交差, 合流路線上における移動ロボット群の衝突回避*

齊 藤 守**・津 村 俊 弘***

Collision Avoidance among Mobile Robots Moving on the Route Crossing and Joining*

Mamoru SAITO** and Toshihiro TSUMURA***

The problem of collision avoidance among mobile robots moving along crossing and joining paths is formulated as a motion planning problem in terms of the velocity vector modification. In this paper, a local approach based on a nonlinear programming is applied to solve this problem. Here, the velocity vector constraint for robots are set up using the relative position and velocity information of neighboring robots. The desired velocity vector, which enables robots to navigate without collision, is given as the optimal solution of objective function under this velocity vector constraint. This method is implemented using both experimental robots system and computer simulated one. From the results, it is shown that the experimental robots achieves acceptable performance both in case of crossing and joining. The feasibility and effectiveness of our method are also discussed through the simulation results.

1. はじめに

新交通システムや工場内の無人搬送システムなどにおける車両群の効果的な自動運行制御を行うためには、全車両に関する膨大な情報量、計算量が必要とされてきた。近年、このような移動ロボット群の制御方式として、柔軟性、拡張性に富んだ自律分散型制御方式が指向されつつある¹⁾。そこでは制御入力決定に際して、近接する移動ロボット間での限られた情報のみを用いるため、個々の移動ロボットが自立性を生かしながら互いに協調することで、システム全体としての効率化をはかることが重要な課題となってくる。

そのような協調の一つとして、ロボット間の衝突回避問題が挙げられ、すでに幾つかの研究がなされている。Wang²⁾はロボットやロボット間の相互関係、ロボットの誘導方略を、簡単なダイナミクスで記述しロボット群全体の力学的な挙動について考察している。新井ら³⁾はロボットと障害物、目標軌道との関係を、仮想的な質

量・バネ・ダンパー系で記述しサーボ系を構成してロボットの誘導制御を行う方法について提案している。また著者ら⁴⁾もロボット間の相対的な位置、速度情報から幾何学的解析によって非衝突速度ベクトルを導出し、それぞれのロボットに対する誘導制御を行う方法について示している。これらの方法は、いずれもロボットが自由平面上を移動する場合の衝突回避問題を扱った研究である。しかしながら実際の地上交通や屋内搬送システムにおける移動体群は、あらかじめ設定された2次元路線ネットワーク上で制限走行するものが多い、このような路線ネットワークは構造的に交差、合流、分岐路線から成り、上記の方法をそのまま適用すると、交差、合流路線上でのデッドロックを生じる場合がある。その対策としては従来からの閉塞区間制御や信号機を用いた交通管制を適用する方法があるが、より多くの移動体の効率的な自動運行—高密度でしかも渋滞なく—を実現する上で十分ではない⁵⁾。

そこで本論文はその基礎的な課題として、交差、合流路線での移動ロボット間の局所的な協調による衝突回避問題を取り上げる。ここではその解法として、非線形計画法に基づくロボットの実時間走行アルゴリズムを適用する。またその検証に当たって試作システムによる交差、合流路での回避走行実験ならびに計算機シミュレーションによる評価を行い、本手法の適用条件や多数のロボットに対する運用効果について議論する。

* 原稿受付 1991. 8. 3.

** 大阪市立工業研究所 機械課 Osaka Municipal Technical Research Institute, 1-6-50, Morinomiya, Jhoto-ku, Osaka 536, Japan

*** 大阪府立大学 工学部 College of Engineering, University of Osaka Prefecture, Gakuen-cho1-1, Sakai 593, Japan

Key Words : collision avoidance, mobile robot, motion planning, local approach, non-linear programming.

2. 問題設定

交差する通路内を走行する n 台の移動ロボット群を想定する。これを図式的に示したものが Fig. 1 である。有向直線 l_1, l_2 は各々の通路内におけるロボットの誘導経路であり、交差角 α をもって交差し、それぞれ他の経路への合流路を持つものとする。ここで各々のロボット i はその作業空間の座標系 $O-x_1x_2$ における位置ベクトル $\mathbf{x}_i(t)$ 、速度ベクトル $\mathbf{v}_i(t)$ を実時間で計測し、経路に自立誘導する手段を持つものとする。またロボットは自己の占有領域(半径 r の円領域)、ならびに視覚または通信によって他のロボットの位置、速度情報を得るための局所的な観測領域(レンジ R , 前方視野 180° の半円領域)を持つものとする。本論文では走行するすべてのロボットを等価なものとし、これら二つの領域が同一であるものとして議論する。

3. ロボットの走行アルゴリズム

3.1 移動拘束領域

ここでは移動ロボット群が指示された走行ルートに従って衝突を回避しつつ走行するための速度ベクトルの拘束領域について述べる。このような領域としては、互いに近接するロボット間の相対関係によって付加される非衝突速度ベクトル領域と、個々のロボットの誘導経路に対する追従速度ベクトル領域とがある。そこでまず前者の非衝突速度ベクトル領域について考える。いまロボット i, j が互いにその観測領域内に侵入し、各々の位置、速度ベクトル情報を相互にあるサンプル周期ごとに得るものとする。このとき、時点 k におけるロボット j のロボット i に対する相対位置ベクトルを $\mathbf{x}_{ij}(k) (= \mathbf{x}_j(k) - \mathbf{x}_i(k))$ 、相対速度ベクトルを $\mathbf{v}_{ij}(k) (= \mathbf{v}_j(k) - \mathbf{v}_i(k))$ とすると、これらロボット間の予測最接近時間 t_c と予測距離関数の最小値 $L_{\min}$ が次式により与えられる⁶⁾。

$$t_c = -\frac{\mathbf{x}_{ij}(k)^T \mathbf{v}_{ij}(k)}{\|\mathbf{v}_{ij}(k)\|^2} \quad (1)$$

$$L_{\min} = \|\mathbf{x}_{ij}(k)\|^2 - \frac{(\mathbf{x}_{ij}(k)^T \mathbf{v}_{ij}(k))^2}{\|\mathbf{v}_{ij}(k)\|^2} \quad (2)$$

(1)式においてロボット i, j は $t_c < 0$ の時互いに離反し、 $t_c \geq 0$ の時互いに接近することがわかる。したがって $t_c \geq 0$ の場合に対して、これらのロボットが衝突しない条件は

$$L_{\min} \geq (2r)^2 \quad (3)$$

である。そこでこの条件を満足するロボット i の修正速度ベクトルを $\mathbf{v}_i(k)$ として(3)式を解くと次の不等式で

現わされる $\mathbf{v}_i(k)$ の非衝突領域 h_{ij} が得られる⁷⁾。

$$h_{ij} = \{\mathbf{v}_i(k) \mid f_{ij}(\mathbf{v}_i(k)) \leq 0\} \quad (4)$$

ただし、

$$f_{ij}(\mathbf{v}_i(k)) = \mathbf{x}_{ij}(k)^T \begin{bmatrix} 2r & -\sqrt{\|\mathbf{x}_{ij}(k)\|^2 - 4r^2} \\ \sqrt{\|\mathbf{x}_{ij}(k)\|^2 - 4r^2} & 2r \end{bmatrix} \times (\mathbf{v}_i(k) - \mathbf{v}_j(k))$$

この(4)式で表現される非衝突領域 h_{ij} は、幾何学的に Fig. 2 に示すようなロボット i を原点とする $\mathbf{v}_i(k)$ の領域を現わしている。この領域 h_{ij} は、ロボット i の観測領域内において接近($t_c \geq 0$)して来る他のロボット j ($= 1, 2, \dots, m$)についても同様に得られる。

次にロボット i の走行経路に対する追従速度ベクトル領域としては、Fig. 3 に示すような誘導経路に平行な許容経路幅 $2e$ を設定する。これは次の(5)式のように表現

Fig. 1 Mobile robots traveling over crossing and joining paths

Fig. 2 Collision free velocity vector region for the i -th robot

Fig. 3 Path following velocity vector region for the i -th robot

することができる。

$$h_{i0} = \{ \underline{v}_i(k) \mid f_{i0}(\underline{v}_i(k)) \leq 0 \} \quad (5)$$

ただし，

$$f_{i0}(\underline{v}_i(k)) = \begin{bmatrix} d_L^t(\underline{v}_i(k) - \underline{d}_L) \\ d_R^t(\underline{v}_i(k) - \underline{d}_R) \\ -\underline{p}_1^t \underline{v}_i(k) \\ \|\underline{v}_i(k)\| - v_{\max} \end{bmatrix}$$

ここで d_L ， d_R はロボット i の許容経路幅に対する左右のオフセットベクトルであり， $\underline{p}_1$ は走行経路に平行な単位ベクトルである，また $\underline{p}_1^t \underline{v}_i(k) \geq 0$ としているのはロボットを逆進させないためであり， $v_{\max}$ はロボットの最大速度を表わしている。

以上からロボット i の移動拘束領域は(4)，(5)式を満足する $\underline{v}_i(k)$ の領域として次式のように記述できる。

$$H_i = \{ \underline{v}_i(k) \mid F_i(\underline{v}_i(k)) \leq 0 \} \quad (6)$$

ただし，

$$F_i(\underline{v}_i(k)) = [f_{i0}^t, f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{im}]^t$$

3.2 指示速度ベクトルの導出

先に得られた移動拘束条件下で，ロボットを走行制御するための指示速度ベクトルの導出方法について述べる。そこでまず Fig. 4 に示される経路誘導ベクトル $\underline{n}_i(k)$ を考える。これは経路上に設けた仮想目標点 $G_i(k)$ を指向する基準速度 v_0 の速度ベクトルであり， $G_i(k)$ はロボット i の経路偏差 $\varepsilon (= \|\underline{d}_L + \underline{d}_R\|/2)$ に反比例する距離 ξ に置くものとする。すなわち誘導係数を $A = \varepsilon \xi (\text{const.})$ とすると $\underline{n}_i(k)$ は次のようになる。

$$\underline{n}_i(k) = \frac{v_0(\varepsilon(\underline{d}_L + \underline{d}_R) + 2A\underline{p}_i)}{2\sqrt{\varepsilon^4 + A^2}} \quad (7)$$

さてロボット i の指示速度ベクトルを決定するに当たって，先の(6)式の制約条件下で $\underline{v}_i(k)$ を最適化するための目的関数 J_i を以下に定義する。

$$\begin{aligned} J_i(\underline{v}_i(k)) &= w_1 \|\underline{v}_i(k) - \underline{n}_i(k)\|^2 + w_2 \|\underline{v}_i(k) - \underline{v}_i(k)\|^2 \\ & \quad (8) \end{aligned}$$

ただし， w_1 ， w_2 は重み係数であり

- $\underline{n}_i(k) \in H_i$ ， $\underline{v}_i(k) \notin H_i$ の場合 $w_1 = 1$ ， $w_2 = 0$
- $\underline{n}_i(k) \notin H_i$ ， $\underline{v}_i(k) \in H_i$ の場合 $w_1 = 0$ ， $w_2 = 1$
- その他の場合 $w_1 = 0.5$ ， $w_2 = 0.5$

とする。ここで(8)式における第一項，第二項はそれぞれロボットの経路偏差と急激な速度変化を抑制する評価項である。ロボット i の指示速度ベクトルはこの J_i を用い

Fig. 4 Target point and path following velocity vector of the i -th robot

Fig. 5 Local optimization of the velocity vector

て以下の不等式制約条件付最適化問題の解として与えられる。

$$\text{minimize } J_i(\underline{v}_i(k)) \quad \text{subject to } F_i(\underline{v}_i(k)) \leq 0 \quad (9)$$

ここで J_i ， F_i は $\underline{v}_i(k)$ に関する凸関数であり，ロボット i の指示速度ベクトルとして Fig. 5 に示すような(9)式の唯一解 $\underline{v}_i^*(k)$ が得られる⁸⁾。以上の手法をすべてのロボットに適用し，それらの指示速度ベクトルに追従させることにより走行制御を行う。

4. 実験

4.1 システムの構成

前節の手法を検証するための基本実験に当たって，2台の移動ロボットを用いた試作システムを製作した。ロボット本体は教育用無人搬送車(PZ-AC 1，太平洋工業(株)製)をベースに改造を加えたものであり，その外観，主要諸元をそれぞれ Fig. 6，Table 1 に示す。ロボットのハードウェアはCPU ボード(z80A，clock 4MHz)と教示部(走行ルート of 指定)，検出部(磁気式エンコーダによる左右2輪の移動量計測)，駆動部(サーボモータによる左右2輪独立駆動)で構成し，自立走行に必要な機能を備えている。なお，ロボット間の相互の位置情報の取得は24bit PIO を介した有線通信で行っている。

次にロボットの走行制御プログラムについて述べる。ここでは Fig. 7 に示すようにロボットの走行ルートの捕捉とその速度制御を主ルーチンで行い，ロボットの位

Fig. 6 Overview of the experimental mobile robot

Table 1 Specification of the experimental mobile robot

Dimensions	372 (L)×250 (W)×120 (H)
Weight	3kg
Drive-motor	12vDC (Japan servo co.)

Fig. 7 Schematic flow of the running control

置計測、通信、指示速度ベクトルの算出を割込みルーチンで処理している。走行制御プログラムの開発は VAX Station 2000(DEC 社製)を用いて行っており、ロボットの制御サンプリング周期は 128msec である。

4.2 実験結果と考察

ここでは衝突回避の基礎実験として、Fig. 8 に示す経路設定での交差、合流実験を行う。なお実験においては robot 1, 2 の基準速度 $v_0 = 0.20\text{m/sec}$ 、最大速度 $v_{\max} = 0.35\text{m/sec}$ 、固有領域 $r = 0.238\text{m}$ 、誘導係数 $A = 0.01\text{m}^2$ 、観測レンジ $R = 0.5 \sim 2\text{m}$ とし、許容経路幅 $e = 0.02 \sim 0.5\text{m}$ 、交差角 $\alpha = 45^\circ \sim 180^\circ$ とした。

実験結果の一例として $e = 0.2\text{m}$ 、 $\alpha = 90^\circ$ 、 $R = 1\text{m}$ とした場合の実験状況とその時の robot 1, 2 間の距離の時間的変化について、各々 Fig. 9(a), (b) と Fig. 10 に示

Fig. 8 Initial setup of mobile robots

す。これらより交差、合流いずれの場合も許容経路幅内で円滑な回避走行がなされることが確認された。またこの場合の実験では回避に必要なロボットの最小観測レンジ $R_{\min}$ は 0.87m であり、 $R \geq 0.87\text{m}$ であれば R の変化に対する影響の少ないスムーズな回避動作が行われるが、 $R < 0.87\text{m}$ では衝突 (robot 1, 2 間の最接近距離が $2r$ 以下) することがわかった。

このように本手法においてはロボットのもつ R は回避の成否を決定する重要な要素となる。 R を大きくすることは回避を容易とする反面、観測すべきロボット数の増加を意味し、アルゴリズムの実時間上の制約から現実性に乏しい。

逆に R が不十分であれば、誘導経路の条件 (e, α) によっては回避が不可能となることが予想される。そこで本手法の適用限界である $R_{\min}$ に対する e, α の影響について確認した。

Fig. 11 は実験における e と $R_{\min}$ の関係について α をパラメータとしてプロットしたものである。明らかに e が大きい (経路に対する拘束が小さい) ほど回避も容易になり、 $R_{\min}$ も小さくなるが示されている。また α が大きくなるに従って $R_{\min}$ も大きくなるが、これは α に伴うロボット間の相対速度 ($\|v_{12}(k)\|$) の増加によるものである[†]。これらの結果より、本手法の適用条件は、与えられた誘導経路の e, α に対して $R \geq R_{\min}$ を満足することにある。

5. 計算機シミュレーション

5.1 条件設定

より多数の移動ロボットに対して本手法の適用可能性と運用効果について検討するため、計算機シミュレー

[†] ただし $\alpha = 180^\circ$ の場合はロボットの対面通行となり、すれ違いのために $e \geq r$ であることが必要となる。

Fig. 9 Collision avoidance of two mobile robots

Fig. 10 Distance between crossing and joining mobile robots

Fig. 11 Minimum range of the sensing area

ションによる回避走行実験を行う。ここではロボットの各種パラメータ(v_0 , $v_{\max}$, A , r)に先の実験と同様の値を用い、観測レンジ $R = 1.25\text{m}$ としている。またロボットの指示速度ベクトル追従系を構成するため、その動特性を試作システムから同定し以下の線形方程式で近似した。

$$\begin{cases} \dot{v} + 0.05v = 0.25(u_R + u_L) \\ \ddot{\phi} + 0.09\dot{\phi} = 1.49(u_R - u_L) \end{cases} \quad (10)$$

ここで v , ϕ はそれぞれロボットの進行速度，方位角であり， u_L , u_R は左右両輪の駆動入力である。

さてシミュレーションの条件としては Table 2 に示すような 6 台のロボットを用いた四つの事例を想定する。Table 2 より，Ex. 1, 2 は Fig. 12(a) に示す直角交差，合流路における回避実験であり，Ex. 1 は路線 l_1 , l_2 の順に通行優先権を与える場合(robot 1, 2, 3 は robot 4, 5, 6 に対する (4) 式の拘束条件を含めない)，Ex. 2 は通行優先権が等しい場合について検討する。また Ex. 3, 4 は Fig. 12(b) に示す三差路での回避実験である。ここで Ex. 3 は路線 l_1 , l_2 , l_3 の順に通行優先権を与える場合，EX. 4 は通行優先権が等しい場合である。

5.2 結果と考察

シミュレーションの結果を Fig. 13 (a)~(d) に示す.

(a) Ex. 1 では路線 l_1 上のロボット群が通行優先権をも

Table 2 Simulation conditions

path	arrangement		Ex. 1	Ex. 2	Ex. 3	Ex. 4
	priority level	l_1	(see Fig. 9 (a))		(see Fig. 9 (b))	
			1	0	2	0
			0	0	1	0
route	width (e)	l_2			0	0
		l_3			0	0
			0		0	$2r/\sqrt{3}$
	robot	robot 1	l_1		l_1	
		robot 2	$l_1 \rightarrow l_2$		$l_1 \rightarrow l_2$	
		robot 3	l_1		l_2	
		robot 4	l_2		$l_2 \rightarrow l_3$	
		robot 5	$l_2 \rightarrow l_1$		$l_3 \rightarrow l_1$	
		robot 6	l_2		l_3	

つため、路線 l_2 上の robot 4, 5, 6 は robot 1, 2, 3 が通過して衝突の危険がなくなるまで交差点 O の手前で待機することになる。一方、(b) Ex. 2 ではすべてのロボッ

トが(5)式の協調則に基づく回避走行を行う。

結果としてすべての回避動作が終了する 20 秒後のロボット群の走行距離平均と標準偏差は Table 3 に示すようになり、(b)の場合のほうが全体としての運行効率がよいと判断できる。また(c) Ex. 3 と(d) Ex. 4 についても Table 3 から同様のことがいえる。ただし(d)の場合、協調則のみに基づく回路が可能となる必要条件は、それぞれの経路上のロボットが同時に交差点 O を通過できるだけの最小経路幅 $e_{\min}$ (Fig. 14 参照)が満足されることである。このように n 本 ($n \geq 2$) の路線が一点 O で点対称に集中するような経路設定では最小許容経路幅として

$$e_{\min} = \frac{r}{\sin \frac{\pi}{n}} \quad (11)$$

が必要となる。

6. おわりに

本論文では交差、合流路線上での移動ロボット群の衝突回避問題を取り上げ、非線形計画法に基づく実時間走行制御アルゴリズムを用いた。また試作システムによる基礎実験と計算機シミュレーションによる検証を行い、その適用条件や運用効果について議論した。ここでは経路ネットワークにおける基礎的課題として交差、合流路線に着目し、本手法を用いることで良好な結果を得ることができた。一般的な経路ネットワーク全体を想定した本手法の応用と、ロボット群の運行効果の評価を行うことは、今後の課題である。なおこのような手法を実システムに適用することは、従来からの一括運行制御方式と比べて、

• 上位システムの負担軽減

個々のロボットに対してはたまかな運行指示(目的地や走行ルートなど)を与えるだけでよい。

• システム全体の柔軟性、信頼性の向上

運行指示の変更、追加が容易となり、上位システムの故障に伴うロボットの暴走や衝突が避けられる。

などの不加価値があると考えられる。

最後に、本研究は 1987 年度日本小型自動車振興会の補助金の一部により行われたものである。

Fig. 12 Path arrangement for six mobile robots

Fig. 13 Collision avoidance of six mobile robots

 Table 3 Simulation results (μ and σ indicate the mean and standard deviation of traveling distance)

	Ex. 1	Ex. 2	Ex. 3	Ex. 4
μ (m)	3.40	4.66	3.45	4.83
σ (m)	1.51	0.48	0.87	0.24

Fig. 14 Minimum path width for three symmetric paths conjunction

参考文献

- 1) 長田：自律分散システムと情報処理；計測と制御，Vol. 29 No. 10, pp. 59~62 (1990)
- 2) P. K. C. Wang：Dynamics of Interacting Multiple Autonomous Mobile Robots with Simple Navigation Strategies；IEEE/RSJ Int. Workshop on IROS, pp. 179~185 (1987)
- 3) T. Arai, H. Ogata et al.：Collision Avoidance among Multiple Robots using Virtual Impedance；IEEE/RSJ Int. Workshop on IROS, pp. 479~485 (1989)
- 4) M. Saito and T. Tsumura：Collision Avoidance among Multiple Autonomous Mobile Robots；1990 JAPAN-USA Symposium on Flexible Automatiom, pp. 103~110 (1990)
- 5) 長谷川：列車の知能化；計測と制御，Vol. 30, No. 1, pp. 40~45 (1991)
- 6) 齊藤，津村：移動ロボット間における衝突回避；システム制御情報学会論文誌，Vol. 3, No. 1, pp. 1~7 (1990)
- 7) 齊藤，永守：交差路線における移動ロボット間の衝突回避；ビークルオートメーション技術研究会 第4回シンポジウム講演論文集，pp. 21~24 (1991)
- 8) 齊藤，津村：移動ロボット群における衝突回避；システム制御情報学会論文誌，Vol. 3, No. 8, pp. 24~32 (1990)