

群れ行動特性に基づくマルチエージェント戦闘モデル

山本 聡彦[†] 生天目 章[†] 佐藤 浩[†]

[†]防衛大学校情報工学科 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

E-mail: [†]{g47038,nama,hsato}@nda.ac.jp

あらまし 戦闘に関する研究は、ランチェスター方程式による兵力損耗過程を連立微分方程式によって解析することがこれまで主として行われているが、それは確率現象である交戦結果の平均的な特性を述べるにとどまり、多くの前提条件も必要であった。しかし現実には生起している戦闘は、非線形性、相互作用、空間的特性とったランチェスターの連立微分方程式のみでは記述できない面が多くある。本研究においては、マルチエージェントシミュレーションにより、3次元空間における航空戦闘をモデル化し、エージェントが群れを形成し、集団戦闘を行う場合やエージェントが回避、追跡の意思をもち、行動することによって戦闘にどのような影響が及ぶかを解析する。

キーワード 戦闘モデル、エージェントベースシミュレーション、群れ行動、ランチェスター方程式

Multi-agent Combat Modeling based on the Property of Flocking Behavior

Toshihiko YAMAMOTO[†] Akira NAMATAME[†] and Hiroshi SATO[†]

[†] Department of Computer Science, National Defense Academy 1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa,
239-8686 Japan

E-mail: [†]{g47038,nama,hsato}@nda.ac.jp

Abstract Analyzing a mathematical model based on Lanchester equation is a conventional way of the military study. Lanchester equation describes a process of attrition, however it can treat only simple force-on-force attrition. Traditional linear models of combat situation such as Lanchester equations treat attrition as a continuous function of time. However, recent thinking on the nature of warfare has it that combat is an inherently nonlinear situation and interactive. Attrition is during duels followed by agent movements in space and time. This study tries to approach multi-agent aircraft combat modeling based on the property of flocking behavior and its space is 3-dimensional. This combat model is analyzing that how the combat is influenced by the agent's decision making and flocking behavior.

Keyword Combat Model, Agent-based Simulation, Flocking Behavior, Lanchester Equation

1. はじめに

従来、戦闘を分析するモデルは、ランチェスター方程式をベースにした連立微分方程式による赤青両軍の撃ち合いによる兵力損耗過程を分析するのが主として行われてきた[1],[2]。この従来モデルでは、単位時間当たりの赤青両軍の兵力損耗を交戦の様態、武器の性能、兵力数の関数で表し、(1.1)式のように連立微分方程式で定式化する。

$$\begin{cases} \frac{dR(t)}{dt} = -\alpha_B B(t), R(0) = R_0 \\ \frac{dB(t)}{dt} = -\alpha_R R(t), B(0) = B_0 \end{cases} \quad (1.1)$$

(1.1)式において、 $R(t)$ と $B(t)$ は、時刻 t における赤軍と青軍の兵力、 R_0 と B_0 は赤軍と青軍の初期兵力、 α_R と α_B は、赤軍と青軍の撃破速度(各単位が単位時間に撃破する敵兵力)をそれぞれ表している。(1.1)式より、次式を得る。

$$\alpha_R R(t) \frac{dR(t)}{dt} = \alpha_B B(t) \frac{dB(t)}{dt} \quad (1.2)$$

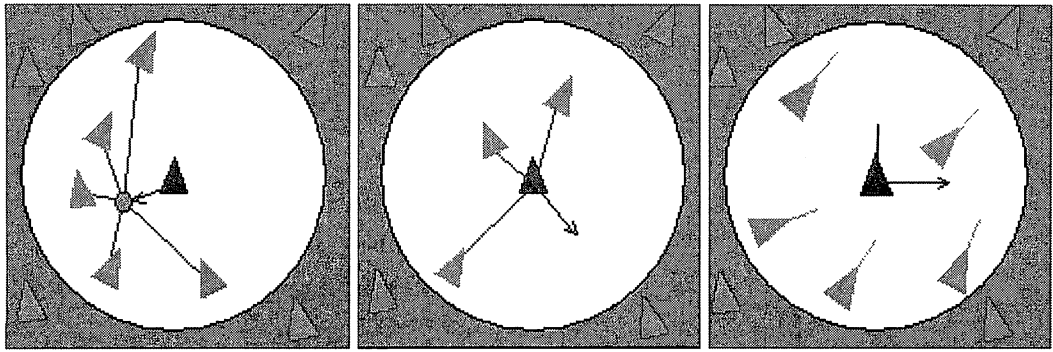
(1.2)式の両辺を $[0,t]$ で積分すると、

$$\alpha_R \{R_0^2 - R(t)^2\} = \alpha_B \{B_0^2 - B(t)^2\} \quad (1.3)$$

この式を解くと、両軍兵力の時間経過に対する関係は、双曲線のグラフで表される。そして、初期兵力 (R_0, B_0) で開始された戦闘は、時間が経過すれば、初期の兵力比によって決まる優勢な集団がますます優勢になることを意味する。

ただし、この方程式の解は、1回の戦闘における勝敗が決定されるということを示しているわけではない点に注意が必要である。すなわち、ここでの解は、確率現象である交戦結果の平均的な特性を述べているだけでしかない。

(1.1)式のランチェスターモデルの定式化は、次の5つが前提条件となっている。(1)均質性(2)交戦形態の



(1) Cohesion

(2) Separation

(3) Alignment

図1 BoidsのCSA ルール

対称性(3)全軍参加(4)火力管制の一様性(5)定常性, これらの前提が全て満たされているという仮定の下で, (1.1)式の連立微分方程式によるモデル化が行われる。

しかしながら, 実際の戦闘は, ランチェスターモデルが前提としている条件とは異なっていることの方が多い。連立微分方程式によるモデルでは, 非線形性, 相互作用, 戦闘単位の異質性や不完全さ, 個人や集団の意思決定能力, さらには空間的要素を考慮したものとはならない。本研究の目的は, 戦場全体の振る舞いを連立微分方程式モデルだけで定式化し, そして検証することには限界があるため, マルチエージェントシミュレーションにより, 従来研究では, 考慮し難い要素を含めての戦闘シミュレーションを行い, 解析する。

2. 群れ行動とマルチエージェント

2.1 マルチエージェント

個々の自律的な動作をする行動主体のことを, “エージェント”という。特に, 外部環境から得た情報に対して自分の持つルールで行動するエージェントを, “適応のエージェント”という。そのような適応のエージェントで構成される系を, 複雑適応系という[3]。そして, 複雑適応系の解析には非線形力学系やゲーム理論, マルチエージェントシミュレーションなどが用いられる。

複雑適応系のキーワードとして, 非線形性, 相互作用, 構成主義などの特徴以外に, 創発性, 非集中, 自己組織性などで表現される。

エージェントモデルの利点は, 想定すべき環境を自由に設定し, 個々のルールにしたがってエージェントを行動させることができ, そこから発生する創発現象を観察し, 分析できることである。個々のエージェントは, 自らのルールで行動し, 情報を得て, 他のエー

ジェントとの相互作用によってエージェントの行動が定まる。そして, 多数のエージェントで構成されるマルチエージェントモデルも, 様々な場面で研究されてきている[4]。

本研究においては, 戦闘環境のマルチエージェントモデルを扱う。連立微分方程式による戦闘モデルには, 様々な前提が必要とされる。その前提を緩和するための方法として, マルチエージェントによる戦闘シミュレーションを行い, 解析する。マルチエージェントモデルシミュレーションは, ボトムアップ的に戦場で活動する両軍の戦闘員を生成し, 戦場を構成する。それにより, 初期兵力の大きさと損耗係数の2つの要素に依存している従来の連立微分方程式に基づくモデルでは扱うことのできなかつた, 戦闘単位の移動や通信などの動作を含んだ問題を分析することができる。

2.2 Boids モデル

個々のエージェントは, ある範囲内に位置する他のエージェント(以下, 近傍のエージェントという。)と局所的に相互作用する。それらの相互作用が多重に連結されることで, 群れ行動は創発される。Boidsモデル[5],[6]では, 個々のエージェントは, 近傍のエージェントとCohesion, Separation, Alignmentの3つの行動ルール(図1, 以下これらの頭文字をとって, CSAルールという。)にしたがって, 行動する。CSAルールは, 力学的側面からみると, 個々のエージェントの推進力であり, それぞれ次のような働きをする。

(1)Cohesion(凝集ルール)は, 近傍のエージェントの中心位置への引力で, これにより近傍のエージェント同士は凝集する。

(2)Separation(分離ルール)は, 近傍のエージェントからの斥力で, これにより, 近傍のエージェントとの衝突を防止する。その力の大きさは, 距離に反比例する。

(3)Alignment(同期ルール) は、近傍のエージェントの平均速度に合わせるように働く力で、これにより、近傍のエージェント同士の速度が揃う。

個々のエージェントにこれらを合成した力が働くことで、力学的運動の第2法則により、各エージェントの速度および位置が逐次変化する[7]。

2.3 群れ行動の創発による集団行動

Boids モデルでは、個々のエージェントは、近傍のエージェントの相対位置および相対速度の情報に基づき、CSA の3つの行動ルールを発火し、それに応じて、エージェントに力が働く。今、 N 体のエージェント集団の任意のエージェント $i(i=1,2,\dots,N)$ の近傍に、 n_i 体のエージェントが存在するものとする。エージェント $i(i=1,2,\dots,N)$ の近傍のエージェント $j(j=1,2,\dots,n_i)$ に対する相対位置ベクトルを \vec{d}_{ij} 、相対速度ベクトルを \vec{v}_{ij} で表す。そして、それぞれの集合的平均 \vec{D}_i 、 \vec{V}_i を次式で定義する。

$$\begin{cases} D_i = \frac{1}{n_i} \sum_j \vec{d}_{ij} \\ V_i = \frac{1}{n_i} \sum_j \vec{v}_{ij} \end{cases} \quad (2.1)$$

また、これらの方向の単位ベクトルを、それぞれ \vec{e}_{D_i} 、 \vec{e}_{V_i} で表す。すると、各エージェント $i(i=1,2,\dots,N)$ に働く、CSA ルールに由来する力の合力 \vec{F}_{bi} は、

$$\vec{F}_{bi} = \left(w_{ci} - \frac{w_{si}}{D_i} \right) \vec{e}_{D_i} + w_{ai} \vec{e}_{V_i} \quad (2.2)$$

ここで、 w_{ci} 、 w_{si} 及び w_{ai} は、それぞれ Cohesion, Separation 及び Alignment に関する力の係数であり、 $D_i = |\vec{D}_i|$ である。このように、合成力 \vec{F}_{bi} は、近傍のエージェントの相対的な中心位置方向 (\vec{e}_{D_i} 方向)の力と平均相対速度方向 (\vec{e}_{V_i} 方向)の力の重み付き一次結合となる。近傍のエージェントとの相互作用の結果、式(2.2)の第1項、すなわちエージェント間の相対位置に基づく引力と斥力の合力の項により、エージェント同士は凝集する。さらに、式(2.2)の第2項、すなわちエージェントの相対速度に基づく調整力により、各エージェントは速度を合わせる。このようにして、エージェント間の相互作用から凝集性と同調動が生まれ、群れ行動が創発される。

各エージェントに CSA の行動ルールによる力が作用する状態で、十分な時間が経過すると、それらの力が釣り合うようになり、群れ全体で等速度運動をとる。このとき、個々のエージェントに働く力は時間に対して一定となり、群れ行動は定常状態になる。本研究においては、Boids モデルを用いて、エージェントの集

団行動における戦闘を解析する。

3. 戦闘モデル

3.1 エージェントの特性

エージェントの戦闘モデルにおいて、個々のエージェントは、これまで述べた群れ行動の創発による集団行動が特性の一つとしてある。そして、戦闘行動をとる上で、エージェントは以下に示す特性をもつ。

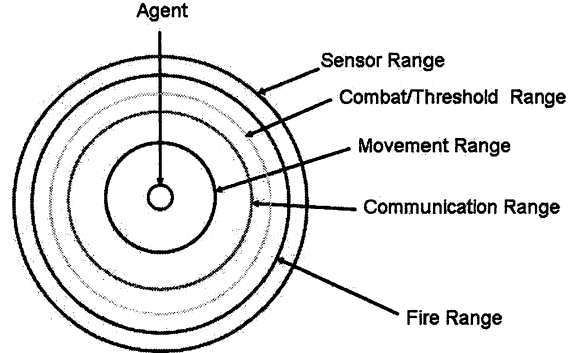


図2 戦闘モデル

図2に示すように戦闘モデルにおける個々のエージェントはそれぞれのレンジに対応した特性をもつ。**Sensor Range**は、その範囲内において敵を発見することができる。**Combat/Threshold Range**は、敵と戦闘を行う境界を表す。**Movement Range**は、エージェントがどこまで動けるかというエージェントが動くスピードに対応するものである。**Communication Range**は、友軍との連絡範囲であり、この範囲内の中で、友軍とコミュニケーションをとり、群れ行動すなわち集団行動を行う。そして**Communication Rang**内において友軍と敵発見の情報を共有することができる。**Fire Range**は、敵を射撃することができる範囲であり、この範囲内において、エージェントの射撃命中率によって敵を射撃し、命中すれば撃破することができる。戦闘空間は3次元空間における空中戦闘(航空戦)を設定する。

3.2 エージェントの意思

戦闘員は戦闘状況下において、敵に対する回避や追跡といった意思による反応がある。ランチェスターの微分方程式を主流とした解析では、考慮することが難しい要素であり、個々の戦闘員がもつ意思の有無を考える上では、マルチエージェントシミュレーションによる分析が有効であると考えられる。本研究でエージェントがもつ意思の特性について説明する

敵エージェントが全 N 体存在し、個々のエージェントが**Sensor Range**内で n'_i 体 $i(i=1,2,\dots,N)$ のエージェントを発見するものとする。発見したエージェント $j(j=1,2,\dots,n'_i)$ に対する相対位置ベクトルを \vec{d}'_{ij} 、相対速度ベクトルを \vec{v}'_{ij} で表す。そして、それぞれの集合

的平均 \bar{D}_i , を次式で \bar{v}_i 定義する.

$$\begin{cases} D_i = \frac{1}{n_i} \sum_j^n \bar{d}_{ij} \\ v_i = \frac{1}{n_i} \sum_j^n \bar{v}_{ij} \end{cases} \quad (3.1)$$

また, これらの方向の単位ベクトルを, それぞれ \bar{e}'_{D_i} , \bar{e}'_{v_i} で表す. 回避方向の単位ベクトルを, \bar{e}''_{D_i} で表す. よって群れ行動の CSA ルールによる合力と追跡, 回避のエージェント意思の合力 \bar{F}_β は,

$$\bar{F}_\beta = \left(w_{ci} - \frac{w_{si}}{D_i} \right) \bar{e}_{D_i} + w_{ai} \bar{e}_{v_i} + w_{ch} \bar{e}'_{D_i} + \frac{w_{avi}}{D_i} \bar{e}''_{D_i} \quad (3.2)$$

ここで, w_{chi} , w_{avi} は, それぞれ追跡, 回避に関するエージェントの力の係数であり, $D_i = |\bar{D}'_i|$ である.

これらの合力は, エージェントの集団行動及び意思決定から創発される動きとなる. これに先に説明した戦闘モデルとしての特性により, 戦闘を行う.

4. 戦闘シミュレーション環境

エージェントによる戦闘環境は, 3次元空間における空中戦闘(航空戦)を設定し, レンジはユークリッド距離によって捉えることで, 空間的特性が現実に近い環境において, マルチエージェント戦闘シミュレーションを行う.

赤軍, 青軍それぞれエージェント数を100として赤軍対青軍による戦闘を行う. 各種のレンジによって, その範囲を測り, 敵軍の発見, 友軍とのコミュニケーションや戦闘を行う. 交戦の過程で射撃命中率に基づき, エージェントが射撃されることにより, 各軍の戦力(エージェント数)は減衰していく. 図3にシミュレーションによる戦闘状況のスナップショットを示す.

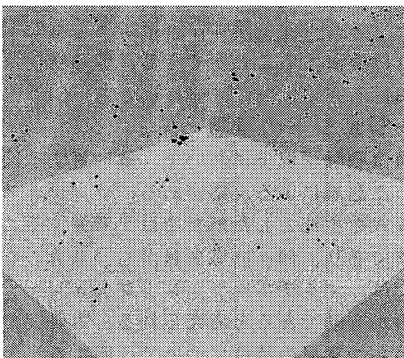


図3 Snapshot of Combat Simulation

本論文において, これまで述べた群れ行動による集団行動, エージェントの追跡, 回避の意思の有無が戦闘へどのような影響を与えるかをシミュレーションを行い, 解析する.

5 シミュレーション結果

5.1 射撃命中率と損耗推移

3次元空間における赤軍対青軍による戦闘を行い, 時間が経過するにつれて交戦中にエージェントが撃破されることにより, 戦闘員数(エージェント数)が損耗していく過程を図4に示す.

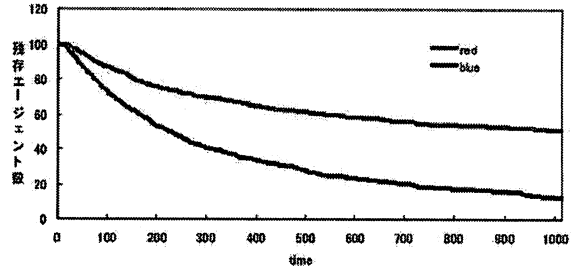


図4 残存エージェント数の推移

図4の残存エージェントの推移は, 縦軸を残存エージェント数, 横軸を時刻としたシミュレーションの推移である. 赤軍, 青軍の射撃命中率をそれぞれ2%, 1%とし, エージェントが敵軍の発見による, 追跡, 回避の意思, 友軍とのコミュニケーションによる情報共有や集団形成を行う場合の戦闘の推移である. 射撃命中率が高くなるほど, 損耗の推移が急激となる結果が得られている.

射撃命中率の高い赤軍が優勢を保ちながら, 勝利していくことになるのであるが, 図4が示す残存エージェント数の減少は, ランチェスターの微分方程式の解法のみからは求めることができない. それはこのマルチエージェント戦闘が空間的要素, 戦闘単位の異質性や不完全さ, 個人や集団の意思決定能力等のランチェスター微分方程式では, 考慮しえない要素が含まれるためである.

5.2 エントロピーによる評価

本論文では, エージェントが集団行動をとり戦闘をすること及び意思の有無が戦闘にどのような影響を及ぼすかをシミュレーション結果から解析する. 残存エージェント数の推移のみからの解析では, 読み取りにくい面もあるため, 評価尺度として戦闘エントロピーを導入する. Carvalho-Rodrigues [8] は, 死傷者ベースのエントロピー (以下, 戦闘エントロピー) が戦闘結果の予測に有用であることを示した. Carvalho-Rodriguesは, 戦闘エントロピーを, 次式で定義した.

$$Ch/Cf * \ln\{Cf/Ch\} \quad (5.1)$$

ここで, Cf は友軍の死傷者数 (casualty), Ch は敵軍の死傷者数である. 本論文では, これを修正した

次式の戦闘エントロピー-ALER(Adjusted Loss Exchange Ratio)を用いる。

$$\ln\{(1+Ch)/(1+Cf)\} \quad (5.2)$$

Cf, Ch が0となった場合の値の発散を防ぐ効果があり、戦闘エントロピー評価としてより有効であるともされている[9]。

エージェントが追跡、回避の意思をもたず、戦闘した場合のエントロピーの推移を図5に示す。

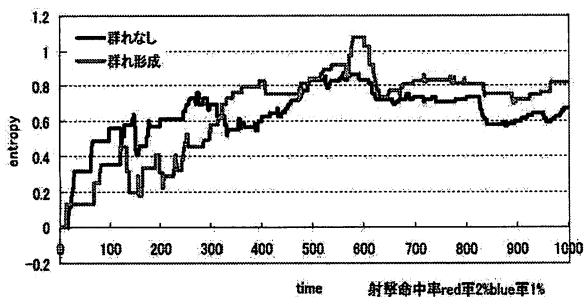


図5 エントロピーの推移

戦闘が推移していくに従って、群れを形成した戦闘集団のエントロピーが高まっていき、優勢になっていくことが分かる。ここに戦史やランチェスターの微分方程式でも取り上げられる兵力集中の特性がマルチエージェントシミュレーションにおいても示すことができる。そして、ランチェスターの微分方程式では、様々な前提条件が必要であるため、このようなエントロピーの複雑な挙動を記述するのは難しい。

次にエージェントが意思をもつ場合の戦闘推移を示す(図6)。

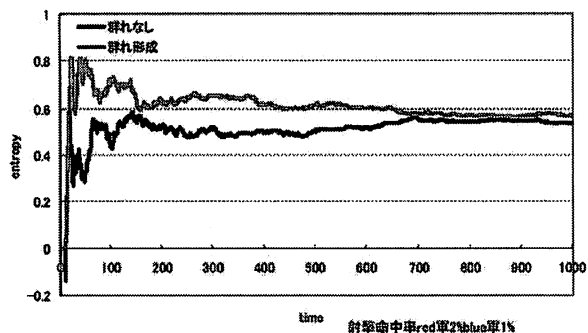


図6 エントロピーの推移(意思有り)

群れ形成によりエントロピーを底上げすることは、意思の有無に関わらず現れる特性であり、集団戦闘の運用が戦闘の効果をもたせることをシミュレーションから捉えることができる。しかし、図6は、意思をもたない場合と比較して戦闘の推移の劇的な変化が早くから起こり、以降は勝敗の帰趨は収束する。群れを形成し

た場合が急速にエントロピーを底上げし、群れを形成しない場合よりも効果的な勝利を収めていることが分かる。意思をもった場合は、そうでない場合と比較して、戦闘の緒戦から有利な戦闘を行っていることが、特性の違いとして現われている。図7に戦闘が急激な変化を起こしている間のエントロピー推移を示す。

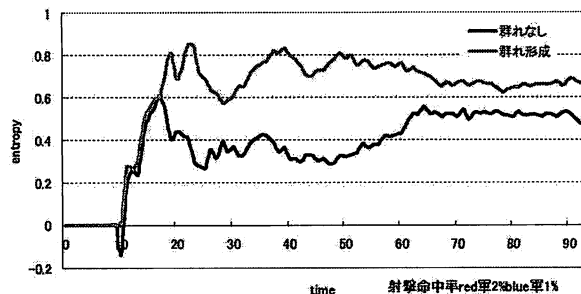


図7 エントロピーの急激な変化

これらの特性は射撃命中率を高くしていても同様に現れる特性である。射撃命中率を高くしていった場合、エントロピーも高くなるが、群れを形成した方が、そうでない場合よりもエントロピーが高くなる特性は普遍的に存在する。意思の有無が、群れを形成する集団戦闘のエントロピーを相互的に高める作用があるということである。集団戦闘が戦闘エントロピーを底上げするだけでなく、その勝敗の帰趨の収束性を大きく速めている。射撃命中率を高くしていった場合にも、勝敗の帰趨の収束する時間帯が近い時間帯であることも興味深い特性である。意思がない場合はこのような特性は存在しない。

このような特性をみてみると、マルチエージェント戦闘シミュレーションによるエントロピー評価による分析と考察は、戦闘の効果的な運用を考える上で、作戦構成上の戦闘指向や集団特性を捉えていく上で有効な手段の一つであると考えられる。

5.3 HelmboldRatio による評価

前項においては、エントロピーによる評価で分析を行った。エントロピーも有効な指標の一つであるが、別の評価要素として、HelmboldRatioによる分析を行う。Nigel[10]やLauren[11]らはフラクタル次元による戦闘へのアプローチを行っているが、その中でHartley[12]のHelmboldRatio[13]による評価を対数関数とも併せて、有効なものとして用いている。HelmboldRatioは次式によって定義する。

$$(R(0)^2 - R(t)^2)/(B(0)^2 - B(t)^2) \quad (5.3)$$

対数関数による評価も併せ、HelmboldRatioにより各軍の兵数を対数を取り本研究でみてきた意思の有無、

群れの形成によって分けて示す。図8にエージェントが意思をもたず、群れを形成する場合は示す。図9には、エージェントが意思をもち、群れを形成する場合は示す。

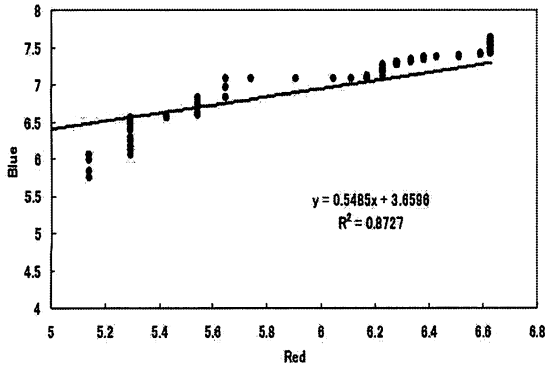


図8 HelmboldRatioによるプロット1

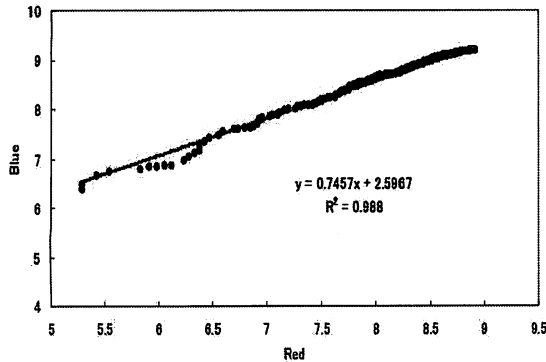


図9 HelmboldRatioによるプロット2

図8、図9を比較すると、図8のエージェントが意思をもたず、群れを形成する場合はプロットのばらつきが大きく、戦闘の推移がより変動的である特性が現われている。図9のエージェントが意思をもち、群れを形成する場合は、プロットがより直線上に並び、戦闘の推移がより安定的な特性が現われている。射撃命中率を高めていってもこの特性は変わらなかった。群れを形成し、集団戦闘を行っても、エージェントの意思のあり方によっては、他の特性が全て同じであっても、戦闘の推移の変動性に大きな違いがでることが分かる。意思の有無により、群れ形成の集団戦闘に現れる推移の変化は、戦闘を解析していく上で重要な要素の一つであると考えられる。

このような結果から、戦闘において、兵力集中の効果といった集団戦闘が引き合いに出されるが、必ずしもただ集団戦闘をすれば良いというわけではなく、集団戦闘の有効性を高めるには、エージェントの意思のあり方とも強い相関があるということである。

6 まとめと今後の課題

本論文においては、マルチエージェント戦闘シミュレーションによる3次元空間における戦闘解析を行い、従来研究で主に行われている微分方程式による解析のみでは、捉え難い特性の分析をシミュレーションにより行った。エントロピーが群れの形成により高まり、エージェントがもつ意思によって、その推移に影響が及ぶことを示した。そして HelmboldRatio により、群れ形成とエージェントの意思から現れる戦闘の特性を分析した。

今後の課題としては、今回扱ったエントロピーや HelmboldRatio による特性分析をより深め、戦闘における勝敗の帰趨やその中における効果的なエージェントの運用法や特性を考慮していきたいと考える。

文献

- [1] 飯田耕治, 戦闘の科学, 軍事ORの理論, 三恵社, 2005.
- [2] B. McCue, Combat Analysis-Lanchester and the Battle of Trafalgar, PHALANX, MORS, 1999.
- [3] Holland, John Henry "Emergence: From Chaos to Order." Reading, MA: Addison-Wesley, 1998.
- [4] 生天目章, マルチエージェントと複雑系, 森北出版, 1998.
- [5] Reynolds, C. W.: "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, in Computer Graphics," 21(4), SIGGRAPH '87 Conference Proceedings, pp.25--34, 1987.
- [6] Reynolds, C. W.: "Steering Behaviors For Autonomous Characters," in the proceedings of Game Developers Conference 1999 held in San Jose, California. Miller Freeman Game Group, San Francisco: California, pp.763--782, 1999.
- [7] M. Aoyagi and A. Namatame, Network Dynamics of Emergent Flocking Behavior, International Transactions on Systems Science and Applications, vol.3, no.1, pp.35-43, 2007.
- [8] Carvarlho, R.F. "A proposed entropy measure for assessing combat degradation". Journal of the Operational Research Society. vol.40, no.8, 789-793, 1989.
- [9] Dekker, A.H. "Network Topology and Military Performance." In Zenger, A. and Argent, R.M. (eds), MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, pp 2174-2180, 2005.
- [10] Nigel Perry, "Verification and Validation of the Fractal Attrition Equation" Jan. 2006.
- [11] M. K. Lauren, J. M. Smith and J. Moffat, Using the Fractal attrition Equation to Construct a Metamodel of the MANA Cellular Automaton Combat Model, TTCP JSA TP3 report, July 2005.
- [12] D. S. Hartley, III, Predicting Combat Effects, , INFORMS, Linticum Md, 2001.
- [13] L. R. Helmbold, Air Battles and Land Battles - A Common Pattern?, AD 718 975, Alexandria VA: DTIC 1971.