

# 簡易的インタフェースを用いた仮想空間移動のための歩行感覚の補償

小鷹 研理

駒谷 和範

尾形 哲也

奥乃 博

京都大学大学院 情報学研究科 知能情報学専攻

## 1. はじめに

仮想空間を移動するとき、汎用の簡易的インタフェースで身体感覚を与えることは極めて重要な課題である。現在、仮想空間移動用のインタフェースは、実際の歩行動作を伴うものと、歩行と相関のないコマンド的なデバイスによるものに大別される。前者は現実の移動形態に近いが、ユーザの移動を相殺する機構が必要であり、システムは複雑かつ大型となり易い。簡易的な方法で仮想空間にアクセスするような日常的な利用を想定すると、前者の方法では非現実的であろう。一方、後者のようにインタフェースを簡略化する立場を取ると、典型的にはジョイスティックのようなデバイスによる、歩行の身体感覚の欠如したシステム構成になり易い。しかも、コマンド的な入力による移動感覚は、仮想空間の環境に強く依存し、歩幅や歩行周期に基づいた絶対的な距離感覚が生じにくい。我々は、身体性を考慮に入れたユーザ・システム間の双方向性を実現することが、絶対的距離感覚の生成と、それに起因する移動における現実感を高めると考える。そこで本稿は、簡易的インタフェースを用いても歩行感覚を表現するための、仮想空間移動システムの枠組みを実装し、評価することを目的とする。

2章で、本システムで実現したい歩行感覚についての定式化を行い、その歩行感覚を簡易的なインタフェースで表現するシステムを3・4章で詳述する。5章で、実装したシステムを用いて行った、距離感覚に関する被験者実験について報告する。

## 2. 歩行感覚の定式化

歩行時の能動的な意志である中枢系からの（速く、遅く）の命令は、直接筋骨格系に反映されるのではなく、まず、CPG（Central Pattern Generator）と呼ばれる神経振動子の結合体に与えられ、神経振動子系・筋骨格系間の相互的な引き込みが生じて運動が発現する。神経振動子系は、中枢系からの影響を受けつつも半自律的にリズムを生成する系であり、歩行における受動的な感覚を生み出しているものと考えられている [1]。本研究では、歩行感覚は、中枢系による「能動性」と神経振動子系・筋骨格系相互引き込みによる「受動性・拘束性」とから構成されると定式化する。従来のコマンド的な入力は、主に能動性のみで構成され、身体的制約による受動性・拘束性が欠けていた。受動性・拘束性の導入は、歩行に特徴的なリズム感覚や、歩幅や歩行周期という身体的拘束に基づく絶対的な距離感覚を生成するものと期待される。

## 3. 神経振動子系のモデル化

神経振動子系・筋骨格系相互引き込みに基づいた受動性・拘束性を実現するためには、簡易的なインタフェース入力では発動しない神経振動子系をシステムが補償する必要がある。すなわち、次の2点が課題となる。

1. システムに埋め込む神経振動子系のモデルの設計
2. ユーザとシステムの同期の方法

三宅は、人間・システム相互の歩行介助を実現するために、システムに構成する神経振動子系のモデル（他者の身体モデル）として van der Pol 非線形振動子を用いている [2]。身体モデルの接地タイミングは聴覚的信号によって人間側に伝送され、人間・システム間のエントレインメント作用により歩行の安定化が実現される。本研究でも、仮想空間における自己の身体モデルとして van der Pol 非線形振動子を採用し、身体モデルとのエントレインメント作用によって歩行感覚を実現する。仮想空間情報提示においては、聴覚情報（歩行周期）だけでなく視覚的な情報（歩幅、速度）提示も必要である。そこで、先の課題に対して次のアプローチをとる。

1. システムに身体モデルとして van der Pol 振動子を構成し、[歩幅・歩行周期]のダイナミクスを半自律的に生成する。
2. 身体モデルの情報を視覚的・聴覚的に強調して仮想空間に提示することによって、ユーザのインタフェースに対するエントレインメント作用を引き起こす。

以上のアプローチにより、神経振動子系・筋骨格系の相互引き込みをシステムが補償する形で実現し、受動性・拘束性に基づいた歩行感覚を表現する。

## 4. 簡易的インタフェースを用いたシステム

図1にシステムの概略を示す。

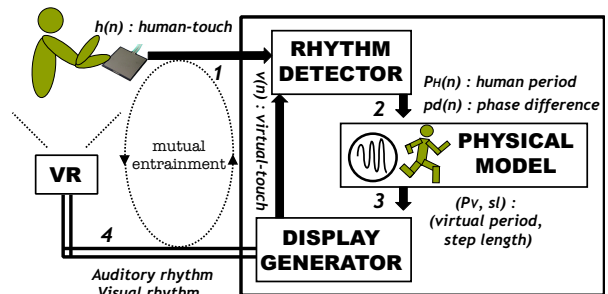


図1: システム（番号は本文に対応）

1. 各種センサを介してユーザの接地タイミング (human-touch) の時間  $h(n)[s]$  を伝送する。
2.  $h(n)$  と身体モデルの接地 (virtual-touch) の時間タイミング  $v(n)[s]$  を基に、RHYTHM DETECTOR は Virtual に構成された身体モデルの目標歩行周期  $P_H(n) = 2\{h(n) - h(n-1)\}$  と Human-Virtual 間の位相差  $pd(n)[rad]$  を出力する。ただし、 $h(n-1)$  の検出後  $1.5 * P_H(n-1)$  時間の間 human-touch が検出されない場合は、そこで強制的に  $h(n)$  を検出する。

Compensation of Walking Perception for Moving in Virtual Environment with a Simple Interface: Kenri Kodaka, Kazunori Komatani, Tetsuya Ogata, and Hiroshi G. Okuno (Kyoto Univ.)

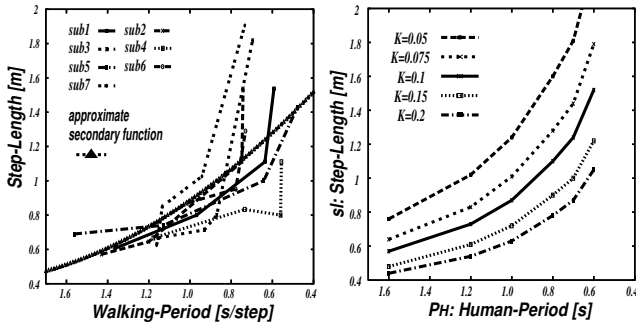


図 2: 被験者 7 人に対して、20m の距離を { ゆっくり, 普通, やや速く, 速く } の指示を与えて移動させた場合の、歩行周期と歩幅の関係 (実装)

### 3. PHYSICAL MODEL は、van der Pol 方程式

$$\begin{aligned} \dot{x}_V(t) &= y_V(t) \\ \dot{y}_V(t) &= -\omega_V^2(n)x_V(t) + K(1 - x_V^2(t))y_V(t) \end{aligned}$$

によって構成される。pd(n) が閾値の範囲内の場合、位相差を消す方向に時間軸の伸縮を行う (詳細は省略)。また、身体モデルの固有振動数  $\omega_V(n)$  を  $\omega_V(n) = 2\pi/P_H(n)$  に更新する。このとき、状態変数  $x_V(t), y_V(t)$  は  $\omega_V(n)$  によって決定するアトラクターへと引き込まれていく。ここで、 $P_V(n')$  を  $x_V(t)$  が極値をとる時間間隔、 $E_V(n')$  を  $x_V(t)$  がとる極値の絶対値とし、次式により歩幅  $sl(n')[m]$  へと変換する。

$$sl(n') = 0.0021 * E_V(n')^2 + 0.128E_V(n') \quad (1)$$

式 (1) は、 $K = 0.1$  の時の  $[P_H-sl]$  の収束値の関係が、現実世界の [歩行周期-歩幅] の関係 (被験者実験により近似 [図 2]) で近似されるように、最小自乗誤差法により決定した [図 3]。

4. DISPLAY GENERATOR は 3 で生成された身体モデルのダイナミクスにユーザを引き込むための、視覚リズムと聴覚リズムを生成する。視覚リズムは、視覚速度  $V_V(t)[m/s]$  の単振動 (平均視覚速度:  $V_a(n') = sl(n')/P_V(n')$ , 周期  $P_V(n')$ , 振幅  $V_w(n') = depth * V_a(n')$ ) であり、身体モデルに基づいた視覚速度の揺れを決定する。聴覚リズムは、 $V_V(t - \frac{P_V(n')}{2\pi} \theta_{av}) - V_a(n')$  が負から正に変わる時間タイミング  $[v(n)]$  に提示される聴覚信号と定義する。  $\theta_{av}$  は、視覚の揺れと接地タイミングの位相の主観的な整合点を表すものであり、被験者実験により  $\pi$  付近に分布することを確かめた。

5. 1 へと戻り、Human は身体モデルからのフィードバックを受けながら、入力を繰り返す。

### 5. 距離感覚に関する実験

本研究のインタフェースシステムが、仮想空間における距離感覚に与える影響を調べるために、18 人の被験者に対して実験を実施した。14.1inch ディスプレイで提示し、インタフェースは次の 2 種類で比較する。

**joystick-like** keyboard の矢印キー (上:  $1[m/s^2]$ , 下:  $-1[m/s^2]$ , 左: 停止) で速度調節行う (後進は不可)。

**walk-like** 本稿で提案されたシステムを用いる ( $K = 0.1, \theta_{av} = \pi, depth = 1$ )。human-touch は、touch-sensor を介した左右の手入力により検出する。

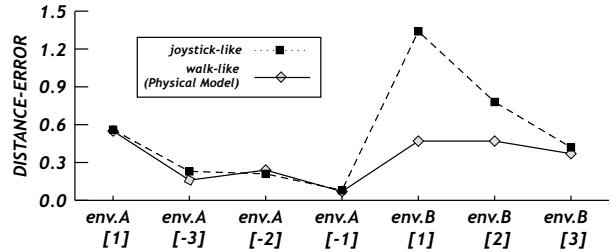


図 4: DISTANCE-ERROR:  $DE = |\log_2(x/100)|$  として計算。env.\*[n] は env.\*における n 回目の試行 (ただし n が負のとき、収束する |n| 回前の試行を表す)。

被験者は、地面の左右に多数のポールが立ち並ぶ仮想空間の中で、次の課題を行う。

1. 前方の誘導物体 (速度  $v_y[m/s]$ :  $v_y^- \leq v_y \leq v_y^+$ ) \* を目標に仮想空間を移動し、100m を同定
2. 停止後、実際に進んだ距離  $x[m]$  が表示される
3. 新たな仮想空間<sup>†</sup> で 1 を繰り返す

まず、env.A (視野  $60^\circ$ , 高さ  $2m, v_y^- = 12, v_y^+ = 18$ ) で距離エラーが収束するまで (収束条件: 連続する 3 回の偏差が  $20[m]$  以内, かつ最後の誤差が  $10[m]$  以内) 課題を繰り返す。その後、env.B (視野  $165^\circ$ , 高さ  $6m, v_y^- = 2, v_y^+ = 8$ ) で同様の課題を 3 回行う。

**実験結果と考察** 図 4 に、収束前後の距離エラー (移動距離  $x[m]$  に対して  $DE = |\log_2(x/100)|$  で定義) の遷移を示す。2 種類のインタフェース間で、収束後の距離エラーに大きな違いが生じていることが分かる。env.B[1] における距離エラーについて t 検定を行ったところ、walk-like の方法の成績が有意に良かった ( $t(17) = 4.07, p < .01$ )。env.A から env.B への移行では、誘導物体の速度の変化によって移動速度が落ちるが、同時に視野が極端に広がるため、視覚のフロー変化は env.A より速くなる。つまり、env.A で学習した視覚フローと移動速度の関係を env.B にそのまま適用すると、正しい距離感覚が生成されない。env.B への移行にあたり、joystick-like の方法では距離を極端に過小評価する例が多く見られた一方 (40m 未満 18 人中 9 人)、walk-like の誤差は低く抑えられた (40m 未満 18 人中 0 人)。これは、本システムを用いることによって得られる距離感覚が、仮想空間の環境 (視野やテクスチャなど) のみに依存するのではなく、歩幅と歩行周期に基づいた絶対的な身体感覚にも強く影響を受けていることを示すものである。

### 6. まとめ

神経振動子系-筋骨格系相互引き込みに着目し、簡易的なインタフェースを用いても歩行感覚を補償するための仮想空間移動システムを提案した。また、実装したシステムが、身体に基づいた距離感覚の生成に寄与することを被験者実験により示した。

**謝辞** 本研究の一部は科研費、21 世紀 COE プログラムの支援を受けた。

### 参考文献

- [1] 多賀殿太郎: “脳と身体の動的デザイン” 金子書房
- [2] 三宅, 宮川, 田村: “共創出コミュニケーションとしての人間-機械系”, 計測自動制御学会論文集, Vol.37, No.11, pp.1087-1096, 2001

\*  $v_y$  は 10 秒毎にランダムに  $v_y^-, v_y^- + 1, \dots, v_y^+$  の間を変化する。

<sup>†</sup> 地面のテクスチャの種類・スケール、ポールの位置がランダムに初期化される。ただしインタフェースの絶対速度は不変である。