

宇宙航空研究開発機構研究開発報告
JAXA Research and Development Report

地上移動型群ロボットを用いた群制御アルゴリズムの検証

Validation of Collective Motion Control Algorithm
by using Ground Vehicle Swarm Robots

稲田 喜信^{*1}, 時田 拓明^{*3}, 二上 将直^{*2},
堀江 数馬^{*4}, 飯田 真澄^{*2}, 遠藤 智博^{*2}, 高信 英明^{*2}

Yoshinobu INADA^{*1}, Hiroaki TOKITA^{*3}, Masanao FUTAKAMI^{*2},
Kazuma HORIE^{*4}, Masumi IIDA^{*2}, Tomohiro ENDO^{*2} and Hideaki TAKANOBU^{*2}

- *1: 研究開発本部 数値解析グループ
Numerical Analysis Group,
Aerospace Research and Development Directorate
- *2: 工学院大学 機械システム工学科
Department of Mechanical Systems Engineering, Kogakuin University
- *3: 工学院大学 機械システム工学科 (現: 電気化学工業)
Department of Mechanical Systems Engineering, Kogakuin University
Denki Kagaku Kogyo Kabusiki Kaisha
- *4: 工学院大学 機械システム工学科 (現: アルプス電気)
Department of Mechanical Systems Engineering, Kogakuin University
Alps Electric Co., Ltd.

2010年3月
March 2010

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

地上移動型群ロボットを用いた群制御アルゴリズムの検証*

稲田 喜信^{*1}, 時田 拓明^{*3}, 二上 将直^{*2}, 堀江 数馬^{*4}, 飯田 真澄^{*2},
遠藤 智博^{*2}, 高信 英明^{*2}

Validation of Collective Motion Control Algorithm by using Ground Vehicle Swarm Robots*

Yoshinobu INADA^{*1}, Hiroaki TOKITA^{*3}, Masanao FUTAKAMI^{*2}, Kazuma HORIE^{*4},
Masumi IIDA^{*2}, Tomohiro ENDO^{*2} and Hideaki TAKANOBU^{*2}

ABSTRACT

Unmanned systems including ground or aerial vehicles have been developed vigorously for the purpose of surveillance in a disaster area. For such unmanned systems, downsizing is beneficial to lower the cost of development or operation. However, such downsizing causes an inevitable problem due to the limitation in system's function and the susceptibility to internal or external disturbances. To handle this problem, collective motion control (CMC) is proposed here which operates multiple small agents at the same time. The authors developed a CMC model of air vehicles based on biologically-inspired three primitive controls, i.e. "approach", "parallel orientation", and "repulsion", depending on the distance between air vehicles, and succeeded to realize various CMC motions such as shape or loitering control. In this study, multiple ground vehicles (GVs) are developed to validate the simulation results. Each GV is equipped with interaction devices and is programmed to switch the above-mentioned three controls depending on the distance to other GV. The approach or repulsion is realized by moving in the direction or in the counter-direction to detected GV, respectively. The parallel orientation is realized by moving in the averaged direction of detected GV's body directions which are measured by using electro magnetic direction sensor on each GV and are transmitted to other GV for calculating the averaged direction by using communication device. Navigation control, shape control, and the control by using altitude sensor are realized, thus validating the feasibility of proposed biologically-inspired CMC model.

Key Words: Collective Motion Control, Ground Vehicle, Mutual Interaction

概 要

災害発生時の情報収集を目的として無人の航空機や地上ロボットの開発が進められているが、開発や運用にかかるコストを低減するための方法としてシステムの小型化がある。ただし、小型化には機能の制限や外乱に対する脆弱性が伴うため、対処の方法として多数の小型機を同時に使用する群制御が有効と考えられる。筆者らは過去に生物の群運動を参考にした群制御モデルを用いて飛翔体の群制御シミュレーションを行い、機体間の距離に応じて接近、平行、反発の3つの制御を切り替える単純な制御によって様々な群制御を実現した。本研究では、その結果を実際のハードウェアを用いて検証することを目的として地上移動型の群ロボットを開発した。各ロボットはロボット間の相互作用のために超音波センサ、磁気方位センサ、通信装置を搭載し、超音波センサで計測したロボット間の距離に応じて3つの制御を切り替えた。接近と反発制御は超音波センサが検知したロボットの方向へ前進、あるいは後退することで実現し、平行制御は磁気方位センサで測定した自身の移動方向を通信装置で他のロボットと交換し、平均的な移動方向に移動することで実現した。この群ロボットを用いて経路制御や、形状制御、高度センサの情報を利用した制御を実現し、提案した群制御アルゴリズムがハードウェア上で有効に機能することを確認した。

* 平成22年2月2日受付 (Received 2 February, 2010)

^{*1} 研究開発本部 数値解析グループ (Numerical Analysis Group, Aerospace Research and Development Directorate)

^{*2} 工学院大学 機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering, Kogakuin University)

^{*3} 工学院大学 機械システム工学科 (現: 電気化学工業) (Department of Mechanical Systems Engineering, Kogakuin University)
(Denki Kagaku Kogyo Kabushiki Kaisha)

^{*4} 工学院大学 機械システム工学科 (現: アルプス電気) (Department of Mechanical Systems Engineering, Kogakuin University)
(Alps Electric Co.Ltd)

1. はじめに

近年、災害現場で情報を収集するための無人の地上ロボットや飛翔体の開発が進められている^{1,2)}。無人のシステムは人間が危険な環境下で活動することによって被るリスクを低減できるほか、操縦者の保護に必要な装備が不要であることから小型化が可能であり、従来の有人機の考え方にとらわれない様々な機能を持つシステムを実現できる可能性を持つ。小型化のメリットは開発や製造、保管に必要なコストを低減でき、可搬性に優れていて機動性が高いこと、騒音の問題が大型機に比べて少ないことなどが挙げられ、また、航空機であれば離着陸に飛行場を必要とせず、墜落した場合の2次災害を抑えられることや、低空での飛行が可能であるために地表面の詳細な観測データを得られることなど、特に都市近郊における災害発生時の情報収集用のシステムとして有効な点が多い。

ただし、小型の機体はペイロードが限られていて搭載できる装備に制約があり、また外乱に対して脆弱である等の問題を抱えている。そこで、多数の小型ロボットや小型飛翔体(MAV)を同時に用いることによって機能を補い、少数が壊れても残りの機体で機能を維持できるような耐故障性の高いシステムを実現しようという考え方が提唱されている³⁻⁷⁾。その一つの例として、多数の小型の移動体にカメラや温度センサ等を搭載して広く空間に分散配置し、取得したデータをネットワークを経由して収集することによって、広がりのある空間情報を取得しようとする「センサネットワーク」の考え方がある^{8,9)}。これが実現できれば、各機体が取得した画像や温度、湿度などの情報を、その場所の位置や取得時間の情報とともにネットワークを経由して地上基地に集め、基地のサーバ上で時間や空間情報をもとに仮想的な3次元空間に情報をマッピングすることによって、単機では得られない多次元の情報データベースを構築することができる。このような情報は加工の仕方によって様々な用途に利用できると考えられ、例えば、火災現場上空における温度やガスの空間分布や時間変動が得られれば、火災の延焼方向や延焼速度の予測に役立てることができると考えられる。

このような、多数の小型のロボットや飛翔体の同時使用、すなわち群制御を実現するため、筆者らは過去に小型飛翔体を対象とした群制御モデルの開発に取り組んだ。この際、高度な制御を実現するための高性能なセンサや制御器を小型のシステムに搭載することが困難であることから、できるだけ簡単な方法で群制御を実現するために、鳥や魚の群が行なう群運動を参考にした生物型群制御モデルを提案した^{3,4)}。ここでは、

従来の編隊飛行制御に用いられてきたトップダウン的な制御⁵⁾ではなく、周辺の機体との局所的な相互作用を基礎とする群制御モデルが使われている。トップダウン的な制御では、全ての情報をリーダーが把握できるため高度で正確な制御が可能になるが、制御の負荷がリーダーに集中することから大規模な群制御に適しておらず、またリーダーが故障によって失われた場合の影響が大きいという問題がある。一方で局所相互作用モデルでは、制御の負荷が周辺の機体との局所的な相互作用のみで決まるため、群に参加する機体が増えても機体ごとの負荷は増加せず、大規模な群制御に適している。また群の中に特定のリーダーが存在しないため、故障によって機体が失われても他の機体が容易に機能を補うことができるというメリットがある。特に、小型の機体を使用する場合には、要求される機能を実現するために使用する機体数が増加し、大規模な群となる可能性があることから、本報告の中で想定している局所相互作用モデルの方が適していると考えられる。

本報告では、このような背景のもとに過去に開発した生物型の群制御モデルを紹介し、続いてそこで得られた結果をハードウェア上で検証するために開発した群ロボットと、それと用いて行なった実験の結果について報告する。

2. 生物型群制御のモデル

生物型の群制御モデルとは、鳥や魚の群運動に見られる規則的な個体間の相互作用をもとに作成された群制御モデルのことで^{10,11)}、相互作用を行なう個体同士の反応が個体間の距離に応じてシンプルに切り替わるというものである。例えば、遠方の個体同士は群を作るために互いに接近し、ごく近傍の個体同士は衝突を避けるために遠ざかり、その中間の距離の個体同士は同じ向きに移動するために向きを揃える。基本的にはこ

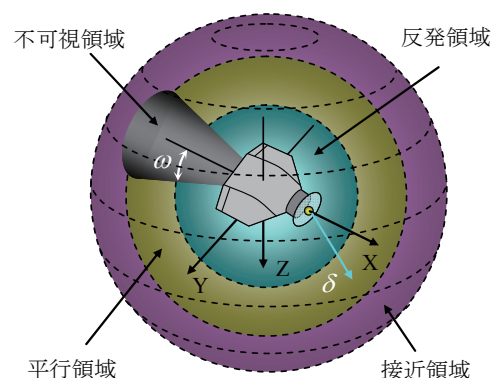


図1 3次元相互作用モデル

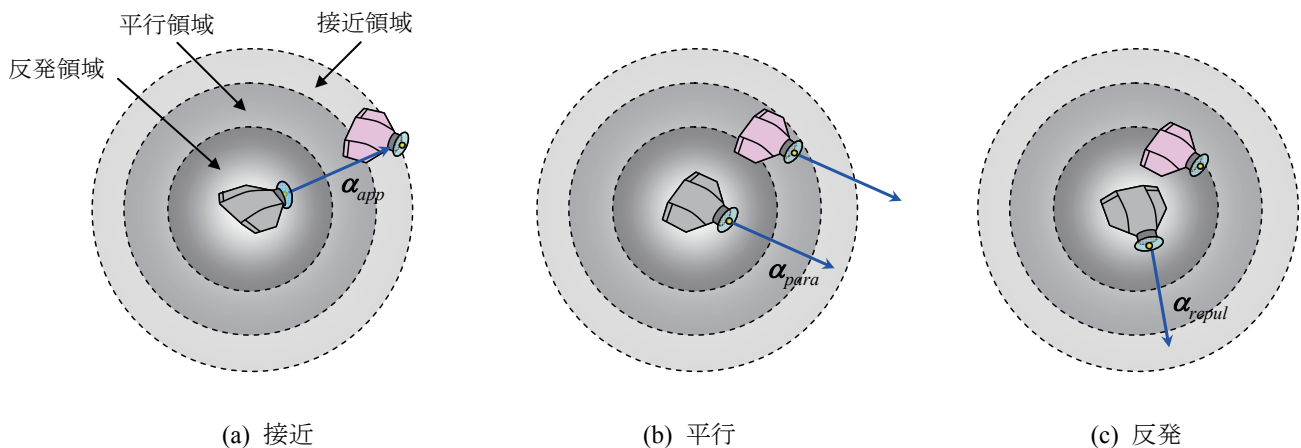


図2 3次元モデルの相互作用ルール

の3つのルールのみで自然界に見られる群の運動を再現できることが、数値シミュレーションによって実証されている^{10, 11)}。

筆者らは過去にこの生物型のモデルに基づいて飛翔体の群制御モデルを作成し、その有効性を分析した^{3, 4)}。図1は作成したモデルの概要を示すもので、飛翔体の周囲に球形をした相互作用領域を設定し、この内部に反発領域、平行領域、接近領域の3つの領域を同心円状に配置している。図2はそれぞれの領域に周囲の機体が入ってきた場合の中心機体の反応を示すもので、接近領域の場合は周囲の機体の方向に、平行領域の場合はその機体と同一方向に、反発領域の場合はその機体から遠ざかる方向に移動する。これらの移動方向を、図に示すように3つの移動方向ベクトル α_{app} 、 α_{para} 、 α_{repul} で表すことにすると、 α_{app} と α_{para} の方向は一意に決められるが、遠ざかる方向 α_{repul} には任意性があるため、できる

だけ少ない制御で遠ざかるように、図3に示すように周囲の機体を指すベクトル \mathbf{a} と、自身の機体の向きを指すベクトル \mathbf{b} が張る平面内で、 \mathbf{a} に垂直な2つの方向 $\mathbf{c1}$ 、 $\mathbf{c2}$ のうち \mathbf{b} と作る角度が小さい方向 $\mathbf{c1}$ を α_{repul} として選択する。領域内に複数の周辺機体が存在する場合には、それぞれの機体の位置に応じて求めた移動方向ベクトルを足し合わせたベクトルの向きに移動することにする。また、後方に相互作用のためのセンサを持たない場合を想定して、図1に示すように不可視領域を設ける。また、センサの処理能力の限界や指向性を考慮するために一度に相互作用できる周辺機体の数に上限値($N_{b,max}$)を設け、それ以上の機体が存在する場合には、特定の方向(=指向性の方向)を決めてその方向に近い順に $N_{b,max}$ の機体を選択する。指向性の方向は図1に示すベクトル δ で指定する。

以上のような相互作用モデルを用いて実現した飛翔体の群制御シミュレーションの結果を図4に示す。このシミュレーションで使用した機体は、実際に飛行している小型飛翔体の諸元¹²⁾を参考にして決めたもので、一機ごとに3次元の剛体の運動方程式を解きながら運動を求めている。このシミュレーションを用いて様々な実験を行なった結果、機体数の変動に対するロバスト性や、相互作用領域の形状を操作することによる群の形状制御(図4(b))、相互作用の指向性の向き(=ベクトル δ の向き)を操作することによる群の旋回制御(図4(c))等を実現することに成功し、生物型の群制御の有効性を確認している。

3. 地上移動型群ロボットの開発

上で述べたように、生物型の群制御は個体間の局所的な相互作用を基本とし、単純なルールで大規模な群の

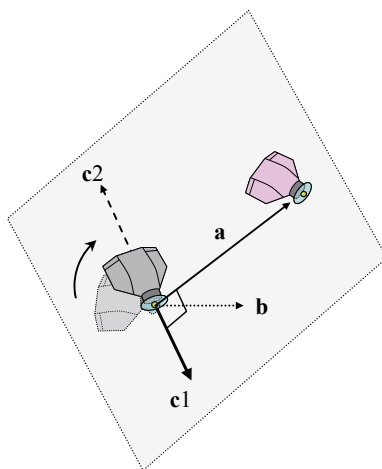
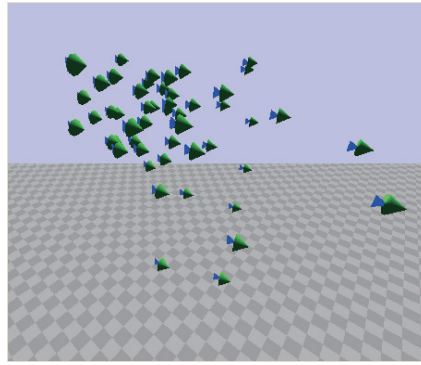
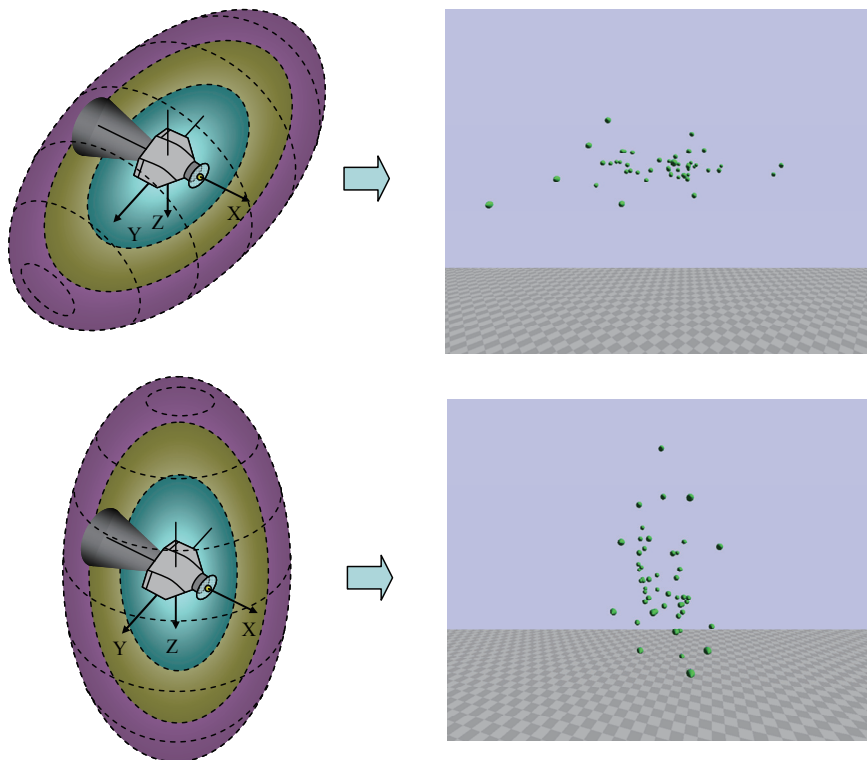


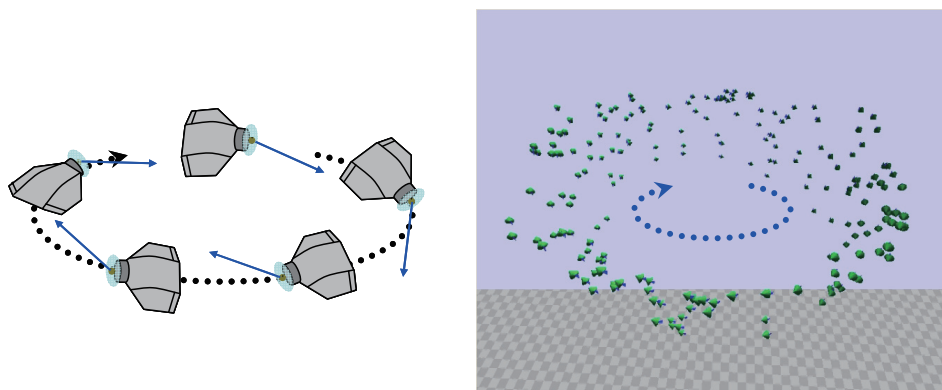
図3 反発時の移動方向



(a) 飛翔体の群制御シミュレーション (50機)



(b) 相互作用領域の形状を変えることによる群の形状制御 (上: 横長形状、下: 縦長形状)



(c) 相互作用の指向性を巡回軌道の内側に向けることによって実現された群の巡回飛行

図4 シミュレーションによって実現された飛翔体の群制御

制御を実現できるという特性を持っている。ただし、あくまでも数値シミュレーション上で確認された結果であるため、真に実現可能なモデルであるかどうかを判断するための検証実験を行う必要がある。そこで、本研究では、シミュレーションで想定した個体間の相互作用を入手可能なハードウェアを用いて実現し、シミュレーションと同様な制御アルゴリズムに従って運動するロボットを作成して、生物型の群制御アルゴリズムの有効性を検証することを目的とする。この際、初めから飛翔体を対象とすることは、姿勢制御などの群制御以外の制御に負荷がかかることや、飛行実験を行うために広い実験場を必要とすることから、今回は対象を地上移動型のロボットに限定して、ハードウェアによる相互作用の実現やアルゴリズムの検証に重点を置くこととした。ただし、将来の飛翔体を用いた群制御の実現のために、飛翔体に搭載可能なハードウェアをできるだけ用いることとし、地上ロボットの段階で問題点などを確認できるように努めた¹³⁻¹⁵⁾。以降では開発した群ロボットの紹介と、それを用いたアルゴリズムの検証実験について報告する。

3.1 群ロボットのハードウェア

本研究で開発した群ロボットの単体の写真を図5に示す。本ロボットは機能ごとにモジュール化された基板を上下に重ねた構造をしており、下から順に第1層が駆動部と電源部、第2層が超音波センサ部、第3層が航法装置及びそれに付随するセンサ部という構成になっている。以下、第1層から順に解説する。

(1) 第1層（駆動部と電源部）

本研究で開発したロボットは、駆動部に株式会社スリーディ製の小型自律移動ロボットVAC3（図6）を使用している。このロボットを選定した理由としては低価格で群制御に必要な台数を揃えやすいこと、センサの拡張や制御が容易であることなどが挙げられる。ロボットのサイズは36x44x47mm、重量は67.4gで、駆動用のミニモータと駆動ギア、駆動輪を左右に一機ずつ搭載し、電源として単5のニッケルカドミウム電池4本を使用する。ロボット単体でも自律制御が可能で、CPUにMicrochip Technology社のPIC16F84Aを搭載し、前面に赤外線発光ダイオードと2個の赤外線センサ、底面に4個の赤外線センサを搭載して、障害物の認識や回避、地面に描かれた軌道の追尾などの制御を行うことが可能である。

本研究ではこのロボットを群ロボットの駆動機構として用いており、上部カバーを取り外して電源とCPU

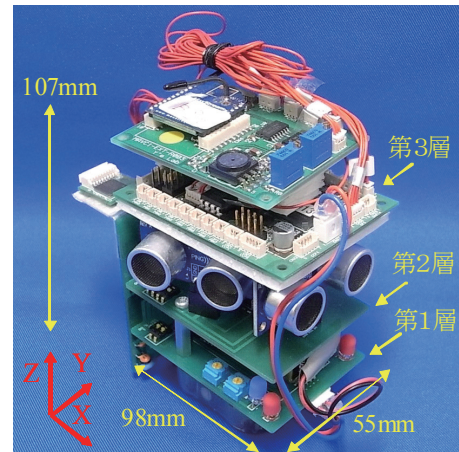


図5 群ロボット全体写真（単体）



図6 VAC3

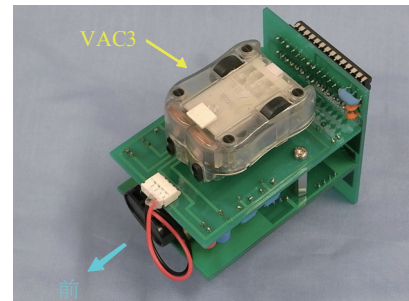


図7 第1層下面に装着された駆動部

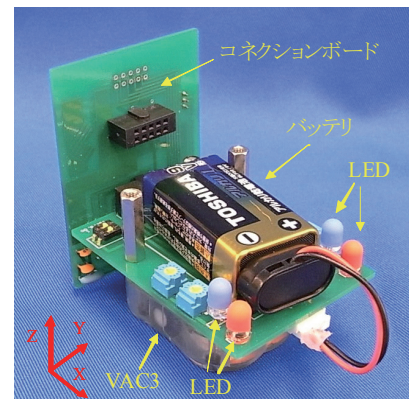


図8 第1層の上面に設置されたバッテリーとモニタ用LED

を除いた残りの部分を図7に示すように第1層の下面に装着し、上面には図8に示すようにバッテリーとモニタ用のLEDを装備している。VAC3に対する指令はコンネクションボード(図8参照)上のMicrochip Technology社CPU PIC16F873-Aから行き、左右の駆動輪の回転数を独立に制御することによって、前進、後退、方向転換の制御を行う。

(2) 第2層(超音波センサ部)

前述したようにVAC3には赤外線発光ダイオードとセンサが搭載されているが、赤外線センサの特性として検知できる距離や角度が限られていることや、太陽光などの外乱に弱いという問題があるため、本研究では超音波センサを用いてロボット同士の認識や、距離の測定を行なった。使用するセンサは図9に示す有限会社浅草ギ研のPING)))で、大きさは21.3(H)x45.7(W)x16(D)mm、検知距離は3cm~3m、検知角度は約60°である。搭載できる基板のサイズに制限があることから、このセンサを図10に示すように第2層の基板上に70°の角度を付けて正面と左右に一個ずつ計3個搭載し、主にロボットの前半部分を検知できるようにした。従って、ロボットの後半部分は不可視領域となっている。また、センサの取り付け角によって検知されたロボットの相対的な角度を知ることができるが、センサの数と取り付け角の制約から角度の分解能は70°となっている。

これらのセンサの制御と入力データの処理のために、22個の入出力ポートを持つCPUであるMicrochip Technology社のPIC16F873-Aを、図10に示すようにセンサと同一基盤上に配置している。このCPUでは超音波センサによって検出された周辺ロボットとの距離から適切な動作を選択することや、その結果をコンネクションボード上に装備した駆動系制御用のCPU(PIC16F873-A)へ出力する処理が行われる。

(3) 第3層(航法装置とそれに付随するセンサ)

第3層には小型飛翔体向けに開発された航法装置であるMAVC1を搭載する。MAVC1は株式会社ワイズラブが大阪府立大学工学部と共同で開発した小型飛翔体用の航法装置で、図11に示すように小型軽量で(重量29g)、CPUとして日立製のH8/3069Fマイコンを搭載し、3軸の加速度、角速度センサをオンボードで搭載している。また、多数の入出力ポートを持ち、GPSや磁気方位センサ、気圧高度センサ、通信装置などを接続することが可能である。また、これらのセンサや通信装置からの情報を処理するためにXilinx社製のFPGA(Field



図9 超音波センサ PING)))

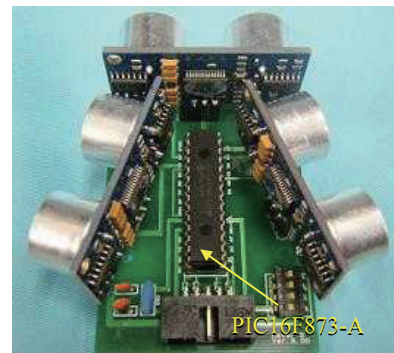


図10 第2層に装備された3基の超音波センサとPIC16F873-A

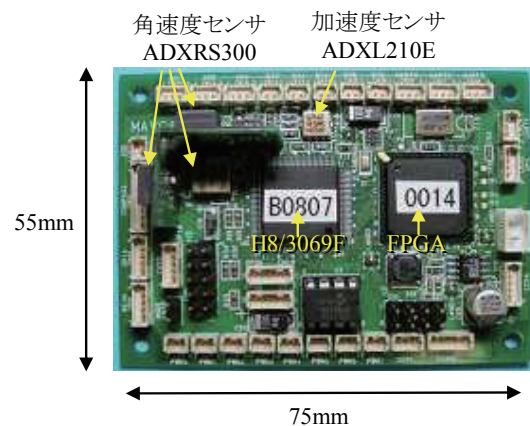


図11 MAVC1

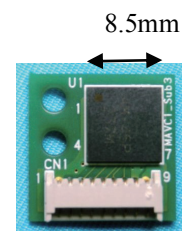


図12 磁気方位センサ AM-45P

Programmable Gate Array)を搭載している。以下、MAVC1に搭載されたセンサ類について述べる。

(i) 加速度センサ、角速度センサ

加速度センサや角速度センサは、地上ロボットや飛行体においてGPSが使用できない場合の慣性航法用として、また飛行体では姿勢制御用として用いられる。使用したセンサは、加速度用がANALOG DEVICES社製のADXL210E、角速度用が同社製のADXRS300である。これらのセンサは図11に示すようにMAVC1上に直接実装されている。

(ii) 磁気方位センサ

制御アルゴリズムにおける「平行制御」を群ロボットで行わせるためには、各ロボットが自身の移動方向を認識し、それを他のロボットと共有して同一方向(複数のロボットの移動方向から求めた平均方向)へ移動する制御が必要である。ロボットの移動方向を認識するために、図12に示す電通企工株式会社製の2軸の磁気方位センサAM-45PをMAVC1に接続している。このセンサは $\pm 3^\circ$ の精度で角度を検出し、検出した角度をX-Yのベクトル成分で出力する。

(iii) GPS

GPS(Global Positioning System)は、ロボットや飛行体の位置情報を取得して誘導制御に用いるほか、位置情報をロボット間で共有することによって、ロボット間の距離を計算するために用いられる。距離の測定は、通常は前述した超音波センサを用いて行なうが、検出可能な距離の最大値が3mであり、それよりも遠方のロボットやロボット後方のセンサの視野外に位置するロボットの距離の計測には使用できない。このような場合にはGPSを用いて各ロボットが自身の位置を検出し、それをロボット間で交換して距離を計算する方法が有効と考えられる。ただし、屋内では衛星電波が届かないため、今回のような屋内での実験が主である場合には超音波センサを用いる。

GPS装置はフルノ電気社製のGH-81(図13)を用いており、MAVC1の入力ポートに接続して用いる。

(iv) 気圧高度センサ

本ロボットは地上移動型のロボットであるため、高度センサを利用した制御を行う必要はないが、MAVC1には高度センサ接続することが可能であり、将来の飛行体制御へ向けた予備実験として高度情報を用いた制御を試みることが可能である。また、地上ロボットに

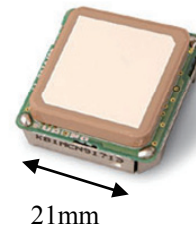


図 1 3 GPS GH-81

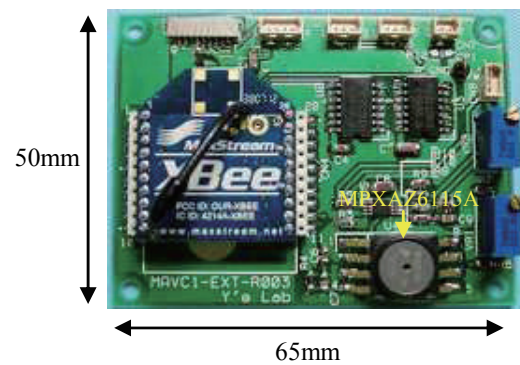


図 1 4 気圧高度センサ MPXAZ6115Aと通信装置 Xbee

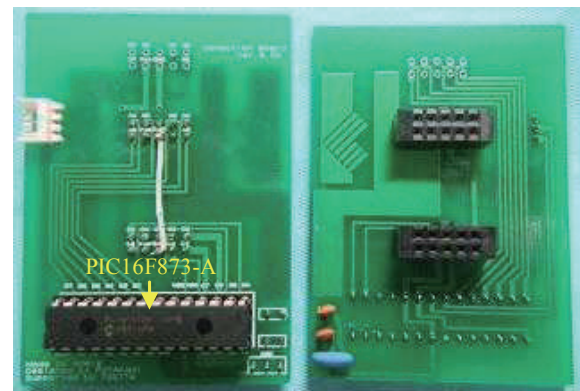


図 1 5 コネクションボード(左:裏面、右:表面)

においても、高度センサの出力からロボットの移動面の高度変化を検出し、移動面の3次元的な地理情報を取得するといった利用も可能である。このような目的からMAVC1に気圧高度センサを搭載した。搭載したセンサはFreescale Semiconductor社製品のMPXAZ6115Aで、図14に示すようにMAVC1用のサブボードに実装されている。

(v) 通信装置

群制御においては、先に述べた平行制御のように取得したロボットの移動方向をロボット間で共有したり、

GPSの取得データを共有したりする必要が生じる。そこで、ロボット間の情報交換用として図14に示すMaxStream社製の小型無線通信装置であるXBeeを搭載している。この装置はモバイル機器向けの通信規格であるZigBee/IEEE802.15.4に準拠した装置で、通信可能な最大距離は屋外で100m、屋内で30mであり、通信速度は250kbpsである。最も大きな特徴は最大で65,000ユニットが接続可能なMesh型ネットワークを構成することで、Mesh型ネットワークは通信方向に指向性を持たないため、発信された情報は途中のロボットを経由しながらネットワークに接続している全ロボットに一律に伝達される。また、低価格、低消費電力であり、本研究のような小型ロボットの群制御に非常に適した通信装置と言える。この装置は、図14に示すように気圧高度センサと同じサブボード上に実装されている。

(4) コネクションボード

上記の第1層、第2層のユニットは、図15に示すコネクションボードで接続されている。コネクションボードはロボットの構造を支える背骨としての役割を持つほか、駆動部を制御するためのPIC16F873-Aが搭載されており、超音波センサやMAVC1が搭載するセンサからの出力を受けて駆動部を操作する。MAVC1を含む第3層は、第2層の上に乗せるようにして固定されている。

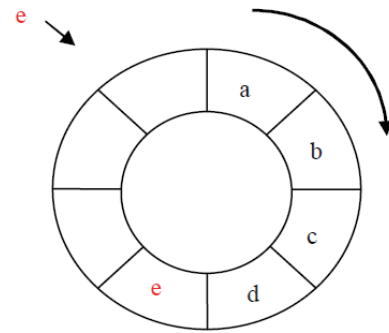
以上のボード類（MAVC1を除く）は本研究の群ロボット用に専用に作成したプリント基板を用いて作られている。

3.2 群ロボットのソフトウェア

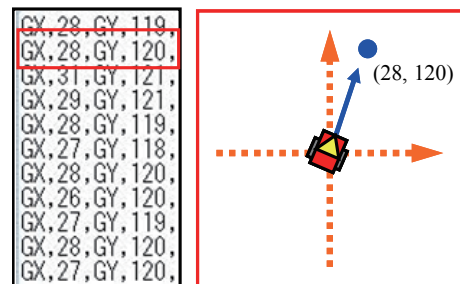
(1) 開発環境

PIC16F84AとPIC16F873-A用にはMPLABという総合開発環境ソフトを使用する。MPLABはMicrochip Technology社が提供するWindowsベースのフリーソフトで、PIC16/17シリーズに対応している。プログラムの作成からデバック、ストップウォッチを使用した時間計測などができるほか、C言語用のコンパイラと統合できるため、本研究ではCCS社のPIC C-Compiler PCMを統合して使用している。PIC内部のROM (Read Only Memory)へのプログラムの書き込みには、株式会社アドウィンの「PICライターキットAタイプ」、あるいは秋月電子通商のAKI-PICプログラマーキットを使用する。

MAVC1が搭載するH8/3069Fマイコンについては、統合開発環境ソフトVisual Studio 2005を用い、C言語でプログラムを作成する。プログラムのコンパイルはGNU H8/300用のgccコンパイラを用い、作成したプログラム



(a) リングバッファ (イメージ)



(b) 磁気方位センサの出力

図16 通信処理

はH8ライターを用いてH8/3069Fマイコンに書き込む。

(2) 通信処理

受信：本機の受信処理では、受信データを確実に処理するために受信割込みを用いている。受信割込みでは、受信機がデータを受信するとCPUのメインプログラムの処理が一旦中断し、受信データの処理が開始される。全ての受信処理を完了するとCPUは再びメインプログラムの中断箇所へ戻り、もとの処理を再開する。この方法を用いることによってデータの受信があった時のみ処理を行うことができ、効率的な処理が可能になる。ただし、割込み処理中はメインプログラムの処理が中断するため、データ量が多いと中断時間が長くなるという問題が生じる。そこで、割込み処理では受信データのメモリへの書き込みのみを行い、その他の処理はメインプログラムで行なうことにしている。

データ書き込み用のメモリバッファは図16(a)に示すようなサイクリックバッファ（リングバッファ）を用いている。受信されたデータは順にリングバッファ内に書き込まれ、最後のメモリ番地まで来ると再び始めの番地から順に上書きされる。こうすることでデータの保存域を確保しながら受信を続けることができる。

送信：データの送信のタイミングにはタイマ割込みを使用している。メインループ内で送信処理をする方

法もあるが、その場合は状況に応じて他の処理にかかる時間が変動し、安定したタイミングで送信処理を行なうことができない。そこで、一定の時間間隔で送信処理が可能なタイマ割込みを用いている。この際、データの送信間隔をできるだけ短くすれば最新の情報に基づいた処理が可能になるが、その間メインループの処理が中断し、またデータ量が増えた分だけ受信側の負荷も増大するため、適切な時間を選択する必要がある。最適な時間間隔はロボットの性能や実験条件等に依存するが、ユーザ側でその値を自在に指定できる点もタイマ割込みを用いる利点である。

送受信データ：送受信されるデータは磁気方位センサの計測結果で、図16(b)に示すようにXY平面上のベクトル成分としてセンサから出力される。これを、一定の規則に従って文字列データに格納して送受信する。例えば、1区切りの文字データは「AX+1234,AY-5678;」となっており、「,」はデータの区切りを、「;」はひとまとまりのデータの終点を意味している。また「A」は個体識別のためにAから順に各ロボットに振

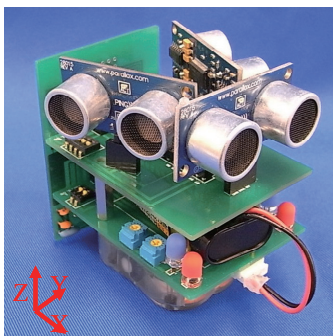
たアルファベットのIDナンバーを意味し、「X」「Y」は座標の種類、「+1234」「-5678」はベクトルの座標値を意味している。この文字列は送受信時には16進数に変換されて送られる。このような規則を与える理由は、送受信時のエラーによってデータが壊れた時に、規則からはずれたエラーデータを発見しやすくするためである。

(3)制御アルゴリズム

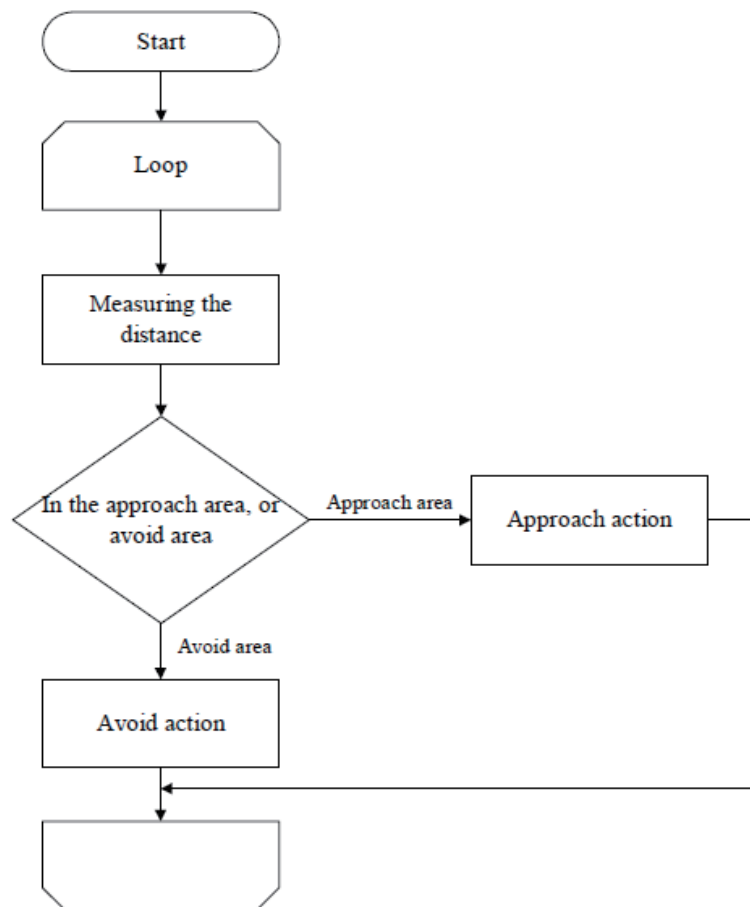
前述したように、ロボットは機能ごとにまとまったモジュールを層状に重ねた構造をしており、使用するモジュールによって機能が変化する。このため、使用目的に応じてモジュールを使い分けることが可能である。以下ではロボットのシステムを接近・反発型と、接近・反発・平行型に分けて、システムの構成と制御アルゴリズムについて記述する。

接近・反発型

接近・反発型のシステム構成は図17(a)に示すような2



(a) システム構成



(b) 処理のフローチャート

図17 接近・反発型システムの構成とフローチャート

層構造からなり、2層目のボード上に装備した超音波センサーとそれを制御するPIC（センサ用PIC）、ロボット背面のコネクションボードに装備されて駆動部を制御するPIC（駆動用PIC）、第1層に装備されている駆動部とそれに電力を供給するバッテリーからなる。接近・反発型ロボットの基本動作は

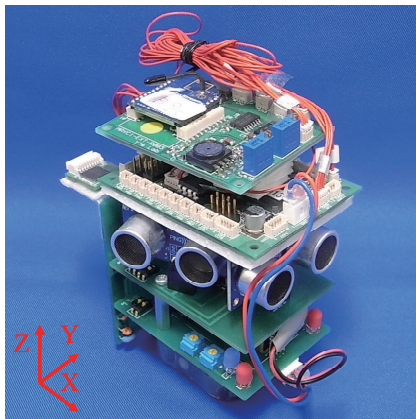
- (1) 超音波センサーによって他のロボットを認識し、距離を測定する。一定時間他のロボットを認識できない場合は、ロボットを停止して回転させる（＝探索制御）。
- (2) 測定した距離に応じて接近、あるいは反発のどちらかの動作を選択する。
- (3) 接近の場合はセンサーの向きに前進、反発の場合は後退する方向に移動方向を決定する。

(4) 決定した移動方向に従って駆動部を操作して移動する。
 の繰り返しであり、(1)～(3)の処理を超音波センサーとセンサ用PICが行ない、(4)の処理を駆動用PICが行う。処理のフローチャートを図17(b)に示す。

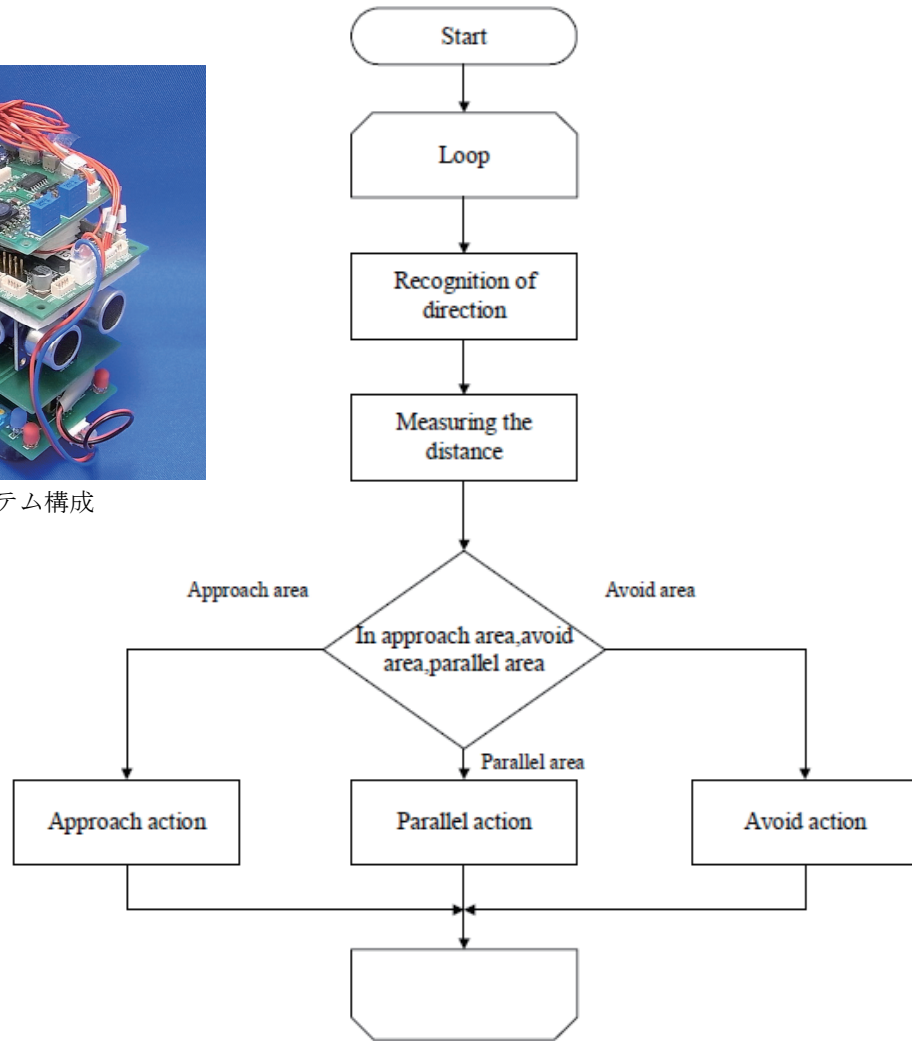
接近・反発・平行型

接近・反発・平行型のシステム構成は図18(a)のようになっており、先に述べた接近・反発型のシステムに、MAVC1とそれに付属する磁気方位センサー、気圧高度センサー、通信装置をまとめて第3層に搭載したものになっている。このロボットの基本動作は

- (1) 磁気方位センサーを用いて自ロボットの移動方向を検知する。



(a) システム構成



(b) 処理のフローチャート

図 1 8 接近・反発・平行型システムの構成とフローチャート

- (2) 通信処理を行い周囲のロボットとの間で移動方向のデータを交換する。
- (3) 交換したデータを用いて平均的な移動方向を計算し、それを平行制御の移動方向とする。
- (4) 超音波センサによって他のロボットを認識し、距離を測定する。一定時間他のロボットを認識できない場合は探索制御を行う。
- (5) 距離に応じて接近、反発、平行のいずれかの動作を選択する。
- (6) 接近の場合はセンサの向きに前進、反発の場合は後退する方向を選択し、平行の場合は(3)で決定された平均的な移動方向を選択して移動方向を決定する。
- (7) 決定した移動方向に従って駆動部を操作し移動する。

の繰り返しある。ここで、(1)~(3)の移動方向の検知と通信によるデータの交換、および平均的な移動方向の決定はMAVC1とそれに付属する磁気方位センサ、通信装置が行い、(4)~(6)の距離の測定と動作の選択、および移動方向の決定は超音波センサとセンサ用PICが行ない、(7)の駆動部の操作は駆動用PICが行なう。処理のフローチャートを図18(b)に示す。

4. 結果と考察

上で紹介した群ロボットを用いて各種の群制御実験を行なった。以下にその方法と結果について述べる。

4.1 凝集・分散実験

実験方法

凝集・分散実験では、接近・反発型ロボットを8台使用した。初期状態でロボットの配置の影響を考慮するためにロボットの位置と向きを、i)ロボットを円形に配置し、向きを円の中心方向に向ける、ii)ロボットを円形に配置し、向きを外側に向ける、iii)任意の場所、向きに設置する、の3つのケースに分けて実験を行った。全ての実験において、ロボットの反発領域はロボットからの距離が0~250mmの範囲、接近領域は250~800mmの範囲とした。

結果・考察

図19はロボットを円形に設置し、向きを円の中心方向に設置した場合の結果である。実験開始後、ロボットは接近制御が働いて徐々に中心に向かって移動し、ある程度集合すると反発制御が働いてそれ以上密集することなく、個体間の距離を維持する状態で群を形成した。15秒以降はロボットが集合したまま写真の右上

の方向に移動した。これは領域外におかれたホワイトボードを一部のロボットが検知し、検知したロボットがその方向に移動して、残りのロボットがそれに追従したためである。想定外の動作であったが、この結果から一部のロボットが発見した対象を追跡しようとする時、接近・反発制御のみで残りのロボットを含めて全てのロボットが一群となって対象に向かって移動できることが確認された。

図20はロボットを放射状に外側に向けて実験を開始した結果である。この時、個々のロボットは一旦は外側に向かって移動したが、移動の過程で他のロボットが後方の不可視領域に入って認識不能になると探索制御が働いて向きを変え、その後接近制御が働いて徐々に集合して一塊の群を形成した。ロボットには反発領域が存在するため、凝集した後で互いのロボットは衝突しないはずだが、今回の実験では60秒前後でロボット同士が接近したり衝突したりするものが存在した。これは、他のロボットとすれ違う際にロボットの基板からはみ出したセンサが接触して停止したり、センサを持たない背面同士で衝突したりしたためである。

図21はロボットの向きや配置を任意に設定して起動させた場合の結果である。実験の様子より、起動後9秒で群の中に2つの小群が形成され、18秒後にはこの小群ごとにロボットが集合して群が二つに分裂した。その後、38秒後には片方の小群の中から一部のロボット(図の赤い矢印)が他の小群に向かって動きだし、48秒後には他の小群と合体した。この結果から、ロボットがランダムに分布した場合には、局所的なロボットの密度の違いや、開始時のロボットの向きに依存して複数の小群が形成されることがわかった。ただし、小群に分裂した状態は必ずしも安定ではなく、ロボットのセンサの検知領域に他の小群のロボットが含まれている場合には、何らかの外乱等によってロボットが他の群へ移動し始め、最終的には分裂した群が一つにまとまる可能性があることが示された。

4.2 凝集・分散・平行実験

実験方法

この実験では、接近・反発・平行型のロボットを3台使用し、初期状態でそれらに向かい合わせに配置して実験を開始した。それぞれのロボットの反発領域は0~200mm、平行領域は200~400mm、接近領域は400~600mmの範囲とした。

結果・考察

図22に実験の結果を示す。当初離れていたロボット

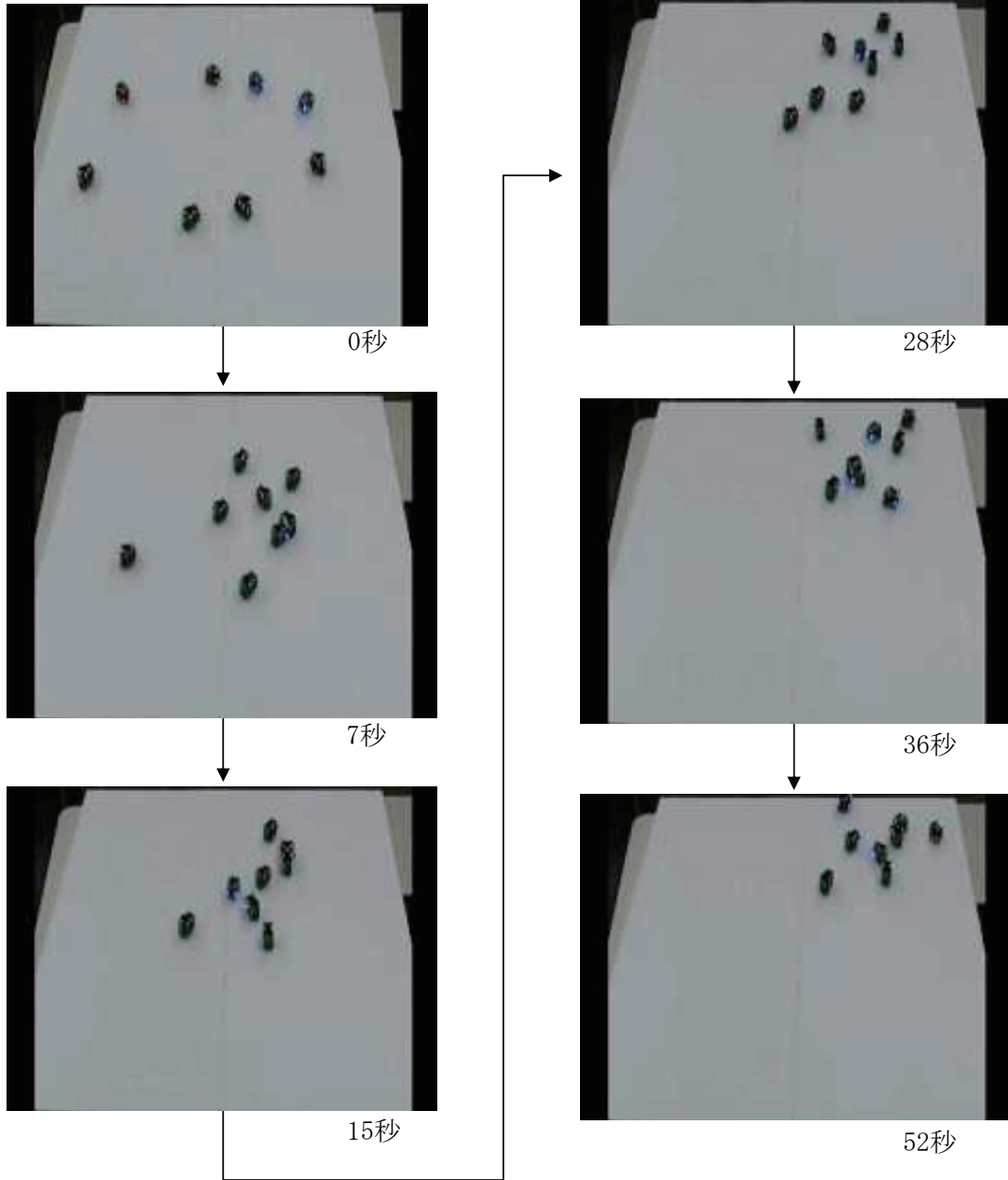


図19 凝集・分散実験（円形配置、中心向き）

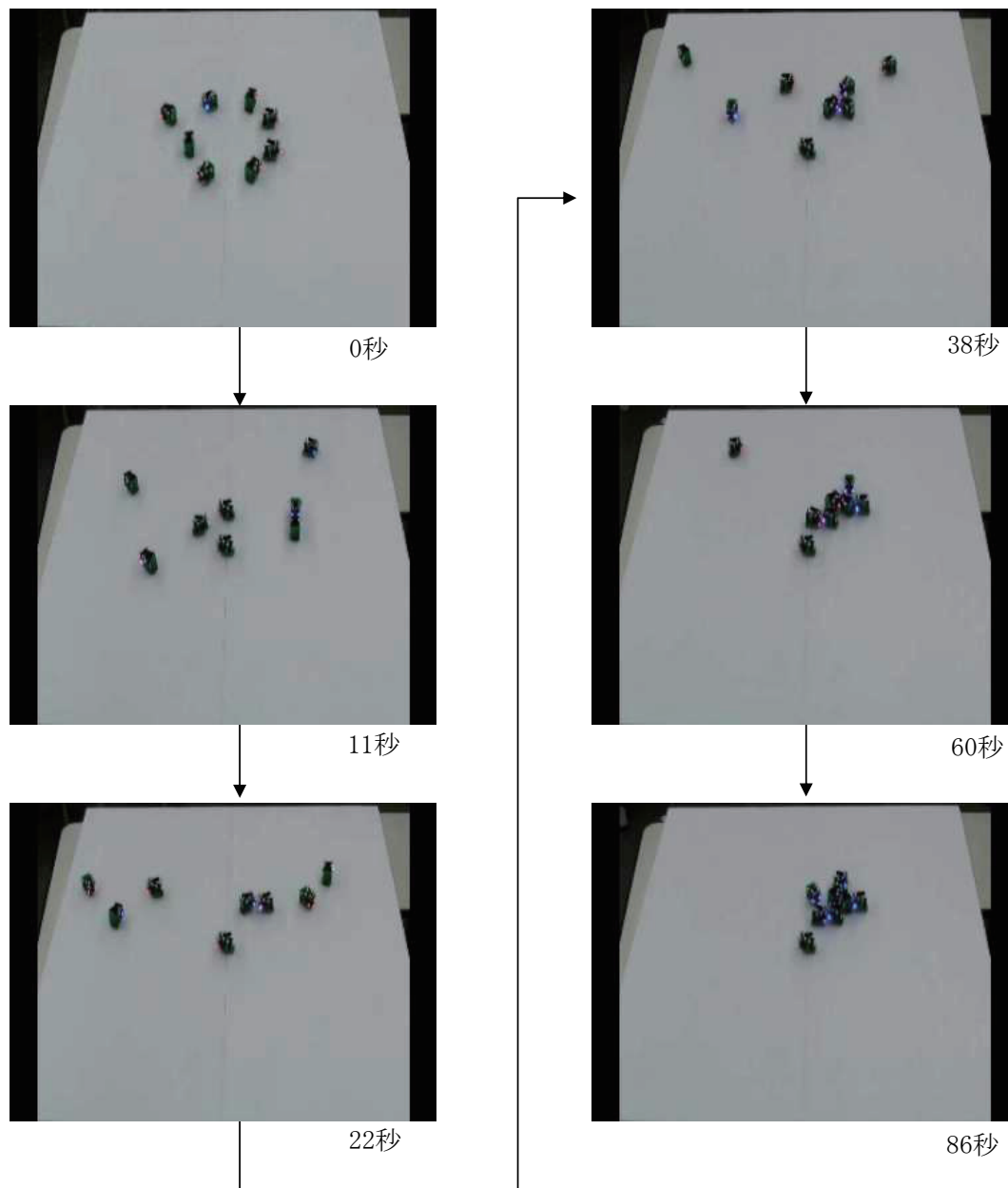


図 2 0 凝集・分散実験（円形配置、外向き）

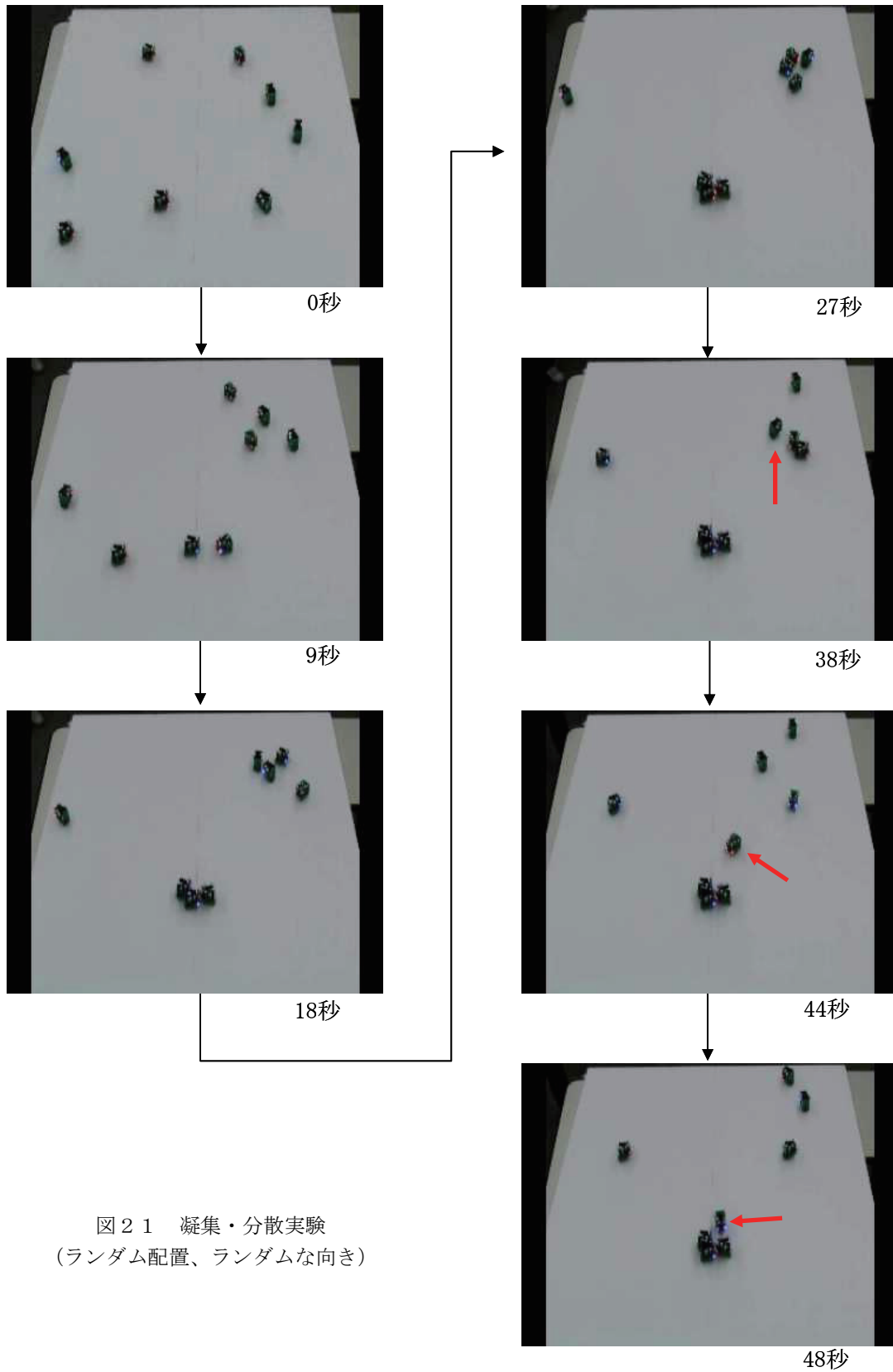


図 2 1 凝集・分散実験
(ランダム配置、ランダムな向き)

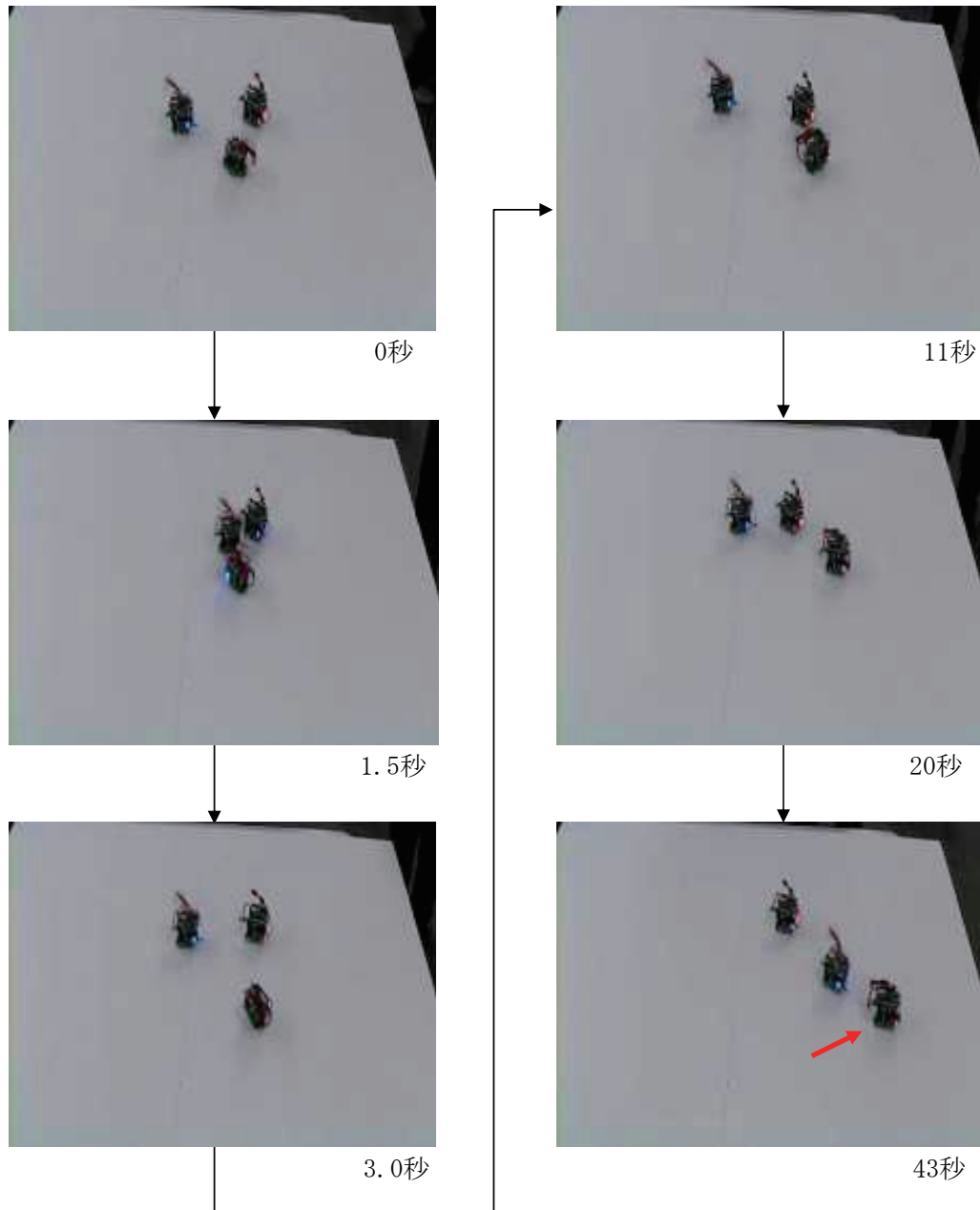


図 2 2 凝集・分散・平行実験

は接近制御によって互いに接近し、1.5秒後にはロボット間の距離が小さくなりすぎて反発制御が働き、3秒後には距離が広がった。その結果、互いのロボットが平行領域に位置する状態が実現し、平行制御が働いて20秒後にはそれぞれのロボットが同じ向きを向くようになり、最終的には43秒後の状態のように全てのロボットが向きを揃えて移動した。この状態でも、接近・反発制御が働いてロボットがほぼ一定の距離を保ちながら移動することができた。

ただし、図22の最後の状態のように前後に一直線に並んだ状態や、先頭に1台のロボットが存在して、他のロボットが全て後方に位置する状態が実現すると、先頭の1台（図の赤い矢印）については超音波センサの視界に他のロボットが入らないため一時的に停止し、後方のロボットは接近と反発を繰り返しながら前後に移動を繰り返す場合があることが確認された。これはロボットが後方にセンサを持たないことが原因であり、このような状態を回避するためには、後方にセンサを設置して常に他のロボットを認識できるようにするか、あるいは通信装置を用いて相互作用の対象が見つからないロボットの移動方向を外部から指令するなどの制御が必要になると考えられる。後者の制御は群の移動方向を外部から制御するという意味で経路制御であり、ロボット間の相互作用と経路制御を組み合わせた制御が群の移動制御において有効であると考えられる。次節に経路制御を試みた実験について記す。

4.3 経路制御実験

ロボットの群を目的の場所まで誘導したり、前述したような相互作用の対象が見つからない場合にロボットの移動方向を外部から指定することを目的として、通信装置を経由して外部からロボットの移動方向を制御する経路制御実験を行なった。

実験方法

経路制御実験では、接近・反発・平行型ロボットを1台、接近・反発型ロボットを2台使用した。無線通信を使用して接近・反発・平行型ロボットの移動方向をパソコンから操作し、その背後からパソコン操作をしない接近・反発型ロボットを追従させた。3台のロボットの全てを外部から制御しない理由は、故障や通信障害等によって全てのロボットを外部から制御できない場合や、コスト低減のために通信装置や航法装置を搭載しないロボットが混在する場合を想定するためである。

結果・考察

図23に実験の結果を示す。先行する1台の接近・反発・平行型ロボットが外部の制御用パソコンからの指令を受けて前進し（0～17秒）、その後ゆっくりと移動方向を変え（25～50秒）、それ以外の2台の接近・反発型ロボットは外部からの指令を受けることなく、接近制御を用いて前方のロボットに追従する結果が得られた。この間、追従するロボットは前方のロボットに接触するように追従しているが、これは後方の2台のロボットには反発領域を設けず、全ての領域を接近領域としているためである。その理由は、反発制御が働くと衝突を回避するために別の方向を向いて前方のロボットを見失ったり、他の全てのロボットを見失って動作が停止したりするためである。ただし、反発制御が動作しないと接触や衝突が起きるため何らかの対策を講じる必要があり、例えば、反発制御が働いても前方のロボットを見失わないようにセンサの数を増やしたり、衝突回避のための移動方向の変更をやめて、停止するのみとすることなどを検討している。

4.4 形状制御実験

飛翔体の群制御シミュレーションでは、機体周囲の相互作用領域の形状を変更することによって群の形状を変える制御を実現したが、ロボットを用いた群制御においても、相互作用の特性を変えることによって群の形状を制御できるかどうかを確認する実験を行った。

実験方法

形状制御実験では、凝集・分散実験と同様に接近・反発型ロボットを8台使用し、相互作用の特性を変えるために全てのロボットの左側の超音波センサを切断して、正面と右のセンサのみで他のロボットを認識する状況を作って実験を行なった。

結果・考察

図24に実験の結果を示す。初期状態でロボットは円状に配置しており、しばらくの間は円状かそれに近い配置をしているが、時間が経過するにつれてロボットの位置が変化し、62秒後は図の赤色の破線で囲ったように細長い形の配置に変化した。これは左のセンサを切断したことによってロボット間の相互作用の対象性が崩れ、円状の配置とは異なる配置が安定状態となったためと考えられる。従って、シミュレーションと同様に、相互作用の特性を制御することによって群の形状を変える制御が、群ロボットにおいても可能であると考えられる。

4.5 高度変化実験

将来の飛翔体を用いた群制御の実現に向けた予備実験として、また高度センサの出力からロボットの移動面の高度変化を検出して、移動面の3次元的な地理情報を取得するような制御を実現することを目的として、高度センサの情報をを用いた制御の実験を行った。この実験では全センサを装備した接近・反発・平行型ロボットを3台用いた。

実験方法

各ロボットはセンサより取得した高度データを通信装置を用いて共有し、群全体の平均高度データと自機の高度データを比較して、自機の高度データの方が低い場合にのみ旋回動作を行うように設定した。3台のロボットうちの2台を手で持って上下させて群の平均高度を変化させ、残る1台の動作を確認した。

結果・考察

図25に実験の結果を示す。2台のロボットを上昇させると、残り1台のロボットは平均高度よりも自身の高度が低いと判断し、旋回動作を行なった。また、2台のロボットを下降させて同一平面に置くと、旋回運動していたロボットの動作が停止した。ただし、搭載する高度センサの精度が十分ではなく、手で上下させる程度の高度変化ではノイズの影響によって正確な高度を捉えられないことが多かった。飛翔体で用いる場合は高度の変化量は大きいため誤差の影響は少ないと考えられるが、地上ロボットが移動面の高度変化を検知するような場合には、高度の変化量は本実験よりも小さくなることも十分に予想されるため、将来的にはより精度の高いセンサを搭載する必要がある。

5. まとめ

本研究では、生物の群運動を参考にして作られた生物型の群制御アルゴリズムに従って動作する地上移動型の群制御ロボットを開発し、数値シミュレーションで実現した各種の群の運動が実際のハードウェア上で実現できるかどうかを確認するための検証実験を行なった。以下にその結果をまとめる。

- 1) 相互作用の機構として超音波センサや磁気方位センサ、通信装置などを備え、これらのセンサの情報に基づいて自律制御を行うことが可能な地上移動型群ロボットを開発した。
- 2) 群ロボットは、ロボット間の距離を超音波センサ

で検出し、搭載するコンピュータを用いて距離に応じて「接近」、「平行」、「反発」の3つの動作を切り替えることに成功した。

- 3) 「接近」と「反発」の場合は、それぞれ検出した超音波センサの方向へ近づく、あるいは遠ざかる方向へ移動し、「平行」の場合は方位センサが検出した移動方向を通信装置を用いてロボット間で共有し、平均的な方向へ移動することによって群制御を実現した。
- 4) 一部のロボットの移動方向を外部から指定し、残りのロボットをこれに追従させることによって群全体を目的地へと誘導する経路制御実験に成功した。
- 5) ロボットの超音波センサの特性を操作することによってロボット間の相互作用を操作し、それによって群の形状を変える実験に成功した。
- 6) 高度センサの情報をを用いて、ロボットの高度が群全体の平均高度と異なる場合に特定の動作を行なう実験に成功した。

以上のような結果から、数値シミュレーションで実現された機能の多くを群ロボットにおいても実現することに成功し、生物型の群制御の有効性を確認することができた。また、小型飛翔体用の制御ボードであるMAVC1の機能の一部を用いた群制御に成功し、将来の飛翔体を用いた群制御のための予備実験という目的を果たすことができた。ただし、開発したロボットは後方に超音波センサを持たないため、GPSが使えない屋内の実験では後方のロボットを認識できずに動作が停止したり、実験が中断するという問題があった。また、超音波センサで検出可能な距離は3m程度と短いため、飛翔体の制御用には十分ではないという問題もあった。これらの問題を改善するためには、後方にもセンサを搭載して不可視領域を減らすことや、GPSの情報が利用できる屋外において実験を行う必要があると考えられる。また、高度の変化を検出するための高度センサの精度が十分ではないため、地上ロボットが移動面の高度変化を検出するためにはより高精度な高度センサを用いる必要があると考えられる。

今後の予定としては、今回の実験では一定値とした相互作用領域のサイズや制御サイクルの周期などの各種のパラメータを変化させた時の、群の運動に対する影響を分析することや、動作確認が取れたハードウェアを飛翔体に搭載し、飛翔体を用いた群制御の実現を試みるほか、今回開発した地上ロボットの機能を向上させて、飛翔体と地上ロボットを連携させた群制御を

実現し、空と地上から3次的に情報を収集できるセンサネットワークシステムの実現を目指す予定である。

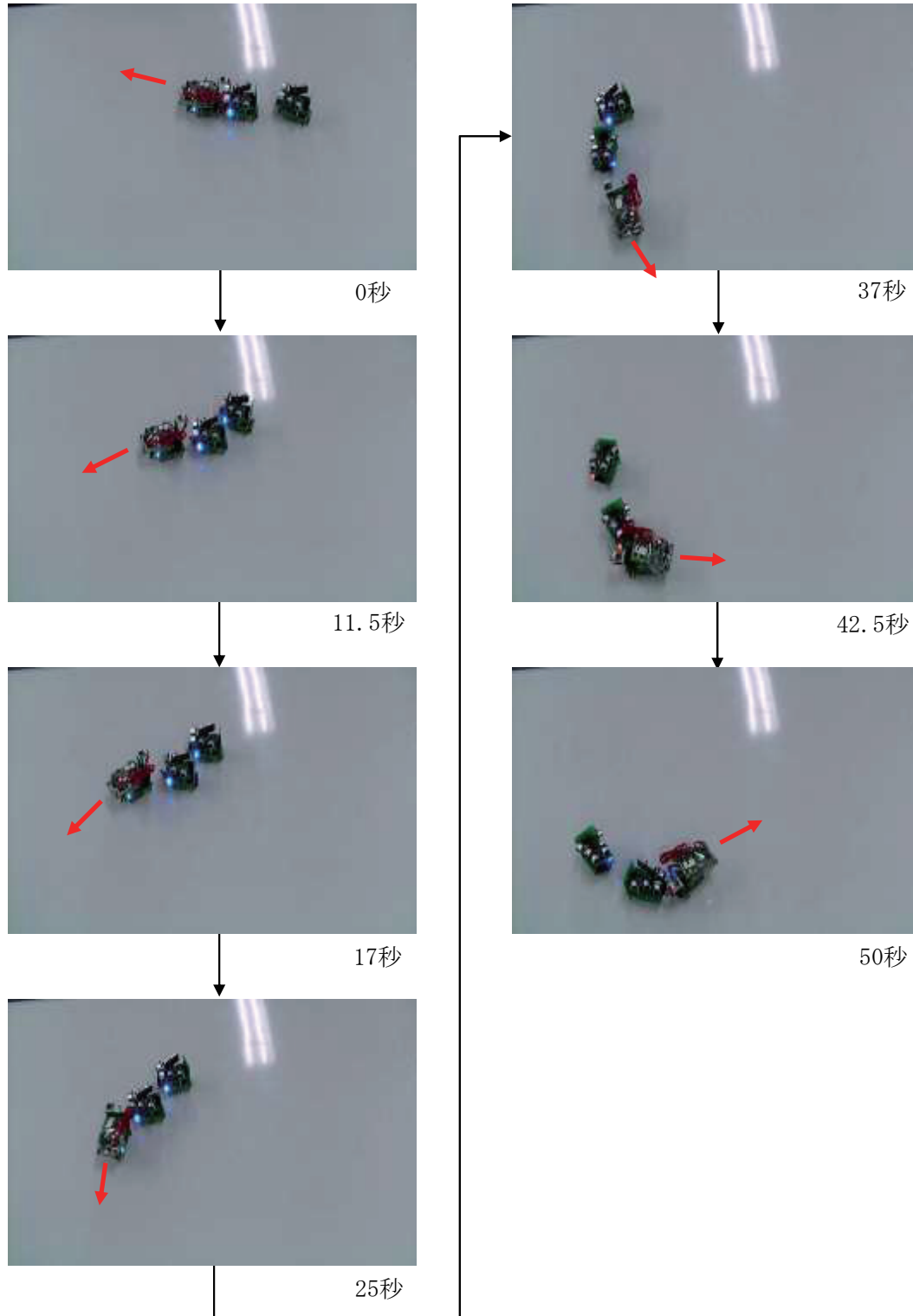


図 2 3 経路制御実験
(赤い矢印は先頭ロボットの移動方向を示す)

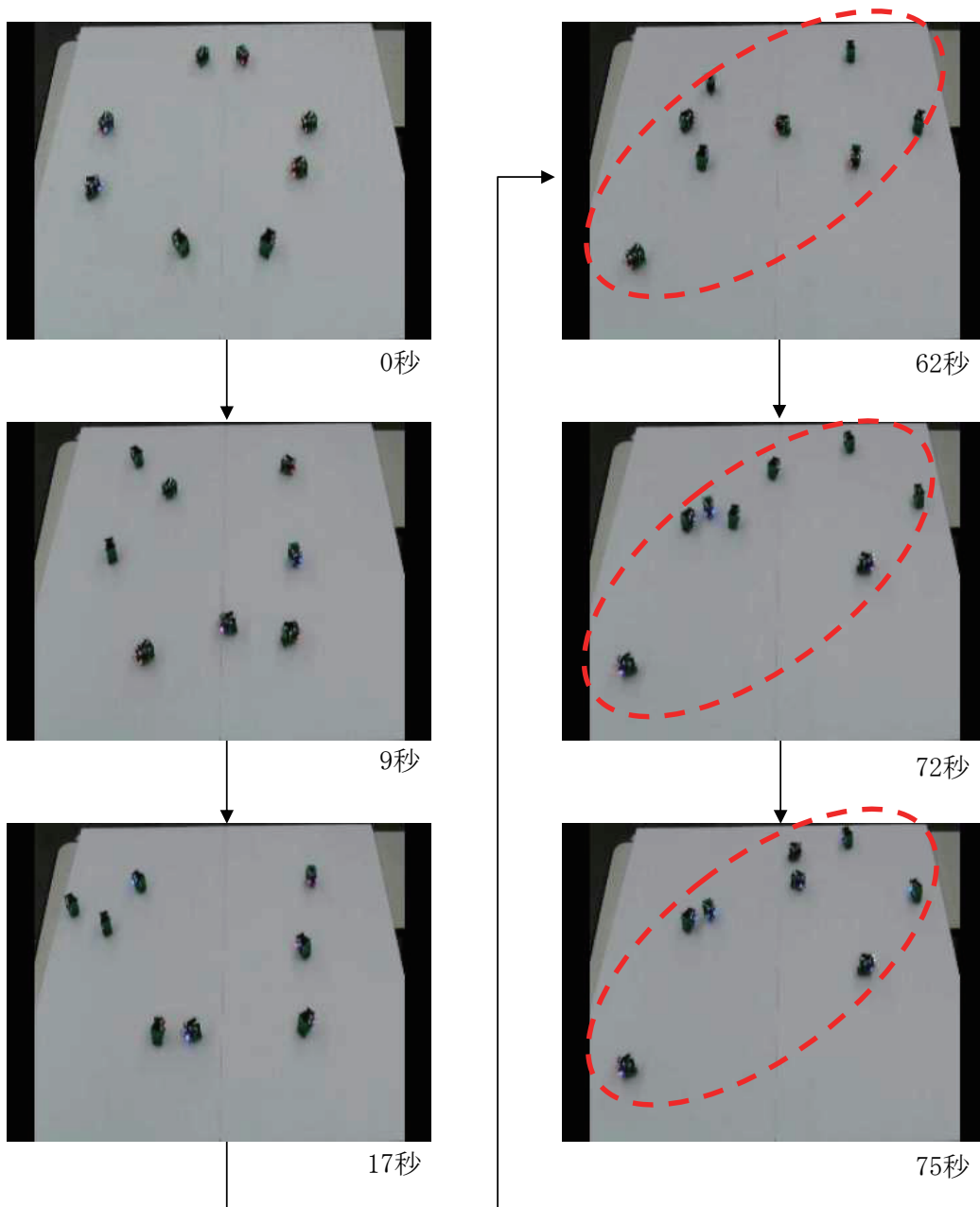


図 2 4 形状制御実験

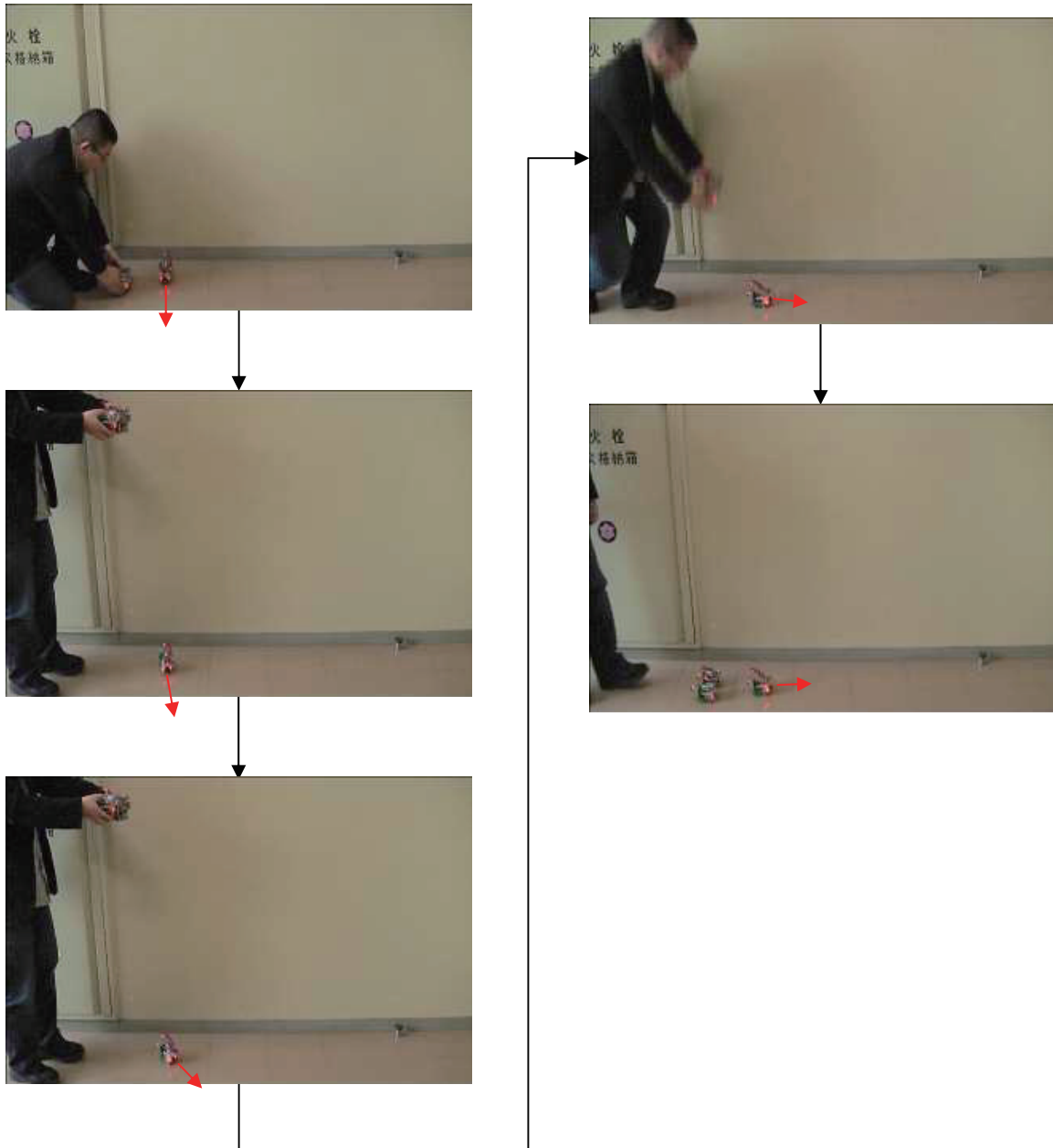


図 2 5 高度変化実験
(赤い矢印は地上ロボットの移動方向を示す)

参考文献

- 1) S. Sasa, Research on UAV Systems for Disaster Rescue Operation, The 4th International Symposium on Innovative Aerial/Space Flyer Systems, 41-44 (2008).
- 2) 田所 諭, レスキューロボットの現状と未来, 電子情報通信学会誌, 92(3) pp.203-208 (2009).
- 3) 稲田喜信, 高信英明, 小型飛翔体の群制御へ向けた試み - 生物型群制御の可能性 -, 自動車技術会論文集, 40(6), p.1635-1640 (2009).
- 4) 稲田喜信, 時田拓明, 二上将直, 堀江数馬, 高信英明, 生物型群制御を用いた小型飛翔体の編隊飛行シミュレーション, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, ISSN 1349-1113, JAXA-RR-08-010 (2008).
- 5) T.J. Koo and S.M. Shahrz, "Formation of a group of unmanned aerial vehicles (UAVs)", Proceedings of American Control Conference, Arlington, USA, 69-74 (2001).
- 6) C. Park, M. Tahk, and H Bang, "Multiple aerial vehicle formation using swarm intelligence", Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Providence, Rhode Island, Aug. 11-14 (2003).
- 7) E. Ronchieri, L. Pollini, and M. Innocenti, "Decentralized Control of a Swarm of Unmanned Aerial Vehicles", Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Hilton Head, South Carolina, Aug. 20-23 (2007).
- 8) S. S. Iyengar, R. R. Brooks, Ed., Distributed sensor networks, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL (2004).
- 9) X. Li, Wireless ad hoc and sensor networks: theory and applications, Cambridge Univ. Press, Cambridge (2008).
- 10) I. Aoki, An analysis of the schooling behavior of fish: internal organization and communication process, Bull. Ocean. Res. Inst. Univ. Tokyo. 12, 1-65 (1980).
- 11) Y. Inada and K. Kawachi, "Order and Flexibility in the Motion of Fish Schools", J. Theor. Biol. 214, 3, 371-387 (2002).
- 12) 藤永 仁, 小型無人航空機の開発および飛行制御系設計, 大阪府立大学大学院 工学研究科 航空宇宙海洋系専攻 修士論文 (2008).
- 13) 二上将直, 高信英明, 鈴木健司, 三浦宏文, 稲田喜信, 群知能ロボットの研究 - マルチセンサ融合型群知能 -, 第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (2009)
- 14) 時田拓明, 群知能ロボットの開発 ~ 相互通信による群移動制御~, 工学院大学工学部機械工学専攻 修士論文 (2009).
- 15) 堀江数馬, 群知能ロボットの研究 - 超音波を利用した群の拡大 -, 工学院大学工学部機械工学専攻 卒業論文 (2009).