

# 群制御の有効活用 Swarming Simulation

株式会社グローバルセキュリティー  
CTO 竹之上典昭  
主席技師 蛇島 伸吾



## はじめに

前回まで、超高速にシミュレーションを可能にする技術（SCS：Simulation for Complex Systems）とその応用例として都市計画シミュレーション（LSS：LandScape Simulator）の技術および具体的な適用例などを述べてきた。本稿では、SCS のさらなる適用例として、群制御技術について紹介する。特に群制御については LSS の 2 次元空間（地表面）のシミュレーションから空を飛ぶ移動体を扱う 3 次元空間のシミュレーションにまでその領域を拡大する。

適用例は、近年注目を集めているドローンの群制御に焦点を当てる。また多数の群の中で、特定の人々がグループを形成する場合、例えば、家族・恋人・旅行団体などのグループ制御についてその技術の一端を紹介する。

## 群制御の研究開発状況

群制御の始まりは、安全保障の分野から始まったと言っても過言ではない。当初、個別の無人機（UAV：Unmanned Aerial Vehicle）の研究の中から無人機を群として使用する方法とそれに対処する方法<sup>1)</sup> が研究されてきた。特に昨今になってドローンと総称で呼ばれる回転

翼機の出現はその研究を加速<sup>2), 3)</sup> させていった。

現在ではさらに飛行距離を伸長させるため固定翼機の群制御についても研究が<sup>4), 5)</sup> 進められている。

翻って、日本でも三菱重工がクラスターダイナミックス社の物理学ベース群知能<sup>6)</sup> を使用する iSwarming<sup>®</sup> の開発を手がけている。その他には国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）のドローン同士の通信を行う方式<sup>7)</sup> や、東海大学・稻田研究室の生物の群運動を応用した編隊飛行制御の研究<sup>8)</sup> などがあるが、外国に比べて少数のドローン制御の研究にとどまっている。

さらにここ数年、ドローンの群制御技術は編隊飛行や敵の攻撃のための研究よりも、皆さんで楽しむ娛樂的な方向へ伸展している。その最たるもののが、東京オリンピック2020開会式のデモンストレーション、「閃光で彩るインテル<sup>®</sup> ドローン・ライト・ショー」<sup>9)</sup> であろう。このイベントに使用されたドローン数は1,824機において<sup>10)</sup>、このオリンピックの開会式で最も華やかで美しかったイベントの一つである。この技術を取り仕切ったのが米国のインテル社（Intel Corporation）であり、米国の群制御技術の高さを物語るものである。

## ドローン群制御技術の一般的な方式

この群制御は、どのようにして行われているのだろうか。

ドローンの群制御は、一般的には図1に示す方式で行うことが多い。ドローンには「どこへ行くのか」そして「どこで止まるのか」「ホバリングはするのか」などの指令が逐次送られてくる。その制御指令によりドローンはぶつかることなく目的地へ飛んでいける。しかし、また別な方式もある。それは各ドローンに事前プログラムが施せる場合で、目的地やホバリングの位置と時刻を事前に記憶させていく方式がこれに当たる。このように自立制御できるドローンがNICTの方式である。しかしながら現状ではNICTの方式では3機の実験にとどまってしまっており、多数ドローンの群制御には程遠い。

この一般的な方式における重要な技術は「ドローン位置把握の精度と飛行精度の確保」「実空間とその飛行制御のコンピュータ上の仮想空間をタイムロス無しに繋ぐ、デジタル・ツイン」そして多数のドローンの飛行制御を司る「シミュレーション速度」があげられる。

これまで紹介してきた群制御の中で最も多数のドローンを飛ばしているのはインテル社による、つまり東京オリンピックの例である。

自由な飛行を個々のドローンにさせる場合には、図2に示す問題が生じる。例えばCase1の場合、二つの異なるグループ内で編隊を組むための制御を計算しつつ、グループとしての異なる方向へ飛行するための経路決定の計算を階層的に実施しなければならない。このためには階層化するグループのそれぞれにどういった論理を当てはめるかという検討も重要である。さらに、二つのグループに三つ目、あるいは四つ目のグループが入ってくるとその複雑性は膨大な計算量になると思われる。

Case2については、個々の行き先が異なることから通常の飛行制御での計算では最悪 $O(N^N)$

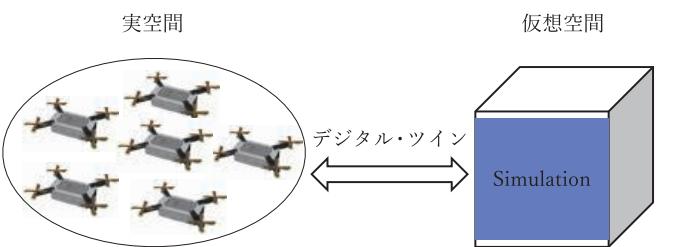


図1 ドローン群制御の一般的な方式例

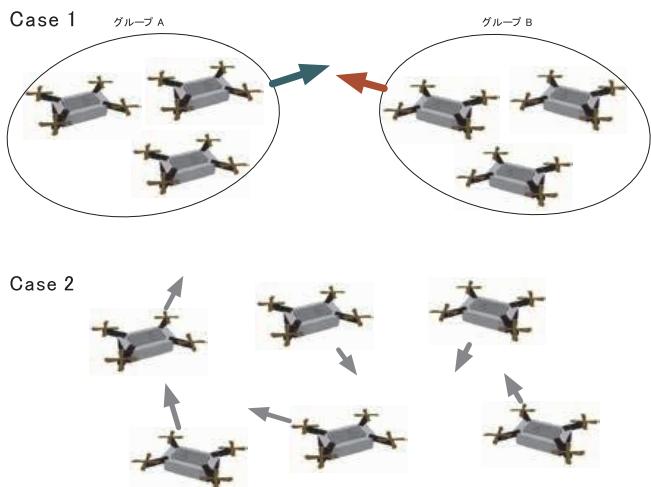


図2 ドローン群制御の複雑性を示す例

の計算量になる可能性がある。

このように考えてみると、東京オリンピックの飛行制御は大変な計算をしているのではないかと危惧される方もいるだろう。しかしながら、図2の例は、シミュレータが「個々のドローンの行き先を知ることができない」ために起きる問題であり、オリンピックの場合とはまったく状況は異なっている。オリンピックの場合には事前に空中に描くデザインは決まっており、そのホバリング点をデザインの中で決定することができる。つまり、事前の検証が可能であり、ここで取り上げるリアルタイムな群制御とは異なるものである。従って、オリンピックにおける群制御では、当日のデモンストレーション時に交差する経路と衝突を同時に計算する必要はなく、飛行中のドローンが確実に決められた時間に決められた位置へ飛行するための位置制御だけで良いことになる。つまり、仕掛け花火の点火順をコンピュータに負わせている

のと同じ状況といえるであろう。それでも、かなり困難な制御であることには違いない。

ここに現実世界でリアルタイムに群制御できるドローン数をなかなか増やすことができない事情がある。どれだけ大きなコンピュータが必要になってくるのであろうか。

図2の問題をリアルタイムに解こうとすると、これまで紹介してきた方式では計算量が爆発しそうである。そこで、新たな群制御の方式を紹介することとする。

### 群制御～共通グリッド参照モデル

大群を成して飛来する白鳥や丹頂鶴などは、どのように群れを成し遠路はるばるやって來るのであろうか。群れを成して飛翔する鳥には、おそらくこの地球環境で生き抜くための多くのメリットがあるのだろうが、それは生物学者の研究に譲るとして、ここでは大群を成す鳥の衝突回避について考えてみたい。鳥たちには計算してくれる大型コンピュータは存在しない。隣り合う鳥同士でその位置関係や方向、飛翔速度を相対的に感知できる範囲で判断し飛んでいるのではないだろうか。

これとは別に東京駅や新宿駅構内の非常に混み合った中を、われわれは難無く通り過ぎて目的地へ行くことができる。ここにもコンピュータは関わっていないし、難解な方程式を解いているわけでもない。人は単に周りの人を見ているだけなのである。そして個々の意思で好き勝手に自由な方向へ進んでいる。つまり、この人々の状況をそのまま再現できれば、より簡単なアルゴリズムを確立できることになる。この至極当然な思考を実装したものが「共通グリッド参照モデル」である。

共通グリッド参照モデルの思想は簡単である。人（以降は移動体）の安全空間を構成する大きさを1グリッドとして定義、そしてこのグリッドを評価したい空間の広さだけ準備する。後は、このグリッドに隣で空いているグリッド

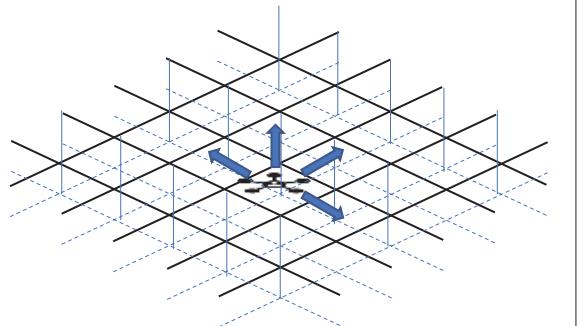


図3 共通グリッド参照モデルの概念図

を教えてもらい、次はそこへ行くと予約する。これだけで、すべての移動体は自由に目的地へ移動できる。

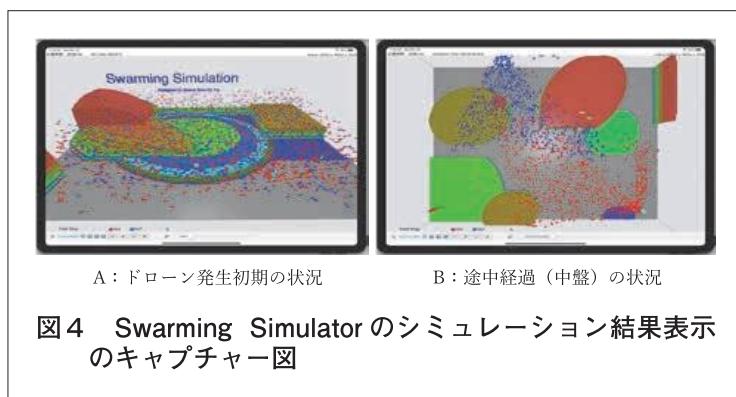
この方式をアルゴリズム的に書くと次のようになる。

- ① 評価する空間を共通グリッドとして登録する
- ② 複数の移動体に最終目的地を与え共通グリッドに現在位置を登録する
- ③ 個々の移動体は図3のように行きたい方向を示し、空いているグリッドを教えてもらう
- ④ もし、空いているグリッドがなければ、その場に停止し、空いているグリッドがあれば、移動体が希望するグリッドに移動する
- ⑤ すべての移動体で、③と④を繰り返し、最終目的地へ移動する

このアルゴリズムは、移動体の数 ( $V$ ) と最終目標地の数 ( $T$ ) に制限はなく、計算量は  $V$  に比例する。つまり非常に少ない計算量で移動経路を求められることが大きな特徴である。そして、2次元空間のみならず3次元空間でも同様に適用することができる。

### 共通グリッド参照モデルの実装例

共通グリッド参照モデルの実証のために開発したのが「大量ドローンの群制御シミュレータ (Swarming Simulator : SS)」である。SS は図4 のように (X : 2,200m、Y : 1,800m、H : 150m)



の3D空間に赤と青の2グループそれぞれに最終目標地点を与えてランダムに発生させる。この空間にはシミュレーションの実行ごとにランダムな地形が形成される。

個々のドローンが、これらの地形および近隣のドローンとの衝突を避けつつ赤、青のそれぞれの最終目的地へ飛翔する経路を選定するシミュレーションである。図4-Aは、ドローンが発生した初期状態をキャプチャーしたものであり、赤、青のドローンが入り乱れた位置に発生していることがよく分かる。図4-Bはシミュレーションの中盤で赤、青のドローンが最終目的地へと飛翔している様子が表現されている。図4のAとBは、異なる状況下でのキャプチャー図ではあるが、各グループがまるで示し合わせたかのように飛行していく様子が見て取れる。この図4では、赤：1,500機、青：1,500機 合計3,000機のドローン群制御のシミュレーションを実施している。表1はその時の計算時間を表しており、Aの状況では、2,026 [ms]、Bの状況では、2,296 [ms] すべての飛行経路計算を終えている。

ハードウェア環境としては、表1のようないntel Core i5のiMac上にあるiPadシミュレー

表1 Swarming Simulation の規模と計算時間

状況	赤	青	合計	計算時間 [ms]
A	1,500	1,500	3,000	2,026
B	1,500	1,500	3,000	2,296
iMac、3GHz 6コア Intel Core i5、40GB iPad シミュレータ上で計算				

タ上にSwarming Simulatorがインストールされている。その条件下での計算結果であり、グリッド参照モデルの高速性を証明している。シミュレーションの計算は、最終目的地までの計算をすべて行い、その経路ログを3D表示している。

この群制御モデルは、図2 case 2の場合をシミュレートしており、ドローンの目的地が幾つになろうと問題なく計算できる。このシミュレータはApple Storeで販売されておりiPadやiPhoneで実行できる。

## グループ制御

全体の情報を「リーダー」に相当する個体が、代表してすべてを判断するのではなく、それぞれ独立した比較的単純な処理構造をもつ個体が多数集合して「創発」と呼ばれる高度な知能を生成することが期待されている。「創発」の一例として「群知能」がある<sup>11), 12)</sup>。「群れが知能をもつ」とは、個々のエージェントが、それぞれ自律的な判断により行動をしているにもかかわらず、全体が集団で行動を行うと、あたかも全体が知能をもっているかのように振る舞うことである。「群知能」を発生させる論理として有名なものは、図5に示すようなフェロモンによって蟻の行列が発生する場合<sup>13)</sup>や、近傍の仲間の位置等を鳥や魚が群れを成して移動する等がある<sup>11)</sup>。

鳥や魚の群れを生成する理論は、BOID (Bird-

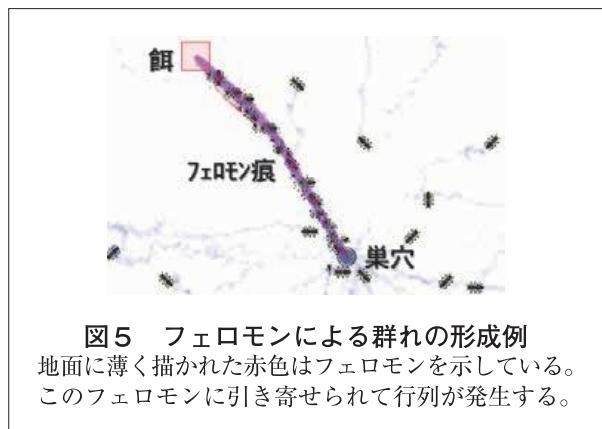




表2 グループ種類と領域の大きさ

グループの種類	領域			
	①反発領域	②並列領域	③誘引領域	④探索領域
恋人同士／ 幼児と親	≈ 0	①と③の間	互いに手を伸ばして届 かなくなる距離	有り
家族	パーソナルスペース (小)	①と③の間	会話が可能な範囲	有り
知人グループ	パーソナルスペース (中)	①と③の間	声が聞こえる範囲 又 は、視認できる範囲	有り
他人	パーソナルスペース (大)	無し	無し	無し

oid：鳥もどき<sup>14)</sup>が有名である。BOIDの原理を簡単に述べると、図6に示すように2羽の鳥（または、2匹の魚）は、互いの距離によって以下のような行動をとると規定する<sup>12)</sup>。

- 非常に接近している場合（図中：反発領域）には、互いに離れる方向に向きを変えて移動する。
- 離れすぎた場合（図中：誘因領域）には、お互いが接近する方向に向きを変えて移動する。
- 近過ぎず・遠過ぎずの距離にいる場合（図中：平行領域）には、お互いに同じ方向に同じ速度で移動する。

ところで、人間も群れを成して生活する生物であり、遠い祖先の時代から、他の生物と同じような群れを生成する仕組みが存在しているのは自然なことに思えるので、人間にもBOIDの原理を適応することができる。ただし人間の行動にBOIDの原理を適応しようとする場合、対象となる二人の人間関係によってその振る舞いが変わるという動作が加味される。

その具体的違いを与える大きなパラメータとして、二人の心理的距離を導入する。具体的な例

をあげると、心理的距離の最も近いのは「恋人同士」や「幼児をついた親」であり、彼らは常に手の届く範囲内にいようとするであろう。「家族」「知人」「他人」と関係が希薄になるにつれ、心理的距離は次第に大きくなり、その領域を超えて接近すると不快感や警戒心を生じる。この領域は心理学的にパーソナルスペースと呼ばれるものと等価と考えられる。そこで、図6の各距離を心理的距離に応じて表2に定義する。

二人の心理的距離は対称ではなく、何かに夢中になった小さな子供は親に対する距離が一時的に遠くなるが、親は子供のことが心配で心理的距離が小さいこともあり得る。また状況に応じてもその心理的距離は変化し、同じ避難所へ逃げてきた人達は一時的に心理的距離が近くなり、お互いに助け合ったりすることが考えられる。

ところで、人間に限らず生物の行動は単に「群れを形成する」だけではなく「餌を喰う」「敵から逃げる」、人間の場合には「目的地方向へ移動する」「交通規則を守る」等々の色々な行動を取る必要がある。このため、図6のBOIDの原理に追加して別の行動規範を追加する必要がある。

図7は赤い魚が青い魚を捕食する状況をシミュレートした例である。この例では、同じ種

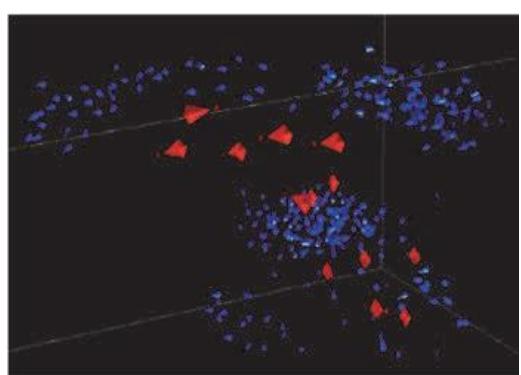
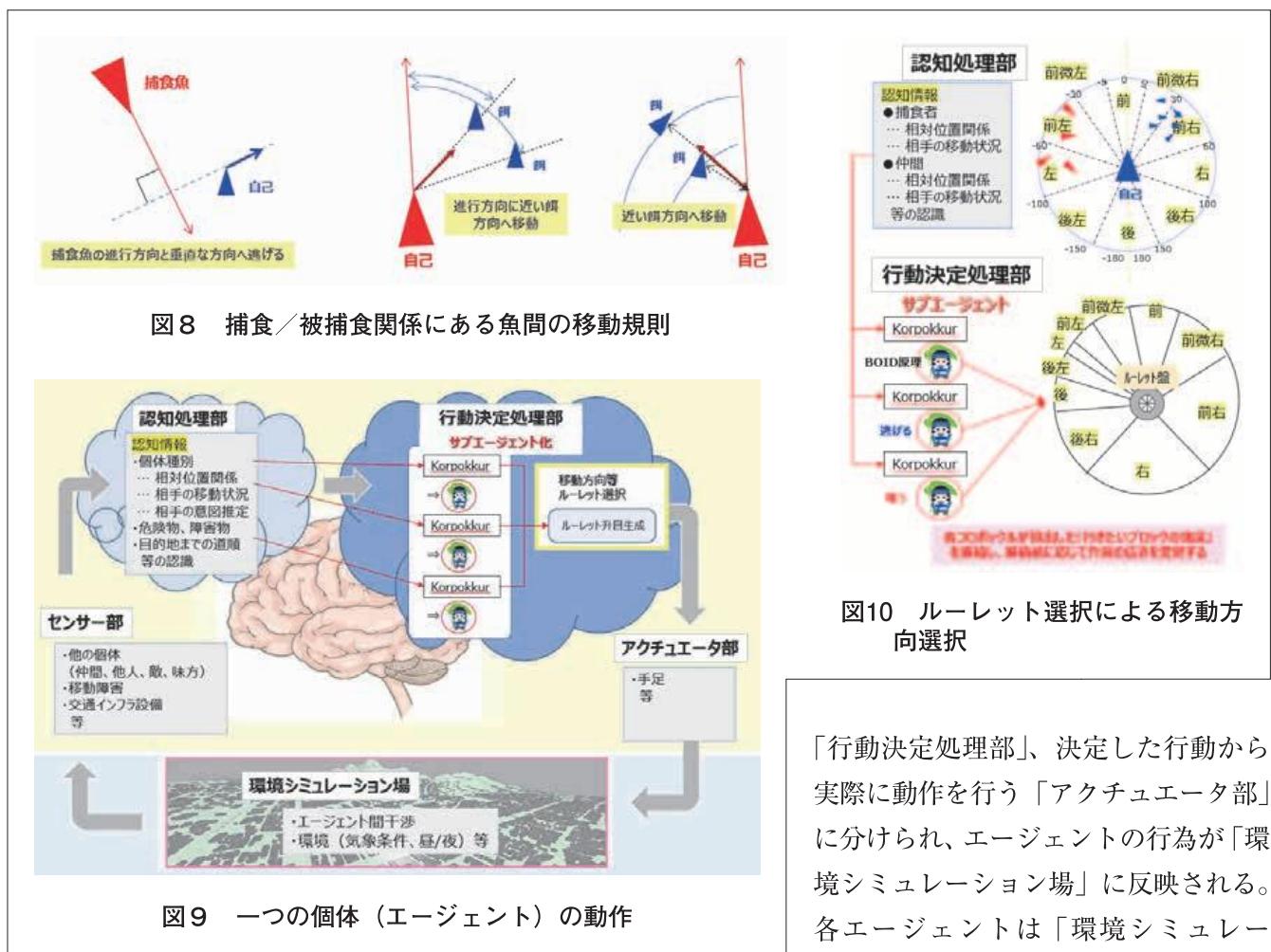


図7 嘉うー喰われる関係の2種類の魚の群れ



類の魚は互いに BOID の原理に従って群れを形成する。これに加えて、捕食魚である赤い魚に出会った被捕食魚の青い魚は逃げるため、図8に示すように「①捕食魚の進行方向に対して垂直な方向に逃げる」という規則を加える。一方、赤い魚は「①餌（青い魚）が複数いる時には近い餌を選ぶ」「②餌が等距離にいる時には進行方向に近い餌を選ぶ」という二つの規則を加える。この規則を加えることで、青い魚は群れで赤い魚から逃げ、赤い魚は群れを成して青い魚を追う。このように異なる種類の規則を総合的に判断させるためには、次に示すような仕組みを導入する。

図9に一つの個体（エージェント）の動作を示す。各エージェントの処理は環境から他のオブジェクトを検出する「センサー部」、検出したオブジェクトの位置関係等を認識する「認識処理部」、認識した状況から次の行動を決定する

「行動決定処理部」、決定した行動から実際に動作を行う「アクチュエータ部」に分けられ、エージェントの行為が「環境シミュレーション場」に反映される。各エージェントは「環境シミュレーション場」でお互いのエージェント間の相互作用、あるいは取り巻く環境の影響を受ける。1回のイベント処理内で、これら一連の処理を1サイクル行う。「行動決定処理部」はサブエージェント（以後、コロポックル）に分割されて、それらコロポックルが出したリコマンド値で適切な値を採用し、行動を行う。この図は、すでに前回で述べたエージェントの動作と基本的に同じである。しかしながら、行動決定処理部で意思決定を行う時に、ルーレット選択という手法を用いていることに違いがある。

ルーレット選択を説明するためにもう一度、魚の群れ形成動作に戻って考えてみよう。

図10は、青い魚の認知処理部と行動決定処理部を拡大した図である。自分の周りの空間を図に示すように「前」「前微右」「前右」「右」…のようにブロック分割を行う。コロポックルとして「BOID ルール」「逃げるルール」「喰うルール」の3種類を準備しておく。青魚はただ逃げ

るだけであるが、さらに小さな魚を入れた場合も考慮し、「喰う」場合のルールも入れてある。

各コロポックルは自分の基準に従って、認知した他の魚の種別、相対位置とその進行方向から、自らの進行方向を算出する。各コロポックルが算出した「行くべき方向」に対応する方向ブロックに、コロポックルの出す値を強度として累積する。その強度に応じてルーレットの各ブロックの大きさが変化する。図10の例では、左から捕食者が接近してきており、右へ逃げるルーレットの升目が大きくなり、左へ移動するルーレット升目は小さくなっている。

ここでそのルーレットを回すと、当然のことながら、升目の大きな右方向へ移動しやすくなる。升目の大きなブロックを選ぶということは、その瞬間に最適と思われる選択を行うことであり、これを繰り返して適した解に近づくという意味で、ヒューリスティックな（発見的手法）選択を行っているといえる。ここに、ルー

レットを作成して確率的判断を入れる意味は二つある。一つ目は適していると思われる判断に搖らぎを敢えて与えて局所解に陥ることを防止することであり、二つ目は行動基準を多くし、ルーレットの升の大きさが場合（例えば、図10では、ルーレットの「前右」と「右」はほぼ同じ大きさ）でも、前回と異なる判断を行う可能性をもたせることで、解の探索範囲を広げる効果を狙っている。

これら内部のコロポックルは、シミュレーションの目的に応じて入れ替えることが可能である。例えば道路上の歩行者を考えると、表3に示すようなコロポックル（行動ルール）を考えることができる。通常、歩行者は行くべき目的地をもっており、その方向へ移動するルールを目的方向コロポックルが判別する。同時に歩道外や危険な領域を判断するのが歩行エリア内外判別、障害物の回避、歩行者用信号等の各コロポックルが動作し、さらにグループメンバー

表3 歩行者の行動決定処理部内のコロポックルの例

コロポックル種類	役割
目的方向	目的地方向へ移動する。（例：買い物目的地、職場、等）
歩行エリア内外判定	歩行者道内、広場等の内外判定。歩行可能以外には移動しない。
障害物の衝突回避	人以外の移動体や壁等を回避する。
歩行者信号	目的方向の信号の青：移動、青点滅：早足移動or停止、赤：停止
BOID理論	グループ形成（BOIDシミュレーションで用いられる論理）
探索	仲間を見失うと、仲間を探す。（具体的には、最後に見かけた位置方向へ移動する）
引き寄せ	仲間から離れすぎると、仲間の居る方向に向かって移動する
同一方向	仲間と一定の距離に居る時には、仲間と同じ方向に進む。また、相手速度に合わせて、自分の速度を調整する。
反発	あまりにも接近しそうだと、相手を避ける方向に移動する。
対向	正面方向から向かってくる人に対して、相手の居ない方向、および、相手の前方ではない方向に向かう。
横切り	左右横方向から接近てくる人に対して発動し、相手が移動する位置には向かわない。また、相手の前方には向かわない。
後追い	人混み時に、自分とほぼ同一方向に向かう人で、且つ、前方に居る人に対して発動。 相手に非常に接近した時には、相手に衝突しない様に速度を調整する。それ以外の時で、相手より自分の速度が速い時には、相手位置を回避する方向に向かう。
心理的負荷	心理的に『ある方向には、行きたくない』という圧力。 (例：『他人が多くいる中にいると疲れる』『薄暗く狭いところは嫌』『不潔なところは嫌』等)
バス・電車待ち	電車・バス待ち
乗降動作	電車・バス等への乗降動作（老人は乗り降りに時間が掛かる 等）
寄り道	立ち止まって会話、購買動作
パニック時の行動	異常事態時には、認知範囲が狭くなり特定の方向しか見えなくなる。人と同じ行動を取る。等
心的慣性	現在状況の継続圧力
	シミュレーション目的によって追加

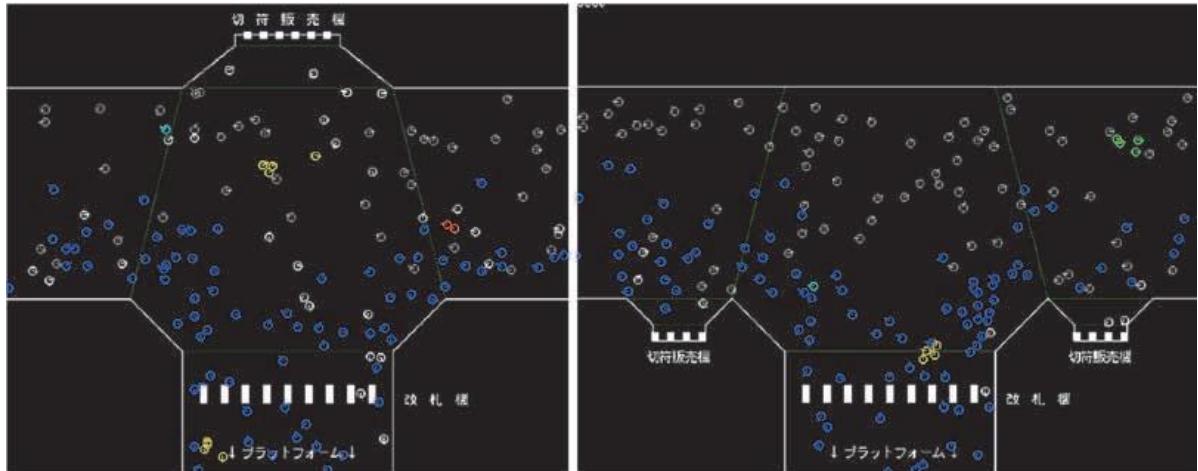


図11 駅構内の歩行者の移動をシミュレーションした例

内では心理距離に従って BOID 論理コロポックルが動作する（他人同士であれば BOID 論理内の反発のみが動作する）。このようなコロポックルが判断した移動方向をそれぞれ累積して図10のルーレットの升の大きさを設定し、ルーレットを回す。歩行者はルーレット上の球の落ちた升方向へ移動する。

図11に、歩行者移動の具体的な例として駅構内で、切符を購入し改札口を抜ける人のシミュレーションを行った結果を示す。

図中で、

- 白色は、切符を購入した後、プラットホームに出る乗客
- 青色は、Suica 等の IC 乗車券を持っており、切符を購入することなく改札口を通ってプラットホームに行く、あるいはプラットホームから構内へ戻る乗客
- 灰色は、列車を利用せずに駅の通路を左右に通過して行く歩行者
- 赤色は恋人同士、橙色は家族、緑色は知人グループを示す

図を見ると、改札口のある図下側にプラットホームを利用する人々（青色）が集まり、上側に列車を利用しない通行人（灰色）が集まっている。左右からシミュレーション場に進入してくる人々の位置はランダムであり、自然に発生したような状況にしている。

このように混雑した状況下でも、左図の二つの家族（橙色）と恋人（赤色）が1組、右図の一つの家族（橙色）と一つの知人グループ（緑色）は、時間が経過しても、恋人（赤色）、家族（橙色）、知人グループ（緑色）は人混みの中で離れ離れにはならず、グループとして行動できている。

さらに左図（改札口と切符売り場が異なる壁に存在している場合）に比べて、右図（改札口と切符売り場が同じ壁に存在している場合）では、切符を購入する乗客（白色）が通路内に滞留していないことが分かる。

図11では通行人の行動をシミュレートしたが、エージェント本体と頭脳に当たるコロポックルを変更することで、別のシミュレーションに応用できる。図12は、重要施設の上空を複数の飛行機型ドローン（ホバリングできないド



図12 飛行機型ドローンの編隊飛行

ローン)が、編隊飛行しながら警戒している例を示す。この例では、仲間(青色ドローン)同士はBOIDコロポックルが働いて編隊を組む。さらに旋回制御コロポックルが重要設備の上空を旋回し、燃料が少なくなると燃料管理コロポックルと帰投ルート計算コロポックルの働きにより、自動的にベースへ帰投する。

また不審物を発見したならば、デジタル・ツインが動作する仮想空間中に「仮想フェロモン」を投下することで、あたかも「蜂の巣をついたように」多くのドローンを呼び寄せることも可能である。

\* \* \*

本稿ではSCSの適用事例として各種の群制

御やグループ制御技術について紹介した。近年注目を集める空上／海上／水中の各ドローンの群制御、色々な個体が群れを成すことで創発する「群知能」の発見や検証、繁華街での人流の検証等、SCSは多岐にわたる複雑系のシミュレーションに適用できる。

次回は、安心安全な社会を目指す日本に必要なシミュレーション技術として、津波災害からの住民の避難や火山爆発における噴石の飛散状況を従来のような同心円状の被害予測とは異なり、地形に沿ったより具体的なシミュレーションなどの研究状況について紹介する。

## 引用文献

- 1) J. HECH, "Fiber Lasers Mean Ray Guns Are Coming," 27 march 2018. [オンライン]. Available: <https://spectrum.ieee.org/fiber-lasers-mean-ray-guns-are-coming>. [アクセス日：10 9 2021].
- 2) C. Q. Choi, "Can the U.S. Military Combat the Coming Swarm of Weaponized Drones?," 3 March 2018. [オンライン]. Available: <https://spectrum.ieee.org/us-military-evaluates-antidrone-tech#toggle-gdpr>. [アクセス日：10 9 2021].
- 3) P. Tucker, "The US Military's Drone Swarm Strategy Just Passed a Key Test," 21 11 2018. [オンライン]. Available: <https://www.defenseone.com/technology/2018/11/us-militarys-drone-swarm-strategy-just-passed-key-test/153007/>. [アクセス日：10 9 2021].
- 4) K. D. Atherton, "Navy office awards \$30 million contract for drone swarms," 28 June 2018. [オンライン]. Available: <https://www.c4isrnet.com/unmanned/2018/06/27/office-of-naval-research-awards-raytheon-30-million-to-develop-locust-swarm/>. [アクセス日：10 9 2021].
- 5) K. D. Atherton, "The United Kingdom wants a drone swarm by 2022," 14 2 2019. [オンライン]. Available: <https://www.c4isrnet.com/unmanned/2019/02/13/the-united-kingdom-wants-a-drone-swarm-by-2022/>. [アクセス日：10 9 2021].
- 6) クラスター・ダイナミクス株式会社、「三菱重工業(株)からiSwarming(R)を活用した次世代の移動体システムのシミュレーション等業務を受託しました」, 2 7 2018. [オンライン]. Available: <https://www.atpress.ne.jp/news/160161>. [アクセス日：10 9 2021].
- 7) 情報通信研究機構、「ドローン同士の直接通信でニアミスを自動的に回避する実験に成功～目視外飛行における安全な飛行運用に向けて～」, 24 1 2019. [オンライン]. Available: <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190124-2/index.html>. [アクセス日：10 9 2021].
- 8) 東海大学・稲田研究室、「生物の群運動を応用した飛翔体の変態飛行制御(群制御)の研究」, 10 9 2021. [オンライン]. Available: <http://www.ea.u-tokai.ac.jp/inada/CollectiveMotionControl.html>.
- 9) インテル株式会社、「閃光で彩るインテル®ドローン・ライト・ショー」, 10 9 2021. [オンライン]. Available: <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/technology-innovation/aerial-technology-light-show.html>. [アクセス日：10 9 2021].
- 10) DRONE、「オリンピック開会式に1824機のドローンが東京の空を舞う」, 10 9 2021. [オンライン]. Available: <https://www.drone.jp/news/2021072611303947315.html>.
- 11) J. Steven 著: 創発—蟻・脳・都市・ソフトウェアの自己組織化ネットワーク、ソフトバンクパブリッシング株式会社、2004.
- 12) 科学シミュレーション研究会著: パソコンで見る複雑系・カオス・量子、株式会社講談社、1997.
- 13) C. Scott, Nigel R Franks 著: 生物にとって自己組織化とは何か 群れ形成のメカニズム、(株)海游舎、2009.
- 14) ルーディ・ラッカー著: ルーディ・ラッカーの人工生命研究室、アスキー出版局、1996.