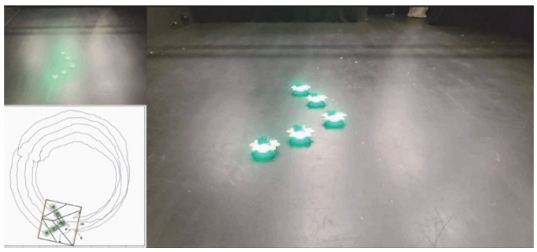
機数変化・隊形変更に対応可能な複数移動体のフォーメーション制御手法

Formation Control Method for Multiple Vehicles with Adaptability to Unit Number Variation and Formation Reconfiguration



菊池 惟子*1 Yuiko Kikuchi
小柳 容子*2 Yoko Koyanagi

移動体製品では，偵察・監視・防御ニーズの高まりを受け，無人機群による協調制御手法が求められている。そこで本報では，無人機同士が衝突せずに指定のフォーメーションを形成しながら対象を追尾し，運用中のフォーメーション変更・機数変化に対応可能な分散的なフォーメーション制御手法を提案する。具体的には，被覆制御を時変なフォーメーション・領域に適用できるように拡張し，その収束性を理論的に保証した。開発したフォーメーション制御手法の有効性は，5機の無人車両を用いた実機検証にて確認した。

1. はじめに

近年，無人移動体製品による偵察・監視・防御ニーズの高まりを受け，複数移動体が協調して対象の追尾・探索，指定の領域の防御などを実現する協調制御技術が求められている。協調制御においては，移動体機数が増加した場合にも計算負荷・通信量を抑えるため，各機体が隣接する機体のみと通信を行い，局所的な情報を使用して自律的に制御することで，全体最適を目指す分散制御手法の適用が期待されている。さらに実運用においては，機体の故障などによるミッション中の無人機数の変化や，状況に応じたフォーメーションの変更に柔軟に対応することが求められている。

分散的なフォーメーション制御手法として，合意制御(1)と被覆制御(2)が挙げられる。合意制御は隣接する機体との相対位置情報のみを使用して，フォーメーションを保って対象に追従することができるが，各機に対象からの所望の偏差量を事前に定義する必要があるため，運用中の機数変化に柔軟に対応することは難しい。被覆制御は所望のフォーメーション形状を確率密度関数として定義することでフォーメーション上に均等に機体を配置する手法であるが，機体を配置する領域・フォーメーション形状は時不変であることが前提となっている。

そこで本報では，マルチエージェントシステムの制御に高度な知見を有するメルボルン大学に委託し，機数の変化に応じて機体間隔を自律的に調整可能な被覆制御手法を，機体を配置する領域・フォーメーション形状が時変な場合にも適用できるように拡張した。また，制御バリア関数(3)を用いた機体間の衝突回避制御器をフォーメーション制御器の後段に配置することで，機体衝突せずに所望のフォーメーション形成を実現した。

本報で開発した技術の製品への適用イメージを図 1 に示す。例えば防御対象に追従しながら，障害物や検知した相手機の情報を基にフォーメーションを変更し，群からの離脱/合流に応じてフォーメーションを補間することで，高度なミッションを遂行できる。

*1 総合研究所 制御システム研究部
*2 総合研究所 制御システム研究部 次長

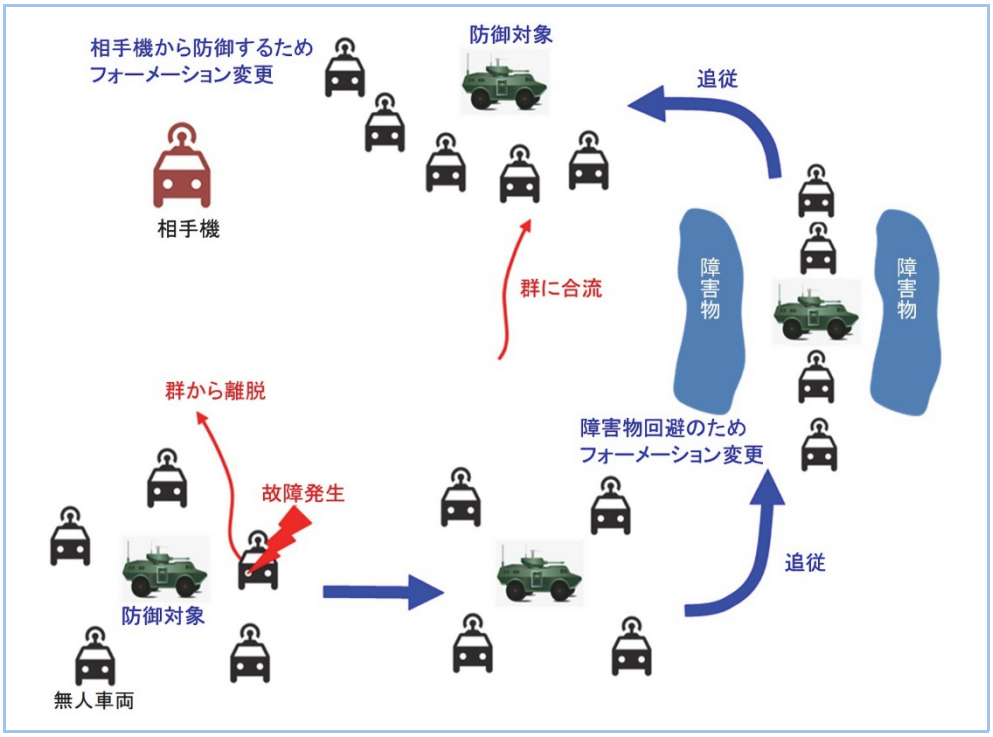


図1　本報で開発した技術の適用イメージ

2. フォーメーション制御手法の開発

本報では，被覆制御[2]を拡張したフォーメーション制御手法を開発した。被覆制御では，ある有界領域Qにおいてn機のエージェント$P = \{p_1, p_2, \cdots, p_n\}$を密度関数$\phi(q)$の分布で配置するとき，最適化すべき評価関数は，(1)式で記述される。密度関数を任意の形状に設計することで，所望のフォーメーションが達成される。

$$J(P) := \int_Q \min_{i\in[1,2,\cdots n]} \|q - p_i\|^2 \phi(q)\ dq \qquad (1)$$

領域Q，n機のエージェント位置P が与えられた時，p_iに対するボロノイ領域$V_i(P(t))$は(2)式で定義され，p_iに一番近い点の集合を意味する。

$$V_i(P(t)) := \{q \in Q : \|q - p_i\| \le \|q - p_j\| \quad \forall j \in [1, 2, \cdots, n]\} \qquad (2)$$

被覆制御における評価関数(1)式は，(3)式に示すように各エージェントのボロノイ領域ごとの評価関数に分割できる。つまり(1)式の評価関数を最小化する最適解は，(3)式の各エージェントが自身のボロノイ領域$V_i(P(t))$における評価関数を最小化することによって得られる。よって，各エージェントが自身のボロノイ領域においてそれぞれ最適化計算を行うことで，全体最適を達成できる。

$$J(P) := \int_Q \min_{i\in[1,2,\cdots n]} \|q - p_i\|^2 \phi(q)\ dq = \sum_{i=1}^{n} \int_{V_i(P(t))} \|q - p_i\|^2\, \phi(q) dq \qquad (3)$$

従来の被覆制御では，有界領域Q，密度関数$\phi(q)$が時不変である前提で制御設計が行われる。本報では，対象の追従を実現するため有界領域を時変とする必要があり，フォーメーション変更を実現するため密度関数を時変にする必要がある。図 2 に示すように時不変な領域Ξ内部に，時変ローカルポリトープ$\Omega(t)$を定義する。ローカルポリトープの境界を$\partial\Omega(t)$，特にエージェントiのボロノイ領域の境界と$\partial\Omega(t)$との共通部分は$\partial\Omega_i(t)$と表す。

本研究では，ボロノイ領域と密度関数は時間に依存する関数として定義されるため，最適化すべき評価関数は(4)式で表される。

$$J(P, t) = \sum_{i=1}^{n} \int_{V_i(P(t),t)} \|q - p_i\|^2\, \phi(q, t)dq \qquad (4)$$

評価関数$J(P,\ t)$をリアプノフ候補関数とする。Barbalat の補題[4]より，リアプノフ関数$J(P,\ t)$が下界であり，その時間微分が負かつ一様連続であるとき，リアプノフ関数$J(P,\ t)$の時間微分は 0 に収束することが保証される。リアプノフ関数$J(P,\ t)$の時間微分が 0 に収束するのは，各エージェントがボロノイ重心に収束するときであり，ボロノイ重心は評価関数を最小化する最適解であることから，各エージェントの最適解への収束が保証される。よって，各エージェントが最適解に収束するためには，(4)式の時間微分である(5)式の$\dot{p}_i$に制御則を代入した時，(5)式が負になるように制御則を決定する必要がある。(5)式を負とするため，提案する制御則は(6)式で定義される。

$$\frac{d}{dt}J(P,t)=\sum_{i\in V}\left(2m_i\dot{p}_i{}^{\top}(p_i-c_i)+\int_{V_i(P(t),t)}\|p_i-q\|_2^2\frac{\partial}{\partial t}\phi(q,t)dq\right.$$
$$\left.+\int_{\partial\Omega_i(t)}\|p_i-q\|_2^2\phi(q,t)\frac{\partial q}{\partial t}*n(q)dq\right) \tag{5}$$

$$\dot{p}_i=-\frac{1}{2}\left(2k_0+\frac{1}{m_i r(p_i,c_i)}(a_i+b_i)\right)(p_i-c_i) \tag{6}$$

ただし，m_iはエージェントiのボロノイ領域質量，c_iはエージェントiのボロノイ重心位置，$n(q)$はローカルポリトープの境界に対して垂直かつ外向きの単位ベクトル，k_0は制御ゲインで設計パラメータである。また(6)式において，a_i，b_i，rの定義を以下に示す。

$$a_i=\int_{V_i(P,t)}\|p_i-q\|_2^2\left|\frac{\partial}{\partial t}\phi(q,t)\right|dq$$

$$b_i=\int_{\partial\Omega_i(t)}\|p_i-q\|_2^2\phi(q,t)\left|\frac{\partial q}{\partial t}*n(q)\right|dq$$

$$r(p_i,c_i)=\begin{cases}\|p_i-c_i\|_2^2, & \|p_i-c_i\|\geq C_1\\ C_1^2, & \|p_i-c_i\|<C_1\end{cases}$$

$\|p_i-c_i\|\geq C_1$であるとき，(5)式に(6)式を代入すると(7)式が成立し，設計パラメータであるk_0が正であれば，リアプノフ関数$J(P,\ t)$の時間微分が負であることが示される。また，$J(P,\ t)$は密度関数$\phi(q,t)>0$であるとき，$J(P,t)\geq 0$が成り立ち，下界である。さらにリアプノフ関数$J(P,\ t)$の時間微分の一様連続性は，リアプノフ関数$J(P,\ t)$の二階微分が有界であることから示すことができる。

以上より，$\|p_i-c_i\|\geq C_1$であれば，Barbalat の補題より，評価関数の時間微分が 0 に収束し，各エージェントがボロノイ重心に収束することが保証される。$\|p_i-c_i\|\geq C_1$の条件は，各エージェントがボロノイ重心から距離C_1の球の外側に存在する時であるため，各エージェントは必ずボロノイ重心から距離C_1の球内に収束することが示された。C_1は設計パラメータであるため，収束精度は任意に設定可能である。

$$\frac{d}{dt}J(P,t)\leq\sum_{i\in V}\left(2m_i\dot{p}_i{}^{\top}(p_i-c_i)+a_i+b_i\right)$$
$$=\sum_{i\in V}\left(2m_i\left(-\frac{1}{2}\left(2k_0+\frac{1}{m_i r(p_i,c_i)}(a_i+b_i)\right)(p_i-c_i)^{\top}\right)(p_i-c_i)+a_i+b_i\right)$$
$$=-2k_0\sum_{i\in V}m_i\|p_i-c_i\|_2^2 \tag{7}$$

(6)式は，従来の被覆制御則からa_i,b_iの項が追加された形となっている。a_iは密度関数の変化を，b_iはローカルポリトープの移動をそれぞれ補償するために加えられた項であり，密度関数が大きく変化するほど，ローカルポリトープが大きく移動するほど，ゲインを大きくすることで各時刻の目標位置であるボロノイ重心に素早く追従することを可能にしている。また，収束精度を向上すべくC_1を小さくすることは，制御ゲインを大きく設定することを意味している。

本報で提案するフォーメーション制御則(6)式は，従来の被覆制御手法に対して，a_iを追加する

ことでフォーメーション変更を実現し，b_iを追加することでローカルポリトープの移動，つまり追尾対象への追従を実現することができるようになった。

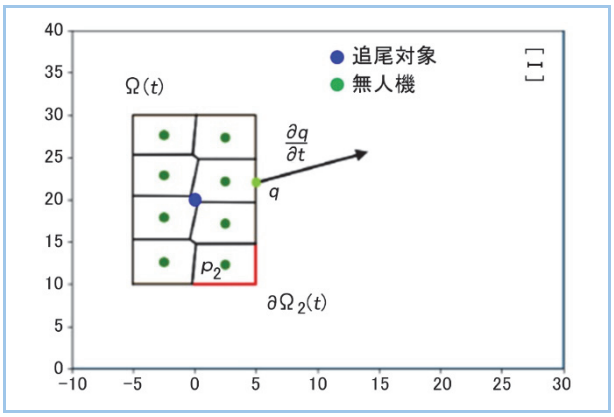


図2 本研究で定義するローカルポリトープのイメージ

3. 移動体のダイナミクスを考慮したフォーメーション収束保証

本報では，2 章で提案したフォーメーション制御器，参考文献(3)を適用した衝突回避制御器を接続し，図 3 に示す階層的な制御器を設計する。目標速度に追従するための十分な応答性を得られる位置姿勢制御器を設計可能であることを前提とし，開発したフォーメーション制御器では移動体が質点系であることを仮定している。一方で，実際の速度応答には遅れが存在するため，設計したフォーメーション制御器における安定性・収束性を保証できない。

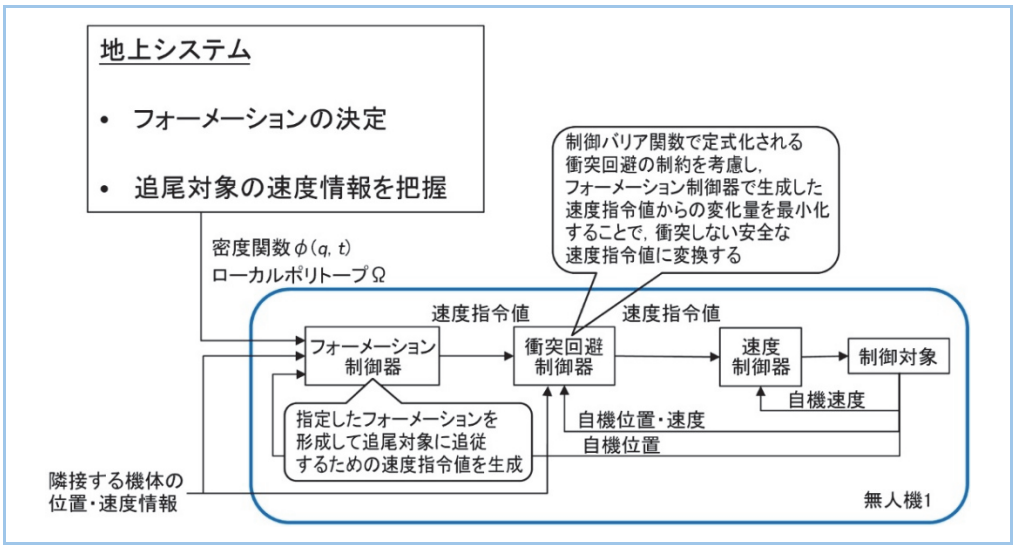


図3 本研究で提案する制御システム構成

本報ではシステム全体の収束性を保証するために，受動性[5]の概念を導入した。2 章より，フォーメーション制御器の収束性は保証されており，衝突回避制御器は 2 重積分系のダイナミクスを仮定していることから[3]受動性が保証されている。このとき，速度制御と制御対象を併せた下位システムが受動的であればシステム全体が受動的であるといえる[5]。このとき，質点系で構築したフォーメーション制御において保証される収束性は，ダイナミクスを考慮した系においても保証される[5]。以上より，フォーメーション制御と各移動体のダイナミクスを独立に考えることができるため，異なるダイナミクスを持つ移動体群に対しても，同じフォーメーション制御則を適用できる。

受動性とは，時刻 0～t のエネルギー増加量が注入量より少ない＝エネルギーの消耗を伴う系であることを意味する。任意の指令値u_iを印加した時の出力y_iにおいて，$\int_0^t y_i^\top(\tau)u_i(\tau)d\tau \geq \beta$を満たす正数 β が存在するとき，そのシステムの受動性が示される。本報では，次章の実機検証で

使用する無人車両に対して，図 4 に示すように任意の速度指令値を入力，車両の実速度を出力とする系の受動性を確認することで，下位システムの受動性を示した。

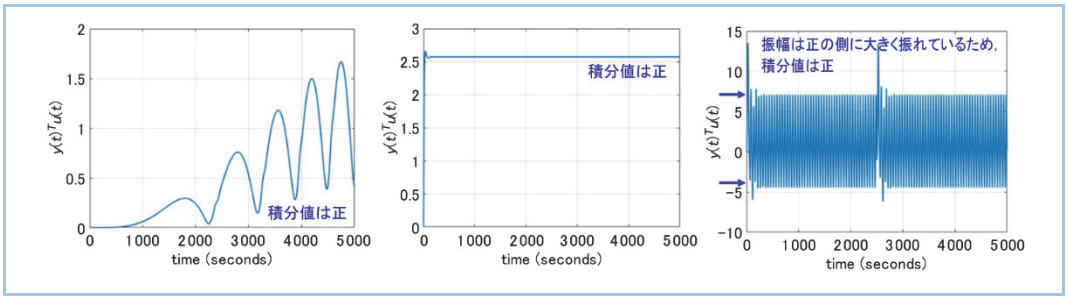


図4　本研究の検証で使用する制御対象の受動性の確認
左：チャープ信号を印加，中：一定値を印加，右：正弦波を印加し，その時の実速度$y(t)$を用いて$y(t)^{\mathrm{T}}u(t)$を算出した結果を示す。これらの積分値はいずれも正であり，$\int_0^t y_i^{\mathrm{T}}(\tau)u_i(\tau)\,d\tau \geq -\beta$を満たす正数$\beta$が存在するといえるため，速度制御器と制御対象を併せた下位システムの受動性が示された。

4. 検証結果

4.1　シミュレーション検証

2 章で開発したフォーメーション制御手法の妥当性を確認すべく，制御対象は質点系を仮定したシミュレーション検証を実施した。密度関数は一様分布とし，10×20m のローカルポリトープを領域内で移動させた結果を図 5 に示す。開発手法では，ローカルポリトープが移動してもエージェントはローカルポリトープ内で均一に分布していることが分かる。一方で，従来の被覆制御を使用すると，ローカルポリトープの移動に追従できず，エージェントの分布が不均一になっていることが分かる。(6)式の制御則において，収束させる範囲のパラメータC_1を変化させたケースと従来の被覆制御を使用した場合のフォーメーション誤差を比較した結果，従来の被覆制御手法が最も精度が悪く，開発手法ではC_1を小さくするほど誤差が小さくなっていることが確認できた。

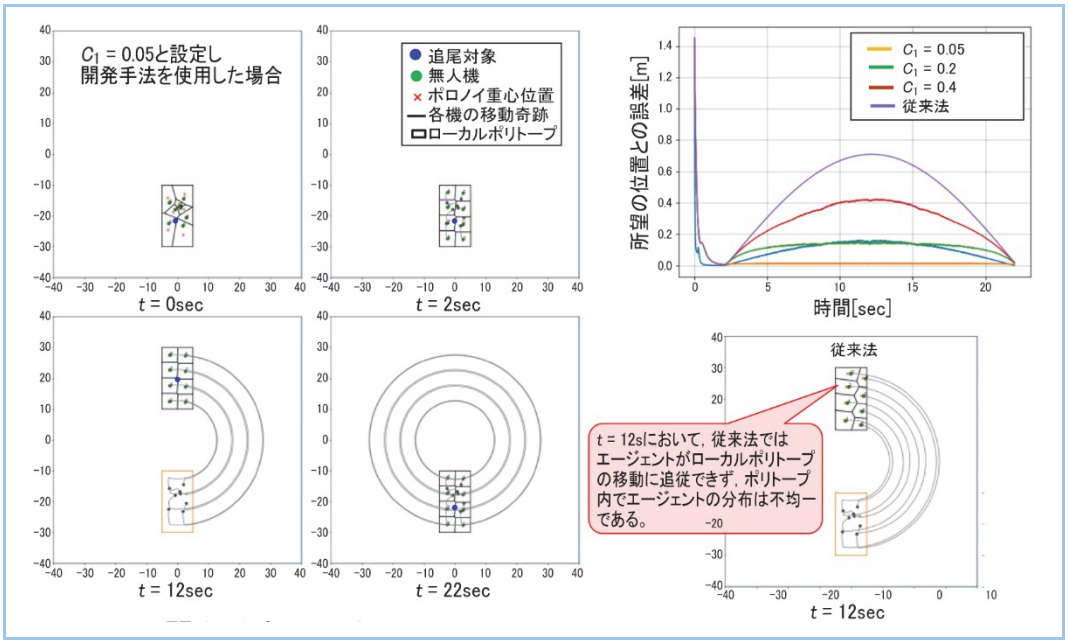


図5　開発手法によるシミュレーション検証結果
左：0, 2, 12, 22sec でのエージェントの位置を示す。
右上：開発手法と従来法の誤差比較
右下：左図と同じシミュレーション条件にて従来法で制御した場合の結果

4.2　実機検証

2 章で開発したフォーメーション制御手法の有効性を，無人車両を用いた実機検証により示した。図 6 に示すとおり，5 機の無人車両を使用し，円形→一列→V 字にフォーメーション変更しな

がら広い領域を移動できることを確認した。図 7 では 5 機のうち 1 機が途中で群から離脱・合流した場合にも残った機体のみで柔軟にフォーメーションを再形成できることを確認した。図 8 では全方向移動体であるオムニホイールの緑の機体と，ユニサイクルモデルの紫の機体が混在した群に対しても，同じ制御器を使用してフォーメーションを達成できていることを確認した。

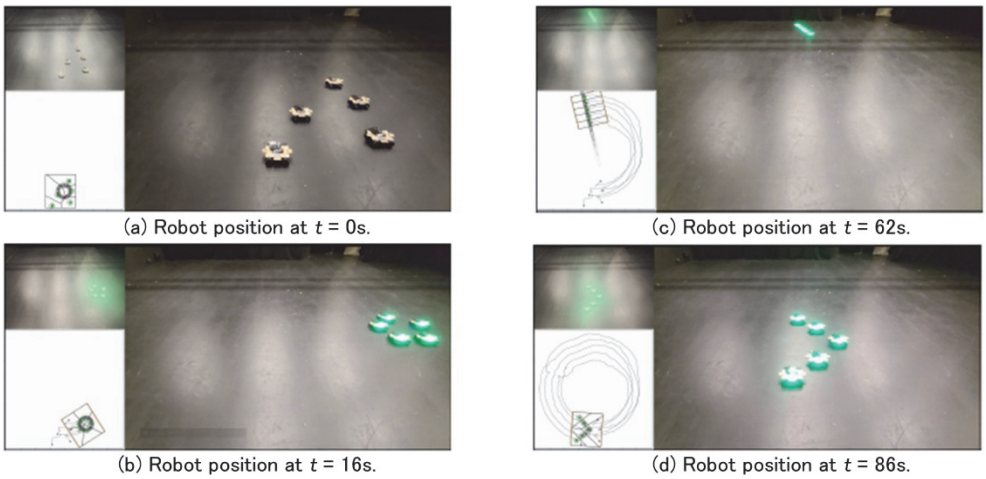


図6　開発手法による実機検証結果（フォーメーション変更）

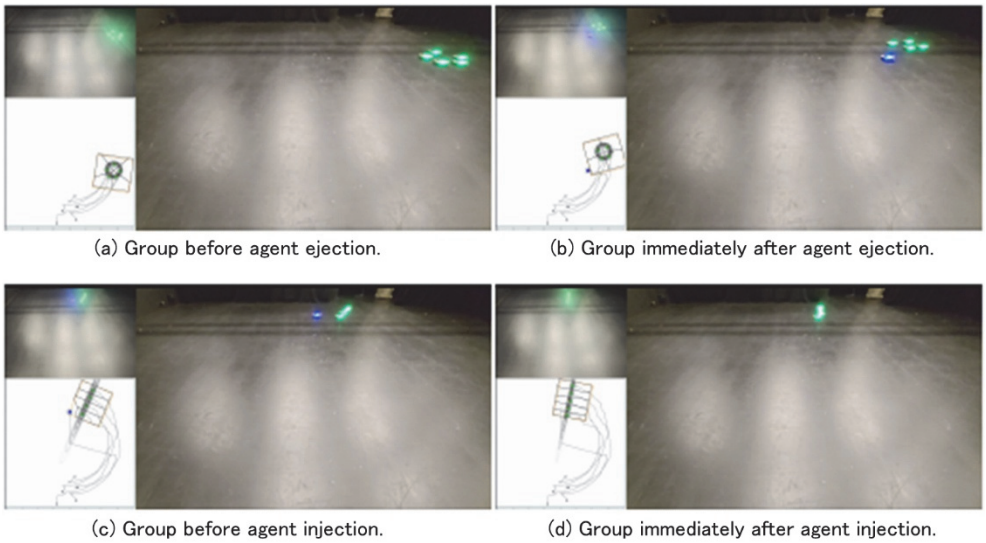


図7　開発手法による実機検証結果（機体の離脱/合流）

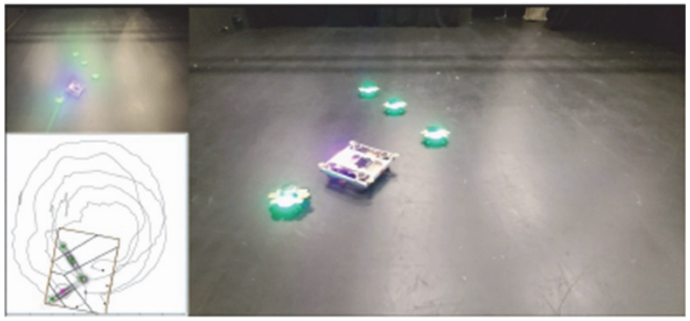


図8　開発手法による実機検証結果（ダイナミクスの違い）

5. まとめ

複数移動体が衝突せずに指定のフォーメーションを形成しながら対象を追尾し，運用中のフォーメーション変更・機数変化に柔軟に対処可能なフォーメーション制御手法を開発した。具体的

には，被覆制御を時変なフォーメーション・領域に適用できるように拡張し，その収束性を理論的に保証した。

5 機の無人車両を用いた実機検証において，広い領域を移動しながら，フォーメーション形状を変更し，走行中に一部機体が群から離脱/合流した場合にもフォーメーションを自律的に再形成できることを示した。

本報の成果は，無人移動体製品全般のミッション遂行能力向上に貢献できるものと考えられ，実用化を進める。

本報で開発した手法は，メルボルン大学との共同研究により得られた成果です。共同研究における多大なご協力ご助言をいただいたメルボルン大学の Chirs Manzie 教授，Joshua Keene 研究員，および研究グループに厚く御礼申し上げます。

参考文献

(1) Olfati-Saber, R. et al., Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 49 No. 9 (2004) pp. 1520-1533
(2) Cortes, J. et al., Coverage Control for Mobile Sensing Networks, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 20 No. 2 (2004) pp. 243-255
(3) Wang, L. et al., Safety Barrier Certificates for Collisions-Free Multirobot Systems, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 33 No. 3 (2017) pp. 661-674
(4) Khalil, H. K. Nonlinear Systems, Prentice Hall, (2002)
(5) 申鉄龍，<<第 11 回>> 受動性設計の基礎，計測と制御，第 43 巻，第 5 号 (2004)