

3D プリンターを用いたギアボックス造形支援システム

中川 瑠星¹ 新山 大翔¹ 塚田 浩二¹

概要：3D プリンターの普及に伴い、歯車のような機械部品を個人が設計／出力することが可能になってきた。一方、複数の機構部品を組み合わせた造形は、部品の噛み合わせや組み立てを考慮する必要があり、敷居が高い。そこで本研究では、そうした造形の例としてギアボックスに着目し、ユーザーにとって分かりやすいパラメータ（例：ギア比、外径サイズ、固定方法等）を入力として、カスタマイズしたギアボックスを手軽に設計／造形可能な支援システムを提案する。

1. はじめに

3D プリンターの普及によって、個人でも利用可能なモデリングツールが多数登場しつつある。例えば、2D スケッチやプリミティブな 3D モデルを組み合わせてモデルを生成できるツール（例：Autodesk 社 Fusion 360）や、独自のプログラミング言語によってコードを記述してモデルを生成できるツール（例：OpenSCAD）等がある。こうしたツールに習熟することで、単純なケース等はもちろん、歯車やスライドといった機構部品を設計し、3D プリンターで出力することができる。

しかし、こうしたツールの習熟には時間と労力が必要である。特に、複数の機構部品を組み合わせて実用的な機構設計を行うことは、部品の噛み合わせや組み立てを考慮する必要があり、一層困難であった。

そこで、本研究では、こうした機構の例としてギアボックスに着目し、ユーザーにとって分かりやすいパラメータ（例：ギア比、外径サイズ、固定方法等）を入力として、カスタマイズしたギアボックスを手軽に設計し、3D プリンターで一体造形可能な支援システムを提案する（図 1）。

2. 関連研究

2.1 3D プリンターを用いた設計支援

3D プリンターを用いた設計支援の研究を紹介する。

後藤らの研究では、設計手順を日本語テキストに変換し、手順をソートする機能を組み込んだモデリング手順教育システムによって、CAD 初心者が効率的にモデリング手順を理解することができる [1]。

五福らの研究では、図形の変更履歴や設計意図を図面を

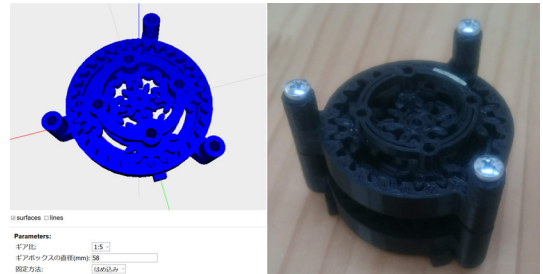


図 1 提案システムの概要、ユーザー視点のパラメータ（ギア比等）を入力することで、ギアボックスを（ほぼ）一体造形で出力できる。

介して相互に伝達できる CAD を制作し、複数人での作業効率を高めることができる [2]。

高橋らの研究では、熱溶解積層方式を制御するパラメータ探索を行い、パラメータの変化具合を構造として記述することで、新たな造形手法のデザインを制作している [3]。また、パラメータの影響を試行錯誤するにあたって造形の一時停止が重要となるため、FDM 方式 3D プリンターでの造形中の一時停止による影響を調査し、造形品質に影響を与えにくい一時停止の手法を提案した [4]。

Thijs Roumen らの研究では、レーザーカッターでの嵌め合わせの設計に着目し、板バネ機構をマウント部に搭載することで、安定性の高いマウントとジョイントを制作することができる [5]。

2.2 機構部品の設計支援

特に本研究との関わりが深い、機構部品の設計支援手法について紹介する。

新山らの研究では、3D プリンターでの一体造形手法に着目し、一体造形が可能な回転機構の設計を行った [6]。加えて、作動部と受動部の間のクリアランスに着目し、回転

¹ 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate

軸の形状を機種・積層ピッチによるクリアランスへの影響を調査して、回転機構の応用例を実装している。

Stelian Coros らの研究では、関節が可動する Mechanical Character の制作を一般ユーザー向けに支援するシステムを提案している [7]。関節の動きをモーションカーブでスケッチすることで、適切な機構（列状の歯車やクランク等）を提供する点が特徴である。

Gear Generator は、Web ブラウザから利用可能な歯車設計サービスである [8]。歯車の歯数や 1 分間の回転数 (RPM) を指定でき、複数個の歯車を組み合わせることができる。また、作成した歯車は、DXF や SVG 形式等で個別にダウンロードできる。

Gear Model for 3D Printer は、Web ブラウザから利用可能な歯車設計サービスである [9]。歯数やモジュール等のパラメータを変更でき、平歯車や内歯車、かさ歯車、ウォームギア等のモデルを作成することができる。

前述したモデリングツールの一つである Fusion 360 では、専用のアドインを実行することで、歯数やピッチ、厚さ等のパラメータを変更して歯車を制作できる [10]。

2.3 本研究の特徴

本研究では、ユーザーにとって分かりやすいパラメータ（例：ギア比、外径サイズ、固定方法等）を入力として、カスタマイズしたギアボックスを手軽に設計できる。加えて、主要部品を一体造形で出力可能にして、組み立ての手間を軽減する。

3. 提案

本研究ではギアボックスのような複雑な機構を持つモデルのパラメータを自由に調整可能なギアボックス造形支援システムを提案する。具体的には、以下の特徴を持つシステムを構築する。

- 一体造形で制作可能
- ユーザーに分かりやすいパラメータを指定可能
- 細部のパラメータを省略可能

1 つ目の特徴は、提案システムで用いるモデルは一体造形で制作できることである。一体造形で出力することで、出力後のモデルの組み立ての手間を軽減できる。

2 つ目の特徴は、ユーザーにとって分かりやすいパラメータを直接指定できることである。例えば、出力速度／トルクを調整するギア比や、ギアボックスの外径サイズ、及びギアボックスの固定方法等を指定できるようにする。

3 つ目の特徴は、細部のパラメータを省略可能にすることである。例えば、各ギアの歯数や配置、部品同士のクリアランス等をユーザーが原則指定する必要がないように配慮する。

これらの特徴を踏まえた造形支援システムによって、ユーザーが手軽にギアボックス等を作成することができる。



図 2 回転軸のモデル (左から順に、円錐台型、半球型、凸型、V 字型)

4. 実装 1 モデルの制作

本章では、システム内部で利用するモデルの設計と検証について述べる。まず、このギアボックスを一体造形で制作するために回転機構に着目し、回転軸の設計を行った。次に、設計した回転軸を使用して一体造形で歯車を制作した。最後に、その歯車を組み合わせてギアボックスを制作した。まず、設計／出力環境を紹介し、各実装について説明する。

4.1 設計／出力環境

提案システムで使用するモデルを、モデリングツールの一つである OpenJSCAD^{*1}を使用して制作した。OpenJSCAD は JavaScript で移植された OpenSCAD で、OpenSCAD と同様にコードによってモデリングを行える。また、Web ブラウザ上で直接モデルを編集できる特徴がある。

モデルの出力には、熱溶解積層方式の 3D プリンター「UP Plus2」を使用した。積層ピッチは 0.20mm、サポートの出力角度は 30 度未満に設定して制作・検証を行った。

4.2 回転軸の設計

回転機構を一体造形で制作するには適切な軸の形状と適切なクリアランスの設計が必要となる [6]。まず、回転軸の設計を行った。回転軸の形状は、新山らが設計した円錐台型に加え、半球型、凸型、V 字型を検討した。検討した回転軸のモデルを図 2 に示す。

次に、回転機構を一体造形で出力するために、回転軸のクリアランスを設計した。クリアランスの値を 0.1mm から 0.4mm に設定して出力し、軸の形状ごとに回転するかを比較した。比較した結果、0.4mm の時点では、円錐台型と V 字型は回転が安定したが、半球型は回転に大きなブレが生じた。また、凸型は軸と軸受けが溶着して回転しなかった。

さらにクリアランスを小さくすると、V 字型は軸の中心に負荷が掛かり、サポート材を剥がす際に破損してしまう時があった。そのため、最終的には先行研究と同様に円錐台型の回転軸を採用した。円錐台の底角は 45 度、クリアランスは 0.2mm または 0.3mm とした。

4.3 歯車の制作

前節で設計した回転軸を使用して、一体造形で歯車を制作した。制作した歯車を図 3 に示す。図 3 左の歯車は、歯の形状を台形とした。この歯車を水平方向に連結して出力

^{*1} OpenJSCAD, <https://openjscad.org/>

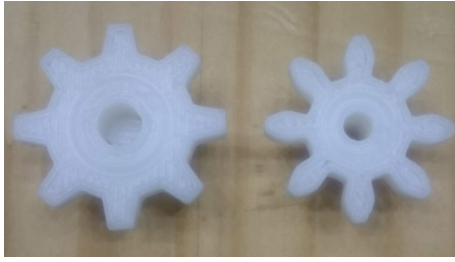


図 3 歯の形状が台形の歯車とインボリュート歯車



図 4 連結歯車の一例（左：2 個，右：3 個）



図 5 ステッピングモーター用の歯車と DC モーター用の歯車

し、連動して回転するかを検証したところ、2 個連結した場合は滑らかに回転するが、3 個以上連結した場合は回転しにくくなってしまった。この原因として、連結した方向ごとに歯と歯の接触面積が異なってしまうことが考えられた。

この問題を解決するために、図 3 右のようなインボリュート曲線を使用した歯車を制作した。歯の形状にインボリュート曲線を用いることで、どちらの方向でも歯の接触面積が均等となり、動力の伝達が安定する。図 4 は一体造形で出力した連結歯車の一例である。

連結した歯車をモーターで動かせるように、制作した歯車にモーターを接続できる穴を設けることにした。図 5 左はステッピングモーターを接続できるようにした歯車の例である。この歯車には、縦 3.0mm、横 4.8mm の矩形の穴を設けている。図 5 右は DC モーターを接続できるようにした歯車の例である。この歯車には、直径 2.0mm の円の一部分に突起をつけた穴を設けている。なお、これまでの歯車は回転軸を上側に設けているが、この 2 つの歯車は固定穴の設計の都合上、回転軸を歯車の支柱の下側に設置した。

4.4 ギアボックスの制作

上記のインボリュート歯車を複数組み合わせ、ギアボックス（図 6）を制作した。ギアボックスには多様な種類があるが、今回はまず、遊星ギアボックスを実装した。遊星ギアボックスは、図 7 のような太陽歯車、内歯車、遊



図 6 遊星ギアボックス（ギア比 1:4）



図 7 遊星ギアボックスの構成パーツ（太陽歯車、内歯車、遊星キャリア）

星キャリアから構成される。

図 7 左の太陽歯車は、内歯車に接続できるように十字型の土台とツメを設けている。

図 7 中央の内歯車はギア比によって歯数が変わるようになっている。加えて、遊星キャリアのブレを小さくするために、図 8 右のように内歯車底面の穴と遊星キャリア土台のクリアランスが約 0.1mm になるようにした。また、長ネジ等で内歯車同士を固定するために内歯車の外側に突起と穴を設けた。穴の径はネジの径等に合わせて調整できる。

図 7 右の遊星キャリアは複数の遊星歯車が組み合わさって構成されている。遊星歯車の歯数は太陽歯車と内歯車の歯数に合わせて変化する。

これらの歯車に加えて、図 9 右のような接続用の太陽歯車を制作した。接続用の太陽歯車を介することで遊星ギア同士を繋げることができ、よりギア比の大きいギアボックスを実現することが可能となる。図 10 にギア比が 1:4 のギアボックスを 2 つ重ねた 1:16 のギアボックスを示す。

また、回転軸に接続する DC モーターを固定する固定用パーツを制作した（図 11）。DC モーターを固定する穴の径は使用する DC モーターの径に合わせて調整でき、図 6 中央の内歯車と同様にネジで固定することができる。

モーターを接続する太陽歯車の回転軸のクリアランスは、回転のブレを小さくするために 0.2mm にしている。また、遊星歯車で使用している回転軸のクリアランスは、回転をスムーズに伝えやすいように 0.3mm にしている。

5. 実装 2 ギアボックス造形支援システム

ギアボックス造形支援システムは、OpenJSCAD で実装



図 8 内歯車（左：上面，右：組み立て済みの底面）



図 9 太陽歯車（底面用／接続用）



図 10 1:16 のギア比を持つ 2 重遊星ギアボックス



図 11 モーター固定用パーツと利用例，1:4 の遊星ギアに接続している．

したモデルのパラメータを Web ブラウザ上から調整する形で実装した．ユーザーはまず，制作したいギアボックスの種類を選択すると，モデルの 3 次元ビューや，設定パラメータ等が表示される．設定パラメータはフォームから任意に変更可能であり，3 次元ビューに反映される．作成したモデルデータは STL 形式でダウンロードでき，3D プリンターの専用ソフトウェアを介して出力する．実装したシステムを図 12 に示す．

先述したギアボックス造形支援システムで使用できる機構部品を持つモデルの一つとして，実装 1 で制作した遊星

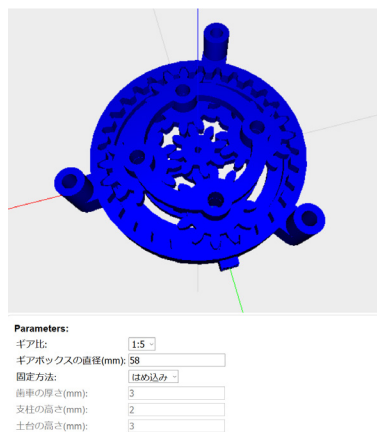


図 12 ギアボックス造形支援システムの外観

ギアボックスを適用した．このシステムでは，ギアボックスを制作する上で欠かせないパラメータとして，ギアボックスの最終的なギア比，ギアボックスの直径，固定方法等が指定できる．加えて，入力に付随して変化する項目（歯車の厚さ，支柱・土台の高さ等）と，コアユーザーがこだわって出力する時に変えられる項目（圧力角，歯車のクリアランス等）を設けている．

6. まとめ

本研究では，ユーザーにギアボックスのような複雑な機構を持つモデルと，そのモデルのパラメータを調整してモデルを制作できる調整システムを提供することで，手軽にモデルのカスタマイズを行えることを提案した．今回は，複雑な機構を持つモデルの一つとして遊星ギアボックスとその調整システムを制作した．今後は，ギアボックスのパラメータをより分かりやすく指定できる UI を用意すると共に，多様なギアボックスや複合機構への対応を進めたい．

参考文献

- [1] 後藤 範恭，下村 芳樹，野間 口大，小池 一郎，西郷 知泰，知識ベース CAD とモデリング手順書作成システムを用いたネットワーク CAD 教育 -Maxis Cubic の応用-，精密工学会誌，1558-1563，2006．
- [2] 五福 明夫，杉野 友彦，伊藤 一之，設計意図と図形を関連付けた CAD，日本機械学会論文集（C 編），71，335-342，2005．
- [3] 高橋 治輝，宮下 芳明，熱溶解積層方式 3D プリンタを用いた表現と造形手法のデザインのためのパラメータ探索手法，情報処理学会 インタラクシオン 2018 論文集，135-144，2018．
- [4] 高橋 治輝，宮下 芳明，熱溶解積層方式 3D プリンタの造形工程の観察と介入を前提とした一時停止命令の再設計，ヒューマンインタフェース学会論文誌．Vol. 20，No. 1，135-146，2018．
- [5] Thijs Roumen, Jotaro Shigeyama, Julius Cosmo Romeo Rudolph, Felix Grzelka, and Patrick Baudisch. 2019. SpringFit: Joints and Mounts that Fabricate on Any Laser Cutter. In Proceedings of UIST '19. ACM, New York, NY, USA, 727-738.
- [6] 新山 大翔，沖 真帆，塚田 浩二，3D プリンターによる一

体造形式回転機構の提案, WISS2019 論文集, pp.31-36, Sep, 2019.

- [7] Stelian Coros, Bernhard Thomaszewski, Gioacchino Noris, Shinjiro Sueda, Moira Forberg, Robert W. Sumner, Wojciech Matusik, and Bernd Bickel. 2013. Computational design of mechanical characters. *ACM Trans. Graph.* 32, 4, Article 83 (July 2013), 12 pages.
- [8] Gear Generator, <https://geargenerator.com/>, 2019.12.09 参照.
- [9] Gear Model For 3D Printer, <http://www.knowhave.com/gear/indexjp.php>, 2019.12.09 参照.
- [10] Fusion 360 による歯車設計, <https://fabble.cc/robotakun/fusion360xxxxxxx>, 2019.12.09 参照.