

並列的解法による フレキシブルマニピュレータの制振について

○加藤昭博(筑波大院) 磯部大吾郎(筑波大)

Vibration Control of Flexible Manipulators by Using Parallel Solution Scheme

*Akihiro KATO, Graduate school, Univ. of Tsukuba, Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba

Abstract — In this paper, verification is done on the effects of a vibration control scheme using the formerly proposed inverse dynamics solution scheme. The solution scheme, with proper target trajectories as input data, can easily calculate inverse dynamics regardless of member stiffness and/or connectivity. Target trajectories are calculated by using another scheme, which is based upon the principle of virtual work, where member stiffness and damping effects are included in the trajectory data. Some numerical tests are carried out on a simple flexible link system, and the results show that the vibration control scheme can achieve good effects on the control.

Key Words: Vibration control, Flexible manipulators, Parallel solution scheme, Trajectory

1. 緒言

リンク機構の一般的な動力学方程式は、相対回転座標系に基づいて定式化され、各変数が相互に依存し合うために、対象となる機構が変化した場合には式の再導出が必要となる。そこで、リンク機構の形態に依存しない統一的な逆動力学計算法の開発を目的とし、有限要素法(FEM)を用いた並列的解法(PSS)が考案され[1]、開・閉ループが連続的に発生する機構のフィードフォワード制御においても有効であることが確認された[2]。

他方、近年のロボットにはタスクを高速化し、かつ消費エネルギーを削減する目的で部材の軽量化が求められている。しかし、軽量化が招く部材剛性の低下により、部材に発生する曲げ振動が無視できなくなるため、その振動を制御することが重要な問題となる。そのため、フレキシブルアームの軌道制御や逆動力学計算などの研究[3]が行われている。しかし、従来の動力学方程式が剛体リンク系を想定し、しかも相対回転座標系に基づいていることにより、その逆動力学計算過程は煩雑なものとなっている。一方、並列的解法は、FEMによって弾性たわみを考慮した軌道計算アルゴリズムを付加することで、柔軟リンク系に対しても適用可能となる[4]。

本報告では、本解法を用いたフレキシブルマニピュレータの制振手法について簡単な数値例とともに示し、その有効性の評価を行う。

2. 軌道計算アルゴリズム

並列的解法では、動的な効果を含めた節点力を求めれば全関節のトルクが算出されるため、その計算過程は部材剛性に依らず同一のものとなる。したがって、部材剛性や減衰を考慮した正確な軌道を作成し、並列的解法の入力値とすればよい。以下にFEMを用いた軌道計算アルゴリズムについて記す。

機構の動作によって生じる体積力を考慮すると、仮想仕事の原理より、時刻 $t + \Delta t$ における増分型運動方程式は次式で定式化される。

$$[M] \ddot{u}_{t+\Delta t} + [M] \dot{u}_{t+\Delta t} + [C] \dot{u}_{t+\Delta t} + [K] u_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} - \{R\}, \quad (1)$$

ここで $[M]$ は全体質量マトリクス、 $[C]$ は全体減衰マトリクス、 $[K]$ は全体剛性マトリクス、 $\{F\}$ は外力ベクトル、 $\{R\}$ は内力ベクトル、 $\{u_m\}$ は系の移動量のみベクトル、 $\{u_d\}$ は系の変形量のみベクトルである。また、減衰には比例減衰を用いた。(1)式に時刻毎の $\{u_m\}$ を入力することで逐次的に $\{u_d\}$ が算出され、最終的にはこの2つの変位量の和として剛性や減衰を考慮した軌道が得られる。時間積分法としては、Newmarkの β 法($\delta=1/2, \beta=1/4$)を使用した。

3. 並列的逆動力学計算法

並列的解法は、剛性および減衰に関する項を無視した(1)式に、前節で得た軌道を入力して部材剛性や減衰を考慮した節点力を算出し、それ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、全体座標系のマトリクス形式で表したものが次式である[1]。

$$\{\tau^n\} = [L^n] [T^n] \{P^n\} \quad (2)$$

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、 $[L^n]$ は系の構造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処可能となる。また、軌道計算と逆動力学計算の双方を同一のモデルで解くことにより、包括的に一つのアルゴリズムとして扱うことを可能とした。

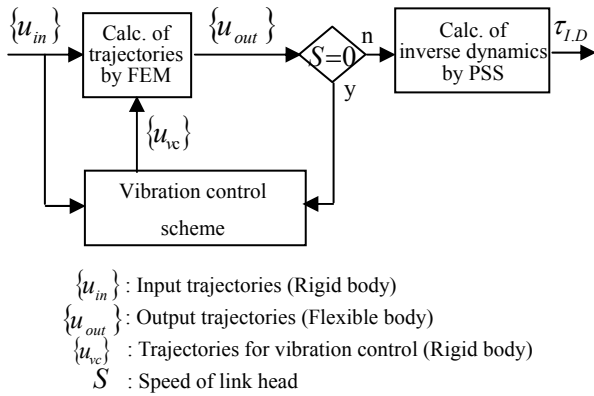


Fig.1 Outline of the vibration control scheme

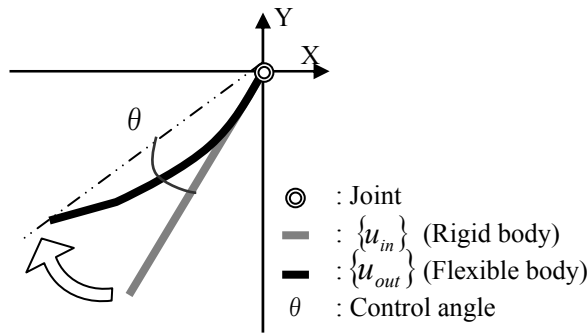


Fig.2 Angle of vibration control

4. 制振手法について

4.1 概要

フレキシブルマニピュレータの制御においては、目標手先位置の実現の障害となる曲げ振動を制御あるいは抑制する必要がある。本研究では、目標手先位置の近傍で曲げ振動を抑制することを目的とする。以下に、前述の軌道計算アルゴリズムを用いた制振手法について述べる。この手法の概要図を図1に示す。図のように軌道計算アルゴリズムは、剛体リンクの入力軌道 $\{u_{in}\}$ から部材剛性を考慮した軌道 $\{u_{out}\}$ を出力する。出力された軌道 $\{u_{out}\}$ が目標手先位置の近傍にあり、かつリンク先端の並進方向の速さが $S=0$ となる場合、すなわち部材の変形が最大とみなせる場合に、制振軌道 $\{u_{vc}\}$ を作成し入力する。 $\{u_{vc}\}$ は、部材の変形に合わせて部材が真直となるように関節を回転させる軌道である。すなわち、図2に示すように、剛体リンクの軌道と変形した部材の先端とがなす操作角 θ だけ剛体リンクを回転させる軌道である。また、このときに θ [rad] だけ回転させるのに要する時間を変形追従時間と呼ぶ。最終的には、以上のようにして得た軌道から、部材剛性と制振を考慮した関節トルクが算出される。

4.2 数値例

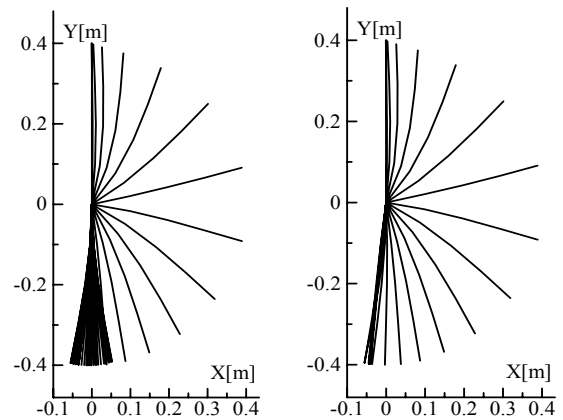
表1のようなアクリル製1リンクフレキシブルマニピュレータに対し解析を行った。リンクは3次は

Table 1 Parameter of link member (Acrylic plastic)

Parameter	Value
Length: L [m]	0.4
Sectional area: A [m ²]	0.2×10 ⁻⁴
Density: ρ [kg/m ³]	1.19×10 ³
Young's modulus: E [GPa]	3.2
Moment of inertia: I _y [m ⁴]	6.667×10 ⁻¹²
Head mass: m [kg]	0.024
1st natural period of vibration T ₁ [s]	1.017
2nd natural period of vibration T ₂ [s]	0.0673

り要素1要素でモデル化し、部材先端に24[g]の質点を付加し、水平面内で1.5[s]でπ[rad]回転させるタスクを与えた。

図3には、全体座標系におけるマニピュレータの位置を0.1[s]毎に描画したものを示す。また図4,図5,図6にはそれぞれ要素座標系におけるリンク先端のx方向変位、リンク先端の並進方向速さ、リンク根元のトルク曲線を示す。凡例には、制振を考慮したものとしなないものを挙げた。図3より、タスク開始から部材がたわみながら動作をしている様子が分かる。その曲げ振動の固有周期は1次の固有周期と一致した。また、タスク終了となる時刻1.5[s]を過ぎた辺りで並進方向の速さが0および部材の変形が最大となり、制振が開始されることが図4,5から確認できる。さらに図6から、制振が開始されると、部材を拘束する向きにトルクを発生していたモータがトルクを緩和させ、部材の変形を抑制する様子が分かる。制振の効果により、リンクの最終位置が急速に収束している様子が図3から確認できる。このときの変形追従時間は130[ms]である。変形追従時間をさらに短くすると、ある時点で2次の固有周期に対する共振がみられ、振幅が増大した。一方、追従時間を長く設定すると十分な制振効果が得られず、振動が緩やかに続く様子が観察された。このように、対象とする系の共振を回避し、かつ効果的な制振を行うには、適切な変形追従時間の選定が必要となる。



(a) Without vibration control (b) With vibration control

Fig.3 Trajectory of flexible manipulator

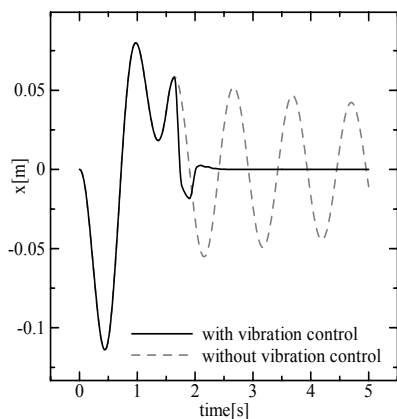


Fig.4 Displacement of link head in elemental coordinate

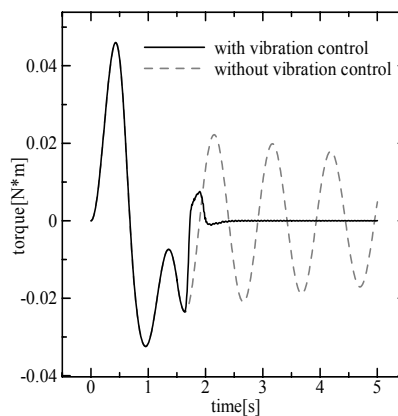


Fig.6 Torque curve

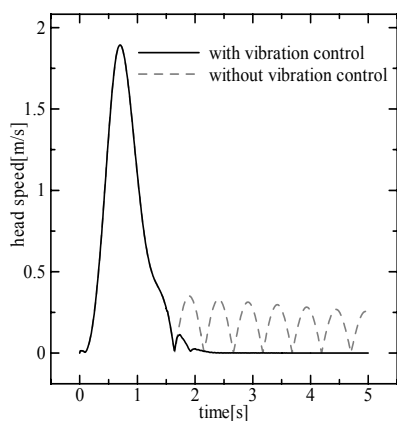


Fig.5 Link head speed

5. 結言

本研究では、様々なリンク系に対する統一的逆動力学計算法の開発の一環として、並列的解法を用いたフレキシブルマニピュレータの制振手法を数値的に評価し、その有効性を確認した。今後は、フレキシブルマニピュレータのフィードフォワード制御を実現することが課題となる。

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, Y. Chikugo, D. Imaizumi, S. Sato and A. Yagi, Feed-forward control of link mechanisms under various boundary conditions by using a parallel solution scheme, *Proc. 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*, 2003, 2773-2778, Las Vegas U.S.A.
- [3] H. Asada, Z. -D.Ma and H. Tokumaru, Inverse Dynamics of Flexible Robot Arms: Modeling and Computation for Trajectory Control, *Trans. of ASME, J. of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, 112, 177-185, 1990.
- [4] 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逆動力学計算法”, 日本機械学会論文集 (C編), 70(691), 728-735, 2004.