

多自由度磁気浮上アクチュエータ及びそれによる 高速・高精度レーザ加工の研究

日本工業大学 機械工学科
教授 張 暁友

(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017206)

キーワード：レーザ加工，磁気浮上，アクチュエータ，多自由度

1. 研究の目的と背景

レーザ切断加工は、集光したレーザ光を局部的に材料に直接照射して溶融させ、さらに高压のアシストガスを加工面に吹き付けることで、溶融材料の除去を行う加工法である。レーザ切断加工は非接触の加工方法のため、複雑な形状を有する板材の切断や、セラミック等の難削材の加工によく適用されている^{1, 2)}。

従来は、レーザビームの光軸をレーザヘッドのノズル開口の中心に設定することで、加工方向による加工品質の差が出ないように設定していた。厚板切断において、切断面へ十分にアシストガスが供給されないため、溶融材料の除去効果が低下し、加工速度と精度が低下している³⁾。

これらの問題点を解決するため、アシストガス用ノズル中心軸に対し、レーザビームの光軸を加工方向に偏心させる方法が提案されていた⁴⁾。これは、レーザ照射により発生した溶融物の流れをアシストガスにより制御できるためである。一方で、アシストガス用ノズル中心軸に対し、レーザ光軸を加工方向に偏心させる方法が提案されている⁵⁾。提案アクチュエータはレーザ加工用集光レンズを2自由度方向のみに制御できるが、5自由度方向の制御が実現されていない。

一方で、磁気浮上は非接触であるため摩擦や磨耗が無く、また高速・高精度かつ多自由度位置決めや姿勢制御が可能となる。このため、本研究では、磁気浮上の5自由度精密位置決め機能を着目し、レーザ加工用集光レンズの長ストロークかつ高精度位置決めが可能な、5自由度制御型磁気浮上アクチュエータを開発し、それをレーザ加工への応用を試みる。

2. 提案磁気浮上アクチュエータ

2.1 アクチュエータの構成と駆動原理

磁気浮上において、コイルの発生する磁束を集中できる鉄心ありの電磁石は良く使われているが、その電磁力は、エアギャップの2乗に反比例し、かつコイル電流の2乗に比例する、強い非線形性を有するため、制御が困難である。また、長ストロークを実現するため、大きな変動範囲の駆動電流が必要となり、コイルの銅損による電磁石の発熱が問題となる。

一方で、空心コイルには磁気漏れが多いが、発生する電磁力がコイルに流れている電流と比例するため制御しや

すくなる。そのため、本研究では、空心コイルを用いた案内方法を採用する。

図1に提案する5自由度制御型磁気浮上アクチュエータの原理図を示す。軸に取り付ける永久磁石の上下に、2個で1セットとする8個ずつのコイルが配置される。永久磁石は電磁軟鉄を挟んだ三段構造となっている。上下は極性の異なるリング状の磁石であり、中央はリング状の電磁軟鉄である。この構造により磁束を集中することが可能となる。

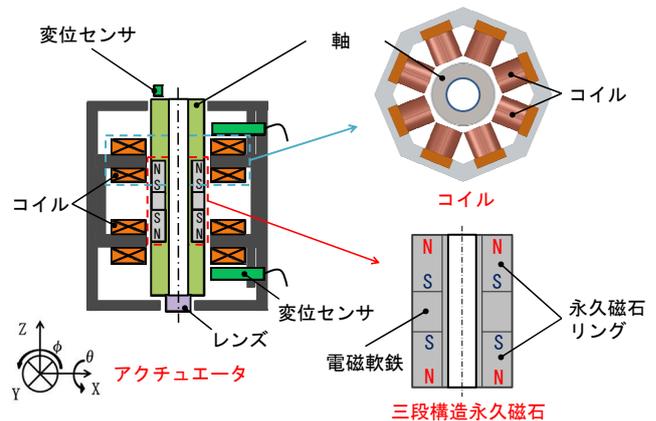


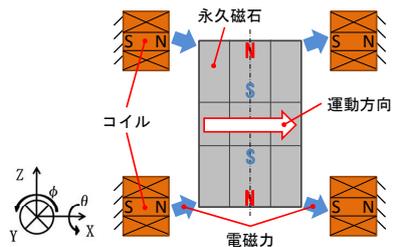
図1 磁気浮上アクチュエータの原理図

図2にアクチュエータの駆動原理を示す。図2(a)のように、右側のコイルと磁石間に吸引力を発生させ、左側には反発力を発生させることによって軸をX軸の正の方向に運動させることができる。一方で、右側のコイルと磁石間に反発力を発生させ、左側には吸引力を発生させ、軸をX軸の負の方向に運動させることができる。Y軸方向の運動制御も同様である。

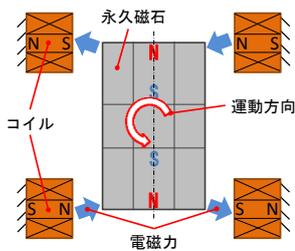
図2(b)のように上下のコイルと電磁石の間に発生した電磁力の方向が逆になる場合、Y軸周りの回転運動を制御できる。X軸周りの回転運動も同様である。また、図2(c)のように上側のコイルと磁石間の吸引力を、下側には反発力を発生させることによってスピンドルのZ方向の運動を制御できる。

2.2 アクチュエータの設計と試作

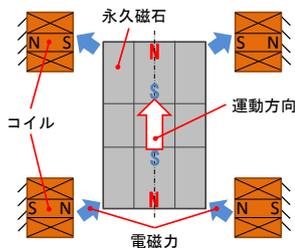
アクチュエータの性能目標値は、5自由度方向に50Hz以上の応答周波数、並進方向に1 μ mの位置決め分解能と4mmのストローク、回転方向に25 μ radの位置決め分解



(a) X 軸方向の並進運動



(b) Y 軸周りの回転運動



(c) Z 軸方向の並進運動

図2 各運動方向の駆動原理

能と 0.1rad 以上のストロークにする。また、外形 $\phi 150 \times H200\text{mm}$ 、質量 10kg 以下を目標値として、コイルと永久磁石リングの寸法を探索し、5 自由度制御型磁気浮上アクチュエータを設計する。

永久磁石とコイルの材質を、それぞれネオジウムと銅に、電磁力の目標値を 15N にして、有限要素法を用いた磁場解析より磁石とコイルの寸法を探索した。永久磁石の外径が 45mm、上下の段の厚さが 20mm、中央の段が 10mm、穴径が 30mm になった。また、コイルの外形が $W20 \times D20 \times H30\text{mm}$ 、銅線列の厚さが 7.5mm になった。図 3 にコイルの電流と発生する電磁力の関係を示す。解析結果から X 方向ではコイル電流を 1500AT、Z 方向では 1300AT にして、目標値 15N の電磁力を発生できる。

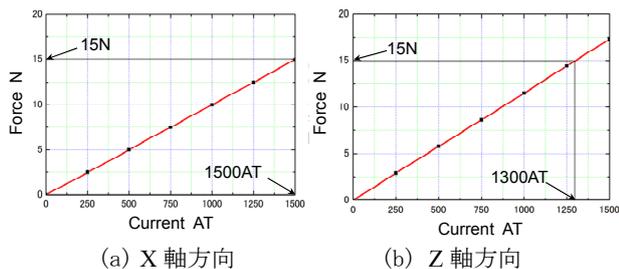


図3 コイルの電流と発生する電磁力の関係

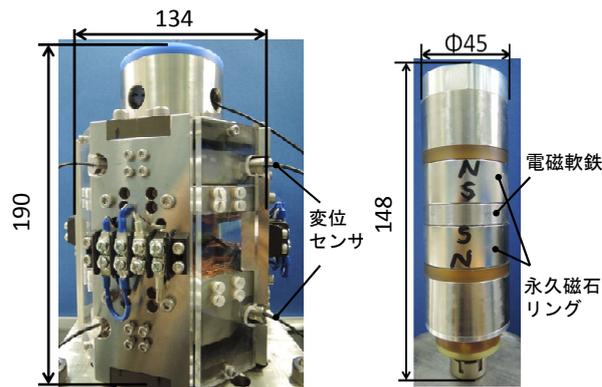


図4 試作したアクチュエータ

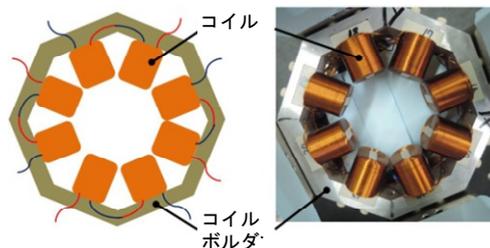


図5 アクチュエータのコイル

試作したアクチュエータを図 4 に示す。アクチュエータの高さは 190mm、幅は 134mm、質量は 8.0Kg である軸の長さは 148mm、径は 45mm、質量は 0.7Kg である。軸の変位計測には、ラジアル方向が、分解能 $0.5\mu\text{m}$ 、測定レンジ 4mm の渦電流式変位センサ (PU-09, AEC Corp.) を 4 本、スラスト方向が 1 本を使用する。

アクチュエータのコイルの配置は図 5 に示され、上述のように 2 個 1 セットで直列に繋がっており、八角形のコイルホルダに取り付けられる。1 セットのコイルの巻き数は 670 巻となる。永久磁石の材質は $\text{Nb}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ となる。

2.3 アクチュエータの制御系

図 6 にアクチュエータの X 軸方向の制御系のブロック線図を示す。この制御系は、定常誤差の除去を目的とした積分器、安定化を目的とした分母 2 次分子 2 次のレギュレータ、コイルの応答速度を改善するための電流フィードバックループから構成される。他の方向のコントローラは X 方向と同様である。

図中の m は軸の質量、 c は減衰係数、 k はばね定数、 L はコイルのインダクタンス、 R はコイルの抵抗、 k_i は電磁力・電流係数、 k_v は逆起電力係数である。これらのパラメータが同定され、表 1 に示される。

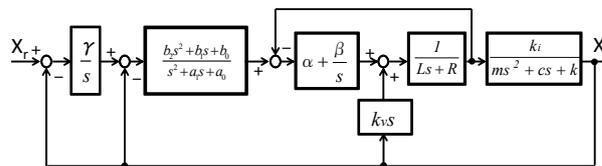


図6 X 軸方向の制御系のブロック線図

表1 アクチュエータのパラメータ

m	0.7kg	L	1.87mH
k	7.56N/m	R	2.31 Ω
c	1.0Ns/m	k_t	3.84N/A
k_v	7.47Vs/m		

また、制御パラメータ γ , a_0 , a_1 , b_0 , b_1 , b_2 は電流フィードバックを1次遅れ要素に近似する目標値 X_r から変位 X までの閉ループ伝達関数の極を、複素平面内上の実軸上に安定な1点に配置することで、自動的に決定される。

アクチュエータの制御は DSP システム (DSP1103, dSPACE Corp.) を用いて行い、そのサンプリング周波数は 10kHz である。磁気浮上システムの構成図を図7に示す。軸の変位を測定するための渦電流型変位センサの出力はセンサアンプで増幅された後に DSP ボードの A/D コンバータを介して制御用 PC に送られる。コントローラで演算され、DSO ボードの D/A コンバータを介して、出力してコイル用アンプに与え、増幅されてコイルを駆動する。また、コイルに流れる電流を電流センサ (LA25-NP, LEM Corp.) で測定して電流フィードバックを行う。

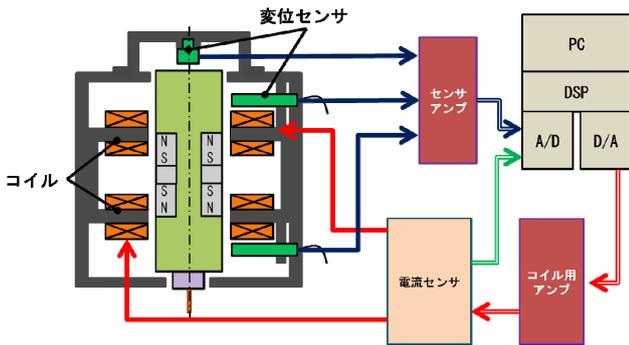


図7 磁気浮上システムの構成図

3. アクチュエータの位置決め性能評価

設計したコントローラをアクチュエータに適用してその性能の評価を行った。X 軸方向に 10 μ m, Θ 方向 (X 軸周りの方向) に 1mrad のステップ信号を入力するときの応答を図8に示す。実験結果から明らかなように、X 方向に 20%, Θ 方向に 10% のオーバーシュートがみられた。オーバーシュートを低減するため、今後は制御パラメータを再チューニングすることが必要である。

軸を浮上させ、安定した状態で X 軸方向に振幅 2mm, 周波数 1Hz の正弦波, Θ 方向に振幅 70mrad, 周波数 1Hz の正弦波を入力するときの実験結果を図9に示す。X 軸方向には 4mm, Θ 方向に 70mrad のフルストロークを実現できた。この機能を生かして、アシストガスを噴射するノズル開口の中心軸に対し、レーザ光軸を加工方向に偏心させることができる。また、板金の傾斜切断、彫刻やマーキング加工も可能になる。

また、図10と図11から、X 軸方向と Θ 方向には位置決め分解能はそれぞれ 1.0 μ m と 20 μ rad, バンド幅は 101Hz と 45Hz を有することが明らかになった。

まとめた磁気浮上アクチュエータの位置決め性能を表2に示す。試作したアクチュエータは、並進方向には 1.0 μ m の位置決め分解能, 4mm のストローク, 傾き方向には 20 μ rad の位置決め分解能, 70mrad のストロークを実現した。また、アクチュエータのバンド幅はラジアル方向に 100Hz, スラスト方向に 70Hz, 傾き方向に 40Hz 程度を有した。ただし、一部の位置決め性能が目標値に達していないため、今後はアクチュエータの制御系の再検討が必要である。

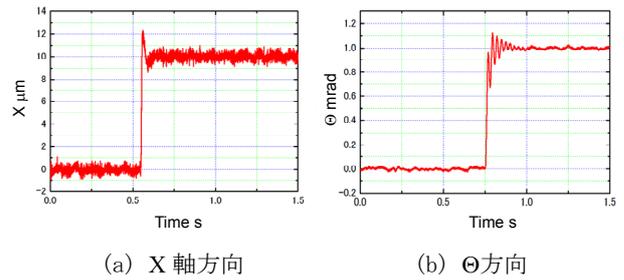


図8 ステップ応答

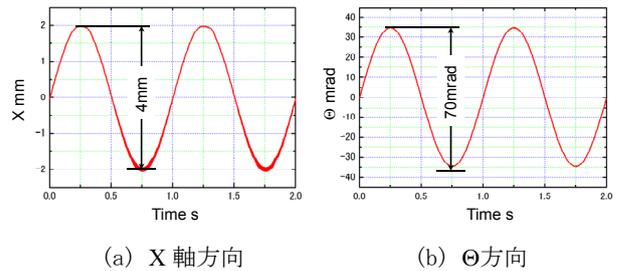


図9 ストローク

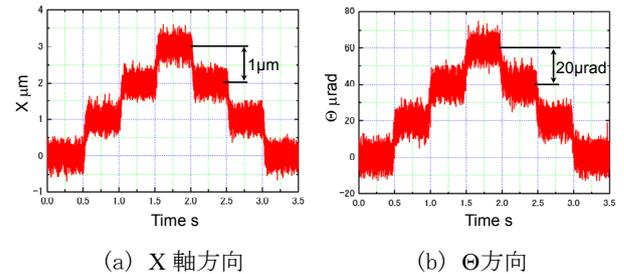


図10 位置決め分解能

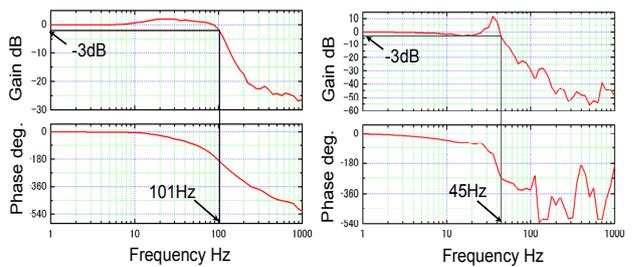


図11 周波数応答

表2 アクチュエータの位置決め性能

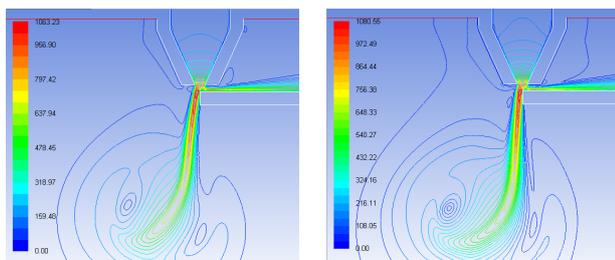
	ストローク	分解能	バンド幅
X軸方向	4mm	1 μ m	101Hz
Y軸方向	4mm	1 μ m	101Hz
Z軸方向	4mm	1 μ m	51Hz
Θ (X軸周りの回転) 方向	70mrad	20 μ rad	45Hz
Φ (Y軸周りの回転) 方向	70mrad	25 μ rad	42Hz

4. 偏心加工のシミュレーションと基礎実験

4.1 偏心加工のシミュレーション

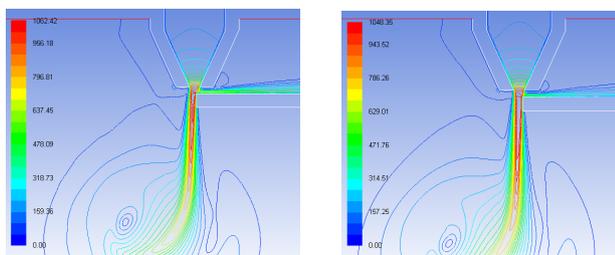
アシストガス用ノズル中心軸に対し、レーザビームの光軸を偏心させることにより、アシストガスへの影響を検討するため、レーザ切断加工をモデル化し、有限要素法を用いた流体解析よりシミュレーションを行う。

アシストガスの供給圧力を 0.6Mpa、加工物の板厚を 2mm、アシストガス用ノズルから加工物までの距離を 1mm にし、偏心量をそれぞれ 0, 0.1, 0.3, 0.5mm にして計算したアシストガスの速度の分布図を図 12 に示す。シミュレーション結果から明らかなように、偏心量をそれぞれ 0, 0.1, 0.3, 0.5mm にするとき、ガス噴出速度は 731.46m/s, 755.19m/s, 824.07m/s, 901.82m/s となり、ガスが加工物に到達するときの速度は 11.58m/s, 27.53m/s, 39.89m/s, 49.03m/s となった。偏心量の増加とともに、ガス噴出速度も加工物に到達するときの速度も大きくなった。レーザビームの光軸の偏心のため、アシストガスによりレーザ照射で発生した溶融物の流れをコントロールでき、ガスの消費量も低減できると考えられる。



(a) 偏心量 : 0mm

(b) 偏心量 : 0.3mm



(c) 偏心量 : 0.3mm

(d) 偏心量 : 0.5mm

図 12 アシストガスの速度の分布

4.2 偏心加工の基礎実験

レーザビームの光軸の偏心により、加工速度と加工精度

への影響を検討するため、YAG レーザ加工機を用いて切断加工の基礎実験を行う。ガスの圧力を 0.5Mpa、加工物の板厚を 2mm、加工物までの距離を 1mm にし、偏心量を 0mm と 0.1mm、切断速度を 1300mm/min と 1500mm/min にして加工結果を表 3 に示す。切断速度を 1500mm/min に設定するとき、偏心なしの場合は、加工物を切断できなかった。一方で、0.1mm の偏心の場合は加工物の切断が可能になった。

表 3 異なる偏心量と切断速度の加工結果

偏心量	切断速度	加工物表面	加工物裏面
0mm	1300mm/min		
	1500mm/min		
0.1mm	1300mm/min		
	1500mm/min		

また、切断速度を 1300mm/min にし、偏心量を 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25mm にするときの加工結果を表 4 に示し、切断面の粗さを図 13 に示す。偏心量の増大とともに、切断面の表面粗さは小さくなり、加工面の品質が良くなっている。

表 4 異なる偏心量の加工結果

偏心量	加工物の表面	加工物の裏面	切断面
0mm			
0.05mm			
0.10mm			
0.15mm			
0.20mm			
0.25mm			

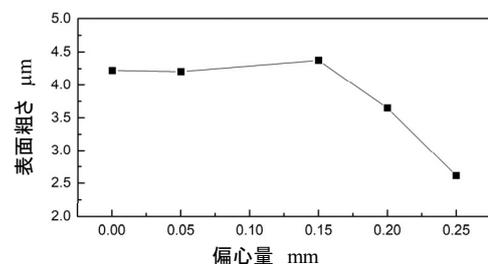


図 13 切断面の粗さ

5. 結び

レーザ加工の加工速度と加工精度を向上するため、本研究では、磁気浮上の 5 自由度精密位置決め機能を生かし、

レーザー加工用集光レンズの長ストロークかつ高精度位置決めが可能な、5自由度制御型磁気浮上アクチュエータを提案して試作した。

また、磁気浮上アクチュエータの制御系を検討してその位置決め性能評価を行った。試作したアクチュエータは、並進方向には 1.0 μ m の位置決め分解能、4mm のストローク、50Hz 以上のバンド幅、傾き方向には 20 μ rad の位置決め分解能、70mrad のストローク、40Hz 以上のバンド幅を実現した。

さらに、レーザービームの光軸の偏心により、アシストガス、加工への影響を検討するため、流体解析によるシミュレーションと基礎加工実験を行った。レーザービームの偏心により、加工時に発生した溶融物の流れをコントロールでき、加工速度と加工精度を向上できることが明らかになった。今後は試作したアクチュエータをレーザー加工機に取り付け、加工実験を行う予定である。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 29 年度一般研究開発助成 AF-2017206 の支援を受けて実施した研究であり、ここに記して、心より深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) F. Quintero, et al.: Optimization of an off-axis nozzle for assist gas injection in laser fusion cutting, *Optics and Lasers in Engineering*, 44, (2006) 1158-1171.
- 2) H.G. Salem, et al.: CW Nd: YAG laser cutting of ultra-low carbon steel thin sheets using O₂ assist gas, *Journal of Materials Processing Technology*, 196, (2008), 64-72.
- 3) O.B. Kovalev, et al.: Modeling of flow separation of assist gas as applied to laser cutting of thick sheet metal, *Applied Mathematical Modeling*, 33, 9 (2009), 3730-3745.
- 4) H.O. Ketting and F.O. Olsen: High pressure off-axis laser cutting of stainless steel and aluminum, *Proceedings of International Conference on Laser Advanced Materials Processing (Science and Applications)*, 7-12 (1992), 607-612.
- 5) 森本貴景, 進士忠彦, 中井孝洋, 福岡輝章: レーザ偏心加工に用いる磁気・静圧ハイブリッドレンズ駆動アクチュエータ, *日本機械学会論文集 (C)*, 78巻794号 (2012-10), 239-252.