対象物押し操作にもとづく摩擦力分布の推定法

吉 川 恒 夫* 栗 栖 正 充*

Estimation of the Friction Distribution from Pushing an Object

Tsuneo YOSHIKAWA* Masamitsu KURISU*

Moving an object on a work surface by pushing it is one of the operations which are required in the robotic manipulation. The motion of the pushed object is closely related to the distribution of the frictional force between the object and the surface. When the pushing force vector applied to an object passes through the center of friction which is the centroid of the friction distribution, the motion of the object is a pure translation. In this paper, we describe a method for estimating the friction distribution of an object and the position of the center of friction by pushing the object several times using a manipulator. First, on the assumption that the object has several points in contact with the work surface, we suppose the position of the points. By this supposition, we derive a linear equation relating the pushing force and the friction distribution. Then, substituting the measurements obtained from pushing the object several times by the manipulator into this equation, we estimate the friction distribution. Simulation and experimental results show the effectiveness of the approach.

Key Words : Estimation, Friction Distribution, Center of Friction

1. は じ め に

人間に代わって様々な作業を円滑に行う汎用性の高いロボットの研究、開発が精力的に進められている。このようなロボットに要求される作業の一つに押し作業がある。これは平面上の物体を任意の姿勢で任意の位置に押し移動させようとするものである。マニピュレータによる押し作業が可能となれば、組立作業などにおいて作業台上の部品を把持すること無く動かすことができるため、これにより作業時間の短縮、エネルギーの節約、手先効果器の簡略化などが期待できる。また、移動ロボットに押し作業を行わせることができれば、移動ロボットにより汎用性を持たせることができる (Fig. 1)。例えば進路上の障害物を移動させれば、移動ロボットはより最短な経路を確保できる。工場内などでの運搬作業において、比較的軽量なものであればロボット本体よりも大きな物を扱うことができる。

しかし平面上に置かれた対象物を1本のアームで押す場合、摩擦などの不確実な要素が多く対象物を単に直進させることすら困難である。近年マニピュレータによる押し作業の研究が盛んに行われているが^{1), 2), 3)}、その多くは未知対象物を目標位置へ直進させることを目的としており、ロボットがオンラインで得るセンサデータから対象物に関する固有な情報を引き出し、それを対象物の移動計画に結び付けているものはまだない。Mason⁴⁾は、対象物を押す力が圧力分布から定まる摩擦中心と呼ばれる1点を通るとき、その対象物は姿勢変化を伴わない完全な直進を行うことを示している。しかし対象物と床面との摩擦係数を一様としており、これが一様でない場合は扱っていない。床面上の対象物の動きは対象物と床面との間に生じる摩擦力の分布と密接な関係があり、摩擦力の分布を知ることにより対象物の運動を予測できる可能性がでてくるので、摩擦力の分布、摩擦中心の位置を知ることが対象物の移動計画を立てる上で重要である。

本論文では、視覚センサからの情報とマニピュレータで未知対象物を数回押すことによって得られる情報とを

原稿受付 1991年9月27日

* 京都大学工学部

用いて対象物の摩擦力の分布および摩擦中心位置を推定する方法を提案する。また、シミュレーションおよび実験よりこの方法の有効性を検証する。

2. 対象物に働く力とモーメント

摩擦のある水平面上に置かれた対象物に外力が加わったとき、その対象物に働く力、モーメントの関係式を導く。以下対象物が置かれている面を支持面と呼ぶことにし、次の仮定を設ける。

- 仮定 1) 対象物は剛体である。
 仮定 2) 対象物と支持面とは n 個の点接触を行っている。これらの接触点を支持点と呼ぶ。
 仮定 3) 対象物が支持面に対して移動しても、対象物から見た支持点の位置は変化しない。
 仮定 4) 対象物と支持面との間の摩擦係数は支持点によって異なってもよいが時間不変である。
 仮定 5) 外力は支持面に対して水平に、かつ支持面に十分近い位置で対象物に加えられる。
 仮定 6) 対象物の速度は十分低速で、慣性力は摩擦力に対して無視できる。

Fig. 2 に示すように、支持面に基準座標系 $\Sigma_U(O_U - X_U Y_U Z_U)$ を $X_U Y_U$ 平面が支持面に一致するように設定する。また、対象物に対象物座標系 $\Sigma_O(O_O - X_O Y_O Z_O)$ を $X_O Y_O$ 平面が対象物の底面と一致するように固定し、 Σ_O から見た各要素を以下のように定義する。

p_i : i 番目の支持点の位置

v_i : p_i における対象物の支持面との相対速度

a_i : p_i に働く摩擦力の大きさ

f_i : p_i に働く摩擦力

m_i : f_i によるモーメント

F_f : 対象物に働く合摩擦力

M_f : 摩擦力による合モーメント

なお、モーメントはすべて Σ_O の原点まわりのモーメントである。

このとき、 i 番目の支持点に働く摩擦力 f_i およびモーメント m_i はそれぞれ

$$f_i = -\frac{v_i}{\|v_i\|} a_i \quad (1)$$

$$m_i = p_i \times \left\{ -\frac{v_i}{\|v_i\|} a_i \right\} \quad (2)$$

となる。ここで、 $\|\cdot\|$ はベクトルのユークリッドノルム、 $\times$ は外積を表す。したがって対象物に働く合摩擦力 F_f および摩擦力による合モーメント M_f は

$$F_f = \sum_{i=1}^n f_i = -\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{\|v_i\|} a_i \quad (3)$$

$$M_f = \sum_{i=1}^n m_i = -\sum_{i=1}^n \left\{ p_i \times \frac{v_i}{\|v_i\|} a_i \right\} \quad (4)$$

となる。

基準座標系からみて対象物に姿勢変化を伴う運動が生じているとき、その瞬間回転中心の位置を $p_r = [x_r, y_r, 0]^T$ とすると、各支持点 $p_i = [x_i, y_i, 0]^T$ の支持面との相対速度の方向を表す単位ベクトルは次式で与えられる。

$$\frac{v_i}{\|v_i\|} = k \times \frac{p_i - p_r}{\|p_i - p_r\|} \quad (5)$$

ここで k は対象物の回転方向を表す単位ベクトルで、 Σ_O の Σ_U にたいする回転角を θ とすると、 $k = [0, 0, \text{sgn}(\theta)]^T$ で与えられる。すなわち対象物の回転方向が上からみて反時計回りのとき $k = [0, 0, 1]^T$ 、時計回りのとき $k = [0, 0, -1]^T$ となる。

いま、対象物のある 1 点 $p_c = [x_c, y_c, 0]^T$ に力 $F_c = [F_{cx}, F_{cy}, 0]^T$ を加えているとすると、仮定 6) より

$$F_c = -F_f \quad (6)$$

$$M_c = -M_f = p_c \times F_c \quad (7)$$

なる関係が成り立つ。ここで $M_c = [0, 0, M_{cz}]^T$ は F_c によるモーメントである。式 (3)~(7) より

$$\text{sgn}(\theta) F_{cx} = -\sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{R_i} a_i \quad (8)$$

$$\text{sgn}(\theta) F_{cy} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{R_i} a_i \quad (9)$$

$$\text{sgn}(\theta) M_{cz} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i X_i + y_i Y_i}{R_i} a_i \quad (10)$$

$$X_i = x_i - x_r, \quad Y_i = y_i - y_r, \quad R_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad (11)$$

を得る。 a_i は対象物底面の支持点 (x_i, y_i) に働く摩擦力の大きさなので、 $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ は対象物底面の摩擦力の大きさの分布を表す。この $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ を摩擦力分布、 $f = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ を摩擦力ベクトルと呼ぶことにする。

3. 摩擦中心

対象物が姿勢を変えずに動くとき、各支持点の基準座標系に対する相対速度方向 $\frac{v_i}{\|v_i\|}$ は一定である。そこで

$$e_v = \frac{v_i}{\|v_i\|} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

Fig. 1 Mobile robot

Fig. 2 Reference frame and object frame

とおくと、式 (3), (4) は

$$\mathbf{F}_f = -\mathbf{e}_v \sum_{i=1}^n a_i \quad (13)$$

$$\mathbf{M}_f = -\left\{ \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i a_i \right\} \times \mathbf{e}_v \quad (14)$$

となる。ここで

$$\mathbf{p}_g = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \mathbf{p}_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (15)$$

なる $\mathbf{p}_g$ を定義すると、式 (14) は

$$\mathbf{M}_f = \mathbf{p}_g \times \mathbf{F}_f \quad (16)$$

と書ける。これは、対象物に働く合摩擦力 $\mathbf{F}_f$ は $\mathbf{p}_g$ に集中的に働いているとみなせることを意味する。この $\mathbf{p}_g$ を摩擦中心と呼ぶ。式 (6), (13) より対象物を押す力 $\mathbf{F}_c$ は

$$\mathbf{F}_c = \mathbf{e}_v \sum_{i=1}^n a_i \quad (17)$$

となるので、 $\mathbf{F}_c$ の方向は対象物の移動方向と一致し、その作用線は $\mathbf{p}_g$ を通っていることになる。言いかえれば、押す力 $\mathbf{F}_c$ が $\mathbf{p}_g$ を通れば、姿勢を変えずに対象物を押すことができる。式 (15) から分かるように、摩擦中心は摩擦分布の重心に位置しており、仮定 3), 4), 5) を考慮するとその位置は対象物に固有となる。特に摩擦係数が一様の場合には、 $a_i = \mu n_i$ より

$$\mathbf{p}_g = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \mathbf{p}_i}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad (18)$$

となり、Mason⁴⁾ の定義した摩擦中心と一致する。ただし、 n_i は i 番目の支持点にかかる垂直抗力、 μ は摩擦係数である。

4. 摩擦力分布、摩擦中心位置の推定法

4.1 問題の定式化とその解

ここでは、未知対象物をマニピュレータで数回押すことによって対象物の摩擦力分布および摩擦中心位置を推定する方法について述べる。

摩擦力分布を求めるには支持点の位置を知る必要があるが、床面上に置かれている対象物の支持点の位置を知することは困難である。そこで、視覚センサから得られる情報を用いて仮想的に支持点の位置を決定する。なお仮想支持点の設定の仕方については後述する。支持点の位置を決定することによって、対象物に加える力およびモーメントと摩擦力分布との間に成立する線形な関係式が得られる。以下これを示す。

前提として、押し操作による対象物の移動量は微小で、その間に瞬間回転中心の位置は変わらないとし、対象物

座標系 Σ_0 から見たその位置 $\mathbf{p}_{rj}$ は視覚センサまたは何らかのセンサで測定できるものとする。また、1回の押し操作によって測定できる値は、 Σ_0 から見た対象物に加えた力 $\mathbf{F}_{cj}$ 、対象物移動前の対象物とマニピュレータとの接点の位置 $\mathbf{p}_{cj}$ とする。ここで、各値の右下の添字 j は j 回目の押し操作で得られた値を意味する。このときモーメント $\mathbf{M}_{czj}$ は

$$\mathbf{M}_{czj} = x_{cj} \mathbf{F}_{cyj} - y_{cj} \mathbf{F}_{cxj} \quad (19)$$

となる。いま押し操作を m 回行ったとすると、式 (8) ~ (10) より

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} \mathbf{f} \quad (20)$$

を得る。ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{F} = & [\text{sgn}(\theta_1) \mathbf{F}_{cx1}, \text{sgn}(\theta_1) \mathbf{F}_{cy1}, \text{sgn}(\theta_1) \mathbf{M}_{cz1}, \\ & \dots, \text{sgn}(\theta_m) \mathbf{F}_{cxm}, \text{sgn}(\theta_m) \mathbf{F}_{cym}, \\ & \text{sgn}(\theta_m) \mathbf{M}_{czm}]^T \end{aligned} \quad (21)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -\frac{Y_{11}}{R_{11}} & \dots & -\frac{Y_{n1}}{R_{n1}} \\ \frac{X_{11}}{R_{11}} & \dots & \frac{X_{n1}}{R_{n1}} \\ \frac{x_1 X_{11} + y_1 Y_{11}}{R_{11}} & \dots & \frac{x_n X_{n1} + y_n Y_{n1}}{R_{n1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{Y_{1m}}{R_{1m}} & \dots & -\frac{Y_{nm}}{R_{nm}} \\ \frac{X_{1m}}{R_{1m}} & \dots & \frac{X_{nm}}{R_{nm}} \\ \frac{x_1 X_{1m} + y_1 Y_{1m}}{R_{1m}} & \dots & \frac{x_n X_{nm} + y_n Y_{nm}}{R_{nm}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

であり、 $\mathbf{f}$ は 2 章で定義した摩擦力ベクトルである。

式 (20) より $\mathbf{f}$ の推定値 $\hat{\mathbf{f}}$ は

$$\hat{\mathbf{f}} = \mathbf{G}^+ \mathbf{F} \quad (23)$$

で与えられる。ここで $\mathbf{G}^+$ は $\mathbf{G}$ の疑似逆行列⁵⁾ である。特に $\mathbf{G}$ が正則行列となる場合は、 $\mathbf{G}^+$ は逆行列 $\mathbf{G}^{-1}$ となる。このとき摩擦中心位置の推定値 $\hat{\mathbf{p}}_g$ は式 (15) より

$$\hat{\mathbf{p}}_g = \frac{\mathbf{X}^T \hat{\mathbf{f}}}{\mathbf{e}_n^T \hat{\mathbf{f}}} = \frac{\mathbf{X}^T \mathbf{G}^+ \mathbf{F}}{\mathbf{e}_n^T \mathbf{G}^+ \mathbf{F}} \quad (24)$$

で与えられる。ただし、

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (25)$$

$$\mathbf{e}_n = [1, 1, \dots, 1]^T (\in \mathbb{R}^n) \quad (26)$$

である。

4.2 仮想支持点の設定

対象物と床面との実際の接触状態、すなわち支持点の位置を視覚センサで知ることは難しい。そこで本論文では仮想支持点を対象物底面内に均等に設定することにする。対象物を真上から見ることによって底面の形状を把

握できるのであれば、底面を格子状に分割し、各小領域の図心に仮想支持点を設定する。しかし、対象物を真上から見えない場合や移動ロボットの視覚センサのように取り付けの高さが限られている場合には、一般に底面の形状を正確に把握することはむずかしい。このような場合には、視覚センサから得る対象物に関する情報から底面の形状を仮定し、その仮定した形状に対して仮想支持点を設定することにする。例えば、扱う対象物の底面の形状が矩形であることのみが予め情報として与えられている場合には次のようにする。ただし、対象物の側面は支持面に対して垂直で、少なくとも1つの側面の最下部はすべて視覚センサで確認できるとする。

まず視覚センサの視野内の対象物の側面の数によって2つのケースに分ける。

ケース 1: 視野内の対象物の側面が1面の場合 (Fig. 3 (a)).

この場合は底面の形状を見えている面下端 (長さ l_x) を一辺とする正方形と仮定する。また対象物座標系 Σ_0 を、見ている面が X_0 軸を含み X_0Y_0 平面が底面と一致するように設定する (Fig. 3 (b)).

ケース 2: 視野内の対象物の側面が2面の場合 (Fig. 4 (a)).

この場合は対象物底面の形状が把握できる。 Σ_0 はケース 1 と同様に設定する。ただし2面のうち近い方の面が X_0 軸を含むようにする (Fig. 4 (b)).

次に、仮定した底面を格子状に分割し、各小四辺形の図心に支持点を設定する。Fig. 3 (b), Fig. 4 (b) は支持点の数を9個とした例である。

今回は対象物底面の形状が矩形である場合を考えているが、任意形状の対象物に対しても、視覚センサで見える部分を多角形で近似し、見えない部分は正方形として、二つの領域をつなげた形状を底面の形状と仮定する方法などが考えられる。

4.3 押し操作のアルゴリズム

摩擦力分布の推定に必要な情報を得るために対象物に対して押し操作を行うわけであるが、良好な推定値を得るためには適切なアルゴリズムが必要である。例えば前節で述べた矩形底面の例に対するアルゴリズムとして次のものが考えられる。

アルゴリズム

押し操作はすべて、押す力の方向が面の法線と一致するように X_0 軸を含む面に対して行う。この面を以下対象面と呼ぶ。

<ステップ 1>

対象面下端中央を押す。このとき対象物には直進、回転のいずれかが生じる。

Fig. 3 Object and virtual supporting points (case 1)

Fig. 4 Object and virtual supporting points (case 2)

<ステップ 2>

(1) 直進が生じた場合は、1回目に押した位置より左右 $1/4 l_x$ だけ離れた位置をそれぞれ押す。この2回の押し操作より得た測定値を用い、4.1 節で述べた計算法で摩擦力分布、摩擦中心位置を求め、その値を推定値とする。

(2) 右 (左) 回転が生じた場合は対象面の右 (左) 端から $1/10 l_x$ 離れた位置を押す、それによって得た測定値と、<ステップ 1>で得た測定値とから摩擦力分布、摩擦中心位置を求める。

<ステップ 3>

押す力のベクトルが求めた摩擦中心を通るように対象面を押す。

<ステップ 4>

(1) <ステップ 3>で対象物に回転が生じた場合は、そのときに得た測定値と、それまでの押し操作で得た測定値とから摩擦力分布、摩擦中心位置を求め<ステップ 3>へもどる。

(2) 対象物に回転が生じなかった場合は、そのときの摩擦力分布、摩擦中心位置の値を測定値とする。

ただし、ここでいう回転が生じないとは次の条件を満たした場合である。

$$\text{条件 1) } \frac{l_x}{\|p_c - p_r\|} < 0.2$$

以上のアルゴリズムに従い順次押し操作を行うことに

より摩擦力分布および摩擦中心位置を推定する。

5. シミュレーション

5.1 仮想支持点の個数

同じ形状の対象物に対して設定する仮想支持点の数 n を 4, 9, 16, 25 個と変えてシミュレーションを行い、摩擦中心位置の推定値の違いを比較した。対象物底面の形状を幅 $l_x=0.6\text{m}$ 、奥行き $l_y=1\text{m}$ の長方形とし、摩擦力分布を Fig. 5 のように与えた。仮想支持点の設定はケース 1 の場合とした。すなわち底面の形状を一辺が l_x の正方形と仮定して仮想支持点を設定している。シミュレーションの終了は、条件 1) を満たすか、押し操作の回数が 10 回となったときとした。また、評価は次式で定義したパーセント位置誤差 e_x , e_y を用いる。

$$e_x = \frac{|\hat{x}_g - x_g|}{l_x} \times 100 \quad (27)$$

$$e_y = \frac{|\hat{y}_g - y_g|}{l_y} \times 100 \quad (28)$$

ここで、 $\hat{x}_g$, $\hat{y}_g$ は摩擦中心位置の推定値、 x_g , y_g は摩擦中心位置の真値である。

シミュレーションの結果を Fig. 6 に示す。仮想支持点の数 n が 4 個の場合は誤差 e_x が、9 個の場合では誤差 e_y がある程度以上小さくならない。これに対して仮想支持点の数が 16, 25 個の場合は、どちらも 3 回目の押し操作で誤差 e_x , e_y とも小さくなっており、非常に良い推定結果を得ている。以上より、設定する仮想支持点の個数が少なすぎると良い推定値が得られないが、設

定する個数がある程度以上だと推定値には違いがでなくなるようである。しかし一方仮想支持点の個数が多いと計算時間が増えるので、設定には適当な個数を選ぶ必要がある。

5.2 対象物の形状

次に形状の異なる対象物種類に対するシミュレーションを行った。対象物底面の寸法を Table 1 に、各対象物に与えた摩擦力分布を Fig. 7 に示す。仮想支持点の数は 25 個とした。シミュレーションの終了条件は 5.1 節と同じである。

推定に要した押し操作の回数 m および位置誤差 e_x , e_y を Table 2 に示す。また、各対象物の推定した摩擦力分布を Fig. 8~Fig. 10 にそれぞれ示す。ただし、推定した摩擦力分布は与えた摩擦力分布と比較するために、底面を分割した小四辺形の面積で除してある。シミュレーションはほぼすべて 3 回目の押し操作で条件 1) を満たして終了し、摩擦中心位置の推定値も真値に近い。推定した摩擦力分布は対象物 A、対象物 C に関してはケ

Fig. 5 Given friction distribution

(a) $n = 4$

(c) $n = 16$

(b) $n = 9$

(d) $n = 25$

Fig. 6 Simulation results

Table 1 Objects

	l_x [m] $\times$ l_y [m]
Object A	1 $\times$ 1
Object B	0.6 $\times$ 1
Object C	1 $\times$ 0.6

Table 2 Simulation results

	Case 1		Case 2	
	m [times]	e_x, e_y [%]	m [times]	e_x, e_y [%]
Object A	3	0.23, 0.02	3	0.23, 0.02
Object B	4	0.00, 0.01	3	0.05, 0.45
Object C	3	0.27, 0.45	3	0.13, 0.98

Fig. 7 Given friction distribution

Fig. 8 Estimated friction distributions obtained from simulations (object A)

Fig. 9 Estimated friction distributions obtained from simulations (object B)

Fig. 10 Estimated friction distributions obtained from simulations (object C)

ース 1, ケース 2 とも与えた摩擦力分布に似た形状になっている。また, 対象物 B のケース 2 の場合も同様である。しかし対象物 B のケース 1 の場合, 推定した摩擦力分布は与えた摩擦力分布とは全く違った形状となっている。これは底面を正方形と仮定したために, 仮定した底面が真の底面より小さくなり, 実際には摩擦力が生じているにもかかわらず仮想支持点が設定されない領域ができたためである。しかし, このような場合でもあらかじめ仮定する底面形状を長方形とすることで対処可能であると考えられる。

以上より, 対象物底面の形状が矩形である場合, 本論文の摩擦力分布, 摩擦中心位置の推定法が有効であることがわかった。

6. 実験

6.1 実験装置

本論文の推定法の有効性を検証するために実験を行った。実験で用いた腕部および対象物の外観を Fig. 11 に示す。腕は水平 1 自由度の直動関節を持ち, 関節の根元に取り付けたレバーを手で動かすことにより動作範囲

1.5 $\times$ 10⁻² m の伸縮運動を行わせることができる。手先には力覚センサを取り付けており, これによって対象物に加える力を測定する。実験で使用した対象物は質量 0.5 kg のアクリル樹脂製の直方体で, 1.5 kg の分銅をはめて摩擦中心位置を変えてある (Fig. 12)。実験は方眼紙を張り付けた水平な平板の上で行った。瞬間回転中心の位置は以下の手順で求めた (Fig. 13)。まず, 対象物底面の 4 つの角のうちの 2 つを選び, その 2 点の移動前後の位置 (点 P, Q, P', Q') を方眼紙の目盛りから測定する。つぎに線分 PP', QQ' の垂直二等分線をそれぞれ求める。瞬間回転中心はこの 2 本の直線の交点 R で与えられる。本実験では瞬間回転中心の位置を手作業で求めているが, 底面の 2 つの角の動きを視覚センサで捕らえることによりこの作業をロボットに行わせることは可能である。

6.2 実験結果

押し操作は対象物の面 A に対して行い, 押し操作量は 2 $\times$ 10⁻³ m とした (Fig. 13 参照)。対象物の底面形状の仮定はケース 2 の場合, すなわち底面形状が把握できる場合とし, 仮想支持点は 25 個とした。以上の設定のも

Fig. 11 Overview of manipulator and object used for experiment

Fig. 13 Instantaneous rotation center

とで、4.3 節で述べたアルゴリズムに従い実験を行ったところ、3 回目の押し操作で対象物に回転が生じなくなった。すなわち 2 回目の押し操作後に求めた値が推定値となる。このとき対象物の面 B を押す方向が摩擦中心を通るように押したところ、対象物はほとんど回転しなかった。これは推定値が真値に近いことを意味している。推定摩擦力分布を Fig. 14 に示す。図より分銅をはめている部分の摩擦力が最も大きくなっていることが分かる。また、周辺部分の摩擦力が大きいのは、実験で使用した対象物底面が完全な平面ではなく、実際には周辺部分に荷重が大きかったためであり、推定した摩擦力分布は実際の摩擦力分布に近いものと考えられる。

7. おわりに

対象物の摩擦力分布および摩擦中心位置を推定する方法を提案した。またシミュレーションにより底面の形状が矩形である対象物に対してこの推定法が有効であることを示した。この推定法を用いれば、移動ロボットの視覚センサのように対象物底面の形状が正確に把握できない場合でも、予め形状に関してある程度の情報が与えられていれば、対象物の摩擦中心位置を数回の押し操作により実用可能な程度の精度で推定できると思われる。今後の課題としては、押し操作の回数と得られる推定結果の精度の関係の解明、推定結果に基づく対象物の押し作業計画の立案などが考えられる。

Fig. 12 Object

[10² N/m²]

Fig. 14 Estimated friction distribution obtained from experiment

参考文献

- 1) 沢田, 稲葉, 井上. "ビジュアルフィードバックを用いたマニピュレータによる押し操作の研究". 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.599-600, 1987.
- 2) 長田, 山浦. "力覚センサを用いたマニピュレータによる押し操作の研究". 第29回 SICE 学術講演会予稿集, pp.483-484, 1990.
- 3) M. A. Peshkin and A. C. Sanderson. "The Motion of a Pushed, Sliding Workpiece". IEEE Journal of Robotics and Automation, 4(6): pp.569-598, 1988.
- 4) M. T. Mason. "Mechanics and Planning of Manipulator Pushing Operations". The International Journal of Robotics Research, 5(3): pp.53-71, 1986.
- 5) 吉川. "ロボット制御基礎論". コロナ社, 1988.

吉川恒夫

(Tsuneo YOSHIKAWA)

1941 年 12 月 19 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)

栗栖正充

(Masamitsu KURISU)

1964 年 6 月 30 生. 1989 年, 京都大学工学部資源工学科卒業. 1991 年, 京都大学大学院工学研究科応用システム科学専攻修士課程修了. 同年, 同研究科機械工学専攻博士後期課程に進学し現在に至る. システム制御情報学会学生会員. (日本ロボット学会学生会員)