらず、原点より距離が 2m 以内の計測ポイントにおける誤差の平均はほぼ 10cm 以内となった。また、ロボットから遠方に関する誤差も、補正前に比べて大幅に修正されており、全体に対する距離の絶対誤差の平均はわずか 17cm しか観測されなかった。 $\Delta Dire$ については誤差の範囲はおよそ $-1\sim1$ 度であり、誤差の絶対値の平均は 0.71 度であった。この結果から、方位に関しても若干誤差が補正されていることが分かる。

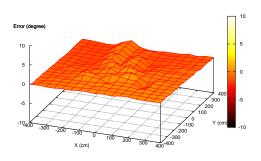
5 自己位置同定実験

実験は図 9 のような RoboCup 中型ロボットリーグを想定したミニチュアフィールド $(幅 350cm \times 奥行き 400cm)$ を用いて行なった。ゴール $(高さ 100cm \times 幅 150cm \times 奥行き 50cm)$ は黄色と青色の 2 つ存在するが、今回は黄色のゴール端をランドマークとして用いて実験を行なった。また、物体位置同定に用いる計測対象物としてオレンジ色のサッカーボールを用いた。絶対座標系はフィールドの中心を原点とし、黄色のゴール方向を Y 軸、向かって右方向を X 軸とした。ランドマークであるゴールポストは向かって左側の座標を P(-75cm, 200cm)、右側の座標を Q(75cm, 200cm) とし、ボールは絶対座標系における原点 (0cm, 0cm) に配置する。

以上の環境において、MOVIS を搭載した移動ロボット (約 $50 \text{cm} \times 50 \text{cm}$)を 1 m 間隔の格子点上に配置し、各計測ポイントごとに自己位置同定および物体の絶対位置同定を行なう。この時、ロボット座標系の x 軸と絶対座標系の x 軸は常に並行となるようにロボットを配置することによって、ロボットの姿勢についても同時に誤差を計測する。

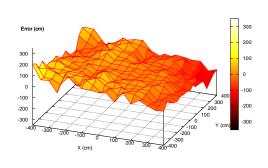


a) 距離誤差 $\Delta Dist$

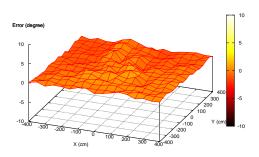


b) 方位誤差 ΔDire

図 5. 全方位ビジョン単眼の計測結果

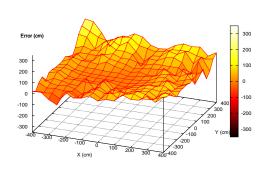


a) 距離誤差 $\Delta Dist$

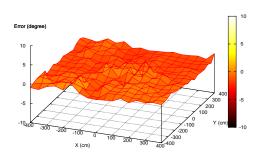


b) 方位誤差 $\Delta Dire$

図 6. 垂直全方位ステレオビジョンの計測結果

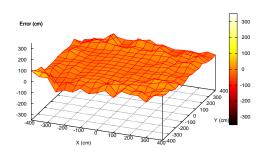


a) 距離誤差 $\Delta \mathrm{Dist}$

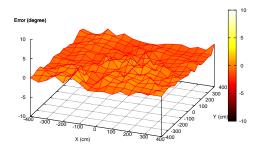


b) 方位誤差 $\Delta Dire$

図 7. MOVIS の計測結果



a) 距離誤差 $\Delta Dist$



b) 方位誤差 ΔDire

図 8. 測定誤差補正後の計測結果

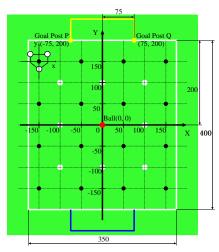


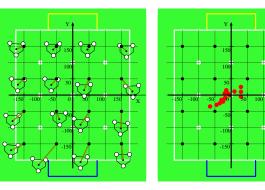
図 9. 実験における計測ポイント (単位 cm)

5.1 自己位置同定実験結果

MOVIS を用いたロボットの自己位置同定実験結果を図 10 a) に示す。ランドマークであるゴールが遠方になるほど物体位置計測の誤差が大きくなる傾向があるため、自己位置同定結果についても同様に誤差が大きくなっていることがわかる。本実験環境下において、誤差は平均約 39.9cm 観測されたが、実験に用いたロボットおよび MOVIS の大きさとほぼ同じであり、許容誤差範囲内であると考えられる。また、ロボットの姿勢については誤差があまり見られず、最大でも-8 度の誤差であった。

5.2 物体の絶対位置同定実験

m MOVIS を用いた物体の絶対位置同定実験結果を図 m 10~b) に示す。計測実験の結果、ある程度誤差が含まれているが距離誤差の平均 m 25.8cm で同定できていることが確認できる。計測ポイント (m -50, m -150) における誤差が一番大きく、物体を同定した絶対位置は (m -62, m -41) であり、およそ m 74.3cm の距離の誤差が観測された。



a) ロボットの自己位置

b) 物体の絶対位置

図 10. 自己位置同定実験結果

6 移動ロボットの自律行動制御実験

自律行動制御には、本研究室で提案された階層型ファジィ行動制御手法を用いた [6,7]。ファジィ推論の入力情報であるボール・障害物の距離と方位、ゴールの方位情報は、MOVISを用いてすべて同時に計測される。実験環境には、図 11 に示すような RoboCup 中型ロボットリーグのハーフコート $(4m \times 5m)$ を使用し、フィールド上にボールと障害物を配置した。この環境において、MOVIS を搭載した自律移動ロボットに階層型ファジィ行動制御を用いて、障害物を避けながらボールをゴールに運ぶシュート行動実験を行った。



図 11. 実験環境

図 12. 実験結果

6.1 実験結果

実験結果 (図 12 参照) より、MOVIS を搭載した移動ロボットにおいて、階層型ファジィ行動制御による自律行動制御が可能なことが分かった。今回行なった制御実験では、回避行動(反発行動) と回り込み行動(接近行動) という対照的な行動を適応的に統合できることが確認されたが、これは MOVIS によって精度良く計測された距離情報を用いているため実現できたものと考えられる。

7 結言

本研究では、3台の全方位カメラによるマルチ全方位ビジョンシステムを構築し、自律移動ロボットにおける物体位置計測、自己位置同定を行う手法について提案した。また、測定誤差に基づいたファジィ推論による誤差補正を施すことによる計測精度の向上を試みた。

本システムの有効性を検証するため実際に計測実験を行なった結果、ある範囲の距離までは精度良く物体位置計測が可能であり、ロボットの自己位置をある程度同定できることがわかった。また、測定誤差補正を行なうことによって、自己位置同定の精度をさらに向上できることも分かった。

今回は提案手法の実用性検証実験の環境として RoboCup中型ロボットリーグのフィールドにおける位置計測を試みたが、マルチ全方位ビジョンシステムは汎用的な全周環境認識センサとして、一般の自律移動ロボットや汎用監視システムなどへの応用も期待できる。

参考文献

- [1] 知原 伸悟, 川端 邦明, 浅間 一, 三島 健稔: "全方位視覚センサによる移動ロボットの自己位置推定,"第 20 回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 3A25 (2002)
- [2] 茶園 篤, 山澤 一誠, 横矢 直和, 竹村 治雄: "全方位ステレオ視による 3 次元情報の獲得," 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.10, pp.1745-1753 (1997)
- [3] J.Gluckman, K.Nayar, J.Thoresz: "Real-Time Omnidirectional and Panoramic Stereo," *Proc. of Image Understanding Workshop*, Vol.1, pp.299-303 (1998)
- [4] 三木 隆太郎, 山澤 一誠, 竹村 治雄, 横矢 直和: "複数の 全方位画像センサを用いた遠隔監視システム," 信学技 報, PRMU98-177, pp.7-14 (1997)
- [5] W.Shimizuhira and Y.Maeda: "Self-Localization Method Used Multiple Omnidirectional Vision System," SICE Annual Conference 2003, CD-ROM, pp.2796-2799 (2003)
- [6] W.Shimizuhira, K.Fujii and Y.Maeda: "Fuzzy Behavior Control for Autonomous Mobile Robot in Dynamic Environment with Multiple Omnidirectional Vision System," Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004), CD-ROM, SA2-M3 (2004)
- [7] W.Shimizuhira and Y.Maeda: "Behavior Control Method by Multi-Layered Fuzzy Rule for Autonomous Mobile Robot with Multiple Omnidirectional Vision System," The Fourth International Symposium on Human and Artificial Intelligence Systems (HART 2004), pp.283-288 (2004)