

知覚交差実験による他者の存在感の定量的解析

小島大樹^{†1} 岡瑞起^{†2} 飯塚博幸^{†3} 池上高志^{†1}

概要：他者の認知においては、相手との相互作用によって生まれる二者間のダイナミクスが重要な役割を果たす。知覚交差実験は、二人の関わりを、コンピュータを介して次元の指の運動と触覚だけに制限することで、相互作用をできるだけ単純にしてデータを取り、そのデータから二者間のダイナミクスを定量的に捉えることを目的としている。ここでは、どれだけ相手の存在を感じたかという主観報告による量（PAS:perceptual awareness scale）と、二者の動きと感覚の時系列データに基づく特徴量を比較することで、相手の存在感を強く感じる状況の定量的な特徴づけを行った。

キーワード：社会的認知，他者性，二者相互作用，時系列解析

Analysis of Others' Presence in Perceptual Crossing Experiment

HIROKI KOJIMA^{†1} MIZUKI OKA^{†2}
HIROYUKI IIZUKA^{†3} TAKASHI IKEGAMI^{†1}

1. はじめに

通常認知実験では、一人の被験者に対して決められた刺激を与え、それに対する反応を計測する。こうすることで複数の被験者を同じ条件下で実験でき、それぞれの被験者の反応を単純にまとめて統計処理できる。

それでは、二人が相互作用している状況を理解したいと考えたとき、同じ手法を用いることができるだろうか。もし、相互作用している二人が、一人一人に還元できるのであれば、それぞれの被験者への入力とそれに対する出力だけに注目すればよく、通常的手法でも対処可能かもしれない。しかし、実際には二人を分けることで損なわれてしまうものがある。その一つの例としてよく知られているのが、Murray&Trevarthen の double video experiment [1]である。この実験では、母子を別の部屋にわけ、ビデオ越しにコミュニケーションをとってもらう。もしビデオがライブ動画であれば、母親は赤ちゃんをうまくあやすことができる。一方、うまくあやせた時のライブ動画を録画しておき、これを赤ちゃんに見せた場合にはうまくいかず、赤ちゃんはぐずってしまうのだという。この場合、どちらの場合も赤ちゃんに対する入力自体は同じであるが、結果は異なる。二人を別に扱い、特定の入力に対する反応を測るという方法では太刀打ちできない。

このように二人が不可分な状況を扱うことを「二人称心理学」と呼ぶこととする。二人称心理学では、一人に被験者に対してコントロールされた入力を与え、その反応をみるというやり方を放棄せざるを得ない。その代わりに二人

が相互作用している状況を記録し、それをまとめて解析する。当然、これにより状況はコントロールしにくくなり、なおかつ複雑になるため、工夫が必要である。

そこで今回とった戦略は、二人の相互作用を残しつつ、できるだけミニマルにした実験系を用いることである。それが「知覚交差実験」である。この実験では、各被験者は、触覚と、一方向の動きのみが可能であり、コンピュータを介して相互作用する。相互作用のデータは、各被験者の動きと触覚の時系列データのみであり、二人あわせて4つの時系列データにダイナミクスの全てを集約することができる。従って、これらの時系列データの解析をおこなえば、実験中の相互作用の内実について十分に理解できると期待できる。特に今回は、時系列データによる解析結果と、被験者による主観報告を比較することで、主観的な量を、時系列から導き出される特徴量によって裏打ちすることを目指した。

2. 知覚交差実験

まず知覚交差実験(perceptual crossing experiment)について述べる。知覚交差実験とは、二人の被験者が次元の仮想空間上を動きまわり、互いに相手の場所を探りあてるものである。この実験はもともと、Auvray ら [2]によって、Murray&Trevarthen の double video experiment をよりコントロールされた状況で実験することを目的として始められたものである。ここで用いた方法は、Auvray のオリジナルの手法に、いくつかの変更をおこなって実施している (Froese et al. [3] 変更点については後述)。

†1 東京大学
University of Tokyo

†2 筑波大学
University of Tsukuba

†3 北海道大学
Hokkaido University

実験は二人の被験者が参加して行われる。(図1)それぞれの被験者は隔離されており、お互いの様子が直接わかることはない。それぞれの前にはボールマウスと、振動子が置かれている。ボールマウスを動かすことで各被験者(avatar)は一次元の仮想空間上を左右に動かすることができる。(図2 ただし、この情報は被験者に視覚的に与えられることはない。)二人が仮想空間上で同じ位置に来た場合、手元の振動子が振動することで両者にフィードバックが与えられる。この実験で被験者に課されるタスクは、ボールマウスを用いて仮想空間上を移動し、相手の場所を探り当てることである。相手を見つけたときには、マウスをクリックすることで実験者に報告することになっている。

これだけでは、振動しただけで相手の存在がわかってしまうので、さらに二種類のフェイク刺激が入っている。(図2)被験者にはフェイクがあるということは伝えているが、どのような種類のフェイクがあるかについては伝えていない。

1つ目は、「静止物体(static object)」であり、これは被験者がある場所に来たときにいつも振動するものである。そして2つ目は「影(shadow)」であり、これは相手の実際の位置から一定距離離れた場所に存在し、相手の動きと全く同じ動きをする。ここに来たとき、自分には振動のフィードバックが与えられるが、相手には振動が来なくなっている。これらの配置は図2に示してある。

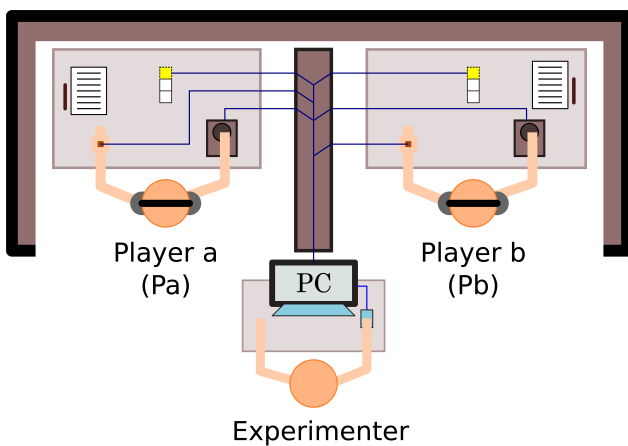


図1 知覚交差実験のセットアップ

Figure 1 The experimental setup of perceptual crossing experiment

各試行の時間は1分であり、この間に各被験者は一度だけクリックして、相手を発見したことを実験者に報告することが許されている。この試行を15回行う。点数は各ペアのクリックの正解数の合計で算定されるため、ペアでの協力が高い点数を取るために重要となっている。さらに、ペアで協力して行うようにとの指示もおこなった。(許されるクリックの回数が1回であることと、二人の被験者の協力の

二点が、Auvrayらのオリジナルと異なる主な点である。)

各試行後には、毎回アンケートによる主観報告を実施した。その中で今回はPAS(perceptual awareness scale)に注目して解析した。これは、クリックをした際に相手の存在感をどれだけ強く感じたかを1-4の4段階で評価してもらうものである。

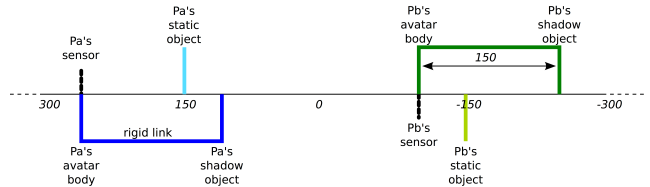


図2 仮想空間内の配置

Figure 2 The configuration in the 1D virtual space

ここで用いた実験データセットには34人の被験者(17ペア)の結果が含まれている。このデータセットはFroese et al. [3]で報告したものと同一であり、今回は実験によって得られた動きと感覚の時系列データを用いて、より定量的な解析を行うことを目指した。

実際の試行で得られる時系列データの一例を図3に示す。横軸が時間、縦軸が各被験者の仮想空間上の位置であり、赤と青の実線が各被験者の位置の時間変化を示している。破線は、それぞれに対応する「影」、横に入った線は「静止物体」の位置をそれぞれ表している。また矢印は、各被験者が相手を見つけたと判断して、クリックしたタイミングを示している。値は10msごとに取得した。

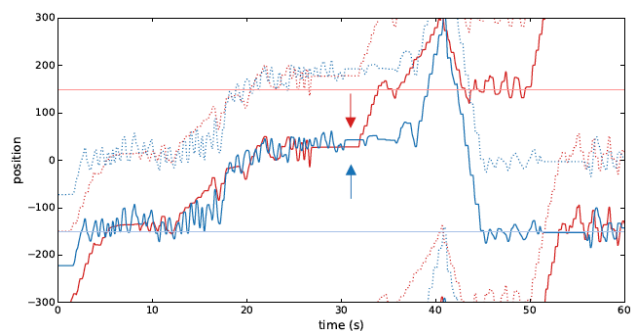


図3 試行の一例

Figure 3 one example of the experimental trial.

3. 結果

以下では、まずこれまでに報告した結果のうち主なものを述べ、その後今回おこなった定量的な解析の結果について報告する。

3.1 以前の結果

まず、以前の報告 (Froese et al. [3][4]) で得られた主な結果を述べる。

まず、クリックした場合の正解率は全体的に高く、正解率の中間値は 92% となり、「静止物体」、「影」の存在にもかかわらず、相手の場所を高い確率で探し当てられることがわかった。またその際片方だけが正解する (single success) 確率よりも、両方が正解する (joint success) 確率のほうが有意に高いことがわかった。さらに、いつクリックしたか相手には一切知らされないにも関わらず、クリックする時間が有意に近くなることがわかり、相手を探し当てたときには、二人の間に共同の状態が生じていることが示唆される。

さらに、相手の存在をどれだけ強く感じたかを示す主観的指標、PAS との関係調べると、joint success した場合に有意に PAS が高く、この共同の状態と、主観的な相手の存在感の間に関係があることを示唆するものであった。

また、両者がかわりばんこに動く、ターンテッキングとよばれる振る舞いがしばしば見られ、これが生じていると PAS が高くなる傾向があることがわかった。

以下では、この共同の状態を詳細に調べるために、二人の被験者の動きと感覚の時系列データを解析し、定量的な特徴付けを行った。特に今回は、相手の存在感をどれだけ感じたかを示す主観的指標 PAS に注目し、PAS と、時系列データから得られた客観的な特徴量との比較をおこなった。

3.2 動きの同調の指標による解析

まず、二人の動きの時系列データのみに着目し、二人の動きの同調と PAS の関係を調べた。動きの同調の指標として、ここでは相互相関関数を用いた。各クリック前 10 秒間の二人の動きの時系列データを用いており、片方の動きが相手の動きに影響するまでの時間遅れを考慮するため、時系列データを少しずつずらしながら相互相関関数の計算をおこない、その最大値を以下の解析に用いた。相互相関関数の結果の一例を図 4 に示す。この計算に用いた試行は図 3 に示したものと同一である。横軸は経過時間、縦軸は相互相関関数を計算する際に、互いの時系列を何秒ずらして計算したかを示している。

動きの同調の特徴量としては、相互相関関数に加えて、windowed cross-lagged regression (WCLR) [5] と呼ばれる量もあわせて用いた。相互相関関数を用いて計算すると、二人が相互作用していないのにたまたま同じ方向に動いている場合であっても、高い値がでてしまうが、WCLR は自己相関を除くことができるため、この問題を回避できる。図 6 に WCLR で計算した場合の結果を示す。

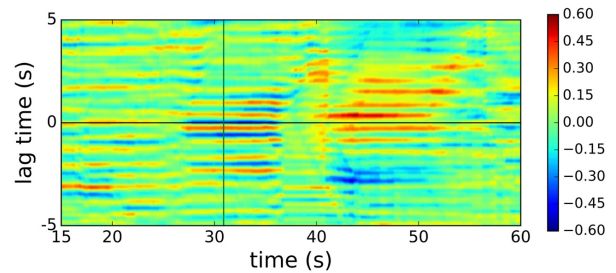


図 4 相互相関関数のヒートマップ
Figure 4 a heat map of cross correlation

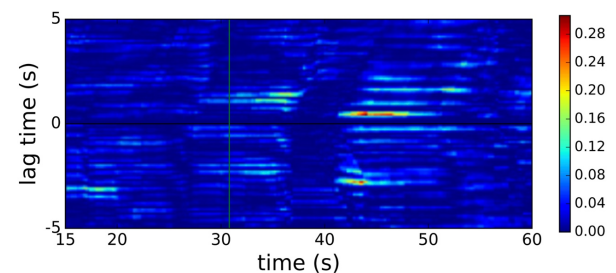


図 5 WCLR のヒートマップ
Figure 5 a heat map of WCLR

以上の 2 つの方法を用いて求めた、動きの同調の度合いと、主観的な相手の存在感の強さの関係を調べるために、各特徴量と PAS との間の相関係数を求めた。その際、PAS は主観的な量で個人差があるので、ここでは相互相関関数と PAS の間の相関係数の計算は各被験者ごとに行うこととし、各被験者での相関係数の値がどのように分布するか調べることにした。

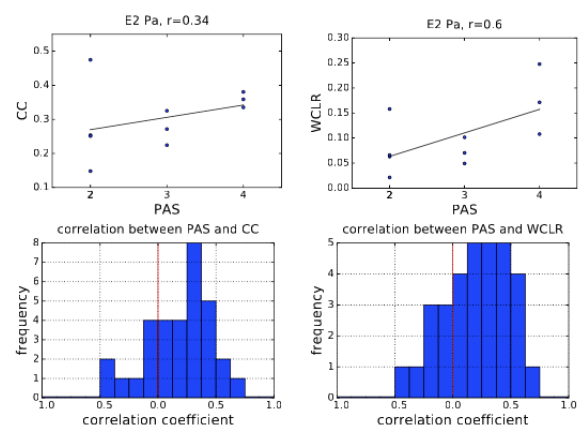


図 6 動きの同調と PAS の相関係数
Figure 6 correlation between movement synchrony and PAS

その結果を図5に示す。左が相互相関関数での結果、右が WCLR での結果である。また上段は、ある被験者での PAS と動きの同調の指標の関係を、一例として示している。このように各被験者について相関係数を計算し、全ての被験者の相関係数の結果をヒストグラムとしたものを下段に示した。その結果、ばらつきはあるものの、相関係数のヒストグラムのピークは正の側に寄っていることがわかる。平均は 0.18 ± 0.05 (誤差は standard error を示す。以下同様) で有意に正となった。

また、以前の解析においてターンテーキングと呼ばれる、二人の被験者がかわりばんこに動くという運動の構造を作る場合がしばしば見られること、この構造がある場合に PAS が高くなる傾向があることがわかった。そこで、ここでは、二人の間の動きにおける共同の構造と PAS の関係をより定量的に扱うために、動きの時間的構造に注目し、PAS の間の関係を調べた。

時間構造の定量化のために用いたのは、WCLR の計算における時間遅れである。WCLR での計算では、2つの時系列の時間を少しずつずらして、WCLR の値が最大となることをその時点での動きの同調の指標としていた。もし、二人がある一定のタイムスケールでやり取りをしているのであれば、このタイムスケールが、WCLR を最大とする時間遅れに対応すると考えられる。従って、この WCLR の値が最大となる時間遅れの値は、二者間の相互作用の時間構造の有無の指標になると期待できる。そこで、この時間遅れを指標として使い、同様に各被験者ごとに PAS との相関係数を計算して、時間構造と、相手の存在感の主観報告との関係を調べた。その結果を図6に示す。左がある被験者での一例であり、右が全体でのヒストグラムである。その結果、全体として相関係数は正に寄っており、平均は 0.15 ± 0.07 で、有意に正となった。

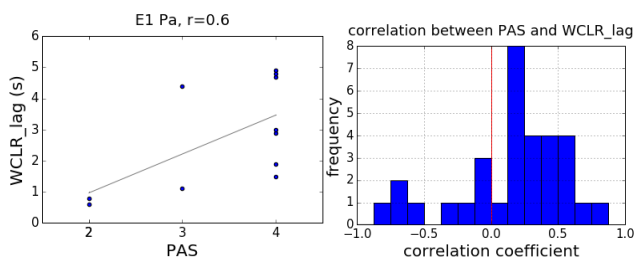


図7 時間構造と PAS の相関係数

Figure 7 correlation between temporal structure and PAS

3.3 情報の流れによる解析

以上の解析では、得られる時系列の内、動きの時系列だけを用いて解析を行った。ここでは、これに加え、感覚(手に持つ振動子の振動)の時系列をあわせ、時系列間の情報の流れを用いた解析をおこなった。(感覚の時系列は、被験

者が振動を受けているときは1、それ以外は0という離散的な時系列データになっている。)

ここで用いた指標は、transfer entropy (Schreiber [6])と呼ばれるもので、ある時系列から他の時系列への情報の流れを定量的に与えるものである。通常の transfer entropy は時系列全体に対して平均の情報の流れを与えるが、ここではクリックの直前だけに着目したいので、local transfer entropy(Lizier et al. [7])と呼ばれる、時系列全体で平均を取る前の指標を用いることとした。具体的には click 前 (1s,3s,5s,10s) と click 後 (1s,3s,5s,10s) について local transfer entropy の平均値を計算し、PAS との比較をおこなった。

transfer entropy の計算の際には、時系列を離散化する必要があるため、動きの時系列は動く方向が変わるところを1、それ以外を0とし、感覚の時系列についても変化だけを扱うために、刺激の変化があったところを1それ以外を0とした。また、計算においては、50ms でサンプリングし直し、3ステップ前までの影響を取り入れた。50ms というタイムスケールは、時間幅を変えて transfer entropy を計算した結果、動きの時系列から感覚の時系列への transfer entropy の値が最大となる場所として選んだ。

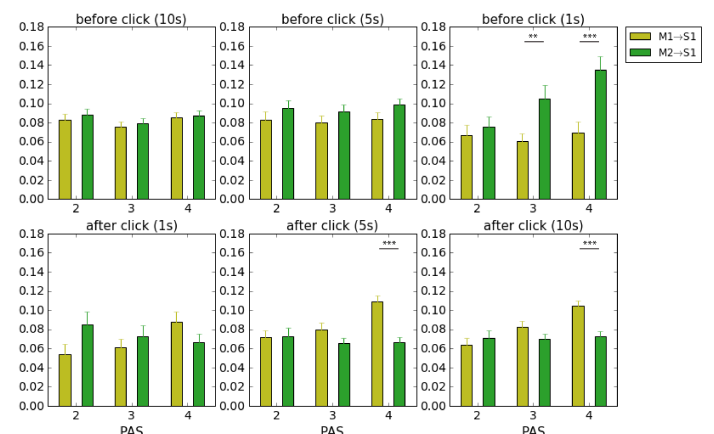


図8 クリック前後の local transfer entropy の平均値
Figure 8 averaged local transfer entropy before/after clicks.

その結果を図7に示す。黄色の棒グラフが自分の動きから、自分の感覚への情報の流れ、緑の棒グラフが相手の動きから自分の感覚への情報の流れを示す。(クリック前は二人の被験者は、ほとんどの場合直接相互作用しているので、自分の感覚と、相手の感覚はほぼ同一となっている。) また上段は、クリック前の10秒間、5秒間、1秒間での local transfer entropy の平均、下段は、クリック後の1秒間、5秒間、10秒間での平均の値を示しており、各グラフでの横軸は、相手の存在感の主観的強さをあらわす PAS の値になっている。

解析の結果、クリック前、すなわち被験者がここに相手

がいると確信する直前では、相手の動きから自分の感覚への情報の流れが優勢になっており（上段右のクリック前1秒でのグラフで顕著）、さらにこの傾向はPASが高い、すなわち相手の存在感を強く感じている場合ほど明確になっていることがわかった。

一方、クリックした後では、逆に、自分の動きから自分の感覚への情報の流れが次第に優勢になっていくこと（下段中央と左で顕著）、そしてこの傾向も、PASの値が高いほどはつきりとみられることがわかった。クリック前後では自分の感覚の時系列と、相手の感覚の時系列はほぼ同一なので、自分の動きから相手の感覚への流れが優勢になっていると言い換えてもよい。

以上より、相手の存在感を強く感じる場合には、受動的に相手から触られる状況が多い一方、逆にクリックし終えたあとには、自分から相手に積極的に触っていく傾向があることを、定量的に捉えることができた。

4. まとめ

知覚交差実験は、二人の相互作用を捉えるミニマルな実験系であり、その途中経過は、各被験者の動きと感覚の時間変化からなる、4つの時系列データとして与えられる。また、ミニマルな実験系でありながら、うまく相互作用が起こった場合には、相手の存在感を強く感じることができる。この強さは主観報告によるスケールであるPASとして記録される。

本研究では、この時系列データの解析をおこない、その結果をPASと比較することで、相手の存在感と関係する相互作用の特徴を見出すことができた。

まずは、動きの同調である。相互相関関数ないしWCLRによって定量化された、動きの同調の度合いと、PASの間に正の相関が生じる傾向があることがわかった。対面コミュニケーションの際に、二者の動きがしばしば同調することや、共感の度合いと関連することはよく知られている。しかし今回の結果との決定的な違いは、知覚交差実験では相手の動きを直接知ることができないことにある。つまり、この場合の動きは、互いに開示されたものではなく、むしろ各被験者の内部状態に相当すると捉えるほうが適当である。すなわち、被験者が相手の存在感を強く感じる際に、それぞれの被験者の内部状態が同調することを示唆する結果とみることができる。

また、WCLRの値が最大となる時間遅れを用いることで、相互作用の時間構造についても定量的な解析を行うことができた。これもPASと正の相関を持つ傾向が見られ、相手の存在感を感じている場合、互いにやりとりをする時間構造を二者で作りに出し、共有していることを示唆する結果となった。

そして、transfer entropyを用いて、動きと感覚の4つの時系列データの解析することで、時系列間の情報の流れを用

いた特徴付けをおこなうことができた。それにより、受動的に相手から触られることが、相手の存在感の強さと関係すること、さらに、その場合クリックして自分のタスクが終わった後には、相手に自分の存在を知らせるように、能動的に触る行動に移行する傾向があることが見られた。

そもそも、ここでの感覚は手に持つ振動子の振動であるため、感覚そのものには方向性がない。すなわち、振動が起きたときに、自分も相手も両方動いている場合、この感覚は自分由来のものであるとも相手由来のものであるともいうことはできない。それにもかかわらず、相手から触られている、自分が触っているという状況が取り出せたということは、二者の間になんらかの構造ができあがっていることの傍証にもなっている。

以上の定量的な解析で用いたそれぞれの指標は、今回の研究のためだけに作られたものではなく、一般的で汎用的なものである。これまで二者間の相互作用を定量的に特徴づける研究は十分に行われてこなかったが、このような共通の指標を用いて、さまざまな実験系の解析をおこない、様々な状況で共通な特徴を見出していくことで、二者間のダイナミクスについて普遍的な理解が可能になるのではないかと期待している。

参考文献

- [1] Murray, L., & Trevarthen, C. (1985). Emotional regulations of interactions between two-month-olds and their mothers. In T. M. Field & N. A. Fox (Eds.), *Social Perception in Infants* (pp. 177-197). Norwood, NJ: Ablex Publishing.
- [2] Auvray, M., & Rohde, M. (2012). Perceptual crossing: The simplest online paradigm. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(181). doi: 10.3389/fnhum.2012.00181
- [3] Froese, T., Iizuka, H., & Ikegami, T. (2014). Embodied social interaction constitutes social cognition in pairs of humans: A minimalist virtual reality experiment. *Scientific Reports*, 4(3672). doi: 10.1038/srep03672
- [4] Froese, T., Iizuka, H., & Ikegami, T. (2014b). Using minimal human-computer interfaces for studying the interactive development of social awareness. *Frontiers in Psychology*, 5(1061). doi: 10.3389/fpsyg.2014.0106
- [5] Altmann, U. (2011). Investigation of movement synchrony using windowed cross-lagged regression. In A. Esposito, A. Vinciarelli, K. Vicsi, C. Pelachaud & A. Nijholt (Eds.), *Analysis of Verbal and Nonverbal Communication and Enactment* (pp. 335-345). Berlin: Springer-Verlag.
- [6] Schreiber, T. (2000). Measuring information transfer. *Physical Review Letters*, 85(2), 461-464.
- [7] Lizier, J. T., Prokopenko, M., & Zomaya, A. Y. (2008). Local information transfer as a spatiotemporal filter for complex systems. *Physical Review E*, 77(2), 026110.