アーム・多指ハンド機構による把握と操り

永井 清^{*1} 吉川 恒夫^{*2}

Grasping and Manipulation by Robotic Arm/Multifingered-Hand Mechanisms

Kiyoshi Nagai^{*1} and Tsuneo Yoshikawa^{*2}

A control scheme for grasping and manipulation by arm-hand mechanisms is proposed. The arm-hand mechanisms, discussed in this paper, consist of arm and multifingered hand, and they have the same feature as that of redundant macro-micro manipulator about manipulation. That is; 1) manipulation is possible not only by the arm but also by the hand, 2) the hand is suitable for compliant motion compared to the arm because of the small inertia, and the motion range of the arm is larger than that of the hand. The control scheme can utilize both of the merits of the arm and the hand. Simultaneously, it can realize secure grasping during manipulation. Several simulation results illustrate the validity of the proposed control scheme.

Key Words: Grasping and Manipulation, Arm and Multifingered Hand, Redundant Macro-Micro Manipulator, Cooperative Control, Impedance Control

1. はじめに

マニピュレータ（ロボットアーム）の手先位置制御や力制御の性能を向上させるために、その先端に小さな付加的装置を装着して用いることが提案されている [1]~[4]。このような機構は一般に、冗長マクロ・マイクロ・マニピュレータとして見なすことのできるものであり、先端部の慣性が小さくなる [1]、位置制御や力制御の帯域が広がる [2]、などの利点が報告されている。この問題に対して筆者らは、インピーダンス制御の考え方に基づき、マクロ部の広い動作範囲とマイクロ部の高い応答周波数帯域での動作の実現可能性という両者の利点を活かす制御方法を提案している [5][6]。

一方では、マニピュレーション技術の向上のために、多指ロボットハンド（以下、多指ハンド）による把握と操りが研究されている。最近では、把握と操りに影響を与える、多指ハンドや対象物の動力学的特性を考慮した制御則が提案されている [7][8]。筆者らはさらに、多指ハンドの指先力に対して握力と操り力を定義し [9][10]、それらをもとに確実な把握と望みの操りのための制御則を提案している [11]。

しかしながら、多指ハンドの動作範囲は一般に小さいため、実際の作業のためにはハンドをアームの先端に装着する必要がある。

ある。このようなアーム・ハンド機構も、ハンドの慣性が小さい場合には、アームがマクロ部に多指ハンドがマイクロ部に対応する、冗長マクロ・マイクロ・マニピュレータと見ることができる。この場合、操り動作に関しては、マクロ・マイクロ・マニピュレータとしての制御が必要となるが、同時に把握動作に関しては、多指ハンド部に対して行う必要がある。このような観点でのアーム・ハンド機構の運動制御の研究は報告されていない。

そこで本研究では、多指ハンドとアームの両者の機能と長所を活かす制御方法を提案する。この制御方法は、操り動作に関しては、多指ハンドがアームと比べて高い動作周波数帯域でそれを実現できるという長所と、アームが広い動作範囲をもつという長所を活かすものである。また、把握動作に関しては、文献 [11] の制御方法と同様に、多指ハンドが確実な把握動作を実現するものである。以下、2 章では基礎式を示し、3 章では制御方法の提案を行う。また、4 章ではシミュレーションにより制御則の有効性を検証する。

2. 基礎式

2.1 アーム・ハンド機構

ここでは、三次元空間の任意の運動にそれぞれが十分な自由度をもつようなアームと多指ハンドにより構成されるアーム・ハンド機構を議論の対象とする。このため、アームは 6 関節を有し、多指ハンドは、文献 [9] と同様な仮定のもとに、3 関節の指を 3 本もち、対象物と摩擦のある点接触を行うものとする。この章では、これらを合わせたアーム・多指ハンド機構を対象

原稿受付 1994 年 8 月 9 日

^{*1}立命館大学理工学部^{*2}京都大学工学部^{*1}Ritsumeikan University^{*2}Kyoto University

にして、制御則に必要な基礎式について述べる．

アーム・ハンド機構を **Fig. 1** に示す．議論のために以下の変数を定義する．

Σ_B	: 基準座標系, 原点 O_B
Σ_A	: アーム座標系, 原点 O_A
Σ_H	: ハンド座標系, 原点 O_H
C_i	: 第 i 指の指先の接触点 (以下, $i=1, 2, 3$)
$p_{Fi} \in \mathbb{R}^3$	: 点 O_B から点 C_i へ向かう位置ベクトル
${}^A p_{Fi} \in \mathbb{R}^3$	: 点 O_A から点 C_i へ向かう位置ベクトル
${}^H p_{Fi} \in \mathbb{R}^3$	: 点 O_H から点 C_i へ向かう位置ベクトル
$p \in \mathbb{R}^3$	: 点 O_B から点 O_H へ向かう位置ベクトル
$p_A \in \mathbb{R}^3$	: 点 O_B から点 O_A へ向かう位置ベクトル
${}^A p_H \in \mathbb{R}^3$	: 点 O_A から点 O_H へ向かう位置ベクトル
$\phi \in \mathbb{R}^3$	: Σ_B から見た Σ_H の姿勢 (以下, 姿勢はロール・ピッチ・ヨー角)
$\phi_A \in \mathbb{R}^3$	: Σ_B から見た Σ_A の姿勢
${}^A \phi_H \in \mathbb{R}^3$	: Σ_A から見た Σ_H の姿勢
$r = [p^T \ \phi^T]^T \in \mathbb{R}^6$	: Σ_B から見た Σ_H の位置姿勢
$r_A = [p_A^T \ \phi_A^T]^T \in \mathbb{R}^6$	: Σ_B から見た Σ_A の位置姿勢
${}^A r_H = [{}^A p_H^T \ {}^A \phi_H^T]^T \in \mathbb{R}^6$	: Σ_A から見た Σ_H の位置姿勢
$\omega \in \mathbb{R}^3$	: Σ_B から見た Σ_H の角速度ベクトル
$\omega_A \in \mathbb{R}^3$	: Σ_B から見た Σ_A の角速度ベクトル
${}^A \omega_H \in \mathbb{R}^3$	: Σ_A から見た Σ_H の角速度ベクトル
$v = [\dot{p}^T \ \omega^T]^T \in \mathbb{R}^6$	: 対象物の速度
$v_A = [\dot{p}_A^T \ \omega_A^T]^T \in \mathbb{R}^6$	: アーム先端の速度
${}^A v_H = [{}^A \dot{p}_H^T \ {}^A \omega_H^T]^T \in \mathbb{R}^6$	: Σ_A から見た対象物の速度
${}^B A_H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	: Σ_B から Σ_H への姿勢変換行列
${}^B A_A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	: Σ_B から Σ_A への姿勢変換行列

${}^A A_H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	: Σ_A から Σ_H への姿勢変換行列
$q_A \in \mathbb{R}^6$	: アームの関節変数
$q_{Fi} \in \mathbb{R}^3$	: 第 i 指の関節変数
$q_F = [q_{F1}^T \ q_{F2}^T \ q_{F3}^T]^T \in \mathbb{R}^9$	: 指の関節変数
$q = [q_A^T \ q_F^T]^T \in \mathbb{R}^{15}$	: 機構全体の関節変数
$\tau_A \in \mathbb{R}^6$	: アームの関節駆動力
$\tau_{Fi} \in \mathbb{R}^3$	: 第 i 指の関節駆動力
$\tau_F \in \mathbb{R}^9$	: 指の関節駆動力
$\tau = [\tau_A^T \ \tau_F^T]^T \in \mathbb{R}^{15}$	: 関節駆動力
$f_i \in \mathbb{R}^3$	: 第 i 指の指先力
$F = [f_1^T \ f_2^T \ f_3^T]^T \in \mathbb{R}^9$	: 指先力
$T \in \mathbb{R}^6$	: 指が対象物に加える合力
$T_A \in \mathbb{R}^6$	: アーム先端に加わる力
$T_E \in \mathbb{R}^6$	: 対象物に加わる外力

なお, 左肩の添え字は物理量を記述する座標系を表し, 基準座標系で記述する場合は省略する. ただし, 姿勢変換行列の場合のみ Σ_B を明示する.

2.2 把握前の運動学

この章ではハンドが対象物を把握していない状態の基礎式を示す. この場合, アーム先端の位置姿勢やその速度, 指先位置やその速度が明らかにすべき対象になる.

アーム先端の位置, 姿勢, および Σ_A から見た第 i 指の指先位置は次式で表される.

$$p_A = p_A(q_A) \quad (1)$$

$${}^B A_A = {}^B A_A(q_A) \quad (2)$$

$${}^A p_{Fi} = {}^A p_{Fi}(q_{Fi}) \quad (3)$$

式 (1)~(3) より第 i 指の接触点位置 p_{Fi} は, 次式で表される.

$$p_{Fi} = p_A + {}^B A_A {}^A p_{Fi} \quad (4)$$

速度に関しては, 式 (1)~(3) をもとに, アーム先端の速度 v_A と Σ_A から見た指先の速度 ${}^A \dot{p}_{Fi}$ を次式のように表すことができる.

$$v_A = J_A \dot{q}_A \quad (5)$$

$${}^A \dot{p}_{Fi} = {}^A J_{Fi} \dot{q}_{Fi} \quad (6)$$

ただし, J_A , ${}^A J_{Fi}$ はそれぞれ, アームのヤコビ行列と Σ_A に関する第 i 指のヤコビ行列である. v_A , ${}^A \dot{p}_{Fi}$ を用いると, 接触点の速度 $\dot{p}_{Fi}$ は式 (4) より,

$$\dot{p}_{Fi} = J_{AFi} v_A + {}^B A_A {}^A \dot{p}_{Fi} \quad (7)$$

と表される. ただし,

$$J_{AFi} = [E_3 \ -P_{AFi}] \in \mathbb{R}^{3 \times 6}, \quad i = 1, 2, 3$$

$$P_{AFi} = \begin{bmatrix} 0 & -p_{AFiz} & p_{AFiy} \\ p_{AFiz} & 0 & -p_{AFix} \\ -p_{AFiy} & p_{AFix} & 0 \end{bmatrix}$$

$$p_{AFi} = [p_{AFix} \ p_{AFiy} \ p_{AFiz}]^T = {}^B A_A {}^A p_{Fi}$$

Fig. 1 Arm-hand mechanism

である。

結局、指先速度 $\dot{\mathbf{p}}_F = [\dot{\mathbf{p}}_{F1}^T \ \dot{\mathbf{p}}_{F2}^T \ \dot{\mathbf{p}}_{F3}^T]^T \in \mathbb{R}^9$ は、式 (5) ~ (7) を $i = 1, 2, 3$ の場合について合わせた後に式 (5) (6) を代入して得られる次式により表される。

$$\dot{\mathbf{p}}_F = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (8)$$

ただし、

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{AF1}\mathbf{J}_A & {}^B\mathbf{A}_A\mathbf{J}_{F1} & 0 & 0 \\ \mathbf{J}_{AF2}\mathbf{J}_A & 0 & {}^B\mathbf{A}_A\mathbf{J}_{F2} & 0 \\ \mathbf{J}_{AF3}\mathbf{J}_A & 0 & 0 & {}^B\mathbf{A}_A\mathbf{J}_{F3} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{9 \times 15} \quad (9)$$

である。

2.3 把握後の運動学

この章では、アーム先端と対象物の速度の組と、関節速度の関係性を明らかにする。この際、ハンドが対象物を把握した状態を議論するため、把握に伴う指先の運動学的拘束も明らかにする必要がある。

把握状態において、対象物の位置 $\mathbf{p}$ と姿勢 ${}^B\mathbf{A}_H$ は、アームの位置 $\mathbf{p}_A$ と ${}^B\mathbf{A}_A$ 、および多指ハンド部の位置 ${}^A\mathbf{p}_H$ と姿勢 ${}^A\mathbf{A}_H$ と、次式で表される関係がある。

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_A + {}^B\mathbf{A}_A\mathbf{p}_H \quad (10)$$

$${}^B\mathbf{A}_H = {}^B\mathbf{A}_A\mathbf{A}_H \quad (11)$$

ここで、多指ハンド部のみに注目し、指先の位置を対象物の位置姿勢を用いて表すと、

$${}^A\mathbf{p}_{Fi} = {}^A\mathbf{p}_H + {}^A\mathbf{A}_H\mathbf{p}_{Fi} \quad (12)$$

となる。式 (12) の両辺を時間微分して $i = 1, 2, 3$ をまとめ、 Σ_A から見た指先速度を ${}^A\dot{\mathbf{p}}_F = [{}^A\dot{\mathbf{p}}_{F1}^T \ {}^A\dot{\mathbf{p}}_{F2}^T \ {}^A\dot{\mathbf{p}}_{F3}^T]^T \in \mathbb{R}^9$ 、対象物の速度を ${}^A\mathbf{v}_H \in \mathbb{R}^6$ とすると、

$${}^A\dot{\mathbf{p}}_F = {}^A\mathbf{J}_{HF}\mathbf{v}_H \quad (13)$$

表すことができる。

一方、式 (6) より $i = 1, 2, 3$ を合わせると次式を得る。

$${}^A\dot{\mathbf{p}}_F = {}^A\mathbf{J}_F\dot{\mathbf{q}}_F \quad (14)$$

対象物の操り動作中に指先が滑らないときには、対象物上の各接点と、対応する各指先の速度が等しくなる。すなわち式 (13) (14) より、

$${}^A\mathbf{J}_F\dot{\mathbf{q}}_F = {}^A\mathbf{J}_{HF}\mathbf{v}_H \quad (15)$$

が成立し、この式 (15) が、把握に伴う指と対象物の運動学的拘束条件を表す。

把握に伴うこの拘束は、機構全体の関節速度に着目した拘束として表すこともできる。この場合、まず、 Σ_B から見た指先位置 $\mathbf{p}_{Fi}$ を次式により表す。

$$\mathbf{p}_{Fi} = \mathbf{p}_H + {}^B\mathbf{A}_H\mathbf{p}_{Fi} \quad (16)$$

そしてこの式 (16) の両辺を時間微分して $i = 1, 2, 3$ について合わせ、 Σ_B から見た指先速度 $\dot{\mathbf{p}}_F$ を表す次式を得る。

$$\dot{\mathbf{p}}_F = \mathbf{J}_{HF}\mathbf{v} \quad (17)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{HF} &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{HF1} \\ \mathbf{J}_{HF2} \\ \mathbf{J}_{HF3} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{9 \times 6}, \quad \mathbf{J}_{HF i} = [\mathbf{E}_3 \quad -\mathbf{P}_{HF i}] \\ \mathbf{P}_{HF i} &= \begin{bmatrix} 0 & -p_{HF iz} & p_{HF iy} \\ p_{HF iz} & 0 & -p_{HF ix} \\ -p_{HF iy} & p_{HF ix} & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_{HF i} &= [p_{HF ix} \ p_{HF iy} \ p_{HF iz}]^T = {}^B\mathbf{A}_H\mathbf{p}_{Fi} \end{aligned}$$

である。この式 (17) と式 (8) より次式を得る。

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_{HF}\mathbf{v} \quad (18)$$

この式 (18) が機構全体の関節速度に着目した場合の運動学的拘束条件を表す。

さて、以下では機構全体の関節速度の、アーム先端速度と把握された対象物の速度の組との関係を明らかにする。

まず、関節速度とアーム部とハンド部の関節速度の組の関係として、式 (5) (15) より次式を得る。

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_A \\ \dot{\mathbf{q}}_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_A^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & {}^A\mathbf{J}_F^{-1}\mathbf{J}_{HF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_A \\ {}^A\mathbf{v}_H \end{bmatrix} \quad (19)$$

一方、対象物の速度 $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^6$ は、次式で表される。

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}_{AH}\mathbf{v}_A + {}^B\mathbf{R}_A\mathbf{v}_H \quad (20)$$

ただし、

$$\mathbf{J}_{AH} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 & -\mathbf{P}_{AH} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E}_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{AH} &= \begin{bmatrix} 0 & -p_{AH z} & p_{AH y} \\ p_{AH z} & 0 & -p_{AH x} \\ -p_{AH y} & p_{AH x} & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_{AH} &= [p_{AH x} \ p_{AH y} \ p_{AH z}]^T = {}^B\mathbf{A}_A\mathbf{p}_H \end{aligned}$$

$${}^B\mathbf{R}_A = \begin{bmatrix} {}^B\mathbf{A}_A & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & {}^B\mathbf{A}_A \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6} \quad (22)$$

である。式 (20) より次式が成立する。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_A \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_6 & \mathbf{0} \\ \mathbf{J}_{AH} & {}^B\mathbf{R}_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_A \\ {}^A\mathbf{v}_H \end{bmatrix} \quad (23)$$

よって、式 (19) (23) より次式を得る。

$$\dot{\mathbf{q}} = \tilde{\mathbf{J}}\tilde{\mathbf{v}} \quad (24)$$

ただし、

$$\tilde{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_A \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{12} \quad (25)$$

は、アーム先端速度と対象物の速度の組であり、 $\tilde{\mathbf{J}}$ は、

$$\tilde{\mathbf{J}} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_A^{-1} & 0 \\ -{}^A\mathbf{J}_F^{-1}\mathbf{J}_{HF}^B\mathbf{R}_A^{-1}\mathbf{J}_{AH} & {}^A\mathbf{J}_F^{-1}\mathbf{J}_{HF}^B\mathbf{R}_A^{-1} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{15 \times 12} \quad (26)$$

である。多指ハンドが対象物を把握している場合には式 (18) が成立するが、式 (18) において対象物の速度を指定しただけでは $\mathbf{J}\dot{\mathbf{q}}$ は決まるものの機構全体の関節速度 $\dot{\mathbf{q}}$ は一意には決まらない。ところが式 (24) においては、対象物の速度 $\mathbf{v}$ のほかに、アーム先端の速度 $\mathbf{v}_A$ を指定することにより機構全体の関節速度が決定できることになる。次章で述べる制御則においては、対象物の挙動とアーム先端の挙動を共に指定することにより $\tilde{\mathbf{v}}$ が指定されることになる。

$\mathbf{v}_A$, $\mathbf{v}$ においては、速度の回転成分に対して角速度ベクトルを用いているが、制御量として扱うには、その積分値が明確な意味をもたないために適当でない。そこで、代わりにロール・ピッチ・ヨー角の時間微分を用いた速度を用いるが、両者の関係は、次式で表される。

$$\mathbf{v}_A = \mathbf{W}_A \dot{\mathbf{r}}_A \quad (27)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{W} \dot{\mathbf{r}} \quad (28)$$

である。式 (27) (28) は合わせて

$$\tilde{\mathbf{v}} = \tilde{\mathbf{W}} \tilde{\mathbf{r}} \quad (29)$$

と表すことができる。ただし、

$$\tilde{\mathbf{r}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}_A \\ \dot{\mathbf{r}} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\tilde{\mathbf{W}} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_A & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W} \end{bmatrix} \quad (31)$$

である。

2.4 マニピュレータと対象物の運動方程式

アーム・多指ハンド機構と対象物の運動方程式はそれぞれ次式で表される。

$$\mathbf{M}_q \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}_q + \mathbf{J}^T \mathbf{F} = \boldsymbol{\tau} \quad (32)$$

$$\mathbf{M}_O \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{h}_O = \mathbf{T} + \mathbf{T}_E \quad (33)$$

ただし、

$$\mathbf{T} = \mathbf{J}_{HF}^T \mathbf{F} \quad (34)$$

であり、 $\mathbf{M}_q \in \mathbb{R}^{15 \times 15}$ と $\mathbf{h}_q \in \mathbb{R}^{15}$ はそれぞれ、機構全体の慣性行列と非線形項、 $\mathbf{M}_O \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ と $\mathbf{h}_O \in \mathbb{R}^6$ はそれぞれ、対象物の慣性行列と非線形項である。

2.5 多指ハンドの把握と操り

アーム・多指ハンド機構のハンドは、アームとの協調動作による操りの最中に、対象物を確実に把握することが必要となる。筆者らは、確実な把握と操りを行うために、多指ハンドの指先力の成分に対して握力と操り力の定義を行い、指先力を握力と操り力に分解する方法を示している [9]。

ここでは、3本指ハンドの握力と操り力について簡単に述べる。

握力 $\mathbf{F}_g = [\mathbf{f}_{g1}^T \mathbf{f}_{g2}^T \mathbf{f}_{g3}^T]^T \in \mathbb{R}^9$ は、対象物に加える合力が零となる指先力 $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1^T \mathbf{f}_2^T \mathbf{f}_3^T]^T \in \mathbb{R}^9$ のうち、各指の静止摩擦の制限を満足するものとして定義される。ただし、 $\mathbf{f}_{gi}$ は第 i 指の握力である。握力は、各接触点間の内力成分の大きさをその要素にもつ握力パラメータを $\mathbf{h}_g \in \mathbb{R}^3$ とすると次式で表される。

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{B}_g \mathbf{h}_g \quad (35)$$

一方、操り力 $\mathbf{F}_m = [\mathbf{f}_{m1}^T \mathbf{f}_{m2}^T \mathbf{f}_{m3}^T]^T \in \mathbb{R}^9$ は、望みの操り動作に必要な合力を対象物に加える指先力のうち、各指において握力と逆方向を向かず、握力要素を含まないものとして定義される。ただし、 $\mathbf{f}_{mi}$ は第 i 指の操り力である。操り力は、力の次元をもつ要素からなる操り力パラメータを $\mathbf{h}_m \in \mathbb{R}^6$ とすると次式で表される。

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{B}_m \mathbf{h}_m \quad (36)$$

上述の定義のもとで指先力 $\mathbf{F}$ は、握力 $\mathbf{F}_g$ と操り力 $\mathbf{F}_m$ の和として次式で表される。

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_m \quad (37)$$

3. 制 御 則

ここでは前章で述べた基礎式をもとに、アーム・多指ハンド機構の制御則を議論するが、まず、操り動作と把握動作に対する望みの挙動について述べる。

操り動作に関する望みの挙動として、以下のインピーダンス特性がアーム先端と対象物に対して与えられているとする。

$$\mathbf{M}_{Ad} \ddot{\mathbf{r}}_A + \mathbf{D}_{Ad} \dot{\mathbf{r}}_{Ae} + \mathbf{K}_{Ad} \mathbf{r}_{Ae} = \mathbf{T}_A \quad (38)$$

$$\mathbf{M}_{rd} \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{D}_{rd} \dot{\mathbf{r}}_e + \mathbf{K}_{rd} \mathbf{r}_e = \mathbf{T}_E \quad (39)$$

ただし、 $\mathbf{M}_{Ad} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $\mathbf{D}_{Ad} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $\mathbf{K}_{Ad} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ はそれぞれ、アーム先端の挙動における望みの慣性行列、粘性係数行列、剛性行列であり、 $\mathbf{M}_{rd} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $\mathbf{D}_{rd} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $\mathbf{K}_{rd} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ はそれぞれ、対象物の挙動における望みの慣性行列、粘性係数行列、剛性行列である。また、 $\mathbf{r}_e (= \mathbf{r} - \mathbf{r}_d)$, $\mathbf{r}_{Ae} (= \mathbf{r}_A - \mathbf{r}_{Ad})$ はそれぞれ、対象物の位置姿勢の誤差、アーム先端の位置姿勢の誤差であり、 $\mathbf{r}_d$ は対象物の目標位置姿勢、 $\mathbf{r}_{Ad}$ はアーム先端の目標位置姿勢である。式 (38) (39) の望みの挙動の指定においては $\ddot{\mathbf{r}}_A$ や $\ddot{\mathbf{r}}$ の代わりに $\dot{\mathbf{v}}_A$ や $\dot{\mathbf{v}}$ を用いることも可能である。 $\mathbf{r}_{Ad}$ の算出においては、まず、対象物の目標位置 $\mathbf{p}_d$ と目標の姿勢 ${}^B\mathbf{A}_{Hd}$ のほかに、ハンド部の目標の位置 ${}^A\mathbf{p}_{Hd}$ と目標の姿勢 ${}^A\mathbf{A}_{Hd}$ を用いて、次式によりアーム先端の目標の位置 $\mathbf{p}_{Ad}$ と目標の姿勢 ${}^B\mathbf{A}_{Ad}$ を得る。

$$\mathbf{p}_{Ad} = \mathbf{p}_d - {}^B\mathbf{A}_{Ad} {}^A\mathbf{p}_{Hd} \quad (40)$$

$${}^B\mathbf{A}_{Ad} = {}^B\mathbf{A}_{Hd} {}^A\mathbf{A}_{Hd}^{-1} \quad (41)$$

そして、式 (41) の ${}^B\mathbf{A}_{Ad}$ を用いて、ロール・ピッチ・ヨー角で表したアームの目標姿勢 ϕ_{Ad} を求め、式 (40) の $\mathbf{p}_{Ad}$ と合

わせて $\mathbf{r}_{Ad}$ とすればよい。また、式 (38) 中の、アーム先端に加わる力 $\mathbf{T}_A$ は通常、多指ハンド部から伝わる機構内部の力 $\mathbf{T}_{AI}$ と同じになる。

通常のインピーダンス制御 [12] においてはアームの先端だけに望みの機械インピーダンスが指定されるが、ここで提案する制御則においては、アームの先端と多指ハンドが把握した対象物の両者に対して、式 (38) (39) のように望みの機械インピーダンスが指定される。そして、 $\mathbf{T}_A$ を使うことによって、多指ハンドの可動範囲の狭さを補償するように、アームを動作させることが可能となる。

式 (38) (39) は合わせて次式により表現することもできる。

$$\mathbf{M}_d \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}}_A \\ \ddot{\mathbf{r}} \end{bmatrix} + \mathbf{D}_d \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}_{Ae} \\ \dot{\mathbf{r}}_e \end{bmatrix} + \mathbf{K}_d \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{Ae} \\ \mathbf{r}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_A \\ \mathbf{T}_E \end{bmatrix} \quad (42)$$

ただし、

$$\mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{Ad} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{rd} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{Ad} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_{rd} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{Ad} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{rd} \end{bmatrix}$$

である。

一方、把握動作に関する望みの挙動に対しては、握力パラメータ $\mathbf{h}_g$ に着目し、次式を考慮することにする。

$$\mathbf{h}_g = \mathbf{h}_{gd} \quad (43)$$

ただし、 $\mathbf{h}_{gd}$ は握力パラメータの目標値である。この場合、把握位置などを考慮して適切に決定する握力パラメータの目標値への追従により、確実な把握動作を実現することになる。

さて、以上の準備のもとで、前章で述べたアーム・ハンド機構と対象物に対して、上述の望みの挙動を実現する制御則は、文献 [13] の動的ハイブリッド制御則や文献 [11] と同様な考え方にに基づき導出され、以下のように表される。ただし、添え字に d をもつ物理量は、添え字を伴わない物理量と同じ次元を持ち、制御則の中での目標値に相当するものである。

$$\boldsymbol{\tau}_C = \boldsymbol{\tau}_O + \boldsymbol{\tau}_{AH} \quad (44)$$

$$\boldsymbol{\tau}_O = \mathbf{J}^T \mathbf{F}_d \quad (45)$$

$$\mathbf{F}_d = \mathbf{F}_{gd} + \mathbf{F}_{md} \quad (46)$$

$$\mathbf{F}_{gd} = \mathbf{B}_g \mathbf{u}_2 \quad (47)$$

$$\mathbf{F}_{md} = \mathbf{B}_m (\mathbf{J}_{HF}^T \mathbf{B}_m)^{-1} \mathbf{T}_d \quad (48)$$

$$\mathbf{T}_d = \mathbf{M}_O \ddot{\mathbf{v}}_d + \mathbf{h}_O - \mathbf{T}_E \quad (49)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{AH} = \mathbf{M}_q \ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{h}_q \quad (50)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_d = \tilde{\mathbf{J}} \ddot{\mathbf{v}}_d + \dot{\tilde{\mathbf{J}}} \dot{\mathbf{v}}_d \quad (51)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_d = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_{Ad} \\ \dot{\mathbf{v}}_d \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{W}} \mathbf{u}_1 + \dot{\tilde{\mathbf{W}}} \tilde{\mathbf{r}} \quad (52)$$

$$\mathbf{u}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{1A} \\ \mathbf{u}_{1r} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_d^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{T}_A \\ \mathbf{T}_E \end{bmatrix} - \mathbf{D}_d \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}_{Ae} \\ \dot{\mathbf{r}}_e \end{bmatrix} - \mathbf{K}_d \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{Ae} \\ \mathbf{r}_e \end{bmatrix} \right\} \quad (53)$$

$$\mathbf{u}_2 = \mathbf{h}_{gd2} + \mathbf{K}_F \int (\mathbf{h}_{gd2} - \mathbf{h}_g) dt \quad (54)$$

$$\mathbf{h}_{gd2} = \mathbf{h}_{gd} - T_c \dot{\mathbf{h}}_{gd2} \quad (55)$$

ただし、 $\mathbf{h}_{gd2}$ は、握力パラメータの目標値 $\mathbf{h}_{gd}$ が時定数 T_c の一次遅れ補償器を通過した後の値であり、 $\mathbf{K}_F$ は積分ゲインである。式 (55) は $\mathbf{h}_{gd}$ が不連続に変化することにも対応するための目標値フィルタを表す。式 (44)～(55) により算出される駆動トルク $\boldsymbol{\tau}_C$ を式 (32) の $\boldsymbol{\tau}$ として加えればよい。制御則中の式 (48) において $\mathbf{J}_{HF}^T \mathbf{B}_m$ が正則であることは付録 1 に示す。また、対象物に加わる外力 $\mathbf{T}_E$ の算出は、式 (33) を用いて行う。この場合力 $\mathbf{T}$ は、検出される指先力 $\mathbf{F}$ を式 (34) に代入して算出する。

上述の制御則は二つに分けて考えられるものである。一つは式 (44)～(52) で表される系全体の線形化補償器である。この線形化補償器により、

$$\ddot{\mathbf{r}}_A = \mathbf{u}_{1A} \quad (56)$$

$$\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{u}_{1r} \quad (57)$$

$$\mathbf{h}_g = \mathbf{u}_2 \quad (58)$$

という、線形な系が得られる。

もう一つは式 (53)～(55) で表される制御器であり、線形系に対して望みの挙動を実現させるものである。式 (53) はインピーダンス実現器と呼ぶべきものである。

提案する制御則においては、系全体の安定性が重要である。以下ではこの安定性が保証されることについて述べる。機構全体の関節変数 $\mathbf{q}$ は、式 (29) (24) の関係があるため、 $\mathbf{r}_A$ と $\mathbf{r}$ によりその挙動が決定される。よって $\mathbf{r}_A$ と $\mathbf{r}$ の安定性が補償されれば、 $\mathbf{q}$ の安定性についても保証されることになる。この $\mathbf{r}_A$ と $\mathbf{r}$ の安定性は、望みの挙動を表す式 (42) が安定となるように $\mathbf{M}_d$, $\mathbf{D}_d$, および $\mathbf{K}_d$ を指定すれば、線形化補償の機能により保証される。以上のことより機構全体の安定性は保証される。

4. シミュレーション

4.1 並進1自由度アーム多指ハンド機構

ここでは1自由度の並進運動を行うアームと多指ハンドで構成される機構に対して、3章で提案した制御則を適用した場合のシミュレーションを行い、制御則の有効性の検討を行う。

シミュレーションで用いるアームハンド機構を Fig. 2 に示す。図において、 m_A , m_H , m_{F1} , m_{F2} および m_O はそれぞれ、アーム、ハンドの台座、第1指、第2指、および対象物の質量を表す。この場合の機構の運動方程式は、各部に分けて記述すると、以下の式で表される。

$$\text{アーム: } m_A \ddot{q}_A = \tau_A + T_A \quad (59)$$

$$\text{ハンド台座: } m_H \ddot{q}_A = -\tau_{F1} - \tau_{F2} - T_A \quad (60)$$

$$\text{第1指: } m_{F1} (\ddot{q}_A + \ddot{q}_{F1}) = \tau_{F1} - f_1 \quad (61)$$

$$\text{第2指: } m_{F2} (\ddot{q}_A + \ddot{q}_{F2}) = \tau_{F2} - f_2 \quad (62)$$

式 (59) と式 (60) を別々にしたのは、アーム先端に加わる力 T_A を陽に記述するためである。式 (59)～(62) をまとめて一

Fig. 2 1 DOF arm-hand mechanism

つの式にするために、まず、式 (59) (60) から T_A を消去すると次式を得る。

$$(m_A + m_H) \ddot{q}_A = \tau_A - \tau_{F1} - \tau_{F2} \quad (63)$$

この式 (63) と式 (61) (62) を合わせて整理し、次式を得る。

$$\mathbf{M}_q \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}^T \mathbf{F} = \boldsymbol{\tau} \quad (64)$$

ただし、 $\ddot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^3$, $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^2$, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^3$ であり、

$$\mathbf{M}_q = \begin{bmatrix} m_A + m_H + m_{F1} + m_{F2} & m_{F1} & m_{F2} \\ m_{F1} & m_{F1} & 0 \\ m_{F2} & 0 & m_{F2} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$$

である。以下、一般の場合と異なる各変数の次元に注意されたい。

一方、対象物の運動方程式は次式で表される。

$$M_O \dot{v} = T + T_E \quad (65)$$

$$T = \mathbf{J}_{HF}^T \mathbf{F} \quad (66)$$

ただし、 $\dot{v} \in \mathbb{R}^1$, $T \in \mathbb{R}^1$, $T_E \in \mathbb{R}^1$ であり、

$$M_O = m_O \in \mathbb{R}^{1 \times 1}, \quad \mathbf{J}_{HF} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$$

である。

また、運動学に関しては次式が成り立つ。

$$\dot{\mathbf{q}} = \tilde{\mathbf{J}} \tilde{\mathbf{v}}, \quad \tilde{\mathbf{J}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 2} \quad (67)$$

$$v_A = W_A \dot{r}_A, \quad v = W \dot{r}, \quad W_A = W = 1 \quad (68)$$

握力と操り力の和である指先力はこの場合、

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_m \quad (69)$$

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{B}_g h_g, \quad h_g \geq 0, \quad \mathbf{B}_g = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 1} \quad (70)$$

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{B}_m h_m, \quad h_m \geq 0, \quad \mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} k \\ -(1-k) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 1} \quad (71)$$

となる。ただし、 $k (= 1 \text{ or } 0)$ の値は、式 (66) (69) ~ (71) より定まる次式、

$$h_m = (\mathbf{J}_{HF}^T \mathbf{B}_m)^{-1} T \quad (72)$$

が 0 以上となるように選ばれる [9]。この場合式 (48) を計算すると

$$\mathbf{F}_{md} = \begin{cases} \begin{bmatrix} T_d \\ 0 \end{bmatrix}, & \text{when } T_d \geq 0 \\ \begin{bmatrix} 0 \\ T_d \end{bmatrix}, & \text{when } T_d < 0 \end{cases} \quad (73)$$

となる。

シミュレーションでは機構の質量を、

$$m_A = 10 [\text{kg}], \quad m_H = 2.5 [\text{kg}], \quad m_{F1} = m_{F2} = 0.2 [\text{kg}]$$

$$m_O = 0.1 [\text{kg}]$$

としている。

4.2 望みの把握と操り

3 章の制御則に従う望みの把握動作は、握力パラメータの目標値 h_{gd} とサーボ補償器中の定数により決定される。これらの値を、

$$h_{gd} = 20 [\text{N}], \quad K_F = 100 [1/\text{s}], \quad T_c = 0.05 [\text{s}]$$

とする。

一方、望みの操り動作は、把握した対象物とアーム手先に与える機械インピーダンスにより決定され、

$$M_{Ad} = 12.5 [\text{kg}] \quad M_{rd} = 0.5 [\text{kg}]$$

$$D_{Ad} = 140 [\text{N}/(\text{m}/\text{s})] \quad D_{rd} = 28 [\text{N}/(\text{m}/\text{s})]$$

$$K_{Ad} = 800 [\text{N}/\text{m}] \quad K_{rd} = 800 [\text{N}/\text{m}]$$

とする。これらの設定は、次の方針に従い決定した。

- 1) 対象物を把握した機構の本来の慣性を考慮する。
- 2) 外力の大きさが一定となる状態において、多指ハンドの把握姿勢がもとの状態に戻るようにする。
- 3) 多指ハンドとアームの運動を安定にする。

以下では、これらの方針について詳しく述べる。

1) に関しては、対象物を把握した機構の運動方程式を明らかにする必要がある。

まず、準備として、式 (67) より次式の加速度の関係を得る。

$$\ddot{\mathbf{q}} = \tilde{\mathbf{J}} \ddot{\mathbf{v}} \quad (74)$$

ただし、 $\ddot{\mathbf{v}} = [\ddot{v}_A \quad \ddot{v}]^T \in \mathbb{R}^2$ である。また、式 (67) に仮想仕事の原理を適用し、次式を得る。

$$\tilde{\mathbf{J}}^T \boldsymbol{\tau} = \tilde{\mathbf{T}} \quad (75)$$

ただし, $\tilde{\mathbf{T}} = [T_A \ T]^T \in \mathbb{R}^2$ である. よって, 式 (64) (74) (75) より, $\boldsymbol{\tau}$ と $\dot{\mathbf{q}}$ を消去して次式を得る.

$$\tilde{\mathbf{J}}^T \mathbf{M}_q \tilde{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{v}} + \tilde{\mathbf{J}}^T \mathbf{J}^T \mathbf{F} = \tilde{\mathbf{T}} \quad (76)$$

ここで式 (76) においては, $\tilde{\mathbf{J}}$ と $\mathbf{J}$ の値を代入すると

$$\tilde{\mathbf{J}}^T \mathbf{J}^T \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_1 + f_2 \end{bmatrix} \quad (77)$$

が成立する. 一方, 式 (65) (66) より, 外力 T_E が作用しないときには,

$$m_O \dot{v} = f_1 + f_2 \quad (78)$$

が成立する. また, この場合, 式 (68) より次式が成り立つ.

$$\tilde{\mathbf{v}} = \tilde{\mathbf{r}} \quad (79)$$

よって, 式 (76)~(79) より対象物を把握した状態の運動方程式として次式を得る.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{r}} = \tilde{\mathbf{T}} \quad (80)$$

ただし,

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \tilde{\mathbf{J}}_{AH}^T \mathbf{M}_q \tilde{\mathbf{J}}_{AH} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & m_O \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} m_A + m_H & 0 \\ 0 & m_{F1} + m_{F2} + m_O \end{bmatrix} \end{aligned}$$

である. この式 (80) が, 系全体の運動方程式を表し, $\mathbf{M}$ が系全体の本来の慣性を表す. 式 (80) の $\mathbf{M}$ と異なる値を望みの慣性として与えた場合には, その差異に対応する駆動力が必要とされることになる. ここでは, 式 (80) の本来の慣性 $\mathbf{M}$ と同じ慣性を望みの慣性 $\mathbf{M}_d$ として与えることとし,

$$M_{Ad} = m_A + m_H \quad (81)$$

$$M_{rd} = m_{F1} + m_{F2} + m_O \quad (82)$$

とした.

2) に関しては, アームの先端に与える剛性 K_{Md} を対象物に与える剛性と合わせて $K_{Ad} = K_{rd}$ としている. そしてそれらの値は, アーム先端の手先の 2 次系の運動としての固有角周波数 ω_A と ω が,

$$\omega_A = \sqrt{\frac{K_{Ad}}{M_{Ad}}} = 8 [\text{rad/s}], \quad \omega = \sqrt{\frac{K_{rd}}{M_{rd}}} = 40 [\text{rad/s}]$$

となるように決定している.

一般の場合の剛性の決定に関しては, 文献 [5] と同様に,

$$\mathbf{K}_{Ad} = \mathbf{J}_{AHd}^T \mathbf{K}_{rd} \mathbf{J}_{AHd} \quad (83)$$

とすればよい. 式 (83) 中の $\mathbf{J}_{AHd}$ は, 多指ハンド部が望みの姿勢をとるとき点 O_A から点 O_H へ向かう位置ベクトル ${}^A\mathbf{p}_{Hd}$ を用いて式 (21) と同様に計算できる.

3) に関しては, アーム手先と対象物の 2 次系としての運動の粘性減衰係数 ζ_A, ζ が共に,

$$\zeta_A = \frac{D_{Ad}}{2\sqrt{M_{Ad}K_{Ad}}} = 0.7, \quad \zeta = \frac{D_{rd}}{2\sqrt{M_{rd}K_{rd}}} = 0.7$$

となるように D_{Ad}, D_{rd} の値を決定している.

手先と多指ハンドの位置と速度の初期値は,

$$\mathbf{r}(0) = 0.5 [\text{m}], \quad {}^A\mathbf{r}_H(0) = 0.1 [\text{m}]$$

$$\dot{\mathbf{q}}_A(0) = \dot{\mathbf{q}}_{F1}(0) = \dot{\mathbf{q}}_{F2}(0) = 0 [\text{m/s}]$$

とし, 目標位置 $\mathbf{r}_d$ と ${}^A\mathbf{r}_{Hd}$ は, 初期値と同じにしている.

4.3 シミュレーション結果

この章ではシミュレーション結果について述べるが, その前に, シミュレーションの手法について説明する.

本研究のシミュレーションにおいては, 把握に伴う指先の拘束のもとで運動する系を扱う. そのため, ある状態で機構に駆動トルクが与えられたときに, 指先の拘束を満足する運動とそのときの指先力を得る必要がある. そこでまず, この点を考慮した運動方程式を明らかにする.

まず, 加速度の関係式として式 (18) より次式を得る.

$$\mathbf{J} \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_{HF} \ddot{\mathbf{v}} + \dot{\mathbf{J}}_{HF} \dot{\mathbf{v}} \quad (84)$$

この式 (84) と式 (33) (34) より $\ddot{\mathbf{v}}$ と $\mathbf{T}$ を消去して次式を得る.

$$\mathbf{J} \ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{J}_{HF} \mathbf{M}_O^{-1} \mathbf{J}_{HF}^T \mathbf{F} = \mathbf{J}_{HF} \mathbf{M}_O^{-1} (\mathbf{T}_E - \mathbf{h}_O) + \dot{\mathbf{J}}_{HF} \dot{\mathbf{v}} - \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}} \quad (85)$$

よって, 式 (85) と式 (32) より次式の系全体の運動方程式を得る.

$$\tilde{\mathbf{M}}_q \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{F} \end{bmatrix} = \tilde{\boldsymbol{\tau}} \quad (86)$$

ただし,

$$\tilde{\mathbf{M}}_q = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_q & \mathbf{J}^T \\ \mathbf{J} & -\mathbf{J}_{HF} \mathbf{M}_O^{-1} \mathbf{J}_{HF}^T \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$$

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} - \mathbf{h}_q \\ \mathbf{J}_{HF} \mathbf{M}_O^{-1} (\mathbf{T}_E - \mathbf{h}_O) + \dot{\mathbf{J}}_{HF} \dot{\mathbf{v}} - \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^5$$

である. 式 (86) の $\tilde{\mathbf{M}}_q$ はフルランクであるので (付録 2 参照), 与えられた駆動力 $\boldsymbol{\tau}$ に対して $\ddot{\mathbf{q}}$ と $\mathbf{F}$ を同時に求めることができる. シミュレーション実行時には, サンプリングタイム時間を 1 [ms] として $\ddot{\mathbf{q}}$ と $\mathbf{F}$ を求め, $\ddot{\mathbf{q}}$ からの $\dot{\mathbf{q}}$ と $\mathbf{q}$ の算出は, 積分時間 0.1 [ms] のオイラー法を用いている. なお, 制御則中で用いる T_A の値は, 式 (60) を用いて算出している.

以下に示すシミュレーションの各試行における最初の 1 秒間は, 対象物が初期位置において台に支えられているとし, すべりのない把握動作を行うための時間にあてている. このため外力は, 1 秒後に加えることとした.

まず, Fig. 3(a) に示す $T_E = 40 [\text{N}]$ のステップ関数状の外力を加え, 位置と力の応答を調べた.

操りに関しては, Fig. 3(b) から分かるように, 動作の開始は同じであるものの対象物の変位の方がアーム先端の変位より

Fig. 3 Simulation results when external force is changed as step function

素早く現れ、結果として、両者の差異であるハンド部の変位が素早く現れている。これは、対象物の動作に与えられた ω の方が、アーム先端の動作に与えられた ω_A より大きいためである。そして静止状態においては、対象物の位置 r が、 $T_E/K_{rd} = 0.05$ [m] だけ変位しているが、ハンド部は初期値 $A r_H(0) = 0.1$ [m] に戻り、ハンド部の狭い可動範囲が有効に利用できる制御則であることが分かる。

把握に関しては、Fig. 3(c) から分かるように、制御量 h_g はシミュレーション開始後まもなく h_{gd} に収束し、操り動作中も目標値に追従している、また、Fig. 3(d) に示されているように、各指の握力 f_{g1} , f_{g2} の大きさは h_g となり、操り動作開始後の指先力は、第2指の方だけが内向きに、より大きくなっている。仮に第1指の方に負の大きさの操り力成分が現れるとすると、第1指の指先力の大きさが小さくなり、すべりやすい把握状態となる。

また、Fig. 3(e) に示される駆動力が過大でないのは、望みの慣性の設定において、対象物を把握した機構の本来の慣性を考

慮したためと考えられる。

次に、振幅 40 N の正弦波状の外力を加え、位置の応答を調べた。Fig. 4(a) と Fig. 4(b) はそれぞれ周波数が 0.25 [Hz] と 4 [Hz] の場合である。周波数が 0.25 [Hz] の場合には、主にアーム部が動作し、4 [Hz] の場合には、主にハンド部が動作している。このことより、外力の周波数帯域に応じた動作の分担が可能であることが分かる。

さらに、より一般的な場合を想定し、次式で表される複合正弦波状の外力を加え、位置と力の応答を調べた。

$$T_E = a_1 \sin(2\pi f_{r1} t') + a_2 \sin(2\pi f_{r2} t') \quad (87)$$

ただし、 $t' = t - 1$ (≥ 0) であり、ここでは $a_1 = 40$ [N], $a_2 = 10$ [N], $f_{r1} = 0.25$ [Hz], $f_{r2} = 4$ [Hz] としている。この場合の外力を Fig. 5(a) に示す。

Fig. 5(b) により、周波数の低い外力成分に応じてアーム部が動作し、周波数の高い外力成分に応じてハンド部が動作していることが分かる。このことから考えると、手先に加わる外力が、

Fig. 4 Simulation results when external force is changed as sine wave

Fig. 5 Simulation results when external force is changed as composite sine wave

振幅が大きく周波数が低い外力成分と振幅が小さく周波数が高い外力成分からなる場合には、前者をアーム部に、後者をハンド部に分担させるように望みの機械インピーダンスを設定すればよい。具体的には、本章で述べたように、アーム部先端の固有角周波数に比べて対象物の固有角周波数が大きくなるように

M_{Ad} や M_{rd} などを設定することになる。このような考え方により、動作範囲が大きく取りやすいアーム部の長所と柔軟動作が行いやすいハンド部の長所を活かした制御が可能となる。

この場合の握力パラメータ、指先力と握力の応答を Fig. 5 (c), Fig. 5 (d) に示す。ステップ関数状の外力を加えた場合と同様に、

握力パラメータ h_g は操り動作中も目標値に収束しており、それぞれの指の指先力 f_i の大きさは、 h_g 以上に保たれていることが分かる。

また、この際の駆動トルクが過大にならないことが Fig. 5 (e) より分かる。

以上のシミュレーションで用いた制御則においては、文献 [9][10] の握力と操り力を用いており、それが確実な把握のために有効に作用していると思われる。以下では、このことを検証するために、握力と操り力を用いない制御則を構成し、Fig. 5 の場合との比較検討を行う。

握力と操り力を用いない制御則の構成として、例えば、式 (46)～(48) (54) (55) の代わりに、次式により指先力の目標値 F_d を算出する方法が考えられる。

$$F_d = \tilde{F}_{gd} + \tilde{F}_{md} \quad (88)$$

$$\tilde{F}_{gd} = \tilde{F}_{gd2} + K_F \int (\tilde{F}_{gd2} - \tilde{F}_g) dt \quad (89)$$

$$K_F = \text{diag.}(k_{F1}, k_{F2})$$

$$\tilde{F}_{gd2} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} h_{gd} - T_c \dot{\tilde{F}}_{gd2} \quad (90)$$

$$\tilde{F}_{md} = (J_{HF}^T)^{\dagger} T_d = \begin{bmatrix} T_d/2 \\ T_d/2 \end{bmatrix} \quad (91)$$

この方法は、把握のための指先力成分 $\tilde{F}_{gd}$ を、指先力と同じ次元をもつ $\tilde{F}_g = [\tilde{F}_{g1} \ \tilde{F}_{g2}]^T \in \mathbb{R}^2$ を制御量として算出し、操りのための指先力成分 $\tilde{F}_{md}$ を、疑似逆行列を用いて式 (34) を F について解くことにより算出するものである。式 (90) においては、把握のための指先力成分の目標値を、Fig. 5 の場合と同じにするために h_{gd} で与えている。また、上述の $\tilde{F}_{md}$ の算出と整合するような、指先力 F からの $\tilde{F}_g$ の検出方法を付録 3 に示す。

この算出方法を用い、Fig. 5 の場合と同じ複合正弦波を外力として与えた場合の位置の応答と f_i , $\tilde{f}_{gi}$ の応答を Fig. 6 に示す。ただし、この場合、Fig. 5 の場合と同様に

$$h_{gd} = 20 \text{ [N]}, \quad k_{Fi} = 100 \text{ [1/s]}, \quad T_c = 0.05 \text{ [s]}$$

としている。

Fig. 6 (a) に示す位置の応答は、Fig. 5 (b) と同じであるが、指先力 f_i の応答は異なり、その大きさがつねに h_{gd} 以上にならないばかりか、対象物と逆方向を向く瞬間もある。これは、式 (91) による $\tilde{F}_{md}$ の算出に起因するものであり、一定の内力成分を把握のための目標値として与えるだけでは不十分なことが分かる。このことより、本論文で提案する握力と操り力を用いる制御方法のほうが確実な把握を実現しやすいと思われる。

5. おわりに

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

1) アーム・多指ハンド機構に対して、アームと多指ハンドの両者の機能と長所を活かす制御方法を提案している。この制御方法は、操り動作に関しては、アームをマクロ部と見なし、多指ハンドをマイクロ部と見なす、冗長マクロ・マイクロ・マ

(a) position

(b) fingertip force and its component for grasping

Fig. 6 Simulation results without the grasping and manipulating forces when external force is changed as composite sine wave

ニピューレータの運動制御の考え方に基づくものである。この制御方法により、アームの広い動作範囲と多指ハンドの柔軟動作、実現性の両者を生活かす合理的な協調動作が実現できる。また、把握動作に関しては、多指ハンドが確実な把握動作を実現するための制御方法となる。

2) シミュレーションにより提案する制御系の有効性を検証している。

本論文で提案するアーム・ハンド機構の運動制御法は、ロボットによる高度なマニピュレーション技術の一つになると思われる。この制御法は、アームまたは多指ハンドの自由度が少ない場合にも適用可能 [14] であるが、詳細な検討は今後の課題としたい。

参考文献

- [1] O. Khatib: "Reduced effective inertia in macro-/mini-manipulator systems," Proc. of ACC, pp. 2140-2147, 1988.
- [2] A. Sharon, N. Hogan and D.E. Hardt: "Controller Design in the Physical Domain," Proc. of the IEEE Conference on Robotics and Automation, pp. 552-559, 1989.
- [3] 川瀬, 石川, 澤田, 高田: "手首と腕の協調制御によるマニピュレータのコンプライアンス制御", 日本ロボット学会誌, vol. 9, no. 4, pp. 401-408, 1991.
- [4] 吉川, 細田, 土井: "マクロ-マイクロシステムによるフレキシブルアームの準静的軌道制御", 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 1, pp. 140-147, 1993.
- [5] 永井, 吉川: "インピーダンス制御に基づく冗長マクロマイクロマニピュレータの運動制御", 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 267-270, 1993.
- [6] 永井, 吉川: "冗長マクロ・マイクロマニピュレータのインピーダンス制御", 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 5, pp. 766-772, 1994.
- [7] Z. Li, P. Hsu and S. Sastry: "Grasping and Coordinated Manipulation by a Multifingered Robot Hand," Int. Journal of Robotics

Research, vol. 8, no. 4, pp. 33–50, 1989.

- [8] T. Yoshikawa and X. Zheng: "Coordinated Dynamic Hybrid Position/Force Control for Multiple Robot Manipulators Handling One Constrained Object," Proc. 1990 JAPAN-U.S.A. Symp. on Flexible Automation, pp. 401–407, 1990.
- [9] 吉川, 永井: "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, no. 11, pp. 1206–1213, 1987.
- [10] T. Yoshikawa and K. Nagai: "Manipulating and Grasping Forces in Manipulation by Multifingered Robot Hands," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 7, no. 1, pp. 67–77, 1991.
- [11] 永井, 吉川: "多指ハンドの動的操り/握み制御", 計測自動制御学会論文集, vol. 30, no. 1, pp. 39–47, 1994.
- [12] N. Hogan: "Impedance Control; An Approach to Manipulation," Parts I–III, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 107, no. 1, pp. 1–24, 1985.
- [13] T. Yoshikawa: "Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators—Description of Hand Constraints and Calculation of Joint Driving Force," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 3, no. 5, pp. 386–392, 1987.
- [14] 永井, 吉川: "多指ハンドとアームの協調制御", 日本ロボット学会第4回ロボットシンポジウム予稿集, pp. 155–160, 1994.

付録1 $J_{HF}^T B_m$ が正則であることの証明

以下では, $J_{HF}^T B_m$ に適当な正則行列をかけた行列の正則性を利用して $J_{HF}^T B_m$ が正則であることを証明する.

B_m は, 1 または 0 の値をとる補助変数 k_1, k_2 および k_3 を含む[10]. ここでは $k_1 = k_2 = k_3 = 0$ の場合を考え, Σ_B の xy 平面が, C_1, C_2, C_3 を通る把握平面に平行となるようにするものとする.

Σ_B のとり方により,

$$B_m = \begin{bmatrix} 0 & \bar{e}_{13} & 0 & e_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{e}_{21} & 0 & e_z & 0 \\ \bar{e}_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & e_z \end{bmatrix} \quad (92)$$

となる. ただし, $e_z = [0 \ 0 \ 1]^T$ である. $\bar{e}_{ij}$ の z 成分 ($\bar{e}_{ij}$) _{z} は, $(\bar{e}_{32})_z = (\bar{e}_{13})_z = (\bar{e}_{21})_z = 0$ を満たす. 他方, J_{HF}^T は, $-P_{HF}^T = P_{HF}$ を $[p_i \times]$ と表記する (p_i は C_i までの位置ベクトル) と,

$$J_{HF}^T = \begin{bmatrix} E_3 & E_3 & E_3 \\ [p_1 \times] & [p_2 \times] & [p_3 \times] \end{bmatrix} \quad (93)$$

となる. よって,

$$J_{HF}^T B_m = \begin{bmatrix} \bar{e}_{32} & \bar{e}_{13} & \bar{e}_{21} \\ p_3 \times \bar{e}_{32} & p_1 \times \bar{e}_{13} & p_2 \times \bar{e}_{21} \\ e_z & e_z & e_z \\ p_1 \times e_z & p_2 \times e_z & p_3 \times e_z \end{bmatrix} \quad (94)$$

となる. この行列の正則性を以下に示す.

まず, 上式と, $\bar{e}_{ij}$ の定義より成り立つ次式,

$$\|p_1 - p_2\| \bar{e}_{13} + \|p_2 - p_3\| \bar{e}_{21} + \|p_3 - p_1\| \bar{e}_{32} = 0 \quad (95)$$

より, $J_{HF}^T B_m$ の前後に正則行列をかけた行列,

$$A = \begin{bmatrix} E_3 & 0 \\ [-p_3 \times] & E_3 \end{bmatrix} J_{HF}^T B_m \begin{bmatrix} 1 & 0 & \|p_3 - p_1\| \\ 0 & 1 & \|p_1 - p_2\| \\ 0 & 0 & \|p_2 - p_3\| \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \bar{e}_{32} & \bar{e}_{13} & 0 \\ 0 & (p_1 - p_3) \times \bar{e}_{13} & a \\ e_z & e_z & e_z \\ -\|p_1 - p_2\| \bar{e}_{12} & -\|p_2 - p_3\| \bar{e}_{21} & 0 \end{bmatrix} \quad (96)$$

を得る. ただし,

$$a = \{ \|p_1 - p_2\| \|p_2 - p_3\| \cos \phi - \|p_2 - p_3\|^2 \} e_z \quad (97)$$

であり, ϕ はベクトル $(p_2 - p_1)$ から $(p_3 - p_1)$ までの e_z 軸まわりの角度である. ここで余弦定理より

$$\|p_2 - p_3\|^2 = \|p_1 - p_2\|^2 + \|p_1 - p_3\|^2 - 2\|p_1 - p_2\| \|p_1 - p_3\| \cos \phi \quad (98)$$

であること, ならびに A が

$$A = \begin{bmatrix} * & * & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & * & * & 0 \\ 0 & 0 & 0 & * & * & 0 \\ 0 & * & * & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (99)$$

の形をしていることに注意すれば,

$$\begin{aligned} \det A &= \det [\bar{e}_{32} \ \bar{e}_{13}] \\ &\times \left\{ \|p_1 - p_2\|^2 + \|p_1 - p_3\|^2 \right. \\ &\quad \left. - \|p_1 - p_2\| \|p_1 - p_3\| \cos \phi \right\} \\ &\times \|p_1 - p_3\| \|p_2 - p_3\| \det [\bar{e}_{12} \ \bar{e}_{21}] \\ &\neq 0 \end{aligned}$$

が得られ, A が正則であることが示せる. したがって $J_{HF}^T B_m$ は正則である.

またほかの k_1, k_2, k_3 の場合についても同様に証明できる. $\square$

付録2 $\tilde{M}_g$ がフルランクであることの証明

正則行列をかけても行列の階数が変化しないことを利用する.

$$\begin{aligned} &\text{rank}(\tilde{M}_q) \\ &= \text{rank} \left(\begin{bmatrix} E_3 & 0 \\ -JM_q^{-1} & E_2 \end{bmatrix} \tilde{M}_q \right) \\ &= \text{rank} \left(\begin{bmatrix} M_q & J^T \\ 0 & -JM_q^{-1} J^T - J_{HF} M_O^{-1} J_{HF}^T \end{bmatrix} \right) \\ &= \text{rank}(M_q) \\ &\quad + \text{rank} \left([J \ J_{HF}] \begin{bmatrix} -M_q^{-1} & 0 \\ 0 & -M_O^{-1} \end{bmatrix} [J \ J_{HF}]^T \right) \\ &= 3 + 2 \\ &= 5 \end{aligned} \quad (100)$$

$\square$

付録3 握力と操り力を用いない場合の $\tilde{F}_g$ の算出方法

$$\tilde{F}_g = F - \tilde{F}_m \quad (101)$$

$$\tilde{F}_m = (J_{HF}^T)^{\dagger} T \quad (102)$$

$$T = J_{HF}^T F \quad (103)$$

$$\begin{aligned} \tilde{F}_g &= \left\{ E_2 - (J_{HF}^T)^{\dagger} J_{HF}^T \right\} F \\ &= \begin{bmatrix} 1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1/2 \end{bmatrix} F \\ &= \begin{bmatrix} (f_1 - f_2)/2 \\ (-f_1 + f_2)/2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (104)$$

より

を得る.

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科助手。1995年4月より同大学助教授。ロボット工学の研究に従事。工学博士。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年同大学教授（オートメーション研究施設）。1989年5月より同大学工学部応用システム科学教室教授となり、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。工学博士。システム制御情報学会、計測自動制御学会、日本機械学会、IEEEなどの会員。

(日本ロボット学会正会員)