

ケーシングマニピュレータのための永久磁石誘導を用いた 手の平コンポーネントの開発

少ない駆動源で実現される軽量・高速な指水平駆動機構

丹羽 大和^{*1}, 福井 類^{*1}, 下坂 正倫^{*1}, 佐藤 知正^{*1},

Development of Palm Component for Caging Manipulator Using Permanent Magnet Induction

Light/Fast Horizontal Driving Mechanism with a Small Number of Actuators

Yamato NIWA^{*1}, Rui FUKUI^{*1}, Masamichi SHIMOSAKA^{*1} and Tomomasa SATO^{*1}

^{*1} Department of Mechano-Informatics, School of Engineering, the University of Tokyo
Hongo 7-3-1, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

We have been developing a caging manipulator with distributed end effectors. This manipulator decentralizes necessary functions to several modules and aims to get variety among target object shapes. This paper describes an implementation of palm component as a part of system configuration, which takes role to drive finger components. Because actuators of the palm component are shared by all finger components, the palm component has an advantage that it can realize driving of finger components with a small number of actuators. Note that this system configuration makes driving of finger components sequential and one by one. By conducting connecting experiment, we verified connecting between the palm component and the finger component is robust to misalignment of finger components. Furthermore, we achieved alignments of finger components with enough accuracy to constrain objects.

Key Words : Manipulation, Caging, Hardware design

1. 序 論

近年、摩擦に依らない物体把持手法としてケーシングが注目されている⁽¹⁾⁽²⁾。ケーシングは摩擦を必要としないため把持力の制御が不要であり、物体の表面性状に依らない安定な把持が可能であるという利点を有する。そのため、物体表面の摩擦係数が低くグリップが困難である物体の拘束や、物体位置情報の不確かさが大きい際に有用となる把持手法である。しかし、幾何モデルが与えられる中でケーシングのための拘束構造配置を計画する研究は数多く成されているが⁽³⁾⁽⁴⁾、実際のマニピュレータに適用し、環境を含めた外乱に対する操作安定性を実証することで、ケーシングが本当に有用な物体拘束手法であることを示した例はない。これまで、著者らは特定の応用に絞込み込むことでケーシングが優れた物体把持手法となり得ることを示すとともに、ケーシングを実際にマニピュレータに適用する上での問題がアクチュエータ数の増大であるこ

とを示してきた⁽⁵⁾。また、その解決方法として図1に示す、分散型エンドエフェクタによるケーシングマニピュレータを提案している。提案するマニピュレータでは物体の周囲に分散させた指により物体を囲うことでケーシングを行う。

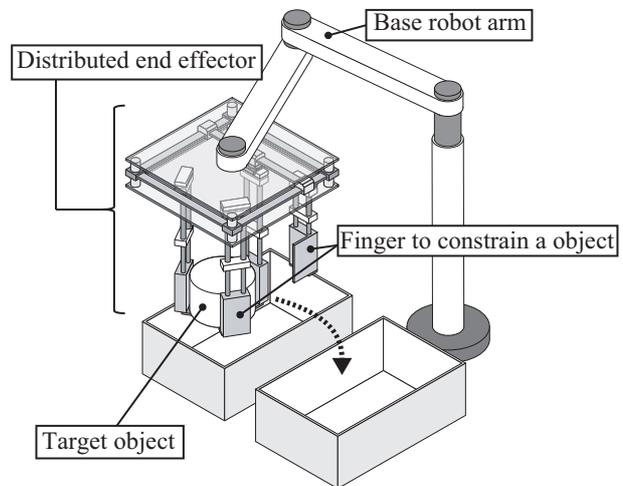


Fig. 1 Conceptual sketch of the caging manipulator

^{*1} 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) {niwa, fukui, simosaka, sato}@ics.t.u-tokyo.ac.jp

2. 提案する分散型エンドエフェクタのシステム構成

従来のロボットハンドでは複数の指それぞれに駆動用アクチュエータが必要であったため、アクチュエータ数の増大を招いていた。ケーシングではグリッピングのような物体拘束機構と物体との常時接触が不要である。そのため全ての指を同時制御せず、1つずつ順番に配置し、物体を囲うことで物体拘束が可能となる。図2に提案するシステム構成を示す。マニピュレータは機能毎に分離された4つのコンポーネントから構成される。システム構成の詳細は⁽⁵⁾を参照されたい。

物体を拘束する指コンポーネントは隔壁を挟んで分散駆動モジュールにより懸架されており、分散駆動モジュールにはアクチュエータは存在しない。分散駆動モジュールは結合モジュールにより共通駆動機構である $xy\theta$ アクチュエータと結合され、1つずつ駆動される。このような構成とすることで、指コンポーネントが多数存在してもアクチュエータ数は増加しない。また、構成要素をモジュール化して分散させることで機能の追加、拡張が容易となる。本論文では手の平コンポーネントの開発について述べる。

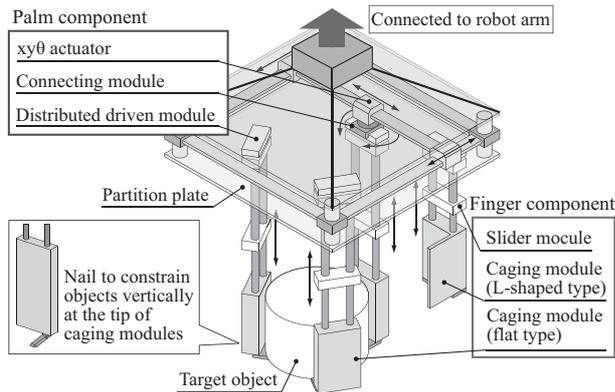


Fig. 2 Framework of the proposed manipulator

3. 手の平コンポーネントの設計・実装

本章では手の平コンポーネントの構成要素である分散駆動モジュール、 $xy\theta$ アクチュエータ、結合モジュールの設計・実装について述べる。

3.1 分散駆動モジュールの設計・実装 分散駆動モジュールの役割は指コンポーネントを懸架、誘導することである。力学モデルを用いて計算することで必要な鉛直吸着力が244 N、水平吸着力が54 Nであり、磁場解析ソフトによる解析から離れた永久磁石間で大きな磁石吸着力を得るために適した磁石配置が分かっている⁽⁶⁾。得られた結果を用い、実装した分散駆動モジュールを図3に示す。文献⁽⁶⁾において提案されている磁石構造を4つ並列に配置し、大きさ120 × 50 ×

12.5 mm、質量300 gで要求仕様を実現している。

分散駆動モジュールにおいて注意すべきこととして、駆動時の指コンポーネントとのずれが挙げられる。両者は隔壁を挟んで永久磁石により結合されているのみであるため、駆動時のずれは不可避である。文献⁽⁶⁾において提案された磁石構造の駆動時におけるずれ量が評価されており、アクリル板を隔壁として用いた場合、その量は0.15 mmである。実装した分散駆動モジュールではその磁石構造を並列に並べているため、分散駆動モジュールと指コンポーネントのずれ量も同様に0.15 mmと推定できる。

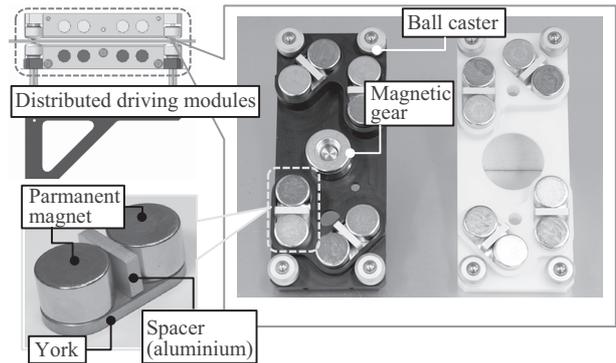


Fig. 3 Structure of the distributed driving module

3.2 $xy\theta$ アクチュエータの設計・実装

3.2.1 $xy\theta$ アクチュエータへの要求仕様

- 駆動速度: 600 mm/s
- 重量: 最大7 kg (取扱質量10 kgのPA10⁽⁷⁾を想定)
- 位置決め精度: ±0.5 ~ 1.0 mm
- 分散駆動モジュールを牽引可能な駆動力 (15 N)

一般に、平面駆動機構としてボールネジを用いた xy テーブルが知られている。ボールネジは大きな駆動力と高精度を長所とし、産業用機械等で広く用いられている。本研究で求められる特徴は高速動作と軽量化であり、ボールネジとは相反する特徴となる。タイミングベルトは簡易で高速な動作を必要とされるところで広く用いられる機構であり、本研究ではタイミングベルトによる駆動を用いる。

提案するマニピュレータでは、指コンポーネントは $xy\theta$ アクチュエータにより1つずつ駆動される。そのため、物体拘束の所要時間は $xy\theta$ アクチュエータの駆動速度に大きく依存する。本研究では端から端までの移動時間を1秒と設定し、最高速度を600 mm/sとした。また、必要精度は指コンポーネントの許容位置誤差より決定される。6章で述べる予備実験より、1 mm程度の位置誤差が許容可能である事が分かっているため、上記のように定めた。

3.2.2 平面駆動機構の考察 図4(a)に従来のタイミングベルトによる平面駆動機構を示す。本論文では平面駆動機構における、2軸の概念を新たに導入する。通常、xyテーブルでは2つのモータがx軸、y軸の駆動をそれぞれ独立に行う。本論文ではモータ1つにより駆動する方向を trajectory axis と呼ぶ。図4(a)では、x方向、y方向が trajectory axis に該当する。一方、2つのモータを同時駆動して駆動する方向を force axis と呼ぶ。図4(a)では斜め45度方向が該当する。trajectory axis では1つのモータのみを駆動するので完全な直線軌道を描くが、駆動力は1つのモータからしか得ることが出来ない。一方、force axis では2つのモータの合力が駆動力になるため、trajectory axis に比べ $\sqrt{2}$ 倍の力を発揮できるが、モータの回転速度の同期が取れていないと軌道が歪むという欠点を有する。

ここで、最終的な位置は各モータの回転角のみにより決定され、速度制御の誤差の影響は軌道の歪みの中に現れることに注意する必要がある。乃ち、位置決め精度は両者で同等であり、エンドエフェクタに完全な直線軌道を描くことが求められる場合は trajectory axis 上を駆動し、大きな駆動力が必要な場合は force axis 上を駆動させるのが良い。ケーシングでは指コンポーネントを物体の周囲に配置することで幾何拘束を行うため、指コンポーネントの経路計画への高精度な追従は不要である。force axis を駆動軸として用いることで必要なモータ出力を小さくすることが可能となる。

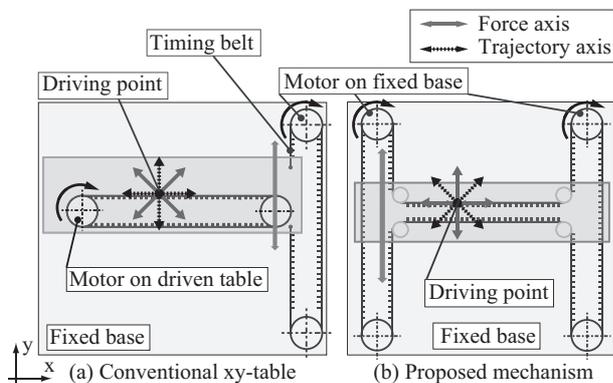


Fig. 4 Two axes of planarly actuating mechanism

3.2.3 2つのモータによる協調駆動機構 本論文では図4(b)に示す機構を提案する。提案機構では force axis が xy 方向となり、2つのモータを同方向に回転させることで x 方向の駆動を行い、反対方向に回転させることで y 方向の駆動を行う。提案機構を用いることで2つの駆動モータを共に固定ベースに配置が可能となる。これにより駆動テーブルが軽量となり、モータの小型化が可能となる。図5に実装した xyθ アクチュエータを示す。

θ 方向の駆動軸は平面駆動機構の先端に搭載されている。

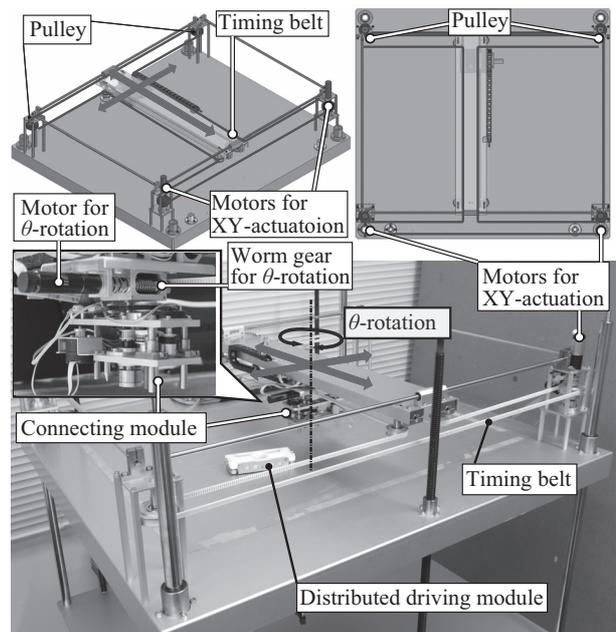


Fig. 5 Picture of xyθ actuator

3.3 結合モジュールの設計・実装 結合モジュールは xyθ アクチュエータに装着され、xyθ アクチュエータと分散駆動モジュールの結合、分散駆動モジュールの位置誤差の吸収、幾何拘束モジュール駆動のための指コンポーネントへの動力伝達⁽⁸⁾の3点が役割となる。分散駆動モジュールは xyθ アクチュエータに牽引されて駆動するため、その位置は xyθ アクチュエータの位置からでしか得ることが出来ない。そのため、外乱などにより生じる位置誤差を吸収するために、結合モジュールに対しロバスト性が要求される。

本研究ではピンを分散駆動モジュールに挿入することで結合を行う機構を選択した(図6)。分散駆動モジュール上面にはテーパをかけた穴があり、そこに結合ピンを挿入することで結合を行う(図7)。ピン挿入は1自由度で実装可能であり、ピン先端にテーパを設けることで分散駆動モジュールの位置誤差を吸収可能なため、要求機能を簡易に実現できる。テーパ角度を 15 deg, テーパ部の長さを 10.5 mm とすることで、3.0 mm までの位置誤差を吸収可能であるように設計した。大きさ 120 × 50 × 90 mm, 質量 400 g, 磁気歯車を通して 1.2 W を指コンポーネントに伝達できる。

4. 実験

本章において特に断りがない限り原点とは xyθ アクチュエータの座標系における原点を指すものとし、座標を (x, y) と記述した場合、原点から X 方向に x mm,

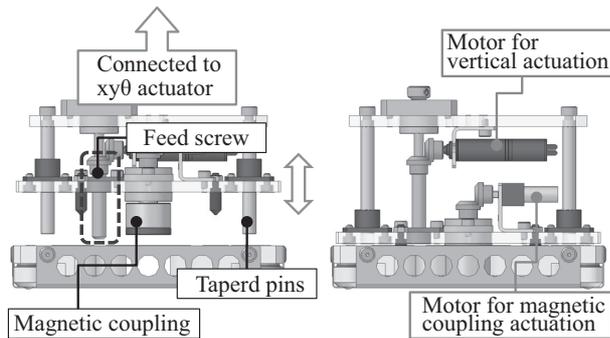


Fig. 6 Mechanism of the connecting module

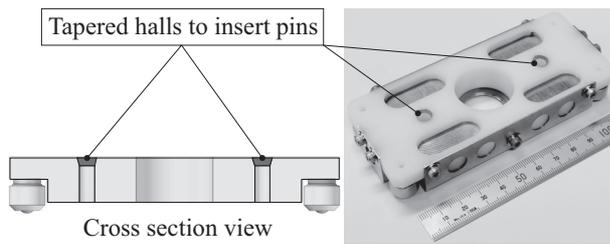


Fig. 7 Tapered halls on the distributed driving module

Y方向に y mm 移動した点を表すものとする。

4.1 結合モジュール評価実験 結合モジュールが分散駆動モジュールの位置誤差に対しロバストな結合が可能である事の確認を目的として実験を行った。

4.1.1 実験設定

1. 分散駆動モジュールを誤差を与えて配置する。与える誤差は設計上限である 3 mm を目安として、人の手によりランダムに与える。
2. 結合モジュールを駆動して結合ピンを挿入する。
3. 結合モジュールを逆方向に駆動して結合ピンを抜き、結合状態を解除する。

上記の試行を 50 回行い、結合の成否を調べた。

4.1.2 実験結果 図 8 に結果を示す。図は結合モジュールの位置を原点とした座標系となっており、分散駆動モジュールの配置点がプロットされている。四角のプロット点は結合に成功した点であり、丸のプロット点は失敗した点である。また、中央の円は半径 3 mm の円であり、この円の内側が設計上結合可能な領域となる。概ね設計通りの結合が成功する領域を得られたが、境界線付近では円の外側での成功例や、円の内側で失敗例が存在する。これはハードウェアの機械的誤差から生じる結合ピンの傾きによるものと考えられる。しかし、この事象は境界線のごく付近で観測されるのみであることから、影響は微少であると考えられる。

4.2 $xy\theta$ アクチュエータの軌道歪み計測実験 3 章で述べた様に、 $xy\theta$ アクチュエータにおける提案機構では、force axis 上を駆動させる際に軌道の歪みが

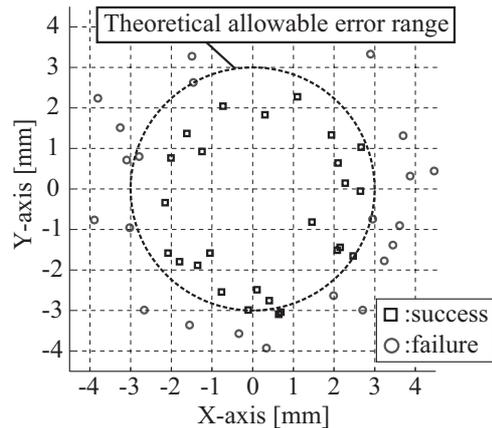


Fig. 8 Experimental result of pin insertion with various position errors

生じる。歪み量は理論的に解析することが困難であるため、実験により生じる歪み量を評価する。

4.2.1 実験設定 初期座標 (0, 250) から目標座標 (600, 250) までの X 軸に平行な移動経路と初期座標 (300, 0) から目標座標 (300, 450) までの Y 軸に平行な移動経路の 2 つの移動経路を目標軌道として $xy\theta$ アクチュエータを駆動させ、目標軌道からのずれをモータの回転角より計測する。実験は結合モジュールにより指コンポーネントを把持した状態と把持していない状態の両方について行い、各経路につき 4 回ずつ計測を行った。また、本実験は生じるずれの最大値を計測することを目的とするため、モータの速度制御は行わず、目標位置へのモータ回転角の P 制御のみで駆動した。

4.2.2 実験結果 図 9 に指コンポーネントを把持していない状態の移動軌跡のうち、最も歪みが大きかったものを示す。x 方向、y 方向共に目標軌道からのずれは 3 mm 以内となった。よって、3 mm 程度の移動軌跡歪みが許容される用途において、提案機構はモータの低出力化に有効であると言える。また、求められる精度に合わせてモータの速度制御を行うことで、移動軌跡への正確な追従が求められる用途にも提案機構を用いることが可能である。

図 10 に指コンポーネントを把持した状態で最も歪みが大きかったものを示す。目標軌道からのずれの最大値は 4.1 mm となった。次節の結果より指コンポーネントの位置誤差は 0.67 mm である事が分かっているので、指コンポーネントの経路計画は各指コンポーネントの間隔が 4.8 mm 以上となる様に計画すればよい。

表 1 に全試行における誤差の絶対値の平均と標準偏差を示す。指コンポーネント把持状態では把持していない状態と比較して平均値が小さく、標準偏差が大きい結果となった。これは、指コンポーネントを把持す

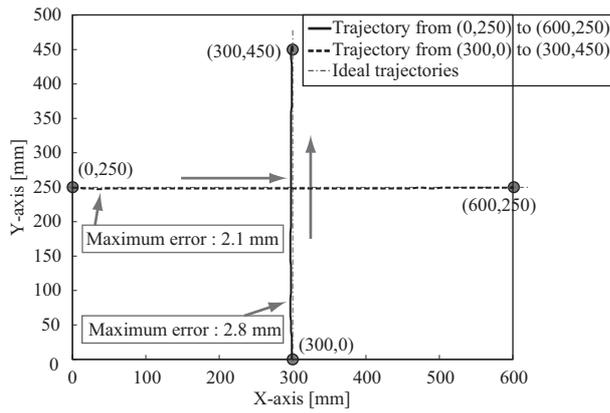


Fig. 9 Trajectories of the $xy\theta$ actuator without holding finger component

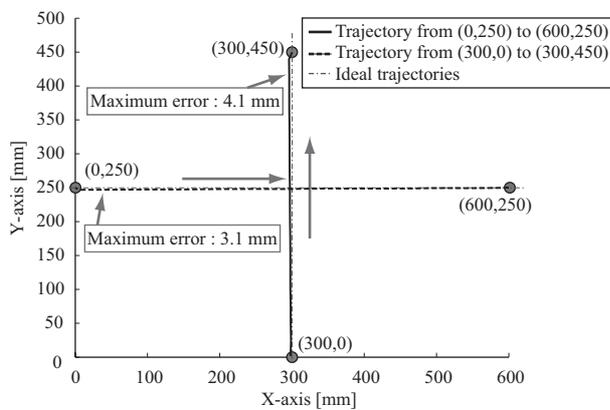


Fig. 10 Trajectories of the $xy\theta$ actuator with holding finger component

ること駆動速度が遅くなり、誤差の絶対値が一律に減少したためと推定できる。また、分散駆動モジュール駆動時の摩擦は隔壁表面の微小な凹凸により、ランダムに向きと大きさが変動する。この影響で希に大きな誤差が生じ、指コンポーネント把持状態の方が大きな標準偏差を取っているのだと考えられる。これは指コンポーネント把持状態の方が最大誤差が大きかった図 10 の結果とも一致する。

Table 1 Average and standard variation of all trials

	Without finger component	With finger component
Average error [mm]	1.67	1.11
Standard variation [mm]	0.70	0.96

4.3 手の平コンポーネントによる指コンポーネントの位置決め精度測定実験 実装した手の平コンポーネントにより分散駆動モジュールを駆動し、規定の精度 (± 1 mm) で指コンポーネントの位置制御が可能であることを確認する。

4.3.1 実験設定 分散駆動モジュールを駆動する際の手の平コンポーネントの駆動手順を以下に示す。

1. 分散駆動モジュール (指コンポーネント) を任意の初期位置に配置する
2. $xy\theta$ アクチュエータを原点から分散駆動モジュールの位置まで駆動する
3. 結合モジュールにより $xy\theta$ アクチュエータと分散駆動モジュールを結合し、分散駆動モジュールを目標位置まで駆動する
4. 結合を解除し、 $xy\theta$ アクチュエータを原点に戻す
分散駆動モジュールを駆動する度に $xy\theta$ アクチュエータを原点に戻すことで複数の指コンポーネントを1つずつ駆動する様子を模擬できる。本実験では分散駆動モジュールの初期位置を (0, 0) とし、(500, 0), (500, 400), (0, 400), (0, 0) の順番に駆動して各地点における位置誤差を計測した。ここで計測する位置誤差は分散駆動モジュールの位置誤差であり、指コンポーネントの位置を直接計測しているわけではないことに注意する必要がある。分散駆動モジュールとのずれにより生じる、指コンポーネントの位置誤差については後述する。以上の試行を 5 回行い、分散駆動モジュールの位置誤差の平均と標準偏差を求めた。

4.3.2 実験結果 実験結果を図 11 に示す。図中の各座標における Average error は 5 回の試行における位置誤差の平均値、Standard variation は標準偏差を示している。最も誤差が大きい場合で平均値が 0.22、標準偏差が 0.10 となった。本研究では生じる誤差は正規分布に従うと仮定し、手の平コンポーネントによる分散駆動モジュールの最大駆動誤差を 0.52 mm とする。これは観測値が正規分布に従う場合、平均値を \bar{x} 、標準偏差を σ とすると、統計的に $\bar{x} + 3\sigma$ 以内に値が入る確率が 99.7% であることが保証されるからである。

以上より、実装した手の平コンポーネントにより分散駆動モジュールを ± 0.52 mm 以下の誤差で駆動可能であることがわかった。しかし、指コンポーネントは分散駆動モジュールの永久磁石により懸架されているのみであるため、指コンポーネントと分散駆動モジュール間に生じたずれがさらに指コンポーネントの位置誤差として加わる。3 章より、駆動時に分散駆動モジュールと指コンポーネントの間に生じるずれは 0.15 mm 以下であるため、最終的な指コンポーネントの位置誤差は ± 0.67 mm となる。6 章で述べる予備実験より、指コンポーネントは ± 1 mm 程度の精度で配置すればよいことが分かっているため、開発した手の平コンポーネントはケーシングによる物体拘束を行う上で十分な位置決め精度を有していると言える。

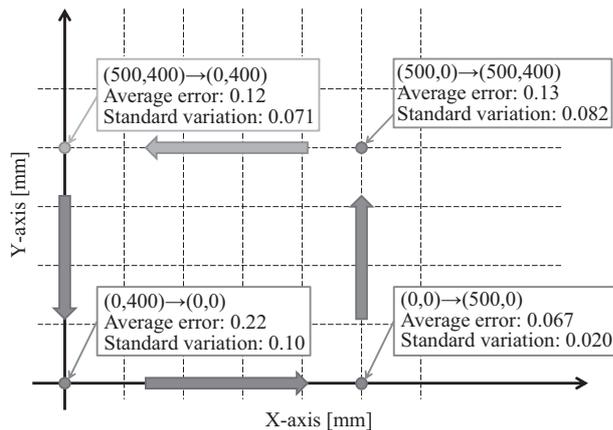


Fig. 11 Result of driving finger component by palm component

5. 結 論

本論文では先行研究で提案された分散型エンドエフェクタによるケーシングマニピュレータのシステム構成要素の一つであり、マニピュレータのアクチュエータ数を削減する鍵となるコンポーネントである、手の平コンポーネントの設計・実装について述べた。平面駆動機構において trajectory axis と force axis の 2 軸の概念を導入し、2 つのモータを協調して駆動することで駆動速度、発揮力を維持したままモータの低出力化が可能であることを示した。結合モジュールではピン結合を用いた、対象の位置誤差にロバストな結合機構を提案し、設計値通りのロバスト性を発揮することを確認した。実装した手の平コンポーネントによる指コンポーネントの駆動実験を行い、要求される精度で指コンポーネントを駆動できることを確認した。これにより、提案されているシステム構成によるケーシングマニピュレーションの実現可能性を示した。

6. 将 来 課 題

図 12 は実際に物体をケーシングにより拘束する予備実験の写真である。8 種類の物品に対しそれぞれ 5 回ずつ試行を行い、拘束の成功率を調べた。結果を表 2 に示す。表中の Gap は幾何拘束モジュールと物体との隙間である。本やバインダー、CD ケースには高い配置精度が要求される事が分かる。これは高アスペクト比の物体や薄い物体は幾何拘束モジュールとの間に少しの隙間が存在するだけで物体が回転し、拘束状態から抜け出してしまうからである。この様に、理論上はケーシング可能であるが、実際にケーシングにより拘束を行う事が難しい形状は数多く存在する。ケーシング形成を多種類の形状に対し行い、ケーシング形成に影響

を与える形状要素を分析することが将来課題である。現状では物体のアスペクト比、エッジ上のテーパ等がケーシング形成に大きな影響を有することが分かっており、検証を行う予定である。更なる将来課題として著者らによる指配置アルゴリズム⁽⁹⁾と融合し、物体認識と操作を自動で行う事を考えている。



Fig. 12 Example of constraining objects by caging

Table 2 Result of constraining objects

Gap	packing tape	spray can	mug	basin	CD case	book	Kleenex	binder
1 mm	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5
5 mm	5/5	5/5	5/5	5/5	0/5	0/5	5/5	0/5
10 mm	5/5	5/5	1/5	5/5	0/5	0/5	5/5	0/5

参 考 文 献

- (1) Peam Pipattanasomporn et al. Two-finger squeezing caging of polygonal and polyhedral object. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 205–210, 2007.
- (2) Guilherme A. S. Pereira et al. Decentralized algorithms for multirobot manipulation via caging. In *International Journal of Robotics Research*, pp. 783–795, 2004.
- (3) Satoshi MAKITA et al. 3D multifingered caging: Basic formulation and planning. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2697–2702, 2008.
- (4) Alberto Rodriguez et al. From caging to grasping. In *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, 2011.
- (5) 福井類, 丹羽大和ら. ケーシングを利用したマニピュレータの構想とシステム設計. 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 1E1-5, 2011.
- (6) 福井 類ら. 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. 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会概要集, pp. 632–635, 2010.
- (7) 関本昌紘, 有本卓. 仮想バネ・ダンパー仮説に基づいた冗長関節ロボットアーム制御法の実験的検証. 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 5, pp. 785–791, 2007.
- (8) 福井類, 丹羽大和ら. 分散型エンドエフェクタの協調によるケーシングマニピュレーションの研究. 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 1E1-6, 2011.
- (9) Wan Weiwei et al. Grasping optimization by employing caging primitives and genetic algorithm. 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, 1Q1-2, 2011.