仮想空間シミュレーションによる関節物体の力学的機能推定

大田 博義　　木村 朝子　　田中 弘美
立命館大学 理工学部 情報学科
滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1
E-mail : {hiroyoshi, asa, hiromi}@cv.cs.ritsumei.ac.jp

あらまし　最近，視覚情報に加え触覚情報の重要性から，触覚／力フィード 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．また我々は，これらの人間の能動的探索により獲得される，剛さ，柔軟度，重さ，相互拘束関係等の触覚情報を自動獲得することを目的とし，「触れて視る」ハプティックビジョン構想を提案した．そこで本論文では，ハプティックビジョンに基づき物体の動的挙動の観測により獲得された関節物体の力学構造モデルを用いた仮想操作シミュレーションにより，つまり，*analysis by simulation* アプローチにより，関節物体の力学的機能を推定する方法を提案する．単一関節物体であるクルミ割り，ピンセット等の力学構造モデルを用いた仮想シミュレーション実験結果から，提案手法が関節物体の持つ力学的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，関節物体モデリング，仮想空間シミュレーション， ハプティックインターフェイス

Analysis by simulation approach to inferring function of an articulated object

Hiroyoshi Ota　　Asako Kimura　　Hiromi T. TANAKA
Department of Computer Science, Ritsumeikan University
1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu-shi, Shiga, Japan
E-mail : {hiroyoshi, asa, hiromi}@cv.cs.ritsumei.ac.jp

Abstract　Recently, there are growing needs for haptic exploration to estimate and extract physical object properties such as mass, friction, elasticity, relational constraints, function, etc.. In this paper, we propose a novel analysis by simulation approach to inferring function of an articulated object with Haptic vision, which is a vision-based haptic exploration approach toward an automatic construction of reality-based virtual space simulator, by augmenting active vision with active touch. We first apply this technique to construction of a dynamic structure model of an articalated object and use this model to infer function of object through virtual space simulation. Experimental results show that feasibility and validity of the proposed approach.

Key words　Inferring Function, Haptic Vision, Virtual Space Simulation, Analysis by Simulation

1　はじめに

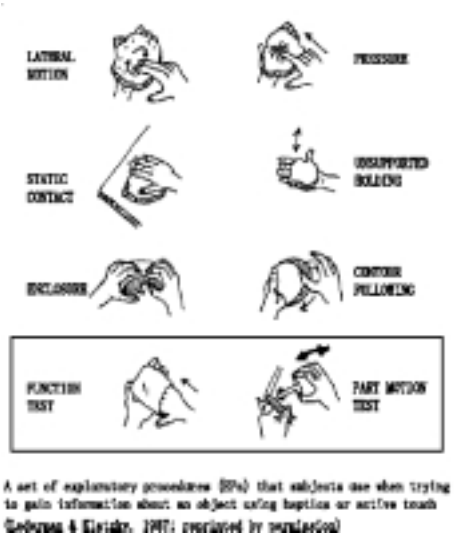
バーチャルリアリティ(VR) の新規性は，実世界に依拠した「体験」を提供することにあり，実世界に依存する現象，ふるまいに忠実なシミュレーションを実現することが本質的な課題である．VR 空間における実世界に忠実な「体験」を通して，実世界に

対する新たな「発見」や「理解」を導くことを可能にする．最近では，触覚／力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きている [1] [2].

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，人間の手による探索動作は，物体の形状，剛さ，柔軟度，重さ，温度等を探索する 6 種類の動作パターンと，物体の機能やパーツ間の接続構造や力学構造を探索する 2 種類の動作パターンから構成されている．そこで我々は、これらの手の能動的探索により獲得される，剛さ，柔軟度，重さ，相互拘束関係等の触覚情報を自動獲得することを目的とし,「触れて視る」ハプティックビジョン構想を提案した [2]．さらにハプティックビジョンに基づき，物体の力学的機能を推定するために，能動的接触によるインタラクションや動的挙動を観測することにより，関節物体の力学構造モデルを自動構築する研究を進めている [10].

物体の機能推定や認識の研究は人工知能や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 [6]，次に，栓抜き・スパナ等の単一の剛体が持つ動的な力学的機能に対象が広げられ [7]，さらに関節物体 (Articulated Objects) の動的機能推定も試みられている [11]．また，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 [8].

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動的挙動の観測により獲得された，関節物体の力学構造モデルを用いた仮想操作シミュレーションにより，つまり，*analysis by simulation* アプローチにより，関節物体の力学的機能を推定する方法を提案する．仮想空間においてユーザーにより任意に選択される，1）対象の関節物体上の力点位置，2）使用対象物体が置かれた作用点位置とその力学的特性、3）外力の大きさや向きを入力として，テコによる力の増減幅や，距離の増減幅を算出し仮想操作シミュレーションを行う。その結果が、仮想使用対象物体に及ぼす，潰れる，切れる，壊れる等の状態変化から，対象関節物体が持つ力学的機能を推定する．単一関節物体であるクルミ割り，ピンセット等の力学構造モデルを用いた仮想空間シミュレーション実験結果から，提案手法が関節物体の持つ力学的機能推定に有効であることを確認した.



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: 物体の特徴検索のための手動作パターン

2　物体の力学的機能の従来のアプローチ

物体の機能とは，辞書によると使用目的ための有用性と記されている．物体の力学的機能は，図 2 に示すように，(1) 物体の形状，(2) 要素機械 (部品/パーツ) とその素能力，(3) 使用目的，の 3 要素間の関係により記述することができる [5]．我々身の回りにある物体は，その 3 次元形状，物体を構成する部品 (以下，パーツ) 間の関節接続構造，姿勢により表される．力学的機能を持つ物体は，複数の要素機械を持ち，各要素機械は，複数のパーツから構成される．要素機械とは，物体の力学的機能を実現させる最も基本的な要素であり，対となる素能力を持つ．要素機械としては，テコ, 斜面, 輪軸, くさび, 滑車, バネなどが挙げられる [12]．また，使用目的とは，ある主体 (以下，使用主体) がその物体を用いて対象 (以下，使用対象) を操作することをいう．テコを例にとると，力増幅，距離増幅，つりあいの 3 つの素能力が対応している．これらの素能力集合の構成によって，物体がどのような能力を持つかが決定される．さらに，使用目的に応じて幾つかの素能力が選択的に用いられ機能を達成する.

初期の静的機能推定では，椅子, 机, ベッドなどを

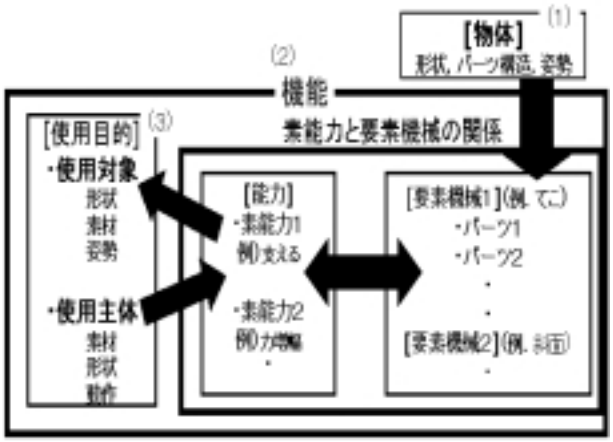


図 2: 物体の力学的機能と形状の関係 [5]

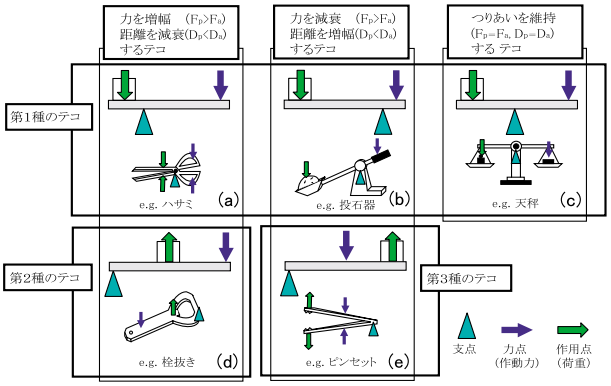


図 3: テコパターンの分類

対象とし，その３次元形状や姿勢から機能推定が行われていた [5] [6]．しかし，使用主体や使用対象が考慮されておらず，椅子や机等の物体の境界，つまり，カテゴリ分けが困難であった．最近の物体の動的機能の研究では，使用対象を導入し，物体と使用対象との接触判定から機能推定した．しかし，操作者である使用主体が考慮されておらず，作用点，力点位置は固定されていた [7]．使用主体を考慮した研究は [8] にみられ，使用主体の動作から機能を推定した．しかし，使用対象を考慮しておらず，実際に使用対象に類似動作を行った場合の機能の認識が困難であった．

任意な使用対象に作用し，任意の力点，作用点位置を選択可能となれば，安定で高信頼な機能推定が可能となる．しかし，従来のアプローチが示すように，実世界において任意の使用主体と使用対象による適切な観察環境を設定することが困難である．そこで，我々は実世界に忠実な仮想空間において，操作者 (使用主体) の使用目的に応じて，任意の使用対象を選択し，任意の力を作用させることによって，機能を推定する *analysis by simulation* アプローチを提案する．本アプローチにより，上記の問題点を克服することが可能になる．

3　力学的機能と要素機械

要素機械により物体の力学的構造は，表現され，使用主体によって発生した力がどのように使用対象に伝わるか計算できる．

テコは物体の力学的機能を実現させる最も基本的な要素機械であり，従来の動的機能の研究は，テコを要素機械として持つ物体を対象としている [7] [13] [14]．テコの構造は，剛体上にある支点，作用点，力点の３点によって特徴付けられる．テコの能力は，回転動作によって回転方向に加えられた力の大きさを変換することである．テコの種類は支点，力点，作用点のいずれが中央にくるかによって分類される [9]．

- 第１種のテコ　支点が力点と作用点の間に存在.
- 第２種のテコ　作用点が力点と支点の間に存在.
- 第３種のテコ　力点が支点と作用点の間に存在.

また力点に加わる力を 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 とした場合は, 次式が成り立つ.

$$F_p D_p = F_a D_a \tag{1}$$

式 (1) の関係より能力的に分類した場合は,

- 力を増幅するテコ　$F_p > F_a$　$D_a < D_p$
- 距離を増幅するテコ　$F_p < F_a$　$D_a > D_p$
- つりあいを示すテコ　$F_p = F_a$　$D_a = D_p$

のように分類できる．

図 3(a)(b)(c) に示すように第一種の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出来る．図 3(d) に示すように第２種のテコは増幅・距離減衰のテコとなる．図 3(e) に示すように第三種のテコは力減衰，距離増幅のテコとなる．

4 機能推定シミュレーションのための力学構造モデル

4.1 ハプティックビジョンに基づく能動的関節物体モデリング

ハプティックビジョンに基づき物体への能動的接触によるインタラクションを観測することにより，機能を持つ多関節物体の力学的構造情報を自動的に抽出し記述し，仮想空間における機能推定のためのシミュレーションを可能とする力学構造モデルを自動生成する [10].

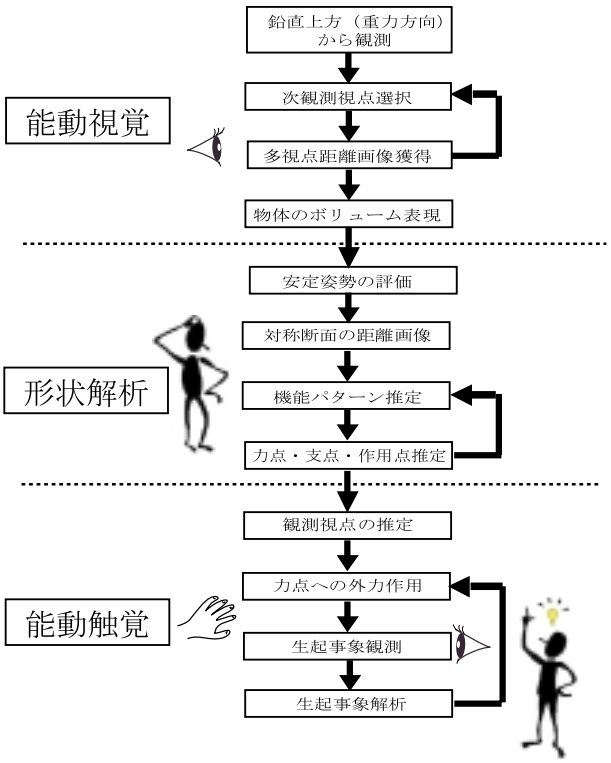


図 4: 処理の流れ

図 4 に全体の処理の流れを示す．まず，能動視触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，関節物体を推定するためにテコの力点・支点・作用点の位置とそれらの相対位置関係を比較し，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ロボットハンドにより能動的に接触し，物体に既知外力 (作動力) を作用する．この際，生起し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機能を持つ多関節物体の力学的構造情報を抽出する．

4.2 力学構造モデル

水平面上に安定平衡姿勢に置かれた関節物体のボリューム表現と，図 5 に示す，物体の対称面の断面輪郭形状の表現から，安定平衡姿勢の形状は以下のように記述される．

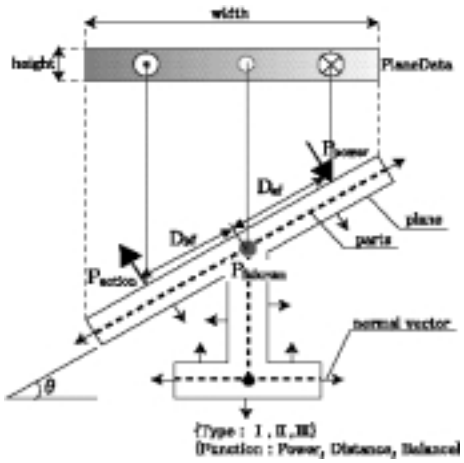


図 5: 断面輪郭形状表現

$StablePose\{$ 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 ：物体のボリューム表現 $\}$

ただし，P_g はボリューム表現 V の 3 次元重心位置を表す．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)，テコ情報が記述される．また，テコモデルは，以下のように記述される．

$lever\{$ $type$ ：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
$(Power/Distance/Balance)$ $\}$

ここで，$type$ には第 1 種から第 3 種のテコの種類，P_{power}・$P_{fulcrum}$・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

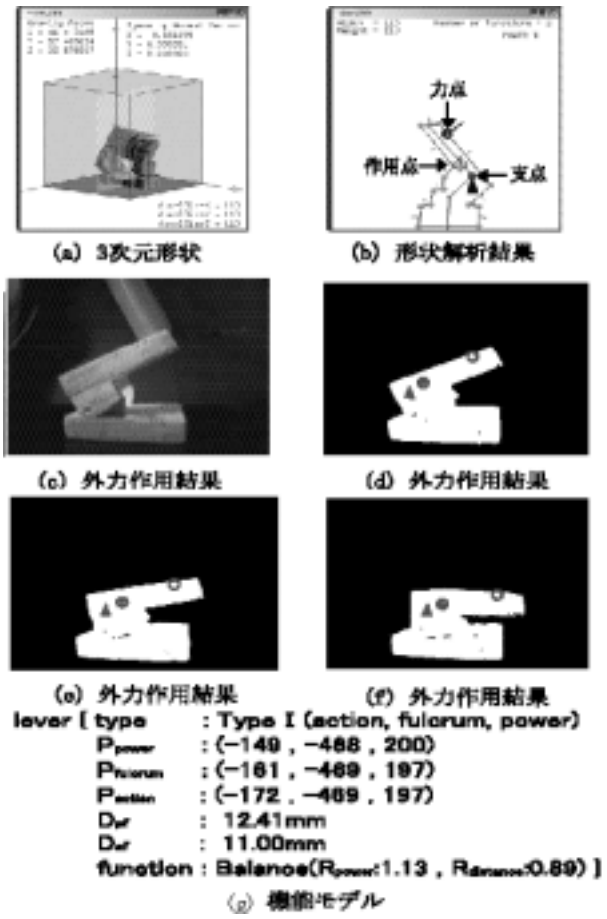


図 6: 関節物体の力学構造モデル

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」のいずれかがを記述される．

図 6 に穴あけパンチを対象にした能動的関節物体モデリング結果を示す．図 6(a) は推定された３Dボリュームデータ，図図 6(b) は，断面形状解析結果，図 6(c)(d)(e)(f) に外力作用による動作結果，図 6(g) は抽出された力学構造モデルを示している．

5　シミュレーションによる多関節物体の力学的機能推定

本研究では，最も基本的な要素機械「テコ」を持つ関節物体を対象とする．まず，関節物体を仮想空間上に置く．次に，使用主体 (以下，使用主体) はデータグローブをはめ仮想空間上で関節物体を操作する．使用主体は，探索の対象となる機能に応じた仮想の使用対象を選択し，関節物体の力学構造モデルを用いて使用対象に仮想の力を作用させ，使用対象に生じたシミュレーション結果の状態変化から機能を推定する．また，効果的に機能推定を行うためのガイド情報として，関節物体のテコモデル *lever* を用る．

5.1　使用主体と使用対象

機能推定に必要な使用主体と使用対象モデルの記述内容について述べる．

5.1.1　使用対象モデル

使用対象に起こる現象 O_{Phe} は，１つとする．現象を起こすために必要な仕事は，力と距離の積で計算できる．ただし，使用対象のサーフェス形状表現 O_s には，使用対象の現象後のサーフェス表現も記述される．使用対象モデルの記述例は，以下のとおりである．

$Object\{$　O_s　：サーフェス表現
　　O_{phe}：起こる現象
　　O_p　:現象を起こすために必要な力
　　O_v　:現象を起こすために必要な力の方向
　　O_{dis}　:現象を起こすために必要な移動距離
　　$\}$

ただし，O_{phe} に，使用対象が起こる現象，例えば，切れる, 壊れる, つぶれる等を記述する．O_p には現象を起こすために必要な力，O_v に現象を起こすために必要な力の方向，O_{dis} に現象を起こすために必要な距離を記述する．

5.1.2　使用主体モデル

使用主体モデルには，Push 操作による力 H_p を既知としモデルに記述する．実際に Push 操作は，鉛直方向に一定の力で押すと仮定する．

$Hand\{$　H_s　：サーフェス表現
　　H_p :Push 操作の力
　　$\}$

5.2　接触平面と作用平面

シミュレーションにおいて，使用主体はどの平面が接触可能で Push 操作を作用すればよいか，またどの位置に使用対象を置けばよいかが問題となる．Push 操作する平面を接触平面と呼び，ハプティックビジョンシステムによって外力を作用した平面を接触面候補として，赤色で表示する．使用対象を置く平面は，安定な平面でかつ一定以上の面積をもつ平面とした．使用対象を置く作用平面候補を青色で表示する．使用主体は，以上の表示を参考として，任意に接触平面を選択し，Push 操作により仮想力を作用する．

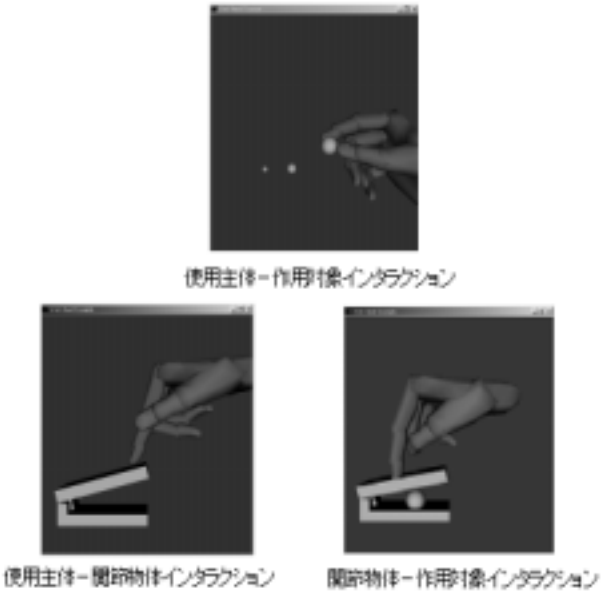


図 7: インタラクション

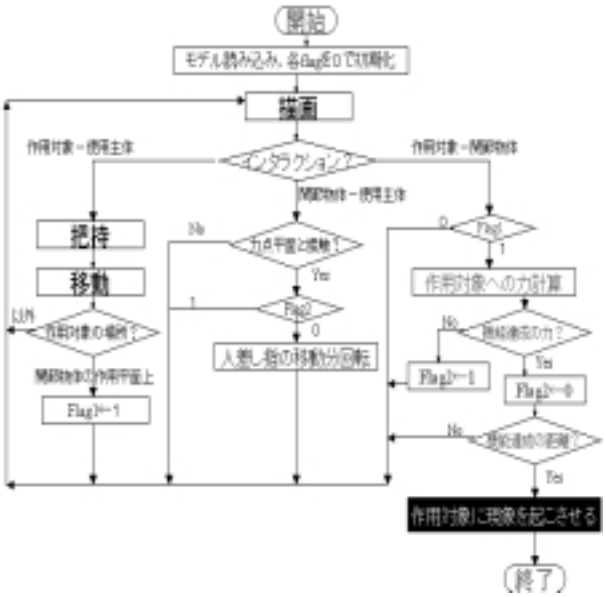


図 8: 操作シミュレーション処理の流れ

5.3 操作シミュレーション処理の流れ

まず，4 章の手順により自動的に得られた関節物体モデル *StablePose* を仮想空間上に置く．操作者 (使用主体) はデータグローブをはめ仮想空間上で仮想関節物体を操作する．操作シュミレーション処理の流れを図 8 に示す．操作者は試したい機能を決める (図 10)．すると，その機能を持つ使用主体が多数選ばれる．その中から，操作者は大きさや硬さの異なる任意の使用主体モデル選ぶ．また，関節物体を Push 操作する力を使用主体モデルに記述する．作用主体，使用主体，関節物体モデルを読み込み，操作可能なシミュレーションを構築する．まず，使用主体は，使用主体-使用主体インタラクションによって使用主体を関節物体の作用平面に置く．次に，使用主体-関節物体インタラクションによって関節物体の力点平面を Push 操作する．使用主体-関節物体インタラクション中に関節物体-使用主体インタラクションが起これば，実時間で機能達成かどうか計算する．各インタラクションの様子を図 7 に示す．実際に使用主体に機能達成の力が加わっているか否かは，コンソール出力によって表示する．操作者は，コンソール出力から情報を得て試行錯誤しながら操作する．もし，機能達成であれば，使用主体に壊れる、切れる、潰れる等の現象を起こす．その現象を見た操作者は，関節物体には，使用主体に現象を及ぼすだけの機能を持つと推定できる．

図 9: 使用目的の力学的機能に応じた使用対象の選択

5.4 テコパターン情報を用いる効率的な機能推定

本研究において，機能推定する状態を使用主体に任せた．ここでの状態とは，使用対象を関節物体の作用平面のどの位置に置き，使用主体が接触平面のどの位置を Push 操作するかを表す．しかし，操作が使用主体任せでは，どのような操作行ったらよいか分からない．そこで，テコパターンを用い，図 10 のように，ガイド情報を表示することが出来る．

5.5 関節物体に作用可能な大きさの使用対象選択

使用目的の力学的機能に応じた使用対象は幾つかあるが，関節物体の作用空間の大きさによって関節物体に作用できる使用対象と，そうでない使用対象に分けることができる．これは，物体と作用空間との論理演算によって可能である．

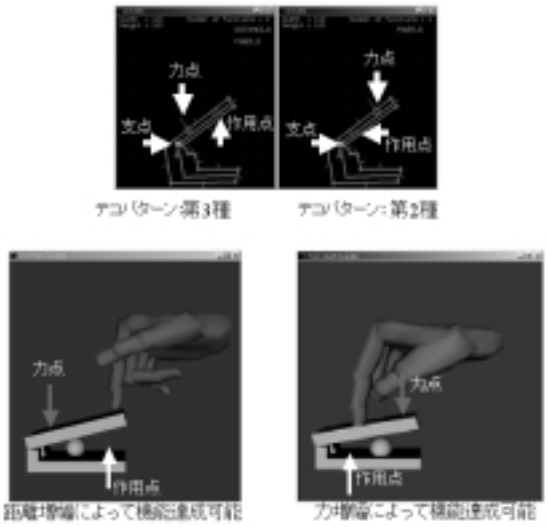


図 10: テコパターンによる力点位置及び作用点位置推定

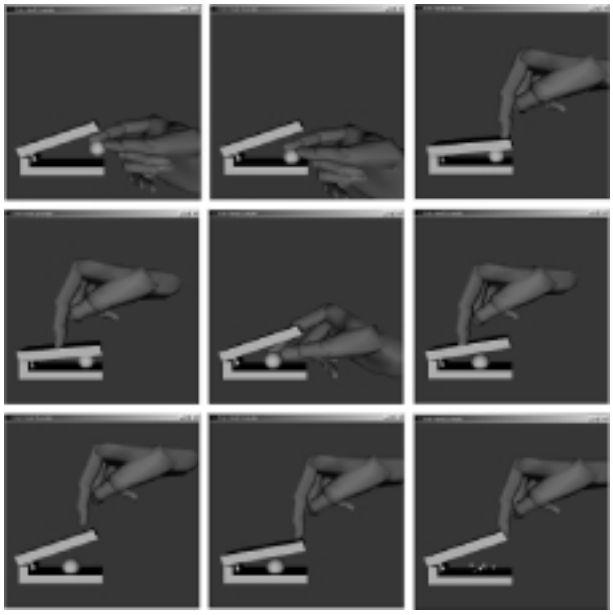


図 11: ”壊れる”使用対象に対する機能推定

6 実験

ピンセットやくるみ割りのような使用対象を挟む形状をした関節物体について５章に述べた方法で関節物体の機能をシミュレーションすることが出来るか，実際に操作者 (使用主体) が機能を推定することが出来るか，確認する実験を行った．”壊れる”と”切れる”に対し，関節物体が機能を達成するかどうか操作シミュレーションを行った．

”壊れる”に対して行った操作シミュレーションの様子を図 11 に，このときのコンソール画面を図 12 に示す．図 11，1 列目では機能達成する仕事が得られず関節物体は物体と接触するとその角度で止まった．一方，図 11，3 列目では，機能達成する仕事が得られたので作用対象は壊れた．この現象をみて，操作者はこの関節物体には作用対象を壊す機能があると推定できた．

作用対象を”切る”ために必要な計算は，要素機械「斜面」によって求めることができる．斜面の力の入出力は，1) 斜面角度，2) 斜面と作用対象の摩擦係数，3) 切るために必要な力，4) 力の方向，5) 切るために必要な距離によって求めることが可能である．

そこで，”切れる”機能を推定するため，要素機械「斜面」を持った関節物体を用意しシミュレーションを行った．”切れる”に対して行った操作シミュレーションの様子を図 13 に，コンソール画面を図 14 に示す．図 13 より、機能達成する仕事が得られたので作用対象は切れた．この現象を見て，操作者 (使用主体は) この関節物体には使用対象を切る機能があると推定することが出来た．

7 まとめ

本研究では，ハプティックビジョンに基づき物体の動的挙動の観測により獲得された，関節物体の力学構造モデルを用いた仮想操作シミュレーションにより，つまり，*analysis by simulation* アプローチにより，関節物体の力学的機能を推定する方法を提案した．単一関節物体であるクルミ割り，ピンセット等の力学構造モデルを用いた仮想空間シミュレーション実験結果から，提案手法が関節物体の持つ力学的機能推定に有効であることを確認できた．本研究は，使用主体-使用対象-関節物体のインタラクションを考慮することにより，従来アプローチにおける使用主体，使用対象，使用目的の不完全な設定による機能推定のあいまいさを解決した．今後は，機能認識を検討する予定である．

参考文献

[1] Lederman, S.J., and Klatzky,R.L., “Hand movements: A wmindow 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，佐藤高土，“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，CVIM 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，CVIM 119-6, pp.41-48, 1999

図 12: ”壊れる”使用対象に対する機能推定のコンソール出力

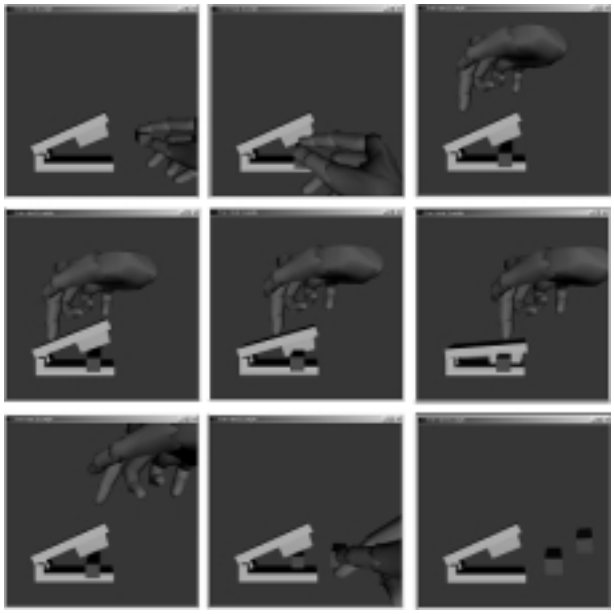


図 13: ”切れる”使用対象に対する，要素機械斜面を持った関節物体の機能推定

図 14: ”切れる”使用対象に対する，要素機械斜面を持った関節物体の機能推定のコンソール出力

[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-)，vol.J84-D- ,no7, pp.1447, July 2001.

[5] 神田亨子，北橋忠弘 “機能定義による物体のモデル記述と画像理解における利用”，人工知能学会全国大会論文集，pp543-546, 1985

[6] 山本 勉，加藤博一，佐藤宏介， 井口征士 “機能モデルを用いた３次元物体認識”，電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-D2, No5, 5. 1991.

[7] 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.

[8] Zoran Duric, Jeffrey A. Fayman, and Ehud Rivin: “Function From Motion”, IEEE PAMI, Vol.18, No6, June. 1996.

[9] David Marcaulay, 歌崎秀史：“道具と機械の本”, 岩波書店, 1999.

[10] 松下浩一郎，松谷剛，内藤嘉基，田中弘美 “ハプティックビジョンに基づく能動的関節物体モデリング” 情報処理学会論文誌, vol.41, No.6, pp., June. 2000.

[11] Luca Bogoni and Ruzena Bajcsy: “Interactive Recognition and Representation of Functionality”, CVIU, Vol.62, No.2, pp.194-214, Sep. 1995.

[12] Jack Hodges: “Functional and Physical Object Characteristics and Object Recognition in Improvisation”, CVIU, Vol.62, No.2, pp.147-163, Sep. 1995.

[13] 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.

[14] 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.