

卒業論文要旨

立位の矢状面バランスモデルを介した視覚の重みづけの評価

Evaluation of visual sensory weighting based on standing balance identification on sagittal plane

システム工学群

動的デザイン研究室 1250057 菊地 健介

1. 緒言

人の立位におけるバランス維持では、3種類の感覚器（前庭感覚・体性感覚・視覚）の感覚器統合による姿勢推定が重要となる。これら重みづけには個人差があり、環境によっても変化すると考えられているが、重みづけに偏りがある場合には、転倒やめまいのリスクが生じる。一例として、加齢に応じて視覚の重みづけが増大すると言われている⁽¹⁾が、視覚の感覚器重みづけの定量的な評価法が確立されていないため、明確なことはわかっていない。

視覚の重みづけの定量化が難しい理由は、重みづけを段階的に変える環境構築と重みづけの数値化が難しいことが挙げられる。環境による重みづけの変化を開眼・閉眼で与えた研究が多いが、閉眼は視覚情報が消失する極端な例で比較が難しい。重みづけの数値化は、圧力中心軌跡長のロンベルグ率等の指標は存在するが、閉眼時には他の感覚器による代償が生じるために直接的な比較は難しい。

視覚の重みづけの定量化手法として、我々は支持面の水平揺動に対する応答に基づく個人の重心（COM）制御のモデリングとパラメータ同定の手法を提案している⁽²⁾。この方法では、支持面速度に応じたCOMの平衡点の移動が制御則に含まれる。支持面速度は視覚で検知するため、この制御則から視覚の重みづけを推定できる。しかし、過去の実験は開眼のみで実施されたため、視覚の貢献の検証が不十分であった。

本研究の目的は、支持面水平揺動に基づくバランス制御システムの同定を介して、視覚の重みづけを定量化することである。まず、視覚の貢献度を段階的に変えて、視覚の影響が表れやすい0.3 Hz以下の帯域における特性の変化を確認する。視覚の貢献度の変化は、開眼・閉眼のほかにゴーグルで視野の下半分を遮断することで与えた。次に、得られた周波数応答線図にシステム同定を適用し、開眼とゴーグルの条件で適切な同定ができていないことを確認する。最後に、同定された支持面速度のフィードバックパラメータから視覚の貢献度の定量化を試みる。

2. バランス制御システムの同定実験

2.1 実験の概要

本研究では、図1に示すように被験者が揺動台車の上に立ち、台車を水平に揺動させたときのCOM変位を推定し、台車加速度に対する重心変位の応答からバランスモデルを同定する。被験者として9名の若年健常者が本実験に参加した。被験者に対し、素足で台車に搭載された力覚センサの上に立ち、顔を正面に向けて両腕を自然に下ろしてリラックスして立位状態を維持するように指示した。視覚条件は、開眼、閉眼と図1に示す視野の下半分をビニルテープで遮断したゴーグルを着用した。視野の下半分をカットする理由は、VRを用いた実験において下半分の点群の流れが姿勢制御に影響

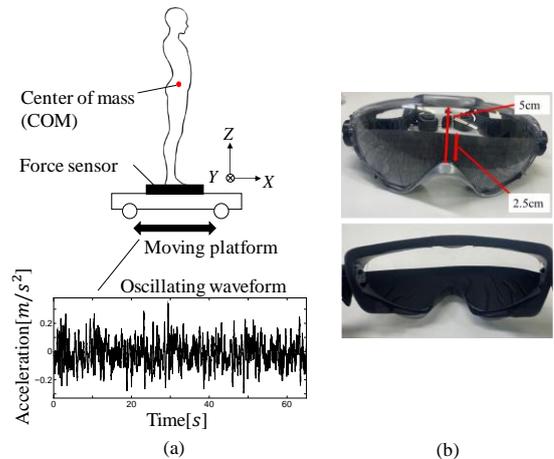


Fig. 1 Experimental setup: (a) Schematic diagram of experiment for balance identification. (b) Goggles used to restrict the visual condition.

を及ぼしたためである⁽³⁾。3つの視覚条件で65秒間の揺動を10回ずつ行った。

実験装置として、ロータリエンコーダを内蔵したブラシレスDCモータ（EC-i52, Maxon motor）で前後への揺動が可能な4輪台車を使用した。揺動は、0.05 Hzきざみで0.05~1.50 Hzの30個の調和振動を加速度振幅一定で重ね合わせ、時間波形の最大値が0.15 m/s²となるように振幅を調整した。計測機器として、6軸フォースセンサ（SFS100F102M500G6, レプトリノ）2台と加速度センサ（ADXL355, Analog devices）を台車に内蔵した。フォースセンサは両足の下に設置し、床反力を測定した。サンプリング周波数は100 Hzとした。

2.2 バランスモデルの同定

計測した応答に対して周波数解析を適用し、仮定した機構モデルと制御モデルに一致するように未知パラメータを同定した。機構モデルは、図2に示す人体を足部と身体部に分けた単一倒立振り子とし、セグメントの質量、慣性モーメント、重心高さ等は被験者の身長・体重からの比率で求めた。機構モデルの運動方程式は次のようになる。

$$\left(\frac{J_b + m_b l_b}{l_b} \right) \ddot{x}_b(t) - m_b g x_b(t) = -m_b l_b \ddot{X}_s(t) + N_a(t) \quad (1)$$

ここに、 x_b は台車に対するCOMの相対変位、 \ddot{X}_s は台車の加速度、 m_b は身体部の質量、 J_b は身体部の重心まわりの慣性モーメント、 l_b は身体部の重心高さ、 g は重力加速度を表す。

N_a は足関節トルクを表し、その制御則を次式で仮定する。

$$N_a(t) = -K_p \{x_b(t - T_D) - \bar{x}_b(t - T_D)\} - K_D \dot{x}_b(t - T_D) \quad (2)$$

$$T_R \ddot{\bar{x}}_b + \dot{\bar{x}}_b = -G_R \dot{X}_s \quad (3)$$

ここに、式(2)は状態遅延フィードバック制御則で、式(3)ではCOMの平衡点 \bar{x}_b が支持面速度に対する1次遅れ系として変化すると仮定した。 K_p は比例ゲイン、 K_D は微分ゲイン、 T_D は遅延時間、 T_R 、 G_R は1次遅れ系の時定数とゲインを表す。この制御則では、視覚の重みづけが T_R と G_R に反映される。

式(1)~式(3)より、支持面加速度を入力、COM変位を出力とする伝達関数は次式で表される。

$$G(s) = \frac{-m_b l_b T_R s^2 - m_b l_b s - G_R K_p e^{-T_D s}}{s(T_R s + 1) \left\{ \left(\frac{J_b}{l_b} + m_b l_b \right) s^2 + K_D e^{-T_D s} s + K_p e^{-T_D s} - m_b g \right\}} \quad (4)$$

COM変位は、既報の方法⁽⁴⁾を用いて計測値から推定できる。同一被験者かつ同条件で行われた複数回の実験で得られた周波数応答関数の平均が式(3)の伝達関数に一致するように、未知パラメータ K_p 、 K_D 、 T_D 、 G_R 、 T_R を最小二乗法で同定した。

同定パラメータの適切性を判断するために、システムの安定性を評価した。システムの安定性は式(4)の伝達関数に同定されたパラメータを代入し、その極によって評価した。 $s=0$ 以外の全ての極の実部が負であれば安定系となる。

2.3 視覚の重みづけの評価

開眼およびゴーグル条件での視覚の貢献度について考える。式(3)の支持面速度 \dot{X}_s と平衡点 \bar{x}_b の関係から、1次遅れ系の伝達関数 $G_v(s)$ は以下のように表される。

$$G_v(s) = \frac{-G_R}{T_R s + 1} \quad (5)$$

式(5)のインパルス応答は、

$$\bar{x}_b = -\frac{G_R}{T_R} e^{-\frac{t}{T_R}} \quad (6)$$

となる。本研究では、このインパルス応答における $|\bar{x}_b(0)| = G_R / T_R$ を視覚の重みづけを表す評価変数とする。

3. 結果

ゴーグル着用時に同定ができなかった1名を除く8名分の解析を行った。代表的な被験者1名の3つの視覚条件における実験と同定したシステムの周波数応答線図を図3に示す。ゲインは、開眼のとき0.3~0.5 Hz付近で減少したが、0.2 Hz以下では逆転した。位相は、0.5 Hz以下で開眼の位相が遅れた。ゴーグル着用時は、周波数応答線図が開眼と閉眼の中間的な特性を示した。この結果より、ゴーグルによって視野を制限が視覚の貢献を抑制することを示した。

パラメータ同定の結果、8名の被験者の開眼・ゴーグルの条件で同定されたシステムは安定であった。一方、閉眼の場合は T_R と G_R がゼロや極端に大きい値となる被験者が生じたため、式(3)は視覚の影響を表す制御則であることを確認できた。

被験者個人の視覚の重みづけを検討するために、 T_R 、 G_R および G_R/T_R を開眼とゴーグルで比較した。8名の被験者の T_R 、 G_R および G_R/T_R の平均と標準偏差を図4に示す。ゴーグル着用時に G_R/T_R が小さくなったため、この指標を用いることで視覚の重みづけが評価できる可能性が示された。

4. 結言

本研究では、開眼立位における支持面水平揺動から同定されるバランス制御モデルに基づいて、視覚の重みづけを評価

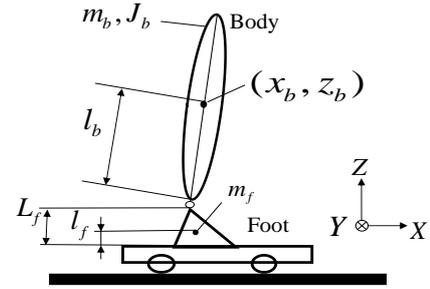


Fig. 2 Single inverted pendulum model for identification

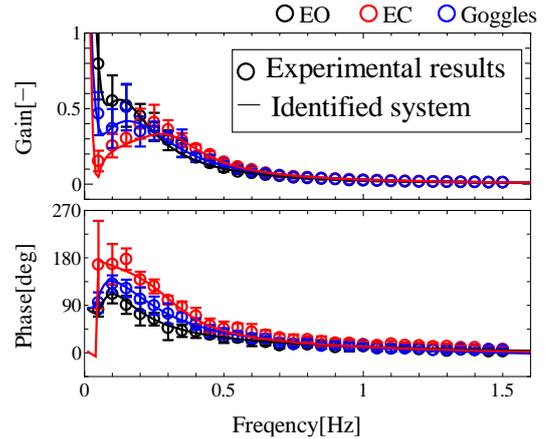


Fig. 3 Frequency response diagrams from ten times experiments with eyes open, eyes closed, and wearing goggles.

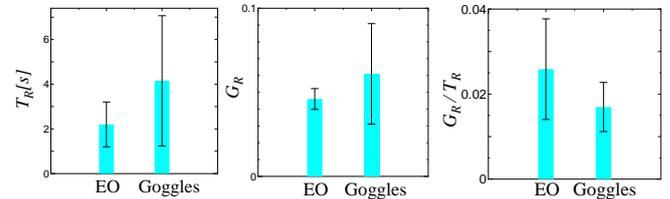


Fig. 4 Mean and standard deviation of T_R , G_R and G_R/T_R during quiet standing with eyes open and wearing goggles.

することを検討した。開眼、閉眼、視野を制限するゴーグルを着用した場合のパラメータ同定の結果から、閉眼以外では視覚の重みづけが評価できる可能性が示された。

文献

- (1) Eikema, D., et al., "Age-dependent modulation of sensory reweighting for controlling posture in a dynamic virtual environment", AGE, Vol. 34, No. 6 (2012), pp. 1381-1392.
- (2) 三浦直人, 園部元康, "立位バランスシステムの同定における適切な外部刺激の検討", 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス (2023)
- (3) Mani, H., et al., "Visual feedback in the lower visual field affects postural control during static standing", Gait & Posture, Vol. 97 (2022), pp. 1-7.
- (4) Sonobe, M. and Inoue, Y., "Center of mass estimation using a force platform and inertial sensors for balance evaluation in quiet standing", Sensors, Vol.23, No.10(2023)