人間の把持特性に基づくロボットハンドの力制御

○中沢 信明(東北大) 池浦 良淳(三重大) 猪岡 光(東北大)

Force control of a robot hand emulating human's grasping behavior

Nobuaki Nakazawa(Tohoku Univ.), Ryojun Ikeura(Mie Univ.), Hikaru Inooka(Tohoku Univ.)

1. 緒言

人間は必要最小限の力で物体を把持することが知られている。また把持物体に慣性力が生じた場合には、慣性力を補うように把持力を微妙に変化させている^{[1][2]}。本研究では、把持物体の加速度の方向および大きさに対する人間の把持特性を調べ、それに基づくロボットハンド制御の有効性を示す。

2. 人間の把持特性

人間の把持動作の測定装置を Fig.1 に示す。被験者は、親指および中指で物体を把持し、ビープ音に合わせて鉛直方向における上下振動動作(周期: 0.4 sec 振幅: 50 mm)を行なった。Fig.2 に典型的な測定波形を示す。図中の実線は測定値であり、破線は次式で与えられる理論値(最小把持力)である。

$$F_1^* = m(g + \alpha)/2\mu \quad (1)$$

ここで、 m は物体質量、 g は重力加速度、 α は加速度、 μ は静止摩擦係数である。図より、人間は周期的に把持力を変化させていることが確認できる。その値は、理論値とともに変化している。ここで、次式で示される Safety factor N を求めた。

$$N = F_1/F_1^* \quad (2)$$

把持物体の加速度と Safety factor との関係を図.3 に示す。図中の○印は測定値である。加速度が正の場合、すなわち物体が振幅の最下地点に到達するときに、Safety factor は加速度によらずほぼ一定値をとっている。その値は約 1.3 であり、効率のよい把持動作が行なわれている。一方、加速度が負の場合、Safety factor は大きくなり、加速度の方向によりその特性が異なることが分かる。この人間の特性を加速度の関数として、次式で近似する。

$$N(\alpha) = \begin{cases} \kappa & (\alpha \geq 0) \\ T\alpha^2 + \kappa & (\alpha < 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで近似式は図中の点線で示され、パラメータの値は、 $\kappa = 1.29$, $T = 0.0427$ である。

3. ロボットへの応用

3.1 ロボットハンドの制御

本研究では、Fig.4 に示されるロボットハンドを用いて人間の動作に基づく把持力制御を行なう。フィンガ部は 2 自由度平行移動型であり、加速度センサを搭載し、把持物体の加速度が観測可能である。こ

Fig.1 Experimental device to measure the grasping force

Fig.2 Time trajectories of grasping force and theoretical force

Fig.3 Relationship between acceleration and parameter N

こで、式 (3) における Safety factor $N(\alpha)$ を用いた場合、目標値 $F_i(t)$ は次式で与えられる。

$$F_i(t) = N(\alpha, t)\{F_d + F(\alpha, t)\} \quad (4)$$

ただし、 F_d は静止状態における最小把持力、 $F(\alpha, t)$ は慣性力による影響を補うために必要な最小把持力である。ここでは、外乱の慣性力に対して PD フィードバック制御による入力で把持力を制御する。入力 $u(t)$ は次式で与えられる。

$$u(t) = K_p\{F_i(t) - F(t)\} - K_d \frac{dF(t)}{dt} \quad (5)$$

ここで、 K_p は比例フィードバックゲイン、 K_d は微分フィードバックゲインである。

Fig.4 Control system of robot hand

Fig.5 Experimental results of controlling the grasping force performed by the robot hand (A period of time = 0.7(sec))

Fig.6 Typical time trajectories when the delay time occurs

3.2 ロボットハンドによる実験結果

前節の被験者による実験と同様に、ロボットハンドが物体を把持した状態で、上下振動動作を行なった。実験結果を Fig.5 に示す。図中の実線がハンドの把持力、破線が理論値、点線が Safety factor を一定にした場合の把持力である。図より、ロボットハンドが慣性力を補うように把持力を制御していることが分かる。このときの把持力の値は、人間の場合と同様に理論値とともに周期的に変化している。Safety factor を一定にした場合には、把持力を減少させる時点において理論値との差が小さくなり、把持物体を滑り落す可能性がある。一方、人間の把持動作に基づき Safety factor を可変にした場合には、把持力を減少させる動作が抑制され、安定な把持動作が行なわれていることが確認できる。

3.3 時間遅れの改善

理論値に対して把持力が時間遅れを持つ場合、Fig.6 に示されるように理論値と把持力との差 $|F_1(t_c) - F_1^*(t_c)|$ が大きくなり、必要のない時点で過大な力が加わることになる。本研究ではリアルタイムで各々のピーク値における時刻 t_c , t_d を検出し、 K_d を次式のように周期的に逐次更新して時間遅れを

(a) Grasping force

(b) Delay time and parameter K_d

Fig.7 Experimental results of controlling the grasping force under the condition that K_d is variable

少なくする。

$$e(k) = t_c(k) - t_d(k) \quad (6)$$

$$K_d(k+1) = K_d(k) + \Phi e(k) \quad (7)$$

ただし、 Φ は収束を決定するパラメータであり、 k は周期の回数である。振動周期を 0.4(sec) に設定したときの測定結果を Fig.7 に示す。ここでは、 $K_d(0) = 0.01$, $\Phi = 0.002$ とした。図より、 K_d が周期的に更新され、その値は 0.12~0.13 でほぼ収束していることが分かる。実験開始から時刻 $t=1$ (sec) 付近での時間遅れは約 70(msec) であり、把持力の時間波形と理論値とが重なる時点において不安定な把持状態となる。時刻 $t=1$ (sec) 以降は、時間遅れが改善され、時刻 $t=3$ (sec) 付近で時間遅れが収束し、安定な把持動作が行なわれていることが確認できる。

4. 結言

本研究では、把持物体に慣性力が生じた場合における人間の把持特性をモデル化し、ロボットハンドの力制御への適用を行なった。さらに、把持力の時間遅れを改善するための手法を提案した。その結果、ロボットハンドが慣性力に対して効率のよい把持動作を行っており、人間の動作特性に基づく把持力制御の有効性を示した。

なお、本研究は平成 9~10 年度文部省科学研究費(日本学術振興会特別研究員奨励費 No.6227)および財団法人メカトロニクス技術高度化財団の補助を受けている。また測定にあたり、東北大学工学部機械航空工学科 中宮賢樹氏に多大な協力を得た。各関係者に心から謝意を表す。

参考文献

- [1] 金一煥, 仕入 英武, 猪岡 光, “人間の把持力制御特性の実験的考察”, 人間工学, Vol.29, No.2, pp.95-102, 1993.
- [2] J.R.Flanagan and A.M.Wing, “The stability of precision grip forces during cyclic arm movements with a hand-held load”, Exp Brain Res, 105, pp.455-464, 1995.