多指ハンドの適応把握

永井 清* 吉川 恒夫**

Adaptive Grasping by Multifingered Hands

Kiyoshi NAGAI* Tsuneo YOSHIKAWA**

The purpose of this paper is to propose a new method of the adaptive grasping for multifingered hands with the constraints of static friction and the joint torques, under the repeated manipulation tasks. First, the manipulating and grasping forces of two fingered hands and the dynamic manipulation/grasping controller based on these forces, which have been proposed by authors, are introduced. This controller makes it possible to be given the desired grasp parameter which determine the grasping force, in spite of the desired trajectory of the object. Second, the scalar functions for evaluation of the manipulation and the grasping are defined, and the effects on them by the given grasp parameter are shown. Then, a new algorithm of the adaptive grasping based on these functions is proposed. This algorithm realizes the desired manipulation without slip of the fingertips, adjusting the grasp parameter to the specified manipulation task. Finally, the effectiveness of the proposed method is shown by several experiments.

Key Words : Multifingered hand, Grasping and manipulation, Adaptive grasping, Force control, Dynamic control

1. はじめに

近年のロボット制御技術の発達に伴い、産業界では多くの生産行程が自動化されてきている。しかしながら、対象物の形状に合わせて設計したグリップをマニピュレータに装着して用いる少品種多量生産を除くと、組立作業の自動化率はまだ高くはない。現在求められている多品種少量生産に対しても組立作業の自動化率を上げるには、さまざまな形状の対象物を把握し、作業の状況に応じて微少に位置・姿勢の制御を行うような高機能なエンドエフェクタが必要となる。関節型の指を複数もつ多指ハンドは、こうした要請に応じる可能性をもつものとして研究されてきた^{1)~4)}。

多指ハンドを用いる際には、まず、対象物の把握における安定性が重要となる。この安定性には、大きく分け

て、1) 外乱に対する復元性、2) 把握の継続のための指先のすべりにくさ、の2つの意味がある。

1) に関する研究では、把握系のポテンシャル、ないしは剛性行列を議論することが中心となる。ポテンシャル関数を用いたものには、Hanafusa と Asada の最適把握⁵⁾や、北川、浅田、得丸の拘束の強さの定義⁶⁾などがある。また、Nguyen は force-closure⁷⁾ による把握を、金子らは指を物理的に理解しやすい仮想バネと長なす把握モデル⁸⁾などを報告している。

1) の意味での安定把握は、動力学的な問題に拡張した場合には、時間関数で与えられた目標の位置に対する復元性の問題となるが、これはすなわち、操りの問題である。多指ハンドの操りに関しては、従来ハンドの運動学に基づく制御方法が考えられてきたが^{2), 8)}、最近では、指や対象物の動特性を考慮した制御方法が提案されてきている。Hsu, Li, Sastry は、動的制御の考え方に基づく制御方法⁹⁾を、杉江、隅下、小野は、さらに把握のポテンシャルを導入して内力の制御も行う制御方法を提案

原稿受付 1992 年 3 月 27 日

* 立命館大学理工学部

** 京都大学工学部

している¹⁰⁾。

一方、2)の研究においては、指先がすべらないための内力が重要となる。Salisbury と Craig は、内力を数学的に定義し⁸⁾、筆者らは、多指バンドの指先力に対して、操りに必要な合力を対象物に加える操り力と、静止摩擦の制約を満たす内力である握力を定義している¹¹⁾¹²⁾。また、すべらない把握のための内力の決定方法については、いくつかの報告がある。Hanafusa らは、内力となる指先力に注目して確実な把握を議論している¹³⁾。Kerr と Roth は静止摩擦と指の関節駆動トルクの制限を線形近似し、指先力がこれらの制限を満足するように内力を決定している¹⁴⁾。中村、永井、吉川は、静止摩擦の制約のもとでの指先力の決定問題を、2次形式の非線形計画問題に帰着させ、ユークリッドノルム最小の指先力を与える内力を最適内力としている¹⁵⁾。筆者らは、操り力と握力のもとでの把握における把持の強さを定義し、指先力の大きさの制約のもとで、外力に対して最もすべりにくい把握を実現する握力の決定方法について議論している¹⁶⁾。

静止摩擦の制約のもとで指先がすべらないような内力、ないしは握力の決定方法については、2つの立場があるように思われる。すなわち、文献 15) のように最小の指先力を与える内力を選ぶ立場と、文献 16) のように、許される範囲で最大の指先力を選ぶ立場である。どちらの立場が妥当かは一概に決められず、実際の操り動作と望ましい握力の関係については、まだ検討の余地があると思われる。

本論文では、2本指ハンドが特定の操り作業を繰り返して行う状況を対象にし、前述の 2) の意味で把握の安定性と望みの操りを、試行ごとに適応的に実現させるためのアルゴリズムを考える。2節では、筆者らが提案している、操り力と握力、および動的制御の考え方に基づく動的操り／握み制御系¹⁷⁾を2本指ハンドの場合について簡単に述べる。この制御系は、握力を決定する握力パラメータの目標値を、対象物の位置の目標値とは独立に与えることができるものである。3節では、把握と操りの評価指標を定義し、静止摩擦の制約と駆動トルクの制約がある場合には、これらの指標が握力パラメータにより影響を受けることを述べる。また、この指標を用いて、多指ハンドの適応把握のアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムは、握力パラメータの目標値を操り作業に応じて適応的に変更することにより望ましい把握と操りを実現するものである。4節では、実験により提案するアルゴリズム有効性の検討を行う。

Fig. 1 Two-fingered hand and object

2. 2本指ハンドの把握と操り

2.1 基礎式

本論文では、文献 11), 12) と同様に、対象物と摩擦のある点接触をする2本指ハンドによる2次元平面内の把握と操りを対象とする。議論に用いる2本指ハンドと対象物を Fig. 1 に示す。ここで Σ_b は基準座標系、 Σ_o は対象物座標系、 $r_p = [r_{px} \ r_{py}]^T$ は Σ_b の原点から Σ_o の原点へ向かう位置ベクトル、 θ は対象物の姿勢である。また、 $p_i = [p_{ix} \ p_{iy}]^T$ は Σ_o の原点から第 i 指の接触点 C_i までの位置ベクトル (以下 $i=1, 2$)、 f_i は第 i 指の指先力である。

ハンドが対象物を操る際には、その各指先が接触点を離れることなく追従する必要があり、対象物の速度 $\dot{r} = [\dot{r}_p^T \ \dot{\theta}]^T \in \mathbb{R}^3$ と、各指の関節変数速度 $\dot{q}_i \in \mathbb{R}^2$ をまとめた指の関節変数速度 $\dot{q} = [\dot{q}_1^T \ \dot{q}_2^T]^T \in \mathbb{R}^4$ の間には次の運動学的拘束がある¹⁷⁾。

$$J_o \dot{r} = J_f \dot{q} \quad (1)$$

ただし、

$$J_o = \begin{bmatrix} J_{o1} \\ J_{o2} \end{bmatrix}, \quad J_{oi} = \begin{bmatrix} E_2 & -p_{iy} \\ & p_{ix} \end{bmatrix}$$

である。なお、 E_n は n 次元単位行列、 J_f は各指のヤコビ行列を対角ブロックにもつ行列である。

指の運動方程式は次式にまとめることができる。

$$M_f(q) \ddot{q} + h_f(q, \dot{q}) + J_f^T F = \tau \quad (2)$$

ただし、 $\tau = [\tau_1^T \ \tau_2^T]^T \in \mathbb{R}^4$ は指の関節駆動トルク、 $F = [f_1^T \ f_2^T]^T \in \mathbb{R}^4$ は指先力、 $M_f(q)$ は慣性行列、 $h_f(q, \dot{q})$ は遠心・コリオリ力、重力項などである。なお、実際の機構においては指関節の駆動トルクに大きさの制約がある。本論文ではこのことを考慮し、第 i 指第 j 関節の駆動トルク τ_{ij} の大きさに、

$$|\tau_{ij}| \leq \tau_{ij\max} \quad (3)$$

Fig. 2 Manipulating and grasping forces

の制約があるものとする。ここで $\tau_{ij\max}$ は、アクチュエータと駆動系によって定まる定数である。

対象物の運動方程式は次式にまとめることができる。

$$M_0(r)\ddot{r} + h_0(r, v) = T \quad (4)$$

$$T = J_0^T F \quad (5)$$

ただし、 $T = [f^T \ N]^T \in R^3$ は対象物に加わる合力であり、 $M_0(r)$ は慣性行列、 $h_0(r, v)$ は遠心・コリオリ力、重力項である。

2.2 握力と操り力に基づく把握と操りの制御

多指ハンドで対象物をすべらないように把握し、与えられた操りを行う場合には、指から対象物に加える指先力をどのように算出するか、また、算出した指先力を制御においてどのように実現するか、が重要な問題となる。筆者らが提案している操り力と握力は、望みの操りに必要な合力と確実な把握のために必要な内力を、指先力の成分として捉えなおしたものである。このため、静止摩擦の制約を満足するような指先力の議論が簡単になる利点をもつ。ここでは、2本指のハンドの操り力と握力¹²⁾、およびそれらに基づく動的操り/握み制御系¹⁷⁾について簡単に述べる。

2本指ハンドにおける、操り力 $F_m = [f_{m1}^T \ f_{m2}^T]^T \in R^4$ と握力 $F_g = [f_{g1}^T \ f_{g2}^T]^T \in R^4$ の表現式を以下に示し、その一例を Fig. 2 に示す。

$$F = F_g + F_m \quad (6)$$

$$F_g = B_g h_g, \quad B_g \in R^{4 \times 1} \quad (7)$$

$$h_g \geq 0 \quad (8)$$

$$F_m = B_m h_m, \quad B_m \in R^{4 \times 3} \quad (9)$$

$$h_m = [h_{m1} \ h_{m2} \ h_{m3}]^T, \quad h_{m1} \geq 0 \quad (10)$$

(8)式の h_g は、図に示すように、各指の握力 f_{g1}, f_{g2} の大きさを決定するものであり、握力パラメータと呼ぶ。 f_{g1}, f_{g2} の向きは、(7)式の B_g によって互いの接触点を向くように決まるため、結局、握力は h_g のみで定まることになる。

さて、以上の準備のもとで動的操り/握み制御系の適

用が可能となるが、この制御系は、線形化補償器とサーボ補償器とから構成される。

2.1 節の指と対象物に対する線形化補償器は次の通りである。以下、 $M_0(r)$, $h_0(r, v)$ などを M_0 , h_0 などと略記する。

$$\tau_c = \tau_0 + \tau_f \quad (11)$$

$$\tau_0 = J_f^T F \quad (12)$$

$$F = F_m + F_g \quad (13)$$

$$F_m = B_m (J_0^T B_m)^{-1} (M_0 u_1 + h_0) \quad (14)$$

$$F_g = B_g u_2 \quad (15)$$

$$\tau_f = M_f \ddot{q}_d + h_f \quad (16)$$

$$\ddot{q}_d = J_f^{-1} (J_0 \ddot{u}_1 + \dot{J}_0 \dot{r} - \dot{J}_f \dot{q}) \quad (17)$$

ここで、 $u_1 \in R^3$, $u_2 \in R^1$ は線形化補償器への入力である。指と対象物からなる系は、指の駆動トルクに制約がない場合には、この非線形状態フィードバック制御則により線形化され、

$$\ddot{r} = u_1 \quad (18)$$

$$h_g = u_2 \quad (19)$$

となる。

実際の制御においては系のモデルの不正確さなどのためにサーボ補償器が必要であり、ここでも文献17)と同様に、2自由度制御系を適用する。サーボ補償器は線形化補償器への入力を算出するものであり、次式で表されるものを用いている。

$$u_1 = \ddot{r}_d + K_p e + K \int e dt + K_d \dot{e} \quad (20)$$

$$e = r_d - r \quad (21)$$

$$u_2 = h_{ga2} + K_f \int (h_{ga2} - h_g) dt \quad (22)$$

$$h_{ga2} = h_{ga} - T \dot{h}_{ga2} \quad (23)$$

とする。ここで、 r_d は対象物の位置・姿勢の目標値、 h_{ga} は握力パラメータの目標値である。また、 T は前置補償器として設けた一次遅れの時定数である。

本論文で用いる動的操り/握み制御系の特徴は、指の駆動トルクに制約がない場合には、望みの操り動作 r_d を与えることとは独立に、望みの握みの状態を h_{ga} を適当に与えることにより陽に制御できる点である。ところが、指の駆動トルクに制約がある場合、制約がない場合には厳密に成り立つ線形化補償器に運動性能の劣化が生じる場合があると考えられる。本論文ではこの点を考慮し、望ましい把握と操りの実現方法を議論する。

3. 適応把握

3.1 把握と操りの評価

多指ハンドで対象物を操る際には、対象物を確実に把握すること、対象物を正確に操ることの両者が必要とされる。ここでは、これらを次のように考える。

Fig. 3 Value of e_{gi}

操り追従性：与えられた目標の軌道に追従するときの正確さ

把握安定性：操りの最中の指先のすべりにくさ

ここでは、適応把握のための評価関数を定義し、それを用いて適応的に握力を変更する方法を提案する。まず、操り追従性と把握安定性の指標を次のように定める。

操り追従性の指標：

$$J_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \|e_m\|^2 dt \quad (24)$$

$$e_m = L^{-1}(r_d - r)$$

$$L = \text{diag.} (r_{pxs}, r_{pys}, \theta_s)$$

把握安定性の指標：

$$J_g = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \|e_g\|^2 dt \quad (25)$$

$$e_g = [e_{g1} \ e_{g2}]^T$$

$$e_{gi} = \frac{|\theta_i|}{\theta_{imax} - |\theta_i|}$$

$$\theta_{imax} = \tan^{-1}(\mu_i)$$

ここで、 t_1 と t_2 は評価の開始と終了時刻、 L は偏差を正規化するための係数行列、 θ_i は、第 i 指の接触点における内向き単位法線ベクトルから見た指先力 f_i の開き角である。また、 μ_i は接触点の最大静止摩擦係数であり、 θ_{imax} は μ_i に対応する最大開き角である。上式中の e_{gi} は、指先のすべりにくさを評価するために導入したもので、Fig. 3 に示す値をとる。

(24)、(25) 式の J_m, J_g は、その評価が良いときに値が小さくなるように定めているが、その値は制御則や操り作業ばかりでなく、握力パラメータの目標値 h_{ga} により定まる握力、および把握状態によっても影響を受けることを以下に述べる。

まず、 J_g の値が h_{ga} の値により影響を受けることを直感的に説明しよう。握力が操り力に比べて小さくなるように h_{ga} を定めた場合、指先力の向きは操り力の向

きに支配される。この場合、開き角 θ_i が大きくなるため、 J_g の値が大きくなり、 θ_i がその最大値 θ_{imax} に近づくにつれ、 J_g の値は無限に大きくなる。逆に、握力が操り力に比べて大きくなるように h_{ga} を定めた場合には、指先力の握力の向きに支配される。その結果、開き角が小さくなり、 J_g の値が小さくなることが予想される。このように、 J_g の値は h_{ga} の値により影響を受ける。

次に、 J_m の値が h_{ga} の値により影響を受けることを説明しよう。駆動トルクに制約がなく、指先力の応答に時間遅れのない理想的な場合には、 J_m の値は h_{ga} の値とは無関係である。なぜなら本論文における握力は、対象物に姿勢の変化が生じた場合にも常に機構内部で打ち消し合うような内力であり、把握系の安定性や剛性には影響を与えないものだからである。しかしながら、指関節の駆動力に大きさの制約がある場合には、以下の理由により h_{ga} の値の影響を受ける。

指の駆動トルクは、(11)~(17) 式より、指の運動に必要な τ_f 、対象物の操りに必要な $J_f^T F_m$ 、および、握力の発生に必要な $J_f^T F_g$ からなる。そのため、 h_{ga} の値が大きくなり、 $\tau_f + J_f^T F_m + J_f^T F_g$ による駆動トルクがその制約を越えると、指の運動と対象物の操りに必要な駆動トルクが十分に得られなくなり、操りが満足に行えなくなる。すなわち、握力が小さな場合に比べて J_m の値は大きくなると思われる。

花房らは、内力により機構の剛性の変化が生じるとしている¹⁸⁾が、そこにおける内力の定義は、平衡状態においてのみバランスする力であり、本論文での握力の定義に用いる内力の定義とは異なる。本論文における内力は、常にバランスする力であり機構の剛性には影響を及ぼさない。したがって J_m の値が h_{ga} の値の影響を受けるのは駆動トルクの制約を通じての場合のみである。

3.2 適応把握による握力の決定

前節で定めた指標をもとに、適応把握のための評価関数 J を次のように定めることにする。

$$J = w J_m + J_g \quad (26)$$

ただし、 w は重み付けのパラメータである。前節の議論により、 h_{ga} の値が小さくても大きくても J の値は大きくなると思われる。そして、ある h_{ga} の値に対して、 J の値は極小値をとり、把握と操りの組み合わせが最も良い状態になると考えられる。

本論文では、2本指ハンドが特定の操り作業を繰り返して行う状況を対象にし、操り作業中の把握状態を試行ごとに適応させるためのアルゴリズムを考える。すなわち、握力パラメータの目標値 h_{ga} を操り作業に応じて適応的に変更することにより、望ましい把握と操りを実

Fig. 4 Two-fingered hand and object for experiment

Fig. 5 Experimental setup

現することを試みる。

前節の議論を踏まえて、適応把握を次のようなアルゴリズムで実現することを提案する。以下では、 $h_{ga}(n)$ 、 $J(n)$ はそれぞれ、第 n 回目の試行時における h_{ga} 、 J の値を示している。

適応把握のための握力決定アルゴリズム

ステップ 1 : $w > 0, k < 0, \epsilon > 0$ を設定する。

ステップ 2 : $h_{ga}(0)$ を実現可能な範囲で適当に決定する。

$h_{ga} = h_{ga}(0)$ で操り作業を実行する。

(26)式を用いて J を算出し、 $J(0)$ とする。

ステップ 3 : $h_{ga}(1) (\neq h_{ga}(0))$ を適当に決定する。

試行回数 n を 1 とする。

ステップ 4 : $h_{ga} = h_{ga}(n)$ で操り作業を実行する。

J を算出し、 $J(n)$ とする。

ステップ 5 : J の変化量 $\Delta J(n)$ を、

$$\Delta J(n) = J(n) - J(n-1) \quad (27)$$

により算出する。

$\Delta J(n) \leq \epsilon$ ならばステップ 8 へ。

$\Delta J(n) > \epsilon$ ならばステップ 6 へ。

ステップ 6 : 次式により $h_{ga}(n+1)$ を決定する。

$$h_{ga}(n+1) = h_{ga}(n) + k \frac{\Delta J(n)}{\Delta h_{ga}(n)} \quad (28)$$

ただし、

$$\Delta h_{ga}(n) = h_{ga}(n) - h_{ga}(n-1) \quad (29)$$

ステップ 7 : $n \leftarrow n+1$ 。ステップ 4 へ。

ステップ 8 : 終了。□

上述のアルゴリズム中で用いる J の値は、作業実行時の指先力センサの検出データなどから算出されるものであり、試行ごとのばらつきが存在することが予想される。ステップ 5 はこのことに対応するものであり、 J のばらつきの程度に応じて定める正の小数 ϵ を用いて終了の条件を決定する。

このアルゴリズムにより、 h_{ga} は J の極小値近傍の値をとることが期待される。

4. 実験

3 節で提案したアルゴリズムの有効性を検討するために、Fig. 4, Fig. 5 に示すような 2 本指ハンドと対象物を水平面内で運動するように設置して実験を行った。

Table 1 に第 k リンク ($k=1, 2, 3, 4$) のリンク長さ l_{ik} 、質量 m_{ik} 、重心回りの主慣性モーメント I_{ik} を示す。各リンクの重心はその中心にあるとしている。指の各関節は、50 W の DC サーボモータ (トルク定数 : 0.153 Nm/A, 電機子抵抗 : 13.8 Ω) で駆動され、減速比は 1/5 である。2 本の指の第 1 関節は 0.30 m 離れており、

Table 1 Parameters of finger

k	l_{ik} (m)	m_{ik} (kg)	I_{ik} ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
1	0.30	0.40	3.00×10^{-3}
2	0.15	0.26	0.49×10^{-3}
3	0.30	0.40	3.00×10^{-3}
4	0.45	0.58	9.79×10^{-3}

Table 2 Parameters of object

m_o (kg)	I_o ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
0.35	2.67×10^{-3}

Table 3 Parameters of frictions

ij	$\tau_{m^{+}ij}$ (Nm)	$\tau_{m^{-}ij}$ (Nm)	V_{ij} (Nm/(rad/s))
11	0.169	-0.120	0.102
12	0.178	-0.251	0.065
21	0.205	-0.157	0.113
22	0.196	-0.146	0.081

Fig. 6 Experimental results of manipulation

Fig. 7 Experimental results of grasping

Fig. 8 Experimental results of joint torques

基準座標系は、原点をその中央に位置させ、 x, y 軸を図に示すような向きに設定している。

対象物は、横幅 0.17m、長さ 0.25m の長方形形状のものを用いた。Table 2 に対象物の質量 m_0 、中心にある重心回りの慣性モーメント I_0 を示す。また、2つの接触点は左右の側面の中央に配置した。

実験に先立ち、大須賀らの方法¹⁹⁾を参考に、動的操り/掴み制御系の線形化補償器に必要な摩擦力の同定を行った。Table 3 に、実験に用いた正、負方向の動摩擦力 τ_{m+ij}, τ_{m-ij} と、粘性摩擦係数 V_{ij} を示す。

操り作業の目標空間軌道は、対象物の目標位置が半径 0.05m の円を描き、目標姿勢が $\theta=0$ の一定値をとるように与えた。また、目標の速度は、円を描く際の角速度に関して台形則を用い、2～4 秒の間が設定した最大の周波数 ω_{max} になるようにした。操り動作中の指先力は静止摩擦の制約を受けるため、操りの初めに安定な掴み状態を実現する必要がある。このため、最初の 1 秒間に対象物が台で支えられている状態で安定な掴み状態を実現するものとする。

実験における指先の静止摩擦の制約は、 $\mu_i=1/\sqrt{3}$ 、すなわち、 $\theta_{imax}=30(\text{deg})$ としている。この設定にお

いては、静止摩擦が変動しやすいことを考慮し、小さめの値を用いている。また、第 i 指第 j 関節の駆動トルク τ_{ij} の制約はソフトウェア上で定め、

$$\tau_{ij\max}=2(\text{Nm}) \quad (30)$$

としている。駆動トルクの制約は本来、モータのドライバアンプの出力の飽和特性として現れるものであるが、大きさの制約を陽に扱うため本論文では、(3)式により定めることが妥当であると考えた。

動的操り/掴み制御系のサーボ補償器におけるゲインは、 $K_p=\text{diag.}(100, 100, 100)$, $K_t=\text{diag.}(50, 50, 50)$, $K_d=\text{diag.}(8, 8, 8)$, および $K_f=5$ である。また、 $T=0.05(\text{s})$ としている。なお、実験のサンプリング時間は 3.7ms である。

まず、 $\omega_{max}=1.0(\text{Hz})$ とし、(a) $h_{gd}=2.5(\text{N})$ 、および (b) $h_{gd}=6.0(\text{N})$ にした場合の、操りの結果を Fig. 6 に、把握の結果を Fig. 7 に示す。両者を比較すると、 $h_{gd}=2.5(\text{N})$ の場合、操りの応答は良いものの、開き角 θ_i は設定した θ_{imax} に近く、把握状態が悪いと考えられる。ここで注意されたいのは、把握状態の良し悪しは、 h_g の応答の良し悪しではなく、滑りにくさで評価すべきだということである。逆に、 $h_{gd}=6.0(\text{N})$ の

Fig. 9 Scalar functions for manipulation and grasping

Fig. 10 Experimental results of adaptive grasping

場合には操りの応答が悪いが、開き角 θ_i は小さく、把握状態は良いことがわかる。なお、 $h_{gd}=2.0$ (N)では対象物を滑り落としてしまい、逆に h_{gd} をあまり大きく設定すると、対象物の姿勢の大きな偏差のため、指先以外の部分に対象物に接触し、正常な操り動作が実現できなかった。

Fig. 8 に、 $h_{gd}=2.5$ (N)、 6.0 (N) のそれぞれの場合の駆動トルクの変化を示す。 $h_{gd}=6.0$ (N) の場合、駆動トルクの制約により必要な駆動トルクが得られていないことがわかる。

Fig. 9 に、 $\omega_{\max}$ が 1.0 Hz、 1.1 Hz、そして 1.2 Hz の3つの場合について、 h_{gd} の変化による評価指標 J_m 、 J_g 、および J の変化を示す。把握と操りの評価は、 $t_1=1$ (s) から $t_2=5$ (s) までをその対象にし、 $r_{pzs}=r_{pys}=1$ 、対象物の横幅を考慮して $\theta_s=0.085$ としている。また、操りの指標と把握の指標の重み付けは、 $w=200$ としている。 $\omega_{\max}$ の値が異なることは操り作業が異なることを意味する。 $\omega_{\max}$ が大きくなる程、 J は全体的に大きな値を示しており、 1.0 Hz、 1.1 Hz の場合、 J の値は下に凸の性質をもち、設定された w の値に対して最

Fig. 11 Experimental results of manipulation with suitable h_{gd}

適な把握と操りの組み合わせが存在することがわかる。

$\omega_{\max}=1.2$ (Hz) の場合、 $h_{gd} \geq 4.5$ (N) においては指先以外の部位に対象物に触れてしまい満足な操りが実現できず、 J の値が下に凸にならなかったが、 w の設定を適当にすれば、下に凸の性質をもたせることは可能である。

J が極小値となる h_{gd} の値は、 1.0 Hz の場合に比べて 1.1 Hz の場合の方が小さいことがわかる。このことは、 $\omega_{\max}$ が大きくなる程、指と対象物の運動に要求される駆動トルクが大きくなり、同じ握力の設定に対して、駆動トルクの制約の悪影響が大きく現れるためと考えられる。

次に、適応把握のアルゴリズムの有効性を検討するために、 $\omega_{\max}=1.0$ (Hz) として提案するアルゴリズムの実験を行った。ここでは、 $w=200$ 、 $k=-10$ 、 $\varepsilon=0.002$ としている。Fig. 10 に J と h_{gd} の変化を示す。Case I は、 $h_{gd}(0)=2.5$ (N)、 $h_{gd}(1)=3.0$ (N) とした場合であり、Case II は、 $h_{gd}(0)=6.0$ (N)、 $h_{gd}(1)=5.5$ (N) とした場合である。

Case I の場合、 $n=5$ で $J(5)=0.0338$ 、Case II の

Fig. 12 Experimental results of grasping with suitable h_{gd}

場合、 $n=6$ で $J(6)=0.0420$ のときにステップ5の終了条件を満たした。このとき、それぞれの h_{gd} 値は、Case I の場合、 $h_{gd}(5)=4.69(\text{N})$ 、Case II の場合、 $h_{gd}(6)=4.31(\text{N})$ であった。2つの場合の h_{gd} の値に多少の差があるのは、やはり試行ごとの J のばらつきによるものと思われるが、Fig. 9(c) を見ると $\omega_{\max}=1.0$ (Hz) の場合、 h_{gd} のある範囲では、 J の値は同じような小さな値をとり、どちらもおおそ望ましい把握と操りが実現されていると考えられる。

Case I の $n=5$ のときの操りと把握の結果、および駆動トルクをそれぞれ、Fig. 11, Fig. 12, および Fig. 13 に示す。Fig. 13 に示される駆動トルクは必ずしも十分には得られていないが、Fig. 11 の操りの応答は Fig. 6 (b) より良く、Fig. 12 の把握状態は Fig. 7(a) より良いものであり、提案するアルゴリズムの有効性がわかる。

5. おわりに

本論文での結論は以下のとおりである。

- 1) 駆動トルクの制約をもつ多指ハンドに対して、操り力と握力の考え方に基づく把握と操りを議論し、指先のすべりにくさの意味での把握の安定性と、操りの追従性について述べている。そして、2本指ハンドが特定の操り作業を繰り返し行う場合に、望ましい把握と操りを実現する握力を適応的に決定する適応把握のアルゴリズムを提案している。
- 2) 提案するアルゴリズムを検討するために実験を行い、その有効性を検証している。

(a) $h_{gd}=2.5$ (N)
Fig. 13 Experimental results of joint torques with suitable h_{gd}

本論文で提案した適応把握の方法は、一連の操り作業中に握力を適応的に変更させるために用いることも可能であると考えられる。ただし、その場合には評価指標 J のばらつきに対するより注意深い対処が必要であろう。

3本指ハンドや、4本以上の指をもつハンドへの拡張を考えることは、人間が日常生活の中で無意識に行っているような合理的な把握と操りのメカニズムを探ることにつながり非常に興味深い問題である。これは今後の課題としたい。

最後に、日頃ご指導いただく立命館大学 花房秀郎教授と実験に協力いただいた立命館大学院生 戸谷浩己氏と同4回生(現院生)花井宏倫氏に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) H. Hanafusa and H. Asada, "Stable Prehension by a Robot Hand with Elastic Fingers", Proc. 7th Int. Symp. on Industrial Robots, pp. 361-368, 1977.
- 2) T. Okada, "Object-Handling System for Manual Industry", IEEE Trans. SMC, Vol. 9-2, pp. 79-89, 1979.
- 3) J. K. Salisbury and J. J. Craig, "Articulated Hands, Force Control and Kinematic Issues", Int. Journal of Robotics Research, Vol. 1-1, pp. 4-17, 1982.
- 4) S. C. Jacobsen, et al., "The Version I UTA/MIT Dextrous Hand", Robotics Research The second Int. Symp., pp. 301-308, MIT press, 1985.
- 5) 北川雅也, 浅田春比古, 得丸英勝, "ポテンシャル関数を用いたロボットハンドによる物体把握の力学", 第30回システムと制御研究発表講演会講演論文集, pp. 91-92, 1986.
- 6) V. Nguyen, "Constructing Force-Closure Grasps in 3D", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 240-245, 1987.
- 7) 金子 真ほか, "摩擦を考慮した多指ハンドの剛性モデルによる安定把握解析", 日本ロボット学会誌, Vol. 7-3, pp. 49-59, 1989.
- 8) H. Kobayashi, "Control and Geometrical Consideration for an Articulated Robot Hand", Int. Journal of Robotics Research, Vol. 4-1, pp. 3-12, 1985.
- 9) P. Hsu, Z. Li and S. Sastry, "On Grasping and Coordinated Manipulation by a Multifingered Robot

- Hand", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.384-389, 1988.
- 10) 杉江俊治, 隅下恭介, 小野敏郎, "複数のマニピュレータによる物体の協調的操り", システム制御情報学会論文集, Vol.1-4, pp.144-151, 1988.
 - 11) 吉川恒夫, 永井 清, "多指ハンドの操り力と握力", 計測自動制御学会論文集, Vol.23-11, pp.90-97, 1987.
 - 12) T. Yoshikawa, K. Nagai, "Manipulating and Grasping Forces in Manipulation by Multifingered Robot Hands", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.7-1, pp.67-77, 1991.
 - 13) H. Hanafusa, et al., "Structural Analysis and Robust Prehension of Robotic Hand-Arm System", Proc. '85 Int. Conf. on Advanced Robotics, pp.311-318, 1985.
 - 14) J. Kerr and B. Roth, "Analysis of Multifingered Hands, Int. Journal of Robotics Research, Vol.4-4, pp.3-17, 1986.
 - 15) 中村仁彦, 永井 清, 吉川恒夫, "複数のロボット機構による協調的あやつりの力学", 日本ロボット学会誌, Vol.4-5, pp.23-32, 1986.
 - 16) T. Yoshikawa, K. Nagai, "Evaluation and Determination of Grasping Forces for Multi-fingered Hands", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.245-248, 1988.
 - 17) 吉川恒夫, 永井 清, "多指ハンドの動的操り/握み制御", システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, pp.315-316, 1989.
 - 18) 花房秀郎, M. Arif Adli, "閉じた機構の剛性に及ぼす内力の効果", 日本ロボット学会誌, Vol.10-1, pp.128-134, 1992.
 - 19) 大須賀公一, 前田浩一, "マニピュレータの動特性同定法", 計測自動制御学会論文集, Vol.22-6, pp.637-643, 1986.

永井 清 (Kiyoshi NAGAI)

1959年10月21日生。1983年, 京都大学工学部精密工学科卒業。1986年, 同大学大学院修士課程修了。1987年, 同大学大学院博士課程中途退学。同年, 立命館大学理工学部情報工学教室助手。ロボット工学の研究に従事。システム制御情報学会, 計測自動制御学会, 日本油空圧学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

吉川恒夫

(Tsuneo YOSHIKAWA)

1941年12月19日生。1964年, 京都大学工学部精密工学科卒業。1969年, 同大学大学院博士課程修了。同年, 同大学工学部助手。1970年, 同大学助教授。1986年, 同大学助教授(オートメーション研究施設)。1991年5月より同大学工学部機械工学教室教授。ロボット工学および制御工学の研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)