

アクティブ・コンプライアンスデバイスの開発

Development of Active Compliance Device

株式会社 山武

川瀬 茂
Shigeru Kawase

株式会社 山武

津村 高志
Takashi Tsumura

株式会社 山武

小黒 直輝
Naoki Oguro

キーワード

ロボット, 組み立て, コンプライアンス制御, センサレス, 力検出, 外乱オブザーバ

ボイスコイルモータを用い、作業内容に応じて機械的特性を自由に変更でき、かつ、力センサなしで、対象作業とロボット間の接触力及び位置を高速、高精度に制御可能なユニットを開発しアセンブリ・セルに搭載した。

作業対象とロボットの間、力と位置の検出・制御が可能なデバイスを設置することにより、組み立て動作の高速化、作業状態の監視、多様な作業への対応が可能となる。

The authors have developed an active compliance device driven by a voice coil motor. It can adjust the mechanical characteristics according to the targeted operation and can control the operation force and position between a robot and a targeted workpiece without a force sensor. Installing the device between a robot and a targeted workpiece makes the robot faster, more intelligent, and more versatile because of its light weight, quick response, and force and position control/sensing ability.

1. はじめに

近年、産業用ロボットにおいても智能化の研究が進み、精密組み立てや嵌め合い作業など、従来人手に頼らざるを得なかった作業もロボットで行えるようになってきた。これらを実現する要素技術としてはビジョンやロボットの柔軟制御、力センサ（力覚）を用いた力制御技術が掲げられる。

一例として垂直多関節ロボットのアーム先端とエンドエフェクタとの間に6軸の力センサを設けて機能を実現する装置があるが、ロボットのアーム質量や減速器の摩擦が比較的大きいため、電子部品組み立てなど小さな力で細かい部品を高速にハンドリングするような用途に適しているとは言えない。

今回、高速に位置制御が可能でコンプライアンス（柔軟性）を自由に変更でき、かつ力覚機能を持つデバイス（アクティブ・コンプライアンス）（図1）を開発し、ロボットとエンドエフェクタ（もしくはワーク）の間に設置することで、組み立て作業の高速化、作業状態の監視、多様な作業への対応を可能にしたのでここに報告する。

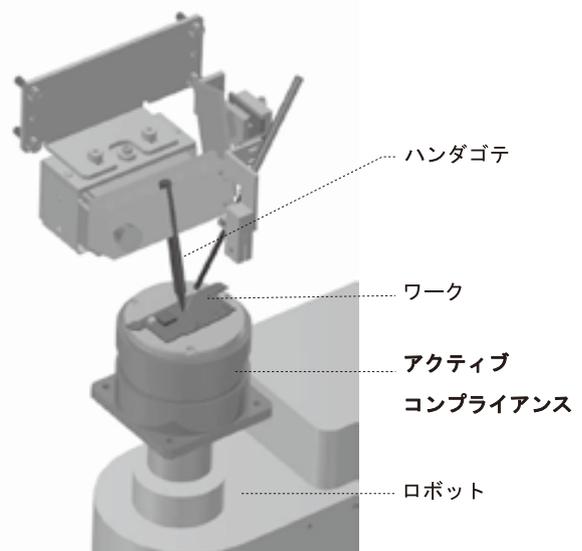


図1 アクティブ・コンプライアンス外観

2. 開発の背景

2.1 組み立て作業における課題

ロボットを使用する組み立て作業の自動化において、人が教示ボックスなどを用いてロボットに手先位置を覚えさせるティーチングという作業があり、ロボットが正確に教示位置をトレースすることで自動化が実現できる。

ところが部品には寸法誤差があるので、ロボットで正確に位置決めを行っても組み付け位置や高さがずれる場合があります。そのような状態で組み立て作業を行うと過大な力が発生して部品破損につながる。

この問題の対応策として従来下記の方法がとられていた。

- ①ロボットのアーム先端とワークの間にバネを設置し力を吸収する(パッシブ・コンプライアンス)。
- ②ロボットのアーム先端とワークの間に力センサを設置し、過大な力が加わらないようにロボットで制御する。

しかし組み立て作業においてロボットは様々な作業を行うため、①の方法は対象物や作業内容によりその都度バネの種類を変える必要がある。②の方法はロボットの重量が比較的大きく剛性が高いため、急速に対象物に接近させた場合に部品破損の危険性があるため高速なハンドリングが難しい、センサが高価であるなどの難点があった。

2.2 課題の解決

これらの課題を解決するためコンプライアンス(柔軟性)を自由に変えられ、かつ高速に位置決めが可能で力覚(力検出)機能を持つデバイス(アクティブ・コンプライアンス)を開発し、ロボットのアーム先端とワーク(もしくはハンド)の間に組み込むことにした。

アクティブ・コンプライアンスの機能・特長を下記に示す。

- ①作業中の力と柔軟性を瞬時に変更し、部品を破損することなく組み立て作業を高速化できる。
- ②ロボットと連携して複雑で高速な動作を行える。
- ③接触力を監視することで作業状態を把握できる。

3. 装置概要

3.1 装置構成

アクティブ・コンプライアンス(以降AC)はVCM(ボイスコイルモータ)と位置センサ、小型ACコントローラで構成され、ロボットとワーク(もしくはハンド)の間に設置して作業対象物との接触力を制御しながら、嵌め合い、押し付け、ハンダ付けなどの作業を行う。

位置センサは非接触の近接センサを内蔵しており、外部に高価な力センサを設けることなく、近接センサ出力と駆動電流を用いた外乱オブザーバにより作業対象との接触力を推定する。

アクティブ・コンプライアンスの制御はマイクロコントローラで行い、内部処理は主として制御演算部とシステム制御

部とに分けられる(図2)。

制御演算部は外力推定と定電流、コンプライアンス、位置、力制御、PWM変調に必要な演算を行い、システム制御部はアセンブリ・セル全体を制御する上位コントローラとの通信処理や内部ステート、コマンド処理を行う。

上位コントローラはEthernet(UDP)経由でアクティブ・コンプライアンスと指令値や作業力などのデータをリアルタイムに交換し、アセンブリ・セル内のロボットや他のデバイスと協調動作をさせる。

尚、パラレル接続としてPLCインターフェイスも装備した(図3)。

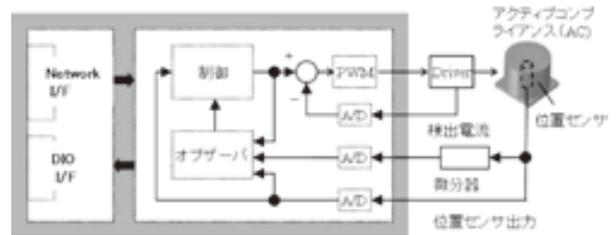


図2 ACコントローラ内部ブロック

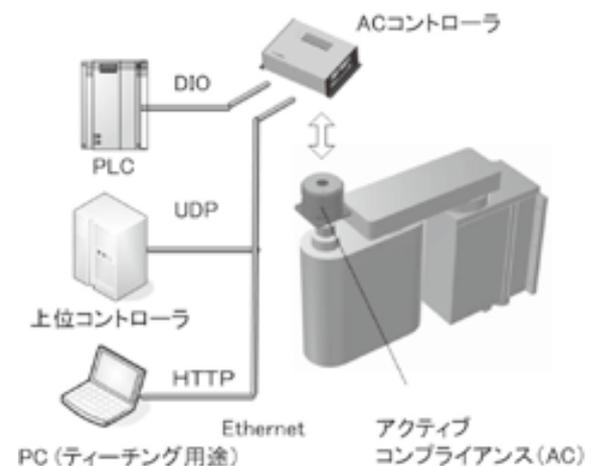


図3 装置構成図

表1にアクティブ・コンプライアンス装置の仕様を示す。

可搬質量	0.5kg
定格推力	10N(最大30N)
動作範囲	±1.5mm
位置繰り返し精度	±0.01mm
コンプライアンス	600~30000N/m
可動部質量	0.1kg
機構部質量	0.6kg
力検出精度	±0.2N(力センサレス)
ホストI/F	Ethernet, DIO(PLC)
主な適用分野	精密部品組み立てなど

表1

3.2 ACコントローラ・ハード構成

ACの制御は、装置の要求仕様と制御イコライザの計算負荷を考慮してDSP付のARM966E-Sをコアにもつマイクロコントローラで行うことにした。

ACコントローラのアナログ入力のコイル電流検出器、位置センサ、及び位置を近似微分した速度検出器信号で、マイクロコントローラ内のマルチプレクサを通してA/D変換し取り込む。マイクロコントローラは取り込んだ位置、速度、電流情報に基づき外力推定と定電流、コンプライアンス、位置、力制御に必要な各種演算を行い、得られた操作量を基準にPWM変調した信号でドライバを通してアクチュエータを駆動する。

なお制御演算は一定周期で時間内に行う必要があり、PWM変調の定電流制御ではA/D変換のタイミングも精度よく管理する必要があるため、制御演算は後述する方法によりリアルタイムOSの動作に影響を及ぼすことがないようにしてOS管理外で行う(図4)。

リアルタイムOSではシステム全体の制御と上位コントローラとの通信制御を行い、周辺ハードとしてEthernet接続のためのPHYとパラレル接続のためのBus Bufferがある。

また以上の処理の大半をソフトウェアで実現しているため、ACコントローラの小型化は容易である。

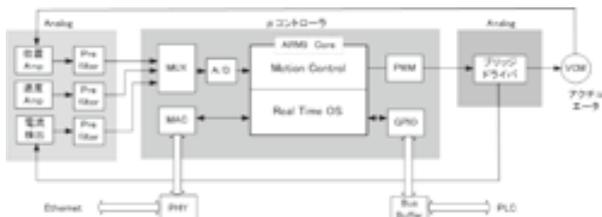


図4 ACコントローラ・ハード構成

3.3 ファームブロック及びスケジューリング

図5にACコントローラのファームウェア構成を示す。定電流、位置、コンプライアンス制御や外乱オブザーバ演算などの積和演算処理は最短50(μS)の周期で時間内に処理を終えなければならないため、高速割り込み(FIQ)を使ってリアルタイムOS管理外のモーションコントロール部で行う。

制御演算はリアルタイムOS上で行うことも可能だが、OSのタスク切り換え時間が数(μS)なので50(μS)周期で制御を行う場合のオーバーヘッドは10パーセントに達しスループットが低下する。一方高速割り込みFIQのlatency timeは1(μS)程度で影響が少ない(図6)。

上位コントローラからの指令はサーボブロックに渡され、サーボブロックでは指令に応じてモーションコントロール部の制御パラメータや動作モードを変更し所定の制御動作をさせる。

なお制御周辺回路に直接アクセスできるのはモーションコントロール部のみとし、リアルタイムOSからの直接アクセスを禁止すると同時に、リアルタイムOSの管理下にあるリソースはモーションコントロール部から直接操作できないようにすることで、モジュールの独立性を高め信頼性を向上させた。

また制御動作を行いながら上位コントローラとの通信も

リアルタイムで行える様にタスクのローテーションとスケジューリングを行った。

その結果、50(μS)以内に全ての制御演算を行いながら上位コントローラとAC間の通信間隔2(ms)の性能を実現できた。

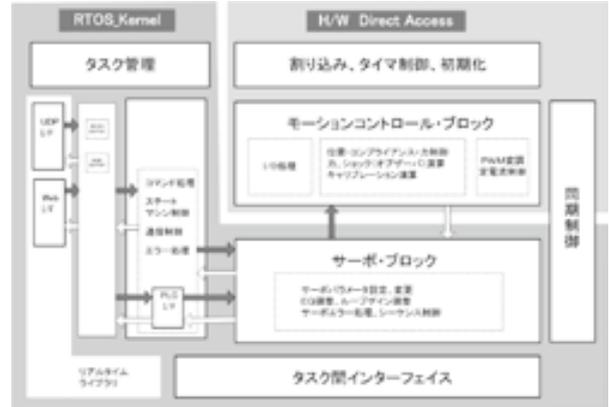


図5 ファームブロック

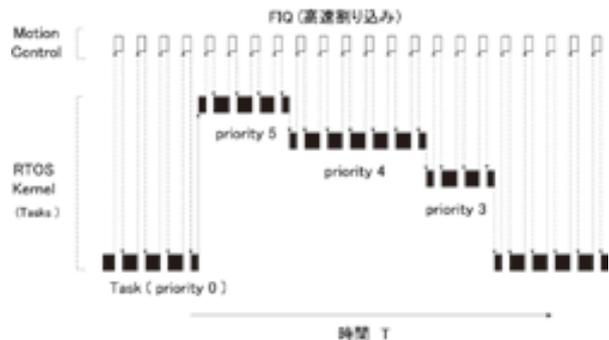


図6 スケジューリング

4. アクチュエータ・センサ

4.1 アクチュエータ構成

アクチュエータは一对のフラットスプリングで支持されたコイル、ネオジウム磁石、ヨークからなるVCMと誘導型近接センサより構成され、センサを内部ヨークの中心部に配置することで小型化を達成している(図7)。

尚、コイルからの漏洩磁束を極力抑えた設計にした上、センサ周辺を二重シールドすることで磁束飛び込みの影響を実用上問題のない範囲まで押さえ近接センサの使用を可能にしている。図8に近接センサの距離特性を示す。

近接センサは非接触で外力を直接受けることがないため作業ミスなどで破損の可能性がない利点もある。

また可動部はヒステリシスの少ないフラットスプリングで支持する構成のため、摺動抵抗の影響を無視でき外乱オブザーバで正しい外力推定が可能となる。

さらにアクチュエータ上下端には可動部位置を制限するストッパを設けてあり、強度が高いためロボットの推力を直接作業対象に加えることも可能である。

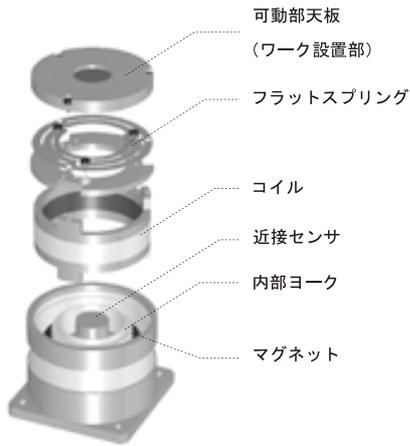


図7 アクチュエータ分解図

4.2 アクチュエータ伝達特性

VCM入力からセンサ出力までのゲイン伝達特性は、サスペンションのバネ定数と可動部質量で決まる一次共振周波数をピークに約-40dB/decで減衰する良好な特性を示している(図9)。位相特性はコイルインダクタンスとサンプリング周期の影響で、100Hz近傍から廻り始めるがインダクタンスによる電流遅れの影響は定電流ループを構成して補正している。

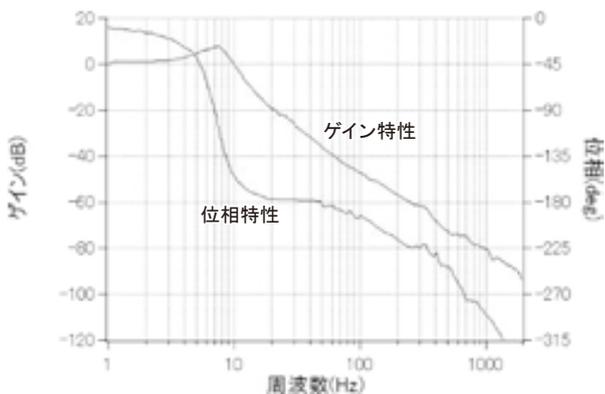


図9 アクチュエータ伝達特性

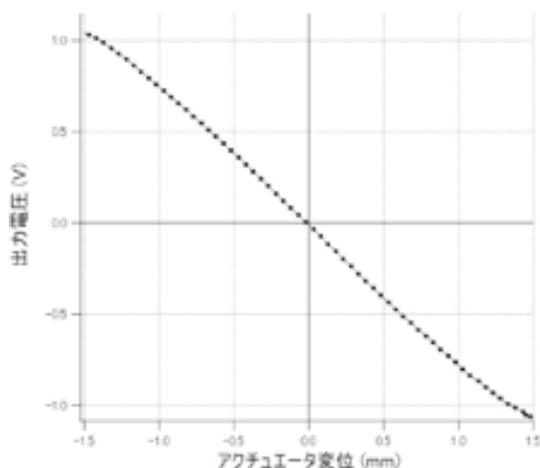


図8 センサ特性

5. 制御特性

5.1 位置制御特性

図10にアクティブ・コンプライアンスの位置ステップ応答を示す。高速に移動させても短い整定時間で精度よく位置決めが行えるため、ロボットと連携してプロフィールをコントロールすることにより、ロボット単体では難しい複雑な動作を高速で行うことができる。

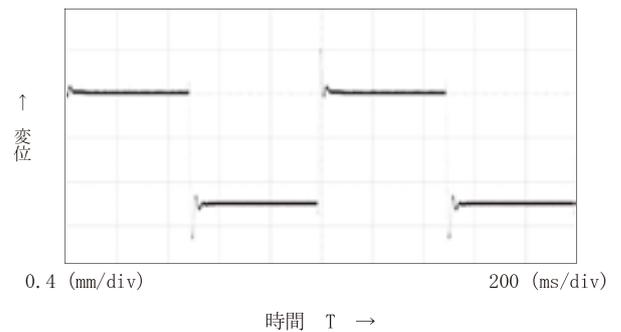


図10 位置指令応答

5.2 コンプライアンス特性

図11はコンプライアンス特性で、作業に応じて約600(N/m)から30000(N/m)まで柔軟性をコントロールできる。

たとえば精密部品の嵌め合い作業で穴に部品を挿入する場合、部品を破損しない様に柔らかい状態で穴位置を探り、穴にはまった時点でコンプライアンスを高く設定して押し付け動作を行い確実に挿入する。

また可動部が軽量で柔軟性があるため、対象物の近くで移動速度を大きく落とさずに接触させても部品やワークを損傷しないのでタクトタイムを短くできる。

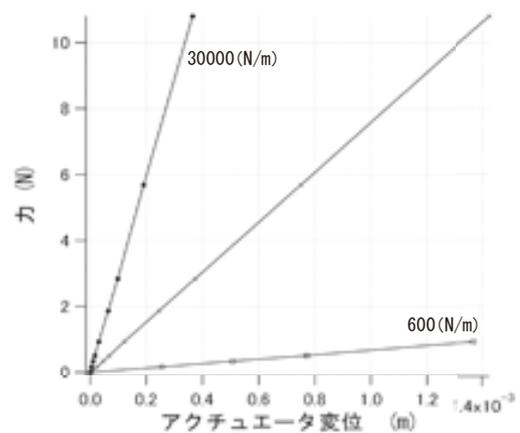


図11 コンプライアンス特性

5.3 外乱オブザーバによる外力推定

作業対象と接触している時の外力検出はロードセルなどの力センサを用いることなく、アクチュエータ駆動電流と近接センサ出力より外乱オブザーバで推定して求める。

算出のパラメータはVCMのトルク定数 K_t 、フラットスプリングのバネ定数 K 、可動部の質量 M である(図12)。

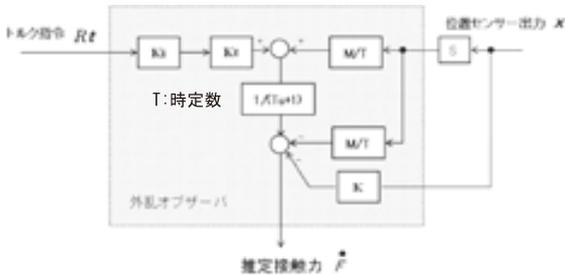


図12 外力推定オブザーバ

アクティブ・コンプライアンス可動部に取り付けたロードセルに外力を加えた場合(図13)のセンサ出力と外乱オブザーバで算出した外力を(図14)に示す。

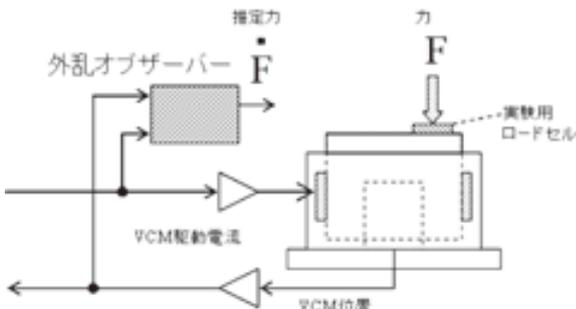


図13 外力推定オブザーバ

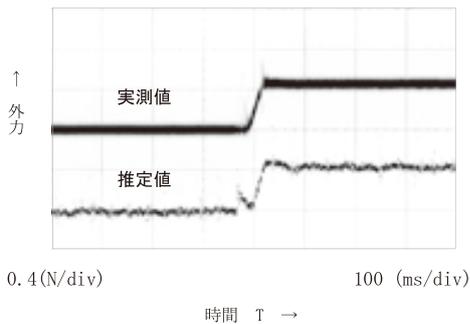


図14 推定外力と実測値

5.4 衝突検出

ワークやハンドが対象物と衝突した場合、これを検出してロボットに停止指令を出す衝突検出機能を持たせた。

衝突の判定は可動部速度信号を微分して求めた加速度のレベルと時間幅を基準に行う。

図15に金属棒先端にロードセルを取り付けて自由落下で衝突させた場合のロードセル出力と算出した衝撃力を示す。

加速度の演算は位置の二階微分なので、高域ノイズのフィルタリング処理をしている関係上若干のディレイを伴うが、落下物と接触している間のロードセル出力と計算により求めた衝撃力はおおむね一致している。

この衝撃力 $F (F = Ma)$ が所定の閾値 F_r を一定の時間 T を越えた場合、つまり力積が $F_r T$ を超えたら部品破損の可能性ありと判定し、上位コントローラにロボット停止要求を出すと同時に自ら最大速度で反対方向に移動しショックを低減する。

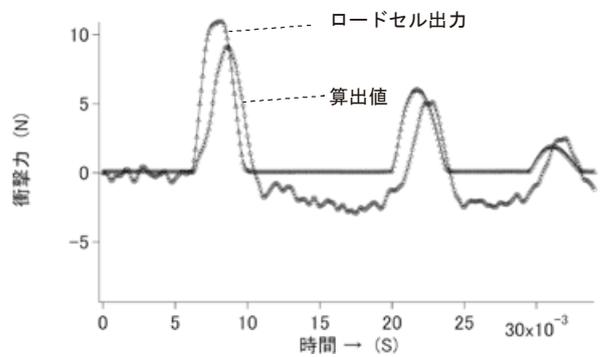


図15 算出衝撃力と実測値

5.5 センサキャリブレーション

近接センサの感度ばらつきやオフセットの校正は以下の方法で行う。

アクチュエータの可動部位置を制限する上下端ストップ間の距離は予め決まっているので、可動部を上下に移動し上端ストップ位置におけるセンサ出力 X_H と下端における出力 X_L の平均値を零中心として、出力差 $(X_H - X_L)$ が常に一定になるように内部係数を掛けることで実現する(図16)。

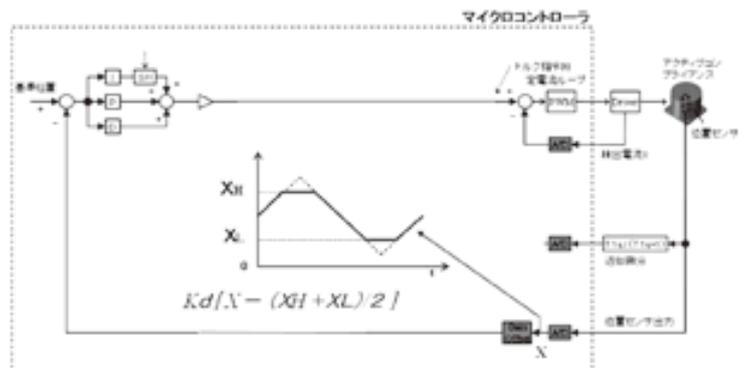


図16 センサキャリブレーション

6. ハンダ付け作業への応用

アクティブ・コンプライアンスの力・位置検出機能を用いることで作業中の品質判定も可能である。

たとえばハンダ付け作業はハンダの溶融状態の良否がそのまま品質に結びつくため、作業終了後に画像処理で状態を確認し不良検出を行うが、ハンダ付け作業中はコテ先でハンダ面が隠れてしまうので、画像でリアルタイムに溶融状態を確認することは難しい。

しかしアクティブ・コンプライアンスを使うとハンダ付け作業中の溶融不良を検出できるので、即座に修正を行うことが可能になる。以下にその方法を説明する。

引きハンダ作業はコンプライアンスをハンダ付け作業に適した値に設定し、ロボットをZ軸上方向に移動する(図17)。そして予備ハンダ部分にコテ先が接触した位置よりさらに押し込んで作業に最適な接触力が得られる様にする。

このとき、ごくまれに予備ハンダが十分溶けない場合があり、そのまま動作を継続すると不良になる。

図18にアクティブ・コンプライアンスで検出した引きハンダ作業中の接触力変化を示す。

ハンダが溶融すると接触位置が変わるため、そのときのコンプライアンス値に応じた力の変化となって表れる。

ハンダが溶融している過程では変化が大きく(図18 ①)、溶融していない状態では変化が少ない(図18 ②)。

また、十分溶融していない状態で引きハンダ動作を開始すると、接触位置が予備ハンダ頂点から基板面が変わるため段差が発生し(図18 ③)不良と判断できるので、すみやかに修復作業を行うことが可能になる。

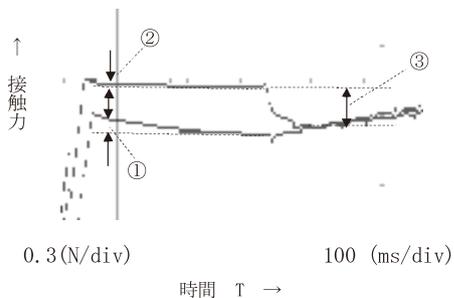


図18 ハンダ作業時の接触力変化

7. おわりに

本稿では組み立て作業における柔軟性や力制御の必要性と、それを実現するためのアクティブ・コンプライアンス装置について述べた。またアクティブ・コンプライアンスをアセンブリ・セルに適用することで、その効果と実用性を立証できた。

今回のアセンブリ・セルではアクティブ・コンプライアンスのコンプライアンス、位置決め機能や力検出機能を用いて作業効率を大幅に改善できたが、その高速性を活かすことでさらに作業範囲を拡大することが可能である。

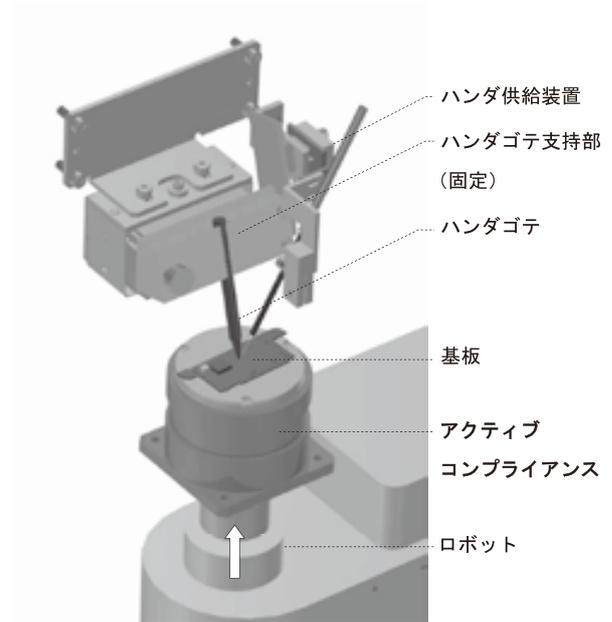


図17 ハンダづけ装置概要

参考文献

- (1) ロボットマニピュレータの適応センサレスコンプライアンス制御, 第34回 計測自動制御学会

著者所属

- | | |
|-------|----------------------|
| 川瀬 茂 | 生産技術開発部
自動化技術グループ |
| 津村 高志 | 生産技術開発部
自動化技術グループ |
| 小黒 直輝 | 生産技術開発部
自動化技術グループ |