

把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発 (十字状ひずみゲージ配列を有する球面状センサによる任意方向把持力制御)

木村竜司^{*1}, 内山孝憲^{*2}, 前野隆司^{*2}

Development of Elastic Finger-like Sensor for Control of Grasping Force (Control of Grasping Force in Arbitrary Direction using Spherical Sensor with Strain Gages Arranged on Perpendicular Axes)

Ryuji KIMURA, Takanori UCHIYAMA
and Takashi MAENO^{*3}

^{*3} Graduate School of Science and Technology, Keio University
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, 223-8522 Japan

A two axial finger-shaped sensor is developed for controlling grasping force so that an object is lifted with appropriate grasping force at any grasping direction. It consists of silicone rubber having spherical surface and strain gauges arranged in two perpendicular axes. First, the relationship between stick area and the internal strain distribution of the sensor are calculated using FE (finite element) analysis when the sensor is in contact with an object. It is necessary to detect the shear strain distributed in the sensor in order to grasp the object with appropriate force. Then, the method for estimating stick area of the sensor is proposed using FE analysis. Finally, the grasping force control is achieved using the constructed system. It is shown that arbitrary objects with various weight and friction coefficients are lifted using the developed sensor and control method.

Key Words : Tactile Sensor, Grasping Force, Contact Problem, Finite Element Analysis

1. 緒 言

手術、介護、物体ハンドリングといった高度なマニピュレーションを行うロボットハンドを実現するためには、把持力の精緻な制御が不可欠である。このため、近年、把持力制御のための触覚センサの研究が盛んに行われている⁽¹⁾⁽²⁾。筆者らは、質量および摩擦係数が未知の物体を適切な把持力で把持し操ることのできるロボットハンドを目指し、分布したセンサを内蔵した円筒断面状弾性フィンガ型センサによる把持力制御の研究を行ってきた⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。すなわち、弾性フィンガの表面に曲率を持たせることによって法線反力の小さい接触端部に局所滑りを発生させるとともに、フィンガ内部のせん断ひずみ分布の変化をモニタすることによって局所滑り状態を推定し、局所滑り領域が一定範囲になるように把持力を制御する手法を試みてきた。しか

し、センサの円筒軸に直交する方向の滑りしか検出できないため、持ち上げる方向が限定されるという問題があった。また、一定の把持速度でなければ最適な把持力を算出できないというアルゴリズム上の問題があった。

このため、本研究では、直交する2軸上にセンサを配置した球面状弾性フィンガ型センサを開発するとともに、物体を把持し任意方向に任意速度で持ち上げることのできるセンサの制御法を提案することを目的とする。まず、第2章で有限要素法を用いたセンサ構造の設計を行なう。第3章では、把持力制御アルゴリズムを提案するとともに、製作したフィンガ型センサを用いて質量および摩擦係数が未知の物体の把持を行なう実験を行い、本弾性フィンガ型センサの有効性を検証する。

2. センサの設計

2.1 フィンガ型センサの基本設計

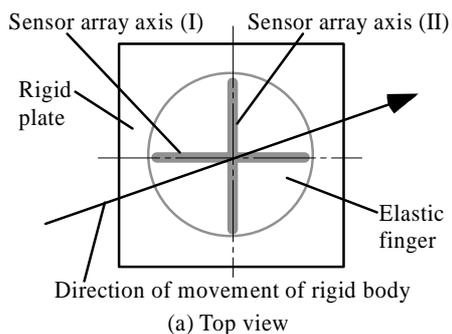
筆者らがこれまでに開発した円筒状弾性フィンガ型センサ⁽³⁾⁻⁽⁵⁾は、弾性体内部に配置した複数のひずみゲージによって、

原稿受付 平成14年11月13日

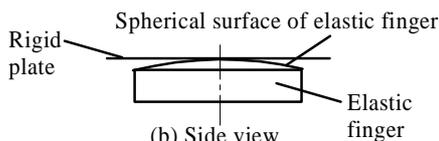
^{*1} 慶応義塾大学大学院

^{*2} 正員, 慶応義塾大学理工学部(〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)

E-mail : maeno@mech.keio.ac.jp

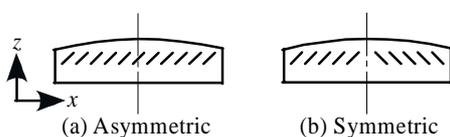


(a) Top view



(b) Side view

Fig. 1 Elastic sensor

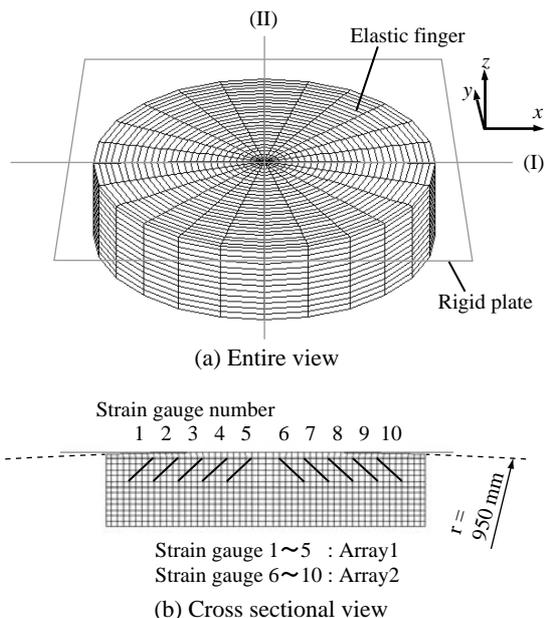


(a) Asymmetric

(b) Symmetric

Fig. 2 Arrangement of strain gages

円筒軸に直交する方向の固着・滑り状態を推定するものであった。任意方向の固着・滑り状態を検出するためには、フィンガ表面を球状とし、いずれの方向に物体を持ち上げた際にもフィンガと物体の接触外周部付近から初期局所滑りが発生するような構造とすればよい。また、任意方向の固着・滑り状態を高精度にセンシングするためには、フィンガ内部に配置するセンサは数が多いほどよく、ヒト指のように分散して配置させるのが望ましい。しかし、ロボットハンドへの適用を考える場合、固着・滑り状態検出のためのデータ処理を単純化するために、センサ数はなるべく少ない方が好ましい。このため、図 1(a)に示すように、センサを配置するセンサ配列軸を直交する(I), (II) 軸のみとし、ひずみゲージをそれぞれ 10 枚ずつ配置することとする。これにより、センサ配列軸と滑り発生方向軸(物体との接触により接線力が働く方向の軸)との成す角が小さい方のセンサ配列軸を選択し、選択した軸上のひずみをモニタすることによって、固着・滑り状態を検出することが可能となる。なお、センサの数は、ヒトの触覚受容器に比べればはるかに少ないものの、実用面から見ると検討の余地は残されている。固着・滑り分布をある程度精度良く検出することが本研究の主眼であるため、自ずからセンサ数の減少には限界があると考えられるものの、工学的にはセンサ数を必要最小限に留めることに意味がある。センサ数を極小化することは今後の課題である。



(a) Entire view

Strain gauge number

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Strain gauge 1~5 : Array1

Strain gauge 6~10 : Array2

(b) Cross sectional view

Fig. 3 Finite elements model of elastic sensor

つぎに、センサの配置角度を決定する。接触面に平行な方向を x 軸方向、垂直な方向を z 軸方向とする。平面ひずみ場において、一様弾性体が x 軸方向のせん断力を受けるとき、弾性体にはせん断ひずみ γ_{xy} が生じ、垂直ひずみ ϵ_x, ϵ_y は 0 となる。つまり、最大主ひずみ方向は x 軸方向に対して 45 度傾く。このため、ひずみゲージを 45 度に傾けて配置すれば、せん断ひずみに対応する主ひずみを検出できる⁽¹⁾⁻⁽³⁾(図 2 (a))。しかし、任意の方向に接線力が加わる場合に物体把持を実現するためには、センサを左右対称に配置することが望ましい。左右非対称の場合には滑り検出に方向依存性が生じるからである。このため、図 2 (b)のようなハの字型にひずみゲージを配置することとする。このような配置は、滑り発生方向軸と成す角が小さいセンサ配列軸を選択する際にも有効である。例えば、(I)方向に接線力が加わった場合に、センサ配列軸 (I)の左右のひずみゲージではそれぞれ引張りひずみおよび圧縮ひずみが生じるため、左右のひずみは符号が逆となる。これに対し、センサ配列軸 (II)上下のひずみは共に引張りひずみであり、その値が等しい。このため、(I)軸および(II)軸における左右のひずみゲージの出力差をそれぞれ算出し比較することにより、滑り発生方向軸と成す角が小さいセンサ配列軸を選択することが可能である。これらの理由から、図 2 (b)に示すように、 z 軸に対し軸対称にひずみゲージを配置したフィンガ型センサの設計を行うこととした。

なお、前報⁽¹⁾⁻⁽³⁾では、リン青銅板に貼付したひずみゲージをシリコンゴム内に埋め込む構造のセンサを

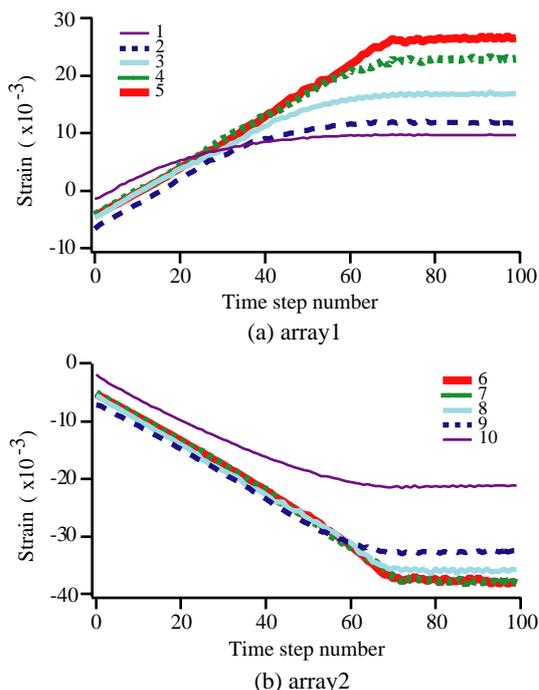


Fig. 4 Change in strain detected by strain gauges

製作したが、シリコンゴムとリン青銅板の縦弾性係数の違いの影響が無視できなかったため、本研究では、ひずみゲージを直接シリコンゴム内に斜めに配置する構造とした。

2.2 フィンガ型センサの有限要素モデル 本研究で設計したシリコンゴム製弾性フィンガ型センサの有限要素モデルを図 3 に示す。球面状フィンガ表面の曲率半径は 950 mm、直径は 60 mm、高さは 15 mm とした。また、底面の節点の変位を拘束した。フィンガのヤング率は 0.3 MPa、ポアソン比は 0.45、密度は 1230 kg/m³ とした。これらは実際に用いるシリコンゴムの物性値である。図 3(b)は、図 3(a)の (I) 軸におけるセンサ配置部の断面である。(I) 軸断面に 10 枚のひずみゲージを左右対称に 45 度傾けて配置している。(II) 軸断面にも (I) 軸同様に 10 枚のひずみゲージを配置するものとする。センサ配列軸 (I)において、 x が負の領域に配置されたひずみゲージ 1 から 5 を列 1、正の領域に配置されたひずみゲージ 6 から 10 を列 2 と呼ぶこととする。同様に、センサ配列軸 (II) のひずみゲージを 11 から 20 と呼ぶこととする。

2.3 接触状態とひずみの関係 物体と接触するセンサ表面の固着・滑り状態を内部ひずみ分布から推定できることを確認するために、有限要素法による接触解析を行なった。有限要素コードには MSC.MARC を用いた。まず、剛体平板を z 軸方向に押し込むことによって 7 N の法線荷重を与えた。この時点を経過時間ステップ

0 とする。次に、この状態から剛体平板を x 方向に移動させた際にひずみゲージ 1 から 10 で検出されるひずみを求めた。 x 方向強制変位量が 0 mm から 1 mm (時間ステップ 100) のときのひずみの履歴を図 4 に示す。

列 1 のひずみゲージでは、 x 方向の荷重に対して引張ひずみが発生するため、剛体平板の接線方向変位の増加にともない、ひずみは増加する (図 4(a))。一方、列 2 においては、圧縮ひずみが発生するため、ひずみは減少する (図 4(b))。

センサ表面の節点において局所滑りが発生すると、ひずみ変化率、すなわち、図 4 の曲線の傾きはほぼ 0 となる。これは、ひずみゲージ位置の直上に存在する節点が、固着状態から局所滑り状態に移行したことにより、直下の弾性体のせん断ひずみが解放されるためである。また、センサ表面が球面状であるため、外側の節点から局所滑りが発生している。例えば、図 4(a) をみると、外側のひずみゲージから順に傾きが減少する傾向を呈していることがわかる。

2.4 接触状態判定法 前節の解析の結果、ひずみ変化率と接触状態との間に関係があることがわかった。このため、ひずみゲージを配置した点 i におけるひずみの変化率の絶対値 $|\Delta \epsilon_i|$ に閾値を設定すればフィンガ表面の接触状態を推定することができる。ただし、 $|\Delta \epsilon_i|$ は剛体平板の移動速度によって変化する値であるため、このような推定法を適用すると一定の把持速度の場合にしか物体把持を行うことができない。

一方、図 4 において、固着している節点の直下のひずみを比較すると、履歴の傾きがほぼ等しいことがわかる。これは、固着している領域の直下の点では、剛体平板の x 方向への移動に伴うせん断ひずみがほぼ等しいことによる。なお、把持速度が変化してもこの傾向は変化しない。このため、各列において、各ひずみゲージにおけるひずみ変化率の絶対値を、ひずみ変化率の絶対値が最も大きいひずみゲージにおける値と比較し、両者の差が一定の閾値よりも小さければ、直上の接触面は固着していると判定することとする。すなわち、着目する点 i の直上表面の固着条件を、列 1、列 2 について、それぞれ、

$$|\Delta \epsilon_i| / |\Delta \epsilon_{max}| > c \quad (1)$$

により判定する。ただし、 $|\Delta \epsilon_{max}|$ は着目する列における $|\Delta \epsilon_i|$ の最大値、 c は一定の閾値である。

以上の固着判定法により固着点数の推定を行なった結果を図 5 に示す。ただし、 c は 0.7 とした。図 5(a)お

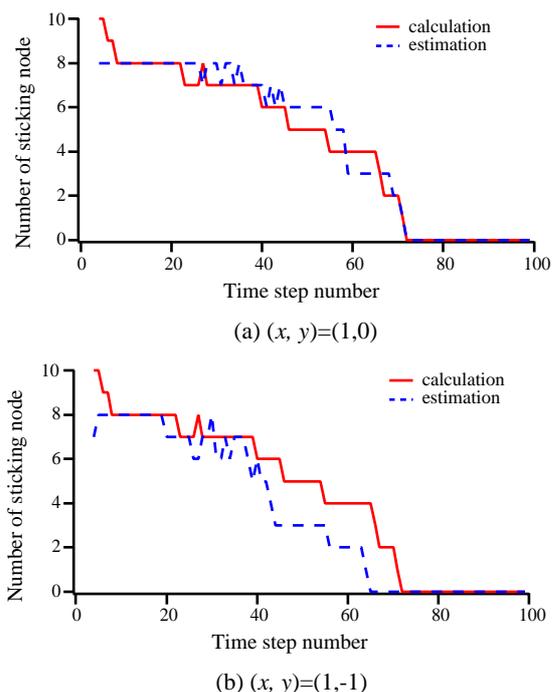


Fig. 5 Change in the number of sticking nodes



Fig. 6 Picture of the elastic sensor

よび(b)は、それぞれ、 $(x, y) = (1, 0)$ および $(1, -1)$ の方向に剛体平板を移動させた場合の結果である。実線はフィンガ表面の節点の変位より求めた実際の固着点数履歴、点線は上記の固着判定法により推定した固着点数履歴である。図 5(a) をみると、固着点数の推定誤差は時間ステップ 5 付近では 2 であるが、それ以降は±1程度と十分小さい。一方、図 5(b) では、時間ステップ 50 付近から推定誤差が大きくなっている。これは、図 5(b)では剛体平板の移動方向と固着判定を行うひずみゲージ列の軸が 45 度ずれているためであると考えられる。このため、両者の成す角を利用して固着点数の補正を行えば、より精度の高い固着・滑り判定を行うことができると思われる。ただし、本研究の目的

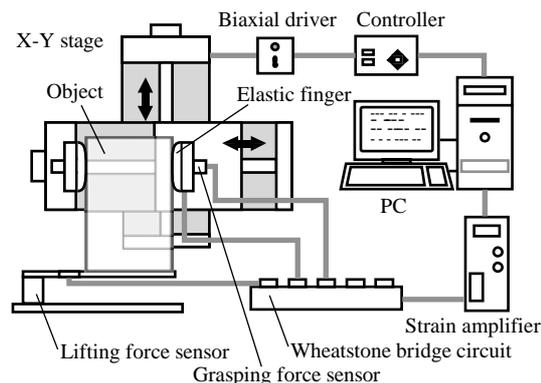


Fig. 7 Grasp force control system

は、なるべく単純なセンサ構造および制御手法によって、任意方向の物体把持を行なえることの確認であるので、閾値の補正は行わないこととする。

3. 実験

3.1 センサの製作と評価 2章で設計した球面状センサを製作した。まず、金属枠を切削加工することによって、シリコンゴムを流し込んでセンサを作成するための球面状の型を製作した。次に、斜めに配置するひずみゲージの下側(図 3(b)参照)に当たる台形断面を有するシリコンゴムブロックを作成し、ベースプレート上に接着した。また、シリコンゴムのブロックに、大ひずみ用ひずみゲージを接着した。さらに、ベースプレートに球面状の型をかぶせ、ひずみゲージの上部に液状のシリコンゴムを流し込んだ。シリコンゴムが固まった後に、型をはずすことにより、図 6に示したような球面状センサを作成した。

シリコンゴム内にひずみゲージを埋め込むタイプのセンサは筆者らがこれまでも開発しており、いずれも有限要素法による設計結果と実験結果が十分一致することを確認している⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。本センサにおいても、特性を計測したところ、図 4と同様な特性が得られることを確認した。

3.2 把持力制御システム 把持力制御実験を行なうために、図 7に示すシステムを構築した。接線方向・法線方向の 2 自由度をもつ X-Y ステージにハンド部を取り付け、その先端に弾性フィンガ型センサを固定した。また、同様の形状・材質のフィンガを対向したハンド部に取り付けた。X-Y ステージはコントローラ、2 軸ステージドライバを介し、計算機により制御される。

3.3 把持力制御アルゴリズム 質量および摩擦係数が未知の物体を、フィードバック制御により把持し持ち上げるためには、固着状態判定法に基づいて固着点

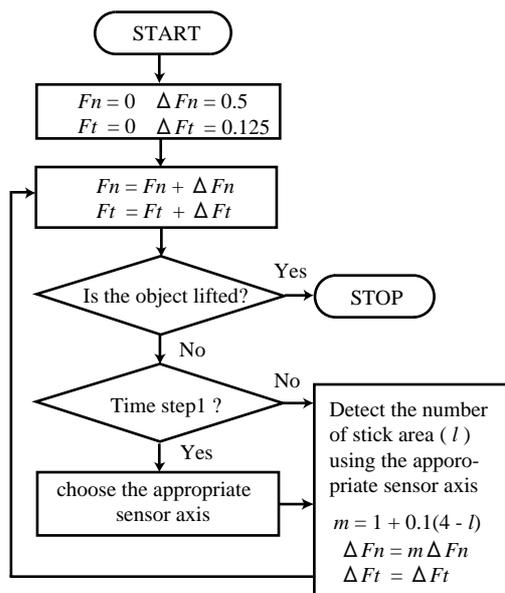


Fig. 8 Flow chart of grasp force control scheme

数を判定した後、その固着点数から次に加える接線力 F_t および法線力 F_n の値を決定する必要がある。このため、図 8 に示すような把持力制御アルゴリズムを考案した。

まず、初期状態では $F_t = F_n = 0$ とし、それぞれの増分の初期値を決定する。ここでは、 $\Delta F_n = 0.5$ N、 $\Delta F_t = 0.125$ N とした。 ΔF_n を ΔF_t よりも大きな値とした理由は、把持開始時点である程度大きな法線力 F_n を加えておかないと全体が滑るから⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾である。次に、把持力を増加させ、物体が持ち上げられているか否かの判定を行う。1 番目のステップでは持ち上げられていないので、次へ進み、直交した 2 つのひずみゲージ配列軸のうち、持ち上げる方向 (滑り発生方向) に近い配列軸を選択する。すなわち、 $|\Delta \epsilon_5 - \Delta \epsilon_6|$ と $|\Delta \epsilon_{15} - \Delta \epsilon_{16}|$ を比較し、前者が大きい場合には配列軸 (I) を、後者が大きい場合には配列軸 (II) を選択する。つぎに、選択されたセンサ配列軸で検出したひずみにより固着状態の判定を行なう。ただし、センサ配列軸の選択は時間ステップ 1 の場合にのみ行い、それ以降は同じセンサ配列軸を用いるものとする。さらに、フィンガ型センサで推定した固着点数 l に基づいて把持力増加曲線の傾き $\Delta F_t / \Delta F_n$ を変化させる。ただし、ここでは、 ΔF_t を一定とし、 ΔF_n を変化させることとした。すなわち、固着点数が 4 より小さい場合には把握力の増分 ΔF_n を以前よりも大きくし、固着点数が 4 以上の場合には ΔF_n を小さくした。この操作を繰り返すことによって、固着点数が少なすぎて物体が滑りそうになる状態や、固着点数が多すぎて物体に過大な把握力を加え

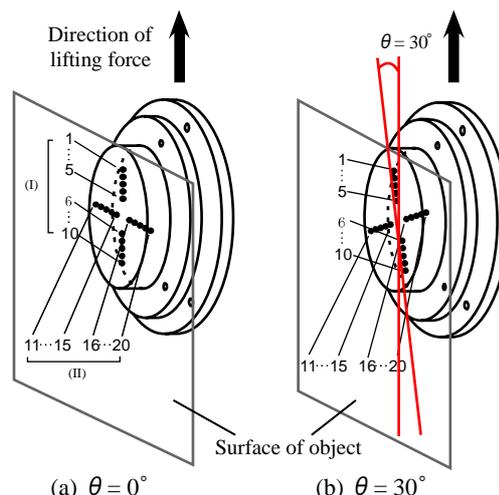


Fig. 9 Relationship between object and sensor array axes

る状態を回避しながら、適切な範囲で接線力・法線力を増加させて物体を把持し持ち上げることができると考えられる。

3.4 把持力制御実験 製作したフィンガ型センサおよび構築した実験系を用いて把持力制御実験を行ない、持ち上げる方向に依存することなく、質量および摩擦係数が未知の物体を把持し持ち上げることが可能であるか否かを確認した。ただし、閾値 c は 0.7 とした。実験時における把持物体とフィンガ型センサの位置関係を表した模式図を図 9 に示す。図 9(a)は持ち上げる方向がセンサ配列軸(I)と一致している場合、図 9(b)は持ち上げる方向とセンサ配列軸方向のなす角が 30 度の場合を表している。

なお、本実験の目的はアルゴリズムの確認であるため、把持力制御を高速かつスムーズに行ってはいない。すなわち、各時間ステップにおける固着・滑り判定をウィンドウズパソコン上で行い、入出力系の高速化に配慮していないため、時間ステップ間隔は一定ではなく、また、十分に高速ではない。時間ステップ間隔の最小値は数 100 ms 程度に留まる。ただし、本アルゴリズムは原理的に時間ステップ間隔に依存しないため、制御のための処理と入出力系を高速化し時間ステップ間隔を小さくすることにより、慣性力が支配的にならない範囲で把持力制御を高速化することが可能である。

結果の例として、持ち上げる方向とセンサ配列軸方向のなす角が 0 度および 30 度の場合において、質量 1.2 kg、摩擦係数 0.46 および 0.59 の物体を把持する制御を行った際の把持力増加曲線を図 10 および図 11 に示す。いずれの場合にも、物体を滑り落とすことなく持ち上げることができた。また、いずれの場合にも、

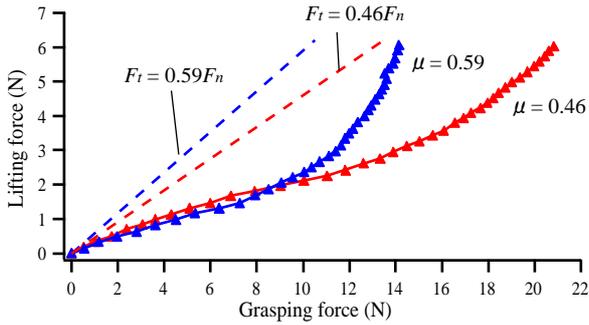


Fig. 10 Change in measured grasp force ($\theta = 0^\circ$)

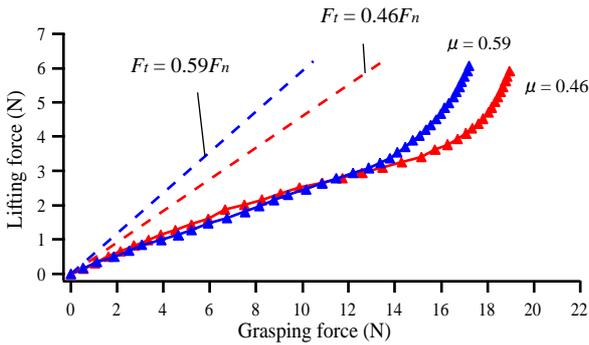


Fig. 11 Change in measured grasp force ($\theta = 30^\circ$)

摩擦係数の大きな物体を把持する場合には、より小さな法線力（把握力）で物体を把持できていることがわかる。これは、摩擦係数が大きい場合には局所滑りが生じにくいので、前述のアルゴリズムに従い、あまり法線力を増加させることなく制御が行われた結果である。把持が完了したときの法線力（把握力）は、必要最小限の力の約 1.5 から 1.7 倍程度であった。ヒトは、摩擦係数に関わらず、必要最小限の力の約 1.2 から 1.5 倍程度の力で把持を行なっていること⁽⁶⁾⁽⁷⁾が知られている。本制御はヒトの制御と比較すると多少大きめの把握力を加えて物体を把持しているといえる。ヒトの触覚受容器の分布密度は本センサよりもはるかに大きいことを考慮すれば、本結果は妥当なレベルにあると考えられる。

なお、本センサでは、持ち上げる方向とセンサ配列軸方向のなす角が 45 度の場合に検出感度が最も低下する。このため、45 度など、他の角度の場合について

も実験を行った。その結果、0 度および 30 度の場合と同様に把持力を制御できることを確認した。

4. 結 言

直交する 2 軸上にセンサを配置した球面状弾性フィンガ型センサを開発した。また、フィンガ表面と把持物体との固着・滑り状態判定に基づき把持速度に依存せずに把持力を制御できるアルゴリズムを提案した。さらに、実際に質量および摩擦係数が未知の物体の把持力制御実験を行ない、質量および摩擦係数が未知の物体を本センサにより適切な力で任意方向に把持し持ち上げることを確認した。

参考文献

- (1) 山田, 把持までのセンシング戦略, その 2: 滑りと静摩擦係数の検出～表面粗さ情報の取得, 日本ロボット学会誌, 11-7, (1993), 959.
- (2) 山田, 触覚センシング研究の新しい展開, 機論 No. 96-2, B, (1996), 1505.
- (3) 前野, 小林, 河合, 平野, 曲面状弾性体の内部ひずみ検出に基づく把持力制御法, 機論 64-620, C (1998), 881.
- (4) 河合, 平野, 前野, 把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発, 機論 64-627, C (1998), 4264.
- (5) 前野, 広光, 河合, 曲面状弾性フィンガの固着・滑り分布推定に基づく把持力の制御, 日本ロボット学会誌 19-1, (2001), 91.
- (6) Yamada, D., Maeno, T. and Yamada, Y., Artificial Finger Skin having Ridges and Distributed Tactile Sensors used for Grasp Force Control, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 14, No. 2, (2002), 140.
- (7) Johansson, S and, Westring G, Roles of Glabrous Skin Receptors and Sensorimotor Memory in Automatic Control Precision Grip When Lifting Rougher or More Slippery Objects, Exp. Brain Res., 56, (1985), 550.
- (8) Johansson, S and, Westring G, Signals in Tactile Afferents from the Fingers Eliciting Adaptive Motor Responses during the Precision Grip, Exp. Brain Res., 66, (1988), 141.