

構造可変型多肢マニピュレータのフィードフォワード制御

○上田浩正(筑波大院) 磯部大吾郎(筑波大)

Feed-Forward Control of Structure-Varying Multi-Armed Manipulator

*Hiromasa UEDA (Graduate School, Univ. of Tsukuba), Daigoro ISOBE (Univ. of Tsukuba)

Abstract — In this paper, feed-forward control of structure-varying multi-armed manipulator is done using the parallel solution scheme of inverse dynamics. The dynamic equations of such manipulator are hard to conduct by generally used schemes such as the Newton-Euler method or the Lagrangian method, since the equations include interdependent variables between the constituting links. In the parallel solution scheme, the joint torque is calculated by converting the nodal forces, which is evaluated by equations of motion of finite elements in a matrix form. Therefore, information of the entire system is handled in parallel, and it makes easier to deal with structure-varying multi-armed manipulator. Some numerical tests are carried out to verify the adequacy of the parallel solution scheme.

Key Words: Inverse dynamics, Multi-armed manipulator, Feed-forward control, Parallel solution scheme

1. 緒言

宇宙空間など人間が活動することが困難な環境下で、マニピュレータは貴重な作業手段として用いられている。ペイロードの低減や限られたスペースの活用、構造を冗長系にすることにより迅速な作業を実現できる効果を狙い、リンクを付け替えて形状が変化できる、即ち構造を変化させることが可能なマニピュレータ (Fig. 1) が JAXA にて提案されている [1]。このようなマニピュレータは無重力下で使用されるため、動作が低速であっても遠心力やコリオリ力など非線形力項が無視できなくなる。そのため動力学補償を行うべく逆動力学計算が必要となってくる。しかし、現在使用されている Newton-Euler 法や Lagrange 法といった方法 [2] では、相対回転座標系を用いリンク間で相互に依存した、系固有の動力学方程式を導出することとなる。そのため、複雑な構造をもつ系や構造が変化する系においては、式の導出が特に煩雑になるといった問題点がある。そこで、有限要素法 (FEM) を適用した逆動力学計算法である並列的逆動力学計算法 (以下、並列的解法と記す) が開発された [3]。FEM では全体直交座標系で系全体を微小要素に離散化し、全体方程式にまとめて解を出す。よって、各要素の情報は並列的に取り扱われる。並列的解法ではこの特徴を使って

節点力を出し、それを力学的な関係に基づいてトルクに換算するという 2 段階の計算を行う。トルクに換算する過程においては、節点力、座標変換、リンク長に関する各々の成分はそれぞれ独立したマトリクスで表されている。そのため、例えば枝分かれ系といった複雑な構造への対応は入力データの変更のみで可能であり [4]、さらには構造が変化する際でもその都度適切なデータを入力すれば対応することができる。

本研究では、JAXA の提案したマニピュレータに準じた構造可変型マニピュレータを製作し、その制御に並列的解法を用いることによって解法の有効性を検証する。

2. 並列的逆動力学計算法

並列的解法では、最初に運動学計算によって算出された目標軌道の加速度情報をもとに運動方程式を解き、系内の拘束されていない節点に作用する節点力を逐次的に算出する。

$$[M]\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} \quad (1)$$

$[M]$ は全体質量マトリクス、 $\{\ddot{u}\}$ は節点加速度ベクトル、 $\{F\}$ は全体座標系で表される外力ベクトルである。次に、 n リンク系の各々のリンクにおいて (1) 式で得られた節点力を使って関節のトルクを表すと

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

という簡潔な式で表現できる [3]。ここで、 $\{\tau^n\}$ は要素座標系における関節トルクベクトル、 $\{P^n\}$ は全体座標系における節点力に関するベクトル、 $[T^n]$ は全体座標系を各リンクの要素座標系に変換する座標変換マトリクス、 $[L^n]$ は部材長やリンク構造の情報を含む部材長マトリクスである。

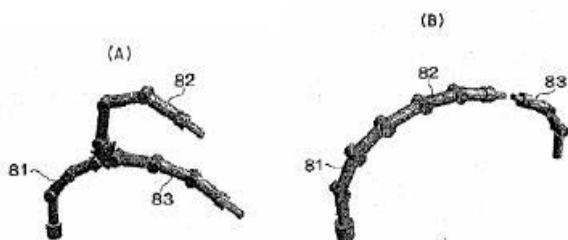


Fig. 1 Concept of variable multi-armed manipulator proposed by JAXA [1]

3. 構造可変型多肢マニピュレータ

構造可変型多肢マニピュレータの仕様としては、構造の組換えが容易にでき、さらに動作時に思わぬ変形が生じないようにモータを小さくし、できるだけ堅牢かつ軽量にすることとした。これらのことを考慮し、マニピュレータのリンクにおける構成要素をモジュール化し、リンクユニットとコネクタユニットに分けた。リンクユニットは、主にリンク部材とモータで構成される。コネクタユニットは、リンクユニット同士を機械的かつ電氣的に結合するものである。また、動力学補償の影響を大とするため、モータはギアレスであることを目指した。一方では全体を軽量化する必要があることから、重量が動作に影響しない根元部分のモータに限ってギアレスモータ(maxon, RE40)にし、他の箇所には減速比 18:1 のギア付モータ(maxon, RE25)を使用した。根元部分以外の各ユニットを Fig. 2

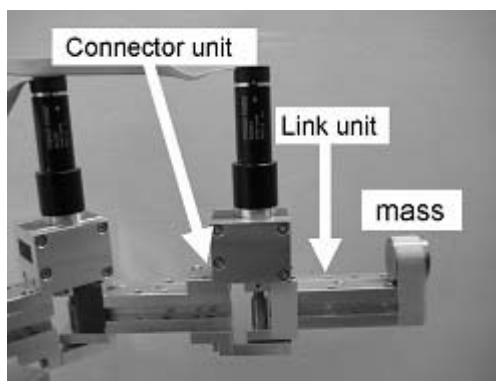


Fig. 2 Connector and link units

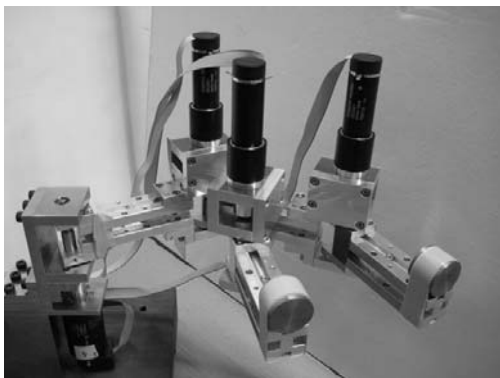


Fig. 3 Structure-varying multi-armed manipulator

Table 1 Parameter of the link system

Parameter	Value
Length of link unit [m]	0.120
Length of connector unit [m]	0.020
Link mass [kg]	0.183
Connector and motor mass [kg]	0.713
Extra mass[kg]	0.160

に、ユニットを接続したときの全体概要を Fig. 3 に示す。また、実機の仕様を Table 1 に示す。

4. 制御実験

実験は合計 4 リンクのマニピュレータを枝分かれ構造、そして直列に並べた構造について行った。なお、その際にはフィードフォワード(FF)制御を補助する目的で PID フィードバック(FB)制御を併用した。これは実機の組み付け誤差による抵抗や、関節で使われるベアリングの抵抗は定式化が困難であり[5]、補償する必要が生じたためである。この場合の制御トルク τ_{FF+FB} は次式で表される。

$$\tau_{FF+FB} = \tau_{motor} + \tau_{I.D.} + \tau_{feedback} \quad (3)$$

ここで、 $\tau_{I.D.}$ は逆動力学計算により求めるトルク、 τ_{motor} 、 $\tau_{feedback}$ はそれぞれ、次式で求められるモータ特性トルクおよび PID フィードバックトルクである。

$$\begin{aligned} \tau_{motor} &= J\ddot{q}_d + D\dot{q}_d + f_c \quad (4) \\ \tau_{feedback} &= K_p(q_d - q) + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_I \int (q_d - q) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで J 、 D 、 f_c はモータの慣性モーメントと粘性係数と動摩擦力、 q_d 、 \dot{q}_d 、 \ddot{q}_d は目標の角度と角速度と角加速度、 q 、 \dot{q} は実際に検出された角度と角速度、 K_p 、 K_D 、 K_I は比例、微分、積分に対するフィードバックゲインである。一方、FB 制御のみを使用した場合は次の制御トルク τ_{FB} を使用した。

$$\tau_{FB} = \tau_{motor} + \tau_{feedback} \quad (6)$$

実験に用いた J 、 D 、 f_c の値を Table 2 に示し、各ゲイン値を Table 3 に示す。関節 1 のみ他の関節とは違うモータを使用しているため、異なる値をとる。

枝分かれ構造の実験について、目標軌道を Fig. 4 に示す。図で A、B と記された部分に 0.160 [kg] の錘を配置した。また、動作時間は 1 [s] とした。関節 1, 3, 5 の全体座標系における目標角度、FF+FB 制御の場合ならび

Table 2 Dynamics parameters of each motor

	J [kgm ²]	D [kgm ² /s]	f_c [N]
Joint 1	1.350×10^{-4}	1.910×10^{-5}	1.662×10^{-2}
Joint 2~5	1.053×10^{-6}	3.618×10^{-6}	1.778×10^{-3}

Table 3 Feedback gain for each motor

	K_p	K_I	K_D
Joint 1	0.10000	0.00100	0.00001
Joint 2~5	0.06000	0.00001	0.00001

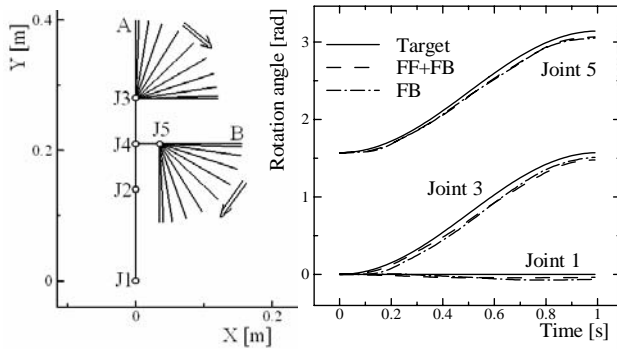


Fig. 4 Target trajectory Fig. 5 Rotational angle

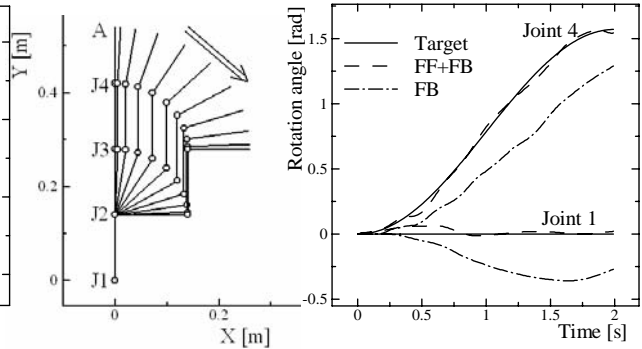


Fig. 7 Target trajectory Fig. 8 Rotational angle

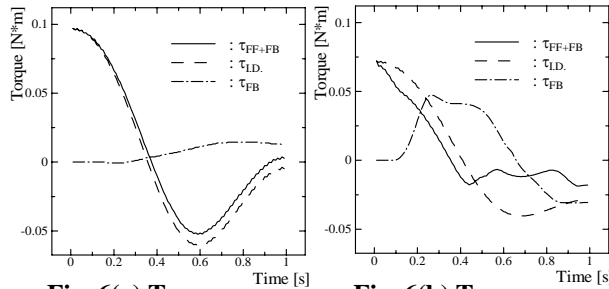


Fig. 6(a) Torque curve of J1

Fig. 6(b) Torque curve of J2

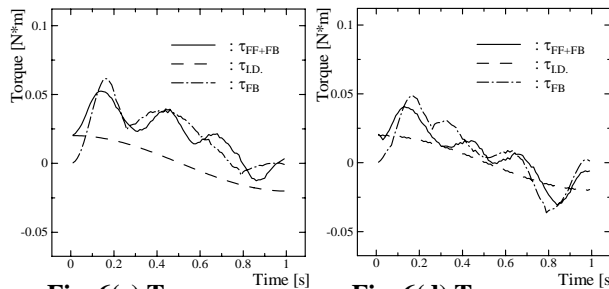


Fig. 6(c) Torque curve of J3

Fig. 6(d) Torque curve of J5

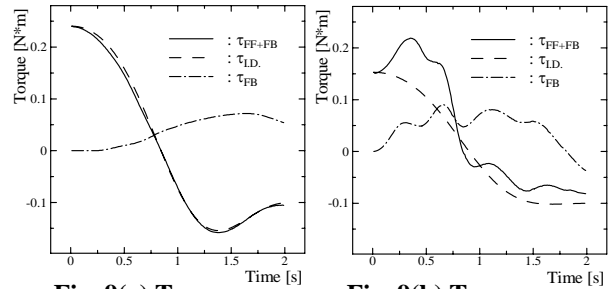


Fig. 9(a) Torque curve of J1

Fig. 9(b) Torque curve of J2

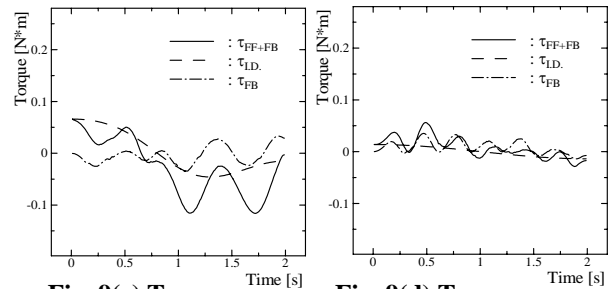


Fig. 9(c) Torque curve of J3

Fig. 9(d) Torque curve of J4

に FB 制御のみの場合の計測角度を Fig. 5 に示す。FF+FB 制御の場合の全関節についての τ_{FF+FB} , τ_{LD} , および FB 制御のみの場合の τ_{FB} を Fig. 6(a)~(d) に示す。なお、関節 4 と 5 の間はコネクタユニットであり、関節 4 に制御トルクは発生しない。回転角を見ると、FF 制御を併用することによって追従性が向上していることが分かる。トルク値は関節 1 と 2 では τ_{LD} が τ_{FF+FB} と良好に一致している。一方、関節 3 と 4 では、 τ_{LD} のみでは制御トルク値に十分に近い値が出ていないことが分かる。これは、ベアリングの動摩擦抵抗の計測、実験時誤差に起因するものと思われる。

次に、直列に並べた構造での実験について、目標軌道を Fig. 7 に示す。図で A と記された部分に 0.160 [kg] の錘を配置した。動作時間は 2 [s] とした。関節 1 と 4 の全体座標系における目標角度、FF+FB 制御の場合ならびに FB 制御のみの場合に計測された角度を Fig. 8 に示す。 τ_{FF+FB} , τ_{LD} , τ_{FB} を Fig. 9(a)~(d) に示す。回転角を見ると、FB 制御のみの場合は、フィードバックゲイ

ンを FF+FB 制御用に小さく設定しているため当然ではあるが、追従性が大幅に悪化している。一方、FF+FB 制御の場合には、回転角の追従性は良好に保たれている。フィードバックゲインの設定幅が狭まる意味でも、FF 制御は有効である。また、関節 1 と 2 でのトルク値 τ_{LD} は τ_{FF+FB} と良好に一致している。

以上の結果より、並列的解法による逆動力学計算が、構造可変型多肢マニピュレータに対しても良好なフィードフォワードトルクを提供できることが示された。

5. 結論

本研究では、汎用性を有する並列的解法を利用し、従来より使用されてきた方法では困難とされるような多肢マニピュレータの FF 制御を行った。今後は長編成化、構造の複雑化、そしてリンクを柔軟化した場合に対しても検証を行っていく予定である。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、(独)日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究C(課題番号: 19560250)の援助を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

[1] 若林靖史, 稲場典康, 下田孝幸, 狼嘉彰:“再構成型宇宙用多肢マニピュレータ・システム”, 特許第3435081号, 2000-7-11.

- [2] [2]J.J.Craig, 三浦宏文, 下山勲 訳:ロボティクス-機構・力学・制御-, pp.155-188, 共立出版, 1991.
- [3] 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, Vol.20, No.6, pp.647-653, 2002.
- [4] D. Isobe, A. Yagi, S. Sato:“General – Purpose Expression of Structural Connectivity in the Parallel Solution Scheme and Its Application”, JSME International Journal Series C, Vol.49, No.3, pp. 789-798, 2006.
- [5] 小野繁:ころがり軸受の応用設計, pp.69-71, 大河出版, 1979.