把握中の制御

操りと把握のための位置と力のハイブリッド制御

永 井

清*

1. はじめに

多指ハンドロボットは、人が行うような器用な作業をロボットに行わせることを目的として研究開発されてきている。その基本的な機能は、確実に把握することと望みの操り動作を行うことであり、Hanafusa と Asada は把握系のポテンシャル関数を用いて安定把握¹⁾を議論し、Okada²⁾, Kobayashi³⁾, Salisbury⁴⁾ は運動学に着目した制御方法を提案している。

対象物を把持している多指ハンドは、対象物とともに内力の存在する力学系を構成するが、確実な把握のためには、この内力の決定方法が重要な課題となる。内力の数学的な定義を初めに行ったのは、Salisbury⁵⁾である。Hanafusa らは内力である把握力の定量的な評価を試み⁶⁾, Kerr と Roth は線形計画法を用いて最適な内力を求めることを提案している⁷⁾。中村、永井、吉川は、非線形計画法を用いてすべりを生じない最小の指先力を与える最適内力を求めている⁸⁾。また、吉川と永井は、内力と対象物を操るための合力を握力と操り力の問題として議論している^{9),10)}。

一方、操りに関して最近では、指や対象物の動特性や、対象物に加える複数の指先力の合力を陽に取り扱った制御則が多くみられる。この制御方法は、中村らにより動的協調制御⁹⁾として提案されたものである。その後、杉江らは位置制御に適した把握系の制御を含む制御則¹¹⁾を提案している。また、Li, Hsu, Sastry は、内力の閉ループ制御を含む制御則¹²⁾を、吉川と永井は握力と操り力に基づく制御方法を提案している^{13),14)}。また、Yoshikawa と Zheng は把握した対象物の環境との接触力も制御する方法を提案している¹⁵⁾。

さて、ここで把握と操りの制御方法について考えよう。望みの操り動作に対しては、対象物を空間内で運動させる場合には位置制御が適当であろう。一方、確実な把握動作のためには、指先力の向きが重要であるので内力成分を力制御することが妥当と思われる。すなわち、この場合には、操りと把握のために位置と力の制御を同時に行うことになる。環境と接触しているロボットアームに対しては、Raibert と Craig が位置と力のハイブリッド制御則を提案している¹⁶⁾。この制御方法は、吉川によりアームの動特性を考慮した一般的な形に拡張され¹⁷⁾, Yoshikawa らにより実験結果も報告されている¹⁸⁾。しかしながら、把握力制御と操り位置制御のハイブリッド制御に対しては、アームのハイブリッド制御ほど明確でないように思われる。

そこで本稿では、多指ロボットハンドの操りと把握の制御にみられる位置と力のハイブリッド制御則について議論する。以下、2節では、ハイブリッド制御の考え方の確認と、ハンドの把握力制御と操り位置制御の特徴について述べる。3節では、ハイブリッド制御の考え方を含む制御則^{12),13),14)}について述べ、ハンド固有の問題について考察を行う。また、4節では、3節で述べる制御則の実現に必要な情報のセンシング方法について述べる。なお、内力の決定問題である力分配問題、把握と操りの安定性の概念、ハイブリッド制御についてはそれぞれ、文献 19), 20), 21) に詳しいので一読されたい。

2. 操り位置制御と把握力制御のハイブリッド制御¹⁶⁾

2.1 位置と力のハイブリッド制御¹⁶⁾

まず、図1に示す2関節アームを用いて、位置と力のハイブリッド制御を確認しよう。ハイブリッド制御は、環境と接触している手先が拘束を受けている状況を対象とし、拘束方向に適当な力を加え、拘束されていない方向、すなわち運動可能な方向の位置を制御す

原稿受付 1993年8月30日

Control during Grasping

Hybrid Position/Force Control for Manipulation and Grasping

* 立命館大学理工学部

図1 2関節アームと拘束座標系

るものである。この手先の拘束を扱うには、軸を拘束方向に応じて設定する拘束座標系を用いると都合が良い。図1における拘束座標系 Σ_c は、 y_c 軸方向を位置の拘束方向としている。この場合、 x_c 軸方向が位置制御方向であり、 y_c 軸方向が力制御方向である。

いま、 ${}^c\mathbf{r}_d$ と ${}^c\mathbf{r}$ を Σ_c で記述した手先位置の目標値と応答、 ${}^c\mathbf{f}_d$ と ${}^c\mathbf{f}$ を Σ_c で記述した手先力の目標値とその応答とする。このとき、拘束方向を考慮した手先位置誤差 ${}^c\mathbf{r}_e$ と力誤差 ${}^c\mathbf{f}_e$ は、

$${}^c\mathbf{r}_e = (\mathbf{I} - \mathbf{S})({}^c\mathbf{r}_d - {}^c\mathbf{r}) \quad (1)$$

$${}^c\mathbf{f}_e = \mathbf{S}({}^c\mathbf{f}_d - {}^c\mathbf{f}) \quad (2)$$

となる。ただし、 $\mathbf{I}$ は単位行列、 $\mathbf{S}$ は力制御方向の成分を抜き出すために用いられる対角行列であり、選択行列と呼ばれる。図1の場合、

$$\mathbf{S} = \text{diag}(0, 1) \quad (3)$$

となる。 ${}^c\mathbf{r}_e$ と ${}^c\mathbf{f}_e$ を用いるとハイブリッド制御則は次式で表される。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_p + \boldsymbol{\tau}_f \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\tau}_p = K_{pp}\mathbf{q}_e + K_{pd}\dot{\mathbf{q}}_e \quad (5)$$

$$\mathbf{q}_e = \mathbf{J}^{-1c}\mathbf{r}_e \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_e = \mathbf{J}^{-1c}\dot{\mathbf{r}}_e \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\tau}_f = K_{fp}\boldsymbol{\tau}_e + K_{fi}\int \boldsymbol{\tau}_e dt \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\tau}_e = \mathbf{J}^T \mathbf{f}_e \quad (9)$$

ただし、 $\boldsymbol{\tau}$ はアームに加える関節駆動トルク、 $\boldsymbol{\tau}_p$ と $\boldsymbol{\tau}_f$ はそれぞれ位置制御と力制御による駆動トルク、 $\mathbf{q}_e$ は関節角誤差、 $\dot{\mathbf{q}}_e$ は関節角速度誤差、 $\boldsymbol{\tau}_e$ は力誤差に対応する駆動トルク誤差、 $\mathbf{J}$ はアームのヤコビ行列である。また、 K_{pp} と K_{pd} 、 K_{fp} と K_{fi} はそれぞれ、位置制御と力制御用フィードバックゲインであり、位置制御はPD制御、力制御はPI制御としている。

ハイブリッド制御の特徴は、環境との接触に伴う手先の拘束を陽に表現し、拘束されている方向には力制御、そうでない方向には位置制御を行う点である。このため、通常は位置制御と力制御の2つのフィードバックループを持つことになる。

なお、2つの制御方向がこの場合直交していること

図2 2本指ハンドルと指先の拘束

は、直交補空間の概念に基づく解釈が可能である。すなわち、位置制御方向を表す位置制御空間は、力制御方向を表す力制御空間との和空間が全空間、積空間が0ベクトルのみからなる空間となるので、力制御空間の補空間であるといえる。さらに、位置制御空間の任意のベクトルは、力制御空間の任意のベクトルと直交するので、結局、位置制御空間は力制御空間の直交補空間であるといえる。このような考え方は、明解で説得力もあると思われる。しかし、位置と姿勢を同時に扱う一般の場合は、次元の異なる並進系と回転系を同時に扱うことなどに問題があるとする考えもある²²⁾。

2.2 操り位置制御と把握力制御

次に図2に示す2本指ハンドについて考えよう。ハンドが接触点 C_1 、 C_2 で対象物を把握している場合、対象物が剛体ならば C_1 - C_2 間の距離はすべりが生じない限り不変であり、この距離が一定であることが指先の拘束になる。よって、この距離を変えようとする指先の運動方向が力制御方向であり、内力、ないしは把握力を制御する方向となる。この拘束が図1のアームの手先の拘束と大きく異なる点は、 C_1 - C_2 間の距離が不変ではあるが、 C_1 、 C_2 の指先位置が固定されているわけではない点である。

一方、操り動作では、対象物に固定した対象物座標系 Σ_0 を、図2の場合、機構を含む平面内で運動させることであり、任意の方向が位置制御方向となる。

上述のように、ハンドにおける力制御方向と位置制御方向の組は、図1の2つの方向の組のような分かりやすい直交関係ではない。しかしながら、4節で述べるように、指先力と合力の関係を代数方程式として表す場合には、その係数行列の直交補空間を表す係数行

列を用いて内力を表すことができる。

3. ハイブリッド型制御系の構成例

3.1 基礎式

本稿では、対象物と摩擦のある点接触をする3本指ハンドを対象とし、制御に必要な基礎式について述べる。簡単のために各指の関節数を3とし、対象物の任意の操り操作は可能であるが、運動学的な冗長性は存在しない機構を対象とする。

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 $\mathbf{v} = [\dot{\mathbf{r}}_p^T \ \omega^T]^T \in \mathbb{R}^6$ と、各指の関節変数速度 $\dot{\mathbf{q}}_i \in \mathbb{R}^3$ ($i=1, 2, 3$) からなる指の関節変数速度 $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{\mathbf{q}}_1^T \ \dot{\mathbf{q}}_2^T \ \dot{\mathbf{q}}_3^T]^T \in \mathbb{R}^9$ の間には指先の速度が一致することよりの運動学的拘束がある。

$$\mathbf{J}_o \mathbf{v} = \mathbf{J}_f \dot{\mathbf{q}} \quad (10)$$

ただし、 $\mathbf{r}_p$ は、基準座標系 Σ_b の原点から対象物に固定した対象物座標系 Σ_o の原点に向かう位置ベクトル、 ω は対象物の角速度ベクトルである。また、 $\mathbf{J}_o$ は把握位置により決まる行列、 $\mathbf{J}_f$ は各指のヤコビ行列 $\mathbf{J}_{fi} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を対角ブロックに持つ行列である。

対象物の角速度は ω 以外に、基準座標系の各座標軸まわりの回転速度 $\dot{\phi}$ を用いて表すことができる。例えば、この $\dot{\phi}$ にはロール・ピッチ・ヨー角などを用いることができる。今このベクトルを $\dot{\mathbf{r}} = [\dot{\mathbf{r}}_p^T \ \dot{\phi}^T]^T \in \mathbb{R}^6$ とおくと、 $\mathbf{v}$ と $\dot{\mathbf{r}}$ は一般に変換 $\mathbf{W}$ により次式のように関係付けられる。

$$\mathbf{v} = \mathbf{W} \dot{\mathbf{r}} \quad (11)$$

第 i 番目の指の運動方程式は、通常のアームと同様に次式で表すことができる。

$$\mathbf{M}_{fi}(\mathbf{q}_i) \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{h}_{fi}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + \mathbf{J}_{fi}^T \mathbf{f}_i = \boldsymbol{\tau}_i \quad (12)$$

ただし、 $\boldsymbol{\tau}_i \in \mathbb{R}^3$ は第 i 指の駆動力、 $\mathbf{f}_i \in \mathbb{R}^3$ は第 i 指の指先力、 $\mathbf{M}_{fi}(\mathbf{q}_i)$ と $\mathbf{h}_{fi}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$ はそれぞれ、第 i 指の慣性行列と遠心・コリオリ力、重力項などからなる非線形項である。指の運動方程式は、式(12)を基に、指全体を次式にまとめることができる。

$$\mathbf{M}_f(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}_f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{J}_f^T \mathbf{F} = \boldsymbol{\tau} \quad (13)$$

ただし、 $\boldsymbol{\tau} = [\boldsymbol{\tau}_1^T \ \boldsymbol{\tau}_2^T \ \boldsymbol{\tau}_3^T]^T \in \mathbb{R}^9$ は指の関節駆動トルク、 $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1^T \ \mathbf{f}_2^T \ \mathbf{f}_3^T]^T \in \mathbb{R}^9$ は指先力、 $\mathbf{M}_f(\mathbf{q})$ は慣性行列、 $\mathbf{h}_f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ は遠心・コリオリ力、重力項などである。

対象物の運動方程式は次式で表すことができる。

$$\mathbf{M}_o(\mathbf{r}) \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{h}_o(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}) = \mathbf{T} \quad (14)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{J}_o^T \mathbf{F} \quad (15)$$

ただし、 $\mathbf{T} = [\mathbf{f}^T \ N^T]^T \in \mathbb{R}^6$ は対象物に加わる合力であり、 $\mathbf{M}_o(\mathbf{r})$ は慣性行列、 $\mathbf{h}_o(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}})$ は遠心・コリオリ

力、重力項である。式(15)において、 $\mathbf{T}$ は6成分、 $\mathbf{F}$ は9成分であることに注意されたい。 $\mathbf{J}_o^T$ がフルランクの場合、この成分数の差が内力の次元となる。

3.2 Li らの制御方法¹²⁾

Li, Hsu, Sastry は、把握系の内力のフィードバック制御を含むハイブリッド制御型の把握と操りの制御則を提案している。彼らの制御方法は、3.1節の基礎式を用いると次式のように表すことができる。以下では、 $\mathbf{M}_o(\mathbf{r})$ 、 $\mathbf{h}_o(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}})$ などと $\mathbf{M}_o$ 、 $\mathbf{h}_o$ などと略記する。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_p + \boldsymbol{\tau}_f \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\tau}_p = \boldsymbol{\tau}_{finger} + \boldsymbol{\tau}_m \quad (17)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{finger} = \mathbf{M}_f \mathbf{J}_f^{-1} (\mathbf{J}_o \dot{\mathbf{v}}_d + \dot{\mathbf{J}}_o \mathbf{v} - \dot{\mathbf{J}}_f \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{h}_f \quad (18)$$

$$\boldsymbol{\tau}_m = \mathbf{J}_f^T (\mathbf{J}_o^T)^+ \mathbf{T}_d \quad (19)$$

$$\mathbf{T}_d = \mathbf{M}_o \dot{\mathbf{v}}_d + \mathbf{h}_o \quad (20)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_d = \mathbf{W} (\ddot{\mathbf{r}}_d - \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}_p - \mathbf{K}_p \mathbf{e}_p) + \dot{\mathbf{W}} \dot{\mathbf{r}} \quad (21)$$

$$\boldsymbol{\tau}_f = \mathbf{J}_f^T (\mathbf{F}_{fd} - \mathbf{K}_f \int \mathbf{e}_f dt) \quad (22)$$

この制御則をブロック線図で表したものを図3に示す。式(16)～(22)の制御則は、操り動作の位置誤差 $\mathbf{e}_p = \mathbf{r}_d - \mathbf{r}$ と把握動作の力誤差 $\mathbf{e}_f = \mathbf{F}_{fd} - \mathbf{F}_f$ を、次式に従い、0 に収束させようとするものである。

$$\ddot{\mathbf{e}}_p + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}}_p + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_p = 0 \quad (23)$$

$$\mathbf{e}_f + \mathbf{K}_f \int \mathbf{e}_f dt = 0 \quad (24)$$

Li らの制御則は、操りの位置制御と把握の力制御を同時に行う点に特徴があり、2つのフィードバックループを持つ。この点において2.1節で述べた位置と力のハイブリッド制御系と同じ構造を持つ制御則であるといえる。

ここで、位置制御により算出される駆動トルク $\boldsymbol{\tau}_p$ と力制御により算出される駆動トルク $\boldsymbol{\tau}_f$ の算出過程の物理量に対して少し丁寧に説明を行おう。式(17)～(21)による $\boldsymbol{\tau}_p$ の算出においては、まず、対象物の位置 $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^6$ を制御量として、式(21)により対象物に生じさせようとする加速度 $\dot{\mathbf{v}}_d$ が算出される。これは角加速度 $\dot{\omega}$ を姿勢成分に持つものであるが、目標軌道 $\mathbf{r}_d \in \mathbb{R}^6$ を与える際に都合の良いロール・ピッチ・ヨー角などの2階微分の $\ddot{\phi}$ とは異なる。このため、式(11)に起因する $\dot{\mathbf{W}} \dot{\mathbf{r}}$ の項を含むことになる。この $\mathbf{v}_d$ が決まると、対象物の操り動作に必要な $\boldsymbol{\tau}_m$ 、及び操り動作に伴う指自身の運動のために必要な $\boldsymbol{\tau}_{finger}$ が算出される。ここで、式(20)の $\mathbf{T}_d \in \mathbb{R}^6$ は、指先力の合力として対象物に加えようとする力であるが Li らの制御方法においては、この合力から対象物に加える各指の指先力成分を算出する際に、 $\mathbf{J}_o^T$ の擬似逆行列 $(\mathbf{J}_o^T)^+ \in \mathbb{R}^{9 \times 6}$ を用いて式(15)を $\mathbf{F}$ について解いている。そしてこれを、式(19)に示すように $\mathbf{J}_f^T$ を用いて

図3 Liらの制御則のブロック線図

駆動トルク τ_m に変換している。

一方、式(22)の τ_F の算出においては、指先力の内力成分 $F_I \in \mathbb{R}^9$ が把握の制御量として用いられる。Liらの制御方法では、本稿で議論する摩擦のある点接触を行う3本指ハンドの場合、把握の制御に用いる制御変数の要素数は指先力の要素数と同じ9になる。しかしながら、この場合の内力の次元は3であるので⁹⁾、内力の次元数と違う要素数の制御変数を用いていることになる。多指ハンドの内力は、接触点間の距離が不変であることによる拘束力であり、ハイブリッド制御^{16),17)} の考え方によれば拘束の自由度に応じた要素数の変数を力制御するのが自然であると考えられる。

3.3 握力と操り力に基づく制御方法^{13),14)}

筆者らは、握力と操り力に基づく動的操り/握み制御系^{9),10)} を提案している。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直したものである。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持つ。以下では、3本指ハンドの定義と表現式⁹⁾ について簡単に述べる。

握力 $\mathbf{F}_g = [\mathbf{f}_{g1}^T \ \mathbf{f}_{g2}^T \ \mathbf{f}_{g3}^T]^T \in \mathbb{R}^9$ は次の2つの条件を満足する指先力として定義されている。(1)対象物に合力を加えない。(2)接触点における静止摩擦の制限を満足する。一方、操り力 $\mathbf{F}_m = [\mathbf{f}_{m1}^T \ \mathbf{f}_{m2}^T \ \mathbf{f}_{m3}^T]^T \in \mathbb{R}^9$ は次の3つの条件を満足する指先力として定義されている。(1)指定された合力を対象物に加える。(2)各指において握力と逆方向を向かない。(3)握力成分を持たない。これらの定義に基づく握力と操り力の表現式を以下に示す。

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_m \quad (25)$$

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{B}_g \mathbf{h}_g, \quad \mathbf{B}_g \in \mathbb{R}^{9 \times 3} \quad (26)$$

$$\mathbf{h}_g = [h_{g1} \ h_{g2} \ h_{g3}]^T, \quad h_{gi} \geq 0, \quad i=1, 2, 3$$

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{B}_m \mathbf{h}_m, \quad \mathbf{B}_m \in \mathbb{R}^{9 \times 6} \quad (27)$$

$$\mathbf{h}_m = [h_{m1} \ \cdots \ h_{m6}]^T,$$

$$h_{mi} \geq 0, \quad i=1, 2, 3$$

ここで、式(26)、(27)の $\mathbf{B}_g$ と $\mathbf{B}_m$ は、握力を対象物の形状に応じた向きにするための把握モードと把握位置により定まる係数行列である。握力 $\mathbf{F}_g$ は、内力の次元と同じ数の要素からなる握力パラメータ $\mathbf{h}_g$ が与えられることにより決定される。図4に、握力の一

例を示す。各指の握力 $\mathbf{f}_{gi}$ の作用線は、Pが無遠に位置する場合も含めて、3つの接触点 C_i により定まる把握平面内の一点Pで交わるという性質を持つ。

与えられた合力 T を対象物に加える操り力 $\mathbf{F}_m$ を算出するには、式(15)、(27)を用いて $h_{mi} \geq 0$ ($i=1, 2, 3$) を満足する $\mathbf{h}_m$ を、

$$\mathbf{h}_m = (\mathbf{J}_o^T \mathbf{B}_m)^{-1} \mathbf{T} \quad (28)$$

により求め、これを式(27)に代入して得られる

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{B}_m (\mathbf{J}_o^T \mathbf{B}_m)^{-1} \mathbf{T} \quad (29)$$

を用いればよい⁹⁾。

握力と操り力に基づく制御方法は、動的制御の考え方に従い、指と対象物の動特性を考慮している点と、操りを位置制御、把握と力制御により行う点においてはLiらの制御方法¹²⁾ と同じ考え方をしている。しかしながら、(1)把握のための力制御の制御変数に、内力の自由度と同じ数の要素を持つ握力パラメータを用いている、(2)対象物に加える合力を指先力に分解する際に操り力に分解している点異なるものである。また、把握系全体の線形化補償器と、線形化されている系に対するサーボ補償器とを分けて構成している点もサーボ系設計上、実用的と思われる。

動的操り/握み制御系の線形化補償器を構成するには、前述の方法に対して、式(19)、(21)、(22)の代わりに次式を用いればよい。

$$\tau_m = \mathbf{J}_f^T \mathbf{F}_{md} \quad (30)$$

$$\mathbf{F}_{md} = \mathbf{B}_m (\mathbf{J}_o^T \mathbf{B}_m)^{-1} \mathbf{T}_d \quad (31)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_d = \mathbf{W} \mathbf{u}_1 + \dot{\mathbf{w}} \dot{\mathbf{r}} \quad (32)$$

$$\tau_F = \mathbf{J}_f^T \mathbf{F}_{gd} \quad (33)$$

$$\mathbf{F}_{gd} = \mathbf{B}_g \mathbf{u}_2 \quad (34)$$

式(30)、(33)の $\mathbf{F}_{md}$ と $\mathbf{F}_{gd}$ はそれぞれ、対象物に加えるようとする操り力と握力である。実際の力は、制御対象の同定誤差やサーボ補償器の性能などに依存する。

式(16)、(17)、(18)、(20)、(30)～(34)により、把

図4 握力の一例

握系全体が線系化され、次の線形系が得られる。

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{u}_1 \quad (35)$$

$$\mathbf{h}_g = \mathbf{u}_2 \quad (36)$$

ただし、 $\mathbf{u}_1 \in \mathbb{R}^6$ 、 $\mathbf{u}_2 \in \mathbb{R}^3$ は線形化補償器への入力である。式(35)、(36)から分かるように、この線形化は、把握に対しては握力パラメータに関する線形化になっている。この線形化補償器により、望みの操り動作 $\mathbf{r}_d$ を与えることは独立に、望みの握み状態を適当な $\mathbf{h}_{gd}$ で与えることが可能となる。

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、線形化補償器への入力を算出するサーボ補償器が必要である。これには、最近設計手法なども整えられてきている2自由度制御系²⁴⁾などを適用すればよく、例えば次式で表されるものを用いればよい。

$$\mathbf{u}_1 = \dot{\mathbf{r}}_d + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_p + \mathbf{K}_I \int \mathbf{e}_p dt + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}}_p \quad (37)$$

$$\mathbf{u}_2 = \mathbf{h}_{gd2} + \mathbf{K}_F f(\mathbf{h}_{gd2} - \mathbf{h}_g) dt \quad (38)$$

$$\mathbf{h}_{gd2} = \mathbf{h}_{gd} - \mathbf{T}_c \dot{\mathbf{h}}_{gd2} \quad (39)$$

ここで、 $\mathbf{r}_d$ は対象物の位置・姿勢の目標値、 $\mathbf{h}_{gd}$ は握力パラメータの目標値である。また、 $\mathbf{T}_c$ は前置補償器として設けた一次遅れの時定数である。

上述の動的操り/握み制御系のLiらの制御系との違いは、図3のブロック線図を用いてまとめると、9成分を持つ内力 $\mathbf{F}_I$ の代わりに3成分を持つ握力パラメータ $\mathbf{h}_g$ を制御量としていること、式(19)の代わりに式(30)、(31)、式(21)の代わりに式(32)、(37)、式(22)の代わりに式(33)、(34)、(38)、(39)をそれぞれ用いていることである。

握力と操り力を用いた制御方法は、Liらの制御方法と比較した場合、同一の握力(内力)を用いた場合には指先がすべりにくいという利点を持ち¹⁴⁾、作業に応じて握力を適応的に更新するような適応把握に応用し

た報告もある²⁵⁾。

4. 制御に必要な情報のセンシング方法

この節では、3節の制御則の実現に必要な制御変数などの情報のセンシング方法について述べる。

典型的な実験装置の構成を考えると、ハンドから直接検出することが期待できる情報は、エンコーダから得られる関節角 $\mathbf{q}$ と力センサから得られる指先力 $\mathbf{F}$ である。タコジェネレータもあると仮定すると、関節角速度 $\dot{\mathbf{q}}$ も得られることになる。 $\dot{\mathbf{q}}$ に関しては、検出した $\mathbf{q}$ から計算機内部の処理により求めることも十分実用的であろう。ここでは、 $\mathbf{q}$ 、 $\dot{\mathbf{q}}$ と $\mathbf{F}$ が直接得られる情報であるとする。

上述の仮定の下では、3節で述べたLiらの制御方法の実現に際して必要な情報は、対象物の位置 $\mathbf{r}$ 、2通りの速度 $\dot{\mathbf{r}}$ と $\mathbf{v}$ 、及び内力 $\mathbf{F}_I$ である。以下では、これらの算出方法について述べる。

対象物の位置 $\mathbf{r}$ を算出しようとする際、検出した関節角 $\mathbf{q}$ から指先位置を求めようとしても、 $\mathbf{q}$ が誤差を含む場合には3つの指先位置の相対的位置がずれてしまう場合がある。そこでここでは初期位置 $\mathbf{r}_0$ が既知であるとし、次式により算出することとする。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \int \dot{\mathbf{r}} dt \quad (40)$$

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{v} \quad (41)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}_o^+ \mathbf{J}_f \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{J}_o^+ = (\mathbf{J}_o^T \mathbf{J}_o)^{-1} \mathbf{J}_o^T \quad (42)$$

ただし、 $\mathbf{J}_o^+$ に対しては文献9)と同じく、3つの接点が一直線上に並ばない、との仮定より $\mathbf{J}_o$ がフルランクであることを利用している。式(42)により算出する $\mathbf{v}$ は指先速度の誤差のユークリッドノルムを最小にするものとなる。なお、式(40)による誤差の蓄積が問題となる場合には、関節角 $\mathbf{q}$ より対象物の位置姿勢 $\mathbf{r}$ を直接求める方法をとればよい。

また、内力 $\mathbf{F}_I$ を求めるには、検出した $\mathbf{F}$ から、操り動作のために必要とした指先力成分 $(\mathbf{J}_o^T)^+ \mathbf{T}_d$ の応答分である $(\mathbf{J}_o^T)^+ \mathbf{T}$ を引いたものを用いればよい。これを次式に示す。

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_I &= \mathbf{F} - (\mathbf{J}_o^T)^+ \mathbf{T} \\ &= \mathbf{F} - (\mathbf{J}_o^T)^+ \mathbf{J}_o^+ \mathbf{F} \\ &= \{\mathbf{E}_9 - (\mathbf{J}_o^T)^+ \mathbf{J}_o^T\} \mathbf{F} \end{aligned} \quad (43)$$

ただし、 $\mathbf{E}_9$ は9次元の単位行列である。式(43)は、文献12)にも明記されていないが、Liらの制御則を用いる際には、把握と操り動作のシミュレーションを行う場合にも必要な式である。

一方、3.3節で述べた動的操り/握み制御系の場合には、内力 $\mathbf{F}_I$ の代わりに握力パラメータ $\mathbf{h}_g$ が必要

となる. この h_g の算出においては, まず, 文献 9) と同様に, 操り力と握力の定義を満足するパラメータの組 $h=[h_g^T h_m^T]^T$ を, 検出した指先力 F から,

$$h=B^{-1}F, B=[B_g B_m] \quad (44)$$

により算出し, この h を用いて,

$$h_g=[E_3 \ 0]h \quad (45)$$

により求めればよい.

5. お わ り に

本稿では, 操りを位置制御で行い, 把握を力制御で行うハイブリッド制御型の制御方法について考察した. ここでの議論は, 本質的には複腕ロボットの協調制御における問題と同じであり, 内山とドシェは, 運動学的な観点ではあるが, 複腕ロボットのハイブリッド制御系の構成方法について議論している²⁶⁾. 指と対象物の動特性を考慮した制御則は少し複雑であるが, 本稿によりハンドの制御に興味を持つ技術者や研究者の理解が少しでも深まれば幸いである.

参 考 文 献

- 1) H. Hanafusa and H. Asada, "Stable Prehension by a Robot Hand with Elastic Fingers," Proc. of 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) H. Kobayashi, "Control and Geometrical Consideration for an Articulated Robot Hand," Int. J. of Robotics Research, Vol. 4-1, pp. 3-12 (1985)
- 4) J. K. Salisbury, "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates," Proc. of 19th IEEE Conf. on Decision and Control, pp. 95-100 (1985)
- 5) J. K. Salisbury and J. J. Craig, "Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues," Int. J. of Robotics Research, Vol. 1-1, pp. 4-17 (1982)
- 6) H. Hanafusa et al., "Structural Analysis and Robust Prehension of Robotic Hand-Arm System," Proc. of '85 Int. Conf. on Advanced Robotics, pp. 311-318 (1985)
- 7) J. Kerr and B. Roth, "Analysis of Multifingered Hands," Int. J. of Robotics Research, Vol. 4-4, pp. 3-17 (1986)
- 8) 中村他, "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)
- 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. 23-11, pp. 90-97 (1987)
- 10) T. Yoshikawa and K. Nagai, "Manipulating and Grasping Forces in Manipulation by Multifingered Robot Hands," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 7-1, pp. 67-77 (1991)
- 11) 杉江他, "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)
- 12) Z. Li et al., "Grasping and Coordinated Manipulation by a Multifingered Robot Hand," Int. J. of Robotics Research, Vol. 8-4, pp. 33-50 (1989)
- 13) 吉川, 永井, "多指ハンドの動的操り/掴み制御", 第 33 回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)
- 14) K. Nagai and T. Yoshikawa, "Dynamic Manipulation/Grasping Control of Multifingered Robot Hands," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1027-1033 (1993)
- 15) T. Yoshikawa and X. Zheng, "Coordinated Dynamic Hybrid Position/Force Control for Multiple Robot Manipulators Handling One Constrained Object," Proc. of 1990 JAPAN-U.S.A. Symp. on Flexible Automation, pp. 401-407 (1990)
- 16) M. Raibert and J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 103-2, pp. 126-133 (1981)
- 17) 吉川, "ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御—手先拘束の記述と関節駆動力の算出—", 日本ロボット学会誌, Vol. 3-6, pp. 25-31 (1985)
- 18) T. Yoshikawa et al., "Dynamic Hybrid Control of Robot Manipulators - Controller Design and Experiment -," Proc. of 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2005-2010 (1987)
- 19) 中村, "把握とあやつり", 計測と制御, Vol. 29-3, pp. 206-212 (1991)
- 20) 中村, "指の制御", 計測と制御, Vol. 30-5, pp. 395-399 (1991)
- 21) 吉川, "マニピュレータの力制御", 計測と制御, Vol. 30-5, pp. 383-388 (1991)
- 22) J. Duffy, "The Fallacy of Modern Hybrid Control Theory that is Based on "Orthogonal Complements" of Twist and Wrench Spaces," J. of Robotic Systems, Vol. 7-2, pp. 139-144 (1990)
- 23) T. E. Alberts and D. I. Soloway, "Force Control of a Multi-Arm Robot System," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1490-1496 (1988)
- 24) T. Sugie and T. Yoshikawa, "General Solution of Robust Tracking Problem in Two-Degrees-of-Freedom Control Systems," IEEE Trans. on Automatic Control AC-31-6, pp. 552-554 (1986)
- 25) 永井, 吉川, "多指ハンドの適応把握", 日本ロボット学会誌, Vol. 11-1, pp. 111-120 (1993)
- 26) 内山, ドシェ, "両手ロボットの対象型運動学と非マスタスレーブ協調制御", 日本ロボット学会誌, Vol. 7-1, pp. 19-30 (1988)

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 3 月, 同大学大学院博士課程中途退学. 同年 4 月, 立命館大学理工学部情報工学科助手. ロボット工学の研究に従事. 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本油圧学会などの会員.

(日本ロボット学会正会員)