

歩行応答と知覚応答による視覚誘導性自己直線運動の知覚速度の測定

—刺激形状の効果に関する検討—

加藤 典之*・金子 寛彦**

*ソニー株式会社ホームエレクトロニクスネットワークカンパニービデオ事業本部 〒141-0001 東京都品川区北品川 6-7-35

**東京工業大学大学院理工学研究科像情報工学研究施設 〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259 R2-60

Velocity of Visually Induced Linear Self-Motion Measured by Walking and Perceptual Responses: Consideration of Stimulus Size Effects

Noriyuki KATO* and Hirohiko KANEKO**

*Video Group, Home Electronics Network Company, Sony Corporation, 6-7-35 Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141-0001

**Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-tyou, Midori-ku, Yokohama 226-8503

This investigation measured the velocity of linear self-motion by walking and perceptual responses when observing optical flow, then investigated their relation. In addition, the spatial factors to determine the velocity of linear self-motion were examined. Experiment 1 used a two-dimensional stimulus containing optical flow. Experiment 2 used a stimulus containing binocular disparity cues in addition to the optical flow. Results of those experiments showed that the walking velocity and estimated velocity were highly correlated and had a linear relation, indicating that walking responses are useful for quantitative measurement of the velocity of linear self-motion. Results also showed that even when simulated velocities of the optical flow were identical, the responses varied depending on the stimulus' spatial configuration. Further analyses suggest that three-dimensional perceptual velocity and two-dimensional velocity on the retina have additive effects on the velocity of linear self-motion.

Key words: linear-vection, binocular disparity, optical flow, walking, self-motion

1. はじめに

人間には、自己が直線的に運動しているという感覚、すなわち自己直線運動感覚がある。日常生活において、この自己直線運動感覚は、視覚情報、卵形囊や迷路小囊からの前庭系情報、皮膚受容器や深部受容器等からの体性感覚情報の3つの情報により生起されると考えられている。

自己直線運動感覚の量や性質を調べる場合、まずその意識的な知覚の量や性質を計測する方法が考えられる。視覚情報による意識的な知覚としての自己直線運動感覚に関しては、過去に視覚誘導自己直線運動感覚（リニアベクション）として多くの研究が報告されている¹⁻⁴⁾。その中で空間形状に関するものとしては、刺激の視角が10度以上あ

れば自己直線運動感覚が生起されるという報告や、周辺に対して中心窩付近の視覚刺激に優位性があるという報告がされている^{1,2)}。

自己直線運動感覚の量や性質を調べる他の方法として、行動応答によるものが考えられる。前方向への自己直線運動に対応する行動は歩行である。日常、歩行速度とそれに伴う視覚情報による三次元的な刺激速度は物理的に一致しており、このような場合には、自己直線運動の感覚速度と歩行速度は一致していると考えられる。そのため、歩行を指標とすることで^{5,6)}、自己直線運動感覚を知覚応答とは別な角度から定量的に測定できるのではないかと考えた。

自己直線運動感覚において、入力である視覚情報と知覚

** E-mail: kaneko@isl.titech.ac.jp

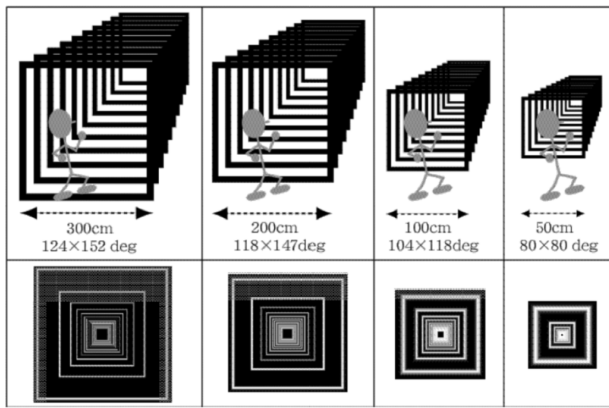


Fig. 1 Schematic diagrams of the stimuli with different stimulated size. The upper diagrams represent the simulated environments and the lower diagrams show the images on the screen. The translucent areas in the lower diagrams indicate the unseen parts because of the limitation of screen size.

応答、行動応答の関係を検討することは、自己直線運動感覚生成メカニズムを解明するうえでも重要である。しかし、これらの関係において解明されていない部分は多く、特に歩行応答と知覚応答の関係や、それぞれの応答に対する視覚情報の空間特性についての十分な検討は行われておらず、明らかであるとはいえない。

以上より、本研究においては、視覚情報を入力として知覚応答と行動応答を測定することにより、それらの関係を明らかにすることを目的とした。第一に、自己直線運動感覚を歩行応答によって測定することの妥当性を検討した。第二に、歩行応答と知覚応答による自己直線運動感覚の関係を調べた。第三に、知覚もしくは行動によって測定される自己直線運動感覚が、視覚刺激のどのような空間的特性に依存しているのかを検討した。

2. 実験 1

人間が前方に移動する際に入力される視覚像を二次元的にシミュレートした視覚刺激を観察しながら、歩行速度をマッチングすることにより、歩行応答による自己直線運動の速度感覚を定量的に測定した。また、同じ視覚刺激に対して知覚応答による自己直線運動の速度感覚も測定し、両者を比較した。これにより、知覚応答および歩行応答のための自己直線運動感覚の関係を検討した。さらに、視覚刺激の空間パラメータを変化させることにより、歩行および知覚応答による自己直線運動の速度感覚の決定要因を検討した。

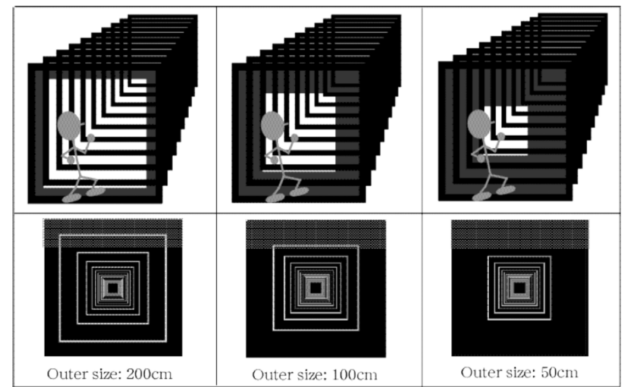


Fig. 2 Schematic diagrams of the stimuli with different restricted sizes. The upper diagrams represent the simulated environments and the lower diagrams show the images on the screen. The translucent areas in the lower diagrams indicate the unseen parts because of the limitation of screen size.

2.1 実験方法

2.1.1 刺激

視覚刺激は、奥行き方向に続く幅と高さが一定のトンネル内を歩行するときの視覚像を模擬したものであった。模擬したトンネルのサイズ（幅と高さ）は、300 cm, 200 cm, 100 cm, 50 cm の 4 種類であり、四方を囲み奥行き方向に間隔 50 cm で並ぶ太さ約 7 cm の枠により構成された (Fig. 1)。トンネルの最も近い仮想位置は被験者から 30 cm の距離であり、最も遠い仮想位置はそこから 10 m の距離であった。最も近い仮想位置は、刺激が呈示される広視野平面スクリーンの視距離に対応していたため、広視野平面スクリーン上では模擬したトンネルのサイズが原寸で呈示された。ただし、スクリーンの大きさが縦 180 cm, 横 240 cm であり、視覚刺激の中心が、スクリーン底辺から 150 cm, 上辺から 30 cm, 右辺と左辺からそれぞれ 120 cm であったため、条件によっては刺激の上方と左右において見切れ (Fig. 1 の半透明の部分) が生じた。しかし、各刺激とも、視点から下方中央の部分においてはスクリーンによる見切れはなく呈示された。4 種類のトンネルの縦方向と横方向の最大視角は、それぞれのトンネルサイズに対し、124 deg×152 deg (300 cm), 118 deg×147 deg (200 cm), 104 deg×118 deg (100 cm), 80 deg×80 deg (50 cm) であり、300 cm のトンネルサイズの刺激においては、スクリーンの底辺が被験者の歩く地面と一致していた。また、これらの刺激に加えて、トンネルのサイズが 300 cm の視覚刺激に対して周辺視野を制限し、30 cm の視距離で、200 cm (118 deg×147 deg), 100 cm (104 deg×118 deg), 50 cm (80 deg×80 deg) の大きさとした刺激も用いた (Fig. 2)。ただし、ここでも Fig. 1

と同様に見切れがある場合があった (Fig. 2 の半透明の部分)。視覚刺激の三次元的速度は、1.08 km/h, 2.16 km/h, 4.32 km/h の 3 種類を用いた。固視点は呈示しなかったが、被験者にはトンネルの中心部を見るよう教示をした。

2.1.2 装置

実験装置は、視覚刺激呈示部と歩行速度測定部からなっていた。視覚刺激呈示部は、パソコン (Apple Power Mac G4)、液晶プロジェクター (EPSON ELP-7250)、広視野平面スクリーン (180 cm×240 cm) より構成された。パソコンで作成された視覚刺激を、液晶プロジェクターを用いて広視野平面スクリーンの後方から投影した。刺激は、解像度 768 pixel×1024 pixel, 周波数 60 Hz, モノクロ 256 階調で呈示された。

歩行速度測定部は、トレッドミル (JE-360)、デジタルレコーダー (TEAC DR-M3)、DC タコジェネレーター (FAULHABER 2225 U 4.3 G9) により構成された。トレッドミルの回転円盤部に DC タコジェネレーターを取り付け、これからリアルタイムに出力する回転数に応じた電圧値をデジタルレコーダーにより、サンプリング周期 20 Hz で記録することにより歩行速度を測定した。

2.1.3 手順

実験 1 では、歩行応答実験 (実験 1-a) と知覚応答実験 (実験 1-b) を行った。両実験で用いた視覚刺激はまったく同様であった。

歩行応答実験では、被験者は、視覚刺激が自分の歩行によって生じているような知覚を得るように歩行速度を調節するよう教示された。各トライアルでは、まず被験者はトレッドミルの歩行ベルト上に直立し、視覚刺激が呈示されるのを待った。その後、実験者の操作によって視覚刺激の呈示が始まり、それと同時に被験者はトレッドミル上で歩行を開始した。このとき、通常の歩行時のように、両手は自然に動かし姿勢はできるだけ自然な状態を保った。視覚刺激は 30 秒間呈示された。被験者は、視覚刺激が呈示されている間歩行を行い、視覚刺激の呈示終了と同時に歩行を停止した。トレッドミルから出力される歩行データの記録は、視覚刺激開始と同時に開始し、32 秒後 (刺激呈示終了 2 秒後) に終了した。解析には、被験者の歩行速度が一定となった開始 10 秒から 27.5 秒まで 17.5 秒間の記録データの平均値を使用した。また、視覚刺激の呈示開始と同時に、被験者の視野から遮られた刺激の右下隅の小部分にシグナル光を短時間呈示し、それをフォトディテクターで検出してデータレコーダーによる歩行速度記録の開始トリガーに用いた。

知覚応答実験では、被験者は視覚刺激による前方への自己の知覚運動速度の大きさを口答で応答するように教示された。速度の評価は、基準となる視覚刺激 (トンネルサイズ: 300 cm, 三次元的刺激速度: 2.16 km/h) によって生じられる自己の知覚運動速度を 10 として、その基準より 2 倍ならば 20, 半分ならば 5 というように外挿、内挿することにより行った。被験者は、各セッションの前に基準の視覚刺激を 3~4 回見ることで、基準の知覚速度を確立した。また、基準の視覚刺激は、3~4 トライアルごとに 1 回ずつ再度呈示された。各トライアルでは、被験者はまず固定されたトレッドミルの歩行ベルト上に直立し、視覚刺激が呈示されるのを待った。次に、実験者の操作により視覚刺激の呈示が始まり、これは 30 秒間続いた。被験者は、静止した状態で視覚刺激を観察し、呈示終了後に自己の知覚運動速度を口頭で応答した。

視覚刺激の空間形状は、トンネルサイズ 4 種類と周辺視野制限条件 3 種類の計 7 種類で、それぞれに対し三次元的刺激速度 3 種類があったため、刺激は計 21 種類となった。1 セッションは、各視覚刺激 1 トライアルずつの合計 21 トライアルで構成された。視覚刺激の順番は、セッション内でランダムであった。各被験者とも歩行応答実験 (1-a) と知覚応答実験 (1-b) を各 4 セッションずつ行った。刺激観察時は両眼視であった。

被験者は大学院に所属する男性 3 人で、視力正常または矯正視力正常であった。3 名のうち 1 名は筆者であり、他の 2 名は実験の目的を知らされていなかった。また、3 名とも以前に心理物理実験の被験者の経験はあったが、本実験と同様な歩行応答を用いた実験の経験はなかった。

2.2 実験結果

各被験者の三次元的刺激速度と歩行速度応答および知覚速度応答の関係を Fig. 3 に示す。グラフの横軸は視覚刺激の三次元的刺激速度を、縦軸は被験者が応答した歩行速度 (左列) と知覚速度 (右列) を示す。誤差棒は 4 回の繰り返しデータに対する標準偏差を示す。シンボルの違いは、視覚刺激の空間形状の違いであり (7 種類)、実線は 4 種のトンネルサイズ条件を、破線は 3 種の周辺視野制限条件を表している。歩行速度のグラフ内の傾き 1 の破線は、三次元的刺激速度に対して歩行速度が同じ速度にマッチングした場合に予測される直線である。

結果から、刺激の種類によらず三次元的刺激速度の増加に伴い、歩行速度と知覚速度が増加することがわかった。しかし、歩行速度と三次元的刺激速度は完全には一致していなかった。これらの傾向は、被験者全員に対してみられた。また、歩行速度の標準偏差が小さいことから、歩行応

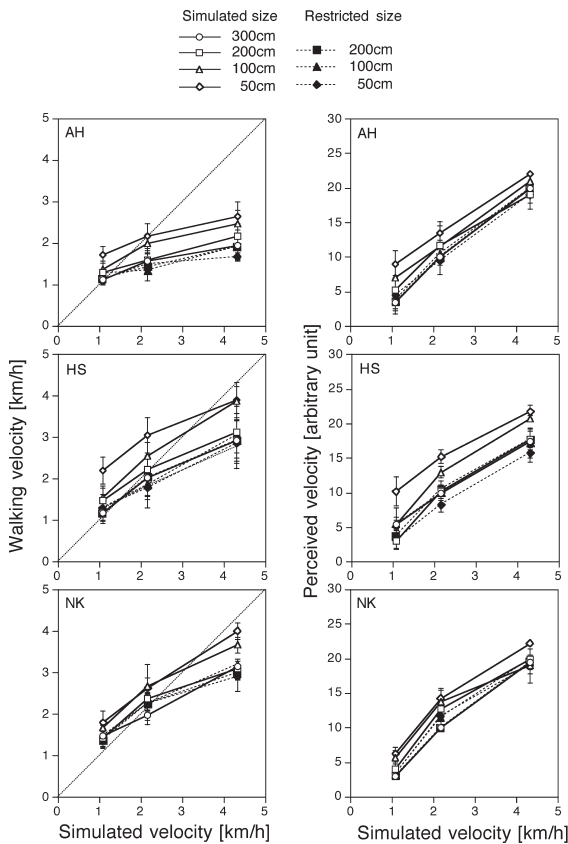


Fig. 3 Result of Exp. 1. Walking velocity and perceived velocity as a function of the simulated velocity of the stimuli for each condition of stimulus configuration.

答の再現性が高いことがわかる。

Fig. 3の結果より、三次元的刺激速度の増加に伴い歩行速度と知覚速度がともに増加することがわかった。しかし、三次元的刺激速度の増加に対する歩行速度応答と知覚速度応答の増加が同様な割合を示しているのかどうかは明確でない。そこで歩行速度応答と知覚速度応答を直接的に比較し、その関係を調べた。Fig. 4は、被験者ごとに、同条件の視覚刺激に対する歩行速度と知覚速度の関係を示したものである。このとき基準とした視覚刺激（トンネルサイズ：300 cm，三次元的刺激速度：2.16 km/h）に対する応答値を1として、歩行速度と知覚速度をそれぞれ正規化した。縦軸は正規化した歩行速度の比率を、横軸は正規化した知覚速度の比率を示す。グラフの破線は最小二乗法によってフィッティングした直線で、 r^2 は相関係数である。

Fig. 4から、歩行速度比と知覚速度比との間に高い相関がみられ、比例関係があることがわかる。この結果は、歩行応答と知覚応答の決定機構が独立ではないことを示唆している。

次に、視覚刺激の空間形状の変化による歩行速度と知覚速度への影響をみるため、グラフの横軸をスクリーン上に

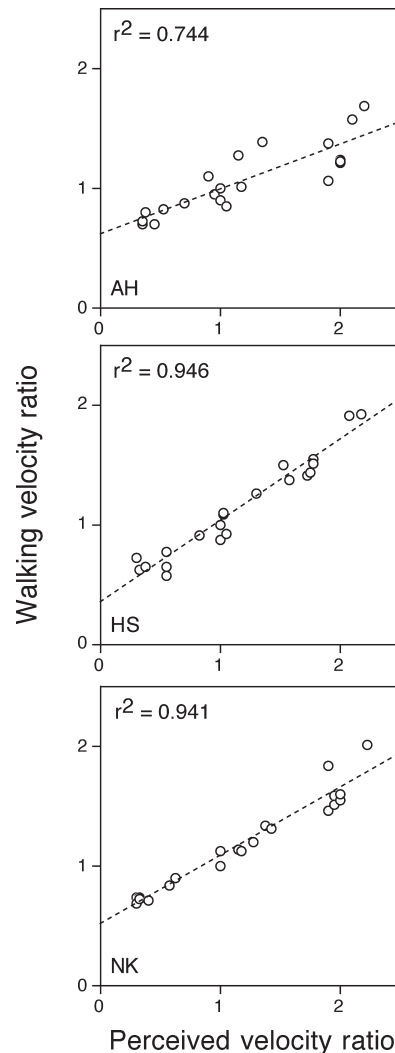


Fig. 4 Relation between walking velocity and perceived velocity ratios for each condition. The data for each subject were fitted by a linear line, which is shown as a dotted line.

呈示された視覚刺激の最大サイズとして、Fig. 3のデータをリプロットした (Fig. 5)。縦軸は被験者が応答した歩行速度（左列）と知覚速度（右列）を示している。実線はトンネルサイズが異なる条件、すなわち Fig. 1の各形状に対するデータである。破線は300 cmのトンネルサイズの刺激に周辺視野制限を行った条件、すなわち Fig. 2の各形状と Fig. 1左の300 cmの形状に対するデータである。このため、横軸300 cmにおける点線と破線のデータは同一である。シンボル形状の違いは、呈示した視覚刺激の三次元的刺激速度の違いを示す。

結果から、同じ三次元的刺激速度を観察しても、トンネルサイズが大きくなるのに伴って歩行速度と知覚速度が減少する傾向がみられた。しかし、周辺視野制限のサイズが変化しても、ほぼ一定の歩行速度と知覚速度を応答してい

る。これらの傾向は、被験者全員に対してみられた。

以上の結果を統計的に検討するため、歩行応答および知覚速度応答 (Fig. 5) 個別に、トンネルサイズの異なる条件 (Fig. 5 の実線のデータ)、視野制限のサイズが異なる条件 (Fig. 5 の破線のデータ) それぞれに対して、3人の被験者の平均データを繰り返しとして2要因 (サイズ×刺激速度) の分散分析を行った。その結果、刺激速度の効果は、サイズ条件 (トンネル/視野制限) と応答条件 (歩行/知覚) のすべての組み合わせにおいて有意であった (視野制限条件の歩行応答の場合に $p < 0.05$, 他の組み合わせでは $p < 0.01$)。そして、トンネルサイズの効果は両応答において有意であった (歩行応答: $F_{3,6} = 36.97$, $p < 0.01$, 知覚応答: $F_{3,6} = 17.26$, $p < 0.01$) が、視野制限サイズの効果は有意ではなかった (歩行応答: $F_{3,6} = 1.50$, $p > 0.1$, 知覚応答: $F_{3,6} = 1.14$, $p > 0.1$)。また、サイズと刺激速度の交互作用は、すべてのサイズ条件と応答条件の組み合わせにおいて有意ではなかった ($p > 0.1$)。

2.3 考 察

人間の前方移動時に入力される視覚像を模擬した刺激を観察した際、それに合わせるように歩行速度を一定にすることができた。また、同じ刺激を静止して観察した場合に自己直線運動感覚が生じ、このときの知覚速度を応答することができた。このとき、歩行速度応答の標準偏差が小さいことから、歩行速度応答は安定した高い再現性をもち、歩行速度応答を指標にして自己直線運動感覚の測定を行うことが可能であるといえる。

Fig. 4の結果から、歩行速度比と知覚速度比との間に高い相関がみられ、歩行応答と知覚応答の決定機構が独立ではないことが示唆された。可能性のひとつとして、入力された視覚刺激に対して1つの自己直線運動感覚が生成され、そこからこれらの応答が決定されることが考えられる。または、歩行応答が知覚をもとに決定される、もしくは、知覚応答が歩行 (のイメージ) をもとに決定される可能性もあるだろう。

Fig. 5の結果より、三次元的刺激速度が同じ場合、トンネルサイズが大きくなるのに伴い歩行速度と知覚速度は減少することが明らかになった。この結果は、理論的な三次元的刺激速度が自己直線運動感覚量を一意に決定しているわけではないことを示している。また、トンネルサイズと三次元的刺激速度が一定であれば、周辺視野制限サイズが変化しても歩行速度と知覚速度はほぼ一定であることが明らかになった。この結果は、自己直線運動感覚が、少なくとも本研究で用いた80度以上の周辺視野に呈示される視覚刺激からの影響を受けず、中心部分の視覚刺激のみから

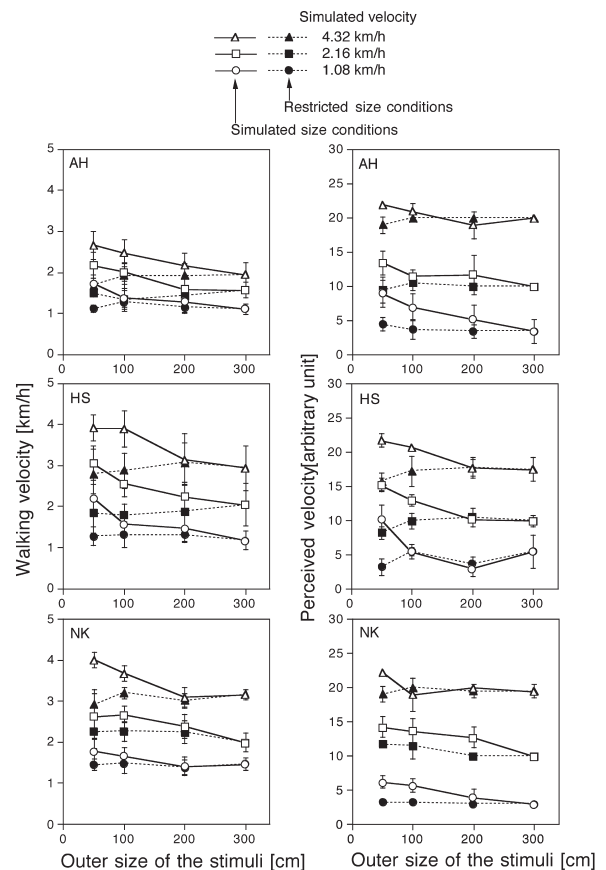


Fig. 5 Result of Exp. 1. Walking velocity and perceived velocity as a function of the outer size of the stimuli for each condition of simulated velocity.

影響を受けることを示す。では、視覚刺激中のどのような量が自己直線運動感覚を決めているのであろうか。そして、なぜトンネルサイズの変化に対して歩行速度と知覚速度が変化したのであろうか。

トンネルサイズの変化と周辺視野制限サイズの変化において刺激中で異なる点を考えると、ある定位置での二次元的な速度の違いが挙げられる。トンネルサイズが変化すると、スクリーン上の各位置での速度が変化する。つまり、網膜上の各位置の速度が変化することになる。しかし、周辺視野制限条件の場合、トンネルサイズは常に同じ (300 cm) であるため、制限の範囲が変化してもスクリーン上の各位置の速度、すなわち網膜上の各位置の速度は一定となる。これらのことから、網膜上のある一定の位置の刺激速度を手がかりに歩行速度と知覚速度が決定されている可能性が考えられる。

そこで、スクリーン上の任意の位置における各刺激の速度分布を計算し (Fig. 6), これをもとにして上記の考えを検討した。Fig. 6より、三次元的刺激速度が同じ場合 (各パネル), トンネルサイズの増加に伴い (各シンボル),

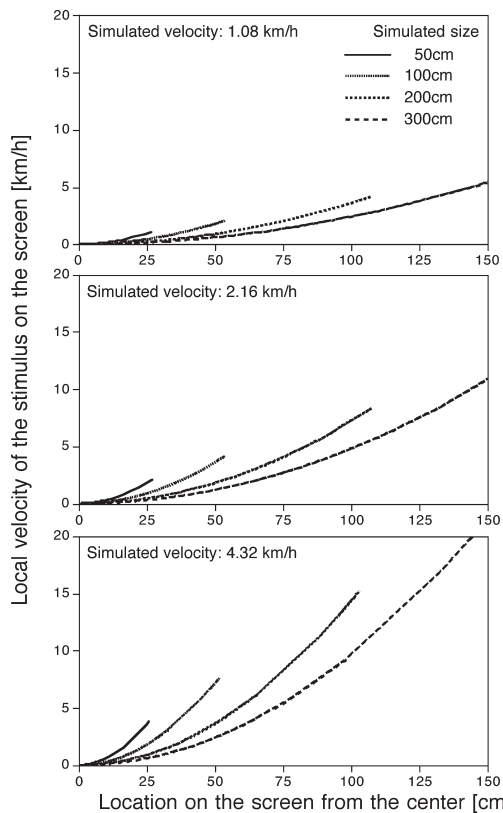


Fig. 6 Local velocities of the stimulus at each location on the screen for each condition of simulated size and velocity.

スクリーン上における同じ位置での速度が減少することがわかる。これより、上記の考え、すなわち網膜上 80 度以下の中心範囲におけるある一定の位置（例えば Fig. 6 の横軸に示される中心から 25 cm の位置）の刺激速度によって歩行速度と知覚速度が決定されるという考えによって、結果を定性的に説明できることがわかる。しかし、定量的には説明できない。すなわち、トンネルサイズの増加によるスクリーン上のある位置での刺激速度の違いは、その歩行速度、知覚速度の違い（Fig. 5）と比較すると非常に大きい。このため、単純に網膜上の一定の位置での二次元的速度に対応して、自己直線運動感覚の速度が決定されているわけでもないと考えられる。実験 1 では、奥行き方向の刺激を単眼手がかりのみによって模擬した刺激であったため、手がかりが不足し、刺激形状に依存した不完全な三次元的速度に変換され、それに基づいて自己直線運動感覚が決定されていたとしてもデータの説明が可能である。そこで、実験 2 においては視覚刺激に両眼視差を付加し三次元的な手がかりを強めた条件下で、視覚情報によって表現される三次元的速度が知覚応答および歩行応答を決定している可能性を検討する。

3. 実験 2

実験 1 では、刺激によって模擬される三次元的刺激速度と、歩行速度応答および知覚応答による自己直線運動感覚の速度の間に対応がみられなかった。これは、実験 1 で用いた刺激における三次元的な手がかりの不足によることが原因である可能性が考えられる。このため実験 2 では、この可能性を検証することを目的として、視覚刺激に両眼視差を付加することにより三次元的手がかりを強めて実験 1 と同様の実験を行った。

3.1 実験方法

実験 2 では、両眼視差を付加するため両眼で異なる像を呈示した。このため、実験 1 で用いたものとは異なる刺激呈示システムを用いた。パソコンで作成した左右眼に呈示する 2 枚の異なる視覚刺激は、スキャンコンバーター (Chromatek 9135)、分配機 (YEM DA-950A)、2 台のハイビジョン液晶プロジェクター (SANYO HVP-100) を通して、広視野平面スクリーンの後方から投影された。また、ハイビジョン液晶プロジェクターのレンズ部分に偏光板を付け、偏光板の付いたメガネを通して刺激を観察することにより、左右眼にそれぞれのプロジェクターからの視覚刺激を入力した。付加した両眼視差は模擬した刺激の奥行き形状 (10 m のトンネル) に対応するものであり、視差量の範囲としては、無限遠に対して 12.6 deg (最も近い位置: スクリーンの距離である 0.3 m に対応) から 0.37 deg (最も遠い位置: 10.3 m に対応) であった。また、トンネルを構成する枠 (Fig. 1) はアンチエイリアスの手法を用いて作製したため、仮想的に 1 画素以下の位置を調節でき、視差による奥行き形状は知覚的に滑らかなものとなった。その他の装置、刺激条件 (三次元的刺激速度、サイズ)、応答方法、手順については、実験 1 と同様であった。

3.2 実験結果

結果を Fig. 7 に示す。Fig. 5 と同様に、グラフの横軸はスクリーン上に呈示された視覚刺激の最大サイズを、縦軸は被験者が応答した歩行速度 (左列) と知覚速度 (右列) を示す。実線は模擬したトンネルサイズが異なる条件で、破線は 300 cm のトンネルサイズの刺激に周辺視野制限をした条件である。Fig. 5 と同様に、横軸 300 cm における点線と破線のデータは同一である。シンボル形状の違いは、呈示した視覚刺激の三次元的速度の違いを示す。

結果から、同じ三次元的刺激速度を観察しても、トンネルサイズが大きくなるのに伴って歩行速度と知覚速度が減少する傾向がみられた。しかし、この減少の割合は、スクリーン上 (網膜上) の定点における二次元的速度の減少の割合 (Fig. 6) ほど大きくなかった。一方、周辺視野制限

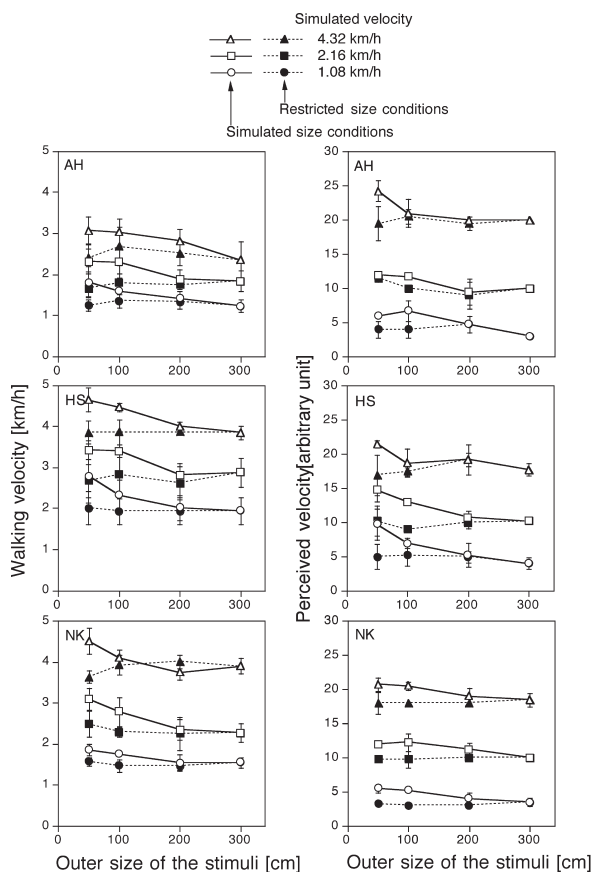


Fig. 7 Result of Exp. 2. Walking velocity and perceived velocity as a function of the outer size of the stimuli for each condition of simulated velocity.

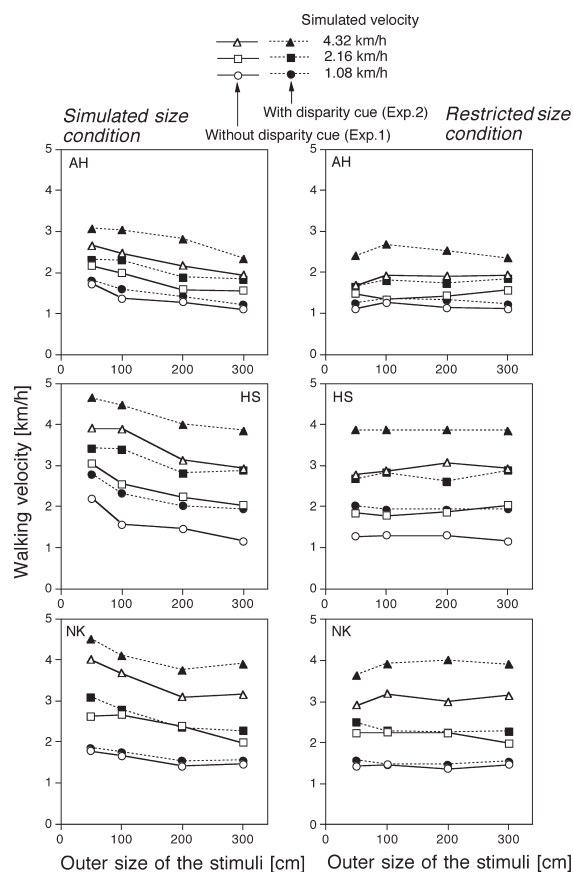


Fig. 8 Walking velocity as a function of the outer size of the stimuli for the simulated and restricted size conditions. Comparison between the results for the stimulus without disparity cue (solid lines; results in Exp. 1) and for the stimulus with disparity cue (dotted lines; results in Exp. 2).

サイズでは、制限の範囲が変化しても、ほぼ一定の歩行速度と知覚速度を応答した。これらの傾向は、実験1と同様であり、被験者全員に対してみられた。また、実験2においても、歩行速度の標準偏差が小さいことから、歩行応答の再現性が高いことがわかる。

以上の結果は、実験1と同様の手法により統計的に確かめられた。トンネルサイズの効果は両応答において有意であった（歩行応答： $F_{3,6}=38.46$, $p<0.01$, 知覚応答： $F_{3,6}=16.62$, $p<0.01$) が、視野制限サイズの効果は有意ではなかった（歩行応答： $F_{3,6}=0.88$, $p>0.1$, 知覚応答： $F_{3,6}=0.18$, $p>0.1$)。また、サイズ条件と応答条件のすべての組み合わせにおいて、刺激速度の効果は有意であり ($p<0.01$)、刺激サイズと刺激速度の交互作用は有意ではなかった ($p>0.1$)。

3.3 考察

実験2では、両眼視差が加わり三次元情報が増加したにもかかわらず、同じ三次元的刺激速度を模擬した刺激に対して、トンネルサイズの違いによって歩行速度応答と知覚速度応答が変化した。この結果は実験1と同様である。両

眼視差手がかりの有無による応答の違いを詳しく検討するため、実験1と実験2の結果を直接比較した。実験1と実験2の歩行応答の結果を同一軸にプロットしたグラフをFig. 8に示す。グラフの縦軸は歩行速度を、横軸は刺激の最大サイズを示しており、左列と右列はそれぞれ、トンネルサイズが異なる条件と周辺視野制限サイズが異なる条件の結果を示している。実線は実験1（両眼視差を含まない刺激）、破線は実験2の結果（両眼視差を含む刺激）である。シンボル形状の違いは、模擬した三次元的刺激速度の違いを示す。

Fig. 8を見ると、刺激に両眼視差を含む場合（実験2）、単眼手がかりのみの場合（実験1）より歩行速度の絶対量は増加することがわかる。しかし、両眼視差手がかりの有無にかかわらず、三次元的刺激速度が同じ場合にトンネルサイズの違いによって歩行速度は変化した。

この結果を統計的に検討するため、トンネルサイズの異なる条件、視野制限のサイズが異なる条件それぞれの歩行

速度応答 (Fig. 8) に対して, 3人の被験者の平均データを繰り返しとして3要因(サイズ×刺激速度×両眼視差の有無)の分散分析を行った。その結果, 両眼視差の有無の効果は, 両刺激条件において有意傾向があった(トンネルサイズ: $F_{1,2}=9.93$, $p<0.1$, 視野サイズ: $F_{1,2}=9.55$, $p<0.1$)。また, 両眼視差の有無とトンネルサイズの交互作用は有意ではなかった($F_{3,6}=0.77$, $p>0.1$)。そして, 両眼視差の有無と刺激速度の交互作用は, 両条件において有意であった(トンネルサイズ: $F_{1,2}=8.52$, $p<0.05$, 視野サイズ: $F_{1,2}=8.08$, $p<0.05$)。

以上から, 自己直線運動感覚の速度は, 両眼視差の有無によらないトンネルサイズの効果として表れる刺激の二次元的な速度と, 両眼視差の有無によって変化する三次元的な速度の2つの独立した成分に基づいて決定されると考えられる。

自己直線運動感覚の速度が, 刺激の二次元的な速度と三次元的な速度に基づいて決定されることは, 広い道を歩いているときより狭い道を歩いているほうが自己の移動速度を速く感じてしまう日常の感覚と対応しており, 過去にも報告されている⁷⁻⁹⁾。Redlickら⁷⁾は, 廊下のような狭いトンネルをシミュレートした刺激を用いた場合, 自己の直線運動速度感が高まり, 目標物に達するまでの時間を小さく見積ると報告している。Denton⁸⁾は, 運転環境を模擬した刺激を用い, 視覚刺激中のエッジの間隔が自己運動速度に影響することを報告している。また, Larishら⁹⁾も, 刺激中のエッジが単位時間あたりに視野中のある点を横切る頻度と刺激が模擬する三次元的な速度が, 自己運動感覚速度に対して加算的に寄与することを報告している。これらの研究の結論と, 本研究の結論は矛盾のないものである。ただし, 過去の研究では知覚的な応答を用いており, 本研究によって歩行応答においても同様の結論が得られることが新たに示された。また, Denton⁸⁾の研究に関しては, 刺激中のエッジの間隔を指数的に変化させているため, それが新たな三次元情報となり, 三次元的な速度を変化させている可能性も考えられる。いずれにしても, 自己直線運動感覚の速度が, 刺激によって模擬される三次元的な速度のみに基づいて決定されるのではなく, 二次元的な成分にも基づいていることは確かであろう。これらの成分の詳細を明確にするためには, さらなる検討が必要である。

両眼視差の付加によって自己運動感覚速度が増加したという結果と, 両眼視差の有無によって二次元的な速度による自己運動感覚速度への効果が変化しないという結果から, 両眼視差手がかりがある場合は, ない場合より二次元的

な速度による効果が相対的に減少したといえる。瀬川ら¹⁰⁾は, 絵画的距離手がかりが豊富になるのに伴い, オプティカルフローによる自己運動知覚速度における刺激の二次元的形状による影響が減少し, 刺激の三次元的速度に収束することを報告している。この結果は, 刺激条件や応答方法が異なるために本実験の結果と直接比較することは難しいが, 空間知覚手がかりが豊富になるほど刺激の二次元的要因による自己運動感覚速度への影響が減少するという意味において矛盾がない。

4. む す び

歩行および知覚のための自己直線運動感覚の関係と, 視覚情報におけるそれらの決定要因を検討した結果, 以下のことが明らかになった。

第一に, 前方に移動する際に入力されるような視覚運動刺激に対する歩行応答は安定しているため, 視覚運動刺激に対する自己運動感覚速度を推定する場合, 歩行速度を指標とすることが可能である。第二に, 歩行応答と知覚応答による自己直線運動感覚の間に比例関係がみられたことから, それらのどちらかがもう一方を決定する, もしくはそれらが共通の決定機構に基づくことが示唆される。第三に, 視覚運動刺激によって模擬される三次元的速度が同じ場合, それに対する歩行速度と自己運動知覚速度は, 模擬された刺激のサイズ(トンネルサイズ)が大きくなるのに伴って減少した。このことから, 刺激の二次元的な速度成分が自己運動感覚に寄与しており, その効果と刺激の三次元的速度による効果は独立で加算的であることが示唆される。第三の点を定量的に明確にするためには, さらなる検討が必要である。

文 献

- 1) G. J. Anderson and B. P. Dyre: "Spatial orientation from optic flow in the central visual field," *Percept. Psychophys.*, **45** (1989) 453-458.
- 2) G. J. Anderson and M. L. Braunstein: "Induced self-motion in central vision," *J. Exp. Psychol.*, **11** (1985) 122-132.
- 3) I. Giannopulu and J.-C. Lepecq: "Linear-vection chronometry along spinal and sagittal axes in erect man," *Perception*, **27** (1998) 363-372.
- 4) L. Telford, J. Spratley and B. J. Frost: "Linearvection in the central visual field facilitated by kinetic depth cue," *Perception*, **21** (1992) 337-349.
- 5) T. Prokop, M. Schubert and W. Berger: "Visual influence on human locomotion," *Exp. Brain Res.*, **114** (1997) 63-70.
- 6) 高幣俊之, 野村宜邦, 前田太郎, 舘 暉: "歩行における視覚と運動感覚の整合性に関する研究", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **5** (2000) 831-836.
- 7) F. P. Redlick, M. Jenkin and L. R. Harris: "Human can use

- optic flow to estimate distance of travel,” *Vision Res.*, **41** (2001) 213-219.
- 8) G. G. Denton: “The influence of visual pattern on perceived speed,” *Perception*, **9** (1980) 393-402.
- 9) J. F. Larish and J. M. Flach: “Sources of optical information useful for perception of rectilinear self-motion,” *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, **16** (1990) 295-302.
- 10) 瀬川かおり, 氏家弘裕, 岡嶋克典, 斎田真也: “オプティカルフローによる自己移動速度知覚に距離手がかりが及ぼす影響”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **8** (2003) 111-118.