



複数のプロセッサを用いたロボット制御則の並列処理に関する研究

田川, 聖治

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1997-04-25

(Date of Publication)

2008-02-27

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2136

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3129899>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002136>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	た がわ きよ はる 田 川 聖 治	（愛知県）
博士の専攻分野の名称	博 士（工 学）	
学位記番号	博ろ第156号	
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当	
学位授与の日付	平成9年4月25日	
学位論文題目	複数のプロセッサを用いたロボット制御則の並列処理に関する研究	

審査委員	主査 教授	羽根田 博 正		
	教授	太 田 有 三	教授	高 森 年

論 文 内 容 の 要 旨

ロボット・アームに対して動的制御を適用するためには、膨大な演算を含むロボット制御則の計算の実時間処理が不可欠となることから、複数のプロセッサを用いたロボット制御則の並列処理について研究を行った。初めに、ロボットの動的制御は、非線形な動特性を有するロボット・アームの線形化補償と、線形化されたシステムに対するサーボ補償から構成される2段階制御であり、ロボットの動的制御に寄与する制御則は、ロボット・アームの動的モデルに基づく非線形な下位制御則と、伝達関数などによって表される線形な上位制御則に分解できることを示した。次に、それぞれの制御則の計算に対して、独立に、制御則の特性を考慮した並列処理手法を提案した。また、これらの並列処理に要する時間を最短とするためのスケジューリング問題を考え、それぞれを組合せ最適化問題として定式化すると共に、分枝限定法などによるアルゴリズムを提案した。

第1章では、研究の背景として、幾つかの剛対リンクからなるロボット・アームを高速かつ高精度に制御するためには、その動的モデルに基づく動的制御が有効であるが、膨大な演算を含む制御則の計算を実時間で行う必要があり、これが実際のロボット・アームに対して動的制御を適用する場合の1つの大きな障害となること、また、この問題を解決するための手段として、複数のプロセッサを用いた並列処理が注目されていることを述べた。さらに、従来のロボット制御則の並列処理に関する研究について紹介し、これらの問題点として、任意のロボット制御則に対して適用できないこと、ロボット・アームの幾何学的な構造の違いを反映したロボット制御則の計算の効率化が不十分であること、線形な上位制御則の処理時間が考慮されていないことを指摘した。

第2章では、単一のプロセッサにより、ロボットの動的制御における非線形な下位制御則を、効率的に計算するための手法を提案した。この手法は、数式処理システムを用いて、任意のロボット制御則をスカラの多変数多項式の形で導出した後に、数式に代数的な変換を施して、含まれる演算回数が最小であるという意味で最適化されたロボット制御則の計算公式を、機械的に得るものであり、幾つ

かの適用例において、その有効性と実用性を確認した。また、上記の代数的な変換による数式の簡単化に関しては、一般的なロボット制御則の特性を考慮して、「部分的因数分解」、「共通部分式の括り出し」、「共通因子の括り出し」など、汎用的な数式処理システムの能力を凌駕する独自の手法を考案した。

第3章では、ロボットの動的制御における非線形な下位制御則に対して、汎用的なMIMD (Multiple Instruction stream Multiple Data stream) 型の並列計算機モデルを用いた並列処理手法を提案した。この並列処理手法では、多変数多項式の形で与えられた任意のロボット制御則の計算を、積項単位で複数のプロセッサに割り当てた後に、前節で提案した数式の簡単化手法を適用して冗長な演算を削除し、各プロセッサごとの計算効率を改善することで、並列処理全体としての計算時間の短縮を実現した。次に、このような数式の並列化と簡単化を考慮したスケジューリング問題を、最適化問題として定式化すると共に、それがNP困難な問題であることを証明した。さらに、この最適化問題に対して、3種類の異なる特性を持つアルゴリズムを提案した。すなわち、発見的な手法に基づき大規模な問題に対しても適用可能な近似アルゴリズム、分枝限定法に基づき厳密に最適解を求める最適化アルゴリズム、両者のアルゴリズムを組み合わせ、実用的な計算時間で優れた近似解(準最適解)が得られる準最適化アルゴリズムであり、幾つかの適用例において、それらの特性と有効性を確認した。

第4章では、ロボットの動的制御における線形な上位制御則に対して、複数の信号処理用プロセッサ(DSP: Digital Signal Processor)を用いた並列処理手法を提案した。初めに、一般的なDSPの特徴である積和演算のパイプライン処理機能について考察した後に、パイプライン処理の効率を損なうことなく、任意の個数のDSPを並列化することができる並列処理手法と、デジタル制御器の構成方法を示した。次に、このデジタル制御器に対して、ロボットの動的制御など、フィードバック制御系に組み込まれるデジタル制御器の重要な性能特性であるサンプリング周期と滞在時間を、共に最短とするための多目的スケジューリング問題を考えた。まず、提案した並列処理において、そのタイミングに関する3つの制約条件を明らかにして、多目的のスケジューリング問題を、多目的の最適化問題として定式化した。次に、この多目的の最適化問題に対して、分枝限定法に基づく最適化アルゴリズムを提案した。この最適化アルゴリズムは、デジタル制御器のサンプリング周期のみを最短化して、弱パレート最適解を求めた後に、滞在時間についても最短化することで、多目的の最適化問題のパレート最適解を得るものであり、幾つかの適用例において、その有効性が確認された。

第5章では、本研究で得られた成果を総括した。

論文審査の結果の要旨

本論文は、高速・高精度の実時間動的ロボット制御を可能ならしめるために、複数のプロセッサによる並列処理手法について研究したものである。

本文は緒論を含め5章から構成されている。

第1章は緒論である。そこでは、複雑な多変数非線形システムであるロボット・アームに非線形状態フィードバック補償を施すことにより、線形かつ非干渉なシステムに変換し、線形化されたシステムに対してサーボ補償器の付加を行い、誤差や外乱を軽減させる二階層制御の方法が現在ではもっと

も有効な手法であることを示している。下位の制御である非線形状態フィードバック補償には、ロボット・アームの運動方程式の計算が含まれ制御則の演算上での複雑さが動的制御実現の障害となっていること、そして上位の線形制御では制御則がより簡単であるにもかかわらずシステム全体の応答性や安定性確保のために一層の高速処理が必要であることを明らかにしている。これらの背景より、ロボット・アームの動的制御での制御則計算の高速化のために、効率的かつ汎用性に富む並列処理手法を新しく提案する必要性があることを主張している。

第2章では、下位の非線形制御処理について論じている。非線形制御則の一般的な特徴を明らかにすると共に、数式処理システムを用いて、与えられたロボットに対して具体的なロボット制御則を自動的に積和式の形で導出する方法を提案している。

このようにして得られた制御則は長大で冗長な演算を多く含んでいるため、含まれる演算回数が最小となる制御則簡単化法を新たに提案している。

この手法を応用して、任意のロボット制御則から効率的な計算プログラムを自動生成するオブジェクト指向型の最適化コンパイラを開発した。多関節ロボット・アームの逆動力学計算に種々適用しその有効性を確認している。

第3章では、再び下位の非線形制御処理について、ハードウェア的な解決策として、複数のプロセッサを用いた並列処理の立場から論を進めている。プロセッサの数やプロセッサ間通信が制限される、より現実的な場合に対処するため、MIMD (Multiple Instruction stream Multiple Data stream) 分散メモリ型の並列計算機モデルを用いた並列処理手法を新しく提案している。

まず、ロボット制御則の簡単化と並列化を共に考慮したスケジューリング問題が組み合わせ最適化問題として定式化できることを示し、この問題がNP困難 (Nondeterministic Polynomial time Hard) と呼ばれる極めて解くのが難しい問題であることを証明している。

次に、この最適化問題に対するアルゴリズムとして、大規模問題に適したヒューリスティックアルゴリズム、分枝限定法に基づいた厳密なアルゴリズム、これらの両者を組み合わせた準最適化アルゴリズムの3つを提案している。

これらの3つのアルゴリズムを、極座標ロボット・アーム、多関節ロボット・アームに適用し、並列プロセッサの個数をパラメータとして、計算時間、探索効率、解の精度についての評価を行い設計上でのデータを提供し、いずれも実時間制御に耐え得るものであり、かつロボット・アームの幾何学的構造の違いや、ロボット制御則の種類に関わらず有効であることを確認している。

第4章では上位の線形制御則の並列処理について論じている。複数のデジタル信号処理プロセッサDSP (Digital Signal Processor) を用いたデジタル制御器の実現方法を提案している。ここでは、伝達関数の次数にかかわらず任意の個数のDSPを並列化でき、DSP数の増加に伴ってサンプリング周期を短縮することができ、滞在時間をサンプリング周期よりも短くできるといった従来の障害を除去した高い機能を有する。また、DSPが計算処理を中断してデータ交換や同期処理を行う必要がないために、演算のパイプライン処理の効率を損なうことがない。

さらに、この制御器の性能に重要な、サンプリング周期と滞在時間を共に最短とする多目的スケジューリング問題を多目的組み合わせ最適化問題として定式化し、因果性条件、滞在時間条件、DSP個数条件といった制約条件を明らかにしている。

この問題に対して、分枝限定法に基づく最適化アルゴリズムを提案している。商用のDSPの採用を想定して、いくつかの例題に適用しその性能評価を行った結果、その実用性が確認された。

第5章は結論である。本論文をまとめると共に、得られた研究成果が他の実時間制御にも応用でき

ることを示唆している。

以上のように、本研究はロボット工学、とくにロボットの動的制御において従来難点とされてきた実時間高速・高精度制御を新しい並列処理技法により解決したものであり、ロボット工学において重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者 田川聖治は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。