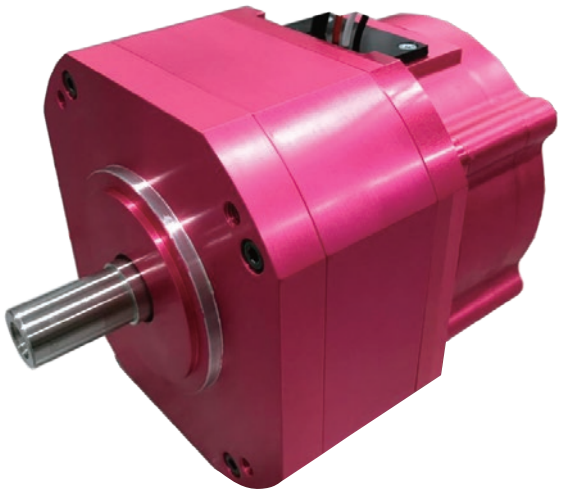
磁束変調型磁気ギヤを用いた磁気柔軟アクチュエータの基礎検証

Basic Verification of Magnetic Flexible Actuator Using Flux-Modulated Magnetic Gear

●小　泉　　光*　　水　野　博　之*　　山　本　泰　三*
Hikari KOIZUMI　　Hiroyuki MIZUNO　　Taizo YAMAMOTO



MFA（磁気柔軟アクチュエータ）試作機の外観
Prototype MFA (Magnetic Flexible Actuator)

磁束変調型磁気ギヤ（FMG：Flux-Modulated Magnetic Gear）は，従来の磁気式可変伝達機構と比較して，著しく高いトルク伝達密度を実現できることが広く報告されている(1)。この性能向上については，FMGの動作原理そのものが持つ利点だけでなく，近年の高エネルギー積永久磁石の発展によってFMGシステムのトルク伝達能力が大幅に向上したことにも起因する。

FMGは，摩擦のない駆動，柔軟性（コンプライアンス），静粛性，低バックラッシ，脱調トルク（ステップアウトトルク）など，機械式伝達機構には見られない独自の特性がある。故に，既存の機械式ギヤを置き換える可能性があるだけでなく，新たな価値を創出する可能性も持っている。本報では，FMGにモータおよびセンサを組み合わせた新しいアクチュエータ「磁気柔軟アクチュエータ（MFA：Magnetic Flexible Actuator）」を提案し，その基本特性について述べる。

本報は，日本機械学会の許可を得て，注記の文献の内容を改変するとともに，新たな内容を一部追加したものである。

Flux-Modulated Magnetic Gear (FMG) has been widely reported to achieve substantially higher torque transmission density than conventional magnetic variable transmission mechanisms. This improvement stems not only from the inherent advantages of the FMG operating principle but also from recent advancements in high-energy product permanent magnets, which have markedly enhanced the torque transmission capability of FMG systems. It has some unique characteristics not found in mechanical transmissions such as frictionless drive, compliance, quiet drive, low backlash, step-out torque and so on. Therefore, it has potential not only to replace existing mechanical gears but also to create new value. This paper proposes a new actuator, the Magnetic Flexible Actuator (hereinafter called "MFA"), which combines the FMG with a motor and sensor, and describes its basic characteristics.

This report is based on the referenced publication and has been adapted and supplemented with additional content, with permission from the Japan Society of Mechanical Engineers.

1　まえがき

近年，少子高齢化に伴う労働人口の減少が社会課題となっており，その代替労働力として協働ロボットの開発が進んでいる。協働ロボットは人と同一空間で稼働するため，安全性や静粛性に加え，柔軟な外力応答性が求められる。一方，現在広く用いられる機械式ギヤは摩擦やバックラッシを伴うため，これらの要求を高水準で満たすことは容易ではない。

そこで筆者らはFMGにモータおよびセンサを一体化したMFAを提案する。FMGは磁気結合による非接触動力伝達機構であり，機械的接触に起因する摩擦やバックラッシを本質的に排除できる。そのため，静粛かつ柔軟な力学応答を実現でき，協働ロボット用アクチュエータとして有望である。本報では，協働ロボットへの適用を見据え，MFAのトルク制御手法を検討し，実験によりその有効性を検証する。

2　FMG の構成と動作原理

図 1 に，FMGの構造を示す。FMGは，内極磁石および内極

＊技術本部

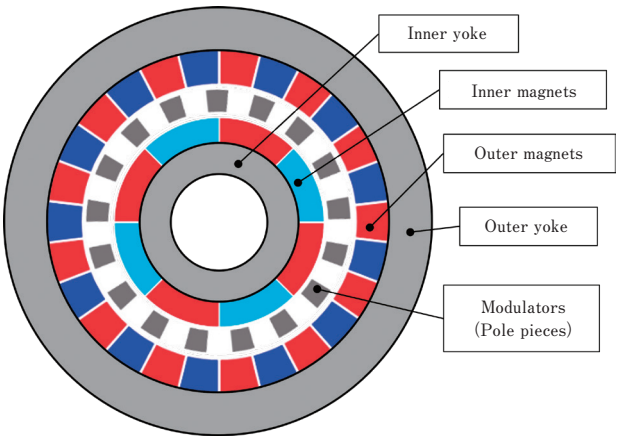


図１　FMGの断面図
Cross sectional view of FMG

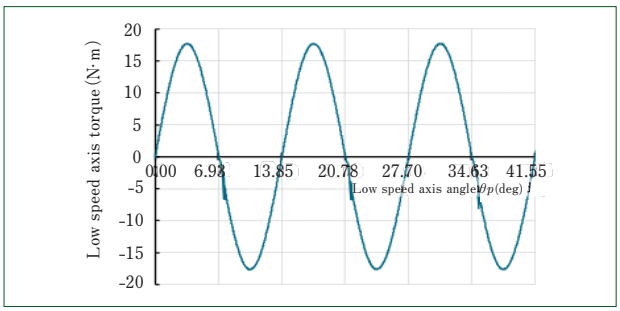


図２　FMGの低速軸のトルク−角度特性
Torque-angle curve of low-speed axis

ヨーク，外極磁石および外極ヨークの径方向中間に位置し，円周方向に等間隔で配置された変調子から構成される。内極軸，外極軸，および変調子軸は同心円状に配置されており，軸受を除き互いに非接触である。磁石には希土類永久磁石（Nd磁石）を用い，強力かつ安定した磁束の供給が可能である。一方，変調子は磁性体で構成され，磁気回路内におけるパーミアンス（磁束の通りやすさ）の周期的変化を生み出す役割を果たす。

次に，FMGの動作原理について述べる。FMGにおけるトルク伝達は，内極磁石および外極磁石のそれぞれが生成する起磁力に，変調子による変調磁束が同期することで起きる。ここで，内極磁石および外極磁石の周囲には，それぞれの磁極対数に対応した空間周波数を有する起磁力分布F_{in}，F_{out}が形成される。これらは空間的に周期性を有することから，本報では余弦波を用いて表現する。

$$F_{in}=F_a\cos(N_i\theta) \quad \cdots\cdots(1)$$

$$F_{out}=F_b\cos(N_o\theta) \quad \cdots\cdots(2)$$

ここで，F_a，F_bはそれぞれ内極磁石・外極磁石の起磁力振幅を，N_i，N_oはそれぞれの磁極対数を表す。

変調子は円周方向に均等に配置され，パーミアンスPも空間的な周期性を有することから式(3)のように表される。

$$P=P_o+P_1\cos(N_p\theta) \quad \cdots\cdots(3)$$

ここで，P_0はパーミアンスの平均値を，P_1はその振幅，N_pは変調子数を表す。

磁束はパーミアンスと起磁力の積として計算され，変調子により変調された内極側の磁束ϕ_{in}は式(4)で表される。

$$\phi_{in}=F_{in}P=P_oF_a\cos(N_i\theta)+P_1F_a[\cos\{(N_p-N_i)\theta\}+\cos\{(N_p+N_i)\theta\}] \cdots(4)$$

一方，外極磁石周辺に生じる磁束ϕ_{out}は，空気のパーミアンスを一定値P_{air}として，式(5)で表される。

$$\phi_{out}=F_{out}\,P_{air}=P_{air}\,F_b\cos(N_o\theta) \quad \cdots\cdots(5)$$

ここで，外極側磁束の空間周波数N_oと，内極側磁束に含まれる空間周波数N_i，N_p-N_i，N_p+N_iのいずれかが一致すると，両者は同一極数の磁石が対向した状態と等価となる。その結果，磁気的な吸引・反発力により動力伝達が生じる。この磁気的なかみ合い条件を満たす磁極対数と変調子数の関係，および各部の回転角速度（ω_i，ω_o，ω_p）の関係は式(6)(7)で与えられる。

$$N_o=N_p\pm N_i \quad \cdots\cdots(6)$$

$$N_o\omega_o=N_p\omega_p\pm N_i\omega_i \quad \cdots\cdots(7)$$

3　磁気柔軟アクチュエータの構造とトルク推定原理

FMGは磁気的な歯のかみ合いで動力を伝達する機構である。理想的な条件下においては，変調子の回転角度θ_pは，内極磁石軸の回転角度θ_iに減速比の逆数を乗ずることで求められる。

$$\theta_p=\frac{N_i}{N_p}\theta_i \quad \cdots\cdots(8)$$

一方，外部から負荷が加わり，変調子の回転が理想関係から遅れを生じる場合には，軸間のエアギャップ中の磁気エネルギーに勾配が生じ，結果としてトルクが発生する。新口らの文献[2]を参考に仮想変位法を用いて導出すると，FMGの出力トルクTは式(9)で表される。

$$T=\frac{F_a^2P_1N_i}{4}\sin(-N_o\theta_o+N_p\theta_p-N_i\theta_i+\phi) \quad \cdots\cdots(9)$$

ここで，θ_i，θ_p，θ_oはそれぞれ内極磁石，変調子，外極磁石の回転角度を，ϕは初期位相差を表している。さらに，式の簡略化として，固定軸である外極磁石の回転角度θ_oは0とする。また，初期位相差ϕは角度原点の設定により0として省略し，トルクの振幅をK_tとして整理すれば，トルクは式(10)で示される。

$$T(\theta_p)=K_t\sin(N_p\theta_p-N_i\theta_i) \quad \cdots\cdots(10)$$

図２に，試作したFMGの高速軸固定時におけるθ_pに対するトルク特性を示す（式(10)においてθ_i=0）。試験に用いたFMGは，減速比8.67，トルク波高値17.7N·mである。同図よりトルク−出力軸角度特性は，式(10)の理論式の通り正弦波形状を示すことが確認された。トルクが正の値から負の値に切り替わる瞬間に，負のスパイクトルクが認められるが，これは強制回転を与えるための減速機のバックラッシが要因であり，FMGの特性ではない。FMGの詳細試験結果は，文献[3]を参照されたい。式(10)および**図２**より，内極磁石軸（高速軸）と変調子軸（低速軸）の位置が判明すれば，FMGの出力トルクが検出でき，この情報を用いれば，FMGの出力トルク

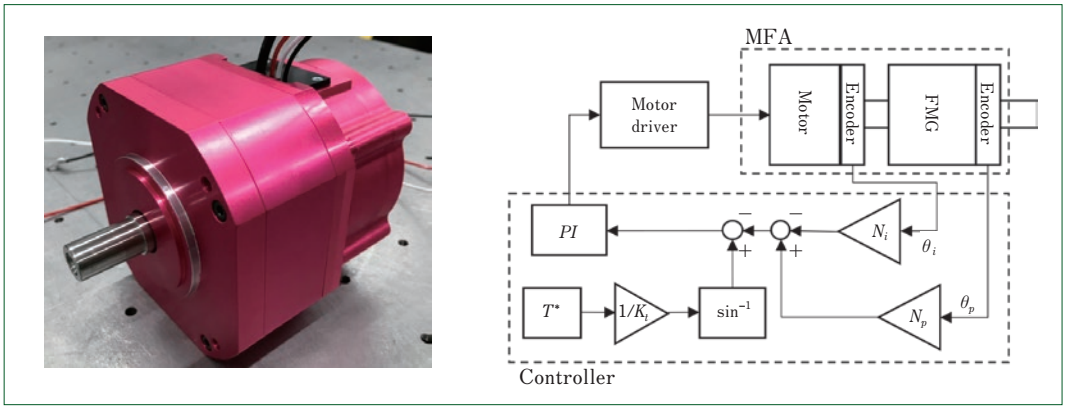


図３　**MFA試作機の外観と概略図**
Prototype MFA and its schematic configuration

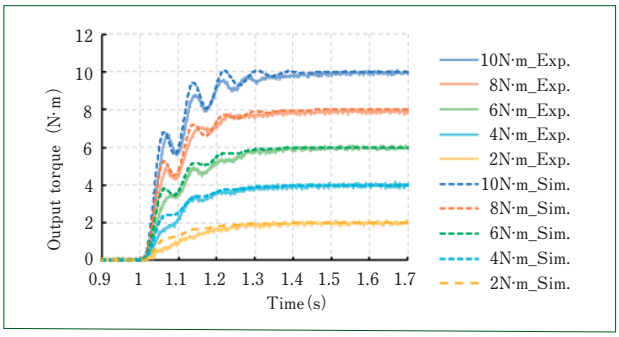


図４　**出力軸拘束時のステップ応答**
Step response with output shaft fixed

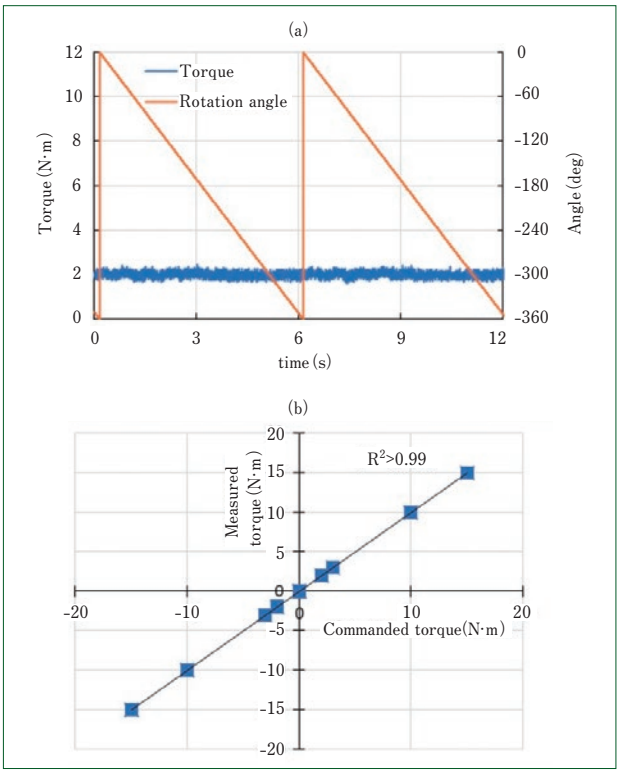


図５　**出力軸回転時のトルク制御性能**
(a) 負荷モータ回転角度と出力トルクの関係
(b) 指令トルクと実測トルクの関係
Torque control performance during output shaft rotation
(a) Load motor rotation angle and output torque
(b) Commanded torque versus measured torque

を制御することが可能であると推測した。

そこで，モーターFMG－角度センサを一体としたMFAを考案した。**図３**に，MFAの外観と概略図を示す。FMGの高速軸，低速軸のそれぞれに位置（回転角度）検出器を配置し，高速軸にモータを接続した構成とした。位置検出には高速軸，低速軸ともに光学式エンコーダ（26 bit/rev）を用いた。また，高速軸側の検出器はモータ制御と併用可能である。トルクの式(10)より，磁気的位相差は出力トルクの逆正接を取ることで得られる。本システムのトルク制御は，ここで得られた磁気的位相差を指令とし高速軸，低速軸の回転角度検出値から磁気的位相差の実際値を求め，これをフィードバックすることで，モータドライバへの制御指令を生成する構成とした。

4　実機検証結果

続いてMFAの動作検証を実施した。**図３**に示すように，本来は高速軸とモータエンコーダは共通化可能であるが，本検証では簡易的な試験構成とし，それぞれ独立したセンサを用いて評価を行った。また，FMGを一般的な減速機のモデル化で用いられる，２慣性系モデルで表現したシミュレーション解析も併せて実施した。

図４に出力軸（FMGの低速軸）を拘束した場合のステップ応答試験の結果を示す。トルクの定常誤差は0.1 N·m以下であり，シミュレーション結果とも良好に一致している。一方で，定常状態において微小ながら誤差のばらつきが確認された。この要因として，FMGに存在するコギングトルクなどの影響が考えられる。

次に，動的条件下におけるトルク制御性能を評価するべく，FMGの出力軸に負荷モータを接続し，MFAにトルク指令を与えた状態で出力軸を強制回転させた。**図５**に，出力軸回転角度および出力トルクの測定結果を示す。同図より，出力軸回転時も実測トルクは指令値に追従し，適切なトルク制御が可能であると認められた。また，10～100 rpmの範囲において，平均トルクは指令値と良好に一致し，回転速度によらず所望のトルクを出力できることを確認した。

5　インピーダンス制御

MFAに用いたFMGは磁束のかみ合いによりトルクを伝達する非接触動力伝達機構である。このため，機械式ギヤで必要となる歯面間の隙間を要さず，バックラッシの影響をほとんど受けない。また，歯面接触がないことから摩擦や摩耗に

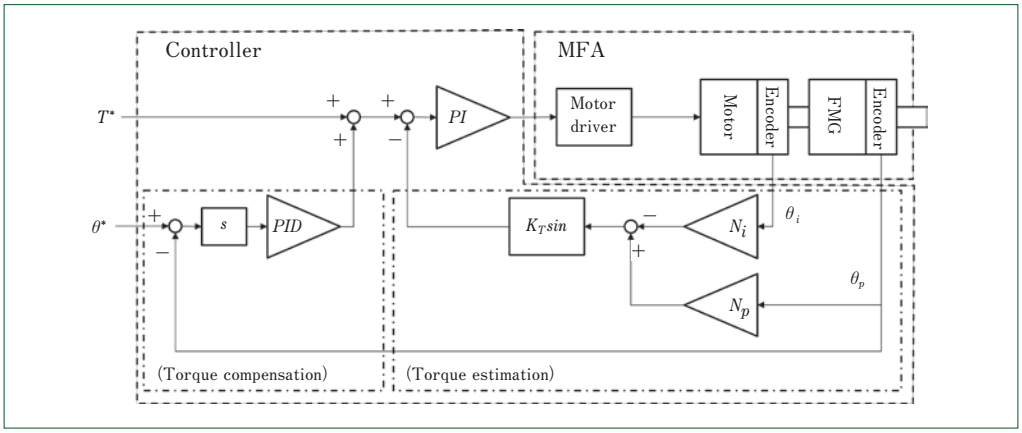


図6　**トルク補償を適用したMFAの構成図**
Configuration of MFA with torque compensation

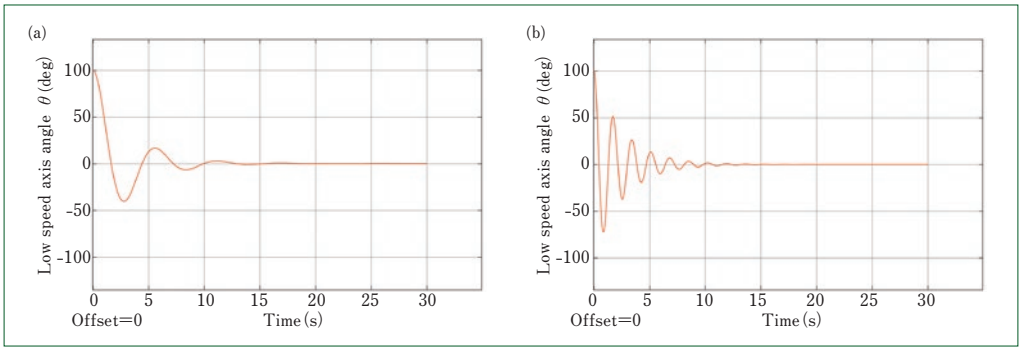


図7　**仮想剛性Kの違いによる出力軸応答シミュレーション結果 (a) K=0.5 (b) K=5.0**
Simulation results of output shaft responses for different virtual stiffness values K (a) K=0.5 (b) K=5.0

起因する特性変化も生じにくい。その結果，MFAはこれらの非線形的な影響を受けにくく，シミュレーションと実験結果が精度良く一致している。このことから，MFAはトルク特性を理論的に把握しやすく，出力軸トルクの推定および制御が比較的容易であると考えられる。この特性を利用することで，仮想的な運動状態の模擬や，直感的な装置の動作・調整の実現が期待できる。

MFAの力学特性が，慣性モーメントJ，粘性係数cおよび剛性Kを有する仮想的なばね・マス・ダンパ系となるよう制御することを考える。すなわち，

$$T=J\ddot{\theta}+c\dot{\theta}+K\theta \quad \cdots\cdots (11)$$

目標位置θ^*とすると，トルク計算式は，ラプラス変換を用いて変数sで表すと，

$$T=-(Js^2+cs+K)(\theta^*-\theta)=-s\left(Js+c+\frac{K}{s}\right)(\theta^*-\theta) \cdots (12)$$

となるので，この外力Tと釣り合うように目標トルクT^*を補償すればよい。**図6**に，トルク補償をMFAへ適用したときの概略構成例を示す。**図3**のトルク検出およびトルク制御の制御部を基に，トルク補償部を追加した構成となっている。**図7**に，出力軸挙動をシミュレーションした結果の一例を示す。高速軸を仮想的に固定し，出力軸を100°回転させた状態から解放したときの出力軸の回転角度θの挙動である。なお，出力軸を開放したときの時刻を0 sとし，剛性Kは0.5および5.0とした。同図より，仮想モデルの剛性Kの特性を変更することで，MFAの挙動が変化し，想定した制御が可能であることを確認した。

6　むすび

(1) FMGを用いた磁気柔軟アクチュエータ (MFA) を提案し，トルク推定および制御原理を示した。
(2) 出力軸拘束試験の結果，トルク誤差0.1 N·m以下の高精度なトルク制御を可能とし，また，シミュレーション結果と実測結果が良好に一致することで，提案モデルの妥当性を確認した。
(3) 出力軸回転試験の結果，回転中においても指令トルクへの追従を確認し，動的条件下でのトルク制御が可能であることが確かめられた。
(4) トルク制御系にトルク補償器を付加することで，仮想ばね特性を模擬した制御系が構成できることを示した。

今後は，より高度な制御性能を実現するアクチュエータの開発を目指し，ハードウェアおよびソフトウェアの両面から改良を進めていく。

※山本泰三，水野博之，磁束変調型磁気変速機を用いた磁気柔軟アクチュエータの基礎検証，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集，26-2 (2026)，1A1-F01.

(参考文献)
(1) Atallah, K. and Howe, D., "A novel high-performance magnetic gear," IEEE Transactions on Magnetics, 37-4 (2001) , 2844-2846.
(2) 新口昇，平田勝弘，早川裕一，表面磁石型磁気減速機の伝達トルク特性に関する研究，電気学会論文誌D，131-3 (2011)，396-402.
(3) 山本泰三，三成貴博，中川博貴，磁束変調型磁気変速機の基礎特性，日本機械学会論文集，89-924 (2023)，23-00066.