

平成 22 年 6 月 28 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008～2009

課題番号：20860077

研究課題名（和文） 多関節構造体に対する共振の拡張とそれに基づく適応型制御法

研究課題名（英文） An Extension of Resonance to Multi-Joint Robots with Adaptive Control Methods

研究代表者

植村 充典（UEMURA MITSUNORI）

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：00512443

研究成果の概要（和文）：

本研究では、ロボットなどの多関節構造体に対してエネルギー効率の良い運動制御を実現するため、多関節構造体に対して共振概念を理論的に拡張した。このとき、従来の共振概念の重要な点が、拡張した共振概念でも成立することを示した。この拡張版の共振概念を用いることで、複雑な数値計算や制御対象のパラメータを用いない適応型の制御法を提案した。制御系の大域的な安定性は、数学的に証明した。本手法を応用すれば、エネルギー効率の高い歩行補助システムや、産業用ロボットの省エネルギー化に貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：

This study proposed and formulated resonance for multi-joint structures. We made clear that some important characteristics of conventional resonance hold for new resonance, and new resonance is a natural extension of conventional resonance. Next, we proposed adaptive control methods based on new resonance. Advantages of the proposed control methods are to work well without using exact parameter values of the multi-joint structures nor huge numerical calculations. We mathematically prove global stability of the controlled systems. Applications of this study are walking support systems, energy saving industrial robots, and so on.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,330,000	399,000	1,729,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,530,000	759,000	3,289,000

研究分野：ロボティクス

科研費の分科・細目：知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：共振、多関節ロボット、非線形ダイナミクス、剛性制御、適応制御、安定性解析

## 1. 研究開始当初の背景

共振は、物理システムにとって最も重要な概念の一つであり、古くから詳しく解析されてきた。従来の共振の概念では、1自由度の線形システムを対象とし、システムの入出力は単振動に限定していた。これにより、最適性が数学的に厳密に定義され、学術的体系化が行われた。この共振の概念を用い、振り子運動や建築構造物の振動現象など様々な物理現象が解析・理解されてきた。共振状態では、ある一定の周期入力を仮定した場合、出力は最大となる。逆に一定の周期的な出力を仮定した場合には、入力是最小となる。つまり、共振を利用することで省エネルギー・高運動性能が達成できる。にもかかわらず、高運動性能・省エネルギーを期待して図1のような多関節ロボットの運動制御に共振現象を応用することは、容易ではない。その理由は、多関節構造体では自由度が複数あることや、ダイナミクスが非線形なこと、運動パターンが非単振動なことである。このような場合、通常では線形近似を用い、ある姿勢近傍の運動を各関節ごとに議論することが多い。しかし、このような線形近似と各関節単位の運動解析では、多関節構造体の全身の協調的な運動を理解することは不可能である。つまり、多関節構造体においては従来の共振の概念では不十分であり、有用性は限定的となる。

一方、ロボティクス分野では受動歩行ロボットが注目を集めている。受動歩行ロボットは、アクチュエータトルクを全く用いずに、坂道を安定に歩行できる。歩行は、衝突を含む非線形システムの物理現象であるため、従来の共振が対象としてきた物理現象と比べて極めて複雑である。それにもかかわらず、受動歩行ロボットはアクチュエータトルクを全く用いないという意味で最適な周期運動を実現する。これは、複雑なシステムにおいても、物理現象に着目することで最適性を自然に導入できる可能性を示しており、線形近似することなく「共振」を取り扱うことの重要性を示唆している。

生物にとっても運動性能やエネルギー効率は極めて重要である。例えば、カンガルーのホッピング運動はエネルギー効率の高い全身の協調運動であり、人間の歩行や走行も同様である。よって、多関節構造体の共振に基づいた理論体系は、生物の運動科学にも大きく貢献できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、多関節構造体の周期運動を対象とし、高運動性能・省エネルギーを実現するために「共振」をエネルギー効率の観点から拡張する。これにより、多関節構造体の非線形なダイナミクスを非線形なまま理解し、有効に活用するための理論基盤となることが期待できる。

また、この多関節構造体に対する共振概念に基づいた適応型の制御法も提案し、制御対象の詳細な情報を用いなくても省エネルギー効果を得られる制御法を確立する。

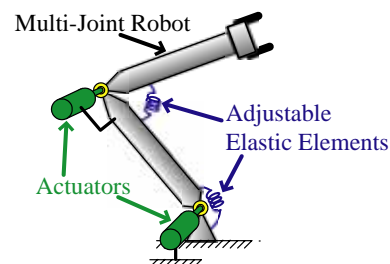


図1 弾性要素を利用した多関節ロボット

## 3. 研究の方法

共振概念を多関節構造体に理論的に拡張するため、本研究ではエネルギー解析やハミルトン・ヤコビ・ベルマンの方程式を用いて解析を行った。このとき、従来の共振概念の重要な点が、多関節構造体に対して拡張した共振概念でも成立かどうかを検討した。

次に、この多関節構造体に対する共振概念に基づき、複雑な数値計算や制御対象のパラメータを用いない適応型の制御法の構築を検討した。提案制御法を用いた場合の制御系の大域的な安定性は、数学的に調べた。多関節構造体の周期運動生成においてエネルギー効率を向上する方法は、剛性調節のようにダイナミクスを最適化する方法と、運動パターンを最適化する方法に分けられる。申請者の過去の研究では、剛性調節によるダイナミクスの最適化法の問題に取り組んできた。よって、本研究は運動パターンの最適化方法を一つの焦点とした。具体的には、カオスシステムの制御法として提案されてきた遅延フィードバック制御 (DFC) と、剛性最適化制御法を併用する。遅延フィードバック制御も剛性最適化制御法も、制御対象のパラメータや複雑な数値計算を用いないため、両者を併用した制御法は制御対象の詳細な情報を用いない。この制御法の有効性は、まず関節に粘性を持たない多関節ロボットのシミュレーションにより確認した。また、粘性がある

場合でも最適な運動パターンを獲得できる制御法も検討した。

次に、歩行運動のように衝突を含む周期運動に対して共振を拡張し、最適運動を生成する制御法を検討した。これらの理論解析と提案制御則の有効性は、シミュレーションと実験により確認した。

### 3. 現在までの達成度

#### (1) 多関節構造体に対する共振概念の理論的拡張

多関節構造体の周期運動を、エネルギー解析やハミルトン・ヤコビ・ベルマンの方程式を用いて解析を行った。その結果、共振が多関節構造体に自然に拡張できることを示した。このとき、従来の共振概念の重要な点が、多関節構造体に対して拡張した共振概念でも成立する。この重要な点とは、周期運動を最小のトルクで生成する点と、アクチュエータトルクが速度の線形フィードバックとなる点である。この特徴は、物理的意味が明確であるのと同時に、制御則の構築に役に立つ。

#### (2) 拡張版の共振概念に基づいた適応型制御法

提案した拡張版共振概念に基づき、適応型の制御則を提案した。拡張版共振概念では、最適アクチュエータトルクは関節角速度の線形フィードバックの形式で表される。この性質を利用すると、従来のように膨大な数値計算を用いて最適入力を算出する必要はなくなる。また、有本らによって提案された受動性に基づいた制御法を用いれば、多関節ロボットの正確なパラメータ値は未知であっても制御が可能となる。実際、本研究ではこの拡張版共振概念の性質と受動性に基づいた制御法の構築を用いることで、複雑な数値計算や制御対象のパラメータを用いない適応型の制御法が構築できた。関節剛性を適応的に最適化する制御法においては、制御系の大域的な安定性をリアプノフ関数を用いた方法により証明した。

#### (3) 受動周期運動の生成

多関節構造体は非線形で多自由度のダイナミクスを持つため、自由運動は通常カオスとなる。しかし、関節剛性や運動パターンを適切に調節すれば、アクチュエータトルクを必要としない周期運動を生成できる可能性がある。ここでは、このような運動を受動周期運動と呼ぶ。本研究では、遅延フィードバック制御と関節剛性最適化制御の併用により、多関節構造体において図2のような受動周期運動を生成できることをシミュレーションにより確認した。また、収束点近傍での制御系の安定性を証明した。ただし、制御系の大域的な安定性は十分議論できていない

ため、この点は今後の課題である。

#### (4) 省エネルギー歩行運動の生成

歩行運動のように衝突を含む周期運動に対して共振を拡張し、最適運動を生成する制御法を提案する。この問題に対しては、有本

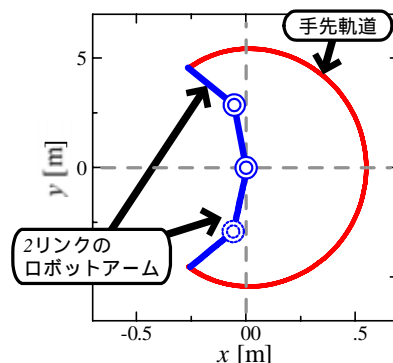


図2 2リンクロボットの受動周期運動

らによる多関節ロボットにおける非線形最適制御問題の解析的解法が有効であることを見出した。有本らは、多関節構造体のエネルギー保存則（受動性）に基づいた制御法・解析に関して世界をリードしており、申請者の研究の過去・未来に渡って強力な解析手段を提供する。有本らの研究では、効率的な周期運動生成は取り扱っておらず、申請者の研究によりエネルギー保存則に基づいた多関節構造体制御法の学術体系を拡張できたと考えている。

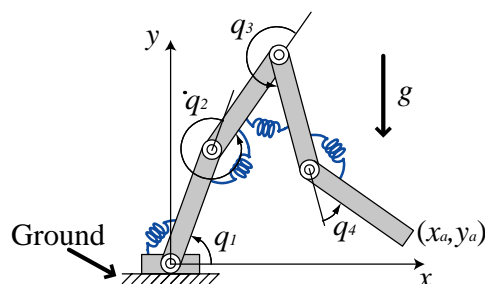


図3 弾性要素を利用した歩行ロボット

### 4. 研究成果

多関節構造体に対する共振概念の理論的基盤を確立しつつある。具体的には、非線形で複数の自由度を持つ多関節構造体のダイナミクスに対して、従来の共振と同様の性質を持つ共振概念を確立した。また、関節剛性と運動パターンを適応的に最適化する制御法を構築した。提案方法の有効性を確認するための実験機を作成し、2関節のマニピュレータ型ロボットで高い省エネルギー効果が得られることを確認した。シミュレーション結果も充実しつつあり、多関節ロボットに対してアクチュエータトルクを必要としない

周期運動が生成可能となった。また、省エネルギーな歩行運動を生成するシミュレーション結果も得られた。提案概念と制御則の有効性を確認する実験システムも開発しつつあり、図4の歩行ロボットを製作している。

今後は、理論的基盤を充実させることが重要である。提案した共振状態の最適性は非線形最適制御問題を通して証明をおこなったが、この共振概念が物理現象とどのような関係にあるのかは必ずしも明確ではなかった。よって、微分幾何学的手法などを用いることで、提案共振概念と物理現象との関わりを明らかにする予定である。運動パターンの適応を用いた制御法においては、制御系の安定性を数理的に証明することが重要である。また、本制御法において収束する運動パターンの境界条件を指定できるように制御則を改良する予定である。提案共振概念と適応型制御法を用いたロボットシステムを充実し、省エネルギーで人の運動を補助するシステムや省エネルギー産業用ロボットなどの実現可能性を調べる予定である。



図4 弾性要素を利用した歩行ロボットの実験機

## 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2件)

著者名:植村充典、川村 貞夫、論文標題:省エネルギーを目的とした適応的剛性調節による複数周波数成分の運動実現、雑誌名:日本ロボット学会誌、査読:有、巻:6、発行年:2008、ページ:54-60

著者名:植村充典、金岡克弥、川村貞夫、論文標題:機械的弾性要素を利用した周期運動用パワーアシストシステム -理論的考察とロバスト性の実験的検証-、雑誌名:日本ロボット学会誌、査読:有、巻:3、発行年:2008、ページ:78-84

〔学会発表〕(計13件)

発表者名:Uemura Mitsunori、発表標題:Adaptive Tuning of Stiffness and Motion for Multi-Joint Robot、会議名:The 9th International IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO2009)、発表年月日:2009年9月11日、発表場所:岐阜、日本

発表者名:Uemura Mitsunori、発表標題:Resonance-based Motion Control Method for Multi-Joint Robot through Combining Stiffness Adaptation and Iterative Learning Control、会議名:2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2009)、発表年月日:2009年5月14日、発表場所:神戸、日本

発表者名:Uemura Mitsunori、発表標題:An Energy Saving Control Method of Robot Motions based on Adaptive Stiffness Optimization - Cases of Multi-Frequency Components -, 会議名:The 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2008)、発表年月日:2008年9月23日、発表場所:Nice, France

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

植村 充典 (Uemura Mitsunori)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号:00512443