

ハプティックビジョンに基づく能動的物体重量推定

田中 士郎[†], 谷川 武市[†]
安部 慶喜[†], 田中 弘美[†]

バーチャルリアリティは視覚中心のヒューマンインタフェース技術として広範な分野に応用され、最近では視覚の重要性からハプティック（触覚）インタフェースを実現する触覚/力フィードバック装置も実用化されてきた。そこで我々はハプティックインタフェースによる実世界に忠実な仮想空間シミュレータを、観測画像から自動構築することを実現するために「触れて見る」ハプティックビジョン/能動視触覚構想を提案した。本論文では、ハプティックビジョンに基づく能動的物体重量推定法を提案する。まず、対象物体の安定姿勢における形状分析を基に、重量推定のために最適な、摩擦中心に作用するように接触点と接触力を推定する。次に、ロボットハンドの Push 操作により対象物体に能動的に接触し、対象物体の姿勢を変えない並進運動を生起させる。さらに、ロボットハンドに搭載した力センサを用いて観測した対象物体の並進運動時の摩擦力の変化と、生起された運動追跡結果から、既知の摩擦係数を用いて、対象物体の重量を推定する。木、鉄、陶器等を用いた実験結果から、対象物体と支持面がともに剛体の場合は 10% 以内の誤差で物体重量が安定に推定できることを確認した。

Estimating Mass Based on Haptic Vision

SHIRO TANAKA,[†] TAKESHI TANIGAWA,[†] YOSHINOBU ABE[†]
and HIROMI T. TANAKA[†]

Recently, haptic interface has been intensively studied for providing sense of “touch sensation”. Moreover, high-performance force-feedback displays also have been developed for realizing haptic interface with virtual environments. In this paper, we propose a novel approach to mass estimation based on Haptic Vision. Haptic Vision is based on active sensing and real-time image understanding methodology, and is proposed for observation-based automatic construction of virtual space simulator. We first estimate a plane of symmetry of an object from a set of principal views acquired by our active vision system. Next, we estimate a contact point and contact force based on the plane of symmetry, and make a contact to the object by a robot hand. Such contact force exerts on a center of friction and causes a pilot event for mass estimation where the object moves straight in the direction of the contact force with no rotation and with no change in its posture. We measure transition of the friction force during “Push” contact using a force-feedback sensor mounted on the robot hand. We also track the object from a top view point during contact to confirm its straight movement. We then estimate the mass of the object by analyzing friction force change during contact, given a friction coefficient. Experimental results show that the mass of solids such as wood, iron, and ceramic objects were estimated efficiently within 10% error bound.

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) の新規性は、実世界に依拠した「体験」を提供することであり、実世界に存在する現象、人間をはじめとする種々の物体、その現象や振舞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。

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等の視覚情報とともに、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、触覚および力フィードバックのための触覚データが必要である¹⁾。そこで我々はハプティックインタフェースによる実世界に忠実な仮想空間シミュレータを、観測画像から自動構築することを実現するために「触れて見る」ハプティックビジョン/能動視触覚構想を提案した⁶⁾。ハプティックビジョンは従来の能動視覚/アクティブビジョンにおける視覚情報獲得のための視点制御の概念と、それ

[†] 立命館大学理工学部情報学科コンピュータビジョン研究室
Computer Vision Laboratory, Department of Computer
Science, Ritsumeikan University
現在、コナミコンピュータエンタテインメントスタジオ
Presently with Konami Computer Entertainment Studio
現在、ブラクストン株式会社
Presently with Braxton Co., Ltd.

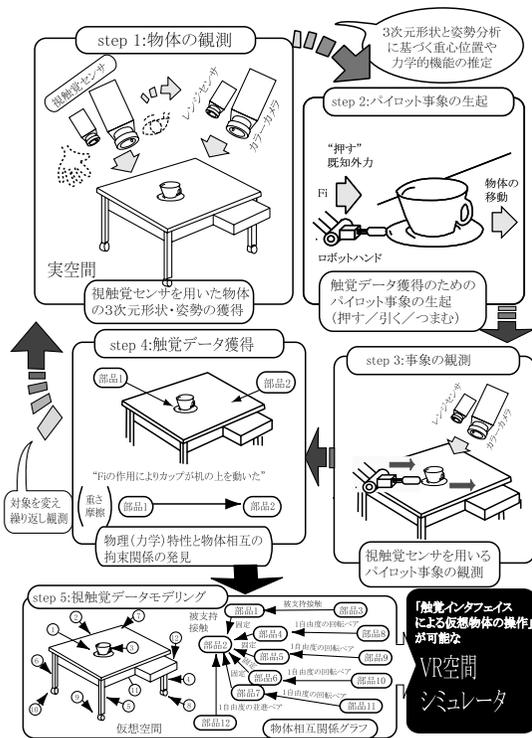


図1 ハプティックビジョンシステム全体構想図

Fig. 1 Haptic Vision system.

を触覚インタフェー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/アクティブタッチと呼ぶべき新たな概念を統合し増強させたものである。図1に示すように、Step1) 能動的な観測により獲得されたシーンの対象物体の3次元形状と姿勢に基づき、対象物体に能動的に接触して既知外力を作用し、Step2) パイロット事象と呼ぶ、物体の力学的物理特性を最も効果的に表す指標となる事象を生起させる。Step3) その結果生じた、対象物体の変化や変形過程を3次元実時間画像計測および画像認識技術を用いて観測し解析することにより、Step4) 触覚情報の獲得を可能にさせるものである。さらに、ハプティックビジョンに基づいて、重力下の実世界に忠実かつハプティックインタフェー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^{7)~11)}。

一方、Paiらは、物体への接触により起きる表面の変形、風合いの感触や音の発生を計測する高精度なロボットシステムを開発し、計測データから物理的インタラクションモデルを実現する方法を示した⁵⁾。また、Okamuraらは多指ハンドロボットを用いて、物体の表面テクスチャ、弾性や摩擦係数等の触覚情報を

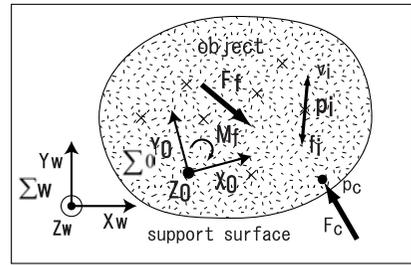


図2 世界座標系と物体座標系

Fig. 2 The world-coordinate frame and the object-centered coordinate frame.

自動的に探索し獲得する方法を提案している^{3),4)}。しかし、一般にはこれらの提案された高精度で複雑なロボットシステムを構築し制御することは困難である。また、Krotkovはロボットによる打つ、たたく等の強い接触による物体へのインタラクションから、物体の移動や音の発生を観測することにより、物体の素材(material)の特性を抽出する方法を提案した²⁾。しかし、これらのインタラクションは物体の形状ではなくセンサフィードバックに基づいているため、対象はモデル化を必要としない単純形状の物体に限られており、また効率的にインタラクションを制御することは困難であった。

そこで本論文では、ハプティックビジョンに基づく能動的物体重量推定法を提案する。まず、能動視覚により獲得された対象物体の3次元形状と安定姿勢を基に、重量推定のために最適な、摩擦中心に作用するような接触点と接触力を推定する。次に、ロボットハンドのPush操作により対象物体に能動的に接触し、物体の姿勢を変えない並進運動を生起させる。さらに、ロボットハンドに搭載した力センサを用いて観測した物体の並進運動時の摩擦力の変化と、生じられた運動追跡結果から、既知の摩擦係数を用いて、対象物体の重量を推定する。木、鉄、陶器等の剛体を用いた実験結果から、対象物体と支持面がともに剛体の場合は10%以内の誤差で物体重量が安定に推定できることを確認した。

2. 重量推定のための力学法則^{12),13)}

2.1 摩擦中心

図2に示すように、支持面に世界座標系 $\Sigma_w(O_w - X_w Y_w Z_w)$ を $X_w Y_w$ 平面が支持面に一致するように設定する。また、対象物体に物体中心座標系 $\Sigma_0(O_0 - X_0 Y_0 Z_0)$ を $X_0 Y_0$ 平面が対象物体の底面と一致するように固定する。 Σ_0 から見た対象物体の i 番目の支持点の位置を p_i, p_i における対象物体の支

持面との相対速度を v_i , p_i に働く摩擦力の大きさを a_i とすると, p_i に働く摩擦力 f_i および f_i によるモーメント m_i は

$$f_i = -\frac{v_i}{\|v_i\|} a_i \quad (1)$$

$$m_i = p_i \times \left\{ -\frac{v_i}{\|v_i\|} a_i \right\} \quad (2)$$

となる。ただし, $\|*\|$ はベクトルのユークリッドノルム, \times は外積を表す。

したがって, 対象物体に働く合摩擦力 F_f および F_f による合モーメント M_f は,

$$F_f = \sum_{i=1}^n f_i = -\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{\|v_i\|} a_i \quad (3)$$

$$M_f = \sum_{i=1}^n m_i = -\sum_{i=1}^n \left\{ p_i \times \frac{v_i}{\|v_i\|} a_i \right\} \quad (4)$$

となる。ここで, 対象物体が姿勢を変えずに動くとなると, 各支持点の世界座標系に対する相対速度方向 $v_i / \|v_i\|$ は一定である。そこで, $e_v = v_i / \|v_i\|$ ($i = 1, 2, \dots, n$) とおくと, 式 (3), (4) は

$$F_f = -e_v \sum_{i=1}^n a_i \quad (5)$$

$$M_f = -\left\{ \sum_{i=1}^n p_i a_i \right\} \times e_v \quad (6)$$

となる。ここで,

$$p_g = \frac{\sum_{i=1}^n p_i a_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (7)$$

となる p_g を定義すると, 式 (6) は,

$$M_f = p_g \times F_f \quad (8)$$

と書ける。これは対象物体に働く合摩擦力 F_f は p_g に集中的に働いていると見なせることを意味する。この p_g を摩擦中心という。

今, 対象物体のある 1 点 p_c に力 F_c を加えているとすると, 対象物体の速度は十分に低速で一定であり, 慣性力は摩擦力に対して無視できることから,

$$F_c = -F_f \quad (9)$$

$$M_c = -M_f = p_c \times F_c \quad (10)$$

が成り立つ。式 (5) より対象物体を押す力 F_c は,

$$F_c = e_v \sum_{i=1}^n a_i \quad (11)$$

となり, F_c の方向は対象物体の移動方向と一致し, その作用線は p_g を通っていることになる。つまり「押

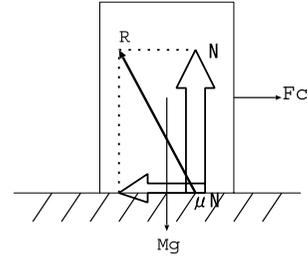


図 3 作用反作用

Fig. 3 Action reaction.

す力 F_c が p_g を通れば, 姿勢を変えずに対象物体を押すことができる。また, 式 (7) が示すように, 摩擦中心は摩擦分布の重心に位置している。特に摩擦係数が一様の場合には, $a_i = \mu n_i$ より,

$$p_g = \frac{\sum_{i=1}^n n_i p_i}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad (12)$$

ただし, n_i は p_i にかかる垂直抗力, μ は摩擦係数である。

2.2 つりあいの法則

図 3 の対象物体が力 F_c を受けても静止しているとき, 対象物体に作用している力の水平成分, すなわち外力 F_c と支持面から受ける静止摩擦力 μN , および垂直成分すなわち重力 Mg と対象物体が支持面から受ける垂直抗力 N は,

$$F_c - \mu N = 0 \quad (13)$$

$$Mg - N = 0 \quad (14)$$

を満たしている。したがって, 対象物体の質量 M は式 (13), (14) より,

$$M = \frac{F_c}{\mu g} \quad (15)$$

となる。式 (15) より, 静止摩擦係数 μ が既知であれば, 質量 M は対象物体が動き出す瞬間の力 F_c より求められる。対象物体が滑りはじめると, 摩擦力は μN より小さくなり, 滑走中は一定となる。このときの摩擦力 F_c を動摩擦力といい, これも近似的に N に比例する。

$$M = \frac{F_c}{\mu g} \quad (16)$$

同様に動摩擦係数 μ が既知であれば, 質量 M は対象物体が滑走しているときの動摩擦力 F_c で求められる。

2.3 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。

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

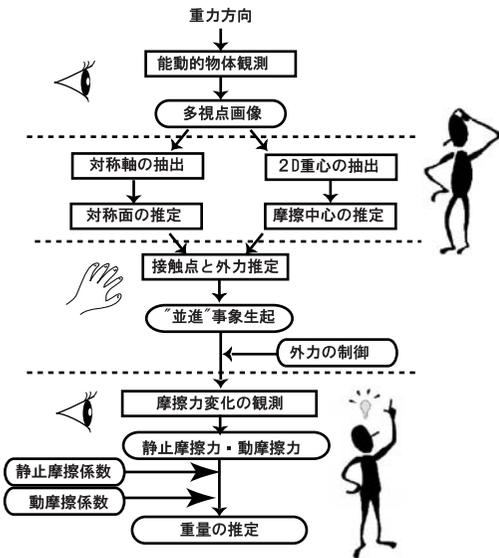


図 4 処理の流れ
Fig. 4 Process flow.

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。

この法則はクーロンによって経験的に見いだされたもので、接触面間の圧力や相対速度が特別に大きいか逆に小さくない限り、一般的に成り立つ。

3. 能動的重量推定アルゴリズム

本研究では、室内シーンに存在する形状対称性を持つ人工物を対象とし、以下を前提条件とする。

- 条件 1) 水平支持面上に安定に置かれている。
- 条件 2) 少なくとも 1 つの重力方向を含む 3 次元形状の対称面を持つ。
- 条件 3) 密度および摩擦係数が一様である。

図 4 に、ハプティックビジョンに基づく重量推定アルゴリズムの全体処理の流れを示す。まず、Step1) 能動視覚に基づいて多視点画像を自動獲得し、Step2) 各視点画像より抽出された物体領域の 2D 対称軸と 2D 重心を統合することにより、対称面と摩擦中心を推定する。なお、上記の条件 2) より、摩擦中心を推定するために必要な「重力方向を含む対称面」が少なくとも 1 つ存在する。次に、Step3) 能動触覚に基づいて、推定された対称面と摩擦中心から接触点と接触力を推定し、対象物体に能動的に接触する。その結果、パイロット事象、つまり重量推定のために指標となる「物体の姿勢を変えない並進運動」事象を生起させる。Step4) 力センサを用いて並進運動時の摩擦力の変化を観測し、

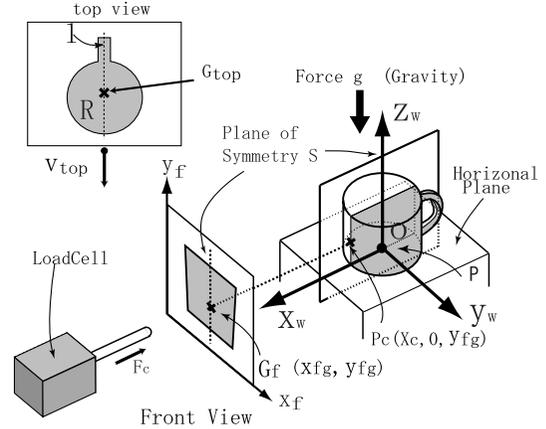


図 5 Push 操作のための接触点および外力の推定
Fig. 5 Contact point and contact force estimation.

同時に、能動視覚に基づいて、鉛直上方より観測した対象物体の運動を追跡し分析することにより、与えられた摩擦係数を用いて重量の推定を行う。以下、各章において、各ステップについて述べる。

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。本手法は、実世界の重力下に置かれた対象物体がその機能を果たすために最も重要な「外力に対する姿勢の安定度」を、形状の面対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¹⁴⁾。まず、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た観測距離画像から対象物体の対称面を推定する。対称面への投影画像を得るための前後左右の 4 観測点を導き出し、3 面図に対応する直交 5 視点画像を獲得する。

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

図 5 に示すように、鉛直上方 V_{top} から観測された対象物体シルエット像の対称軸 1 より 3 次元形状の対称面 S を推定する。次に、対象物体が置かれた水平面と、 V_{top} より観測されたシルエット像領域 R の 2 次元重心 G_{top} を通る重力方向の直線との交点を注視点 P とする。さらに、 P を原点とし対称軸 1 を x 軸、垂直上向を z 軸、 xy 平面を水平面、とする世界座標系 $\Sigma_w(O_w - X_w Y_w Z_w)$ を設定する。ただし、対称軸が複数存在する場合は、最長軸方向を x 軸とする。対称面 S は、 P を通り、1 と観測方向ベクトル v_{top}

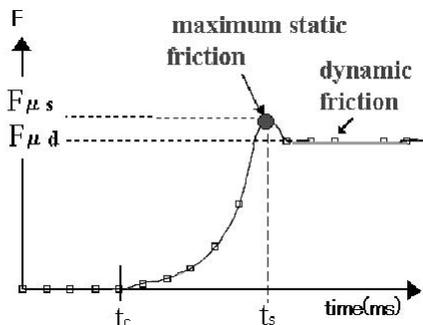


図 6 摩擦力の変化グラフ

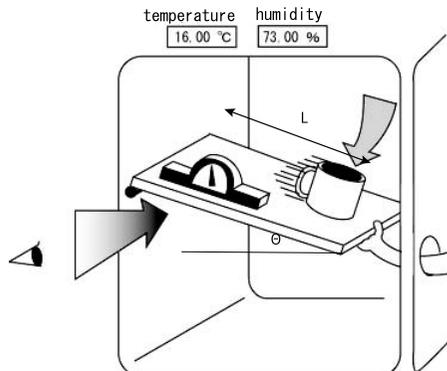
Fig. 6 A graph of friction force F vs. time t .

図 7 摩擦係数の計測方法 (傾斜法)

Fig. 7 Measurement of friction coefficient.

の外積を法線ベクトル $\mathbf{n} = \mathbf{1} \times \mathbf{v}_{top} / \|\mathbf{1} \times \mathbf{v}_{top}\|$ とする平面 $S = \{P, \mathbf{n}\}$ として推定される。

5.2 接触点および接触力の推定

対象物体は密度が一樣で、対称面 S に対して 3 次元形状が対称であるため、対称面 S で 2 等分されたそれぞれ対称な底面領域における垂直抗力の和は等しくなる。そのため、摩擦中心は S と底面の交線上にあることが分かる。また、2.1 節より「押す力 F_c が摩擦中心 p_g を通れば、姿勢を変えずに対象物体を F_c の方向に直進移動させる」とある。さらに、2.2 節の式 (13), (14) のつりあいの法則が成り立つには、接触力 F_c の方向 \mathbf{e} に対して以下の条件が必要となる。

- 摩擦を生じる支持面に平行である。
- 対象物体の対称面 S に含まれる。

以上から、 \mathbf{e} が以下のように求められる。

$$\mathbf{e} = (x_f, y_f, z_f) = (-1, 0, 0) \in S \quad (17)$$

また、図 5 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 $G_f = (x_{fg}, y_{fg})$ を通る \mathbf{e} に平行な直線と物体表面との交点である。

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

2.2 節の式 (15) に示すように、静止摩擦力 F_{μ_s} は、重量 M と静止摩擦係数 μ_s と重力加速度 g の積により求められる。

$$F_{\mu_s} = \mu_s Mg \quad (18)$$

同様に動摩擦力 F_{μ_d} も動摩擦係数 μ_d と Mg の積として求められる。

$$F_{\mu_d} = \mu_d Mg \quad (19)$$

本手法では、Push 操作において、接触棒に装着した力センサを用いて対象物体を直進運動させるために作用された、接触力 F_c の大きさを計測し、摩擦力の変化を観測する。

図 6 は、静止している対象物体に外力 F を作用さ

せて対象物体を移動させるときに観測される、一般的な摩擦力の変化を表すグラフである。外力 F が増加しはじめた時刻 t_c が接触点への到達を表し、最大値 F_{μ_s} が対象物体の移動開始時刻 t_s を表す。移動開始後、摩擦力 F が減少し、一定となり F_{μ_d} が滑走中の動摩擦力を表す。つまり、Push 操作による摩擦力の変化を観測することにより、静止摩擦力 F_{μ_s} と動摩擦力 F_{μ_d} を抽出することができる。以上より、本手法では、摩擦係数 μ_s と μ_d を既知とし、Push 操作における摩擦力変化の分析から抽出した静止摩擦力 F_{μ_s} と動摩擦力 F_{μ_d} の、それぞれを用いて重量の推定を行う。

6.2 並進事象の観測

正確な重量推定のためには、Push 操作により生じられた運動を追跡し、対象物体が姿勢を変えずに直進したことを確認する必要がある。そのため、水平面における直進運動事象を最も安定に観測するために、鉛直上方を観測視点位置として選択する。事象を観測した動画像から対象物体表面の 2 特徴点を追跡し、各特徴点間の移動を示す 2 本のベクトルの成す回転角度から並進運動の直進性を評価する。

7. 摩擦係数の安定性

本研究では、摩擦係数を既知とすることにより、計測された摩擦力から重量を推定している。しかし、摩擦係数が温度や湿度の変化に不安定であれば、推定重量と実重量の誤差も計測環境によって大きく変化する。そこで我々は、可変式保温保湿機を用いて、温度、湿度の変化に対する摩擦係数の安定性を評価した。

7.1 静止摩擦係数の計測

図 7 に示すように、可変式保温保湿機内で支持面となる台の一方を水平に固定し、その上に対象物体を乗せ、台の固定されていない方を徐々に傾け、台に取り

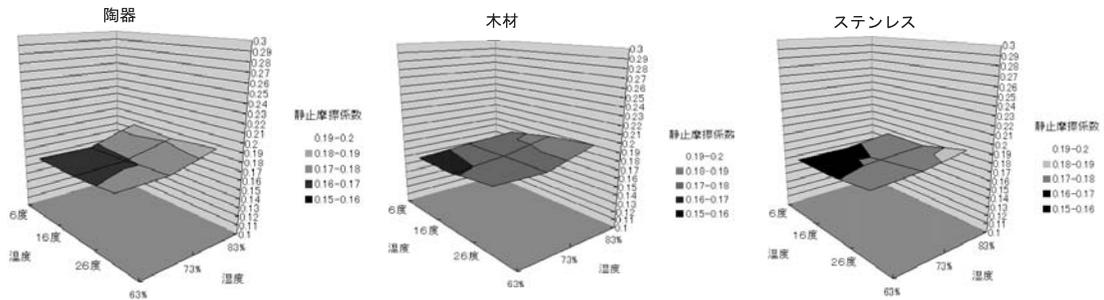


図 8 温度・湿度の変化に対する静止摩擦係数の変化

Fig. 8 Static friction coefficients vs. temperature & humidity change.

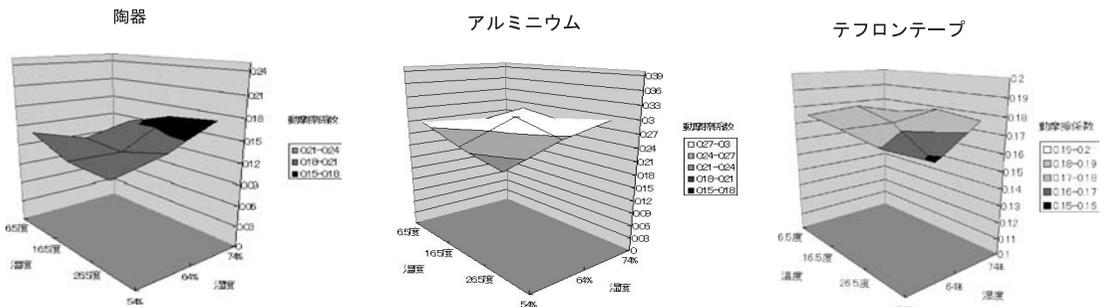


図 9 温度・湿度の変化に対する動摩擦係数の変化

Fig. 9 Dynamic friction coefficient vs. temperature & humidity change.

付けられた，絶対水平面に対する角度が測定できる測定器によって，対象物体が滑りはじめる角度 θ を計測する．この傾斜計測法により計測される θ から静止摩擦係数 μ_s が求まる．

$$\mu_s = \tan \theta \quad (20)$$

図 8 に，木材の支持面に置かれた 3 種類の材質，陶器，ステンレス，木の対象物体の静止摩擦係数の温度と湿度による変化に対する静止摩擦係数の計測値の変化を示す．ただし，計測環境は愛知県岡崎市の 1997 年の年間平均温度 (16°C) と平均湿度 (73%) をもとにして，温度 $\pm 10^\circ$ ，湿度 $\pm 10\%$ とした．1 つの実験について 30 回実験を繰り返し，全体の 80% (24 回) を正値として平均した．

計測結果から，温度・湿度とも上昇するほど，静止摩擦係数は大きくなるのが分かる．しかし，最大変化量はそれぞれ 0.01752 (陶器)，0.01799 (ステンレス)，0.01623 (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．ステンレスの場合の最大変化量 0.01799 は，重量推定において最大誤差 10.6% と推定される．

7.2 動摩擦係数の計測

静止摩擦係数と同様の傾斜計測法により動摩擦係数も求めることができる．図 7 に示す傾斜した支持面を

物体が滑りはじめてある一定の距離 L を滑り降りるときの時間 t を測定するもので，動摩擦係数 μ_d は

$$\mu_d = \tan \theta - \frac{2L}{gt^2 \cos \theta} \quad (21)$$

と表される．

図 9 に，塩化ビニルの支持面に置かれた 3 種類の材質，陶器，アルミニウム，テフロンを対象物体の，温度と湿度の変化に対する，動摩擦係数の計測値の変化を示す．ただし，計測環境は，大阪市の 1997 年～2001 年の年間平均温度 (16.5°C) と平均湿度 (64%) をもとに，温度 $\pm 10^\circ$ ，湿度 $\pm 10\%$ とした．計測結果から，最大変化量はそれぞれ 0.04715 (陶器)，0.06781 (アルミニウム)，0.02212 (テフロン) であり，静止摩擦係数の最大変化量よりも大きくなっている．これは磨耗現象が原因と考えられる．つまり，動摩擦係数の計測では一定の距離を滑り降りるときの時間を計測しなければならず，数多くの計測を行う過程で対象物体の底面と支持面の表面が磨耗し，摩擦係数が変化してしまう．したがって，傾斜計測法により計測された場合は静止摩擦係数の方が動摩擦係数より安定で精度が高いと考えられる．

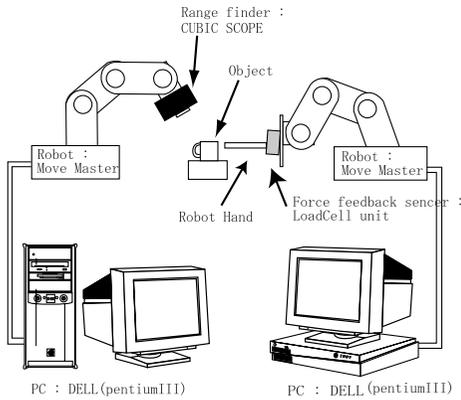


図 10 ハプティックビジョンシステム構成図
Fig.10 Haptic Vision system.

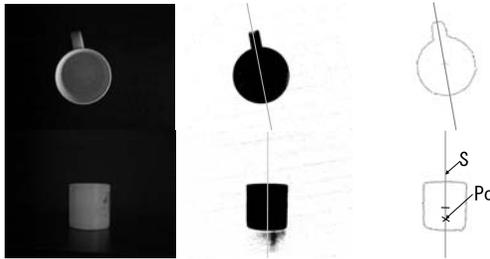


図 11 対称面 S に基づく接触点 P_c の選択

Fig.11 Contact point P_c extraction using a plane of symmetry S.

8. 実 験

図 10 に示すハプティックビジョンシステムを用いて重量推定実験を行った。ビジョンロボットとして三菱電機製ロボットマニピュレータ RV-E2 を使用し、これに東芝製 CCD カメラと、ISIDA 製の MG-6000 デジタル定量秤のロードセルユニット(カセンサ)搭載した。この計量機は、1 カウント=0.4 gw とするカウント値を 50 msec の間隔で得ることができる。このロボットマニピュレータは DEL 製の PC(CPU: pentiumIII.8 Gz, OS: Windows2000)から RS-232C を通じて制御される。以下に、ハプティックビジョンシステムを用いた接触点・接触力の推定と、静止摩擦係数と動摩擦係数を用いた重量推定の実験結果を示す。

8.1 接触点・接触力の推定

対象物体として陶器のマグカップ、皿、固い紙質のトイレットペーパーを用いた。図 11 に、能動的な多視点からの観測により得られた、カラー画像、二値画像、輪郭像の抽出結果を、また、図 11 右図に、対称軸 l 、対称面 S、接触点 P_c の抽出結果を示す。また、図 12 に、レンジファインダの多視点画像から復元さ

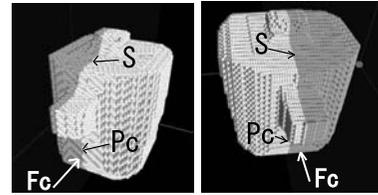


図 12 3次元形状の鉛直対称面 S を用いて抽出された接触点 P_c と接触力 F_c
Fig.12 Contact point P_c and force F_c extraction using a plane of symmetry.

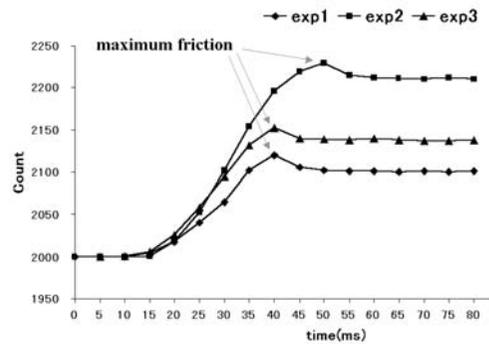


図 13 摩擦力 F の変化(マグカップ)
Fig.13 Frictional force change (mug cup).

表 1 静止摩擦係数を用いた重量推定結果
Table 1 Mass estimation results with μ_s .

対象物体 (実重量)	支持面	外力 (gw)	静止 摩擦係数	推定重量 (g)	誤差 (%)
マグ カップ (221 g)	木	46.8	0.217	215.7	2.4
	ゴム	94.9	0.533	178.0	19.5
	鉄板	64.2	0.306	209.8	5.1
皿 (252 g)	木	42.6	0.183	232.8	7.6
	ゴム	104.6	0.629	166.3	34.0
	鉄板	72.3	0.307	235.5	6.5
ペーパー (252 g)	木	72.2	0.313	230.7	8.5
	ゴム	213.3	0.671	317.9	26.1
	鉄板	127.6	0.532	239.8	4.8

れた対象物体 3 次元の形状、対称面 S、接触点 P_c および接触力 F_c の抽出結果を示す。形状対称性を持つ曲面物体を用いた実験結果から、鉛直な面対称性に基づき安定に接触点と接触力が抽出されることが確認できた。

8.2 静止摩擦係数を用いた重量推定

図 13 に、マグカップを押した時のロードセルユニットから測定された摩擦力 F と時間 t の変化グラフを示す。図中の exp1, exp2, exp3 はそれぞれ木、ゴム、鉄板を支持面としたときの測定結果である。

表 1 に、マグカップ、皿、トイレットペーパーの重量推定の結果を示す。1 つの実験について 30 回測定

表 2 異なる重量の推定結果

Table 2 Mass estimation results on weight scale change.

実験	外力 (gw)	推定重量 (g)	実重量 (g)	誤差 (%)
木材 1	33.2	110.7	111.6	0.81
木材 2	120	400	408.4	2.06
木材 3	756.4	2,521.3	2,543.2	0.86
木材 4	1,271.2	4,237.3	4056	4.47
木材 5	1228	4,093.3	4,076.8	0.40

表 3 摩擦係数計測結果

Table 3 Result of friction coefficient measurement.

対象物体 (実重量)	角度 (度)	時間 (秒)	距離 (m)	静止摩擦 係数	動摩擦 係数
アルミニウム (282 g)	15	14.253	0.38	0.26709	0.26742
陶器 (290 g)	11.8	9.712	0.4	0.209	0.203
クラフト テープ (378 g)	11	73.808	0.4	0.19438	0.19436

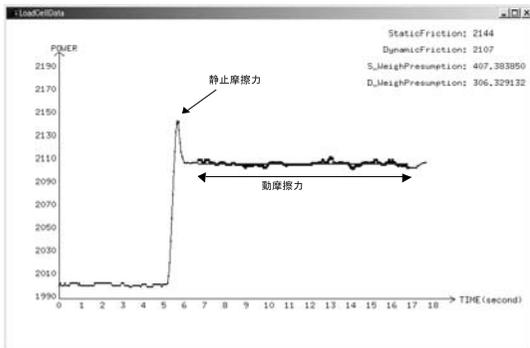


図 14 摩擦力変化グラフ

Fig. 14 Frictional force change graph.

を繰り返し、全体の 80% (24 回) を正值として平均した。実験結果から、支持面がゴム以外は 10% 以内の誤差で安定に重量が推定されることが確認できた。

さらに、推定重量の有効範囲を確認するために、同一の支持面 (鉄板) におかれた同じ材質で重さの異なる 5 種類の物体に対して、静止摩擦係数 $\mu_s = 0.3001$ として実験を行った。表 2 に示す実験結果から、100 g 程度の対象物体から 4,000 g 程度の対象物体まで、安定に推定できることが確認できた。

8.3 静止摩擦係数と動摩擦係数を用いた結果の比較

表 3 に、傾斜計測法により求めた、陶器のコップ、アルミニウム、底面にテフロンテープを貼り付けた陶器の小物の摩擦係数計測結果を示す。図 14 に、ロードセルユニットから計測された摩擦力 F_c の変化を示す。カウント値が最大の点が静止摩擦係数 F_{μ_s} を表し、対象物体が滑走している間のカウント値が動摩擦係数

表 4 静止摩擦係数と動摩擦係数を用いた結果との比較

Table 4 The comparison of results with μ_s vs. μ_d .

対象物体 (実重量)	外力 (gw)	静止摩擦 係数	推定 重量 (g)	誤差 (%)
アルミニウム (282 g)	174.9	0.2679	261.09	7.413
陶器 (290 g)	146.2	0.209	279.92	3.473
クラフトテープ (378 g)	201.7	0.1943	403.59	6.77

対象物体 (実重量)	外力 (gw)	動摩擦 係数	推定 重量 (g)	誤差 (%)
アルミニウム (282 g)	175.6	0.2674	262.52	6.905
陶器 (290 g)	110.5	0.203	212.47	26.73
クラフトテープ (378 g)	197.2	0.19436	394.79	4.44

F_{μ_d} を表す。図 14 に示すように静止摩擦力はグラフの最大値から安定に抽出することができる。しかし、動摩擦係数 F_{μ_d} は大きさが一定にはならず振動している。これはスティック-スリップ現象と呼ばれるものであり、動摩擦係数が静止摩擦係数よりも小さい場合に発生する。多くの場合動摩擦係数は静止摩擦係数よりも小さいためほとんどの状況においてこの現象が起こるといえる。そこで、滑走時のカウント値を最小二乗法により直線にフィッティングを試みた結果、動摩擦係数の傾きは 0.019° となった。これは十分に安定した滑りを示しており、この間の動摩擦係数は一定と見なすことができるため、その間の平均値を用いて重量推定を行った。

表 4 に、静止摩擦係数と動摩擦係数のそれぞれを用いて推定された重量の比較結果を示す。対象物体がアルミニウムブロック、クラフトテープの場合は動摩擦係数を用いた場合の誤差が静止摩擦係数を用いた場合よりも小さくなった。しかし、陶器の場合は動摩擦係数を用いた結果に大きな誤差が出た。これは 7.2 節で述べた傾斜計測法による動摩擦係数の計測誤差によるものと推測される。

以上より、Push 操作による重量推定には、i) 静止摩擦係数の計測結果が安定であること、ii) Push 操作による摩擦係数の変化の観測から静止摩擦係数が安定に抽出できること、から動摩擦係数より静止摩擦係数を用いた方が安定な重量推定結果が得られることを確認した。

8.4 並進事象の運動追跡評価

対象物体の並進運動を追跡し、直進性を評価をした。図 15 に 2 特徴点を追跡した結果を示す。鉛直上方に設置した固定カメラによって運動軌跡を追跡し、直進方向に対する回転角度 θ を算出した。図 16 に示す

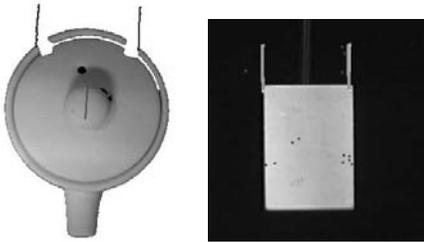


図 15 動画像追跡結果 (直進運動の場合)
Fig. 15 Tracking result.

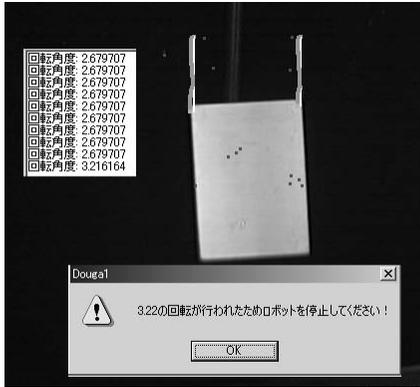


図 16 動画像追跡結果 (閾値 3° 以上の回転が発生した場合)
Fig. 16 Tracking result.

ように、設定した閾値 3° 以上の回転が発生した場合は、現在のロボットマニピュレータの制御でいったん Push 操作の命令を送信すると途中で停止することができないため、ロボット停止要求メッセージを表示する。観測された回転角度 θ は次回の Push 操作の接触力 F_c の方向 e の設定にフィードバックされ、接触力の方向は

$$\hat{e} = \begin{pmatrix} \cos(-\frac{1}{2}\theta) & -\sin(-\frac{1}{2}\theta) \\ \sin(-\frac{1}{2}\theta) & \cos(-\frac{1}{2}\theta) \end{pmatrix} e \quad (22)$$

と修正される。同物体で 10 回実験した結果から、80%が 3° 未満の誤差であることが確認できた。

9. おわりに

ハプティックビジョンにに基づく能動的物体重量推定法を提案した。まず、能動視覚により獲得された対象物体の 3 次元形状と姿勢に基づいて、重量推定のために最適な「接触点と接触力」を推定した。その結果を用いてロボットの Push 操作により対象物体に能動的に接触し、重量推定のために指標となる「回転のない並進運動」を発生させた。力センサを用いて観測した対象物体の直進運動中の摩擦力の変化と、直進運動の追跡結果から既知の静止摩擦係数および動摩擦係数

を用いて、対象物体の重量を推定した。静止摩擦係数を用いた実験結果から、対象物体と支持面がともに剛体の場合は 10%以内の誤差で物体重量が安定に推定できることを確認した。さらに、Push 操作による重量推定には動摩擦係数より静止摩擦係数を用いた方が安定な重量推定結果が得られることを確認した。

謝辞 本研究の実験を行うにあたり、ご協力いただいた株式会社イシダの玉井祐氏と須佐晴行氏に深く感謝致します。本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究 (B)(2) 課題番号 14380149 の補助により進められた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 「ハプティックインタフェース」特集, *Trans. the Virtual Reality Society of Japan*, Vol.3, No.3 (1998).
- 2) Krotkov, E.: Robotic Reception of Material, *Proc. Int. Joint Conf. Artificial Intelligence*, pp.88-94 (1995).
- 3) Okamura, A.M., Turner, M.L. and Cutkosky, M.R.: Haptic Exploration of Objects with Rolling and Sliding, *Proc. 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol.3, pp.2485-2490 (1997).
- 4) Okamura, A.M., Smaby, N. and Cutkosky, M.R.: An Overview of Dexterous Manipulation, *Proc. 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol.1, pp.255-262 (2000).
- 5) Pai, D.K., van den Doel, K., James, D.L., Lang, J., Lloyd, J.E., Richmond, J.L. and Yau, S.H.: Scanning Physical Interaction Behavior of 3D Objects, *Computer Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 2001 Conference)* (2001).
- 6) 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ーフェイス実現のための能動触覚, 情報処理学会研究報告, Vol.CVIM111-10, pp.73-80 (1998).
- 7) 山岡 勝, 田中弘美: 仮想空間シミュレータ自動構築のためのハプティックビジョンに基づく物体間の水平支持接触拘束抽出, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.7, pp.1439-1447 (2001).
- 8) 安部慶喜, 田中士郎, 田中弘美: 能動触覚に基づく物体の重量推定, 情報処理学会研究報告, CVIM119-6, pp.41-48 (1999).
- 9) 松下浩一郎, 松谷 剛, 田中弘美: ハプティックビジョンに基づく物体の機能推定, 情報処理研究報告, CVIM, No132-15, pp.103-110 (2002).
- 10) 松下浩一郎, 松谷 剛, 内藤嘉基, 田中弘美: ハプティックビジョンに基づく関節物体の力学的機能抽出, 画像認識・理解シンポジウム (MIRU) II-479 (2002).
- 11) Tanaka, H.T. and Kushihama, K.: Haptic Vi-

sion. Vision-Based Haptic Exploration, *Proc. IEEE 16th Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.2, pp.852–855 (2002).

- 12) 吉川, 栗栖: 対象物押し作業に基づく摩擦係数分布の推定法, *日本ロボット学会誌*, Vol.10, No.5, pp.632–638 (1992).
- 13) 河野彰夫: 摩擦の科学, 裳華房 (1989).
- 14) Nishimura, K. and Tanaka, H.T.: Active shape inferring based on the symmetry in stable poses—Shape from function approach, *Proc. IEEE 13th Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.I-A, pp.136–140 (1996).

(平成 15 年 3 月 26 日受付)

(平成 15 年 9 月 9 日採録)

(担当編集委員 和田 俊和)



田中 士郎

平成 11 年立命館大学工学部情報工学科卒業。平成 13 年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。現在、(株)コナミコンピュータエンタテインメントスタジオ勤務。在学中、ハプティックビジョンの研究に従事。



谷川 武市

平成 14 年立命館大学工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科博士前期課程に在学中。ハプティックビジョンの研究に従事。



安部 慶喜

平成 10 年立命館大学工学部情報工学科卒業。平成 12 年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。現在、ブラクストン株式会社勤務。在学中、ハプティックビジョンの研究に従事。



田中 弘美(正会員)

昭和 50 年お茶の水女子大学理学部物理学科卒業。昭和 50 年～53 年(株)富士通勤務。昭和 56 年米国立チェスター大学大学院コンピュータサイエンス学科修士課程修了。昭和 63 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。工学博士。昭和 63 年～平成 6 年 ATR 通信システム研究所客員研究員。平成 6 年立命館大学工学部情報工学科教授。コンピュータビジョン, コンピュータグラフィックス, ハプティックビジョン, 仮想現実, 3 次元画像通信の研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。