



身体行為のリズム表現による  
エントレインメントと間合いの創出に関する研究

Creation of Entrainment and  
“*Maa*” (Temporal and Spatial Interval)  
by Rhythm Expression of Bodily Action

2009 年 7 月

早稲田大学大学院 理工学研究科  
機械工学専攻 材料設計研究

板井 志郎

# 目次

<b>第 1 章 序論</b> .....	1
1.1. 研究背景.....	1
1.2. 研究方針.....	5
1.2.1. 場の自己組織化と引きこみ（エンタテインメント）.....	5
1.2.2. 間合いの生成と場の共創出.....	7
1.3. 従来研究.....	11
1.4. 研究目的.....	16
1.5. 本論文の構成.....	16
<b>第 2 章 身体行為のリズム表現によるエンタテインメントと間合いの計測方法         - 協調ゲームシステムと剣道ロボットシステム -</b> .....	21
2.1. はじめに.....	21
2.2. 身体行為のリズム表現手法 - リズムコントローラの開発 - .....	21
2.2.1. リズムコントローラのコンセプト.....	21
2.2.2. リズムコントローラによるアバターの操作手法とその特徴.....	26
2.2.3. リズムコントローラ操作の特徴量.....	28
2.2.4. エンタテインメントの判定手法.....	30
2.2.5. 被験者の選定方法.....	31
2.3. 協調ゲームシステム.....	32
2.3.1. システムのコンセプト.....	32
2.3.2. システム構成.....	35
2.4. 剣道ロボットシステム.....	36
2.4.1. システムのコンセプト.....	36
2.4.2. システム構成.....	39
2.5. まとめ.....	40
<b>第 3 章 間合いの生成とエンタテインメント（予め場が共有されている場合）</b> .....	42
3.1. はじめに.....	42
3.2. 協調ゲームシステムの予備実験.....	43
3.2.1. バンド許容長さに関する検討.....	43
3.2.2. ゲームの成立に必要な条件に関する検討.....	45

3.3. 協調ゲームシステムの実験結果	48
3.3.1. 完全弾性反射の場合	48
3.3.2. イレギュラー反射の場合	50
3.4. 考察	53
3.5. まとめ	55
<b>第4章 間合いの生成とエンタテインメント（予め場が共有されていない場合）</b>	<b>58</b>
4.1. はじめに	58
4.2. 剣道ロボット対戦の結果	59
4.2.1. 被験者の選定	59
4.2.2. 同じ場所での対戦結果	59
4.2.3. 離れた場所での対戦結果	62
4.3. ゆらぎとエンタテインメントの解析結果	64
4.3.1. ゆらぎに関する解析	65
4.3.2. エンタテインメントに関する解析	70
4.4. リズムコントローラ波形の特徴	72
4.5. 考察	73
4.6. まとめ	78
<b>第5章 身体リズムの力触覚表現による間合いの生成支援</b>	<b>80</b>
5.1. はじめに	80
5.2. 実験手法	80
5.2.1. タイミング表現装置の開発	82
5.2.2. 同場所対戦で身体リズムの伝達を遮断する実験環境の構築	82
5.3. 実験結果	85
5.3.1. タイミング表現装置を利用した同じ場所での対戦	85
5.3.2. タイミング表現装置を利用した離れた場所での対戦	86
5.3.3. 身体リズムの伝達を遮断した同じ場所での対戦	92
5.4. 考察	94
5.5. まとめ	97
<b>第6章 コヒーレンス映像表現と身体リズムの表現による間合いの生成支援</b>	<b>99</b>
6.1. はじめに	99

6.2. コヒーレンス映像表現 .....	99
6.3. 実験結果 .....	101
6.3.1. コヒーレンス映像表現のみを用いた遠隔対戦 .....	101
6.3.2. コヒーレンス映像表現とタイミング表現装置の両方を用いた遠隔対戦 .....	103
6.4. 考察 .....	107
6.5. まとめ .....	113
<b>第7章 結論 .....</b>	<b>116</b>
7.1. 本論文の結論 .....	116
7.1.1. エンタテインメントと場の共創出 .....	118
7.1.2. 遠隔地間での場の共創出の支援手法 .....	120
7.2. 今後の課題と展望 .....	121
<b>参考文献 .....</b>	<b>128</b>
<b>謝辞 .....</b>	<b>134</b>
<b>研究業績 .....</b>	<b>135</b>
<b>著者紹介 .....</b>	<b>139</b>

# 第 1 章 序論

## 1.1. 研究背景

近年，家庭，学校，病院，会社，地域など，我々の生活の身近な現場で，高齢者や子どもへの虐待，いじめやハラスメント，引きこもりや急増するニート，医療ミス等に代表される深刻な社会問題がいくつも発生している．これに呼応するかのようには，最近では，共創による場づくり支援技術が注目を集めつつある．実際，共創には，工学，情報科学，社会科学，ビジネス，産学連携，地域コミュニティ支援など，社会の様々な分野から関心が寄せられており[1]～[7]，例えば，Google において，共創という言葉で検索を行うと，ヒット数が約 870 万件に達する状況にある[8]．

そもそも，共創（co-creation）とは，“違った背景や価値観を持つ人々が同じ目標や夢を共有し，それらを一緒になって実現していく創造的な共同活動”[9]～[12]のことであり，シャープの元副社長である佐々木正や本田技研工業の元社長である久米是志らが，1980 年代から 90 年代にかけて，提唱し始めたものである．佐々木は，自身の企業での様々な製品の開発体験を基に，独創的な人物が一人だけで大きな成果を出すことが難しくなった現代社会において，新しい何かを生み出すためには，特長のある人物が集まり，異なった価値観を持つ者同士が確かな信頼関係の上で共鳴しあうことが必要であることを主張し，共創というコンセプトを提唱した．そして，安心してお互いの個性をぶつけ合うことができるプラットフォームが共創の基盤となると述べている[9]．久米も，自らのエンジンの開発体験に基づいて，創造が 1 人の天才によって独創としてなされるのではなく，人々の出会いの中で共創によって行われることを指摘している．そして，共創のための条件を，自らの経験から導き出した[11]．それは，共通目的をもつこと，平等心をもつこと，異質性のあること，創出の場を共に経験することの 4 つである．

以上の内容を踏まえると，このような共創活動を実現するためには，清水や三輪らが述べているように[11][12]，“場”が重要になることが分かる．“場”とは，物理的な空間ではなく，現場に自身が存在することによって自身の内面に現れてくる，“いま，ここ”の現場の全体的な状況のことである．共創は，“異なった価値観を持つ異質な人々”，つまり，年齢や性別，障害の有無などによらない様々な人々の間で行われるコミュニケーションである．したがって，互いに異なる場を持つ人々の間で行われるコミュニケーションということになるので，そのコミュニケーションでやり取りされる情報の意味が，参加者の間で必ずしも共有されるとは限らない．つまり，共創を実現するためには，まずもって，互いの異なる場を共有することが必要となる．なぜなら，これにより，はじめてコンテキスト（状況的意味）の共有が



図1.1 共創の即興劇モデル

可能となり，それによってコミュニケーションが成立し得るからである．したがって，共創を実現するためには，参加者の間で，場を共創出することが重要になる．

また，共創の理論的なモデルとして，清水により，即興劇モデルが提唱されている（図 1.1）[11][13][14]．このモデルは，共創を，それぞれの役者が異なる演技を多様に創出しながら，シナリオを持続的に創出していく即興的なドラマづくりとして捉えることで，共創の原理を解明しようとするものである．即興劇は，予めシナリオが決まっていないドラマであるので，そのドラマに役者が参加しようとするれば，役が決まっていなくてもいい，どのような役でも演じることができる状態でなければならない．つまり，役者は，どのような表現をも自由自在に（多様に）生み出すことができなければならない．さらに，即興劇においては，予めシナリオや配役が決まっていないので，役者各人は，互いの関係づけができていない状況でドラマを始めることになる．このようなドラマを役者が共演するためには，役者が，互いの役者の行為により変化する舞台の状況，言い換えれば，場を共有することが必要になるのはいうまでもない．この際，舞台における役者の関係，つまり，自身を含めた役者の舞台における位置づけを共有することが重要になる．それは，役者の演じる役割が，舞台における役者の位置づけに大きな影響を受けるので，役者の位置づけが変化すると，それに伴ってシナリオが変化するとともに，舞台の状況（場）も変わってしまうからである．以上より，即興劇モデルでは，共創について，役者の異なる場が自己組織化され，その統合された舞台（共存在の場）に自身を位置づけ

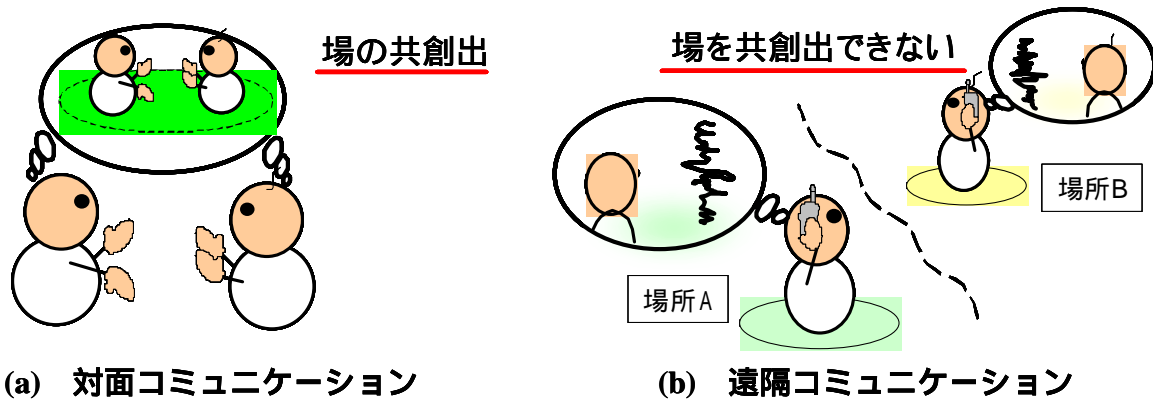


図1.2 対面コミュニケーションと遠隔コミュニケーションの違い

ることで、それぞれの役者が異なる演技を多様に創出しながら、シナリオを持続的に創出していく即興的なドラマづくりが可能になると説明している。このことは、共創を実現するためには、互いの間で場（舞台）を共創出することが必要になることを示すものである。

それでは、このような場の共創出はいかにして実現されているのであろうか。この問題について、現行の IT を用いた遠隔コミュニケーションで実現できるかということを手掛かりにして考えることにする。これまでの IT ネットワークを活用した場づくりの試みにおいては、互いの間で場を共創出することが困難であることが、体験的によく知られている[15][16]。これは、IT を用いた遠隔コミュニケーションでは、場の状況を送りあうことができないからではないかと考えられる。実際、携帯電話やチャット、TV 会議システムを用いた遠隔コミュニケーションでは、気持ちが相手に伝わらない、存在感が感じられない、相手の息づかいが感じられない、相手とうまく間（ま）が取れないといった問題がある。そして、このため、意味の取り違いや誤解によるトラブルが生じやすく、インターネット掲示板上のトラブルに端を発する事件は、後を絶たない[17]～[19]。つまり、図 1.2 に示すように、現象的には、互いが同じ場所に存在する対面コミュニケーションとは異なり、互いが同じ場所に存在しない遠隔コミュニケーションでは、場を共創出することは困難であるということになる。そこで、次に、これまでに提案された人間のコミュニケーションのモデル[20]を紹介し、これらを基に対面コミュニケーションと遠隔コミュニケーションの違いについて考え、場の共創出がいかにして行われているのかを考えることにする。まず、代表的なコミュニケーションのモデルとして、Shannon-Weaver のコミュニケーションモデル[21]が挙げられる。これは、情報の送り手が、情報を記号化し、それをコミュニケーションチャンネルに載せ、情報の受け手は、その情報を解読するという形でなされる（図 1.3）。しかし、人間のコミュニケーションは、このモデルでは説明できない。それは、人間のコミュニケーションは、物理データの通信のように送り手と受け手の間で何らかの情報がやり取りされれば、それでコミュニケーションが成立するわけではなく、受け手が送り手の伝達したい情報の意味内容を

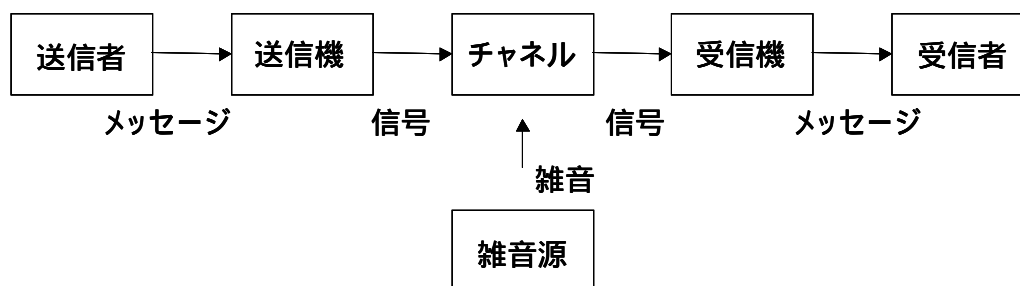


図1.3 Shannon-Weaverのコミュニケーションモデル

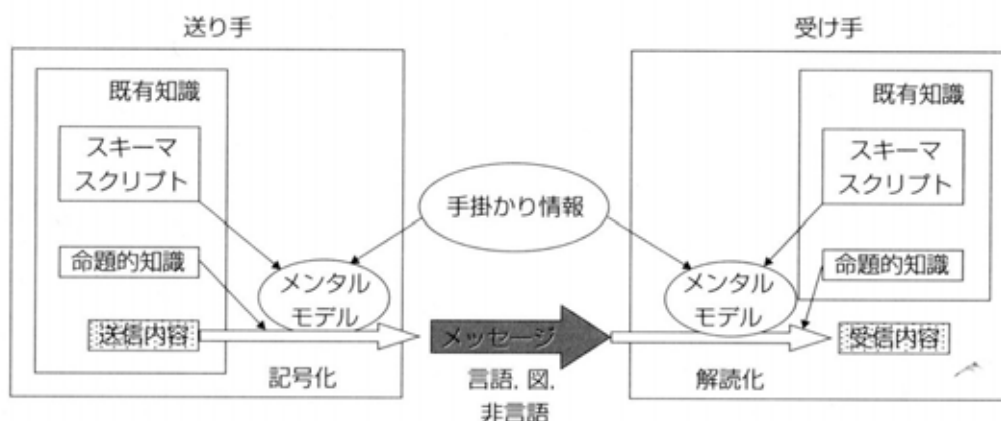


図1.4 松尾のコミュニケーションモデル(コミュニケーションの心理学(松尾,1991)より抜粋)

理解できなければコミュニケーションが成立したとはいえないからである。つまり，Shannon-Weaver のモデルは，情報の意味という問題が抜け落ちていいる。この点を踏まえ，これまでに，いくつかのモデルが提案されている。例えば，Jakobson は，コンテキストやコードの共有，コミュニケーションを開始し，維持するための物理的なチャネルの利用と心理的なつながりを可能にする送り手と受け手の間のコンタクトが必要であると考え，モデルを構築した[20]。しかしながら，どのようにメッセージが生成するかというコンテキストの問題についての説明が不充分であるため，Shannon-Weaver のモデルの代替でしかなかった。また，Anzieu と Martin は，心理社会モデルを提唱し，コミュニケーションは，言葉だけではなく，イントネーション，ジェスチャ，姿勢，空間を利用し，解釈することで，その中で当事者が意味を構築するグローバルシステムであると主張した[20]。さらに，松尾は，コミュニケーションでやり取りされる情報の意味を理解するための心的な枠組みとしてのメンタルモデルを提唱し，受け手が送り手の送ったメッセージの伝達意図を理解するためには，送り手と受け手双方のメンタルモデルを一致させる必要があると主張している[22]（図 1.4）。そして，手掛かり情報が，メンタルモデルの合致に関わっていると述べている。ここで，松尾は，手掛かり情報とは，対面コミュニケーションにおいて通常意識されない，環境情報，他者の存在，社会的文脈（関係）等を指すとしているので，これは，記号化困難な暗在的な情報とみなすことができるだろう。なお，松尾が述べているメンタルモデルは，本論文における場に近いところもあるように推

察されるが、メンタルモデルそのものがどのようにできるのかということは、ほとんど議論されていない。

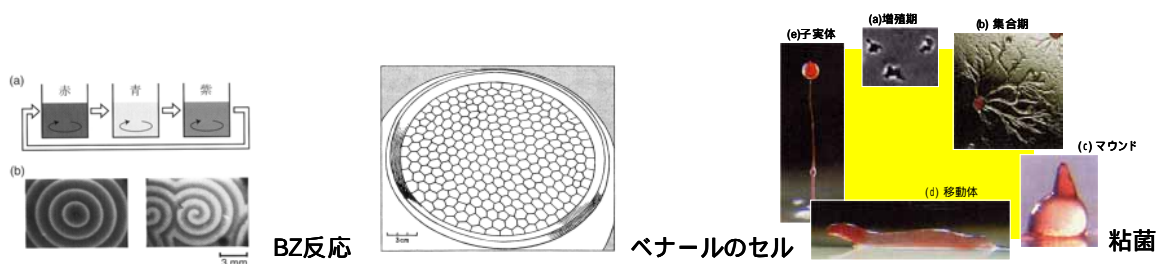
以上の内容を整理すると、人間のコミュニケーションにおけるコンテキストの共有には、記号化可能な情報だけでなく、記号化困難な暗在的な情報（手掛かり情報）が必要になるということになる。しかし、現行のメディアを用いた遠隔コミュニケーションにおいて、このような記号化困難な手掛かり情報のやり取りが十分に行われているとは考えにくい。その一方で、互いの身体が同じ場所に居合わせる対面コミュニケーションにおいては、コンテキストが共有されやすい。したがって、場の共創出は、記号を介したコミュニケーションだけではなく、互いの身体が同じ現場に居合わせることで可能となる身体と身体とが直接的に伝え合うコミュニケーションにより、暗在的な情報のやり取りが行われることで、実現していると考えることができる。つまり、場の共創出は、身体のはたらきによる自己組織化現象であると考えられる。しかし、この原理は、明らかにされていない。

以上を踏まえて、本研究では、人間同士のコミュニケーションにおける場の共創出の原理に関して研究することにする。次節では、本研究において、場の共創出について、どのような問題を対象として、それに対してどのようにアプローチして研究を進めるのかを説明する。

## 1.2. 研究方針

### 1.2.1. 場の自己組織化と引きこみ（エンタテインメント）

自己組織化現象とは、システムが、秩序を自律的に創り出す現象のことを指す。つまり、構造のなかったところに、ある特徴的な構造が生まれ、システムの秩序の度合いが上がるということである[23]。このような現象は、熱力学的な相転移現象[24]（例えば、結晶形成、強磁性体の自発磁化、散逸構造などの非平衡状態における相転移）、生命システムにおける諸現象[25]、生物進化[26]、社会集団の形成と発展[27]、化学反応[28]など、広範な分野で見られることが分かっている（図 1.5）。このように、自律的に秩序を創り出す自己組織化現象は、物理現象から、生命現象、心理現象に至るまで、複雑さのレベルが異なる様々な分野で見られる現象ではあるが、これが起きる原理には、共通点があるように思われる。そこで、本研究では、自己



**図1.5 自己組織化現象**

組織に関する科学的な理論として、現在、世界で広く受け入れられているプリゴジンによる散逸構造論[24]に着目し、身体のはたらきによる一種の自己組織化現象である場の共創出の原理を明らかにすることを目指す。

ここで、秩序が何を意味しているかということが問題になるが、“要素のふるまいやはたらきのあいだに、コヒーレンスが発生すること[23]”と考えることにする。それは、プリゴジン[24]も指摘しているように、コヒーレンスが、自己組織化を促すキーワードになるからである。なお、コヒーレンスとは、2個以上のミクロな要素の時間変化において、それぞれの要素の状態を示す量に、一定の関係があることを意味する。つまり、散逸構造によれば、自己触媒能を持つ要素からなるシステムが、システムの内部に過剰なエネルギーが蓄えられて、不安定な状態にあるとき、この過剰なエネルギーが散逸されることによって、各要素の動きにコヒーレンスが実現され、秩序が形成されることになる。ここで、なぜ、過剰なエネルギーの散逸に伴ってコヒーレンスが生成されるのかという疑問が生じるが、これは、このコヒーレンスが生み出されることによって、システムの内部にある過剰なエネルギーは、要素の自己触媒性に基づく連鎖反応を伴って、効率よく散逸することが可能になるからである[23][24]。以上をまとめると、自己組織化現象における秩序形成において、コヒーレンスの生成が極めて重要な役割を担っていることが分かる。そして、このコヒーレンスの生成を生み出す原理が、引き込み（リズムの同期現象）である。そこで、本研究では、引きこみに着目して、場の共創出の原理について調べることにする。

引きこみとは、自律的な振動子、すなわち、外部からの周期的なエネルギーの供給がなくても、自身の仕組みによって持続する振動子が、弱い相互作用をすることにより、同期状態に向かうプロセスのことである[29]。また、同期状態といっても、狭義から、広義のものまであり、狭い意味では、各振動子の変数が全て同じ振動をする状態（完全同期）をいい、広い意味では各振動子が同じ振動数で振動する状態、すなわち、位相差が時間的に変化しない（位相関係が成立する）状態（位相同期、位相ロック）をいう（図1.6）。つまり、引き込み（以下、引き込みを広義の意味で捉える）とは、互いの振動子の位相にコヒーレンスを生成させることを意味しており、この現象は、数学、物理、化学、生物学、工学、脳科学、社会科学など、様々な学問分野で観察される普遍的な現象である[28]（図1.7）。

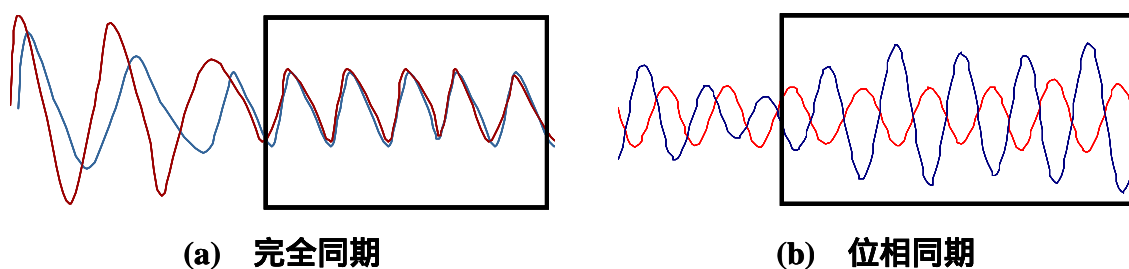


図1.6 完全同期と位相同期

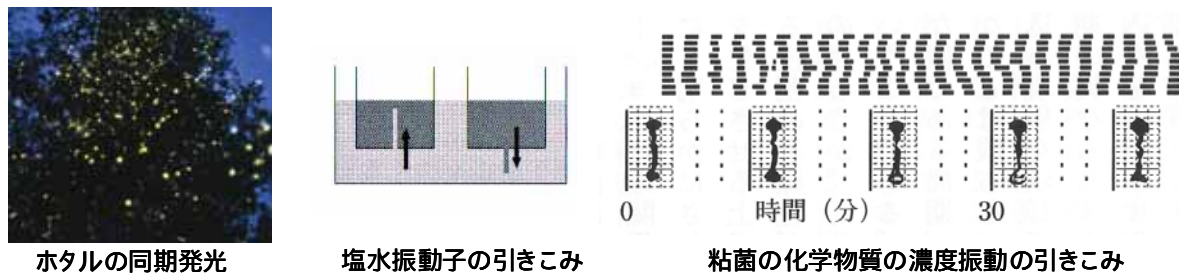


図1.7 引き込み現象

この際，人間同士のコミュニケーションにおいても，このような引きこみ現象が見られるのかということが問題となるが，これについては，Condon らの研究が有名である．Condon らは，先に，対面した状態で行われる対話のような人間同士のコミュニケーションにおいて，それが円滑に行われている際には，無意識のうちに互いの身体リズムや生理的变化が同調する，すなわち引きこみが起こることを，映画フィルムの解析により報告している[30]．また，先に，遠隔コミュニケーションでは，場が共創出されにくいことについて説明したが，このような引きこみが，遠隔よりも対面コミュニケーションにおいて生成されやすい傾向があるとの報告もある[31]．このことは，引きこみが，場の共創出に関係している可能性があることを示すものである．ただし，本研究で取り扱うコミュニケーションは，共創であり，これは，その場の状況に合わせて，コミュニケーションにおけるシナリオを即興的に創出することが必要となるコミュニケーションである．このような場の共創出が起きるコミュニケーションにおける秩序の生成では，これまでに研究されてきた自己組織化現象とは異なり，一度，秩序が生成されるとそれが維持され続けるというタイプの秩序形成ではなく，次々に新たな秩序が生成され続けるということが起きていると予想される．なぜなら，ある特定の秩序を創り，それを維持するだけでは，新しいシナリオの創出が起きないように推察されるからである．つまり，この場合，一度できた秩序を壊し，もう一度，新たな秩序を創るといったプロセスが必要になるように思われる．そこで，本研究では，身体リズムの引きこみ現象の生成と崩壊，さらには，引きこみ現象の多様性ということまで含めて，身体リズムの引きこみ現象と場の共創出の関係を調べ，場の共創出の原理について検討することにする．なお，人間同士のコミュニケーションにおける引きこみ現象は，一般的にエントレインメントと呼ばれることが多いので，本研究においても，これにならって，以下，エントレインメントと呼ぶことにする．

### 1.2.2. 間合いの生成と場の共創出

場の共創出とエントレインメントの関係を調べる際に問題となるのは，場の共創出が，自身の内面で起きる現象であるため，外側から観察することが極めて困難であることである．そこで，間合いに着目し，この問題に接近することにした．なお，

## 第1章 序論

本論文では、間合いは、時間的な間（ま）と空間的な間（ま）の両方の意味を含むと考えることにする。

時間的な間（ま）とは、簡単にいえば、タイミングやテンポのことである[32]が、これを合わせることは、人間同士の協調作業においては、極めて重要になる。これは、スポーツの場面において、顕著である。例えば、大相撲では、両者が同時に立ち会いをして、相撲が始まるが、片方が立ったとしても、もう一方がまだ立っていないと、待ったになる。このことが、間（ま）（もしくは、間合い）が合わないといわれる。ここで、大相撲の立ち会いにおいては、どのタイミングで取り組みを始めるかは、両者の力士に委ねられており、両者の合意により、立ち会いが行われることになる。したがって、各人の内部で創られる主観的な時間が、共有されなければ、立ち合いは成立しない。つまり、間（ま）が合うということは、各人の間で、“いま”という主観的な時間が合致していることを意味している。

次に、空間的な間（ま）について考える。自分と相手が同じ場所にいる際に生成される、互いの身体と身体的位置関係や距離が、自身の心の状態を反映していることは、だれでも経験的に知っていることであろう。本研究では、このような心理的な距離感が反映された、互いの空間的な関係性のことを空間的な間（ま）と呼ぶことにする[32][33]。この空間的な間（ま）は、対人距離と密接に関係するものであり、これについては、Hall のプロクセミックスに関する研究が良く知られている[34]。Hall は、対人距離が、社会的、個人的な関係や、その場の状況を反映するような形で、密接距離（0~45[cm]）、個体距離（45~120[cm]）、社会距離（120~360[cm]）、公衆距離（360~[cm]）の四種類に分類でき、それぞれ近接相と遠方相に分けられることを示している。そして、人々がそのとき互いにどんな気持ちを抱き合っているかが、用いられる距離を決めるのに決定的な要素になると述べている。さらに、このような距離は普段意識して創られるものではないが、意識して操作すると相手の心理に影響を及ぼすことも報告している。また、Kendon は挨拶行動において、対人距離に応じてジェスチャが異なることや、複数人が対話するときに生成される身体的位置関係が、その場の状況によって変化することを示している[35]。したがって、空間的な間（ま）は、周囲の環境や相手との社会的な関係性、その時々的心情を反映した形で生成される空間的な関係性とみなすことができる。すなわち、空間的な間（ま）が生成されるということは、共通の場所へと自身と相手を位置づけることとほぼ同義である。つまり、各人の間で、“ここ”という、互いの内部に生成される空間が合致していることを意味している。

以上をまとめると、時間的な間（ま）と空間的な間（ま）が生成される（合う）ということは、互いの存在する現場における、“いま、ここ”，すなわち、“場” が合致していることを意味している。つまり、互いの間で、場が合致することにより、間合いが互いの身体を介して表現されるのではないかと考えられる（図 1.8）。そこで、本研究では、間合いの生成により場の共創出を評価し、間合いとエントレイン

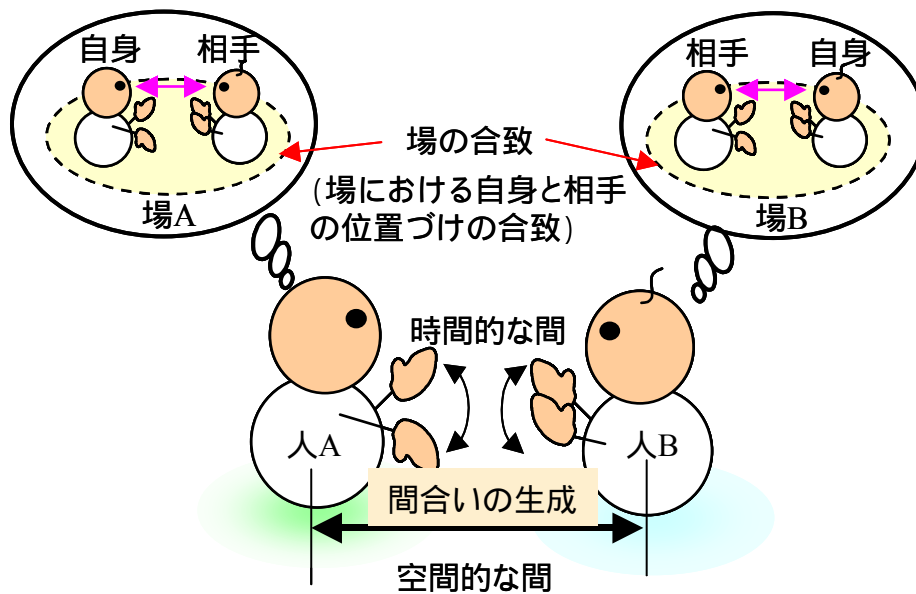


図1.8 場の合致による間合いの生成

メントの関係を調べることで、場の共創出とエンタテインメントの関係を明らかにすることを目指す。

ただし、この際、間合いが生成されたからといって、必ずしも場の共創出が起きるとは限らないことが問題となる。つまり、コミュニケーション開始以前に、互いの間で関係づけができておらず、コミュニケーション中における間合いの取り方に対する拘束が弱い（自由度が大きい）場合においては、場の共創出が起きるが、コミュニケーション開始以前に、互いの間で関係づけができていて、コミュニケーション中における間合いの取り方に対する拘束が強い（自由度が小さい）場合では、場の共創出は起きないと考えられるのである。前者のような、互いの間で関係づけができていない場合というのは、具体的には、インクルーシブダンスに相当する。図1.9に、間合いの取り方に対する拘束の強い場合や弱い場合に相当するコミュニケーションの典型的な例についてまとめたものを示す。インクルーシブダンスとは、障害の有無や年齢、性別、舞踊経験などにかかわらず、さまざまな活動者が、身体を通して共に創造・表現・交流を行う身体活動のことである（図1.10）[36]。このようなインクルーシブダンスの特徴として、予めコミュニケーションのシナリオや互



図1.9 コミュニケーションにおける間合いの取り方に対する拘束の度合い



図1.10 インクルーシブダンス

いの役柄が決まっていないこと、さらには、異質な人々の間で行われることが挙げられる。すなわち、ダンスをしていく中で、自身の位置づけ（役柄）が決まり、多様な身体表現が創出される。そして、これにより、ストーリー性のあるコミュニケーションが即興的に紡ぎだされていくのである。つまり、予めコンテキストが共有されておらず、互いの役柄、つまり、場における互いの存在の位置づけが、外部から限定されていない状態でコミュニケーションすることになるので、コミュニケーション開始以前に、互いの間で関係づけができておらず、コミュニケーション中における間合いの取り方に対する拘束が弱い（自由度が大きい）。したがって、この場合、予め場が共有されておらず、互いのコミュニケーションを介して、場が共創出されることになる。一方、後者の、互いの間で関係づけができている場合というのは、オーケストラによるクラシック音楽の演奏のように、コミュニケーションのシナリオ（オーケストラで演奏する曲）が決められていて、予めコンテキストが共有された状態でコミュニケーション（演奏）を行うことに相当する。よって、互いの役柄、つまり、場における互いの存在の位置づけが、外部から限定されることになるので、コミュニケーション開始以前に、互いの間で関係づけができてしまうことになる。つまり、この場合、外部から場が限定されており、予め場が共有されていることになるので、互いのコミュニケーションを介して、場が共創出されることはない。

以上、本節では、本研究では、間合いの生成に着目して、場の共創出とエンタテインメントの関係について調べることにについて述べた。あわせて、インクルーシブダンスのような間合いの取り方に対する拘束が弱く、予め場が共有されていないようなコミュニケーションを対象としなければ、場の共創出とエンタテインメントの関係を調べることができないことについて説明した。次節では、従来の間合いやエンタテインメントの研究について概説し、それらの問題点について指摘しながら、本研究で取り組むべき課題について、具体的に示すことにする。

### 1.3. 従来研究

本研究では、エンタテインメントと間合い（時間的な間（ま）と空間的な間（ま））に着目し、場の共創出の原理を明らかにすることを目的としている。本節では、場の共創出という観点から、従来の研究について整理し、本研究の位置づけを行うことにする。前節で述べたように、間合いの取り方に対する拘束の度合いが、場の共創出に関係している。つまり、間合いの取り方に対する拘束が強く、予め場が共有されている場合には、場の共創出が起きにくい。一方、間合いの取り方に対する拘束が弱く、予め場が共有されていない場合には、場の共創出が起きる。そこで、間合いの取り方に対する拘束の度合いという観点から、従来の研究について整理することにする。その図を図 1.11 に示す。同図は、2 つの軸が設定されている。第 1 の軸は、時間的な間（ま）の取り方に対する拘束に関するものであり、時間的な間（ま）の取り方に対する拘束が強い研究を左側に、時間的な間（ま）の取り方に対する拘束が弱い研究を右側に配置している。第 2 の軸は、空間的な間（ま）の取り方に対する拘束に関するものであり、空間的な間（ま）の取り方に対する拘束が強い研究を下側に、空間的な間（ま）の取り方に対する拘束が弱い研究を上側に配置している。したがって、同図において、左下に位置づけられている研究ほど、間合いの取り方に対する拘束が強い、つまり、予め場が共有されていて、場の共創

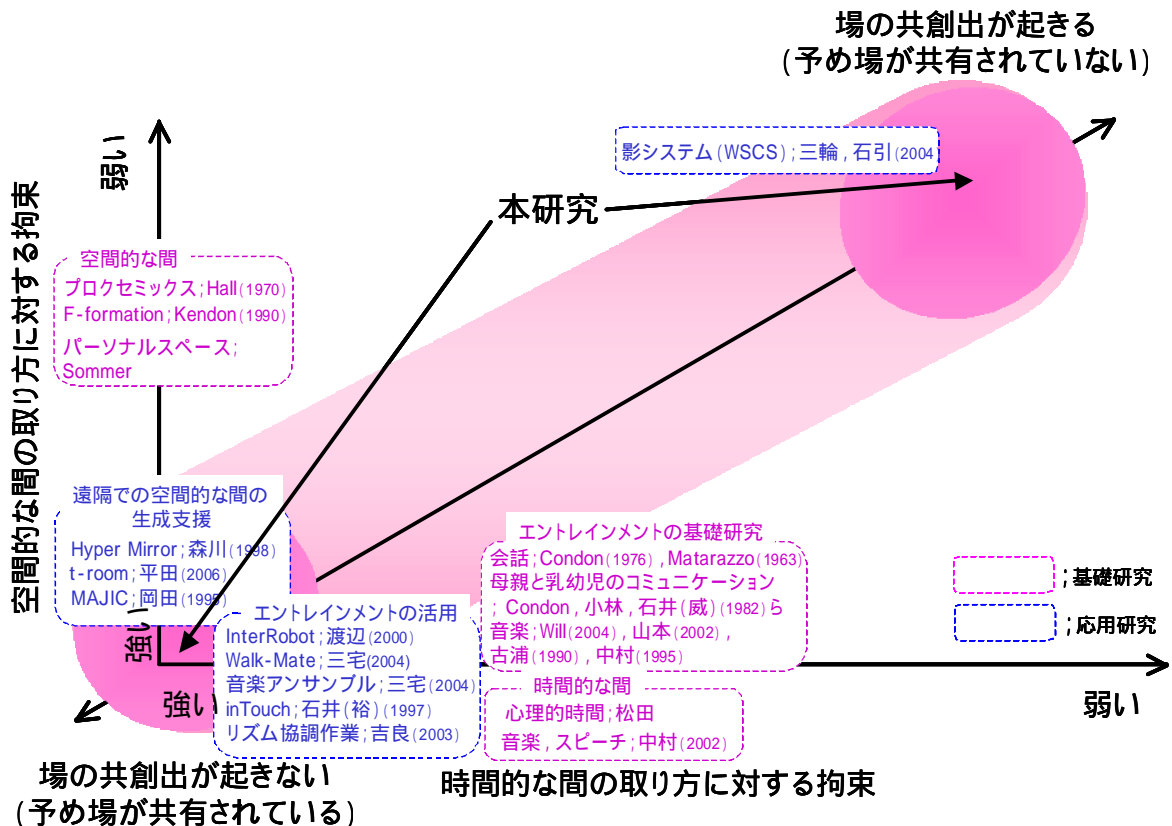


図1.11 間合いの取り方に対する拘束度合いに着目した研究マップ

出が起きにくい研究ということになる。一方、右上に位置づけられている研究が、間合いの取り方に対する拘束が弱い、つまり、予め場が共有されておらず、場の共創出が起きる研究ということになる。また、同図において、時間的な間（ま）の問題のみを取り扱った研究を、第1の軸上に、空間的な間（ま）の問題のみを取り扱った研究を、第2の軸上に、位置づけている。同図より、場の共創出を取り扱った研究は、三輪らによる影をメディアとしたコミュニケーションに関する研究以外は、ほとんどないといってよく、既存の研究の大部分が、場の共創出が起きにくいときの研究ということになる。さらに、これまでの研究のほとんどは、時間的な間（ま）もしくは空間的な間（ま）のどちらか一方のみを取り扱ったものであり、これらの両方を取り扱った間合いに関する研究が非常に少ないということも分かる。

以下、この研究マップに示した研究を具体的に見ていくことにする。まず、時間的な間（ま）の基礎的な研究について説明する。会話における時間的な間（ま）（タイミング）の問題に関して、垣田ら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[37]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[38]などがある。しかし、これらの研究では、簡単な一問一答形式の対話や予め話す内容が決められた条件での対話を取り扱っており、会話のストーリーやコンテキストが予め決まっている、つまり、間合いの取り方に対する拘束が強いと考えられ、場の共創出の問題を取り扱っているとはいえない。また、中村や長岡らは、対面での自由対話において、話者が用いる交替潜時が対話者間で類似することを示している[39]。しかし、この実験は、親しい2者間における実験であるため、予めコンテキストが共有されていた可能性があり、場の共創出の問題を取り扱えているかどうかは疑わしい。次に、エントレインメントの研究について紹介する。この研究の先駆者である Condon は、先にも少し述べたが、家族団欒の場で円滑なコミュニケーションが行われている時には、その発話に同期して、互いの身体のはたらきを同調させる自己組織的現象が見られることを確認してこれをエントレインメントと名づけ、エントレインメントがコミュニケーションにおいて重要な役割を果たしている」と指摘した[30]、[40]～[44]。さらに、Hall は、Condon の研究を参考にして、小学校の校庭で遊んでいる児童を観察すると、彼女らの間に無意識のうちにエントレインメントが形成され、一人の女の子がまるでダンスをするように校庭を移動すると、最初ばらばらであった子供たちの遊びに共通のリズムが出現し、それが同調しながら広がっていくことを報告している[45]。その後、エントレインメントの研究は、我が国において、小林登、石井威望らのグループにより紹介され、彼らのグループでは、特に、母親と乳幼児のコミュニケーションに着目し、子どもと養育者の身体の動きや声が同期することを報告している[46][47][48]。さらには、Trevarthen らによる、未熟児とその父親とのやりとりにおいて、その子どもの表情や手の動きは、その子に触れる父親の手の動きやその子に話しかける父親の声の調子と、アダージョのようなテンポで同期するという報告もある[49]～[52]。これらの結果は、言語的な理解

がない段階においても，身体にはリズムミクな外部刺激に対して引き込む機能が備わっていることを意味している．そして，このような身体の機能は，他者や周囲の環境を感じ取り，それに合わせて自身を変化させるという，コミュニケーションの原型ともいえるべき機能であるという主張もなされている[11][53][54]．さらに，成人間のコミュニケーションにおいては，Matarazzo, Kendon, Webb, 渡辺らによって，彼らの会話において，発話長，発話速度，身体動作，呼吸などが，話者間で同期することが確認されている[55]～[58]．さらには，エンタテインメントの強度とポジティブな感情との間に相関があるという報告もされている[59]．以上のエンタテインメントに関する研究の大部分は，間合いの取り方に対する拘束が強く，場の共創出が起きない条件で行われている．また，音楽の分野でも，エンタテインメントの研究が，いくつか散見される．例えば，Will らの音楽における演奏者同士のエンタテインメントの研究がある[29]．また，山本らは，音楽アンサンブルにおける，演奏者間の呼吸リズムの引き込み現象や，演奏者の小節周期と聴取者の呼吸周期の引き込み現象について報告している[60][61]．さらに，古浦は，ギターの共同演奏における演奏者の呼吸を計測し，初心者同士，あるいは困難な曲を演奏したときのほうが呼吸が一致することを確認している[62]．中村らは，歌い手と伴奏者の呼吸を計測し，大きいポーズのあるところで両者の呼吸が合うことを示している[63][64]．以上の音楽に関するエンタテインメントの研究は，コミュニケーションのシナリオにあたる曲が決まっており，間合いの取り方に対する拘束が強いので，場の共創出の問題は取り扱えていない．

続いて，時間的な間（ま）に関する応用的な研究について説明する．小林らは，非線形位相振動子による引き込みモデルを用いた音楽のアンサンブルシステム[65][66]を開発し，遠隔地間でアンサンブルを行うことを実現している．また，吉良らは，二人でリズムを合わせて音楽を演奏するという PC 上のリズム協調作業において，互いの打鍵動作のタイミングとその強さを振動として伝えあうことで，非対面状況においても，相手とリズムを合わせやすくなることを報告している[67]．さらに，石井らは，inTouch において，離れた場所間にある複数の実体オブジェクトが同期して運動するというアイデアに基づき，木製のローラーを回転させるともう一方の側に設置された装置のローラーがリアルタイムで回転するシステムを提案し，これを用いて遠隔地間コミュニケーションを支援するというを行っている[68][69]．また，渡辺は，対面コミュニケーションにおいて，発話に 0.3 秒程度先行して，無意識的に身体が動いていることを見出している．さらに聞き手は，話し手の話の区切りを予測して，その 0.1-0.3 秒前に無意識に頷くことを確認している[70]．そして，渡辺は，人の会話音声の ON・OFF のリズムを線形予測し，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の開発を行っている[71]．さらに，三宅は，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-Mate の開発を行っている[72]．Walk-Mate は，二

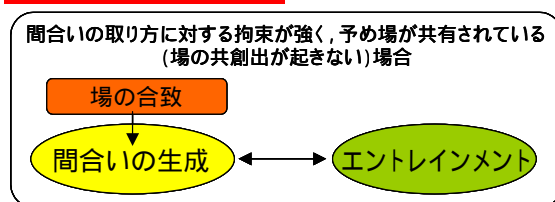
重化されたタイミング機構が組み込まれており，これにより，人間と仮想ロボットの歩行リズムを同調させた上で，そのタイミングのずれ（位相差）を制御することを可能にしている．この研究で，三宅らは，人間と仮想ロボットの歩行リズムを引き込ませることによって，互いの間で一体感が出ることや，人間の歩行運動が安定化することを確認している[73][74]．しかし，上記の研究は，予めなすべきことが決められている状況におけるコミュニケーションの支援を目的としたものであり，間合いの取り方が限定されている場合の問題を対象にしているので，場の共創出を支援するような研究からは，少し距離があるように思われる．

次に，空間的な間（ま）の基礎的な研究について紹介する．これについては，先に述べたように，Hall によるプロクセミックスの研究がある[34]．また，これも先に少し述べたが，Kendon は，複数人の会話の場面における身体配置について詳しく報告しており，現在のビデオ・コミュニケーションにおいてはこのような無意識的過程が含まれる身体配置が生成されないことに問題があると指摘している[35][75]．以上の研究では，場の共創出と絡めて空間的な間（ま）の生成について研究されているようにも思われるが，時間的な間（ま）の問題については，議論されていない．最後に，空間的な間（ま）の応用的な研究について紹介する．Sellen らは，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[76]．また，MAJIC[77]では，遠隔の3箇所間において，各テーブルの周りに，残りの2箇所の相手の映像を等身大で投影することで，互いの身体位置の適切な関係や身体行為を表現している．これにより，視線方向の一致などを支援することが実現されている．そして，平田らは，遠隔地間で自由な座席配置を取ることを目指し，ユーザのいる空間を囲むように複数のカメラとディスプレイ，マイクとスピーカを配置して，遠隔のユーザのいる位置に対応したディスプレイに，そのユーザの映像を表示させる t-room[78]を開発している．また，森川らの HyperMirror では，離れた場所にいる相手が提示される映像空間中に，自身の映像を鏡像として写し込み，その合成映像を介してコミュニケーションをとる方法が提案されている[79][80][81]．これらの遠隔コミュニケーションシステムに関する研究においては，メディアによる情報空間がスクリーン内部に生成されるため，現場を共にするような感覚の創出は弱いことが予想され，場の問題は，取り扱えていないように思われる．したがって，互いの間でコンテキストが共有されている条件，つまり，互いの間合いの取り方が予め決められているような条件でなければ，コミュニケーションそのものが成立しないように推察される．さらには，共有仮想空間を利用して，遠隔地間での空間的な間（ま）の生成を支援する研究例もある．これらは，CVEs(Collaborative Virtual Environments)と呼ばれている．CVEs ではコンピュータ内部に作られた仮想空間の中を，自身の分身であるアバターを操作して動き回ることが可能であり，そこで出会った他のアバターと対話することができる[82][83]．さらに，これに関連した

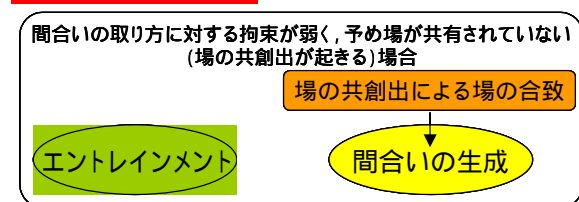
代表的な研究として、FreeWalk[84]や DIVE[85]などが挙げられる。これらの特徴はアバターを介すことで離れた場所の人と同じ空間の中を一緒に動き回ることを可能としている点にある。しかし、やはり、仮想空間と現場との接続性が問題であり、単にコンピュータ画面上のキャラクターを認識的に操っているに過ぎないという問題が報告されている。したがって、これらの研究では、場の問題を取り扱っているとはいえず、互いの間でコンテキストが共有されている条件でなければ、コミュニケーションそのものが成立しないように思われる。

以上の内容をまとめると、従来の研究の大部分は、間合いの取り方に対する拘束が強く、予め場が共有されている、つまり、場の共創出が起きない場合を対象にしている。そして、この場合の間合いやエンタテインメントの生成、さらには、エンタテインメントと間合いの関係について研究しているといえる。一方、間合いの取り方に対する拘束が弱く、予め場が共有されていない、つまり、場の共創出が起きる場合を対象とした研究は、三輪らによる身体の影響をメディアとしたコミュニケーションシステム（WSCS）の研究[86][87][88]以外に見当たらない。三輪らは、影が人間の存在感や存在位置を表現できることを発見した。そして、離れた場所にいる人物の身体の影響を自身の存在する現場に表現することによって、遠隔地間において、相手と同じ場所で対面しているのと同様な状況を創り出し、遠隔地間での場の共創出を実現している。しかし、この研究では、コミュニケーションにおける行為の中身については議論されていない。つまり、場の共創出が起きている際に、互いの間でどのようなインタラクションが行われているかということや、このような状況においてどのようにエンタテインメントが生成されるかということについては研究されていない。まとめると、従来の研究では、場の共創出が起きているときにどのようなエンタテインメントが生成され、それが間合いの生成とどのように関係して

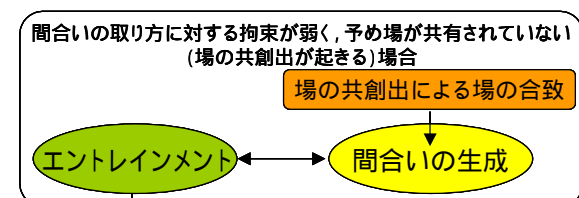
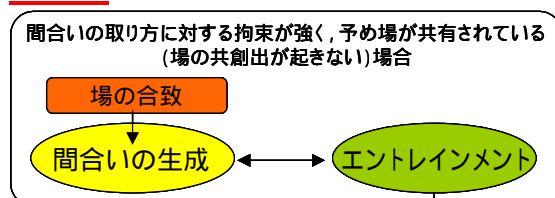
### 従来の大部分の研究



### 影システム(WSCS)



### 本研究



比較

場の共創出において見られるエンタテインメントの特徴を明らかにする

図1.12 研究方針

## 第1章 序論

いるのかということや、場が共創出されるときとされないときのエンタテインメントに違いが見られるのかということは、明らかにされていない。そこで、本研究では、図 1.12 に示すような方針で研究を進めることにする。すなわち、場の共創出が起きる（予め場が共有されていない）ときと、場の共創出が起きない（予め場が共有されている）ときの両方について、間合いとエンタテインメントの関係について調べるとともに、各々の状況で生成されるエンタテインメントについて比較を行い、場の共創出において見られるエンタテインメントの特徴を明らかにしようというものである。なお、これは、図 1.11 に示した研究マップにおける、ピンク色の領域を取り扱うことを意味するものである。

### 1.4. 研究目的

背景や価値観の異なる多様な人々が、即興的に、シナリオ（ストーリー）を持続的に創出していく創造的活動を共創と呼ぶ。本研究の最終目標は、このような共創活動を実現するインタフェースやシステムの設計原理を明らかにすることである。

このような共創活動を実現するためには、場を共創出することが必要である。しかし、これまでのところ、身体のはたらきによる自己組織化現象である場の共創出の原理についてはよく分かっていない。また、記号化可能な明在的な情報のみがやり取りされる現行の遠隔コミュニケーションシステムでは、場を共創出することは困難である。そこで、本研究では、間合いとエンタテインメントに着目して、場の共創出に関して、以下の2点について研究を行うことにする。

- (1) 予め場が共有されている（場の共創出が起きない）場合のコミュニケーションと、予め場が共有されていない（場の共創出が起きる）場合のコミュニケーションの両方について、間合いとエンタテインメントとの関係を調べ、場の共創出とエンタテインメントの関係を明らかにする。
- (2) 遠隔地間で場の共創出を支援する手法について検討し、場の共創出に必要な要件を明らかにする。

### 1.5. 本論文の構成

本論文の構成を図 1.13 に示す。

第1章では、共創を実現するためには、場の共創出が必要になることについて説明した。そして、場の共創出の原理について研究するため、間合いとエンタテインメントの関係や遠隔地間で場の共創出を支援する手法について調べるといふ本研究の全体的な背景と目的を述べた。さらに、従来のコミュニケーション研究に関して、

場の共創出（間合いの取り方に対する拘束の度合い）という観点から調査し，本研究の位置づけを行った．

第2章では，間合いとエンタテインメントの関係を調べるために，本研究で開発した二つの実験システムについて述べる．まず，柳生新陰流において，心のリズムである「調子」から生み出される太刀のリズムである「拍子」を相手と合わせることで，間合いを生成していることに着目した．そして，これを基に，アバターを介

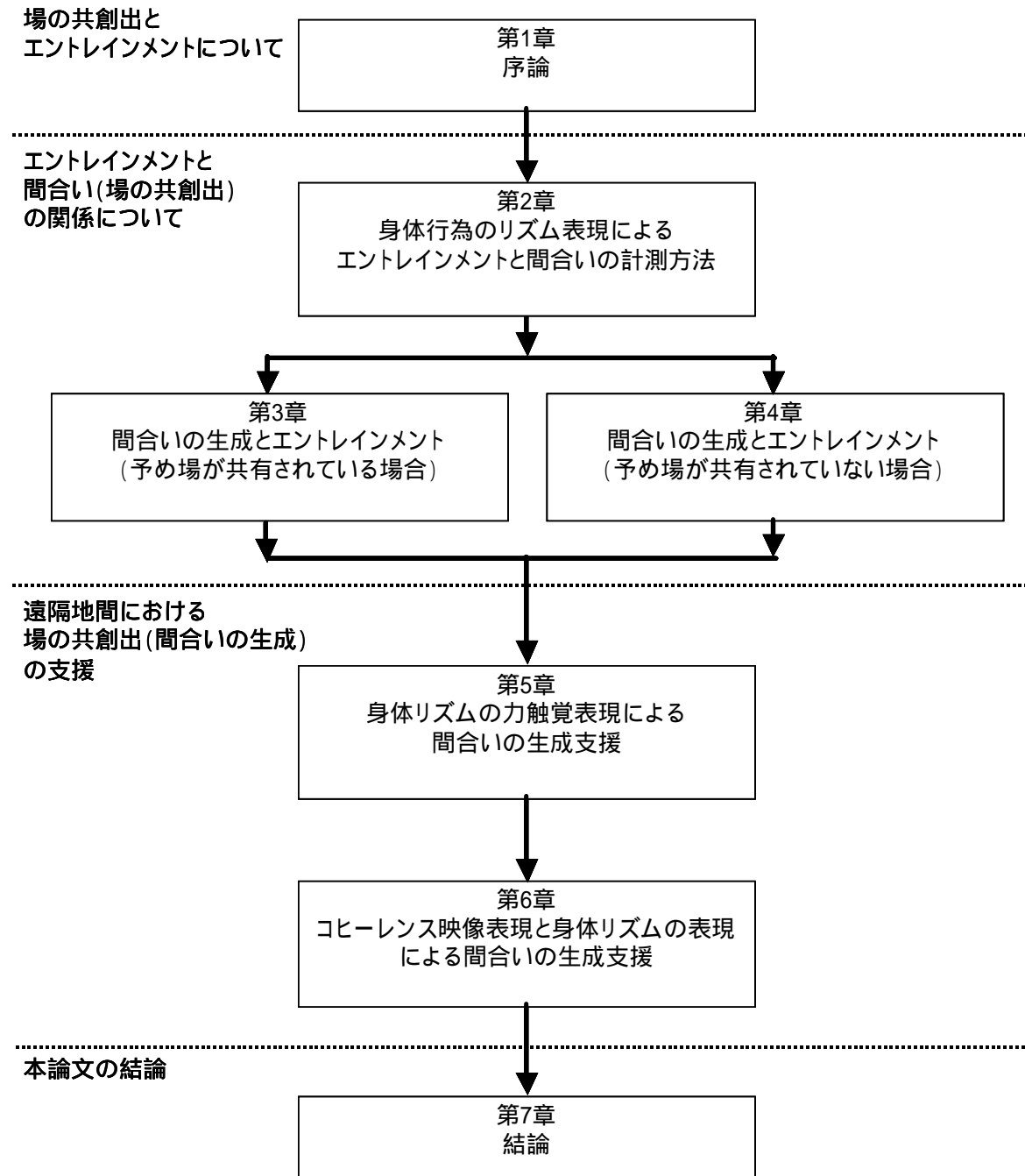


図1.13 本論文の構成

## 第1章 序論

したコミュニケーションにおいて、拍子のエントレインメントと間合いの関係について調べることを構想した。そのためには、拍子が表現される身体行為をアバターの操作に取り込み、これをリズム表現させる必要がある。そこで、運動時の“タメ”のような意識が直接関与しないリズムミク身体行為でアバターを操作するリズムコントローラを開発した。そして、このコントローラを用いた二つの実験システムの開発を行った。一つは、間合いの取り方に対する拘束が強く、予め場が共有されている（場の共創出が起きない）場合の間合いとエントレインメントの関係を調べるための協調ゲームシステムである。もう一つは、間合いの取り方に対する拘束が弱く、予め場が共有されていない（場の共創出が起きる）場合の間合いとエントレインメントの関係を調べるために開発した剣道ロボットシステムである。

以下に続く、第3章と第4章では、上記の二つの実験システムを用いて、間合いとエントレインメントの関係について調べた。

第3章では、協調ゲームシステムを用いて、予め場が共有されている（場の共創出が起きない）ときの、間合いとエントレインメントの関係について調べた。その結果、予め場が共有されている場合には、タスク（間合い生成）の難易度によらず、リズムコントローラ波形には、通常の非線形振動子（位相モデル）の引きこみ現象で見られるような特定周期のエントレインメントしか生成されないことを示した。さらに、このようなエントレインメントが、互いの予測を共有するために生成されている可能性があることを明らかにした。

第4章では、剣道ロボットシステムを用いて、予め場が共有されていない（場の共創出が起きる）ときの間合いとエントレインメントの関係について調べた。その結果、2台のロボットがほぼ一定の距離を保った状態で前後に移動するというように間合いが生成されている際には、リズムコントローラ波形に、エントレインメントの生成・崩壊が繰り返し見られることを示した。さらに、この際、エントレインメントが、先の協調ゲームの結果とは異なり、互いのコントローラの固有操作周期を含む多様な周期で、生成されることを見出した。つまり、人間には多様な周期でエントレインメントを創出する能力があることをはじめて発見した。そして、このエントレインメントの多様性が、場の変化に応じた間合いの生成、つまり、場の共創出に関わっていることを示した。さらに、この多様な周期での引きこみ現象が、通常の非線形振動子（位相モデル）の理論では、説明ができない現象であることを示すとともに、この引きこみ現象の生成に伴い、 $1/f$  ゆらぎが出現することを見出した。以上により、場の共創出が起きるときに見られるエントレインメントと、予め場が共有されており場の共創出が起きないときに見られるエントレインメントでは、その質が異なることを示した。

以下に続く，第 5 章から第 6 章では，エンタテインメントと間合いに着目して，遠隔コミュニケーションにおいて，場の共創出を支援する手法について検討した．

第 5 章では，遠隔剣道対戦において，エンタテインメントや間合いが生成されないという結果を踏まえ，相手の身体行為のリズム（コントローラ操作リズム）を力触覚刺激として表現するタイミング表現装置を開発した．しかし，本装置のみを用いた遠隔対戦では，間合いが取れているかのようなロボットの動きが見られたが，特定周期のエンタテインメントしか生成されなかった．以上より，遠隔地間で場の共創出を実現するためには，意図した行為（画面上のロボットの動き）とそれに先行する無意識的な身体行為（リズムコントローラの操作）の両方を表現するという行為の二重的な表現では，不十分であることを示した．そして，場の共創出には，相手の行為の予測の支援だけでなく，互いの関係の予測の支援を合わせて行うことが必要になることを考察した．以上より，互いの関係の予測を支援する手法として，対戦中に互いの間で創られる関係であるリズムコントローラ波形のコヒーレンスの度合いをリアルタイムに提示する手法を提案した．

第 6 章では，リズムコントローラ波形のコヒーレンス度合いを映像表現する手法（コヒーレンス映像表現）を開発した．その結果，タイミング表現装置とコヒーレンス映像表現を組み合わせた遠隔対戦で，多様なエンタテインメントによる間合いが生成されることを明らかにした．このことから，遠隔地間で場を共創出させるためには，相手の行為に関する情報と互いの関係に関する情報の両方が必要になることを示した．また，本研究結果から，多様なエンタテインメントの生成が一領域的なコミュニケーションでは説明できない現象であることを示した．さらに，互いの身体行為のリズム表現と相手の身体の影の提示による共存在感の創出の両方を実現することで，遠隔地においても場が共創出されることを示し，コヒーレンス映像表現が，存在的なつながりの表現に関係していることを明らかにした．以上により，場の共創出には，行為的コミュニケーションと存在的コミュニケーションの両方が必要になることについて考察した．そして，これまでの結果を総合して，多様なエンタテインメントの創出を伴う二領域的なコミュニケーションにより場が共創出されている可能性があることを示した．さらには，このような存在の位置づけを伴って生成される多様な周期でのエンタテインメント現象を，従来のエンタテインメントとは区別し，存在的エンタテインメントとして提唱した．

最後に，第 7 章では，本論文の結論として内容をまとめ，今後の課題と展望について述べた．



## 第2章 身体行為のリズム表現によるエンタテインメントと間合いの計測方法 - 協調ゲームシステムと剣道ロボットシステム -

### 2.1. はじめに

本研究では、予め場が共有されている（場の共創出が起きない）場合のコミュニケーションと、予め場が共有されていない（場の共創出が起きる）場合のコミュニケーションの両方について、間合いとエンタテインメントとの関係を調べ、場の共創出とエンタテインメントの関係について明らかにすることを目指す。本章では、間合いの生成とエンタテインメントの関係を調べることを可能とする実験システムについて検討する。その際、間合いの生成に関して、人間が創り出しているリズムを取り出すことが、まずもって必要となる。本研究では、このリズムとして、柳生新陰流[14]でいうところの拍子に相当する無意識的な身体行為に着目し、これをリズム表現させることで、エンタテインメントと間合いの関係を調べることを構想した。そこで、無意識的な身体行為をリズム表現させる手法であるリズムコントローラ（映像画面上の自分のアバターを操作するコントローラ）について最初に紹介する。次に、このリズムコントローラを用いて、アバターを介したコミュニケーションにおいて、エンタテインメントと間合いの関係について調べるために、二つの実験システムの開発を行った。具体的には、予め場が共有されている場合の間合いとエンタテインメントの関係を調べるための協調ゲームシステムと、予め場が共有されていない場合の間合いとエンタテインメントの関係を調べるための剣道ロボットシステムの開発を行ったので、以下で説明する。

### 2.2. 身体行為のリズム表現手法 - リズムコントローラの開発 -

#### 2.2.1. リズムコントローラのコンセプト

間合いとエンタテインメントの関係を明らかにするためには、間合いの生成に関連して人間が創っているリズムを取り出し、このリズムのエンタテインメントの生成が、間合いの生成とどのように関係しているのか調べる必要がある。そこで、本研究では、相手と間合いを取ることが重要であるとされている剣術、特に、柳生新陰流[14]に着目した。柳生新陰流では、人間の創りだすリズムについて、拍子と調子の二つがあるとしている。ここで、柳生新陰流における拍子とは、太刀のはたらきのことであり、これを自分の本心から出てくる生きたリズムとしている。そして、

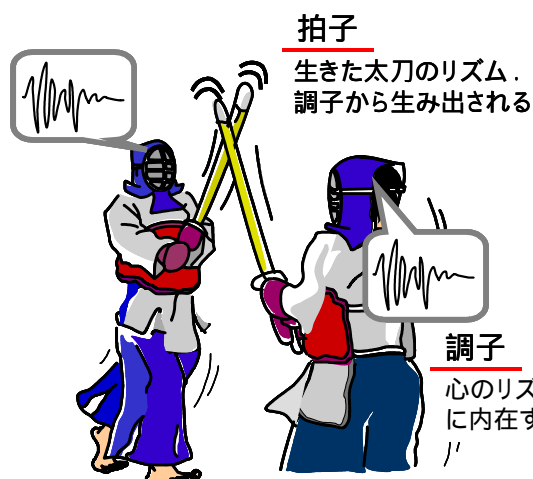


図2.1 拍子と調子

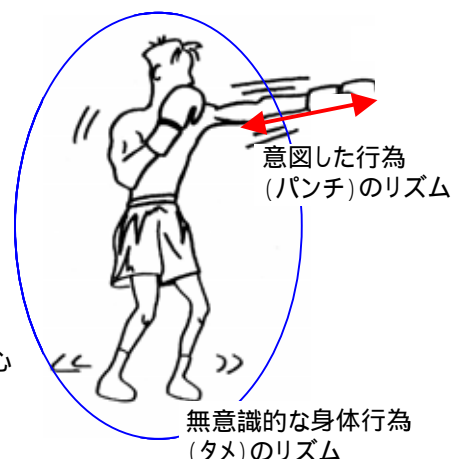


図2.2 意図した行為と身体行為

調子を、心のリズムとしている。つまり、自分の本心に内在する生きたリズムである調子から、生きた太刀のリズムである拍子が生み出されると、考えられている（図 2.1）。そして、相手と間合いを生成するためには、相手と拍子を合わせることが重要であると指摘されている。そこで、本研究では、拍子のエンタテインメントと間合いの生成との関係について調べることにする。

この際に問題となるのは、いかにして、拍子を人間の身体から取り出すかということである。この問題を考えるに当たり、図 2.2 に示すようなスポーツの場面において、自分の意図した行為（例えば、バットを振る行為、相手のサーブしたボールを取りにいく行為など）が行われる前に、身体を意識することなく左右にリズムに動かしてタイミングを取っていることに着目した。つまり、このような自分の意図した行為が発現する前に、意識が直接関与することなく行われる身体行為（運動時に見られる“タメ”）が、柳生新陰流でいうところの拍子に相当するのではないかと考えた。

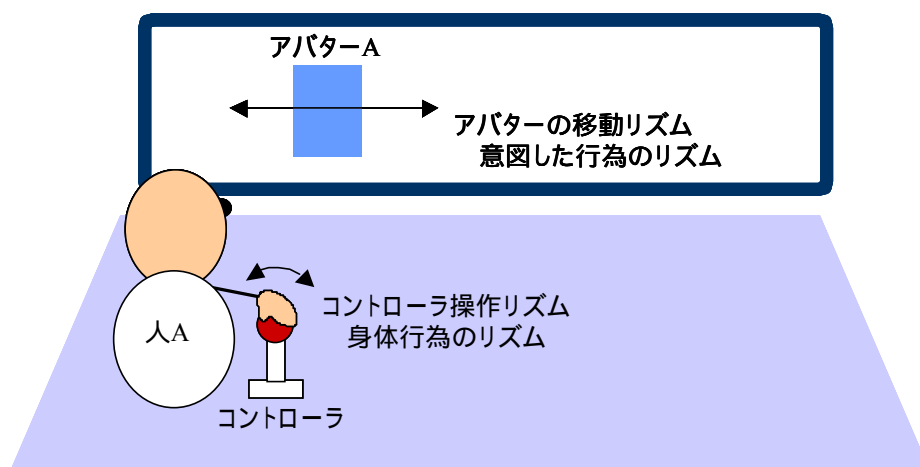


図2.3 身体行為のリズム表現

ノーマルコントローラの変換規則

$$V(t) = G \times S(t)$$

$V(t)$ :アバター速度  $S(t)$ :コントローラ入力  $G$ :比例ゲイン

図2.4 ノーマルコントローラ

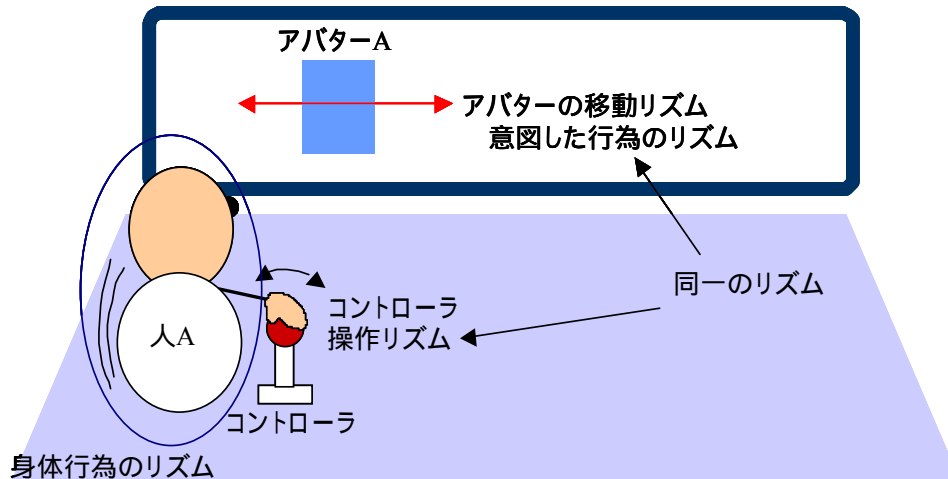


図2.5 ノーマルコントローラによるアバターの操作

しかし、この身体行為のリズムを取り出すことは容易ではない。それは、図 2.2 に示すように、意図した行為のリズムと、これに先行して無意識のうちに創られる身体行為のリズムが、1 つの同じ身体に表現されてしまうので、これら二つのリズムを分離して、後者のみのリズムを取り出すことは、困難であるからである。そこで、本研究では、図 2.3 に示すように、アバターを操作するコントローラに、アバターの動き（自分の意図した行為）に先行して創られる無意識的な身体行為を表現させ、このような方法で、アバターを介したコミュニケーションにおいて、拍子のエンタテインメントと間合いの関係について調べることを構想した。

この場合、上記で述べたような身体行為を表現させるコントローラの設計が問題となるが、このコントローラとして、アバターの操作方法として一般的に用いられているアバターの移動速度をコントローラ操作量に比例させる方法（図 2.4 参照。以下、このアバターの操作方法を“ノーマルコントローラ”と呼ぶ）が考えられる。しかし、図 2.5 に示すように、この方法では、アバターの移動リズム（意図した行為のリズム）とコントローラの操作リズムが同一のリズムになるため、先に述べた“タメ”のような無意識的な身体行為は、アバターの操作者の実際の身体の動きとして表現されてしまい、このような身体行為が、コントローラ操作には、表現されなくなってしまう。そこで、アバターの移動に先行して、“タメ”のようなリズムミッ

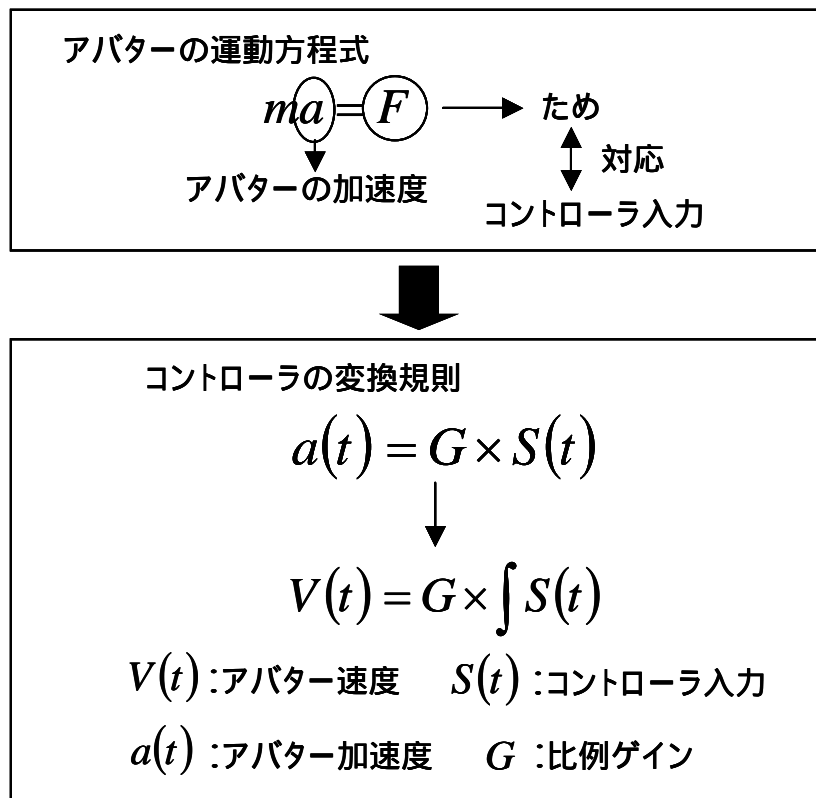


図2.6 加速度入力のコントローラ

くな身体行為を表現させることが必要となる新たなコントローラを開発することにした。以下、このコントローラをリズムコントローラと呼ぶことにする。ここで、コントローラ操作を、アバターを操作する際の“タメ”とするためには、コントローラに表現される“タメ”の大きさ、つまり、コントローラの入力値を、アバターの駆動力とする必要があるのではないかと考えられる。そこで、本研究では、リズムコントローラを加速度入力のコントローラとすることにした（図2.6）。

さらに、このリズムコントローラの意味について、身体論や身体システムという立場から考えてみることにする。これらの分野においては、身体図式という概念が、身体運動（行為）の創出という問題を捉える上で重要であると考えられている。身体図式は、身体論や身体システムだけでなく、生理学、心理学、認知科学、脳科学などの様々な分野で、この言葉の意味する内容について、現在も議論が続いており、統一した見解が出ていないのが現状ではある。そもそも、身体図式とは、Head と Holms が提唱した概念であり、現在も基本的には、この概念が発展したものとして広く受け入れられているようである。Head と Holms は、通常、我々は、時々刻々変化していく自身の姿勢の変化を意識することなく、的確に認識できることから、身体の姿勢や動きを制御する際にダイナミックに働く無意識のプロセスがあるのではないかと考え、これを身体（体位）図式と呼んだ[89]。さらに、運動学習理論家であ

る Frostig は、身体図式を身体運動の生成と結びつけて捉え、身体図式を以下のように説明した[90]。

身体図式は完全に無意識である点に特徴がある。身体図式はある瞬間の筋肉の位置や身体部位相互間の位置関係を定める。そして身体の向きによって変化する。人の身体のバランスは、身体図式に依存している。身体図式が無かったら、歩くことも、座ることも、前かがみになることも。その他どんな動作もできずに転んでしまう。身体図式が混乱していたら、協調運動や平衡の維持がひどく困難になる。

さらに、河本英夫[91]は、身体図式は、運動に対して、潜在的な構造的な性格をもち、それは身体の部分性に対して連携の可能性を保証しており、正確に言えば、個々の動作の継続の可能性を保証するものであると述べている。そして、身体運動は、随意運動の手前で理由なく起こるという実体を基本とし、そのさなかで、徐々に無駄な動きが調整され、目的志向的な行為（自分の意図した行為）だけが残っていくと考察している。実際、軽度脳性麻痺の子供は、突然手を動かしたりするが、それらは、随意性の運動のようには見えない。また、内田は、武道における身体技法を例に取り、人間は、操り人形の動きとは異なり、いかに努力しても、動き出す前のわずかな予備動作（起こり）を完全には消すことができないと述べている[92]。以上の内容をまとめると、人間の意図した行為の遂行には、身体図式の形成が前提となっており、この身体図式を介して行為を創出することに伴って、ある種の無駄な動きや予備動作といわれているもの、つまり、図 2.2 でいうところの“無意識的な身体行為（タメ）”が生成されると考えることができるだろう。つまり、身体図式を用いて行為を創出する人間においては、このような無意識的な身体行為の生成は、避けられないということになる。このような観点に立てば、本研究では、意図した行為を生み出す前に無意識的な身体行為を生成させるリズムコントローラを採用することで、身体図式を介して自分の意図した行為を創出するという人間の行為創出プロセスをシステムの内部に取り込んだということができるだろう。

また、コミュニケーションにおける間合いの生成において、相手の動きの予測が重要になることはいうまでもないが、この予測に、上記の身体図式によって生じる予備動作、つまり、意図した行為の前に見られる無意識的な身体行為が、大きく関係していると思われる。実際、古武術研究家の甲野は、「タメない、ひねらない、うねらない」というように、できる限り無駄な動きや予備動作を消すことにより、相手の（固定観念と化した）身体図式をはぐらかし、隙を突いて倒すということを提唱している[93]。このような観点に立つと、本研究では、リズムコントローラを活用することにより、相手の行為の予測に対して重要な手掛かりとなるこのような無意識的な身体行為に着目して、コミュニケーションにおける間合いの生成について調

べている．さらには，この身体行為を積極的に活用することにより，コミュニケーションの支援を行っているということになるだろう．

### 2.2.2. リズムコントローラによるアバターの操作手法とその特徴

リズムコントローラによるロボットの操作方法について説明する．このコントローラは，図 2.7 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入力を積分し，その積分値を次のゼロクロスが発生するまでのアバター速度出力値とする一種の加速度入力コントローラである．したがって，この操作法を用いた場合，ロボットの移動速度や移動方向を変化させるときに，常に 1 周期分のコントローラ操作をそれに先行して行うことが必要となる．つまり，相手側のアバターの位置や速度を画面上で認識してから操作すると，相手に対して遅れを生じることになり相手とうまくコミュニケーションをとることができない．つまり，被験者には，相手のアバターの動き，とくに相手のアバターが移動方向を切り替える地点や時間を，常に先読みしつつ，その変化に柔軟に対応できるようにリズムにコントローラを操作し続けることが求められる．また，このようなコントロール方式を用いることで，振幅，周期の変化により動作の応答性と速度を変化させることができる．例えば，周期を大きくすれば，移動速度は増すが，移動方向を変化させる機会は減少する．周期を小さくすればこの逆になる．これは，ちょうど，大きく移動したい時には大股で一気に飛び，素早く

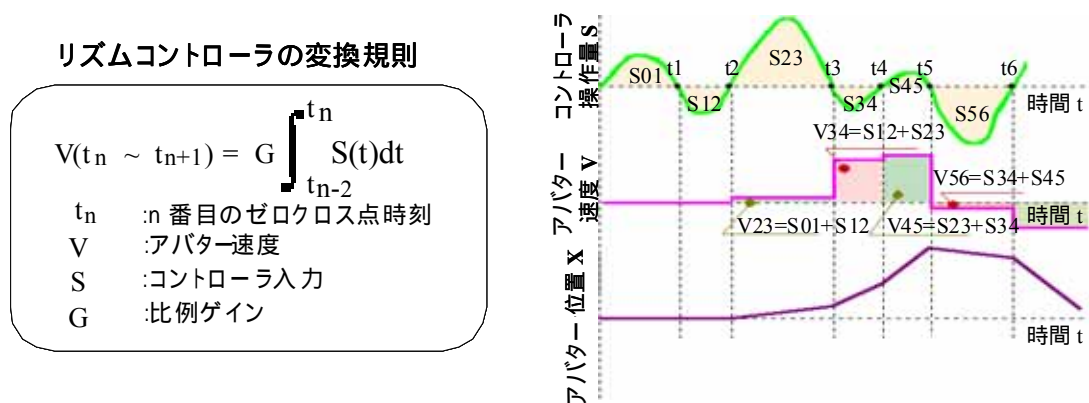


図2.7 リズムコントロール方式

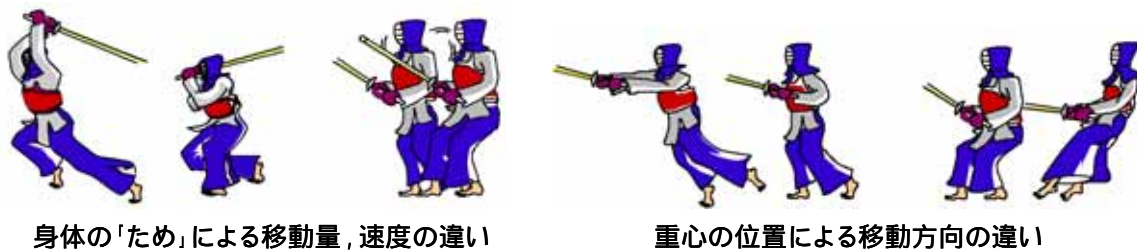


図2.8 人間の移動における「ため」

移動したい時には小刻みに重心を移動してステップを踏むといった人間の移動における“タメ”の創り方と似ている（図 2.8）。つまり，先に述べたような“タメ”を含んだ動きが，本方式を採用することで，手の動きとして表現されることになる．また，本方式の場合，振幅が同じになるようにコントローラを繰り返しゼロクロスさせることにより，アバターの静止状態が維持される．したがって，仮に同じようにアバターが静止していても，被験者の時間的な間（ま）や空間的な間（ま）の取り方が変わると，それらがコントローラの入力周期の違いとして表現されることが期待できる．

さらに，上述のようにコントローラを設計することで，柳生新陰流でいうところの拍子を取り出すことができるようになるだけでなく，あわせて身体性を取り込むことができるようになっていないかと考えられる．つまり，自分の意図した行為に先行して身体を無意識的に左右にリズムに動かしてタイミングを取ったり，「ため」を創ったりするというような身体のはたらきを，コントローラの操作に取り込む，言い換えれば，身体図式を取り込んだコントローラを用いて，アバターの操作を行うということは，あたかもアバターが自身の身体の一部であるかのような自身の身体とアバターとの間の非分離感の創出を促すことにも有効であると思われる．さらに，この際，リズムコントローラの操作（操作リズム），つまり，身体図式に伴って生成される無意識的な身体行為が，音として相手に表現される．したがって，リズムコントローラを用いて，自身のアバターを操作すれば，互いの身体行為を介して，相手の少し先の状況を予測し，相手と間合いを取りながらコミュニケーションを行うことが実現され，自身の内面で創られる間合いが，映像画面上に表現されることになる（図 2.9）．

なお，ノーマルコントローラを用いた場合には，身体図式を介した身体運動創出における，最終的な出力結果である自分の意図した行為のみしか，表現されないこ

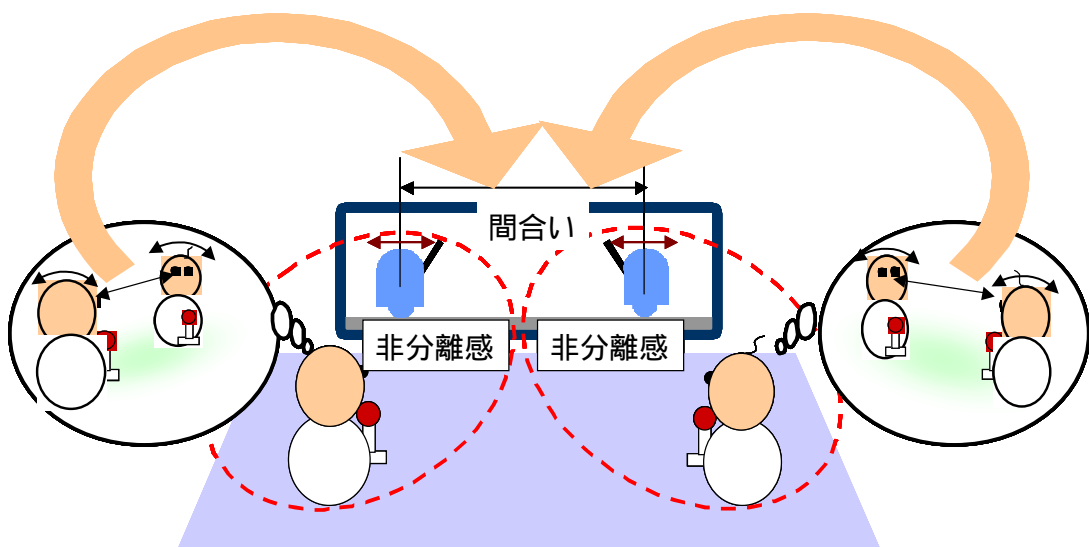


図2.9 自身の身体とアバターとの間の非分離感の創出

となる。したがって、ノーマルコントローラを用いた場合、相手の動きを先読みして、自分のアバターを操作するのでなく、映像画面上の相手のアバターの動きを見てから、相手に合わせて、自分のアバターを操作するということが、起こりやすくなると考えられる。つまり、この場合、通常のTVゲームのように、アバターを対象化して捉え、認識的に操作することになるので、行為よりも認識的なコミュニケーションが、優先されてしまうことになる。つまり、ノーマルコントローラを用いた場合、映像画面上のコミュニケーションにおいて間合いの問題を取り扱うことは困難である。

ただし、リズムコントローラの問題として、自身のコントローラの動きを意識しているうちは、アバターをうまく操ることはできないことがあげられる。しかしながら、この操作法の練習を繰り返すことで、自転車を自在に乗りこなしている際に、その操作が意識されなくなることと同じように、自身のコントローラ操作を意識することなく、自在にアバターを前後に動かすことができるようになる。つまり、この操作法に十分習熟した対戦者は、相手のアバターの動きを予測しながら、意識することなく自動的にリズムミックにコントローラを動かして自身のアバターを操作している。

### 2.2.3. リズムコントローラ操作の特徴量

リズムコントローラを操作する際、対戦者固有の操作リズムがあると考えられるが、対戦中は、試合の状況に応じて、リズムコントローラの操作リズムを変化させ

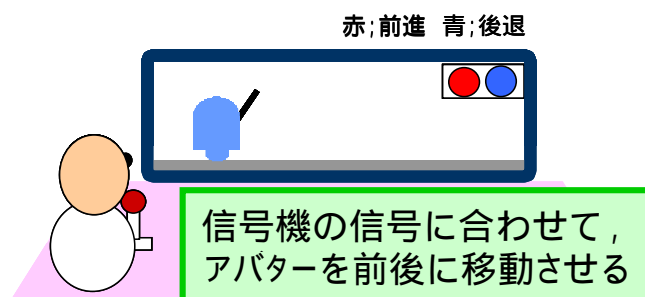


図2.10 固有操作リズムを調べる実験

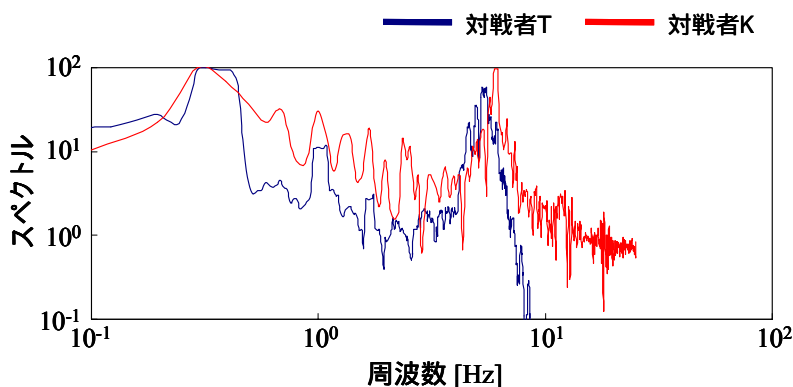


図2.11 リズムコントローラの固有操作リズム

てしまうため、固有リズムを取り出すことができない．そこで、1人で一定周期の点滅を繰り返す信号機の信号に合わせて、アバターを前後に移動させる実験（図 2.10 参照）を行い、対戦者固有の操作リズムを取り出すことを試みた．その時のリズムコントローラ波形を周波数解析した結果の一例を図 2.11 に示す．同図から、スペクトルが 0.3[Hz]付近と、5-6[Hz]付近の 2 つのピークを持つことが分かる．ここで、前半のピークは、この実験時の信号機の点滅周期 3[s]に関して現れるロボットの移動周期に関する成分である．そして、後半のピークがリズムコントローラの操作リズムであり、この場合、対戦者 K には 6.2[Hz]、対戦者 T には 5.4[Hz]にピーク値が存在する．この例から明らかなように、対戦者にはそれぞれ固有の操作リズムが存在することを見出した．なお、図 2.11 や、これ以外の以下に示すリズムコントローラ波形の周波数解析結果において、10[Hz]以上の周波数域においても、スペクトル成分が見られる場合がある．しかし、リズムコントローラ波形が、人間の手の運動そのものであることを考えると、10[Hz]以上の成分は、ノイズである可能性が高く、この周波数域のデータの信頼性は、低いように思われる．そこで、以下、本論文では、リズムコントローラ波形の 10[Hz]以上のスペクトル成分については、議論しないことにする．

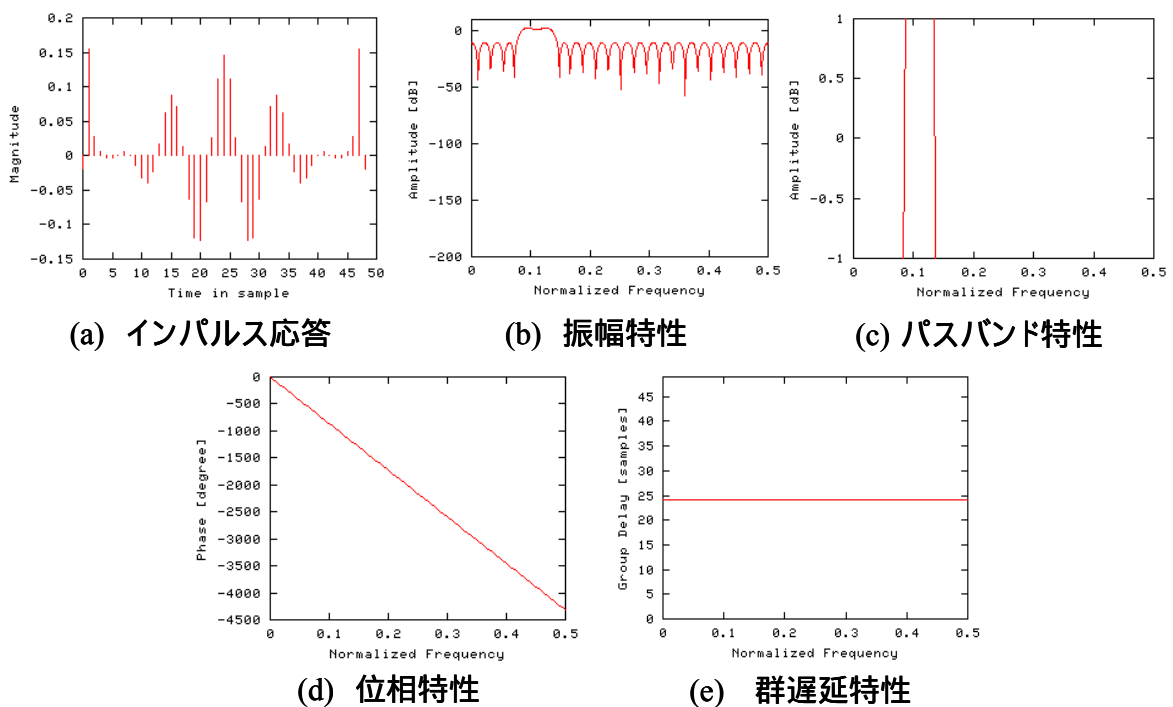


図2.12 FIRフィルタの各種特性

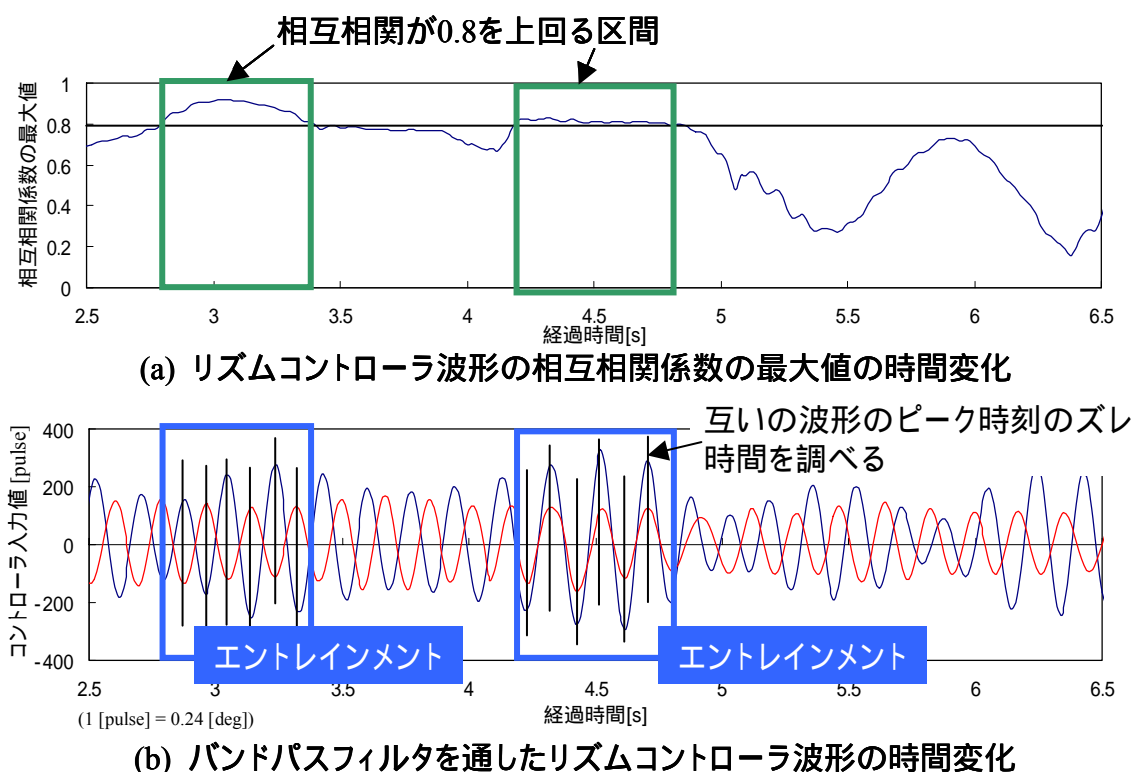


図2.13 エントレインメントの判定方法

#### 2.2.4. エントレインメントの判定手法

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．上記の実験において，対戦者のコントローラの固有操作振動数（リズム）は，5.0[Hz]前後であることが分かったので，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．しかし，フィルタを通すことにより，アナログフィルタに見られるようなロールオフ周波数近傍の位相歪が生じると，当然位相関係を調べることができなくなる．そこで，このような位相歪をまったく生じない FIR フィルタ(Finite Impulse Response フィルタ)[94]を採用することにした．本研究で使用した FIR フィルタの各種特性を図 2.12 に示す．そして，この FIR フィルタを通した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（の絶対値）が 0.8 を上回っている区間を算出する．ただし，互いのコントローラ波形に形成されるエントレインメントは，同相（位相差 0）で生成される場合，逆相（位相差  $\pi$ ）で生成される場合，さらには， $2/3$  ずれた状態で生成される場合など，様々な位相差で形成される可能性があることが予想される．したがって，ズレ時間を変えて相互相関関数を計算する必要がある．ここで，エントレインメントが起きているかどうかを調べる波形の周波数が約 5[Hz]（半周期は，約 0.1[s]）であることから， $0 \leq s < 0.1$ （s:ズレ時間）の範囲のズレ時間で，相互相関関数を計算すれば，約 5[Hz]の波形に

起きるエントレインメントを、どの位相差においても、もれなく調べあげることが可能になる。そこで、本研究では、リズムコントローラのデータのサンプリング間隔が  $0.02[s]$ であることを考慮し、ずれ時間を  $0.02[s]$ 刻みで  $0-0.08[s]$ の間でそれぞれの相互相関係数を計算し、それぞれのずれ時間における相互相関係数の絶対値のうち最大値が、 $0.8$ を上回っているかどうかで、エントレインメントの判断を行う。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、全て同一の値になっている（位相関係が生成されている）ことを確認した上で、エントレインメントの判定を行っている（図 2.13）。なお、図 2.13(b)のリズムコントローラ波形のグラフにおける縦軸のコントローラ入力値[pulse]とは、このコントローラのスティックの入力角度のことを指す（ $1[pulse] = 0.24[deg]$ ）。

### 2.2.5. 被験者の選定方法

リズムコントローラを用いた実験では、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、間合いを取り合った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、次に示すような実験の結果から判定し、基準を満たした被験者のみを実験の被験者として採用することにした。以下、そのために行った実験について説明する。

この実験では、リズムコントローラの固有周波数を調べる実験（図 2.10）と同様に、 $2.5$ 秒おきに前進・後退の合図を出す信号機に合わせて、アバターを前後に移動させる。そして、この実験において、信号機の信号が変化してから、アバター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、この時間を、リズムコントローラの習熟度の目安とすることにした。なお、この実験では、信号機の変化を予測し、信号の切り替えタイミングとアバターの移動方向の切り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、できる限り早くアバターの移動方向を変化させるように、被験者に指示している。この実験におけるアバター位置の時間変化に関する結果の一例を図 2.14 に、反応時間の頻度分布の一例を図 2.15 に示す。ここで、本研究では、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  $1000$  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。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  $\pm$  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  $\pm$  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。以下に示すリズムコントローラを用いた全ての実験では、上記の基準を満たした被験者によって実験が行われている。

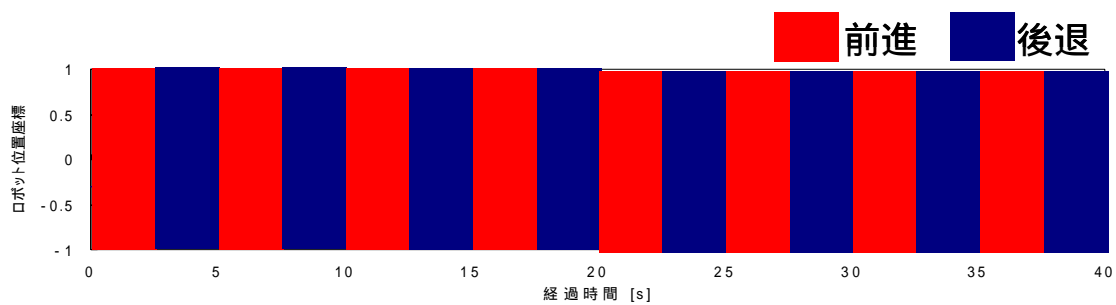


図2.14 アバター位置座標の時間変化

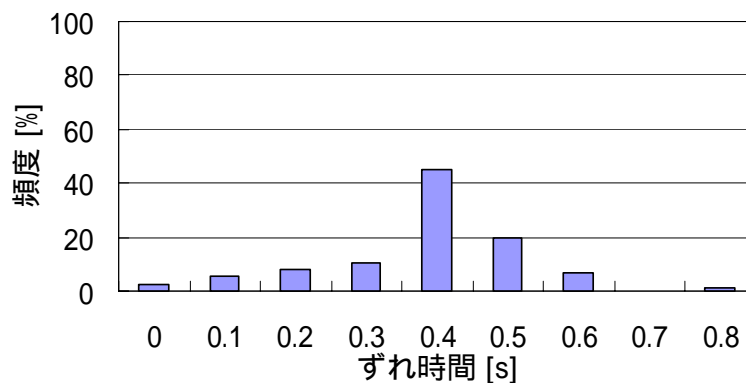


図2.15 反応時間の分布

### 2.3. 協調ゲームシステム

#### 2.3.1. システムのコンセプト

間合いの取り方に対する拘束が強く、予め場が共有されている（場の共創出が起かない）場合の間合いとエンタテインメントの関係を調べるために開発した協調ゲームシステムについて説明する．間合いの取り方に対する拘束を強くする，すなわち，外部から場を限定するため，コミュニケーションにおけるシナリオ（ストーリー）を，コミュニケーションの参加者自身が創り出すのではなく，彼らとは，無関係に外部から与えることにする．このようにすれば，参加者は，外部から提示されたストーリーにしたがって行為をしなければならないので，各人の間合いの取り方は強く拘束されることになる．さらに，コミュニケーション中の，時間的な間（ま）と空間的な間（ま）の取り方を限定する（間合いの取り方の自由度を小さくする）ことで，各人の間合いの取り方を拘束することにした．つまり，以下に示す二つを限定することで，各人の間合いの取り方を強く拘束し，予め場が共有されている状態を創り出すことにした．

- コミュニケーションにおけるシナリオ（ストーリー）
- 互いの空間的な間（ま）の取り方と時間的な間（ま）の取り方

そこで、本研究では、図2.16に示すように、映像空間上で、互いのアバター同士の間隔を一定の範囲に保ちつつ、障害物のボールを避けて移動するという協調ゲームを行うシステムを開発することとした。この協調ゲームにおいては、a)の要件を満たすために、あらかじめ決められたルールで動くボールを二人で協力して避けるタスクとしている。つまり、ボールを互いのアバターの動きとは、独立に動かすとともに、共通の目的を予め共有し、それを達成するため、相手と協調的な関係を創り続けるという状況にすることで、外部からコミュニケーションのストーリーを拘束している。さらに、b)の要件を満たすために、各自のアバター同士をバンドで連結している。なお、このバンドは、互いの距離に反比例して細くなり、また、予め設定した距離以上になると消失する（図2.17）。つまり、被験者は、各自が接触したり、バンドが消えたりしないように操作しなければならないことになる。なお、バンドにボールが触れることは、認められる。以上より、協調ゲームを行っている際に二人のアバターが取るべき、時間的な関係や空間的な関係は拘束されることになる。

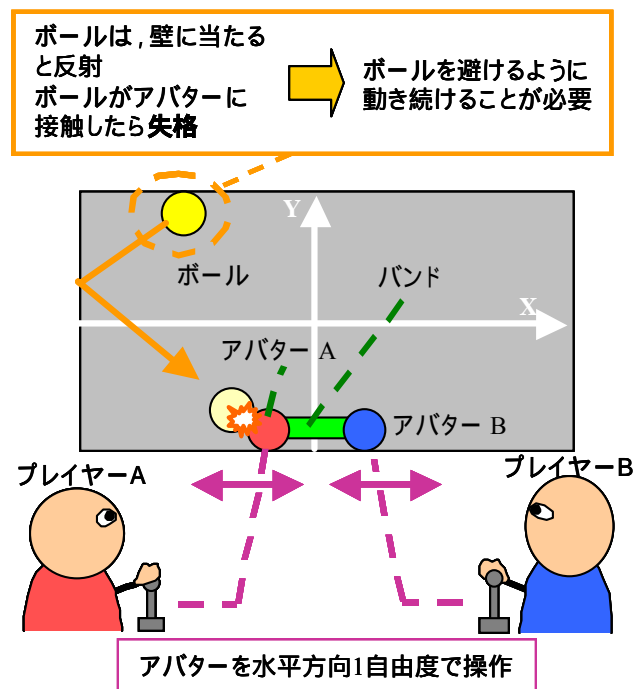


図2.16 協調ゲームシステム

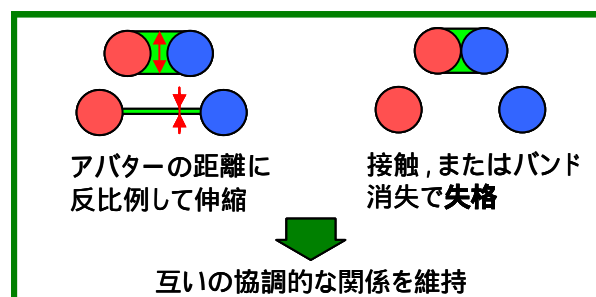


図2.17 バンドに関するルール

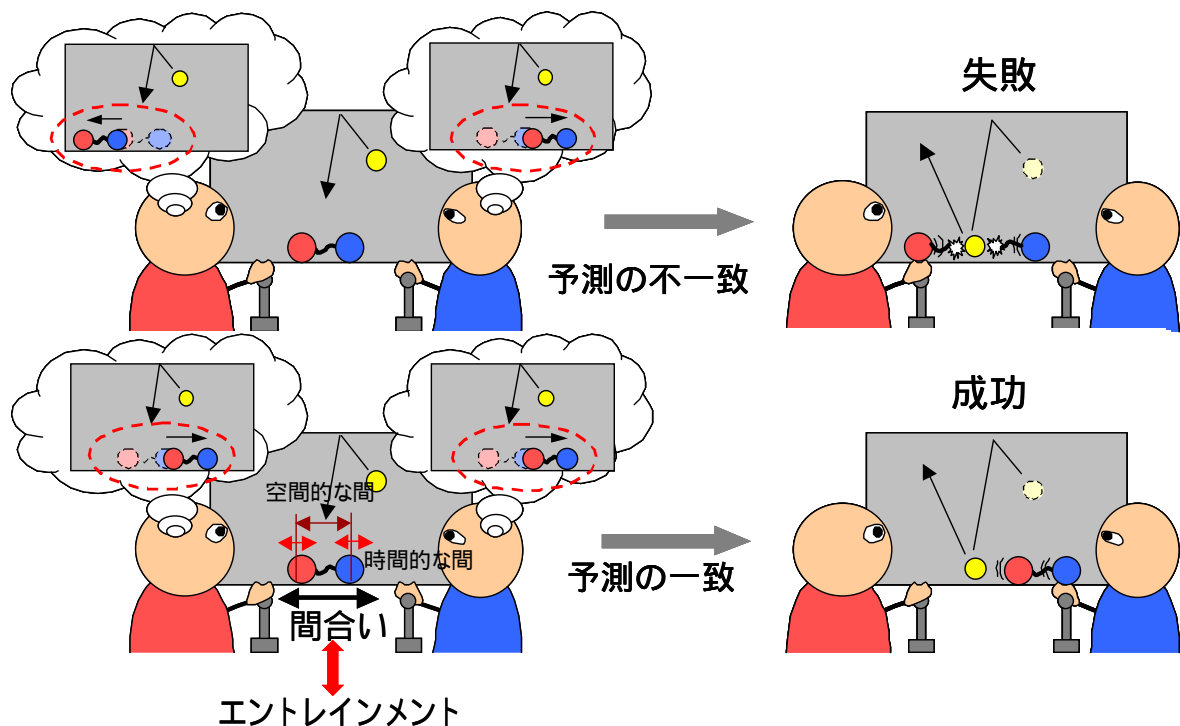


図2.18 協調ゲームシステムのコンセプト

したがって、このゲームにおいて、被験者は、これまでのボールや各人のアバターの動きから、少し先のボールやアバターの動きを予測し、どのようにボールを避けるのかを決定する必要がある。その際、ボールの避け方には、幾つかの選択肢（例えば、図2.18のような状況においては、右に避けるか、左に避けるか大きく分けて2つの選択肢がある）があるので、どの選択肢を選んで、ボールを避けるのか決めることになる。その際、アバター間がバンドで結ばれているため、ゲームを持続させるためには、互いの間で常に協調的な関係を創り続けなければならない。ただし、実験中あるいは、実験前に、被験者の間で、実験タスクの進め方について協議をしてしまう（例えば、“アバターが、中央にいる際に、ボールが中央に向かってきたら、必ず、右にアバターを動かす” などのような取り決めを作っておくこと）と、本来、実験のタスクを進める中で、相手の動きを予測しながら創るべき互いの協調的な関係が、相手の予測とはほぼ無関係に創られてしまうことになる。そこで、本研究では、実験中に会話をする、及び、アバターの位置やボール避け方について指示を行うこと、ならびに、実験前に被験者の間で実験の内容について協議することは、一切禁止する。したがって、この協調ゲームにおいて、被験者は、図2.18に示すように、画面上におけるこれまでの互いのアバターの動きから、これらの動きを予測することになる。つまり、アバターが映像画面上で折り返す際の位置と時間（時刻）の予測を互いに合致させ、時間的な間（ま）と空間的な間（ま）の両方を合わせることが、タスクを成功させるために必要となる。そして、本システムを用いた実験では、前節で述べたリズムコントローラを用いてアバターを操作することで、間合

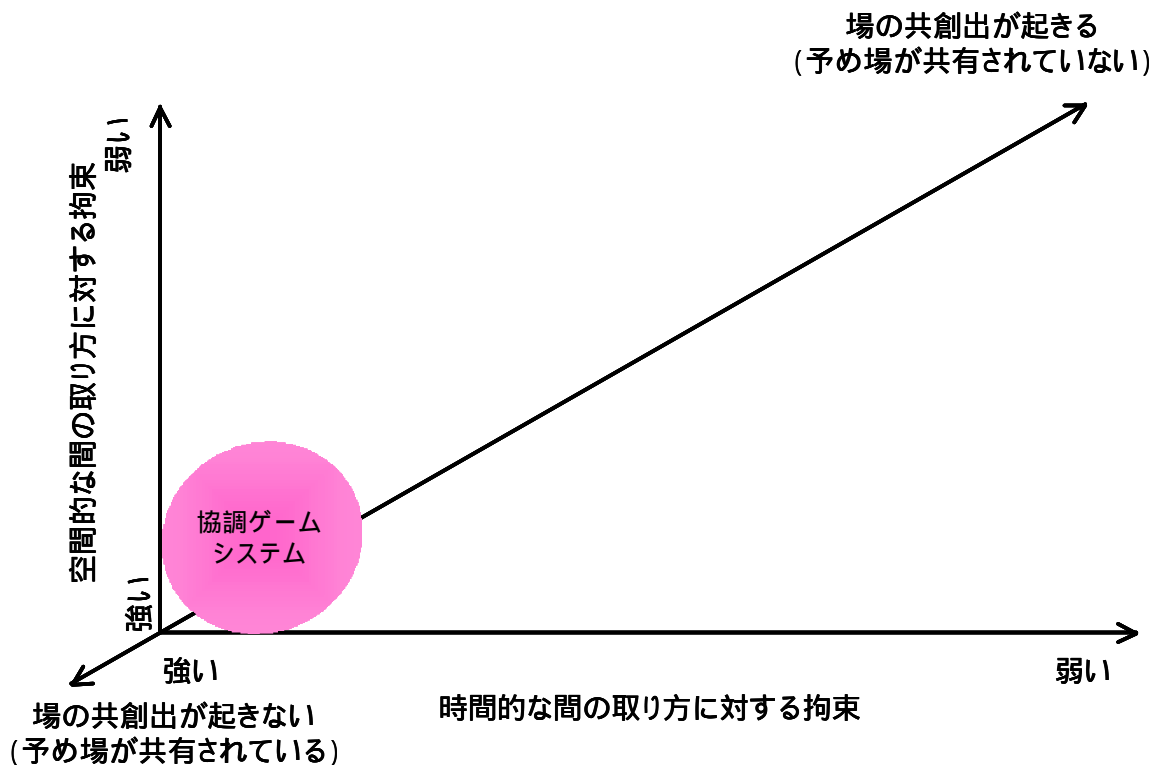


図2.19 間合いの取り方に対する拘束度合いに着目した研究マップ

いの生成と関連づけてリズムコントローラ波形のエントレインメントを調べることになる。

また、上記の協調ゲームシステムで取り扱っている研究について、第1章で述べた研究マップにしたがって示したのが図2.19である。協調ゲームシステムは、同図の左下にあたる、時間的な間（ま）や空間的な間（ま）の取り方がともに強く拘束されており、予め場が共有されているコミュニケーションの研究として位置づけられる。

### 2.3.2. システム構成

協調ゲームシステムの構成を図 2.20 に示す。本システムは、アバター操作のためのリズムコントローラ、ホストコンピュータから構成されている。システム全体は、1台のホストコンピュータから統括的に制御され、サンプリング周波数 50[Hz]で、コントローラ入力値、アバターやボールの位置等の各種データが記録される。また、TCP/IP プロトコルにより、互いのアバターの位置、コントローラ入力値などのデータを送受信することで、遠隔地間でゲームを行うことも可能である。さらに、本システムにおいては、ゲームにおけるボールの初期位置や速度、壁における反射の仕方、各自のアバターのサイズや移動速度、実験フィールドのサイズや形状、バンドの太さやバンドが切れる長さ等の各種パラメータを自由に変更可能としている。なお、第 3 章で述べる全ての実験において、協調ゲームシステムの実験画面の大きさ

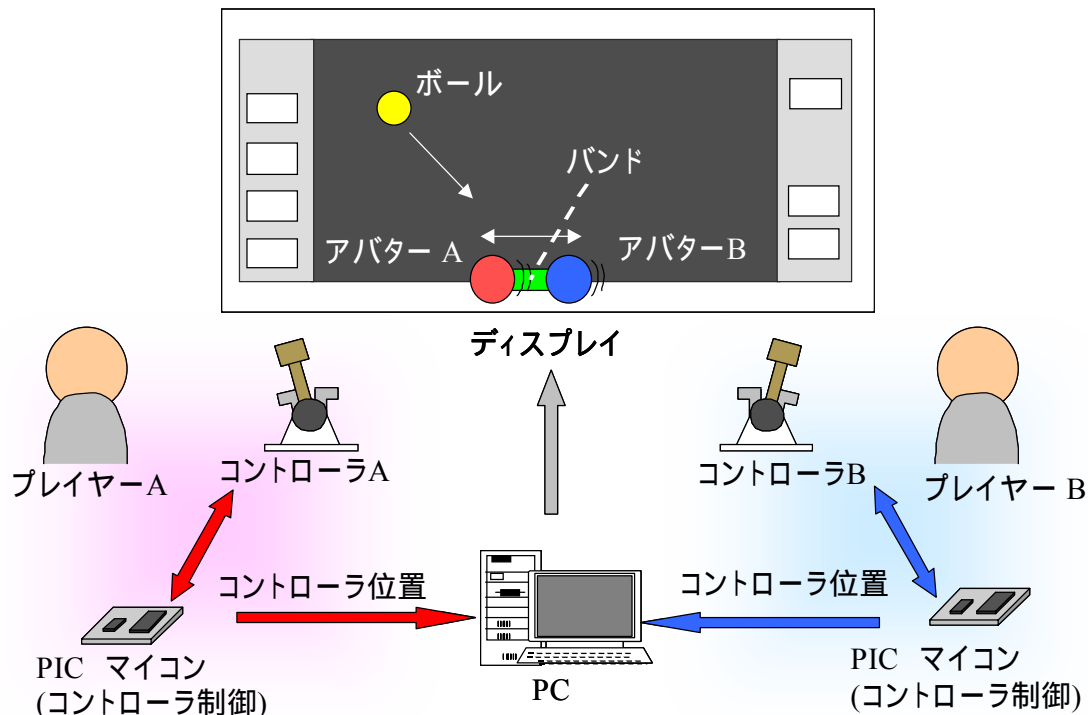


図2.20 協調ゲームシステムの構成

を統一している．その大きさは，アバターの大きさが，直径約 100[mm]，ボールやアバターが移動する実験フィールドの大きさが，縦 250[mm]，横 450[mm]である．

## 2.4. 剣道ロボットシステム

### 2.4.1. システムのコンセプト

間合いの取り方に対する拘束が弱く，予め場が共有されていない（場の共創出が起きる）場合の間合いとエンタテインメントの関係を調べるために開発した剣道ロボットシステムについて説明する．ここでは，外部から場を限定されていない状況，つまり，被験者の間で場を共創出することが必要となる状況で，相手と間合いを取り合うコミュニケーションタスクを考えなければならない．前節の内容を踏まえれば，コミュニケーションにおけるシナリオ（ストーリー）や，互いのアバター間の空間的，時間的關係の自由度が大きい（外部からの制限の度合いが低い）状況で，間合いを取り合うことが求められるタスクを考えればよい．そこで，武道における間合いの生成に着目し，図 2.21 に示すような，映像画面上で，自身のアバターである剣道ロボットを介して，模式的な剣道対戦を行うシステムを開発することにした．このシステムにおける剣道対戦において，2 人の対戦者は，前後方向へ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ー）を操

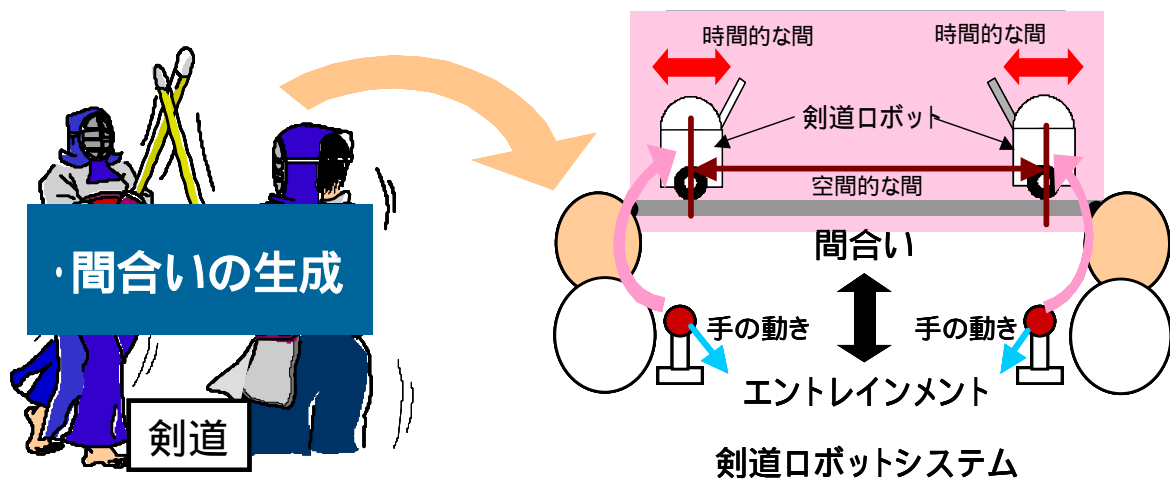


図2.21 剣道ロボットシステム

作して、剣道の試合を行うことになる。その際、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。なお、剣道ロボットの前後移動は、リズムコントローラで、剣道ロボットの剣の振りは、剣操作レバーを指で倒すことで操作する（剣操作レバーの操作角度と剣の角度が一致している）。

剣道対戦では、相手と間合いを取ることが重要である[14]が、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、予め決まっていない。言い換えれば、剣道対戦では、“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、互いの関係も決められていない。つまり、この場合、間合いの取り方に対する拘束が弱く、予め対戦者の間で、場が共有されているわけではない。さらに、図 2.22 示すように、本システムにおける剣道対戦において、間合いは、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）かということの予測（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。よって、本システムを用いた剣道対戦において対戦者は、相手の心の動きを読んで、互いのロボットの動きを予測し、時間的な間（ま）と空間的な間（ま）の両方を合わせる必要がある。したがって、本システムの剣道対戦では、場を共創出することが必要になる。そして、本システムを用いた剣道対戦では、上記の間合いの生成と関連づけてリズムコントローラ波形のエントレインメントを調べることになる。

なお、上記の内容を満たすため、以下の 2 つを本システムにおける剣道対戦の特別なルールとして設定していることを追記しておく。

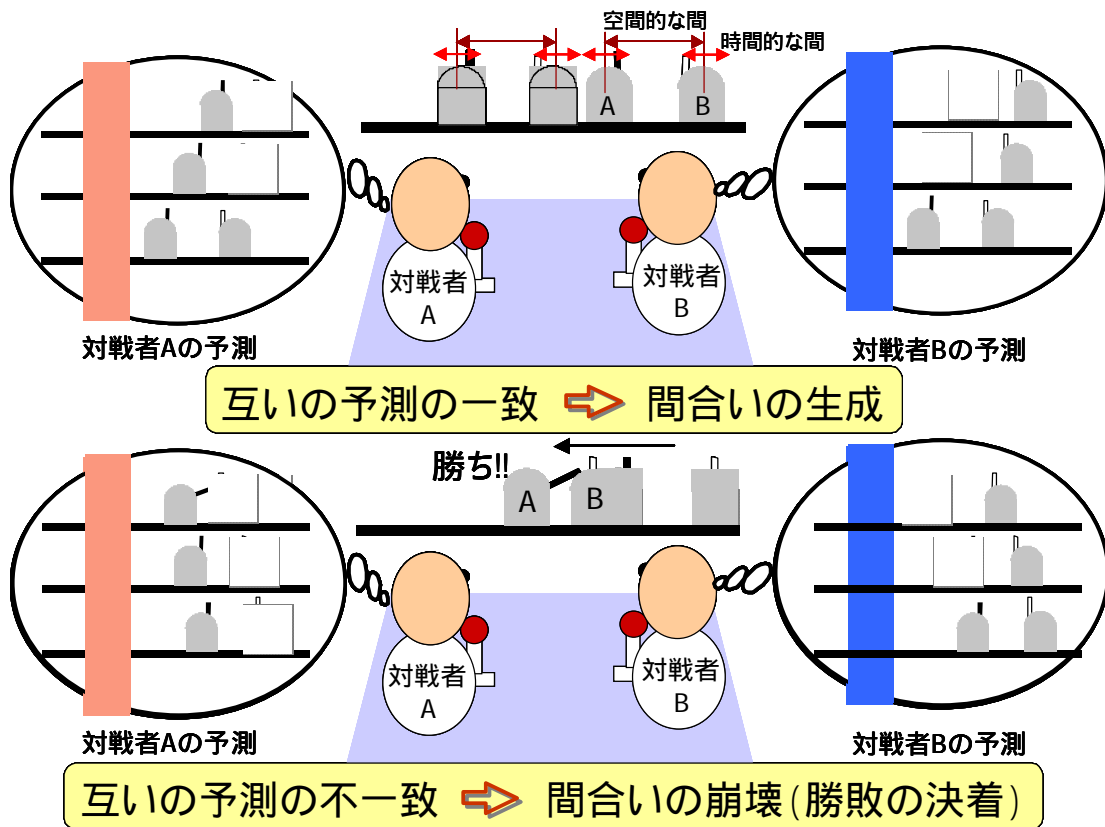


図2.22 剣道ロボット対戦における間合いの生成と崩壊

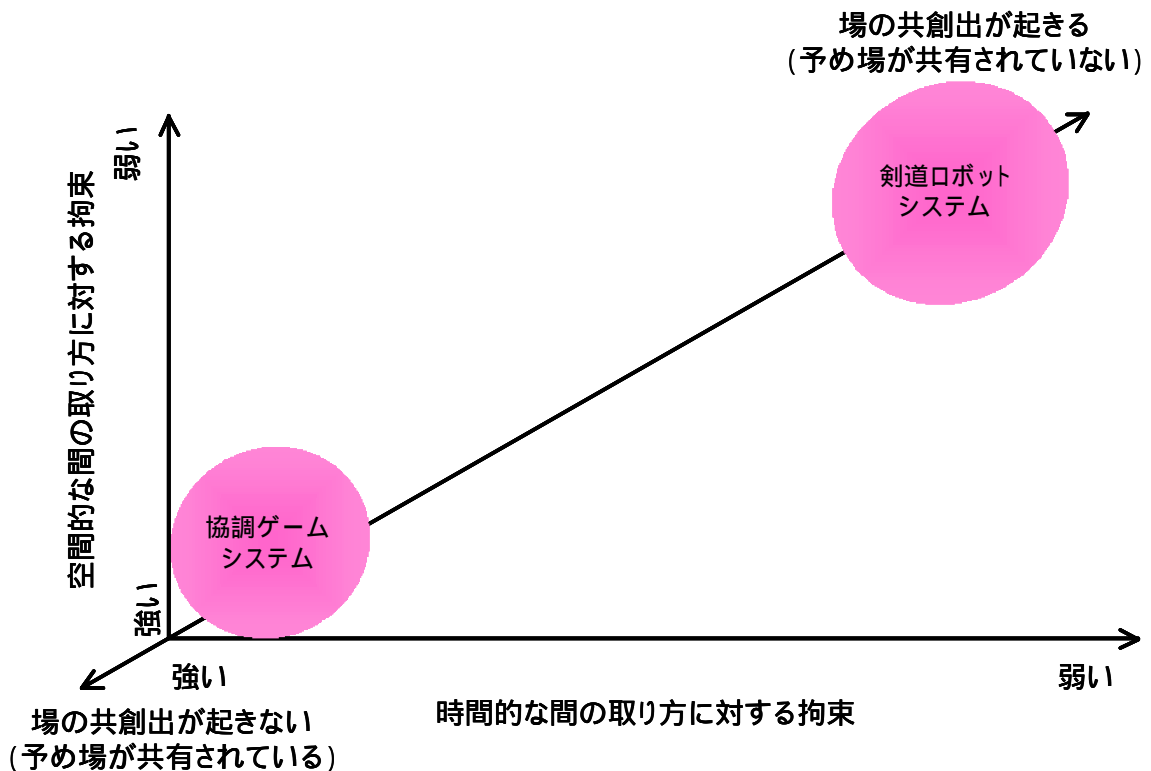


図2.23 間合いの取り方に対する拘束度合いに着目した研究マップ

- ( 1 ) レール端 ( 画面端 ) に達したら場外とする．場外になっても減点する ( 負けとする ) ことはないが，望ましいことではないので，できるだけ避けるようにする
- ( 2 ) 剣を振られた際に，後退する以外にこれを防ぐ手だてはないので，剣を倒したまま前進してはならない

さらに，上記の剣道ロボットシステムで取り扱っている研究について，第 1 章で述べた研究マップにしたがって示したのが図 2.23 である．剣道ロボットシステムは，同図の右上にあたる，時間的な間や空間的な間の取り方に対する拘束がともに弱く，場の共創出が起きる研究として位置づけられる．なお，図 2.23 には，前節で述べた協調ゲームシステムで取り扱っている研究もあわせて示してある．同図より，協調ゲームシステムと剣道ロボットシステムの両方を用いることで，予め場が共有されている ( 場の共創出が起きない ) 場合のコミュニケーションと，予め場が共有されていない ( 場の共創出が起きる ) 場合のコミュニケーションの両方を，本研究において取り扱うことが可能になっていることが分かる．

#### 2.4.2. システム構成

剣道ロボットシステムの構成を図 2.24 に示す．本システムは，対戦画面を提示するための液晶プロジェクタ，剣道ロボット操作のためのコントローラ，ホストコンピュータから構成されている．コントローラはロボット本体の移動操作用，剣操作用の二本のレバーからなり，角度の検出には光学式パルスエンコーダを用いている．

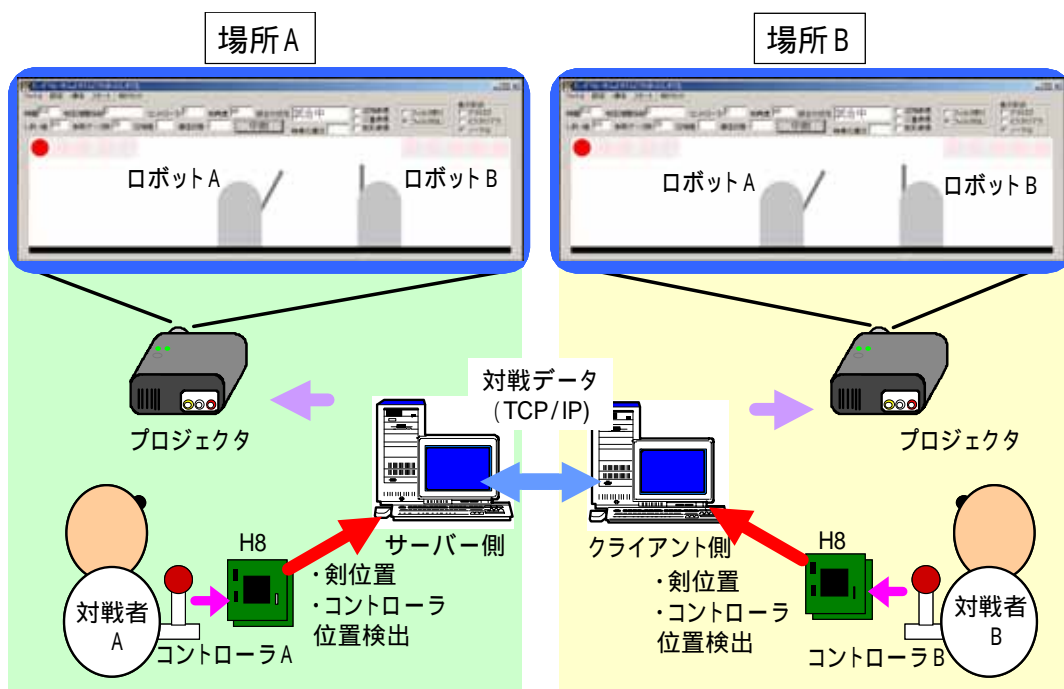


図2.24 剣道ロボットシステムの構成

なお、先に述べたように、剣道ロボットの操作は、リズムコントロール方式で、剣の操作は、剣操作レバーを指で倒すことによって行う。システム全体は、ロボットごとに各1台のホストコンピュータから統括的に制御され、サンプリング周波数50[Hz]で、ロボットの位置、剣角度、コントローラ入力値等のデータが記録される。また、TCP/IPプロトコルにより、各種対戦データを送受信することで、遠隔対戦を行うことも可能である。なお、第4章以降の全ての剣道ロボットシステムの実験において、液晶プロジェクタで投影する対戦画面の大きさを統一している。その大きさは、剣道ロボットの大きさが、全高250[mm]、全副150[mm]、剣の長さ180[mm]、対戦場の大きさが、長さ1600[mm]である。

### 2.5. まとめ

本章の内容をまとめると以下ようになる。

- (1) 間合いの生成とエンタテインメントの関係を調べることを可能とする実験システムについて検討した。まず、柳生新陰流において、心のリズムである「調子」から生み出される太刀のリズムである「拍子」を相手と合わせることで、間合いを生成していることに着目し、拍子のエンタテインメントと間合いの関係について調べることを構想した。
- (2) これを、アバターを介したコミュニケーションにおいて実現することとし、意図した行為に先行するリズム的な身体行為でアバターを操作するリズムコントローラの開発を行った。
- (3) 予め場が共有されている（場の共創出が起きない）場合の間合いとエンタテインメントの関係を調べるため、仮想的なバンドで連結された映像空間上のアバターをリズム的に操作し、アバター同士の間隔を一定に保ちつつ、障害物を避けて移動するという協調ゲームシステムを開発した。
- (4) 予め場が共有されていない（場の共創出が起きる）場合の間合いとエンタテインメントの関係を調べるため、映像画面上で、自身のアバターである剣道ロボットを介して、模式的な剣道対戦を行うことを可能とする剣道ロボットシステムを開発した。



## 第3章 間合いの生成とエンタテインメント（予め場が共有されている場合）

### 3.1. はじめに

本論文では、予め場が共有されている（場の共創出が起きない）場合のコミュニケーションと、予め場が共有されていない（場の共創出が起きる）場合のコミュニケーションの両方について、間合いとエンタテインメントとの関係を調べ、場の共創出とエンタテインメントの関係について明らかにすることを目指している。本章では、前章で説明した協調ゲームシステム（図3.1）を用いて、予め場が共有されているときの間合いの生成とエンタテインメントの関係について調べた。具体的には、予め互いの間で場が共有された状況において、どのような状況で、エンタテインメントの創出が見られるかどうかを明らかにした。さらに、予め場が共有された状況において、タスク（間合い生成）の難易度を变化させた場合、エンタテインメントの生成に変化がみられるかどうかを検討し、間合いの生成とエンタテインメントの間にどのような関係があるのかを示した。あわせて、相手と一定の協調的な関係を創り続けることが求められるような状況において、エンタテインメントが生成されることがどのような意味を持つのかということについても考察したので、以下にその詳細を述べる。

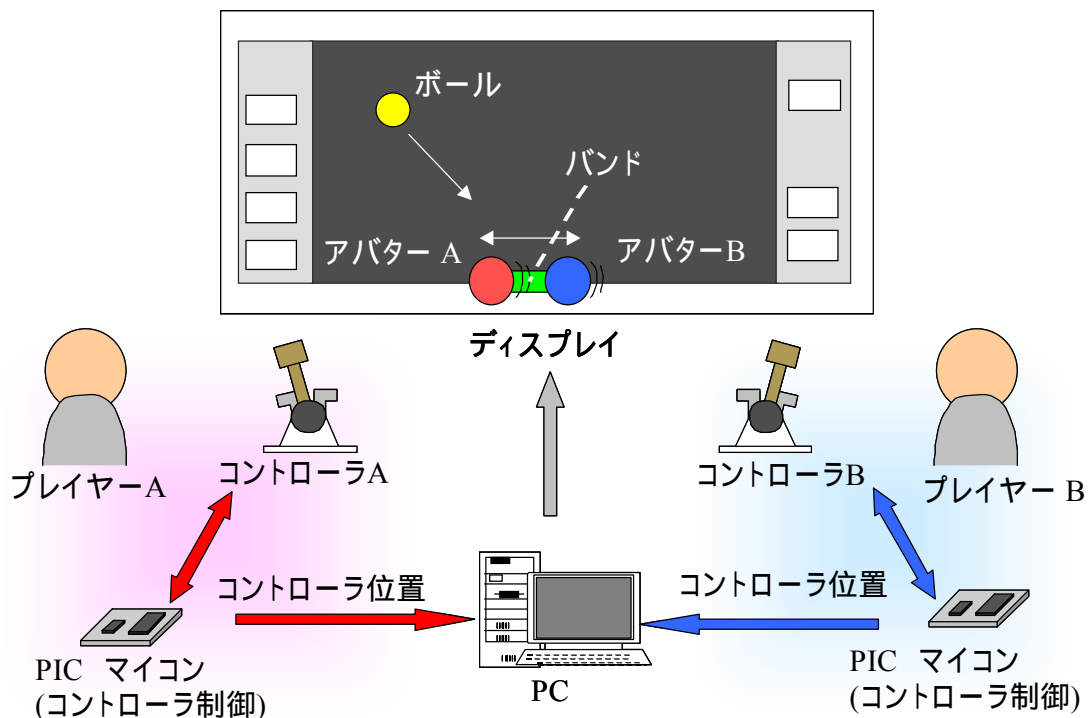


図3.1 協調ゲームシステムの構成

### 3.2. 協調ゲームシステムの予備実験

協調ゲームにおいて、間合いの生成とエンタテインメントの生成について調べるためには、二人の被験者の間で間合いを生成しないとゲームの遂行ができないような条件で、実験を行う必要がある。そこで、まず、予備実験を行い、この条件を決定することにした。具体的には、アバターを連結するバンドの許容長さについて調べた。さらに、被験者同士がどのような状況でゲームを行うことが、ゲームの成立に必要なものであるのか確認するために、被験者を別々の場所に隔離した状況で実験を行った。

#### 3.2.1. バンド許容長さに関する検討

協調ゲームシステムでは、被験者のアバター同士を、バンドで連結した状態で、アバターを操作し、画面上を動き回るボールを避けるというタスクを行うことになる。ここで、バンドの許容長さ（バンドが切れてしまう長さ）を長すぎてしまうと、相手のアバターと無関係に動いたとしても、タスクが成立してしまう可能性がある。つまり、相手と間合いを取らない状態で、実験を行ってしまうことになる。逆に、バンドの許容長さを短くしすぎると、アバターそのものを操作することが、非常に困難になってしまう可能性がある。つまり、協調ゲームシステムにおいて、エンタテインメントと間合いの生成の関係を調べるためには、適切なバンドの許容長さを設定する必要がある。そこで、最初に、上記の協調ゲームをバンドの許容長さを変えて、実験することにした。具体的には、バンドの許容距離がアバターの中心間距離の 5 倍（ $5R$ ）、8 倍（ $8R$ ）、11 倍（ $11R$ ）の 3 条件で実験を行い、それらの違いについて比較した（図 3.2）。この実験は、同じ場所にいる 2 人で被験者の間で、ボールが、壁で完全弾性反射する設定で行った。実験の被験者は、リズムコントローラによるアバターの操作に習熟した 6 人の 20 代男子学生である。図 3.3 に、それぞれの条件におけるアバター間距離の頻度分布を示す。その結果、どの条件においても、その距離が  $4R$ - $5R$  であることが多いことが分かる。つまり、被験者はアバター間距離を、

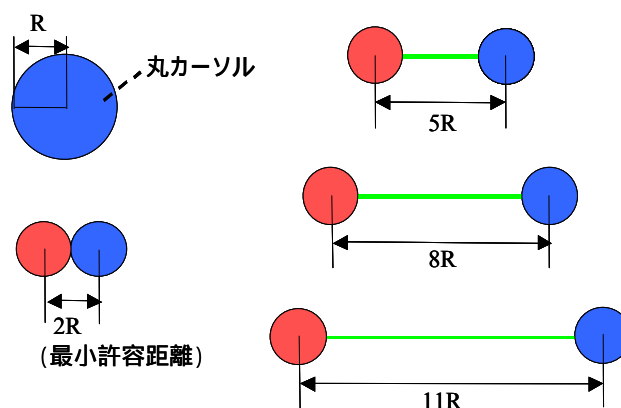


図3.2 バンドの許容範囲

### 第3章 間合いの生成とエンタテインメント（予め場が共有されている場合）

バンドの許容長さによってそれほど大きく変化させるわけではない．したがって，バンドの許容長さをむやみに長くしてしまうと，相手と動きを合わせなくてもゲームが成立してしまう可能性が増大し，相手と間合いを取らなくなる恐れがある．また，逆に許容長さを狭くしすぎると，窮屈になりアバターを動かせなくなる可能性が生じる．実際，ゲーム中のアバターとボールの変化を見ると，5R の場合には，図 3.4(a)に示すように，両者のアバターは，ほとんど動けないままゲームが終了することが多かった．また，被験者からは，この場合，“非常に窮屈で，アバターをほとんど動かせない”とのコメントが多く寄せられた．一方，11R の場合には，図 3.4(c)に示すように，互いのアバターが逆方向に動いてしまっても，ゲームが成立してしまうケースも見られた．さらに，全ての被験者から，“相手をあまり気にしなくてもゲームが続けられる”とのコメントが得られた．8R の場合には，図 3.4 (b)に示すように，互いのアバターがほぼ一定の距離を保ちながら移動しており，また，被験者からも，“相手と協力してゲームをしている感覚が強く，そのようにしないとゲームがうまくいかない”，“相手の動きを後追いついてアバターを操作しようとする”と，相手のアバターと衝突したり，バンドが切れてしまったりして，うまくタスクが成立しない”などのコメントが得られている．また，8R の場合において，ゲームが成立している際には，図 3.5 に示すように，コントローラ波形にエンタテインメントが生成されることが分かった．以上より，本研究では，バンドの許容長さが 8R の条件で実験を行うことにした．

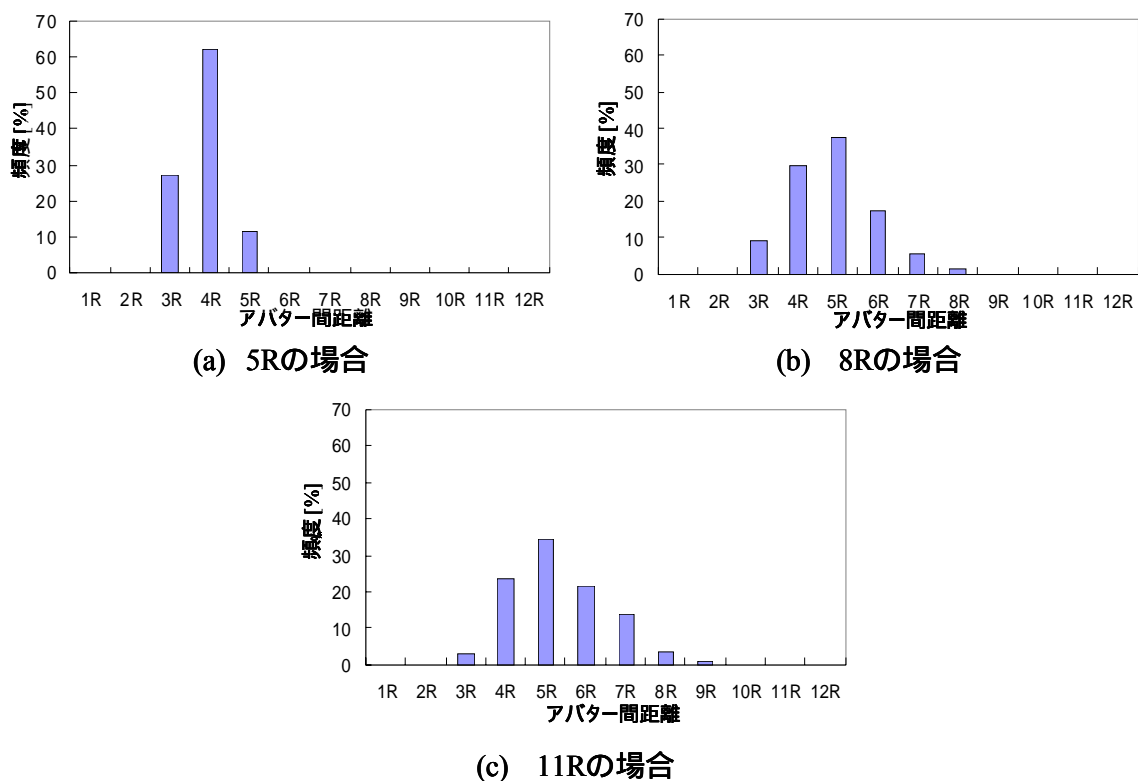


図3.3 アバター間距離の頻度分布

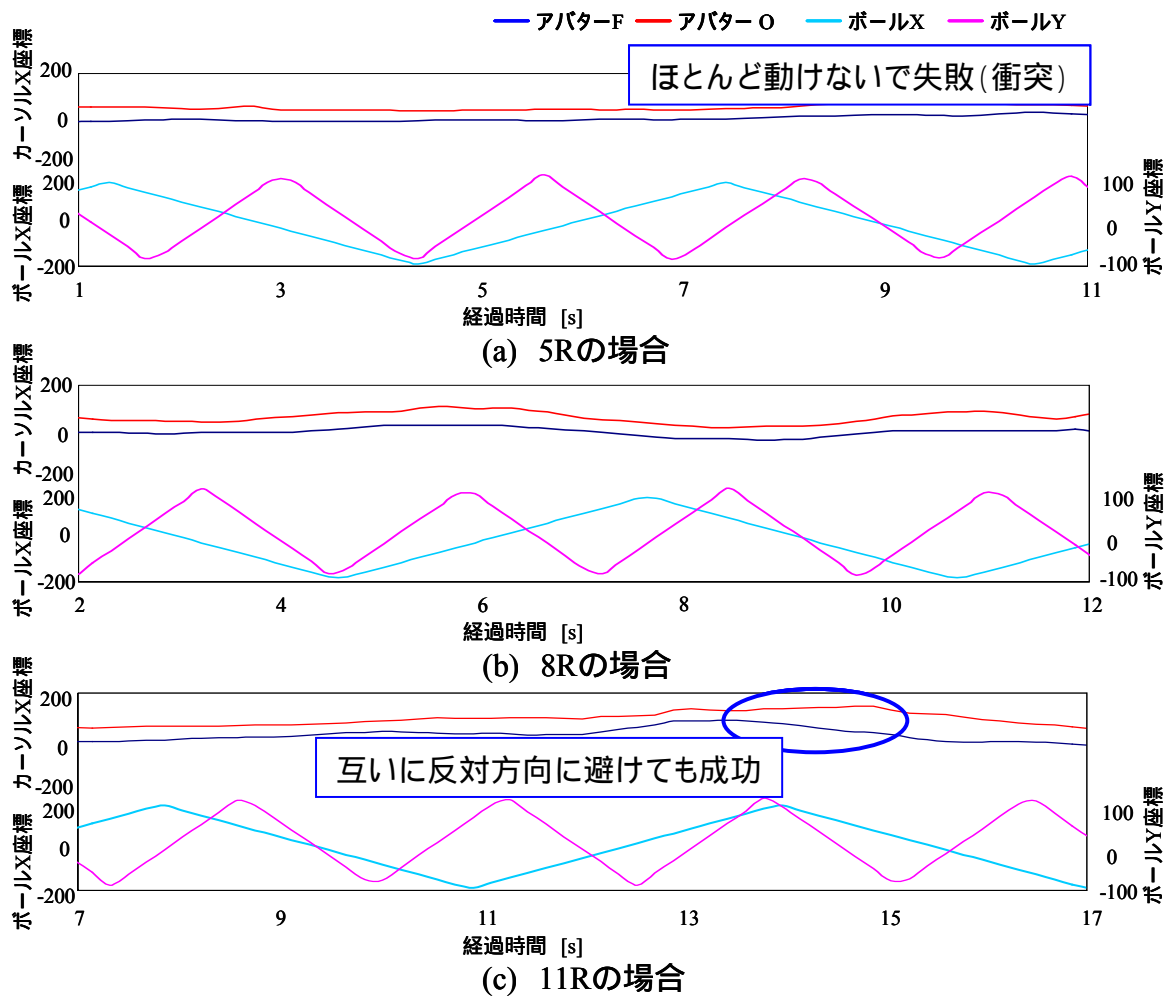
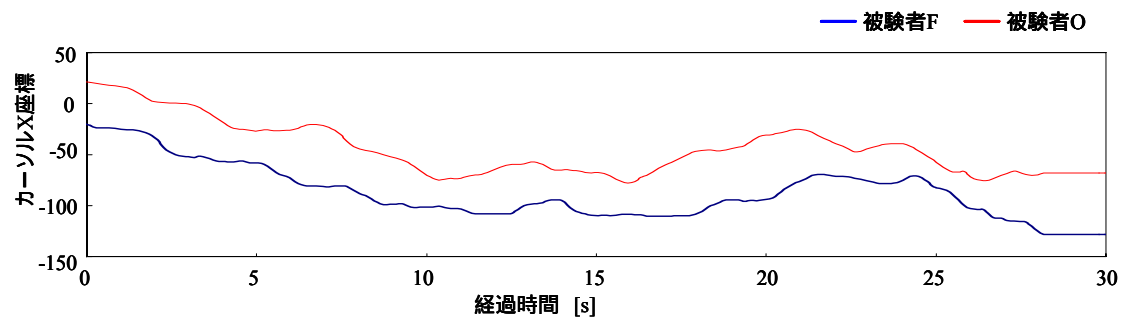


図3.4 アバターとボールの位置の時間変化

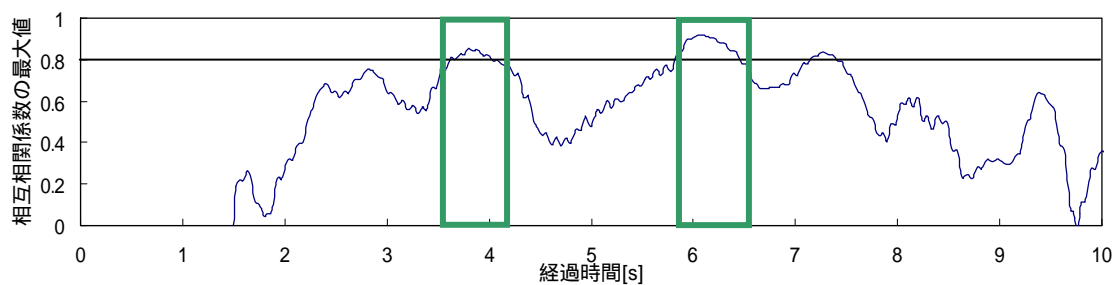
### 3.2.2. ゲームの成立に必要な条件に関する検討

前節までの予備実験により，被験者が同じ場所にいる状況で本ゲームを行った場合（ただし，バンドの許容長さが 8R の場合）には，ゲームが成立することが分かった．しかし，本ゲームの成立に，映像上のアバターの動き以外の情報，つまり，相手の身体の動きや顔の表情，音声等の情報のやり取りが，被験者の間で必要であるかどうかは，定かではない．そこで，被験者をそれぞれ別々の場所に配置し，互いを完全に隔離した状態で，実験（遠隔ゲーム）を行った．本実験は，リズムコントローラを用いて，バンドの許容長さが 8R，ボールは壁において完全弾性反射する条件で行った．結果の一例を表 3.1 や図 3.6 に示す．この場合，同場所でのゲームと比べて，ゲーム持続時間が半分程度になり，ゲームがほとんど成立しないことが分かった．また，ゲームが持続した場合においても，図 3.6 (a)に示すように，両者のアバターがほとんど動けず，アバター同士が衝突してゲームが終わるという結果が多かった．さらに，この場合，コントローラ波形にエンタテインメントが生成され

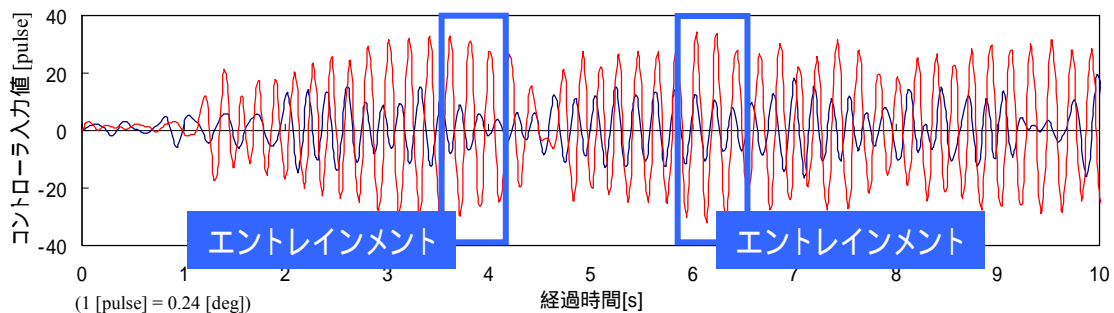
### 第3章 間合いの生成とエントレインメント（予め場が共有されている場合）



(a) アバター位置の時間変化



(b) リズムコントローラ波形の相互相関係数の最大値の時間変化



(c) バンドパスフィルタを通したリズムコントローラ波形の時間変化

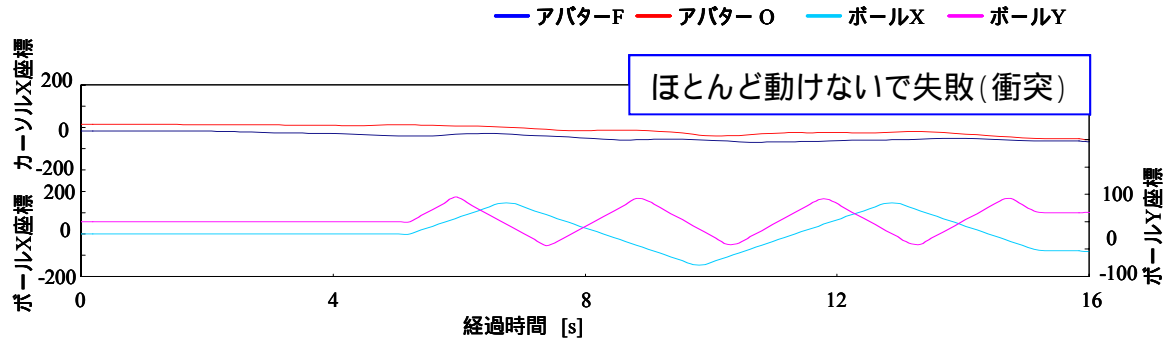
図3.5 ゲームが成立している際のコントローラ波形

ていない（図 3.6(c)）。被験者からは，“相手のアバターの動きを予測することが難しい”，“相手のアバターをコンピュータが操作しているように感じられる”，“相手とうまく協力してアバターを移動させることが難しく，ゲームを進めていくうちに，自分の協力相手であるはずの相手のアバターが，自分の敵であるかのように感じられるようになった。”等のコメントが得られている．以上の結果は，互いの被験者を完全に隔離した状況では，ゲームが成立しないことを示している．これらのことから，本ゲームの成立にはエントレインメントの生成が必要であり，離れた場所間での対戦ではそのための要件が満足されないものと考えることができる．

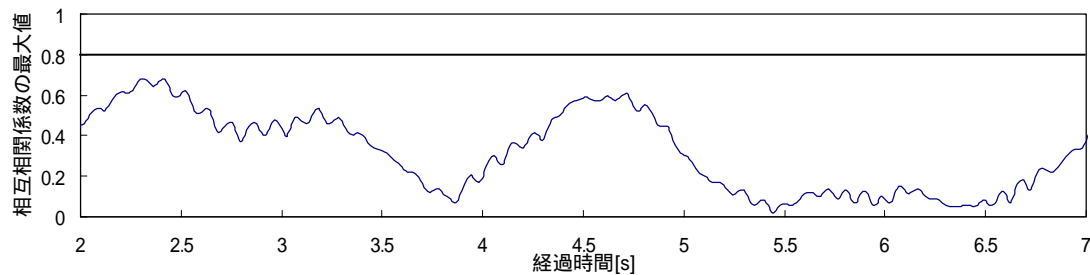
以上の 2 種類の予備実験の結果を踏まえて，本研究では，協調ゲームにおけるエントレインメントと間合いの生成に関する実験を，バンドの許容長さが  $8R$  の状

表3.1 遠隔ゲームと同場所ゲームの平均時間

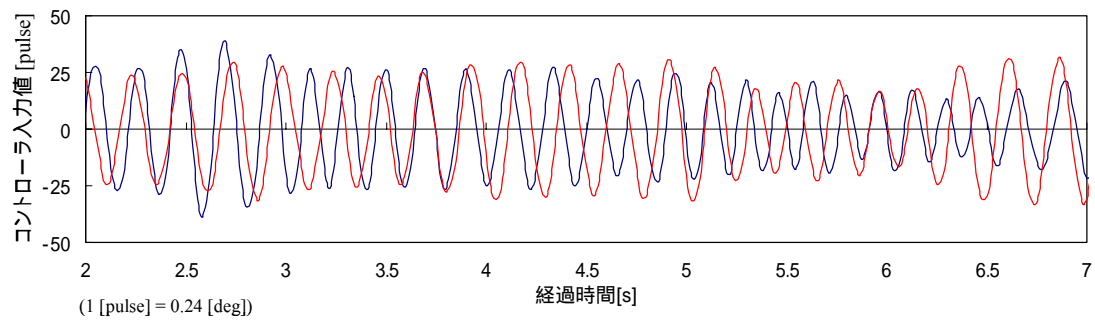
	同場所でのゲーム	遠隔でのゲーム
	平均ゲーム時間 [s]	平均ゲーム時間 [s]
ペアA	20.4	9.1
ペアB	17.6	10.2
ペアC	21.0	8.2



(a) アバター位置の時間変化



(b) リズムコントローラ波形の相互相関係数の最大値の時間変化



(c) バンドパスフィルタを通したリズムコントローラ波形の時間変化

図3.6 遠隔ゲームの実験結果

態で、同じ場所において、行うことに決定した。この条件で行った実験の詳細については、次節で述べる。

### 3.3. 協調ゲームシステムの実験結果

#### 3.3.1. 完全弾性反射の場合

協調ゲームシステムを用いて、ゲームのどのような状況で、エンタテインメントが生成されるのか調べた。実験は、長方形のフィールドにおいて、ボールは壁において完全弾性反射する条件で行った。実験の様子を図 3.7 に示す。なお、この実験と次項で説明する実験は、先の実験と同様、リズムコントローラによるアバターの操作に習熟した 6 人の 20 代男子学生を 3 ペアに分けて行っている。図 3.8 にこの実験の結果の一例を示す。この図において、ゲーム時におけるバンドパスフィルタを通したコントローラ入力波形を同図(b)に、ボールとアバターの位置座標変化を同図(c)に示す。ただし、ボールとアバターの位置座標の時間変化のグラフでは、ボールとアバターがどのような関係にあったのかが把握しにくい。そこで、同図(d)に、両者のアバターの重心位置の時間変化と、両者のアバターの重心位置とボール間の距離（図 3.7 参照）の時間変化を示す。なお、この図における両者のアバターの重心位置とボール間の距離の時間変化を表すグラフにおいて、グラフの尖っている箇所は、ボールが壁と接触していることを、グラフの傾きが正の箇所は、ボールが、アバターから離れていくことを、負の箇所は、ボールがアバターに接近していることを示している。この様子を図に示したのが、図 3.8 (e)である。まず、コントローラ入力波形を見ると、ゲーム中において、エンタテインメントが生成、崩壊を繰り返していることが確認できる。さらに、エンタテインメントが生成されているときのゲー

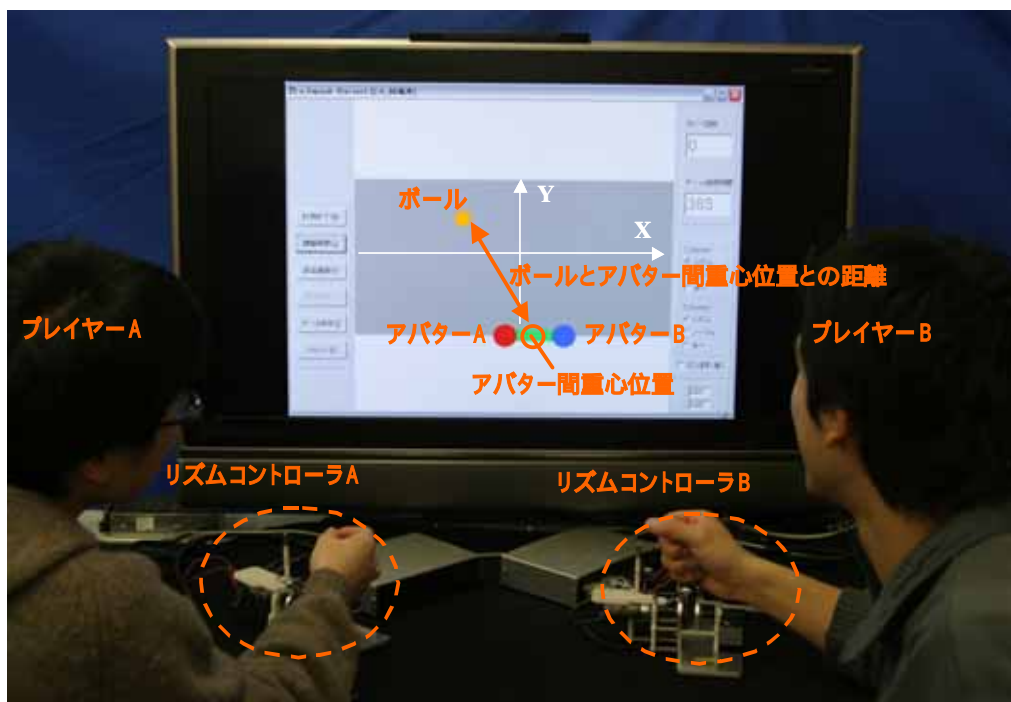


図3.7 実験の様子

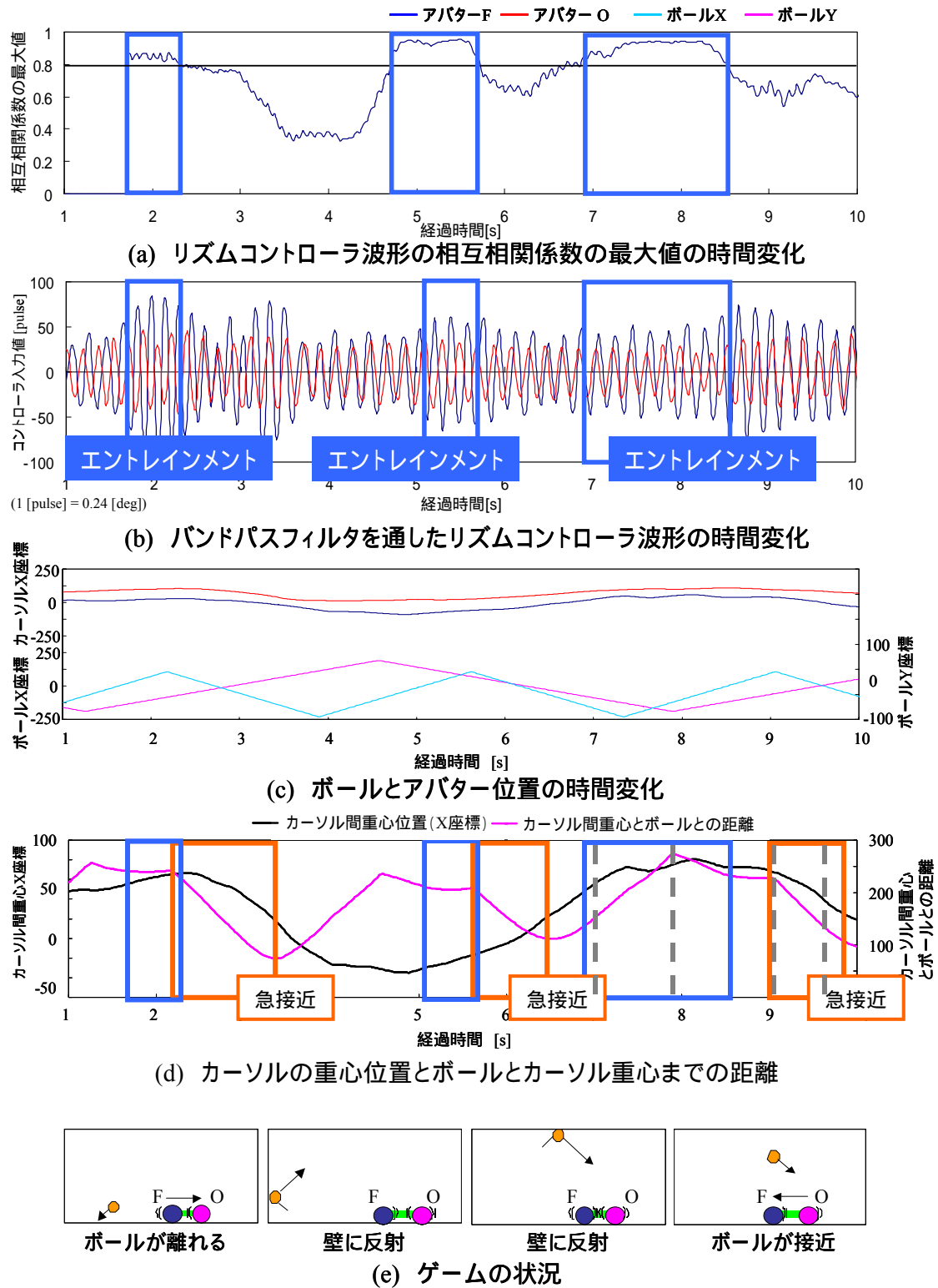


図3.8 完全弾性反射の実験結果

ムの状況について注目すると，図 3.8 より，ボールがアバターに急接近を始める前に，エンタレインメントの生成が開始されていることが分かる．同図に示す例だけでなく，他のペアにおいても，同様に，エンタレインメントが生成されるタイミングは，

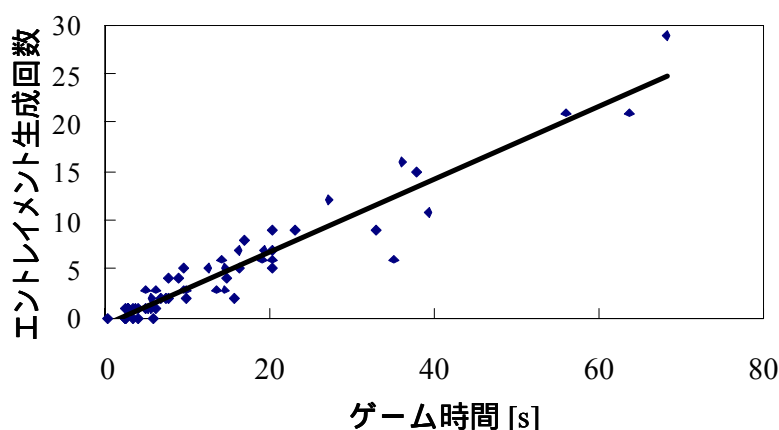


図3.9 ゲーム時間とコヒーレンス生成回数の関係

ボールがアバターに急接近を始めるよりも前であることが多い傾向があった。次に、ゲームの持続時間とそのゲーム中に起きたエントレインメント生成の回数の関係について調べた。その結果、図 3.9 に示すように、ゲーム時間とエントレインメントの生成回数に相関が見られ、ゲームの持続時間の増大とともにエントレインメントの生成回数も多くなる傾向があることを確認した。なお、同図において、近似直線は、最小二乗法を用いて計算している。また、他の 2 ペアについても同様の結果が得られている。この結果は、エントレインメントが生成されない状態で、長時間ゲームが持続することが、ほとんど起こりえないことを示しており、エントレインメントの生成は、協調的なタスクの達成、つまり、間合いの生成に関係していることが分かる。

### 3.3.2. イレギュラー反射の場合

前項で述べた実験においては、外部から場が限定された状況において、間合いが生成される際に、エントレインメントが創られることを明らかにした。そこで、外部から場が限定された状況における間合いの生成とエントレインメントの関係をさらに詳しく調べるため、次に、間合い生成（タスク）の難易度を变化させた場合に、

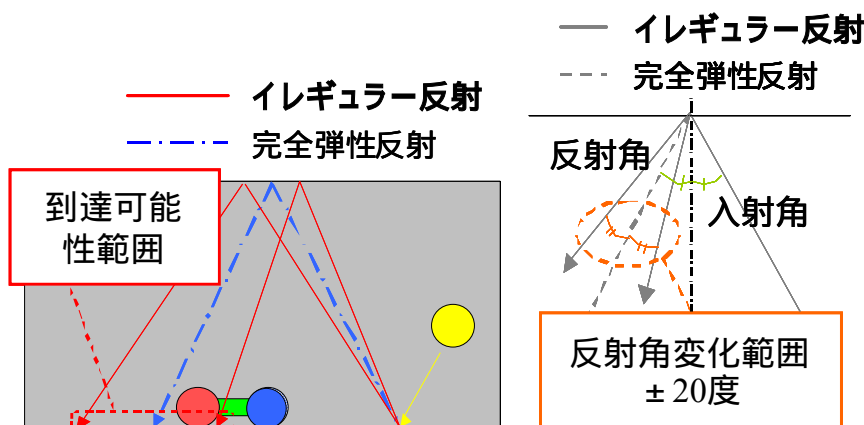


図3.10 イレギュラー反射

エントレインメントの生成にどのような違いが見られるのかを調べることにした．  
前項の実験では，ボールが壁で完全弾性反射するので，ボールの動きの予測は容易

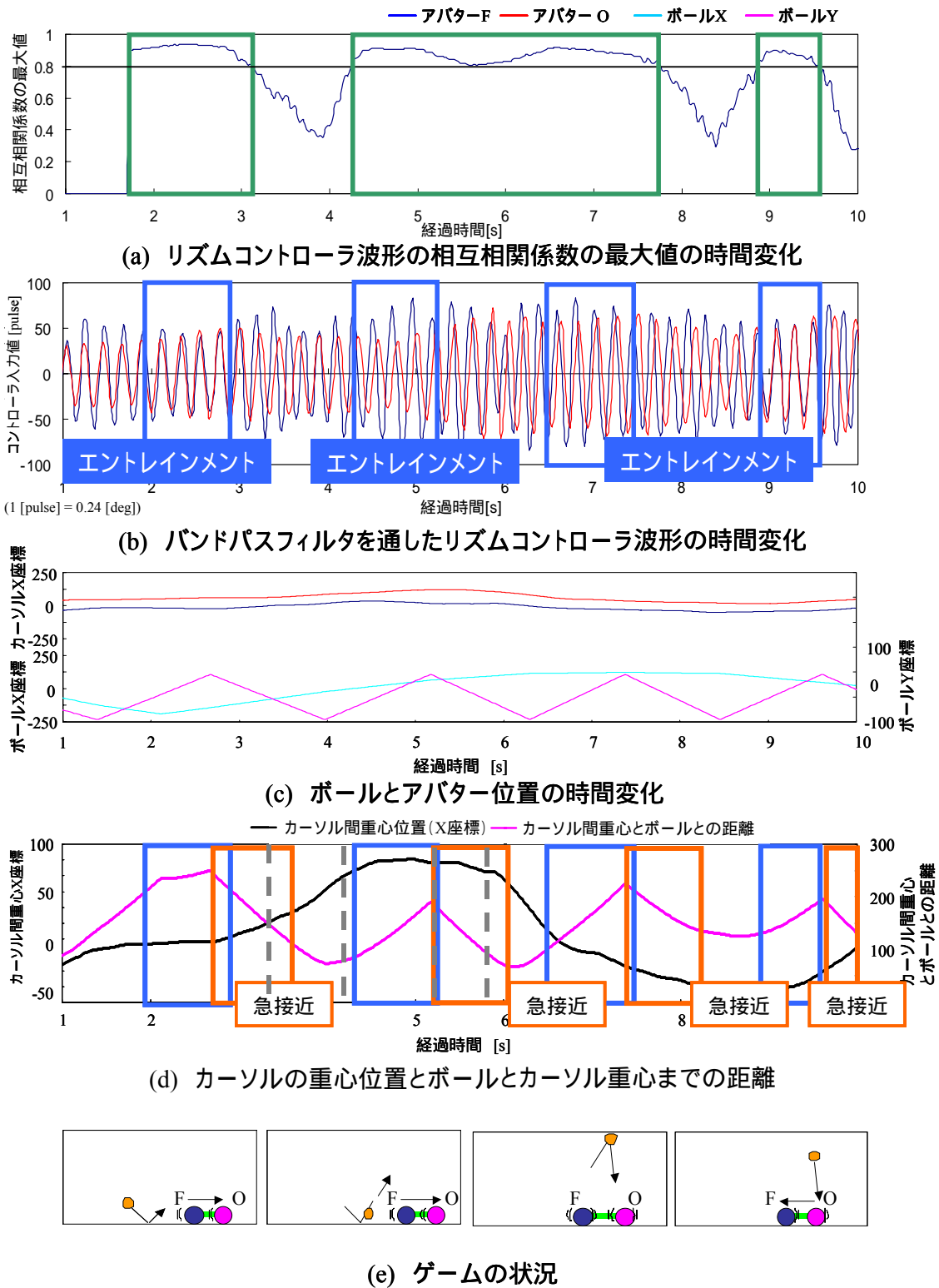


図3.11 イレギュラー反射の実験結果

であり、相手のアバターの動きを読み、相手と合わせて移動すること（間合いを取る こと）も比較的容易であると考えられる。しかし、図 3.10 示すように、反射角をランダムに変化させる（以下、この反射を“イレギュラー反射”と呼ぶことにする）と、完全弾性反射の場合と異なり、ボールの動きが、完全に限定されなくなるので、ボールの動きが予測しにくくなり、相手の動きを予測し、相手と協調的な関係を創りながら移動すること（間合いを取る こと）は困難になると考えられる。そこで、ボールを壁でイレギュラー反射させる実験を行った。実験は、ボールの反射角を、完全弾性反射の場合の反射角に対して、 $\pm 20$  度の範囲で、ランダムに変化させる（図 3.10 参照）条件で行った。図 3.11 に、この実験の結果の一例を示す。この実験におけるコントローラ波形（図 3.11(b)）に着目すると、前項の実験と同様に、ゲーム中において、エンタテインメントの生成、崩壊を繰り返していることが確認できる。さらに、エンタテインメントが生成されているときのゲームの状況について注目すると、図 3.11 より、前項の実験と同様に、ボールが急接近を開始する前にエンタテインメントを生成している傾向があることが確認できる。これは、他のペアについても同様である。また、被験者からはイレギュラー反射の条件でゲームを行ったときの感想として、“ボールの動きが読みにくい”、“完全弾性反射の場合よりも緊張感がある”、“ゲームとしてイレギュラー反射の場合の方が面白く難しい”、“相手がどう動くか予想しにくくなった”などのコメントが得られた。さらに、前節の実験と同様に、ゲームの持続時間とそのゲーム中に起きたエンタテインメント生成回数の関係について調べた。その結果、図 3.12 に示すように、ゲーム時間とエンタテインメントの生成回数に相関が見られ、ゲームの持続時間の増大とともにエンタテインメントの生成回数も多くなる傾向があることを確認した。なお、同図において、近似直線は、最小二乗法を用いて計算している。ここで、興味深いことに、イレギュラー反射の場合の方が、完全弾性反射の場合と比較して、エンタテインメントの生成回数が増大することが分かった。なお、表 3.2 に示すように、3 組すべてのペアについて同様の結果が得られている。したがって、以上の完全弾性反射の条

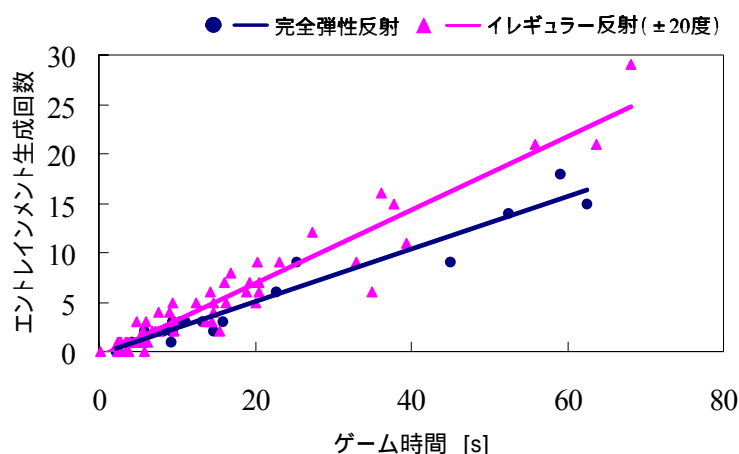


図3.12 完全弾性反射とイレギュラー反射の比較

表3.2 各ペアのコヒーレンス生成頻度

ランダム度合い		コヒーレンス間隔 (s) (ゲーム時間/コヒーレンス生成回数)
ペアA	0	4.29
	$\pm 20$	3.16
ペアB	0	4.93
	$\pm 20$	3.92
ペアC	0	5.16
	$\pm 20$	2.81

件とイレギュラー反射の条件の実験結果から，ボールが壁で反射し，ボールがアバターに接近し始める前にエンタテインメントを生成し始める傾向があることと，タスク（間合い生成）の難易度が高い場合の方が，エンタテインメントの生成頻度が高まることが分かった．

### 3.4. 考察

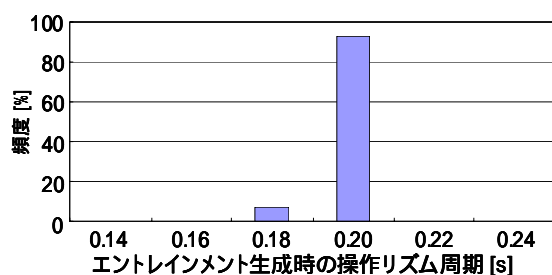
本研究で開発した協調ゲームにおいて，タスクを成立させる，つまり，相手と間合いを取るためには，互いのアバターの動きに関する予測を共有する必要がある．特に，本ゲームでは，ボールを避けてアバターを操作することが求められているので，ボールがアバターに接近する前に，互いの間でどちらに動いてボールを避けるかということを共有しなければならない．つまり，相手の動きを見てから，相手に合わせて動かそうとすると，ゲームが失敗するように，バンドの許容長さが，設定されているので，ボールが接近する前に，互いの動きに関する予測が共有できていなければならない．したがって，本実験において，エンタテインメントが生成された，ボールがアバターに急接近し始める少し前というのは，ボールを避けるためのアバターの動きに関して，幾つかの選択肢がある中で，これまでのボールや互いのアバターの動きから，少し先の状況を予測し，互いの間で選択肢を共有しなくてはならない状況である．したがって，本実験におけるエンタテインメントの生成は，過去から未来を予測する際に，その予測を共有させ，互いの表現を合わせるために必要とされることを示しているものと考えられる．

また，本研究より，イレギュラー反射の方が，完全弾性反射の場合と比べて，エンタテインメントの生成頻度が高くなることを見出されている．完全弾性反射の場合は，未来におけるボールの動きが一意に決定されているので，ボールが次に壁で反射した後，どの位置に来るのか完全に予測できるため，相手の動きを予測することは，比較的容易であるといえる．さらにいえば，この場合，ボールとアバターの位置関係によっては，相手がどこに動くかということがほぼ明らかであり，相手の動きを予測するまでもない状況も存在するであろう．一方，イレギュラー反射の場

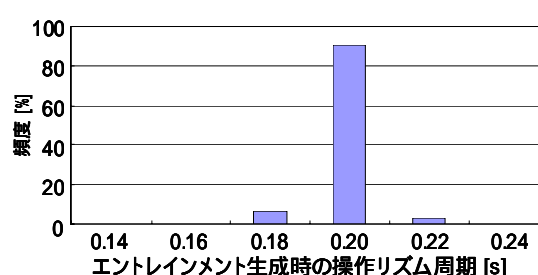
合は、ボールが壁で反射した後どこに到達するかということは、ある程度の幅を持って決まっているが、ボールが反射するまで確定はしていない。したがって、完全弾性反射の場合と比べて、相手の動きを予測することは、困難になる。また、この場合、ボールが壁に反射した後、アバターに接近するかどうかは、確率的に決まる（反射後のボールの到達範囲に幅がある）ため、ボールが、アバターに接近する可能性がある局面、つまり、互いの間で少し先の状況を予測しなければならない局面は、完全弾性反射の場合と比べて、多くなると考えられる。以上を踏まえると、イレギュラー反射において、完全弾性反射と比較して、エンタテインメントの生成頻度が増えることは、エンタテインメントが、互いの予測を共有するために生成されることを支持するものといえよう。

したがって、エンタテインメントの生成を促すことができれば、互いの予測が合致した表現を支援できる可能性がある。今回開発した実験システムにおける協調ゲームは、共通の目的を予め共有し、それを達成するため、相手と一定の協調的な関係を創り続けるという状況で行われている。そのため、本研究では、予め場が共有されていることを前提としているが、この場合に、エンタテインメントの生成は時間的な間（ま）を合わせた同時的なコミュニケーションを成立させる上で必要な要件になっていると考えられる。このことは、互いの表現の同時性がエンタテインメントの生成によって実現可能になることを示唆するものである。

これまで、タスクの難易度を变化させた際のエンタテインメント生成頻度の違いについて調べたが、さらに、エンタテインメント生成時の周期の違いについても調べてみた。図 3.13 に、その結果を示す。同図は、コントローラの固有操作リズム周期（振動数）がそれぞれ  $0.18[s]$  ( $5.6[Hz]$ )と  $0.22[s]$  ( $4.6[Hz]$ )である対戦者 K, S 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している。その結果、完全弾性反射の場合もイレギュラー反射の場合も、エンタテインメントが生成される周期は、90[%]以上が、 $0.20[s]$  ( $5.0[Hz]$ )であり、特定周期のみでエンタテインメントが生成される傾向があることが分かる。つまり、タスクの難易度が変化しても、エンタテインメントの生成される周期は、同一であることが分かる。これは、場の状況が変化しない場合には、互いの間で特定の関係し



(a) 完全弾性反射の場合



(b) イレギュラー反射の場合

図3.13 エンタテインメント生成時の周期分布（対戦者KとSの対戦）

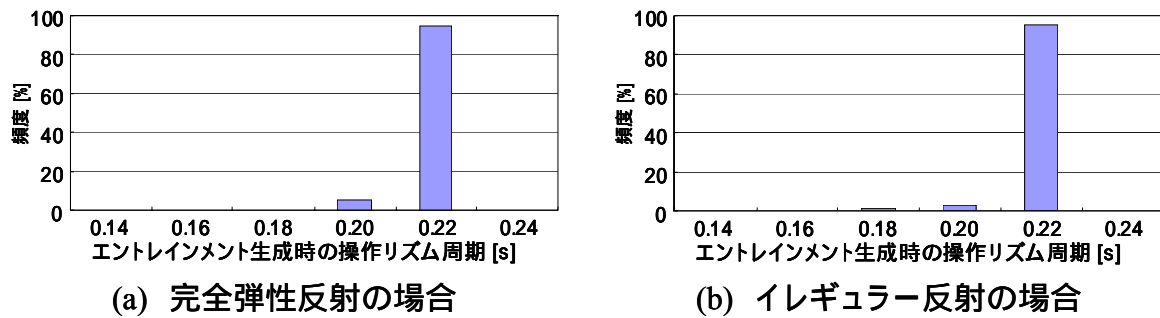


図3.14 エントレインメント生成時の周期分布（対戦者FとOの対戦）

か創られないことを意味しているように思われる．また，図 3.14 は，コントローラの固有操作リズム周期（振動数）がそれぞれ  $0.23[s]$  ( $4.3[Hz]$ )と  $0.22[s]$  ( $4.6[Hz]$ )である対戦者 F, O により行われた 100 試合の対戦におけるエントレインメント生成時の操作リズム周期の分布であるが，対戦者 K, S の対戦と同様に，特定周期でしかエントレインメントが生成されていないことが分かる．

以上より，本章では，間合い生成の難易度を変化させると，エントレインメントの生成頻度は変化するが，その周期は，変わらないことを明らかにした．つまり，場の状況が限定されている場合には，タスク（間合い生成）の難易度によらず，特定周期のエントレインメントしか生成されないことを示したことになる．このことは，予め場が共有されているときには，固有振動数が近い振動子同士を結合させた際，それらの固有振動数の中間のある一定の振動数で同期するという van del Pol 振動子のような通常の非線形振動子の引き込み現象[28]と同様な現象が起きていることを意味している．

### 3.5. まとめ

本章では，協調ゲームシステムを用いて，予め場が共有されている（場の共創出が起きない）場合の間合いの生成とエントレインメントの関係を実験的に調べた．本研究をまとめると以下のようなになる．

- (1) 予め場が共有されている（場の共創出が起きない）場合において，間合い生成（タスク成立）時に，エントレインメントが生成されることを明らかにした．そして，これについて，さらに詳しく調べたところ，ボールがアバターに接近し始める前にエントレインメントを生成し始める傾向があること，さらには，ボール（相手）の動きの変化が予測しにくい場合（間合いの生成が困難な場合）の方が，エントレインメントの生成頻度が高まることが分かった．
- (2) 以上の結果から，エントレインメントが，過去から未来を予測する際に，その予測を共有させ，互いの表現を合わせるために生成されていることを示した．

### 第 3 章 間合いの生成とエントレインメント（予め場が共有されている場合）

- (3) 予め場が共有されている（場の共創出が起きない）場合には，タスク（間合い生成）の難易度によらず，通常の非線形振動子の引きこみ現象で見られるような特定周期のエントレインメントしか生成されないことを発見した．



## 第4章 間合いの生成とエンタテインメント（予め場が共有されていない場合）

### 4.1. はじめに

本論文では、予め場が共有されている（場の共創出が起きない）場合のコミュニケーションと、予め場が共有されていない（場の共創出が起きる）場合のコミュニケーションの両方について、間合いとエンタテインメントとの関係を調べ、場の共創出とエンタテインメントの関係について明らかにすることを目指している。本章では、第2章で説明した剣道ロボットシステム（図4.1）を用いて、予め場が共有されていない（場の共創出が起きる）場合の間合いの生成とエンタテインメントの関係について調べる。具体的には、本システムによる剣道対戦を、間合いが生成されると推測される同場所ならびに間合いが生成されないと推測される遠隔地間で行い、間合いが生成される場合とそうでない場合において、エンタテインメントの生成に違いが見られるかどうかを検討する。また、本システムの剣道対戦のような場の共創出が起きる共創的コミュニケーションでは、多様な行為が創出されているのではないかと考えられる。そこで、エンタテインメント生成時の周期や対戦データのゆらぎについて解析を行い、多様な行為が創出されているかどうかを調べることにする。以上により、本章では、場の共創出が起きるときの間合いの生成とエンタテインメントの関係について明らかにする。

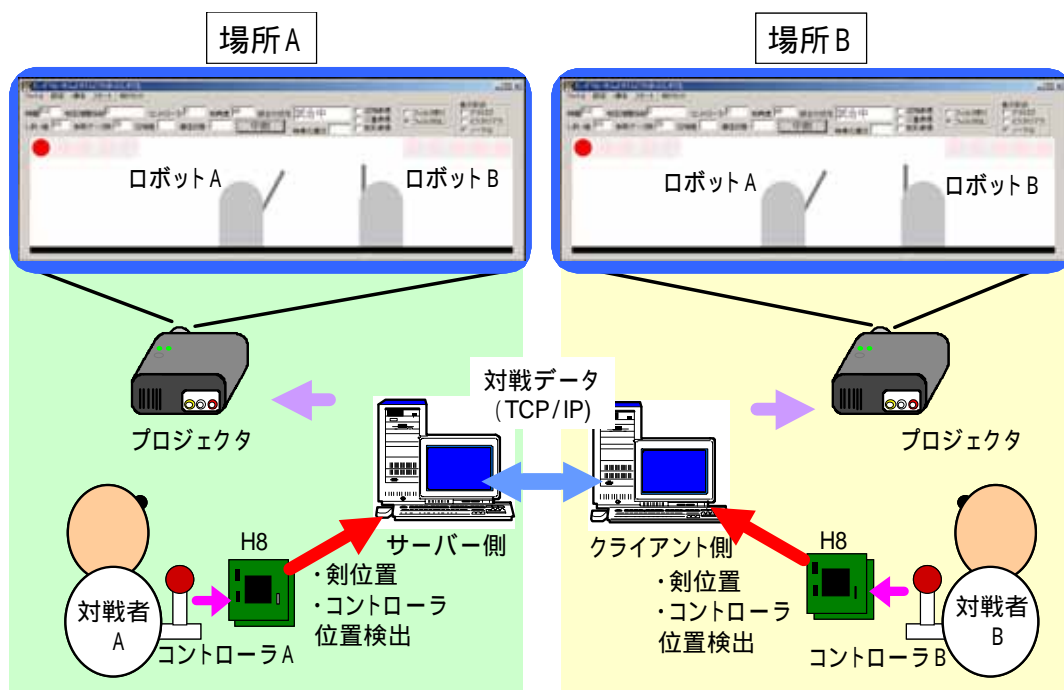


図4.1 剣道ロボットシステムの構成

## 4.2. 剣道ロボット対戦の結果

### 4.2.1. 被験者の選定

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、本研究では、被験者を互いの実力が接近しているグループと、互いの実力に差があるグループに分けて実験を行うことにした。ただし、間合いを取ることができない被験者では、本研究そのものが成立しなくなる。そこで、リズムコントローラの操作に習熟した（2.2.5 項で述べたコントローラの習熟度合いを示す基準を満たした）被験者の中から、剣道対戦において、相手と間合いが取れるようになるまで実力のついた被験者を選抜することにする。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、状況に応じて、実験を行う。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、全ての実験を1ペアにつき100試合ずつ行ってもらう。また、後者のグループについては、実験ごとに、ランダムに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試合行ってもらう。そして、それらの実験結果について、詳しく調べることにする。なお、以下の本論文に示す全ての剣道ロボットシステムを用いた実験において、基本的には、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結果を示すことにする。

### 4.2.2. 同じ場所での対戦結果

剣道ロボットシステムを用いた同じ場所での対戦結果について説明する。ここで、

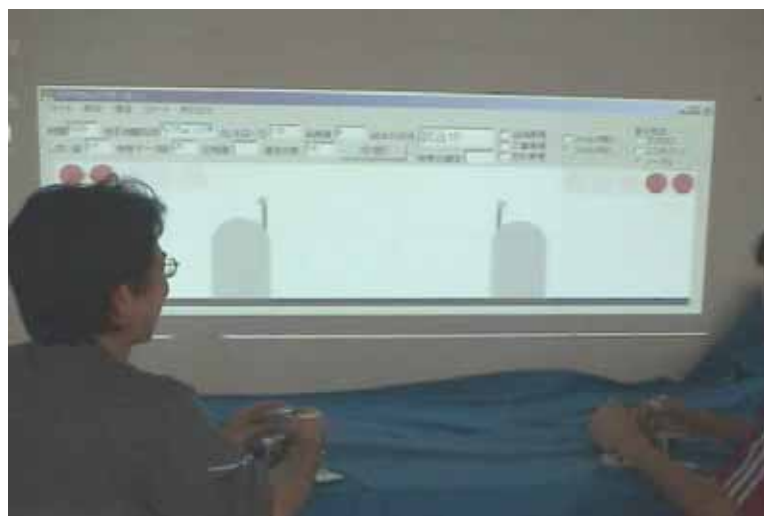


図4.2 同じ場所での剣道対戦の様子

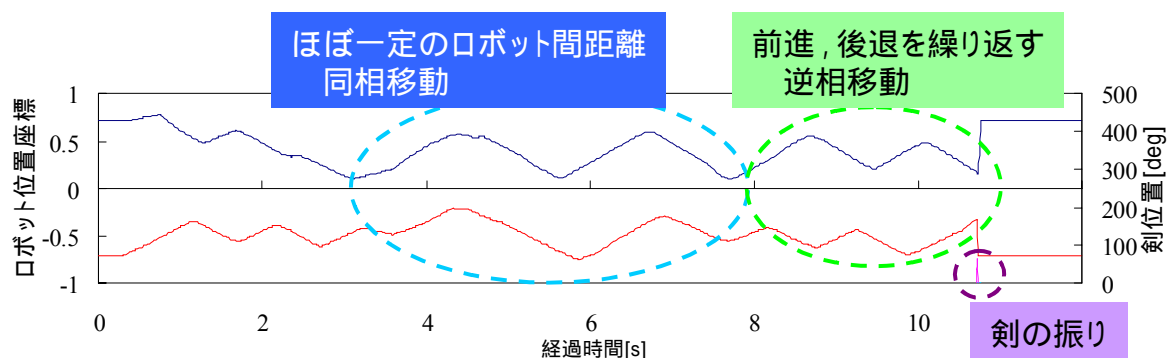


図4.3 対戦中に見られるロボットの移動パターン

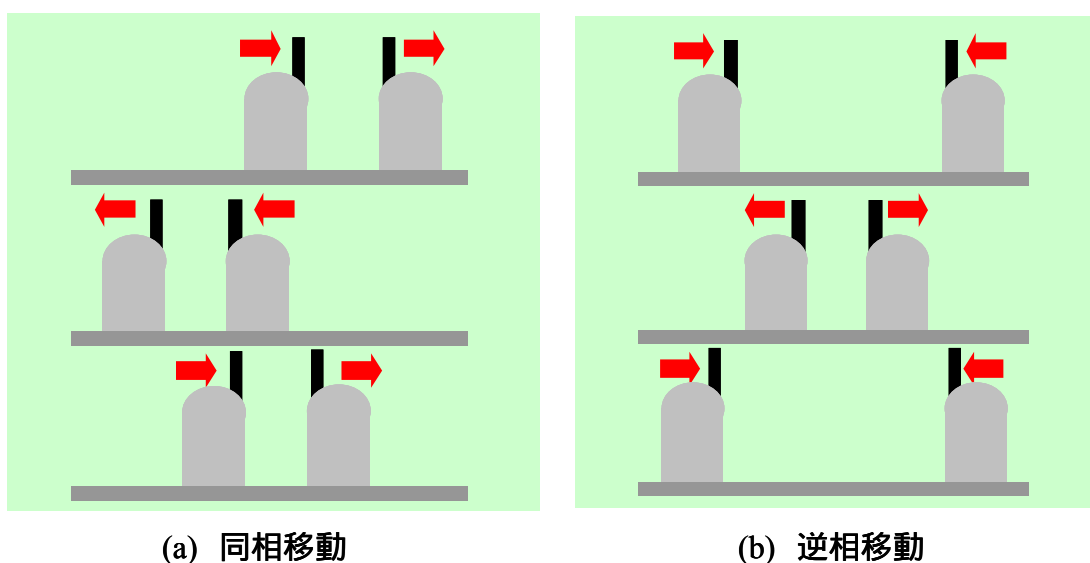


図4.4 同相移動と逆相移動

同じ場所での対戦とは，図 4.2 に示すように，対戦者が，映像画面を目の前にして，左右に 1[m]程度離れて位置し，自身のロボットを操作する実験のことを意味する．まず，ロボットの移動パターンの結果について説明する．図 4.3 が，対戦者が相手と間合いを取ることができていると感じている時の，ロボットの移動パターンの典型的な例である．この対戦をさらに詳しく調べてみると，図 4.4 に示すように，両者の間合いがあまり変化せず，一方が押すと他方が引くといった同相的な動き（以下，同相移動とする）と，互いが前進と後退を繰り返す逆相的な動き（以下，逆相移動とする）の 2 つのパターンが存在することが分かった．そして，試合中にこの 2 つのパターンが，繰り返し現れ，勝敗が逆相時に決まるといった結果が数多く得られた．このことは，対戦中に互いの間で間合いが形成され，それが壊されたときに勝負がつくことを意味している．

対戦者の間で同相移動が行われている時には，互いのロボットの間でほぼ一定の間合いが形成されているが，この間合いとエントレインメントの関係を探るため，その時のコントローラの操作量，すなわち手の動きのリズムについて調べた．その

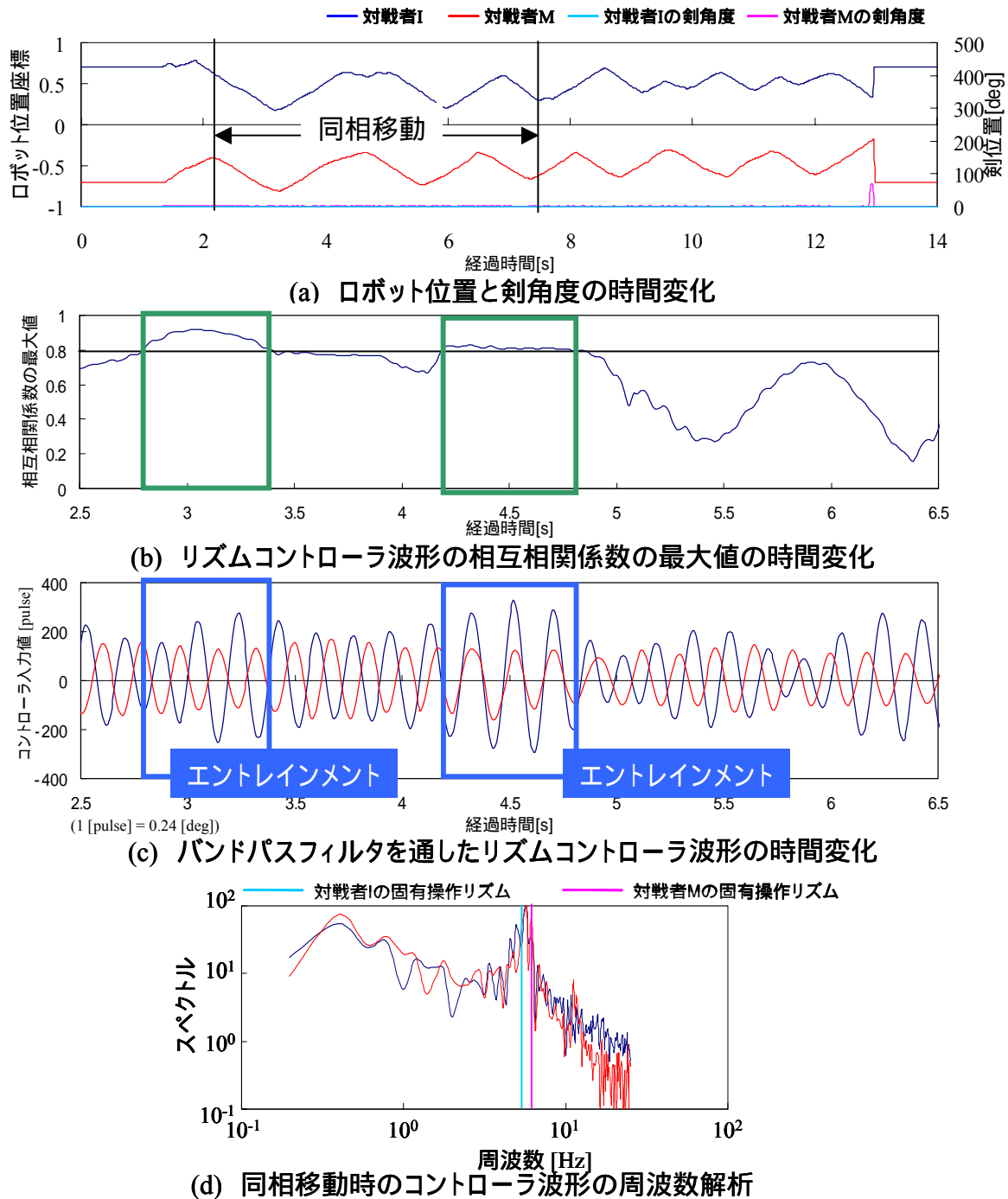


図4.5 同じ場所での対戦結果（実力の接近した被験者同士の対戦）

結果を図 4.5 にまとめて示す．この実験の結果は，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 の結果である．対戦中の同相移動時（同図(a)；試合開始後 2.3-7.6[s]付近）において，コントローラ波形を周波数解析した結果が同図(d)である．これより，同相的な移動においては，互いのスペクトルのピーク値はほぼ 5.7[Hz]で一致していることが分かった．さらに，対戦者両者のコントローラ操作リズムのエンタレインメントについて調べ

るため、リズムコントローラ波形にバンドパスフィルタを通した。その結果、互いの操作リズムに、コヒーレントな位相関係（エンタテインメント）が創られていることが確認できた（図 4.5(c)）。ただし、その持続時間は、長くても 1 秒程度であり、エンタテインメントをダイナミックに繰り返し生成したり、崩したりしているのが、非常に特徴的である。以上の結果は、実力が接近した被験者同士の他の 2 ペアや実力に差がある被験者同士の 2 ペアにもみられることを確認している。

以上から、対戦者の操作リズムにエンタテインメントが生成されることが、間合いの生成に深くかかわっているのではないかと考えられる。しかし、エンタテインメントがそのまま維持される間合い（これを仮にここでは臨界距離と呼ぶ）では勝負がつかない。そのため、対戦者は、相手の動きを予測し、自身を優位な状態に位置づけようとする身体的な感覚のはたらきによって、相手との距離をつめ臨界距離内に僅かに入ったり、あるいはそこから僅かに出たりしようとする。このような膠着状態ともいえるなかでの対戦者の心の動きが、同相移動中における操作リズムのダイナミックな位相関係（エンタテインメント）の生成過程に反映されているものと推察される。

### 4.2.3. 離れた場所間での対戦結果

次に、離れた場所間で、対戦を行った結果について説明する。なお、この対戦では、研究室内 LAN を使用して、異なる部屋間で対戦を行っており、その際に、双方の部屋間でやり取りされる情報の遅延時間は、50[ms]以下であることを確認している。この対戦時の様子を、図 4.6 に示す。図 4.7 が、離れた場所間での対戦における、ロボットの移動パターンの典型的な例である。この場合には、同じ場所での対戦とは異なり、衝突や場外が頻繁に起こり、試合が円滑に進行していかない。また、勝負が決まるまでの時間も、先ほどの同じ場所での対戦と比べて、100 試合平均で、約 60%程度に短縮されることが分かった（同じ場所での対戦時間の平均は、9.5[s]、離

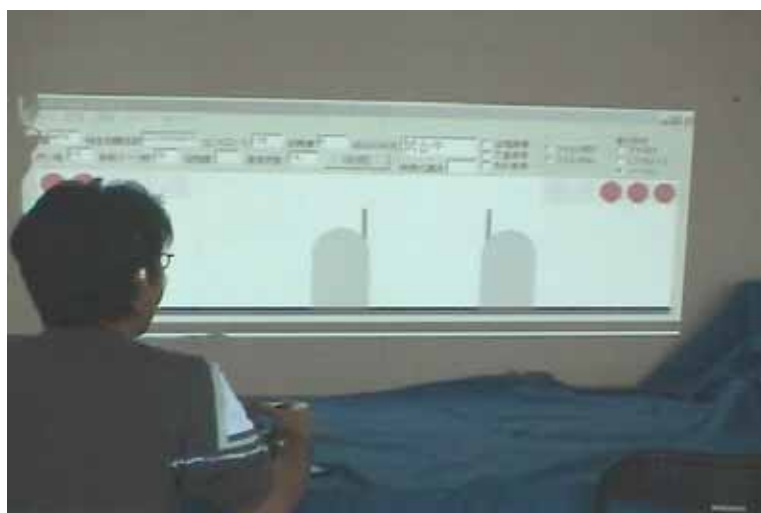


図4.6 離れた場所での対戦の様子

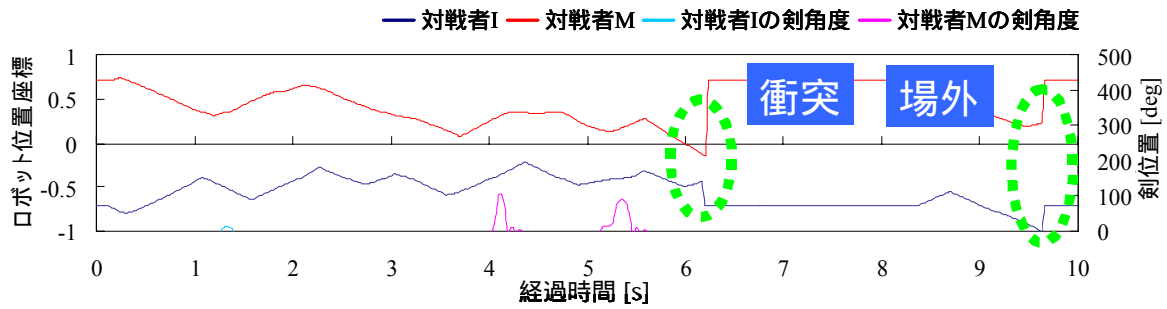


図4.7 離れた場所間での対戦でのロボットの移動パターン  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

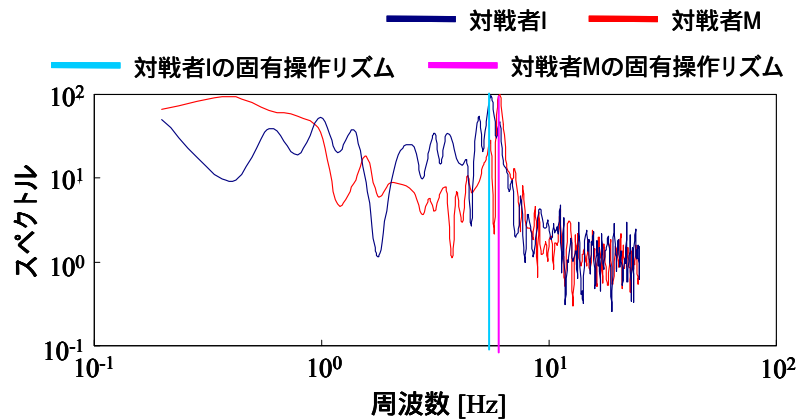


図4.8 離れた場所間での対戦時のコントローラ  
入力の周波数解析  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

れた場所での対戦時間の平均は、5.7[s]）。この理由として、ロボットの同相的な移動を互いがうまく創り出せないことが挙げられる。図 4.8 に、この場合のコントローラ波形を周波数解析した結果を示す。同図は、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 の対戦結果であるが、一試合を通して先に述べた自分の固有の操作リズムに近いリズムでコントローラを操作していることが分かる。そして、互いのコントローラ波形にエンタレインメントは見られない（図 4.9）。以上の結果は、実力が接近した被験者同士の他の 2 ペアや実力に差がある被験者同士の 2 ペアにも共通している。さらに、対戦後、実験者から“相手の動きが予測できない”、“相手のロボットの動きをみても相手の存在が感じられず不安である”などのコメントが得られた。以上より、離れた場所間での対戦においては、ロボットの移動パターンや対戦者のコメント、さらには、エンタレインメントができないことから、間合いが生成されていないことが分かる。

このような結果は、離れた場所では互いの間で身体的なインタラクションが起こりにくいことを現象的に示しているのではないかと推察される。本実験のような異なる場所での対戦では、映像上のロボットの動き以外に相手の行為に対する手がか

## 第4章 間合いの生成とエントレインメント（予め場が共有されていない場合）

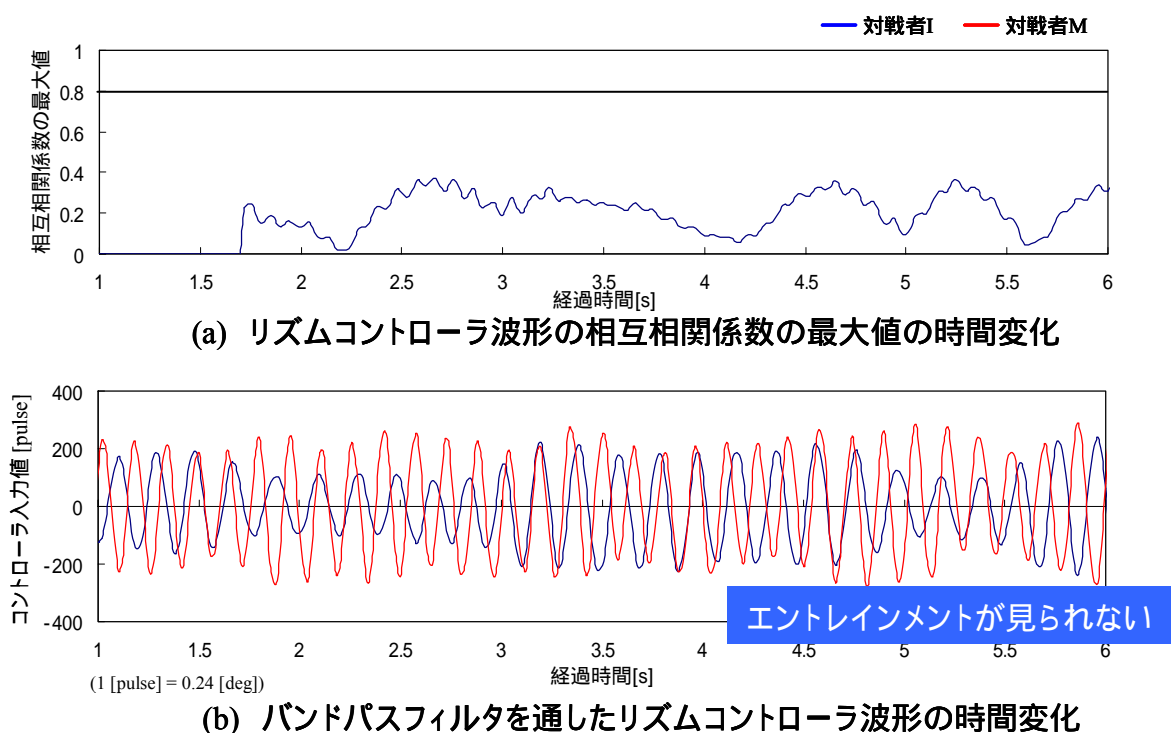


図4.9 離れた場所間での対戦時のコントローラ波形  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

りがなくなることや、相手と同じ場所でタスクをこなしているといった共存在感がなくなることから、ロボットの動きに先行するコントローラのリズミックな操作情報の共有が互いに困難になる。つまり、相手を予測してタイミングを合わせることができなくなる。その結果、先に述べたような臨界距離を互いが維持できないまま、剣の当たる距離に進入してしまうことによって、衝突が起こりやすくなると考えられる。

### 4.3. ゆらぎとエントレインメントの解析結果

剣道対戦のような共創的コミュニケーションは、予め互いの関係づけができておらず、間合いの取り方の自由度が高い状況で行われる。つまり、相手がいつ、何をしてくるのか完全に予測することができない複雑な状況になるので、ここでは、多様な行為が創出されるものと考えられる。したがって、このような状況で、相手と間合いが生成されている（場が共創出されている）とすれば、互いの間で関係（秩序）の生成、崩壊が繰り返されることで、多様な関係（秩序）の創出が起きているのではないかと推察される。一方、相手と間合いが生成されていなければ（場が共創出されてなければ）、このような秩序の生成、崩壊は見られないと考えられる。

そこで、剣道対戦において、多様な秩序の生成や崩壊が起きているかどうかを調べるため、 $1/f$  ゆらぎに着目した解析を行うことにした。それは、 $1/f$  ゆらぎが、長時間の記憶を保持する保守的な機能と別の秩序過程を新たに創発する革新的な機能という 2 つの相反する機能と関係があるということや、 $1/f$  ゆらぎは最大多様性を持つこと、つまり多様性が創出されていることと密接に関係していることが示されているからである[95][96][97]。そこで、 $1/f$  ゆらぎに着目し、剣道対戦データを調べることにした。具体的には、対戦者が創る空間的な関係として互いのロボット間距離に、時間的な関係として互いのコントローラ操作リズム周期の差に着目し、これらの時系列変化のゆらぎのスペクトルが  $1/f$  になっているかどうかを調べることにした。なお、本論文では、以下、前者を空間的な関係性、後者を時間的な関係性と呼ぶことにする。さらに、間合い生成時に対戦者間で創出されるエンタテインメントについても、多様性があるかどうかを検証するため、エンタテインメント生成時の周期についてもあわせて、解析を行うことにした。

#### 4.3.1. ゆらぎに関する解析

まず、空間的な関係性（互いのロボット間の空間的な距離のゆらぎ）の解析手法について説明する。これは、剣道対戦中における互いのロボット間距離の時間変化を周波数解析し、そのスペクトルの傾きを調べることで行っている。なお、第 2 章で述べたように、リズムコントローラ波形の  $10[\text{Hz}]$  以上の周波数成分は、データの信頼性が低い。ここで、ロボット間距離の時間変化は、互いのロボット移動波形（ロボット位置座標の時間変化）より生成されており、ロボット移動波形そのものは、リズムコントローラ波形により生成されている。したがって、互いのロボット間距離の時間変化に関しても、そのスペクトルの  $10[\text{Hz}]$  以上の周波数域のデータの信頼性は低いと思われる。そこで、本研究においては、 $10[\text{Hz}]$  以下の周波数域において、スペクトル図におけるパワースペクトルの近似直線の傾き  $b$  が、 $-1 \pm 0.1$  の範囲であ

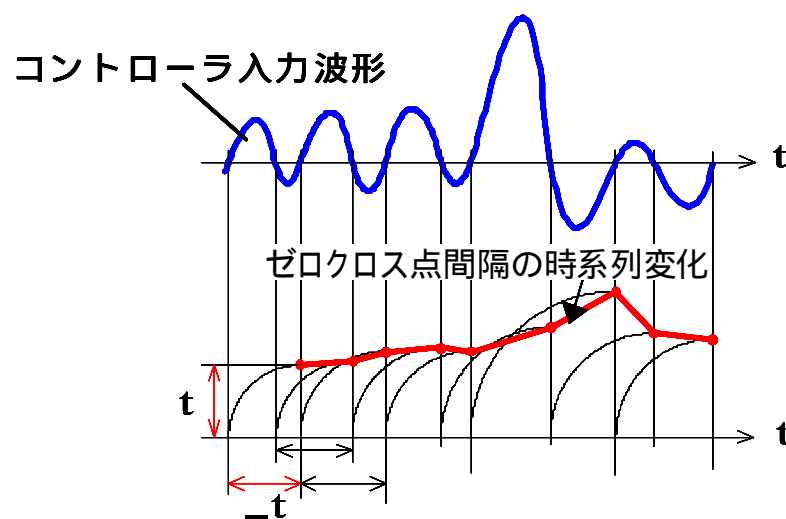


図4.10 ゼロクロス点間隔の抽出方法

#### 第4章 間合いの生成とエントレインメント（予め場が共有されていない場合）

り，なおかつ，その近似直線の決定係数（相関係数の二乗）が 0.8 以上であるときを 1/f ゆらぎとしている．なお，近似直線は，最小二乗法で計算する．

次に，対戦者間で創られる時間的關係性の解析手法について説明する．本研究では，これを互いのコントローラ操作リズム周期（リズムコントローラ波形の一点おきゼロクロス点間隔）の時間差の時間変化から計算することとした．具体的には，まず，対戦者それぞれについて，図 4.10 に示すような方法で一点おきゼロクロス点間隔をプロットすることにより，リズムコントローラ波形の一点おきゼロクロス点間隔の時系列変化  $A_z(t)$ ， $B_z(t)$  を求めた．次に，両者の時系列変化の差

$$D_z(t) = A_z(t) - B_z(t) \quad (1)$$

を計算し， $D_z(t)$  で，互いのコントローラ波形に創られる位相關係の時間変化を簡易的に評価することにした．なお，先に述べたように，リズムコントローラ波形の 10[Hz] 以上の周波数成分は，データの信頼性が低い．そこで，時間的關係性についても，10[Hz] 以下の周波数域において，空間的關係性の場合と同様な方法で， $D_z(t)$  の時系列変化について，周波数解析を行い，そのスペクトルが 1/f になるかどうかを調べた．

対戦中の空間的關係性の時間変化について，図 4.11 に示す．その結果，同じ場所での対戦では，互いのロボット間距離の時間変動について周波数解析を行うと，0.1-

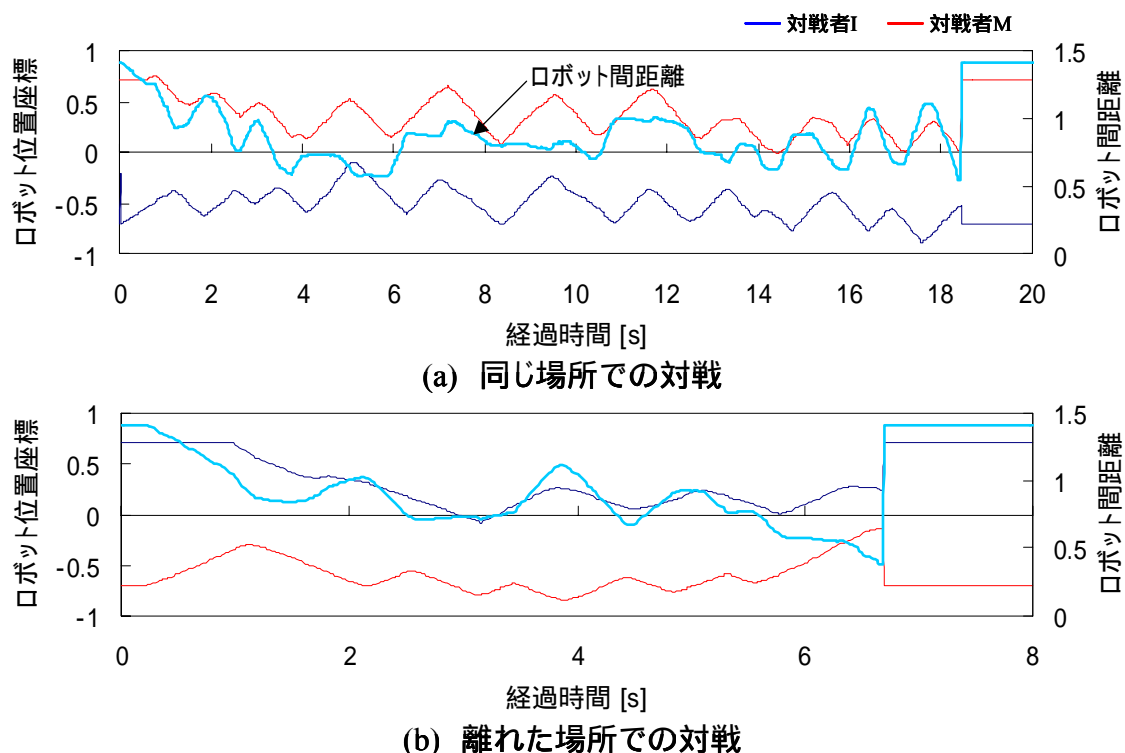


図4.11 同じ場所での対戦と離れた場所間での対戦の空間的關係性（実力の接近した被験者同士の対戦）

1 [Hz]の周波数域において、 $1/f$  ゆらぎが認められた(図 4.12)。一方、通常の遠隔対戦の場合は、このような  $1/f$  ゆらぎは認められなかった(図 4.13)。そして、それぞれの実験条件におけるロボット間距離のゆらぎに関するスペクトル図の近似直線の傾き  $b$  について、 $t$  検定を行った。その結果、ロボット間距離のゆらぎについてのスペクトルの傾きに、同じ場所での対戦と離れた場所での対戦の間で、有意差が認め

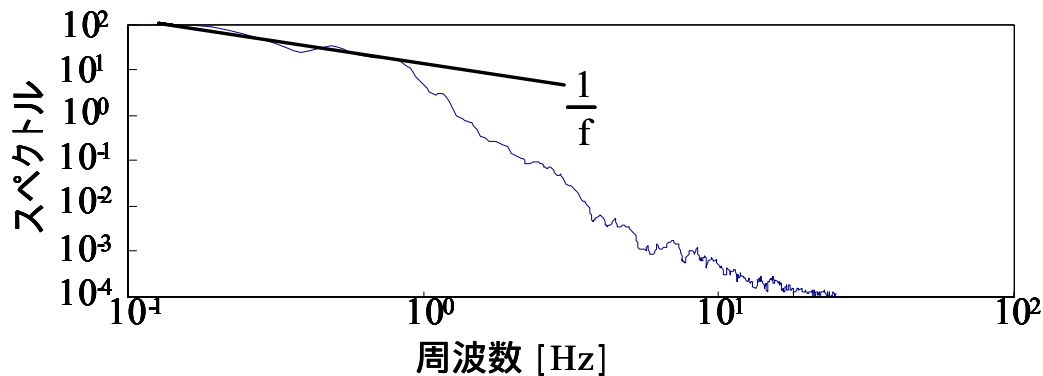


図4.12 同じ場所での対戦における空間的関係性のゆらぎ  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

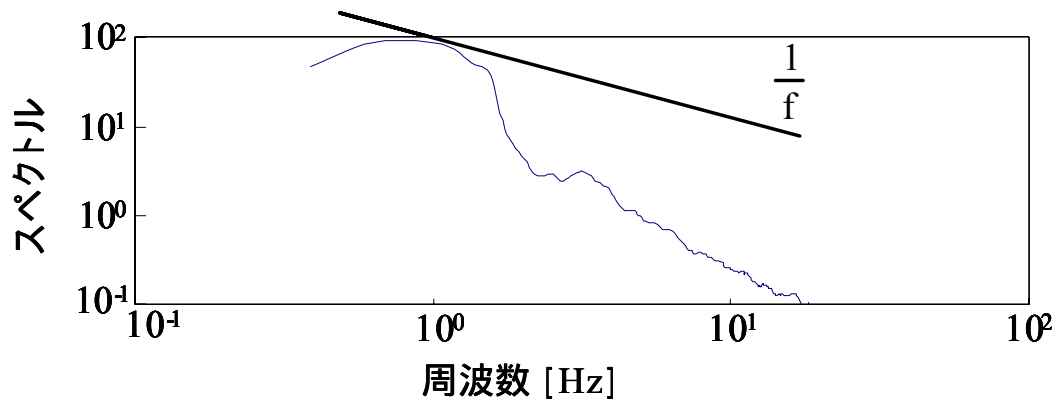


図4.13 離れた場所間での対戦における空間的関係性のゆらぎ  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

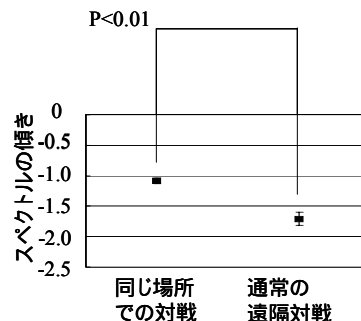


図4.14 空間的関係性のスペクトルの傾きに関する解析結果  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

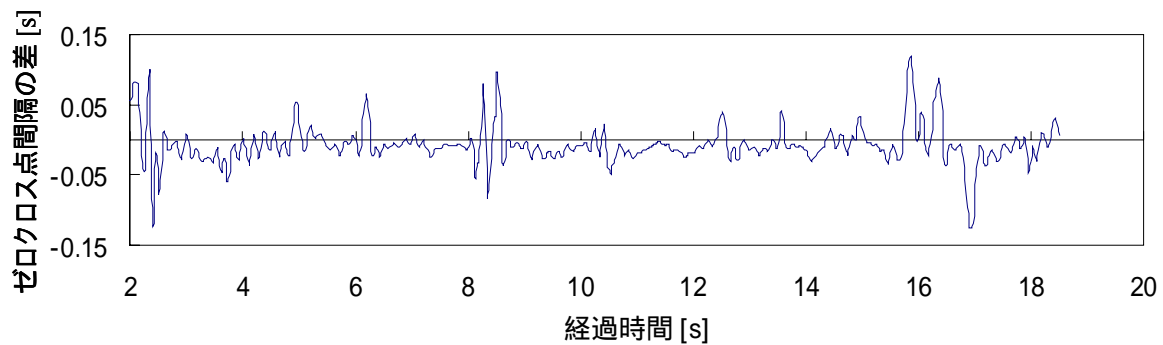


図4.15 同じ場所での対戦における時間的關係性  
（実力の接近した被験者同士の対戦）

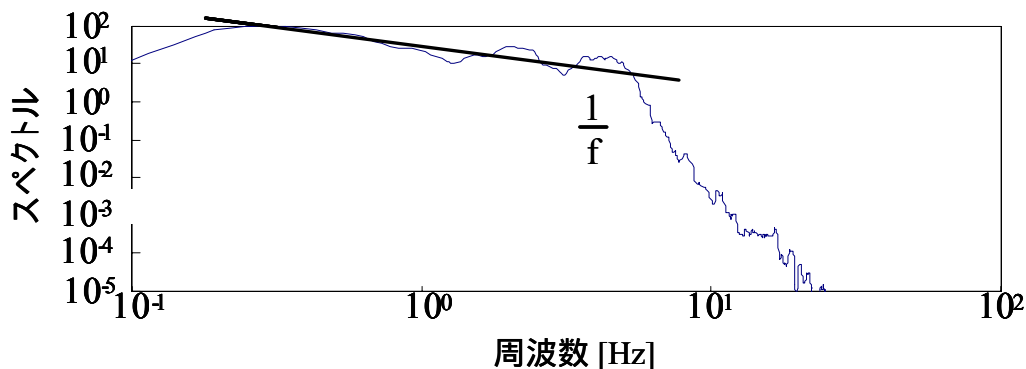


図4.16 同じ場所での対戦における時間的關係性のゆらぎ  
（実力の接近した被験者同士の対戦）

られた（ともに、 $p < 0.01$ ）（図 4.14）。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ている（ともに、 $p < 0.01$ ）。この結果は、間合いが生成されるときとそうでないとの間で、互いの間で創られる空間的な関係（ロボット間距離）の多様性に、違いがあることを示している。

次に、時間的關係性の結果について説明する。図 4.15 に、同じ場所での対戦における  $Dz(t)$  のグラフの一例を示す。これより、対戦中コントローラ操作リズム周期の時間差は、あまり変化しない状態と大きく変化する状態を繰り返し、間欠的であることがわかる。また、この時間変動について周波数解析を行い、このゆらぎについてさらに詳しく調べた。その結果、図 4.16 に示すように 0.5-5[Hz] の周波数域において、 $1/f$  ゆらぎが認められることが分かった。一方、通常の遠隔対戦においては、コントローラ操作リズム周期の時間差  $Dz(t)$  は、あまり変化していないことが分かる（図 4.17）。さらに、この時間変動について、周波数解析を行うと、同じ場所での対戦とは異なり  $1/f$  ゆらぎが認められない（図 4.18）。そして、それぞれの実験条件におけるコントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎに関するスペクトル図の近似直線の傾き  $b$  について、 $t$  検定を行った。その結果、コントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎについてのスペクトルの傾きに、同じ場所での対戦と離れた場所での

対戦の間で、有意差が認められた（ともに、 $p<0.01$ ）（図 4.19）。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ている（ともに、 $p<0.01$ ）。これらの結果は、同じ場所での対戦と通常の遠隔対戦では、時間的關係性に違いがあることを示している。

なお、同じ場所での対戦において、ロボット間距離のゆらぎ、コントローラ操作

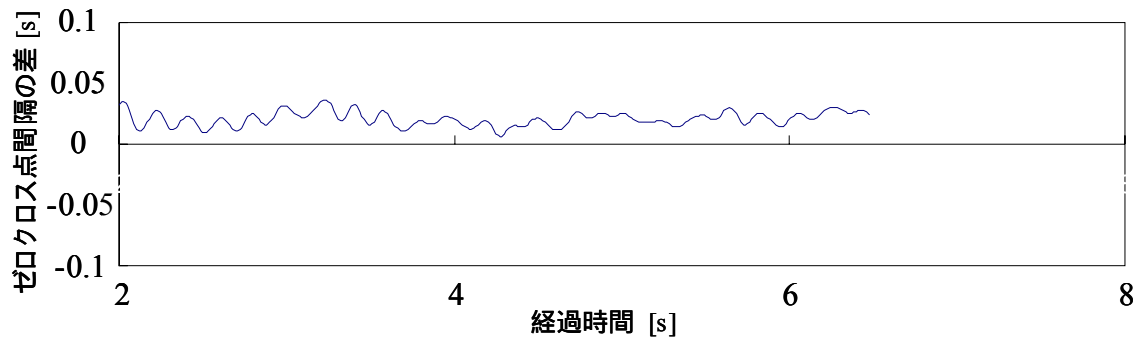


図4.17 離れた場所間での対戦における時間的關係性  
（実力の接近した被験者同士の対戦）

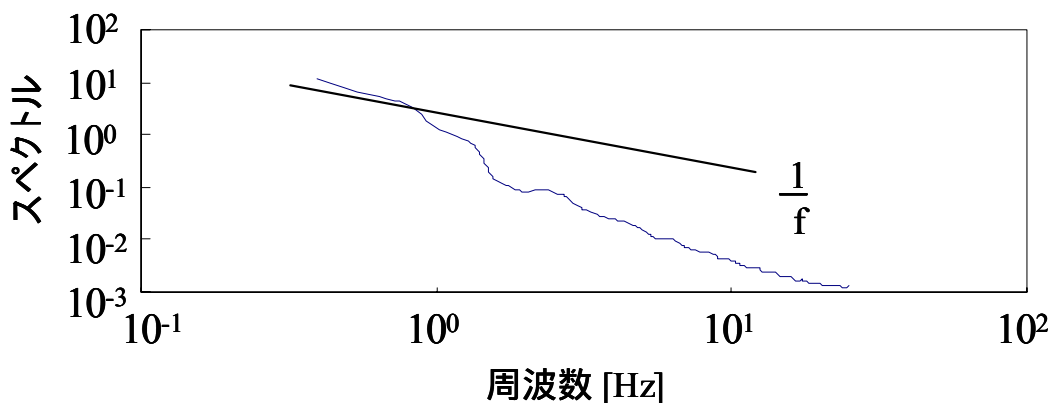


図4.18 離れた場所での対戦における時間的關係性のゆらぎ  
（実力の接近した被験者同士の対戦）

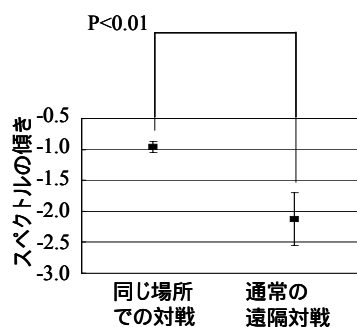


図4.19 時間的關係性のスペクトルの傾きに関する解析結果  
（実力の接近した被験者同士の対戦）

リズム周期の時間差のゆらぎの両方に  $1/f$  ゆらぎが認められた例は、100 試合中 46 試合あった（対戦者 M と I の結果）。なお、実力が接近した被験者同士の他の 2 ペアや実力に差がある被験者同士のペアにおいても、100 試合中 40 試合程度は、 $1/f$  ゆらぎが生成されている。しかしながら、通常の遠隔対戦において、ロボット間距離のゆらぎ、コントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎに  $1/f$  ゆらぎが認められた例は、100 試合中 1 試合もなかった（対戦者 M と I の結果）。また、実力が接近した被験者同士の他のペアや実力に差がある被験者同士のペアにおいても、 $1/f$  ゆらぎが認められた試合はなかった。

ここで、剣道システムを用いた実験は、人間同士が行う実験であるので、データにばらつきが出るのは避けられない問題である。さらに、剣道対戦は、相手に勝つことが目的であり、相手に勝つための手段として間合いの生成を行うことになるので、間合いが生成される同場所対戦においても、間合いが創られないまま試合が終わってしまうこともある。このようなことを考えると、間合い生成時に  $1/f$  ゆらぎが生成されるということが一般的な知見であったとしても、間合いが生成されるという同場所対戦において、100[%]の確率で  $1/f$  ゆらぎが生成されるということは、まずありえない話である。ここで、間合いが生成されない遠隔対戦の試合時間の平均が約 6[s]であるので、試合の平均時間がこの基準を下回る試合は、試合時間の短さから考えても、ほぼ確実に間合いが生成されていないと判断できる。この基準を同場所対戦に当てはめると、約 30[%]程度の試合は、間合いが生成されていないと判断されることになる。つまり、同場所対戦において、間合いが生成されている可能性がある試合は、約 70[%]程度であると推察される（この中にも、実際には、間合いが生成されていない試合が混ざっていると予想される）が、 $1/f$  ゆらぎが起きている試合は、全体の 40[%]程度である。したがって、同場所対戦において、間合いができている可能性があると考えられる試合時間を持つ試合の約 60[%]は、 $1/f$  ゆらぎを生成していることになる。さらに、同場所対戦と遠隔対戦では、スペクトルの傾きに有意差があり、遠隔対戦では、全く  $1/f$  ゆらぎが生成されていない。以上のデータと最初に述べたような人間が実験を行うことによるデータのばらつきを考えれば、本研究において、間合い生成時に  $1/f$  ゆらぎが生成されるということを一般性のある結果として認めてよいと思われる。

### 4.3.2. エントレインメントに関する解析

次に、エントレインメント生成時の周期の多様性に関する解析結果について説明する。図 4.20 は、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 により同じ場所で行われた 100 試合の対戦におけるエントレインメント生成時の操作リズム周期の分布を示している。同図より、この場合には、エントレインメントの周期は、両者の固有操作リズム周期の間である 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ことが分かる．次に，このようなエントレインメントの多様性について，試合ごとに違う周期のエントレインメントを創ることによって，その分布が多様になっているのか，1 試合においても，多様な周期でエントレインメントが創出されることによって，その分布が多様になっているのか調べることにした．図 4.21 に，剣道対戦の 1 試合中に創られるエントレインメントの周期の種類について示す．同図より，間合いが生成されている同じ場所での対戦において，1 試合においても，3-4 種類の違う周期でエントレインメントが生成されていることが分かる．

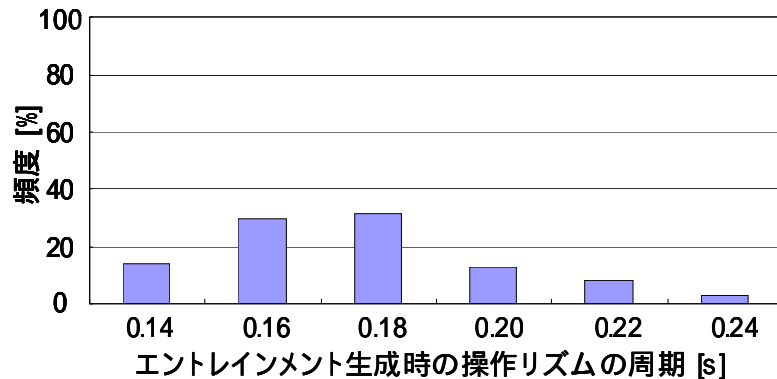


図4.20 同じ場所での対戦におけるエントレインメント生成時の周期分布  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

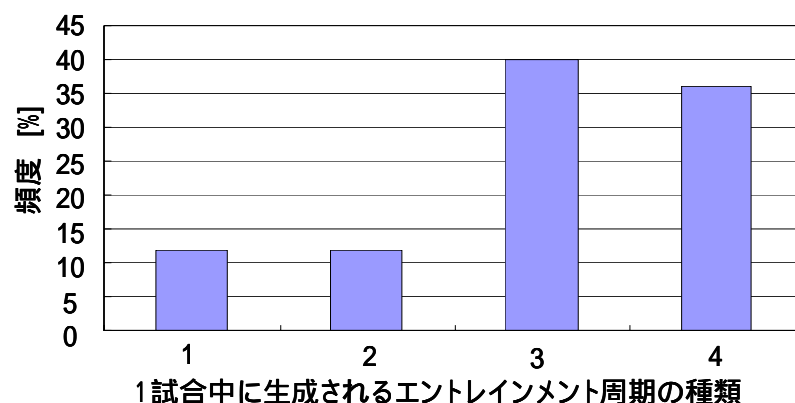


図4.21 同じ場所での対戦における1試合中に見られるエントレインメント  
周期の種類 (実力の接近した被験者同士の対戦)

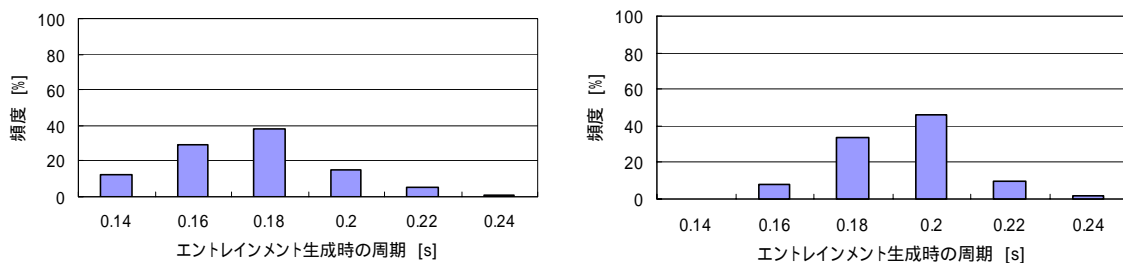


図4.22 同じ場所での対戦におけるエントレインメント生成時の周期分布  
(実力に差がある被験者同士の対戦と実力の接近した被験者同士の対戦)

なお，図 4.22 に示すように，他の被験者同士の対戦においても，エントレインメントの周期分布には，広がりがある．したがって，上記の対戦者 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実験における，一般的な結果であるとみなされる．

#### 4.4. リズムコントローラ波形の特徴

このような多様な周期でエントレインメントが生じる現象は，リミットサイクルを持つ通常の非線形振動子では，一般的には，見られない現象である[28][98]．この振動子では，リミットサイクルが安定であれば，振動の振幅は，位相によって，一意に決定されるので，振動子の運動を記述する方程式における独立な自由度は，位相のみである．そこで，このような振動子の引き込み現象を記述する数理モデルとして，位相モデル[28][98]が使われている．ここでは，このような位相モデルで，本システムで生じる引き込み現象（エントレインメント）が，記述することが可能であるかどうかを検証することにする．

まず，リズムコントローラで生成されるリズムに，安定なリミットサイクルが見られるかどうかを調べるため，縦軸にコントローラ入力値の変化率，横軸にコント

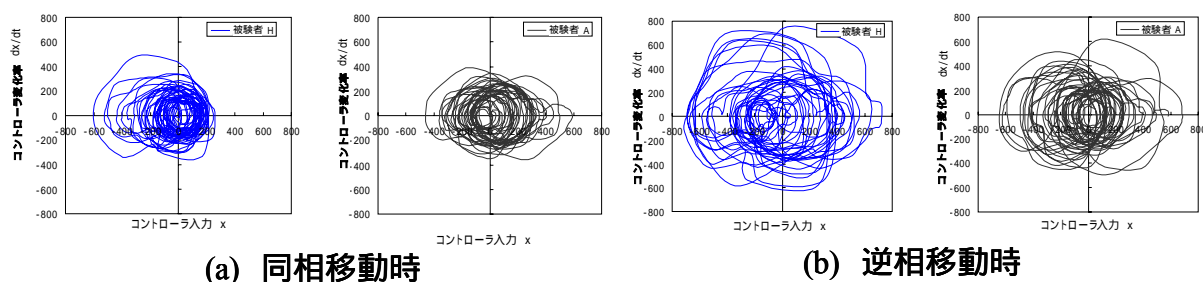


図4.23 同じ場所での対戦におけるコントローラ波形の位相曲線（実力の接近した被験者同士の対戦）

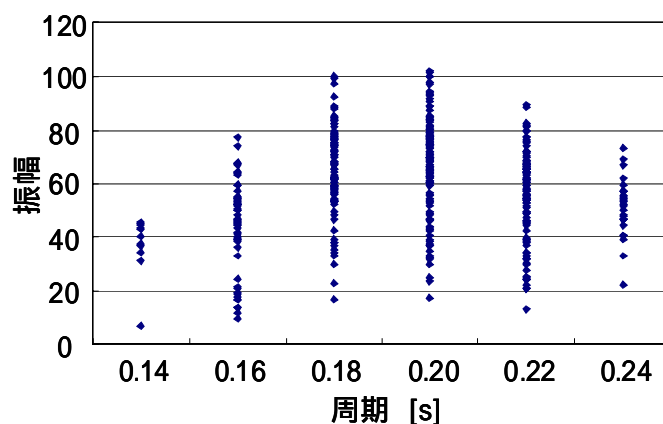


図4.24 同じ場所での対戦におけるリズムコントローラ波形の振幅と周期の関係（実力の接近した被験者同士の対戦）

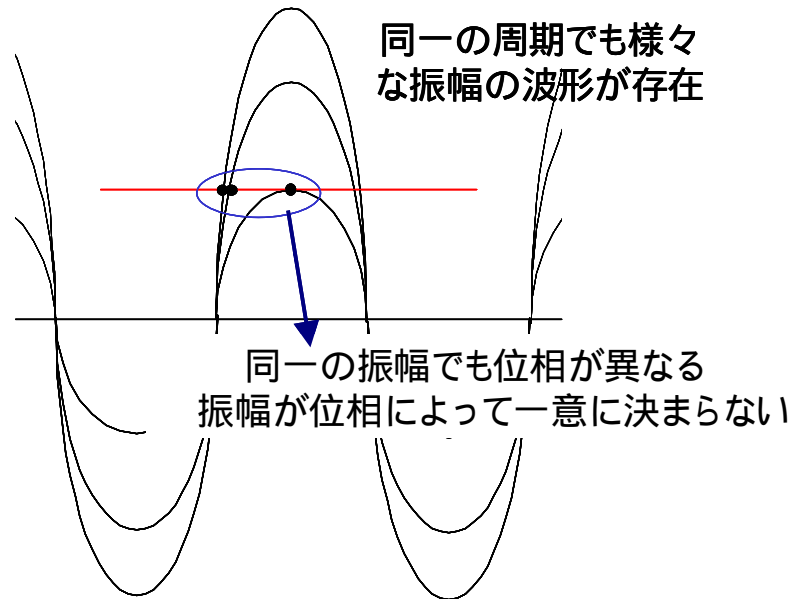


図4.25 同じ場所での対戦におけるリズムコントローラ波形の振幅と位相の関係

ローラ入力値を取った相空間を描くことにした．ここでは，多様な周期でエントレインメントが生成される同じ場所での対戦において，図 4.23 に示すように，位相関係（エントレインメント）の生成，崩壊が繰り返されることが多い同相移動時と，位相関係（エントレインメント）が崩壊されることが多い逆相移動時について，別々に相空間での軌跡を示す．その結果，この軌跡は，同相移動時と逆相移動時では異なり，同相時では比較的半径の小さい安定した円軌道を描くが，逆相時は円軌道が広がって，不安定化することが分かる．しかし，いずれの場合においても，安定なリミットサイクル軌道は，生じていない．さらに，リズムコントローラ波形の振幅と周期の関係について，調べた結果を図 4.24 に示す．その結果，この波形においては，振幅と周期の間には，相関関係はなく，また，同じ周期でも，様々な振幅の波形が生じていることが分かる．このことは，図 4.25 に示すように，この波形においては，同一の振幅であっても，いくつかの位相が存在しうること示している．つまり，この波形では，位相から，振幅を一意に決定することができない．

以上の結果は，本システムを用いた剣道対戦における引き込み現象（エントレインメント）を，結合振動子の位相モデルで記述することができないことを示している．

#### 4.5. 考察

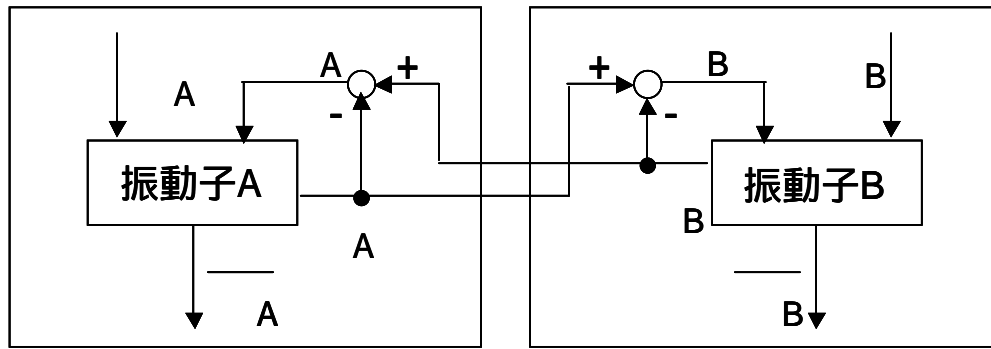
剣道の試合では，先にも述べたように，間合いをいかにとるかということが勝敗を分ける重要なポイントになる[14]．それには，無限定ともいえる状況において，相手との身体的なインタラクションを介し，自身を試合の場に時々刻々と位置づけていくことが必要となる．つまり，対戦者は自身と相手との関係を時間的，空間的に

予測しなければならない．本システムではロボットの動きに先行してコントローラをリズムに操作し，この間合いを創り出す．そのため，これも先述したように，必然的に相手の心の動きを読むことが求められる．その場合，同じ場所での対戦における実験結果で示されたように，間合いの生成は，コントローラの操作リズムが相互に引き込むことにより実現されるものと考えられる．このことは，コントローラ操作により互いのタイミングを合わせ，それを介することで，相手のロボットが前へ出るか後ろに退くかの予測を無意識的かつ先行的に行っている可能性を意味している可能性がある．また，間合いは，相手が踏み込んで剣を打つ直前に，剣を打つことができない臨界距離が存在し，その地点をはさんで，意識に昇らないような身体的感覚により，エンタテインメントを壊したり，生成したりすることで，維持されているものと考えられる．これはホールが報告している，ライオンと調教師の間における臨界距離の取り方と現象的に似ている[34]．そして，場所的優位に立った一方が，コントローラの位相や振動数を意識的にずらすことで，相手とのタイミングを外して，間合いをつめ，剣を振り勝ちに至ると推察される．

ところが，離れた場所での対戦実験では，リズムの相互引き込みが起こらず，間合いの形成が極めて困難になる．この場合，相手の動きが予測できないため，ほとんど間合いがとれず，試合にならないといっても過言ではない．このことは，離れた場所での対戦では，同じ舞台（場）に，自身のロボットを相手のロボットと関係づけて位置づけることが困難になることを示していると思われる．つまり，離れた場所間では，隣同士に対戦者が存在し同じタスクを行うことで伝わる暗在的な情報が切り離されてしまい，互いの間で共有される場が生成されないがために，間合いが形成されないといってもよいだろう．

また，本章では，場の共創出が起きるときの間合いの生成とエンタテインメントを関連づけて調べた．そして，間合いが生成される際には，多様な周期でエンタテインメントが生成されることを明らかにした．一方，前章で示したように，外部から場の状況が限定されている場合，つまり，予め場が共有されており，場の共創出が起きない場合には，特定周期でしかエンタテインメントが生成されないことが分かっている．また，間合いが生成されない場合には，エンタテインメントそのものが生成されない．以上より，本研究では，エンタテインメントの多様性は，場の共創出に関係していることを明らかにした．

さらに，興味深いことに，このような多様なエンタテインメントによる間合いが生成されている際に， $1/f$ ゆらぎが現れることが分かっている．なお， $1/f$ ゆらぎについては，先に述べたように，これまでの研究で， $1/f$ 型スペクトルを持つゆらぎの中で $1/f$ ゆらぎがその時系列変化が持つ多様性が最大になる[95][96]ということや， $1/f$ ゆらぎは，長時間の記憶を保持する保守的な機能と別の秩序過程を新たに創発する革新的な機能という2つの相反する機能と関係があるということが示されている[97]．したがって，これらの知見を踏まえると，本研究結果は，間合いが生成される状況，



：固有振動数    —：みかけの振動数    ：位相    ：位相差

図4.26 位相モデルにおける引きこみ現象

つまり，場が共創出される際には，互いの間で，様々な関係を創ったり壊したりすることができる可能性を持っていることを示しているように思われる．つまり，このように互いの間で多様な関係を創れる可能性があることにより，決められた目的とルールの下で互いが自由に振舞えることができる本システムの剣道の対戦において，場の状況が時々刻々変化していく中で，互いの間で場を共創出し，その場の状況に合わせた間合いを創出することを可能にしているのではないかと考えられる．以上より，本研究では，外部から場が限定されていない状況において，場の変化に即興的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になることを明らかにした．

多様な周期で引き込みが起きるという現象は，これまでにほとんど例がない新しい引きこみ現象であると考えられる．そこで，これまでの引きこみ現象と本研究で見られる引きこみ現象の違いについて，図 4.26 を用いて，少し考察する．図 4.26 は，位相モデルにおける引きこみ現象を説明したものである．この場合，それぞれのリズムの位相差  $\phi$  が互いにフィードバックされることによって，互いの見かけの振動数  $\omega$  が同期する．これまでの自己組織化現象に代表される引きこみ現象の研究においては，システムを構成する要素の均質性を対象としていた[23]．さらには，システムの境界条件（拘束条件）が外部から固定されている[23]，言い換えれば，場の状況が変化しない（外部から拘束されている）ことを前提としている．つまり，図 4.26 において，互いの固有振動数  $\omega_0$  が，ほぼ同じであり，かつ，  $\phi$  そのものは，時間的に変化しないという条件で，引きこみ現象について研究していた[23][98]．そして，この場合，特定の周期で引きこみ（秩序）が形成されることを明らかにしている[23][98]．一方，本研究では，システムを構成する要素は，個性がある人間であり，要素の均質性を必ずしも保障できない状況にある．さらには，剣道対戦においては，場の状況を外部から限定していないので，システムの境界条件（拘束条件）も，固定されてはいない．図 4.26 でいえば，互いの固有振動数  $\omega_0$  が，必ずしも同じではなく，  $\phi$  そのものが，時間的に複雑に変化する状況ということになる．つまり，本研究では，これまでの引きこみ現象の研究で前提としたことが，成り立た

ない状況で、引きこみ現象を調べたことになる。その結果、多様な周期で引きこみが起こり、またその際に  $1/f$  ゆらぎが生成されることから、多様な引きこみ（秩序）の生成、崩壊が繰り返し起こることを明らかにした。そして、このことが、場の共創出に関係していることを見出した。さらに、この引きこみ現象が、結合振動子の位相モデルで記述することができないこともあわせて示した。このことは、場の状況が変化しない、つまり、前章で述べた協調ゲームシステムのような実験系で見られるようなエンタテインメントと、場の状況が複雑に変化し、場の共創出が起きる剣道ロボットシステムのような実験系で見られるエンタテインメントでは、エンタテインメントの質が異なることを意味している。この場合、多様な周期で引きこみ現象は、どのようにして実現されているのか、特に、これを実現するためには、互いの要素の間にどのようなインタラクションが必要になるのかということが、問題となるであろう。そこで、この問題については、次章以降で説明する遠隔地間で場の共創出を支援する研究を通して、明らかにしたいと考えている。

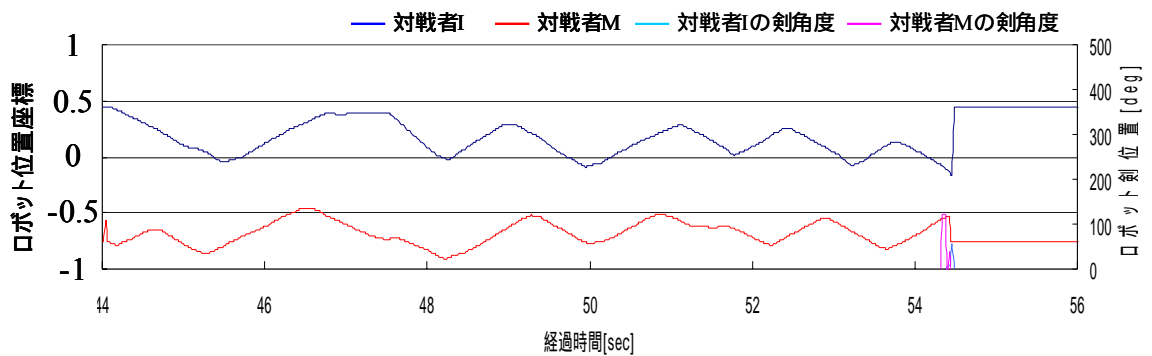
最後に、本システムで得られた結果が、実際の剣道の間合いと同じであるかどうかという問題について少し考察する。ここでは、場の理論について研究している清水博と柳生延春氏（柳生新陰流宗家第21世）との対談（「生命知としての場の論理 - 柳生新陰流に見る共創の理」，中公新書）[14]を基に考えることにする。この本の中で、日本の伝統的剣術である柳生新陰流におけるリズムの問題について、

柳生「リズムというのは、敵に合わせるのではなく、自分の心に従っているべきもので、自由なのです」

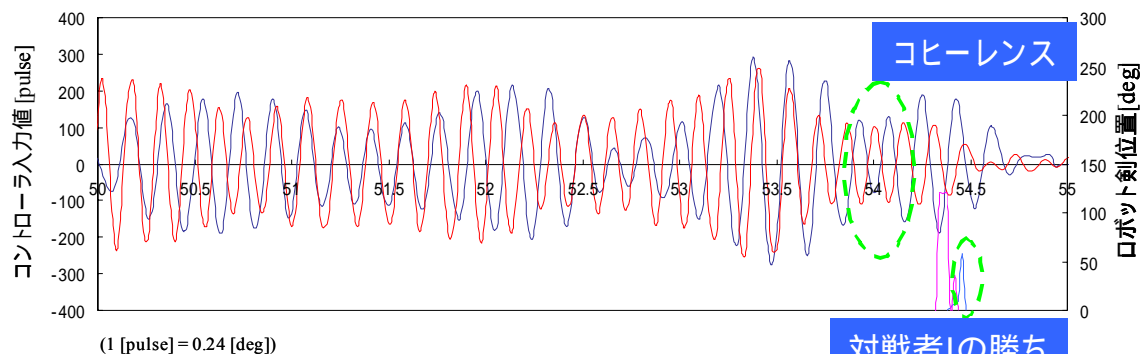
とある。このことは、剣道の対戦において、対戦者は、多様なリズムを創り得ることを示しており、これは、剣道ロボットシステムにおける対戦において、多様なリズムでエンタテインメントの生成、崩壊が行われることと関係があるようにも思われる。

また、本システムを用いた剣道対戦において、互いが同時に前進、もしくは後退する逆相的な動き（逆相移動）と、両者の間合いがあまり変化せず、一方が押すと他方が引くといった同相的な動き（同相移動）が現れ、勝敗が逆相時に決まるといった結果が数多く得られている。このような、間合いの取り方については、先の文献において、

柳生「自分の攻めが効いて敵がじわじわと押されて下がっていったら、いつまでも押さないでサッと引いてしまいます。迎え入れるのですね。そうすると、それまで押されていた敵は、呼び込まれるような感じで出てきます。そこで、敵があせって斬り込むのを外すわけです。」



(a) ロボット位置座標と剣位置



(b) コントローラ波形と剣位置

図4.27 熟練の被験者Iの試合データ

(同じ場所における実力に差のある被験者同士の対戦)

と述べられている．このことは，本システムを用いた対戦において，同相移動から逆相移動に移行して勝負を決めるという間合いの取り方と似ているようにも思われる．

また，本システムを用いた剣道対戦において，相手に剣を振らせるように仕向けて，それをかわしておいて勝つということを実現しているとコメントしている熟練の被験者（被験者 I）もいる．さらには，この被験者は，自分に相手の剣が届かないぎりぎりのところで相手に先に剣を振らせ，その（相手が自分の剣を避けられない状態にした）後，すぐに自分の剣を振って，相手に勝っている．この際，さらに，興味深いことに，剣を振る直前に，それまでできていたコヒーレントな位相関係を崩して，タイミングをずらすことが行われている（図 4.27）．このような現象は，柳生新陰流でいうところの活人剣[14]で戦っている際に見られる現象に近いようにも思われる．本システムにおいて，真剣勝負という究極の無限定な状況で行われていることと似たような現象が再現されているということは，非常に興味深いことである．以上の結果は，本システムを用いた剣道対戦におけるリズムや間合いの取り方は，実空間におけるリズムや間合いの取り方と，現象的に似ている点も多いことを示している．したがって，本システムで得られた知見を，実空間における間合いの生成に対応づけることができる可能性があるように思われる．

#### 4.6. まとめ

本章では、予め場が共有されていない（場の共創出が起きる）場合における、間合いの生成とエントレインメントの関係を実験的に調べた。本研究をまとめると以下ようになる。

- （1）同じ場所での対戦において、間合いが生成されている際に、ロボット間距離ならびに互いのコントローラ操作リズム周期の時間差が  $1/f$  ゆらぎを伴って変化していることを示した。さらに、この際、コントローラ波形に多様な周期でエントレインメントが生成されていることを発見した。
- （2）離れた場所間での対戦では、相手と場を共有することができないため、間合いが形成されず、試合が円滑に進行しないことが分かった。さらに、この際、同じ場所での対戦のように、 $1/f$  ゆらぎを伴った間合いやエントレインメントが生成されないことを示した。
- （3）エントレインメントの多様性が、場の変化に応じた間合いの生成、つまり、場の共創出により出現することを明らかにした。そして、即興的に状況に対応して間合いを生成するために、互いの間で多様な関係を創出できることが必要になる可能性があることについて考察した。
- （4）同じ場所で生成される多様な周期での引き込み現象は、通常为非線形振動子の引き込み現象を記述するモデルである位相モデルで、記述できない現象であることを示した。そして、剣道対戦のような場の共創出が起きるときに見られるエントレインメントと、協調ゲームシステムのような予め場が共有されており場の共創出が起きないときに見られるエントレインメントでは、その質が異なることを明らかにした。



## 第 5 章 身体リズムの力触覚表現による間合いの生成支援

### 5.1. はじめに

本研究では、場の共創出とエンタテインメントの関係を明らかにすることと、遠隔地間で場の共創出を支援することを目指している。前章までにおいて、エンタテインメントの多様性が、場の変化に応じた間合いの生成、つまり、場の共創出に関わっていることを明らかにした。一方で、遠隔地間での剣道対戦において、間合いが生成されず、この場合には、エンタテインメントも創出されないことも分かった。そこで、本章では、これらの結果を踏まえて、剣道ロボットシステムを用いて、遠隔地間で場の共創出を支援する手法について検討する。具体的には、剣道対戦中の相手のロボットの動きに先行する身体行為であるリズムコントローラ操作を、力触覚刺激としてリズム表現することが可能なタイミング表現装置を開発した。そして、それを介することで、多様なエンタテインメントによる間合いの生成、つまり場の共創出が起きるかどうかを調べた。さらに、このような身体行為の表現が、場の共創出の必要条件になっているかどうかを調べるため、場が共創出される同じ場所での対戦で、この情報を遮断した実験を行った。以上により、身体行為のリズム表現による間合いの生成支援手法について検討したので、以下にその詳細を述べる。

### 5.2. 実験手法

剣道対戦で間合いの生成をするためには、互いの動きを予測することが必要になるが、前章で述べた通常の遠隔剣道対戦の結果を踏まえると、この予測がうまく行われていないように推察される。したがって、遠隔対戦において、相手の動きの予測を支援できる情報を提示すれば、間合いの生成が支援できるようになると考えられる。剣道ロボットの操作は、先に説明したように、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入力を積分し、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する方式により行われる。これにより、ロボットの移動速度や移動方向を変化させる場合、常に 1 周期分のコントローラ操作をそれに先行して行うことになる。したがって、対戦者が、ロボットの移動の仕方を変えようとした場合、必然的にそれに先行して、コントローラ操作が変わることになる。それゆえ、相手のコントローラ操作リズムの時系列的な変化を知ることができれば、これを相手のロボットの移動に先行して捉えることが可能になり、相手の動きを読むことができるようになる可能性がある。リズム

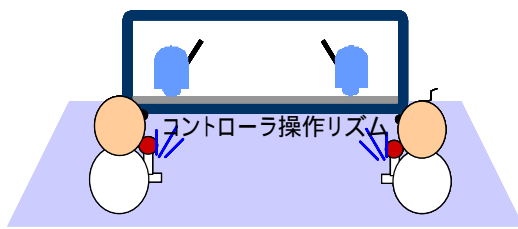
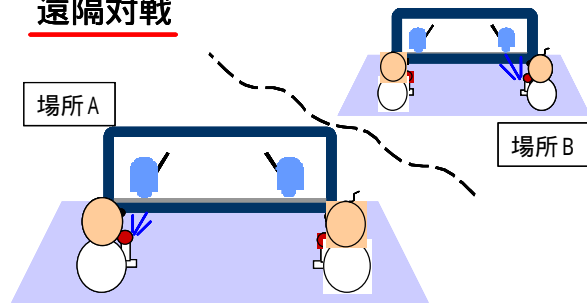
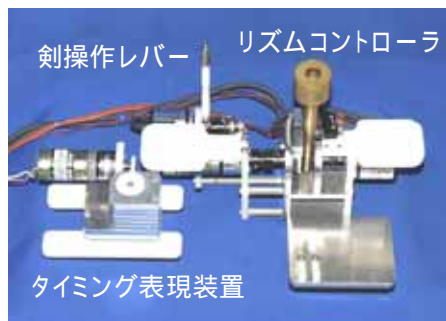
同場所対戦遠隔対戦

図5.1 同場所対戦と遠隔対戦の違い

コントローラは、ゼロクロス点を通過することによって金属音が発生するので、相手が自分の隣に存在する同場所対戦では、コントローラ操作リズムを互いに送りあっているが、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身体行為のリズム（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 5.1）。このことから、この情報が、間合いの生成に重要な役割を果たしている可能性は高いといえる。

そこで、身体行為のリズムを離れた場所にいる相手に伝達する装置（タイミング表現装置）を開発し、これにより、遠隔地間で場の共創出が支援できるかどうかを調べる。さらに、この情報が、場の共創出に必要な条件になっているかどうかを確認するため、同場所対戦において、この情報を遮断して対戦実験を行うことにする。以下、5.2.1 項では、タイミング表現装置の内容について、5.2.2 項では、同場所対戦で身体リズムの伝達を遮断するために行った実験環境の構築について説明する。

装置の諸元

寸法	100 × 64 × 66[mm]
一回あたりの振動発生時間	約20[ms]
最大応答周波数	20[Hz]
振動の強さ	0.98[N]

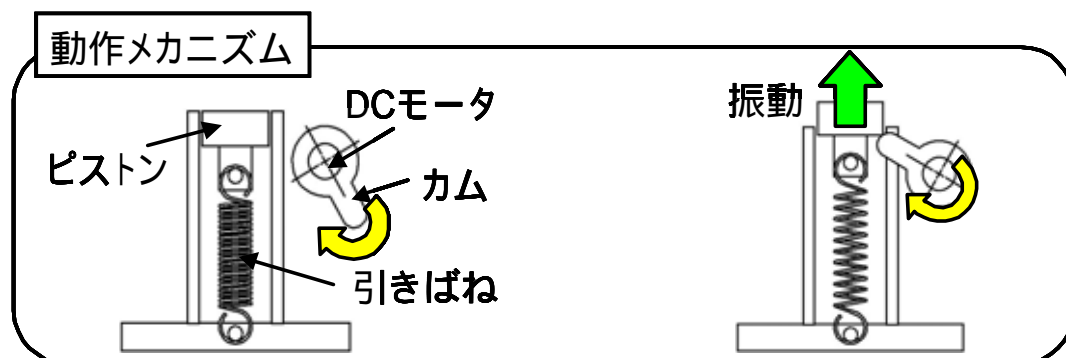


図5.2 タイミング表現装置の外観と構造

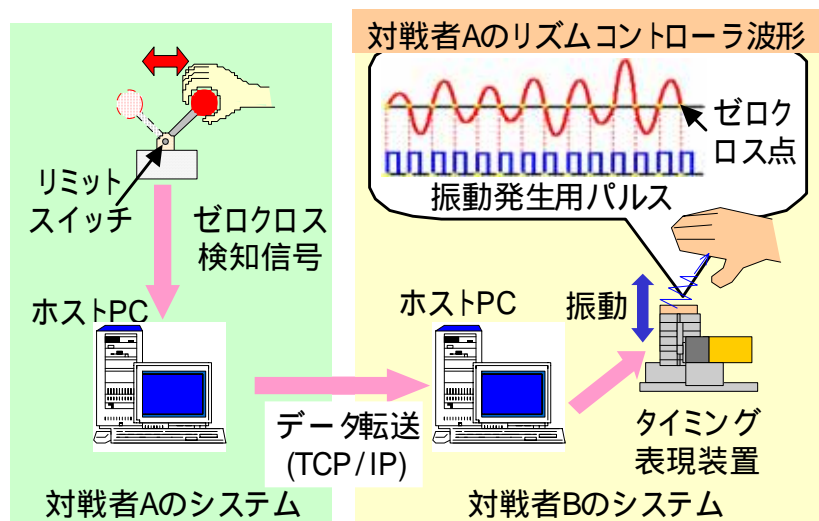


図5.3 ゼロクロス点間隔の伝達システム

### 5.2.1. タイミング表現装置の開発

タイミング表現装置の内容について説明する。本装置は、リズムコントローラのゼロクロス点間隔を離れた場所の相手に力触覚刺激として伝える装置である。その構造ならびに外観を図 5.2 に示す。ゼロクロス点間隔システムの構成は図 5.3 のようになっている。すなわち、リズムコントローラのゼロクロス地点にリミットスイッチを取付け、コントローラがゼロクロス点を通過するごとに信号をホスト PC に入力し、対戦者両者のホスト PC 間で TCP/IP プロトコルによるデータの送受信を行い、相手側の ON 信号ごとにタイミング表現装置にパルス状（矩形状）振動を約 20[ms] 間断続的に発生させる。対戦者は対戦中、振動伝達部を体の一部（通常は操作者の左手）にあてることで、相手側のゼロクロス点間隔に基づいたコントローラリズムの力触覚刺激を受けられる。また、ホスト PC でタイミング表現装置を直接制御することにより、ゼロクロス点間隔の刺激以外にも、一定周波数の振動などによる力触覚刺激を対戦者に与えることができる。

### 5.2.2. 同場所対戦で身体リズムの伝達を遮断する実験環境の構築

身体行為のリズムの伝達が場の共創出に必要な条件になっているかどうかを調べるためには、場が共創出されている同場所対戦において身体行為のリズムの伝達を遮断した実験を行い、この場合に場が共創出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 5.4(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（コントローラの中心）を通過するときに、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

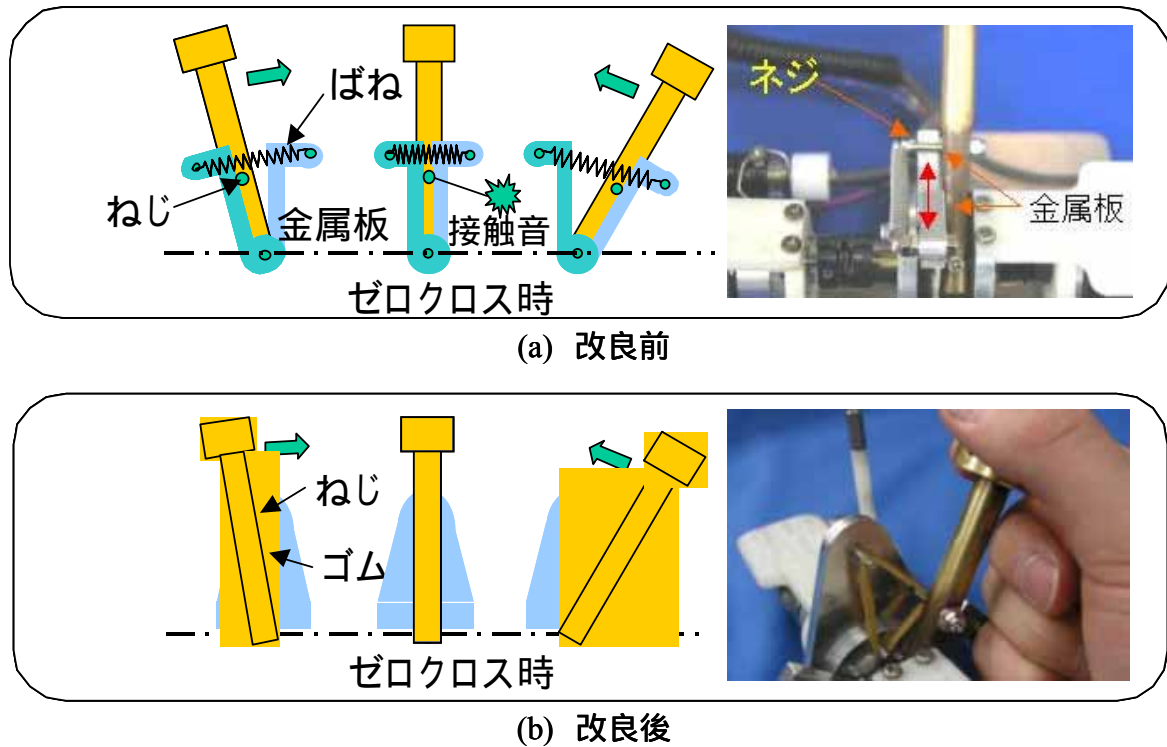


図5.4 リズムコントローラの変更

いようにするため，図 5.4(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を確認するため，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，第 2 章で述べたリズムコントローラの習熟度合いを調べる実験と同様に，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，信号の切り替えタイミングとロボットの移動方向の切り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，全ての対戦者から，“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 5.5 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，信号機の変化から，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 5.6 に示す．同図よ

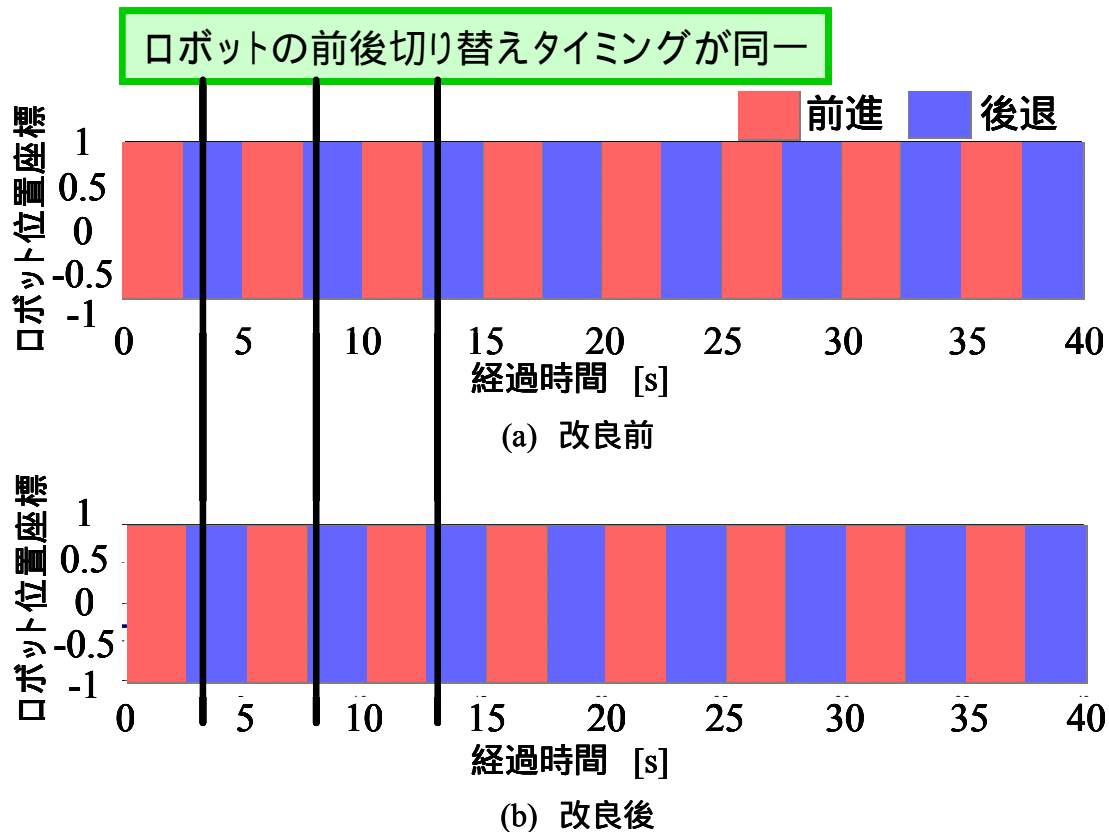


図5.5 ロボット位置座標の時間変化

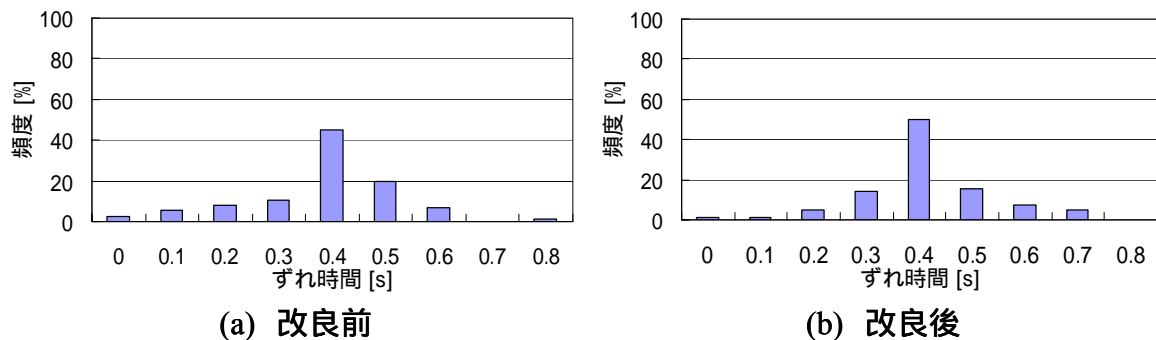


図5.6 反応時間の分布

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 5.5，5.6 については，被験者 A 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 A 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（全て， $p>0.05$ ）．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 5.7 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．

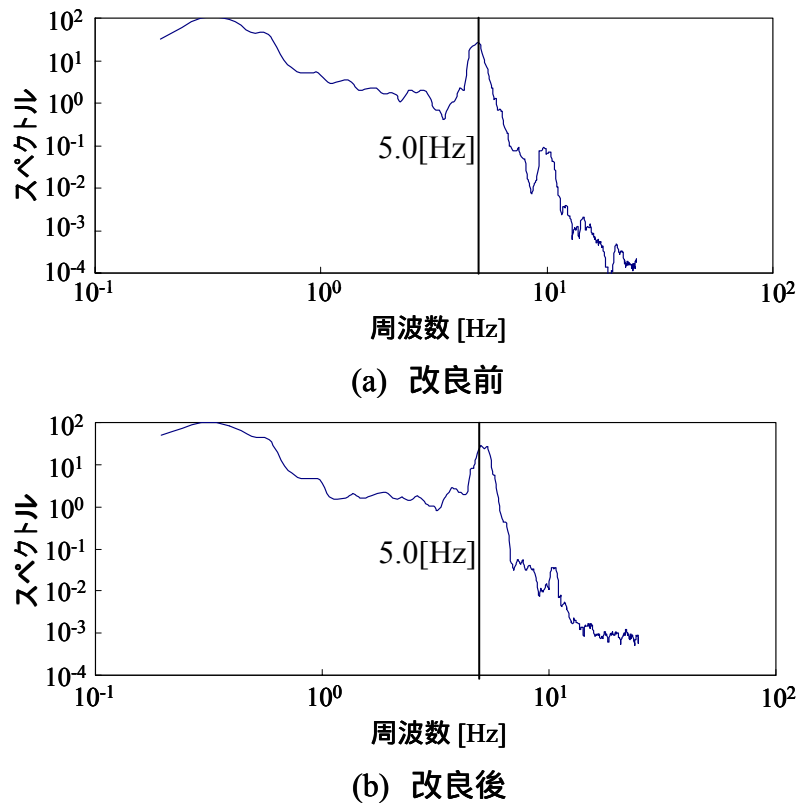


図5.7 コントローラの固有周期

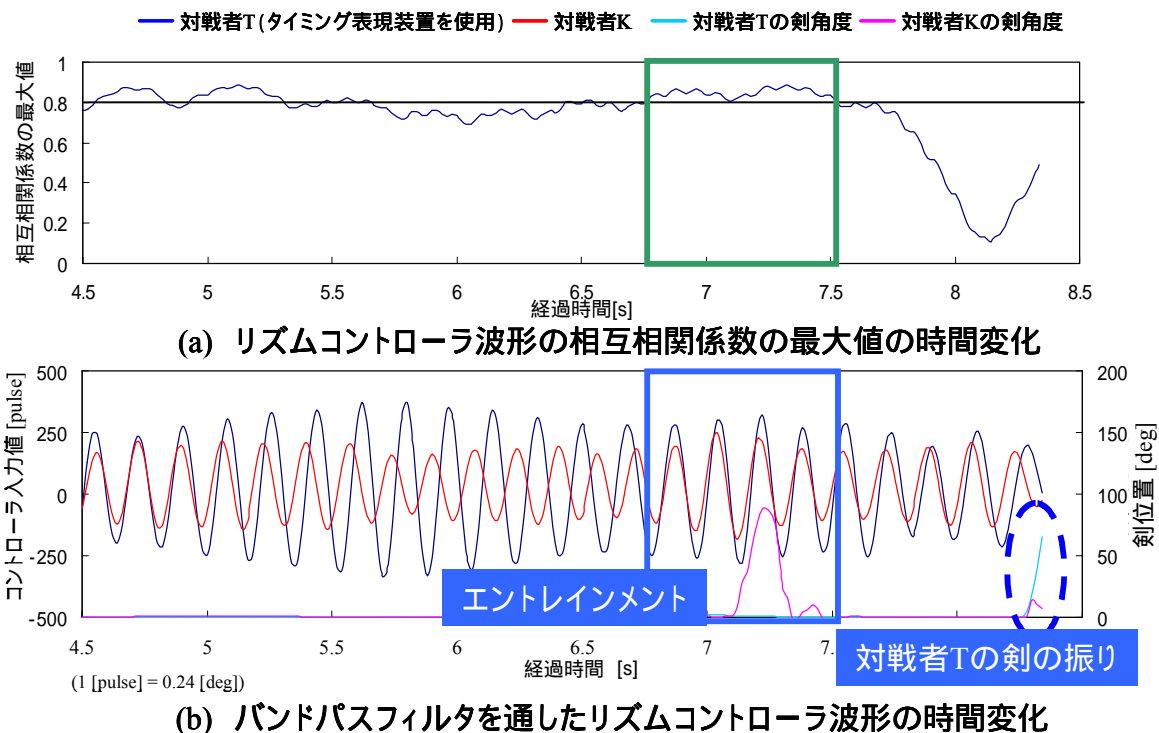
### 5.3. 実験結果

#### 5.3.1. タイミング表現装置を利用した同じ場所での対戦

離れた場所での対戦に先立ち、タイミング表現装置の有効性を確認するため、同じ場所での対戦において、対戦者一方のみに本装置を用いて、ゼロクロス信号を伝える実験を行った。その結果、ゼロクロス信号を受け取った全ての対戦者から、“相手の動きが手に取るように分かる”という感想が得られた。実際、この条件においては、タイミング表現装置を使用している方が、有利に試合を進めていくことが多く、勝率がタイミング表現装置を使用しない場合に比べて、圧倒的に高くなる。例えば、対戦者 K は他の対戦者に対しての勝率が、タイミング表現装置を使うことにより、100 試合平均で 5 割程度から 8 割強程度に変化し、また、対戦者 S は 3 割程度から 6 割程度へと変化するなど、本装置を使用することでいずれの対戦者も勝率が高くなることが確認された。

また、対戦者の固有操作リズムに近い周波数域の位相情報を取り出すため、通過帯域が 4-7[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を見ると、図 5.8 に示したように、試合終盤において、タイミング信号を受けている対戦者 T は、操作リズムにエンタテインメントを生成した後、それを自ら壊し、相手と位相をずらして剣を振り勝っている。このような結果は、タイミング表現装置によってゼロ

## 第5章 身体リズムの力触覚表現による間合いの生成支援



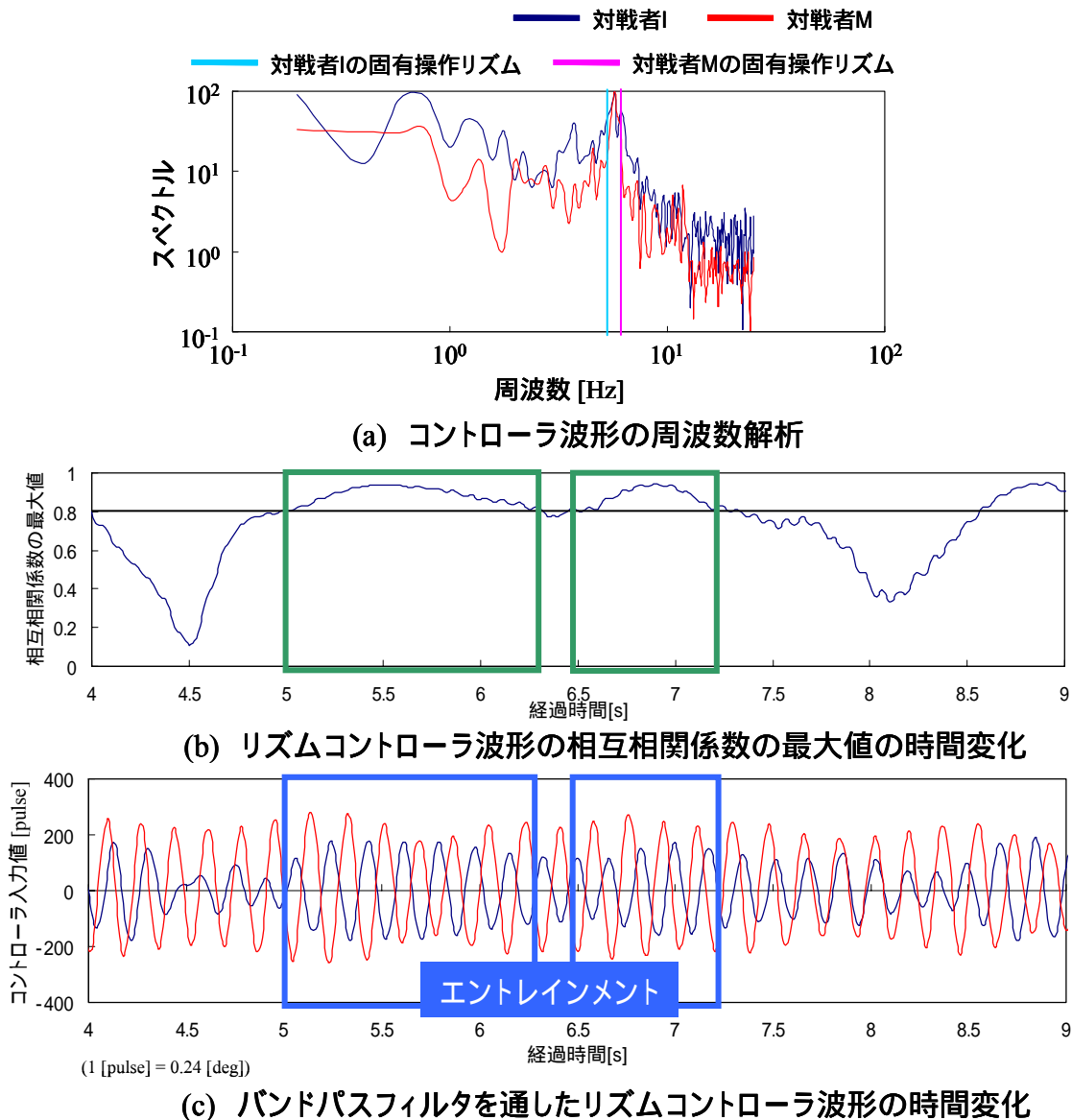
**図5.8 対戦者一方のみがタイミング表現装置を使用した同場所対戦の結果  
(実力の接近した被験者同士の対戦)**

クロス信号を受けると、相手の動きが感覚的に読めるようになるという対戦者のコメントに根拠を与えるものと思われる。

### 5.3.2. タイミング表現装置を利用した離れた場所での対戦

#### (a) ゼロクロス信号を送った場合

次に、タイミング表現装置を用いて、離れた場所間で両者にゼロクロス信号を送りあう対戦実験を行った。なお、タイミング表現装置において表現される相手のゼロクロス信号の通信による遅延時間は、50[ms]以下である。また、被験者には、タイミング表現装置における振動の意味をあらかじめ教示した上で実験を行っている。この対戦において、バンドパスフィルタを通したリズムコントローラ波形を見ると、操作リズムにエントレインメントが生成されたり、崩されたりしていることを確認できる。その場合、タイミング表現装置を用いたこの実験においてはエントレインメントが1[s]を超えて形成されることもあった(図5.9(c))。そして、図5.9(a)に示すように、互いのリズムコントローラの操作リズムが各人の固有リズムからはずれて、ほぼ一致するようになる。しかしながら、対戦者から、“ロボット同士で試合をしている感覚が強く、相手と試合をしている感覚がなく、相手と間合いが取れない”、“相手のロボットがいつ動き出すかの予測はできるが、同じ場所での対戦のように試合全体の流れからロボットの移動方向までを読んで、余裕をもって試合を行うことはできない”とのコメントが得られた。



**図5.9 タイミング表現装置を使用した遠隔対戦の結果  
(実力の接近した被験者同士の対戦)**

また、ゼロクロス信号を、タイミング表現装置のような力触覚刺激でなく、パルス音で音刺激として表現する実験もあわせて行った。なお、相手のゼロクロス信号の通信による遅延時間は、50[ms]以下である。その結果、タイミング表現装置を用いた対戦と同じように、コントローラ波形に、エントレインメントの生成、崩壊が見られる(図 5.10(c))。また、周波数解析を行うと、互いのピークが一致している。(図 5.10(a))つまり、ゼロクロス点間隔の提示は、触覚、聴覚といった感覚系によらずエントレインメントの生成に有効であるといえる。しかし、この実験についてのコメントは、タイミング表現装置を用いた場合と同様、“相手と間合いを取ることはできない”というものであった。

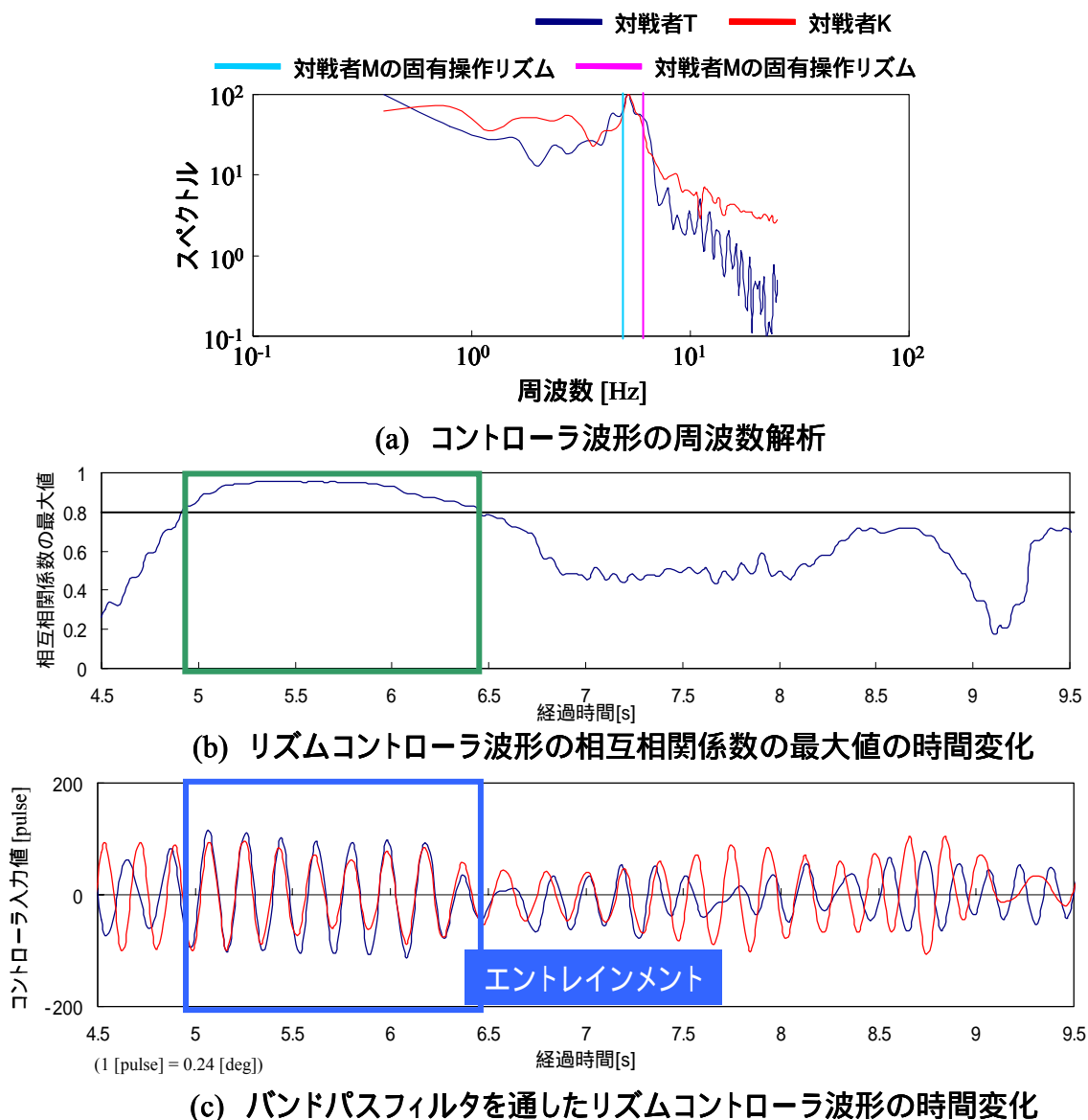
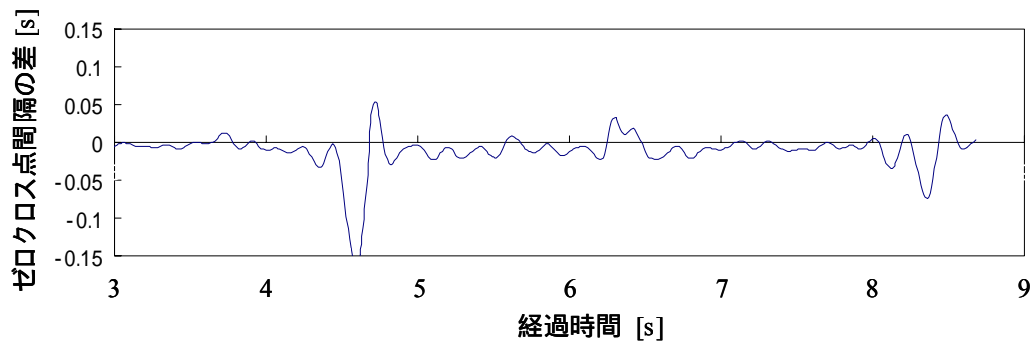


図5.10 ゼロクロス音提示時の遠隔対戦の結果  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

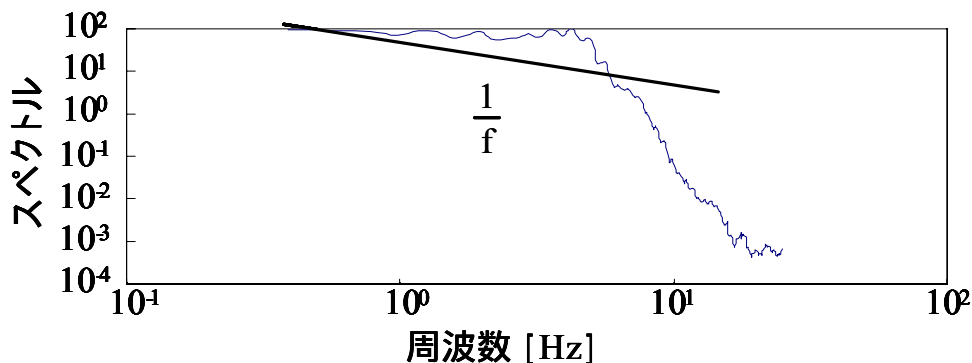
以上のタイミング表現装置を用いた遠隔対戦の結果は，相手のゼロクロス信号を伝達した場合において，エントレインメントは生成されるが，対戦者のコメントから判断すると間合いは生成されていないということになる．

そこで，この場合において，同場所での対戦で見られたような  $1/f$  ゆらぎや多様なエントレインメントが見られるかどうかを，さらに詳しく調べることにした．

まず，ゆらぎについて解析を行った．最初は，時間関係性に関する結果を説明する．その結果，コントローラ操作リズム周期の時間差  $Dz(t)$  は，あまり変化していないことが分かる（図 5.11(a)）．さらに，この時間変動について，周波数解析を行うと，同じ場所での対戦とは異なり， $1/f$  ゆらぎが認められない（図 5.11(b)）．以上の結果は，ゼロクロス信号を，タイミング表現装置を用いて，力触覚で表現した場合



(a) 時間的關係性の時間変化



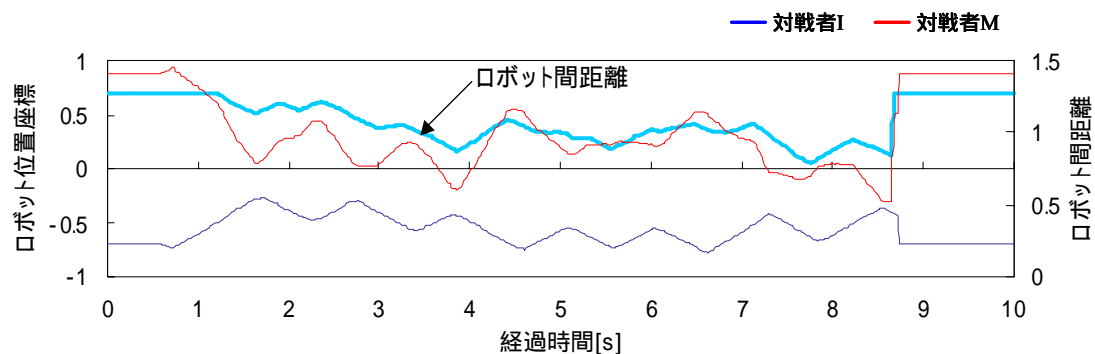
(b) 時間的關係性の周波数解析結果

図5.11 タイミング表現装置を用いた遠隔対戦における時間的關係性  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

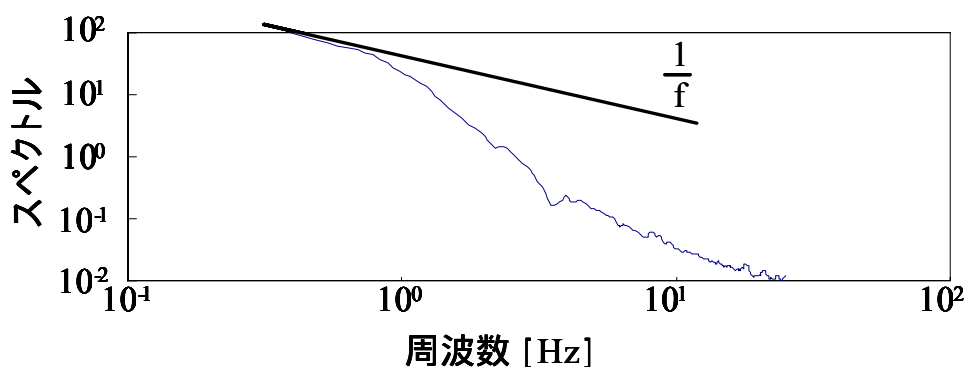
も、音で表現した場合も同様であった。したがって、同じ場所での対戦とゼロクロス信号を伝達した遠隔対戦では、互いのコントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎの性質が異なることが分かる。

次に、互いのロボット間距離のゆらぎ（空間的關係性）についても、同様に調べた。その結果、タイミング表現装置を用いた遠隔対戦では、 $1/f$  ゆらぎは認められなかった（図 5.12(b)）。なお、タイミング表現装置のみを用いた遠隔対戦において、ロボット間距離のゆらぎ、コントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎに  $1/f$  ゆらぎが認められた例は、100 試合中 1 試合もなかった（対戦者 M と I の結果）。以上の結果は、ゼロクロス信号を音で表現した場合も同様であった。そして、対戦者 M, I 以外のペアにおいても同様であった。

さらに、エントレインメント生成時の操作リズム周期について解析を行った。図 5.13 は、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 によるタイミング表現装置を用いた遠隔での 100 試合の対戦におけるエントレインメント生成時の操作リズム周期の分布を示している。同図より、先に述べた間合いが生成されている同じ場所での対戦とは異なり、エントレインメントが生成される周期は、対戦者両者の固有操作周期の間である  $0.18[s]$  ( $5.6[Hz]$ ) に集中しており、この周期と  $0.16[s]$  ( $6.3[Hz]$ ) 以外では、エントレイ



(a) 空間的関係性の時間変化



(b) 空間的関係性の周波数解析結果

図5.12 タイミング表現装置を用いた遠隔対戦空間的関係性  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

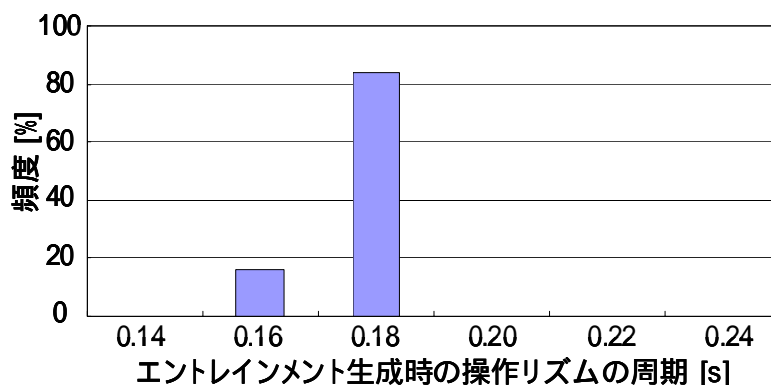


図5.13 タイミング表現装置を用いた遠隔対戦におけるエンタレインメント  
生成時の周期分布 (実力の接近した被験者同士の対戦)

ンメントが生成されていないことが確認できる。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 4.20 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。この結果も、ゼロクロス信号を音で表現した場合も同様であった。

以上の結果は、相手のコントローラ波形のゼロクロス信号を伝達した遠隔対戦においては、同じ場所での対戦と同様の多様なエンタテインメントによる間合いが生成されていない（場が共創出されていない）ことを示すものであり、間合いを生成することができないという対戦者のコメントを裏づけるものである。

(b) ゼロクロス信号と異なる信号を送った場合

さらに、ゼロクロス点に対応した信号でなければ、間合いが形成されないのかどうかを以下に調べることにし、タイミング表現装置に一定周波数の振動を与えて対戦実験を行ってみた。なお、この実験では、被験者には、タイミング表現措置で提

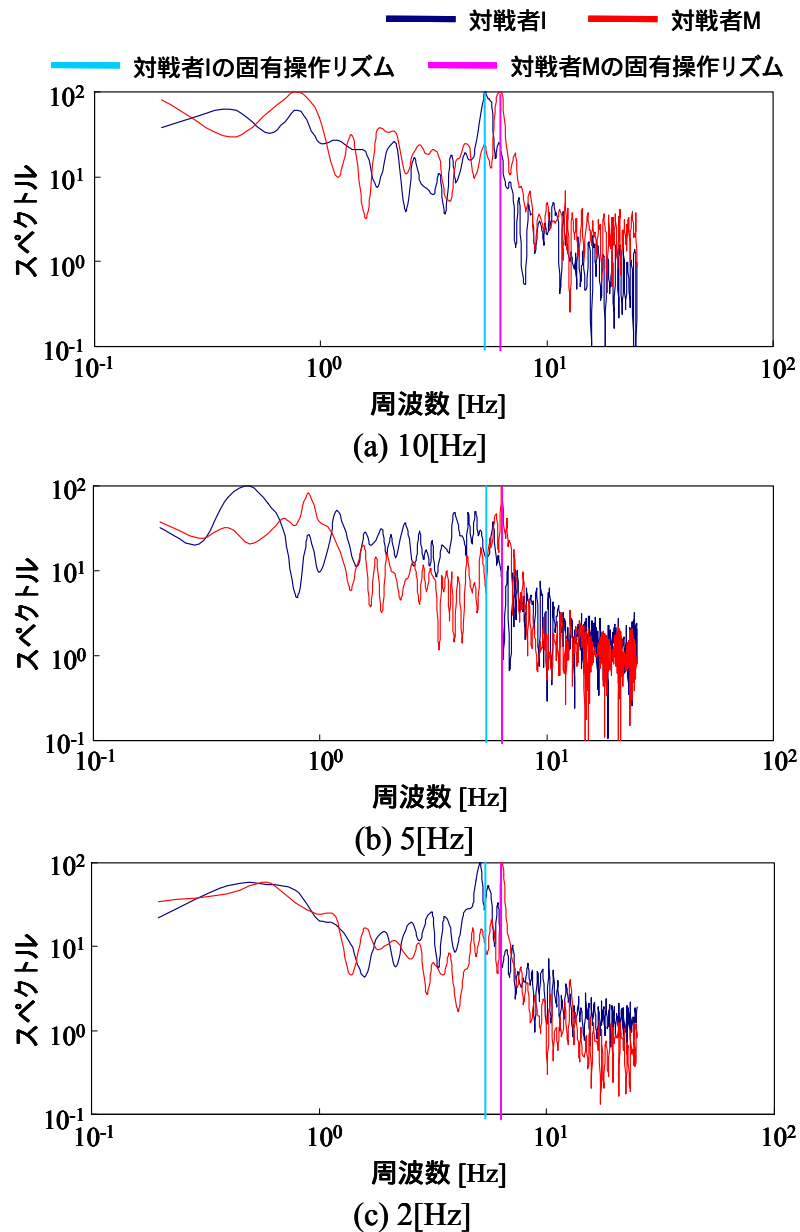


図5.14 遠隔対戦において一定周波数の振動を伝達したときの結果  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

示される振動の意味をあらかじめ教えないで（相手のゼロクロス信号を提示していると偽って）実験を行っている．その結果，固有操作リズムに近い 5[Hz]の一定周波数の振動を対戦者に伝達すると，被験者から“相手の動きが予測できず，間合いが取れない”，“違和感がある”などのコメントが得られた．その時のコントローラ波形を周波数解析したのが図 5.14(b)である．同図より，ピークが分散しており，コントローラをうまく操作できていないことが分かる．これは，自分の固有のリズム（5[Hz]）に近い周波数を与えられたことで，自分のリズムを創れなくなったことを示していると思われる．また，10[Hz]および 2[Hz]の振動を与えた時は，“相手が常に攻撃しようとしていると感じる”，“無視してしまう”といった感想が聞かれ，自身の固有リズムで対戦していることが認められた．さらに，対戦者からは，“相手と間合いをとることができない”とのコメントが得られた．その他に，ランダムなリズム振動やロボットの移動方向の変化にあわせた振動などを与えた実験もあわせて行ったが，いずれの場合も，エントレインメントが生成されず，また，間合いが形成されることもなかった．

### 5.3.3. 身体リズムの伝達を遮断した同じ場所での対戦

前項において，タイミング表現装置による身体リズム（コントローラ波形のゼロクロス信号）の伝達のみでは，場が共創出できないことを示した．しかし，5.3.1 項で述べたように，この情報は，相手の行為の予測に有益な情報であるので，これが，場の共創出の必要条件になっている可能性はある．このことを実験的に調べるため，同じ場所の対戦において，前節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，実験を行った．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，全ての対戦者から，“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，間合いが取れない”とのコメントが得られた．さらに，エントレインメント生成時の操作リズム周期を見ると，場が共創出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])）のみでエント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，エントレインメントが生成されていないことが確認された（図 5.15）．同図の結果は，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 の結果であり，さらに，同図のヒストグラムと同場所での対戦結果を示す図 4.20 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ト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，通常と同じ場所での対戦とは，エントレインメントの生

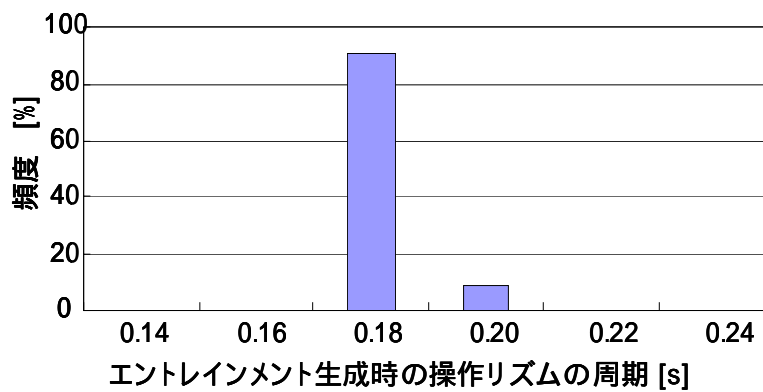


図5.15 身体行為のリズムを遮断した同場所対戦におけるエンタレインメント生成時の周期分布（実力の接近した被験者同士の対戦）

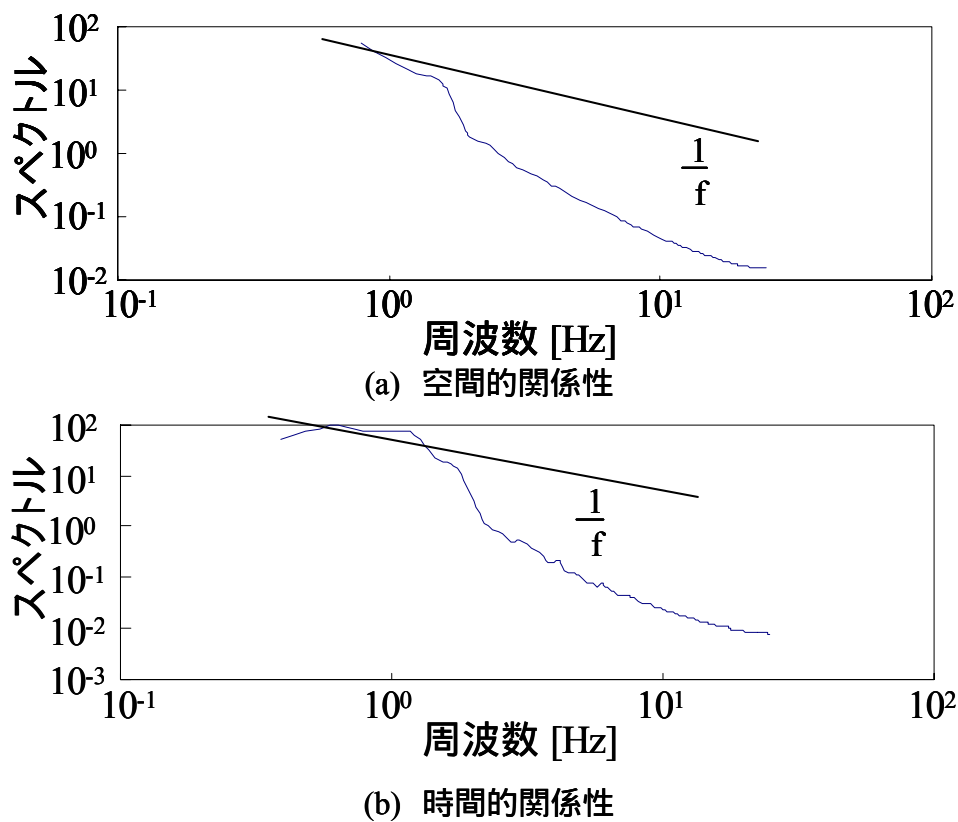


図5.16 身体行為のリズムを遮断した同場所対戦における空間的関係性と時間的関係性のゆらぎ（実力の接近した被験者同士の対戦）

成のされ方が異なることになる．さらに，ロボット間距離のゆらぎ（空間的関係性）やコントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎ（時間的関係性）についても解析を行ったが， $1/f$  ゆらぎを確認することはできなかった（図 5.16）．この結果も，他の被験者のペアにおいても同様である．以上より，コントローラ操作リズムの伝達が，多様なエンタレインメントによる間合いの生成（場の共創出）に必要であることが実験的に示された．

### 5.4. 考察

本章では、同じ場所での対戦において、身体行為のリズムの伝達を遮断すると、特定周期のエントレインメント生成にとどまり、多様なエントレインメントによる間合いが生成されないことを示した。さらに、遠隔地間での対戦において、タイミング表現装置を用いて互いの身体行為のリズムを送りあった場合も、特定周期でしかエントレインメントが生成されず、多様なエントレインメントによる間合いの生成には、至らないことが分かった。以上の結果は、多様なエントレインメントによる間合いの生成、つまり、場の共創出には、身体行為のリズム表現が必要ではあるが、これだけでは不十分であることを示している。この理由について、以下で考察する。

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）かということを予測することで、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。この予測を行う上で、映像画面上に表現されるロボットの動きの変化に先行する情報である身体行為のリズム（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、先に述べたように、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舞えることに関係していると考えられる。つまり、互いの行為やその関係の自由度が高い状況でコミュニケーションを行っていることと深く関係しているように推察される。この場合、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、“いつ攻撃にでるか”を窺っている（間合いを維持しようとしている、協調的な関係を保とうとしている）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、競争的な関係に移行しようとしている）”のかということも読む必要がある。したがって、この場合、相手と間合いを取る、言い換えれば、コミュニケーションを成立させるためには、相手の行為の予測だけでなく、互いの関係も予測することが必要になると考えられる。このこととこれまで本章で述べてきた実験結果を踏まえると、タイミング装置による相手の意図した行為に先行する情報であるコントローラ操作リズムの伝達は、相手の行為を予測することには有効であるが、これだけでは、互いの関係を予測することはできないのではないかと推察される。つまり、遠隔地間で場を共創出するためには、互いの関係を予測することを支援する新たな手法が必要である。

ただし、本節の冒頭で述べたように、身体行為のリズム表現がなければ、場の共創出は起こらない。この際、対戦画面上に表現される自分の意図した行為（ロボッ

トの動き)のような意識が直接関与する行為と、自分の意図した行為に先行して創られる身体行為(リズムコントローラの操作)のような意識が直接関与しない行為の両方が必要となる。つまり、行為を二重的に表現することが、場を共創出するための必要条件になっていることが分かる。

つまり、本章の結果は、場の共創出の実現において、行為の二重的な表現による相手の行為の予測支援が必要条件になっているが、これだけでは不十分であり、互いの関係の予測を支援する手法があわせて必要になることを示している。

以上を踏まえて、次に、互いの関係の予測を支援する具体的な手法について考えることにする。剣道対戦においては、リズムコントローラ波形に見られるエントレインメントという協調的な関係が、剣道対戦において生成され、これが、間合いの生成に関係していることも分かっている。さらに、リズムコントローラ波形が、映像画面上のロボットの動きに先行していることも踏まえれば、リズムコントローラ波形の一致度合い(コヒーレンスの度合い)は、画面上に表現される互いのロボットの関係(間合い)に先行した情報であるので、これをリアルタイムに映像表現すれば、互いの関係が予測可能となり、間合いが生成できるのではないかと考えられる。そこで、次章では、このようなコヒーレンスに着目した互いの関係の予測を支援する手法を実際に開発するとともに、この手法が場の共創出に有効であるかどうかについて、実験を行いその評価を行うことにする。

また、本章では、リズムミクなコントローラ波形のゼロクロス時刻を互いに送りあうことで、エントレインメントの生成を支援することを試みたが、このことについて、以下で考察する。まず、本システムを用いた剣道対戦中のコントローラ波形の周期(見かけの振動数 $\omega$ )について考えてみると、被験者によって多少ばらつきはあるが、0.1~0.30[s]まで、分布に広がりがある(図 5.17)。また、対戦中のゼロクロス点間隔(リズムコントローラ波形の半周期)の時系列変化をみると、それは、時間に対して一定ではなく、時間変化を伴うものであることが分かる(図 5.18)。第2章で、リズムコントローラ波形には、固有振動数があることを述べたが、対戦中

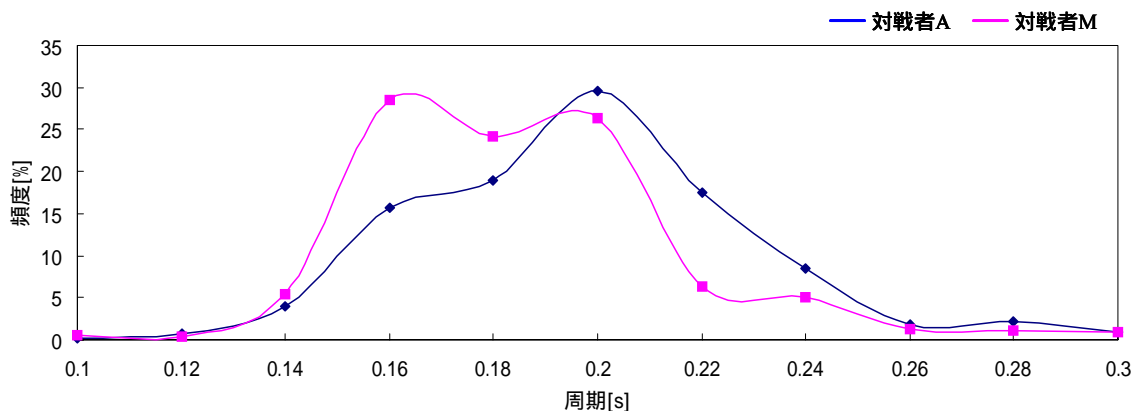


図5.17 タイミング表現装置を用いた遠隔対戦におけるコントローラ波形周期の頻度分布(実力の接近した被験者同士の対戦)

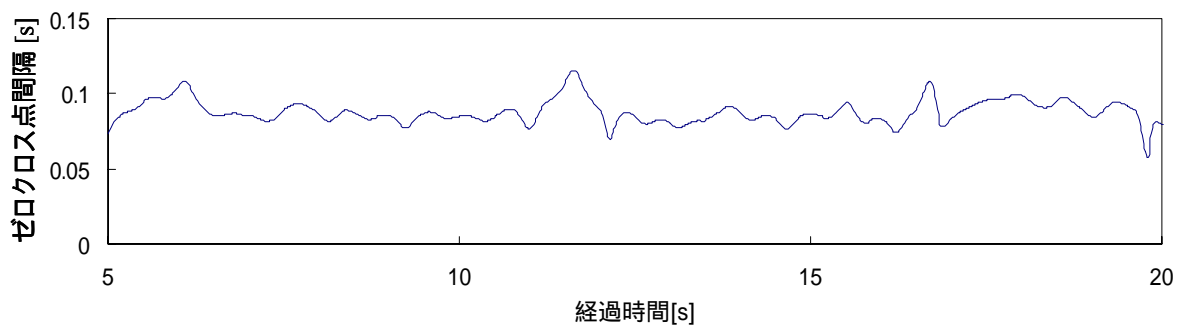


図5.18 タイミング表現装置を用いた遠隔対戦におけるゼロクロス点間隔の時間変化

は，試合の状況に合わせて，対戦者が周期（見かけの振動数  $\bar{\omega}$ ）を変化させているため，実質的には，固有振動数  $\omega$  が存在しない（固有振動数  $\omega$  が時間的に変動する）状況になる．つまり，本システムにおける剣道対戦においては，互いの振動子の周期（見かけの振動数  $\bar{\omega}$ ）の差が，大きくなる可能性がある中で（高い状況において），引き込みを創らなければならないということになる．

互いの振動子の周期（見かけの振動数  $\bar{\omega}$ ）が接近している場合には，先に説明した位相モデルで示されているように，位相差をフィードバックするだけで引き込みが生じる．しかし，本研究の剣道対戦のような状況で，位相関係（エントレインメント）を生成するためには，そもそも，互いの周期（見かけの振動数  $\bar{\omega}$ ）を合わせる必要があるので，位相差  $\phi$  だけでなく，周期差（みかけの振動数の差  $\Delta\bar{\omega}$ ）の情報がないと，引き込みを生成することは困難であると考えられる．したがって，本システムにおいて，引き込みを生成させるためには，少なくとも互いのリズムの位相差  $\phi$  と周期差（みかけの振動数の差  $\Delta\bar{\omega}$ ）に関する情報が必要になるであろう．実際，本章で行った実験においては，相手のコントローラのゼロクロス点間隔を互いにやり取りしているが，これにより，相手のコントローラリズムの位相と周期が離散的に表現されていることになる．これを模式的に表したのが図 5.19 である．

しかしながら，ゼロクロス信号をやり取りするだけでは，特定周期のエントレイ

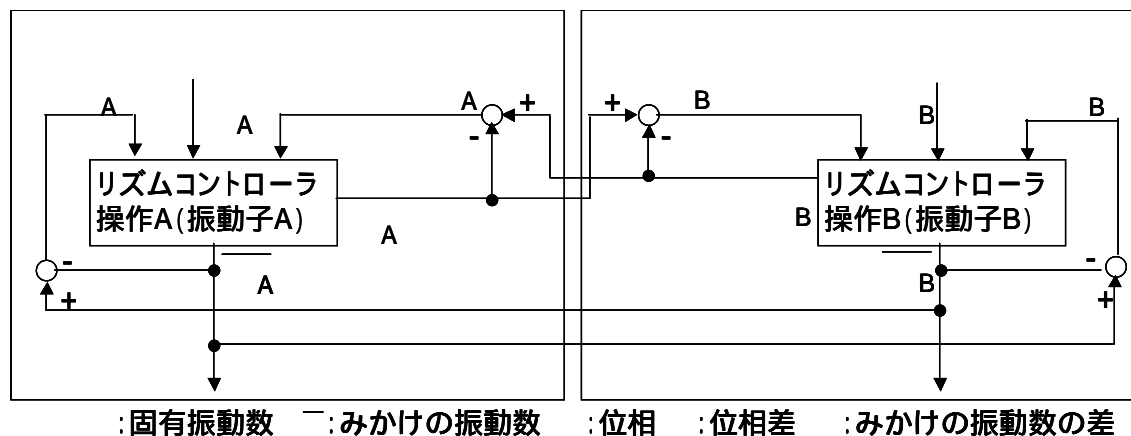


図5.19 エントレインメントのモデル化（タイミング表現装置を用いた遠隔対戦）

ンメントしか生成することができず、多様な周期でエントレインメントを生成することはできなかった。このことは、固有振動数が時間的に変動する振動子の引き込み現象において、位相差と周期差（みかけの振動数の差）をフィードバックするだけでは、特定周期でしか引き込みは起きないことを示している。すなわち、多様な周期で引き込みを起こすためには、これら以外の振動子間のインタラクションが必要になることを示している。つまり、図 5.19 は、同場所対戦における多様な周期でのエントレインメント現象を説明するモデルとしては、不十分であるということになる。

## 5.5. まとめ

本章の内容をまとめると以下のようになる。

- (1) 離れた場所間での対戦において、間合いの生成を支援するために、ロボットを操作するリズムコントローラのゼロクロス点間隔（身体行為のリズム）を互いに伝え合うタイミング表現装置を考案し、開発した。
- (2) 同場所対戦において、身体行為のリズムの伝達がないと、多様なエントレインメントによる間合いが生成されないことを見出し、身体行為のリズムの伝達が、少なくとも場の共創出に必要なことを示した。
- (3) 遠隔剣道対戦において、身体リズムの表現だけでは、特定周期のエントレインメントしか生成されず、場の共創出に至らないことを示した。
- (4) 以上より、遠隔地間で場の共創出を実現するためには、行為の二重的な表現による相手の行為の予測支援だけでは不十分であり、互いの関係の予測を支援する手法があわせて必要になることを考察した。そして、関係の予測を支援する手法として、互いのコントローラ波形のコヒーレンスの度合いを表現することを提案した。
- (5) 多様な周期でエントレインメントを生成するためには、互いのリズムの位相差と周期差のフィードバックだけでは、不十分であることについて考察した。



## 第6章 コヒーレンス映像表現と身体リズムの表現による間合いの生成支援

### 6.1. はじめに

本研究では，遠隔地間で場の共創出を支援することを目指している．この問題について，前章で行った剣道対戦実験の結果から，遠隔地間で場の共創出するためには，互いの関係の予測を支援する必要がある可能性が見出された．そして，前章では，互いの関係の予測を支援する手法として，互いのコントローラ波形のコヒーレンス度合いを表現することを提案した．以上を踏まえて，本章では，コヒーレンス度合いを表現する手法を開発するとともに，この手法により，遠隔地間で場の共創出を支援することができるかどうかを調べることにする．具体的には，対戦中における互いのコントローラ波形のコヒーレンスの度合いを映像表現する手法（コヒーレンス映像表現）を開発した．そして，この映像表現手法と前章で述べたタイミング表現装置の両方を用いて，遠隔対戦を行うことで，遠隔地間においても場の共創出が起きるかを調べたので，以下にその内容を述べる．

### 6.2. コヒーレンス映像表現

前章において，多様なエンタテインメントによる間合いを生成する，すなわち場を共創出するためには，相手の行為の予測だけではなく，互いの関係が，この先どのように変化するかということの予測が，必要になるではないかと考察した．そして，このような関係の予測を支援する手法として，リズムコントローラ波形の一致度合い（コヒーレンスの度合い）をリアルタイムに映像表現することを提案した．以下，本節では，これを具体的に実現する手法について説明する．なお，これ以後，本論文では，リズムコントローラ波形の一致度合い（コヒーレンスの度合い）の映

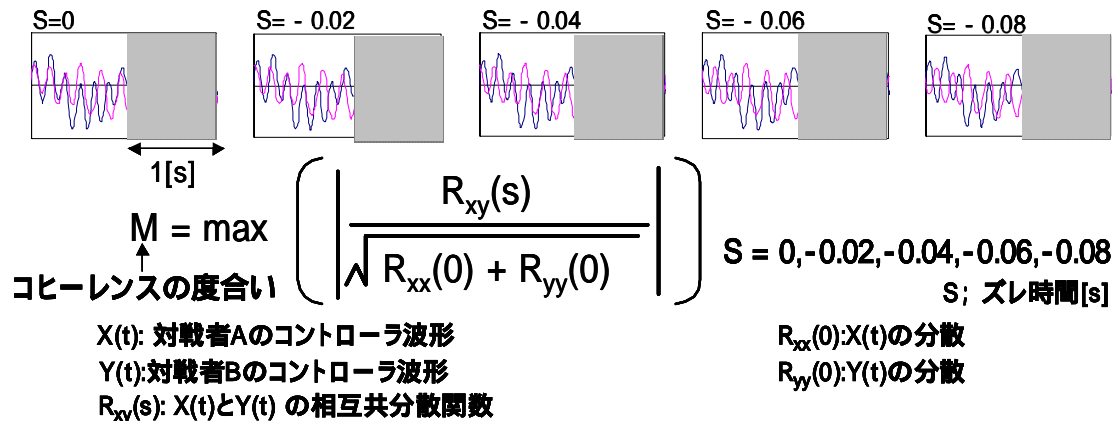


図6.1 コヒーレンスの度合いの計算方法

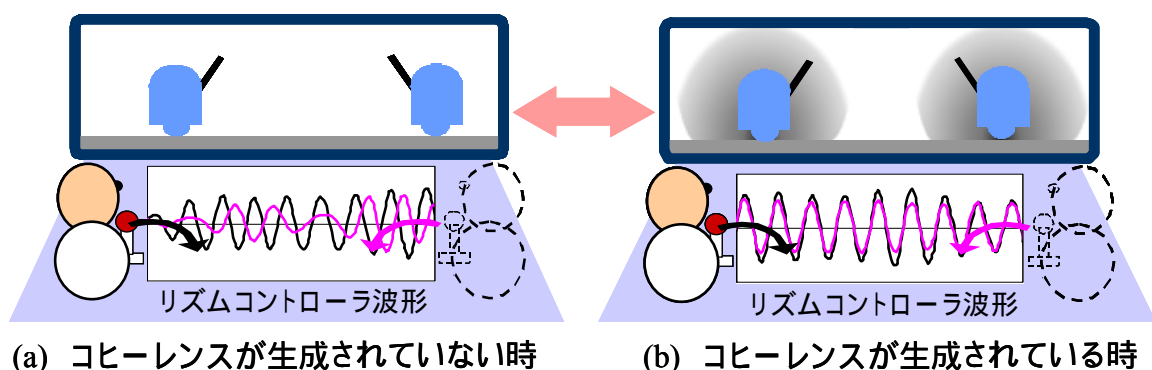


図6.2 コヒーレンス映像表現

像表現を，コヒーレンス映像表現と呼ぶことにする．

なお本研究では，コヒーレンスを映像表現する研究の手始めとして，互いのコントローラ波形の位相関係ではなくそれらの相関関係を評価することで，擬似的にコヒーレンスを映像表現している．これまでの実験結果から，互いのコントローラ波形に形成されるコヒーレンス（エントレインメント）は，位相差 0 で形成される場合だけではなく，位相差  $\pm 1/5$ ， $\dots$ ， $\pm$  というように様々な位相差で形成される可能性があること，その持続時間は通常 1[s]程度であること，さらには，エントレインメントが生成されるコントローラ操作リズムの周波数が約 5[Hz]（半周期が約 0.1[s]）であることが分かっている．したがって， $0 < s < 0.1$ （s:ずれ時間）の範囲のずれ時間で，相互相関関数を計算すれば，約 5[Hz]の波形に起きるエントレインメントを，どの位相差においても，もれなく調べあげることが可能になる．そこで，本研究では，リズムコントローラのデータのサンプリング間隔が 0.02[s]であることを考慮し，具体的には図 6.1 に示すような方法で，互いのリズムコントローラ波形の相互相関係数を計算している．つまり，現在から 1 秒前までの対戦者両者の波形を対象に，ずれ時間を 0.02[s]刻みで 0-0.08[s]の間でそれぞれの相互相関係数を計算し，それぞれのずれ時間における相互相関係数の絶対値のうち最大値  $M$  を，その時点での対戦者両者の創るコヒーレンスの度合いとした．

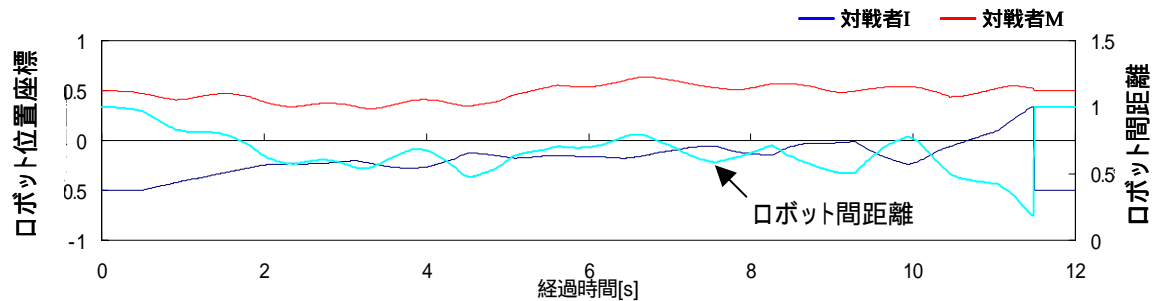
そして，このようなコヒーレンスの度合いは，コミュニケーションにおいて，通常，意識されない情報であり，この情報は，意識が直接関与しない形で処理されている可能性が高い．そこで，本研究では，この情報を，周辺視的（視野の周辺）に表現することにした．具体的には，本システムの剣道対戦において，対戦者は，ロボットを注視していると考えられるので，その周囲にこの情報を表現する．

以上より，互いのコントローラ操作リズムの相関関係をロボット自身の映像の外側にグラデーションをつけて濃淡表現することとした（図 6.2）．

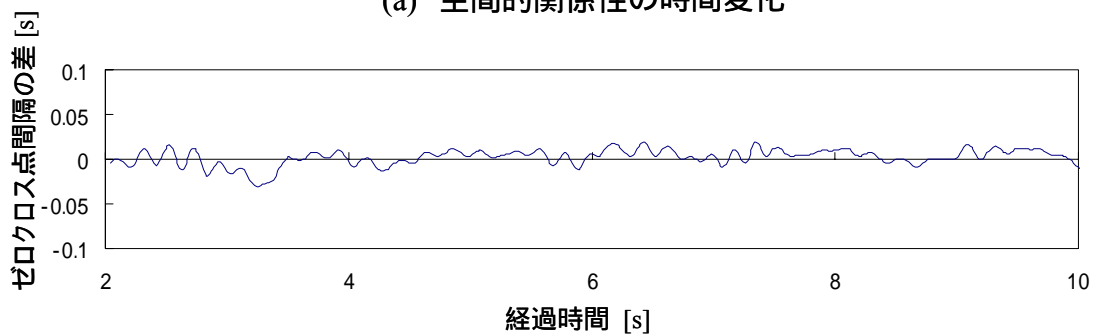
### 6.3. 実験結果

#### 6.3.1. コヒーレンス映像表現のみを用いた遠隔対戦

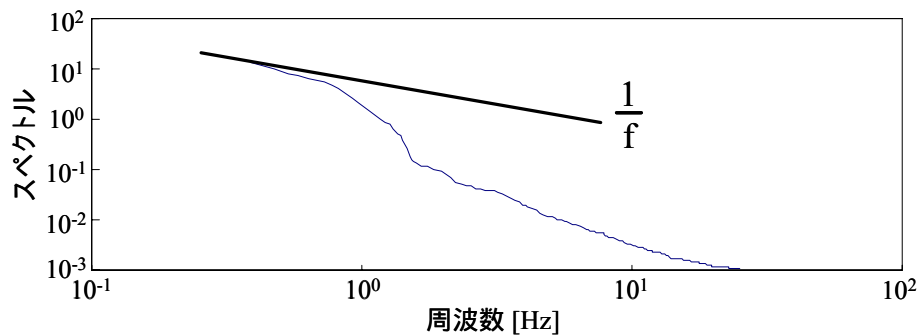
離れた場所間で、コヒーレンス映像表現のみで対戦したときの結果について説明



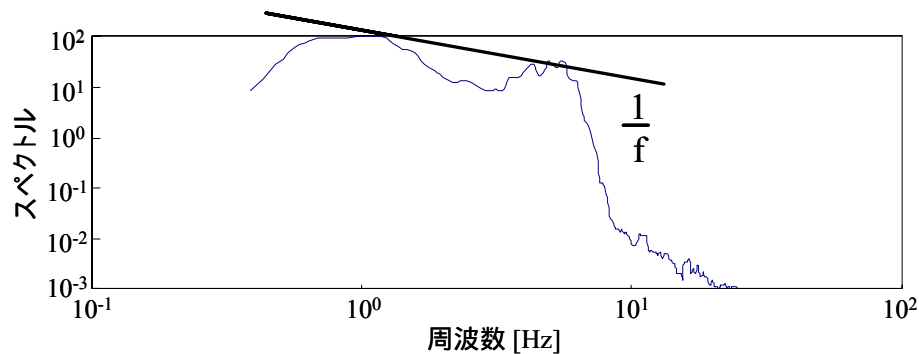
(a) 空間的關係性の時間変化



(b) 時間的關係性の時間変化



(c) 空間的關係性の周波数解析結果



(d) 時間的關係性の周波数解析結果

図6.3 コヒーレンス映像表現のみを用いた遠隔対戦の結果  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

する．なお，この実験では，被験者には，コヒーレンス映像表現におけるグラデーションの意味をあらかじめ教示した上で実験を行っている．この実験における，互いのロボット位置座標の変化を図 6.3(a)に示す．この場合には，対戦者両者の間合いが余り変化せずに，一定のまま試合が進行していくことが非常に多かった．そして実験者からは，“相手（人間）と試合をしている感覚はさほど強くない”，“相手の動きに対する予測が外れることが多い”などのコメントが得られた．つまり，コヒーレンス映像表現のみで対戦した場合には，同じ場所での対戦のように，相手の動きを予測し，間合いを形成することが困難であることが分かった．また，互いのロボット間距離のゆらぎについて調べると，互いのロボット間距離の時間変化を周波数解析した結果から，この対戦においては， $1/f$  ゆらぎが認められない（図 6.3 (c)）．そして，対戦者両者の自身のロボットの動きに先行して自己創出するコントローラ操作リズムの時間差のゆらぎについて調べた結果を図 6.3(b)に示す．同図では，互いのコントローラ波形のゼロクロス点間隔の時間差の変動を示してある．これより，対戦中，コントローラ操作リズムの時間差は，あまり変化していないことがわかる．また，この時間変動について，周波数解析を行い，ゆらぎについてさらに詳しく調べると，図 6.3 に示すように，ロボット間距離のゆらぎ，コントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎに  $1/f$  ゆらぎが認められた例は，100 試合中 1 試合もなかった（対戦者 M, I の対戦）．この結果は，実力が接近した被験者同士の他の 2 ペアや実力に差がある被験者同士の 2 ペアにおいても同様であった．さらに，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 の間で行われた 100 試合の対戦に関して，エントレインメントが生成されときの周期の分布について解析を行ったところ，エントレインメント生成時の周期は，全体の 95%が  $0.18[s]$  ( $5.6[Hz]$ )であり，この周期と  $0.16[s]$  ( $6.3[Hz]$ )以外では，エントレインメントが生成されていないことが分かる（図 6.4）．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 4.20 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

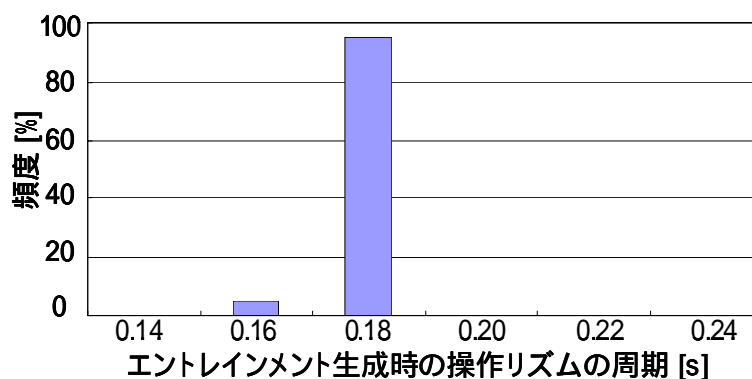


図6.4 コヒーレンス映像表現のみを用いた遠隔対戦におけるエントレインメント生成時の周期分布（実力の接近した被験者同士の対戦）

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ト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。以上の結果は、コヒーレンス映像表現のみでは、多様なエントレインメントによる間合いの生成、つまり、場の共創出に至らないことを示している。

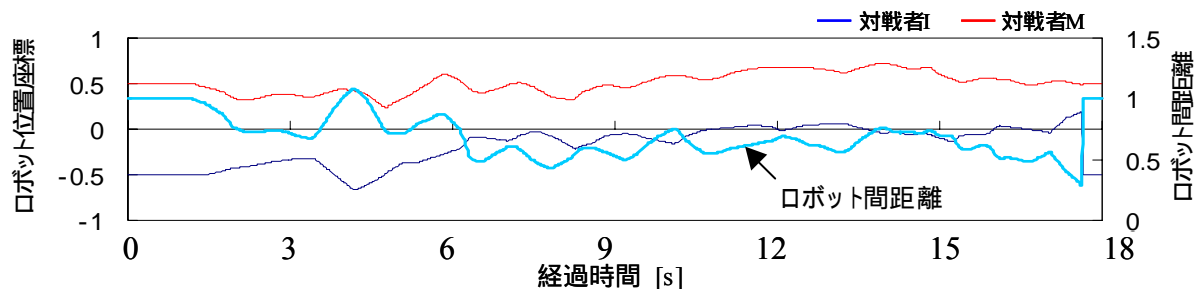
### 6.3.2. コヒーレンス映像表現とタイミング表現装置の両方を用いた遠隔対戦

次に、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用いた遠隔対戦を試みた。その結果、活発に自身のロボットを動かし、2 台のロボットの間で間合いの生成と崩壊を繰り返しながら対戦する様子が見られた（図 6.5(a)）。また、対戦者からは、“相手がいつ、どのように動いてくるのかという予測がしやすく、相手と同じ舞台で試合を進めているような感覚がある”、“ロボットを操作している相手と間合いを取り合っている試合している感覚がある”などのコメントが得られた。さらに、ロボット間距離のゆらぎについて解析すると、0.1-1[Hz]の周波数域で  $1/f$  ゆらぎが認められた（図 6.5(c)）。また、対戦中のコントローラ操作リズム周期の時間差は、あまり変化しない状態と大きく変化する状態を繰り返し、間欠的であることがわかる（図 6.5(b)）。さらに、コントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎについても、0.5-5[Hz]の周波数域において  $1/f$  ゆらぎが確認された（図 6.5(d)）。そして、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用いた遠隔対戦において、ロボット間距離のゆらぎ、コントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎの両方に  $1/f$  ゆらぎが認められた例は、100 試合中 42 試合あった（対戦者 M, I の対戦）。そして、実力が接近した被験者同士の他の 2 ペアや実力に差がある被験者同士の 2 ペアにおいても、100 試合中 40 試合程度で、 $1/f$  ゆらぎが認められた。

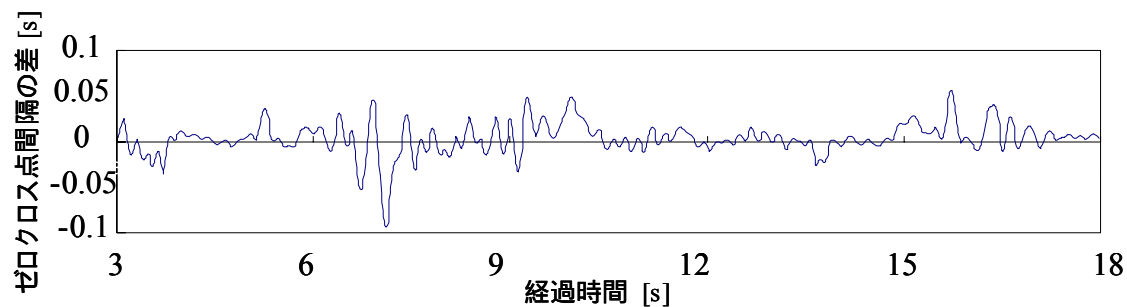
さらに、それぞれの実験条件におけるロボット間距離のゆらぎやコントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎに関するスペクトル図の近似直線の傾き  $b$  について、 $t$  検定を行った。その結果、対戦者 M, I の対戦において、ロボット間距離のゆらぎについてのスペクトルの傾き、コントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎについてのスペクトルの傾きの両方に、コヒーレンス映像表現とタイミング表現を組み合わせ用いた遠隔対戦とそれ以外の遠隔対戦、それぞれの間で、有意差が認められた（図 6.6）。以上の結果は、実力が接近した被験者同士の他の 2 ペアにおいても同様である。

そして、コントローラ波形にエントレインメントが生成されときの周期の分布について解析を行ったところ、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用いた対戦においては、同じ場所での対戦と同様に、エントレインメントが生成される周期の分布に幅があることが見出された（図 6.7）。なお、図 6.7 に示す解析結果は、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

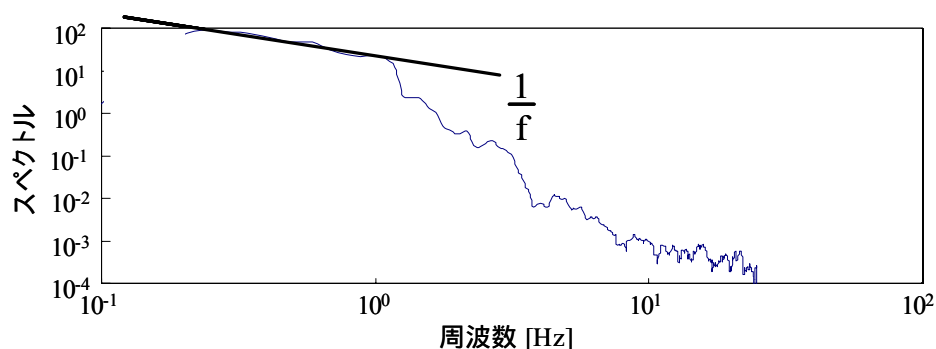
## 第6章 コヒーレンス映像表現と身体リズムの表現による間合いの生成支援



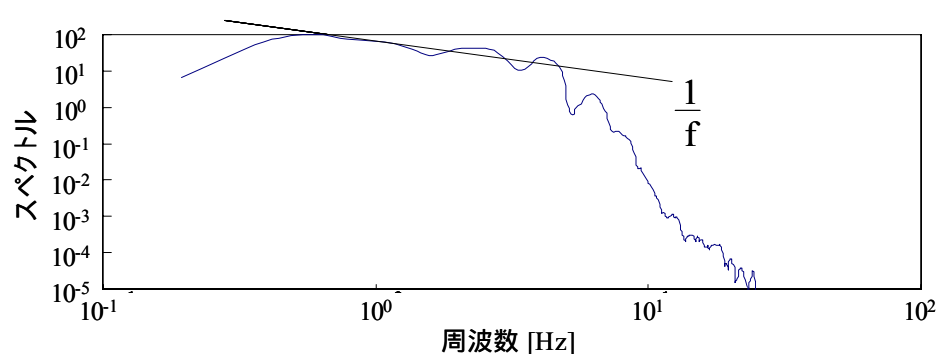
(a) 空間的関係性の時間変化



(b) 時間的関係性の時間変化



(c) 空間的関係性の周波数解析結果



(d) 時間的関係性の周波数解析結果

**図6.5 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  
て用いた遠隔対戦の結果（実力の接近した被験者同士の対戦）**

[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周期の頻度分布を示したものである。そして、同図のヒストグラムと同場所での対戦結果を示す図 4.20 の間で、等分散性の検定 (F 検

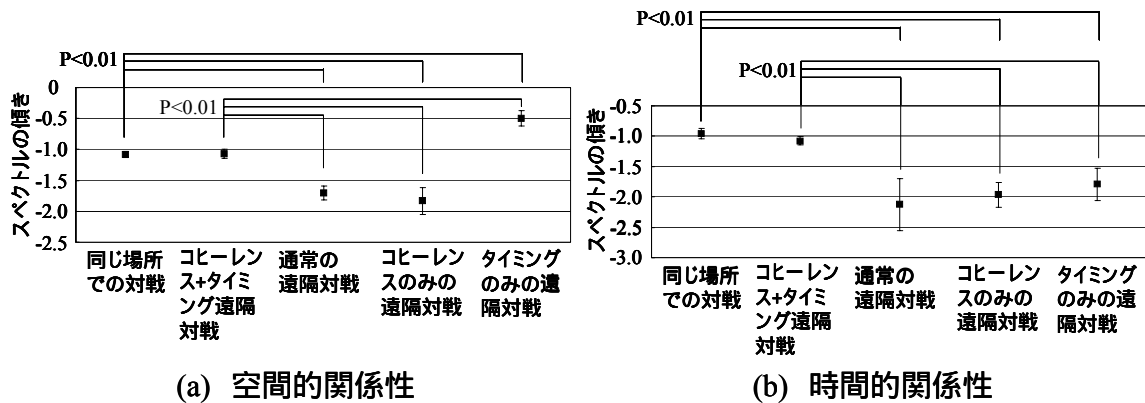


図6.6 スペクトルの傾きに関する解析結果（実力の接近した被験者同士の対戦）

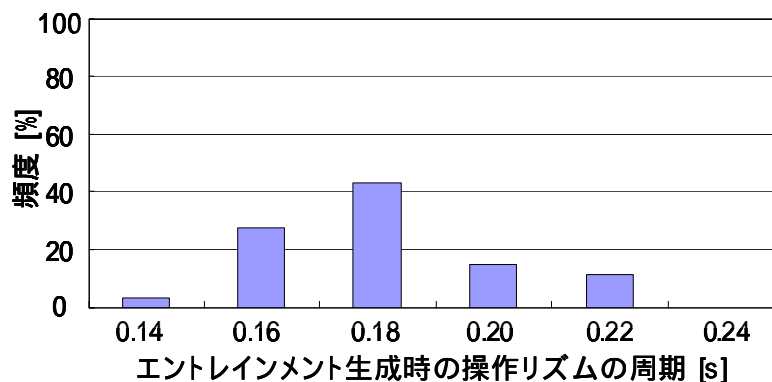
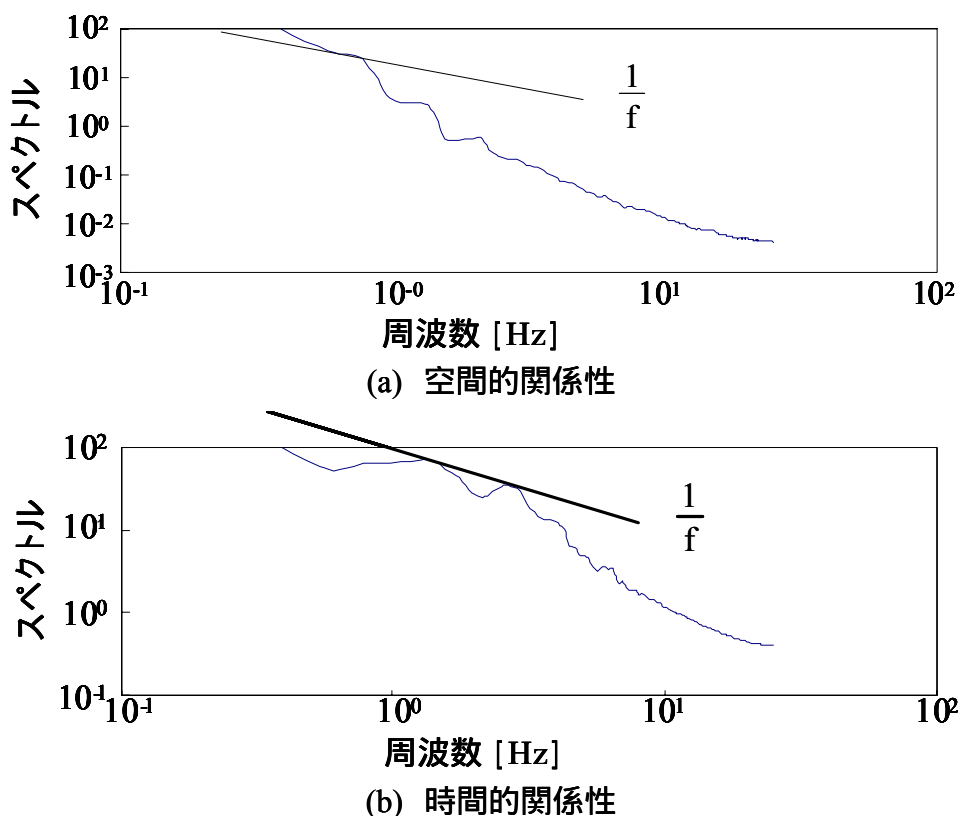


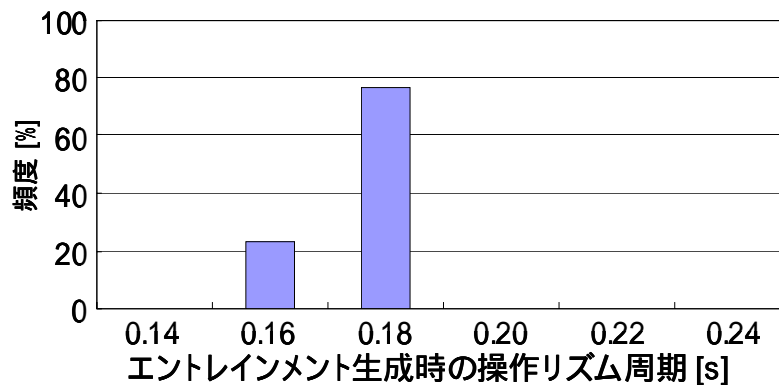
図6.7 コヒーレンス映像表現とタイミング表現装置を組み合わせで用いた遠隔対戦におけるエンタレインメント生成時の周期分布（実力の接近した被験者同士の対戦）

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, 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, 本実験と通常の同場所対戦では, 少なくともエンタレインメント生成時の周期分布の分散は, 等しいといえることができる. さらに, 図 6.7 と図 6.4 (コヒーレンス映像表現のみを用いた遠隔対戦の結果) 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, 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, 両方のペアで有意差が認められた (全て,  $p<0.01$ ). 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, 本実験とコヒーレンス映像表現のみを用いた遠隔対戦において, エンタ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, 多様な周期でエンタレインメントが生成されることを確認している.



**図6.8 時間遅れのあるコヒーレンス映像表現とタイミング表現装置を  
組み合わせて用いた遠隔対戦における空間的関係性と時間的関係性  
のゆらぎ（実力の接近した被験者同士の対戦）**

以上の一連の実験結果は、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ることで、離れた場所間でも、同じ場所での対戦と同様に場が共創出されることを示すものである。ここで、コヒーレンス映像表現については、リズムコントローラ波形が、ロボットの移動に、この波形の1周期分先行しているため、表現されるコヒーレンスの度合いが、ロボットの動きに先行した自分と相手の関係であるということが重要であるようにも思われる。この点に関して、ロボットの動きに先行したコントローラ操作リズムのコヒーレンスの度合いでなければ、同じ場所での対戦のような多様なエンタテインメントによる間合いが形成されないのかどうかを調べることにした。具体的には、タイミング表現装置とコヒーレンス映像表現を組み合わせた遠隔対戦において、コヒーレンス映像表現のみを、リズムコントローラ波形の1周期程度の時間に相当する0.2[s]遅らせて表現する実験を行った。その結果、実験者からは、“人間が操作しているロボットと試合をしている感覚が弱くなり、同じ場所での対戦と同じように、試合全体の流れ（試合展開）を感じながら試合を行うことができなくなる”とのコメントが多く寄せられた。さらに、ロボット間距離のゆらぎやコントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎについて解析を行ったが、 $1/f$  ゆらぎを確認することはできなかった（図6.8）。また、この場合には、



**図6.9 時間遅れのあるコヒーレンス映像表現とタイミング表現装置を  
組み合わせて用いた遠隔対戦におけるエントレインメント生成時  
の周期分布（実力の接近した被験者同士の対戦）**

図 6.9 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ていないことも分かった。この結果は、遠隔対戦で表現されるコントローラ操作リズムのコヒーレンスの度合いが、ロボットの動きに先行していなければ、同じ場所での対戦のように、多様なエントレインメントによる間合いを生成する（場を共創出する）ことが困難であることを示している。

#### 6.4. 考察

本章では、遠隔地間で場の共創出を支援することを試みた。その結果、タイミング表現装置による身体行為のリズム表現と身体行為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）を組み合わせることにより、遠隔地間においても、多様なエントレインメントによる間合いが生成され、場が共創出されることを示した。ここで、相手の身体リズムの表現は、相手の行為に関する情報の表現であり、身体行為のコヒーレンス度合いの表現は、互いの関係に関する情報の表現である。したがって、間合いの取り方に対する拘束が弱く、予め場が共有されていないコミュニケーションにおいて、場を共創出するためには、相手の行為に関する情報と互いの関係に関する情報の両方が必要になることが分かる。ここで、ポイントになるのが、先行性である。つまり、タイミング表現装置による身体行為のリズム表現というのは、映像画面上に表現される意図した行為に先行して創られる無意識的な身体行為（身体図式を介して意図した行為を創出することに伴って創出される事前動作、つまり、リズムコントローラの操作）である。そして、コヒーレンス映像表現も、意図した行為に先行する身体行為（リズムコントローラの操作）のコヒーレンス度合いであるので、映像画面上に表現される互いの意図した行為の関係の先行情報である。したがって、これらの情報は、相手の行為や、互いの関係を予測するために使

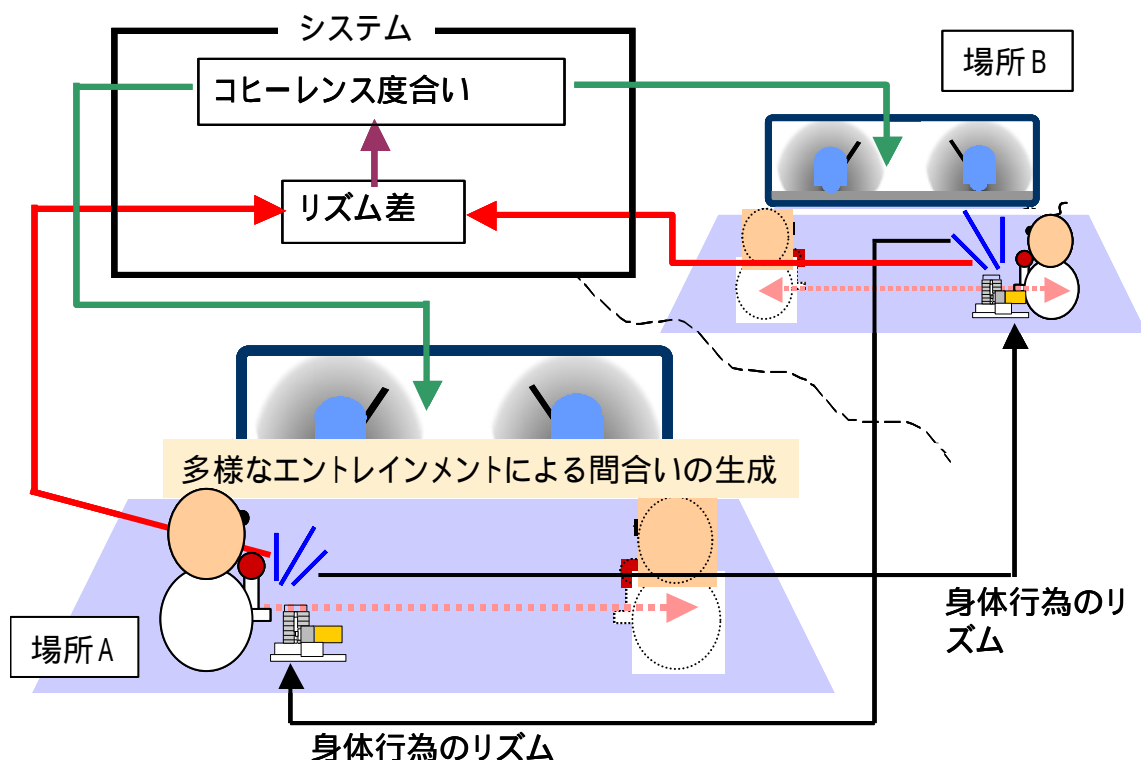
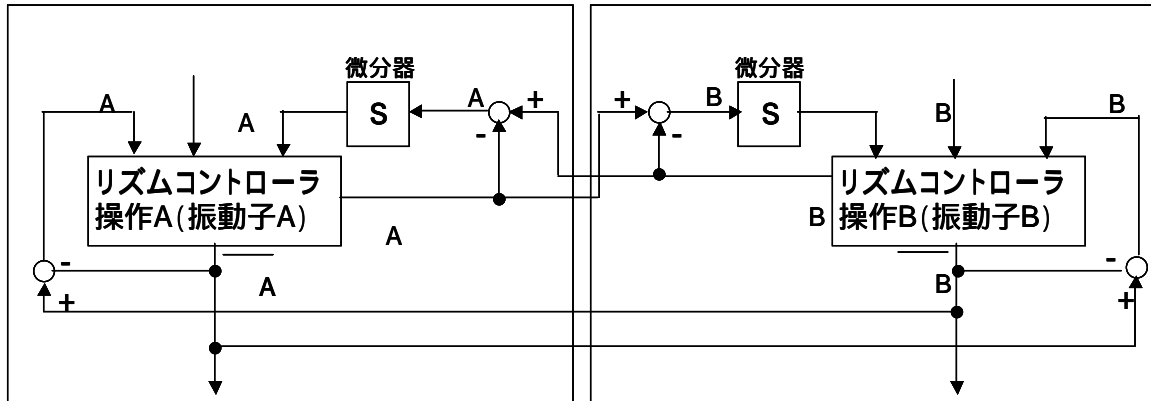


図6.10 コヒーレンス映像表現の模式図

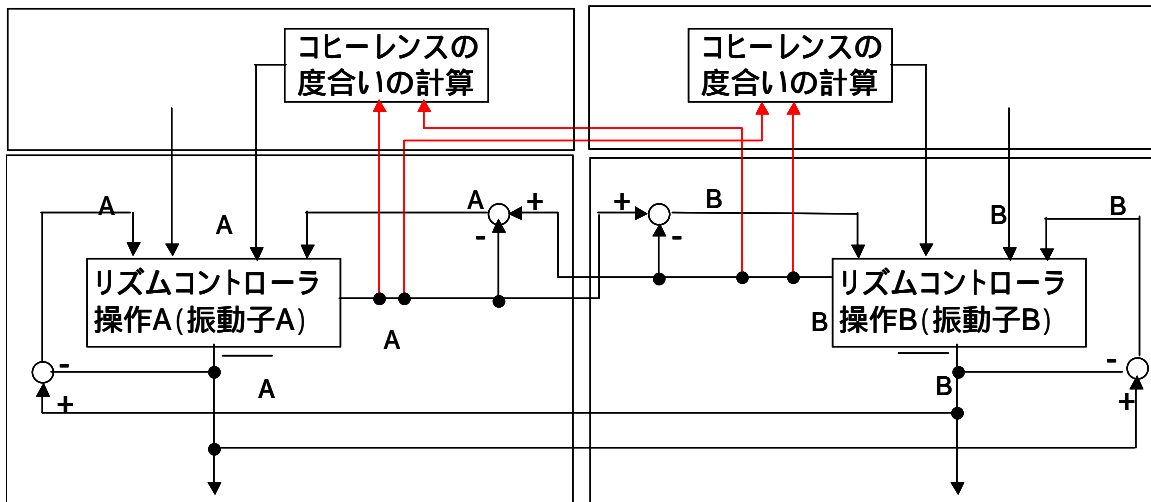
われる情報ということになるであろう。このことは、場を共創出するためには、互いの行為の予測と関係の予測の両方が必要になることを示すものである。

次に、相手の身体行為のリズムと身体行為のコヒーレンス度合いという情報について、少し別の観点から考えてみることにする。ここで、前者の身体行為のリズム表現は、(相手の)身体から直接発信されている情報の表現ということになる。そして、この情報は、同場所対戦においては、コントローラ操作音として、相手に発信されることになる。一方、後者の身体行為のコヒーレンス度合いという情報は、前者のように身体から直接発信されている情報ではない。これは、同場所対戦においても、同様である。本章で行った実験の結果を踏まえれば、場の共創出には、この情報が必要ということになるが、そうであるとするならば、同場所対戦において、この情報は、互いの身体が同じ場所に居合わせることによって、互いの身体のはたらきにより生成されていると考えることができる。したがって、本章の実験結果は、遠隔地間で場を共創出するためには、相手の身体から直接発信されている情報と、互いの身体のはたらきにより創られる情報の両方を表現する必要があることを示していることにもなる。さらにいえば、本章で行ったコヒーレンス映像表現というのは、通常、互いの身体が同じ場所に居合わせれば創られる情報である身体行為のコヒーレンス度合いが、互いの身体が同じ場所に居合わせない遠隔対戦では生成されないもので、これをシステムが肩代わりして生成し、対戦者に示しているということになる(図6.10)。

$\omega$  : 固有振動数     $\omega_c$  : みかけの振動数     $\phi$  : 位相     $\Delta\phi$  : 位相差  
 $\Delta\omega$  : みかけの振動数の差     $C$  : コヒーレンスの度合い



(a) 一領域的なモデル



(b) 二領域的なモデル

図6.11 多様なエンタテインメント創出に関するモデル

この場合、同場所対戦において、どのようにして、身体行為のコヒーレンス度合いという互いの関係の情報が創られているのかということが問題となる。身体行為のコヒーレンス度合いとは、互いのリズム波形の位相差の時間変化に関する情報（位相差が時間変化しないことが、コヒーレンスの生成を意味する）であるから、互いの身体行為のリズムの位相に関する情報が伝達されれば、この情報は生成できることになる。しかし、このような方法（図 6.11(a)）で、コヒーレンス度合いを被験者が生成していると考えると、本研究結果に矛盾することになる。それは、もしもこれが正しいとすると、相手の身体行為のリズムの位相（図 6.11 の  $\phi$ ）や周期（同図の“みかけの振動数  $\omega_c$ ”）を表現するタイミング表現装置を用いるだけで、多様なエンタテインメントが生成され（同図において、互いの“みかけの振動数  $\omega_c$ ”が、多様な周期で引き込むこと）、場が共創出されることになるからである。つまり、人間は、コヒーレンス度合いの情報を、単純に位相差を時間微分すること

によって計算しているだけではないように思われる．したがって，多様なエントレインメントの生成は，図 6.11(a)に示すような，一領域的なモデルでは説明できない現象ということなる．ここで，本章での実験結果にしたがえば，多様なエントレインメントの生成には，リズムの位相差 や周期差 ，リズムのコヒーレンス度合い が必要になる．よって，図 6.11(b)に示すようなモデルが，多様なエントレインメントの生成を説明するモデルとして要請されることになる．つまり，人間の内部では，リズムの位相差の情報とリズムのコヒーレンス度合いの情報は，別々の場所で互いに独立に生成されており，リズムの位相に関する情報が，それぞれの場所に二手に分かれて入力されるという構成になっているのではないかと推察される．これは，多様な周期によるエントレインメントの生成（場を共創出）を説明するには，二領域的なコミュニケーションが必要になることを示唆するものである．

このことをさらに検討するため，コヒーレンス情報がどのようにしたら生成可能になるのかについて，再度考えることにする．先に，同場所対戦において，この情報は，身体が同じ場所に居合わせることによって，互いの身体のはたらきにより生成されていると述べたが，仮にそうであるとすれば，このようなことを遠隔対戦においても実現することができれば，遠隔対戦においても場を共創出することが可能になるはずである．そこで，これを検証するための実験を行うことにした．この実験を行うためには，遠隔対戦において，離れた場所にいる相手の身体を，自分の身体が存在する現場に位置づけることが必要になる．そこで，本研究では，人間の身体と存在的に非分離であり，人間の存在感や存在位置を喚起させるはたらきを持つ身体の影響[86]に着目し，離れた場所にいる相手の身体の影響を自身のいる空間に投影し，相手の存在を自身のいる現場に位置づけて遠隔対戦を行うことで，互いの異なる現場を統合させた．具体的には，三輪らによって開発された，遠隔地間で互いの身体の影響を送りあうことを可能とした WSCS (Waseda Shadow Communication System) [86][87][88]に，剣道ロボットシステムを組み込み，これを実現させた．このシステムの構成を図 6.12 に示す．そして，タイミング表現装置を用いた身体行為のリズムの伝達とこのシステムを用いた影の提示の両方を組み合わせて，遠隔剣道対戦を行った（図 6.13）．その結果，対戦者から，“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．このことは，対戦相手の影を表現することで，互いの異なる現場が統合され，共存在感が創出されることを示している．さらに，“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取ることができる”とのコメントも得られている．そして，対戦者 M, I の対戦において，図 6.14 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．また，この対戦において，ロボット間距離のゆらぎ，コントローラ操作リズム周期の時間差のゆらぎの両方に  $1/f$  ゆらぎが認められた例（図 6.15）は，100 試合中 47 試合あった．なお，

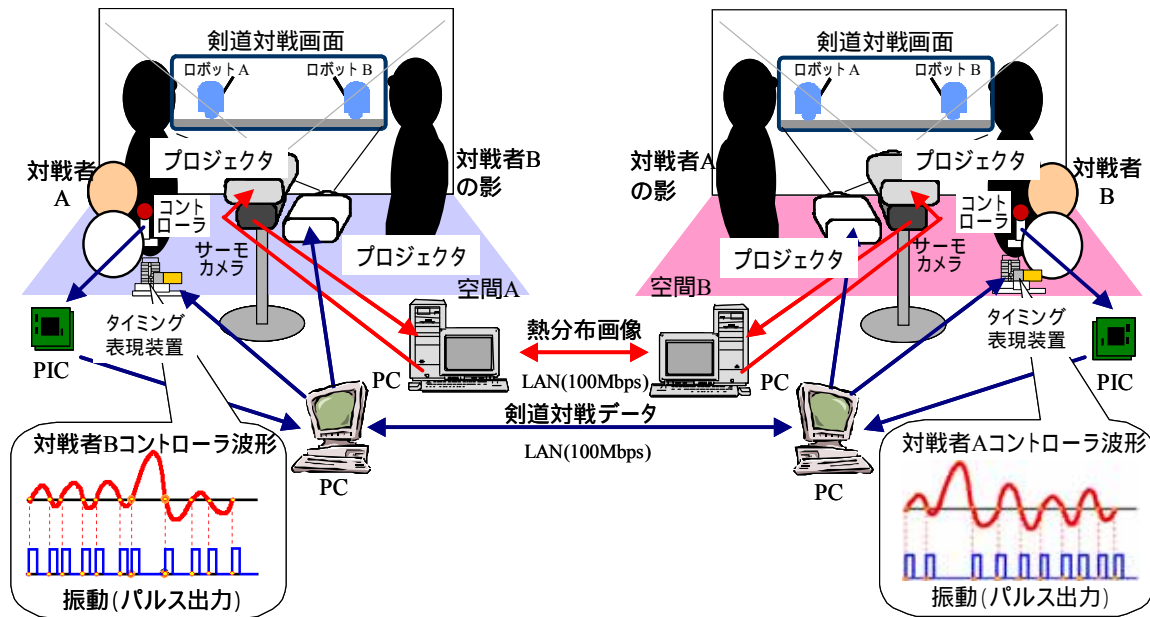


図6.12 影システム（WSCS）を組み込んだ剣道ロボットシステムの構成



図6.13 身体の影を表現した遠隔剣道対戦の様子

対戦者 M と I の実験結果とほぼ同様な結果が、他の対戦者のペアでも得られている。これらの結果は、相手の影を表現することで共存在感を創出させるとともに、相手の身体行為のリズムを伝達すると、通常の同じ場所での対戦と同じように、多様なエンタテインメントによる間合いが生成される、つまり場が共創出されることを示すものである。なお、本章でこれまで述べたように、コヒーレンス映像表現と相手の身体行為のリズム表現の組み合わせにおいても、遠隔地間で多様なエンタテインメントによる間合いが生成される、つまり場が共創出される。したがって、これらの結果を総合すると、コヒーレンス映像表現は、存在的なつながりの表現（共存在感の創出）に関係しており、身体と身体とが直接的に伝え合う存在的なコミュニケーションを支援しているものと考えられる。一方、身体行為のリズム表現は、先に述べたように映像画面上に表現される意図した行為の予測に関係しているので、行為的なコミュニケーションを支援しているものと考えられる。

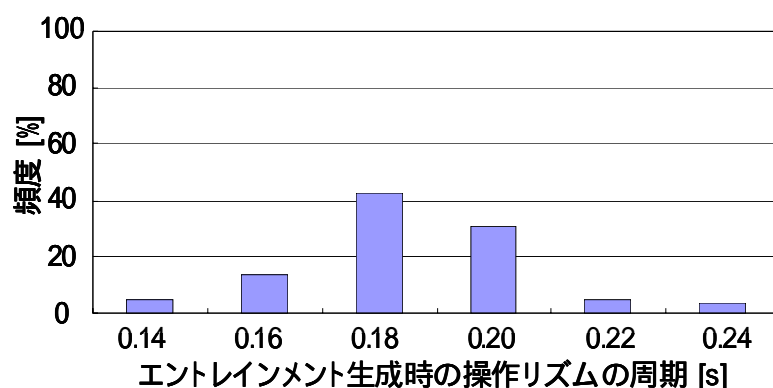


図6.14 影の表現とタイミング表現装置を組み合わせた遠隔対戦におけるエンタレインメント生成時の周期分布  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

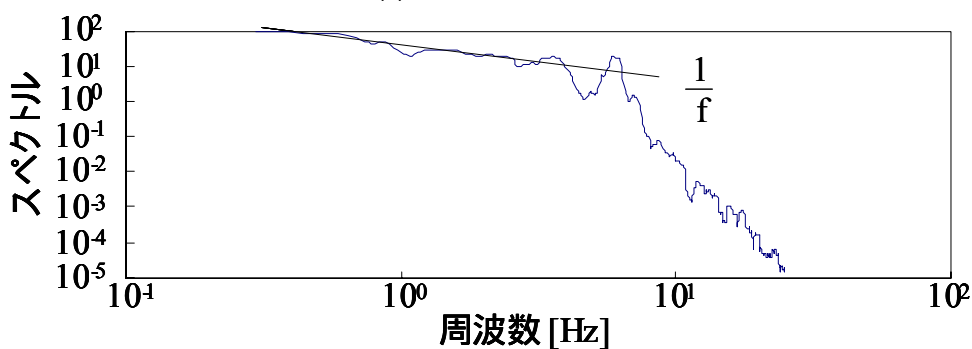
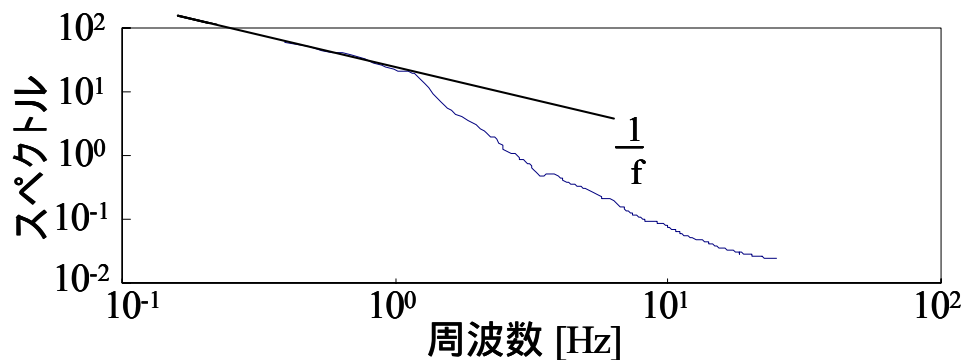


図6.15 影の表現とタイミング表現装置を組み合わせた遠隔対戦における空間的關係性と時間的關係性のゆらぎ  
(実力の接近した被験者同士の対戦)

以上をまとめると、本研究結果は、行為的コミュニケーションと存在的コミュニケーションの両方が成立することで、多様なエンタレインメントによる間合いの生成、つまり場の共創出が起ることを示している。これは、二領域的なコミュニケーションにより、場が共創出される可能性があることを示すものである。ここで、このような場の共創出が起きるときに見られる多様なエンタレインメントは、存在

の位置づけが関わっていることと通常の非線形振動子の引きこみ現象を説明するモデルである位相モデルで説明できないという意味で、1.3 節で述べた従来研究や本論文における協調ゲームシステムでの実験のような場の共創出が起きない一領域的なコミュニケーション（行為的コミュニケーション）において見られるエントレインメントとは、質の異なるものである。そこで、本研究で発見した存在の位置づけを伴って生成される多様な周期でのエントレインメントを、従来の特定周期のエントレインメントと区別し、存在的エントレインメントとして提唱したい。なお、二重性に基づくエントレインメントの生成モデルとして、第 1 章で述べた三宅らによる Walk-Mate[72][73][74]がある。このシステムでは、人間の歩行における固有振動数に合わせて、ロボット側の固有振動数を変更することで、エントレインメントの生成を実現していることに大きな特徴がある。しかし、人間とロボットの間で創るべき位相差（目標とする位相関係）を予め設計者が与えており、それが、人間とロボットのインタラクションを介して変更されることはないので、一度、両者の間で創られたエントレインメントを壊すことは困難であるように思われる。したがって、Walk-Mate では、特定周期のエントレインメントを生成することは可能であるが、本研究における剣道ロボット対戦で見られるような多様な周期でのエントレインメントを生成することは、難しいように推察される。今後は、本研究結果を踏まえて、二領域的なコミュニケーションに基づく存在的エントレインメントにおいて、どのようにして多様な周期での引きこみ現象が実現されているのか、そのダイナミクスについて、詳細に検討していきたいと考えている。

## 6.5. まとめ

本章の内容をまとめると以下ようになる。

- (1) 離れた場所での対戦において、場を共創出させることを目指し、互いのコントロール操作リズムのコヒーレンスの度合いを映像表現する手法を開発した。
- (2) 各人の身体行為のリズムとそのコヒーレンスの度合いの両方を表現することにより、遠隔対戦においても、同じ場所での対戦と同じように、多様なエントレインメントや 1/f ゆらぎが生成され、場が共創出されることを確認した。
- (3) 遠隔地間で場を共創出させるためには、相手の行為に関する情報と互いの関係に関する情報の両方が必要になることを明らかにした。
- (4) 遠隔地間で場を共創出させるためには、相手の身体から発信される情報と互いの身体のはたらきにより創られる情報の両方を表現する必要があることや、コヒーレンス映像表現が、存在的なつながりの表現に関係していることをについて考察した。
- (5) 多様なエントレインメントの生成が行為的コミュニケーションのみでは説明できない現象であることを見出した。

- (6) 行為的コミュニケーションと存在的コミュニケーションからなる二領域的なコミュニケーションにより場が共創出されている可能性があることについて考察した。そして、このような場の共創出に伴って生成される多様な周期でのエンタテインメントを、存在的エンタテインメントと提唱した。



## 第 7 章 結論

### 7.1. 本論文の結論

背景や価値観の異なる人々が、目標や夢を共有し、一緒にそれらを実現していく創造的な共同活動のことを共創と呼ぶ。このような共創活動を実現するためには、現場に自身が存在することによって、自身の内面に立ち現れてくる全体的な状況のことを指す“場”を共創出する必要がある。一方、記号化可能な明在的情報のみを伝達し合う設計手法に基づいている現行の IT を用いた遠隔コミュニケーションシステムでは、互いの間で場を共創出することが困難である。

そこで、本研究では、場の共創出に関して、第 1 章の研究目的で述べたように、以下の二つの内容を目的として研究を行った。

- (1) 間合いとエンタテインメントとの関係を調べ、場の共創出とエンタテインメントの関係を明らかにすること
- (2) 遠隔地間で場の共創出を支援する手法について検討すること。

まず、第 1 章では、序論として本研究の背景や上記に示した二つの研究目的を述べるとともに、従来研究と本研究の違いについて説明し、本研究の位置づけを行った。

続く、第 2 章から第 4 章までにおいて、上記の(1)の内容について研究を行った。第 2 章では、間合い生成に関係している身体リズムとして、意図した行為に先行する無意識的な身体行為（身体図式を介して意図した行為を創出することに伴って創出される事前動作）のリズムに着目し、これをリズム表現させるリズムコントローラを開発した。そして、このコントローラを用いた二つのアバターを介した実験システムの開発を行った。一つは、予め場が共有されている（場の共創出が起きない）条件で間合いとエンタテインメントの関係を調べるための協調ゲームシステムである。もう一つは、予め場が共有されていない（場の共創出が起きる）ときの間合いとエンタテインメントの関係を調べるために開発した剣道ロボットシステムである。第 3 章では、協調ゲームシステムを用いて、予め場が共有されている（場の共創出が起きない）条件において、間合いとエンタテインメントの関係について調べた。その結果、予め場が共有されている際には、タスク（間合い生成）の難易度によらず、リズムコントローラ波形には、非線形振動子（位相モデル）の引きこみ現象で見られるような特定周期のエンタテインメントしか生成されないことを示した。さらに、このようなエンタテインメントが、互いの予測を共有するために生成

されている可能性があることを明らかにした。第 4 章では、剣道ロボットシステムを用いて、予め場が共有されていない（場の共創出が起きる）ときの間合いとエントレインメントの関係について調べた。その結果、人間には多様な周期でエントレインメントを創出する能力があることをはじめて発見した。そして、このエントレインメントの多様性が、場の共創出に関わっていることを示した。さらに、この多様な周期での引きこみ現象が、通常の非線形振動子（位相モデル）の理論では、説明ができない現象であることを示し、この多様なエントレインメントは、第 3 章で述べた場の共創出が起きないときに生成されるエントレインメントとは、質が異なる可能性があることを明らかにした。

次に、第 5 章と第 6 章では、上記の(2)の内容について研究を行った。第 5 章では、離れた場所にいる相手の身体から発信されるコントローラ操作リズムを力触覚刺激として表現するタイミング表現装置を開発した。しかし、本装置のみを用いた遠隔対戦では、特定周期のエントレインメントしか生成されず、場の共創出が起きないことを示した。そして、遠隔地間で場の共創出を実現するためには、行為だけでなく、互いの関係の予測を支援する手法が必要になることを考察した。そして、互いの関係の予測を支援する手法として、対戦中に創られる互いの関係であるリズムコントローラのコヒーレンス度合いをリアルタイムに提示する手法を提案した。第 6 章では、互いの身体行為のリズムのコヒーレンスの度合いを映像表現する手法（コヒーレンス映像表現）を開発した。その結果、タイミング表現装置とコヒーレンス映像表現を組み合わせた遠隔対戦で、多様なエントレインメントによる間合いが生成されることを明らかにした。このことから、遠隔地間で場を共創出させるためには、相手の行為に関する情報と互いの関係に関する情報の両方が必要になることを示した。さらに、互いの身体行為のリズム表現と相手の身体の影の提示による共存感の創出により、遠隔地においても場が共創出されるという結果から、コヒーレンス映像表現が、存在的なつながりの表現に関係していることを明らかにした。以上により、場の共創出には、行為的コミュニケーションと存在的コミュニケーションの両方が必要になることについて考察した。そして、これまでの結果を総合して、多様なエントレインメントの創出を伴う二領域的なコミュニケーションにより場が共創出されている可能性があることを示した。そして、このような存在の位置づけを伴って生成される多様な周期でのエントレインメント現象を、従来のエントレインメントとは区別し、存在的エントレインメントとして提唱した。

以上より、本論文の主要な成果をまとめると次のようになる。まず、上記の(1)の研究目的に対する成果は、

- (a) 予め場が共有されている状況において、エントレインメントは、互いの予測を共有させ、互いの表現を合わせるために生成されることを示し、エントレインメントがコミュニケーションにおいて果たす役割を明らかにしたこと。

- (b) 人間には多様な周期でエンタテインメントを創出する能力があることを発見するとともに、場の共創出に伴って多様な周期でのエンタテインメント（存在的エンタテインメント）が生成されることを示し、場の共創出が起きるときと起きないときでは、エンタテインメントの質が異なることを明らかにしたこと。

次に、上記の(2)の研究目的に対する成果は、

- (c) 二領域的なコミュニケーションにより場が共創出されている可能性があること明らかにし、遠隔地間において場の共創出を支援するコミュニケーションシステムの設計指針を得たこと

以下、本研究の二つの研究目的に対応させる形で、「1. エンタテインメントと場の共創出」、「2. 遠隔地間での場の共創出の支援手法」という2つの観点から、上記の本研究で得られた主要な成果について、さらに詳しく説明し、本論文の内容をまとめることにする。

### 7.1.1. エンタテインメントと場の共創出

本研究では、外部から場が限定された状況で行われるコミュニケーションにおいて、どのような状況でエンタテインメントが生成されているのか調べ、これが、過去から未来を予測する際に、その予測を共有させ、互いの表現を合わせるために生成されていることを示した。このことは、相手の行動予測とエンタテインメントには、関係があることを示すものである。つまり、あくまで予め場が共有された条件での結果であるが、エンタテインメントの生成は時間的な間（ま）を合わせた同時的なコミュニケーションを成立させる上で必要な要件になっていることを明らかにした。この知見は、エンタテインメントの生成を促すことができれば、互いの予測が合致した表現を支援できる可能性があることを示すものであり、人間同士のコミュニケーションにおける予測を支援する技術として今後発展させられる可能性がある。

さらに、外部から場を限定しないとき、すなわち、場の共創出が起きるときのコミュニケーションにおいて、多様な周期でエンタテインメントが生成されることを見出した。つまり、人間には、多様な周期でエンタテインメントを生成する能力があることを示した。なお、多様な周期での引きこみ現象は、これまでの引きこみ現象の研究、特にこれまでの人間同士のコミュニケーションにおける引きこみ現象の研究においては、これまでに報告されていない現象である。そして、このようなエンタテインメントの多様性が、場の共創出に関係していることを示した。これは、予め場が共有されていて、場の共創出が起きない際には、通常为非線形振動子（位相モデル）の引きこみ現象のように、特定周期のエンタテインメントしか起きないことから明らかである。また、エンタテインメントの多様性が場の変化に応じた

間合いの生成に関わっているということは、場のコンテキスト（状況的意味）にエンタテインメントが関係することを意味するものである。

なお、本研究では、これまでの引きこみ現象（自己組織化現象）の研究で前提とされていた 2 つの条件（システムの均質性や固定（限定）された境界条件（拘束条件））が、成り立たない状況でこの現象について調べたことになる。そして、この場合、多様な周期で引き込みが起こり、それが生成・崩壊を繰り返すこと、さらには、このような引き込み現象が、一領域的なモデルでは説明できない現象であることを示した（第 6 章参照）。さらに、この現象を引き起こすリズムコントローラで創られるリズム（振動子）の特徴として、以下の 3 つがあることが分かった。

- （１）安定したリミットサイクル軌道をもたないこと。
- （２）位相から振幅を決定することができないこと。つまり、位相と振幅が独立していること。
- （３）固有振動数が時間変化する可能性が高いこと。

さらに、この振動子が結合した際に見られる引きこみ現象の特徴として、以下の 3 点が挙げられることを示した。

- （１）様々な周期で引き込みが起きること
- （２）コヒーレンスの生成、崩壊を繰り返すこと
- （３） $1/f$  ゆらぎが生成されること。

以上の特徴は、ここで見られる引き込み現象を、通常为非線形振動子の引き込み現象を記述するモデルである位相モデルでは、記述できないことを示している。

つまり、本研究では、予め場が共有されていて、場の共創出が起きないときに生成される特定周期のエンタテインメントと、予め場が共有されておらず、場の共創出が起きるときに生成される多様な周期でのエンタテインメントでは、エンタテインメントの質が異なることを明らかにした。そして、後者のエンタテインメントに関しては、第 6 章で示したように、存在の位置づけが関わる二領域的なコミュニケーションによって生成されることから、このエンタテインメントを、従来研究されていた前者のエンタテインメントと区別し、存在的エンタテインメントと呼ぶことにした。本研究において、場の共創出が起きるときに生成される存在的エンタテインメントは、場の共創出が起きないときに見られる通常のエンタテインメントと、エンタテインメントの質（エンタテインメントが生成されるダイナミクス）が異なることを明らかにしたことは、場の共創出の原理を解明する上で、重要な意味を持つように思われる。

### 7.1.2. 遠隔地間での場の共創出の支援手法

場の共創出が、存在の伝達による二領域的なコミュニケーションにより実現されることが、三輪らの影システム（WSCS）を用いた研究[86][87][88]により明らかにされているが、本論文では、場の共創出について、新たに以下の内容を明らかにした。

まず、1つは、前節で説明したが、場の共創出に伴って多様な周期でエントレインメント（存在的エントレインメント）が生成されることである。

次に、場の共創出において、相手の意図した行為に先行する無意識的な身体行為が必要になることを示した。つまり、相手の行為を予測するためには、意図した行為そのものを表現するだけでは不十分であり、意図した行為とそれに先行する無意識的な身体行為の両方を二重的に表現することが必要になることということである。このことは、場の共創出を支援するためには、このような意図した行為に先行する無意識的な身体行為（身体図式を介して意図した行為を創出することに伴って創出される事前動作）をシステムに取り込むことが必要なることを示しており、この知見は、場の共創出を支援するコミュニケーションシステムの設計指針として、重要な意味を持つと考えられる。

さらに、本研究では、一領域的なコミュニケーションでは、場の共創出が起きないことを実験的に示した。すなわち、行為的なコミュニケーションのみでは、場の共創出を実現できないということである。ここで、ポイントになるのは、行為を二重的に表現したとしても、場が共創出されないことである。

そして、最終的に、本研究では、場を共創出するためには、相手の行為に関する情報と、互いの関係に関する情報の両方が必要になることを示した。そして、互いの関係に関する情報の表現が、存在の表現に関係している可能性があることを示し、行為的なコミュニケーションと存在的コミュニケーションからなる二領域的なコミュニケーションにより、場が共創出されることを実験的に明らかにした。この知見も、場の生成を支援するコミュニケーションシステムの設計指針として、重要な意味を持つだろう。

また、本研究では、仮想空間（映像空間）上で、場を共創出させるための具体的な方法を示した。すなわち、自分の意図した行為（仮想空間上のアバターの動き）に先行して創られる身体行為のリズムと、その身体行為のコヒーレンス度合いをあわせて表現するという手法である。ここで、ポイントとなるのは、第6章で考察したように、互いの身体が同じ場所に存在すれば、身体のはたらきを介して創られているであろう互いの関係に関する情報を、システムが肩代わりして生成し、参加者それぞれに示している点にある。つまり、参加者各人の身体のはたらきをシステムが代行することにより、仮想空間を共有した遠隔コミュニケーションにおける場の共創出を実現しているということである。この知見は、映像空間中のアバターを介したコミュニケーションシステムの設計指針になるように思われる。

何度も繰り返しになるが、場の共創出を支援するためには、多様なエンタテインメント（存在的エンタテインメント）を創出する必要がある。このためには、一度創られたエンタテインメントを壊すということが不可欠になる。このような観点で捉えた場合、本研究で開発した存在的エンタテインメントの生成手法は、エンタテインメントを創るだけでなく、壊せるというところにポイントがあり、この点が、これまでのエンタテインメントの創出を促すインタフェースと比較した際に、画期的なことではないかと考えられる。つまり、これまでのインタフェースは、エンタテインメントの生成そのものは支援できるが、この一度できてしまったエンタテインメントを壊すはたらきがほとんどない。したがって、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、予め互いの意思が共有されているような限定された状況、つまり、本研究における協調ゲームのような予め場が共有されている状況にしか、対応できないのではないかと推察される。したがって、以上の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。

## 7.2. 今後の課題と展望

本研究では、共創活動を実現する上で重要となる場の共創出の問題について研究し、場が共創出される際には、存在的エンタテインメントが生成されること、さらには、二領域的なコミュニケーションにより場が共創出されることを示した。そして、遠隔地間で場を共創出するための設計要件を実験的に明らかにし、その具体的な方法を示した。最後に、本研究において、現時点では未解決な問題や今後の方向性について述べる。

### （１）存在的エンタテインメントが生成されることの意味について

本研究では、剣道対戦において、場の変化に応じた間合いが創られる際に、存在的エンタテインメント（多様な周期でのエンタテインメント）が生成されることを明らかにした。しかし、特定周期ではなく、多様な周期でエンタテインメントが生成されることが、コミュニケーションにおいてどのような意味を持つのか、本研究では明確にされていない。ここで、場の変化に応じた間合いの生成により、多様なエンタテインメントが生成されているので、多様な周期でエンタテインメントが生成される理由として、多様なロボット間距離で間合いを生成することを実現するためということが考えられる。つまり、間合い生成時のロボット間距離とリズム周期には、何らかの関係があると考えられる。仮にそうであるとすれば、多様なロボット間距離で間合いを生成するために、多様な周期で引きこみを創ることが必要になる。剣道対戦において、間合いが近い場合には、相手の変化に瞬時に対応するため、

小刻みに動く必要があると考えられる．これは，身体行為のリズムの周期が早くなることを意味している．一方，間合いが遠い場合には，そのような必要がないので，ゆったりと動くのではないかと考えられる．解析を行ったデータ数が多くないので，断言することは憚られるが，実際，対戦者 M と I の対戦においては，エントレインメント生成時のリズム周期とその時のロボット間距離の間に，正の相関を示す傾向があることが分かっている．そこで，今後は，この関係について詳細に調べ，多様な周期でのエントレインメント（存在的エントレインメント）の生成がコミュニケーションにおいて果たす意味を明らかにしていきたいと考えている．

## （2）存在的エントレインメントの生成のダイナミクスについて

本研究では，人間同士のコミュニケーションにおいて存在的エントレインメント（多様な周期でのエントレインメント）が生成されることを発見し，これを遠隔地間で創出するための設計要件を実験的に明らかにした．しかし，そのダイナミクスについてはよく分かっていない．これを調べる方法として，位相差の時間変化やリターンマップについて調べるのが有効である．しかしながら，本研究では，リズムコントローラ波形の位相を連続的に定義できていないので，これらを調べるのが困難である．リズムコントローラ波形のようなその周期や振幅が複雑に変化する波形においては，一般に，連続的に位相を定義することは困難であるが，Hilbert 変換を用いれば，このような波形においても瞬時位相を定義することができる可能性がある[99]．そこで，今後は，コントローラ波形の Hilbert 変換を試み，エントレインメントのダイナミクスについても検討していきたい．

また，本研究で発見した存在的エントレインメント（多様な周期でのエントレインメント）に現象的に近いものとして，オンオフ間欠性がある[100][101][102]．これは，例えば，以下に示す，ローレンツ方程式に従う二つの系  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $(x_2, y_2, z_2)$  を結合した系（図 7.1）において，同期と非同期の間を変動することが見られるというものである．つまり，図 7.2 に示すように， $x_1 - x_2$  が 0 くらいの値を取る状態（オン状態）が長く続き，ときおり間欠的に非 0 の大きな値を取る状態（オフ状態）が現れるというものである．また，間欠性カオスでは， $1/f$  型のスペクトルを持つことが知られている[103]．したがって，剣道対戦で見られた引き込み現象は，カオス振

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \sigma(-x_1 + y_1) + g(x_2 - x_1) \\ \dot{y}_1 &= -x_1 z_1 + r x_1 - y_1 \\ \dot{z}_1 &= x_1 y_1 - b z_1 \\ \\ \dot{x}_2 &= \sigma(-x_2 + y_2) + g(x_1 - x_2) \\ \dot{y}_2 &= -x_2 z_2 + r x_2 - y_2 \\ \dot{z}_2 &= x_2 y_2 - b z_2 \end{aligned}$$

図7.1 ローレンツ方程式

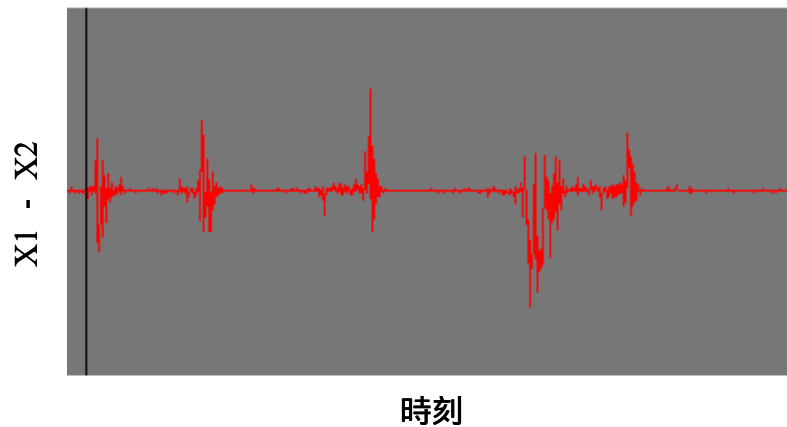


図7.2 間欠性カオス

動子の引き込み現象とよく似た現象である可能性はある．今後は，リズムコントローラ波形がカオス性を持つかどうかを検証する必要があるだろう．ただし，本研究で見られた存在的エンタテインメントは，先に述べたように，一領域的コミュニケーションでは説明できない現象である．したがって，存在的エンタテインメントは，単純なカオス振動子の引きこみ現象では，説明できない可能性が高い．このような点を踏まえて，今後，人間のコミュニケーションにおける存在的エンタテインメントの生成のダイナミクスについて詳細に検討したいと考えている．

### (3) コヒーレンス映像表現の意味について

本研究では，互いのリズムコントローラ波形のコヒーレンス度合いを示すコヒーレンス映像表現が，場の共創出に必要であることを実験的に示した．しかし，コヒーレンス映像表現が，場の共創出において，具体的にどのような役割を果たしているのかについては，よく分かっていない．リズムコントローラ操作において，リズムを創るということは，意識が直接関与することなく，無意識のうちに行われている．また，何度も述べてきたように，リズムコントローラ波形のコヒーレンスは，意図した行為（映像画面上のアバターの動き）に先行している．したがって，コヒーレンス映像表現は，自身の意図した行為の創出に先立って，無意識のうちに創られる互いの関係を表現していることになる．また，コヒーレンス映像表現は，共存感の創出にも関係している．今後は，このようなことを手掛かりとして，コヒーレンス映像表現の意味を明らかにし，場の共創出の原理についての研究を深めていきたいと考えている．

また，予測という観点から，本研究について考えた場合，特に剣道ロボット対戦では，前もってこれから発生する状態を予測することができない（確率によって表現できない）状況において，相手の動きを予測することが求められる．つまり，無限定な状況[23]で予測を行うということである．この際，本研究では，コヒーレンス映像表現が必要になることを示した．このことは，無限定な状況で予測を行うため

には、映像画面上に表現される互いのロボットの位置関係という顕在的な情報と、コヒーレンス映像表現のような無意識のうちに創られる関係という潜在的な情報の両方が、必要になることを示している。したがって、無限定な状況でのコミュニケーションは、顕在的な情報に基づいて行われる意識レベルでの予測と、潜在的な情報に基づいて行われる無意識レベルでの予測からなる二重予測機構により成り立っていると考えられる。さらに、本研究結果を踏まえれば、この二重予測機構に、存在的エンタテインメントが関係しているということになる。今後は、以上の内容を踏まえて、共創における人間の予測の理論的なモデルを構築し、人と間合いを合わせることが可能なロボットの開発にも取り組みたいと考えている。

### (4) 本研究で開発した場の共創出を支援する手法の適用範囲について

本研究では、意図した行為に先行するリズム的な無意識的な身体行為（身体図式を介して意図した行為を創出することに伴って創出される事前動作）に着目し、このような身体リズム力触覚表現とこの身体リズムのコヒーレンス度合いの映像表現を組み合わせることによって、遠隔地間における場の共創出を支援できることを示した。ただし、当然ではあるが、この手法を実現するためには、意図した行為に先行するリズム的な無意識的な身体行為を取り出すことができていることが前提となる。このような身体行為のリズムは、アバターを介したコミュニケーションであれば、アバターを操作するインタフェースに、本研究で用いたリズムコントローラを採用すれば、取り出すことが可能になる。したがって、本研究で得られた知見は、CVEs のような共有仮想空間を用いた遠隔コミュニケーションシステム[82]～[85]やロボットによる遠隔協調作業[104][105][106]システム（図 7.3）において適用可能であり、これらのシステムにおいて、場や間合いの生成を支援する技術の有用な設計指針となるであろう。ただし、現状のリズムコントローラでは、アバターを 1 自由度でしか操作することができないという問題があるので、この点は、今後、改良する必要があると思われる。また、身体行為のリズムやそのコヒーレンス度合いを表現する感覚モダリティの問題もある。身体行為のリズムについては、音声、（力）触覚のどちらのモダリティでこれを表現してもその効果が変わらないことを確認している。したがって、身体行為のリズムについては、どの感覚モダリティでこれを表現しても問題ないと思われる。一方、身体行為のリズムのコヒーレンス度合いに関しては、映像以外のモダリティでは、その有効性は確認されていないので、今後、検討する必要があるだろう。

なお、アバターを介さない、通常的身體を介したコミュニケーションを支援する手法に、本研究で得られた成果を適用することは、現状では、困難であるといわざるをえない。それは、第 2 章で述べたように、意図した行為のリズムと、これに先行して無意識のうちに創られる身体行為のリズムが、1 つの同じ身体に表現されてしまう（図 2.2 参照）ので、これら二つのリズムを分離して、後者のみのリズムを取り

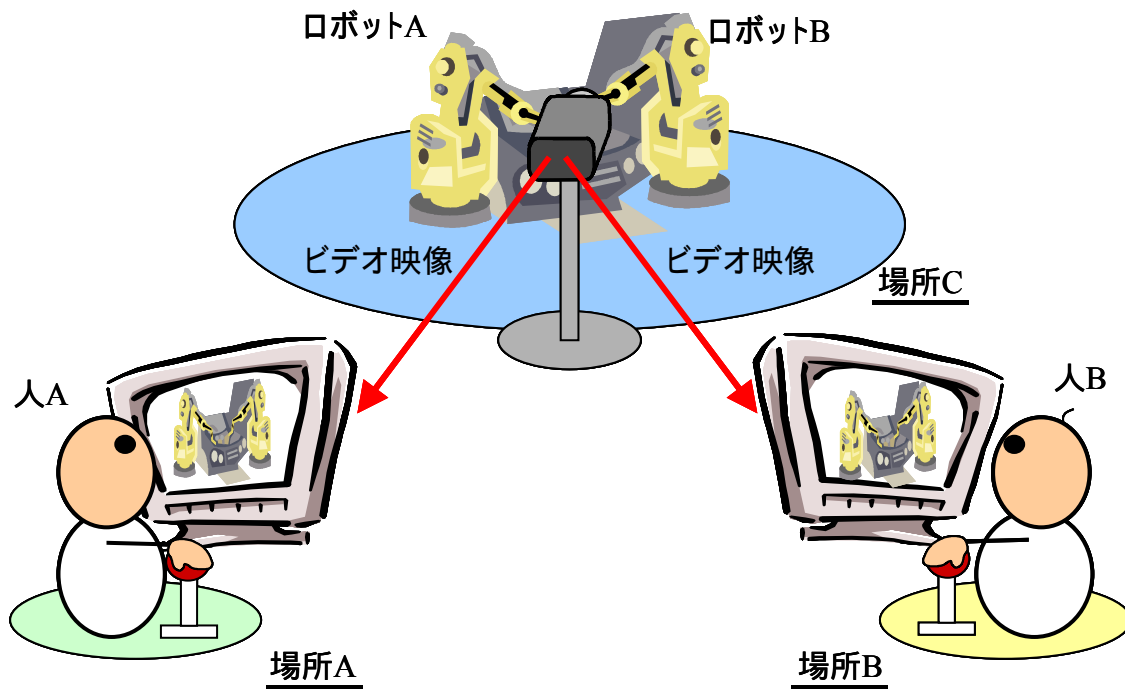


図7.3 ロボットによる遠隔協調作業システム

出すことは、困難であるからである。今後は、本システムで得られた成果の適用範囲を広げるためにも、この問題を解決する手法について、考えていきたい。

#### (5) 新たな実験システムの構築に向けて

本研究では、場の共創出に必要な要件を明らかにしてきた。しかし、ここで示されたものは、場の共創出のための必要条件であり、(必要)十分条件ではないという問題がある。今後の課題としては、この十分条件を示す必要があるだろう。ただし、剣道ロボットシステムでこれを明らかにすることは容易ではないと思われる。場が共創出されるための十分条件を明らかにするためには、確実に場が生成される条件を見つける必要がある。しかし、剣道システムでは、場を共創出すること(相手と協調的な関係を創ること)そのものが目的なのではなく、相手に勝つことが目的である。つまり、原理的に必ずしも、場を共創出する必要がない実験システムである。したがって、本システムで、十分条件を探ることは、難しいと思われる。十分条件を探すことそのものが、難しい問題であると思われるが、そのためには、競争の要素が含まれない、協調的なコミュニケーションで、実験を行うことが有効ではないかと考えられる。そこで、今後は、場の状況を外部から限定しない状況で行われる新しい協調ゲームシステムの開発に取り組みたいと考えている。また、本研究で用いたシステムは、剣道ロボットシステムにしても、協調ゲームシステムにしても、2人でのコミュニケーションシステムであり、集団(3人)以上のコミュニケーションを扱うことができないという問題がある。そこで、今後は、この問題も視野に入れて、新しいシステムの開発に取り組みたいと考えている。

本研究では、何度も述べているように、場の共創出に伴って存在的エンタテインメントが創出されることを明らかにしたが、場には感情が結びついていると考えられるので、存在的エンタテインメントと感情の共有には、関係があるように思われる。また、西は、身体を介したインタラクティブなコミュニケーションにおいて、互いがイメージを伴いながら多様な表現を共創していく過程で生じる、一体感を伴った心身の深いレベルでの同調状態のことを“共振”と呼んでいる[36]が、本研究で提唱した存在的エンタテインメントは、これとも密接な関係があるようにも思われる。そこで、今後は、このような“共振”や共感の問題を調べることで可能な実験システムを構築し、存在的なエンタテインメントに感情がどのように関わっているかを明らかにするような研究を行いたいと考えている。

### (6) その他

さらには、本研究で得られた知見を活用し、遠隔地間で場を共有しながら対話できるシステムや、心理療法、リハビリ・高齢者介助、教育などにおける共創活動を遠隔地間で支援できるコミュニケーションシステムの開発について検討したいと考えている。



## 参考文献

- [1] 清水, 前川: 競争から共創へ 場所主義経済の設計; 岩波書店 (1998).
- [2] 上田, 黒田: 共創とは何か; 培風館 (2004).
- [3] プラハラード, ラマスワミ, ベンカト: 価値共創の未来へ 顧客と企業の Co Creation (有賀訳); Harvard business school press (2004).
- [4] 佐々木, 江原: 『産業界に聞く産学連携』 - 元シャープ株式会社代表取締役副社長 佐々木正氏に聞く 共創こそ事業化の要; 産学官連携ジャーナル, Vol.2, No.12 (2006).
- [5] 小林, 地域・大学連携まちづくり研究会 (編さん): 地域と大学の共創まちづくり; 学芸出版社 (2008).
- [6] 横浜市 共創推進事業本部 (<http://www.city.yokohama.jp/me/keiei/kyoso/>).
- [7] 日本経済新聞社 朝刊紙面広告特集「共創ジャパン」 (<http://www.nikkei.co.jp/kyoso/consept.html>).
- [8] google (<http://www.google.co.jp/>).
- [9] 佐々木: はじめに仮説ありき 明日を拓く"技術屋魂"の世界; クレスト新社 (1995).
- [10] 三宅: 共創とシステムインテグレーション; 計測と制御, Vol.43, No.12, pp.993-997 (2004).
- [11] 清水, 久米, 三輪, 三宅: 場と共創; NTT 出版 (2000).
- [12] 三輪: 共創的コミュニケーションにおける場の技術: システム/制御/情報, Vol. 45, No.11, pp.683-644 (2001).
- [13] 清水: 場の思想; 東京大学出版会 (2003).
- [14] 清水: 生命知としての場の論理; 中公新書 (1996).
- [15] 金子: コミュニティ・ソリューション; 岩波書店 (1999).
- [16] 加藤: エコマネーの新世紀; 勁草書房 (2001).
- [17] 碓井: なぜ「少年」は犯罪に走ったのか; KK ベストセラーズ (2000).
- [18] 唯野: ネット犯罪から子どもを守る 被害者にも加害者にもしないために親がすべきこと; 毎日コミュニケーションズ (2006).
- [19] 碓井: インターネットの心理学; <http://www.n-seiryu.ac.jp/~usui/net/>.
- [20] Riva, G., and Galimberti, C.: Virtual Communication: Social Interaction and Identity in an Electronic Environment; in G.Riva, F.Davide, eds., Communications Through Virtual Technologies, IOS Press, pp.23-46 (2001).
- [21] Shannon, C., and Weaver, W.: The Mathematical Theory of Communication: The University of Illinois Press (1949).

- [22] 松尾：コミュニケーションの心理学；ナカニシヤ出版(1999).
- [23] 清水：生命と場所；NTT 出版 (1992).
- [24] プリゴジヌ：散逸構造（小島，相澤訳）；岩波書店 (1980).
- [25] 多賀：脳と身体の動的デザイン；金子書房 (2002).
- [26] カウフマン：自己組織化と進化の論理（米沢訳）；日本経済新聞社 (1999).
- [27] ルーマン：社会システム理論 上（佐藤訳）；恒星社厚生閣 (1993).
- [28] 蔵本編：非線形・非平衡現象の数理 1 リズム現象の世界；東京大学出版会 (2005).
- [29] Clayton, M., Sager, R. and Will, U.: In time with the music: The concept of entrainment and its significance for ethnomusicology; ESEM CounterPoint, Vol.1, (2004), <http://ethnomusicology.osu.edu/EMW/Will/InTimeWithTheMusic.pdf>.
- [30] Condon, W. S.: An analysis of behavioral organization; Sign Language Studies, 13, pp.285-318 (1976).
- [31] 渡辺，大久保：コミュニケーションにおける引き込み現象の生理的側面からの分析評価; 情報処理学会論文誌，Vol.39，No.5，pp.1225-1231 (1998).
- [32] 南：間の本；講談社 (1983).
- [33] 大野木：間合い上手 メンタルヘルスの心理学から；日本放送出版協会 (2005).
- [34] Hall, E. T.: かくれた次元 (日高，佐藤訳)；みすず書房 (1970).
- [35] アダム・ケンドン，アンドリュー・ファーバー：人間の挨拶行動（菅原他 編「コミュニケーションとしての身体」）；大修館書店 (1996).
- [36] 西：身体によるインタラクティブなコミュニケーション - 身体表現の現場での実践と研究の統合をめざして；神戸大学博士論文 (2002).
- [37] 垣田：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).
- [38] 三宅, 辰巳, 杉原: 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).
- [39] 長岡，小森，中村：対話における交替潜時の 2 者間相互影響；人間工学，Vol.38, No.6，pp.316-323 (2002).
- [40] Condon, W.S. and Ogston, W.D.; A Segmentation of Behavior; J. Psychiat. Res. 5, pp. 221-235 (1967).
- [41] Condon, W.S., and Sander, L.: Neonate movement is synchronized with adult speech; Science, No.183, pp.99-101 (1974).
- [42] Condon, W. S : Cultural microrhythms; In M.Davis, (Ed.), Interaction Rhythms, New York. (1982).

## 参考文献

- [43] Condon, W. S. : Sound-film microanalysis: a means for correlating brain and behavior; In F.H. Duffy and N. Geschwind, (Ed.), *Dyslexia*. Boston/Toronto (1985).
- [44] Condon, W. S.: Communication: Rhythm and structure; In Evans and Clynes, pp.55-77 (1986).
- [45] Hall, E. T.: 文化を超えて (岩田訳); TBS ブリタリカ (1979).
- [46] Kobayashi, N., Ishii, T., and Watanabe, T; Quantitative evaluation of infant behavior and mother-infant interaction ; *Early Development and Parenting*, Vol.1, No1, pp. 23-31 (1992).
- [47] 渡辺, 石井, 小林: コミュニケーションにおけるエンタテインメント(音声-体動同調現象)のコンピュータ自動分析法--母子(新生児)をモデルとして; *医用電子と生体工学*, Vol.22, No.6, pp.419-425 (1984).
- [48] 小林: 育つ育てる ふれあいの育児 胎児期からの子育て; TBS ブリタリカ (1988).
- [49] Trevarthen, C.: Conversations with a 2-month-old; *New Scientist*, pp.230-235 (1974).
- [50] Trevarthen C.: Descriptive analysis of infant communicative behavior; In H. R. Schaffer (Ed.), *Studies in mother-infant interaction* (pp. 227-270), New York: Academic Press (1977).
- [51] Trevarthen, C.: Universal cooperative motives: How infants begin to know language and skills of culture; In G. Jahoda & I. M. Lewis (Eds.), *Acquiring culture: Ethnographic perspectives on cognitive development* (pp. 37-90), London: Croom Helm (1988).
- [52] Trevarthen C.: Musicality and the intrinsic motive pulse; In *Rhythms, musical narrative, and the origins of human communication. Musicae Scientiae, Special Issue*, 1999-2000 (pp. 155-215) (1999). Liege: European Society for the Cognitive Sciences of Music.
- [53] 渡辺: エンタテインメント(引き込み)と親子の絆, 赤ちゃんの認識世界; ミネルヴァ書房, pp.51-74 (1999).
- [54] 三宅, 宮川, 田村: 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).
- [55] Matarazzo, J.D., Weitman, M., Saslow, G., and Wiens, A.N.: Interviewer influence on durations of interviewee speech; *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, vol.1, pp.451-458 (1963).
- [56] Kendon, A. Movement coordination in social interaction: Some examples described; *Acta Psychologica*, Vol.32, pp.101-125 (1970).
- [57] Webb, J.T.: Interview synchrony: An investigation of two speech rate measures in an automated standardized interview; In B. Pope and A.W. Siegman (Eds.), *Studies in dyadic communication* New York: Pergamon, pp.115-133 (1972).

- [58] 渡辺: 身体的コミュニケーションにおける引き込み; 日本新生児学会雑誌, Vol.34, pp.734-738(1998) .
- [59] Warner, R., Malloy, D., Schneider, K., Knoth, R., and Wilder, B.: Rhythmic Organization of Social Interaction and Observer Ratings of Positive Affect and Involvement. *Journal of Nonverbal Behavior*, 11(2), pp.57-74. (1987).
- [60] 山本, 三宅: 音楽の生演奏時における演奏者と聴取者の相互作用の解析; 計測自動制御学会論文集, Vol.38, No.9, pp.800-805 (2002).
- [61] 山本, 三宅: 共同演奏における演奏者間コミュニケーションの解析; 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.5, pp.563-572 (2004).
- [62] 古浦: 心理学的考察「いきが合う」; 北大路書房 (1990).
- [63] 中村: 「間」における演奏者と伴奏者の呼吸の同期; 日本心理学会第 59 回大会発表論文集, pp.631 (1995).
- [64] 長岡, 中村: 練習が演奏者間の呼吸の一致に及ぼす効果; 日本心理学会第 64 回大会発表論文集, pp.603 (2000).
- [65] 小林, 三宅: 相互引き込みモデルを用いたアンサンブルシステムの開発; 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.9, pp.948-957 (2004).
- [66] 小林, 三宅: 階層化された相互引き込みモデルに基づくアンサンブルシステム; 計測自動制御学会論文集 Vol.41, No.8, pp.702-711 (2005).
- [67] 吉良, 仲谷, 西田: 身体性に注目した感性協調支援実験 リズムを介した協同作業について; 電子情報通信学会技術研究報告. HCS, ヒューマンコミュニケーション基礎, Vol.102, No.599, pp.35-40 (2003).
- [68] Brave, S., and Dahley, A.: inTouch: A Medium for Haptic Interpersonal Communication, *Extended Abstracts of CHI'97*, pp. 363-364 (1997).
- [69] Brave, S., Ishii, H., and Dahley, A.: Tangible Interfaces for Remote Collaboration and Communication; *Proc. of CSCW'98*, ACM Press, pp.169-178 (1998).
- [70] Watnabe,T., and Yuuki,N.: Work with computers(Smith,M.J. et al. ed.); A voice reaction system with a visualized response, Elsevier, pp.396-403 (1989).
- [71] 渡辺, 大久保, 小川: 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).
- [72] 三宅, 宮川, 田村: 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).
- [73] 武藤, 三宅: 歩行介助を目的とする人間-ロボット協調系における共創出過程の解析; 計測自動制御学会論文集, Vol.38, No.3, pp.316-323 (2002).
- [74] 高梨, 三宅: 共創型介助ロボット"Walk-Mate"の歩行障害への適用; 計測自動制御学会論文集, Vol.39, No.1, pp.74-81 (2003).
- [75] Kendon, A.: *Conducting Interaction: patterns of behavior in focused encounters*, Cambridge University Press, (1990).

## 参考文献

- [76] Sellen,A.J.: Speech patterns in video-mediated conversations, Proc. of CHI'92, pp.49-59 (1992).
- [77] Ishikawa, Y., Okada, K., Jeong, G., Tanaka, S., and Matsusita, Y.:MAJIC Videoconferencing System: Experiments, Evaluation and Improvements;Proc. of ECSCW'95, pp.279-293 (1995).
- [78] Hirata, K., Harada, Y., Takada, T., Aoyagi, S., Shirai, Y., Yamashita, N., and Yamato, J.: The t-Room-Toward the Future Phone, NTT Technical Review, Vol.4, No.12, pp.26-33(2006).
- [79] Morikawa O., and Maesako, T.:HyperMirror: Toward Pleasant-to-use Video Mediated Communication System; CSCW98, pp.149-158 (1998).
- [80] 森川：ビデオ対話における自己像の表示による対話相手の存在感への影響；ヒューマンインタフェース学会誌 Vol.1 No.1 pp.61-68 (1999).
- [81] 森川，山下，佐藤，福井：相手の空間の指差しが可能なビデオ対話：超鏡；計測自動制御学会，第 50 回パターン計測部会研究会，pp382-387 (2000).
- [82] Greenhalgh, C., and Benford, S.: Massive: A collaborative virtual environment for teleconferencing; ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 2.3, pp.39-261 (1995).
- [83] Benford, S., Greenhalgh, C., Rodden, T., and Pycck, J.: Collaborative virtual environments; Communications of the ACM, 44 (7), pp.79-85 (2001).
- [84] Nakanishi, H., Yoshida, C., Nishimura, T., and Ishida, T.: FreeWalk: Supporting casual meetings in network; Proceedings of CSCW '96, ACM Press, pp.308-314 (1996).
- [85] Hagsand, O.: Interactive multiuser VEs in the DIVE system; IEEE Multimedia 3, 1, IEEE Computer Society, pp.30-39 (1996).
- [86] Miwa, Y., and Ishibiki, C.: Shadow Communication: System for embodied interaction with remote partners, Proceeding of CSCW 2004, pp.467-476 (2004).
- [87] 石引, 渡邊, 三輪: 影を場の統合メディアとする共存在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).
- [88] 石引：存在を伝え合う場のコミュニケーションメディアの設計と開発に関する研究；早稲田大学博士論文 (2008).
- [89] Head, H., and Holmes, G.; Sensory disturbances from cerebral lesions, Brain vol.34 (1911).
- [90] マリアンヌ・フロスティグ;ムーブメント教育 理論と実際 (肥田野訳), 日本文化科学社 (1978).
- [91] 河本; システム現象学 オートポイエーシスの第四領域, 新曜社 (2006).
- [92] 内田; 非中枢的身体論 - 武道の科学を求めて, Studies, 47(3), 神戸女学院大学, pp.97-117 (2001).

- [93] 甲野：古武術に学ぶ身体操法；岩波アクティブ新書 (2003).
- [94] 岩田実践デジタル・フィルタ設計入門；CQ 出版 (2004).
- [95] Tanaka,K., and Aizawa,Y.: Fine Structures in Stationary and nonstationary Chaos; Progress of Theor.Phys., vol.90, No.3, pp547-567 (1993).
- [96] Akimoto,T., and Aizawa,Y.: Logarithmic Scaling in the Stationary-Nonstationary Chaos Transition; Progress of Theor.Phys., vol.110, No.5, pp849-860 (2003).
- [97] 早稲田大学複雑系高等学術研究所編: 複雑系叢書 7 複雑さへの関心; 共立出版 (2006).
- [98] 大同: 振動子集団における引き込み相転移; 数理科学, No.408, pp.44-51 (1997).
- [99] Rosenblum, M., Pikovsky, A., Kurths, J., Schafer, C., and Tass, P.A.: Phase synchronization -from theory to data analysis; Handbook of Biological Physics, Elsevier Science, Series Editor A.J. Hoff, Vol. 4, Neuro-informatics, Editors: F. Moss, F., and Gielen, S., Chapter 9, pp. 279-321(2001).
- [100] Fujisaka, H., and Yamada, T.: A New Intermittency in Coupled Dynamical Systems; Progress of Theoretical Physics, Vol. 74, No. 4, pp. 918-921 (1985).
- [101] Fujisaka, H., and Yamada, T.: Stability Theory of Synchronized Motion in Coupled-Oscillator Systems. IV- Instability of Synchronized Chaos and New Intermittency -; Progress of Theoretical Physics, Vol. 75, No. 5, pp. 1087-1104 (1986).
- [102] Pikovsky, A., Rosenblum, M., and Kurths, J.: Synchronization; Cambridge Univ. Press (2001).
- [103] 津田：カオスの脳観；サイエンス社 (1990).
- [104] Suzuki, T., Fujii, T., Yokota, K., Asama, H., Kaetsu, H., and Endo, I.: Teleoperation of multiple robots through the internet; Proc. of the 5th IEEE International Workshop on Robots and Human Communication, pp.84-89 (1996).
- [105] Chong, N.Y., Kawabata, S., Ohba, K., Kotoku, T., Komoriya, K., Takase, K., and Tanie K.: Multioperator Teleoperation of Multirobot Systems with Time Delay: Part I Aids for Collision-free Control; PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments, MIT Press , 11, 3, pp.277-279 (2002).
- [106] Elhajj, I., Xi, N., Goradia, A., Kit, C.M., Liu,Y.H., and Fukuda, T.: Tele-coordinated control of multi-robot systems via the internet; Proc. of 2003 IEEE International Symposium on Computer Intelligence in Robotics and Automation, pp.1646-1652 (2003).

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始懇切なる御指導と御激励を賜りました早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 三輪敬之教授に心よりの感謝の意を表します．

本論文をまとめるにあたり，数々の有益な御助言と丁寧な御指導を賜りました，早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 山川 宏教授，菅野重樹教授，宮下朋之准教授，上杉 繁准教授に深謝の意を表します．

本研究を進める上での貴重な御指導を賜りました東京大学 清水 博名誉教授，早稲田大学 先進理工学部 応用物理学学科 相澤洋二教授に深謝の意を表します．

本研究に対して多くの御助言，御激励を賜りましたシラキユース大学 押田良機教授，岡山県立大学 渡辺富夫教授，東京工業大学 三宅美博准教授，東洋英和女学院大学 西 洋子教授に深謝の意を表します．

本研究を遂行するにあたり，数々の貴重な御助言を賜るとともに，実験の被験者として多大なる御協力をいただきました，トキ・コーポレーション株式会社 石引 力氏に心からの感謝を申し上げます．

本研究を遂行するにあたり，多くの有益な議論，検討を共にした，早稲田大学 総合研究機構 WABOT-HOUSE 研究所 大崎章弘助手，早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 渡辺貴文助手，飯田公司氏に深謝の意を表します．

本研究の共同研究者として，終始御協力をいただきました，早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科（旧理工学部 機械工学科）三輪研究室学生，工藤 敦氏，篠原 淳氏，小暮光義氏，村岡至紘氏，三代尚卿氏，森重佳久氏，小川拡樹氏，酒井 秀氏，嘉部好洋氏に深く感謝いたします．

ならびに，多大なる御支援をいただいた三輪研究室諸先輩後輩方に深く感謝いたします．

最後に，著者の研究生活を常に支えてくれている家族に心から感謝します．

## 研究業績

種類別	題名	発表・発行掲載誌名	発表・発行年月	連名者
1.論文 論文	Hands-on Modelling interface system for co-creative telecommunication	INTERACT2001, Eighth IFIP TC.13 Conference on Human-Computer Interaction, IOS Press, pp.675-677	2001年7月	Shigeru Wesugi Yoshiyuki Miwa
論文	Embodied interface for emergence and co-share of 'Ba'; Usability Evaluation and Interface Design	Proceedings of HCI International 2001, pp.248-252	2001年8月	Yoshiyuki Miwa, Shigeru Wesugi Chikara Ishibiki
○論文	Creation and co-share of timing in an actual communication	Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2002)	2002年10月	Yoshiyuki Miwa Atsushi Kudo Yoji Aizawa
論文	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, No2, pp215-223	2003年5月	Yoshiyuki Miwa
論文	Design of Co-existing space by Shoji interface showing Shadow	Proceedings of HCI International 2003, pp.508-512	2003年6月	Yoshiyuki Miwa Chikara Ishibiki Takashi Watanabe
○論文	Creation and co-share of "Maai" by the interface employing the embodiment	Proceedings of RO-MAN 2004, pp.193-198	2004年9月	Yoshiyuki Miwa
○論文	Co-Existing Communication Using a Robot as Your Agent	Proceedings of IROS 2004, pp.1218-1225	2004年10月	Yoshiyuki Miwa
○論文	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.487-495	2005年11月	三輪敬之
論文	Shadow arts-communication System supporting communicability for encounter among remote groups	Human Interface, PartII, HCI2007, LNCS 4558, pp.84-94	2007年7月	Yoshiyuki Miwa Daichi Sakurai Shoichi Hasegawa
○論文	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	情報処理学会論文誌, Vol.48, No.12, pp.3907-3918	2007年12月	三輪敬之
論文	Public Viewing with Shadows: Design of theater-type space where remote actors and audiences can coexist using the shadow as their own agents	Proceedings of RO-MAN 2008, pp.677-682	2008年9月	Koji Iida Takabumi Watanabe Yoshiyuki Miwa
○論文	協調ゲームにおける身体的コヒーレンスの生成と予測の共有に関する実験的研究	ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.10, No.4, pp.113-124	2008年11月	小川拓樹 三輪敬之
2.講演 ○講演	仮想空間における実在感創出のためのブロック型入出力装置の開発	日本機械学会関東学生会第40回学生員卒業研究発表講演前刷集	2001年3月	三輪敬之

## 研究業績

種類別	題名	発表・発行掲載誌名	発表・発行 年月	連名者
○講演	仮想空間における実在感創出のためのブロック型入出力装置の開発	日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集	2001 年 8 月	上杉 繁 三輪敬之
講演	植物と相互作用する環境創出インタフェースに関する研究 (その 1) 電場に着目した仮想根の開発と二三の実験	第 2 回 SICE システムインテグレーション部門学術講演予稿集	2001 年 12 月	三輪敬之 平誠士 斎藤秀樹
○講演	行為的コミュニケーションにおけるタイミングの創出に関する研究 - 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形成について	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2002 論文集	2002 年 9 月	三輪敬之
○講演	共創場の生成支援技術に関する研究-身体性に着目したタイミング創出インタフェース	日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集	2002 年 9 月	三輪敬之
講演	場を喚起する力触覚インタフェースの開発	日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集	2002 年 9 月	小暮光義 五嶋仁 三輪敬之
○講演	自己の二領域性に着目した共存在的空間創出インタフェースに関する研究	日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集	2003 年 8 月	村岡至紘 三輪敬之
○講演	身体性の二重的表現による共存在感創出インタフェースの研究	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2003 論文集	2003 年 10 月	村岡至紘 三輪敬之
講演	存在の影による場の統合と間の共有に関する研究 存在の気づきと出会いに関する二三の実験的検討	SICE, SI 部門学術講演会予稿集	2003 年 12 月	石引 力 小暮光義 三輪敬之
○講演	身体性を取り込んだインタフェースによる間合いの生成と 1/f ゆらぎについて	情報処理学会第 66 回全国大会講演論文集	2004 年 3 月	村岡至紘 三輪敬之
講演	高速振動電極システムの開発による植物形成電場の時系列変化挙動	日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集	2004 年 9 月	大保彰弘 細井慎一郎 柳橋康博 三輪敬之
○講演	間合い形成時における創出的エンタテインメントに関する研究	信学技報, ヒューマンコミュニケーション基礎	2005 年 7 月	三輪敬之
講演	紐をインタフェースとする荷物運搬支援モビルの開発	日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集	2005 年 9 月	木村龍平 津端浩介 金子政人 石引 力 三輪敬之
講演	Robot Design Factory - その 1 : 空間性を考慮した共存在デザインとメディア表現手法の提案 -	ロボメック 2006 講演論文集	2006 年 5 月	三輪敬之 上杉 繁 石引 力 大崎章弘

種類別	題名	発表・発行掲載誌名	発表・発行 年月	連名者
講演	人間追従に紐の冗長性を利用する荷物運搬支援モビルに関する研究	ロボメック 2006 講演論文集	2006 年 5 月	小川純市 木村龍平 石引 力 三輪敬之
講演	MRI 環境下で使用可能なワンハンド・コントローラの開発 - 5 ボタンスイッチとジョイスティックの搭載 -	ロボメック 2006 講演論文集	2006 年 5 月	西 直人 三輪敬之
○講演	身体の影とリズム表現による間合いの生成について	SICE,SI 部門学術講演会予稿集	2006 年 12 月	森重佳久 飯田公司 三輪 敬之
講演	紐の冗長性を活用した荷物運搬支援モビルに関する研究 - 実用性向上のための紐誘導法の拡張 -	SICE,SI 部門学術講演会予稿集	2006 年 12 月	寺島 亮 板井 志郎 三輪 敬之
講演	Shadow Communication System - 遊びツールの仮想影表現による集団間コミュニケーション支援 -	情報処理学会第 69 回全国大会講演論文集	2007 年 3 月	桜井大地 三輪敬之 長谷川昌一
講演	fMRI を用いた行為的コミュニケーションにおける脳活動計測 - ビデオ映像提示システムを用いた対面・非対面じゃんけん時の比較 -	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2007 論文集	2007 年 9 月	飯田公司 川畑秀明 関口達彦 三輪敬之
講演	場のアーツ・コミュニケーション - 影システム (WCS) による出会いの場づくり支援の実践的研究 -	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2007 論文集	2007 年 9 月	三輪敬之 船戸峰洋 石引 力
講演	対面コミュニケーションの脳活動	Neuro2007	2007 年 9 月	関口達彦 飯田公司 川畑秀明 渡辺貴文 三輪敬之
講演	MRI 環境下で使用可能な身体的インタフェースに関する研究 - つながり感に着目した呼吸表現デバイスの開発 -	日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集	2007 年 9 月	飯田公司 三輪敬之
講演	Difference in neural distributions between face-to-face and remote situations in a communicative game	Society for Neuroscience 37th Annual Meeting	2007 年 11 月	Tatsuhiko Sekiguchi Koji Iida Hideaki Kawabata Takabumi Watanabe Yoshiyuki Miwa
講演	協調ゲーム時のエンタテインメント生成挙動に関する研究	SICE,SI 部門学術講演会予稿集	2007 年 12 月	小川拓樹 三輪敬之
講演	影を活用した劇場型共存在空間の設計手法に関する研究	信学技報, ヒューマンコミュニケーション基礎	2008 年 3 月	飯田公司 渡辺貴文 三輪敬之
講演	つながり感を強めあう遠隔玉転がしシステムの開発	日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集	2008 年 8 月	河合聡宏 芳賀公一郎 三輪敬之

## 研究業績

種類別	題名	発表・発行掲載誌名	発表・発行 年月	連名者
講演	Shadow communication system - 存在感強化のためのグリッドを用いた影の表現手法に関する研究 -	日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集	2008 年 8 月	西島宏輔 飯田公司 三輪敬之
○講演	Shadow Communication System - 影を活用した実空間と背景映像の非分離的接続による空間性拡張の試み -	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008 論文集	2008 年 9 月	長谷川 晶一 稲沢 綾二 飯田公司 三輪 敬之
講演	Shadow Communication System - つながり感に着目した仮想遊具の影による 3 次元的運動表現 -	ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008 論文集	2008 年 9 月	河合聡宏 桜井大介 西 洋子 三輪 敬之
講演	コミュニケーションと共創表現 - 影の存在的非分離性に着目したイメージ創出支援手法の検討 -	SICE,SI 部門学術講演会予稿集	2008 年 12 月	三輪敬之 渡辺貴文 西 洋子
○講演	場の共創出メカニズムに関する基礎的研究 - 間合い生成時に見られる多様なエンタテインメントについて -	ヒューマンインタフェース学会研究報告集 Vol.11, No.2	2009 年 5 月	三輪敬之
講演	影の時空的操作による身体表現創出に関する研究	ヒューマンインタフェース学会研究報告集 Vol.11, No.2	2009 年 5 月	飯田公司 大野洋人 渡辺貴文 三輪敬之
3. その他 ○講演	Emergence of co-existing space based on dual expression of embodiment	Slovenia-Japan seminar – Tokyo Seminar–	2003 年 11 月	Yoshiyuki Miwa
○講演	共創における共存在的な場の創出と間の共有に関する研究 - ロボットを自身のエージェントとして用いたコミュニケーションにおける間合いの生成と 1/f ゆらぎについて -	21 世紀 COE プログラム「超高齢社会における人とロボット技術の共生」第 1 回 若手研究者による Workshop	2004 年 4 月	
○講演	Creation of Timing and “Maai” (Spatial Distance) in the Embodied Communication	第 2 回 COE - CIR ワークショップ - 人との共生を目指すメカトロニクスの未来	2005 年 8 月	Yoshiyuki Miwa

## 著者紹介



ふりがな    いたい    しろう  
氏名        板井 志郎  
生年月日    1978 年 7 月 4 日 ( 31 歳 )

### 学 歴

1997 年 3 月	茨城県立土浦第一高等学校	卒業
1997 年 4 月	早稲田大学理工学部 機械工学科	入学
2001 年 3 月	同 上	卒業
2001 年 4 月	早稲田大学大学院理工学研究科	修士課程
	機械工学専攻 機械工学専門分野	入学 ( 材料設計研究 )
2003 年 3 月	同 上	修了
2003 年 4 月	早稲田大学大学院理工学研究科	博士後期課程
	機械工学専攻 機械工学専門分野	入学 ( 材料設計研究 )
2006 年 3 月	同 上	退学

### 職 歴

2003 年 9 月	早稲田大学 理工学術院	客員研究助手 ( COE 助手 )
2006 年 3 月	同 上	解任
2006 年 4 月	早稲田大学 理工学部	助手
2009 年 3 月	同 上	解任
2009 年 4 月	早稲田大学 理工学術院	研究助手 ( GCOE 助手 )
～ 現在に至る		

## 著者紹介

### 研 究 歴

2000 年 4 月 ～ 2001 年 3 月	仮想空間における実在感創出のためのインタフェースに関する研究
2001 年 4 月～ ～ 現在	共創的コミュニケーションにおけるエンタテインメントと間合いの生成に関する研究

### 賞 罰

2001 年 3 月 機械工学科学術賞

### 給付奨学金

1998 年 大隈記念奨学金  
1999 年 海老崎ツル奨学金  
2001 年 小野梓記念奨学金  
2003 年 博士後期課程特別奨学金