コンピュータ・グラフィックス(CG)の身体モデル 表示によるテニスサーブの予測判断

福原和伸¹⁾・井田博史²⁾・石井源信³⁾

Anticipatory Judgment of Tennis Serve Displayed by the Human Models of Computer Graphics (CG)

Kazunobu Fukuhara¹, Hirofumi Ida², and Motonobu Ishii³

Abstract

This study examined the perceptual effect of color and/or figuration information in human models created using computer graphics (CG) on anticipatory judgments of tennis serves. Fourteen skilled and fourteen novice tennis players attempted to anticipate serve direction by observing one live-action image and four CG animations (polygon, shadow, stick, and point-light) edited in accordance with a temporal occlusion paradigm. The dependent variable was the correct responses of serve directions (anticipation accuracy). The shadow, stick, and point-light models were simplified variations of the color and/or figuration information within a polygon model. At an occlusion of 30 ms before the moment of racket-ball impact, the skilled player's anticipation accuracy was superior to the chance level (50%) in the live-action and polygon model conditions, but not in the other three model conditions. In contrast with the results of skilled players, the novice player's anticipation accuracy did not exceed the chance level in all the conditions (model and occlusion). Moreover, the skilled players made more accurate judgments than their novice counterparts in the live-action and polygon model conditions. These results suggested that the skilled players used the color and figuration information in human models as visual information when they picked up the essential kinematic information from opponent's movement patterns. In addition, there were no significant differences in the skilled player's anticipation accuracy between the live-action and polygon model conditions. This led to the conclusion that our polygon model had sufficient quality to evaluate the superior anticipatory performance of skilled tennis players.

Key words: kinematic information, skill-level, temporal occlusion, visual information process

1) 東京工業大学大学院 社会理工学研究科
〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 W9-601
2) 神奈川工科大学 ヒューマンメディア研究センター
〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野1030
3) 東京工業大学大学院 社会理工学研究科
〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 W9-601
連絡先: 福原和伸
fukuhara@gi.hum.titech.ac.jp

1 Graduate School of Decision Science and Technology, Tokyo
Institute of Technology
W9-601 2-12-1 O-okayama, Meguro, Tokyo, 152-8552 JAPAN
2 Human Media Research Center, Kanagawa Institute of
Technology
1030 Shimo-Ogino, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0292 JAPAN
3 Graduate School of Decision Science and Technology, Tokyo
Institute of Technology
W9-601 2-12-1 O-okayama, Meguro, Tokyo, 152-8552 JAPAN
Corresponding author: Kazunobu Fukuhara

緒 言

対峙型のスポーツ競技場面において、アスリートは対戦相手や周辺環境の刻々と変化する状況に対して瞬時に対応しなければならない。これを実現するために、彼らは相手の動作パターンを基に次に生起する事象を予測する。例えば、テニスのサーブリターンにおいて、熟練者は正確かつ効果的なリターンを行うために、相手サーバーによるラケットとボールのインパクト前に動作を開始することが報告されている (Farrow et al., 2005)。これは、テニス熟練者が初級者に比べ、相手の動作パターンから得られた視覚手掛かりを情報源とし、打球の方向や速度をより正確に予測することができるからである (Goulet et al., 1989; Jackson and Mogan, 2007; Singer et al., 1998)。特に、インパクト直前は、熟練者にとってサーブ方向の予測情報を利用する上で重要な時間帯であることが報告されている (Farrow and Abernethy, 2003; Jones and Miles, 1978)。以上から、テニスサーブの予測判断における高い時間制約の下で、相手の動作パターンを正確に認知することは、熟練者特有の技能の一つであると言える。

従来、人の動作に対する認知(バイオロジカルモーション認知)の研究では、光点表示(point-light display)が呈示映像の一つとして利用されてきた。光点表示は人の関節中心につけた光点のみを表示する方法であり、この光点は静止した状態では人として認識できなくとも、一旦それが動き始めると動作の判別が可能になるという特徴がある (Johansson, 1973)。光点表示を利用したバイオロジカルモーション認知に関する先行研究では、歩行者の性別の識別(Cutting, 1978; Kozlowski and Cutting, 1977)、持ち上げ運動時の物の重さ識別(Runeson and Frykholm, 1983; Shim and Carlton, 1997)などがある。これらの先行研究では、観察者が日常生活に関わる様々な動作を、上肢と下肢の各関節で構成される運動情報(kinematic information)の不変項(例えば、肩と腰を繋ぐ箇所)から認識できることを報告した。

スポーツの認知研究では、このバイオロジカルモーション認知の観点から、熟練者が相手の動作パターンから獲得する予測手掛かりの情報源を明らかにすることが試みられてきた (e.g., Abernethy, 1993; Abernethy et al., 2001; Shim et al., 2005; Ward et al., 2002)。Abernethy (1993)はスカッシュのストローク動作の実写映像と光点映像を用いて、時間的遮蔽手法により熟練者と初級者の予測正確性を評価した。その結果、光点映像による視覚情報の制限は、熟練者と初級者の両群の予測正確性を低下させるが、両群は光点映像から打球の奥行きと方向に関する視覚情報を獲得していた。さらに、実写と光点の両映像呈示下において、熟練者は初級者よりも優れた予測判断を行うことが確認され、熟練者と初級者の予測判断能力の違いは、相手の動作パターンから本質的運動情報(essential kinematic information)と呼ばれる重要な予測手掛かりを抽出する能力の違いに関連することが示唆された。また、Ward et al. (2002)は、テニス熟練者と初級者がグラウンドストローク動作の実写映像と光点映像を観て予測判断する際、彼らの眼球運動を計測した。その結果、予測正確性における熟練度と映像の効果は認められなかったが、熟練者は初級者に比べ、呈示映像による情報変化に拘わらず相手の体幹付近へ長く注視しており、ラケットスイング動作に伴う体幹周辺領域の僅かな変化(例えば、腰と肩の位置関係など)を予測手掛かりとして利用していることを示唆した。以上からWard et al. は、光点映像で示される相対的な運動連鎖情報が、熟練者の予測判断に必要な本質的運動情報であることを明らかにした。

さらに近年では、この光点映像に加え、コンピュータ・グラフィックス(以下、CG)アニメーションの身体モデルが、バイオロジカルモーション認知に関する研究(e.g., Tarr and Warren, 2002; Thompson et al., 2005)やスポーツ科学研究(e.g., Bideau et al., 2004; Gray, 2002; Pollick et al., 2001)の呈示映像として採用されてきている。CGアニメーションの身体モデル利用の主な目的は、運動情報の正確な操作や外観情報(色や

形態など)を呈示できるところにあり、研究の目的に合わせて視覚情報を操作することを可能とする。例えば、Hodgins et al. (1998)は、身体モデルの形態情報の違いが、観察者の動作識別の精度に与える影響について検討した。この研究では、人の各関節を直線で連結し表現した棒モデルと、人の形態を色彩表示による多面体で表現したポリゴンモデルのランニング動作に対して、体幹の捻りや腕振り動作の運動情報を変化させ呈示映像として利用した。その結果、ポリゴンモデルは棒モデルに比べ、体幹の捻りや腕振り動作に対する観察者の識別精度が高かった。このことからHodgins et al. は、観察者がランニング動作の運動情報の変化を知覚する過程で、身体モデルの形態情報を視覚情報として利用したことを明らかにした。

筆者らの先行研究では、CGアニメーションの身体モデルを球技スポーツの認知研究に利用するために、テニスサーブ動作の実写映像とポリゴンモデルの呈示下における、テニス熟練者の眼球運動と予測正確性について評価した(Fukuhara et al., in press)。その結果、ポリゴンモデルは実写映像に比べ、熟練者の予測正確性を低下させるものの、熟練者はポリゴンモデルからサーブ方向の予測情報を抽出していた。しかしながら、この結果は、光点映像は実写映像に比べ熟練者と初級者の両群の予測正確性を低下させるが、両群は光点映像から予測情報を獲得するという先行研究の結果(e.g., Abernethy, 1993; Abernethy et al., 2001; Ward et al., 2002)と類似している。これらの先行研究の結果から、熟練者が相手の動作パターンに内在する本質的運動情報を知覚する過程において、ポリゴンモデルで表現されている色情報と形態情報を視覚情報として利用するのかどうかは明らかではない。これまで、身体モデルの形態情報の違いは、ランニング動作に対する観察者の動作識別に影響を与えることを報告しているが(Hodgins et al., 1998)、球技スポーツの認知研究において、身体モデルの色情報と形態情報の制限が、相手の動作に対する熟練者と初級者の予測判断に与える影響については直接検討されていない。

本研究では、球技スポーツの認知研究で多く採用されているテニスサーブの予測判断において、身体モデルの色情報と形態情報がテニス熟練者と初級者の予測正確性に与える影響を明らかにすることを目的とした。身体モデルの効果を検証するために、実場面のテニスコート上で撮影したサーブ動作の実写映像と、身体モデルの色情報と形態情報を減少させたサーブ動作のCGアニメーションを呈示映像として利用することとした。また、映像の時間的遮蔽手法(e.g., Abernethy and Russell, 1987; Farrow and Abernethy, 2003)により、各呈示映像に対するサーブ方向の予測判断の時間的推移を調べた。

時間的遮蔽手法を用いたテニスサーブの予測判断研究では、ラケットとボールのインパクト前での遮蔽において熟練者は初級者よりも優れた予測判断を行うが、インパクト後の遮蔽では熟練度の効果が見られないことを報告している(Farrow and Abernethy, 2003; Farrow et al., 2005; Jones and Miles, 1978)。これは、熟練者と初級者の両群が、インパクト後のボール軌跡をサーブ方向の予測手掛かりとして利用するためである。本研究においても、実験参加者によるインパクト後のボール軌跡に関わる視覚情報の利用を避け、身体モデルの効果を直接検討するために、呈示映像をインパクト瞬間の直前で遮蔽することとした(同様に、Jackson and Mogan, 2007)。

熟練度による予測判断能力の違いが、相手の動作パターンから本質的運動情報を抽出する能力の違いによるのであれば(Abernethy, 1993; Abernethy, et al., 2001; Ward et al., 2002)、映像条件に拘わらず、熟練者は初級者に比べ、早い遮蔽段階から一貫して予測正確性が高いと仮説を立てた(仮説1)。さらに、熟練者もしくは初級者が相手の動作パターンの本質的運動情報を知覚する過程において、身体モデルの色情報と形態情報を視覚情報として利用するならば、身体モデルの色情報と形態情報が減少するに伴い、熟練者もしくは初級者の予測正確性は低下すると予想した(仮説2)。これらの結果から、身体モデルの色情報と形態情報の視覚情報

特性を明らかにし、本研究で作成したポリゴンモデルが、熟練者の優れた予測判断能力を評価できる特性を有するかどうかを検討する。

方 法

1. 実験参加者

14名のテニス熟練者（平均年齢 19.5 ± 1.3 歳；平均競技経験 6.1 ± 1.1 年）と14名の初級者（平均年齢 24.8 ± 1.9 歳）が実験に参加した。熟練者は関東学生テニス連盟に加盟する大学硬式テニス部に所属し、地域もしくは国内の競技大会に向けて毎日練習を行っている。初級者は体育授業で数回のテニス経験を有する大学院生であり、競技経験のないものであった。実験参加者には実験前に内容を説明し、参加に関する同意を得た。なお実験参加者全員が正常な視機能を有していた。

2. 呈示映像

1) モデル参加者と撮影状況

呈示映像のモデル参加者は、右利きのプロテニスコーチ1名（年齢42歳；競技経験30年）であった。動作撮影の前に、モデル参加者の実験参加に対する同意を得た。参加者にはデュースサイドのサービスボックス内に設置した2ヶ所（センター・サイド）の目標エリア（ $1\text{m} \times 1\text{m}$ ）を狙い、テニスのオーバーハンドのフラットサーブを最大努力感で打球するよう指示した。目標エリア内に正しく打球され、験者が成功と判断した、計24試技が達成されるまで行われた。

試技は1台の民生用デジタルビデオカメラ（30Hz, DCR-TRV7, Sony Inc., Tokyo）と、2台の高速度カメラ（250Hz, HSV-500C3, Nac Inc., Tokyo）で撮影された。2台の高速度カメラは、同期ユニット（V-719-B, Nac Inc., Tokyo）により電気的な同期が行われた。民生用デジタルビデオカメラはシングルスコートのサイドラインとベースラインの交差する位置に設置し、レシーバーの視野に相当する高さ（1.6m）に調整した。さらに、サーバーの身体部位とトスアップしたボールが最大限映るように画角の調整を行っ

た。高速度カメラはモデル参加者から側方9m、後方11mの2ヶ所に設置し、コントロールエリアは5m（X：左右） $\times$ 5m（Y：前後） $\times$ 3m（Z：高さ）とした。24の成功試技からセンター・サイド各3試技、計6試技を呈示映像として選択した。この呈示映像の選択基準は民生用デジタルビデオカメラによる撮影で、ラケットとボールインパクトの瞬間が含まれていることである。これは民生用デジタルビデオカメラ（30Hz）と高速度カメラ（250Hz）の電気的な同期を行わなかったため、インパクトの瞬間を同期イベントとして採用した。

2) 呈示映像の作成

民生用デジタルビデオカメラの画像データは、動画編集ソフト（Premiere Pro CS3, Adobe Systems Inc., San Jose, CA）にてサーバーの構えからラケットとボールのインパクトの瞬間までの1400msについて編集し、実写映像とした。また、民生用デジタルビデオカメラでインパクトの瞬間を撮影する際、長い露光時間の影響により、引き伸ばされて映るモーションブラーが起こる可能性が高い（Shechtman et al., 2005）。このモーションブラーには、インパクト後のボール軌道に関する視覚情報が僅かに含まれ、サーブ方向の予測手掛りになる（Fukuhara et al., in press）。従って、本研究ではインパクトの瞬間の1フレーム（30ms）前で遮蔽した。実写映像の長さは、サーバーの構えた状態の静止画像2000ms、本試技のサーブ動作1400ms、計3400msとした。高速度カメラの画像データは、ビデオ動作解析システム（Frame-DIAS II, DKH Inc., Tokyo）によりディジタイジング作業が行われた。身体各部、ラケット、ボール、計32点の3次元座標値はDLT（direct linear transformation）法（Winter, 1990）により求めた。得られた座標データはスプライン補間（Winter, 1990）の利用から、実写映像と同じフレームレートである30Hzへと変換した。結果として、高速度カメラの全350フレーム（250Hz）から41フレーム（30Hz）となる座標データを得た。CGアニメーションの身体モデルは、CG作成専用ソフト（Maya 8.5, Autodesk Inc., San Rafael, CA）を用いてモデリ

ング作業が行われ、専用スクリプト(MEL)により身体モデル内に座標データを挿入した。また、実写映像の背景画像をCGモデルの背景として組み込んだ。CGアニメーションは、視覚情報特性の異なる以下の4種類のモデルに基づき作成された(Figure 1)。

- a) ポリゴン：身体の色は肌色で表され、ラケット、ボールは実場面に似せた形状、色で作成されたモデル。
- b) 影：身体、ラケット、ボールの形状はポリゴンモデルと同様であるが、色は白色のみで表され、陰影情報を取り除いたモデル。
- c) 棒：身体、ラケット、ボールは白色の線で表され、身体部分の形状情報が簡略化されたモデル。
- d) 光点：Johansson (1973) の光点表示に基づき、身体関節中心26点、ラケット5点、ボール1点を白色の点で表し、CGモデルの中で最も情報が簡略化されたモデル。

3) 呈示映像の遮蔽

時間的遮蔽手法は、相手選手がプレーしている動作の映像を特定の時点で遮蔽して呈示する手法である (e.g., Abernethy and Russell, 1987; Farrow and Abernethy, 2003)。また遮蔽を数段階に設け、遮蔽タイミングと予測正確性の関係を検出するものである。本研究ではFarrow and Abernethy (2003) が採用した動作イベントに合わせ、以下の4段階で遮蔽した(Figure 1)。

T1：サーバーの構えからボールのトスアップ開始まで(インパクトの瞬間の約730ms前)。

T2：トスアップしたボールが頂点に飛来するまで (インパクトの瞬間の約380ms前)。

T3：サーバーのラケットヘッドが最下点に来るまで (インパクトの瞬間の約150ms前)。

T4：インパクトの瞬間の直前まで(インパクトの瞬間の約30ms前)。

結果として、呈示映像はモデル5条件(実写, ポリゴン, 影, 棒, 光点) ×サーブ方向2条件(センター, サイド) ×サーブ動作3条件×遮蔽4条件(T1, T2, T3, T4), 合計120条件であった。

Figure 1 Five model conditions and four occlusion points

3. 実験手順および試行数

呈示映像は、実験参加者から4.48m離れた大型スクリーン(1.77m×0.99m)上に投影された(Figure 2)。投影されたサーバーの大きさは、サーバーの足先からインパクト時のラケット先端部分までが0.5mになるように調整し、視野角は約6.4度であった。これは、実場面のテニスコート上でレシーブする際のサーバーの大きさに相等する。

実験参加者は立位でラケットを保持した状態で映像を観た。また、彼らは映像が遮蔽された直後に左右に配置されたマット上に足部を移動することで、サーブ方向(センター・サイド)の予測を行うよう指示された。実験参加者の足部が左右どちらか一方のマット上に触れた際、験者がパーソナルコンピュータのエクセル上に実験参加者の予測したサーブ方向を記録した。同時に民生用デジタルビデオカメラでその動作を撮影し、記録されたデータの確認を行った。

実験参加者の試行回数は、練習試行20回と本試行240回であった。練習試行は本試行に含まれない呈示映像が用いられ、モデル5条件×遮蔽4条件の計20試行をランダムに呈示した。練習試行の呈示映像は、実験参加者間で同一で

あった。本試行は各モデル条件で、24条件(サーブ方向2条件×サーブ動作3条件×遮蔽4条件)をランダム化したものを2回繰り返して、計240試行を呈示した。さらに、モデル条件の呈示順序は、実験参加者の半数は実写、ポリゴン、影、棒、光点の順序で、残りの半数は、上記とは逆の順序で映像を観た。また、試行間のインターバルには約5000msを設けた。

4. 統計処理

従属変数はサーブ方向の正答率(予測正確性)とした。また、各遮蔽条件の各モデル条件における熟練者と初級者の予測正確性が、50%(チャンスレベル)よりも高いかどうかを検討するために、1サンプルの t 検定を行った。加えて、チャンスレベルを超えた条件に対して分散分析(ANOVA)を行った。全ての正答率は逆正弦関数で変換を行い、全ての統計分析において有意水準は5%とした。

結 果

Table 1は各遮蔽条件の各モデル条件に対する熟練者と初級者の正答率を示したものである。熟練者の正答率はT4の実写($t(13)=3.69, p<0.01$)とポリゴン($t(13)=2.78, p<0.05$)の両

Figure 2 Experiment set-up

モデル条件で、チャンスレベルを有意に上回っていた。一方、初級者の正答率ではチャンスレベルを有意に超える条件が確認されなかった。

影、棒、光点の各モデル条件では、熟練者と初級者の予測正確性はチャンスレベルを超えないことから、熟練者の正答率がチャンスレベルを超えたT4の実写とポリゴンの両モデル条件に対して二要因の分散分析（モデル×熟練度）を行った（Figure 3）。その結果、熟練度に有意な主効果が認められたが（ $F(1, 26) = 19.25$, $p < 0.01$ ）、モデルの主効果、モデルと熟練度の交互作用に有意な差は確認されなかった。モデルと熟練度の交互作用に有意な差は認められなかったものの、実写とポリゴンの各モデル条件における熟練度の効果を調べるために、熟練度の主効果に関して単純主効果の検定（一要因の分散分析）を行った。その結果、実写（ $p < 0.01$ ）とポリゴン（ $p < 0.05$ ）の両モデル条件におい

て、熟練者は初級者に比べ有意に正答率が高かった。

考 察

熟練者の予測正確性はT4の実写とポリゴンの両モデル条件でチャンスレベルを上回っていた。テニスサーブの予測判断研究では、ラケットとボールのインパクト直前で遮蔽した際、熟練者の予測正確性はチャンスレベルを僅かに超える程度であったことを報告した（Farrow and Abernethy, 2003; Farrow et al., 2005; Jones and Miles, 1978）。さらに、インパクト直前の約300 ms間の時間帯において、熟練者の予測正確性は向上することが明らかにされている（Farrow et al., 2005）。本研究では、熟練者の予測正確性がT4でチャンスレベルを超えたことから、T3からT4までの時間帯（インパクト直前の約150ms間）で彼らの予測正確性は少なくとも向

Table 1 Anticipation accuracy means (with standard deviations) for skilled and novice participants in five model conditions for four occlusion points.

Model conditions	Occlusion window			
	T1	T2	T3	T4
Live-action				
Skilled	54.17 (9.67)	52.38 (11.52)	55.95 (13.24)	60.12* (9.90)
Novice	49.40 (15.83)	53.57 (17.52)	47.02 (12.49)	45.24 (9.65)
Polygon				
Skilled	51.79 (10.43)	51.19 (13.81)	52.98 (14.47)	55.95* (9.49)
Novice	39.29 (12.42)	51.79 (13.94)	39.88 (10.43)	49.40 (7.64)
Shadow				
Skilled	45.24 (10.70)	52.98 (17.17)	51.19 (15.28)	50.00 (11.79)
Novice	52.38 (14.77)	52.98 (13.32)	47.02 (12.06)	51.79 (12.73)
Stick				
Skilled	39.88 (12.31)	55.36 (10.13)	53.57 (17.52)	48.21 (9.90)
Novice	42.54 (11.65)	55.36 (9.59)	47.62 (8.29)	51.19 (9.73)
Point-light				
Skilled	47.62 (15.13)	46.43 (15.58)	54.17 (12.97)	55.36 (14.10)
Novice	44.64 (15.19)	48.21 (15.04)	44.05 (17.73)	47.02 (9.59)

* Significantly above chance levels of 50% ($p < 0.05$)

Figure 3 The means and standard deviations of anticipation accuracy for the live-action and polygon model conditions at T4 (the occlusion of 30 ms before the moment of racket-ball impact)

** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

上したものである。以上から、実写とポリゴンの両モデル条件において、熟練者はインパクト直前の約150ms間の相手サーバーの運動情報から、サーブ方向の予測情報を獲得したと考えられる。

一方で、熟練者の結果と異なり、初級者の予測正確性はT1からT4までの全てのモデル条件でチャンスレベルを超えなかった。テニスサーブのインパクト前の遮蔽において、初級者の予測正確性はチャンスレベルを超えず、インパクト後のボール軌跡が含まれる際には、彼らの予測正確性はチャンスレベルを上回ることが報告されている (Farrow and Abernethy, 2003; Farrow, et al., 2005; Jones and Miles, 1978)。本研究では、呈示映像をインパクト瞬間の30ms前で遮蔽を行い、インパクト後のボール軌跡は呈示しなかった。即ち、初級者はボール軌跡を予測手掛かりとして利用しなかったために、彼らはインパクト前の相手サーバーの運動情報から、サーブ方向の予測情報を十分に獲得できなかったと思われる。これは、初級者がテニスサーブに対峙した経験が少ないことによるものかもしれない。従って、本研究で設定した呈示映像の遮蔽条件は、初級者がサーブ方向を予測する上で非常に困難であったと考えられる。

実写とポリゴンの両モデル条件に限定して、二要因の分散分析 (モデル×熟練度) を行った結果、熟練度に有意な主効果が確認された。その後、単純主効果の検定の結果、実写とポリゴンの両モデル条件において、熟練者は初級者に比べ予測正確性が高かった。テニスサーブの予測判断研究では、インパクト前の遮蔽で、熟練者は初級者よりも予測正確性が高いことが報告されている (Goulet et al., 1989; Farrow et al., 2005; Jackson and Mogan, 2007; Jones and Miles, 1978)。さらに、この熟練度による予測判断能力の違いは、相手の動作パターンから本質的運動情報を抽出する能力の違いに関連することが示唆されている (Abernethy, 1993; Abernethy, et al., 2001; Ward et al., 2002)。これらの先行研究の結果から、実写とポリゴンの両モデル条件における熟練者の優れた予測判断は、熟練者が相手サーバーの動作パターンに内在する本質的運動情報を利用したことによるとと思われる。

Johansson (1973) は、人の運動情報は色情報や形態情報に比べ、人の動作の識別に利用できる情報量が多いことを主張している。これは、観察者が光点表示で提供される人の運動情報の不変項を検出することができるためである。例えば、Cutting (1978) は、歩行者の性

別による違いは肩と腰のモーメント中心と呼ばれる高さの差異が不変項であることを示唆した。この運動情報の不変項を抽出するには、観察者の視覚的な経験が大きく反映することが明らかになっている (Jacobs et al., 2004)。同様に、光点映像を利用したテニスの先行研究では、熟練者は相手のラケットスイング動作に伴う運動連鎖情報を本質的運動情報として利用することを報告しており (Ward, et al., 2002; Williams et al., 2002)、この熟練した視覚情報処理は、練習や試合などの経験から蓄積された知識情報に大きく依存すると考えられている (Williams et al., 1999; Williams and Ericsson, 2005)。

しかしながら、本研究における熟練者の経験に基づく視覚情報処理は、実写とポリゴンの両モデルにのみ反映される結果となった。これは、本研究で設定した呈示映像の遮蔽条件が非常に難しい課題であったことが原因の一つと推察され、熟練者は影、棒、光点の各モデル条件において、相手サーバーの動作パターンから本質的運動情報を抽出することが困難であったと思われる。影モデルは実写とポリゴンの両モデルに比べ、色の陰影情報が取り除かれており、身体の奥行き、皮膚の凹凸、光源などに関する情報が減少している。さらに、棒と光点の両モデルは実写とポリゴンの両モデルに比べ、身体情報が単純化されており、身体の形態情報が減少している。このことから、身体モデルの色情報と形態情報が減少することで、熟練者は相手サーバーの関節の位置や回転などの僅かな運動情報の変化を正確に知覚できなかったと考えられる。

Hodgins et al. (1998) は、ポリゴンモデルは棒モデルに比べ、ランニング動作の体幹の捻りや腕振り動作に対する観察者の識別精度が高く、観察者はランニング動作の運動情報の変化を知覚する過程で、形態情報を視覚情報として利用することを明らかにした。本研究ではHodgins et al. の結果を支持し、熟練者が相手サーバーの動作パターンの本質的運動情報を知覚する過程において、身体モデルの色情報と形態情報を視覚情報として利用することで、熟練者の高い

予測正確性を実現したことが示唆される。

モデルの有意な主効果、モデルと熟練度の有意な交互作用は認められなかった。これらの結果から、実写とポリゴンの両モデル条件間において、熟練者の視覚情報処理に大きな相違はなかったことが示唆される。しかしながら、この見解は、実写映像条件 (75-85%) はポリゴンモデル条件 (60%) に比べ、熟練者の予測正確性が高いことを報告した筆者らの先行研究 (Fukuhara et al., in press) とは異なるものである。筆者らの先行研究では、実写映像はポリゴンモデルに比べインパクト瞬間で僅かなボールの変形を含み、これが熟練者の予測手掛かりの一つとなることを推察した。本研究では呈示映像をインパクト瞬間の1フレーム前で遮蔽を行ったが、筆者らの先行研究では呈示映像をインパクト瞬間で遮蔽した。よって、筆者らの先行研究で報告されたモデル条件による熟練者の予測正確性の相違は、インパクト瞬間の僅かなボールの変形による影響であることが示唆される。これは、ポリゴンモデルのボールが剛体で生成されているため、実写映像のボールの変形を表現しなかったことによるとと思われる。以上から本研究では、ポリゴンモデルは影、棒、光点の各モデルに比べ、実写モデルで呈示した熟練者がサーブ方向の予測に利用する視覚情報をより正確に再現したことが示唆される。

総 括

本研究では、時間的遮蔽手法に従って編集されたテニスサーブ動作の実写映像とCGアニメーション (ポリゴン、影、棒、光点) の利用から、熟練者と初級者の予測正確性について検討を行った。その結果、インパクト瞬間の30ms前での遮蔽において、熟練者は実写とポリゴンの両モデルからサーブ方向の予測情報を獲得していた。しかしながら、熟練者の結果と異なり、初級者は全ての条件 (モデルと遮蔽) でサーブ方向の予測情報を獲得することができず、本研究の実験課題は初級者にとって非常に難易度の高いものとなった。さらに、実写とポリゴンの両モデル条件では、熟練者は初級者よ

りも優れた予測判断を行っていた。これらの結果から、熟練者が相手サーバーの動作パターンに内在する本質的運動情報を知覚する過程において、身体モデルの色情報と形態情報を視覚情報として利用することが明らかとなった。また、実写とポリゴンの両モデル条件間において、熟練者の視覚情報処理には大きな違いが確認されなかったことから、本研究で作成したポリゴンモデルは、熟練者の優れた予測判断能力を検討する特性を有することが示唆される。この結果は、将来的にCGアニメーションを利用したスポーツの認知実験、トレーニングへ向けた身体モデルの決定に大きく貢献すると考えられる。

謝 辞

本研究は科学研究費補助金（20108202）の助成を受けたものである。

文 献

- Abernethy, B. and Russell, D.G. (1987) Expert-novice differences in an applied selective attention task. *Journal of Sport Psychology*, 9 (4) : 326-345.
- Abernethy, B. (1993) Searching for the minimal essential information for skilled perception and action. *Psychological Research*, 55 (2) : 131-138.
- Abernethy, B., Gill, D.P., Parks, S.L., and Packer, S.T. (2001) Expertise and the perception of kinematic and situational probability information. *Perception*, 30 (2) : 233-252.
- Bideau, B., Multon, F., Kulpa, R., Fradet, L., Arnaldi, B., and Delamarche, P. (2004) Using virtual reality to analyze links between handball thrower kinematics and goalkeeper's reactions. *Neuroscience Letters*, 372 (1-2) : 13-16.
- Cutting, J. E. (1978) Generation of male and female synthetic walkers through manipulation of a biomechanical invariant. *Perception*, 7 (4) : 393-405.
- Farrow, D. and Abernethy, B. (2003) Do expertise and the degree of perception-action coupling affect natural anticipatory performance? *Perception*, 32 (9) : 1127-1139.
- Farrow, D., Abernethy, B., and Jackson, R.C. (2005) Probing expert anticipation with the temporal occlusion paradigm : experimental investigations of some methodological issues. *Motor Control*, 9 (3) : 332-351.
- Fukuhara, K., Ida, H., Kusubori, S., and Ishii, M. (in press) Anticipatory judgment of tennis serve: a comparison between video images and computer graphics animations. *International Journal of Sport and Health Science*.
- Goulet, C., Bard, C., and Fleury, M. (1989) Expertise differences in preparing to return a tennis serve: A visual information processing approach. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 11 (4) : 382-398.
- Gray, R. (2002) Behavior of college baseball players in a virtual batting task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28 (5) : 1131-1148.
- Hodgins, J.K., O'Brien, J.F., and Tumblin, J. (1998) Perception of human motion with different geometric models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 4 (4) : 307-316.
- Jackson, R.C. and Mogan, P. (2007) Advance visual information, awareness, and anticipation skill. *Journal of Motor Behavior*, 39 (5) : 341-351.
- Jacobs, A., Pinto, J., and Shiffrar, M. (2004) Experience, context, and the visual perception of human movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30 (5) : 822-835.
- Johansson, G. (1973) Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception and Psychophysics*, 14 (2) : 210-211.
- Jones, C. M. and Miles, T. R. (1978) Use of advance cues in predicting the flight of a lawn tennis ball. *Journal of Human Movement Studies*, 4 : 231-235.
- Kozlowski, L. T. and Cutting, J. E. (1977) Recognizing the sex of a walker from a dynamic point-light display. *Perception and Psychophysics*, 21 (6) : 575-580.
- Pollick, F. E., Fidopiastis, C.M., and Braden, V. (2001) Recognizing the style of spatially exaggerated tennis serves. *Perception*, 30 (3) : 323-338.
- Ranganathan, R. and Carlton, L. G. (2007) Perception-action coupling and anticipatory performance in baseball batting. *Journal of Motor Behavior*, 39 (5) : 369-380.
- Runeson, S. and Frykholm, G. (1983) Kinematic specifications of dynamics as an informational basis for person-and-action perception: Expectation, gender-recognition and deceptive intention. *Journal of Experimental Psychology: General*, 112 (4) : 585-615.
- Shechtman, E., Caspi, Y., and Irani, M. (2005) Space-time super-resolution. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27 (4) : 531-545.
- Shim, J. and Carlton, L. G. (1997) Perception of kinematic characteristics in the motion of lifted weight. *Journal of Motor Behavior*, 29 (2) : 131-146.
- Shim, J., Carlton, L. G., Chow, J.W., and Chae, W.S. (2005) The use of anticipatory visual cues by highly skilled tennis players. *Journal of Motor Behavior*, 37 (2) : 164-175.
- Singer, R. N., Williams, A. M., Frehlich, S. G., Janelle, C. M., Radlo, S. J., Barba, D. A., and Bouchard, L. J. (1998) New frontiers in visual search: An exploratory study in live tennis situations. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 69 (3) : 290-296.
- Tarr, M. J. and Warren, W. H. (2002) Virtual reality in behavioral neuroscience and beyond. *Nature Neuroscience*,

- 5 (Suppl. 1) : 1089-1092.
- Thompson, J. C., Clarke, M., Stewart, T., and Puce, A. (2005) Configural processing of biological motion in human superior temporal sulcus. *Journal of Neurosciences*, 25 (39) : 9059-9066.
- Ward, P., Williams, A. M., and Bennett, S. J. (2002) Visual search and biological motion perception in tennis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 73 (1) : 107-112.
- Williams, A. M. and Ericsson, K. A. (2005) Perceptual-cognitive expertise in sport: Some considerations when applying the expert performance approach. *Human Movement Science*, 24 (3) : 283-307.
- Williams, A. M., Davids, K., and Williams, J. G. (1999) *Visual perception and action in sport*. E. and F.N. Spon. London.
- Williams, A. M., Ward, P., Knowles, J. M., and Smeeton, N. J. (2002) Anticipation skill in a real-world task: measurement, training, and transfer in tennis. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 8 (4) : 259-270.
- Winter, D. A. (1990) *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. 2nd ed. John Wiley and Sons Inc. New York.

(2008.12.25 受稿, 2009.9.7 受理)