

卒業論文要旨

座位バランスシステムにおける頭部加速度フィードバックゲインの特性

システム工学群

動的デザイン研究室 藤森 昭匡

1. 緒言

人の姿勢制御は、前庭感覚・体性感覚・視覚の三つの感覚情報を統合して行われ、それぞれの感覚の重みづけには個人差がある。この重みづけを定量化することで、姿勢制御における感覚情報の寄与を客観的に評価し、個人の感覚統合戦略を明らかにできると考えられる。特に前庭感覚の重みづけは、めまいや乗り物酔いとの関連が指摘されているが、その定量化は難しい。先行研究⁽¹⁾では、座位での揺動実験から頭部加速度フィードバックゲインを推定する手法が提案されているものの、モデル依存性の問題が残っている。

一方、急制動時の上半身や頭部の挙動には個人差があり⁽²⁾、これが前庭感覚の重みづけを反映している可能性があるが、明確にはされていない。本研究では、座位バランスシステムにおける頭部加速度フィードバックゲインと、急制動時の上半身最大重心変位との関係に着目する。周波数応答実験により頭部加速度フィードバックゲインを同定し、急制動実験を行って得られた正規化重心変位との相関を調べることで、前庭感覚の重みづけ特性を検討することを目的とする。

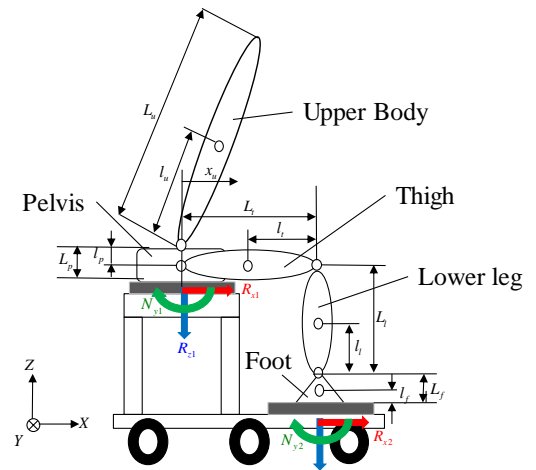


Fig. 1 Upper body COM estimation model

2. 理論

2.1 上半身質量中心変位 (COM) 変位推定

本研究では、先行研究⁽³⁾に基づき、支持面加速度を外部刺激として、上半身 COM 変位の応答をモデル(図1)化し、矢状面内の上半身 COM の水平変位および加速度を推定する。被験者の座面および足下に設置した2枚のフォースプレート (FP, TF-3040, テック技販社) と、揺動実験機に取り付けた加速度センサ (Analog Devices, ADXL355) の計測値を用いる。人体は上半身・骨盤・大腿・下腿・足部からなるモデルとし、骨盤および足部は揺動実験機と剛体的に結合され、上半身のみが相対運動の自由度をもつと仮定する。上半身は1リンク剛体としてモデル化し、姿勢変化は微小として線形化を行う。座標系として、静止座標系(X,Y,Z)と、揺動実験機に対する相対座標系(x,y,z)を定義し、矢状面前方を X, x 軸、左手方向を Y, y 軸、鉛直上方向を Z, z 軸とした。FP の計測値は、鉛直方向の反力 R_z 、水平方向の反力 R_x 、y 軸周りのモーメント N_y を使用し、座面を添え字 1、足下を 2 とした。また、各セグメントの質量を m 、長さを L 、セグメント下端から質量中心までの長さを l 、慣性モーメントを J とした。添え字は上半身を u 、骨盤を p 、大腿を t 、下腿を l 、足部を f としてそれぞれ示す。これらの仮定のもと、線形化した運動方程式から、相対座標系における上半身 COM 加速度 \ddot{x}_u および変位 \tilde{x}_u を推定する。以下に推定に用いた式を示す。

$$\ddot{x}_u(s) = -\frac{1}{m_u}(M\ddot{X}_s + R_{x1} + R_{x2}) \quad (1)$$

$$\tilde{x}_u = -\frac{1}{m_u g} \{ K_1 \ddot{x}_u + K_2 \ddot{X}_s + K_3 - N_{y1} - N_{y2} + R_{x1}(l_p + l_f - L_f - L_t) + R_{x2}l_f - R_{z1}L_t \} \quad (2)$$

$$K_1 = -\frac{J_u}{l_u} + m_u(l_p + l_f - l_u - L_p - L_t - L_f)$$

$$K_2 = m_u(l_p - l_u - L_p) + M(l_f - L_t - L_f) + m_f(L_t + L_f - l_f) + m_l(L_t - l_l)$$

$$K_3 = (-m_u L_t - m_p L_t - m_l l_t)g$$

2.2 座位バランスモデリング

本研究では、機構則とバランス制御則から構成されるモデル⁽¹⁾を定義した。機構則は、上半身の運動方程式で、次のように表される。

$$\left(\frac{J_u}{l_u} + m_u l_u \right) \ddot{x}_u(t) - m_u g x_u(t) = -m_u l_u X_s + N_h(t) \quad (3)$$

バランス制御則として、腰部トルクを次式で仮定した。

$$N_h(t) = -k_p x_u(t - t_d) - k_d \dot{x}_u(t - t_d) - k_h \ddot{x}_h(t - t_d) \quad (4)$$

ここで、 t_d は遅延時間を表し、 k_p 、 k_d はそれぞれ上半身 COM 変位の比例および微分ゲインである。また、 k_h は頭部加速度抑制ゲインを示す。式(4)の第一項および第二項は、相対座標系における上半身 COM に対する遅延を伴うフィードバック制御を表し、第三項は静止座標系における頭部加速度を抑制するフィードバック制御を表している。式(3)、(4)を組み合わせたことで、揺動実験機の加速度 $\ddot{X}_s(s)$ を入力、上半身 COM 変位 $x_u(s)$ を出力とする伝達関数 $G(s)$ は次式で表される。

$$G(s) = \frac{-m_u l_u - k_h e^{-t_d s}}{s^2 \left(\frac{J_u}{l_u} + m_u l_u + \frac{L_u}{l_u} e^{-t_d s} \right) + s k_d e^{-t_d s} - m_u g + k_p e^{-t_d s}} \quad (5)$$

3. 実験方法

3.1 周波数応答実験

本研究では、健康な 20 代男性 6 名を対象に、背もたれのない揺動実験機を用いた座位揺動実験を実施した。被験者は閉眼およびノイズキャンセリングヘッドホンの装着により視覚・聴覚情報を遮断した。揺動は 1 回 65 秒で計 10 回行い、0.05~1.5 Hz の 0.05 Hz 刻みの正弦波 30 成分を合成した最大加速度 0.3 m/s² の参照加速度を支持面に与えた。

支持面加速度を入力、上半身 COM 変位を出力として周波数解析を行った。実験で得られた時系列データにフーリエ変換を施し、先行研究⁽¹⁾に基づき 0.6 Hz を境に使用するフーリエ係数を切り替えて周波数応答関数を算出した。10 回分の結果を平均し、被験者ごとの周波数応答関数を求めた。本研究で仮定した式(4)の PDA フィードバックシステムが安定となる条件は文献⁽⁴⁾より、 $|k_h| < (J_u/l_u + m_u l_u)/(l_u/L_u)$ であるため、これを非線形最小二乗法の条件式として、伝達関数の未知パラメータ k_p, k_d, k_h, t_d を同定した。身長体重比で正規化したものを $\bar{k}_p, \bar{k}_d, \bar{k}_h$ とする。

3.2 急制動実験

急制動実験は 1 回 33 秒とし、計 10 回実施した。被験者条件および感覚遮断条件は周波数応答実験と同様とした。実験開始後 0~5 秒は静止状態とし、5~7 秒で加速して速度 1.0 m/s に到達させた後、8 秒まで等速前進を行った。8~9 秒には姿勢復帰を目的として 0.8 m/s まで減速し、その後等速前進を継続した。10~12.5 秒の間に試行ごとに異なる不規則なタイミングで急制動を加え 1.5 秒で、-0.4 m/s まで減速させた。最終的に初期位置まで後退させて静止させた。図 2 に速度波形を示す。急制動時の姿勢制御を考えると、上半身が前方に倒れる場合、頭部にかかる水平加速度を小さくする前庭感覚優位の姿勢制御と考えられる。したがって、前庭感覚の重みづけが大きい被験者ほど、急制動時の上半身の重心変位が大きくなると推測される。

2.1 節で示した手法を用いて、上半身の重心変位を算出した。各試行における急制動開始タイミングから、2.0 秒間(ブレーキ後の残留挙動を考慮した)データを抽出し、その区間における重心変位の最大値を求めた。それら 10 回分の平均を各被験者の身長で除し、正規化を行ったものを最大重心変位 \tilde{x}_{u_MAX} とした。3.1 節で求めた \bar{k}_h と、 \tilde{x}_{u_MAX} とを、ピアソンの相関係数を用いて、評価した。

4. 結果

各被験者の正規化した同定パラメータを表 1 に示す。また、頭部加速度抑制ゲインと急制動時の最大重心変位との、相関を図 3 に示す。

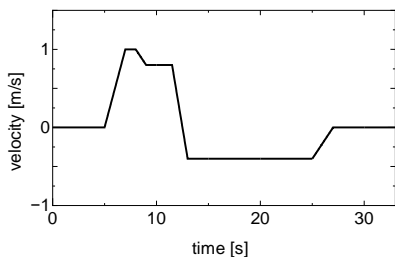


Fig.2 Velocity waveform during emergency braking experiment

Table 1 identified parameters

subject	\bar{k}_p	\bar{k}_d	\bar{k}_h	t_d
1	31.8	6.94	0.943	0.150
2	27.7	5.75	0.496	0.105
3	24.7	5.89	0.738	0.158
4	34.0	11.3	0.601	0.130
5	26.7	6.58	0.835	0.165
6	37.1	9.25	0.859	0.126

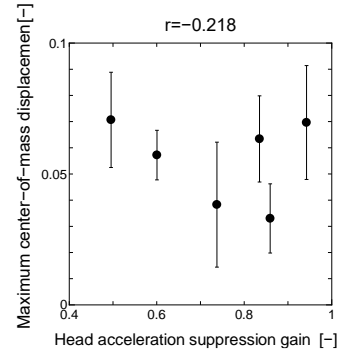


Fig.3 Correlation between \bar{k}_h and \tilde{x}_{u_MAX}

結果は、本研究の仮説と異なり、頭部加速度抑制ゲインと急制動時の上半身最大重心変位との間に、正の相関は見られなかった。原因として、頭部加速度抑制ゲインは周波数応答実験による比較的小さな連続的外乱の下で、線形的な頭部の制御特性を反映する指標であり、急制動実験における高加速度・非定常的な全身姿勢応答を評価できない可能性が考えられる。また、最大重心変位は一時的なピーク値であり、制御応答全体の特性を必ずしも代表しない。そのため、頭部加速度抑制に関わる制御特性との線形な関係が現れにくかった可能性が考えられる。

5. 結言

本研究では、座位バランスシステムにおける頭部加速度フィードバックゲインの特性解明を目的とし、急制動時の上半身最大重心変位との正の相関を仮定して検証した。その結果、両者の間に明確な相関は認められず、頭部加速度抑制ゲインが上半身の最大重心変位を直接規定する指標ではない可能性が示唆された。一方で、本ゲインは頭部の動的安定性に関わる制御特性を反映しており、前庭感覚の役割を定量的に評価する上で有用な指標であると考えられる。

文献

- (1) 大楯司 “矢状面水平揺動に対する座位の姿勢制御モデリング” ,2024 年度修士学位論文
- (2) 青木匠, 竹原昭一郎 “前方障害物の有無を考慮した自動車乗員の制動時における身体挙動の実験的検討” ,[No.23-18] 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2023
- (3) 村上博都, 園部元康. “フォースプレート計測に基づく座位の上半身質量中心推定” . Vol. 89, No. 917 : 日本機械学会論文集, 2023.
- (4) T, Insperger, J, Milton. “Delay and uncertainty in human balancing task” , 2021.