



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	関係の局所性に基くマルチエージェント制御とその人工感性への応用
Author(s)	生方, 誠希
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第11489号
Issue Date	2014-06-30
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11489
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56719
Type	doctoral thesis
File Information	Seiki_Ubukata.pdf



関係の局所性に基くマルチエージェント制御と
その人工感性への応用

北海道大学 大学院情報科学研究科
コンピュータサイエンス専攻
生方 誠希

目次

第 1 章	序論	4
1.1	本論文の背景と目的	4
1.2	本論文の構成	8
第 2 章	準備	10
2.1	位相空間	10
2.1.1	基本近傍系	11
2.2	様相論理と線形時相論理	11
2.2.1	線形時相論理	12
2.3	マルチエージェントシミュレーションにおける位相空間と近傍 . .	13
2.3.1	Euclid 空間	15
2.3.2	セル空間	16
2.3.3	2 次元 Euclid 空間と 2 次元セル空間における基本近傍系の例	20
2.3.4	視覚・視界	22
2.3.5	パーソナルスペース	22
2.3.6	マルチエージェントシステムのタスクの例	24
第 3 章	関係達成型制御のための三層モデル	26
3.1	可変な近傍を持つエージェントモデル	26
3.2	三層モデルの概要	27
3.3	第 1 層：位相空間	29
3.4	第 2 層：エージェント空間	30

3.5	第3層：時相論理	31
3.6	近傍選択のルール	33
3.6.1	対称性	34
3.6.2	推移性	35
3.7	近傍選択のストラテジ	36
3.8	シミュレーション実験	45
3.9	2次元セル空間におけるシミュレーション	46
3.9.1	追跡問題	46
3.9.2	協調行動	49
3.10	2次元 Euclid 空間におけるシミュレーション	50
3.10.1	局所的対称性／非対称性に基づく2エージェントシミュレーション	50
3.10.2	各エージェントの特徴的な行動や役割	50
3.10.3	エージェントたちの協調行動	55
3.11	関係達成型制御によるエージェントの挙動の考察	61
第4章	人工感性への応用	63
4.1	人工感性	63
4.2	感性の表現	64
4.3	本モデルの人工感性への応用	68
4.3.1	マルチエージェントの感性的挙動	68
4.3.2	本モデルに基づく人工感性の枠組み	69
4.3.3	非言語的アプローチ	72
4.3.4	本モデルに基づく人工感性プログラムの概要	73
4.4	人工感性プログラムの流れ	74
4.5	シミュレーション実験	74
4.5.1	人工感性プログラムの実装	75
4.6	シミュレーション結果	77

4.7 アンケート調査結果	79
4.8 結果の考察	80
4.9 言語イメージスケールを考慮したパラメータ選定	80
4.9.1 マッピングによるイメージスケールのカバー範囲	80
第 5 章 結論	85
謝辞	88
文献	94

第1章 序論

1.1 本論文の背景と目的

マルチエージェントシステムは、2013年の人工知能学会誌第28巻第3号における特集「エージェント」[9, 15, 16]や、同じく2013年のシステム/制御/情報(システム制御学会誌)第57巻第5号から始まった講座「マルチエージェントシステムの制御」[13, 1, 10]で紹介されているように、現在、応用を中心に数多くの研究が推進され、交通流シミュレーションや災害時の避難シミュレーション、電力システム、ビークルフォーメーションなどの様々な問題に盛んに応用されている。後者の講座の第1回総論(石井[13])によると、マルチエージェントシステムとは、複数のエージェントが相互に影響を及ぼしあい協調行動することによって、全体として共通の目標を達成するシステムである。マルチエージェントシステムの種々の実装においては個々のエージェントにそれぞれ特定の行動や役割を持たせ、全体として協調行動を実現している。それらの挙動の仕組みの理論的解明は容易ではないが、システム/制御/情報の連載第2回の林・永原[10]で解説されているように、例えばエージェント間のネットワーク構造をグラフ理論で解析するなどの理論的研究の展開も進んでいる。

マルチエージェントシステムではエージェントの集合を扱うが、一言にエージェントと言っても、様々な意味がある。例えば、Russellらは1995年に出版した著書[25]でエージェントを「感覚器を通して環境を知覚し、効果器を通して行動する何らかのもの」と定義し、次の4種類に分類している。

- 単純条件反射エージェント：現在の知覚をもとに行動し、過去の知覚履歴は

無視する.

- モデルベース条件反射エージェント：瞬間の感覚だけでは判断できない部分がどのように変化するかかの予想や，動作後に何がもたらされるかを知ることができる.
- 目的ベースエージェント：ゴールに向かって意思決定する.
- 効用ベースエージェント：明示的なゴールでなく効用のより高い状態を好む行動をとる.

エージェントの制御においては，環境と相互作用しながら自律的にタスクを遂行することが目標となり，従来研究では，環境と目的の両者を同時に考慮して綿密なプランニングを生成した後に行動の実行に移る，熟考型のエージェントの研究が主流である．それらの多くは，Russell らの分類では目的ベースエージェントないし効用ベースエージェントに相当すると考えられる．熟考型アプローチでは，複雑な環境において適切な制御を行うにはエージェントの動作や知識を詳しく記述する必要がある．更に，熟考型のエージェント制御では環境の急激な変化が起きると，想定していなかった状況が起こる可能性があり，タスクの遂行が困難になるという問題点が 1991 年に Brooks により指摘されている [3]．1986 年に Brooks は熟考型のエージェントに対して，環境に反射的に作用するモジュールから構成される行動規範型ロボットを提唱し，実機を用いて実際に複雑で動的な環境に柔軟に対処できることを示した [2]．Russell らの分類では単純条件反射エージェントやモデルベース条件反射エージェントが反射型エージェントである．反射型エージェントは環境の変化に柔軟に対応できるが，しかし，他エージェントも関わる目的を持った高次の行動を生成しづらいという欠点がある．

熟考型エージェントの制御では先験的知識によるコーディングや強化学習が必要であり，反射型エージェントの制御では，それらを必要とするものとそうでないものに分かれる．本研究では先験的知識によるコーディングや強化学習が必要な制御を局所目的達成型制御とよぶ．局所目的達成型制御では，目的を達成する

ための先験的知識が必要があり，コーディングが複雑化し，行動の原理が分かりにくいという欠点がある．

このことから，綿密なプランニングをすることなく，動的な環境に反射的に対応でき，先験的知識によるコーディングや強化学習が必要がなく，更に，他エージェントも関わる目的を持った高次の行動が可能なエージェントが期待される．本研究では，局所目的達成型制御に代わり，エージェント間の関係の局所的性質に基く関係達成型制御を提案する．エージェントは通常，Euclid 空間やセル空間で行動する．Euclid 空間は理論的には距離空間に，更には位相空間にまで抽象化される．位相空間を特徴付ける方法として，開集合系，閉集合系，開核演算子，閉包演算子，近傍系などがあり，互いに同等であることが知られている．位相空間の近傍系は空間の各点において近傍と呼ぶことのできる集合たちの性質を記述する．よって近傍系の公理は位相空間のすべての点に共通に働く法則である．マルチエージェントシステムのエージェントたちは近隣のエージェントと相互作用することから，各時刻で何らかの近傍を持つといえる．エージェントに視界や縄張り，温度や音，振動等の物理量を検知する範囲，他のエージェントと通信可能な範囲などの機能を持たせる時に，その位置における近傍系から一つの近傍を選択し，それに基づいて何らかの行動を実行するとみなせる．しかし，近傍を持つエージェントに対して，近傍系は選択可能な近傍全体を与えるが，実際にどの近傍を選ぶべきかに関する情報は与えない．したがって，近傍系の公理とは独立に，別に基準を定めて近傍を選択する必要がある．各時刻におけるエージェントの近傍に基きエージェント間の二項関係を生成し，エージェント同士の繋がり方を表現できる．その結果，例えば，あるエージェントはある別のエージェントを近傍に含めたいが，しかし，その別のエージェントはその近傍に入りたくない(対称性の局所的不成立)，あるいは，2体のエージェントが互いに互いの近傍に入りたい(対称性の局所的成立)，など，関係の局所的な性質の達成を目的として挙動するエージェントを設定することができる．一般に対称性などの関係の性質は全域的に成立することが求められるが，しかし，先に挙げたような関係の局所的な性質

はエージェントの動きに特徴を与えることが可能となるという点で有用と考えられる。本研究ではエージェント間の関係の局所的な性質の成立／不成立に着目し、それらの達成を目指した結果として、エージェントが追跡や回避、協調などの目的を持った行動を実現できるかどうか追究する。以上が、関係の局所的な特徴の達成に基く関係達成型制御の基本的な考え方である。

本研究では、関係達成型制御を三層のモデルで定式化する。三層モデルは(1)位相空間、(2)エージェント空間、(3)時相論理、の層からなる。本モデルの1層目は位相空間であり、例えば、2次元 Euclid 空間(平面)やセル空間が考えられる。複数のエージェントは位相空間上に配置され、各時刻でそれらの配置が変化すると仮定する。このとき、あるエージェントが選択した近傍内に位置するエージェントには関係があるとして、エージェント間の二項関係を定義し、一般化近似空間を生成する。本モデルの2層目はここで生成された一般化近似空間である。この二項関係によって各時刻におけるエージェント間の繋がりを表現できる。各時刻でエージェントが選択できる近傍の候補は直前の時刻で選択された近傍たちに依存するが、しかし、一般に一意には定まらない。そこで、エージェント間に生成される二項関係の特徴などを利用して近傍を一意に選択するために時相論理式によるルールやその他のストラテジが必要になる。本モデルの3層目が時相論理式に基くルールとその他のストラテジになる。2層目の二項関係の局所的な特徴に基いて、次の時刻の各エージェントの近傍を選択する基準を、時相論理式によるルールやその他のストラテジで構成する。二項関係が持つ特徴、すなわち、どういう性質を持つか、または持たないかなど、局所的な特徴を次の時刻の近傍選択に反映させることによって、従来のマルチエージェントシステムで見られるエージェントの追跡や回避、協調行動などを生成する。

以上説明した三層モデルにおいて現在の時刻の3層目のルールやストラテジに基いて選択された近傍から再び次の時刻の1層目におけるエージェントの位置や近傍が定まる。このモデルに関して、追跡や回避、協調行動などに関するシミュレーション実験を実施し、結果について考察する。その結果、それらの行動を、よ

り原始的なレベルである関係の局所性に還元して、それらの組合せによって再現できることを明らかにする。また、二項関係の局所性に基くエージェントたちの集団行動が感性的に解釈できることを利用して、本モデルに基いて、個々のユーザの感性を反映させる配色デザインを構成するプログラムを試作し、その有効性を検討する。

1.2 本論文の構成

本論文を以下の5章で構成する。

第1章は序論である。従来のマルチエージェントシステムに関する研究を概観し、その特徴と問題点を論じることによって、本研究の立場と目的を明らかにする。

第2章は本研究の数学的準備をなす章であり、位相空間や様相論理の1つである線形時相論理を説明する。一般化近似空間は全体集合とその上の二項関係からなる数学的構造であり、様相論理のKripkeフレームと同一である。一般化近似空間はその二項関係が反射的かつ推移的である場合、Euclid空間の通常の位相とは異なる位相空間となる。また、マルチエージェントシミュレーションにおける位相空間や近傍などについて説明する。

第3章ではエージェント間の関係の局所的性質に基く関係達成型制御を提案する。関係達成型制御を実現するために、位相空間上のエージェントが各時刻で近傍を選択する三層モデルを定式化する。また、本モデルにおける具体的な近傍選択の設定法について議論する。エージェント間に生成される二項関係の特徴などを利用して近傍を選択するルールを時相論理式により表現し、ルールの要請を満たす複数の近傍から目的を実現する近傍を一つ選択するストラテジについて議論する。この二項関係は近傍系の公理より反射性を満たすが、しかし、対称性や推移性などは一般には満たさない。本章では、それらの性質を持つ、または、持たないなど局所的な関係の特徴を利用して近傍を選択する方法を考察する。具体的にどの特徴を反映させるとエージェントのどの挙動に対応するかについて吟味し、

マルチエージェントの協調行動や回避行動をそれらの対応を利用して表現できるか検討する。また、以上に関して、シミュレーション実験を実施し、従来のエージェントシミュレーションにおける追跡や逃走、協調行動などの役割や行動を表現できることを確認する。

第4章では、本研究で提案したモデルの応用可能性の一例として、配色デザインを生成する人工感性プログラムを試作する。2004年に椎塚久雄 [27, 28] が提唱した人工感性においては「個人個人とそのときの状況に合わせて違った対応ができる (個別性)」ことが重要であり、集団の感性だけでなく個々の感性を活かすことが強調される。本試作プログラムは位相空間内に配置され行動するエージェントたちにユーザの感性を投影し、ユーザがエージェントたちとノンバーバルにインタラクションすることによって、配色デザインにユーザの感性の個別性を表現できることを示す。

第5章は結論であり、本研究を総括し、今後の課題について検討する。

第2章 準備

本章では，位相空間および様相論理の1つである時相論理を説明する．一般化近似空間は全体集合とその上の二項関係からなる数学的構造であり，様相論理のKripke フレームと同一である．一般化近似空間はその二項関係が反射的かつ推移的である場合，Euclid 空間の通常の位相とは異なる位相空間となる．

また，マルチエージェントシステムやエージェントについて概観し，マルチエージェントシミュレーションで用いられる代表的な空間である Euclid 空間やセル空間について説明する．加えて，それらの空間における距離や位相について説明する．また，マルチエージェントシステムにおける代表的な例題である追跡問題について説明する．

2.1 位相空間

位相空間は集合に要素どうしの近さやつながり方を抽象化した構造を付与した空間であり，

$$\langle U, \mathcal{N} \rangle$$

として定義する． U は全体集合， $\mathcal{N}$ は近傍系 (neighborhood system) である．すなわち，

$$\mathcal{N} : U \rightarrow 2^{2^U}$$

は以下の近傍系の公理をみたす関数である．記法 2^S は集合 S のべき集合を表す．すなわち， $\mathcal{N}$ の終域は U のべき集合のべき集合である．

$$(N_1) \quad U \in \mathcal{N}(x)$$

$$(N_2) \quad X \in \mathcal{N}(x) \Rightarrow x \in X$$

$$(N_3) \quad X_1, X_2 \in \mathcal{N}(x) \Rightarrow X_1 \cap X_2 \in \mathcal{N}(x)$$

$$(N_4) \quad (X \in \mathcal{N}(x) \wedge X \subseteq Y) \Rightarrow Y \in \mathcal{N}(x)$$

$$(N_5) \quad X \in \mathcal{N}(x) \Rightarrow \exists Y \in \mathcal{N}(x)[Y \subseteq X \wedge \forall y(y \in Y \Rightarrow X \in \mathcal{N}(y))]$$

位相空間は距離空間の一般化となっている．ここでは位相空間を近傍系により定義しているが，しかし，位相空間を特徴付ける方法として，開集合系，閉集合系，開核演算子，閉包演算子などがあり，互いに同等であることが知られている．

2.1.1 基本近傍系

位相空間 $\langle U, \mathcal{N} \rangle$ において， $\mathcal{N}(x)$ は点 x の全近傍系である． $\mathcal{N}(x)$ の部分集合 $\mathcal{N}'(x)$ が

$$\forall V \in \mathcal{N}(x)(\exists V' \in \mathcal{N}'(x)(V' \subseteq V))$$

を満たすとき， $\mathcal{N}'(x)$ を点 x における基本近傍系 (fundamental system of neighbourhoods) という．

2.2 様相論理と線形時相論理

原子文 (atomic sentences) の集合 $\mathcal{P}$ が与えられたとき，様相論理の言語 $\mathcal{L}_{\text{ML}}(\mathcal{P})$ は以下の論理演算子 $\top$ (恒真)， $\perp$ (恒偽)， $\neg$ (否定)， $\wedge$ (連言)， $\vee$ (選言)， $\rightarrow$ (実質含意)， $\leftrightarrow$ (実質同値)， $\Box$ (必然)， $\Diamond$ (可能) を使って，次の形成規則

$$p \in \mathcal{P} \Rightarrow (p) \in \mathcal{L}_{\text{ML}}(\mathcal{P})$$

$$(\top), (\perp) \in \mathcal{L}_{\text{ML}}(\mathcal{P})$$

$$p \in \mathcal{L}_{\text{ML}}(\mathcal{P}) \Rightarrow (\neg p), (\Box p), (\Diamond p) \in \mathcal{L}_{\text{ML}}(\mathcal{P})$$

$$p, q \in \mathcal{L}_{\text{ML}}(\mathcal{P}) \Rightarrow (p \wedge q), (p \vee q), (p \rightarrow q), (p \leftrightarrow q) \in \mathcal{L}_{\text{ML}}(\mathcal{P})$$

によって生成される最小の集合である.

Kripke フレーム $\mathcal{F}$ は構造

$$\langle U, R \rangle$$

である. ここで U は全体集合 (可能世界の集合), R は U 上の二項関係である.

Kripke フレーム $\mathcal{F}$ が与えられたとき, Kripke モデル $\mathcal{M}$ は構造

$$\langle U, R, V \rangle$$

である. V は付値関数であり, 各可能世界で全ての原子文に真理値 0 (偽, false) か 1 (真, true) を割り当てる. 以下の二つの U の部分集合を定義する:

$$\begin{aligned} \|p\|^{\mathcal{M}} &= \{x \in U \mid \mathcal{M}, x \models p\}, \\ U^R(x) &= \{y \in U \mid xRy\}. \end{aligned}$$

様相文の解釈は以下ようになる:

$$\begin{aligned} \mathcal{M}, x \models \Box p &\Leftrightarrow U^R(x) \subseteq \|p\|^{\mathcal{M}}, \\ \mathcal{M}, x \models \Diamond p &\Leftrightarrow U^R(x) \cap \|p\|^{\mathcal{M}} \neq \emptyset. \end{aligned}$$

2.2.1 線形時相論理

時相論理 (Temporal logic) は様相論理の一種であり, 1950 年代に Prior により提案されて以来, 多くの研究や拡張がなされてきた. 時相論理には線形時相論理 (LTL), 計算木論理 (CTL) など様々な種類があるが, 本研究では線形時相論理を使用する. 線形時相論理は 1977 年に Pnueli によって定式化された [23]. 時相論理では様相演算子として時相演算子を用いて, 時間に関する論理的性質を表現することができるため, 動的なモデルを扱う際に有用である.

線形時相論理の言語は原子式の集合 P から，論理演算子 $\neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow$ $\bigcirc$ によって通常通り生成される． $\bigcirc$ は Next 演算子であり，その真理条件は

$$t \models \bigcirc p \Leftrightarrow t+1 \models p$$

で与えられる．線形時相論理には，他にも $[F]$ (Globally), $\langle F \rangle$ (in the future), U (Until) などがあるが，本研究では使用しない．

線形時相論理のモデルは $\langle T, \leq \rangle$ である．ここで，

1. T : 時刻の集合 (本研究では自然数の集合)
2. $\leq$: T 上の全順序

である． $t \models p$ は時刻 t で p が真であることをあらわす． $\bigcirc$ (Next) 演算子により， $t \models \bigcirc p$ は時刻 $t+1$ で p が真であるなどの表現が可能となる．

2.3 マルチエージェントシミュレーションにおける位相空間と近傍

マルチエージェントシステムは複数のエージェントが相互に影響を及ぼしあい，協調行動する事で全体として共通の目標を達成するシステムである．自然界における協調行動を模した，1987年のReynoldsによるコンピュータグラフィックスのBoidsはよく知られている[24]．近年では，交通流シミュレーションや災害時の避難シミュレーション，電力システム，ビークルフォーメーションのような様々な問題に応用されている．種々の実装において個々のエージェントがそれぞれ特定の行動や役割を持ち全体として協調行動を実現する．しかし，それらの挙動の仕組みの理論的解明は容易ではなく，例えばエージェント間のネットワーク構造をグラフ理論で解析するなど，抽象度を高めた研究がある．エージェントは通常，Euclid空間やセル空間で行動する．Euclid空間は理論的には距離空間に，更には位相空間にまで抽象化される．位相空間の近傍系は空間の各点において近傍と呼

ぶことのできる集合たちの性質を記述する．よって近傍系の公理は位相空間のすべての点に共通に働く法則である．マルチエージェントシステムのエージェントたちは近隣のエージェントと相互作用することから，各時刻で近傍を持つといえる．エージェントに視界や縄張り，温度や音，振動等の物理量を検知する範囲，他エージェントと通信可能な範囲などを持たせる時に，その位置における近傍系から一つの近傍を選択し，何らかの行動を実行するとみなすこともできる．しかし，近傍を持つエージェントに対して，近傍系は各エージェントが選択可能な近傍全体を与えるが，実際にどの近傍を選ぶべきかに関する情報はない．したがって，近傍系の公理とは独立に，別に基準を定めて近傍を選択する必要がある．

マルチエージェントの制御においては，多数の自律的に行動するエージェントが用意される．例えば，Russell らは 1995 年に出版した著書 [25] でエージェントを「感覚器を通して環境を知覚し，効果器を通して行動する何らかのもの」と定義し，次の 4 種類に分類している．

- 単純条件反射エージェント：現在の知覚をもとに行動し，過去の知覚履歴は無視する．
- モデルベース条件反射エージェント：瞬間の感覚だけでは判断できない部分がどのように変化するかかの予想や，動作後に何がもたらされるかを知ることができる．
- 目的ベースエージェント：ゴールに向かって意思決定する．
- 効用ベースエージェント：明示的なゴールでなく効用のより高い状態を好む行動をとる．

個々のエージェントは高度な知能を持つものから，Brooks が 1986 年に提唱・実装した行動規範型ロボット [2] のように反射的な行動を基本とするものまで様々ある．

本研究ではモデルベース条件反射エージェントを扱い，更に先験的知識によるコーディングや強化学習を必要としないものを扱う．本研究で扱うエージェント

は過去の記憶を持たないが、しかし、次の時刻のエージェント間の関係の局所的な性質の成立／不成立に関する情報を部分的に持っている。これらは目的ベースエージェントや効用ベースエージェントのような明確なゴールや目的を持たず、熟考して綿密なプランニングをすることもない。本研究では関係達成型制御によって、モデルベース条件反射エージェントに他のエージェントも関わる目的を持った行動をさせることを目標としている。

自律的に移動するエージェントたちが協調行動をする際には、お互いの位置を知る必要があり、エージェントは感覚器 (距離センサやビジョンセンサ) をもつ。これらの感覚器は位相空間における近傍と解釈できる場合がある。エージェントの知覚、視野、縄張りなどは空間の一部、局所的なものであり、それらによってエージェント間の関係に局所的な特徴がもたらされる。

以下に、マルチエージェントシミュレーションで用いられる位相空間や近傍の例を挙げる。

2.3.1 Euclid 空間

ロボットなどが行動する空間は 3 次元 Euclid 空間である。 n を自然数とするとき、実数全体 $\mathbb{R}$ の n 個の直積 $\mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \cdots \times \mathbb{R}$ を $\mathbb{R}^n$ と書く。 $\mathbb{R}^n$ の 2 つの元 $x = (x_1, \dots, x_n), y = (y_1, \dots, y_n)$ に対し、その間の距離 (Euclid 距離) は

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

で定義される。集合 $\mathbb{R}^n$ にこのように距離を導入したとき、 $\mathbb{R}^n$ を n 次元 Euclid 空間とよぶ。 Euclid 空間上の距離位相は Euclid 位相あるいは通常の位相とよばれる。 $x \in \mathbb{R}^n, \varepsilon \in \mathbb{R}, \varepsilon > 0$ とするとき、

$$B(x, \varepsilon) = \{y \in \mathbb{R}^n \mid d(x, y) < \varepsilon\}$$

を x を中心、 ε を半径とする $\mathbb{R}^n$ の球体 (ball) という。 $\mathbb{R}^n$ の球体 $B(x, \varepsilon)$ は開集合であり、開球体という。

n 次元空間 $\mathbb{R}^n$ における位相的構造はこの距離の概念に基いて定義される．開球体 $B(x, \varepsilon)$ を点 x の近傍と考えるとき，これを x の ε -近傍という．開球体全部の集合 $\{B(x, \varepsilon) \mid x \in S, \varepsilon > 0\}$ は開集合系 $\mathcal{O}_d$ の基底を作り，点 x を固定した場合， $\{B(x, \varepsilon) \mid \varepsilon > 0\}$ は点 x の一つの基本近傍系を作る．

計算機上のマルチエージェントシミュレーションにおいては実数型の変数の配列を用いて，2次元 Euclid 空間や3次元 Euclid 空間を近似した空間を用いる．

2.3.2 セル空間

セル空間 (cellular space) と，セル空間における代表的な近傍について説明する．セルオートマトン (セルラーオートマトン, cellular automaton, CA) においては，セル空間が用いられる．セルオートマトンは 1951 年に von Neumann [41, 42] により生物の自己再生の数理モデルとして発案された．セル空間において骨や樹木などの生体組織のリモデリング等を再現する数理モデルであり，1972 年に Ulam [40] は自動自己修復・自己複製装置の論理的基礎を発展させた．1970 年に Conway により 2次元セルオートマトンの一種であるライフゲーム (Game of life) が考案され，同年に Gardner [5] がライフゲームを Scientific American で紹介したことで大きな反響を呼んだ．更に，1984 年の Wolfram [43] による再発見や，1986 年に Langton [19] が発案した人工生命 (Artificial Life) などにより注目されてきた．現在では社会，物理，科学等の広範囲における複雑な現象を解明するための有力な手法となっている．

セルオートマトンでは，有限個の状態設定可能なセルを空間的に規則正しい格子状に接続した系を基本モデルとする．このような格子状に接続した空間をセル空間という．セル空間は 1999 年の真鍋らによる Q-Learning を用いたマルチエージェントシステム [20] や，2008 年の大鏑・小野木によるセルオートマトン法による避難流動のシミュレーション [22] など，様々なマルチエージェントシミュレーションに用いられている．

1次元セル空間は整数全体の集合

$$\mathbb{Z}$$

で, 2次元セル空間は整数全体の集合の直積

$$\mathbb{Z}^2$$

で表現できる.

2次元セル空間における代表的な近傍として, Neumann 近傍 (ノイマン近傍, フォン・ノイマン近傍, von Neumann neighborhood) や Moore 近傍 (ムーア近傍, Moore neighborhood) などがある. 他にも Margolus 近傍など, 多様な近傍がある. Neumann 近傍はあるセルに上下左右に隣接するセルを加えた集合であり, Moore 近傍はあるセルに上下左右に隣接セルに加えて左上, 左下, 右上, 右下の斜め方向のセルを加えた集合である (図 2.1, 図 2.2).

Neumann 近傍は中央のセルを含まない 4 近傍とする場合や, 中央のセルを含む 5 近傍とする場合があり, Moore 近傍は中央のセルを含まない 8 近傍とする場合や, 中央のセルを含む 9 近傍とする場合がある. 本研究では中央のセルを含む近傍として扱う. これらの近傍は 3次元セル空間などにも拡張される.

セル空間においては Euclid 距離の他に, Manhattan 距離や Chebyshev 距離などが用いられる. Neumann 近傍はあるセルから Manhattan 距離が 1 以内のセルの集合であり, Moore 近傍はあるセルから Chebyshev 距離が 1 以内のセルの集合である.

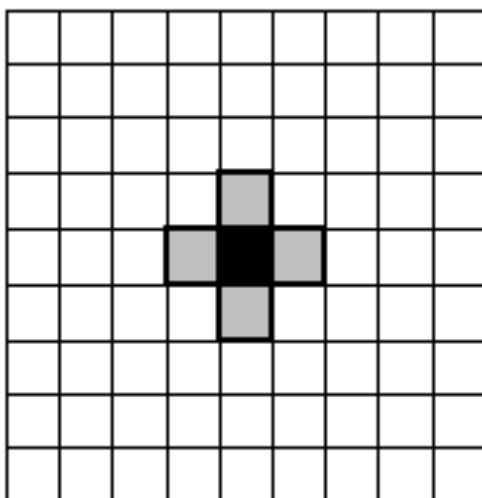


图 2.1: Neumann 近傍

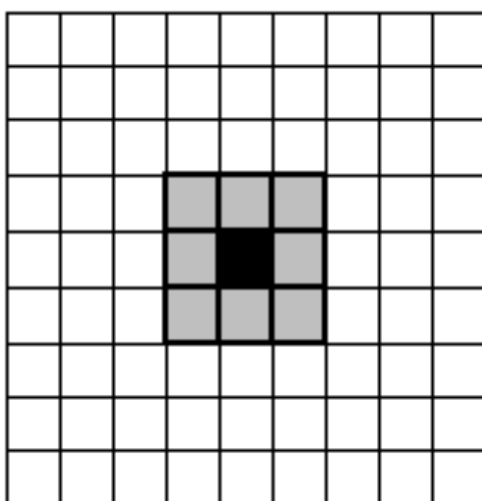


图 2.2: Moore 近傍

Manhattan 距離

Manhattan 距離 (Manhattan distance) は Minkowski により発案された． $\mathbb{Z}^n$ の 2 つの元 $x = (x_1, \dots, x_n), y = (y_1, \dots, y_n)$ に対し，

$$d_{\text{Mh}}(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

で定義される．

本研究ではセル空間において Manhattan 距離に基く基本近傍系を利用するため， $\mathbb{Z}^n$ 上で説明したが，しかし，これらは実数全体の集合の直積 $\mathbb{R}^n$ 上でも同様に定義される．また， $\mathbb{Z}^n$ 上でも Euclid 距離を同様に定義できる．

Chebyshev 距離

Chebyshev 距離 (Chebyshev distance) は Chebyshev に因んで命名された距離であり，Chessboard 距離 (Chessboard distance) ともよばれる． $\mathbb{Z}^n$ の 2 つの元 $x = (x_1, \dots, x_n), y = (y_1, \dots, y_n)$ に対し，

$$d_{\text{Ch}}(x, y) = \max_i (|x_i - y_i|)$$

で定義される．

セル空間の位相

セル空間は離散位相 (discrete topology) をもつ離散空間 (discrete space) となる． U における離散位相とは，開集合系 $\mathcal{O} = 2^U$ となる位相である．

Manhattan 距離や Chebyshev 距離によって ε -近傍を構成することができ，また， ε -近傍を用いて基本近傍系を構成することができる．それぞれ，以下のような基本近傍系を構成する：

$$B_{\text{Mh}}(x, \varepsilon) = \{y \in \mathbb{Z}^n \mid d_{\text{Mh}}(x, y) < \varepsilon\},$$

$$\mathcal{N}'_{\text{Mh}}(x) = \{B_{\text{Mh}}(x, \varepsilon) \mid 0 < \varepsilon\},$$

$$B_{\text{Ch}}(x, \varepsilon) = \{y \in \mathbb{Z}^n \mid d_{\text{Ch}}(x, y) < \varepsilon\},$$

$$\mathcal{N}'_{\text{Ch}}(x) = \{B_{\text{Ch}}(x, \varepsilon) \mid 0 < \varepsilon\}.$$

セル空間においては、例えば、 $\varepsilon = 1$ とすると開近傍 $B_{\text{Mh}}(x, 1) = \{x\}$ をとることができる。したがって、任意の点の一元集合 (singleton) が開近傍となり、開集合となるため離散位相となる。

2.3.3 2次元 Euclid 空間と 2次元セル空間における基本近傍系の例

Euclid 距離や Manhattan 距離, Chebyshev 距離を用いて、2次元 Euclid 空間や 2次元セル空間の基本近傍系を構成することができる。全近傍系では、例えばセル空間においては現在のセルを要素として含む任意の部分集合が近傍となり、あらゆる形状の近傍が考えられ、煩雑になるため扱うのが難しい。本研究では、エージェントは現在の位置における基本近傍系の中から一つの近傍を選択するものとする。

2次元 Euclid 空間においては、Euclid 距離による ε -近傍によって基本近傍系

$$\mathcal{N}'(x) = \{B(x, \varepsilon) \mid 0 < \varepsilon\}$$

を構成することができる。

2次元セル空間においては、Manhattan 距離や Chebyshev 距離による ε -近傍を、 $\varepsilon = 1, 2, 3, \dots$ として、可算の基本近傍系を構成することができる。

$$\mathcal{N}'_{\text{Mh}}(x) = \{B_{\text{Mh}}(x, 1), B_{\text{Mh}}(x, 2), B_{\text{Mh}}(x, 3), \dots\},$$

$$\mathcal{N}'_{\text{Ch}}(x) = \{B_{\text{Ch}}(x, 1), B_{\text{Ch}}(x, 2), B_{\text{Ch}}(x, 3), \dots\}.$$

Manhattan 距離による点 x の基本近傍系の例を図 2.3 に示す。

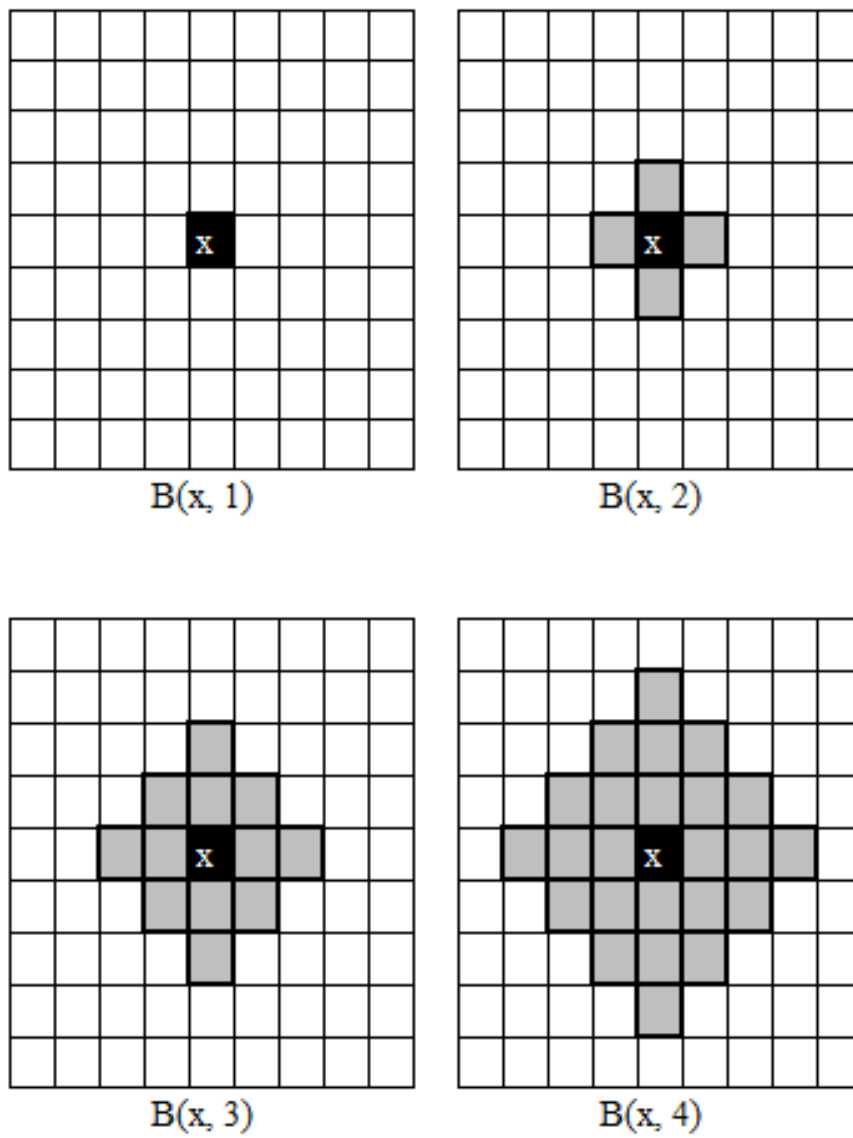


図 2.3: Manhattan 距離による ϵ -近傍の例

2.3.4 視覚・視界

エージェントの近傍として視覚・視界を設定している例は多く見られる [13, 20, 22, 24, 44]。例えば，セル空間上の追跡問題 (ハンターゲーム) においてエージェントは，各時刻に設定された近傍 (周囲のセルの集合) 内の情報を視覚情報として得ることができ，それに基づき行動する。セル空間における代表的な近傍の種類として，4 近傍や 8 近傍などがある。セル空間におけるエージェントの視界に関する研究として，2001 年の伊藤による視覚の粗視化をするエージェントの研究 [14] や，2006 年の山村による段階的な視覚をもつエージェントの研究 [44] などがなされている。

視覚範囲・視界の形状例

エージェントが持つ視覚範囲，視界の形状は，各シミュレーションの実装において様々な設定がなされる。2006 年の山村らによる段階的な視覚をもつエージェントの研究 [44] では Euclid 距離に重みを付け，水平方向を長く見せるようにした仮想距離を定義している。その仮想距離を用いて，視界内の近距離，中距離，遠距離を設定し，離れるほど得られる情報が削減されるようにしている。2008 年の大鑄・小野木による災害時の避難シミュレーション [22] では，エージェント (歩行者) の視界を，自身を中心とした左右それぞれ 90 度の角度を持つ扇型とし，半径はシミュレータ上で適宜設定している。

2.3.5 パーソナルスペース

1966 年にアメリカの文化人類学者 Hall の提唱したパーソナルスペース (personal space) [7] は心理的な縄張りのようなものである。パーソナルスペースは個人の身体を取り巻く空間領域であり，相手に侵入されると不快感を抱き，その回避を誘発する。Hall はパーソナルスペースを以下のように分類している。

密接距離 (intimate space) 0～45cm

家族・恋人などとの身体的接触が容易にできる距離.

個体距離 (personal space) 45～120cm

友人などと個人的な会話を交わすときの距離.

社会距離 (social space) 120～360cm

職場の同僚と一緒に仕事をするときなどの距離.

公共距離 (public space) 360cm～700cm

公的な人物と公式的な場で対面するときの距離.

各空間は更に細かく近接相・遠方相に分割される. cm 単位で示された数値は目安であり, 個人差がある. パーソナルスペースは性別, 年齢, 身体的特徴, 人種, 民族, 個人の性格, 相手との関係, 状況等により流動的に変化する.

パーソナルスペースは人間の個性や感性と密接に関連しており, エージェントに個性や感性を持たせるのに役立つと考えられる. パーソナルスペースの分類・形状等の解釈・設定のしかたは, 1985 年の渋谷によるパーソナルスペースの形態に関する考察 [26] に示される通り, 多数存在する.

パーソナルスペースは位相空間における近傍とみなすことができる. 本研究では位相空間上の開近傍を用いてシンプルなパーソナルスペースを構成する. 位相空間 $\mathcal{S} = \langle U, \mathcal{N} \rangle$ において, パーソナルスペースは現在の位置 $x \in U$ に対応して決定される U の部分集合であり, 開近傍を利用して表現できる.

$$PS = \{N_1, N_2, N_3, N_4\},$$

$$N_1, N_2, N_3, N_4 \in \mathcal{N}(x).$$

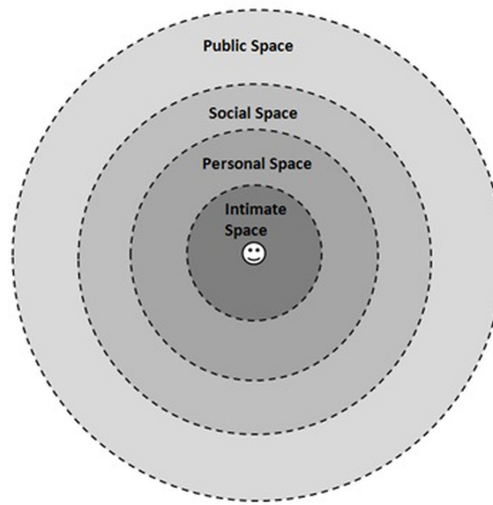


図 2.4: パーソナルスペース

2.3.6 マルチエージェントシステムのタスクの例

追跡問題

追跡問題 (ハンターゲーム, pursuit problem) はマルチエージェントシステムの代表的な例題である (図 2.5). 追跡問題では $n \times n$ の 2 次元セル空間において, 複数のハンターエージェントと獲物エージェントをランダムに配置したものを初期状態とする. エージェントは隣接するセルへ移動することが可能である. 移動可能セルとして Neumann 近傍や Moore 近傍が設定される. 通常, 同一のセルに複数のエージェントが存在することは許容されないが, しかし, 他エージェントと重なることを許容しているものもある [4].

獲物を追跡するエージェント (ハンター, hunter) とハンターから逃走するエージェント (獲物, prey) が存在し, 全てのハンターが獲物に隣接した状態を目的とする. 獲物はハンターの位置とは無関係にランダムに行動する (非逃避的行動) ものや, ハンターから遠ざかるように行動する (逃避的行動) ものなどの設定がある.

捕獲条件，捕獲状態としては，獲物の 8 近傍に 2 体のハンターが存在する状態とするもの [8] や，ハンターと獲物がセル上の同じ位置を占めると獲物が捕獲されたとみなすもの [14] がある．エージェントの視覚の設定としては，制限が無く全体を見渡せるものや Chebyshev 距離がある値以内の範囲であるものなどがある．

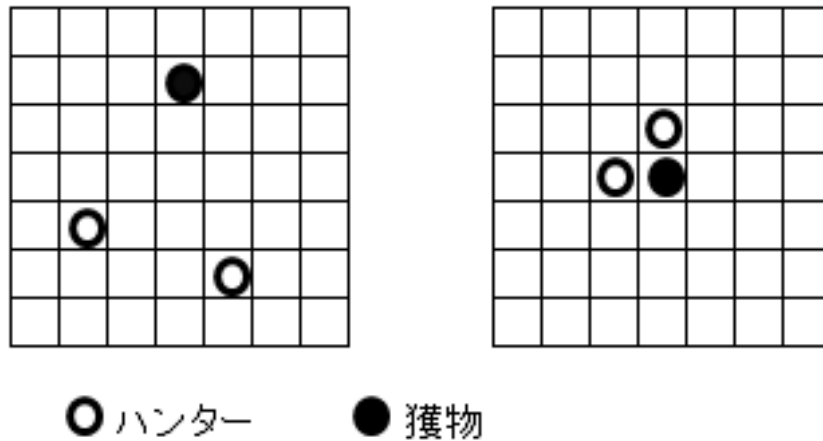


図 2.5: 追跡問題

移動可能セル

マルチエージェントシミュレーションにおけるエージェントは通常，次の時刻に，現在位置するセルの近隣のセルに移動することが可能であるとされる．エージェントが次の時刻で移動可能なセルはエージェントの現在地における Neumann 近傍や Moore 近傍などが設定される．障害物や他エージェントと重なる場合には移動できない．

長谷川らの 2006 年の追跡問題 [8] においては，Moore 近傍内から移動先セルを決定している．大鏑らの 2008 年のセルオートマトン法による避難流動のシミュレーション [22] においても移動可能セルとして Moore 近傍が採用されている．

第3章 関係達成型制御のための三層モデル

本章では，関係達成型制御の定式化のために，エージェントが行動する位相空間において次の時刻の近傍選択を時相論理式のルールに基いて動的に実現するモデルを提案する．その特徴は，ある時刻における近傍から生成された二項関係の局所的な特徴が時相論理式の意味を定め，次の時刻の近傍選択に反映させる点にある．本章の内容は2014年のUbukata *et al.* による公表論文 [39] に基いて構成される．関係達成型制御のための三層モデルの1層目は2011年のUbukata *et al.* による公表論文 [34] で提案したモデルが基礎となっている．そのモデルは位相空間上のエージェントが，各時刻に各位置の近傍系の中から1つの近傍を選択する動的なモデルである．

3.1 可変な近傍を持つエージェントモデル

2011年にUbukata *et al.* は各時刻に位相空間上でエージェントが個々に近傍を持ち，その近傍を可変とする動的なモデルを提案した [34]．このモデルではエージェントの知覚範囲，視野，縄張り，パーソナルスペース，他エージェントとの通信可能な範囲などを位相空間における近傍として統一的に解釈される．平面や2次元セル空間は位相空間でありこのモデルの適用が可能である．2011年のモデルの特徴は，強化学習や先験的な知識によるコーディングが不要な反射型エージェントに関して，近傍のコントロールによってエージェントの挙動を生成できることである．しかしながら，問題点として，他のエージェントも関わる目的を持つ

た行動が考慮されていない点が挙げられる。

本研究ではこの問題に対処するため、近傍を介したエージェント間の関係性に着目し、その関係の局所性に基く制御としてエージェントの関係達成型制御を提案する。

3.2 三層モデルの概要

一般に、エージェントは Euclid 空間やセル空間などの位相空間において、各時刻で近傍を持ちながら行動すると考えられる。近傍を持つエージェントに対して、近傍系は各エージェントが選択可能な近傍全体を与えるが、しかし、実際にどの近傍を選ぶべきかに関する情報は与えない。したがって、近傍系の公理とは独立に、別に基準を定めて近傍を選択する必要がある。

本章では関係達成型制御を実現するために、位相空間上のエージェントが各時刻で近傍を選択する三層モデルを定式化する。

三層モデルは、以下の 3 つの層から構成される。

第 1 層 位相空間

第 2 層 エージェント空間

第 3 層 時相論理

エージェントは一般に第 1 層の位相空間の上で行動する。具体的には、2 次元 Euclid 空間 (平面) やセル空間が考えられる。各時刻で各エージェントは近傍を持ち、近傍の位置関係から第 2 層であるエージェント集合上の二項関係を生成できる。この二項関係は各時刻でのエージェントの繋がり方を表現し、第 3 層における時相論理式の意味を定める。その結果、現時刻の二項関係のある特定の性質の成立／不成立に関する時相論理式の真偽が決定される。第 3 層では次の時刻で成立／不成立すべき性質を要求するルールが設定されていて、現時刻の真偽に基づいて適切なルールが選択され、次の時刻の近傍選択に反映する。一般に、ルールの

要求を満たす近傍は複数あり，その中から行動の目的に対応するストラテジを採用することで次の時刻の適切な近傍を選択する．三層モデルの概念図を図 3.1 に示す．

以降，各層に関して詳細に説明する．

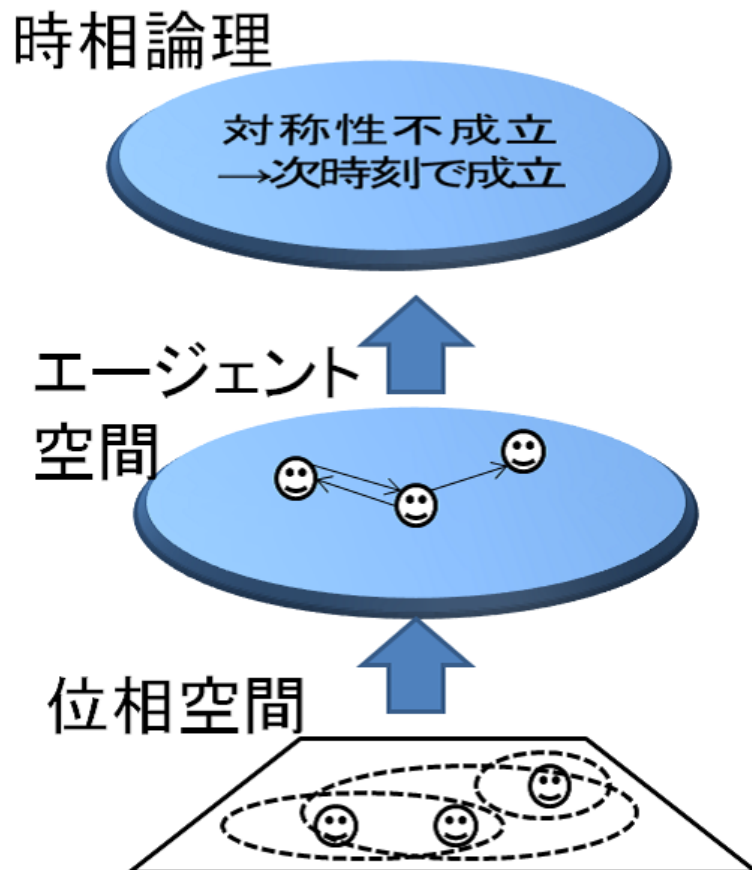


図 3.1: 三層構造のモデル

3.3 第1層：位相空間

まず，三層モデルの第1層を説明する．本論文で提案するモデルでは，複数のエージェントが位相空間上に配置され，各時刻でエージェントの位置が変化すると仮定する．エージェントは自律的に次の時刻の位置と近傍を選択することができる．

位相空間は全体集合と近傍系の公理をみたす関数 $\mathcal{N}$ の組

$$\mathcal{F} = \langle U, \mathcal{N} \rangle$$

で表される．本研究ではエージェントの集合を有限集合

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

とする．本研究では時刻を離散時間として扱い，時刻の集合を

$$T = \mathbb{N} = \{0, 1, \dots\}$$

とする．自然数の全順序を用いて順序集合 $\langle T, \leq \rangle$ を構成でき，これは一般化近似空間 (Kripke フレーム) である．各時刻におけるエージェントの位置を写像

$$Loc : A \times T \rightarrow U$$

で記述する．エージェント a の時刻 t における位置は $Loc(a, t)$ であり，次の時刻でのエージェントの位置が決定されたとき，エージェント a の位置は $Loc(a, t+1)$ によって表現される．本研究ではエージェントを大きさを持たない一点として存在すると仮定している．エージェントが次の時刻で移動可能な位置の集合を写像

$$PosLoc : A \times T \rightarrow 2^U$$

で表現する．現在の時刻を t とした時，エージェント a が次の時刻 $t+1$ で採りうる位置の集合は $PosLoc(a, t)$ であり，これは U の部分集合である．エージェントの次の時刻 $t+1$ における位置は $PosLoc(a, t)$ の要素から選択される．すなわち，

$Loc(a, t+1) \in PosLoc(a, t)$ である．時刻 t において各エージェントが採っている近傍を写像

$$N : A \times T \rightarrow 2^U$$

$$s.t. N(a, t) \in \mathcal{N}(Loc(a, t))$$

によって表現する．すなわち， $N(a, t)$ がエージェント a が時刻 t で採る近傍を表す．エージェントが採る近傍を基本近傍系 $\mathcal{N}'$ の要素に限定すると $N(a, t) \in \mathcal{N}'(Loc(a, t))$ となる．本研究では主に (全) 近傍系 $\mathcal{N}$ の基本近傍系 $\mathcal{N}'$ を考える．すなわち，エージェント a は各時刻 t において $\mathcal{N}'(Loc(a, t))$ から近傍を選択する．

3.4 第2層：エージェント空間

次に，三層モデルの第2層を説明する． A をエージェントの集合とする．各時刻におけるエージェントたちの位置と，各エージェントが選択した近傍により，エージェント間の二項関係を生成できる．本研究では，あるエージェントが選択した近傍内に位置するエージェントには関係があるとして，エージェント間の二項関係を定義する．すなわち，エージェント間の時刻 t における二項関係 $R_t (\subseteq A \times A)$ をエージェント $a, a' \in A$ に対して，

$$aR_t a' \Leftrightarrow a' \in N(a, t)$$

によって定義する．ここで， $N(a, t)$ は前節で導入した，エージェント a が時刻 t で採る近傍である．この二項関係は各時刻におけるエージェント間の繋がりを表現する．

エージェントの集合 A と時刻 t における二項関係 R_t は一般化近似空間 (Kripke フレーム)

$$\langle A, R_t \rangle$$

を構成する．

本研究はこのように時刻ごとに生成される関係 R_t の局所的な特徴に着目する．

3.5 第3層：時相論理

第3層では，第2層の二項関係に基いてエージェント間の関係を表現する時相論理の原子式の真偽が定まる．また，時相論理式によって近傍選択のルールを記述する．まず，言語を定義する：

1. 個体定項集合： $C = A$ (簡単のため，一対一対応があると仮定する)
2. 述語記号： $r(x, y)$ (x は y と関係がある)
3. 原子式集合： $P = \{r(a_i, a_j) \mid 1 \leq i, j \leq n\}$

本言語では，述語記号と個体定項を使っているが，全称，存在記号は使用しないので，事実上，命題論理の言語である．よって，時相論理式はこの原子式の有限集合から $\neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow, \bigcirc$ を使って生成される．次に，意味論を定める．領域をエージェント集合 $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ とし， A 上の二項関係族 $\{R_t\}_{t \in \mathbb{N}}$ が与えられたとき，原子文 $r(a_i, a_j)$ の時刻 t における真理条件を

$$t \models r(a_i, a_j) \Leftrightarrow a_i R_t a_j$$

によって定義する．これによって，「時刻 t で関係がある」とは「時刻 t で近傍内にある」という意味となる．

この言語を使って，エージェント間の関係に関する，例えば，以下の表現ができる．

例 1

- $t \models r(x, y) \Leftrightarrow x R_t y$: 時刻 t で y は x の近傍内にいる
- $t \models \neg r(x, y)$: 時刻 t で y は x の近傍外にいる
- $t \models \bigcirc r(x, y)$: 次の時刻 $t + 1$ で y は x の近傍内にいる
- $t \models \text{sym}(x, y) = (r(x, y) \wedge r(y, x))$: 時刻 t で x と y は対称性を満たす (s_{11})

- $t \models r(x, y) \wedge \neg r(y, x) : \text{時刻 } t \text{ で } x \text{ は } y \text{ を近傍内とし, } y \text{ の近傍外にいる } (s_{10})$
- $t \models \neg r(x, y) \wedge r(y, x) : \text{時刻 } t \text{ で } x \text{ は } y \text{ を近傍外とし, } y \text{ の近傍内にいる } (s_{01})$
- $t \models \neg r(x, y) \wedge \neg r(y, x) : \text{時刻 } t \text{ で } x \text{ は } y \text{ を近傍外とし, } y \text{ の近傍外にいる } (s_{00})$
- $t \models \bigcirc trans(x, y, z) = (r(x, y) \wedge r(y, z) \wedge r(x, z)) : \text{次の時刻で } x, y, z \text{ は推移性を満たす}$
- $t \models \bigcirc \neg trans(x, y, z) : \text{次の時刻で } x, y, z \text{ は推移性を満たさない}$

これらの表現を使って，次の時刻のエージェント間の局所的な関係の成立／不成立に関するルールを記述できる．時刻 t において，次の時刻 $t+1$ の状態を記述するため，時相論理式によるルールは主に $\bigcirc(\text{Next})$ 演算子を用いて表現できる．

例 2

- $t \models \bigcirc r(x, y) : x \text{ は次の時刻で } y \text{ を近傍に入れる } (s_{1*})$
- $t \models \bigcirc \neg r(x, y) : x \text{ は次の時刻で } y \text{ を近傍外とする } (s_{0*})$
- $t \models \bigcirc sym(x, y) = \bigcirc (r(x, y) \wedge r(y, x)) : x \text{ と } y \text{ は次の時刻で対称性を満たす } (s_{11})$
- $t \models r(x, y) \rightarrow \bigcirc r(x, y) : \text{現在 } y \text{ が } x \text{ の近傍内ならば次の時刻にも近傍内とする (維持)}$
- $t \models \neg r(x, y) \rightarrow \bigcirc r(x, y) : \text{現在 } y \text{ が } x \text{ の近傍内にいないならば次の時刻では近傍内とする (変化)}$

時刻毎に三層モデルが更新されていき，結果としてエージェントの挙動が生成される流れの概念図を図 3.2 に示す．

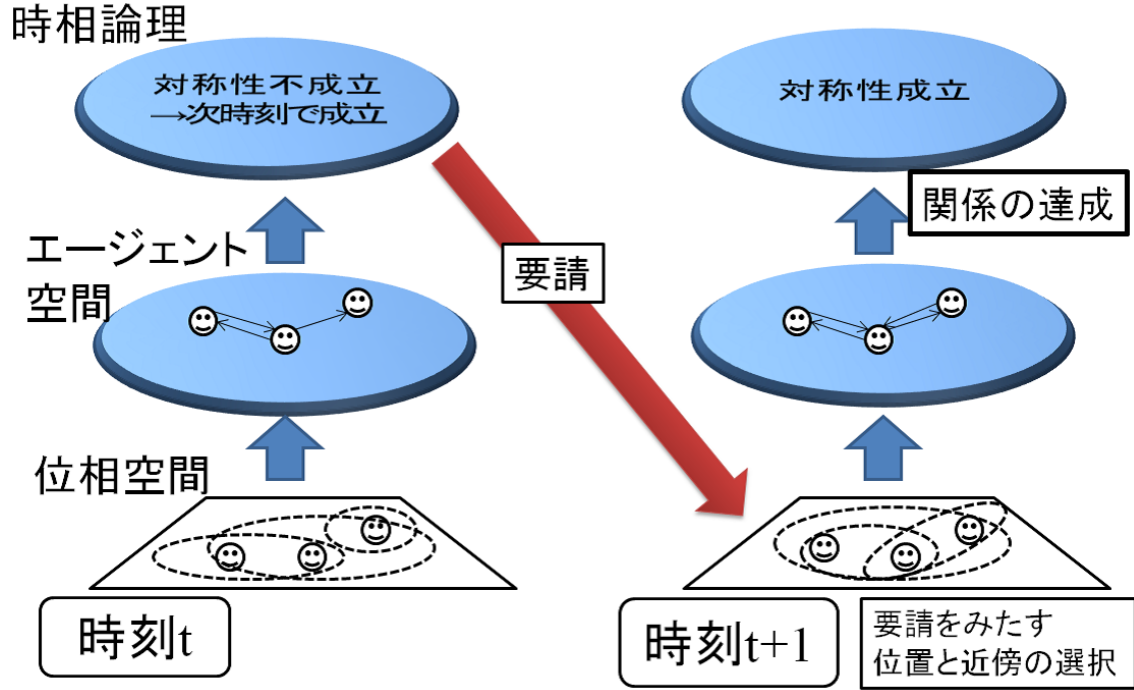


図 3.2: 三層モデルの更新によるエージェント制御

3.6 近傍選択のルール

二項関係の代表的な性質として

反射性 $\forall x \in A(xRx)$,

対称性 $\forall x, y \in A(xRy \Rightarrow yRx)$,

推移性 $\forall x, y, z \in A(xRy \wedge yRz \Rightarrow xRz)$

などがある。これらは A 上で全域的に成り立つ性質である。本研究では全域的に成り立つ性質だけでなく、 A において局所的に成り立つ性質ないし成り立たない性質に着目して考察する。

本モデルにおいてエージェントの近傍に基いて生成される二項関係 R_t は近傍系の公理 (N_2) により常に反射性を満たす。反射性に関しては自明であり、エージェ

ントの挙動に影響を与えないため、本研究では扱わない。

3.6.1 対称性

本モデルのエージェント間の二項関係は、対称性に関しては一般には満たされない。しかし、局所的には対称性／非対称性を満たす、あるいは満たさないなどの特徴があり、この点について議論する。対称性に関する特徴を議論する上で典型的なのはエージェントが2体の場合である：

$$\{a, a'\} \subseteq A.$$

対称性が成り立つ場合だけでなく、成り立たない場合についても考慮すれば、起こりうる状態は以下の4つである：

$$(S_{11}) \quad s_{11}(a, a') = aRa' \wedge a'Ra,$$

$$(S_{10}) \quad s_{10}(a, a') = aRa' \wedge a' \not Ra,$$

$$(S_{01}) \quad s_{01}(a, a') = a \not Ra' \wedge a'Ra,$$

$$(S_{00}) \quad s_{00}(a, a') = a \not Ra' \wedge a' \not Ra$$

以上の状態をまとめて

$$\mathcal{S}_{sym} = \{S_{11}, S_{10}, S_{01}, S_{00}\}$$

とする。

例 3 上記の4つの状態をエージェントの近傍を視界として解釈すると以下のようになる：

$$(S_{11}) \quad a \text{ と } a' \text{ は互いに見えている.}$$

$$(S_{10}) \quad a \text{ から } a' \text{ は見えている. } a' \text{ から } a \text{ は見えていない.}$$

$$(S_{01}) \quad a \text{ から } a' \text{ は見えていない. } a' \text{ から } a \text{ は見えている.}$$

(S_{00}) a と a' は互いに見えていない.

エージェントの位置と近傍から生成されるエージェント間の二項関係の局所的な特徴に基く行動の方策として以下を考えることができる:

- 次の時刻で S_{11} を満たすように行動する.
- 次の時刻で S_{10} を満たすように行動する.
- 次の時刻で S_{01} を満たすように行動する.
- 次の時刻で S_{00} を満たすように行動する.

時刻 t において, エージェント a が次の時刻 $t + 1$ で移動可能な位置の集合は $PosLoc(a, t)$ であり, それらの位置で採りうる近傍はそれぞれの位置における基本近傍系 $\mathcal{N}'$ によって定められる.

前述の4つの状態に基く行動は, 以下の時相論理式によるルールを満たすように位置と近傍を決定することで生成する:

$$(S_{11}) \quad t \models \bigcirc (r(a, a') \wedge r(a', a))$$

$$(S_{10}) \quad t \models \bigcirc (r(a, a') \wedge \neg r(a', a))$$

$$(S_{01}) \quad t \models \bigcirc (\neg r(a, a') \wedge r(a', a))$$

$$(S_{00}) \quad t \models \bigcirc (\neg r(a, a') \wedge \neg r(a', a))$$

3.6.2 推移性

対称性と同様に, 本モデルのエージェント間の二項関係において推移性も一般には満たされない. 推移性に関する特徴を議論する上で典型的なのはエージェントが3体の場合である:

$$\{a, a', a''\} \subseteq A.$$

他エージェントとの関係 aRa' , $a'Ra$, aRa'' , $a''Ra$, $a'Ra''$, $a''Ra'$ の有無を考えると、3者の繋がりがたのパターンは64通りある。代表的な状況としては、以下が考えられる：

$$(T_{111}) \ aRa' \wedge a'Ra'' \wedge aRa''$$

$$(T_{110}) \ aRa' \wedge a'Ra'' \wedge a \not Ra''$$

これらの状態に基く行動は、以下の時相論理式によるルールを満たすように位置と近傍を決定することで生成する：

$$(T_{111}) \ t \models \bigcirc (r(a, a') \wedge r(a', a'') \wedge r(a, a''))$$

$$(T_{110}) \ t \models \bigcirc (r(a, a') \wedge r(a', a'') \wedge \neg r(a, a''))$$

3.7 近傍選択のストラテジ

本研究では、エージェントの近傍選択によって追跡や回避、協調行動などのエージェントの行動を生成することが目的である。一般に、時相論理式による近傍選択のルールを満たす近傍は複数存在し、コンテキストに応じて、それらの近傍から一つ選択することによってエージェントの行動を生成することが可能である。時相論理式のルールの要請を満たす複数の近傍から、目的となる行動を実現する近傍を一つ選択する方法を近傍選択のストラテジとよぶ。以下では、本研究のシミュレーション実験で主に扱うセル空間を例にして、近傍選択のストラテジを説明する。

現在の時刻の他エージェントの位置は確定しているが、しかし、次の時刻での他エージェントの位置と近傍は確定していない。そのため、次の時刻の相手の位置や近傍を、可能性のある位置、可能性のある近傍についてチェックする必要がある。ここでは、現在の相手の位置と近傍を用いて判断する場合について議論する。これは、相手が次の時刻で移動しないということを意味する。

近傍選択のストラテジとして典型的な例を挙げる：

- ルールを満たす最小の近傍を採る
- ルールを満たす最大の近傍を採る
- 近傍を変えないで1時刻前と同じ挙動をする

時刻を $t \in T$ とし, 2体のエージェント $a, a' \in A$ を考え, エージェントの位置を $Loc(a, t), Loc(a', t) \in U$ とする. 今, エージェント a に着目する. 次の時刻 $t+1$ で a が採りうる位置の集合は $PosLoc(a, t)$ であり, a' の位置は $Loc(a', t)$, 近傍を $Y \in \mathcal{N}'(Loc(a', t))$ とする.

2次元セル空間の場合, $PosLoc(a, t)$ は有限集合であり, 要素を列挙することができる.

$$PosLoc(a, t) = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}.$$

各移動可能な位置において ε -近傍に基く基本近傍系があり, セル空間の場合, 可算な基本近傍系となる. $x \in PosLoc(a, t), X \in \mathcal{N}'(x), y \in PosLoc(a', t), Y \in \mathcal{N}'(y)$ の組に対して, 対称性に関わる4つの状態のいずれになるかが定められる.

例 4 次の時刻 $t+1$ の移動可能な位置と選択可能な近傍, およびそれらの位置と近傍における状態を列挙した例を以下に挙げる.

$$x_1 \in PosLoc(a, t).$$

$$B(x_1, 1) \in \mathcal{N}'(x_1) \quad t \models \bigcirc (\neg r(a, a') \wedge \neg r(a', a))$$

$$B(x_1, 2) \in \mathcal{N}'(x_1) \quad t \models \bigcirc (\neg r(a, a') \wedge \neg r(a', a))$$

$$B(x_1, 3) \in \mathcal{N}'(x_1) \quad t \models \bigcirc (r(a, a') \wedge \neg r(a', a))$$

$\vdots$

$$x_2 \in PosLoc(a, t)$$

$$B(x_2, 1) \in \mathcal{N}'(x_2) \quad t \models \bigcirc (\neg r(a, a') \wedge r(a', a))$$

$$B(x_2, 2) \in \mathcal{N}'(x_2) \quad t \models \bigcirc (r(a, a') \wedge r(a', a))$$

$$B(x_2, 3) \in \mathcal{N}'(x_2) \quad t \models \bigcirc (r(a, a') \wedge r(a', a))$$

⋮

⋮

次の時刻での位置と近傍の組は，その位置と近傍を選択した際に満たされる状態に応じて，以下のように分割される：

$$(S_{11}) \quad \{\langle x_2, B(x_2, 2) \rangle, \langle x_2, B(x_2, 3) \rangle, \dots\}$$

$$(S_{01}) \quad \{\langle x_2, B(x_2, 1) \rangle, \dots\}$$

$$(S_{10}) \quad \{\langle x_1, B(x_1, 3) \rangle, \dots\}$$

$$(S_{00}) \quad \{\langle x_1, B(x_1, 1) \rangle, \langle x_1, B(x_1, 2) \rangle, \dots\}$$

次の時刻における各状態を目的とするエージェントはこのように限定された位置と近傍の組の中から次の時刻の位置と近傍を決定する．

次の時刻で，特定の状態を満たす最小の近傍や最大の近傍を考えることで，次に選択する位置と近傍を更に限定する．

例 5 具体例として，図 3.3, 3.4 のような状況を考える． 5×5 の 2 次元セル空間上にエージェント a, b が配置されている．

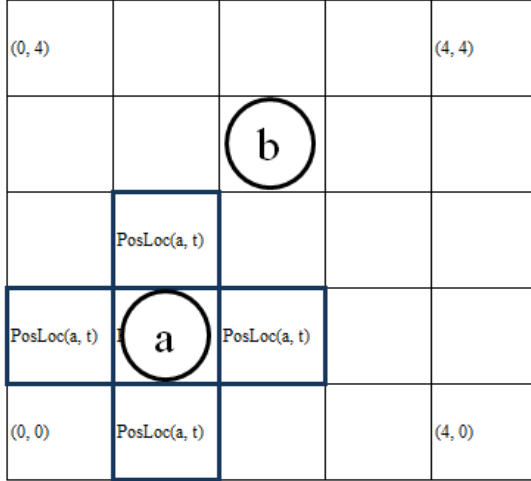


図 3.3: エージェント a の移動可能範囲

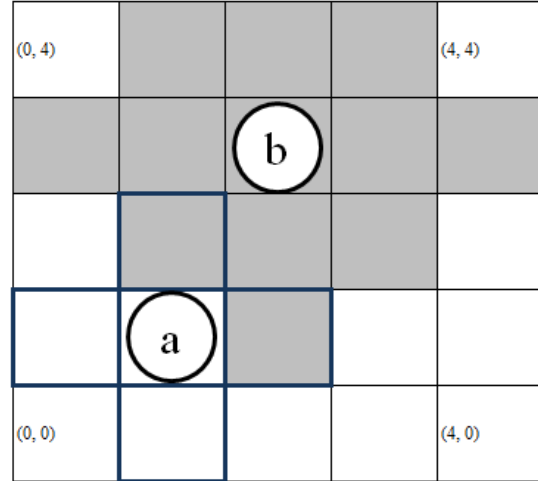


図 3.4: エージェント b の近傍

時刻を $t \in T$ とする．時刻 t においてエージェント a は $Loc(a, t) = (1, 1)$ ，エージェント b は $Loc(b, t) = (2, 3)$ に配置されている．また，エージェント b は位置 $(2, 3)$ で，Manhattan 距離による ε -近傍 ($\varepsilon = 3$)， $B((2, 3), 3)$ を採っている．エージェント a が次の時刻で移動可能なセルを現在の位置 $(1, 1)$ の Neumann 近傍とし， $PosLoc(a, t) = \{(0, 1), (1, 0), (1, 1), (1, 2), (2, 1)\}$ である．ここで，次の時刻 $t + 1$ でエージェント a がエージェント b を近傍内に置くには，

1. 位置 $(0, 1)$ で $\varepsilon > 4$ の近傍を採る
2. 位置 $(1, 0)$ で $\varepsilon > 4$ の近傍を採る
3. 位置 $(1, 1)$ で $\varepsilon > 3$ の近傍を採る
4. 位置 $(1, 2)$ で $\varepsilon > 2$ の近傍を採る
5. 位置 $(2, 1)$ で $\varepsilon > 2$ の近傍を採る

a が b を近傍外に置くには,

1. 位置 $(0, 1)$ で $\varepsilon \leq 4$ の近傍を採る
2. 位置 $(1, 0)$ で $\varepsilon \leq 4$ の近傍を採る
3. 位置 $(1, 1)$ で $\varepsilon \leq 3$ の近傍を採る
4. 位置 $(1, 2)$ で $\varepsilon \leq 2$ の近傍を採る
5. 位置 $(2, 1)$ で $\varepsilon \leq 2$ の近傍を採る

また, a が b の近傍内であるためには,

位置 $(1, 2), (2, 1)$ のいずれかに移動する.

a が b の近傍外であるためには,

位置 $(0, 1), (1, 0), (1, 1)$ のいずれかに移動する.

などのような位置を決定し, 近傍を選択する必要がある.

これらをまとめると以下ようになる:

- S_{11} エージェント: $(1, 2), (2, 1)$ のいずれかに移動し, $\varepsilon > 2$ の近傍を採る.
- S_{10} エージェント: $(0, 1), (1, 0)$ のいずれかに移動し, $\varepsilon > 4$ の近傍を採る. または, $(1, 1)$ から移動せず, $\varepsilon > 3$ の近傍を採る.
- S_{01} エージェント: $(1, 2), (2, 1)$ のいずれかに移動し, $\varepsilon \leq 2$ の近傍を採る.
- S_{00} エージェント: $(0, 1), (1, 0)$ のいずれかに移動し, $\varepsilon \leq 4$ の近傍を採る. または, $(1, 1)$ から移動せず, $\varepsilon \leq 3$ の近傍を採る.

さらに, 次の時刻の位置の決定と近傍の選択に関して, 以下のような方策が考えられる:

- S_{11} エージェント：相手の近傍内となる位置に移動し，相手を近傍内とする最小の近傍を採る．
- S_{10} エージェント：相手の近傍外となる位置に移動し，相手を近傍内とする最小の近傍を採る．
- S_{01} エージェント：相手の近傍内となる位置に移動し，相手を近傍外とする最大の近傍を採る．
- S_{00} エージェント：相手の近傍外となる位置に移動し，相手を近傍外とする最大の近傍を採る．

例 6 図 3.5, 3.6 は状況 S_{11} を満たし，さらに，最小の近傍を採るよう行動するエージェントである． $(1, 2), (2, 1)$ いずれかのセルに移動することで，自身が相手の近傍内に入るという条件を満たす．どちらのセルに移動すべきかの情報はなため，適当に，例えばランダムに決定する必要がある．どちらかのセルに移動後は，相手を自身の近傍内に収める最小の近傍は一意に定まる．この場合， $B((1, 2), 3), B((2, 1), 3)$ がそれぞれの位置で最小の近傍である．

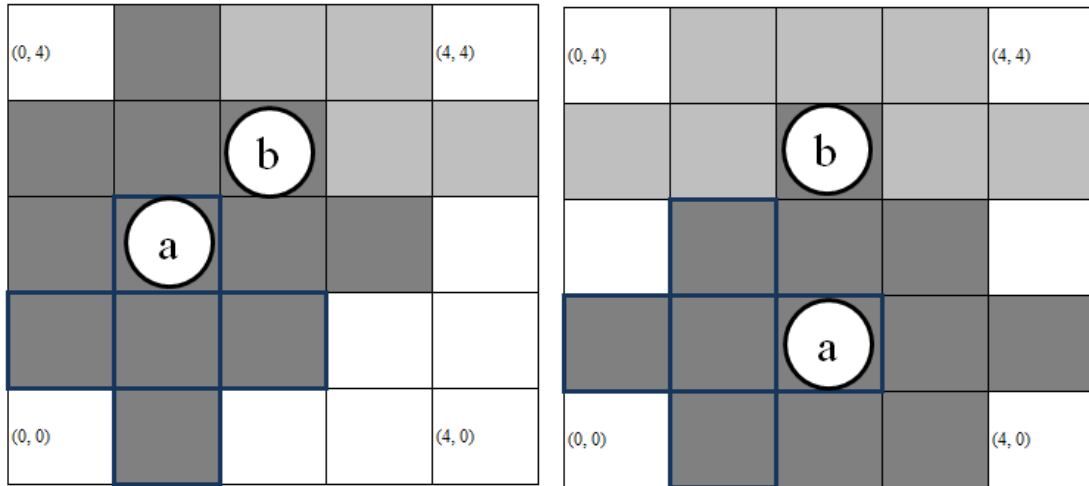


図 3.5: S_{11} を満たす位置と最小の近傍 (1) 図 3.6: S_{11} を満たす位置と最小の近傍 (2)

例 7 図 3.7, 3.8, 3.9 は状況 S_{10} を満たし、さらに、最小の近傍を採るよう行動するエージェントである。現在のセルにとどまるか、 $(0, 1)$, $(1, 0)$ いずれかのセルに移動することで、自身が相手の近傍外にいるという条件を満たす。現在のセルにとどまったとき、 $B((1, 1), 4)$ で相手を自身の近傍内に置ける。 $(0, 1)$, $(1, 0)$ いずれかに移動したとき、 $B((0, 1), 5)$, $B((1, 0), 5)$ がそれぞれの位置での最小の近傍である。

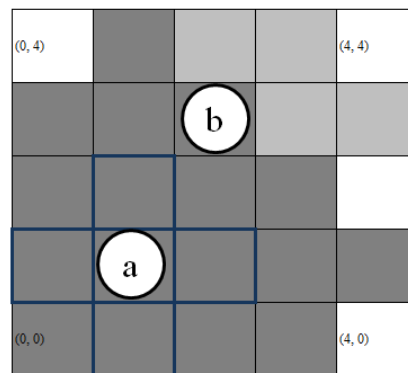


図 3.7: S_{10} を満たす位置と最小の近傍 (1)

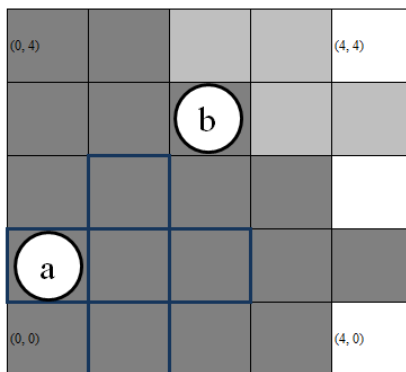


図 3.8: S_{10} を満たす位置と最小の近傍 (2)

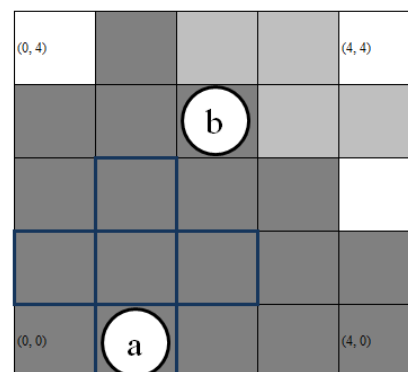


図 3.9: S_{10} を満たす位置と最小の近傍 (3)

例 8 図 3.10, 3.11 は状況 S_{01} を満たし、さらに、最大の近傍を採るよう行動するエージェントである。 $(1, 2), (2, 1)$ いずれかのセルに移動することで、自身が相手の近傍内にいるという条件を満たす。 $B((1, 2), 2), B((2, 1), 2)$ がそれぞれの位置での最小の近傍である。

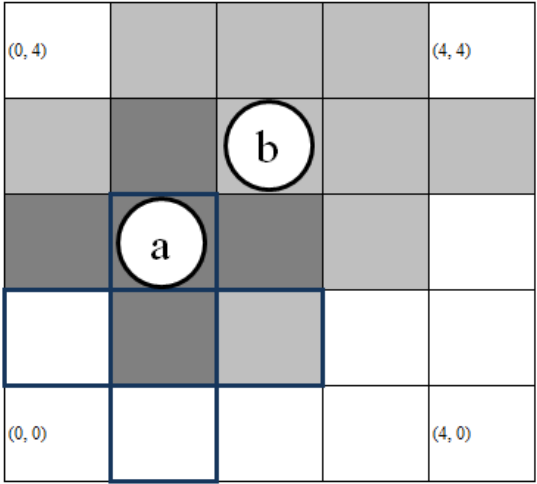


図 3.10: S_{01} を満たす位置と最大の近傍 (1)

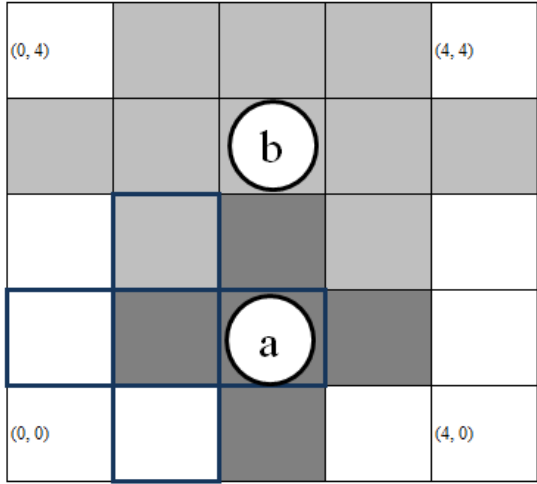


図 3.11: S_{01} を満たす位置と最大の近傍 (2)

例 9 図 3.12, 3.13, 3.14 は状況 S_{00} を満たし、さらに、最大の近傍を採るよう行動するエージェントである。現在のセルにとどまるか、 $(0, 1)$, $(1, 0)$ いずれかのセルに移動することで、自身が相手の近傍外にいるという条件を満たす。現在のセルにどどまったとき、 $B((1, 1), 3)$ が最大の近傍である。 $(0, 1)$, $(1, 0)$ いずれかのセルに移動したとき、 $B((0, 1), 4)$, $B((1, 0), 4)$ がそれぞれの位置での最大の近傍である。

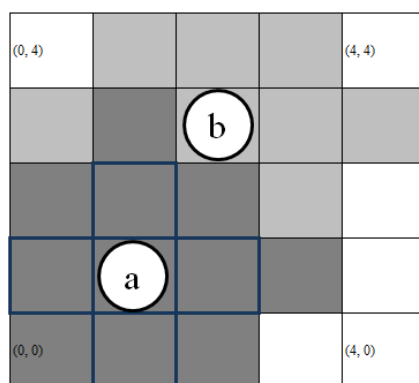


図 3.12: S_{00} を満たす位置と最大の近傍 (1)

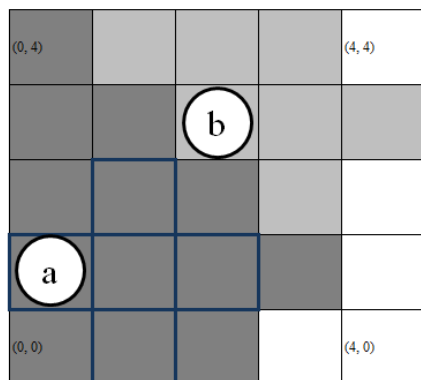


図 3.13: S_{00} を満たす位置と最大の近傍 (2)

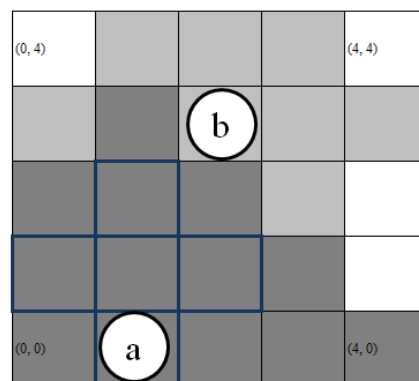


図 3.14: S_{00} を満たす位置と最大の近傍 (3)

3.8 シミュレーション実験

本モデルによる，エージェント間の二項関係の局所的な特徴の成立／不成立の達成に基く制御によってエージェントたちの様々な挙動が生成される．この点について，シミュレーション実験を実施し，従来のエージェントシミュレーションにおける追跡や逃走，協調行動などの目的を持った行動を表現できることを確認する．本マルチエージェントシミュレーションの開発言語には ActionScript 3.0 を用いた．

二項関係の局所的な特徴に基いて近傍を設定するエージェントを以下のように各種用意する．

エージェントのルール：

- S_{11} エージェント：相手の近傍内となる位置に移動し，相手を近傍内とする最小の近傍を採る．
- S_{10} エージェント：相手の近傍外となる位置に移動し，相手を近傍内とする最小の近傍を採る．
- S_{01} エージェント：相手の近傍内となる位置に移動し，相手を近傍外とする最大の近傍を採る．
- S_{00} エージェント：相手の近傍外となる位置に移動し，相手を近傍外とする最大の近傍を採る．

エージェントのストラテジ：

- 最大近傍エージェント：各状況を満たす最大の近傍を採る．
- 最小近傍エージェント：各状況を満たす最小の近傍を採る．
- 固定近傍エージェント：現時刻での近傍と同じサイズの近傍を採る．

3.9 2次元セル空間におけるシミュレーション

3.9.1 追跡問題

2次元セル空間において、本モデルに基づくエージェントたちのシミュレーション実験を実行した。近傍選択とエージェント空間の一般化近似空間 (Kripke フレーム) の関係の特徴に基づくエージェントの行動制御によって、追跡問題におけるハンターの追跡行動や獲物の逃避行動を再現可能であることを確認する。このシミュレーション実験では、 10×10 の2次元セル空間上に複数のエージェントを配置して動作を確認した。エージェントたちの初期配置はランダムとした。濃い青や赤で表示されているものがエージェントであり、薄い青で表示される範囲が各エージェントの近傍である。本シミュレーションでは、Manhattan 距離による ε -近傍に基き基本近傍系を設定した。セルを跨いでエージェントまで引かれている線はエージェントの直近の移動経路の履歴である。

図 3.15 は、次の時刻で S_{11} を満たす最小の基本近傍を採るように、次の時刻の位置を決定するエージェントである。2体のエージェントは最小の近傍を採れる位置への移動を繰り返し、結果として近傍を狭めながら互いに近づき、隣接した。このように、 S_{11} を満たす最小の近傍を採るという方法で、対象に接近するエージェントの行動を実現できる。

図 3.16 は、次の時刻で S_{00} を満たす最大の基本近傍を採るように、次の位置を決定するエージェントである。2体のエージェントは近傍を拡大しながら互いに距離をとる。このように、 S_{00} を満たす最大の近傍を採るという方法で、対象を回避するエージェントの行動を実現できる。

図 3.17 は、次の時刻で S_{11} を満たす最小の基本近傍を採るように、次の位置を決定するエージェントと、次の時刻で S_{00} を満たす最大の基本近傍を採るように、次の位置を決定するエージェントの2体である。 S_{11} 最小近傍エージェントと S_{00} 最大近傍エージェントを混在させたとき、 S_{11} 最小近傍エージェントが S_{00} 最大近傍エージェントを追跡する挙動が見られる。

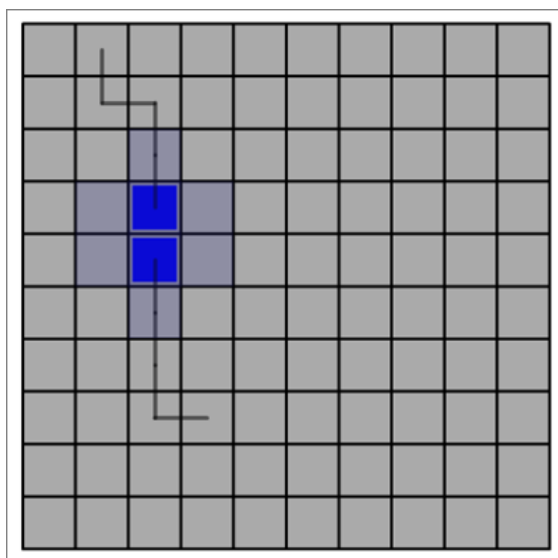


図 3.15: S_{11} 最小近傍エージェント 2 体の挙動例

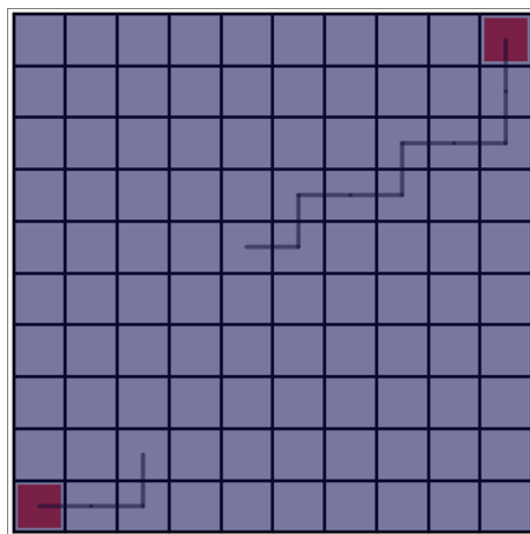


図 3.16: S_{00} 最大近傍エージェント 2 体の挙動例

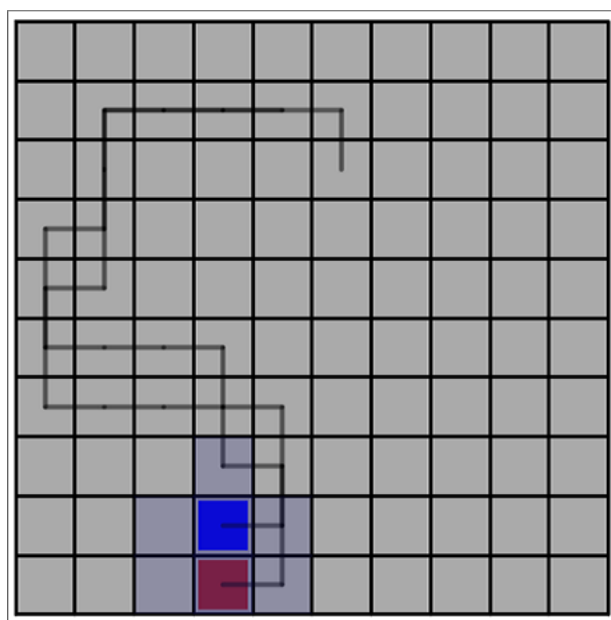


図 3.17: S_{11} 最小近傍エージェントと S_{00} 最大近傍エージェント 2 体の挙動例

次に，エージェント数を 2 体から 4 体に増やし，そのうち 3 体を S_{11} 最小近傍エージェント，1 体を S_{00} 最大近傍エージェントとしてシミュレーション実験を実行した．図 3.18 や図 3.19 がその結果の例である．

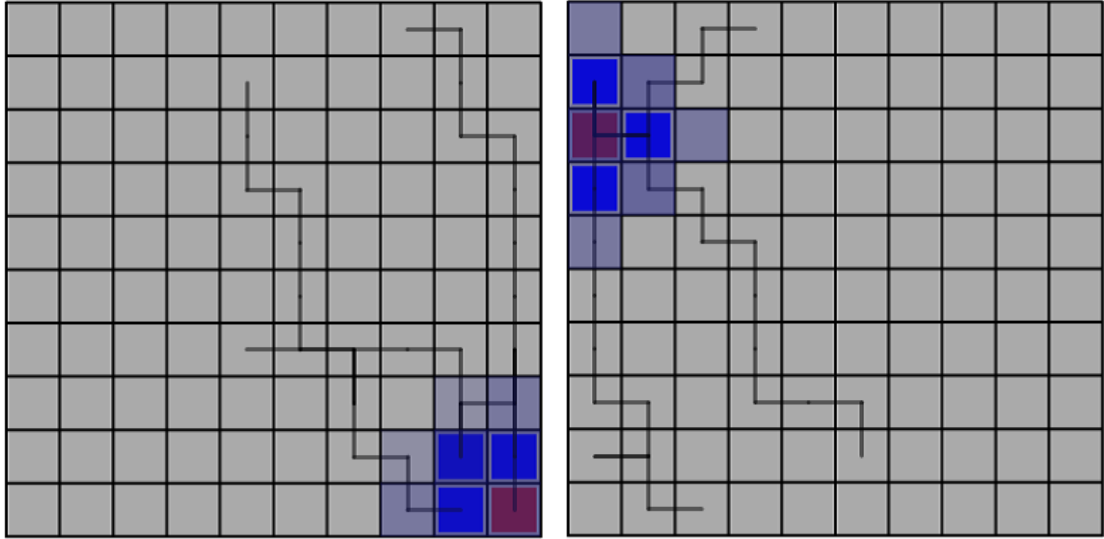


図 3.18: ハンターによる獲物の捕獲 (1) 図 3.19: ハンターによる獲物の捕獲 (2)

S_{11} 最小近傍エージェントは近傍を狭めながら他エージェントに接近し， S_{00} 最大近傍エージェントは条件を満たす最大の近傍を採りながら，他のエージェントを避ける方向へ移動する．他エージェントが接近してくるため，条件を満たす最大の近傍のサイズは小さくなっていく．結果として，複数の S_{11} 最小近傍エージェントが S_{00} 最大近傍エージェントを取り囲む行動が生成された．

このように，関係達成型制御に基いて，追跡問題におけるハンターの追跡行動や獲物の逃避行動を生成できることを確認した．

3.9.2 協調行動

推移性の成立／不成立を用いて協調行動の例を示す．推移性を成立させるルールによって行動させると密集型のフォーメーションをとり，推移性を不成立とさせるルールによって行動させると，互いに距離を置くフォーメーションをとる．(図 3.20)

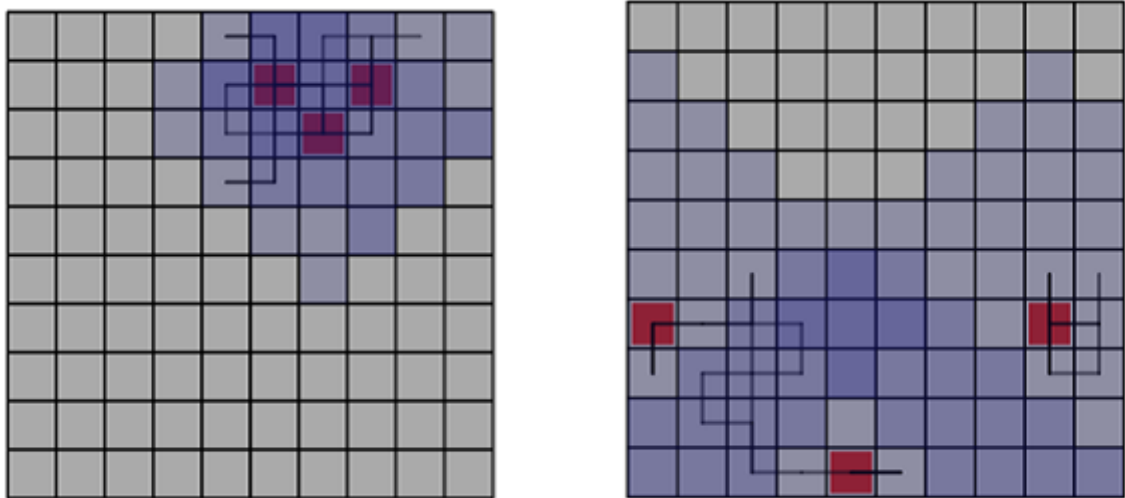


図 3.20: 推移性の成立／不成立による協調行動の例

3.10 2次元 Euclid 空間におけるシミュレーション

2次元 Euclid 空間を仮定して、シミュレーション実験を実行した。エージェントは進行方向のパラメータを持つ。また、各エージェントは一ステップでの移動幅 $r \in \mathbb{R}$ を持つ。エージェント a の位置 $Loc(a, t)$ から次の時刻に移動可能な位置の集合を $PosLoc(a, t) = \{y \mid d(Loc(a, t), y) = r\}$ と設定した。色のついた丸がエージェントであり、その周りを取り巻く円が現在そのエージェントが選択している近傍である。エージェントから伸びている線が現在のエージェントの向きであり、点列がエージェントの直近の移動履歴である。

3.10.1 局所的対称性／非対称性に基く 2 エージェントシミュレーション

2次元 Euclid 空間上でのシミュレーション実験の結果を提示する。エージェント間の二項関係の局所的な特徴

$$S_{11}, S_{10}, S_{01}, S_{00}$$

をそれぞれ満たすようなエージェントを用意した。まず、2体のエージェントを用いてシミュレーション実験を行い、挙動を確認した。

3.10.2 各エージェントの特徴的な行動や役割

S_{11} エージェント 2 体による挙動例

図 3.21, 図 3.22, 図 3.23 は S_{11} エージェント 2 体による挙動の例である。2体エージェントが互いに近づいた時、並走する、ジグザグに走行する、旋回するなどの特徴的な行動が見られる場合があった。

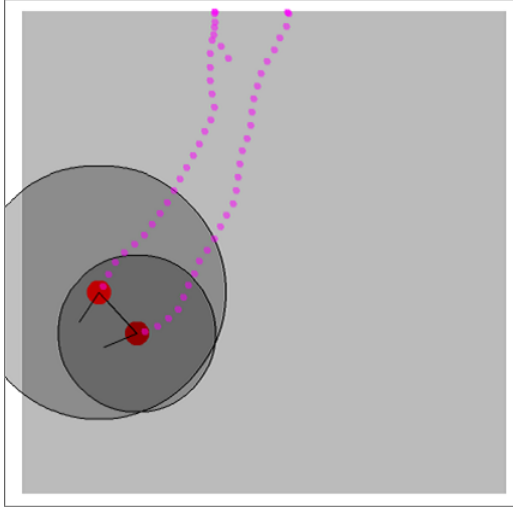


図 3.21: S_{11} エージェントによる
挙動例 (1)

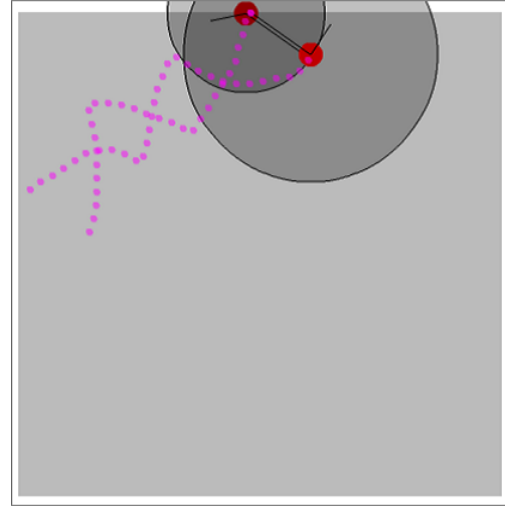


図 3.22: S_{11} エージェントによる
挙動例 (2)

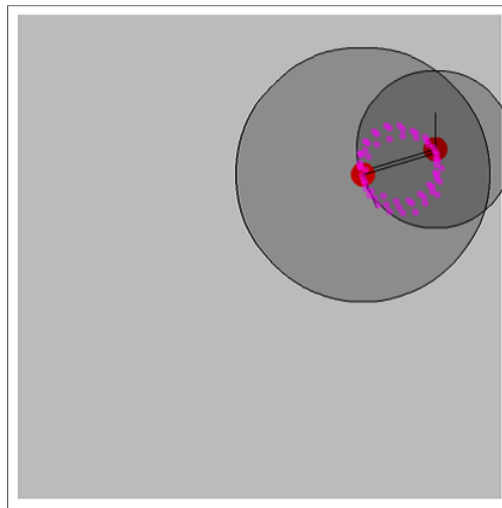


図 3.23: S_{11} エージェントによる挙動例 (3)

S_{10} エージェント 2 体による挙動例

図 3.24, 図 3.25 は S_{10} エージェント 2 体による挙動の例である. 並走, 逃走, 追跡などの行動が見られる場合があった. 逃走から追跡へ切り返し, 追跡から逃走へ切り返しなどの特徴的な行動が見られる場合があった.

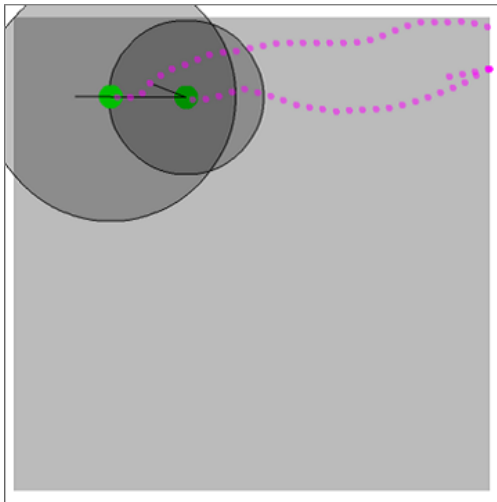


図 3.24: S_{10} エージェントによる
挙動例 (1)

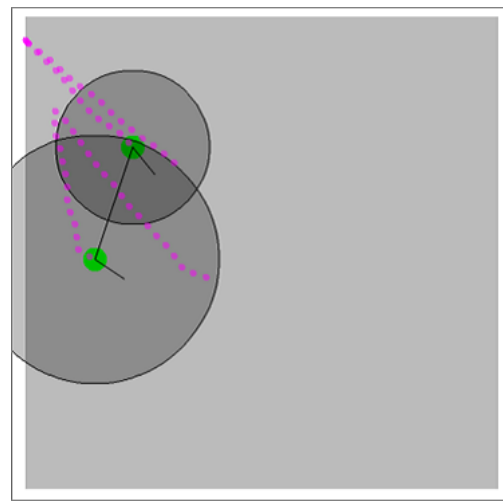


図 3.25: S_{10} エージェントによる
挙動例 (2)

S_{01} エージェント 2 体による挙動例

図 3.26, 図 3.27 は S_{01} エージェント 2 体による挙動の例である．並走，逃走，追跡などの行動が見られる場合があった．逃走から追跡へ切り返し，追跡から逃走へ切り返しなどの特徴的な行動が見られる場合があった．

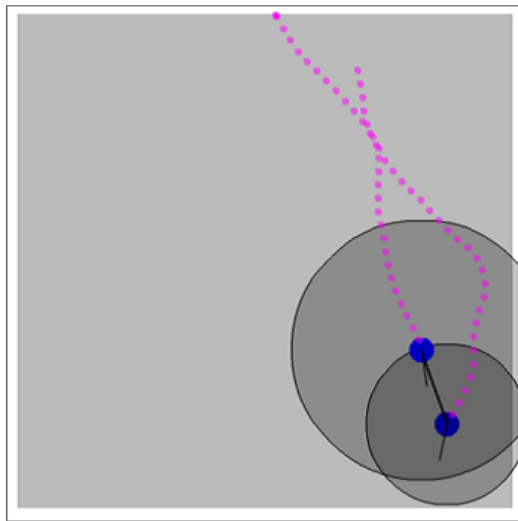


図 3.26: S_{01} エージェントによる
挙動例 (1)

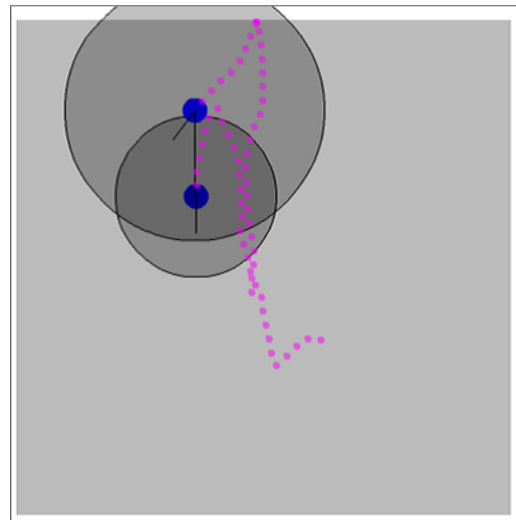


図 3.27: S_{01} エージェントによる
挙動例 (2)

S_{00} エージェント 2 体による挙動例

図 3.28 は S_{00} エージェント 2 体による挙動の例である．互いの近傍に入らないように反発・回避する行動が見られた．

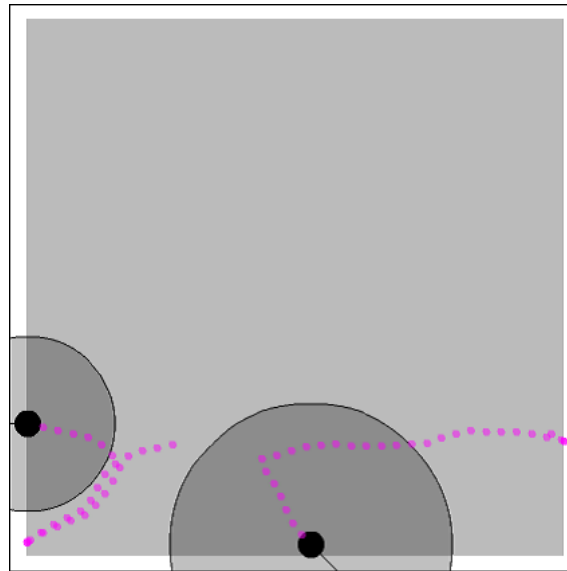


図 3.28: S_{00} エージェントによる挙動例

3.10.3 エージェントたちの協調行動

次に，エージェントたちの協調行動を観察するため，エージェントの数を8体に増やしてシミュレーション実験を実行し，エージェント全体の挙動を確認した．

S_{00} エージェント8体による挙動例

図 3.29 は S_{00} エージェント8体による挙動の例である．各エージェントの近傍内に他エージェントが存在しない状態になっている．したがって，エージェントたちは全体的に分散したフォーメーションになっている．

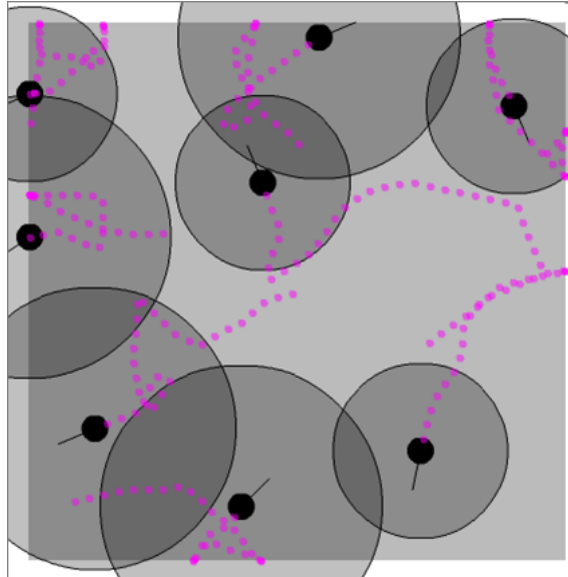


図 3.29: S_{00} エージェント8体による挙動例

S_{11} エージェント 8 体による挙動例

図 3.30, 図 3.31 は S_{11} エージェント 8 体による挙動の例である．全体として密集したフォーメーションをとりながら行動し，エージェントのグループが結合や分離をしていく様子が見られた．

図 3.30 では，全体として同値関係が構成されている．図 3.31 では，局所的に対称性が満たされている部分が 5 箇所見られる．また，並走や旋回，ジグザグ走行などの特徴的な行動が見られる．

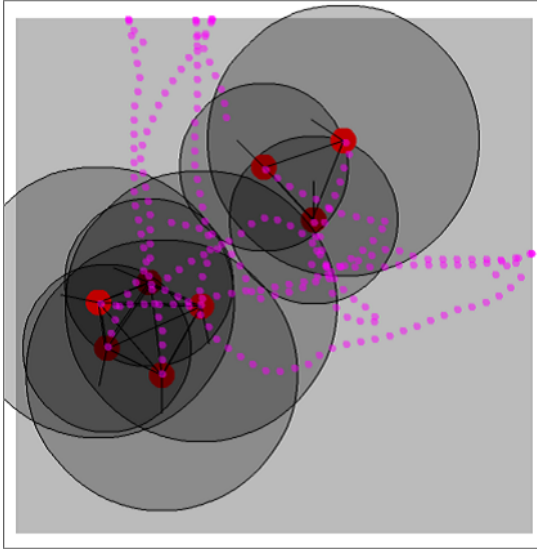


図 3.30: S_{11} エージェント 8 体による
挙動例 (1)

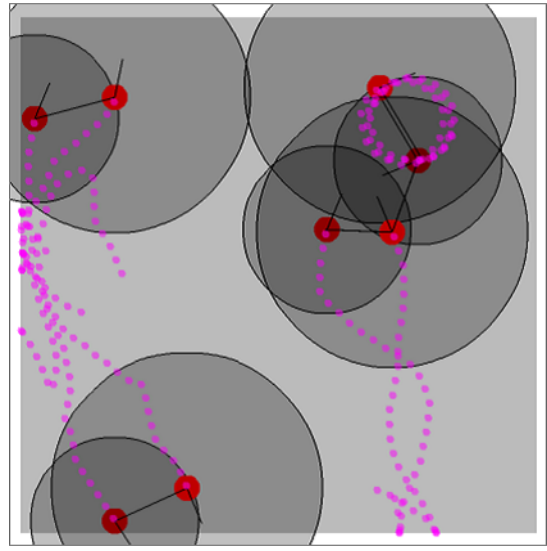


図 3.31: S_{11} エージェント 8 体による
挙動例 (2)

S_{10} エージェント 8 体による挙動例

図 3.32 は S_{10} エージェント 8 体による挙動の例である。付かず離れず，持続的な逃走・追跡を行う。分散しすぎず，密集しすぎないフォーメーションをとる。この例では，局所的な対称性の連鎖が見られる。

S_{01} エージェント 8 体による挙動例

図 3.33 は S_{01} エージェント 8 体による挙動の例である。付かず離れずで，持続的な逃走・追跡が見られた。分散しすぎず，密集しすぎないフォーメーションをとる。この例でも，局所的な対称性の連鎖が見られる。

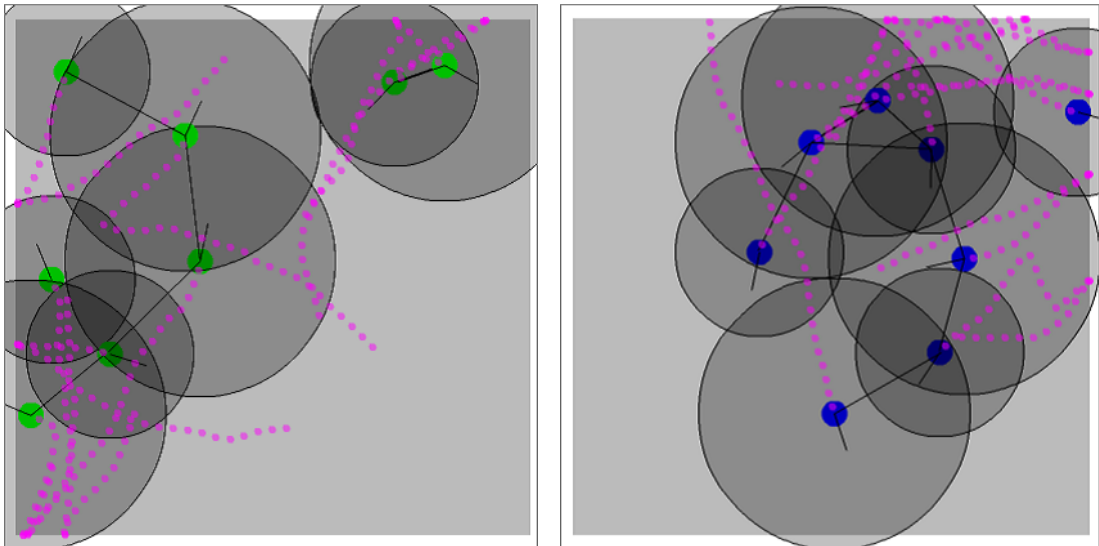


図 3.32: S_{10} エージェント 8 体による挙動例 図 3.33: S_{01} エージェント 8 体による挙動例

S_{10} エージェントと S_{01} エージェントは一方からのみ関係する (近傍に入る) という点で同一であり，本シミュレーション実験においては，それらの挙動に明確な差異は見られなかった。

S_{11} エージェント 4 体と S_{00} エージェント 4 体による挙動例

図 3.34, 3.35 は S_{11} エージェント 4 体と S_{00} エージェント 4 体による挙動の例である． S_{11} グループは結合や分離をしながら S_{00} グループを追跡し， S_{00} グループは逃走する行動が観測された． S_{11} グループが旋回しながら，グループによる縄張りを形成し， S_{00} エージェントを待ち伏せるような挙動が見られた．

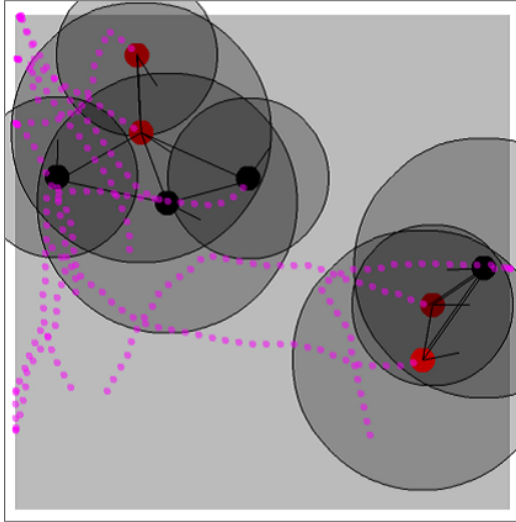


図 3.34: S_{11} エージェント 4 体と S_{00} エージェント 4 体による挙動例 (1)

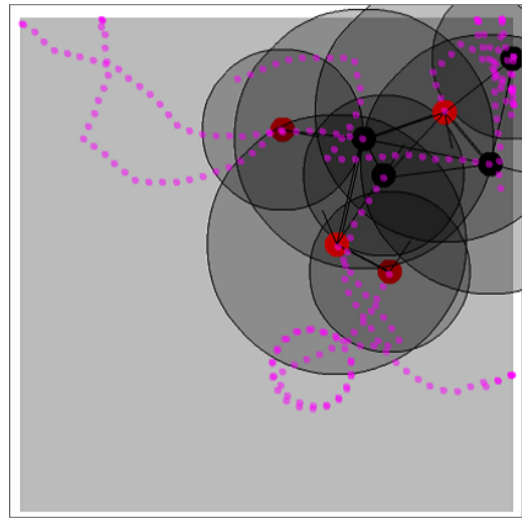


図 3.35: S_{11} エージェント 4 体と S_{00} エージェント 4 体による挙動例 (2)

S_{10} エージェント 4 体と S_{01} エージェント 4 体による挙動例

図 3.36 は S_{10} エージェント 4 体と S_{01} エージェント 4 体による挙動の例である．持続的な逃走・追跡などの行動が見られた．分散しすぎず，密集しすぎないフォーメーションをとる．局所的に並走やジグザグ走行，旋回が見られる場合があった．

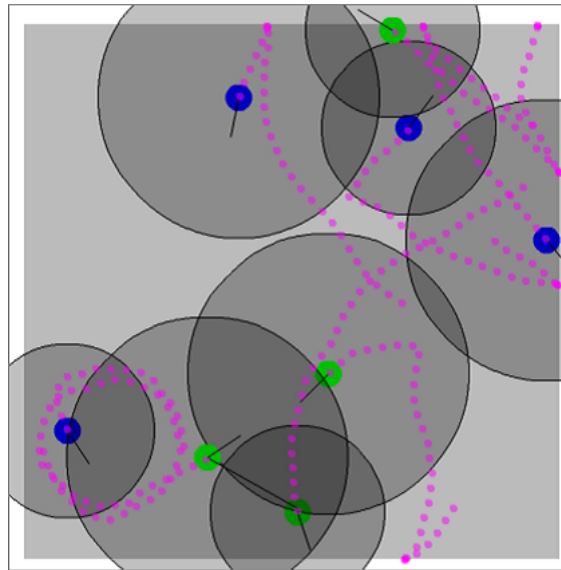


図 3.36: S_{10} エージェント 4 体と S_{01} エージェント 4 体による挙動例

S_{11} エージェント 2 体, S_{10} エージェント 2 体, S_{01} エージェント 2 体, S_{00} エージェント 2 体による挙動例

図 3.37 は S_{11} エージェント 2 体, S_{10} エージェント 2 体, S_{01} エージェント 2 体, S_{00} エージェント 2 体による挙動の例である. S_{11} エージェントは他全エージェントを追跡するような挙動が見られた. それに対して, S_{00} エージェントは全エージェントから逃走するような挙動が見られた. S_{10} エージェントや S_{01} エージェントは付かず離れずで, 逃走や追跡を繰り返すような行動が見られた.

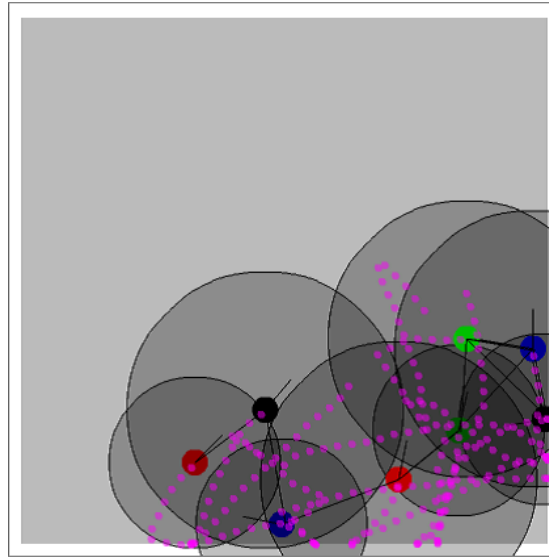


図 3.37: S_{11} エージェント 2 体, S_{10} エージェント 2 体, S_{01} エージェント 2 体, S_{00} エージェント 2 体による挙動例

3.11 関係達成型制御によるエージェントの挙動の考察

シミュレーション結果から、先験的知識によって目的行動をコーディングするのではなく、関係の局所的性質という原始的なレベルの組み合わせによって様々な行動が生成されることが確認できた。

2次元セル空間におけるシミュレーション：対称性の成立／不成立

- ルール $t \models \bigcirc (r(a, a') \wedge r(a', a))$ を満たす最小の近傍を採るストラテジを持つエージェントは追跡行動をする。
- ルール $t \models \bigcirc (\neg r(a, a') \wedge \neg r(a', a))$ を満たす最大の近傍を採るストラテジを持つエージェントは回避行動をする。

これらのエージェントの組み合わせによって追跡問題を再現することができる。

2次元セル空間におけるシミュレーション：推移性の成立／不成立

- ルール $t \models \bigcirc (r(a, a') \wedge r(a', a'') \wedge r(a, a''))$ を満たす最小の近傍を採るストラテジを持つエージェントは密集型のフォーメーションを生成する。
- ルール $t \models \bigcirc (r(a, a') \wedge r(a', a'') \wedge \neg r(a, a''))$ を満たす最大の近傍を採るストラテジを持つエージェントは互いに距離を置くフォーメーションを生成する。

2次元 Euclid 空間におけるシミュレーション：対称性の成立／不成立

- ルール $t \models \bigcirc (r(a, a') \wedge r(a', a))$ は並走、ジグザグ走行、旋回などの特徴的な行動を生成する。また、密集したフォーメーションをとり、グループの結合や分裂が生じる。密集したフォーメーションをとりながら、集団で他エージェントを追跡するなどの協調行動を生成する。
- ルール $t \models \bigcirc (r(a, a') \wedge \neg r(a', a))$ やルール $t \models \bigcirc (\neg r(a, a') \wedge r(a', a))$ は並走、逃走、追跡、逃走から追跡へ切り返し、追跡から逃走へ切り返しなど

の行動を生成する．また，密集しすぎず，分散しすぎないフォーメーションをとりながら追跡や逃走などの協調行動を生成する．

- ルール $t \models \bigcirc (\neg r(a, a') \wedge \neg r(a', a))$ は反発，回避などの行動を生成する．また，広く分散したフォーメーションを生成する．

本章ではエージェント間の関係に基く関係達成型制御の提案とシミュレーション実験の結果を提示した．エージェント間の局所的な関係の性質の達成という，より原始的レベルの組み合わせにより，モデルベース条件反射エージェントの枠組みにおいても，他のエージェントも関わる目標を持った行動を再現できることを確認した．時相論理式の組み合わせによるルールや，その他ストラテジは本章で挙げたもの以外にも多数考えられ，本モデルに基き，更に多様な行動を生成できると考えられる．

第4章 人工感性への応用

本章では本研究で提案したモデルの応用可能性の一例として、配色デザインを生成する人工感性プログラムを試作する。本章の内容は2014年のUbukata *et al.*の公表論文[38]に基いて構成される。2004年に椎塚が提唱した人工感性においては「個人個人とそのときの状況に合わせて違った対応ができる(個別性)」ことが重要であり、集団の感性だけでなく個々の感性を活かすことが強調される[27, 28]。本試作プログラムは位相空間(2次元 Euclid 空間)上に配置され行動するエージェントたちにユーザの感性を投影し、ユーザがエージェントたちとノンバーバルにインタラクションすることで、配色デザインにユーザの感性を反映させる。その結果、個々のユーザの感性の個別性を表現できることを示す。

4.1 人工感性

2004年に椎塚は感性システムのフレームワークを提唱し、人工感性に関わる研究指針を提示した[27, 28]。椎塚は人工感性の設計において「個人個人とそのときの状況に合わせて違った対応ができる(個別性)」が重要であると主張している。また、感性は暗黙知・身体知と深く関わりのある概念であり、形式知のみによるアプローチでは不十分であると言われている。感性工学の分野においては、個の感性を形式知である感性語に変換して解析されることが多いが、しかし、その際に暗黙知である感性の情報が落ち、感性損失が生じる可能性がある。

人工感性は椎塚によって提唱され、感性システムのフレームワークにおいてその研究指針が示されているものの、その後研究は十分になされていない。2013年に生方らは個別性と非言語的アプローチの実現のため、近傍を持つエージェント

たちがせめぎ合う空間を考え，ユーザがエージェントたちの挙動にパラメータを介して作用することで感性を入力する枠組みを提案した [36, 37, 35, 38].

プログラム内部ではエージェントたちの挙動パラメータから感性語の集合へのマッピングと感性語の集合から感性プロダクトへのマッピングの2つのプロセスが働き，最終的にユーザがエージェント空間に込めた感性に対応する配色デザインが出力される．感性語の集合から配色デザインへのマッピングには日本カラーデザイン研究所 (NCD) による配色イメージスケールを利用した．配色イメージスケールは 1991 年の Kobayashi の著書にまとめられている [17]. また，日本カラーデザイン研究所の Web サイト上でイメージスケール (カラーイメージスケール，配色イメージスケール，言語イメージスケール) が公開されている [21].

感性損失を補うには，マッピング元となるエージェント空間の持つ表現能力が重要であり，エージェント空間やエージェントたちの挙動をどのようなパラメータで記述するかが問題になる．本研究では，エージェント空間のパラメータの設定法について言語イメージスケールを用いて考察する．

4.2 感性の表現

感性語 (印象語，イメージ語) に基き感性的な創作物を生成する従来研究は多数見られる．例えば，柳澤らは 2001 年に，印象語を入力とした携帯電話の意匠設計を支援するシステムを構築している [11]. また，2007 年に黒田らは印象語から Web ページデザイン (配色とレイアウト) を決定するシステムを提案・構築しており [18], 同年に堀田らは感性語を入力とし，それを反映させた日本語フォントを生成するシステムを構築している [6]. 2012 年には井上らはカラーイメージスケールを利用しイメージ語を入力としたユニフォームの配色の生成を行なっている [12].

カラーイメージスケール

本研究ではイメージスケールを利用して Web ページを模した配色デザインを生成するシステムを試作した。

日本カラーデザイン研究所の小林らがカラーイメージスケールを提案している [17, 21]。カラーイメージスケールとは人々が色に抱くある共通したイメージを形容詞で表し、色と結びつきを研究しスケール化したものである。カラーイメージスケールにより感性語と色の対応が得られ、感性語を検索してそれに対応した配色を取得することなどが可能となる。

イメージスケールは WARM-COOL 軸と SOFT-HARD 軸, CLEAR-GRAYISH 軸による空間への対応 ($WC \times SH \times CG$ へのマッピング) で表現できる。

カラーイメージスケール (図 4.1) で用いる色は色相 (Hue), トーン, 無彩色 AC に基づき, 10 色相 12 トーン + 無彩色の 130 色が Hue&Tone130 であり以下で記述できる:

$$H = \{R, YR, Y, GY, G, BG, B, PB, P, RP\},$$

$$T = \{Vp, Lgr, Gr, Dgr, P, L, Dl, Dk, B, S, Dp, V\},$$

$$AC = \{N9.5, N8, N6, N3, N1.5\},$$

$$HT_{130} = H \times T \cup AC.$$

カラーイメージスケールは対応

$$G_{HTI} : HT_{130} \rightarrow WC \times SH \times CG$$

で表せる。

配色イメージスケール (図 4.2) は複数の色の組合せからイメージスケールへのマッピングである。例として 3 色配色のイメージスケールは単色 HT_{130} の 3 組で得られる:

$$CC_3 = HT_{130} \times HT_{130} \times HT_{130}.$$

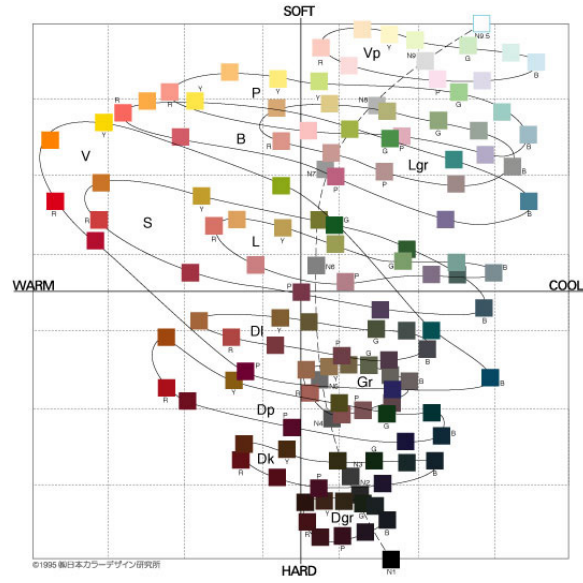


図 4.1: カラーイメージスケール [21]

3 色配色イメージスケールは対応

$$G_{CC3I} : CC_3 \rightarrow WC \times SH \times CG$$

である.

言語イメージスケール (図 4.3) は用いる感性語の集合を

$$K_{180} = \{ \text{“あどけない”, “かわいい”, ..., “メカニックな”} \}$$

とし, 対応

$$G_{KI} : K_{180} \rightarrow WC \times SH \times CG$$

で表せる.

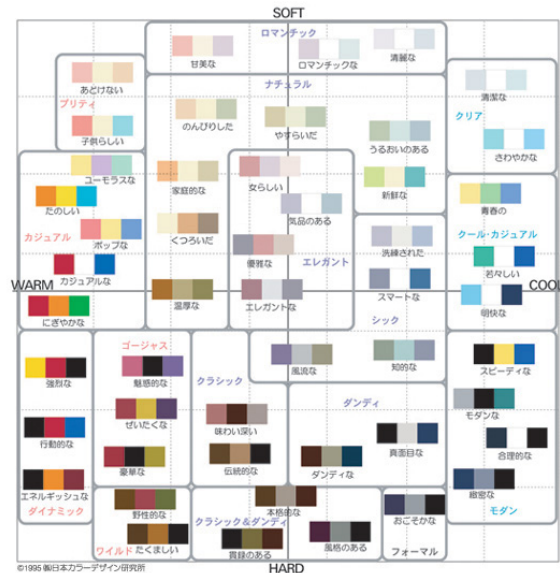


図 4.2: 配色イメージスケール [21]

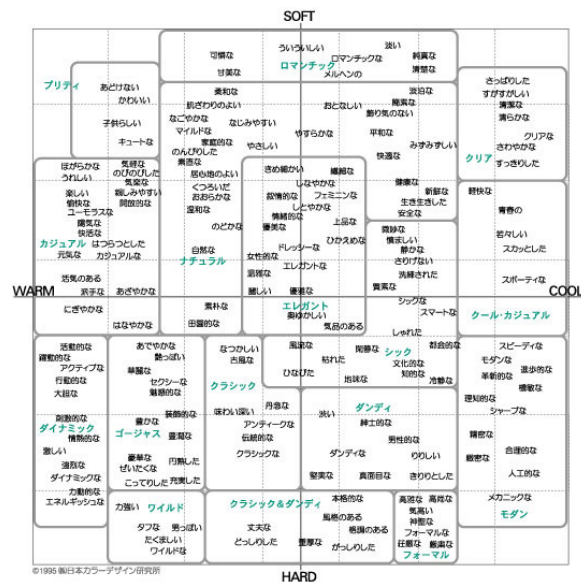


図 4.3: 言語イメージスケール [21]

4.3 本モデルの人工感性への応用

4.3.1 マルチエージェントの感性的挙動

2009 年に生方らは位相空間上のエージェントがコンテキストに依存して近傍のサイズを調整するモデルを提案した [29, 30, 32, 31]. 位相空間は $\langle U, \mathcal{N} \rangle$ で表せる. ここで, U は全体集合 (直感的には 2 次元 Euclid 空間や 3 次元 Euclid 空間), $\mathcal{N} : U \rightarrow 2^{2^U}$ は近傍系の公理を満たす関数である. エージェントの集合を A , 時刻の集合を T とする. 時刻 $t \in T$ におけるエージェント $a \in A$ の位置を $Loc(a, t) \in U$ と書く. エージェント $a \in A$ は時刻 $t \in T$ で近傍の組 $U_{\Lambda}^{a,t} = \langle N_1(Loc(a, t)), N_2(Loc(a, t)), \dots, N_{\Lambda}(Loc(a, t)) \rangle$ を決定する. この近傍の組の決定はエージェントの視界や数層のパーソナルスペースの決定に相当する. パーソナルスペース [7] は階層化された心理的なナワバリであり, 感性や個性に深く関わる概念である.

2011 年に Ubukata *et al.* は近傍を持つエージェントたちが感性を持っているかのようにふるまうことを, シミュレーション実験により確認した [33]. 例えば, 小さなパーソナルスペース (近傍) を選択する傾向にあるエージェントは他者のナワバリに積極的に侵入していく「積極的な, 攻撃的な, 激しい」ふるまいをし, 逆に, 大きなパーソナルスペース (近傍) を選択する傾向にあるエージェントは遠い距離の他エージェントからも逃げ出すような「消極的な, 守備的な, おとなしい」ふるまいをするなど, 感性的と解釈できるような行動が観察された. エージェントたちに, 感性に深く関連する近傍 (パーソナルスペースなど) を持たせ, その形状やサイズを調整することは, エージェントの感性の表現に役立ち, 感性損失を補う一つの手がかりになると考えられる.

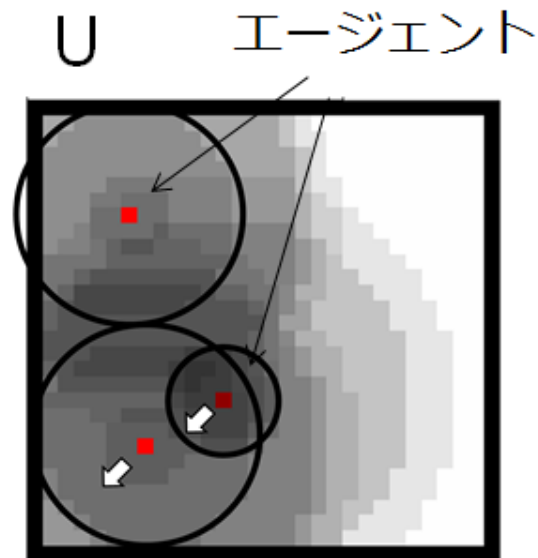


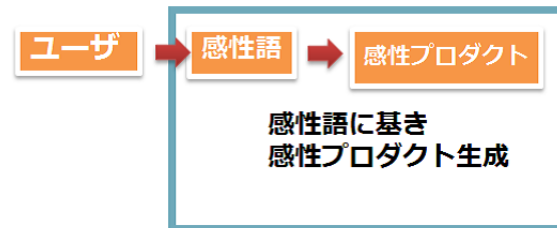
図 4.4: 近傍 (小) エージェントの縄張り侵入行動

4.3.2 本モデルに基づく人工感性の枠組み

提案する枠組みの目標と方策

人工感性を設計する際に重要な要素とされる個別性と、感性語に頼らない非言語的アプローチの実現が目的である。個別性の実現には個人個人のそのときの状況をシステムに反映させる機構が必要になる。提案する人工感性の枠組みでは感性を反映させうる機構として本モデルに基くマルチエージェントの空間を利用する。近傍を持つエージェントたちが動き回る空間にユーザのその時の感性を投影し、その感性に対応した感性プロダクトを出力するというプロセスを定式化する。本枠組みの概念図を図 4.5 に示す。非言語的アプローチの実現は、初期段階としてまず従来通り感性語を利用したシステムを構築し、最終的に感性語に関連するプロセスを除去することで行う。

従来型



人工感性プログラム (Ubukata et al, 2014)

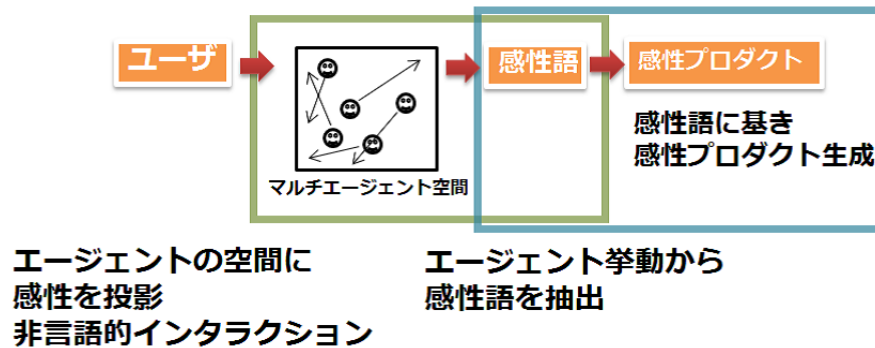


図 4.5: 本モデルに基づく人工感性プログラム概念図

提案する人工感性の枠組みのプロセス

エージェントたちは複数の動作パラメータを持つとし、ユーザは各動作パラメータをインタフェースを介して調整できるようにすることで、ユーザがエージェントのふるまいに干渉できるようにする。例えば、エージェントたちの動作パラメータとしては近傍サイズ、移動幅、方向転換のランダム性などが挙げられる。エージェントの動作パラメータを

$$P = P_1 \times P_2 \times \cdots \times P_N$$

で表す。例えば、移動幅パラメータは $P_1 = [1, 5]$ 、近傍サイズパラメータは $P_2 = [10, 100]$ などのようにパラメータが取りうる範囲によって設定できる。ユーザはインタフェースを介してこれらの動作パラメータを調整できる。その際、ユーザ

が定めた $p \in P$ に基いてエージェントたちの挙動が生成される．エージェントたちのふるまい (行動の列) を B_A で表せばこれを対応

$$G_{P,B_A} : P \rightarrow B_A$$

で表現することができる．エージェントたちのふるまいは環境や近傍エージェントのランダム性により一意に定まらないため、写像ではなく対応で表現する．

感性語の集合を KW とする．

例 10 感性語の集合の例：

$$KW = \{ \text{“強烈な”, “行動的な”, “野性的な”, “温厚な”, ...} \}.$$

エージェントたちの挙動から感性語を抽出する仕組みを考える．この仕組みはエージェントの行動列から感性語の集合へ対応

$$G_{B_A,KW} : B_A \rightarrow 2^{KW}$$

を決定することに相等する．この対応 $G_{B_A,KW}$ はアンケート等により感性を計測し事前に作成しておく必要がある．ユーザがエージェントたちの挙動から想起する感性語は複数あることが考えられるため、感性語の集合へ対応させている．また、抽出される感性語は人によって異なるため、一般に一意には定まらない．したがって、写像ではなく対応によって記述する．対応 G_{P,B_A} , $G_{B_A,KW}$ をまとめて写像

$$f_{P,KW} : P \rightarrow 2^{KW}$$

が得られる．最終的に得られる感性語の集合について和集合を採るなど、適切な処理を実行し、写像に変換する．人工感性プログラムが最終的に生成しうる感性プロダクトの集合を KP とする．ここで、感性語から感性プロダクトを生成するプロセスが必要になる．このようなプロセスは従来研究が多数見られ、それを流用することも可能である．感性語から感性プロダクトを生成するプロセスは写像

$$f_{KW,KP} : 2^{KW} \rightarrow 2^{KP}$$

で表現することができる．写像 $f_{P,KW}$ と $f_{KW,KP}$ を用いて写像

$$f_{P,KP} : P \rightarrow 2^{KP}$$

が得られる．この写像 $f_{P,KP}$ は動作パラメータの値を決定することで，いくつかの感性プロダクトが生成されることを示している．このような一連の流れにより，感性語から感性プロダクトを生成する従来機構の前に，ユーザの感性を反映する構造（エージェントたちの空間）を付与したことになる．提案する枠組みのプロセスを図 4.6 に示す．

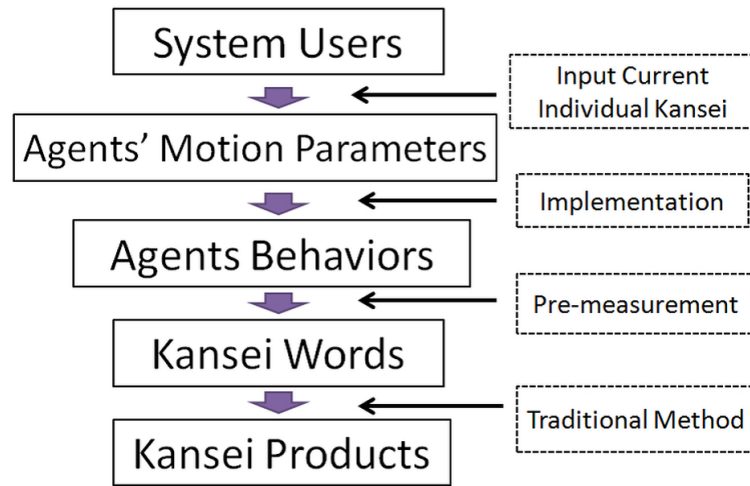


図 4.6: 提案する枠組みの流れ

4.3.3 非言語的アプローチ

感性工学の分野の従来研究では，ユーザは幾つかの感性語を選択・決定しシステムに入力する必要があった．本研究で提案する枠組みでは，感性語を内部処理で利用しているため，言語的アプローチとしての側面がある．しかしながら，本枠組みではユーザは感性語を直接使うのではなく，動作パラメータを規定するユーザインタフェースを身体的に操作することで配色デザインを得るものであり，見

かけ上は非言語的アプローチであると解釈できる．現状ではプログラムの内部のプロセスで感性語を利用している部分があるが，しかし，将来的には感性語使用部分を完全に排除することも検討している．

4.3.4 本モデルに基づく人工感性プログラムの概要

本モデルに基く人工感性プログラムは，ユーザが現在の感性をエージェント空間に投影し，それに対応した配色デザインを出力するという枠組みのもとで設計されている．提案する枠組みにおける，感性語から配色デザインへのマッピングのプロセスでは，配色イメージスケールを利用した．エージェントたちの挙動を規定する，動作パラメータを以下のように設定した．

$$P = P_N \times P_S \times P_R.$$

- $P_N = [10, 100]$: 近傍サイズ．小さいほど他エージェントの近傍に侵入しがちになる．
- $P_S = [1, 5]$: エージェントの移動幅．大きいほど激しく動くようになる．
- $P_R = [0, 1]$: エージェントの方向転換のランダムさ．大きいほどランダムに方向転換する．

また，以下のような粒状化を行った．

$$P' = P'_N \times P'_S \times P'_R,$$

$$P'_N = \{[10, 50), [50, 100]\} = \{“S”, “L”\},$$

$$P'_S = \{[1, 3), [3, 5]\} = \{“S”, “L”\},$$

$$P'_R = \{[0, 0.5), [0.5, 1]\} = \{“S”, “L”\}.$$

上記パラメータをユーザがインタフェース (マウスドラッグ) により操作し，配色デザインを出力するプログラムを作成した (図 4.7)．

4.4 人工感性プログラムの流れ

ユーザはマルチエージェントの動作パラメータを入力インタフェースにより操作し、マルチエージェントの挙動を調節する。マウスでインタフェース上のオブジェクトをドラッグすることで挙動パラメータを $P_N = [10, 100]$, $P_S = [1, 5]$, $P_R = [0, 1]$ を表記の範囲内で直感的に動かすことができる。

プログラムの内部で挙動パラメータの組から感性語の集合へのマッピングを用い、その時刻で対応する感性語を抽出する。この際、挙動パラメータは $P_N = \{“S”, “L”\}$, $P_S = \{“S”, “L”\}$, $P_R = \{“S”, “L”\}$ に粒状化された上で感性語の集合へマッピングされている。さらに、感性語から配色デザインへのマッピングを用い、その時刻で対応する配色デザインを出力する。以上の一連のプロセスはリアルタイムに実行、表示される。したがって、ユーザはリアルタイムに出力される配色デザインやマルチエージェントの挙動とインタラクションすることができ、現時点での個人の感性を反映させていくことが可能となる。

4.5 シミュレーション実験

本研究で提案したモデルに基づく人工感性システムを実際にプログラムにより実装し、シミュレーション実験を実行した (図 4.7)。近傍をもつエージェントたちは位相空間上に存在する。本実験では位相空間の一つである二次元 Euclid 空間を用いた。画面左にエージェントたちの動作パラメータをマウスドラッグにより操作する入力インタフェースがあり、画面中央に近傍をもつエージェントたちが動く空間、画面右に生成された Web ページ配色を模した配色デザイン (感性プロダクト) を表示させている。

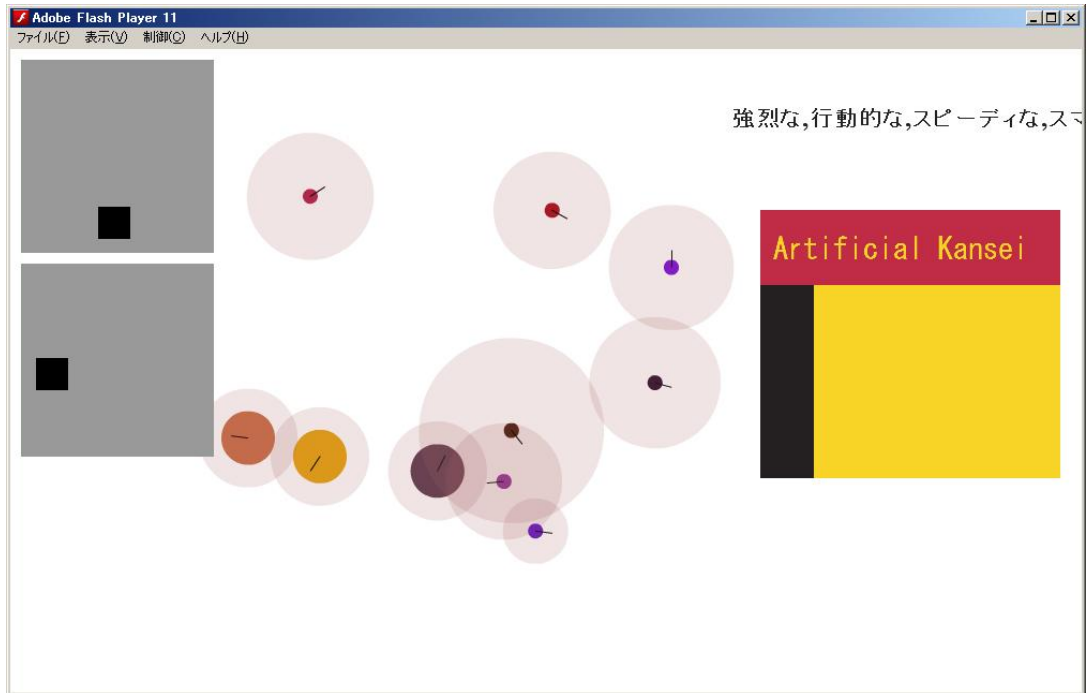


図 4.7: 作成した人工感性プログラム画面

4.5.1 人工感性プログラムの実装

近傍をもつエージェントたちの動作パラメータとして以下を用意した.

$$P = P_N \times P_S \times P_R,$$

$$P_N = [10, 100], P_S = [1, 5], P_R = [0, 1].$$

P_N は近傍サイズであり, ナワバリのサイズが変わる事により, エージェントたちのせめぎ合いの様子が変わる. 今回は簡単のため, 一つのナワバリを持つとした. P_S はエージェントの移動幅であり, この数値が大きいほど移動スピードや移動範囲が大きくなり, 激しくふるまうようになる. P_R は方向転換のランダム性であり, この数値が1に近いほどランダムに方向転換を実行するようになる. 実数値

を含むパラメータ空間では必要なマッピングを得ることが困難であるために、適当に粒状化を行う。今回は下記のように粒状化を行った。

$$P'_N = \{[10, 50), [50, 100]\} = \{“S”, “L”\},$$

$$P'_S = \{[1, 3), [3, 5]\} = \{“S”, “L”\},$$

$$P'_R = \{[0, 0.5), [0.5, 1]\} = \{“S”, “L”\}.$$

これにより粒状化されたパラメータ空間 P' は以下の 8 通りになる。

$$P' = P'_1 \times P'_2 \times P'_3 = \{\langle “S”, “S”, “S” \rangle, \langle “S”, “S”, “L” \rangle, \dots, \langle “L”, “L”, “L” \rangle\}.$$

写像 $f_{P,KW}$ をアンケートにより作成した。 P' の各パラメータにより生成された近傍エージェントたちのふるまいを観測し、各パラメータに対応する感性語を調査した。今回実際に得られた写像 $f_{P,KW}$ を表 4.1 に示す。

表 4.1: 動作パラメータから感性語の集合への写像 $f_{P,KW}$

Motion Parameters	Kansei Words
$\langle “S”, “S”, “S” \rangle$	$\{“elegant”\}$
$\langle “S”, “S”, “L” \rangle$	$\{“pop”\}$
$\langle “S”, “L”, “S” \rangle$	$\{“bold”, “active”, “speedy”, “smart”\}$
$\langle “S”, “L”, “L” \rangle$	$\{“active”, “wild”\}$
$\langle “L”, “S”, “S” \rangle$	$\{“mild”, “leisurely”, “relaxing”\}$
$\langle “L”, “S”, “L” \rangle$	$\{“young”, “naive”\}$
$\langle “L”, “L”, “S” \rangle$	$\{“flowing”\}$
$\langle “L”, “L”, “L” \rangle$	$\{“energetic”\}$

感性語に対応した配色デザインの生成には配色イメージスケールを利用した。本プログラムでは、写像 $f_{P,KW}$ により得られた幾つかの感性語のうち一つをラン

ダムに選択する。次に、選択された感性語に対応する配色を配色イメージスケールより抽出し、配色デザインに割り当て出力する。

4.6 シミュレーション結果

実際のシミュレーションで、各パラメータから生成された配色デザインを図 4.8 に示す。

以下に結果の例を挙げて考察する。

例 11 パラメータ $\langle "S", "L", "S" \rangle$ の場合

各動作パラメータが $\langle "S", "L", "S" \rangle$ のとき、一部のエージェントの近傍サイズが小さいため積極的に他エージェントのナワバリ (近傍) に侵入する行動が見られる。移動幅が大きいため移動速度や移動距離が大きく激しくふるまう。また、ランダム性が小さいため、方向転換が少なく方向性をもって直進する傾向にある。これらによってエージェントは強く、激しくふるまう。結果として得られた配色デザインも強烈なイメージとなっている。

例 12 パラメータ $\langle "L", "S", "L" \rangle$ の場合

各動作パラメータが $\langle "L", "S", "L" \rangle$ のとき、一部のエージェントの近傍サイズが大きいため遠くの他エージェントからも逃げ出す傾向が見られる。移動幅が小さいため移動速度や移動距離が小さくゆるやかな動きになる。また、方向転換のランダム性が大きいため、方向性があいまいになる。これらによってエージェントはゆるやかに、ゆったりとふるまう。結果として得られた配色デザインは、控えめでかわいらしいイメージになっている。

このように、エージェントの動きが激しい感じになるよう動作パラメータを操作した場合、強烈な配色デザインが生成され、エージェントの動きがゆったりした感じになるよう操作した場合、かわいらしい配色デザインが生成される。リアルタイムなインタラクションによって、個々のユーザが現在の感性と共感できる

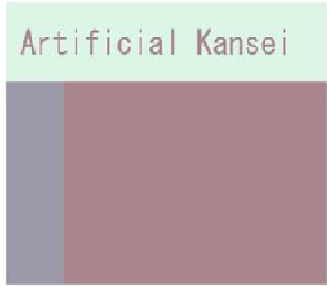
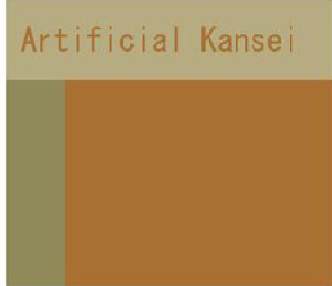
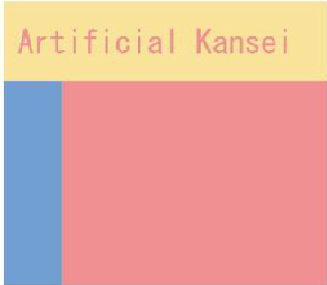
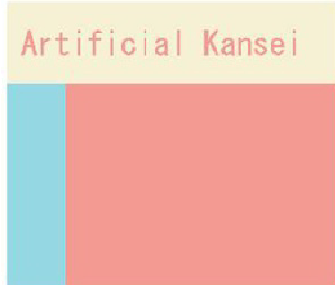
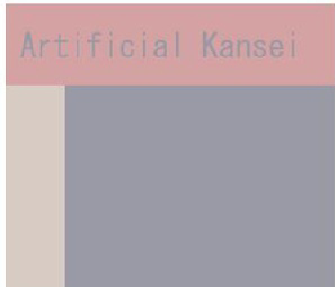
〈“S”, “S”, “S”〉 	〈“L”, “S”, “S”〉 
〈“S”, “S”, “L”〉 	〈“L”, “S”, “L”〉 
〈“S”, “L”, “S”〉 	〈“L”, “L”, “S”〉 
〈“S”, “L”, “L”〉 	〈“L”, “L”, “L”〉 

図 4.8: 各動作パラメータから生成された配色デザイン

ようなエージェントのふるまいを探ることで、それに概ね対応した配色デザインが得られることを確認できた。

4.7 アンケート調査結果

大学生6名に対し、本試作プログラムの出力結果に関するアンケート調査を行った。PC画面上に、本研究で提案したモデルに基づくマルチエージェントがせめぎ合う空間と、そのエージェントたちの動作パラメータから生成される配色デザインを同時に表示する。その際の、エージェントたちの挙動から受ける印象、雰囲気、ムードと、配色デザインから受ける印象、雰囲気、ムードがマッチしている度合（「まったくマッチしない (-2)」, 「ややマッチしない (-1)」, 「どちらともいえない (0)」, 「ややマッチする (1)」, 「とてもマッチする (2)」）を選択させた。この調査をエージェントの行動パラメータの組合せ8パターンについて行った。アンケート結果を表4.2に示す。

表 4.2: 動作パラメータごとのマルチエージェントの挙動から受ける印象と配色デザインから受ける印象の一致度

Motion Parameter	-2	-1	0	1	2
$\langle "S", "S", "S" \rangle$	0	1	1	4	0
$\langle "S", "S", "L" \rangle$	0	1	2	2	1
$\langle "S", "L", "S" \rangle$	0	0	2	4	0
$\langle "S", "L", "L" \rangle$	1	0	2	1	2
$\langle "L", "S", "S" \rangle$	0	0	0	3	3
$\langle "L", "S", "L" \rangle$	0	1	2	2	1
$\langle "L", "L", "S" \rangle$	0	4	2	0	0
$\langle "L", "L", "L" \rangle$	0	3	2	1	0
Total	1	10	13	17	7

4.8 結果の考察

アンケートの結果から、一見関係がないと考えられる、マルチエージェントの挙動から得られる印象と、その挙動から生成される配色デザインから得られる印象に関連があることが示唆された。

このことから、ユーザが現在の気分に対応したマルチエージェントの動きを探ることによって、現在の気分に対応した配色デザインを出力することが実現可能であると考えられる。ユーザは感性語を選択し入力するのではなく、身体によってマルチエージェントとインタラクションするため、非言語的アプローチによるプログラムになっている。また、リアルタイムなインタラクションにより、現在のユーザの感性を反映する個別性の実現に近づいている。

同様の手法で配色デザイン以外の感性プロダクトについても応用が可能と考えられる。

4.9 言語イメージスケールを考慮したパラメータ選定

4.9.1 マッピングによるイメージスケールのカバー範囲

本研究の人工感性の試作プログラムの枠組みにおいては、エージェント空間やエージェントたちの挙動を規定するパラメータの空間 (一般には何らかの構造を持った集合) から感性語へのマッピングをどのように構成するかが重要である。エージェントたちの挙動を指定するパラメータから感性語へのマッピングは対応

$$G_{AK} : P \rightarrow K_{180}$$

で表すことができる。対応の合成 $G_{KI} \circ G_{AK}$ によりエージェント空間からイメージスケールへのマッピングを構成できる。エージェント空間を直接イメージスケールにマッピングすることも考えられるが、しかし、本研究では扱わない。

単色イメージスケール G_{HTI} は HT_{130} を用いたマッピングであり、図 4.1 のようにイメージスケールの左下部、右下部、左上部などをカバーできていない。3 色

配色イメージスケール G_{CC3I} は CC_3 を用いたマッピングであり、図 4.2 のようにイメージスケールの大部分をカバーできている。それぞれの対応の値域 $V(G_{HTI})$ と $V(G_{CC3I})$ を比較することで、マッピング元の構造の違いにより表現能力がどのように変化するかを観察できる。

提案する人工感性の枠組みのアイディアは、現在のユーザの感性を感性語に変換するプロセスで損なわれる感性情報を再生させるために身体的・非言語的インタフェース (近傍をもつマルチエージェントの空間) を付与する事であった。しかしながら、エージェント空間からイメージスケールの極一部へしかマッピングされない場合、システムから得られる感性プロダクトは少数の感性語のみに基く、多様性のないものになり、感性損失を補うことができないだけでなく、更なる感性損失を生み出す恐れがある。

感性語の集合へマッピングする元の集合の構造はシステムの感性の表現能力に大きく関わる。マッピング元の構造は、直接言語を用いた方法よりも多様な表現能力を持つことが期待される。言語イメージスケール (図 4.3) のように、言語はイメージスケールの大部分をカバーしている。非言語的アプローチにより言語よりも豊かな表現を可能にするには、言語イメージスケールがカバーする範囲よりも大きな範囲をカバーできることが望ましいと考えられる。仮にエージェント空間のパラメータ空間から感性語へのマッピング G_{AK} の値域 $V(G_{AK})$ が K_{180} に比べて小さければ、表現能力が欠落している可能性がある。したがって、エージェント空間のパラメータをどのように選定するかは非常に重要である。パラメータ数やパラメータの取りうる値が多ければ多いほどイメージスケールカバー率は大きくなると考えられるが、しかし、ユーザが探索する空間が膨大になるため実用的でなくなる。このことから、適切なパラメータの選定と、その取りうる値の決定が必要になることがわかる。これはマッピング元となる構造の粒状化に関わる問題とも考えられる。

例 13 エージェント空間を規定するパラメータの例：

- P_{num} : エージェント数。エージェント数の最大値 N_{max} を決定し、それ以下

の自然数をとする.

- $P_{dim} = \{0, 1, 2, 3\}$: エージェント空間の次元数.

エージェントたちの挙動を規定するパラメータの例:

- $P_N = \{“S”, “L”\}$: 近傍サイズ. 小さいほど他エージェントの近傍に侵入しがちになる.
- $P_S = \{“S”, “L”\}$: エージェントの移動幅. 大きいほど速く激しく動くようになる.
- $P_R = \{“S”, “L”\}$: エージェントの方向転換のランダムさ. 大きいほどランダムに方向転換する.

エージェント群挙動パラメータは簡単のため S (Small) と L (Large) の 2 値に粒状化してある.

エージェント空間やエージェントたちの挙動を規定するパラメータは, ここで挙げた以外にもエージェントの色や形等, 多種多様に考えられる.

ここで,

$$P_{all} = \{P_{num}, P_{dim}, P_N, P_S, P_R\}$$

とすると, パラメータ選定のパターンは $2^{P_{all}}$ 考えられ, パラメータセットは $p \in 2^{P_{all}}$ で表せる. パラメータセット p から感性語への対応

$$G_p : p \rightarrow K_{180}$$

はパラメータセット p を持つ人工感性プログラムを実装しマッピングを実測することで G_p を得られる. 値域 $V(G_p)$ を調査することで p が表現可能なイメージスケールの範囲を特定できる. 多数のパラメータセットとイメージスケールのカバー率, カバー範囲形状を調査し, 組合せによるカバー範囲の形状変化を解析し, 階層構造やネットワーク構造を構築することにより特定の感性を担うパラメータ要素や不要なパラメータ要素などがわかり, 感性の解析に役立つと考えられる.

図 4.9 はパラメータセットが近傍サイズ，移動幅，ランダムさである場合のイメージスケールのカバー範囲形状を示し，図 4.10 はパラメータセットが近傍サイズのみである場合のカバー範囲形状を示している．パラメータセットが限定されたとき，イメージスケールのカバー範囲が減少していることがわかる．

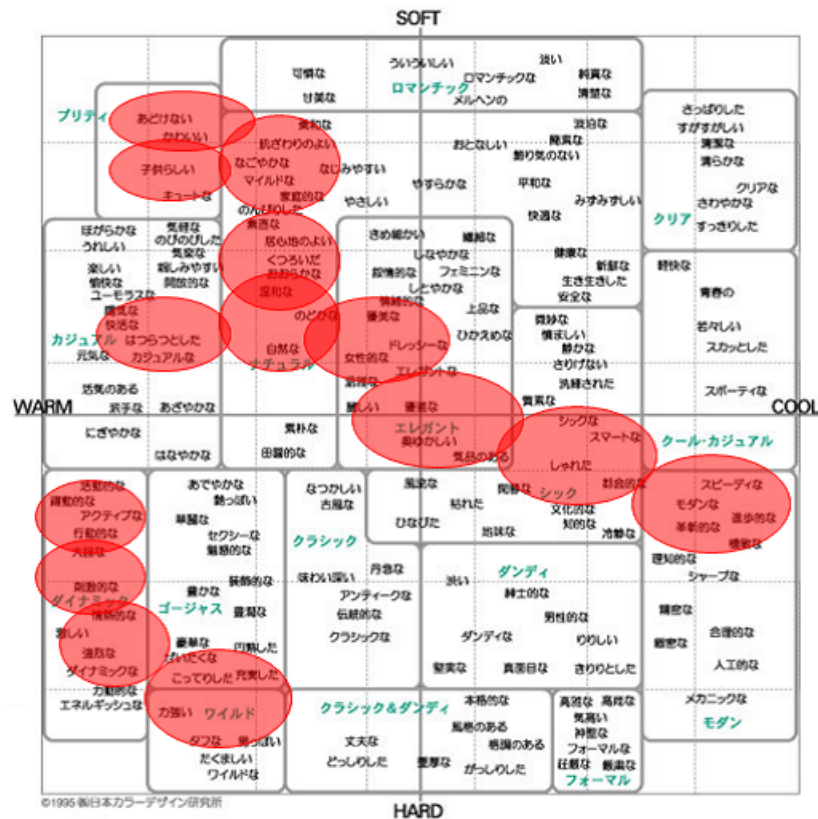


図 4.9: 近傍サイズ，移動幅，ランダムさによる言語イメージスケール [21] へのマッピングの範囲

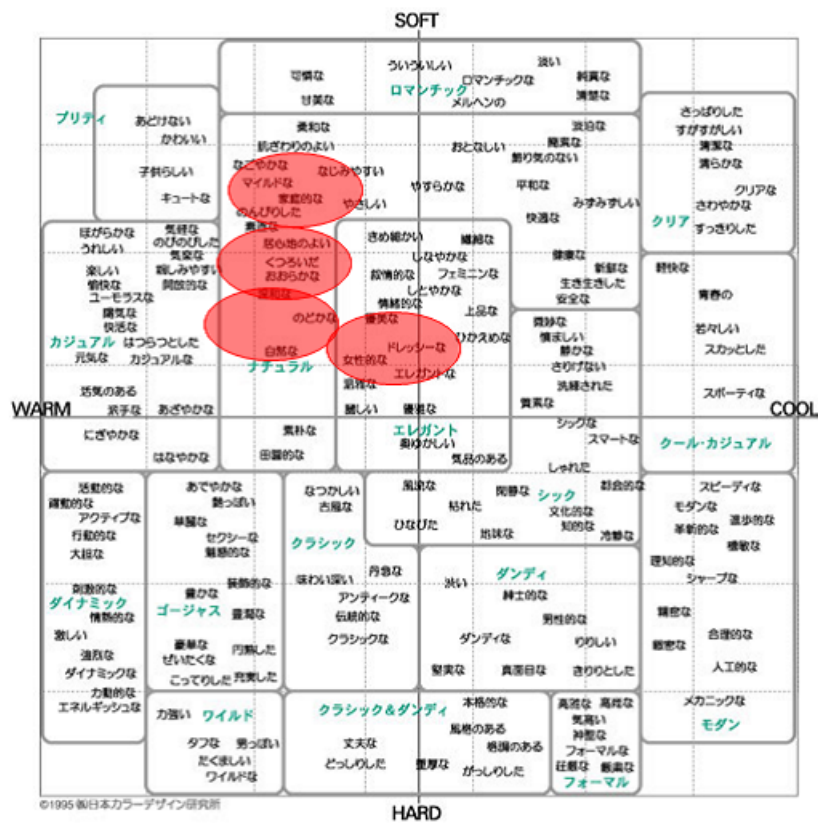


図 4.10: 近傍サイズのみによる言語イメージスケール [21] へのマッピングの範囲

第5章 結論

本論文では，従来型の局所目的達成型制御に代わり，エージェント間の関係の局所的性質に基く関係達成型制御を提案し，その制御モデルを (1) 位相空間，(2) エージェント空間，(3) 時相論理，の三層のモデルにより定式化した．関係達成型制御により，綿密なプランニングをしないモデルベース条件反射エージェントに他のエージェントも関わる目的を持った行動を持たせられるかを確認するため，追跡や回避，協調行動などに関するシミュレーション実験を実施し，結果について考察した．さらに，二項関係の局所性に基くエージェントたちの集団行動が感性的に解釈できることを利用して，本モデルに基いて，個々のユーザの感性を反映させる配色デザインを構成するプログラムを試作し，その有効性を検討した．

本論文で得られた成果およびその意義を挙げる．

1. エージェント間の関係の局所的性質に基く関係達成型制御を提案し，その制御モデルを (1) 位相空間 (Euclid 空間，セル空間)，(2) エージェント空間 (セマンティクス)，(3) 時相論理 (シンタックス)，の三層のモデルにより定式化した．エージェントの近傍に基くエージェント間の二項関係の局所的な特徴 (対称性の局所的成立／不成立，推移性の局所的成立／不成立など) の達成を目標として挙動するエージェントを設定すると，結果として様々な挙動が生成でき，モデルベース条件反射エージェントにも，例えば追跡や回避，協調行動のような目的を持った行動を実現できることを示した．2次元セル空間と2次元 Euclid 空間でのシミュレーション実験を実施しそれらが本モデルによって再現可能であることを確認した．
2. 本研究で提案したモデルの応用可能性の一例として，配色デザインを生成す

る人工感性プログラムを試作した。各時刻で近傍を持つマルチエージェントの挙動が感性的に解釈できることを利用し、ユーザの非言語的な感性を投影することを提案した。本試作プログラムは位相空間内に配置され行動するエージェントたちにユーザの感性を投影し、ユーザがエージェントたちとノンバーバルにインタラクションすることによって、配色デザインにユーザの感性の個別性を表現するものである。試作プログラムに関するアンケート結果から、その有効性を部分的に確認した。

最後に、今後の課題を挙げる。

1. 種々の位相空間とその粒状性の検討

本研究ではエージェントたちの挙動する空間として2次元 Euclid 空間や2次元セル空間を扱ったが、しかし、他にも多様な位相空間が存在し、更にその位相の粗さや細かさといった粒度によって様々な空間が想定される。したがって、それらの位相、粒度における本モデルの適用可能性とそれに伴うエージェントたちの挙動の変化について検討する必要がある。また、エージェントがそれぞれ異なる粒度を持っている場合の、粒度に依存した挙動の変化や分類などが課題となる。粒状化された空間においては、エージェントの採る近傍はラフ集合の下近似と上近似で近似され、近傍が層状となり、層状の近傍は、例えばパーソナルスペースなどと解釈して議論が可能になるため、その点に関しても検討の必要がある。

2. 二項関係の局所的な特徴とマルチエージェントの挙動との対応

本研究ではエージェント間の関係の局所的な特徴に関して、代表的性質である反射性や対称性、推移性などについて説明したが、しかし、関係の特徴としては Euclid 的、連鎖的など、様々あり、それらについての検討も必要である。関係の局所的な特徴とエージェントたちの挙動との対応のうち、本研究で扱ったものは追跡、回避、協調行動など、一部に留まっている。しかし、マルチエージェントの行動やタスクは本研究で扱ったもの以外にも多数

存在する。それらの行動やタスクに関して、本モデルの適用可能性や有用性を確認する必要がある。

3. 時相論理によるルールと矛盾・競合の解消

本研究では関係達成型制御の三層モデルの第3層目において、時相論理式によってルールを記述した。時相論理では本研究で用いた $\bigcirc$ (Next) の他にも、 $[F]$ (Globally), $\langle F \rangle$ (in the future), U (until) のような多様な時相演算子があり、それらの組合せによって豊富な表現能力を持つため、そのようなルールを適用した際のマルチエージェントの挙動についても確認と考察が必要である。特に U (until) は、局所的推移性が満たされるまでは局所的対称性を満たすよう行動するなどのルールを表現でき、関係達成の条件付けに有用であるため利用可能性を検討する必要がある。また、エージェント数の増加や局所性の影響で、ルールを適用する際に矛盾や競合が発生することが考えられるため、時相論理によるそれらの解消も課題となる。

4. 人工感性の個別性

本研究では、ユーザの現在の感性を反映し得る構造としてマルチエージェントの空間を付与することで個別性の実現を目指した。個別性の実現は人工感性の分野で究極的な課題であり、容易に達成できるものではなく、本研究ではその実現可能性の一端を示したにすぎない。したがって、個別性の実現のためには引き続き考察、検証を行う必要がある。非言語的アプローチに関しては、本研究で試作したプログラムは表面上ノンバーバルなシステムになっているが、しかし、内部で感性語のマッピングのプロセスを利用している。将来的には、内部で感性語を用いるプロセスを除去することで真にノンバーバルなシステムを実現することを検討している。

謝辞

本論文を閉じるにあたりまして、北海道大学大学院情報科学研究科 村井 哲也 准教授に心から厚く御礼申し上げます。同大学工学部情報工学科在学中から通算して10年の長きに渡りまして、懇切丁寧なる御指導や御助言を賜り、未熟な学生でありました私が本研究を完成させることができました。

本論文を作成するに際しまして、大変貴重な御指摘や御助言を数多くいただきました、同大学大学院情報科学研究科 今井 英幸 教授，工藤 峰一 教授，原口 誠 教授に深く感謝させていただきます。

また，随所に渡り，ご討論いただき，ご相談に乗っていただきました室蘭工業大学大学院工学研究科 工藤 康生 准教授，北海道大学院情報科学研究科 瀧川 一 学 特任助教に深く感謝させていただきます。

最後に，研究者の道に進むことを許し，かつ，惜しまず援助してくれました父 生方 秀紀 と母 生方 町子 に対して深く謝意を表します。

文献

- [1] 東俊一, 永原正章. マルチエージェントシステムの制御 : 導入と準備. システム/制御/情報 : システム制御情報学会誌, Vol. 57, No. 5, pp. 207–210, 2013.
- [2] R. A. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol. RA-2, pp. 14–23, 1986.
- [3] R. A. Brooks. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, Vol. 47, pp. 139–159, 1991.
- [4] 藤田和幸, 松尾啓志. 状態空間の部分的高次元化手法を用いたマルチエージェント強化学習法 (一般: マルチエージェントと学習). 情報処理学会研究報告. ICS, [知能と複雑系], Vol. 2004, No. 29, pp. 95–100, 2004.
- [5] M. Gardner. Mathematical games - the fantastic combinations of john conway's new solitaire game "life". *Scientific American*, Vol. 223, pp. 120–123, 1970.
- [6] 堀田創, 野澤貴, 萩原将文. 感性ルールベースを用いた日本語フォント自動作成システム (知識処理, <特集>インタラクション技術の原理と応用). 情報処理学会論文誌, 2007.
- [7] E. T. Hall. *The hidden dimension*. A Doubleday anchor book. Doubleday, 1966.

- [8] 長谷川雄吾, 高田沙都子, 中野秀洋, 荒井秀一, 宮内新. 行動選択確率に基づく動的強化関数を用いた強化学習手法 (人工知能, 認知科学). 電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム, Vol. 89, No. 4, pp. 788–796, 2006.
- [9] 服部宏充, 栗原聡. 特集「エージェント」にあたって. 人工知能学会誌, 2013.
- [10] 林直樹, 永原正章. マルチエージェントシステムの制御 : II 代数的グラフ理論. システム/制御/情報 : システム制御情報学会誌, Vol. 57, No. 7, pp. 283–292, 2013.
- [11] 柳澤秀吉, V. Kostov, 福田収一. 印象語による意匠設計支援方法の開発 : 感性の多様性を考慮して : 機械要素, 潤滑, 工作, 生産管理など. 日本機械学会論文集. C 編, 2001.
- [12] 井上博行, 村本善之. 感情配色モデルとイメージ感情モデルを用いた配色システムとユニフォーム配色への応用 イメージ語選択型アンケートを用いたイメージ感情モデルとトーン選択機能の導入. 日本感性工学会論文誌, Vol. 11, No. 2, pp. 273–280, 2012.
- [13] 石井秀明. マルチエージェントシステムの制御 : I 総論. システム/制御/情報 : システム制御情報学会誌, Vol. 57, No. 5, pp. 211–218, 2013.
- [14] 伊藤昭, 金淵満. 知覚情報の粗視化によるマルチエージェント強化学習の高速化 : ハンターゲームを例に. 電子情報通信学会論文誌. D-I, 情報・システム, I-情報処理, Vol. 84, No. 3, pp. 285–293, 2001.
- [15] 伊藤孝行, 金森亮, チャクラボルティシヤンタヌ, 大塚孝信, 原圭佑. 未来の社会システムを支えるマルチエージェントシステム研究 (1) : 経済パラダイム, 交渉エージェント, 交通マネジメント (<特集>エージェント). 人工知能学会誌, Vol. 28, No. 3, pp. 360–369, 2013.

- [16] 伊藤孝行, チャクラボルティシャンタヌ, 大塚孝信, 金森亮, 原圭佑. 未来の社会システムを支えるマルチエージェントシステム研究 (2) : 電力システムおよびワイヤレスセンサネットワークへの応用 (<特集>エージェント). 人工知能学会誌, Vol. 28, No. 3, pp. 370–379, 2013.
- [17] S. Kobayashi. *Color Image Scale*. Kosdansha International, 1991.
- [18] 黒田英憲, 小澤朋之, 亀田弘之. 印象語に基づく web ページデザインシステムの構築とその評価 (思考と知識検索・獲得, 一般). 電子情報通信学会技術研究報告. TL, 思考と言語, Vol. 107, No. 387, pp. 19–24, 2007.
- [19] C. G. Langton. Studying artificial life with cellular automata. In *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 22, 1986. Issues 1-3.
- [20] 真鍋彰宏, 梶川嘉延, 野村康雄. Q-learning を用いたマルチエージェントシステムに関する検討 : 視覚情報の動的切替による学習速度向上の試み. 全国大会講演論文集, Vol. 59, No. 2, pp. 2–99–2–100, 1999. 4J-5.
- [21] 日本カラーデザイン研究所. <http://www.ncd-ri.co.jp/>.
- [22] 大鋳史男, 小野木基裕. セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション. 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, Vol. 51, pp. 94–111, 2008.
- [23] A. Pnueli. The temporal logic of programs. *SFCS '77 Proceedings of the 18th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 46–57, 1977.
- [24] C. W. Reynolds. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '87, pp. 25–34, New York, NY, USA, 1987. ACM.

- [25] S. Russell and P. Norvig. Artificial Intelligence, A Modern Approach (古川 監訳, 人工知能エージェントアプローチ, 共立出版, 1997). 1995.
- [26] 渋谷昌三. パーソナル・スペースの形態に関する一考察. 山梨医大紀要, 第 2 巻, pp. 41–49, 1985.
- [27] 椎塚久雄. 感性から感性システムへ—人工感性への布石. 感性工学, Vol. 3, No. 1, pp. 39–44, 2004.
- [28] 椎塚久雄. 感性システムのフレームワーク (<特集>感性工学). 知能と情報 : 日本知能情報ファジィ学会誌 : Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics, Vol. 16, No. 5, pp. 386–391, 2004.
- [29] S. Ubukata, Y. Kudo, and T. Murai. An agent control method based on variable neighborhoods. In *13th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (KES2009)*, CD-ROM, k09is-053, pp. 356–363, 2009. (September 28–30, 2009. Universidad de Chile, Santiago, Chile).
- [30] 生方誠希, 工藤康生, 村井哲也. 可変到達可能関係モデルに基づくエージェント制御に関する一考察. 第 25 回ファジィシステムシンポジウム (FSS2009) 講演論文集, 第 25 巻 of *CD-ROM, 2B2-01*, pp. 105–105, 2009. (筑波大学筑波キャンパス).
- [31] S. Ubukata, Y. Kudo, and T. Murai. A multi-agent system based on variable neighborhood model. In *The 2010 IEEE Conference on Granular Computing (GrC2010)*, CD-ROM, G408, pp. 495–498, 2010.
- [32] 生方誠希, 工藤康生, 村井哲也. 可変近傍モデルに基づくマルチエージェントシステム. 第 26 回日本知能情報ファジィ学会ファジィシステムシンポジウム (FSS2010) 講演論文集, CD-ROM, TE2-3, 2010.

- [33] S. Ubukata, T. Murai, and Y. Kudo. Agents' kansei expression based on variable neighborhood models. In *The 2011 IEEE International Conference on Granular Computing (GrC2011)*, CD-ROM, A4-05, pp. 687–690, 2011. (November 8-10, 2011, Garden villa, Kaohsiung, Taiwan).
- [34] S. Ubukata, Y. Kudo, and T. Murai. Autonomous agent control based on variable neighbourhoods. *International Journal of Reasoning-based Intelligent Systems (IJRIS)*, Vol. 3, No. 1, pp. 8–13, 2011.
- [35] S. Ubukata, Y. Kudo, and T. Murai. A formulation of artificial kansei design method based on multi-agent spaces generated by variable neighborhood models. In *First International Symposium on Affective Engineering 2013 (ISAE2013)*, CD-ROM, 5C-4, 2013. (November 10(Sunday)-12(Tuesday), Kitakyushu International Conference Center, Kitakyushu, Japan).
- [36] 生方誠希, 工藤康生, 村井哲也. 可変近傍モデルに基づく人工感性システムにおけるエージェント空間のパラメータ選定に関する一考察. 第29回ファジィシステムシンポジウム (FSS2013), CD-ROM, MA2-1, 2013.
- [37] 生方誠希, 工藤康生, 村井哲也. 可変近傍モデルに基づく人工感性システムの設計に関する一考察. 第8回日本感性工学会春季大会, 2013. (北九州国際会議場).
- [38] S. Ubukata, Y. Kudo, and T. Murai. A formulation of artificial kansei systems based on multi-agent spaces generated by variable neighborhood models. *International Journal of Affective Engineering (IJAE)*, Vol. 13, No. 1 (Special Issue), pp. 81–87, 2014.
- [39] S. Ubukata, T. Murai, Y. Kudo, and S. Akama. A variable neighborhood model for agent control introducing accessibility relations between agents

with linear temporal logic. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics (JACIII)*, 2014, to appear.

- [40] S. M. Ulam. Some ideas and prospects in biomathematics. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, Vol. 1, pp. 277–292, 1972.
- [41] J. von Neumann. The general and logical theory of automata. In *Cerebral mechanisms in behavior; the Hixon Symposium*, pp. 1–41, 1951.
- [42] J. von Neumann. *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Champaign, IL, USA, 1966.
- [43] S. Wolfram. Cellular automata as models of complexity. *Nature*, Vol. 311, pp. 419–424, 1984. No. 5985.
- [44] 山村忠義, 馬野元秀, 瀬田和久. 段階的な視覚をもつエージェントにおける強化学習について : 追跡問題を例にして. 知能と情報 : 日本知能情報ファジィ学会誌 : Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics, Vol. 18, No. 4, pp. 561–570, 2006.