

卒業論文要旨

一定周波数の支持面揺動に対する定常的な立位バランス制御則の検討

システム工学群

動的デザイン研究室 1220139 日高 壮梧

1 緒言

姿勢制御システムは、フィードフォワード制御(FF 制御), フィードバック制御(FB 制御), 遅延などを含む複雑なシステムとされている。そのため、応答も複雑になり、従来の方法で、精度の高いバランス評価を行うことは難しい。そこで、新たな精度の高いバランス評価法として、一定周波数揺動に対する応答による評価法を検討している。この方法では、被験者は、応答の遅延を FF 制御で補償できる⁽¹⁾が、その制御メカニズムについては不明である。

一定周波数揺動において、0.7 Hz 付近を境界として、低周波帯域では単一倒立振り子モデル(1 リンクモデル)、高周波帯域では二重倒立振り子モデル(2 リンクモデル)で運動を表現できる⁽²⁾。さらに、制御戦略は 0.4 Hz 付近を境に変化していること⁽³⁾ことが報告されている。しかし、これらの制御戦略の使い分けの理由は不明である。

本研究の目的は、一定周波数揺動における揺動周波数に応じた制御戦略の合理性を調べることである。そこで、不規則な支持面揺動に対する応答(A 応答)と、一定周波数揺動に対する応答(B 応答)を比較する。A 応答には、FB 制御のみによる受動的な応答が現れるのに対し、B 応答には、FB 制御に加えて、FF 制御による能動的な応答が強く現れると考えられる。ここに、A 応答におけるバランス制御が、B 応答における FB 制御と一致すると仮定すると、A 応答と B 応答の差異は、FF 制御による応答を表すと予想される。この応答特性を調査することで、一定周波数揺動に対するバランス制御メカニズムを検討する。

2 一定周波数揺動に対する応答

被験者 20 代男性 10 名(身長 174.9±5.2cm, 体重 62.4±10.6kg)に対し、一定周波数揺動実験を実施した。一定振幅での揺動を 25 周期継続し、最初の 5 周期を除く 20 周期を定常区間として解析した。実験は、5 つの周波数パターンを 1 セットとし、合計 3 セット実施した。周波数パターンは、0.2, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8 Hz の 5 つで、振幅は 25 mm とした。

本実験では、3 軸方向の力と 3 軸まわりのモーメントを計測するためのフォースプレート(テック技販, TF-3040-C)を揺動装置(テック技販, BASIS)の支持面に設置した。また、3 軸方向の加速度と 3 軸まわりの角速度を計測するため、慣性センサ(テック技販, IMS-WD)を揺動装置と頭部に取り付けた。本実験での計測値について、2 章 2.1 節と同様の座標系を定義し、同様の表現方法を用いた。本実験から、一定周波数揺動に対するバランス制御の応答として、支持面変位 x_s 、質量中心変位 x_b 、圧力中心変位 x_p を得た。

3 不規則な支持面揺動に対する応答

3.1 支持面揺動実験

2 章 2.1 節と同じ被験者について、電動台車による支持面揺動実験を実施した。計測時間を 65 秒とし、最初の 5 秒間

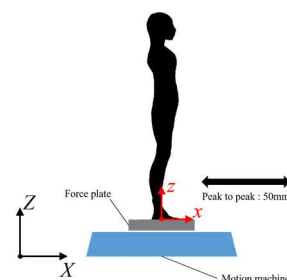


Fig.1 Outline of experiment

を準備時間として、60 秒を解析時間とした。計測回数は 10 回とした。

また、支持面揺動の加速度 a を次式で与えた。

$$a = A \sum_{k=1}^{20} \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (1)$$

式(1)は、周波数が 0.05 Hz ~ 1.5 Hz の 0.05 Hz 刻みの 30 個の cos 波を重ね合わせたものである。加速度振幅 A は 0.0161 で台車の最大加速度は 0.15 m/s^2 とした。また、位相 ϕ_k は、加速度のヒストグラムが正規分布 $\sigma = 0.5$ に近づくように調整した。本実験での計測値について、絶対座標系における変位を大文字で表現し、水平前方を X 軸、鉛直上向きを Z 軸と定義した。また、原点を足関節に固定した移動座標系における変位を小文字で表現し、水平前方を x 軸、鉛直上向きを z 軸とした。本実験から、支持面加速度 \ddot{x}_s と質量中心変位 x_b を得た。

3.2 制御則の仮定

不規則な支持面揺動に対する機構モデルを、図 2 に示す 1 リンクモデルとする。質量中心の変動が微小として近似線形化を行うと、運動方程式は次のようになる。

$$\left(\frac{J_b}{l_b} + m_b l_b \right) \ddot{x}_b - m_b g x_{ref,b} = -m_b l_b \ddot{X}_s - N_a \quad (2)$$

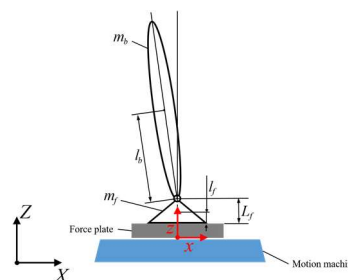


Fig.2 Single link model.

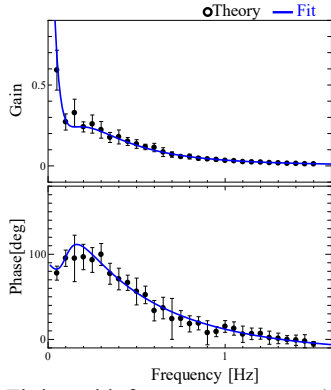


Fig.3 Fitting with frequency response.(subject D)

足関節モーメント N_a は、状態遅延フィードバック制御と支持面の速度に応じた目標姿勢の調整を組み合わせたカスケード制御系と仮定し、以下の式を定義する。

$$\begin{aligned} N_a &= k_p \{x_b(t-t_d) - x_{ref,b}(t)\} + k_d \dot{x}_b(t-t_d) \\ T_c \dot{x}_{ref,b} + x_{ref,b} &= \alpha \dot{X}_s \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $x_{ref,b}$ は質量中心の目標変位である。また、 k_p 、 k_d は状態フィードバックゲイン、 t_d は遅延時間、 T_c は支持面速度と重心の目標変位の間の1次フィルタ、 α は支持面速度と質量中心の目標変位の関係を表す比例定数である。これら5つの未知パラメータを実験結果に基づき、非線形最小二乗法によるフィッティング⁽⁴⁾により同定した。図3にフィッティング図を示す。得られたモデルに基づいて、支持面変位 X_s 、質量中心変位 x_b 、圧力中心変位 x_p の定常解を求めた。

4 正規複素振幅による変位の表現

定常応答解析では、様々な変位を支持面に対する振幅や位相差として、フーリエ係数に基づく複素振幅で表現する。これらを、支持面変位の複素振幅で除することで、正規化した。支持面の複素振幅 \tilde{X}_s は次式のようになる。

$$\tilde{X}_s = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_s(n) e^{-i\omega n \Delta t} \quad (4)$$

ここに、 ω [rad/s] は揺動角振動数、 Δt [s] はサンプリング時間、 N は解析区間内のサンプリングデータ数、 n はデータ番号である。式(4)と同様に、 x_b 、 x_p の複素振幅を求め、 \tilde{x}_b 、 \tilde{x}_p とする。正規複素振幅 \bar{x}_b 、 \bar{x}_p は次式から

$$\bar{x}_b = \tilde{x}_b / \tilde{X}_s, \quad \bar{x}_p = \tilde{x}_p / \tilde{X}_s \quad (5)$$

5 周波数別の制御特性の確認

周波数別の制御特性を評価するために、足関節トルクのフィードバックゲイン γ を、 \bar{x}_p と \bar{x}_b より、次式から求めた。

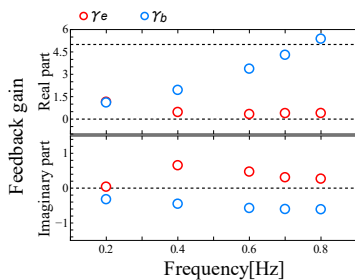


Fig4. Average of feedback gain by 8 subject.

$$\bar{x}_p = \gamma \bar{x}_b \quad (6)$$

ここに、フィードバックゲイン γ は複素数で、実部が剛性係数、虚部が減衰係数とほぼ同意とみなすことができる。

揺動実験より推定したフィードバックゲイン γ_e と、同定した力学モデルより推定したフィードバックゲイン γ_b を比較する。図4より、実部に注目すると、周波数が小さくなるにつれて γ_e と γ_b の差は小さくなり、周波数 0.2 Hz のときは、値がほぼ一致した。これより、揺動周波数が小さくなるにつれて、FF制御の影響は小さくなると考えられる。

6 質量中心の目標変位による比較

一定周波数揺動に対する質量中心の目標変位 $x_{ref,e}$ 、同定した力学モデルからFB制御に対する質量中心の目標変位 $x_{ref,b}$ を推定し、それぞれの正規複素振幅 $\bar{x}_{ref,e}$ 、 $\bar{x}_{ref,b}$ を求めた。

図5(a)(b)より、周波数 0.2、0.6 Hz で、 $\bar{x}_{ref,e}$ について大きな違いがみられた。また、 $\bar{x}_{ref,b}$ は 0.2 Hz、0.6 Hz とともにほぼ 0 を示し、0.2 Hz のときの $\bar{x}_{ref,e}$ は $\bar{x}_{ref,b}$ とほぼ一致した。これより、周波数 0.2 Hz ではFB制御のみであるが、周波数 0.6 Hz ではFB制御に強いFF制御が加わると考えられる。これは、先行研究の知見を支持するものであった。

7 結言

本研究では、一定周波数揺動に対する定常応答を、FB制御モデルにより推定される応答と比較することで、バランス制御の特性を理解することを試みた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 一定周波数揺動に対して、揺動周波数が小さくなると、FF制御の影響が小さくなり、周波数 0.2 Hz のときはFB制御しかほとんど行っていない。
- (2) 質量中心の目標変位の値の違いから、周波数 0.6 Hz、0.2 Hz では、明らかに制御則が変わっており、これは先行研究の知見を支持するものであった。

文献

- (1) Nardone, A., Grasso, M. and Schieppati, M., Balance control in peripheral neuropathy: Are patients equally unstable under static and dynamic conditions?, Gait & Posture, Vol. 23, No. 3 (2006), pp. 364-373.
- (2) 園部元康, 井上喜雄, “一定周波数で揺動する台車上における立位バランス応答”, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.877(2021).
- (3) Ko, J., Challis, J. and Newell, K., Transition of COM-COP relative phase in a dynamic balance task, Human Movement Science, Vol. 38(2014), pp.1-14
- (4) 園部元康, 支持面水平刺激に対する矢状面の立位バランスモデルの信頼性, 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2021 (2021)

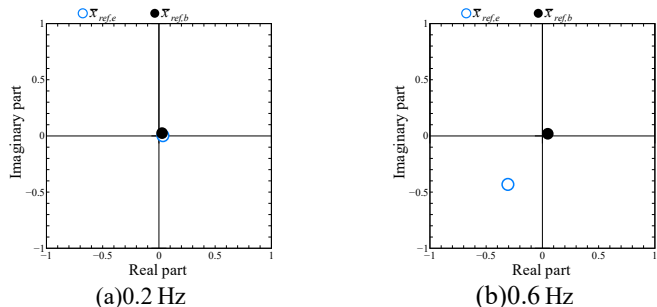


Fig5. Normalized complex amplitudes.