

能動触覚に基づく水平接触拘束関係の抽出

山岡勝 田中弘美

立命館大学 理工学部 情報学科

E-mail : {masaru,hiromi}@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／力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、物体相互間の拘束関係を表す「触覚データ」が必要であり、我々は3次元画像計測・認識技術を用いて、能動触覚アプローチにより、観測画像データから触覚情報を自動抽出し、重力下の実世界に忠実か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、観測画像データから自動構築する研究を進めている。そこで本稿では、能動触覚に基づき水平面における重力下の剛体間の支持接触拘束関係を自動抽出し記述する手法を提案する。レンジセンサを用いる能動視触覚システムによる実験結果から、実世界に忠実な剛体間の支持接触関係が抽出されることを確認した。

Extacting Relational Constraints Among Objects Based on Interactive Vision Approach

Masaru Yamaoka Hiromi T.Tanaka

Department of Computer Science,Ritsumeikan University

E-mail : {masaru,hiromi}@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 extract relation constraints among objects under gravity based on interactive vision approach, towards vision-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 sence 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.

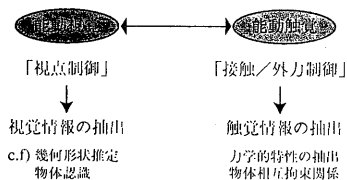


図 1: 能動視覚と能動触覚

1 はじめに

バーチャルリアリティ (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次元映像を用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」を提供することにより、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。最近では、「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」と表現される触覚の重要性から、「触る (ハプティック)」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に向けて勢力的に研究が進められている [1] [2] [3]。また、コンピュータビジョンの分野においても能動的に物体に接触し作用することにより、安定な物体認識に導く能動認識の研究も進められている [4] [5]。

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。そこで我々は、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 [6] [7]。

我々は図1に示すように、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「接触/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構想を提案した [6]。図2に示すように、まず、1) 能動視覚システム

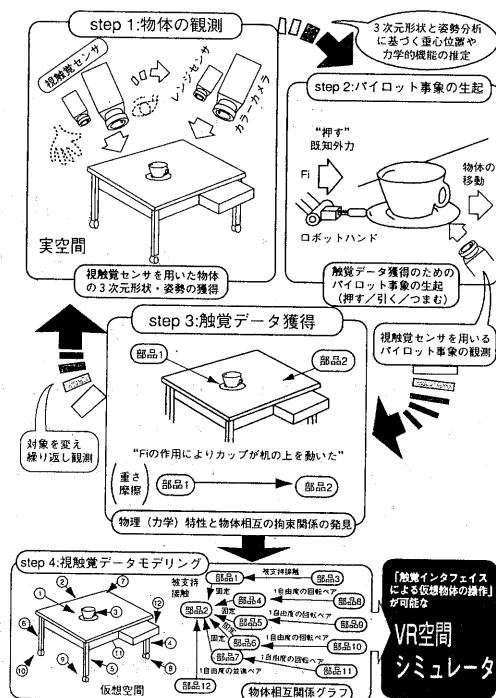


図 2: 能動視触覚システム全体構想図

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、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、効果的にか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) することによりパイロット事象を生起させ触覚データを獲得可能にさせる。

本研究では、シーンの物体は水平面に置かれ重力下で安定であるという仮定の下に、能動触覚に基づき、水平面における剛体間の支持および接触拘束関係を自動抽出し記述する方法を提案する。まず、レンジセンサをロボットアームに搭載した能動視覚システムによりシーンを観測した多視点距離画像を獲得し、それらを3次元ボクセル空間に投影し、シーンのボリューム表現を生成する。次にそのボリューム

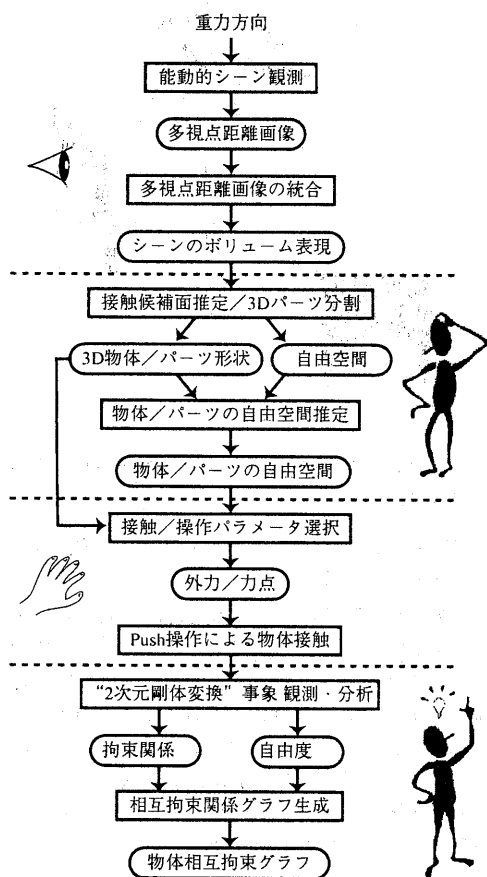


図3: 処理の流れ

ム空間から凹ルーフエッジを抽出し、それらを連続することにより接触候補面を抽出し、対称物体を3Dパーツ集合に分割する。シーンのボリューム表現から各パーツの自由空間を推定し、パーツの形状に基づき、相互拘束関係を最も効率的に発見するための接触点位置と力の方向を選択し、ロボットハンドにより能動的に物体に作用する。外力作用により生じた水平移動事象を観測することにより、物体間に存在する支持接触関係とその自由度を決定し相互拘束関係グラフを生成する。図3に処理の流れを示す。

また本研究では、水平面に置かれた剛体間の2次元相互拘束関係を抽出することを目的としていることから、ロボットハンドによる物体への操作は、「押す/PUSH」に限定することが可能である。

レンジセンサを用いる能動視触覚システムによる実験結果から、実世界に忠実な剛体間の支持接触関係が抽出されることを確認した。

2 能動的シーン観測

近年は、3次元形状計測技術の進展が著しく、レーザレンジセンサの高速化、小型化かつ軽量化が実現され [8]、高精度な距離画像を獲得することも可能となってきた。本研究は、従来の CCD カメラを用いる能動視覚 [9][10] に代えて、レンジセンサを用いた能動視覚システムにより、複数の物体から成るシーンの複雑な3次元構造を安定に正確に実時間観測する。

2.1 「機能から形状推定」アプローチに基づく多視点距離画像獲得

ロボットアームの先端に取り付けたレンジセンサの3次元位置と視線方向を制御することによりシーンを観測し、物体の3次元形状復元や自由空間抽出に重要な、多視点距離画像を自動獲得する。

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」[11]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、観測距離画像における対象物体の対称面を推定し、対称面への投影距離画像を得るための前後左右の観測点を導き出す。

レンジセンサは、初めに高さ 0 となるレーザキャリブレーション平面を定める必要がある。すなわち、能動視覚システムにより抽出する多視点距離画像は、すべてカメラからレーザキャリブレーション平面までで構成される空間内に存在する物体を観測したものである。

図4に示すように、まず、鉛直上方より観測された距離データの重心を通過する重力方向の直線とレーザキャリブレーション平面とが交わる点を原点 0 とし、重力方向を z 軸、距離データの対称面の法線を x 軸とする座標系を定義することができる。カメラからキャリブレーション平面までの距離を H すると鉛直上方の観測視点を $(0, 0, H)$ と表すことができる。また、前方の観測視点は、鉛直上方より観測した最大物体高 Z_{max} と重心を通る物体の x 軸方向の幅を $x_{gravity}$ 、 y 軸方向の幅を $y_{gravity}$ とすると、前方の観測点は、 $(H - \frac{x_{gravity}}{2}, 0, \frac{\max_{height}}{2})$ 、右側方の観測点は、 $(H - \frac{y_{gravity}}{2}, 0, \frac{\max_{height}}{2})$ と表すことができる。

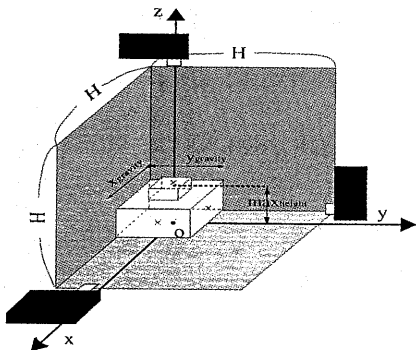


図 4: 物体の観測点

2.2 シーンのボリューム表現生成

能動視覚システムにより獲得された多視点距離画像を、それぞれの視点位置と視線方向、キャリブレーション平面からの奥行き距離を表す画素値を用いて3次元配列のボクセル空間に投影し、シーンの3次元ボリューム表現を生成する。図5に示すように、まず、距離画像の各画素において、視線に平行なレイ（光線）をボクセル空間に定義し、レイに沿って視点から物体表面までの各ボクセルのボクセル値を自由空間を表す0(=free)と設定する。次に、表面点よりキャリブレーション面までのボクセル値を物体内部として1(=body)と設定する。また、物体と背景の境界で抽出されるジャンプエッジ点はその両側のボクセル値を物体内部側であれば凸エッジであることから“+”を、背景側であれば、凹エッジ(Lジョイントエッジ)であることから“-”と設定する。

3 3次元パーツ分割

3.1 接触候補面の推定

観測されたシーンの物体集合を個々の物体/3Dパーツ（以下、パーツと略す）分割するためには接触の可能性のあるパーツ間の接触候補面を抽出する必要がある。本研究では、人が分割を予測する可能性の大きい“limb-based” [12] に従い、Lジョイントを表す凹ルーフエッジにより囲まれる平面を接触候補面として抽出する。また、本研究ではシーンにおける支持接触拘束は水平面上に制限していることから、支持接触面は水平面に平行であると仮定している。なお、本研究では、観測された多視点画像をアダプティブメッシュを用いた画像の並列領域分割 [13]

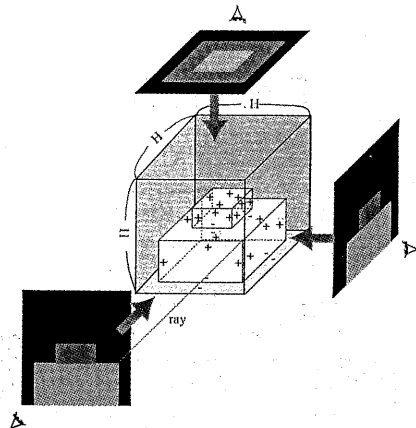


図 5: 多視点距離画像の統合によるシーンのボリューム表現生成

を用いて、物体領域とジャンプエッジ、凹凸ルーフエッジを抽出している。

まず、シーンのボリューム表現の床面($z=0$ のボクセル断面)において、凹エッジボクセルを連結して囲まれた領域から第1階層の水平支持接触候補面(群)を抽出する。同様に、上方にシーンのボリューム表現を水平面に平行に(1mm間隔に相当)スライスし、凹エッジボクセルが存在する高さにおけるスライス画像から凹エッジボクセルを連結して、次階層の水平支持接触候補面を抽出して行く。

3.2 3次元パーツ推定と拘束関係の初期化

シーンのボリューム表現と接触候補面をもとに、物体内部を表すボディボクセル集合を凸形状のパーツに対応する部分集合に分割する。次に、各パーツ間の接触関係を示す拘束関係グラフを初期化する。

拘束関係グラフは、物体間の隣接関係と支持接触の階層構造を表しており、拘束関係グラフのルートノード“FL”は床面を表し、各ノードは個々のパーツを表す。その属性としてパーツの3次元形状、重心、体積、密度等が記述される。親子ノード間のアークはパーツ間の支持接触関係を表し、その属性として拘束の種類、自由度、接触面の形状と重心等が記述される。兄弟ノード間のアークは、同一の水平面上における隣接関係を表す。一つの親ノードが複数の n 個の子ノードを持つ場合は、親パーツの水平支持面上において、 n 個のパーツが存在することを示す。また、すべての葉ノードは、共通の自由空間ノード

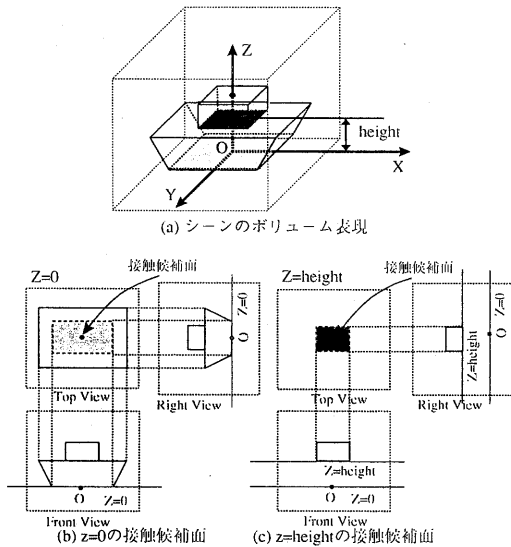


図 6: 接触候補面の抽出

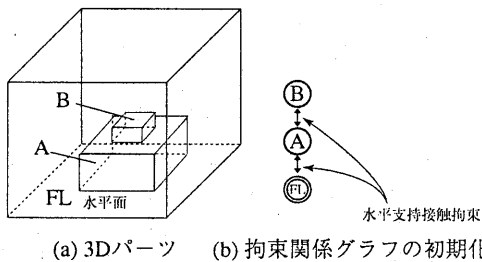


図 7: 3D パーツ分割と拘束関係グラフの初期化

“Free” に連結され、それらが Pick up 可能であることを表す。図 7(a) に示すシーンの拘束関係グラフは、各アークの拘束種類、並進と回転の自由度を未定として、図 7(b) のように初期化される。

3.3 パーツの自由空間の推定

物体を操作するためには、個々のパーツが移動可能な自由空間の推定する必要がある。本研究では、パーツ分割により初期化された拘束関係グラフから支持接触関係にある親子パーツ対を選び出し、パーツ間の接触候補面と親パーツの水平支持面の情報を用いて、子パーツの自由空間を推定する。拘束関係グラフの各階層において以下の 2 つの場合が考えられる。

- 水平支持面に唯一のパーツが存在するとき

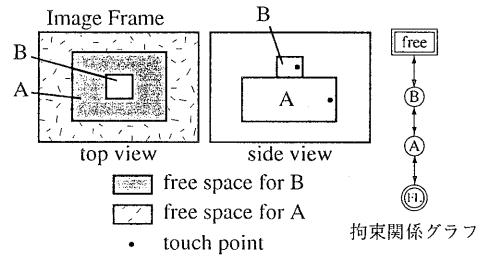


図 8: 多階層支持接触パーツ間の自由空間

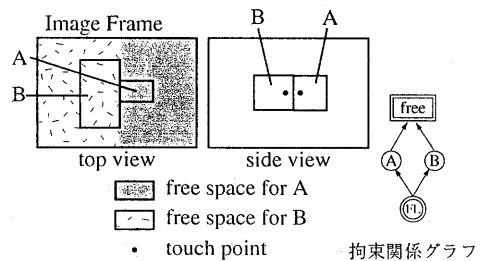


図 9: 同一階層支持接触パーツ間の自由空間

同一階層に唯一の物体が存在する場合には、支持面からの落下を避けるため親パーツの水平支持面が自由空間と推定される。図 8 のように、パーツ A はパーツ B の自由空間を既定し、また、パーツ A は、水平面全体が自由空間となる。

- 水平支持面に複数のパーツが存在するとき

親パーツの持つ水平支持面上に複数のパーツが存在する場合には、その 1 つのパーツを操作する場合、他のパーツに影響を及ぼさない自由空間を設定する必要がある。図 9 に示すように、ジャンプエッジをはさんで AB 間は隣接関係であると判断し、そのパーツ側の半空間を自由空間とする。

4 能動的支持接触拘束抽出

物体間の相互拘束関係を抽出するには、物体に力作用させたときに物体がどのような振る舞いをするかの分析が必要となる。一般に剛体の自由度は、重心移動の並進の自由度 3 と重心回りの回転軸の方向を示す自由度 2 とその回転角の自由度 1 の合計 6 の自由度を持つ。本研究では、2 自由度の並進と 1 自由度の回転を表す物体間の水平面上の 2 次元相互拘束関係を抽出することを目的としているために、ロ

拘束関係	全非支持接触	半非支持接触	-	レール型	軸支持
並進自由度	2	2	2	1	0
回転自由度	1	1	0	0	1
優先度	1	3		2	1

Pushによる 水平移動 事象						
-----------------------	--	--	--	--	--	--

図 10: 2次元剛体変換による支持接触拘束の分類

ロボットハンドによる操作を、水平面における「Push」に限定することができる。

4.1 支持接触拘束の種類と優先度

2次元の自由度は並進に対して2、回転は1存在する。図10にこれら自由度の組み合わせによる拘束関係を示す。全非支持接触とは、物体が単に接している状態で外力の作用に対しては自由度3が存在する。半非支持接触は水平面上に、複数物体存在し外力生成に対してもう一方の物体が干渉する接触である。レール型接触は、回転の自由度は持っておらず並進も自由度1しか存在しない接触関係である。例えば、机の引き出しや窓などがある。軸支持接触は回転自由度は存在するが並進自由度がない接触関係である。PUSH操作では、皿に乗ったコーヒーカップなどがある。また、自由度3の組み合わせとしては、並進自由度2、回転自由度0の時や並進自由度1、回転自由度1のときも考えられるがこのような対象シーンは考えにくい。また、これらを抽出するときの優先度としては1操作で確認できる全非支持接触、軸支持接触が高く、次に1操作では抽出することが困難なレール型接触、また水平面上に複数物体存在するときは最も低い。このときは、物体操作で、他方の物体に対しての干渉を避けるような外力作用点を抽出する。

4.2 “Pushによる水平移動”事象の生起

拘束関係グラフを用いてロボットハンドにより作用する接触/力作用点を抽出する。まず、物体間に存在するすべての拘束関係を、全非支持接触と予測する。物体間が全非支持接触関係であれば、並進の自由度2、回転の自由度1を持つことになり、そのパーツの自由空間上で任意方向に動かすことができる。

まず、パーツの重心を通る水平線で、モーメント量が最大となる端点を作用点として抽出する。すな

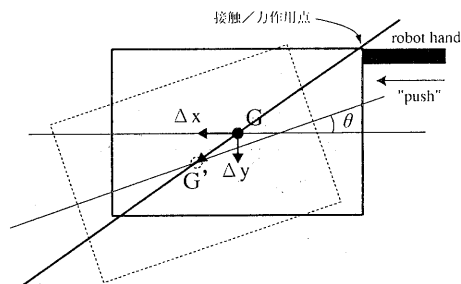
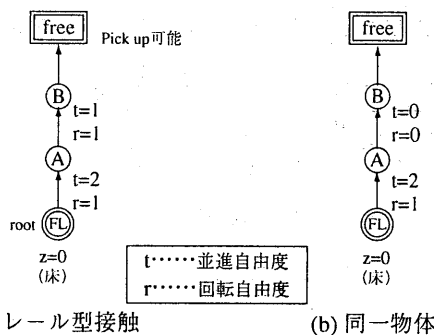


図 11: Pushによる水平移動



(a) レール型接触

(b) 同一物体

図 12: 物体間の拘束関係グラフ

わち、作用点は物体重量が作用方向に対して、均等にならないように（作用により回転を生じさせる）求めることで、1回のPush操作により3自由度の有無を確認することができる。自由度3の移動を発見できない場合はパーツの3D形状とその自由空間に基づいて、4.1節の2次元剛体変換の発見の優先度に従って、接触/力作用点、外力方向を選択し、自由度を決定していく。

これらのパーツの振る舞いを観測するには、接触面を含む水平面を鉛直上方から観測する（図11）。並進の自由度2においてはパーツ重心の並進移動、回転自由度に関しては対称軸の傾きの変化、対称軸が存在しない場合にも、パーツ最長軸の回転を観察することにより求める。その結果から拘束関係グラフの各アークの拘束関係と自由度の属性値を更新する。図12にレール型接触と同一物体の場合の拘束関係グラフを示す。

5 実験結果

本実験では、能動触覚システムを用いて、図13の入力世界に対して、以下の3種類の実世界に忠実な

接触関係を抽出した。

- 観測物体のパーツが単体であるとき (図 13(a))
- 観測物体のパーツが複数あり、これらパーツ間に非支持接触が存在する場合 (図 13(b))
- 観測物体のパーツが複数に分割されるが、外力作用後パーツ間に接触関係が存在しない場合 (図 13(b))

また、これらに対してのレンジファインダ能動視覚システムの形状観測結果、またその推定モデルを入力実世界 1 に対しては、図 14、入力実世界 2 に対しては、図 15 に示す。また、入力実世界 2 に対しては 2 パーツ間に支持接触関係が存在するモデルと完全に、固定した物体により、重力方向に 1 階層上のパーツに外力を作用したときの物体の振る舞いと、各パーツの重心位置と対称軸の傾きの変化を、前者を図 16 に、後者を図 fig:ouitsu に示す。また、最後に本実験風景を??に示す。

6 まとめ

能動触覚に基づき水平面における重力下の剛体間の支持接触拘束関係を自動抽出し記述する手法を提案した。この能動触覚に基づき、重力方向の外力に対して安定でかつ水平方向に接触面を持っている複数物体に対して、レンジファインダにより物体を観測し、その形状をから、接触候補面を抽出し 3D パーツに分割した。さらに、ロボットハンドにより PUSH 操作を施し、レンジセンサを用いる能動視触覚システムによる実験結果から、実世界に忠実な剛体間の支持接触関係が抽出されることを確認した。物体間に存在する自由度を求め、その自由度の組み合わせにより物体間に存在する接触関係を自動抽出し、拘束関係グラフを生成した。

本研究の一部は (財) 立石科学技術振興財団の研究助成により進められました。ここに謝意を表します。また、本論文作成に多大なご協力をいただいたコンピュータビジョン研究室の松本卓氏、実験にご協力いただいた田中士郎氏に深謝致します。

参考文献

- [1] 田中厚子, 広田光一, 金子豊久: “力覚表現を考慮した仮想物体の変形手法,” 情報処理学会論文誌, vol.39, No.8, pp.2485-2493, 1998.
- [2] 大脇崇史, 中坊嘉宏, 並木明夫, 石井 抱, 石川正俊: “視触覚モダリティ変換を用いたリアルタイム実環境仮想接触システム,” 信学論 D-II, vol.J-81-D-II, No.5, pp.918-924, 1998.
- [3] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 島脇純一郎: “仮想空間における仮想手による道具操作のための知識とモデル,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.3, No.3, pp.167-175, 1998.
- [4] 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.
- [5] 天野 晃, 右田剛史, 浅田尚紀: “視覚情報と触覚情報の強調による重心位置の推定,” 情処研法, vol.CVIM113-6, pp.41-48, 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ース実現のための能動触覚,” 情処研法, vol.CVIM111-10, pp.73-80, 1998.
- [7] 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.
- [8] 服部数幸, 佐藤幸男: “スキャン式符号化法による小型高速レンジセンサ,” 信学論 D-II, vol.J-76-D-II, No.8, pp.1528-1535, 1993.
- [9] D. H. Ballard “Reference frames for animate vision,” Proc. Int. Joint Conf. Artificial Intelligence, pp.1635-1641, 1989.
- [10] Y. Aloimonos “Active vision revisited,” Active Perception, pp.1-18, Lawrence Erlbaum Associates, Pub, 1993.
- [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.I-A, pp.136-140, Aug., 1996.
- [12] Kaleem Siddiqi and Benjamin B. Kimia: “Parts of Visual Form: Computational Aspects,” IEEE PAMI, Vol.17, No.3, pp.239-251, March, 1995.
- [13] 李 相善, 田中弘美: “適応メッシュを用いた画像の並列領域分割,” 情処 MIRU'98 講演論文集 II, pp.137-142, 1998.

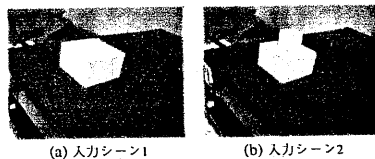


図 13: 入力シーン

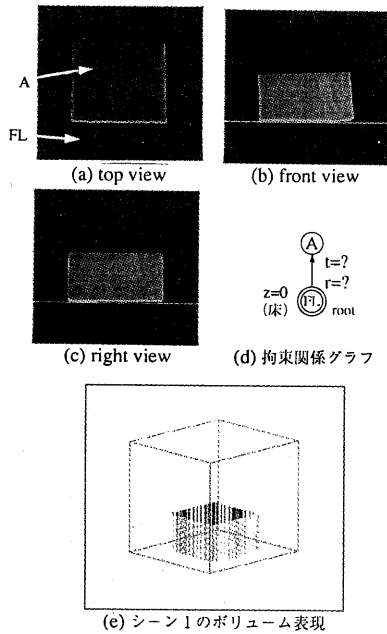


図 14: 入力シーン 1 のモデル

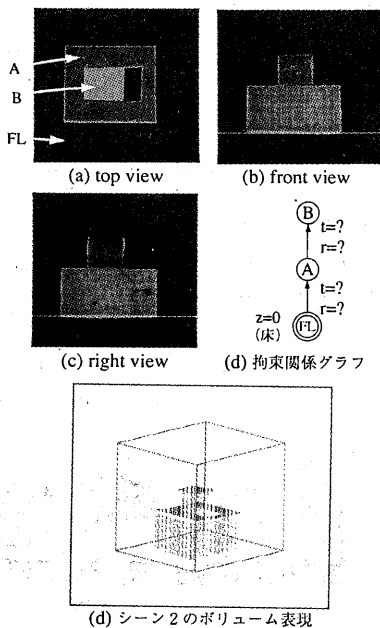


図 15: 入力シーン 2 のモデル

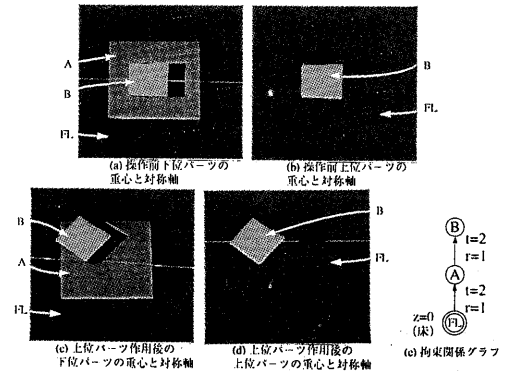


図 16: 物体間のパーツ分割と作用後の振る舞い-非支持接触の場合-

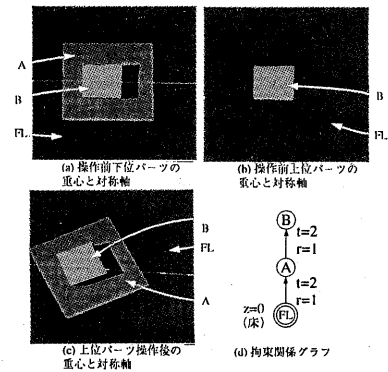


図 17: 物体間のパーツ分割と作用後の振る舞い-同一物体の場合-

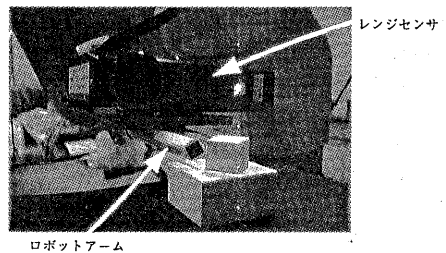


図 18: 能動触覚システム