

DCサーボモータによる把持力制御

山本吉範* 小林正幸**

Grip Force Control by means of the DC Servo Motor

Yoshinori YAMAMOTO* Masayuki KOBAYASHI**

In this paper, the control method to gripping by means of a robot hand that automatically discriminates among rigid body, middle body and soft body is proposed. Further, an anti-fall method due to slipping of gripping body is made a trial by using a slipping sensor due to rotary encoder form to improve the reliability.

For a control of gripping behavior in this paper, the grip force control is enforced by means of DC servo motor instead of the stepping motor by reason of which have a weak gripping force and a slow gripping behavior. Still more, gripping control program is constructed by means of Visual Basic by reason of that express many data of gripping movement visually.

Key words: robot hand, gripping force, control, slipping sensor, DC servo motor

1. はじめに

ロボットハンドの研究は、古くから多くの研究がなされている¹⁾。その中で、人間が物を掴むという動作に着目した場合、人間は重さや摩擦係数が未知の物体や全く初めて目にする物を把持することが出来る。これは普段何気なく行っている動作であるが、指腹部で検出した触覚情報だけしか用いることが出来ないにもかかわらず、形状が同一で重さの異なる物体でも瞬時に把持し、過度な力による物体の破壊もない高度な把持力制御を行っている。

ロボットハンドに把持動作を行わせる場合、工業用ロボットなどは形状や重量が予め分かっている剛体物を扱う事が多いので、把持する力が多少強くても物体を握りつぶすことはない。したがって、簡単な圧力センサを用いて把持力を検出すれば十分である。しかし、近年研究が盛んに行われている医療用ロボット、介護用ロボット、家事用ロボットなどは形状が複雑で比較的柔軟性が高い物体を握りつぶさないように把持しなくてはならない。このように、ロボットハンドによる把持力制御は必要かつ重要な技術である。

本報告では、柔らかい物から硬い物まで自動的に判別して、1つのロボットハンドで把持出来るよう

な制御法を提案し、更に滑りによる落下を防止して、その把持成功頻度を高めるためにロータリーエンコーダ方式滑りセンサを利用したので、その結果について報告する。

2. 使用機器

図1-1及び図1-2のようにハンドを構成し使用する。

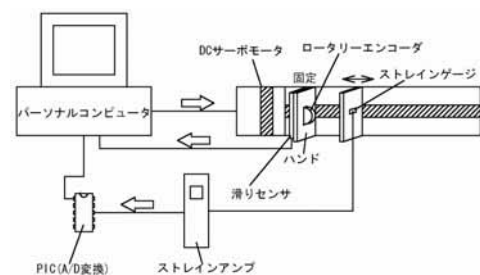


図1-1 システム構成図

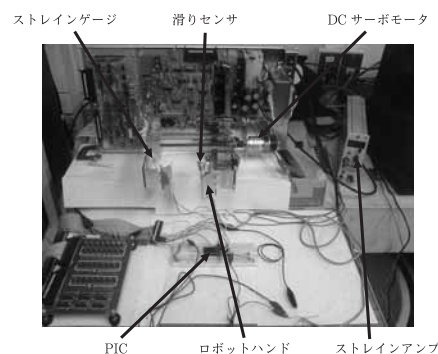


図1-2 システム構成の写真

*電子制御工学科

**平成17年度電子制御工学科卒業生 (現, (株)サノヤスヒシノ明昌)

ステッピングモータでは把持するための力が弱く、動作速度も遅いため DC サーボモータを用いた把持力制御を行うこととし、制御プログラムは把持動作を行う場合のデータを視覚的に表わすために Visual Basic を使用した。また、入力データは比較的安価で扱い易い PIC(Peripheral Interface Controller)を用いて AD 変換しパソコンに取り込んだ。

ハンドの開閉は、DC サーボモータをパソコンで制御し行う。硬いものから柔らかいものまで把持するために比較的たわみ易い板状のハンドを採用した。把持原理は、まず先端に把持力を受け、たわんだハンドの根元のひずみをそこに取り付けしたストレインゲージを用いて、ブリッジおよびストレインアンプを介して電圧値として出力する。その電圧値を AD 変換しパソコンに入力することで、そのときハンドが物体に加えている力が求まる。そして、求めた力が物体を把持するために必要な力になるまでハンドを閉じるという方法で物体を把持する。さらに、力学的センサであるストレインゲージを用い、把持成功頻度を向上させるために滑りセンサを導入した。

3. ハンド部の構成と理論的実験的検討

ハンドはアルミニウムの薄い板を2枚用い、さらに物体把持部（荷重点）にはアルミニウム板がたわんでも把持物体に均等に面圧が作用するようにアルミニウム製の支え部（対象物に接触している部分）を設けた。この支え部の回転支点と物体把持面との間に木片を入れて固定し、支え部自体のたわみを防止した。その構成を図2に示す。

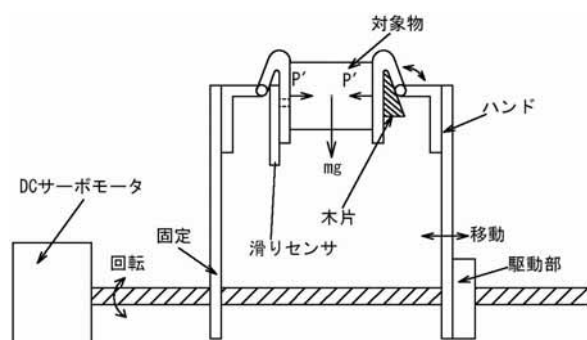


図2 ハンド部の詳細

ハンドで対象物を把持するとは、図2に示すように対象物を大きく変形させないで静止の状態に保つ（滑り落ちない）ことを指す。これを実現するために、まず初めに支え部について、物体把持面の面性状（面に貼り付けた材料）と対象物との間の静摩擦係数を実験的に求めた。対象物としては、全て支え部との接触面積をほぼ一定にした直方体形状とし、柔らかいもの硬いものその中間的なものの代表的な

3種類を取上げた。また、面性状についても身近にあり安価で手に入り易いアルミ板、薄いゴム、テープの上面（非粘着面）とした。実験方法は、対象物をそれぞれの面性状の板の上に乗せて引っ張り、その引っ張り力をバネばかりで測定することで摩擦係数を得た。その結果を表1に表わす。表1よりテープ面における静摩擦係数が大きいことが分かったので、支え部にテープを貼ることにした。

表1 静摩擦係数の測定値

	アルミ板	ゴム	テープ
木綿豆腐 200g 静摩擦係数 μ	0.4	0.467	0.533
積木 50g 静摩擦係数 μ	0.167	0.367	0.467
スポンジ 3g 静摩擦係数 μ	0.291	0.602	0.583

次に、図2より次のような関係が成り立つことがわかる。即ち

$$2\mu P' \geq mg$$

ここで、 P' は物体把持力、 m は物体の質量、 g は重力加速度をそれぞれ表わす。これより以下の関係を得る。即ち

$$P' \geq \frac{mg}{2\mu} \quad (3.1)$$

(3.1)式を用いて、各対象物の与えられた質量に対して、面性状をテープ面とした場合の最小把持力を計算し、以下の不等式を得る。即ち、

(i) 木綿豆腐 (100g)

$$P' \geq \frac{mg}{2\mu_7} = \frac{100 \times 9.8 \times 10^{-3}}{2 \times 0.533} = 0.919 [\text{N}] \quad (3.2)$$

(ii) 積木 (50g)

$$P' \geq \frac{mg}{2\mu_8} = \frac{50 \times 9.8 \times 10^{-3}}{2 \times 0.467} = 0.525 [\text{N}] \quad (3.3)$$

(iii) スポンジ (3g)

$$P' \geq \frac{mg}{2\mu_9} = \frac{3 \times 9.8 \times 10^{-3}}{2 \times 0.583} = 0.025 [\text{N}] \quad (3.4)$$

ここで、 μ_7, μ_8, μ_9 はそれぞれテープ面に対する木綿豆腐、積木、スポンジの静摩擦係数を表わす。

次に、物体把持力 P' を発生させることを考える。ここで考えているハンドは図2に示すように、アルミニウム板で構成される片持りである。この片持りの先端に荷重をかけると、はりたわみ、その固定点付近には歪みを生じることはよく知られてい

る。逆に、片持はりの先端を固定して固定点付近を移動させてはりをたわませれば、先端の固定部分に力を発生させることができる。この考えにより把持力 P' を発生させることにする。

ハンド（アルミニウム板）自体は、たわみ量が小さい場合、弾性体と見なすことができる。把持物体については、必ずしも弾性体ではないが変形量が十分小さいので、ここでは近似的に弾性体と見なして取り扱う。

ばね定数を k と表し、変位を x 、力を F とすると、弾性体に加わる力と変位について線形関係

$$F = kx \quad (3.5)$$

が成立する。把持力に対してハンド自体と把持する物体が直列に接続されているので、ハンド自体のばね定数を k_1 とし、把持する物体のばね定数を k_2 とすれば、両物体の合成ばね定数が(3.5)式の k となる。即ち、

$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (3.6)$$

となる。ここで例えば把持する物体を剛体とした場合、 $k_2 = \infty$ となる。従って、(3.6)式よりこの場合の合成ばね定数は近似的に

$$k \cong k_1 \quad (3.7)$$

となり、ハンド自体のばね定数と等しくなる。これより把持する物体が剛体ならば、ハンド自体（アルミニウム板）の力学的議論を行えばよいことになる。

長さ l の片持はりの先端に加える力と変位は

$$F = \frac{3EI}{l^3} x \quad (3.8)$$

となる。ここで、 E は縦弾性係数、 I は断面二次モーメントを表わす。(3.5)式と(3.8)式より、ハンド自体のばね定数 k は

$$k = \frac{3EI}{l^3} \quad (3.9)$$

となる。ここで、 I は断面二次モーメントなので

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3.10)$$

である。ここで、 b はハンドの幅、 h はハンドの厚さを表わす。

図2に示すハンドの幅 b は 43 [mm] であり、厚さ h は 1 [mm] である。(3.10)式より断面二次モーメント I は、

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{43 \times 10^{-3} \times (1 \times 10^{-3})^3}{12} \cong 3.583 \times 10^{-12} [\text{m}^4] \quad (3.11)$$

と求まる。ハンドの材料はアルミニウムなので、縦弾性係数 E は、70 [GPa] である。ハンドの長さ l は 120 [mm] より、ハンドのばね定数 k は、

$$k = \frac{3EI}{l^3} = \frac{3 \times 70 \times 10^9 \times 3.583 \times 10^{-12}}{(120 \times 10^{-3})^3} = 0.435 [\text{N/mm}] \quad (3.12)$$

となる。

片持はりの固定点付近の歪み ε_1 と先端に働く荷重 F との関係は

$$\varepsilon_1 = 0.5 lhF(EI)^{-1} \quad (3.13)$$

で与えられる。ここで、 l は固定点から先端の荷重点までの距離を表わす。(3.13)式より把持物体に働く把持力 P' を片持はりの固定点付近の歪み ε_1 を測定することで知ることができる。

実際には、DC サーボモータによりハンドの開閉動作を行わせるため、ハンドの移動量が問題となる。そこで、図1の実験装置を用いて把持物体に加わる力とハンド移動部の移動量との関係を実験的に調べた結果を図3-1に示す。また、その測定実験の様子を図3-2、図3-3及び図3-4に示す。

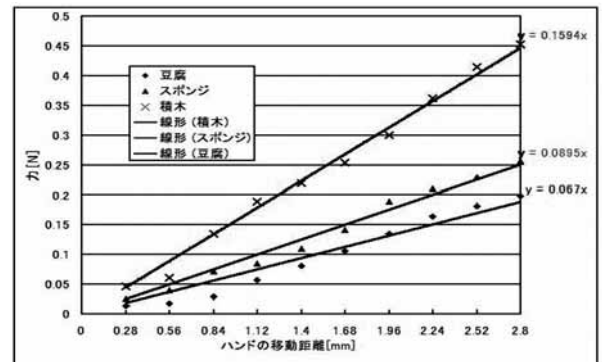


図3-1 ハンドの移動量と物体の反力

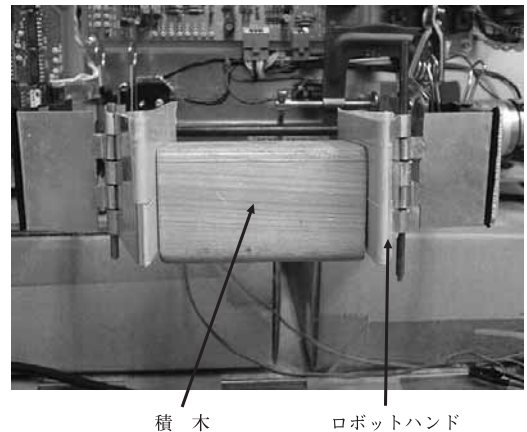
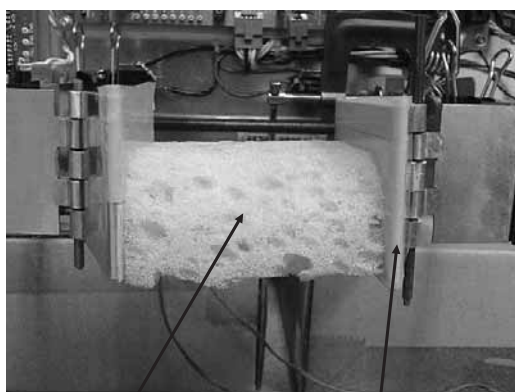
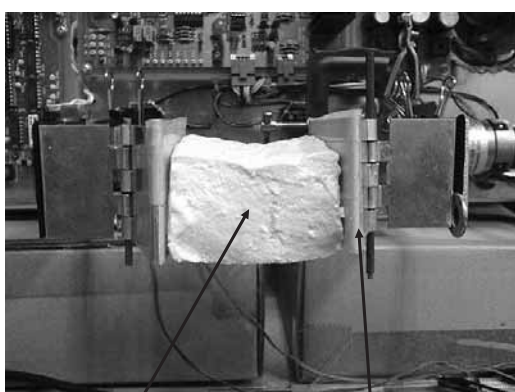


図3-2 積木の把持



スポンジ
図3-3 スポンジの把持



木綿豆腐 ロボットハンド
図3-4 木綿豆腐の把持

この結果より(3.12)式のばね定数 $k=0.435[N/mm]$ と図3-1における積木のグラフの傾き $0.419[N/mm]$ がほぼ同じ値なので、ハンド自体(片持はり部)と把持物体の合成ばね定数とした仮定(3.6)式を採用できる。参考までにこの理論と実験結果を用いて、木綿豆腐とスポンジのばね定数を仮に計算すれば、

$$\left. \begin{array}{ll} \text{木綿豆腐} & k_2=0.15[N/mm] \\ \text{スポンジ} & k_2=0.367[N/mm] \end{array} \right\} \quad (3.14)$$

となる。これは柔らかいものほど同じ力に対しての変形量が多いことを表わす。

4. 対象物の硬さ軟らかさ判別法

硬いもの柔らかいものは、何処が異なるかであるが、1つには前節で調べたように擬似弾性定数に違いがあるといえる。すなわち、加える力に対して把持物体の変形量に違いが現れる。また、図3-1に見られるように加える力とハンドの移動量は、把持物体の変形量が少ない(加える力が小さい)領域でほぼ線形関係にあるといえる。

図3-1の近似直線の傾きの大きさは、硬いものほど大きく、柔らかいものほど小さい傾向にある。すなわち、硬さ柔らかさが異なる数種類の基準となる物体について、硬さや柔らかさ(図3-1に示す加える力とハンドの移動量)を実験的に調べ、柔らかい領域、硬い領域、その中間領域というように数段階に分けて境界(原点を通る直線)を決める。このようにして作成した基準図をもとに硬い、柔らかいを判別する。

具体的には、基準図の境界を決める直線は原点を通るので、各領域は横軸から測った原点回りにおける角度の大きさで指定できる。つまり、直線の傾きを a とするとその角度 θ は

$$\theta = \tan^{-1} a \quad [^\circ] \quad (4.1)$$

で求まる。この基準領域角の範囲を基準図にして示したものが図4である。

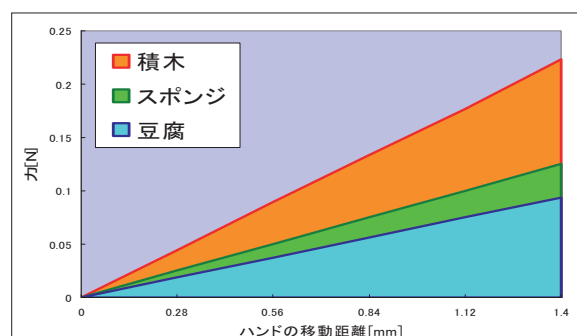


図4 基準図「カラー表示」

注意書き：1番下の領域が豆腐、下から2番目がスポンジ、3番目が積木の領域

図4の基準図は、硬いもの、やや硬いもの、柔らかいものの順に直線で原点0回りの角度を分割している。これら個々の角度範囲については、(4.1)式を用い各把持物体について70個の計測結果をもとに決めた。その結果、平均値はそれぞれ積木=21.02[°]、スポンジ=13.45[°]、豆腐=7.49[°]となり、値のばらつきの範囲は積木=18.63~24.16[°]、スポンジ=11.73~15.38[°]、豆腐=6.88~8.84[°]となった。従って、この3種類を判別するための境界線(直線)の角度は

$$\left\{ \begin{array}{ll} \alpha \text{ (積木)} & = 24.16 [^\circ] \\ \beta \text{ (スポンジ)} & = 15.38 [^\circ] \\ \gamma \text{ (木綿豆腐)} & = 8.84 [^\circ] \end{array} \right.$$

とし、それを図4に示した。ある未知の物体をハンドで挟み、数回の挟みデータ(荷重の大きさとハンドの移動量)を瞬時に取り込み、(4.1)式を用いて傾

き角度を計算する．その角度を図4の基準図に照らし合わせることで，その物体の硬さ柔らかさを判別する．

把持物体の重さと摩擦係数が前もって分かっているならば，その既知の物体を持ち上げられる最低の把持力を(3.1)式で計算できる．実際は，把持物体の重さや摩擦係数を前もって把握できない．ただし，比較的軽くて小さい把持物体の硬さ柔らかさは図4から把握でき，そのような物体に加える力の大きさと変形量も図4（あるいは図3-1）を用いてある程度推測可能である．軽く物体を挟んで，少しでも持ち上げた時に滑り始め，滑りが止まるまで挟む力を素早くかつ少しずつ増加してやれば，比較的軽くて硬めの物体について把持することが可能と推測できる．

このように把持物体の滑りを検出できれば，比較的軽くて硬めの物体を把持することがある程度可能になり，さらに滑りによる落下を防止して把持成功頻度を向上させることが出来ると考えられる．

5. 滑りセンサを用いた把持力制御

本研究で構成したロボットハンドでは，物体を把持した後，持ち上げることが出来ない．そこで，既知の把持物体が把持された後，何らかの影響により滑り始めた時，落下する前にその滑りを検知しハンドの挟み力を強めて物体の落下を防ぐことを考える．本研究で用いた滑りセンサの構成を図5-1に示す．また，滑りセンサはロータリーエンコーダ方式のものを使用し，実際に滑りセンサを取り付けた装置の構成を図5-2に示す．

今回の滑りセンサによる把持物体の落下防止実験は図5-2に示す実験装置を用いた．まず既知の把持物体（3種類の重さ）の硬さ柔らかさを判別して，その物体を適切な力で把持した後，ハンドを少しずつ開き物体が落下しようとしたときに生じるロータリーエンコーダからの滑り信号を読み取る．滑り信号を検知したら少し強めの力でハンドを素早く閉じ，物体を把持する．この動作を20回繰り返した実験結果を表2に示す．表2に示す結果より，重さが50gを越えると滑り防止成功頻度が落ちてくることが理解できる．

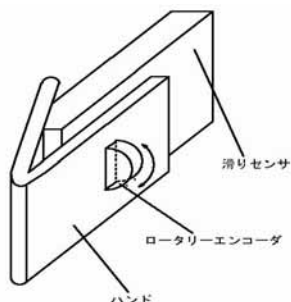


図5-1 滑りセンサの構成

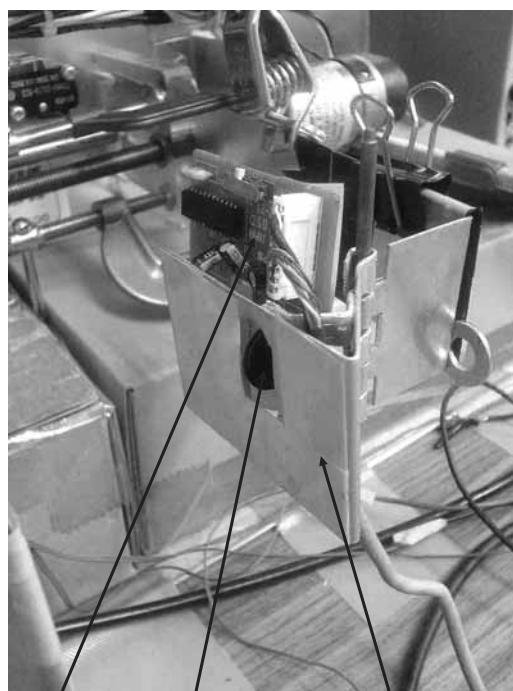


図5-2 滑りセンサ取り付け写真

表2 滑りセンサの実験結果

sliding sensor			
	積木 10g	積木 30g	積木 50g
測定回数	結果	結果	結果
1	○	○	×
2	○	○	×
3	○	○	○
4	○	○	○
5	○	○	×
6	○	○	○
7	○	○	○
8	○	○	○
9	○	○	×
10	○	○	○
11	○	○	○
12	○	○	○
13	○	○	×
14	○	○	○
15	×	○	○
16	○	○	○
17	○	○	○
18	○	○	○
19	○	○	○
20	○	○	○

○：成功、×：失敗

6. プログラムの Visual 化²⁾³⁾

Visual Basic は Windows で使用できるプログラミング言語で、視覚的にプログラミングができるため効率的に作業を進めることができる。以下、この言語を用いて把持実験の Visual 化を行った。図 6 に実際に Visual 化した結果を表示する。



図 6 プログラムの Visual 表示「カラー表示」

注意書き：上図のひずみは赤色バーと数値で表示

ボタンの機能を、以下に示す。速度、速度バーは速度に直接値を入力するか、速度バーをマウスで移動させる事で DC サーボモータの出力を変化させ、ハンドの移動速度を変更できる。変化可能な値は 0 ～ 127 となっていて片方を変更すればもう片方の値も自動的に変更する。左、停止、右スイッチをクリックすればそれぞれの動作をハンドが行う。ひずみでは、ハンドが物体を挟み、たわんだ時のストレインゲージ信号の変化をストレインアンプで増幅し、PIC で AD 変換してコネクタから読み取った値を出力する。出力は 0 ～ 1023 まで可能であるが、変化速度が速いため数値だけでは見づらいという事があり、右側の赤いバーで値を見やすくしている。パルスでは DC サーボモーターに組み込まれているロータリーエンコーダからの信号を読み取って、ハンドの位置決め制御に使用できる。パルスカウンタではパルス信号の変化をカウントして表示する。硬さ測定ではスイッチを押すと物体を軽く挟みハンドと物体を水平に調整し、それから硬さの測定を行いその値を最小自乗法で計算して傾きを求める。その傾きを角度に変換して出力する。角度では硬さ測定により求めた角度を出力する。そして、この角度の直線を左下の図に赤い線で出力し、測定結果がどの範囲の硬さになっているかが直ぐ分かる様になっている。測定データでは硬さ測定で測定された値を出力して

いて、左からパルスカウンタの値、ひずみの値より計算したハンドにかかる荷重 $P[N]$ 、移動距離[mm]を表す。物体把持はスイッチを押すと求めた角度により物体を判別し、その物体に適切な力で把持する。滑りセンサでは滑りセンサのロータリーエンコーダからの信号を読み取って出力する。滑りカウンタは滑り信号の変化をカウントし表示する。滑り制御スイッチを押すと少しずつハンドが開き物体が落下しようとするが、その前に滑りセンサからの信号を読み取りハンドを素早く閉じ物体の落下を防ぐ。終了スイッチを押すとハンドを初期の位置に戻してプログラムを終了する。

このように、1 枚のパネルで実験の操作や結果の表示ができ、作業効率の向上のために有効である。

把持動作の流れを図 7 に示す。具体的には、硬さ測定後ハンドを開き物体把持を行う。その後、滑り制御を実施して物体の落下を防げるか確認する。実験が終了すれば終了ボタンを押して終わる。図 8 は、この把持動作の中で特に硬さ測定とその決定手順の流れを示す。図 8 において、角度の決定に必要な直線の傾きを求める際、把持力と変位（ハンドの移動量）の関係を測定するが、把持物体が弾性体でないことや測定誤差のためにその値がばらつく。ここでは、ばらつきがありなおかつ少ない測定点の数でも精度の高い傾きを求められる最小自乗法を用いた。

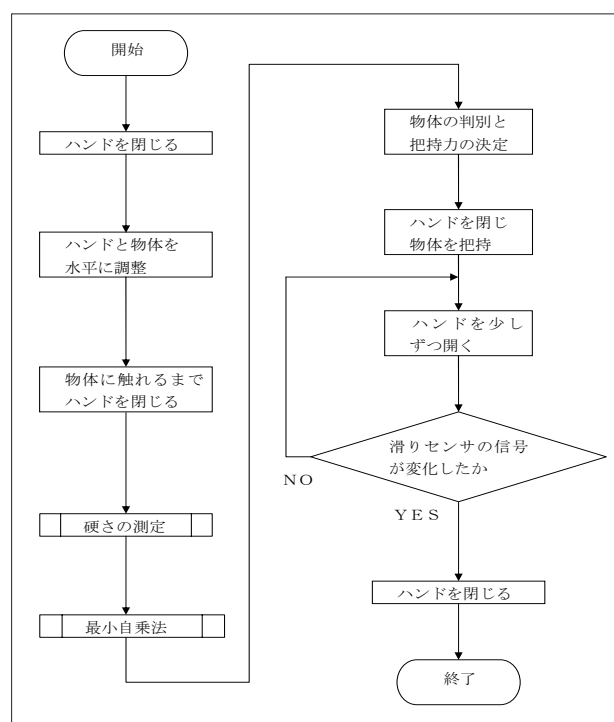


図 7 把持力制御のフローチャート

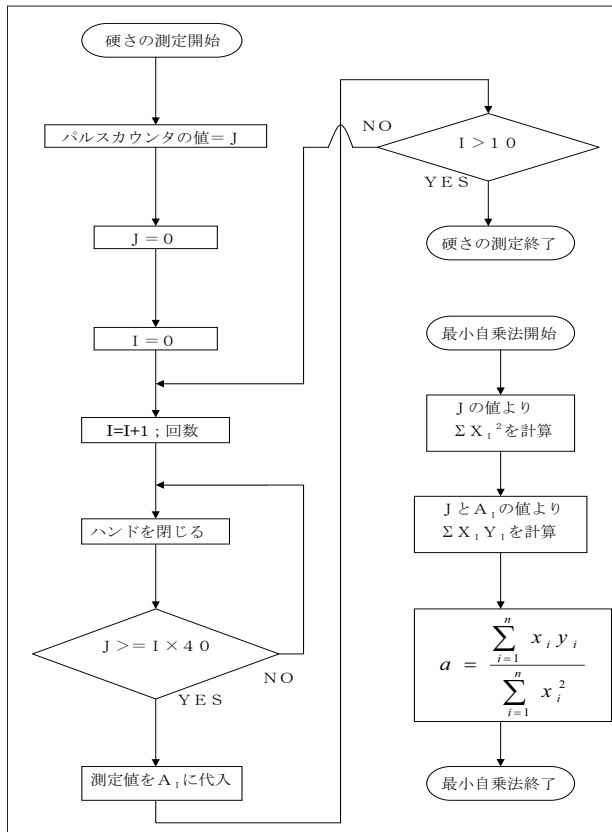


図8 硬さの測定と決定のフローチャート

7. おわりに

把持物体の硬さ柔らかさを判断するために、硬いもの柔らかいものその中間的なものを設定し、それをもとに硬さを3段階の角度領域として表わした。硬さ測定を通して、3段階のどの領域に把持物体の測定値が入るかで硬い柔らかいを判断できるようになった。

ロータリーエンコーダ方式滑りセンサをロボットハンドの先端に取り付けることによって比較的軽く硬めの物体の滑りを検知し、物体の落下を防げるようになった。その結果、ハンドの把持成功頻度がある程度向上させることができた。

Visual Basic によりプログラムを作成し、Visual

化をした結果、視覚的かつ効率的に作業を進めることができるようになった。

以上の結果より、本研究で構成したハンド構造は広範囲の硬さの物体を把持する上に有効である。また単純な硬さ判別法ではあるが確実性があり、介護や医療ロボットなどへの応用が可能である。

しかしながら、いくつかの問題点も残った。滑りセンサの成功頻度について表2より、積木30gまではほぼ確実に把持することが出来た。しかし50gになると滑りセンサは滑りを検知しているが、滑り信号を読み取ってからハンドを閉じる速度が追いつけない場合がある。従って、これ以上重い物体を把持したいならハンド支え部表面の摩擦係数を高める必要がある。

豆腐などは表面が水で濡れている上、ハンドで挟んだときに内部から水が染み出して来るなど、安定して把持することがとても難しい。測定する物体を豆腐ではなく他のもので検討すべきかもしれない。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、山本研究室の卒業研究生、特に平成15年度卒業生栗本和政氏、花谷一樹氏、平成16年度卒業生青木吉春氏、栗井昭裕氏、平成17年度卒業生大極祐介氏には卒業研究を通じてご協力を頂いた。また、本校技術専門職員の中尾三徳様をはじめ多くの方々にご助言およびご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 新井健生, ロボットの運動と制御-マニピュレーション-, 数理学, No.249, (1984), 25-31.
- 2) 川口, 河野, かんたんプログラミング Visual Basic 6 基礎編 技術評論社, (2001), 12.
- 3) 川口, 河野, かんたんプログラミング Visual Basic 6 コントロール・関数編 技術評論社, (2001), 12.