高速視覚を用いた多指ハンドによる物体操作

東京大学　○ 並木 明夫　中坊 嘉宏　石井 抱　石川 正俊

Manipulation by a Multifingered Hand Using High Speed Visual Feedback

The University of Tokyo　○ Akio NAMIKI　Yoshihiro NAKABO　Idaku ISHII　Masatoshi ISHIKAWA
http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/~sfoc/

Abstract: In this paper we discuss a manipulation system using high speed visual feedback and its control scheme. In this scheme visual feedback is dynamically integrated with other sensor feedback and robust against dynamical environment transition. This is experimented on a multi-fingered hand-arm system with a high speed active vision. As a result the hand has succeeded in grasping and manipulation at high speed.

Key Words: *high speed visual feedback, sensor fusion, multifingered hand-arm system, manipulation*

1　はじめに

従来のマニピュレーションでは，外界の認識の多くを内界センサや力覚センサに依存していたために，確実な予測や計画が不可能な環境では，動作の遂行が困難であった．この問題は，外界の状況を実時間で認識できる高速な視覚フィードバックを用いることで解決できる．本研究では，高速視覚フィードバックを把握・操り制御系に統合するための手法を提案し，高速把握システム [1] 上に実装する．これは，視覚と力覚・内界センサの各センサ情報を動的に統合するものであり，外部環境の変動に対して高い応答性能が得られるだけでなく，異なる作業形態へも対応できる汎化能力の実現にも有用であることを示す．

2　高速視覚フィードバックを用いた物体操作

一般に，マニピュレーション作業では，複雑かつ多様な動作が要求され，対象の位置や形状の情報と力情報を統合して制御計画を行う必要がある．よって，高速視覚フィードバックをマニピュレーション制御系に組み入れる際には，他のセンサフィードバックとの安定性を考慮した統合を行わなければならない．

これに対して，従来のセンサフュージョンで多く行われているような静的な融合手法を用いた場合には，センサフィードバック信号の持つ強い動特性のために，高応答性と安定性を同時に実現することは難しい．よって，(1) 高速性に基づいた高応答性 (2) センサ情報の外乱に対する安定性 を共に満たすような，動的なセンサフュージョン手法を新たに構築する必要がある．

一方，マニピュレーション作業のもう一つの重要な特性として，その作業形態の多様性が挙げられる．例えば，対象操り動作は，Fig.1左図に示すように，対象を把持するまでの動作からなるグラスピング相と，把持した後に目標状態に変位を与えるマニピュレーション相に分離される．前者は主に視覚フィードバック中心であるのに対して，後者では，視覚と触力覚フィードバックが統合された制御系が中心となっており，制御形態が異っている．

このように，一つのタスクを実行する上でも，異なる多くの作業状態を経る必要があるが，一般的な環境においては，作業形態の変更を確実に予測・計画することが困難であるために，(3) 作業形態の違いを包含する汎化性 を考慮した統合手法が要求される．

以上の性質を満たすような統合形態を，本稿ではマルチセンサフィードバックと呼ぶ (Fig.1右図)．

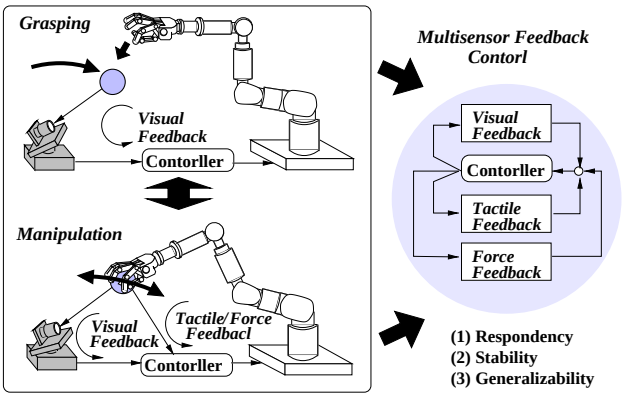

Fig. 1　Manipulation Using Multisensor Feedback

3　動的なセンサフィードバックの統合

マルチセンサフィードバックの実現のための第一歩として，従来の力制御系に視覚フィードバック補正を加えることで，センサフィードバック統合を実現する．さらに，これを用いてグラスピング相とマニピュレーション相が統合されることを示す．

まず，対象の位置が視覚によって計測可能であり，これを関節角センサと手先に力センサを持つハンドアームで操作するような状況を考える．ハンドアームは位置制御をベースとしたスティフネス制御系を組まれており，そのダイナミクスが次式で近似できるものとする．

$$M\ddot{\boldsymbol{x}} + D\dot{\boldsymbol{x}} + K(\boldsymbol{x} - \hat{\boldsymbol{x}}_{ref}) = K_f(\boldsymbol{F} - \boldsymbol{F}_{ref}) \qquad (1)$$

ここで，$\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{R}^3$ は関節角から計算されるアームの手先位置座標であり，$\boldsymbol{x}_{ref}$ はその目標値を表す．M, D, K は位置制御後の近似ダイナミクスを表す正定値行列である．また，$\boldsymbol{F} \in \boldsymbol{R}^3$ は手先に加わる外力，$\boldsymbol{F}_{ref}$ はその目標値であり，K_f は力制御補正係数となる．

一方，視覚によって得た対象の位置座標 $\boldsymbol{p} \in \boldsymbol{R}^3$ とアーム手先の位置座標 $\boldsymbol{x}$ の間で

$$\boldsymbol{p} - \boldsymbol{x} = \boldsymbol{d} \qquad (2)$$

が成り立つことを仮定する．ここで，$\boldsymbol{d} \in \boldsymbol{R}^3$ は対象中心と手先中心の偏差を表すベクトルである．

以上のモデル化のもとに，視覚フィードバック補正を伴った位置制御入力を次のように与える．

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{ref} = \boldsymbol{x}_{ref} + C(\boldsymbol{p}_{ref} - \boldsymbol{p}) \qquad (3)$$

ここで, $\hat{\boldsymbol{x}}_{ref}$ は視覚補正後の手先位置の目標値, $\boldsymbol{p}_{ref} \in \boldsymbol{R}^3$ は対象位置の目標値であり, C は視覚フィードバック補正係数を表している. また, 各目標値は

$$\boldsymbol{p}_{ref} = \boldsymbol{r} \tag{4}$$
$$\boldsymbol{x}_{ref} = \boldsymbol{r} - \boldsymbol{d}_{ref} \tag{5}$$

として計算する. ただし,

$$\boldsymbol{r} = \begin{cases} \boldsymbol{p} & \text{Grasping Phase} \\ \hat{\boldsymbol{p}}_{ref} & \text{Manipulation Phase} \end{cases} \tag{6}$$

である. ここで, $\boldsymbol{d}_{ref} \in \boldsymbol{R}^3$ は対象中心位置と手先位置の偏差に対する目標値であり, $\hat{\boldsymbol{p}}_{ref} \in \boldsymbol{R}^3$ はマニピュレーション相において与えられる対象位置の目標値を表している. これら制御系全体のブロック線図を Fig.2 に示す.

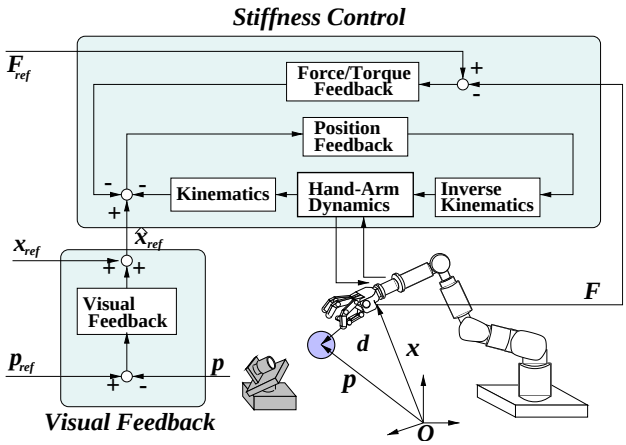

Fig. 2 Control Diagram

この制御系では, 視覚, 位置, 力のフィードバックが動的に統合され, システムの汎化性を高めている. また, 係数を適切に選ぶことで, 視覚情報と関節角位置情報に誤差がある場合でも, システムの安定性を高めることができる. さらに, 視覚制御と関節角位置制御フィードバックの依存度は, 係数 C の大きさの調整により変更される.

4 実験

前節で述べたセンサフィードバック統合制御系を, 我々の開発している 1ms 感覚運動統合システム上に実装した [1]. これは, 高速視覚処理システムを搭載したアクティブビジョンと, 4 本指 7 軸のハンドアームを備えた階層並列情報処理システムであり, 視覚を含む全てのセンサフィードバック を 1ms のオーダで実現する能力を持つ.

これに対して, 次のようにして把握操り実験を行った. 目標動作として, グラスピング相では, 高速に移動する対象を把握するように動作させ, 把握後にはマニピュレーション相に移行し, 与えられた正弦波形に追従させた. 実験は, 位置偏差 $\boldsymbol{d} = \boldsymbol{0}$, 視覚補正係数 $C = 1.4$ かつサイクルタイム 1.5ms で行った.

Fig.3に結果を 0.3s ごとの連続写真にして示す. 写真 0.0s ~ 0.6s がグラスピング相に, 0.9s ~ 1.5s がマニピュレーション相に対応している. また, グラスピング相からマニピュレーション相に移行する際の水平方向 1 軸における制御系の応答の様子を Fig.4 に示す.

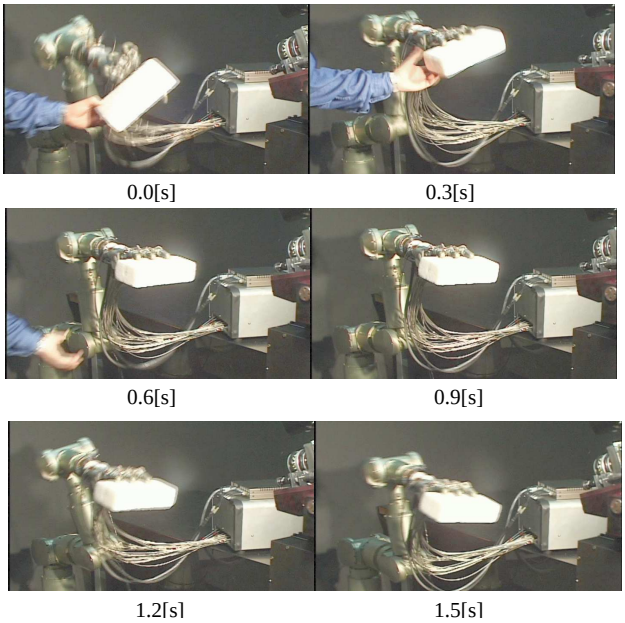

Fig. 3 Experimental Result

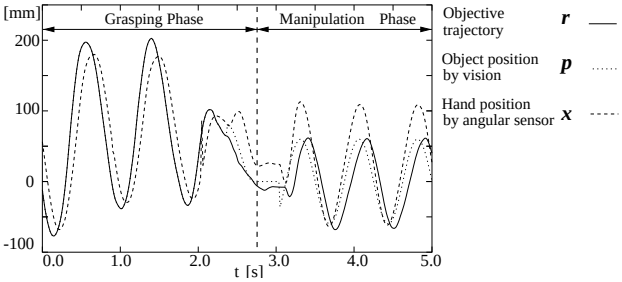

Fig. 4 Response of hand-arm

結果を見ると, グラスピング相では 対象位置 $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{p}$ に対して, 手先位置 $\boldsymbol{x}$ が追従しているのが, 把握後にはマニピュレーション相に移行し, 目標値 $\boldsymbol{r}$ に対象位置 $\boldsymbol{p}$ が追従するように制御構造が変化している様子がわかる. マニピュレーション相において, 手先位置 $\boldsymbol{x}$ と目標値 $\boldsymbol{r}$ の間に偏差が存在するのは, 視覚空間と関節情報空間での構造化誤差が存在するためあり, ここでは, C の値が大きいために視覚フィードバックへの追従性が高く, 結果として関節角フィードバックの誤差が残して, 平衡状態が達成されている.

これらの結果は, 提案した制御手法が (1) 高速性を満たし, (2) センサ情報間の誤差に対して安定であり, かつ (3) グラスピングからマニピュレーションという作業形態の変化に対応可能であることを示している.

5 まとめ

高速視覚フィードバックと力・関節角フィードバックを統合手法を提案し, 高速把握システム上で実現した. これにより, 把握から操りへの作業形態の動的な移行を包含する制御系が実現できた.

参考文献

[1] 並木, 中坊, 石井, 石川. 高速視覚を用いた把握行動システム. ロボティクス・メカトロニクス '98 講演会講演論文集, 1998.