

1. 緒言

人体の立位バランス能力は視覚、前庭感覚、体性感覚の組み合わせのフィードフォワード制御、あるいはフィードバック制御によってなされているとされている<sup>(1)</sup>。この制御則を明らかにすることができれば、個人のバランス能力の推定やリハビリ患者の回復具合の推定などに応用できることが期待される。先行研究によって周波数応答実験を行った際の人のバランス制御は低周波帯域で位相が遅れることがわかっている。我々は視覚による床面速度のフィードバックによってこの遅れが生じているのだと考えた。この仮説を検証するために、本研究では視覚による影響を明らかにすることを目的としている。

人体に視覚だけの情報を与える方法として VR (virtual reality) を用いる。実際に支持面を揺らす実験の被験者目線の動画を VR で見せることで視覚の情報だけを被験者に与える。視覚による影響が顕著に出やすいのは単一周波数だと考え、VR 実験は単一周波数で行った。同じ被験者で比較を行うため、床面揺動による周波数応答実験の結果と、単一周波数 VR 実験の結果を示す。

2. 周波数応答実験

2.1 周波数応答実験概要

本研究では、応答の再現性確保のために支持面の水平揺動に対する人の受動的な応答の計測を目的とし床反力計を搭載した揺動装置を用いて周波数応答実験を行った。人体の応答は、反射マーカを頭、肩、腸骨稜、大転子、膝、くるぶし、支持面に左右対称に計 14 個設置し、モーションキャプチャで計測した。実験条件として被験者は 20 代男性 7 名、実験回数は 12 回とし、スタンス幅は 230mm とし、視線はまっすぐ遠くを見るように指示した。人が支持面の動きを予測できないように 3 パターンの揺動波形を用意した。図 1 のように人体の足首を回転軸とした 1 自由度の剛体とみなし、マーカの位置座標からその姿勢角と支持面の加速度の関係から周波数応答線図を導出した。

2.2 周波数応答線図

支持面の加速度を入力とし、人の姿勢角を出力とした周波数応答線図を図 2 に示す。被験者 1 名分の実験回数 12 回の平均値を白丸、標準偏差をエラーバーとして記す。

図 2 を見ると、1rad/s 付近で位相が 90°程度遅れていることがわかる。この特性は被験者 G を除く全被験者に共通してみられており、先行研究でも同じような傾向が確認されている。低周波帯域では視覚による影響が現れると考えられており、位相特性が視覚の影響によって励起されたと仮定したモデルを検討する。

2.3 モデルの構築

本研究では、図 1 のように人体を 1 自由度の剛体リンクと仮定してモデルの定義を行う。人のバランス制御則については現在確立されていないが一般的には随意制御として遅延を含む状態フィードバックと扱われることが多い<sup>(1)</sup>。しかし、この考え方では低周波帯域の位相特性が再現できない。そこ

で、本研究では一般的な状態フィードバック制御に低周波位相特性を再現するための制御則を付加することを検討する。

モデルの検討にあたり、ベースとなる図 2 の 1 自由度剛体リンクモデルの運動方程式は次のようになる。

$$(J_b + m_b l_b^2) \ddot{\theta}_b - m_b g l_b = m_b l_b \ddot{X}_s + \tau_b \quad (1)$$

$\theta_b$  は鉛直軸からの角度 (左回りが正)、 $X_s$  は支持面の絶対変位、 $l_b$  は回転軸から質量中心までの長さ、 $m_b$  は身体部の質量、 $J_b$  は身体部の質量中心まわりの慣性モーメントを表す。式 (1) の右辺第 1 項は支持面の加速度によって生じる慣性力の影響を表し、第 2 項は人体の姿勢制御トルクを表す。一般的な随意制御の制御則として、以下のような遅延を含む状態フィードバック制御とおく。

$$\tau_b = -k_p \theta_b(t - t_d) - k_d \dot{\theta}_b(t - t_d) \quad (2)$$

$k_p, k_d$  は姿勢角と角速度に応じたフィードバックの係数を表し、 $t_d$  は応答の遅延時間を表す。

上記の仮定したシステムでは低周波帯域の位相特性を再現することができないため、本研究では、上記のシステムに支持面の速度フィードバックを加えたモデルを検討する。このモデルは以下のように仮定する。

$$\tau_b = -k_p \{\theta_b(t - t_d) - \bar{\theta}_b(t)\} - k_d \dot{\theta}_b(t - t_d) \quad (3)$$

$$\dot{\bar{\theta}}_b + \frac{1}{c} \bar{\theta}_b = \frac{\alpha}{c} \dot{X}_s$$

式(3)は支持面の速度に起因して生じる目標姿勢角度を加えたものである。 $\bar{\theta}_b$  は 1 次遅れ系とみなして、 $c$  はその時定数、 $\alpha$  は比例定数を表す。このモデルに対して支持面の加速度を入力、姿勢角を出力として伝達関数を求めると以下のようになる。

$$G(s) = \frac{m_b l_b c s^2 + m_b l_b s + \alpha k_p}{s(cs + 1) \{ (J_b + m_b l_b^2) s^2 + k_d e^{-t_d s} s + k_p e^{-t_d s} - m_b g l_b \}} \quad (4)$$

式(4)のように定義した伝達関数が実験結果に一致するようにフィッティングを行い、未知の制御パラメータである  $k_p, k_d, t_d, c, \alpha$  の 5 つを同定した。この推定したシステムと実験結果の比較を図 2 に示す。このグラフから、仮定したモデルと実験結果はほぼ一致していることがわかり、支持面速度フィードバックを加えたモデルは安定なシステムであると言える。

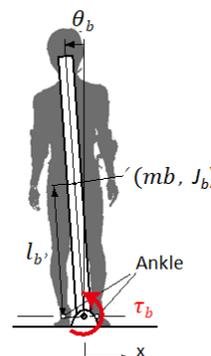


Fig. 1 Single rigid body model

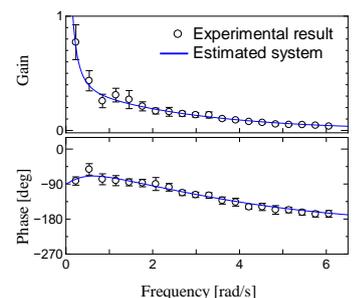


Fig. 2 Frequency response diagram and system identification

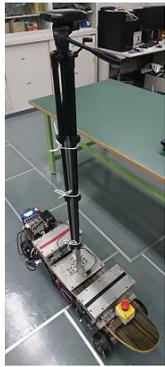


Fig. 3 Photograph Device

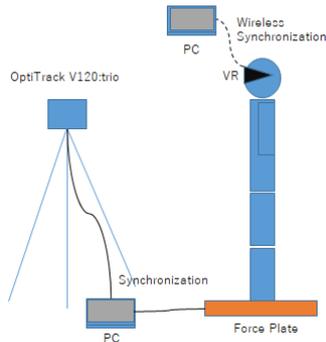


Fig. 4 Experimental diagram

Table 1 Velocity condition of support surface in VR test

Experimental Video	I	II	III	IV
Amplitude[mm]	1000	500	333	250
Frequency[Hz]	0.1	0.2	0.3	0.4
Cycle	10	10	10	10

### 3. 単一周波数 VR 実験

#### 3.1 単一周波数 VR 実験概要

本実験は支持面を前額面方向に単一周波数で揺動した時の、立位バランスの視覚による影響を見るのが目的である。また、揺動周波数の違いによって応答に差が生じるのかを確認する。

被験者に見てもらう動画は図 3 に示す撮影機器を使い撮影した。電動スケートボードに角柱を取り付け、Vuze camera を取り付け三脚を角柱に固定した。Vuze camera は 8 つのレンズが付いており、360°全体を撮影することが可能である。撮影した映像は専用ソフト Humaneyes VR Studio で VR 動画に変換し本実験で使用した。実験に用いる動画は 0.1, 0.2, 0.3, 0.4Hz の角周波数で揺動する 4 種類あり、動画内容を表 1 に示す。電動スケートボードの支持面速度  $\dot{X}$  を

$$\dot{X} = A\omega \cos \omega t \quad (5)$$

としたときの強度  $A\omega$  を一定に設定した。A は支持面の振幅、 $\omega$  は角速度、t は時間である。

本実験の様子を図 4 に示す。人体の姿勢変化を計測するためにモーションキャプチャと床反力計を使用した。反射マーカの位置、被験者、スタンス幅、は周波数応答実験と同様である。実験回数は被験者一人につき、4 種類の動画を 6 回ずつ、計 24 回行った。視線は一点を凝視するのではなくまわりを見るようにと指示した。

#### 3.2 結果

モーションキャプチャによって得られた位置座標から姿勢角を導出した結果を図 5 に示す。実験動画 I の 5 周期分を示す。また、姿勢角の後半 6 周期分(動画 II は 3 周期分)をフーリエ変換し、導出した周波数応答線図を図 6 に示す。被験者ごとに 4 種類の動画で場合分けし、6 回実験した平均値を出力している。白丸は揺動周波数、黒線が 0.1Hz、緑線が 0.2Hz、水色線が 0.3Hz、赤線が 0.4Hz を示している。

すべての被験者で動画の周波数に対して上段のゲインでピークが出ていることから、視覚刺激によって姿勢を傾けていることが確認された。また、全体的な傾向として低周波帯域の方がゲインは大きくなるのがわかった。しかし、被験者 G に関しては全く逆の傾向を示している。

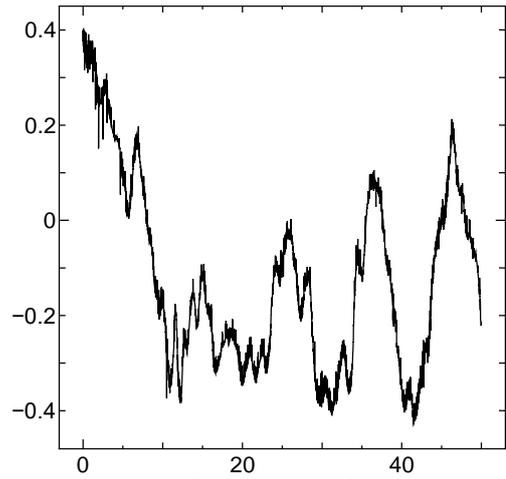


Fig. 5 Posture angle in VR test

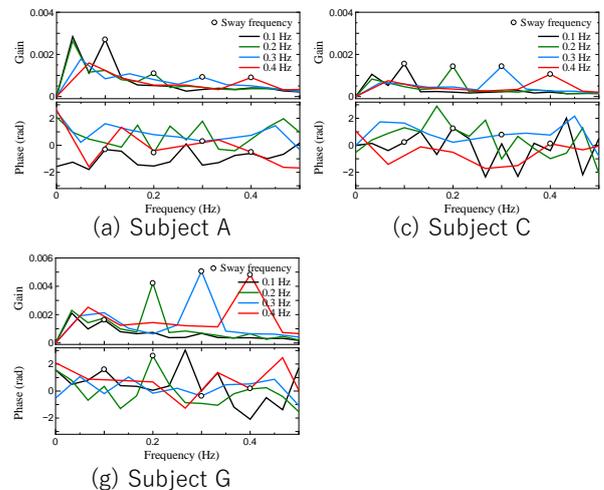


Fig. 6 Frequency response diagram in VR test

下段の位相については被験者によってばらばらである。仮定したモデルと一致しているのは被験者 B, C, E であるが、他の被験者の位相はあまり変化しない。これは、単一周波数であるため被験者が揺動を予測することが容易であり、この予測によって結果が変わってきていると考えられる。

### 4. 結言

本研究では、立位人体の前額面バランスに関して支持面水平揺動による周波数応答実験を行った。実験結果で見られた低周波帯域の位相遅れを説明できるモデルを仮定し、安定なシステムが得られた。仮定したモデルは支持面の速度によって姿勢角が変化すると仮定しており、視覚情報が低周波帯域においては大きく働くと考えられる。

そこで、視覚だけの情報を与えて応答が現れるのか確認するため単一周波数 VR 実験を行った。実験結果から、明らかに揺動周波数で人体の応答が出ていることがわかり、視覚情報が立位バランスに関与していることが確認された。

### 文献

- (1) Robertson, D.G.E., Whittlesey, S.N., Caldwell, G.E., Kamen, G. and Hamill, J., 身体運動のバイオメカニクス研究法, 大修館書店(2008), p.66