

# 超高速動画画像の解析による $\mu$ スケールの物体追跡

田中 士郎<sup>†</sup> 田中 弘美<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 立命館大学理工学研究科

〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1

E-mail: †{stanaka,hiromi}@cv.ci.ritsumei.ac.jp

あらまし 実世界に忠実かつ物体操作が可能な仮想空間を実現するためには、物体の形状等の視覚情報だけでなく、重量、摩擦、弾性等の触覚情報が必要である。我々は、摩擦の研究分野において提案されている摩擦モデルに基づいて、摩擦現象を仮想空間で再現する研究を進めている。実世界に存在する物体の摩擦特性を推定するには、外力を与えられた物体の変位を取得する必要があるが、特に予すべりはその変位が数マイクロと微小であるため、観測は非常に困難である。そこで本論文では、安定姿勢に置かれている物体に対して、外力を与えた際の物体の変位を高精度に求める手法を提案する。まず、物体に外力を与える手段としてロボットマニピュレータを使用し、物体が滑り出す過程を 1 秒間に 500 フレームの撮影が可能な高速度カメラで観測し画像を取得する。次に 1 フレーム目の画像において基準領域を指定し、他のフレーム画像の各ピクセルを中心とした領域との相関値を求める。本論文で提案する相関値のモデル式を用いて、相関値分布とのフィッティングを行い、相関値の最も高い物体座標を推定する。各フレーム画像のフィッティングにおける評価値および真値からの誤差標準偏差から、物体変位の信頼性が高いことを確認した。

キーワード 高速度カメラ、物体変位、サブピクセル、仮想空間、摩擦、相関法

## 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」を提供することにより、実世界に存在する種々の物体やその現象、振る舞いに忠実なシミュレータを実現することが本質的な課題である。最近では触覚の重要性から触覚や力覚デバイスも実用化され、VRをはじめ医療、ロボティクスや心理学の分野においても視覚とさらに触覚に基づくインターフェース実現へ向けて勢力的に研究が進められている。

仮想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には、対象の三次元形状、テクスチャなどの視覚情報、重量、摩擦、弾性等の力学的物理特性、物体相互の拘束関係、さらには機能を表す触覚および力フィードバックのためのデータが必要となる。そこで我々は、実世界に忠実な仮想空間シミュレータを自動構築するために「触れて見る」ハプティックビジョン構想を提案し、物体の重量、摩擦、相互拘束関係などの触覚情報を自動獲得する研究を進めている [1][2][3][4][5]。

摩擦による機械部品の消耗を避けるための適切な潤滑剤の注入や、多指ロボットハンドが安定した物体把持を行うためのすべり覚センサの開発や、タイヤの摩耗、地震など、様々な研究分野において摩擦の概念が必要とされており、摩擦やすべりに関する実験も行われている。また、摩擦現象をシミュレーションするために、摩擦のモデル化の研究も行われている [6][7]。我々は、実物体の持つ情報を能動的に取得し、摩擦モデルに当てはめることで物体の摩擦特性を推定し、仮想空間内で摩擦現象を再

現する研究を進めている。摩擦特性を推定するためには、外力を与えられた物体が滑り出すまでの変位が必要である。特に滑り出しにおける変化は瞬時に起こる現象であるため、観測することは非常に困難である。

そこで本論文では、安定姿勢に置かれている直方体形状の物体に対して、外力を与えた際の物体の変位を、1 秒間に数百～数千枚の撮影が可能な高速度カメラを用いて 100 倍ズームで観測し、画像処理を用いて物体の変位を高精度に求める手法を提案する。本手法は、まず物体に外力を与える手段としてロボットマニピュレータを使用し、安定姿勢に置かれている物体が滑り出す瞬間を高速度カメラで観測し画像を取得する。次に観測された画像から、画像処理を用いて物体の変位を推定する。変位の推定方法として、物体の側面に真円マーカーを貼り付けて、その重心計算を行うことでサブピクセルレベルで推定することが比較的容易である。しかし、100 倍ズームで観測を行っているため、観測範囲は横幅で数ミリ程度と狭く、撮影範囲に収まる小さな真円精度の高いマーカーが必要となり、実装することは非常に困難である。そこで、テンプレートマッチングによる物体変位の推定を行う。1 フレーム目の画像において特徴量の多い  $50 \times 50$  画素の基準領域を選択し、各フレーム画像に対してテンプレートマッチングを行い、各ピクセルを中心とした  $50 \times 50$  画素の領域との相関値を求める。相関値分布の傾向に基いたモデル式を提案し、各フレーム画像ごとに最小二乗によるフィッティングを行うことで、相関値の最も高い座標をサブピクセルレベルで求め、高精度な物体の変位を推定する。

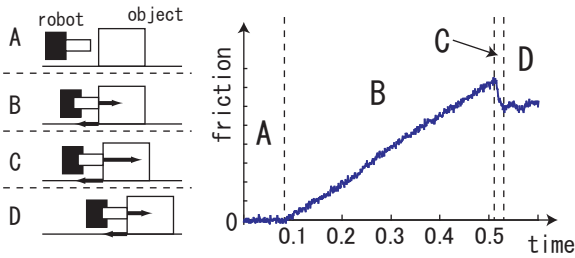


図1 物体に外力を与えた時の摩擦力和滑りの関係

各フレーム画像に対するフィッティングにより算出された評価値および標準偏差から、推定された物体変位の信頼性が高いことを確認した。

## 2. 外力によって作用される物体の摩擦力和運動の変化

安定姿勢に置かれている物体が運動するためには、物体に対し外力を与える必要がある。本研究では物体の並進運動における変位を解析するために、ロボットマニピュレータを用いて、物体が水平方向に並進運動するように外力を与える。クーロンの摩擦法則に基づく、物体に働く外力が、物体と支持面に働く摩擦力より大きくなると、物体は滑り出す。物体の滑り出す直前の摩擦力を、最大静止摩擦力と呼ぶ。ロボットマニピュレータの先端には力覚センサが搭載されており、物体に接触した際に反力データを取得することで、物体と支持面との摩擦力を測定することができる。図1に、等速で運動するロボットマニピュレータの先端が物体に接触し、物体が滑り出すまでの概要と摩擦力の変化を示す。摩擦力は力覚センサ内部のひずみゲージが変形することで測定され、ロボットマニピュレータが物体に接触し摩擦力が増加している間、力覚センサは反力を受けて収縮し続けており、物体はほぼ静止状態を保つ(図1のB)。最大静止摩擦力に到達すると物体は滑り始め(図1のC)、物体と支持面の間には動摩擦力が働いた状態となり(図1のD)、物体はロボットマニピュレータと同様、等速で運動する。

## 3. 高速度カメラ画像解析による物体変位推定

### 3.1 相関値分布のモデル式の定義

高速度カメラにより連続観測された画像の1フレーム目において、マッチングのための基準領域を定義する。図2(a)に示すように、1フレーム目の画像上にある対象物体の表面の一部を選択し、これを基準領域とする。基準領域は縦横同じ長さの正方形とし、ノイズによる影響と空間周波数特性から  $50 \times 50$  画素と比較的大きなサイズとする。この基準領域と、各フレーム画像との正規化相互相関(ZNCC)によるマッチングを行う。正規化相互相関は、画像全体の輝度変化に強い特徴を持つ。相関値を  $R$  とすると、正規化相互相関は次式で示される。

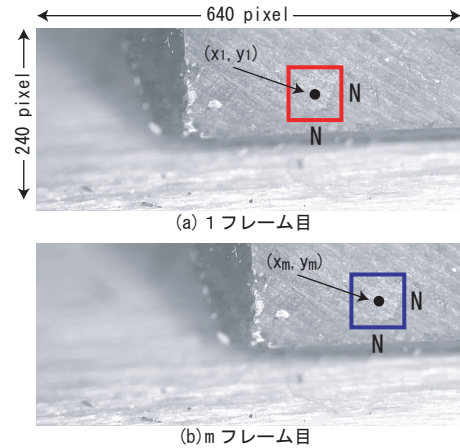


図2 テンプレートマッチング(銅ブロック・画像幅は約3mm)

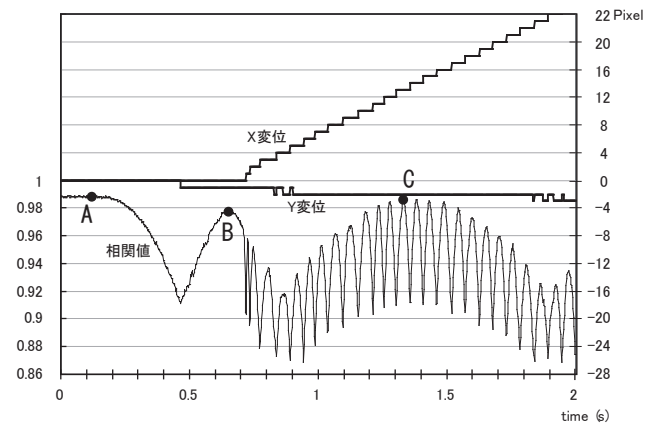


図3 相関値, X変位, Y変位のグラフ

$$R = \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f(x,y) - \bar{f})(g(x,y) - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f(x,y) - \bar{f})^2 \times \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} (g(x,y) - \bar{g})^2}} \quad (1)$$

$f(x,y)$  は最初に定義した基準領域内の  $(x,y)$  座標における輝度値、 $g(x,y)$  は、マッチング対象となる画像領域内の  $(x,y)$  座標における輝度値を示す。 $\bar{f}, \bar{g}$  は、それぞれ  $f(x,y), g(x,y)$  の平均値を示す。

図3に、各フレーム画像における相関値が最も高い値と、その物体変位の整数座標  $(x,y)$  を示す。グラフのY軸の左側が相関値、右側がX,Y変位(ピクセル)の目盛を示す。グラフの左側の相関値が一定となっている部分は物体には外力が作用していない状態を示し、相関値の減少する部分から物体に外力が作用しており、Xの変位が変化している部分から滑りが生じている。

相関値の変化に関しては、2種類の幅の異なる周期的な変化があり、幅の大きい方はY軸方向の変位、小さい方はX軸方向の変位に対応しており、相関値と変位には関連性があることが確認できる。また、相関値上の点A,B,Cに着目すると、A,C点についてはほぼ相関値が一致しているのに対し、B点においてはA,Cよりも低い値

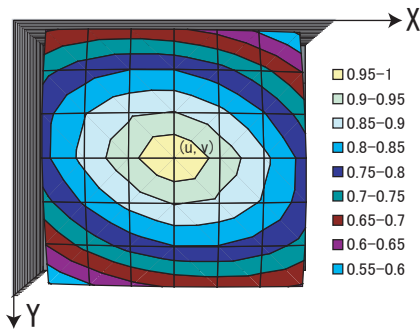


図 4 相関値分布

となっている。これは B 点では Y 軸方向ではマッチングが一致しているが、X 軸方向に関してはサブピクセルレベルでの変位が既に生じていることを示している。

次に物体の変位に関して、画像の X,Y 軸両方において変位が生じている。これは物体の滑り方向である水平方向と、観測された画像座標系に傾きがあることを示しており、X,Y 変位から水平方向の成分を求める必要があることを示す。また、物体の変位は Y 軸方向から生じていることが確認できる。

しかし、各フレーム画像における相関値の最大値のみでは、物体追跡を整数値でしか求めることができない。相関値は小数であるが、X,Y の 2 つの方向を含んでおり、相関値をそれぞれを成分に分割できない。そこで、最も高い相関値とその周辺のピクセルの相関値を含めた複数の相関値から、相関値の最も高い座標をサブピクセルレベルで推定することにより物体変位を高精度に求める。相関値の最も高い座標を推定するために、相関値分布のモデル式を定義し、実際の相関値分布とのフィッティングを行う。相関値の分布は、図 3 に示すように、最も高い値から曲線状に減少し、ある程度離れていても輝度情報がある限り相関値は値を持つため、その値に収束することが予想されることから、最も相関値の高い座標  $(u, v)$  を中心とした 2 次元のガウス関数である

$$G(x, y) = a \exp \left\{ -\frac{(x-u)^2 + (y-v)^2}{2b^2} \right\} \quad (2)$$

で示される。

実際に相関値分布を確認するため、先ほどと同様の条件でテンプレートマッチングを行う。図 4 に、得られた相関値の分布を示す。図 4 に示すように、相関値の分布は傾いた楕円形状のような傾向を示す。これは、図 2 に示す銅ブロック表面に見られる斜め方向の模様が原因であり、模様に沿った方向に関しては相関値の減少が滑らかなになる。このような場合、式 (2) は相関値の分布のモデル式として不十分であることが考えられる。また、本研究で使用する対象物体は機械加工されたブロックを使用しており、そのような物体は少なくない。そこで、式 (2) の 2 次元のガウス関数に対し、楕円の半径  $b, c$  とその傾き要素  $\theta$  と切片  $d$  を加えた式に変形すると、

$$G(x, y) = a \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{((x-u) \cos \theta + (y-v) \sin \theta)^2}{b^2} + \frac{((-x+u) \sin \theta + (y-v) \cos \theta)^2}{c^2} \right] \right\} + d \quad (3)$$

となる。切片  $d$  を加えているのは、相関値は常にある程度の値を持っているからである。また、他のフレーム画像における相関値分布も、相関値の最も高い部分を中心とした領域は、同じ特徴量であるため、画像のノイズが小さく安定している場合、同様の傾向となることが予想される。

### 3.2 各フレーム画像における物体変位の推定

各フレーム画像において相関値の最も高い整数座標を中心とする一定範囲の相関値分布を求め、提案した式 (3) に対し、非線形最小二乗法である *Levenberg - Marquardt* 法によるフィッティングを行うことで、各パラメータと物体変位を示す相関値の最も高い座標  $(u, v)$  をサブピクセルレベルで推定する。フィッティングを行うための評価式  $J$  は、

$$J = \frac{1}{2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} (g(x, y) - G(x, y))^2 \quad (4)$$

で示される。 $g(x, y)$  は、座標  $(x, y)$  における相関値、 $G(x, y)$  は、式 (3) によって算出された相関値を示す。

各フレーム画像に対して最小二乗によるフィッティングを行い、式 (3) の未知のパラメータを推定する方法を、1 フレーム目の画像とそれ以外のフレーム画像で分けて行う。1 フレーム目の画像では、定義した基準領域と画像より検出される領域が完全に一致し、その相関値は 1.0 であることから、1 フレーム目のフィッティングでは、式 (3) の  $u, v$  に相関値が 1.0 となる整数座標 (基準領域の中心座標) を固定パラメータとして代入し、残りの未知のパラメータ、 $a, b, c, d, \theta$  をフィッティングにより求める。一方、2 フレーム目以降の画像では、1 フレーム目の画像で求めたパラメータ  $a, b, c, d, \theta$  を固定パラメータとして代入し、 $u, v$  をフィッティングにより求める。得られた各フレーム画像における  $u, v$  が、画像座標系における物体の変位を示し、これらを順次記録する。

### 3.3 物体変位の水平成分の抽出

取得された物体変位は画像座標系に対する変位であり、図 5 に示すように物体の滑り方向とは一致せず傾きがあるため、水平成分の変位を求める必要がある。そこで、物体が等速に滑っている状態での近似直線を求め、その傾きから画像の X 軸方向との回転角を算出し、等速滑り状態の物体変位が X 軸方向へ回転することで、床面に対する物体の変位を求める。



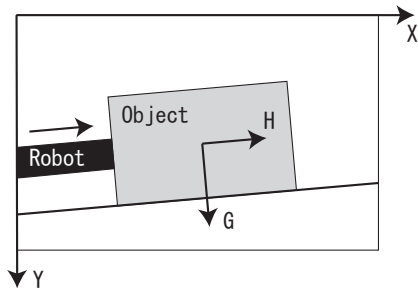


図 5 画像座標系 (X,Y) と物体変位方向 H との関係

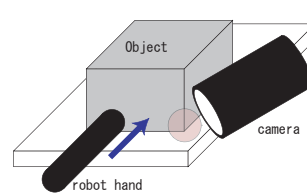


図 6 実験環境



図 7 高速度カメラ VW5000

### 3.4 物体変位の実寸値変換

求めた物体変位の単位はピクセルなので、単位ピクセルあたりの実寸値 [mm] を算出することで、変位の単位をピクセルから実寸値に変換する。高速度カメラのフレーム数を  $N$  とすると、1枚の画像の撮影時間は  $1/N$  [s] なので、物体が等速に滑っている状態の物体変位データから、速度 [pixel/s] を求めることができる。物体変位データは誤差を含んでいるため、算出される複数の速度データの平均値  $v_o$  を使用する。ロボットの速度 [mm/s] を  $v_r$  とすると、単位ピクセルあたりの実寸値  $s$  は、

$$s = \frac{v_r}{v_o} \quad (5)$$

となる。物体の変位 [pixel] を  $D_p$  とすると、実寸値での変位  $D_m$  は、

$$D_m = sD_p \quad (6)$$

となる。

## 4. 実験

### 4.1 実験環境

図 6 に実験環境を示す。物体に対して外力を与え運動させるために、ロボットマニピュレータ (三菱製 RV-E2) を使用する。また、物体変位の観測には、図 7 に示す、高速度カメラ (キーエンス製 VW5000) を使用する。500fps の場合  $640 \times 240$  画素の解像度の撮影が可能で、fps を増やすと撮影範囲および解像度が減少する。保存形式は非圧縮の Avi 形式で、最大 5 秒まで保存可能である。高速度カメラに使用するレンズは、同社製 VH-Z20R を用いており、最大 200 倍までのズームが可能である。また、テレセントリック性を持っているため、観測画像を歪み補正や物体の表面部分の正面化処理をかけることなく、物体の変位を測定することができる。物体の微小な変位を観測するためには高倍率のズームレンズが必要となり、図 6 に示すように物体表面に対し極めて近い位置からの撮影となる。

### 4.2 実験方法

水平な支持面上で安定姿勢に置かれている物体に対し、ロボットマニピュレータを用いて物体が並進運動するよ

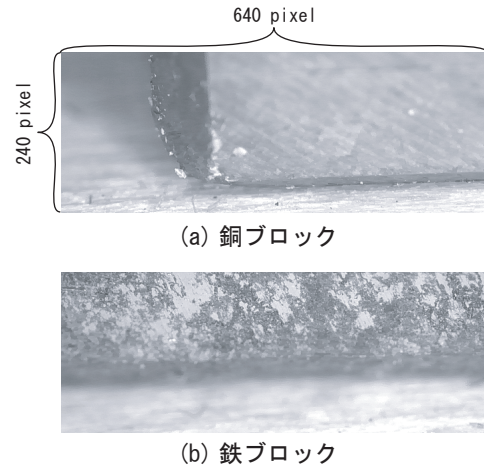


図 8 高速度カメラによる観測画像

うに外力を加える。物体の変位を詳細に観測するために、ロボットの速度を最小速度である  $0.1\text{mm/s}$  に設定する。高速度カメラの撮影条件は 500fps の  $640 \times 240$  画素の解像度とし、レンズの倍率を 100 倍に設定し、物体変位の観測を行う。実験の対象物体として、銅ブロック (980g) と鉄ブロック (848g) を使用する。図 8 に、高速度カメラから観測された銅ブロックおよび鉄ブロックの画像を示す。また、ロボットハンドが物体に接触した際に、互いの接触面の傾きから物体に回転が生じないために、一旦低速で既知の座標まで物体を押し、次の物体への押し操作において高速度カメラの観測を行う。

式 (3) のパラメータおよび物体変位を推定するための条件として、入力する相関値の範囲は、相関値が最も高い整数座標を中心に  $\pm 5$  ピクセルの合計 121 ピクセルとした。

### 4.3 相関値分布の結果

図 9, 図 10 に、銅と鉄ブロックのそれぞれのマッチングにおける相関値の結果を示す。各物体ごとに 4 つのグラフを示しており、図 1 に示す A, B, C, D における 4 つの状態 (初期・接触・すべり始め・すべり) において選択した画像の相関値を示している。相関値の範囲は、相関値が最大である整数座標を中心とした  $\pm 5$  [Pixel] である。実際の相関値の値はメッシュの交点の部分であり、交点から周辺の交点までは線形補完された等高線で表現しているが、図 3 で示すように、変位に対する相関値の変化は線形ではない。そのため、例えば銅ブロックにおける (d) 図においては、中心付近の相関値の分布が他よりも低く見

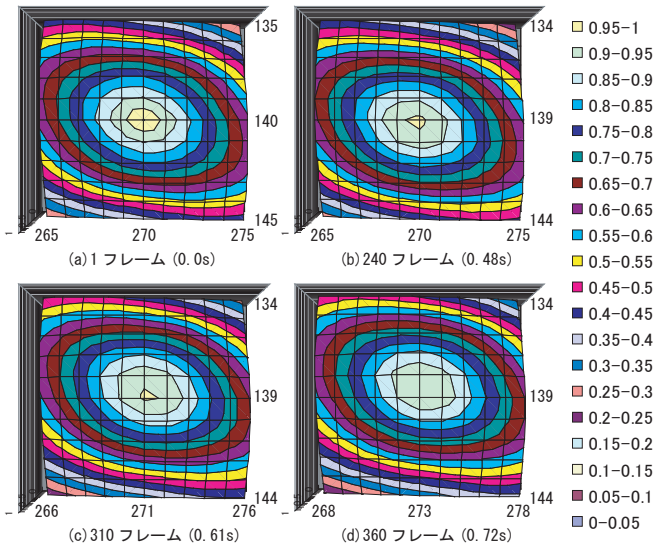


図 9 相関値分布 (銅ブロック)

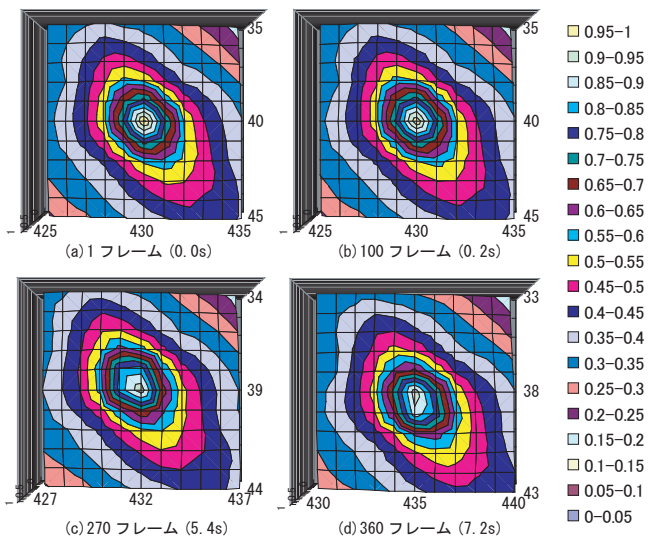


図 10 相関値分布 (鉄ブロック)

られるが、サブピクセル空間において高い値が存在することを示しており、問題ない。銅ブロックでの相関値の分布は全体的に緩やかな変化であり、鉄ブロックは中心部分は激しく少し離れた部分においては緩やかに変化している。この分布の違いはブロック表面上の空間周波数の違いに影響されていることがわかる。この空間周波数の相違による相関値の変化と、式 (3) に示すような楕円形状で傾きのある変化が 4 つのグラフにおいて類似していることから、画像のノイズが少なく安定していることと、式 (3) に示すフィッティングのためのモデル式が有効であることを示す。

#### 4.4 物体変位の追跡結果

図 11(a), (b) に銅ブロックの変位 (水平・重力方向)、図 11(c), (d) に鉄ブロックの変位 (水平・重力方向) 結果を示す。いずれの物体も類似したグラフ変化を示している。

水平方向の変位に着目すると、物体変位が急激に上昇

した後では、線形に増加していることから物体は等速で運動していることがわかる。また、物体が滑り出す瞬間の速度はグラフの傾きから判断すると、等速運動時における速度よりも大きいことが言える。これは力覚センサのひずみゲージがスティック状態として徐々に収縮したのが最大静止摩擦力に到達することで解放されることによって、スリップ現象が生じたからであると判断できる。さらに、変位が急激に上昇する前段階において、極めて微小な変位が生じていることが確認される。図 12 に、物体変位が急激に変化するまでの範囲における物体の水平方向の変位グラフを示す。いずれの物体も、急激な変位が生じるまで  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  程度の極めて微小な変位が生じていることがわかる。摩擦の研究分野では、このような巨視的なすべりの前において生じる微小な変位を、予すべり [8] と呼び、実際に起こる現象として報告されている。

次に、垂直方向の変位に着目すると、物体が等速に滑っている部分においては垂直方向の変位は一定を保っており、これは物体が水平方向のみ移動していることが判断できる。一方、滑り出す前段階においては、いずれの物体も上昇する傾向があり、その変位量は水平方向の予すべりの変位量より大きく、 $5 \sim 6 \mu\text{m}$  程度の変位が生じている。重力方向の変位に関しては、なぜこのような現象が生じているのかは現在不明で今後の課題となる。

#### 4.5 物体変位の推定における信頼性評価

各フレーム画像において、最小二乗によるフィッティングによって式 (3) のパラメータを推定した時に、評価値および RMSE (真値からの誤差標準偏差) が算出される。表 1 に、各フレーム画像において算出された RMSE に対する、平均値と標準偏差を示す。これらは推定され

表 1 各画像の RMSE の平均と標準偏差 (単位:pixel)

	平均	標準偏差
銅ブロック	0.007428	0.000554
鉄ブロック	0.029559	0.001076

たパラメータの信頼性を示す値であり、RMSE の平均は鉄ブロックで 0.03 ピクセル程度と小さい値であり、その標準偏差もさらに小さいことから各フレーム画像に対するフィッティングの結果は安定しており、信頼性が高いことが判断できる。

#### 5. ま と め

本論文では、高速度カメラを用いて高倍率ズームかつ、高フレームレートで物体の運動の観測を行い、得られた各フレーム画像に対して、まずテンプレートマッチングにより相関値分布を求め、その相関値分布のモデル式を提案し、フィッティングによって位相値が最も高い座標をサブピクセルレベルで推定した。推定結果を実寸値に変換すると  $1 \mu\text{m}$  以下の変位であり、比較的安定していることを確認した。また、提案手法により、物体が見た目滑り

と考えられる。

今後は推定した物体変位を、現在研究中である摩擦特性の推定に使用することを予定している。

## 文 献

- [1] 田中士郎, 西村憲吾, 田中弘美: “安定姿勢における形状対象性を用いた能動的三次元形状推定 - 機能から形状を推定するアプローチ,” 情報処理学会論文誌, vol. 44, No. SIG 9(CVIM 7), pp.38-45, July. 2003.
- [2] 田中士郎, 谷川武市, 安部慶喜, 田中弘美: “ハプティックビジョンに基づく能動的物体重量推定,” 情報処理学会論文誌, vol. 44, No. SIG 17(CVIM 8), pp.51-59, Dec. 2003.
- [3] 山岡勝, 山崎佳代子, 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,” 信学論 (D-II), vol.J84-D-II, no.7, pp.1439-1447, July 2001.
- [4] 植田 直樹, 榑浜 斎延, 平井 慎一, 田中 弘美: “ハプティックビジョンに基づく能動的レオロジー物体モデリングのための粘弾性特徴抽出 ” パーチャルリアリティ学会論文誌, TVRSJ Vol.8 No.3 pp.237-246,2003
- [5] 島田 伸敬, 上條 真継, 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関節物体のインタラクティブモデリング,” 電子情報通信学会論文誌, D-II Vol.J89-D No.9 pp.2013-2024, Sep. 2006
- [6] C.C.deWit, H. Olsson, and K. Astrom, “A New Model for Control of Systems with Friction,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 40, pp. 419-425, Mar. 1995.
- [7] P.Dupont, V.Hayward, B.Armstrong, and F.Altperter, “Single state elasto-plastic friction models,” *IEEE Trans.Automat.Contr.*, vol.47, no.5, pp.787-792,2002.
- [8] 藤本 隆士, 清水 陽介: “弾性体の微小変位特性 (第1報) -接線力と変位の指標化の試みに関する基礎的研究-,” 弓削商船高等専門学校紀要, pp.89-95, Feb, 2007.

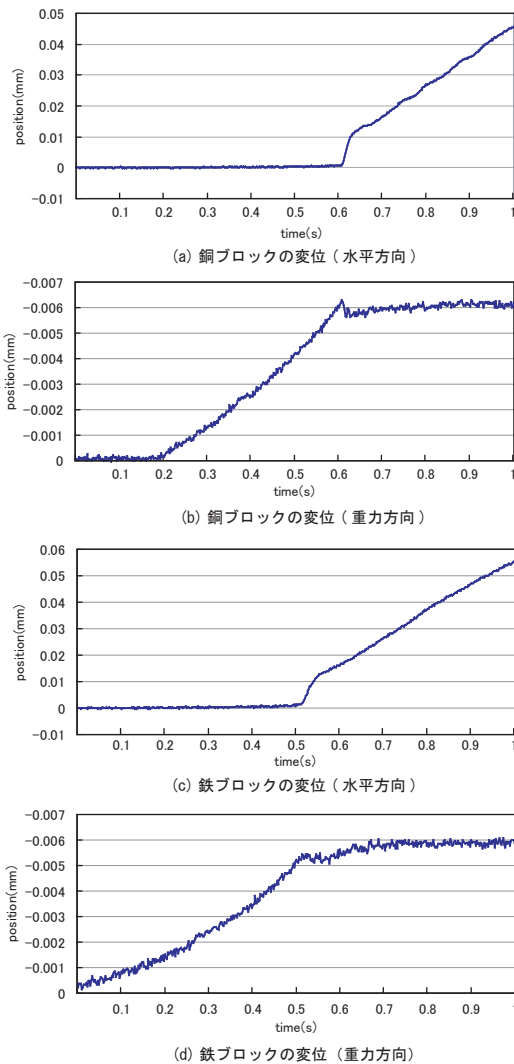


図 11 物体変位の推定結果

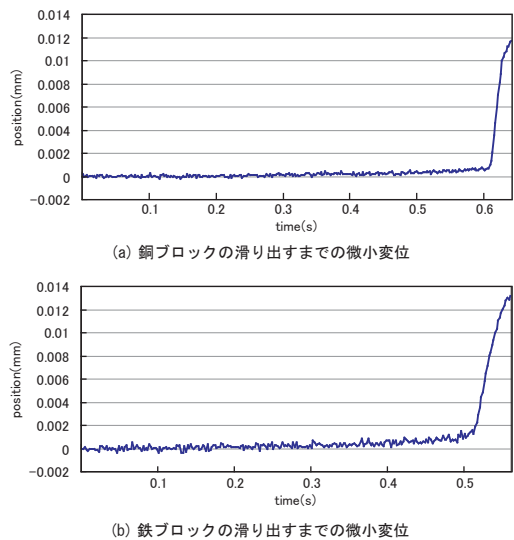


図 12 物体変位の推定結果 (予すべり部分)

始める初期段階において生じるとされる予すべりの観測を確認した。

本論文における観測方法と画像解析方法は、摩擦の分野に限定されず、幅広い分野において応用が可能である