

複数台のドローン用モータとアキシャル形磁気ギア を一体化したモータシステムの開発

芝浦工業大学 工学部 電気電子工学課程
相曾 浩平

1. はじめに

脱炭素を背景に自動車の電動化が進み、省エネルギー化と車内空間の拡大に向け、モータシステムの高効率化と小型軽量化が求められている。モータの出力はトルクと回転速度の積で表され、モータの体積と質量はトルクの大きさに決まるため、トルクを低く抑え、高速回転により出力を満たすことでモータの小型軽量化が可能である。現在、市場が拡大しているドローン用モータは、小型軽量、大量生産が可能で安価という特徴に加え、高速回転により極めて高い出力密度（およそ 5kW/kg ）が得られる。これは、一般的な自動車主機用モータと比較しても高い出力密度であり、同一出力をより軽量のモータで満たせることを意味する。このドローン用モータを複数台用いれば、自動車用途に高出力密度のモータシステムを構築できる。一方で、所望のトルクと回転速度を得るためにはギアを要するが、従来の機械式ギアは歯同士の接触により動力を伝達するため高速回転時には歯の機械的疲労や磨耗から伝達効率の低下、振動及び騒音の増大といった課題が存在する。高速モータの利点を活かすためには、高速回転するモータ動力を如何に高効率かつ高トルク密度のギアによって動力変換できるかが鍵となる。そこで本研究では、磁力により非接触で動力変換できる磁気ギアに着目し、高効率かつ高トルク密度を満たす磁気ギアの構造と磁束伝達方法を提案し、その特性を解析と実機実験により明らかにすることを目的とした。

2. 複数台の小型高速モータとアキシャル形磁気ギアを用いたモータシステムの提案

提案する磁気ギア(Magnetic Multiple Spur Gear: MMSG)は、永久磁石を配置した1つの出力ロータと複数の入力ロータから構成され、全ての入力ロータにドローン用モータ(ブラシレスモータ)が取り付けられた構成となる(図1)。各入力ロータがモータによって回転すると入力ロータの磁力により出力ロータに動力が非接触で伝達され、トルクと回転数が動力変換される。複数台のドローン用モータを高速回転することで高出力密度を確保し、MMSGを用いて全モータ動力を各入力ロータから出力ロータに非接触で動力伝達を行うことでシステムの高効率化と小型軽量化が可能である。永久磁石の磁力を用いた非接触の動力伝達によりメンテナンスフリー、低振動・低騒音の利点を得られ、ギア比を入力ロータと出力ロータの磁極数の比で得ることが出来る。これまでにラジアル形 MMSG(図2)が検討され、高出力密度、

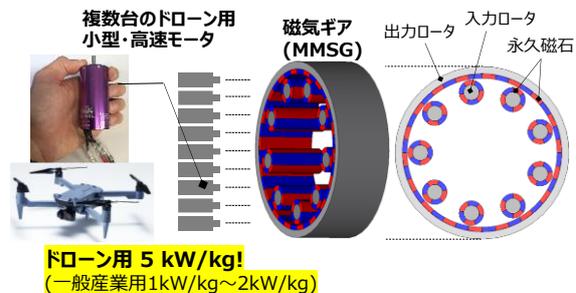


図1. 複数台のドローン用モータと
磁気ギアを一体化したモータシステム

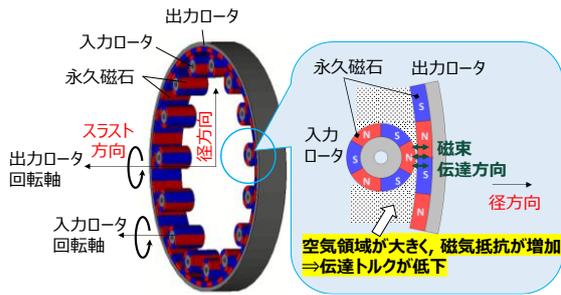


図 2. ラジアル形 MMSG とその課題

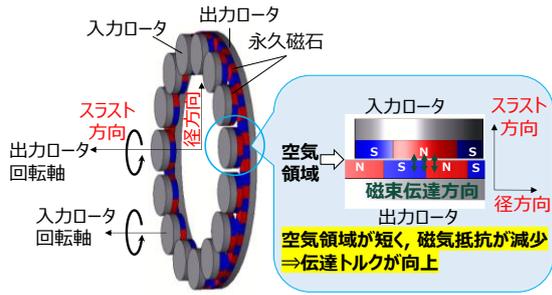


図 3. 提案するアキシアル形 MMSG

高い伝達効率が得られることが検証されてきたが[参考文献(1)], ラジアル形構造は各入力ロータと出力ロータ間の磁束が伝達される空間(空気領域)が大きく磁気抵抗が増加するため磁力が弱まり, 更なる高トルク密度化が難しい問題が存在した。そこで, 本研究ではアキシアルギャップ構造の MMSG を提案した(図 3)。アキシアル形 MMSG では入力ロータと出力ロータの配置を変更し磁束伝達方向をスラスト方向とすることで, 空気領域の間隔を短く磁気抵抗を減少し, トルク密度の向上が期待できる。

3. アキシアル形磁気ギア(MMSG)の解析による性能評価

提案するアキシアル形 MMSG と従来のラジアル形 MMSG の特性を有限要素法解析(JMAG-Designer)により評価した。アキシアル形 MMSG は, 先行研究のラジアル形 MMSG と同じ仕様で設計した。表 1 にシミュレーションモデルの仕様を示す。

表 1. シミュレーションモデルの仕様

	Radial-gap type	Axial-gap type
Model		
Air gap length [mm]	0.5	0.5
Pole pairs of output rotor	30	30
Pole pairs of input rotor	3	3
Gear ration	1:10	1:10
Core material	Magnetic steel sheet (35H300)	Magnetic steel sheet (35H300)
Permanent magnet material	Sintered Nd-Fe-B	Sintered Nd-Fe-B
Mass of magnet [kg]	1.22	0.81

表 1 に示すように, 出力ロータ外径, ギア比, 入力ロータ個数などの条件を揃えた。アキシアル形 MMSG の磁石質量は 0.81 kg であり, ラジアル形 MMSG の 1.22 kg よりも少ない質量となっている。また, 両モデルとも, 入力ロータの回転速度は 16000 rpm, 出力ロータの回転速度は 1600 rpm で解析を行なった。図 4 にトルク波形を示す。ラジアル形 MMSG の出力トルクは 195 Nm, トルク密度は 194 kNm/m³ であり, アキシアル形 MMSG の出力トルクは 200 Nm, トルク密度は 319 kNm/m³ となった。アキシアル形 MMSG は, 体積, 磁石質量ともにラ

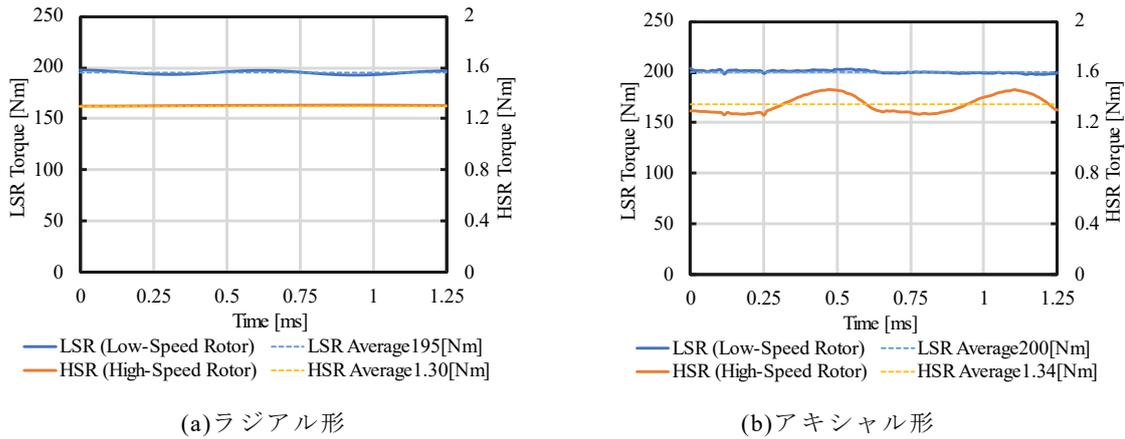


図 4. トルク波形

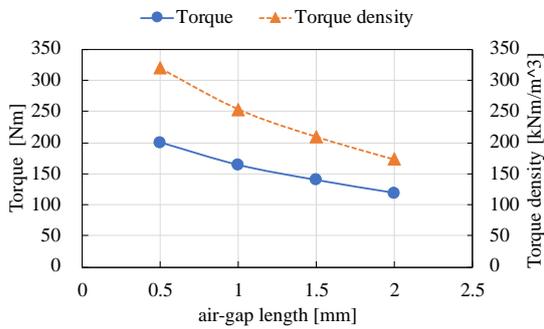


図 5. エアギャップ長を変えた時のトルク特性

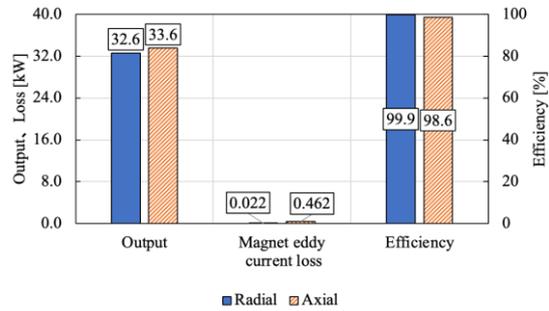


図 6. 磁気ギアの損失と効率

ラジアル形 MMSG よりも少ない状態で、同程度のトルクが出力できることが確認された。図 5 にアキシャル形 MMSG のエアギャップの長さを変えた場合のトルク特性を示す。図 5 より、アキシャル形 MMSG は各ロータ間での磁石の接触を考慮し、エアギャップの長さを 1.5 mm にした場合でも、ラジアル形 MMSG より高い、210 kNm/m³ という高トルク密度が得られる結果となった。これらのトルク密度の値は国内外で研究開発されている磁気ギアと比較しても極めて高い数値である。図 6 に損失とギアの伝達効率を示す。図 6 より、アキシャル形 MMSG では磁石における渦電流損が増加する。そのため、ラジアル形 MMSG の 99.9% の効率に劣るが、高い伝達効率 98.6% を達成できることがわかった。以上の研究成果について、査読付国際学会[参考文献(2)(3)]で研究発表した。

4. アキシャル形 MMSG システムの実験による性能評価

アキシャル形 MMSG の実験機を製作し、特性評価を行った。実験機の詳細はまだ未公開であるため、結果のみ示す。実験機のトルク特性を図 7, 図 8 に示す。図 7, 図 8 は入力ロータ 1 つ分(モータ 1 台駆動)でのトルクを測定し、入力ロータ台数が増えた場合のギアのトルク密度とシステム(磁気ギア+モータ)のトルク密度を見積もった結果である。図 7, 図 8 より、モータ台数を増やすほどトルク密度が得られることが実験により検証された。

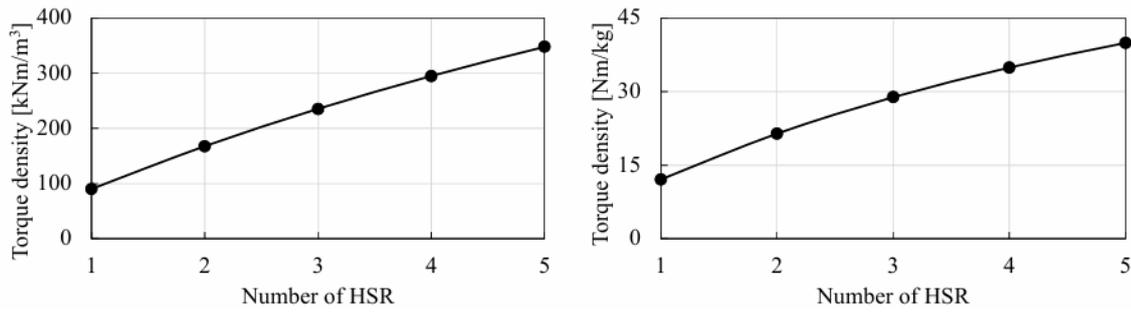


図 7. 入力ロータ数(モータ台数)に対する磁気ギアのトルク密度

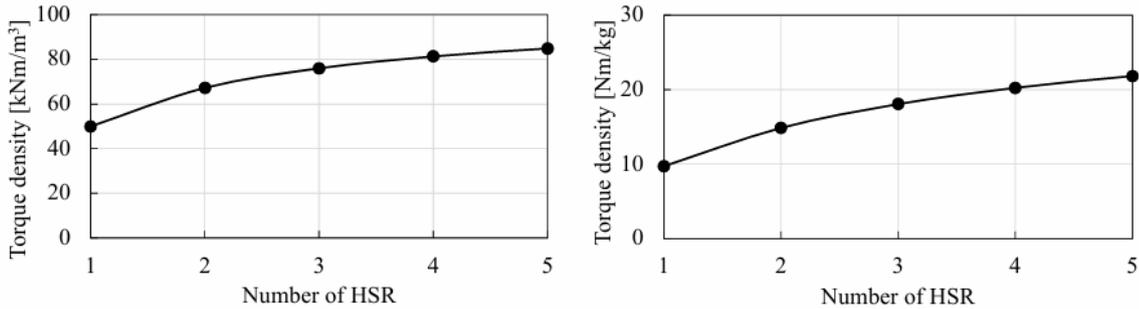


図 8. 入力ロータ数(モータ台数)に対するシステム(磁気ギア+モータ)のトルク密度

9. まとめ

本研究では、モータシステムの小型軽量化と高効率化のために複数台の小型高速モータとアキシヤル形磁気ギア(MMSG)のシステムを提案し、その性能を明らかにした。解析と実験により、提案システムにおいて高トルク密度と高い伝達効率が得られ、モータシステムの小型軽量化と高効率化の有効性が示された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) A Novel In-Wheel Motor Drive System of Multiple High-Speed Motors Integrated with Magnetic Gear for Electric Vehicle, K. Aiso, K. Akatsu, Y. Aoyama, 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia), 2022.
- 2) Taiga Kamijo, Kohei Aiso, Kan Akatsu, Yasuaki Aoyama, "Proposal of Axial-gap type Magnetic Multiple Spur Gear for In-wheel Motor System of Electric Vehicle", 2023 International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), May 2023.
- 3) Taiga Kamijo, Kohei Aiso, Kan Akatsu, Yasuaki Aoyama, "Investigation on Structures of Axial Gap Type Magnetic Multiple Spur Gear for In-Wheel Motor System of Electric Vehicle", 2023 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC-AP), November.