指先に回転テーブルを有するハンドによるマニピュレーション

永 田 和 之*

Manipulation with a Parallel-Jaw Gripper which has a Turn Table at Each Finger Tip

Kazuyuki Nagata*

Dextrous manipulation of a non-articulated multi-fingered hand is presented. To achieve dextrous manipulation with a non-articulated multi-fingered hand, a parallel-jaw gripper which has a turn table at each finger tip has been developed. The turn tables in this hand are controlled by ultrasonic motors, and the rotating angle is detected by an encoder located under each turn table. This hand has only one free rotation at each finger tip, but can achieve various manipulations. For example, regrasping an object about the center of the turn table, rotating a nut, sliding a block along a plane surface, pulling out a long stick from a cylinder, etc, are all feasible. The design of this hand and manipulation using this hand are more easily realized than that of an articulated multi-fingered hand. In this paper, the mechanism of the new hand is presented, and the concrete manipulations that can be done with this hand when an object is placed in the lower pair is analyzed. The required conditions for achieving these manipulations are calculated. Since these manipulations can be achieved without moving the arm, this means the hand can effectively manipulate objects in very narrow workspaces.

Key Words: Non-Articulated Multi-Fingered Hand, Turn Table, Parallel-Jaw Gripper, Manipulation, Lower Pair

1. は じ め に

人間の手は物を握むという機能に加えて、握んだ物を手の中で転がしたり、指先を器用に動かしてネジを回すといった操作を物体に加えることができる。このような器用な操作をロボットで実現するために、近年多指ハンドの研究が盛んに行われている。多指ハンドは自由度が多い分、従来の平行グリップと比べると様々な操りが可能となる。しかし、このような多自由度機構のハンドをコンパクトに設計することが困難であることや、操りのための動作戦略が複雑となるなど解決すべき課題が多く、いまだ実際に作業を行わせるには至っていない。

ある操作を実現しようとした場合、指をどう協調させて動かすかといった動作戦略も重要であるが、物体操作が実現しやすいようにハンドのメカを工夫することも重要なアプローチである。このようなことから、従来の平行グリップに新たな自由度を付加して、簡単な機構ではあるが物体操作性を向上させたハンドが幾つか報告されている[1]-[7]。このようなハンドとして、平行グリップの指先に並進自由度と回転自由度を与えて把持面上での並進・回転操作を可能にしたもの[1]。グリップの指にスライダを設け、3自由度の持ち替えを可能にしたもの

[3]。指を前後に動かす機構によりひねり操作を可能にしたものの[4]などが報告されており、把持物体の持ち替え操作などが容易に実現できることが報告されている。これらのハンドは多指ハンドと比べると機能的には制限されるものの操りの実現は比較的容易である。しかし、これらの論文ではハンドのメカニズムについては詳しく述べられているが、マニピュレーションについての記述は少ない[2]。

筆者は、従来の平行グリップの各指先に最も少ない数の自由度を付加することにより、どれくらいハンドの操作性が向上するかという点を探るために、平行グリップの指先に1つの回転自由度を付加した指先に回転テーブルを有するハンドを開発した[5]。本論文の目的は、従来の平行グリップの各指先に1つの回転自由度を付加することにより拡大する物体操作性について具体的に示し、多指ハンドとは異なったカテゴリーのハンドによる物体操作の有効性を示すことである。本論文では、開発した指先に回転テーブルを有するハンドの機構を示すとともに、本ハンドによって実現される代表的なマニピュレーションについて具体的に力学解析を行い、それらマニピュレーションを実現するための条件を求める。

2. 指先に回転テーブルを有するハンドの開発

平行グリップの各指先にただ1つの同一の自由度を付加することを考えると、Fig. 1に示す6つのパターンが考えられる。このうち(a)、(b)はそれぞれx軸方向に並進機構を有する

原稿受付 1993年2月22日

• 電子技術総合研究所
• Electrotechnical Laboratory

把持面、及び y 軸回りに回転する回転体側面を把持面とするハンドで、把持物体の x 軸方向の並進操作を可能にする。また、把持面と把持物体との接触形態、摩擦条件によっては y 軸回りの回転操作も可能となる。(c)(d)はそれぞれ y 軸方向に並進機構を有する把持面、及び x 軸回りに回転する回転体側面を把持面とするハンドで、 y 軸方向の並進操作を可能にする。この場合も、把持面と把持物体との接触形態、摩擦条件によって x 軸回りの回転操作が可能となる。(e)は z 軸方向に並進機構を有するハンドで、 z 軸方向の並進操作を可能にする。(f)は z 軸回りに回転機構を有するハンドで、 z 軸回りの回転操作を可能にする。

ここで把持物体の操作について考える。把持物体の微小な並進操作はアームの特異点近傍以外では、比較的少ないアームの運動で実現することができる。また y 軸回りの回転操作は、回転軸がリストの回転軸と一致するため容易に実現される。しかし、 x 軸、 z 軸回りの回転操作については、アームの姿勢の大幅な変化が要求され、狭隘な空間での操作は困難を伴う。以上の点を考慮すると、指先に与える自由度として x 軸、 z 軸回りの回転操作を実現する(c)、(d)、(f)が候補に挙げられる。しかし、(c)、(d)の x 軸回りの回転操作は、把持面と把持物体との接触形態や摩擦条件によって左右されるので、指先に与える自由度は z 軸回りの回転操作を実現する(f)を採用した。

開発した z 軸回りに回転自由度を有するハンドの機構を Fig. 2 に示す。 z 軸回りの回転は指先に取り付けられた回転テーブルを超音波モータで駆動することにより実現される。超音波モータの定格トルクは $1.5 [\text{Kg}\cdot\text{cm}]$ である。回転角はトルク伝達経路中にあるエンコーダにより検出される。把握を安定させるために回転テーブル表面と側面にラバーが貼ってある。

各指には2ヶ所歪易い構造が設けてあり、その部分に歪ゲージが貼ってある。この歪ゲージの出力を計測することにより握力が検出される。検出された握力をハンド開閉用モータにフィードバックすることにより握力のコンプライアンス制御が可能となる。指の開閉は DC モータの回転をピニオン・ラックで平行運動に変換することで行われる。指の開閉幅は $80 [\text{mm}]$ 、回転テーブルの半径 $30 [\text{mm}]$ 、ハンドの全体長 $300 [\text{mm}]$ 、重さは約 $1.8 [\text{Kg}]$ である。本ハンドは z 軸回りの回転操作だけでなく、外部環境の拘束を利用することで様々なマニピュレーションを実現することができる。以下、これらのマニピュレーションについて述べる。

3. 指先に回転テーブルを有するハンドのマニピュレーション

指先の回転テーブルで対象物を操作する方法として、左右の回転テーブルで対象物を把持しながら行う物体操作と、回転テーブル側面を対象物に押し当てながら行う物体操作が考えられる。以下、これら2つの方法について、回転テーブルが対象物に及ぼす力を求める。なお、以下の解析においては、摩擦力はクーロンの摩擦の法則に従うものとし、物体の運動は慣性力が無視できるほど小さいものとして準静的に扱う。

3.1 対象物把持によるマニピュレーション

いま、回転テーブルと把持物体とが Fig. 3 のように接触しており、回転テーブルは z 軸回りに矢印の方向に回転しているものとする。ここで、

R : 回転テーブル-把持物体間の接触面積

dA : 微小部分の面積

r_t : 回転テーブル中心からみた微小部分の2次元位置ベクトル

Fig. 1 Six types of hands with 1 DOF at finger tips

Fig. 2 Mechanism of the gripper

$p(\mathbf{r}_t)$: 回転テーブル-把持物体間の接触圧力

μ_t : 回転テーブル-把持物体間の摩擦係数

ω_t : 回転テーブルの回転速度

$\mathbf{v}_t(\mathbf{r}_t)$: 微小部分における回転テーブルの速度

$\mathbf{v}_b(\mathbf{r}_t)$: 把持物体微小部分の把持面上での速度

とすると、回転テーブルが把持物体微小部分に及ぼす力は[8]

・回転テーブル法線方向

$$f_n = p(\mathbf{r}_t) dA \quad (1)$$

・回転テーブル接線方向

$$\mathbf{f}_t = \mu_t \frac{\mathbf{v}_t - \mathbf{v}_b}{\|\mathbf{v}_t - \mathbf{v}_b\|} \cdot p(\mathbf{r}_t) dA \quad (2)$$

となる。ここで $\mathbf{r}_t = (x, y)^T$ とすると、

$$\mathbf{v}_t = (-\omega_t y, \omega_t x)^T \quad (3)$$

である。

これより、回転テーブルが把持物体に加える力は

・回転テーブル法線方向

$$F_n = \int_R p(\mathbf{r}_t) dA \quad (4)$$

・回転テーブル接線方向

$$\mathbf{F}_t = \mu_t \int_R \frac{\mathbf{v}_t - \mathbf{v}_b}{\|\mathbf{v}_t - \mathbf{v}_b\|} \cdot p(\mathbf{r}_t) dA \quad (5)$$

となる。また、把持物体が回転テーブルからうける回転テーブル中心軸回りのモーメントは、

$$\mathbf{M} = \mu_t \int_R \mathbf{r}_t \otimes \frac{\mathbf{v}_t - \mathbf{v}_b}{\|\mathbf{v}_t - \mathbf{v}_b\|} \cdot p(\mathbf{r}_t) dA \quad (6)$$

となる。ここで演算子 $\otimes$ は $(a, b)^T \otimes (c, d)^T = ad - bc$ を行う演算子である。

3.2 回転テーブル側面押し当てによるマニピュレーション

次に、Fig. 4 のように回転テーブル側面を対象物に押し当てて、回転テーブルを矢印の方向に回転させたときに回転テーブルが対象物に及ぼす力を求める。ここで

r : 回転テーブルの半径

t : 回転テーブルの厚さ

$p(z)$: 回転テーブルの押しつけ圧力

μ_t : 回転テーブル-対象物間の摩擦係数

ω_t : 回転テーブルの回転速度

Fig. 3 Contact of the turn table with grasped object

$\mathbf{v}_t(z)$: 微小区間における回転テーブルの速度

$\mathbf{v}_b(z)$: 微小区間における対象物の速度

とすると、回転テーブルが対象物に加える力は

・テーブル側面法線方向

$$F_n = \int_0^t p(z) dz \quad (7)$$

・テーブル側面接線方向

$$\mathbf{F}_t = \mu_t \int_0^t \frac{\mathbf{v}_t(z) - \mathbf{v}_b(z)}{\|\mathbf{v}_t(z) - \mathbf{v}_b(z)\|} \cdot p(z) dz \quad (8)$$

となる。ここで

$$\mathbf{v}_t(z) = (r\omega_t, 0)^T \quad (9)$$

である。

4. 動作例

本章では、指先に回転テーブルを有するハンドによって実現される代表的な動作プリミティブについて述べる。本ハンドは、回転テーブル中心軸回りの回転操作のほかに、回転テーブルが対象物に及ぼす力と外部環境が対象物に及ぼす力の力学的バランスによって、様々な物体操作を実現することができる。特に対象物が低次対偶で作業環境中に置かれている場合には、その操りの実現はより確実なものとなる。本章では低次対偶(回り対偶、ねじ対偶、面对偶、すべり対偶、円筒対偶)で置かれている物体の操りについて、具体的に準静力学的解析を行い、動作プリミティブを実現するための条件を求める。

4.1 能動的持ち替え操作

物体を把持しながら左右の回転角及び回転速度が等しくなるように回転テーブルを制御すると、把持物体を回転テーブル中心軸回りに回転させることができる。通常物体を把持する場合、物体の置かれている環境の制約を受けるために、必ずしも作業に適した把握姿勢で物体を把持できるとは限らない。このような場合、本ハンドは、把持面上での姿勢に限って、把持物体を作業に適した任意の姿勢に持ち替えることができる。また、狭隘な空間から物体を取り出す場合でも、従来のハンドでは取り出すことのできない状態から、能動的持ち替え操作を行うことによって、周囲の障害物を回避しながら対象物を取り出すことができる[9][10]。Fig. 5に本ハンドによる持ち替え操

Fig. 4 Side contact of the turn table with the object

作の様子を示す。

4.2 固定軸回りの回転操作

ドアのノブやネジに挿入されたナットのように、回り対偶もしくはねじ対偶で対象物が置かれている場合、左右の回転テーブルを互いに反対方向に回転させることにより、対象物を拘束する固定軸回りに対象物を回転させることができる。本稿では、握力が一定となるようにコンプライアンス制御することにより実現されるナットの回転操作を取り上げ、ナットを回転させるための条件を求める。なお、ここでは以下の条件の下で解析をすすめる。

- ・ナットはあらかじめネジに取り付けられている。
- ・ハンドの左右の握力は等しく一定である。
- ・ナット-回転テーブル間の摩擦係数は一定である。
- ・回転テーブルと接触しているナットの頂点と対角線上にある頂点も、もう一方の回転テーブルと接触している。(Fig. 6 参照)

いま Fig. 6 に示すようにナットを時計回りに回転させるものとする。ここで C はナットの最大径、 T_R はナットがネジから受ける回転抵抗を表す。このとき、ナットを時計回りに回転させるための条件は、ナットの回転速度がゼロのとき、

$$\frac{1}{2}C \cos \phi (F_{x1} + F_{x2}) > \frac{1}{2}C \sin \phi (F_{z1} + F_{z2}) + T_R \quad (10)$$

Fig. 5 Photograph of regrasping operation

Fig. 6 Rotating a nut with the turn tables

が成り立つことである。

いま, Fig. 6, Fig. 7 でナットと右側の回転テーブルの接触に注目し、ナットの右上頂点の位置を $x_c = (x_c, y_c)$ とする。このとき、ナットと回転テーブルの接触は線接触となるので、ナットが右側の回転テーブルから受ける力は式(4)(5)より

$$F_{x1} = \int_{y_e}^{y_c} \mu_t p \sin \phi dz \quad (11)$$

$$F_{y1} = - \int_{y_e}^{y_c} \mu_t p \cos \phi dz \quad (12)$$

$$F_{z1} = \int_{y_e}^{y_c} p dz = P \quad (13)$$

$$y_e = \begin{cases} y_c - H & (y_c + \sqrt{r^2 - x_c^2} \geq H) \\ -\sqrt{r^2 - x_c^2} & (y_c + \sqrt{r^2 - x_c^2} < H) \end{cases} \quad (14)$$

となる。ここで P はハンドの握力、 p は回転テーブルの接触圧力、 μ_t はナットと回転テーブルの間の摩擦係数、 H はナットの高さを表す。ナットと左側の回転テーブルとの接触は Fig. 7 で y 軸に対して対称となるので、ナットが左側の回転テーブルから受ける力は式(14)の x_c を $C \sin \phi - x_c$ として式(11)(12)(13)に代入した値となる。

次にナットがネジから受ける回転抵抗 T_R を求める。ナットとネジのネジ山間の接触は、均一な剛性を有する一様に分布したバネを介した剛体同士の接触と仮定し、ナットがネジから受ける圧力分布は Fig. 8 に示すような直線的に変化する分布荷重に近似して求める。

Fig. 7 Contact of the turn table with a nut

Fig. 8 Model of pressure distribution between a nut and a screw

ここで z 軸からの角度 θ における圧力 Q は

$$Q = \frac{Q_1 - Q_2}{2} \cos \theta + \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad (15)$$

力のつり合いより、

$$\begin{aligned} F_{y1} + F_{y2} &= \int_0^{2\pi} Q d\theta \\ &= (Q_1 + Q_2)\pi \end{aligned} \quad (16)$$

モーメントのつり合いより、

$$\begin{aligned} (F_{y1} - F_{y2}) \frac{C}{2} &= \int_0^{2\pi} \frac{D}{2} Q \cos \theta d\theta \\ &= \frac{D(Q_1 - Q_2)}{4} \pi \end{aligned} \quad (17)$$

ここで D はネジの有効径を表す。式(15)(16)(17)より

$$Q = \frac{F_{z1} - F_{z2}}{\pi D} C \cos \theta + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{2\pi} \quad (18)$$

となる。

ネジのねじれ角を σ , ナット-ネジ間の摩擦角を ρ とすると, 仕事量の関係より, ナットがネジ軸より受ける回転抵抗 T_R は,

$$T_R = \int_0^{2\pi} \left(\frac{D}{2} \right)^2 |Q| \tan(\sigma + \rho) d\theta \quad (19)$$

となる。ここで、ネジのピッチを p_t , ナットとネジの間の摩擦係数を μ_n とすると,

$$\tan \sigma = \frac{p_t}{\pi D}, \quad \tan \rho = \mu_n \quad (20)$$

となるので、式(20)を用いて式(19)を書き換えると、ナットがネジ軸から受ける回転抵抗 T_R は,

$$T_R = \frac{D^2(p_t + \pi D \mu_n)}{4(\pi D - p_t \mu_n)} \int_0^{2\pi} |Q| d\theta \quad (21)$$

となる。

式(10)～(21)をもとに、回転テーブルの半径 $r=30[\text{mm}]$, 回転テーブルとナットの間の摩擦係数 $\mu_t=1.0$, ナットとネジ軸の間の摩擦係数 $\mu_n=0.2$, 握力 $P=1.0[\text{Kg}]$ としたとき, M8 のナットを回転させることのできる領域の計算結果を Fig. 9 に示す。ここで数値は Fig. 6 の ϕ の値で, 接触頂点 x_c が $\phi=30^\circ$ の領域内部にあるならばロボットはアームを動かすことなくナ

Fig. 9 Required region for x_c to rotate a nut

ットを連続的に回転させることができる。従来、ナットを回すためにはロボットアームでネジ軸のまわりに回転運動を生成しなければならず、広い作業空間が必要であった。本ハンドを用いた場合、ナットの接触頂点 x_c が Fig. 9 で示した領域内部にあるならば、ロボットはアームを動かすことなくナットを連続的に回すことができ、狭い作業空間でも効率良く作業を遂行することができる。実験は M8 ナットの回転操作を行い、容易に連続回転を実現することができた (Fig. 10)。

4.3 面上での並進操作

平面上に置かれた物体(面对偶)は、平面に沿った2自由度の並進と平面法線回りの回転の3自由度を有する。この物体の運動は、一般に対象物-平面間の接触圧力の分布が不確定となるため解析的に記述することはできない。しかし、ある条件の下で対象物-平面間の接触圧力分布が既知とみなせる場合には、その物体の運動を記述することができる。相山らは平面に置かれた薄状シートの操りを取り上げ、指の押しつけ力が接触点でのみ床面に伝わるものとして解析している[6]。本稿では平面上に置かれた均質な材質から成る直方体を、面に沿って並進させる操作を取り上げ、解析する。直方体を面に沿って並進させる方法として、左右の回転テーブルで対象物を把持しながら並進させる方法と回転テーブル側面を対象物に押し当てて並進させる方法がある。回転テーブルで直方体を把持しながら並進させる場合、回転テーブル面法線方向の直方体-床面間の圧力分布は均一となる。また、左右の回転テーブル側面を直方体中心軸に対して対称に配置し、等しい力で押し当てた場合にも、回転テーブル面法線方面の直方体-床面間の接触圧力分布は均一となる。したがって、両方とも直方体に作用する力を回転テーブル面と平行な面に投影して考えることができる。以下これら2つの手法について準静力学的解析を行い、直方体を目的の方向に並進させるための条件を求める。

4.3.1 対象物把持による並進操作

Fig. 11 のように左右の回転テーブルで直方体を把持しながら、直方体を面に沿って矢印の方向に滑らせることを考える。ここで、対象物が床面から受ける力は分布荷重となるが、この場合頂点に作用する力 N_1, N_2 に置き換えて考えることができる。ここで、回転テーブルの中心座標を $(x_t, y_t)^T$, 握力を F_{xt} , 回転テーブルが対象物に及ぼす力を F_{xt}, F_{yt} , モーメントを M_t

Fig. 10 Photograph of the experimental scene of rotating a nut

とし,

p : 回転テーブル-対象物間の接触圧力

μ_t : 回転テーブル-対象物間の摩擦係数

μ_b : 対象物-床面間の摩擦係数

W : 対象物の重さ

$T_{\max}$: 回転テーブルの最大トルク

ω_t : 回転テーブルの回転速度

v_b : 対象物の移動速度

とすると, 回転テーブル-対象物間の接触圧力は,

$$p = \frac{F_{zt}}{\int_R dA} \quad (22)$$

となる. 対象物が面に沿って滑るためには以下の条件を満足しなければならない.

- 回転テーブルのトルク制限より

$$M_t \leq T_{\max} \quad (23)$$

- 力のつり合いより

$$N_1 + N_2 = W + F_{yt} \quad (24)$$

$$\mu_b(N_1 + N_2) = F_{xt} \quad (25)$$

- 回転テーブル中心回りのモーメントのつり合いより

$$M_t + W\left(x_t - \frac{l_1}{2}\right) + N_2(l_1 - x_t) \quad (26)$$

$$= \mu_b(N_1 + N_2)y_t + N_1x_t \quad (27)$$

- 対象物が転がらないための条件

$$N_1 > 0, N_2 > 0 \quad (28)$$

ここで

$$v_b = (v, 0)^T \quad (29)$$

とすると, 式(5)(6)より

$$F_{xt} = 2\mu_t p \int_R \frac{-\omega y - v}{\sqrt{(\omega y + v)^2 + \omega^2 x^2}} dA \quad (30)$$

$$F_{yt} = 2\mu_t p \int_R \frac{\omega x}{\sqrt{(\omega y + v)^2 + \omega^2 x^2}} dA \quad (31)$$

$$M_t = 2\mu_t p \left\{ \int_R \frac{\omega x^2}{\sqrt{(\omega y + v)^2 + \omega^2 x^2}} dA - \int_R \frac{-\omega y^2 - vy}{\sqrt{(\omega y + v)^2 + \omega^2 x^2}} dA \right\} \quad (32)$$

となり, N_1, N_2 はそれぞれ,

Fig. 11 Sliding a block along a plane in which the block is grasped by the turn tables

$$N_1 = \frac{1}{l_1} \left\{ F_{yt}(l_1 - x_t) - F_{xt}y_t + M_t + W \frac{l_1}{2} \right\} \quad (33)$$

$$N_2 = \frac{1}{l_1} \left\{ F_{yt}x_t + F_{xt}y_t - M_t + W \frac{l_1}{2} \right\} \quad (34)$$

となる. 式(22)~(34)をもとに, 回転テーブル半径 $r = 30$ [mm], $T_{\max} = 20.0$ [Kgw-mm], $\omega = 2.0$ [RAD/sec], $F_z = 0.25$ [Kgw], $\mu_t = 1.0$, $\mu_b = 0.2$, $W = 1$ [Kgw], ブロックの長さ $l_1 = 100$ [mm], 高さ $l_2 = 80$ [mm] としたとき, ブロックを矢印の方向に滑らすことのできる条件の数値計算結果を Fig. 12 に示す. Fig. 12 でハッチングした領域に回転テーブルの中心があるならばブロックを面に沿って矢印の方向に滑らせることができる.

実験でも Fig. 13 に示すように, 対象物の並進操作を容易に実現することができた.

4.3.2 回転テーブル側面押し当てによる並進操作

Fig. 14 のように回転テーブル側面を対象物に押し当て, 対象物を矢印の方向に滑らせることを考える. ここで

P : 回転テーブルの押しつけ力

μ_t : 回転テーブル-対象物間の摩擦係数

μ_b : 対象物-床面間の摩擦係数

r : 回転テーブルの半径

$T_{\max}$: 回転テーブルの最大トルク

Fig. 12 The region of the turn table where a block can be slide along a plane

Fig. 13 Photograph of the experimental scene of sliding a block

W : 対象物の重さ

とし、回転テーブルの中心座標を $(x_t, y_t)^T$ とする。このとき、対象物が面に沿って滑るための条件は、

- 回転テーブルのトルク制限より、

$$\mu_b(N_1 + N_2) \cdot r \leq T_{\max} \quad (35)$$

- 回転テーブルが対象物上を滑らないための条件

$$\mu_b(N_1 + N_2) \leq \mu_t P \quad (36)$$

- 力のつり合いより、

$$N_1 + N_2 = W + P \quad (37)$$

- 原点 O の回りのモーメントのつり合いより、

$$N_2 l_1 - \left(P x_t + W \left(\frac{l_1}{2} \right) + \mu_b(N_1 + N_2) \right) = 0 \quad (38)$$

- 対象物が転がらないための条件

$$N_1 > 0, N_2 > 0 \quad (39)$$

式(35)~(37)より、対象物を平面に沿って滑らすことのできる押しつけ力の範囲は、

$$\frac{\mu_b}{(\mu_t - \mu_b)} \cdot W \leq P \leq \frac{T_{\max}}{\mu_b r} - W \quad (40)$$

式(37)(38)(39)より、対象物を平面に沿って滑らすことのできる回転テーブルの位置は、

$$-\frac{W}{P} \left(\frac{l_1}{2} + \mu_b \right) - \mu_b < x_t < \frac{W}{P} \left(\frac{l_1}{2} - \mu_b \right) + l_1 - \mu_b \quad (41)$$

となる。式(40)(41)をもとに、回転テーブル半径 $r=30[\text{mm}]$, $T_{\max}=20.0[\text{Kgw} \cdot \text{mm}]$, $\mu_t=1.0$, $\mu_b=0.2$, $W=1[\text{Kgw}]$, プロックの長さ $l_1=100[\text{mm}]$, 高さ $l_2=80[\text{mm}]$ としたときに、プ

Fig. 14 Sliding a block along a plane in which the block is pressed by the turn tables

Fig. 15 Regions P and x_t where a block can be slide along a plane

ロックを矢印の方向に滑らすことのできる条件を Fig. 15 に示す。

実験は、箱を $0.4[\text{Kgf}]$ の力で押し当てながら、手前に手繰り寄せる操作を行った (Fig. 16)。実験では対象物の並進のほか、左右の回転テーブルの速度誤差、摩擦力の不一致、対象物-床面間の接触圧力の不均一性等のために床面法線回りの回転も観察された。このような制御誤差や摩擦力の不確定性等に起因する動作を避けるためには、視覚等によるセンサフィードバックを行う必要がある。逆にこのようなセンサフィードバックを行うことにより、回転操作も扱うことが可能となる。

ここで、4.3.1, 4.3.2 で示した手法を比較する。左右の回転テーブルで対象物を把持しながら行う並進操作は、並進に関しての信頼性は高いが、扱える対象物の大きさは指間の幅より小さい物に限られる。一方、回転テーブル側面押し当てによる並進操作は、並進に関する信頼性は低い、指間の幅より大きい物体を扱うことができる。

4.4 長竿の挿入・引き出し操作

穴に挿入された長竿のように、対象物がすべり対偶若しくは円筒対偶で置かれている場合、対象物を把持しながら左右の回転速度が等しくなるように回転テーブルを制御すると、アームを動かすことなく、長竿を穴に挿入したり、穴から引き出すことができる。いま、Fig. 17 に示すように回転テーブルの制御のみで長竿を穴から引き出すことを考える。なお、穴は十分深いものとする。このとき、長竿は穴に対して Fig. 17(a)(b) の2つの状態をとることができる。ここで、回転テーブルの中心座標を $(x_t, y_t)^T$, 長竿重心位置を $(x_g, y_g)^T$, 長竿-穴間の摩擦係数を μ_b , 回転テーブルの最大トルクを $T_{\max}$ とする。長竿を穴から引き出すための条件は、長竿の速度がゼロのとき以下の条件を満たせばよい。

- 回転テーブルのトルク制限より、

$$M_t \leq T_{\max} \quad (42)$$

- 力のつり合いより、

$$F_x > W \cos \theta + \mu_b f_1 + f_2 (\mu_b \cos \theta - \sin \theta) \quad (43)$$

$$F_y + W \sin \theta - f_1 + f_2 (\mu_b \sin \theta + \cos \theta) = 0$$

((a) のとき)

$$F_y - W \sin \theta + f_1 - f_2 (\mu_b \sin \theta + \cos \theta) = 0$$

((b) のとき) (44)

Fig. 16 Photograph of the experimental scene of sliding a block

Fig. 17 Pulling out operation using the turn tables

Fig. 18 The region of the turn table where a long stick can be pulled out

・モーメントのつり合いより,

$$M_t - W\{(x_t - x_c)\sin\theta + (y_t - y_c)\cos\theta\} + f_1(x_t - \mu_b y_t) - f_2\{(x_t + l)(\cos\theta + \mu_b \sin\theta) + (y_t + d)(\mu_b \cos\theta - \sin\theta)\} = 0$$

((a)のとき)

$$M_t + W\{(x_t - x_c)\sin\theta - (y_t - y_c)\cos\theta\} - f_1(x_t + \mu_b y_t) + f_2\{(x_t + l)(\cos\theta + \mu_b \sin\theta) - (y_t - d)(\mu_b \cos\theta - \sin\theta)\} = 0$$

((b)のとき)

(45)

・穴との接触状態維持のための条件

$$f_1 > 0, f_2 > 0$$

(46)

ここで式(46)の条件が満たされないとき、穴と長竿との接触状態は(a)→(b), (a)←(b)と変化する。以上、(42)-(46)式をもとに、回転テーブル半径 $r=30[\text{mm}]$, $T_{\max}=20.0[\text{Kgw} \cdot \text{mm}]$, 握力 $F_z=0.25[\text{Kgw}]$, $\mu_t=1.0$, $\mu_b=0.2$, $W=0.2[\text{Kgw}]$, 長竿の長さ $L=300[\text{mm}]$, 幅 $d=30[\text{mm}]$, 穴の幅 $D=35[\text{mm}]$ としたとき、角柱を引き出すことのできる領域の数値計算結果を Fig. 18 に示す。Fig. 18 でハッチングした領域内に回転テーブルの中心があるならば、この角柱を回転テーブルの制御のみで穴から引き出すことができる。

従来のハンドを用いて長竿の挿入・引き出し操作を実現するためには、アームの大きな運動が必要となるが、2台のマニピュレータで交互に長竿を持ち替えて引き出す必要があった。しかし、本ハンドを用いた場合、アームの運動をほとんど必要とせずに、長竿の挿入・引き出し操作を実現することができる。

Fig. 19 Photograph of the experimental scene of pulling out a long stick

実験は、丸棒の挿入・引き出しを行った (Fig. 19)。実験では丸棒の挿入・引き出し操作は容易に実現できたものの、左右の回転テーブルの速度誤差、摩擦力の不一致等の原因で、丸棒中心軸回りの回転が観察された。この場合も、視覚等によるセンサフィードバックを行うことにより、制御誤差や摩擦力の不確定性等に起因する誤動作を避けることができるものと思われる。

5. おわりに

本論文では、ロボットによる器用な操りを実現するハンドとして、多指ハンドと異なったカテゴリの指先に回転テーブルを有するハンドを提案した。また、本ハンドにより拡大される物体操作について具体的に示すことで、本ハンドの有効性を示した。本ハンドによる操りは、多指ハンドと比べると制限されるもののその実現は比較的容易であり、これらの動作プリミティブを組み合わせることにより、複雑な作業にも柔軟に対応できるものと思われる。本稿では、開発した指先に回転テーブルを有するハンドの機構を示すとともに、本ハンドによるマニピュレーションのうち、特に低対次偶で置かれている物体の操りについて具体的に提起し、準静力学的解析から、その操りを実現するための条件を求めた。回り対偶、ねじ対偶、すべり対偶のように対象物が1自由度の対偶で作業環境中に置かれている場合には、その操りは比較的確実に実現することができる。しかし、それ以上の自由度の対偶で置かれている場合には、回転テーブル-対象物間の摩擦係数の不確定性や制御誤差などのために、その操りが不確実となるため、視覚や力覚などのセンサフィードバックが必要となる。逆にセンサフィードバ

ックを強化することにより、ここでは示さなかった高次対偶で置かれている物体の操りも可能になるものと思われる。また、実際の操りを実現するための条件は、摩擦係数の不確定性や制御誤差などのために、ここで示した解析結果とは一致しない。しかし、幾つかの条件について解析を行っておくことにより、誤差があった場合に起こり得る事態をあらかじめ予測することができ、動作プランニングやセンサによる作業監視システムに活用することができる。

最後に、本研究を御支援くださった高瀬電総研知能システム部長、坂根自律システム研究室長、鷲見東北工業技術試験所計測制御課長、並びに電総研ロボットグループの皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] P. Datsoris and W. Palm: "Principles on the development of mechanical hands which can manipulate objects by means of active control," ASME J. of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, vol. 107, no. 2, pp. 148-156, 1985.
- [2] W. Palm: "Design and control of robot hands: a non-anthropomorphic approach," Int. J. of Robotics and Automation, vol. 2, no. 3, pp. 136-143, 1987.
- [3] 山本, 岩本: "超音波モータを用いた3自由度グリップ", 日本ロボット学会誌, vol. 7, no. 5, pp. 118, 1989.
- [4] 飯倉, 番場: "マスタスレーブマニピュレータ用の2自由度ハンド", 日本ロボット学会誌, vol. 7, no. 5, pp. 116, 1989.
- [5] 永田: "指先に回転テーブルを有するハンドのマニピュレーション", 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 937-940, 1990.
- [6] 相山, 鎌田, 稲葉, 井上: "指先に回転円盤を持つ2本指ロボットを用いた薄板の操作", 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 761-762, 1991.
- [7] R. C. Luo, M. H. Lin and C. K. Shih: "Design and implementation of a multi-degree of freedom intelligent robot hand," Proc. of IROS '91, pp. 719-724, 1991.
- [8] M. T. Mason: "Mechanics of pushing," Proc. 2nd Int. Symp. on Robotics, pp. 73-80, MIT Press, 1984.
- [9] 長谷川, 寺崎: "平行2指ハンドによる知能的物体操作: 指先での対象物回転操作計画", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92予稿集, pp. 139-142, 1992.
- [10] 音田, 末広: "把持物体のあやつりを考慮したマニピュレータの動作計画", 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 791-794, 1992.

永田和之 (Kazuyuki Nagata)

1962年10月2日生。1986年東北大学工学部精密工学科卒業, 同年通産省工業技術院東北工業技術試験所入所, 1991年より電子技術総合研究所。現在知能システム部自律システム研究室研究官。知能ロボットの研究に従事。計測自動制御学会, 日本機械学会の会員。(日本ロボット学会正会員)