

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	産業応用に向けた3Dプリンタ製ロボット機構部品 -第7報: 樹脂製トロコイド減速機の耐久性向上-
Title(English)	Mechanical Parts Manufactured by a 3D Printer for Industrial Robot - Part7 : Improving the Durability of Resin Trochoidal Reducer-
著者(和文)	大久保暁史, 難波江裕之, 遠藤玄
Authors(English)	Akifumi Okubo, Hiroyuki Nabae, Gen Endo
出典(和文)	第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 予稿集, , , pp. 931-932
Citation(English)	Proceedings of the 24th SICE System Integration Division Annual Conference, , , pp. 931-932
発行日 / Pub. date	2023, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2023 The Society of Instrument and Control Engineers

産業応用に向けた 3D プリンタ製ロボット機構部品

-第 7 報: 樹脂製トロコイド減速機の耐久性向上-

○大久保 暁史 (東京工業大学), 難波江 裕之 (東京工業大学), 遠藤 玄 (東京工業大学)

Mechanical Parts Manufactured by a 3D Printer for Industrial Robot

-Part7 : Improving the Durability of Resin Trochoidal Reducer-

○ Akifumi OKUBO (Tokyo Tech), Hiroyuki NABAE (Tokyo Tech), and Gen ENDO (Tokyo Tech)

Abstract: We prototyped a resin trochoidal reducer using Fused Filament Fabrication (FFF) 3D printing and evaluated its durability under extended operation. In particular, we utilized the strongest material compatible with FFF 3D printing, potassium titanate fiber-reinforced nylon. When operated for continuous periods with a maximum load of 4 Nm, the heat generated by the motor caused the resin to deform and led to motor damage. When operated with cooling, the system successfully ran for approximately 929 hours until the planetary gears failed.

1. 緒言

減速機は、ロボット製作にモータを用いる場合にはほぼ必須であり、その性能は重要である。しかし一般に性能の高い減速機は、重く、高価であり、市場で入手可能なものの中から納期なども考慮し要求仕様を満たすものを選択しなければならない。もし減速機を一から試作することができれば、より高い設計自由度や、減速比の最適化によるロボットの性能向上が期待できる^[1]。

ところで、熱溶融積層 (FFF) 方式の 3D プリント技術は近年大きく発達しており、特に材料の強度の向上によって、負荷のかかる機構部品にも 3D プリントにより造形した部品を使用できる可能性がでてきている。もし減速機を 3D プリントにより試作することができれば、迅速で低コストな開発が可能となり、設計自由度は向上する。また、樹脂で製作することによる軽量化も見込める。

3D プリントによる減速機の試作はすでに行われているが^{[2][3][4]}、それらの多くは概念実証に留まっており詳細な性能評価はされておらず、実用性については十分に検証されていない。

本論文は、FFF 方式 3D プリンタを用いて樹脂製トロコイド減速機を試作し、長時間動作によりその耐久性を評価することを目的とする。特に材料については、従来の 3D プリント材料の acrylonitrile butadiene styrene (ABS) や polylactic acid (PLA) などに比べ強度の高い、チタン酸カリウム繊維強化ナイロン樹脂 (POTICON NTL34M, 大塚化学 (株))^[5] を用いた。

2. 使用した材料

材料には POTICON NTL34M を用いた。その物性を表 1^{[6][7][8]} に示す。POTICON はチタン酸カリウム繊維強化ナイロン樹脂であり、カーボン長繊維を用いない通常の FFF 方式 3D プリンタで使用できる樹脂としては知りうる限り最も強度の高い材料である。また、マイクロ補強性、寸法精度、摺動性に優れるといった特徴があり、ウォッチギアなどにも使用されている。

3. 試作したトロコイド減速機

試作したトロコイド減速機の詳細を図 2 に示す。アクチュエータにはブラシレス DC モータ (EC 45 flat 80 W, マクソンジャパン (株)) を用いた。定格出力は 80

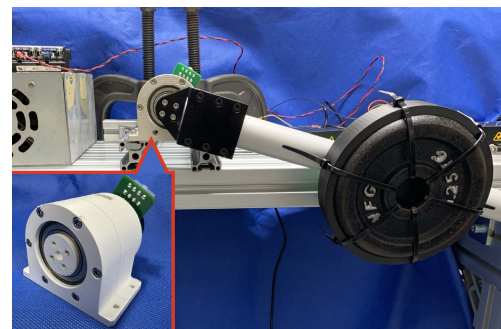


Fig.1 Overall image of trochoid reducer

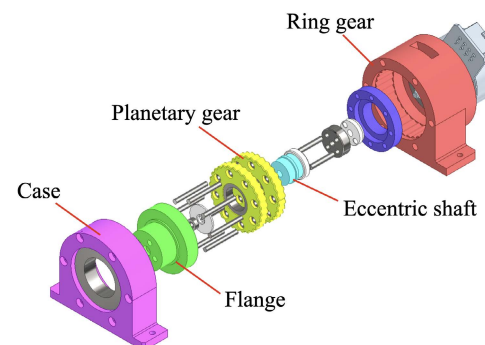


Fig.2 Exploded view of trochoid reducer

W, 減速比は 30 : 1 である。減速機はベアリング、ピン、セットカラー、六角ナット、インサートナット、ネジを除き、全て POTICON で試作している。3D プリントの造形条件は表 2 に示すとおりである。ただし、ケースとリングギアの一部は充填率 37%, 充填形状は三角形としている。

4. 長時間動作による耐久性試験

試作したトロコイド減速機に負荷をかけながら長時間動作を行うことで、耐久性を試験した。図 1 に示すように、トロコイド減速機の出力に、最大 4 Nm の負荷がかかるようおもりを取り付け、周期 10 秒の正弦波で左右に $\pm 90^\circ$ 動作させた。試験はグリース (マルテンブ AC-N, 協同油脂 (株)) を塗って行った。

この条件で動作させたところ、モータの発熱が見られたためサーモカメラ (サーモギア G100, 日本アビオ

Table 1 Mechanical properties of the materials

Material	POTICON	Onyx	ABS	PLA
Filler	Potassium titanate fiber	Carbon fiber	-	-
Tensile strength [MPa]	100	37	38	45
Bending strength [MPa]	167	71	61	92
Flexural modulus [GPa]	6.3	3.0	1.4	2.9
Heat deflection temp. [°C] @0.45 MPa	120	145	87	58

Table 2 Parameters for the 3D printing

Material	POTICON
3D printer	G-ZERO
Slicer	PrusaSlicer
Nozzle diameter [mm]	0.4
Extruder temperature [°C]	270
Pitch [mm]	0.1
Number of shells	2
Number of solid layers (top / bottom)	10 / 10
Fill density / shape	100 % / concentric

ニクス（株）を用いて温度を測定した。動作を始めてから約 12 時間後の温度の測定結果を図 3 に示す。モータコイルの温度は約 170°C、リングギアのモータ周辺部の温度は約 100°C であった。また、この温度上昇により、リングギアのモータ取り付け面が変形しモータが偏心することで、モータ内のベアリングが破損した。

次に、温度上昇の対策のため、リングギアとモータの間にアルミ板を取り付け、送風機で風を当てることで冷却しながら動作させ試験を行った。動作を始めてから約 12 時間後の温度の測定結果を図 4 に示す。モータコイルの温度は約 60°C であり、十分に冷却されていることがわかる。この条件で動作を続けたところ、約 929 時間（約 39 日間）の動作後、図 5 に示すように遊星歯車が破損した。遊星歯車が破損した原因は、ピンを通すベアリングと歯底の間の樹脂の幅が、3D プリンタの造形する線 2 本分と薄かったためと考えられる。

5. 結言

3D プリント造形により試作した樹脂製トロコイド減速機の長時間動作による耐久性を評価し、約 929 時間の動作を確認した。また、冷却を行わずに動作させると、高温により樹脂が変形しモータの破損につながるということがわかった。今後は試作したトロコイド減速機を四足歩行ロボットの TITAN-E1^[9] に搭載する予定であり、そのための耐久性が確認できた。

6. 謝辞

本稿執筆にあたり、大塚化学株式会社の材料や情報のご提供、ならびにご助言を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

貴重なコメントと議論をいただきました武居直行教授（東京都立大学）、太田祐介教授（千葉工業大学）、高木健教授（広島大学）に感謝いたします。

参考文献

[1] Hideaki YAMATO et al.: “A Partner Robot Transforming to a Vehicle: CanguRo - Design, Development and Evaluation of Its In-Wheel Drive Unit with Cycloid Gear -”,

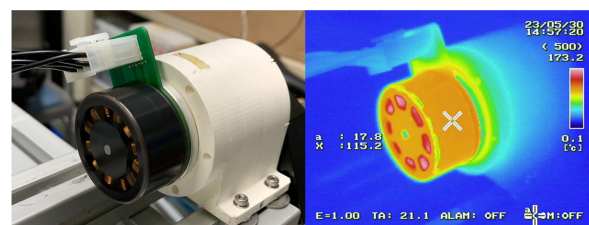


Fig.3 Temperature without cooling

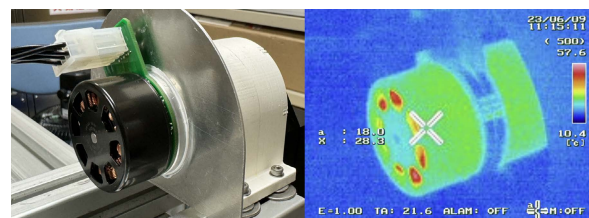


Fig.4 Temperature with cooling



Fig.5 Broken planetary gear

pp. 1205–1211, (2020). doi: 10.1109/SII46433.2020.9025922.

- [2] Kota IIZUKA et al.: “Evaluation of Compliant Robot Arm with Quasi DD Motor and Gravity Compensation Mechanism”. *The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec)* 2021, 2P3–I02, (2021). doi: 10.1299/jsmermd.2021.2P3–I02.
- [3] G. Levine: *OpenTorque Actuator - Hackaday.io*. Accessed on 18.10.2023. URL: <https://hackaday.io/project/159404-opentorque-actuator>.
- [4] Wesley Roozing and Glenn Roozing: “3D-printable low-reduction cycloidal gearing for robotics”, pp. 1929–1935, (2022). doi: 10.1109/IROS47612.2022.9982006.
- [5] Ltd. Otsuka Chemical Co.: *POTICON TISMO Reinforced Compound*. Accessed on 18.10.2023. URL: <https://www.otsukac.co.jp/en/products/chemical/poticon/>.
- [6] Inc. Markforged: *MATERIAL DATASHEET Composites*. Accessed on 18.10.2023. URL: <https://www-objects.markforged.com/craft/materials/CompositesV5.2.pdf>.
- [7] Ultimaker: *Ultimaker ABS TDS*. Accessed on 18.10.2023. URL: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759139-Ultimaker-ABS-TDS>.
- [8] Ultimaker: *Ultimaker Tough PLA TDS*. Accessed on 18.10.2023. URL: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759599-Ultimaker-Tough-PLA-TDS>.
- [9] 角田 柊平 et al.: “熱溶融積層方式による樹脂構造材を用いた四足歩行ロボット TITAN-E1 の開発”. *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2022, 2A1–Q07*, (2022). doi: 10.1299/jsmermd.2022.2A1–Q07.