

# リアリティーベース・シミュレーションによる 関節物体の力学的機能推定

Inferring Function of Articulated Objects through Reality-Based Simulation

大田博義<sup>1)</sup>, 木村朝子<sup>2)</sup>, 田中弘美<sup>2)</sup>

Hiroyoshi Ota, Asako Kimura and Hiromi T. Tanaka

1) 立命館大学 理工学研究科

2) 立命館大学 情報理工学部

(〒113 滋賀県草津市野路東 1-1-1, hiroyoshi@cv.ci.ritsumeai.ac.jp, asa@is.ritsumeai.ac.jp, hiromi@ci.ritsumeai.ac.jp)

**Abstract :** Recently, there are growing needs for haptic exploration to estimate and extract physical object properties such as mass, friction, elasticity, and function, etc.. In this paper, we propose a novel "Reality-Based Simulation" approach to inferring function of articulated objects, through reality-based simulation for function tests in virtual environments. We estimate the primary function by the virtual simulation using the model of articulated object which are observed in the real world, the prehension patterns which were performed by the research of Psychology and the actee model. Experimental results demonstrate the validity, effectiveness and performance of the proposed approach.

**Key Words:** *Function, Articulated Object, prehension*

## 1. はじめに

人工知能やコンピュータビジョンにおいて、物体の機能推定が試みられている。初期の研究では、物体（椅子等）の静的機能推定が行われてきた [1][2]。その後、動的機能が注目され、物体（レンチや栓抜き）と作用対象（ナット、栓抜き）の接触状態（物体 - 作用対象インタラクション）から推定する手法が提案された [3]。近年になり、人間（主体）動作に着目した動的機能推定も行われるようになった [4]。主体が、包丁などの物体を使用しているシーン（物体 - 主体のインタラクション）を撮影し、その画像を解析することによって機能推定するものである。しかし、作用対象の変化（物体 - 作用対象インタラクション）を画像から解析することは難しく、完全な機能推定とはいえなかった。図1に示すように物体の機能は、物体 - 主体 - 作用対象相互間のイ

ンタラクションによって達成されている。従来の手法では、物体 - 作用対象 - 主体を同時に観察することは困難であった。

一方、我々は、人間の手の能動的探索により獲得される触覚情報、特に重力、摩擦テクスチャ、粘弾性等の物体の力学的物理特性を画像情報から自動獲得する『ハプティックビジョン構想』を提案してきた [5]-[6]。この手法では、実世界における能動的接触とその結果起因された事象を非接触で能動的に画像観測することにより関節物体（パンチ、ハサミ、 Tongue など）の力学構造モデルを自動的に獲得することが可能である [6]。仮想空間中でデータグローブ、グラスプなどのハプティック装置を用いることにより、物体 - 作用対象 - 主体のインタラクションを実世界に忠実にシミュレーションすることができる。しかし、この場合物体にどのような機能があるかは、人間が実際に仮想物体と仮想作用対象を操作してみなければわからない。

そこで、本研究では人間が物体に触れることなく、しかも物体 - 作用対象 - 主体のインタラクションから物体の機能を推定するために、人間が物体を把持する際の心理学および人間工学の知見を利用する。具体的には、パンチ、ホッチキス、ピンセット等の関節物体を対象とし、外力の作用に対して、関節物体の持つテコ構造によって達成される力学的機能（掴む、壊す、つぶす）を推定した。また、シミュレーションにより推定された主機能が適当であるかを評価するために、被験者の判断（物体をどのように把持し、どの機能を使用するか）と比較する実験を行った。

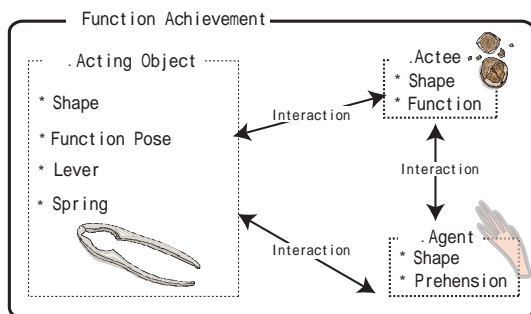


図1: 機能達成のインタラクション

2. リアリティーベースシミュレーションによる機能推定  
 機能を推定する方法として、1) 実世界で実際にロボットに機能テストをさせる方法と、2) リアリティーベースの仮想空間上(リアリティーベース)でシミュレーションを行う方法が考えられる。我々は、任意で多様な機能テストを行いたいという理由から後者を選んだ。ハプティックビジョンによって構築された実世界と忠実な仮想空間において、リアリティーベースシミュレーションで機能テストを行う。リアリティーベースで機能が推定されるため、推定された機能は実世界においても存在すると考えられる。

図2に全体の処理の流れを示す。まず、実世界に基づいた関節物体、作用対象、主体モデルを入力し、これらのモデルを用いたシミュレーションを行う。Step1) 入力された関節物体モデルの形状、安定姿勢と、主体モデル(人間の手)の形状、把持パターンから、可能な把持パターンを全て推定する。Step2) 各把持パターンについて、機能テストを行う。機能テストとは、関節物体モデルの形状、安定姿勢、テコ、バネ情報と、主体モデルの形状、把持パターン、力情報、作用対象モデルの形状、機能情報を用いたシミュレーションである。Step3) 機能テストで推定された複数の機能候補を「握りやすさ」、「力の増幅伝達度」の2点から評価し優先度を付ける。その結果、優先度の最も高い機能(主機能)が出力される。

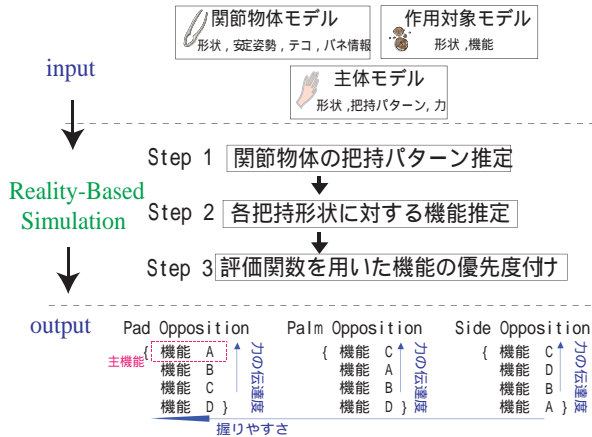


図2: 全体の処理の流れ

### 3. 関節物体, 作用対象, 主体のモデリング

#### 3.1 関節物体の力学構造モデリング

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安定平衡な姿勢を保つことが重要である。また実世界では、必ず重力が外力として働くため、物体は鉛直方向に対し対称性を持つと考えられている [5]。そこで我々は、関節物体が安定に機能するために必要な姿勢を図3のように表した [6]。図3の形状は、関節物体を鉛直方向に対する対称面で切断した形状を示している。Contact Plane, Support Planeは、人間が関節物体を持つ際の接触部分となり、外力を作用させる平面を Contact Plane, 物体を支持する平面を Support Plane とした。関節物体はテコを有しており、テコ情報を表すため、支点の位置、テコの回転方向、角度を考慮

した。回転角度は、Primary Axis に対して対称性を持つ。Interaction Space とは、作用対象に接触する空間である。

以上のデータを基に、関節物体の力学構造モデル(図4)を記述する。形状には、3次元サーフェイス形状  $O_s$ , 3次元ボリュームデータ  $O_v$ , 重心座標  $O_g$  を、安定姿勢には、関節物体の対称面  $O_{sp}$ , 対称輪郭形状  $O_{cross}$ , 関節物体の主要軸  $O_{axis}$  を、テコ情報には、テコパターン  $L_p$ , 関節物体の初期状態の角度  $L_{min}$ , 最大回転角度  $L_{max}$ , 回転の方向  $L_d$ , 回転軸の位置  $L_f$ , 接触面  $L_{cp}$ , 支持面  $L_{sp}$ , 作用空間  $L_{is}$  を、バネ情報には、バネ定数  $S_k$ , バネの位置  $S_p$  を記述する。

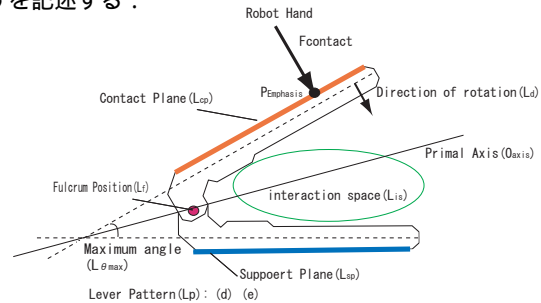


図3: 関節物体の安定姿勢

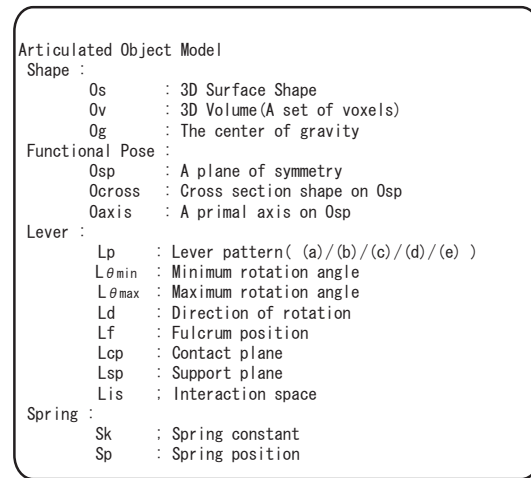


図4: 関節物体の力学的構造モデル

#### 3.2 作用対象のモデリング

図5に作用対象モデルを示す。作用対象の変化は様々であるが、本研究では、シンプルな問題から着手するために、作用対象に力を加えた場合の反力は線形に変化すると仮定した(図5Fpf)。また、機能は作用対象の変化に依存しているところが大きい。以上から、図5のようなモデルを作成した。 $F_s$ は、作用対象の3次元形状、 $F_{pf}$ は、機能と機能達成に必要な力を記述した。例えば、「壊す」という機能と機能に必要な力は、図5のように線形に表した。ある一定の力を超えると、作用対象は壊れ、「壊す」という機能が推定される。

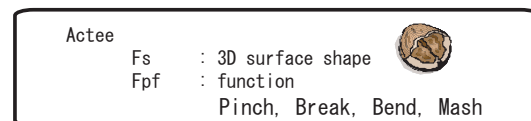


図5: 作用対象モデル

### 3.3 主体モデリング

人間は、作業の目的に応じて、物体を持つ手の把持形状が異なる。例えば、ペンを使って何か物を書くときと、落ちていたペンを拾うときは、異なった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 Naiper は、細かな作業を行う際に用いる 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 [8]。以後、Naiper の 2 種類を基に様々な把持の分類が提案されてきた。その中で、手の姿勢が物体の表面に対し、少なくとも 2 つの力を含んでいるということに着目し、手が力を適用することができる 3 つの基礎的なカテゴリ 6 について述べている [9]。Opposition Vector とは、物体を把持する際に、人間の手と物体の接触面に対する力が互いに対となる 2 点を結んだベクトルである。

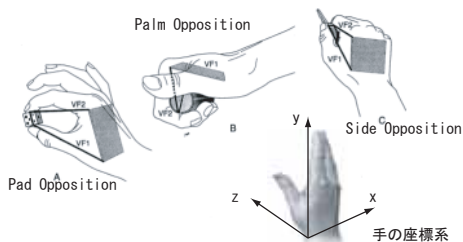


図 6: 把持パターン

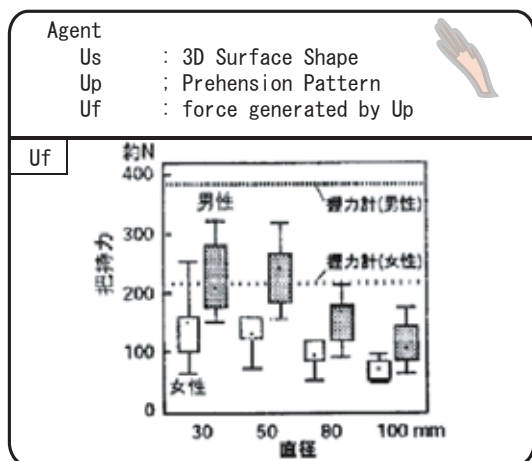


図 7: 主体モデル

#### ・ Pad Opposition(図 6A)

把持する際の Opposition Vector が、手の palm 座標系の y 軸に対して平行な把持であり、細かな作業を行う場合に用いる。

#### ・ Palm Opposition(図 6B)

把持する際の 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(図 6C)

把持する際の Opposition Vector が、手の palm 座標系 x 軸に対して平行な把持であり、上記の 2 つの中間に位置し、細かな作業を行いたい、もしくは、力を必要とする作業を行う場合に用いる。

我々は、主体の把持特性を考慮するために、上記の 3 つの把持パターンを主体モデルに記述した図 (7)。Us には手の 3 次元形状、Up は、把持パターンを記述する。把持パターンには、手の姿勢を表すため、指の位置、palm 平面、各関節の角度 (可動範囲) を記述している。Uf には、各把持パターンを用いた際、物体にどのくらいの把持力が生じるかを記述する (くらしと JIS センターの調べ)。図 7 Uf は、健康者の円筒把持力を示しており、Palm Opposition の把持力とした。

### 4. 処理の流れ

#### Step1) 関節物体の把持パターン推定

関節物体の 3 次元形状から把持するために使用される可能性の高い把持パターンを推定する。1) まず、関節物体の Contact Plane を通り、Contact Plane との角度と Support Plane の角度が等しく、Symmetry Plane 上に存在する Opposition Vector を求める。2) 次に、求めた Opposition Vector の長さが、把持パターン Up の許容範囲であれば、把持可能であると判断する。

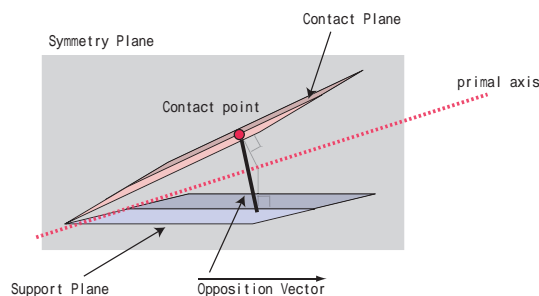


図 8: Opposition Vector 計算

#### Step2) 各把持パターンに対する機能推定

関節物体を主体が把持可能なパターンを推定した後、各把持パターンに対して機能テストを行う。ここで機能テストとは、関節物体 - 主体 - 作用対象のインタラクションシミュレーションを指す。例えば、主体が関節物体に  $F_{ag}(t)$  という力を加えると、以下の式が成り立ち、作用対象に  $F_{ac}(t)$  という力が加わる。 $F_{ag}(t)$  は、主体モデルの Uf より参照する。

$$F_{ag}(t) \times D_{ag} = F_s(t) \times D_s + F_{ac}(t) \times D_a \quad (1)$$

ここで、 $D_{ag}$ ,  $D_s$ ,  $D_a$  それぞれテコの支点と作用対象、支点とバネの位置、力点と支点の位置との距離を表す。 $F_s$  はバネの反力を表す。例えば、作用対象モデルの機能「壊す」機能の機能テストを行う場合、 $F_{ac}(t)$  が  $F_{pf}$  の一定の力を超えると、その関節物体は機能「壊す」が在ると判断される。

#### Step3) 評価関数を用いた機能の順位付け

入力された関節物体のモデル 1 つに対し、複数の機能が推定される (図 2) そこで、物体の握りやすさ、力の伝達増幅度を評価し、両者とも評価の高いものを主機能とする。

#### ・ 握りやすさの評価

人間工学の分野において、物体の握りやすさを評価する研究が行われている [10]。人間が円筒物体を把持する際、直

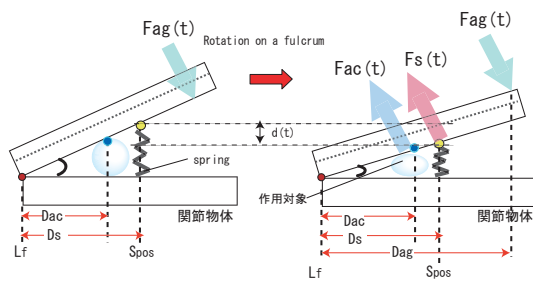


図9: テコによる力の計算

径 30-40mm の円筒最も握り易いと判断されている。この結果は、我々が主体モデルで用いた、把持パターンの把持の力の大きさのピークと一致している。よって我々は、物体の握りやすさは、把持パターンの把持の力に応じて変化すると考えた。例えば、*Palm Opposition* は、把持の直径を *Opposition Vector* の長さとし、直径が 30-40mm の場合は評価値 10、30-50mm の場合は評価値 7、50-80mm の場合は評価値 5、80-100mm の場合は評価値 3 と評価した。30mm 未満、100mm より大きい値のときは、把持不可能と判断し、評価値 0 とした。

・力の伝達増幅度

関節物体のテコ情報から、力の増幅度が高いものを選択することにより、効率よく達成された機能を優先度を高くする。例えば、機能「Break」の達成までの力を  $F$ 、把持パターンの把持の力を  $f$  と置くと、 $F$  が  $f$  に近いものが最も効率よく達成された機能と選択する。 $f-F$  の絶対値が、10[N] 未満の場合は評価値 10、10 以上 20[N] 未満の場合は評価値 8、20 以上 30[N] 未満の場合は評価値 5、30 以上 40[N] 未満の場合は評価値 3、それ以上は評価値 0 とした。

5. 実験・結果

5.1 機能推定実験

ハプティックビジョンによって獲得された図 10 に示す形状を持つ 3 種類の関節物体モデル、機能「Break, Pinch, Bend, Mash」の  $F_{pf}$  を記述した作用対象モデル、図 5 に示す主体モデルに対して、リアリティーベースシミュレーションを行い、主機能を推定した。

形状 Stapler に対する実験結果を図 11 に示す。図のように Stapler が持つ機能の中で最も握りやすく、力の伝達度の高い主機能は、Side Opposition の把持に対する Pinch と推定された。

5.2 被験者実験

推定された主機能が妥当であるかを被験者の意見と比較した。すると、ほとんどのユーザが推定され主機能を答えたが、違う意見を答えるユーザも存在した。それは、Palm Opposition の機能 break であった。これは、力の大きさが人間各々によって異なるためだと考えられる。例えば、ホットキスなどを使用する際、細かな作業を行いたい人と、弱い力を補いより力の加わる把持をする人がいるためである。



図 10: 実験対象とした関節物体

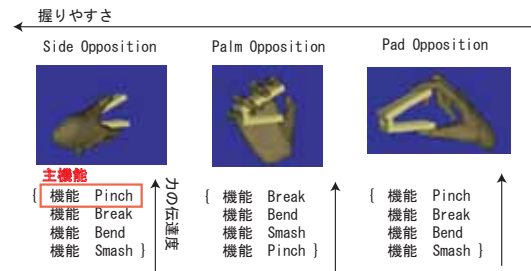


図 11: 実験結果

6. まとめ

我々は、ハプティックビジョンによって構築された実世界と等価な仮想空間上、つまり、リアリティーベースにより、機能テストを行い、関節物体の機能を推定する手法を提案した。実世界と等価な仮想空間上でシミュレーションを行うので、仮想空間上で推定された機能は実世界にも存在することになる。仮想空間上で行うメリットは、任意の作用対象に対して、つまり、任意の機能テストを行えることであり、実世界で機能推定を行うより効率的に機能が推定できた。また、本研究は、物体-主体-作用対象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物体、主体、作用対象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

参考文献

- [1] T.Yamamoto, H.Kato, S.Sato and S.Inokuchi: *3-D Object Recognition Using Functional Models*. IEICE, Vol.74-D-2[5], pp.601-609, 1991.
- [2] K. Green, D. Egger, L. Stark and K. Bowyer: *Generic Recognition of Articulated Objects through Reasoning about Potential Function*. CVIU, Vol.62[2], pp.177-193, 1995.
- [3] H.Hattori, K.Kise, T.Kitahashi and K.Fukunaga: *Recognition of Functions of Objects Based on Models of Dynamic Functions*. IPSJ, Vol.36[10], pp.2277-2285, 1995.
- [4] Z.Duric, J.A. Fayman and E. Rivin: *Function From Motion*. IEEE PAMI, Vol.18[6], pp.576-578, 1996.
- [5] K.Nisimura, H.T. Tanaka: *Active Shape Inferring Based on the Symmetry in Stable Poses -Shape from Function Approach-*. IEEE Proc. on In. Conf. on Pattern Recognition(13th ICPR), pp.136-140, Aug.1996.
- [6] M. Uejo, H.T. Tanaka: *Active Modeling of an Articulated Object with Haptic Vision.*, IEEE 17th Int. Conf. on Pattern Recognition, Aug. 2004.
- [7] C. L.Mackenzie, T.Iberall: *THE GRASPING HAND*. NORTH-HOLLAND, 1994.
- [8] Napier, J.R.: *The prehensile movements of the human hand*. Journal of Bone and Joint Surgery, 38B, pp.902-913, 1956.
- [9] Iberall, T., Bingham, G., Arbib, M.A.: *Opposition space as structuring concept for the analysis of skilled hand movements*. In H.Heuer C.Fromm(Eds.), GMAP, pp.158-173, 1986.
- [10] Y.Takao, K.Yamamoto, K.Hyodou, M.Koyama: *Sensory Evaluation of Grip Using Cylindrical Objects*. JSME, Vol62, No.602, pp.3999-4004, 1996.