

1 自由度回転式カウンタウェイト駆動ロボットアームの運動制御

○石根 亮介 (九州大学), 河村 晃宏 (九州大学), 倉爪 亮 (九州大学), 川村 貞夫 (立命館大学)

Motion Control for 1 D.O.F. Robotic Arm with Rotational Counterweight

○Ryosuke Ishine (Kyushu University), Akihiro Kawamura (Kyushu University), Ryo Kurazume (Kyushu University), and Sadao Kawamura (Ritsumeikan University)

Abstract : This paper proposes a new control method for a robotic arm with a rotational counterweight. This robotic arm is actuated by gravitational and inertia torque generated by the counterweight. Although a control method of joint angles for a robotic arm with a rotational counterweight has been proposed so far, the stability analysis of this control method has not been performed. The control method proposed in this paper enables to analyze and verify the convergence of the dynamics of the system theoretically. We conduct numerical simulations for position control and verify the stability of the dynamics of the robotic arm with a rotational counterweight.

1. 緒言

従来のロボットアームは、剛性の高い材料を用いることによって運動の精度の向上を実現している。しかし、同時にロボット全体の重量が増加してしまうため、減速比の高いモータを関節に搭載する必要がある。それにより、関節部分の摩擦が増加し、バックドライバビリティが低下するという問題が生じる。

この問題に対して、我々はこれまでに、カウンタウェイトがリンクに対して回転可能なロボットアームを提案している [1]。本ロボットはカウンタウェイトを駆動させることによって、重力補償を行うだけでなく、アームを駆動するためのトルクを生み出すことができる。これにより、関節部分に駆動モータを搭載する必要がなくなるため、モータのギアによる摩擦が大幅に減少し、高いバックドライバビリティを実現することができる。

これまでに、本ロボットの角度制御が可能な制御則が提案されている [1] が、システム全体の安定性については議論されていない。そこで本稿では、角度制御が可能であり、且つ解析的に安定性の証明が可能な制御則を提案する。また、動力学数値シミュレーションを行い、提案手法の有効性の確認を行う。

2. 回転式カウンタウェイト駆動ロボットアーム

本研究で用いる 1 自由度回転式カウンタウェイト駆動ロボットアームのモデルを Fig.1 に示す。リンクにカウンタウェイトが取り付けられており、カウンタウェイトはリンクに対して回転可能となっている。また、リンクは土台部分と回転自由の関節で接続されている。そのため、リンク

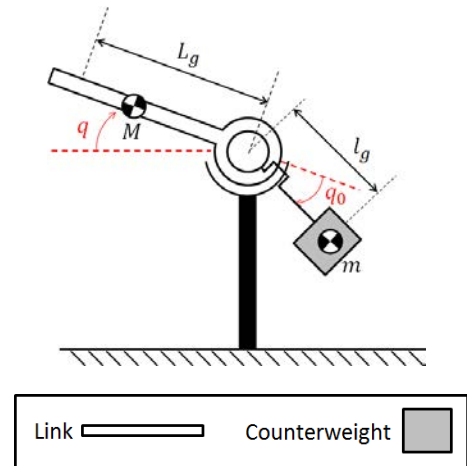


Fig. 1: The model of a robotic arm with a rotational counterweight.

はカウンタウェイトに働く慣性力と重力のみによって駆動する。

2.1 運動方程式

Fig.1 に示すように、水平面に対するリンクの角度を q 、リンクに対するカウンタウェイトの角度を q_0 とする。また、リンクの質量、関節から重心までの距離をそれぞれ M , L_g とし、カウンタウェイトの質量、関節から重心までの距離をそれぞれ m , l_g とする。このとき、ロボットアームの運動方程式は次式で表される。

$$\mathbf{H} \begin{pmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{q}_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} g_q \\ g_{q_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau \end{pmatrix}. \quad (1)$$

ここで、

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} ML_g^2 + ml_g^2 & ml_g^2 \\ ml_g^2 & ml_g^2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$g_q = MgL_g \cos q - mgl_g \cos(q + q_0), \quad (3)$$

$$g_{q_0} = -mgl_g \cos(q + q_0), \quad (4)$$

である。\$\mathbf{H}\$ は慣性行列を表し、\$g_q\$ と \$g_{q_0}\$ はそれぞれリンク、カウンタウエイトの重力項である。また、\$\tau\$ はリンク上でカウンタウエイトを回転運動させるための入力トルクを表している。このように、本ロボットは全体では2自由度であるのに対し、入力\$\tau\$の1つだけの劣駆動系となっている。

3. 制御則

これまでに、本ロボットに対して角度制御が可能な制御則が提案されているが[1]、システム全体の安定性については議論されていない。そこで、角度制御が可能であり、且つ安定性の証明が可能な、新たな制御則を提案する。提案する制御則を以下に示す。

$$\tau = -K_p(q_d - q) + K_{v1}\dot{q} - K_{v2}\dot{q}_0 - MgL_g \cos q - \tau_c, \quad (5)$$

$$\tau_c = \frac{(1+k)\dot{q}_0}{\dot{q}_0^2 + \delta} (\dot{q} + \dot{q}_0) \tau_d, \quad (6)$$

$$\tau_d = -K_p(q_d - q) + K_{v1}\dot{q} - MgL_g \cos q + mgl_g \cos(q + q_0), \quad (7)$$

$$\dot{k} = \begin{cases} \frac{\eta}{k} \left(\frac{k\dot{q}_0^2 - \delta}{\dot{q}_0^2 + \delta} \right) (\dot{q} + \dot{q}_0) \tau_d & (k \neq 0), \\ \delta & (k = 0), \end{cases} \quad (8)$$

\$K_p\$, \$K_{v1}\$, \$K_{v2}\$, \$\delta\$ 及び \$\eta\$ はいずれも正の定数である。また、\$q_d\$ はリンクの目標角度を表している。

4. 安定性解析

まず、次のような出力ベクトルを定義する。

$$\dot{\mathbf{\Lambda}} = (\dot{q}, \dot{q}_0)^T. \quad (9)$$

(1) の両辺に左から \$\dot{\mathbf{\Lambda}}^T\$ を掛けると、次の式が得られる。

$$\dot{\mathbf{\Lambda}}^T \mathbf{H} \ddot{\mathbf{\Lambda}} - \dot{\mathbf{\Lambda}}^T \begin{pmatrix} -g_q \\ -g_{q_0} + \tau \end{pmatrix} = 0. \quad (10)$$

ここで、(10) の第一項については以下のように計算できる。

$$\dot{\mathbf{\Lambda}}^T \mathbf{H} \ddot{\mathbf{\Lambda}} = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} ML_g^2 \dot{q}^2 + \frac{1}{2} ml_g^2 (\dot{q} + \dot{q}_0)^2 \right] \quad (11)$$

また、(10) の第二項については次のように計算できる。

$$\begin{aligned} & -\dot{\mathbf{\Lambda}}^T \begin{pmatrix} -g_q \\ -g_{q_0} + \tau \end{pmatrix} \\ &= -(\dot{q} + \dot{q}_0) \tau_d + K_{v2} \dot{q}_0^2 + \dot{q}_0 \tau_c \\ &+ \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} K_p (q_d - q)^2 \right] + K_{v1} \dot{q}^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Table. 1: Physical parameter

| | | |
|---------------------------------|---------|-----------|
| Link length | \$L\$ | 0.20 [m] |
| Counterweight length | \$l\$ | 0.15 [m] |
| Center of mass of link | \$L_g\$ | 0.09 [m] |
| Center of mass of counterweight | \$l_g\$ | 0.07 [m] |
| Link mass | \$M\$ | 0.20 [kg] |
| Counterweight mass | \$l\$ | 0.40 [kg] |

ここで、(8) を変形すると、

$$\frac{k\dot{q}_0^2}{\dot{q}_0^2 + \delta} (\dot{q} + \dot{q}_0) \tau_d = \frac{k\dot{k}}{\eta} + \frac{\delta}{\dot{q}_0^2 + \delta} (\dot{q} + \dot{q}_0) \tau_d, \quad (13)$$

となるので、次の関係式が得られる。

$$\dot{q}_0 \tau_c = \frac{d}{dt} \left[\frac{k^2}{2\eta} \right] + (\dot{q} + \dot{q}_0) \tau_d. \quad (14)$$

この式を(12)に代入すると、次の式が成立する。

$$\begin{aligned} & -\dot{\mathbf{\Lambda}}^T \begin{pmatrix} -g_q \\ -g_{q_0} + \tau \end{pmatrix} \\ &= K_{v1} \dot{q}^2 + K_{v2} \dot{q}_0^2 + \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} K_p (q_d - q)^2 + \frac{k^2}{2\eta} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

よって、(11) と (15) をまとめると、

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} ML_g^2 \dot{q}^2 + \frac{1}{2} ml_g^2 (\dot{q} + \dot{q}_0)^2 + \frac{K_p}{2} (q_d - q)^2 + \frac{k^2}{2\eta} \right] \\ &= -K_{v1} \dot{q}^2 - K_{v2} \dot{q}_0^2, \end{aligned} \quad (16)$$

が成立する。ここで、

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} ML_g^2 \dot{q}^2 + \frac{1}{2} ml_g^2 (\dot{q} + \dot{q}_0)^2 \\ &+ \frac{K_p}{2} (q_d - q)^2 + \frac{k^2}{2\eta} \end{aligned} \quad (17)$$

で表される非負の関数 \$V\$ を定義すると、

$$\dot{V} = -K_{v1} \dot{q}^2 - K_{v2} \dot{q}_0^2 \leq 0 \quad (18)$$

が成立する。(17) 及び (18) から \$V\$ は単調減少し、\$t \to \infty\$ のとき \$V \to 0\$ が示される。\$V \to 0\$ のとき \$\dot{\mathbf{\Lambda}} \to \mathbf{0}\$, \$q \to q_d\$ となることから、収束点においてリンクが目標角度に収束して静止することが示される。ただし、\$k = 0\$ 近傍の関数 \$V\$ の微分可能性については、さらなる議論が必要である。

5. シミュレーション

提案する制御則を用いて、数値シミュレーションを行う。ロボットの物理パラメータ及び制御則中のパラメータはそれぞれ Table 1, 2 に示す値とする。また、ロボットの初期状態を Table 3 に示す。これは Fig.2(A) のように、リンクとカウンタウエイトがともに鉛直下向きで静止した状

Table. 2: Controller parameter

| | |
|----------|---------|
| K_p | 0.50 |
| K_{v1} | 0.50 |
| K_{v2} | 0.30 |
| δ | 0.005 |
| η | 0.00001 |

Table. 3: Initial condition

| | |
|-------------|--------------|
| \dot{q} | 0.00 [rad/s] |
| \dot{q}_0 | 0.00 [rad/s] |
| q | -1.57 [rad] |
| q_0 | 3.14 [rad] |

態を示す。この初期状態から、(B), (C) のような中間状態を経て、(D) の目標状態へと変化する。

リンクの目標角度を $q_d = 0.52 \text{ rad}$ (30°) としたときの、 q , q_0 , V の値の時間変化をそれぞれ Fig.3, 4, 5 に示す。これらのグラフから、リンク角度 q は目標角度に、 V は 0 に、それぞれ収束していることが確認できる。また、カウンタウエイトの角度 q_0 は

$$MgL_g \cos q - mgl_g \cos(q + q_0) = 0 \quad (19)$$

を満たす角度 (0.46 rad) に収束している。

6. 結言

本稿では、回転式カウンタウエイト駆動ロボットアームに対して新たな制御則を提案し、これを用いたときのシステム全体の安定性の証明を行った。さらに、数値シミュレーションを行い、アームが目標角度に収束することを確認した。今後は実機での動作実験を行う予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金若手研究(B) (課題研究 16K18053) の交付により行われたものである。

参考文献

- [1] A. Kawamura, B. Gang, M. Uemura and S. Kawamura, "Mechanism and Control of Robotic Arm using Rotational Counterweights," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp. 2716-2721, 2015.

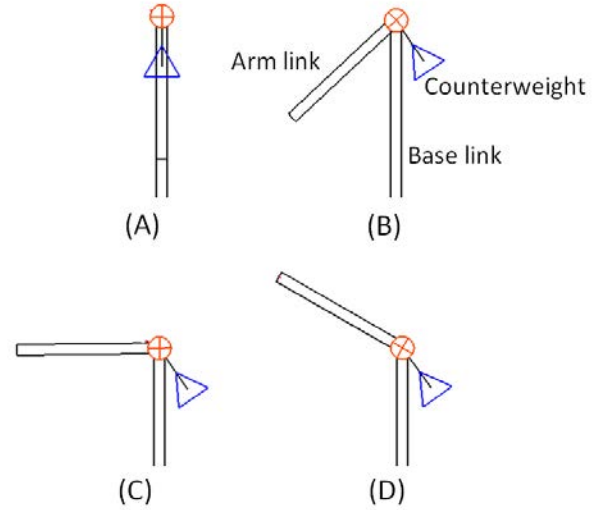


Fig. 2: (A) Initial state of simulations. (B), (C) Middle state of simulations. (D) Desired states of simulations.

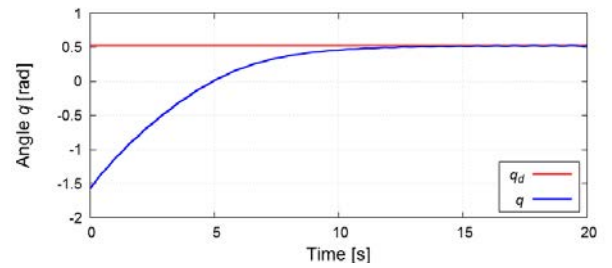


Fig. 3: The transient response of q when desired angle is $q_d = 0.52 \text{ [rad]}$.

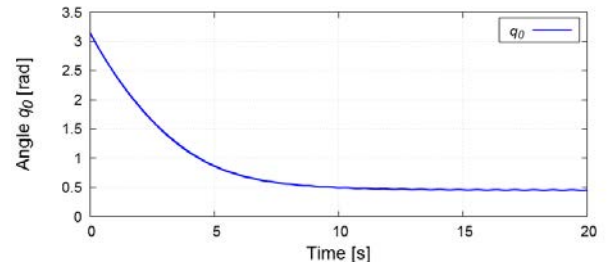


Fig. 4: The transient response of q_0 when desired angle is $q_d = 0.52 \text{ [rad]}$.

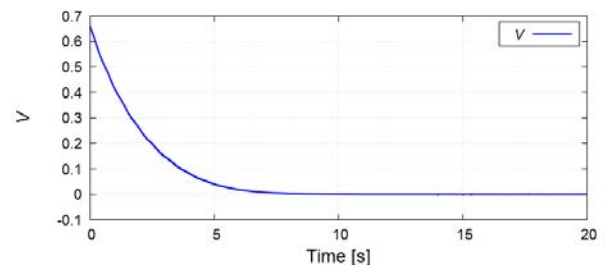


Fig. 5: The transient response of V when desired angle is $q_d = 0.52 \text{ [rad]}$.