

Generative Design を活用した軽量化ロボットアーム部品の開発

Development of Lightweight Robot Arm Components Using Generative Design

○真所 最 (栞山本金属製作所) *1 後藤 浩二 (九州大学 大学院工学研究院 海洋システム工学部門) *2

*1 Sai MADOKORO, Yamamoto Metal Technos Co., Ltd., 5324 Haga, Kita-ku, Okayama, Japan, 701-1221, madokoro@yamakin.co.jp

*2 Koji GOTOH, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, Japan, 819-0395, gotoh@nams.kyushu-u.ac.jp

キーワード: 積層造形, 3D プリンタ, Generative Design, 産業用ロボット

1. 緒 言

近年, 3D プリンタを活用した積層造形 (Additive Manufacturing: AM) 技術の進歩が著しく, 造形方式や素材の違いにより多種多様な 3D プリンタが市場に投入されている. その市場規模は年々増加しており, 航空宇宙分野, エネルギー・産業機器分野, 医療分野に加え, 自動車分野などにも展開されている^{(1), (2)}. AM 技術が進歩すると共に注目を集めているのが構造最適化手法の一つであるジェネレーティブデザイン (Generative Design: GD)^{(3), (4)}であり, GD を活用することで高剛性化・軽量化された部品設計が可能となる. しかし, GD で構造最適化されたモデルは形状が非常に複雑で, 切削加工や鋳造, 鍛造などの一般的な機械加工による製作が困難である場合が多い. その点 AM はその特性上, 対象のモデル形状の複雑さは製作の難易度にほとんど関係なく, むしろ対象モデル形状が複雑であるほどその付加価値を最大限発揮できることが特徴であるため, GD により高剛性化・軽量化された複雑形状の部品を AM によって製作・運用することが注目されている⁽⁵⁾.

著者らは GD を活用することにより, 必要な強度を保ちつつ軽量化した部品を AM によって製作し, 機械加工プロセス, 特に切削加工現場の生産ライン自動化において使用される産業用ロボット⁽⁶⁾に実装することを検討している.

1.1. 切削加工現場での産業用ロボット運用について

切削加工現場では, 多品種の生産に対応できるライン構築が求められており, 同一の設備を用いながらも大きさや形状の異なる多種多様な製品加工を自動化させることが一般化しつつある. その生産ラインで使用される産業用ロボットにおいても, 多品種製品・ワークの把持や搬送に対応するためにロボットハンド部品を都度交換したり, 延長部品を追加装備してアームの長さを変更することでリーチを調整したりと, 様々な工夫がなされている. さらには, 高速稼働による作業効率の向上や, モーター負荷低減のために各種部品が軽量であることが望ましい⁽⁷⁾.

1.2. 従来部品の課題および解決方法

著者らは, 図 1 に示す「アームブロック」と称するアルミニウム合金製の部品を切削加工により製作し, 複数個を結合する形式でロボットに装着することによりアーム長さ

を自由に変更してリーチを調節することで, 多様な生産ラインに適用させてきた. しかしこのアームブロック 1 個の重量は 640g であり, 例えば一般的な 7kg 可搬のロボットにアームブロック 1 個を取付けるだけで可搬重量に対して約 10%を占め, 複数個連結して装着すればさらに大きな割合を占めることとなり, 製品の重量次第では搬送ができない, または高速稼働ができないという課題が生じていた. この場合, ロボット自体を大型化しなければならない場合や, ロボットの動作速度を大幅に低下させる必要があり, 生産ラインの大型化やコストアップにつながるものが懸念される.

従来部品への軽量化が求められている中, 前述のアームブロックを対象として GD を活用した軽量化設計を実施して AM により製作し, その効果やデザインについて従来部品との比較を基に検討した.

2. Generative Design の実施と評価

2.1. Generative Design と AM 製作の条件

GD による構造最適化は, AUTODESK 社の 3D CAD ソフトウェアである「Fusion360」を使用し, 表 1 に示す条件で解析を実施した. GD により生成されたモデルは, EOS 社製粉末床溶融結合方式 (Powder Bed Fusion: PBF) 3D プリンタの「M290」を使用し, GD 解析と同じく素材を AlSi10Mg として製作した.

2.2 比較実験

従来の切削加工製アームブロックと, GD により構造最適化した AM 製アームブロックの性能比較として, 構造最適化前後の重量比較に加え, ロボットでの動作検証方法として図 2 に示す FANUC 社製 6 軸協働ロボット「CR-7iA/L」



Fig. 1 "Arm Block" manufactured by cutting

Table 1 Generative Design analysis conditions

| | | |
|------------------------------|---------------------------------|------|
| Material | AlSi10Mg | |
| | Young's Modulus (GPa) | 71 |
| | Density (g/cm ³) | 2.67 |
| | Yield strength (MPa) | 240 |
| | Ultimate tensile strength (MPa) | 460 |
| Lower limit of safety factor | 2 | |
| Maximum load (N) | 200 | |

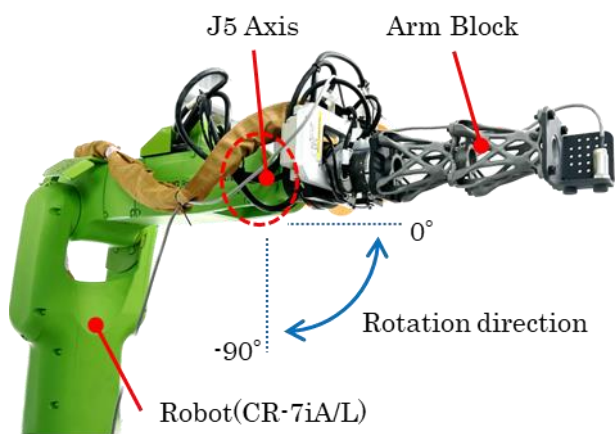


Fig. 2 Schematic illustration of performance comparison experiment

にアームブロックを2個取付け、J5軸を水平位置(0°)から垂直位置(-90°)まで90°下方に回転させてから、再び水平に往復動作させたときのモータートルクを発生させている実効電流成分を比較した。J5軸の軸位置(角度)および電流出力値はコントローラシステム変数(サーボ情報の内部パラメータ)を取得することで外部PCに出力できる。また、GDの特徴的な形状についても、機能性とデザイン性の観点から評価を行った。

3. 結果および考察

3.1. Generative Design 前後の重量比較

図3にGDにより軽量化したAM製アームブロックを示す。切削加工製アームブロックの重量が640gであるのに対し、AM製アームブロックの重量は150gであり、従来から約75%の重量削減という大幅な軽量化を達成した。この結果、アームブロックの使用数を増加するほど軽量化の効果は大きくなり、可搬重量に対しての製品・ワーク搬送の重量割合や動作範囲に余裕が生まれるだけでなく、安定した高速稼働の実現が期待できる。加えて、これまでよりも小型のロボットも採用できるため、生産ラインのコンパクト化やコスト削減につながると考えられる。

3.2. デザイン性の評価

GDにより軽量化したアームブロックのデザインについて、最適性と創発性^{(8),(9)}に注目すれば、軽量化という目的に対する「最適性」が発揮されたことに加え、人間が簡単には思いつかない新奇性のあるデザインが生成されたことによる「創発性」のある部品としても成立していると判断できる。さらに、ユーザが抱く感性工学的な観点での満足度(デライト)^{(10),(11)}について着目しても、GDは特徴的なデザイン解を生成するツールとして有用なものであると考えられる。

GDによる構造最適化モデルは、AMで製作することにより付加価値を最大限発揮でき、デザイン性に優れるものであると評価した。

3.3. モータートルク発生電流の比較

図4に切削加工製およびAM製アームブロックを取付けたロボットのJ5軸位置(角度)とモーター電流出力値の関係を示す。J5軸を水平位置(0°)に保っている状態では、姿勢を維持するための電流値が切削加工製で約1.2A、AM製で約0.8Aと、切削加工製の電流値が1.5倍程度高いことがわかる。ロボット停止時の姿勢維持のためにも電力は消費されており、軽量化による消費電力の低下が期待できることが示唆された。また、垂直位置(-90°)から水平位置(0°)まで上方への回転動作するときのピーク電流にも差が確認でき、切削加工製で約1.8A、AM製で約1.3Aと、ここでも切削加工製の電流値が1.4倍程度高いことを確認した。軽量化による消費電力の低減、それに伴うモーター負荷の低減(長寿命化)につながると期待される。



Fig. 3 "Arm Block" manufactured by AM

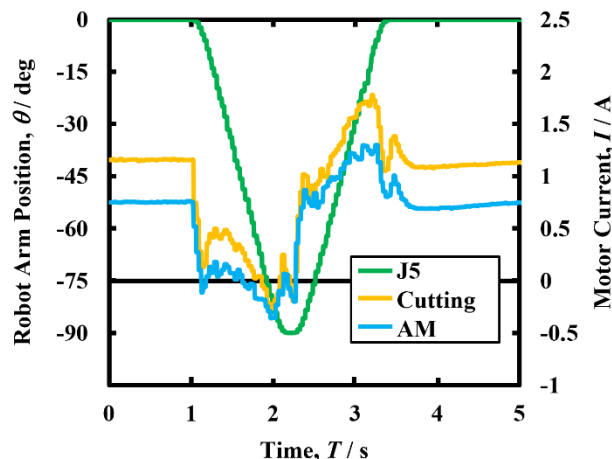


Fig. 4 Relationship between robot arm position and motor current

4. 結言

本研究では、産業用ロボットのアーム延長用部品を対象に、従来の切削加工製と、GDによる構造最適化をしたAM製の比較を実施しその効果を検討した。得られた結果を次に示す。

- 1) 従来の切削加工製アームブロックの重量が約 640 g であるのに対し、AM 製アームブロックの重量は約 150 g であり、GD により約 75%の軽量化を達成した。
- 2) GD により生成されたモデルのデザインについて、AM で製作することにより付加価値を最大限発揮でき、最適性や創発性、デライトの観点から見ても優れたデザインであると評価した。
- 3) 6 軸協働ロボットにアームブロックを 2 個取付けた際、J5 軸を 0° (水平) 位置に保つ状態では、切削加工製に比べて AM 製のモーター電流出力値が 33%低下した。また、-90° (垂直) 位置から 0° (水平) 位置まで上方への回転動作するときのピーク電流では、切削加工製に比べて AM 製のモーター電流出力値が 28%低下した。省電力化や、モーター負荷低減による装置の長寿命化が期待できる。

文 献

- (1) 京極秀樹：金属積層造形技術概説，日本船舶海洋工学会誌，104, (2022), 2-7.
- (2) 萩原恒夫：樹脂系三次元積層造形（3D プリンティング）技術概説，日本船舶海洋工学会誌，104, (2022), 8-15.
- (3) Buonamici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Volpe, Y. and Governi, L.: Generative Design: An Explorative Study, *Computer-Aided Design & Applications*, 18, 1 (2021), 144-155.
- (4) Seowoo, J., Soyoun, Y. and Namwoo, K.: Generative Design by Reinforcement Learning-Enhancing the Diversity of Topology Optimization Designs, *Computer-Aided Design*, 146, (2022), 103225.
- (5) Pilagatti, A. N., Atzeni, E. and Salmi, A.: Exploiting the generative design potential to select the best conceptual design of an aerospace component to be produced by additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125, (2023), 5597-5612.
- (6) 野田哲男：ものづくりにおける産業用ロボットの展開と今後の課題，システム/制御/情報，65, 3 (2021), 78-84
- (7) Bugday, M. and Karali, M.: Design optimization of industrial robot arm, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22, (2019), 346-352.
- (8) 木山順正, 佐藤浩一郎, 寺内文雄：時系列変化に着目した Generative Design 研究の特徴分析, 日本機械学会第 28 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 18, 11(2018), 1209.
- (9) 佐藤浩一郎, 木山順正, 小林弘侑, 寺内文雄: Generative Design 研究における創発性と最適性, 日本機械学会第

29 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 19, 35(2019), 3403.

- (10) 寺西正俊, 西田一人, 中野貴由, 田中敏宏, 掛下知行: 積層造形技術による金属製カスタム照明の開発とデライト価値の創出, までりあ, 5, 1 (2016), 18-20.
- (11) 寺西正俊, 西田一人, 中野貴由, 荒木秀樹, 田中敏宏: 金属 3D プリンタ技術によるカスタム照明の開発, 粉体および粉末冶金, 63, 2 (2016), 82-84.