運動残効の時間特性への頭部運動の影響

Effects of Head Movement on Temporal Tuning Property of Motion Aftereffect

正会員 瀬川 かおり[†], 正会員 氏家 弘裕[†], 齋田 真也[†]
 Kaori Segawa[†], Hiroyasu Ujike[†] and Shinya Saida[†]

Abstract The purpose of this study was to clarify the effects of head movement on the duration of motion aftereffect. We raise two hypotheses concerning the effects of head movement on the temporal tuning property. The first hypothesis is that the tuning functions shift toward larger adapting velocities for larger head movement velocities. The second hypothesis is that the functions shift downward over the entire range of the adapting velocity for larger head movement velocities. Using sinusoidal gratings, the duration of motion aftereffect was measured for various adapting velocities. An observer moved her/his head at one of five different velocities of head movement in the horizontal direction after being adapted to the vertical relative motion. The results indicated that the second hypothesis is positive. The results suggest that the larger velocity of head movement is the more the motion aftereffect is suppressed.

キーワード：頭部運動，運動残効，順応速度

1. ま え が き

人間の移動時にはどのような視覚特性の変化が生じるのか。日常生活では，人間は移動しながら外界の情報を取得することが多く，これまで主に調べられてきた観察者の静止時の視覚特性では，通常の視覚機能を十分に記述できていない可能性がある。一方，観察者の移動時の視覚特性が明らかにできれば，その知見をもとに視覚情報をより効率良く呈示することが可能となり，近年発展してきたバーチャルリアリティ技術において，より臨場感豊かに観察者の視空間を表現できる可能性がある。したがって，以上のような観点から，観察者の運動時の視覚特性を知ることは重要である。

観察者の移動時の視覚特性に関連する研究は，意外に少なく，その中では運動視差による奥行き知覚や運動残効に関する研究があげられる。運動視差による奥行き知覚は，網膜上で相対運動が頭部運動と同期することで生じるもので，両眼網膜像差による奥行き知覚とさまざまな観点からその類似性が報告されている¹⁾。例えば，拡大/縮小運動する刺激をこれに同期して観察者が前後運動しながら観察すると，静止して観察するより奥行きの知覚量が増加する²⁾。一方，運動残効を用いて視覚特性への頭部運動の影響

が議論されている。例えば，拡大運動刺激に対して観察者が前進運動しながら順応すると，観察者の静止時に順応するよりも運動残効が弱まる³⁾⁴⁾。このことは，頭部運動情報の3次元空間の知覚への利用を示唆している。また，順応時ではなく順応直後に頭部運動を行うと，刺激の相対運動が頭部運動と平行する場合には奥行き知覚が生じ⁵⁾，直交する場合には通常の運動残効が生じるが，頭部運動速度の増加に伴い，両者ともその持続時間が減少することが報告されている。

運動残効の持続時間が頭部運動の増加に伴い減少する過程については，いくつかの説明が可能である。そもそも，運動に対する感度は，刺激の速度や時間周波数に応じて異なり⁶⁾，運動残効では，その持続時間⁷⁾や見かけの速度⁸⁾が特定の順応刺激の速度に対してピークをもつような帯域通過型の特性を示す。そして，この特性への頭部運動による影響は，以下のような特性の推移により説明が可能である。まず，頭部運動速度の増加に伴い，ピークを与える順応刺激速度が大きい値へと遷移する可能性が考えられる(図1(a))。これは，頭部運動静止時の運動残効持続時間 Td は順応速度 v に対して，

$$Td = f(v)$$

として表すことができるのに対し，運動残効観察時に頭部運動を伴うことで頭部運動速度に応じた値 δ を用いて，

$$Td = f(v - \delta)$$

で表されるような右方への帯域通過特性の移動が生じるものである。これは，頭部運動速度の増加に伴い，静止物体が網膜上で流れる速度は増加するため，より速い運動刺激

2000年10月8日，Optics Japan 2000で発表

2001年3月30日受付，2001年6月8日再受付，2001年7月6日採録

[†] 産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門

(〒305-8566 つくば市東1-1-1 中央第6, TEL. 0298-61-6603)

[†] Institute for Human Science & Biomedical Engineering National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
 (Tsukuba Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan)

図 1 運動残効持続時間に対する頭部運動速度の影響に対する 2 つの仮説
Two hypotheses concerning effects of head movement velocities on motion aftereffect (MAE) duration.

に視覚系の感度を上げることでこの速度の増加に対応しようとする働きであると考えられる。この場合、順応刺激速度としてピークを与える値よりも小さいものを用いると、頭部運動速度の増加に伴い運動残効の持続時間が減少するが、大きい値を用いると、逆の傾向がみられることになる。次に、頭部運動速度の増加に伴い、運動残効の持続時間または見かけの速度の値が全体的に低下する可能性が考えられる(図 1(b))。これは、運動残効観察時に頭部運動を伴うことで頭部運動速度に応じた値 δ を用いて、

$$Td = f(v) - \delta$$

で表されるような下方への帯域通過特性の移動が生じるものである。この場合、順応刺激速度に関わらず、頭部運動速度の増加に伴い、運動残効の持続時間や見かけの速度が減少することになる。本研究では、運動残効の持続時間に対する頭部運動の影響を明らかにするために、上述の 2 つの可能性について検証することを目的とする。そしてこの結果から、頭部運動速度の増加に伴う、視覚系の網膜像の運動への適応についても考察を試みる。

2. 実験

2.1 実験装置、刺激および頭部運動

刺激と頭部運動の制御には PC (Apple, Macintosh 7500) を用いた。刺激は 17 インチ CRT モニタに呈示し、視距離は 57 cm とした。モニタは表示部分を除いて黒い紙で覆われている。実験室内はモニタ以外の光は遮断された。

図 2 刺激
A stimulus.

図 3 実験装置の略図
A schematic apparatus.

刺激には順応刺激とテスト刺激の 2 種類が存在する。これらの刺激パターンは同一である。刺激パターンは 2 本の縦帯からなる正弦波グレーティング(図 2)で、全体の大きさは 24×8 deg, 各グレーティングは 24×3.7 deg であり、グレーティングの間には 0.6 deg のギャップを設けた。ギャップの中央には固視点 (0.2×0.2 deg) を置いた。グレーティングの空間周波数は 0.8 c/deg, 平均輝度は 30 cd/cm², コントラストは 0.85 である。固視点の輝度は 30 cd/cm² である。順応刺激は 2 つのグレーティングが互いに逆方向に相対運動し、テスト刺激は常に静止している。順応刺激の各グレーティングの速度は $0.6 \sim 19.2$ deg/s の 8 種類を用いた。

頭部運動はガイドを用いて統制した(図 3)。ガイドは左右方向に幅 20 cm で正弦波状に往復運動を行った。観察者は左右方向に移動可能なあご台に頭部を置き、ガイドが額からずれないように常に注意を払いながら頭部運動を行った。頭部運動は静止状態を含め、その最大速度(以後、頭部運動速度と表記する)は $0, 6.3, 12.5, 25.1, 50.1$ cm/s の 5 種類を用いた。

2.2 実験手続き

実験開始前に観察者は実験室内で 5 分間の暗順応を行った。実験開始と同時に、順応刺激が 20 s 間呈示される。その間観察者は刺激正面で静止し、固視点を注視しながら順応刺激を片眼で観察する。その後テスト刺激が 30 s 間呈示される。この呈示開始と同時にガイドが動き始め、観

観察者は固視点を注視したまま、ガイドに同期するように頭部運動を行い、テスト刺激を観察する。観察者はテスト刺激を観察している間、運動残効が見えている場合、および順応刺激と同方向の動きが見えている場合とで別々のボタンを押し続け、静止して見える場合はボタンを押さないように教示された。1セッション内の順応刺激速度は固定し、各試行の頭部運動速度はランダムな順で計4回行った。順応刺激の運動方向は試行毎に逆向きに呈示された。頭部の動きがガイドに同期するようにあご台を動かすにはある程度の練習が必要であり、実験前に各頭部運動速度条件での練習を充分に行った。

2.3 観察者

著者2名を含む、男性1名、女性3名の計4名である。

すべての観察者は、視力または矯正視力が正常である。

3. 結 果

運動残効の持続時間として、運動残効が生じた時間から運動残効と逆の運動が生じた時間を引いた MAE index⁹⁾を用いた。

図4は、観察者毎に順応刺激の速度に対する MAE index の平均値を示している。各シンボルは頭部運動速度を表す。また、左上の縦棒はすべての条件における4回の測定の標準偏差の平均値を示している。テスト刺激を観察している間に順応刺激と同方向の動きが見えた応答は、観察者1名で2試行のみにおいてわずかな時間生じただけであり、MAE index は運動残効が見えている時間に相当す

図4 頭部運動速度毎の順応速度に対する MAE index

MAE index was plotted as a function of adapting velocities for five head movement velocities.

(a) Observer KS, (b) Observer HU, (c) Observer MI and (d) Observer NH.

図 5 順応速度毎の頭部運動速度に対する MAE index. 頭部運動なしの MAE index で正規化
 MAE index was plotted as a function of head movement velocities for adapting velocities. The results
 were normalized by MAE index under no head movement.
 (a) Observer KS, (b) Observer HU, (c) Observer MI and (d) Observer NH.

と考えてよい。まず、観察者 KS(a)の結果をみると、各頭部運動速度で順応速度に対する MAE index の大きさは、山型(つまり、帯域通過型)の傾向を示している。この山型の形状は頭部運動速度によらず、ピーク位置も順応速度がほぼ 12 deg/s で一定している。また、全体的に MAE index の大きさは、頭部運動を伴わない条件を除くと、頭部運動速度の増加に伴い減少する傾向がみられる。以上の傾向は他の観察者の結果においてもみられ、観察者毎に各頭部運動速度での山型のピーク位置と形状に大きな違いはみられなかった。ただし、観察者間で MAE index の大きさに違いがみられ、また、MAE index がピークとなる順応速度は、観察者 MI では他の観察者に比べてわずかに大きい方へ遷移している。

各頭部運動速度における MAE index の大きさの傾向を確認するため、順応速度毎に頭部運動を伴わない条件での MAE index を基準にその他の条件の MAE index を正規化した。これを図 5 に示す。横軸が頭部運動速度を表し、

縦軸が各順応速度において正規化を行った MAE index を示す。観察者毎に、順応速度によらず頭部運動速度の増加に伴い MAE index は減少している。最大の頭部運動速度 (50.1 cm/s) では、頭部運動を伴わない場合より 0.5 倍程度まで MAE index が減少した。また逆に、最小の頭部運動速度 (6.3 cm/s) では、最大で 1.5 倍程度まで増加している。

4. 考 察

順応速度に対する MAE index の帯域通過型の傾向は、頭部運動速度によらず、そのピーク位置と形状に違いがみられなかった。また、頭部運動速度の増加に伴う MAE index の減少傾向は、刺激の順応速度に依存しないことが示された。これは、図 1(b)で示した考えと一致する。つまり、運動残効の持続時間が頭部運動速度の増加に伴い減少する過程は、運動残効の持続時間が一様に減少するため生じた現象であり、順応速度に対する帯域通過型の特性

が順応速度の大きい側に遷移したためではないことが明らかになった。しかし、この傾向は頭部運動が伴われる場合に限定され、頭部運動を伴わない場合の運動残効持続時間は、最小の頭部運動速度条件(6.3 cm/s)より明らかに短い傾向を示した。この結果の原因解明は、今後の検討課題としたい。

また、各頭部運動速度における山型のピーク位置は、ほぼ一定(12 deg/s 付近)の順応速度であり、これは、これまでの頭部運動を伴わない研究での報告とほぼ一致している⁶⁾⁷⁾。したがって、頭部運動は、物理的刺激速度に対してピークをもつような帯域通過型の時間的同調特性には影響を与えていないことが示唆された。

今回の結果から以下のような視覚系の機能が考えられる。運動残効の運動情報処理は、刺激が実際に運動している場合と比較して、以下の2つの立場から考える必要がある。1つめが、運動残効と実運動の運動情報処理は同一とする考えである。実運動の運動信号は網膜上で発生するが、運動残効は網膜より高次の運動情報処理経路中で発生する。そして、それ以降の両者の運動情報処理は同一のものであると考えられる。結果から、頭部運動速度の増加に伴い、運動残効の持続時間が全体的に低下し、運動残効を弱める働きが強くなることが明らかになった。実運動でも運動残効と同様の傾向が得られると予想されるため、頭部運動速度の増加に伴い、運動情報が弱められることが示唆される。このことは、外界の視空間の知覚を安定させる働きの表れであると考えられる。我々は自己運動を伴わずに運動刺激を観察すると、網膜像に流れ像が生じ、物体の運動を知覚する。一方、自己運動を伴うことで、同様に網膜像に静止物体の流れ像が投影されるが、我々は、その物体が運動しているとは知覚しない。頭部運動速度の増加に伴い網膜像が流れる速度は増加するため、その運動情報に対してより強い抑制を行うことで、自己運動時に安定した外界を知覚しているのかもしれない。2つめが、運動残効と実運動の運動情報処理は相異なるという考えである。運動残効は網膜より高次の運動情報処理経路中に発生するため、網膜に投影される外界の視覚情報とそれより高次の視覚情報には矛盾が生じる点で実運動と異なる。この見解から予想される視覚系の機能として、頭部運動速度の増加に伴い、外界の視覚情報と矛盾する運動情報をより早く弱め、正しい外界情報を得ようとする働きがあると考えられる。また、実運動刺激を用いた場合には、運動情報に対して頭部運動速度の影響は生じないはずである。また、上述した運動残効に対する2つの運動情報処理の考えに従っても、頭部運動は帯域通過型の時間的同調特性には影響を与えていないと言える。

本実験における頭部運動方向は、相対運動刺激の運動方向に対して直交方向に限定されている。これは、運動視差からの刺激の奥行き情報を排除し、刺激の純粋な運動情報を得ることができる観察条件である。また、相対運動は複

雑な運動の基本成分である。これらの点を考慮すると、今回の結果は運動知覚に対する頭部運動の影響についての一般的特性を示していると言える。

5. む す び

異なる順応速度を用いて頭部運動時の運動残効の持続時間の測定を行った。その結果、運動残効の持続時間は、頭部運動速度の増加に伴い順応速度によらず一様に減少することが示された。この結果から、頭部運動は運動に対する時間的同調特性には影響を与えていないことが示唆された。さらに、頭部運動速度の増加は運動情報をより強く抑制する働き、もしくは、より早く外界の視覚情報を獲得しようとする働きがあることが示唆された。

今回の結果を、観察者の移動時を考慮した映像呈示技術への応用面から考えると、頭部運動の有無、もしくは頭部運動速度が変化しても、最も感度の高い運動刺激速度に変化はみられず不自然な画像には知覚されないことが明らかになったと言える。

〔文 献〕

- 1) B. Rogers and M. Graham: "Motion Parallax as an Independent Cue for Depth Perception", *Perception*, **8**, pp 125-134 (1979)
- 2) T. Yajima et al.: "Apparent Depth with Retinal Image Motion of Expansion and Contraction Yoked to Head Movement", *Perception*, **27**, pp 937-949 (1998)
- 3) H. Wallach and W. Flaherty: "A Compensation for Field Expansion Caused by Moving Forward", *Perception and Psychophysics*, **17**, pp 445-449 (1975)
- 4) R. Harris et al.: "Moving and the Motion After-effect", *Nature*, **293**, pp 139-141 (1981)
- 5) H. Ono and H. Ujike: "Apparent Depth with Motion Aftereffect and Head Movement", *Perception*, **23**, pp 1241-1248 (1994)
- 6) D. Burr and J. Ross: "Contrast Sensitivity at High Velocities", *Vision Res.*, **22**, pp 479-484 (1982)
- 7) H. Ashida and N. Osaka: "Motion Aftereffect with Flickering Test Stimuli Depends on Adapting Velocity", *Vision Res.*, **35**, 13, pp 1825-1833 (1995)
- 8) M. Wright and A. Johnson: "Invariant Tuning of Motion Aftereffect", *Vision Res.*, **25**, 12, pp 1947-1955 (1985)
- 9) S. Nishida, H. Ashida and T. Sato: "Complete Interocular Transfer of Motion Aftereffect with Flickering Test", *Vision Res.*, **34**, pp 2707-2716 (1994)

せがわ

瀬川かおり 1997年、東京工業大学大学院総合理工学研究科知能科学専攻修士課程修了。2000年、同大学院物理情報工学専攻博士課程修了。同年、通産省工業技術院(現、産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門)特別研究員。視覚情報処理に関する研究に従事。正会員、博士(工学)。

うじけ ひろやす

氏家 弘裕 1991年、東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻博士課程修了。1995年、通産省工業技術院生命工学工業技術研究所入所。視覚情報処理、空間知覚、高齢者の視覚特性等の研究に従事。現在、産業技術総合研究所主任研究員。正会員、工学博士。

さいだ しんや

斎田 真也 1977年、東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻博士課程修了。1978年、通産省工業技術院製品科学研究所入所。視覚心理物理、人間工学の研究に従事。1979～80年、カナダヨーク大学博士研究員。現在、産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門長。工学博士。