

往復運動の知覚における振幅短縮現象

梁 暢*・岡嶋 克典**

*横浜国立大学 大学院環境情報学府

**横浜国立大学 大学院環境情報研究院

〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-7

liang-chang-my@ynu.jp

(受付：2014年3月31日；受理：2015年9月4日)

Shortened Perception of Amplitude in Reciprocating Motion

Tyou RYOU and Katsunori OKAJIMA

*Graduate School of Environment and Information Sciences,

**Faculty of Environment and Information Sciences,

Yokohama National University

79-7 Tokiwadai, Hodogaya, Yokohama, Kanagawa 240-8501, Japan

(Received 31 March 2014; Accepted 4 September 2015)

Observers adjusted the vanishing locations of the repeatedly unidirectional motion stimulus. As a result, Fröhlich effect can be observed at the onset but the RM (representational momentum) effect cannot be observed at the offset. In a similar way, it was found that the amplitude of reciprocating motion appears shorter than the physical length. It is suggested that our visual system correct the shifted onset position caused by Fröhlich effect and the offset position in reciprocating motion spatiotemporally so that the smooth reciprocating motion appears with shorter amplitude.

1. はじめに

日常生活において運動物体の位置を正しく知覚することは重要である。運転中に突然視野に現れた人や車の位置を正しく知覚しなければ事故に繋がる恐れがある。また、サッカーやバスケットボールの試合では、突然運動方向が変わるボールの位置を素早く正しく知覚しなければならない。

視覚研究において、錯視現象は視覚処理メカニズムを解明するために優れたツールとなる¹⁾が、運動物体の位置知覚に関する錯視として、運動刺激の開始位置や消失位置がずれて知覚されるという現象がある。刺激の運動開始位置に関する錯視としてフローリッヒ効果²⁾やOnset

Repulsion³⁾があるが、前者が突然現れる運動刺激の運動開始位置が運動方向側へずれて知覚される現象であるのに対し、後者は刺激の運動開始位置が運動方向側とは逆にずれて知覚される現象である。一度のみ呈示される刺激の呈示位置において、予測性がある場合にはフローリッヒ効果が、予測性がない場合にはOnset Repulsionが生じる⁴⁾。開始位置において異なる2つの錯視が観察されることは、刺激呈示の文脈が影響していることを示唆している⁴⁾。また、このメカニズムは注意配分の差とも関連している⁵⁾。

一方、運動刺激の消失位置の錯視としてRepresentational Momentum (以下RM効果と呼ぶ)が知られている⁶⁾。RM効果はランダム

な位置で消失する運動刺激の消失位置が運動方向側へずれて知覚される現象である。Freydら⁶⁾は、RMの発生は刺激位置の記憶ずれに起因すると主張している。

知覚される運動経路については、予測性がない運動刺激において実際の運動経路よりも長く見える現象が報告されている⁷⁾。しかし、予測性がある運動刺激においては、運動開始位置と消失位置はどちらも運動方向側にずれることが予想されることから、運動経路の長さがどのように知覚されるかは明らかではない。また、同じ運動刺激の呈示を繰り返すことで予測可能となり、記憶に頼る必要もなくなることから、消失位置においてRM効果が生じなくなる可能性もある。そこで本研究では、同じ場所に繰り返し呈示される片道運動刺激と往復運動刺激の振幅量の知覚の特性を調べるために、片道運動刺激の開始位置と消失位置ならびに往復運動刺激の端位置のマッチング実験を行い、結果を考察した。

2. 実験 1

2.1 装置

視覚刺激はコンピュータ (Dell T5500) および Psychlops⁸⁾ で制御し、CRT モニタ (SONY GDM-F520) 上に呈示した。ディスプレイの空間解像度は 1920 pixel × 1440 pixel、リフレッシュレートは 85 Hz であった。観察距離は 0.7 m とし、被験者は暗室内に座り、顎台で頭を固定した。

2.2 刺激と手順

実験 1 と 2 とともに、**図 1** のような視覚刺激を用いた。背景は白色 (輝度 80.2 cd/m², xy 色度 $x=0.288$, $y=0.312$) で、刺激はエッジのみが黒 (輝度 1.18 cd/m²) の 2 deg の正方形を用いた。**図 1** の上はテスト刺激で、下はマッチング刺激である。テスト刺激の運動方向は、左向きの片道運動、右向きの片道運動と、往復運動の 3 種とした。

運動刺激の移動量は 4 deg で、実験 1 の運動刺激の運動速度は 4 deg/s と 8 deg/s とし、実験

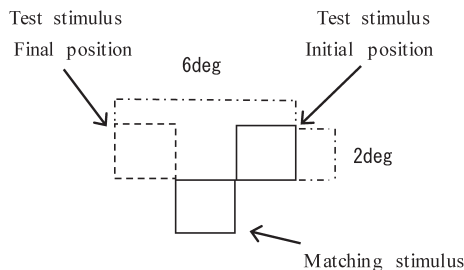


図 1 Stimulus in the case of one-way motion in the left direction.

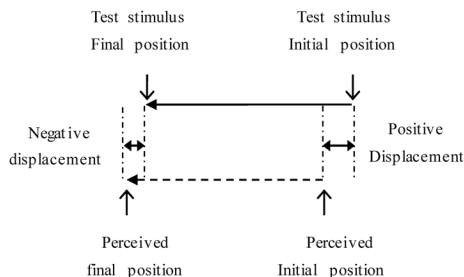


図 2 Definition of the positional deviation.

2 の運動刺激の運動速度は 1 deg/s と 0.67 deg/s とし、各被験者に対し各条件トライアルを 5 回ずつ実施した。片道運動刺激の刺激間時間間隔 ISI (ISI=Inter Stimulus Interval) を 1 秒に設定した。トライアル中の運動刺激の呈示回数は無制限としたが、実験 1 では平均で 20 秒程度 (4 deg/s 条件で約 20 回, 8 deg/s 条件で約 40 回) で、実験 2 では平均で 60 秒程度 (1 deg/s 条件で約 15 回, 0.67 deg/s 条件で約 10 回) であった。マッチング刺激の初期位置は運動経路の中央とした (**図 1** 参照)。

実験 1 では、被験者のタスクとして、マッチング刺激を動かしてテスト刺激の運動経路の左端と右端を合わせるように指示した。実験 2 では、マッチング刺激を動かしてテスト刺激の運動経路の左端を合わせるように指示した。マッチング刺激はトライアル中にテスト刺激の出現や消失にかかわらず常に呈示された。また、凝視点は設定しなかったが、被験者にはどちらかの端を見ながらマッチングを行うように指示した。ここで、既存研究に基づいて位置ずれ (量) を定義する。**図 2** のように、知覚されたマッ

ング刺激（破線）の位置がテスト刺激（実線）の運動経路の中に入った場合に知覚した位置と実際の位置までの距離を「正」の位置ずれとし、逆に運動経路の外になった場合に「負」の位置ずれと定義し、位置ずれの量をdegで示すことにする。

2.3 被験者

実験1では、4名の被験者（男性2名（24, 26歳）、女性2名（共に25歳））が実験に参加した。実験2では、4名の被験者（男性3名、うち2名は24歳、1名は26歳）、女性1名（25歳））が実験に参加した。全ての被験者は、視覚および色覚機能に異常がなく、視力は矯正または裸眼で視力0.7以上であった。実験は、横浜国立大学におけるライフサイエンス研究等の実施に関する規則に従い実施した。

2.4 結果

図3に、実験1と実験2の結果を示す。横軸は速度、縦軸は位置ずれの量である。片道運動条件の結果は、実験1では左向きの片道運動と右向きの片道運動における運動開始位置と運動消失位置での位置ずれの4人の被験者の結果の平均値で、実験2では左向きの片道運動における運動消失位置と右向きの片道運動における左端での位置ずれの4人の被験者の結果の平均値

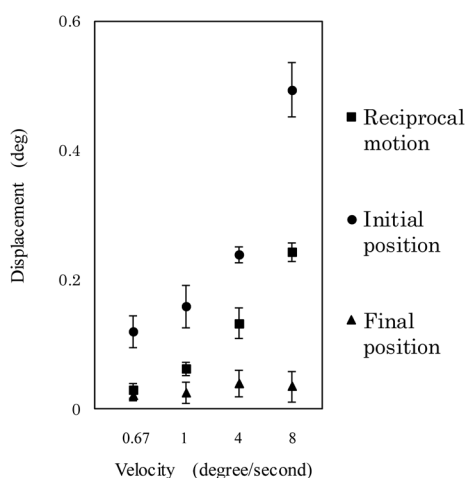


図3 The average results of the four subjects who were tested by one-way motion and reciprocating motion.

を示す。往復運動条件の結果は、実験1では往復運動時の両端での位置ずれの4人の被験者の結果の平均値で、実験2では往復運動時の左端での位置ずれの4人の被験者の結果の平均値を示す。丸いシンボルは片道運動時の運動開始位置の位置ずれ、三角形のシンボルは片道運動時の運動消失位置の位置ずれ、真ん中の四角のシンボルは往復運動時の位置ずれの量を示す。誤差棒はSE（標準誤差）を表す。

片道運動および往復運動条件の知覚的位置における速度の影響を分析するため、1要因の分散分析を行った。その結果、片道運動時の運動開始位置と往復運動時の両端の位置ずれの量は、速度が大きくなると有意に増加するという速度依存性があることが示された（片道運動： $F(3, 12)=31.93, p<0.001$, 往復運動： $F(3, 12)=37.64, p<0.001$ ）。片道運動時の消失位置においては、速度依存性が見られなかった（ $F(3, 12)=0.24, p=0.87$ ）。

表1にt検定の結果を示す。それぞれの速度での片道運動開始位置の知覚的位置は物理的位置から有意にずれており、知覚的な運動開始位置が運動方向にシフトすることが示された。往復運動両端の知覚的位置は、物理的位置から有意にずれており（0.67 deg/sを除く）、往復運動

表1 T-test for the average results with physical position's result.

| t検定 t(3) | R×0 | I×0 | F×0 |
|-------------|----------|----------|------|
| 0.67 deg/s | 2.57 | 4.67* | 2.78 |
| 1 deg/s | 5.98** | 4.87* | 1.54 |
| 4 deg/s | 5.82* | 20.93*** | 1.89 |
| 8 deg/s | 16.56*** | 11.96** | 1.48 |

R is short for the result of reciprocating motion; I is short for the result of the initial position of one-way motion; F is short for the result of the final position of one-way motion.

R×0 means 2-sample t test for the result of reciprocating motion with 0; I×0 means 2-sample t test for the result of the initial position of one-way motion with 0; F×0 means 2-sample t test for the result of the final position of one-way motion with 0.

* $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.0001$

表2 T-test for the results of one-way motion with reciprocating motion.

| t検定 | 0.67 deg/s | | | 1 deg/s | | | 4 deg/s | | | 8 deg/s | | |
|------|------------|------|--------|---------|------|--------|---------|-------|----------|---------|---------|---------|
| | I×R | R×F | I×F | I×R | R×F | I×F | I×R | R×F | I×F | I×R | R×F | I×F |
| t(3) | 5.92 ** | 0.87 | 4.74 * | 2.98 | 1.90 | 5.46 * | 8.17 ** | 3.69* | 10.72 ** | 8.22 ** | 8.72 ** | 8.53 ** |

R is short for the result of reciprocating motion; I is short for the result of the initial position of one-way motion; F is short for the result of the final position of one-way motion.

I×R means 2-sample *t* test for the result of the initial position of one-way motion with the result of reciprocating motion; R×F means 2-sample *t* test for the result of reciprocating motion with the result of the final position of one-way motion; I×F means 2-sample *t* test for the result of the initial position of one-way motion with the result of the final position of one-way motion.

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.0001$

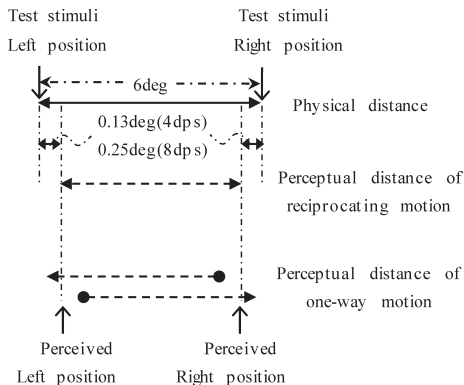


図4 Conceptual diagram of the contract with reciprocating motion and one-way motion.

時に運動軌跡が縮んで知覚されることを示している。

表2は、それぞれの速度での往復運動の両端で生じた位置ずれと片道運動の運動開始位置と運動消失位置で生じた位置ずれの量の比較で、*t*検定の結果を示す。全体的な傾向として、片道運動時の運動開始位置の位置ずれは有意に往復運動時の位置ずれより有意に大きく（ただし1 deg/sのときを除く）、また、片道運動時の運動消失位置の位置ずれは有意に往復運動時の位置ずれより有意に小さい（ただし0.67 deg/sと1 deg/sのときを除く）。

図4は、今回の往復運動時と片道運動時の結果の比較を図で表したものである。実線は物理的距離、破線は知覚的な距離を示す。片道運動時の知覚的な運動開始位置が運動方向側へシフトするのに対し、知覚的な運動消失位置が運動

方向の逆側へシフトすることを示している。図4に示すように、往復運動時に生じる位置ずれ量は、片道運動時に生じるいずれの位置ずれとも一致せず、片道運動時の運動開始位置で生じた位置ずれの量と運動消失位置で生じた位置ずれの量の中間程度であった。

2.5 考察

以上の実験結果から、刺激を繰り返し提示しても、運動開始位置におけるフローリッチ効果は生じるが、運動消失位置におけるRM効果は生じなくなることが明らかとなった。また往復運動時には、運動軌跡の振幅が短縮して知覚されることが示された。

Hubbardら⁷⁾は、一度のみ提示される片道運動刺激において、運動開始位置におけるフローリッチ効果を測定し、運動速度が5 deg/sのときに、運動刺激の運動開始位置が運動方向側へ約0.4°ずれて知覚されることを報告している。また彼らは、運動速度が15 deg/sのときには運動刺激の運動開始位置が運動方向側へ約0.65°ずれて知覚されたことから、フローリッチ効果には速度依存性があると述べている。片道運動の開始位置において生じた位置ずれにも速度依存性（0.67 deg/s条件で約0.12 deg, 1 deg/s条件で約0.16 deg, 4 deg/s条件で約0.24 deg, 8 deg/s条件で約0.49 deg）が見られた。これは、既存のフローリッチ効果と同様の現象であり、フローリッチ効果は刺激を繰り返し提示しても生じていることを意味している。Kirschfeldら⁹⁾は、注意追跡とメタコントラストマスクン

グによってフローリッヒ効果を説明している。彼らは運動刺激の最初の位置が次の位置に対して手がかりになることで、メタコントラストマスキングが生じ、最初の位置の知覚精度が顕著に低下すると主張した。また、Krekelbergら¹⁰⁾によると、Whitneyらは静止手がかりありとなしの二つ条件において、それぞれフローリッヒ効果とflash-lag効果を測定した結果、静止手がかりありの条件ではフローリッヒ効果が著しく減少することが示された。彼らの結果はKirschfeldら⁹⁾の注意追跡とメタコントラストマスキング説を支持するものである。本研究の片道運動時は、運動開始位置に前もって注意を向けていることがしやすくなると考えられる⁷⁾。ただし、運動開始のタイミングを運動消失タイミングから予想しようとするため、注意が運動開始位置から離れている可能性もある。結果的に運動開始位置はメタコントラストマスキングの影響や注意の影響を受けやすくなり、フローリッヒ効果が生じると考えられる。

Hubbardら⁷⁾は、一度のみ呈示される片道運動刺激において、運動消失位置の知覚位置も測定した結果、運動方向側へずれて知覚されるRM効果が生じることを示した。しかし、今回の消失位置においてRM現象は観察されなかった。今回の結果は、片道運動刺激を繰り返し呈示したことで、運動刺激の消失位置にマッチング刺激を調整させることによって、記憶の影響が減少し、制度が向上したために、消失位置に

においてRM効果が生じなくなると考えられる。

本研究において、往復運動時に振幅が実際の振幅より短く知覚されるという現象が示された。往復運動時の位置ずれの量とそれに対応する片道運動時の位置ずれの量の間には有意差が認められ、位置ずれの量（短縮度合い）は刺激の速度に依存することが示された。フローリッヒ効果に関する従来研究⁴⁾では、実験中に凝視点を見ながら眼球運動を測定し、サッケードした時のデータはその後の統計処理から除外している。本研究では凝視点を設定せず、眼球運動も測定しなかったが、被験者は運動経路の端の位置を合わせるため、実験中はそれぞれの端を見ながらマッチングを行った。そのため、眼球運動の影響によってこのような短縮現象が生じたとは考えにくい。

今回の短縮現象が生じた最も簡単な説明として、フローリッヒ効果によって生じる「ずれた開始点」と「(物理的な端である)消失点」で何らかの平均化が生じ、その平均化された両端の間で往復運動しているように知覚されていた可能性が考えられる。図5はこの説明を図で示したものである。実際、定性的に図3や図4で示したように、往復運動時の端位置は片道運動の開始点と消失点の間にあることから、位置の平均化（線形平均とは限らない何らかの平均化）によって生じたと考えるのは自然な流れであろう。しかしながら、往復運動時は時間的流

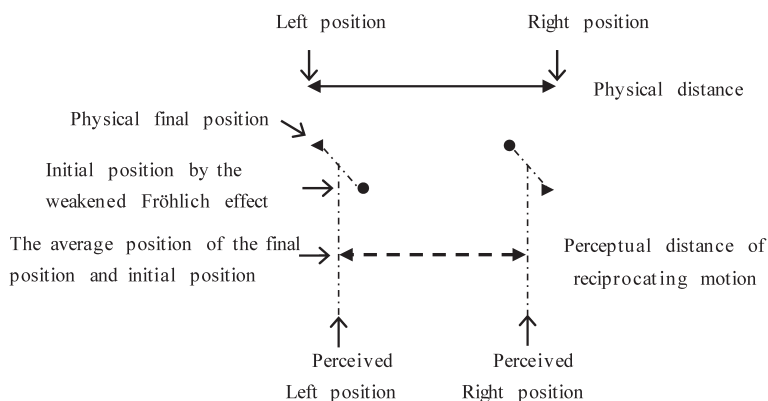


図5 Conceptual diagram of the reciprocating motion.

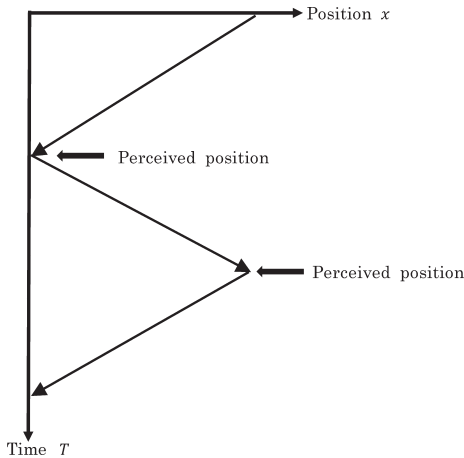


図6 Spatiotemporal plot of a physical reciprocatory motion.

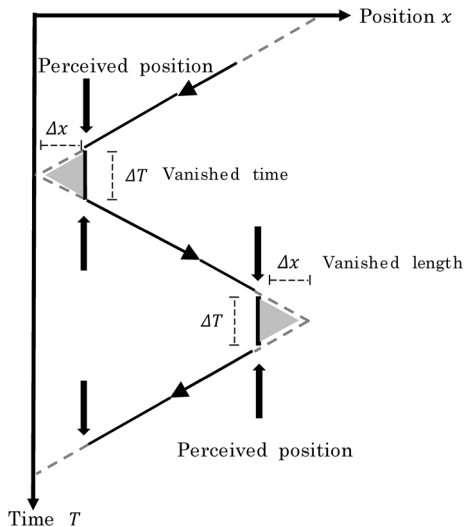


図7 Spatiotemporal plot of the perceived reciprocatory motion.

れも連続していることから、空間的（位置）だけが平均化されたと考えるだけでは不十分である。図6に理論上の（物理的な）往復運動の時空間プロットを示す。これを基に、今回の振幅短縮現象を時空間プロットで示したのが図7である。どちらも、横軸は位置、縦軸は時間を表す。図7において、実線は観察された往復運動の運動経路、点線は消失した往復運動の運動経路を表す。また、灰色破線で囲まれた影の横軸は位置ずれ (Δx)、縦軸は時間ずれ (ΔT) を表

す。往復運動時において経路の短縮（端における位置変化）は観察されたが、端において位置が変化せずに時間だけが経過する現象（4 deg/s 条件で停留時間 $\Delta T=32.5$ ms, 8 deg/s 条件で停留時間 $\Delta T=31.25$ ms）は知覚されなかった。この失われた時間 ΔT が視覚系においてどのように処理されているかは今回の実験からは不明であるが、往復運動時の折り返し時にフローリッヒ効果が生じているにも関わらず、スムーズな往復運動が知覚できるように視覚系が位置の平均化とともに時間ずれ (ΔT) の矛盾も処理しながら、両端における消失と開始を矛盾なく接続していると考えられる。

3. 結 論

片道運動時に繰り返し呈示しても、フローリッヒ効果は生じるが、RM効果は消失することを示した。片道運動刺激を繰り返し呈示し、運動刺激の消失位置にマッチング刺激を調整させることで、記憶の曖昧さが減少して精度が向上するために、消失位置におけるRM効果が生じなくなることを示唆している。また、往復運動時に知覚的な振幅が短縮することを示した。この現象は、視覚系が終端位置と始端位置の空間的平均化と時間ずれを補正して、往復運動を矛盾なく知覚させている可能性が高いことを示唆している。

文 献

- 1) 村上郁也：視覚研究ツールとしての錯視。光學, 39, 66-74, 2010.
- 2) F. W. Fröhlich: Über die Messung der Empfindungszeit (Measuring the time of sensation). *Zeitschrift für Sinnesphysiologie*, 54, 58-78, 1923.
- 3) I. M. Thornton: The onset repulsion effect. *Spatial Vision*, 15, 219-243, 2002.
- 4) J. Müsseler and D. Kerzel: The trial context determines adjusted localization of stimuli: Reconciling the Fröhlich and onset repulsion effects. *Vision Research*, 44, 2201-2206, 2004.
- 5) J. Müsseler and J. Tiggelbeck: The perceived

- onset position of a moving target: Effects of trial contexts are evoked by different attentional allocations. *Attention, Perception, & Psychophysics*, **75**, 349–357, 2013.
- 6) J. J. Freyd and A. R. Finke: Representation momentum. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, **10**, 126–132, 1984.
- 7) T. L. Hubbard and M. A. Motes: Does representational momentum reflect a distortion of the length or the endpoint of a trajectory? *Cognition*, **82**, B89–B99, 2002.
- 8) 細川研知, 丸谷和史, 佐藤隆夫: Psychlops: C++言語による汎用的な視覚刺激提示ライブラリ. *VISION*, **21**, 165–172, 2009.
- 9) K. Kirschfeld and T. Kammer: The Fröhlich effect: A consequence of the interaction of visual focal attention and metacontrast. *Vision Research*, **39**, 3702–3709, 1999.
- 10) B. Krekelberg and M. Lappe: The position of moving objects. *Science*, **289**, 1107–1107, 2000.

付 録

今回の実験結果が装置及びプログラム等による乱れではないことを、フレームごとにリアルタイムでフレーム落ちを検出して検証した。具体的には、一定回数のフレームを実行し、その間の経過時間を測定することで総表示時間(ms)とフレーム時間(ms)またはリフレッシュ頻度(Hz)の理論値と実測値を比べた。また描画の時間精度を確認するため、FPSチェックも行った。その結果、フレーム落ち等は生じていないことを確認した。