

# コミュニケーション相手の動作情報を利用した共同注意の自律的獲得

Autonomous acquisition of joint attention triggered by human partner's behaviors

住岡 英信 (阪大院) 正 細田 耕 (阪大院, 阪大FRC)  
吉川 雄一郎 (阪大院) 正 浅田 稔 (阪大院, 阪大FRC)

Hideobu SUMIOKA, Graduate School of Eng., Osaka University, sumioka@er.ams.eng.osaka-u.ac.jp  
Koh HOSODA, Graduate School of Eng., Osaka University, HANDAI Frontier Research Center  
Yuichiro YOSHIKAWA, Graduate School of Eng., Osaka University  
Minoru ASADA, Graduate School of Eng., Osaka University, HANDAI Frontier Research Center

*Joint attention*, that is a behavior to attend to the object that the other attends to, is an important ability not only for human-human communication but also for human-robot communication. It is formidable for a robot to autonomously acquire joint attention through the interaction with a human since he/she shifts his/her attention on his/her own timing. In this paper, we extend the previous method to perform fully autonomous learning of *joint attention* by embedding a mechanism to switch its attention based on motion information of environment. In the experiments with a real robot, we show that it can autonomously acquire the behavior of joint attention through the interaction with a human experimenter by the proposed method.

**Key Words:** joint attention, motion information, real time learning in the real world, asynchrony, bootstrap learning

## 1 はじめに

人間とロボット間のコミュニケーションについての研究が近年盛んに行われている。これらの従来研究の多くでは設計者がロボットにコミュニケーション能力をあらかじめ与えていた。しかし、コミュニケーション相手の変化に対応するためにはロボット自らが相手との相互作用によりコミュニケーション能力を獲得できることが望ましい。また、非エキスパートとロボットがコミュニケーションする場合、ロボットには人間と人間とのコミュニケーションに近い行動が求められ、そのような行動を通して学習できるメカニズムが必要であると考えられる。そのためにはロボットが実世界のエージェントとして自律的にコミュニケーション相手の人間と相互作用することを通じ、コミュニケーション能力を実時間で獲得する問題を扱う必要がある。このような研究は人間のコミュニケーション能力の獲得過程を調べるための構成論的アプローチとしても興味深い。

本研究ではコミュニケーション能力の基礎である共同注意と呼ばれる行動 [1] をロボットに自律的に獲得させることを目指す。ここで共同注意とは「他者の見ているものを見る」という行動を指す。ロボットの共同注意獲得に関する従来研究として、人間からの注視対象についての明示的な教示なしに共同注意を獲得する手法の研究がある [2, 3]。しかしこれらの研究においては共同注意に必要な注視対象切替えのタイミングを人間が明示的に与えていたため、自律的な学習とはいい難く、またそのために長い学習時間を要していた。

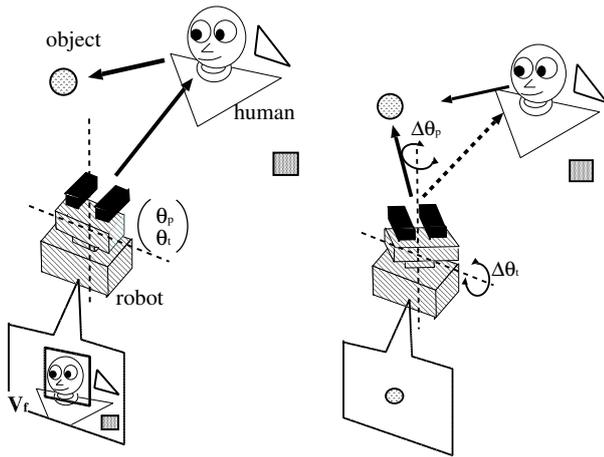
これに対し前研究 [2, 3] を拡張し、ロボットが自律的に注視対象を切替えながら実時間で共同注意を獲得することを目指した研究がある [4]。しかしこの研究では、ロボットは設計者があらかじめ適当に定めたタイミングで注視対象を切替えていたため、ロボットと人間の注視切替えのタイミングが同期しない場合があり、学習が進みにくいという問題があった。そこで本研究では、環境中の動きの情報を

利用して注視対象を切替えるメカニズムを考える。人間は物体を注視する際、手に取ってみるなどの物への働きかけをするため、人間が注目している対象物には動きが生じる場合があると考えられる。また人間は視野の中で動くものに対して注意を払う傾向があると考えられる。これらのことから動きのある対象物を注視対象として選択するようになれば注視切替えのタイミングを人間に同期させることができ、共同注意の学習が容易になると期待される。

本論文ではまず提案手法において用いる共同注意獲得の基本的な枠組について説明した後、動きの情報を利用した注視対象切替えのメカニズムについて述べる。そして提案手法をロボットに実装し、複数人間に対して検証実験を行い、動きの情報を利用することで従来手法に比べてより短時間で共同注意を自律的に学習することができることを示す。

## 2 共同注意のブートストラップ学習 [2]

本節では本論文で用いる共同注意の学習メカニズムである長井らが提案したブートストラップ学習 [2] について説明する。ブートストラップ学習ではロボットは正対する人間の顔をカメラ中心に捕らえた時の顔画像の輝度値パターン  $V_f$  とその時のカメラヘッドの姿勢  $\theta$  を入力とし、人間と同じ対象物を注視するためのカメラの制御角  $\Delta\theta_t$  を出力するようなネットワークを学習する。ロボットはまず人間の顔をカメラ中心に捕らえ、学習の入力である  $V_f, \theta$  と獲得する (Fig. 1 (a))。次にロボットは視覚サーボにより視野内にある特徴的な対象物の一つを注視する (Fig. 1 (b))。この時の注視までのカメラの制御角  $\Delta\theta$  を出力の教師信号としてネットワークのパラメータを更新する。このとき、ロボットは共同注意が成立したどうかは明示的に教示されず、その成否には関係なく上述の入出力関係を学習するため、学習データには共同注意が成立しなかったデータも含まれることになる。しかし長井ら [2] が示したように、環境中に対象物が有限個存在し、その位置がランダムに変化



(a) Phase 1: The robot observes a human who looks at an object. At the same time, it obtains a image pattern of the human's face  $V_f$  and the posture of its camera head  $\theta$ .

(b) Phase 2: The robot changes its view to observe an object by a motor command  $\Delta\theta$ .

Fig.1 The two-phase process to obtain the experiences for learning joint attention.

する環境において、人間が常にそのうちの一つを注視する場合には共同注意の獲得が可能である。

住岡ら [4] はこのブートストラップ学習に同じ物を注視し続けると飽きて注視対象を切替えるメカニズムを導入し、人間の顔を注視するフェーズと対象物を注視し、ネットワークの学習を行うフェーズの切り替えを自動化し、学習時間の短縮を図った。しかしこの手法では、ロボットは設計者があらかじめ適当に定めたタイミングで注視対象を切替えていたため、ロボットと人間の注視切替のタイミングが同期しない場合があり、学習がうまく進まないという問題があった。これに対し、ロボットは自律的に注視切り替えを行いながらも人間と注視切り替のタイミングをできるだけ同期させるような切り替えメカニズムを持つ必要がある。

### 3 動きの情報を利用した注視対象切り替えメカニズム

前節で述べたようにロボットには人間と注視切替のタイミングを出来るだけ同期させるような切替えメカニズムが必要である。これに対し、本研究では人間の顔や対象物の動きに関する情報に着目する。これは人間は注目している対象物に対して何らかの動きかけを行っていることが多く、また視野内の動く対象物に対して注意を払う傾向があると考えられるため、動きの情報を利用して注視切替を行えば人間と同じタイミングで注視対象を切替えることが出来るかと期待されるからである。以下に提案手法による注視対象切替のプロセスを示す。

1. ロボットはまず、カメラ画像から対象物と人間の顔を注視対象の候補として抽出する。ここでは対象物は、設計者があらかじめ決めた数種の色領域を色毎にラベリングしたものとして抽出され、人間の顔はあらかじめ与えられた顔テンプレートと最も適合する領域として抽出される。

2. カメラ画像から抽出された  $n$  個の対象物と 1 つの顔領域の計  $n+1$  個の注視候補の対象物に対し、サンプリング時刻  $t$  における  $i$  番目の対象物の注視確率  $\Pr(i, t)$  を各対象物に対する興味度  $I_j(t)$  ( $j = 1, 2, \dots, n+1$ ) を用いて

$$\Pr(i, t) = \frac{I_i(t)}{\sum_{j=1}^{n+1} I_j(t)} \quad (1)$$

として定める。ここで  $t$  における  $i$  番目の注視対象物候補の興味度  $I_i(t)$  は動きに起因する興味度  $m_i(t)$  と対象物固有の特徴に起因する興味度  $s_i(t)$  を用いて

$$I_i(t) = m_i(t)s_i(t) \quad (2)$$

として定義される。

ロボットは式 (1) の確率に従って注視する対象  $k$  を選択し、注視する。ロボットが対象物を注視している間、 $m_i(t)$  と  $s_i(t)$  から注視対象物候補の興味度  $I_i(t)$  が計算され、注視切替の判定が行われる。

3. 式 (2) における  $m_i(t)$  は

$$m_i(t) = g(c_i(t)) \quad (3)$$

と定義されるものである。ここで  $c_i(t)$  は時刻  $t$  までの  $i$  番目の注視対象物候補の動きの特徴量を表すものであり、対象  $i$  に対するオプティカルフローの水平成分、垂直成分  $\bar{f}_p, \bar{f}_t$  とある微小量  $\delta_p, \delta_t$  の関係から

$$c_i(t) = \begin{cases} c_i(t-1) + 1 & (\bar{f}_p > \delta_p \cap \bar{f}_t > \delta_t) \\ \max(c_i(t-1) - 1, 0) & (\bar{f}_p \leq \delta_p \cup \bar{f}_t \leq \delta_t) \end{cases} \quad (4)$$

と決められる。

また関数  $g$  は動き情報の影響を決める関数であり、本研究ではシグモイド関数を用いた。この  $m_i(t)$  によってロボットは環境中の動いている対象物を注視対象として選択し易くなる。

4. 式 (2) における  $s_i(t)$  は注視対象物候補固有の特徴に起因する興味度であり、その初期値は

$$s_i(0) = b_i \quad (5)$$

である。ここで  $b_i$  は  $i$  番目の注視対象物候補に対する注視選択のバイアスを表す適当な正の係数である。ロボットが対象物  $k$  を注視している間、対象物  $k$  の  $s_k(t)$  は減少し、そうでない対象の  $s_i(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, n+1, i \neq k$ ) は上昇する。すなわち、 $s_i(t)$  は

$$s_i(t+1) = \begin{cases} \alpha s_i(t) & (i = k) \\ \max(b_i, \beta s_i(t)) & (i \neq k) \end{cases} \quad (6)$$

のように更新される。但し、 $\alpha, \beta$  は  $s_i(t)$  の増加、減少の割合を決める定数であり、 $0 < \alpha < 1, \beta > 1$  である。

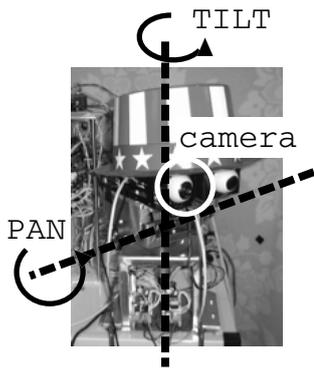
上記のサイクルによってロボットは異なる対象物を注視対象に選択していくことになる。

ロボットは環境中から抽出した注視対象候補の内の一つを注視する。注視し続けると、注視対象と注視対象候補の興味度は式 (6) に従って更新される。この更新によって各興味度間の相対的な関係が変化し、ロボットは注視切対象を切り替える。一方で注視対象候補の興味度には式 (3) で表

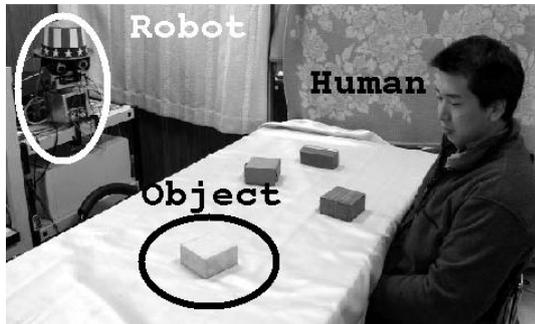
される動きに起因する要素がある．そのため注視対象候補が動くとその候補の興味度は上がり，この上昇によっても各興味度間の相対的な関係が変化することとなり，ロボットは注視対象を切替える．このように対象物注視と動きの情報による興味度の変化によってロボットは自律的に注視対象を切替えながら前述のブートストラップ学習によって共同注意を自律的に獲得していく．

#### 4 実験

実ロボットを用いた実験により，提案手法の有効性を確認する．まず提案する動きの情報を考慮した注視対象切り替えメカニズムによるロボットの振舞いを確認した後，実際にロボットが自律的に共同注意の学習が可能であることを，複数の人間に対する検証実験によって示す．



(a) The camerahead of robot



(b) An overview of the experimental setup

Fig.2 The experimental setup for joint attention.

##### 4.1 実験設定

Fig. 2 に使用したロボットと実験環境を示す．実験に用いたロボットはパン方向，チルト方向の2自由度で動作し，右目のカメラで画像を取得する (Fig. 2 (a))．ロボットは33msecのフレームレートで取得した画像から視野内の人間の顔と特徴領域を抽出する，環境中には複数の対象物が存在するとし，ロボットと人間は正対しているものとする (Fig. 2 (b))，実験に際し，ロボットとインタラクションをしてもらう被験者に対して以下の情報が伝えられた．

- テーブルの上に置かれた複数の対象物のいずれかを選択し，その対象物の位置を左右に移動させ，注視すること．この一連の動作は少なくとも5秒間を行い，操作している対象物を注視し続けること．

- 注視していない対象物には触れず，注視している対象物を移動させること，
- 実験中，対象物の位置が偏らないようにできるだけ均等に対象物を配置すること．

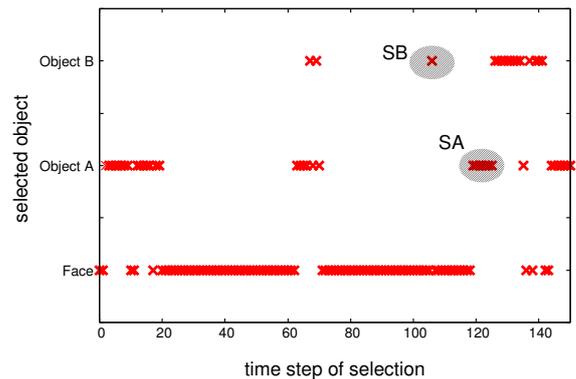
以上の実験設定において被験者に自らの注視切替のタイミングをロボットに合わせるような指示はない．そのため，実験においては人間とロボットの注視切替のタイミングが同期しない場合が存在する．

このような実験設定でロボットは提案する注視切替えメカニズムによって自律的に注視対象の選択と切り替えを行う．

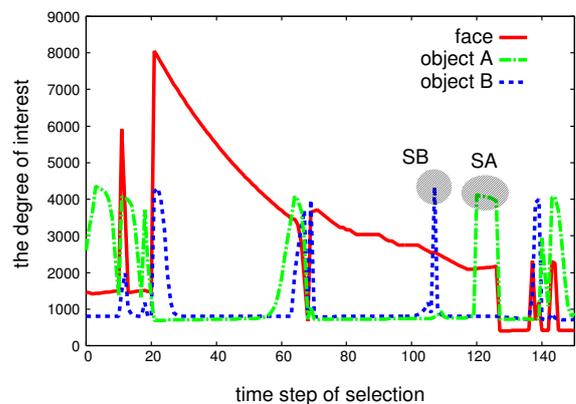
##### 4.2 動き情報を考慮した注視対象切替えの振舞い

まず，環境中に一人の人間と赤と黄の2つの対象物が存在する状況において，動きの情報を考慮した注視対象選択により注視対象が切り替えられる様子を調べた．Fig. 3 (a) は注視対象選択によって選択された注視対象の遷移を示し，図の縦軸が選択された対象物を表す．Fig. 3 (b) は対象物2つと顔それぞれに対する興味度の変化を示す．Fig. 3 (b) において object A は赤色の対象物を，object B は黄色色の対象物を表す．

Fig. 3 (a), (b) とともに横軸は注視対象選択を行った回数である．なお，各注視対象選択の間隔は様々であるがおおよそ0-3秒である．



(a) an selected object



(b) the degree of interest

Fig.3 The time courses of the degree of interest in human face, object A and object B, and an selected object.

Fig. 3 (b)を見ると、ある対象物の興味度が急激に上昇している領域が存在する。これはその対象物が動いたことを示している。このような上昇によって注視対象切替えが生じたと考えられる例が Fig. 3 (a), (b)における斜線の領域  $SA, SB$  である。例えば、領域  $SA$  ではそれまで顔の興味度が最も高かったが、対象物  $A$  が動かされ、対象物  $A$  の興味度が上昇し、それに伴い対象物  $A$  に対する注視確率の上昇が生じたために注視対象として  $A$  が選択されたと考えられる。また領域  $SB$  でも対象物  $B$  が動いた為にこれらの興味度が急激に上昇し、その結果注視対象として  $B$  が選択され注視されていたと考えられる。

#### 4.3 提案手法による共同注意の自律的獲得

次に2名の人間(被験者  $S, M$ )を被験者とし、各自、提案手法を実装したロボットと前研究 [4] の手法を実装したロボットのそれぞれと共同注意獲得実験を行ってもらい、そのパフォーマンスを比較した。但し、被験者  $S$  はロボットの内部プロセスを熟知している人間、被験者  $M$  はロボットが共同注意を学習することは知っているが内部プロセスは理解していない人間である。以下では前研究 [4] の手法を従来手法と呼ぶ。

実験では学習の高速化を図るためにロボットの学習は注視対象を人間の顔から対象物へ切替えた場合だけでなく対象物から人間の顔へ切替えた場合においても行った。また、提案手法では動きの情報を利用して、注視対象を切替えたときに注視対象が動いていた場合、学習を行わなかった。なお、実験には赤、黄、青、緑の各色の特徴を持つ対象物4つを用いた。

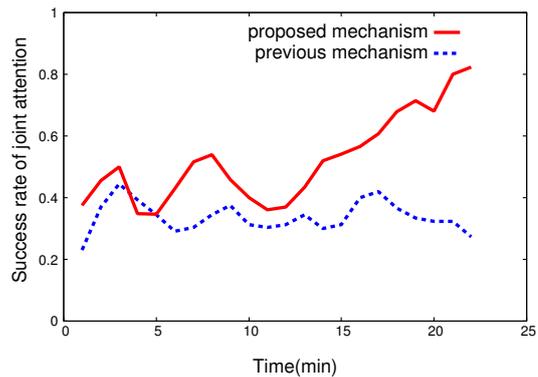
実験は23分間で終了しそれぞれのパフォーマンスを比較した。Fig. 4は二人の被験者それぞれに対する提案手法と従来手法での共同注意の成功率を示したものである。ここでいう成功率とはある時刻の1分前から1分後までの2分間の間の対象物を注視しようとした回数に対して共同注意が成功した回数を表したものであり、Fig. 4 (a), (b)はその移動平均を示したものである。横軸は時間(分)である、Fig. 4 (a), (b)において実線が提案手法での成功率、破線が従来手法での成功率を表す。Fig. 4より提案手法は約20分ほどで成功率が60%以上まで上昇しているが従来手法は30%程の成功率にとどまっている。これは提案手法が人間の顔や対象物の動きによって注視対象を切替えるため、人間と注視切替えのタイミングをできるだけ同期させるように注視切替えを行った結果、学習が容易になったためであると考えられる。

Fig. 4 (a), (b)から、ロボットの内部プロセスを熟知している人間である被験者  $S$  の方がそうでない人間の被験者  $M$  よりも学習が早く進み、学習後期の成功率も80%と高くなっていることがわかる。この違いは被験者  $S$  が学習に都合のよい対象物の配置を知っていたためであると考えられる。そのため被験者  $M$  のような非エキスパートとのインタラクションを通して学習するメカニズムとするためには両者の対象物配置の仕方を分析し、この違いを埋めるメカニズムについて考える必要がある。

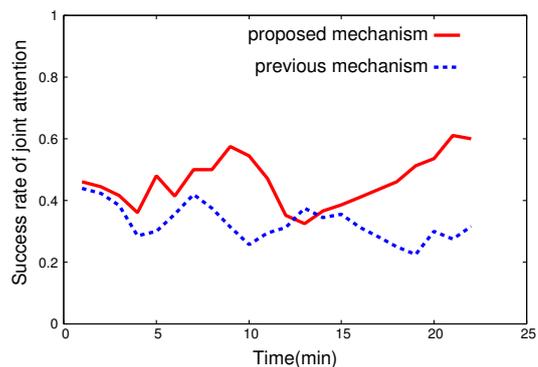
## 5 結論

本報告ではコミュニケーション相手の動作情報を含めた環境中の動きの情報を考慮しながら自律的注視対象切り替える機能をロボットに与えて実環境でロボットが自律的に共同注意の能力を学習するメカニズムを提案した。提案手法をロボットに実装し、複数の人間に対して検証実験を行い、動きの情報を利用することで従来手法に比べてより短時間で共同注意を自律的に学習することができることを示した。

本研究においてはロボットは環境中の動きの情報の持つ意味を全く考慮せずに利用している。しかし、人間がロボッ



(a) Subject S



(b) Subject M

Fig.4 The time courses of success rate of joint attention through the learning process with subjects S and M.

トに対して注目してほしい対象物に対して行う働きかけと、そうでない対象物に対する働きかけは性質の異なる動きの情報を持つはずである。このような動き情報の性質の違いをロボット自身が人間とのインタラクションを通して自律的に発見するメカニズムについても考えることも今後の課題の1つである。

## 参考文献

- [1] C. Moore and P.J. Dunham, editors. ジョイント・アテンション 心の起源とその発達を探る。ナカニシヤ出版, 1999. 大神英裕 監訳。
- [2] 長井志江, 細田耕, 森田章生, 浅田稔. 視覚注視と自己評価型学習の機能に基づくブートストラップ学習を通じた共同注意の創発. 人工知能学会論文誌, Vol. 19, No. 1, pp. 10-19, 2004.
- [3] 森田章生, 吉川雄一郎, 細田耕, 長井志江, 浅田稔. 自己組織化マップによる共同注意の学習速度の向上. 第21回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 3B34, 2003.
- [4] 住岡英信, 細田耕, 吉川雄一郎, 長井志江, 浅田稔. 注視対象に対する馴化を利用した共同注意の自律的獲得. ロボティクス・メカトロニクス講演会 '04 予稿集, 2004. CD-ROM, 2P2-H-18.