

ハプティックインターフェイス実現のための能動触覚

田中弘美 安部慶喜 山岡勝 田嶋諭 佐藤高志

立命館大学 理工学部 情報学科

E-mail : {hiromi, abe, masaru}@cv.cs.ritsumeai.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/カフィードバック装置も実用化されてきた。仮想空間において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、弾性等の力学特性と物体相互間の拘束関係を表す「触覚データ」が必要である。そこで本稿では、実世界に忠実で且つ「触覚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の自動構築に向けて、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「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を提案する。まず能動視覚により物体を観測し、その3次元形状や姿勢、重心位置等の幾何的特徴を推定する。次に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、その結果として生起された事象、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、力点位置や外力の方向、速度などを自動的に選択決定し、「触覚データを効果的に且つ安定に獲得するために適当な外力」を作用するよりパイロット事象を生起させる。

人工物から構成される室内実験環境の構成と初期実験結果を、1) 安定姿勢に基づく能動的3次元形状推定、2) Push操作による重量推定、3) Push操作による支持接触拘束の判定、について示す。

キーワード 能動視覚、能動触覚、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、触覚データモデリング

Toward Automatic Construction of Haptic-Interface based Virtual Space Simulator

H.T. Tanaka, Y. Abe, M. Yamaoka, S. Tajima, T. Sato

Department of Computer Science, Ritsumeikan University

E-mail : {hiromi, abe, masaru}@cv.cs.ritsumeai.ac.jp

Abstract Virtual Reality technology provides a new methodology for human interface with realistic sensation. Recently, haptic interface has been intensively studied for the virtue of providing a sense of "understanding the real world". Moreover, 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 observation-based automatic construction of virtual space simulator based on active sensing and realtime image understanding methodology, which enables objects in the virtual space to behave, and change realistically with virtual force, and to be operated with a sense of real 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 Active vision, Active Haptics, Haptic Interface, Virtual Object Operation, Virtual Space Simulator, Tactile Data Modeling

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イス技術として、医療、デザイン、通信、アミューズメントなど広範な分野に急速に浸透している。最近では「触わる」インターフェイス実現のための触覚/力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。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やその現象ふるまい、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。

触覚の重要性は、「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」と表現されている。VR空間におけるハプティック (触覚) インターフェイスの実現は、操作体験や操作実験が「理解や評価」に重要な役割を果たしている分野、例えば、教育・訓練、設計、福祉等においては極めて有用である。

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、触覚及び力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。

一方コンピュータビジョン分野においては、3次元形状計測技術の進展が著しく、近年はレーザーレンジファインダの高速化小型化かつ軽量化が実現され¹⁾、複雑な物体の3次元形状や表面テクスチャ、さらにその変形の様子を多方向から非接触で観察し、動距離画像データとして獲得することも可能になって来た。また獲得されたレンジデータは、あたかも暗い空間で未知の物体を手探りでなぞって得る触覚データの性格を持つことも確認されている。

そこで本研究は、3次元実時間画像計測・認識技術を用いて、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、物体を非接触で観測した実時間画像データから自動構築する方法を確立することを目的とする。本研究はレンジデータの、視覚としてより触覚データとしての特長の洞察に基づき、レンジセンサを用いた能動視覚の、視覚のみならず触覚センシングとしての可能性と有効性を積極的に追求し、観察ベース

の仮想空間シミュレータを自動構築しようとする試みである。

以上の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自動構築に向けて、本論文で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「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を提案する。まず能動視覚により物体を観測し、その3次元形状や姿勢、重心位置等の幾何的特徴を推定する。次に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、その結果として生じられた事象、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、力点位置や外力の方向、速度などを自動的に選択決定し、「触覚データを効果的に且つ安定に獲得するために適当な外力」を作用するよりパイロット事象を生起させる。

本報告では人工物から構成される室内実験環境の構成と初期実験の内容を、1) 安定姿勢に基づく能動的3次元形状推定と、Push操作による2) 重量推定、および3) 支持接触拘束の判定、の各ステップにおける実験結果から、提案構想の実現可能性を示す。

2 能動触覚構想の概要

図1に、能動触覚に基づき、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処理過程の示す。まず、1) 能動視覚システムにより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) その結果として生じられた事象、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、効果的に且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。

3 能動視覚による物体観測

本研究では、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 [4] を用いる。図 ?? のようにロボットアームの先端に取り付けた CCD カメラの 3 次元位置と視線方向を制御することにより 3 次元物体を観測し、形状復元や姿勢抽出に重要な、三面図を含む、多視点画像を自動獲得する。

3.1 安定姿勢における形状対象性を用いた能動的 3 次元形状推定

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、対象の 3 次元物体モデルを再構成する。

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

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。各観測点において観測方向とシルエットをそれぞれ中心軸と切断面とする直方一般化円筒の集合積から対象物体の 3 次元形状を再構成する。

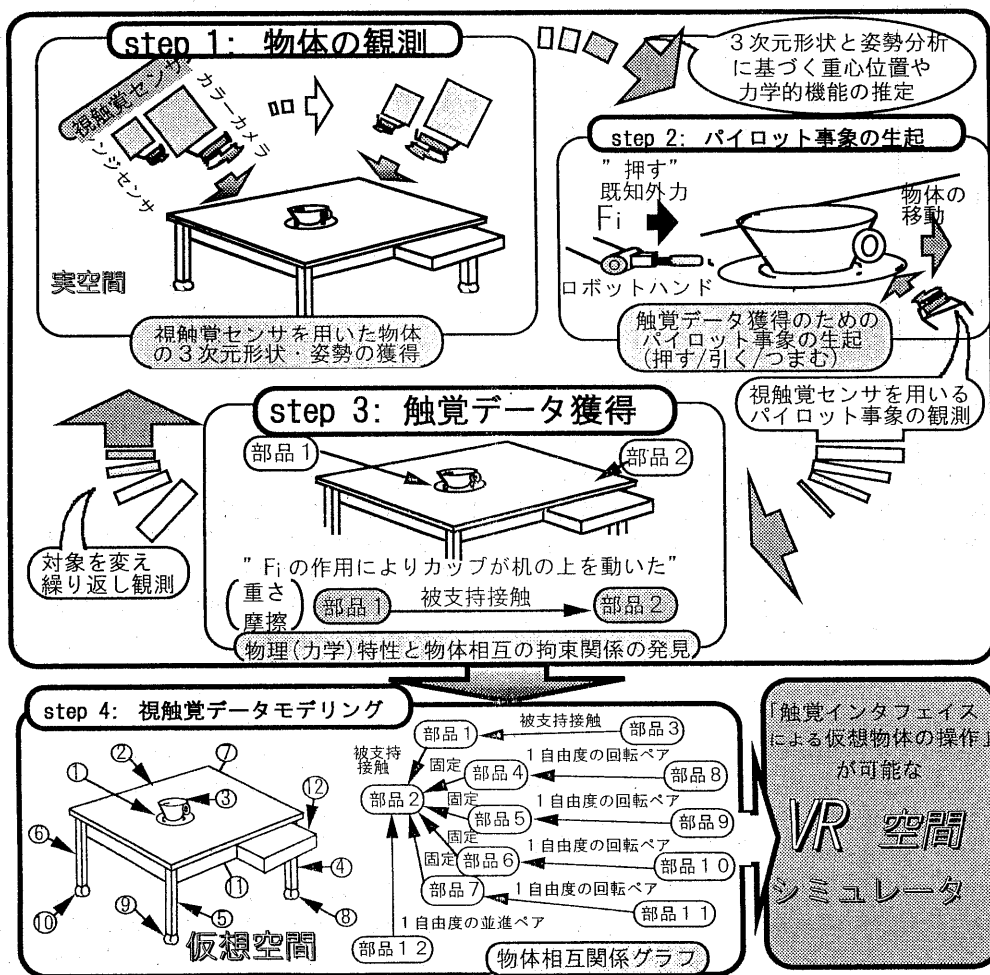


図 1: 研究開発構想図

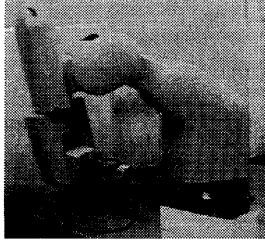


図 2: 能動視覚システム

3.2 機能するための安定姿勢と形状対称性

本研究では室内シーンに存在する人工物を対象物としている。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。つまり物体が、外力が働く方向を含む面に対して対称性を持つことである。従って、物体には外力である重力が作用しているから安定姿勢に置かれている場合は、重力方向を含む面に対して対称性を持つと考えられる [3]。以上の考察より、対象物体について以下を仮定する。

- ・ 水平面に設置され、重力に対して安定である。
- ・ 少なくとも一つの対称面を保持する。
- ・ 少なくとも一つの対称面は重力方向を含む。
- ・ 均質で空洞や観測不能な凹部分は存在しない。

3.3 対称軸の推定

観測画像において、抽出された物体のシルエット領域 $S(x, y)$ の重心 $G = (m_x, m_y)$ はシルエット領域 $R(x, y)$ に含まれる各点の x, y 座標の総和を $R(x, y)$ 内の総点数で割った値となる。鉛直上方画像 I_{top} から、物体のシルエット領域 R の重心 G_{top} を通過する対称軸 l を求める。対称軸 l の角度 θ は式 (1) で表される。

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{-\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 + 4}}{2} \right\} \quad (1)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{m_{xx} - m_{yy}}{m_{xy}} \quad (2)$$

$$m_{xx} = \sum \sum (x - m_x)^2 S(x, y) \quad (3)$$

$$m_{xy} = \sum \sum (x - m_x)(y - m_y) S(x, y) \quad (4)$$

$$m_{yy} = \sum \sum (y - m_y)^2 S(x, y) \quad (5)$$

本研究では、分裂・増殖型の符号付き動的輪郭モデル [5] を用いて、入力画像中の穴領域を含んだすべての複数領域の輪郭と輪郭間の階層的な位相構造 (図 3) を抽出する。領域の外輪郭とともに穴領域輪郭の形状対称性を分析し安定に対称軸を求めている。

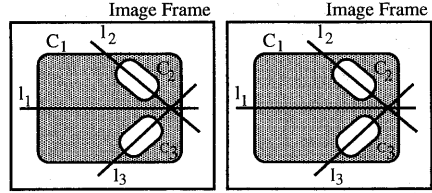


図 3: 符号付き動的輪郭モデルを用いる対称軸推定

3.4 対称面の推定

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

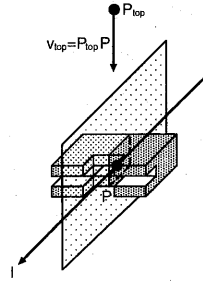


図 4: 対称面の推定

3.5 次観測点の選択

V_{top} より観測した際の対象物体の対称性を検証するために、図 5 に示す対称面上に相対する前後 2 点と、対称面に直交する直線上に相対する左右 2 点の合計 4 点の次観測点を選択する。 $V_{front}, P_{rear}, P_{right}, P_{left}$

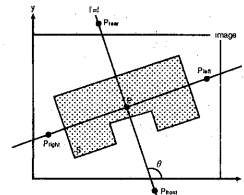


図 5: 対称面に基づく次観測点の選択

は推定された 4 つの次観測点で、 \mathbf{g} は重力方向である。

P_{top} において求められる \mathbf{v}_x と \mathbf{v}_y を含む平面を図これらの方向ベクトルにより、 V_{top} からベクトル \mathbf{v}_{top} 方向に観測した際の次観測点 $V_{front}, V_{rear}, V_{right}, V_{left}$ における観測方向ベクトル $\mathbf{v}_{front}, \mathbf{v}_{rear}, \mathbf{v}_{right}, \mathbf{v}_{left}$

が式 (6), 式 (7) で表される.

$$\mathbf{v}_{front} = -\mathbf{v}_{rear} = -\mathbf{l} \quad (6)$$

$$\mathbf{v}_{right} = -\mathbf{v}_{left} = -\mathbf{n} \quad (7)$$

従って, これら 4 つの観測方向ベクトルと注視点 P , および観測点と注視点との距離 d より次観測点 $V_{front}, V_{rear}, V_{right}, V_{left}$ は式 (8) で表される.

$$V_{front/rear/right/left} = V - d\mathbf{v}_{front/right/rear/left} \quad (8)$$

3.6 物体中心座標系の設定

能動視覚システムにより多視点画像を獲得する際の観測座標系 (X_w, Y_w, Z_w) から物体中心座標系 (X_b, Y_b, Z_b) を決定する方法を述べる. 図 6 に示すように能動視覚システムにより多視点画像が獲得される. まず, 安定姿勢を仮定しているために重力方向 V_{top} から観測するため, その重力方向の逆方向を Z_b 軸とする.

重力方向から観測した画像 I_{top} の対象物体領域の対称軸 1 (複数存在する場合は長軸) を X_b 軸, その直角方向を Y_b 軸とする. 次に, 対称面側方からの観測方向 $V_{left/right}$ とそれぞれの画像 $I_{left/right}$ の重心 $G_{left/right}$ を用いて対称面 S との交点を求め原点位置 O_b を決定する. 画像座標系 (X_I, Y_I, Z_I) において各画像の中心 (物体領域の重心に一致) を原点, すなわち物体中心座標系の原点を物体重心になるように定義する. この座標系の決定のために, 物体座標系と観測座標系が対応し, 3 次元形状が推定できる.

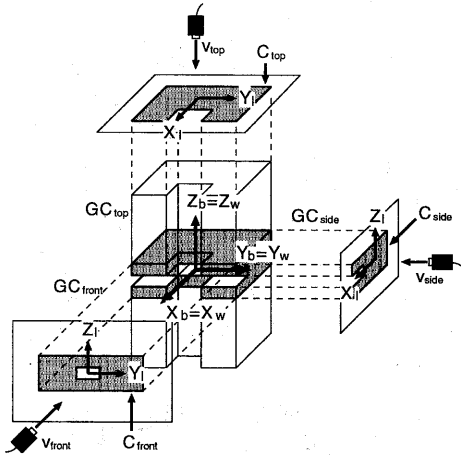


図 6: 座標系の変換

3.7 3次元形状の再構成

観測方向と対象物体のシルエット像をそれぞれ中心軸と切断面とする直方一般化円筒の形状を推定す

る. 各視点において推定された直方一般化円筒の集合積を求めることによって, 対象物体の 3 次元形状を推定する. 物体形状を推定するプロセスを図 7 に示す.

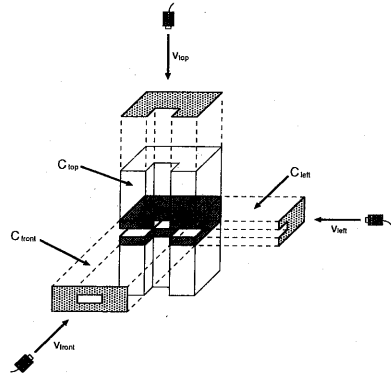


図 7: 物体形状の推定

4 Push 操作による重量の推定

4.1 静止摩擦

図 8 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力 μN , 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

$$F - \mu N = 0 \quad (9)$$

$$Mg - N = 0 \quad (10)$$

を満たしている. N を消去して整理すると,

$$M = \frac{F}{\mu g} \quad (11)$$

式 (11) より, 静止摩擦係数 μ が既知であるならば, 物体が動き出す瞬間の力 F が分かれば, 質量 M が求まる.

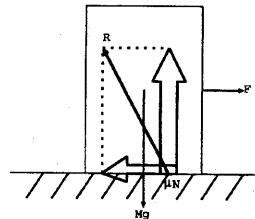


図 8: 作用反作用

4.2 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 [9].

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.

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、接触面の間の圧力や相対速度が特別に大きいとか逆に小さくない限り、かなり一般的に成り立つものである。また、基本的に摩擦係数は接触する面の性質によって決まるとされている。代表的な値を表1に示す [6]。

表 1: 静止摩擦係数

摩擦片	摩擦面	μ_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

しかし、実際は静止摩擦に及ぼす接触時間や温度、湿度など、さまざまな状況によって微妙に変化する。

本研究では、仮想現実空間において仮想物体をあたかも実際に操作しているかのような「仮想現実感」を得るために必要となる、おおよその重量を自動獲得することを目的としているので、10~20%程度の誤差は問題としない。

4.3 重量推定のための外力生成

本研究では既知の静止摩擦係数と、ロボットハンドによる外力によって物体の重量を推定するので、ロボットハンドによる外力が式(11)の力 F と大きさ・方向が共に等しくなるような力点 P_f と方向ベクトル f を求める。

式(11)は作用・反作用の法則によって成り立っているので、力 F の方向ベクトル f と摩擦力 μN の方向ベクトル f_f の関係式

$$f = -f_f \quad (12)$$

が成り立つ。ここで、摩擦力は物体の移動を妨げるように働くので、方向ベクトル f_f は物体が直線運動をすれば一定となる。

本研究では、対象物体の密度は一定であると仮定しているので、物体の体積を二等分する面、つまり3.4節で求めた対称面 S に沿って方向ベクトル f が存在すれば、物体は回転することなく直線運動し、方向ベクトル f_f は一定方向に決まる。

また、式(10)のつりあいの法則が成り立つためには、 F が垂直抗力 N に影響を与えることを防ぐために摩擦が生じる接触面に平行に力を加えなければならない。

さらに、物体の安定性を保つために、物体の3D重心 G と方向ベクトル 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、唯一の方向ベクトル f が以下のように求められる。

$$f = (x_f, y_f, z_f) \in S \quad (13)$$

ただし、 $x_f, y_f, z_f = 0$ は単位ベクトル f のそれぞれ x, y, z 成分とする。

また、力点 P_f は方向ベクトル f と物体表面との交点（視点 V_{front} から得られた2次元画像の2D重心 G_{front} ）となる。ただし、力点部分に穴領域は存在しないものとする。図9にその例を示す。

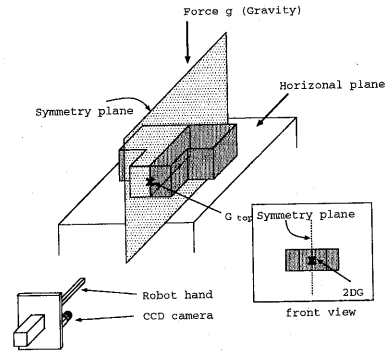


図 9: 重量推定のための力点の選択

5 支持接触拘束の発見

5.1 部分/部位間の分割

“form from function” で提案された機能のこととなる部位間の分割の一般的な原則として、“Limb-based” と “Neck-based” の2つの分割手法を挙げている [10]。最初に人間が直観的に分割を判断するのは、この “Limb-based” で、枝となる部分の分割である。幾何学的には、図10(a)に示すように輪郭線の不連続な凹点どうしの自然な分割である。“Neck-based” とは、図10(b)の様に、物体形状が極小となる線で分割できることを示している。しかし、本研究では人工物間の相互拘束関係を抽出するための接触を押すのみに限定している。このため、“Neck-based” での実際の拘束関係を抽出することは困難である。したがって、分割予想として “Limb-based” に基づいて分割を行う。



(a)limb-based (b)neck-based

図 10: 部分/部位間の分割点の抽出

5.2 支持接触線の抽出

本研究では、能動視覚システム [4] によって得られた多視点画像の符号付き動的輪郭モデルにより得られる輪郭形状の曲率の大きい特徴点を凹凸特徴点として抽出する。これは、輪郭線を多角形近似したときの頂点となる点であり、この点を用いることで各視点画像間の対応を取ることができる。

次に、求められた凹凸特徴点から、“Limb-based”で分割できる凹頂点对を抽出する。この特徴点对からできる水平な線分を支持接触線と呼ぶ。本研究では、対象物は重力方向の外力のみ安定な姿勢を保持すると仮定したので、支持接触線は、水平であることが推定される。そこで、水平な凹頂点对を抽出し、その2点を結ぶ線分を支持接触線として用いることにより接触候補面の推定を行う。

5.3 支持接触面の抽出

1つのサイドビューで支持接触線が発見から、その線分を含む水平な面において分割した2つの部分物体間に支持接触拘束関係の可能性を導くことができる。この面を接触候補面と呼ぶ。この接触候補面を抽出するために、さきほど支持接触線が存在した観察方向の水平面上での垂直方向から物体を観察する。

この視点で対応の取れた同様な支持接触線が存在すれば、これら2本の線分を含む面を接触候補面として抽出する。そして、この接触候補面で分割できる領域の重心をとり、ロボットハンドから重心に向かう外力を生成することで被支持接触部分を押しことにより物体間の支持接触関係を抽出する。

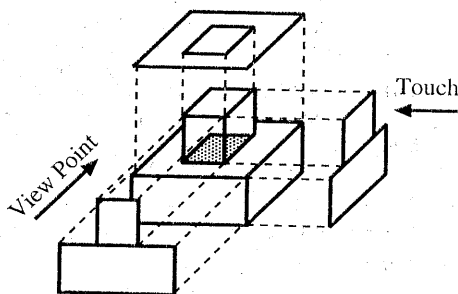


図 11: 接触候補面

6 支持接触発見のための外力の生成

本研究では、カメラの視線方向と外力の生成方向を同一方向とし、しかもカメラ視線位置からロボッ

トハンド先端の位置が既知であるとし、ハンドアイキャリブレーションの問題を回避している。まず、外力生成点をカメラで注視させ、そのカメラ視線位置にロボットハンドを移動させる。後に、ロボットハンドを物体観測時の視線方向に水平に移動させることで、外力生成点に外力を与える。次に、対象物体がど

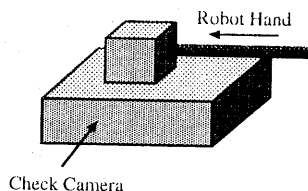


図 12: 外力生成と物体動きの観察

のような動作をしたのかを検証する必要がある。本研究では、前述の通り、外力の生成を、重力方向に対し水平な観測面 (front view, right view) についてのみ行なう。外力を生成した結果、物体はその視線方向の軸上を移動することとなる。従って、物体の動きの検証は、例えば front view から、外力を生成した場合、right view のように、視線方向が重力と垂直な面に対し、垂直な視線方向から観察することにより求めることができる。これは、観測した画像の符号付き動的動的輪郭モデルによる輪郭線より、外輪郭線の重心と分割可能領域の重心を求めることで、どの点で物体が移動したのかを判断する。結果、支持接触がある時には、外輪郭線の重心と分割可能物体の重心との距離が変化し、支持接触が存在しなければ、これらの距離は、変化しない。もし、物体間に支持接触が見られる場合には、自由度1を加え、再帰的にすべての外力生成点において外力を生成し、物体間相互関係グラフを抽出する。

7 実験結果

7.1 3次元形状再構成結果

能動視覚システムにより得られた車の模型の top, front, right におけるシルエット画像を図 13の (a), (b), (c) に示す。また図 14に CAD システムを用いて獲得した3次元形状再構成の結果を示す。



(a) Top view (b) Rear view (c) Right view

図 13: 模型自動車の二値化結果

7.2 重量の推定

本研究では、ロボットハンドによる外力を ISHIDA 製の MG-6000 デジタル定量秤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 で表すカウント値を 50msec の間隔で得ることができる。

また、対象物体には同じ材質で静止摩擦係数が既知 ($\mu=0.3$) である重さの異なる物体を使用した。ただし、この静止摩擦係数 ($\mu=0.3$) は事前に同じ材質の異なる既知の重量の物体を用いた実験の平均値から求めたもので、温度や湿度による微小変化は本研究の目的に十分無視できるものである。

図 15 に時間とカウント値の結果を示す。また、表 2 に各実験における最大外力値および推定重量の結果を示す。

表 2: 重量推定結果と実重量の比較

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

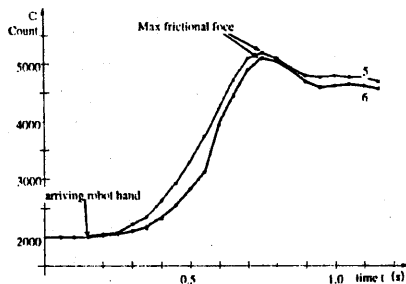


図 15: 外力 f と時間 t の f - t グラフ

7.3 物体間相互拘束の抽出結果

図 16(a) に符号付き動的輪郭モデルによる対象物の輪郭形状、(b) に “Limb-based” による分割結果とその外力生成点、(c) に推定された 3 次元形状を示す。(d) には、本実験で得られた物体 A, B 間の自由度 2 を表す物体相互関係グラフを示す。

8 まとめ

実世界に忠実で且つ触覚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の自動構築に向けて、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「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を提案した。

また、人工物から構成される室内実験環境における初期実験結果から実現可能であることを示した。

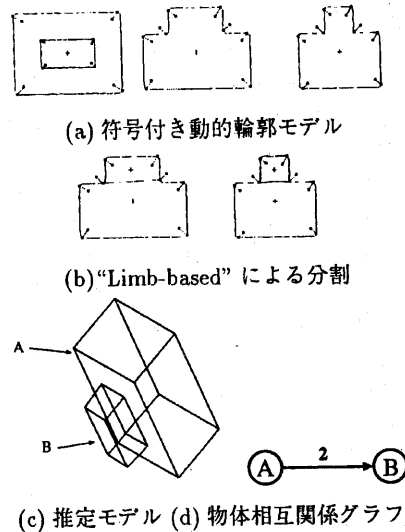


図 16: 支持接触関係の抽出結果

参考文献

- [1] D. H. Ballard “Reference frames for animate vision,” Proc. Int. Joint Conf. Artificial Intelligence, pp.1635-1641, 1989.
- [2] Y. Aloimonos “Active vision revisited,” Active Perception, pp.1-18, Lawrence Erlbaum Associates, Pub, 1993.
- [3] David J. Kriegman “Computing stable poses of piecewise smooth objects,” CVGIP : Image Understanding, vol.55, no.2, Mar., pp.109-118, 1992.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 渡辺昌昭: “物理学 I,” 共立出版, 1987.
- [7] 入江敏博, 山田元: “工業力学,” 理工学社, 1980.
- [8] 今井功: “力学,” 丸善, 1975.
- [9] 河野彰夫: “摩擦の科学,” 裳華堂, 1989.
- [10] Kaleem Siddiqi and Benjamin B. Kimia “Parts of Visual Form: Computational Aspects,” IEEE PAMI, Vol.17, No.3, pp.239-251, March, 1995.