

視線の認識と制御の共進化に基づくコミュニケーションの成立に対する 構成論的アプローチ

高野 雅典 ††, 有田 隆也 †
名古屋大学 大学院情報科学研究科 †
日本学術振興会特別研究員 ‡

概要 ヒトのコミュニケーションにおいて、入力器官である目は、自分の意図や願望を表示する器官という側面もあり、これに応じた視線検知モジュールは心を成立させる基盤と考えられている。本研究は、視線制御の形質に基づく、心を読むことと、読まれることを前提とした他者操作の間の共進化を含むコミュニケーションの成立メカニズムを構成論的手法により探ることを目的とする。本稿では、衝突回避タスクを対象として各エージェントが他個体の視線方向に応じて自分の視線を制御するエージェントベースモデルを設計し、進化シミュレーションを行った。その結果、視線を進行方向からそらすコストの存在にもかかわらず、視線を動かすことの適応性が示された。さらに、視線のもつ役割に関して相互情報量などを用いて詳細に解析した。

Emergence of Communication based on gaze control through the Coevolutionary Dynamics of Mind Reading and Manipulation of Others

Masanori Takano†† and Takaya Arita†
Graduate School of Information Science, Nagoya University†
JSPS Research Fellow‡

Abstract: Human eyes are sophisticated detectors but also work as indicators of their intentions and desires. Depending on these functions, humans evolved the Eye-Direction Detector in their minds, which plays a critical role in social recognition. This paper explores the emergence of communication based on gaze control as a result of the coevolutionary dynamics of “mind reading” and “manipulation of others”. We construct an agent-based model in which agents interpret the gaze of others and control their own gaze in a collision avoidance task, and conduct evolutionary simulations. We have shown by computing mutual information and correlation coefficients that a kind of communication based on gaze movement has emerged although agents have implicit and explicit costs of taking their eyes off their directions of movement.

1 はじめに

多くの場合、目を持つ生物は、自らの生存や繁殖において重要なものに視線を向ける。ならば、他個体の視線追従が可能なことによって他個体が注意を払っている食料、配偶者や天敵に気づくことができる可能性がある。とすると、入力器官である目は自分の意図や願望を表示する器官という側面を持つことになる。そのため、多くの生物種において他個体の視線を読む能力が徐々に進化してきたと考えられ、コミュニケーションにおいても重要な役割を果たすと思われる [3]。このような視線検知モジュールは心を成立させる基盤と考えられている [1]。

このように視線はその個体に関する多くの情報を表すものであるため、読まれる側にとっての有益、不益はその状況によって変わる。利害が一致しており、互いの行動を調整しあうことが重要となるような協調的な状況では、視線を読むことと読まれることは両者にとって有益に働くと考えられる。逆に競合的な状況では、自分の行動の手がかりになる視線を相手に読まれることは不利になるであろう。

いずれにせよ個体は他個体の行動を正確に予測することが重要であるが、予測される個体は、この予測能力を予測者の振る舞いを操作するために利用することができる [6]。例えば、霊長類では視線が読まれることを利用した欺きを行うことが観察されている [2]。しかし、予測されること、または予測されてし

まうことが、その個体にとって有益ならば、予測の手がかり（例えば視線）を媒介としたコミュニケーションが進化すると考えられる [6]。例えば小林ら [5] は、霊長類の多くの種の目の構造を調べ、多くが他個体に視線が読まれにくい目の構造を持つこと、ヒトの目は視線を強調するような特異的な構造を持つことを示し、ヒトの視線がコミュニケーション装置としての機能を持っている可能性を示唆した。個体間の利害が一致している状態を想定したコミュニケーションの成立に関する研究は、これまでもなされてきた [8, 7, 4] が、本研究では一方の利益と他方の利益と必ずしも一致しないような複雑な環境を想定する。

本研究では、前述したような視線の性質を一般化して、コミュニケーション基盤の成立という観点から、“他個体の行動予測”と“予測されることを前提とした操作”の2方向の選択圧に基づく共進化に焦点を当てる。そのために人混みの中での移動という具体的な場面を想定し、物理的に状況付けられた群集の衝突回避行動モデルを設計し、視線の認識と制御の共進化シミュレーション実験について論ずる。

2 モデル

他個体の行動予測とそれを前提とした操作の共進化について議論するために、次のようなエージェントベースモデルを設計した。本モデルは、集団の中で他個体の相対位置、進行方向や視線の方向の情報を得て、その上で自分の移動を決定する行動を対象とした、物理的に状況付けられたモデルである。環境内の複数のエージェントは、個々に設定されたスタート地点からゴール地点まで速く移動することを目的とする。ただし、エージェント同士が衝突すると移動速度が大きく低下する。また、他者を避けなくても必要以上の距離を移動しなければならなくなる。そのため、他個体の行動予測とそれを前提とした操作をするなど、効率よく衝突回避をすることが必要である。

エージェントの適応度は次の式に従って与える。

$$fitness = \sum_{i=1}^G \frac{distance_i}{t_i} + \frac{distance_{G+1} - d}{t'}$$

G はゴールについての回数、 $distance_i$ は $i-1$ 番目のゴールから i 番目のゴールの距離、 t_i は $i-1$ 番目のゴールに着いてから i 番目のゴールに着くまでにかかった時間（ただし、 $i=1$ の場合は最初に配置さ

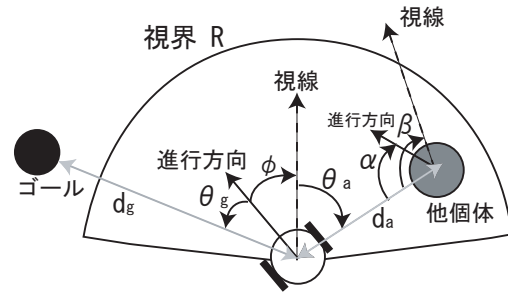


図1 エージェントのセンサー入力

れた場所からの距離、時間とする)、 d はタスク終了時の位置とゴールの距離、 t' は G 番目のゴールについてからタスク終了までの時間である。

エージェントは対向2輪の車輪移動型とし、扇形の視界 R を持つ (図1)。エージェントが得る情報はゴールの相対位置 (d_g, θ_g)、自分の視線の角度 (ϕ)、視界内の最近傍の他エージェントの情報 ($d_a, \theta_a, \alpha, \beta$) である (図1)。ここで、 d_g はゴールまでの距離、 θ_g は進行方向 (体の向き) に対するゴールの角度、 ϕ は進行方向に対する視線の角度、 d_a は他個体との距離、 θ_a は視線に対する他個体の角度、 α は他個体から自分を見た方向に対する他個体の進行方向の角度、 β は他個体から自分を見た方向に対する他個体の視線の角度とする。角度は右回りを正とする。そして、車輪の接地面の速度 w_r, w_l と視線の角速度 $\Delta\phi$ を出力する。ただし $0.0 \leq w_r, w_l \leq 1.0$ 、 $-\pi < \phi < \pi$ 、 $-\pi/50.0 < \Delta\phi < \pi/50.0$ とする。

エージェントの移動は上記の w_r, w_l から次のように決める。

$$\Delta a = \frac{w_r - w_l}{2r}, \quad (1)$$

$$v = \frac{w_r + w_l}{2r} \quad (2)$$

a はエージェントの進行方向、 v は速さ、 r はエージェントの半径である。

本研究は、視線はそのエージェントの状態や行動に関する情報がある程度表すものであると考えている。本モデルでは視線を動かすことで視界 R が動くため、視線は見ている方向を表すものである。さらにエージェントの状態や行動を表す度合いを連続的に調節できるようにするため、視線の方向 ϕ によってエージェントの移動速度 v に次のようなコストをかける。

$$v = v \times (-c|\phi| + 1)$$

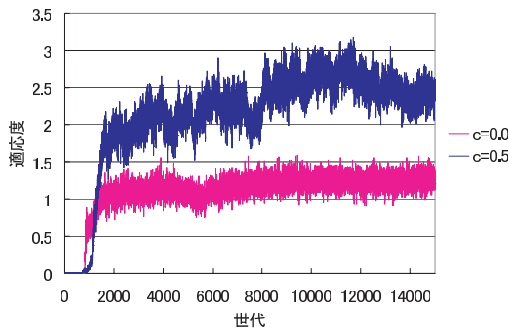


図2 進化における平均適応度の変化 ($c = 0.0, c = 0.5$)

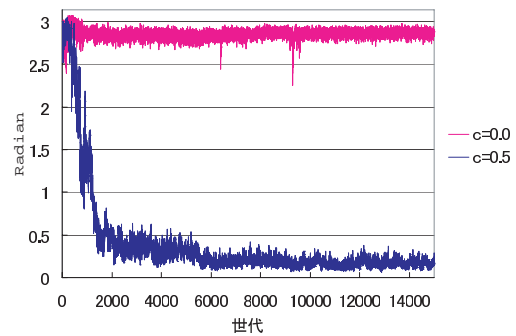


図3 進化における視線の角度の大きさ $|\bar{\phi}|$ の平均の変化 ($c = 0.0, c = 0.5$)

$c \geq 0$ はコストの大きさである。ただし、 $v < 0$ ならば $v = 0$ とする。これにより、 c が大きい場合、エージェントは進行方向へ視線を向けなければ速く移動することができなくなり、そのエージェントの次の行動を表す度合いが高くなる。このようにして、視線を進行方向に向けないと、速度が落ちるといふこのような明示的なコストと、視界内に他個体を認識しにくく適切な衝突回避行動がしにくくなるという非明示的なコストの両者を考えることにする。

3 シミュレーション実験

エージェントは半径 $r = 0.5$ の円形とし、視界 R は半径 5、角度 π の扇形とする。衝突時の速さは通常の 0.0004 倍とする。エージェントの制御にはエルマン型リカレントニューラルネットを用いる。そのリカレントニューラルネットは入力ニューロンを 7 つ、中間ニューロンを 7 つ、出力ニューロンを 3 つ持つ。ゴールは 100×100 の正方形の範囲内にランダムに配置する。エージェントの初期配置もその範囲内にランダムで行う。進化の操作は、リカレントニューラルネットの結合重みを実数値 GA を用い進化させることとする。GA による進化はエージェント数は 100 として突然変異とルーレット選択により 15000 世代行った。

以上の設定で c を変えて進化シミュレーションを 5 試行ずつ行った。

行った進化シミュレーションのうち、典型的な進化の過程を図 2, 3 に示す。図 2 は平均適応度の変化である。また、各個体の視線の角度 ϕ の平均の絶対値を各世代の集団で平均したものの変化を図 3 に示す。図 2 より、コスト c が 0.5 のときのほうが 0.0 のときよりも適応度が高く進化したことがわかる。また、図 3 より $c = 0.0$ のときは $|\phi|$ が π に近い値へ進化

し、 $c = 0.5$ のときは $|\phi|$ が 0.0 に近い値へ進化した。つまり、 $c = 0.0$ のときは視線が進行方向とは逆を向くように進化し、 $c = 0.5$ のときは視線が進行方向を向くように進化したことを示している。これらのエージェントの振る舞いについて観察した。 $c = 0.0$ のエージェントはゴールへ直進する。視線は後ろを向いており進行方向の他個体を認識することができないため衝突回避を行わない。 $c = 0.5$ では衝突回避をしながらゴールへ向かう。 $c = 0.5$ の場合、 $|\phi|$ を小さくしなければ移動することができない。そのため $|\phi|$ を小さく保つように進化してから、ゴールへ向かうように進化したと考えられる。このとき、視線は進行方向を向いているため進行方向の他個体を認識することができる。衝突はエージェントの適応度を下げるため、衝突回避行動をとるように進化したと考えられる。一方、 $c = 0.0$ 、つまり、進行方向からはずれると移動速度が小さくなるという明示的なコストがない場合は、視線が進行方向を向くような進化をしなかった。視界が前を向かないことによる衝突しがちという非明示的なコストだけでは、視線をうまく進行方向に向ける制御法を探索するための進化圧としては弱かったと考えられる。その結果、進行方向の他個体を見ないエージェントは衝突回避行動も進化しなかったと考えられる。

次に、各 c の 5 試行中最も適応度の高かった集団をそれぞれ選び、振る舞いを解析した。これ以降の解析は全てこれらの集団を用い、進化において 1 世代の適応度を計測した操作を 10 回行い平均したものを示す。

図 4 に適応度を、図 5 にエージェントあたりの平均衝突回数を示す。また、視線の角度 $\phi = 0$ に固定して、同じ集団を用い適応度を計測したのも同図に示す。 $c = 0.0$ の場合、衝突回数は多く適応度は低

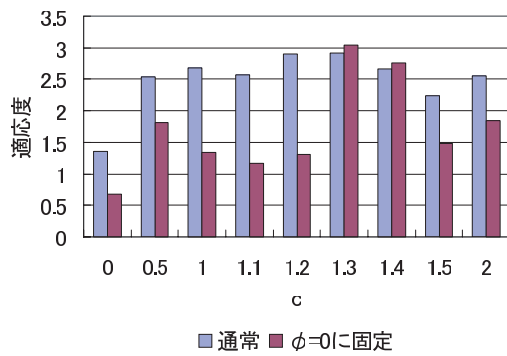


図4 最終世代の適応度(通常)と、その集団の視線の角度 ϕ を 0 に固定し計測した適応度 ($\phi = 0.0$ に固定) の比較

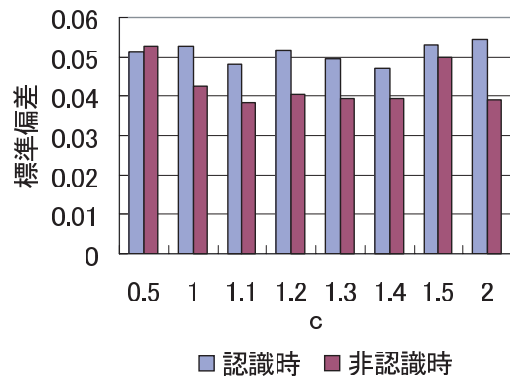


図6 他個体認識時と非認識時の視線角度の標準偏差の比較

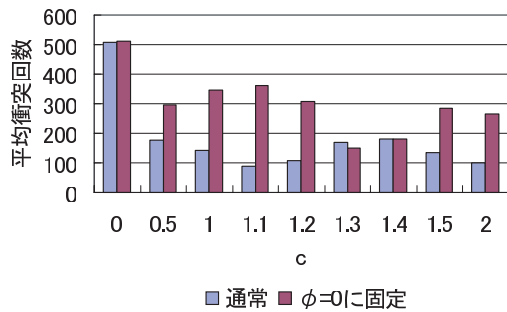


図5 最終世代の集団のエージェントあたりの平均衝突回数(通常)と、その集団の視線の角度 ϕ を 0.0 に固定し計測したエージェントあたりの平均衝突回数 ($\phi = 0$ に固定) の比較

くなった。前述したように $c = 0.0$ では視線を進行方向に向けず衝突回避行動をとるような進化は難しい。そのため衝突が頻繁に起こり適応度が低くなったと考えられる。 $c > 0.0$ の場合、衝突回数は少なく集団の適応度が高くなった。これらは前述の $c = 0.5$ と同様にエージェントは視線を進行方向へ向け衝突回避行動をとるように進化したと考えられる。

前述のように、 $c > 0.0$ の場合は視線をずらすコストにより $|\phi|$ を小さく保つように進化したと考えられる。ならば $\phi = 0.0$ の値に固定すれば、 c によるコストは無くなるため適応度の上昇が予想される。ここではエージェントが視線を動かすことが適応度にどのような影響を与えるかを検証するために、視線を動かす通常の設定と $\phi = 0.0$ に固定にした設定の集団の適応度を比較する。多くの集団が $\phi = 0.0$ に固定にしたことで適応度が下がった(図4)。 $c = 0.0$ の場合、視線を前に向けずゴールに向かうため、 $\phi = 0$ という状況はまれである。そのため、その状況に適

応しておらず、 $c = 0.0$ の集団の適応度は下がったと考えられる。 $c > 0.0$ の場合には $c = 1.3, 1.4$ を除き集団の適応度は減少した。このとき平均衝突回数は $\phi = 0$ に固定しているほうが多い。つまり、 $\phi = 0.0$ に固定すると c によるコストは無くなるが、衝突が起こりやすくなり適応度が下がったと考えられる。よって、エージェントが視線を利用することでうまく衝突回避を行っていると考えられる。

視線を衝突回避に用いているのならば、他個体が視界 R にいる場合(他個体認識時)といない場合(他個体非認識時)で、視線の動き方は異なると考えられる。それについて調べるために、他個体認識時と他個体非認識時に分けて、各々の視線の角度 ϕ の標準偏差を調べた。図6に各個体の ϕ の標準偏差を集団で平均したものを c ごとに示す。同図で示しているのは、14400, 14600, 14800, 15000 世代で標準偏差を計測し、それらを平均したものである。ただし、 $c = 0.0$ の場合は視線が進行方向を向いおらず衝突回避に視線を用いていないと考えられるので省略する。 $c = 0.5$ の場合を除き、他個体認識時の方が他個体非認識時よりも標準偏差が大きい値を示した。このことから他個体認識時には、他個体非認識時と比べ視線を動かす操作を行っていると言える。 $c = 0.5$ において他個体非認識時の標準偏差が高いのは視線をずらすことによるコストが少ないためであると考えられる。

相手の視線に関する入力 β はどの程度エージェントの振る舞いに影響を与えているのか、視線の操作に関する出力 $\Delta\phi$ はどの程度相手から影響を受けているのかについて調べるために、エージェントの他個体に関する入力と出力の相互情報量を計測し、比較した。入力は相手の相対位置 $p = (d_a, \theta_a)$ 、視線の

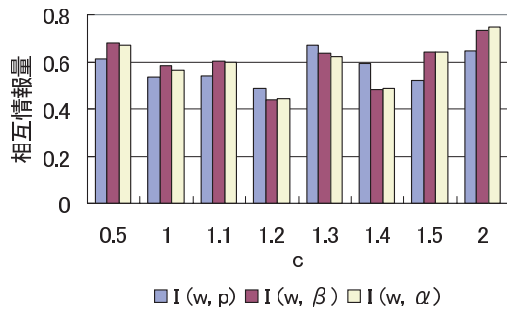


図7 移動の出力 w と他個体に関する入力 p, β, α の相互情報量 I の比較

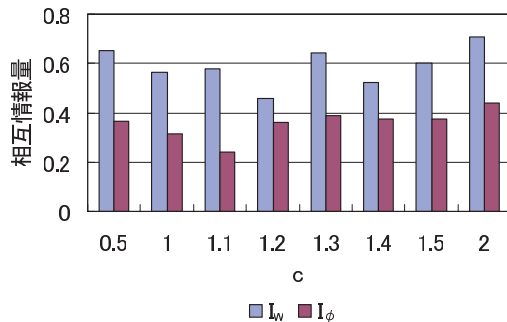


図8 移動の出力 w に関する相互情報量 I_w と視線操作の出力 $\Delta\phi$ に関する相互情報量 I_ϕ の比較

方向 β , 体の方向 α の3つに分け, 出力は車輪の速度 $w = (w_l, w_r)$ と視線の操作 $\Delta\phi$ の2つにわけて全ての組み合わせについて計測した.

図7に移動出力に関する相互情報量 $I(w, p)$, $I(w, \beta)$, $I(w, \alpha)$ を示す. $I(w, p)$, $I(w, \beta)$, $I(w, \alpha)$ は同程度の値を示している. 衝突回避において位置 p や進行方向 α は他個体の振る舞いに直結するものであり重要な情報である. $I(w, p)$, $I(w, \beta)$, $I(w, \alpha)$ が同程度の値を示していることから, エージェントは移動の出力 w を決定する際に, 相手の視線の方向 β の情報を利用していることがわかる. 図8に移動の出力 w に関する相互情報量 I_w と視線操作の出力 $\Delta\phi$ に関する相互情報量 I_ϕ を示す. I_w は移動の出力 w に関する相互情報量 $I(w, p)$, $I(w, \beta)$, $I(w, \alpha)$ の平均値, I_ϕ は視線操作の出力 $\Delta\phi$ に関する相互情報量 $I(\Delta\phi, p)$, $I(\Delta\phi, \beta)$, $I(\Delta\phi, \alpha)$ の平均値である. 全ての c において他個体の情報と移動の出力の相互情報量 I_w は高い値を示し, 他個体の情報と視線操作の出力の相互情報量 I_ϕ も, I_w に比べ低いもの, ある程度の値を示した(図8). よってエージェントは他個体の情報を用いて自分の視線を操作していると考えられる. 以上より, エージェントは他個体の

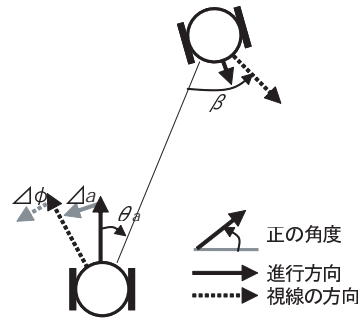


図9 相関係数計算の対象とした属性値

振る舞いに直結する位置 p や進行方向 α を用いて衝突回避をするだけでなく, 視線によって相互に影響を与え合っていると考える.

以上より, エージェントは衝突回避行動タスクにおいて, なんらかの形で視線を使用する行動を進化的に獲得したと考えられる. 以下では, エージェントが視線をどのように用いているかについて解析を行う.

エージェントの振る舞いを表す値(進行方向の角速度 Δa , 視線の角速度 $\Delta\phi$)とそのときのセンサー入力(θ_a, β)の相関係数 $corr$ を計測した(図9). 加えて, ϕ と Δa の相関係数も計測した. 値は視界内に他個体が存在している場合についてのみ観測した. 表1に各 c において最も高い適応度を示した集団の相関係数を示す. $c = 0.5, 1.2, 1.3, 1.5, 2.0$ において, $corr(\Delta a, \theta_a)$ が負, $corr(\Delta a, \beta)$ が正, $corr(\Delta\phi, \theta_a)$ が負, $corr(\Delta\phi, \beta)$ が正, $corr(\Delta a, \phi)$ が正という傾向がみられる. また, それら以外の c についても部分的にはあるが同様の傾向を示している. $corr(\Delta a, \theta_a)$ が負とは, 相手との相対角度 θ_a とは逆方向へ進行方向を変える, つまり回避行動をとることを表す. $corr(\Delta\phi, \theta_a)$ が負とは, 相手との相対角度 θ_a とは逆方向へ視線を向ける, つまり相手から視線をそらすことを表す. $corr(\Delta a, \beta)$ が正とは, 相手の視線の向いていないほうへ進行方向を向けることを表す. $corr(\Delta\phi, \beta)$ が正とは, 相手の視線の向いていないほうへ視線を向けることを表す. $corr(\Delta a, \phi)$ が正とは, 自分の視線の方向に進行方向を向けることを表す.

以上より, エージェントの衝突回避において, 典型的な記述としては次のようなコミュニケーションが個体間に創発していると推測される. エージェントは互いに自分の視線を相手の視線の向いていないほうへ向けようとする ($corr(\Delta\phi, \beta)$), その結果,

表 1 相関係数

c	$corr(\Delta a, \theta_a)$	$corr(\Delta a, \beta)$	$corr(\Delta \phi, \theta_a)$	$corr(\Delta \phi, \beta)$	$corr(\Delta a, \phi)$
0.5	-0.60	0.16	-0.62	0.45	0.37
1.0	-0.49	0.09	0.06	0.27	-0.07
1.1	-0.62	0.48	-0.05	0.06	0.15
1.2	-0.58	0.37	-0.23	0.23	0.30
1.3	-0.55	0.42	-0.41	0.48	0.35
1.4	-0.48	0.11	-0.28	0.30	0.14
1.5	-0.53	0.28	-0.26	0.29	0.12
2.0	-0.69	0.58	-0.63	0.70	0.33

互いに視線をそらしあうことになる。そして互いに相手の視線が向いていないほうへ移動しようとする ($corr(\Delta a, \beta)$)。つまり、視線はその個体が進行方向を左右どちらへ向けるかを表すもの ($corr(\Delta a, \phi)$) であり、衝突回避の際に左右どちらへ避けるかを調整するものになったと考えられる。図 5 で視線を $\phi = 0.0$ に固定した設定では通常の設定よりも衝突回数が多くなったのも、 $\phi = 0.0$ に固定したことにより上記のような視線の調整機能が無くなったためであると思われる。

4 まとめ

視線制御の形質に基づく、心を読むことと、読まれることを前提とした他者操作の間の共進化に対する計算論的モデルを設計し、進化シミュレーションを行った。その結果、視線を進行方向からずらしたときにコストが存在するにもかかわらず、相互に視線を動かして自分の回避していく方向を知らせることにより個体間の競争的な関係をうまく調整するコミュニケーションが創発することを示した。この解釈は一連の解析結果に基づいて行ったものであり、それ以外にも何らかの意味がこめられている可能性があり、今後の検討課題としたい。

参考文献

- [1] S. Baron-Cohen. *Mindblindness: An Essay on Autism and Theory of Mind*. The MIT Press, 1995.
- [2] R. Byrne and A. Whiten, editors. *Machiavelian Intelligence: Social Expertise and the Evolution of Intellect in Monkeys, Apes, and Humans*. Oxford University Press, Oxford, 1988.

(藤田 和生, 山下 博志, 友永 雅巳 監訳 (2004). 『マキャベリの知性と心の理論の進化論』. ナカニシヤ出版.)

- [3] 遠藤利彦 (編). 読む目・読まれる目: 視線理解を通してみる心の源流. 東京大学出版会, 2005.
- [4] Bruno Galantucci. An experimental study of the emergence of human communication systems. *Cognitive Science*, Vol. 29, pp. 737–767, 2005.
- [5] H. Kobayashi and S. Kohshima. Unique morphology of the human eye. *Nature*, Vol. 387, pp. 767–768, 1997.
- [6] J. R. Krebs and R. Dawkins. Animal signals: Mindreading and manipulation. In *Behavioural ecology: An evolutionary approach*, pp. 380–402. Blackwell, Oxford, 1984.
- [7] J. H. Miller and S. Moser. Communication and coordination. *Complexity*, Vol. 9, No. 5, pp. 31–40, 2004.
- [8] 柴田克成, 伊藤宏司. 利害の衝突回避のための交渉コミュニケーションの学習—リカレントニューラルネットワークを用いたダイナミックコミュニケーションの学習—. 計測自動制御学会論文集, Vol. 35, No. 11, pp. 1346–1354, 1999.