

遅延時間を含む人の立位バランスに対する制御系設計

Control system design for human standing including time delay

知能機械工学コース

動的デザイン研究室 1255017 常田 仁

1. 緒言

近年, Segway や電動キックボード, 電動スケートボードといった様々なパーソナルモビリティビークルが提案されており, 自動車とは違った個人でのスマートな移動手段として期待されている. Segway と類似した移動手段として, 支持面が水平な四輪台車上に立位状態の人を乗せた移動体が考えられる. この移動体では, 搭乗者が自らバランスを取る必要があるため, その動特性を考慮した制御を行う必要がある. しかし, これまでの研究でこのような移動体の制御は報告されていない. その理由として, 個人のバランスシステムが構築できないことが問題として挙げられる.

これらの課題に対して, これまで我々は四輪台車型の移動体に立位で搭乗する人を対象とした, 搭乗者の質量中心推定とバランスモデルの同定法を提案してきた. 質量中心位置の推定では, 台車に搭載したフォースプレートと加速度センサを組み合わせることでリアルタイムでの推定を可能にしている²⁾. バランスモデルの同定では, 0.05~1 Hz までの周波数帯域に限定されるが, 台車の移動速度に応じた平衡点の変化を考慮することで, 単一倒立振り子モデルに基づく安定なシステムを個人ごとに同定できることが確認されている³⁾.

本研究の目的は, 同定した立位バランスシステムに対して, 未知状態量を推定するオブザーバ設計を行う. 対象となるシステムでは, 質量中心位置, 質量中心速度, 質量中心位置の平衡点の3つが状態量となるが, このうち観測できるのは質量中心位置のみである. 状態フィードバック制御を行うためには, すべての状態量が既知でなければならないので, 未知状態量を推定するオブザーバを設計する必要がある.

制御対象である立位バランスシステムの特徴として, 状態量に 90~200 ms の遅延時間が存在している. そのため, 通常ルーエンバーガー型のオブザーバを適用することができない. そこで, 過去の研究よりランベルトの W 関数を用いた遅延システムに対するオブザーバ設計法⁴⁾を採用し, 遅延を含む人の立位バランスシステムに対するオブザーバ設計を行った.

2. 遅延時間を含むシステムに対するオブザーバ設計

2.1 システムの定義

本研究では, 同定した立位バランスモデルを使用して制御系設計を行う. 入力を台車速度 \dot{X}_s と台車加速度 \ddot{X}_s , 状態量を質量中心位置 x_b , 質量中心速度 \dot{x}_b , 質量中心の平衡点 \bar{x}_b , 出力を質量中心位置 x_b とした状態方程式と出力方程式は次のようになる.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_d\mathbf{x}(t - T_d) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

ここに, 各係数行列は次のようになる.

Table 1: Physical parameters for COM estimation and system identification.

Segment	Symbol	Male	Female
Body	m_b	0.978M	0.978M
	J_b	0.0425MHP	0.0441MHP
	l_b	0.531H	0.523H
Foot	l_f	0.015H	0.015H
	L_f	0.038H	0.038H

Table 2: Parameter values identified from experimental results (Number of subject=5)

Subject	K_p	K_d	T_d [s]	T_r	G_r
1	720.7	186.5	0.121	1.41	0.052
2	1050.2	289.4	0.141	1.30	0.047
3	794.8	277.9	0.157	1.38	0.046
4	640.1	217.2	0.165	1.63	0.053
5	711.7	212.5	0.143	1.96	0.064

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_b \\ \dot{x}_b \\ \bar{x}_b \end{bmatrix}, \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \dot{X}_s \\ \ddot{X}_s \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ m_b g l_b / (J_b + m_b l_b^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_d = \frac{l_b}{J_b + m_b l_b^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -K_p & -K_d & K_p \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -m_b l_b^2 / (J_b + m_b l_b^2) \\ -G_r / T_r & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0]$$

各パラメータの値は表1と表2に示す. また, これらのシステムは Matlab の c2d コマンドからサンプリング時間 0.01 秒で離散化している.

2.2 オブザーバ設計法

ここでは, 状態量に遅延時間を含むシステムに対するルー

エンバーガー型オブザーバの設計法を説明する．式(1)の状態方程式に対するオブザーバ方程式は次式となる．

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + A_d\hat{x}(t - T_d) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (2)$$

ここに、 \hat{x} は推定した状態量，行列 L はオブザーバゲインである．式(1)と式(2)の差を $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ とすると，

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) + A_d e(t - T_d) \quad (3)$$

式(3)の誤差方程式が収束するようにオブザーバゲイン L を設計すれば未知状態量を推定できることがわかる．しかし，この誤差方程式は右辺第二項に遅延時間を含むため，一般的なオブザーバ設計法を適用することができない．そこで本研究では，ランベルトの W 関数を利用した遅延フィードバック系の制御系設計法^{4),5)}を用いて，オブザーバゲイン L を設計する．式(3)の基本解を次の式で仮定する．

$$e(t) = e^{S_k t} c_k \quad (4)$$

ここに、 S_k は 3×3 行列で，対角成分に固有値を持つ対角行列または，固有値に重根を持つ場合はジョルダン標準形となる行列である． c_k は初期状態に依存する 3×1 の係数行列である．式(3)に式(4)を代入すると次の特性方程式が得られる．

$$T_d \{S_k - (A - LC)\} e^{S_k T_d} e^{-(A - LC)T_d} = T_d A_d e^{-(A - LC)T_d} \quad (5)$$

この特性方程式を行列 S_k について解くことが出来れば，式(3)の安定解析を行う事ができる．行列 S_k を求めるために，ランベルトの W 関数を利用すると，以下の2つの式が得られる．

$$D_k e^{D_k + (A - LC)T_d} = T_d A_d \quad (6)$$

$$S_k = \frac{1}{T_d} D_k + A - LC \quad (7)$$

ここに、 $D_k = W_k(T_d A_d Q_k)$ となり， W_k がランベルトの W 関数を表す．

D_k の初期値を $D_k = W_k(T_d A_d e^{-(A - LC)T_d})$ として，式(6)を D_k について解き，得られた D_k から式(7)を解くことで行列 S_k を得ることができる．得られた行列 S_k の固有値がすべて負であれば式(3)の誤差方程式は収束し，オブザーバから未知状態量を推定することができる．

本手法では，行列 S_k の最大固有値 λ_{\max} と任意の固有値 $\bar{\lambda}$ が次の方程式を満たすように，オブザーバゲイン L を反復計算より求める．

$$f(L) = |\lambda_{\max}(L) - \bar{\lambda}|^2 = 0 \quad (8)$$

3. 検証結果

任意の固有値 $\bar{\lambda}$ を $\bar{\lambda} = -2.5$ として設計したオブザーバによる推定結果を図1と図2に示す．図1が同定時の揺動に対する結果で，図2が最大加速度 $0.4 m/s^2$ のインパルス刺激を与えた時の推定結果である．黒線がモーションキャプチャ計測，赤線がオブザーバによる推定値を示している．

4. 結言

本研究では，状態量に遅延時間を含むシステムに対するオブザーバ設計を行った．設計したオブザーバを利用して，未知状態量をある程度推定出来ることが確認できた．今後は，同様の方法から，レギュレータの設計を行っていく．

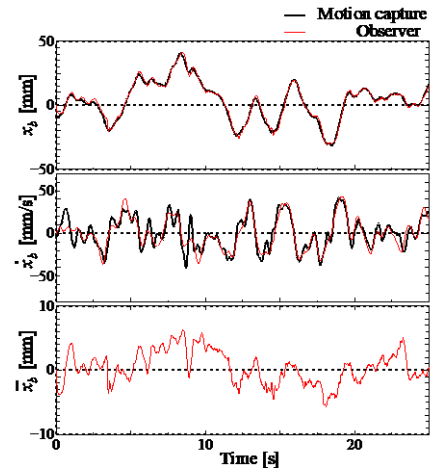


Fig. 5: Results of state variable estimation by observer system (Steady-state response) (Subject No.2, -:Motion capture, -:Observer)

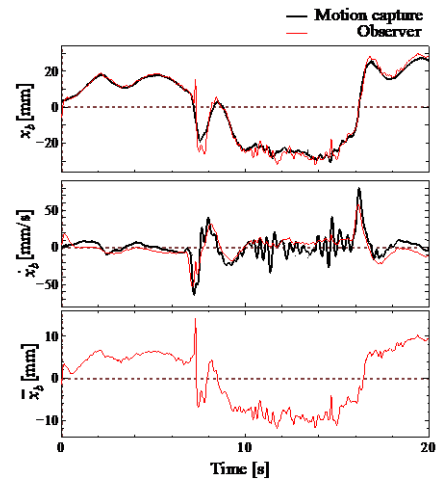


Fig. 5: Results of state variable estimation by observer system (Transient response) (Subject No.2, -:Motion capture, -:Observer)

文献

- (1) F. Olsson, K. Halvorsen, and A. Aberg, Neuromuscular controller models for quantifying standing balance in order people, A systematic review, IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 2021.
- (2) 園部 元康, 井上喜雄, フォースプレート計測に基づく立位時の矢状面質量中心推定 (推定誤差の発生メカニズムと推定精度の評価), 日本機械学会 論文集, Vol. 85, No. 877, 2019.
- (3) 成田 和樹, 園部 元康, フォースプレート計測に基づく支持面水平揺動時の矢状面バランスモデルリング, 第16回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, 2019.
- (4) S. Yi, S. Duan, P. Nelson, A. Ulsoy, The Lambert W Function Approach to Time Delay Systems and the Lambert W_DDE Toolbox, 10-th IFAC Workshop on Time Delay Systems, pp. 114-119, 2012.
- (5) Ulsoy and R. Gitik, On the Convergence of the Matrix Lambert W Approach to Solution of Systems of Delay differential Equations, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 142, 2020