

## 能動触覚に基づく物体の重量推定

安部 慶喜 田中 士郎 田中 弘美

立命館大学 理工学部 情報学科

E-mail : {abe, tanaka, hiromi}@cv.cs.ritsumeikai.ac.jp

あらまし バーチャルリアリティは視覚中心のヒューマンインターフェイス技術として広範な分野に応用され、最近では、「触る」インターフェイスを実現する触覚/力フィードバック装置も実用化されてきたが、仮想空間においてハプティックインターフェイスによるリアリティの高い物体操作を実現するためには、物体の重量、摩擦、弾性等の力学的特性や物体間の相互拘束関係等の触覚情報が必要である。そこで我々は3次元画像計測・認識技術に基づいて、能動触覚における視覚情報獲得のための視点制御の概念を、触覚インターフェイス情報獲得のための接触/外力制御に拡張した「能動触覚」を提案し、重力下の実世界に忠実で且つハプティックインターフェイスによる物体操作が可能な仮想空間シミュレータを観測画像データから自動構築する研究を進めている。そこで本稿では、能動触覚に基づき、物体の「重量推定のために最適な外力」を推定し、Push操作により対象物体に作用して、回転のない並進運動を発生させ、力センサーを用いて観測した並進運動時の摩擦力の変化から、対象物体の重量を推定する方法を提案手法による、木、鉄、陶器等の硬質物体を用いた実験結果から、10%以内の誤差で重量が推定できることを確認した。

キーワード 能動触覚, 能動視覚, ハプティック (触覚) インターフェイス, 仮想物体操作, 仮想空間シミュレータ, 重量推定

## Estimating Mass based on Haptic Vision

Yoshinobu ABE Shiro TANAKA Hiromi T. TANAKA

Department of Computer Science, Ritsumeikan University

E-mail : {abe, tanaka, hiromi}@cv.cs.ritsumeikai.ac.jp

**Abstract** Our ability to “visualize”, remember and establish cognitive models stems from haptic interactions with objects. Recently, haptic interface has been intensively studied, and high-performance force-feedback displays also have been developed for realizing haptic interface with the virtual environment. In this paper, we propose a novel approach to estimating the mass of an object based on Haptic Vision. Haptic Vision, which is based on active sensing and realtime image understanding methodology, is a novel approach to observation-based automatic construction of virtual space simulator, which enables virtual objects to behave and deform realistically with virtual force, and to be operated with a real sense of touch through haptic interface devices.

We apply this technique to the construction of virtual indoor space simulator. Preliminary experimental results show that the feasibility of the proposed approach towards the observation-based automatic construction of virtual space simulator.

**Key words** Haptic Vision, Active vision, Haptic Interface, Virtual Object Operation, Virtual Environment Modeling, Virtual Environment Simulator, Mass Estimation

# 1 はじめに

バーチャルリアリティ (VR) の新規性は、3次元CG技術を駆使したリアリティの高い3次元映像を用いて表現された仮想空間において、実世界に依拠した「体験」を提供することにより、実世界に存在する現象、人間をはじめとする種々の物体、その現象やふるまいに忠実なシミュレーションを実現することが本質的な課題である。最近では、「聞いた事は忘れる、見た物は覚える、触ったものは理解する」と表現される触覚の重要性から、「触わる (ハプティック)」インターフェイス実現のための触覚/カフィードバックデバイスも実用化され、視覚とさらに触覚に基づくインターフェイス実現へ向けて勢力的に研究が進められている [1] ~ [7].

VR空間でリアリティの高い操作シミュレーションを実現するためには、対象の3次元形状やテクスチャ情報とともに、重量、摩擦、弾性等の力学特性と物体相互間の拘束関係を表す、触覚及びカフィードバックのためのデータが必要である (我々はこれを触覚データと呼ぶ)。しかし、これらの触覚データを獲得しモデル化するためには、特殊なソフトウェアと膨大な知識と人力を要しており、現状では極めて限定された領域のみに応用されている。そこで我々は、3次元画像計測・認識技術を用いて、重力下の実世界に忠実かつハプティックインターフェイスによる物体操作が可能な仮想空間シミュレータを、観測画像データから自動構築する研究を進めている [8] [9] [10]。また、能動的に物体に接触し作用することにより、安定な物体認識に導く能動認識の研究も進められている [11] [12].

本稿では、能動触覚に基づき、物体の「重量推定のために最適な外力」を推定し、Push操作により対象物体に作用して、回転のない並進運動を発生させ、力センサーを用いて観測した並進運動時の摩擦力の変化から、対象物体の重量を推定する方法を提案する。

本手法の処理の流れを図1に示す。本手法は、能動視覚に基づく物体観測部分と、能動触覚に基づく重量推定のための回転を発生しない“並進”事象発生部分と、力センサーを用いた重量推定部分の3つのプロセスから構成される。物体観測部分では、能動視覚に基づいて多視点画像を自動獲得し、各視点画像より抽出された2D対称軸と2D重心を統合することにより、対称面と3D重心を

推定する。“並進”事象発生部分では、得られた対称面と3次元重心から、接触点と外力を推定し、外力を制御しつつ対象物体に作用することにより、並進運動を発生させる。重量推定部分では、力センサーを用いて並進運動時の摩擦力の変化を観測することにより、最大摩擦力を推定し、既知の静止摩擦係数から重量の推定を行う。

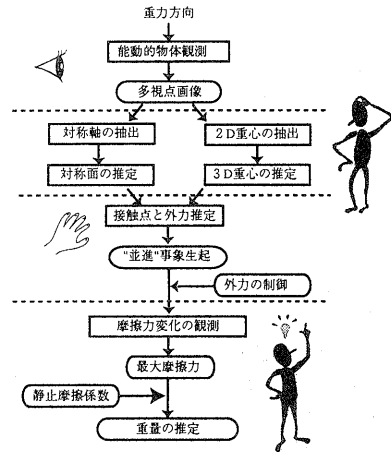


図1: 処理の流れ

## 2 能動視触覚

### 2.1 能動視触覚のアプローチ

図1に示すように、我々は能動視覚における視覚情報獲得のための「視点制御」の概念を、触覚インターフェイス情報獲得のための「接触/外力制御」に拡張した、いわば「能動触覚」と呼ぶべき新しい概念に基づき、ハプティックインターフェイス実現のための触覚データを自動獲得する構想を提案した [8]。図2に示すように、まず、1) 能動視覚システムによりレンジセンサーとカラーカメラを用いて物体を観測し、その3次元形状、表面テクスチャ、姿勢や重心位置等の幾何的特徴を推定する。次に、2) 獲得された幾何特徴に基づき外力を制御しつつ対象物体に作用し、3) その結果として発生された事象、物体とそのふるまい、を観察分析することにより、4) 物体の力学的特性や相互拘束関係を自動的に抽出しモデル化する。つまり、物体の3次元形状や姿勢や重心位置に基づき、効果的にかつ安定に触覚データを獲得するために最適な力点位置、外力の方向、速度などを自動的に選択決定し、制御された既知外力を物体に作

用（押す／引く／つまむ等）することによりパイロット事象を生起させ触覚データを獲得を可能にさせる。

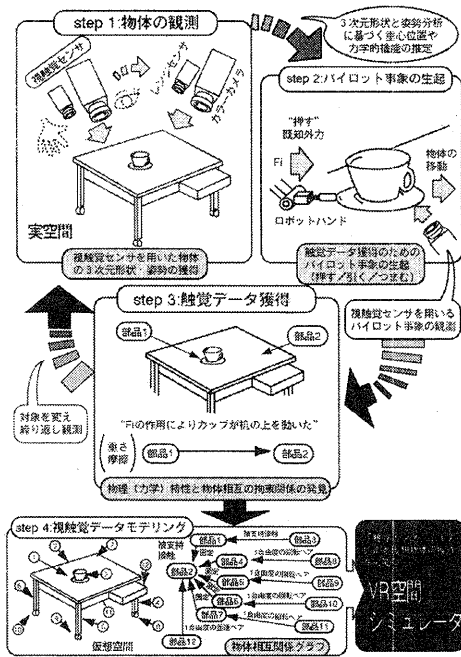


図 2: 能動視触覚システム全体構想図

## 2.2 能動視触覚システム

能動視触覚システムの構成図を図 4 に示す。

図 3 に示すように、CCDカメラの視線方向と平行に接触棒と力センサーを取り付け、接触点や外力方向、外力の大きさを制御し、作用することによりパイロット事象を生起させ、物体の動き、変形を 2 台のロボットアームに搭載された力センサー、CCDカメラ、レンジセンサーを用いて、フィードバックされた観測データを解析することにより、触覚データを抽出する。

## 3 重量推定のための力学法則

### 3.1 つりあいの法則

図 5 の物体が力  $F$  を受けても静止しているとき、物体に作用している力の水平成分、外力  $F$  と面から受ける摩擦  $\mu N$ 、および垂直成分すなわち重力  $Mg$  と物体が面から受ける垂直抗力  $N$  は

$$F - \mu N = 0 \quad (1)$$

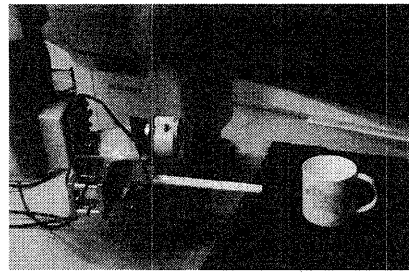


図 3: 能動視触覚システム

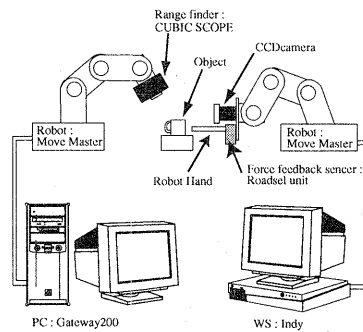


図 4: 能動視触覚システム構成図

$$Mg - N = 0 \quad (2)$$

を満たしている。 $N$  を消去して整理すると、

$$M = \frac{F}{\mu g} \quad (3)$$

式 (3) より、静止摩擦係数  $\mu$  が既知であれば、質量  $M$  は物体が動き出す瞬間の力  $F$  より求められる。

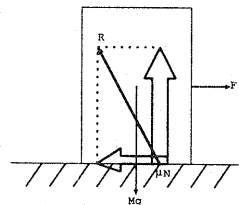


図 5: 作用反作用

### 3.2 クーロンの摩擦の法則

クーロンによる摩擦の法則を以下に示す [13].  
ともに乾燥状態にある固体と固体との間に働く摩擦に関して次の法則が成り立つ。

- 摩擦力は垂直抗力（荷重）に比例し、見かけの接触面積によらない。
- 動摩擦力はすべり速度に無関係である。
- 静止摩擦力は動摩擦力より大きい。

基本的に摩擦係数は接触する面の性質によって決まる。その代表的な値を表1に示す [14].

表 1: 静止摩擦係数

摩擦片	摩擦面	$\mu_s$
硬鋼	硬鋼	0.44
硬鋼	鋳鉄	0.18
鋳鉄	鋳鉄	0.21
石	金属	0.3~0.4
木	木	0.5~0.2
木	金属	0.6~0.2
ゴム	ゴム	0.5
皮革	金属	0.4~0.6
ナイロン	ナイロン	0.15~0.25
スキー	雪	0.08

## 4 能動視覚に基づく物体観測

物体が外力を得て機能するためには、外力の作用に対して物体が安定な姿勢を保つことが重要である。本手法では物体の安定姿勢における形状対称性に基づいて観測点を選択する能動視覚システム [15] を用いる。

物体の安定姿勢における3次元形状の対称性に基づいて、自動的かつ再帰的に選択された観測点から獲得された多視点カラー画像を用いて、重量推定に重要な、物体の対称面、接触点、外力方向を抽出する。本手法は、実世界の重力下に置かれた物体がその機能を果たすためにもっとも重要な「外力に対する姿勢の安定度」を、形状の面对称性に基づいて複数視点から観測・評価することにより物体の3次元形状を推定する「機能からの形状を推定するアプローチ」に基づいている。

まず、外力である重力に対する安定度を評価するために鉛直上方より対象物体を観測し、観測画像における対象物体のシルエットの対称軸を抽出する。次に、抽出された対称軸と観測方向を用いて対称面を推定し、対称面への投影像を得るための次観測点を導き出す。各観測点において得られた、多視点画像から対称面を検証する。以上により得られた、多視点画像と対称面から、接触点と外力方向を導き出す。

## 5 能動触覚に基づく並進事象の生起

### 5.1 Push 操作のための対称面抽出

対象物体の観測点  $V_{top}$  から観測された物体シルエット像の対称軸  $l$  より対称面を推定する。対象物体が設置された水平面と、鉛直上方より観測されたシルエット像領域  $R$  の重心点  $G_{top}$  を通る重力方向の直線との交点が注視点  $P$  となる。図6に示すように、対称面  $S$  は、重心  $G_{top}$  を通り、対称軸  $l$  と観測方向ベクトル  $v_{top}$  の外積を法線ベクトル  $n = l \times v_{top} / \|l \times v_{top}\|$  とする平面  $S = \{G_{top}, n\}$  として推定される。

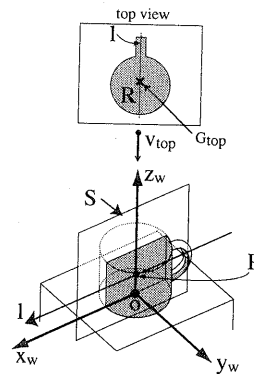


図 6: 対称面の推定

### 5.2 接触点および外力の推定

3.1 節の式 (1) (2) のつりあいの法則が成り立つには、外力  $F$  の方向  $f$  に対して以下の条件が必要となる。

- 摩擦を生じる接触面に平行である。
- 対象物体の対称面  $S$  に沿って存在する。

また、物体の安定性を保つために、物体の3D重心  $G$  と  $f$  が同一直線上に存在するように定めた。以上のことから、唯一の  $f$  が以下のように求められる。

$$f = (x_f, y_f, z_f) = (-1, 0, 0) \in S \quad (4)$$

また、図7に示すように、接触点  $P_c$  は、Front View より得られた2次元画像の重心  $G_f = (x_{fg}, y_{fg})$  と世界座標系  $(X_w, Y_w, Z_w)$  の  $x$  軸によって、以下のように定義できる。

$$P_c = (X_w, 0, y_{fg}) \quad (5)$$

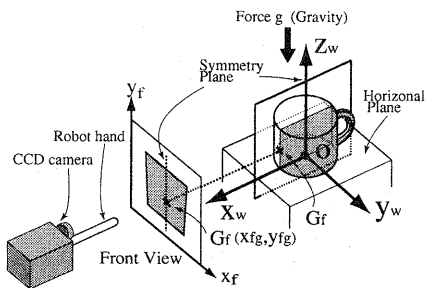


図 7: Push 操作のための接触点および外力の推定

## 6 “並進”事象の観測による重量推定

### 6.1 Push 操作による重量推定

3.1 節の式 (3) に示すように、最大摩擦力  $F_{max}$  は、重量  $M$  と静止摩擦係数  $\mu$  と重力加速度  $g$  の積によって求められる。

$$F_{max} = \mu Mg \quad (6)$$

本手法では、Push 操作において、対象物体を並進運動させるために作用された、外力  $F$  の大きさと接触棒装着した力センサーを用いて観測する。

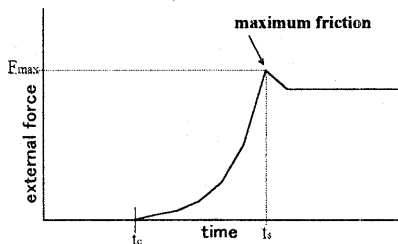


図 8: 外力  $f$  と時間  $t$  の一般的な  $f-t$  グラフ

図 8 に示すように、外力  $F$  が増加し始めた時  $t_c$  が接触点への到達を表し、最大値  $F_{max}$  が物体の移動開始時  $t_s$  を表す。

つまり、Push 操作により、最大摩擦力  $F_{max}$  が求められる。しかし、重量  $M$  を求めるには、静止摩擦係数  $\mu$  が必要となる。本手法では、静止摩擦係数  $\mu$  を既知とすることによって、最大摩擦力  $F_{max}$  から重量  $M$  の推定を行う。

### 6.2 外力の制御

外力を作用する際に、ロボットアームは常に低速等速度運動で対象物体に接近し、接触し、Push

操作を行う。このとき、ロボットアームの力は一定である。そこで、弾性力のある力センサーであるロードセルユニットをクッションとして、接触棒とロボットアームの先端との間に取り付けることにより、Push 操作による外力の制御を行う。これは、接触棒が対象物体の作用点に到達した後、ロボットアームが Push する距離によってロードセルの弾性力が変動することで、力の制御をしている。

## 7 静止摩擦係数の安定性

本手法では、静止摩擦係数を既知とすることによって、最大摩擦力から重量を推定している。しかし、静止摩擦係数が温度や湿度によって、大きく変化するようであれば、推定重量と実重量の誤差も計測環境によって大きくなる。そこで我々は、計量機器センターの可変式保温保湿機を利用して、温度、湿度の変化による静止摩擦係数の変化量について、計測した。

図 9 に示すように、可変式保温保湿機内で床面（木）となる台の一方を水平に固定し、その上に対象物体（陶器、ステンレス、木）を乗せる。実験者の一人が台の固定されていない方を持ち、徐々に傾けていく。観測者は台に取り付けられた、絶対水平面（地球の重力方向に対して垂直な平面）に対する角度が測定できる測定器によって、対象物体が滑り始める角度を観測する。この物体が滑り始める角度  $\theta$  に対する、 $\tan \theta$  が静止摩擦係数となる。

計測環境は、日本の平均気候下にある、愛知県岡崎市の 1997 年の年間平均温度（16℃）と平均湿度（73%）をもとにして、それぞれ  $\pm 10$  の範囲で行った。ただし、一つの実験について 30 回実験を繰り返し、全体の 80%（24 回）を正值として平均した。

材質として床面（木材）に対する、対象物体（陶器、ステンレス、木）を選択し、それらの静止摩擦係数の温度と湿度による計測値の変化量を表すグラフをそれぞれ図 10、図 11、図 12 に示す。

計測結果から、温度・湿度ともに上昇するほど、静止摩擦係数は高くなり、最大変化量はそれぞれ 0.01752（陶器）、0.017996（ステンレス）、0.016231（木）であり、実環境における同一物体の静止摩擦係数は十分に安定であることが確認される。ここで 0.017996 の変化量は、重量推定において最大誤差 10.6% と推定される。

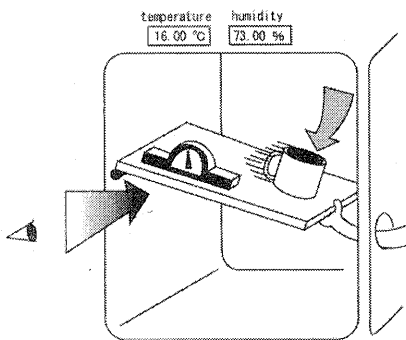


図 9: 静止摩擦係数の計測方法

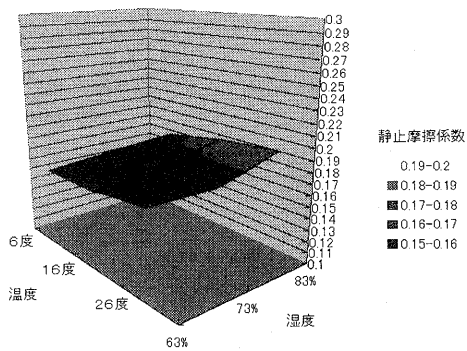


図 12: 静止摩擦係数の変化グラフ (木材)

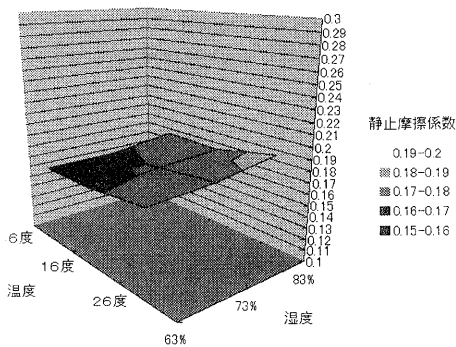


図 10: 静止摩擦係数の変化グラフ (陶器)

## 8 実験

対象物体は図 13 に示すように陶器で作られたマグカップ、皿、固い紙質のトイレトーパーを用いた。これらはすべて一般に市販されているものであり、マグカップと皿にはそれぞれ模様が付いている。

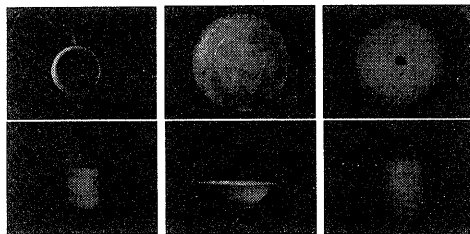


図 13: 実験対象物体

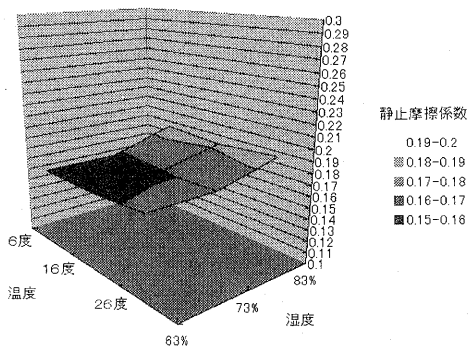


図 11: 静止摩擦係数の変化グラフ (ステンレス)

### 8.1 接触点の推定結果

能動視覚システムにより得られた、カラー画像、シルエット画像、接触点の抽出結果を図 14 に示す。

Front View のシルエット画像 (図 14 下段中央) に見られるノイズは対象物体が床面に反射したものであり、本研究では符号付き動的輪郭モデル [16] を用いることで安定した輪郭線を抽出している。

### 8.2 重量の推定結果

ロボットハンドによる外力を ISHIDA 製の MG-6000 デジタル定量評の部品をもとにしたロードセルユニット (力のセンサー) で計測した。この計量器は、1 カウント = 0.4gw で表すカウント値

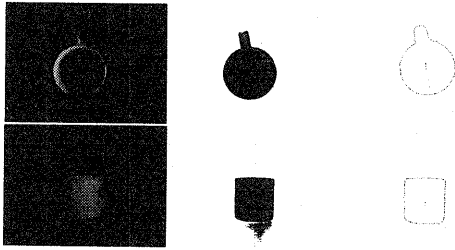


図 14: 能動視覚システムによる接触点の推定

を 50msec の間隔で得ることができる。

図 15 に、マグカップにおけるロードセルユニットから測定された外力  $f$  と時間  $t$  の変化グラフを示す。

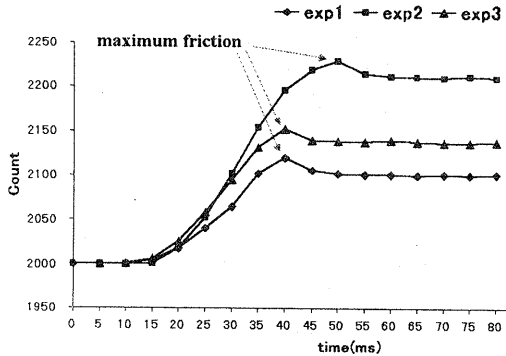


図 15: 外力  $f$  と時間  $t$  の  $f$ - $t$  グラフ (マグカップ)

図中の exp1, exp2, exp3 はそれぞれ木, ゴム, 鉄板を床面としたときの測定結果である。カウント値が上昇し始めた点が接触点への到達を表し、カウント値が最大の点が対象物体の移動開始時と最大摩擦力を表す。また、同じ床面 (鉄板), 同じ対象物体 (マグカップ) について、同様に 30 回の実験を行った結果を図 16 に示す。

ここで、本手法では一つの実験について 30 回実験を繰り返し、全体の 80% (24 回) を正值として平均した。

以上の手法により求めた最大摩擦力と、7 章で事前に測定した静止摩擦係数から、重量を推定する。表 2, 表 3, 表 4 にそれぞれマグカップ, 皿, トイレレットペーパーの重量推定の結果を示す。

実験結果から、床面が木と鉄板の場合は、本手法

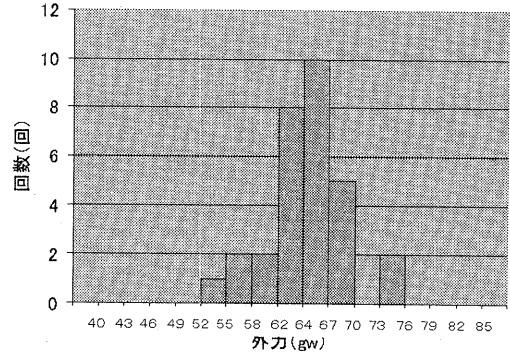


図 16: 最大摩擦力計測値の度数分布

の有効性が確認できた。しかし、床面がゴムの場合は、実重量と推定重量の誤差が大きくなる。これは、床面が剛体でないために対象物体が滑らかに滑らないことが原因と考えられる。

表 2: 重量推定結果と実重量の比較 (マグカップ)

床	外力 (gw)	静止摩擦係数	推定重量 (g)	実重量 (g)	誤差 (%)
木	46.8	0.217	215.7	221	2.4
ゴム	94.9	0.533	178.0	221	19.5
鉄板	64.2	0.306	209.8	221	5.1

表 3: 重量推定結果と実重量の比較 (皿)

床	外力 (gw)	静止摩擦係数	推定重量 (g)	実重量 (g)	誤差 (%)
木	42.6	0.183	232.8	252	7.6
ゴム	104.6	0.629	166.3	252	34.0
鉄板	72.3	0.307	235.5	252	6.5

### 8.3 適用範囲

本手法の適用範囲を確認するために同じ材質 (木材) で床面 (鉄板) との静止摩擦係数  $\mu = 0.3001$  である重さの異なる 5 つの物体を使用した。各実験における重量推定の結果を表 5 に示す。

実験結果から、100g 程度の物体から 4000g 程度の物体まで、安定に測定できることが確認できた。この限界値は力センサー (ロードセルユニット) の性能によって左右される。

表 4: 重量推定結果と実重量の比較 (ペーパー)

床	外力 (gw)	静止摩擦係数	推定重量 (g)	実重量 (g)	誤差 (%)
木	72.2	0.313	230.7	252	8.5
ゴム	213.3	0.671	317.9	252	26.1
鉄板	127.6	0.532	239.8	252	4.8

表 5: 本研究の限界を示す実験結果

実験	外力 (gw)	推定重量 (g)	実重量 (g)	誤差 (%)
1	33.2	110.7	111.6	0.81
2	120	400	408.4	2.06
3	756.4	2521.3	2543.2	0.86
4	1271.2	4237.3	4056	4.47
5	1228	4093.3	4076.8	0.40

#### 8.4 推定精度

本手法による重量推定精度を確認するために図 13 のマグカップを複数回 (30 回) 実験して求められた, 推定重量と実重量との誤差を図 17 に示す。ただし, 床面は鉄板である。実験結果から, 全体の 80% (24 回) が, 推定重量と実重量の誤差が 10% 未満であることが確認できた。

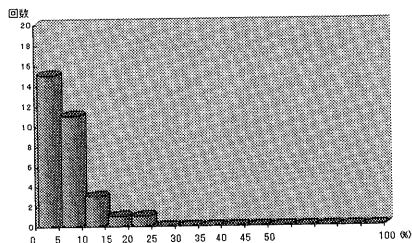


図 17: 精度を表すグラフ

## 9 おわりに

能動触覚に基づき, 「重量推定のために最適な外力」を推定し, Push 操作により回転のない並進運動を発生させ, 力センサーを用いて観測した摩擦力の变化から, 対象物体の重量を推定する方法を提案した。また, 実験結果から, 対象物と床面が剛体であれば, 安定に重量が推定されることを確認した。

## 謝辞

本研究の一部は (財) 立石科学技術振興財団の研究助成により進められた。ここに謝意を表します。また, 実験に御協力頂いた株式会社イシダに深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] Thomas H. Massie and J. K. Salisbury: "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects" Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division, Chicago, IL, Nov. 1994.
- [2] Robert D. Howe: "The Haptic Camera": A Technique for Characterizing and Playing Back Haptic Properties of Real Environments," Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol.58, pp.451-458, Nov. 17-22, 1996.
- [3] Karon E. MacLean: "Haptic and Visual Feedback for Manipulation Aid in a Virtual Environment," Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol.58, pp.459-476, Nov. 17-22, 1996.
- [4] Susan J. Lederman and Roberta L. Klatzky: "Perception and Control of Finger Forces," Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol.64, pp.127-132, Nov. 15-20, 1998.
- [5] 服部 洋一, 黄瀬 浩一, 北橋 忠宏, 福永 邦雄: 動的機能のモデルに基づく物体の機能認識, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.10, pp.2277-2285, 1995.
- [6] T. Kitahashi et al.: "The 'function' in a functional model: A theoretical consideration of reasoning about shape, structure and function", Proc. of Applications of Artificial Intelligence, Machine Vision, Vol.1708 of SPIE, pp.561-568, 1992
- [7] 「ハプティックインタフェース」特集, Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.3, No.3, Sep. 1998
- [8] 田中弘美, 安部慶喜, 山岡勝, 田嶋諭, 佐藤高志: 「ハプティックインタフェース実現のための能動触覚」, 情報研報, Vol.CVIM111-10, pp.73-80, 1998.
- [9] 山岡勝, 田中弘美: 「能動触覚に基づく水平接触拘束関係の抽出」, 情報研報, Vol.CVIM115-21, pp.157-164, 1999.
- [10] 安部慶喜, 田中弘美: 「能動触覚に基づく物体の重量推定」, 電子情報通信学会総合大会論文集, D-12-B, 1999.
- [11] 天野晃, 右田剛史, 浅田尚紀: 「視覚情報と触覚情報の協調による重心位置推定」, 情報研報, Vol.CVIM113-6, pp.41-48, 1998.
- [12] 右田剛史, 天野 晃, 浅田尚紀: 「物体認識のための視覚情報と触覚情報の統合」, 電子情報通信学会総合大会論文集, D-12-164, p.363, 1998.
- [13] 河野彰夫: 「摩擦の科学」, 裳華堂, 1989.
- [14] 渡辺昌昭: 「物理学 I」, 共立出版, 1987.
- [15] Kengo Nishimura and Hiromi T. Tanaka: "Active shape inferring based on the symmetry in stable poses — shape from function approach —," Proc. of the 13th ICPR, vol.I-A, pp.136-140, Aug., 1996.
- [16] 上田恭敬, 田中弘美: 「領域のトポロジカルな構造抽出のための符号付動的輪郭モデル」, 信学論 (DII), no.6, pp.1398-1405, June 1997.