

視覚情報と触覚情報の協調による重心位置推定

天野 晃 右田剛史 浅田尚紀

広島市立大学情報科学部知能情報システム工学科

E-mail: {a-amano, migita, asada}@cv.its.hiroshima-cu.ac.jp

概要:

従来のコンピュータビジョン研究では、「観察者」はシーンの外に位置し、シーンに触れない、あるいはシーンを変化させないという条件の下で、三次元情報を正確に取得することを行っていた。これに対し、我々は、ビジョンによる3次元情報復元というタスクと、その情報に基づいて物体に作用するというアクションタスクを融合し、能動的にシーン中の物体を移動するなど、シーンの改変を行うことによって物体の形状および力学的特性を安定に取得する能動認識 (Active Recognition) の研究を進めている。本研究では、能動認識の試みとして、物体を押すことによって生じる移動を観測した視覚情報から、物体の力学的特性である重心位置の推定を行った。机の上に置かれたトレイを、ロボットアームにより移動させ、重心位置を推定する実験を行った結果、重心位置の場所にかかわらず、安定に重心推定が可能であることがわかった。

キーワード:

能動認識, 視覚と触覚の協調, シーンの改変, 重心推定

Estimation of Center of Gravity by Integrating Visual and Physical Information

Akira Amano Tsuyoshi Migita Naoki Asada

Department of Intelligent Systems, Hiroshima City University

abstract:

The task of computer vision is to recover accurate 3-dimensional shape of objects from 2-dimensional images. In such a vision task, the observer is assumed to be outside of the scene, and this means that the scene configuration are never destroyed by the observer. In this paper, we propose a new paradigm "active recognition", in which the object information is obtained by cooperation of visual and physical systems which can reform the scene configuration.

Experiments on the estimation of the center of gravity was performed with a robot arm and a camera that were used to push and track the object. The stable results have shown the effectiveness of the integration of visual and physical information.

keywords:

active recognition, cooperation of visual and physical system, reformation of the scene, estimation of center of gravity

1 まえがき

コンピュータビジョンは、2次元画像から3次元物体の形状や運動を求めること、すなわち2次元情報から3次元情報を復元することを主な目的としている。これは、3次元情報から2次元情報への幾何学的・光学的変換(投影)の逆問題を解くことに相当し、投影によって失われた奥行き情報をいかにして安定かつ高精度に求めるかという本質的に困難な問題を含んでいる。しかも、シーンには光源と物体の位置関係によって生じる陰影や、物体同士の重なりによる隠蔽が存在することがあり、3次元情報の復元をさらに困難にする原因となっている。

これらの問題に対して、レンズパラメータの変化によって奥行き情報を得る多重画像解析[1]、複数のカメラを用いて奥行き情報を得るステレオ視[2]、光源を制御して得られる陰影情報から3次元情報を得るフォトメトリックステレオ[3]、カメラが移動することによって物体の裏側や物体同士の隠蔽に対処する能動視覚(ActiveVision)[4]など、それぞれの状況に応じた解法を適用して問題解決を図ってきた(表1)。ここで重要なことは、これらの解法ではいずれも視覚を持つ「観察者」がシーンの外に存在し、シーンに触れない、あるいはシーンを変化させないことがビジョントスクの前提となっている点である。

しかし、ビジョントスクによって得られた3次元情報から物体を認識し、その後、物体に作用する(移動させる、把持する)というアクションタスクが続く場合を考えると、ビジョンとアクションを一体とするタスクを構成することが可能である。我々はこのような考え方に基づいて、シーンを意図的に変化させることによって得られる情報を積極的に利用して、シーン解釈や物体認識を行う能動認識(Active Recognition)の研究を進めている(図1)。

ビジョンとアクションを一体のものと考えることにより、アクションによりシーンを変化させ、その結果をビジョンで利用することが可能になる。また、アクションを行うロボットアームに設置した触覚センサーからの情報により形状や力学的な情報を得ることも可能である。なお、本稿では、視覚センサーから得られる情報を視覚情報と呼び、物理作用を与える行為と触覚センサーから得られる情報を総称して触覚情報と呼ぶ。

以下では、視覚と触覚の協調による情報の取得について簡単に整理した後、能動認識の試みとして、ロボットアームによって生じるシーンの変化を視覚センサーで捉え、物体の重心位置の推定を行う方法について述べる。

表1: コンピュータビジョンにおける問題と解決手法

問題	解決手段	手法
奥行き	レンズパラメータの変化	depth from focus
	複数視点の利用	stereo
陰影	複数照明の利用	photometric stereo
隠蔽	視点位置の移動	active vision

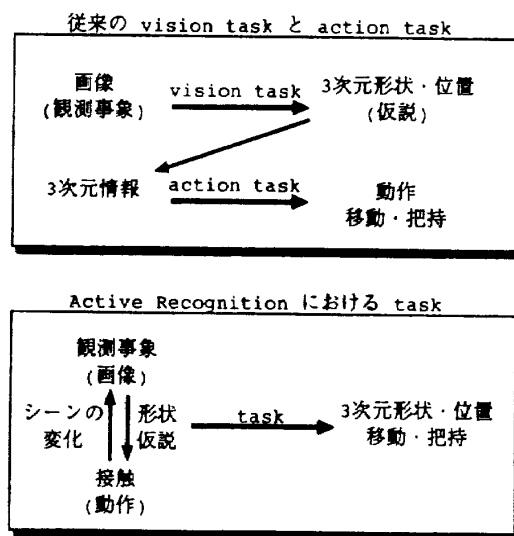


図1: 視覚と触覚の協調による能動認識

2 視覚情報と触覚情報を用いた物体認識

従来の視覚情報のみを用いた物体認識に対して、視覚情報と触覚情報を互いに協調させる認識システムには、様々な利点がある。ここでは、取得可能な情報、手法上の利点についてまとめる。

2.1 視覚と触覚の協調手法

基本となる考え方は、複数のセンサーからの情報を利用して、それぞれの不利な点を他のセンサーの情報で補うことにより、幅広い情報を安定に求めることにある。

表2に示すように、視覚情報は、高速に大域的な情報が得られるという利点がある。しかし、視覚によって得られる画像情報には誤りの混入や情報の欠落が避けられないため、画像という観測事実に基づいて計算された物体の位置や形状はあくまでも仮説であり、実際には誤りを含む複数の仮説が生成されることになる。

表 2: 視覚情報と触覚情報の比較

視覚情報	触覚情報
大局的	局所的
高速	低速
非接触	接触
不正確	高精度

一方、触覚情報は、情報の取得が局所的であり時間もかかるが、得られる3次元情報は視覚情報に比べて正確であるといえる。また、重量や摩擦などの力学的な情報を取得することが可能であり、更に3次元的な形状に関する情報が得られる。

このような異なる特性をもつ視覚情報と触覚情報を利用する場合、これらの利点を利用し、欠点を補う協調を考える必要がある。

2.2 視覚・触覚を用いて取得できる情報

視覚と触覚を用いる場合、視覚のみを用いた認識システムよりも、取得できる情報が増える。ここでは、物理的な作用を与えることによって取得できる情報についてまとめる(表3)。

形状に関する情報(3次元形状の曖昧性の排除)

単一画像からの3次元形状復元などの問題では、本質的に情報が縮退しているため解に曖昧さが残る。また、対象世界に鏡がある場合など、視覚情報中のどの情報が実像で、どの情報が虚像であるかを視覚情報だけで判定することは不可能である。この問題に対しては、我々は、ロボットアームを用いた接触センサーの情報を導入する手法を提案した[7]。そこでは、視覚情報から曖昧性を含む複数の仮説を生成し、信頼性及び検証効率を考慮して、曖昧性を排除するための検証を接触センサーを用いて行っている。

物体の力学的情報(重量、重心)

3次元空間中に存在する物体を移動もしくは把持する場合、対象となる物体の重量や重心位置がわかっている必要がある。従来の研究では、この問題は、物体の密度が均一であるなどの仮定によって回避されてきたといえる。例えば、積み上げられた荷物を他の場所に移動するなどのタスクを考えると、荷物を3次元的に持ち上げ運搬するためには、荷物の重量や重心位置の情報が不可欠である。田中ら[6]は、ロボットアームで物体を移動することにより物体の重量推定を行っている。

物体間の情報(連結性、摩擦力)

表 3: 視覚情報と触覚情報を用いて取得できる情報

形状情報	3次元形状の曖昧性の排除	
力学情報	物体内	重量, 重心
	物体間	連結性, 摩擦力

3次元空間中の物体に移動等の作用を与える場合、移動の単位となる剛体の情報が必要になる。例えば、視覚的には単一の物体に見えても実際には複数の剛体に分離できる場合、あるいは逆に、複数の物体に見えても力学的には単一の剛体を構成している場合がある。この問題に対して、田中ら[5]は、ロボットアームで物体を移動することにより、剛体の分離を行う方法を提案している。また、同様の手法[6]で、物体間摩擦力を測定し、この情報を利用して仮想現実における物体の移動における触覚をシミュレートすることを提案している。

3 水平面上の運動に基づく重心位置の推定

2次元平面の問題として考える。いま、剛体がある点(作用点)からある方向に押すと、その運動は剛体の重心を中心とする回転運動と並進運動に分離される。ここでは、剛体の特徴点の移動軌跡から重心を求めることを考える。

重心位置を $O = (O_x, O_y)$ 、作用点を $s = (s_x, s_y)$ 、作用点の移動方向を $v = (v_x, v_y)$ とする。このとき剛体の運動は、作用点から重心に向かう並進運動成分 v_t の運動と、重心を中心とする角速度 ω の回転運動に分解される(図2)。

作用点に力 F が加えられているとする。剛体の並進運動方向への動摩擦力を f_R 、重心のまわりの回転摩擦力を f_r とすると、それぞれの運動成分の変化率は以下ようになる。なお、剛体の質量は m 、重心のまわりのモーメントは M 、作用点から重心に向かうベクトルと力のベクトルとのなす角を θ とする。

$$\frac{dv_t}{dt} = \frac{F \cos \theta - f_R}{m} \frac{O - s}{|O - s|} \quad (1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{F \sin \theta - f_r}{M} \quad (2)$$

剛体を押し続けると、この式に従って並進運動速度及び角速度が変化することになる。

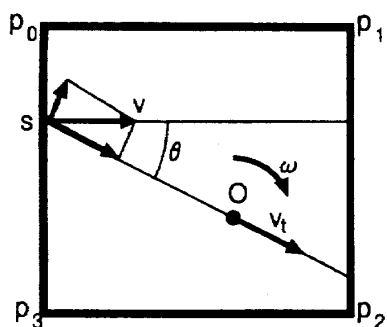


図 2: 物体の運動

3.1 回転角度からの重心位置推定

静止している剛体の作用点に力を加える。このとき、剛体は式 (1) 及び式 (2) にしたがって運動を始め、 v_t 及び ω は、これらの式の値が 0 になるところで一定になる。このときの各パラメータがわかっているならば重心位置を計算することは可能である。

しかしながら、剛体が並進運動のみを行う場合以外は、これらの式の値が 0 になることはなく、更にモーメントや摩擦力を正確に測定することは困難であるため、式から直接重心位置を求めることは困難である。そこで、ここではいくつかの作用点を選び、一定時間そこを押し続ける運動を行い、そのときの回転角度の比を用いることにより、正確な重心位置推定を行う。

作用点を一定の力で時間 t の間押し続けた場合、回転角度 ϕ は、以下の式で表される。なお、ここでは移動量は微小とし、作用点と重心との位置関係を表す θ の変化は無視できるものとする。

$$\begin{aligned}\phi &= \int_0^t \frac{F \sin \theta - f_r}{M} dt \\ &= \frac{t}{M} (F \sin \theta - f_r)\end{aligned}\quad (3)$$

ここで、回転摩擦 f_r は、 $F \sin \theta$ に比例すると仮定し、 $f_r = -kF \sin \theta$ とすると、 ϕ は以下のように表せる。

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{t}{M} (1+k) F \sin \theta \\ &= K \sin \theta\end{aligned}\quad (4)$$

$\sin \theta$ は、 O , s , v によって決まるが、 s , v は既知であるので、この式には、 K , O の三つの未知変数があることになる。そこで、ここでは 3 箇所以上の作用点を選び、そのときの剛体の回転角度を求め、非線形最小二乗法でこの式を当てはめることにより、重心位置を求める。

具体的には剛体のある辺を選び、その辺の上で等間隔の 3 点以上の点を選びそこを作用点として、辺に垂直な方向に一定距離剛体を移動させる。このときの回転角度を用いて、重心位置の推定を行う。

物理的な情報を得る場合、常に得られる結果の誤差を考慮しなければならないが、最小二乗法を用いることで誤差の問題にも対処していると言える。

なお、非線形最小二乗法では初期値が重要であるが、ここでは、重心位置が剛体の内部に存在するという事前知識を用いて、剛体の幾何中心に重心位置の初期値を取っている。

3.2 回転角度

次に剛体上の特徴点から剛体の回転角度を求める。

剛体上の特徴点 $p_i = (p_{ix}, p_{iy})$ が $p'_i = (p'_{ix}, p'_{iy})$ に移動したとする。並進運動した距離を l 、回転角度を ϕ とし、回転行列を $R(\phi)$ で表すと、以下の式がなりたつ。

$$p'_i = R(\phi)(p_i - O) + O + l \quad (5)$$

$$R(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、2 点 p_i と p_j を上式に代入し、それら 2 式の差を取ると以下の式になる。

$$p'_j - p'_i = R(\phi)(p_j - p_i) \quad (7)$$

この式から、重心のまわりの回転角度 ϕ を求めることができる。

4 実験

机の上のトレイを対象に、ロボットアームを用いてトレイを押し、トレイの重心位置を推定する実験を行った。

4.1 実験環境

実験には、6 軸のロボット (三菱電気製 RV-E3-ST) 及び専用電動ロボットハンドを用いた。ロボットハンドの先にはトレイを押しするための棒が付けてあり、視覚情報による位置検出を容易にするためマーカーを付けた。トレイは、プラスチック製のもので、大きさは 260mm × 220mm であり、視覚情報による位置検出を容易にするため 4 隅にマーカーを付けた。このトレイは 80cm × 80cm のテーブルの上に置き、テーブルの横に設置したロボットアームにより移動を行った。



図 3: 実験環境

トレイ及びロボットハンドに関する視覚情報を得るカメラ (SONY 製 EVI-G20) は、問題の設定を容易にするため、実験環境の直上に設置した (図 3)。

4.2 キャリブレーション

視覚情報と触覚情報を用いる場合、これらのキャリブレーションを行う必要があるが、本実験では問題を容易にするため、カメラは実験環境の垂直上方にあるものとし、平行投影モデルにより視覚情報における画像上の位置と触覚情報における 3 次元位置の対応を決定した。

視覚情報と触覚情報を利用する場合、それぞれの情報が得られる範囲があり、これらの共通領域を用いて動作を起こす必要がある。この共通領域をここでは、協調領域とよぶ。本実験では、事前に視覚情報が得られる範囲 (視野範囲) 及びロボットハンドが動作を起こすことが出来る範囲 (動作範囲) を調べ、これらの共通領域である協調領域で実験を行うようにした。

協調領域の境界に近いなるべく離れた 4 点にロボットハンドを移動し、その 3 次元位置及び画像上の位置を計測する。現在は、これらの点は手動で与えている。これらの点から最小二乗近似により、平行投影のパラメータである、画像中心、スケール、回転角度を求めた。

4.3 重心位置推定

本実験では、トレイの長辺に対して、等間隔の 5 点を辺に垂直な方向に押し、そのときの回転角度を計測することにより、トレイの重心位置を推定した。

実験環境は、トレイの位置を人間が移動させてしまったり、ロボットハンドがトレイにひっかかるなどの動

作によりトレイが予期しない移動をしてしまうことが考えられる。そこで、本実験では視覚情報はトレイの位置を常に追跡し、常に適切な動作が取れるようにしている。

具体的には、1 回の動作は以下の手順により行われる。

1. トレイが静止していることを確認する。
2. 作用点の位置を計算する。
3. 作用点の少し手前にロボットハンドを移動する。
4. トレイの辺を少し押す位置までロボットハンドを移動し、トレイの移動を確認し、辺とロボットハンドが確実に接触していることを確認する。
5. このときのトレイの位置から辺に垂直な方向にロボットハンドを一定距離移動させる。現在は 3cm 移動させている。
6. ロボットハンドの動作直前のトレイ位置とロボットハンド静止後のトレイ位置からトレイの回転角度を求める。

これらの動作を作用点を変えながら 5 回実行する。実験中、人間の手などによりトレイが移動したり、ロボットアームの予期しない接触などによりトレイが移動してしまうことがある。この場合、作用点として選んだ点と実際に接触した作用点は異なることになる。また、トレイを押し方向もトレイの正確な位置を計測しないと誤ることになる。そこで、本実験では、常に視覚情報の中でトレイの位置を追跡し、作用点の位置、力を加える方向を実環境に合うようにしている。

最後に 5 回の回転角度の計測が終了した後、重心位置の推定を行い、推定した重心位置を通る直線を画像上に表示する。

4.4 実験結果

4.4.1 重心位置が幾何中心付近にある場合

トレイにおもりなどを載せない状態で、重心がトレイの幾何中心付近にある場合に重心位置推定を行った。なお、トレイの長辺を X 軸とし、その辺に対して左側の短辺を Y 軸として以下の各点の座標を記述する。単位は mm である。

真の重心位置を計測するためトレイの 2 辺を持ち上げ、安定する位置を調べた。この結果、真の重心位置は、(124, 110) であることがわかった。

ここでは重心位置の推定実験を 10 回行った。推定された重心位置の平均と標準偏差を表 4 に示す。

表 4: 重心が幾何中心付近にある場合の推定結果 (単位 mm)

	平均推定重心位置	真の重心位置
X 座標	127	124
(標準偏差)	(2.6)	
Y 座標	120	110
(標準偏差)	(4.8)	

また、推定された結果の分布を図 4 に示す。図中の点線は真の重心を通過する線である。また、5 点を押したときの回転角度の計測結果とそれを用いて、式 (4) を用いて重心推定を行った結果をグラフに表した例を図 5 に示す。実験終了後に推定重心位置を表示した結果の例を図 6 に示す。図中の直線が推定した重心を通過する線分である。

この実験から、本手法により長辺方向で平均 3mm、短辺方向で平均 10mm の誤差で重心位置の推定が可能であることがわかった。また、それぞれの最大誤差は 10mm、16mm であった。前章における推定方法では、摩擦力は常に加える力に比例するとしており、力を加える瞬間の静止摩擦係数に関する過渡現象については無視できるとして考慮していない。また、力を加える方向と重心位置の方向とのなす角度 θ に関して、前章では一定値であるという仮定をおいている。これらの仮定から推定結果の誤差が生じていると考えられる。

4.4.2 重心位置が偏っている場合

トレイにおもりを載せた状態で、重心がトレイの幾何中心から大きくずれた位置にある場合に重心位置推定を行った。

真の重心位置を前節と同様に計測したところ、(64, 110) であることがわかった。

ここでは重心位置の推定実験を 10 回行った。実験の結果、重心位置から離れるに従い回転角度は単調に変化するはずであるが、実際には重心から離れた点において単調に変化しない点が計測されることがあった。これらの点は前章における議論の仮定が成立しないことによる問題であると考えられるので、ここではこれらの点を除いて最小 2 乗近似を行った。推定された重心位置の平均と標準偏差を表 5 に示す。

また、推定された結果の分布を図 7 に示す。図中の点線は真の重心を通過する線である。また、5 点を押したときの回転角度の計測結果とそれを用いて、式 (4) を用いて重心推定を行った結果をグラフに表した例を図 8 に示す。実験終了後に推定重心位置を表示し

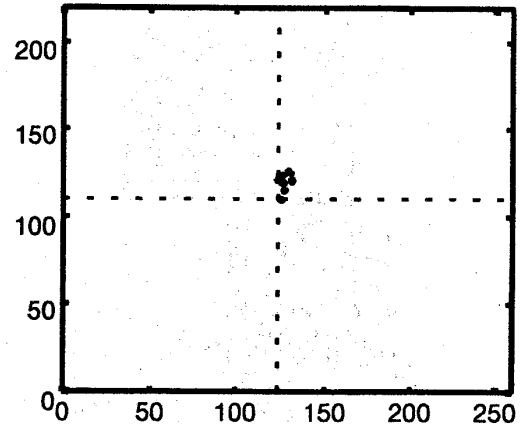


図 4: 推定された重心位置の分布 (点線は真の重心位置を通る直線)

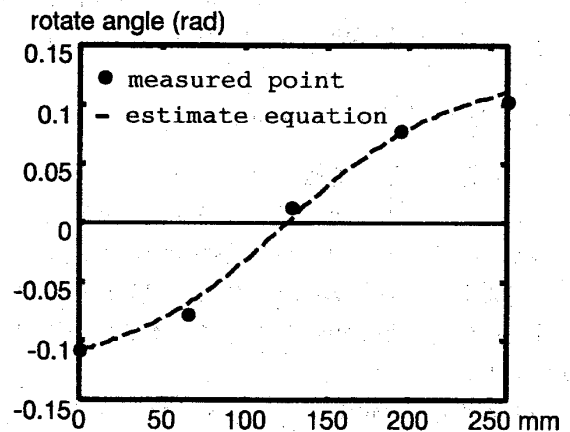


図 5: 辺を押した時の回転角度と重心推定結果

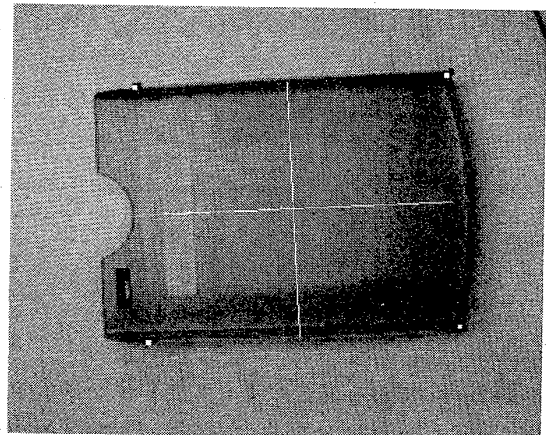


図 6: 推定された重心位置の表示

表 5: 重心が偏っている場合の推定結果 (単位 mm)

	平均推定重心位置	真の重心位置
X 座標	61	64
(標準偏差)	(3.2)	
Y 座標	112	110
(標準偏差)	(4.7)	

た結果の例を図 9 に示す。図中の直線が推定した重心を通過する線分である。重心位置は、トレイ上のおもりの位置からずれているが、トレイとおもりを合わせた重心位置が、トレイ自身の重心とおもりの重心との中間になるためであり、この例ではほぼ正確に推定されている。

この実験から、重心位置が偏っている場合でも、長辺方向で平均 3mm、短辺方向で平均 2mm の誤差で重心位置の推定が可能であることがわかった。また、それぞれの最大誤差は 8mm、10mm であった。これらの誤差は、前節の重心位置が幾何中心付近にある場合と大きくは変わらないことから、重心位置によらず安定して重心位置の推定を行うことが可能であると言える。

5 まとめ

本研究では、画像情報から対象世界に関する情報を得る視覚情報と、対象世界に作用して世界を改変することにより情報を得る触覚情報を協調させることにより、従来のコンピュータビジョンの手法では得られない情報として剛体の重心位置を取得する方法を提案した。

始めに、剛体に力を加えたときの 2 次元平面内の運動について解析し、剛体に力を加えることにより生じる回転運動を計測し、その回転角度を用いて重心位置の推定を行う方法を示した。次に、実環境において重心位置を推定する手順として、トレイの辺を 5 箇所押し、そのときの回転角度を利用する方法を示した。以下に本手法の特徴と問題点を整理する。

剛体の運動解析

剛体に力が加えられたときの剛体の運動を微分方程式の形で示した。実環境において、この方程式を解くことは困難であるので、仮定として静止摩擦における並進運動成分と回転運動成分の比は、動摩擦におけるそれと等しい、動摩擦力は剛体に加える力に比例し、並進成分と回転成分との比は変わらない、とした。さらに、回転運動が起こっている状態では、外力の方向と重心位置との関係が変化するが、ここでは微小時

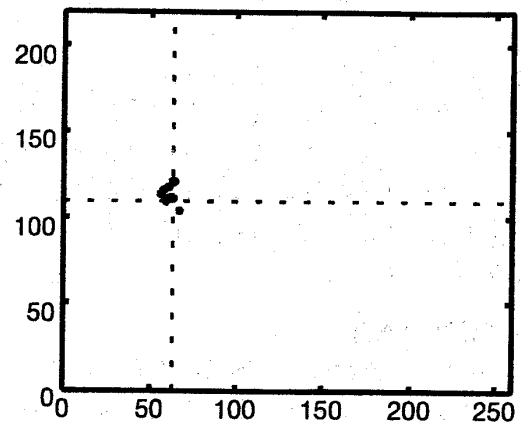


図 7: 推定された重心位置の分布 (点線は真の重心位置を通る直線)

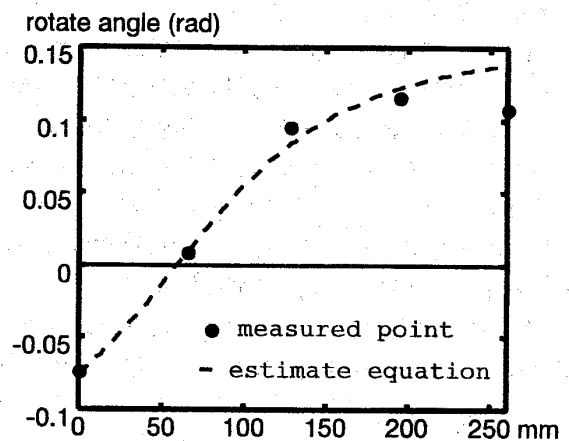


図 8: 辺を押しした時の回転角度と重心推定結果

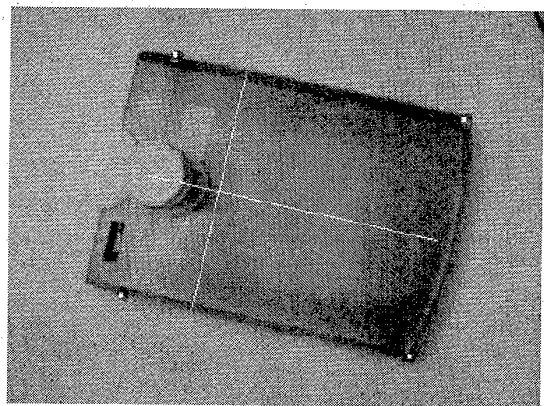


図 9: 推定された重心位置の表示

間の範囲ではこの関係は一定であるという仮定をおき、方程式に含まれる重心位置を推定した。しかしながら、剛体の回転角度が大きい場合、後者の仮定が成立しない状況が存在し、これが誤差が生じる要因となっていると考えられる。そのため、上記微分方程式を正確に解く、あるいは回転角度によって剛体を押す距離を変え仮定が成立する範囲でのみ情報取得を行うなどの改善が必要である。

トレイ位置の取得

トレイには位置計測を容易にするためマーカーを付してある。また、視覚情報と触覚情報との対応をとるキャリブレーションを容易にするため、カメラはトレイの直上に設置し、平行投影モデルで近似している。平行投影モデルでは光軸から離れるに従って実際の位置とのずれが大きくなり、これが重心位置推定の誤差を生じる一因となっている。カメラモデルを変更しても本質的に問題の複雑さは変わらないので、透視投影モデルへの変更を行う予定である。

また、本来視覚から得られる情報は正確な情報ではない。本実験では視覚から得られる情報は正確であるという仮定で議論を進めたが、視覚からは複数の仮説が得られ、それらの中から妥当性の高いものを選択し検証していくという手順が必要である。このとき、検証手段として、トレイに触るなどの触覚情報を積極的に利用する手法を検討する必要がある。

さらに、現在はトレイを2次元的な領域として扱っているが、3次元構造を持つ実体として扱う必要がある。

トレイを押す動作

トレイの辺に対して均等な5点を同じように押し、そのときに生じる回転角度を計測した。この際、実環境において動作するシステムを実現するため、ロボットハンドの移動などを行った後で、必ずトレイの位置とロボットハンドの位置との相対的な関係を視覚情報によって補正した。また、マーカー位置と実際の接触点とのずれを補正するため、ロボットハンドとトレイが接触しトレイが移動することを利用して、確実にトレイとロボットハンドが接触するようにした。このため、トレイの回転角度を計測する動作以外の時点では、トレイを移動させてもそれを追跡し重心推定を行うことが可能である。

回転角度からの重心位置推定

ある辺の5箇所を、辺に対して垂直な方向に押しその回転角度を計測することにより、非線形最小2乗法により重心位置の推定を行い結果を実時間表示している。この際、明らかに計測結果に大きな誤差が含まれていると思われる点、特に重心から離れた点において回転角度が単調に増加しなくなる点を除いて推定を

行っている。しかしながら、5点という数に関しては経験的に良い結果を与えるという理由で選択しているため、本来ならば計測点を増やすごとに推定結果の残差を見るなどの方法で、妥当な結果が得られるまで計測を繰り返すなどの手法が必要である。

参考文献

- [1] 松山隆司, 浅田尚紀: “多重画像の統合による多機能高精度画像計測,” コンピュータビジョン (松山, 久野, 井宮編), pp.25-36, 1998.
- [2] S.T. Barnard, M.A. Fischler: “Computational Stereo,” Computing Surveys, Vol. 14, No. 4, pp.553-572, 1982.
- [3] R.J. Woodham: “Analyzing images of curved surfaces,” Artificial Intelligence, vol. 17(1-3), pp. 117-140, 1981.
- [4] Y. Aloimonos, A. Bandopadhyay and I. Weiss: “Active Vision,” Proc. 1st ICCV, pp.35-54, 1987.
- [5] 山岡勝, 上田恭敬, 田中弘美: “仮想物体操作のための能動触覚に基づく物体相互拘束の抽出,” 電子情報通信学会総合大会論文集, D-12-128, p.327, 1998.
- [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視覚,” 情処研報, Vol. CVIM111-10, pp.73-80, 1998.
- [7] 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.