

# 養育者の関わりの変容を考慮した移動を伴う共同注意発達モデル

竹内佑治 (阪大院) 住岡英信 (JST ERATO, 阪大院)  
吉川雄一郎 (JST ERATO) 浅田稔 (JST ERATO, 阪大院)

## Development of joint attention with locomotion taking account of changes in caregiver

\*Yuji TAKEUCHI (Osaka Univ.), Hidenobu SUMIOKA (JST ERATO, Osaka Univ.)  
Yuichiro YOSHIKAWA (JST ERATO), Minoru ASADA (JST ERATO, Osaka Univ.)

**Abstract**— This paper extends a model of development of joint attention[3] for coping with not only the locomotion by a robot but also the effects of changes in the caregiver's behavior. As expected in the parent-infant interaction, the caregiver is assumed to more frequently call the robot to look back when it goes farther from the caregiver. In the experiment, we examine the hypothesis where natural caregiver's call enables it to effectively learn joint attention by effectively giving it spatial information which is supposed to be lacked by the robot due to its underdevelopment of the spatial perception.

**Key Words:** joint attention, locomotive experience, spatial perception, caregiver's change

### 1. はじめに

他者の見ているものを見る行動と定義される共同注意の能力は、人同士だけでなくロボットと人間の間においても、円滑なコミュニケーションを実現するために重要であると考えられている [1]。本研究では、認知発達ロボティクス [2] の一つのアプローチとして、ヒトの共同注意発達過程を再現するロボット及びインタラクションモデルを構築することを通じて、適応的なコミュニケーションロボットの実現とヒトの共同注意発達過程の理解の双方を目指す。

共同注意発達に関する構成論的なアプローチの研究として、長井らの研究がある [3]。長井らは養育者の顔の向きと自分の現在の首の姿勢から、養育者の見ている対象物を注視するための運動指令を出力する学習によって、乳児の6~18ヶ月における段階的な共同注意の発達過程 [4] をモデル化している。このモデルでは対面状況のみが考慮され、養育者と乳児は移動しないことが仮定されていたが、共同注意と同時期に起こる移動能力の発達による乳児の活動範囲の拡大が、養育者の乳児への関わり方の変容を導き、結果的に共同注意能力や空間認知能力などの乳児の認知発達を促進させることが示唆されている [5]。しかし、養育者の関わりがどのようにそれらの認知発達に影響を及ぼしているのかはまだ明らかではない。そこで本研究では、養育者の見ている物体に向かって移動し到達することを移動を伴う共同注意と定義し、長井らのモデルを拡張して、乳児の移動能力発達に伴う養育者の関わりの変容と移動を伴う共同注意獲得の関係を明らかにすることを試みる。

移動を伴う共同注意を実現する運動は、初めに養育者を観察したときの養育者の顔の向きと養育者までの距離、及び自分がどの程度移動したかに依存すると考えられる。しかし、共同注意を獲得する時期の乳児にとっては、自分がどの程度移動したかを認知するため

の空間認知が不正確であるため、自身の移動量を始めから正確に知ることは困難であり、移動距離が長くなるほど困難の度合いが強まっていくと考えられる。一方、実際の親子のインタラクション場面を考えると、移動によって乳児の活動範囲が拡大するにつれ、乳児が養育者の声掛けに応じて養育者の方を振り返るといった場面が増えると言われている [5, 6]。本研究ではこの養育者への振り返り行動が、乳児に自身の位置に関する正確な情報を与え、不正確な空間認知を補う働きがあると考えられる。そこで、振り返ることによる自己移動の確認を考慮したロボットの共同注意発達過程のモデルを提案し、養育者の関わり方が移動を伴う共同注意獲得に及ぼす影響について調べる。

以下ではまず、ロボットによる移動を伴う共同注意について説明した後、それを獲得するメカニズムについて述べる。そして提案するメカニズムを実ロボットに実装し、移動を伴う共同注意獲得実験を通じて、ロボットの移動に伴って養育者が関わりを変容させることが結果的に乳児の不正確な空間認知を補い、共同注意獲得を助ける働きがあることを示す。

### 2. 問題設定

本論文における、ロボットと人との移動を伴う共同注意と移動中の人への振り返り行動を Fig.1 に示す。ロボットと人は間隔  $d_0$  で正対しており、環境には複数の対象物が配置されている。以下では人を養育者と呼ぶ。養育者が対象物の内のいずれかを注視している状況において、ロボットはまず養育者の顔をカメラ中心に捉え、カメラ画像  $I$  を取得する。このときロボットは画像  $I$  から養育者の顔画像  $I_c$  を抽出する。その後、前進と回転により環境中の対象物の一つに向かって移動する。対象物への移動中、時折停止しカメラを回転させて養育者の方を振り返る。

ここで、 $t$  ステップ<sup>1</sup>にロボットに与えるモータコマ

<sup>1</sup>本研究では、1 ステップを 33msec と定義する

ンドを  $\mathbf{u}(t) = [u_{trans}(t) \ u_{rot}(t)]^T$  とし、ロボットの位置・姿勢を  $\mathbf{p}(t) = [x(t) \ y(t) \ \phi(t)]^T$  とする．ただし、 $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $\phi(t)$  は Fig.1 で示される座標系で表される位置と姿勢である．

このとき、移動を伴う共同注意を行うためにロボットが学習する必要があるのは、養育者の顔画像  $I_c$  に対して養育者が見ている対象物へと移動するための各ステップでの移動のモータコマンド  $\mathbf{u}(t)$  である．また、ロボットによる  $r$  回目の養育者への振り返りステップを  $T_r$  ( $r = 1, 2, \dots$ ) とする．

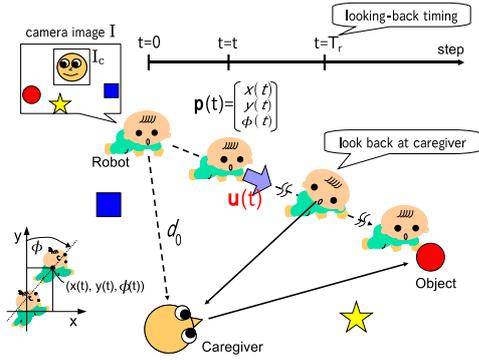


Fig.1 Joint attention with locomotion between a robot and a caregiver, and looking-back behavior to the caregiver.

### 3. 移動を伴う共同注意獲得モデル

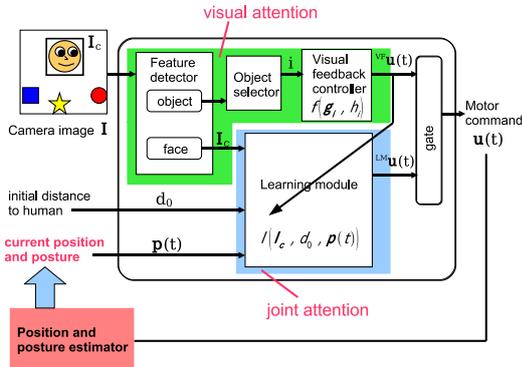


Fig.2 The proposed architecture for learning joint attention with locomotion

ロボットが移動を伴う共同注意を獲得するための学習構造を Fig.2 に示す．本メカニズムは特徴抽出器、注視対象選択器、視覚フィードバック制御器、学習器、ゲートの5つのモジュールで構成される．各モジュールの詳細は長井ら [3] を参照されたい．ロボットはまず特徴抽出器によって、取得したカメラ画像  $I$  から特徴的な画像領域を抽出する．特徴抽出器は対象物抽出と顔抽出の2つの機能を備えており、対象物抽出機能では色特徴に従って対象物  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) を抽出する．また、顔抽出機能ではテンプレートマッチング法によりテンプレートと相関のある領域を顔画像  $I_c$  として抽出する．次にロボットは注視対象選択器によって、抽出された  $n$  個の対象物の中からどの対象物の方へ移動

するかを選択する．本研究ではこの選択はランダムで行うこととした．そしてロボットは、注視対象選択器によって選ばれた対象物  $i$  の画像特徴から、その対象物の方へ移動するためのモータコマンド  ${}^{VF}\mathbf{u}(t)$  を視覚フィードバック制御器により生成する．モータコマンド  ${}^{VF}\mathbf{u}(t)$  は、カメラ画像上での対象物  $i$  の重心位置  $g_i$  と大きさ  $h_i$  により決定される．つまり、ロボットは対象物  $i$  を十分近くでカメラ中心に捉えるまで移動する．

$${}^{VF}\mathbf{u}(t) = f(g_i, h_i) \quad (1)$$

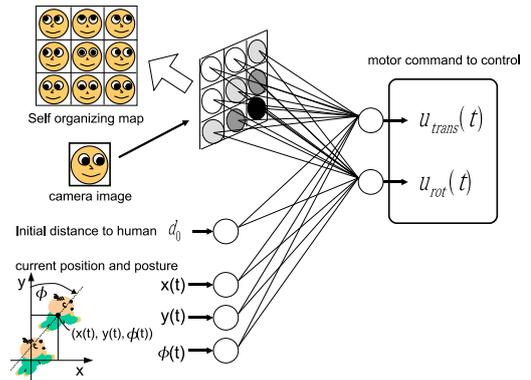


Fig.3 A learning module

同時に、学習器では特徴抽出器で抽出された養育者の顔画像  $I_c$  と養育者までの初期距離  $d_0$ 、現在 ( $t$  ステップ) の自身の位置・姿勢  $\mathbf{p}(t)$  からモータコマンド  ${}^{LM}\mathbf{u}(t)$  が生成される．

$${}^{LM}\mathbf{u}(t) = l(I_c, d_0, \mathbf{p}(t)) \quad (2)$$

学習器は Fig.3 に示す入力層と出力層の2層からなるニューラルネットワークである．ニューラルネットワークの結合荷重は、移動中各ステップにおいて視覚フィードバック制御器より生成されたモータコマンド  ${}^{VF}\mathbf{u}(t)$  を教師信号として誤差逆伝播法によって修正される．尚、顔画像  $I_c$  に関するネットワークへの入力としては、森田らの研究 [7] で用いられている、予め作成しておいた顔の自己組織化マップ (SOM) の各ユニットと養育者の顔画像  $I_c$  との類似度の分布を用いる．

視覚フィードバック制御器からの出力  ${}^{VF}\mathbf{u}$  と学習器からの出力  ${}^{LM}\mathbf{u}$  のどちらを用いて移動を行うかは対象物への移動を始めるときにゲートによって決定される．ロボットは確率  $P$  によって学習器からの出力  ${}^{LM}\mathbf{u}$  で移動し、確率  $(1 - P)$  によって視覚フィードバック制御器からの出力  ${}^{VF}\mathbf{u}$  で移動する．確率  $P$  は以下のシグモイド関数により決定される．

$$P = G(S) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\alpha - S}{\beta}\right)} \quad (3)$$

ここで、 $S$  は対象物へ到達した回数であり、 $\alpha$ ,  $\beta$  は定数である．この様にゲートにおける  ${}^{LM}\mathbf{u}$  の選択確率を与えることで、学習初期には主に  ${}^{VF}\mathbf{u}$  を、学習後期には主に  ${}^{LM}\mathbf{u}$  を採用するようになる．

### 3.1 空間認知モデル

ロボットが移動を伴う共同注意を学習するためには、学習の入力として利用される現在の自身の位置・姿勢  $p(t)$  を計算する必要がある。そのため、ロボットは位置・姿勢推定器によって今までの移動量から現在の自身の位置・姿勢  $p(t)$  を計算する。

位置・姿勢推定器によって推定される  $t$  ステップでの自身の位置・姿勢  $p(t)$  は、 $t-1$  ステップにおいて採用したモータコマンド  $u(t-1)$  と  $t-1$  ステップでの位置・姿勢  $p(t-1)$  を変数とする関数  $g$  によって以下のように決定される。

$$p(t) = g(p(t-1), u(t-1)) + \epsilon \quad (4)$$

ここで  $\epsilon$  は、ロボットの空間認知が不正確であることによって生じる位置・姿勢の推定誤差である。

### 3.2 養育者の関わりモデル

Campos[5] は、乳児の活動範囲が拡大するにつれて、乳児は不安を覚え、養育者は危険防止や心配のために乳児に積極的に声掛けをするようになると述べている。移動によって不安を覚えた乳児は、養育者の積極的な声掛けに応じて頻りに振り返り、安心を得ようとするのではないかと考える。振り返ることで相手の位置が確認できるため、このような養育者の呼びかけに対する振り返り行動は乳児が正確に自身の位置・姿勢を推定するために役立っているのではないかと考えられる。

これより本研究においては、ロボットは養育者の方へ振り返ったとき、正確な自身の位置・姿勢情報を得ることができるものとする。ここでは便宜的に、推定誤差を含まない位置・姿勢

$$p^{true}(t) = g(p^{true}(t-1), u(t-1)) \quad (5)$$

を計算しておき、 $t = T_r$  ステップでの振り返り時に、

$$p(t) = p^{true}(T_r) \quad (6)$$

とする。このとき、ロボットの移動距離に対しての養育者の声掛けがどのようなタイミングでロボットに与えられるかがロボットの移動を伴う共同注意の発達に影響を及ぼすと考えられる。

## 4. 実験

提案するモデルを実ロボットに実装し、学習性能を評価する実験を行った。まず提案メカニズムによって、ロボットが移動を伴う共同注意を獲得可能であるかを検討し、次にロボットが移動することによる養育者の関わりの変容と移動を伴う共同注意の学習との関係について検討する。

### 4.1 実験設定

実験環境を Fig.4 に示す。この環境にはロボットと人間、複数の対象物が存在し、その位置は Fig.4 にある A~R の 18ヶ所に、ランダムに配置される。ここで Fig.4 の A~L に対象物が配置される場合、対象物はロボットから見て視野内に、M~R の場合は視野外に位置することになる。ロボットが対象物へ移動し始めてからその対象物へ到達するまでを 1 試行とし、各試行

ごとに対象物の位置は変更される。人間は必ず同じ対象物を見ることとし、ロボットは環境中の対象物を等確率で見るとする。また今回は実験の高速化のために、ロボットと人間との初期距離  $d_0$  を一定とした。

Fig.5 に実験の外観と使用したロボットを示す。このロボットは直進・回転によって移動することができ、頭部にカメラを備えている。

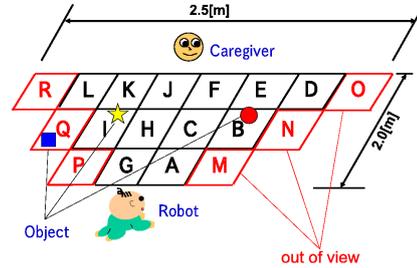
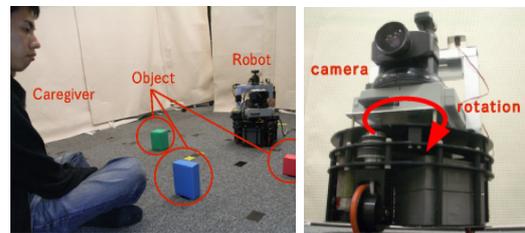


Fig.4 The experimental environment



(a) The overview of the experiment

(b) Robot

Fig.5 An experimental environment of joint attention with locomotion

### 4.2 移動を伴う共同注意獲得実験

まず、環境中に 3 個の対象物が存在する場合に提案メカニズムにより移動を伴う共同注意を獲得できるかを確認する実験を行った。本実験ではゲートとして用いられる (3) 式の  $\alpha$ ,  $\beta$  を  $\alpha = 150.0$ ,  $\beta = 20.0$  とした。Fig.6 に、実験結果を示す。Fig.6 は移動を伴う共同注意の成功率の 50 施行ごとの移動平均を示しており、横軸が試行回数、縦軸が共同注意の成功率を表している。これより学習後期になるにつれて共同注意の成功率が上昇していることが確認でき、提案メカニズムによって移動を伴う共同注意を獲得できたことがわかる。

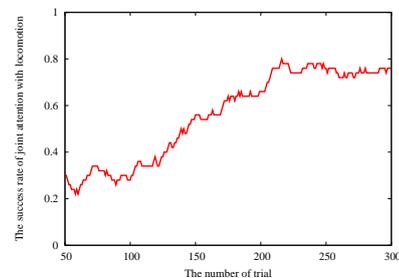


Fig.6 The success rate of joint attention with locomotion

### 4.3 養育者の関わりが共同注意発達に及ぼす影響の検証実験

Campos[5]の述べたような、乳児の振り返りを引き起こす養育者の関わりが、空間認知が不正確なロボットにおける移動を伴う共同注意の学習にどのような影響を及ぼすかを検証するために、移動距離が増すにつれて養育者の方へ振り返る頻度が高くなる場合と、移動距離が増しても常に一定周期で振り返る場合とを比較した。振り返りのタイミング  $T_r$  は Fig.7 に示すように与える。比較のため双方の振り返り回数  $r$  を同じにし、振り返りのタイミングのパターンのみを変更している。Fig.7の(a)が移動距離が増すにつれて振り返りの頻度が高くなる場合であり、Fig.7の(b)が移動距離が増しても常に一定周期で養育者の方へ振り返る場合である。また、Fig.7の横軸はステップ数を表し、今回の実験環境ではOやRに達したときに約200ステップとなる。

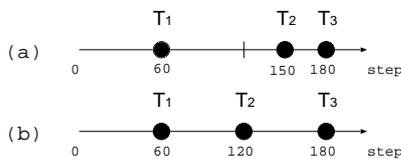


Fig.7 The pattern of looking-back timing

実験環境は Fig.4 の環境であるが、今回のこの実験に関しては、環境中の対象物は1個とし、A~Lすなわち全て視野内に配置されるものとする。実験の高速化のため、本実験ではゲートとして用いられる(3)式の  $\alpha$ ,  $\beta$  を  $\alpha = 75.0$ ,  $\beta = 20.0$  としている。それぞれのケースで学習を行い、学習開始から150回目の結合荷重を用いてパフォーマンスを比較した。パフォーマンスの評価はA~Lにおいて10回中何回共同注意が成功したかで行う。成功の判定規準としては、対象物を視野内にある大きさで捉えることができたなら成功とみなす。パフォーマンス結果を Fig.8,9 に示す。実験結果より、移動距離に伴い振り返りの頻度が高くなる場合 (Fig.8) の方が、一定の周期で振り返る場合 (Fig.9) に比べて、高い成功率を示していることがわかる。自分の近くや正面などの比較的移動距離の短い位置では成功回数に大きな違いはないが、B,D,I,Lのように移動距離の長い位置では、一定の周期で振り返る場合ではほとんど成功できていない。逆に、移動距離に伴い振り返りの頻度が高くなる場合は、移動距離の長い位置でも短い位置と同じくらいの成功回数を示している。この結果は、移動するにつれてロボットの振り返りが増えることで、ロボットの共同注意獲得が促進されることを示しているといえる。

### 5. おわりに

本報告では、長井らの手法 [3] を拡張し移動を考慮することによって、自律的に移動を伴う共同注意を獲得できるモデルを提案した。そして、実ロボットによる提案モデルの検証実験を通じて、自己移動についての空間認知が不正確な場合に、自己移動経験とそれに伴う養育者の関わりの変容が移動を伴う共同注意発達に影

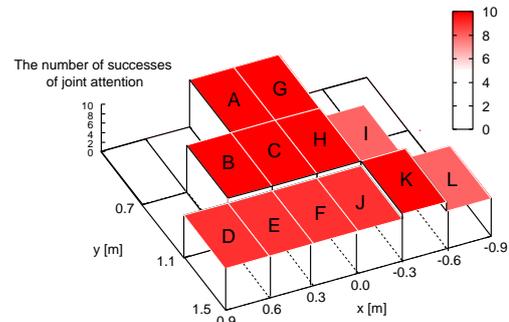


Fig.8 The case of more frequent looking-backs as the robot moves farther.

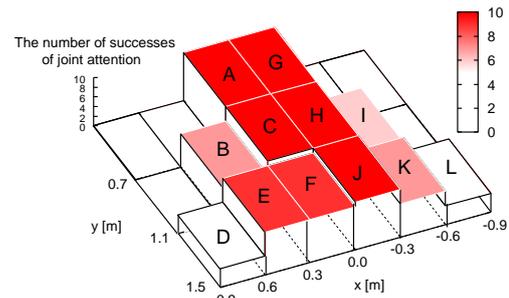


Fig.9 The case of the constant time looking-back

響を及ぼし得ることを示した。この結果は、Campos[5]の知見を支持するものであると言える。

本論文では空間認知の発達を考慮していないが、ヒトの乳児においては共同注意と空間認知が同時期に発達するようである。また、実際の乳児においては、本論文で取り扱ったような移動を伴う共同注意のみではなく、従来研究で取り扱われていたような首を振ることによる共同注意行動も無視できない。従って、養育者の関わり方が空間認知及びこれら二つの共同注意の能力の共発達にどのような影響を及ぼし得るかという視点から、乳児の発達過程のモデル化を今後進めていく予定である。

### 参考文献

- [1] H. Kozima, H. Yano: "A Robot that Learns to Communicate with Human Caregivers", In Proceedings of the First International Workshop on Epigenetic Robotics, 2001.
- [2] 浅田稔, 石黒浩, 國吉康夫: "認知ロボティクスの目指すもの", 日本ロボット学会誌, 17, 1, pp.2-6, 1999.
- [3] 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, 19, 1, pp.10-19, 2004.
- [4] G. Butterworth: ジョイント・アテンション 心の起源とその発達を探る, chapter 2 知覚と行為における心の起源, pp.29-39, ナカニシヤ出版, 1999, 大神英裕監訳.
- [5] J. J. Campos, D. I. Anderson, M. A. BarbuRoth, E. M. Hubbard, M. J. Hertenstein, D. Witherington: "Travel Broadens the Mind", *Infancy*, 1, 2, pp.149-219, 2000.
- [6] J. Gabin Bremner: 乳児の発達 *Infancy*, 3 知覚の発達, pp.128-130, ミネルヴァ書房, 1999, 渡部雅之訳.
- [7] 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予稿集, 2003, CD-ROM, 3B34.