

# 有限要素法を用いた逆動力学計算による リンク機構の制御実験

## Control Experiments of Link Mechanisms Using Inverse Dynamics Calculated by FEM

筑後 陽一(筑波大院) 佐藤 俊介(筑波大院) 正 磯部大吾郎(筑波大)

In this report, a new calculation scheme of inverse dynamics for link mechanisms using Finite Element Method (FEM) is implemented into a control system. Joint torques of link mechanisms are calculated in parallel, and also incrementally, in the calculation scheme. Therefore, some investigations are made to verify the validity of the control system. This paper explains the outline of the control system, in which the proposed scheme is used to supply a feed-forward control. Some control experiments are carried out, and the results are compared with those by a PD control system.

*Keywords* : Link Mechanisms, Inverse Dynamics, Control, Finite Element Method (FEM)

### 1. はじめに

ロボット工学の発展に伴い、ロボットに求められる動作は多様化してきている。ロボットに高速、複雑な動作をさせようとする際、遠心力やコリオリ力といった非線形力項の影響を受けることが予想される。この問題に対処するには、非線形力項を考慮した動力学方程式を導出し、制御系に動力学補償を組み込むことが大変有効な手段となる。

従来の逆動力学計算法、例えばニュートン・オイラー法などでは、リンク機構に対して内向き、外向き計算を行い、リンク間で相互依存する変数による動力学方程式を導出している。そのため、多自由度を持つリンク機構やリンク構成が変化するような機構、または系が閉じるような機構では式の導出が非常に困難になってしまう。

一方、ロボットの動作が高速化、複雑化してくると、系の形態や拘束条件の変化などに対して柔軟に対応できる統一的な逆動力学計算法の必要性が増すことが考えられる。そこで、並列解法の一つである、有限要素法(FEM)を適用した逆動力学計算法が提案された[1]。この手法では、系全体を有限要素で離散化し、並列的にその節点力を求める。そして、力学的関係より節点力をトルクに変換することで逆動力学を求める。本アルゴリズムには、直交座標系に基づいて関節トルクを算出することや、運動方程式を厳密に解くのではなく、時間増分ごとに逐次的に解くことによって算出するといった特徴がある。本研究では、以上の特徴を持つ FEM による逆動力学計算法を実際に制御系に組み込み、簡単な開リンク機構の制御に適用することで、本手法の実用性を確認することを目的とした。本報告では、ギヤ無しモータを使用した平面開リンク機構に対し、逆動力学によるフィードフォワード制御と PD フィードバック制御を適用した場合についての検討結果を報告する。

### 2. 制御系の構成

従来の逆動力学計算法では、動力学方程式に変位、速度、加速度を入力してその時刻のトルクを直接的に求め

る。一方、FEM による逆動力学計算法では、まず時々刻々の節点力増分を算出し、それを足し合わせて逐次的に節点力を求め、最終的にトルクに換算する。また、従来の手法では各リンクにおける相対回転座標系を用いるのに対し、FEM による手法では絶対直交座標系を用いる。このように、解の計算法や扱う座標系などが従来の手法と異なるため、本手法を使用する場合には、実際に制御を行う際に重要となるフィードバックの導入や、計算時間などについて検討を行う必要がある。そこで本報告では、Fig.1 のような平面 3 リンク機構に対し、PD フィードバック制御と FEM 逆動力学計算によるフィードフォワード制御を組み合わせた Fig.2 のような制御系を構築し、軌道追従制御の実験を行った。

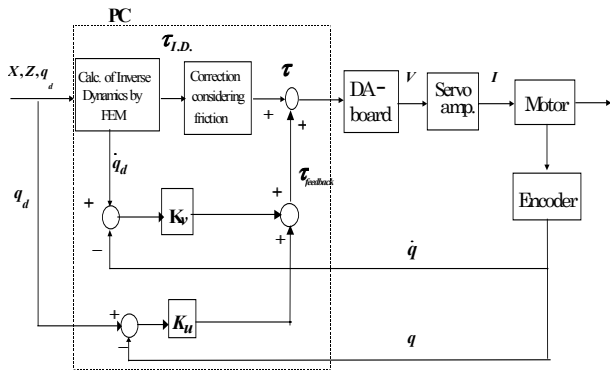
逆動力学計算部では目標軌道から FEM により逆動力学計算を行い、逐次的に全関節のトルクを算出する。リンク機構を実際に制御する際には、逆動力学によるトルク値の他に、モータに発生する摩擦力の影響やフィードバック値などを加え、次式のように計算した。

$$\tau = J\dot{q} + Dq + f_c + \tau_{I.D.} + \tau_{feedback} \quad (1)$$

ただし、 $\tau$  は入力トルク、 $J$  はモータの慣性モーメント、



Fig.1 3-link mechanism used in the control experiments



$X, Z, q_d$  : Coordinates in global Cartesian coordinates  
 $q, \dot{q}$  : Actual angle, speed  
 $q_d, \dot{q}_d$  : Target angle, speed  
 $K_u, K_v$  : Feed back gain for angle, speed

Fig.2 Outline of the control system

$q$ はモータの角速度,  $D$ はモータの粘性抵抗,  $f_c$ は動摩擦  
 力,  $\tau_{I.D.}$ は逆動力学計算により求めたトルク値,  $\tau_{feedback}$   
 はフィードバック値である. 本実験では, モータの慣性  
 モーメント  $J$ はカタログ値から, モータの粘性抵抗  $D$ ,  
 動摩擦力  $f_c$ は実験的に同定した. フィードバックは, 前  
 ステップの直交座標系における目標角度を要素座標系に  
 座標変換した値と, 計測された角度情報を用いて次式の  
 ように行った.

$$\tau_{feedback} = K_u (q_d - q) + K_v (\dot{q}_d - \dot{q}) \quad (2)$$

ここで  $q_d, \dot{q}_d$  はそれぞれ目標角度および目標角速度,  
 $q, \dot{q}$  はそれぞれエンコーダより取得した実際の角度お  
 よび角速度,  $K_u, K_v$  はそれぞれ角度, 角速度に対するゲ  
 インである. また, サーボアンプでは電流制御モードを  
 使用した.

### 3. 実験結果

サンプリングタイム 10 ms で時々刻々のトルク値をフ  
 ィードフォワード的に入力し, PD フィードバックと組み  
 合わせて制御した場合と, PD フィードバックのみで制御  
 した場合の 2 種類の実験を行った. Fig.3 に制御時間 3 s  
 の目標軌道を, Fig.4 にリンク 1 におけるモータの回転  
 角度の時刻歴を示す.

実験において, 10 ms のサンプリングタイムで逐次的  
 なトルク値の計算から電流値への変換, 指令電圧の出力  
 までなされており, 十分にリアルタイム性が確保でき  
 ることが分かった. また, フィードフォワード的にトルク  
 値を与えた場合, PD フィードバックのみで制御を行っ  
 た場合と比較して追従性, 収束性共に優れていることが  
 確認できた. フィードフォワードを加味した場合, フィ  
 ードバックのゲインを小さくでき, 速い動作などの制御  
 には特に有効であると考えられる.

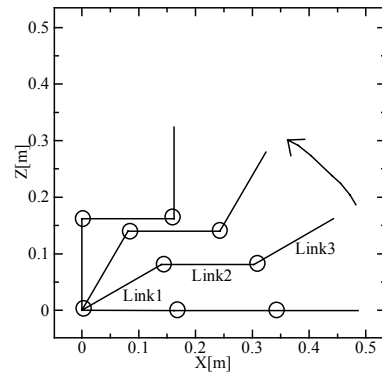


Fig.3 Target for control in 3-second motion

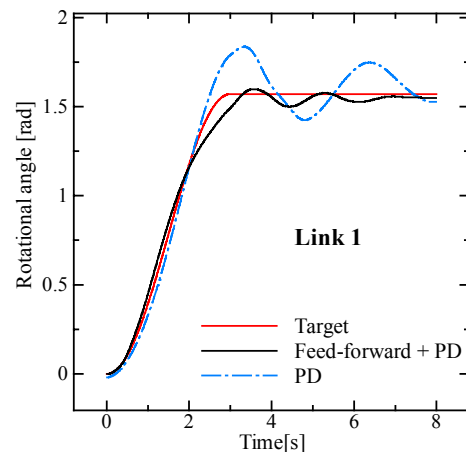


Fig.4 Control result of Link-1 in 3-second motion

### 4. まとめ

本報告では, 実際に平面 3 リンク機構の制御に FEM に  
 よる逆動力学計算法を適用して実験を行い, フィードバ  
 ック制御の導入やリアルタイム性についての検討を行っ  
 た. その結果, 逐次的に解を算出する本手法の場合でも,  
 PD フィードバック制御と組み合わせリアルタイムに使用  
 可能であることが確認できた. 今後は, 並列解法の一  
 種である本手法の特徴を最大限に利用し, 本報告で構築  
 した制御系を閉リンク機構や開閉リンク系が交互に発生  
 するような問題などに適用し, 統一的な手法としての実  
 用性を高めていく予定である. また, 逆動力学の算出が  
 特に重要となるような, リンク系と外界との間に力が作  
 用する場合などについても実験を進め, 検討を行いたい.

### 参考文献

- [1] 磯部大吾郎 他: 有限要素によるリンク機構のモデル化(その 1 ~ その 3), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, (2000, 2001).
- [2] 小林尚登, 増田良介, 小森谷清 他, 計測自動制御学会編 ロボット制御の実際, コロナ社.