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

（株）富士通研究所 ○倉爪 亮　長田 茂美　東京工業大学 広瀬 茂男

Cooperative Positioning System with Multiple Robots

FUJITSU LABORATORIES LTD. : ○ Ryo Kurazume, Shigemi Nagata

Tokyo Institute of Technology : Shigeo Hirose

Abstract - 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. This paper proposes a new computational theory that is to integrate positional information obtained from various combinations of multiple robots in CPS. We ran computer simulations to verify the validity of proposed theory.

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，同時に多くのロボットを位置同定に利用することにより複数の冗長な位置情報が得られるため，それらを融合することにより一層の同定精度の向上が期待できる．そこで本報告では，最尤推定法を用いてこれら冗長な位置情報を融合する手法を提案し，計算機シミュレーションによりその有効性を検証する．

2　協調ポジショニングシステム (CPS)

まず，本報告で検討する CPS について説明する．これは，**Fig.1**に示すように、まずロボット 1,2 の初期位置を測定した後、

1. ロボット 3 が移動、静止する。
2. ロボット 1 がロボット 2 とロボット 3 の相対角度 θ_1 及び迎角 ϕ_1 を計測する。
3. ロボット 2 がロボット 1 とロボット 3 の相対角度 θ_2 及び迎角 ϕ_2 を計測する。
4. ロボット 1、2 の位置、及び計測された角度を用い、三角測量法によりロボット 3 の位置を計算する。
5. ついで静止ロボット 1 を移動させ、同様の計測を繰り返す。

という動作を繰り返し移動していくものである。

3　複数位置情報の融合手法

まず簡単のため **Fig.2**に示すように平面上を y 方向に移動する 4 台のロボット 0,1,2,3 を考え，各ロボットの位置をそれぞれ $x_0, x_1, x_2, x_3 \in R^{2\times1}$ とする．またロボット 0,1,2 からなる三角形を $\triangle_a$，ロボット 0,1,3 からなる三角形を $\triangle_b$，ロボット 0,3,2 からなる三角形を $\triangle_c$

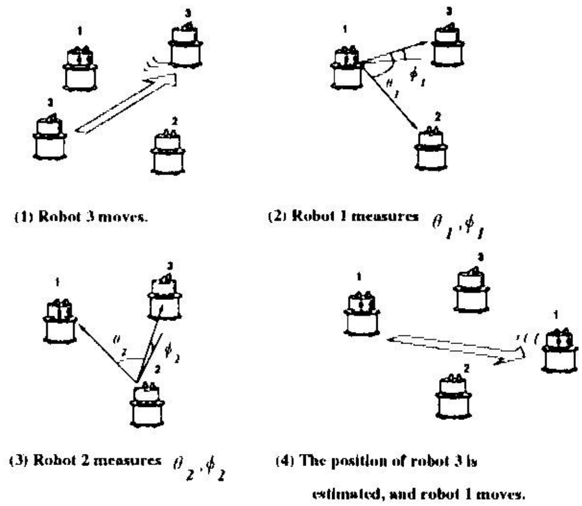

Figure 1: An example of CPS.

とする．このときのロボット 0 の位置は，$\triangle_a,\triangle_b,\triangle_c$ それぞれについて計算することができる．

$$x_0^a = f_a(x_1, x_2, \theta_a) \tag{1}$$

$$x_0^b = f_b(x_1, x_3, \theta_b) \tag{2}$$

$$x_0^c = f_c(x_2, x_3, \theta_c) \tag{3}$$

ただし，$\theta_a = (\theta_1, \theta_2)^T$, $\theta_b = (\theta_3, \theta_4)^T$, $\theta_c = (\theta_5, \theta_6)^T$ である．

さて，各ロボットの位置及び測定角度にはそれぞれ平均 0 の正規分布に従う測定誤差が存在するものと仮定し，式 1,2,3を Taylor 展開すると次式が得られる。

$$\Delta x_0^a = M_0^a \Delta x_1 + M_1^a \Delta x_2 + M_2^a \Delta\theta_a \tag{4}$$

$$\Delta x_0^b = M_0^b \Delta x_1 + M_1^b \Delta x_3 + M_2^b \Delta\theta_b \tag{5}$$

$$\Delta x_0^c = M_0^c \Delta x_2 + M_1^c \Delta x_3 + M_2^c \Delta\theta_c \tag{6}$$

ただし，$M_0^a \in R^{2\times2}$ 等はそれぞれ式 1,2,3の位置及び測定角度についての微分係数行列である．よって，それ

第12回ロボット学会学術講演会（平成6年11月20日、21日、22日）

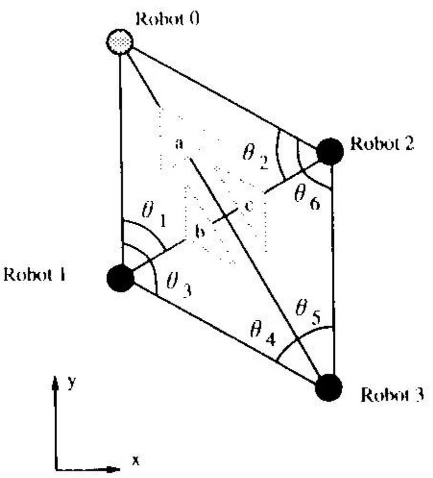

Figure 2: CPS with four robots.

それの測定における測定値 x_0 の共分散行列 (Σ_{aa} 等), 及び各測定間の相関行列 (Σ_{ab} 等) は,

$$
\begin{aligned}
\Sigma_{aa} &= E[\Delta x_0^a \Delta x_0^{aT}] \\
&= M_0^a \Sigma_{11} M_0^{aT} + M_1^a \Sigma_{22} M_1^{aT} + M_2^a \Sigma_{\theta_a} M_2^{aT} \\
&\quad + M_0^a \Sigma_{12} M_1^{aT} + M_1^a \Sigma_{21} M_0^{aT} \qquad (7) \\
\Sigma_{ab} &= E[\Delta x_0^a \Delta x_0^{bT}] \\
&= M_0^a \Sigma_{11} M_0^{bT} + M_0^a \Sigma_{13} M_1^{bT} \\
&\quad + M_1^a \Sigma_{21} M_0^{bT} + M_1^a \Sigma_{23} M_1^{bT} \qquad (8)
\end{aligned}
$$

と計算できる. ただし Σ_{ij} $(i, j = 1, 2, 3)$ はロボット i, j 間の相関行列, Σ_θ は角度測定誤差である.

さて, ここで各測定誤差には相関値が存在することから, それらは6次元正規分布に従うと考え, x_0 についての最尤関数を

$$L(x_0) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^6 \mid \Sigma \mid}} \exp(-\frac{1}{2}(\Delta x_0^T \Sigma^{-1} \Delta x_0)) \qquad (9)$$

とおく. ただし,

$$\Delta x_0 = \begin{pmatrix} \Delta x_0^a \\ \Delta x_0^b \\ \Delta x_0^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 - x_0^a \\ x_0 - x_0^b \\ x_0 - x_0^c \end{pmatrix} \qquad (10)$$

$$\Sigma^{-1} = \begin{pmatrix} \Sigma_{aa} & \Sigma_{ab} & \Sigma_{ac} \\ \Sigma_{ba} & \Sigma_{bb} & \Sigma_{bc} \\ \Sigma_{ca} & \Sigma_{cb} & \Sigma_{cc} \end{pmatrix}^{-1} \qquad (11)$$

である. さらに, ここで

$$\Sigma^{-1} = \begin{pmatrix} \hat{\Sigma}_{aa}^{-1} & \hat{\Sigma}_{ab}^{-1} & \hat{\Sigma}_{ac}^{-1} \\ \hat{\Sigma}_{ba}^{-1} & \hat{\Sigma}_{bb}^{-1} & \hat{\Sigma}_{bc}^{-1} \\ \hat{\Sigma}_{ca}^{-1} & \hat{\Sigma}_{cb}^{-1} & \hat{\Sigma}_{cc}^{-1} \end{pmatrix} \qquad (12)$$

とおくと, 式9を微分することにより最尤関数 $L(x_0)$ は

$$x_0 = \Sigma_0 \sum_{i=a,b,c} \sum_{j=a,b,c} \hat{\Sigma}_{ij}^{-1} x_0^j \qquad (13)$$

で極値を持つことがわかる. ただし,

$$\Sigma_0^{-1} = \sum_{i=a,b,c} \sum_{j=a,b,c} \hat{\Sigma}_{ij}^{-1} \qquad (14)$$

である. 式13,14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. これらの式より, 本システムの様に相互に相関関係のある複数の情報を融合する場合には, 各情報間の相関行列 (Σ_{ab} 等) も考慮しなければならないことがわかる.

4 計算機シミュレーション

提案した情報融合手法の有効性を検討するために,

1. 3台のロボットを用いる場合 (方式1)
2. 4台のロボットを用い, 冗長な位置情報の相加平均値を用いる場合 (方式2)
3. 4台のロボットを用い, 冗長な位置情報の最尤推定値を用いる場合 (方式3)

について計算機シミュレーションを行なった. ただし, 各ロボットの初期位置は, $(-0.43, 0.5)$,$(0.43, 1.0)$, $(-0.43, -0.5)$,$(0.43, 0)$ であり, 目標位置は $(-0.43, 10.5)$ である. 計算では, 角度測定誤差を平均0度, 標準偏差1度の正規乱数として与え, 10,000回の繰り返し計算により目標位置での同定精度を求めた. **Table 1**に計算結果を示す. この結果, 提案した融合手法は同定精度が

Table 1: Positioning Accuracy

	σ_x^2	σ_y^2	σ_{xy}	S.D.
Method 1	0.207	0.382	-0.019	0.281
Method 2	0.128	0.343	0.007	0.209
Method 3	0.067	0.174	-0.008	0.107

3台のロボットを用いた場合の2.6倍, 4台のロボットによる相加平均値を用いた場合の1.9倍になることがわかり, 本手法の有効性が確認された.

5 まとめ

群ロボット中の各ロボットを協調制御することにより, ロボットの位置を高い精度で求めることのできる「協調ポジショニングシステム (CPS)」に対し, 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最尤推定法を用いて融合する手法を提案した. また計算機シミュレーションにより本手法の有効性を確認した.

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, 第3回ロボットシンポジウム予稿集, pp. 37-42, (1993).