

# 並列的解法を用いたロボット機構のフィードフォワード制御

## Feed-Forward Control of a Robotic Mechanism Using Parallel Solution Scheme

山中浩司（筑波大院） 上田浩正（筑波大院） 正 磯部大吾郎（筑波大）

Kouji Yamanaka, Graduate School, Univ. of Tsukuba, e0201364@edu.esys.tsukuba.ac.jp  
Hiromasa Ueda, Graduate School, Univ. of Tsukuba, e0201238@edu.esys.tsukuba.ac.jp  
Daigoro Isobe, Univ. of Tsukuba, isobe@kz.tsukuba.ac.jp

In this paper, the parallel solution scheme is applied to the inverse dynamics computation of a robotic mechanism, and is implemented into a control system. This paper explains the process of the joint torque calculation by the parallel solution scheme and the outline of the robotic mechanism. Some control experiments are carried out on the robotic mechanism, with feed-forward plus feedback control, in comparison with single feedback control system. The results indicate the validity of the parallel solution scheme in feed-forward control of actual robotic mechanism.

*Key Words: Inverse dynamics, Feed-forward control, Parallel solution scheme, Robotic mechanism*

### 1. はじめに

近年様々な分野でロボットの研究が進んでいる。ロボットは日々進化を続けており、人間生活において身近な存在となる日も近いと思われる。しかし、ロボットに高速で複雑な動作をさせようとする際、遠心力やコリオリ力など非線形力項の影響が無視できなくなる。したがって、安定した制御を行うためには、これらの非線形力項を考慮したトルクをフィードフォワード的に入力することが有効となる。

従来は、ニュートン・オイラー法などを用いて動力学方程式を導出し、逆動力学計算を行ってきた。導出される動力学方程式はトルクの厳密解を得ることができるが、各リンクの情報が相互に依存し合うため、方程式は系固有のものとなる。そこで、系の自由度が多くなればなるほどその動力学方程式は長く、かつ複雑なものになってしまい、解の算出が困難になってしまう。

一方、連続体力学に基づく数値解析手法として広く用いられている有限要素法（FEM）は、一般的に絶対的な直交座標系に基づいて定式化され、系全体を微小要素に離散化し、それぞれの情報を全体方程式に集約して解を求めるといった手法である。この特徴を利用し、並列的に求められた節点力を力学的な関係に基づいて関節トルクに変換する並列的逆動力学計算法（以降、並列的解法と記す）が開発された[1]。本解法の節点力 トルク換算式では、節点力に関する成分、座標変換に関する成分、部材の長さに関する成分が個々のマトリックスに分割されて表現されるため、機構の変化に対しても入力データの変更により柔軟に対応することができる[2]。また、柔軟リンク系や枝分かれリンク系など、複雑なダイナミクスを有する系に対しても適用可能であることが確認されている[3][4]。しかし、その適用例は実験用のリンク系に留まっていた。

そこで本研究では、並列的解法の実用性を高めることを目的とし、実際のロボット機構のフィードフォワード制御に適用した場合の有効性について検証した。

### 2. 並列的逆動力学計算法

並列的解法は、入力データとして与えられる軌道より陽に算出可能な節点力を、力学的な関係に基づいてトルクに換算する。得られた各節点力から各関節回りのトルクを算出する式を、マトリックス形式で表したものが次式である[1]。

$$\{\tau^n\} = [L^n][T^n]\{P^n\} \quad (1)$$

ここで、 $\{\tau^n\}$ は求めるべき関節トルクベクトル、 $\{P^n\}$ は節点力に関するベクトルである。また、 $[T^n]$ は全体座標系からリンクの要素座標系に変換する座標変換マトリクス、 $[L^n]$ は系の形態を表す部材長マトリクスである。このように、各変数をマトリクス形式に分離することにより、機構の構造が変化した場合にも入力値の変更のみで柔軟に対応可能となる。

### 3. ロボット機構の概要

実験では、筑波大学医用生体工学研究室（星野研究室）が開発した剛性調整可能な空気圧式ロボットアームを使用した[5]。使用したロボット機構の概観を Fig.1 に示す。逆動力学計算を行うために、このロボット機構のモデル化を行った。モデル化の概要を Fig.2 に示す。各リンクの質量および長さは正確なデータであるが、重心の位置については、上腕および前腕はねじり機構のシリンダの中心とし、手先および肩より上のシリンダについてはリンクの中心と仮定した。線形チモシェンコはり要素を用い、関節と重心の位置に節点を設けて4リンク8要素で数値モデル化を行った。実験で使用した

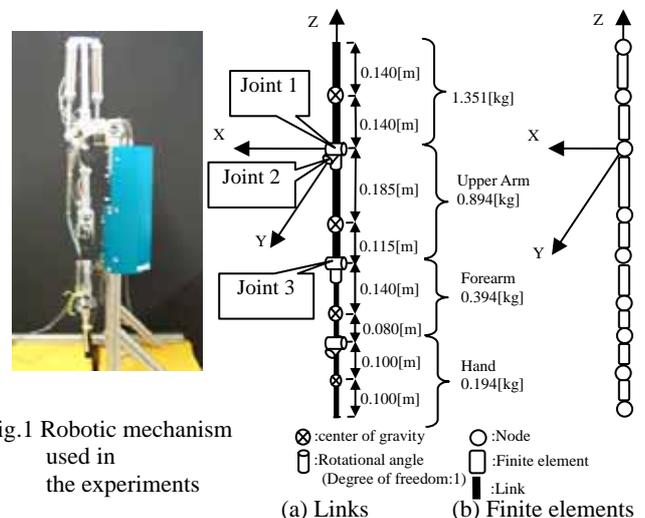


Fig.1 Robotic mechanism used in the experiments

Fig.2 Modeling of the robotic mechanism

肩の屈伸に関する関節、肩の内外転に関する関節、肘の屈伸に関する関節の名称をそれぞれ Joint 1、Joint 2、Joint 3 とする。

#### 4. ロボット機構の制御実験

実験では、比例(Proportional)、積分(Integral)、微分(Differential)補償によるPIDフィードバック制御を適用した。また、タスク個別に対してではなく、全てのタスクに適用可能となるようなフィードバックゲインを選定した。

まず、Joint 1 の関節について、1自由度の制御実験を行った。目標軌道は、1[s]で関節を  $60[^\circ]$ 回転させる軌道とした。サンプリングタイムは  $20[ms]$ とした。並列的解法によって算出されたトルク曲線を Fig.3 に示す。算出されたトルクをフィードフォワード的にロボット機構に入力し、PIDフィードバック制御を組み合わせた場合と、PIDフィードバック制御のみの場合との比較を行った。また目標軌道への収束性を調べるため、動作終了後の1[s]はフィードバックをかけ、目標軌道の最終姿勢に収束するように制御を行った。実験結果を Fig.4 に示す。実験の結果より、オーバーシュートの回避に対して有効であることが確認された。また、フィードフォワード的にトルクを補償することで、立ち上がりにおける目標角追従性の向上が確認された。全体的に目標角と実際の回転

角に差が生じているのは、アクチュエータとしてエアシリンダを用いているため、空気の圧縮からピストンの運動に変換されるまでに時間差があるためと考えられる。

次に、2自由度の制御実験を行った。3次元軌道上を動かすことを目標とし、Joint 2 と Joint 3 を制御対象とした。目標軌道は1[s]で Joint 2 を  $30[^\circ]$ 、Joint 3 を  $45[^\circ]$ 動かすもので、これを Fig.5 に示す。並列的解法で算出されたトルク曲線を Fig.6 に、制御結果を Fig.7 に示す。実験の結果より、フィードフォワード的にトルクを補償することにより、立ち上がりにおける目標角追従性の向上が確認された。しかし本実験においては、フィードフォワード的にトルクを補償した効果があまり見られなかった。これは、ロボット機構のアクチュエータが機械的な損失を多く含むため、フィードフォワード的にトルクを補償してもその効果が薄れてしまい、動作においてフィードバックに頼る部分が大きくなったためと考えられる。また、Joint 2 においてはオーバーシュートが、Joint 3 においては定常偏差が発生している。これは、1自由度制御に比べ自由度数が多いため、モデル化の誤差がより大きく制御結果に反映されるためであると思われる。しかし、フィードバック制御のみの場合よりもフィードフォワード的にトルクを与えた方が動作の再現性が向上し、全体的に制御の安定性が増すことが確認された。

#### 5. 結論

本研究では、並列的解法により算出されたトルク値をフィードフォワード的にロボット機構に補償し、フィードバック制御と組み合わせて制御実験を行った。その結果、フィードバック制御のみの場合と比較して、立ち上がりの目標角追従性および動作の再現性の向上、また一部においてはオーバーシュートの回避等の改善が確認された。本研究に用いたようなロボット機構の動力学方程式を求め、それを用いて動力学補償を行うことは一般的に困難である。これに対し並列的解法は、入力データの作成のみで容易にロボット機構のダイナミクスをモデル化できるため、対処が簡単であった。

今後は、ユニット式で容易に着脱可能な構造可変型多肢マニピュレータを製作し、そのフィードフォワード制御実験を通じ、解法の柔軟性の検証をさらに行いたいと考えている。

#### 謝辞

本研究を遂行するに当たり、財団法人メカトロニクス技術高度化財団の助成を一部受けた。また、実験を行うに当たり、筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻、星野聖助教授にはロボットを使用させて頂いた。ここに謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] 磯部大吾郎：有限要素法を用いたリンク機構の逆動力学計算，日本ロボット学会誌，20(6)，647-653，2002.
- [2] D. Isobe: A Unified Solution Scheme for Inverse Dynamics, Advanced Robotics, 18(9), 859-880, 2004.
- [3] 磯部大吾郎、今泉大作：リンク系の部材剛性に依存しない統一的反動力学計算法，日本機械学会論文集(C編)，70(691)，728-735，2004.
- [4] D. Isobe, A. Yagi and S. Sato: General-Purpose Expression of Structural Connectivity in the Parallel Solution Scheme and Its Application, JSME International Journal Series C, 49(3), 789-798, 2006.
- [5] 淵上幸太、古藪陽太、阿波野朋樹、川淵一郎、小川博教、星野聖：剛性調整可能な空圧式ロボットアーム，SICEシステムインテグレーション部門講演会(SI2004)論文集，747-748，2004.

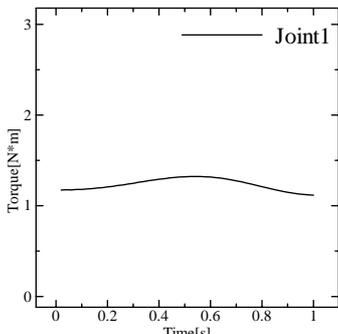


Fig.3 Joint torque curves

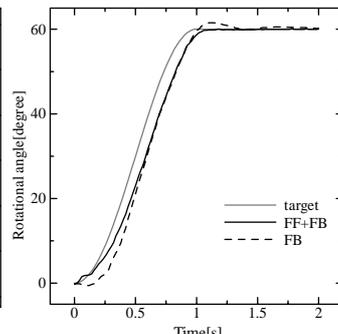
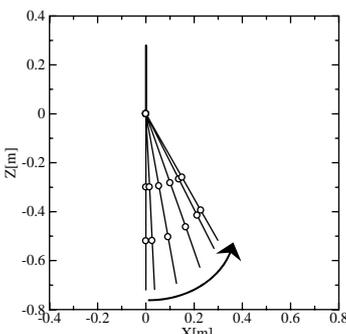
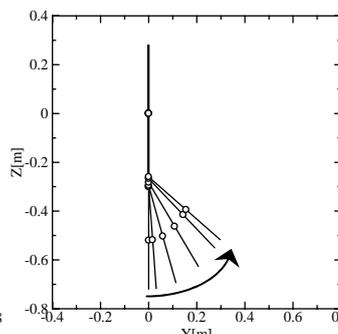


Fig.4 Control results



(a) X-Z plane



(b) Y-Z plane

Fig.5 Target trajectory

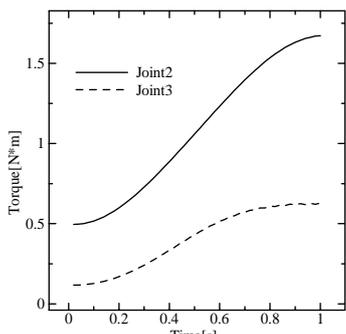


Fig.6 Joint torque curves

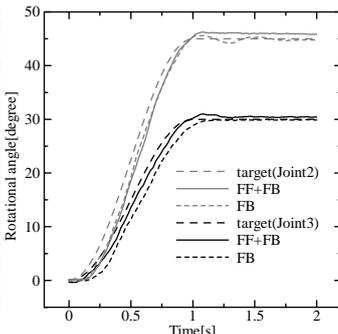


Fig.7 Control results