

# V B による小型摩擦攪拌接合機の制御

青木延幸\*、佐々木敏幸\*、澤木弘二\*\*、福森 勉\*\*、増田俊雄\*  
名古屋大学工学部・工学研究科 技術部

## はじめに

摩擦攪拌接合 (FSW: Friction Stir Welding) は、1991 年英国 TWI (The Welding Institute) により発明・開発された新しい接合技術である。FSW は部材 A と部材 B を接合する場合、部材 A、B の接合部の中心に回転する段付きピン (肩付きのピン) を押しつける。その回転しているピンと部材との摩擦熱により軟化した A、B の部材内で塑性流動が起こり、A、B の部材組織が攪拌される。ピンを部材の接合境面に沿って順次移動させると、攪拌された部材は順次冷却され、組織が一体化して接合が完了する。即ち、FSW は固相接合の一種で従来の溶接とは異なり、素材の融点より低い温度でこの接合プロセスが完了する為、従来の溶解して接合する方法より多くの利点がある。現在、異種金属の接合も含め、新しい接合法として各方面で研究 / 改良が行われている。この度、材料プロセス工学専攻 熱加工プロセス講座の篠田剛助教授より、研究用小型 FSW 機の製作依頼が技術部にあり、技術部の装置開発技術系と電子・情報系が協力して製作した。機械の設計製作については立花らの「小型摩擦攪拌接合機の設計製作」を参照。

本稿では同機の Visual Basic による制御系を中心に報告する。

図 1 に製作した FSW 機を示す。

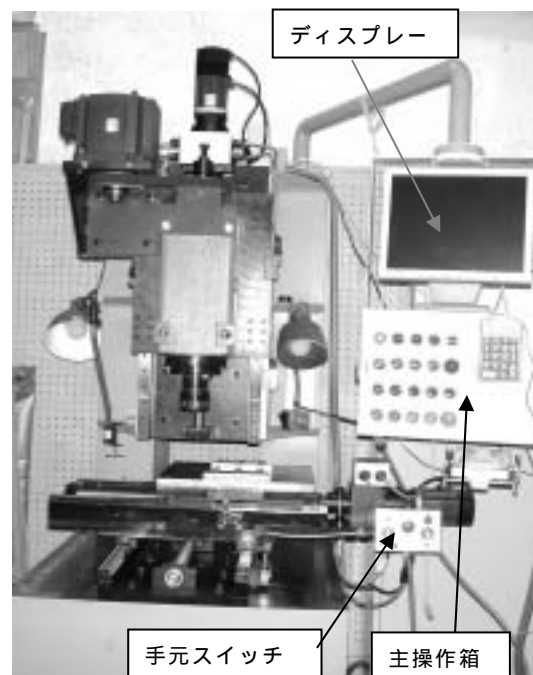


図 1 製作した FSW 機

## 1 制御システム

### 1) 制御系概要

制御系はブレーカ、モータドライバ、電磁リレー等を納めた制御箱を中心に、制御中枢の液晶ディスプレイ付パソコンおよび運転準備釦や各個 / 自動運転の切替スイッチ、エラー表示灯、非常停止釦を納めた主操作箱、手で攪拌ピンの回転・昇降や X Y テーブルの簡易操作が出来る手元操作箱により構成され、4 台のモータを制御する。パソコンは制御箱上に固定され、主操作箱は FSW 機本体から出た可動型アームの下部に設置されている。ディスプレイはその主操作箱の上に固定され、主操作箱の下部にはスライド式のテーブルを設け、ボール型のマウスとキーボードを配置した。

\* 電子・情報技術系、 \*\* 装置開発技術系

運転操作は主にディスプレイ上の釦をマウスでクリックして行い、数値の入力はマウスとキーボードにより行う。回転数や加工ステップなどの接合運転に関するデータはディスクに記録/読出しが出来る。制御系の構成を図2に示す。

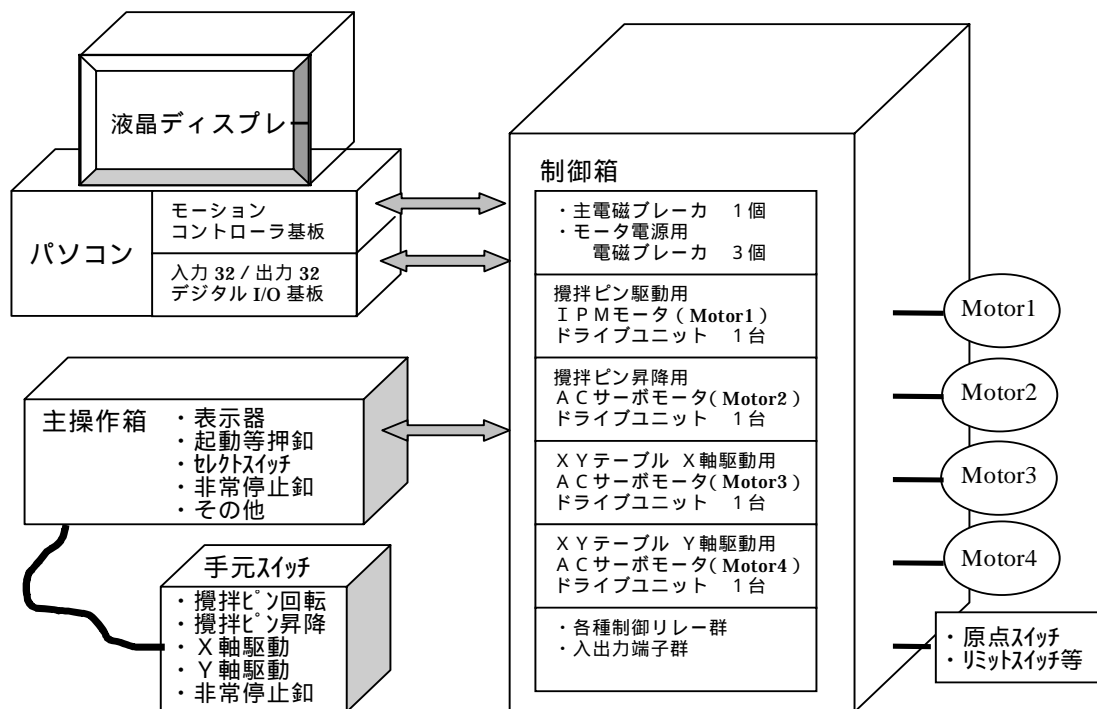


図2 制御系の構成

## 2) 制御対象アクチュエータ

### 攪拌ピン回転用モータ 1台

三菱電機製 マグネットモータ MM-CF352、ドライブユニット MD-AX520-3.5K

- ・定格速度 100~2000rpm 最大回転数 3000rpm
- ・定格出力 3.5kw 定格トルク 16.7(N m) 最大トルク 33.41(N m)

このモータは磁石埋込型同期モータで、通常の誘導電動機に比して容積は30%、重量は50%と小型軽量であり、回転数可変においてもインダクションモータとインバータとの組み合わせより定トルクの面で高性能である。価格もACサーボモータより安価である。回転数の制御は回転数の選択が15種類以下の場合には4bitの接点信号により可能である。今回は400rpm~2000rpmまで100rpm刻みで15種類の回転数を設定した。更に細かい回転数制御が必要な場合は、D/Aコンバータを使った電圧制御となる。

### 攪拌ピン昇降用モータ 1台

三菱電機製 ACサーボモータ HC-KFS73 (電磁ブレーキ付、1/12減速ギア内蔵)  
ドライブユニット MR-J2S-70A

- ・定格速度 3000rpm 最大回転数 4500rpm
- ・定格出力 750W 定格トルク 2.4(N m) 最大トルク 7.2(N m)

このモータはACサーボモータで17bit(131072Pulse/rev)の高分解能エンコーダを持ち、オートチューニングが可能で使いやすくなっている。制御方式は正弦波PWM制御、電流

制御方式である。速度制御、トルク制御、位置制御の3つの制御モードがあり、今回は位置制御モードを利用した。ステッピングモータの様にパルス列入力によりオープンループによる位置制御が可能である。内蔵の17bitエンコーダでは1Pulse当たりの回転角が小さすぎるので、1/12減速ギアおよび微動装置のボールねじのリード(6mm)を考慮して0.001mm/Pulseとなるように電子ギア機能の減速比を計算して設定した。

計算法の詳細は紙面の都合上割愛する。

部材接合用XYテーブル駆動モータ(X軸、Y軸用各1台)

攪拌ピン昇降用モータに同じ、但し、電磁ブレーキは無し。

尚、各々の微動装置にはその両端に終端用リミットスイッチ及び原点用リミットスイッチを取り付けた。

### 3) 制御装置

制御箱：図3参照

電磁ブレーカ、モータ用ドライバ、制御リレー、入出力端子群、ノイズフィルター等が納められ、幅70cm高さ100cmと、かなり大型のものとなった。

操作箱：

- ・セレクトスイッチ(自動/各個の切替)
- ・押釦スイッチ(運転準備、自動起動/停止、自動停止、原点復帰、非常停止等)
- ・表示器(電源、各モータの異常表示、原点表示等)

手元操作スイッチ箱：

攪拌ピン回転/停止、XYテーブルの操作など



図3 制御箱内部

パソコン(17インチ液晶ディスプレイ付)

パソコン工房製オリジナルパソコン

OS: Windows 2000 制御ソフト: Microsoft Visual Basic Ver.6

制御用インターフェース基板

- ・絶縁型4軸モーションコントローラ Interface社 PCI-7414V 1枚  
この基板はPCIバス準拠したパルス列入力方式位置制御型モータドライバと併用して最大4個のモータを並列に制御できる。任意の2軸で直線補間と円弧補間動作をサポートし、加減速時のS字動作をサポートしているので滑らかな運転が可能である。
- ・入力32点/出力32点デジタル入出力ボード Interface社 PCI-2826CV 1枚  
この基板はPCIバス準拠したデジタル入出力用基板で、入力として各リミットスイッチ、運転準備釦等主操作箱のスイッチの把握用、出力として攪拌ピン回転用モータの速度指定や各サーボモータのサーボON信号、ブレーキ信号出力等に使用した。

制御用インターフェース基板の詳細はInterface社のHPを参照

URL: <http://www.interface.co.jp>

## 2 制御

運転者が操作しやすいビジュアルな画面を迅速かつ容易に作ることやインターフェース基板に基板動作用の Visual Basic ( V B ) の関数が付属している点などを考慮して、制御プログラムの作成には V B を使用した。

### 1 ) 加工軌道の設定

加工用の攪拌ピンの軌道は、直線補間と円弧補間を最大で 8 ステップ組み合わせ可能。

- ・直線補間はそのステップで到達する点の X Y 座標をスタート原点の X Y 座標 ( 0 , 0 ) からの相対座標として 0.1mm 単位で入力する。現在の位置座標から入力した到達点までを直線補間して進む。
- ・円弧補間では同様にそのステップで到達する円弧の終了点の位置座標と円弧の中心座標と半径を入力する。共にスタート原点の X Y 座標 ( 0 , 0 ) からの相対座標として 0.1mm 単位で入力する。

尚、ディスプレイ上の「加工トレース運転釦」により、事前に X Y テーブルの動作確認が出来る。

### 2 ) 加工部材の設置 ( 加工スタート点の登録 )

研究には同じサイズの加工部材について加工パラメータを変えて数次の実験が行われる。従って、一連の実験において加工を常に同じ位置からスタートすることが出来れば、円滑に実験を行うことが出来る。

加工部材は同じ場所にセットできるように機械的な治具を製作し、固定する。次に X Y テーブルの各軸にスタート原点のリミットスイッチを設置し、原点復帰釦によりこの原点に戻す。復帰動作はギアのバックラッシュ誤差を小さくするため、まず原点スイッチが入り、その原点スイッチを通り過ぎるまで戻す。次に逆回転で原点に向かって微速度で進み、再び原点スイッチが入ると停止して原点復帰動作を行わせる。そこでカウンタ値をクリアして、加工部中心へ攪拌ピンがくるようにインチング動作にてテーブルを動かして調整し、その位置を加工スタート点として X 軸 / Y 軸のカウンタ値 ( 原点からの距離 ) を記憶する。

### 3 ) 攪拌ピンのスタート点高さの登録

前述のように同一形状の部材でパラメータを変えて実験を行うことが普通である。攪拌ピンのスタート位置 ( スタート高さ ) も同じ位置から行えるように事前にセットする必要がある。これには市販の隙間センサ ( 隙間長 50mm のものを使用 ) を部材の上に置き、インチングにより攪拌ピンを降下させ、ピンの先をこのセンサに接触させる。接触は同センサ内の L E D の点滅により確認できる。この時点で攪拌ピンの先端は部材表面から 50mm 上部にある。この時、ディスプレイ上の「攪拌ピンスタート位置移動釦」をクリックすると、この位置から、予め設定値として入力されている「隙間センサからスタート点までの距離」分上昇して停止する。この点が下降スタート位置となる。

### 4 ) 自動運転の流れ

- ・攪拌ピンがスタート位置にあることを確認して自動起動釦を押す。
- ・攪拌ピン回転用モータが設定回転方向に設定回転数で起動する。
- ・定常回転数に達した後、攪拌ピンが下降速度で加工部材表面より 1mm 上部まで下降。

- (下降距離は「隙間センサからスタート点までの距離」+ 隙間センサ長 - 1mm)
- ・部材の 1mm 上部に達した後、拌ピン挿入速度で、設定の挿入深さまで部材に挿入する。  
(挿入深さは一般的に攪拌ピンの肩部が部材に接触するか 0.1mm 程度部材内に入るように設定する。)
  - ・挿入状態で一定時間攪拌を行う。  
(この攪拌時間もパラメータの一つ)
  - ・攪拌ピン回転用モータの回転数を加工用回転数に増減速する。  
(この回転数もパラメータの一つ)
  - ・定常回転数に達したら、予め設定した軌道ステップに従って X Y テーブルが起動する。
  - ・所定のステップが終了したら、一定時間待って攪拌ピンを上昇させる。
  - ・スタート点まで上昇したら、攪拌ピンの回転を停止し、X Y テーブルをスタート点に戻して終了となる。

### 5) 液晶ディスプレイの表示レイアウト

Visual Basic を利用したので比較的簡単に Command button, Option Button, Combo Box, Text Box, Timer 等を配置して操作性の良い制御画面を作ることが出来た。液晶ディスプレイ上には、自動運転起動釦、エラー復帰釦やインテグ用、手動運転用の各制御釦および運転条件設定部、各モータのカウント値の表示、エラーメッセージの表示などを画面上にレイアウトした。自動運転の軌道も仕様により 8 ステップ分が設定できればよいとのこと、運転に必要な全ての機能を一つの画面に納めた。今後、運転ステップの増加など、バージョンアップを図る場合には、目的別に画面を用意する必要があると思われる。

## 3 制御結果

図 4 に 180 度の円弧補間を 4 ステップ組み合わせ 8 字運転を行った例を示す。極めてスムーズな外観を得て所期の仕様を満足できるものである。また制御に関しても原点復帰や繰り返し精度について仕様の 0.05mm を満足し、所期の制御仕様をクリアできた。



図 4 加工例 (円弧補間による 8 字制御)

### 問題点：

#### Black Box 的な関数

モータの制御は Interface 社のモーションコントロール基板と付属の制御ソフト (制御関数) を組み合わせて行った。

大部分の制御はこれで十分であったが、使用した関数の中身は Black Box となっているので、関数の組み合わせの相性が悪い場合や引数の与え方によっては不満足な結果となり、またメーカーの対応も不十分で今後の一つの問題点であろう。例えば、連続補間運転モードで一つの補間動作が終了して次のステップに移る場合、必要に応じてステップ間の待ち時間を設定できる。今回は不要なのでゼロに設定するとプログラムが停止するので、不要だが停止しない最小値の 3msec に設定した。今回は実用的には特に問題を生じない。また、連続補間運転中は速度が変えられない、あるいは 90 度の円

弧補間の場合、制御基板が出力したパルスを記憶しているカウンタ値がX軸とY軸で一致しなければならないのに一致しない。この場合もその誤差が繰り返し精度内に収まっていたので問題はないが、メーカーの付属プログラムには基本的な制御に対しての不具合があった。

#### OSの安定性、言語の安定性

過負荷などでモータドライバ用のブレーカが作動した場合、そのタイミングによってはパソコンがフリーズする場合がある。時にはOSは動いているがVisual Basicのみがフリーズする場合もある。シールドワイヤ、ノイズフィルターやフェライトコアなどによりノイズ対策はしているが、十分な対策を取りきれていない。また、ノイズとは無関係にWindowsは不安定で制御に向かないと聞いていたが、実験用は良いとしても工業製品の制御にはやはりMS-DOSと機械語で行うのが良いかとも思われる。しかし、比較的簡単にユーザフレンドリな実験室レベルでの制御を行うには、やはりVisual Basicが簡便で良いかと思われる。いずれを選択するかは議論の余地がある。

#### 過剰安全率

グループで協議しながらFSW機の電気回路の設計を行ったが、配線材の太さや端子台の大きさなど電流容量的に過剰な仕様となった。またモータ用ドライバの取り付けの際も、放熱に関して必要以上にスペースをとるなど、過剰仕様となった部分があったとの反省点があった。一考を要するところである。

#### おわりに

今回、はじめて摩擦攪拌接合機の制御を含む電気回路の設計製作にあたり、多くの問題点に遭遇しながら全員が一つ一つそれをクリアし、装置開発技術系と相まって実用的なFSW機を製作することが出来た。まだ改善点は多くあるが今後の課題としたい。

プログラムは自動運転に至るまでの前処理やエラー発生時の適切な処理に関することに多くの時間を費やした。このような機械の制御はオペレータがどのような操作を行ってもフリーズしない、止まらないプログラムの作成が重要なことを改めて認識した。

最後に依頼者の篠田剛助教授はじめ多くの関係各位のご協力、ご厚意に感謝します。