高精度速度および加速度近似手法を用いたロボットの
アドミッタンス制御における周波数特性の改善*佐藤 邦彦^{*1}, 堀 貴之^{*2}
豊田 希^{*3}, 藪田 哲郎^{*3}Improvement of Frequency Characteristic of
Admittance Control of Robot Using High Accuracy
Approximation Method of Velocity and AccelerationKunihiko SATO, Takayuki HORI,
Nozomi TOYODA and Tetsuro YABUTA^{*4}^{*4} Graduate School of Engineering, Yokohama National University,
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 240-8501 Japan

This paper shows high frequency performance of an admittance control for a finger-arm robot. As the admittance control uses both velocity and acceleration information estimated from position sensing data when realizing virtual dynamic model, experimental results depend on accuracy of the estimation method. New estimation method of a bilinear transformation method (trapezoidal integration method) is introduced to estimate both velocity and acceleration instead of a conventional backward difference method, whose experimental results show more precise results in high frequency area.

Key Words: Robot, Approximation Method, Admittance Control, Manipulator, Kinematics

1. 緒言

ロボットが社会で活躍するためには人に対して安全に動作することが求められる。そこで著者らはフィンガ・アームロボットを用いてロボットの動きに柔らかさを与える研究を行ってきた。この研究ではアドミッタンス制御を用いて仮想環境モデルの剛性、粘性を付与した。しかし、従来の実験では速度に関連する粘性効果をうまく再現できない問題が残っていた⁽¹⁾⁽²⁾。これは、動的運動計測の問題であり、仮想環境モデル構築に際して、位置の変化から速度および加速度の推定法に問題があったものと考えられる。本論文は推定法の向上を行ったもので、その結果、高周波領域の周波数特性の改善効果が得られたことを示す。

2. 制御システム

本研究では図1に示すような6自由度アームロボット

の先端に、3自由度フィンガロボットを2本取り付け、フィンガ・アームロボットのフィンガ部を用いて実験を進めた。フィンガは式(1)で示されるマス・ばね・ダンパ系を模擬した仮想環境モデルが設定され、 M, D, K の値を設定して任意の粘性、剛性を再現する。

$$F(k) = M\Delta\ddot{X}(k) + D\Delta\dot{X}(k) + K\Delta X(k) \quad (1)$$

(ただし k はサンプリング時刻)

具体的な制御方法は、力 $F(k)$ が与えられた時、式(1)の関係が成り立つような位置目標値 $\Delta X(k)$ を算出し、それを制御系の目標値とするアドミッタンス制御を実現している。

Fig. 1 Finger-arm robot

* 原稿受付 2010年7月7日。

^{*1} 横浜国立大学大学院工学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)。

^{*2} 学生員, 横浜国立大学大学院工学府。

^{*3} 正員, 横浜国立大学大学院工学府。

E-mail: yabuta@ynu.ac.jp

Fig. 2 Stiffness experiment

Fig. 3 Viscosity experiment

Table 1 Parameters of stiffness and viscosity test

	$M[\text{kg}]$	$D[\text{Ns/m}]$	$K[\text{N/m}]$
Stiffness experiment	1	30	150
Viscosity experiment	0.5	100	0

Table 2 Parameters of frequency response

	$M[\text{kg}]$	$D[\text{Ns/m}]$	$K[\text{N/m}]$
Pattern1	1	30	150
Pattern2	1	0	300

3. 速度および加速度推定法

(a) 従来の近似法(差分法 BDM-backward difference method) 従来の差分法を用いた速度および加速度近似式を示す⁽⁴⁾.

$$\Delta \ddot{X}(k) = \frac{\Delta \dot{X}(k) - \Delta \dot{X}(k-1)}{T} \quad (2)$$

$$\Delta \dot{X}(k) = \frac{\Delta X(k) - \Delta X(k-1)}{T} \quad (3)$$

式(2),(3)を式(1)に代入して $\Delta F(k)$ が作用したときの位置制御目標値 $\Delta X(k)$ を求めると以下ようになる.

$$\Delta X(k) = G_1 F(k) + G_2 \Delta X(k-1) + G_3 \Delta \dot{X}(k-1) \quad (4)$$

ただし,

$$G_n = \frac{M}{T} + D + KT, \quad G_1 = \frac{T}{G_n}$$

$$G_2 = \frac{M/T + D}{G_n}, \quad G_3 = \frac{M}{G_n}$$

(b) 台形法(BTM-bilinear transformation method)

近似精度を向上させる台形法を用いた速度及び加速度の近似式を示す.

$$\Delta \ddot{X}(k) = \frac{2}{T} (\Delta \dot{X}(k) - \Delta \dot{X}(k-1)) - \Delta \ddot{X}(k-1) \quad (5)$$

$$\Delta \dot{X}(k) = \frac{2}{T} (\Delta X(k) - \Delta X(k-1)) - \Delta \dot{X}(k-1) \quad (6)$$

式(5),(6)を式(1)に代入して $\Delta F(k)$ が作用したときの位置制御目標値 $\Delta X(k)$ を求めると以下ようになる.

$$\Delta X(k) = G_1 F(k) + G_2 \Delta X(k-1) + G_3 \Delta \dot{X}(k-1) + G_4 \Delta \ddot{X}(k-1) \quad (7)$$

ただし,

$$G_n = \frac{4M}{T^2} + \frac{2D}{T} + K$$

$$G_1 = \frac{T}{G_n}, \quad G_2 = \frac{1}{G_n} \left(\frac{4M}{T} + 2D \right)$$

$$G_3 = 4M + DT, \quad G_4 = MT$$

4. 剛性・粘性実験

上記の差分法と台形法を用いてアドミッタンス制御を行う. 式(1)に示す仮想環境モデルの剛性及び粘性結果を図2, 図3にその実験条件を表1に示す.

図2および図3より剛性実験と粘性実験では近似法の違いが出なかった. この原因としては, 最高速度5cm/s以下の条件で行ったため動的運動に影響があまり出なかったと考える.

5. 周波数応答実験

本章では動的運動の効果を明らかにするために, 周波数特性を調べ, 特に高い周波数領域での近似法の差を検証する. 外力 $F(k)$ については外部環境を一定周波数で高周波に変化させるのは困難なので, 内部信号として次式の $F(k)$ を用いてフィングの運動を調べた.

$$F = F_0 \sin \omega t \quad (8)$$

ただし $F_0 = 4.0[\text{N}]$ とし, 実験周波数 ω は $\{0.04, 0.063, 0.1, 0.158, 0.25, 0.4, 0.63, 1.0, 1.58, 2.5, 4.0, 6.25, 10.0, 15.9\}[\text{Hz}]$ の14段階に設定した.

表2に示すパターン1, パターン2の運動の理論式を求めると, パターン2のばねのみでダンパがない場合は減衰のない強制振動となり理論式は,

Fig. 4 Frequency response with viscosity effect
($M=1[\text{kg}]$, $D=30[\text{Ns/m}]$, $K=150[\text{N/m}]$)

Fig. 5 Frequency response without viscosity effect
($M=1[\text{kg}]$, $D=0[\text{Ns/m}]$, $K=300[\text{N/m}]$)

Fig. 6 Position change with viscosity effect
($M=1[\text{kg}]$, $D=30[\text{Ns/m}]$, $K=150[\text{N/m}]$, $\omega=2.5[\text{Hz}]$)

Fig. 7 Position change without viscosity effect
($M=1[\text{kg}]$, $D=0[\text{Ns/m}]$, $K=300[\text{N/m}]$, $\omega=2.5[\text{Hz}]$)

$$X = \frac{F}{M(\omega_n^2 - \omega^2)} \sin \omega t - \frac{F\omega\omega_n}{M(\omega_n^2 - \omega^2)} \sin \omega_n t \quad (9)$$

また、パターン1のマス・ばね・ダンパを設定した場合は減衰のある強制振動となり理論式は、

$$X = \frac{D_1\omega - C_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{\lambda_1 t} + \frac{D_1\omega - C_1\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{\lambda_2 t} + C_1 \cos \omega t + D_2 \sin \omega t \quad (10)$$

(ただし、 $C_1, D_1, \lambda_1, \lambda_2$ は設定により決まる定数)となる。パターン2の減衰のない場合の強制振動は異なる周波数の正弦波の重なりとなり複雑な動きとなる。

両パターンの実験結果を図4、図5に示す。図4の減衰のある場合は6Hz付近まで実験値は理論値と同じであり、優れた特性を示す。近似法による違いはあまり見られなかった。次に減衰のない場合を図5に示すと1Hz付近から理論値との差が大きくなる。近似法による違いは台形法が差分法よりも理論値との誤差が少なくなっており、減衰のない場合は台形法が優れているという結果となった。これは減衰のない場合の動きは速くなり近似法の効果が表れたものと思われる。実際の目標値の波形について比較を行う。図6は減衰のある場合だが3線全てが同一線上にある。一方、図7は減衰のない場合の比較であるが台形法は理論線上に載っているが差分法は振幅が大幅に下回っている。減衰のない場合の運動は複雑で動きも速いため台形法による近似精度向上のメリットが現れている。

6. まとめ

本研究ではフィンガ・アームロボットの速度の近似推定法の改良を行い、従来の差分法による速度、加速度の近似を台形法に変更して精度向上を試みた。制御性能への影響を評価するために外力付加による剛性、粘性試験および周波数応答実験をした。その結果、動きの遅い剛性、粘性試験では近似法の違いはなかったが高周波における減衰のない場合の周波数応答では台形法による制御性能改善の効果が現れた。台形法を用いた推定法が有効であると確かめられた。

文 献

- (1) Honma, J., Yabuta, T., Kaji, S., Yoshida, K., Compliance Control of Master-Slave System (Comparison of Master-Slave System between DCC and WCC), *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.69, No.685(2003), pp.2366-2373
- (2) Yamada, D., Nakamura, Y., Hara, M., Jian, H., Yabuta, T., Cooperative Impedance Control of a Finger-Manipulator System in Consideration of Manipulability, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.74, No.748 (2008), pp.2994-3003.
- (3) Hori, T., Yamada, D., Jian, H., Sugiuchi, H., Yabuta, T., Admittance Control of Multi-Finger-Arm Robot with Manipulability Control of Fingers Under Arm Compensatory Movement, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.76, No.763 (2010-3), pp.655-664
- (4) Ogata, K., DISCRETE-TIME CONTROL SYSTEMS, Printice-Hall, Inc C, 1987.