

ハプティックビジョンに基づく物体の機能推定

松下 浩一郎 松谷 剛 田中 弘美

立命館大学 理工学部 情報学科

E-mail : fmatsushita, matsutani, hiromig@cv.cs.ritsumeai.ac.jp

あらまし 最近, 触覚の重要性から, 触覚/カフィードバック装置も実用化され, ハプティック(触覚)インターフェースの研究が活発に進められている. そこで我々は, ハプティックインター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. 本研究では, ハプティックビジョンに基づき物体の機能情報を自動的に推定し記述する手法を提案する. 従来の機能の研究は動作を伴わない静的機能や変形を伴わない動的機能に限られていた. 本研究では関節を持つ物体を対象とし, 能動触覚による接触のために変形した物体の形状と姿勢を, 能動視覚により観測分析することにより, 関節物体の持つテコの機能を推定する. ハプティックビジョンシステムによる実験結果から, 提案手法が関節物体が持つテコの機能推定に有効であることを確認した.

キーワード 機能推定, ハプティックビジョン, 能動触覚, 能動視覚, ハプティックインターフェイス

Inferring Object Function with Haptic Vision

Koichiro Matsushita Takeshi Matsutani Hiromi T. TANAKA

Department of Computer Science, Ritsumeikan University

E-mail : fmatsushita, matsutani, hiromig@cv.cs.ritsumeai.ac.jp

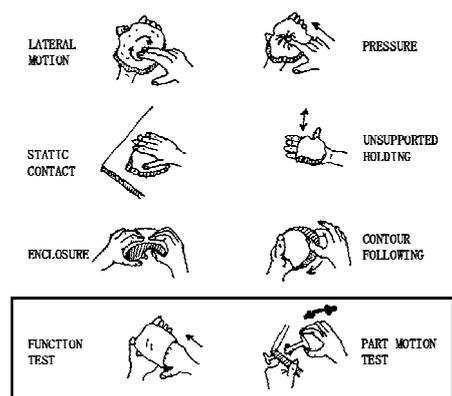
Abstract Recently, haptic interface has been intensively studied, and high-performance force-feedback displays also have been developed for realizing haptic interface in the virtual environment. In this paper, we propose a novel approach to inferring function of objects with Haptic Vision. Haptic Vision, which is based on active sensing and realtime image understanding methodology, is proposed for observation-based automatic construction of virtual space simulator, which enables virtual objects to behave, deform and function realistically with virtual force, and to be operated with a real sense of touch through haptic interface devices.

Key words Function Modeling, Haptic Vision, Active Touch, Active Vision, Haptic Interface

1 はじめに

バーチャルリアリティ(VR)は視覚中心のヒューマンインターフェース技術として広範な分野に応用されている. 最近では, 触覚の重要性から, ハプティック(触覚)インターフェースを実現する触覚/カフィードバック装置も実用化され, VRをはじめ, CG, ロボティクス, 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イス実現へ向けて勢力的に研究が進められている.

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情報とともに, 重量, 摩擦, 弾性等の力学的物理特性や機能, さらに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. そこで我々は「触れて見る」ハプティックビジョン構想を提案し, 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でかつハプティックインターフェイスによる物体操作が



A set of exploratory procedures (EPs) that subjects use when trying to gain information about an object using haptics or active touch (Lederman & Klatzky, 1987; reprinted by permission)

図 1: 物体の特徴探索のための手動作パターン EPs: Exploratory Procedures [1]

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 [2] [3] [4] .

心理学分野における触覚の研究は手の機能や把持の分析を中心に進められてきた。代表的な研究として、Lederman と Klatzky による物体の顕著な特徴を探るための典型的な手の動作パターン EPs(Exploratory Procedures) が挙げられる。図 1 の EPs が示すように、人間の手の探索機能は、物体の形状、剛さ、柔軟度、重さ、温度等を探索する 6 種類の手動作パターンと、物体の機能やパーツ物体の構成要素の動作を探索する 2 種類の手動作パターン等により実現されていることが確認されている。

物体の機能推定や認識の研究は人工知能はコンピュータビジョンの分野において進められ、物体の 3 次元形状分析から様々な機能情報が推定されることが報告されている [5] ~ [8]. 従来の機能認識の研究はまず、椅子・机などの静的機能を持つ物体を対象とし [5], さらに、栓抜き・スパナ等の動的機能を物体に対象が広げられ [6], 最近では物体の動きの解析から機能を推定する方法も提案されている [7]. しかし、ハサミ等の関節を持つ物体 (Articulated Objects) を対象にした機能の研究 [8] は極めて限られている。

そこで本研究では、ハプティックビジョンに基づき物体の機能情報を自動的に推定し記述する手法を提案する。関節物体を対象とし、まず能動視覚により、対象の 3 次元形状と姿勢を観測し、観測画像データの分析から、最も効率的に安定に、機

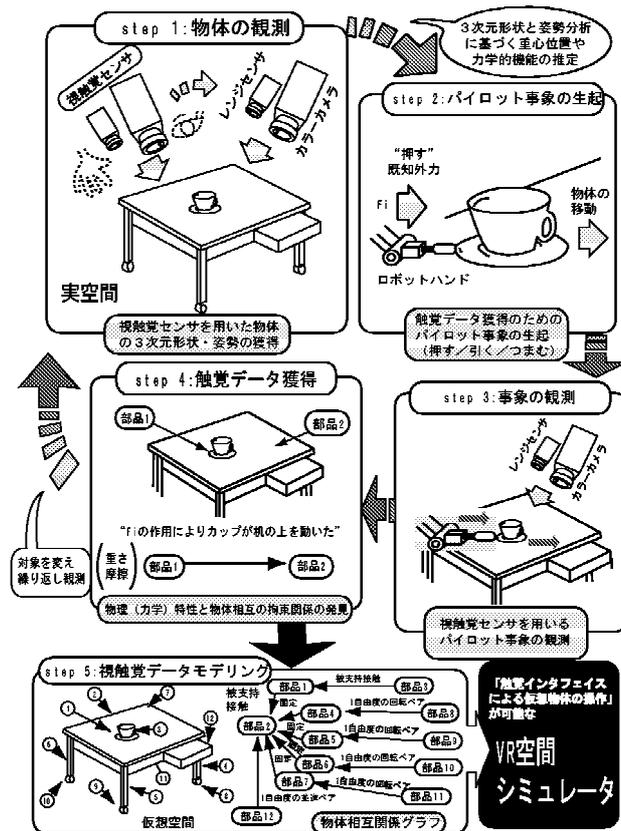


図 2: ハプティックビジョンシステム全体構想図

能を推定できる事象を生起するための接触点位置と外力を選出する。次に能動触覚により接触点への外力作用により変形した物体の形状姿勢を能動視覚により観測・分析し、物体の持つテコの機能を推定し記述する。ハプティックビジョンシステムによる実験結果から提案手法が関節物体が持つテコの機能推定に有効であることを確認した。

2 ハプティックビジョン構想

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ことを目的とし、「触れて見る」ハプティックビジョン構想を提案した [2]. ハプティックビジョンは従来の能動視覚 (Active Vision) における視覚情報獲得のための視点制御の概念と、それを触覚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たな概念 (Active Touch) を統合し増強させたものである。

図 2 に示すように、ハプティックビジョンシステムはまず、step1) レンジセンサ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特徴を推定する。ここで、カラーカメラは広視野の視覚情

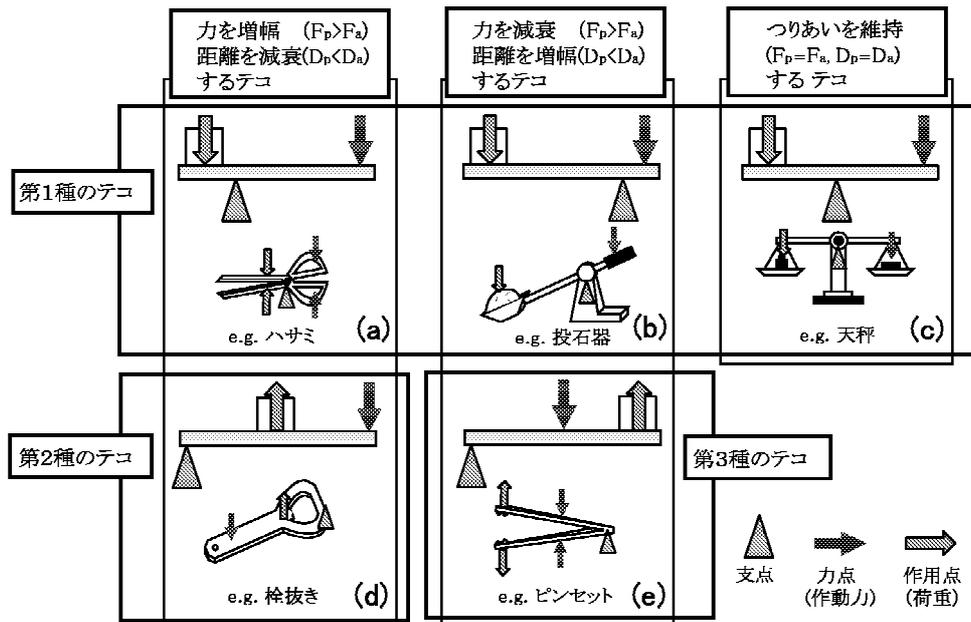


図 3: テコパターンの分類

報を獲得する“目”の役割を果たし、レンジセンサは近距離の物体表面に接触して3次元構造を探る“手”の役割を果たしている。次に、step2) 獲得された幾何特徴に基づき接触点を選択し、外力を制御しつつ対象物体に作用し、パイロット事象、つまり、物体間の力学的特性や相互拘束関係抽出のために最も有効であり指標となる事象、を生起させる。step3) 物体とそのふるまいを観察した動画像データを分析する、step4) 物体の力学的特性や相互拘束関係を自動的に抽出し、step5) 各物体をノードとし、接触する物体間をアークで表現した関係グラフとしてモデル化する。

このようにハプティックビジョンは、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情報や機能情報を獲得するために最適な接触点位置、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、触覚情報や機能情報の獲得を可能にさせるものである。

3 テコの機能

一般に人工物の3次元形状は何らかの機能を発揮するために設計されており、物体形状から機能を推定し、カテゴリーに分類できるといえる。物体の様々な複雑な機能は斜面、テコ、輪軸等の要素となる構造の組み合わせとして実現されている [10]。

そこで本研究ではテコの機能に基づいて関節物体の機能を推定することを目的とする。一般にテコの種類はテコは剛体上にある支点、力点、作用点のいずれが中央に来るかによって次の様に分類される [10]。

- 2 第1種 of テコ
支点は力点と作用点の間に存在する。
- 2 第2種 of テコ
作用点が力点と支点の間に存在する。
- 2 第3種 of テコ
力点が支点と作用点の間に存在する。

力点に加わる力を F_p 、作用点に生成される力を F_a 、力点・支点間の距離を D_p 、作用点・支点間の距離を D_a とした場合、次式が成り立つ。

$$F_p D_p = F_a D_a \quad (1)$$

また、力と距離の関係を機能的に分類した場合、次の様になる。

- 2 力を増幅・距離を減衰するテコ
 $F_p > F_a \quad D_a < D_b$
- 2 力を減衰・距離を増幅するテコ
 $F_p < F_a \quad D_a < D_b$
- 2 つりあいを示すテコ
 $F_p = F_a \quad D_a = D_b$

これらから作用点における力の増幅・減衰率は $D_p = D_a$, 距離の増幅率・減衰率は $F_p = F_a$ となる . 本研究ではこれらの 2 種類の分類方法を融合し , 図 3 に示す 5 種類のパターンに分類することによりテコの機能情報を抽出する . 図 3(a)(b)(c) に示すように第 1 種 of テコは力と距離の関係から , 力増幅・距離減衰 , 力減衰・距離増幅 , つりあいの 3 つのパターンに分類することができる . 例としてそれぞれ , 釘抜きやハサミ , 投石器 , 天秤などが挙げられる . 図 3(d) に示すように第 2 種 of テコは常に $D_p > D_a$, $F_p < F_a$ の関係が成り立つため力増幅・距離減衰のテコとなる . 例としては穴あけパンチなどが挙げられる . 同様に図 3(e) に示すように第 3 種 of テコは常に $D_p < D_a$, $F_p > F_a$ が成り立つことから力減衰・距離増幅のテコとなる . 例としてピンセット等が挙げられる . これらの情報をもとにテコの機能モデルを以下のように記述する .

- leverf type : テコの種類 (/ /)
 - P_{power} : 力点
 - $P_{fulcrum}$: 支点
 - P_{action} : 作用点
 - D_{pf} : 力点・支点間の距離
 - D_{af} : 作用点・支点間の距離
 - function : 機能
- (Power=Distance=Balance) g

ここで , type には第 1 種から第 3 種 of テコの種類 , $P_{power} \cdot P_{fulcrum} \cdot P_{action}$ にはそれぞれ力点・支点・作用点の世界座標系での位置座標 , D_{pf} 力点支点間の距離 , D_{af} には作用点・支点間の距離 , function にはテコの 3 つの機能「力増幅・距離減衰 , 力減衰・距離増幅 , つりあい」のいずれかが記述される .

4 ハプティックビジョンに基づく機能推定

図 4 に全体の処理の流れを示す . まず , 能動視覚により物体を観測し多視点距離画像を獲得する . それらを 3 次元ボクセル空間に投影し , 物体のボリューム表現を生成する . 次にシーンに含まれる関節物体の形状と安定平衡姿勢を解析し , テコの力点・支点・作用点の位置とそれらの相対位置関係を比較しとテコのパターン候補の優先度リストを生成する . さらに , 推定した力点座標に口ボツ

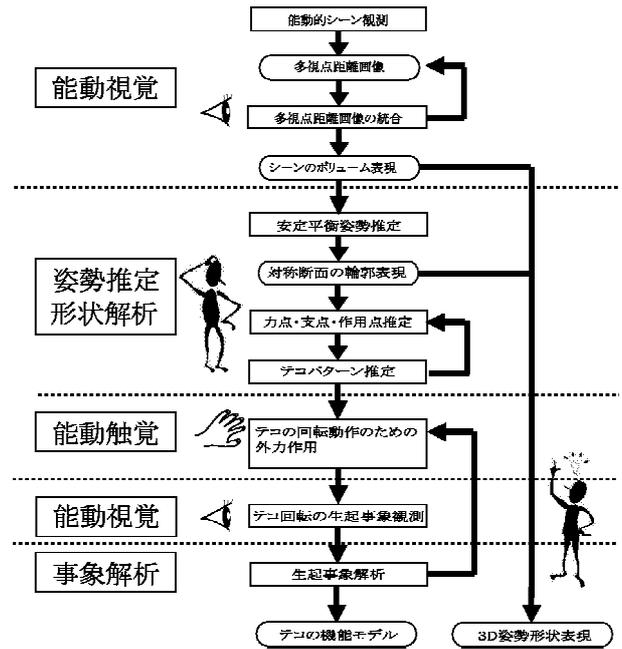


図 4: 処理の流れ

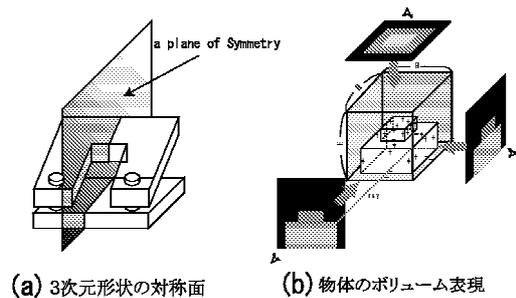


図 5: 機能からの形状推定のアプローチ

トハンドにより能動的に接触し , 物体に既知外力を作用する . この際 , 生じたテコの回転事象を能動視覚と能動触覚を用い観測することによって関節物体の持つテコの機能情報を抽出する .

4.1 機能するための安定平衡姿勢

人工物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平衡な姿勢を保つことが重要である . つまり図 5(a) に示すように , 物体が機能する姿勢にあるためには鉛直面に対して対称性を持つと考えられている . 以上より , 対象となる物体について以下のことを仮定する .

- 2 物体は均質である .
- 2 物体は水平面に置かれ , 安定平衡姿勢を保つ .
- 2 物体は少なくとも 1 つの重心を含む鉛直な対称面を持つ .

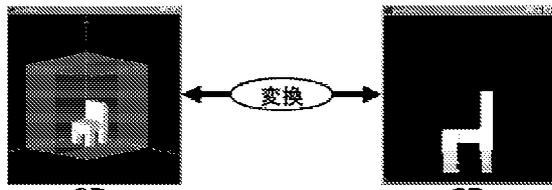


図 6: 3次元形状と対称断面の距離画像

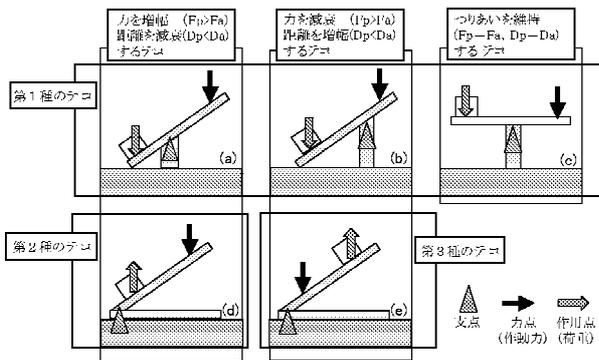


図 7: 水平面上で機能するテコのパターン

4.2 「機能から形状推定」アプローチに基づく3次元形状復元

本研究では「物体の安定平衡姿勢に基づく機能から形状を推定するアプローチ」[11]に基づいてレンジファインダを搭載した能動視覚システムにより、シンの多視点距離画像を獲得する。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。対称面への投影距離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。この処理を各観測点にて再帰的に行うことにより、形状復元に有効な多視点距離画像を自動獲得する。次に図5(b)に示すように獲得された多視点距離画像を、3次元ボクセル空間に投影し、シンの3次元ボリューム表現を生成する。

4.3 安定平衡姿勢の抽出の形状解析に基づくテコパターン推定

本研究では対称面が重心を含む鉛直面に着目し、対称面に投影される断面輪郭形状を解析することにより、テコの支点・力点・作用点を推定する。本研究では動作を伴う関節物体を対象としているため、テコの回転中心となる支点抽出が重要な要素となる。そこで対称面における断面輪郭の傾き不連続点から、物体のパーツ分割のための関節点を抽出し、支点として選出する。なお、対象物体は

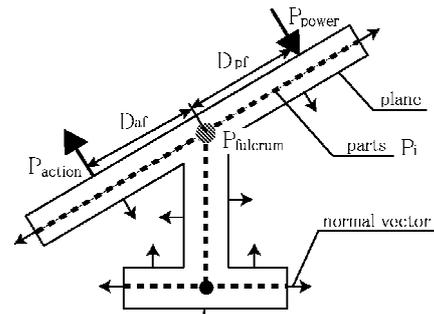


図 8: 断面輪郭形状表現

水平面に置かれ安定平衡姿勢にあると仮定しているため、図3に示したテコパターンは図7のように置き換えることが可能である。

4.3.1 断面距離画像の解析

まず、物体のボリューム表現より、対称面を xy 平面とする距離画像を生成する。次にテコ機能を推定するための各ステップの処理を行う。

以下に各ステップ毎の処理について説明する。接触面候補の抽出

対称面の距離画像から抽出される輪郭から直線部分を抽出する。直線部分は3次元空間内で対称面に垂直な平面として推定できる。また対象物体に安定に外力を作用させるため、平面の法線方向を外力作用時の方向ベクトルとする。得られた線分とボリューム表現における対称面に直交する面との対応に基づいて、以下の条件を満たすものを接触面候補として抽出する。

- 2 接触点の近傍十分な面積を有する
- 2 接触点の近傍に障害物が存在しない
- 2 接触面と対称面は直交する

支点候補点の選出

断面距離画像から抽出される輪郭形状を用いて骨格線を抽出し、さらに骨格線の傾き不連続点を用いて、物体を関節単位のパーツ(直線セグメント)集合に分割する。接触面候補を含むパーツと交差するパーツとの交点を支点候補点とする。

テコパターンの推定

支点候補点と水平面との位置関係、支点候補点と接続するパーツ間の交差角度を基に、図7に示したテコパターンとの照合を行う。テコパターンに合致すれば、現在の支点候補点を支点として決定し、さらに力点・作用点の推定を行う。これらの

処理を各支点候補点に対して繰り返し行うことによって物体のテコ機能を推定する。

4.3.2 安定平衡姿勢の形状記述

物体のポリウム表現と、前節で得られた対称面の断面輪郭形状の表現から、安定平衡姿勢の形状を以下のように記述する。

StablePosef P_g : 物体重心座標
 $P_{symmetry}$: 対称面 (法線, 座標)
 P_{cross} : 断面輪郭形状表現
 V : 物体のポリウム表現 g

ただし、 P_g はポリウム表現 V の3次元重心位置を表す。て図8に断面輪郭形状表現を示す。断面輪郭形状には断面輪郭形状の線分 (plane) 及び法線 (normal vector), 物体の関節単位のパーツ (parts), テコの機能情報 ($P_{power}, P_{fulcrum}, P_{action}, D_{af}, D_{pf}$) などが含まれる。

4.4 機能推定のための能動触覚

図9に示すように、入力の特コ機能モデルに記述された、推定テコのパターンを認識するための処理を示す。

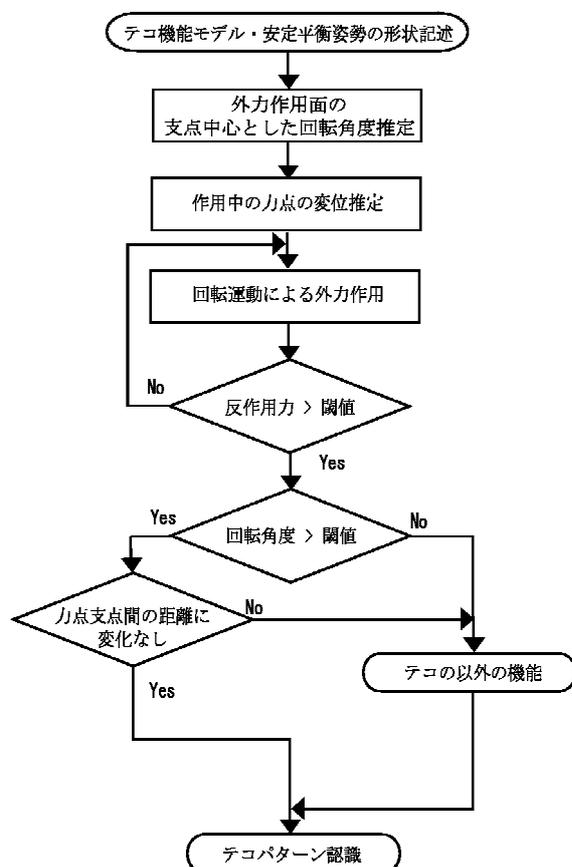


図9: 能動触覚処理の流れ

4.4.1 "Pushによるテコ回転運動" 事象の生起

テコの原理として、支点を中心に力点は回転移動することが挙げられる。また、接触面に対し外力を垂直に作用させることが、最も効率良く力を伝えることができる。そのためには、接触面の回転移動中の変位を知る必要がある。

全体の関係を図10に示す。ここで、形状解析から得られた力点・支点・作用点をそれぞれ $P_{power} \cdot P_{fulcrum} \cdot P_{action}$, 回転後を $P_{power}^0 \cdot P_{fulcrum}^0 \cdot P_{action}^0$ とする。また、接触面の法線ベクトルを N とし、回転後の法線ベクトルを N^0 とする。

まず、テコの機能モデルから支点力点間の距離 D_{pf} を抽出し、次に支点を中心とし D_{pf} を半径とする弧を算出する。ここで物体は剛体であるため、外力作用による回転移動で力点位置の軌跡は、抽出された円弧を描くことが予測される。最後に、軌跡と物体領域または水平面との衝突点を算出し、接触面の回転可能角度を μ_{max} とする。

以上より、接触面上の推定力点 P_{power} に N 方向の外力を作用し、接触面を $\mu \cdot \mu_{max}$ 回転させる事象を生起する。

4.4.2 テコ回転運動事象の観測

ハプティックロボットの能動触覚より生起されたテコ回転運動事象を、観測ロボットを用いて実時間観測する。観測ロボットの視線方向は、回転事象を安定に観測できるように、物体の対称面の法線方向と視線方向を一致させる。視点位置は、物体の重心が画像の中心になる位置とする。

テコ回転運動事象における、接触面の変位および物体の姿勢を確認するため

- 2 接触面の傾き変位
- 2 力点・作用点の位置変位
- 2 接地面と水平面間の角度変位

を観測する。

4.4.3 テコ回転事象の解析

前節までに得られた情報から、テコ回転運動事象を解析する。図9に示すように、反作用力が任意の閾値より大きくなるまで、あるいは回転角度が μ_{max} を越えないように、力点 P_{power} に外力を作用する。作用終了後、実際に接触面の回転した

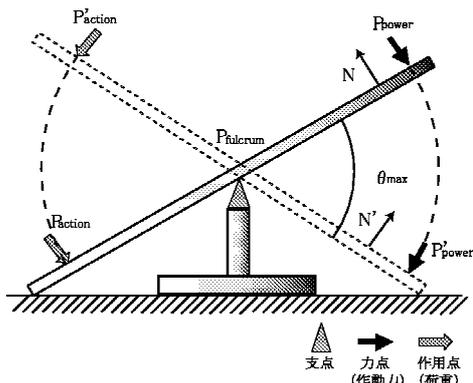


図 10: 回転移動前後のテコ

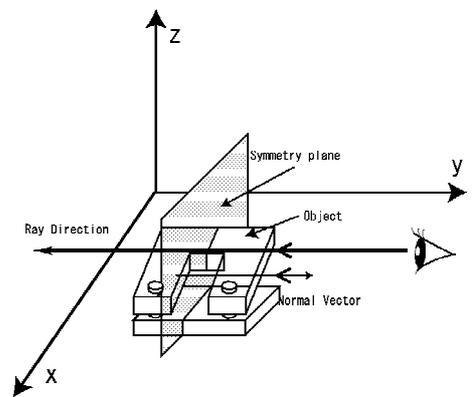


図 11: 観測視点の推定

角度が任意の閾値より小さければ、テコの機能ではないと判断し終了する。ここで回転角度が閾値より大きければ、回転運動中に、力点支点間が常に等距離であるかどうかを、力点の軌跡から判定する。もし、等距離運動をしていれば、接触面が支点を中心に回転運動していると判断し、推定テコパターンを認識する。

5 実験

5.1 実験環境

本実験では、ハプティックビジョンの画像獲得用ロボットとして三菱電機製ロボットマニピュレータ RV-E4N を使用し、CKD 製レンジファインダ CubicScope および東芝製 CCD カメラ IK-C40 を搭載した。CubicScope の解像度は 512×242 pixel ($\Phi x = \text{約 } 0.2\text{mm}$, $\Phi y = \text{約 } 0.5\text{mm}$) である。また、外力作用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、ISHIDA 製デジタル定量秤 MG-6000 の部品ロードセルユニットを搭載した。外力作用ロボットは定格の負荷を用いて物体に Push 操作を行っている。これらのロボットマニピュレータおよびロードセルユニットは、自作 PC (CPU: AthlonMP1.4Gz,

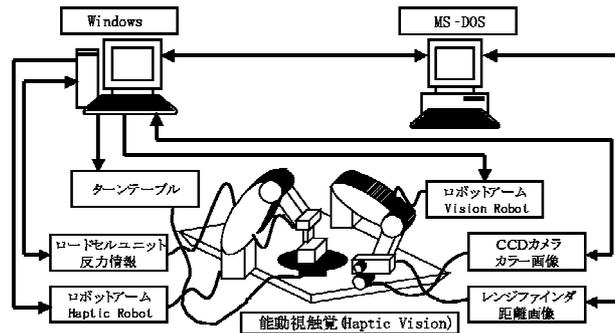
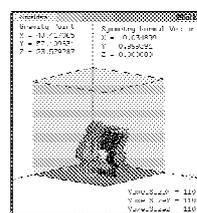
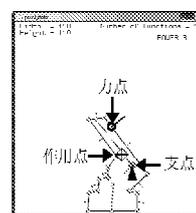


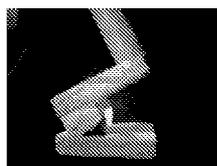
図 12: システム構成



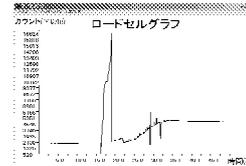
(a) 3次元形状



(b) 形状解析結果



(c) 外力作用結果



(d) 触覚情報

```

lever { type      : Type II (power,action,fulcrum)
      Ppower    : (-142, -417, 197)
      Pfulcrum  : (-154, -416, 175)
      Paction   : (-148, -416, 181)
      Dpf      : 25.08mm
      Daf      : 8.49mm
      function   : Power(Rpower:2.95, Rdistance:0.339) }
    
```

(e) 機能モデル

図 13: 実験結果 (穴開けパンチ)

OS:Windows2000) から RS-232C を通じて制御される。CCD カメラも同 PC で Canopus 製ビデオキャプチャカード (PowerCapturePro) を用いて制御される。また、CubicScope は Gateway 製 PC (CPU:PentiumPro120Mz, OS:MS-DOS6.2) から、CKD 製 CubicScope 制御ソフト NetCubic を用い TCP/IP を通じて制御される。本実験のシステム構成を図 12 に示す。回転運動に際して、接触面の回転可能角度 μ_{\max} の 70% 以上の回転が認められれば、テコパターンが認識できたとする。また、ロードセルカウント値の上限を 10000 カウント (1 カウント 0.4g) とし、上限を超えた場合はロボットの動作を強制終了させる。

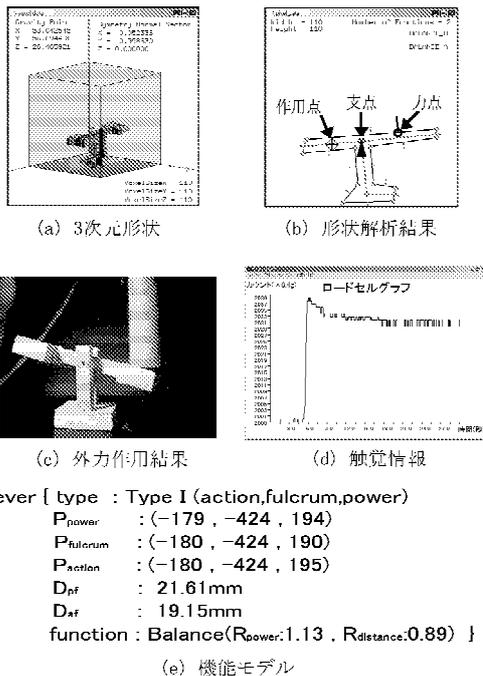


図 14: 実験結果 (天秤)

5.2 実験結果

穴あけパンチを対象に本システムで実験をおこなった。ハプティックビジョンシステムに基づき多視点距離画像を獲得し、推定された3D形状のポリウムデータを図13(a)に示す。物体形状を解析した結果を、図13(b)に示す。また、ハプティックビジョンに基づく外力作用による動作結果を図13(c)に、ロードセルカウント値の変化を図13(d)のグラフに示す。これらの結果から、抽出された機能モデルを図13(e)に示す。同様に天秤の模型を用いて実験をおこなった。実験によって得られた結果を図14に示す。

6 まとめ

ハプティックビジョンに基づき、関節物体のテコの機能情報を自動的に抽出し、記述する方法を提案した。対象物体の3次元形状を解析し、ロボット制御されたPush操作により既知外力を対象に作用し、その結果、生じられたテコ回転運動事象の観測からテコ機能を抽出した。ハプティックビジョンシステムを用いた実験結果から、提案手法が関節物体のテコ機能情報の推定に有効であることを示した。

今後は、作用点にかかるカフィードバックの計測、道具の作用対象および人体サイズとの関係な

どを考慮に入れ、物体の機能を推定する手法を検討する予定である。また、PickUp動作を伴う道具への拡張なども考えられる。

参考文献

- [1] Lederman, S.J., and Klatzky, R.L.: "Hand movements: A window into haptic object recognition.", *Cognitive Psychology*, 19, pp.342-368, 1987.
- [2] 田中弘美, 安部慶喜, 山岡勝, 田島諭, 佐藤高志: "ハプティックインターフェース実現のための能動触覚", *情報研報*, C V I M 111-10, pp.73-80, 1998.
- [3] 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", *情報研報*, C V I M 119-6, pp.41-48, 1999.
- [4] 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.
- [5] Luca Bogoni and Ruzena Bajcsy: "Interactive Recognition and Representation of Functionality", *CVIU*, Vol.62, No.2, pp.194-214, Sep. 1995.
- [6] 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, Oct. 1995.
- [7] Zoran Duric, Jeffrey A. Fayman, and Ehud Rivin: "Function From Motion", *IEEE PAMI*, Vol.18, No.6, June. 1996.
- [8] Kevin Green, David Egger, Louise Stark and Kevin Bowyer: "Generic Recognition of Articulated Objects through Reasoning about Potential Function", *CVIU*, Vol.62, No.2, pp.177-193, Sep. 1995.
- [9] Louise Stark and Kevin Bowyer: "Achieving Generalized Object Recognition through Reasoning about Association of Function to Structure", *IEEE PAMI*, Vol.13, No.10, Oct. 1991.
- [10] David Marcaulay, 歌崎秀史: "道具と機械の本", 岩波書店, 1999.
- [11] 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.1-A, pp.136-140, Aug., 1996.