

高速センサフィードバックに基づく感覚運動統合アーキテクチャとその把握・操り行動への応用

The Sensory-Motor Fusion Architecture Based on High-Speed Sensory Feedback and Its Application to Grasping and Manipulation

○ 並木 明夫 (東大) 石井 抱 (東大) 正 石川 正俊 (東大)

Akio NAMIKI, Idaku ISHII, Masatoshi ISHIKAWA, University of Tokyo

Abstract: A general purpose architecture for real-world robotic manipulation is proposed in which both responsiveness and general-purpose capability is realized making use of high-speed sensory feedback. In this architecture high-speed sensory feedback is used at hierarchical three stages: (1) servo control, (2) motion planning, and (3) modeling of motion planners. Because structure of motion planners is changed according to external environment at a high rate, high responsiveness under multiple conditions is realized. Next a grasping algorithm based on this architecture is proposed, in which a grasping task, an object manipulation task, and a collision avoidance task are integrated. At last an experimental result is shown using a sensory-motor fusion processing system with a dextrous hand-arm and a high-speed active vision.

Key Words: high-speed sensory feedback, sensory-motor fusion hierarchical parallel architecture, real-world robotic manipulation, grasping, object manipulation, collision avoidance

1. はじめに

実環境マニピュレーションシステムでは、多様な環境に対応して汎用的な把握・操りタスクを行う能力が要求される。これを実現するためには、作業環境の状態に対応してシステム内部の処理構造を変更できるような、可変で柔軟な構造を持つ処理アーキテクチャが必要とされる [1]。

このような背景のもとに、従来より多様な環境への対応を目指したシステムアーキテクチャの研究が進められてきた。これらのうち代表的なものに、反射行動の重ね合わせに基づくアーキテクチャ [2] [3] や、制御モジュールの交換に基づくアーキテクチャ [4] 等が挙げられる、また、それらに基づいたシステム構築も行われてきた。しかし、従来開発されてきたシステムでは、センサフィードバックの処理速度の不足のために、処理構造の変更は、行動制御と比較して遅いレートで行われており、結果として構築されたシステムには、動的に変化する環境に対する柔軟性が欠けていた。

一方、我々は、これまでに、高速センサフィードバックに基づく把握システムの構築を進めてきた [5]。ここでは、高速センサフィードバックを行動計画や行動制御に用いることで高速な把握タスクを実現しているが、内部の処理構造は固定されたものであり、汎用的なマニピュレーションに対応したものではなかった。そこで、本論文では、高速センサフィードバックを用いることで、環境変化に対して柔軟な構造を持つシステムアーキテクチャを構築する。また、それを我々が開発した高速把握システム上に実装することで、動的な環境の変化に対する柔軟性と汎用性を兼ね備えた高速マニピュレーションを実現する。

2. 階層並列高速センサフィードバックアーキテクチャ

簡単のために、システムの状態が状態変数 $z \in \mathbf{R}^{m_z}$ によって一意に表され、関節角 $\theta \in \mathbf{R}^{m_\theta}$ との間に、 $\theta = f(z)$ の関係が満たされるものと仮定する。また、全てのセンサ情報値 $s \in \mathbf{R}^{m_s}$ とサブタスクの目標値は、状態変数空間上に射影された後に統合処理にかけられることを仮定し、射影後の値を、それぞれ、 $z_i = z_i(s) \in \mathbf{R}^{m_z}$ ($i = 1, 2, \dots, M_z$) と $z_{di} = z_{di}(s) \in \mathbf{R}^{m_z}$ ($i = 1, 2, \dots, M_{zd}$) で表すことにする。

この仮定のもとで、本論文で提案する高速センサフィードバックに基づいた汎用システムアーキテクチャのブロック線図を Fig.1 に示す。これは、3層からなる階層並列構造を持っており、各層で行われる処理は次のようになる。

(1) 行動制御層

この層では、高速センサフィードバックを用いたサーボ制御が行われる。サーボへのセンサ入力は、複数のセンサ情報を用いたセンサフュージョンの結果として得られるものであり、センサ情報 s によって認識されるシステムの状態 z_i の線形和として計算される。

(2) 行動計画層

この層では、多様な行動目的や環境に対応するために、複数のサブタスクに対応した行動目標の統合値の計算が行われる。ここでの各サブタスクは、それぞれが単体で意味を持つ行動であり、 z_{di} として表される。統合行動目標値はこれらの線形和として表される。

(3) 行動モデリング層

この層では、高速センサフィードバックを用いて、行動計画層におけるサブタスクの統合の構造や、行動制御層におけるセンサフュージョンの構造の変更が行われる。これは、各層における線形和の計算に用いられる正定値係数行列である、 $G_i(s) \in \mathbf{R}^{m_z \times m_z}$ と $C_i(s) \in \mathbf{R}^{m_z \times m_z}$ を変更することで実現される。

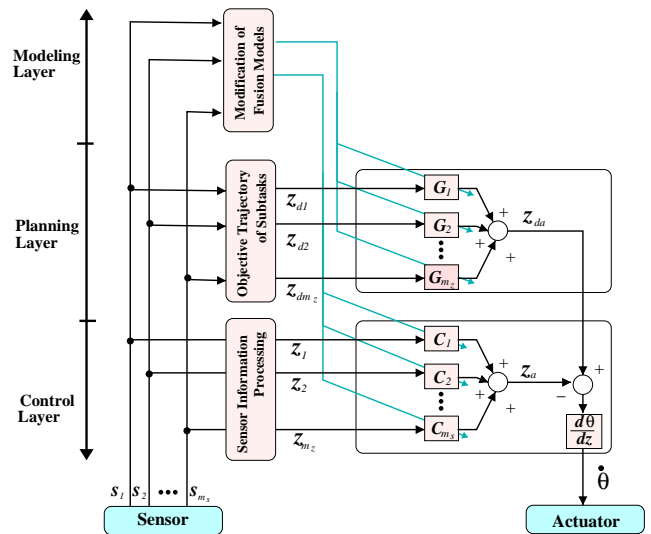


Fig.1 階層並列高速センサフィードバックアーキテクチャ

これらをまとめると、統合行動指令値は次のように計算される。

$$\dot{\theta} = \frac{\partial f}{\partial z} \left(\sum_i G_i(s) z_{di}(s) - \sum_j C_j(s) z_j(s) \right) \quad (1)$$

ただし、 $\sum_i G_i(s) = \sum_j C_j(s) = I_{m_z}$ が満たされるものとする。本論文では、この式に基づいた統合手法を階層並列高速センサフィードバックアーキテクチャと呼ぶことにする。

3. 把握・操り・障害物回避の統合アルゴリズム

前節で提案したアーキテクチャの応用例として、対象を握る把握行動と、物体を任意の位置に制御する物体操作、障害物に対する把握物体の回避行動の3つのサブタスクを統合するためのアルゴリズムを提案する。Fig.2に処理の流れを示す。

このうち、各層における計算は次のように行われる。

$$\mathbf{x}_{\text{avoid}}^o = \begin{cases} \mathbf{x}^o + \mathbf{n}^l (l_{\text{limit}} - l) & \text{if } l_{\text{limit}} - l > 0 \\ \mathbf{0} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$C^m = \Gamma^c \int_{t=0}^{\tau^h} \text{sgn}(\tau^h - \tau_o^h) dt \in \mathbf{R}^{3 \times 3} \quad (3)$$

$$G^a = \text{diag} \left\{ \frac{1}{1 + \exp(\gamma_i(t - l_{\text{limit}}))} \right\} \in \mathbf{R}^{3 \times 3} \quad (4)$$

ここで、ベクトル \mathbf{n}^l は把握対象の重心 $\mathbf{x}^o \in \mathbf{R}^3$ と障害物の重心 $\mathbf{x}^{\text{obst}} \in \mathbf{R}^3$ の間の単位方向ベクトルを表し、 l はその間の距離を表している。また、 l_{limit} は回避行動発現のための閾値である。一方、 τ^h は把握力を表しており、 τ_o^h は把握判定のための閾値である。また、 Γ^c や γ_i ($i = 1, 2, 3$) は適当な係数値である。

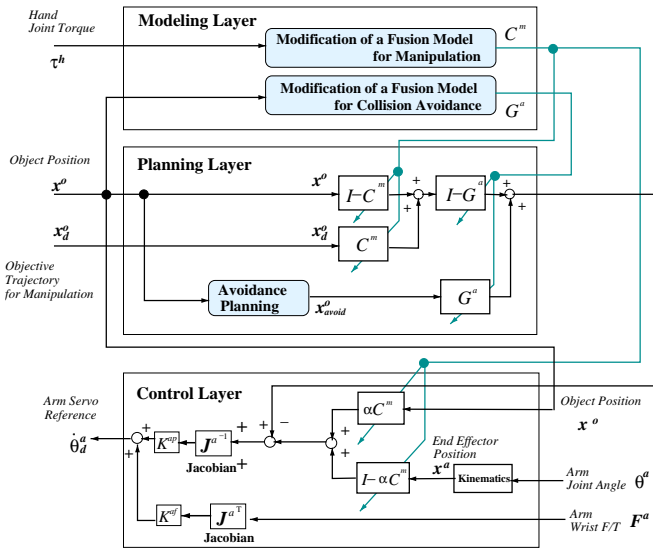


Fig. 2 把握・操り・障害物回避の統合アルゴリズム

このアルゴリズムでは、把握動作と操り動作の切り替えは、力覚によって観測される把握力 τ^h を用いて、また、操り動作と回避動作の切り替えは、視覚に観測される距離 l を用いて、それぞれ、連続かつ高速に行われる。どちらもセンサ情報値によって変更されるために、環境に対応した適切な行動が実現される。

また、行動制御層では、係数 C^m に基づいた視覚と体性感覚のセンサフュージョンが行われる。これにより視覚と体性感覚の誤差が緩和された、より精度の高い操り動作が実現される。

4. 実験

提案したアルゴリズムを、我々の研究室で開発した 1ms 感覚運動統合システム [5] 上に実装し、把握実験を行った。

簡単のために、把握行動の時には、人間によって高速に動かされる対象に追従して把握することを目標とし、操り動作の時には、把握対象を指定した位置に静止させることを目標とした。また、操り動作実行中に障害物を近接させることで、回避行動を発現させた。

Fig.3 (a)(b)(c) に、それぞれ、把握相から操り相を経て障害物回避に至るまでの主要パラメータの時間応答、フィードバック統合係数 G^a と C^m の時間応答、ハンドの把握力の時間変化を示す。これを見ると、把握力の増加に対応した把握から操りへの移行と、障害物の近接に対応した軌道制御から障害物回避への行動の切り替えが高速に行われている様子がわかる。その結果、把握・操り・回避の各動作が状況に応じて高速に実現されている様子も示されている。

また、Fig.4に実験結果を 0.3s ごとの連続写真にして表示する。ここでは、0.0s から 1.5s までが、左右に振られる対象に追従する把握行動を、1.8s から 3.6s までが、物体を指定位置に静止させる操り動作を、3.9s から 4.5s が、障害物の近接に伴う回避行動を、それぞれ表している。

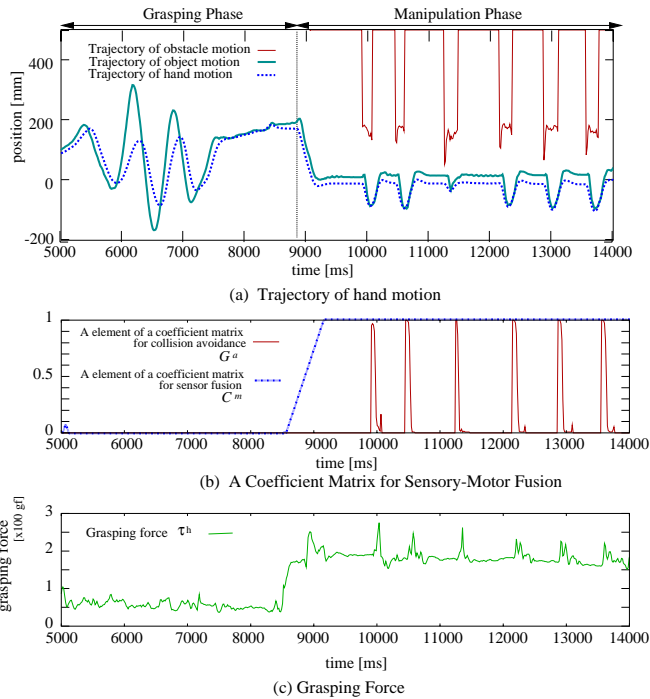


Fig. 3 主要パラメータの時間応答

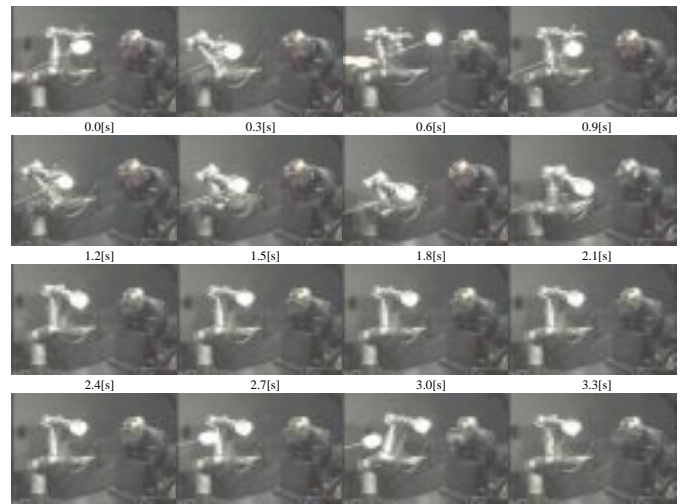


Fig. 4 実験結果

5. まとめ

本論文では、高速性と汎用性を兼ね備えたマニピュレーションを実現するために、高速センサフィードバックに基づいた階層並列アーキテクチャを提案した。またその応用例として、把握行動と物体操作、障害物回避行動の 3 つのサブタスクの統合を実現することで提案したアーキテクチャの有効性を示した。

参考文献

- [1] 石川. アクティブセンシングとロボットハンド. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 7, pp. 938–942, 1993.
- [2] R.A. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, No. 1, pp. 14–23, 1986.
- [3] 中村, 山崎. 反射行動の重ね合わせ理論とその多指ハンドの反射的把握動作への応用. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 448–459, 1997.
- [4] R.A. Grupen. Planning grasp strategies for multifingered robot hands. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 646–651, 1991.
- [5] 並木, 中坊, 石井, 石川. 高速センサフィードバックを用いた感覚運動統合把握システム. 第 4 回ロボティクスシンポジウム, 1999.