

WAAMにおける形状モニタリングとフィードバックによる曲面上への造形

東京農工大学 ○増田 広輝, 東京農工大学 ◎笹原 弘之

要旨

本研究では WAAM において現在の造形形状をセンシングし、目標造形物の形状と比較することにより造形経路とトーチ送り速度を変更するシステムを開発し、造形経路とトーチ送り速度が造形形状に与える影響を調査した。また、本システムを造形に用いることで、自在な上面形状を得ることを可能とした。

1. 緒言

近年、機械部品や金型における複雑形状を迅速に造形し、製造コストの低減や高機能化を可能にするアディティブ・マニファクチャリング(AM)技術への期待が高まっている⁽¹⁾。本研究では、アーク放電により金属ワイヤを溶融・固化させる技術に着目し、ワイヤ材料をアーク放電で溶融し積層することにより 3 次元造形を行う AM (Wire and Arc-based Additive Manufacturing :WAAM) の研究を行っている。本手法は溶接ビードを何層も重ねることによって目標形状を得るが、トーチと造形物の干渉が問題となることがある。造形中の高さを測定し、造形経路に反映することで造形精度が向上することが報告されている⁽²⁾。また、WAAM によって目標形状に近い形状を得ることで仕上げ切削する体積が減り、従来と比較して効率のよいものづくりを実現することができる。トーチ送り速度を変更することによって、積層高さが変更できることが報告されている⁽³⁾。

そこで本研究では、造形中の被積層部の座標を測定し、造形高さとトーチ送り速度にフィードバックするシステムを開発し、曲面上への所望の高さ分布を持つ形状の造形を実現することを目的とする。

2. WAAM システムの概要

本研究で使用した AM 装置を図 1 に示す。この装置では Z 軸に溶接トーチを取り付け、直進軸(X, Y, Z 軸: ストローク 500mm)の運動を制御し造形を行う。各軸は CNC ソフトウェア (Mach3 ArtSoft 社) によって制御され、CNC インターフェイス基板(オリジナルマインド社 CNC-4Axis) によって各軸のモータドライバを動作させる。

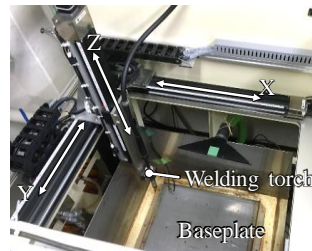


Fig. 1 WAAM machine

3. 造形形状フィードバックシステムの開発と効果

3.1 造形高さ・速度制御システム

開発した制御システムには造形物形状を測定し、目標形状と比較することで造形高さとトーチ送り速度を変更する機能と、造形物が任意の温度まで低下したら造形を自動で開始する機能を実装した。溶接トーチの-X側にレーザセンサ(オムロン社製 ZX1-LD300A61)と放射温度センサ(FT-40K, FT-50A KEYENCE 製)を取り付け、測定を行った。距離データと温度データの処理、造形の開始を指示する制御器として、ArduinoUNOを使用した。また、本システムを使用することによって、造形物上面形状に沿って造形を行うことが可能となるためアーク長の長さを一定として造形物に干渉することなく造形できる。またトーチ送り速度を変更することでビードの高さを任意の高さに変更することができるため、目標形状に応じた造形物形状の修正が可能となる。

3.2 造形高さ・速度制御実験

トーチの移動を造形物上面形状に沿って造形を行う場合と沿わず直線的に移動する場合、トーチ送り速度を 100-300 mm/min で変化させる場合と 100 mm/min で固定した場合で四通りの造形を行うことにより、形状にあたる影響を調査する比較実験を行った。100-300 mm/min でトーチ送り速度を変化させる場合、低いトーチ送り速度ほど積層高さは高くなり、高いトーチ送り速度ほど積層高さは低くなる。被造形物上面形状と造形目標を比較し、差が最大の地点のトーチ送り速度を 100 mm/min、差が最小の地点のトーチ送り速度を 300 mm/min と設定した。積層条件は、溶接電流 140 A、溶接電圧 15.7 V、溶接ワイヤ YGW12 (JIS Z 3312)、ワイヤ供給速度 3.2 m/min、シールドガス Ar+CO₂ 20%、ガス流量 15 L/min、層間温度 100 °Cである。サブストレートは円弧を 2 つ組み合わせた最大斜度が 25 °の凹凸を持つ形状である。

図 2 に造形前の形状を黒で、目標の造形形状を赤で示す。造形目標形状はトーチ送り方向に 120 mm、高さ 20 mm の立壁形状である。

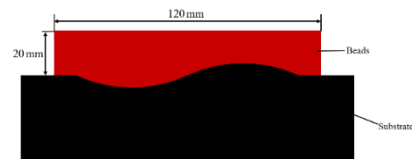


Fig. 2 Target shape

図 3 に実験で得られた造形物を示す。(a)はトーチ高さとトーチ送り速度を制御した場合の造形物、(b)はトーチ送り速度のみ制御した場合の造形物、(c)はトーチ高さのみ制御した場合の造形物、(d)は制御を行わなかった場合の造形物である。(a)と(b)は同一ビード内でもビード高さが 2 倍程度変動しているが、(c)と(d)においては同一ビード内の変化量が 2 割程度となった。(d)より、制御を行わない場合においても造形物上面形状が目標形状である平面へ近づいていくことが判明した。WAAM において、造形直後のビードは粘性をもった液体である。液体の状態では重力の影響を受けるとビードの金属が高部から底部へと移動する。また、図 4 に示すようワイヤが溶融し滴下されるため、滴下直後に表面張力の影響を受け斜面に垂直な半球となる。そのため底部が高く、高部が低くなるため平面に近づいたと考えられる。

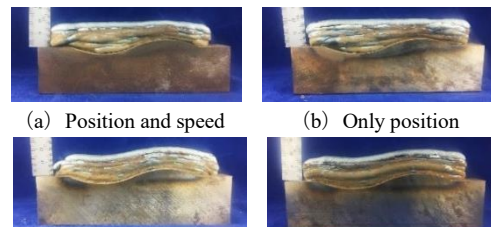


Fig. 3 Fabricated objects

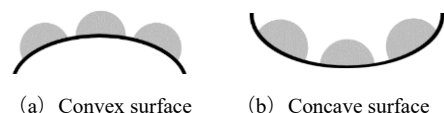


Fig. 4 Fabricating transition

図5に目標形状と造形形状の差の推移を示す。トーチ送り速度の制御をすることにより、目標形状に近い形状を得られていることが判明した。また、トーチの移動を造形物上面形状に沿って行う場合と、沿わず直線的にトーチを移動させる場合において、造形物形状に差は生じないことも判明した。

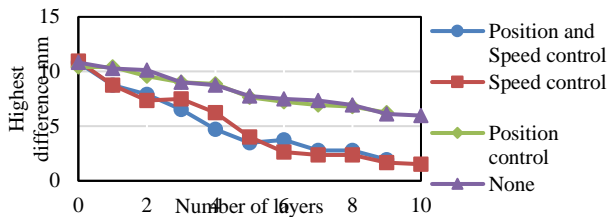
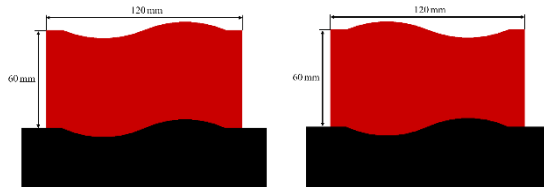


Fig. 5 Effect of position and torch speed on difference between target shape and base shape

3.3 造形形状制御実験

次に曲面の被積層面上に曲面を最終目的形状とする造形を行った。造形物目標形状は図6に示す形状であり(a)は被積層面の初期形状を同位相で上方に移動した形状であり、(b)は凹凸を逆にし、逆位相とした形状である。これを60mmの高さ変化の中で実現する。

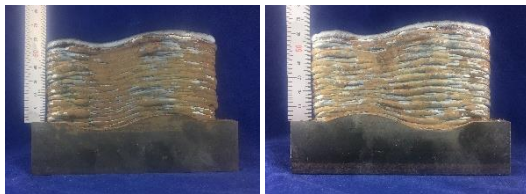


(a) Same shape

(b) Antiphase

Fig. 6 Target shape

図7に造形結果を示す。(a)と(b)の両者ともに30層で造形が終了した。前項より制御を行わなかった場合は上面形状平面に近づいていくことが判明しているが、本造形物においては目標形状に近い形の造形上面が生成されていることがわかる。



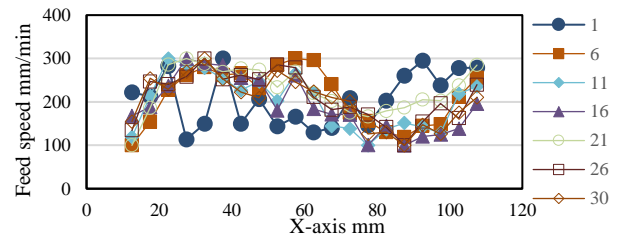
(a) Same phase

(b) Antiphase

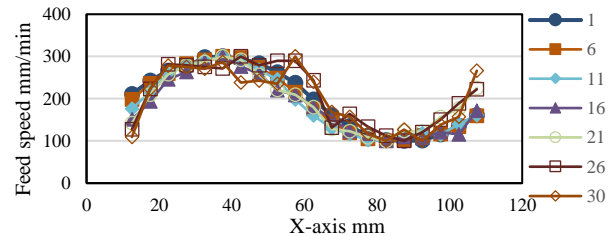
Fig. 7 Fabricated objects

図8にトーチ送り速度の推移を示す。被造形物上面形状と造形目標形状を比較し、差が最大の地点のトーチ送り速度を最も遅くすることで高く積層し、差が最小の地点のトーチ送り速度を最も早くすることで低く積層することにより、造形形状を造形物目標形状に近づけることができる。(a)の同位相の造形物において、1層目の造形時のトーチ送り速度のばらつきが大きく、6層目以降造形時は凸部でトーチ送り速度が低く、凹部で高くなることが確認できた。サブストレートの形状は目標形状と同一であるため、1層目の速度は一定となるはずである。原因としては、距離センサとサブストレートの座標を手動で合わせたため、測定位置がずれたことが考えられる。以降の造形で生じた速度差は、造形目標形状によるものだと考えられる。前述したよう、WAAMにおいて凸部は低く盛り、凹部は高く盛られる。それを打ち消す作用として、速度差が生じたと考えられる。

(b)の逆位相の造形において、常にサブストレートの凸部においてトーチ送り速度が高く、凹部において低い。これは目標形状との差がトーチの送り速度に表れたためである。



(a) Same phase



(b) Antiphase

Fig. 8 Transition of speed

図9に目標形状と造形形状の差の推移を示す。両者において、目標形状と造形形状の差が4mm付近に収束していることがわかる。本実験で使用している条件において、造形目標に対する造形物の精度の限界が4mm付近であることが判明した。

逆位相の造形において、1層あたりの目標形状への修正幅は造形が進むにつれて少なくなっていくことが確認できる。本実験の目標形状とサブストレート形状を比較すると、まず上面形状を平らにし、その後盛り上がった上面形状を作成する手順となる。そのため、重力と表面張力の影響が目標形状の造形を補助する作用から邪魔する作用へと変化することがわかる。そのため、造形が進行するにつれて形状の補正効果が小さくなったと予想される。

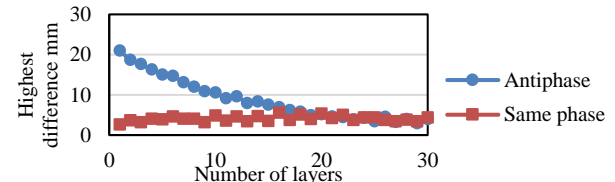


Fig. 9 Difference between target shape and model shape

4. 結 言

本研究では造形高さと同位相のトーチ送り速度を制御し、所望の高さ分布を持つ形状の造形を行うシステムを開発した。トーチの移動を造形物上面形状に沿って行う場合と、沿わず直線的にトーチを移動させる場合において、造形物形状に差は生じないことが判明した。トーチ送り速度を被造形物上面形状と造形目標形状の差に応じて変化するように制御することによって、所望の高さ分布の造形物上面形状の造形を可能とした。

文 献

- (1) Wohlers Associates, Inc. "Wohlers Report 2019" (2019)
- (2) 吉岡亨, 笹原弘之, 中野佑紀, ワイヤ+アーク方式の金属AMにおける温度と形状のモニタリングと造形へのフィードバック, 2019年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2019) pp. 496-497.
- (3) T.Kamioka, S.Ishikawa and H.Sasahara, Fabrication of Elbow Pipe by Direct Metal Lamination Using Arc Discharge while Maintaining the Molten Pool in a Horizontal Position, Int. J. of Automation Technology, 4, 5 (2010) pp.422-431.