

システム制御工学シリーズ 22

マルチエージェントシステムの制御

博士(工学) 東 俊一
博士(情報学) 永原 正章 編著

Ph.D. 石井 秀明
博士(工学) 林 直樹
博士(情報学) 桜間 一徳 共著
博士(情報学) 畑中 健志

コロナ社

システム制御工学シリーズ編集委員会

編集委員長 池田 雅夫（大阪大学・工学博士）
編集委員 足立 修一（慶應義塾大学・工学博士）
（五十音順） 梶原 宏之（九州大学・工学博士）
杉江 俊治（京都大学・工学博士）
藤田 政之（東京工業大学・工学博士）

（2007年1月現在）

□□□□□□□□□ 刊行のことは □□□□□□□□□□

わが国において、制御工学が学問として形を現してから、50年近くが経過した。その間、産業界でその有用性が証明されるとともに、学界においてはつねに新たな理論の開発がなされてきた。その意味で、すでに成熟期に入っているとともに、まだ発展期でもある。

これまで、制御工学は、すべての製造業において、製品の精度の改善や高性能化、製造プロセスにおける生産性の向上などのために大きな貢献をしてきた。また、航空機、自動車、列車、船舶などの高速化と安全性の向上および省エネルギーのためにも不可欠であった。最近は、高層ビルや巨大橋梁きょうりょうの建設にも大きな役割を果たしている。将来は、地球温暖化の防止や有害物質の排出規制などの環境問題の解決にも、制御工学はなくてはならないものになるであろう。今後、制御工学は工学のより多くの分野に、いっそう浸透していくと予想される。

このような時代背景から、制御工学はその専門の技術者だけでなく、専門を問わず多くの技術者が習得すべき学問・技術へと広がりつつある。制御工学、特にその中心をなすシステム制御理論は難解であるという声をよく耳にするが、制御工学が広まるためには、非専門のひとにとっても理解しやすく書かれた教科書が必要である。この考えに基づき企画されたのが、本「システム制御工学シリーズ」である。

本シリーズは、レベル0(第1巻)、レベル1(第2～7巻)、レベル2(第8巻以降)の三つのレベルで構成されている。読者対象としては、大学の場合、レベル0は1,2年生程度、レベル1は2,3年生程度、レベル2は制御工学を専門の一つとする学科では3年生から大学院生、制御工学を主要な専門としない学科では4年生から大学院生を想定している。レベル0は、特別な予備知識なしに、制御工学とはなにかが理解できることを意図している。レベル1は、少

し数学的予備知識を必要とし、システム制御理論の基礎の習熟を意図している。レベル2は少し高度な制御理論や各種の制御対象に応じた制御法を述べるもので、専門書的色彩も含んでいるが、平易な説明に努めている。

1990年代におけるコンピュータ環境の大きな変化、すなわちハードウェアの高速化とソフトウェアの使いやすさは、制御工学の世界にも大きな影響を与えた。だれもが容易に高度な理論を実際に用いることができるようになった。そして、数学の解析的な側面が強かったシステム制御理論が、最近では数値計算を強く意識するようになり、性格を変えつつある。本シリーズは、そのような傾向も反映するように、現在、第一線で活躍されており、今後も発展が期待される方々に執筆を依頼した。その方々の新しい感性で書かれた教科書が制御工学へのニーズに応え、制御工学のよりいっそうの社会的貢献に寄与できれば、幸いである。

1998年12月

編集委員長 池 田 雅 夫

□□□□□□□□□ ま え が き □□□□□□□□□

マルチエージェントシステムとは、複数のエージェントの局所的な相互作用をもとに大域的な機能を発現するシステムのことである。近年、大きな注目を浴びているセンサネットワーク、スマートグリッド、高度交通システム、システムバイオロジなどへの応用を視野に入れ、システム制御分野においては2000年以降、最も重要な研究対象に成長してきた。

一方で、それを学ぶための基礎事項や、一連の研究成果を体系的にまとめた書籍は、洋書に限られており、日本語を母語とする学生にとっては、そのことが学習を始める上での障害となっている。また、さまざまな角度から数多くの研究成果が発表されているために、新たに参入を目指す研究者や技術者も、どこから手をつけるべきかがわかりにくい。

このような背景のもと、本書は、マルチエージェントシステムをシステム制御の視点から体系的にまとめた「初の邦書」として企画された。特に、今後、マルチエージェントシステムの制御を、勉強してみたい、使ってみたい、研究してみたい、と考える読者に、「これだけは最初に押さえておきたい事項」を厳選して伝えることを目的としている。また、上述のように、すでに多くの研究成果が得られている一方で、根本的な部分は共通しており、それを理解しておくことによって最先端の研究へも容易にアクセスできるようになる。本書は、この点にも十分に配慮している。

本書を読むための予備知識としては、線形代数と現代制御論が必要である。しかし、線形代数は大学の教養課程レベルのもの、現代制御論は線形システムの基本的な性質だけである。このように、多くの予備知識を前提としない点も、本書の特徴の一つである。

本書は、システム制御分野で、現在、マルチエージェントシステム研究の最

前線にいる6人の若手研究者によって執筆されている。全5章からなり、その構成は以下のとおりである。

- | | | |
|----|-------|-----------------|
| 1章 | 序論 | 石井秀明 |
| 2章 | 数学的基礎 | 林直樹, 永原正章, 桜間一徳 |
| 3章 | 合意制御 | 桜間一徳 |
| 4章 | 被覆制御 | 東俊一 |
| 5章 | 分散最適化 | 畑中健志 |

1章では、マルチエージェントシステムの背景や応用範囲を解説し、これをもとに諸課題を概説する。2章は、ネットワークで結合された動的システムを扱うにあたって数学的な道具立てとなる線形代数と代数的グラフ理論を解説する。3章では、マルチエージェントシステムの基本的な制御方法である合意制御について説明する。4章では、発展的な制御方法である被覆制御について述べ、最後に5章では、集中的な方法では解けないような大規模な最適化問題を、マルチエージェントシステム上で分散的に解く方法を解説する。1~3章を基礎編、4章と5章を発展編と位置付けているが、実際には、1章、2章の2.2.1~2.2.3項、3章の3.1節と3.2節を読めば、マルチエージェントシステムの制御の全体像と基本的な理論が理解できるようになっている。初学者は、最初にこれらの部分を手を動かしながら読み進め、その後、残りの部分に進むことを勧める。

本書は、システム制御情報学会会誌「システム/制御/情報」(2013年5月~2014年5月)に掲載された連載講座「マルチエージェントシステムの制御」^{1)~8)}†をもとにしている。出版を快くご許可くださったシステム制御情報学会にお礼を申し上げたい。また、「システム制御工学シリーズ」の編集委員会の委員各位、特に、編集委員長である大阪大学池田雅夫先生、企画に際してご尽力くださった京都大学杉江俊治先生に感謝の意を表したい。さらに、草稿を読んでご意見をいただいた、大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻インテリジェントシステム領域の浅井俊紀氏、安部洸暉氏、岩瀬真司氏、加藤雅也氏、瀬川昂平氏、野村健二氏、藤村勇人氏、三宅志織氏、村西悠氏、鳥取大学大学院工

† 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

学研究科機械宇宙工学専攻 制御・ロボティクス研究室の太田洋平氏，大塚貴浩氏，小阪悠介氏，西垣建志氏にお礼を申し上げる。最後に，出版に際してお世話になったコロナ社にも謝意を表したい。

2015年7月

著者を代表して
東 俊一, 永原正章

本書で用いる記法

本書を通して、以下の記法を用いる。

- \mathbb{R} : 実数の集合
- \mathbb{N} : 自然数の集合 (0 を含む)
- \mathbb{C} : 複素数の集合
- \mathbb{R}_+ : 非負実数の集合
- j : 虚数単位
- $|z|$: 複素数 z の絶対値
- $\operatorname{Re}(z)$: 複素数 z の実部 (Re で実軸を表すこともある)
- $\operatorname{Im}(z)$: 複素数 z の虚部 (Im で虚軸を表すこともある)
- \emptyset : 空集合
- $S^{m \times n}$: 集合 S の要素で構成される $m \times n$ 行列の集合
- S^n : 集合 S の要素で構成される n 次元列ベクトルの集合
- $\operatorname{int}(S)$: 集合 S の内部
- $\operatorname{bd}(S)$: 集合 S の境界
- $|S|$: 有限集合 S の要素数
- $\dim(S)$: 線形空間 S の次元
- S^\perp : 線形空間 S の直交補空間
- $S_1 \subset S_2$: 集合 S_1 は集合 S_2 の真部分集合 ($S_1 \neq S_2$)
- $S_1 \subseteq S_2$: 集合 S_1 は集合 S_2 の部分集合
- $S_1 \cup S_2$: 集合 S_1 と S_2 の和集合
- $\bigcup_{i=1}^n S_i$: 集合 S_1, S_2, \dots, S_n の和集合
- $S_1 \cap S_2$: 集合 S_1 と S_2 の共通集合
- $\bigcap_{i=1}^n S_i$: 集合 S_1, S_2, \dots, S_n の共通集合
- 0 : 零ベクトル
- $\mathbf{1}_n$: 要素がすべて 1 の n 次元列ベクトル
- $\langle x, y \rangle := y^\top x$: 二つのベクトル $x, y \in \mathbb{R}^n$ の標準内積 (またはユーク

リッド内積)

- $\|x\| := \sqrt{\langle x, x \rangle}$: ベクトル $x \in \mathbb{R}^n$ のユークリッドノルム
- $x \perp y$: ベクトル $x, y \in \mathbb{R}^n$ が直交する, すなわち $\langle x, y \rangle = 0$
- $\text{span}(x_1, x_2, \dots, x_n)$: ベクトル x_1, x_2, \dots, x_n が張る線形空間
- I_n : $\mathbb{R}^{n \times n}$ の単位行列 (添え字 n はサイズが明らかなき場合は省略する)
- 0 : 零行列
- $[a_{ij}]$: 第 (i, j) 要素が a_{ij} である行列
- A^\top : 行列 A の転置
- $\text{abs}(A)$: 行列 $A = [a_{ij}]$ に対して $\text{abs}(A) := [|a_{ij}|]$
- $\ker(A)$: 行列 A の零化空間 (カーネル)
- $\text{imag}(A)$: 行列 A の像空間 (イメージ)
- $\text{rank}(A)$: 行列 A の階数
- $\det(A)$: 正方行列 A の行列式
- A^{-1} : 正方行列 A の逆行列
- $\text{diag}(A_1, A_2, \dots, A_n)$: 行列 A_1, A_2, \dots, A_n を対角ブロックに持つブロック対角行列
- $\rho(A)$: 正方行列 A のスペクトル半径
- δ_{ij} : クロネッカーのデルタ, すなわち $i = j$ のとき $\delta_{ij} = 1$, それ以外で $\delta_{ij} = 0$
- $o(g(x))$: ランダウの記号 (連続関数 $f(x), g(x)$ に対して, $\lim_{x \rightarrow a} |f(x)/g(x)| = 0$ が成り立つとき, $f(x)$ は $x = a$ で $o(g(x))$ であるという)
- $\frac{\partial J}{\partial x}(x)$: 微分可能な関数 $J : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ の勾配 (列ベクトル), すなわち

$$\frac{\partial J}{\partial x}(x) := \left[\frac{\partial J}{\partial x_1}(x) \quad \frac{\partial J}{\partial x_2}(x) \quad \dots \quad \frac{\partial J}{\partial x_n}(x) \right]^\top$$

- $\text{dom}(J)$: 関数 $J : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ の実行定義域 $\{x \in \mathbb{R}^n : J(x) < \infty\}$
- $x(t) \rightarrow \mathcal{S}$: 関数 $x(t)$ の集合 \mathcal{S} への収束 (おのおのの正数 ε に対して, ある正数 τ が存在し, 任意の $t \in [\tau, \infty)$ において $\inf_{z \in \mathcal{S}} \|x(t) - z\| < \varepsilon$)
- $x[k] \rightarrow \mathcal{S}$: ベクトル列 $x[k]$ ($k = 0, 1, \dots$) の集合 \mathcal{S} への収束

1. 序 論

1.1	マルチエージェントシステムとは	1
1.2	動物の協調行動モデル：ボイド	2
1.3	ビークル群の協調制御	4
1.4	センサネットワーク	7
1.5	エージェント間の情報交換	11
1.6	ネットワーク構造のモデル化	14
1.7	関連分野におけるマルチエージェントシステム	16

2. 数学的基礎

2.1	線形代数の基礎	21
2.1.1	有限次元実ベクトル空間と行列	21
2.1.2	行列の固有値	27
2.1.3	行列指数関数	36
2.2	代数的グラフ理論	39
2.2.1	グラフ	39
2.2.2	グラフの演算	46
2.2.3	グラフラプラシアン	49
2.2.4	ペロン行列	61
2.2.5	重み付きグラフの場合	68
	演習問題	77

3. 合意制御

3.1	合意問題	80
3.1.1	ネットワークと分散制御器	80
3.1.2	合意の定義と種類	82
3.2	連続時間システムの合意制御	87
3.2.1	合意を達成するための分散制御器	87
3.2.2	無向グラフの場合	89
3.2.3	一般のグラフの場合	96
3.3	離散時間システムの合意制御	105
3.4	スイッチングネットワークにおける合意制御	110
3.4.1	離散時間システムの場合	110
3.4.2	連続時間システムの場合	115
	演習問題	119

4. 被覆制御

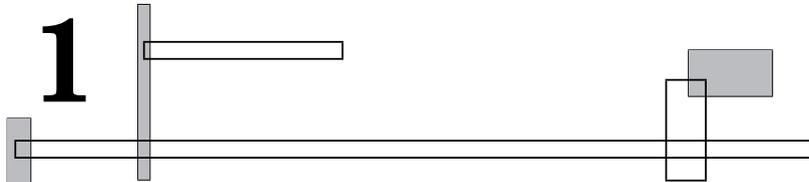
4.1	被覆問題	122
4.2	ボロノイ図と勾配系	125
4.2.1	ボロノイ図	125
4.2.2	勾配系	131
4.3	被覆制御	133
	演習問題	140

5. 分散最適化

5.1	分散最適化問題	142
5.2	最適化の基礎	147
5.2.1	劣勾配法	147

5.2.2	双対問題と劣勾配法による解法	150
5.3	双対分解による分散最適化	153
5.3.1	問題設定	153
5.3.2	双対分解による分散最適化	156
5.4	合意制御による分散最適化	160
5.4.1	問題設定	160
5.4.2	制約無し問題の場合	163
5.4.3	制約付き問題の場合	166
	演習問題	167
	 付 録	 169
A.1	動的システムの安定性	169
A.1.1	リアプノフ安定性	169
A.1.2	ラサールの不変性原理	171
A.2	定理と補題の証明	171
A.2.1	定理 2.21(i) の証明と (ii) の必要性の証明	171
A.2.2	定理 2.29 の必要性の証明	176
A.2.3	定理 2.30 の証明	177
A.2.4	定理 3.1(iii) の証明	178
A.2.5	定理 3.2(iii) の証明	178
A.2.6	補題 4.4 の証明	179
A.2.7	定理 5.6 の証明	182
A.2.8	補題 A.2 の証明	188
	 引用・参考文献	 195
	 演習問題の解答	 199
	 索 引	 217

1



序論

本書では、どのようなシステムをマルチエージェントシステムとして扱い、その制御を考える際にはどのような挙動を実現することを目指すのか。本章では、まず代表的な応用例である自律移動型ビークル群やセンサネットワークにおける分散制御問題を見ることで、こうしたシステムが持つ特徴や課題を考える。その上で、マルチエージェントシステムをより一般的に扱うために、エージェント間の情報交換や相互作用のあり方、その結果として得られるネットワーク構造を表すグラフによるモデル化について説明する。これらを通じて、マルチエージェントシステムの考え方とその世界の広がりを感じ、次章以降で理論的な基礎を学ぶ際の動機付けとしてもらいたい。

1.1 マルチエージェントシステムとは

多数の自律的に意思決定を行うことのできる構成要素からなるシステムをマルチエージェントシステム (multi-agent system) と呼ぶ。各要素をエージェント (agent) と呼び、それらが相互に影響を及ぼし合うことで、システム全体のレベルでの振る舞いが定まる。特に工学的なシステムにおいては、エージェント間で共通の目標を達成することが目的となる。

近年のセンサやアクチュエータ技術の向上により、小型機器であっても無線通信や一定の計算を行えるものが比較的安価に手に入るようになった。制御システムにおいてもネットワーク化が可能となり、大規模・複雑化してきた結果、そうしたシステムをどのように協調的に制御すべきかが、制御工学の観点からも新たな研究対象となってきた。そこでは、特定の制御タスクを実行したいと

きに、どのような相互作用、情報交換、あるいは分散制御アルゴリズムを実行すれば達成できるかが重要な課題となっている。

近年、こうした課題は、制御工学の分野で多くの研究者の関心を集め、熱心に研究がなされてきた^{9)~12)}。その理由の一つに、関連する応用分野が非常に幅広いことが挙げられる。従来、制御工学が扱ってきた応用分野に近いものでは、自律移動型ビークル群やセンサネットワークがある。より最近では、電力ネットワーク、システムバイオロジ、あるいは社会的ネットワークなどの関連する分野に深く関わる形で発展している。

本書の目的は、こうしたマルチエージェントシステムの制御に関する初等的な内容を、システム制御の観点から体系立てて紹介することである。その導入として、以下ではマルチエージェントシステムの代表的な応用や関連する課題についてまとめる。

1.2 動物の協調行動モデル：ボイド

自然界における協調制御の代表的な例として、魚や鳥の群れ行動がある。ここでは多数の個体が、集まる、まとまって移動する、フォーメーションを組むなど、社会的な集団行動をとることができる。こうした現象は、マルチエージェントシステムの研究を行う際の強い動機付けとなり、目指すべき目標とされてきた。個々の動物（エージェント）がどのような意思決定を行っているかを考える上で、米国の研究者レイノルズによるコンピュータグラフィックスのボイド (Boids)¹³⁾ はよく知られ、多くの示唆を与えてきた。本節では、その概要を説明する。

複数のエージェントが一定速度で移動している状況を考える。進行方向については、おのおののエージェントは、位置的に近い他のエージェントの行動を考慮して決定するとしよう。どのようなルールに基づいて進行方向を決めれば、すべてのエージェントが同一の方向に向くような協調行動を示すことができるだろうか。また、その際に考慮すべき他のエージェントは、魚や鳥であれば視

覚で感知できる範囲内にいる仲間程度であろうから、図 1.1 に示すように、一定のセンサレンジ内にいるものとなる。

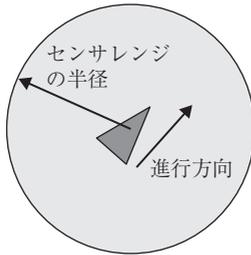


図 1.1 ボイドにおけるエージェント

むしろ、グループに指揮をとるリーダーがいれば、マルチエージェントシステムのモデル化は比較的簡単である。しかし、ここではリーダーの存在は仮定せず、全エージェントが対等に同一のルールに従って行動するものとしよう。さらに、ルールといっても（動物であるので）可能な限り単純なものを想定したい。ボイドのモデルでは、図 1.2 に示す三つのルール、すなわち

- 衝突回避：エージェント同士が衝突しないよう、混雑してきたら離れる方向に移動する
- 整列：レンジ内の全エージェントの進行方向の平均にあたる方向に向きを変える
- 結合：レンジ内の全エージェントの位置の重心にあたる場所の方向へ移動する

が採用された。

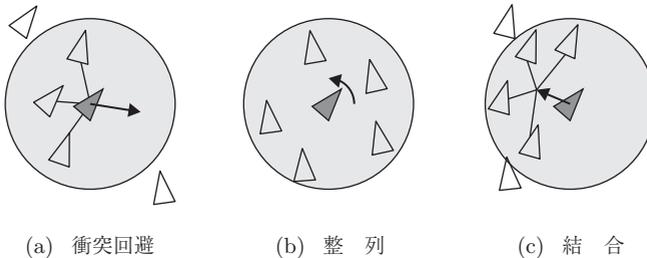


図 1.2 ボイド：三つのルール

上の三つのルールはいずれも、各エージェントが自身の周りで局所的に得られる情報のみを用いて、つまりシステム全体の情報を知ることなく、従うことができるものとわかる。このモデルを用いてシミュレーションを行うと、エージェントが群れを作って移動する様子を再現することができる。これは、単純なルールに従うエージェントが全体として目的を持った振る舞いを示す興味深い結果となっている。

1.3 ビークル群の協調制御

動物のグループ行動に近いイメージの工学的な応用として、地上や空中を自律的に移動できる車両や飛行体などからなるビークル群がまとまって移動してタスクを実行するものが考えられよう。特に航空宇宙の分野では幅広い応用が期待されている。本節では、近年検討されている方向性をいくつか紹介する^{12), 14), 15)}。

(1) 人工衛星群による干渉計

その一つに人工衛星のフォーメーションフライト (formation flight) がある。これは、従来大きな衛星が1台で行ってきたタスクを、複数の衛星が協調することで実行するものである。宇宙空間にセンサを分散的に配置することで、科学的、軍事的あるいは民生の目的の観測や監視において、観測範囲を広げたり、精度を向上したりできることが知られている。各衛星が小さいため、メリットとして、打ち上げや運用にかかるコストを削減できる点や、タスクの目的変更や故障といった変化へ柔軟に対応できる点が挙げられる。

フォーメーションフライトの一つの応用例として、天文観測で用いられる干渉計を実現する方法について説明しよう¹⁶⁾。干渉計では、複数の望遠鏡を連動させ、得られたデータをまとめて画像処理することで、より精細な天体画像を合成することが可能である。一般に望遠鏡の分解能は口径に依存するが、干渉計測では、2台の望遠鏡を結ぶ線 (基線と呼ばれる) の長さに相当する口径を持つ望遠鏡と同等の解像度が得られる。その実現には、同一の発信源からの電波が、離れた望遠鏡に到達するとき、到達時間に差が生じることを利用する。地

上でも広く使われるが、宇宙空間で実現することで、地球の大気や地理的な条件に影響されることのない観測が可能となる。

このような干渉計で高い観測性能を実現するためには、構成要素である複数の望遠鏡をいかに精度良く配置できるかが重要な課題となる。大きな構造物に望遠鏡を固定する方法も考えられるが、宇宙空間における構造物の大きさには限度がある。その意味でより現実的なのは、図 1.3 に示すように、複数の衛星にそれぞれ望遠鏡を積む方法である。この場合には、図 1.4 のように、衛星同士が相対的な位置を一定に保つ高度なフォーメーション制御の実現が不可欠となる。

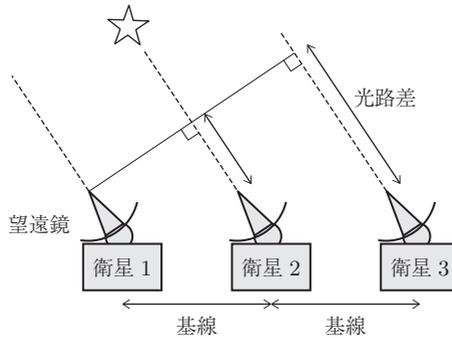


図 1.3 衛星群による干渉計

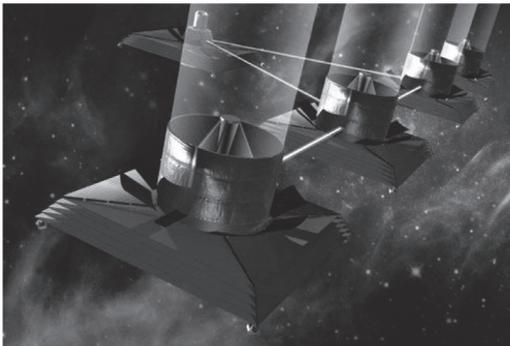


図 1.4 衛星群のフォーメーション制御
(NASA 提供)

衛星の軌道制御には一定の燃料が必要となるため、その制約を守りつつフォーメーションを維持するような軌道設計が行われる。また、衛星数が数十を超える場合には、ある衛星がリーダーとなって集中的に制御をすることは、計算負荷や通信容量の面で難しい。そこで、分散制御型のシステム設計が重要となる。この技術は、2000年頃から米国宇宙航空局（NASA）が太陽系外惑星探査のために積極的に推進したことで注目されたが、その後、予算的な問題で計画は中止になった¹⁷⁾。同様に衛星群を用いた技術として、小型衛星による巨大なアンテナやレーダーの形成が挙げられる。

(2) ビークル群によるアンテナアレイ

人間が行動するのが難しい危険な地域や惑星での調査や捜索において、無人の自律探査車や飛行体が用いられることがある。このときも、タスクに必要な機器類を複数のビークルに分散して載せ、協調した行動をとらせることで、コスト面からのメリットが少なくない。例えば、個々のビークルの積載能力が小さくてすむため、製作や運転にかかるコストが抑えられる。また、ビークル数を増やして冗長性を持たせることで、その一部に故障や事故が起きた場合でも、システム全体として機能が維持できるようになる。

遠隔地においては、操作する側とビークルとの間での交信が重要である。これを保てないと、行動範囲が限定されたり、活動そのものが困難になったりする。例えば、NASAが火星の地表で用いる探査車 Curiosity は、地球と交信する際にいくつかの制約がある。直接通信を行うことが可能であるが、通常は火星を回る人工衛星を通じて交信する。こちらのほうが送信スピードが速く、消費電力も少ないからである。しかし、衛星が探査車の上空にいる時間は、（火星での時間で）1日にたかだか10分程度である¹⁸⁾。

そのような状況では、複数のビークルが一定の形状にフォーメーションを組むことで、無線通信が可能な距離を伸ばせることが知られている^{19), 20)}。これには、図 1.5 に示すアンテナアレイ（antenna array）と呼ばれる通信技術が活用される。おのおののビークルはアンテナを一つしか持っていないため出力も限られるが、複数のアンテナからの出力を合成することで、結果として大



図 1.5 ビークルによるアンテナアレイの形成

きな出力が得られるのである。これは、アンテナ間で電波を発信する位相をずらすことで、一定の方向に指向性を持った電波が生成されることにより達成される。

(3) 合意問題について

このようなアンテナアレイを実現する際に、制御の面で以下の課題がある。第一に、地理的に分散しているビークルを特定のエリアに集合させる必要がある。事前に集合地点を決定せずに、ビークルの初期位置に応じた適切な場所を動的に決めることが望まれる。第二に、集合した後、ビークル群が自律的に所望のフォーメーションを形成し、また、通信が行われる間も環境の影響などによりフォーメーションが乱れないよう維持しなければならない。

3章で見るとおり、こうした問題は一般に**合意問題** (consensus problem) あるいは**ランデブー問題** (rendezvous problem) と呼ばれる基本的なクラスに属する。ここでは、全エージェントが局所的な相互作用を通じて、特定の状態変数について一致することを目指す。ビークルの例では、一致すべき状態は位置となる。また、1.2節で見たボイドでは、(一定速度で移動する) エージェントが進む方向となる。

1.4 センサネットワーク

センサネットワークは広い領域で種々の計測を行うためのシステムである。このシステムにおいて分散的なアルゴリズムの設計、あるいは移動型のセンサノードを考えることで、新しい制御の問題が現れる。

(1) 特徴とシステム構成

センサネットワーク (sensor network) とは、複数のセンサ端末を広範囲に配置し、その環境の温度や音、振動、圧力といった物理量を観測するシステムである²¹⁾。各端末は比較的小型で、おもに電池により駆動され、無線通信機能が付いている。そのため、初期導入が容易であり、構造物や環境、地震のモニタリングなど、さまざまな分野で応用されている。この技術によって、これまで有線を用いていた計測機器を低コスト化したり、従来は難しかった計測を高精度で実行したりすることができるようになった。

例えば、建物や橋梁などの巨大な構造物は、経年劣化により崩壊するなどの危険性が考えられるが、そのような事故を未然に防ぐためには、健全性をモニタリングする必要がある。具体的には、構造物の複数箇所で振動を計測し、そのデータを解析することとなる。このような計測は、加速度センサを積んだ端末を多数設置し、データをワイヤレス通信を介して収集することで実現可能である。

センサネットワークの通信で特徴的なのは、基地局やアクセスポイントを介さずにノード同士で通信が可能な点である。図 1.6 に示すように、直接無線が届かないノード間での通信は、その間にあるノードを介して行われる。これをマルチホップ通信 (multi-hop communication) と呼ぶ。マルチホップ通信は、自律的に通信ルートを形成する必要があるため、新しいタイプの分散ネットワー

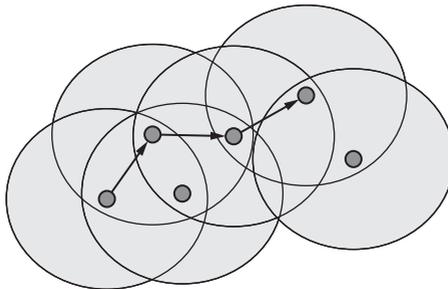


図 1.6 センサネットワークにおける
マルチホップ通信

クとして注目されている。

各ノードの電力は、おもに電池により供給される。なるべく駆動時間を伸ばすためには、電力消費を抑えたシステム設計が求められる。通信や計算、センシングの実行についても、頻度や時間が極力少なくなるようスケジューリングされることになる。特に無線通信は、センサネットワーク全体で消費される電力の大半を占めるとされる。したがって、上で述べたマルチホップ通信を用いる場合も、センサの配置場所を決定する上で通信距離は考慮しなければならない。

センサネットワークのシステム構成には、図 1.7 のように大まかに 2 通りあり、計測データの処理の仕方により決まる。

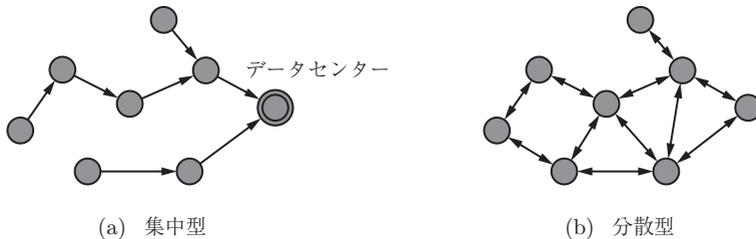


図 1.7 センサネットワークのシステム構成

- 集中型：解析に必要な情報のすべてを特定のノード（データセンター）に集める構成である。大局的な意思決定が可能となるが、データセンターに負荷が集中することになり、そのノード自身、あるいはマルチホップ通信時にそのノードへのルート上にあるノードが故障した場合に弱い。
- 分散型：各ノードは、直接通信できるノードと情報交換を行い、得られたデータをもとに処理を行う。例えば、複数のノードで計測したデータから、本来知りたい物理量のより精確な推定値（全データの平均値など）を求めたい場合に有効な構成となる。

マルチエージェントシステムの制御の観点から興味があるのは、後者の構成を採用した際に有用な分散アルゴリズムを構築することである。計測データをもとに全ノードで特定の値（平均値など）を分散的に求めるような問題は、前

節で述べた合意問題のクラスに属する。

(2) 時刻同期

上で述べた構造物のモニタリングのような応用では、データ解析をする際に、各センサが取得したデータ間の時間的な整合性が非常に重要となる。例えば、どのセンサが先に振動したかを厳密に知らなければならず、そのためには、100 マイクロ秒の単位で時刻を合わせる必要がある。しかし、一般にセンサノードが持つクロックには微小な個体差があるため、時計の進み方が異なっている。したがって、これを補正するために、センサノード間でクロックを高精度に同期する必要がある。電波時計を用いた通常の方法は、誤差が大きく十分ではない。

こうした手法は**時刻同期** (time synchronization) と呼ばれる。センサネットワークのための手法も多く提案されており、やはり集中型と分散型のものに分類される。集中型の手法では、ある特定のノードが持つ時刻を基準として、他のノードにそれを送信する。受信した側はその時刻に同期した上で、近くのノードに次々と時刻信号を送っていく。システム構成は図 1.7 (a) と同様であるが、情報の流れを表す矢印の向きが逆になる。一般には、時刻同期において、このアルゴリズム (flooding time synchronization などと呼ばれる) は通信の遅延に影響を受けやすいが、センサネットワークでは通信距離が短いので問題にならない。

分散型の手法では、図 1.7 (b) のように、各ノードが近くのノードと時刻情報を交換することで同期を実現する^{14), 22)}。時刻同期の場合にも、分散型のほうが、ノードの故障に対してよりロバストな構成であることがわかる。基準ノードを持たず、またメッシュ状に情報交換が行われるためである。この場合も合意問題の手法を用いることで解決できる。

(3) 被覆制御

ここまででは、おもにセンサノードが固定された状況を想定してきたが、一方で、監視などの用途のためにセンサを搭載したロボット群を自律的に移動させるセンサネットワークも注目されている応用である¹¹⁾。**被覆問題** (coverage problem) と呼ばれる問題では、多数のセンサロボットを事前に定められた領域

【あ】	
アンテナアレイ	6
【い】	
入次数	41
【え】	
エージェント	1
【お】	
凹関数	148
重み関数	68
重み付きグラフ	68
親 (頂点の)	45
【か】	
確率行列	25
可視領域	140
完全グラフ	41
【き】	
幾何学的重複度	28
幾何平均合意	83
狭義凸関数	148
強連結	43
距離センサ	12
近 傍	81
【く】	
グラフ	14, 39
グラフラプラシアン	51, 88
蔵本振動子	18

【け】	
計 測	11
ゲルシュゴーリンの定理	32
【こ】	
子 (頂点の)	45
合 意	82
合意集合	84
合意速度	85
合意値	83
合意問題	7, 19, 82
勾 配	131
勾配系	131
孤立点	41
【さ】	
最急降下法	132
最小生成木構成問題	19
最小値合意	83
最大次数	41
最大値合意	83
最適解	143
最適配置問題	129
【し】	
時刻同期	10, 85
自己ループ	49
次 数	42
次数行列	50
指数合意	85
始点 (辺の)	41
始点 (有向道の)	43
重心ボロノイ配置	135

終点 (辺の)	41
終点 (有向道の)	43
主問題	151
【す】	
スイッチングネットワーク	
	110
ステップ幅	141, 149
スペクトル半径	31
スレーターの制約想定	151
【せ】	
静的なネットワーク	16
性能関数	124
積 (グラフの)	46
積分系	87, 106, 133
全域木	45
全域部分グラフ	42
センサネットワーク	8
【そ】	
相違ベクトル	85
双対関数	151
双対定理	151
双対分解	147
双対問題	150
【た】	
代数的重複度	28
単純 (固有値が)	28
【ち】	
頂 点	14, 39
頂点集合	39

【つ】		【ふ】	【み】
通 信	11	フォーメーションフライト	40
【て】		深さ (頂点の)	45
停留点	130	部分グラフ	42
出次数	41	不変集合	171
展開問題	123	分解可能問題	155
電力システム	17	分割 (集合の)	129
【と】		分散アルゴリズム	19
同 期	10, 17	分散最適化問題	143
動的なネットワーク	16	分散推定	18
凸関数	148	分散制御	18
凸集合	148	分散制御器	81
ドロネーグラフ	127	【へ】	
【な】		平均合意	83
長さ (有向道の)	43	平 衡	41
【に】		閉路グラフ	41
二重確率行列	26	ページランク問題	19
【ね】		ベキ (グラフの)	46
根	44	ペロン行列	61, 106
ネットワーク科学	19	ペロンの定理	35
ネットワーク構造	14, 81	ペロン・フロベニウスの 定理	34
【は】		辺	14, 39
半単純 (固有値が ^s)	28	辺集合	39
【ひ】		【ほ】	
ビジョンセンサ	12	ボイド	2
被 覆	123	ポテンシャルゲーム	147
被覆問題	10, 123	ポロノイ図	125, 126
		ポロノイ領域	126
		【ま】	
		マルチエージェント システム	1, 122
		マルチホップ通信	8
		道グラフ	40
		【む】	
		無向グラフ	15, 39
		群れ行動	2
		【ゆ】	
		有向木	44
		有向グラフ	15, 39
		有向道	43
		【ら】	
		ラサールの不変性原理	171
		ランデブー問題	7, 86
		【り】	
		リアプノフ関数	170
		リアプノフの安定性定理	170
		リーダー選挙問題	19
		リーダー・フォロワー合意	83
		隣接行列	49
		隣接集合	81
		隣接する (エージェントが ^s)	81
		隣接する (頂点が ^s)	49
		【れ】	
		劣勾配	148
		劣勾配法	147
		連 結	43
		連結成分	44
		【わ】	
		和 (グラフの)	46

— 編著者・著者略歴 —

東 俊一 (あずま しゅんいち)

1999年 広島大学工学部第2類電気電子工学課程卒業
 2001年 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了(制御工学専攻)
 2004年 東京工業大学大学院情報理工学研究科博士後期課程修了(情報環境学専攻), 博士(工学)
 2004年 日本学術振興会特別研究員
 2005年 京都大学助手
 2007年 京都大学助教
 2011年 京都大学准教授
 現在に至る

永原 正章 (ながはら まさあき)

1998年 神戸大学工学部システム工学科卒業
 2000年 京都大学大学院情報学研究科修士課程修了(複雑系科学専攻)
 2003年 京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了(複雑系科学専攻), 博士(情報学)
 2003年 京都大学助手
 2007年 京都大学助教
 2012年 京都大学講師
 現在に至る

石井 秀明 (いしい ひであき)

1996年 筑波大学第三学群工学システム学類卒業
 1998年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了(応用システム科学専攻)
 2001年 イリノイ大学ポスドク研究員
 2002年 トロント大学電気コンピュータ工学科 Ph.D. 課程修了, Ph.D.
 2004年 東京大学助手
 2007年 東京工業大学准教授
 現在に至る

林 直樹 (はやし なおき)

2006年 大阪大学基礎工学部システム科学科卒業
 2008年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了(システム創成専攻)
 2011年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了(システム創成専攻), 博士(工学)
 2011年 京都大学研究員
 2012年 大阪大学助教
 現在に至る

桜間 一徳 (さくらま かずのり)

1999年 京都大学工学部物理工学科卒業
 2001年 京都大学大学院情報学研究科修士課程修了(システム科学専攻)
 2003年 日本学術振興会特別研究員
 2004年 京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了(システム科学専攻), 博士(情報学)
 2004年 電気通信大学助手
 2007年 電気通信大学助教
 2011年 京都大学特定研究員
 2011年 鳥取大学准教授
 現在に至る

畑中 健志 (はたなか たけし)

2002年 京都大学工学部情報学科卒業
 2004年 京都大学大学院情報学研究科修士課程修了(数理工学専攻)
 2007年 京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了(数理工学専攻), 博士(情報学)
 2007年 東京工業大学助教
 2015年 東京工業大学准教授
 現在に至る

マルチエージェントシステムの制御

Control of Multi-agent Systems

© S. Azuma, M. Nagahara, H. Ishii, N. Hayashi,
K. Sakurama, T. Hatanaka 2015

2015年9月18日 初版第1刷発行

検印省略

編著者 東 俊 一
永 原 正 章
著者 石 井 秀 明
林 直 樹
桜 間 一 徳
畑 中 健 志
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-03322-9 (新宅) (製本:愛千製本所) G

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします