

デュアルドライブシステムの軌跡最適化による レーザ加工の高速高精度化

東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所
助教 田島 真吾
(2021年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2021241-C2)

キーワード：粗微動機構，冗長システム，軌跡生成

1. 研究の目的と背景

近年の製造業の進歩に伴い、レーザ支援製造プロセスは、新たな高速・高精度製造技術として大きな関心を集めている。最新のリソグラフィ装置、パウダーベッドレーザ積層造形、レーザ切断、レーザ穴あけ、レーザアシスト微細加工、表面仕上げ/テクスチャリング、レーザアシストバリ取りプロセス¹⁾は、いずれも高い生産性を実現するために、一般的にガルバノミラーや超高速リニアアクチュエータシステムを利用した精密位置決めシステムで駆動される低/中出力のレーザビームを使用している²⁾。通常、レーザ加工を広範囲に適用するためには、これらの短いストロークの高速な「微動」アクチュエータを、ボールねじやリニアモータ駆動軸のような長いストロークの「粗動」アクチュエータで駆動し、広い加工領域を実現する必要がある。このようなレーザ加工機的设计では、粗動(低速)軸と微動(高速)軸の両軸が同じ方向に駆動する冗長軸構成になる³⁾。このようなサーボ機構は「デュアルドライブ」システムとして知られている。本研究では、直交2軸のデュアルドライブによるレーザ加工システムを対象に、新しいリアルタイムでの軌跡生成法を提案する⁴⁾。

非常に高速で動作する最新のレーザ加工を対象とした場合、こうしたデュアルドライブの2軸システムのリアルタイム軌跡生成は極めて重要な課題となる。一般的に、指令軌跡は各ドライブの動的および運動学的な制限を考慮して生成する必要がある。ここで、粗動アクチュエータは大きなストロークを実現する一方で、加速度や躍度の限界は低く制限される。反対に、微動アクチュエータは狭いストロークしか実現できないが、加速度と躍度の限界は高く、粗動アクチュエータの3~5倍での高速動作が可能である。そのため、一般的な方法としては、低速動作には粗動アクチュエータを使用し、高速動作には微動アクチュエータを使用する。このような問題に対する従来の軌跡生成法は、「相補フィルタリング」アプローチに基づいている。指令位置軌跡(xr)はローパスフィルタリングされて粗動軸に送られ、同時にハイパスフィルタリングされた目標位置が微動軸に送られる。この実用的な方法は、時系列フィルタリングに基づき、駆動軸のダイナミクスに応じた指令分配が可能になるため、リアルタイムシステムへの導入に適している。しかしながら、この相補フィルタリングによる手法では、駆動部の運動学的限界は考慮されていないため、

アクチュエータの駆動限界や意図しない振動を引き起こす可能性がある⁵⁾。

2. 研究方法

粗動機構および微動機構それぞれの駆動軸の運動学的限界を考慮して指令軌跡をリアルタイムに生成するために、本研究では移動平均フィルタの特性を有する Finite Impulse Response (FIR) フィルタを用いたリアルタイム軌跡生成法を提案する⁶⁾。FIR フィルタを用いる理由として、まず第1に軌跡生成に FIR フィルタを利用することで、リアルタイム性を持つ実機実装が可能となる。次に、低域通過フィルタの特性を持つ FIR フィルタを用いることで、高速での位置決め時に発生する機体振動を抑制することができる。最後に、従来研究^{7,8)}とは異なり、提案法では粗動軸と微動軸の同期動作を別々に制御可能である。粗動軸で生じた「補間」誤差を補正するために微動軸を使用することで、微動軸の駆動指令を生成する際にストロークの制限を考慮することが可能となるとともに、エンドエフェクタの位置決め誤差を最小限に抑えることが可能になる。

図1に提案するデュアルドライブシステムの軌跡生成法の概要を示す。図に示すように、粗動軸と微動軸の両方の駆動指令は、速度パルスコマンドを FIR フィルタリングすることにより生成される。使用する FIR フィルタの伝達関数を以下に示す。

$$G_{FIR} = \frac{1 - e^{-sT_i}}{sT_i}, i = 1 \dots 4. \quad (1)$$

ここで、 T_i はフィルタ時定数であり、低域通過フィルタの減衰周波数と周波数応答でのノッチを制御する⁶⁾。例えば、式(1)で表わされる FIR フィルタは、不要な残留振動を抑制するために $\omega_n = 2\pi k/T_i, k=1 \dots N$ で連続するノッチを生成する。また、FIR フィルタへの指令は、工具の直線移動

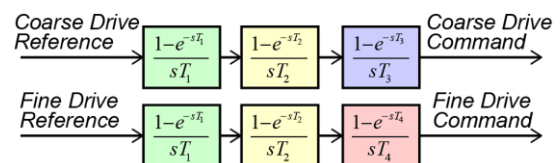


図1 FIR フィルタを用いたデュアルドライブシステムの軌跡生成法

に基づいて生成される速度パルスである。速度 V で距離 L の直線を移動する場合、速度パルスは $T_v=L/V$ の時間幅を持つ。FIR フィルタには積分器が含まれているため、速度パルスが FIR フィルタを通過することで台形速度プロファイルが生成される。加えて、図 1 に示すように、各ドライブに対して 3 つの FIR フィルタを使用することで、躍度の微分であるスナップを制限した滑らかな動作プロファイルの生成が実現できる。

2・1 粗動軸指令の生成

粗動軸指令は、エンドエフェクタの速度指令パルスを直接 FIR フィルタリングすることによって生成される。そのため、単純な Point-to-Point (P2P) 動作中は、微動軸が使用されることはない。これは、長い P2P 位置決め指令を補間する場合、ストロークが小さい微動軸は全体的なデュアルドライブでの協調動作に有意な影響を与えることができないためである。一方で、連続的な（停止しない）位置決め動作を実行する場合、つまり輪郭運動では、粗動軸による指令補間動作により補間誤差を考慮する必要がある⁹⁾。図 2 に示すように、この補間誤差は FIR フィルタによる指令補間法によって発生する。

図 2 に示すように、この FIR フィルタによる補間誤差は、粗動軸が現在のブロックから次のブロックへと送り方向を変えようとする際に、連続する P2P 動作指令セグメントの接続点（コーナ部）で発生する。提案する 3 つの FIR フィルタを用いた軌跡生成では、粗動軸の補間誤差 ϵ_{Coarse} は、経路形状、フィルタ時定数、および指令速度より次式で計算できる^{6,9,10)}。

$$\epsilon_{Coarse} = \frac{3T_3^2 + T_1^2 + T_2^2}{24T_3} \sqrt{F_{p,1}^2 + F_{p,2}^2 - 2F_{p,1}F_{p,2} \cos \theta} \quad (2)$$

ここで、 θ はコーナ角度、 $F_{p,1}$ と $F_{p,2}$ は連続する 2 つの直線区間の接線速度を示す。式(2)より、コーナの形状は固定であるため、補間誤差は接線速度 F によってのみ制御できることが分かる。つまり、送り速度を下げることで誤差は小さくなり、その補間誤差 ϵ_{Coarse} と許容誤差 ϵ_{Limit} との関係式は次の式で表わされる。

$$\alpha = \frac{\epsilon_{Limit}}{\epsilon_{Coarse}} \quad (3)$$

ここで、 α は速度オーバーライド係数であり $\alpha \leq 1$ で定義される。ここで、指令送り速度を下げることで全体的な動作時間が長くなり、その結果、生産性の低下が生じる。提案法では、これら補間時に生じる誤差を補正し、生産性を向上するために微動軸を活用する。

2・2 微動軸指令の生成

前節の通り、微動軸は粗動軸での補間誤差を最小にするために用いられる。この微動軸の速度パルス指令は次のように生成される。

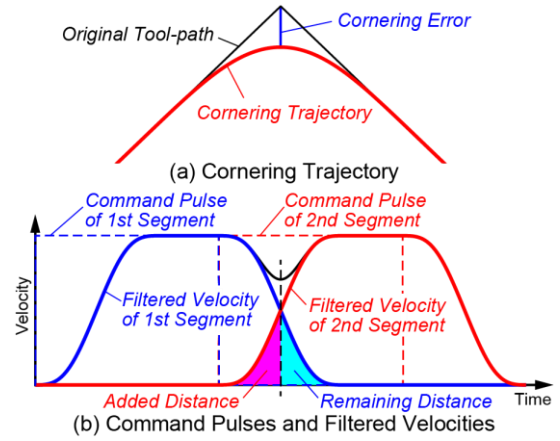


図 2 FIR フィルタを用いた補間誤差

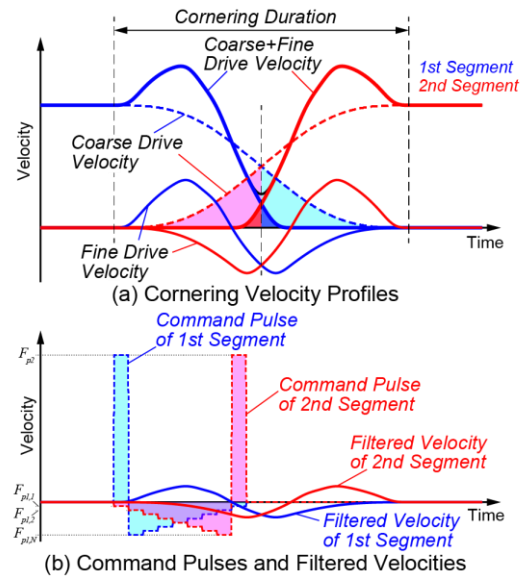


図 3 コーナ誤差を補償する微動軸指令

コーナリング誤差は、FIR フィルタによって生成された粗動軸軌跡によって生じる残留距離と加算距離によって発生する。これらの残留距離と加算距離を減少させるため、微動軸の速度パルスを新たに生成する。図 3 に微動軸の指令パルスと FIR フィルタリング後の速度プロファイルを示す。図 3 (a) に示すように、コーナ部では粗動駆動速度を打ち消すように微動駆動速度を発生させる。この結果、コーナリング時に生じるコーナ誤差は、微動機構を用いることで粗動機構のみの場合と比較して小さくなる。

図 3 (b) に微動駆動の指令パルスとフィルタリング後の速度波形を示す。粗動駆動と逆の動作を発生させるために、微動軸の指令パルスは階段状に生成する。ここで、階段状の指令パルスの高さや幅は、各駆動のフィルタ時定数と粗動軸の指令パルスの振幅によって決定される。図 3 に示す n 段目の速度 $F_{p1,n}$ は以下の式で決定する。

$$F_{p1,n} = \frac{nFT_4}{T_3}, n = 1 \dots N, \text{ with } N = \text{ceil}\left(\frac{T_4}{T_3}\right) - 2 \quad (4)$$

また、コーナリング動作終了時には、微動軸は元の位置

に戻る必要がある。そのため、階段状に生成した速度パルスと同じ面積で逆方向の指令パルスを1区間目の始点と2区間目の終点に加える。微動機構の総移動距離をゼロにするための逆方向に追加する速度パルスの振幅 F_{p2} は以下の式で求められる。

$$F_{p2} = \frac{NF}{T_3} (T_3 - (N+1)T_4) \quad (5)$$

2.3 ストロークと補間誤差の制御

粗動軸と微動軸の軌道は、補間誤差の許容範囲と微動軸のストローク制限を満たすように制御する必要があるため、以下に示す動的な速度コマンドのスケールを実行する。

微動軸は粗動軸により生じた補間誤差を補正するために用いられる。そのために、まず粗動軸で生じる補間誤差の制御を2.1節で示すように式(3)を使用して速度パルスをスケールすることで実施する。ここで、粗動軸で生じた補間誤差が微動軸のストローク制限を超える場合、速度パルスは以下のパラメータを用いてスケールされる。

$$\alpha_{Coarse} = \frac{\varepsilon_{Limit}}{\varepsilon_{Coarse}} \quad (6)$$

上式により、微動軸のストローク制限を遵守することが保証される。

次に、2.2節で示すように、微動軸の指令軌跡を生成する。微動軸は粗動軸の補間誤差を補正するが、コーナ誤差を完全に除去することはできない。そのため、粗動機構に加えて微動機構を使用したとしても、コーナ誤差がユーザーの指定する許容誤差 ε_{Limit} を超える場合が生じる。その際は、下式で求められる新たなパラメータを使用して、粗動軸と微動軸の両方の速度パルスを等しくスケールすることで誤差を抑制する。

$$\alpha_{Dual} = \frac{\varepsilon_{Limit}}{\varepsilon_{Dual}} \quad (7)$$

上記のスケールによる方法により、微動軸のストローク制限とデュアルドライブ全体での許容誤差の両方を満たすことが可能になる。

3. 研究成果

本研究で提案したデュアルドライブの軌跡生成法について、図4に示す2軸サーボシステムを対象にシミュレーションで検証した。図に示すように、このシステムは冗長の直交サーボ機構で構成されており、微動機構は粗動機構によって搬送される。ここで、使用するFIRフィルタの時定数はそれぞれ $T_1=100$ ms, $T_2=80$ ms, $T_3=200$ ms, $T_4=20$ msとする。また、微動軸のストローク制限は8 mmに設定した。

まず始めに、図5に示す2つの直線からなる単純な工具

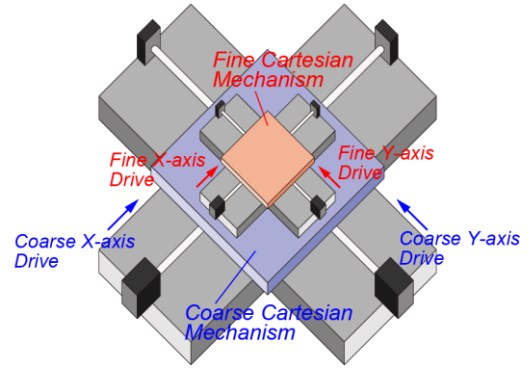


図4 デュアルドライブシステムによる粗微動テーブル機構

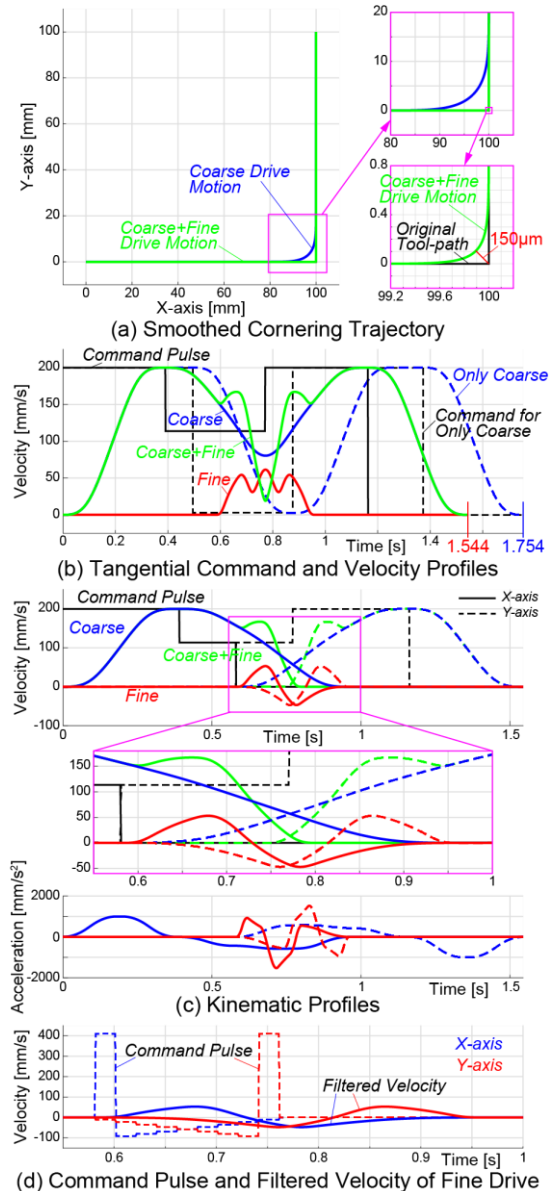


図5 直角コーナ指令に対する軌跡生成

経路の補間を実施する。この工具経路補間時の許容誤差は150 μ mと設定した。図5に示すように、提案したデュアルドライブの軌跡生成アルゴリズムは粗動機構と微動機

構とが同期した動作が実現できていることが分かる。粗動軸のみを使用した場合、補間誤差が許容誤差よりも大きくなるため、コーナリング時の速度を極端に落とす必要がある。一方で、デュアルドライブの場合は全体のサイクル時間の変更や、粗動軸で大きな加速度を使用せず、補間誤差を許容値以下に抑制することが実現できた。

次に、提案した軌跡生成法をより複雑な工具指令に適用した結果を図6に示す。まず、微動軸を使用せず粗動軸のみで補間した場合のサイクル時間は60.03秒であった。次に、提案する軌跡生成法を使用して微動軸を活用した結果の軌跡を図6(a)に示す。図6に示すように、微動軸はストローク制限内で制御されており、またサイクル時間は49.30秒に削減された。これらの結果より、粗動軸が微動軸を目標軌道に搬送し、微動軸が高速動作することで目標軌道を追従していることが確認できた。

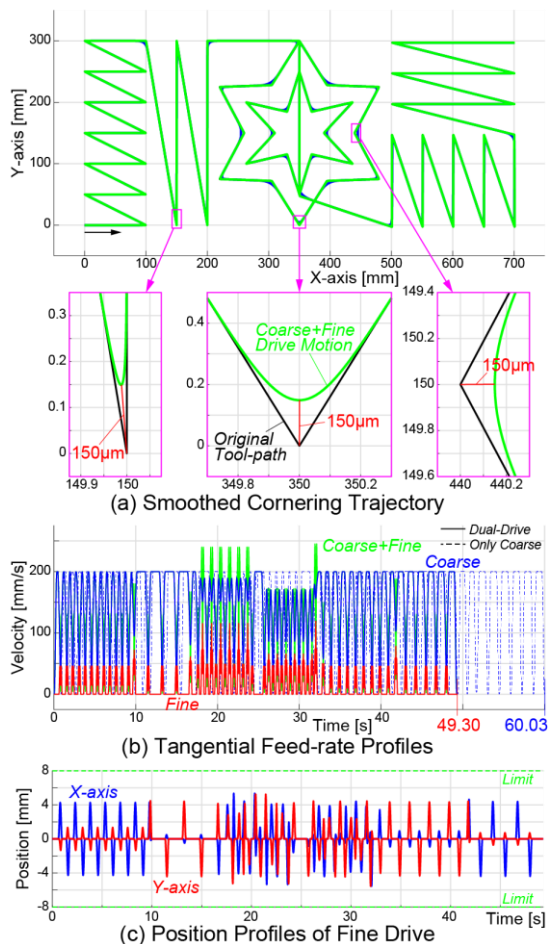


図6 複雑な工具指令に対する軌跡生成

4. 結言

本研究では、2軸のデュアルドライブシステムに対して新しい軌跡生成法を提案した。提案法では、粗動機構と微動機構の両方の指令軌跡を生成するためにFIRフィルタを使用した。また、微動機構は粗動機構で生じた補間誤差を補償するために用いられており、微動機構のストローク制限も考慮されている。加えて、軌跡生成にFIRフィルタ

を使用することで、周波数スペクトルの制御が可能になる。提案法により、複雑なレーザ加工用工具経路に対する軌跡補間後のサイクル時間を15~20%向上することができた。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団2021年度奨励研究助成(若手研究者枠)(AF-2021241-C2)により行われたものであり、ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Chryssolouris, G., Anifantis, N., and Karagiannis, S., 1997, "Laser Assisted Machining: An Overview," *J. Manuf. Sci. Eng.*, 119(4B), pp. 766–769.
- 2) Zaeh, M. F., and Pieczona, S. J., 2018, "Adaptive Inverse Control of a Galvanometer Scanner Considering the Structural Dynamic Behavior," *CIRP Annals*, 67(1), pp. 385–388.
- 3) Yuen, A., and Altintas, Y., 2018, "Constrained Trajectory Generation and Control for a 9-Axis Micromachining Center with Four Redundant Axes," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 23(1), pp. 402–412.
- 4) Morimoto, Y., Shinshi, T., and Nakai, T., 2012, "A TWO-DOF Controlled Lens Drive Actuator for Off-Axis Laser Beam Cutting," *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, 6(6), pp. 875–884.
- 5) Guo, D., Nagel, W. S., Clayton, G. M., and Leang, K. K., 2020, "Spatial-Temporal Trajectory Redesign for Dual-Stage Nanopositioning Systems with Application in AFM," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 25(2), pp. 558–569.
- 6) Tajima, S., Sencer, B., and Shamoto, E., 2018, "Accurate Interpolation of Machining Tool-Paths Based on FIR Filtering," *Precis. Eng.*, 52, pp. 332–344.
- 7) Mitrovic, A., Nagel, W. S., Leang, K. K., and Clayton, G. M., 2020, "Closed-Loop Range-Based Control of Dual-Stage Nanopositioning Systems," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 26(3), pp. 1412–1421.
- 8) Zheng, J., and Jinchuan Zheng, 2013, "Model Predictive Control of a Dual-Stage Actuator System for Fast Setpoint Tracking," *Proceedings of ICIEA 2013*, pp. 1604–1609.
- 9) Sencer, B., Ishizaki, K., and Shamoto, E., 2015, "High Speed Cornering Strategy with Confined Contour Error and Vibration Suppression for CNC Machine Tools," *CIRP Annals*, 64(1), pp. 369–372.
- 10) Tajima, S., and Sencer, B., 2019, "Accurate Real-Time Interpolation of 5-Axis Tool-Paths with Local Corner Smoothing," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 142, pp. 1–15.