

# 歩行における視覚と運動感覚の整合性に関する研究

高幣 俊之 野村 宜邦 前田 太郎 舘 暉\*1

The relation between walking velocities perceived through sight and through leg movement

Toshiyuki TAKAHEI, Yoshikuni NOMURA, Taro MAEDA and Susumu TACHI\*1

**Abstract** - Walking velocity is perceived by various senses. We investigated the accuracy of velocities perceived by the sense of sight and leg movement. In the first experiment the subjects adjust their walking velocity to the velocity displayed in the HMD. On the other hand, in the second experiment the subjects adjust the velocity displayed in the HMD to their walking velocity. The findings of both experiments indicate that the velocity perceived by the sense of sight is higher than actual walking velocity.

**Keywords** : locomotion, the sense of sight, the walking sensation, sensor fusion

## 1. はじめに

Virtual Reality (VR) 技術の実装[1]において、歩行による移動が可能な空間を提示することを考える。人間は視覚や体性感覚などの様々な感覚器を通して自己の移動を認識しており、移動感覚の提示にはこれら複数感覚器の知覚モデルに関する考察が特に重要である。人間をこれら感覚器を入出力とするシステムとして見た場合、それぞれの感覚器から得られた移動情報は、独立に処理されるのであろうか。あるいは一つの移動感覚に統合されるのであろうか。移動速度の知覚に対して優位に働く感覚の特定や感覚器ごとの知覚特性がわかれば、それを提示するデバイスの設計指針としても有用であると考えられる[4]。

従来、移動感覚の定量化や自己の移動量に関する知覚特性についての評価には距離感の精度評価が用いられることが多かった。Thomson はターゲットを提示した後、目隠しをして視覚による移動量知覚のフィードバック無しにターゲットまで歩行させる実験を行っている。ここからは距離が約9m(約8秒)を超えると到達誤差が急激に増大するという結果が得られており、またこれに関する検証実験も数多く行われている。しかしこのような評価方法では、歩行運動中に定常的に比較条件を提示できず、また時間の経過や自己の移動によって距離感があいまいになる等の誤差要因を切り分けることができない。

そこで本研究では、特に視覚と歩行時の運動感覚に注目し、その特性と相互の関係を移動速度に関して評価する。移動量知覚の評価を移動速度によって行うことにより、HMD(Head-Mounted Display)等によって比較刺激となる移動速度を常に提示し続けることができる。また移動距離の精度評価に比べて、実空間とのマッチングや立体視などの提示方法よりもオプティカルフローなどの刺激内容が重要になると考えられる。

まず視覚については、HMD で被験者に対して一定速度で空間内を前進する映像を提示する。以後このHMDで提示した速度を視覚速度(Visual velocity)と呼ぶことにする。

これに対して、被験者が実際に歩行する際に感じる足の接地や筋肉の伸縮などの固有受容感覚をまとめて歩行運動感覚と定義し、被験者の歩く速度をここでは歩行速度(Walk velocity)と呼ぶことにする[5]。

本研究ではこの視覚速度と歩行速度を入出力とし、自己移動速度のそれぞれの感覚における速度知覚特性とその関係について考える。

## 2. 実験装置

条件を自然な歩行時の状態にできる限り近づけるため、すべての実験・計測は実際に屋外で歩行することにより行った。Fig.1に示すように、被験者は視覚速度の入力装置としてHMDを装着する。また歩行速度の計測にはワイヤエンコーダを用いる。

\*1 東京大学大学院 工学系研究科

\*1 Faculty of engineering, University of Tokyo

HMD は Olympus 社製 Mediamask/MW601 を使用し、画像生成装置として Note PC を被験者が背負った。Note PC から出力される VGA 画像を S-VIDEO 信号に変換し、HMD に両眼共通に入力した。今回の実験は被験者が広範囲を移動するため、被験者頭部の正確な方向の計測は困難である。このため、視界方向の変化などに対するトラッキングは行わず、被験者は身体に対する首の角度を計測の間維持するものとした。

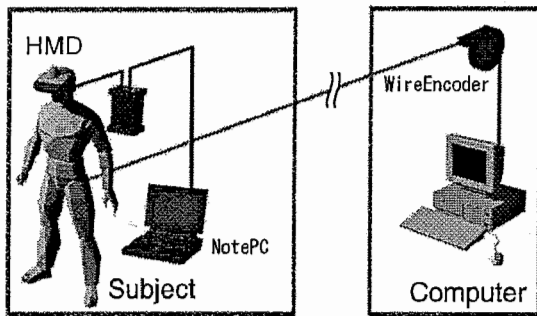


Fig. 1 実験装置

被験者に提示する映像は Fig.2 に示すように、1m おきに引かれた幅 2m の白線と 5m おきに配置された一辺 0.25m の立方体ワイヤフレームで構成される空間である。被験者は各歩行の開始前に HMD をシースルー状態にし、これと同様の指標を実際に配置した実環境での距離感覚をあわせるとともに、首の角度等を調整させた。この空間内を前進する一定の速度を視覚速度とする。映像は周期的なものになるが、これによる歩幅や歩行テンポへの有意な影響が無いことをランダムな間隔で指標を配置した空間での対照実験を通して確認した(Fig.3 参照)。

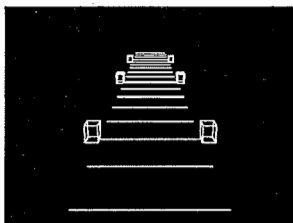


Fig. 2 HMD から提示した画像①



1 m / line② 1.7 m / line③ ランダムに配置④

Fig.3 提示画像の対照実験

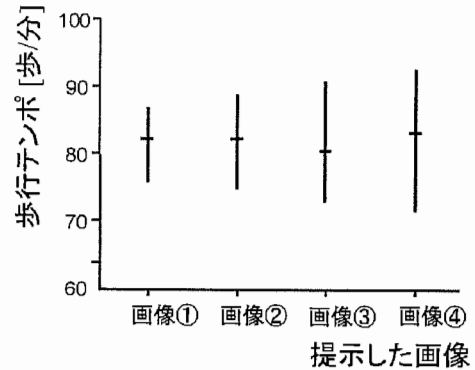


Fig.3 提示画像の対照実験

計測可能範囲はエンコーダのワイヤ長の 15m までとした。ワイヤエンコーダはマイクロテック・ラボラトリー社の MLS80-600-15000 を用い、測定距離内において 1mm 単位での位置計測を行った。ワイヤエンコーダの出力は CONTEC 社製 24 ビット Up/Down カウンタボード CNT24-4 を通して計測用 PC に取り込んだ。データの計測はサンプリング周期 100ms 程度で行った。

この他に後述の実験で必要となる画像生成装置への操作を可能にするため、Note PC には外付けテンキーボードを入力インターフェースとした。

### 3. 実験方法

#### 3.1 実験 1

被験者に空間内を一定速度で前進する映像を提示し、これに速度を主観的に合わせて歩行させる。

被験者が視覚から知覚した自己移動速度を、各視覚速度を入力、歩行速度を出力として計測し、視覚による移動速度の知覚精度と個人差を計測する。被験者に提示する視覚速度は 0.25m/s (0.9km/h) から 1.5m/s (5.4km/h) まで 0.25m/s 刻みで 6 種類用意した。これを循環法に従って適切な順番で提示し、計 6 回の歩行を 1 セットとする [6][7]。被験者 1 人につき 6 セットの計測を行い、被験者 6 人から計 36 セット、216 回の歩行速度データをとった。歩行速度は視覚速度が自然に見える速度に合ったと被験者が申告してから測定限界位置に達するまで測定する。

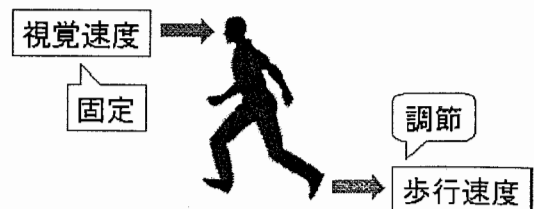


Fig. 4 視覚速度を入力・歩行速度を出力

### 3.2 実験2

被験者を一定速度で歩行させる。被験者には自分で進行速度(視覚速度)を調整できる視覚映像をHMDで与え、歩行速度に主観的に合わせた視覚速度を記録する。被験者が歩行運動感覚から得た移動速度を視覚速度の調整によって計測し、各歩行速度を入力、視覚速度を出力として、歩行運動感覚による移動速度の知覚精度と個人差を計測する。

視覚に与える映像は実験1と同様のものとする。さらに画像生成用のNote PCからテンキーボードを手元まで延長し、これを使って視覚速度の加速・減速ができるようにした。調整する視覚速度の初期値は被験者の歩行速度を中心にランダムに振ったものを与える。被験者は一定速度で歩行し続ける必要があるため、実験環境にメトロノームを用意し、このテンポに一歩の\*1歩行動作を合わせて歩行させた。テンポは毎分50歩から100歩まで毎分10歩刻みで6種類用意し、視覚速度を合わせた後の平均歩行速度を実験1と同様の方法で計測した。6種類の歩行テンポを循環法に従った順序で与えて計測したものを1セットとし、6人の被験者についてそれぞれ循環法に従い6セットずつデータをとった。



Fig. 5 歩行速度を入力・視覚速度を出力

## 4. 結果

Fig.6は、被験者が1回の測定として約15m歩行した際の速度変化の様子を記録したものである。歩行において一歩ごとに生じる速度の脈動が周期的な波として記録されている。

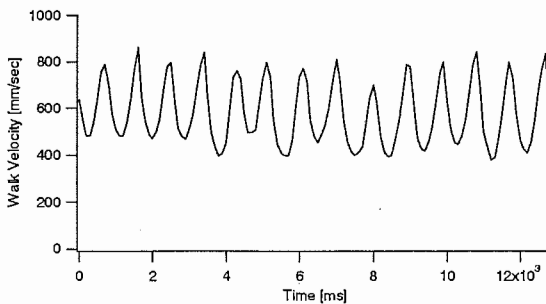


Fig. 6 計測された歩行速度

### 4.1 実験1

Fig.7は、6人の被験者について視覚速度入力-歩行速度出力の関係を重ねたものである。横軸を映像で与えた移動速度とし、縦軸にはそれに合わせた歩行速度をそれぞれ6回ずつ計測して平均をとったものをプロットした。グラフ中の縦軸方向の広がり、この実験における個人差が現れている。図中の破線はこれらの両速度が一致した場合を示したものである。通常の歩行においては視覚速度と歩行速度は物理的に一致するので、この破線が通常我々の知覚している移動速度情報にあたる。この図から、視覚から得た速度情報のみをもとにすると、高速移動時には実際より遅く移動しているように感じていることがわかった。

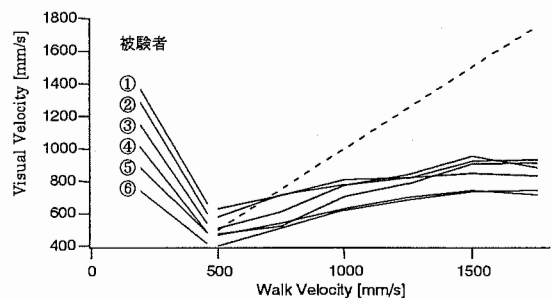


Fig. 7 視覚速度から知覚された移動速度

### 4.2 実験2

Fig.8は、6人の被験者について歩行速度入力-視覚速度出力関係データを取り近似曲線を重ねたものである。実線で示した近似曲線が、各速度の歩行運動感覚で主観的に感じる移動速度を表すと考えられる。グラフ中の縦軸方向のひろがり、この実験における個人差が現れている。図中の破線は実験1の結果に示した破線と同様に、通常の歩行において我々が知覚している移動速度情報である。この図から、歩行動作によって知覚される速度情報をもとにすると、被験者は常に実際の移動よりも速く歩いていると感じていることがわかった。

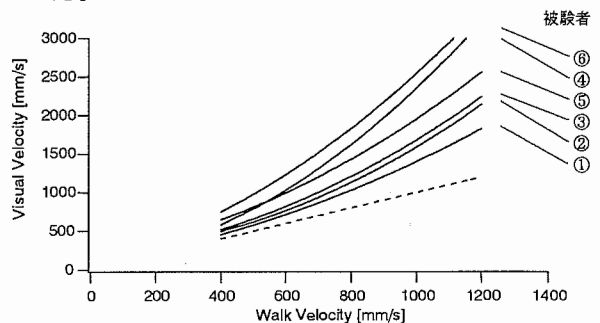


Fig. 8 歩行速度から知覚された移動速度

\*1 歩行時に片足が地面についてからもう片方の足が地面につくまでを一歩と定義する。

## 5. 考察

### 5.1 実験1

我々が普通の歩行において経験している移動速度を「視覚」と「歩行運動感覚」による知覚に分けて調べた。実験1の結果として Fig.7 で示したように、視覚のみで移動速度を伝えた場合、実際に歩行している速度である歩行速度より遅く移動していると感じることがわかった。

また視覚から高速な移動情報を与えた際には速度に関する感度が鈍ってくる傾向が見られる。当然、実際の実験において 1500mm/s で進む映像を提示した直後に 1750mm/s の映像を見ると、被験者の合わせた歩行速度は前者に比べてより速くなるが、循環法により映像の提示順序による影響を除いた結果、直前の参照なしに見た移動速度に対する感度は被験者に依らず鈍くなるようである。特に視覚の速度知覚感度が鈍くなり始めるのは提示速度が 1000mm/s 付近からであり、視覚の速度識別能力がその理由であるとは考えにくい。Fig.7 から見て取れるように、これが時速にして 3.6km/h と日常の平均歩行速度に近いことは注目し値する。これは、日常生活において経験の少ないこれ以上の速度の移動情報に対し、視覚や歩行運動感覚などの感覚間の対応関係が甘くなっていると見ることができる。

次に被験者間の速度知覚特性を比較すると、その個人差が非常に大きい。また視覚速度を実際より遅く感じる者は、映像で提示されたほぼ全ての速度について一貫して他の被験者よりも遅く感じていることがわかる。これは、この実験において結果を歩行速度について比較したため、歩幅や身体的差による影響を強く受けていると考えられる。

### 5.2 実験2

実験2の結果として Fig.8 で示したように、歩行運動感覚によって知覚される移動速度は、視覚速度によって評価する限り実際の移動速度より遅く感じることがわかる。この傾向は、特に高速で歩行した際に強く現れている。この結果は、主観的には高速で歩行する際に移動速度を過大評価していることに相当する。

実験1と同様に、各個人の測定結果は歩行速度が低速の際にも高速の際にも、それを遅く感じる被験者は一様に移動速度を遅く感じる傾向が見られる。また Fig.7, Fig.8 に示したように、実際の移動速度とのずれの順序がほぼ一致していることがわかる。これは両実験の計測結果の間に何らかの関係があることを示唆しているものと考えられる。

### 5.3 両実験のまとめ

これまでの考察では実験1と実験2について、移動速度の知覚を「視覚」と「歩行運動感覚」による知覚に分けて考えてきた。

まずこれらの実験結果にみられた個人差の原因について、Fig.6 に挙げたような歩行速度記録から歩行時の平均歩幅と平均歩行テンポ(一步の動作歩行にかかる時間)を算出した。Fig.9,10 はそれぞれの実験結果の歩行速度を平均歩幅と平均歩行テンポにかえてプロットし直したものである。これらの図から、個人差は主に被験者の平均歩幅に依存していることがわかる。これをふまえて、以下の考察では視覚速度と歩行テンポの関係として両実験の結果をまとめる。

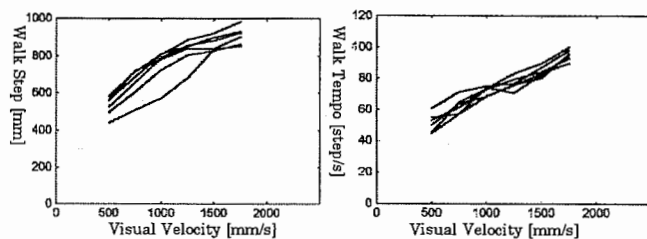


Fig. 9 視覚速度入力・歩幅出力(左)  
視覚速度入力・歩行テンポ出力(右)

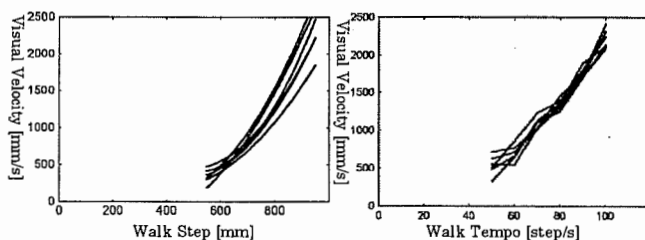


Fig. 10 歩幅入力・歩行速度出力(左)  
歩行テンポ入力・歩幅出力(右)

実験1と実験2は、移動情報を視覚と歩行運動感覚を入出力とした対となる実験である。これまではそれぞれの入力・出力関係から各提示速度に対する知覚の様子を別々に見てきたが、この2つの実験は共に、感覚器の入力から主観的な移動速度が知覚される過程を複数の視点から調べたと見こともできる。

Fig.11 のように実験1の Fig.9(視覚速度入力・平均歩行テンポ出力)に対し実験2の Fig.10(平均歩行テンポ入力・視覚速度出力)を入出力の軸を反転して重ねてみると、2つの実験で得られた結果からは非常に近い傾向が見られることが分かる。これにより、「視覚」と「歩行運動感覚」という2つの感覚について、移動速度を知覚する仕組みに類似した点があること、あるいは人間の内部状態として各感覚を統合した「自己移動感」の存在が示唆される。

(2000年2月3日受付)

これが仮定できるなら、実験1と実験2で得られた結果や確認された結果について、不明瞭であった点を互いに補完して考察を加えることもできるであろう。この実証のため、他の感覚についても同様に速度に対する知覚特性・精度を調べるなど、今後より詳細に多角的な検討をしていく必要がある。

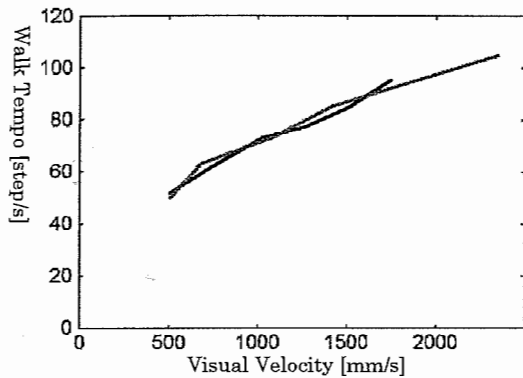


Fig. 11: 視覚速度と歩行テンポの関係

## 6. おわりに

歩行時の移動速度の知覚について、視覚と歩行運動感覚による速度知覚の特性と関係について調べた。その結果、視覚で知覚される移動速度は常に歩行運動感覚で知覚される速度よりも遅く知覚されることがわかった。また特に視覚で知覚される速度と歩行テンポの関係から、視覚と歩行運動感覚を統合して知覚する機構の存在が示唆された。

## 参考文献

- [1] 館, 廣瀬: パーチャルテックラボ, 工業調査会, (1992)
- [2] 岩田, 吉田: 無限平面を用いた仮想歩行装置, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 Vol.2, 1997
- [3] 野間, 宮里: トレッドミルを用いた歩行感覚提示装置の開発, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 Vol.2, 1998
- [4] 高橋, 前田, 柳田, 館: 無限歩行空間の研究(第3報), 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 Vol.2, 1998
- [5] 大山, 今井, 和気編: 感覚・知覚ハンドブック, 誠信書房, 1994
- [6] 高橋: 人工現実感における歩行感覚提示に関する研究, 東京大工学部館研究室修士論文, 1994
- [7] 森, 吉田: 心理学のためのデータ解析テクニカルブック, 北大路書房
- [8] 大石: 人工現実感における実環境と仮想環境の整合性に関する研究. 東京大工学部館研究室修士論文, 1994