

動的機能のモデルに基づく物体の機能認識

服部 洋一^{†,☆} 黄瀬 浩一[†]
北橋 忠宏^{††} 福永 邦雄[†]

知能ロボットの視覚など、コンピュータによる画像理解の利用を考える場合、物体の形状から、カテゴリだけではなく機能に関する情報を得ることが重要となってくる。このような観点から、本論文では、物体の機能を記述するモデル（機能モデル）、および機能モデルを用いて物体の機能を認識する手法を提案する。モデル化の対象は、人間が用いる道具の機能のうち、使用の際に動作を伴うような機能（動的機能）とする。本モデルの特徴は、物体の機能と形状を対応付ける手がかりとして、(1) テコ、輪軸などの単純な機能を持つ構造（要素機械）、(2) 物体が機能する際に作用する対象（作用対象）の2種類の概念を導入し、機能を記述することにある。一方、機能の認識法としては、多面体物体の完全な3次元形状データを入力し、機能モデルの記述を満たすかどうかをトップダウン的に判定する手続きを提案する。本手法は、(1) 作用対象と適切に接触できるか、(2) 力が十分拡大されるか、(3) 使用する際の動作が可能か、の三つの基準で入力物体の形状を評価し、機能を認識するものである。また本論文では、テコ、輪軸に基づいて、栓抜き、スパナ、ドライバの機能モデルが記述可能なことを示すと共に、これらの機能モデルを用いた認識実験の結果を示す。さらに、実験結果に基づいて、機能モデルと認識手法の有効性、問題点について考察する。

Recognition of Functions of Objects Based on Models of Dynamic Functions

HIROKAZU HATTORI,^{†,☆} KOICHI KISE,[†] TADASHI KITAHASHI^{††}
and KUNIO FUKUNAGA[†]

In order to realize a vision module of an intelligent robot, it would be important to derive information about a function of an object from its shape, as well as a category of an object. In this paper, we propose a method of recognizing an object's function using a functional model. As functions to be modeled, we consider dynamic functions of hand-tools, such as a "magnifying force" function. In our functional model, the relation between a function of a hand-tool and its shape is represented using the following knowledge: (1) knowledge about elementary machines such as a lever and a wheel-axle, (2) knowledge about *funcstands*, i.e., an object contacting with a hand-tool. As a recognition method, we propose a top-down algorithm which determines whether an input polyhedral object satisfies a function described in the functional model. Our method recognizes a modeled function by verifying the following points: (1) appropriateness of contact with a *funcstand*, (2) magnification ratio of applied force, (3) performability of human's action required to use a hand-tool. In addition, we discuss the effectiveness and drawbacks of the proposed method, based on the experimental results on recognition of functions of a bottle-opener, a wrench and a screw-driver.

1. はじめに

我々は、物体の形状から様々な情報を得ることができる。最も基本的な情報は物体のカテゴリであろう。

物体が人工物（以下、単に物体と呼ぶ）である場合には、他にも次のような情報を得ることができると考えられる。

- 用途：この物体を何に使うのか。
- 使用法：この物体をどのように使うのか。
- 形状の説明：この物体はなぜこのような形をしているのか。

これらの情報は、物体の持つ機能と深く関連している¹⁾。我々は物体に関する知識を持っているため、物体の機能をカテゴリを介して得ることができる。例え

[†] 大阪府立大学 工学部 情報工学科

Department of Computer and Systems Sciences,
College of Engineering, University of Osaka Prefecture

^{††} 大阪大学 産業科学研究所

The Institute of Scientific and Industrial Research,
Osaka University

[☆] 現在、グローリー工業(株)

ば、物体が「椅子」ならば、座るためのものであることが分かる。ところが、物体のカテゴリを介さず、形状を直接解釈することによって、同様の情報を得ることも可能である。我々が日常的に行う「座れそうな場所（物体）」という解釈は、その一例と言える。

コンピュータによる画像理解、特に知能ロボットの視覚を考える場合、物体の形状から、カテゴリだけではなく機能に関する情報を得ることは重要となってくる²⁾。文献3), 4)では、重要性を示す典型として、機能的に等価な代用品の発見 (functional improvisation) が挙げられている。具体例として文献3)では、釘を打つというタスクに対してハンマーが見つからない場合、手近にある代用品 (ドライバ) を探し、どのように使えば良いかを推論する処理が示されている。

本論文では、同様の観点から、物体の形状を解釈し、与えられたタスクを実行するためにその物体が使用可能かどうかを判定する手法、すなわち、物体の機能の認識法を提案する。また、機能の認識を実現するために用いるモデル (機能モデル) についても述べる。

ところで、物体の機能は、その物体が機能する際に動作を伴うか否かにより、静的 (状態維持的) な機能と動的 (動作支援的) な機能に分類できる。静的な機能を持つ物体としては、「椅子」、「机」、「本棚」などを挙げることができる。例えば、椅子の機能は人間の着座姿勢を支持することである。一方、動的な機能を持つ物体には、「栓抜き」、「スパナ」、「ドライバ」、「ハサミ」などがある。従来の機能モデルに関する研究では、このうち静的な機能を扱うものが多い^{5), 6)}。これに対して、本論文では動的な機能を対象とする^{7), 8)}。動的な機能を持つ物体には、単一の剛体からなる物体 («栓抜き」など)、関節を持つ物体 («ハサミ」など) があるが、本論文では前者の物体を対象を絞る。

本手法は、多面体物体の完全な3次元形状を入力とし、仮定した機能を満たすかどうかをトップダウン的に判定するものである。本手法の特徴は、物体の機能と形状を対応付ける手がかりとして、テコ、輪軸などの単純な機能を持つ構造 (要素機械) の概念を導入すること、および要素機械に加えて物体が機能する際に作用する対象 (作用対象^{5), 9)}) を用いて機能を記述することにある。また、テコ、輪軸に基づいて「栓抜き」、「スパナ」、「ドライバ」の機能モデルを記述すると共に、それらを用いた認識実験から、本手法の利点、問題点について考察する。

2. 機能のモデル化

2.1 道具の機能と形状

椅子や栓抜きなど、我々の周囲にある単純な道具には、力の変換という機能をもつもの (以後、単に道具と呼ぶ) が多い。例えば、椅子の機能は、人間の体から座面に与えられた力の方向を逆方向に変換して、人間の体に加えることで達成される。また、栓抜きの機能は、人間の手から回転方向に与えられた力の大きさを変換して、栓に加えることによって達成される。

このような道具の機能は、道具の形状と密接な関連性がある。例えば、椅子は、人間の着座姿勢を支持するのに適した形状の座面を持ち、栓抜きは、栓の適切な箇所力に力を加えられるような形状を持つ。したがって、道具の形状と機能の関係をモデル化できれば、ある形状の物体が、ある機能を持つかどうかを判定することができると考えられる。

2.2 要素機械

以上のように、道具の機能と形状には関連性があるが、一方で道具の形状のうち、機能とは余り関係のない部分 (飾りなど) があるのも事実である。また、同じ機能を実現する場合でも、様々な形状があり得る (椅子の足など)。したがって、機能と形状を対応付けるには、形状のどのような特徴が機能と本質的に結びついているのかを選択するための知識が必要である。

本論文では、このような知識として、機能を実現するための構造 (要素機械と呼ぶ) を導入する。要素機械とは、具体的にいうと、「斜面」、「テコ」、「輪軸」など、機械を構成するプリミティブ¹⁰⁾であり、力の変換などの単純な機能を、単純な物理的構造により実現するものである。

複雑な機能をもつ道具をモデル化するためには、まず各々の要素機械のモデル化と有効性の検討が必要である。そこで本論文では、要素機械のうち、テコと輪軸に着目し、いずれか一方の要素機械だけに実現されている道具を対象を絞る。

2.3 テコの記述

テコの構造は、剛体上にある支点、作用点、力点の3点により特徴付けられる。機能は、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。変換の割合は、支点-力点間、支点-作用点間の距離によって決定される。輪軸の回転中心を支点と考えれば、輪軸とテコは同じ機能と構造を持つと考えられることから、以下では輪軸を含めてテコを考える。

本手法では、要素機械を、従うべき制約を用いて表現する。制約には、力の変換に関する制約、動作に関

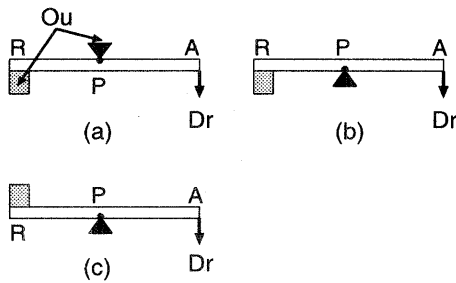


図1 テコの接触状態

Fig. 1 Contacting states of a lever.

する制約の2種類を設ける。

[力の交換に関する制約]

この制約は、与えられる力と得られる力の関係を表す制約であり、力と距離に関する次のよく知られた関係を表す。

$$\text{dist}(P, A) / \text{dist}(P, R) = F_r / F_a \quad (1)$$

ここで、 P , R , A , F_r , F_a は、それぞれ支点、作用点、力点、作用点で得られる力の大きさ、力点に加えられる力の大きさを表す。また、 $\text{dist}(P, A)$ と $\text{dist}(P, R)$ は、支点、力点、作用点を、テコの回転軸に垂直な平面に投影したときの点間の距離である。

[動作に関する制約]

つりあいを取る場合を除けば、テコが機能するためには回転動作が必要である。動作についてさらに詳しく見ると、次の2種類の制約を満たす必要がある。

まず、力を伝達するために満たさなければならない制約について述べる。テコが機能するためには、力を伝える対象に接触しなければならない。しかし、図1(a),(b)のような接触状態では、テコは対象物 O_u に力を伝えることなく D_r 方向に空転してしまう。ここで D_r は、テコが機能する際に回転する方向である。対象物 O_u に力を伝えるためには、図1(c)に示されるように、対象物 O_u を固定した場合、テコが支点、作用点を中心として D_r 方向に回転不可能でなければならない。この制約は、次のように書くことができる。

$$\begin{aligned} \text{unrotatable}(\text{対象物} : O_u, \\ \text{軸} : P, \text{方向} : D_r) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{unrotatable}(\text{対象物} : O_u, \\ \text{軸} : R, \text{方向} : D_r) \end{aligned} \quad (3)$$

次に、テコが力を伝達しながら回転する際の制約について述べる。テコが機能するためには、少なくともある一定の角度 A_r だけ、支点を軸として回転可能でなければならない。このとき、テコの回転に伴って変形あるいは回転する対象物（栓抜きに対する栓、スパナに対するナットなど）を除けば、テコの回転が阻害

されてはならない。この制約は、次のように書ける。

$$\begin{aligned} \text{rotatable}(\text{対象物} : O_r, \\ \text{軸} : P, \text{方向} : D_r, \text{角度} : A_r) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで対象物 O_r とは、テコの周囲に存在する物体のうち、テコの回転に伴って変形または回転する対象物を除いたものである。

2.4 作用対象

要素機械テコによって構成されている道具には、「栓抜き」、「スパナ」など様々なものがある。これらの道具は、それぞれに固有の機能を持ち、また形状も大きく異なる。したがって、要素機械だけでは、道具の機能と形状を対応付けることはできない。

これらの道具についてさらに詳しく考えてみると、栓抜きは手の力を栓を開けるための力に変換するテコであり、スパナは手の力をネジをまわすための力に変換するテコであると言える。このように、同じ要素機械により構成されている道具でも、道具の作用する対象（作用対象）によって、機能が異なってくる。また、テコが作用対象に力を伝達するためには、作用対象と適切に接触しなければならない。このことは、テコの形状のうち、作用対象と接触する部分は、作用対象の形状から強い制約を受けることを意味する。

以上の事項を表現するため、本手法では、作用対象について次の情報を記述する。

- 作用対象の形状
- 道具が作用対象に接触する位置
- 作用対象に対して道具が回転する方向と回転角
- 要求される力の大きさ

ただし、手については具体的な形状や可能な動作を与えることは困難であるため、本手法では、入力物体の凸エッジを与えることによって、その周囲が手で握れるかどうかを判定する手続き **grasp** によって評価する。また、手から発生できる力の大きさを別に記述しておく。

2.5 機能モデル

機能モデルは、要素機械の記述と作用対象の記述からなる。以下、栓抜きの機能を例に、機能モデルの具体的な記述について述べる。

(1) 作用対象の記述

栓抜きの作用対象としては、図2に示す瓶と栓、および手が与えられる。図2において、 D_r は栓抜きの回転方向、 A_r は栓を開けるために最低限必要な回転角を示している。さらに栓には、点 P_r と直線 L_p を与え、作用点 R は P_r と接触するものとし、支点 P は L_p と接触するものとする。また、栓を開けるために要求される力 F_r は、手から得られる力 F_a を1と

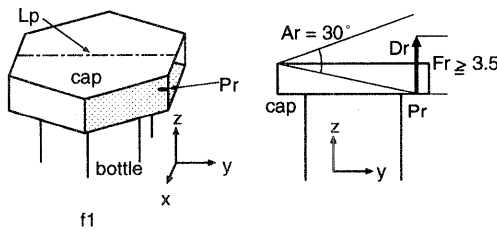


図2 栓抜ききの作用対象
Fig. 2 Function of a bottle opener.

した場合、 $F_r \geq 3.5$ である。なお、瓶は固定され動かないものとする。

(2) 要素機械の記述

栓抜ききの要素機械の記述は、作用対象の記述に示された力の大きさなどの値を、テコの記述の制約 (1) ~ (4) に代入することにより得られる。栓抜ききに対するテコの記述を以下に示す。

$$\text{dist}(P, A) / \text{dist}(P, R) \geq 3.5 \quad (5)$$

$$\text{unrotatable}(\text{対象物} : (\text{cap}, \text{bottle}), \text{軸} : P, \text{方向} : D_r) \quad (6)$$

$$\text{unrotatable}(\text{対象物} : (\text{cap}, \text{bottle}), \text{軸} : R, \text{方向} : D_r) \quad (7)$$

$$\text{rotatable}(\text{対象物} : (\text{bottle}), \text{軸} : P, \text{方向} : D_r, \text{角度} : 30^\circ) \quad (8)$$

rotatable と unrotatable の制約で対象物が異なるのは、栓抜ききが機能する際に栓が変形するためである。

3. 多面体認識

3.1 処理の概要

本手法は、2章で述べた機能モデルを用いて、入力物体が、仮定した機能を持つかどうかをトップダウン的に判定するものである。入力は、物体を多面体近似して得られた3次元形状データである。この形状データは、凸点、凹点、凸エッジ、凹エッジ、面の5種類の構成要素により記述されている。処理は、入力物体の構成要素から支点、力点、作用点の候補を生成し、候補に基づいて入力物体と作用対象を接触させた後、機能モデルに記述された制約を満たすかどうかを検査するという生成検査法である。制約を満足する支点、力点、作用点の組が得られれば、入力物体は仮定した機能を持つと判定し、逆に得られなければ機能を持たないと判定する。

3.2 追加制約の導出

生成検査法では、正しい候補を生成するという条件の下で、いかに不適当な候補の生成を抑えるかが、効率化の鍵となる。ところが、機能モデルに記述された制約 (5) ~ (8) は、物体と作用対象を接触させて相対

表1 追加制約 (c1) を導出するための知識

Table 1 Knowledge for deriving additional constraints (c1).

接触部分の組	接触状態	回転自由度	回転軸
(面, 面)	面接触	1	面の法線
(面, 凸エッジ)	線接触	2	面の法線, 凸エッジ
(面, 凸点)	点接触	3	
(凹エッジ, 凸エッジ)	線接触	1	凸エッジ (凹エッジ)
(凹エッジ, 凸点)	点接触	3	
(凸エッジ, 凸エッジ)	線接触	1	凸エッジ
(凸エッジ, 凸点)	点接触	3	
(凹点, 凸点)	点接触	3	
(凸点, 凸点)	点接触	3	

位置を決めた後でなければ評価できないため、不適当な候補の生成を抑える目的には利用できない。そこで本手法では、認識処理に先立ち、候補の生成に利用可能な制約、すなわち作用対象との相対位置に関係なく物体単独で評価できる制約を、機能モデルから導出する。具体的には、支点、力点、作用点 (物体と作用対象の接触部分) に着目して、(c1) 接触部分の形状に関する制約、(c2) 接触部分間の空間的關係に関する制約の2種類を求める。以下、各々について述べる。

(c1) 接触部分の形状に関する制約

作用対象と接触する部分を、作用対象の形状、および要求される回転方向をもとに、多面体を構成する5種類の構成要素の中の可能なものと対応付ける。このために本手法では、表1に示す知識を用いる。表1の「接触部分の組」には、二つの多面体物体において、接触可能な構成要素の組を表している。例えば、(面, 凸エッジ)とは、一方の物体の面と他方の物体の凸エッジが接触する場合を表す。また「接触状態」は、接触部分の組による接触が、面接触、線接触、点接触のいずれであるかを表す。「回転自由度」、「回転軸」には、それぞれ、接触状態を保つという条件の下で物体と作用対象の間に残っている回転自由度^{*}、回転自由度が2以下のときの回転軸を記述している。

栓抜ききの場合、支点と作用点は、それぞれ栓の上面、下面と接触する。したがって、支点と作用点は面に接触可能な構成要素でなければならない、凸点、凸エッジ、面のいずれかに限られる。さらに、支点、作用点は、栓の上面、下面との接触状態を保ったまま、 D_r 方向に回転しなければならない。したがって、凸点、凸エッジ

^{*} 本論文では、接触状態を保たない回転、例えば面接触が線接触に変化する回転を考えない。

のいずれかに限られる。一方、力点は、凸エッジを入力とする手続き **grasp** によって評価される。したがって、力点には凸エッジが選択される。

(c2) 接触部分間の空間的關係に関する制約

入力物体において、複数の接触部分が同一の作用対象に接触する場合、これらの接触部分間の空間的關係は作用対象の形状から制約を受ける。このような制約には様々なものが考えられるが、ここではその一つとして、接触部分間の距離に関する制約を求める。

栓抜きの場合、支点-作用点間の距離は、図2に示す直線 L_p 上の点と点 P_r の最大距離、最小距離の範囲内でなければならない。

以下では、導出された制約 (c1), (c2) をまとめて制約 (a) と呼び、機能モデルに記述された制約 (5) ~ (8) を制約 (b) と呼ぶ。

3.3 認識の手順

本手法では、ステップ1において接触部分の候補を生成し、ステップ2, 3で候補の妥当性を検査する。以下では、手順に沿って述べる。

[ステップ1: 候補の生成]

制約 (a) に従って、作用対象との接触部分の候補を生成する。栓抜きの場合、支点、作用点の候補として、(c2) の距離の制約を満たすような、凸エッジまたは凸点を選択される。力点の候補としては、前述の理由から、凸エッジが選択される。また、すべての候補が検査され、それ以上候補が存在しない場合は、仮定されたカテゴリには属しないと判定して終了する。

[ステップ2: 接触]

入力物体と作用対象の相対位置を決定するため、ステップ1で生成された候補に基づいて、入力物体を作用対象に接触させる。

栓抜きの場合、作用点の候補が点 P_r と接触し、支点の候補が直線 L_p と接触するように物体を移動させる。ところが、この条件では入力物体と作用対象の相対位置を一意に決定できずに自由度が残る。例えば、支点と作用点の候補が共に凸点の場合、入力物体は支点と作用点の候補を通る直線を軸として回転可能である。支点と作用点の候補が共に凸エッジの場合には2自由度が残る。そこで本手法では、残りの自由度に対して並進、回転のパラメータを設定し、そのパラメータに適当な初期値を与えることにより、入力物体を作用対象に仮接触させる。例えば、支点、作用点の候補が凸エッジならば、凸エッジの中点を P_r , L_p と接触させる。

次に、物体と作用対象の占める空間が重複するかどうかを評価する。両者が空間的に重複する場合、実際

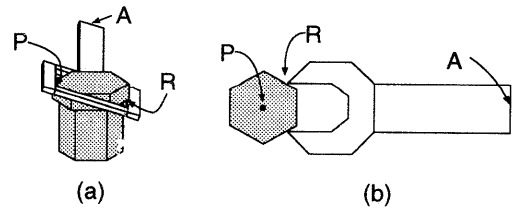


図3 不適当な接触状態

Fig. 3 Inappropriate contacting states.

には接触不可能であるため、相対位置を変えて再度、空間の重複を評価する。具体的には、並進、回転のパラメータに対して、適当に量子化した値を順に与えていく。可能な値をすべて試しても空間的に重複しない相対位置が得られない場合には、ステップ1に戻って他の候補を試す。一方、両者が空間的に重複しなければ接触可能であるため、次の処理に移る。

[ステップ3: 制約式の評価]

入力された形状が、制約 (b) を満たしているかどうかを評価する。制約がすべて満たされる場合は、仮定した機能を持つと判定して終了する。そうでない場合は、ステップ1に戻って次の候補を生成する。例えば、図3(a)に示す候補は2.5節に述べた制約(5)を満たさず、図3(b)に示す候補はスパナに対する制約(3)を満たさないため、不適当と判定される。

ここで、**unrotatable** の制約は次のように評価される。まず、制約に指定された軸と方向に基づいて、入力物体を微小な角度だけ回転させる。次に、動作後の入力物体と作用対象が同じ空間を占めるかどうかを評価する。両者が同じ空間を占めていれば制約は満たされる。一方、**rotatable** の制約は次のように評価される。まず、指定された軸、方向、角度に基づいて入力物体を回転させ、入力物体の回転に伴って掃引される空間を求める。次に、作用対象のうち O_r に指定された部分が占める空間と掃引された空間が重複するかどうかを検査する。両者が同じ空間を占めていなければ制約は満たされる。物体を回転させる際の回転軸は次のように定める。支点(作用点)が凸エッジの場合には、エッジを回転軸とする。凸点の場合には、支点(作用点)を通り、直線 L_p に垂直で栓の上面と並行な直線を回転軸とする。

4. 実験と考察

4.1 機能モデルと認識対象

2章に述べた栓抜きに加え、スパナ、ドライバの機能モデルを作成し、認識実験を行った。これらのモデルは、すべてテコに基づいて記述した。栓抜きの作用

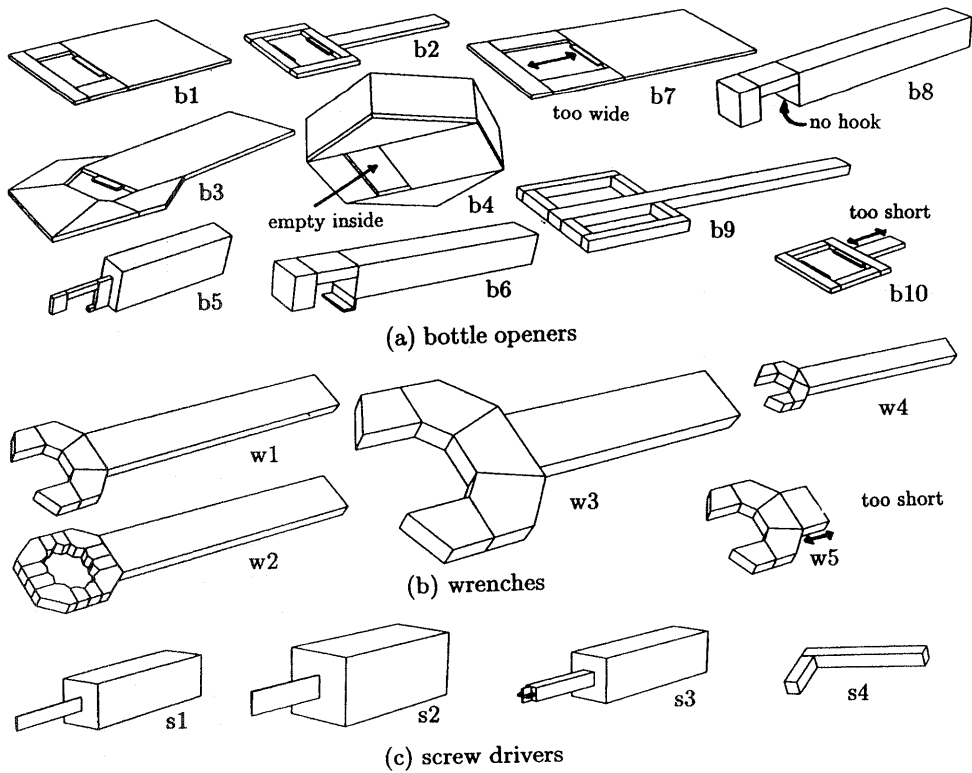


図5 実験対象

Fig. 5 Objects for experiments.

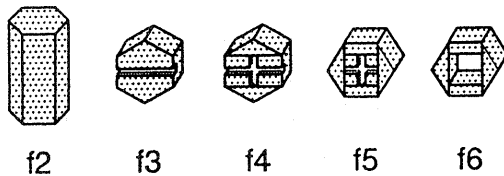


図4 スパナとドライバの作用対象

Fig. 4 Functands of a wrench and a screw-driver.

対象としては、図2に示す栓付きの瓶f1を与えた。スパナの作用対象としては、図4に示すナットf2を与えた。またドライバの作用対象としては、図4のf3～f6に示す形状の異なる4種類のネジを与え、各々のネジを作用対象とした場合について実験を行った。

認識対象とした入力物体を図5に示す。これらのうち、b1～b6は実際に存在する栓抜ききの形状を多面体近似した例であり、b7～b10はそれらに対する反例（ニアミス）である。同様に、w1～w4の物体はスパナの例、w5はw1に対する反例であり、s1～s4の物体はすべてドライバの例である。

4.2 実験結果

各モデルを用いて、すべての入力物体を対象に認識

表2 実験結果

Table 2 Experimental results.

モデル	作用対象	認識結果
栓抜き	f1	b1 - b6
スパナ	f2	w1, w2, b8
ドライバ	f3	s1, s2
	f4	s1, s2, s3
	f5	s1, s3
	f6	s4

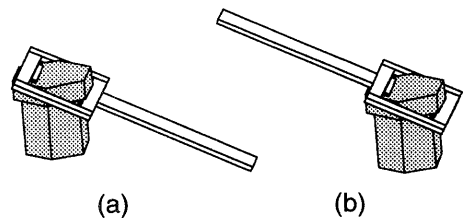


図6 生成された接触状態

Fig. 6 Generated contacting states.

実験を行った。実験結果を表2に示す。ここで、認識結果の欄には、仮定した機能を満たすと判定された入力物体を、図5の番号を用いて示している。

栓抜ききのモデルを用いた場合、b1～b6の物体が栓

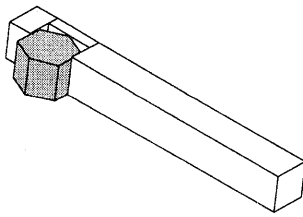


図7 スパナとして機能する栓抜き反例
Fig. 7 Near-miss object of a bottle opener functioning as a wrench.

抜きとして機能し、b7～b10の反例はすべて機能しないと判定された。反例の中には、実際の栓抜きと形状が非常に類似した物体もあるが、これらも正しく判別された。また、b1～b4の物体に対しては、図6に示すような2通りの接触状態が可能であることも導かれた。

スパナについては、w1, w2, b8の物体がスパナの機能を持つと判定された。w3, w4の物体がスパナとして機能しないと判定された理由は、作用対象のナットとこれらの入力物体が正しく接触できないためである。与えられるナットの大きさによっては、w3あるいはw4の物体がスパナの機能を持ち、w1, w2の物体が機能を持たないと判定される場合もあり得る。また、栓抜きの反例として与えた物体b8が、スパナとして機能すると判定された理由は、物体b8と作用対象f2が図7のように接触できるためである。

ドライバーについては、表2に示すように、作用対象の形状に応じて異なる結果が得られた。

以上の結果から、本手法は、与えられた作用対象に応じて、機能を満たす物体を選択することができると言える。特に、物体b8がスパナの機能を持つと判定されたことから、本手法は、機能的に等価な物体を発見する能力（functional improvisation）の一側面を実現するものと言えよう。また、入力物体の使用に際して、作用対象とどのように接触させるべきかについても、認識結果に付随して情報を得ることができる。この点も、本手法の特徴の一つと言える。

4.3 考察

ここでは、機能モデルの記述や認識実験を通して明らかとなった本手法の問題点について述べると共に、本手法を拡張して様々な機能を持つ物体に適用するための課題について述べる。

(1) 機能モデルの表現力

まず、提案した機能モデルは、テコに基づく物体の機能を適切に表現しているかについて考察する。現在の機能モデルでは、支点、作用点、力点が、入力物体、

作用対象のいずれに存在するかが固定的に記述されている。例えば、栓抜きの場合には、3点すべてが入力物体にあることが記述されている。しかし、このような記述は適切ではない場合がある。例えば、栓抜きを固定し、栓抜きと接触させた瓶の端を持って回転させれば、栓抜きの機能が達成される（栓抜きの柄は不要）。この栓抜きでは、力点が入力物体になく、テコの構造も栓抜きと瓶が接触してはじめて出てくるものである。以上のような機能は、2章に述べた栓抜きの機能モデルに含める形で統一的に記述することはできず、別の記述を用意しなければならない。

(2) 認識法の有効性・効率

本手法は、機能的に重要な部分（支点、作用点、力点）のみに着目してトップダウン的に入力物体の形状を評価するものであり、機能的に無意味な部分の形状変動に影響を受けにくい。実験結果にも示されている通り、この特徴により多様な形状を持つ入力物体に対しても有効に機能を判定することができる。

しかしながら、効率的には次の問題点がある。本手法は生成検査法であり、現段階では候補の生成に利用できる制約（3.2節の制約（a））が弱いいため、不適当な候補が多数生成される。これらの候補の大半は、ステップ2でリジェクトされるが、このために計算コストのかかる空間の重複検査を繰り返し適用してしまう。したがって、処理効率を改善するには、候補の生成に用いる制約を強化する必要がある。具体的には、現在、空間の重複検査に頼って評価している物体の形状を、幾何的な推論を用いて、作用対象の形状から陽に制約として抽出・記述する必要がある。例えば、「栓抜きの支点と作用点の間には、栓を避けるために凹状の構造が必要である」などが導出できれば、不適当な候補の多くを削減できる。

(3) 物体認識法としての有効性

物体のカテゴリを機能により定義すると、機能モデルを用いたカテゴリの判別（物体認識）が可能となる。機能モデルに関する従来法の多くは、この観点から提案されている^{5),6),9)}。物体認識で通常用いられる形状モデルに比べ、機能モデルを用いる利点は、単一のモデルにより様々な形状の物体をカバーできることである。例えば、図5の物体b1～b6は一つの機能モデルにより認識可能であるが、これらをすべてカバーする形状モデルを作成するのは困難と考えられる。逆に問題点としては、あるカテゴリに属さないと人間が判断するような物体も認識してしまう点がある。例えば、図5の物体b8はスパナとして認識されている。他にも、「壁に接した箱」のように座ることができる物体

は、椅子と認識されるという報告がある⁹⁾。以上から、機能は物体があるカテゴリに属するための必要条件であるが、十分条件ではないと言える。

(4) 枠組みの拡張性

最後に、本論文で提案した枠組みの拡張性について考察する。(1), (2) に述べた問題点は残るものの、本手法はテコを要素機械に持つ物体の機能を認識することができる。様々な機能を持つ他の物体に本手法を適用するためには、まず、要素機械の種類を増やさなければならない。力学的な道具の要素機械には、「テコ」の他にも、釘抜きの先端部分などに用いられている「斜面」、椅子の座面や背もたれに用いられる「支持面（作用対象を動かさないように支持する面）」などがある。テコと同様、これらの要素機械も力の入出力、要求・制限される動作に基づいて記述可能と考えられる。例えば、「斜面」の場合、力の入出力の関係は斜面を作る二つの面のなす角により定義され、要求される動作は並進動作となる。

また、物体の機能には複数の要素機械により実現されるものもある。このような機能をモデル化するためには、要素機械を接続する枠組み^{10), 11)}が必要となる。

5. 他手法との比較

ここでは、機能モデルに関する従来法として、DiManzo らの手法⁴⁾、Stark らの手法⁶⁾、北橋らの手法^{5), 9)}を取り上げ、本手法と比較検討する。

まず、記述対象となる機能について述べる。従来法では、いずれも椅子を記述例に挙げており、静的な機能を対象としている。一方、本手法は、栓抜き、スパナ、ドライバなどの持つ動的な機能を対象としている。なお、DiManzo らはスパナの記述例も示しているが、その内容は「スパナは、ネジを掴むヘッドと手に掴まれるボディからなる」というものであり、力の変換や動作など動的な機能の記述に必要な視点が欠けている。

次に、機能モデルについて述べる。DiManzo らの手法、Stark らの手法では、物体の機能を実現するために必要な部品（椅子の場合、座と背もたれ）を考え、部品に関する形状的、構造的制約を用いて機能をモデル化している。一方、北橋らの手法では、「部品に関する形状的、構造的制約は、機能から一意に決まるものではなく、作用対象に依存する」との観点から、機能モデルに作用対象を導入している。本手法では、基本的には北橋らの手法と同様の観点から、作用対象を導入している。しかしながら、「力の変換」という動的な機能を実現する構造には、作用対象を考慮してもなお

任意性が残るため^{*}、本手法では作用対象に加えて要素機械を導入している。

最後に認識法について述べる。DiManzo らの手法、Stark らの手法では、機能モデルに記述された形状・構造の制約が満たされるかどうかを検証することにより物体を認識する。北橋らの手法では、機能モデルから形状モデルを導出し、その形状モデルを用いて物体を認識する。したがって、従来法の認識は、すべて形状レベルでの検証と捉えられる。一方、本手法では動的な機能を対象としているため、力の変換やそれに伴う動作の検証が不可欠となる。すなわち本手法では、入力物体が作用対象に対して使用可能かという使用レベルでの検証を行っている。ただし、現在の処理で検証される動作は、入力物体と作用対象が接触した後の動作に限られる。より確実に、入力物体と作用対象が離れた状態から動作を検証する必要がある⁸⁾。

6. おわりに

本論文では、道具の持つ動的な機能に着目し、機能モデルを用いて入力物体の機能を認識する手法を提案した。本手法の特徴は、(1) 機能と形状を対応付けるために要素機械と作用対象を導入していること、(2) 物体と作用対象の接触を通して機能を認識すること、などである。また、栓抜き、スパナ、ドライバの3種類の物体の機能について認識実験を行った結果、様々な形状を持つ物体の機能を認識できることが明らかとなった。さらに、実験結果に基づいて、機能モデルの利点、問題点について考察し、今後の課題として、他の要素機械をモデル化することにより機能モデルの適用範囲を拡張すること、認識に有効な制約の導出を可能にすることなどを指摘した。

参考文献

- 1) マービン・ミンスキー著、安西祐一郎訳：心の社会、産業図書(1990)。
- 2) 北橋忠宏：画像処理と知識と意味、パターン認識・理解の新たな展開（小川英光（編））、電子情報通信学会、pp. 136-138 (1994)。
- 3) Connell, J. H. and Brady, M.: Generating and Generalizing Models of Visual Objects, *Artif. Intell.*, Vol. 31, pp. 159-183 (1987)。
- 4) DiManzo, M., Trucco, E., Giunchiglia, F. and Ricci, F.: FUR: Understanding Functional Reasoning, *Int'l Journal of Intelligent Systems*, Vol. 4, pp. 431-457 (1991)。
- 5) 神田享子, 小川 均, 北橋忠宏：画像理解のた

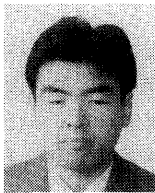
^{*} 例えば、動滑車を用いても、栓抜きを作ることが可能である。

めの機能に基づく物体モデルの記述, 電子情報通信学会技術研究報告, AI88-29 (1988).

- 6) Stark, L. and Bowyer, K.: Achieving Generalized Object Recognition through Reasoning about Association of Function to Structure, *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 13, No. 10, pp. 1097-1104 (1991).
- 7) Kise, K., Hattori, H., Kitahashi, T. and Fukunaga, K.: Representing and Recognizing Simple Hand-tools Based on Their Functions, *Proc. of ACCV'93*, pp. 656-659 (1993).
- 8) 服部洋一, 秋山文人, 黄瀬浩一, 北橋忠宏, 高松 忍, 福永邦雄: 力の入出力に着目した道具の機能モデル表現と物体認識への適用, *MIRU'94* 論文集, Vol. II, pp. 1-8 (1994).
- 9) 北橋忠宏, 芦田昌也, 淡誠一郎, 安部憲広, 黄瀬浩一: 機能に基づく物体概念とその応用, 電子情報通信学会技術研究報告, AI91-70 (1991).
- 10) Hodges, J.: Naive Mechanics - A Computational Model of Device Use and Function in Design Improvisation, *IEEE Expert*, Vol. 7, No. 1, pp. 14-27 (1992).
- 11) Freeman, P. and Newell, A.: A Model for Functional Reasoning in Design, *Proc. IJCAI-71*, pp. 621-633 (1971).

(平成 6 年 10 月 31 日受付)

(平成 7 年 4 月 14 日採録)



服部 洋一 (正会員)

昭和 45 年生。平成 5 年大阪府立大学工学部電気工学科卒業。平成 7 年同大学院博士前期課程修了。現在、グローリー工業(株)勤務。在学中、機能モデルに関する研究に

従事。



黄瀬 浩一 (正会員)

昭和 38 年生。昭和 61 年大阪大学工学部通信工学科卒業。昭和 63 年同大学院博士前期課程修了。同年同大学院博士後期課程入学。平成 2 年より大阪府立大学工学部助手。文書画像理解、機能モデルに関する研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会, 電気学会各会員。



北橋 忠宏 (正会員)

昭和 14 年生。昭和 37 年大阪大学工学部通信工学科卒業。昭和 43 年同大学院博士課程修了。同年大阪大学基礎工学部助手。同助教授, 豊橋技術科学大学助教授, 教授を経て, 昭和 61 年大阪大学産業科学研究所教授。工学博士。3次元物体認識のための視覚システム, 自然言語処理, 学習・推論機構に関する研究に従事。電子情報通信学会, IEEE, 日本認知科学会, AVIRG, 計量国語学会, 人工知能学会各会員。



福永 邦雄 (正会員)

昭和 20 年生。昭和 42 年大阪府立大学工学部電気工学科卒業。昭和 44 年同大学院修士課程修了。同年同大学工学部電気工学科助手。現在, 同大学工学部情報工学科教授。統合化認識システム, グラフ理論とその応用などの研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, 人工知能学会, システム制御情報学会, IEEE 各会員。