

トポロジー最適化ヒューマンロボットアームの レーザ式粉末床溶融法による造形

池庄司 敏孝*1, 匂梅 秀輝*2, 米原 牧子*3, 京極 秀樹*4

Topology optimized human robot arm fabricated by laser beam powder bed fusion

Toshi-Taka IKESHOJI*1, Hideki KOBAI *2, Makiko YONEHARA, and Hideki KYOGOKU*3

A topologically optimized forearm of human-robot arm was fabricated using the laser beam powder bed fusion. The starting model of a truncated cone shape with a top circle of $\text{Ø}50\text{mm}$, a bottom circle of $\text{Ø}80\text{mm}$, and a height of 200mm was topologically optimized with the goal of minimizing mass under the constraint of maximum local von Mises stress. As a result, the shape of the model changed according to the maximum allowable local von Mises stress after topology optimization, and the mass was significantly reduced while maintaining the mechanical properties. The dimensions of the modeled object were in close agreement with the CAD model.

Keywords: Topology optimization, laser beam powder bed fusion, AlSi10Mg, Maraging steel

1. はじめに

近年、我が国のみならず世界的に高齢化社会を迎えつつあり、労働力不足などの社会問題の解決方法としてロボットの導入が期待されている。ロボットの導入は単純労働のリプレースなどの産業用途以外にも、人を支援し、人と日常生活をともにできるヒューマンロボットの研究開発が多くなされている。ヒューマンロボットは、将来、オフィス、福祉・医療施設、家庭の中で人間の行動を手助けし、人々の日常生活を支えることが期待されている^(1,2)。ヒューマンロボットは人の生活の場に自然に溶け込むことができるようにするにはヒューマンロボット本体の小型化、軽量化が必要である。更に、ヒューマンロボットが、人間同士のように自然に人間とインタラクションを開始するためには、人間に信頼感や親近感を持たせるようなインターフェースのデザインが必要となる⁽³⁾。人間に信頼

感や親近感を与えるデザインとは、人と同じような身体表現ができるデザインであり⁽⁴⁾、三次元自由形状が多用される。そこで、本研究では近年研究開発が進展してきたトポロジー最適化設計のロボットアームへの適用と三次元自由形状の部品を製造可能な AM 技術によるロボットアームの製作を試みる。

従来、製品設計では形状最適化設計が適用されてきたが、金属 AM 技術ではトポロジー最適化設計した製品を製造できると期待されている⁽⁵⁾。トポロジー最適化とは、形状最適化の手法である。トポロジー最適化は、環境条件を設定すれば初期形状では穴のない形状でも最適化の結果、穴を開ける事ができる。即ち、穴の有無といった幾何的位相 (トポロジー) を変化させて最適化が可能である。トポロジー最適化には均質化法、密度法、レベルセット法の三分類があるが、密度法は、各要素の材料密度から材料分布を表現し形状を決める⁽⁶⁾。そのため、粉末の層を積み上

原稿受付 2022年10月16日

*1 近畿大学次世代基盤技術研究所 客員准教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番)

技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構; TRAFAM 研究員 (〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町 1 丁目 10-4 丸石ビルディング 5 階) E-mail ikeshoji.tt@hiro.kindai.ac.jp

*2 近畿大学工学部ロボティクス学科 (〒739-2245 東広島市西条 5 丁目 2-5-1)

*3 技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構; TRAFAM 研究員 E-mail yonehara@hiro.kindai.ac.jp

*4 近畿大学次世代基盤技術研究所 特任教授 E-mail kyogoku@hiro.kindai.ac.jp

連絡先: 池庄司敏孝 (研究代表者)

げていく方法を用いる際は、密度法が最適だと考えた。

AM 技術(付加製造技術, Additive Manufacturing; AM)は従来の加工法では困難な三次元複雑形状の部品や製品の製造が可能な技術である。また、ラティス構造といった軽量化や種々の機能を付与できる技術である。最近では、AM 製造装置や原料である粉末の性能向上により高品質の製品の製造が可能となってきた⁷⁾。金属 AM 技術の中でも粉末床溶融結合(パワーベッドフュージョン, PBL-LB)は、材料が粉末でその粉末を溶かすことによって製造するため自由度が高く細かい複雑な形状を製造できる。そのため、本研究では PBL-LB 法を用いる。

本研究では家庭の日常生活で人間が持つものを代わりに持ってくれるような人間の行動を手助けするヒューマンロボットを対象とする。例えば、人間が日常的に持つには重い約 10kg の水を持たせると仮定し、ロボットアームに付加する荷重を設定条件とし、ヒューマンロボット全体の設計をする前に、ロボットアーム前腕部のみを対象とする。

本研究では、ヒューマンロボットのロボットアーム前腕部のトポロジー最適化設計と AM 技術による製造を行う。また、本研究では、トポロジー最適化手法のうち、密度法を用いてヒューマンロボットのロボットアーム前腕部の構造最適化形状を提案する。提案した形状の部品を PBL-LB 法で製作する。そして、製作物が設計形状、設計仕様と一致しているか検証を行う。

2. ロボットアーム前腕部のトポロジー最適化解析

2.1 解析方法

ロボットアーム前腕部構造を密度法によるトポロジー最適化により形状最適化した。

ヒューマンロボットのロボットアーム前腕部を想定したトポロジー最適化の固定設計領域を上円が $\varnothing 50\text{mm}$ 、底円が $\varnothing 80\text{mm}$ 、高さが 200mm の円錐台とした(図 1)。

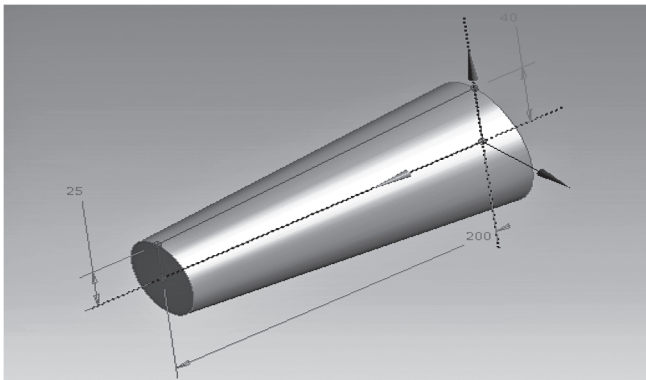


図 1 ロボットアーム前腕部のトポロジー最適化のための固定設計領域

円錐台は鋳造用アルミニウム合金 Al-10Si-0.3Mg 製を仮定した。Al-10Si-0.3Mg の材料特性は、ヤング率 73GPa 、密度 2.57g/cm^3 、ポアソン比 $0.33^{(8)}$ とした。

また、境界条件として上円の中心に 98N の荷重を負荷し、もう一方の端面の面を 3 軸方向とも固定とした。形状最適化の目標を質量最小とした。また、解析領域内の局所フォンミーゼス応力の最大値 $\sigma_{v,max}$ を $4.0, 2.0, 1.0, 0.5\text{MPa}$ 以下とする制約条件を課した。これらの制約条件を、それぞれ、Case1-4 とした。

本研究で使用するトポロジー最適化ソフトでは、解析結果が要素寸法に依存することから、予め最小の要素寸法を 5mm に設定した。

トポロジー最適化ソフトには汎用有限解析法ソフト ANSYS Workbench 2021R1 を用いた。

2.2 解析結果

ヒューマンロボットのロボットアーム前腕部を模した円錐台の端部 ($\varnothing 50\text{mm}$ の円) の中心に 98N の荷重を負荷し、制約条件 Case 1-4 の際の質量最小の目標を満たした最適化形状を図 2 に示す。全ての Case において、荷重負荷部の上円部と固定部の下円が円盤状に残り、その間の円錐部が肉抜きされる形状となった。最大局所フォンミーゼス応力値 $\sigma_{v,max}$ が 4.0MPa のときに最も固定設計領域内に残った体積が少なくなり、 $\sigma_{v,max}$ 値が大きくなるにつれ大きくなった。

制約条件が最大局所フォンミーゼス応力値 $\sigma_{v,max}$ 以下ということは荷重を付加した際に生じるフォンミーゼス応力の値 σ_v が部材内の全ての位置で $\sigma_{v,max}$ 値以下でなければならないということである。逆にいえば、ごく小さな部位で局所的に σ_v 値が $\sigma_{v,max}$ 値に近くなってもよいという制約条件である。そのため、Case 1 の $\sigma_{v,max} = 4.0\text{MPa}$ では残された部位が $\sigma_v \cong \sigma_{v,max}$ であり、肉抜きされた部分は $\sigma_v \ll \sigma_{v,max}$ だったと考えられる。制約条件 $\sigma_{v,max}$ 値が小さくなるにつれ $\sigma_v \ll \sigma_{v,max}$ の部位は狭くなり、肉抜きされる部位は少なくなったと考えられる。

3. 最適化構造体の PBF-LB 造形

3.1 造形方法

トポロジー最適化によって作成された最適化構造体を PBL-LB 法で製作した。本研究で使用した造形機は SLM 280HL (SLM Solutions GmbH) の造形エリアは $250 \times 250 \times 200\text{mm}^3$ だったため、前節の解析結果によるロボットアーム前腕部最適化形状の寸法を $1/4$ 倍に縮小して造形した。また、マルエージング鋼 (Maraging Steel) を用いて製作した。Case 1-4 でのそれぞれの形状を 4 個ずつ製作した(図 3)。造形条件をレーザ出力 310W 、スキャンスピード 800mm/s 、ハッチ幅 0.12mm 、積層厚さ

0.05mm,とし、体積エネルギー密度値は 64.6J/mm^3 となった。

3.2 造形結果

PBL-LB 法を用いて製作したロボットアーム前腕部の制約条件 Case 1-4 での最適化形状を図 4 に示す。トポロジー最適化により設計したロボットアームのモデルの形状に概ね一致する造形物が得られた。

寸法の検証は 造形物の寸法を三次元形状を 3D スキャナ ATOS Core を用いて測定し、CAD モデルと比較した (図 5) 。造形体の外形は CAD モデルとの偏差がほぼ 0.00mm だった。

一方、造形体内側には 0.8mm 前後の偏差があった。これは PBF-LB 法で造形で造形が困難なダウンスキン部であったためと考えられる。また、 1.00mm を超える部分はサポート部の除去が不十分な部位だった。

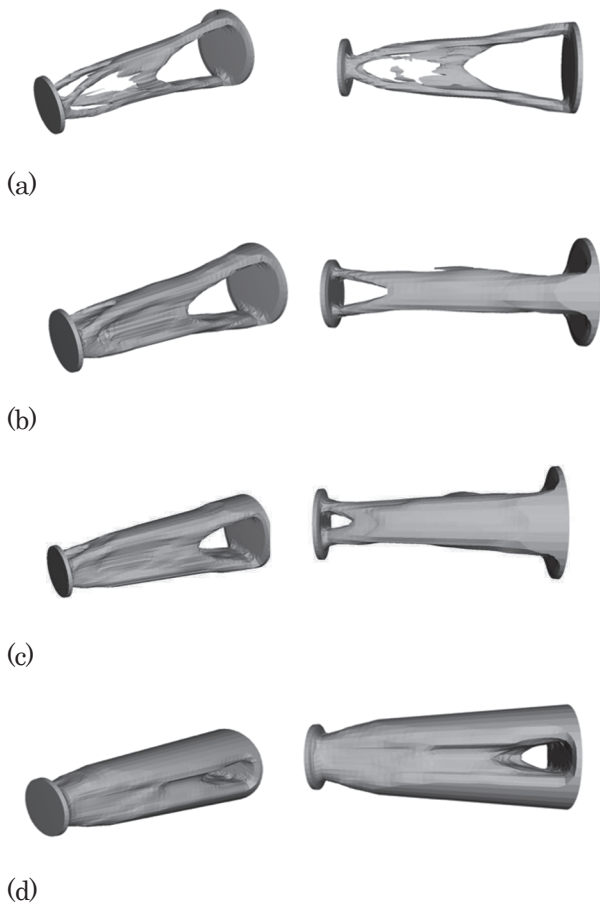


図 2 ヒューマンロボットアーム上腕部質量最小を目標としたトポロジー最適化形状。制約条件：最大局所フォンミーゼス応力値 $\sigma_{v,max}$ (a) 4.0MPa (Case 1), (b) 2.0MPa (Case 2), (c) 1.0MPa (Case 3), (d) 0.5MPa (Case 4)。

4. 結言

本研究では、ヒューマンロボットアーム前腕部を想定した上円 $\text{Ø}50\text{mm}$ 、底円 $\text{Ø}80\text{mm}$ 、高さ 200mm の円錐台を、最大局所フォンミーゼス応力を制約条件に質量最小を目標としたトポロジー最適化したモデルを作成し、



図 3 造形物のビルドプレート上の配置

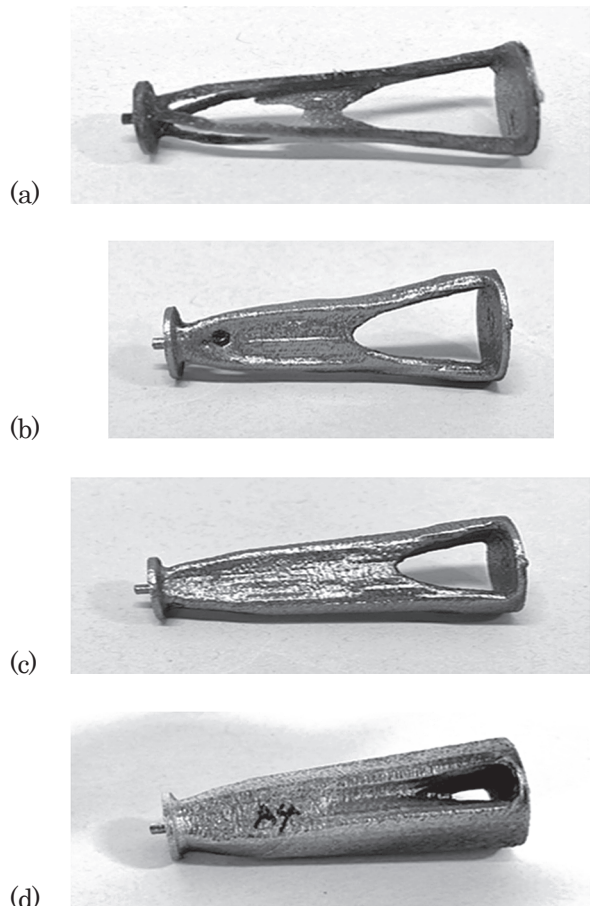


図 4 レーザ式粉末床溶融法 (PBF-LB) で造形したトポロジー最適化ヒューマンロボットアーム上腕部。制約条件：最大局所フォンミーゼス応力値 $\sigma_{v,max}$ (a) 4.0MPa (Case 1), (b) 2.0MPa (Case 2), (c) 1.0MPa (Case 3), (d) 0.5MPa (Case 4)。

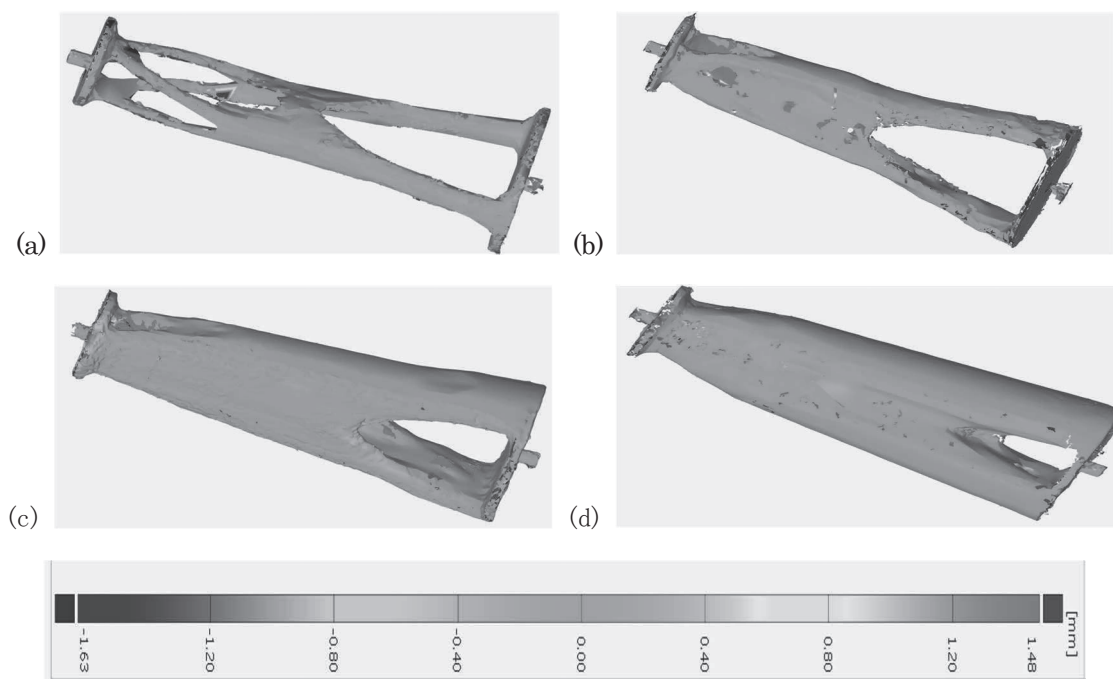


図 5 3D 造形体のスキヤナで測定した三次元形状と CAD モデルの寸法比較. カラーバーは CAD モデルとの偏差.

PBF-LB 法で実際に製作した. その結果, トポロジー最適化後に形状は許容最大局所フォンミーゼス応力によって形状が変化し, 機械的特性を維持しつつも質量を大幅に削減できた. また, 造形体の寸法は CAD モデルとはほぼ一致した.

謝辞

近畿大学工学部ロボティクス学科ヒューマン・ロボティクス研究室の松谷祐希講師のご協力に感謝いたします. 実験での造形や測定にご協力いただいた近畿大学大学院システム工学研究科池田峻史氏, 伊藤創大氏に感謝いたします.

参考文献

- (1) 井上博允, “人間型ロボットが拓く未来社会と新産業の創成”, 日本ロボット学会誌, 22, 1(2004), pp.2-5
- (2) M.A. Salichs, R. Barber, A.M. Khamis, M.Malfaz, J.F. Gorostiza, R.Pacheco, R.Rivas, A. Corrales, E.Delgado, D.García, “Maggie: A Robotic Platform for Human-Robot Social Interaction,” 2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2006, pp. 1-7, doi: 10.1109/RAMECH.2006.252754.
- (3) 小野 哲雄, 今井 倫太, 江谷 為之, 中津 良平, “ヒューマンロボットインタラクションにおける関係性の創出”, 情報処理学会論文誌, 41, 1(2000)pp.1-9
- (4) 京極 秀樹, “ミニ特集「Additive Manufacturing(付加製造)の医療応用への展開と現状」金属積層造形技術の可能性と技術開発動向”, まてりあ, 57, 4(2018), pp. 140-144
- (5) 技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構, “～設計者・技術者のための～金属積層造形技術入門”, (2016), pp.110
- (6) 山崎慎太郎, “トポロジー最適化の概要と新展開”, システム/制御/情報, 61, 1(2017), pp.29-34
- (7) 今井倫太, “ヒューマノイドV:日常活動型ロボット「ロボビー」の開発”, 画像電子学会誌, 30, 6(2001)pp.739-744
- (8) EOS Aluminum AlSi10Mg 材料データ pp.1-9