

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	3Dプリンティング繊維強化樹脂を用いたロボットアームの基礎的検討 -第2報 関節剛性と繰り返し位置精度の比較-
Title(English)	Fundamental Study for Robot Arm made of 3D printed Fiber Reinforced Plastics -Part2: Comparison of Joint Stiffness and Position Repeatability-
著者(和文)	金澤洸輝, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄
Authors(English)	Hiroki Kanazawa, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2020講演論文集, Vol. , No. , pp.
Citation(English)	Proceedings of the 2020 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol. , No. , pp.
発行日 / Pub. date	2020, 5

3D プリンティング繊維強化樹脂を用いたロボットアームの基礎的検討 —第2報 関節剛性と繰り返し位置精度の比較—

Fundamental Study for Robot Arm made of 3D printed Fiber Reinforced Plastics -Part2: Comparison of Joint Stiffness and Position Repeatability-

○学 金澤 洸輝 (東工大) 正 難波江 裕之 (東工大)
正 鈴森 康一 (東工大) 正 遠藤 玄 (東工大)

Hiroki KANAZAWA, Tokyo Tech, kanazawa.h.ad@m.titech.ac.jp

Hiroyuki NABAE, Tokyo Tech

Koichi SUZUMORI, Tokyo Tech

Gen ENDO, Tokyo Tech

To study methods of developing 3D printed robots, I converted metal frames of the robot arm to 3D printed frames, and compared them about joint stiffness and position repeatability. Technology of 3D printing is progressively developing, and above all 3D printer which can make fiber reinforced plastics (FRP) already have been developed. So application of it to robots is expected. However, making by 3D printer depends on individual know-how, and uniform methods of developing robots doesn't exist. Therefore I converted metal frames of the robot arm to 3D printed frames, and verified problems. The joint stiffness was significantly reduced under a load in a specific direction. But the position repeatability don't deteriorated.

Key Words: Manipulator · Robot arm, 3D printer, CFRP

1 緒言

3D プリンティングでは三次元 CAD などを用いて設計した 3D データをそのまま製造に利用することができ、切削・曲げ・注型などの従来の加工法では実現できなかった形状の製作や低コスト・低環境負荷での製造が期待されている [1]。なおかつ、近年では FRP や PEEK といった高機能材料を用いることができる 3D プリンタが登場している。特に FRP は一般的な樹脂材料と比べて熱収縮が小さいため熱溶解積層法を用いた 3D プリンタとの相性がよい。それゆえ、3D プリンタ製の FRP について材料力学的見地から特性評価を行っている研究がある [2][3]。しかし、現状 3D プリンティングを用いたロボットの開発には汎用的な設計法が存在せず、開発者個人のノウハウに依存している部分がある。特に積層造形はその原理上必ず完成品に異方性が存在してしまい、予想外の変形や破断を起こす可能性がある。また、樹脂を加熱するというプロセスを挟むため、冷却時の熱収縮の影響が大きく寸法精度が低くなりがちである。そのため新たに設計・開発を行うためには使用する機器の特性を理解し、最適な調整を試行錯誤により模索しなければならず、3D プリンティングの製造の速さ等の利点を活かしきれてはいない。

そこで本研究では、3D プリンティング技術での製作を前提としたロボットの最適設計法を検討することを最終的な目的とし、本論文では既存の金属製 3 自由度ワイヤ駆動マニピュレータの構造部材を 3D プリンティング製のものに置き換えたものを製作し、その評価を行うこととする。

2 3D プリンティング製ロボットアームの製作

本研究でモデルとした金属製 3 自由度マニピュレータと今回製作した 3D プリンティング製ロボットアームを図 1 に示す。[4] このマニピュレータは根元軸 (Joint1, 以下 J1) がヨー方向に回転しアームの肩関節 (Joint2, 以下 J2) と肘関節 (Joint3, 以下 J3) がそれぞれピッチ方向に回転する。J1 並びに J2 はモータの出力を波動歯車減速機に入力し、直接関節を駆動している。J3 は、波動歯車減速機の出力をワイヤ・プーリ系に伝えテンション機構で張力を維持することで駆動している。

3D プリンティング製ロボットアームの製作にあたり、今回は金属製の構造部材のみを 3D プリントで製作し、波動歯車減速機、ベアリング、タイミングプーリといった機能部品や締結部品については金属部品を用いた。これは 3D プリンティングで製造

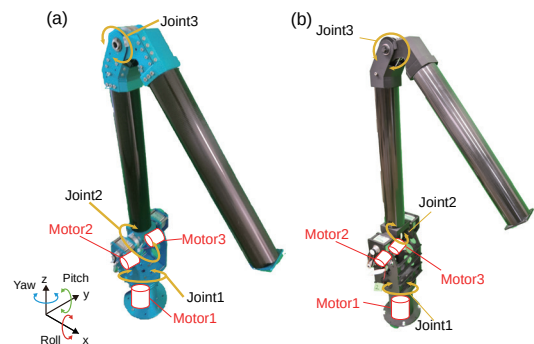


Fig.1 3-DOF robot arm made of (a)metal, (b)CFRP. Elbow joint(J3) is driven by wires.

することによって機能自体に変化をきたす可能性がある要素による影響を排除するためである。構造部材は、3D プリンターに Markforged 社製 Mark Two 及び X7 を用いて、母材に短繊維のカーボンファイバーが練りこまれたナイロン系樹脂である Onyx、繊維材に長繊維のカーボンファイバーを用いた熱可塑性 CFRP で製作した。

3 関節剛性の測定

関節剛性は、JIS B 8432:1999 に定義される静的コンプライアンスの測定に準じて J2 及び J3 関節について測定を行った。J1 関節については、設計上関節剛性が機構の構造よりも材料及びベアリングの剛性に依存するため予測が容易であると考え、測定を行わなかった。図 2 に示す装置を製作し、アーム部の先端に負荷をかける。負荷はベース座標系の xyz 軸に平行な方向のそれぞれ正負両方の方向に定格負荷の 10%ずつ、100%になるまでかけていき、負荷を増やすごとに変位を測定する。今回の実験では定格負荷の 100%を 506g(=4.96N) とした。ただし、J2 関節に z 方向の負荷をかけた時などは、装置に対して変位が大きくなり、負荷に用

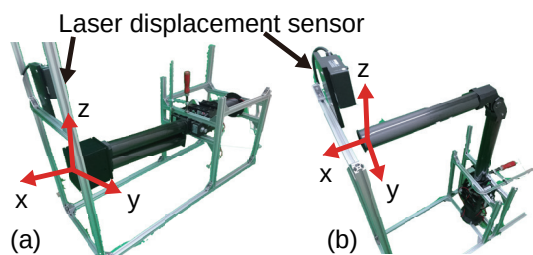


Fig.2 Machine for measuring joint stiffness.(a) for J2, (b) for J3.

Table 1 The absolute value of compliance at each joint.[mm/N]

J2	x+	x-	y+	y-	z+	z-
3D printed arm	0.499	0.0208	1.04	0.908	3.96	1.82
Metal arm	0.392	-	0.210	0.172	0.894	0.262
J3	x+	x-	y+	y-	z+	z-
3D printed arm	0.395	0.164	1.95	1.98	67.0	60.3
Metal arm	0.407	0.375	0.504	0.524	8.06	4.91

Table 2 Displacement at each joint after removed load.[mm]

J2	x+	x-	y+	y-	z+	z-
3D printed arm	0.101	0.0230	2.36	-2.36	0.520	-0.124
Metal arm	-0.200	-	0.0664	-0.109	1.87	0.0372
J3	x+	x-	y+	y-	z+	z-
3D printed arm	0.556	-0.353	1.08	-1.51	22.8	-64.1
Metal arm	0.374	-0.344	0.0935	-0.117	0.611	-6.06

いた重りが接地してしまい十分なデータ数が取れなかったため、図2に示す装置を時計回りに90回転させ実験を行った。今回の実験では関節それぞれの剛性を測定したいため、測定する関節以外はアルミフレームなどに固定されている。また、負荷を定格負荷の100%までかけた後、除荷し、その際に残留していた変位についても測定した。ただし、金属製アームのx軸負方向に関しては装置の構成上測定できなかった。

表1に関節剛性の値を示す。J2関節,J3関節共にx軸方向の負荷については金属製と3Dプリンティング製で大きな差はなく、J3関節に関してはわずかであるが、3Dプリンティング製アームのほうが優れた結果を示した。しかし、y軸、z軸に関しては3Dプリンティング製アームの方が剛性が非常に低い。特にJ3関節のz軸方向については負荷を保持できておらず、これは伝達機構に問題があると考えられる。

また、残留変位の値を表2に示す。残留変位についても関節剛性と同様にy軸、z軸方向の負荷に対して3Dプリンティング製アームの方が除荷後の残留変位が大きい傾向がみられる。

これらの原因として、ワイヤ駆動系のテンショナが考えられる。図3に示す通り、J3関節にはテンショナが取り付けられており、このテンショナによってワイヤの張力を一定以上に保つことができる。テンショナの内部構造を図4に示す。このうちTensioner1とOne Way Clutch, Tensioner2とSteel Pipeは圧入で組み立てられているが、この圧入面で滑りが生じているものと考えられる。3Dプリンティング製の部品は表面が柔らかく、本来の圧入の強度が発揮できていないものと考えられる。

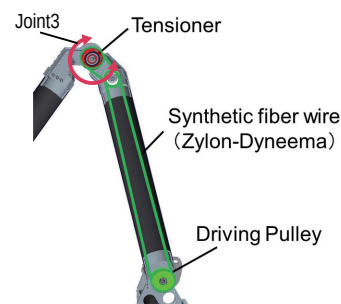


Fig.3 Structure of J3 joint. J3 joint is driven by wire.

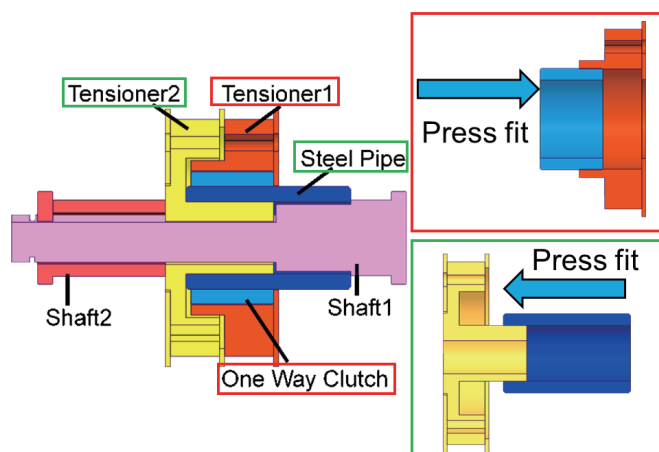


Fig.4 Mechanism of tensioner.Tensioner1 with one way clutch and Tensioner2 with steel pipe are press-fitted.

4 繰り返し位置精度の測定

繰り返し位置精度は、JIS B 8432:1999に定義されるポーズ繰り返し精度に準じて測定を行った。ロボットアームの可動域内に図6で示されるような立方体を設定し、その中の5点に対して同じ方向から指定回数近づけ、その時の位置精度を計測した。今回は図5に示す装置を製作し、アームを指定回数レーザ変位計に近づけ、その時の変位から繰り返し位置精度を求めた。先端の変位測定ではアームに取り付けた立方体のターゲットの平面にレーザを当てるのが便利のため、今回は基準座標系に円筒座標系を用いた。ただし、使用できるレーザ変位計に限りがあるため、今回の実験ではz,r,θそれぞれの座標軸での変位を個別に測定している。ポーズ繰り返し精度は、それぞれの座標の平均と標準偏差から算出するので、座標のばらつき方は互いに独立と考え、この方法を採用した。

今回の実験で得られた繰り返し位置精度を表3に示す。3Dプリンティング製アームと金属製アームを比べると、全体的な傾向は存在せず、測定点ごとに精度が高い方が異なる。ただし、今回の実験では絶対的な位置精度については測定できていないことに留意したい。それゆえ、前章での結果を考慮すれば、3Dプリンティング製アームの場合、500g程度の重量物を負荷した時に絶対的な位置精度は低下するが、繰り返し位置精度は金属製アームと比べてあまり大きく低下することはないと考えられる。絶対的な位置精度も関節の剛性や伝達機構の改良を行えば改善すると期待できるため、十分な性能を持ったロボットアームが3Dプリンティングでも開発できる可能性が高い。

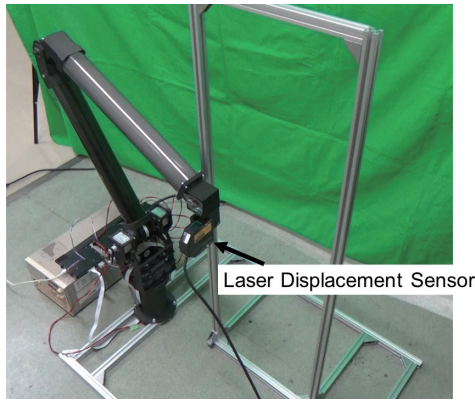


Fig.5 Machine for measuring position repeatability.

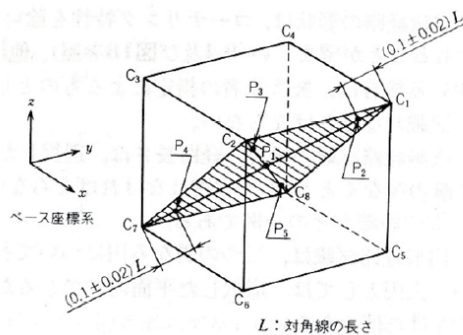


Fig.6 Target points for repeatability experiment.[5]

Table 3 Position repeatability at each path.[mm]

	3D printed	Metal
P1 → P5	1.50	1.97
P5 → P4	0.833	0.754
P4 → P3	1.60	2.45
P3 → P2	1.02	1.38
P2 → P1	0.588	1.07
Average	1.11	1.52

5 結言

本研究では既存の3自由度マニピュレータをモデルとした3Dプリンティング製ロボットアームを製作し、関節剛性と繰り返し位置精度について評価を行った。その結果、ある方向の負荷に対して著しく関節の剛性が低下していることが確認された。これは伝達機構に起因するものであると考えられる。一方で、繰り返し位置精度については有意な変化は確認できなかった。

本論文で明らかになった問題点は3Dプリンティング技術のロボットへの適用の大きなハードルといえる。しかし、3Dプリンティング技術は形状自由度が切削加工などと比べて高く、また、形状を容易に変更することができる。例えば本論文で問題となった関節の低剛性もリブを追加したり、断面形状を工夫したりすることで容易に対処できる。今後は本論文で明らかになった問題に対処しつつ、3Dプリンティングだからこそできる構造や組み立て法を模索し、最適設計法を検討していく。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです。

参考文献

- [1] 蒲生秀典, "デジタルファブリケーションの最近の動向—3Dプリンタを利用した新しいモノづくりの可能性—", 科学技術動向, Vol.13, No.8, pp.19-25, 2013
- [2] Frank van der Klift, Yoichiro Koga, Akira Todoroki, Masahito Ueda, Yoshiyasu Hirano, Ryosuke Matsuzaki, "3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermo-Plastic(CFRTP) Tensile Test Specimens", Open Journal of Composite Materials, Vol.6, No.1, pp.18-27, 2016
- [3] 古賀洋一郎, 轟章, 水谷義弘, 鈴木良郎, "FDM形式の3Dプリントにおける短繊維強化プラスチックの繊維偏向と異方性特性", 強化プラスチック, Vol.63, No.12, pp.604-609, 2017
- [4] 金澤洸輝, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄, "3Dプリンティング繊維強化樹脂を用いたロボットアームの基礎的検討", 第20回システムインテグレーション部門講演会, 2019
- [5] 日本工業標準調査会 審議, JIS B 8432:1999, 産業用マニピュレーティングロボット—性能項目及び試験方法