D101 2段階終端状態制御によるサーボプレスの衝撃制御 Shock Control of a Servo Press Using Two-Staged Final-State Control

○学 福岡 淳一 (慶大院), 正 成川 輝真 (慶大院), 正 西村 秀和 (慶大院),
伊藤 博幸 (コマツ), 有壁 剛生 (コマツ)

Junichi FUKUZAKI, Keio University, 4-1-1, Kohoku, Yokohama, Kanagawa 223-8526
Terumasa NARUKAWA, Keio University, 4-1-1, Kohoku, Yokohama, Kanagawa 223-8526
Hidekazu NISHIMURA, Keio University, 4-1-1, Kohoku, Yokohama, Kanagawa 223-8526
Hiroyuki ITOU, KOMATSU, 1200, Manda, Hiratsuka, Kanagawa 254-8567
Takeo ARIKABE, KOMATSU, 1200, Manda, Hiratsuka, Kanagawa 254-8567

Recently, servo presses have become widely used in manufacturing companies since they have the capability of high accuracy and free motion of the slide. This paper describes the optimum trajectory to achieve target values of the bottom dead point and the contact force between the slide and the die cushion (DC), and shows its implementation method. The optimum trajectory is derived using final-state control by dividing into two stages from the collision of the slide and DC until reaching the bottom dead point. Effectiveness from the viewpoint that controlled the DC load and the bottom dead point is shown by using two degrees of freedom control system as a method for following to the optimum trajectory.

Key Words: Servo Press, Final-State Control, Shock Control, Optimal Trajectory

1. 緒言

近年,自動車部品や電子部品の加工に使われるプレス機械として,駆動源にサーボモータを用いることで,加工軌道を自由に決定できるフリーモーションという優れた能力を有するサーボプレスが注目を浴びている⁽¹⁾。サーボプレスに関する先行研究^(2,3)では,スライドのフリーモーションを利用することで,これまでに実現できなかったような高精度な加工事例が示され,成形性能・生産性の向上が報告されている。しかし,これらの研究で用いられている加工時のスライド軌道は,従来のプレス機械で使われていた軌道を参考にして決定されたものであり,フリーモーション機能の効果を最大限に発揮しているとは言えない。実際にサーボプレスが使われている現場では,スライドの動きは職人の経験や勘によって決められており,スライド軌道の決定方法およびその実現方法は必ずしも明確ではない⁽⁴⁾。

さらに,最近ではハイテン材などの難加工材がプレス素材として使われるようになり,製品の加工精度の安定性が求められている⁽⁵⁾。また,騒音・振動および消費エネルギーの低減などの付加価値への要求が増加している⁽⁶⁾。こうした状況から,これまでの経験や勘だけでスライド軌道を決定するのではなく,適切な目標を設定した上でスライド軌道を決定する方法を検討する必要がある⁽⁷⁾。

本論文では,成形性能の向上を念頭におき,成形性能の指標となるスライドの下死点とスライドとダイクッション(以下,DCと略記)の接触荷重(以下,DC荷重と略記)を所望の時間内に目標値へ到達させるためのスライドの目標軌道を導出する。スライドとDCを独立に制御することが可能なサーボプレスを模擬して製作した実験装置のパラメータを定め,力学モデルを導出する。目標軌道の導出には終端状態制御⁽⁸⁾を用いる。終端状態制御により得られた目標軌道を実現するために,PID制御をフィードバック制御系とした2自由度制御系を用いる。最後に,目標軌道を正弦波としたときと応答を比較する。

2. サーボプレスの力学モデルと実験装置

スライドとDCを独立に制御することが可能なサーボプレスを模擬して製作した実験装置とその力学モデルを図1に示す。この実験装置は,クラウン,スライド,DCから

構成される。スライドとDC制御用にリニアモータを使用する。リニアガイドによりスライドとDCは上下方向にのみ運動する。

サーボプレスの力学モデルは,上下方向の振動を模擬するためにばねとダンパを付加する。 m_c はクラウン質量, m_s はスライド質量, m_d はDC質量, k_c はフレーム剛性, c_c はフレームの粘性減衰係数, k_s は接触剛性, c_s は粘性係数である。 a_{ir} はエアシリンダによる力を表す。 u_1 はスライド側アクチュエータによる力, u_2 はDC側アクチュエータによる力であり, f_s はスライドへの力, f_d はDCへの力を表す。それぞれのパラメータの値を表1に示す。

クラウン,スライド,DC各質点の運動方程式は次のように与えられる。

$$m_c \ddot{x}_c = -k_c x_c - c_c \dot{x}_c - u_1 + m_c g \quad (1)$$

$$m_s \ddot{x}_s = -k_s (x_s - x_d) - c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_d) + u_1 + m_s g \quad (2)$$

$$m_d \ddot{x}_d = -k_s (x_d - x_s) - c_s (\dot{x}_d - \dot{x}_s) + m_d g - u_2 - a_{ir} \quad (3)$$

状態ベクトルを

$$\mathbf{x} = [x_c \ x_s \ x_d \ \dot{x}_c \ \dot{x}_s \ \dot{x}_d]^T, \mathbf{u} = [u_1 \ u_2]^T \quad (4)$$

とすると,式(1),(2),(3)から,状態方程式

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{E} \quad (5)$$

を得る。ここで,各行列は以下のとおりである。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_3 \\ -\frac{k_c}{m_c} & 0 & 0 & -\frac{c_c}{m_c} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} & 0 & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} \\ 0 & \frac{k_s}{m_d} & -\frac{k_s}{m_d} & 0 & \frac{c_s}{m_d} & -\frac{c_s}{m_d} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1 \times 3} & -\frac{1}{m_c} & \frac{1}{m_s} & 0 \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 & 0 & -\frac{1}{m_d} \end{bmatrix}^T, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1 \times 3} & g & g & g - \frac{a_{ir}}{m_d} \end{bmatrix}^T$$

(a) Experimental setup (b) Dynamical model
Fig.1 Experimental setup and dynamical model of servo press

Table 1 Parameter values

Parameter	Value
Crown mass	20 kg
Slide mass	4.7 kg
DC mass	2.8 kg
Air cylinder force	100 N (0.5 MPa)
Stiffness of contact portion	1×10^6 N/m
Viscous damping coefficient of contact portion	400 Ns/m
Stiffness of Crown	2×10^5 N/m
Viscous damping coefficient of crown	300 Ns/m
Max. value Actuator force of slide	± 120 N
Max. value Actuator force of DC	± 50 N

3. 最適な加工軌道の導出

3.1. 設計指標

スライドが DC に衝突してから下死点に到達するまでのスライド軌道を加工軌道とする。最適な加工軌道（以下、最適軌道と略記）を導出する際の指標には、成形性能に大きな影響を与えるスライドの下死点と DC 荷重を用いる。さらに、生産性の向上を目的として、下死点到達時間を指標に加える。成形性能と生産性を高めるために、最適軌道の設計指標を以下のように与える。

- ・ スライドと DC が衝突後に、DC 荷重は、オーバーシュートが小さく、かつ、なるべく早く目標値 100 N に到達する
- ・ DC 荷重は、スライドが下死点 10 mm に移動するまで目標値 100 N を保つ
- ・ スライドと DC が衝突後に、スライドは、下死点 10 mm をオーバーシュートすることなく、かつ、なるべく早く下死点 10 mm に到達する
- ・ スライドと DC のアクチュエータによる力は最大値を超えない

これらの指標に基づき、最適軌道の導出を行う。

3.2. 2 段階終端状態制御を用いた加工軌道の導出方法

終端状態制御⁽⁸⁾は、初期状態と目標とする状態およびそれに到達するまでの時間を指定し、これを実現するための最適な制御入力を導出する方法である。この方法は下死点の精度が重要となるプレス加工に適していると考えられる。本論文では、終端状態制御を用いて最適軌道を導出する。

終端状態制御によって得られる入力 u の始点と終点の値を任意に指定するために、入力 u の一階微分 $\dot{u}$ を新たに制御入力とした拡大系を構成する。

$$\dot{x}_a = A_a x_a + B_a \dot{u} + E_a \quad (6)$$

拡大系の新たな状態ベクトルは状態方程式(5)の状態ベクトル x と入力 u から $x_a = [x^T u^T]^T$ として与えられる。ここで、

$$A_a = \begin{bmatrix} A & B \\ 0_{2 \times 6} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, B_a = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 2} \\ I_2 \end{bmatrix}, E_a = \begin{bmatrix} E \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix}$$

である。式(6)を離散化すると、以下の離散時間方程式を得る。

$$\begin{aligned} \dot{x}_d(k+1) &= A_d x_d(k) + B_d \dot{u} + E_d \\ (k &= 0, 1, \dots, N-1) \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)と出力行列 C により、目標時間 $N\Delta t$ 後の部分状態量である出力行列 $y(N)$ は

$$\begin{aligned} y(N) &= C x_d(N) \\ &= C A_d^N x_d(0) + C \bar{A}_d \bar{E}_d + C \bar{B}_d \bar{u} \end{aligned} \quad (8)$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} \bar{A}_d &= [A_d^{N-1}, A_d^{N-2}, \dots, A_d, I] \\ \bar{E}_d &= [E_d^T, E_d^T, \dots, E_d^T]^T \\ \bar{B}_d &= \bar{A}_d B_d, \bar{u} = [\dot{u}^T(0), \dot{u}^T(1), \dots, \dot{u}^T(N-1)]^T \end{aligned}$$

である。ただし、 $\bar{E}_d$ において、 E_d の数は N 個である。式(8)により、出力 $y(N)$ を目標出力 y_f に到達させるためのフィードフォワード入力 $\bar{u}$ は

$$\bar{u} = \bar{B}_d^T C^T (C \bar{B}_d \bar{B}_d^T C^T)^{-1} (y_f - C A_d^N x_d(0) - C \bar{A}_d \bar{E}_d) \quad (9)$$

で与えられる。

本論文では、スライドと DC が衝突してからそれぞれの時間で DC 荷重と下死点の二つの指標を満たすために、衝突してから下死点に到達するまでを 2 段階に分けて終端状態制御（以下、2 段階終端状態制御と略記）を用いて最適軌道を導出する。2 段階終端状態制御を用いる際に、1 段階目で、DC 荷重の制御をスライドと DC の変位のみで行い、2 段階目で下死点の制御を行う。このことから、最適軌道を導出する際の設計パラメータは、1 段階目の終端時間 t_1 、1 段階目の終端時間のスライド変位 $\hat{x}_s$ 、2 段階目の終端時間 t_2 とスライドの衝突初速度がある。これらのパラメータを適切に設定することで、加工軌道の導出を行い、最適軌道の設計指針を示す。

3.3. 加工軌道の導出例

単純な軌道である振幅 10 mm、周期 1 s の正弦波を参考に、 $t_2 = 0.25$ s とし、 $t_1 = 30$ ms、 $\hat{x}_s = 2$ mm と設定して軌道の導出を行う。初期状態は静止している DC にスライドが初速度 0.06 m/s で衝突する状態とし、この速度はスライドを振幅 10 mm、周期 1 s の正弦波で動作させたときの衝突速度である。1 段階目の終端状態で出力方程式 C_1 と目標出力 y_n をそれぞれ

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, y_n = \begin{bmatrix} 0.002 \\ 0.002 - \frac{100}{k_s} \\ 0 \end{bmatrix}$$

とし、DC 荷重が目標荷重となるようにスライド変位、DC 変位を与える。2段階目の初期状態は1段階目の終端状態を使用する。2段階目の終端状態で出力方程式 C_2 と目標出力 y_n をそれぞれ

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, y_n = \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.01 - \frac{100}{k_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

とし、下死点が 10 mm、DC 荷重が目標荷重となるようにスライド変位、DC 変位を設定する。

図 2 に 2 段階終端状態制御を用いたときのスライド軌道、DC 荷重、スライド・DC へのアクチュエータの力を示す。図 2(a)において、スライド変位は衝突後 0.25 s でオーバーシュートせずに下死点 10 mm に到達していることがわかる。図 2(b)から DC 荷重は衝突後 30 ms で 100 N に到達し、その後ほぼ 100 N で一定である。図 2(c)から、スライド、DC へのアクチュエータによる力は、制約を満たしていることがわかる。これらのことから、設計指標が満たされた軌道が導出されていることが確認できる。

(a) Slide displacement

(b) DC load

(c) Control input of slide and DC

Fig.2 Trajectory using the two-staged final-state control

3.4. 最適な加工軌道の導出の設計指針

成形性能と生産性の向上を目指すために、設計パラメータである t_1 , $\hat{x}_s$, t_2 が軌道の導出に与える影響について検討する。具体的には、3.3 で用いた設計パラメータの値を基準として、 t_1 と $\hat{x}_s$ を調整することで、DC 荷重を目標荷重にオーバーシュートが少なく、かつ、早く到達させ、 t_2 を小さくすることによって、早く下死点に到達させることを検討した。

t_1 がスライド変位、DC 荷重、及びスライドと DC のアクチュエータ最大値に与える影響を図 3 に示す。図 3(a), (d) から、 t_1 を小さくすることで、スライド変位のオーバーシュートが増大することがわかる。また、図 3(b), (e) から衝突直後の DC 荷重のオーバーシュートと目標 DC 荷重との偏差は増減の両方の場合があることがわかる。図 3(c), (f) から、スライド側のアクチュエータの最大値は大きくなるが、DC 側は t_1 の範囲によって増減が変わることがわかる。次に、 $\hat{x}_s$ が及ぼす影響を図 4 に示す。図 4(a) から $\hat{x}_s$ を小さくすることで、下死点のオーバーシュートを防ぐことができることがわかる。また、図 4(b) から DC 荷重の応答にはほとんど影響がないと言える。図 4(c) から、スライド側のアクチュエータの最大値は小さくなるが、DC 側は大きくなる。最後に、 t_2 が与える影響を図 5 に示す。図 5(a) から、 t_2 を小さくした場合にスライドは下死点をオーバーシュートせずに、下死点に到達しており、図 5(b) から DC 荷重はほぼ変化しないことがわかる。図 5(c) において、スライドと DC のアクチュエータの最大値は大きくなる。

以上の知見から設計パラメータが軌道設計に及ぼす影響を表 2 に示す。表 2 から、最適軌道を導出するためのパラメータ設定方法が次のように得られた。

1. t_1 を小さくし、目標 DC 荷重への到達時間を早める。この時、スライド変位の下死点からのオーバーシュートが 10 mm を超える所で止める。
2. $\hat{x}_s$ を小さくし、スライド変位が下死点をオーバーシュートするのを防ぐ。 $\hat{x}_s$ を小さくする過程で下死点を超えない軌道が得られた時の $\hat{x}_s$ を採用する。
3. スライド、DC のアクチュエータの出力が最大値を超えない範囲で、1., 2. を繰り返し、目標 DC 荷重への偏差が一番小さい t_1 を決定する。その時間 t_1 において下死点をオーバーシュートしない $\hat{x}_s$ を決定する。
4. t_1 と $\hat{x}_s$ を固定し、スライドと DC のアクチュエータの出力が最大値を超えない範囲で、 t_2 を小さくする。

図 6 に設計指針に基づき、パラメータ設定方法を用いて、最適軌道を導出した結果を示す。図 6 から目標 DC 荷重到達時間を 8 ms、下死点到達時間を 0.11 s まで短くすることができ、設計指標を満たす最適軌道が導出されたことがわかる。

Table 2 Influence of design parameters

	t_1	$\hat{x}_s$	t_2
	decrease	decrease	decrease
Overshoot of the DC load	decrease or increase	NA	NA
Difference with the targeted DC load	decrease or increase	NA	NA
Overshoot of the slide displacement	increase	NA	NA
Max. value of u_1	increase	decrease	increase
Max. value of u_2	decrease or increase	increase	increase

Fig.3 Trajectory using the two-staged final-state control when the final time in the first stage is adjusted.

Fig.4 Trajectory using the two-staged final-state control when the final slide displacement in the first stage is adjusted. ($t_1 = 20$ ms, $t_2 = 0.25$ s)

Fig.5 Trajectory using the two-staged final-state control when the final time in the second stage is adjusted. ($t_1 = 30$ ms, $\hat{x}_s = 2$ mm)

Fig.6 Optimal trajectory using the two-staged final-state control ($t_1 = 8$ ms, $\hat{x}_s = 0.38$ mm, $t_2 = 0.11$ s)

3.5. 衝突初速度を変えた場合における衝撃荷重への影響

衝突初速度が DC 荷重に与える影響について検討する。衝突初速度は 0.06 m/s から 0.03 m/s に変更し、3.4 で示したパラメータ設定方法を用いて最適軌道の導出を行う。図 7 に最適軌道の導出結果を示す。最適軌道の設計パラメータはそれぞれ $t_1 = 8 \text{ ms}$, $\dot{x}_s = 0.25 \text{ mm}$, $t_2 = 0.11 \text{ s}$ とした。図 7(a) からスライドはオーバーシュートせずに下死点に到達しており、図 7(b) から衝突直後の DC 荷重の値が抑えられており、その後の振動も小さいことがわかる。これらのことから、衝突初速度を変えた場合においても、軌道の設計指標に基づき、パラメータ設定方法を用いることで、最適軌道が導出されていることを確認できる。また、衝突直後の DC 荷重の最大値は、衝突初速度が 0.06 m/s の場合と比較して 20 % 低減できている。

4. 実験装置を用いた検証

4.1. 実験の概要

実験装置ではクラウン変位 x_c をレーザー変位計で検出し、クラウンに対するスライド変位 $x_s - x_c$ と DC 変位 x_d をリニアエンコーダで検出する。状態量のスライド絶対変位 x_s はクラウン変位に対するスライド変位とクラウン変位から求める。速度信号は変位を近似微分して求める。DC 荷重はロードセルを用いて測定する。スライドに衝突時の初速度 0.06 m/s を与えるために、スライドが DC に衝突するまではスライドを振幅 10 mm、周期 1 s の正弦波に追従させる。

摩擦やパラメータ誤差に対するロバスト性を確保するために、フィードバック制御を加えた 2 自由度制御系を設計する。目標軌道は図 5 で示した軌道を採用し、フィードバック制御系には PID 制御を適用する。フィードバック制御はスライドのみへの入力とし、スライドを下死点に到達させるための制御を行う。衝突直後は速度変化が大きいことから、1 段階目はフィードバック制御は行わず、フィードフォワード入力のみで制御した。下死点到達後は、下死点保持を行うために、スライドと DC の制御入力に下死点到達時の釣り合いの力を補償として加えた。

Fig.7 Optimal trajectory using the two-staged final-state control when collision speed is changed

4.2. 2 自由度制御系の実験結果

図 8 に 2 自由度制御系の実験結果を示す。そして、2 自由度制御系全体のブロック線図を図 9 に示す。 $k_p = 7 \times 10^4$, $k_i = 1.5 \times 10^3$, $k_d = 6 \times 10^2$ とした。また、目標軌道を正弦波に設定して、目標軌道に対して PID 制御を施し、応答を比較した。正弦波は最適軌道と下死点到達時間が同じ振幅 10 mm、周期 0.44 s と設定し、目標軌道に対しては、スライドに関してのみ PID 制御を施し、DC 側に関しては一定値を保持する方法で制御を行った。スライドへは PID 制御に加え、エアシリンダ圧力補償(100 N)、スライド自重の補償を行った。DC への入力は一一定値とし、DC 自重の補償を行った。図 10 にそのブロック線図を示す。 $k_p = 7 \times 10^4$, $k_i = 1.5 \times 10^3$, $k_d = 6 \times 10^2$ とした。正弦波への PID 制御の実験結果を図 11 に示す。図 8(a) と図 11(a) からそれぞれの制御方法における目標軌道への追従性を比較すると、どちらも目標軌道に追従し下死点に到達していることから、双方の制御方法で追従性には差がないと言える。一方で、図 8(b) と図 11(b) の DC 荷重を比較すると、PID 制御と比べ、2 自由度制御系は衝突直後の DC 荷重のオーバーシュートを抑えられていることがわかる。また、図 11(c) の PID 制御では、衝突直後はスライド側に大きな入力が発生しているのに対して、図 8(c) の 2 自由度制御系では、衝突直後の入力が抑えられていることがわかる。

Fig.8 Experimental results of two degrees of freedom control system

Fig.9 Block diagram of two degrees of freedom control system

Fig.10 Block diagram of PID control

(a) Slide displacement

(b) DC load

(c) Control input of slide and DC

Fig.11 Experimental results of PID control

5. 結言

2段階終端状態制御を用いて、スライドの最適軌道の導出方法を示した。設計指標として、DC 荷重、下死点と下死点到達時間を設定し、スライドとDCの衝突からスライドが下死点に到達するまでを2段階に分け、1段階目でDC 荷重を制御し、2段階目で下死点を制御することで最適軌道を導出した。設計指標に基づき最適軌道を導出する際に、設計パラメータが、スライド変位、DC 荷重、及びスライドとDCのアクチュエータ最大値に及ぼす影響を明らかにすることで、パラメータ設定方法を示した。1段階目の時間とその終端におけるスライド変位を調整することで、目標DC 荷重への偏差を小さくし、かつ下死点へのオーバーシュートを防ぐことができ、2段階目の時間を調整することで、下死点到達時間を短縮することができることを示した。また、衝突初速度を変えた場合においても、パラメータ設定方法を用いることで、最適軌道を導出できることを示し、その時のDC 荷重への影響を比較した。

最適軌道に追従させる手法として、2自由度制御系を用いて実験を行い、DC 荷重と下死点の制御を行う観点からの有効性を示した。ここでは、最適軌道から得られた入力をフィードフォワード入力とし、フィードバック制御にはPID 制御を用いた。また、目標軌道を正弦波に設定し、スライドのみにPID 制御を施し、スライドを正弦波に追従させる制御実験を行い、応答を比較した。2 自由度制御系を用いると、スライドとDC 衝突直後の入力と衝撃を抑制できることを示した。

参考文献

- (1) 林央, サーボプレス, 塑性と加工, **50**, pp.92-93, 2009.
- (2) 古閑伸裕, 久保雅亮, NC サーボプレスを利用したかえり無しせん断, 塑性と加工, **48**, pp.645-649, 2007.
- (3) 鈴木裕一, 白神二栄, ハイブリッド AC サーボプレスのモーション制御, 日本機械学会 *Dynamics and Design Conference*, No.04-5, 2004.
- (4) 畑幸男, 松本順次, *KOMATSU TECHNICAL REPORT*, **53**, pp.44-51, 2007.
- (5) 江河隆幸, なぜ高強度鋼板が多用されるのか, 塑性と加工, **46**, pp.556-559, 2005.
- (6) 佐藤章仁, 高強度鋼板の問題点とその対応, 塑性と加工, **46**, pp.548-551, 2005.
- (7) 黒瀧和彦, ハイブリッド AC サーボプレスシリーズ, プレス技術誌, **41**, pp.54-57, 2003.
- (8) T. Totani, H. Nishimura, "Final-State Control Using Compensation Input", *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, **30**, pp.253-260, 1994.