

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500248

研究課題名(和文) 作業プログラムの機能的構造を用いた自動チューニングに関する研究

研究課題名(英文) The study of automatic tuning of a task program based on its structure

研究代表者

音田 弘 (Onda, Hiromu)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員

研究者番号：40356746

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：機能別のモジュール群を用いて構成された知能ロボットの作業プログラムの自動チューニングについて、作業プログラムの構造を元に自動チューニングを行う手法の基礎を確立することが本研究の目的である。作業プログラムの個々のモジュールの機能・性能を考慮して全体の最適化を行うために、パラメタやモジュールの選択によって変化する作業プログラムの性能について、その仕様の実現度を評価し、作業プログラムの構造を元に自動チューニングを行う新しい手法を提案・開発し、その有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：Automatic tuning of a task program for intelligent robots, which consists of different functional modules, is dealt with in this study. It is an object of this study to establish the basis for techniques for automatically tuning based on the structure of the task program. In order to perform an overall optimized in consideration of the functions and performance of the individual modules of the task program, the performance of the task program which varies with the choice of parameters and the module evaluates the implementation of the specification. It was proposed and developed a new method for automatic tuning based on the task program structure and demonstrated its effectiveness.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：作業プログラム

1. 研究開始当初の背景

ロボットを製造に使う際の教示の手間の短縮とそれによるシステムの立ち上げ時間の短縮は、製造現場で大きな問題となりつつある。特に単なるティーチングプレイバックでは実現できない器用なセンサフィードバックを必要とする作業においては、人によりロボットに教示されたデータを元にした再利用が可能な作業のプログラムを構成する必要がある。そして、その構成においては、作業における情報の流れ、作業プログラムモジュール間のインタフェースの設計、個々のモジュールの入出力の不確かさの要因と最終的な作業の成否結果との関係を知った上で、それらに基づいて適切なモジュールを開発・選択し、作業プログラムを構成する必要がある。

一方、CAD、シミュレータ、動作計画エンジン、解析ツールなど、有償や無償で高信頼・高機能なソフトウェアが入手可能となっている。中にはソースコードも公開されているものもあり、数値計算の最新の成果や精度保証された信頼性の高い結果をそれらによって得ることも可能となってきている。これらのソフトウェアを使うことでIDCAEのような上流設計での試行錯誤的なトライアルにおける開発効率を上げることが可能であり、これらの有効な活用もシステム立ち上げ時間の短縮に寄与する重要な問題である。これらの資源は、中にはミドルウェア等を使ってモジュール化されたコンポーネントとして提供されているものもあるが、簡単には他のアプリケーションと接続できないものとして提供されているものも多い。また、インタフェースを揃えて見かけ上つなぐことができても、どういう場面での使用を想定して開発されているかが暗黙のうちにコンポーネントに含まれていることがある。それは実際の作業において個々の機能の十分な性能を発揮できない要因となり、現状では設計や解析に携わる人が個々のツールを別々に利用し経験と勘でその結果を作業プログラムの開発に援用している。

本研究は、上記のようなモジュール群を用いて作成した知能ロボットの作業プログラムの自動チューニングに関する研究である。

2. 研究の目的

本研究では、有償または無償でネット等から入手可能であるような機能別のモジュール群を用いて構成された知能ロボットの作業プログラムの自動チューニングを想定して、作業プログラムの構造を元に自動チューニングを行う手法の基礎を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

作業プログラムの個々のモジュールの機能・性能を考慮し全体の最適化を行うには、一般には開発者の異なる個別に開発された機能モジュールを接続・比較可能とした上での評価法が必要となる。パラメタやモジュールの選択によって変化する作業プログラムの性能について、その仕様の実現度をシミュレーションで評価し自動チューニングを行う新しい手法を提案・開発し、その有効性を実験により実証する。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

異なる仕様を持つセンサを、タスクを実行する同じアルゴリズムに使用した場合、そのセンサの持つ異方性や解像度が、そのパフォーマンスに影響をどう及ぼすかを解析した。センサの仕様は、力覚センサの力とモーメントの各 F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z について、それぞれ、200[N], 200[N], 400[N], 13[Nm], 13[Nm], 13[Nm]のセンサと、200[N], 200[N], 200[N], 4[Nm], 4[Nm], 4[Nm]のセンサを比較した。また、解像度については、前者のセンサが 0.050[N], 0.050[N], 0.100[N], 0.0032[Nm], 0.0032[Nm], 0.00032[Nm]、後者のセンサが、0.050[N], 0.050[N], 0.050[N], 0.0010[Nm], 0.0010[Nm], 0.00010[Nm]である。

アルゴリズムにおいて、このセンサがz軸方向と鉛直方向を一致させて動作させた場合と、z軸方向を鉛直方向から傾けた場合とでは、そのパフォーマンスが異なる。作業時に実際に観測される力は、その方向によっては、例えば後者のセンサの場合、モーメントの許容範囲を超えることがある。これらの様子を、グラフィカルに3D幾何モデル上に表示して解析することを可能とした。

評価関数は、そのセンサで測るべき値のアルゴリズム実行時に全体のパフォーマンスにクリティカルな影響を与える成分について、実際に測定される値が解像度の高い成分に一致している範囲が大きいものを取り、作業に望ましい条件として、この値が平均的に高いことが作業のパフォーマンスを上げると仮定して解析を進めた。具体的には、実際に計測される力ベクトルと上記の成分方向の単位ベクトルの内積の全軌道に関する二乗和を評価関数とした。また、満たすべき条件としては、許容範囲をどれだけよく満たしているか、をその限界値からの距離を見ることで評価できる。この場合には、許容範囲の限界からどれだけ離れているかを同様にベクトルの内積の全軌道における二乗和により評価関数とした。これらにより、センサの配置の、アルゴリズム実行における、そのパフォーマンスに対するマッチングの良さが定量的に示される。

作業実行時の、センサの配置を仮想環境で変更しながら上記のシミュレーションを元に解析を行った。伝播する成分の有無(接続関係)と型をまず考慮し解析し、定量的な値についても解析を行った。ここでは、異なるセンサを使うかわりに、異方性のあるセンサを異なる配置に設定してその影響を解析した。異なる初期姿勢から作業を開始すると、作業におけるセンサの配置を変更したことに相当する。作業を行うアルゴリズムは、特に姿勢を固定していないで一般的な姿勢に対して書かれていることが多い。どの姿勢が本来の仕様の実現度を高め、適当であるかを解析することが可能となる。

一方で、上記ではアルゴリズムを固定し配置を変化させたが、配置を固定した場合には、同様の枠組みを用いて、その配置に適合したアルゴリズムを選ぶための指標として用いることが可能となる。

今回使用した作業のためのアルゴリズムは、センサ値の絶対値の感度にあまり依存しない、状態の変化を検出するためのアルゴリズムであったため、センサの配置による感度の変化が直接作業の成否に関わるということは示すことができなかった。途中過程の作業の良し悪しを評価する指標として、上記に示したような2つの指標を元に評価関数を定義し、そのマッチングの度合いを評価した。これにより仕様を逸脱する危険性の評価や、解像度が高い方向を優先して使用するというような望ましい配置や、配置が与えられた場合にはどのようにアルゴリズムのパラメータを設定すべきかについて、定量的に評価が可能になったと考える。その一方で、今回の枠組みに関して、作業アルゴリズムの分類とそれに応じた扱いは今後の課題である。

一部の成果を査読付きの国際会議で発表した。数値シミュレーションのvalidityを解析する方法について述べたもので、自動的に最適化を行うためのシミュレーション空間を構成した際に必要となる、その解の妥当性をmaximaの数式処理によって導出した解の区間により解析している。一般向けの動力学シミュレーションエンジンは必ずしも作業評価にそのまま用いることができるわけではなく、シミュレーションにおいて作業内で重要な現象が生じる条件を調べるためには、カスタマイズや妥当性のチェックをシミュレータそのものと別に行うことが必要になる場合がある。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究は、モジュール群を用いて作成した知能ロボットの作業プログラムの自動チューニングに関する研究である。ロボットに作業を行わせるには、必要なモジュールを開発・選定し組み合わせ、特定の環境下で特定のシナリオで動作するように作業プログラムを作る必要がある。この際、どのような

モジュールを選択し、どのように使うかの有効性を評価もしくは推定する技術が必須となる。ここでの選択基準は、認識・計画・実行系の機能モジュールと作業プログラムおよび実行環境との整合性の度合いが高いことを意味する。

モジュールの作業プログラムへの適合度と選択の判断基準を持つことを可能とし、ロボットの作業プログラムが持つ構造(機能レベル、仕様レベル、実装レベル)に基づき作業プログラムを構成するモジュール自体の評価とモジュールの接続関係の評価を行う本研究そのものは国内外に見られないが、関連研究として高性能コンピューティングの分野におけるソフトウェア自動チューニングに関する研究が挙げられる[1]。これは、新しいマシン環境に性能を自動的にチューニングすることによって高速化を実現する技術である。高性能コンピューティングの場合と大きく異なり、ロボットでは実世界での作業をパフォーマンスとして評価する必要がある。本研究では自動チューニングできる程度にモジュールを実装レベルでつなげることを可能とし、モジュール選択のための接続関係や適合度の定量的評価を可能とするために、仮想世界でのシミュレーションを併用した各モジュールの自動チューニングを行う。

接続関係の適合度の評価については、関連研究として認識と行動(作業実行に相当)の研究で、不確かさの表現や扱いにおいて近いものが見出される。認識系においては、タスク指向視覚、能動視覚、目的視覚として、このような研究が内外共に多く行われてきている。一方、計画・実行系においては、環境や対象を認識するだけでなく目的を達成しなければならぬため、実行によってより良い観測を行うことと、各時点での環境・対象の認識結果から最適な作業実行を行うことが課題である。しかし、移動ロボットにおけるナビゲーションを対象としたものはあっても、力覚を伴う手作業に関してこのような切り口から考える研究は見られない[2][3]。

本研究では、作業の不確かさと性能として最終結果に現れる認識・計画・実行系の構造と、主にその仕様と作業アルゴリズムに依存する作業プログラムの構造との複雑に絡み合った関係を、最適化問題としての自動チューニング技術の定式化を行うことにより整理し、作業モジュールの選定のためにその定量的な評価を可能としようとしたものである。

参考文献

[1] 米国応用数学会ニュースジャーナル SIAM News, 特集記事: Parallel Processing '08: Automatic Tuning of High performance Numerical Libraries: State of the Art and Open Problems, June 11, 2008.

[2]白井：三次元環境認識と行動計画の歴史と展望、日本ロボット学会誌、vol. 26, No.4, pp. 302-305, 2008.

[3]S. M. LaValle: Planning Algorithms (Chapter 12: Planning Under Sensing Uncertainty), Cambridge University Press, 2006.

(3) 今後の展望

本研究では、認識・計画・実行系モジュールのなす構造を機能レベル・仕様レベル・実装レベルで表現し各レベルについて、作業プログラムとの関係と適合度を表現する枠組を作るための基礎的な解析を行った。

定性的な接続の扱い、インタフェースと型の扱い、定量的な扱いを各レベルで考慮して、実世界を扱うソフトウェア自動チューニング技術を実現するためには、最適化のための関数をどう決めるかが問題となる。今回の場合は2つの評価指標により評価関数を定め、最終的には重みづけした線形和でそれらを統合した。本来は、異なる評価指標であるので、多目的最適化を行い、その統合の仕方を洗練する必要がある。また、平均的に良い値をとることがアルゴリズムによっては必ずしも必要でないし、アルゴリズム自体がある状態変化を起こすためのきっかけとしてのセンシングをしている場合、必ずしもセンサが与える絶対値の分解能が高いことを必要としない場合もある。そのような細やかな評価を、アルゴリズムの持つ特質に応じて定めて知識として表現していくことが必要と考えられる。

本研究の結果は、仕様の実現度を評価し自動チューニングする手法の基礎技術を与え、試行錯誤で行っていたモジュールの選択をベンチマークでなく実アプリケーションの中で可能とする。そのためには、今後、仕様そのものをより明確に定義する、もしくは、その定義を必要に応じて推定し、それに応じた扱いをしていく必要がある。

本研究の意義は、力覚・視覚のセンシングを要する手作業におけるプログラム開発効率を改善し、ロボットを導入したシステムの立上げを加速し、情報の流れ・モジュール間のインタフェース・作業結果の不確かさと性能を扱う上流設計の際の評価についての基礎技術を与える事であるが、今後は最初の一歩としての統一性と近似的な扱いを越えて、上記のような扱いを検討していく必要がある。

ロボットにおける力を用いた制御で良く行われるように、接触時の反力のみを測定するためには、把持する物体の重力の影響をキャンセルするための重力補償を行うことが多い。このような重力補償を行った上で反力を測定する場合、実際に力センサにかかる力およびモーメントは、重力補償した結果の力およびモーメントよりも、力センサの先に大

きい力とモーメントがかかっている。このような影響は、力覚センサに異方性がある場合やその許容範囲がセンサによって異なる場合には、表に現われないがゆえに、仕様で許された範囲を逸脱して使用するというようなことも起こりうる。把持物体の重量に応じて、適切なセンサの配置や、アルゴリズムの選択をすることを可能にすることは、こういう場合により細やかな選択を可能とし、作業の遂行の上で重要になってくる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

Hiromu Onda, "Stability Analysis of Densest Packing of Objects using Partial Order Representation of Feasible Procedural Sequences," Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots, Lecture Notes in Computer Science, vol. 8810, pp. 424-437, 2014.

6. 研究組織

(1)研究代表者 音田 弘 (Onda Hiromu)
産業技術総合研究所 知能システム研究部門・主任研究員
研究者番号：40356746

(2)研究分担者 尹 祐根 (Yoon Woo-Keun)
産業技術総合研究所 知能システム研究部門・主任研究員
研究者番号：40312615

(ただし、研究期間の途中で休職したため、研究分担者から外れた。)