

磁気復元力生成により内部補償を実現するマグネット機構

○清水 杜織, 藤本 敏彰, 西村 礼貴, 野村 陽人,
鉄井 光, 藤田 政宏, 高根 英里, 小松 洋音,
多田隈 建二郎, 昆陽 雅司, 田所 諭 (東北大学)

Internally-Balanced Magnet Mechanisms Using Magnet Springs

○Tori Shimizu⁽¹⁾, Toshiaki Fujimoto⁽¹⁾, Ayaki Nishimura⁽¹⁾, Akito Nomura⁽¹⁾
Hikaru Tetsui⁽¹⁾, Masahiro Fujita⁽¹⁾, Eri Takane⁽¹⁾, Hirone Komatsu⁽¹⁾,
Kenjiro Tadakuma⁽¹⁾, Masashi Konyo⁽¹⁾, Satoshi Tadokoro⁽¹⁾, Tohoku University

キーワード

機構 (Mechanism), IB マグネット, 磁気ばね, 機械的信号伝達, メカニカルトランジスタ

連絡先 〒980 - 8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

東北大学工学部 機械知能・航空工学科 清水杜織

Tel : 022-795-7025 Fax : 022-795-7023 E-mail : shimizu.tori@rm.is.tohoku.ac.jp

1. はじめに

1.1: 研究背景 (旧来の磁気吸着方式)

ロボット研究の勃興期より, 壁面や天井面に吸着する移動体の研究開発は広く行われ, 建築物が強磁性体である鉄を多用していることから, 磁石による吸着を利用する手法が多く見受けられる. 稼働時間の観点上電磁石より永久磁石を利用することが望ましい一方で, 磁性が常に生じており永久磁石単体では吸着状態の切り替えが困難であるという欠点が認められる. 離脱や移動のために壁面から移動体を剥がす際, 既に発生している吸着力に逆らって移動体内外からの大きな操作力で磁石を取り外すほかに, 永久磁石とは逆向きの極性を生じる電磁石に通電して磁性を打ち消す[1], ヨークの切り替えにより磁気回路を吸着面から隔離する[2]など, 一時的ではあるものの大きなエネルギーの消費を必要とする.

1.2: IB マグネットとその問題点

永久磁石による強大な吸着力の適用状態を僅かな操作力で切り替える手法として, 図 1 に示す内部力補償型磁気吸着機構 (Internally-Balanced Magnetic Unit, 以降 IB マグネット) が提案されている[3].

永久磁石の吸着力は, 吸着対象面に接近するほど急激に増大する非線形な特性を持つため, これを特性が正負反転した非線形ばねによる反発力で補償し, 小さな操作力で磁石の操作を可能としつつ, 機構自体は補償力の反力によって対象面に押し付けられ吸着状態を維持するものである. 図 1 の例においては, 線形特性を持つ複数の板ばねが磁石を保持する操作ロッドに取り付けられ, 磁石のストロークに応じて順次作用しだすことで近似的に非線形な特性を持つ反発力が発生可能となる[4].

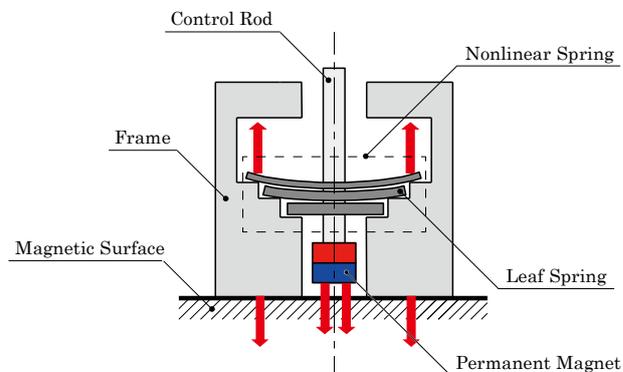


図 1 : IB マグネットの原理図

当研究チームにおいても、円筒状の永久磁石で構成した車輪機構に IB マグネットの概念を適用し、壁面への大きな吸着力と離脱に要する小さな操作力を両立する装置を実現した[5]. その過程で、線形ばねを用いた非線形ばねの設計に要する手順が複雑かつ不正確となりがちである欠点が見出された. 本稿では、その課題への解決策として、吸着に利用する磁石と同一の磁石の組を磁気ばねとして補償に用いる手法を提案し、その応用を議論する.

2. 磁気復元力生成方式の考案

2.1: 基本原理

考案した磁気復元力生成式 IB マグネット機構(以降磁気ばね式 IB マグネット)の原理図を図2に示す. これは、永久磁石の組の吸着力-変位特性と反発力-変位特性が正負を反転したものであるためその合力は位置によらず0で一定となることに着目し、従来は金属などのばね部材の弾性により生成していた復元力を、永久磁石同士の反発により生成する方式に置き換えている. 従って、摩擦や重力の影響を受けない理想状態では、操作ロッドの移動に要する仕事を0とすることができる. ただし、反発力と吸着力の平衡を精確にするために、吸着対象は機構で利用するものと同じの永久磁石であることを主に想定している. 吸着対象が通常磁性体である場合、その透磁率や形状により吸着側の磁気回路が反発側のそれと同一ではなく補償の平衡が厳密に保たれなくなるため、ある程度の仕事が生じると考えられる.

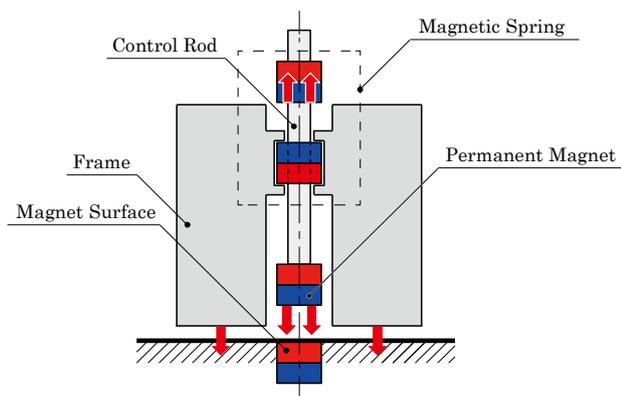


図2：磁気ばね式 IB マグネットの原理図

2.2: 利点

提案する磁気ばね式 IB マグネットは、従来の IB マグネットにおける設計手順の複雑さと補償力の精度の低さを解決できる利点を有すると考えられる.

従来の IB マグネットでは、利用する磁石の吸着力特性を測定した上で、その幾つかの点での傾きから適切なばね定数を持つ線形ばね群を選定し、入手後にそれぞれの正確な自由長を測定するまで機構上の取り付け位置と作用開始位置のオフセットを決定できないという設計容易性の低さがあった. さらに、反発力を厳密に吸引力の非線形性へ追従させるには線形ばねの種類と個数を増やす必要があり、操作力に加わる補償の差分が一定にならず補償力の精度と機構全体の容積がトレードオフの関係にある. 磁気ばね式 IB マグネットは、2組の同一の磁石のみで機構を構成できるため、ばねの選定が不要で部品点数も削減でき、一定の強さの磁気作用が生じはじめる相対距離を測定しストロークを決定するのみで設計が確定できる点で、従来の IB マグネットの設計上の不便さを大きく解消するものである.

さらに、本稿で試作した実機のようにリング型の磁石を用いる場合、操作ロッドを回転させてもばねの特性は変化せず、間接力である磁気は摩擦の影響を受けずにばねとして機能できるため、操作ロッドあるいはフレームを回転体として車輪や歯車に接続することが可能となる. これは、ロッドとフレームの両方に接触することで反力を発生し、補償力として伝達するばねを利用する従来の IB マグネットでは配置によっては望ましくないあるいは不可能であったものである. このように、提案する磁気ばね式 IB マグネットは、設計の簡便化に加えて、機械要素技術としての広い適用可能性も併せ持つものとして発展が期待できる.

2.3: 注意点

吸着用の磁石と磁気ばね用の磁石の磁気の干渉による吸着力と反発力の変化の抑制を徹底する必要がある場合、吸着部と磁気ばね部を配置距離や磁気シールドにより磁気的に隔離することが望ましい.

3. 原理確認用実機の具現化

3.1: 実機設計

前章において説明した考案原理に基づき、図3の三面図に示す実機を設計した。操作ロッドの摺動精度と摩擦低減を重視しつつ、部品点数を必要最小限とできる構成としている。また、利用方法の拡張性を持たせる工夫として、他のロッドやワイヤ、信号線などを通せるよう中空の操作ロッドが利用できるだけの内径を有する磁石を選定した。

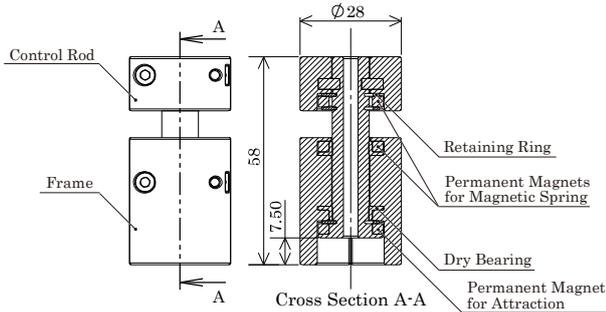


図3：磁気ばね式IBマグネットの設計図

3.2: 実機試作

設計に基づいて試作した実機の外観と内部構造を図4に示す。また、仕様の詳細を表1に示す。第一次試作機においては、製作の容易性を重視し、ロッドを磁石とドライベアリングに通して留め輪で固定し、これらをフレームで挟み込む構成とした。強度と摺動精度、ならびにはめ合いにおける摩擦低減の観点から、操作ロッドは金属で構成することが望ましいと考えられるが、研究の初期段階である現時点における原理確認用には3Dプリンタによる成形で十分であると見なし次章の実機実験を執り行った。なお、操作ロッドのストロークは次章第1節の磁気復元力の測定実験にて磁気作用の到達距離を確認した上で最終的に確定した。

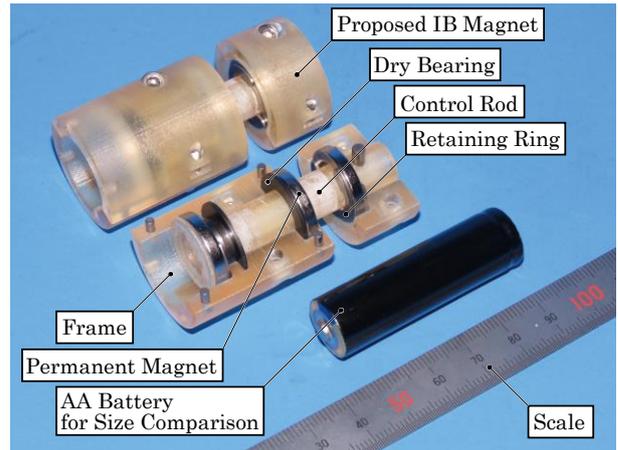


図4：試作機の全体外観と内部構造

表1：試作機の仕様

Magnet	Type Number	HXCW18-12-3
	Outer Diameter	18[mm]
	Inner Diameter	12[mm]
	Thickness	3[mm]
	Weight	2.9[g]
Diameter		28.0[mm]
Length		58[mm]
Stroke		7.5[mm]
Weight		44.3[g]

4. 実機実験

4.1: 磁気復元力特性実験

実機の寸法を確定させる前に、選定した磁石の組による吸着力と反発力の大きさを測定し、磁気反発力が磁気ばねの復元力として利用できるか検証する実験を行った。万能材料試験機 (Instron, 3343) により、1[mm/sec]の速度で磁石同士を接近させる圧縮試験を5回ずつ試行し平均を算出した。実機で吸着用の磁石の底面には操作ロッドと一体化した厚さ1[mm]のカバーを設ける想定から、実験でもそれぞれの磁石を覆う1[mm]厚のカバー同士が接触した位置を0[mm]とし、最接近時で磁石同士は2[mm]離れているように設定した。

測定の結果を図5に示す。クーロン力である磁石の吸着力と反発力は正負が反転した特性を持つことが視覚的にも明らかとなった。これらの合力を算出すると測定区間ではほぼ0[N]で一定となることから、

一つの磁石の異極同士の組の吸着力を、同一の磁石の同極同士の組の反発が生む復元力で容易かつ正確に補償でき、任意の区間において吸着用磁石を理想状態では限りなく0[N]に近い力で操作できることが示唆された。

この測定結果をもとに、吸着力と反発力がほぼ0.5[N]となる距離7.5[mm]を実機のスローク（フレーム底面から吸着用磁石のカバーまでの最大距離、ならびに磁気ばね用磁石同士の最大距離）とした。

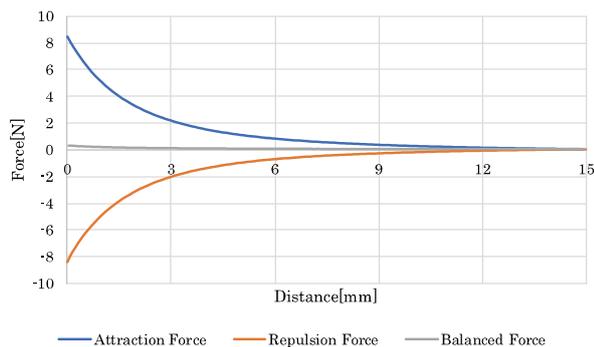


図5：磁石による吸着力，反発力，その合力

4.2: 磁気ばね式 IB マグネットの動作検証

試作した実機を用いて、図6に示す厚さ1[mm]のカバーで接地した吸着対象の磁石へ IB マグネットのフレーム底面と吸着用磁石のカバー底面を接触させ完全に吸着させた状態から、フレームを把持して機構全体を引き剥がす際に必要な要剥離力，ならびに磁気復元力による内部補償効果が期待される操作ロッドを把持する際の要剥離力を検証した。試験機により、0.5[mm/sec]の速度で15[mm]の距離だけ引き抜くのに要する操作力を5回ずつ測定し平均を算出した。図7に示す測定結果には要剥離力と同時に IB マグネット本体とその引き抜き治具の重量も混在していることから、要剥離力のみと比較も図8に示す。

図7より、フレームを把持した際の引き剥がし動作は、ひとたび吸着用磁石が剥離するまで大きな操作力を必要とし、それ以降は吸着対象の磁石との距離が開くにつれて吸着力が減少するため装置の重量へ漸近していく操作力の推移を経ることが分かる。一方で、操作ロッドを把持した際の引き剥がし動作は、ひとたび吸着用磁石が剥離するまでの操作力が

顕著に小さく、またロッドのスロークである7.5[mm]付近までは吸着用磁石の遠隔の吸着力を、それ以降はフレームが吸着対象面から浮きはじめるため吸着用磁石の遠隔の吸着力と機構重量の分の操作力を要する推移を経ることが分かる。さらに、図8より、ロッドを把持した際の要剥離力の最大値は、フレームを把持した際の要剥離力の最大値の13.0[%]にまで低減しており、重力や摺動部の摩擦により完全とまではいかなくとも磁気復元力による補償が機能していると分かる。これにより、提案する磁気式の復元力を利用した IB マグネットが、従来の IB マグネットと同様の効果を容易に実現するものであることが示された。

以上より、考案した原理の有効性が実機実験を通して確認された。

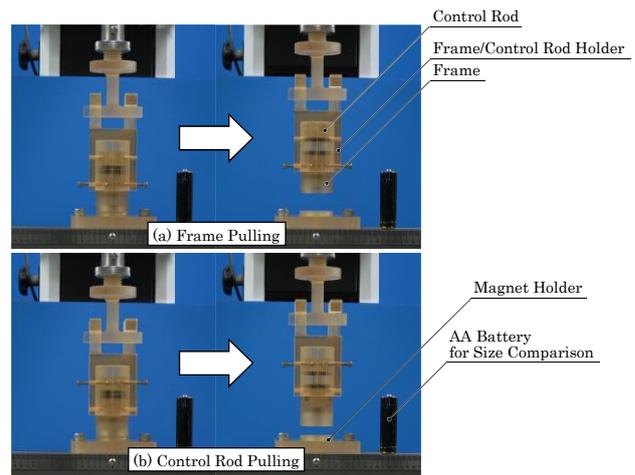


図6：動作検証の実験系

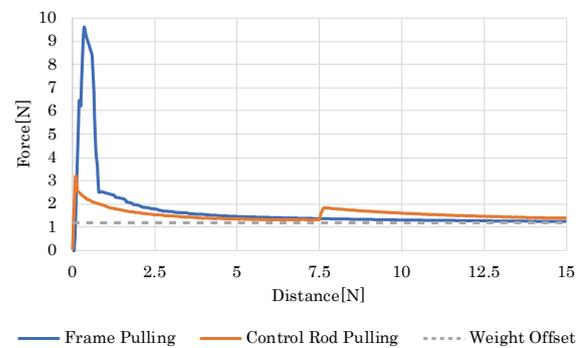


図7：フレームを把持した際の要剥離力と操作ロッドを把持した際の要剥離力の推移

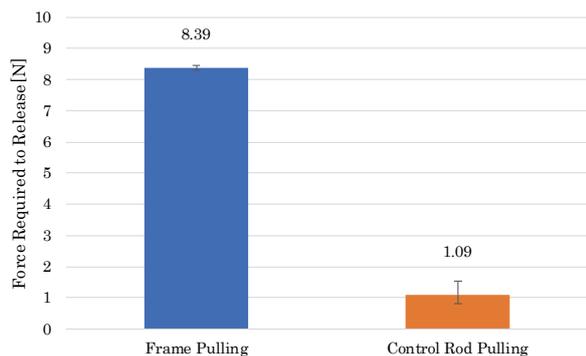


図 8 : 要剥離力の最大値の比較

5. まとめと今後の課題

本研究では、従来の IB マグネットにおいて問題となっていた設計性の低さと非線形ばねの追従精度の低さの解消を目的とし、磁石の吸着力と反発力が正負反転した同一の特性となることを利用して、磁気ばねを用いた復元力により内部補償を行うことによる問題の解決方法を提案した。さらに、考案した原理に基づき、実機を具現化し、試作した実機を用いた引き剥がし動作の要剥離力の測定実験を通して、その有効性を確認した。

今後は、本原理により容易に制御できることとなった磁気吸着力あるいは反発力を機械要素に応用し、バルブやブレーキの制御、機械的信号の伝達・反転・増幅（メカニカルトランジスタ）機構や、磁気ユニット対称配置型把持機構、磁性流体によるジャミング転位現象を利用したグリッパ、中央線ジャミングにおけるワイヤの牽引など、複数の実機の具現化例を創出し、磁気復元式 IB マグネット機構の体系化へと繋げていく予定である。

謝 辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）により、科学技術振興機構を通して委託されたものです。

参 考 文 献

- [1] 呉，大澤，小川，中村：“永久磁石による磁気吸着機構を用いた進行波型全方向壁面移動ロボットの開発”，計測自動制御学会論文集，Vol.51, No.5, pp.282-289, 2015.

- [2] H. Yaguchi, S. Sakuma, and T. Kato: “A New Type of Magnetic Actuator Capable of Wall-Climbing Movement Using Inertia Force”, Journal of Engineering, Vol. 2014, Article ID 903178.
- [3] 広瀬，今里，工藤，梅谷：“内部力補償型磁気吸着ユニット”，日本ロボット学会誌，Vol.3, No.1, pp.10-19, 1985.
- [4] 鈴木，広瀬：“内部力補償型磁気吸着ユニットのための非線形スプリングと機構の設計”，日本ロボット学会誌，Vol.27, No.4, pp.460-469, 2009.
- [5] 多田隈，田中：“IBM 車輪：磁気力内部補償による車輪機構 -基本概念と第一次試作-”，No. 14-2 Proceedings of the 2014 JSME Conference on Robotics and Mechanism, Toyama, Japan, May 25-29, 2014.