

簡易形状エンドエフェクタの選択による ケーシングマニピュレーションの研究

(第一報) 基本構成の検討と手先懸架誘導部の試作

福井 類 丹羽 大和 門脇 啓太 森 武俊 佐藤 知正 (東京大学)

Caging Manipulation by Selection of Simple-shaped End Effectors (First Report) Deliberation of Basic Framework and Prototype Development

Rui FUKUI Yamato NIWA Keita KADOWAKI Taketoshi MORI Tomomasa SATO
(The University of Tokyo)

Abstract— We focus on caging; a means of objects holding and aim to develop a caging manipulator. Caging can hold objects with only position control, but it needs many actuators in a manipulator to constrain objects geometrically. This research proposes novel mechanism. In the mechanism, several fingers can be operated by one actuation unit, accordingly the mechanism can hold objects with fewer actuators than existing manipulators. So far, a prototype was developed and an experiment confirmed the possibility of object holding with the proposed mechanism. Then a magnetic field analysis introduced an optimal magnet arrangement for the end effector's hanging component.

Key Words: manipulation, caging, magnetic force, magnetic field analysis, optimal magnet arrangement

1. 緒論

物を持つという行為は我々の日常生活から工場の中まで人間社会のあらゆる所で必要とされ、その援助をするためにこれまで様々なロボットハンドが開発された [1][2]。その中でも日常生活中の物体操作を目的とするロボットハンドには、その把持対象物体の多様さから汎用性が強く求められる。既存の研究の多くでは汎用性を得るために人間の手を模倣したロボットハンドを開発したが、その多自由度、冗長性故に多くのアクチュエータを必要とし、また摩擦による把持を行うため構造、制御の複雑化を招いていた。

これに対し、近年摩擦によらない把持方法としてケーシングが注目されている [3][4]。ケーシングでは物体に対し完全な幾何拘束をかけるのではなく、物体を任意の閉空間内に閉じ込めることで物体の拘束を行う。そのため空間から物体が脱出不可能であればよく、物体とロボットハンドの接触状態は任意である。そのため、物体とロボットハンドの間に厳密な接触が必要無く、“遊び”が許容される。

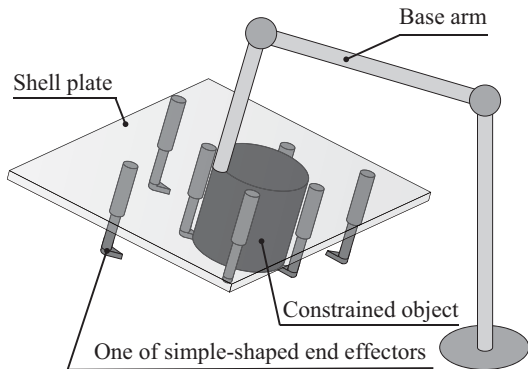


Fig.1 Conceptual sketch of caging manipulator with simple-shape end effectors

そこで本研究では物体を幾何学的に拘束する手法としてケーシングに着目し、Fig. 1 に示す、簡易エンドエフェクタ群の選択による物体拘束及びマニピュレーションを目指す。簡易エンドエフェクタとは物体を幾何拘束するための指に相当し、エンドエフェクタ毎に固有の機能的特徴を有する。様々な状況に応じた多種のエンドエフェクタを搭載し、状況に応じた最適なエンドエフェクタを選択することで拘束可能物体の多様性を確保する。また、物体を認識するセンサ用モジュールを用意することで拘束対象物体を認識し、大きさ・形状等を計測することで物体の拘束計画に利用できる。

2. エンドエフェクタ群によるケーシングマニピュレーション

2-1 本研究における課題とアプローチ

ケーシングマニピュレーションをロボットハンドに応用するために課題となるのはアクチュエータ数の増大である。物体を拘束するためにはエンドエフェクタ群を駆動させ物体を閉空間内に閉じ込める必要があるが、本研究では多種のエンドエフェクタを搭載、選択して用いることで拘束を行うため、各エンドエフェクタを駆動するためのアクチュエータが多数必要となる。拘束可能物体の多様性を確保するために多くのエンドエフェクタを搭載するのが良いが、多くのエンドエフェクタを搭載するほど多くのアクチュエータが必要となるという問題を有する。この問題に対し、本研究では永久磁石型天井誘導法 [5] を用いることで解決する。

2-2 システム構成

ケーシングではエンドエフェクタの位置制御に誤差が許容されるため、従来のロボットハンドの様に常にエンドエフェクタと物体との厳密な接触を保つ必要が無い。そのた

め全エンドエフェクタを常時制御せず，1つずつ順番に駆動するだけで物体の拘束が可能となる．そこで本研究では Fig. 2 に示す，基盤となる駆動機構がエンドエフェクタを1つずつ駆動するシステム構成を提案する．上段の $xy\theta$ テーブルが共通駆動機構であり，中段の手先懸架誘導部を1つずつ駆動する．中段の手先懸架誘導部と下段のエンドエフェクタは永久磁石型天井吸着法により磁石を用いて結合されており，上段の共通駆動機構が手先懸架誘導部を駆動することで下段のエンドエフェクタを駆動させることが出来る．このような駆動機構の共通化によりアクチュエータ数の大幅な削減が可能となる．

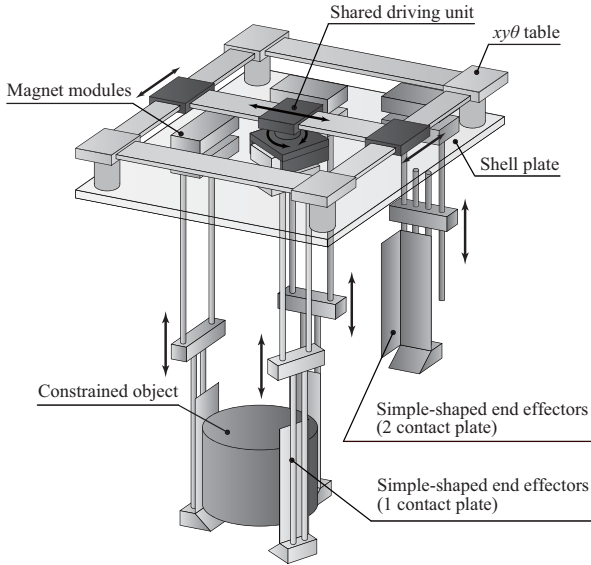


Fig.2 Framework of the proposed system

2.3 本システム構成における技術的課題

本システム構成で課題となるのは以下の2点である．

課題1 1つずつ順次駆動されるエンドエフェクタ群により物体を拘束すること

課題2 磁石によりエンドエフェクタを隔壁を挟んで釣り下げ，水平・垂直駆動及び静止を自由に制御すること

次節で課題1に対し，提案するシステム構成の試作機を制作し，エンドエフェクタ群の非同時駆動により物体の幾何拘束が可能であることを確認した実験結果について述べる．また，4.節で課題2に対し3次元非線形動磁場解析ソフトによる磁場の解析結果を用いた磁石モジュールの設計，試作及び評価について述べる．

3. エンドエフェクタ群による幾何拘束

3.1 試作機の設計

提案システムで物体拘束が可能であることを確認するために試作機を制作した (Fig. 3)．手先懸架誘導部から磁気歯車により伝達される動力により手先の上下運動が可能である．手先の爪は本来アクチュエータにより駆動するものであるが，駆動方法は物体の幾何拘束に直接関係しないため試作機では手動で駆動するものとした．試作機ではエンドエフェクタは1つのみ作成し，物体の幾何拘束はあらかじめ物体の周囲を板で囲った後にエンドエフェクタを駆動し，爪を物体の底面に挿入することで行う．これは物体と直接干渉するのは最後に駆動されるエンドエフェクタのみであるからである．

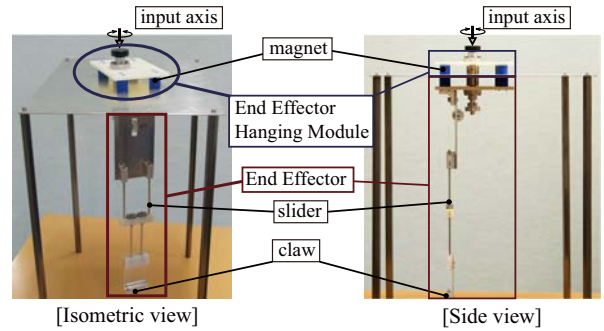


Fig.3 Structure of prototype

3.2 物体の幾何拘束実験

試作機を用いてエンドエフェクタ群による物体の幾何拘束実験を行った．把持対象物の形状として日常生活で頻繁に見られる直方体，円柱，錐体を選択し，大きさは $250 \times 200 \times 160$ [mm] までの物とした．Fig. 4(a) に立方体及び円柱の試作機による幾何拘束を行っている様子を示す．立方体形状に近い物体は4面拘束のみで簡易に拘束できることが確認できた一方で Fig. 4(b) の様にアスペクト比が高い直方体は4面拘束では拘束が外れてしまうことが確認された．これは高アスペクト比の長方形ではわずかなエンドエフェクタの位置決め誤差でも回転により拘束が外れてしまうからである．このような物体に対しては Fig. 4(c) の様に4隅を拘束することで安定に拘束できた．

4. 手先懸架誘導部の設計

4.1 要求仕様

質量 M_{obj} の物体に角度 θ の鋭角の爪を押し込み物体を持ち上げるための力 F_{ins} は Eq. (1) の様に計算できることが知られている．ここで g は重力加速度， α は物体と爪の間の摩擦角である．

$$F_{ins} = M_{obj}g \tan(\theta + \alpha) \quad (1)$$

本研究では1 [kg] の物体を最低2本のエンドエフェクタを用いて拘束することを目指し，爪の角度を 30 [deg]，摩擦角を 20 [deg] と仮定する．これより， F_{ins} は 15.5 [N] と求まる．爪の押し込み力を支えるために必要な磁石の吸着力への要求仕様は Fig. 5 に示す力学モデルを考えることで必要な垂直吸着力 F_{mag} が 61 [N]，水平吸着力 F_{fric} が 13.5 [N] と求まる．

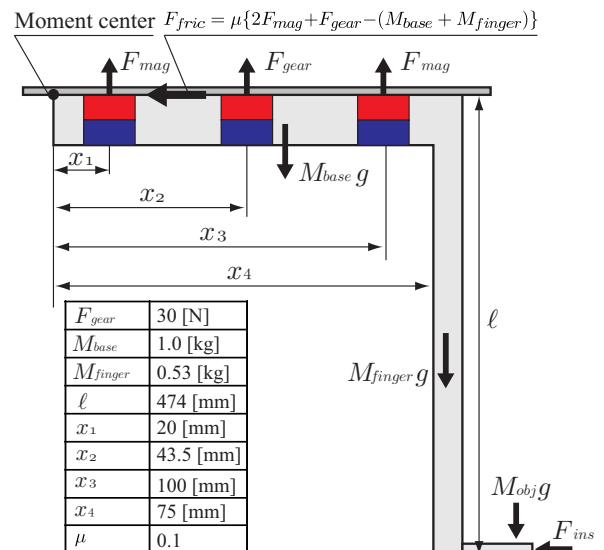


Fig.5 Calculation model of required specification

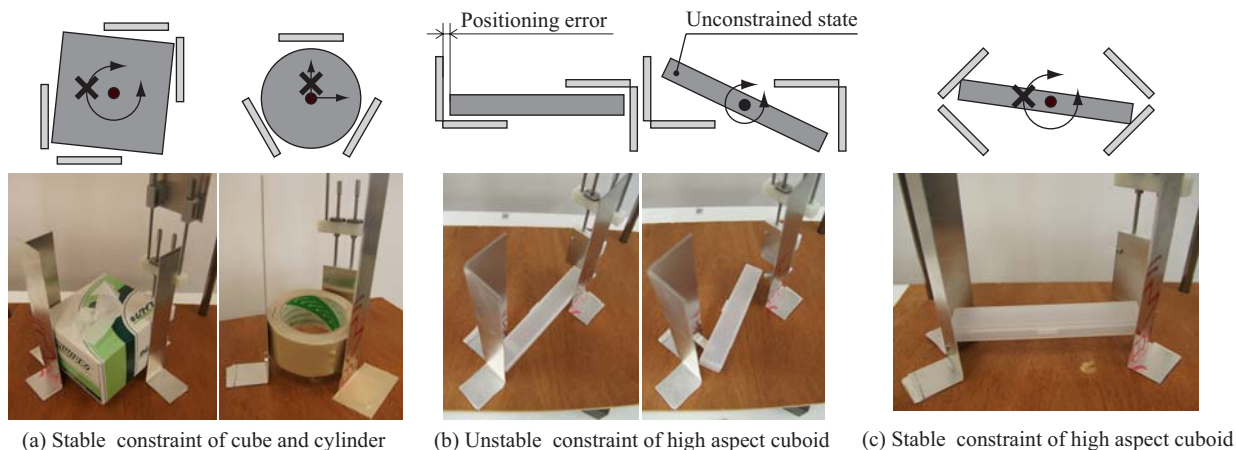


Fig.4 Example of constraining objects

4.2 磁気回路設計

前項の要求仕様を満たす磁石モジュールの設計を行った。磁石が大きな吸着力を發揮するには磁束が磁石と被吸着物で共有され、一つの磁気ループを形成していることが重要となる。磁石と被吸着物で共有されない磁束を漏れ磁束と呼び、磁石の吸着力は漏れ磁束が少ないほど、乃ち共有される磁束が多いほど大きくなる。空間の磁束の通過やすさを磁気抵抗と呼び、空気中では磁性体内に比べ極端に大きい値を取る。磁束は最も磁気抵抗の小さい経路を通るため、磁石の付近に磁性体が存在する場合、磁束は磁性体を含む経路を優先的に選択する。乃ち、磁性体を用いて磁束の経路を自由に設計することが出来る。

一般のキャップ磁石は Fig. 6(a) に示す構造を有し、磁性体で出来たヨークを用いて磁束を吸着面に集中させることで磁石と被吸着物で共有される磁束を増やし、磁石単体で吸着させる場合の3~4倍の吸着力を得ることが出来る。一方で本研究の様に二つの磁石間の隙間が大きい場合、Fig. 6(b) の様に磁束が対面の磁石まで届かず、上側、下側の経路のみで閉じた磁気ループが形成され、互いに共有される磁束が少なくなる。これは磁石の隙間を大きくした結果、上下で共有される経路の磁気抵抗が増大したためである。これによりヨークを使わない場合よりも磁石間の吸着力は減少してしまうと考えられる。実際に二つのキャップ磁石を3 [mm] 離して吸着力を測定したところ、キャップ磁石間の吸着力がヨークを用いない磁石単体よりも小さくなることが確認できた。そこで磁石間ギャップが大きな時も強い吸着力を發揮できる磁石モジュールの設計に取り組んだ。

上記のキャップ磁石の構造で磁束が近距離にしか届かないのは磁気ループが縦長形状を取るためであると考えられる。この場合磁気ループを上下に二分した方が空気中を通る距離が短くなり、磁気抵抗が小さくなる。乃ち磁気ループを横長形状とし、磁気ループの幅を磁石間のギャップに比べ十分大きく取ることによって片側のみで閉じた経路の磁気抵抗を増やし、上下で共有される磁束を増加させることが可能であると考えられる。Fig. 7 に本研究で提案する磁石吸着モジュールの構造を示す。提案構造では磁石を十分に離して配置することで磁気ループを横長形状としている。

提案構造で要求仕様を満たすために必要な磁石の大きさを求めるために3次元非線形動磁場解析ソフト“ELF/MAGIC”を用いてシミュレーションを行い、ヨー

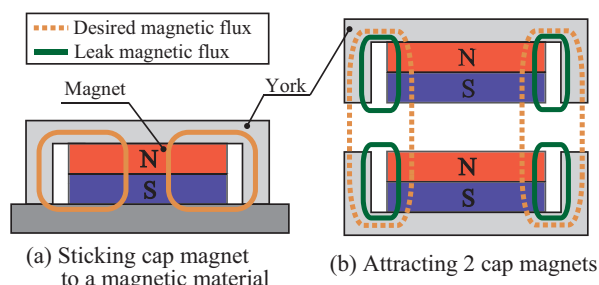


Fig.6 Magnetic flux of cap magnet

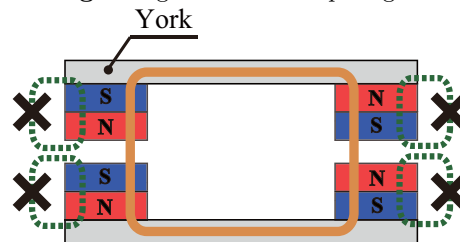


Fig.7 Structure of the proposed magnet module

クを用いない場合と比較した。要求仕様を満たすために必要な磁石の大きさ及び發揮できる吸着力を Table. 1 に示す。提案構造では磁石単体に比べ半分以下の磁石体積で要求仕様を満たせることが確認できた。Table. 1 中の V/H ratio は鉛直吸着力と水平吸着力の比を示し、この値が大きい方が上下の磁石モジュールの追従性が向上すると考えられる。磁石単体に比べ提案構造の方が大きな V/H ratio を取ることから、提案構造の方が磁石モジュールの追従性、乃ちエンドエフェクタの位置制御の精度の面でも有利であるといえる。Fig. 8 に ELF/MAGIC による磁束密度の等高線図を示す。ただし、(b) の提案構造の等高線図では構造の対称性より等高線図を一部省略してある。磁石のみの場合磁束の経路が空間を通過するが、提案構造では空間中に漏れていないことがわかる。磁束が空間中に漏れることで周囲の磁性体を引きつけ、漏れ磁束が生じることで吸着力が低下し、最悪の場合エンドエフェクタの落下に繋がる。提案構造の場合、磁束が空間中に漏れ出さないため周囲の磁性体の影響を受けず、安定した吸着力を得ることが出来る。

4.3 磁石モジュールの吸着力測定実験

提案した磁石モジュールが解析通りの吸着力を發揮し、要求仕様を満たすか実験を行った (Fig. 9)。実験は鉛直

Table. 1 Required magnet size and volume

	Magnet size [mm]	Volume [cm ³]	Horizontal deviation [mm]	Vertical force [N]	Horizontal force [N]	V/H ratio [%]
Without york	20 × 20 × 15	6.0	2.0	69	11	16
			3.0	66	15	23
Proposed structure	14 × 14 × 10 (each of couple)	3.92	2.0	63	14	22
			3.0	60	21	35

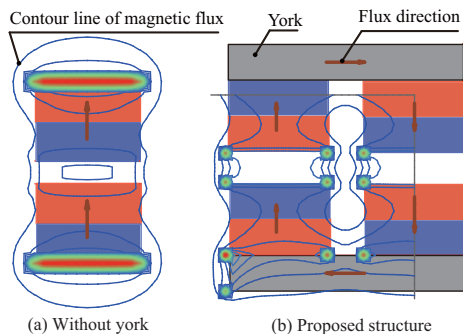


Fig.8 Contour drawing of magnetic flux density

吸着力及び水平吸着力について行い、鉛直吸着力は磁石が発揮できる最大吸着力を、水平吸着力に関しては変位に比例して吸着力が増大することが予想されるため、変位に対する吸着力の値を各5回測定した。Fig. 10(a)に鉛直吸着力の最大値を、Fig. 10(b)に水平吸着力のグラフを示す。鉛直吸着力について要求仕様(61 [N])を満たすことを確認し、水平吸着力について1.5 mmのずれで要求仕様(13.5 [N])を満たし、良好な追従性を有することを確認できた。

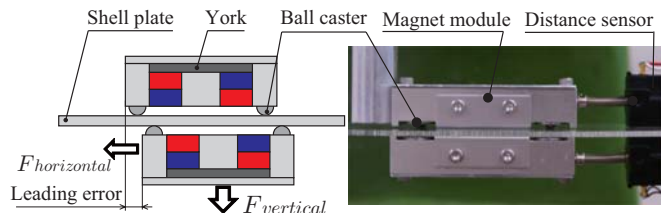


Fig.9 Structure of magnet module

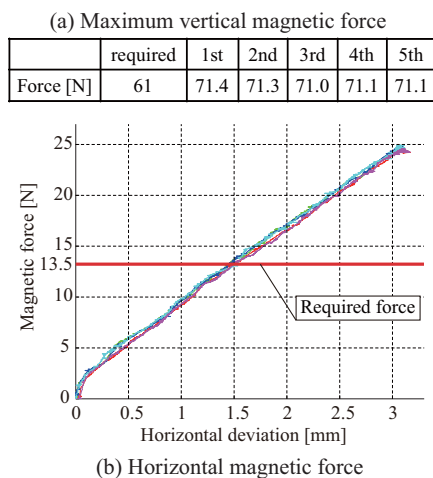


Fig.10 Experimental result of magnetic force

また、磁石モジュールの水平方向の追従性について実験を行った。提案システムでは磁石モジュール間の追従性がエンドエフェクタの位置決め精度を決定する。追従性に影

響を及ぼす要因として磁石モジュールの水平吸着力の他に隔壁が挙げられる。磁石モジュールは鉛直方向に約70 [N]という強い力で押しつけられているため、隔壁の表面硬度が低いと磁石の鉛直吸着力によりボールキャスターとの接触面がへこみ、追従性が低下することが予想される。そこで隔壁としてアルミニウム(A5052, 表面処理無し)とアクリルを選択し、追従性の比較を行った。Fig. 11は横軸に水平変位、縦軸に上下の磁石モジュールのずれを示したグラフである。アクリルにおけるずれはアルミニウムにおけるずれの3分の1程度となっており、隔壁に表面硬度の高い材質を用いた方が追従性が向上することが確認できた。

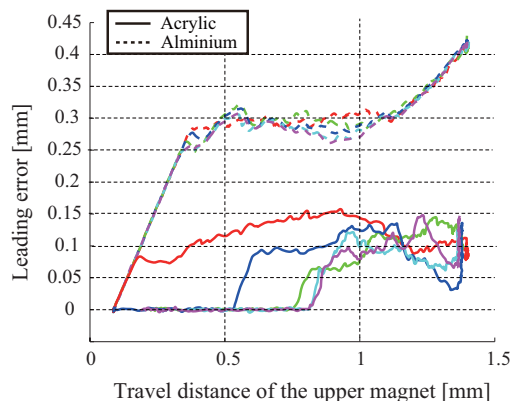


Fig.11 Leading error of magnet module

5. 結論

本稿では日常生活での物体操作を目的としたロボットハンドについて、エンドエフェクタ群の選択、集合により多岐にわたる日常物品を把持できる可能性を示すと共に、それに付随するアクチュエータ数の増加という問題を解決するためにケーシングの特長を生かしたシステム構成について提案した。横長形状の磁気ループを形成することが磁束を長く飛ばし、上下の磁石間ギャップが大きい時に大きな吸着力を実現するのに有効であることを実験により示した。また、エンドエフェクタと隔壁の摺動面において、エンドエフェクタの追従性を向上させるには摺動面の表面硬度を高くすることが重要であることを確認した。

参考文献

- [1] S. Fan, Y. Liu, K. Wu, Z. Chen, Z. Jiang, L. Jiang, and H. Liu. Object shape recognition and grasping by five-fingered robotic hand based on E-ANFIS model. *International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1075–1080, 2009.
- [2] C.S.Lovchik and M.A.Diftler. The robonaut hand: A dexterous robot hand for space. *International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 907–912, 1999.
- [3] 小林達也, 前田雄介. 環境を利用したケーシングマニピュレーションの計画. 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol. 5, pp. 191–192, 2008.
- [4] Z. WANG and V. Kumar. Object closure and manipulation by multiple cooperating mobile robots. *International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 394–399, 2002.
- [5] 福井類, 森下広, 原田達也, 森武俊, 佐藤知正. 生活環境中で人と共棲可能な永久磁石誘導型天井移動ロボットプラットフォーム. 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 9, 2010.