

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

Autonomous Learning of Joint Attention utilizing Habituation

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) 長井 志江 (阪大院)
正 浅田 稔 (阪大院, 阪大 FRC)

Hidehiko SUMIYAMA, Graduate School of Eng., Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka
Koh HOSODA, Graduate School of Eng., Osaka University, HANDAI Frontier Research Center
Yuichiro YOSHIKAWA, Graduate School of Eng., Osaka University
Yukie NAGAI, Graduate School of Eng., Osaka University
Minoru ASADA, Graduate School of Eng., Osaka University, HANDAI Frontier Research Center

Recently, many researchers focus on the studies of communication between robots and human being. It seems worthy to address a issue how to build a real robot that can autonomously acquire the behavior of *joint attention*, that is one of fundamental competences of communication, through interaction with human being. In this paper, we extend the previous method to perform fully autonomous learning of *joint attention* by embedding a mechanism called *habituation* to make the robot autonomously switch its attention in the learning process. From experiments with a real robot, we show that it can acquire the behavior of joint attention through interaction with human experimenter even if the robot's timing to switch is different from the human's one. Finally we discuss a potential merit of habituation to cope with the difference of the preferences.

Key Words: joint attention, habituation, real time learning in the real world, asynchrony, bootstrap learning

1 はじめに

近年, 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注目されている. 従来研究の多くではロボットの持つコミュニケーション能力は設計者によってあらかじめ与えられていたが, コミュニケーション相手の変化に適應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, 非エキスパートがロボットとコミュニケーションする場合には, 人間と人間とのコミュニケーションに近い行動をとると考えられ, このような行動から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非エキスパート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⁾をロボットに実時間で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. この共同注意の能力をロボットに獲得させることを目指した研究に Fasel *et al.*²⁾ や森田ら³⁾の研究がある. Fasel *et al.*²⁾ は観察実験からの認知的知見により共同注意を創発するモデルを提案した. しかしモデルの検証はシミュレーション上で行われており, 実世界のロボットにそのモデルを適用可能であるかは明らかでない. 森田ら³⁾はロボットが自身の対象物注視までの行動を教師信号とすることで, 人間からの明示的な評価なしに共同注意の能力を獲得するメカニズムを提案した. しかし共同注意の学習を行うための注視対象切り替えのタイミングは人間から明示的に与えられており, ロボットが実時間で自律的に共同注意の能力を獲得するメカニズムにはなっていない.

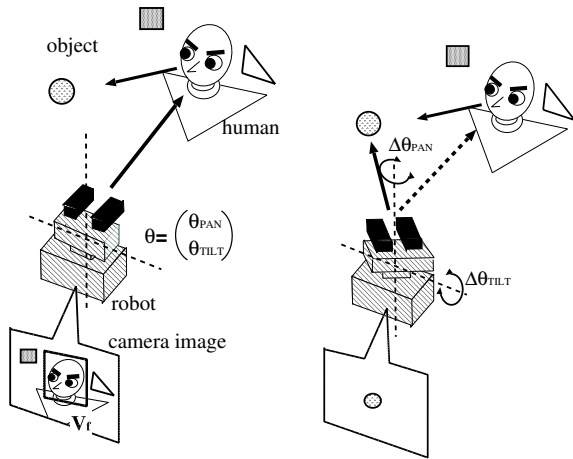
そこで本論文では森田ら³⁾の共同注意獲得のメカニズムに人間が示すような馴化現象を用いた注視対象切り替

えの機能を付与し, 実環境において実時間でロボットが自律的に共同注意の能力を獲得するメカニズムを提案する. 本論文ではまず, 森田ら³⁾の共同注意獲得のメカニズムとその問題点について説明した後, 馴化を用いた注視対象切り替えのメカニズムを提案する. そして提案する共同注意獲得のメカニズムをロボットに実装し, 実ロボットが自律的に共同注意を学習することが可能であることを示す. また, この注視対象切り替えの過程が共同注意の学習にどのような影響を与えるかについて考察する.

2 森田ら³⁾の共同注意獲得メカニズム

本節では森田ら³⁾の共同注意の学習メカニズムについて説明する. ロボットはまず, 正対する人間の顔を注視する (Fig. 1 (a)). 以下では注視とはカメラ画像の中心に捕らえることを指す. このときの中心の画像の輝度値パターン V_f と注視時のカメラヘッドの姿勢 θ を学習の入力として獲得する. 次にロボットは人間から注視切り替えの指示を受けると視界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その顔画像とカメラ角度に対する共同注意のためのカメラの制御角 $\Delta\theta'$ を学習していく. このとき, ロボットは共同注意が成立したどうかにかかわらず上述の入出力関係を学習するため, ロボットが得る学習データには共同注意が成立しなかったときのものが含まれることになる. しかし長井ら⁴⁾が示したように, 環境中对象物が有限個存在し, その位置がランダムに変化する環境において, 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能力の獲得が可能である.

森田ら³⁾のメカニズムでは人間の顔を注視して顔画像とその時のカメラヘッドの姿勢を学習の入力として取得するフェーズと対象物を注視してその注視までのカメラの制御角を出力の教師信号として学習を行うフェーズの切り替えを人間からの明示的な指示によって行っていた (Fig. 2). 人間と自律的にインタラクションすることを通



(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 θ .

(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.

じて共同注意能力を獲得することを考えた場合、このような人間による明示的な切り替えによらないメカニズムが必要である、これに対し本研究では森田ら³⁾のメカニズムに次節で述べる馴化に基づく注視対象切り替えの機能を付与し、ロボットが自律的に2つのフェーズを切り替えながら共同注意を獲得するメカニズムを提案する。

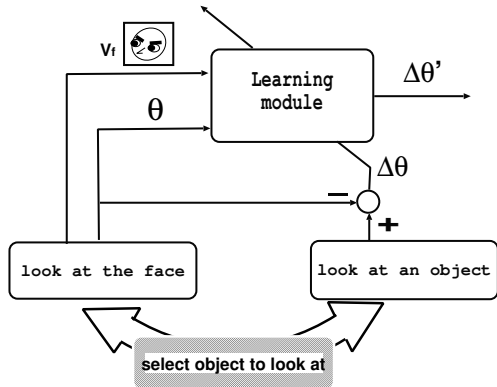


Fig.2 The learning mechanism of learning joint attention

3 自律的共同注意獲得メカニズム

ここではまず、馴化と選好性を用いてロボットがどのように注視対象切り替えを行うかについて説明する。次に提案する注視対象切り替えのメカニズムについて説明し、最後に森田ら³⁾の共同注意獲得メカニズムに提案する注視対象切り替えの機能を付与した自律的共同注意獲得のメカニズムについて説明する。

3.1 馴化、選好性と注視対象切り替え

人間、特に乳幼児は新しい刺激、珍しい刺激を与えられると注意を払う。しかし、同じ刺激が与えられ続ける

と人間は徐々にその刺激に慣れ、そのうちその対象物に飽きて別の刺激に注意を払うようになる。この慣れの現象を馴化という。また人間は、乳幼児期において複雑なパターンのも、ピンク色のも、人の顔などの特定の刺激をより注視する選好性と呼ばれる傾向がある。本論文では選好性と馴化現象を組み合わせることにより、自動的に注視対象を切り替えるメカニズムを提案する。ロボットはまず、選好性に従って視界中の最も興味のある対象物を選択し、注視する。注視する時間が長くなるにつれ、対象物に対する馴化が起こり、その結果、現在注視している対象物とは違う別の対象物に選好性に従って視線を移す。

3.2 馴化を用いた注視対象切り替えのメカニズム

選好性と馴化を利用して注視対象を切り替えるメカニズムについて説明する。ロボットはまず、

- 対象物：設計者があらかじめ決めたカメラ画像上の数種の色領域
- 人間の顔：カメラ画像上で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

を注視対象の候補として抽出する。ロボットはこの対象物のうちのひとつと人間の顔を時刻 T ずつ交互に注視する。このとき、ロボットが同じ対象物のみを注視しないように以下に述べるメカニズムを用いる。

カメラ画像から抽出される特徴の数を n とし、それぞれの特徴について時刻 t の特徴量 $S_i(t) (i = 1, 2, \dots, n)$ を求める。そして各対象物 i に対する時刻 t の興味度を $I_i(t)$ とし、その初期値を

$$I_i(0) = S_i(0)C_i \quad (1)$$

とする。但し C_i はロボットの選好性として設計者によって決められる正の定数である。各対象物 i に対する注視確率 $\text{Pr}(i)$ はこの興味度を用いて

$$\text{Pr}(i) = \frac{I_i}{\sum_{j=1}^n I_j} \quad (2)$$

として定められる。ロボットは式 (2) の確率に従って注視する対象物 k を選択する。ロボットは注視対象に選択した対象物 k がカメラ画面中心付近にきたときから時間 T の間その対象物 k を注視し続ける。注視の間、対応する興味度 I_k は

$$I_k(t+1) = \gamma_k I_k(t) \quad (3)$$

のように減少する。但し、 γ_k はロボットの選好性によって決められる正の定数であり、 $(0 < \gamma_k < 1)$ である。このとき、注視されていない対象物の興味度は変化しない。また、もし注視対象 k の興味度 I_k がある値 ϵ より小さくなったとき、興味度を

$$I_i(t+1) = S_i(t)C_i \quad (4)$$

とリセットする。こ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。

3.3 提案するメカニズムによる自律的共同注意獲得のプロセス

本論文で提案する共同注意の学習メカニズムは前述の森田ら³⁾の手法に提案した馴化による注視対象切り替えを付与することで、ロボットの自律的共同注意学習を目指したものである。ロボットはカメラから取得した画像から人間の顔と対象物の特徴を抽出する。そしてそれらの情報に基づいてロボットは馴化による注視対象切り替えの機能により注視対象を自律的に切り替える。この

切り替えのサイクルの中で、ロボットは自律的に顔画像と注視時のカメラヘッドの姿勢 θ を学習の入力として獲得し、注視対象が顔から対象物へ移った場合にその対象物を注視するまでのカメラの制御角 $\Delta\theta$ を出力の教師信号にして共同注意のためのカメラの制御角 $\Delta\theta'$ を学習していく。

森田ら³⁾の手法と異なり、馴化を用いた注視対象切り替えの機能によってロボットが人間からの明示的な切り替えの指示を待たずに次々と学習データを取得することで高速な学習が期待できる。しかし反面、ロボットは森田ら³⁾のように人間が対象物を注視している状態での入出力関係を学習するだけでなく、人間が対象物を注視していない状態での入出力関係も学習してしまうことが考えられる。これは人間とロボットが互いに自律的に、すなわち非同期的に注視対象を切り替えるため起こる問題である。しかし、人間が視線を移す期間は何かを注視している期間に比べて少ないと考えられることから、ロボットと人間の注視対象切り替えの非同期性は共同注意学習において深刻な問題でないと考えられる。すなわち、ロボットに馴化による注視対象切り替えのメカニズムを実装することによって、実時間で自律的に共同注意を学習できると考えられる。

4 実験

ここではまず、馴化を用いた注視対象切り替えの機能がどのように働くかを確認する。その後、提案するメカニズムによって実際にロボットに自律的に共同注意の学習を行わせ、人間とロボットの注視対象切り替えのタイミングが非同期である場合においても共同注意の学習が可能であることを示す。また、馴化を用いることで期待できる結果について議論する。

4.1 実験設定

Fig. 3 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. 3 (a))。ロボットは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、環境中には赤色と黄色の特徴をもつ対象物2つが存在するとし、ロボットと人間は正対しているものとする (Fig. 3 (b))、また、実験中の対象物の位置は人間がランダムに変えるものとする。

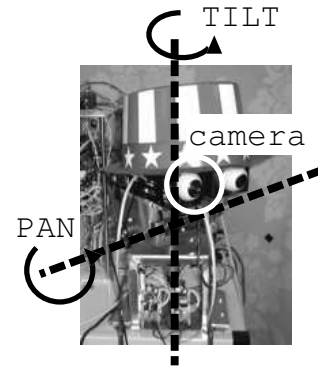
ロボットと人間はそれぞれが環境中の複数の対象物に対してあらかじめ決めた選好性に従って自律的に注視対象の選択と切り替えを行う。

4.2 馴化による興味度の変化

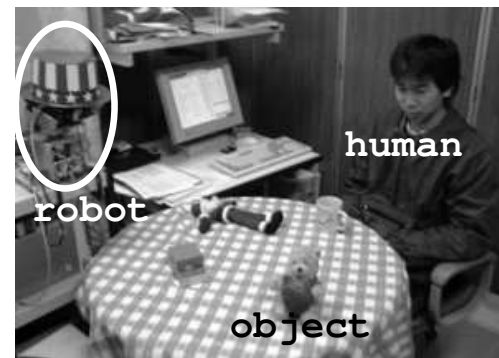
まず、提案した馴化を用いた注視対象選択により注視対象が切り替えられる様子を調べた。Fig. 4 に、対象物2つの場合における興味度の変化を示す。ここで横軸はフレーム数を表し、フレームレートは約66[msec]である。ロボットは20フレームに一度 (つまり $T = 1.32[sec]$) 注視対象選択を行うものとする。Fig. 4 において対象物Aが注視対象として選択されている期間ではAの興味度が減少しており、その期間においてはBは注視されていないため興味度に変化はない。反対に、対象物Bが注視対象として選択されている期間ではBの興味度が減少しており、Aの興味度には変化はない。約700フレーム目で対象物Bの、約850フレーム目で対象物Aの興味度がそれぞれ急激に上昇しているのは、興味度が閾値 ($\epsilon = 40$) 以下になったことにより興味度がリセットされたためである。

4.3 実時間でロボットが自律的に共同注意学習を行うことによる影響

人間とロボットの注視対象切り替えのタイミングが非同期である場合において、共同注意の学習が可能であるかについて調べる実験を行った。一連の実験において、同



(a) The camerahead of robot



(b) An overview of the experimental setup

Fig.3 The experimental setup for joint attention.

様の実験を森田ら³⁾の方法によって実現した場合、学習に約6時間かかるが提案するメカニズムでは約1時間で収束する。すなわち提案メカニズムにより学習時間の短縮が確認できた。

Fig. 5 はそのときの共同注意の成功率の遷移を示したものであり、それぞれ人間がロボットに同期したタイミングで注視対象切り替えを行った場合 (Case 1)、ロボットが人間よりも速いタイミングで注視対象を切り替えた場合 (Case 2)、ロボットが人間よりも遅いタイミングで注視対象を切り替えた場合 (Case 3)、ロボットと人間が比較的速いタイミングで注視対象を切り替えた場合 (Case 4) について示している。定性的に Case 1 から順に非同期的に注視対象切り替えが行われる場合が多くなると考えられる。なお、これらの実験において、人間とロボットの注視対象選択における選好性は同じとした。すなわちロボットと人間は共に赤色の対象物を注視対象としてよく選択する。

Fig. 5 より、注視対象切り替えが同期している場合 (Case 1) に比べ、非同期性が大きくなるにつれて共同注意の成功率の上がり方が緩やかになっていることがわかる (Case 2 - Case 4) が、いずれのケースも500ステップ学習を進めることによって共同注意を獲得できることがわかる。

4.4 馴化による選好性の変化の影響

次に、人間、ロボット共に赤色の対象物をよく注視する場合 (選好性が同じ場合) と人間は黄色の対象物をロボットは赤色の対象物をよく注視する場合 (選好性が異なる場合) の2つのケースについて、ロボットが注視対象に馴

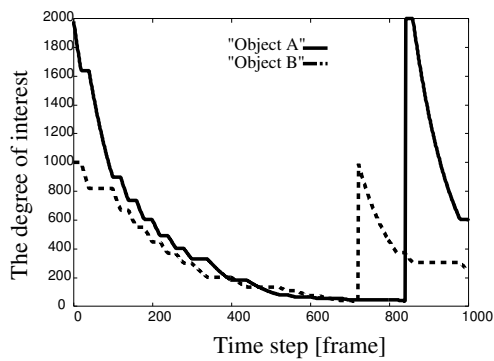


Fig.4 The time courses of the degree of interest in objects A and B.

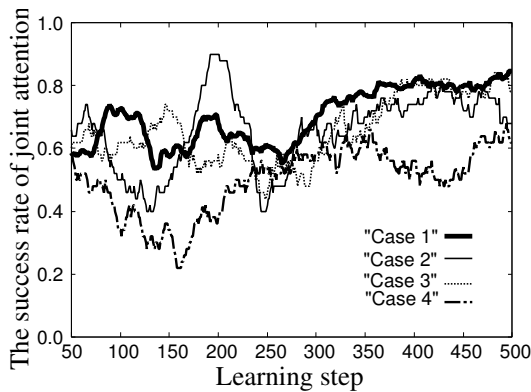


Fig.5 The time courses of the success rate of joint attention in several degrees of asynchronously shifting attention

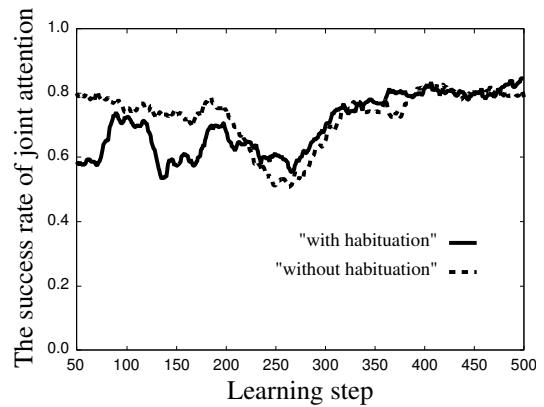
化するか、馴化せず一定の注視確率で注視対象を選択するかで共同注意の学習にどのような違いが生じるのかについて調べる実験を行った。Fig. 6 にそれぞれ3回の試行における平均を示す。Fig. 6 (a) が選好性が同じ場合、Fig. 6 (b) が選好性が異なる場合の共同注意の成功率の変移を示しており、それぞれ実線が馴化する場合、破線が馴化せず一定の確率で注視対象を選択する場合を示している。但し、どの場合においても人間とロボットの注視対象切り替えのタイミングにおいて、ほぼ同期をとっている状態で実験を行った。

これらの図より馴化するしないにかかわらず学習が進んでいることがわかる。また両者の選好性が異なる場合には対象物に馴化しない場合に比べて馴化することによって共同注意の学習が若干加速されていることがわかる。

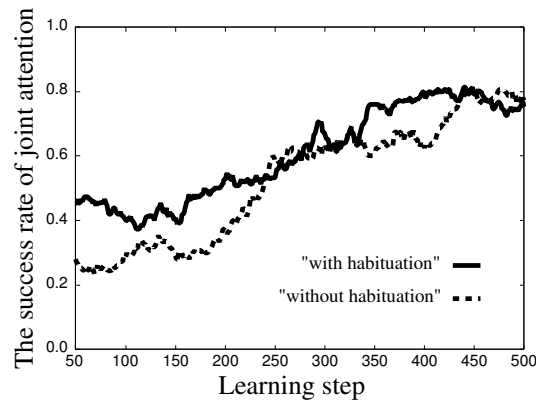
5 結論

本報告ではロボットに馴化を用いた自律的注視対象切り替え機能を与えて実環境、実時間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。提案するメカニズムをロボットに実装し、実際に実時間で自律的に共同注意の学習が可能であることを示した。また、馴化を用いた注視対象切り替えの機能がコミュニケーション相手と選好性が異なる場合の共同注意学習を促進する可能性があることを示した。

提案したメカニズムにより実時間の自律的共同注意獲得が可能になったことで、システムの振る舞いを統計的に評価するための実験が可能になったといえる。本論文では様々なパラメータを設計者があらかじめ与えていた



(a) the same preference



(b) different preferences

Fig.6 The time courses in the cases where the robot and the human have the same preference (a) and different ones (b).

が、システムの振る舞いの統計的な評価を通じてそれらのパラメータがどうあるべきかについて検討する必要がある。また、共同注意の獲得過程が人間のコミュニケーションダイナミクスに依存するため、人間の振る舞いも合わせて観察する必要がある。

参考文献

- [1] 大神英裕 監訳. 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.
- [2] Ian Fasel, Gedeon O. Deák, Jochen Triesch, and Javier Movellan. Combining embodied models and empirical research for understanding the development of shared attention. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Development and Learning*, pp. 21–27, 2002.
- [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] 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.