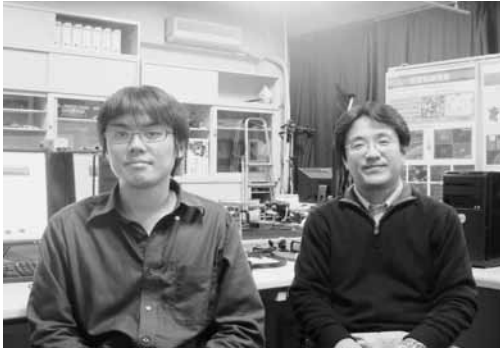




つながりを科学する新たな分野

藤田 政之 研究室～機械制御システム専攻



畑中 健志 助教

藤田 政之 教授

インターネットに代表されるように、私たちの身の回りにある多くのものは互いに何らかのつながりを持っている。だが、今までの科学はものに注目することが多く、その間にあるつながりに注目することは少なかった。

藤田研究室では、つながりの中でも群れの中における動物の個体同士のつながりに注目し、協調制御という制御を研究している。また、視覚は動物にとって重要な役割を果たしていることから、カメラで得られる光学情報を用いた制御の研究も行っている。



制御——ものを自在に操る

今までの科学は、全体を小さな要素へ分類し、その各々について研究することを主として、それら同士のつながりに注目することは少なかった。これは、20世紀の物理学が研究対象のスケールを分子や原子レベルにまで小さくしてきたことに代表される。しかし、藤田先生は、これからは小さな要素同士のつながりへと科学の目を向けることが必要だと考えている。藤田研究室では、つながりを重視した科学であるネットワークサイエンスを制御技術の観点から研究している。

例えば、株価は多くの人の考えが繋がって決定されている。些細なことが起こっただけで株価が大きく変動するのは、人同士の考えが複雑に絡み合っ繋がっているためである。このように、つながりという考えなしに株価の予想をすることは無意味に等しい。そこで、ネットワークサイエンスを研究することが重要となる。

藤田研究室の研究対象である制御とは、ある目的を達成するために、ものを操作することである。例えば、掌に乗せた棒が倒れないように手を動かしてバランスをとることを想像してみよう。これと同じことを機械で行うのが制御の簡単な一例で

ある。この例では、棒を倒さないようにすることが目的で、棒が倒れようとする方向に手を動かしてバランスをとることが制御を達成するための操作である。機械の場合でも同様に、手に相当する部分をうまく動かす必要がある。人間が、五感から得た情報を基に体を動かす脳を持っているように、機械にも入力された情報を基に制御対象を操作する制御部と呼ばれる部分がある。この制御部に入力する値の決め方を制御則といい、制御の種類によって制御則は変わってくる。

制御の一つとして、フィードバック制御というものがある。この制御は、制御対象が出力した制御量と、目標量の二つを利用して制御則を構成するものである。エアコンが設定温度になるまで自動で室温調整を続けるという身近なところでもこの制御は使われている。制御対象をエアコンと見た例では、温度センサが測定した室温と設定温度を基に、エアコンの風の温度や強さを決めている。

本稿では、藤田研究室で行われている研究の中から、ネットワークサイエンスの一つである協調制御と、それに関係のある視覚フィードバック制御という二つの制御を紹介する。

動物の行動を模倣する

協調制御とは、自然界において動物が行っているような協調行動を、機械で再現しようとしたものである。動物の各個体がすぐそばの情報のみを利用することによって、全体としてまとめて行動ができることを協調行動という。その例として、鳥の群れが同じ方向に飛んでいくことが挙げられる。この場合、鳥の一只一只は群れ全体の状況を把握しているのではなく、すぐそばにいる鳥の飛んでいる方向から、自分の飛ぶ方向を決めていると考えられる。この協調行動に注目し、それを再現、応用することを目的として、世界中で協調制御の研究が行われている。以下では、協調制御の中でも代表的な二つの制御である、合意問題と被覆制御問題について紹介する。

合意問題とは、複数の制御対象がそれぞれ持つ数値情報を一定値に収束させる制御である。ここでの制御対象は、位置や速度といった数値情報を測定するセンサ、通信機能を持っており、エージェントとも呼ばれる。また、エージェントが持つばらばらの数値情報が一定値に収束することを「合意する」と呼ぶ。この合意問題を応用すれば、情報を一つに集めて処理するコンピュータなしで空間の状態を合意することができる。この合意問題を用いた一つの例として、釜全体の温度を、温度センサと通信装置を持った複数のヒータで均一に上昇させることを考える。この場合、付近のヒータ同士がそれぞれの近辺の温度を通信により把握していれば、付近のヒータからの熱を考慮し、釜内の温度を一定値に合意させ、均一に変化させることができる。そして、この制御には、ヒータ全てを管理する制御装置を必要としないのだ。

最近では、大規模なシステムが多くの分野で

使われるようになり、全ての情報を一つのコンピュータにまとめて集中管理するのは困難となってきている。しかし、合意問題を使えば、そのような状況下でもシステムの情報を把握することが容易になる。このため、合意問題はまた広く利用されていない新しい分野ではあるが、将来的には有望な分野となりうるのである。

ここからは合意問題を数学的に見ていこう。エージェント同士はネットワークでつながっているが、つながり方は一通りではない。そのつながり方、つまり通信構造をグラフという(図1)。ここでは、矢印が向いている方向にのみ情報が送られるとする。また、グラフの中で通信を行う一つの端末のことをノードという。グラフにはさまざまなつながり方があり、特徴があるグラフには次のように名前がつけられている。

- すべてのノードについて、情報が入ってくる枝の数と出て行く枝の数が等しいグラフを「平衡グラフ」という。
- 任意の互いに異なるノード間で情報を伝える経路が存在するグラフを「強連結グラフ」という(図1(1))。
- 少なくとも一つのノードから任意のノードへと情報を伝える経路が存在するグラフは「全域木を含む」という(図1(2))。

ここでは一つの例として、 n 個のノードの合意について考える。まず、 n 個のうちの i 番目のノードの数値情報を表す時間の関数を $x_i(t)$ 、その一階時間微分である数値情報の変化速度を $u_i(t)$ とおく。合意問題ではノードの役割をエージェントが果たしているため、以下ではノードをエージェントと呼ぶことにする。合意問題の場合では、次式を制御則として用いることでエージェントの持つ数値情報の変化速度を指定する。

$$u_i(t) = \sum_j (x_j(t) - x_i(t)) \quad (1)$$

j は各エージェントに対し直接情報を受け取るエージェントの番号であり、送られてきた情報を自身の制御則へとフィードバックしているのである。この制御則を繰り返し入力することで数値情報を収束させることになる。上記の制御則が入力

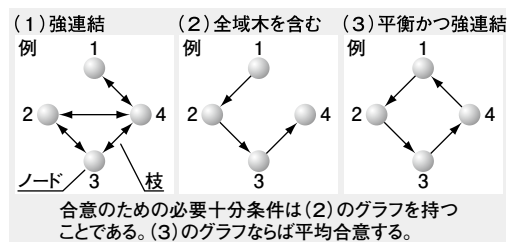


図1 さまざまなグラフ

されたとき、次のようなエージェントの数値情報
と、その変化速度の n 次のベクトルが定まる。

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}$$

このベクトルを利用して、次のような n 次正
方形行列 L がグラフの構造によって定義される。

$$u = -Lx \quad (2)$$

x_i は u_i を時間で積分し、積分定数を加えたも
のであるため、 u_i が x_i を決めているともいえる。
式 (2) から分かるように、 u_i は右辺の形で決まっ
ており、影響を与えるものは L しかない。よって、
エージェントの挙動 x_i は行列 L によって決まる。
つまり、式 (1) を入力したとき、合意が達成され
るかどうかはグラフの構造に依存しており、ど
のようなグラフなら合意が達成されるのかが重要
となる。実は、合意が達成するための必要十分条
件は図 1 (2) のようにグラフが全域木を含むこ
とであるとわかっている。さらにグラフが平衡か
つ強連結ならば、その収束値は、すべてのエー
ジェントが持つ数値情報の初期値の平均となる。こ
のように収束値が初期値の平均となる場合の合意を
平均合意という。

合意問題については数多くの研究がなされてい
る。例えば、枝数が多く、枝がグラフ全体に分散
しているグラフほど合意にかかる時間は短くなる。
そのかわり、グラフがエージェント間の通信
ラグに対して弱くなり、合意することが難しくな
る場合がある。通信ラグとは、エージェントが物
理的に離れているなどの理由で、それらが通信す
るときに発生する遅延時間のことである。一般に、

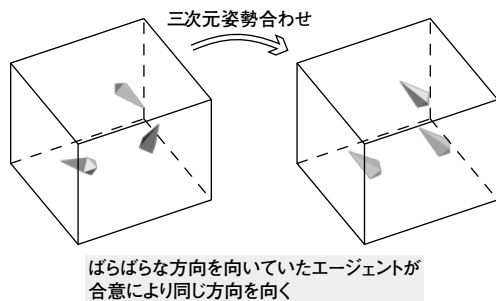


図2 三次元姿勢合わせ

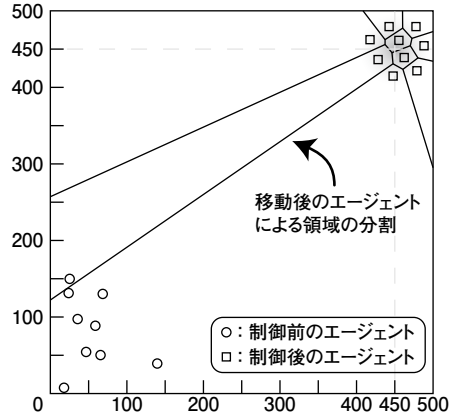


図3 被覆制御問題の一例

早く合意することと、通信ラグに対して強くする
ことは両立できないことがわかっている。

藤田研究室では、ここまで述べた合意問題を三
次元空間内における複数台のエージェントの姿勢
を合わせる制御に適用している (図 2)。この場
合の制御則は式 (1) の制御則を応用し、エー
ジェントが持つ角速度ベクトルについて構成したも
のである。このエージェントの姿勢を合わせる制御
は、宇宙、空中、海中のような、三次元で姿勢を
制御しなければならない環境での姿勢制御に用い
ることができるのだ。

次に、被覆制御問題について紹介する。被覆制
御問題とは、複数のエージェントが、指定された
領域を効率よくカバーするようにエージェントの
配置を決定する制御である。この制御では、周り
のエージェントの位置を自身の位置へとフィード
バックしている。具体的な応用としては、エー
ジェントとして無人の潜水探査艇を複数使い、でき
るだけ広い範囲の海中探査を行うことや、複数の監
視衛星に編隊を組ませて、あるエリアを効率的に
カバーすることなどが挙げられる。

まず、この問題の前提は次のようにしておく。

- 各エージェントは移動可能である。この利
点は、環境の変化への柔軟性を有すること
や耐故障性が必要とされるシステムに適用
できることである。また、あるエー
ジェントが故障した場合にも、他のエー
ジェントが自動的に最適な配置へと移動できるため、
危険な場所でも効率よく監視などが行える。
- 全エージェントに搭載されているセンサは

同じものであり、センサに近い場所ほど高精度の情報得られる。

- 探査する領域に壁などの障害物はなく、エージェントは領域内を自由に移動できる。
- エージェントが担当する領域は、自身のセンサの精度が他のエージェントが持つセンサの精度より高い範囲である。
- 領域内の点には、その点の重要さを表す重要度が設定されている。
- 通信は領域が接したエージェント間のみで可能である。

図3で表される領域では $(x, y) = (450, 450)$ の点で重要度を最大とし、そこから離れるにつれて、距離に対して指数関数的に重要度が小さくなるよう設定している。

これらの前提の上で、効率的な配置を実現するためには、どのようにエージェントを配置すればよいだろうか。例えば、重要度が高い場所の近辺に、必ず一つ以上のエージェントが配置されることが望ましいことは明らかである。しかし、あまりに多くのエージェントが狭い領域に集まった場合、各エージェントの担当領域が狭くなるため、

配置が非効率的なものになってしまう。そこで、重要度が低い地点にもエージェントを配置する必要が出てくる。こうした配置全体の望ましさは一つの関数で表すことができ、この関数を評価関数と呼ぶ。評価関数が最大になるとき、エージェントは最も望ましい配置となる。被覆制御では、制御則がエージェントの移動速度に対し構成される。この制御則を用いて被覆制御を行うと、最終的にエージェントの位置は、それぞれのエージェントが担当する領域の重心に収束することがわかっている。ただし、この場合の重心とは一般的な意味での重心を求める計算で、質量を重要度に置き換えて計算したものである。

協調制御の研究は世界中の大学でも行われているが、動物の行動のようにすぐそばの個体の情報のみを用いて制御を行った場合、実験を成功させることは実際には難しい。そこでGPSのように、簡単に全体の状況を把握できる「神の目」のような視点を補助的に使う場合もある。しかし、藤田研究室は、「神の目」なしに被覆制御の実験を世界で初めて成功させるという成果を上げていることで注目されている。

📷 視覚を制御に取り入れる

私たち人間や動物が周囲の情報を把握する上で、視覚は重要な役割を果たしている。同様に、協調制御システムにおいてもカメラなどから光学情報を得て制御を行う方法が考えられている。藤田先生が考え出した視覚フィードバック制御システムもこれにあたる。ここでは、藤田先生が考えたカメラを用いた視覚フィードバック制御システムについて紹介する。

藤田研究室では、マニピュレータという人間の

腕を模した機械と、その手先に取りつけたカメラを用いたフィードバック制御の研究を行っている。この制御の目的は、マニピュレータを動かし、カメラと対象物体の位置関係を指定したものに一致させることである。

まず、対象物体が静止している場合の視覚フィードバック制御を紹介する。前提として、カメラから対象物体までの距離は既知であるとし、図4のように、カメラ座標系と画像面上の

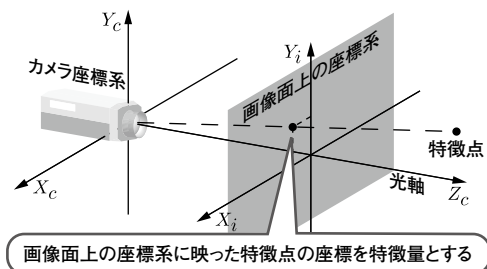


図4 特徴点と特徴量の関係

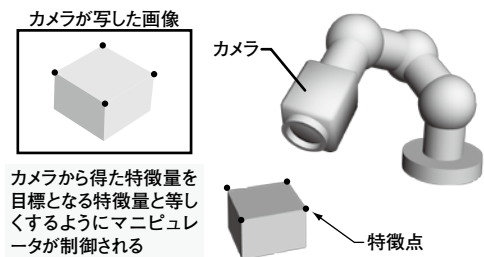


図5 視覚フィードバック制御

座標系を定義しておく。カメラ座標系とは図4の X_c, Y_c, Z_c 軸を座標軸とする座標系であり、画像面上の座標系は、 Z_c 軸上の点を原点とする二次元の座標系である。その座標軸 X_i, Y_i はそれぞれ X_c, Y_c と平行となっている。また、対象物体の形を特徴づける点である特徴点を決める(図5)。カメラから見た特徴点を画像面上の座標系に投影した場合の座標は特徴量と呼ばれる(図4)。カメラから得られる特徴量を、目標となる特徴量に一致させることが制御の目的となる。これが達成されるように、マンピュレータに対して制御則を構成する。この制御則をマンピュレータに適用すると、十分に時間が経過したとき制御の目的が達成され、マンピュレータは停止する。

しかし、マンピュレータを制御する場合、解の収束しなくなるという現象が起きてしまうことがある。マンピュレータは関節の角度や角加速度の調整によって制御することができるが、一つの関節が変化したとき、その先にある関節も、最初の関節の動きの影響を受けて位置を変化させてしまう。そのため、マンピュレータの先端の位置が数値的に振動し、十分に時間が経過しても目的の位置に動かすことができなくなる可能性があるのだ。藤田研究室では、マンピュレータとカメラを用いた視覚フィードバック制御の枠組みを作っただけでなく、システムが制御の目的を達成した状態に収束することも理論的に証明している。

また、対象物体が運動している場合の制御でも、藤田研究室は制御が達成できることを明らかにしている。この場合は、事前に指定したカメラと対象物体の相対位置、相対姿勢を保ちながらマンピュレータの手先を対象物体に追従させることが制御の目的となっている。対象物体が運動しているので、カメラと観測対象との相対位置、相対姿勢を知ることが重要となるが、光学情報から直接それらを得ることは一般に困難だ。そこで、オブザーバと呼ばれる機構を用いて光学情報から相

対位置、相対姿勢の推定値を構成する方法を用いる。オブザーバとは、制御システムの情報が完全には把握できないとき、モデルを基にわからない情報を推定し、得られた推定値と計測した情報からモデルを逐次修正する機構である。モデルとは物体の性質を表したものであり、ここでは相対位置、相対姿勢の数式モデルを利用している。この制御でオブザーバは、モデルとカメラからの情報を基にモデルを逐次修正し、真の相対位置、相対姿勢に推定値を一致させる。推定値を基にして、マンピュレータの手先が対象物体に追従できるようにマンピュレータの制御則を構成すれば、指定した相対位置、相対姿勢を保ちながら、マンピュレータの手先を対象物体に追従させられるのだ。

カメラを用いたフィードバック制御には応用例が多数あるが、その一例として、自動車運転アシストが挙げられる。これは、自車両に取りつけたカメラから前後車両との相対位置を計算し、自動的に車間距離を一定に保つ制御である。また、前述したように、カメラを用いたフィードバック制御は協調制御システムに使うことができる。例えば複数のカメラが、オブザーバから推定値をそれぞれ与えられたとしよう。推定値は常に正しいものとは限らず、間違っている場合もある。そこで、カメラ同士をネットワークでつなぎ、合意問題を用いることにより、システム全体として正しい情報を得ることができるのである。

昔、制御の目的は温度や速度という物理量で表せるもの、または物理量に簡単に直せるものであった。しかし現在、制御の目的は乗り心地の良い運転の実現のように、人間の感覚によるものとなってきている。このため、制御の目的を物理量に直すことは難しくなってきているのである。制御の分野にはこれ以外にも多くの課題が存在しているが、藤田研究室のネットワークサイエンスの研究によりそれらの課題が解決されることを期待したい。

取材でお話を伺った中でも、協調制御は特に興味深いものでした。機械が自動的に合意したり、効率的な配置に動くなど、あたかも機械が知能を持っているようで、協調制御は21世紀の科学にふさわしい制御の形であると思います。

最後になりますが、お忙しい中、快く取材を引き受けていただいた上、こちらからの度重なる質問にも丁寧にお答えいただいた藤田、畑中両先生にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

(河尻 翔太)