

協調ポジショニングシステムの研究

- 冗長位置情報の融合 -

Study on Cooperative Positioning System - Fusion of redundant positioning information -

○ 正倉爪 亮 (東工大)
正長田 茂美 (富士通研)

正 広瀬 茂男 (東工大)
指田 直毅 (富士通研)

Ryo Kurazume, Hirose Shigeo

Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

Naoki Sashida, and Shigemi Nagata

FUJITSU LABORATORIES LTD., 1015, Kamikodanaka, Nakahara-ku, Kawasaki

We have already proposed a new positioning method for multiple mobile robots, called "Cooperative Positioning System, CPS". The method is to make accurate positioning by dividing robots into two groups, and casting a part of the landmark and the traveling vehicle for each robot alternatively. CPS has a far lower accumulation of positioning error than dead reckoning and can work in three-dimensions and uncharted environment. For CPS with redundancy, we have also proposed a computational theory that is to integrate positional information obtained from various combinations of multiple robots. In this paper, we introduce a second prototype CPS machine model (CPS-II) with redundancy and show experimental results of positional information fusion.

Keywords: Multiple robots, Cooperation, Position identification, Sensor fusion, Maximum likelihood

1. はじめに

移動ロボットに対する正確な自己位置同定技術の確立は、自立移動ロボットを実現する上で重要な研究課題の一つである。この問題に対し我々はこれまでに、移動可能なランドマークとして複数のロボットを導入することにより、未知・不整地環境においても相互の位置関係の情報を交換しながら各ロボットの位置を高精度で同定することのできる「協調ポジショニングシステム (Cooperative Positioning System, CPS)」を提案した [1],[2]。

さて本システムでは、位置同定に最低必要な台数以上のロボットを用い、その際得られる複数の冗長な位置情報を適切に融合することにより、最低台数を利用した場合に比べて位置同定精度の向上が可能である。そこで我々はこれまでに、位置同定時の測定誤差がガウス分布に従うと仮定し、各ロボットの位置同定誤差を誤差分散行列で評価する手法を提案した。さらに各ロボットの位置同定誤差に応じて、最尤推定法を用いて冗長な位置情報を融合する手法を開発した [3]。そこで本報告では、これまでに提案した情報融合手法を、今回新たに試作した第2次機械モデル CPS-II に適用した結果を示し、本手法の有効性を検証する。

2. 第2次機械モデル (CPS-II)

試作した第2次機械モデル CPS-II の構成を Fig. 1 に示す。本システムは1台のマスターロボットと2ないし3台のスレーブロボットからなる。マスターロボットには、コーナーキューブの自動探索機構を有するレーザ距離計測装置 (AP-L1, (株) トプコン製, Table 1) と2軸傾斜計センサ (CMS-05A-XY, 桑野電機 (株) 製) を搭載しており、スレーブロボットに搭載されたコーナーキューブからの反射光を検知することにより、スレーブロボットまでの距離と方位を自動的に高精度に計測することができ

るようにしている。また、スレーブロボット上部には6つのコーナーキューブを垂直軸回りに放射状に等間隔で配置し、これにより任意の方向から投射されたレーザ光をその投射された方向へ正確に反射できるようにしている。各ロボットはマイクロコンピュータ (8086-8MHz)、モータ駆動回路 (BLD453, 光進ミニモ (株) 製)、バッテリー (Yuni-Z, 湯浅電池 (株) 製)、無線システム (HRF-600, ヘルツ電子 (株) 製) を搭載し、RS232C による無線通信を介してオペレータのコンピュータ (S-4/Liea, 富士通 (株) 製) により集中制御する構成としている。

Table 1: Specifications of a range finder.

AP-L1 (TOPCON Ltd.)	
Range	4 ~ 400 [m]
Resolution (distance)	0.2 [mm]
Resolution (angle)	5 [°]
Precision (distance)	$\pm 3 + 2\text{ppm}$ [mm]
Precision (angle)	± 5 [°]

本システムの基本動作手順を以下に示す。ただしここではスレーブロボットが2台であり冗長な位置情報を利用しない場合について述べる (Fig. 2)。まず始めにマスターロボット0の初期位置姿勢を測定し、その後、

1. スレーブロボット1および2が移動、静止する。
2. マスターロボット0がスレーブロボット1までの相対距離 l_1 と方位角 θ_1 、仰角 ϕ_1 を計測し、スレーブロボット1の位置を同定する。
3. 同様にマスターロボット0がスレーブロボット2ま

Fig. 1: Total view of the mechanical model CPS-II.

での相対距離 l_2 と方位角 θ_2 , 仰角 ϕ_2 を計測し, スレーブロボット 2 の位置を同定する.

4. マスターロボット 0 が移動した後, 静止する.
5. マスターロボット 0 がスレーブロボット 1,2 までの相対距離 l_1, l_2 と方位角 θ_1, θ_2 , 仰角 ϕ_1, ϕ_2 を計測し, マスターロボット 0 の位置姿勢を同定する.
6. 1 へ戻る.

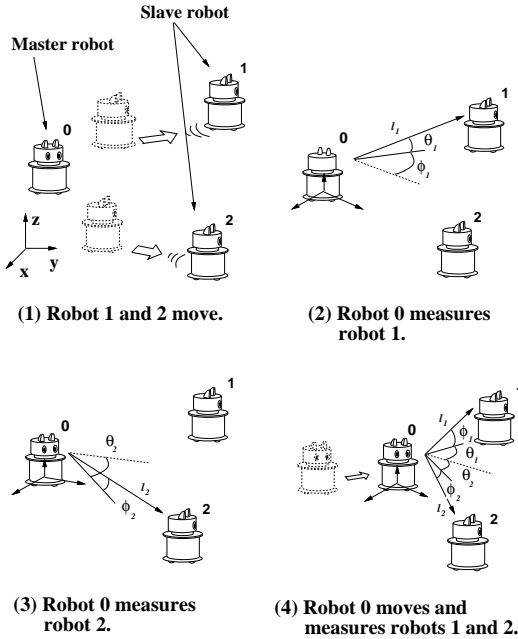


Fig. 2: Positioning principle of CPS-II

3. 複数情報の融合手法

Fig. 2 で示したように, CPS-II で採用した動作原理では, 最低 2 台のスレーブロボットが利用可能であれば, マスターロボットの位置姿勢を一意に同定できる. しかしより多くのスレーブロボットを観測し, それぞれ測定された距離角度情報から得られるマスターロボットの複数冗長な位置情報を利用することにより, 位置同定精度の向上が実現可能である. そこでここでは, これまでに

著者らが提案した CPS に対する誤差伝播の基本方程式, および冗長位置情報の融合手法を, 4 台のロボットを用いた CPS-II に適用した結果を示す.

3.1 誤差伝播の基本方程式

ここでは距離角度の測定誤差が期待値 0 のガウス分布に従うと仮定したとき, 移動測定を繰り返すに従い各ロボットの位置同定誤差がどのように累積していくかを示す [1].

まず Fig. 2(4) のように位置が既知な 2 台のスレーブロボット 1,2 からマスターロボット 0 の位置を測定する場合を考える. このときマスターロボット 0 の位置 P_0 は, スレーブロボット 1,2 の位置 P_1, P_2 , およびマスターロボット 0 から各スレーブロボットまでの距離 r , 重力方向に直交する面からの仰角 ϕ を測定することにより求められる, これをまとめて次のように表す.

$$P_0 = f(P_1, P_2, r, \phi) \quad (1)$$

さて, 式 (1) の全微分を計算すると,

$$\begin{aligned} \Delta P_0 &= \frac{\partial f}{\partial P_1} \Delta P_1 + \frac{\partial f}{\partial P_2} \Delta P_2 + \frac{\partial f}{\partial r} \Delta r + \frac{\partial f}{\partial \phi} \Delta \phi \\ &= M_0 \Delta P_1 + M_1 \Delta P_2 + M_2 \Delta r + M_3 \Delta \phi \quad (2) \end{aligned}$$

となる. ここで式 (2) のように, 位置および距離, 角度誤差が微小であるとして線形近似した場合, 距離, 仰角の測定誤差は期待値 0 のガウス分布に従うと仮定したため, 位置同定誤差も期待値 0 のガウス分布の線形和, すなわちガウス分布となる. よって, マスターロボット 0 の誤差分散行列 Σ_{00} は, スレーブロボット 1,2 の誤差分散行列 Σ_{11}, Σ_{22} , スレーブロボット 1,2 間の誤差相関行列 Σ_{12} , および計測誤差分散行列 Σ_r, Σ_ϕ を用いて,

$$\begin{aligned} \Sigma_{00} &= E[\Delta P_0 \Delta P_0^T] \\ &= M_0 \Sigma_{11} M_0^T + M_1 \Sigma_{22} M_1^T + M_2 \Sigma_r M_2^T \\ &\quad + M_3 \Sigma_\phi M_3^T + M_0 \Sigma_{12} M_1^T + M_1 \Sigma_{21} M_0^T \quad (3) \end{aligned}$$

と求められる.

次に, Fig. 2(2),(3) のように位置が既知なマスターロボット 0 からスレーブロボット i の位置を測定する場合についても, スレーブロボット i の位置 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ は, マスターロボット 0 の位置 $P_0(x_0, y_0, z_0)$, およびスレーブロボットまでの距離 r_i , 方位角 θ_i , 重力方向に直交する面からの仰角 ϕ_i を計測することにより求められる, これをまとめて

$$P_i = g_i(P_0, r_i, \theta_i, \phi_i) \quad (4)$$

とする. またこれを全微分することにより次式が得られる.

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= \frac{\partial g_i}{\partial P_0} \Delta P_0 + \frac{\partial g_i}{\partial r_i} \Delta r_i + \frac{\partial g_i}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial g_i}{\partial \phi_i} \Delta \phi_i \\ &= N_{i0} \Delta P_0 + N_{i1} \Delta r_i + N_{i2} \Delta \theta_i + N_{i3} \Delta \phi_i \quad (5) \end{aligned}$$

よって, スレーブロボット i の誤差分散行列 Σ_{ii} は, マスターロボット 0 の誤差分散行列 Σ_{00} , および計測誤差分散 $\Sigma_r, \Sigma_\theta, \Sigma_\phi$ を用いて,

$$\begin{aligned} \Sigma_{ii} &= E[\Delta P_i \Delta P_i^T] \\ &= N_{i0} \Sigma_{00} N_{i0}^T + N_{i1} N_{i1}^T \Sigma_r + N_{i2} N_{i2}^T \Sigma_\theta \\ &\quad + N_{i3} N_{i3}^T \Sigma_\phi \quad (6) \end{aligned}$$

と求まる．同様に，スレーブロボット i, j 間 ($i \neq j, i, j = 1, 2$) の誤差相関行列 Σ_{ij} は，

$$\Sigma_{ij} = E[\Delta P_i \Delta P_j^T] = N_{i0} \Sigma_{00} N_{j0}^T \quad (7)$$

となる．

つまり，CPS-II で測定を繰り返した後のロボットの位置同定精度は，各ロボットの移動毎に移動したロボットの種類に応じて式 (3), (6), (7) で与えられる誤差分散行列，誤差相関行列を順次計算することで導出できる．

3.2 複数位置情報の融合手法

つぎに上述した誤差伝播の基本方程式を基に，Fig. 2 で示されるシステムにおいて，スレーブロボットを 3 台利用し冗長な位置情報が得られる場合に対して，最尤推定法を用いた複数位置情報の融合手法を示す [3]．

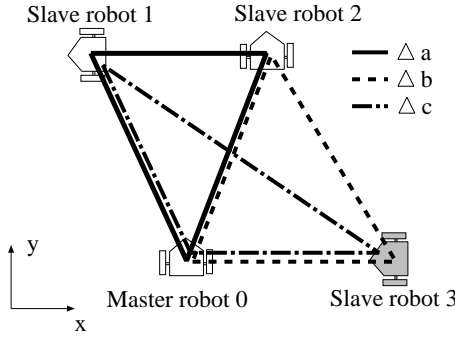


Fig. 3: CPS with four robots.

Fig. 2 で示した測定原理では，最低 2 台のスレーブロボットを観測すればマスターロボット 0 の位置を一意的に同定できるから，ロボット 0, 1, 2 を用いる組合せを Δ_a ，ロボット 0, 2, 3 を用いる組合せを Δ_b ，ロボット 0, 3, 1 を用いる組合せを Δ_c とすると，全てのスレーブロボットを観測することにより，マスターロボット 0 の位置は式 (1) より以下のように 3 通りに求められる．

$$P_0^k = f_k(P_i, P_j, r^k, \phi^k) \quad (8)$$

$$(i, j, k) = \{(1, 2, a), (2, 3, b), (3, 1, c)\}$$

そこでこれら誤差を含む複数の位置情報を，それぞれの精度や誤差の特性に応じて適切に融合するために，本研究では確率的情報融合手法の一つである最尤推定法を用いることにする．

さて CPS では，例えば式 (8) で $k = a$ および b の時に与えられるマスターロボット 0 の位置 P_0^a, P_0^b には，両者ともスレーブロボット 2 の位置情報が含まれるように，CPS において複数の位置情報に存在する測定誤差には，ある相関関係が成り立つ．ところが従来の最尤推定法に基づくセンサ情報の融合手法では，複数のセンサ情報がそれぞれ独立に得られる場合を想定しており，それらの情報間に相関関係が存在する場合についてはこれまであまり議論がされていない．そこでここでは，従来の最尤推定法に基づく情報融合手法を，各情報間に相関が存在する場合に拡張しておく．

まず前項と同様に距離，角度の測定誤差はそれぞれ平均 0 のガウス分布に従うと仮定し，式 (2) と同様に式 (8) を全微分すると次式が得られる．

$$\Delta P_0^k = M_0^k \Delta P_i + M_1^k \Delta P_j + M_2^k \Delta r^k + M_3^k \Delta \theta^k \quad (9)$$

よって，それぞれの測定における同定位置 P_0 の共分散行列 Σ_{00}^{aa} 等は，式 (3) と同様に次式で与えられる．

$$\Sigma_{00}^{aa} = M_0^a \Sigma_{11} M_0^{aT} + M_1^a \Sigma_{22} M_1^{aT} + M_2^a \Sigma_r M_2^{aT} + M_3^a \Sigma_\theta M_3^{aT} + M_0^a \Sigma_{12} M_1^{aT} + M_1^a \Sigma_{21} M_0^{aT} \quad (10)$$

ただし Σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) は式 (7) で与えられるスレーブロボット i, j 間の相関行列， Σ_r, Σ_θ は距離，角度の測定誤差である．一方，測定位置 P_0^a, P_0^b の誤差間に存在する相関行列 Σ_{00}^{ab} も，同様に次式のように求まる．

$$\Sigma_{00}^{ab} = M_0^a \Sigma_{11} M_0^{bT} + M_0^a \Sigma_{13} M_1^{bT} + M_1^a \Sigma_{21} M_0^{bT} + M_1^a \Sigma_{23} M_1^{bT} \quad (11)$$

さて，ここで各位置測定誤差には式 (11) で示される相関値が存在することから，それらは n 次元正規分布に従うと考え， P_0 についての最尤関数を

$$L(P_0) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |\Sigma|}} \exp\left(-\frac{1}{2} (\Delta P_0^T \Sigma^{-1} \Delta P_0)\right) \quad (12)$$

とおく．ただし，

$$\Delta P_0 = \begin{pmatrix} \Delta P_0^a \\ \Delta P_0^b \\ \Delta P_0^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_0 - P_0^a \\ P_0 - P_0^b \\ P_0 - P_0^c \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_{00}^{aa} & \Sigma_{00}^{ab} & \Sigma_{00}^{ac} \\ \Sigma_{00}^{ba} & \Sigma_{00}^{bb} & \Sigma_{00}^{bc} \\ \Sigma_{00}^{ca} & \Sigma_{00}^{cb} & \Sigma_{00}^{cc} \end{pmatrix} \quad \Sigma \in \mathbf{R}^{n \times n} \quad (14)$$

である．さらに，ここで

$$\Sigma^{-1} = \begin{pmatrix} \widehat{\Sigma_{00}^{aa,-1}} & \widehat{\Sigma_{00}^{ab,-1}} & \widehat{\Sigma_{00}^{ac,-1}} \\ \widehat{\Sigma_{00}^{ba,-1}} & \widehat{\Sigma_{00}^{bb,-1}} & \widehat{\Sigma_{00}^{bc,-1}} \\ \widehat{\Sigma_{00}^{ca,-1}} & \widehat{\Sigma_{00}^{cb,-1}} & \widehat{\Sigma_{00}^{cc,-1}} \end{pmatrix} \quad (15)$$

とおくと，式 (12) を微分することにより最尤関数 $L(P_0)$ は

$$P_0 = \Sigma_{00} \sum_{i=a,b,c} \sum_{j=a,b,c} \widehat{\Sigma_{00}^{ij,-1}} P_0^j \quad (16)$$

で極値を持つことがわかる．ただし，

$$\Sigma_{00}^{-1} = \sum_{i=a,b,c} \sum_{j=a,b,c} \widehat{\Sigma_{00}^{ij,-1}} \quad (17)$$

である．式 (16), (17) は，複数のロボットの組合せにより得られる冗長な位置情報を融合するための基礎式である．

4. 移動測定実験

これまで示した冗長位置情報の融合手法の有効性を検討するために，4 台のロボットからなる CPS-II を用いた移動測定実験を行ない，冗長な位置情報を利用する場合と利用しない場合について実現される位置同定精度を比較した．実験では，マスターロボット 1 台とスレーブロボット 3 台を，カーペットの敷かれた平坦な室内 (6m × 12m) の壁に沿って，CPS による位置同定を行ないながら時計回りに一周させ，再び初期位置に到達した時点でのマスターロボットの同定位置と定点計測により測定

されるマスターロボットの位置を比較して移動後の同定精度を調べた。また実験ではマスターロボットを含む3台のロボットだけを位置同定に利用した場合と、4台全てのロボットを利用し、式(16),(17)により冗長な位置情報を融合した場合について位置同定計算を行ない、両者の移動後の位置同定精度を比較した。

このときの各ロボットの移動の様子を Fig. 4に、また各動作サイクルにおけるロボットの移動手順を Fig. 5に示す。図では、マスターロボットは四角、スレーブロボットは丸で表されており、各ロボットは左下に示す扇形の初期配置から y 軸方向へ移動を開始し、Fig. 5に示す動作サイクルを11回繰り返した後、再び初期位置へ到達している。またマスターロボットの移動の様子を Fig.

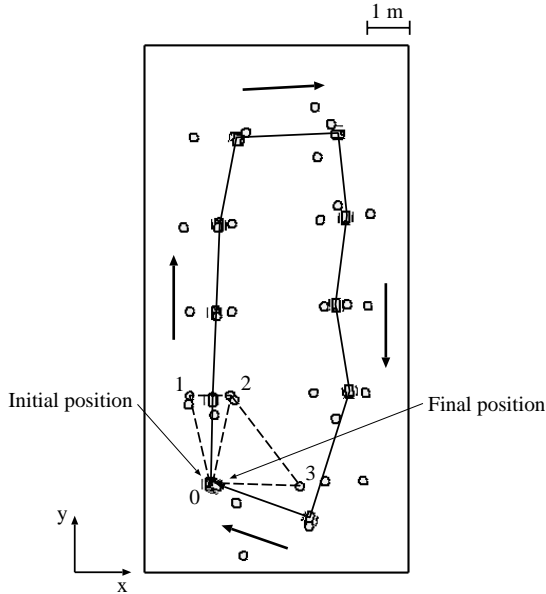


Fig. 4: An example of the experimental results with 4 robots.

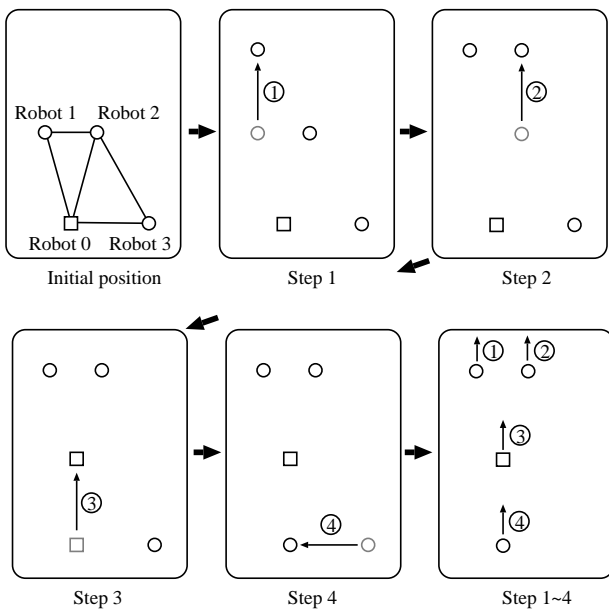


Fig. 5: Moving strategy in each measurement cycle.

4中に実線で示す。この測定実験を10回行ない、移動終了時の位置およびz軸回りの方位角 θ の同定誤差の平均値を求めた結果を、ロボットを3台用いた場合、ロボットを4台用いて提案する手法により位置情報を融合した場合、ロボットを4台用いて冗長な位置情報の算術平均を計算することにより各位置情報を融合した場合について Table 2に示す。

このようにマスターロボットの総移動距離 21.5m に対し、平均位置、姿勢同定誤差はロボットが3台だけで冗長性が無い場合が一番大きく、ロボットを4台用い、提案した冗長な位置情報の融合手法を用いた場合は、それぞれ 26.3mm(相対精度 0.12%)、0.32 度と最も良い結果となった。またロボットを4台用い、算術平均を用いた場合にはそれらの結果の中間的な誤差となった。これらの実験から、提案するような冗長位置情報の融合によって、位置姿勢同定精度が向上できることが確認された。

Table 2: Positioning and attitude accuracy of CPS-II with 3 and 4 robots. Positioning error ratios are also shown.

	Position	Attitude
3 robots	67.9mm (0.32%)	0.43 deg.
4 robots		
Proposed method	26.3mm(0.12%)	0.32 deg.
4 robots		
Arithmetic means	53.0mm(0.25%)	0.83 deg.

5. まとめ

筆者らがこれまでに提案した「群ロボットによる協調ポジショニングシステム (CPS)」において、多数台のロボットを用いることにより得られる複数冗長な位置情報を、最尤推定法を用いて融合することにより位置同定精度を向上させる手法を示した。また試作した第2次 CPS 機械モデル (CPS-II) に適用した結果を示し、提案した情報融合手法によれば群ロボットからの冗長な位置情報が利用でき、位置同定精度がより向上することを示した。

参考文献

- [1] R. Kurazume, S. Nagata, S. Hirose, Cooperative Positioning with Multiple Robots, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1250-1257, (1994).
- [2] 広瀬, 倉爪, 長田, 群ロボットによる協調ポジショニング法, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.6, pp.838-845, 1995
- [3] 長田, 倉爪, 広瀬, 群ロボットによる協調ポジショニングシステム - 第2報: 複数位置情報の融合 -, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.301-302, 1994