

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560321

研究課題名(和文) 2関節同時駆動アームロボットの安全駆動型位置・力同時制御系

研究課題名(英文) Force position concurrency control method with safety-drive of bi-articular muscle driven arm robot

研究代表者

宮崎 敏昌 (Miyazaki, Toshimasa)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：90321413

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：2関節筋は、人間の四肢を駆動するための重要な筋肉である。四肢の筋肉は2対3筋として、6つの筋肉によって構成されている。2関節筋と2つの単関節筋からなるこの組み合わせは、FEMS(機能有効筋力)として定義されている。遊星歯車機構と、3つの回転モータを組み合わせた3入力2出力の機構を用いて、2関節筋をより正確に構成する方法を提案する。また、本研究は2関節を使ったロボットアームの制振位置制御及びロボットアームの先端力制御系についても提案した。最後に、アーム先端の位置ずれと重力を補償することができる2関節筋による位置力同時制御法を提案した。上記の有効性を実験を用いて確認した。

研究成果の概要(英文)：bi-articular muscle is an important muscles to drive the limbs of a human. Three antagonistic muscle pair is formed by six muscles. Combination of the two single-joint and bi-articular muscles, has been defined as FEMS (muscle function enabled). Combining a planetary gear mechanism, the rotary motor 3, using the 3-input 2-output, how to configure the bi-articular muscles have already been proposed. I proposed a position damping control of the robot arm was used the two joint robot arm. I proposed about the force control system of the robot arm. Finally, I have proposed a force position concurrency control method using bi-articular muscles can compensate the gravity and the positional deviation of the arm tip. I was confirmed by experiments effectiveness of the proposed system.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：2関節筋 遊星歯車機構 ロボットアーム

1 研究開始当初の背景

回転型アクチュエータを持つ産業用ロボットに関する学術的な研究については、各関節アクチュエータの回転角度や回転速度、トルクなどを所望の応答となるように部分最適化制御し、システム全体でのモーション制御性能を向上させる方向に向かっている。一方で、産業用ロボットは、製造行程における単純作業の担い手のみではなく、工場環境との調和や作業者との協調を必要とする複雑な作業への担い手へと進化を促されている現在、従来型の産業用ロボットでは人間や環境との協調動作に対しては、インピーダンス制御等の受動型の力依存制御系が主に利用されることとなる。その制御においては、移動状態における位置制御精度の確保は大変難しい。これは、力制御は位置制御と比べて、逆の特性を有しているためである。また、産業用ロボットでは、空間内を自由に位置決め可能な基本3軸、姿勢3軸の構造が主に用いられている。このような構造は、コストや構造力学の面から大変有用な構想であるが、一方で、人間等の生物が持つ力・位置の関係とは違った関係となっているため、人間などが容易に行える動作でも、ロボットにとっては大変複雑な動作（モーション）となる場合がある。このような場合に、従来のロボットでは協調動作が大変難しく、受動的な制御と能動的な動作を常に切り替えながら制御する必要があることから、その実現は大変困難であった。そこで、本研究では人間の筋骨格機構の特徴である2関節同時駆動システムを用いた、ロボットアームを用いて、力・位置同時制御方式の開発を行う。

2 研究の目的

人間や動物は、主に筋骨格機構によりモーションを行っており、筋骨格機構をもつ産業用（作業用）ロボットの開発には、現在の回転型アクチュエータを超える出力をもつアクチュエータの開発が必要である。そこで、筋骨格機構の特徴である2関節同時駆動方式を、従来の回転型アクチュエータを組み合わせることで実現する手法について、広く研究が進められている。本研究課題ではこの2関節同時駆動方式によって全く新しい動作が可能な産業用ロボットの制御システム構築を目指す。本研究で目指す動作（モーション）は、高精度軌跡制御・接触力減衰制御を核とする力と位置の同時制御による人間協調モーションである。目的とする位置と力の合成制御手法は、力制御と位置制御の役割を分担させて組み合わせることで達成する。基本的な制御系としては位置制御、力制御の2

つを持ち、これをモード変換システムを介すことで、3つのアクチュエータにその効力を伝達させる仕組みとしている。本研究課題では、2関節同時駆動機構において独特な位置制御及び力制御を開発し、より高精度化を実現する。このため、制御対象となるシステムの数学モデルを導出して、より容易に設計できるシステムを開発する。更に、各アクチュエータの正確で安全な駆動方法を持たせることによって、全体での安全性を確保する必要がある。位置モード、力モードの制御の内側に、マイナーループとして安全駆動ループを設ける。安全駆動ループは、ロボットの過負荷を防いで、ロボット自身が安全に動作できるようにする。以上の点をまとめ、本研究課題における目標を以下の様に定める。

- 2関節同時駆動型ロボットマニピュレータにおける位置・力同時制御の実現（理論検証及び実験検証）
- アクチュエータの3次元安全駆動方式の実現

3 研究の方法

平成23年度においては、2関節同時駆動型ロボットの実機製作と数学モデルの確立し、位置制御系のアルゴリズムを提案した。本研究では、遊星歯車機構を利用した2関節同時駆動型ロボットアームを製作した。2関節同時駆動ロボットには、各関節を駆動するアクチュエータに加えて、2関節に同時に動力を伝達するアクチュエータを追加している。初年度に製作したロボットは、2関節同時駆動機構の特性を確認するため、2リンクマニピュレータとし、ロボット先端が平面内を移動するモデルとした。制作したロボットを用いて、以下の内容を検討した。

- 2関節同時駆動機構を持つマニピュレータに対する位置の理論的制御手法確立
- 2関節同時駆動機構ロボットの製作と安全アクチュエータのためのモデルパラメータ取得方法確立

平成24年度においては、平成23年度までの研究成果を踏まえ、2リンクマニピュレータの先端位置制御を実現した。上で、先端力制御手法の確立と提案を行った。

- 2関節同時駆動機構を持つマニピュレータに対する平面内力制御手法の実証
- アクチュエータの3次元システムに対する安全駆動手法についての理論検証

平成 25 年度においては、平成 24 年度までの研究成果から、本研究の目的である「2 関節同時駆動機構を持つマニピュレータに対する 3 次元内位置・力の同時制御手法の実現」を目指した研究を行った。これまでに制作したロボットマニピュレータに回転軸を追加し、3 リンクマニピュレータとした。この機構を用いたシステムを構築し、先端の位置力同時制御に向けた実験を行った。力制御においては、ロボット先端に発生させるべき力の方向に応じて 3 つのアクチュエータが受け持つトルクを逆算することで、容易にトルク配分を決定できることが確認した。また、位置制御においては伸縮のためのトルク配分と旋回のためのトルク配分に分離する手法を確立し、冗長性をもつ関節へのトルク配分を容易にした。さらに、伸縮方向へは重力に対向する力制御を行い、旋回方向に位置制御を実現した位置力同時駆動法も実現した。最終的には 3 次元での位置力同時駆動方式への足掛りとなることができる。ロボット先端の位置力同時生後として、伸縮方向に重力補償制御を行いつつ屈伸動作する実験を行い、位置力同時制御の有効性を確認した。

4 研究成果

(1) 2 関節同時駆動アクチュエータを持つ実験装置

図 1 に実験で使用したロボットアームの外観を示す。図 2 には二関節筋を再現したロボットアームのモータからリンクまでの構成図を示す。二関節筋機構をロボットに再現するために、本研究では遊星歯車機構とモータを採用している。遊星歯車機構を用いて構成したロボットアームでは、筋肉が関節部に発生させるトルクをモータにより再現し、遊星歯車機構により二関節筋機構を実現する。

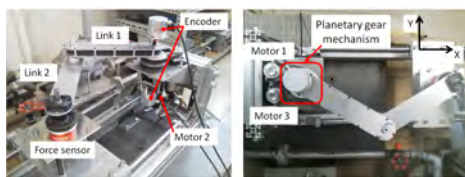


図 1: 二関節筋を再現したロボットアームの外観

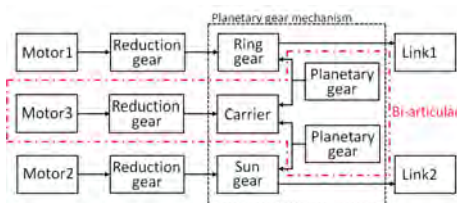


図 2: 二関節筋を再現したロボットアームでのモータからリンクの構成

(2) 二関節筋を再現したロボットアームの位置制御

二関節筋を再現した 2 リンクロボットアームでは 2 つの駆動関節に対してモータが 3 つ存在するため関節速度指令値のみではモータへの速度指令値が足りない。また 3 つのモータが遊星歯車機構を動作させてアームが駆動するため 3 つのモータ全てを任意の速度で駆動することはできず、その動作の組合わせを考慮する必要がある。また、従来のロボットアームと同様に振動抑圧制御が必要となる。

そこで 3 つモータと 2 つのリンクが図 3 に示すような多慣性系を構成しているとみなして二慣性共振系のモデルを二関節筋を再現したロボットアーム用のモデルへ拡張する。

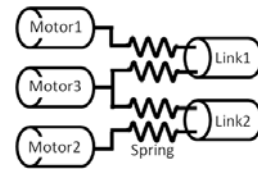


図 3: 二関節筋を反映させた多慣性系

図 4 に提案する二関節筋を再現したロボットアーム用に拡張した二慣性共振系のモデルを示す。

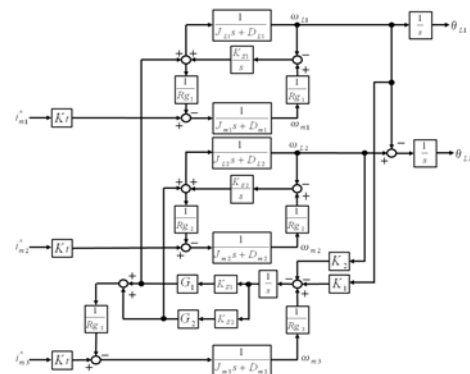


図 4: 位置制御のための振動モデル

二関節筋を再現したロボットアームの振動抑圧制御として関節速度制御と状態フィードバックにモータ速度制御を追加した制御方法を図 5 に提案する。

提案する振動抑圧制御を適用した位置制御と従来法による位置制御の実験結果の比較を図 6 に示す。図 6 より関節速度は提案する振動抑圧制御により過渡応答後には振動が発生しているがすぐに振動は抑圧され定常状態では第一関節の関節速度に発生する振動の振幅を最大で 88% 抑圧できることが実験により確認できた。モータ速度についても動作している全てのモータの速度に発生する振動が抑圧されていることが実験により確認できた。

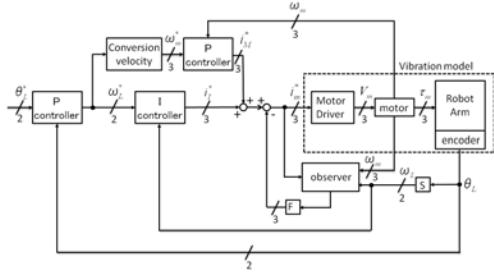


図 5: 二関節筋を再現したロボットアームの振動抑圧制御系

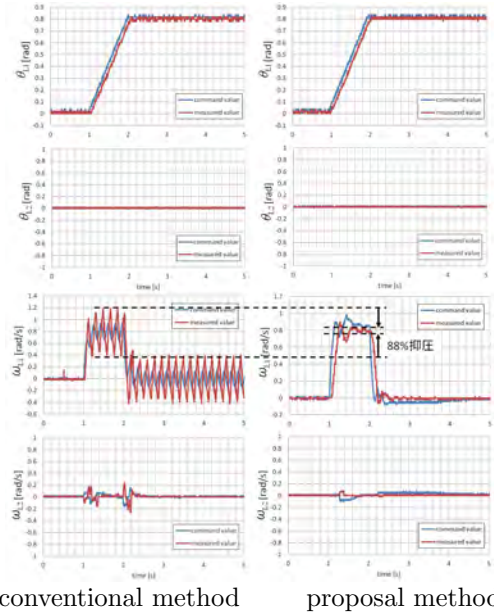


図 6: 重量増加時の位置制御の比較

(3) 配分決定法を用いた力制御

図 7 に提案する配分決定法により力指令値配分を決定するアーム先端の力制御を示す。この力制御では、与えられた力指令値より配分決定法を用いて各筋肉がアーム先端に発生させる筋力ベクトルの指令値を求め、一関節筋と二関節筋のうち、二関節筋を優先的に利用する条件を用いる。図 7 に示す力制御では、アーム先端に装着した力センサによる測定値から筋力ベクトルへ変換して、それぞれに対して PI 制御を適用して得られた電流指令値をそれぞれのモータドライバに与えることで力制御が実現される。

$$\begin{cases} F_x^* = F_1^* \cos \theta_{f1} + F_2^* \cos \theta_{f2} + F_3^* \cos \theta_{f3} \\ F_y^* = F_1^* \sin \theta_{f1} + F_2^* \sin \theta_{f2} + F_3^* \sin \theta_{f3} \end{cases} \quad (1)$$

$$F_3^* = F^* \cos(\theta_f^* - \theta_{f3}) \quad (2)$$

$$T_1^* = J_{11} F_{1PI} \cos \theta_{f1} + J_{21} F_{1PI} \sin \theta_{f1} \quad (3)$$

$$T_2^* = J_{12} F_{2PI} \cos \theta_{f2} + J_{22} F_{2PI} \sin \theta_{f2} \quad (4)$$

$$T_3^* = \frac{J_{11} F_{3PI} \cos \theta_{f3} + J_{21} F_{3PI} \sin \theta_{f3}}{G_1} \quad (5)$$

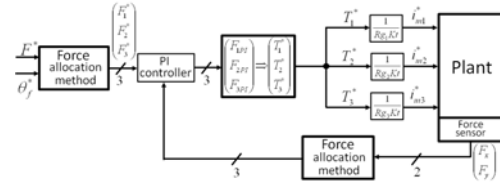


図 7: 力指令値配分決定によるロボットアームの力制御系

図 8 に提案する配分決定法を用いた二関節筋を再現したロボットアームの力制御の実験結果を示す。図 8 より力指令値配分決定による力制御が関節角度を変更したときに対応できることが確認できる。

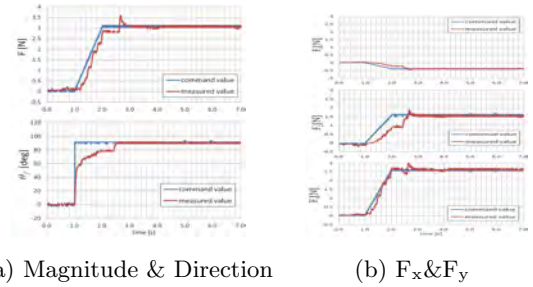


図 8: 力指令値配分決定による力制御の実験結果 ($\theta_{L1} = -45\text{deg}$, $\theta_{L2} = 90\text{deg}$, $\theta_f^* = 90\text{deg}$)

(4) 3 リンクマニピュレータを用いた位置力同時制御

2 関節同時駆動型 3 リンクマニピュレータの出力自由度、座標系を図 9 に、示す。

二関節筋を効果的に利用した制御系を構築するために、図 10 に示すような 3 リンクマニピュレータから 2 リンクマニピュレータを抽出したモデルを考える。このような 2 リンクマニピュレータの動作において、絶対座標で見た際のマニピュレータの伸縮運動、旋回運動に着目すると、伸縮運動は θ_L^* 、旋回運動は θ_R^* に依存している。そこで、これらとアームの関節角度の関係を考えると、 θ_L^* 、 θ_R^* は式 (6)、式 (7) より求められる。

今伸縮運動について考えると、二関節筋の出力は第一関節、第二関節に対して等しい分配比で分配されているので、二関節筋として働くキャリアモータの目標回転角度 θ_c^* と θ_1^* 、 θ_2^* の関係は式 (8) であらわされる。そのため、伸縮運動の動作である θ_L^* は式 (9) としてあらわされる。旋回運動で

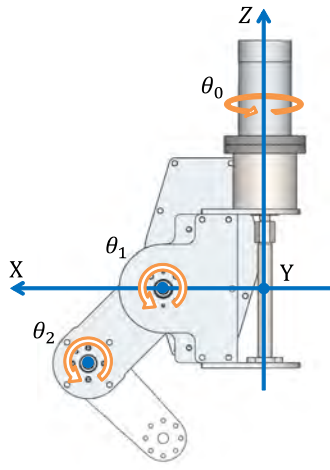


図 9: 2 関節同時駆動型 3 リンクマニピュレータの出力自由度と座標系

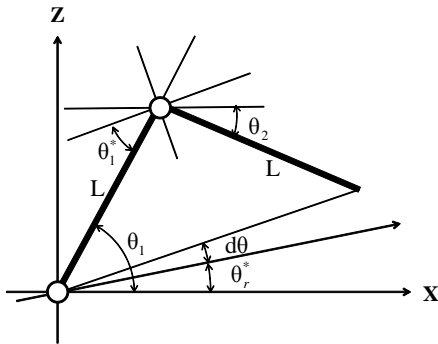


図 10: 伸縮運動、旋回運動で表現される 2 リンクマニピュレータのモデル

$$\theta_L^* = \frac{\theta_1^* + \theta_2^*}{2} \quad (6)$$

$$\theta_R^* = \frac{\theta_1^* - \theta_2^*}{2} \quad (7)$$

は、目標の旋回角 θ_R^* は伸縮運動と非干渉に動作させる必要があることも考慮する必要がある。そのため、リングギアモータの回転角 θ_r^* とサンギアモータの回転角 θ_s^* と目標旋回角度 θ_R^* の関係は式 (10)、式 (11) であらわされる。以上の式 (9)、式 (10)、式 (11) を用いて、アーム伸縮運動を二関節筋によって、マニピュレータの旋回運動を単関節筋によって実現できることを示している。

$$\theta_c^* = \theta_1^* + \theta_2^* \quad (8)$$

$$\theta_c^* = 2\theta_L^* \quad (9)$$

$$\theta_r^* = \theta_R^* \quad (10)$$

$$\theta_s^* = -\theta_R^* \quad (11)$$

式 (9)、式 (10)、式 (11) を分配器 (Distributor) として指令値及びフィードバック値をリングギア、

サンギア、キャリアのモータ制御に適用する指令値分配型位置制御系によって、マニピュレータの伸縮運動と旋回運動を個別に制御することが可能になる。

一方、ロボットマニピュレータを脚機構として使用することを考えた場合、自立時において伸縮方向の重力外乱を非常に大きく受ける。速度 PI 制御は負荷外乱に対する抑圧性能があまり見込めないため、実機実験においては重力外乱の影響によって振動を生じてしまうことが考えられる。そこで、外乱の抑圧を目的として外乱オブザーバを伸縮方向の運動を行なうキャリアモータの制御系に加えた制御系を構築した。構築した制御系を図 11 に示す。

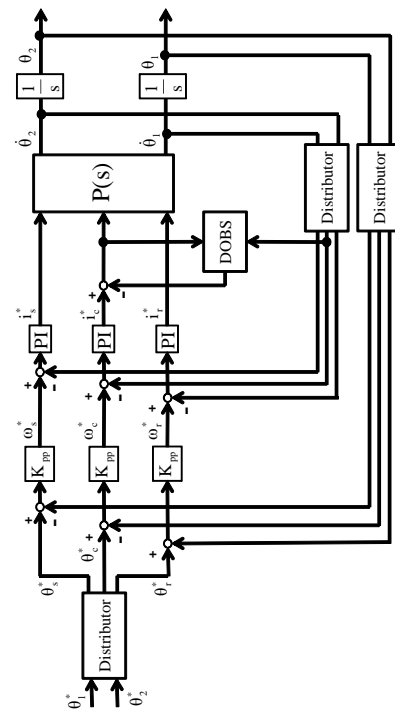
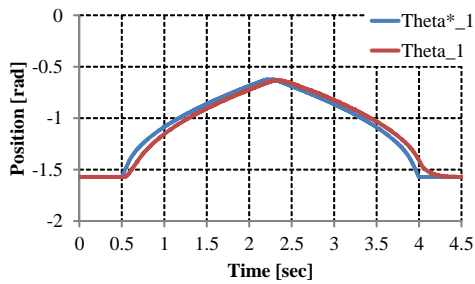


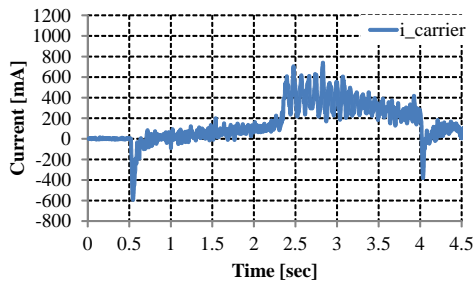
図 11: 伸縮方向の外乱のみを補償する外乱オブザーバを含むブロック線図

構築した制御系を用いた実験として、屈伸運動を四脚歩行ロボットに行わせた。提案する制御系の実験結果を図 12 に示す。この結果から、主として作用している重力外乱を補償するためにキャリアモータ電流がリングギアモータ電流、サンギアモータ電流に対して非常に大きくなっており、伸縮方向の負荷外乱をキャリアモータが補償して、リングモータ、キャリアモータが位置制御をしていると考えられる。

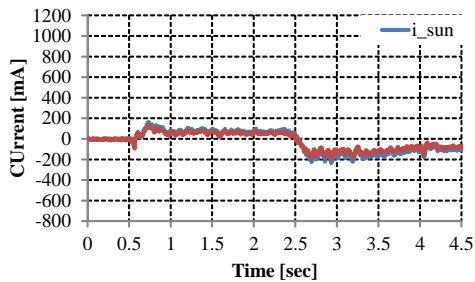
上記により、位置力同時制御系を構築しその有効性を確認できた。



(a) 第一関節の位置応答



(b) キャリアモータの電流応答



(c) リングギアモータ、サンギアモータの電流応答

図 12: 提案手法の実験結果

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)

[学会発表](計 8 件)

1. 佐藤雄一, 宮崎敏昌, 「二関節筋と単関節筋を併用する四脚歩行ロボットの姿勢制御」, 産業計測制御研究会 (2014)
2. 上田圭佑, 佐藤雄一, 宮崎敏昌: 「二関節筋機構を再現する遊星歯車機構のキャリアトルク伝達損失補償」, 電気関係学会北陸支部連合大会 (2013)
3. 香川 悠, 宮崎敏昌, 大石 潔: 「二関節筋による出力方向を考慮したロボットアームの力制御」, 日本ロボット学会学術講演会 (2013)
4. 佐藤雄一, 宮崎敏昌, 「二関節筋を再現する遊星歯車機構における等分配比の実現」, 日本

ロボット学会学術講演会 (2013)

5. 香川 悠, 宮崎敏昌, 大石 潔: 「二関節筋を再現したロボットアームの二慣性共振系を用いたモデル」, 電気学会東京支部新潟支所 (2012)
6. 佐藤雄一, 宮崎敏昌, 「遊星歯車機構を用いた二関節筋における関節間の干渉トルク解析」, 電気学会東京支部新潟支所 (2012)
7. 香川 悠, 宮崎敏昌: 「2 関節筋を再現したロボットアームの関節速度非干渉化」, 電気関係学会四国支部連合大会講演論文集 (CD-ROM)、2012、ROMBUNNO.8-5
8. 香川 悠, 宮崎敏昌: 「2 関節筋を再現したロボットアームの位置制御手法」, 電気関係学会四国支部連合大会 講演論文集 (CD-ROM)、2011、ROMBUNNO.8-14

6 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎 敏昌 (ミヤザキ トシマサ)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号: 90321413

(2) 研究分担者

大石 潔 (オオイシ キヨシ)
研究者番号: 40185187

長岡技術科学大学・工学部・教授

(3) 連携研究者

漆原 史郎 (ウルシハラ シロウ)
研究者番号: 90311092

香川高等専門学校・電気情報工学科・准教授