

三菱電機産業ロボット用力覚制御システム

藤島光城*
村田健二*

Force Control System for Mitsubishi Electric Industrial Robots

Mitsushiro Fujishima, Kenji Murata

要旨

電気・電子分野に適した高速・高精度・スリムアームの新型産業用ロボット“Fシリーズ”で、組立て作業用途に求められる高難易度作業を実現する力覚制御システムを製品化した。

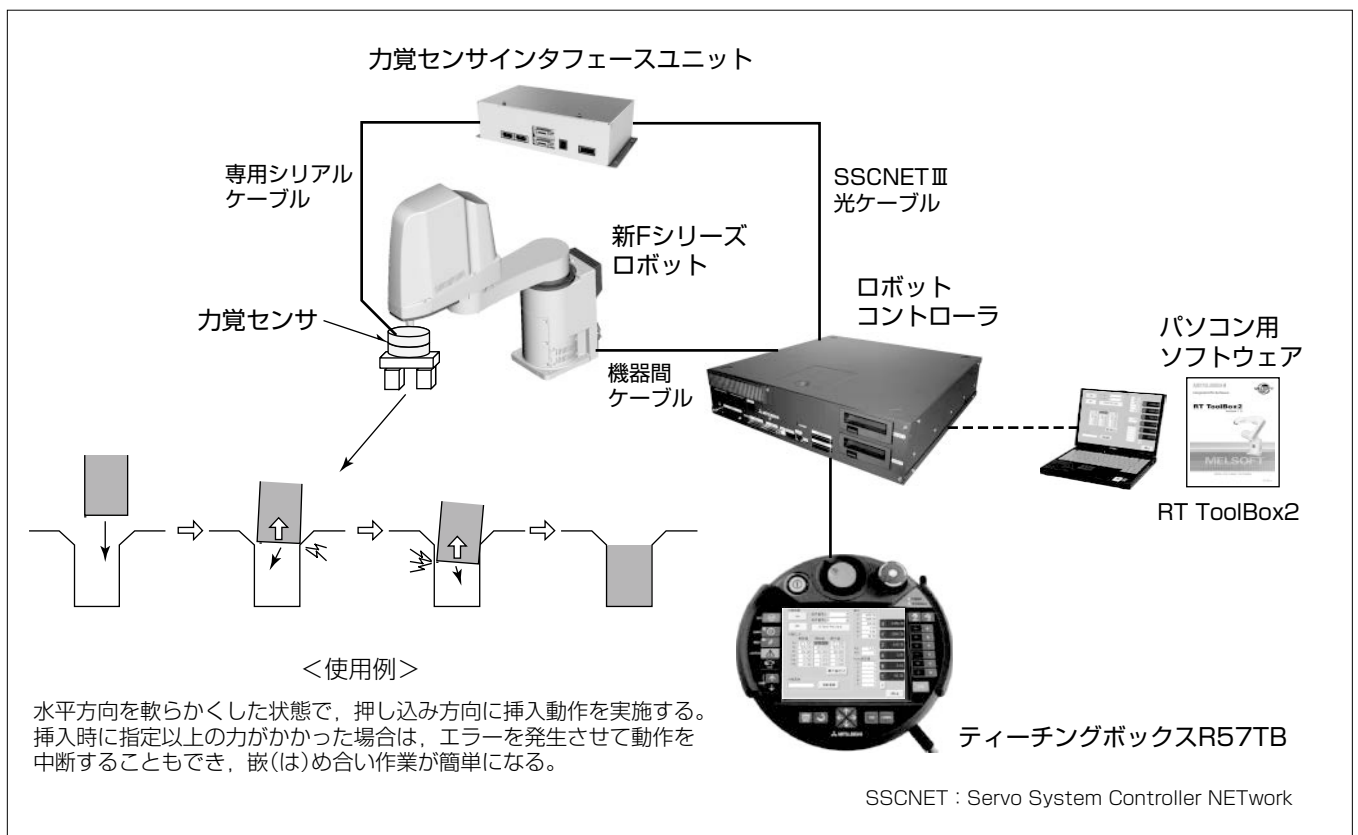
具体的には、ロボットアーム先端に6軸の力覚センサを取り付け、各軸方向の力3成分・各軸まわりのモーメント3成分をリアルタイムに高い精度で検出する。検出した力覚データを高信頼な“SSCNETⅢ(光ケーブル)”通信でロボットコントローラに取り込み、柔らかく制御、押し付け制御、力検知等の力覚制御をする。

この力覚制御を応用すれば、部品のばらつきによる位置

ずれを吸収でき、また、正確な位置をティーチングできる等の機能が実現できるため、ロボットを用いたセルの構築／運用容易化が行えるようになる。

今回開発したのは、①力覚インタフェースユニット(力覚センサのデータをSSCNETⅢ通信へ変換)、②ロボット用ソフトウェア(力覚制御)、③パソコン用ソフトウェア(力覚専用画面)、④ティーチングボックス用ソフトウェア(“R57TB/R33TB”力覚専用画面)である。構成を図に示す。

本稿では、主に力覚制御システムの機能と制御、及びロボットへの適用例について述べる。



新型ロボット“Fシリーズ”の力覚制御システムの構成

新Fシリーズのアーム先端に市販の力覚センサを取り付け、力覚センサインタフェースユニットを介してロボットコントローラの付加軸(SSCNETⅢ)に簡単に接続できる。力覚データはティーチングボックスやパソコンで表示でき、JOG操作時にティーチングボックスからの力覚制御によって、教示作業を省力化できる。また、力覚データのログをパソコンに保存できるので、エラーの解析も容易である。さらに、力覚制御用のソフトウェアは新Fシリーズのロボットコントローラに標準で搭載されているため、自動運転時にパソコンが不要である。

1. ま え が き

モノづくりの現場ではグローバル競争に対応するための次世代生産システムとして産業用ロボットの活用が進んできている。その背景として、①工場の安定的な労働力確保のための自動化推進、②消費者嗜好(しこう)の多様化による多品種生産に適応したセル生産システムへの移行、③安価にかつ短期間で設計、稼働できる生産システムへの要求、④高精細組立て、柔軟物搬送、高速ハンドリング等の高度な作業の自動化要求が挙げられる。

しかし、この高度な作業の自動化は難しく、力覚センサやビジョンセンサ等の各種センサを活用した智能化システムを構築する必要がある。三菱電機ではこの要求にこたえるため、知能化機能を搭載したロボットによるサーマルリレーの組立てを自動で行うセル生産システムを開発した(図1)。

本稿では、この智能化システムの中でも重要な力覚制御システムの機能と制御、及びロボットへの適用例を述べる。

2. ロボット用力覚制御システムの機能と制御方法

2.1 力覚機能

力覚機能は6自由度の力覚センサ情報を用いて、ロボットに力の感覚を持たせる機能である。今までロボットでは難しかった微小な力加減・力検知を必要とする高度な作業や、教示の省力化を実現できる。以下に主な特長を示す。

- (1) ロボットを柔らかく制御し、対象ワークに倣いながら動作できるため、精度が要求される機械部品の嵌め合い作業が容易になる。
- (2) 任意の方向に一定の力で押し付けながら動作できるので、ロボットによるバフ掛けや研磨作業ができる。
- (3) ロボットの動作途中にロボットの柔らかさや接触検知条件を変更できるため、ピン挿入時に柔らかさを変更し、挿入初期はワーク表面を傷つけないように柔らかく制御、押し込み時は強く制御してしっかり挿入できる。

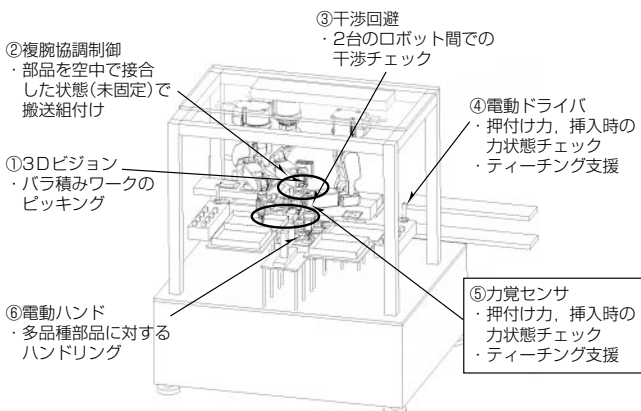


図1. ロボットによるセル生産システム(2011国際ロボット展)

- (4) 接触状態を検知し割り込み信号を発生させ、ロボットの動作を変更できるため、ワークを傷つける力を検知したら移動方向を変えるなど、エラー・リカバリー用途に使える。
- (5) 接触時の位置情報や力情報を取得できるため、接触による高い精度の位置検出が行える。また、教示作業で見えづらいワークとロボットハンドの接触状態の確認ができるため、教示作業の省力化が行える。
- (6) 位置データに同期した力データをログデータとして保存し、パソコンのロボット用ソフトウェア“RT Tool Box2”で簡単にグラフ表示できるのでエラー発生時の解析に役立つ。
- (7) ログデータをFTP(File Transfer Protocol)経由でパソコンに自動転送してデータベースに蓄積し、組立て品質を後からトレースできる。
- (8) センサに設定以上の力が検出された異常時に、ロボット動作を停止し、ワークや力覚センサを保護できる。

2.2 力覚制御とは

力覚制御は、ロボット周辺物と接触したときの反力や柔らかさがあらかじめ設定した値になるようにロボットを制御する機能である。

2.2.1 力指令制御(押し付け力の制御)

力覚制御における力指令を設定すると、力制御有効時にロボットは力指令にあらかじめ設定した反力(N)が得られるように位置を補正しながら自主的に動作する。ただし、外力が作用していない場合(接触していない場合)は、力指令値の方向と反対方向にロボットが動作するが、このときの動作速度は、2.3.1項で述べる力覚制御ゲインに比例する。

2.2.2 スティフネス制御(柔らかさの制御)

スティフネス制御におけるロボットの柔らかさはスティフネス係数で設定する。値が大きい程、ロボットが硬くなり、値が小さいほどロボットが柔らかくなる。

図2は、ツールZ軸のみスティフネス制御を行った場合の例であり、Z方向のスティフネス係数を0.5(N/mm)とし、

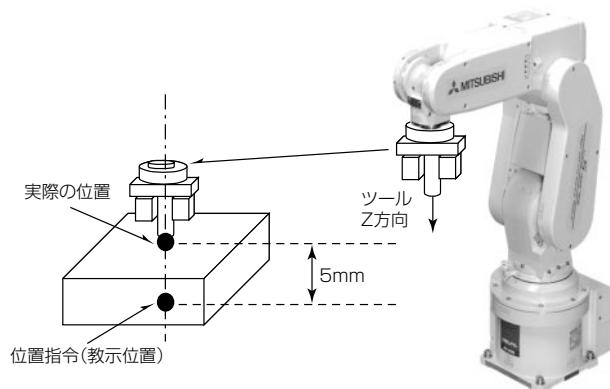


図2. スティフネス制御

教示位置を接触面より 5 mm 下の位置を教示した場合、接触面に発生する力Fは以下ようになる。

$$F = 0.5(\text{N/mm}) \times 5(\text{mm}) = 2.5(\text{N})$$

2.3 力覚制御の調整

実際に力覚制御を精度良く行うには、力覚制御の応答性(ゲイン)や、振動(ダンピング)を抑制する必要がある。

2.3.1 力覚制御ゲイン

力覚制御ゲインは、力覚制御の応答性を調整するパラメータである。設定値が高いほど、力指令・ステイフネス指令に対する応答性が高くなるが、上げすぎると接触時に過敏に反応してしまい動作が不安定になる。

この力覚制御ゲインは接触対照物の剛性の影響を受けるため、対象物に応じてゲイン設定を変更することが望ましい(表1)。ただし、力覚制御ゲインが0の場合は、力覚制御による補正を行わないため、通常の位置指令となる。したがって動作途中でゲイン設定を変更すると、ステイフネス制御から位置制御、位置制御からステイフネス制御へ移行できる。

ゲイン調整例を次に挙げる。

- (1) 力覚制御(力指令制御、又はステイフネス制御)を有効にしている軸方向に、JOGモードで低速動作(JOG OVRD(Override) 5%程度)させ、作業対象物に接触させる。
- (2) 接触の際に動作方向と反対側に跳ね返るような動作をする場合は、ゲインを下げる。

2.3.2 ダンピング係数

力覚制御(力指令制御又はステイフネス制御)による動作が振動する場合にダンピング係数を調整する。値を大きくする程、振動を抑制する効果が増すが、ワークが接触した瞬間など、急激な力変化に対する補正動作が遅くなるため、ワークに作用する力が増加する。実際のダンピング調整は、先に述べた力覚制御ゲインの調整が完了してから必要に応じて変更する。

2.4 力検知機能とモニタリング

力検知機能は表2の設定ができ、これらの機能を使って動作変更や、力覚データのモニタリングによる教示の省力化、力覚データのロギングが行える。

2.4.1 力覚検知による教示容易化

力覚制御中にあらかじめ設定した検知値を超えた場合、自動的にJOG動作を停止し、ブザーが鳴りオペレータへ通

知する。これによってワークや力覚センサの保護ができる。また、ティーチングボックスに表示される力覚センサデータの表示欄の色を変更して視覚的にも認識できる。

また、ステイフネス制御でロボットを柔らかく制御し、嵌め込み形状に倣いながら挿入完了位置をティーチングすることができるため、教示作業が省力化できる。

2.4.2 力覚モニタ機能

力覚モニタ機能で力覚センサの現在値と最大値をリアルタイムで表示し、例えば力覚モニタに表示され力データを見ながらワークとの接触状態を見て、位置を教示することができる。また、力覚モニタには力覚パラメータ編集画面があり、力覚制御の制御モード・制御特性の変更や設定内容の確認が行える(図3)。

2.4.3 ログファイル・ビューア機能

力覚データのログファイルはRT ToolBox2の力覚制御のメイン画面からボタン操作によって、位置と力の関係を簡単にグラフ表示ができる(図4)。また、専用命令によってロボットコントローラ上でロギングしたデータをFTP経由でパソコンにファイル転送し、組立て品質を後からトレースできる。

2.5 力覚制御ソフトウェア

力覚制御ソフトウェアの構成を図5に示す。力覚インタフェースユニットソフトウェアからSSCNETⅢ経由で力覚センサデータを受信するセンサデータ処理、そのデータを用いて力覚制御、力覚データのロギング処理をロボット本体制御ソフトウェアのモーション制御部でリアルタイムで処理する。制御の流れを図6に示す。

力覚制御の処理は、モーションタスクで生成された位置指令に対して最新の力覚センサデータを用いて補正を行い、それを精補間してサーボへ出力する。力覚センサデータは、SSCNETⅢ通信経由で定周期に送られてくるが、できるだけ最新のデータを力覚制御の処理に反映させるため、定周期で実行するセンサデータ処理を新規に追加し、力覚センサデータの取得や許容値をチェックしている。

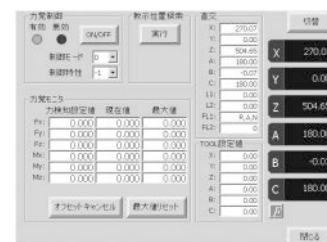


図3. 力覚モニタ画面

表2. 力検知機能一覧

機能分類		内容
力覚検知	割込み信号	力検知設定値に対する状態を監視する。(力検知設定に対する立上がり、立下り信号を取得可能)
	データラッチ	力検知設定値を超えた瞬間のセンサデータ・位置データを保持する。
力覚制御(TB)	接触検知	指定した力(モーメント)を超えた瞬間にジョグ動作を停止する。

表1. 力覚制御ゲイン設定例

対象物剛性	力覚制御ゲイン
1.0N/mm	100.0
10.0N/mm	8.0
100.0N/mm	0.25

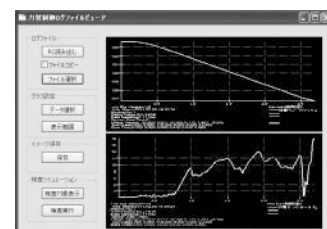
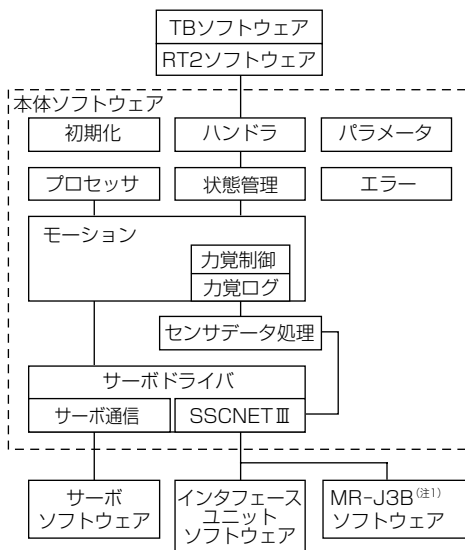


図4. 力覚ログファイル画面



TB : Teaching Box
RT2 : RT Tool Box2
(注1) MR-J3Bは、当社サーボアンプの形名である。

図5. 力覚制御ソフトウェアの構成

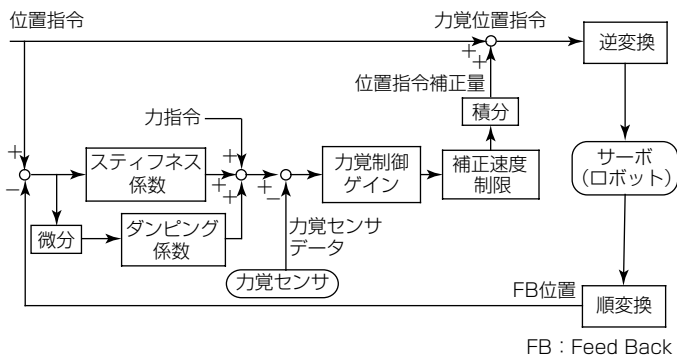


図6. 制御ブロック図

3. 力覚制御システムの適用事例

3.1 嵌め合い作業

水平方向を柔らかくした状態で、押し込み方向に挿入動作を実施する。挿入時に指定以上の力がかった場合は、エラーを発生させて動作を中断することもできる。このような嵌め合い作業やエラー検知が簡単にできる(図7)。

3.2 バフ掛け研磨作業

Y軸方向に動作しながら、対象物を探す。対象物が見つかったら、対象物に一定の力を加えながらX軸方向に動作する。指定以上の力がかった場合は、エラーを発生させて動作を中断する(図8)。

3.3 コネクタ挿入作業

XY平面上のコネクタを探索する。コネクタが見つかった場合は、その中心位置のXY座標値を算出し挿入する(図9)。

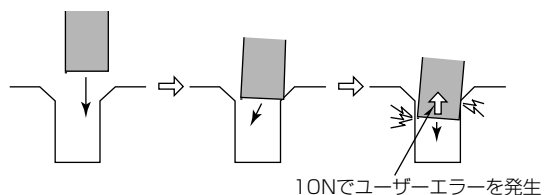


図7. 嵌め合い作業例

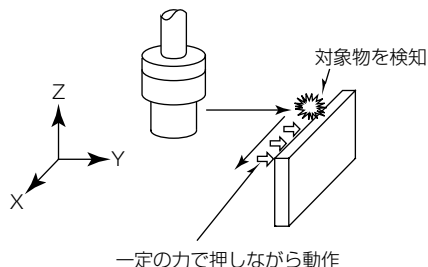


図8. バフ掛け研磨作業例

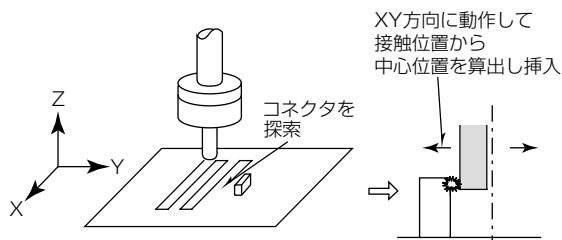


図9. コネクタ挿入作業例

4. む す び

ロボットの知能化の中でも重要な力覚制御システムの機能と制御、及びロボットへの適用例について述べた。力覚センサは精度が要求される機械部品の嵌め合い作業や、バフ掛けや研磨作業、コネクタ挿入作業等に使用でき、また、エラーリカバリーなどの用途や、教示省力化、ログデータによるエラー発生時の不具合解析等応用範囲も広い。

今後、力覚センサの応答性能向上や応用機能の“easy to use”開発を行い、顧客に一層満足してもらえる開発を推進する。

参考文献

- (1) 劉 正勇, ほか: 力制御機能搭載ロボットコントローラの開発, 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2011)
- (2) 藤島光成, ほか: 産業用ロボットビジョンの活用事例と今後の展望, ロボット(特集), No.200, 26~30 (2011)
- (3) 牧田裕之, ほか: FA機器とビジョンシステムによる連携ソリューション, 計測技術, 38, No.11, 38~42 (2010)