

「メカトロニクスにおけるセンサフュージョン利用技術」の研究

石川 友彦*

本研究は平成4年度～平成7年度にかけて行われたものである。本研究のメインテーマは「センサフュージョン技術の確立」とその「メカトロニクスへの応用」である。

我々人間が何か作業を行おうとした場合、あるいは機械に何か作業を行わせようとした場合、外界から情報を得るものはセンサである。では、単一のセンサで作業に必要な情報を全て得ることができるかという不可能な場合が多い。我々人間を例にとっても、実に上手にセンサ群（人間にとっては五感と呼ばれるもの）を用いて、外界からの情報を取得・加工し、時によっては情報を組み合わせ、場合によっては新たに情報を生み出すこともあるし、冗長な情報を整理したりしながら作業に必要な情報を抽出している。センサ情報を取得・加工するのみではなく、これら一連の情報処理機構を明らかにすることが「センサフュージョン」の一つの目標である。

本研究では、それらセンサ群の中で視覚と力覚に着目し、ロボットにおける組立作業とその作業戦略におけるセンサフュージョンの役割を明らかにすることを試みた。これにより今まで単純な作業しか行えなかったものが、自律的な作業を行うことが可能となり、様々な状況において柔軟性のある対応が可能となった。

本報告では、センサフュージョンを利用した作業戦略について述べる。

1. はじめに

我々が工場内において行うような作業を、ロボットに行わせようとした場合に、一つのセンサのみですべての作業状況を把握し、効果的な情報を得ようとするのは困難である。そこで、作業意図に沿って様々なセンシング情報を効果的に統合し活用するセンサフュージョン技術の確立が重要な課題の一つとなっている¹⁾。

視覚から得られた情報とロボットハンドの手首に装着した6軸力センサの情報とを融合することにより、把持物体と他物体との接触位置を推定するシステムを構築し、実験によりその有効性を確認した^{2) - 4)}。

さらに、この接触位置の推定において、視覚や力覚から得られる情報の組合せは一意的に決められるものではなく様々な選択性が存在し、それら情報の中から作業意図に沿った最適な組み合わせを抽出し融合することが必要であること、さらにより精度良く接触位置を推定するためには、視点位置を移動させることが重要であることを指摘した⁷⁾。

本報告では、センサ情報の融合を考慮した作業のプランニングにおいて視点位置を移動させることの必要性と、どのような位置に視点を移動させたら良いのか、という視点移動の戦略について述べる。

2. 接触位置の推定原理

最初に、視覚情報と力覚情報を融合することにより接触位置を推定する原理について述べる。視覚センサにより得られた情報から接触点を含む平面（接触平面）を推定できる場合

には、力覚センサから得られる接触点を通る力ベクトル（外力ベクトル線）の情報とを融合することにより、接触位置を推定することが可能となる²⁾。

これは、以下の原理による。視覚センサにより得られた接触点を含む平面 P は、複数個の平面方程式により、

$$a_i \cdot x + b_i \cdot y + c_i \cdot z = d_i \quad (1)$$

と表わすことができる。

一方、力覚センサから得られる基本式は、

$$\Delta M = \Delta A \cdot re \quad (2)$$

と表わすことができる。ただし、 $re=(x_e, y_e, z_e)^t$ は、Fig.1 に示すような、力覚センサ中心から見た接触点の位置ベクトルである。また、 ΔM はモーメント、 ΔA は力ベクトルによる 3×3 の行列である。

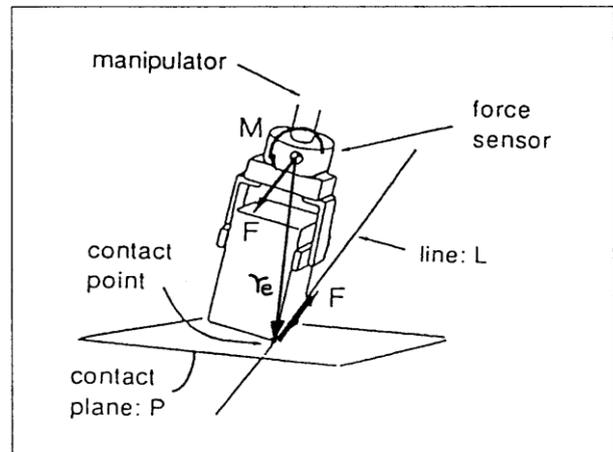


Fig.1 estimation of contact position

センサ座標系における接触点の位置ベクトル re をワールド座標系に直した接触点の位置ベクトル rw は、(1)式を満足しているため、結局(1)式と(2)式とを結合した線形連立方程式(3)式を解いて接触位置の推定を行うことができる。

$$Cvf \cdot rw = D \quad (3)$$

ここで、 Cvf は視覚から得られる接触平面の方程式の係数と力覚センサから得られる外力ベクトル線の情報とを融合したセンサ融合マトリクス、 D は ΔM と d_i を並べたベクトルを表す。

$$Cvf = \begin{pmatrix} 0 & \Delta fz & -\Delta fx & k \\ -\Delta fz & 0 & \Delta fx & \\ \Delta fy & -\Delta fx & 0 & \\ a_i & b_i & c_i & \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} \Delta mx \\ \Delta my \\ \Delta mz \\ d_i \end{pmatrix}$$

$$rw = (x_w, y_w, z_w)^t$$

3. センサ情報の選択性について

視覚情報と力覚情報とを融合することにより接触位置を推定する原理は、前節で述べたとおりである。しかし、それら情報の組み合わせは一意的に決められるものではなく、センサ情報自体に選択性が存在し、その中から最適な組み合わせを選び出すことが必要となる。

Fig.2 に示すような 2 つの物体の接触位置を推定する場合を例にとり述べる。(この場合、把持物体が確認できるが、実作業においてはハンド等により接触位置が隠されている場合を想定している。) 2 つの物体がある一点にて接触しているとしても、その接触位置を推定するために用いることが可能な接触平面は複数存在する。仮に P 点において接触しているであろうと仮定しても、視覚情報と力覚情報を融合する組み合わせの候補は、

- 1) 面Aの接触平面情報+力Fベクトル情報
- 2) 面Bの接触平面情報+力Fベクトル情報
- 3) 面A・面Bの接触平面情報+力Fベクトル情報をあげることができる。

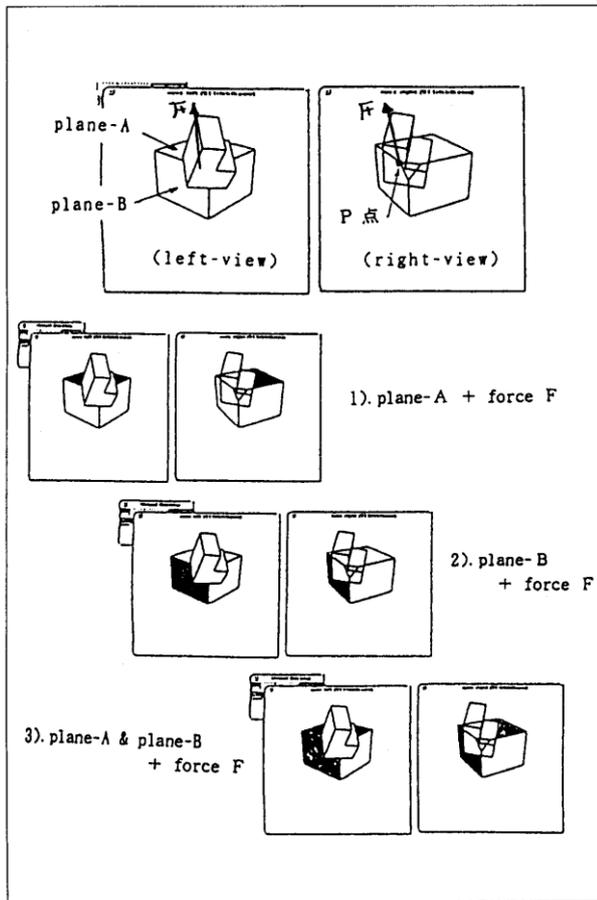


Fig.2 three possiblecases to select a plane for fusion calculation

さらに、これらの情報は対等の重みを持つわけではなく、相対的な関係により接触位置の推定に大きな影響を及ぼす場合がある。つまり、単に数多くの情報を融合すれば良いというわけではない。一例をあげると、融合に用いようとする面同士のかなす角が小さい場合には、交線情報はそれらの公差として得られるため、逆に誤差を多く含む結果となり、かえって融合した結果に悪影響を及ぼすこととなる。

このように、一概には決定できない複数の候補の中から力覚情報を考慮しつつ接触位置の推定に用いる平面(複数個の選択も可)を決定するためには、一定の評価基準を設けなければならない。そこで我々は、それらの組み合わせの中から最適な組み合わせを選択する評価基準として、(3)式が r_w を未知数とする線形連立方程式であることに着目し、係数行列

であるセンサ融合マトリクス C_{vf} の特異値分解を行い、そこから得られる条件数(最大特異値と最小特異値の比)^{5) 6)}を、フュージョンシステムの解の安定性の評価基準として用いた。

4. フュージョンを考慮したセンシング戦略

通常はこの評価基準に基づき、その状況における最適なセンサ情報の組合せを選択し、それら情報を融合し接触位置の推定を行えば良い。しかし視点位置が現状のまま接触位置の推定値の誤差範囲が作業に要求される基準を満たしているとは限らない。基準を満たさないような場合には、より精度良く情報が得られる位置に視点を移動させ、その位置にて改めて接触位置の推定を行うというセンシング戦略を構成することが必要となる。

具体的に、センシング戦略上どのような位置に視点を移動させたら良いのかというフローを Fig.3 に示す。

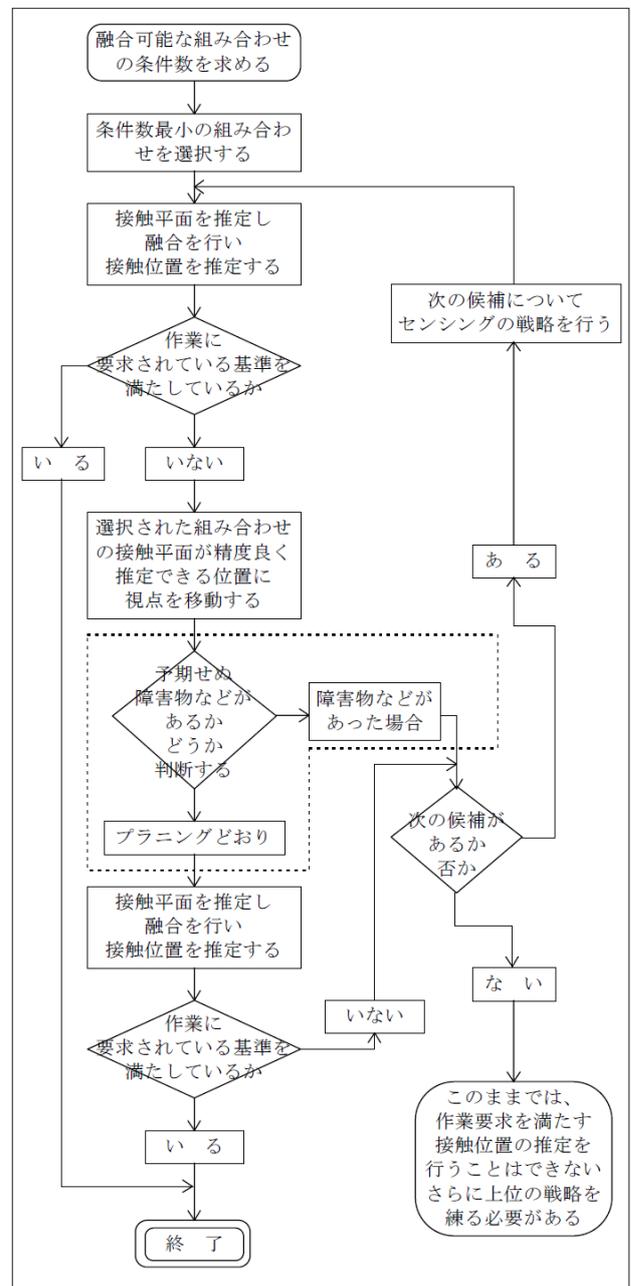


Fig.3 flowchart of active placement of the next view point

このフローを基に戦略の手順を説明する。

- 1) 力覚センサより接触点を通過するカベクトルが得られた場合には、そのカベクトルと視覚より得られた接触平面情報を融合したセンサ融合マトリクスの条件数を導く。
- 2) その条件数の最も小さい値をとるセンサ情報の組み合わせにおいて接触位置の推定を行う。
- 3) 推定値の誤差範囲が作業に要求されている基準を満たしているかどうか判断する。
- 4) 基準を満たしている場合は、具体的な作業に入る。基準を満たしていない場合は、選択された接触平面が精度良く推定できる位置に視点を移動し、改めて接触位置の推定を行う。
- 5) 推定値の誤差範囲が作業に要求されている基準を満たしている場合は、具体的な作業に入る。
- 6) 基準を満たしていない場合、及び何らかの理由により、求められる精度を得られなかった場合には、次に小さな値をとる条件数の組み合わせに対して同様の作業を行う。

このようなセンシング戦略をとることにより、接触位置を推定することができ、組立作業等に活かすことができる。しかし、センサ情報の組み合わせすべてにおいて、作業に要求される誤差範囲に推定値が納まらなかった場合には、視点位置を移動しただけでは、具体的な作業に移ることができないことがわかる。つまり、そのような状況では作業に要求される基準を満たすことができないわけであるから、さらに上位レベルの戦略において、改めてセンシング戦略を練る必要があることが明確となる。

5. 実験

前節にて述べた視点移動の戦略に基づいて、Fig.4 に示すような1辺200mm 高さ150mm のある角が切り落とされてような直方体に、長辺100mm 短辺50mm のL字形の立体を接触させ、その接触位置を推定する実験を行った。最初カメラは把持物体から約920mm の位置に260mm の間隔で配置しているものとした。

一般的には外力ベクトル線を接触位置が適切に推定できるように能動的に変更する戦略もとる得るが、本実験においては、力覚センサより得られる外力ベクトル線は既知とし、その外力ベクトル線に対する視覚情報との融合について評価し、視点移動の戦略の評価を行うこととした。また、評価基準の有効性を確かめるため、視覚センサによる平面の推定誤差は考慮せずにシミュレーションを行った。

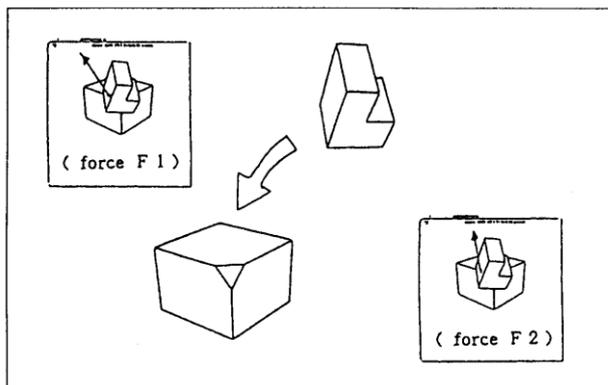


Fig.4. an experimental model

Fig.4 に示したモデルに対して、カベクトルF1,F2 が検出された場合のシミュレーションを行った。ここで、カベクトルF1 は、面Aと面Bの法線ベクトルとのなす角が同じくらいの位置に存在するものとし、カベクトルF2 は、面Aの法線ベクトルとのなす角が面Bに対して小さいものとして実験を行った。その結果を、Table.1 に示す。

	カベクトル F1	カベクトル F2
面A+力F	2.618	1.632
面B+力F	2.618	22.405
面A・B+力F	1.732	1.899

Table.1 Condition numbers

ここで、面A+力Fは、融合したセンサ情報の組み合わせ（面Aの法線ベクトルとカベクトルFを用いたこと）を示す。その右の欄は、このセンサ情報を融合したセンサ融合マトリクスを特異値分解して得られた条件数を示す。

このように、面Aや面Bと同等の位置にカベクトルが存在する場合には、個々の面のいずれかを選択して融合するのではなく、双方の面情報とカベクトルを融合し接触位置を推定するのが最適であり、現視点位置では十分な推定精度が得られない場合は精度良く推定できる位置に視点を移動した後、接触位置の推定を行う必要がある。

また、カベクトルがF2 の場合には、複数の面情報を融合するよりも面Aが精度良く推定できる位置に視点位置を移動する戦略をとる方が良いことがわかる。

さらに、このような戦略を基に視点を移動して接触位置の推定を行おうとしたが、予期せぬ障害物や他の制約

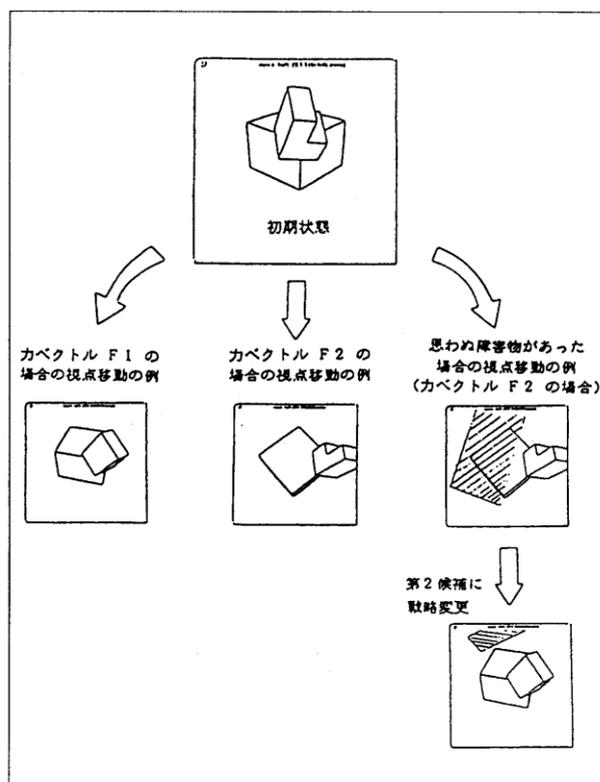


Fig.5 examples of the next view points

条件のために、予想した情報を得ることができなかった場合には、次の組み合わせの候補において同様の戦略をとりながら作業を進めれば良いことがわかる。このような戦略に基づいて視点移動を行う例をFig.5に、また、現在構築を進めているシステムの様子をFig.6に示す。

6. むすび

本報告では、センサ情報の融合においては選択性が存在し、作業意図に沿った最適な組み合わせを抽出し融合することが必要であること。さらに、センサ情報の融合を考慮した作業のプランニングにおいては、視点位置を移動させることが重要であることと視点移動の戦略について述べるとともに、センシング戦略を評価するための処理系の基本部を構成し、提案した戦略の基づいた実験例について述べた。今回は、視覚センサによる接触平面の指定誤差を考慮せずに実験を行ったが、今後は推定誤差をも含めた処理系に拡張する必要がある。

現時点において「センサフュージョン」というものは確立された技術ではなく、まだまだ変貌を遂げている研究分野である。これまで決まり切った作業を寸分の狂いも無く行うというイメージの強かったロボットや工作機械であるが、これからは医療関係やホームケアなど人間に近い様々な領域に参画することになるであろう。そのためにはどのように人間社会に打ち解けて行くのか、これからの「センサフュージョン」研究の進展によるロボットや機械たちの自律化に期待したい。

最後に、長期間に渡りましてご指導頂きました中央大学 坂根茂幸 教授、電総研 築根秀男 知能システム部長、東京電機大学 柿倉正義 教授、東京大学 佐藤知正 教授、EusLispを開発された松井俊浩主任研究官をはじめ、本システムの開発にご協力頂きました電総研ロボットグループの方々に感謝いたします。

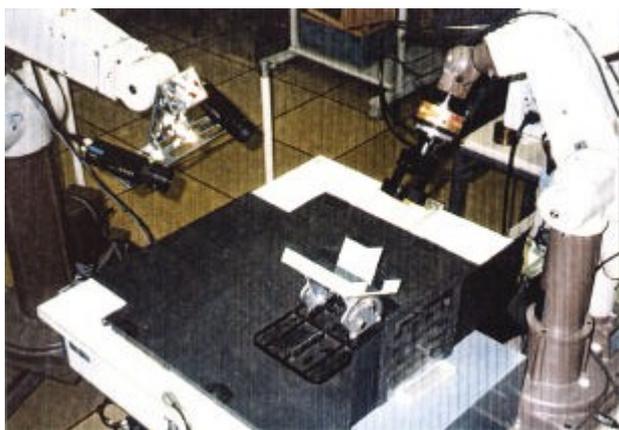


Fig.6 overview of the new experimental system

参考文献

- 1) 特集：センサ情報の統融合、日本ロボット学会誌、vol.8,no.6,(1990).
- 2) 坂根、石川、岡本、佐藤、柿倉：視覚と力覚のセンサフュージョンに基づく把持物体の接触位置の推定、第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集、pp.229-230,(1992).
- 3) 坂根、石川、岡本、佐藤、柿倉：視覚と力覚のセンサフュージョンに基づく把持物体の接触位置の推定—センサ情報の組み合わせの評価について—、第32回計測自動制御学会学術講演会、pp.605-606,(1993).
- 4) 坂根、石川、佐藤：視覚と力覚のセンサフュージョンによる接触位置の推定、日本ロボット学会誌、vol.12,no.5,pp.677-684,(1994).
- 5) 伊理、児玉、須田：特異値分解とそのシステム制御への応用、計測と制御、vol.21,no.8,pp.763-772,(1982).
- 6) 内山、中村、箱守：特異値分解によるロボット力覚センサの構造評価、日本ロボット学会誌、vol.5,no.1,pp.4-10(1987).
- 7) 石川、坂根：視覚と力覚のセンサフュージョンシステム—センサ情報の選択について—、第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集、pp.279-280,(1994).