

球状歯車の動作特性と小型化に関する研究 -多自由度機構の社会実装に向けて-



愛媛県立松山南高等学校3年
歯車班

代 表 者: 田村 和也
山路 大陽
担 当 教 諭: 笹岡慎太郎

1. はじめに

近年、医療・福祉、災害対応、インフラ点検などの現場では、狭い空間や複雑な環境でも柔軟に動作できる小型機構への需要が高まっている。これらの分野では、単一方向の回転伝達を前提とした従来の平面歯車だけでは対応が難しい場面があり、多方向に動力を伝達できる新たな機械要素の開発が求められている。

そこで本研究では、球面上で噛み合うことにより多方向への回転伝達が可能な球状歯車に着目した。球状歯車は、多自由度機構の中核部品としてロボットや精密機器への応用が期待される一方、加工の再現性、伝達特性、小型化限界などの基礎データが十分に蓄積されていない。

本研究の目的は、第一に学校所有の3Dプリンタを用いて球状歯車を再現できるかを検証すること、第二に高校生でも実施可能な簡易な性能評価法を提案すること、第三に小型化が造形精度と実装可能性に与える影響を明らかにすることである。加えて、機械工学、3DCAD、3Dプリント、画像処理を横断する学際的な研究として、地域の教育機関や企業でも再現可能な開発手法を示し、社会実装への基礎資料を得ることを目指した。

2. 研究背景

平面歯車は、インボリュート曲線に基づく設計により一定の速度比を保った安定した動力伝達が可能であり、機械工学において長年広く利用と応用がされてきた。しかし、その構造上、回転軸が固定されるため、複数方向への動力伝達や自由度の高い運動を実現するには、複数の部品や複雑な機構設計が必要となる。これまでも複数方向の自由度を一点に統合する研究は行われてきたが、回転効率や滑らかさに課題があった。一方、球状歯車(図1)はこの課題を球面上での噛み合いにより解決し、従来の歯車では困難であった多方向への回転伝達を可能にする機構として提案された。しかし、球状歯車は比較的新しい提案であるということもあり、力の伝達特性や小型化に伴う加工精度や性能の変化など、詳細については、研究が十分になされていない。そこで本研究では、先行研究のモデルを参照しながら、球状歯車が実際の機械要素として応用されるために、これらの特性を明らかにすることを目的とした。

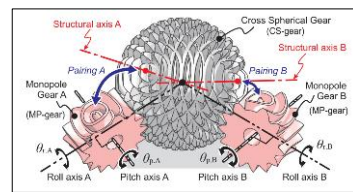


図1 球状歯車(白)と鞍状歯車(桃)

3. 研究方法

球状歯車は2021年に提唱された機構であり、先行研究が少ないことから、まずはその再現性を確認することにした。

3-1 3Dソフトを用いた製作方法

設計にはFusion360を用いて、平面歯車の軌跡を残しながらx軸・y軸方向に回転させることで球状歯車をモデル化した(図2)。平面歯車の歯数は先行研究に合わせて32枚に設定した。鞍状歯車はBlenderのブーリアン機能を用いて設計を行った。当初は紙粘土による製作を試みたが、接合部に課題があったため、3Dソフトによる設計へと移行した。3Dプリントには、本校所有のFused Deposition Modeling (FDM)方式の3Dプリンタ、素材はAcrylonitrile Butadiene Styrene(ABS)樹脂を使用した。ここでは、特殊な産業用装置を用いず、学校設備で再現可能かを重視した。

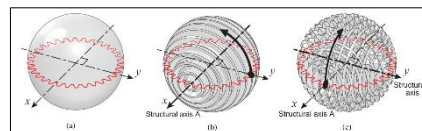


図2 球状歯車の設計手順

3-2 画像処理による再現性評価

自作モデルと先行研究のモデルの形状差異を定量的に評価するため、画像処理を用いた外形比較を行った。まず各画像から歯車の輪郭を抽出し、

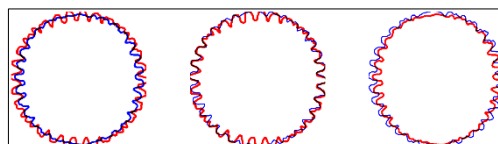


図 3 形状比較の様子

IoU (Intersection over Union) を用いて一致率を算出した。IoU は、2 つの形状を重ね合わせた際に「双方が占める全体の面積」に対して「完全に重なり合っている部分の面積」が占める割合を算出するものである(図 3)。この手法により、単なる面積の大小だけでなく、自作モデルと先行研究のモデルにおける突起の位置や線の重なり具合といった空間的な一致率を厳密に数値化することが可能となる。

※「先行研究のモデル」とは多田隈先生から借用した球状歯車である。

3-3 伝達率評価法の設計

球状歯車が多自由度機構として成立するためには、重心を通る任意の軸に対して安定した動力伝達が可能であることが望ましい。そこで本研究では、「重心を通る軸であれば、どの方向を回転軸としても伝達率は一定になる」という仮説を立てた。図 4 に、本研究で検討した回転軸の取り方の例を示す。なお、以後は図 4 左図の軸を基本軸として扱う。

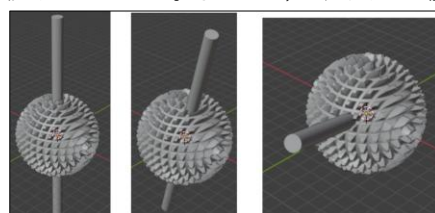


図 4 球状歯車における回転軸の取り方

仮説検証のため、トルク比を伝達率 η と定義し、

$$\eta = \frac{T_{out}}{T_{in}}$$

η :伝達率[-] T_{in} :入力トルク[N・m]

T_{out} :出力トルク[N・m]

として評価した。実験では、基準軸を取り付けた球状歯車 S1 と、それに噛み合う鞍状歯車 M を固定し、各軸に糸を巻き付け、その先にばねばかりを接続した。図 5 に実験装置の概略を示す。糸を引く方向を統一した上で一定の力で引き、入力トルクと出力トルクを計測する方法を考案した。高度な計測機器がなくても定量評価を行えるようにした点が、この手法の特徴である。

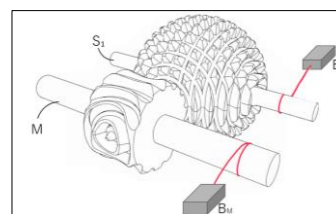


図 5 伝達率測定に用いた実験装置の概略

3-4 小型化評価

球状歯車の社会実装を考える上では、小型化可能性の把握が重要である。特に、小型ロボットや補助機器への応用には、限られた空間に搭載できるサイズで高精度に造形できることが求められる。そこで、3-1 で設計したモデルを段階的に縮小して印刷し、造形可能な最小サイズと外形精度を調べた。

4. 結果

4-1 再現性の確認

外形比較の結果、自作した球状歯車と先行研究モデルとの一致率は 90.30% となった(表 1)。これは、学校所有の FDM 方式 3D プリンタでも、球状歯車の主要な形状特徴を十分に再現できることを示している。すなわち、球状歯車の研究が、高価な専用設備に依存せず、教育現場でも取り組み得るテーマであることを確認できた。

表 1 外形比較の結果

	モデル化	印刷	借用	小型化
モデル化	-			
印刷	89.69%	-		
借用	92.26%	90.30%	-	
小型化	92.58%	92.55%	92.70%	-

4-2 伝達率評価法の検証

基準軸を固定した状態で10回の予備試行を行ったところ、同一条件下であるにもかかわらず伝達率は大きくばらついた。中には0に近い値や1を超える値も確認された。伝達率が1を超えることは、出力トルクが入力トルクを上回ることを意味し、エネルギー保存の法則に照らして妥当ではない。

この原因として、第一に糸が他部品に絡まりやすく、軸と固定具の間でつかかりが生じたことが考えられる。図6に、軸と固定具の干渉箇所を示す。第二に、ばねばかりの読み取りタイミングが一定でなく、手動測定に大きな誤差が含まれたことも原因として考えられる。

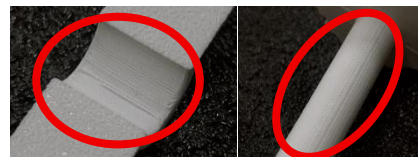


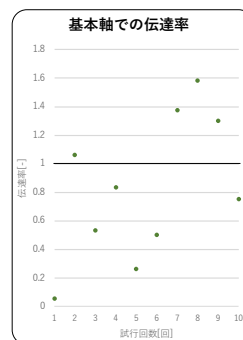
図6 軸と固定具の干渉箇所

したがって、現段階では「どの軸でも伝達率が一定である」という仮説を十分に検証できたとは言えない。一方で、本研究によって、高校設備で簡易評価を試みる際に生じる具体的な誤差要因を整理できた点には意義がある。これは今後の装置改良に向けた基礎データとなる。

4-3 小型化

モデルの小型化を試みた結果、直径約2.5 cmまでは安定して造形できた。また、このサイズにおいても、先行研究モデルとの一致率は92.58%であり、高い外形精度が維持されていた(表1)。しかし、それ以下のサイズでは、本校所有の3Dプリンタでは歯の細部を十分に造形できず、印刷途中の誤作動や歯の欠損が多発した。球状歯車は平面歯車に比べて接触構造が複雑であるため、小型化に伴うわずかな造形誤差が噛み合わせ性能に直結しやすいことが示唆された。

この結果は、地域の学校や中小規模の試作環境において球状歯車を実用化の際の設計指針となる。すなわち、現有設備で試作可能なサイズの下限を把握することで、無理のない開発条件を設定できる。



5. 社会共創の観点からの考察

本研究の意義は、球状歯車そのものの形状を再現したことだけではない。第一に、学校所有のFDM方式3Dプリンタと一般的な3DCADソフトを用いて試作を行ったことで、高度な研究設備がなくても多自由度機構の基礎研究に参加できる可能性を示した点にある。これは、地域の高校、大学、企業が連携しながら機械要素の開発に取り組み始める際のハードルを下げる。第二に、本研究は機械工学に加え、3DCAD、デジタルファブリケーション、画像処理による定量評価を組み合わせた学際的研究である。これは、単なるものづくりではなく、設計、製作、評価を一体化して進める研究プロセスとして価値をもつ。第三に、球状歯車が実用化されれば、狭い空間で多方向の動作を必要とする機構に応用できる可能性がある。例えば、災害現場や点検現場で用いる小型ロボット、身体動作を補助する機器、複雑な可動部を有する精密機械などである。本研究は、そうした応用を直ちに実現したものではないが、その前提となる「再現可能な製作法」と「評価法の課題」を明らかにした基礎研究として位置付けられる。

また、本研究は山形大学・多田隈理一郎先生の協力により、先行研究モデルの借用と助言を受けて進めた。高校と大学が協働し、研究成果を共有しながら発展させていく点も、社会共創という観点に合致すると考える。

6. 結論

本研究では、球状歯車の再現性、性能評価法、小型化可能性について検討し、次の3点を明らかにした。第一に、学校所有のFDM方式3Dプリンタを用いて球状歯車を再現した結果、先行研究モデルとのIoUは90.30%となり、教育現場でも十分な再現が可能であることを示した。図7に、自作した球状歯車と鞍状歯車の外観を示す。第二に、ばねばかりを用いた簡易的な伝達率評価法を提案したが、予備実験では装置構造や手動計測に起因する誤差が大きく、現段階では厳密な性能評価には至らなかった。しかし、誤差要因を具体的に整理できたことは、今後の評価装置改良につながる成果である。第三に、小型化については直径約2.5 cmまでは高精度に造形でき、一致率92.58%を確認した。一方で、それ以下では造形誤差や欠損が多発し、本校の設備における限界が明らかになった。



図7 自作した球状歯車と鞍状歯車

以上より、球状歯車は多自由度機構の基礎要素として高い可能性を有する一方、社会実装には精密な性能評価法の確立と、大きさに合わせた設計の工夫が必要である。

7. 今後の展望

本研究では、球状歯車の伝達率や小型化の可能性について検討を行い、多方向への動力伝達に関する新たな知見と課題を得た。今後は、性能評価を確立させ、加工精度や耐久性といった課題の解決を図るとともに、実際の機構への応用に向けた検証を進める。また、本研究を通して得られた知識や技術については、発表活動や交流を通じて後輩や他校の生徒に広く共有し、理解の促進と新たな発想の創出につなげていきたい。こうした取り組みにより、研究成果を個人のものととどめず、社会全体で価値を高めていくことを目指す。

8. 謝辞

本研究を進めるにあたり、山形大学の多田隈理一郎先生には、貴重な研究成果である球状・鞍状歯車の実物をお貸しいただくとともに、研究内容について貴重な助言を賜った。ここに深く感謝申し上げます。

9. 参考文献

- (1) 遠山茂樹(1995)「球面超音波モータ」．『精密工学会誌』, 61(9), 1227-1230
- (2) 矢野智昭 佐々木亮(2013)「切頂八面体と正十二面体にもとづく球面モータの開発-回転氏の回転方向を切り替える方法の提案-」．『日本 AEM 学会誌』, 21(2), 184-189
- (3) ABENICS: Active Ball Joint Mechanism With Three-DoF Based on Spherical Gear Meshings
- (4) Hatena Blog gear <https://bevel-gear.hatenablog.com/entry/2021/07/09/224425>
- (5) Emir, F. and Ayyildiz, S., “Accuracy evaluation of complete-arch models manufactured by three different 3D printing technologies: a three-dimensional analysis,” Journal of Prosthodontic Research, Vol. 65, No. 3, pp. 365-370, 2021.
- (6) 久次米利彦, 「光造形方式 3D プリンタの造形精度に関する基礎的研究」, 『産業技術短期大学誌』, 第 56 巻, pp.81-84, 2023.