

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4報：樹脂製トロコイド減速機の試作-
Title(English)	Mechanical Parts Manufactured by a 3D Printer for Industrial Robot - Part4 : Prototyping of a plastic trochoidal gear reducer-
著者(和文)	吉田賢央, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄
Authors(English)	Takateru Yoshida, 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2022講演論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2022, 6

産業応用に向けた3Dプリンタ製ロボット機構部品

-第4報：樹脂製トロコイド減速機の試作-

Mechanical Parts Manufactured by a 3D Printer for Industrial Robot
-Part4 : Prototyping of a plastic trochoidal gear reducer-

学 吉田賢央 (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)

Takateru YOSHIDA, Tokyo Tech
Hiroyuki NABAE, Tokyo Tech
Koichi SUZUMORI, Tokyo Tech
Gen ENDO, Tokyo Tech, endo.g.aa@m.titech.ac.jp

In this study, we investigate the applicability of the plastic parts made by FDM 3D printer to a trochoid gear reducer, which is expected to reduce the weight. A trochoidal gear reducer with a reduction ratio of 30 was developed. The part was developed using a resin material with excellent mechanical strength, nylon resin reinforced with carbon short fibers and potassium titanate, respectively, and compared with Extra Super Duralumin (A7075). The gear reducer's outer diameter is 58 mm, height is 50 mm, and a maximum torque is about 5 Nm, mass is 205 g, 204 g, and 309 g, respectively. It is found that the efficiency of the reduction gear decreased under operating conditions due to the slipperiness of the material and the molding accuracy of the contact surface between the teeth, and that the maximum torque could be increased to more than 5 Nm by applying grease.

Key Words: Robot, 3D Printer, Reduction Gear, Resin

1 緒言

近年は、3Dプリンタによるモノづくりが新たな手法として注目を集めている [1, 2]. 3Dプリンタにはいくつかの造形方式があり、熱溶融積層方式 3Dプリンタは造形方式が他の 3Dプリンタと比較して単純であるため、主流の造形方式となっている。熱溶融積層方式 3Dプリンタは、多くの業界で活用されており、ロボット機構部品の開発の事例もいくつかある [3-6]. ロボット機構部品において、従来から用いられている金属部品の代わりに、3Dプリンタで造形する樹脂部品を用いることで、軽量化、形状の自由度が高いことから部品点数の削減や省スペース化が可能となる。ロボット機構部品の内、駆動部に用いられる減速機を樹脂化することは、自由度の多いロボットでは大きな軽量化、場合によっては小型化が可能となるため、消費電力の削減、省スペース化につながり意義がある。一方で、使用する 3Dプリンタ・樹脂材料、3Dプリンタの積層条件によって変化する剛性や強度などの機械的特性が金属部品と比較して、明らかになっておらず、ロボット機構部品への適用性の検討が不十分であることが挙げられる。

本稿では、3Dプリンタによる樹脂製のロボット用減速機への適用性を検討するため、2つの樹脂材料を用いて、ロボット用減速機（トロコイド系歯形を用いた内接式遊星歯車減速機）を試作し、使用した 3Dプリンタ、材料、積層条件について明示し、それらを評価したので報告する。

2 3Dプリンタ造形によるトロコイド系歯形を用いた内接式遊星歯車減速機の試作

設計した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略す）の全体像を Fig. 1 に示す。ベアリング、ピン、ねじ、ねじのインサート、スナッピング以外は全て熱溶融積層方式 3Dプリンタ（以下、3Dプリンタと略す）による造形部品を用いている。

樹脂製減速機を製作するにあたり、使用した 3Dプリンタ、材料、スライサーソフト、積層条件を Table 1 に示す。使用した樹脂材料は、Onyx™ [7] と POTICON™ [8] である。Onyx は、ナイロンに微小なカーボンを加えて強化した材料であり、POTICON はナイロンにチタン酸カリウム繊維を加えて強化された材料で

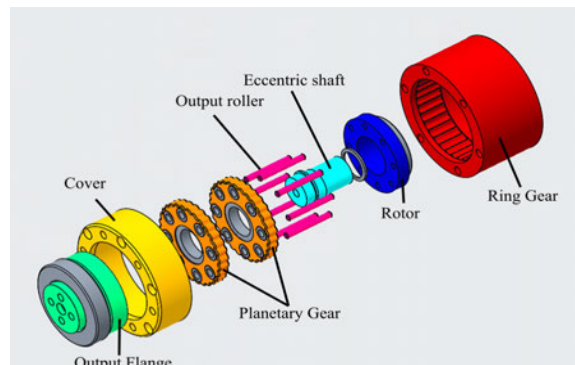


Fig.1: Overall structure of trochoidal gear reducer

ある。それぞれの材料の物性値を Table 2 に示す。比較のために ABS の物性値も載せている。ナイロンは PLA や ABS に比べて強度、剛性は劣るが、柔軟性があるため、靱性、耐衝撃性に優れる。Onyx, POTICON はナイロンに繊維を加えることで、ナイロンの欠点である強度、剛性を高めた材料である。POTICON は炭素繊維よりも微小なチタン酸カリウム繊維を用いることで、表面平滑性に優れ、また、マイクロサイズの補強性能にも優れているため、Onyx よりも強度、剛性に関する物性値が高くなっている。

積層条件について説明する。積層ピッチは樹脂材料を吐き出すノズルが、各々の層を造形し終えた際に積層方向に移動する距離である。シェル数は、積層方向に層を積み上げることで形成される造形部品の側面の表面から部品内部に向かって形成される層の数である。充填率は各層を埋める樹脂の密度を表す値であり、充填する形状を決めることができる。ソリッドレイヤ数は造形物の底面と上面に形成する充填率 100% の層の数である。

試作したトロコイド減速機の諸元を Table 3 に示す。なお、A7075 は次節に示すトロコイド減速機の評価実験で、Onyx, POTICON と比較するために用いた。遊星歯車、内歯車、偏心軸が A7075 の金属部品、他の部品が Onyx の樹脂部品である。樹脂製減速機は A7075 と比較して 100 g 程度の軽量化を達成している。

Table 1: Laminated conditions

3DPrinter	MarkTwo	Raise3D Pro2
Slicer	Eiger	ideaMaker
Material	Onyx	POTICON
Nozzle diameter [mm]	0.4	0.4
Extruder temperature [°C]	270	270
Pitch [mm]	0.1	0.1
Number of shells	2	2
Number of solid layers (top / bottom)	4 / 4	4 / 4
Fill Density (Planetary gear / others) shape	100% / 37%Triangle	100% / 37%Triangle

Table 2: Material property

Material	Onyx	POTICON	ABS
Tensile strength [MPa]	37	100	33
Flexural Strength [MPa]	71	167	60
Flexural Modulus [GPa]	3.0	6.3	1.3
Heat Deflection Temperature [°C] (0.45 MPa)	145	120	107

Table 3: Specifications of trochoidal gear reducer

Material	Onyx	POTICON	A7075
Reduction ratio	30		
Size [mm]	$\phi 58 \times 50.5$		
Weight [g]	205	204	309

3 動トルク計測装置

試作した Onyx, POTICON, A7075 製のトロコイド減速機を用いて、動トルクの効率を計測するため、Fig.2 に示す実験装置を構築した。減速機の評価を行うにあたり、モータは定格 200 W の DC モータ (maxon 社製 : RE50 200W 24V 370354) を使用し、エンコーダ (Broadcom Inc. : HEDS-5540#A06) をモータに取り付けた。モータドライバーは EPOS2(maxon 社製)を用いた。位置、速度、電流等の指令、値の取得は PC 上のソフトウェア (Maxon 社製 : EPOS Studio) を用いた。試作機の出力に一定の負荷トルクをかけるため、マイクロブレーキ (小倉クラッチ株式会社 : OP シリーズ OPB80N) の軸と減速機の軸を軸継手で連結した。マイクロブレーキが出力する負荷トルクの大きさはマイクロブレーキに流す励磁電流の値によって決まり、0.5 Nm~8 Nm まで安定した負荷トルクを出力することができる。なお、実験前にあらかじめマイクロブレーキに流す励磁電流とマイクロブレーキの出力トルクの関係は調べた。負荷トルクを出力するマイクロブレーキに減速機を直結した状態で、モータを一定速度で回転させ、その際にモータに流れた電流からトルク定数 ($K = 38.5$ [Nm/mA]), 減速比 ($N = 30$) を掛けることで試作した減速機の理論出力トルクとした。マイクロブレーキによる負荷トルクを理論出力トルクで除することで減速機のトルク伝達効率を求めた。

モータへの印加電圧は定格の 24V とし、回転速度は 400 rpm に設定している。モータの消費電流の計測はモータの立ち上がりを除いて、指令した回転速度に近い速度に落ち着いてから計測を開始した。計測時間を 10 秒として、その間に流れる電流を平均して求めた。計測は 2 回行った。実験の対象は、Onyx, POTICON, A7075 製の試作機に加え、Onyx, POTICON, A7075 製の試作機の歯車にグリスを塗った場合も比較対象とした。使用したグリスは Onyx, POTICON にはマルテンプ AC-N (協同油脂社製) を用い、A7075 にはハーモニックグリス 4B No.2 (ハーモニック・ドライブ・システムズ社製) を用いた。

4 実験結果

結果を Fig.3 に示す。横軸にブレーキによる負荷トルク的大小、縦軸に効率を表示している。グリスを塗っていない Onyx,

Micro Powder Brake

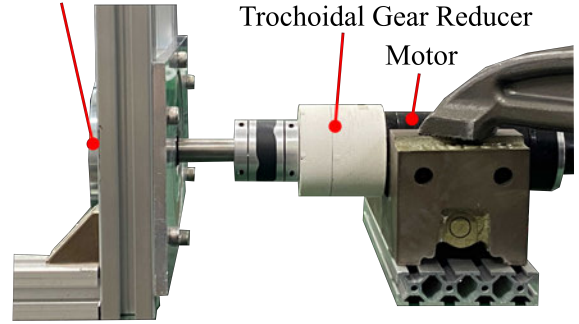


Fig.2: Experiment apparatus for dynamic torque measurement

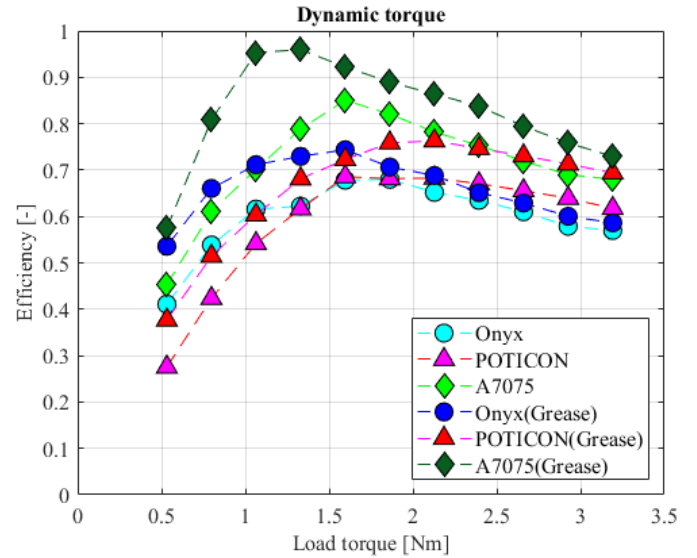


Fig.3: Efficiency of dynamic torque with trochoidal gear reducer

POTICON による樹脂製試作機と A7075 製の金属製試作機を比較すると、測定範囲全体にわたって A7075 製の試作機の方が効率は優れていることが分かる。グリスを塗っていない Onyx, POTICON 製の試作機を比較すると、負荷トルクが約 0.5~1.5 Nm の範囲では Onyx 製の試作機の方が効率が優れ、それより負荷トルクが大きい範囲では POTICON 製の試作機の方が効率が優れた。このようになった理由としては負荷トルクが小さい範囲では Onyx の歯車の方が POTICON の歯車よりも造形精度が優れていることにより表面が滑らかで、摩擦力が小さいことから、Onyx 製の試作機の方が効率が優れていると考えられる。一方、負荷トルクがある程度大きくなると、摩擦よりも剛性の影響が効率に対して支配的となり、POTICON は Onyx より剛性が高い分、POTICON 製の試作機は Onyx 製の試作機よりも効率が高くなったと考えられる。グリスを塗っていない Onyx, POTICON 製の試作機とグリスを塗った Onyx, POTICON 製の試作機を比較すると、いずれの試作機もグリスを塗った方が測定範囲全体にわたって効率が優れた。また、グリスを塗った POTICON 製の試作機は負荷トルクが大きい範囲では、グリスを塗っていない A7075 製の試作機の効率と同程度であった。

5 結言

本稿ではトロコイド減速機を設計し、3D プリンタで造形した部品で組み立てた Onyx, POTICON による樹脂製試作機と、A7075 製の金属製試作機を対象に実験を行った。今後は、樹脂製試作機の耐久性能の調査や効率の向上を図る。また、4 足歩行ロボットに搭載し、歩行実験を行うことで、3D プリンタ造形による樹脂製のロボット用減速機への適用性を検討する。

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。

参考文献

- [1] Hernandez Aldo Kaufui V. Wong. A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012.
- [2] Flaviana Calignano, Diego Manfredi, Elisa Paola Ambrosio, Sara Biamino, Mariangela Lombardi, Eleonora Atzeni, Alessandro Salmi, Paolo Minetola, Luca Iuliano, and Paolo Fino. Overview on additive manufacturing technologies. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 105, No. 4, pp. 593–612, 2017.
- [3] 金澤洗輝, 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研究. 第 21 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, pp. 2440–2441, 2019.
- [4] 鈴木諒太郎, 飯塚浩太, 武居直行, 徳永晋也, 深澤俊樹, 山本章. 重力補償機構および低減速比ギアを有するアクチュエータの開発. 第 21 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, 2020.
- [5] Dongil Choi. Development of open-source motor controller framework for robotic applications. *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 14134–14145, 2020.
- [6] David Kim, Chaehyun Lee, Seongyong Hur, Minjun Choi, Seungchul Shin, Yoseph Yang, and Dongil Choi. Development of 3d printed rapid omni-directional mecanum mobile manipulator. In *2021 18th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, pp. 124–129, 2021.
- [7] Markforged. Micro carbon fiber filled nylon that forms the foundation of markforged composite parts.
- [8] Ltd. Otsuka Chemical Co. Poticon is a series of compounds using otsuka chemical’s ultrafine potassium titanate fiber, tismo.