

仮想環境を利用した自由落下物体の位置予測特性の解析

竹市 勝^{*1*2} 藤田欣也^{*1} 田中秀幸^{*1}

Analysis of Human Anticipation Property of a Free-falling Object Position using Virtual Environment

Masaru Takeichi^{*1*2}, Kinya Fujita^{*1}, and Hideyuki Tanaka^{*1}

Abstract — Human anticipation property of a free-falling object was experimentally studied by using a VR system, and the obtained results were compared to the results in real environment. Twelve participants were required to answer the anticipated position of free-falling virtual object at the visual stimulus onset, which was given after a specific interval of the object disappearance. The anticipated position increased proportionally to the interval, while the interval was varied from 30 to 190 ms. However, the slopes of the regression lines, which represent the anticipated velocities of the subjects, were five times smaller than the actual velocities. This unexpected slowdown was independent from the distance in virtual space. Therefore, this slowdown appears to be caused by the internal process of the recognition and anticipation, not the physical limitation such as the eye movement velocity.

Keywords: anticipation, free-falling object, perception, real environment

1. はじめに

仮想現実感 (Virtual reality: VR) は、臨場感のある仮想世界を表現するための視覚や力覚ディスプレイ装置の研究や、動作を介して仮想環境とのインタラクションをはかる入力インタフェースの開発など、様々なシステムについて研究がなされ、近年飛躍的な技術進歩を遂げている。今日では、このような VR 技術を多方面からヒトへ応用するアプローチが行われている。リハビリテーションなどの機能回復訓練 [1] やスポーツ分野への応用 [2, 3, 4, 5, 6] などは、その例である。

日常生活における落下物のキャッチ、野球におけるフライのキャッチやバドミントンでのスマッシュのように、自由落下物体をうまく捕らえて、捕球や打球する場面がよく見られる。特に初心者などでは、キャッチミスや空振りもよく目にする。自由落下物体の捕捉という運動は、日常生活やスポーツにおいて重要な技能である。しかし、その運動の成就是困難であり、高度なスキルを必要とする。このように、捕捉などの運動物体に対する運動が、なぜ困難なのかについては、運動物体の認知や動作制御特

性に関する詳細な解析が、失敗原因などの解明につながるものと期待される。特に、前述の野球やバドミントンの例のような自由落下物体の捕捉に関しては、動作制御ではなく、物体の運動認知や予測の機構が失敗の原因となっている場合もあるものと予想され、動作制御特性を含まない自由落下物体の運動予測特性についての解析が望まれる。

人間の自由落下物体予測特性を解析するためには、物体運動を正確に繰り返し再現することが可能であり、さらに実験環境を自由に設計できるといった長を有する VR 技術の利用が有効と考えられる。しかし、仮想環境で運動物体の認知や予測に関する特性の評価を行う場合、ディスプレイ上での描画が離散的であること、ディスプレイ面までの距離と仮想空間での物体までの距離が矛盾することなどが、認知や予測に影響を及ぼす可能性が存在する。したがって、特性評価にあたっては、仮想環境における個人の特性が、現実環境における特性を反映したものであることを検証しておく必要がある。

運動物体の認知や予測に関する研究では、捕捉について多くの報告がなされている。例えば、標的速度の打撃動作への影響に関する研究 [7] や、正確な捕球のための運動戦略に関する研究 [8] などがある。捕球や打撃などの運動は、物体運動の認知・予測と、それらの情報をもとにした運動制御の過程を経て

*1: 東京農工大学大学院

*2: 国士館大学政経学部

*1: Graduate School of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology

*2: Faculty of Political Science and Economics, Kokushikan University

実行されるが、これらの研究は、認知・予測から運動制御までの過程を包括的に捉えたものであった。しかし、捕球や打撃のメカニズムや失敗の原因を解明するためには、運動制御が起こる前の物体運動の認知・予測特性と運動制御を分離して、評価検討を行うことが必要である。

運動物体の認知と予測に関しては、心理学の分野において多くの先行研究が見られる。例えば、運動中の物体の消失位置を、実際よりも運動方向にずれて判断する表象的慣性 representational momentum (RM) [9]や、衝突物体と被衝突物体の速度知覚における因果関係を調べた launching event (LE) [10]、そして衝突時刻 TTC (time-to-contact) 予測に関連する多くの研究が知られている。中でも TTC に関する研究は、対象物の網膜上の像の大きさ変化によって算出される τ と衝突予測時刻との関係を論じた研究 [11] に始まり、運動物体に対する捕捉動作制御に衝突予測時刻 τ が利用されているとの報告や、optical flow にもとづく衝突予測時刻 τ と、捕球動作の開始時刻の関連についての報告もある [12]。TTC 課題においては、衝突までの時間を実際より過小評価する現象が報告されているが [13, 14, 15]、過小評価の原因について明快な解釈を与える報告が現在まで見られないなど、運動物体の予測機構に関しては、いまだ多くの疑問が残されている。

これまでの時間予測や位置予測に関する研究の多くは、運動物体の衝突時刻や衝突位置といった結果を議論するものであった。一般に、原因の解明には結果に至る途中経過の解析が有効である。運動物体の予測に関しては、例えば、運動物体が遮蔽されて再出現する場面において、再出現時刻や再出現位置の予測特性ではなく、遮蔽から再出現までの物体運動の認知や予測に関する特性を解析することは、運動物体の予測機構解明につながるものと期待される。したがって、被験者が予測する遮蔽後の物体位置が経時的に移動する様子の解析は、運動予測機構解明の一助となる可能性がある。この場合、TTC のように衝突位置を規定して衝突時刻を予測させる課題とは逆に、時間を規定して位置を予測させる課題となるが、時間から位置への予測特性はこれまで報告されておらず、不明であった。

また、自由落下物体を対象にした研究については、コンピュータによって描画された画像の観察による、落下地点予測への加速イメージの役割について報告がなされている [16]。しかし、これはコンピュータによって再現された自由落下物体の観察から、単に最終的な位置を予測するもので、物体運動速度の認知や予測に関するものではなかった。

そこで本研究では、自由落下物体の運動について、運動制御を含まない運動の認知・予測特性を実験的

に解析した。実験では、自由落下物体の運動を視覚的に提示する仮想実験環境を構築し、遮蔽中の運動物体の位置予測特性について解析することを目的に、TTC 課題とは逆に、時間を規定し位置を予測する課題を被験者に課したところ、興味深い現象が観察されたので報告する。

2. 方法

2.1 被験者

被験者は、健康な男子大学生 24 名 (19~21 歳) とした。視力は、いずれの被験者も裸眼または矯正視力で 0.8 以上であった。被験者のうち 12 名は、後述の仮想環境実験、現実環境実験、仮想環境比較実験の全てに参加した。残りの 12 名は、等速運動実験にのみ参加した。

2.2 仮想環境実験

2.2.1 実験装置とセットアップ

仮想環境は、コンピュータ (OS: Windows 2000, CPU: Athlon XP1700+) と平面ディスプレイ (22 インチ: liyama 社製) のシステム上で、Visual C++ と OpenGL を用いた自作ソフトウェアによって構築した。描画速度とモニタのリフレッシュレートはともに 100 frames/s とした。被験者とディスプレイの位置は、ディスプレイに描画された仮想環境が、現実環境の上下方向視野角 60 度と同じになるよう被験者の目の高さを 120cm、目とディスプレイ間の距離を 25cm とした。さらに頭部の位置を安定させるため、固定装置に顎と額を図 1 のように接触させ固定した。

2.2.2 視覚刺激提示

図 2 のような仮想環境の部屋 (間口 5m、高さ 2.7 m) において、遮蔽板 (高さ 1.1m) 後方から卓球ボールが、地上 1.67m の高さに打上げられ、遮蔽板後方に自由落下する運動を再現した。ボールが遮蔽された後、遮蔽板全体を明るく変色させ視覚刺激とし

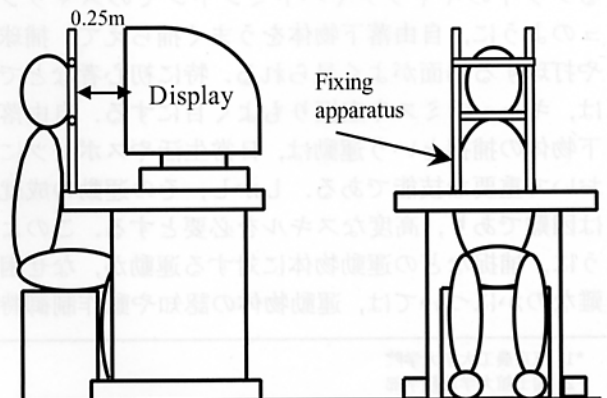


図 1 仮想環境実験状況

Fig.1 Experimental set-up in virtual environment

た. ボールの遮蔽後, 遮蔽板が変色するまでの時間 (遅延時間) は, 30, 80, 120, 160, 190ms の 5 段階とした. これらは遮蔽板の上端から 10, 25, 40, 55, 70cm の位置に相当する. 遮蔽板の変色は, 次の試行でリセットされるまで変色した状態で, 視覚刺激は, 被験者にとって十分認識可能な刺激であった. 各タスクにおける視覚刺激の提示順序は, 1 ブロック 25 回のうち各遅延時間が 5 回ずつランダムに出現するように設定した.

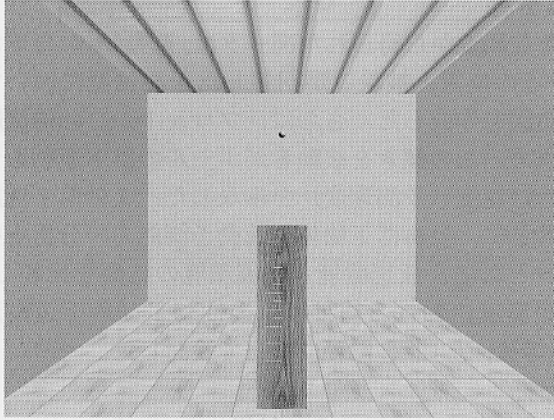


図2 仮想環境イメージ

Fig.2 Virtual environment image

2.2.3 実験要領

被験者は, 頭部を固定してディスプレイに正対し, 描画された卓球ボールの自由落下運動を観察した (図1). 被験者には, 視覚刺激提示時刻におけるボールの位置を, 遮蔽板前面に表示した 16 段階 (仮想空間内で 5cm 間隔) の目盛によって口頭で回答するように指示した. 実験では, 25 回の試行を 1 ブロックとし, 5 ブロック (合計 125 試行) を実施した. 各ブロック間に十分な休憩をとりながら実験を行った.

運動する卓球ボールの空気抵抗は, 実際の卓球ボールの自由落下運動時間を計測し, 同一になるように設定した. 遮蔽直前での落下速度は 3m/s で, 視点からボールまでの距離が 2.5m の時の画面上の速度は, 8 ピクセル/frame である. このとき直径 40mm のボールは画面上で 11 ピクセルとなり, 連続的な運動として観察される.

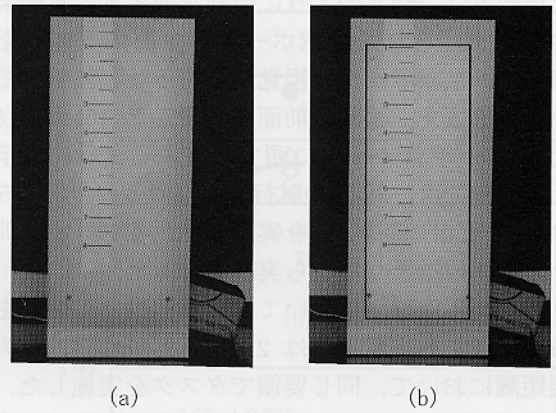
また, 眼球運動との関係性をみるために, 各被験者には, ボールとの距離 (視距離) が 2.5m のタスクのほか, 3.5m, 4.5m の視距離においても同じ要領でタスクを実施した. 各視距離 (2.5m, 3.5m, 4.5m) での実験は, 疲労を回避する目的で異なる日に実施した.

さらに, 時間経過と予測速度について検討するために, 3 ヶ月後, 視距離 3.5m の条件において, 同じ要領でタスクを実施した.

2.3 現実環境実験

2.3.1 実験装置とセットアップ

現実環境では, 定速ボール打上げ機, 遮蔽板, 遮蔽板背部に設置したボール位置検出器と検出器に連動する視覚刺激提示用光源によって構成される遮蔽板付き実験装置, および被験者の頭部の位置を安定させるための固定装置を使用した. 定速ボール打上げ機は DC モータを定電圧駆動し, 打ち上げの高さを 1.9-2.0m の範囲に制御した. 遮蔽板には, 白色アクリル板 (高さ 120cm, 幅 50cm) を使用し, ボール位置検出器として, 遮蔽板の上端から 20, 35, 50, 65, 80cm 下方に 5 組のフォトトランジスタと LED を設置した. 刺激用光源には LED を使用することで, ボール通過から視覚刺激提示までの遅延時間を抑制し, 133 個の赤色 LED を遮蔽板中央部の縦 90cm, 横 30cm の範囲に上下 5cm 間隔で配置した (図3).



(a)

(b)

図3 現実環境における実験装置

(a) 通常,

(b) 視覚刺激時; □の内部全面が赤色に変色する

Fig.3 Experimental apparatus in real environment

(a) Normal, (b) Stimulated

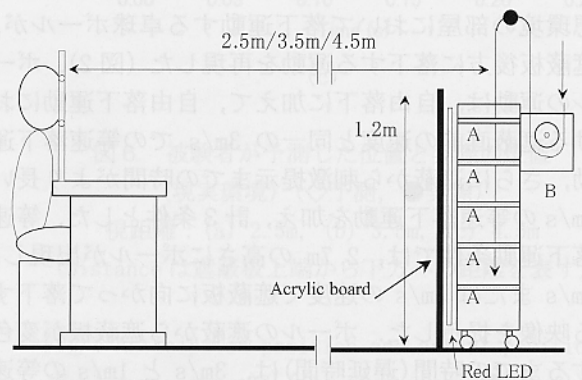


図4 現実環境実験状況 (側面図)

A: 位置検出器, B: ボール打上げ器

Fig.4 Experimental set-up in real environment

A: Position sensor, B: Ball projection machine

実験では、被験者の目の高さが 120cm になるように、椅子の高さを調整し、実験装置は、図 4 のように被験者の正面に正対した位置にセットした。

2.3.2 視覚刺激提示

現実環境では、卓球ボールが、遮蔽板後方から地上約 2m の高さに打上げられ、遮蔽板後方に自由落下する。遮蔽後の視覚刺激提示は、遮蔽板の上端から 5 段階のうちスイッチによって選択された位置検出器を通過した時に、遮蔽板背後の赤色 LED が点灯するようにした。それぞれの位置における遅延時間は、約 60, 100, 130, 170, 200ms である。視覚刺激持続時間は、提示開始から 0.4 秒後に LED を消灯するように設定した。この視覚刺激は、被験者にとって十分認識可能な刺激であった。各タスクにおける視覚刺激の提示順序は、仮想環境実験と同じ設定とした。

2.3.3 実験要領

被験者は、図 4 のように頭部を固定し、実験装置から打上げられた卓球ボールの自由落下運動を観察した。被験者には、視覚刺激提示時刻におけるボールの位置を、遮蔽板前面に表示した 16 段階(5cm 間隔)の目盛によって口頭で回答するように指示した。実験では、25 回の試行を 1 ブロックとし、5 ブロック(合計 125 試行)を実施した。各ブロック間に十分な休憩をとりながら実験を行った。

また、現実環境においても眼球運動との関係を知るために、各被験者には 2.5m, 3.5m, 4.5m の各視距離において、同じ要領でタスクを実施した。各視距離 (2.5m, 3.5m, 4.5m) での実験は、疲労を回避する目的で異なる日に実施した。

2.4 等速運動実験

位置予測とボールの速度や等速運動、加速運動といった運動形態との関係を知るために、仮想環境において、ボールの等速落下運動と自由落下運動を再現し、位置予測タスクを実施した。実験装置およびセットアップは、2.2 の仮想環境実験と同じく、仮想環境の部屋において落下運動する卓球ボールが、遮蔽板後方に落下する運動を再現した(図 2)。ボールの運動は、自由落下に加えて、自由落下運動における遮蔽直前の速度と同一の 3m/s での等速落下運動、さらに遮蔽から刺激提示までの時間がより長い 1m/s の等速落下運動を加え、計 3 条件とした。等速落下運動条件では、2.7m の高さにボールが出現し、1m/s または 3m/s の速度で遮蔽板に向かって落下する映像を提示した。ボールの遮蔽から遮蔽板が変色するまでの時間(遅延時間)は、3m/s と 1m/s の等速運動では、それぞれ 30, 80, 130, 180, 230ms と、100, 250, 400, 550, 700ms の 5 段階とした。自由落下運動は、先の仮想環境実験と同一の 30, 80, 120, 160, 190ms とした。

視距離は 3.5m とし、被験者には、仮想環境実験同様、視覚刺激提示時刻におけるボールの位置を遮蔽板前面に表示した 16 段階の目盛によって口頭で回答するように指示した。被験者は、等速 1m/s, 等速 3m/s, 自由落下の各条件において、25 回の試行を 3 ブロック(合計 75 試行)ずつ行った。各タスクにおける視覚刺激の提示順序は、1 ブロック 25 回のうち各遅延時間が 5 回ずつランダムに出現するように設定した。

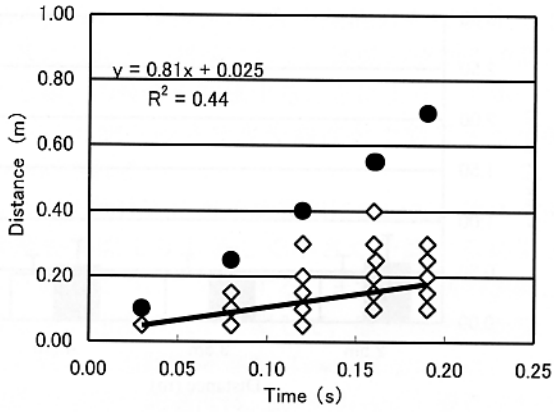
2.5 分析

各被験者から得られたデータは、運動物体(卓球ボール)の位置と被験者が回答した予測位置について散布図を作成した。さらに、プロットから回帰直線を求め、この傾きを被験者がボールの落下運動を予測した速度(予測速度)とみなした。この落下速度をもとに、自由落下物体の運動予測能力の分析を行うとともに、仮想環境と現実環境の結果を比較し、仮想環境における結果の妥当性および落下運動形態(等速、加速)の影響について検討した。

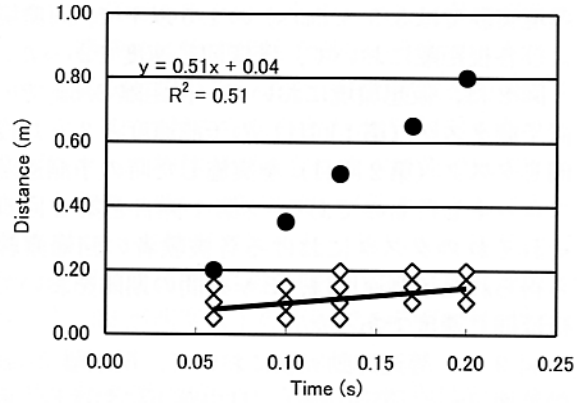
3. 結果

図 5(a)-(c) は仮想環境実験、図 6(a)-(c) は現実環境実験における、各視距離 (2.5m, 3.5m, 4.5m) での視覚刺激提示時刻に被験者が回答した予測位置と、実際の自由落下ボールの位置をプロットしたものである。図 5 と図 6 は、仮想環境実験と現実環境実験における特徴的結果を示す被験者 1 名の例である。仮想環境と現実環境、いずれの実験においても、また 2.5m, 3.5m, 4.5m のいずれの視距離においても、刺激提示遅延時間の増加に伴い、予測位置が大きくなる比例関係を示していた。しかし、被験者が回答した予測位置は、自由落下ボールの実際の位置よりも小さく、各条件における予測速度は、実際のボール落下速度の 1/4~1/5 程度と、非常に小さいものであった。他の被験者においても同様の結果であった。

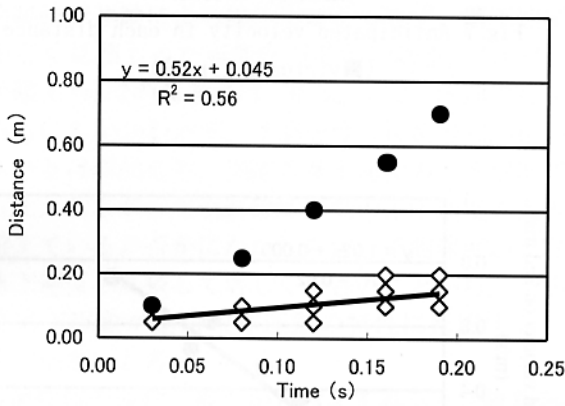
図 7 は、両環境の実験における、各被験者の位置予測結果をもとに、回帰直線の傾きから予測速度を求め、仮想環境(黒)と現実環境(白)および各視距離において、全被験者 12 名による平均値と標準偏差を示したものである。視距離 2.5m, 3.5m, 4.5m での値は、仮想環境実験では、0.58m/s (± 0.28), 0.47m/s (± 0.25), 0.54m/s (± 0.25), 現実環境実験では、0.45m/s (± 0.21), 0.46m/s (± 0.20), 0.45m/s (± 0.19) であった。二元配置分散分析において、距離要因の主効果、環境要因の主効果、交互作用ともに、統計的有意差は認められなかった。各条件間で、物体までの距離の違いにかかわらず、予測速度は、実際の自由落下ボールが遮蔽板に遮蔽



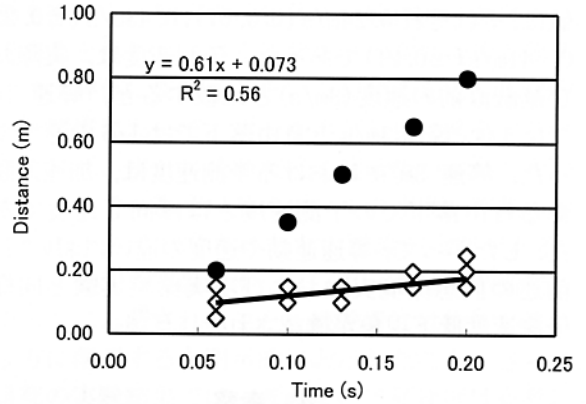
(a)



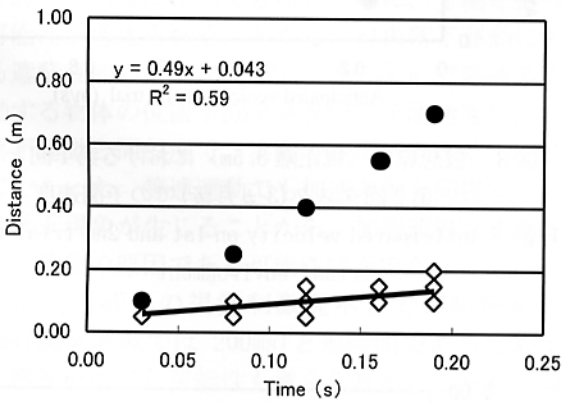
(a)



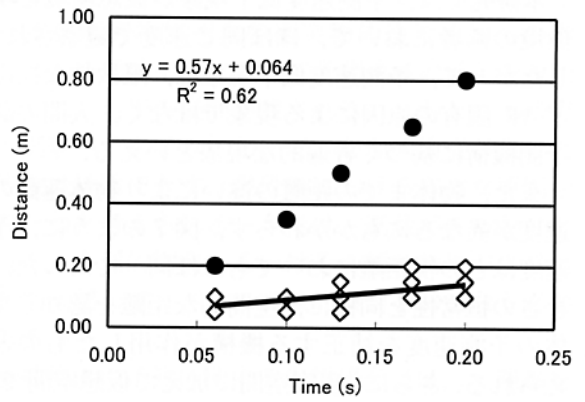
(b)



(b)



(c)



(c)

図5 被験者が予測した位置と実際の位置
(仮想環境) (◇予測, ●実際)

視距離 : (a) 2.5m, (b) 3.5m, (c) 4.5m

(Distance は遮蔽板上端から下方への距離を表す)

Fig.5 Anticipated position and actual position
(Virtual environment) (◇anticipated, ●actual)

Distance from subject to the ball:

(a) 2.5m, (b) 3.5m, (c) 4.5m

(Distance means downward distance from the top of the board.)

図6 被験者が予測した位置と実際の位置
(現実環境) (◇予測, ●実際)

視距離 : (a) 2.5m, (b) 3.5m, (c) 4.5m

(Distance は遮蔽板上端から下方への距離を表す)

Fig.6 Anticipated position and actual position
(Real environment) (◇anticipated, ●actual)

Distance from subject to the ball:

(a) 2.5m, (b) 3.5m, (c) 4.5m

(Distance means downward distance from the top of the board.)

される直前の速度（仮想環境実験では 3.0m/s, 現実環境実験では 3.3-3.5m/s）の 1/5 以下で, 両環境および各視距離において, ほぼ同じ速度であった。

図 8 は, 仮想環境において, 視距離 3.5m での位置予測タスク（第 1 回目）の予測速度と 3 ヶ月後と同じタスク（第 2 回目）を実施した時の予測速度をプロットしたものである。第 1 回目と第 2 回目のそれぞれのタスクにおける各被験者の回帰直線から得られた予測速度は, 3 ヶ月間の期間においてもほぼ同じ速度であった。

図 9 は, 等速運動実験において, 視距離 3.5m での等速 1m/s, 等速 3m/s, 自由落下における, 回帰直線の傾きの平均値と標準偏差を示したものである。等速 1m/s, 等速 3m/s, 自由落下の各条件での値は, それぞれ 0.24m/s (±0.07), 0.43m/s (±0.22), 0.41m/s (±0.21) であった。予測速度は, 実際および遮蔽直前の速度 (3m/s) と比較すると, 等速 1m/s では 1/4, 等速 3m/s と自由落下では 1/6 の速度であった。等速 3m/s における予測速度は, 加速運動である自由落下での予測速度とほぼ同じ速度であった。したがって, 等速運動や速度の違いにおいても, 前述の仮想環境実験および現実環境実験と同様の予測速度低下現象が確認された。

4. 考察

本研究では, 予測速度低下現象が仮想環境と現実環境の両者において, ほぼ同じ速度で観察された。したがって, 予測速度低下現象は, 離散的な描画など VR 固有の原因による現象ではなく, 人間の認知予測機構に基づく普遍的な現象といえる。

また, 物体までの距離の違いにより物体運動の角速度が異なるにもかかわらず, 図 7 のように, 予測速度はどの視距離においてもほぼ同一であった。大きさの恒常性と同様に, 空間的な距離を認知して物体の予測速度を補正する機構が作用したものと考えられる。さらに, 現実空間に加えて仮想空間でも, 現実空間と同様の恒常性が見られたことから, 今回の実験の仮想空間では, 両眼視差を用いた奥行き提示がなく, 平面的な CRT ディスプレイでの表示であったにもかかわらず, 現実空間と同様の補正機構が作用していたと考えられる。

仮想環境において, 3 ヶ月後に実施した位置予測課題で, 各被験者における 1 回目と 2 回目の予測速度の関係には, 図 8 に示すような高い相関が見られた。予測速度は, 個人によって固有の速度が存在し, 期間において同じ位置予測タスクを実施すると, 各個人固有の予測速度が再現されることが示された。また本研究では, 位置予測課題において正解（実際の位置）に関するフィードバックを行わなかった。

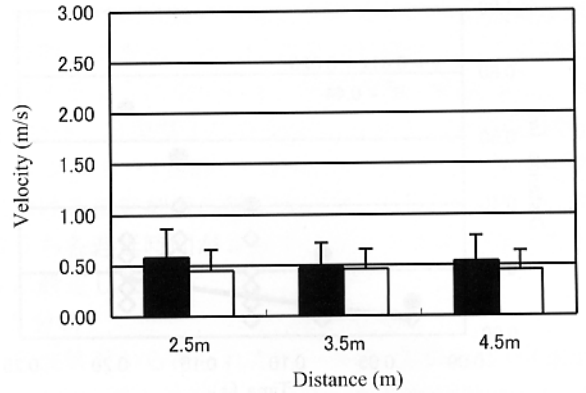


図 7 各視距離における予測速度 (■仮想, □現実)

Fig. 7 Anticipated velocity in each distance (■virtual, □real)

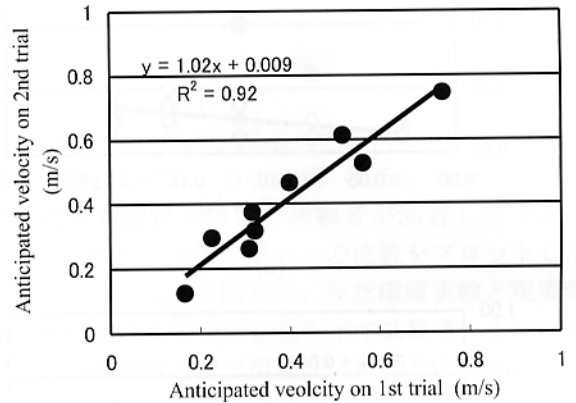


図 8 仮想環境（視距離 3.5m）における第 1 回と第 2 回タスク（3 ヶ月後）での予測速度

Fig. 8 Anticipated velocity on 1st and 2nd trial in virtual environment

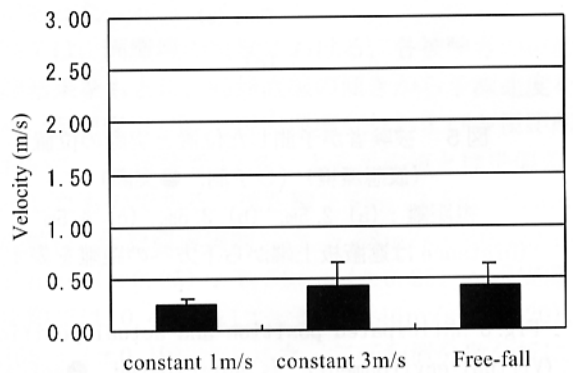


図 9 等速運動タスクと加速運動タスクにおける予測速度 Fig. 9 Anticipated velocity in constant and accelerated movement tasks

したがって、今回の実験結果は、課題に対する学習効果を含まない個人の位置予測能力を反映するものと考えられる。同様にして、運動の認知や予測に関する個人の特性を評価することにより、スポーツ等における個人のスキルや適性を予測できる可能性が期待される。

自由落下物体の位置予測課題において、物体の落下速度を実際よりも著しく小さく予測する結果となった原因について考察する。まず、今回の実験における予測速度の低下に関して、眼球運動の影響が考えられる。追跡眼球運動 (smooth pursuit) による標的の追跡可能速度は、20-40deg/s と報告されている [17]。視距離 2.5m でのボール落下の角速度は、69deg/s である。これは前述の上限速度を超えるため追跡眼球運動による物体追跡ができず、落下速度を小さく見積もった可能性が考えられる。しかし、視距離 4.5m での角速度は、38deg/s で上限速度程度であるにもかかわらず、予測速度は視距離 2.5m のタスクとほぼ同じで、実際の落下速度の 1/5 程度であった。したがって追跡眼球運動の上限速度を大きく超えているか否かにかかわらず、予測速度が実際の落下速度と比較して著しく小さいことから、予測速度低下現象が追跡眼球運動の特性に起因する可能性は小さいと考えられる。

対象物体の運動の観点から考えてみると、図 5-図 8 の加速運動のみの結果から、加速が原因で物体の最終速度が正確に認知できないために、予測を誤った可能性が考えられる。しかし、自由落下運動における遮蔽直前の落下速度と同一の 3m/s で等速落下運動する物体の位置予測タスクでの予測速度は、自由落下運動と同程度で、実際の速度を大きく下回る結果であった。等速運動でも加速運動と同様の予測速度低下現象が生じることから、加速運動が予測速度低下現象の原因である可能性は否定される。

また、遮蔽後の視覚刺激提示までの時間が、190ms (現実環境では 200ms) と短時間であるため予測に誤りを生じた可能性も考えられる。しかし、等速 1m/s での位置予測タスクでは、遮蔽後の視覚刺激提示までの時間が 100-700ms と大幅に延長されたにも関わらず、予測速度は実際の速度の 1/4 程度であり、他の条件と同様の予測速度低下現象が観察された。したがって、視覚的に観察できる物体運動速度や加速・等速などの運動様式が、速度低下の原因としては考えにくい。すなわち、視覚的観察による物体の運動情報の認知よりも、むしろ遮蔽後の物体運動の予測機構に原因がある可能性が高いと考えられる。

運動中に物体が消失すると、その物体の消失位置は、実際よりも運動経路の延長上にずれて判断される表象的慣性 (representational momentum: RM) と

呼ばれる現象が知られている [9]。本研究は、消失ではなく遮蔽であるという点や、消失位置の回答に対して、遮蔽後の物体運動予測という点で、タスクが RM と異なっている。また、消失位置を明確にすることで、RM は起こらないとの報告 [15] もあり、遮蔽板によって物体が遮蔽される本研究では RM が起きる可能性は低い。仮に RM が起きたとしても、予測位置が一定量下方にずれて認知されるだけであり、予測速度 (回帰直線の傾き) には影響しないことから、RM が速度低下の原因である可能性は排除される。

運動中に急激に停止する物体の知覚に関する研究としては launching event (LE) が知られている [10, 18]。運動物体 A が静止物体 B に衝突して物体 B が動き出すと、観察者は物体 A が物体 B の運動の原因であると認知し、さらに物体 B の認知速度が物体 A の速度評価に影響するという現象である。本研究の実験環境において、ボールが遮蔽板に衝突すると解釈すれば、ボールの衝突後に遮蔽板が運動しないことによって、衝突以前のボールの速度が実際の速度よりも小さく知覚されたとの推論が可能である。しかし、今回の実験条件では、ボールは板と衝突せず明らかに遮蔽されること、被験者には物体が遮蔽板後方に落下すると明示的に教示したこと、さらに、本研究の実験結果では、遮蔽後の予測速度は有意に 0 より大きく、すなわち被験者が遮蔽後もボールは運動していると認知していることなどから、LE でみられる被衝突物体速度の衝突物体速度認知への影響など、心理的衝突によって予測速度の低下を説明するには、若干の疑問が残される。しかし、本研究での実験パラダイムにおいて、心理的衝突が生じた可能性は排除できず、現段階における有力な原因仮説の一つと考えられる。今後は、遮蔽がきっかけとなって、心理的衝突あるいはその類似効果が生じた可能性に関して、さらに実験的検討をおこなう必要がある。

運動物体の予測に関する先行研究では、 τ 理論をはじめとする衝突時刻 (time-to-contact: TTC) 予測に関するものが多く知られている。TTC と本研究の課題を比較すると、物体運動を視覚的に認知する点については共通である。さらに、TTC に関する従来の研究では、衝突地点までの距離すなわち位置から、衝突時刻である時間を予測する課題を課し、比較的正確な衝突時刻予測がなされている。これに対して本研究では、規定された時間から位置を予測する課題を課したところ、実際の速度の 1/5 という予測速度の低下現象が認められた。本研究で課した課題は、遮蔽後の物体位置を回答させるものであり、TTC 課題とは逆に時間を規定して位置を予測する、非日常的な課題である。そのため、タスクに対して未習熟

であったことが、速度低下現象の原因ではないかと推察される。このことは、TTC 課題においても、非日常的あるいは未経験の加速度によるボールキャッチタスクにおいて、TTC エラーが起こり、タスクの成績に影響するとの報告とも矛盾しない[19]。この、課題に対する未習熟は、もっとも矛盾なく現象を説明する原因仮説であり、今後は、学習実験など新たな実験パラダイムを用いて、実速度の1/5という大幅な速度低下を説明可能であるか、検証をおこなう必要がある。

今回の予測課題には、物体の運動速度認知と、認知した速度に基づく位置予測、という二つの要素が含まれている。本研究で観察された予測速度低下のさらなる原因解明のために、物体の速度認知誤差によるものか、物体の予測機構の問題であるのかについての検討が必要である。したがって物体運動の認知特性と予測特性をそれぞれ独立して解析するなど、さらに詳細な実験が望まれる。

5. まとめ

自由落下物体運動を途中から板で遮蔽し、その後視覚刺激提示時の物体位置を回答させる予測課題を仮想環境および現実環境で実施した。両者の結果は良好に一致し、仮想環境システムの運動予測能力評価への有効性が示唆された。両環境における実験の結果、落下物体の位置予測は、実際の5分の1以下の落下速度でなされるという予測速度低下現象が観察された。この現象に、追跡眼球運動の速度特性や、物体運動における加速の有無との関連は見られなかった。

本研究で観察された予測速度低下現象の原因には、心理的衝突および課題への未習熟が考えられ、原因解明に向けたさらに詳細な実験が今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金によって行われた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

[1] 四宮葉一, 関根修, 仲島了治, 澤田一哉, 王碩玉, 石田健司, 木村哲彦: 乗馬療法機器の開発と筋力トレーニング効果の検証, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 6, No. 3, pp. 197-202, 2001.

[2] 浅井丈弘, 鳥脇純一郎, 安田孝美, 横井茂樹: 仮想空間における運動情報の提示システム, 電子情報通信学会大会講演論文集, pp. 392, 1998

[3] 岡本敦, 高橋繁浩, 桜井伸二, 池上康男, 安田孝美, 横井茂樹: VRMLによる平泳ぎ動作学習システムの開発, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 100, No. 716, pp. 17-22, 2001.

[4] 吉井暢彦, 山地裕子, 和田隆広, 田中聡, 塚本一義: バーチャルテニスによるリハビリテーションの実現—テニスの上肢運動とリハビリとの関連—, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol. 6, pp. 255-256, 2001.

[5] 竹田仰, 筒井良夫: 力覚提示機能を持つボールのドリブル仮想環境の構築, テレビジョン学会誌, Vol. 49, No. 10, pp. 1339-1346, 1995

[6] 伊丹由和, 佐波晶, 吉田典正, 北嶋克寛: 高精度モーションスピード制御によるバーチャルエアロビクスシステム, 情報処理学会論文誌, Vo44, No. 2, pp. 478-485, 2003.

[7] Brouwer AM., Brenner E., Smeets JB.: Hitting moving objects: is target speed used in guiding the hand?, *Exp Brain Res.*, 143, pp. 198-211, 2002

[8] Peper L., Bootsma RJ., Mestre DR., Bakker FC.: Catching Balls: How to Get the Hand to the Right Place at the Right Time, *J Exp Psychol Hum Percept Perform.*, 20(3), pp. 591-612, 1994

[9] Freyd JJ., Finke RA.: Representational momentum, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 10, pp. 126-132, 1984

[10] Michotte A.: *The perception of causality*, Translated by T. Miles and E. Miles. Methuen., 1963

[11] Lee DN.: A theory of visual control of braking based on information about time-to-contact, *Perception*, 5, pp. 437-459, 1976

[12] Savelsbergh GJ., Whiting HT., Burden AM., Bartlett RM.: The role of predictive visual temporal information in the coordination of muscle activity in catching. *Exp Brain Res.*, 89: pp. 223-228, 1992

[13] Schiff W., Detwiler ML.: Information used in judging impending collision. *Perception*, 8: pp. 647-658, 1979

[14] Peterken C., Brown B., Bowman K.: Predicting the future position of a moving target. *Perception*, 20: pp. 5-16, 1991

[15] Gray R, Thornton IM.: Exploring the link between time to collision and representational momentum. *Perception*, 30(8): pp. 1007-1022, 2001

[16] Babler TG., Dannemiller JL.: Role of image acceleration in judging landing location of free-falling projectiles. *J Exp Psychol Hum Percept Perform.*, 19(1), pp15-31, 1993

- [17] Buizza A., Schmid R., Gigi MR.: The range of linearity of the smooth pursuit control system. Theoretical and applied aspects of eye movement research, 1984
- [18] Kerzel D., Bekkerring H., Wohlschlager A., Prinz W.: Launching the effect: Representations of causal movements are influenced by what the lead to. Q J Exp Psychol A., 53A, 4, pp.1163-1185, 2000
- [19] Hong SK., Kim JH., Sato M., Koike Y.: Investigation of prediction model for ball catching task using technology. SICE Annual Conference in Fukui, Aug4-6, pp.2720-2725, 2003

(2004年2月4日受付)

[著者紹介]

竹市 勝 (学生会員)



1988年筑波大学大学院体育研究科修了。現在東京農工大学工学研究科博士後期課程在学中、国士舘大学政経学部助教授。運動物体の認知および位置予測と運動パフォーマンスに関する研究に従事(体育学修士)。

藤田 欣也 (正会員)



1988年慶應義塾大学大学院理工学研究科修了。相模工業大学、東北大学医学部、岩手大学を経て、現在東京農工大学大学院共生科学技術研究部システム情報科学部門教授。力触覚や空間移動インタフェースに関する開発と評価、ならびに医用福祉工学に関する研究に従事(工学博士)。

田中 秀幸 (非会員)



1998年東京都立大学大学院理学研究科修了。東京農工大学大学院共生科学技術研究部助教授。人間行動のメカニズムの解析、ヒトの形態・機能の運動適応に関する研究に従事。博士(理学)。