

人間の把持機能の実験的考察

Experimental Study on Human's Grasping Force

○植北祥充, 中沢信明, 猪岡光

○Yoshimitsu Uekita, Nobuaki Nakazawa, Hikaru Inooka

東北大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

キーワード : 把持力 (grasping force), 加速度 (acceleration), 重心 (center of gravity), モーメント (moment)

連絡先 : 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学 情報科学研究科 システム情報科学専攻
植北祥充, Tel.: (022)217-7021, Fax.: (022)217-7019, E-mail: nekita@control.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

現在使用されているロボットハンドは, 取り扱う物体が限定された簡単なものが多い。しかし次世代のロボットでは, 複雑でより高度な作業のできるものが要求される。そこで近年, 人間の手のように優れた機能を持つロボットハンドの研究・開発が行われている。人間は物体を扱う作業を行う場合, まず視覚的に物体の形, 大きさを認識し, 把持できる位置を決める。次に指を接触させ, 滑り具合などにより力の大きさを決める。人間はこのような把持動作を無意識に行うことができる。これらの把持機能は, ロボットハンドに適用するため様々な考察がなされてきた^{1,2,3,4}。

人間は取り扱う物体の重心位置が分からない場合であっても, その物体を簡単に持ち上げ, また水平を保ったまま移動させることができる。これは人間が状況に応じて把持力をうまく制御しているためと考えられる。このように物体の重心に偏りがあり, 回転モーメントが作用しているときの

人間の把持特性は, まだ十分に明らかにされていない。

本研究では, 重心に偏りのある物体を持ち上げ, 移動させるときの人間の把持特性について実験的に考察を行う。まず物体の重心が中心にある場合において, 移動時の加速度によって生じる慣性力と把持力との関係を明らかにする。次に, 重心が中心にない場合の人間の把持特性について考察する。このとき, 物体を滑らせないで把持するための理論値を求め, 実験値と比較を行う。同時に回転モーメントの変化による影響について調べる。

2. 実験装置および方法

(i) 重心が中心にある場合

把持力測定装置をFig.1に示す。ただし, Fig.1の重り W は付加しないので, 把持物体の重心は中心にある。

(ii) 重心が中心にない場合

ここでは, Fig.1に示されるように重り W を付

加することにより、把持物体の重心位置を中心からずらす。そのため把持物体を水平にしたときには、回転モーメントが生じるようにする。

被験者はセンサ A,B,C をそれぞれ親指、人差し指、薬指により把持する。物体に加えられた把持力は、歪ゲージにより測定される。次に把持力および位置の測定装置の構成を Fig.2 に示す。把持物体の位置は、レーザ変位計により測定される。歪ゲージとレーザ変位計からの出力は、A/D コンバータを通して 10ms 毎にコンピュータに取り込まれる。

実験は机の上に置かれた把持物体を持ち上げ、そして水平を保ちながら周期的に上下に振動させるというものである。被験者は 20~30 歳の男性で、予め 10 回程度練習を行い、把持動作に慣れてから実験を行う。

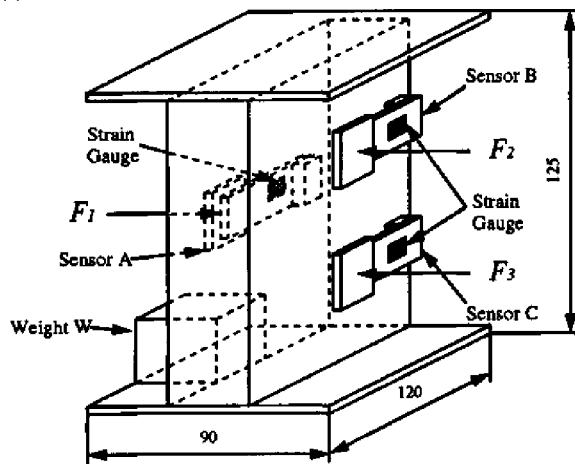


Fig. 1 把持力測定装置

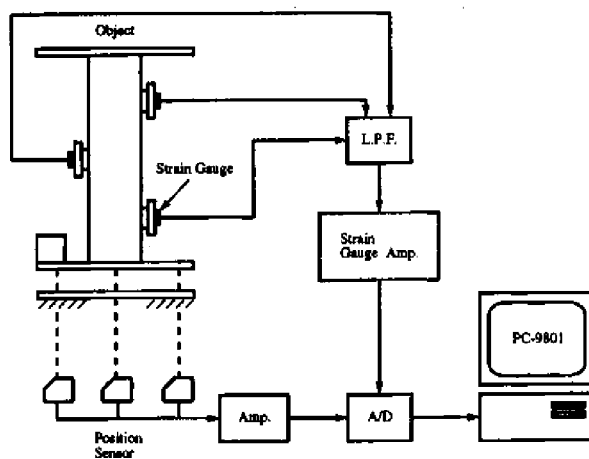


Fig. 2 測定装置の構成

3. 実験結果および考察

3.1 把持力の実験値

(i) 重心が中心にある場合

約 0.6 秒の周期で把持物体を上下に振動させたときの実験結果を Fig.3 に示す。(a) は把持物体の位置と加速度、(b),(c) はセンサ A,B,C に働く把持力 F_1, F_2, F_3 である。ただし加速度は、位置のデータを数値微分することにより求めている。図より、把持力と加速度の変化の周期はほぼ等しくなっている。また、 F_2 と F_3 がほぼ等しいので、物体の中心回りにモーメントは生じていない。このように、人間は無意識に把持力を加速度の変化に合わせて調節していることが分かる。

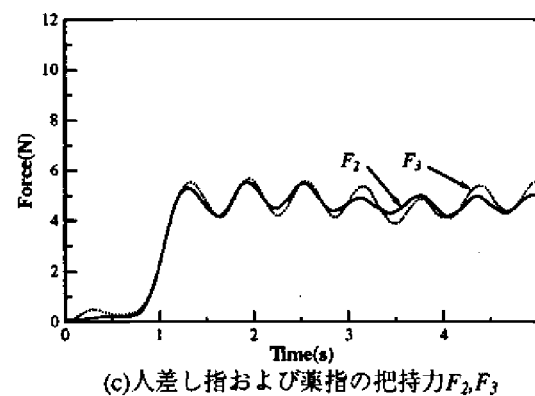
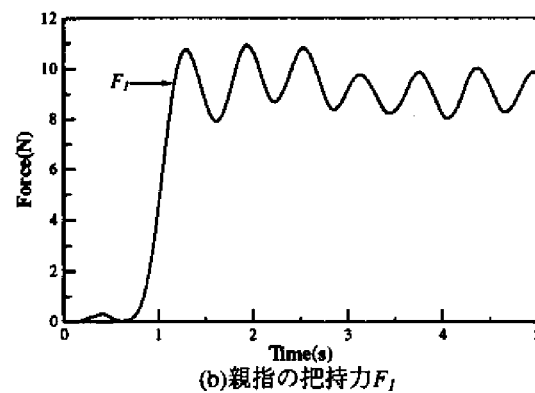
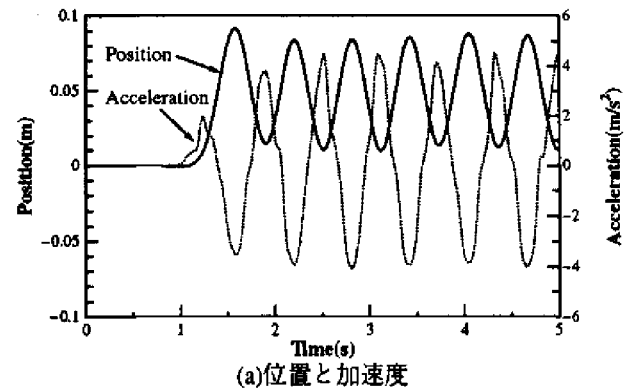


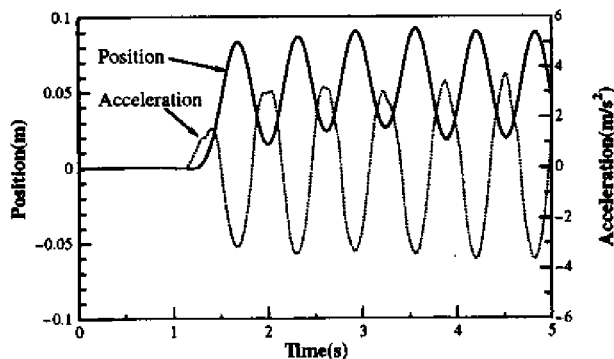
Fig. 3 上下振動の結果 (i)

(ii) 重心が中心にない場合

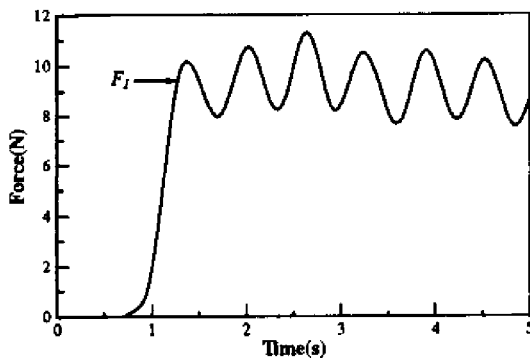
約0.6秒の周期で把持物体を上下に振動させたときの実験結果をFig.4に示す。重心が中心にある場合と同様、把持力と加速度の変化の周期はほぼ等しくなっている。ただし、 F_2 と F_3 の大きさと振幅は異なっている。すなわち、物体の中心回りにモーメントが生じている。

3.2 把持力の理論値

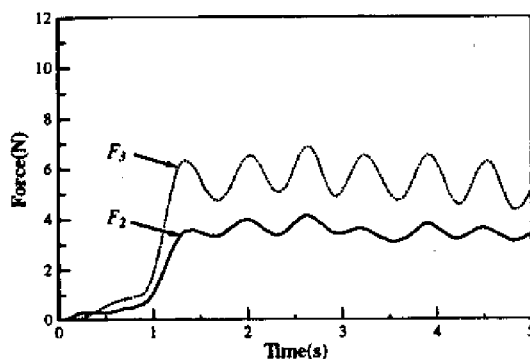
ここでは前節の実験のモデルを考え、物体を滑らせないで把持するための最小の把持力を理論的に求める。



(a)位置と加速度



(b)親指の把持力 F_1



(c)人差し指および薬指の把持力 F_2, F_3

Fig. 4 上下振動の結果 (ii)

(i) 重心が中心にある場合

Fig.5に示されるように、鉛直上向きに加速度 a が働いているモデルを考える。ここで点 $A(x_a, y_a)$, $B(x_b, y_b)$, $C(x_c, y_c)$ は、それぞれ把持力 F_1, F_2, F_3 が作用する点、点 $G(x_g, y_g)$ は把持物体の重心である。ただし、把持物体の中心は重心と等しいとしている。把持物体の運動方程式は次式で示される。

$$ma = f_1 + f_2 + f_3 - mg \quad (1)$$

ただし、 $|f_1| \leq \mu F_1$, $F_1 = F_2 + F_3$, $F_2 = F_3$ である。また用いた記号は、以下の通りである。

F_1, F_2, F_3 : センサ A, B, C に働く把持力 (N)

f_1, f_2, f_3 : センサ A, B, C に働く摩擦 force (N)

m : 把持物体の全質量 (kg)

a : 加速度 (m/s^2)

g : 重力加速度 (m/s^2)

μ : 静止摩擦係数

以上より、把持物体を滑らせないための条件は次式となる。

$$F_1 \geq \frac{|m(g+a)|}{2\mu} \quad (2)$$

$$F_2 = F_3 \geq \frac{|m(g+a)|}{4\mu} \quad (3)$$

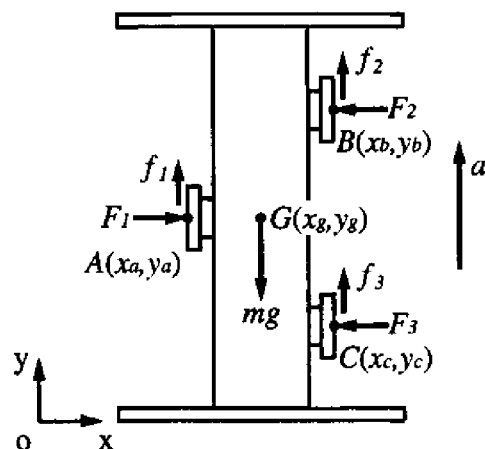


Fig. 5 把持物体のモデル (i)

ただし、等号は最小の把持力のときに成り立ち、このときの値を理論値 F_1^*, F_2^*, F_3^* とする。ここで実験装置の各パラメータは、Table.1 に示される通りである。

これらの値を (2), (3) 式に代入して求めた把持力の理論値 F_1^*, F_2^*, F_3^* を Fig.6 に示す。(a) は把持物体の位置と加速度、(b), (c) はセンサ A, B, C に働く把持力の実験値 F_1, F_2, F_3 および理論値 F_1^*, F_2^*, F_3^* である。図より、把持力の実験値と理論値の周期はほぼ等しくなっている。すなわち、人間は加速度による慣性力を補うように把持力を変化させ、物体の移動動作を安定化させていることが分かる。

把持力の実験値と理論値の差と把持物体の位置の関係を Fig.7 に示す。ここで $\Delta F_1 = F_1 - F_1^*, \Delta F_2 = F_2 - F_2^*, \Delta F_3 = F_3 - F_3^*$ である。図より、把持力の実験値と理論値の差は一定ではなく、その差の変化は位置の周期にほぼ等しいことが分かる。すなわち、位置が最大になるときに人間の把持力の実験値および理論値は最小になるが、両者の差は最大となる。逆に位置が最小のときには両者の値は最大となるが、差は最小となる。これは人間が慣性力により把持力を弱められるときでも、把持物体を落とすという危険性のため、ある程度以上弱められないためと思われる。

(ii) 重心が中心にない場合

(i) と同様にして、Fig.8 に示されるように、鉛直上向きに加速度 a が働いているモデルを考える。ただし、点 $D(x_d, y_d)$ は把持物体の中心、点 $E(x_e, y_e)$ は重り W の重心で、その他の記号は、Fig.5 と同様である。把持物体の運動方程式およびモーメントの釣り合いは次式で示される。

$$ma = f_1 + f_2 + f_3 - mg \quad (4)$$

$$m_w a(x_d - x_e) = F_3(y_d - y_e) - F_2(y_b - y_d) - m_w g(x_d - x_e) \quad (5)$$

Table.1 実験装置の各パラメータ (i)

Parameter	Value	Unit
m	0.58	kg
μ	0.41	

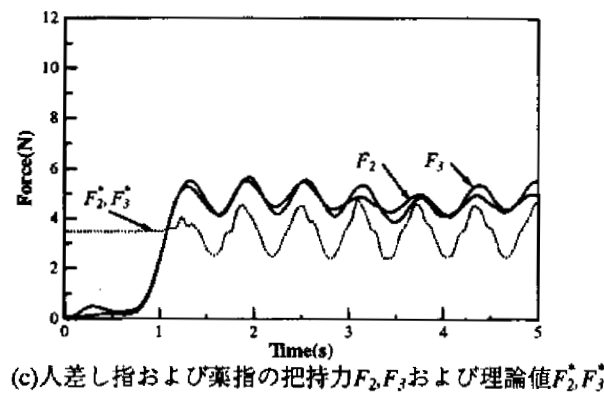
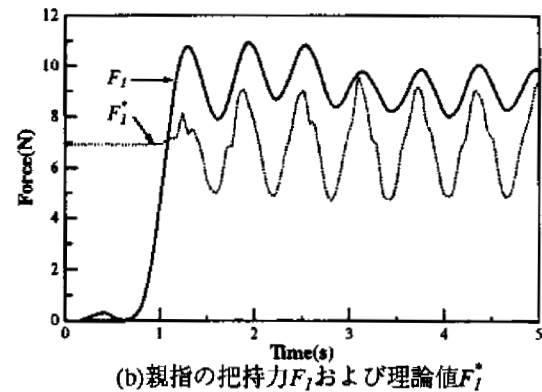
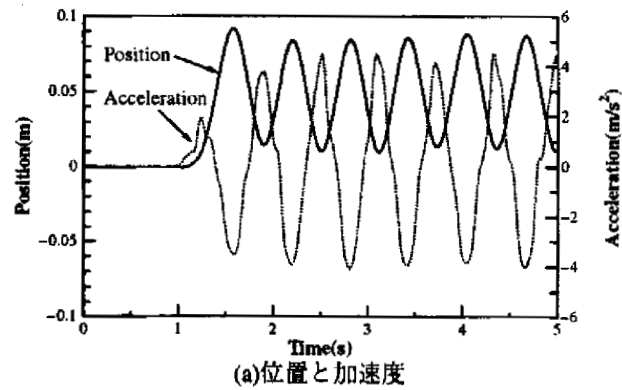


Fig. 6 上下振動の実験値と理論値 (i)

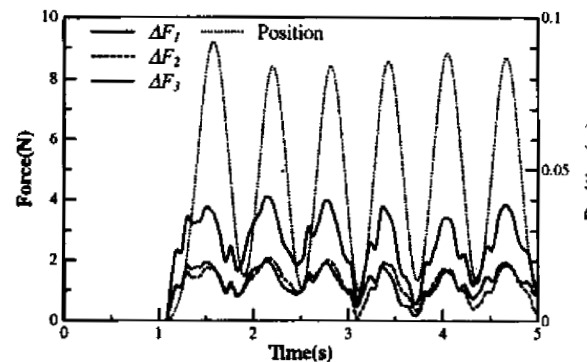


Fig. 7 把持力の実験値と理論値の差と把持物体の位置 (i)

ただし、 $|f_1| \leq \mu F_1$ 、 $F_1 = F_2 + F_3$ である。ここで、 m_w は重りの質量(kg)であり、その他の記号は(i)と同様である。

ここで簡単化のために、 $x_d = (x_a + x_b)/2$ 、 $y_a - y_c = y_b - y_a$ 、 $x_b = x_c$ 、 $y_a = y_d$ とする。以上より、把持物体を滑らせないための条件は次式となる。

$$F_1 \geq \frac{|m(g+a)|}{2\mu} \quad (6)$$

$$F_2 \geq |m(g+a)| \left(\frac{1}{4\mu} - \varepsilon \right) \quad (7)$$

$$F_3 \geq |m(g+a)| \left(\frac{1}{4\mu} + \varepsilon \right) \quad (8)$$

ただし、 $\varepsilon = (x_d - x_g)/(y_b - y_c)$ である。等号は最小の把持力のときに成り立ち、このときの値を理論値 F_1^* 、 F_2^* 、 F_3^* とする。ここで実験装置の各パラメータは、Table.2に示される通りである。

これらの値を(6),(7),(8)式に代入して求めた把持力の理論値 F_1^* 、 F_2^* 、 F_3^* をFig.9に示す。図より、(i)と同様に把持力の実験値と理論値の周期はほぼ等しくなっている。把持力の実験値の振幅は、理論値と同様にそれぞれの指によって異なっている。把持力の実験値と理論値の差と把持物体の位置の関係をFig.10に示す。図より、(i)と同様に把持力の実験値と理論値の差の変化は位置の周期にはほぼ等しいことが分かる。

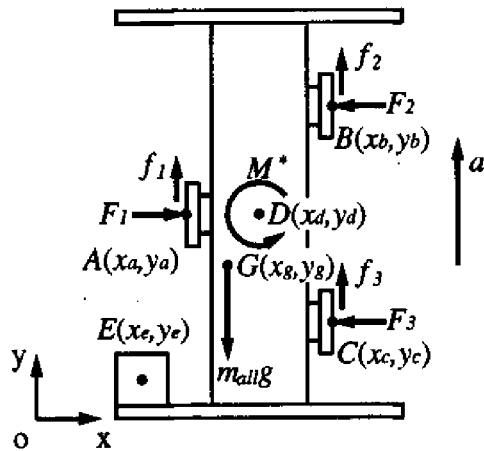
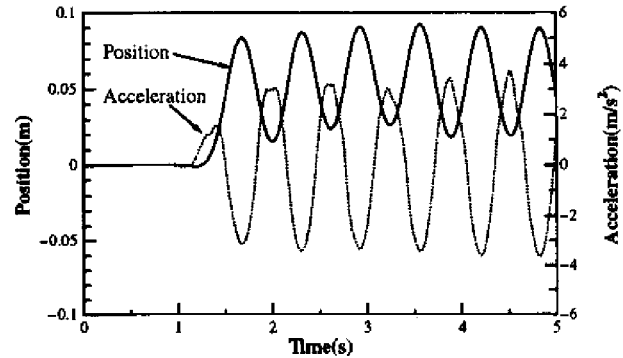


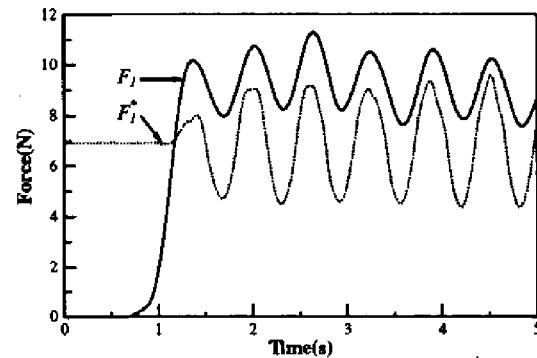
Fig. 8 把持物体のモデル(ii)

Table.2 実験装置の各パラメータ(ii)

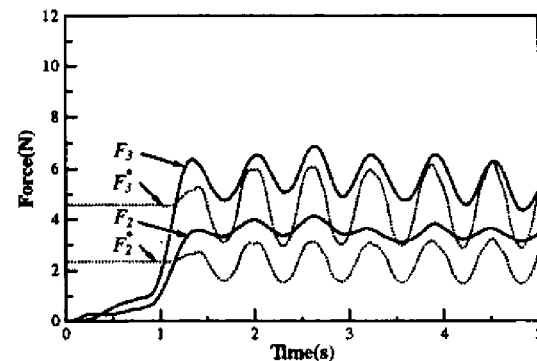
Parameter	Value	Unit
m_w	0.17	kg
ε	0.194	
$x_d - x_e$	33	mm
$y_d - y_c$	25	mm



(a)位置と加速度



(b)親指の把持力 F_1 および理論値 F_1^*



(c)人差し指および薬指の把持力 F_2, F_3 および理論値 F_2^*, F_3^*

Fig. 9 上下振動の実験値と理論値(ii)

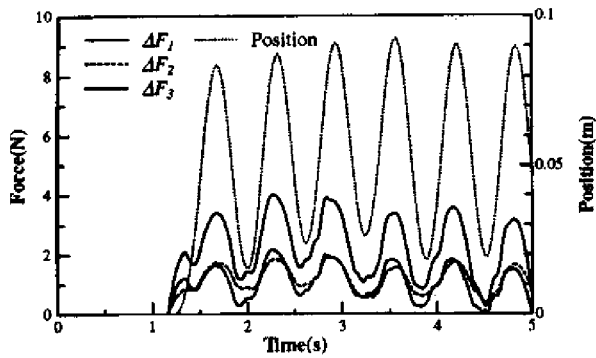


Fig. 10 把持力の実験値と理論値の差と把持物体の位置 (ii)

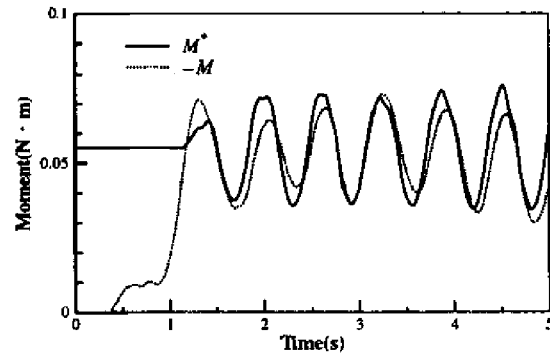


Fig. 11 モーメント

3.3 モーメント

ここで把持物体の重心が中心にない場合の、把持物体の中心点回りのモーメントについて考える。

Fig.8の点 $D(x_d, y_d)$ の左回りのモーメントを考えた場合、重り W に関して慣性力によって生じるモーメント M^* は、次式のようにになる。

$$M^* = m_w(g + a)(x_d - x_e) \quad (9)$$

一方、把持力 F_2, F_3 の差によって M^* を相殺するモーメント M は、次式のようにになる。

$$M = (F_2 - F_3)(y_d - y_c) \quad (10)$$

モーメント $M^*, -M$ を Fig.11 に示す。図より、理論値 M^* と実験値 $-M$ は周期、値ともに合致しており、把持力の差によるモーメントは、慣性力による回転モーメントを抑制するように働いていることが分かる。ここでは把持力 F_3 の振幅を F_2 より大きくすることにより、モーメントを調整している。

4. おわりに

本研究では、物体を持ち上げ、移動させるときの人間の把持特性について調べた。その結果、人間は加速度による慣性力を補うように、把持力

を変化させていることが分かった。ただし、把持力を弱めるには限界があるようである。また、重心に偏りのある物体を動かしたときには、物体に生じた慣性力を補う力は、把持する指によりそれぞれ大きさが異なっている。その大きさはモーメントによる回転を抑制するように変化しており、人間は微妙に把持力を調整していることが確認された。

人間は以上の動作を無意識で行うことにより、物体の移動動作を安定化させている。

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, 29-2, 95/102 (1993)
- 2) 川合悟, 木下博, 生田香明: 摘み持ち上げ運動の諸条件が空間保持力に及ぼす影響, 日本バイオメカニクス学会第11回大会論集, 138/142 (1992)
- 3) 中沢信明, 池浦良淳, 猪岡光: 物体の移動動作における人間の把持特性に関する研究, 第5回ロボットシンポジウム, 233/238 (1995)
- 4) 飯田健夫, 倉井賢一, 川村貞夫: 把持操作における Size-weight 効果, 第5回ロボットシンポジウム, 229/232 (1995)
- 5) 永井清, 吉川恒夫: 多指ハンドによる対象物の把握と操りの力学, 日本ロボット学会誌, 7-5 91/95 (1989)
- 6) 中村仁彦: 把持とあやつり, 計測と制御, 29-3 6/12 (1990)
- 7) 中野栄二, 小森谷清, 新井健生: ロボット工学応用技術, 40/47, 養賢堂 (1985)