T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

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2報:樹脂製減速機の製作及び試験
Title(English)	Mechanical Parts Manufactured by a 3D Printer for Industrial Robot - Part2 : Production and testing of plastic reduction gears-
著者(和文)	吉田賢央, 鈴森康一, 難波江裕之, 遠藤玄
Authors(English)	Takateru Yoshida, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2021講演論文集, , ,
Citation(English)	Proceedings of the 2021 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , ,
発行日 / Pub. date	2021, 6

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

産業応用に向けた3Dプリンタ製ロボット機構部品
第2報：樹脂製減速機の製作及び試験

Mechanical Parts Manufactured by a 3D Printer for Industrial Robot
-Part2：Production and testing of plastic reduction gears-

○学　吉田　賢央 (東工大)　正　鈴森　康一（東工大）
正　難波江　裕之（東工大）　正　遠藤　玄（東工大）

Takateru YOSHIDA, Tokyo Institute of Technology, yoshida.t.bp@m.titech.ac.jp
Koichi SUZUMORI, Tokyo Institute of Technology
Hiroyuki NABAE, Tokyo Institute of Technology
Gen ENDO, Tokyo Institute of Technology

Today, the demand for industrial robots continues to grow. In order for industrial robots to make further progress, they need to reduce costs. One way to achieve this is to adapt new materials to robots in order to reduce power consumption by reducing weight. In order to realize the use of resin materials for FDM 3D printers as these new materials, we evaluate the characteristics of these materials when used. In this paper, we describe the contents and results of the evaluation of a planetary gear mechanism made with parts formed by an FDM 3D printer for the drive unit.

***Key Words*:** 3Dprint, Industrial Robot, Resin

1　緒言

現在，世界各国で産業用ロボットの需要が年々増して普及し続けている [1]. その社会的背景として，世界各国での労働人口の減少や新興国における賃金の上昇，品質向上ニーズの拡大等が挙げられる．また，ロボットの小型化，低価格化に伴い導入コストが低減したことによって，自動車・電子機器のみならず，食品・医療薬品等の業界にも導入，産業用ロボットの分野においても共存技術によって協働用ロボットの開発が進み始めたことが挙げられ将来の産業用ロボット市場は，益々拡大されることが予測されている．今後，産業用ロボットの課題でもある多品種少量生産の現場をはじめとするロボット導入が進んでいない業界にも実装を加速させるために，要素技術の開発の 1 つとして，ロボットを構成する部材へ適応できる非金属や複合素材，樹脂等のロボットの新素材がある [2]. これらの新素材を適応することは，軽量化，小型化によって，消費電力，導入コストを含めたトータルコスト削減を図ることが目的である．新素材を適応するためにはロボットの構造部，把持部，駆動部において疲労強度，剛性等の仕様を策定することが必要となってくる． そこで本研究では，新素材として軽量化及び形状の柔軟性による部品の小型化を実現できる FDM3D プリンタ用途の樹脂材料を挙げ，それらの材料を用いて造形された部品の特性を評価する．本稿では構造部，把持部，駆動部の内，駆動部を対象として樹脂製減速機を用いた評価内容およびその結果を記す.

2　特性評価の対象

駆動部機構を評価するにあたり，一例として OpenTorqueActuator[3] と呼ばれる（以下 OTA と略す）MIT Biomimetics Lab. によって開発されたオープンソースハードウェアを一部，改造したものを用いた．その全体像を Fig.1 に示す．脚式ロボットに適した準ダイレクトドライブとして開発され，MIT Cheetah[4] にも採用されている．その特徴は小さい減速比，トルク密度の大きいアクチュエータを用いることで，力制御のしやすさ，バックドライビリティ，動作速度，エネルギー効率，ロバスト性のバランスをとっている [5]．また脚式ロボットのみならず，コンプライアンス性能を活かしたロボットアームとしても利用されている [6]. OTA の駆動機構としてコンパクトであり軽量，バックドライブのしやすさ，バックラッシの低減を考慮し，遊星歯車機構を用いて，太陽歯車を後述するブラシレス DC モータに取り付け入力とし，遊星歯車のついているキャリアを出力としており，その減速比は 8:1 である．歯車形状は，かみ合い率，強度向上のためはすば歯車を用いている．アクチュエータにはトルク密度の高いドローン用に開発されたブラシレス DC モータ (X8313S(定格電圧：約 48V, 定格トルク：約 4.7 Nm，トルク密度：6.76 [Nm/kg]) が採用されている．モータを制御するドライバーは市販されている「ODrive」を用い，Fig.2 に示すカスケード制御系でモータを駆動する．位置制御，速度制御，電流制御ループは，それぞれ P, PI，PI 制御である．また軌道追従誤差を減らすためにフィードフォワードも組み込まれている．

Fig.1 Overall structure of OTA

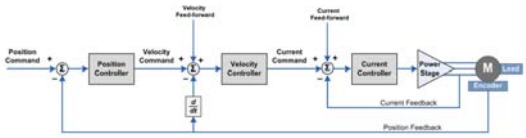

Fig.2 Block diagram of motor control (ODrive)

3　評価する材料

FDM3D プリンタで使用する材料として MarkForged 社製の Onyx と， 大塚化学株式会社提供の POTICON と呼ばれるチタ

ン酸カリウム繊維強化複合材料を用いた. 物性表は Table1 に示すとおりである．強度面では POTICON が優れていることが見て取れる．ともに市販されている PLA,ABS 系の樹脂と比較し，造形精度に優れている．

Table 1 Material property

材料	Onyx	POTICON
引張強度 [MPa]	37	100
曲げ強度 [MPa]	71	167
曲げ弾性率 [GPa]	3.0	6.3
荷重たわみ温度 [℃]	145 @0.45 MPa	120 @0.45MPa

4　特性評価

4.1　Onyx と POTICON の関節剛性の比較

関節剛性を調べるために Fig.3 に示すように OTA の出力軸に治具を取り付け，CFRP 材のパイプを固定して，そこに錘を吊るすことで負荷をかけた．Onyx 及び，POTICON の関節剛性は Fig.4 に示す結果となった．結果としては 2 つの材料でほとんど差は見られなかった．なお，$\Delta\theta$ の値は位置制御を行った状態でアーム先端に負荷をかけたときの角度の変異をエンコーダで読み取り減速比で割った値であり，バックラッシは含まないように計測を行っている．

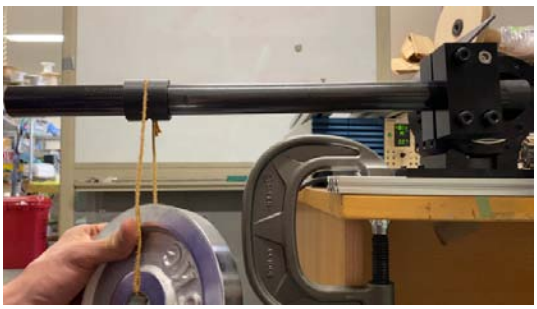

Fig.3 Fix CFRP pipe to OTA's output axis

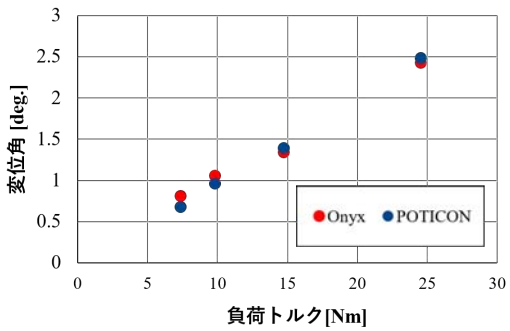

Fig.4 Comparison of joint stiffness between Onyx and POTICON

4.2　トルクと温度の関係

歯車に 3D プリンタ材料，またアクチュエータにブラシレス DC モータを用いる際，温度管理には特に注意を払う必要がある．電流制御により電流に制限をかけ，それに応じた拘束トルクは Fig.5 に示す結果となった．横軸はトルクを決めるトルク電流 [A] であることに注意する．赤線の理論値はモータの特性を用いて理論式から算出したトルクを減速比倍した値を示している．おおむね実測値と理論値が近い値をとり，減速機として機能していることを確認した．しかし，電流値が大きくなるにつれ理論値からのずれが大きくなる．伝達の効率が下がる原因の 1 つとしてモーターの熱損失があり，また本実験では BLDC の冷却は行っておらず，理論値からずれている範囲でのトルクの測定はコイルの巻き線温度が 100 ℃を優に超えていたため，ロータ部の永久磁石に熱が伝わることで，温度上昇に伴う減磁作用により若干の滑り等の原因があったことが予想される．　本実験では冷却を行ったモータの性能を見ていないが，今後，冷却した場合との比較を行う．Fig.6 は，モータの出力軸の CFRP 材のパイプに，一定の負荷をかけ，位置制御により水平を保つように制御した際の温度の上昇速度を示している．トルク $T = 7.34$ Nm の場合は 100 ℃以下で温度が平衡に近づくことが確認されたが，$T = 14.7, 19.6, 24.5$ Nm の場合は平衡になる前に 100 ℃を超える．100 ℃を超えた状態で負荷をかけ続けると，3D プリンタ製の太陽歯車が溶融し破壊に至り，負荷トルクが定格トルクの減速比倍 36.7Nm 以下であっても冷却措置は必須であるといえる．なお温度計測には T 型熱電対を使用し，応答性の観点から示した Fig.6 の温度履歴よりも実際は短い時間で温度が上昇していると予測される．

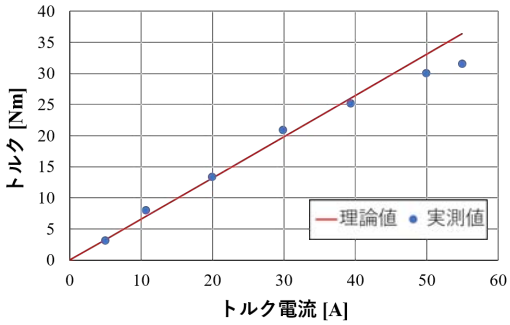

Fig.5 Relationship between current and torque

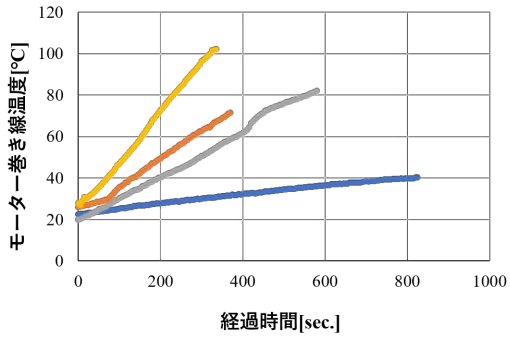

Fig.6 Time response in winding temperature

4.3　位置制御の応答性能

先述した方法と同様に CFRP 材のパイプに負荷（錘の質量：1.25kg，アーム長：0.3 m(肘関節から手のひらを想定)）を重力の影響を受けない方向に取り付け位置制御の応答性能を調べた．その結果を Fig.7 に示す．指令値 θ_m は正弦波としてモータ入力軸が ± 180[deg.]($\theta_m = 180\sin(2\pi ft)$) の範囲を可動するように与えた (出力軸の可動範囲は $\pm$ 45[deg.])．Fig.7 の応答線図からカットオフ周波数は約 4 Hz であることが読み取れる．この結果は同じ負荷を手で持ったときの人間の肘関節よりも応答性能が高いと言える [6][7].

4.4　長時間連続動作による耐久性

先述した方法と同様にアームに負荷を取り付けた状態で,Fig.8 に示す可動範囲 ± 90[deg.] を一定周期 (10 秒) で連続動作させた．結果として 2.5kg の場合は 5 時間を超えても，問題なく指令通りに動作した．5.0kg の場合は実験途中で動作が鈍くなり，アームが錘を持ち上げる動作の途中で停まってしまい，可動域の先端まで上がらないことが確認された．この現象が生じ始める時間は実験によって異なるが，多くは 10 分を超えたあたりから確認された．この原因としては歯車にはすば歯車を使用していることによって，スラスト荷重を受けていることが要因の 1 つとして考えられる．実際に負荷を上下させる動作の中で，モータに取り付けられた太陽歯車がスラスト方向に動いていることが確認された．Fig.1 に示すようにモーターはモーターに取り付けられた樹脂製のプレートを介し，内歯車のケースに固定されているが，そのプレートも動作中に変形するため，スラスト方向の動作を抑えられておらず，時間が経過するにつれ動作が大きくなり，太陽歯車と遊星歯車のかみ合い率が徐々に低下し，伝達効率が下がっている事が考えられる．

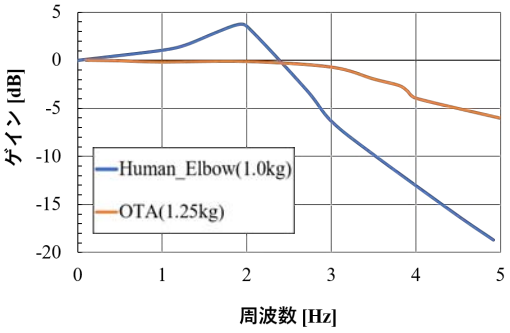

Fig.7 Position Bandwidth of OTA (gain)

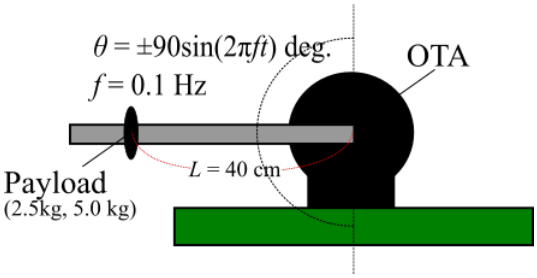

Fig.8 Range of movement

5　結言

本稿では樹脂製減速機を有するアクチュエータユニットの評価内容及びその結果を記した．

- 温度が上昇する箇所 (動力伝達部，摺動部等）では部品変形具合に関して剛性以上に耐熱性が影響する．
- 熱が発生するアクチュエータと組み合わせる場合，定格出力以下であっても，冷却措置が必要となる可能性がある．
- 今回使用した樹脂製減速機は減速機としての機能を果たし，また，位置制御性能に関して準ダイレクトドライブとしての機能を果たしていることを確認した．

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] IFR International Federation of Robotics「Global industrial robot sales doubled over the past five years」(最終閲覧日: 2020 年 12 月 11 日)

[2] NEDO 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構「「革新的ロボット研究開発基盤構築事業」を開始」(最終閲覧日: 2020 年 12 月 11 日)

[3] https://hackaday.io/project/159404-opentorque-actuator

[4] Patrick M. Wensing et al., Proprioceptive Actuator Design in the MIT Cheetah: Impact Mitigation and High-Bandwidth Physical Interaction for Dynamic Legged Robots,

[5] Simo Kalouch, DESIGN FOR 3D AGILITY AND VIRTUAL COMPLIANCE USING PROPRIOCEPTIVE FORCE CONTROL IN DYNAMIC LEGGED ROBOTS, 2016

[6] David V. Gealy et al., Quasi-Direct Drive for Low-Cost Compliant Robotic Manipulation, 2019

[7] S. Aaron and R. Stein, “Comparison of an emg-controlled prosthesis and the normal human biceps brachii muscle.” American journal of physical medicine, 1976