

D7. 片足ロボットの爪先による屈伸動作安定化制御に関する研究

発表者：9ADGM007 中村 裕聡
 指導教員：大内 茂人 教授
 平田 弘志 准教授

Research on Stabilized Control for Stretching Movement by Tiptoe One-legged Robot

Abstract: In this paper, we report the stabilized control of stretching movement by one-legged robot. One-legged robot is stretching movement that is state of standing on tiptoe, experiment from the virtual pendulum with varying length and weight to take the center of gravity. Then, postural stabilization is designed using effective VSS adaptive control for parameter variations. In addition, we suggest a control system to suppress the movement of the projected center of gravity as a reference point for stability evaluation.

1. はじめに

2足歩行型ロボットは、現在までに工業用・エンターテインメントに至るまで多く存在する。しかし、爪先の付いたロボットの事例は少なく、人間型のロボットを想定する際に脚部による姿勢安定化が大きな課題となってくる。

本研究では、慣性変化が伴う運動に着目し、3関節片脚ロボットを使用することにより、爪先立ち姿勢のまま安定な屈伸動作を実施する。このとき、パラメータが一定の制御器を使用すると、脚部の慣性変化が姿勢安定化制御に影響を及ぼし、転倒してしまう場合がある。そこで、パラメータが変化する倒立振子を仮想し、未知パラメータ系に有効であるVSS適応制御の適用を試みる。

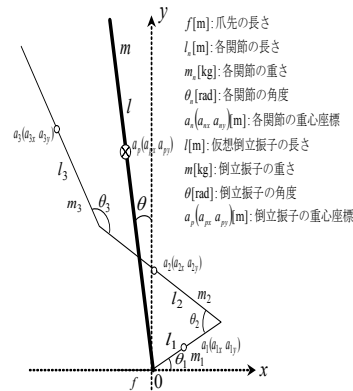


Fig.1 Model of one-legged robot

2. VSS 型適応制御系の設計

2.1 重心計算

慣性が変化する倒立振子を仮想し、第1関節に制御則を施すため、片脚ロボットの各リンクの重心から合成重心を算出する。

そこで、Fig.1 に示すような片脚ロボットの重心を通る長さ l の倒立振子を仮想する。本研究における片脚ロボットは、接地面積が小さく、安定領域が狭い為、重心位置を把握しておくことが重要となる。そこで、仮想倒立振子の重心 $a_p(a_{px}, a_{py})$ は各関節の合成重心より、以下のような式(1)で求めることができる。

$$a_{px} = \frac{\sum m_n a_{nx}}{\sum m_n}, \quad a_{py} = \frac{\sum m_n a_{ny}}{\sum m_n} \quad (1)$$

また、仮想倒立振子の重心までの長さは次式である。

$$a_p = \sqrt{a_{px}^2 + a_{py}^2} \quad (2)$$

2.2 仮想倒立振子のモデル化

ラグランジュ関数を用いて、仮想倒立振子のモデル化を行う。ラグランジュアン L は

$$L = \frac{1}{2} m a_p^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 - m g a_p \cos \theta \quad (3)$$

となり、関節トルクを τ_r とすると次式を得られる。

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = m a_p^2 \dot{\theta} + J \dot{\theta}, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = (m a_p^2 + I) \ddot{\theta} \quad (4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = m g a_p \sin \theta \quad (5)$$

$$(m a_p^2 + I) \ddot{\theta} + B \dot{\theta} - m g a_p \sin \theta = \tau_r K_{iv} e \quad \because I = \frac{1}{12} m l^2 \quad (6)$$

ここで第1関節部分の粘性摩擦係数 B を考慮し、仮想倒立振子の運動方程式を求めると、以下ようになる。

$$J \ddot{\theta} + B \dot{\theta} - m a_p g \sin \theta = \tau_r K_{iv} \gamma e \quad (7)$$

$$\because J = I + m a_p^2 + \gamma^2 J_m, \quad B = B_i + \gamma^2 B_m$$

ただし、 J_m はモータ軸慣性モーメント、 B_i は負荷軸粘性摩擦、 B_m はモータ軸粘性摩擦、 m は仮想倒立振子の重さ、 L は仮想倒立振子の長さ、 τ_r はトルク定数、 K_{iv} は増幅器変換定数、 γ はギア比とする。

2.3 重心投影点の移動変位を抑える VSS 適応制御

重心投影点を VSS 適応制御系に組み込み、重心投影点の移動変位を抑えるような VSS 適応制御系を設計し、仮想倒立振子への適用を試みる。

さて、Fig.2 は仮想倒立振子における重心投影点の移動変位を表したものである。振子の y 座標からの初期角度を θ_0 としたときの重心座標を $G_0(G_{0x}, G_{0y})$ とする。また、片脚ロボットが屈伸動作を開始時の振子の角度を θ とし、そのときの重心座標を $G(G_x, G_y)$ とすると重心投影点の移動変位 x は以下のように求められる。

$$x = G \sin \Delta \theta \quad \because \Delta \theta = \theta - \theta_0 \quad (8)$$

ここで、仮想倒立振子の θ を微小と考え線形化すると

$$x = G \Delta \theta \quad (9)$$

となる。

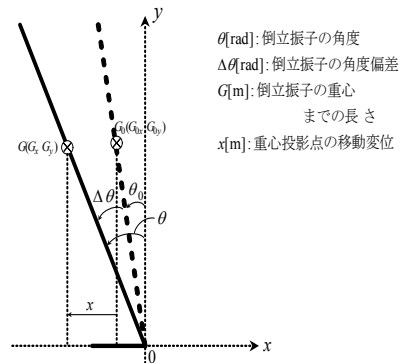


Fig.2 Center of gravity horizontal position

また、 $N = \tau_r K_{iv} \gamma$ とし、 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, w$ は、 w_n を入力外乱と

して式(7)を整理すると

$$\frac{\alpha_0}{G} \ddot{x} + \frac{\alpha_1}{G} \dot{x} + \frac{\alpha_2}{G} x = e + w \quad (10)$$

$$\therefore \dot{x} = \theta, \quad w = -\frac{D}{N} \text{sgn}(\dot{\theta}) + w_n$$

となる。切換関数を式(11)とすれば式(10)は式(12)となる。

$$s_c = \dot{x} + cx \quad (11)$$

$$Y^T a + Hs_c = e + w \quad \therefore H = \alpha_0 / G \quad (12)$$

ただし、計測ベクトル Y とパラメータベクトル a は

$$\begin{cases} Y^T = [-c\dot{x} & \dot{x} & x] \\ a^T = [H & \alpha_1/G & \alpha_2/G] \end{cases} \quad (13)$$

とし、制御入力を式(14)、適応則を式(15)とする。

$$e = Y^T \hat{a} - k \text{sgn}(s_c) \quad (14)$$

$$\dot{\hat{a}} = -\Gamma^{-1} Y s_c \quad (15)$$

ここで、VSS ゲイン k は正の定数で、適応ゲイン Γ は正定行列である。正值関数 V を

$$V(t) = \frac{1}{2} [s_c H s_c + \tilde{a}^T \Gamma \tilde{a}] \quad \therefore \tilde{a} = a - \hat{a} \quad (16)$$

とすれば、その時間微分は

$$\dot{V}(t) = -(k |s_c| - s_c w) \leq -|s_c| (k - |w|) \leq 0 \quad (17)$$

となるので、これにより、 $|w|$ より大きな k を選ぶことで、 $s_c \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ のとき、振子の安定性、パラメータ推定がリアプノフの安定理論により保証される。

3. VSS 型適応制御実機実験

前節の VSS 適応制御系の設計により、片脚ロボットの实機実験による結果について説明する。ここで、各リンクのパラメータを Table.1, VSS 適応制御の諸条件を Table.2 に示す。

Table.1 Link parameter

	第1関節	第2関節	第3関節
長さ [m]	0.20	0.40	0.38
質量 [kg]	1.05	0.64	1.03
重心位置 [m]	0.115	0.21	0.2947

Table.2 VSS adaptive Control simulation conditions

サンプリング周期	$T = 0.002[\text{sec}]$
VSS ゲイン	$k = 2.0$
VSS 適応ゲイン	$\Gamma = \text{diag}(10,10,10)$
切換関数の定数	$c = 10.0$
境界層	$\delta = 0.15$

動作手順としては、片脚ロボットは初期姿勢の状態から 10 秒後に屈伸動作を開始する。今回は、屈伸動作として第 2・第 3 関節に正弦波外乱を与え、慣性変化が伴う倒立振子を仮想し、その動きに追従するように第 1 関節が制御則を施す。また、従来法である VSS 適応制御と重心投影点の移動変位を抑える VSS 適応制御の 2 つの条件で実験を行う。

Fig.3 は、従来法である角度偏差を VSS 適応制御系に組み込んだときの結果である。

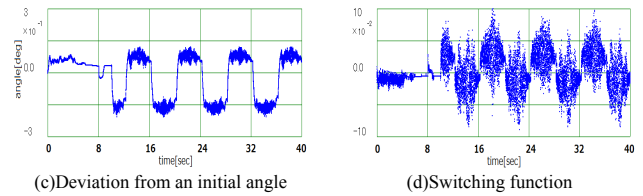
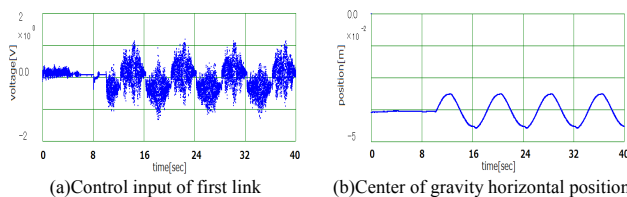


Fig.3 VSS adaptive control with the deviation of angle

このときの、仮想倒立振子の重視投影点の移動変位は、(b)から $-3.125 [\text{cm}] \sim -4.375 [\text{cm}]$ であった。爪先の長さは $5.0 [\text{cm}]$ であるので、重心投影点は慣性変化が伴っても爪先上に存在し、転倒することなく屈伸動作を行えている。しかし、片脚ロボットの初期位置によっては、慣性変化に伴い転倒してしまう危険がある。そこで、重心投影点の移動変位を抑える、よりロバストな制御が必要となってくる。

そこで、重心投影点の移動変位を抑える VSS 適応制御系を提案する。Fig.4 はそのときの結果である。

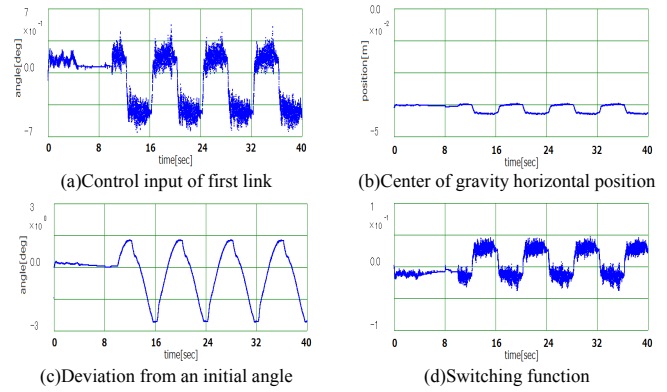


Fig.4 VSS adaptive control with the projection cent

このときの、仮想倒立振子の重心投影点の移動変位は、(b)から $-3.750 [\text{cm}] \sim -4.125 [\text{cm}]$ であり、Fig.3 の (b) と比較しても移動変位を抑えることができ、仮想倒立振子が慣性変化を伴っても転倒することなく屈伸動作を行うことができています。

4. まとめ

本研究では、片脚ロボットにおいて慣性変化が伴う倒立振子を仮想し、VSS 適応制御系の設計について一手法を提案した。2 つの条件で実験を行ったが、重心投影点の移動変位を抑える VSS 適応制御系を設計することで、外乱に対し、よりロバスト性が向上した。

今後としては、荷重変化を考慮したときの VSS 適応制御系の適用や、逆運動学から求めた軌道パターンとの比較を検討する。

業績

中村,大内,平田:”片脚ロボットの爪先立ちによる屈伸動作安定化制御に関する研究”,第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演概要集 2L1-4(2010)

参考文献

- 1)木和,田崎,柴田:”二足歩行ロボットの重心加速度制御による踏み出し動作”,電学誌 D 124.10,pp1017-1022 (2004)
- 2)但馬,菅:”1脚ロボットによる跳躍動作の実現”,日本ロボット学会誌, Vol.25 No6 pp860-866 (2007)
- 3)平田,高部,穴吹,大内:”セルフチューニング制御器を組み込んだ回転型倒立振子の VSS ロバスト適応制御”,電学誌 C 128,4,pp618-627(2008)