

自律移動型群ロボットの開発と場に基づく制御

Development of Autonomous Swarm Robot and Its Control based on Vector Field

本間良幸, 岡田昌史 (東京工業大学)

* Yoshiyuki HOMMA and Masafumi OKADA (Tokyo TECH)

Abstract— So far, we have developed the swarm control method based on the vector field for congestion reduction. In this method, assuming that the individuals in the swarm take their own motion following the defined vector field, the swarm behavior is modeled by continuum. The density of the continuum is calculated by the continuity equation and the position of the poles that prevent the flow are determined based on the obtained density. The effectiveness of the proposed method is evaluated by the simulations, however, it is necessary to confirm its phenomenon by an experimental environment in the real world. In this paper, we design and develop the autonomous mobile robots. They have a two-dimensional localization sensor, range sensors for collision avoidance, CPU, battery and a wireless LAN module to communicate with a host PC. The control algorithm is implemented to the CPU and the usability of the robots is verified.

Key Words: autonomous mobile robot, omni-directional locomotion, swarm, vector field

1. はじめに

駅構内, 建物の出入り口, 階段など, 我々を取り巻く環境には混雑が引き起こされる場所が数多く存在する. このような場所において, 我々は不快を感じたり, 場合によっては重大な事故が引き起こされることもある. この問題を解決すること, または混雑を緩和させることは, 人口が増加する都市設計においても重要な課題であると考えられる.

この混雑緩和のために, 群を制御するアルゴリズムを利用することが有用である. 久米ら [1], Finkら [2] は各ロボットの明示的な制御によって協調しながら物体の搬送を行い, 倉林ら [3] は神経振動子を用いた暗示的な制御系構築により群の編隊制御を行っている. しかし, これらの方法では各個体の直接的な制御を行うため, 少数の個体からなる群であれば可能であるが, 数が増えると制御アルゴリズムは複雑化し, 場合によっては破綻することも考えられる. 特に, 我々を取り巻く環境の中の個体数は極めて多く, 個体ひとつひとつを個別に制御することは非現実的であり, 群をマクロに捉えた制御法が必要であろう.

我々はこれまでに群を連続体としてモデル化し, その挙動をマクロに捉えて空間の流れ場としてモデル化する方法を提案してきた [4]. この方法は与えられた流れ場に基づいて, 連続の式 (連続体の質量保存則) から圧縮性流体の密度を求め, 混雑度合いを評価し, その結果から流れを妨げるポールを配置して混雑緩和を行うものである. これにより, 極めて数の多い個体からなる群の挙動制御が可能となり, その有効性をシミュレーションによって検証した. しかし, 実世界の中での現象としてこの有効性を示すために, 群ロボットを用いた実験検証は有効な手段である.

そこで本研究では, 空間に定義された場に従って移動する自律型車輪移動ロボットを設計する. このロボットは移動平面内の位置計測装置, CPU, バッテリ, 他のロボットとの衝突防止のための距離センサを搭載し, 無線 LAN によってサーバと通信する. また, このロボットの制御基板を開発し, ロボットが所望の速度で移動することを確認する.

2. ロボットに要求される仕様

2.1 群ロボットの移動アルゴリズム

参考文献 [4] によって提案したロボットの移動アルゴリズムを説明する. 各ロボットは, Fig.1 左図に示すような実空間上に定義されたベクトル場に従って移動する. このベクトル場は実線で示された軌道に引き込まれながら進むように設定されており, 美術館などにおける人の移動を想定したものである. このベクトル

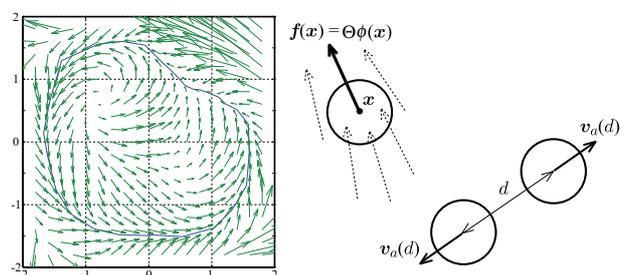


Fig.1 Vector field and robot motion definition

ル場に従い, 各ロボットは Fig.1 右図のように自己位置 x を計測し, x の関数として表されるベクトル場

$$f(x) = \Theta\phi(x) \quad (1)$$

により移動速度を決定する. ただし, $f(x)$ は x の要素のべき多項式

$$f(x) = a_0 + a_{11}x + a_{12}y + a_{21}x^2 + a_{22}xy + \dots + a_\ell y^\ell \quad (2)$$

で表されるベクトルであり, $\Theta, \phi(x)$ は,

$$\Theta = \begin{bmatrix} a_0 & a_{11} & a_{12} & a_{21} & a_{22} & \dots & a_\ell \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\phi(x) = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2 & xy & \dots & y^\ell \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

で定義される. さらに, 個体どうしの衝突を避けるため, 他のロボットとの距離 d に基づいた速度 v_a を付加する.

2.2 移動アルゴリズム実装のための要求

上述のアルゴリズムに従ってロボットが移動するために以下の仕様が要求される。

自己位置計測 各ロボットは自己の移動方向を決定するために、空間における絶対位置を計測することが必要である。

他のロボットとの距離計測 他のロボットとの相対距離や障害物との距離を計測する必要がある。

ロボットの自律性 各ロボットはCPUおよびモータドライバ、バッテリーを搭載し、自律移動を行う必要がある。

データ収集のための通信 各ロボットの移動情報を収集するため、無線LANによってホストコンピュータと通信を行う必要がある。ただし、ロボットは自律移動のため、データ収集のための実時間性は必要としない。

3. 自律移動型ロボットの開発

3.1 移動のためのハードウェア構成

上記の仕様を満たすことを目的とし、Fig.2にある移動ロボットを設計した。この仕様をTable 1に示す。また、移動機構(駆動部)はFig.3のように3つのオム

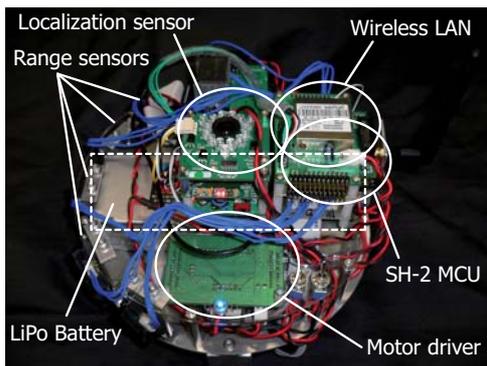


Fig.2 Autonomous mobile robot

Table 1 Specification of the designed robot

Weight	2.8 kg
Size	H150 × φ200mm
Communication	WirelessLAN(LANTRONIX WiPort)
Controller	32bit 48MHz(RENESAS SH7144)
Battery	Lithium polymer 14.8V 8000mAh

ニホイールを均等配置することで構成し、それぞれの車輪はFig.4にあるように、それぞれ独立にDCモータ、ハーモニックギアを用いて駆動している。各要素の仕様をTable 2に示す。ロボットの自律性を確保するためにCPU(SH-2 MCU)、モータドライバ、バッテリーを搭載し、移動アルゴリズムの計算を各ロボット内部で行う。モータに搭載されたエンコーダのデータから角速度を求め、これが目標の速度になるよう、PD制御による速度制御を行う。開発したモータドライバの仕様をTable 3に示す。

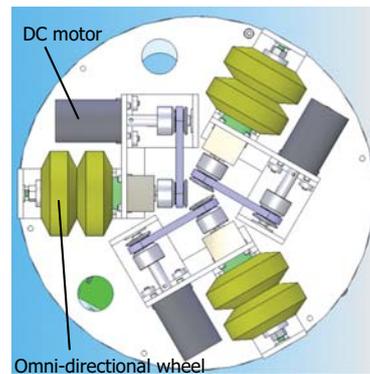


Fig.3 Power train of the autonomous mobile robot

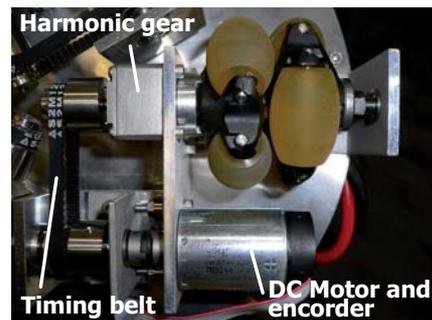


Fig.4 Wheel of the robot

Table 2 Specification of the power train

Elements	Type	Specification
Wheel	Omnidirectional wheel	φ50 mm
Gear	Harmonic Drive	1:30
Motor	maxon RE-max 24	12V 11W
Encoder	MR Type M (built-in)	128 count/rev

3.2 ロボットのセンサ構成

2.2章の仕様を満たすために、ロボットには以下のセンサを搭載している。

絶対位置測定 ベクトル場に基づいた速度を得るために、自己の絶対位置 x を得る必要がある。このために、StarGazer(HAGISONIC社製)を用いた。このセンサは天井に設置したマーカに赤外線を当て、その反射光をCCDカメラで検出することで、ロボットの絶対位置、姿勢を計測することが可能である。特に、ロボットは自律制御されるためセンサをロボット本体に搭載する必要がある。

Table 3 Specification of the motor driver

Communication	Protocol : RS232
	Speed : 9600 baud
	32 Bytes/Speed command
PWM	Frequency : 93.75 kHz
	Resolution : 8 bits
Control method	PD control
Controller	FPGA(Xilinx Spartan 3E X3S500E)

この点において、大きさ・質量共に適したセンサとなっている。このセンサの仕様を Table 4 に示す。20mm 程度の位置計測誤差，1° 程度の姿勢計

Table 4 The specification of localization sensor

Sensor	Size : D50 × W50 × H28 mm
	Repetitive precision : 20 mm
	Angle resolution : 1.0 deg
	Measurement speed : 20/sec
	Distance(Marker to Sensor) : 2m
Communication	Protocol : RS232
	Speed : 115.2 kBaud

測誤差は、ロボットの大きさ (直径 200mm) に比べて十分小さい。

距離センサ ロボットに搭載する衝突防止のための距離センサには PSD 素子測距センサ GP2Y0A21 (SHARP 社製) を使用した。ロボットの前方に集中配置し、Fig.5 のように進行方向を中心に 30° 間隔に取り付けた。これは個体が前方のみに注目することに対応している。これ

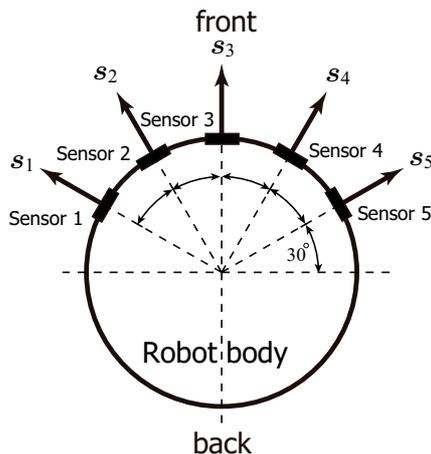


Fig.5 Location of the range sensors

ら 5 つのセンサから衝突防止を実現する。距離センサの仕様を Table 5 に示す。

Table 5 Specification of the PSD range sensor

Measuring range	100 mm-800 mm
Output voltage	1.65V-2.15V
Sensing time	38.3ms ± 9.6ms

これらのアクチュエータ，センサ，ドライバの構成を Fig.6 に示す。位置センサによって計測された絶対位置，姿勢および距離センサによって計測された他のロボットとの相対距離は SH-2 マイコンに集約され，このデータに基づいて速度指令値を計算する。速度指令値は FPGA に送られ，現在のモータの回転速度を用いたフィードバック制御によってモータを制御する。また，ロボットのデータは無線 LAN 経由でホスト PC に送られる。

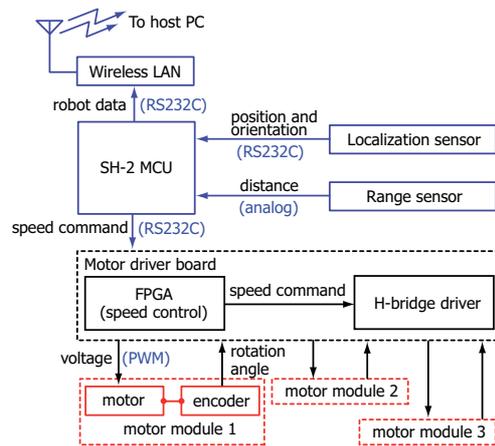


Fig.6 Block diagram of the control system

3.3 ロボット制御アルゴリズム

距離センサの信号の利用とキャリブレーション 5 つの距離センサから得られた距離データ d_i ($i = 1 \sim 5$) を利用して，他のロボットあるいは障害物から離れるための速度 v_a を

$$v_a = -k_a \sum_{i=1}^5 \frac{1}{d_i + \delta} s_i \quad (5)$$

で定める。ここで， k_a は定数， s_i はセンサ i の取付方向を表す単位ベクトル， δ ($\ll 1$) は定数である。距離センサの測定範囲は，約 100mm から 300mm 程度であり，センサの出力電圧から距離を求めるために，障害物までの距離が 100mm から 300mm のときの出力電圧を測定した。このときの測定距離と出力電圧の逆数の関係を Fig.7 に示す。この結果から，測定距離

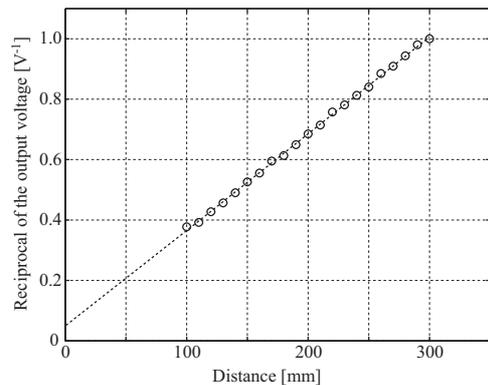


Fig.7 Output voltage of PSD sensor and distance

と出力電圧の逆数は線形な関係にあるとし，出力電圧 V_o [V] のときの測定距離 d_i [mm] を

$$d_i = \frac{a}{V_o} + b \quad (6)$$

と表されるとして， a ， b は実験値より，それぞれ $a = 312$ ， $b = -13.7$ と最小二乗法によって求めた。移動速度とモータの回転速度の算出 位置センサからはロボットの絶対位置 x と姿勢 θ が得られる。これ

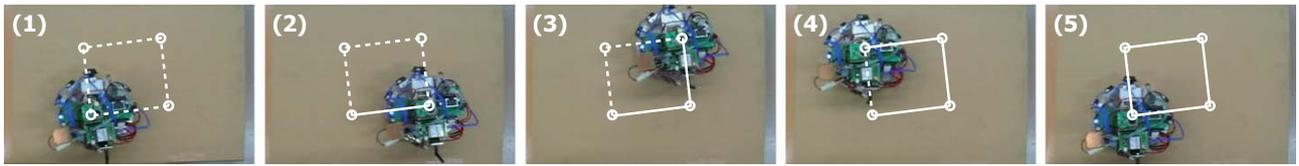


Fig.9 Robot motion control

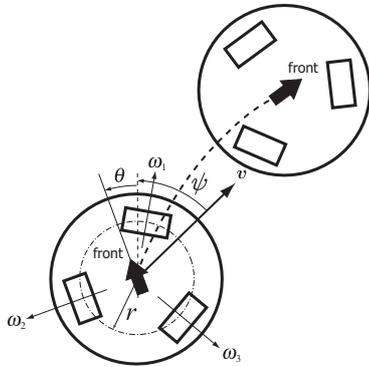


Fig.8 Robot control algorithm

より，式 (1) に基づいて f を求め，速度指令値 v を

$$v = f + v_a = \begin{bmatrix} v_x & v_y \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

によって得る．

ロボットは Fig.8 のように，目標速度 v の方向に前面を向けるように移動する．これを実現するために，各モータの角速度指令値 ω_i ($i = 1 \sim 3$) は

$$\omega = \frac{1}{r_t} \begin{bmatrix} \cos \frac{5\pi}{6} & \sin \frac{5\pi}{6} & r \\ \cos \frac{\pi}{6} & \sin \frac{\pi}{6} & r \\ \cos \frac{\pi}{2} & -\sin \frac{\pi}{2} & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \theta - \psi \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

によって定める．ただし， r_t は車輪の半径， r は車輪とロボットの中心との距離を表す．

4. ロボットの移動制御

ロボットの動作確認として全方向移動車輪を使って移動させる実験を行った．ここでは，位置センサ，距離センサの情報は用いず，ロボットの中心が姿勢角を保存したまま長方形の経路を移動するものである．実験の結果を Fig.9 に示す．この結果から，このロボットは群ロボットの制御アルゴリズムを実装するうえで十分な性能を持っていると確認できる．今後，このロボットを 20 台製作し群制御アルゴリズムの検証用として用いる．

5. おわりに

本研究では，これまでに提案した群制御アルゴリズムを実装するための実験プラットフォームとして自律移動ロボットの開発を行った．本研究の成果を以下に示す．

- 場に基づく制御を可能とするためのロボットの仕様を定め，それを満たすためのアクチュエータ・センサの選定を行った．
- 3つのオムニホイールによって全方向移動を可能とする自律移動ロボットの設計を行った．
- 制御アルゴリズムを実装するための制御基板を設計し，ロボットに実装した．
- 移動ロボットの運動制御を実装し，これまでに提案した手法が実装可能であることを示した．

謝辞

本研究は，科学技術振興機構 CREST「パラサイトヒューマンネットによる五感情報通信と環境センシング・行動誘導」の支援を受けた．

参考文献

- [1] 久米，平田，小菅，浅間，嘉悦，川端．力センサを用いない複数移動ロボットによる物体の協調搬送．日本機械学会論文 (C 編)，Vol. 68(673)，pp. 179–185，2002．
- [2] J.Fink, M.A.Hsieh, and V.Kumar. Multi-robot manipulation via caging in environments with obstacles. In *Proc. of 2008 International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1471–1476, 2008.
- [3] 倉林，長川．幾何条件による自律移動ロボット群の編隊構造遷移．日本ロボット学会誌，Vol. 23, No. 3, pp. 376–382, 2005.
- [4] 本間，岡田．群の連続体モデルに基づく混雑緩和のためのアメニティ設計．第 26 回日本ロボット学会学術講演会，pp. 3O1–06(CD-ROM)，2008.