

立位時の前額面姿勢制御に対する支持面速度の影響

システム工学群

知能メカトロダイナミクス研究室 1190041 尾崎 大晟

1. 緒言

人は立位時の詳細な制御則は明らかになっていない。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特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。そこで我々は個人のバランス特性を得るための制御則を検討する。

支持面の水平揺動時の前額面の応答をモデル化するために、周波数応答実験を行ったが、その中で 0.2Hz 以下の帯域において位相が遅れるという現象が見られた。すなわち、支持面速度に応じて姿勢を故意に傾けることがわかった。この現象は人のバランス制御則特有のものであると考えられる。この位相遅れは支持面の速度を人体がなんらかの方法で把握し行うフィードバック制御の影響であると考えられ、この制御則について明らかにしたい。支持面速度に応じて姿勢を傾けるのであれば、床面を等速で動かした場合に決まった角度に姿勢を傾けるはずである。支持面速度に応じた制御則が妥当であるかどうかを確認するために、周波数応答実験を行い被験者の支持面速度に応じた制御の特徴と等速度実験の結果を比較する。

2. 理論

人体のバランス解析では、図 1 のような足部を除いた人体部を 1 つの剛体と考え、足首を回転軸とした剛体リンクモデルがよく用いられる。⁽¹⁾⁽²⁾本研究では低周波帯域でのモデルの構築を目指しており、図 1 のモデルをベースにバランスフィードバックシステムを検討する。本研究では 下半身を拘束 3 リンク、上半身を 1 リンクとしたモデルを用いて運動方程式を立て、最終的に上半身と下半身の運動が等しいという仮定に基づく合成により 1 リンクモデルを導く。⁽³⁾

$$\bar{J}_b \ddot{\theta}_b - \bar{G}_b g \theta_b = \bar{G}_b \dot{x}_s + N_t \quad (1)$$

式(1)より、前額面における下半身トルクと 1 リンク姿勢の関係が示された。1 リンクモデルなので、上半身と下半身の関係は常に固定されており、その拘束条件から腰部ジョイントの関節モーメントは自動的に定まる。したがって、ここでは 1 リンクモデルの復元モーメントを下半身の 4 つのモーメントで代表させ、そのモーメント生成則を第 3 章で検討する。

3. 周波数応答実験

3.1 概要

本実験は前章で用いた床反力計からの姿勢推定方法を用いて立位時の支持面を水平揺動させた場合の姿勢変化を計測するために行う。

立位人体バランスモデルを構築するためには、立位人体立位人体の支持面に加速度を印可し、人体の姿勢変化や圧力中心を計測しなければならない。周波数応答実験における支持面の揺動は、0.3~0.6rad/s の帯域で与えた。本実験では応答の再現性を確保するために、被験者が支持面の揺れを予測できないような複雑な揺動波形を用いて支持面揺動を与えた。

実験条件について被験者は健康な 20 代男性 7 名とし、各

被験者に対して 3 種類の揺動振幅 1 種類につき 5 回、つまり全てで 15 回ずつ実験を行った。被験者に対しては、床反力系に記したスタンス幅 230mm のラインの上に乗ってもらい、両腕はズボンの縫い目に合わせるように下した状態で視線は 1 点凝視ではなく広い視野で前方を見てもらうように指示した。

3.2 内部フィードバック制御の仮定と伝達関数の導出

前額面の立位バランスシステムを構築するためには、バランス制御則をなす力を下半身モーメント で適切なシステムで表現する必要がある。

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

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制御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

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

$$T_c \dot{\bar{\theta}}_b + \bar{\theta}_b = \alpha \dot{x}_s$$

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 T_c はその時定数 α 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。

$$\frac{\Theta_b(s)}{A_s(s)} = \frac{\bar{G}_b T_c s^2 + \bar{G}_b s + \alpha k_p}{s(T_c s + 1)(\bar{J}_b s^2 + k_d e^{-t_d s} s + k_p e^{-t_d} - \bar{G}_b g)} \quad (4)$$

ここに、 \bar{G}_b はそれぞれ支持面の加速度と姿勢角のラプラス変換後の変数を表す。

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 $k_p, k_d, t_d, T_c, \alpha$ の 5 つを同定する。

3.2 パラメータ同定結果

周波数応答実験の結果に対して、式(4)の伝達関数を用いて同定したパラメータを表 1 に示す。推定したシステムと実

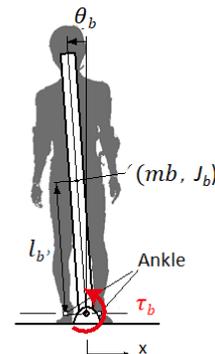


Fig. 1 Single rigid body model

験結果の比較を図 2 に示す.

Table 1 Identified parameters

	kp	kd	td	tc	α
SubjectA	710.5273	281.9407	0.171232	1.216637	0.031072
SubjectB	501.3451	213.3549	0.177482	1.614925	0.027087
SubjectC	599.4269	213.4218	0.180052	0.00013	0.011922
SubjectD	426.4129	156.4129	0.179574	2.734667	0.048895
SubjectE	418.4023	187.0482	0.190369	2.632039	0.05579
SubjectF	415.4516	127.794	0.16688	1.140057	0.03553
SubjectG	674.9314	307.1163	0.17923	1.061065	0.006808

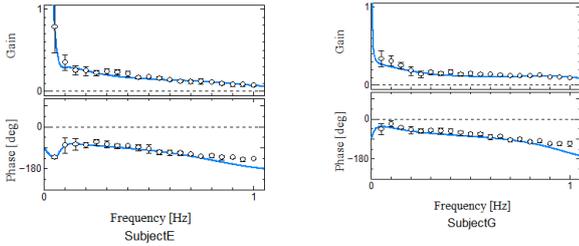


Fig. 2 Frequency response diagram and system identification

4. 等速度実験

4.1 概要

支持面速度に応じた制御則が妥当かどうか確認するために、第 3 章で用いたものと同様の実験機を水平方向に走らせ等速運動時の姿勢変化を確認する。支持面速度に応じた制御則が正しければ、支持面が一定速度 v で動くとき、角度 θ_b の傾きが生じ、3 章で同定したパラメータを用いて $\theta_b = \alpha v$ という関係になる筈である。

4.1.1. 実験条件

本実験における支持面速度の与え方について、本実験では 15 秒間の等速区間を設け、その区間での姿勢角を調べる。支持面速度(等速区間)は 0.2~0.6m/s で 0.2m/s 刻みで設定し、進行方向は左手方向を正、右手方向を負とし、正負の動作を交互に繰り返しながら、10 回ずつ実験を行った。

4.2 実験結果

等速区間 15 秒のうち後半の 5 秒間の姿勢角の平均を最終姿勢として、図 4.3 に各被験者の各速度の最終姿勢を示す。○印が姿勢角の平均値で、赤線は姿勢角と支持面速度の傾きを最小二乗法で直線近似したもので、青線は関数で曲線近似したものである。赤文字のは最小二乗法で求めた未知パラメータで、青文字のは関数で求めたものである。座標は、支持面速度は左手方向を正、姿勢角は右手方向を正としている。

4.3 周波数応答実験との比較

等速度実験の結果より の妥当性を検討するために、周波数応答実験の最大振幅を変えて実験する。比例関係がなりたっているのならば最大振幅を大きくすればパラメータ α は小さくなり、その逆もまた然りである。

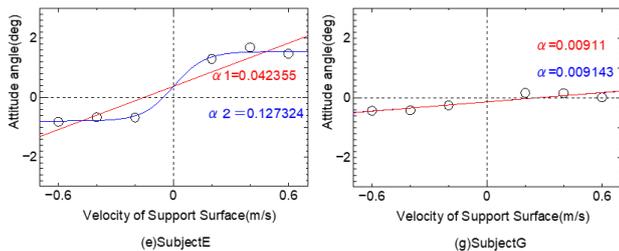


Fig. 3 Posture angle at constant velocity

3 章の周波数応答実験では 0.15,0.2,0.25m/s² で実験を行い周波数応答実験との比較を行った。図 4 にそれぞれの振幅の α を比較したグラフを示す。結果より振幅の大きさと α の値には比例関係はなかった。

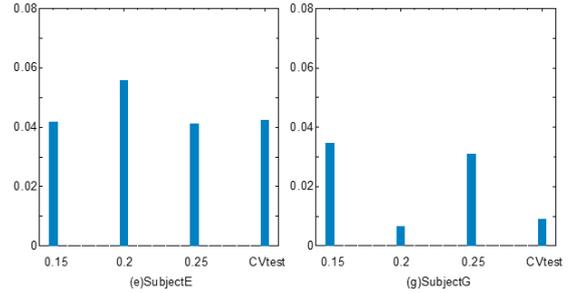


Fig. 4 α of each acceleration

5. 結言

本研究では、周波数応答実験によって支持面揺動に対する応答の個人特性を取得し、実際に等速度実験を行いその個人特性が正しいかどうか検証した。結果、周波数応答実験の個人特性と等速度実験の結果が一致する被験者もいれば、そうではない被験者も確認できた。周波数応答実験での最大速度は等速度実験で行う支持面揺動時の速度よりも小さいため、特性が一致する被験者としなない被験者に分かれたのではないかと考える。また、周波数応答実験では加速度が入力されるが、等速度実験ではされていないのでその影響も考えられる。今回の実験では周波数応答実験より支持面速度に応じた制御の特性を得ることはできなかった。しかし、支持面速度に応じて姿勢角を変化させていることはわかった。

文献

- (1) Stépán, G., and Kollár, L., "Balancing with reflex delay", *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 31, No. 4-5 (2000), pp. 199-205
- (2) Bingham, J. T., Choi, J. T., and Ting, L. H., "Stability in a frontal plane model of balance requires coupled changes to postural configuration and neural feedback control", *Journal of Neurophysiology*, Vol. 106, No. 1 (2011), pp. 437-448
- (3) 園部 元康, 山口 大貴, 日野 順市, "低周波数帯域における位相特性を考慮した立位バランス制御モデルの構築", 「日本機械学会 シンポジウム」2018