

錯視からわかる視覚の時間特性

一 川 誠

Temporal Illusions in Visual Perception

Makoto ICHIKAWA

This article is summarizing the visual illusion concerning temporal aspects of the events in the visual perception. In particular, I will explain the visual illusions which are related to the latency for the visual perception and other perceptual modalities, simultaneity and temporal order for the multiple events in the visual space, duration of the sustained stimulus, as well as the illusory flash-lag effect which is assumed to be a consequence of the differences in temporal properties between the processing for the continuously changing stimulus and that for the transiently presented stimulus. Recent findings support the idea that multiple processings, rather than a single inner clock, determine the temporal perception in different visual tasks.

Key words: temporal order, simultaneity, duration, flash-lag effect

本論では、時間に関連する錯視から理解される視覚の時間的特性について解説する。時間に関する錯覚は、視覚だけではなくその他の知覚様相においても存在している。時間的特性は、視覚だけではなく、聴覚や触覚等、他の知覚様相の特性と視覚の特性とを比較する上でも重要な要因である。また、時間の長さや時間順序、同時性とといった時間にかかわる知覚の対象は、視覚だけではなく、その他の知覚様相と視覚との関係を理解する上でも重要な要因である。そこで本論では、時間にかかわるさまざまな錯視を紹介し、そうした錯視についての研究を通して理解される視覚の時間的特性を説明する。

1. 知覚の不可避免的な遅れにかかわる錯視

通常、われわれは、目の前で生じた出来事をリアルタイムで見ているように体験している。実際には、網膜に光刺激が与えられてから対象についての視知覚的体験が生じるまでに、網膜から視覚皮質までの伝達やその後の処理に一定の時間を要している。したがって、リアルタイムで視知覚体験が成立しているというわれわれの素朴な感覚自体も、錯視といえる。

網膜が刺激されてからさまざまな段階においてその処理

がなされ、視知覚的な体験が成立したり、さまざまな身体的反応が生じるまでに要する時間は、刺激や反応の内容によって大きく異なる。視覚誘発電位の測定では、視覚刺激提示に対応した最初の視覚皮質の反応は約 30~40 ミリ秒後であることが報告されている¹⁾。

心理学的な研究においては、基本的な知覚処理の時間については、単純な刺激に対してその刺激に対応した知覚が成立したことを被験者が報告する反応（指でのボタン押しなど）までの時間を測定する「単純反応時間実験」によって調べられている。Pöppel は単純反応時間の測定において、聴覚刺激に対して約 130 ミリ秒、視覚刺激に対して約 170 ミリ秒という反応時間の平均値を報告している²⁾。実際、知覚閾上の強度の光と音を同時に提示した場合、音が光に先行するように知覚される³⁾。

視覚刺激に対する単純反応時間は、測定前に観察していた画像の影響を受けることも報告されている。さまざまな動作を行っている場面の画像を早回し再生したりスロー再生した場合には、その観察の直後には観察者の動作が画像の再生速度に対応して速くなったり遅くなったりする⁴⁾。これらの研究は、知覚や行動のテンポが環境や他者からの刺激の影響を受けていることを示唆している。

2. 同時性や時間順序に関する錯視

2.1 知覚様相による効果

2つの刺激が異なる時点で提示された刺激として知覚されるためには、刺激の間に一定の時間の幅が必要である。この時間よりも小さい時間の幅の中で提示された2つの刺激は、物理的には異なる時点で提示されたにもかかわらず、同時に提示されたように知覚される。この複数の事象が同時に生じたように感じられる時間の幅は、知覚情報処理の時間的解像度に対応しており、「同時性の窓」と呼ばれている。

上述の Pöppel は、同時性の窓の幅について視覚、聴覚、触覚を比較した²⁾。彼の測定によると、同時性の窓の幅は視覚では20~30ミリ秒であるのに対し、聴覚では約5ミリ秒、触覚では約10ミリ秒であった。視覚の時間解像度は聴覚や触覚と比べて低いのである。

時間的な特性に関する知覚認知においては、視覚と聴覚の情報が不一致のとき、聴覚の情報が優先されることが多い⁵⁾。他方、空間的な知覚における視聴覚の交互作用にかかわる現象には、「腹話術効果」や「視覚捕捉」がある。これらの現象が示すように、音源位置の知覚のような空間的な知覚に関しては、視覚が聴覚に対して優位性をもっている^{6,7)}。異なる様相の情報が統合される際、より有効な様相における情報が優位になるような処理戦略がとられているといえる。

時間に関する知覚において聴覚が視覚に対して優位性をもつことを示す現象に、sound induced flash がある⁸⁾。これは、1回の閃光刺激（フラッシュ）に合わせて数十ミリ秒程度の短い音を数十ミリ秒程度の間隔をあけて2回提示すると、光が2度点滅したように見えるという現象である (<http://shamslab.psych.ucla.edu/demos/>)。光点刺激と短い音刺激を組み合わせた実験では、仮現運動における速度や加速度についての視覚的処理が音刺激によって捕捉的に影響されることも示されている^{9,10)}。短い時間間隔の中で生じた出来事の回数の知覚においては、聴覚的情報が視覚体験の内容に影響を及ぼすのである。

2.2 知覚属性による効果

処理の時間的特性に違いがあるのは、視覚と他の知覚様相の間だけではない。視覚の様相内においても、処理に要する時間は属性（色彩、形状、運動、奥行位置など）によって異なる。たとえば、灰色の地の上に赤いドットが配置された模様が上方向に動いているとする。ドットの色が赤から緑に変わるのと同時に運動方向が下向きに逆転した場合、色の変化が運動方向の変化に先行して知覚される¹¹⁾。運動方向と色変化とが同時に生じたよう知覚される

ためには、色よりも運動方向を先に変化させる必要があるのである (http://www.brl.ntt.co.jp/people/nishida/demo/Motion_Colour.html)。

視覚の属性による処理時間の違いに関連した現象として、視覚刺激を高速で次々と提示した場合に生じる「結合錯誤」を挙げることもできる¹²⁾。複雑な形状の刺激では形状の処理に時間がかかり、色彩の処理よりも遅れるためにこのような結合錯誤が生じると考えられている。

2.3 刺激強度の効果

知覚においては、強い刺激ほど速く処理される (http://www.michaelbach.de/ot/lum_lazyShadow/)。この特性は単純反応時間にも反映されるが、それ以外にもさまざまな錯視現象を引き起こす。ND フィルターなどで一方の眼を覆うと、その眼の刺激強度が低下し、結果としてその眼の視覚情報処理が遅れる。前額平行面上の軌道を往復運動する視覚刺激を観察すると、時間的な遅れが左右眼の網膜像差を生じ、刺激が水平の楕円軌道上を動くように見える（プルフリッヒ効果、Pulfrich effect）^{13,14)}。また、背景とのコントラストの違いによって運動刺激の見かけの運動速度が変動して見えることも見出されている¹⁵⁾ (<http://psy2.ucsd.edu/~sanstis/Foot.html>)。

2.4 刺激提示位置の効果

刺激提示位置も知覚の時間特性に影響を及ぼす。同じ大きさで同じ明るさの光点を中心視野と周辺視野に同時提示した場合、中心視野の刺激のほうが先に提示されたように見える^{16,17)}。刺激の提示される偏心度がほぼ同一の場合でも、刺激の提示される奥行位置によって見かけの時間順序が影響を受ける¹⁸⁾。両眼視差によって2つの刺激を注視している点よりも近い空間内の異なる奥行位置に提示する場合、観察者により近い刺激のほうが、もう一方の刺激よりも後に提示されたように知覚される。奥行方向の運動を検出する過程が、異なる奥行位置に瞬間的に出現する刺激の時間順序についての知覚に寄与していることが示唆されている。

2.5 注意の効果

注意も視覚情報処理の時間特性に影響を及ぼす。たとえば、瞬間的に提示される視覚的ターゲットを検出する課題において、ターゲットの提示される位置を示す手がかり刺激（矢印など）をターゲット提示の数十ミリ秒から200ミリ秒程度前に注視点の近くに提示すると、ターゲット検出の時間が短縮される¹⁹⁾。他方、手がかり刺激がターゲットとは異なる位置を指示した場合、ターゲット検出はむしろ遅延される。また、手がかり刺激提示から300ミリ秒以上経つと、ターゲット検出までの時間が先行刺激を提示しな

い場合よりも長くなることがある。これは、効率的なターゲット探索のために、注意が一度向けられた位置には向けられにくいために生じる現象と考えられており、「復帰抑制」と呼ばれている。

このような注意による促進に基づいて、2つの視覚刺激の提示順序に錯覚が生じることも知られている^{20, 21)}。たとえば、2つの視覚刺激を同時提示する際、その直前にどちらか一方の刺激のそばに光点を瞬間的に提示すると、その光点に注意が引きつけられることにより、光点側の刺激がもう一方の刺激よりも先に提示されたように見えるという錯視が生じる。2つの視覚刺激の代わりにそれらをつなぐ位置関係で線分を提示すると、光点が提示された側から線が描かれたように見える「線運動錯視」が生じる (<http://www.psy.l.chiba-u.ac.jp/labo/vision2/linemotion.html>)。

輪郭で区切られた領域内に先行刺激が提示された場合、その輪郭で囲まれた領域の内部では処理が速められる²²⁾。この現象は、注意による促進が網膜位置に特異的な処理に基づいているのではなく、オブジェクトとその他の領域を区別した後の処理に基づいていることを示唆している。

2.6 経験の効果

知覚の処理過程の速さの違いに基づく時間差については、日常的には体験されることはほとんどないだろう。それぞれの属性や知覚様相の処理時間には差があっても、一定の時間の幅の中では目立つ変化や出来事が生じたタイミングの間に同期や時間順序の判断が行われていることが指摘されている²³⁾。この場合、属性や知覚様相によって処理時間に違いがあったとしても、目立つ刺激どうしは同時に生じたように知覚されやすいことになる。

また、視聴覚刺激の同時性の知覚には可塑性がある。たとえば、視覚刺激と聴覚刺激の提示に数十ミリ秒程度のずれを設けたとする。このとき、視聴覚刺激の間にずれが知覚されるが、その状態で数分程度の刺激観察を続けると、視聴覚刺激間のずれが当初より小さく感じられるようになる²⁴⁾。また、観察者のキー押しから100ミリ秒後に音が鳴る状況で観察を繰り返した後で、キー押しの瞬間に音を鳴らすと、キー押しより先に音が鳴ったように知覚されるようになる²⁵⁾。視聴覚刺激の間に一貫して同じ程度の時間的ずれが持続して存在する状況では、異なる知覚様相間や動作と知覚との間の同時性が刺激の顕著な特性の対応関係についての経験に基づいて決定されるのである。

3. 運動する刺激の位置についての錯視

一定の速度で運動する視覚刺激のそばに、別の刺激を瞬間的に提示した（フラッシュを提示した）とする。実際に

は2つの刺激が並んでいたとしても、運動する刺激が進行方向側にずれた位置にあるように見える。これは「フラッシュラグ効果」(flash lag effect) と呼ばれ²⁶⁾ (http://www.michaelbach.de/ot/mot_flashlag1/index.html)、1920年代から知られている視覚現象である²⁷⁾。このフラッシュラグ効果は、刺激の運動に関してだけでなく、明るさや色相、空間周波数、配置のランダムさといった属性が連続的に変化する場合にも見出されており²⁸⁾、知覚の時間的特性にかかわる錯視と考えられている。また、同様の錯覚は、移動する聴覚刺激の位置についての判断²⁹⁾や、筋運動感覚に基づく手の位置についての判断³⁰⁾でも生じることが報告されている。

フラッシュラグ効果の基礎にある過程についてのおもな仮説のひとつは、知覚の遅れを補償する機能が関与していることを主張している^{26, 31)}。すなわち、この仮説では、視覚系が定速運動する刺激については運動に関する情報によって不可避免的な知覚の遅れを補償するような処理を行っていることが仮定されている。他方、突然に提示されるフラッシュについては、将来の状態の予測に基づく補償の処理ができない。そのために、2つの刺激の間に位置ずれが見えることになるものと考えられている。

知覚の処理の基礎にある不可避免的な遅れの補償がフラッシュラグ効果の基礎にあることを想定する仮説^{26, 31)}は、どの時点でフラッシュを提示しても同じ程度のフラッシュラグ効果が生じることを予測する。しかしながら、実際には、フラッシュのタイミングによってフラッシュラグ効果の程度は変化する。たとえば、フラッシュ後80ミリ秒以内に運動刺激の運動方向を反転させた場合、フラッシュラグ効果はずいぶん小さくなる³²⁾。刺激が運動を始めた瞬間にフラッシュを提示した場合には、運動の途中でフラッシュを提示した場合と同程度のフラッシュラグ効果が生じるのに、フラッシュと同時に運動刺激が停止したり消失した場合にはフラッシュラグ効果が認められなくなる³¹⁾。また、フラッシュラグ効果の程度は、フラッシュ前の運動刺激の速度ではなく、フラッシュ後の刺激の速度に対応して変化する³³⁾も、知覚処理の遅れの補償によってフラッシュラグ効果が起こるという仮説とは合わない。

フラッシュラグ効果におけるこうした特性を説明するために、別の仮説が提案されている。たとえば、運動の速度や方向が変化する運動刺激を用いた実験の結果に基づき、フラッシュ刺激が提示された際の位置を空間的平均に基づいて決定するためにフラッシュラグ効果が生じるとする仮説^{33, 34)}がある。また、ランダムに位置を変える運動刺激を用いた実験の結果に基づき、突然提示された刺激の処理

よりも運動刺激に対する処理が速いことによってフラッシュラグ効果が生じるとする仮説が提案されている^{32,35)}。さらには、運動する刺激が提示されるとその周囲の空間表象が歪むことがフラッシュラグ効果の基礎にあると主張する仮説もある³⁶⁾。これらの仮説の間では議論が続いており、まだ決着はついていない。

なお、運動する視覚刺激の位置についての錯視には、フラッシュラグ効果以外にも、フローリッヒ効果 (Fröhlich effect)^{37,38)} や representational momentum^{39,40)} がある。前者は運動刺激の動き始めの位置が運動の進行方向側にずれて見えるという錯視、後者は運動刺激が止まった位置が運動の進行方向側にずれて見えるという錯視である。錯視の方向がフラッシュラグ効果と一致しているため、これらの間に共通の基礎過程がある可能性も検討されている⁴¹⁾。

観察者が自ら押すキーによってフラッシュ提示のタイミングを決定した場合⁴²⁾ や、観察者自身がマウスを使って視覚刺激の運動をコントロールする場合⁴³⁾、フラッシュラグ効果が低減される。また、フラッシュや運動刺激に注意を向けた場合にも、フラッシュラグ効果が低減される⁴⁴⁾。これらの研究は、刺激変化やフラッシュ提示に対する注意がフラッシュラグ効果の基礎にある過程に影響を及ぼすことを示唆している。

フラッシュラグ効果の存在は、動いている物体を捕まえる際の視覚情報処理を理解する上での問題を提起している。視知覚成立のための不可避的な遅れがあるため、動いている物体の見えの成立を待ってその見えた位置にむけて手を伸ばすことでは、その物体を捕まえることができないはずである。スポーツにおいて動いているボールなどを捕捉する場合、不可避的な知覚の遅れを補うような無意識的処理がなされているものと考えられる。

しかしながら、このような無意識的な調整があるために、逆に問題が生じることもある。位置についての正確な判断を求められる場合、このような知覚の特性は判断の誤りを生じることがある。たとえば、フラッシュラグ効果がサッカーのオフサイド誤審につながる可能性があることが報告されている⁴⁵⁾。

また、通常動いているはずのものなのに、それが止まっていることによって問題が生じることがある。たとえば、止まっているエスカレーターを昇降するときである。われわれは動いているエスカレーターに足を置くのに失敗することは少なく、適切な位置に足を置くことができる。このことは、われわれは日常生活の中でエスカレーターを使う際に、見た目よりも少し将来の状況に対応する位置に足を置くことを訓練していることを意味している。他方、止

まっているエスカレーターを昇ろうとして、多くの人が、つまづいたり、身体のバランスを崩したり、違和感を感じたりしている。止まっているエスカレーターで昇ったり降ったりしにくいのは、一段一段の高さが異なっているためではなく、無意識的に見た目よりも先に足を置こうとする自動的調整が行われてしまうためと考えられている⁴⁶⁾。

4. 時間の長さに関する錯視

4.1 刺激量の効果

視覚刺激の持続時間の長さについての知覚は、その刺激の強度に対応して変化することが知られている。すなわち、より大きな視覚刺激が提示された時間は、小さな刺激が提示された時間よりも長く感じられる^{47,48)}。また、明るさや数字の示す量に対応して、その提示時間が長く感じられる^{49,50)}。

大きさの錯視 (エビングハウス錯視) を用いた実験では、刺激の物理的量は一定でも、知覚される大きさに対応して知覚される持続時間が伸長することが見出されている⁵¹⁾。この結果は、刺激の物理量は一定であっても、知覚量が大きいほうが刺激提示時間がより長く知覚されることを示している。

4.2 運動速度の効果

動画像の速度は、時間の長さの知覚における錯視を引き起こす。動画像の運動速度が速いほど、その画像観察の間に感じられる時間が長く感じられる。この現象はランダムドットのような人工的画像を動かした場合でも認められるが⁵²⁾、自然画像を用いた場合により顕著になることが報告されている⁵³⁾。知覚される時間の長さを引き延ばすことの基礎について、動画像の変調の時間周波数の処理に関連することを主張する仮説⁵⁴⁾ と、高次の運動速度処理に基づくとする仮説⁵⁵⁾ などが提案されている。

4.3 刺激の新規性の効果

視覚刺激の新規性も時間の長さの知覚における錯視を引き起こす。たとえば、同じ刺激が等しい時間間隔で繰り返して提示された後にそれまでとは異なる新奇な刺激が提示された場合、この新奇な刺激は他の刺激より長い間提示されていたように感じられる^{56,57)}。また、同じ刺激が等しい時間間隔で次々と繰り返して提示された場合、その刺激が最初に提示されたときよりも2度目以降に提示されたときのほうが刺激の提示時間が短く感じられる^{58,59)}。異なる刺激が次々と連続して等しい時間間隔で提示された場合、予期と異なる刺激が提示された際にその刺激の提示された時間が長く感じられる⁶⁰⁾。時間の長さの処理のこうした特性は、知覚情報処理に与えられる負荷や処理された情報の量

によって知覚される時間の長さが決定されるという仮説⁶¹⁾と一致している。

4.4 眼球運動の効果

画像観察中の眼球運動も、知覚される時間の長さにおける錯視を引き起こす。2つの刺激の間でサッケードさせた場合、サッケードの前後にわたって提示された視覚刺激の提示時間が実際よりも短く知覚される⁶²⁾。サッケードの際に時間が短縮して知覚されることは、サッケード抑制の最中の知覚の連続性の保持と関連しているのかもしれない。

4.5 感情の効果

強い緊張や恐怖は体験される時間を長く感じさせる効果がある⁶³⁾。Eagleman とその共同研究者たちは、強い恐怖や緊張が視覚の情報処理の時間特性に及ぼす影響について検討した⁶⁴⁾。彼らは、バンジージャンプで約 31 m の高さから落下する観察者について、落下に要した時間の長さの知覚と、落下中の視覚処理の時間的解像度を検討した。視覚の時間的解像度の測定では、観察者が手首に装着したディスプレイにさまざまな時間周波数で輝度反転する数字を提示し、落下中に見えた文字を答えさせた。実際に落下にかかった時間は平均で 2.49 秒であったが、直後に報告された落下時間は実際よりも 36% 過大評価されていた。それに対し、落下中に読み取られた数字から得られた視覚的処理の時間的解像度は、地上での通常の状態では測定されたものと有意差が認められなかった。これらの結果から、落下中の時間の過大評価は、知覚的な情報処理の時間的解像度が高められたことによるものではないこと、むしろ、強い恐怖を感じた期間を実際より長い時間として誤記憶することに基づく結論されている。ただし、同じ研究グループでは、落下中の知覚情報処理の時間解像度の向上を示唆する結果が得られたこともある⁶⁵⁾。感情の状態が時間の長さの知覚や知覚の時間解像度に及ぼす効果については、まだ検討の余地があるといえる。

5. 視覚の時間的特性の基礎

かつては、単独の内的時計が時間にかかわるさまざまな課題の遂行の基礎にあることが想定されていた⁶⁶⁾。しかしながら、最近の研究成果により、同じような時間にかかわる知覚であっても、知覚様相や遂行される課題の内容によって、異なる過程が知覚の時間的特性の決定にかかわっていることが示唆されている。たとえば、前節で紹介したように、強い恐怖を感じた際、その間の時間は長く感じられるが、その際に知覚の時間解像度は変化しない⁶⁴⁾。サッケード中は視覚刺激の提示時間が過小評価される⁶²⁾が、サッケード中に聴覚刺激を提示してもその提示時間が

過小評価されることはない⁶⁷⁾。高速系列提示の手続きで同じ刺激が繰り返し提示される中に新奇な刺激を提示すると、その提示時間は長く感じられるが、その際、ピッチや時間周波数の知覚は影響を受けない⁶⁰⁾。こうした研究は、単独の過程が時間に関する知覚を決定しているのではなく、知覚様相や時間に関する指標ごとに異なる基礎過程が介在していることを示唆している⁶¹⁾。また、第 2 章で紹介したように、時間順序の知覚には奥行方向の仮現運動の処理過程が介在していると考えられる¹⁸⁾。時間に関する知覚にはさまざまな視覚的属性の処理過程も関与しており、時間に関するさまざまな知覚はそうした情報の総合によって決定されるものと考えられる。

時間知覚の神経的基盤に関連して、知覚様相によらず、知覚刺激についての時間的な計測やカウンティングを実施しているとき、大脳基底核の一部が通常より活性化されていることが fMRI を用いた脳機能研究によって示されている⁶⁸⁾。他方、知覚様相や実験課題によって異なる脳部位が関与していることを示唆する研究もある⁶⁹⁾。脳機能研究においても心理物理学的研究においても、時間に関する知覚情報処理が、単独の過程に基づくのか、あるいは複数の過程に基づくのかについての結論は今後の研究にゆだねられている。

ここまでで紹介してきたように、たとえ物理的な刺激の時間的特性は同一であったとしても、その刺激の時間的な特性に関する知覚の内容はさまざまな要因によって変動する。したがって、われわれが日常的に見たり聞いたりしている外界の出来事の生じた時点、時間順序や同時性、時間の長さは、おそらくは物理的な刺激の時間的特性とは異なるものであることが多いだろう。ところが、このような知覚の制約があったとしても、これまでの日常生活の中では大きな問題には発展していない。進化論的に考えれば、われわれの知覚系は、地上環境での長い時間にわたる進化の過程で獲得されてきたものである。また、われわれが現在、このような特性の知覚系をもっているということは、その処理過程の特性がこの地上の環境の中で生き抜く上で有効であったことの証拠ともいえる。

しかしながら、人類は、自ら発展させた科学技術によって生活環境を大きく変えている。その結果、現在では一般人でさえ、これまでの進化の過程では経験したことがないほど高速での移動や情報通信を行っている。われわれの知覚系や運動系はこのような高速の環境にはまだ適応していないため、これまでになくさまざまな錯誤が生じる可能性が高い。また、高速の移動や道具の操作においては、瞬時

に的確な知覚的处理と行動を行わないとさまざまな問題が生じ、場合によっては致命的な事態に発展する可能性も高まっているものと考えられる。視覚情報処理における時間的限界やその適応能力を理解し、適切なサポートのための条件を明らかにすることで人間の環境への適応に寄与することも、今後の視覚研究の重要な課題といえよう。

文 献

- 1) G. A. Goff, Y. Matsumiya, T. Allison and W. R. Goff: "The scalp topography of human somatosensory and auditory evoked potentials," *Electroen. Clin. Neurophys.*, **42** (1977) 57-76.
- 2) E. Poppel: *Grenzen des Bewusstseins: Über Wirklichkeit und Weltverfährung* (Verlages-Anstalt GmbH, 1985). 田山忠行, 尾形敬次訳: 意識の中の時間 (岩波書店, 1995).
- 3) Y. Sugita and Y. Suzuki: "Audiovisual perception: Implicit estimation of sound-arrival time," *Nature*, **421** (2003) 911.
- 4) K. Watanabe: "Behavioral speed contagion: Automatic modulation of movement timing by observation of body movement," *Cognition*, **106** (2008) 1514-1524.
- 5) S. Shimojo and L. Shams: "Sensory modalities are not separate modalities: plasticity and interactions," *Curr. Opin. Neurobiol.*, **11** (2001) 505-509.
- 6) V. C. Jackson: "Visual factors in auditory localization," *Q. J. Exp. Psychol.*, **5** (1953) 52-65.
- 7) M. Radeau: "Signal intensity, task context, and auditory-visual interactions," *Perception*, **14** (1985) 571-577.
- 8) L. Shams, Y. Kamitani and S. Shimojo: "What you see is what you hear," *Nature*, **408** (2000) 788.
- 9) M. Ichikawa and Y. Masakura: "Auditory stimulation affects apparent motion," *Jpn. Psychol. Res.*, **48** (2006) 91-101.
- 10) Y. Wada, N. Kitagawa and K. Noguchi: "Audio-visual integration in temporal perception," *Int. J. Psychophysiol.*, **50** (2003) 117-124.
- 11) K. Moutoussis and S. Zeki: "Functional segregation and temporal hierarchy of the visual perceptive systems," *Proc. Biol. Sci.*, **264** (1997) 1407-1414.
- 12) 下村満子, 横澤一彦: "高速提示された刺激の時間的結合錯誤: ターゲットの複雑性操作による効果", *心理学研究*, **68** (1998) 449-456.
- 13) C. Pulfrich: "Die Stereoskopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie," *Naturwissenschaften*, **10** (1922) 553-564.
- 14) A. Lit: "The magnitude of the Pulfrich stereophenomenon as a function of binocular differences in intensity at various levels of illumination," *Am. J. Psychol.*, **62** (1949) 159-181.
- 15) S. Anstis: "Footsteps and inchworms: Illusions show that contrast affects apparent speed," *Perception*, **30** (2001) 785-794.
- 16) M. Carrasco, B. McElree, K. Denisova and A. M. Giordano: "Speed of visual processing increases with eccentricity," *Nat. Neurosci.*, **6** (2003) 699-700.
- 17) L. Mitrani, S. Shekardjiiski and N. Yakimoff: "Mechanisms and asymmetries in visual perception of simultaneity and temporal order," *Biol. Cybern.*, **54** (1986) 159-165.
- 18) M. Ichikawa: "Illusory temporal order for stimuli at different depth positions," *Attention, Percept. Psychophys.*, **71** (2009) 578-593.
- 19) M. I. Posner: "Orienting of attention," *Q. J. Exp. Psychol.*, **32** (1980) 3-25.
- 20) O. Hikosaka, S. Miyauchi and S. Shimojo: "Focal visual attention produces illusory temporal order and motion sensation," *Vision Res.*, **33** (1993) 1219-1240.
- 21) O. Hikosaka, S. Miyauchi and S. Shimojo: "Visual attention revealed by an illusion of motion," *Neurosci. Res.*, **18** (1993) 11-18.
- 22) H. Jordan and S. P. Tipper: "Object-based inhibition of return in static display," *Psychon. Bull. Rev.*, **5** (1998) 504-509.
- 23) S. Nishida and A. Johnston: "Marker correspondence not processing latency determines temporal binding of visual attributes," *Curr. Biol.*, **12** (2002) 359-368.
- 24) W. Fujisaki, S. Shimojo, M. Kashino and S. Nishida: "Recalibration of audio-visual simultaneity," *Nat. Neurosci.*, **7** (2004) 773-778.
- 25) C. Stetson, X. Cui, P. R. Montague and D. M. Eagleman: "Motor-sensory recalibration leads to an illusory reversal of action and sensation," *Neuron*, **51** (2006) 651-659.
- 26) R. Nijhawan: "Motion extrapolation in catching," *Nature*, **370** (1994) 256-257.
- 27) F. Hazelhoff and H. Wiersma: "Die Wahrnehmungszeit," *Z. Psychol.*, **54** (1924) 58-78.
- 28) B. R. Sheth, R. Nijhawan and S. Shimojo: "Changing objects lead briefly flashed ones," *Nat. Neurosci.*, **3** (2000) 489-495.
- 29) D. Alais and D. Burr: "The 'Flash-Lag' effect occurs in audition and cross-modally," *Curr. Biol.*, **13** (2003) 59-63.
- 30) R. Nijhawan and K. Kirschfeld: "Analogous mechanisms compensate for neural delays in the sensory and the motor pathways: Evidence from motor flash-lag," *Curr. Biol.*, **13** (2003) 749-753.
- 31) R. Nijhawan: "Neural delays, visual motion and the flash-lag effect," *Trends Cogn. Sci.*, **6** (2002) 387-393.
- 32) D. Whitney and I. Murakami: "Latency difference, not spatial extrapolation," *Nat. Neurosci.*, **1** (1998) 656-657.
- 33) E. Brenner and J. B. Smeets: "Motion extrapolation is not responsible for the flash-lag effect," *Vision Res.*, **40** (2000) 1645-1648.
- 34) D. M. Eagleman and T. J. Sejnowski: "Motion integration and postdiction in visual awareness," *Science*, **287** (2000) 2036-2038.
- 35) I. Murakami: "A flash-lag effect in random motion," *Vision Res.*, **41** (2001) 3101-3119.
- 36) K. Yokoi and K. Watanabe: "Dynamic distortion of visual position representation around moving objects," *J. Vision*, **8** (2008) 1-11.
- 37) F. W. Fröhlich: "Über die Messung der Empfindungszeit," *Z. Sinnesphysiol.*, **54** (1923) 58-78.
- 38) J. Müsseler and G. Aschersleben: "Localizing the first position of a moving stimulus: The Fröhlich effect and an attention-shifting explanation," *Percept. Psychophys.*, **60** (1998) 683-695.
- 39) J. J. Freyd and R. A. Finke: "Representational momentum," *J. Exp. Psychol. Learn.*, **10** (1984) 126-132.
- 40) T. L. Hubbard and J. J. Bharucha: "Judged displacement in apparent vertical and horizontal motion," *Percept. Psychophys.*, **44** (1988) 211-221.
- 41) J. Müsseler, S. Stork and D. Kerzel: "Comparing mislocalizations with moving stimuli: The Fröhlich effect, the flash-lag, and representational momentum," *Vision Cogn.*, **9** (2002) 120-138.
- 42) J. López-Moliner and D. Linares: "The flash-lag effect is reduced when the flash is perceived as a sensory consequence of our action," *Vis. Res.*, **46** (2006) 2122-2129.
- 43) M. Ichikawa and Y. Masakura: "Manual control of the visual stimulus reduces the flash-lag effect," *Vision Res.*, **46** (2006) 2192-2203.
- 44) S. Shioiri, K. Yamamoto and H. Yaguchi: "Effect of attention on flash lagging," *J. Vis.*, **2** (2002) 27a.

- 45) M. V. Baldo, R. D. Ranvaud and E. Morya: "Flag errors in soccer games: The flash-lag effect brought to real life," *Perception*, **31** (2002) 1205-1210.
- 46) T. Fukui, T. Kimura, K. Kadota, S. Shimojo and H. Gomi: "Odd sensation induced by moving-phantom which triggers subconscious motor program," *PLoS ONE*, **4** (2009) e5782.
- 47) E. A. C. Thomas and N. E. Cantor: "On the duality of simultaneous time and size perception," *Percept. Psychophys.*, **18** (1975) 44-48.
- 48) E. A. C. Thomas and N. E. Cantor: "Simultaneous time and size perception," *Percept. Psychophys.*, **19** (1976) 353-360.
- 49) M. Terao, J. Watanabe, A. Yagi and S. Nishida: "Reduction of stimulus visibility compresses apparent time intervals," *Nat. Neurosci.*, **11** (2008) 541-542.
- 50) B. Xuan, D. Zhan, S. He and X. Chen: "Larger stimuli are judged to last longer," *J. Vis.*, **7** (2007) 1-5.
- 51) F. Ono and J. Kawahara: "The subjective size of visual stimuli affects the perceived duration of their presentation," *Percept. Psychophys.*, **69** (2007) 952-957.
- 52) 田山忠行: "運動パターンの時間評価". 松田文子, 調枝孝治, 甲村和三, 神宮英夫, 山崎勝之, 平 伸二 (編著), 心理的時間—その広くて深い謎 (北大路書房, 1996) pp.101-116.
- 53) D. M. Eagleman: "Time perception is distorted during slow motion sequences in movies," *J. Vis.*, **4** (2004) 491.
- 54) R. Kanai, C. L. Paffen, H. Hogendoorn and F. A. Verstraten: "Time dilation in dynamic visual display," *J. Vis.*, **6** (2006) 1421-1430.
- 55) S. Kaneko and I. Murakami: "Perceived duration of visual motion increases with speed," *J. Vision*, **9** (2009) 1-12.
- 56) P. U. Tse, J. Intriligator, J. Rivest and P. Cavanagh: "Attention and the subjective expansion of time," *Percept. Psychophys.*, **66** (2004) 1171-1189.
- 57) R. Ulrich, J. Nitschke and T. Rammsayer: "Perceived duration of expected and unexpected stimuli," *Psychol. Res.*, **70** (2006) 77-87.
- 58) R. Kanai and M. Watanabe: "Visual onset expands subjective time," *Percept. Psychophys.*, **68** (2006) 1113-1123.
- 59) D. Rose and J. Summers: "Duration illusions in a train of visual stimuli," *Perception*, **24** (1995) 1177-1187.
- 60) V. Pariyadath and D. M. Eagleman: "The effect of predictability on subjective duration," *PLoS ONE*, **2** (2007) e1264.
- 61) D. M. Eagleman: "Human time perception and its illusions," *Curr. Opin. Neurobiol.*, **18** (2008) 131-136.
- 62) M. C. Morrone, J. Ross and D. Burr: "Saccadic eye movements cause compression of time as well as space," *Nat. Neurosci.*, **8** (2005) 950-954.
- 63) F. N. Watts and R. Sharrock: "Fear and time estimation," *Percept. Motor Skills*, **59** (1984) 597-598.
- 64) C. Stetson, M. P. Fiesta and D. M. Eagleman: "Does time really slow down during a frightening event?" *PLoS ONE*, **2** (2007) e1295.
- 65) A. Burdick: "The mind in overdrive," *Discover Mag.*, **15** (2006) 21-22.
- 66) M. Treisman: "Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the "internal clock", " *Psychol. Monogr. Gen. Appl.*, **77** (1963) 1-33.
- 67) D. M. Eagleman: "Distortions of time during rapid eye movements," *Nat. Neurosci.*, **8** (2005) 850-851.
- 68) S. M. Rao, A. R. Mayer and D. I. Harrington: "The evolution of brain activation during temporal processing," *Nat. Neurosci.*, **4** (2001) 317-323.
- 69) D. Buetti, E. V. van Dongen and V. Walsh: "The role of superior temporal cortex in auditory timing," *PLoSOne*, **3** (2008) e2481.

(2009年9月14日受理)