

複数対象物の操り

原田 研介* 中野 慎也* 金子 真* 辻 敏夫*

Manipulation for Multiple Objects

Kensuke Harada*, Shinya Nakano*, Makoto Kaneko* and Toshio Tsuji*

This paper discusses the manipulation for multiple objects under rolling contacts. For manipulating multiple objects, there are two key issues which do not appear in the manipulation of a single object, (1) each object motion is restricted by other objects, and (2) the contact force between objects is not controlled independently. As for (1), we consider the motion degrees of freedom of the grasped objects, and propose a necessary condition for manipulation. As for (2), we propose three indices for internal force. Finally, we show some numerical examples and an experimental results to confirm the validity of the proposed idea.

Key Words: Multi-fingered Hand, Multiple Objects, Manipulation, Internal Force, Control Strategy

1. 緒 言

ロボットハンドとして最も単純なものに、グリッパ型ロボットハンドがある。これは自由度が少なく制御が簡単である反面、器用さが要求されるような環境には適さない。これに対し、人の手のような多くの指と関節を備えた多指ロボットハンドは、その自由度を巧みに利用して、複雑な作業を実現する潜在的能力を備えている。

従来ロボットハンドについては、把握安定性や把握コンプライアンス [1]~[4]、平衡把握や Force Closure [5] [6] 等の対象物の把握に関する研究や、指と対象物の間に点接触や転がり接触を仮定したり [7] [8]、あるいは滑り接触を利用した [9] 対象物の操りに関する研究がある。しかし、いずれも単一対象物を取り扱うことが大前提となっていた。これに対し Dauchez ら [10]、Kosuge ら [11] は複数アームのそれぞれに単一対象物を把握させて、組み付ける問題を取り扱っている。相山ら [12] [13] は複数の箱型の対象物の把握に関する報告を行っており、余ら [14] [15] は複数の箱型の対象物の把握に関して、指どうしが加え合う内力に関する研究を行っている。また組み立て作業の分野においては、Mattikalli ら [16] が複数の物体の安定な配置決定法について論じているが、いずれの研究も対象物の転がりや滑りといった、ハンド内での対象物の運動学的自由度がない場合に限定されている。これに対し、筆者らは転がり接触まで許して複数対象物を把握する場合、指先把握よりも包み込み把握のほうが有利であることに着目し、把握系の運動学および重力場に

おかれた複数対象物のすくい上げについて考察してきた [17]~[19]。また、複数対象物が転がりを利用して平衡が崩れても別の平衡点に移動する平衡把握のメカニズムの解明を行った [20]。ただし、筆者らの知る範囲において、複数の対象物をロボットハンドで自由に操ることを目指した研究は行われていない。

ここで、包み込み把握をリンク内接触を許容した把握（リンク内接触型把握と呼ぶ）と拡大解釈してみる。このようなリンク内接触型把握では Fig. 1 (a) だけでなく、Fig. 1 (b) のような把握まで含めることができる。Fig. 1 (a) のように、1本の指で複数のリンク内接触を許すと、少ない指の本数で対象物を把握できる。しかし、接触点において任意の接触力が発生できるとは限らないために、対象物の操りは極端に制限される。それに対して、Fig. 1 (b) のように指先リンクのみでリンク内接触する場合は多くの指が必要となるものの、指の構造によっては接触点において任意の接触力が発生できる可能性を有するため、操りの自由度が大幅に増加することが見込まれる。そこで、本論文では指先リンクのみでリンク内接触をする把握形態による

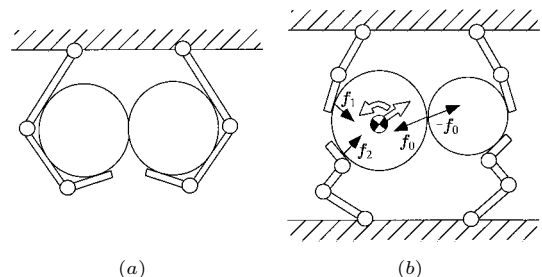


Fig. 1 Two kinds of enveloping grasp

原稿受付 1998年11月13日

*広島大学工学部

*Hiroshima University

複数対象物の操りに着目する。

複数対象物を操る場合、単一対象物の操りと異なるという意味において、留意しなければならない点が二つある。一つは対象物の運動拘束である。例えば Fig. 1 (b) で示される把握形態において、左側の対象物が仮に並進と回転のすべての方向に移動することが可能であるとしても、右側の対象物は左側の対象物と接触を保たなければならないため、任意の方向に移動できるわけではない。よって、複数の対象物を操る場合は、対象物どうしの接触を通じて対象物の運動が拘束されることを踏まえる必要がある。もう一つは対象物どうしの接触点における接触力の従属性である。Fig. 1 (b) に示されるように、指が対象物に対して接触力 (f_1, f_2) を発生している場合を考える。指先では任意の接触力が発生できたとしても、対象物どうしの接触点における接触力 (f_0) は指力に依存して、あるいは指力に独立に求まるため、任意の接触力が発生できるとは限らない。よって、複数の対象物を操る場合は、運動の拘束に加えて対象物どうしの接触点における接触力の従属性を考慮に入れることが必要となる。

本論文では、対象物の運動拘束を考察するため、複数対象物の運動自由度を表す変数を導入し、対象物を操るための必要条件を導出する。これは、指変位を決めた場合に対象物の位置が一意に決まることに対応する。また接触力の従属性を考察するため、内力の自由度 I_I, I_{IL}, I_{IO} を導入する。特に、 I_{IO} は対象物間の接触力の間に働く内力の自由度を表し、複数対象物に特有である。この内力は複数対象物の操りを困難にする。以上の考察に基づき、対象物の軌道制御のシミュレーションを行う。最後に、対象物の軌道制御を実機実験により行う。対象物の位置、姿勢をその目標軌道に制御する意味で、本実験は複数対象物の操作で初めての実機による試みである。

2. 運動学

Fig. 2 は、 m 対象物系を n 本指で把握する場合をモデル化したものであり、第 j 指が指先リンクで第 i 対象物と転がり接触し、第 i 対象物が第 l 対象物と転がり接触している場合を表している。 Σ_R は基準座標系を表し、 Σ_{Bi} ($i = 1, \dots, m$) は第 i 対象物の重心に固定された座標系、 Σ_{Fj} ($j = 1, \dots, n$) は第 j 指の指先リンクに固定された座標系を表す。 p_{Bi}, R_{Bi} は基準座標系から見た Σ_{Bi} の位置ベクトル、ならびに姿勢を表す回転行列であり、同様に p_{Fj}, R_{Fj} は基準座標系から見た Σ_{Fj} の位置ベクトル、ならびに姿勢を表す回転行列である。 ${}^{Bi}p_{Cij}$ は Σ_{Bi} から見た第 i 対象物と第 j 指との接触点の位置ベクトルであり、同様な接点を Σ_{Fj} で表したベクトルが ${}^{Fj}p_{Cij}$ である。また、 ${}^{Bi}p_{COt}$ ($t = 1, \dots, r$) は Σ_{Bi} から見た第 i 対象物と第 l 対象物の接触点の位置ベクトルであり、 r は対象物どうしの接触点数を表す。第 j 指は s_j 個の関節を持つ。これは、接触点において任意の接触力を発生するのに十分な関節数であるとする ($s_j \geq 3$)。また、複数対象物を把握する場合、各対象物が少なくとも 1 本の指に接していれば、より確実な把握が可能となる。よって、本論文では各対象物は少なくとも 1 本の指と接触すると仮定する。

接触点において転がり接触を仮定することにより、第 i 対象

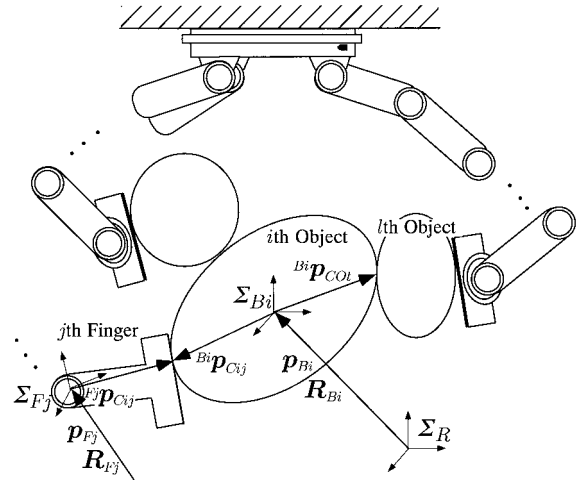


Fig. 2 Model of the system

物と第 j 指の指先リンクの微小変位の関係、ならびに、第 i 対象物と第 l 対象物の微小変位の関係は以下のように表すことができる [18] [20] .

$$D_{Bij} \begin{bmatrix} \Delta p_{Bi} \\ \Delta \phi_{Bi} \end{bmatrix} = D_{Fij} \begin{bmatrix} \Delta p_{Fj} \\ \Delta \phi_{Fj} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$D_{Oit} \begin{bmatrix} \Delta p_{Bi} \\ \Delta \phi_{Bi} \end{bmatrix} = D_{Olt} \begin{bmatrix} \Delta p_{Bl} \\ \Delta \phi_{Bl} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$D_{Bij} = [I_3 - (R_{Bi} {}^{Bi}p_{Cij} \times)] \in R^{3 \times 6}$$

$$D_{Fij} = [I_3 - (R_{Fj} {}^{Fj}p_{Cij} \times)] \in R^{3 \times 6}$$

$$D_{Oit} = [I_3 - (R_{Bi} {}^{Bi}p_{COt} \times)] \in R^{3 \times 6}$$

ここで、 I_3 は 3×3 単位行列で、 $(R_{Bi} {}^{Bi}p_{Cij} \times)$ 、 $(R_{Fj} {}^{Fj}p_{Cij} \times)$ 、 $(R_{Bi} {}^{Bi}p_{COt} \times)$ はそれぞれ外積と等価な歪対称行列である。また、 $\Delta \phi_{Bi}, \Delta \phi_{Fj}$ は座標系 Σ_{Bi}, Σ_{Fj} の Σ_R に関する微小回転角ベクトルである。式 (1)、式 (2) をそれぞれ $j = 1, \dots, n, t = 1, \dots, l$ についてまとめることにより、以下のような式が得られる。

$$D_C \Delta p_{CF} = D_B \Delta p_B \quad (3)$$

ここで、

$$\Delta p_{CF} = [\Delta p_{CF1}^T \dots \Delta p_{CFn}^T]^T \in R^{3n}$$

$$\Delta p_{CFj} = D_{Fj} [\Delta p_{Fj}^T \Delta \phi_{Fj}^T]^T \in R^3$$

$$\Delta p_B = [\Delta p_{B1}^T \Delta \phi_{B1}^T \dots \Delta p_{Bm}^T \Delta \phi_{Bm}^T]^T \in R^{6m}$$

$$D_C = [I_{3n} \ 0]^T \in R^{(3n+3r) \times 3n}$$

$$D_B = [D_{CB}^T \ D_O^T]^T \in R^{(3n+3r) \times 6m}$$

であり、 $D_{CB} \in R^{3n \times 6m}$ は、構成する行列のうち第 j ($j = 1, \dots, n$) 行に着目すると、 (j, i) 要素が D_{Bij} でそれ以外が 0 により構成される行列である。また、 $D_O \in R^{3r \times 6m}$ は、構成する行列のうち第 t ($t = 1, \dots, r$) 行に着目すると、 $i < l$ の

場合、 (t, i) 要素が D_{Oit} で (t, l) 要素が $-D_{Oit}$ で構成され、その他の要素が 0 である行列である。また、 Δp_{CF} は基準座標系から見た接触点における指先リンクの変位を表すベクトルである。式 (3) において、行列 D_B は p_B 以外にも ${}^{B1}p_{C11}$, ${}^{F1}p_{C11}, \dots, {}^{Bi}p_{CO_r}$ の関数である。これらのベクトルは Kerr [7] によって提案された方法を複数対象物系に拡張することで導出することができ、詳しくは文献 [18] に示されている。

次に、把握された複数対象物の運動自由度に関して考察を行う。複数対象物の把握においては、対象物どうしが接触するため、すべての対象物が任意の方向に動けるとは限らない。把握系は式 (3) を満足しながら運動を行うため、式 (3) は把握系の拘束条件とみなすことができる。 $[-D_C \ D_B] \in R^{(3n+3r) \times (3n+6m)}$ であることを考慮すると、式 (3) に $\Delta p_{CF} = 0$, $\Delta p_B = 0$ 以外の解が存在するためには、

$$3n + 6m > \text{rank}[-D_C \ D_B]$$

でなくてはならず、解の次元は $3n + 6m - \text{rank}[-D_C \ D_B]$ に依存する。さらに、 D_C は単位行列と零行列により構成されているため、 $3n + 6m - \text{rank}[-D_C \ D_B] = 6m - \text{rank}D_O$ の関係が常に成立する。このとき、把握された対象物の運動自由度を以下のように定義できる。

[定義 1]: 運動自由度

複数対象物の把握において、対象物は

$$\begin{aligned} I_M &= 3n + 6m - \text{rank}[-D_C \ D_B] \\ &= 6m - \text{rank}D_O \end{aligned} \quad (4)$$

自由度の運動自由度を有する。

ここで、式 (4) の第 2 行目においては、指の運動に関する項 $(3n, D_C)$ が消えている。つまり、 I_M は純粋な対象物の運動自由度を表している。さらに、 D_O がフルランクのとき、 $I_M = 6m - 3r$ が成立する。 $3r$ は対象物どうしの拘束次数の総和を表すため、 I_M は Hunt [23] によるリンク機構の運動自由度の定義と一致する。つまり、この対象物の運動自由度に関する議論は、機構学における自由度 [23] や、把握系の自由度 [24] の複数対象物系への拡張である。ただし、このような対象物の運動自由度の解析により、後に示すような、複数対象物を操るための必要条件が導出される。

次に、対象物の運動自由度を表現する変数を導入することを考える。対象物の運動自由度を表現する変数を $\Delta \zeta = E_C \Delta p_{CF} + E_B \Delta p_B \in R^{I_M}$ のように定義する。ここで、行列 E_C, E_B は式 (3) を用いた、

$$\begin{bmatrix} -D_C & D_B \\ E_C & E_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p_{CF} \\ \Delta p_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \zeta \end{bmatrix} \quad (5)$$

において、 $\begin{bmatrix} -D_C & D_B \\ E_C & E_B \end{bmatrix}$ を列フルランクにできる最小のサイズを有する。なお、 D_C が単位行列と零行列により構成されるため、 E_C を零行列と仮定しても常に列フルランクとすることが可能である。 $\Delta \zeta, E_C, E_B$ の選択には任意性があるが、

$E_C = 0$ とすると、 $\Delta \zeta$ は $\Delta \zeta = E_B \Delta p_B$ のとおり Δp_B の関数となり、 $\Delta \zeta$ により対象物の運動が表現される。複数対象物では、ある一つの対象物に着目して、その対象物を自由に操り、他の対象物はその対象物に追従させるような操り形態が考えられる。本手法における ζ の選択の任意性はそのような操りを可能にする。5 章では、ある対象物に最大限の自由度を割り当て、残った自由度を他の対象物に割り当てる方法を示す。式 (5) を $\Delta p_{CF}, \Delta p_B$ について解くことにより、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta p_{CF} \\ \Delta p_B \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -D_C & D_B \\ E_C & E_B \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \zeta \end{bmatrix} \\ &\triangleq \begin{bmatrix} C \\ B \end{bmatrix} \Delta \zeta \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $*^+$ は $*$ の擬似逆行列を表す。式 (6) では擬似逆行列が用いられているが、 $\begin{bmatrix} -D_C & D_B \\ E_C & E_B \end{bmatrix}$ が列フルランクであり、また $D_C \Delta p_{CF} = D_B \Delta p_B$, $\Delta \zeta = E_C \Delta p_{CF} + E_B \Delta p_B$ が常に成立しているため、

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \zeta \end{bmatrix} \in \text{Im} \left(\begin{bmatrix} -D_C & D_B \\ E_C & E_B \end{bmatrix} \right)$$

が成立する。ここで、 $\text{Im}(*)$ は $*$ の値域を表す。このとき、一意に $\Delta p_{CF}, \Delta p_B$ の厳密解が導出でき、零空間は存在しない。また行列 $[-D_C \ D_B]$ が行フルランクである場合、式 (6) の擬似逆行列は普通の逆行列と等価となる。ここで、 $\Delta \zeta$ の選択には任意性があると述べたが、これに関して以下の定理が成立する。

[定理 1]: 運動の一意性

$\Delta \zeta$ の選択には任意性があるが、 $\Delta p_B, \Delta p_{CF}$ は $\Delta \zeta$ の選択には依存せず一意に決定される。

[証明]

与えられた $\Delta p_B, \Delta p_{CF}$ に対して、2 通りの $\Delta \zeta$ の選択 $\Delta \zeta_1, \Delta \zeta_2$ が以下のとおりに存在すると仮定する。

$$\begin{aligned} E_{C1} \Delta p_{CF} + E_{B1} \Delta p_B &= \Delta \zeta_1 \\ E_{C2} \Delta p_{CF} + E_{B2} \Delta p_B &= \Delta \zeta_2 \end{aligned}$$

このとき、逆に $\Delta \zeta_1, \Delta \zeta_2$ を与えたときに同じ $\Delta p_{CF}, \Delta p_B$ が導出されれば、定理は満足されることになる。行列 $\begin{bmatrix} -D_C & D_B \\ E_{C1} & E_{B1} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -D_C & D_B \\ E_{C2} & E_{B2} \end{bmatrix}$ には、共に零空間が存在しないため、以下のように $\Delta \zeta_1, \Delta \zeta_2$ に対して同じ $\Delta p_{CF}, \Delta p_B$ が導出される。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta p_{CF} \\ \Delta p_B \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -D_C & D_B \\ E_{C1} & E_{B1} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \zeta_1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -D_C & D_B \\ E_{C2} & E_{B2} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \zeta_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

証明終

本論文では、対象物の操り制御則を構成する場合、変数 ζ を制御する。 ζ の制御を可能とするためには、接触点における指先リンクの変位 Δp_{CF} により、 $\Delta \zeta$ が一意に定まることが必要である。このことは、式(6)を用いた以下の条件により表される。

[条件 1] 対象物の操り可能性

対象物が指で操り可能なための必要条件は

$$\text{Ker}(C) = \emptyset \quad (7)$$

である。ここで、 $\text{Ker}(\ast)$ は \ast の零空間を表す。

$\text{size}C = 3n \times (6m - \text{rank}D_O)^\dagger$ であるため、上式は $\text{rank}C = 6m - \text{rank}D_O$ と等価であるが、特に C がフルランクである場合、 $6m - \text{rank}D_O \leq 3n$ となる。 n は指数を表すため、この条件は複数対象物を操るために必要な指数を示している。なお、この条件は筆者らにより文献[20]で提案した転がり冗長性の概念において、転がり冗長性が存在しない場合と関連する。この対応関係を付録において示す。

3. 接触力の解析

複数対象物の場合、対象物どうしの接触力は、指から加えられる接触力に依存して決定される。本章では、この接触力の従属性を内力の解析を通じて考察する。まず、対象物にロボット指から加わる接触力と対象物重心に加わる力との関係式は、式(3)と双対な関係として、次式のように導出される。

$$f_B = D_B^T f_C \quad (8)$$

$$= D_{CB}^T f_{CB} + D_O^T f_O \quad (9)$$

ここで、

$$f_B = [f_{B1}^T \ n_{B1}^T \ \cdots \ f_{Bm}^T \ n_{Bm}^T]^T \in R^{6m}$$

$$f_{CB} = [f_{C11}^T \ \cdots \ f_{Cmn}^T]^T \in R^{3n}$$

$$f_O = [f_{CO1}^T \ \cdots \ f_{CO\gamma}^T]^T \in R^{3r}$$

であり、 $f_{Bi} \ n_{Bi}$ ($i = 1, \dots, m$) は第 i 対象物重心に働く力とモーメントを表し、 f_{Cij} ($i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$) は第 j 指の指先リンクが第 i 対象物に加える力を表す。また、 f_{COt} ($t = 1, \dots, r$) は対象物間の接触力ベクトルであり、第 i 対象物と第 l 対象物間の接触では、 $i < l$ のとき第 l 対象物が第 i 対象物に加える力と定義する。

複数対象物の把握における内力の自由度に関して考察を行う。 $D_B \in R^{(3n+3r) \times 6m}$ であることを考慮すると、式(9)の解としての接触力 f_C は $\text{rank}D_B^T = 3n + 3r$ のとき一意に存在するが、それ以外の場合は斉次解が存在し、これが内力に相当する任意性となる。また、斉次解の次数は $3n + 3r - \text{rank}D_B^T$ で

ある。また、同様な議論が行列 D_{CB}, D_O に対しても成立する。ここで、以下のように内力の自由度を定義できる。

[定義 2]: 内力の自由度

複数対象物の把握において、把握系の内力は以下の三つの自由度を有する。

$$I_I = 3n + 3r - \text{rank}D_B^T \quad (10)$$

$$I_{IC} = 3n - \text{rank}D_{CB}^T \quad (11)$$

$$I_{IO} = 3r - \text{rank}D_O^T \quad (12)$$

ここで、 I_I は内力の自由度、 I_{IC} は指との接触点間に働く内力の自由度、 I_{IO} は対象物どうしの接触点間に働く内力の自由度である。

$\text{rank}D_B \leq \text{rank}D_{CB} + \text{rank}D_O$ が成立するため、常に $I_I \geq I_{IC} + I_{IO}$ が満足される。つまり、指との接触点間に働く内力の自由度 I_{IC} 、対象物間に働く内力の自由度 I_{IO} は内力の自由度 I_I に含まれる。

$I_{IC} > 0$ の場合を考える。これは、仮に複数対象物の対象物どうしの接触を離れた場合にも、各対象物に指によって内力が加えられていることを意味する。この内力は、複数対象物のうちの任意の一つの対象物が 2 本以上の指と接触する場合に存在する。一方、 $I_{IO} > 0$ の場合を考える。これは、仮に指との接触を離し、かつ対象物どうしは常に接触を保つと仮定した場合に、対象物どうしの接触点の間に機構的な内力が存在することを意味する。対象物間に働く内力は複数対象物に固有の内力であり、指力の影響を受けない。つまり、 $I_{IO} > 0$ の場合は対象物どうしの接触点での接触力が一意に決まらないため、接触力が摩擦円錐内に入ることが保証できず、複数対象物の操りが困難となる。よって、以降では $I_{IO} = 0$ を仮定する。

次に、これら内力の自由度を表す変数 k_B, k_{CB}, k_O を導入することを考える。式(9)をそれぞれ f_C, f_{CB}, f_O について解くことにより、次式が得られる。

$$f_C = (D_B^T)^+ f_B + N_B k_B \quad (13)$$

$$f_{CB} = (D_{CB}^T)^+ \hat{f}_B + N_{CB} k_{CB} \quad (14)$$

$$f_O = (D_O^T)^+ \bar{f}_B + N_O k_O \quad (15)$$

ここで、 $\hat{f}_B = f_B - D_O^T f_O, \bar{f}_B = f_B - D_{CB}^T f_{CB}$ である。また、 N_B, N_{CB}, N_O はそれぞれ $D_B^T N_B = 0, D_{CB}^T N_{CB} = 0, D_O^T N_O = 0$ を満足する行列であり[22]、 $k_B \in R^{I_I}, k_{CB} \in R^{I_{IC}}, k_O \in R^{I_{IO}}$ は内力の大きさを表す任意ベクトルである。

4. 対象物の操り

以上の議論をもとに、転がりを利用して複数対象物を操ることを考える。まず、対象物に関して I_M 自由度より多くの変数を独立に制御するのは不可能であるため、 $\zeta \in R^{I_M}$ を対象物の位置に関する制御変数として用いる。また、条件 1 を満足しない把握系は操り不可能であるため、対象物の各姿勢において条

[†]本論文では、行列のサイズを表すため、行列 $A \in R^{m \times n}$ に対して関数 $\text{size}A = m \times n$ を定義する。

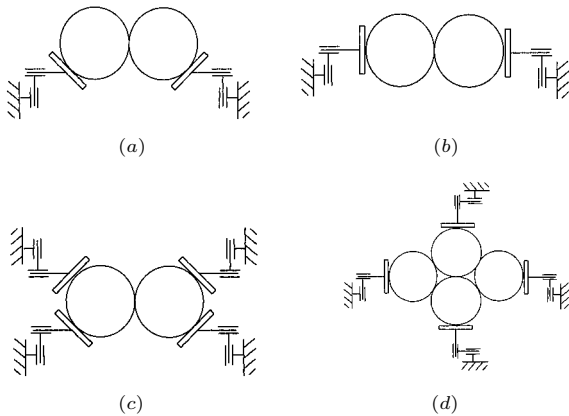


Fig. 3 Several grasp configurations of multiple objects

件 1 を満足するような軌道計画が必要となる．また， $I_{IO} = 0$ を満足する把握かどうかを調べる．以上の点を考慮して，単一対象物に対して提案されている操り制御則を拡張することで，様々な複数対象物の操り制御則の構成が可能となる．その一例として，付録に文献 [25] の手法を複数対象物に拡張した制御手法を示し，有効性の確認を 5 章で行う．

5. 例 題

数値例は簡単のため二次元で行う．二次元モデルにおいて外積に等価な歪対象行列 $a \times$ は $(a \times) = [-a_y \ a_x]$ によって再定義される．また， $D_B \in R^{(2n+2r) \times 3m}$ ， $D_C \in R^{(2n+2r) \times 2n}$ となる．Fig. 3 に示すような四つの把握形態に対して，考察を行った．Fig. 3 のうち，(a) は二つの直動関節を有する 2 本指により二つの円柱対象物を斜め下から把握しており，(b) は 2 本指により二つの円柱対象物を横より把握している．(c) は指 4 本により二つの円柱対象物を把握しており，(d) は四つの対象物を 4 本指により把握している．

5.1 運動学

これらの把握形態に対して，まず対象物の運動自由度と条件 1 を調べた． $\text{size}[-D_C \ D_B]$ ， $\text{rank}[-D_C \ D_B]$ ， I_M および条件 1 を計算した結果を Table 1 に示す．まず，(a) において，二つの対象物を 2 本指で把握した場合， $I_M = 4$ であるため，系は 4 自由度の運動自由度を有する．この運動自由度の物理的解釈を Fig. 4 に示す．系は 2 対象物を一体とみなした場合の並進 2 自由度 (Fig. 4 (a), (b)) と回転 1 自由度 (Fig. 4 (c))，ならびに，対象物の相対位置は変化せず回転をする 1 自由度 (Fig. 4 (d)) の合計 4 自由度をもつ．また，この把握形態は条件 1 ($\text{Ker}C = \emptyset$) を満足する．これに対して，(b) の把握形態は (a) と指の配置が異なるだけにもかかわらず， $\text{Ker}C = \emptyset$ を満足していない．Fig. 3 (b) より分かるとおり，この場合対象物は上下方向には自由に動けて，この上下方向の運動は指によっては制御できない．(c) において，二つの対象物を 4 本指で把握する場合， $I_M = 4$ より 4 自由度の運動自由度が存在する．また，(d) では $I_M = 3$ であり，単一対象物と同様な 3 自由度の運動自由度を有する．

Table 1 Calculation of kinematic relations

	$\text{size}[-D_C \ D_B]$	$\text{rank}[-D_C \ D_B]$	I_M	$\text{Ker}C = \emptyset$
(a)	6×10	6	4	○
(b)	6×10	6	4	×
(c)	10×14	10	4	○
(d)	18×20	17	3	○

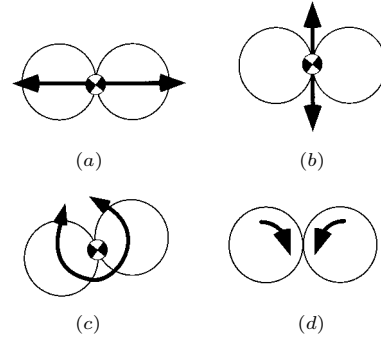


Fig. 4 Four motion degrees of freedom

Table 2 Calculation of static relations

	$\text{size}D_B$	$\text{rank}D_B$	$\text{size}D_O$	$\text{rank}D_O$	I_I	I_{IC}	I_{IO}
(a)	6×6	6	2×6	2	0	0	0
(b)	6×6	5	2×6	2	1	0	0
(c)	10×6	6	2×6	2	4	2	0
(d)	18×12	12	10×12	9	6	0	1

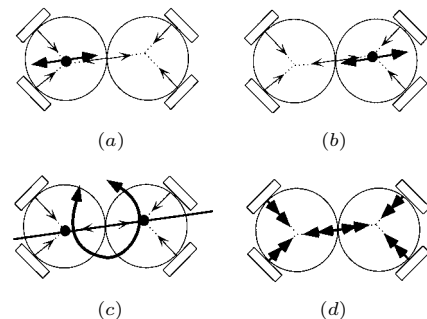


Fig. 5 Four internal force degrees of freedom

5.2 接触力

次に，内力の自由度，ならびに対象物間内力の自由度を調べた． $\text{size}D_B$ ， $\text{rank}D_B$ ， $\text{size}D_O$ ， $\text{rank}D_O$ ， I_I ， I_{IC} および I_{IO} を計算した結果を Table 2 に示す．まず，(a) は $I_I = 0$ ，(b) は $I_I = 1$ であるため，それぞれ 0, 1 自由度の内力を有する．これに対して，(c) は $I_I = 4$ より 4 自由度の内力の自由度が存在する．この 4 自由度の内力の物理的解釈を Fig. 5 に示す．4 本指で 2 対象物を把握する場合，両方の対象物に内力の焦点が存在し，これら二つの焦点は対象物どうしの接触点を含む直線上に乗る．よって，左右の焦点がこの直線上を移動する 2 自由度 (Fig. 5 (a), (b)) と，この直線自体が対象物どうしの接触点まわりに回転する 1 自由度 (Fig. 5 (c)) と，焦点の位置を変更せず内力を増減させる 1 自由度 (Fig. 5 (d)) の合計 4 自由度の内力が存在するとみなせる．また，各対象物が指 2

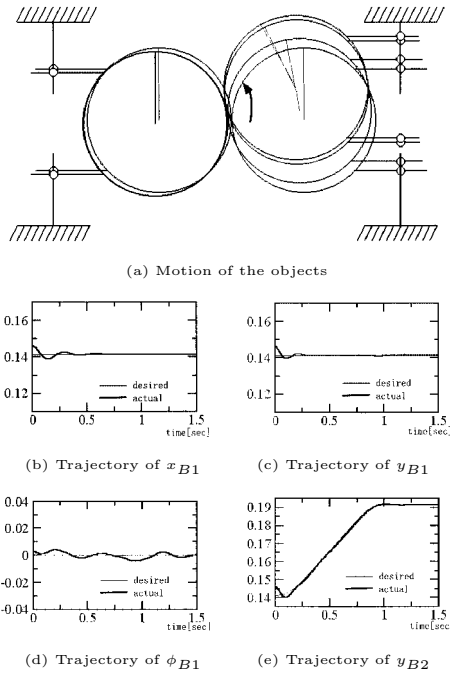
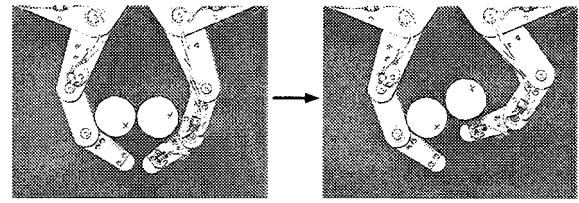


Fig. 6 Simulation results



(a) Overview of the experiment

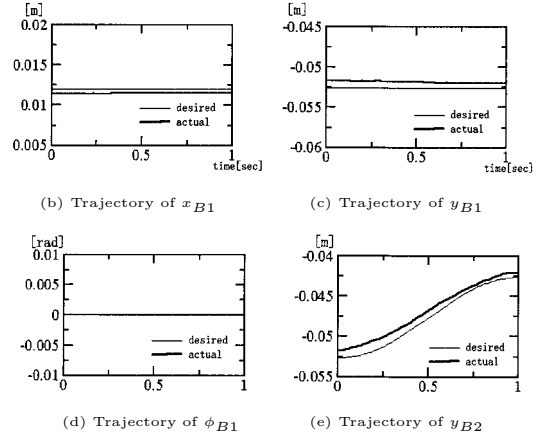


Fig. 7 Experimental results

本と接触するため、対象物どうしの接触を離しても各対象物には内力が存在する。つまり、 $I_C = 2$ である。(d)では $I_I = 6$ 、 $I_{IO} = 1$ であり、1自由度が対象物間に働く内力となっている。

5.3 軌道制御

次に、対象物の軌道制御のシミュレーションを行った。シミュレーションにおいて用いた制御則は付録に示す。シミュレーションは、Fig. 3 (c) に示す 2 対象物の 4 本指による把握系に対して行った。最初に、 ζ の構成を行うが、左側の対象物 (第 1 対象物) の運動を優先的に制御することを考える。つまり第 1 対象物のすべての運動と右側の対象物 (第 2 対象物) の上下方向 (y 方向) の運動を制御することを考え、変数 ζ を以下のとおりに構成する。

$$\zeta \triangleq \begin{bmatrix} x_{B1} \\ y_{B1} \\ \phi_{B1} \\ y_{B2} \end{bmatrix} = E_C p_C + E_B p_B \quad (16)$$

ここで、 $p_{CF} = [p_{CF1}^T p_{CF2}^T p_{CF3}^T p_{CF4}^T]^T$ 、 $p_B = [x_{B1} y_{B1} \phi_{B1} x_{B2} y_{B2} \phi_{B2}]^T$ 、 $E_C = 0 \in R^{4 \times 8}$ 、 $E_B =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ である。このとき、} \text{size} \begin{bmatrix} -D_C & D_B \\ E_C & E_B \end{bmatrix} =$$

14×14 、 $\text{rank} \begin{bmatrix} -D_C & D_B \\ E_C & E_B \end{bmatrix} = 14$ となるので、式 (6) により与えられた $\Delta \zeta$ に対して Δp_{CF} 、 Δp_B が一意に定められる。

シミュレーションに用いた把握系において、対象物の半径は 0.1、質量は 1 に設定した。また、ロボット指のリンク質

量は 0.01 とした。また、簡単のため、 $k_d = 0$ とした。シミュレーション結果を Fig. 6 に示す。制御変数 ζ として $\zeta \triangleq [x_{B1} y_{B1} \phi_{B1} y_{B2}]^T$ とおいたため、目標軌道として x_{B1} 、 y_{B1} 、 ϕ_{B1} を一定に固定し、 y_{B2} として上方向に動く目標軌道を時間に関する速度台形則で 1 秒で結ぶ軌道として与えた。Fig. 6 より、対象物の初期姿勢に誤差を与えているが、対象物は目標軌道に収束しているのが分かる。

6. 実験

本章では、複数対象物の操りの実機実験を行う。実験にはハンドシステム Hiroshima-Hand [26] を用いた。Hiroshima-Hand は 3 本指を持っており、各指は平面 3 自由度を持っている。この先端リンク上で対象物を操る。対象物として半径が 0.01 [m] の円柱二つを用いた。Hiroshima-Hand は速度制御型のドライバにより駆動されるため、対象物の軌道を制御するための速度指令としては以下のものを用いた。

$$\dot{\theta} = K J_F^+ (\zeta_d - \zeta) \quad (17)$$

ここで、 K は指令ゲインである。また、平面内で対象物を操るために各指は最低 2 自由度必要であるため、Hiroshima-Hand は 1 自由度の冗長自由度を有している。よって、式 (17) では J_F の擬似逆行列が用いられている。実験において、 x_{B1} 、 y_{B1} 、 ϕ_{B1} は初期姿勢を保ち、 y_{B2} は 1 秒間で 10 [mm] 増加する目標軌道を与えた。対象物の重心の位置は、実験の様子をビデオに撮影し、その画像を後に解析することで得た。実験結果を Fig. 7 に示す。本システムは対象物の絶対位置をフィードバックするようなビジョンシステムを持っていないため、最初に対象物を置いた位置の誤差に応じて 1 [mm] 程度の定常位置偏差

が生じているが、対象物が目標軌道を追従しているのが分かる。

7. 結 言

本論文では、転がり接触を前提とした、複数対象物の操りについて論じた。複数対象物を操る場合に考慮すべき点として、対象物の運動拘束と接触力の従属性があることを示した。またこれに関して、対象物の運動自由度、操りのための必要条件、内力の自由度の定義を行い、数値例と実機実験により考察を行った。今後の課題としては、転がり以外に滑りも考慮した操り、あるいは包み込み把握による操りを行うことが考えられる。最後に、本研究において、実験に協力していただいた白井達也氏(広島大学工学研究科博士後期課程)に感謝する。

参 考 文 献

- [1] M.R. Cutkosky and I.Kao: "Computing and Controlling the Compliance of a Robotic Hand," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 5, no. 2, pp.151-165, 1989.
- [2] M. Kaneko, N. Imamura, K. Yokoi and K. Tanie: "Direct Compliance Control —Basic Concept and Application Examples—," Proc. of SYROCO, pp.8.1-8.6, 1988.
- [3] W.S. Howard and V. Kumar: "On the Stability of Grasped Objects," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.12, no.6, pp.904-917, 1996.
- [4] H. Maekawa, K. Tanie and K. Komoriya: "Kinematics, Statics and Stiffness Effect of 3D Grasp by Multifingered Hand with Rolling Contact at the Fingertip," Proc. of 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.78-85, 1997.
- [5] V. Nguyen: "Constructing Force Closure Grasps," The Int. J. of Robotics Research, vol.7, no.3, pp.3-16, 1988.
- [6] A. Bicchi: "On the Closure Properties of Robotic Grasping," The Int. J. of Robotics Research, vol.14, no.4, pp.319-334, 1995.
- [7] J. Kerr and B. Roth: "Analysis of Multifingered Hands," The Int. J. of Robotics Research, vol.4, no.4, pp.3-17, 1986.
- [8] A.B.A. Cole, J.E. Hauser, and S.S. Sastry: "Kinematics and Control of Multifingered Hands with Rolling Contacts," IEEE Trans. on Automatic Control, vol.34, no.4, pp.398-404, 1989.
- [9] A.A. Cole, P. Hsu and S.S. Sastry: "Dynamic Control of Sliding by Robot Hands for Regrasping," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.8, no.2, pp.42-52, 1992.
- [10] P. Dauchez and X. Delebarre: "Force-Controlled Assembly of two Objects with a Two-arm Robot," Robotica, vol.9, pp.299-306, 1991.
- [11] K. Kosuge, M. Sakai and K. Kanitani: "Decentralized Coordinated Motion Control of Manipulators with Vision and Force Sensors," Proc. of 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2456-2462, 1995.
- [12] 南, 相山, 新井: "双腕協調による複数対象物の操作", 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1001-1002, 1996.
- [13] Y. Aiyama, M. Minami and T. Arai: "Manipulation of Multiple Objects by Two Manipulators," Proc. of 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2904-2909, 1998.
- [14] 余, 福田, 辻尾: "多指ハンドによる複数物体の把持安定性の評価", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1307-1308, 1998.
- [15] 余, 福田, 辻尾: "多指ハンドによる複数物体の安定把持", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 1999.
- [16] R. Mattikalli, D. Baraff, P. Khosla and B. Repetto: "Gravitational Stability of Frictionless Assemblies," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.11, no.3, pp.374-388, 1995.
- [17] 原田, 金子: "複数対象物体の包み込み把握—2対象物系のモデル化と転がりを利用した包み込み把握の実現—", 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.913-914, 1997.
- [18] 原田, 金子: "複数対象物体の包み込み把握—運動学とすくい上げ条

- 件—", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.6, pp.860-867, 1998.
- [19] K. Harada and M. Kaneko: "Kinematics and Internal Force in Grasping Multiple Objects," Proc. of 1998 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.298-303, 1998.
- [20] 原田, 金子: "複数対象物の平衡把握とそのロバスト性", 日本ロボット学会誌, vol.17, no.1, pp.133-139, 1999.
- [21] M. Kaneko, M. Higashimori and T. Tsuji: "Transition Stability of Enveloped Object," Proc. of 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3040-3046, 1998.
- [22] 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.
- [23] K.H. Hunt: Kinematics Geometry of Mechanisms. Oxford University Press, p.38, 1978.
- [24] A. Bicchi, C. Melchiorri and D. Balluchi: "On the Mobility and Manipulability of General Multiple Limb Robots," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.11, no.2, pp.215-228, 1995.
- [25] R.M. Murray, Z.X. Li and S.S. Sastry: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. CRC Press, 1994.
- [26] N. Imamura, M. Kaneko and T. Tsuji: "Development of Three-Fingered Robot Hand with a New Design Concept," Proc. of IASTED Int. Conf. Robotics and Manufacturing, pp.44-49, 1998.

付録 A. 条件 1 と転がり冗長性の関連

付録においては、条件 1 と文献 [20] において導出した転がり冗長性の概念の比較を行う。まず、転がり冗長性はロボット指関節を固定した場合に対象物に残る自由度であるが、本論文では指関節ではなく、対象物と指との接触点 p_{CF} を有する指リンクを基準座標系に対して固定した残りの自由度として考える。具体的には、式 (3) を Δp_B について解いた式である

$$\Delta p_B = H_C \Delta p_{CF} + H_G \Delta \lambda \quad (18)$$

の右辺第 2 項が転がり冗長性を表す [20]。右辺第 2 項は D_B の零空間であり、 $D_B H_G = 0$ が成立する。

次に、条件 1 との比較を行う。ここでは条件 1 を満たさない場合、つまり C に零空間が存在する場合を考える。条件 1 を満たさない場合とは、接触点を有する指リンクを絶対座標系に対して固定しても対象物に自由度が残ることを表すため、 C の零空間と転がり冗長性を表す H_G が関連していることが予想できる。まず、式 (6) を式 (5) に代入することで、次の 2 式を得る。

$$-D_C C + D_B B = 0 \quad (19)$$

$$E_C C + E_B B = I \quad (20)$$

式 (6) の第 1 行を $\Delta \zeta$ について解き、第 2 行に代入することにより、次式を得る。

$$\Delta p_B = B C^+ \Delta p_{CF} + B N_C k_C \quad (21)$$

ここで、 N_C ($\text{size} N_C = 6m - \text{rank} D_O \times 6m - \text{rank} D_O - \text{rank} C$) は、 C の零空間を表し、

$$C N_C = 0 \quad (22)$$

を満足する．また， k_C は $6m - \text{rank}D_O - \text{rank}C$ 次元任意ベクトルである．式 (19) の両辺に右から N_C を掛け，式 (22) を用いることにより，次式が得られる．

$$D_B B N_C = 0 \quad (23)$$

上式より $\text{Im}(B N_C) \subset \text{Ker}(D_B)$ が示せる．ここで， $\text{Im}(\ast)$ は \ast の値域を表す．転がり冗長性は $\text{Ker}(D_B)$ として定義されるため，条件 1 を満足しない場合は，転がり冗長性が存在する場合と考えられる．

付録 B. 制御則

本章では，文献 [25] に記されている単一対象物に対する操り制御則を複数対象物に拡張する．指の運動方程式，ならびに対象物の運動方程式は以下のとおりに表される．

$$M_F \ddot{\theta} + h_F = \tau - J_F^T f_{CB} \quad (24)$$

$$M_B \ddot{p}_B + h_B = D_{CB}^T f_{CB} + D_O^T f_O \quad (25)$$

ここで， M_F, M_B, h_F, h_B はそれぞれ指と対象物の慣性行列と遠心，コリオリ力に関するベクトルである．また， τ は指の関節駆動トルクベクトルである．各指は冗長自由度を持たないとする ($s_j = 3, j = 1, \dots, n$)．このとき，対象物を目標軌道に沿わせる関節駆動トルクは以下のように与えられる．

$$\tau = J_F^T (D_{CB}^T)^+ F + J_F^T N_{CB} k_d \quad (26)$$

$$F = \bar{M}_B B (\ddot{\zeta}_d - K_V \dot{\zeta}_d - K_P \delta_\zeta) + \bar{h}_B \quad (27)$$

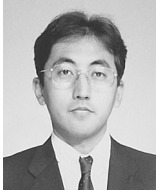
ここで，

$$\bar{M}_B = M_B + D_{CB}^T J_F^{-T} M_F J_F^{-1} D_{CB}$$

$$\bar{h}_B = h_B + D_{CB}^T J_F^{-T} \left(M_F \frac{d}{dt} (J_F^{-1} D_{CB}) \dot{p}_B + h_F \right)$$

$$\delta_\zeta = \zeta - \zeta_d$$

であり， K_P, K_V はそれぞれフィードバックゲインを表す対角行列である．また， ζ_d, k_d はそれぞれ ζ, k_{CB} の目標である．



原田研介 (Kensuke Harada)

1968年9月28日生．1997年3月京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了．博士(工学)．同年4月広島大学助手，現在に至る．ロボットハンド，ロボットマニピュレータの力学と制御に関する研究に興味を持つ．IEEE，計測自動制御学会，日本機械学会などの会員．

(日本ロボット学会正会員)



金子 真 (Makoto Kaneko)

1954年1月18日生．1981年3月東京大学大学院工学系研究科博士課程卒業．工学博士．同年4月通産省工業技術院機械技術研究所入所．1990年4月，九州工業大学情報工学部助教授．1993年10月広島大学教授，現在に至る．ロボットハンド，力覚センサ，触覚ベースアクティブセンシングなどの研究に興味を持つ．IEEE，計測自動制御学会，日本機械学会などの会員．

(日本ロボット学会正会員)



中野慎也 (Shinya Nakano)

1974年9月27日生．1998年広島大学工学部第二類卒業．現在博士前期課程在学中．ロボットハンドの力学に関する研究に興味を持つ．

(日本ロボット学会学生会員)



辻 敏夫 (Toshio Tsuji)

1959年12月25日生．1985年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了．同年同大学工学部助手，1994年同助教授，現在に至る．工学博士．人間とロボットの運動制御，ニューラルネット，マン・マシンシステムなどの研究に従事．計測自動制御学会，日本機械学会，電気学会，電子情報通信学会などの会員．

(日本ロボット学会正会員)