

流体場を介した力学的相互作用に基づく 群ロボットの自発的群れ形成

Self-Swarming Robots That Exploit Physical Interaction via Fluid Field

藤原亮, 加納剛史, 石黒章夫

Ryo Fujiwara, Takeshi Kano, Akio Ishiguro

東北大学

Tohoku University

キーワード： 群ロボット (Swarm robots), 力学的相互作用 (Physical interaction), 流体場 (Fluid field)
局所センサフィードバック (Local sensory feedback)

連絡先： 〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2 丁目 1-1 東北大学電気通信研究所 2 号館 4 階 (W406,407)
藤原亮, Tel.: 022-217-5465, Fax.: 022-217-5464, E-mail: fujiwara@cmlpx.riec.tohoku.ac.jp

1. はじめに

自然界には、単体では単純な機能しか有していないにも関わらず、それらが複数組み合わせることで巨視的に非自明な振る舞いを発現する現象が存在する。このような現象は自己組織化と呼ばれ、生物学や物理学、数学など広範な分野で研究がなされてきた。自己組織化現象は工学分野においても、環境適応性や耐故障性、拡張性といった優れた能力の人工物への発現を可能とすることから、近年注目を浴びている。このような背景からロボティクスの分野では、単純な知覚・判断・行動出力の機能を持つロボットが協働的に振舞うことで大域的に優れた能力を発揮する、群ロボットの開発がさかんに行われている。

群ロボットの設計に際しては、ロボット間の相互作用様式をいかに設計するかが重要な課題

となる。これまで、信号通信を介した相互作用による群ロボットの制御に関する研究が多くなされてきた。たとえば、信号通信により各ロボットに搭載された振動子の位相調整を行うことで、編隊の動的な改変を行う手法や、全方向カメラからの画像データに基づいた動作制御により、単純な制御入力でも編隊を保持する手法などが知られている¹⁾²⁾。これらの手法を適用することにより、陸上や狭窄路などにおいて、複数のロボットが動作を協調させ、タスクを達成することが確認されている。しかしながらこれらの群ロボットには、信号通信の遮断や外乱に対して脆弱であるなどといった問題が依然として存在する。

これらの問題が生じる原因として、主にロボット間の情報を介した相互作用のみに焦点が当てられ、ロボットが周囲の環境に関する情報を十分に取得していないことが挙げられる。それゆ

え，高い環境適応性や耐故障性を実現するためには，ロボットの機構系が環境と相互作用することによって生じる力学的な感覚情報を積極的に制御に活用する必要がある．このような背景から力学的特性を活用した制御方策を群ロボットに用いる試みがなされている³⁾⁴⁾．しかしながら，これらの制御方策は各事例ごとにテーラメードかつアドホックに設計されているのが現状である．このような事実を踏まえると，群ロボットにおける力学的相互作用に関する体系的な考察は喫緊の課題であると筆者らは考える．

そこで，筆者らは基本に立ち返り，最小限の設定から群ロボットにおける力学的相互作用に関する考察を試みる．本研究では，ロボット間の力学的な相互作用の媒体として流体に着目し，流体場を介した群れの形成手法を提唱する．流体は「ロボットが動くことで圧力や流速の時空間的な分布が変化し，それが他のロボットに影響を与える」といった場を介した力学的相互作用を生起させることができるため，ロボットに複雑な機構を設計することなしに，最小限の設定で力学的相互作用を考察できる．このような相互作用様式を適用することにより，群れのトポロジーをある程度保ちつつも環境に応じて変形可能な群ロボットを構築できることが期待できる．このような流体力学的相互作用は実際の生物の群れ形成にも存在していることが示唆されているが⁵⁾⁶⁾，具体的なメカニズムは依然として明らかになっておらず，ロボットへの応用もいまだになされていない．そこで本稿では，ミニマリストックアプローチに基づき，流体力学的相互作用によって生じた力学情報に応じて推進力を変化させる群ロボットの制御則を設計し，その妥当性を検証する．

本稿の構成は以下のとおりである．第2節では，流体場の力学情報により群れを形成するロボットの制御則を設計する．第3節では，シミュレーションで設計した制御則の妥当性を確認したのでこれを報告する．第4節では，実世界に

おける制御則の妥当性を検証するためのロボット実機を設計・製作したのでこれを紹介する．そして，第5節ではまとめと今後の展望を示す．

2. 提案手法

本節では，最小限の設定に基づいた流体力学的相互作用による群れの形成手法を探る．Fig.1に提案するモデルの概要を示す．圧縮性流体を満たされた空間内の二次元水平面上に複数台の円形のロボットが配置されている．各ロボットは二次元水平面内において，進行方向の前後にある流体に力を加えることができ，その反作用で移動する．ロボットの側面には複数の圧力センサがくまなく装着され，流体を押すことにより得られる反作用力と，流体から受ける抵抗力を感知できる．後述するように，ロボットはこのセンサ情報に基づいて，推進力の大きさを変化させる．また流体力学場全体に，ある方向からの一様な誘引刺激が生じており，その方向に向かって群れを作りながら移動することをロボットのタスクとする．

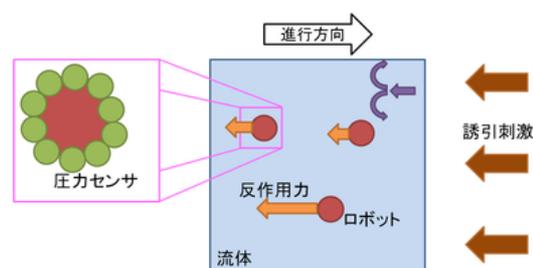


Fig. 1 流体場の力学情報を活用する群ロボットの模式図．Schematic illustration of swarm robots that exploit hydrodynamical interaction.

具体的なロボットの移動方法は以下の通りである．ロボットは進行方向の後方にある流体に力を与えることにより得られる反作用力で推進する． i 番目のロボットが流体を押す力 u_i は，以

下の式で規定される：

$$u_i = u_0(1 - s_i). \quad (1)$$

u_i は最大推進力である． s_i はセンサ入力に基づいたフィードバック項であり，本制御則の要となる． s_i 式 (2) によって与えられる：

$$\tau \frac{ds_i}{dt} = \alpha |F_i \cdot n| - s_i. \quad (2)$$

F_i は圧力センサにより得られる力を表しており，式 (3) によって与えられる：

$$F_i = \sum_j -p_j A_j t_{ij} \quad (3)$$

j はセンサの番号を表しており， p_j はセンサの圧力， A_j はセンサの有効面積， t_{ij} は i 番目のロボットから見た j 番目のセンサの方向を指す単位ベクトルを表す．

式 (2) の右辺第一項は， F_i と，進行方向を表す単位ベクトル n の内積に，フィードバック定数 α を乗じたものとなっており，ロボットが流体場から受ける力学情報を表している．

具体的には，Fig.2 に示すように前のロボットが生成した渦に巻き込まれて凝集しないように推力を抑制する効果を表す． s_i はこれに時定数 τ の一次遅れで追従する．この時間遅れは，力学情報の時間的なゆらぎを平滑化する効果がある．式 (1)，(2) で示される局所センサフィードバック則により，ロボットは流体場の力学情報に応じて推進力を変化させながら格子状の隊列を形成し，誘引刺激のある方向へ進んでいくことが期待できる．この隊列は Diamond pattern と呼ばれ，魚類はエネルギー消費を抑えるためにこの隊列を形成していることが知られている⁶⁾．

3. シミュレーション

本節では，第2節で述べた制御則の妥当性を検証するために行ったシミュレーションについて報

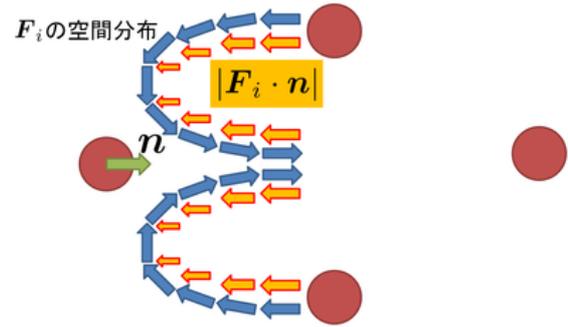


Fig. 2 ロボットと流体粒子の相互作用．Interaction between a robot and fluid particles.

告する．流体は粒子法の一つである SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 法⁷⁾⁸⁾を用いて粒子の集合としてモデル化した．このシミュレーションでは周期境界条件を採用した．ロボットの初期配置は任意に決定され，ロボットはその位置から誘引刺激に向かって進行する．今回のシミュレーションで用いたパラメータを表1に示す．

第2節で述べた制御則を再現するに当たり，推進方法を次のように設定する．Fig.3 に示すように，ロボットは領域 $D_{propulsion}$ 内にある粒子に力を与え，その反作用力で推進する． $D_{propulsion}$ はロボットの進行方向の後方にあり，Fig.3 に示すような中心角 2θ の扇形とする．ロボットはこの領域に存在する各流体粒子（またはロボット）に式 (4) で示す力 F_{ij} を加え，その反作用力を受け取ることで推進する．

$$F_{ij} = u_i e_{ij}. \quad (4)$$

e_{ij} は i 番目のロボットから見た j 番目の流体粒子（またはロボット）の方向を指す単位ベクトルを表す．

センサが検出する力 F_i は，式 (5) で表される．

$$F_i = \sum_{j \in D_{propulsion}} (-F_{ij}) + F_f. \quad (5)$$

右辺第一項はロボットが流体を押すことにより得られる反力を表す．第二項は流体から受ける

Table 1 シミュレーションで用いたパラメータ . Parameters of the simulation.

場の大きさ	1.0×1.0
流体粒子の個数	2450
流体粒子の半径	0.01
ロボットの半径	0.025
$D_{\text{propulsion}}$ の半径	0.15
θ [rad]	$5\pi/18$
u_0	0.001
α	5.0×10^{-5}
τ	1.0×10^{-6}

抵抗力を表し, SPH 法により求めることができる .

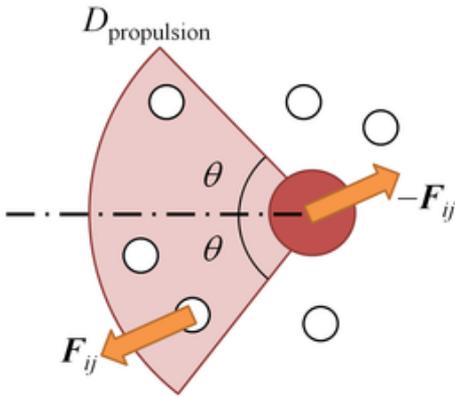


Fig. 3 ロボットと流体粒子の相互作用 . Interaction between a robot and fluid particles.

シミュレーションの結果を Fig.4,5 に示す . まず基礎実験として , Fig.4(a) に示す初期配置からフィードバックなしでロボットを推進させた . その結果 , 前方のロボットが渦を生成し , 後方のロボットがその渦に流されて凝集することが確認された . 次に , フィードバックを有効にした状態でロボットを格子状に並べ , Diamond pattern が形成されるか確認した . ロボットは隊列を形成せずに , 横一列に凝集してしまった (Fig.5) . その原因として , 進行方向に対して横方向の影響を考慮していないため , 前のロボットの隊列が横に広がってしまい , 後方のロボットが侵入してしまうことが考えられる .

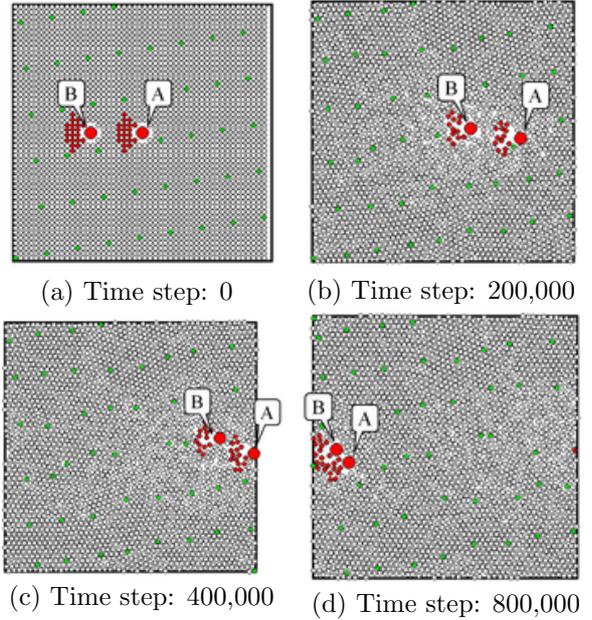


Fig. 4 局所センサフィードバックがないとき ($\alpha = 0$ のとき) のスナップショット . ロボット A が生成した渦に , ロボット B が流される様子を確認できた . Snapshots in the case without feedback. Robot A generates a vortex. And robot B flows on the vortex.

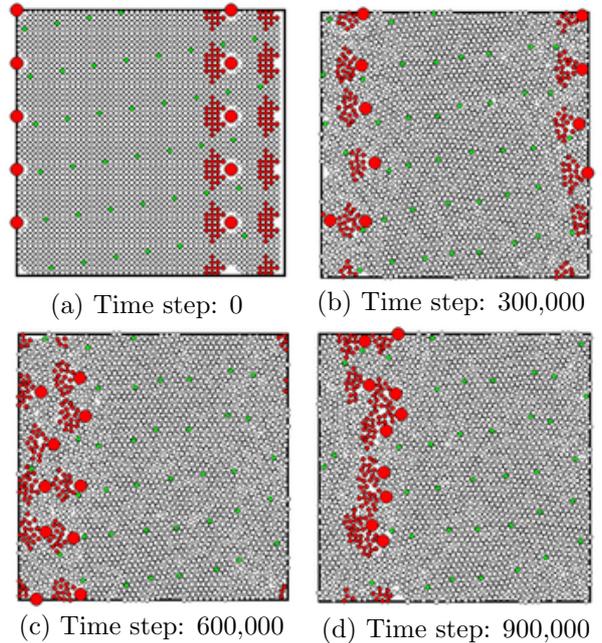


Fig. 5 局所センサフィードバックがあるときのスナップショット . 格子状にロボットを配置し , diamond pattern が生成されるかを確認した . Snapshots in the case with feedback. Robots are placed on latices aim to generate a diamond pattern.

4. ロボット実機のプロトタイプ

提案した制御則の妥当性を実世界で検証するため、ロボット実機を設計・製作した。開発したロボット実機を Fig.6 に示す。全高 100[mm]、全幅 130[mm]、全長 155[mm]、重量は 0.4[kg] である。ロボットには前面左右にそれぞれ赤外線センサとひずみセンサが一組ずつ取り付けられている。赤外線センサにより誘引刺激を検知し、ひずみセンサにより流体の圧力を検知する。これらのセンサ入力に従って、左右 2 つの駆動輪と後方に取り付けられたプロペラを制御する。具体的には、Braitenberg Vehicle⁹⁾ と同様にセンサとモータを接続し、赤外線および流体の圧力情報に応じて進行するように駆動輪を制御することで、流体からロボットへの局所センサフィードバックを実現する。さらに、駆動輪の出力に応じて後方に取り付けられているプロペラの回転数を変化させることで、ロボットから流体への作用を再現する。

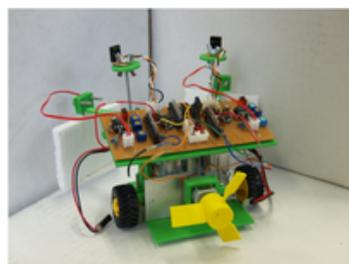
ロボットの群れ形成に関する実験に先立ち、ひずみゲージの性能評価実験を行った。前方のロボットに搭載されているプロペラが送る風を検出し、追従することが確認された (Fig.7)。以上から、ひずみゲージにより流体の圧力を検出し、モータへフィードバックできることが確認できた。

5. まとめと今後の展望

群ロボットにおける環境を介した力学的相互作用について最小限の設定から考察するため、流体力学的相互作用に着目した。ロボットが流体の流体場からの力学情報に従って推進力を変化させる局所センサフィードバック則を設計し、その妥当性をシミュレーションにより検証した。その結果、進行方向に対して横方向の制御が必要であることが分かった。この制御則を考察することにより、群ロボットの制御則を設計する上での流体力学的相互作用の有効性を示唆でき



(a) 正面図



(b) 背面図

Fig. 6 開発しているロボット実機。A real-physical robot that is on development.



(a) $t = 0$ [sec]

(b) $t = 2$ [sec]



(c) $t = 4$ [sec]

(d) $t = 6$ [sec]

Fig. 7 ロボット実機の基礎実験。この実験はベルトコンベア上で行った。The fundamental experiment of the real-physical robots, which drive on a belt conbare.

るだけでなく、自然界の群れ形成のメカニズムの理解にもつながると筆者らは考える。また本稿では、提案した制御則の妥当性を実世界で検証するために開発中のロボット実機を紹介した。

今後は、制御則を改良しシミュレーションで妥当性を確認するとともに、ロボット実機による実世界での群の形成実験を行う予定である。

参考文献

- 1) D. Kurabayashi, T. Choh, J. Cheng, T. Funato: Adaptive Formation Transition among a Mobile Robot Group based on Phase Gradient, IEEE International Conference of Robotics and Biomimetics, 2001/2006 (2009)
- 2) A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer, C. J. Taylor: A Vision-Based Formation Control Framework, IEEE Transactions on Robotics and Automation, **18-5**, 813/825 (2002)
- 3) 鈴木陽介, 木村仁, 小関道彦, 伊能教夫: 力学環境に適応変形する群ロボットの開発-自律分散同期型制御による構造物生成-, 第24回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, (CD-ROM)3D26 (2006)
- 4) D. J. Stilwell, J. S. Bay: Toward the Development of a Material Transport System using Swarms of Ant-like Robots, IEEE International Conference on Robotics and Automation, **1**, 766/771 (1993)
- 5) B. L. Partridge (今福道夫 訳): 魚はどのように群れを作るのか, 60/63, 日経サイエンス社 (1984)
- 6) D. Weihs: Hydrodynamics of fish schooling, Nature, **241**, 290/291 (1973)
- 7) J. J. Monaghan: Smoothed Particle Hydrodynamics, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, **30**, 543/574 (1992)
- 8) J. P. Morris, P. J. Fox, Y. Zhu: Modeling Low Reynolds Number Incompressible Flows Using SPH, Journal of Computational Physics, **136-1**, 214/226, (1997)
- 9) V. Braitenberg: Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology, 6/14, MIT Press (1984)