

共存在感の創出とリズム表現による間合いの生成について

板井 志郎[†] 三輪 敬之[†]

著者らは、これまでに、剣道ロボット映像対戦システムを用いて、エンタテインメント（リズムの引き込み現象）と間合いを関連付けて調べてきた。そして、同場所対戦での間合いの生成において、ロボットの操作リズム（行為のリズム）を伝えようと、このリズムの引き込み周期に多様性が現れるが、遠隔対戦では、行為のリズムを送るだけでは、同様の多様性は現れないこと明らかにしてきた。そこで、本研究では、このような間合いの生成に必要な条件について調べた。具体的には、遠隔対戦では、同場所対戦とは異なり、対戦相手の存在が感じられず、共存在感がないことに着目し、二、三の実験を行うこととした。そのため、相手の存在感を表現できるという身体影の効果に着目し、身体影を活用する遠隔コミュニケーションシステム（WSCS）を用いて、離れた場所にいる対戦相手の身体影を自身のいる空間に投影して、遠隔剣道対戦を行うことを実現した。そして、遠隔対戦で、存在感の表現のみでは不十分であるが、行為のリズムの伝達を合わせて行うと、多様なエンタテインメントをともなった間合いが生成されることを見出した。したがって、間合いの生成には、行為のリズムの伝達と共存在感の両方が必要であると考えられる。また、これにより、相手のロボットの動きを予測することが可能になり、互いの意思が共有される可能性があることを考察した。

Generation of Spatial Distance (“*Maai*”) by Emergence of Co-existing Feeling and Expression of Rhythm

SHIROH ITAI[†] and YOSHIYUKI MIWA[†]

We have investigated the generation of a spatial distance (“*Maai*”) by relating it to the entrainment emergence process taking place during the “*Kendo*” match on a video image, and found that the entrainment is generated in multiple cycles if “*Maai*” is established. Based on this finding, we investigate, in this research, essential requirements for the successful generation of “*Maai*”. In particular, we carried out experiments on “*Maai*” establishment, focusing attention on the co-existing feeling and the transmission of the rhythm of the action. These two essentials (co-existing feeling and rhythm transmission) are quite different between the face-to-face “*Kendo*” match and the remote “*Kendo*” match. Therefore, we focused the attention on the effect of the body shadow by which the existence of a person can be evoked, the remote “*Kendo*” match where the shadow of the remote opponent is projected in the self space was conducted. And, in the remote “*Kendo*” match, only the expression of the existing feeling of the remote opponent is inadequate to establish “*Maai*”. Both the expression of the existing feeling and the transmission of the rhythm of the action enable players to generate “*Maai*” with the generation of the entrainment in multiple cycles. Consequently, it is indicated that the generation of “*Maai*” requires both the co-existing feeling and the rhythm of the action.

1. はじめに

人間同士のコミュニケーションにおいては、少し先の未来の状況を予測し、相手とタイミングや間合いを取り合う必要がある。たとえば、サッカーやバスケットボールなどのスポーツの試合において、華麗なパス回しが見られるのは、各選手が、互いに目的を一致させることによって、それに合わせて自身の内面で創ら

れる少し先の未来における、自分と他の選手たちの空間的な位置、さらには選手たちの動き出しのタイミングが、互いの中で共有されることによるものと考えられる¹⁾。また、このことは、タイミングや間合いの共有が、コミュニケーションにおける意思の共有に密接

大辞林（松村明編，三省堂²⁾）によれば、間合いには、① “物と物とのへだたり” という空間（距離）的な内容を表す意味と、② “動作をするのに適当な時機・ころあい。また、あいま・ひま” という時間的な内容（つまり、タイミング）を表す意味の2つの意味があるが、本論文では、間合いを前者の意味として用いている。

[†] 早稲田大学理工学術院

Faculty of Science and Engineering, Waseda University.

に関係していることを意味しているようにも思われる。実際、意思疎通がとりにくいため、事故やトラブルが起きることが問題となっている現行の IT を用いた遠隔コミュニケーションにおいて、間合いやタイミングはとりにくいといわれている。したがって、コミュニケーション支援において、間合いやタイミングの生成を研究することはきわめて重要であり、これらについて、これまでに様々な研究が行われている。

タイミングの問題に関して、垣田による会話における話者間の発話リズムの相互作用についての研究³⁾や、三宅らによる 2 者間の発話タイミングの解析についての研究⁴⁾などがある。さらに、三宅や上田らによって、タッピング課題を用いたタイミング生成に関する研究^{5),6)}も行われている。また、Condon らは、母子間のコミュニケーションにおいて、幼児の運動と母親の発話のタイミングが同調することを発見し、この無意識のうちに互いの身体リズムが同調する現象をエントレイメントと呼んでいる⁷⁾。そして、このエントレイメントを工学的に応用した研究として、人間と仮想ロボットの間で、足音を介してタイミングを合わせた協調歩行を実現する Walk-Mate⁸⁾ や、人の音声のリズムに合わせて、頷きや身振り、手振りなどの身体動作を自動生成するロボット⁹⁾ などがある。一方、間合いの問題に関しては、Hall によるプロクセミックの研究¹⁰⁾ や Kendon による身体配置の研究¹¹⁾ がある。さらに、Sellen は、自分が対話する相手の数だけカメラとモニタを机上に並べることで、遠隔地の相手と机を取り囲んでいるような身体配置を再現し、遠隔コミュニケーションの支援を行っている¹²⁾。しかしながら、コミュニケーションにおけるタイミングと間合いの双方を関連付けて研究された例は、ほとんど見当たらない。

そこで、著者らは、これまでに、コミュニケーションにおける間合いとタイミングの生成を関連付けて調べるため、映像の剣道ロボットを介した遠隔コミュニケーションシステム（剣道ロボット映像対戦システム¹³⁾、図 1 参照）を用いた研究を行ってきた。このシステムは、タイミングや間合いのととり方が勝敗に重要な役割を果たすといわれている剣道の模式的な試合を、同じ場所や離れた場所間でアバタ（剣道ロボット）を介して行うものである。ここで、本システムでは、リズムコントロール方式¹⁴⁾により、自身のロボットをその動きに先行してリズムを自己創出させながら操作する。そのため、対戦者は、自身の内面において、タイミングをとりながら相手のロボットの動きを先読みし、自身と相手のロボットとの間合いを創っていく

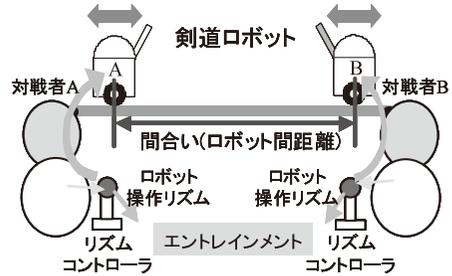


図 1 剣道ロボット映像対戦システムのコンセプト
Fig. 1 Concept of "Kendo" robot system.

ことになる。つまり、本システムは、タイミングの共有については、互いのリズムコントローラ波形に見られるエントレイメントから、間合いの共有に関しては、対戦者の内面で創られる心理的な距離が反映されていると考えられるロボット間距離から調べることを意図している。以上より、本研究では、後述するこれまでの本システムを用いて行った研究成果をふまえて、間合いが生成されている対戦（同場所対戦）と間合いが生成されていない対戦（通常の遠隔対戦）との対戦環境の違いに着目して、エントレイメント生成と関連付けて間合いの生成に必要な条件について実験的に検討したので、以下に報告する。

2. 剣道ロボット映像対戦システム

剣道ロボット映像対戦システム¹³⁾は、2人の対戦者が前後方向の移動と、剣の上下方向の振りの2自由度を有する剣道ロボット（映像空間上のアバタ）を操作して、模式的な剣道の試合を行うものであり、先に相手のロボットの頭部に剣を当てた方が勝ちとなる。

ここで、操作者がロボットを動かす際に自身の内面で創っているリズムをコントローラに表現させるため、以下に示す2点を考慮している^{13),14)}。まず、剣道の試合の状況に応じて、多様な周期や振幅のリズムをコントローラで創り出すことを可能にするとともに、そのリズムをロボットの移動に反映させることができるようにした。さらに、野球やテニスなどのスポーツでは、実際の行為に先行して身体を無意識に左右にリズムに動かしてタイミングをとっていること¹⁵⁾に著者らは着目し、これが自身の内面のリズムを反映したものではないかと考え、この動きをコントローラで表現できるようにした。また、この無意識的な身体の働き（身体性）をリズムコントローラの操作に取り込むことで、あたかもロボットが自身の身体の一部であるかのような自身の身体とロボットとの間の非分離感の創出を促すようにしている。これにより、本システムを用いた剣道対戦において、自身の内面で創られる

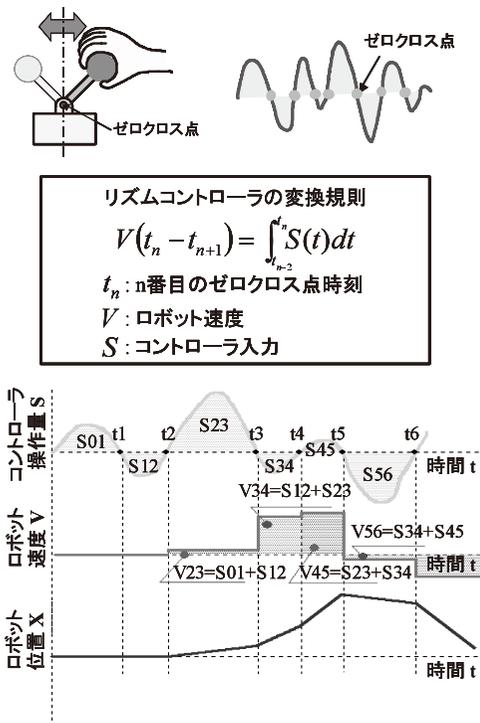


図 2 リズムコントロール方式
Fig. 2 Rhythm control method.

心理的な距離としての間合いが、映像画面上のロボット間の物理的な距離としての間合いに表現されるものと考えられる。

以上の2点をふまえて、ロボットの動きに先行して、つねにリズムを創り出し続けることが求められる操作法を本システムでは採用している。具体的には、図2に示すように、ゼロクロス点を中心にコントローラを前後に振動させ、コントローラがゼロクロス点を通過したときに、現在より2つ前のゼロクロスが発生した時刻から現在までの間でコントローラ波形を積分し、その積分値を次のゼロクロスが発生するまでの速度出力値としてロボットを操作する。

次に、上記のコントローラ波形におけるエントレインメントの判定方法について説明する。これまでの実験において、対戦者のコントローラの固有操作振動数は、5.0 [Hz] 前後であることが分かっている¹³⁾ので、通過帯域が、3.0 ~ 7.0 [Hz] であるバンドパスフィルタを通したリズムコントローラ波形において、エントレインメントの生成を調べている。具体的には、この両者の波形において、相互相関解析を行い、0.5 [s] 以上連続して、相互相関係数が0.8を上回っている区間を算出する。さらに、この区間において、両者の波形のピーク時刻の差、さらには、ゼロクロス時刻の差が、

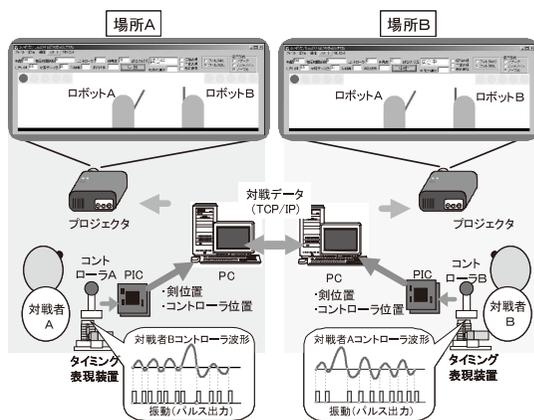


図 3 剣道ロボット映像対戦システムの構成
Fig. 3 System configuration of "Kendo" match system.

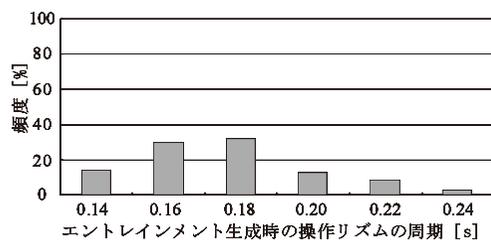
すべて同一の値になっている(位相関係が生成されている)ことを確認したうえで、エントレインメントの判定を行っている。

なお、剣の操作は、剣操作レバーを指で倒すことによって行う。そして、剣道ロボットの動きはPCにより制御され、対戦データはTCP/IPプロトコルにより離れた場所にいる相手側のシステムに伝達される。また、後述するように、本システムによる遠隔対戦では、同場所対戦のように、相手の行為のリズムに相当するコントローラ操作リズムが音として伝わらないので、相手のロボットの動きが予測しにくくなる。そこで、遠隔対戦においても相手の行為のリズム(コントローラ操作リズム)を伝達するため、これを力触覚刺激として表現するタイミング表現装置¹³⁾が、本システムには、組み込まれている。本装置は、相手のリズムコントローラがゼロクロス点を通過するごとに、パルス状(矩形状)振動を約20 [ms]間、発生させるものである。そして、対戦者は、対戦中、この装置の振動伝達部を体の一部(通常は対戦者の左手)にあてて使用する。以上のシステム構成を図3に示す。なお、遠隔対戦において、相手のコントローラ操作リズムを、同場所対戦のように音で表現した場合も、後述するエントレインメントの周期分布については、図4(b)に示したものとほぼ同様であり、タイミング表現装置を用いた場合と同様の結果になることを確認している。

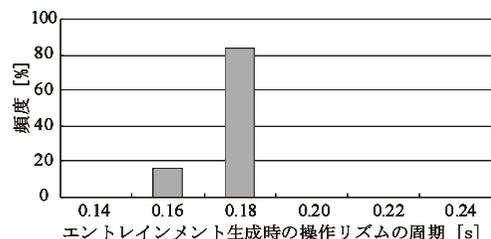
3. 対戦環境によるエントレインメント生成挙動の違い

本システムを用いた同場所対戦では、2台のロボットがそれぞれほぼ一定の距離を維持して互いに間合いをとりながら前後に動いている様子が認められ、対戦者から“相手と間合いをとることができる”とのコメ

ントが得られた．そして，互いのコントローラ波形に見られるエントレインメントの周期分布について調べたところ，図 4 (a) に示すように，多様な周期でエントレインメントが生成されることが分かった¹⁶⁾．なお，同じ場所にいる 2 人の対戦者が，自身の目の前にある実体の剣道ロボット¹⁴⁾ を操作し対戦を行った場合も，同様の間合いが生成され，エントレインメントの生成については，図 4 (a) と似た結果となる．しかし，遠隔対戦では，対戦者から“相手と間合いをとることができない”というコメントが得られた．また，この場合，互いのコントローラ波形にエントレインメントが生成されないことも見出された．そこで，相手のコントローラ操作リズムを力触覚表現するタイミング表現装置¹³⁾ を用いて遠隔対戦を行ったところ，図 4 (b)



(a) 同じ場所での対戦
(a) Match at the same place



(b) タイミング表現装置のみを用いた遠隔対戦
(b) Remote match using only timing display device

図 4 エントレインメント生成時の操作リズム周期分布

Fig. 4 Distribution of cycle of operational rhythm in the generation of entrainment.

に示すように，特定の周期でエントレインメントが生成されるようになった．しかし，対戦者のコメントは“相手と間合いがとれない”というものであった¹⁶⁾．これまでの研究結果をまとめると，対戦者のコメントから間合いが生成されているかどうかを判断した場合，間合い生成時には，特定周期ではなく多様な周期でエントレインメントが創出されていることが分かる．さらに，その後の研究により，遠隔対戦においても，互いのコントローラ操作リズムのコヒーレンス度合いの映像表現（コヒーレンス映像表現）とタイミング表現装置を組み合わせて用いると，多様な周期でエントレインメントが生成されるとともに，対戦者から“相手と間合いをとり合って試合をしているような感覚がある”とのコメントが得られた¹⁶⁾．

しかし，コヒーレンス映像表現がどのような意味を持つ情報を表現しているのかが明らかでないため，現状においては，多様なエントレインメントをとまなう間合いの生成に必要な条件が明確になっていないという問題がある．そこで，本研究では，この問題に対して，間合いが生成されている対戦（同場所対戦）と間合いが生成されていない対戦（通常の遠隔対戦）の対戦環境の違いに着目して，間合いの生成に関する実験を行い，それに必要な条件を実験的に調べることにした．特に，本研究では，その違いとして，“相手と同じ場所にも存在していることからくる共存感覚（以下，これを共存感覚と呼ぶ）”の有無に着目し，遠隔対戦で共存感覚の生成を実現するため，身体の影を利用した実験システムを構築し，研究を進めたので，以下にその詳細について説明する．

4. 実験手法

剣道ロボット映像対戦システムを用いて，同場所での対戦している様子を図 5 (a) に，遠隔で対戦している様子を図 5 (b) に示す．同図より，同場所対戦と遠隔対戦における対戦環境の違いとして，ま



図 5 剣道対戦の様子

Fig. 5 Appearance of “Kendo” match.

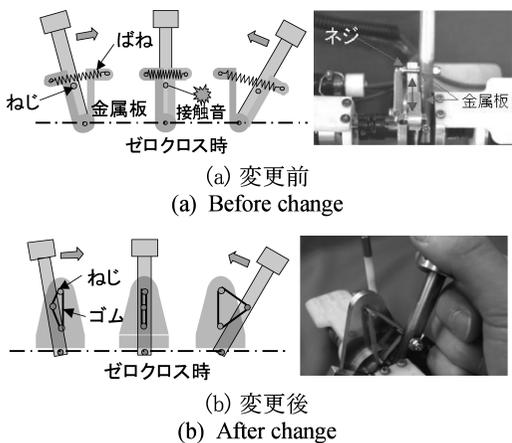


図 6 リズムコントローラの変更
Fig. 6 Change of rhythm controller.

ず、対戦相手の存在の有無があげられる。遠隔対戦では、相手が自身の隣にいないので、同場所対戦とは異なり、共存感がない。また、本システムでは、ゼロクロス点を通して金属の接触音が発生するリズムコントローラを用いて、自身のロボットの操作を行うが、遠隔対戦では、隣に相手がいないので、同場所対戦のように対戦相手の行為のリズム（コントローラ操作リズム）が音として伝わることはない（図 5）。以上をまとめると、本システムにおける同場所と遠隔における対戦環境の違いとして、共存感と行為のリズム伝達の有無があげられる。そこで、本研究では、共存感と行為のリズムが、間合いの生成に必要なかどうか、実験的に調べることにする。

4.1 行為のリズムの伝達を遮断する実験環境の構築
行為のリズムの伝達が間合いの生成に必要な条件になっているかどうか調べるためには、間合いが生成されている同場所対戦において行為のリズムの伝達を遮断した実験を行い、この場合に間合いが生成されるかどうかを調べればよい。そこで、リズムコントローラに変更を加え、このコントローラの操作時に音が発生しないようにした。図 6 (a) に示すように、本システムで用いているリズムコントローラは、コントローラのスティックがゼロクロス点（コントローラを中心）を通過するとき、スティックに取り付けられたネジと金属板が接触するため、コントローラの操作音が、リズム音として対戦相手に伝えられる。そこで、この音を発生させないようにするため、図 6 (b) に示すように、リズムコントローラに変更を施した。なお、この変更を加えた場合においても、リズムコントローラ操作時に生じる音を完全には消去することができなかったため、ヘッドフォンでホワイトノイズを対戦者に聞



図 7 コントローラの操作性の違いを調べる実験
Fig. 7 Experiment to examine the difference of operability of controller.

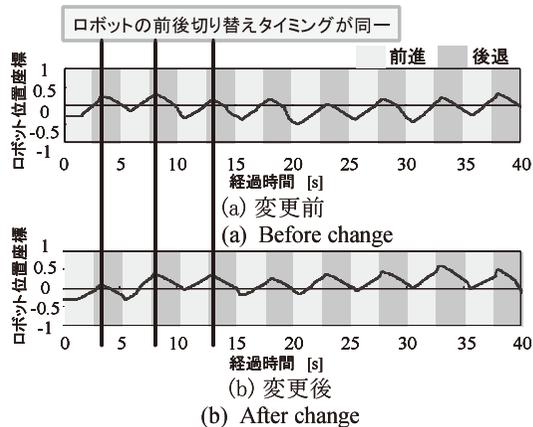


図 8 ロボット位置座標
Fig. 8 Robot position coordinate.

かせることで、コントローラ操作音を完全に遮断することにした。

次に、上記のリズムコントローラの変更により、操作性に違いが生じていないかどうか確認するため、コントローラの操作性を比較する実験を行った。なお、この実験はリズムコントロール方式によるロボットの操作に習熟した 6 人の 20 代男子学生で行った。具体的には、図 7 に示すように、2.5 秒おきに前進・後退の合図を出す信号機に合わせて、剣道ロボットを前後に移動させる実験を行い、変更前と変更後のコントローラで操作性の比較を行った。また、この実験においては、信号機の変化を予測し、信号の切替えタイミングとロボットの移動方向の切替えタイミングを合致させるのではなく、信号機の変化を確認した後、できる限り早くロボットの移動方向を変化させるように、被験者に指示している。その結果、すべての対戦者から、“ゼロクロスした際の感触に違いはあるが、操作性はそれほど変わらない”とのコメントが得られた。また、図 8 に示すように、上述の変更を加えたコントローラで操作したロボットも、変更を加えていないコントローラで操作したロボットと同じように信号に対して

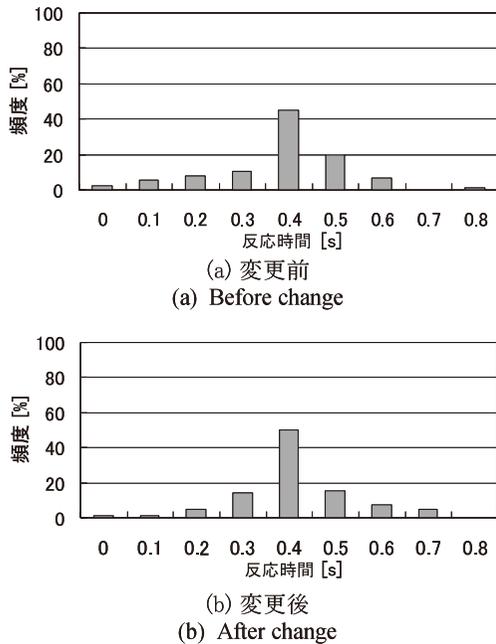


図 9 反応時間の分布

反応し、動いていることが確認できた。このことについてさらに詳しく調査するため、信号機の信号が変化してから、ロボットが移動方向を変化させるまでに要した時間（反応時間）を計測し、その頻度分布について調べた。その結果を図 9 に示す。同図より、変更前と変更後のコントローラで、それらの分布に違いが見られないことが分かる。このことについては、分布の等分散性の検定（F 検定）、および平均値の差の検定（t 検定）を行い、両者の間に有意差がないことを確認している（ともに、 $p > 0.05$ ）。なお、図 8, 9 については、被験者 I の結果のみを示したが、他の被験者 5 人についても、被験者 I と同様の有意差に関する検定を行い、両者の間に有意差がないことを確認してある（すべて、 $p > 0.05$ ）。さらには、この実験時におけるコントローラ波形の周波数解析を行い、すべての被験者が、変更後も変更前とほぼ同じ周波数で、ロボットを操作していることを確認した。この結果の一例を図 10 に示す。以上の結果は、コントローラの操作に習熟した被験者であれば、一般的にコントローラの変更により、操作性に違いが生じないことを示していると考えられる。

4.2 共存在感を創出させる実験環境の構築

共存在感の生成が、間合いの生成に必要な条件になっているかどうかを調べるためには、行為のリズムの場合と同様に、間合いが生成されている同場所対戦

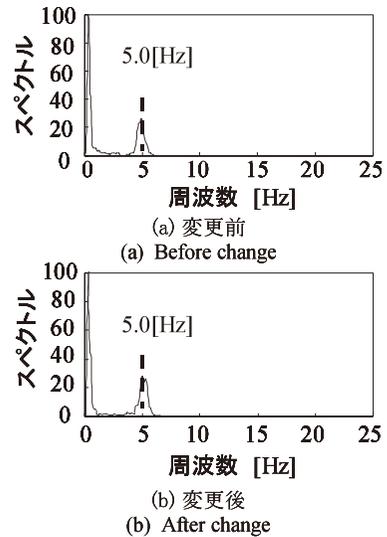


図 10 周波数解析

Fig. 10 Frequency analyses.

において共存在感が生成されないような実験を行い、この場合に間合いが生成されるかどうか調べればよい。

しかし、同場所対戦において、共存在感が生じないような実験環境を構築することは、非常に困難である。そこで、本研究では、間合いが生成されておらず、また、共存在感も生成されていない遠隔対戦において、共存在感を創出させた場合に、間合いが生成されるかどうか調べることにした。しかし、この実験を行うためには、対戦相手の存在そのものを表現するメディアが必要となる。その手法として、まず、ビデオコミュニケーションシステム^{17)~20)}を用いて、ビデオ映像により人物を双方で表現することが考えられる。しかし、この手法では、互いの人物が表現される空間は、自身の身体が存在する空間から切り離されたモニターやスクリーン上に限定される。この場合、“相手（人間）とロボットを介して、剣道の対戦を行っている”という感覚はあるとしても、同場所対戦のように、“相手と同じ場所と一緒に、ロボットを介して、剣道の対戦をしている”という感覚の創出には至らないと考えられる。

そこで、本研究では、相手の存在感を表現できるという身体の影響²¹⁾に着目し、互いの影を送り合うことで、共存在感の創出を可能にした遠隔コミュニケーションシステム（WSCS^{21),22)}を用いて、この問題を解決することにした。具体的には、異なる 2 つの場所に同一形状の空間を用意し、それらの空間において、自身が存在する空間で生成される自身の影と同じように、対戦相手の存在する空間においても、その

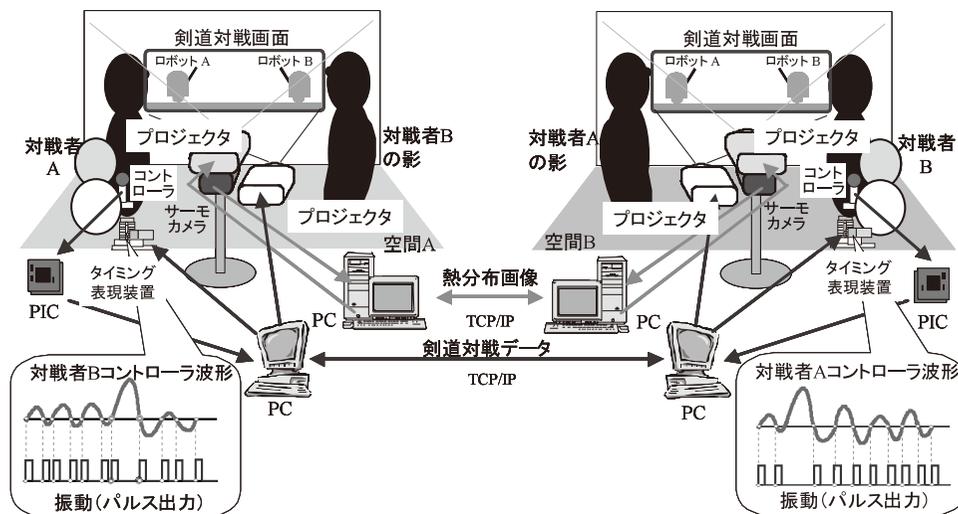


図 11 WCS を組み込んだ剣道ロボット映像対戦システムの構成

Fig. 11 System configuration of “Kendo” match system using WCS.

空間の自身の存在位置に相当する位置から自身の影を生成させる。これにより、両方の部屋で、互いの身体が存在位置の関係が、時間的にも空間的にも共有されるようになる。そして、この互いの身体が表現された空間のスクリーン面に、剣道対戦画面をプロジェクタで投影する。以上により、遠隔対戦においても、相手の存在を自身の存在する空間に感じながら、対戦ができるようにした。そのシステム構成を図 11 に示す。

5. 実験結果

5.1 被験者

最初に、以下に述べる一連の実験の被験者について説明する。本システムを用いた実験では、リズムコントローラの操作に習熟した被験者でなければ、間合いをとり合った対戦実験を行うことはできない。そこで、このコントローラの習熟度合いを図 9 に示す分布を利用して判断し、被験者を選定することにした。具体的には、コントローラの操作に十分に習熟しており、これまでに本システムにおいて 1,000 試合を超える対戦経験がある対戦者 I の結果を、コントローラの習熟度合いの基準の目安として用いることにする。図 7 に示す実験において、被験者 I の信号機の信号が変化してから、ロボットが移動方向を変化させるまでに要した時間（反応時間）の分布は、その平均値が 0.43、その標準偏差が 0.13 である（平均値 ± 標準偏差の範囲が、0.30 ~ 0.56 [s]）。そこで本研究では、これを目安として、反応時間の分布において、平均値 ± 標準偏差の範囲が、0.20 ~ 0.70 [s] の範囲内に収まっているこ

とを、コントローラの習熟度合いを示す基準とする。そして、この基準を満たす 20 代の男子学生 6 人を、本実験の被験者として採用した。

また、本実験においては、本システムにおける剣道の実力の違いにより、結果が異なる可能性がある。そこで、被験者 6 人を互いの実力が接近している 3 人のグループと、互いの実力に差がある 3 人のグループに分けて実験を行うことにした。実験は、基本的には、実力の接近した被験者同士で行うこととし、さらにその結果が、より一般的なものであるかを確認するため、実力差がある被験者同士でも実験を行うことにした。具体的には、前者のグループについては、3 人で 3 ペアを作成し、すべての実験を 1 ペアにつき 100 試合ずつ行ってもらった。また、後者のグループについては、実験ごとに 3 人から 2 ペアを作成し、それぞれの実験について 1 ペアにつき 100 試合行ってもらった。なお、以下の実験結果（図 4 の結果も含む）においては、前者のグループに属するコントローラの固有操作リズム周期（振動数）がそれぞれ 0.17 [s] (6.0 [Hz]) と 0.19 [s] (5.3 [Hz]) である対戦者 M, I により行われた 100 試合の対戦におけるエンタテインメント生成時の操作リズム周期の分布を示すことにする。

5.2 行為のリズムを遮断した同場所対戦

最初に、行為のリズム（コントローラ操作リズム）の伝達が、間合いの生成に必要であるかどうかを実験的に調べるため、同じ場所の対戦において、前章で述べたコントローラ操作音が発生しないリズムコントローラを用いて、同場所に対戦実験を行った。なお、以下に述べるすべての実験においても同様に、コントローラ

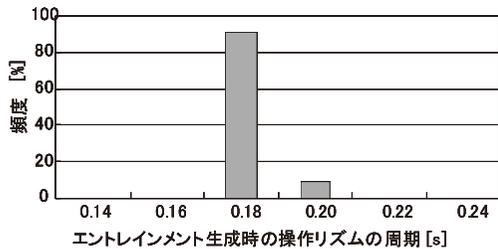


図 12 コントローラ操作リズムの伝達を遮断した同場所実験の結果
Fig. 12 Result of “Kendo” match at the same place in blocking out the sound of the rhythmic controller operation.

操作音が発生しないリズムコントローラを用いている。本実験の結果，“試合に集中できる”というようなコメントも寄せられたが，すべての対戦者から，“相手のロボットの動きが読みにくく，通常と同じ場所での対戦とは異なり，間合いがとれない”とのコメントが得られた。さらに，エンタレインメント生成時の操作リズム周期を見ると，間合いが生成されている同場所対戦とは異なり，ある特定の周期 (0.18 [s] (5.6 [Hz])) のみでエンタレインメントが生成される傾向があり，この周期と 0.20 [s] (5.0 [Hz]) 以外では，エンタレインメントが生成されていないことが確認された (図 12)。なお，同図のヒストグラムと同場所での対戦結果を示す図 4 (a) の間で，等分散性の検定 (F 検定) を行ったところ，有意差が認められた ($p < 0.01$)。また，実力の接近した被験者同士で対戦した他の 2 ペアの結果についても，同様の検定を行ったところ，両方のペアで有意差が認められた (ともに， $p < 0.01$)。さらに，実力に差がある被験者同士で対戦した 2 ペアにおいても，特定周期でしかエンタレインメントが生成されない傾向があることを確認している。したがって，同じ場所での対戦であっても，相手のコントローラ操作リズムが伝達されない場合には，間合いを生成することができず，通常と同じ場所での対戦とは，エンタレインメントの生成のされ方が異なることになる。以上より，行為のリズム (コントローラ操作リズム) の伝達が，間合いの生成に必要なことが実験的に示された。

5.3 身体の影を用いた遠隔対戦

次に，WSCS を用いて対戦相手の身体の影を自身のいる空間に投影して遠隔対戦を行った場合，共存在感が創出されるかどうか調べた。その実験の様子を図 13 に示す。この場合，対戦者からは，“自身の存在する空間に相手の存在が感じられ，相手 (人間) と直接試合をしているような感覚がある”，“試合をしていて楽しい”などのコメントが得られた。この場合，



図 13 身体の影を表現した遠隔剣道対戦の様子
Fig. 13 Appearance of remote “Kendo” match using shadow.

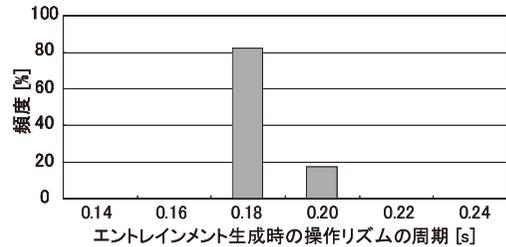


図 14 影のみを用いた遠隔剣道対戦の結果
Fig. 14 Result of remote “Kendo” match only using the shadow.

遠隔対戦であるにもかかわらず，同じ場所でもに試合をしているような感覚が創出されているものと考えられる。このことは，自身のいる空間内において，この空間で生成される自身の影と同じように，相手の影を相手の存在位置から表現し，剣道ロボットシステムの対戦画面を注視しながら，周辺視的に影をとらえることによって，WSCS において集団で共同描画を行った場合²¹⁾と同様に，同じ空間内に相手の存在が位置づけられることを示している。しかし，“相手の予測がしにくく，相手と間合いやタイミングがとりにくい”とのコメントも得られた。さらに，エンタレインメント生成時の操作リズム周期を調べると，間合い生成時とは異なり，特定周期 (0.18 [s] (5.6 [Hz])) でしかエンタレインメントが生成されない傾向があることが確認された (図 14)。なお，同図のヒストグラムと同場所対戦の結果を示す図 4 (a) の間で，等分散性の検定 (F 検定) を行い，有意差があることを確認した ($p < 0.01$)。また，実力の接近した被験者同士で対戦した他の 2 ペアの結果についても，同様の検定を行ったところ，両方のペアで有意差が認められた (ともに， $p < 0.01$)。さらに，実力に差がある被験者同士で対戦した 2 ペアにおいても，特定周期でしかエンタレインメントが生成されない傾向があることを確認している。したがって，自分と相手の間で共存在感が生成されている場合においても，相手の行為のリズムが伝達されない場合には，間合いを生成することがで

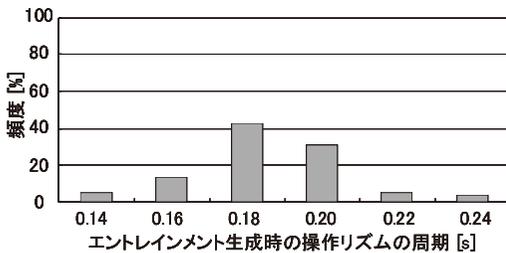


図 15 影とタイミング表現装置を組み合わせ用いた遠隔対戦の結果

Fig. 15 Remote “Kendo” match using both the shadow and the timing display device.

きず、通常と同じ場所での対戦とは、エントレインメントの生成のされ方が異なることになる。以上より、共存感の生成のみでは、間合いの生成に至らないことが実験的に示された。

5.4 身体の影響とリズム表現を用いた遠隔対戦

前節の結果をふまえて、行為のリズムの伝達と影の提示による共存感の生成の両方を組み合わせた遠隔対戦を行った。なお、本実験では、行為のリズムの伝達は、先に述べたタイミング表現装置を利用している。その結果、対戦者から、“相手と同じ場所で試合をしているような感覚があり、試合をしていて面白い”、“同場所対戦と同じように、間合いやタイミングをとることができる”とのコメントが得られるようになった。さらに、エントレインメント生成時の操作リズム周期は、対戦者両者の固有操作リズム周期の間中である 0.18 [s] (5.6 [Hz]) を中心に 0.14~0.24 [s] (4.2~7.1 [Hz]) の間で、幅を持って分布している (図 15)。また、同図のヒストグラムと同場所での対戦結果を示す図 4 (a) の間で、等分散性の検定 (F 検定) や平均値の差の検定 (t 検定) を行ったところ、有意差は認められなかった (ともに、 $p > 0.05$)。実力の接近した被験者同士で対戦した他の 2 ペアに関しては、F 検定については、両方のペアで有意差は認められなかった (ともに、 $p > 0.05$)。しかし、t 検定については、1 ペアで、有意差が認められた ($p < 0.01$)。したがって、実力の接近した被験者同士で対戦した 3 ペアにおいて、本実験と通常と同場所対戦では、少なくともエントレインメント生成時の周期分布の分散は、等しいということができる。また、図 15 と図 12、図 15 と図 14 のヒストグラムの間で、分布の等分散性の検定 (F 検定) を行ったところ、ともに有意差が認められた (ともに、 $p < 0.01$)。そして、実力の接近した被験者同士で対戦した他の 2 ペアの結果についても、同様の検定を行ったところ、両方のペアでともに有意差が認められた (すべて、 $p < 0.01$)。つまり、実力の接近し

た被験者同士で対戦した 3 ペアについて、本実験と行為のリズムを遮断した同場所対戦、本実験と影のみを用いた遠隔対戦において、エントレインメント生成時の周期分布の分散は、等しくないといえる。さらに、実力に差がある被験者同士で対戦した 2 ペアにおいても、特定周期でなく、多様な周期でエントレインメントが生成されることを確認している。したがって、この対戦において、通常と同場所対戦と同様に間合いが生成されているものと考えられる。このことは、共存感の創出させるとともに、相手の行為のリズムを伝達すると、間合いを生成することが可能となり、通常と同じ場所での対戦と同じように、多様な周期でエントレインメントが創出されることを示すものである。

また、以上の一連の実験結果について、これまで述べてきたように、対戦者 M と I の実験結果とほぼ同様な結果が、他の 4 ペアでも得られていることから、対戦者 M と I の実験結果は、コントローラの操作に習熟した被験者同士の対戦における、一般的な結果であると見なされる。

6. 考 察

剣道の対戦では、間合いをとることが勝敗を分ける重要なポイントになる²³⁾。本システムの剣道対戦においては、相手がいつ、どこでロボットの移動方向を変化させる (折り返す) かということ予測することで、間合いを創り出し、その後、この間合いが崩されることによって、勝負が決まる。つまり、間合いは、ロボットを折り返す際の位置と時間 (時刻) の予測が互いの間で一致していなければ生成されない。この予測を行ううえで、映像画面上に表現されるロボットの動きに先立つ行為のリズム (コントローラ操作リズム) が重要な役割を果たしていると考えられる。しかしながら、この情報を伝達するのみでは、間合いは生成されない。これは、本システムの剣道の対戦において、対戦者が、決められた目的とルールの下で自由に振る舞えることに関係していると考えられる。つまり、ここでは、試合が始まってから、いつ、どのような距離 (ロボット間距離) で間合いを創り出すかということや、その創られた間合いをいつ壊して勝負をつけるかというような一連の試合展開が、あらかじめ決まっていないう特徴がある。いい換えれば、本研究の対戦では、“剣道をする (そして、相手に勝つ)” という目的やその目的を達成するためのルールは、事前に決まってはいるが、その対戦において、各人の行為には、多くの可能性があり、あらかじめそれらが互いに共有されているわけではない。よって、相手が今後どのよ

うに試合を進めていこうとしているのかという相手の戦略が読めなければ、相手のロボットの動きに対する予測がうまくできないと考えられる。つまり、相手が、“いつ攻撃にできるかを窺っている（間合いを維持しようとしている）”のか、“相手を攻めて、勝負をつけようとしている（間合いを崩そうとしている）”のかというような相手の意思を読むことができて初めて、相手のロボットの動きが予測できるようになるものと推察される。その場合、互いの意思の共有には、共通の現場に互いが身体を置くことで、ともに存在していることからくる共存在感によって、心情が伝わったり、現場の体験を共有したりすることができるという我々の日常的な体験からも推察されるように、共存在感が重要な役割を果たしていると考えられる²⁴⁾。しかし、共存在感の創出のみでは、間合いは生成されないことを本研究では明らかにした。一方、前述したように、行為のリズムの伝達のみでも間合いは生成されない。したがって、本研究結果は、対戦者がロボットを介して相手と間合いをとり合うためには、相手と現場を共有しているという共存在感と互いの戦略を読み合うための行為のリズムの両方が必要になることを示しているものと推察される。

また、上述のような意思の共有をともなう間合いが生成されている際には、多様な周期でエンタテインメントが生成されるが、このことは、互いの間で多様な関係が創出されていることを意味していると考えられる。つまり、決められた目的とルールの下で互いが自由に振る舞えることができる本システムの剣道の対戦において、即興的に状況に対応して間合いを生成するためには、互いの間で多様な関係を創出できることが必要なのではないかと推察される。そして、そのためには、共存在感の生成と行為のリズムの伝達の両方が必要である。これまで遠隔コミュニケーションを支援する技術として、互いのリズムを表現することで、エンタテインメントの創出を促すシステム²⁵⁾の開発が多く行われてきたが、このシステムは、互いの間で特定の関係しか生成することができないと考えられるので、あらかじめ互いの意思が共有されているような限定された状況にしか対応できないのではないかと推察される。したがって、本研究で得られた知見は、対面時に見られるような即興的かつ多様なコミュニケーションを遠隔地間で行うことを支援するインタフェースの設計指針として、重要な意味を持つものと考えられる。

また、3章で述べたように各人の行為のリズムとそのコヒーレンスの度合いの両方を同時に表現することにより、多様なエンタテインメントが生成されること

が分かっている¹⁶⁾。この結果について、多様なエンタテインメントの生成には、行為のリズムの伝達と共存在感の生成の両方が必要であるという本研究結果と合わせて考えると、互いの行為のリズムのコヒーレンス度合いの表現（コヒーレンス映像表現）は、共存在感の生成に関係している可能性が考えられる。しかし、コヒーレンス映像表現により、対戦相手の身体の影を表現することで得られたような相手との共存在感が創出されているかどうかは定かでない。そこで、今後は、この問題も考慮に入れて、コミュニケーションにおける多様な周期でのエンタテインメント生成の時空的なダイナミクスについて詳細に検討し、多様なエンタテインメントの創出を支援するインタフェースの設計原理を明らかにしたいと考えている。

7. 結 言

本研究では、剣道ロボット映像対戦システムを用いて、間合いやタイミングの生成を支援できるコミュニケーション技術について検討した。本研究をまとめると以下ようになる。

- (1) 間合いが生成される同場所対戦と間合いが生成されない遠隔対戦の対戦環境の違いである共存在感の生成と行為のリズム（コントローラ操作リズム）の伝達に着目した実験を行い、多様なエンタテインメントの生成をともなう間合い生成に必要な条件について調べた。
- (2) 同場所対戦において、行為のリズムの伝達がないと、多様なエンタテインメントをともなった間合いが生成されないことを見出し、行為のリズムの伝達が間合いの生成に必要なことを示した。
- (3) 遠隔剣道対戦において、共存在感を創出するため、相手の存在感を表現できるという身体の影の効果に着目し、身体の影を活用する遠隔コミュニケーションシステム（WSCS）を用いて、離れた場所にいる対戦相手の身体の影を自身のいる空間に投影して、剣道対戦を行うことを実現した。
- (4) 遠隔対戦で、WSCSを用いて相手の身体の影を双方の現場に表現した場合、共存在感が創出されることを確認したが、特定周期のエンタテインメントの生成にとどまり、間合いの生成に至らなかった。しかし、この対戦で、行為のリズムの伝達を合わせて行くと、多様なエンタテインメントをともなった間合いが生成されることが分かった。
- (5) 以上から、間合いの生成には、共存在感の生成と行為のリズムの伝達の両方が必要であることを現象的に示した。また、これにより、相手のロボットの動きを予測することが可能になり、互いの意思が共有され

る可能性があることや、コミュニケーションにおいて互いの中で多様な関係を創出させるためには、行為のリズムと共存感の両方が必要であることを考察した。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金（課題番号 18300044）および、科学技術振興機構 CREST の「デジタルメディア作品の製作を支援する基盤技術」領域における採択課題「人を引き込む身体性メディア場の生成・制御技術」の中で行われた。本研究を遂行するにあたり、貴重なご意見、ご指摘を頂戴した、トキ・コーポレーション株式会社・早稲田大学 WABOT-HOUSE 研究所客員研究員の石引力氏に謝意を表す。また、実験に協力していただいた研究室学生森重佳久、三代尚卿君らに感謝する。

参考文献

- 1) 清水 博：統合による共存の深化、「統合学」へのすすめ 生命と存在の深みから、統合学研究叢書第 3 巻, pp.3-131, 晃洋書房 (2007).
- 2) 松村 明 (編)：大辞林, p.2257, 三省堂 (1988).
- 3) 垣田邦子：話し言葉における話者間の発話リズムの相互作用に関する研究—文長とポーズ長に見られる話者間相互作用について、文部省科研費重点研究平成 5 年度成果報告書, pp.67-73 (1994).
- 4) 三宅美博, 辰巳勇臣, 杉原史郎：交互発話における発話長と発話間隔の時間的階層性, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.6, pp.670-678 (2004).
- 5) 緒方大樹, 竹中 毅, 上田完次：異なる時系列を持った視聴覚信号に基づくリズム生成に関する研究, 第 7 回 SICE システムインテグレーション部門講演会講演論文集 (SI2006), pp.1072-1073 (2006).
- 6) 今 誉, 三宅美博：協調タッピングにおける相互同調過程の解析とモデル化, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.7, No.4, pp.61-70 (2005).
- 7) Condon, W.S. and Sander, L.: Neonate movement is synchronized with adultspeech, *Science*, No.183, pp.99-101 (1974).
- 8) 三宅美博, 宮川 透, 田村寧健：共創出コミュニケーションとしての人間—機械系, 計測自動制御学会論文集, Vol.37, No.11, pp.1087-1096 (2001).
- 9) 渡辺富夫, 大久保雅史, 小川浩基：発話音声に基づく身体的インタラクションロボットシステム, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.66, No.648, pp.251-258 (2000).
- 10) エドワード・ホール (著), 日高敏隆, 佐藤信行 (訳)：かくれた次元, pp.18-24, みすず書房 (1970).
- 11) Kendon, A.: *Conducting Interaction: patterns of behavior in focused encounters*, Cambridge University Press (1990).
- 12) Sellen, A.J.: Speech patterns in video-mediated conversations, *Proc. CHI'92*, pp.49-59 (1992).
- 13) 三輪敬之, 板井志郎：力触覚インタフェースによるタイミングの表現と間合いの生成について, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.5, No.2, pp.63-71 (2003).
- 14) 三輪敬之, 石引 力, 荒井 大, 西島 潤：身体性に着目したエンタテインメント創出過程の計測, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.2, No.2, pp.79-85 (2000).
- 15) 木村 敏：生命のかたち/かたちの生命, pp.87-89, 青土社 (1995).
- 16) 板井志郎, 三輪敬之：コヒーレンス映像表現による間合いの生成と 1/f ゆらぎについて, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.7, No.4, pp.71-79 (2005).
- 17) Tang, J.C. and Minneman, S.L.: VideoWhiteboard: video shadows to support remote collaboration, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Reaching through Technology*, pp.315-322 (1991).
- 18) Ishii, H., Kobayashi, M. and Grudin, J.: Integration of Inter-Personal Space and Shared Workspace: ClearBoard Design and Experiments, *Proc. CSCW'92*, pp.33-42 (1992).
- 19) Morikawa, O. and Maesako, T.: HyperMirror Toward Pleasant-to-use Video Mediated Communication System, *Proc. CSCW'98*, pp.149-158 (1998).
- 20) Kuzuoka, H., Yamashita, J., Yamazaki, K. and Yamazaki, A.: Agora: A remote collaboration system that enables mutual monitoring, *Proc. CHI'99*, pp.190-191 (1999).
- 21) Miwa, Y. and Ishibiki, C.: Shadow Communication: System for embodied interaction with remote partners, *Proc. CSCW 2004*, pp.467-476 (2004).
- 22) 石引 力, 渡邊 隆, 三輪敬之：影を場の統合メディアとする共存コミュニケーションシステムの開発, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.7, No.3, pp.311-318 (2005).
- 23) 清水 博：生命知としての場の論理, pp.155-251, 中公新書 (1996).
- 24) 三輪敬之：影システム, 「統合学」へのすすめ 生命と存在の深みから, 統合学研究叢書第 3 巻, pp.237-260, 晃洋書房 (2007).
- 25) 渡辺富夫, 大久保雅史, 石井 裕, 中林慶一：バーチャルアクターとバーチャルウェブを用いた身体的バーチャルコミュニケーションシステム, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.2, No.2, pp.1-10 (2000).

(平成 19 年 4 月 6 日受付)

(平成 19 年 9 月 3 日採録)



板井 志郎（正会員）

平成 15 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了．平成 18 年同大学院理工学研究科博士後期課程満期退学．平成 18 年同大学工学部機械工学科助手．平成 19 年より，同大学創造理工学部総合機械工学科助手，現在に至る．



三輪 敬之（正会員）

昭和 51 年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了．同大学助手，講師，助教授を経て，昭和 61 年同大学工学部機械工学科教授，平成 19 年より同大学創造理工学部総合機械工学科教授，現在に至る．工学博士．場の工学技術，共創システム，植物のコミュニケーション等の研究に従事．日本機械学会フェロー，ヒューマンインタフェース学会，電子情報通信学会，IEEE，ACM 等の会員．
