〔原著論文〕

多数支持点における指先力の一決定法

——平面内の安定把握——

岡田 徳次* 宮越 朋之* 高野 英資*

A Method of Determining Support Forces at Multiple Points for Stable Grasping

——Prehension of a Plain Object——

Tokuji OKADA Tomoyuki MIYAKOSHI Eisuke TAKANO

Stable graspings have been reported so far, however the prehension is treated in such objects that have simplicity in shapes like the building blocks of circular or triangular shaped. Therefore, it is not clear about how an complex-shaped object should be grasped. This made it difficult to determine support forces of the fingers uniquely, in general.

We define a weight center angle with which the force directing the weight center crosses the normal line on the object, and we think the angle is the important factor to realize the stable grasping in the actual environment. Then, we give a clear definition of the stable grasping of a plain object, by making the distribution of a grasp force or a press force smooth around the object. We propose a calculation method to determine the rectangular components of the support force uniquely, at the designated points on the object. The result of the calculation shows the method is useful to solve the support force in controlling multijointed fingers.

Key Words: Grasping, Prehension, Multijointed Fingers, Stable Grasping, Support Force

1. はじめに

動作自由度の多い指は、物体を保持したままそれを自由に操り、道具や工具として使う能力を有する。この能力によって動物は手で各種の動作や作業をし、日常生活を行っている。しかし、この能力を人工の指で実現しようとすると簡単ではない。その理由は、任意の方向と大きさの力をだせる多数指の制御に関する方策が明かでないこと、人工の指には動物の触感に匹敵する優れたセンサがなく多くの情報を収集できないこと、収集できても必要な情報の処理とその有効の利用法がわからないこと等にある。このような問題点を明かにするために、指の制御、指に必要なセンサ、センサの情報処理などの研究がなされてきた。しかし、いずれも動物の能力に比べる

と初歩的段階にあると言わざるを得ない。

屈伸運動と側屈運動を可能にする剛性あるいは弾性の高いコンパクトな指が作られ、計算機制御によって物体を操作できるようにはなったが、操作の安定性や効率などは殆ど考慮されていない。また、多点支持の場合、支持力の大きさや方向、そして支持位置が計算機によって自動的に決定される場合は少なく、ほとんどが人間によって教示される。複雑な作業にも対応できる器用な指になると人間の教示結果が真に適切なものか疑問になる。動きの冗長性や多様性が高度に存在し、また拘束の条件の緩い中では種々の動作が考えられるからである。このことは、動作の安定性や効率、時間、エネルギー効率など様々な要素を考慮して知的動作を選択できる余地が残されていることでもある。従って、形状、性状の多様な物体を任意の姿勢で操作する場合にはその安定した握みを決定することがとくに重要となる。

原稿受付 1989 年 10 月 31 日

* 新潟大学工学部

これまで、人工の指による物体操作や安定把握に関した報告^{1)~5)}があるが、指本数が少ないことに因って支持点数が少なく、また、作業の対象となる物体の形状が積木モデルのような特定な形に限定されていた。このため、物体の形が複雑になると、それを安定に掴むことの意味が必ずしも明確でなく指の支持力を一意的に定めることが困難であった。安定把握は基本的に、形、大きさ、重量、重心位置、などの物体の性質と支持点数、支持位置等に係わる指の制御、および物体の姿勢（重力場の方向）の3つを総合して定まるものと考えられるが、評価の対象を何にするかによっても異なる掴みが実現する。このため、明確な定義は困難である。対象物の形状や指構造に注目して把握系のポテンシャル関数を用いて安定度を評価するのも一方法である¹⁾。我々は、物体の重心が物体表面法線方向から偏向する角（重心角と呼ぶ）を支持力決定の重要なファクタと見なし、安定な掴みとは如何なるものかについてより一般的に考察した。

本論文は、板状の物体に関し、支持力を握力と操り力、あるいは圧力と接線力の合力として表すこととし、支持力成分の分布如何によって安定把握を定義する。また、予め指定された点で定指把握のために出力すべき指先力を一意的に決定する方法を提案する。さらに、数値計算の結果から本法が多面で物体を支持するときの指先力の決定に有効となることを示す。

2. 指先支持力の成分

人工の指は、一般に剛性が高く物体と点接触することが多いが、動物のように弾力性を有する指は、点を面に広げて接触する。この様な場合でも接触部に作用する力の中心を支持点と定めることにより、そこに作用する合成力を支持力として定めることができる。この支持力は物体の内面（一般には重心）に向かう場合が多く、これによって多くの手作業がなされる。ねじ回しにおいては、ある軸上に保持された物体表面の接線方向に力を加えることで作業が達成される。この作業に必要な支持力の大半は、指先と物体が滑りにくい表面である場合、物体の

Fig. 1 Components of a support force

内面方向と直角な力の成分で表される。レバースイッチのオン・オフ作業では特定方向に倒す力が要求される。このように指先の支持力には掴みに加えて作業内容に応じた方向と大きさの力が必要になる。以下、このような力を解析するにあたり、用語を次のように定義して違いを明確にする (Fig. 1 参照)。

その第1は、握力 (Grasp force) である。これは、支持点から物体の重心を見る方向の力であるとする。物体が形状に関して対称性を有し、かつ均一媒質であるとき、重心は物体の中心と一致する。塗装したての物体を内側から外側に押し広げるように掴む場合、負の握力が重要となるが、この場合の負握力を拡力 (Spread force) と呼ぶことにする。第2は操り力 (Manuever force) である。文献⁵⁾では内力の状態によって7つの把握モードを定め、操り力は支持部の静止摩擦係数などを考慮して握力と逆方向を向かず、かつ、握力要素を含まない指先力と定義されているが、操り力は本来作業を行うために必要な力で掴みそのものへの係わりは大きくないと考えられる。また、できる限り簡明に表現されることが望ましいと考えられるので、本稿ではこれを握力に直交な力と定義する。握力と操り力は、支持力の分解成分であり、物体の媒質に大きく支配されて定まる傾向が強い。

これに対し、物体の幾何学的形状に支配される力として圧力 (Press force) と接線力 (Tangential force) を第3、第4の力として定める。圧力は、物体表面の法線方向に作用する力で支持点から物体の内側方向に向かうものを正とする。接線力は法線力に直交な力を指す。支持力 (Support force) はこれら2つの力によっても構成される。なお、負の握力に対して拡力を定めると同様、物体を広げ持つ場合に重要となる負の圧力を斥力 (Depress force) と呼び、掴み方の違いによって用語を区別することにする。また、点 P_i での握力、圧力、操り力、接線力を以下ではそれぞれ f_{gi} , f_{pi} , f_{mi} , f_{ti} で表すことにする。

3. 安定把握の定義

制御能力を高度に備えた指を使用して可能になる安定な掴みとは如何なるものかについて、より一般的に考察する。すなわち、指は大きな摩擦係数を有し、数に制限なく任意の位置で任意の方向と大きさの力を出力できるものとする。なお、本稿では、考察の対象を板状物体に絞り、重心や支持力は同一平面内にあり、重力もこの面内に作用するものとする。以下、安定な掴みについて詳述する。

3.1 圧力分布が支持位置によらず一定となる掴み

面状物体の掴みとして定性的であるが、Fig. 2 を考

Fig. 2 Illustration of the envelopes formed by the circles

る。図中、 U は物体、 O は重心、 $P_1, P_2, \dots, P_i, P_{i+1}$ は支持点を表す。指には、手作業に必要な力 F とモーメント M が指定され、安定把握時には少なくともこれらをすべて満足させる必要がある。しかし、点 P_i での支持力に関して明言できることは、物体を押し付ける方向の力を必要とすること位で握力や操り力については簡単には定まらない。

そこで、物体が脆い媒質であることを仮定する。この場合、各支持点での圧力 f_{pi} が適当な大きさに統一されるのが望ましいことは想像に難くない。特に、支持点数が増えて物体 U の周上の至る所に圧力が作用することを考えると、このことがより明確になる。Fig. 2中の e_i と e_0 は、各支持点において圧力の大きさを半径として描いた円の内側包絡線と外側包絡線をそれぞれ表す。圧力の大きさ、つまり、 e_i と e_0 間の距離は握みの柔らかさ、硬さを表現するものと見なすことができ、距離が大きい程硬い握みとなる。各支持点における圧力が等しいとき e_i, e_0 は U の形に相似となり、物体は一樣な圧力で保持され、圧力歪による破壊を生じることなく安定に把握されることになる。このときの各支持力を計算する方法は4.1節で述べる。この握みは物体が脆弱である場合に限らず弾性体である場合にも適する。力を受けて変わる物体の形の乱れを少なくする効果があるからである。

3.2 圧力分布が重心角の余弦によって重み付けされる握み

物体が脆弱、あるいは弾性体である場合、3.1節の握みによって安定な握みを実現できるが、剛性の高い、複雑な形状である場合どうであろうか？ 例えば、固いひょうたん形の板に関して一樣な圧力を半径とする円の内側包絡線 e_i と外側包絡線 e_0 はFig. 3のように示される。物体 U は、あたかも一定圧力タンク内に封じ込められたような状況下に置かれ、形の乱れもなく保持されることは明かである。しかし、斜線を施した箇所における力圧が物体の保持に必ずしも必要であるとは言えない。

Fig. 3 Envelopes of an eccentric object

Fig. 4 Definition of the weight center angle

その理由は、この箇所の圧力が物体の重心（例えば図中の O ）を見る方向にないからである。剛性の物体は、これらの圧力が与えられなくても形の乱れを起こさず、応力集中による破壊を起こすこともない。このため、斜線部の圧力を取除くことができる。一部でも圧力が不要になることはエネルギー効率からすれば好ましいことであるので、以下に圧力を不要にできる支持位置についてさらに詳しく考察することにする。

円形の均一媒質物体においては圧力方向は必ず重心を通るが、一般の物体ではその中心と重心は一致するとは限らず、圧力の全てが物体の握みに利用されるとはいえない (Fig. 3 参照)。すなわち $f_{pi} \cos \delta_{\theta_i}$ が握力（重心方向成分）として作用し (Fig. 4 参照)、この値は、 $\pi/2 < \delta_{\theta_i} < 3\pi/2$ のとき負になる。ただし圧力方向と重心方向のなす角度（圧力方向を基準にして反時計方向を正と定める）を重心角 δ_{θ_i} (Weight Center Angle) と定義する。したがって、圧力も握力もともに重心の保持には直接役立たず、このような力を出力するのは非常に効率が悪いと言わざるを得ない。そこで、重心角の余弦で重みづけした力を圧力として使う握みを安定な握みとして取り上げる。このことは $f_{pi} = A \cos \delta_{\theta_i}$ (A は定数) とすることである。もちろん、 $A \cos^2 \delta_{\theta_i}$ とすることでもでき、この場合には重み付けが強調される。ただし、斥力（負の圧力）は無意味であるので前記の $\pi/2 < |\delta_{\theta_i}| < 3\pi/2$ のとき $f_{pi} = 0$ とする。このとき Fig. 3 の圧力円包

Fig. 5 Simulated envelopes when the press force is weighted by $\cos \delta\theta_i$

絡線 e_i と e_o は Fig. 5 のように表される。付録1は他の形状における包絡線 e_i , e_o を示す。ソフトな掴みやハードな掴みは3.1節と同様包絡線 e_i , e_o 間の面積の大きさ、すなわち、 A の値を変えることによって指定することが可能である。

3.3 握力分布が支持位置によらず一定となる掴み

前節の掴みにおける圧力は、 $f_{pi} = A \cos \delta\theta_i$ となる。これは、 $f_{\theta i} = A$ としたときの圧力方向成分 $A \cos \delta\theta_i$ と同一になり前節の掴みが握力を一定にする掴みと相違ないように思えるが、実は同一ではない。これは後者において $f_{\theta i}$ を A しても、 f_{pi} は掴みの条件として与えられる力 F やモーメント M を考慮して計算されるので、 $A \cos \delta\theta_i$ は f_{pi} の一要素にすぎず、これらは必ずしも一致するとは言えないことに因る。ただし、特殊な場合として計算された支持力が重心を向くような支持点、つまり支持力と握力が等しくなり操り力が零となる支持点があるならば、そこでは $A \cos \delta\theta_i$ がそのまま f_{pi} になる。したがって、握力分布が支持位置によらず一定となる掴みもこれまでとは違った安定な掴みと考えることができる。この掴みによる握力の圧力方向成分を半径とした円によって作られる包絡線は Fig. 3 のように均一にならないのは明らかであるが、Fig. 5 中のそれと比較しても若干変化の大きい曲線となることが予想される。このことは、圧力の変化が大きくなる可能性を示唆しており、脆弱な物体の掴みに不適となることが判る。この性質から、対象物の性質を含めた掴みの安定性を論じるときには、この掴みは3.1節、3.2節の掴みに比べて劣ると言える。

3.4 握力分布が重心角の余弦によって重み付けされる掴み

3.2節の掴みにおいて、圧力を握力に置き換えることによって実現する掴みである。この場合の掴み強さは、握力を半径とする円の包絡線によって囲まれる面積を目安として定められる。

3.5 掴みの強さ

掴みの強さは掴みによって物体を拘束する度合であると定性的に表現できる。本稿ではこれを、定量的に定めるを試みる。ハードな掴みでは、ソフトな掴みに比較して拘束力が大になることは明かであり、物体をよりしっかりと掴むためには3.1~3.4節で述べた2つの包絡線によって囲まれる面積を大にすればよいことになる。ただし、包絡線は握力を制御する場合、握力を半径とする円をもとにして作られるものとする。

重心から物体表面までの長さを r とし、物体形状を極座標上で $r(\theta)$ と表すものとすれば、包絡線間の面積は物体の形や大きさの影響を受けて一般に次のように表される。

$$S = 2A \int_0^{2\pi} r \cos^2 \delta\theta \, d\theta \quad (1)$$

ただし、 A は圧力あるいは握力を決める定数、 $\delta\theta$ は重心角である。

この式から計算される値は、重量とは無関係に掴みの強さを評価する目安になるが、物体の大きさと共に増大するので最終的な評価式とするには不十分である。圧力分布が一定であれば物体の形が大きくなっても掴みの強さは変わらないのが自然であると考えられるので、以下形の大小や複雑さの影響を受けない値を得る式として S を物体 U の周長 q で正規化し、その1/2の大きさによって掴みの強さ IG (Intensity of Grasping) を評価する。

$$IG = S/(2q) \quad (2)$$

ただし、 $r(\theta)$ が、 θ の一価関数 (One-valued function) で表されるとき、 q は次のように表される。

$$q = \int_0^{2\pi} \sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2} \, d\theta \quad (3)$$

$r(\theta) = R$ (一定) のとき $q = 2\pi R$ となることは明かである。

掴み強さの概念は以上の通りであるが、実際の掴みにおいては支持点数が有限である。また、掴む物体の全体形状が掴む時点で明かにされるとは限らず、包絡線や周長を求めることは容易でない。このため、各支持点の圧力、あるいは握力の圧力方向成分の総和 ($\sum B_i$ とする) を総支持点数 n で除した平均的な値が掴みの強さの評価において実用的な意味を持つことになる。

$$IG = \sum B_i / n \quad (4)$$

4. 支持力の決定法

物体の形状を表す極座標系 $r(\theta)$ と支持位置を表す直角座標系 (X, Y) の原点を物体の重心位置として重ね合わせると、支持点 P_i の座標 (X_i, Y_i) は $\{r(\theta) \cos \theta, r(\theta) \sin \theta\}$ と表される。また、支持力 F_i を X, Y 軸方向力 f_{xi}, f_{yi} の合成成分として表せる。すなわち、座

標軸の単位ベクトルを $\hat{e}_i, \hat{e}_j$ として

$$\mathbf{F}_i = f_{xi} \cdot \hat{e}_i + f_{yi} \cdot \hat{e}_j \quad (5)$$

したがって、 f_{xi}, f_{yi} を定めることにより、支持力 $\mathbf{F}_i$ が求まる。さらに、次の関係が成立するので、

$$f_{qi} = -f_{xi} \cos \theta_i - f_{yi} \sin \theta_i \quad (6)$$

$$f_{pi} = -f_{xi} \cos(\theta_i - \delta \theta_i) - f_{yi} \sin(\theta_i - \delta \theta_i) \quad (7)$$

f_{xi}, f_{yi} を使って、 f_{qi}, f_{pi} を求めることができる。ここで、支持力は、Fig. 1 に示すように握力 f_{qi} と操り力 f_{mi} の合成力、もしくは圧力 f_{pi} と接線力 f_{ti} の合成力として表されるので、 f_{qi}, f_{pi} が計算できれば残る力の成分 f_{mi}, f_{ti} も一意的に定めることができる。

以上のように、 f_{xi} と f_{yi} を知れば、支持力とその成分 $f_{qi}, f_{mi}, f_{pi}, f_{ti}$ の全てを決定できるので、 f_{xi}, f_{yi} を未知数とする方程式を作り、これを解くことによって支持力を直接、あるいは間接的に決定する2つの方法について述べる。1つは一般の握みとして誤差関数を用いる方法であり、他の一つは特別な握みとして、パラメータを用いる方法である。

4.1 誤差関数を用いる方法

作業時には特定の力 F とトルク M (反時計方向を正) が指に指定される。これらは、作業を実現するための基本的条件でこれらを満たすように f_{xi}, f_{yi} を定める。まず、力 F の X, Y 軸成分を F_x, F_y として次に示す力のバランスに関する誤差関数 ϵ_x, ϵ_y を考える。

$$\epsilon_x = (F_x - \sum f_{xi})^2 \quad (8)$$

$$\epsilon_y = (F_y - \sum f_{yi})^2 \quad (9)$$

また、モーメント M に関する誤差関数 ϵ_m を考える。

$$\epsilon_m = \{M - \sum (x_i \cdot f_{yi} - y_i \cdot f_{xi})\}^2 \quad (10)$$

式中の x_i, y_i は、角度 θ を用いてそれぞれ $r(\theta) \cos \theta_i, r(\theta) \sin \theta_i$ とも表される。(8)~(10)式は、 f_{xi}, f_{yi} を解くための必要条件であるが、十分条件ではない。そこで、3章の安定な握みの条件を採用し、誤差関数 ϵ_s を定める。すなわち、3.1節、3.2節の圧力分布を制御する握みとして

$$\epsilon_s = \sum (B_i - f_{pi})^2 \quad (11)$$

また、3.3節、3.4節の握力分布を制御する握みとして

$$\epsilon_s = \sum (B_i - f_{qi} \cos \delta \theta_i)^2 \quad (12)$$

を定める。(12)式は握力分布を制御する場合の握みの強さが、握力の圧力方向成分による包絡線面積で評価されることに基づく。ただし、(11), (12)式中、 B_i は制御方法によって以下のような値を取る。

圧力を支持位置によらず一定とする場合

$$B_i = A \quad (13a)$$

圧力を重み付けして制御する場合、及び握力を支持位置によらず一定とする場合

$$B_i = A' \cos \delta \theta_i \quad (13b)$$

握力を重み付けして制御する場合

$$B_i = A'' \cos^2 \delta \theta_i \quad (13c)$$

(13b) 式は二つの制御方法に重複する形となっているが、これは同じ握みを意味するのではなく、求まる圧力を考えれば一般には同一にならないので、違う握みといえる。各式中の A, A', A'' は、 F や M と同様に予め与えられる握みの強さ IG によって決まる定数で f_{pi}, f_{qi} は(7), (6)式で表される。

ここで、力、モーメント、および安定握みの条件に関する誤差関数の総和 E を考える。

$$E = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_m + \epsilon_s \quad (14)$$

この式は、未知数 f_{xi}, f_{yi} で表され、 f_{xi}, f_{yi} の如何によらず、零になるのが理想であるので、次式を得る。

$$\partial E / \partial f_{xi} = 0 \quad (15)$$

$$\partial E / \partial f_{yi} = 0 \quad (16)$$

支持点数が n のとき(15), (16)式から合計 $2n$ 個の式が得られ、これらを連立させて未知数 $f_{xi}, f_{yi} (i=1 \sim n)$ が計算される。その結果、支持力とその成分が定まる。

4.2 パラメータを用いる方法

握み方は力の与え方によって異なる。他と比べて大きな支持力箇所が重心位置に近いもの、あるいは物体形状の凸部、または凹部にあるものなど様々であり、どれを

Fig. 6 Force component

Fig. 7 Moment component

Fig. 8 Combination of force and moment components

Fig. 9 Illustration of the parameter of thickness

採用するかによって握みに特徴がでる。このような特別な握みを行う場合、いくつかのパラメータを用いて f_{xi} , f_{yi} を定めることができる⁶⁾。ここでは、物体の厚い部分で支持力を増大させる握み⁷⁾について考える。

物体の握みに係わる力を特定な方向に限って分析すると、Fig. 6~Fig. 8 のように表される。すなわち、支持力が、押え、力の制御、モーメントの制御のそれぞれに必要な3成分に分解される。ただし、図中、Oは重心、細線矢印は基本力、縞矢印は力の制御、白抜き矢印はモーメントの制御にそれぞれ必要な力を表す。

ここで、指定される力 F の X 軸成分に関して a , b_1 を未知パラメータとして次を定める。

$$f_{xi} = \text{sgn}(T_{xi}) \left[a |T_{xi}| \left\{ u_1 \frac{|F_x|}{m_1} + v_1 \frac{|M/y_i|}{n_1} \right\} + b_1 \right] \quad (17)$$

ただし、 T_{xi} は i 番目支持点における x 軸方向の厚さパラメータ (x 軸と同符号、Fig. 9 参照) を表し、関数 sgn は次のようにパラメータ (例えば X) の符号によって、1, 0, -1 のいずれかをとる。

$$\text{sgn}(X) = \begin{cases} 1, & X > 0 \\ 0, & X = 0 \\ -1, & X < 0 \end{cases} \quad (18)$$

また、 u_1 は i 番目支持点に F_x を考慮すべきか否かを定める2値関数、 v_1 は i 番目支持点に M を考慮すべきか否かを定める2値関数でそれぞれ次のように示される。

$$u_1 = \begin{cases} 1, & T_{xi} \cdot F_x > 0 \\ 0, & T_{xi} \cdot F_x \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$v_1 = \begin{cases} 1, & x_i \cdot y_i \cdot M > 0 \\ 0, & x_i \cdot y_i \cdot M \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

m_1 は T_{xi} と F_x が同符号となる支持点の数、 n_1 は支持点 $P_i(x_i, y_i)$ の属する象限及びこれと対角な象限内に存在する総支持点数を表す。

同様に f_{yi} の式を付録2のように定める。支持点是一般に重心周りに散在するので、力とモーメントに関する釣合から以下の式を得る。

$$F_x = \sum f_{xi} \quad (21)$$

$$F_y = \sum f_{yi} \quad (22)$$

$$M = \sum (x_i \cdot f_{yi} - y_i \cdot f_{xi}) \quad (23)$$

これらの3元連立方程式を解くことによって未知数 a , b_1 , b_2 の値が定まり、各支持点における出力の直交成分 f_{xi} , f_{yi} が定まる。その結果、支持力 F_i を求めることができる。さらに、支持力を重心方向とこれに直交な成分とに分解することにより、握力と操り力を計算できる。

なお、本方法によって支持力は求まるが、支持点の配

Fig. 10 Results of calculation by weighting the press force by $\cos \delta\theta_i$. Mean value of the press force is 1.4 Kg Fig. 11 Results of calculation by weighting the press force by $\cos \delta\theta_i$. Mean value of the press force is 0.7 Kg

Fig. 12 Results of calculation by weighting the grasp force by $\cos \delta\theta_1$. Mean value of the grasp force is 1.4 Kg

置如何によっては握力が負になることがある。このときには、負の圧力成分を打ち消す対策として、次を考える。すなわち、負圧となる支持点と重心を結ぶ線を定め、重心を挟んで反対側にある支持点の中でこの線に最も近い位置にある支持点を見つけ、両支持点間に互いに引き合う力を与えて負圧を相殺する。これは、方向が逆で大きさが同じ力を2点間に加えても握みに影響しないことに因るものである。

5. 支持力の計算例

支持力の計算例として、塊状物体の断面を、次の8点で支持することを考える (単位はmm)。

$P_1(65.0, 20.0)$, $P_2(-10.0, 39.0)$, $P_3(-29.0, 10.0)$,
 $P_4(-19.0, -30.0)$, $P_5(-8.5, -40.0)$, $P_6(38.0, -46.0)$,
 $P_7(62.0, -25.0)$, $P_8(67.0, -15.0)$

座標系の原点は同時に物体の重心位置を示すものとする。また、物体の重量も含めて、指先の制御に必要なデータ $F_x=0.5$ Kg, $F_y=2$ Kg と重心周りのモーメント $M=-1$ Kg $\cdot$ mm が与えられるものとする。塊状物体は円であると仮定し、最小2乗法によって中心を定め、重心角を計算する。さらに、握みの強さを指定するデータとして支持点の圧力平均値 1.4 Kg が与えられるものとする。このときの計算結果は3.2節の圧力分布を重心角の余弦で重み付けする握みを、(11)式を用いた誤差関数法で計算すると次のようになる (単位は Kg)。

$(f_{x1}, f_{y1})=(-0.6, -2.2)$, $(f_{x2}, f_{y2})=(1.2, -0.8)$,
 $(f_{x3}, f_{y3})=(1.4, -0.3)$, $(f_{x4}, f_{y4})=(0.9, 1.0)$,
 $(f_{x5}, f_{y5})=(1.9, 0.3)$, $(f_{x6}, f_{y6})=(-2.5, 0.5)$,
 $(f_{x7}, f_{y7})=(-1.0, 1.2)$, $(f_{x8}, f_{y8})=(-0.8, 2.3)$,

Fig. 13 Results of calculation by using the parameters of thickness

$(f_{p1}, f_{t1})=(1.44, 1.74)$, $(f_{p2}, f_{t2})=(1.35, 0.46)$,
 $(f_{p3}, f_{t3})=(1.44, 0.00)$, $(f_{p4}, f_{t4})=(1.38, 0.09)$,
 $(f_{p5}, f_{t5})=(1.34, 1.42)$, $(f_{p6}, f_{t6})=(1.38, 2.19)$,
 $(f_{p7}, f_{t7})=(1.43, 0.52)$, $(f_{p8}, f_{t8})=(1.44, 1.93)$

Fig. 10 は支持力を矢印で、またその成分 (f_{xi}, f_{yi}) を実線で示す。全く同じ条件で握みの強さだけを1/2にすると Fig. 11 のような結果になる。両図から、握みの強さだけを变えるだけで一部の支持力の方向が大きくかわるのを確認できる。さらに、支持点の握力平均値を 1.4 Kg として3.4節の握力分布を重心角の余弦で重み付けする握みを、(12)式を用いた誤差関数法で計算すると次の計算結果 $(f_{\theta i}, f_{mi})$ を得、支持力は Fig. 12 のように表示される。

$(f_{\theta 1}, f_{m1})=(1.44, 0.39)$, $(f_{\theta 2}, f_{m2})=(1.35, 2.84)$,
 $(f_{\theta 3}, f_{m3})=(1.44, 1.59)$, $(f_{\theta 4}, f_{m4})=(1.38, 0.35)$,
 $(f_{\theta 5}, f_{m5})=(1.34, 0.83)$, $(f_{\theta 6}, f_{m6})=(1.38, 0.00)$,
 $(f_{\theta 7}, f_{m7})=(1.43, 0.49)$, $(f_{\theta 8}, f_{m8})=(1.44, 0.22)$

物体形状が円で近似できる場合、重心角の余弦で圧力や握力を重み付ける方法はこれらを一定に制御する方法と大差ないことがこの他の計算結果から明かになった。

前記条件を満たす支持力を4.2節の方法によって計算すると、パラメータ a , b_1 , b_2 の値がそれぞれ 0.0136, 1.16, 0.122 と定まり、Fig. 13 の結果を得る。この図から、Fig. 10~Fig. 12 と比べてパラメータ法では支持力の大きさの偏りは軽減される傾向にあるのが読みとれる。以上の握みは、いずれも指定された条件を満足し、実際の制御に使用できる妥当なものである。

6. おわりに

安定握みについて考察し、その概念を明かにした。握む物体の形状や性状、重量などは千差万別で作業内容に

Fig. 14 Calculated envelopes when the support force is constant

よっても握み方は変わることがある，などの理由によって安定な握みを画一的に取り上げるのは困難であるが，実際の握みには力の重心方向成分が重要となることに着目して安定な握みを定義した．そして，任意の3つの支持点位置を使って重心を内部に含む三角形が一つ以上存在するときには少なくとも F , M , IG を満足させる支持力が定まりこれを一意的に決定する方法を提案した．

本方法は，多数支持点での制御すべき支持力の決定法に一つの解を与えるもので，多関節指で物を握み，また，操る場合に有効であると考えられる．指先ばかりでなく，指腹をも使って作業を行う場合にはその効果がとくに大である．数値計算された結果はすべて妥当なもので，安定した握みである．エネルギー効率の観点からみるとこれら握みの中からさらによいものが見いだされと思われるが，その選択法等については引き続き検討しなければならない課題と考える．

支持点の数と握み位置は予め与えられるものとして考察したが，位置を変えることによって握みはさらに安定することもある．こうした握みを握む時点で見いだせればそれに越したことはない．したがって，支持点数を一定にしたときの最適支持位置の決定法について検討することも課題として残されている．我々は，今後，このような課題と取り組み，さらには本稿で述べた握みや支持力の決定法を3次元の物体に対しても適用できるように発展させていくことを考えている．

参考文献

- 1) 花房，浅田：人工指による物体把握の力学，計測自動制御学会論文集，12巻5号，pp. 536/542, 1976
- 2) 花房，浅田：弾性指を有するロボットハンドによる物体の安定な把握，計測自動制御学会論文集，13巻4号，pp. 370/377, 1977
- 3) 岡田：操作性に富む指構造を有するマニピュレータとその計算機制御，計測自動制御学会論文集，16巻1号，pp.

Fig. 15 Calculated envelopes when the support force is weighted by $\cos \theta_{i1}$

98/104, 1980

- 4) J. Kerr and B. Roth: Analysis of Multifingered Hands, International Journal of Robotics Research, Vol. 4, No. 4, pp. 3/17, 1986
- 5) 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，23巻11号，pp. 1206/1213, 1987
- 6) 岡田，高野：多関節指上の多数支持点における支持力の決定法，日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 459/460, 1987
- 7) 岡田，高野，宮越：多数支持点における指先力の一決定法（平面内の安定把握），日本ロボット学術講演会予稿集，pp. 823/824, 1989

<付録1>

偏心した物体の形状は例えばマソン曲線を用いて次のように表される (a , b は定数)．

$$r = a + b \cos \theta \quad (24)$$

この形状に関し，圧力分布を一定にする場合と圧力分布を重み付けする場合の二つについて包絡線 e_i , e_o を計算するとそれぞれ，Fig. 14と Fig. 15 の結果が得られる．

<付録2>

支持力のY軸成分は，X軸成分と同様にして次のように定められる．

$$f_{yi} = \text{sgn}(T_{yi}) \left[a |T_{yi}| \left\{ u_2 \frac{|F_y|}{m_2} + v_2 \frac{|M/x_i|}{n_2} \right\} + b_2 \right] \quad (25)$$

ただし， T_{yi} は i 番目支持点におけるY軸方向の厚さパラメータ (Y軸と同符号，Fig. 9 参照) である， sgn は式(18)に同じ関数である． u_2 , v_2 は次に定める2値関数で， i 番目支持点に F_y を考慮すべきか否か， i 番目支持点に M を考慮すべきか否か，をそれぞれ定める．

$$u_2 = \begin{cases} 1, & T_{yi} \cdot F_y > 0 \\ 0, & T_{yi} \cdot F_y \leq 0 \end{cases} \quad (26)$$

$$v_2 = \begin{cases} 1, & x_i \cdot y_i \cdot M < 0 \\ 0, & x_i \cdot y_i \cdot M \geq 0 \end{cases} \quad (27)$$

m_2 は T_{yi} と F_y が同符号となる支持点の数， n_2 は支持点 $P_i(x_i, y_i)$ の属する象限及びこれと対角な象限内に存在する総支持点数を表し， n_2 と n_1 は等しい．