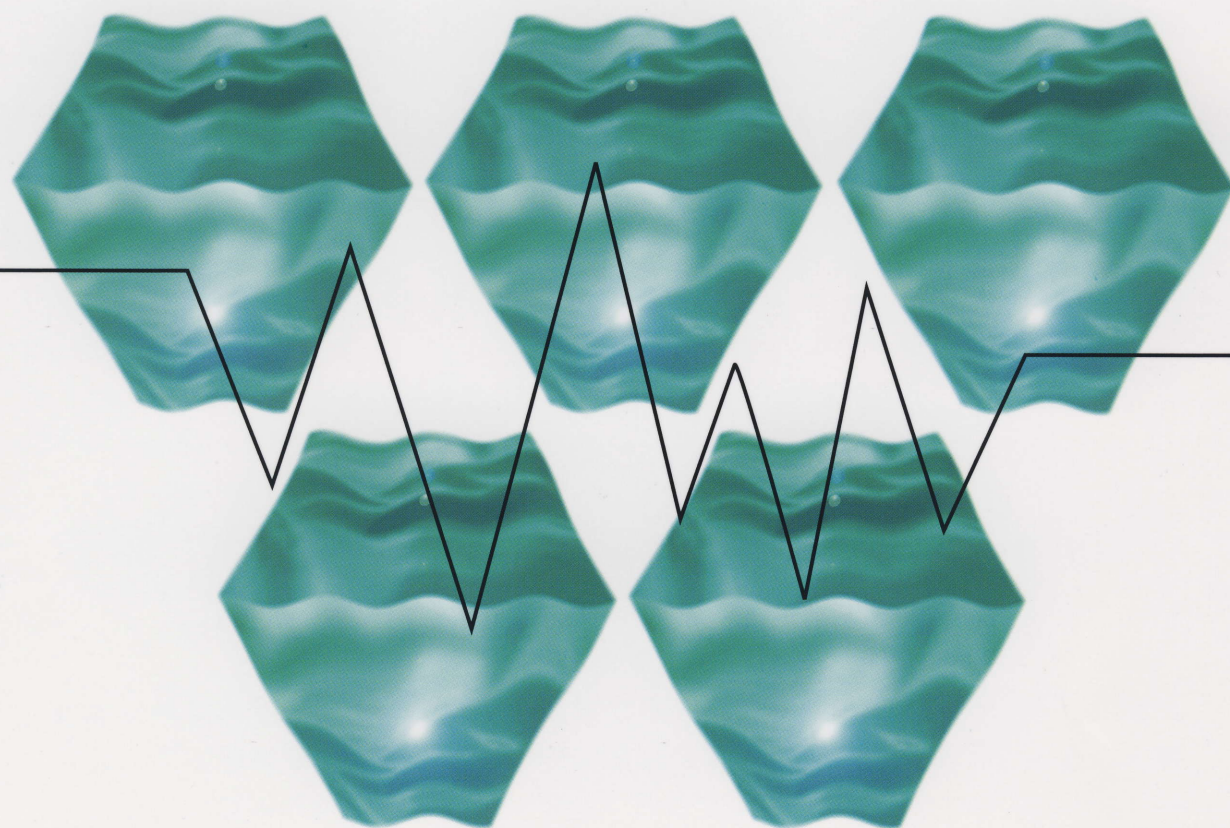




【No.09-30】

第11回 「運動と振動の制御」シンポジウム

講演論文集



2009年9月2日(水)～4日(金)

アクロス福岡

主 催

社団法人 日本機械学会 機械力学・計測制御部門

〒160-0016 東京都新宿区信濃町35番地 信濃町煉瓦館 5 階

TEL : 03-5360-3500 FAX : 03-5360-3508 URL <http://www.jsme.or.jp/>

協 賛

計測自動制御学会, システム制御情報学会, 人工知能学会, 精密工学会, 電気学会, 電子情報通信学会, 土木学会, 日本音響学会, 日本建築学会, 日本航空宇宙学会, 日本知能情報ファジィ学会, 日本フルードパワーシステム学会, 日本ロボット学会, バイオメカニズム学会

B27 永久磁石と回転形モータを利用した磁路制御型磁気浮上機構

Mechanical Magnetic Suspension System Using Rotary Actuator and Permanent Magnet

○正 岡 宏一 (高知工大), 学 孫 鳳 (高知工大)

Koichi Oka, Kochi University of Technology, Miyakuchi 185, Tosayamada-cho, Kami-city, Kochi 782-8502
Feng Sun, Kochi University of Technology

Abstract: This paper describes a magnetic suspension system using a rotary motor and a disk magnet. In this suspension system, the suspension force to the suspended object is provided by a disk-type permanent magnet and controlled by a magnetic resistance control device, which controls the angle of disk magnet to change the flux flowing through the suspended object. This suspension system can generate a zero attractive force, change the polarity of the stator poles, and realize zero power control for any suspension poison. In this paper, the suspension principle of this suspension system is introduced, the model and simulation are carried out, and some suspension experiments are executed.

Key Words: Magnetic Suspension, Permanent Magnet, Rotary Motor, Flux Path Control, Zero Power Control.

1. はじめに

磁気浮上機構は、対象物を非接触で支持できるため、機械的な接触がなく塵埃を発生しないという利点がある。これらの利点によって、特殊環境で用いられる磁気軸受やフライホイール、高速運行の磁気浮上列車、およびクリーンルーム内の支持装置などに利用されている。磁気浮上機構には種々の形式があるが、永久磁石を用いた磁気浮上機構は、コイルがないため容積を節約でき、発熱の問題が無視できる。永久磁石を用いた磁気浮上機構は、起磁力を直接制御することができないので、空隙を変化させて磁気回路内の磁気抵抗を調整する方法⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾や、磁路を変化させて調整する方法⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾が提案されている。前者の磁気浮上システムは、磁力の特性として浮上体が一度吸着してしまうと制御不能であることや、磁極の向きを変えられないという欠点がある。後者の磁気浮上システムでも、磁極を変えることができない。

本研究は、円板磁石と回転モータを用いた浮上システムについて検討する^{(9),(10)}。この浮上システムは、回転モータに取り付けられた円板磁石の回転角度を制御することにより、円板磁石が発生した磁束の経路を変更し、浮上力を制御するものである。円板磁石の回転角度の変化により、向きも変化させることが可能であり、浮上力をゼロにすることもできる。以下では、まず円板磁石を用いた浮上原理を説明する。次に試作装置を紹介し、モデル化と数値シミュレーションを行う。次に試作装置を用いて発生吸引力と磁束密度を計測し、その結果を示す。最後に浮上実験を行った結果を示し、提案した浮上装置の実現可能性を検討する。

2. 回転形アクチュエータを用いた磁気浮上装置

2-1. 浮上原理 提案する磁路調整型磁気浮上機構の原理図を Fig. 1 に示す。この磁気浮上機構は、円板磁石と二つの F 型の強磁性体コアと四角柱の浮上体から構成されている。円板磁石は直径方向に着磁されている。考察のために、90 度の部分が N 極、反対側の 90 度が S 極であると仮定する。

まず、図 (a) のように円板磁石の N 極がちょうど真上に、S 極が真下にあるとき、上部の N 極から出発した磁束の半分は右側のコアに、半分は左側のコアに流れ込んでいると考えられる。そして、これらの磁束はコア下部の S 極に面した部分までコアを通り、その後左右のコアから磁石の S 極に入る。従って、円板磁石からの磁束は浮上体を通過することはなく、コアと浮上体間では吸引力は発生しない。

次に、円板磁石が右に少し回転し、図 (b) の状態になったとす

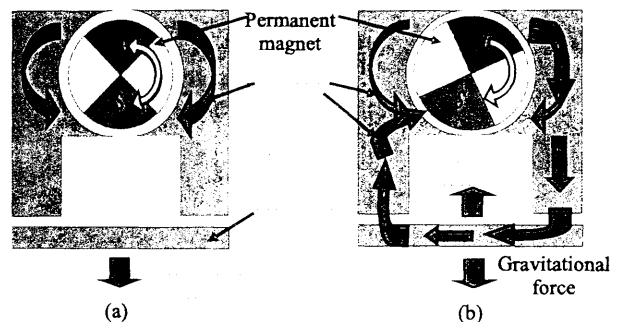


Fig. 1 Principle of Magnetic Suspension System

る。上部の N 極と面するコアの面積は、左側のコアより右側のコアの方が大きいので、流出する磁束は、右側のコアに多く流れる。また、下部の S 極と面する左右のコアの面積関係は、N 極より逆になっており、右側のコアから永久磁石に流入する磁束は少ない。このため、右側のコアの上部からの磁束は、コア下側から永久磁石の S 極に流れるものと、浮上体を通って左側のコアと面する S 極に流れるものの 2 つに分かれる。コアと浮上体間に磁束が流れるため、吸引力が発生する。

上記より、図 (a) の状態から 90 度までの間では、円板磁石の回転角度が大きくなるに従って、浮上体を通過する磁束が大きくなり、吸引力も大きくなる。このことから、円板磁石の回転角度を制御することによって浮上力を調整することが可能である。また、逆方向に円板磁石を回転させることにより、磁束を逆に流すことが可能であり、コアの磁極の極性を変化させることができる。

2-2. 試作装置 今回提案する磁路調整型磁気浮上機構のイラストを Fig. 2 に、試作装置の正面から見た写真を Fig. 3 に示す。この浮上機構は、円板磁石、回転モータ、パーマロイのコア、四角柱の浮上体、二つの渦電流センサで構成している。円板磁石は、装置の中央の円形のもので、直径が 30mm、厚さが 10mm、直径方向上に磁極が半分に磁化されているネオジム磁石である。この磁石は、垂直固定板の裏側に取り付けてある回転モータによって回転駆動される。回転のためのアクチュエータは、減速機構としてバックラッシュの少ない、高い位置決め精度が可能なハーモニックドライブの少ない DC モータである。モータには、360 p/r のエンコーダが取り付けられている。コアは円板磁石の両側にある二つの F 型のもので、厚さが 10mm のパーマロイである。F 型のコアの下にある四角柱はパーマロイの浮上体

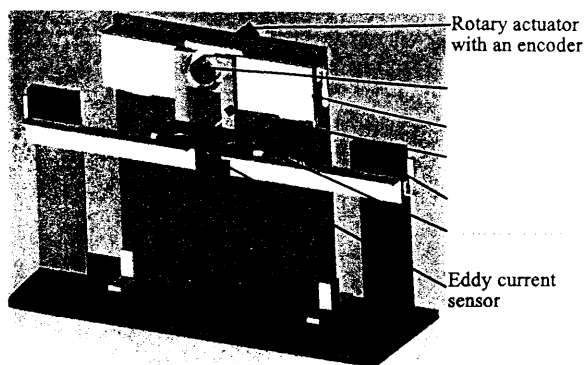


Fig. 2 Illustration of magnetic suspension system

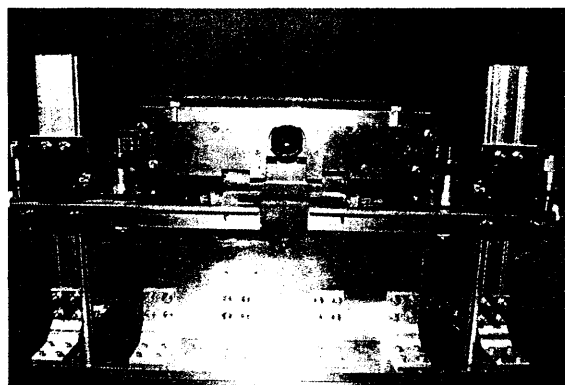


Fig. 3 Photograph of prototype magnetic suspension system

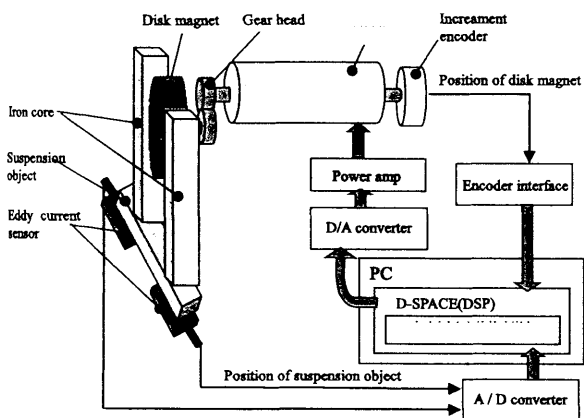


Fig. 4 Setup of experimental magnetic suspension system

である。パーマロイは、透磁率が非常に高く、また保磁率が極めて低い金属であり残留磁気の影響が少ない。回転モータにより、円板磁石の回転角度を制御し、磁路中の磁気抵抗を制御する。それにより、浮上体とコアとの間の吸引力を調整する。浮上体の下には二つの渦電流センサが取り付けられており、浮上体の運動を計測する。

この磁気浮上システムの構成を、Fig. 4に示す。制御システムには、DSP コントローラが用いられ、A/D 変換器によってデジタル化した二つの渦電流センサの信号と回転モータのエンコーダからの回転角度信号が入力される。その信号に基づいて DSP は演算を行い適切な回転モータの回転角度を計算する。その結果は、D/A 変換器を通して回転モータへの電流信号として出力される。

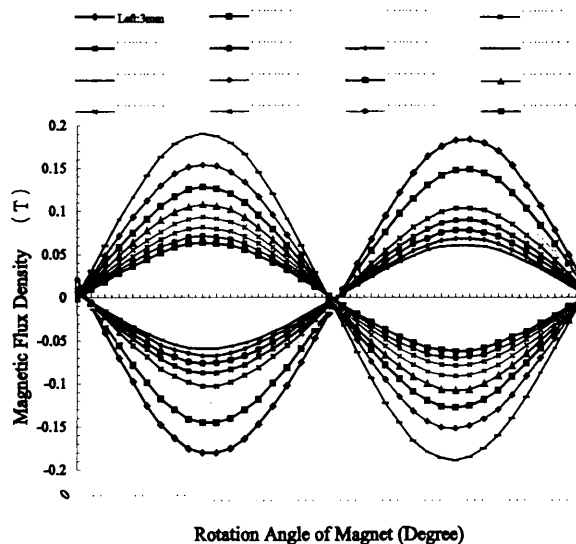


Fig. 5 Flux between iron core and levitated object about air gap and PM angle

2-3. モデル化 試作した磁気浮上システムにおける、浮上可能性の理論的な確認、数値シミュレーションの実行、およびコントローラのフィードバックゲインの決定などのために、磁気浮上システムのモデル化を行った。モデル化のためには、吸引力の同定が必要である。今回の吸引力の同定は、実験的に行った。浮上体に働く吸引力は、空隙を通る磁束の自乗に比例する。

2-4. 浮上機構の特性のための基礎実験 モデル化のためには、永久磁石を回転させたときに、コアと浮上体間を通過する磁束と吸引力の知見が必要である。これは実験によって測定した。

2-4-1 磁束密度測定

まず、浮上体とコア間の磁束密度を測定した。測定方法は、円板磁石と両コアの距離を 2 [mm] に調整し、空隙をパラメータとして、円盤磁石を 10° ずつ変化させたときの磁束密度を測定した。パラメータとした浮上体とコアの空隙の長さは、3 [mm] から 10 [mm] まで 1 [mm] 間隔で測定した。

結果を Fig. 5 に示す。図より、磁束密度は、円板磁石の回転角度と空隙に基づいて変化することがわかる。磁束密度は、空隙距離が小さくなると、磁束密度は大きくなり、円板磁石の回転角度に対してほぼ正弦波状に変化する。また、左右コアの磁束密度は、ほぼ角度と位置の向きが逆である。しかし、左右コアの磁束がゼロになる時の角度は少し違っている。これは、磁束の漏れの影響と考えられる。

2-4-2 吸引力測定

吸引力の測定方法は、浮上体を力センサに取り付けて測定した。測定条件は、磁束密度を測定したときと同様である。

結果を Fig. 6 に示す。図から分かるように、円板磁石の回転角度により吸引力が変化することが確認された。円板磁石の回転角度は 0° と 180° であるとき、吸引力がほぼゼロになり、角度は 90° と 270° であるとき、吸引力が最大値となる。また、空隙が小さくなると吸引力は大きくなる。以上の結果、空隙と円板磁石の回転角度が吸引力に影響することが確認された。

2-4-3 数式化

実験結果から、浮上体中を通る磁束は、正弦波と仮定することができ次式のように表される。

$$Q = \frac{k \sin \theta}{2d} \quad (1)$$

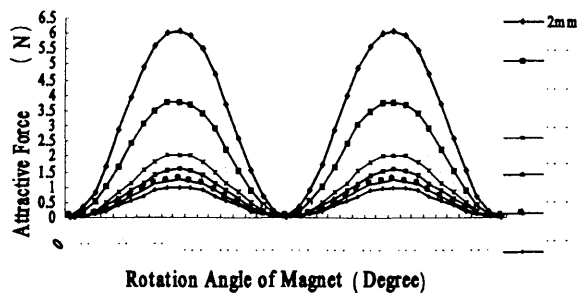


Fig. 6 Attractive force about air gap and PM angle

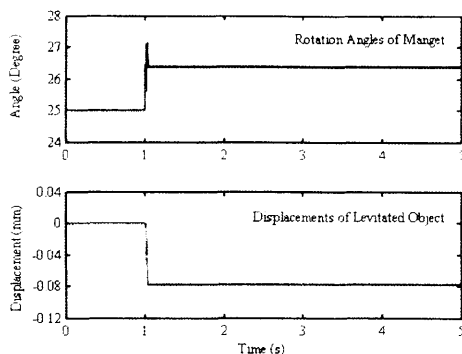


Fig. 7 Simulation result of step response

ただし、 Q :浮上体中を通る磁束、 θ :円板磁石の磁極に面するコアの角度、 d :コアと浮上体との間の距離、 k :定数である。コアと浮上体との間の吸引力は空隙を通る磁束の自乗に比例すると考えられる。よって、浮上体の運動方程式は次式となる

$$m\ddot{z} = k_m \frac{\sin^2 \theta}{d^2} - mg \quad (2)$$

ただし、 m : 浮上体の質量、 z :浮上体の位置、 k_m :吸引力の定数である。

3. 浮上実験

3-1. 数値シミュレーション 上記のモデルによって、円板磁石の回転角度を入力、浮上体の位置を出力として、数値シミュレーションを行った。シミュレーションは、浮上体位置にステップ入力を加えたときの応答を計算した。結果を Fig. 7 に示す。図から分かるように、安定なステップ応答が実現されている。

3-2. リニアレールを用いた浮上実験 試作した機構を用いて、四角柱のバーを浮上させる実験を行った。しかし、試作した装置では浮上体の回転の自由度を制御できない構造のため、完全な非接触状態では安定な浮上ができなかった。この対策として、浮上体をリニアレールに取り付け、回転の自由度を制限して浮上実験を行った。リニアレールを用いた浮上写真を Fig. 8 に示す。

次に、数値シミュレーションと同様にステップ応答の実験を行った。実験は、浮上体を下に 0.2 [mm] 変化させたときの応答を記録した。結果を Fig. 9 に示す。図は上から回転モータへの入力電流、浮上体の変位、円板磁石の回転角度を表している。シミュレーションと同様に、安定なステップ応答を示している。浮上体が下に変位するとき、磁石の回転角度はまず小さくなり、そして大きく回転し、最後の安定角度が前より大きくなった。これは、吸引力を小さくすることで、浮上体を下に変位させ、その後安定浮上動作を行ったからである。最終的な定常状態では、

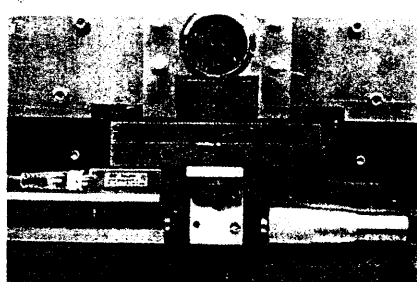


Fig. 8 Photograph during levitation using linear slider

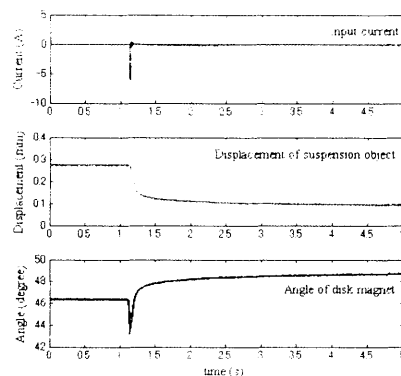


Fig. 9 Experimental result when step reference is inputted

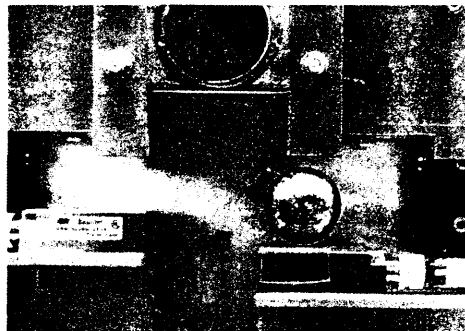


Fig. 10 Photograph during levitation without mechanical contact

空隙が広がったため、前より大きい吸引力が必要になることが分かる。また、応答の後、浮上体位置と永久磁石の角度がわずかに変化している。これは、リニアスライダの摩擦の影響であると考えられる。しかし、ステップ応答の前後で安定浮上が行えていることから、提案の浮上機構の有効性が確認できる。

3-3. 非接触鉄球浮上実験 リニアレールを用いた磁気浮上実験は、摩擦が必ずあるので、制御システムを考察するため、浮上機構の片側のコアを用い、鉄球を浮上する実験を行った。鉄球が安定浮上している写真を Fig. 10 に示す。

ステップ応答の実験を行った。その結果を Fig. 11 に示す。鉄球を浮上させた実験結果は、上記のリニアレールを用いて浮上させた実験結果と比較すると、同じであることを確認できた。また、この磁気浮上機構において制御システムの有効性を実証することができた。

4. おわりに

円板磁石と回転モータを用いた磁気浮上システムを提案した。本報告で行ったことは以下の通りである。まず、磁路調整形磁

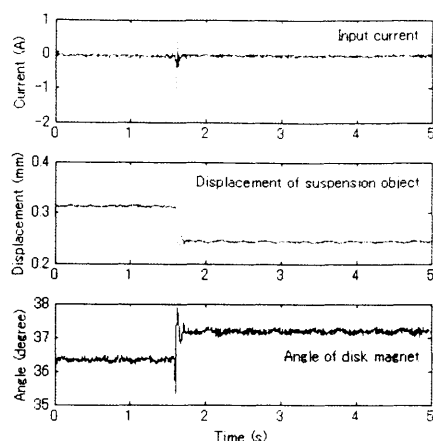


Fig. 11 Experimental result when step reference is inputted

気浮上原理を説明し、試作の浮上装置を設計・製作した。試作した装置の特性を知るため、コアの吸引力と磁束密度の基礎実験を行った。基礎実験の結果に基づいてモデルを行い、数値シミュレーションを行った。最後に、試作装置により、リニアレールを用いた四角柱の浮上体を浮上させる実験と鉄球を非接触で浮上させる実験を行った。

以上の結果によって、この浮上システムは、下記のようにまとめられる。(1) 回転モータに取り付けられた円板磁石の回転角度を制御することにより、円板磁石が発生した磁束の経路を変更し、浮上力を制御できた。(2) 円板磁石の回転角度の変化により、磁束の大きさだけでなく、向きも変化させることが可能なため、磁極の極性を変化させることができた。(3) 円板磁石を一定の回転角度に回転させると、浮上力をゼロにすることができた。

参考文献

- (1) K. Oka, T. Higuchi, Magnetic levitation system by reluctance control: levitation by motion control of permanent magnet Int. Journal of Applied Electromagnetics in Materials, Vol. 4-1, pp.369-375, (1994)
- (2) Oka, K., Higuchi, T. and Shiraishi, T., Hanging Type Mag-lev System with Permanent Magnet Motion Control, Electrical Engineering in Japan, Vol. 133, No. 3 (2000), pp.63-70.
- (3) 孫鳳, 岡宏一, 永久磁石の吸引力を利用した懸垂型磁気浮上機構における零パワ制御, Dynamic and Design Conference 2008, No.660, (2008), pp. 373
- (4) 水野 毅, 関口 秀樹, 荒木 献次, 永久磁石の運動制御を利用した反発形磁気軸受に関する研究 (アキシアル方向の安定化制御) 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.64, No.628, (1998), pp.4717-4722
- (5) T. Ueno, J. Qiu, J. Tani, Magnetic Force Control Based on the Inverse Magnetostrictive Effect, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.40, No.3, pp.1601-1605, 2004
- (6) 上野 敏幸, 袁 進浩, 谷 順二, 超磁歪・圧電の複合化による磁気力制御用電磁変換素子とその磁気浮上への応用, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.67, No.658, (2001), pp.1897-1904
- (7) 水野 毅, 星野 博, 高崎 正也, 石野 祐二, 磁路制御形磁気浮上の提案と基礎実験, 日本 AEM 学会誌, Vol.14,

No.3, (2006), pp.96-102

- (8) 水野 毅, 平井 雄三, 石野 祐二, 高崎 正也, 磁路制御形磁気浮上に関する研究—ボイスコイルモータを用いたシステムの開発, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.72, No.721, (2006), pp.2869-2876
- (9) 藤原 佑輔, 三原 崇, 岡 宏一, アクチュエータによる磁束制御を用いた磁気浮上装置の開発, 第 17 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, No.2PM12, (2005), pp. 359-362
- (10) K. Oka, N. Ninomiya, L. Chen and Y. Fujiwara, Magnetic Suspension System with Variable Flux Path Mechanism Using Rotary Actuator, Tenth International Symposium on Magnetic Bearings 2006, p.86