(105) 計測・制御

外力に応じた立位姿勢の制御モデル：間欠制御を例として

A postural adjustment model of the standing posture in response to external force with intermittent controller

森陽一 † 山崎大河 † 忻欣 † 泉晋作 †
Yoichi Mori † Taiga Yamasaki † Xin Xin† Shinsaku Izumi†
† 岡山県立大学

1 はじめに

ヒトの立位姿勢が直立姿勢の近傍で安定に維持される仕組みは，状態空間の限られた領域のみで神経フィードバック制御が働く，間欠制御モデルによってよく説明できるとされている [1]．しかし，強風に抗するときのように，身体に外力が作用する場合，その姿勢は直立から傾いた姿勢に変化すると考えられる [2]．

そこで本研究では，外力に応じて目標平衡点を調節する機構を間欠制御モデル [1] に導入し，その影響を明らかにすることを目的とする．具体的には，外力に合わせて，足関節トルクが最小になるような平衡点を選択する機構を導入する．シミュレーションにより，目標平衡点の調節機構を持つモデルは，そうでないモデルよりも大きな外力に耐えられることを示す．

2 モデル

ヒトのほぼ直立した立位姿勢において，その身体の矢状面内での運動を単一リンクの倒立振子によりモデル化する (図 1)．さらにその重心に一定外力が加わる状況を考える．

図 1 のモデルの運動方程式は次式で表される．

$$I\ddot{\theta} = mgh\sin\theta + T + \tau_e + \tau_n \tag{1}$$

ここで I は足関節周りの身体の慣性モーメント，θ は前後方向の身体の傾斜角，g は重力加速度，m は体重，h は足関節から身体の重心までの距離，T は足関節周りの筋トルク，τ_e は外力トルク，τ_n は種々のノイズの影響によって生じるノイズトルクを表す．

外力トルク τ_e は，

$$\tau_e = F_x h\cos\theta + F_y h\sin\theta \tag{2}$$

とし，F_x，F_y はそれぞれ水平方向，鉛直方向の外力を表す．ノイズトルクは $\tau_n = \rho\xi$ とし，ρ はノイズの強度，ξ は白色ガウスノイズ（平均 0，標準偏差 1）を表す．筋トルク T は，

$$T = \tau_p + \tau_a \tag{3}$$

とする．ここで，τ_p は筋のもつ機械的なインピーダンス特性によって生じる受動トルク，τ_a は神経フィードバックを介して発生される能動トルクを表す．受動トルク τ_p は，$\tau_p = -K(\theta-\bar{\theta}) - B\dot{\theta}$ とする．ここで，K

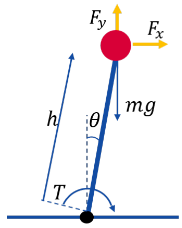

図 1: 立位姿勢の倒立振子モデル

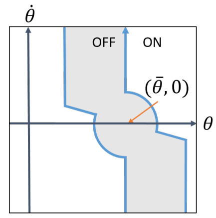

図 2: 能動トルクの切替条件

と B はそれぞれ弾性係数と粘性係数，$\dot{\theta}$ は傾斜角速度，$\bar{\theta}$ は目標傾斜角を表す．能動トルク τ_a は，次式とする．

$$\tau_a = -f_P(\theta_\Delta) - f_D(\dot{\theta}_\Delta) = \begin{cases} 0 & \text{if } (\theta_\Delta, \dot{\theta}_\Delta) \in S_{\text{off}} \\ -P(\theta_\Delta - \bar{\theta}) - D\dot{\theta}_\Delta & \text{otherwise} \end{cases} \tag{4}$$

$$S_{\text{off}} = \{(\theta_\Delta, \dot{\theta}_\Delta) | \left(\text{式 (6)} \wedge \text{式 (7)}\right) \vee \text{式 (8)}\} \tag{5}$$

$$(\theta_\Delta - \bar{\theta})(\dot{\theta}_\Delta - a(\theta_\Delta - \bar{\theta})) < 0 \tag{6}$$

$$|\theta_\Delta - \bar{\theta}| < d \tag{7}$$

$$((\theta_\Delta - \bar{\theta}_\Delta))^2 + \dot{\theta}_\Delta^2) < r^2 \tag{8}$$

ここで，Δ は，角度や角速度の変化が神経フィードバックによって関節トルクに反映されるまでにかかる遅れである．$\theta_\Delta = \theta(t-\Delta)$，$\dot{\theta}_\Delta = \dot{\theta}(t-\Delta)$ は，遅れを含む角度，角速度である．P と D は，それぞれ比例ゲインと微分ゲインである．a，r，d は，能動トルクのオンとオフの切替条件を決めるための定数である．切替条件のオン領域 (白色) とオフ領域 (灰色) の様子を図 2 に示す．

本研究では，外力に応じて $T=0$，$\tau_n=0$ が成り立つような平衡点 $(\theta, \dot{\theta}, T) = (\bar{\theta}, 0, 0)$ が目標平衡点として選ばれるものとする．このような目標傾斜角 $\bar{\theta}$ は，

$$\bar{\theta} = \text{asin}\left(-\frac{\tau_e}{mgh}\right) \tag{9}$$

と導出される．以上をまとめると，運動方程式は

$$I\ddot{\theta} = mgh\sin\theta - K(\theta-\bar{\theta}) - B\dot{\theta} - f_P(\theta_\Delta) - f_D(\dot{\theta}_\Delta) + \tau_e + \rho\xi \tag{10}$$

のように表される．

3　結果

シミュレーションでは，式 (10) を確率微分方程式とみなし，そのオイラー近似を用いて数値積分を行った．数値積分の方法とパラメータの設定は文献 [1] をもとにした（概要を付録に示す）．

結果の一例として，階段状に大きくなる外力に対する提案モデルと従来モデル [1] の応答の比較結果を図 3 に示す．いずれの場合にも $F_y = 0$ とした．図 3 は 10 回分の傾斜角 (実線) と目標傾斜角 (破線) の時間波形を示している．

提案モデルでは，後方への外力に対して前傾した目標傾斜角 $\bar{\theta}$ が設定され，実際の傾斜角 θ もそれに従うように変化していることがわかる．最大外力に対する目標傾斜角および傾斜角は約 4 deg 程度に留まっていることがわかる．一方，従来モデルは後方への小さい外力に対して大きく後傾していることがわかる．この従来モデルでの 20 deg の傾斜は重心が約 34 cm 水平方向に移動することに相当するため，その姿勢を維持するのは困難である．

このことから提案モデルでは，従来モデルに比べより大きな外力に耐えられていることがわかる．

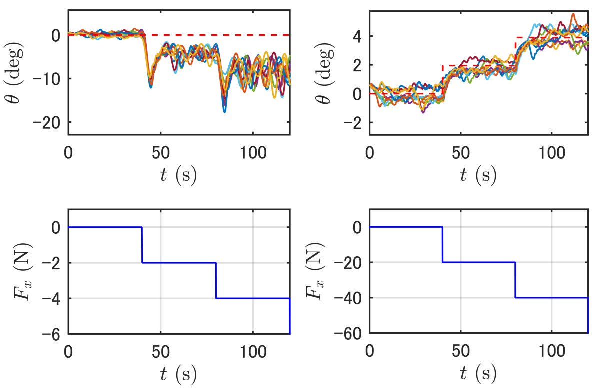

図 3: 外力への応答の比較（左列：従来モデル [1]，右列：提案モデル）

4　おわりに

立位姿勢に一定外力が加えられる状態に対し，外力適応できる機構をモデルに加え，間欠制御でシミュレーション結果を示した．

シミュレーションにより，目標平衡点の調節機構を持つモデルはそうでないモデルに比べてより大きな外力に耐えられる可能性を示せた．

ただし，本研究では簡単のため，外乱の大きさの推定は瞬時に行えるものとし，外乱に応じた適切な目標平衡点の設定は予め学習しているものと仮定した．これらの仮定の妥当性についての詳しい検討や，モデルの過渡応答特性を，ヒトの実験計測の結果と比較することなどが，今後の課題である．

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 16K00356 の助成を受けて行われました．

付録

式 (10) は常微分方程式の形式でつぎのように表せる [1]．

$$\dot{x}(t) = f(x(t), x(t-\Delta)) + N\sigma\xi(t) \tag{11}$$

ここで，$x(t) = [\theta(t), \dot{\theta}(t)]^\top$ を表し，$\xi(t)$ は白色ガウスノイズを表す． $N = [0,\ 1]^\top$ は，ノイズを 2 行目のみに加えるための行列を表す．$\sigma = \rho/I$ は対応する振幅である．

式 (11) の数値積分は，次式のようにオイラー法により離散化して行った [1]．

$$x_{n+1} = x_n + f(x_n, x_{n-k})\Delta t + N\sigma W_n\sqrt{\Delta t} \tag{12}$$

ここで，Δt は時間刻みを表す．W_n は離散型の白色ガウスノイズを表す．W_n は，平均 $E[W_n] = 0$，分散 $E[W_n W_m] = \sigma_{nm}$ の性質を持ち，時刻 $n\Delta t$ から $(n+1)\Delta t$ の間における $\xi(t)$ の積分，

$$W_n = \frac{1}{\sqrt{\Delta t}}\int_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} \xi(s)ds, \tag{13}$$

によって定義されるものとする．

モデルのパラメータ設定 [1] を表 1 に示す．$\Delta t = 0.001$ s と設定した．

表 1: パラメータの設定

記号	値	記号	値
m	60 kg	g	9.8 m/s^2
I	60 kgm^2	Δ	0.2 s
σ	0.2 Nm	r	0.004
h	1.0 m	a	-0.4 s^{-1}
		d	$\pi/60$ rad
B	4.0 Nm/rad	P	$0.25\times mgh$
K	471 Nm/rad	D	10 Nms/rad
F_x	$-60\sim0$ N	F_y	0 N

参考文献

[1] Y. Asai, Y. Tasaka, K. Nomura, T. Nomura, M. Casadio, and P. Morasso. A model of postural control in quiet standing: Robust compensation of delay-induct instability using intermittent activation of feedback control. *PLoS One*, Vol. 4, No. 7, p. e6169, 2009.

[2] 伊藤聡, 西垣智啓, 川崎晴久. 床反力に基づいた一定外力場での起立姿勢に対する制御法. 計測自動制御学会論文集, Vol. 38, No. 1, pp. 79–84, 2002.