

コーディネーションゲームにおける 記号生成確率モデルと「意味」の推定

鮫島和行^{†1} 金野武司^{†2} 李 冠宏^{†3} 奥田次郎^{†4} 森田純哉^{†5} 橋本敬^{†3}

概要: ヒトは、記号に意味を持たせ、その情報交換を通じて協力・協調行動を行うことで、社会を形成している。記号への意味づけや合意を、ヒトはどのように獲得または創発しているのだろうか。本研究では、2 者が協調行動を発現すると成功するゲーム課題において、ゲーム上での記号使用の学習過程を記述する確率モデルを提案する。実際の行動実験の結果から、モデルによる記号の意味の変遷を解析した。その結果、字義的意味の成立の次に言外的意味が成立するなど、認知過程が複数存在することがわかり、その変遷を可視化する事ができた。確率モデルによる認知過程の分離は、脳波などによる対応する脳内過程を検討するために重要である。

キーワード: 確率モデル, バイズ推定, コミュニケーション, 実験記号論

Statistical inference of meaning by a generative model of signal communication in the “coordination game”

KAZUYUKI SAMEJIMA^{†1} TAKEHSI KONNNO^{†2} ADAM LI^{†3}
JIRO OKUDA^{†4} JUNYA MORITA^{†5} TAKASHI HASHIMOTO^{†3}

Abstract: Human beings form a society by giving meaning to symbols and performing cooperative and cooperative behaviors through exchanging information by symbols. How do humans acquire or emerge meaning and agreement on symbols? In this research, we propose a probabilistic model describing the learning process of symbol use on a game in a “coordination-game task” that succeeds when two participants develop cooperative behaviors. From the results of the actual behavioral experiments, we analyzed the transition of the meaning of the symbols by the statistical model. As a result, cognitive processes such as “literal meaning” and “hidden meaning” existed, and found that there is an order in the process of establishment through symbol learning. Also, we were able to visualize the transition in the learning. Separation of cognitive processes by probabilistic models is important for studying neural information processing such as brain waves corresponding to cognitive processes.

Keywords: Statistical model, Bayesian inference, Communication, Experimental Semiotics

1. はじめに

人間は、互いの意図を伝達する言語コミュニケーションによって、協調行動や協力行動を実現する事ができる。言語コミュニケーションの基礎過程は、他者に意図を伝達する記号コミュニケーションであるといえる。しかし、ヒトの記号コミュニケーションの学習過程や、記号コミュニケーションの神経基盤の多くは未解明である。実験記号論の実験パラダイム[1][2]では、二者間で意味の無い記号の送

受信によって課題を遂行する行動を観察し、コミュニケーション成立過程を分析している。この実験パラダイムでは、いかにしてメッセージや記号形式が成立するのかを注視しており、人工言語を創発する過程を捉えることができる。

本研究では、実験記号論の実験パラダイムにおいて、二者間で行った際の記号コミュニケーションと、その際に課題を遂行する行動上での「意味」の学習過程を解析する手法として、確率的な記号生成モデルとそのバイズ推定手法を提案する。また、実際にコーディネーションゲームと呼ばれる課題[3]における実験結果に適用し、実際の記号生成と行動選択から被験者が付与する「意味」の推定を行う。この「意味」の推定によって、被験者間での「意味」の合意過程、被験者の記号理解や記号の一貫性などを可視化する事ができることを示す。

^{†1} 玉川大学脳科学研究所
Brain science institute, Tamagawa University

^{†2} 金沢工業大学
Kanazawa Institute of Technology

^{†3} 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

^{†3} 京都産業大学
Kyoto Sangyo University

^{†4} 静岡大学 Shizuoka University

2. 記号コミュニケーション課題

本研究で用いる記号コミュニケーション課題としてコーディネーションゲームを用いた[3][5].コーディネーションゲームの目的は、二者間でお互い自分しか知り得ない情報を持ち、それぞれが制限された記号の送受信を行うことで情報交換と合意を形成し、協力行動を行うことである.二人は、互いに異なる実験室において画面と反応ボタンを使ってゲームを行うため、お互いの音声、映像など社会的シグナルは一切知ることができない.

コーディネーションゲームにおいて、被験者は4つの部屋のある地図上で、自分の位置を画面表示によって知らされる.二人の被験者は、お互いに他者の位置を知ることができない.次に被験者は、4つの図形から1つを選び、相手にそのメッセージを伝達する.そのタイミングは、それぞれの被験者が自由に決めることができるため、どちらか一方が先に相手に対して送信することができる.送信直後に相手の画面に図形が表示される.そのため、受信した図形を認識した上で相手に図形を送信することも可能である.ここでは、先に図形を選択して送信した被験者を「先手」、後に図形を送信した被験者を「後手」と呼ぶことにしよう.双方の記号の送受信が終了した時点で、被験者は自身の位置の移動を行う行動選択を行う.選択可能な行動は、現在の位置から隣の位置への移動(左右移動か上下移動)または、その場に止まる行動(停留)の3種類である.すなわち4つの部屋のうち、現在位置から対角にある部屋への移動は行う事ができない.移動の結果、二人の位置が一致していれば正解とし、双方にポイントが入る.この一連の記号送受信と行動を複数回行うなかで、二人の被験者が送受信する図形の意味を共有し、毎回移動後の位置を一致させるように行動選択を行うことがこのゲームの目的となる.

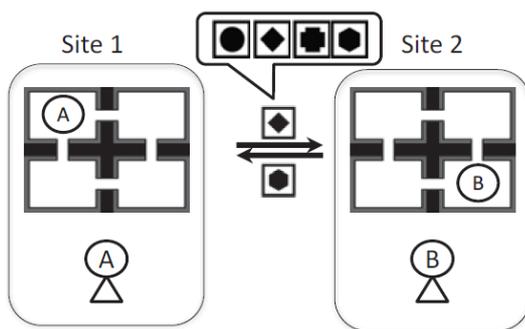


図1 記号コミュニケーションゲームの概要図

Figure 1 Symbolic communication game

このコーディネーションゲームにおいて、この目的を達成するために他者へ伝えなければならない情報、すなわちメッセージ記号の意味には2種類ある.一つは、地図上の位置、もう一つは、その位置が現在位置であるか移動後の位置であるのか、である.地図上の位置は4通りであるから

可能な情報量としては2bitあり、それが現在位置なのか移動後の位置なのかは1bitであるから、合計で3bitの情報を送る必要がある.しかし記号は4種類であるから最大2bitの情報のみを送ることしかできない.しかし、送る順序を用いることで、残りの1bitの情報を受け渡すことが可能となる.先手として送られた記号と、後手として送られた情報は異なる情報(現在位置か移動後位置か)であるのか、区分できれば良い.完全に相手の送信してくる情報が合意できていれば、行動選択として最適な行動を選ぶことで、移動先の位置を一致させる事ができる.

地図上の位置は、記号と一対一対応となるため、記号そのものが指し示す物理空間での情報と一致するが、その物理空間が現在自分のいる位置を指し示すのか、それともこれから移動する先の位置を指し示すのかは、文脈、すなわちここでは送信の順序によって規定される情報となる.

我々が使う自然言語でも同様に、同じ言葉を発しているのに文脈によって意味が異なる事態がしばしば発生する.「塩ありますか?」という発話は、仕事の中では「ありますよ」という返答だけで、なにもする事は無いが、食事中であれば、テーブルの上にある塩を手渡すだろう.後者の場合は「塩が存在するか?」ではなく「塩をとってください」という意味に変化する.読んで字のごとく理解すれば良い言語解釈を「字義の意味」、文脈によって変化する言語解釈を「言外的意味」と、ここでは呼ぶ.コーディネーションゲームにおいては、地図上の場所を理解することを「字義の意味」の共有、現在位置・移動後の位置を理解することを「言外的意味」として解釈することができる.

3. 記号生成確率モデル

コーディネーションゲームでは、被験者が記号メッセージを送信したのちに移動する行動選択を複数回行う.被験者は、複数回の試行を通じて「字義の意味」や「言外的意味」をお互いに合意・学習して移動後の位置が一致するようなコミュニケーションを成立させてゆく.しかし、このゲームでは、メッセージそのものや記号の形式の自然な成立過程が研究対象であるため、明示的にどのような意味で記号を使っているのかについては、被験者に直接訪ねていない.学習過程を考えるうえで、記号の送受信と、行動選択から、使っている記号の意味を推定する必要がある.

双方が送り合っている記号がどのような情報を持っているのかを、モデルにしたがって確率的に推定する問題を考える.注意しなければならないのは、対戦しているペアがどのように認知しているのかではなく、対戦外にいる第三者が、発信しているメッセージ記号と、そのときの現在位置と移動後の位置を複数回観測した際に、その被験者がメッセージ記号の意味を推定する問題であるということである.被験者を「確率的に記号を発信する確率過程」と見なして、その学習過程における確率パラメータを推定す

ることに相当する[4].

ある被験者が各試行で発生する記号を列であるとして $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ とする.これと対になる現在位置列 $C = [c_1, c_2, c_3, \dots, c_n]$ および, 移動後の位置列 $D = [d_1, d_2, d_3, \dots, d_n]$ が同時観測される.ここで x_i, c_i, d_i はそれぞれの要素が 1 か 0 であり, 要素の和が 1 であるようなベクトル $(0, 0, 1, 0)$ 等である. x_i については, 1 である要素は各記号の生成を表しており, c_i, d_i については, 4 つの部屋における現在位置, 移動後の位置である.ここで, 記号 x_i を生成する確率モデルを考えよう.記号は, 各記号と「地図上の位置」との間の変換行列 M によって c_i または d_i から生成されるとしよう. M は, 位置 c_i, d_i から記号 x_i を生成する 4×4 行列であり, 例えば

$$M_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

のような変換行列 M は要素が 1 か 0 であり, 各行各列の和が全て 1 である行列である.このような変換行列は 24 種類存在し, そのいずれかである.記号の「字義的意味」は, この変換行列によって表現される.

このとき, 現在位置の意味で記号を使っているのか, それとも移動後の位置の意味で記号を使っているのかを表す「言外的意味」を表す 1 または 0 である変数を y_i とする. y_i は i ラウンドに送った記号が現在位置を示す場合に 0, 行き先を示す場合に 1 となる変数であるとする.このとき言外的意味を含めて記号 x は y による線形結合によって

$$x = (1 - y)M_k c + yM_k d \quad (2)$$

と表される.しかし, 毎回の試行は, 特定の言外的意味 y , 特定の変換行列 M によって x が生成されるが, 外部からはどの y と M が使われているのかを知ることはできない.従って, 確率的に記号を生成するモデルを考えることになる. M を確率的記号マップとして考え, 現在位置または行き先位置から記号 x を生成する確率的マップと考える.すなわち M を 24 種類ある決定論的な記号変換行列の混合であると考えて

$$M = \sum_j^{24} P(j)M_j \quad (3)$$

と定義する.すなわち, 可能な 24 種類の場所から記号への記号変換行列のうち j 番目基底マップが選択される確率 $P(j)$ を, 与えられたデータから推定する問題になる.これに加えて, その記号を生成したときの言外的意味を生成する確率変数を μ とし, i ラウンド目の記号 x_i を生成する確率 $p(x_i | c_i, d_i, \mu)$ は

$$p(x | c, d, \mu) = (1 - \mu)Mc + \mu Md \quad (4)$$

となる.

字義的意味の推定は, 離散的な確率変数に対するパラメータ $P(j)$ を推定する問題なるが, μ は連続値の分布として推定される.すなわち言外的意味 y を推定する問題の場合, μ の分布を二項分布として, そのパラメータを求める問題

になる.二項分布のパラメータをデータに基づいてベイズ推定する問題の場合, その共役事前分布としてベータ分布を使う事ができる.ベータ分布は, パラメータ a, b に対して

$$p(\mu) = \text{Beta}(\mu | a, b) = \frac{\Gamma(a)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \mu^{a-1} (1 - \mu)^{b-1} \quad (5)$$

であり, 期待値は $\frac{a}{a+b}$ である.

共役事前分布とは, 事後分布の形が事前分布の形と同じ分布の形をしており, そのパラメータを変更するだけで, データからベイズの定理に従って更新できる分布をさす.すなわち, 今回は記号が与えられる毎に, 言外の意味の選択確率を表すパラメータの分布が更新され, それはベータ分布のパラメータである a_i, b_i をデータに基づいて更新し, μ の分布を求める問題となる.以上をまとめて, この推定問題における記号生成モデルのベイジアンネットワークの形で表すと図 2 のようになる.このベイジアンネットワークに従って, 各パラメータの分布が更新されることで, 観測者が, 被験者の発する記号と行動選択から被験者が用いている記号の意味について, 確率的に推定することを可能にする.

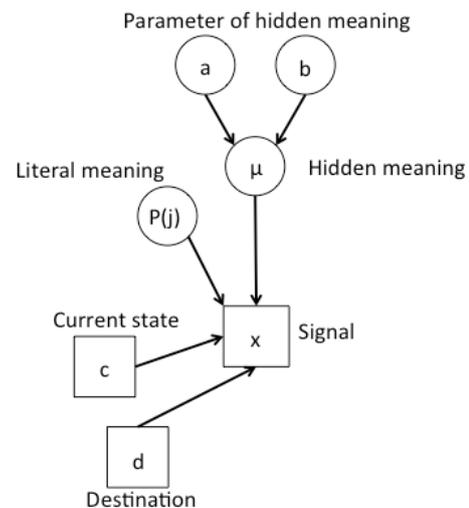


図 2 記号生成のベイジアンネットワーク構造

Figure 2 Bayesian network for signal generation in the coordination game

4. 字義的意味と言外的意味のベイズ推定

前節で定式化したように, 現在位置列 C , 行き先位置列 D , その時に送った記号列 X が観測されたとき, 記号変換行列の選択確率 $P(j)$ と言外的意味の確率分布 $p(\mu)$ を求める問題となる. μ の事前分布 (情報をえる前の思い込みの分布) として一様分布を仮定するならば ベータ分布のパラメータの初期値として $a=1, b=1$ としておけば良い.また, $P(j)$ の事前分布が完全に無情報であるならば, 24 種類の全ての基底マップを一様に選択する $P(j) = 1/24$ と仮定する事ができ

る.事前分布を無情報としたとき、次の手続きによって逐次的にベイズ推定を行うことができる.

記号 x , 現在位置 c , 行き先位置 d を観測したとき、言外の意味の事後分布を事前分布からベイズの式を用いて更新する.まず、基底記号マップの選択確率 $P(j)$ の事前確率 $1/24$ と式 (3) を用いて、確率的記号マップ M を計算する. M に基づいて言外的意味が、それぞれ現在位置、行き先位置であると仮定したときの各記号を生成する確率を要素とするベクトル P_c, P_d を計算する.

$$P_c = Mc, \quad (6)$$

$$P_d = Md \quad (7)$$

これらベクトルから実際に出力された記号 x の生成確率は $x^T P_c, x^T P_d$ となり、その比率をつかって μ の確率分布のパラメータ a, b の更新を

$$a_{i+1} \leftarrow a_i \gamma + \frac{x^T P_d}{x^T (P_c + P_d)} = a_i \gamma + \frac{x^T M d}{x^T M (c + d)} \quad (8)$$

$$b_{i+1} \leftarrow b_i \gamma + \frac{x^T P_c(x)}{x^T (P_c + P_d)} = a_i \gamma + \frac{x^T M c}{x^T M (c + d)} \quad (9)$$

として言外的意味の事後確率分布を更新することができる.ただし、 γ は $0 < \gamma < 1$ の定数パラメータであり、言外的意味が次の試行でも一貫して同一ではなく忘却をすると仮定した時の忘却パラメータである.

本来は、ベイズの式を使うと、1回観測したあとは2つのベータ分布の混合分布になる.その期待値をもとめると、ベータ分布の期待値と同値になる.すなわち、言外的意味の選択確率パラメータ μ の期待値は

$$\tilde{\mu} = \frac{a_i}{a_i + b_i} \quad (10)$$

となる.

基底マップの選択確率 $P(j)$ の更新には、言外的意味の期待値しか影響しないため、この期待値の更新を使って $P(j)$ を特定してゆくことができる.基底記号マップの選択確率の事後確率は、 x を生成する確率を尤度として更新される.

$$P(j|x) = \frac{x^T M_j \{(1 - \tilde{\mu})c + \tilde{\mu}d\} P(j)}{\sum_k^{24} x^T M_k \{(1 - \tilde{\mu})c + \tilde{\mu}d\} P(k)} \quad (11)$$

このとき、記号生成のための変換行列は理想的には1と0となるが、現実的には記号変換にある程度のエラーがある確率的なマップを仮定する方が自然である.すなわち、非常にまれな確率で、異なる記号を使ってしまう、という仮定である.この場合、記号変換行列を1と0の値ではなく、エラー率を ε として、例えば

$$M_j = \begin{bmatrix} 1 - 3\varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & 1 - 3\varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & 1 - 3\varepsilon \\ \varepsilon & 1 - 3\varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \end{bmatrix} \quad (12)$$

のような ε と $1 - 3\varepsilon$ の要素をもつ確率行列とする.ヒトが

エラーを行う可能性がなく、全く完璧に記号を生成するものとしてしまうと、一度間違えて記号を送信し、また同じ記号表を用いる場合に、一貫性が失われて推定が不安定になる可能性があるためである.エラー率は、記号表の一貫性を保つような推定のスムージングの役割を果たす.

また、被験者が記号変換行列の選択を次の試行で突然変更する場合も仮定に含める事ができる.すなわち、事後確率によって求められた $P(j)$ に、一定程度の変更確率 ξ を加えて正規化した確率を、次の試行の記号マップの事前確率として推定する.すなわち

$$P(j) \leftarrow \frac{P(j|x) + \xi}{\sum_k^{24} P(k|x) + \xi}. \quad (13)$$

ここまでは、記号が先手であるのか、後手で出した物であるのかに関して特に区別せずに論じてきた.コーディネーションゲームの特性から、先手であるか後手であるかによって、言外的意味を変更しながら相手に伝える事が、このゲームの成功につながる.従って、このパラメータ推定アルゴリズムを、先手として出した場合と後手として出した場合に分け、それぞれの条件付き確率 $p(\mu)$ の分布を推定する問題に分離することができる.ただし記号変換行列の選択に関する $P(j)$ については、先手と後手の条件を区別せずに推定し、言外的意味の部分だけを分けて更新、推定する事ができる.

5. 推定結果

健常被験者 40 名に 20 ペアに別れて実験に参加してもらい、脳波測定と同時に被験者の記号の送受信、行動選択の記録を行った.初期の位置は 12 試行毎に全ての組み合わせを尽くすように設定し、その組み合わせをランダムに入れ替えることで、双方の初期位置が均等になるように設定されている.このとき、被験者が記号生成モデルに従って記号の送信、受信を行った時の記号の意味を本論文の手法によって推定し $P(j)$ と $p(\mu)$ の分布およびその期待値を求めた.ここで、推定に対するパラメータは $\gamma = 0.99$, $\varepsilon = 0.0033$, $\xi = 0.0001$ として求めた.

両者の移動後の位置の一致率が最後の 12 試行において、完全に一致するペアは、20 組中 10 組であった.このペアを成功ペアと呼ぶ.成功ペアにおけるある被験者の推定の例を図 3 に示す.図 3 の表示は上から順に、(A)記号変換行列の選択確率 $P(j)$, (B) 12 試行毎の確率記号マップ M , (C) 先手の時の言外的意味の確率分布 $p(\mu)$ (カラーマップで表示) と期待値 (白線), (D) 後手の時の言外的意味の確率分布と期待値, (E) 記号送信手順 (先手/後手), (F) 各ラウンドでの言外的意味の尤度 (行き先である確率) であり、青が先手、赤が後手の場合の言外的意味の尤度, (G) 移動位置における成功・不成功(成功=1)を表している.

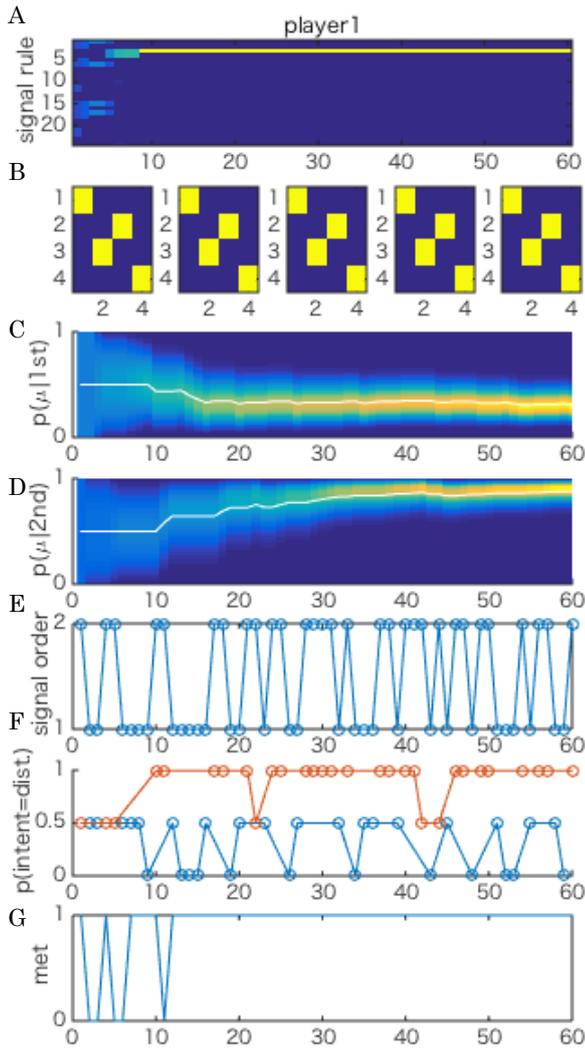


図 3 成功ペアにおける推定結果例

Figure 3 Estimated result of success case

成功ペアでは、セッションの開始から最初の12試行の間に特定の記号変換行列への収束が見られ、かつ両ペアでその一致が見られるばかりでは無く、記号送信の順序によって、先手ではその位置が現在位置を示し、後手では移動先の位置を表すような言外的意味で記号送信していることがわかる。

一方、ゲームの終盤で移動位置を一致できない失敗ペアであるが、その失敗の程度は様々である。いわゆるランダムに行動をとった場合のチャンス一致率は1/4であり、それと統計的な差が無いかそれ以下のペアは2ペアであった。このペアは、記号の字義の意味すらも最後の12試行まで共有できなかったといえる。図4は、最も失敗したペアにおける推定結果である。しかし、このペアでも、一方の被験者は同じ記号を使い続けている事がわかる。(図4 subject2) このように、失敗するペアにおいても、各被験者のとる戦略をこの手法によって可視化することができた。

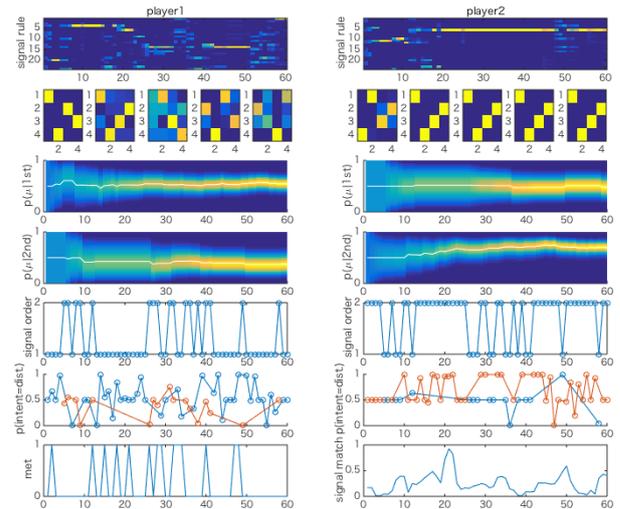


図 4 失敗ペアの推定例

Figure 4 Estimation result of failed pair

一方で、完全なランダムよりも一致率は高いが、完全に一致する事ができない失敗ペアも存在する。この被験者では、字義の意味の共有はできているが、言外的意味を共有できていないがために、成功できない初期位置では合意が形成できず失敗する。このようなペアの一例を図5に示す。

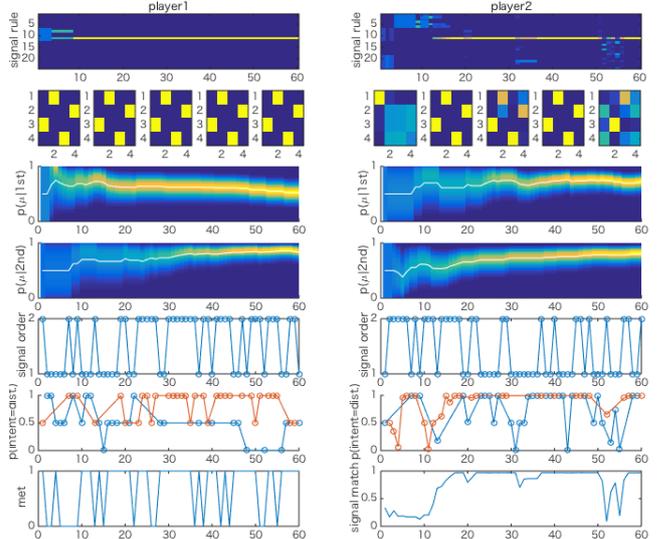


図 5 字義の意味の共有はできるが言外的意味の共有ができない失敗例

Figure 5 Estimation result of failed pair which could not agreed with "hidden meaning" of signals

成功例についても2つに分類することができる。言外的意味を先手と後手の役割を変更しても維持し、状況に応じて言外的意味を使うことができるペアがいる一方で、二者間で役割を固定化し、一方の被験者が常に先手、もう一方の

被験者が後手で記号を送信し続けるペアが存在した。それぞれは、言外的意味を獲得しているが、その役割を変更下場場合には失敗する可能性が残されている。役割を固定化している例を図 6 に示す。このペアでは、player1 が先手を常にとり、player2 が後手を常にとることで役割を固定化し player1 が現在位置を、player2 が移動後の位置を指し示して一致させる戦略に収束している。

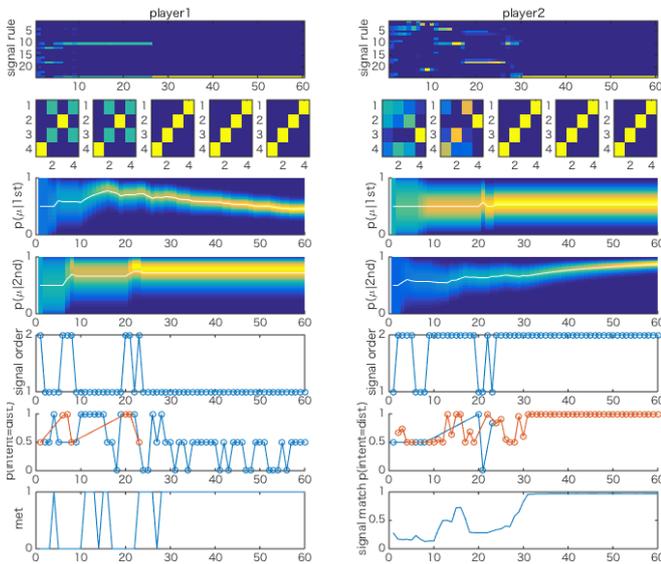


図 6 役割固定型のペアの推定例

Figure 6 Estimation result of fixed-role example of a success pair

5.1 被験者の分類

被験者ペア分類としては下記の 5 通りに分けられる。

(Type 1) 最終的に、記号が一致し、言外の意味も通じる成功例

(Type 1') 最終的に、記号が一致し、役割が固定化された場合に言外の意味も通じる成功例

(Type 2) 最終的に、記号が一致するが、言外の意味が、一方しか獲得しない失敗例

(Type 3) 最終的に、記号が一致するが、言外の意味が、両者とも安定しない失敗例

(Type 4) 記号が一致せず、相手の言っている意味が伝わらないが、一方は記号を固定化する失敗例

6. おわりに

本研究では、ベイジアンネットワークを用いた記号生成モデルを用いて、実際の記号コミュニケーションゲームで得られる行動データから、被験者の内部状態である記号の意味の推定を試みた。60 試行の行動データから、被験者ペアの内的状態を確率変数であると仮定して、それぞれの戦略および内部状態の学習過程における記号の「意味」に関する変遷を可視化することが可能となった。

単純な記号として何を発信したか、または何を受信したか、だけでなく、発信する記号および受信する記号の確率的推定を行う事で、それぞれの被験者のより分化した認知的過程を記述する事が可能となる。例えば、自らの発信する記号が相手に伝わる情報の程度を「自信」として記述することや、相手からの記号が自ら使っている記号変換行列で解釈した場合の最適行動を計算するプロセスなどをより細かく分類することが課題である。

また、このような確率モデルに基づく認知的プロセスの分類を行う事によって、それぞれの記号の送受信時の脳活動を解析することが可能となる。複雑な記号コミュニケーションの学習・創発過程とその脳内プロセスを科学的に探求する際に、このようなモデルベースの行動解析と脳活動との対応関係を調べることは重要である[4]。実際、このゲームにおける行動データと同時に脳波データを取得している[5]。このモデルによる推定手法を用いて、記号の送信・受信時の脳波のイベント関連活動を今後検討する予定である。

謝辞 この研究は文部科学省科学研究費補助金 基盤研究A「意図共有と意味創造を伴うコミュニケーション創発の進化的構成論」による研究(課題番号:26240037)による助成を受けた。

参考文献

- [1] Galantucci, B. (2009) Experimental semiotics: “A new approach for studying communication as a form of joint action”, *Topics in Cognitive Science*, Vol. 1, No. 2, pp. 393–410.
- [2] Scott-Phillips, T. and Kirby, S.: “Language evolution in the laboratory”, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 14, No. 9, pp. 411–417, 2010.
- [3] Konno, T., Morita, J., and Hashimoto, T.: “Symbol communication systems integrate implicit information in coordination tasks”, in Yamaguchi, Y. ed., *Advances in Cognitive Neurodynamics(III)*, Springer, pp.453–460, 2013.
- [4] Samejima, K. and Doya, K., Estimating internal variables of decision maker’s brain: a model-based approach for neuroscience, *LNCS*, 4984, 569-603, 2008
- [5] Li, G., Konno, T., Okuda, J., and Hashimoto, T.: “An EEG Study of human mirror neuron system activities during abstract symbolic communication”, in Wang, R. and Pan, X. eds., *Advances in Cognitive Neurodynamics (V)*, Springer, pp.565–571, 2016.