

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18360117  
 研究課題名（和文） 力覚とアクチュエータの統合による直感的オブジェクトハンドリングシステムの開発  
 研究課題名（英文） Development of an Intuitive Object Handling System based on a Fusion of Haptic and Actuator Technologies  
 研究代表者  
 樋口 俊郎（HIGUCHI TOSHIRO）  
 東京大学・大学院工学系研究科・教授  
 研究者番号：10111569

研究成果の概要：本研究は、バーチャルリアリティの分野で多く用いられている力覚提示技術を用いて、非接触浮上技術と実世界において統合的に用いることで、直感的な非接触ハンドリングを実現することをめざして実施した。磁気浮上および静電浮上が最も不安定となるピック・アンド・プレース作業が力覚の補助によりきわめて直感的かつ安定に実現できることを示したほか、浮上システム全体をユーザ操作と連動して傾斜させることにより安定かつ高速な水平物体搬送が可能となることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2007年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：人間機械システム，非接触浮上，静電浮上，磁気浮上，ゼロパワー浮上，力覚提示，ピック・アンド・プレース作業

## 1. 研究開始当初の背景

近年、製品の小型化・高密度化の流れに伴い、あらゆる部品が小型化・精密化してきている。例えば、ダイオード、コンデンサ等の電子部品はチップサイズが 1mm 前後のものが一般的に用いられているほか、機械部品においてもマイクロ化は進展している。多品種少量生産における人手による生産ラインや、研究室等での研究開発においては、これら小型精密部品を人手により搬送・組み付けする必要に迫られるが、数 mm 以下の小型部品に

おいては、部品のツールへの付着という問題が生ずるため、人手によるハンドリングは熟練を要する非効率な作業となっている(図1)。

マイクロメートル領域での物体ハンドリングに関する研究からも明らかのように、物体の付着を防ぐためには、非接触ハンドリング技術を用いることが有用である。ミリメートルオーダの領域で利用可能な非接触ハンドリング技術としては、磁気浮上ならびに静電浮上技術が知られている。

磁気浮上や静電浮上による非接触浮上技術は、微小部品のハンドリングだけでなく、

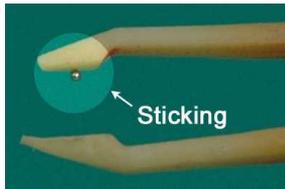


図1 パーツの付着  
(直径 1mm の鉄球がピンセットに  
付着している例)

より大型の精密部品に対しても有用である。例えば、シリコンウェハや、液晶ディスプレイ用のガラス基板、あるいは、塗装・コーティング直後のスチール板などは、機械的接触を伴うハンドリングを適用すると、表面の汚れ・傷につながる恐れがある。そのため、これらのパーツをハンドリングする際にも、磁気/静電浮上技術の適用が期待できる。

## 2. 研究の目的

そこで本研究課題では、磁気浮上ならびに静電浮上の技術を用いることにより非接触で物体をハンドリングするシステムを実現することをめざし、そのための諸技術を開発することを目的とした。

図2は、本研究で将来的に実現をめざすツールのイメージである。本ツールは、先端に浮上機構を有し、様々な物体を非接触で保持することができる。そして、操作者は、機構を自在に動かし、物体のピック&プレース作業などを行うことができる。

磁気/静電浮上では、本来、不安定な系を制御により安定化することで、物体の非接触保持を実現している。そのため、図2にあるように、操作者が浮上機構を自由に動かす、あるいは、ピックアップのために床面に押し付けるといった動作をした場合、被験者による動きや床面からの反力が外乱となり、浮上制御が破綻する。そのため、単に浮上機構をツール先端に設けただけでは、直感的な物体のハンドリングは難しい。

そこで本研究では、ツール内部に力覚提示の機能を持たせ、浮上制御系の内部状態を、操作者に力覚を通じて提示する、あるいは、ユーザの操作を補正することで、浮上状態の直感的理解を可能とし、安定かつ直感的なハ

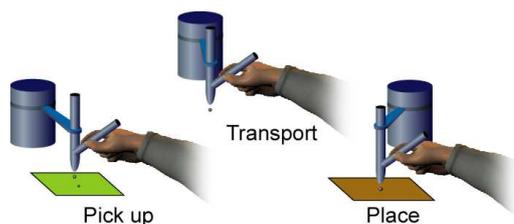


図2 提案するツールのイメージ

ンドリングを実現することをめざした。

## 3. 研究の方法

本研究では、浮上技術そのものに対する研究と、浮上機構と力覚提示の統合手法に対する研究の2点が重要である。そこで、本研究では、大きく分けて以下のような項目を設定し研究を遂行してきた。

### (1) 浮上技術の研究

#### 微小物体の静電浮上

静電浮上の技術は、ある程度確立された技術ではあるが、従来例は、ウェハなど数 cm オーダの物体に対して実施された研究が多く、1 mm 程度の微小物体の浮上は、まだ研究例が少ない。将来的に微小物体のハンドリングツールを実現するためには、その浮上技術の開発が必要である。

#### 平板の水平搬送技術

シリコンウェハやスチール板など薄板の非接触浮上においては、浮上対象物の形状(厚みが少ない)ゆえに、水平方向の拘束力がきわめて小さい。そのため、水平方向への搬送時に、搬送加速度に制約を受けるといった問題があり改善が望まれる。

### (2) 浮上と力覚提示の統合

#### ピック&プレースの力覚支援

物体をハンドリングする際には、まず、物体を拾い上げ(ピックアップ)搬送し、目的地に置く(プレース)という一連の動作をとる。このうち、ピックアップとプレースの動作においては、床面による拘束があることから、浮上制御が不安定になりやすい。よって、この場面において、力覚の支援が最も効率的に発揮されると期待できる。

#### 水平搬送の力覚支援

特に薄板をハンドリングする場合には、前述のように水平方向への搬送に困難な部分が多い。そこで、前述の水平搬送技術に関する研究とあわせて、力覚による支援手法を検討することが必要である。

## 4. 研究成果

### (1) 各研究項目の成果

前節に示した各項目について、それぞれ成果を述べる。

#### 微小物体の静電浮上

微小物体の浮上では、電極形状の選定や、対象物の位置計測手法が重要となる。本研究では、球状電極と光学式変位計を組み合わせることで、直径 1mm 以下の導体球を非接触浮上させることに成功した(図3)。この技術

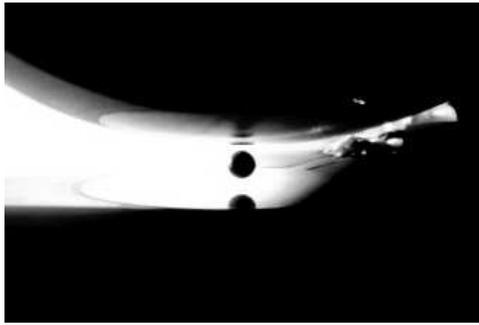


図3 浮上中の0.5mm アルミ球

を図2のようなツールに組み込むためには、センサの小型化が必要であるが、これについては今後の技術開発が必要である。

### 平板の水平搬送技術

静電浮上や磁気浮上において薄板を浮上させる場合、鉛直方向には比較的大きな拘束力を発生できるが、水平方向には、ほとんど拘束力を発生できない。そのため、水平方向に高い加速度で搬送しようとする、浮上対象物がその加速度に追従できず落下してしまう。

これを解決するため、図4のように、浮上機構を傾斜することを考え、静電浮上、磁気浮上の両者に適用した。

結果の一例を図5に示す。この例では、アルミディスクを静電気により浮上させており、それを水平方向に約25mm搬送している。機構を傾斜制御しない場合には、浮上体が激しく振り回っているのに対し、機構を傾斜制御した場合は、ほとんどディスクの横ずれが無い。この結果、水平方向の加速度を高めても、浮上体を落下することなく搬送できるようになった。

### ピック&プレースの力覚支援

搬送物のピック&プレースにおいては、床面が存在するため、床面からの反力により浮上が困難になるケースがある。例えば、図2のようなツールで部品をピックアップする場合に、ツールを床面に近づけすぎると、浮上機構と対象物との距離が狭くなり過ぎてしまい安定な浮上が達成できない(一般に、浮上機構が安定な浮上を実現できる距離は限られている)。また、搬送物をプレースする場合にも、同様の問題が発生する。

このようなケースにおいてユーザへの力覚提示を取り入れることで浮上の安定性を保つことを試みた。具体的には、浮上機構の浮上位置誤差を読み取りながら、それに応じた力をユーザに提示した。これにより、例えば浮上機構を床面に近づけすぎると、適度な反力がユーザに提示されるようになり、ユーザは床面の存在を容易に感じ取りながら対

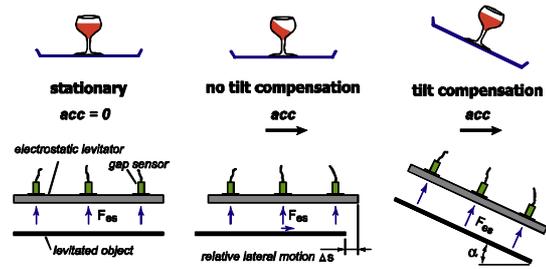


図4 浮上機構の傾斜による水平搬送の安定化  
薄板の浮上では、横方向の拘束力が小さいため、上側のグラスの例と同様に、そのまま横に加速すると浮上体が横ずれしてしまう。加速に応じて機構を傾けることで浮上体の横ずれが防止できる

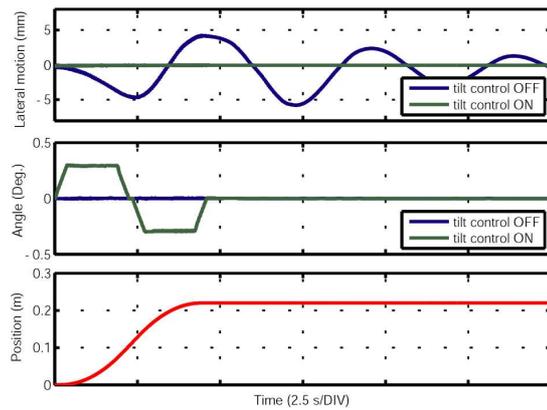


図5 浮上機構傾斜の効果

最上段に示した浮上体の横ずれをみると、機構を傾斜させない場合(tilt control OFF)には、大きな振動が生じているのに対し、機構を傾斜させた場合(tilt control ON)は、全く横ずれを起こしていない。中段と下段のグラフは、それぞれ浮上機構の傾斜角度と、水平方向の機構位置を示す。

象物のピックアップが行えるようになった。

また、浮上制御系の中に積分器がある場合に、上記のような力覚提示を行うと、積分器の働きにより浮上体のプレースが自然と実現されることを発見した。これによると、プレースのためのボタン操作など一切不要で、単に浮上体を床面に軽く押し付けるだけで、浮上体を床面に置くことができる。定量的な評価は難しいが、非常に直感的なプレース作業が実現できることが確認できた。

### 水平搬送の力覚支援

水平搬送において、前述した浮上機構の傾斜と容易に統合できる力覚支援の手法を検討した。提案した浮上機構の傾斜手法では、機構の水平方向加速度に比例して機構を傾斜させる。対象物の横ずれを計測してフィードバックすることはせず、加速度情報のみを用いて機構を傾斜させるため、加速度情報をタイムラグなしに取得する必要がある。

しかし、ユーザに自由に装置を動かさせて、

そのときの加速度を計測しようとする時、タイムラグが生じてしまい対象物の横ずれを招いてしまう。そこで、水平方向のユーザ操作に、アドミタンス制御と呼ばれる力覚提示手法を適用することで、この問題を解決した。

アドミタンス制御とは、(a)力センサによりユーザの操作力を計測し、(b)計算機内部のダイナミクスモデルに基づいて操作力に対する位置応答を計算し、(c)計算した位置へと機構を位置決めすることで、力覚提示を行う手法である。力覚提示系が機構の加速度や位置を算出してから、それに基づいて機構を位置決めするため、機構の加速度情報をリアルタイムに得ることができる。その情報を用いて浮上制御系を傾斜させることで、ユーザの任意の水平搬送動作に対しても安定に浮上体を保持しつづけられることが確認できた。

## (2) 今後の課題

本研究では、図2のようなツールを実現する上で不可欠な技術要素について一つずつ研究を行い、それぞれにおける問題点を解決した。これらの要素を組み合わせることで、図2のように自由自在に物体を搬送するツールが実現できると考えられるが、本研究の期間内では、実際にそのような試作をするには至らなかった。今後は、本研究の成果をベースとして、統合システムの構築を行うことが望まれる。

## (3) 本研究に対する学術的な評価

次節に示すように、本研究の成果は多くの国際学術誌や国際会議にて発表した。そのうちのいくつかについて、賞を授与されるなど、きわめて高い評価を受けた。以下に、研究期間内に本研究に関連して受けた賞を示す。

Mechatronics Journal Best Paper Prize (2008)

(Elsevier Ltd.およびIFAC国際自動制御連合より、雑誌Mechatronics上での発表論文に対して授与された)

Finalist for Best Manipulation Paper (2008)

(国際会議IEEE ICRA2008での発表が、Best Manipulation Paper賞の最終候補に選出された)

Best Student Paper (2006)

(国際会議EuroHaptics2006での発表に対して授与された)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 11件)

E. van West, A. Yamamoto, T. Higuchi, "Manipulation of Thin Objects Using Levitation Techniques, Tilt Control, and Haptics", IEEE Transactions on Automation Science and

Engineering (in press) 【査読有】

E. van West, A. Yamamoto, T. Higuchi, "Transportation of a Thin Sheet Metal Disk using Magnetic Levitation and Tilt Control", Proc. 2009 IEEE International Conference on Mechatronics, MF-003301 (6 pages) (2009/4) 【査読有】

E. van West, A. Yamamoto, T. Higuchi, "Automatic Object Release in Magnetic and Electrostatic Levitation Systems", Precision Engineering, 33-3, pp. 217-228 (2009/7) 【査読有】

E. van West, A. Yamamoto, T. Higuchi, "Transportation of Hard Disk Media Using Electrostatic Levitation and Tilt Control", Proc. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 755-760 (2008/5) 【査読有】

E. van West, A. Yamamoto, B. Burns, T. Higuchi, "Development of SCARA-Type Haptic Device for Electrostatic Non-Contact Handling System", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2-2, pp. 180-190 (2008/4) 【査読有】

E. van West, A. Yamamoto, B. Burns, T. Higuchi, "Non-contact Handling of Hard-Disk Media by Human Operator Using Electrostatic Levitation and Haptic Device", Proc. 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1106-1111 (2007/10) 【査読有】

E. van West, A. Yamamoto, T. Higuchi, "The Concept of "Haptic Tweezer", a Non-Contact Object Handling System Using Levitation Techniques and Haptics Mechatronics", Mechatronics, 17-7, pp. 345-356 (2007/9) 【査読有】

E. van West, A. Yamamoto, B. Burns, T. Higuchi, "Development of SCARA-type Haptic Device", Proc. JSME-KSME Joint International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, D09 (8 pages) (2007/7) 【査読有】

E. van West, A. Yamamoto, T. Higuchi, "Pick and Place of Hard Disk Media using Electrostatic Levitation", Proc. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2520-2525 (2007/4) 【査読有】

E. van West, A. Yamamoto, T. Higuchi, "Intrinsic Placing Behavior in Zero-Power Controlled Magnetic Levitation Object Handling", Proc. Tenth International Symposium on Magnetic Bearings, 6 pages on CD-ROM (2006/8) 【査読有】

E. van West, A. Yamamoto, T. Higuchi, "Development of "Haptic Tweezer", a non-contact object handling system using magnetic levitation and haptic device", Proc. Eurohaptics International Conference 2006, pp.

87-92 (2006/7) 【査読有】

〔学会発表〕(計 9件)

E. van West, "Transportation of Hard Disk Media Using Electrostatic Levitation and Tilt Control", 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2008), 2008/5/21, Pasadena, USA

J. Ryu, "Non-contact electrostatic levitation of micro-objects", 第20回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2008/5/21, 別府

E. Van West, "Pick and Place of Hard Disk Media using Electrostatic Levitation", 第7回SICE システムインテグレーション部門講演会(SI2006), 2006/12, 札幌

E. van West, "Development of "Haptic Tweezer", a non-contact object handling system using magnetic levitation and haptic device", Eurohaptics International Conference 2006, 2006/7/4, Paris, France

〔その他〕

研究内容を紹介するホームページ

<http://am.t.u-tokyo.ac.jp/research/haptics.html>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

樋口 俊郎 (HIGUCHI TOSHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：10111569

### (2)研究分担者

無し

### (3)連携研究者

山本 晃生 (YAMAMOTO AKIO)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：40313035