

Analysis by Reality-Based Simulation に基づく関節物体の力学的機能推定

大田 博義<sup>†,††</sup> 木村 朝子<sup>††</sup> 島田 伸敬<sup>††</sup> 田中 弘美<sup>††</sup>

Inferred Function of Articulated Objects Based on Analysis by Reality-Based Simulation

Hiroyoshi OTA<sup>†,††</sup>, Asako KIMURA<sup>††</sup>, Nobutaka SHIMADA<sup>††</sup>,  
and Hiromi T.TANAKA<sup>††</sup>

あらまし 道具としての物体の機能は，“物体 - 物体に作用する主体（人間の体や手）- 物体が作用する対象”，の相互間のインタラクションにより達成される．しかし，これら相互間のインタラクション/接触の様相を実世界で同時に観測することは困難である．そこで本論文では，Analysis by Reality-Based Simulation アプローチと呼ぶ，実世界に依拠したシミュレーション結果の解析に基づいて，はさみのような機能をもつ関節物体の，(1) 可能な力学的機能をすべて推定し，更に，(2) 主機能と呼ぶ最ゆうの力学的機能とその物体を把持する手の把持姿勢を，推定する方法を提案する．はさみ，ペンチ，ピンセット等の 7 種類の関節物体の力学的機能を推定した実験結果を示し，30 人の被験者による主観評価実験との比較から提案手法の有効性を検証した．

キーワード 仮想環境シミュレータ，リアリティベースシミュレーション，力学的機能推定，関節物体，ハプティックビジョン

1. ま え が き

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，実世界の現象や実物体の振舞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．仮想環境における実世界に忠実な体験が，実世界の現象や物体に対する新たな発見や認識，理解に導くことを可能にする．

近年では，人間の生活環境で活動するヒューマノイドロボットや知能システムの研究が盛んであるが，そのようなロボット/システムには，実環境中に存在する道具や物体が何であるか認識する能力が不可欠である．人間は視覚だけでなく触覚に基づいて実際に物体に手で触れてみて動力的な情報を獲得し認識に役立てていると考えられる．そこで仮想環境において，ロボットと物体のインタラクションが実世界に忠実にシミュレートされれば，物体に触れて操作する「体験」を通して，その物体がどのような機能をもつかを認識

し，その利用方法に関する知識を自動的に獲得し蓄積していく能力をロボットにもたせることが可能になる．このように実世界に忠実な仮想環境シミュレータは，物体認識や知識の自動獲得のための強力な分析手段としての可能性が期待されている．

手の把持や機能の研究は，心理学分野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獲得するための典型的な手探索パターン EPs (Exploratory Procedures) が挙げられる．人間の手の探索機能は，物体の材質感，形状，剛さ，柔軟度，重さ，温度と物体の機能や物体を構成するパーツ間の接続構造や力学機構を探索する 8 種類の手の動作パターンにより実現されていることが確認されている．そこで我々は人間の手の EPs によって獲得される触覚情報を観測データから自動獲得する「触れて見る」ハプティックビジョン構想 [4] を提案し，物体形状・体積 [2]，質量 [3]，拘束関係 [1]，粘弾性 [5] 等の物体の力学的物理特性の自動獲得法を提案した．更に，実世界のインタラクションの観測から，はさみのような機能をもつ関節物体の幾何及び力学構造を力学作用特性を記述した三次元インタラクティブモデルの自動獲得法を提案した [6]．本研究では，EPs の一つである Function Test と呼ばれる

<sup>†</sup> パナソニック MSE, 横浜市  
Panasonic Mobile Communications Co., Ltd., Yokohama-shi, 224-8539 Japan

<sup>††</sup> 立命館大学大学院理工学研究科, 草津市  
Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Kusatsu-shi, 525-8577 Japan

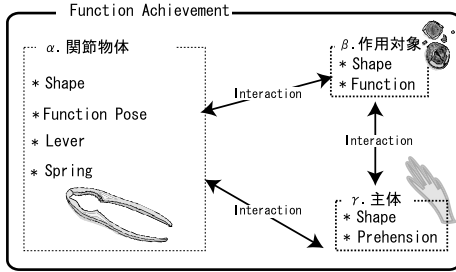


図 1 機能達成のインタラクション  
Fig. 1 Interactions for function achievement.

手探索パターンにより獲得される，物体の機能を自動獲得することを目的としている．

人工的に作られた物体の多くは，何らかの目的を達成するため，つまり，機能を達成するための道具である．図 1 に示すように，物体の機能は，物体-作用対象-主体の 3 要素間のインタラクションにより達成されている．機能は，使用目的のための有用性と定義され，使用目的とは，主体が物体を操作し，作用対象を異なる状態に変える/移すことをいう．3 要素間のインタラクションのうち，どれかが欠けると，機能を達成することはできない．

物体の機能推定・認識の研究は，人工知能やコンピュータビジョン分野において進められてきた．初期の機能推定の研究は，物体（椅子等）のみに着目し，物体の静的機能を静止画像から推定した [7]．その後，主体が包丁などの物体を使用する動的シーン（主体-物体インタラクション）を観測し解析することにより，物体の動的機能（“切る”，“突く”，“スライスする”等）を推定する手法が提案された [8]．しかし，作用対象の変化を画像から観測することは難しく，“物体-作用対象”インタラクションは考慮されていない．作用対象に着目した研究は北橋らに見られ [9]，物体（レンチ，栓抜き）と作用対象（ナット，栓）の接触状態（物体-作用対象インタラクション）による力学的特性を満たすか否かを判断することから機能を推定した．しかし，操作者である主体が考慮されていなかった．これらの従来のアプローチが示すように，実世界において，物体-主体-作用対象の三者相互の力学的なインタラクションを同時に観測するための実験環境を設定することは困難である．そのため，90 年代半ば以降研究が停滞していた．最近では，主体と作用対象の動作を通じて，両者を補完的に認識するという手法が提案されている [10]．

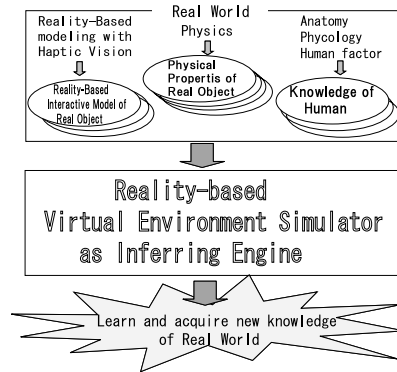


図 2 Analysis by Reality-Based Simulation アプローチ  
Fig. 2 Analysis by Reality-Based Simulation Approach.

そこで本論文では，Analysis by Reality-Based Simulation アプローチと呼ぶ，仮想環境において実世界に依拠した力学的インタラクションをシミュレートし，その結果の解析に基づいて，つかむ，つぶす，こわす等の関節物体の力学的機能を推定する方法を提案する．仮想環境において，実世界の“物体-作用対象”インタラクションの観測から獲得された，はさみのような機能をもつ関節物体のインタラクティブモデルを用いて，様々な既知の物理特性（形状，サイズ，剛性，表面の滑らかさ）をもつ任意の作用対象に対する，様々な既知の人間の特性（性別，年齢，人間の手や体の骨格構造や動き方）をもつ主体による，物体の操作のされ方や力学的作用のシミュレーション結果を解析することにより，(1) 物体のもつ可能な力学的機能を推定し，更に，(2) 主機能と呼ぶ最優秀の力学的機能とその物体を把持する手の把持姿勢を推定する．はさみ，ペンチ，ピンセット等の 7 種類の，一つの関節をもつ物体の力学的機能を推定した実験結果を示し，30 人の被験者による主観評価実験結果との比較から提案手法の有効性を検証した．

## 2. Analysis by Reality-Based Simulation Approach

図 2 に，Analysis by Reality-Based Simulation アプローチの概念を示す．実世界に忠実な仮想環境シミュレータへの入力として，実世界のインタラクションの観測から獲得された，実世界に忠実なインタラクションを可能とする実物体の三次元インタラクティブモデル [6] と実物体の物理特性，あるいは解剖学，心理

学及び人間工学の知見に基づく人間の特性を知識として加える．これらの入力はすべて実世界に依拠した情報であり，これらに基づくシミュレーションは実世界における現象を表している．例えば，ある物体を使って物をつかもうとしたら本当につかめるのか，あるいは壊そうとしたら壊せるのかをシミュレートすることにより，その物体がどのような機能をもつかを表している．これは，与えられた知識を使って新しい結論として物体の機能を推論することを意味している．そこで，Analysis by Reality-Based Simulation アプローチは，仮想環境シミュレータが推論エンジンとして機能することに着目し，実世界に依拠するシミュレーションを通して，実世界（実物体）についての新しい結論を推論する，つまり，新たな発見と知識を自動的に獲得することを可能にするものである．

### 3. Analysis by Reality-Based Simulation アプローチに基づく関節物体の力学的機能推定

フランスの社会思想家 P.J. Proudhon (1809 ~ 1865) は、「人間が仕事をするために使う最も基本的な，最も一般的な道具，つまりそれらの道具の帰るところはてこである」と述べている．このように，てこは物体が機能を認識するための最も基本的な要素であり，物体の機能に関するほとんどの研究は物体がてこの機能をもつと仮定している [9], [11], [12]．そこで本論文においても，“つかむ”，“切る”，“こわす”等の動的な機能をもつ対象の関節物体は，要素機能としてのてこをもつと仮定する．

図 3 に，全体の処理の流れを示す．仮想環境シミュレータへの入力は，機能達成のための 3 要素：(1) 実世界の“物体 - 作用対象”インタラクションの観測から獲得された，関節物体のインタラクティブモデル，(2) 作用対象の物理特性（形状，サイズ，剛性，表面の滑らかさ），(3) 解剖学，心理学及び人間工学の知見に基づく，主体（人間）の特性（性別，年齢，手のサイズ，手の関節構造，把持パターン）である．これらはすべて実世界に依拠した情報である．

Step 1：関節物体の三次元インタラクティブモデル，主体（人間の手）の解剖学的知見 [16] により，主体が関節物体を把持するパターンを推定する．

Step 2：推定された把持パターン，最初の入力として与えられた主体の性別，年齢，利き手を指数とした人間工学的知見 [14], [15] を用いることで，把持パター

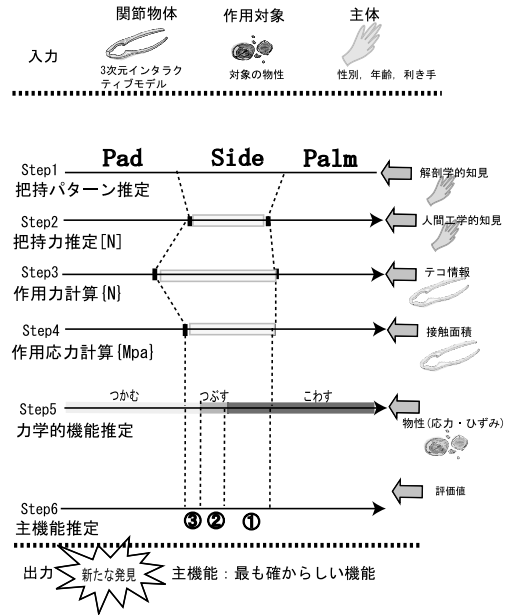


図 3 Analysis by Reality-Based Simulation アプローチに基づく関節物体の力学的機能を推定  
Fig. 3 Analysis by Reality-Based Simulation.

ン [16] に応じた把持力の範囲を推定する．把持力とは，主体が関節物体を把持する力である．

Step 3：関節物体の三次元インタラクティブモデルのてこ情報，Step 2 で求めた把持力の範囲から，作用対象に加える絶対的な力，作用力の範囲を推定する．

Step 4：関節物体の三次元インタラクティブモデルの接触面積（関節物体と作用対象との接触）と Step 3 で求めた作用力範囲から，作用応力の範囲を計算する．

Step 5：Step 4 で求めた作用応力範囲と作用対象の物性（応力・ひずみ）を用いることにより，“つかむ”，“つぶす”，“こわす”それぞれの機能の可能性を推定する．

Step 6：推定された複数の機能から，主機能と呼ぶ最優秀の機能，とその物体を把持する手の姿勢を推定する．

以上のステップにより，任意の作用対象と任意の主体に応じた関節物体の力学的主機能と把持パターン，つまり，物体について新たな知識を発見し自動的に獲得することが可能になる．

#### 3.1 関節物体の三次元インタラクティブモデル

ハプティックビジョン [1] に基づき，実世界のインタラクションの観測から自動獲得される三次元インタラクティブモデル [6] について述べる．まず，(1) (口

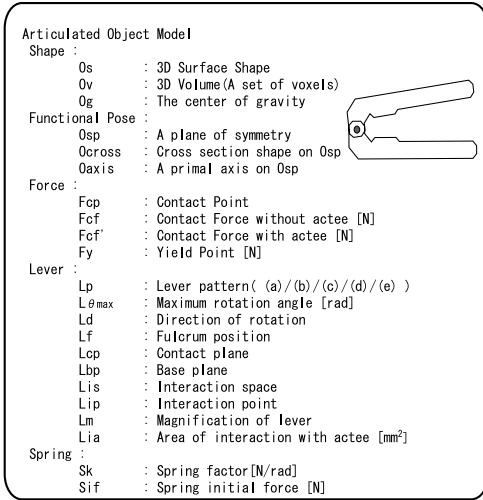


図 4 関節物体の三次元インタラクティブモデル  
Fig. 4 Model of articulated object.

ポットアームに搭載された) 視覚センサを用いて能動的に対象物体の多視点画像を獲得し、関節物体の三次元形状や姿勢、パーツの接続構造を抽出する。次に、対象物体のどの部分にどのような力を作用させたらどのような動きをするかを予測し、力覚センサを搭載したロボットハンドにより、(2) 実際に対象物体上のあらかじめ選定した接触部分に、強さと方向が既知の力を作用して能動的に接触し、物体の変化を観測する。更に、(3) 物理特性が既知の物体に対して実際に対象物体を作用させ、その結果、作用させた既知物体に起こった変化を、視覚センサと力覚センサを用いて観測することにより、関節物体の力学的作用特性を抽出する。これらの方法を用いて、仮想環境において実世界に忠実なインタラクションを可能にする三次元インタラクティブモデルを自動構築する。

図 4 に示すように、関節物体のインタラクティブモデルには、物体の三次元形状 (Shape)、機能的姿勢 (Functional Pose)、力学作用特性 (Force)、てこ構造 (Lever)、物体のばね特性 (Spring) が記述されている。図 5 と図 6 に示すように、Shape には、三次元サーフェス形状  $O_s$ 、三次元ボリュームデータ  $O_v$ 、重心座標  $O_g$  を、Functional Pose には、関節物体の三次元形状の対称面  $O_{sp}$  における断面对称輪郭形状  $O_{cross}$ 、関節物体の対称軸  $O_{axis}$  が記述される。Force には (ロボットが接触した) 接触点  $F_{cp}$ 、図 7 に示すように、作用対象なしでのロボットハンドの作用力/

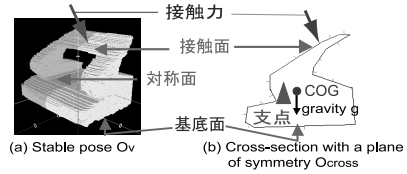


図 5 関節物体のボリューム表現と三次元形状対称面  
Fig. 5 Cross-section shape analysis.

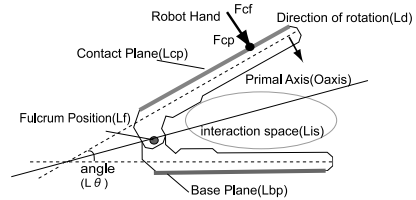


図 6 対称面における断面輪郭形状  
Fig. 6 Functional pose of articulated object.

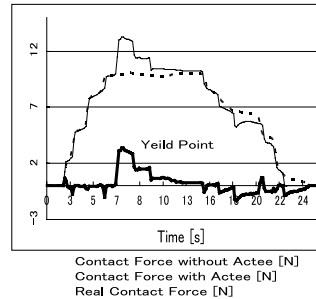


図 7 作用対象あり・なしの場合の作用力変化グラフ  
Fig. 7 Contact force transition with/without actee.

接触力の変化グラフ  $F_{cf}$ 、作用対象ありでのロボットハンドの作用力変化グラフ  $F_{cf}'$ 、降伏点でのロボットハンドの作用力  $F_y$  を、Lever には、てこパターン  $L_p$ 、てこの初期状態からの回転限界状態である角度  $L\theta$ 、てこの支点  $L_f$ 、外力を作用させるであろう関節物体の接触平面  $F_{cp}$ 、関節物体を把持するために支える平面であろう支持平面  $F_{sp}$ 、作用対象がおかれるべき空間である作用空間  $L_{is}$ 、関節物体と作用対象の接触点  $L_{ip}$ 、てこの倍率  $L_m$ 、関節物体と作用対象の接触面積  $L_{ia}$  を、Spring には、関節物体のばね係数  $S_k$  [N/rad]、初期応力  $S_{if}$  [N] を記述する。ここで、てこパターンとは、支点が力点と作用点の間に存在し、(a) 力を増幅し距離を減衰するてこ、(b) 力を減衰し距離を増幅するてこ、(c) 力と距離のバランスを保持するてこ、作用点が力点と支点の間に存在し、(d) 力を増幅し距離を減衰するてこ、(e) 力を減衰し距離を増幅するてこの 5 種類である。

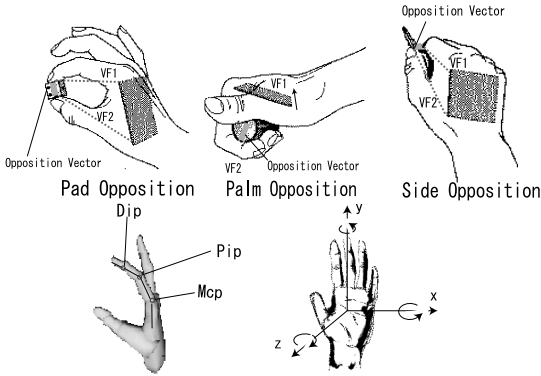


図 8 三つの把持パターン (Iberall [18])  
Fig. 8 Postures of three oppositions.

### 3.2 Step 1: 把持パターン推定

#### 3.2.1 把持パターン

人間は、作業の目的に応じて、物体をもつ手の形状が異なる。例えば、ペンを使って何か物を書くとき、落ちているペンを拾うときは、異なる手の形状を使用する。このように、人間の意図と手の把持パターンが関係していることに着目した Napier は、正確に作業を行うために用いる Precision と、力を必要とする作業に用いる Power の 2 種類に大きく分類した [17]。Napier の功績は、把持の形式を決めるものは物の形や大きさではなく、作業目的であることを指摘した点にある。以後、Napier の 2 種類をもとに様々な把持の分類が提案されてきた。その中で、図 8 に示すように、Iberall は、手の姿勢が物体の表面に対し、少なくとも二つの力 (Opposition) を含むことに着目し、以下の三つの基礎的なカテゴリーに分類した [13], [18]。

- Pad Opposition...把持するときの *Opposition Vector* が、手の palm 座標系 (図 8 右下) の  $y$  軸に対して平行であり、正確さを必要とする作業を行う場合に用いる。

- Palm Opposition...把持するときの *Opposition Vector* が、手の palm 座標系  $xy$  平面に対して垂直な把持であり、力を必要とする作業を行う場合に用いる。

- Side Opposition...把持するときの *Opposition Vector* が、手の palm 座標系  $x$  軸に対して平行な把持であり、PadOpposition と PalmOpposition の中間に位置し、正確さ、あるいは、力を必要とする作業を行う場合に用いる。

#### 3.2.2 把持パターンの推定

関節物体の三次元形状から把持パターンを推定する。

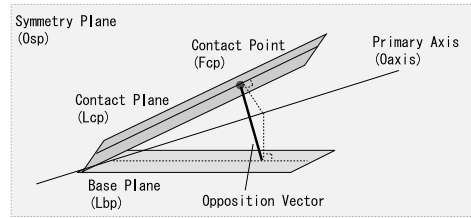
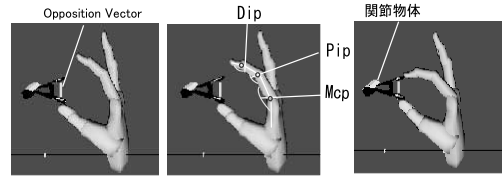


図 9 Opposition Vector  
Fig. 9 Opposition Vector.



角度Dip, Pip, Mcpを解剖学的知見に基づき変化させる

図 10 Pad Opposition における把持推定

Fig. 10 Estimating "Grasp" in Pad Opposition.

図 9 に示すように、(1) まず (*Contact Plane*) と呼ばれる手が接触する関節物体の接触平面を通り、接触面との角度と基底面 (*Support Plane*) の角度が等しく、対称面 (*Symmetry Plane*) 上に存在する *Opposition Vector* を求める。(2) 次に、求めた *Opposition Vector* を三つの把持パターンで把持可能か否か解剖学的知見を用いることにより、判定を行う。図 10 に示すように、人間の手は、以下の解剖学的知見によって手の関節の可動域が制約されている [16]。

$$0^\circ \leq \theta_{mcp} \leq 90^\circ \quad (1)$$

$$\theta_{dip} = 2/3\theta_{pip} \quad (2)$$

ここで  $\theta_{mcp}$  は中手指関節と呼ばれる手のひらと指がなす関節 (*Mcp*)、 $\theta_{dip}$  は遠位指節間関節 (*Dip*)、 $\theta_{pip}$  は近位指節間関節 (*Pip*) それぞれの屈曲角である。

そこで、VHT 社製サイバークロブに付属しているライブラリの手のモデル (22 個の関節をもつ) に対し、上式のとおり各関節の屈曲角を変化させ、Pad, Palm, Side の三つの把持パターンの形状が形成できるか否かで判断する。手と関節物体の相対位置は、手の *palm* 平面と関節物体の (*Opposition Vector* が存在する) 対称面 *Osp* とが垂直あるいは、平行になる状態を初期位置とした。

- Pad Opposition: (1) 手の thumb の *Dip* が関節物体の支持平面 *Osp* と接触可能か、(2) 手の index の *Dip* が関節物体の接触平面 *Ocp* と接触可能か否か

を判定する .

- Palm Opposition: (1) 手の *Palm* が関節物体の接触平面 *Ocp* が接触可能か, (2) 手の thumb 以外の指の *Pip* 若しくは *Dip* が関節物体の *Osp* と接触可能か否かを判定する .

- Side Opposition: (1) 手の thumb の *Dip* が関節物体の接触平面 *Ocp* が接触可能か, 手の index の *Pip* と関節物体の支持平面 *Osp* が接触可能か否かを判定する .

以上の拘束をもとに, 関節物体の対称面  $O_{sp}$  の垂直方向と平行方向から, 可能な把持パターンを推定する . 図 10 に, *OppositionVector* が *palm* 平面に平行な初期位置で, 手のひらを開いた状態から徐々に左から右へ式 (1) と式 (2) に従って, それぞれの関節の屈曲角を変化させて手指を物体に近づけ, 物体表面との接触可能性から把持パターンを推定する過程を示す .

### 3.3 Step 2: 把持力推定

臨床的な手の機能評価のため, 把持パターンの把持力の測定が行われている [15]. [15] では, 健常者 310 人の把持力データを測定しており, 三つの把持パターンに対し, 20~24 歳, 25~29 歳, 30~34 歳, 35~39 歳, 40~44 歳, 45~49 歳, 50~54 歳, 55~59 歳, 60~64 歳, 65~69 歳, 70~74 歳, 75 歳以上の男女, 左右手の計 144 種類の平均値, 標準偏差値が測定されている . 図 11 に *PadOpposition* における把持力を示す . 図 11 の *SD* は, 標準偏差を表し, 平均値から標準偏差を引いた値を *SD-* で表し, 平均値に標準偏差を加えた値を *SD+* と表している . また, *Min* は最低値, *Max* は最高値を表す . 我々は, 平均値から ± 標準偏差値の範囲が把持力範囲であると定義した . これらの知見により, 女性, 高齢者に使いやすい機能を推定できるだけでなく, 機能に適した物体 (道具) が推定可能となる .

### 3.4 Step 3: 作用力計算

関節物体の力学構造モデルの力点  $L_p$ , 作用点  $L_{ip}$ , 支点  $L_f$  から, 作用対象に加わる絶対的な力, 作用力  $F_{ac}(\phi)$  を計算する . 図 12 左に示すように, 把持力を  $F_{ag}$ , 作用対象を挟まない状態での関節物体の反力を  $F_s(\phi)$ , 支点・作用点距離を  $D_{ac}$ , 支点・力点の距離を  $D_{ag}$  とおくと, 作用力  $F_{ac}(\phi)$  は,

$$F_{ac}(\phi) = (F_{ag} - F_s(\phi)) \times D_{ag} / D_{ac} \quad (3)$$

より求めることができる . 一方, 上式によって作用力が計算できない場合がある . それは, 図 12 右に示す

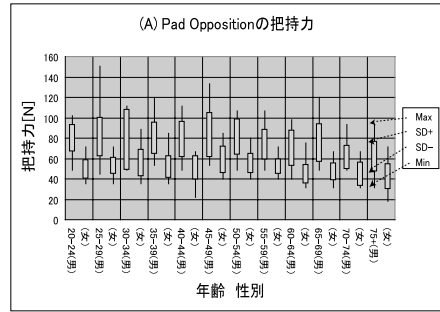


図 11 把持パターンにおける把持力  
Fig. 11 Grasping Force in Pad Opposition.

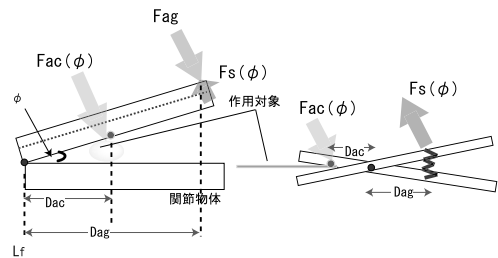


図 12 作用力の計算  
Fig. 12 Estimating action force.

ように, 洗濯ばさみや紙ばさみ等の関節物体で, 主体の力が直接作用対象に作用せず, ばねのエネルギーとして蓄えられる場合である . その場合の作用力  $F_{ac}(\phi)$  は,

$$F_{ac}(\phi) = F_s(\phi) \times D_{ag} / D_{ac} \quad (4)$$

より求める . ここで, 把持力  $F_{ag}$  は, Step 3 より求め, 一定の値と仮定している .

### 3.5 Step 4: 作用応力計算

関節物体のインタラクティブモデル (Step 1) から求めた接触面積  $L_{ia}$  と作用力計算 (Step 4) で求めた作用力  $F_{ac}$  より, 作用対象に加わる応力を求める . ここで応力とは, ある点を微小立方体と考えた場合に, 各面に働く単位面積当りの力 [Mpa] である . 図 13 に一般的な応力・ひずみ曲線を示す .  $\sigma_e$  は降伏点を,  $\sigma_b$  は極限応力を表す . 降伏点に到るまでの変形は弾性変形である . 降伏点を越えて更に荷重を増加すると塑性変形が始まる . 応力は極限応力で最大になり, その後は自然に破断点に向かう . この極限応力を引張強さと呼び, 材料の強さを表す尺度として用いることが多い .

関節物体が作用対象に加える応力, つまり, 作用力  $F_s$  は,

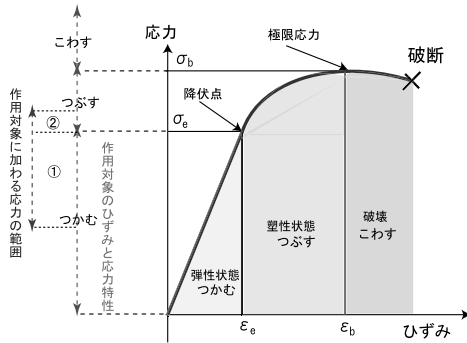


図 13 応力・ひずみ曲線と力学的機能推定  
Fig. 13 Stress v.s. Distortion.

$$F_s = \frac{\text{作用力}}{\text{接触面積}} = \frac{F_{ac}}{L_{ia}} \quad (5)$$

により求めることができる。

### 3.6 Step 5: 力学的機能推定

我々は、物理特性が既知である作用対象の変形に応じて物体がもつ力学的機能を以下のように定義した。

- 弾性変形（作用応力が降伏点より小さい）...つかむ
- 塑性変形（作用応力が降伏点以上極限応力以下）...つぶす
- 極限応力を越えた変形（作用応力極限応力以上）...こわす

ここで、弾性状態は、作用対象に力を加えて変形させた後、力を解放したらまたもとの姿に完全に復元する状態をいう。一方、塑性状態は、力を解放してももとの姿に復元せず、ひずんだままの状態をいう。

例えば、はさみの場合の作用対象を“切る”という機能、穴あけパンチの“穴を開ける”という機能は、“こわす”に分類される。ある作用対象の物理特性と Step 5 で求めた作用応力の範囲が図 13 のように表されるとき、作用応力の範囲は、①つかむ機能と②つぶす機能にまたがっていることが分かる。つまり、ある作用対象に対し、求めた作用応力の範囲によって、“つかむ”と“つぶす”の二つの力学的機能が推定される。

機能推定は、入力された関節物体モデル一つに対して、3種類の把持パターンと3種類の機能との組合せ、つまり、9種類に対して行われる。

### 3.7 Step 6: 主機能推定

我々は、(1) 持ちやすさ、(2) 作用効率性、(3) 機能達成しやすさの3点を数値化し評価値として与え、評価値の高さに従って優先度を付け、最も評価値が高い

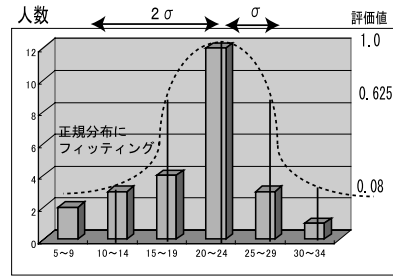


図 14 Pad Opposition における NOD  
Fig. 14 NOD in Pad Opposition.

ものを主機能とした。関節物体の持ちやすさの評価値を P1、作業効率性の評価値を P2、機能達成しやすさを P3 とおく。

#### • 持ちやすさの評価 P1

関節物体を把持するときの持ちやすさは、握りやすさと置き換えることが可能である。人間工学の分野において、NOD (Natural Opposition Distance) の分布を計測し、物体の握りやすさを評価する研究が行われている [14]。NOD とは、屈筋と伸筋の活動がなく、自然な状態の Opposition Vector の長さで定義されている。図 14 は、NOD の分布を正規分布にフィッティングした結果を示している。図 14 に示すように、Pad Opposition における NOD は、20~25 mm が最も握りやすいと判断されている。同様に、Palm Opposition, Side Opposition における NOD はそれぞれ 30~40 mm, 60~70 mm とされている。次に、3.2.2 で述べたように、関節物体の三次元形状から求めた物体を把持するための Opposition Vector の長さを  $l_{op}$ 、NOD の平均値を  $NOD_{ave}$ 、その差を  $\Delta = |NOD_{ave} - l_{op}|$  とし、 $\Delta = 0$  のときに評価値 P1 の最大値 1 を与えた。評価値 P1 は、 $\Delta$  が NOD の標準偏差値  $\sigma$  離れるごとに、0.625, 0.08 と減少し 0 に近づく。

#### • 作用効率性 P2

作用効率性とは、主体が加えた力（把持力）がどれだけ効率良く作用対象に加わるかを表す。図 15 に示すように、把持力を  $F_{ag}$ 、主体への反力を  $F_{agr}(\phi)$  とすると  $F_{agr}(\phi)$  は、関節物体に内蔵されたばね等による主体への反力  $F_s(\phi)$  (図 15 左) と作用対象のみからの反力  $F_{ac}(\phi)$  (図 15 右) からなる。 $F_s(\phi)$  はインタラクティブモデルのばね係数  $Sk$  [N/rad] から得られる。また、作用反作用の法則から  $F_{ag} = F_{agr}(\phi)$  である。したがって P2 は、作用対象からの反力/主体の

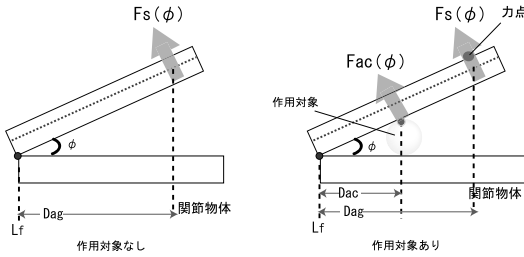


図 15 作用対象なしにおける関節物体の反力と、作用対象ありにおける関節物体の反力

Fig. 15 Reaction force with/without actee.

把持力として、

$$P2 = \frac{F_{agr}(\phi) - F_s(\phi)}{F_{ag}} = \frac{F_{ag} - F_s(\phi)}{F_{ag}} \quad (6)$$

として求めることができる。主体の把持力が小さい領域では相対的に  $F_s(\phi)$  の大きさが大きくなるため、 $P2$  が小さくなり、把持力が小さい主体には使い難いことを示す。また、ばねが弱く  $F_s(\phi)$  小さい場合、あるいは、主体が大きな把持力を出せば  $F_s(\phi)$  は相対的に無視されて  $P2$  は 1 に近づく。これは、主体の把持力に応じた（道具としての物体の）使いやすさと効率性を表しているといえる。

● 機能達成のしやすさ  $P3$

人間が道具を用いるとき、幅広い力範囲で、ある機能を達成する道具は扱いやすい。それは、幅の狭い力範囲で機能を達成する道具は、機能を達成するまで調節に時間が掛かったり、機能させることに失敗したりするからである。そこで、我々は Step 6 で求めた作用対象に加わる応力の範囲のうち、機能を達成する範囲をより広く含んでいるものの優先度を高めた。例えば、図 16 に示すように、作用対象に加わる応力の範囲を  $S$ 、機能“つかむ”の範囲を  $s1$ 、機能“つぶす”の範囲を  $s2$  とおくと、 $S$  に対する  $s1$  と  $S$  に対する  $s2$  の割合を比較すると、 $S$  に対する  $s1$  の割合が大きいため、“つかむ”機能の優先度が高くなる。図 16 において、“つかむ”機能の評価値  $P3$  は、

$$P3 = \frac{s1}{S} \quad (7)$$

により求める。

以上より求めた評価値  $P1, P2, P3$  を用いて総合評価値  $P$  を求める。評価値  $P1, P2, P3$  の積を総合評価値と考えると、すべての評価値  $P1, P2, P3$  に 1 が与えられているとすれば、総合評価値が 1 となり、機能を達成する道具として十分な性能を有していることに

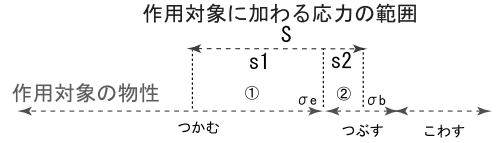


図 16 把持力の範囲による優先度  
Fig. 16 Priorities in function estimation from grasping force.

なる。もし、 $P3$ （機能達成しやすさ）の値が 1 であっても、 $P1$ （持ちやすさ評価値）が 0 であれば機能を達成する道具とはいえない。また、 $P3, P2$  が逆の場合もそうである。したがって、評価値は  $P1, P2, P3$  個別の和ではなく積であるといえる。したがって総合評価値  $P$  は、

$$P = P1 \times P2 \times P3 \quad (8)$$

とする。

4. 機能推定シミュレーション実験

ハプティックビジョンシステムにより獲得された関節物体の三次元インタラクティブモデルを入力とする仮想環境シミュレータを、Virtual Technologies 社製 CyberGlove の付属ライブラリを用いて作成し、関節物体の力学的機能を推定する、リアリティベースシミュレーション実験を Windows2000 マシン（CPU：Intel Pentium 3.06 GHz）を使用して行った。

関節物体は、(1) 手の代用、(2) 手の資質・機能を拡張、(3) 新たな機能を付加したものの 3 タイプについて実験を行った。

- 手の代用...洗濯ばさみ(小)(大), 紙ばさみ(小)(大)
- 手の資質・機能の拡張...ピンセット(小)(大), トング(小)(大), ペンチ
- 新たな機能を付加したもの...穴あけパンチ, はさみ

仮想環境シミュレータに対し、(1) 関節物体の三次元インタラクティブモデル、(2) 主体の性別、年齢、利き手、(3) 作用対象のひずみと応力特性を入力し、主機能を推定した。機能は、*PadOpposition*, *PalmOpposition*, *SideOpposition* の把持パターンに対し、それぞれ“つかむ”、“つぶす”、“こわす”の 3 種類が存在するため、 $3 \times 3$  の計 9 種類に対して機能推定が行われる。



4.1 把持パターンの推定

PadOpposition, PalmOpposition, SideOpposition の把持パターンを以下のステップにより推定した。

(1) サイバークロップを通して獲得した、30 人の被験者の手の 22 個の関節位置と  $Mcp, Pip, Dip$  それぞれの関節角の屈曲角を用いて三つの把持パターンを記述する。

(2) 次に、与えられた関節物体のインタラクティブモデルの Shape の記述から、関節物体の力点、作用点、支点、対称面を獲得する。

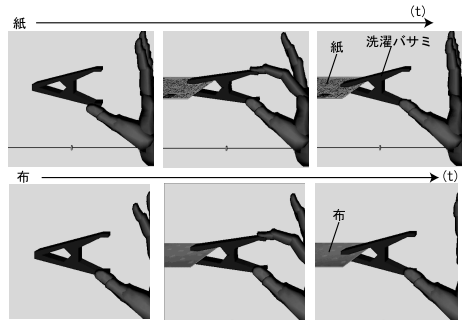
(3) シミュレータ上では、(2) で得られた関節物体の力点と対称面から手の位置を決定し、手を開いた状態から握る状態に、 $Mcp, Pip, Dip$  それぞれの屈曲角を式 (1) と式 (2) に基づいて 0.1 度ずつ減少させる。

(4) 手の指が関節物体と接触したとき手の状態変化を停止させ、(1) で得られた各把持パターンの記述と比較し、差異が最小の把持パターンを選出する。

4.2 実験結果

図 17, 図 18, 図 19 に、洗濯ばさみ、ペンチと穴あけペンチを用いた実験結果を示す。ここで、性別は男性、年齢は 20 ~ 25 歳、利き手は右手を、作用対象である紙、布、針金・鉄板の降伏応力は、それぞれ 5.5 ~ 6 [Mpa], 20 ~ 23 [Mpa], 400 ~ 420 [Mpa] とした [19]。

各図 17 (a), 図 18 (a), 図 19 (a) に、各物体に対する主機能推定のためのシミュレーションシーンを示す。各図 17 (b), 図 18 (b), 図 19 (b) に、各物体の持ちやすさ (P1) と作業効率 (P2) を示す。図 17 (c) と (d), 図 18 (c), 図 19 (c) と (d) の上部に、Pad, Palm, SideOpposition それぞれの把持パターンで、作用対象物体に対して、つかむ、つぶす、こわす、それぞれの機能が達成されたかを示す。図 17 (c) と (d), 図 18 (c), 図 19 (c) と (d) の下部に、Pad, Palm, SideOpposition それぞれの把持パターンで、作用対象物体に対して、つかむ、つぶす、こわす、それぞれの機能の 9 種類の総合評価値 (P1xP2xP3) を示す。図 17 (e), 図 18 (d), 図 19 (e) に、入力として与えられた各関節物体のインタラクティブモデルを示す。図 17 に示すように、洗濯ばさみ (小) と作用対象 (紙) に対してのシミュレーションは、すべての把持パターンに対し、作用対象 (紙) が弾性状態であったため、すべての把持パターンに対し、“つかむ” 機能があると推定された。その中で PadOpposition の“つかむ” が最も評価値が高くなり、主機能と推定された。洗濯ばさみ (小) と作用対象 (布) に対してのシミュレーション結果も



(a) 洗濯ばさみ (小) の機能推定シミュレーション

	Pad	Palm	Side
持ち易さ(P1)	0.93	0.70	0.75
作業効率性(P2)	0.55	0.08	0.37

(b) 洗濯ばさみの持ちやすさ (P1) と作業効率性 (P2)

機能達成のし易さ(P3)	Pad	Palm	Side
つかむ	1.00	1.00	1.00
つぶす	0.00	0.00	0.00
こわす	0.00	0.00	0.00
総合評価値	Pad	Palm	Side
つかむ	0.51	0.06	0.28
つぶす	0.00	0.00	0.00
こわす	0.00	0.00	0.00

(c) 洗濯ばさみの紙に対する機能達成のしやすさ (P3) と総合評価値

機能達成のし易さ(P3)	Pad	Palm	Side
つかむ	1.00	1.00	1.00
つぶす	0.00	0.00	0.00
こわす	0.00	0.00	0.00
総合評価値	Pad	Palm	Side
つかむ	0.51	0.06	0.28
つぶす	0.00	0.00	0.00
こわす	0.00	0.00	0.00

(d) 洗濯ばさみの布に対する機能達成のしやすさ (P3) と総合評価

```

Shape :
  Os      : ClothesPinSmall.wrl
  Ov      : ClothesPinSmall.vxl
  Og      : (0.0,0.0,0.0)

Functional Pose :
  Osp     : V(0.0,0.0,1.0) P(0.0,0.0,0.0)
  Ocross  : Cross section shape on Osp
  Oaxis   : V(0.0,1.0,0.0) P(0.0,0.0,0.0)

Force :
  Fcp     : (3.5,3.0,0.0)
  Fcf     : Contact Force without actee
  Fcf'    : Contact Force with actee
  Fy      : 6.0[Mpa]

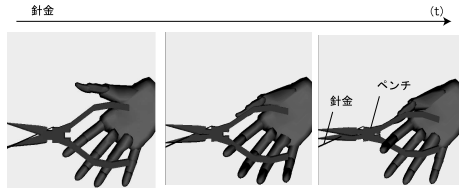
Lever :
  Lp      : Lever pattern(e)
  Lθmax   : 0.2[rad]
  Ld      : (0.0,0.0,1.0)
  Lf      : (0.0,0.0,0.0)
  Lcp     : N(0.0,1.0,0.0) D(3.0)
  Lbp     : N(0.0,-1.0,0.0) D(3.0)
  Lis     : Interaction space
  Lip     : (-5.45, 0.01, 0.0)
  Lia     : 49[mm^2]

Spring :
  Sk      : 11.0[N/rad]
    
```

(e) 洗濯ばさみのインタラクティブモデル

図 17 実験結果 (洗濯ばさみ)

Fig. 17 Experimental result (Clothespin).



(a) ペンチの機能推定シミュレーション

	Pad	Palm	Side
持ち易さ(P1)	0.14	0.66	0.82
作業効率性(P2)	0.31	0.05	0.21

(b) ペンチの持ちやすさ (P1) と作業効率性 (P2)

機能達成のし易さ(P3)	Pad	Palm	Side
つかむ	1.00	0.72	1.00
つぶす	0.00	0.15	0.00
こわす	0.00	0.14	0.00
総合評価値	Pad	Palm	Side
つかむ	0.04	0.02	0.17
つぶす	0.00	0.01	0.00
こわす	0.00	0.01	0.00

(c) ペンチの針金に対する機能達成のしやすさ (P3) と総合評価

```

Shape :
Os : PENCH.wrl
Ov : PENCH.vxl
Og : (0.0,0.0,0.0)
Functional Pose :
Osp : V(0.0,0.0,1.0) P(0.0,0.0,0.0)
Ocross : Cross section shape on Osp
Oaxis : V(0.0,1.0,0.0) P(0.0,0.0,0.0)
Force :
Fcp : (9.0,10.7,0.0)
Fcf : Contact Force without actee
Fcf' : Contact Force with actee
Fy : 200.0[Mpa]
Lever :
Lp : Lever pattern(e)
Lθmax : 0.10[rad]
Ld : (0.0,0.0,1.0)
Lf : (0.0,0.0,0.0)
Lcp : N(0.164,-0.986,0.0) D(3.78)
Lbp : N(-0.164,-0.986,0.0) D(-3.78)
Lis : Interaction space
Lip : (-6.1,1.5,0.0)
Lia : 10[mm^2]
Spring :
Sk : 6.27[N/rad]
    
```

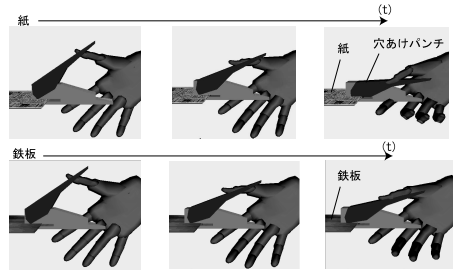
(d) ペンチのインタラクティブモデル

図 18 実験結果 (ペンチ)

Fig. 18 Experimental result (Pliers).

作用対象 (紙) と同様の結果であった。他の評価値が 0 となったのは、評価値 P3 が 0 となったためである。

図 18 に示すように、関節物体ペンチと作用対象 (針金) に対して、PadOpposition は、“つかむ” 機能、PalmOpposition は、“つかむ”、“つぶす”、“こわす” すべての機能、SideOpposition は、“つかむ” 機能があると推定された。その中で SideOpposition



(a) 穴あけパンチの機能推定シミュレーション

	Pad	Palm	Side
持ち易さ(P1)	0.08	0.54	0.69
作業効率性(P2)	0.38	0.06	0.26

(b) 穴あけパンチの持ちやすさ (P1) と作業効率性 (P2)

機能達成のし易さ(P3)	Pad	Palm	Side
つかむ	0.00	0.00	0.00
つぶす	0.00	0.00	0.00
こわす	1.00	1.00	1.00
総合評価値	Pad	Palm	Side
つかむ	0.00	0.00	0.00
つぶす	0.00	0.00	0.00
こわす	0.03	0.03	0.17

(c) 穴あけパンチの紙に対する機能達成のしやすさ (P3) と総合評価値

機能達成のし易さ(P3)	Pad	Palm	Side
つかむ	1.00	0.00	0.93
つぶす	0.00	0.00	0.07
こわす	0.00	1.00	0.00
総合評価値	Pad	Palm	Side
つかむ	0.03	0.00	0.16
つぶす	0.00	0.00	0.01
こわす	0.00	0.03	0.00

(d) 穴あけパンチの鉄板に対する機能達成のしやすさ (P3) と総合評価値

```

Shape :
Os : Punch.wrl
Ov : Punch.vxl
Og : (0.0,0.0,0.0)
Functional Pose :
Osp : V(0.0,0.0,1.0) P(0.0,0.0,0.0)
Ocross : Cross section shape on Osp
Oaxis : V(0.0,1.0,0.0) P(0.0,0.0,0.0)
Force :
Fcp : (9.0,10.7,0.0)
Fcf : Contact Force without actee
Fcf' : Contact Force with actee
Fy : 6.0[Mpa]
Lever :
Lp : Lever pattern(e)
Lθmax : 0.51[rad]
Ld : (0.0,0.0,1.0)
Lf : (0.0,0.0,0.0)
Lcp : N(-0.6114,0.7912,0.0) D(2.9)
Lbp : N(0.0,-1.0,0.0) D(-1.0)
Lis : Interaction space
Lip : (0.5,0.0,0.0)
Lia : 5.6[mm^2]
Spring :
Sk : 16.9[N/rad]
    
```

(e) 穴あけパンチのインタラクティブモデル

図 19 実験結果 (穴あけパンチ)

Fig. 19 Experimental result (Punch).

の“つかむ”が最も評価値が高くなり、主機能と推定された。他の評価値が0となったのは、評価値 P3 が0となったためである。

図 19 に示すように、関節物体穴あけパンチと作用対象(紙)に対して、すべての把持パターンが“こわす”機能があると推定された。その中で *SideOpposition* の“こわす”が最も評価値が高くなり、主機能と推定された。また、作用対象(鉄板)に対して、*PadOpposition* は“つかむ”機能が、*PalmOpposition* は“こわす”機能が、*SideOpposition* は“つかむ”機能があると推定された。その中で、*SideOpposition* の“つかむ”が最も評価値が高くなり、主機能と推定された。他の評価値が0となったのは、評価値 P3 が0となったためである。

### 4.3 検証実験

推定された主機能が妥当であるかを被験者の主観評価値と比較した。被験者は、年齢 20~25 歳、男 25、女 5 人の計 30 人である。検証実験方法はまず、(1) シミュレーションの実験と同一の実関節物体と (2) 同一の応力・ひずみ特性をもつ作用対象を被験者に提示し、被験者は実際に物体に触れながら、(A) 把持パターン、(B) 推定される機能の順位付けと優先度、(3) 可能な力学的機能(つかむ、つぶす、こわす)とその機能により達成される用途を選択する。

図 20 にシミュレーション実験結果と検証結果の比較を示す。Analysis by Reality-Based Simulation による推定結果と主観評価結果は、88.0% (全体で 26 種類の実験) 一致した。しかし、図 20 のピンセット(小)紙、ペンチ針金、穴あけパンチ鉄板に見られるように、主機能が一致していないものがある。

ピンセット(小)紙の場合、シミュレーション結果は、*PadOpposition* の“つかむ”が主機能と推定され、一方、主観評価実験において、*SideOpposition* の“つかむ”が主機能と推定された。シミュレーションでは、すべての把持パターンに対して“つかむ”機能が存在すると推定されたが、評価値計算の際、より少ない力で効率的に作用する機能が優先されるため、*PadOpposition* の“つかむ”が主機能と推定された。

ペンチ針金の場合、シミュレーション結果は、*SideOpposition* の“つかむ”が主機能と推定され、一方、主観評価実験は *PalmOpposition* の“つぶす”が主機能と推定された。シミュレーション結果では、*PalmOpposition* の“つぶす”機能が存在すると推定されている。しかし、シミュレーションにおける主機

		シミュレーション結果	主観評価実験	比較結果
把持の代用	洗濯ハサミ(小)	紙 (1)	(1)	○
		布 (1)	(1)	○
	洗濯ハサミ(大)	紙 (3)	(3)	○
		布 (3)	(3)	○
		ボール(5cm) (3)	(3)	○
		紙ハサミ(小)	紙 (3)	(3)
手の資質・機能を拡張		布 (3)	(3)	○
	ピンセット(小)	紙 (1)	(3)	x
		布 (3)	(3)	○
	ピンセット(大)	紙 (3)	(3)	○
		布 (3)	(3)	○
	トング(小)	紙 (3)	(3)	○
		布 (3)	(3)	○
		ボール(5cm) (3)	(3)	○
	トング(大)	紙 (3)	(3)	○
		布 (3)	(3)	○
		ボール(5cm) (3)	(3)	○
		ボール(8cm) (3)	(3)	○
新たな機能を含む	ペンチ	針金 (3)	(5)	x
	穴あけパンチ	紙 (9)	(9)	○
		鉄板 (3)	(8)	x
	ハサミ	紙 (9)	(9)	○
	布 (9)	(9)	○	
				22/25

- ① Pad つかむ④ Pad つぶす ⑦ Pad こわす
- ② Palm つかむ⑤ Palm つぶす ⑧ Palm こわす
- ③ Side つかむ⑥ Side つぶす ⑨ Side こわす

図 20 シミュレーション結果と主観者評価実験の主機能推定比較

Fig. 20 Simulation v.s. Subjective evaluation results.

能評価では、より少ない力で効率的に作用対象に作用する機能が優先されるため、*SideOpposition* の“つかむ”と推定された。

穴あけパンチ鉄板の場合、シミュレーション結果は、*SideOpposition* の“つかむ”が主機能と推定され、一方、主観評価実験は *PalmOpposition* の“こわす”が主機能と推定された。被験者は、穴あけパンチを渡された時に、穴あけパンチは穴を開ける、つまり、“こわす”機能があると思いついており、どのような把持であれば鉄板を“こわす”ことができるかと考え、主機能が *PalmOpposition* の“こわす”であると判断したと考えられる。シミュレーション結果では、*PalmOpposition* の“こわす”機能も存在すると推定されているが、シミュレーションにおいては、より少ない力で効率的に作用対象に作用する機能である、*SideOpposition* の“つかむ”機能が優先されるため、シミュレーション結果と主観評価実験の結果が一致しなかったと考えられる。

## 5. むすび

Analysis by Reality-Based Simulation アプローチと呼ぶ、実世界に依拠したシミュレーション結果の解析に基づいて、はさみのような機能をもつ関節物体の、

(1) 可能な力学的機能を推定し, 更に, (2) 主機能を呼ぶ最ゆるの力学的機能とその物体を把持する手の姿勢を, 推定する方法を提案した. はさみ, ペンチ, ピンセット等の7種類の関節物体の力学的機能を推定した実験結果を示し, 30人の被験者による主観評価実験との比較から提案手法の有効性を検証した.

## 文 献

- [1] H.T. Tanaka and K. Kushihaman, "Haptic vision," Proc. IEEE 16th Int. Conf. on Pattern Recognition, vol.2, Session1.7 Robotics, vol.II, pp.852-855, Aug. 2002.
- [2] 田中士郎, 西村憲吾, 田中弘美, "安定姿勢における形状対称性を用いた能動的3次元形状推定," 情処学論, vol.44, no.SIG 9(CVIM 7), pp.38-45, June 2003.
- [3] 田中士郎, 谷川武市, 阿部慶喜, 田中弘美, "ハプティックビジョンに基づく能動的物体重量推定," 情処学論, vol.44, no.SIG 17(CVIM 8), pp.51-60, Dec. 2003.
- [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] 植田直樹, 榎浜斎延, 平井慎一, 田中弘美, "ハプティックビジョンに基づく能動的レオロジー物体モデリングのための粘弾性パラメータ抽出," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, TVRSJ, vol.8, pp.237-246, 2003.
- [6] 島田伸敬, 上條真継, 松下浩一郎, 松谷 剛, 田中弘美, "ハプティックビジョンに基づく関節物体のインタラクティブモデリング," 信学論 (D), vol.J89-D, no.9, pp.2013-2024, Sept. 2006.
- [7] 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," 信学論 (D-II), vol.74-D-II, no.5, pp.601-609, May 1995.
- [8] Z. Duric, J.A. Fayman, and E. Rivin, "Function from motion," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.18, no.18, pp.576-578, 1996.
- [9] H. Hattori, K. Kise, T. Kitahashi, and K. Fukunaga, "Recognition of functions of objects based on models of dynamic functions," IPSJ, vol.36, no.10, pp.2277-2285, 1995.
- [10] 吉田成希, 北橋忠宏, "人間動作を通じての物体の機能的認識," 信学技報, PRMU2002-213, 2003.
- [11] K. Green, D. Egger, L. Stark, and K. Bowyer, "Generic recognition of articulated objects through reasoning about potential function," CVIU, vol.62, no.2, pp.177-193, 1995.
- [12] Stark and Bowyer, "Achieving generalized object recognition through reasoning about association of function to structure," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.13, no.10, pp.1097-1104, 1991.
- [13] C.L. Mackenzie and T. Iberall, THE GRASPING HAND, NORTH-HOLLAND, 1994.
- [14] 笠井紀宏, 堀井 健, 小谷賢太郎, "摘み動作における対象幅と安定把持力の関係," 平11年度日本人間工学会関西支部大会講演論文集, pp.175-178, 1999.
- [15] V. Mathiowetz, N. Kashman, G. Volland, K. Weber, M. Dowe, and S. Rogers, Grip and Pinch Strength: Normative Data for Adults, American Occupational Therapy Foundation, 1984.
- [16] 鎌倉矩子, 手のかたち 手のうごき, 医歯薬出版, 1989.
- [17] J.R. Napier, "The prehensile movements of the human hand," J. Bone and Joint Surgery, vol.38-B, pp.902-913, 1956.
- [18] T. Iberall, G. Bingham, and M.A. Arbib, "Opposition space as a structuring concept for the analysis of skilled hand movements," Generation and modulation of action patterns, vol.15, pp.158-173, 1986.
- [19] 日本機械学会(編), 材料力学ハンドブック, 日本機械学会, 1999.  
(平成17年7月22日受付, 18年9月27日再受付)



大田 博義

2003 立命館大・理工・情報卒. 2005 同大大学院理工学研究科博士課程前期課程了. 現在 (株) パナソニック MSE 勤務. 在学中, コンピュータビジョンの研究に従事.



木村 朝子

1996 阪大・基礎工・卒. 1998 同大大学院基礎工学研究科修士了. 同大学助手を経て, 立命館大学理工学部助教授. 現在, 同大情報理工学部メディア情報学科助教授. 工博. 実世界指向インタフェース, 複合現実感, ハプティックインタフェースの研究に従事. 2001より2002年まで Mayo Clinic にて Special Project Associate. ACM, IEEE, 情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員. 2005 日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞受賞.



島田 伸敬 (正員)

1992 阪大・工・電子制御機械卒, 1997 同大大学院博士後期課程了. 工博. 同年同専攻助手. 2001 同研究科研究連携推進室情報ネットワーク部門講師, 同研究科助教授を経て, 現在, 立命館大学情報理工学部知能情報学科助教授. コンピュータビジョン, ジェスチャ認識, ヒューマンインタフェース, インターネットソリューションの研究に従事. 情報処理学会, IEEE 各会員.



田中 弘美 (正員)

1975 お茶の水女子大・理・物理卒．1975  
(株)富士通勤務．1981 米国ロチェスター  
大学大学院コンピュータサイエンス学科修  
士課程了．1988 阪大大学院基礎工学研究  
科博士課程了．工博．1988 ATR 通信シス  
テム研究所客員研究員．1994 立命館大学  
理工学部情報学科教授．コンピュータビジョン，コンピュータ  
グラフィックス，バーチャルリアリティ，三次元画像通信の研究  
に従事．IEEE 会員．