

移動指標が前試行の目標時間と 実現時間の平均で移動する 一致タイミング課題の学習

橋 本 晃 啓

は じ め に

本研究の問題意識は、バスケットボールのようなボールゲームにおいて、移動するプレイヤーがパスを受ける位置に到達すると同時に、ボールが届くようにパスすることができるスキルの学習にある。

この事態は、移動指標としてのパスの受け手に反応アイテムであるボールを際会 (meet) 位置で時間的・空間的に一致させる一致タイミング課題であり、パス動作の筋出力では、パラメータ設定がフィードフォワード制御で行われる必要がある。

橋本 (2014) は、移動指標に関しては際会位置到達時刻を見越し、反応アイテムに関しては移動開始時刻を見越して、移動指標と反応アイテムが際会位置に同時に到達するように制御することを求める一致タイミング課題の学習を検討し、絶対誤差および総変動の減少から約90試行で学習が成立することを明らかにした。

しかしながら、この「迎撃様一致タイミング課題」(橋本, 2016) では、移動指標が等速運動をし、移動開始から際会位置到着までの時間は常に一定であった。橋本 (2018) は、パス事態での受け手は投げ手にタイミングをあわせようと協力・共同作用をすることから、移動指標の運動パラメータの値が被験者の誤差結果に依存して設定される実験課題が必要であることを指摘した。そして、パス事態を模して、移動指標が前試行までのエ

ラー情報に基づいて移動時間を増減し、際会位置到着時刻が変化するユニークな一致タイミング課題を作成してその学習を検討した。

この研究では移動指標が等速運動をする場合との比較がなされたが、橋本(2019)では移動所要時間の増減について、以下の2つの課題に関する学習が比較検討された。一方は橋本(2018)が用いたもので、次試行の移動所要時間を、一定時間(2,500 msec)に直近3試行の恒常誤差の平均値を加えた時間とするもの、他方は、次試行の移動所要時間を直近3試行において被験者が見越した移動指標の移動所要時間とするものであった。

いずれの場合でも、被験者の時間的見越し(temporal anticipation)のエラーには、移動指標の際会位置到達時刻に関する「知覚的見越し(perceptual anticipation)」(Poulton, 1957)に関するものと、反応アイテムの移動開始時刻に関する「効果器の見越し(effector anticipation)」(同)に関するものが含まれる。後者の課題は、これらのエラーを完全に「帳消し」にするように次試行の目標値を設定するものであった。移動指標の移動時間と被験者の反応時間との相関係数を従属変数として検討した結果、後者において、60試行以降でこれらに0.9以上の非常に強い正の相関が認められたことが示された。

この「エラーを帳消しにする」実験課題では、3回連続して同じ時間条件で反応すると、たとえば移動指標が「2,750 msecで際会位置に到着するもの」として1,000 msecの「赤丸保持期間」(橋本, 2018)で反応アイテムを移動を開始させることを3回繰り返すと、それまでどのような時間条件で運動していても、次回の移動指標は2,750 msecで運動する¹⁾。

しかし、被験者には自身のエラーに迎合するように移動指標がふるまうとは知らされていなかった。また、まったく同じ時間条件で反応することは極めて困難であることから、3回連続して同じタイミングで反応した試行は認められず、強い正の相関は正確な時間的見越しが行われるように

1) 以下に示す今回の実験課題でも30回程度まったく同じふるまいをすると、移動指標の運動時間は1点に収束する。しかし、これは現実的ではない。

橋本：移動指標が前試行の目標時間と実現時間の平均で移動する一致タイミング課題の学習
なったことをあらわすと結論づけられた。

しかしこの実験課題では、被験者すなわちパスの投げ手が受け手のふるまいを「完全に無視して」自身の心地よい時間条件でパスをし続ければ、受け手のほうで「これにあわせるふるまい」をしてくれるようになるということになる。これは、究極には、橋本（2014）の実験課題で、移動指標が被験者の反応とまったく関係なく動作することの裏返しとなりかねない。すなわち、被験者のほうにのみ一致タイミングの課題が与えられていても、移動指標のほうにのみ一致タイミングの課題が与えられてしまうことになっても、いずれも協力・共同してタイミングを合わせられるようになるかどうかを検討する実験課題としては適当ではない。

エージェントが協力・共同作用をするということに関して言えば、複数のエージェントによる一般的な「交渉」では、「それぞれ独立の目標を持っていると仮定」されるエージェントが、その目標を達成するために、「個合理性」および「共同合理性」を両方とも満たす「妥結案」（いずれも大沢，1995，pp. 690–691）または「落としどころ」（隅田，2005，p. 6）が探られることになる。橋本（2019）の課題で目指されたエージェントの落としどころは、隅田（2005，p. 5）が合意を形成することは難しいとした「自分の利益や主張だけが通り、相手は一方的に譲歩するだけという状況」であった。

一般の交渉では各エージェントが独立の目標を持ち、橋本では「パスの投げ手と受け手が、パスを受ける位置に到達すると同時にボールを届けるという統一した共通の目標を持つ」という点が異なり、一概に合意形成が難しい落としどころであったとは言えない。しかし、橋本（2019）で認められた強い正の相関は、部分系に依存して、または要素に隷従することによってもたらされたものである。

「部分系の協同作用がどのようにして巨視的スケールの空間的、時間的、あるいは機能的構造をもたらすかを研究する」という立場をとるのであれば、「部分系の性質にはよらず自己組織化の過程を支配している原理」（い

橋本：移動指標が前試行の目標時間と実現時間の平均で移動する一致タイミング課題の学習

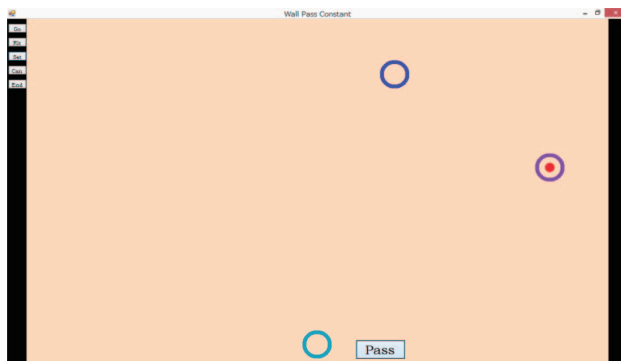


図1 課題提示画面

700)まで、 x 軸方向について毎秒384ピクセル(24インチのモニター画面上約16.5 cm/sec, 以下同じ)で直線的に移動する。その所要時間は1,250 msecであった。この赤丸の移動は被験者がパスを受けることを想定したものである。

青色丸は被験者からパスを受けるプレイヤーという設定で、移動指標である。その移動前の中心の座標は(800, 120)であった。青色丸は、赤丸の水色丸への移動開始の1,000 msec後に移動を開始する。起始位置(800, 120)から座標(440, 160)を経由する放物線を描き、停止位置(160, 320)に到達すると被験者の操作とは独立に移動を停止する。この停止位置が移動指標と反応アイテムの際会位置である。

被験者が「Pass」と書かれたボタンをマウスで左クリックすることにより、反応アイテムである赤丸は、水色丸(640, 700)から際会位置(160, 320)に向かって、 x 軸方向について毎秒320ピクセル(約13.7 cm/sec)で直線的に移動する。際会位置までの所要時間は1,500 msecであった。この赤丸の移動は、被験者が受け手にパスをすることを想定したものである。

図2は、上述した赤丸と青色丸の移動の時間関係をあらわしている。図の上段が赤丸移動開始-水色丸到着-被験者の反応による移動再開-際会位置到着であり、下段が青色丸移動開始-際会位置到着である。この図は

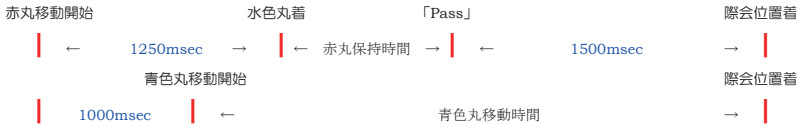


図2 刺激-反応ダイアグラム

青色丸と赤丸が同時に際会位置に到達した場合であり、図中に時間が表記されている部分は、間隔がその時間に固定されていることを示す。

被験者は「Pass」ボタンにマウスカーソルをあわせて待機し、赤丸が水色丸に到達した後、青色丸と赤丸が同時に際会位置に到達することを目標として、利き手の人差し指でマウスをクリックして赤丸の移動を開始させることを要求された。以下、この赤丸が水色丸に到達してから被験者が「Pass」ボタンをクリックするまでの時間を「赤丸保持時間」とする。これは、図2の上段で、「水色丸着」から『「Pass」』までの間隔であらわされている。

青色丸の移動について、最初の3試行では、x軸方向について毎秒256ピクセル（約11.0 cm/sec）の等速度運動を行った。その所要時間は2,500 msecであった。第4試行め以降は、1試行ごとに直近3試行における目標値とこれに対する実現値の平均値を算出し、これを移動所要時間とした。ここでいう目標値とは、各試行において青色丸が移動を開始してから際会位置に到達するまでの時間である。これは、図2の下段で、「青色丸移動開始」から「際会位置着」までの間隔であらわされており、以下「青色丸移動時間」とする。一方実現値とは、青色丸が移動を開始してから、被験者が反応することによって赤丸が際会位置に到達するまでの時間である。被験者が、青色丸の際会位置到達時刻に関する知覚的見越しと、赤丸の移動再開時刻に関する効果器の見越しをともに正確に行えば、図2のように、青色丸と赤丸が同時に際会位置に到達する。これらの時間的見越しにエラーがあった場合には青色丸と赤丸の到達時刻に差が生じる。この差が一致タイミングの誤差となる。

橋本：移動指標が前試行の目標時間と実現時間の平均で移動する一致タイミング課題の学習

青色丸移動時間の設定について、移動所要時間を長くする場合は、青色丸の等速度運動を座標（440, 160）で一時停止させた。また、移動所要時間を短くする場合は、途中で青色丸の移動速度を x 軸方向について毎秒256ピクセルから毎秒320ピクセルに増加させた。なお、図2に表記されている固定時間および青色丸移動時間の設定については、被験者には知らされなかった。

3) 装 置

上記の実験課題は、Visual Basic.2010で作成されたものであった。赤丸および青色丸の移動にはこれに含まれる「タイマーコントロール」が使用された。この「タイマーコントロール」は平均 15.625 msec で動作した。したがって、赤丸および青色丸の見えの移動はこれを1単位としたものであった。

被験者は、机上に置かれた24インチモニター画面に正対して約 60 cm の間隔で椅子に腰を掛け、10 cm 前方の利き手側に置かれたマウスで操作を行った。マウスは、モニターに接続したノート型パーソナルコンピュータに有線につながれており、実験者はモニターを制御するパーソナルコンピュータのキーボードで操作を行った。

4) 手 続 き

被験者は、青色丸と赤丸が同時に際会位置に到達した場合、尚早反応で赤丸が先に到達した場合、遅延反応で青色丸が先に到達した場合について、デモンストレーションをともなう説明を受け、3回の練習試行を行った。

練習試行の後、遅延反応の傾向にある場合には青色丸の移動が一時停止すること、および尚早反応の傾向にある場合には青色丸の移動が加速することについて、デモンストレーションをともなう説明を受けた。そして、図1の画面に移行して120回の学習試行を行った。なお、課題の説明におけるデモンストレーションの方法は、橋本（2018）とまったく同じであった。

学習試行は、1セット30試行を4セット行った。第1セットと第2セットとの間、および第3セットと第4セットとの間には約5分間の休憩期間が挿入された。また第2セットと第3セットとの間には約80分間の休憩期間が挿入された。

学習試行では、赤丸と青色丸の移動の様子が画面上に提示され、誤差結果に応じて、視覚によるフィードバック情報が与えられた。このフィードバックは、恒常誤差が -50 msec より大きく 50 msec より小さい場合、 -50 msec 以下の場合、 50 msec 以上の場合の3種類で、橋本(2018)が用いたものとまったく同じであった。

この視覚情報に加え、1試行ごとに数値によるフィードバック情報が与えられた。フィードバック情報はミリ秒単位で、遅延反応を正、尚早反応を負としてあらわした。また、被験者のモチベーションを維持するために、10試行ごとに画面上に平均フィードバックが表示され、実験者によって注意の方向づけがなされた。

図3は被験者に与えられたフィードバック情報のサンプルである。セットの第10試行めで赤丸の際会位置到達が青色丸よりも 38 msec 遅れ、第1試行めから第10試行めまでの絶対誤差の平均が 71.4 msec であることを示している。

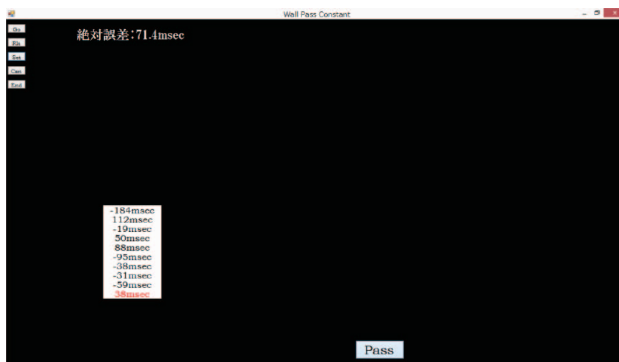


図3 結果表示画面

橋本：移動指標が前試行の目標時間と実現時間の平均で移動する一致タイミング課題の学習

以下の3つのことが起こったときその試行はキャンセルとして再試行を行った。それは、被験者がマウスを2回以上クリックしたとき、赤丸が青色丸に到達する前にクリックしたとき、この場合恒常誤差は -750 msec より小となる。そして、恒常誤差が 750 msec を超えたとき、であった。

結果および考察

被験者の成績は、.NET Framework の「Stopwatch クラス」によって測定された。実験者のキー操作時刻の $1,000$ msec 後、すなわち青色丸の移動開始時刻を「Stopwatch」のスタート、被験者のマウスクリック操作時刻を「Stopwatch」のストップとして、「Stopwatch」の計測時間を求めた。そして、「青色丸移動時間と赤丸の移動時間 ($1,500$ msec) との差」を計測時間から減じたものを一致タイミングの誤差とした。

まず、絶対誤差 (absolute error) について検討した。上記一致タイミングの誤差は正負の符号を付した恒常誤差であるが、絶対誤差はその絶対値であらわされる。図4は、1セット30試行を3つのブロックに分け、合計12ブロックにおける絶対誤差の平均値をあらわしたパフォーマンス曲線である。

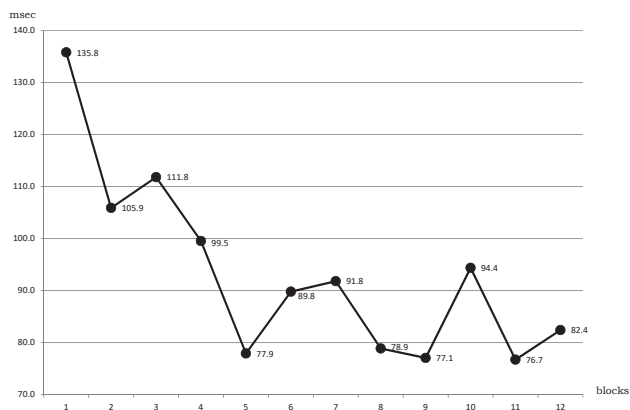


図4 各ブロックにおける絶対誤差

絶対誤差について1要因の分散分析を行った。その結果、1%水準で有意な主効果が認められた ($F_{(11, 88)} = 3.36, p < 0.01$)。多重t検定の結果、第4ブロックまでは、それ以降のブロックよりも有意に絶対誤差が大きいことが明らかとなり、絶対誤差が80 msec 前後まで減少して学習が成立したと考えられる。

本研究の実験課題では、図2に示されるように、青色丸の移動開始から赤丸の水色丸到達までの時間は250 msec で変動しない。また、被験者の「Pass」ボタンクリックから赤丸の実際位置到達までの時間は1,500 msec でこれも変動しない。橋本(2019)は、これとまったく同じ時間関係の課題において、一致タイミングが正確に遂行された場合には青色丸移動時間と赤丸保持時間との間に

$$\text{青色丸移動時間} = 1,750 + \text{赤丸保持時間 (msec)}$$

という線形関係があることを示した。そこでこれに倣ってこれらの相関について検討することにした。

図5は、青色丸移動時間と赤丸保持時間に関するピアソンの積率相関係数をブロックごとにあらわしたものである。これを見ると、すべてのブロックにおいて有意な正の相関を示し、特に第8ブロック以降で0.7以上の

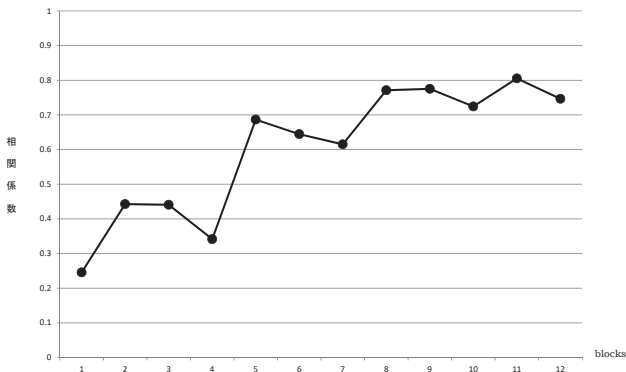


図5 赤丸保持時間と青色丸移動時間との相関

橋本：移動指標が前試行の目標時間と実現時間の平均で移動する一致タイミング課題の学習強い正の相関が認められる。

ただし、強い正の相関が認められるというだけでは、これらの時間的見越しが正確に行えるようになったというには十分ではない。この相関が有意であった場合の回帰直線は、青色丸移動時間を y 、赤丸保持時間を x とした際の一次式 $y = a + bx$ であり、

$$\text{青色丸移動時間} = a + b \times \text{赤丸保持時間 (msec)}$$

とあらわされる。青色丸の際会位置到達時刻の見越しおよび赤丸の移動開始時刻の見越しのいずれもが正しく行ったというためには、この一次式の切片 $a = 1,750$ 、傾き $b = 1$ が必要である²⁾。

表1は、各ブロックにおける回帰直線の係数をあらわしている。これを見ると、第8ブロック以降で、切片、傾きとも $a = 1,750$ 、 $b = 1$ に近づきつつあるように見える。

橋本（2019）が「エラーを帳消しにする」課題で実験した群では、先述のように、60試行以降で0.9以上のきわめて強い正の相関を示し、かつ100から110試行までの10試行では、回帰直線の切片 $a = 1,760.5$ 、傾き $b = 0.9672$ であった。これには及ばないものの、強い正の相関関係と回帰直線の係数からすれば、今回の被験者は、かなり高い精度で青色丸の際会位置到達時刻に関する知覚的見越しおよび赤丸の移動開始時刻に関する効果器の見越しを行えるようになり、移動指標にタイミングをあわせられるよう

表1 回帰直線の係数

	ブロック	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
実験群	切片	2,405.7	2,289.2	2,300.6	2,348.5	2,154.5	2,111.6	2,153.3	2,023.1	2,015.5	2,066.4	1,969.4	2,031.7
	傾き	0.0773	0.2626	0.2698	0.1997	0.4407	0.5028	0.4429	0.6226	0.6312	0.5710	0.6924	0.6293

2) たとえば、恒常誤差がまったく変わらず終始-100 msecのとき、相関係数は1.0、 $a = 1,850$ 、 $b = 1$ となり、青色丸移動時間の平均値が2,145 msec、恒常誤差の平均値が197.5 msecで両者の変化率が等しいとき、相関係数は1.0、 $a = 1,750$ 、 $b = 0.67$ となる。

になったといえるであろう。

橋本（2019）の「エラーを帳消しにする」課題は、次試行の目標値が実現値のみに依存して設定される、被験者自身の心地よいタイミングに引き込むことのできる課題であった。ここで目指された「落としどころ」は、被験者の自己ペースの時間条件であった。同じ研究で比較された「一定時間に恒常誤差を加える」課題では、一定の（すなわち PC 側の）設定時間に引き戻すように「落としどころ」が求められた。

これらは、共通の統一した目標に向かってではあるが、前者では被験者側の、後者では PC 側の主張だけが通ることを求めたものであった。これに対して、本研究での落としどころは、共同合理性すなわち「パレート最適」を満たす点を目指したものである。「一定時間に恒常誤差を加える」課題のようにほとんど主張が通らないということもなく、「エラーを帳消しにする」課題ほどではないが、そこそこの言い分が通ることにより、精度の高い見越しが行えるようになったものと考えられる。

ここで、落としどころを探っていく過程は設定された青色丸移動時間の変遷にあらわされる。図6は、第4試行から第120試行までの、被験者ひとりひとりに提示された青色丸移動時間の推移をあらわしたものである。縦

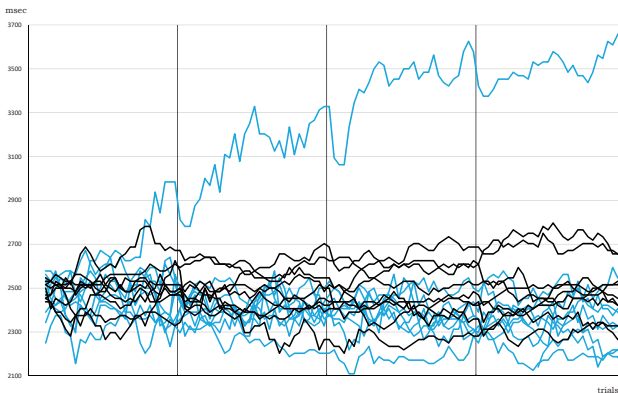


図6 青色丸移動時間の推移

橋本：移動指標が前試行の目標時間と実現時間の平均で移動する一致タイミング課題の学習軸が時間で横軸の試行はセットごとに4つに区切られている。濃色であらわされた折れ線が今回の被験者、淡色であらわされた折れ線が「エラーを帳消しにする」課題を与えられた被験者のものである。後者のうちの1名はこの図の範囲から大きく外れ、3,500 msec 付近にまで至っているが、今回の被験者にはそのようなことは見られない。

そこで、青色丸移動時間のばらつきを見るために変動誤差を検討することにした。表2はこれをブロックごとにあらわしている。実験群が今回の被験者、参考群が「エラーを帳消しにする」課題を与えられた被験者のものである。また、個人平均はそれぞれ9名の被験者の10回ずつの変動誤差の平均をあらわし、全体はそのブロックにおける9名分、すなわち90回の変動誤差である。

全体を比較すると、図6にもあらわされているが、参考群のほうがばらつきが大きい。これは、逸脱減少に方向づけるものがないことによるが、実験群では目標値と実現値との平均値をとるという相互作用の効果により、個人間のばらつきが小さくなったと思われる。一方個人平均を見ると、参考群では第9ブロック以降にかけて減少傾向にあり、個人内で安定してきているが、実験群では当初から参考群の第9ブロック以降よりも小さいことがわかる。全体が徐々に大きくなっていることは個人間で差があらわれていることを示しているが、実験群では、個人内では比較的安定的に、それぞれの自己ペース、それぞれの心地よいタイミングへと「落ちて」いつているのではないかと考えられる。

表2 青色丸移動時間の変動誤差

msec

	ブロック	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
実験群	個人平均	29.9	27.3	36.0	28.6	24.1	24.4	30.8	22.1	17.5	32.7	20.4	21.2
	全体	65.9	92.0	100.9	83.7	91.4	113.3	112.5	125.7	125.2	138.7	141.3	130.2
参考群	個人平均	54.4	47.4	66.3	44.1	51.6	44.8	52.2	43.4	37.1	36.9	38.8	38.1
	全体	91.5	105.0	162.0	181.7	261.4	273.7	305.2	360.2	374.0	347.6	386.7	398.3

お わ り に

パス事態において、受け手が投げ手に対して協力・共同作用をする際のあわせかたについて、投げ手と受け手の間をとるようなパラメータ変更を行う場合を模した学習実験を行った。

具体的には、移動指標が前試行までのエラー情報に基づいて移動所要時間を変更する一致タイミング課題について、次試行の移動指標の移動所要時間を、前試行の目標値である移動指標の移動所要時間と、前試行の実現値であるタイミングエラーを含んだ見越し時間との平均値とした課題を用いてその学習を検討した。

結果として、学習ブロックに絶対誤差の有意な減少が認められ、学習が成立したことが示された。また、移動指標の際会位置到達時刻に関する知覚の見越しと、反応アイテムの移動開始時刻に関する効果器の見越しの正確さをあらわすものとして、移動指標の移動所要時間と反応時間との間の相関を検討した。80試行を超えると0.7以上の強い正の相関が認められ、回帰直線は橋本（2019）には及ばなかったが、かなり高い精度でこれらの時間の見越しを行えるようになったことが明らかにされた。

この結果から以下のことが考えられる。パスの投げ手と受け手が、パスを受ける位置に到達すると同時にボールを届けるという統一した共通の目標を持って協力・共同作用をする際に、両者の共同合理性を満たす点を落とすところとして目指した場合、投げ手は、受け手がいつ際会位置に到達するかを正確に見越すこと、またいつ自身がボールを放てばよいかを正確に見越すことができるようになるといえる。

橋本（2019）では、本研究よりも高いレベルの見越しを示したが、橋本（2020）の成果からすれば、学習の初めからではあるが、5回に1回の割合で自身の反応とは関係のない、いわば摂動（*perturbation*）が入ると学習は崩壊する。本研究で用いた課題に、このようなもろさがあるかどうかを検討する必要がある。

橋本：移動指標が前試行の目標時間と実現時間の平均で移動する一致タイミング課題の学習

また本研究の課題は、移動指標の移動所要時間が、学習初期から個人内ではあまりばらつかない課題であったということからすれば、パスの投げ手と受け手それぞれの主張の間をとるという選択は、受け手が別のプレイヤーにかわっても落としどころが見つかりやすいということであらわしているのではないだろうか。そして、移動所要時間のばらつきを小さくする課題として、帯域幅 (bandwidth) を持たせて、これを超えない場合は移動所要時間を変更しないという課題も考えられる。

ハーケン はシナジェティクスを提唱し、物理学におけるレーザーやベナール対流、化学におけるペルーソフ-ジャボチンスキー反応、生物学における粘菌のふるまいに共通した自己組織化の原理があることの説明を試みている。これらのシステムは、いずれも多数の要素が相互作用することによりマクロな秩序ができあがるというものである。本研究で扱う要素が2のパス事態における学習にこの原理が当てはまるものか、はなはだ疑問ではあるが当てはまると信じてすすめたいものである。

文 献

- ハーケン：高木隆司訳 (1985) 自然の造形と社会の秩序。東海大学出版会。
- ハーケン：斎藤ほか訳 (1986) シナジェティクスの基礎。東海大学出版会。
- 橋本晃啓 (2014) フィードフォワード制御動作における効果器の見越しを含んだ一致タイミング課題の学習。修道法学, 36(2) : 531-545.
- 橋本晃啓 (2016) 「迎撃様」一致タイミング課題に及ぼす知覚的見越しおよび効果器の見越し学習の転移効果。修道法学, 39(1) : 1-24.
- 橋本晃啓 (2018) 移動指標が停止または加速する一致タイミング課題の学習。修道法学, 40(2) : 285-301.
- 橋本晃啓 (2019) 移動指標が前試行の時間的見越しにしたがって移動する一致タイミング課題の学習。修道法学, 41(2) : 303-322.
- 橋本晃啓 (2020) 前試行の実現値とは独立した目標値が挿入される一致タイミング課題の学習。修道法学, 42(2) : 267-280.
- 大沢英一 (1995) マルチエージェント環境における交渉のモデル。人工知能学会誌, 10(5) : 690-696.
- Poulton, E. C. (1957) On prediction in skilled movements. Psychological Bulletin, 54

(6) : 467-478.

隅田浩司 (2005) 戦略的交渉と交渉学——交渉学入門——. パテント2005, 58(8) : 5-13.