

柔らかく人を誘導するロボットハンドの開発

— 平面での力の把握 —

沖 俊任* 相澤 孝一**

Development of the Robot Hand for Leading Human Arms

— Force Detection in 2-Dimensional Space —

Toshitaka Oki* and Kohichi Aizawa**

Abstract: In this paper, a robot hand to guide human arms is proposed. This hand has at least three air bags inside of the hand. These air bags are not only used as shock absorbing material, but works as a pressure sensor. The structure of the air bag and robot hand, and experimental application results are shown.

Key words: robot hand, air bag, air pressure, force detection, guiding

1 緒言

工場など限られた場所で溶接や搬送などの作業を行っていたロボットに対し、人間の生活空間で生活をサポートするロボットが急速に発展しつつある。中でも介護ロボットやレスキューロボット [1, 2] などは人間を掴む、抱える、誘導するなど、人体に直接接触し操作することが求められるため、高機能化と同時に安全性や心理的影響について特に配慮される必要がある。人体に接触するロボットハンドの機能は、例えば腕を把持する場合、手首やひじ等の関節を含む場合や上腕と下腕の場合のように場所によって形状が大きく異なるが、把持する場所に応じて適切に形状が変化することが必要であり、さらに、人の突発的な動きに対して柔軟に対応できるやわらかさも必要である。これらの機能を実現するために、これまでにもロボットハンドの高機能化について多くの研究があり、複

雑な形状をした対象物のたくみな把持や高度な作業などをこなすことができるようになったが、従来の接触面の固いロボットハンドでは多彩な形状に対して広い接触面を使って把持することが困難であり、把持圧の検出も困難であると考えられる。また、これらを一般の生活空間に普及させることは、高機能であるが故に対故障性や価格が問題となり困難であると考えられる。

一方の安全性については、アクチュエータを空気圧駆動とすることで実現することが考察されている。これらは、空気が圧縮性流体であるという特性をうまく使った例と考えられる。これを人体把持に応用するアイデアは、たとえばレスキューロボットコンテスト [3, 4] などで類似のものがあるが単にクッションやアクチュエータとして利用したものであり、他の機能を意図したものではない。あるいは空気をを用いた圧力センサに関する研究が行われているが、センサ以外の目的を考慮したものではない [5, 6]。

本研究では、ロボットが人を掴んで誘導する、抱えて運ぶ、などの操作をすることを目的とした

(2004年12月10日 受理)

* 宇部工業高等専門学校機械工学科

** 株式会社 レンゴー

(平成15年3月宇部高専機械工学科卒業)

ロボットハンドについて考察する [7, 8, 9]. 特に人体を優しく把持し誘導することを想定し, 人の突然の動きに対応できる構造の簡単なロボットハンドとして, エアバックをロボットハンドの内側に装着することを考える. これにより把持部の形状は対象によって柔軟に変形し, その把持力はエアバック内の空気圧を測定するだけで分かるため, 非常に簡単な構造で必要な機能を実現できることが期待できる.

以下ではまず, ロボットハンドに求められる機能と実現方法をまとめる. 次に, 平面にとどまるが, 実験的に作成したロボットハンドを用いて力の検出方法を説明する. 最後に, このロボットハンドを実際の 2DF のロボットアームに取り付け, 検出した力を基に把持した人の腕の動きにロボットが追従できることを示す.

2 人を操作する際にロボットハンドに求められる機能

人の腕を把持するロボットハンドに求められる機能には次が考えられる.

1. 把持した部位に与える刺激が少ないこと
→ 出来るだけ広い接触面と均一な圧力
2. 把持する部位を特定しないこと
→ 掴む部位の形状によって形状が変化すること
3. 自由度はさほど必要としない
→ 単純な構造でよい
4. 人の動作へ柔軟に対応できること
→ 被災者の突然の動作を制御のみでなく機械的にも柔らかく受け止める

これらの機能を実現するために, ロボットハンドの内側にエアバックを取り付けることを提案する [7, 8, 9]. エアバックは把持圧によりその部位の形状と同じに変形するため, 把持部の形状によらずに均一に力を加えることができることが期待できる. 同時に, 把持する力によりエアバックの内圧が高まるので, これを検出することで力の大きさがわかり, さらに, 複数のエアバックで把持することで力の方向も検出できることが期待できる. また, 突発的な人の動きに対して圧力センサの応答遅れや制御応答遅れが生じても, エアバックが本来持ち合わせている圧縮性により人の動き

を易しく受け止めることが期待できる.

3 ロボットハンドの概要

ここではまず実験に用いたエアバックの構造について示す. 次に 1 つのエアバックとそれに付加した機能を 1 つの構成単位「ユニット」について説明する. 次に各ユニットにおいてエアバックにかかる力と圧力センサの出力について示す. その後, 複数ユニットを用いて把持した腕がハンドに及ぼす力の検出方法を示す.

3.1 エアバッグの構造

エアバックの構成図を Fig.1 に示す. エアバックは市販のゴム風船に膨張の少ないビニール袋を被せた 2 重構造になっている. この風船は外部から圧力を受けると変形するが, 外側のビニール袋により体積の変化は少なくなっている. さらに風船内部の空気は圧力センサに繋がり, 圧力の変化を電圧の変化として計算機に取り込むことができる.

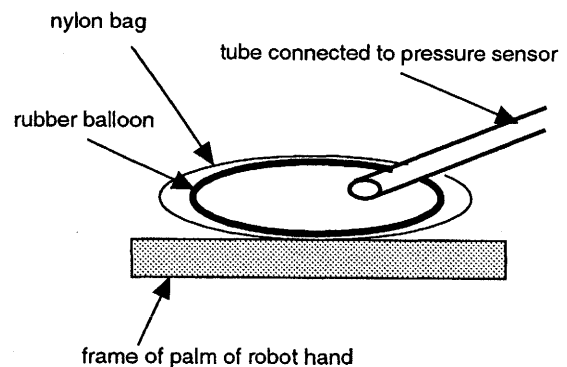


Fig.1: Schematic figure of an air bag

このエアバックをロボットハンドに取り付けた様子を Fig.5 に示す. Fig.5 ではロボットハンドに見たてた 3 角形のフレームの内側の各辺にそれぞれエアバックが取り付けられている. これらのエアバックは構造がよくわかるように空気を抜いているが, 実際には風船はビニール袋とほぼ同形状になるまで膨張させて用いる.

3.2 各ユニットの構成

各ユニットの構成を Fig.2 に示す. エアバックはバルブを介して一定圧に調整された圧縮空気源が接続されており, 使用前にこの圧縮空気が充填され, 使用中はバルブが閉じられる. バルブが閉じられた後は, エアバック内の圧力は圧力センサが電圧に変換し, 増幅器で増幅されて AD 変換器で計算機に取り込まれる.

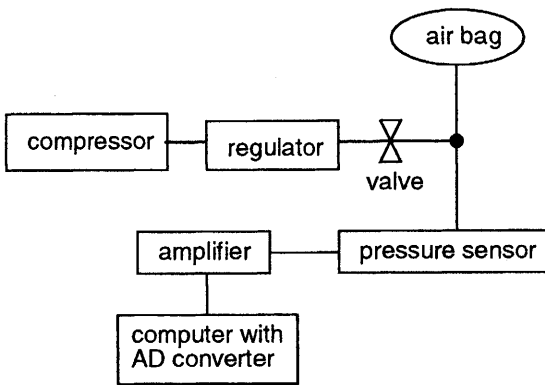


Fig.2: Component of air bag

3.3 エアバッグの特性

このエアバッグの一定面積上に負荷を与えると, 負荷とセンサの出力電圧の間に Fig.3 に示す静特性が得られた. 図中に製作した3つのエアバッグの計測点を点で示し, 最小二乗法を用いて求めた静特性の近似直線を LMS として併せて示している.

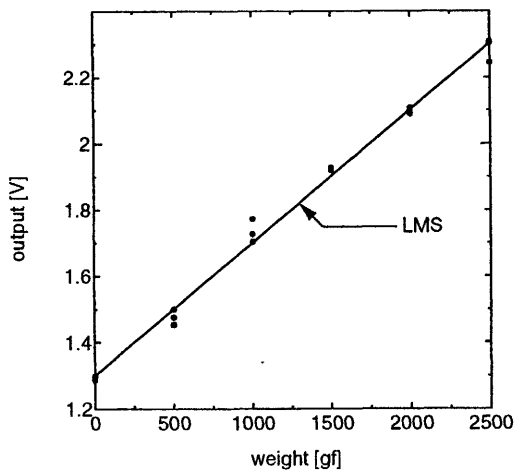


Fig.3: Load-output mapping of three air bags

図より静特性は測定範囲で線形であり, 各ユニットで大きなばらつきがないことが分かる.

3.4 ロボットハンドにかかる力の大きさと向きの検出

実験に用いたロボットハンドの構成図を Fig.4 に示し, 実験装置の写真を Fig.5 に示す.

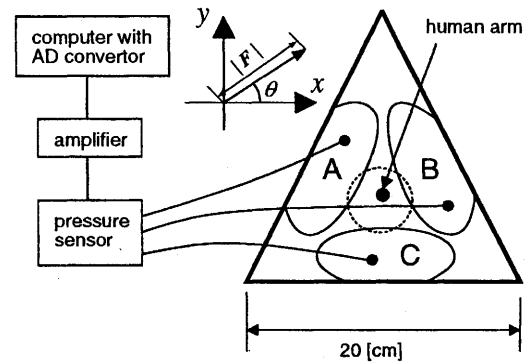


Fig.4: Robot hand with air bags

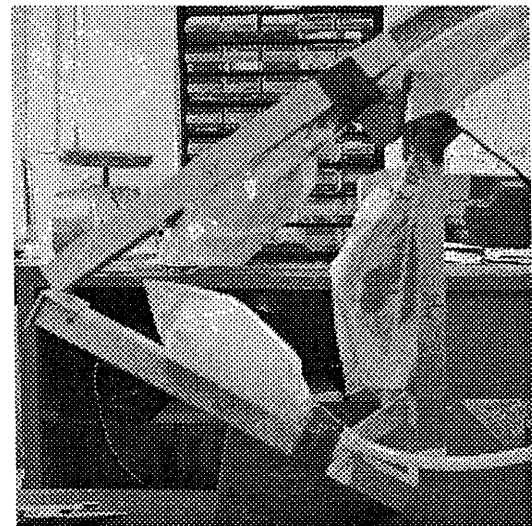


Fig.5: Experimental robot hand with three air bags

ハンドは一辺が 20cm の 3 角形をフレームとし, その各辺の内側に 3 つのエアバック (Fig.4 中で A, B, および, C で示される) を取り付けた. さらに, フレームの重心を原点とし, エアバック B を貼り付けた辺と平行に x , これと直行する方向を y とした.

いま, エアバック A, B, C により検出された

力をそれぞれ f_A , f_B , f_C とする. このとき, A, B, C により把持されている腕にかかる x 軸方向と y 軸方向の力をそれぞれ F_x , F_y とすると簡単な幾何的關係から次式を得る.

$$F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}(-f_A + f_B) \\ \frac{1}{2}(f_A + f_B) - f_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

さらに, x 軸から反時計回りに回転角を θ , 大きさを $|F|$ とすると,

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_y}{F_x} \quad (2)$$

の關係があることが分かる.

この考察を基に, Fig.4 のように, ハンドで腕を掴み, ほぼ円運動をするよう腕を動かしたときにハンドが検出した力の向きと大きさを Fig.6 に示す.

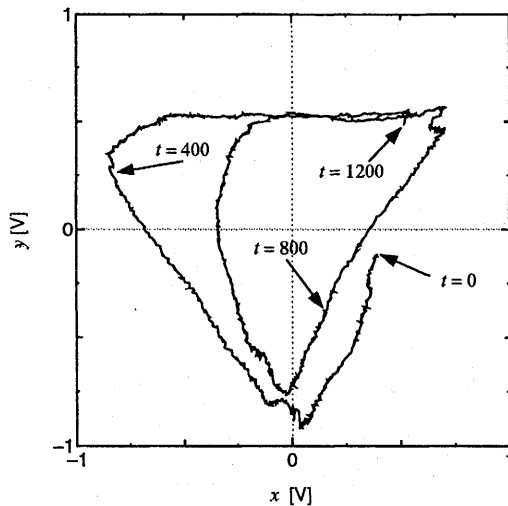


Fig.6: Detection result of the direction and power which has received the hand

Fig.4 のエアバッグの配置より腕は $\theta = \pi/2$, $7\pi/6$, $11\pi/6$ の正方向はエアバッグの変形が少なく反力を受けにくいため検出した力の大きさは小さくなり, 逆に変形が大きくなる方向では大きな圧力を検出している. この結果より, エアバックを用いたロボットハンドが腕から受ける力と方向を検出できることが確認できた.

4 提案するロボットハンドを用いた人の腕の誘導実験

上述のロボットハンドを 2 軸のロボットアームに取り付け, 把持した腕の動きにハンドを追従させる実験を行った.

4.1 実験装置の構成

実験装置の構成図を Fig.7 に示し, 写真を Fig.8 に示す. ロボットの各パラメータは Fig.7 のように設定した. ここで, $l_1 = 212[\text{mm}]$, $l_2 = 178[\text{mm}]$ である.

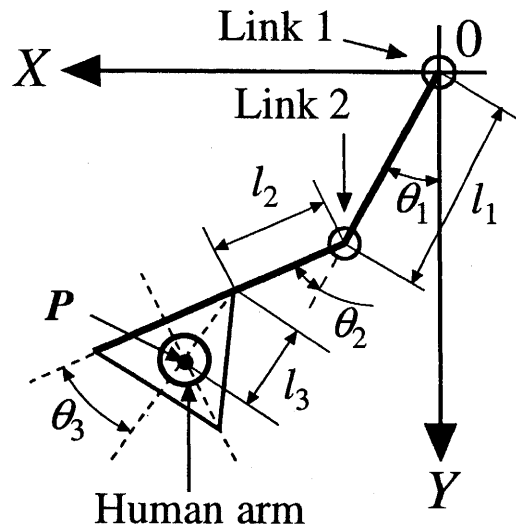


Fig.7: Schematic figure of experimental 2DF robot

モータは Link 1 と Link 2 に取り付けられトルク制御されている. 座標系は X 軸を水平方向とし Y 軸を鉛直下向きに設定した. 以下では, 手先位置と関節角度を次のベクトルで表す.

$$P = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

4.2 ベース座標系から見た人の腕の位置

Fig.7 に示すロボットの各パラメータから, 人の腕の中心座標は次式で求まる.

$$P = f(\theta) = \begin{bmatrix} l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \bar{\theta} + l_3 \sin(\bar{\theta} - \theta_3) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \bar{\theta} + l_3 \cos(\bar{\theta} - \theta_3) \end{bmatrix} \quad (4)$$

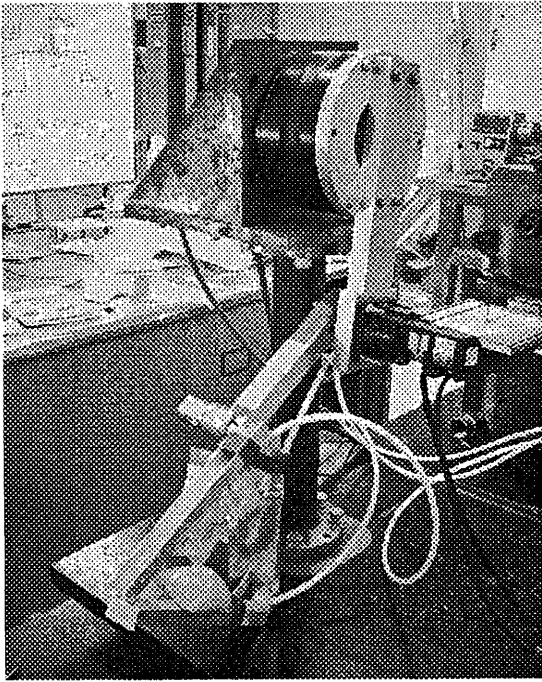


Fig.8: Experimental 2DF robot arm with proposed robot hand

ただし、 $\bar{\theta} = \theta_1 + \theta_2$ である。よって、(4)式とロボットの関節角度 θ_1 と θ_2 の時間変化からロボットハンドの重心の軌跡が求まる。

4.3 人の腕に対するロボットアーム追従制御

まず、ロボットハンドの座標系で検出される力 F とベース座標系で P にかかる力 F_{XY} は等しい。これらは、Fig.9に示すように回転の関係があることから次式のように表すことができる。

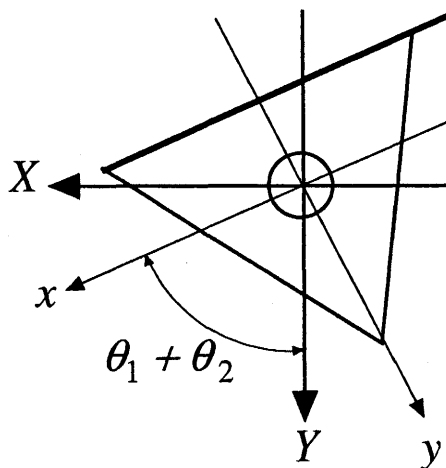


Fig.9: Relation between F and F_{XY}

$$F_{XY} = \begin{bmatrix} \sin \bar{\theta} & -\cos \bar{\theta} \\ \cos \bar{\theta} & \sin \bar{\theta} \end{bmatrix} F \quad (5)$$

次に、この F_{XY} を基に、各モータに発生させるトルクを求める。以下では簡単のため、力の向きとアームの動く方向は一致しているとし、ロボットハンドに掛かる力の方向にロボットアームを動かすことで、人の腕の動きへの追従制御を行うこととする。

P と θ の速度をそれぞれ \dot{P} と $\dot{\theta}$ とすると、次式が成り立つ。

$$\dot{P} = \frac{\partial f(\theta)}{\partial \theta^T} \dot{\theta} = J(\theta) \dot{\theta} \quad (6)$$

ここで $J(\theta)$ はヤコビアンをあらわしている。よって、(5)式と(6)式より、各関節の動かす方向は次式となる。

$$\dot{\theta} = J(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \sin \bar{\theta} & -\cos \bar{\theta} \\ \cos \bar{\theta} & \sin \bar{\theta} \end{bmatrix} F \quad (7)$$

実際のモータへの指示は、(7)式の $\dot{\theta}$ に適当な正数を乗じた上でリミッタをかけて用いた。

4.4 実験結果

ここではハンドのセンサによるフィードバックの有無によってロボットハンドの受ける力の大きさの違い、すなわち、どれだけロボットハンドが人の腕に追従したかを比較する。ロボットハンド受けた力が小さいほど、良好に追従したと考えることができる。以下の実験ではいずれの場合も、おおむねFig.10のように腕を動かした。

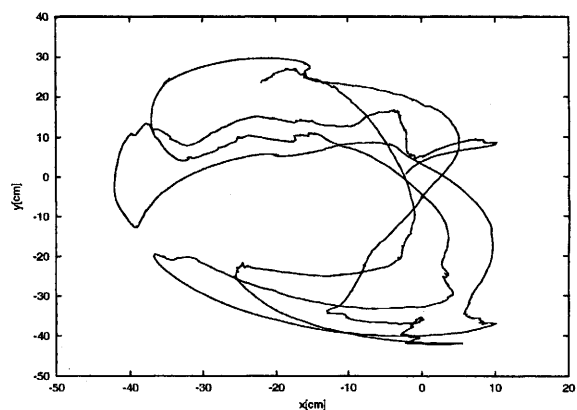


Fig.10: Trajectory of human arm

ただし Fig.10 では, $\theta_1 = 0[\text{rad}]$, $\theta_2 = \pi/2[\text{rad}]$ のときの P を原点としている.

4.4.1 センサのフィードバックがない場合 (関節が力を発生していない場合)

Fig.11 に, ロボットの駆動部にトルクを指示しない状態で腕を動かしたときにハンドの受けた力の大きさを示す.

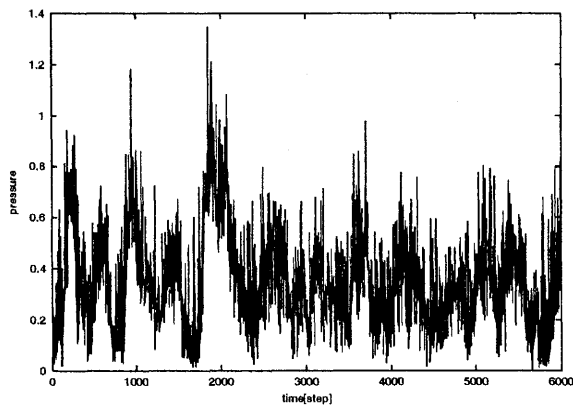


Fig.11: Guidance experiment of human arm : without control

図中, 縦軸はハンドの受ける力の大きさ $|F|$ に比例した電圧を表し, 横軸は制御回数を表している. これより, 人の腕の動きに対してロボットハンドが力を受けている様子がわかる.

4.4.2 センサのフィードバックがある場合

Fig.12 にロボットハンドが検出した力のフィードバックがある場合, すなわち, (7) 式の制御が行われているときにハンドの受けた力の大きさを示す.

Fig.11 と Fig.12 を比較すると, Fig.12 の方が受けた力が弱いことから, 提案したロボットハンドを用いたロボットで把持した腕への追従制御が実現できたことが分かる.

5 結言

本論文では, 人の腕を誘導するためのロボットハンドとして, ハンドの内側にエアバックを用いることを提案した. この手法では, エアバックで

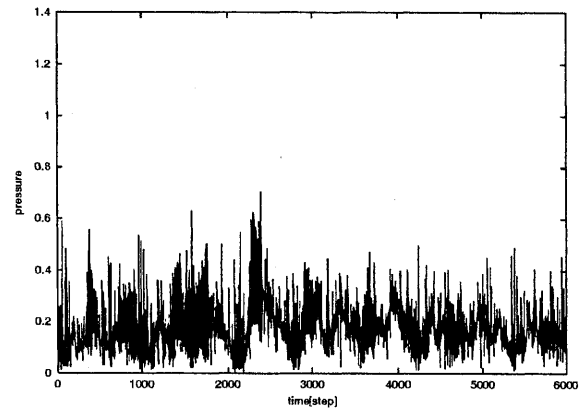


Fig.12: Guidance experiment of human arm : with control

把持した腕をやさしく扱うことができるのみならず, 3つ以上のエアバックと圧力センサを用いることで幾何学的な考察から力の向きが検出できることを示した. 次に実際への応用例として, 試験的に作成したロボットハンドを2自由度ロボットアームに取り付け, 把持した腕の動きにアームを追従させたときの良好な実験結果を示した.

残された課題には, 例えば次をあげることができる.

- 3次元における力の検出
- エアバックの構造と材質の見直し
- 圧力変化からエアバックの変形量の推定

これらのうち, 3次元空間での検出は成功しており, 今後の報告とする.

謝辞 本研究は平成14年度宇部工業高等専門学校特別教育研究費助成により行った.

参考文献

- [1] 救助ロボット機器の研究開発に資することを目的とした阪神淡路大震災における人命救助の実態調査研究会報告書, 日本機械学会 (1997)
- [2] 大規模災害救助ロボットシステムの開発研究分科会研究報告書, 日本機械学会 (1999)
- [3] <http://www.rescue-robot-contest.org/>

- [4] セッションタイトル「レスキューロボットコンテスト」, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会講演論文集 (2000)
- [5] 川島・水内・山口・加賀・稲葉・井上: 柔軟な前身感覚行動体へ向けたゴム空気室型触覚センサ, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.167-168 (1999)
- [6] 則次・佐々木・大野: シリコーンゴムを用いた圧力検出型ソフト触覚センサの開発, 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1003-1004 (2000)
- [7] 沖・忻・吉田: 人の腕を掴むためのセンサの開発, 第2回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 pp.243-244 (2001)
- [8] T.Oki and K.Tanaka: A Simple Robot Hand using Air Bags for Holding Human Arms, Proc. of The 2nd International Conference on Mechatronics and Information Technology, Jecheon, pp.368-371 (2003)
- [9] 沖・相澤・田中: 要介護者をやさしく誘導するエアバックを用いたロボットハンドの開発, 第46回自動制御連合講演会講演概要集, pp.142-1143 (2003)