

一般論文

多軸駆動電動射出成形機の圧力制御での位置同期制御用SFCプログラム

赤 坂 則 之

SFC Programs for Synchronous Positioning Control at Pressure Control
between Multi-AC Servomotors Driven in Injection Molding Machine

Noriyuki Akasaka

abstract In coping with the trend toward the much higher powered electric-motor driven injection molding machine, multi-AC servomotors control system has become necessary. Thus, it is inevitable to use a synchronous positioning control technique not to cause the excessive mechanical stress in the machine body. However in the injection pressure control it is much difficult to realize the synchronous positioning control because the pressure-detector signal have to be used in place of the position feedback signals. This paper introduces SFC(Sequential Function Chart) programs to realize the synchronous positioning control during the injection pressure control as well as the transfer from velocity control to pressure control. The experimental results by using a simulator apparatus is shown

1. まえがき

高精度な制御と優れた応答性を特長とするACサーボモータは、永久磁石の性能向上とコストダウンの実現により大容量化が図られた結果、従来油圧駆動されていた中型射出成形機(型締力350t以上850t以下) , さらには大型機(型締力850t以上) にもACサーボ駆動が急速に適用されるようになった^{[1][2]}。ACサーボ駆動のメリットは、成形安定性の向上、油圧駆動でのリリーフ損失を無くすことによる50%にも及ぶ省エネ効果およびクリーン性の3つがある。射出成形機には、スクリュ回転により樹脂ペレットを溶融しスクリュ先端部に溶融樹脂を貯める可塑化機構、スクリュの前進移動により貯めた溶融樹脂を金型に高速射出し、高压で保持する射出・保圧機構および金型を開閉する型開閉機構があり、いずれの機構にもACサーボ駆動が適用できる。Fig. 1 は射出・保圧機構の模式図を示す。サーボモータの回転運動は減速機を介して倍力機構としてのボールねじに伝えられ、ボールねじ軸上のナットの直線運動に変換されスクリュの前後進移動が実現される。成形品を作る工程は充填工程と保圧工程からなる。充填工程ではスクリュ先端部に貯められた溶融樹脂は、スクリュの前進移動により金型に高速充填される。この工程

に続いて金型内に充填された樹脂に圧力を掛ける保圧工程があり、この2つの工程を射出・保圧機構が担う。

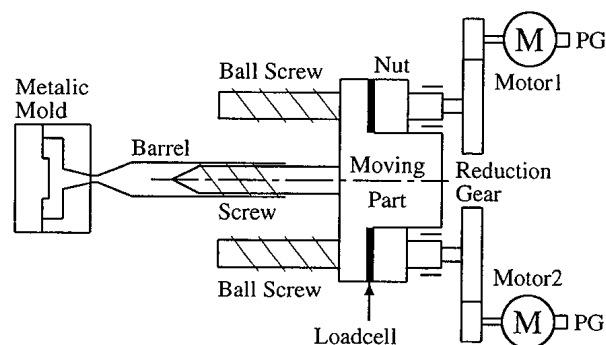


Fig. 1 : Schematic diagram of injection molding mechanism

一方、サーボモータが大容量化したとは言え、射出成形機の大型化に対応できる高速充填、高压保持を実現するにはサーボモータの多軸駆動が機械コストの観点から不可避である。現状は2軸駆動が一般的で、Fig. 2 は2軸駆動での射出・保圧機構の模式図を示す。ところで、多軸駆動法では射出成形機本体に過度の応力を与えないためには、駆動時にすべてのボールねじ軸上のナット位置が同じであること、言い換えると多軸サーボモータの位置同期制御が不可欠である。しかし、上述の保圧工程での圧力制

御^[3]では、サーボモータは圧力検出信号をフィードバック信号としてトルク(電流)制御を行うため位置制御ループが解除されることから、多軸サーボモータの位置同期制御は保証されなくなる。

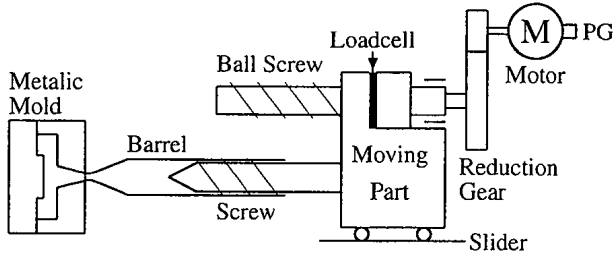


Fig. 2 : Schematic diagram of two-motors injection molding mechanism

本報は、射出成形機の射出・保圧機構のシミュレータ装置を使って、圧力制御での多軸位置同期制御を実現できるSFC(Sequential Function Chart)形式で記述した制御プログラムを紹介し、実験結果を示す。

2. 制御システム

2.1 射出・保圧機構の制御機能

射出・保圧機構の制御機能を説明する。成形品を作る工程は大きく分けて充填工程と保圧工程からなる。充填工程では溶融樹脂をスクリュ位置に対応した所定の速度パターンで短時間に金型内に充填し、

充填後の保圧工程では金型内の溶融樹脂が冷却するまでの一定時間圧力を掛ける。充填工程から保圧工程への切換は、V/P切換点と呼ばれるスクリュ位置で行われるため、V/P切換点は金型への樹脂充填が完了するスクリュ位置(充填完了位置)と一致することが好ましい。しかし、一般に射出成形機の運転者が設定するV/P切換点と実際の充填完了位置が正確に一致することは難しいが、上述の成形品製作工程では射出速度、射出圧力に対して次の2つのことが要求される。

- (1) 充填工程中は所定の射出速度を実現すると同時に、成形不良回避のため、射出圧力が所定の圧力以下であること。すなわち、射出圧力が所定圧力を超えそうなときは、射出速度制御を止めて射出圧力制御を優先すること。
- (2) 保圧工程中は所定の保持圧力を実現すると同時に、射出速度が所定の速度以下であること。すなわち、射出速度が所定速度を超えそうなときは、保持圧力制御を止めて射出速度制御を優先すること。

2.2 多軸位置同期制御方式

Fig. 3は、2.1で述べた2つの要求を実現するための従来制御系のブロック線図である。ここでは単軸駆動を想定する。スクリュ位置に応じた階段状の射出速度指令 V^* がパルス列としてサーボアンプに出力され、サーボアンプ内のカウンタで積算されたスクリュ位置指令 x^* が位置制御ループに与えられ

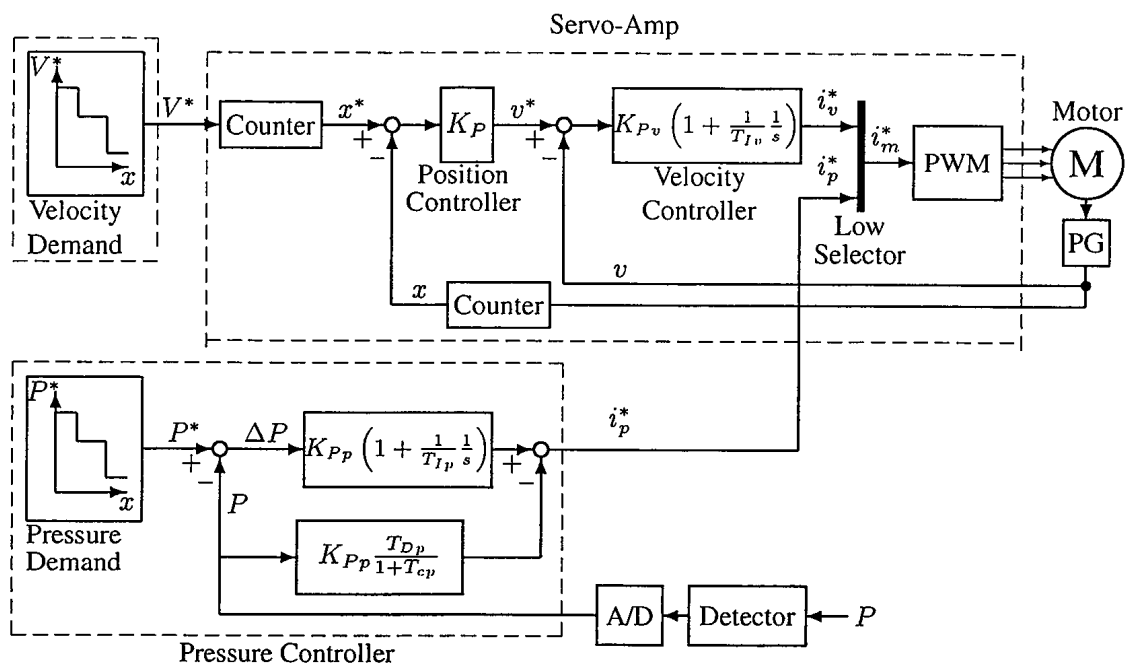


Fig. 3 : Block Diagram of Conventional Control System

る。サーボンプ内の速度，位置信号はすべてパルス単位の信号である。位置制御器は，マイナーループの速度制御ループに対する速度指令 v^* を与え，速度制御器はモータ電流指令 i_m^* を出力する。一方，圧力制御器は，スクリュ位置に応じた射出圧力/保持圧力指令 P^* と実圧力 P からモータ電流指令 i_p^* を算出し，サーボンプに出力する。2つのモータ電流指令 i_v^* 、 i_p^* は低値選択器に入力され，値の小さい方のモータ電流指令が選択される。この低値選択器の採用により，2.1 で述べた充填工程での圧力制限制御と保圧工程での速度制限制御が可能となる。

Fig. 3 の低値選択器でモータ電流指令 i_p^* が採用されたときは，サーボンプはトルク制限モードとなり，位置制御ループは解除される。そのため，Fig. 3 に示す従来制御方式を多軸駆動系に適用した場合，上述したように充填工程中での射出圧力制限或いは保圧工程中での圧力制御が実行されるときは，モータ電流指令 i_p^* が選択されるため各軸の位置制御ループは解除され，多軸位置同期制御は保証されなくなる。充填工程での射出速度制御では，射出速度指令 V^* を多軸共通の速度指令とすることにより多軸位置同期制御は可能である。

Fig. 4 は，圧力制御での多軸位置同期制御を実現すると共に 2.1 で述べた射出速度，射出圧力に対する要求(1)(2)を満足させる制御方式のブロック線図を示す^[4]。Fig. 4 のブロック線図の考え方は次の通りである。

- (1) 射出制御器からの制御指令 Δx^* は，射出速度制御，圧力制御に関係なく常にスクリュ位置変化量指令で，共通位置指令として各軸サーボンプに出力している。
- (2) 各軸サーボンプでは，制御指令 Δx^* に対して常に位置制御ループが確保されているため，多軸位置同期制御を可能としている。

- (3) 射出制御器内では，射出圧力指令 P^* と実圧力 P との偏差圧力 ΔP から圧力制御器がスクリュの速度指令 V_p^* を出力するPD制御の構成とした。低値選択器は射出速度指令 V_v^* と速度指令 V_p^* の値の小さい方を速度指令 V^* として選択する。 V_v^* と V_p^* の低値選択ロジックにより，2.1 で述べた2つの要求(1)(2)を実現している。
- (4) 射出制御器の制御演算周期 T_s を速度指令 V^* に乗じ，制御演算周期ごとのスクリュ位置変化量指令 Δx^* を算出している。

2.3 実験装置

2.2 で述べた多軸位置同期制御方式を技術検証するための射出・保圧機構のシミュレータ装置は，実機射出・保圧機構と次のような対応付けをした。ただし，サーボモータと動力伝達系(減速機+ボールねじ)は両者で同じ構成とする。

シミュレータ装置	⇔	実機射出・保圧機構
ピストン	⇔	スクリュ
油圧シリンダ	⇔	平行
作動油	⇔	溶融樹脂
油圧シリンダ高圧側圧力	⇔	射出圧力

模擬負荷となる油圧シリンダ高圧側圧力は，比例電磁圧力調整弁により可変とする。シミュレータ装置での充填完了動作は，油圧シリンダ高圧側に設置された電磁ストップ弁作動による。なお，シミュレータ装置は，破損防止のため2つの油圧シリンダシステムからなる2軸独立の構成とする。

シミュレータ装置の設計結果を Table. 1 に示す^{[5][6]}。比較のため，モデルとした実機射出・保圧装置例での仕様も示す。

シミュレータ装置の制御装置は市販汎用品を用い，

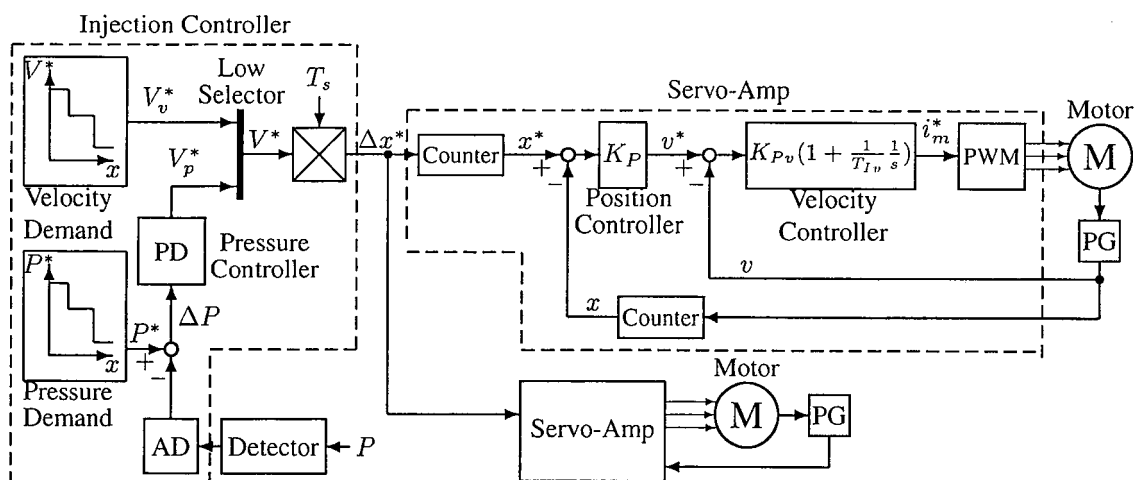


Fig. 4 : Block Diagram of Position Synchronous Control System

実機仕様と同性能のものを採用した。Table. 2 に制御装置の主要構成を示す。

3. 制御プログラム

Table. 2 に示すように制御装置はプログラマブルコントローラ(以降、PCと略記)とモーションコントローラの2つのCPUを持ち、それぞれの制御プログラムの内容と相互関係を述べる。

3.1 PC制御プログラム

PC制御プログラムの構成を Table. 3 に示す。Table. 3 の各プログラムの機能は次の通りである。

(1) 初期設定プログラム

射出速度パターン、圧力制限パターン、V/P切換位置、圧力制御器ゲイン等の初期データ、定数データを設定する。

(2) メインシーケンスプログラム

圧力制御演算周期計算、保圧工程での圧力設定値のタイマによる変更、次回運転のための終了処理を行う。

(3) メインSFCプログラム

Fig. 5 にSFC記述形式の流れ図を示す(記述内容は簡略化している)。3.2 で述べるPCとモーションコントローラとのデータ授受により、基本的機能である速度制御から圧力制御への移行を実現している。Fig. 5 に示すブロック起動ステップで起動されるブロック1～3の機能は次の通りである。

(a) ブロック1

圧力制御演算の実行とピストン位置決め指令のモーションコントローラへの書き込み

(b) ブロック2

ピストンのV/P切換点到達或いは充填工程での射出圧力制限値到達により、圧力制御に移行のための充填工程速度制御中止をモーションコントローラへ指令

(c) ブロック3

- 充填工程での射出圧力上昇を模擬するための比例電磁式リリーフ弁への圧力設定値出力
- ピストン現在値に対応した充填工程での速度設定値、圧力制限値および保圧工程での1段目圧力設定値の設定

(4) サブルーチンプログラム

上記ブロック3でリリーフ弁圧力設定値算出に使われるピストン現在値を入力とする関数発生器

Table. 1 : Simulator Specifications Resulted from the Similarity Law

Simulator		Machine
Nomenclature(Unit)	Amounts	Amounts
Max. Injection Rate(l/min)	15.7	24.0
Max. Injection Power(KW)	3.22	39.2
Motor Torque Rate(Ncm)	1670	10140
Motor Speed Rate(rpm)	2000	2000
Motor Current Rate(A)	17	122
Hydraulic Cylinder Maximum Stroke(cm)	375	372
Hydraulic Piston Maximum Velocity(cm/sec)	13.23	13.33
Hydraulic Cylinder Maximum Pressure(MPa)	12.3	98

Table. 2 : General Specifications of the Control Apparatus

Name of Product	Type	No. of pcs
PC CPU	Q02HCPU	1
Motion CPU	Q172CPU	1
Input Unit	Q172LX	1
Input Unit	Q173PX	1
Input Unit	QX41	1
Output Unit	QY41P	1
A/D Converter	Q64AD	1
D/A Converter	Q64DA	1
Servoamplifier	MR-J2S-350B	2

Table. 3 : List of Control Programs in PC

Program Name	Diagram	Step No.
Initial_Setting_Program	Ladder	924
Main_Sequence_Program	Ladder	225
Main_SFC_Program	SFC	1678
Subroutine_Program	Ladder	193

3.2 モーションコントローラ制御プログラム

モーションコントローラ制御プログラムはモーションコントローラ固有のモーションSFCの記号を使って記述するが、SFC図の考え方はPCと同じである。制御プログラムを構成する12個のプログラム名称と機能は次の通りである。

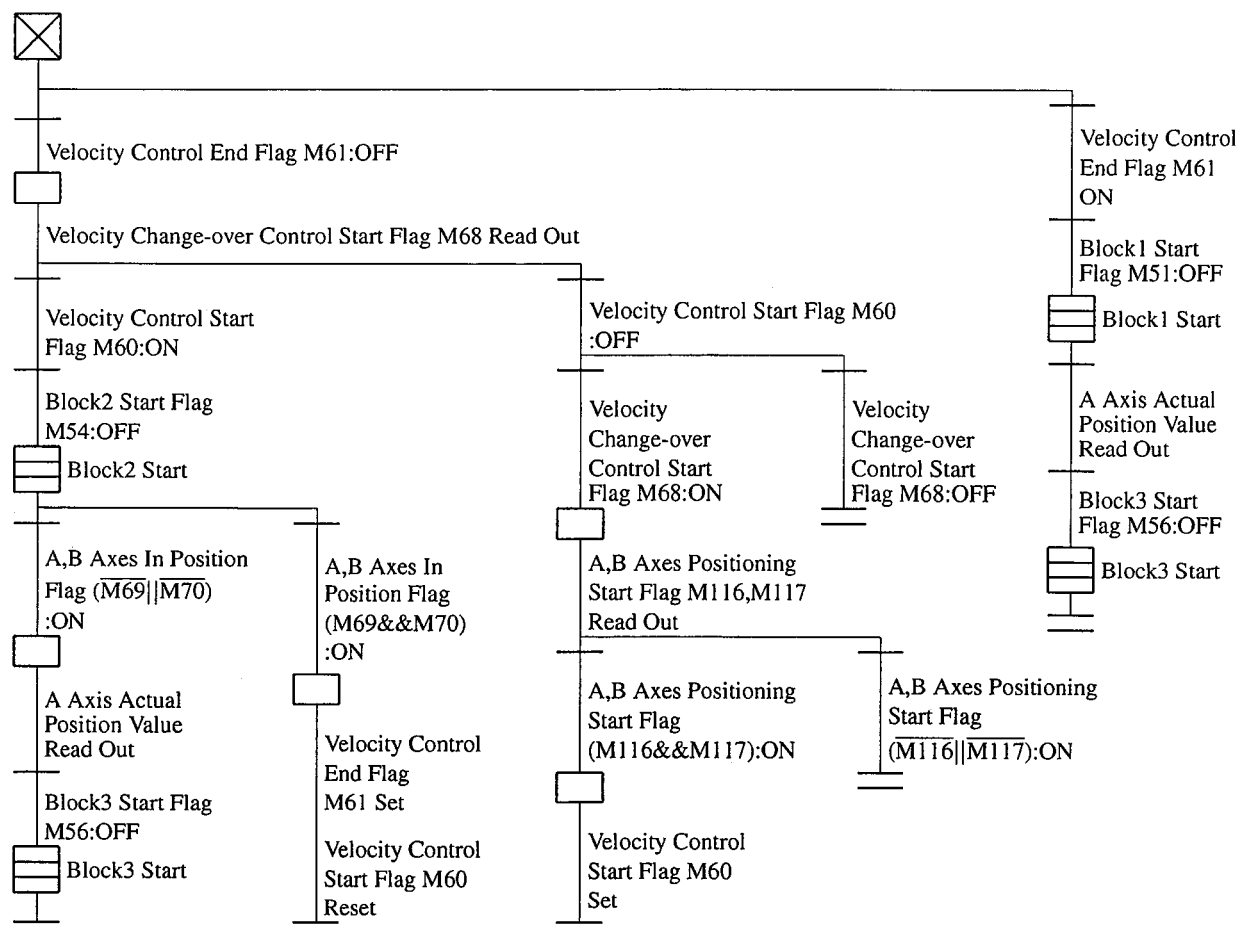


Fig. 5 : SFC Diagram of Main SFC Program

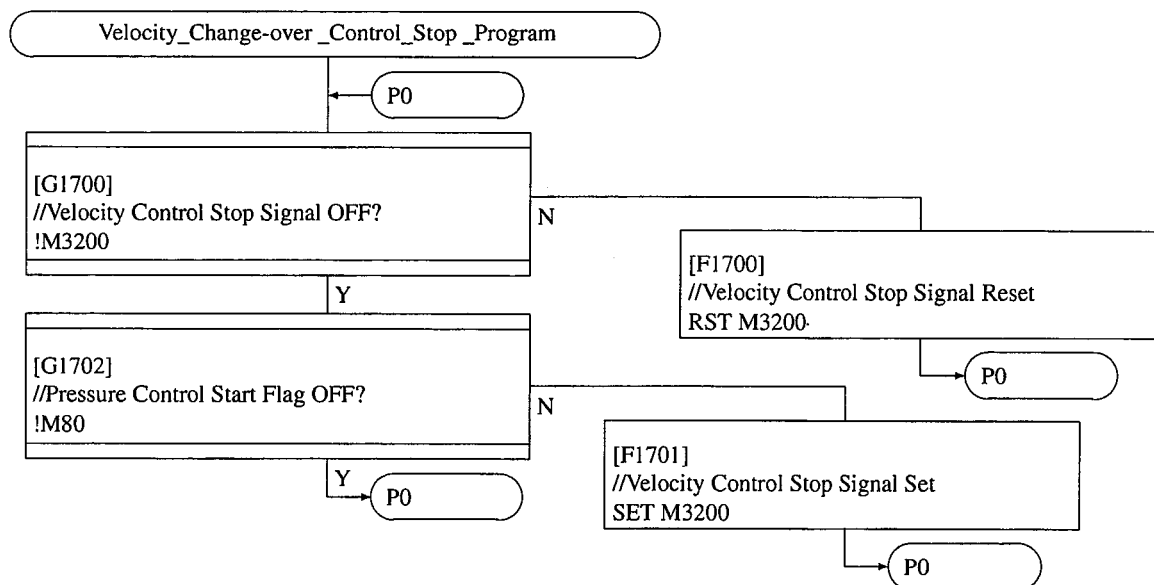


Fig. 6 : Sample Diagram of Motion SFC Program

- (1) メイン射出制御プログラム
サーボアンプ等電源確立でモーション制御プログラムを起動，エラー検出でモーション制御プログラム停止と出力関係終了処理
- (2) モーション制御プログラム
全軸サーボレディー検出後，押釦操作に応じてAB軸射出速度制御(「運転」押釦)，JOG運転(「JOG運転」押釦)，手動パルス運転(「手動パルス」セクタ)の各プログラムを起動
- (3) AB軸射出速度制御プログラム
AB軸待機位置決めプログラムを実行し，ピストンを初期位置に移動後，AB軸速度切換制御プログラムを実行，「停止」押釦ONで運転解除
- (4) AB軸速度切換制御プログラム
充填工程の速度制御を模擬するために，設定したピストン位置で速度を変更しながらA, B軸の直線補間位置決め制御を行う。
- (5) AB軸待機位置決めプログラム
AB軸速度切換制御プログラム実行前に，A, B軸を設定した初期位置に設定速度で位置決めする。
- (6) 速度切換制御停止プログラム
3.1 で述べたメインSFCプログラム(ブロック2)からの指令を受けて速度切換制御を中止する。モーションSFCプログラム例として，Fig. 6に示す。
- (7) 圧力制御位置決めプログラム
3.1 で述べたメインSFCプログラム(ブロック1)からの圧力制御のための位置決め指令を実行する。インクリメント方式の位置決め制御を行う。
- (8) JOG運転プログラム

移動軸と移動方向を指示する押釦を押下する間，設定速度で移動する。

- (9) 手動パルス運転プログラム
軸選択セクタにより1台の手動パルスで運転する。
- (10) 入力プログラム
各種運転押釦の入力処理を行う。
- (11) 出力プログラム
運転状態のランプ表示，充填完了を模擬する電磁ストップ弁の開閉を行う。なお，油圧シリンダの電磁切換弁の操作は，必要とする各プログラムで行う。
- (12) 異常検出リセットプログラム
エラー発生時のランプ表示，異常リセット時の処理を行う。

Fig. 7にPCとモーションコントローラ間のデータ授受を示す。入出力ユニットの管理CPUをモーションコントローラ，AD，DA変換ユニットの管理CPUをPCとすることによりデータ授受を少なくした。

4．実験結果

3. で述べた制御プログラムを検証するための実験結果をFig. 8に示す。V/P切換点で充填完了位置より手前に設定された場合である。Fig. 8(a)~(d)には，ピストン速度，油圧シリンダ圧力，2軸位置同期誤差の時間応答およびストップ弁の開タイミング信号を示す。Fig. 8(a)と(b)中の階段状の線は設定値を示す。Fig. 8には速度制御から圧力制御に切り換わったときの時間タイミングも示す。

Fig. 8(a)に示すように，V/P切換点までは階段状の速度制御が良好に行われている。

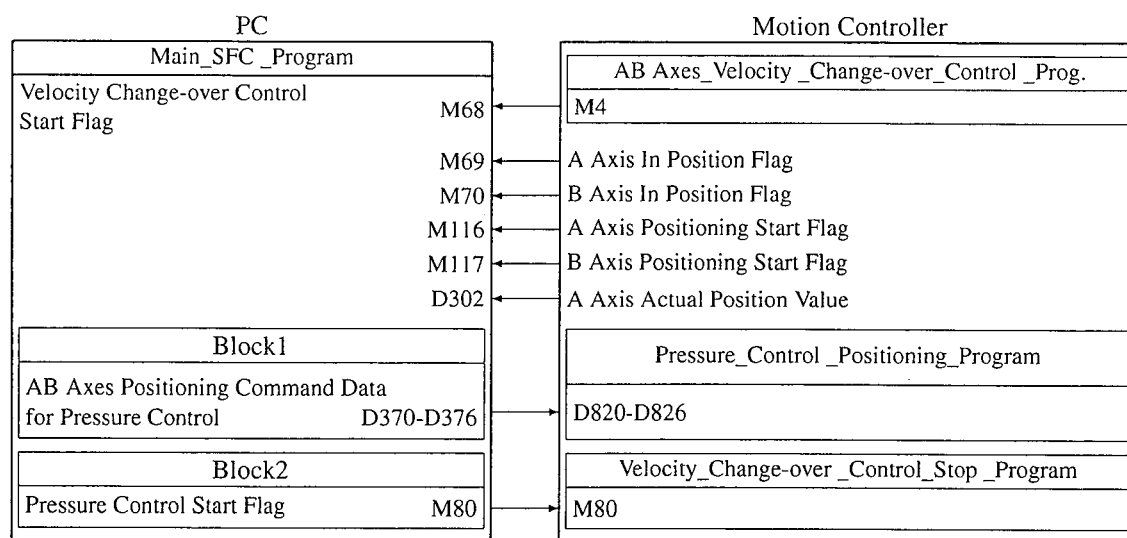


Fig. 7 : Data Transfer between PC and Motion Controller

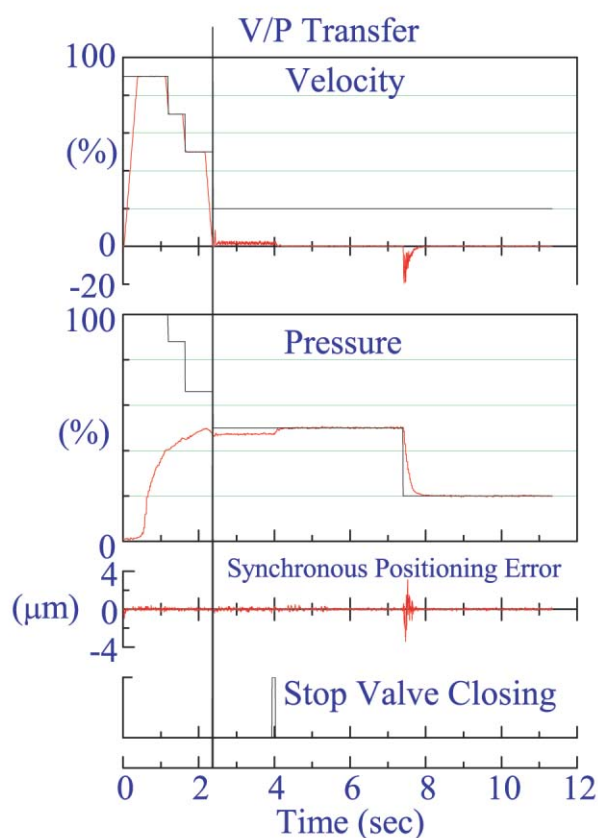


Fig. 8 : Time Responses of Velocity and Pressure in case of V/P Transfer Point in front of Filling up Position

Fig. 8(b)では、V/P切換点までは圧力は速度制御での圧力制限値以下であるが、ピストンがV/P切換点に到達して圧力制御に移行してからストップ弁作動(充填完了を模擬)までの時間帯には圧力制御のPD制御に起因するオフセットエラーが生じている。ストップ弁作動まではリリーフ弁からの油漏れがあり、これを補うためのピストン速度を発生するための圧力制御オフセットエラーである。ストップ弁作動後は、オフセットエラーのない良好な圧力制御が行われている。圧力制御をPID制御にすると、ストップ弁作動後の圧力制御は不安定になる。圧力制御移行後の1段目圧力設定値の持続時間はタイマ設定で設定時間は5秒である。圧力制御での制御周期は25msecである。

Fig. 8(c)は、速度制御から圧力制御に亘る2軸位置同期誤差を示す。位置同期誤差が最大になるのは、圧力設定値が変化したときで最大4 μ mである。

以上より、3. で述べた制御プログラムは、射出成形機の実際の運転パターンに対しても位置同期制御が実現できることをシミュレータ装置を使って明らかにした。

5 . まとめ

2軸駆動の射出・保圧機構のシミュレータ装置で、PCとモーションコントローラからなる制御装置でSFC図およびラダー図からなる制御プログラムを実行することにより、圧力制御での多軸位置同期制御が実現できることおよび速度制御から圧力制御へのバンプレスな移行が可能であることを明らかにした。

参考文献

- [1] 稲葉善治, 伊藤 進:電動サーボ式射出成形機用ボールねじの寿命に関する研究, 精密工学会誌, 65, 6, (1999-6), 805/ 809(1999)
- [2] 中村晋哉:射出成形機の電動化と高負荷用ボールねじ, 日本機械学会誌, 103, 978, 340/ 340(2000)
- [3] 稲葉善治, 松原俊介, 上口賢男:電動サーボ式射出成形機における圧力制御, 精密工学会誌, 65, 4, 542/ 548(1999)
- [4] N. Akasaka:A Synchronous Position Control Method at Pressure Control between Multi- AC Servomotors Driven in Injection Molding Machine, SICE Annual Conference 2003 in Fukui, August 4-6, Japan(2003)
- [5] 赤坂則之:電動式射出成形機用負荷シミュレータの射出速度制御における相似則, 日本機械学会論文集C編, 69, 682, 1662/ 1669(2003)
- [6] 赤坂則之:電動射出成形機負荷シミュレータの相似則に基づく設計法, 日本機械学会2002年次大会講演論文集, VII, 275/ 276(2002)