コンプライアントマニピュレーションにおける 多自由度マニピュレータの階層化制御

羅 志 偉* 高 橋 秀 樹* 伊 藤 正 美*

Hierarchical Control of Multi-Degree of Freedom Manipulators for Compliant Manipulation

Zhi-wei LUO Hideki TAKAHASHI Masami ITO

In this paper, we study on hierarchical control structure of multi-D.O.F. manipulator to perform compliant manipulation on dynamic objects. We propose that in order to realize the real time fast computation of the joint control torques, it is better to calculate the joints angle terms with low sampling frequency at high level, and compute the lefted control torques including joints velocities and linear compensation with high sampling frequency at low level. Such hierarchical structure is demonstrated by the simulation of a 2-D.O.F arm pushing on a dynamic door. Simulation results also shows the effectiveness of the model matching method that was used in the linear force feedback compensator design, compared with impedance control.

Key Words : Hierarchical Control, Compliant Manipulation, Multi-D.O.F. Manipulator, Dynamic Objects

1. は じ め に

動的な作業対象物（または、作業環境）に対して、接触作業（コンプライアントマニピュレーション、以下、CM作業と略称する）を行うために、作業ロボットが対象物からの反作用力に対して敏感に対応できることが要求される。そのために、作業空間におけるロボットの手先の制御の高速、高精度化が必要となる。このようなロボットの制御系の設計に、われわれはモデルマッチング法を提案し、1自由度の場合の本設計法の有効性を実験によって確かめた¹⁾。本稿では、CM作業を行う多自由度マニピュレータの制御について検討する。

多自由度マニピュレータの制御系の構成として、普通非線形フィードバック補償+位置、力の線形補償がよく使われている^{1,2)}。しかし、逆動力学的に関節トルクを求める計算量が膨大となり、実時間での計算処理が困難

な問題となる。この問題を克服するために、計算アルゴリズムの合理化や並列処理方式が研究され、また最近では、作業空間でのロボット運動制御の階層化に関する研究が行なわれている^{3,4)}。

本報告は、多自由度の接触作業ロボットの制御構造の階層化について検討をし、二自由度マニピュレータによる押す作業のシミュレーションによってその有効性を考察する。

2. 接触作業ロボットの制御の階層化

まず、作業空間座標を対象物に合わせて設定する。

$$x=L(\theta), F_{int}=G_e(s)x \quad (1)$$

ここで、 x はロボットの手先の位置ベクトル、 θ は関節ベクトル、 F_{int} は対象物からの反作用力、 $G_e(s)$ は動的な作業対象物（または、作業環境）への入力変位 x から対象の反作用力 F_{int} までの伝達関数で、対象物のダイナミックスを表す。（文献[1]参照）

次にマニピュレータの運動方程式を次のように表わす。

原稿受付 1990 年 12 月 26 日

* 名古屋大学工学部

Fig. 1 Hierarchical control structure

$$A(\theta)\ddot{\theta} + B(\theta)[\dot{\theta} \dot{\theta}] + C(\theta)[\dot{\theta}^2] + g(\theta) = \tau - J^T F_{int} \quad (2)$$

ただし、 $A(\theta)$ は関節空間での慣性行列、 $B(\theta)[\dot{\theta} \dot{\theta}]$ と $C(\theta)[\dot{\theta}^2]$ は遠心力とコリオリ力、 $g(\theta)$ は重力、 $J^T(\theta)F_{int}$ は F_{int} の関節空間での等価力、 τ は関節駆動トルク、 $J(\theta)$ はヤコビ行列である。

$$[\dot{\theta} \dot{\theta}] = [\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3, \dots, \dot{\theta}_{n-1} \dot{\theta}_n]^T$$

$$[\dot{\theta}^2] = [\dot{\theta}_1^2, \dot{\theta}_2^2, \dots, \dot{\theta}_n^2]^T \quad (3)$$

である。また、 $A(\theta)$ について次の関係が成立する。

$$A(\theta) = J(\theta)^T A(x) J(\theta) \quad (4)$$

ただし、 $A(x)$ は慣性行列である。

接触作業ロボットの制御の階層化を考えると、次の二つの特徴に注目すべきである：

a. 接触初期に、対象物との相互作用のため、ロボットの手先速度と対象の反作用力の変化が比較的激しいこと。

b. 接触時に、ロボット手先が対象物によって拘束されているため、姿勢はそれほど大きく変化しないこと。

この二つの特徴に基づいて、次のような多自由度マニピュレータの制御構造の階層化を行なう。

まず、上位レベルで、低サンプリング周期 ($=k\Delta t$) でロボットの関節角度に関するパラメータを計算する。

$$A = J(\theta)^T A(x) = A(\theta) J(\theta)^{-1}$$

$$B = B(\theta), C = C(\theta), D = g(\theta) \quad (5)$$

次に、下位レベルでは、高サンプリング周期 ($=\Delta t$) で次のような動的な線形補償及びトルク入力計算する。

$$\tau = AF_m + B[\dot{\theta} \dot{\theta}] + C[\dot{\theta}^2] + D + E\dot{\theta} + J^T F_{int} \quad (6)$$

$$F_m = C_x(x_d - L(\theta)) - [C_f + I]F_{int} \quad (7)$$

$$E = -A(J(t+\Delta t) - J(t))/\Delta t \quad (8)$$

ここで、 C_x と C_f はそれぞれロボットの位置補償器及び力フィードバック補償で、文献 [1] に従って設計される。

Fig. 2 A 2-D.O.F. manipulator pushing a door

Fig. 1 に、上に説明した多自由度マニピュレータの階層制御の構成図を示している。これに対して、O. Khatib は

$$j(\theta)\dot{\theta} = H_1(\theta)[\dot{\theta} \dot{\theta}] + H_2(\theta)[\dot{\theta}^2] \quad (9)$$

とおき、 $H_1(\theta)$ と $H_2(\theta)$ も上位レベルで計算する方式を提案し³⁾、また吉川らは $B[\dot{\theta} \dot{\theta}]$ 、 $C[\dot{\theta}^2]$ 及び $E\dot{\theta}$ を全部上位レベルで計算する構造を主張している⁴⁾。

3. シミュレーション

本章では、Fig. 2 に示すような二自由度マニピュレータを用いて、動的な対象物を水平面内に回転させる作業における 2 章の階層化制御構造の有効性について検討する。

まず、作業空間座標 $x = (r, \psi)^T$ とし、座標原点を対象物の回転軸におく、従って、 $\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J(\theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}$ である。ただし、 $J(\theta)$ の各要素はそれぞれ次の通りである。

$$J_{11} = l_1(l_3 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 - \theta_2))/r$$

$$J_{12} = l_2(l_3 \sin \theta_2 - l_1 \sin(\theta_2 - \theta_1))/r$$

$$J_{21} = l_1(l_3 \cos \theta_1 - l_1 - l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2))/r^2$$

$$J_{22} = l_2(l_3 \cos \theta_2 - l_2 - l_1 \cos(\theta_1 - \theta_2))/r^2 \quad (10)$$

マニピュレータの運動方程式は次の通りである。

$$\tau_1 = (m_1 l_{g1}^2 + l_1 + m_2 l_1^2) \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_{g2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \ddot{\theta}_2$$

$$- m_2 l_1 l_{g2} \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_2^2 + J_{11} f_r + J_{21} f_\psi$$

$$\tau_2 = m_2 l_1 l_{g2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \ddot{\theta}_1 + (m_2 l_{g2}^2 + l_2) \ddot{\theta}_2$$

$$+ m_2 l_1 l_{g2} \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_1^2 + J_{12} f_r + J_{22} f_\psi \quad (11)$$

対象物のダイナミクスを次のように考える。

$$f_r = 0, f_\psi = I_e \ddot{\psi} + B_e \dot{\psi} + K_e \psi, (I_e > 0) \quad (12)$$

ロボットの慣性行列は

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} m_1 l_{g1}^2 + I_1 + m_2 l_1^2 & m_2 l_1 l_{g2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \\ m_2 l_1 l_{g2} \cos(\theta_2 - \theta_1) & m_2 l_{g2}^2 + I_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

である。

階層構造の上位レベルで計算するパラメータ,

$$A = A(\theta)J(\theta)^{-1}, \quad B = D = 0$$

$$C = m_2 l_1 l_{g2} \sin(\theta_2 - \theta_1) \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

である。また、下位レベルで計算する動的線形補償を含むマニピュレータの制御トルクは次の通りである。

$$\tau = AF_m + C \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1^2 \\ \ddot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} + E\dot{\theta} + J^T F_{int} \quad (15)$$

ここで、 $x_d = [\gamma_d, \phi_d]^T$ はロボットの手先の目標位置、 $F_{int} = [f_r, f_\phi]^T$ は反作用力である。 $F_m = [f_{mr}, f_{m\phi}]^T$ と E は式(7)と式(8)の通りである。 C_x, C_f の設計は、文献[1]の第5章を参照されたい。

以下、シミュレーションは 16bit の計算機 PC-9801 VX 上で行なった。ロボットの順動力学の計算に 10ms

Table 1 Parameters of the 2-D.O.F manipulator

m_1, m_2	1	[kg]
l_1, l_2	0.0833	[kg m ²]
l_1, l_2	1	[m]
l_{g1}, l_{g2}	0.5	[m]
l_2	0.366	[m]
$r(0)$	1.366	[m]
$\phi(0)$	0	[deg]

の刻み幅での 4 次のルンゲ・クッタ法を用いた。入力トルクの計算周期 Δt を 10ms とするための上位と下位レベルの計算周期比 $k \geq 2$ である必要があることが確認された。

シミュレーションに使うパラメータは **Table 1** に示した通りである。

Figs.3, 4 に、対象物の ϕ 方向のダイナミクス $I_e = 2$,

Fig. 3 Simulation results of impedance control

Fig. 4 Simulation results of our approach

Fig. 5 Relations between ratio k and error S_ϕ

$B_e=0$, $K_e=1$ のとき, ロボットの目標インピーダンスを

$$f_\phi = -0.2\ddot{\phi} + 0.42(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + 0.2(\phi_d - \phi) \quad (16)$$

とするインピーダンス制御²⁾及びわれわれの規範モデル法のシミュレーション結果を示す。

Fig. 3 と 4 からわかるように, インピーダンス制御²⁾では過渡振動期が長くて, 定常誤差も大きいのに比べ, モデルマッチング法では, 一自由度の場合の結果とほぼ同じく, 滑らかな位置と力の応答特性が得られた。

また, Fig. 3 と 4 の (c) から, 接触初期における ϕ 方向のロボットと対象物の相互作用力が大きく, このときのロボット手先の速度の変化がとても大きいことを物語る。

Fig. 5 に, 本稿で提案した階層化方式と吉川ら⁴⁾の提唱した “ θ に関する項をすべて上位レベルで低サンプリング周期で計算する” 方式における ϕ 方向の角度偏差の二乗積分

$$S_\phi = \int_0^T e^2 \cdot dt / T \quad (17)$$

と周期比 k との関係を示す。ただし, $e = \phi_1 - \phi$ で, ϕ_1 は非線形フィードバックの計算遅れを無視したときの手先のステップ応答である。周期比 k の増大につれて, われわれの方式では, S_ϕ が図に見えないほどほんの少ししか変わらないのに比べ, 角速度をも低サンプリング周期の計算に含んだ場合の S_ϕ が直線的に増加する。

4. ま と め

接触作業を行う自由度マニピュレータの階層化制御方式について考察した。

ロボットの制御系の設計に, これまでに 1 自由度の場合で確認してきたモデルマッチング法が, 階層化制御された多自由度マニピュレータにも適用できることを確認した。また, 実際の階層化制御構造として, 低いサンプリング周期でマニピュレータの関節角度 θ に関するパラメータを計算し, 高いサンプリング周期で力フィードバックを含む動的補償, 並びに関節角速度 $\dot{\theta}$ に関する項を計算した方が合理的であることがわかった。

この階層化制御構造に対する理論的な検証はこれからの研究課題となる。

参 考 文 献

- 1) 羅, 伊藤: コンプライアントマニピュレーションのためのロボットの制御設計, 計測自動制御学会論文集, 26-4, 61/68 (1990).
- 2) N. Hogan: Impedance Control: an approach to manipulation, Part I~III, Trans. of ASME J. of Dyn. Sys. Meas. Cont., 107-1, 1/24 (1985).
- 3) O. Khatib: A Unified Approach for Motion and Force Control of Mechanical Manipulators, IEEE J. of Robotics Autom., RA-3-1, 43/53 (1987).
- 4) 吉川, 野瀬: マニピュレータの動的制御の階層化に関する研究, システム制御情報学会論文誌 1-7, 33/40 (1988).