解説

ロボットコントローラの運動制御技術

Motion Control Technology for Robot Controller

石川 均*¹ 野瀬 松 男*² 鮫 島 泰 郎*¹ *¹(株)小松製作所ロボット事業部 *²(株)小松製作所研究本部
Hitoshi Ishikawa*¹, Matsuo Nose*² and Tairo Samejima*¹ *¹Robotics Division, Komatsu Ltd. *²Research Division, Komatsu Ltd.

1. はじめに

ロボットコントローラにおける運動制御技術とは周知の通りロボットを「より速く」「より正確に」「より滑らかに」動作させる事を目的としてきた。これはその用途（アプリケーション）にかかわらず共通の課題であるが、アプリケーションに応じて必要とされる制御技術が異なるというのもまた事実である。近年CPUの能力アップにともなうて、ロボットの運動制御技術も飛躍的に向上し、今回紹介する様な技術が実用可能となり、メーカーごとに特色を出す部分となっている。

例えば、図1は建造物の柱をアーク溶接するためのロボットシステムである。こうした溶接作業ではハンドリングロボットのような高速での追従性は要求されない。それよりも高い溶接品質を得るためには作業中の軌跡の正確さが必要である。特にアーク溶接ではウィービングという、溶接線に対してトーチを左右に揺動させる動作が行われるので、ロボット本体の慣性や減速機の剛性の影響は無視できない。これらを克服して指令通りの振幅を実現するための運動制御技術が必要となる。図2ではロボットがプラズマ切断トーチを持ち、作業を行っている。切断作業で必要とされるのは切断軌跡の正確さと切断面の滑らかさであり、特にロボットの場合は三次元形状のワークを扱う事が多く、コーナー部でトーチの姿勢が急激に変化するので、こうした動作での防振制御技術が求められる。

一般に運動制御技術というとサーボ制御に関心が向けられがちであるが、上記ニーズに応えるには軌道計画や加減速処理を含めたトータルな制御系を構築する事が重要である。次章以降では産業用ロボットコントローラの運動制御技術をハード・ソフトの両面から解説する。自社技術を中心に、産業界で実用化されている技術を紹介し、今後を展

望する。

2. 軸制御部のハード構成

近年のロボットコントローラは、溶接・ハンドリング等の用途別のハードウェアの差異を最小限にするために、機能別に基板をモジュール化し、基板間をバス接続する方法をとっている。具体的には、マンマシンI/F・軸制御・I/O制御・センサ処理等の機能単位でモジュール化されている。

図3に、当社ロボットコントローラの軸制御部のハードウェア構成を示す。軸制御処理を3つのCPUに分割し、

図1 溶接ロボットシステム

図2 プラズマ切断ロボット

原稿受付 1996年5月31日

キーワード: Robot Controller, Motion Control, Vibration Control, Neural Network

*¹〒323 栃木県小山市横倉新田400*²〒254 神奈川県平塚市万田1200*¹Yokokurashinden, Oyama-shi, Tochigi*²Manda, Hiratsuka-shi, Kanagawa

図3 軸制御部のハード構成

マルチCPU構成とすることで負荷の分散をしている。

MPUは言語処理・軌道生成・座標変換等を行い、一番守備範囲が広い。SPUは座標変換以降のサーボ制御を行い、最大8軸まで(オプション基板を装着すれば最大15軸まで)の制御が可能である。SCEは、サーボドライバとの高速シリアル通信を行う。MPU、SPUには32[bit]CPUを用いており、SCEには8[bit]CPUと、負荷に応じてCPUを使い分けている。

3. 運動制御技術

3.1 運動制御に必要な要素技術

ロボットの動作性能を向上させるためには、一般にはフィードバックを中心とするサーボ制御技術に関心が向けられがちである。しかし、産業用ロボットコントローラのCPUは、単にサーボ制御を行うだけでなく、動作プログラムの解釈・実行、I/O制御、センサ処理、各種情報のモニタ等多くの処理をこなさなければならない。もちろんそのために前述したようにマルチCPUの構成をとるが、サーボ制御処理にCPUの負荷を100%かけることはできない。このように限られた資源でロボットの性能を向上させるには、サーボ制御だけに頼るのではなく、軌道計画および加減速処理も含めた運動制御を考える事が効果的である。つまり以下の3つを総合的に考えて運動制御系を設計することが重要である。

- (1) 軌道計画
- (2) 加減速処理
- (3) サーボ制御

このような観点から、当社で実施している運動制御技術を以下に紹介する。図4に当社で行っているソフトウェアによる制御系の全体ブロック図を示す。

3.2 軌道計画

ロボットは一般には、作業者が動作を教示しそれをプレイバックするティーチングプレイバック方式を用いている。しかし、作業者がロボットにとってダイナミクスまで考慮した最適な姿勢を教示するには、ロボットに関する高度な知識と熟練を要する。たとえば図1、図2に示すような6自由度を持つロボットで切断または溶接といった作業を教示する場合を考えると、トーチ先端の位置を固定してもトーチ回りの姿勢は任意に選ぶことができる。つまりト

図4 制御系全体ブロック図

ーチ回りに冗長な自由度を持つことになるので、姿勢のとりかたによってはロボットの基本軸の動作速度が大きくなり、軌跡ズレや振動の原因となる。

そこで、このような問題を改善するために、各軸動作速度を極力抑えるように教示データ(姿勢データ)をオフラインで変更する手法を開発している[1]。

この手法はCPUのオンライン処理の負荷にならないという点でも有効な方法といえる。

3.3 加減速処理

初期のロボットコントローラはまだCPUの処理能力もそれほど高くないため、動作中に生じる振動を低減する手法としては、加減速時の速度指令波形を工夫する方法が一般にとられていた。NCカム曲線やS字加減速などがよく知られている。しかし、指令時間が長くなるためタクトタイム延長につながるという問題があること、またCPUの高速化によりソフトウェアサーボによる複雑な制御が可能になったことから、近年ではサーボ制御による防振制御が中心となっている。

そこで、単に速度指令を滑らかにする方法では指令時間が長くなってしまいますので、指令時間を延長することなく、加減速波形レベルでロボットの固有振動数成分を含まないような速度波形を作ること、加減速時の速度指令の最適化を行っている。加減速波形としたのは、アームに働く駆動力が加速度に対応するためである。

この手法も、最適化した速度指令波形をテーブル化して、オンライン処理時にはこのテーブルを参照することでCPUに負荷をかけることなく実現できる。

3.4 サーボ制御

ハードウェアは機能別にモジュール化し、アプリケーションごとに組み合わせているが、サーボ制御部も性能を最大限に引き出すために、すべてのアプリケーションに共通する基本部分とアプリケーション別に追加する部分とに分けて開発している。

1) 基本となるサーボ制御

PID制御とフィードフォワード制御を組み合わせた2自由度制御方式[2]としている。目標値に対する追従特性

は主にフィードフォワード制御部で調整し、フィードバック特性はPID制御部で調整している。

フィードフォワード制御は、モータの慣性までを補償するために速度・加速度のフィードフォワードを行っている。

アームの慣性までを補償しようとすると、姿勢によって負荷が変動すること、弾性体として考慮する必要があること等によりモデルが複雑になることから、アーム部の慣性は考慮していない。

2) アプリケーション別制御

当社主力商品である溶接用と、切断用に開発したサーボ制御技術について解説する。

厚板溶接の場合は、作業速度は低速なので振動は問題にならない。しかし、ロボットはウィービングという揺動動作を行い、一般にはサイン波形で揺動するので、そのウィービング波形精度は各軸の周波数特性の影響を直接受けることになる。したがってロボットの姿勢によって各軸の周波数特性が変動するので、動作する方向・場所によって時々刻々ウィービングの振幅や波形そのものが変化し、その補正が非常に困難であった。

そこで図4に示すように、逆変換後の各軸指令値に各軸

の周波数特性を補正するような目標値フィルタを挿入している[3]。このフィルタの係数は、運動モデルを参照して逐次変更する。図5に旋回軸の補正効果を見た周波数特性の比較データを示す。この例では5[Hz]までを補正しており、ゲイン特性が大幅に改善されている。図6が実際のウィービング波形を計測した結果である。補正前は姿勢の変化により振幅が変化しているが、補正後は姿勢変化にかかわらずウィービング振幅が一定で、安定した高品質の溶接が実現されている。

次に切断アプリケーションは、トーチ姿勢が3次元的に変化するので、ハンドリングほど高速ではないが、動作としては中速の領域になり、アームの振動が問題となる。一般には知られていないが、この速度領域ではロボットはかなり顕著な非線形特性を示す。低トルク域での減速機のバネ特性が非線形であることが原因であり、図7にその例を示す。同図は第2軸回りの固有振動数を計測したもので(図中黒丸印が計測値)、本来第3軸との相対角が一定ならば、第2軸の角度変化に対して固有振動数は一定のはずが大きく変化している。中速域では、このような顕著な非線形特性が原因で振動が発生するため、状態推定オブザーバのような線形理論の適用を困難にしていた。

図5 周波数特性の比較

図6 ウィービング波形の比較(5[Hz], 6[mmpp])

図7 ニューラルネットワーク出力と実測値の比較

図8 従来制御と防振制御の比較

そこで図4に示すように、入力を各軸角度、出力を固有振動数とするニューラルネットワークを用いてロボットの非線形特性をモデル化し、オンラインでニューラルネットワークにより固有振動数を推定して、この固有振動数を使ってノッチフィルタの中心周波数を変更するアダプティブノッチフィルタによる防振制御を開発した[4]。図7中の白丸印がニューラルネットワークによる推定値である。ニューラルネットワークは演算量を考慮し3層の簡単なものとしたので若干の誤差を持っているが、図8に示すように十分な防振効果が得られ、実用化されている。尚、加減速時の加速度波形の振動成分も低減しているのは、3.3項で説明した加減速処理によるものである。

3.5 最新制御技術

現在産業界で量産されているロボットコントローラは、PID制御+フィードフォワード制御が主流であろう。しかし、ロボットの高速化とともに高精度化のニーズが高まってきている。このようなニーズには従来の制御技術では対応しきれなくなっており、新しい制御技術がいくつか実用化されてきている。

たとえば、スポット溶接・シーリング作業といったロボットにとっては高速領域となる動作においては、減速機の線形領域での振動問題となるので、現代制御理論等による線形制御理論の適用が可能となる。

具体的には、ロボットのダイナミクスを補償して軌跡精度を向上する動的制御[5]や、オブザーバを用いてアームの状態量を推定し、状態フィードバックを行って振動を低減する防振制御[6]～[8]等がある。

4. お わ り に

NC工作機械をはじめとするFAシステムの分野では、

近年オープン化・標準化の動きが活発である。これらの議論はロボットコントローラにおいても同様のことがいえる。すでにオープンコントローラを市販しているメーカーもあり[9]、これらを共通の開発・実行プラットフォームとしてOAや他のFA分野で蓄積されたソフトウェアの膨大な資産を活用して、各種アプリケーション、最新の制御技術の開発を行える環境が整いつつある。我々ロボットメーカーは、こういった動きを支援していき、ユーザの課題解決に取り組み、さらなるロボット技術の発展のために努力をしていきたい。

参 考 文 献

- [1] Abe, Shibata, Tanie and Nose: "Motion Planning for a Redundant Manipulator by Genetic Algorithm," Proceedings of 1994 IEEE Symposium on Emerging Technologies & Factory Automation, pp. 466-471, 1994.
- [2] 荒木: "2自由度制御系 — I, PID・微分先行型・I-PD制御系の統一の見方などについて", システムと制御, vol. 29, no. 10, pp. 649-656, 1985.
- [3] 野瀬, 北橋, 阿部, 梨和: "溶接ロボットのウィーピング運動制御", 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 729-730, 1993.
- [4] 野瀬, 阿部: "ニューラルネットワークを用いたロボットの防振制御", 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 931-932, 1994.
- [5] 和田, 西, 宇野, 久保: "ロボットの動的制御方式の開発", 川崎重工技報, no. 105, pp. 1-6, 1990.
- [6] 宇野, 久保, 西, 和田: "ソフトウェアサーボによるロボットの制御", 電気学会論文集D, vol. 107-D, no. 8, pp. 1018-1025, 1987.
- [7] 宮崎, 富田: "状態推定オブザーバによる産業用ロボットの振動抑制制御", 安川電機技報, vol. 58, no. 3, pp. 177-181, 1994.
- [8] 本家, 井上, 川端, 西田, 西村: "外乱オブザーバをもちいた弾性ロボットの運動と振動の制御", 神戸製鋼技報, vol. 45, no. 3, pp. 35-38, 1995.
- [9] 大西: "可搬式汎用知能アーム登場! —オープンロボットの提案—", 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 8, pp. 1137-1142, 1994.

石川 均 (Hitoshi Ishikawa)

1952年1月1日生。1986年(株)小松製作所入社。ロボット事業部開発グループにてロボットおよびシステムの開発に従事。開発グループマネージャ、主任技師。
(日本ロボット学会正会員)

野瀬松男 (Matsuo Nose)

1956年12月17日生。1981年(株)小松製作所入社。ロボット事業部を経て、現在研究本部中央研究所第三研究部主任研究員として、制御技術・マンマシンインターフェースの研究に従事。システム制御情報学会会員。
(日本ロボット学会正会員)

鮫島泰郎 (Tairo Samejima)

1963年10月2日生。1988年(株)小松製作所入社。研究本部を経て、現在ロボット事業部開発グループにてロボットコントローラの開発に従事。