動作モジュール駆動型ロボット運動制御システムの構築

片山 幸久* 南 條 義 人* 下 倉 健一朗*

A Motion Control System with Event-Driven Motion Module Switching Mechanism for Robotic Manipulators

Yukihisa Katayama*, Yoshito Nanjo* and Ken-ichiro Shimokura*

The new motion control system described in this paper has an event-driven motion-module switching mechanism. This mechanism can select a previously prepared motion-module for each event generated from sensor information and can modify a reference input in real-time. This highly modular and extendable motion-compensating mechanism, especially effective in robot tasks with uncertainties and in robot motion that requires skill, should be useful for such robot tasks as machining and assembling. This paper describes the concept and implementation of the proposed system and presents some experimental results demonstrating its feasibility.

Key Words: Robot Controller, Manipulator, Sensory Feedback, Event Drive, Switching

1. は じ め に

1.1 研究の背景

近年、生産現場におけるロボットマニピュレータの活躍は目覚ましいものがある[1]。このようななか、ワークの位置決め誤差やワーク形状の個体差などが存在する不確実性の高い環境下での組立作業、あるいは溶接やバリ取り・磨きといった熟練が必要な作業を実現するロボットの提供が望まれている。

一方、マニピュレーションの高度化を目指して、種々の要素技術や高度な作業を実現する動作戦略が提案されている[2][3][5][9]。一般にこれらを実現するためには、多様なセンサを用い、様々な制御則や動作戦略をロボットシステムに実装することが要求される。ところが、現用の多くの産業用ロボットコントローラは十分なセンサインタフェースを持たず、センサデータの情報処理能力も低い。また、センサ情報に基づく高度なマニピュレーションを実行する機能は、設計やチューニングのための十分な環境が整えられていないため使いこなすことが難しい。このような要因により、マニピュレーション高度化を目指した研究成果の多くは、生産現場へ導入されていないのが現状である。この解決には様々な制御則・動作戦略をモジュール化し、モジュール単位で設計や修整を行い実装ができる構造を持ったコントローラが必要である。

また、現実的な作業は一連の動作シーケンスからなると考えられる。例えば、Fig. 1(a)にみられるような組立作業においては、突きあて、刃合わせ、面合わせといった単位動作のシーケ

ンスにより作業を遂行することができる[3]。また、バリ取り・溶接などの加工作業においても、動作開始から終了までの作業全体を単位動作のシーケンスとみなせる。例えば Fig. 1(b)に見るようなバリ取り作業を考えてみると、Step 1: 開始位置へのアプローチ（開始点の検出と位置決め）、Step 2: A パートのバリ取り（バリ取り戦略 a）、Step 3: 次のバリ開始位置への移動、Step 4: B パートのバリ取り（バリ取り戦略 b）、...、Step n: バリ取り終了後の離脱 といったシーケンスで実現される[6]。満足のいく作業を遂行するためには、各ステップにおいて、戦略 a、戦略 b、...、といった適切な戦略を逐次実行し、各ステップを確実に実行する必要がある。このような考えに基づき、本論文ではシーケンスの各ステップを確実に実行す

Fig. 1 Typical manipulation tasks

原稿受付 1995年4月3日

*NTT ヒューマンインタフェース研究所

*NTT Human Interface Laboratories

る動作を単位動作と定義して用いる。この単位動作のなかで作業中に生じる不確実性を吸収し各動作を確実に実行することにより、各ステップのシーケンシャルな記述により作業全体の実行がなされる。

作業を単位動作のシーケンスで記述し実行するというアイデアは、末広らにより提案されている[3]。文献[3]では、凸多面体の組立作業を対象として、プリミティブな単位動作として基本動作(motion primitive)を抽出し、その基本動作を確実に実行するスキルと呼ぶ機能を実現している。スキルをシーケンシャルに実行することにより作業全体が実現される。ここでは、凸多面体の組立作業に限定しており、他の種類の作業に対する適用可能性は不明であるが、基本動作のシーケンスにより作業を実行する考え方は一般的な作業に対して有効と思われる。一方、作業の解析を通じて動作の基本要素を用意することは有効に違いないが、単位動作の抽出は作業に依存し、作業によっては、あらかじめすべての基本動作を抽出することは困難である。単位動作の数をプリミティブな基本動作として固定してしまうことは、対象作業を限定してしまうことにもなりかねない。

そこで、より複雑な作業への対応を考えると、基本動作というプリミティブに限定せずに、様々な単位動作を実現することが必要になる。そのためには、様々な単位動作を実現することができる共通のテンプレートとしてのメカニズムが必要となる。そこで、このようなメカニズムに必須な基本機能について考えてみる。例えば Fig.1 (b) に示すようなバリ取り作業について考えてみると、各ステップを遂行する機能の実現のためには、熟練者のスキルを導入した運動制御レベルでのセンサフィードバックを用いることが有効であり、また、Fig.1 (a) に示すような組立作業においては、つきあてや刃合わせといった対象物に扱う機能が必要である。各機能の実現のためには状態の監視と、速度制御・力制御・位置制御といった制御モードの切替えが必要となる[3][4]。このように、単位動作のなかで不確実性を吸収するためには、環境の状況に応じた動作の修整が必要であり、外部の状況をトリガーとしたイベントドリブンでの動作の切替えが必須となる。すなわち、様々なセンサフィードバック制御則の実装と、状態を監視し、作業状況に応じて制御則を切替える機能が必要となる。

1.2 従来研究

ロボットシステムのアーキテクチャに関する研究としては、高い自律性を目指したものが提案されているが[10]~[13]、これらの研究はコンセプトの提案にとどまり、それを実現するメカニズム、特に、動作のリアルタイム性を考慮した運動を実現するメカニズムについては十分検討されていない。また、自律性に重点がおかれているため、作業設計を行うための作業の記述能力の考慮も不十分である。センサを用いたロボット制御の実証例としては、運動制御レベルでのモデル追従制御の概念を一般的なセンサフィードバックシステムへと拡張した仮想内部モデル追従制御系がある[8]。しかし、複雑な作業の実行に必要な状態の記述法については十分な検討はされていない。一方、McGragher らは、ペトリネットを用いて複雑な組立作業プロセスをモデル化し、制御システムで用いている[9]。しかしな

がら制御モードは単一であり、具体的な制御系メカニズムは示されておらず、他のタスクへの適用可能性は不明である。

本論文では、運動制御のレベルで、サーボ周期と同程度の実時間でセンサフィードバックが可能であり、かつ、状況に応じて適切に動作モードを切替えることにより、複数のマニピュレーション機能(付録-A 参照)を実現可能な新たなロボット運動制御システムのメカニズムを提案する。まず、複数の動作モードを切替えるうえでの問題点を考慮したうえで、作業プロセスとして離散的な状態を扱う運動制御システムのアーキテクチャを提案し、その構成・機能を示す。さらに実験システムを構築し、本メカニズムの妥当性を示す。

以下、2章で様々なマニピュレーション機能を受容するのに適したシステムについて考察し、システムの基本構造を提案する。3章において、提案するメカニズムの具体的な構成を述べ、4章でシステム設計例を、5章で提案するメカニズムの実現可能性と有効性を示し、最後に6章に本研究で得られた成果をまとめる。

2. システム概要

2.1 システムの基本構成

ロボットを動作させるためには、ワールド座標における手先ツールの位置(以下、位置とは位置および姿勢の6自由度を意味する)を指定しなければならない。本論文ではマニピュレーション機能をツールを操作する機能としてとらえ(付録-Aを参照)、ツール操作の基準位置のワールド座標系における指定と、その基準位置を中心とした相対的なツール操作量を考え、この二つの量を合成して手先ツールの位置を生成する考え方を取る。これにより、作業のシーケンスにおける各段階において、ツール操作を行う基準位置をマクロな軌道として指定し、この軌道の記述と独立した所望のツール操作機能の指定が可能となる。すなわち、マニピュレーション機能をツール操作機能として部品化し、汎用的に用いることができるようになる。さらに、一般的にマニピュレータのセンサフィードバック制御則は位置指令型制御系をベースにして記述できること[8]を考慮し、Fig.2 (a) に示すように、上位プランナ(HLP-High Level Planner)、ツール操作部(TMG-Tool Motion Generator)、サーボコントローラ

Fig.2 Macro structure of the system

ラ (SVC-Servo Controler) の三つのブロックからなる構成をシステムの基本とする。

上位プランナーHLP

HLPにはあらかじめ動作のシーケンスをプログラミングしておき、動作のシーケンスに応じて TMG に適切なマニピュレーション機能を発現させる。また、ツール操作の基準位置の軌道を生成し、ベース指令値として下位のブロックである TMG へ出力する。ここで、TMG で用いるツール操作指令値を記述する座標系をツール操作座標系と名付けると、ベース指令値の軌道は、ワールド座標系におけるツール操作座標系の位置・姿勢の軌道と意味付けすることができる。

ツールマニピュレーションジェネレータ—TMG

Fig.2(b) に示すように、TMG は外部センサ情報やコントローラの内部情報といったリアルタイムな情報、あるいは場合によっては、事前に設定された動作パターンに基づいてツール操作指令値を生成する。ツール操作指令値は、ベース指令値に対する相対的な位置指令値として生成される。このツール操作指令値をベース指令値に合成し、ツールが追従すべきワールド座標系上での位置指令をツールサーボ指令値として SVC へ出力する。

また、高度なマニピュレーション機能の実現には、様々な動作パターンや種々のセンサ情報に基づく制御則の実装と、内部・外部のセンサ情報を用いた状態監視の結果に基づく制御則の切替えが必要であり、これらの機能を TMG が担う。

サーボコントローラ—SVC

SVC はワールド座標系上で記述されるツールサーボ指令値に追従するように、ロボットを制御する。

以上の構成は結果として、仮想内部モデル追従制御システム [8] と同様なものになっているが、TMG はマニピュレーション機能を実現するツール操作を担うブロックとして位置づけられる。これは、必ずしもセンサ情報に基づく動作を生成する必要はなく、バリ取りにおけるグライндаの揺動動作 [7] などのような、ツールを巧みに使うための定型パターンを生成することも可能である。本論文では、マニピュレーション機能を実現するための TMG について、具体的なアーキテクチャに重点をおいて述べる。HLP は単に上述のベース指令値の軌道を生成する目標軌道生成器として考える。SVC については従来の技術 [14] を用いて実現されるため詳しい議論はしない。

2.2 TMG の機能

ロボットシステムが高度なマニピュレーション機能を持つためには、機能に応じた複数のセンサフィードバック制御則と、状態監視の結果に基づく制御則の切替え機能を具備する必要がある。ある特定の制御則が駆動されている時、ロボットの動作は特定のモードにあるとみなすことができる。このモードを動作モードと呼ぶ。必要な機能に応じて、様々な動作モードを用意する必要があり、各モードを実現する機能を、設定パラメータが明確な部品としてモジュール化することが有効である。このモジュールを動作モジュールと名付ける。モジュール化することにより再利用が容易になり、パラメータの設定により様々な機能の実現の際に用いることができ汎用性が高まる。前節で

述べたツール操作指令値は、ベース指令値に対して相対的な位置指令である。センサ情報に基づきこのツール操作指令値を生成することにより、センサフィードバックの実現が可能である。そこで、動作モジュールの出力はツール操作指令値とする。すなわち、動作モジュールは、センサ情報やコントローラの内部情報、事前に用意された動作パターン、さらにはこれらの情報を複合処理した結果を用いてツール操作指令値を生成する。TMG は内部に複数の動作モジュールをもち、作業の状況に応じ、適切に駆動する動作モジュールを切替えながら適切なツール操作を実現する。

以上より TMG に必要な基本機能を以下にまとめる。

- 複数の動作モジュールを内蔵する機能
- 作業の状況を監視する機能
- 監視結果に基づき、作業を中断せずに動作モジュールを切替える機能

ロボットが確実な作業を行うために、ロボットに自律的に学習あるいは適応する能力を期待するよりも、まず、人の手により設計・修正することにより確実な作業を行うものを作り込むことが有用である。マニピュレーション機能の設計の際には、種々の不確実要因を考慮する必要があるが、すべてを予測することは事実上不可能である。そこで、経験を通じて適宜修正していくことが不可欠になるが、その修正を容易に行えるシステムを作り上げる必要がある。以上のことを考慮し、機能分散を重視した TMG の具体的なシステムアーキテクチャを次章以下で述べる。

2.3 ロボット作業に対する前提条件

本論文で考えているマニピュレーション機能を実現するためには、状況に応じて適切に動作モードを切替え、不確実性に対処する必要がある。すなわち、マニピュレーション機能の設計の際には、どのような不確実性がどういった状況で起こり、その対処のために必要とされる適切な動作モードは何かを考慮しなければならない。そこで、必要な動作モジュールの種類と、各モジュールを駆動する条件を決定するために、以下の前提条件を考える。

- (1) 一つの単位動作は、有限の状態遷移によって表現することができる。
- (2) 現在の状態とセンサ情報により、次に遷移する状態を決定することができる。
- (3) 各状態に対する動作は、適切なセンサ情報に基づいて実現することができる。

現実の作業において、作業プロセスを完全に反映するような状態遷移や動作を、事前に把握することは困難である。最初にモデルの大枠を作っておき、試行を通して実際の作業プロセスを反映させるようにモデルを変更していくことが現実的である。そのためには、状態の種類や状態の遷移あるいは動作の追加・修正が容易な構成であることが必要となる。このように実際の作業に応じたシステムの調節が容易なことは実用上重要であり、これは本システムの狙いの一つである。

Fig. 3 Structure of MSM

3. イベント駆動型動作モジュール切替機構

3.1 概要

我々は、TMGの具体的なアーキテクチャとして、イベント駆動型動作モジュール切替機構 (event-driven Motion-module Switching Mechanism-MSM) と呼ぶメカニズムを提案する。Fig. 3にMSMの構造を示す。MSMは事前に用意しておいた複数の動作モジュールを持つ。各動作モジュールは、特定の状況で適切な特定の制御則により、ツール操作指令値を生成する。また、MSMは作業のモデルとして状態遷移ネットワークを持っており、作業の実行中に状態遷移ネットワークとセンサ情報を用いて作業状態を決定する。この決定は、状態遷移の指標となる“イベント”を生成することにより行われる。MSMは作業状態に基づき、複数のモジュールのなかから一つの動作モジュールを選択する。動作モジュールの選択および切替えは、動作を中断せずに行われる。

ここで状態遷移のチャタリングなどを防止した安定な状態遷移を実現する必要がある。例えば、不安定な遷移が生じやすい場合は、その過渡状態を新たな中間状態として設けることが有効である。このように、最終的な状態遷移の設計は試行的に行うことが現実的であり、状態の設定やイベントの生成ルールの変更が容易に行える必要がある。また、動作モジュール切替え前後での運動指令値の連続性を確保しなければならない。そこで、動作モジュールがMSM自身の出力や上位プランナの出力を、センサ情報と同様に用いることができる構成をとる。これにより各動作モジュール内で過去の出力の履歴を用いることが可能となり、常に連続な指令値を生成することを保証できる。

3.2 MSMの構成

次にMSMの各ブロックとそれぞれの機能の詳細について述べる。

イベントジェネレータ (Event Generator)

センサ情報から状態遷移を検出し、センサデータイベントマップ (SE-Map) に基づき、サーボサイクルと同程度のサイクルでイベントを生成する。

状態遷移マネージャ (State Transition Manager)

イベントに基づいて、状態遷移ネットワーク上で現在の状態

を同定する。各イベント入力に対する状態の遷移先は、前もってトランジションイベントマップ (TE-Map) に登録しておく。

モーションジェネレータ (Motion Generator)

モーションジェネレータは、 N 個の動作モジュール (Module $n; n = 1, \dots, N$) を持ち、それらは並列に動作している。各モジュールは、センサ情報、過去のツール操作指令値と自分自身の過去の出力を用いて以下のようにツール操作指令値を生成する。Module n の動作はデジタル制御則で記述され、式(1)で表されるような引数をもつ関数 ${}^nG()$ により、毎サンプル時刻のツール操作指令値を生成する。

$${}^n\mathbf{x}_{acm}[i] = {}^nG({}^n\mathbf{x}_{acm}[i-j], \mathbf{X}_{tmr}[i-j], \mathbf{S}[i-j])$$

ただし、 $j = 1, \dots, i$ (1)

ここで、 $[\]$ 内はサンプリング番号を表し、 n はモジュール番号を表す。 $\mathbf{S}[*]$ はセンサ情報を示す。 ${}^n\mathbf{x}_{acm}[i]$ はサンプル i におけるModule n が出力するツール操作指令値である。 $\mathbf{X}_{tmr}[i-j]$ は j サンプル過去においてスイッチャ (後述) が出力したツール操作指令値であり、サンプル $i-j$ においてスイッチャにより選ばれた動作モジュールの出力に等しい。

センサ情報プロセッサ (Sensor Data Processor)

センサから得られる外部情報およびコントローラの内部情報を処理し、モーションジェネレータやイベントジェネレータで使用される情報を生成する。ここで、センサ情報プロセッサは外部情報だけでなく、内部データも同等の情報として処理可能なことが重要な特長である。例えば、上記モーションジェネレータ内の各動作モジュールは、センサ情報の一種として $\mathbf{X}_{tmr}$ を扱うことができる。その結果、式(1)の右辺の関数 ${}^nG()$ の引数はセンサ情報およびモジュールの内部情報とみなせ、各モジュール内のみの処理でモジュール切替え前後において連続なツール操作指令値を生成することができる。具体例を次章の設計例で述べる。

スイッチャ (Switcher)

状態遷移マネージャによって同定された現在の状態に基づき、動作モジュールの一つを選択する。その結果、選択されたモジュールにより生成されるツール操作指令値がコンポーザへ送られる。

コンポーザ (Composer)

ツール操作の基準位置となるベース指令値とツール操作指令値の合成により、ツールが実際に追従すべきツールサーボ指令値を生成し、サーボコントローラへ出力する。

4. システム設計例

本章では、トラッキング作業の一つであるバリ取り作業を例にシステム設計例を示す。

4.1 作業の概要

Fig. 4 に対象とするバリ取り作業の概要を示す。ワークは曲線状の輪郭形状を有する平板であり、外縁部に様々なサイズ・硬さのバリをもつ。事前にバリの発生している正確な位置、サイズを特定することは困難であり、このようなワークに対し単一の制御モードだけでバリを除去することは難しい。例えば、力一定の力制御だけでは硬いバリを除去できない可能性がある。コンプライアンス制御を用いると偏差が大きくなるにつれて作用力も増大し、その結果としてツールが損傷する可能性も生じる。このような問題を解決するためには種々のアプローチをとることができるが、提案する MSM を用いれば、以下に示すような手順によって見通し良くシステムを設計することができる。

4.2 設計例

まず、教示データとしてワークの外形と動作速度をベース指令値の軌道として HLP に与え、次に、バリの発生状況に応じて次のように作業仕様を設定する。

- (1) バリがほとんど生じていない場合：ワーク面に対して垂直方向に微小な力 (F_{Tx}) を加えながらワーク面に倣う。
- (2) 除去に一定以上の力を加える必要があるバリが生じている場合：ワーク面に対して垂直方向に一定の力 (F_{Dx}) を与えることによりバリをとる。ここで、教示軌道 (位置および姿勢) データの軌跡としてワーク面の外形をあたえるので、教示軌道がワーク面の方向を反映していることになる。

以下にこの作業仕様を実現する MSM の設計例を示す。

【状態の設定】

バリの発生状況による二つの状態に加えて、これらの状態間の過渡状態を考える (過渡状態の定義については付録-B に述べる)。ここで過渡状態を設定することは、状態遷移のチャタリングを防止し、制御モードのスムーズな移行を行わせることに有効である。

さらに、異常事態に対処するための保護状態を考える。バリ取り作業のように、力を作用させる作業においては、力が作用

Fig. 4 Example task

するツールやワークが破損してしまうと制御指令値が発散してしまう可能性がある。保護状態を考えることにより、このような異常事態に対処する。以上のように Fig. 5 (a) に示す四つの状態を設定する。ここでは、状態のイメージ図のみを示しておく。これらの四つの状態の設定の詳細については付録-C に記載しておく。

【動作モジュールの設定】

上記の作業仕様にに基づき、三つの動作モジュールを用意する。ここでは力制御としてダンピング制御 [16] を用いる。

Module 1: ダンピングモジュール A

輪郭形状に追従させるため、軌道垂直方向に微小力 F_{Tx} を作用させる。

Module 2: ダンピングモジュール B

バリを除去するため、軌道垂直方向に力 F_{Dx} を作用させる。

Module 3: 保護動作モジュール

ツール操作指令値の更新を凍結する。

ここで、各モジュールのツール操作指令値の生成法を、簡単のために x 軸方向一次元の場合について以下に示す。

${}^n x_{acm}$ ($n = 1, 2, 3$) は各モジュールの出力するツール操作指令値、 X_{tmr} はスイッチャが ${}^n x_{acm}$, ($n = 1, 2, 3$) から選び、コンポーザへ出力するツール操作指令値である。

また A_T , A_D は適当なダンピング係数である。

Module 1:

$${}^1 x_{acm}[i] = X_{tmr}[i-1] + A_T(f_x[i] - F_{Tx}) \quad (2)$$

Module 2:

$${}^2 x_{acm}[i] = X_{tmr}[i-1] + A_D(f_x[i] - F_{Dx}) \quad (3)$$

Module 3:

$${}^3 x_{acm}[i] = X_{tmr}[i-1] \quad (4)$$

このように実際に MSM が利用した X_{tmr} を各モジュール内で用いることにより、ツール操作指令値の連続性を保証することができる。また、Module 1, 2 のようなセンサフィードバック則だけでなく、Module 3 のような事前に設定した動作パターンの生成も動作モジュールで実現することができる。

【SM-Map の設定】

Fig. 5 (b) に示すように、各状態 (State 1-4) に対してモジュール (Module 1-3) をマッピングする。各作業に対して、システムはデータベースとしてこれらのマップを管理する。

【SE-Map の設定】

Fig. 5 (c) に、センサデータからイベント生成ルールの設定例を示す。状態遷移が生じたときに遷移先を決定するようなイベントが発生するのはもちろん、状態遷移が生じなかった場合も現在の状態を維持するイベントが発生する。ツール操作座標系における水平方向の力 (f_y)、ツール操作指令値の垂直方向成分 (X_{tmr})、およびこれらに対する閾値 (F_{y0} , X_0 , X_1) からイベントを生成する。これは、バリが生じている部分では進行方向の力 f_y が大きく、バリ除去直後ではツール操作指令値の垂直方向成分 X_{tmr} が残存している可能性があること、また、

工具やワークが破損した非常事態では X_{tmr} が発散していくと
いうことを考慮した結果である。

Fig. 5 Example of design

[TE-Map の設定]

Fig. 5 (d) に状態遷移ネットワークを示す。この図は、イベントの状態遷移へのマッピングも示す。この状態遷移ネットワークとイベントのマッピングは、Fig. 5 (e) に示されるマトリックスで表現される。このマトリックスは現在の状態が **State 1** であるとき、**Event 3** の入力により、状態は **State 3** に変化することを意味する。このようにデータベースによる状態推移モデルの表現により、状態やイベントは容易に追加することができる。

上記の設計例はバリ取り作業を単純化してとらえた結果であり、実際のバリ取り作業は上記の設計で満足いく結果が得られるとは限らない。しかし、本設計例は、MSM の設計がデータベースで管理できるデータマップを作成することでできることを示すのが目的である。また、能力が不十分な場合は、MSM の設計に順次変更を加えていくことになるが、設定の修正が容易なことも MSM の特徴である。すなわち、MSM の設計は、Fig. 5 (b) (c) (e) に示される三つのデータマップ (SM-Map, SE-Map, TE-Map) を作成することであり、動作の修正には、この三つのマップを変更すればよい。これらのマップはデータベースとして保持できるので、処理の流れを変更することなく、作業の修正ができる。このように、本システムを用いることにより、作業仕様を満足した動作を実行するモーション・コントロールを見通し良く設計することができる。

5. 実 験

5.1 実験システム

実験システムの概要を Fig. 6 に示す。本システムは機能分散した構成をとるため、並列処理が可能なりアルタイムシステムが必要となる。今回の実験システムでは、12 個のトランスピュータを用いて MSM を構築した。トランスピュータを使うことにより、マルチプロセッサ上での並列処理を行う実時間システムを容易に実現することができた。ロボットとしては 6 自由度マニピュレータ PUMA260 を用いた。本マニピュレータ

Fig. 6 Schematic of experimental system

Fig. 7 Experimental task

はワールド座標系において位置制御されている。

現在のところ以下の4種類の動作モジュールを用意し、そのうち三つを実行時に用いることができる。

- (1) ダンピング制御モジュール
- (2) コンプライアンス制御モジュール
- (3) 保護モジュール
(ツール操作指令値の修正を抑制する)
- (4) ツール操作量修正モジュール
(一定速度でツール操作指令値を減少する)

5.2 実験作業

実験では、4章に示したバリ取りを単純化した以下のような作業を行わせた (Fig. 7)。単純なバリ状物体がワークに付随している。バリを除去するかわりに、この物体に垂直方向に一定力を加える。作業実行前に、教示データとして直線軌道をベース指令値の軌道として与える。実行中にツールがバリ状物体に接触しているとき、マニピュレータは物体に倣いつつ一定の力 (F_{Dx}) を加える。ワークに接触しているときは、小さな力 (F_{Tx}) でワークの外形を倣う。また、ワークの設置位置にも多少の変動があることを想定する。

MSMの設計結果は、状態の設定を Fig. 8(a) に、SE-Mapの設定を Fig. 8(b) に変更する以外 Fig. 5 と同じである。ダンピング制御による力制御の方向は進行方向に対して垂直方向 (f_x) であり、バリ接触中か否かは主に進行方向の力 (f_y) で判別を行っている。

5.3 実験結果

Fig. 9 に実験結果を示す。図に示すように、ベース軌道としては片道 10 秒の往復運動を与えた。設定力として $F_{Tx} = 5N$ 、 $F_{Dx} = 13N$ を与えた。 X_{tmr} は、ベース軌道に対する垂直方向のツール操作指令値である。 f_x と f_y は垂直方向、進行方向の作用力である。動作時間は片道 10 秒、往復で 20 秒であり、 X_{tmr} の履歴、 f_x 、 f_y の履歴のグラフにおいて 10 秒までが往路のデータである。10 秒のところで折り返し、それ以降が復路のデータである。

ツールがバリ状物体に接触しないところでは、指定した小さな力 ($F_{Tx} = 5N$) でワークの外形を倣っている。ツールがバリと接触している間は、バリの表面に、設定した適切な力 ($F_{Dx} = 13N$) を加えている。この結果は、設計したとおりに切替えが行われ、適切な動作モジュールが駆動されていることを示している。

(a) State definition

State 1	Tracking Workpiece Contour
State 2	Hitting Burr
State 3	Transient State
State 4	Emergency State

(b) Sensor-data-to-Events Map (SE-map)

	$X_{tmr} < X_0 (<0)$	$X_0 < X_{tmr}$	
		$f_x > F_{x0}$	$f_x < F_{x0}$
$f_y < F_{y0}$	Ev1	Ev2	Ev3
$f_y > F_{y0}$		Ev4	

X_0 : Threshold of Tool Manipulation reference
 F_{x0} , F_{y0} : Threshold of force data

Fig. 8 Design of experimental task

6. ま と め

マニピュレーション機能のインプリメントを容易にする運動制御システムについて述べ、具体的なアーキテクチャとして、動作モジュール切替機構 (MSM) を提案した。

MSMの特長は以下のとおりである。MSMはセンサ情報に基づき動作モジュールをリアルタイムで切替えることにより、環境の状況に応じた適切な動作を生成する。また、様々なセンサフィードバック則を動作モジュールとして実現するため、様々な制御則を汎用的に用いることができる。機能分散したアーキテクチャ構成をとることにより、モジュラリティが高く、設計パラメータが明確で機能の修正・拡張が容易である。さらに、バリ取り作業を扱う MSM の設計例を述べ、MSM の妥当性・実現可能性を実験的に示した。

提案した MSM はマニピュレーション機能を実現するためのテンプレートであり、セットするモジュールの中身を入れ換えることにより、複数のマニピュレーション機能を実現できる。これにより、一連の動作からなる作業を実現することができる。今後は、実装できる機能のバリエーションを増やすとともに、本システムの適用領域を明確にしていく。また、MSM の設計に有効なヒューマンインタフェースについても検討する。

Fig. 9 Experimental result

謝 辞

本研究を進めるにあたり、適切な助言をいただいた NTT コミュニケーション科学研究所大里延康グループリーダ、同アクセス網研究所辻村健博士に感謝いたします。また、日頃討論をしていただき、知能ロボット研究部の皆様に感謝します。

参 考 文 献

- [1] “特集センサバースト・インダストリアルロボット”, 日本ロボット学会誌, vol.9, no.3, 1991.
- [2] H. Asada, C.C. Federspiel and S. Liu: “Human Centered Control in Robotics and Consumer Product Design,” Trans. the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol.115, no.6, pp.271-280, 1993.
- [3] 末広, 高瀬: “スキルに基づくマニピュレーションシステム”, 日本ロボット学会誌, vol.8, no.5, pp.551-562, 1990.
- [4] 下倉, 武藤: “接触状態変化検出機能を有するマニピュレーションシステムに関する検討”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.6, pp.837-845, 1994.
- [5] 沢崎, 井上: “多指ハンドによる物体の転がし操作”, 日本ロボット学会誌, vol.9, no.5, pp.560-571, 1991.
- [6] S. Muto and K. Shimokura: “Teaching and Control of Robot Contour-Tracking Using Contact Point Detection,” Proc. of 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.1, pp.674-681, 1994.
- [7] 松尾, 久保田, 下倉, 三ツ矢, 水川: “ロボット作業におけるツール操作の記述と制御法の検討”, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, no.1, pp.313-314, 1994.
- [8] K. Kosuge, K. Furuta and T. Yokoyama: “A Control Architecture for Intelligent Mechanical System: Virtual Internal Model Following Control,” Proc. of 1987 IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp.489-494, 1987.
- [9] B.J. McGragher and H. Asada: “A Discrete Event Approach to the

Control of Robotic Assembly Tasks,” Proc. of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.1, pp.331-336, 1993.

- [10] D.M. Lyons and A.J. Hendriks: “Planning for Reactive Robot Behavior,” Proc. of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.3, pp.2675-2680, 1992.
- [11] J.S. Albus: “A Theory of Intelligent Systems,” Proc. of 1990 IEEE International Conference on Intelligent Control, vol.1A, pp.866-873, 1990.
- [12] C. Luh and B.P. Zeigler: “Abstracting Event-Based Control Models for High Autonomy Systems,” IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol.23, no.1, pp.42-54, 1993.
- [13] 柴田, 福田: “階層行動アーキテクチャ”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.8, pp.1111-1117, 1993.
- [14] 吉川恒夫: ロボット制御基礎論, コロナ社, 1988.
- [15] J.K. Salisbury: “Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinate,” Proc. of the 19th IEEE Conference on Decision and Control, pp.95-100, 1980.
- [16] D.E. Whitney: “Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control,” International Journal of Robotics Research, vol.6, no.1, pp.3-14, 1987.

付録-A. マニピュレーション機能

一般的にマニピュレーションといえば、物体の把持・操りなど、ハンドによる物体操作を意味することもあるが、本論文ではロボット作業として組立・加工作業を考え、その範疇でマニピュレーションを考える。組立・加工作業は、ロボット手先のハンドが持つ部品や工具を操作することにより、ロボットの外界におかれた作業対象へ作用を及ぼしながら、組立・加工を行うことである。そこで、ロボットのハンドに持つ部品やエンド・エフェクタとしての工具など、ロボットが手先に装着しているものを“ツール”と呼び、作用を及ぼされるロボット外部にお

かれた作業対象を“ワーク”と呼ぶことにする (Fig.1) [6]. すると、ロボットのマニピュレーションは「ツールを操作することにより、ワークに作用を及ぼすこと」と言え、マニピュレーション作業の高度化とはツールを使いこなす機能の高度化ととらえることができる. ここで、“作用を及ぼすこと”とは、加工したり作用力を及ぼすという意味にとどまらず、ワークに対して非接触で相対的な位置決めを行うといった、作用力を加えるための前段階の動作も広く“作用を及ぼすこと”と捉える. また、ロボットのマニピュレーションを高度化するためには内部・外部のセンサ情報を用いた状態の監視やセンサフィードバック制御が必要となる. そこで、マニピュレーション機能を「センサ情報を用い、ワークに適切な作用を及ぼすように、ツールを操作する機能」と定義する.

付録-B. 過渡状態の定義

隣接すると思われる二つの状態 **A**, **B** が明確に定義できたとする. しかし、実際の作業プロセスを完全に離散的な状態に区分することは困難な場合がある. そこで、定義した状態 **A**, **B** の間でどちらか明確に区別しにくい、あるいは、**A**, **B** どちらの状態でもないと考えられる状況が生じる場合、その状況をまとめて過渡状態 **C** と定義する. **A**, **B** の二つの状態が明確に定義できていれば、その間の状態で、どちらの状態でもない状態を過渡状態 **C** と定義できる.

付録-C. MSM 設計例における状態設計の詳細

State 1 はバリがほとんど生じておらず、ワークの輪郭を削っている状態であり、ツール操作指令値は $X_{tmr} \approx 0$ である.

State 2 はある程度のバリが生じていて、かつ、進行方向から抗力をうけながらバ리를削っている状態と定義する. これらの

状態を f_y , X_{tmr} を状態量に用いて以下のように定義する.

$$\text{State 1: } f_y \leq F_{yo}, \quad X_{tmr} \leq X_1$$

$$\text{State 2: } f_y > F_{yo}$$

ここで、 f_y は Tool が進行方向に受ける力、 F_{yo} は f_y に対する適当な閾値、 X_{tmr} は経路に対して垂直方向に出力しているツール操作指令値、 X_1 は X_{tmr} に対する適当な閾値である. 過渡状態 **State 3** は Fig.5 (a) に見るように

$$\text{State 3: } f_y < F_{yo}, \quad X_{tmr} > X_1$$

と定義する. また、ツールあるいはワークが破損した場合、力を加えている方向にツール操作指令値が発散する. 逆に正常な状態に到達するツール操作指令値 X_{tmr} の絶対値の最大サイズを設定し、それ以上になったときは異常状態であると考え. 本作業例では x 軸方向負方向に力を加えているので、 X_{tmr} の負の閾値 $X_0 (< 0)$ を考え、ツール操作指令値を状態量として異常状態 **State 4** を次のように定義する. また、これに伴い **State 1** の定義も修正する.

$$\text{State 1': } f_y \leq F_{yo}, \quad X_0 \leq X_{tmr} \leq X_1$$

$$\text{State 4: } X_{tmr} < X_0 (< 0)$$

以上まとめると、

- **State 1:** $f_y \leq F_{yo}, \quad X_0 \leq X_{tmr} \leq X_1$
- **State 2:** $f_y > F_{yo}$
- **State 3:** $f_y < F_{yo}, \quad X_{tmr} > X_1$
- **State 4:** $X_{tmr} < X_0 (< 0)$

が設計例の状態の定義となる.

片山幸久 (Yukihiisa Katayama)

1966年3月20日生. 1989年名古屋大学工学部電子機械工学科卒業, 1991年同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程前期課程修了. 同年4月NTT入社. 知能ロボットシステムおよび知能ロボット用センサの研究開発に従事. 現在NTTヒューマンインタフェース研究所研究主任. 計測自動制御学会会員. (日本ロボット学会正会員)

員.

南條義人 (Yoshito Nanjo)

1961年8月24日生. 1987年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程(機械工学専攻)修了, 同年4月NTT入社. 現在NTTヒューマンインタフェース研究所主任研究員. ロボットの運動制御およびシステムの研究に従事. 日本機械学会会員. (日本ロボット学会正会員)

下倉健一朗 (Ken-ichiro Shimokura)

1959年4月1日生. 1982年早稲田大学工学部機械工学科卒業, 1984年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了, 同年電電公社入社. 現在NTTヒューマンインタフェース研究所主任研究員. この間1993~1994年マサチューセッツ工科大学客員研究員. 知能ロボットシステムに関する研究に従事. (日本ロボット学会正会員)

事.