

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560240

研究課題名（和文） 高度安全性を目指したマルチリンク柔軟マニピュレータの衝突検出と制御に関する研究

研究課題名（英文） Studies on Collision Detection and Control of Multi-link Flexible Manipulators for Their Safety Operations

研究代表者

澤田 祐一（SAWADA YUICHI）

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授

研究者番号：80273548

研究成果の概要（和文）：

本研究課題では以下のような成果を得た。非線形性の強い柔軟マニピュレータに対する衝突検出を出来るようにするため、非線形状態推定器である unscented カルマンフィルタ（UKF）を導入した。これにより多リンク柔軟マニピュレータの衝突検知が可能となった。衝突による衝撃力は未知外乱であるため、カルマンフィルタや UKF の状態推定精度を悪化させるため、衝突入力に状態推定に影響を及ぼさないようなロバストフィルタを導入して、衝突検出と推定制御それぞれに機能を振り分けたフィルタを用意することで、より安定的に停止制御が行えるような方法論を考案し、その有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, the following results have been obtained. Considering the nonlinearity of flexible manipulators, Unscented Kalman Filters (UKF) as nonlinear state estimators have been introduced in order to obtain the state estimate of the manipulator. The collision detection for multi-link flexible manipulator has been succeeded based on the innovation process of the UKF. Since the impact force caused by collisions are regarded as unknown disturbance, the estimation error of the state estimator increases when the collision occurs. The deterioration of the estimation error affects the control performance for the flexible manipulator when the collision is detected. To improve the control performance of the flexible manipulator when unobserved obstacles collide with the arm's side, Optimal Disturbance Decoupling Filters that decouples undesired collision force effects from the estimation error have been introduced. As the result, the control performance when the collision occurs have successfully improved.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 2,100,000 | 630,000 | 2,730,000 |
| 2010年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2011年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000 |

研究分野：システム制御

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：マニピュレータ、柔軟構造物、制御、衝突検出、安全性

1. 研究開始当初の背景

先進国では、高齢化などによる労働人口の減少が問題視されている。その解決策として、人が行う作業を同一環境内で代替もしくは支援するロボットの開発が重要視されている。しかしながら、一般環境で安全に使用できる汎用マニピュレータの研究・開発は既に実用化されている産業用ロボットに比べ、著しく立ち遅れている。一般環境、すなわち住宅内、道路上、オフィス内など、人が生活を営む空間内で使用されるべきマニピュレータは動作が極めて安全でなければならない。このような目的には、機械的な柔軟性を持った、安全性の高い柔軟マニピュレータが最適であり、その実用化を目指した研究開発が極めて重要である。

2. 研究の目的

本研究では、高い安全性の実現を念頭に置き、高度安全性を目指したマルチリンク柔軟マニピュレータの衝突検出と制御に関する研究を行うことである。柔軟マニピュレータが、何らかのワークを把持した状態でそのワークのある場所から別の場所へ移動させる動作を行った時、同じ作業空間内にある別の物体（物や人）との衝突を起こせば、たとえ柔軟マニピュレータであっても衝突の相手とマニピュレータ自体に対するダメージは深刻なものとなるだろう。柔軟マニピュレータの使用においても、衝突の回避やダメージを軽減する制御法の開発はマニピュレータ使用の安全上極めて重要である。柔軟マニピュレータは、マニピュレータとして必要となる作業の自由度（剛体マニピュレータの自由度に相当）に加え、アーム自体の変形による無数の自由度を伴うため、運動方程式は常微分方程式と偏微分方程式で記述される無限次元システムとなる。このため、制御や状態推定方法は剛体マニピュレータよりもはるかに複雑になるため、宇宙用のマニピュレータ以外では未だ実用化には至っていない。

本研究代表者は、既に単純な1リンク柔軟マニピュレータに対する、イノベーション過程に基づいた衝突検出法と停止制御アルゴリズムを開発している。この手法は、1リンク柔軟マニピュレータを線形システムとして近似し、そのモデルに対する状態推定器を設計して衝突検出と（停止）制御を行うものである。これをさら

に発展させ、マルチリンク柔軟マニピュレータへの拡張を行い、同様のアプローチがマルチリンク柔軟マニピュレータに対しても有効であることを明らかにし、また、本研究で確立される衝突検出法を用い、マルチリンク柔軟マニピュレータの安全な停止制御法の確立を目指すものである。

3. 研究の方法

【平成21年度】初年度の研究は、2リンク柔軟マニピュレータのモデリングと衝突検出法と停止制御の確立に注力し、その基本手法の検証を行った。柔軟マニピュレータの数学モデルはHamilton原理により導出を行った。導出した数学モデルは、分布常数系と集中定数系に対する幾何学的拘束条件を伴う微分代数方程式系で記述されるものである。2リンク柔軟マニピュレータの衝突検出器を構成するためには、モード展開などの近似手法を用いて、有限次元モデルを導出し状態推定器を構築する必要があるが、非線形性が非常に強い系であるため、Kalmanフィルタなどの線形状態推定器を直接利用することが出来ない。従来手法で用いるKalmanフィルタのイノベーション過程を用いた検出器そのままでは、非線形性の強い2リンク柔軟マニピュレータに対応できない。このため、非線形状態推定機構を用いて衝突検出器を構成することを考えた。そのため、どのような形式の非線形状態推定器が適しているのかを検討を行った。衝突は、マニピュレータの系に対する異常と捉えることで検出可能となる。すなわち、状態推定器に入力する観測情報と推定状態量との残差の大きさに基づいて衝突の有無を判定するが、非線形性の強いマルチリンク柔軟マニピュレータに対しても、本アプローチが有効であることを示す。

【平成22年度】次に本衝突検出方法を用いて、衝突時の緊急停止制御に関する研究を進める。衝突が検出されるまでは、通常的位置制御を行うが、衝突検出器により衝突が検知されれば、急停止を行う制御系に切り替えを行う。停止制御は、衝突が検出された時点での位置でアームのたわみを最小にするように停止するように制御系を構成する。衝突の瞬間は衝突物体に接触をしているが、アームのたわみを最小にすることは、物体とアームとの間に作用する接触力が最

小になることを意味し、互いのダメージを小さくすることができる。また、衝突検出と停止制御の有効性を具体的に検証するため、数値シミュレーションを実施した。また、衝突の方向によって停止制御方法を変えることで、ダメージを軽減する方法についても検討した。

【平成 23 年度】衝突検出と停止制御に関するケーススタディを実施し、実用性の検証とその改善を図った。また、衝突時の制御系の安定性や衝突検出性に関する研究を実施した。衝突時の安定性に関しては、位置制御器と停止制御器の切替制御を行うことになる。また、切り替え時には、衝突という不確定現象を伴うため、その瞬間の安定性は厳密には保証できていない。本研究では、衝突時の系全体の挙動を解析し、その安定性について調べる。現時点では、1 リンク柔軟マニピュレータに対して、単一の物体が 1 点に衝突した場合における衝突検出が確実にできる状態であるが、複数物体や大きさを持つ物体との衝突検出性能に関しては、理論的な裏付けがない。複数物体もしくは大きさを持つ物体との衝突について検出性能の解析を行う。また、停止制御時に使用する状態推定値は衝突入力の影響を大きく受けており、その影響を排除することも検討した。

4. 研究成果

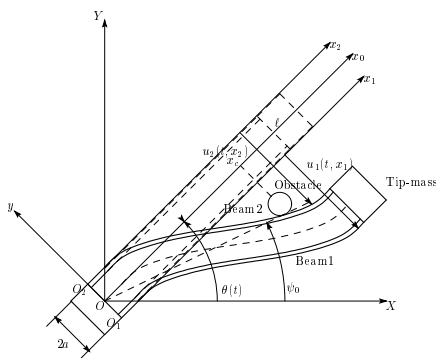


図 1: 並行構造 1 リンク柔軟アーム.

主たる目的は、イノベーション過程を用いた柔軟マニピュレータの衝突検出法の適用できる範囲を拡張し、衝突検出後の停止制御の性能を向上させることである。柔軟マニピュレータ(図 1)は、厳密には非線形分布定数系として定式化されるものであるが、簡単化のため線形化モデルとして記述し、状態推定器として線形カルマン

フィルタを用いた。これを、より厳密に取り扱えるよう非線形状態推定器である unscented カルマンフィルタ(UKF)を導入し、そのイノベーション過程により衝突検出を行えるようにした。図 1 にあるように、アームの任意の位置に未知の物体が衝突するが、UKF のイノベーション過程の振幅によって定義された衝突検出関数を監視することで、衝突の有無を判定できる。

非線形状態推定器として代表的なものに拡張カルマンフィルタがあるが、本研究においては拡張カルマンフィルタと UKF それぞれに対して、衝突検出性能を比較した。柔軟アームに入力される衝突による衝撃入力は非常に急激な変化をする信号であるため、拡張カルマンフィルタの推定値が衝突入力時に不安定になる傾向が見られた。一方、UKF による状態推定は、衝突が発生した場合でも安定して動作することが確認された。このことから、非線形システムとしての柔軟マニピュレータに対する衝突検出においては、UKF を状態推定器として使用することが妥当であると結論された。ただし、柔軟マニピュレータの数学モデル導出は、学会発表論文 [1-3]、雑誌論文 [2] による。

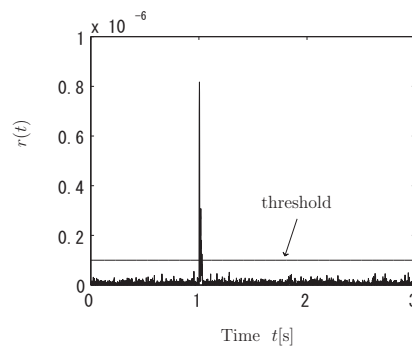


図 2: 衝突検出関数の衝突検出時の応答.

図 2 は、並行 1 リンク柔軟アームに未知物体が衝突した時の衝突検出関数の応答例を示したものであるが、 $t = 1[s]$ に衝突が発生しており、衝突検出関数の値が瞬間的に大きくなり、衝突が検出できていることが分かる。

図 3 に、2 リンクに拡張した並行構造柔軟マニピュレータの概略図を示す。2 リンクの場合は、それぞれのアームに未知物体が衝突する可能性があるため、検出すべきシステムの構造は、1 リンクに比べ複雑かつ非線形性も強い。このようなマニピュレータに対しても、

UKF を用いた衝突検出が有効であることも示し、衝突検出後の停止も速やかにできることを確認した（学会発表論文 [1,2,6]、雑誌論文 [2]）。

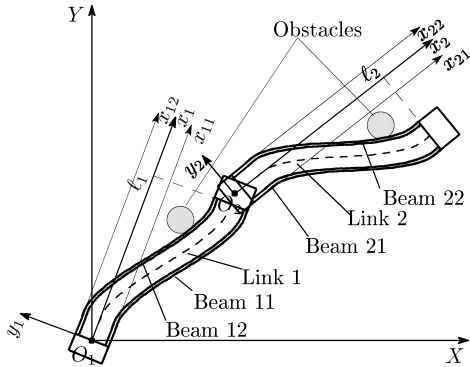


図 3: 並行構造 2 リンク柔軟アーム.

UKF による状態推定は、柔軟アームの非線形性を unscented 変換という形でアルゴリズム中に組み込み、見本点に相当するシグマ点を定義することで、非線形システムに対する統計量の計算を可能にしている。本研究では、柔軟マニピュレータという非線形システムの unscented 変換の前後確率密度がどのように変化するかを、ヒストグラムにより検証した。その結果、変換による分布の崩れはあるが UKF の動作に支障を与えることは無いものであることが確認された（図 4）。したがって、非線形システムである柔軟マニピュレータに対して UKF を用いることは、妥当であることが分かった（学会発表論文 [4]）。

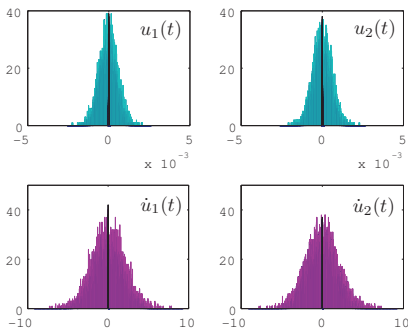


図 4: 1 リンク柔軟アームの第 1, 第 2 モードに対する、UKF の unscented 変換によるヒストグラム.

マニピュレータに対する衝突は、アームの前方から物体が衝突する場合と後方からの場合が

あり、それぞれ力を受ける方向が異なる。衝突時に停止させる場合には、衝突物体から遠ざかるように停止することで互いのダメージを軽減することができる。本アイデアに対する基本手法を確立するため、図 5 に示すような片持ち梁状の柔軟アームに対して、未知物体の衝突方向に合わせて停止制御の方式を切り替え、衝突物体から離れるような制御系の構築した。衝突方向は、アームの振動モードの速度成分から抽出し、衝突方向ごとに停止制御器を用意して切り替える方式を導入した。これによって、衝突方向に応じてアームの角度位置を変えた停止制御が出来るようになった（図 6）（学会発表論文 [7]）。

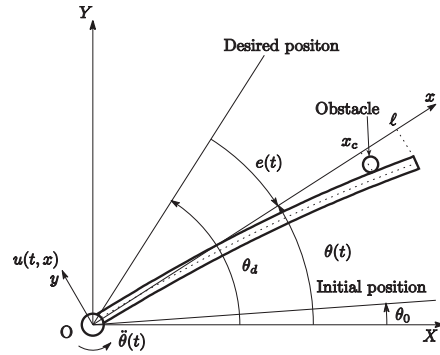


図 5: 1 リンク柔軟アーム.

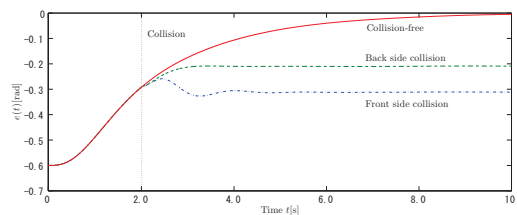


図 6: 衝突の方向を考慮した衝突検出時のアーム角度の応答.

これまでの衝突検出と停止制御は、状態推定器として同一のフィルターを用いていた。衝突による衝撃力は、マニピュレータにとって予測不可能な未知の外乱であるため、カルマンフィルタや UKF の状態推定精度を悪化させてしまい、衝突時の停止制御性能を低下させてしまう。この問題を回避するため、衝突入力を未知入力として定式化した上で、状態推定に影響を及ぼ

さないようなロバストフィルタを制御のための状態推定器として導入した。

一方、衝突検出には従来の状態推定器を用いることで、衝突検出と停止制御に用いる状態推定器を明示的に分けることで、より安定的に停止制御が行えるようにした。図 7 に、そのシステム構成をブロック線図で示す(学会発表論文 [9], 雑誌論文 [1])。

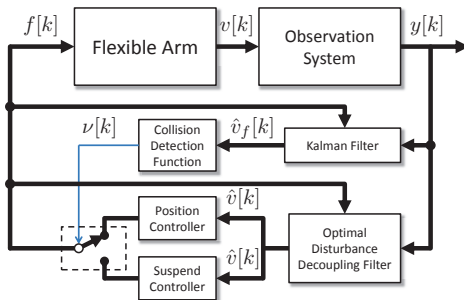


図 7: ロバストフィルタを用いた衝突検知および停止制御システム。

この手法は、線形化したマニピュレータシステムで有効性を検証した。更に非線形システムとしてモデリングを行った柔軟アームに対し、状態推定器として UKF を用い、ロバスト UKF を衝突時の停止制御用状態推定器として導入し、このようなシステムが有効であることを数値シミュレーションで示した(図 8)(学会発表論文 [8])。

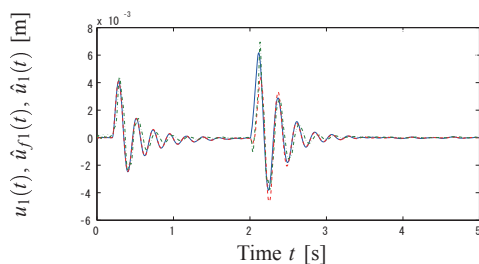


図 8: ロバスト UKF と UKF の状態推定結果の比較。実線がアームの第 1 モード $u_1(t)$ の変化、UKF による推定値を破線で、ロバスト UKF による推定値を一点鎖線で示している。

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)

- [1] Y. Sawada and A. Tanikawa, An Improved Recursive Algorithm of Optimal Filter for Discrete-time Linear Systems Subject to Colored Observation Noise, *Int. J. Innovative Computing, Information and Control*, Vol.8, No.3(B), pp.2389-2397, 2012 (査読有)。
- [2] Y. Sawada, J. Kondo and Y. Watanabe, UKF-Based Collision Detection and Control of Parallel-structured Two-link Flexible Manipulators, *Int. J. Innovative Computing, Information and Control*, Vol.8, No.3(B), pp.2399-2413, 2012 (査読有)。

〔学会発表〕(計 9 件)

- [1] 澤田祐一, 寶壁俊之, 衝突入力の影響を受けない UKF を用いた柔軟アームの制御とイノベーション過程に基づく衝突検知, 第 54 回自動制御連合講演会予稿集(豊橋市), 2011 年 11 月 19, 20 日, 2B105, pp.897-902, 2011
- [2] Y. Sawada, T. Fujimoto, A. Moritani and A. Tanikawa, Robust Filter Based Control of a Single-link Flexible Arm and Its Collision Detection Using Innovation Process, *Proc. the 43rd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, Shiga, Japan, October 28-29* pp.19-26, 2011 (査読有)
- [3] 寶壁俊之, 澤田祐一, 1 リンク柔軟アームの衝突検出と衝突の方向を考慮した停止制御, 第 21 回インテリジェント・システム・シンポジウム講演原稿集(神戸), 2011 年 9 月 1, 2 日, 1A3-1, 2011
- [4] Y. Sawada and A. Tanikawa, Optimal State Estimators for a Class of Discrete-time Linear Systems with Colored Observation Noise Using Improved Recursive Formula, *Proc. the 42nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, Okayama, Japan, Nov. 26-27, 2010*, pp.71-75, 2010 (査読有)

- [5] Y. Sawada, J. Kondo and Y. Watanabe, Collision Detection and Control of Parallel-structured Two-link Flexible Manipulators Using Unscented Kalman Filter, *Proc. the 42nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, Okayama, Japan, Nov. 26-27, 2010*, pp.236-243, 2010 (査読有)
- [6] 渡邊裕介, 澤田祐一, Unscented Kalman Filter を用いた柔軟マニピュレータの衝突検出と Unscented 変換の特性検証, 第 53 回自動制御連合講演会予稿集(高知), 2010 年 11 月 4,6 日, pp.489-494, 2010
- [7] 近藤純基, 澤田祐一, Unscented Kalman Filter に基づいた不規則外乱を受ける並行構造 2 リンク柔軟マニピュレータの衝突検知, 第 52 回自動制御連合講演会予稿集(大阪), 2009 年 11 月 21, 22 日, F1-4, 2009
- [8] H. Okumura, Y.Sawada and G. Takahashi, On a Control of Multi-link Flexible Manipulators Using Sliding Mode Observer and Its Numerical Simulations, *Proc. the 53rd Annual Conference of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, Kobe, Japan, May 20-22, 2009*, F24-4, pp.565-567, 2009
- [9] R. Fukui, Y.Sawada and J. Kondo, Modeling of a Parallel-structured Two-link Flexible Arm, *Proc. the 53rd Annual Conference of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, Kobe, Japan, May 20-22, 2009*, T16-4, pp.281-282, 2009

〔図書〕(計 1 件)

- [1] Y.Sawada, J. Kondo and Y. Watanabe, *Advanced Strategies for Robot Manipulators*, Ed. Seyed Ehsan Shafiei Sciyo, Section 9, pp.197-216, 2010

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

澤田 祐一 (SAWADA YUICHI)
 京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授
 研究者番号 : 8 0 2 7 3 5 4 8

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :