

# 因果関係の再現に基づく社会的行動の逐次的獲得モデル - 視線追従から社会的参照へ -

## Finding A Chain of Causality Leads Social Referencing

住岡 英信 (科学技術振興機構 ERATO 浅田共創知能システムプロジェクト, 阪大院)

吉川 雄一郎 (科学技術振興機構 ERATO 浅田共創知能システムプロジェクト)

正 浅田 稔 (科学技術振興機構 ERATO 浅田共創知能システムプロジェクト, 阪大院)

Hidenobu SUMIOKA, JST ERATO Asada Project,

Graduate School of Eng., Osaka Univ., sumioka@jeap.org

Yuichiro YOSHIKAWA, JST ERATO Asada Project

Minoru ASADA, JST ERATO Asada Project, Graduate School of Eng., Osaka Univ.

The development of joint attention related actions, such as gaze following and gaze alternation, is one of mysteries in infant development. Previous synthetic studies have proposed learning methods for gaze following without any explicit instructions as first step to understand such development. However, a robot was given a priori knowledge about which pair of sensory information and action should be associated. In this paper, we propose a learning mechanism that automatically and iteratively acquires social behavior by detecting and reproducing the causality inherent in interaction with a caregiver without such knowledge. The measurement of causality based on transfer entropy [1] is used to detect appropriate pairs of variables for acquiring social actions. The reproduction of the detected causality promotes other causality. In the computer simulation of human-robot interaction, we examine what kinds of behavior related to joint attention can be acquired sequentially by changing the behaviors of caregiver agent. The result indicates the actions are acquired in similar order to infant development.

**Key Words:** joint attention, transfer entropy, contingency learning, sequential acquisition of social behavior

### 1 はじめに

乳児にとって、相手と同じものを見るという共同注意は相手の視線についての理解を深め、より複雑なコミュニケーションに必要な相手と注意を共有する共有注意の能力を獲得するために重要な能力であると言われており、視線追従や社会的参照、指差し産出といった、共同注意に関連する行動の発達過程についての研究が行われている [2]。ロボットを用いた共同注意研究でも、人-ロボット間のコミュニケーションにおける共同注意関連行動の効果を調べた研究 [3] だけでなく、乳児における共同注意関連行動の発達過程の解明を目指した構成論的な研究が行われている [4]。

共同注意獲得の構成論的モデル化を扱った研究では主に視線追従の獲得に焦点が当てられてきた [4]。これらの研究は養育者と乳児の視線インタラクションにおける因果性に注目し、それを利用することで明示的な教示なしで視線追従のためのセンサリモータマップを獲得するメカニズムを提案した。しかし、入出力関係として複数の感覚情報と行動の組み合わせが考えられる場合において、そのような因果関係の組合せをどのように発見するか、という点については考慮されていなかった。

この問題に対し、住岡らは時間的な要素も考慮して確率変数間の依存関係を示す移動エントロピー [1] に注目し、それを用いて変数間の因果性を評価することで、複数の感覚情報と行動の組み合わせが考えられる場合においても視線追従獲得のための適切な変数の組み合わせをロボットが自律的に発見できることをシミュレーションによって示した [5]。乳児が養育者との相互作用を通して様々な社会的行動を獲得していることが示唆されている [6] ことを考え

ると、この指標は視線追従だけでなく、他の社会的行動の獲得にも利用できると考えられる。

また、共同注意関連行動は乳児の発達に伴って段階的に獲得されることが示唆されている [7] が、行動間の発達的關係は未だに明らかにされていない。乳児が養育者とのインタラクションから因果関係を発見し、それを再現する社会的行動を行うと、養育者の関わり方が変わると考えられることから、そのような共同注意関連行動の段階的な発達はインタラクションにおける因果関係の発見とそれの再現によって実現されている可能性がある。

そこで本研究では、住岡ら [5] によって提案された指標に基づいて養育者とのインタラクションの因果関係を発見しながらそれを再現する社会的行動を逐次的に獲得するメカニズムを提案する。提案メカニズムを実装したロボットと養育者との対面場面での視線インタラクションのシミュレーションを通して、共同注意に関連する行動間にどのような順序で発達していくかを調べることで共同注意関連行動の発達の関係を理解するための一助となることを目指す。

### 2 問題設定

本研究では対面でのやりとりを扱う。この環境において、養育者とロボットは交互に行動する。以下では養育者の行動開始からロボットの行動終了までを1ステップとする。ロボットは養育者の顔の向きといった環境から知覚した情報を観測変数  $S$  として保持する、また、ロボットは観測変数とは別に前に行った行動の結果としての観測情報を事後変数  $R$  へ保持する。その後、各関節への指令値を送り視線切り替えなどの行動  $A$  を行う。以下ではある観測変数

$S$ , 行動変数  $A$ , 事後変数  $R$  の組み合わせを事象変数集合と呼ぶ．本研究において養育者とのインタラクションの因果関係は事象変数集合における統計的偏りとして評価される．ロボットは複数の事象変数集合の中から最も統計的偏りの大きい事象変数集合を発見し，その偏りを表わす行動を再現する．

### 3 社会的行動の逐次的獲得メカニズム

養育者との相互作用の因果関係を発見しながらそれを再現する行動を逐次的に獲得していくための提案メカニズムを Fig. 1 に示す．提案メカニズムは因果関係再現モジュール (CM), 因果関係検出器, モジュール選択器, 反射行動モジュール (RM) からなる．反射行動モジュールがあらかじめ設計者によって設定されるのに対して, 因果関係再現モジュールは初期には存在しない．養育者とのインタラクションを通して因果関係検出器によって生成されていく．

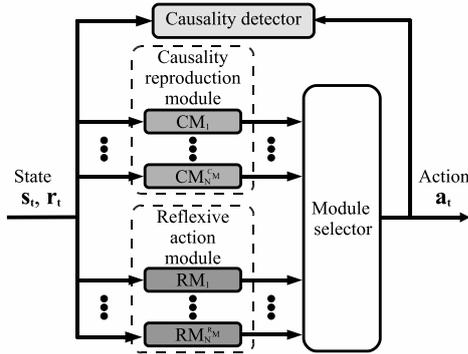


Fig.1 Proposed mechanism to successively develop social behaviors

観測された状態に対して反射行動モジュールと因果関係再現モジュールは割り当てられた関節への制御値とそれについての確信度を出力する．モジュール選択器はその確信度に基づいてどのモジュールからの制御値を採用するかを関節毎に決定する．観測された状態と出力された制御値が事象変数集合の因果関係を評価するために因果関係検出器によって利用される．

#### 3.1 因果関係検出器

因果関係検出器は養育者とのインタラクションから事象変数集合の因果関係の強さを評価する．その指標として本研究では情報理論に基づいた感覚運動因果度を定義する．ある事象変数集合  $S_i, A_j, R_k$  に対する感覚運動因果度  $sm C_{i,k}^j$  は

$$sm C_{i,k}^j = \sum_{\substack{s_i^t \in S_i, \\ r_k^t \in R_k}} p(r_k^t | s_i^t) \left( \sum_{\substack{r_k^{t+1} \in R_k, \\ a_j^t \in A_j}} Q(r_k^{t+1}, a_j^t | s_i^t, r_k^t) \right), \quad (1)$$

で表される．ここで,  $s_t, a_t, r_t$  は時刻  $t$  での事象変数集合の観測値を表している．また,  $Q(r_k^{t+1}, a_j^t | s_i^t, r_k^t)$  は状態  $s_t, r_t$  における要素因果度であり, 式 (2) で表される．

$$Q(r_k^{t+1}, a_j^t | s_i^t, r_k^t) = p(r_k^{t+1}, a_j^t | r_k^t, s_i^t, a_j^t) \log \frac{p(r_k^{t+1} | r_k^t, s_i^t, a_j^t)}{p(r_k^{t+1} | r_k^t, s_i^t)} - p(r_k^{t+1}, a_j^t | r_k^t) \log \frac{p(r_k^{t+1} | r_k^t, a_j^t)}{p(r_k^{t+1} | r_k^t)}. \quad (2)$$

感覚運動因果度は事後変数の状態遷移に対する観測変数と行動変数の組合せの影響を表わしている．これは変数の組合せを考慮した方が観測変数や行動変数の状態のみを考慮したときに比べて事後変数の遷移確率が上昇する場合には大きな値を持つ．ただし, 学習などにより観測変数のある状態に対し選択される行動が一意に決定されるようになると, 式 (2) 右辺第 1 項の分子  $p(r_k^{t+1} | r_k^t, s_i^t, a_j^t)$  が分母  $p(r_k^{t+1} | r_k^t, s_i^t)$  と近似できるようになるため, 感覚運動因果度が減少する．

全ての事象変数集合に対して各ステップ毎に感覚運動因果度が計算される．因果関係検出器はある事象変数集合の感覚運動因果度が一定期間十分大きいときにその集合に対する因果関係再現モジュールを生成する．本研究では  $T^C$  ステップの間, 感覚運動因果度が他よりも常に大きく, さらにその間の変化が  $\theta$  以下のとき, その集合の感覚運動因果度は十分大きいと判断する．

新たな因果関係再現モジュールを生成したときに因果関係検出器は生成したモジュールの状態を表す行動変数と観測変数を生成し, それらを含んだ事象変数集合についても感覚運動因果度を計算し始める．生成される行動変数と観測変数はそれぞれロボットがそのモジュールの出力を利用するか, そのモジュールの出力を利用したかを表す．あらかじめ与えられた変数と区別するため, 以下では  $l$  番目の因果関係再現モジュールに対して生成された変数を  $A^{\Pi_l}, S^{\Pi_l}$  と表記する．このとき,  $T$  ステップ後の観測変数と行動変数は  $S_i \in \{S_1, \dots, S_{N^S}, S_{N^S+1}^{\Pi_1}, \dots, S_{N^S+N^{\Pi}}^{\Pi_{N^{\Pi}}}\}$  と  $A_j \in \{A_1, \dots, A_{N^A}, A_{N^A+1}^{\Pi_1}, \dots, A_{N^A+N^{\Pi}}^{\Pi_{N^{\Pi}}}\}$  で表される．ここで  $N^S$  はあらかじめ用意された観測変数の数であり,  $N^{\Pi}$  は生成された因果関係再現モジュールの数である．

#### 3.2 因果関係再現モジュール

因果関係再現モジュールは因果関係検出器によって割り当てられた事象変数集合に対してセンサリモータマップを構築する．マップは割り当てられた観測変数の各状態に対して, 事後変数の状態遷移の予測性能が上がる行動, すなわち要素因果度が最大となる行動を出力するように構築される．

また因果関係再現モジュールは出力される行動に対する確信度もそれぞれの要素因果度に基づいて計算する．本研究では確信度として各状態における要素因果度を標準化した値を用いる．ある観測状態  $s^t, r^t$  に対して要素因果度が最大となる行動とその結果を  $a^*, r^*$  とする．このとき, 観測状態  $s^t, r^t$  における因果要素度の平均を  $\mu^{s^t, r^t}$ , 標準偏差を  $\sigma^{s^t, r^t}$  とすると, 選択される行動とその結果  $a^{*t}, r^{*t+1}$  の確信度  $Z(s^t, r^t)$  は

$$Z(s^t, r^t) = \frac{Q(r^{*t+1}, a^{*t} | s^t, r^t) - \mu^{s^t, r^t}}{\sigma^{s^t, r^t}}, \quad (3)$$

と表される．

ただし, 全ての観測状態が必ずしも因果的な行動を導くとは考えにくい．そのため, 本研究では各状態において最大の要素因果度が他の状態のものに比べて小さければ再現すべき因果関係はないと考える．そこで, 各観測状態における要素因果度の平均と分散を求め, それらの平均を求めることで, 各状態における要素因果度の平均と分散がその平均よりも大きいときのみ確信度を計算する．

#### 3.3 反射行動モジュール

反射行動モジュールはロボットにあらかじめ与えられている反射行動である．本研究ではどの関節に対するモジュールもランダムな制御値を出力するよう設計した．これは乳児の生得的な反射特性を考慮して設計することもできる．またこのモジュールは確信度として正の定数  $\alpha$  をモジュール選択器へ出力する．

### 3.4 モジュール選択器

モジュール選択器は同じ関節への制御値を出力するモジュールが複数存在する場合にどのモジュールの出力を採用すべきかを決定するモジュールである。どのモジュールの出力を採用するかは各モジュールから送られる確信度に基づいて選択される。ただし同じ状態が続くことをさけるために、前ステップで選択されたモジュールに再び同じ状態が入力された際にはその確信度の値を割引く。

ロボットが  $R_N$  個の反射行動モジュールと  $C_N$  個の因果関係再現モジュールを有しているとする。そのうち関節  $i$  への指令値を出力する  $R_{N^i}$  個の反射行動モジュールと  $C_{N^i}$  個の因果関係モジュールが存在するとする。ここで関節  $i$  への指令値を出力するモジュールを  $M_j^i \in \{RM_1^i, RM_2^i, \dots, RM_{R_{N^i}}^i, CM_1^i, CM_2^i, \dots, CM_{C_{N^i}}^i\}$  と表わすと、 $M_j^i$  の出力が選択される選択確率  $\Pr(M_j^i)$  は

$$\Pr(M_j^i) = \frac{\exp(Z^j(t)/\tau)}{\sum_{l \in R_{N^i} + C_{N^i}} \exp(Z^l(t)/\tau)}, \quad (4)$$

で表される。ここで  $Z^l(t) = Z^l(s_i, r_i)e^{-\beta t}$  であり、 $t'$  は同じ状態が入力され続けたステップ数、 $\beta$  は正の定数を表わす。また  $\tau$  は温度定数であり、因果関係再現モジュールの数が增加することに伴う選択確率の均一化を防ぐために  $C_{N^i}$  に反比例するように設計した。

### 3.5 獲得した行動の利用による新たな行動の逐次的獲得

学習初期ではロボットは反射行動モジュールの出力のみによってランダムに行動を決定する。しかし養育者とのインタラクションを繰り返すことで因果関係検出器により因果関係再現モジュールが生成されると、モジュール選択器が生成された因果関係再現モジュールの出力を選択しだす。これにより獲得した再現モジュールの出力によりロボットの行動様式が変化し、ある観測状態に対して特定の行動が高い頻度で選択されるようになる。その結果最大であった因果的な事象変数集合の感覚運動因果度が減少していく。このとき因果関係検出器が、生成した因果関係再現モジュールについての観測変数と行動変数に関する感覚運動因果度も計算しているため、それらに関連した事象変数集合が発見される。その結果、因果関係の変化に基づく因果関係再現モジュールの連鎖的生成が生じ、行動が逐次的に獲得されることになると考えられる。

## 4 実験

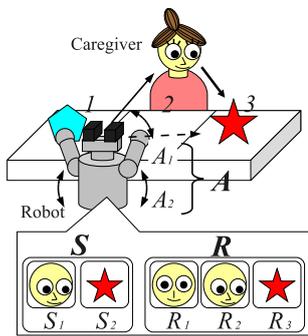


Fig.2 Experimental setting for acquisition of joint attention behaviors

対面での視線インタラクションにおいて提案メカニズムがどのような行動を獲得するかを調べるために、養育者モデルとロボットモデルによるシミュレーションを行った。基本的な環境設定は住岡ら [5] で用いられた設定に従うが、

ロボットモデルには提案メカニズムが実装され、養育者モデルの行動はロボットとの共同注意により注目するように設計された。

### 4.1 実験設定

Fig. 2 に環境設定を示す。従来研究 [5] 同様、ロボットと養育者がテーブルをはさんで一定距離離れて対面で配置された。テーブルの上は3つに量子化されそのうち2ヶ所に2つの対象物がそれぞれ配置され、対象物の位置は10ステップ毎にランダムに変更された。実験はロボットと養育者の100,000ステップのインタラクションを1試行とし、10回行った。

ロボットにはあらかじめ Table 1 に示される観測変数、行動変数、事後変数が与えられた。

Table 1 Initial variables in robot

Type	Name	Elements
Perception: <b>S</b>	caregiver's face	$S_1 = \{f_1, f_2, f_3, f_r, f_\phi\}$
	object	$S_2 = \{o, o_\phi\}$
Action: <b>A</b>	shifting gaze	$A_1 = \{g_1, g_2, g_3, g_c\}$
	hand gesture	$A_2 = \{h_1, h_2, h_3, h_4\}$
Result: <b>R</b>	full face of caregiver	$R_1 = \{0, 1\}$
	profile of caregiver	$R_2 = \{0, 1\}$
	object	$R_3 = \{0, 1\}$

ここで養育者の顔の向き  $S_1$  は5つの要素を持ち、 $f_1, f_2, f_3$  は養育者がテーブルのどの位置を見ているかを、 $f_r$  は養育者がロボットを見ていることを、 $f_\phi$  はロボットは養育者の顔を見ていないことを表す。対象物  $S_2$  は対象物を注視していること ( $o$ )、注視していないこと ( $o_\phi$ ) の2つの要素から構成されている。事後変数としては養育者の正面顔を見たか  $R_1$ 、横顔を見たか  $R_2$ 、対象物を見たか  $R_3$  があらかじめ用意されており、それらの要素はロボットが正面顔、横顔あるいは対象物を見ている場合 ("1") とそうでない場合 ("0") とした。行動変数としては視線切り替え  $A_1$  と手振り  $A_2$  が用意された。視線切り替えはテーブルを見るか ( $g_1, g_2, g_3$ ) と養育者を見る ( $g_c$ ) で構成され、手振りは4種類の振り方 ( $h_1, \dots, h_4$ ) で構成された。提案メカニズムにおけるパラメータは  $(T^C, \theta, \alpha, \beta) = (30, 5.0 \times 10^{-5}, 1.0, 0.5)$  とした。

### 4.2 養育者モデルの視線切り替え

養育者の行動は従来研究 [5] と同様に視線切り替えのみとした。ロボットが時々テーブル上の対象物のない場所を見るのに対して養育者は常にロボットの顔が対象物を見る。視線を切り替える時の規則として、養育者は (1) ロボットの視線を追従 (RJA process)、(2) 対象物とロボットを交互に注視 (IJA process)、そして (3) RJA や IJA を行わないようにランダムに注視 (neutral process) の3つの選択肢を持つ。ロボットの方を見ている時、養育者は確率  $p_r^c$  で RJA を選択し、それ以外の場合は neutral process を選択する。対象物を見ている場合には養育者は確率  $p_i^c$  で IJA を選択し、それ以外の場合は neutral process を選択する。また、もし養育者とロボットが同じ対象物を見れば、養育者は確率  $p_e^c$  で規則に関わらずロボットの方を向く。以下の実験では  $(p_r^c, p_i^c, p_e^c) = (0.5, 0.5, 1.0)$  として実験を行った。

### 4.3 対面インタラクションにおける共同注意関連行動の逐次的獲得

1試行当たり平均3.8個の因果関係再現モジュールが生成された。生成されたモジュールについて調査した結果、80%以上の試行で3つのモジュールが同一の順番で他のモジュールよりも早く生成されていることが分かった。それらが生成される過程におけるロボットの行動様式の変化を

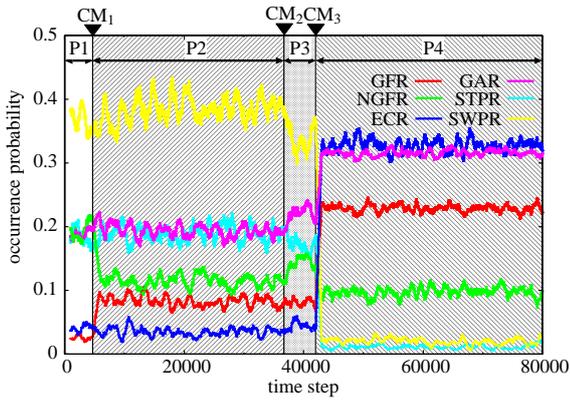


Fig.3 Change of a robot's behavior in face-to-face interactions between a caregiver and a robot.

Fig. 3 に示す．Fig. 3 においてロボットの行動は相手の視線を追従する (GFR)，相手の視線を追従しない (NGFR)，養育者とアイコンタクトをする (ECR)，養育者へ振り返る (GAR)，テーブル上の同じ位置を見続ける (STPR)，テーブル上にある位置から別の位置へ視線を切り替える (SWPR) の 6 つに分けられており，図の縦軸は 1,000 ステップ間のインタラクションにおけるそれぞれの行動の出現確率の移動平均を表わす．またその時の典型的な感覚運動因果度の遷移を Fig. 4 に示す．それぞれの図の上には各因果関係再現モジュールが生成されたタイミングを示す．

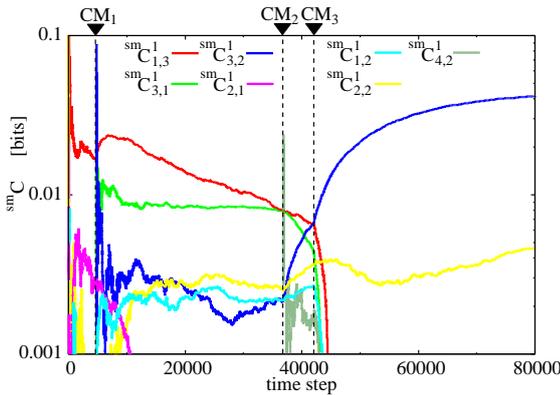


Fig.4 Time courses of sensorimotor causality of set of event variables in face-to-face interactions between a caregiver and a robot.

初期のインタラクション (Fig. 3,P1) においては，ロボットは反射行動モジュールによりランダムに行動するため，しばしば養育者の視線を追従しない行動とる．しかし，インタラクションの回数が増えるにつれて，事象変数集合  $S_1, A_1, R_3$  についての因果度  $^{sm}C_{1,3}^1$  が最大となり (Fig. 4, 赤線)， $CM_1$  が生成される． $CM_1$  が構築したセンサリモータマップを調べたところ，テーブル向けられた相手の視線に対する視線追従行動を可能にするマップとなっていることが確認された．これは獲得前後で GFR が上昇し，NGFR が下降していることから確認できる (Fig. 3, 赤線，緑線)．しかし顔を向く頻度は変わらないため，インタラクション全体に対する頻度はほとんど変化しない (Fig. 4, P2)．

ロボットが生成した  $CM_1$  の出力を利用し，視線追従を

行いはじめると，観測状態に対して特定の行動が選択されるようになるため， $^{sm}C_{1,3}^1$  が徐々に減少していく．その結果，次の因果的な事象変数集合として  $S_3^{II_1}, A_1, R_1$  が発見される．この組合せに対して生成されたモジュール  $CM_2$  は視線追従を行った後で親へ振り返る行動を可能にするセンサリモータマップを構築しており，これによってロボットの GAR が上昇する (Fig. 3, 紫線)．しかし，獲得された振り返り行動は視線追従に依存しており，視線追従の頻度がそれほど高くないため，GAR の頻度もそれほど高くない (Fig. 3, P3)．

さらにインタラクションを続けると，変数集合  $S_3^{II_1}, A_1, R_2$  が発見される．これに対して生成されたモジュール  $CM_3$  は視線追従をするかどうかに関わらずどこを見ても親へ振り返る行動を実現する．そのため  $CM_3$  の出力を利用しだすとロボットは頻繁に養育者の方を見るようになる．その結果視線追従を行う機会が増え，養育者への振り返り行動も頻繁に見られるようになる (Fig. 3)．

この結果を乳児における共同注意関連行動の発達と照らし合わせて考える．乳児は生後 9ヶ月頃に視線追従を獲得するが，その頃の乳児は養育者の視線を追従しても養育者の方を振り返らず，12ヶ月頃に次第に振り返るようになると言われている [7]．本実験の結果は乳児の共同注意関連行動の発達はインタラクションの因果関係を発見とその再現によって実現されている可能性を示唆していると考えられる．

## 5 結論

本研究ではロボットがインタラクションの因果関係を自律的に発見しながら，それを再現する行動を逐次的に獲得するメカニズムを提案した．ロボットと養育者との対面場面での視線インタラクションのシミュレーションを行った結果，視線インタラクションにおいては共同注意関連行動として視線追従を獲得した後，養育者を振り返る行動を獲得するという乳児の発達過程と類似した獲得過程を示すことを確認した．

今後は養育者やロボットの取りうる行動や得られる観測情報の種類を増やし，どのような社会的行動が獲得されるかを調査する．また，乳児観察の知見に基づいた反射行動，や共同注意関連行動の発達に障害があると言われる自閉症児の反射行動をロボットの反射行動として設計したときに共同注意関連行動の発達にどのような違いが出るのかを確認する予定である．

## 参考文献

- [1] T Schreiber. Measuring information transfer. *Physical Review Letters*, Vol. 85, No. 2, pp. 461–464, 2000.
- [2] Moore C. and J. Dunham P., editors. ジョイント・アテンション 心の起源とその発達を探る. Lawrence Erlbaum Associates, 1999. 大神英裕 監訳.
- [3] Imai M., Ono T., and Ishiguro H. Physical relation and expression: Joint attention for human-robot interaction. In *In Proceedings of 10th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, 2001.
- [4] Nagai Y., Hosoda K., Morita A., and Asada M. constructive model for the development of joint attention. *Connection Science*, Vol. 15, No. 4, pp. 211–229, Dec. 2003.
- [5] Hidenobu Sumioka, Yuichiro Yoshikawa, and Minoru Asada. Causality detected by transfer entropy leads acquisition of joint attention. In *6th IEEE International Conference on Development and Learning*, July 2007. CD-ROM, Poster 93.
- [6] S. Watson, J. Smiling, cooing, and "the game". *Merrill-Palmer Quarterly*, Vol. 18, No. 4, pp. 323–339, 1972.
- [7] Tomasello M. Joint attention as social cognition. In Moore C. and P. J. Dunham, editors, *Joint attention: It's origins and role in development*, chapter 6, pp. 103–130. Lawrence Erlbaum Associates, 1995.