可変近傍モデルに基づくマルチエージェントシステム

可変近傍モデルに基づくマルチエージェントシステム

著者	生方　誠希，工藤　康生，村井　哲也
雑誌名	ファジィシステムシンポジウム講演論文集
巻	26
ページ	768-771
発行年	2010-09
URL	http://hdl.handle.net/10258/2209

可変近傍モデルに基づくマルチエージェントシステム

A Multi-Agent System Based on Variable Neighborhood Model

◯ [1] 生方　誠希，　[2] 工藤　康生，　[1] 村井　哲也
◯ [1]Seiki Ubukata，[2]Yasuo Kudo，[1]Tetsuya Murai
[1] 北海道大学
[1]Hokkaido University
[2] 室蘭工業大学
[2]Muroran Institute of Technology

Abstract: Agent control methods are generally required flexibility and robustness. As one of agent control methods to realize the flexibility, we proposed a variable neighborhood model in which an agent selects actions based on variable neighborhoods. In this paper, by its extension, we formulate a framework of multi-agent system based on variable neighborhood model. We also discuss interactions among agents in the model.

1　はじめに

生方ら [3] はラフ集合が生成する粒状性に基づく行動決定法を提案し，シミュレーションによりその動作を確認した．シミュレーション中，エージェントが前方及び左右の壁に囲まれると身動きが取れなくなるデッドロック現象が生じ，エージェントの視界を縮小させることで対処した．この対処を位相空間の観点から解釈すれば，エージェントは近傍（視界）の大きさを調整することによりデッドロック問題を回避したとみなせる．このような近傍を可変とした制御を定式化するため，可変近傍モデル [4] を提案した．本稿では，可変近傍モデル，近傍操作の性質について説明する．また，可変近傍モデルをマルチエージェントに拡張し，エージェント間の相互作用について議論する．

2　ラフ集合と様相論理，位相空間

2.1　ラフ集合

全体集合 U と U 上の同値関係 R が与えられた時，組 $\langle U, R\rangle$ を Pawlak 近似空間と呼ぶ．U の任意の部分集合 $X \subseteq U$ に対して，下近似 $[R]X$ と上近似 $\langle R\rangle X$ が定義できる：

$$\begin{aligned}[R]X &= \{x \in U \mid [x]_R \subseteq X\}, \\ \langle R\rangle X &= \{x \in U \mid [x]_R \cap X \neq \emptyset\}.\end{aligned}$$

ここで，$[x]_R$ は x の R に関する同値類である．組 $([R]X, \langle R\rangle X)$ を X の R に関するラフ集合という．

2.2　様相論理

様相論理の代表的な意味論である可能世界意味論では非空集合 U を考え，様相演算子を含まない文 p の真理値は各可能世界 $x \in U$ 毎に，古典論理と同様に付値関数 V で与える．また，到達可能関係と呼ばれる U 上の二項関係 R が設定される．構造 $\mathscr{M} = \langle U, R, V\rangle$ を Kripke モデルと呼ぶ．付値関数 V より関係 $\models$ を通常通りに定義する．Kripke モデル $\mathscr{M}$ の可能世界 $x \in U$ で文 p が真である可能世界を集めた集合を p の真理集合と呼ぶ：

$$||p||^{\mathscr{M}} = \{x \in U |\ \mathscr{M}, x \models p\}.$$

Kripke モデル $\mathscr{M}$ において可能世界 x から到達可能な世界の集合を $U_R(x)$ で表す：

$$U_R(x) = \{y \in U |\ xRy\}.$$

集合 $U_R(x)$ を用いた様相文の解釈は以下の通りである：

$$\begin{aligned}\mathscr{M}, x \models \Box p &\quad\Leftrightarrow\quad U_t(x_t) \subseteq ||p||^{\mathscr{M}}, \\ \mathscr{M}, x \models \Diamond p &\quad\Leftrightarrow\quad U_t(x_t) \cap ||p||^{\mathscr{M}} \neq \emptyset.\end{aligned}$$

2.3　位相空間

位相空間は全体集合 U と近傍系 $N : U \to 2^{2^U}$ を用いて $\mathscr{F} = \langle U, N\rangle$ と表せる．近傍系 $N(x)$ について次のことが成り立つ．

(N_1) $U \in N(x)$
(N_2) $X \in N(x) \Rightarrow x \in X$

(N$_3$) $X_1, X_2 \in N(x) \Rightarrow X_1 \cap X_2 \in N(x)$
(N$_4$) $(X \in N(x)$ and $X \subseteq Y) \Rightarrow Y \in N(x)$
(N$_5$) $X \in N(x) \Rightarrow \exists Y \in N(x)[Y \subseteq X$ and $\forall y(y \in Y \Rightarrow X \in N(y))]$

位相空間 $\mathscr{F}$ に付値関数 V を加えた構造 $\mathscr{M} = \langle U, N, V\rangle$ を近傍モデルと呼ぶ.

3 可変近傍モデル

3.1 動的な近傍モデル

行動型人工知能のエージェント制御の分野では動的な環境が想定される．動的に変化する環境を表現するため，動的な近傍モデルを導入する．動的な近傍モデルは近傍モデルにおける付値関数 V を時間に依存した付値関数 V_t に置き換えた構造

$$\mathscr{M}_t = \langle U, N, V_t\rangle$$

で表現できる.

3.1.1 エージェント制御への適用

本研究では環境内に 1 体のエージェントと複数のオブジェクトが置かれ，それらが動的に変化するものとする．エージェントは空間 U 内に存在するとし，時刻 t におけるエージェントの位置を $x_t \in U$ とする．オブジェクトの集合を $O = \{o_1, o_2, ..., o_m\}$ とする．時刻 t におけるオブジェクト $o \in O$ を U の部分集合 $X_o^t \subseteq U$ で表す．各オブジェクト o の在り方を表現する文 p_o を導入する．p_o は以下を満たすとする：

$$V_t(p_o, x) \Leftrightarrow x \in X_o^t.$$

p_o によって点 $x \in U$ がオブジェクト o の要素であることを表現できる．真理集合 $||p_o||^{\mathscr{M}_t}$ は X_o^t と一致する.

3.2 可変近傍モデル

可変近傍モデルではエージェントはコンテクストに依存して，多数の近傍の中から一つを選択する．可変近傍モデルは動的な近傍モデルに基づく．可変近傍モデルは以下の構造

$$\mathscr{M}_t = \langle U, N, R_t, V_t\rangle$$

で表す．エージェントは時刻 t，位置 x_t で，近傍 $U_t(x_t) \in N(x_t)$ を選択する．Kripke モデルと対応させるため，選択した近傍に対応する U 上の二項関係 R_t を生成する．本研究では R_t を以下に示す $R_{U_{x,t}}$ の反射的閉包とする：

$$R_{U_{x,t}} = \{(x_t, y)|\ y \in U_t(x_t)\},$$

$$R_t = R_{U_{x,t}} \cup \{(x, x)|\ x \in U\}.$$

時刻 t，位置 x における様相文の解釈は R_t を用いて，

$$\mathscr{M}_t, x \models \Box p \quad \Leftrightarrow \quad U_{R_t}(x) \subseteq ||p||^{\mathscr{M}_t},$$
$$\mathscr{M}_t, x \models \Diamond p \quad \Leftrightarrow \quad U_{R_t}(x) \cap ||p||^{\mathscr{M}_t} \neq \emptyset$$

となる．本モデルではエージェントは自身の位置 x_t のみからしか情報を得られないため x_t における解釈のみが使用され，近傍を用いて以下のように書ける：

$$\mathscr{M}_t, x_t \models \Box p \quad \Leftrightarrow \quad U_t(x_t) \subseteq ||p||^{\mathscr{M}_t},$$
$$\mathscr{M}_t, x_t \models \Diamond p \quad \Leftrightarrow \quad U_t(x_t) \cap ||p||^{\mathscr{M}_t} \neq \emptyset.$$

本モデルでは，x_t における様相文をエージェントの観測情報として扱う．ここで，時刻 t におけるエージェントの観測情報を表現する集合 I_t を導入する．オブジェクト o に対し，I_t^o を以下を満たす最小の集合とする：

$if\ \mathscr{M}_t, x_t \models \Box p_o\ then\ \Box p_o \in I_t^o,$
$if\ \mathscr{M}_t, x_t \models \neg\Box p_o\ then\ \neg\Box p_o \in I_t^o,$
$if\ \mathscr{M}_t, x_t \models \Diamond p_o\ then\ \Diamond p_o \in I_t^o,$
$if\ \mathscr{M}_t, x_t \models \neg\Diamond p_o\ then\ \neg\Diamond p_o \in I_t^o.$

例えば，エージェントが $\mathscr{M}_t, x_t \models \neg\Box p_o$ と $\mathscr{M}_t, x_t \models \Diamond p_o$ を観測した場合，集合 $I_t^o = \{\neg\Box p_o, \Diamond p_o\}$ を得る．オブジェクト o に関する観測情報 I_t^o は以下の 3 パターンに分類される.

1. $I_t^o = \{\Box p_o, \Diamond p_o\}$：近傍 $U_t(x_t)$ がオブジェクト o に包含される.
2. $I_t^o = \{\neg\Box p_o, \Diamond p_o\}$：近傍 $U_t(x_t)$ はオブジェクト o に包含されず，共通部分を持つ.
3. $I_t^o = \{\neg\Box p_o, \neg\Diamond p_o\}$：近傍 $U_t(x_t)$ はオブジェクト o と共通部分を持たない.

エージェントの観測情報全体は各オブジェクトに関する観測情報の和集合

$$I_t = \bigcup_{o \in O} I_t^o$$

となる．例えば，オブジェクトの集合を $O = \{o_1, o_2, o_3\}$ としたとき，エージェントは $I_t = \{\Box p_{o_1}, \Diamond p_{o_1}, \neg\Box p_{o_2}, \neg\Diamond p_{o_2}, \neg\Box p_{o_3}, \Diamond p_{o_3}\}$ のような観測情報を得る.

3.3 近傍操作

エージェントは時刻 t の近傍 $U_t(x_t)$ に操作を加え，時刻 $t+1$ の近傍 $U_{t+1}(x_{t+1})$ を決定する．以下に数種の近傍操作を定義する.

3.3.1 固定

$$U_t(x_t) = U_{t+1}(x_{t+1})$$

を満たす近傍を選択することを近傍の固定と呼ぶ．これにより近傍は変化しない．

3.3.2 変形

$$U_t(x_t) \neq U_{t+1}(x_{t+1})$$

を満たす近傍を選択することを近傍の変形と呼ぶ．

変形の特殊なケースとして，拡大・縮小という操作を挙げる．

3.3.3 拡大

$$U_t(x_t) \subset U_{t+1}(x_{t+1})$$

を満たす近傍を選択することを近傍の拡大と呼ぶ．

3.3.4 縮小

$$U_{t+1}(x_{t+1}) \subset U_t(x_t)$$

を満たす近傍を選択することを近傍の縮小と呼ぶ．

3.4 近傍操作による観測情報の変化

近傍の変形操作等により，エージェントは異なる観測情報を得る．観測情報の変化の要因としては，

1. エージェントの移動
2. 近傍操作
3. 環境の変化（オブジェクトの移動など）

などが考えられる．これらは複雑に関連しており，包括して議論することは難しい．ここではエージェントの位置を固定，環境が変化しないものとして考え，近傍操作による変化にのみ着目する．すなわち，$V_t = V_{t+1}$, $x_t = x_{t+1}$ とする．近傍操作の結果，時刻 $t+1$ でエージェントの観測情報 I_{t+1} はオブジェクト o に関して以下のいずれかの性質を満たすよう変化する．

1. $\{\Box p_o, \Diamond p_o\} \subseteq I_{t+1}$
2. $\{\neg\Box p_o, \Diamond p_o\} \subseteq I_{t+1}$
3. $\{\neg\Box p_o, \neg\Diamond p_o\} \subseteq I_{t+1}$

I_t の要素は拡大・縮小によって，以下のように変化する．煩雑さを避けるため p_o の添字は省略してある．

拡大

(1) If $\{\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_t$ then $\{\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$ or $\{\neg\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$.
(2) If $\{\neg\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_t$ then $\{\neg\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$.
(3) If $\{\neg\Box p, \neg\Diamond p\} \subseteq I_t$ then $\{\neg\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$ or $\{\neg\Box p, \neg\Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$.

証明 (1) $\{\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_t$ を仮定する．仮定から $U_t(x_t) \subseteq ||p||^{\mathscr{M}_t}$ かつ $U_t(x_t) \cap ||p||^{\mathscr{M}_t} \neq \emptyset$. $x_1 \in ||p||^{\mathscr{M}_t}$ となるような $x_1 \in U_t(x_t)$ が存在する．拡大操作より $U_t(x_t) \subset U_{t+1}(x_{t+1})$ である．$x_1 \in U_t(x_t)$ ならば $x_1 \in U_{t+1}(x_{t+1})$. よって $x_1 \in U_{t+1}(x_{t+1})$ であり，$U_{t+1}(x_{t+1}) \cap ||p||^{\mathscr{M}_t} \neq \emptyset$. 従って，$\Diamond p \in I_{t+1}$ を得る．次に，$U_t(x_t) \subset U_{t+1}(x_{t+1})$ であるから $U_{t+1}(x_{t+1}) \setminus U_t(x_t) \neq \emptyset$ であり，$x_2 \in U_{t+1}(x_{t+1}) \setminus U_t(x_t)$ となるような $x_2 \in U$ が存在する．$\mathscr{M}_t, x_2 \models p$ または $\mathscr{M}_t, x_2 \models \neg p$. 従って $U_{x+1}(x_{t+1}) \subseteq ||p||^{\mathscr{M}_{t+1}}$ または $\neg(U_{t+1}(x_{t+1}) \subseteq ||p||^{\mathscr{M}_{t+1}})$. 従って $\mathscr{M}_{t+1}, x \models \Box p$ or $\mathscr{M}_{t+1}, x \models \neg\Box p$. これより $\Box p \in I_{t+1}$ or $\neg\Box p \in I_{t+1}$. 従って，$\{\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$ or $\{\neg\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$.

(2), (3) の証明も同様である．

縮小

(1) If $\{\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_t$ then $\{\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$.
(2) If $\{\neg\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_t$ then $\{\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$, $\{\neg\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$ or $\{\neg\Box p, \neg\Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$.
(3) If $\{\neg\Box p, \neg\Diamond p\} \subseteq I_t$ then $\{\neg\Box p, \neg\Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$.

証明 (1) $\{\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_t$ と仮定する．仮定から $U_t(x_t) \subseteq ||p||^{\mathscr{M}_t}$ かつ $U_t(x_t) \cap ||p||^{\mathscr{M}_t} \neq \emptyset$. 縮小操作より $U_{t+1}(x_{t+1}) \subset U_t(x_t)$ であるから，$U_{t+1}(x_{t+1}) \subset ||p||^{\mathscr{M}_{t+1}}$. また，$U_{t+1}(x_{t+1}) \cap ||p||^{\mathscr{M}_{t+1}} \neq \emptyset$. 従って，$\{\Box p, \Diamond p\} \subseteq I_{t+1}$.

(2), (3) の証明も同様である．

このように近傍の拡大・縮小の操作を行うことによってエージェントの観測情報は法則性を持って変化する．エージェントの近傍選択基準を定める際，これらを踏まえる必要がある．

4 マルチエージェントへの拡張

マルチエージェントシステムにおいて，複数のエージェントが協調してタスクを実行する際，担当する範囲の分担などは重要である．また，協調だけでなく敵対関係にある場合でも縄張りなどの概念が重要となる．このように，マルチエージェントシステムに可変近傍の概念を導入する事は有意義であると考えられる．可変近傍モデルをマルチエージェントに拡張し，以下の構造

$$\mathscr{M}_t = \langle U, N, V_t, \{R_{i,t}\}_{i \in A}, A \rangle$$

を考える．ここで $A=\{1,...,n\}$ はエージェントの非空集合とする．$\{R_{i,t}\}_{i\in A}$ は各エージェントが選択した近傍から生成する二項関係の集合である．

マルチエージェントシステムでは，エージェントのグループ（部分集合）を扱うことがある．$G\subseteq A$ をエージェントのグループとする．G 内のエージェントの近傍について，和集合，積集合を考える：

$$C_{G,t}=\bigcup_{i\in G}U_{i,t}(x_{i,t}),$$

$$D_{G,t}=\bigcap_{i\in G}U_{i,t}(x_{i,t}).$$

これらの集合に関して以下が成り立つ．

オブジェクト $o\in O$ に関して，

(a) If $C_{G,t}\subseteq ||p_o||^{\mathscr{M}_t}$, then $\forall i\in G(\Box_i p_o\in I_{i,t})$.
(b) If $C_{G,t}\cap ||p_o||^{\mathscr{M}_t}\neq\emptyset$, then $\exists i\in G(\Diamond_i p_o\in I_{i,t})$.
(c) If $D_{G,t}\subseteq ||p_o||^{\mathscr{M}_t}$ and $D_{G,t}\neq\emptyset$, then $\forall i\in G(\Diamond_i p_o\in I_{i,t})$.
(d) If $D_{G,t}\cap ||p_o||^{\mathscr{M}_t}\neq\emptyset$ and $D_{G,t}\neq\emptyset$, then $\forall i\in G(\Diamond_i p_o\in I_{i,t})$.

(a) はエージェントのグループの近傍の和集合がオブジェクト o に包含されている場合，グループ内の全てのエージェントは観測情報として $\Box p_o$ を持つことを示している．このように，$C_{G,t}$, $D_{G,t}$ を用いて，集団としての性質を調べることが可能である．

各エージェントが近傍操作をすることによって $C_{G,t}$, $D_{G,t}$ は変化し，集団としての性質が異なってくる．

4.1 エージェント間の相互作用

マルチエージェントシステムにおいて重要な概念であるエージェント間の相互作用について考察する．可変近傍モデルではエージェントは近傍内の情報のみを得ることから，近傍外のエージェントは自身の行動に影響せず，近傍内のエージェントのみ影響する．エージェントの集合 A 上の二項関係 $R_{A,t}$ を考える．本研究では $R_{A,t}$ を以下のように定義する．

$$iR_{A,t}j\Leftrightarrow x_{j,t}\in U_{i,t}(x_{i,t}),$$

エージェント i は近傍内に存在するエージェントと関係を持つ．近傍系の性質から，$x_{i,t}\in U(x_{i,t})$ であるから，

$$\forall i\in A(iR_{A,t}i).$$

よって $R_{A,t}$ は反射律を満たす．

位相空間の一種である距離空間において，全てのエージェントが同じ大きさの ε-開球を選択した場合．距離関数の対称性から，$R_{A,t}$ は対称律を満たす．

このように，エージェントの近傍選択基準により，関係 $R_{A,t}$ の満たす性質が変化し．結果，全体としてエージェントの相互作用の度合いが変化する．

5 おわりに

本研究では．可変近傍モデルをマルチエージェントシステムに拡張した．エージェントのグループの近傍の集合演算から，エージェントが共通の情報を得る等の性質がみられた．エージェント間の相互作用を考察するためにエージェント間の二項関係を導入し，可変な近傍がエージェントの集団の性質に影響を与えることを示した．性質の変化等，今後更に詳細に追求したい．また，マルチエージェントシミュレーションによる挙動の確認や，アプリケーションへの適応なども行う予定である．

文献

[1] B. F. Chellas: Modal Logic: An Introduction. Cambridge University Press, 1980.

[2] Z. Pawlak: Rough Sets. International Journal of Computer and Information Sciences, Vol.11, pp.341-356, 1982.

[3] S. Ubukata, Y. Kudo, and T. Murai: An Agent Control Method Based on Rough-set-based Granularity. Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2008), CD-ROM, FR-G3-1, 2008.

[4] S. Ubukata, Y. Kudo, and T. Murai: An Agent Control Method Based on Variable Neighborhoods. Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems, LNAI 5712, pp.356-363, Springer, Berlin, 2009.

連絡先

生方 誠希

E-mail: ubukata@main.ist.hokudai.ac.jp