

他者への配慮を伴う接近・回避行動のモデル化

A model of spacing behavior with compassion for others

坂本孝丈^{1*} 竹内勇剛¹
Takafumi Sakamoto¹ Yugo Takeuchi¹

¹ 静岡大学

¹ Shizuoka University

Abstract: 公共場面においてロボットが人とコミュニケーションを開始するためには、その場にいる他者に配慮しながら注視や接近を行う必要がある。本研究では、他者の行動から内部状態を推定し、推定結果と自身の内部状態に応じて行動を生成するエージェントのモデルを提案する。そこから、エージェント同士が他者に配慮し距離や身体方向などの身体配置を調整する場合に生じ得るインタラクションについて計算機シミュレーションを通して検証する。また、配慮を伴う行動を生成するうえで必要なエージェントの内部状態の調整について検討する。

1 はじめに

自律的に動作するロボットが人と関係を構築・維持するためには、ロボットが人社会における儀礼に従い人とインタラクションする必要がある。例えば、公共場面では見知らぬ他者同士が同一の空間内を行き交うことから、過度にコミュニケーションが生じないように、移動方向や移動速度、視線方向などが制御されている ([1])。このようなコミュニケーションのダイナミクスをモデル化することで、人社会に受け入れられやすいロボットの振る舞いを設計できると考えられる。

ロボットが人とのコミュニケーションを開始するための接近行動や、衝突の回避や不快感を低減するための回避行動に関する研究は数多くみられる ([2] や [3] を参照)。また、公共場面においてロボットが人の行動を分類または予測し、適切な話しかけ相手の選択と接近を行う手法が提案されている [4, 5]。一方で、エージェント同士のインタラクションをシステムダイナミクスとして記述したモデルはほとんど見られない。これに対して、これまでの研究ではコミュニケーション開始場面における接近・回避行動を生成するためのモデルを提案し計算機シミュレーションによる検証を行ってきた [6]。しかし、これらの研究ではエージェント自身の欲求に基づく行動の生成に基づいたインタラクションのモデルであり、他者への配慮については十分に検討できていない。

そこで、本研究では先行研究のモデルを拡張することで、配慮を伴う行動を含めたインタラクションのモデルについて検証を行う。具体的には、配慮を伴う行

動を「他者の行動や内部状態（欲求）の推定値に応じた自身の内部状態の調整とそれに伴う行動」としてモデル化する。

2 他者への配慮を伴うインタラクション

本研究では先行研究において提案したモデルを拡張し、他者への配慮を伴うインタラクションのモデル化を行う。先行研究のモデルでは、コミュニケーション開始時の接近・回避行動を促進または抑制するエージェントの内部状態を仮定している。以下では、この内部状態の変化を記述することで、配慮を伴う行動の生成について検討を行う。

2.1 内部状態と行動生成

コミュニケーション開始場面におけるエージェントの内部状態に基づく接近・回避行動について、以下の先行研究と重複する部分については概要のみを示す。

エージェント A_i , A_j の身体的なインタラクションは、それぞれの接近・回避行動により変化する身体配置の変化で表される。この身体配置から A_i から A_j への関与の強さ $e_{i \rightarrow j}$ と、 A_j から A_i への関与の強さ $e_{j \rightarrow i}$ が求められるとする。具体的には、相対距離と相対角度の絶対値に対する単調減少関数により求められるとする。また関与の強さを上昇させるエージェントの行動を接近行動とし、関与の強さを減少させる行動を回避行動とする。

*連絡先： 静岡大学
〒432-8011 静岡県浜松市中区城北 3-5-1
E-mail:sakamoto@sapientia.inf.shizuoka.ac.jp

この接近行動と回避行動は促進または抑制する変数をエージェントの内部状態とする。内部状態の変数について、ここでは自身から相手への関与に対する選好 (Control) と、相手から自身への関与に対する選好 (Acceptance) の2つの変数を扱う。 A_i の A_j に対する内部状態を $S_{i \rightarrow j} = (c_{i \rightarrow j}, a_{j \rightarrow i})$, A_j の内部状態を $S_{j \rightarrow i} = (c_{j \rightarrow i}, a_{i \rightarrow j})$ で表す。

ここまでの変数により生成される接近・回避行動に基づくインタラクションのシステムダイナミクスは図1で表される。図1では、四角で表される各変数について、時間毎に他の変数を増加または減少させる関係を矢印と+, -の記号により示している。例えば, A_i の Control の値 $c_{i \rightarrow j}$ が大きくなれば, 接近行動が促進され (回避行動が促成され), 関与の強さ $e_{i \rightarrow j}$ の増加につながる。ただし, この段階では内部状態の変化は規定されていない。そのため, 先行研究では内部状態の値に応じた接近・回避行動の生成のみを検証している。

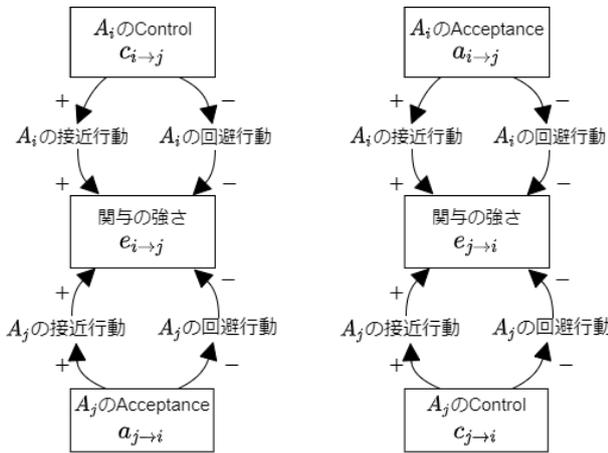


図 1: 内部状態に基づく行動生成によるダイナミクス

2.2 行動結果に基づく内部状態の変化

以下では, 先行研究のモデルを拡張し, 内部状態の変化のプロセスを検討していく。エージェント行動を通して環境をより自身にとって好ましい状態に変化させようとする。他者による環境への変化 (または環境自体の変化) が存在する場合, 行動により生じる期待される環境の変化と実際の環境の変化との間にギャップが生じ得る。このギャップが生じた際に, 予想しない変化を打ち消すような行動が生成されるように, 内部状態の値を変化させる。

図2に行動結果に基づく内部状態の変化を踏まえたシステムダイナミクスを示す。なお, 以下の説明では図が煩雑になるため A_i から A_j への関与の強さに基づ

くダイナミクスのみを示す (A_j から A_i への関与の強さのダイナミクスについては, サブスクリプションの i と j を入れ方ものが対応する。) 図1から図2へ拡張した場合でも, エージェントの予測通りに関与の強さが変化している場合は, 内部状態の変化は起こらない。一方で例えば, A_i の Control の値 $c_{i \rightarrow j}$ の値が大きく, A_j への接近行動が促進されたにも関わらず, $e_{i \rightarrow j}$ が増加しなかった場合, $c_{i \rightarrow j}$ がより大きくなるように内部状態が変化する。このフィードバックにより, A_i が A_j に関与するために接近行動を示し, A_j が A_i からの関与を受け入れずに回避行動を示した場合に, A_i の接近行動がより促進されることになる。また, A_j が A_i からの関与を受け入れ接近行動を示した場合は, A_i の接近行動が抑制される。

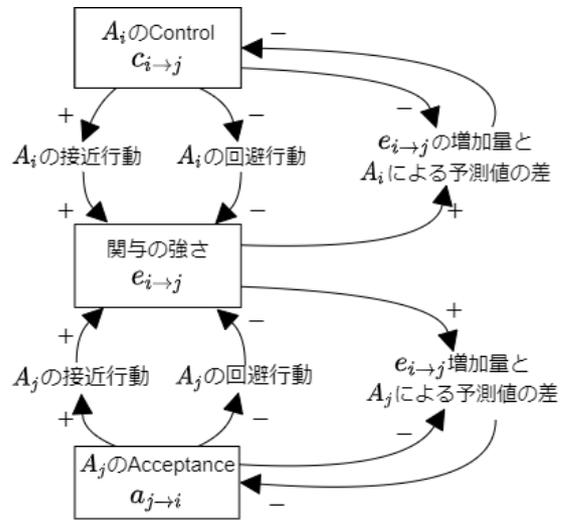


図 2: 行動結果に基づく内部状態の変化を含むダイナミクス

この段階の内部状態の変化はエージェントの接近行動・回避行動を促進することで, 対象との関係を明確にすることに繋がる。しかし, ここでの内部状態の変化は, 相手の行動結果の影響は受けるものの, 配慮を伴う行動にはつながらない。そこで相手の内部状態に合わせた自身の内部状態の変化を扱うために, さらにモデルの拡張を行う。

2.3 社会性に基づく内部状態の変化

上述の内部状態の変化は, エージェント自身の行動による環境の変化と他のエージェントの行動による環境の変化が競合する場合に, 自身の行動をより促進する。これに対して, ここでの内部状態の変化は, 競合する相手の行動とその行動が表す内部状態に合わせて自身の内部状態を変化させる。これは利他的な振る舞いでありエージェントの社会性に基づく内部状態の変

化といえる。この変化は配慮を伴う行動の一つとして扱える可能性がある。

図3に相手の内部状態に合わせたエージェントの内部状態の変化を含めたインタラクションのシステムダイナミクスを示す。図2に対して、図3では A_i と A_j がそれぞれ相手の内部状態を推定するための認知的なプロセスを含んでいる。また、 A_i による A_j の内部状態の推定値 $\hat{a}_{j \rightarrow i}$ の値が A_i の内部状態にフィードバックされる。例えば、 $c_{i \rightarrow j}$ の値が大きく A_i が A_j に接近した場合に、 A_j が回避行動を示している状態では、 $e_{i \rightarrow j}$ の値が増加しないため、図2のダイナミクスでは $c_{i \rightarrow j}$ の値が増加する。これに対して、図3のダイナミクスでは、行動を繰り返すことで徐々に A_j の内部状態 $a_{j \rightarrow i}$ が小さいことが推定され、 $c_{i \rightarrow j}$ の値を小さくするようにフィードバックが働く。その結果、 A_j の接近行動が抑制され、 A_j の内部状態に合わせた行動に調整される。

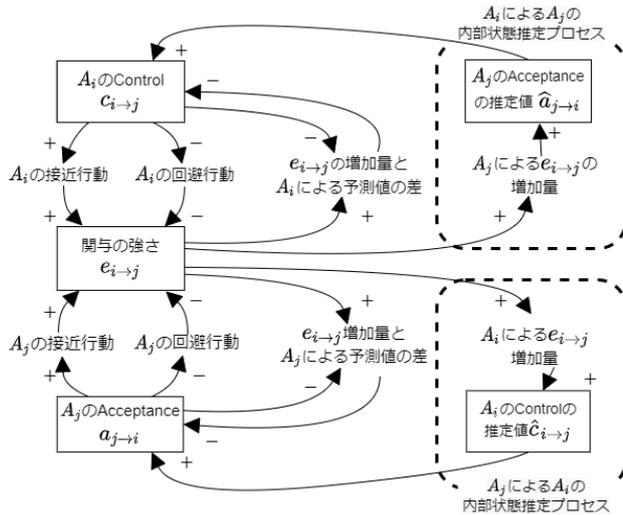


図3: 社会性に基づく内部状態の変化を含むダイナミクス

このダイナミクスにより、相手の内部状態に合わせた自身の内部状態の調整が表現できる。ただし、できるだけ早いタイミングで内部状態を推定し、推定結果を自身の内部状態にフィードバックしなければ、相手にとって配慮のある行動として見做されない可能性もある。例えば、 $c_{i \rightarrow j}$ の値が大きく、 $a_{j \rightarrow i}$ の値が小さい状況において、 A_i が $c_{i \rightarrow j}$ を減少させるよりも前に、 $a_{j \rightarrow i}$ の値をより小さくする可能性がある。これは A_j の回避行動をより促進させているため、 A_i の行動が A_j を煩わせていると見做される可能性がある。また、 A_j の社会性に基づく内部状態の変化も生じ得る。この場合は A_j が A_i に配慮したことになり、 A_i が A_j に配慮する余地がなくなる。そのため、相手の内部状態を速いタイミングで推定することが配慮を伴う行動に必要な

であると考えられる。

2.4 相手の社会性を考慮した内部状態の変化

相手エージェントが社会性に基づき内部状態を変化させる場合、相手からの配慮を受けることになり得る。この点を踏まえると、相手の内部状態の変化を促さないことが相手への配慮を伴う行動につながる。そのため、客観的または相手の視点に基づき、自身の行動から推定される内部状態を考慮する必要がある。

A_j による内部状態の推定プロセスを踏まえて A_i が内部状態を調整する場合のシステムダイナミクスを図4に示す。なお、 A_j による内部状態の推定プロセスと A_i による A_i 自身の内部状態の推定プロセスは厳密には異なるが簡単のために同一のプロセスとして記述している。ここでの内部状態の調整は A_i が A_j 以外の対象に働きかける場面において特に重要となる。例えば、 A_i が A_j の近くをただ通過するような場合に、 $e_{i \rightarrow j}$ が増加する可能性がある。そのような場面において、 A_j に対して関与しようとしているという誤解を与えないように、 A_i は内部状態と行動を調整する。

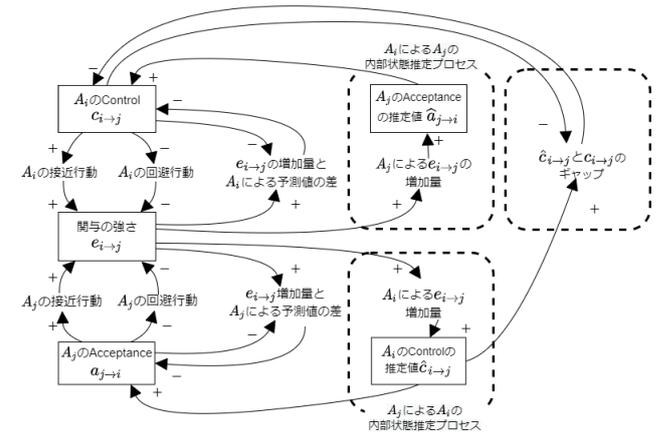


図4: 相手の社会性を考慮した内部状態の変化を含むダイナミクス

相手の社会性を考慮した内部状態の変化についても、相手への配慮を伴う行動を生成し得る。ただし、社会性に基づく内部状態の変化の場合と同様に調整のタイミングが十分に速くなくてはならない。

3 計算機シミュレーション

以下では前節のモデルに基づいて、エージェントの接近・回避行動によるインタラクションを計算機シミュレーションにより検討する。

3.1 行動生成の関数

内部状態の値に応じたエージェントの行動生成の関数については先行研究 [6] のモデルを用いる。このモデルでは2体のエージェント A_1 , A_2 の間の身体的なインタラクションを環境 $\mathbf{x}_{12} = \{r_{12}, \theta_{12}, \theta_{21}\}$ の時間的な変化により表す。なお, r_{12} は A_1 - A_2 の距離を表し, θ_{12} と θ_{21} はそれぞれ A_1 からみた相対角度の絶対値と A_2 からみた相対角度の絶対値を表す。

エージェントの行動それぞれは \mathbf{x}_{12} の時間的な変化により表される。 A_1 の行動を $\Delta_1 \mathbf{x}_{12}$ は行動生成の関数 f を用いて以下の式で表される。

$$\Delta_1 \mathbf{x}_{12} = f(\mathbf{x}_{12}, \mathbf{s}_{1 \rightarrow 2}; \phi_1) \quad (1)$$

ただし, ϕ_1 は移動速度の最大値などの行動特性を表す値とする。 $\mathbf{s}_{1 \rightarrow 2}$ は A_1 の内部状態の値を表し, $\mathbf{s}_{1 \rightarrow 2} = (c_1, a_1) \in [-1, 1]^2$ とする。

先行研究では行動生成の関数 f を設定し, 図5に示す接近・回避行動を生成している。本研究では行動生成についてはこの関数を利用し, 内部状態の変化を表す関数と内部状態の推定を行う関数について新たに規定する。

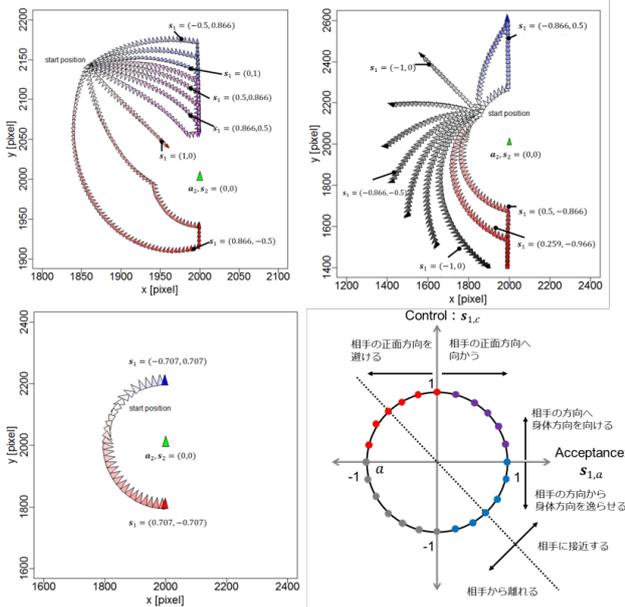


図 5: 内部状態の値に応じて生成される接近・回避行動の例 [6]

3.2 内部状態の推定関数

配慮を伴う行動を生成するうえで, 他のエージェントの内部状態を推定するプロセスを扱う必要がある。ここでは, 式 1 の行動生成の関数を用いて内部状態の推

定を行う。 A_1 が A_2 の行動 $\Delta_2 \mathbf{x}_{12}$ から内部状態を推定する場合, \mathbf{x}_{12} は観測可能な変数である。また, ϕ_2 は推定しなければならないが, 行動特性を表す変数であるため, 行動を観察することでおおよそ推定可能であると仮定する。そのうえで, A_1 により $\mathbf{s}_{2 \rightarrow 1}$ の推定値 $\hat{\mathbf{s}}_{2 \rightarrow 1}$ は関数 h を用いて以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}_2^{(t)} &= h(\mathbf{x}_{12}, \Delta_2 \mathbf{x}_{12}, \hat{\phi}_2) \\ &= \underset{\hat{\mathbf{s}}}{\operatorname{argmax}} \left(L(\Delta_2 \mathbf{x}_{12}; \hat{\phi}_2) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし

$$L(\cdot) = 1 - l\left(f(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{s}}) - \Delta_2 \mathbf{x}_{12}; \hat{\phi}_2\right) \quad (3)$$

とする。 l は $0 \leq l(\cdot) \leq 1$ となる f により生成可能な行動と $\Delta_2 \mathbf{x}_{12}$ の差を規格化する関数を表す。これにより, $\Delta_2 \mathbf{x}_{12}$ と最も類似している行動を生成し得る内部状態が推定値になる。このとき, $\mathbf{s}_{2 \rightarrow 1}$ は 2次元の変数であるため, グリッド探索により近似的に解を求めることができる。

実際に \mathbf{x}_{12} の変化から A_1 と A_2 の内部状態を推定した例を図6に示す。内部状態の取りうる値は半径1の円周上の点に制限されており, 図6下のチャートの長さが $L(\cdot)$ の値に対応している。関数 h により求めた内部状態の推定値に基づき内部状態を変化させることで, 他者への配慮を伴う行動を生成する。

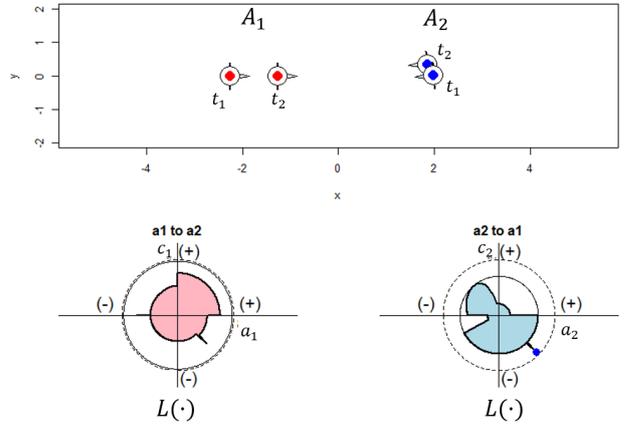


図 6: 行動から内部状態を推定した結果の例

3.3 内部状態の変化を表す関数

内部状態の変化は関数 g を用いて表す。行動結果に基づく内部状態の変化のみを扱う場合 A_1 の内部状態の変化 $\Delta \mathbf{s}_{1 \rightarrow 2}$ は以下の式で表される。

$$\Delta \mathbf{s}_{1 \rightarrow 2} = g(\mathbf{x}_{12}, \mathbf{s}_{1 \rightarrow 2}; \psi_1) \quad (4)$$

ここで、 ψ_1 は A_1 の内部状態の変化の速さなどの認知的な特性を表す。 A_1 が A_2 に対して社会性に基づき内部状態を変化させる場合、関数 g を拡張することで $\Delta s_{1 \rightarrow 2}$ が求められる。

$$\Delta s_{1 \rightarrow 2} = g(\mathbf{x}_{12}, \mathbf{s}_{1 \rightarrow 2}, \hat{\mathbf{s}}_{2 \rightarrow 1}; \psi_1) \quad (5)$$

社会性に基づく内部状態の変化を含めてシミュレーションにより行動を生成した例を図7に示す。この例では、 A_1 (青色)、 A_2 (赤色)、 A_3 (緑色) が同じ場に居合わせた場面を想定している。図7は3つの時点における内部状態の相対位置(上部)と式2により行動から推定した各エージェントの内部状態(下部のレーダーチャート)を表す。 A_3 (緑色) をコミュニケーションロボットと想定し、内部状態の真値が自明であるとする(各図の右下のチャート)。または式5の関数に基づき内部状態を変化させる。

図7の $t = 1$ は初期位置から1ステップ分進んだ状態を表す。 A_3 (緑色) の内部状態は $\mathbf{s}_{3 \rightarrow 2} = (0, 0)$ に設定されている。ここから $t = 15$ までに、 A_2 (赤色) の A_3 (緑色) に対する Control と Acceptance の値が高いことを推定し、 $\mathbf{s}_{3 \rightarrow 2}$ の Control と Acceptance の値を徐々に上昇させる。このときの上昇率は A_3 の認知特性をあらわす変数 ψ_3 による。そこから $t = 23$ 時点で $\mathbf{s}_{3 \rightarrow 2}$ の Control と Acceptance の値がしきい値を超え、接近行動が促進される。このときのしきい値についても ψ_3 による。これにより、 A_2 (赤色) の内部状態に応じて A_3 (緑色) が社会的に振る舞うことができる。この例で示したように、他エージェントの内部状態の推定とその推定値に応じた自身の内部状態の変化により、他者への配慮を伴う行動が生成できる。

3.4 今後の課題

現段階では、行動から内部状態を推定する関数と、他エージェントの内部状態の推定値に基づいたエージェント自身の内部状態の変化の関数を設計し、具体例を示すにとどまっている。今後は、各エージェントのパラメータの値や内部状態の初期値による影響を検証する必要がある。特に内部状態の変化の速さを規定するパラメータが配慮を伴う行動が成立するか否かに大きく影響すると考えられる。また、相手に応じて内部状態を過剰に変化させることがかえって煩わしい行動を生成してしまう可能性もある。計算機シミュレーションを通して状況に適したパラメータの値を探索するとともに、実際の人同士のすれ違い場面の行動データや公共場面におけるロボットの行動のデータセットに対してモデルを適用した分析を行う必要がある。

4 まとめ

本研究では、コミュニケーション開始場園において接近・回避行動を生成する先行研究のモデルを拡張し、他者への配慮を伴う行動についてモデル化を行った。具体的には、行動生成のモデルを用いた他のエージェントの内部状態の推定を行う関数や、推定値に基づく内部状態の変化を表す関数を規定した。そこから、計算機シミュレーションによりエージェント間のインタラクションを生成し、配慮を伴う行動が内部状態の変化のダイナミクスにより記述できる可能性を検証した。今後はモデルのパラメータや初期値を変化させていくことで、配慮を伴う行動が成立する条件を検証するとともにモデルの精緻化を行う必要がある。

参考文献

- [1] Erving Goffman. *Behavior in public place*. Free Press, 1963.
- [2] Thibault Kruse, Amit Kumar Pandey, Rachid Alami, and Alexandra Kirsch. Human-aware robot navigation: A survey. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 61, No. 12, pp. 1726–1743, 2013.
- [3] Jorge Rios-Martinez, Anne Spalanzani, and Christian Laugier. From proxemics theory to socially-aware navigation: A survey. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 7, No. 2, pp. 137–153, 2015.
- [4] Takayuki Kanda, Dylan F Glas, Masahiro Shiomi, and Norihiro Hagita. Abstracting people’s trajectories for social robots to proactively approach customers. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 25, No. 6, pp. 1382–1396, 2009.
- [5] Satoru Satake, Takayuki Kanda, Dylan F Glas, Michita Imai, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. A robot that approaches pedestrians. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 29, No. 2, pp. 508–524, 2012.
- [6] Takafumi Sakamoto and Yugo Takeuchi. Simulation of spatial behavior based on an agent model in human-agent initial interaction. In *Proceedings of the 6th International Conference on Human-Agent Interaction*, pp. 310–317. ACM, 2018.

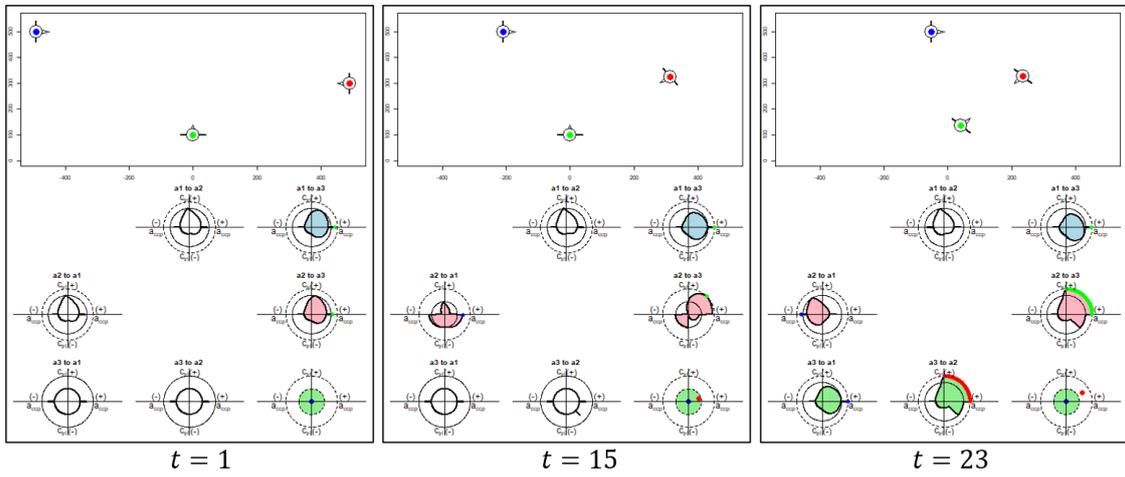


図 7: 社会性に基づく内部状態の変化の例