

学位被授与者氏名	越智 裕章 (Hiroaki Ochi)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第 4 4 号
学位授与年月日	平成 2 8 年 3 月 2 0 日
論文題目	生物が有する筋骨格構造の特性解析とロボティクスへの応用
論文題目 (英訳または和訳)	Characteristic Analysis of Biotic Musculoskeletal Structure and Its Application to Robotics
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 木野 仁 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 河村 良行 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻准教授 加藤 友規 同審査委員: 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 藤岡 寛之
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (和文)	<p>筋骨格構造を持つ生物は、繊細な動作と素早い動作を同時に実現できる。こうした外環境に柔軟に対応できる生物の運動特性を、ロボットにおいて実現することを目的に、様々なアプローチから研究なされている。生物の構造的な特徴に着目すると、生物の持つ筋骨格構造は通常の関節駆動型ロボットと異なり、複数の関節周りにおける多数の筋を収縮させることによって運動生成を行う。そのため、関節に対する筋の冗長性が高い。この冗長性を利用して位置決めのみならず、手先の機械インピーダンス等を制御することができる。また、冗長性によって筋同士の間で内力が生じるといった特徴がある。</p> <p>過去の筋骨格構造に関する研究では、筋骨格構造に生じる内力によるポテンシャルを利用したフィードフォワード位置決めや、フィードバック系での安定性の向上などについて研究されている。しかしながら、ポテンシャル形状は筋構造に強く依存し、筋構造によっては不安定となり、制御不能に陥ることがある。</p> <p>そこで本論文では、筋骨格構造の構造的な特性によって生じるポテンシャル場に着目し、システムが安定となる筋構造条件を解析する。さらに、得られた知見をロボティクスに応用する。</p> <p>第 1 章では、生物の運動特性や筋骨格構造に関する背景に触れ、ロボット研究に対する本研究の位置づけについて説明する。</p> <p>第 2 章では、対象とする筋骨格構造について、各パラメータやダイナミクス、筋の特性について説明を行う。</p> <p>第 3 章では、筋と関節トルクに関する力学関係を示す。また、筋内力によって生じるポテンシャルについて説明し、筋内力を利用したフィードフォワード位置決め手法について述べる。</p> <p>第 4 章では、2 関節 6 筋構造に対して、システムが安定となる条件を、ポテンシャルに基づいて解析する。その際、筋長を近似することにより、システムが安定となるために筋構造が満たすべき十分条件を導出する。この結果に基づき、実際の筋骨格構造ロボットを試作し、提案手法の有用性を実験によって検証する。</p> <p>第 5 章では、4 章の議論を、多関節多筋を有する筋骨格構造に拡張して一般化する。その際、解析対象とするクラスを限定することによって、2 関節 6 筋構造と同様に解析できることを示す。</p> <p>最後に第 6 章で、本論文で得られた主要な結果を要約し、今後の研究課題について述べる。</p>
論文内容の要旨 (英文)	<p>A biotic musculoskeletal structure achieves subtle and quick motions. Characteristics of the biotic motion-generation have been analyzed in robotics to create a robot system with the subtle and quick motions.</p> <p>Focusing on the biotic structure, animals have the musculoskeletal structure which generates a motion by contracting many muscles around some joints, unlike conventional industrial robots. Because the musculoskeletal structure needs the redundant actuation by many muscles. There exist internal forces in the muscles. Due to the redundancy, not only positioning but also the mechanical impedance of</p>

	<p>joints can be controlled.</p> <p>The previous studies focused on feedforward positioning and improvement of feedback controller by using potential field generated by the muscular internal force. However the potential shape strongly depends on the muscular arrangement. As the result, the stability of controller is influenced by the muscular arrangements.</p> <p>Focusing on the potential field generated by the characteristic of the musculoskeletal structure, this study clarifies the mathematical conditions of the feedforward control based on the stability analysis.</p> <p>In Chapter 1, back ground of this study is described by explaining characteristics of biotic motional generation and the musculoskeletal structure.</p> <p>Chapter 2 explains the parameters, dynamics and muscular characteristics of the target musculoskeletal structure.</p> <p>Chapter 3 describes the force relation between muscular tension and joint torque, the potential field generated internal force in the muscles, and feedforward positioning by using the potential.</p> <p>In Chapter 4, the stable conditions of internal force on the musculoskeletal structure with two joints and six muscles are analyzed from the viewpoint of the potential field. In this analysis, sufficient conditions are derived by the approximated muscular lengths. As a result, the muscular arrangement conditions to generate stable internal force are clarified.</p> <p>In Chapter 5, the discussion in Chapter 4 expands to the musculoskeletal structure with more joints and muscles.</p> <p>Finally this thesis is summarized in Chapter 6.</p>
論文審査結果	<p>本論文は、生物の有する筋骨格構造の機械的特性に注目し、その特性を積極的に利用したフィードフォワード位置制御に関する研究である。</p> <p>近年、ロボット工学においては筋骨格構造が注目されている。この構造は通常の関節駆動型ロボットが有する構造とは異なり、関節の周囲に存在する複数の筋肉（もしくはそれに相当するデバイス）を収縮させることによって運動生成を行う。従って、関節自由度に対し筋肉の駆動自由度が多い、冗長性駆動となる。この冗長性は筋内力が生じさせ、目標姿勢での釣合内力をフィードフォワードとして筋肉にステップ的に入力することで、位置制御が可能となる。この制御手法では複雑な実時間計算を一切必要とせず、関節角フィードバックの必要が無く、センサレスでの位置制御が可能となる。</p> <p>しかしながら、目標姿勢への収束性は筋骨格の幾何学的配置に極めて依存する。過去の研究では、この手法に対して、いくつかのケーススタディに対して、シミュレーションによる数値的な解析を行っていた。しかしながら、目標姿勢への収束条件は解析的に明らかにされていなかった。</p> <p>本研究では、はじめに人間の腕を模した 2 関節 6 筋システムに着目し、この手法の目標姿勢への収束条件をリアプノフの安定解析により明らかにした。この結果から、目標姿勢への収束性にはシステムに入力されるポテンシャル場のヘッセ行列が正定であることが、十分条件となることを示した。</p> <p>さらに、筋長と関節の関係を二次のテーラ展開によって近似することで近似ポテンシャルを導出し、ヘッセ行列の正定となる係数条件を導き出した。次に、この結果を利用し、具体的な筋骨格の幾何学条件を明らかにした。</p> <p>上述した解析では、2 関節 6 筋システムに限定されていたが、この解析を拡張し、任意の関節数、任意の筋肉数を有する一般的な筋骨格システムに応用し、ヘッセ行列が実対称三重対角行列になることを示し、正定となる条件を解析的に明らかにした。</p> <p>また、これらの得られた解析結果に対し、シミュレーションや実機ロボットマニピュレータによる実験を行い、解析の有用性を明らかにした。</p> <p>本論文で得られた知見は、ロボット設計やロボットの運動生成に活かされるだけでなく、動物の運動生理学とロボット工学との間にある学問の溝を埋め、次世代・知能ロボットの人間らしい動作実現が期待できる。</p>

	<p>学位論文公聴会においては、論文内容に関連する種々の工学的及び技術的な質問があったが、いずれも適切な回答を行うことができた。また公聴会後の最終試験においては、学位論文に関連する分野の学識を有し、今後研究を進めていくための研究能力を備えていることが判明した。</p> <p>以上の結果から、学位審査委員会はこの論文が博士（工学）の学位に適格であると判定した。</p>
<p>主な研究業績</p>	<p>参考論文 7編1冊</p> <p>【査読付論文】</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. “筋骨格システムのフィードフォワード位置決め制御における筋長の近似を用いた準静的収束条件の解析”, 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 4, pp56-63, 2014. 著者: 木野仁, <b>越智裕章</b>, 田原健二, 松谷祐希, 石橋良太.</li> <li>2. “筋骨格システムを対象にした筋内力フィードフォワード位置制御法における強化学習を用いた筋内力決定法”, 日本機械学会論文誌, Vol. 81, No. 822, 14-00313, 2015. 著者: 松谷祐希, 田原健二, 木野仁, <b>越智裕章</b>, 山本元司.</li> <li>3. “2リンク6筋を有する筋骨格システムにおけるフィードフォワード位置決めのための筋配置条件”, 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 2, 2016. (掲載予定) 著者: <b>越智裕章</b>, 木野仁, 田原健二, 松谷祐希.</li> </ol> <p>【国際会議】</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. “Study of human motion generation based on redundancy of musculoskeletal structure”, 2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), USB, pp1-6, 2013. Author: Hitoshi Kino, <b>Hiroaki Ochi</b>, Kenji Tahara, Yuki Matsutani, Ryota Ishibashi.</li> <li>5. “Feed-forward Positioning of Musculoskeletal-like Robotic Systems with Muscular Viscosity: Determination of an Adequate Internal Force”, 2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), USB, pp7-12, 2013. Author: Yuki Matsutani, <b>Hiroaki Ochi</b>, Hitoshi Kino, Kenji Tahara, Motoji Yamamoto.</li> <li>6. “Set-point control of a musculoskeletal arm by the complementary combination of a feedforward and feedback Manner,” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA'14), pp. 5908--5914, 2014. Author: Y. Matsutani, K. Tahara, H. Kino, <b>H. Ochi</b> and M. Yamamoto.</li> <li>7. “Geometric conditions for feedforward positioning of musculoskeletal tendon-driven structure, ” IEEE, IECON 2015 - 41th Annual Conference of the IEEE, Proceeding on Industrial Electronics Society, USB, pp.001109-001114, 2015. Author: <b>Hiroaki Ochi</b>, Hitoshi Kino, Kenji Tahara, Yuki Matsutani.</li> </ol>