

立位人体の周波数応答特性に対する個人差の影響

知能メカトロダイナミクス研究室 1170054 小林 航貴

1. 緒言

立位人体の動的な特性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様々な応用が期待できる。そこで、本研究では支持面を水平揺動したときに得られる周波数応答を計測し、バランス特性との関係を明らかにすることを目的とする。

本研究の目的を達成するためには、いくつかの課題がある。まず、立位人体の応答の再現性が得られることが重要になる。これまでの研究から、適度な大きさで支持面を前額面方向に水平揺動し、周波数応答解析を適用すると、一定の精度で応答の再現性が得られることが分かっている⁽¹⁾。ただし、揺動の大きさによる違いや、特に重要となる低周波帯域の特性については明らかになっていない。本研究では支持面の揺動を2パターンで与えた場合の応答特性の変化について調べる。

本研究では、水平揺動時の周波数をより低周波帯域に拡張したところ、一般的な力学理論とは異なり、0.2Hz以下の帯域では位相の遅れが見られた。我々は、体性感覚に基づく支持面の動きに対する応答によってこの現象が生じるのではないかと考えた。そこで、テーピングによる足首の固定により足首の体性感覚を弱めて周波数応答実験を行った結果についても報告する。

2. 周波数応答実験の概要

本研究では、図1に示す床反力計を搭載した電動スケートボードを用いて周波数応答実験を行う。本実験に用いる電動スケートボードは出力450Wの市販品を改造したものであり、右前輪にロータリエンコーダ(180 pulse/rev)を取り付けている。この計測値をフィードバックすることで参照変位に対するサーボ追従制御を行っている。予備実験において、低周波帯域では体重80kg以下の被験者を乗せた状態で良好な追従性能が得られることを確認している。

揺動波形は、以下のように周波数の異なる複数のcos波を重ね合わせた波形を参照加速度とした。

$$a(t) = A \sum_{i=1}^N \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (1)$$

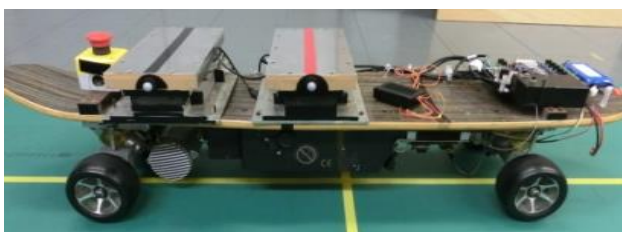


Fig. 1 Electric skateboard

ここに、 A は波形の振幅、 ω_i は角振動数、 ϕ_i は位相を表す。加速度の周波数帯域は0.06Hz~1Hzとなるように設定し、この区間で20個の周波数が等間隔で重ね合わされるように設定した。最終的に加速度波形を決めるためには位相 ϕ を決定する必要があるが、図2のように最大加速度を 1 m/s^2 とするときの波形の分布が正規分布における $\sigma = 0.2$ に近づくように位相を決定した。さらに、被験者の揺動の予測防止のため、図3に示す σ が0.2に近い3つの揺動パターンを用意し、実験時にはそれらを順番に変更しながら揺動した。

次に、身体の応答の計測方法について説明する。本実験では、OptiTrack社製のモーションキャプチャV120:Trioにより被験者の応答を計測する。計測は120Hzで行うが、周波数応答解析では計測データを100Hzに変換して行った。人体の応答を最終的に上半身と下半身の姿勢角に変換するために、身体に取り付けたマーカーから文献⁽²⁾を参考に身体各セグメントの質量中心を求め、上半身と下半身の質量中心の支持面からの相対座標を決定した。装着箇所は、計測版・足首・膝・大転子・腸骨稜・肩・頭とし、左右対称に計14個のマーカーを取り付けた。下半身は両足首、上半身は腸骨稜のマーカーの中心を回転中心と仮定して、それぞれの鉛直軸からの姿勢角を求めた。

実験における被験者は20代の男性4名で、実験回数は12回とし、立位時のスタンス幅は230mmで統一する。計測のサンプリング周波数を100Hzとし、4秒間の予備揺動の後、

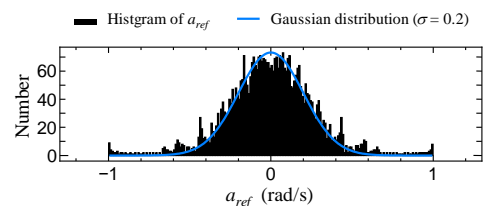


Fig. 2 Distribution of the reference acceleration

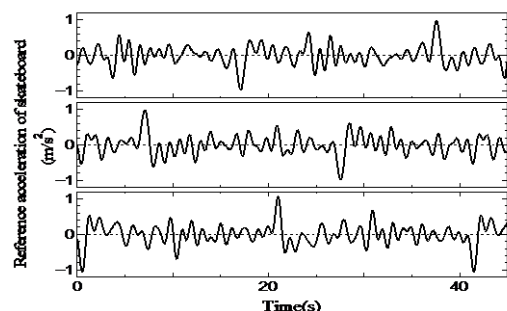


Fig. 3 Reference acceleration waves for experiment

卒論要旨

40.96 秒間の応答を計測する。本実験は高知工科大学倫理審査委員会の承認を得て行い、実験中の被験者には腕を下した自然な姿勢で、視線はまっすぐ前方に固定するよう指示した。

3. 揺動の大きさに対する非線形特性の検証

人体は非線形システムと考えられるため、揺れの大きさに応じて周波数応答線図が変化すると考えられる。過去の研究では、支持面を回転揺動させて得られた前顔面のバランス応答に周波数応答解析を適用した結果、支持面揺動の増大に伴ってゲインが減少することが報告されている。そこで、支持面の振幅を変更して周波数応答解析を行った。

支持面の最大加速度の振幅は 0.3m/s^2 と 0.5m/s^2 の2パターンとした。入力を支持面の加速度、出力を上半身と下半身の姿勢角とした場合の被験者1名の周波数応答線図を図4に示す。図中の○印は12回の実験の平均、エラーバーは標準偏差を表す。この結果、上半身・下半身ともに揺動の大きさによって位相にはほとんど変化はないが、低周波帯域にて揺動が大きくなるにつれてゲインが低下する特性がみられた。他の被験者も同様の結果となった。このような結果となった原因として、姿勢が鉛直となるあたりでは復元力が極端に小さくなる不感帯となっているためと考えられる。

4. 低周波帯域における位相特性の検証

実用的な観点では、周波数応答実験で得られるデータから被験者の身体の特徴をつかむことが重要である。本研究では、図4の結果において、特に低周波帯域における位相の遅れが生じていることに注目し、これが特定の身体機能と周波数応答線図の関係を表す手がかりとなるのではないかと考えた。

一つの仮説として、体性感覚から支持面加速度を感知し、その影響を相殺するように足首まわりの筋群が機能している可能性を考えた。これを確認するために、足首にテーピングを巻いて固定し、足首の機能を弱めた状態で実験を行い、低周波帯域の位相の変化を確認した。本実験では、低周波帯域の特性を正確に確認するために、揺動の周波数帯域を $0.06\text{Hz} \sim 0.5\text{Hz}$ とし、最大加速度は 0.3m/s^2 とした。

1名の被験者の結果を図5に示す。この結果、足首の固定の有無による明確な違いは見られなかった。他の被験者についても1名を除き、ほぼ同様の結果であった。これらの結果から、低周波帯域の位相特性は足首の体性感覚のみで影響ではないことや、制約が加えられた場合に補償が生じている可能性が考えられる。

Fig. 4 Comparison of frequency response with amplitude.

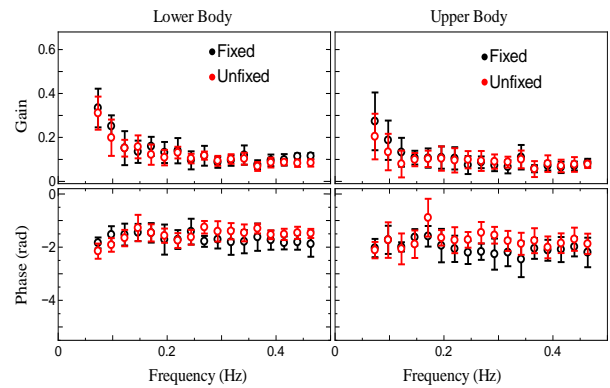


Fig. 5 Frequency response diagrams with fixed ankles

5. 結言

本研究では、立位バランスの特性を調べるために、支持面の水平揺動を行い、周波数応答解析を適用した。まず、本手法の振幅に対する非線形特性を調べるために、揺動の大きさを変更したところ、揺動の増加に伴って周波数帯域のゲインが下がる非線形特性がみられた。また、低周波帯域にて位相が遅れるという特徴的な現象の原因を調べるために、足首にテーピングを巻いて実験を行った。しかし、テーピングの有無によって周波数応答線図に大きな違いは見られなかったため、低周波帯域の位相特性は足首の体性感覚のみの貢献によるものではないと推定される。

本研究では、低周波帯域の位相特性の原因を調査するとともに、応答特性をモデリングしてパラメータを同定することで、身体特徴の関係を明らかにすることを検討する。

文献

- (1) 園部元康, 日野順市, “立位時における人体前顔面の姿勢制御モデルの検討(周波数応答実験による伝達関数モデルの導出)”, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 832, (2015).
- (2) D.Gordon E. Robertson, Saunders N. Whittlesey, Graham E. Caldwell, Gary Kamen, Joseph Hamill “身体運動のバイオメカニクス研究法”, 大修館書店 (2008), pp.65-68.
- (3) Goodworth, A. D. and Peterka, R. J., "Influence of stance width on frontal plane postural dynamics and coordination in human balance, Journal of Neurophysiology", Vol. 104, No.2 (2010), pp.1103-1118.

