

グローブスキャンシステムによる把持力分析と 空気圧フィンガへの適用

Analysis of human's grasping force by a glove-scan system and application to pneumatically actuated fingers

○佐藤勝俊*, 秋谷圭祐**

○Katsutoshi Sato*, Keisuke Akiya**

*八戸高専,**青森オリンパス

*Hachinohe National College of Technology, **Aomori Olympus Co. Ltd

キーワード: 力制御(Force Control), 把持力(Grasping Force), フィンガ(Fingers), 空気圧(Pneumatics),
グローブスキャンシステム (Glove-Scan System)

連絡先: 〒039-1192 青森県八戸市田面木字上野平16-1 八戸工業高等専門学校 機械工学科
佐藤勝俊, Tel.:(0178)27-7265, Fax.:(0178)27-7265, E-mail:sato-m@hachinohe-ct.ac.jp

1. はじめに

青森県は農業・水産業の盛んな県として知られており、特に八戸市では水産業が主要な産業となっている。しかし、水産物に施される食品加工や内臓・骨の除去作業等は人の手によって行われているのが現状であり、その結果、毎年のように衛生面における問題が起こっている¹⁾。このため、工程の機械化・自動化が望まれているが、多くの水産物が柔軟で傷付きやすいことから、安定な状態で保持することが難しく、また柔軟な物体に対する研究例も少ない。

そこで機械に柔軟さを与えるには、空気の圧縮性を利用することで簡単に実現できるのではないかとの考えから、これまで空気圧シ

リンダを使用した把持制御実験を行ってきた²⁾。これらの実験では、実験装置は把持部の一方を固定し、シリンダの先端で物を挟むといった図1のような機構で、物を掴んでいるというには程遠い構造であった。

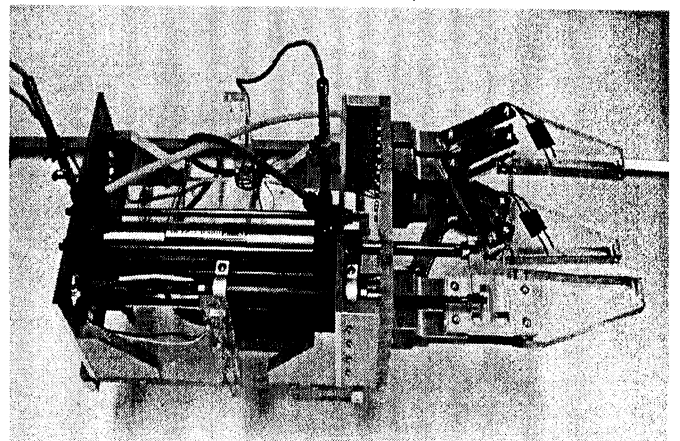


図1. 空気圧シリンダを使用した把持機構

ところで、機械的なフィンガとは異なり、人間はどのような物体に対してでも非常に良く適応し把持動作を行うことができる³⁾。

そこで、まず人間が柔軟な物体を把持する際にどのように力を加えているのかを明らかにすることにした。人間の把持力を調べ、フィンガの数による影響や水産物に加わる力を知ることができれば、これを空気圧フィンガ等の機械化に反映させることができる。

本研究では、グローブスキャンシステムと呼ばれるセンサの解析を行い、さらにこれを用いて実際に物体を把持した時の各指に加わる把持力について実験・考察を行った。

2. グローブスキャンシステム

2.1 センサ原理

人間の把持力を調べるために、図2のようなグローブスキャンシステム⁴⁾を用いる。

このセンサは、人間の手の平を模した(図1において左端が小指、右端が親指)厚さ約0.1(mm)のフィルム状シートで、加わる力の大きさに応じて電気抵抗値が変化する特殊な導電性インキ⁵⁾で薄膜が形成されている。さらに、この薄膜の上下に行電極と列電極が一定の間隔でマトリクス状に配置されており、これらの交点が個別の力検出点となっている。この個別の力検出点をセンサセルと呼び、今回使用したセンサシートは、4セル×4セルの正方形のエリア20箇所(計320セル)の力検出点をもって、把持の際の圧力分布と力を表現することができるようになっている(後述では各エリア・各センサを、図2に示すような名称で識別し、表示している)。具体的には、測定の対象物がセンサシート上に乗せられると、圧力が加えられているセンサセルの電気抵抗値が変化し、この値を8bit(256段階)のデジ

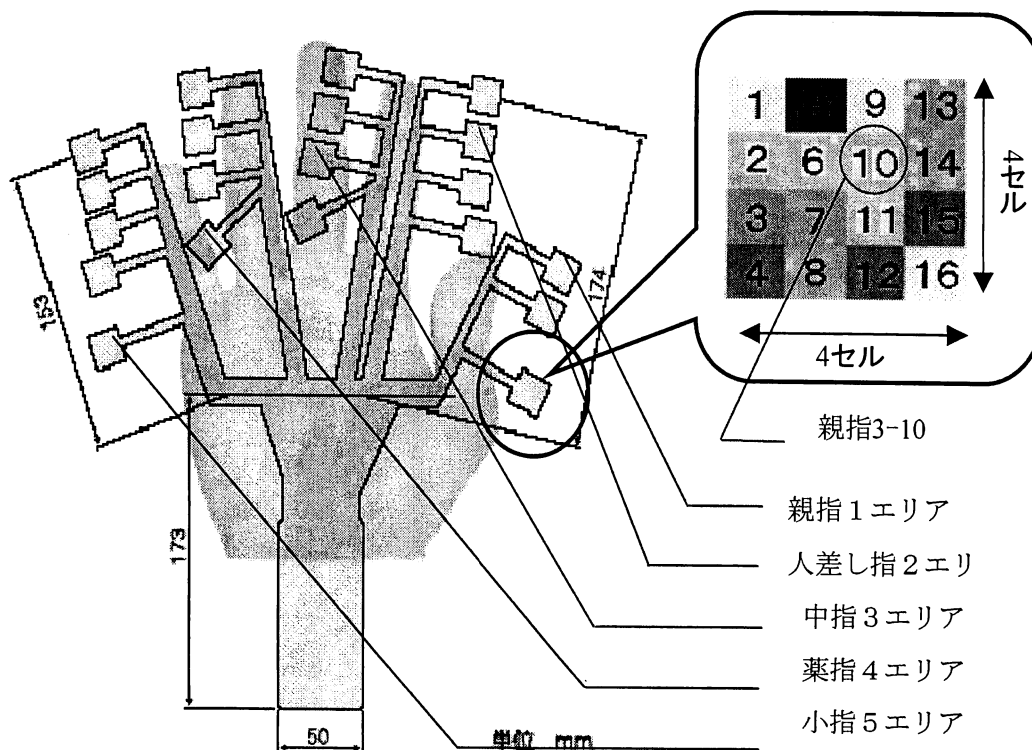


図2. グローブスキャンセンサシート

タル値(raw値)に変換し、コンピュータに取り込んでいる。この様なセンサを薄い皮製のグローブに貼り付け、これを装着した人間が様々な物体を把持し記録・分析を行った。

2.2 ブラダテスト

グローブスキャンシステムは、通常の圧力変換器とは異なり、同時に320点もの検出点からデータを採取するため、センサの較正が特に重要になってくる。センサの較正を行うには、すべてのセンサセルに一樣な荷重をかける必要がある。しかし、今回用いるセンサは広い面積を有するため、様々な大きさの圧力をすべてのセルに発生させるためには、非常に面積が広くかつ平面度の高い重りが複数個必要になる。このような重りを、荷重毎に製作するのは現実的ではないため、空気圧を利用して様々な大きさの圧力を均一にかけることのできるブラダテスト装置を製作した。製作した装置を図3に示す。ボルトで連結された2枚のアルミ板の間に、センサシートと伸縮性のある空気袋（加圧上限180kPa）を挿入し、コンプレッサーからの圧縮空気を空気袋に送り込むことでセンサが均等に加圧されるようになっている。

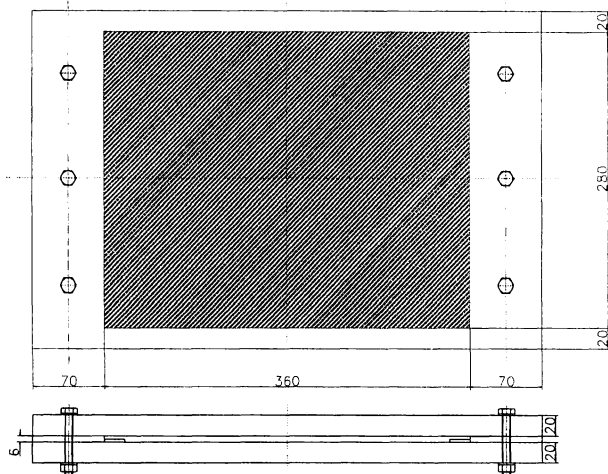


図3 ブラダテスト

図3に示すハッチング部分が加圧部である。

また、コンプレッサーと空気袋を繋ぐチューブの間に圧力変換器を挿入し、空気袋中の圧力の測定も同時に行った。

測定には、VisualC++によるDLL（ダイナミック・リンク・ライブラリ）を利用したソフトウェアを作成し使用した⁶⁾。これは、AD変換ボードを介してWindows環境での測定が行えるようになっている。

2.3 センサの再現性

センサの特性が全く分からないため、センサシートの再現性について評価を行った。実験は、これまで述べたような測定系を用いて一定の圧力(54.59kPa)をセンサシートに印加する方法で行ったが、空気袋が膨らみきるまでの過渡的な応答の影響を排除するため、加圧開始後20(s)経過時に計測を行った。また、320セルすべてのデータを記載するのは不可能であるため、空気袋のちょうど中央に位置する中指4-7に対象を絞って、実験した結果を示す。図4に測定データに対するヒストグラムを示す。バラツキが生じているが、ほぼ正規分布に従っていることが分かる。54.59(kPa)を印加した場合のraw値は±4.92(raw)程度のばらつきの範囲内に入る。

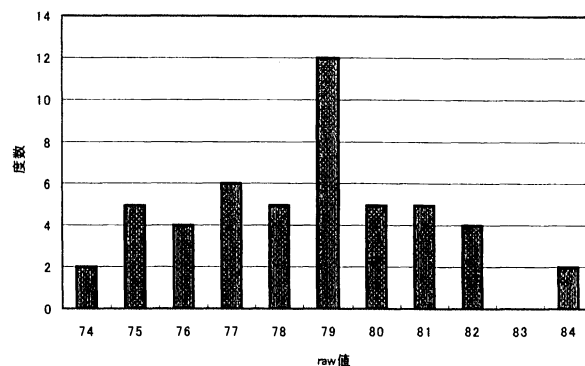


図4 raw値のばらつき

2.4 センサの校正

次にセンサの較正を行った。まず、320点全てのセルについて較正を行うのではなく、概要を知るためのサンプルとして、今までと同様に中指4エリアを対象として出力の測定を行った。測定は空気袋の加圧上限が180 (kPa) であるため、0~160 (kPa) の範囲で10 (kPa) 毎に行った。測定した結果を感度の大きさ毎にまとめて図5に示す。横軸は印加圧力、縦軸はraw値を表している。図5を見ると、20 (kPa) 未満では非線形で、これより大きな圧力ではほぼ線形であることが分かる。そこで、線形部分に対して最小自乗法を適用し、直線近似を行った。作成した直線を比べると、各直線はそれぞれ異なるバイアス値を持っていることが分かる。これは、このセンサを用いて実際に計測を行う場合には、セル毎に零点を調節してやらなければならないことを意味している。

また、バイアス値だけでなく傾きもセル毎に固有の値を持っていることも読み取れる。これは、raw値の変化率がセル毎に異なることを意味している。つまり、零点の調節後に等圧をかけたとしても、320点すべてのセルが異なるraw値を示すということになる。これでは把持力についてのデータを容易に得ることはできないため、以下に示す方法で使用するセルの選定を行い、較正を行うことにした。

2.5 セルの選定方法

センサシートは4×4のセルを1エリアとして、合計20エリアの計測箇所を有している。しかし、前述したように各セルの特性が異なるため、各エリアに対し1つずつ感度が近いセルを探し、これを代表セルとすることで、合計20セルで手の平全体に加わる圧力を計測することにした。このような方法を用いると、零点の調節を行うだけで、センサ毎の特性の

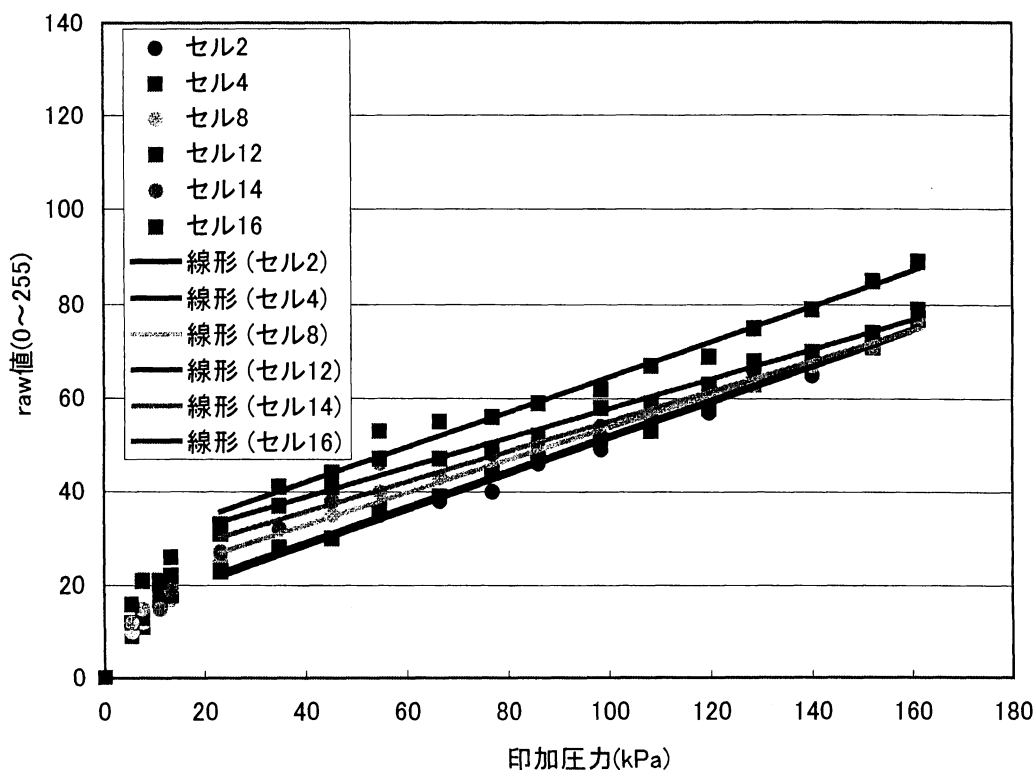


図5 印加圧力とraw値

違いは意識せずに1つの校正線図で計測することができる。

次に、代表セルの決定方法について述べる。

まず、空気袋による過渡的な影響を排除するために、空気袋の中央にあたる中指4エリアについて計測を行い、16セルのraw値の平均をとり、これに対する線形近似式を最小自乗法によって求める。さらに、各圧力におけるraw値の分散を計算し、これより導かれる標準偏差を、先ほど求めた16セルの平均の線形線の上下に取り、この範囲から外れた極端に高感度または低感度のセルを取り除く。残ったセルに対し再び同様のプロセスを行い、平均の線形近似式の傾きといずれかのセルの傾きがほぼ等しくなるまでこれを繰り返す。このように、傾きが等しくなったセルを、基準エリアの代表セルとする。さらに、残りの19エリアについても1セル毎に20(kPa)以上における線形近似式の傾きを求め、中央の代表セルの傾きに最も近いものをそれぞれのエリアの代表として計測に用いることとする。19セルすべてのセルが中指4エリアの代表セルである中指4-13の傾きとほぼ等しく、ゼロ点さえ調節してやれば、1つの線図で校正することが可能であり、20(kPa)以上であれば、およその圧力を知ることができる。図6に、計測に用いた校正線図をばらつきのある範囲と共に示す。

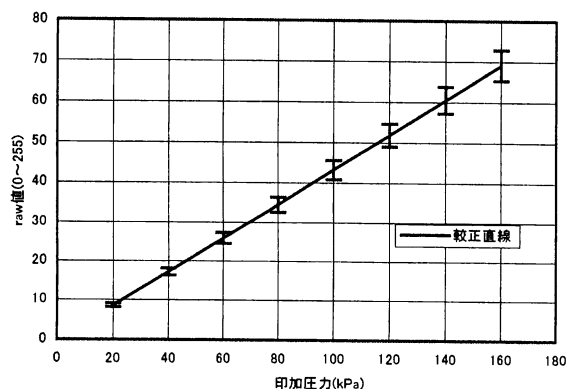


図6 校正曲線

また、代表セルの位置を図7に示す。図において色の付いた正方形で囲まれた部分が今回使用する代表セルを示し、このセルで検出された圧力をそのエリア全体の圧力と見なすこととした。

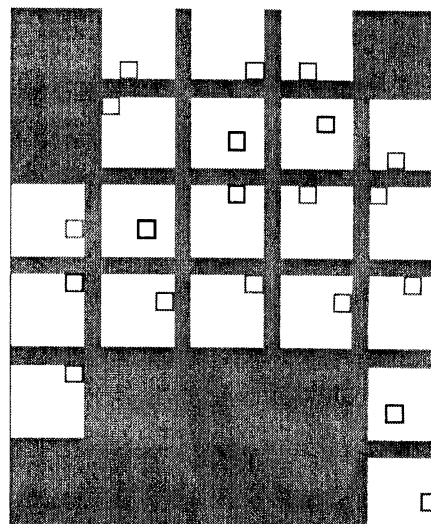


図7. 各エリアの代表セルの位置

3. 把持力の分析

3.1 実験条件と測定結果の表示

これまで述べてきたような特殊な校正方法を計測データ(raw値)に適用し、圧力分布を可視化するために、VisualC++によるMFC⁶⁾を用いてソフトを作成した。測定結果はこのソフトを用いて表示する。尚、20(kPa)未満は非線形であるが、圧力は加わっているためで灰色で表示している。また、各測定結果の後に、分布だけではなく具体的な圧力を数値で示すために表を添付した。圧力が20(kPa)未満の場合、校正は出来ないが圧力は加わっていることを示すために、999(kPa)という極端な値を表示しそのことが分かるようにした。

実験は、柔軟性が異なるという実験の目的に適した性質をもち、青森の名産である2つの食品、りんご(223g)と真いか(250g)を対象と

し、親指とその他の指の間に物体を側面から挟むようにして把持を行った。サンプリング周期を1s、測定時間を120s、指の数を2~5本と変えて行った。また、把持力を計測した結果、掴み始めは圧力が大きく、その後徐々に減少し安定する傾向にあったため、比較的圧力が安定してくる50(s)時のデータを掲載した。

なお、真いかを把持し実験を行った後、翌日にはセンサが機能しなくなっており、データ取得が不可能な状態になっていた。これは、センサが塩分により損傷したものだと考えられる。

3.2 フィンガ数による圧力の違い

図8~11に、フィンガの数を2~5本まで変化させ、りんごを把持した時の圧力について示す。図を見ると、2指の時の親指1エリア、人差し指1エリアに加わる圧力が、3指以上の同エリアに比べて大きな値となっているのが分かる。これは、指の数が少ないことで1本の指に加わる負担が増加するためである。

フィンガの数を3本にすると、親指1エリアに加わる圧力は131.87(kPa)から92.52(kPa)と約30%程度減少し、さらに人差し指1エリアについては106.78(kPa)から37.34(kPa)と約

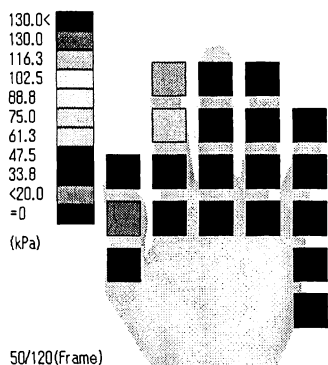


図8 2本指でのりんご把持

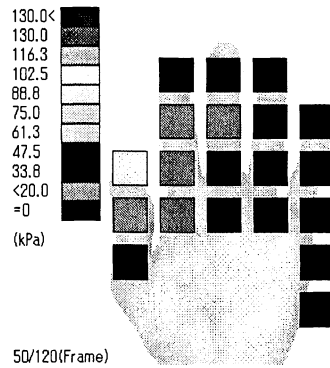


図9 3本指でのりんご把持

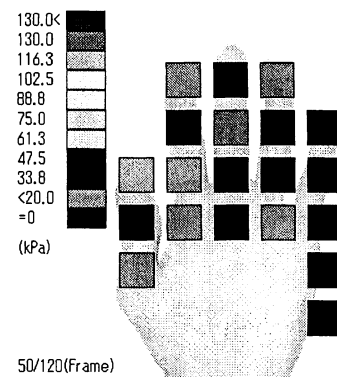


図10 4本指でのりんご把持

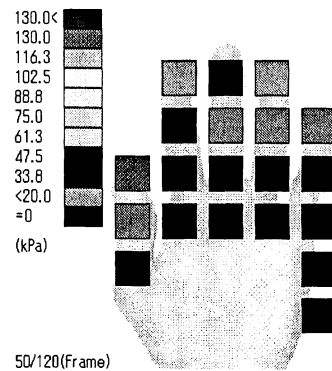


図11 5本指でのりんご把持

65%もの圧力の減少が見られ、1本1本の指の負担が大幅に減っていることが分かる。しかし、3指から4指、5指とフィンガの数を増やしても、親指1エリアの圧力は減少せず、逆に若干の増加傾向さえ見られる。また、親指以外の圧力は、フィンガの数を増やすほど減少し

ていくが、大幅な改善が見られるのは2指から3指までで、それ以上フィンガの数を増やしても、それほど大きな効果は得られない。このような結果は、人間が指で物体を挟むようにして把持を行う時、左右の指の数が異なるのが原因であると考えられる。人間が物体を把持している場合を考えた時、物体の左側を支える指は親指1本のみであるのに対し、右側は4本もの指で支えられている。そのため、指の本数をいくら増やしても、親指の負担はほとんど減少せず、その他の指の負担だけが減少するのである。また、4指5指の場合にそれほど大きな圧力の軽減効果が得られないという結果は、物体を把持する時、実質的に貢献しているのは親指、人差し指、中指であり、薬指、小指は補助的な働きをしていることを意味している。

総括すると、物体の把持のために主となるフィンガが最低3本必要であり、これらの指の圧力的な負担を少しでも軽減したいのならば、さらに4本、5本とフィンガの数を増やす必要がある。しかし、補助的なフィンガを増やしてもそれほど大きな圧力減少効果は得られず、これらの結果から、機械的な指を制御し物体を挟むようにして把持を行う時、最適なフィンガ数は3本であることが分かる。

3.3 硬い物体と柔らかい物体

ここでは、硬さが異なる物体として、りんごと真いかを比較し、把持した時の圧力の違いについて述べる。図12に真いかを3指で把持した時の圧力分布を示す。りんごを把持した時の図9と比較すると、りんごの場合は手の平も使用して把持しているが、真いかの場合は親指、人差し指、中指の指先で物体を把持し

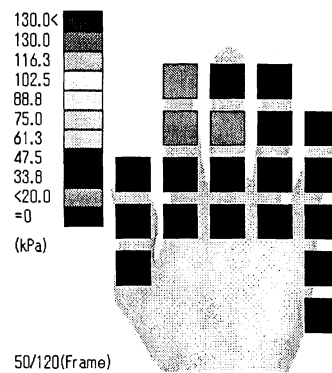


図12 3本指で真いかを把持

ており、手の平には力が加わっていないことが分かる。これは、把持した物体が変形し指から滑り落ちそうになった時、人間は指先に力を入れてこれを防ごうとするということを示し、機械的な指で柔軟な物体を把持する場合も、指先の制御が特に重要であると言える。また、真いかは、りんごよりも12%程度重量が大きいにもかかわらず指に加わる圧力は非常に小さいことも読み取れる。これは、真いかには柔軟性があり変形してしまうため、指に力を加えても、返ってくる反力が小さいためである。

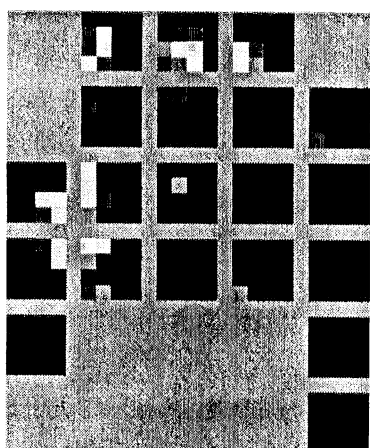
次に摩擦の面から把持動作を考える⁸⁾。真いかのような水産物は、表面の摩擦係数が低いいため、接触面積はなるべく大きく取った方が良い。図9にフィンガの数を増加させた時の接触面積の推移を示す。図9を見ると、フィンガの数を2本から3本に増やした場合は約1.8倍の接触面積の増加が見られるが、その後、4指、5指とフィンガの数を増やしても、大幅な接触面積の増加は見られず、薬指、小指はほとんど物体との接触を持っていないか、または、接触していてもほとんど圧力は加わっていないことが分かる。これより、5-2の結果と同様に、把持動作の際、主な働きを持つ指は親指、人差し指、中指だと言える。このよう

な結果より、摩擦という観点から見た最適なフィンガ数も3本であることが分かる。

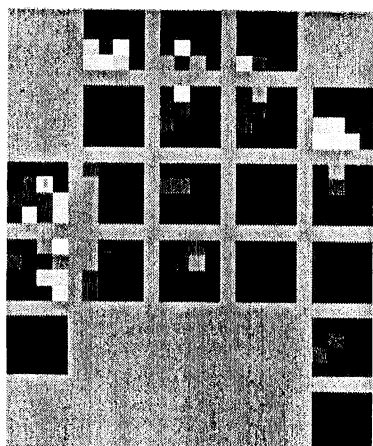
3.4 把持力分布の個人差

これまでの実験結果が個人の握り方の癖では無く、一般的なものであるか確かめるために、3人の被験者に同一物体(円柱状のスティール)を把持してもらい、個人差によって把持力が変化するかどうか実験を行った。結果を図13(a)～(c)に示す。

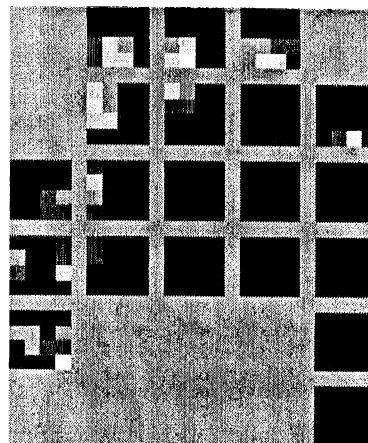
この実験は、分布を比較するのが目的であるため、較正を行っていない電気抵抗値を320点すべての検出点について示す。図13を見ると、すべてのケースにおいて指先のraw値がその他のエリアのraw値に比べて非常に大きく



(a) 被験者Aの把持状態



(b) 被験者Bの把持状態



(c) 被験者Cの把持状態

図13 把持力分布の個人差について
(円柱状のスティール缶を把持)

なっており、今までの結果と同様に親指、人差し指、中指に高いraw値が分布していることが分かる。また、同じセル同士を細かく比較しても若干の力のかかる場所の違いはあるが、その周囲1セル以内に同様の大きさのraw値を示すセルが存在することが分かる。被験者Cについては他の被験者と若干異なり、親指の付け根にも力を加える癖があるように見受けられるが、それでもその他のエリアについては3人ともほぼ同様な分布を示している。これらの結果より、人間が同一物体を把持する場合には、多くの人が共通の分布に従って力を加えていることが分かる。

4. 空気圧フィンガへの適用

以上の把持力分析結果より、人間の把持機構を基に機械的なフィンガで物体を把持するためには、少なくとも親指、人差し指、薬指に相当する3本の指が必要であることが分かった。しかしながら、以前に製作した空気圧フィンガのように、3指が単なる平行移動の機能を有するだけではフィンガとしての機能は限られてしまい、物体を確実に把持するに

は不十分である。平行移動に加えて指先の動きを実現する必要があることがわかった。また確実な把持には指先の力制御が必要であり、その機能も実現する必要がある。例えば、図14に示すように指先も含めて駆動できるフィンガへの改良が必要であり、この機構について検討中である。

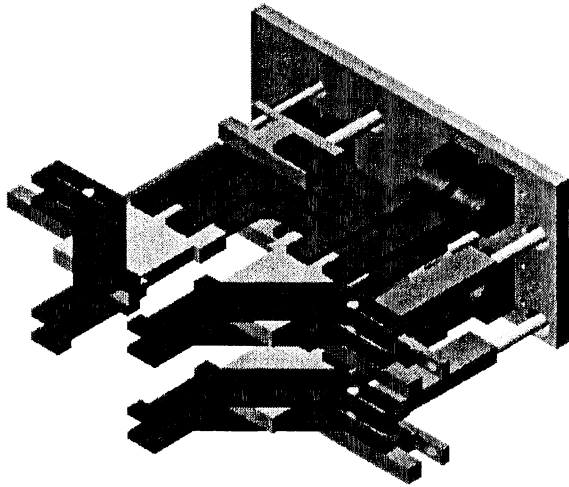


図14 フィンガ機構検討例

5. おわりに

空気圧フィンガの試作に反映させることを目標に、グローブスキャンシステムを用いて人間の把持力の分析を行った。分析結果をまとめると次のようになる。

I. グローブスキャンシステムについて

(1)再現性は正規分布にほぼ従っているが、測定値には ± 4.92 (raw)程度のばらつきが見られる。

(2)低圧では非線形、高圧では線形特性を示す。

(3)線形部の線形近似式は、傾き・切片共にセルによってばらつくが、特性の似たセルを選択し較正することで測定可能となる。

II. 人間の把持力について

(1)人間が物体を把持する時、最も力が加わる

指は親指である。

(2)硬い物体を把持した時

i)3本指で把持した場合、2本の場合と比較すると、親指・人差し指においてそれぞれ約30%、65%の把持圧力の減少が見られ、中指には大幅な負担の補助効果がある。

ii)4指、5指で把持する場合には、大幅な把持圧力の減少は見られず、物体の把持に大きく影響するのは親指、人差し指、中指であり、薬指、小指は補助的な働きをしている。

iii)機械的な指を制御し硬い物体を挟むようにして把持を行う時、フィンガの数は、3本で十分機能を果たせる。

(3)柔軟な物体を把持した時

i)物体が変形し指から滑り落ちそうになった時、人間は指先に力を入れてこれを防ごうとする。

ii)柔軟な物体は力を加えても変形するため、硬い物体を把持する場合に比べ、加わる圧力は小さい。

iii)フィンガの数を2本から3本に増やした場合は約1.8倍の接触面積の増加が見られるが、その後、4指、5指とフィンガの数を増やしても、大幅な接触面積の増加は見られず、最適なフィンガの数は3本である。

最後に、本研究は文部科学省科学研究費基盤研究C16560220の補助を受けて行われていることを付記し、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 水産加工，第108号，千葉県水産研究センター(2001)。
- 2) 佐藤勝俊，成田幸人，空気圧サーボを用いた把持機構の試作，八戸工業高等専門学校紀要，第38号，pp.77~82(2003)。

- 3) 早川恭弘, 空気圧のロボットへの適用 空気圧ハンドリングの力制御の現状と課題, 油圧と空気圧, Vol.26, No.2, pp.141~146 (1995).
- 4) 圧力分布測定システムマニュアル, ニッタ株式会社(2002).
- 5) 成田純平, 笹川和彦, 宮田寛, 藤哲, 生体小関節における接触圧力分布の測定システム, 日本機械学会東北支部第41期総会・講演会講演論文集, pp.141~142 (2006).
- 6) VisualC++によるAD入門書, インターフェイス株式会社(2004).
- 7) 桜田幸嗣・田口景介, VisualC++6.0 プログラミング入門, アスキー出版局(1998).
- 8) I Kim, H Inooka, Determination of grasp forces for robot hands based on human capabilities, Control Engineering Practice, Vol.2, Issue.3, pp.415~420(1994).