

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：17102  
研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2016～2017  
課題番号：16K18053  
研究課題名(和文) カウンタウエイト駆動によるZero Friction Armの実現

研究課題名(英文) Zero Friction Arm driven by Counterweights

## 研究代表者

河村 晃宏 (Kawamura, Akihiro)

九州大学・システム情報科学研究所・助教

研究者番号：60706555

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高いバックドライバビリティ能力を有し、ロボットが人や周囲環境と衝突してもそれらを傷つけることのない、新たなロボットの駆動方式を開発する。本方式では、従来はバランス保持に用いられるカウンタウエイトを駆動源として利用する。これにより、関節部にモータや減速機が不要で、機械的に高いバックドライバビリティを有するロボットアームが実現可能となる。しかし同時に、ウエイトによる総重量の増加や、劣駆動系に起因する制御の困難さが問題となる。これらの問題に対して、モータをウエイトとして活用する機構設計及び、動的安定性を満たす運動制御手法の開発を行った。本成果は国内外の学会において発表を行った。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to develop a robotic arm with movable counterweights. In this system, the counterweight works as not only gravity compensation but also actuation. The gravitational equilibrium angle is shifted by rotating the counterweight on the link. Then, the robot is driven to realize the angle. Namely, the arm is actuated by gravitational and inertia torque of the counterweights. Then, the friction effect caused by reduction gears is drastically reduced. Thereby, this system has high backdrivability. However, there exists a difficulty of stable control of the arm due to an underactuated system. In addition, the total weight of the arm normally increase because of counterweights. Therefore, in this research, a novel control method that realizes stable motion control of the arm, and a mechanical design to utilize the weights of motors as counterweights are proposed. The results of them have been presented in domestic and international conferences.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボットアーム カウンタウエイト 劣駆動 運動制御

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットアームはこれまで、工場の生産ライン等の整備された環境で利用されており、高精度化・高速化のため、高剛性化が図られてきた。しかし、ロボットアームが工場などで人と隣り合って作業をする状況や、日常環境など周囲が刻々と変化する状況では、ロボットとの接触により人や環境を傷つけるリスクや、不意の衝突でロボット自身が故障するリスクをできるだけ少なくする必要がある。この問題に対し、バネを用いて機構的に関節の柔軟性を高める研究や力センサやトルクセンサを用いて制御的に柔軟性を実現する研究などが行われている。しかしこれらの手法では、関節部に減速比の高い減速器を用いたり、機構が複雑で摩擦の影響が大きくなり、バックドライバビリティが低下するなどの問題があった。また、機構的にバネを用いて重力補償を行う場合でも、アームの土台部には大きなモーメントが発生するため、重量が大きく堅牢な土台が必要であった。

### 2. 研究の目的

高いバックドライバビリティを機構的に実現するため、駆動可能なカウンタウェイトを用いたロボットアームの開発を行う。本方式のロボットアームは、ウェイトの位置を変えることで静的なバランスを制御し、アームを望みどおりに駆動するものである。すなわち、駆動モータは関節部ではなくリンク上に設置され、ウェイトの移動に用いられる。また関節部はベアリング等のみで構成され、モータや減速器が不要で摩擦の影響がないため、高いバックドライバビリティ性能を有する。更に、カウンタバランスにより重心位置がロボットの土台上に存在し、土台にかかるモーメントが小さくなるため、土台の小型化が実現できる。特に回転型の駆動方式は、移動型に比べ、可動範囲が広く、効率的にトルクを出力できることが分かっている。本研究では、本ロボットアームの安定な制御手法及び、ウェイトの慣性力を利用した効率的な制御手法・設計手法を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 機構設計

本研究対象となるカウンタウェイト駆動ロボットアームでは、カウンタウェイトを付加することで総重量が増加するという問題がある。従来の並進型カウンタウェイトでは、リンクの重量とカウンタウェイトの重量の静的な重力平衡のみを用いて駆動していたため、高速な運動のためにはリンクに対して数倍の重さのウェイトが必要であった。本研究では、回転型のカウンタウェイトをロボットアームに搭載することで、重力のみではなく、ウェイトの慣性力を積極的に活用し、カウンタウェイトの軽量化を図る。更に、駆動モータをウェイトとしても利用可能な設計にすることで、システム全体の軽量化を図る。

#### (2) 動的安定性を満たす運動制御

カウンタウェイト駆動ロボットアームでは、各関節に加え、カウンタウェイトを駆動する自由度が存在するため、基本的に劣駆動系となる。一般的に劣駆動系の制御は困難であり、特に、システム全体の動的安定性について議論されている研究は少ない。これまでもカウンタウェイト駆動ロボットアームの運動制御手法が提案されているが、動的安定性に関する議論は行われていない。そこで本研究では、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開発する。

### 4. 研究成果

#### (1) 機構設計

本研究では、図1のような2自由度回転型カウンタウェイト駆動ロボットアームの開発を行った。本ロボットの自由度構成を図2に示す。



図1 2自由度ロボットアーム

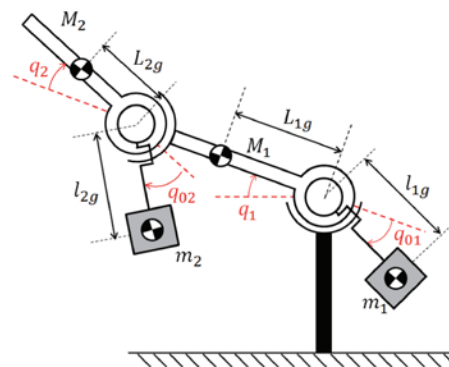


図2 2自由度アームのモデル

本ロボットでは、回転型のカウンタウェイトを採用しており、従来の並進型に比べ、ウェイトの慣性力を制御に利用できる。更に、バランス平衡時のアームとカウンタウェイトの相対角度に制限がなくなるため、アームの可動域も拡大するというメリットがある。

また本設計では、リンク上でカウンタウェイトを駆動させるためのモータをカウンタウェイトの一部として利用しており、アームの総重量を軽減することに成功した。更に軽量化を図るため、アーム部分は樹脂素材を用いて設計を行っている。

(2) 動的安定性を満たす運動制御

① 制御則

運動制御時のシステム全体の動的安定性について議論するため、ロボットアームの運動方程式を導出し、従来の角度制御手法と合わせて安定解析を行った。その結果、安定性を満足するための新たな制御手法を開発した。2自由度ロボットアームに対する制御則は煩雑な数式となるため、本報告では1自由度ロボットアームに対する制御則を記載する。

$$\begin{aligned} \tau &= -K_p(q_d - q) + K_{v1}\dot{q} - K_{v2}\dot{q}_0 \\ &\quad - MgL_g \cos q - \tau_c, \\ \tau_c &= \frac{(1+k)\dot{q}_0}{\dot{q}_0^2 + \delta} (\dot{q} + \dot{q}_0) \tau_d, \\ \tau_d &= -K_p(q_d - q) + K_{v1}\dot{q} \\ &\quad - MgL_g \cos q + mgl_g \cos(q + q_0) \end{aligned}$$

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

このとき、 $\tau$ はリンク上でカウンタウェイトを回転運動させるための入力トルク、 $K_p$ ,  $K_v$ ,  $K_{v2}$ ,  $\sigma$ ,  $\eta$ は正の定数、 $q_d$ 及び $q$ はリンクの目標角度と関節角度、 $q_0$ はカウンタウェイトのリンクに対する相対角度、 $M$ はリンクの質量、 $m$ はカウンタウェイトの質量、 $L_g$ ,  $l_g$ は関節から質量中心までの距離である。従来の制御入力に $\tau_c$ を付加することで、動的安定性を満たす制御入力を実現した。本制御入力は一種の適応制御となっており、 $k$ が適応的に変化することで動的に安定な運動を実現している。安定解析については、[学会発表]1の文献に詳説している。

② 動力学数値シミュレーション

提案する制御則の有効性を確認するため、動力学数値シミュレータを開発し、数値シミュレーションを行った。シミュレーションの様子を図3に示す。

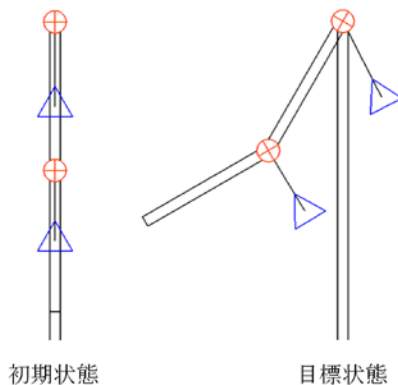


図3 数値シミュレーション

本シミュレータは、運動方程式を用いた動力学数値シミュレーションとなっており、実機

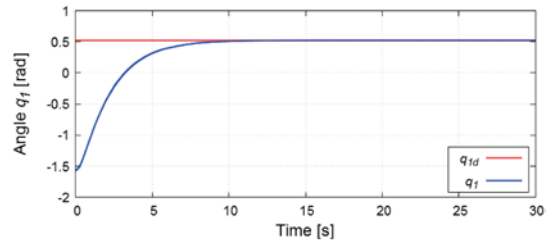


図4 第1関節角度データ

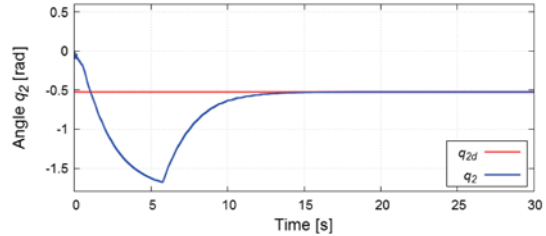


図5 第2関節角度データ

に近い動特性を実現している。このときの各関節角度の時系列データを図4、図5に示す。青線がアームの関節角度、赤線が目標角度を示している。これらの結果から、各関節角度が目標角度に収束していることが分かる。更にこのとき、カウンタウェイトの角度も一定値に収束している。上述した制御入力中では、カウンタウェイトの目標角度を陽に指定していない。それに関わらず、本手法では、自動的に平衡角に収束することが確認できた。通常平衡角の導出には、正確な値の算出が困難な物理パラメータを多く含むため、計算誤差が大きくなる。しかし、本手法を用いることで、カウンタウェイトの目標となる平衡角を指定する必要がなくなり、直接アームの目標角のみを入力することで、目標の運動を実現している。その際、安定解析と同様の収束性を各数値で確認した。

③ 実機実験

同様に4. 1で示した実機を用いた運動制御実験を行った。その結果、シミュレーション同様に目標角度に収束する結果が得られた。本成果は国際雑誌に投稿予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Ryosuke Ishine, Akihiro Kawamura, Ryo Kurazume, Motion Control for Robotic Arm with Rotational Counterweights, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2017), 2017. 12.

- ② 石根 亮介, 河村 晃宏, 倉爪 亮, 川村 貞夫, 1自由度旋回式カウンタウエイト駆動ロボットアームの運動制御, 第18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(SI2017), 2017.12.
- ③ Ryosuke Ishine, Akihiro Kawamura, Ryo Kurazume, Motion Control for Robotic Arm with Rotational Counterweights, The tenth Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPRI7), 2017.11.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等  
無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河村 晃宏 (Kawamura, Akihiro)  
九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・助教  
研究者番号: 60706555

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

### (4) 研究協力者

石根 亮介 (Ishine, Ryosuke)