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)	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
Title(English)	Development of Quadruped Robot TITAN-E1 Using Plastic Structural Parts Printed by Fused Deposition Modeling
著者(和文)	角田柊平, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄
Authors(English)	Shuhei Tsunoda, 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

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

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

Development of Quadruped Robot TITAN-E1
Using Plastic Structural Parts Printed by Fused Deposition Modeling

学　角田　柊平（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）

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

In recent years, the use of 3D printed plastic parts has been attracting attention. However, due to their inferior dimension accuracy, stiffness and strength, there are few examples of using them as structural parts for robots that are subjected to loads. In this study, we developed a quadruped robot, TITAN-E1, in order to verify the applicability of plastic parts made by fused deposition modeling 3D printers to robot structural parts. As a result, it was found that the 3D printed plastic parts had the sufficient dimensional accuracy and the stiffness and strength required for stable static walking. Therefore, the applicability of the 3D printed plastic parts to the structural parts of the quadruped robot was confirmed.

***Key Words*:** Quadruped Robot, 3D Printer, Fused Deposition Modeling

1　緒言

歩行ロボットは接地点を離散的に選択できることから，不整地環境での使用に適しているといえる．その中でも四足歩行ロボットは，静歩行に必要最低限の本数の脚を持つことから，安定性と構造のシンプルさのバランスがとれた構成であると考えられ，盛んに研究が行われている [1], [2].

その一方で，歩行ロボットには，他の移動機械に比べて移動のエネルギー効率が低いという問題がある．歩行ロボットの消費エネルギーを削減する方法として，樹脂部品を使用することでロボットの質量を小さくし，自重支持に使うエネルギーを減らすということが考えられる．さらに近年では，3D プリンタによる樹脂部品の製作に注目が集まっている．3D プリントの利点として，個人の加工技術などが必要なく迅速に部品の製作を行えるという点や，複雑形状の部品を一体で造形することで部品点数を削減できるという点が挙げられる．一方，3D プリンタで製作した部品には，切削などの他の加工方法によって製作した部品と比べて寸法精度や強度・剛性が低くなるという問題があるため，これまでは形状確認用の試作用途や強度を必要としないカバー部品などへの使用が大半であった．また，3D プリンタ製の部品は，異方性をもち，内部の充填構造も複雑となることから，現状ではその剛性や強度を設計段階で正確に計算し評価することは難しい．そのため，3D プリンタ製の樹脂部品を，ロボットの構造材として適用することが可能かどうかについては，実際にロボットを試作して評価をすることが必要であるといえる．

本研究では，3D プリンタ製樹脂部品の四足歩行ロボット構造材への適用可能性を検証することを目的として，3D プリンタ製樹脂部品を実際に用いた四足歩行ロボットの試作を行っていく．3D プリントの造形方式には，コスト面やプリンタのメンテナンス性に優れ，現在最も普及しているといえる熱溶融積層（FDM）方式を採用する．製作する四足歩行ロボットは，定格 80 W のアクチュエータを 12 個搭載して全体質量が 10 kg を超えるようなサイズとし，ロボットが自重を支えながら安定した静歩行ができることを最初の目標と設定して，3D プリンタ製樹脂構造材がそれに必要な剛性や強度を有しているかの確認を行っていくこととする．

2　TITAN-E1 の仕様

製作した四足歩行ロボット TITAN-E1 を図 1 に，その諸元を表 1 に示す．基本的な構造は，我々の研究グループによって開発された四足歩行ロボット TITAN-XIII[2] を参考にしており，各脚 3 自由度の計 12 自由度を有し，脚を外側に張り出す爬虫類型の構成となっている．各軸のアクチュエータには，定格 80 W のブラシレス DC モータ（maxon 製, EC 45 flat 591480）を使用し，モータの出力側には減速比 37 の遊星歯車減速機（ハーモニック・ドライブ・システムズ製, HPGP-11A-37-F0AAH）を取り付けている．足先側の 2 関節の駆動には高強度化学繊維ロープによるワイヤ干渉駆動 [4] を用いている．減速機や回転軸，ベアリングなどを除く大部分の構造材は FDM 方式 3D プリンタ製の樹脂部品となっており，脚のリンク部には CFRP 製の薄肉パイプを使用している．

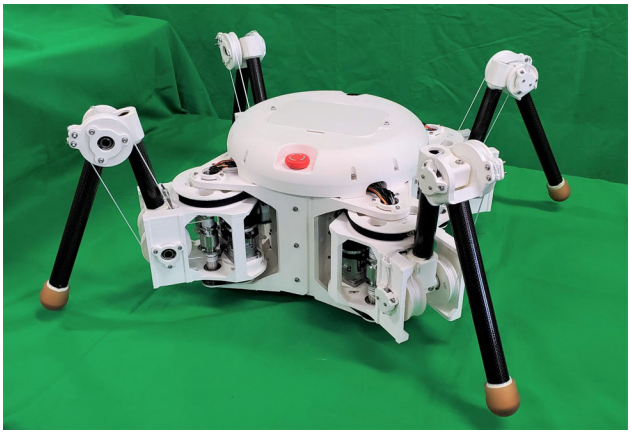

Fig.1 Overall view of TITAN-E1.

3D プリントの材料には，微細なチタン酸カリウム繊維を配合して強化した樹脂であるポチコン（大塚化学製）[3] を用いた．ポチコンの母材には様々な種類の樹脂が使用できることから，大部分の樹脂構造材の材料として，他の 3D プリント用樹脂と比べて引張強度に優れるナイロンベースのポチコンを採用した．また，モータの周囲に取り付ける部品には，耐熱性に優れ，高温下でも寸法変化が少ない PPS ベースのポチコンを用いた．3D プリンタは，ナイロンベースのポチコンには Raise3D N2, Raise3D N2S

Table 1 Specifications of TITAN-E1.

Length of the each leg link (in order from the body side)	70.0, 165.4, 250.5 mm
Total Mass of TITAN-E1	14.22 kg
(Motors and reduction gears)	4.90 kg
(3D printed parts)	4.63 kg
Reduction ratio of each joint (in order from the body side)	80.17, 125.95, 125.95

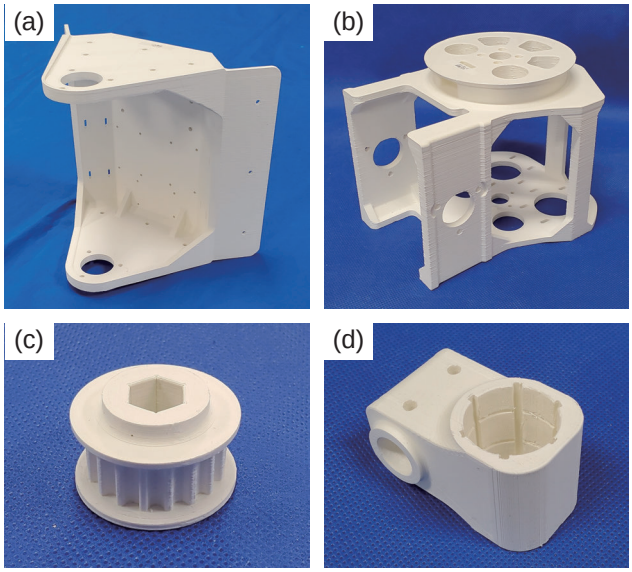

Fig.2 Pictures of the 3D printed parts.

（Raise3D 製）, PPS ベースのポチコンには MothMach S3DP444（エス. ラボ製）を使用した．

3　熱溶融積層方式による樹脂構造材の詳細

TITAN-E1 に用いた FDM 方式 3D プリンタ製の樹脂構造材の設計・製作について説明する．実際に製作した部品を図 2 に示す．3D プリンタを用いることで，図 2(a), (b) のような複雑形状の部品を一体で造形することができ，部品点数の削減が可能となる．これらの部品では，外縁部やコーナ部にリブを設けることで補強をしている．3D プリンタによって部品を製作する際には，このような補強も簡単に行うことができる．

タイミングプーリも 3D プリンタによって製作した．図 2(c) のように，3D プリンタによる造形でも，ほぼ正確な歯形が得られ，市販のタイミングベルトと組み合わせてガタなく回転できることが確認できた．

また，脚リンクのパイプと構造材の間の接着には，エポキシ樹脂系の接着剤を用いているため，部品同士の間には接着剤を充填する隙間があることが望ましい．そこで，パイプを接着する部分には，図 2(d) のような溝形状を設けている．従来の加工方法では難しいこのような複雑な形状も，3D プリンタでは容易に作成することができる．

一般に，FDM 方式により部品を造形する際には，部品の穴径が設計した値より小さく出力されるという現象が見られる．そのため，穴径の精度が求められるベアリングや金属製の軸部品を挿入する穴に関しては，テスト用の部品を何個か造形し，設計上の穴径を調整するという作業を行う必要があった．これらの部品の組み立ての際に，3D プリンタ製部品の穴の位置がずれているために金属製の軸がはまらないなどといった問題は発生しなかった．したがって，3D プリンタ製部品の寸法精度は，四足歩行ロボットを構成する上では，十分なものであると考えられる．

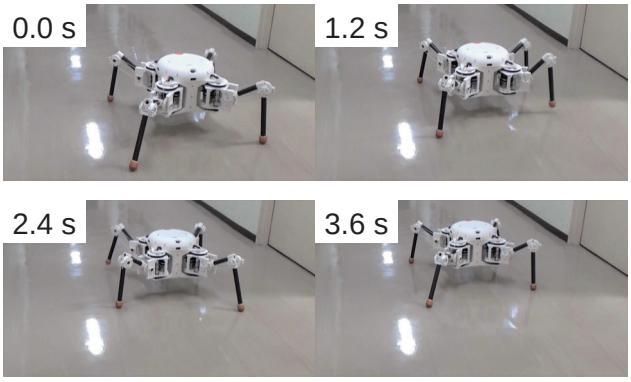

Fig.3 Scene of the walking test. Static walking at a speed of 150 mm/s was achieved.

4　歩行試験

3D プリンタ製樹脂構造材の強度･剛性を確かめるため，TITAN-E1 の歩行試験を行った．歩容はデューティ比 0.75 のクロールとして，歩幅は 200 mm とした．安定性を高めるため，歩行中に胴体を左右に揺動させており，実際には胴体は正弦曲線を描くような軌道で前進することになる．遊脚軌道は，遊脚の開始点と終了点において，足先速度が立脚期の速度と等しくなり，足先加速度が 0 となるような 4 次曲線とした．

歩行速度 150 mm/s で歩行させた様子を図 3 に示す．歩行中に構造部品の顕著な変形や割れなどは発生せず，胴体の傾きも少なく安定した歩行を行うことができた．さらに，樹脂構造材に大きな負荷がかかるようにロボットの胴体に 5.1 kg のおもりを載せた状態で歩行させる実験も行い，歩行速度 100 mm/s の条件でも，樹脂構造材に割れは生じず，安定した歩行が可能であることが確認できた．

したがって，3D プリンタ製の樹脂構造材が，歩行中に生じる衝撃やおもりを搭載しての歩行にも耐えられる強度を有していることが確認できた．

5　結言

本研究では，実際の四足歩行ロボットの開発を通して，FDM 方式 3D プリンタ製樹脂部品の四足歩行ロボット構造材への適用可能性の検証を行った．その結果，3D プリンタ製の樹脂部品であっても，市販の部品等と組み合わせて問題なく組み立てが行える程度の寸法精度と，安定した静歩行に必要な剛性と強度を有しているということが確認できた．また，複雑な形状の部品の一体造形によって，部品点数を削減するなど，3D プリントの特長を生かしたロボット開発を進めることができた．したがって，FDM 方式 3D プリンタ製樹脂部品は，四足歩行ロボット構造材への十分な適用可能性を有していると考えられる．

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] G. Bledt et al., “MIT Cheetah 3 : Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot,” in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2245–2252, 2018.

[2] S. Kitano et al., “TITAN-XIII : sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking,” *ROBOMECH Journal*, Vol. 3, No. 1, pp. 1–16, 2016.

[3] “ ポチコン｜化学製品｜製品情報｜大塚化学株式会社, ” https://www.otsukac.co.jp/products/chemical/poticon/, 2022 年 2 月 17 日参照.

[4] S. Ma et al., “ Design and experiments for a coupled tendon-driven manipulator,” *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 13, No. 1, pp. 30–36, 1993.