

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5報:樹脂製トロコイド減速機の耐久性試験-
Title(English)	Mechanical Parts Manufactured by a 3D Printer for Industrial Robot - Part5 : Durability Test of a Plastic Trochoidal Gear 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)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2023講演論文集, , , 1A2-I20
Citation(English)	, , , 1A2-I20
発行日 / Pub. date	2023, 6

# 産業応用に向けた 3D プリンタ製ロボット機構部品

## -第5報: 樹脂製トロコイド減速機の耐久性試験-

Mechanical Parts Manufactured by a 3D Printer for Industrial Robot

-Part5 : Durability Test of a Plastic Trochoidal Gear Reducer-

○学 大久保 暁史 (東工大) 正 難波江 裕之 (東工大)  
正 遠藤 玄 (東工大)

Akifumi OKUBO, Tokyo Tech , okubo.a.ad@m.titech.ac.jp

Hiroyuki NABAE, Tokyo Tech

Gen ENDO, Tokyo Tech

An actuator unit with a reduction gear whose maximum torque was approximately 5 Nm, was fabricated using resin-molded parts produced by Fused Filament Fabrication type (FFF-Type) 3D printer modeling, and its performance was evaluated. In particular, regarding the material, potassium titanate fiber-reinforced nylon resin material, which is the strongest material applicable to the FFF-type 3D printer, was used for the modeling. The durability of the unit was evaluated through long-time operation, and it was confirmed that the gear and eccentric shaft operated for approximately 176 hours, and the flange and roller for approximately 124 hours, under a maximum load of 3 Nm. Through this experiment, we also figured out that the weakest part was the pin-shaped protrusion of the eccentric shaft.

**Key Words:** Robot, 3D printer, Reduction Gear, Resin

### 1 諸言

電磁モータをロボット用のアクチュエータとして用いる場合、そのほとんどの場合で減速機は必須のコンポーネントである。従来ロボットの試作研究では、大きさ、質量、許容トルク、減速比、価格、納期を鑑みて各自の設計仕様を満足する市場で手に入る減速機を選択してきた。もし減速機そのものから、試作することが可能となれば、より高い設計自由度と、用途に合わせた減速比の最適化により高い性能を発揮できる可能性がある [1]。

ところで近年、ノズルから材料を溶かしながら積層する Fused Filament Fabrication (FFF) 方式に代表される樹脂素材の 3D プリント技術は大いに発達している。もし 3D プリント部品を用いて減速機が構成できるのであれば、低コストかつ迅速なアジャイル開発が可能となる。また設計自由度の向上や樹脂化による軽量化も大いに望める。

実際、3D プリントによるアクチュエータユニットの試作は行われているが [2][3]、これらの試作では概念実証が目的であり、具体的な性能評価は十分に実施されておらず、実用的に使えるか否かは定かではない。

本論文は、FFF 式 3D プリンタによる樹脂成型部品を用いて、減速機付きアクチュエータユニットを製作し、その性能を明らかにすることを目的とする。特に材料に関しては、従来の acrylonitrile butadiene styrene (ABS) や polylactic acid (PLA) ではなく、より強度の高いチタン酸カリウム繊維強化ナイロン樹脂材 (POTICON NTL34M, 大塚化学) [4] (以下 POTICON と称する) を用いて造形を行った。

### 2 評価する材料

材料は POTICON を用いた。POTICON とその他の 3D プリンタ材料の物性を表 1 [6][7][8] に示す。POTICON は微細なチタン酸カリウム繊維により強化されたナイロン樹脂である。POTICON はミクロ補強性、摩擦摩耗特性、寸法精度と表面平滑性に優れており、ウォッチギアなどにも使われている。調べた限りにおいて、FFF 式で造形できる最も強度の高い樹脂である。また FFF 方式は造形時に繊維が配向する特性があるため、射出成型品に比しても強度が高まる可能性がある。

### 3 性能評価の対象

トロコイド系歯形を用いた内接式遊星歯車減速機 (以下、トロコイド減速機と称する) は、本研究室で開発している 4 足歩行ロボット TITAN-E1 [5] に搭載することを目的に設計された減速機

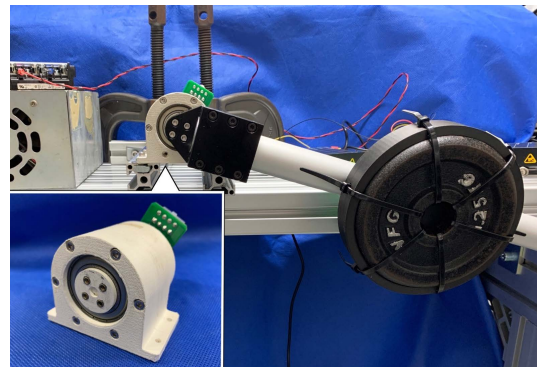


Fig.1 Overall image of trochoid reducer

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

である。概要を図 1、図 2 に示す。金属製の部品は、ベアリング、ピン、ねじ、インサート、スナッピングで、これら以外は、3D プリンタ造形された樹脂で製作されている。アクチュエータにはブラシレス DC モータ (maxon: EC 45 flat 591480) を用いている。このアクチュエータの出力に偏心軸が取り付けられ、その偏心により遊星歯車は内歯車と接触し転がりながら回転する。その際に発生する遊星歯車の自転が出力ピンを介して出力軸に伝達される。遊星歯車の歯数が 30 で内歯車の歯数が 31 であるため、減速比は 30 : 1 である。造形条件は表 2 の通りである。シェル数は造形物の側面の壁の厚さを意味する。ただし、遊星歯車のみ充填率が 100% で充填形状を同心円とした。

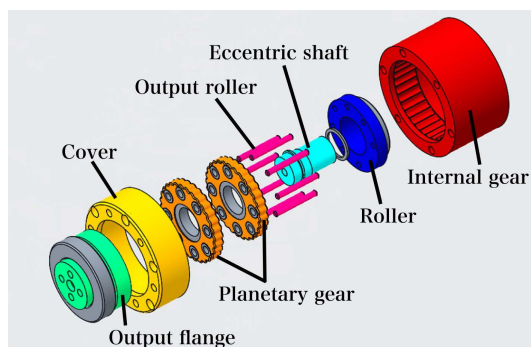


Fig.2 Exploded view of trochoid reducer

Table 2 Parameters for the 3D printing

Material	POTICON
3D printer	Raise3D Pro2
Slicer	ideaMaker
Nozzle diameter [mm]	0.4
Extruder temperature [°C]	250
Pitch [mm]	0.1
Number of shells	2
Number of solid layers (top / bottom)	10 / 10
Fill density / shape	37% / Triangle

#### 4 長時間動作による耐久性試験

トロコイド減速機の長時間動作による耐久性を評価した。図1に示すように、減速機の出力軸にアルミニウム材のパイプを固定し、最大で3 Nmのトルクがかかるようおもりにつけて動作させた。3 Nmは本研究室で開発している四足歩行ロボットTITAN-E1の2.65 kgのペイロードを載せた状態での歩行の際にかかる負荷である。動作は可動範囲±90 degを周期10秒の正弦波で行った。実験はグリース（マルテンP AC-N、協同油脂）を塗って行なった。

この条件下で長時間動作させたところ発生した問題点を以下に示す。

- (1) フランジとローラの出力ピンを挿す穴が広がりピンが傾いた。
- (2) モータの出力軸と圧入された偏心軸との間で滑りが生じた。
- (3) 歯飛びが生じた。
- (4) 遊星歯車の出力ピンを通すベアリングが外れた。

(1)の出力ピンの傾きを抑制するため、造形条件を変えて、図3に示すようにフランジを固定し、ピンにフォースゲージを取り付け手で引張ることで、ピンの傾きを測定した。

結果は、造形条件をシェル数4として固定して、ピンを挿す穴の径を変えた場合、ピンを挿す穴の径が小さい方がピンの傾きは小さかった。ピンを挿す穴の径を3.1 mmに固定して、シェル数と充填率の造形条件を変えた場合、充填率が37%でシェル数が4の場合とシェル数が8の場合を比較するとシェル数が多い方がピンの傾きは小さいが、シェル数が8で充填率が37%の場合と充填率が100%の場合では、測定範囲内では大きな差は見られなかった。

長時間動作により発生した問題点に対して行った解決策を以下に示す。

- (1) ローラとフランジの出力ピンを挿す穴の周辺を充填率100%で充填形状を同心円とした。
- (2) モータの出力軸をセットカラーでクランプし、ピン状の突起により偏心軸と回転拘束した。
- (3) 偏心軸と内歯車の歯の周辺の充填率を100%で充填形状を同心円とした。
- (4) 遊星歯車の造形途中で停止し、ベアリングを埋め込んだのち再度造形した[9]。

上記のような対策を行った結果、偏心軸と遊星歯車と内歯車は約176時間、フランジとローラは約124時間動作したところで、図4に示すように偏心軸のピン状の突起が破断した。



Fig.3 Experimental apparatus for measurement of output pin tilt



Fig.4 Break of eccentric shaft

#### 5 結言

3Dプリンタ造形による樹脂製減速機の長時間動作による耐久性を評価し、歯車部分と偏心軸は約176時間、フランジとローラは約124時間動作することを確認した。今後は、偏心軸のピン状の突起を金属製の部品にして同様の評価を行う。

#### 6 謝辞

本稿執筆にあたり、大塚化学株式会社の方や情報のご提供、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准教授（東京都市大学）、太田裕介教授（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] Yamato, H. et al., A Partner Robot Transforming to a Vehicle: CanguRo - Design, Development and Evaluation of Its In-Wheel Drive Unit with Cycloid Gear -, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (2020), pp.1205-1211.
- [2] Iizuka, K. et al., Evaluation of Compliant Robot Arm with Quasi-DD Motor and Gravity Compensation Mechanism, The 7th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM) (2021), pp.88-89.
- [3] Levine, G., OpenTorque Actuator - Hackaday.io (Online), available from <<https://hackaday.io/project/159404-opentorque-actuator>> .
- [4] POTICON TISMO Reinforced Compound, Otsuka Chemical Co., Ltd., (Online). available from <<https://www.otsukac.co.jp/en/products/chemical/poticon/>> .
- [5] 角田終平ら, 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.
- [6] Markforged, Inc., MATERIAL DATASHEET Composites (Online), available from <<https://www.objects.markforged.com/craft/materials/CompositesV5.2.pdf>> .
- [7] Ultimaker ABS TDS, Ultimaker (Online), available from <<https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759139-Ultimaker-ABS-TDS>> .
- [8] Ultimaker Tough PLA TDS, Ultimaker (Online), available from <<https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012759599-Ultimaker-Tough-PLA-TDS>> .
- [9] 金澤亮輝ら, 産業応用に向けた3Dプリンタ製ロボット機構部品, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 (2022), 2P1-L08.