

小型部品搬送作業支援のためのハンドリングツール

山本晃生, 樋口俊郎
工学系研究科 精密機械工学専攻

概要

試作・開発段階等における組み立て作業では、微小な部品や壊れやすい部品の手作業によるハンドリングが必要となる場合がある。そのような場合に、たとえばピンセットのような接触式ツールを用いると、パーツの破損や付着が問題となる。そこで、それらの問題を解決する一つの試みとして、新しい非接触ハンドリングツールのコンセプトを提案する。提案するツールは、非接触浮上機構を力覚提示デバイスと組み合わせ、浮上機構の制御状態に応じて力覚提示デバイスを制御することで、直感的な非接触ハンドリングを可能とするものである。今回は、提案手法の有効性を確認するため、磁気浮上機構により、1cm程度の磁性体をハンドリングする装置を試作した。

1 はじめに

近年、製品の小型化・高密度化の流れに伴い、電子部品や機械部品を含む多くの部品が小型化・精密化してきている。研究レベルや試作開発段階においては、しばしばそれら精密な部品を手作業でハンドリングする必要に迫られるが、mm前後の小型部品をハンドリングすることは容易ではない。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[1]、これらのハンドリングは習熟を要する困難な作業となる(図1)。

小型物体がツールに付着する現象はマイクロメートル領域では特に顕著であるため、マイクロメートル領域での物体ハンドリングに関しては、様々な手法が研究されている。これに対し、ミリメートル近傍の領域におけるハンドリングは、研究開発や生産の現場において、より身近な領域であるにも関わらず、あまり多くの研究がなされていないように思われる。

そこで本研究では、1mm前後の微小部品を自在にハンドリングするためのツールとして、磁気

浮上や静電浮上[2], [3]などの非接触浮上技術を利用したハンドリングツールのコンセプトを提案する[4]。図2は、本研究で実現をめざすツールのイメージである。本ツールは、先端に磁気浮上あるいは静電浮上などの非接触浮上機構を有しており、例えばパートトレイ上から顕微鏡視野内などへと、微小部品を非接触で搬送することを可能とする。

本研究で部品の保持に用いる静電/磁気浮上では、本来、不安定な系をフィードバック制御により安定化することで、安定な非接触保持を実現する。しかし、図2に示すようにユーザが浮上機構全体を動かして物体のハンドリングを行おうとすると、ユーザの操作や床面からの反力などが浮上系に対する外乱となって、安定な非接触浮上を損なう恐れがある。特に、床面から物体を拾い上げる際(ピックアップ時)や、床面に物体を設置する際(プレース時)の床面からの反力は、浮

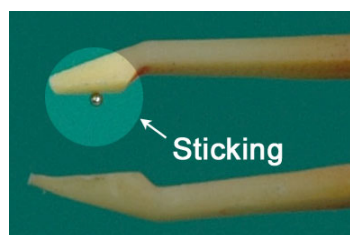


図1 接触式ツールにおける把持物体のツールへの付着(1mm径のボールをピンセットで把持し、離そうとしたところ)

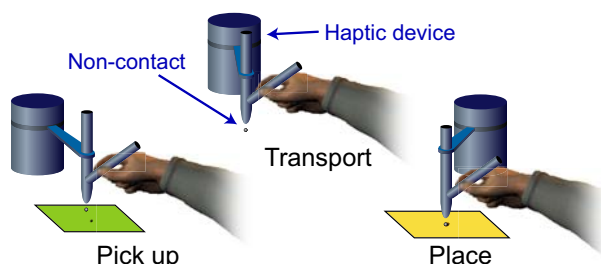


図2 提案するハンドリングツールの概念図

上系にとって大きな外乱要素であり、これらのタイミングにおいて浮上系は不安定となりやすい。そこで本システムでは、浮上機構を力覚提示デバイスと組み合わせ、浮上状態をユーザに力覚として提示することで、ユーザ操作ならびに浮上制御を効果的に補助・支援し、安定かつ直感的な非接触ハンドリングを実現する。

今回、コンセプトの有用性を確かめるため、1 cm 程度の強磁性体を対象として、1 自由度磁気浮上機構を用いてマクロモデルを試作した。本報告では、その概要について報告する[4]。

2 ゼロパワー磁気浮上機構

本研究では、物体の非接触保持にゼロパワー浮上系[5]と呼ばれる磁気浮上系を用いた。ゼロパワー磁気浮上系では、永久磁石と電磁石を併用し、永久磁石からの磁力と浮上体重量とが釣り合うように浮上位置を変化させることで、定常状態における電流量をゼロへと収束させる。釣り合い位置が変化することで、様々な質量の物体を低い消費電力で保持することが可能であり、本システムのように、浮上対象物の重量が特定できない場合に、有効な浮上方式であるといえる。

図3に製作した浮上機構の構造を示す。本機構は、E形トランスコアに530巻きのコイルを取り付けた電磁石部分と、Eコア先端に取り付けた永久磁石、そして、対象物とのギャップを検出するための光学式ギャップセンサ（Z4LB-S10V2、オムロン）から構成される。浮上体と磁石との間のギャップが、ギャップセンサにより検出され、以下に述べる制御系により安定化される。これにより、浮上体はおおよそ一定のギャップを保ったまま磁石下に保持される。なお、今回のプロトタイプでは、浮上体の鉛直方向の動作のみを制御し、水平面内の動作は受動的に安定化している。

浮上制御系のブロック図を図4の左上枠内に示す。浮上制御系は、事前に適当な浮上目標ギャップを定めた微分先行型 PD 制御系をベースとし、出力電流指令値の積分値をフィードバックして目標ギャップへ加算することにより、ゼロパワー系としての機能を持たせた。すなわち、出力電流量がゼロでない場合には、電流量がゼロとなる（すなわち、永久磁石からの磁力が物体重量と釣りあう）ように目標ギャップが変化するように本制御系は動作する。なお、図中には示していないが、過大な電流がコイルに流れるのを防ぐために、対象物体がセンサレンジ外にある場合には、浮上制御系の動作を停止するように構成した。

3 力覚提示デバイスとの統合

本研究で提案するツール構成では、浮上機構の内部状態を力覚提示デバイスで“可触化”し、ユーザに伝えることで、直感的な使い心地を実現する。今回のプロトタイプでは、力覚提示デバイスとして SensAble 社の PHANTOM Omni を用いた。前述の磁気浮上機構を、図3に示すフレーム部を介して PHANTOM のスタイラスに取り付けた(図5)。

PHANTOM 発生力の制御ブロック図を図4下部の枠内に示す。本システムでは、浮上系のギャップ偏差とギャップ微分値にそれぞれゲインをかけ合計した値を、PHANTOM より鉛直方向の力として出力するよう構成した。これにより、例えば、浮上ギャップが減少した場合や、浮上対象が急上昇した際に、スタイラスに対し上向きの力が発生する。ただし、磁気浮上系に加わる主要な外乱は床面から受ける上向きの反力であるため、PHANTOM の発生力は上方向のみに限定した。また、磁気浮上機構の重量(約 255g)を一部補償するため常に上向きに 1.5N の力を発生するとともに、ユーザによる急激な操作を防ぐために、疑

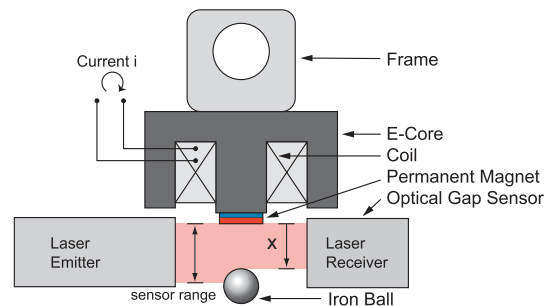


図3 試作したゼロパワー磁気浮上機構の構成

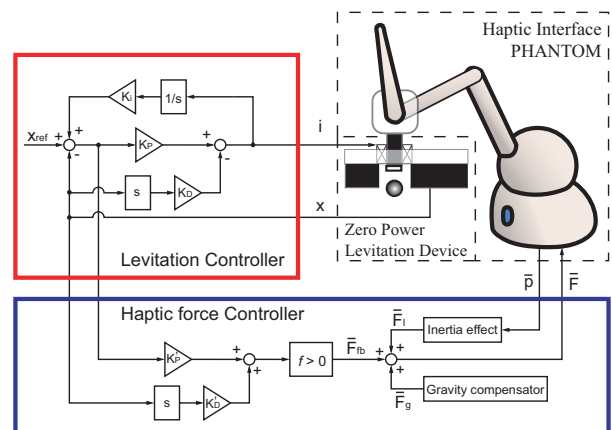


図4 制御系の構成



図5 試作装置の外観

似的な慣性力を発生させた。

なお、今回の浮上機構は浮上体の鉛直方向の動作のみを制御する1自由度浮上系であるため、浮上機構は常に水平を保っている必要がある。しかし、PHANToM Omniの出力は並進3自由度のみであり、回転自由度の制御は行えない。また、今回のセットアップでは、磁気浮上機構を水平に保つ特別な機構も設けていない。よって、使用の際には、操作者自身が機構の水平を保つようにスタイラスを操作する必要がある。

4 動作評価

上記で試作したシステムを、ピック&プレース作業により実験的に評価したところ、特にピックアップ時とプレース時において、力覚提示の有効性が確認された。以下に、実験的に得られたデータをもとに、それぞれの場合におけるシステムの動作を述べる。なお、以下においてハンドリング対象としたのは、高さ約63mmの台座の上に置かれた直径13mm、重さ8.3gの鉄球である。

4.1 ピックアップ時の動作

ピックアップ時の挙動を模式図として図6に示す。また、その際の各部の動作波形を図7に示す。

台座におかれた鉄球をピックアップするためにユーザがスタイラスを台座に近づけ、鉄球がギャップセンサのレンジ内に入ると、浮上制御系が動作を開始し、事前に設定された目標ギャップ初期値へとボールを引き上げる。このとき、ボールと浮上機構の間のギャップが急速に減少すると共に、オーバーシュートにより一時的にギャップが目標ギャップを下回る。先に述べたように、力覚提示系は浮上系のギャップ偏差とギャップ微分値の合計を力覚として提示するよう構成さ

れているため、ボールの急上昇とオーバーシュートにより、力覚提示系はスタイラスを上向きに跳ね上げるような力を発生する。これにより、ユーザはボールが浮上した瞬間に、上向きの衝撃力によりボールのピックアップを力覚により知覚することができる。

すなわち、ユーザ側から見たピックアップの一連の流れは次のようになる。(1)スタイラスを操作して浮上機構を目標物体に近づける。(2)仮想的な反発力を受けたら逆らわずにスタイラスを引き上げる。これらの自然な操作のみによって、ボールは安定にピックアップされる。

4.2 プレース時の動作

図8, 9にプレース時の動作を示す。浮上保持している物体を目標位置にプレースするために、スタイラスを床面に近づけていくと、ある時点でボールが床面に接触する(a)。この時点ではユーザはボールの接触を知覚できないため、スタイラス位置はユーザにより、さらに下へと押し込まれる。すると、ボールは床面より下には下がりえないためボールと磁石との間のギャップが減少し、これにより、力覚提示系が上向きの力を発生してユーザ

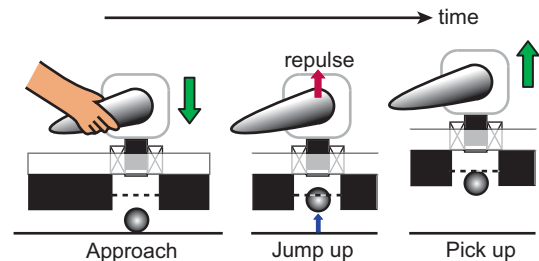


図6 ピックアップ時の挙動

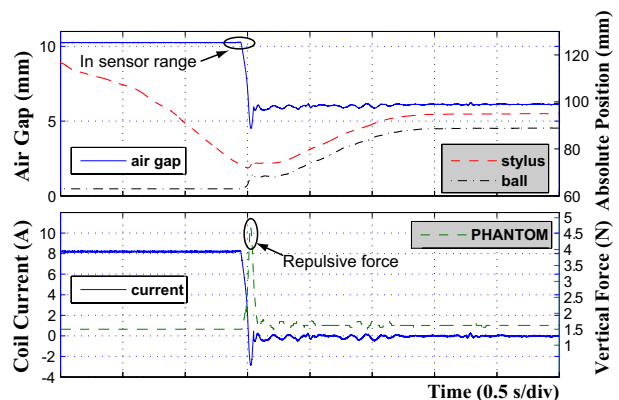


図7 ピックアップ時の各部の動作
(実線は左縦軸、破線は右縦軸に対応)

は床面からの仮想的な反力を知覚する(b).

また、ボールが床面に接している間、床面からの反力分だけ浮上系から見たボール重量は減少する。ゼロパワー浮上系はボール重量と永久磁石の磁力が釣り合う位置へとボールを移動させようとするため、ボール重量が“軽く”なると、ボールと磁石との間のギャップを広げるように制御系が動作する。そのため、ボールが床面に接している間、浮上制御系の目標ギャップは増加し続ける(c)。これにより、浮上目標ギャップと実際のギャップとが乖離していくため、力覚提示系が発生する上向きの力も増加し続ける。そのため、ユーザはより明確に（仮想的な）床面反力を感じるようになる。その後、床面からの反力を感じたユーザがスタイラスを持ち上げると(d)、ボールは床面に押し付けられたままであるため浮上ギャップが増加する。浮上ギャップが目標ギャップを上回った時点で、浮上系は再びボールを引き上げようとするが(e)、その時点での目標ギャップは、“床反力により見かけ上減少したボール重量”とつりあうギャップであるため、浮上系は（実際にはより重い）ボールを引き上げることができず、その結果、ボールは床面に置かれたままスタイラスのみが上昇し、プレス動作が達成される。

この一連の操作においても、ユーザは、床面からの反力を知覚するまでスタイラスを押し下げ、反力を知覚した時点で引き上げる、という自然な操作のみでプレスを行うことができる。

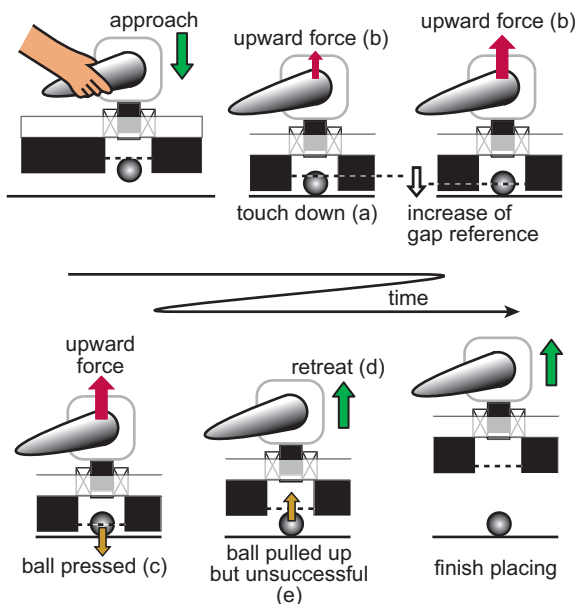


図8 プレス時の挙動

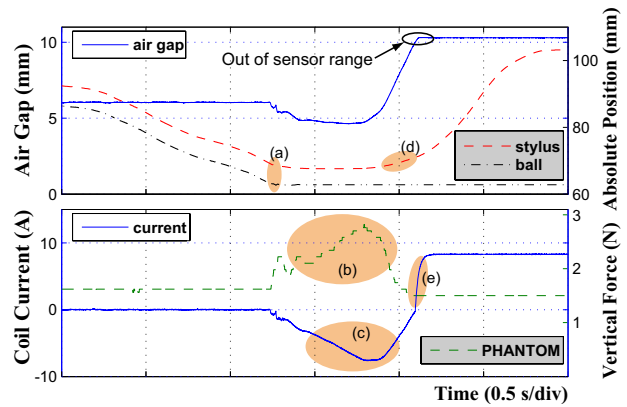


図9 プレス時の各部の動作
(実線は左縦軸、破線は右縦軸に対応)

5 まとめ

本報告では、直感的な非接触ハンドリングを実現するツールとして、非接触浮上機構と力覚提示デバイスを組み合わせたツールコンセプトについて述べた。本文中では触れていないが、複数名の被験者に試作装置でピック&プレス作業を行ってもらったところ、力覚による補助の有無により、2～4倍程度の作業能率の違いを確認することができた[5]。すなわち、力覚の補助により、浮上制御系の安定性を補い、容易なハンドリングが実現された。

今後は、本試作をベースに、より小型化したツールの実現をめざしていきたい。

参考文献

- [1] R. S. Fearing: "Survey of Sticking Effects for Micro Parts Handling", Proc. IEEE/RSJ IROS '95, Vol. 2, pp. 212-217, 1995.
- [2] W. K. Rhim, S. K. Chung, D. Barber, K. F. Man, G. Gutt, A. Rulison, and R. E. Spjut: "An Electrostatic Levitator for High-Temperature Containerless Materials Processing in 1-g", Review of Scientific Instruments, Vol. 64, No. 10, pp. 2961-2970, 1993.
- [3] J. U. Jeon, and T. Higuchi: "Electrostatic Suspension of Dielectrics," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 45, No. 6, pp. 938-946, 1998.
- [4] 山本, ファンウェスト, 樋口: 磁気浮上機構と力覚提示デバイスによる非接触物体ハンドリングシステム (Haptic Tweezer) の開発, 日本VR学会第10回大会論文集, pp. 301-304, 2005.
- [5] 水野, 竹森: 伝達関数を用いたゼロパワー磁気浮上制御系の解析と設計, 電気学会論文誌 D, Vol. 121-D, No. 9, pp. 933-940, 2001.