

「振ってみる」インタフェース

広田光一 関口裕一郎

東京大学大学院 新領域創成科学研究科

内容物をもつ容器を振ってみることで、その内容物のおよその性質を力覚を通して知ることができる。本研究はこのような体験を仮想的に実現する手法について検討している。本論文ではこれを実現するための基本的な概念を整理し、これを踏まえて実装のアプローチを議論する。実際の容器と内容物と同様に、把持して操作する形態をもち慣性力による力覚提示を行うデバイスを提案する。これを具体化する1自由度のデバイスおよびその制御系を設計する。デバイスの試作と比較的単純なモデルの提示を通して、提案手法の妥当性とこのアプローチ可能性を示す。

Shaking virtual box with content

Koichi Hirota, and Yuichiro Sekiguchi

Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo

By shaking a box with content, we can approximately estimate characteristic of the content inside through haptic sensation. Our study is focusing on implementation of haptic device that virtually realizes such interaction between human and a box. This paper discusses conceptual ideas of our approach, design of device and its control system, and implementation of a prototype system.

1 はじめに

人は容器を振ってみることを通しての内容物についてある程度の情報を得ることができる。たとえば、液体の入った容器を振ることで、内部の液体の量や粘性を知ることができる。これは情報提示とハプティックデバイスという2つの観点で非常に興味深いことである。

容器を持っているだけの状態では伝達されるのは重さの情報だけである。インタラクティブな操作を通してはじめて内容物を含めた動的なモデルが伝達される。もし動的なモデルの種類やパラメータを人が区別できるのであれば、すなわち、この容器を振るというインタフェースを情報提示に利用可能であることを意味する。

一方で、容器と内容物は、パッシブなハプティックデバイスと考えることもできる。このようなデバイスは従来のものと比べて自己完結で、対象物そのものをインタフェースとすることを特徴とする。本研究では、このようなハプティックデバイスについて、より汎用な実装を検討する。

2 背景とアプローチ

2.1 情報の伝達

動的な操作を通して伝達される力学的なモデルとして代表的なものは慣性モーメントである。ロボット工学では、ロボットアームのパラメータ同定を目的として、アームの動作を通して慣性モーメントなどを求める手法が一般的に用いられてきた。心理学の知見によれば、人間も対象を空間的に操作することを通して対象の慣性モーメントをある程度推定することができることが知られてい

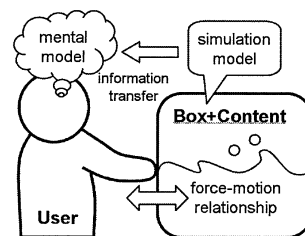


図 1: 操作を通じた情報の伝達

る [1]。

日常生活においては、人はより多様な動的特性を利用していると考えられる。上述のように、液体の入ったビン振ることで、内容物の量だけでなく、粘性についてもある程度の推測が可能である。中身が粒子状の物体であれば、その粒子の大きさ、たとえばあめ玉なのか粉状なのか、についてもある程度の推測が可能である。このような内容物の認識は、対象の物理モデルを近似するメンタルモデルが人の頭の中に構築される過程であると考えることができる (図 1)。

対象物を操作した場合の操作と反力と同様の関係を力覚デバイスによって人工的に与えることができれば、対象物のシミュレーションモデルに対応したメンタルモデルをユーザに構築させることができる。シミュレーションモデルのパラメータを何らかの情報に対応付けることができれば、汎用のインタフェースとしての利用が期待できる。たとえば内容物の量をメールボックスにたまっているメールの量にマップすることで、振ってみる操

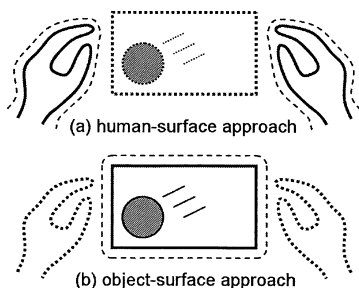


図 2: 実装のアプローチ

作を通してメールの有無や量を知ることができるようになる。

2.2 実体型インタフェース

対象物との接触の表現を目的とした力覚提示では、対象物を表現するという概念が提案されており、対象物提示あるいは遭遇型アプローチなどと呼ばれている。初期の提案としては、Surface Display[2]、Shape Approximation Device[3]、Robotic Graphics[4] などがある。この考え方は、インタフェースとしての特徴は、筆者らの考えでは、インタフェースの界面を人の表面にとるのではなく対象物の表面にとることにあると考えている。

上述の容器と内容物のように対象が把持して操作される場合についても、同様の分類学が適用できると考えられる。すなわち、力-運動関係をユーザの皮膚表面で考えるか、容器の表面で考えるか、という2つのアプローチが可能である(図2)。前者の素直な実装は皮膚表面に力を提示する装着型のデバイスを利用することである。装着型のデバイスで外力を提示するためには接地型のデバイスを用いることになるが、皮膚表面での圧覚提示を行う非接地型のデバイスによっても相当の操作感が得られる事が報告されている[5]。一方、後者の実現には力-運動関係を持つ自己完結的なデバイスを用いることになる。このようなデバイスは容器と内容物そのものを実体として表現するものであり、原理的には実物体と同様に扱うことができるものとなるはずである。これまでに内容物の性質を限定した実装は試みられているが[6, 7]、汎用な実装については十分な検討がなされていなかった。

3 実装のアイディア

3.1 重心移動デバイス

容器を振って内容物の特性を認識する状況の人工的な生成について考えると、これは本質的には容器の運動とその際にユーザが受ける力との関係の表現である。ユーザに把持された容器のように非接地の状態では力を発生する方法として、ここでは慣性を利用するものとした。実際、容器と内容物も慣性力により反力を発生しているが、内容物の

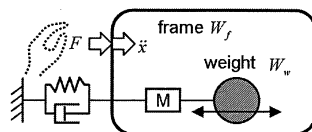


図 3: デバイスの動力学モデル

運動は物理的な法則に従っている。これに対して、デバイスでは内部で錘を人工的に加速度運動させ、その際の反力を提示する。

デバイスの汎用性を考えると、任意のモデルを表現できる事が望ましい。しかしながら、デバイスの実体性から、デバイス自体の質量とモデルに定義される容器と内容物の質量が異なる状態での操作-力関係の提示では、原理的には操作の範囲が限定され、実体型インタフェースの利点が損なわれる事になる。

モデルとデバイスの質量が等しい場合は、両者の運動量の一致から、両者の重心移動が等しくなることが導かれる。すなわち、デバイスはモデルの重心移動を提示する装置と考える事ができる。

3.2 力入力-加速度出力

操作と反力の関係を表現する制御のアプローチとして、(a) 加速度入力-力出力と (b) 力入力-加速度出力とが考えられる。前者のアプローチでは、入力としての加速度の計測は容易である。しかしながら、手でもっている状態が弾性支持である事を考慮すると、力の大きさがデバイスの位置に依存するため、直ちに目標とする力の作用する状態に移行する事は不可能である。後者のアプローチでは、容器のように操作の際の接触の範囲が限定されない状況では力を直接的に計測する事は難しい。一方、出力としての加速度については、外力が直前の状態から変化しないという仮定のもとでは、デバイス内の錘の加速による反作用により直ちに実現が可能である。このようなデバイスのモデルを図3に示す。

本研究では、力センサを使用せずデバイスの加速度からデバイス自体が発生している加速度を差し引いたものが操作力による成分であると考えて、操作力を推定することを試みた。力の変化は、弾性支持の状態では弾性と相対的な運動速度とで決まり、指で弾いたり他の物体がぶつかったりした場合を除けば、人が動作する周波数の範囲内で変化すると考える事ができる。力の推定は、理論的にはデバイスの逆運動学の解となるが、予備的な実験によると加速度センサのノイズなどの影響により力を安定に求めることができなかった。ここでは、上述のような力の性質を考慮してカルマンフィルタにより推定することとした。

なお、加速度制御のみでは、加速度の誤差の蓄積により重心位置に誤差が生じ、上述の重心一致

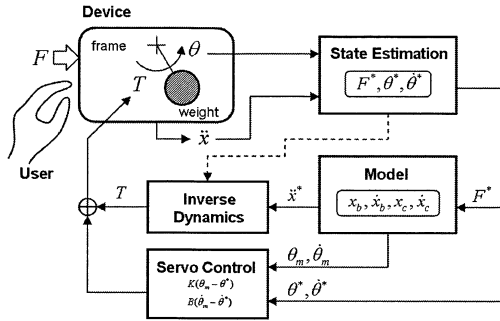


図 4: 制御系の構成

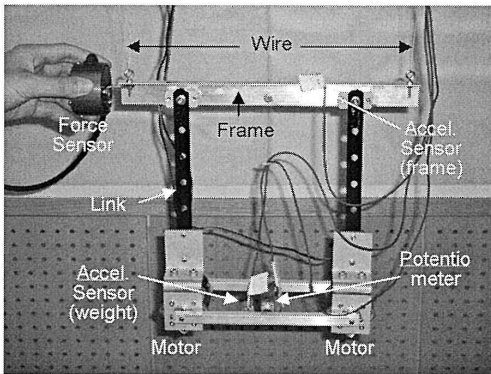


図 5: プロトタイプデバイス

が保証されない。以下の試作では、重心の誤差を補償する制御を追加している。図 4 に制御系の構成を示す。

4 プロトタイプ

以上の概念およびアイデアを実現する 1 自由度のデバイスを試作し [8]、改良と実験を行っている (図 5)。錘の駆動に振り子型のリンク機構を用い、上下方向の作用を相殺するために、ハーネスで吊っている。デバイスの重量は 1.35kg、リンク長は 109mm、デバイスの外装に相当するフレームの加速度を計測する加速度センサおよびリンクの角度を計測するポテンシオメータを備えている。なお、図中の力センサはデバイスの一部ではなく、提示力の検証のために追加したものである。以下の実験では、この力センサを介して操作を行うことで、操作力を計測するが、デバイスとしては本来はフレームのどこをもつて操作しても構わない。

制御系には AD/DA コンバータを備えた PC (AMD Athlon 64X2 4800+ 2.4 GHz) と電流制御を行うモータドライバを用いた。制御の更新レートは 4kHz、AD/DA 変換は 16bit である。動作を

確認するための実験として、剛体のモデルの提示と、容器+内容物のモデルの提示を行い、その際のシステムの動作を計測した。モデルのシミュレーションについても、制御の更新と同時に 4kHz で実行されている。

5 評価

5.1 剛体のモデル

剛体のモデルでは機構と同じ重量の剛体を提示する。剛体の場合は重心は容器に対して静止しており、したがって機構も動かない状態であることが期待される。剛体モデルの場合のインタラクションの例を図 6 に示す。上図には、力センサで計測された外力とカルマンフィルタで推定された力が示されている。これによると、両者は良い一致が得られている。すなわち、フレームの加速度と機構の運動から力を推定する機能が正しく動作していることがわかる。

2 段目には、モデルにより計算された加速度と加速度センサにより計測される実際の加速度が示されている。これらにも比較的 に良い一致が見られる。一致が良くない箇所が見られるが、その理由は制御パワーの限界によるものであると考えられる。3 段目に示すのはモータへの電流指令値と実際の電流値をプロットしたものであるが、電流がおよそ 10A で制限されていることがわかる。これは、モータの保護のために設定しているものである。この制限により指令値と実際の値が乖離している箇所では加速度の不一致が発生していることが観察される。

下図はデバイスのフレームを基準とした相対重心位置とモデルの容器を基準とした重心位置をプロットしたものである。上述のように、モデルの重心は常に 0 で動かない。加速度の誤差と同様に、制御パワーの不足により重心位置にぶれが発生している。

5.2 容器+内容物のモデル

容器+内容物のモデルは 0.26kg の質点が長さ 110 重さ 1.09kg の容器の中を移動するものである。容器の中に固形内容物が入っている状態を 1 次元の並進運動で近似したものである。内容物が容器内を移動する際には速度によらない摩擦を仮定している。また、容器と内容物の衝突については弾性衝突を仮定している。図 7 にこのモデルを用いたインタラクションの例を示す。このモデルについても、上図によれば、力センサで計測された外力とカルマンフィルタで推定された力はよく一致している。なお、周期の長いオフセットの変化は、機構の水平位置によってハーネスからの力が変化するることによるものと考えられる。

同様に、提示加速度も計算された目標値とよく一致している。ただし、剛体のモデルと同様にパワー不足による不一致が見られる。このモデルで

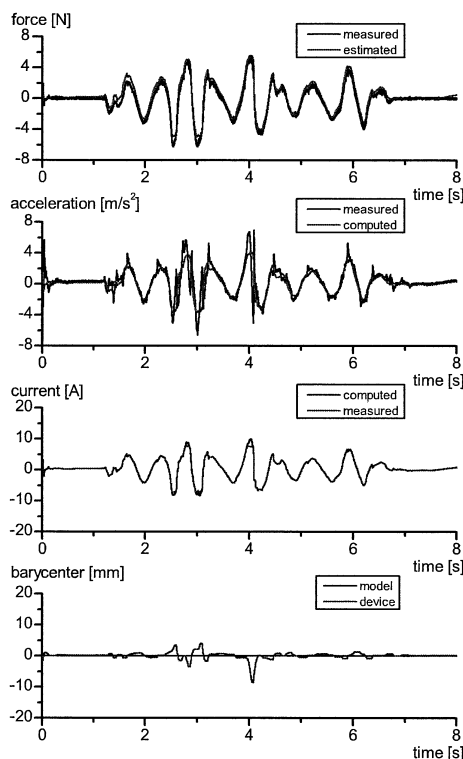


図 6: 剛体モデルの提示

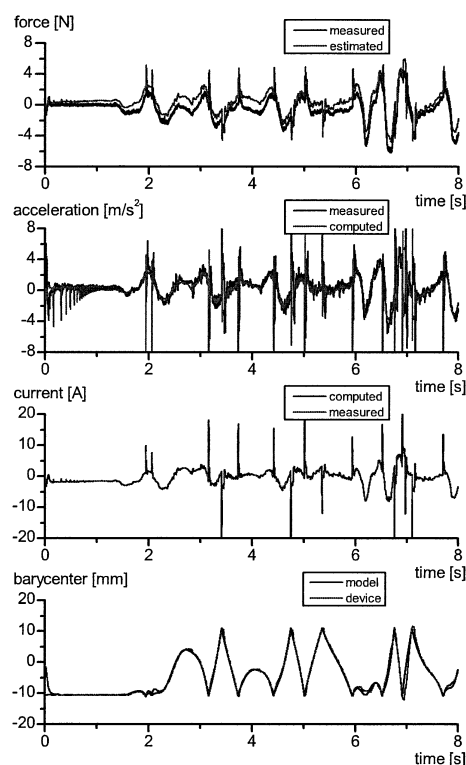


図 7: 容器+内容物モデルの提示

は、内容物が容器に衝突した際の衝撃加速度が非常に大きく、これに対応する出力電流のピークを供給することができていない。加速度提示のみの制御系ではこのような誤差の蓄積により機構の重心とモデルの重心が大きく乖離してしまうことになるが、上述の制御系では重心を一致させるサーボ系を付加することで、下図のように重心の乖離を押さえることができています。

6 おわりに

本研究では「振ってみる」デバイスの概念と実装を論じた。実験を通してデバイスの機能と動作を確認した。今後の課題としては、デバイスのよりコンパクトな実装、より多くの自由度をもつデバイスの試作、流体や粉体のモデルの実装と提示、被験者を用いたデバイスの評価などを考えている。

参考文献

- [1] Turvey, M. T.: Dynamic touch. *American Psychologist*, 51 (1996) 1134-1152
- [2] Hirota, K., Hirose, M.: Providing Force Feedback in Virtual Environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 15(5), 22-30, 1995.
- [3] Tachi, S., Maeda, T., Hirata, R., Hoshino, H.: A Construction Method of Virtual Haptic Space; *Proc. ICAT'94*, 131-138, 1994.
- [4] McNeely, W.A.: Robotic graphics: a new approach to force feedback for virtual reality; *Proc. VRAIS'93*, 336-341, 1993.
- [5] Minamizawa, K., Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S.: A Wearable Haptic Display to Present the Gravity Sensation - Preliminary Observations and Device Design. *Proc. World Haptics 2007*, 133-138, 2007.
- [6] Sekiguchi, Y., Hirota, K., Hirose, M.: The Design and Implementation of Ubiquitous Haptic Device. *Proc. IEEE World Haptics 2005*, 257-258, 2005.
- [7] Williamson, J., Murray-Smith, R., Hughes, S.: Shoogle: excitatory multimodal interaction on mobile devices. *Proc. CHI2007*, 121-124, 2007.
- [8] Hirota, K., Sasaki, S., Sekiguchi, Y.: Presentation of force-motion relationship by inertial force display. *Proc. EuroHaptics 2008*, 267-272, 2008.