

複数モジュールを介した記号・イメージ表現の接続による 機能的な意味を有する人工物の定義

Defining artificial things to make computers recognize them,
by connecting symbolic and image representation systems through some modules

加村 和範*¹
Kazunori KAMURA

上里 福美*¹
Fukumi KOZATO

*¹ 東京工芸大学大学院 電子工学専攻
Graduate School of Electronic Engineering,
Tokyo Polytechnic University

We propose a layered knowledge-base model. The model connects symbolically represented information and the image information acquired from environment, by the several modules. These modules vary in the attributes. We use the knowledge-base to construct a system, which finds out alternative articles from the tools manufactured as Industrial products.

1. はじめに

計算機に情報を蓄積して、効率よい処理をするためには、抽象化された情報の表現として、記号体系が用いられる。一方、現実世界から直接得られる生の情報は、具体的なイメージデータとして獲得される。コンピュータ内部に確保されている記号表現された情報を、現実世界から直接取り込んだ情報へと繋げようとしたときに生じる問題に、記号接地問題[Harnad 90]がある。実世界から直接得られる具体的な形式の情報と、コンピュータ内の記号表現された情報の間には断絶が存在する。ここを接続することができなければ、計算機に柔軟な判断能力を持たせることはできない。

第16回人工知能学会全国大会では、計算機が、工具・文具等の機能を有する人工物を認識する為に必要な知識を蓄積する、知識ベースの構成を提案した[加村 02]。人工物に関する情報は、形状に関しては視覚的に獲得する画像イメージ情報、機能に関しては口頭伝達を想定した記号情報で、与えられるものとする。全体形状に関するイメージ情報と記号表現された機能情報の間を繋ぐため、これらの中に、対象の部分形状を特徴イメージとして介在させ、記号層とイメージ層を連結させた。

この知識ベースは情報の表現体系が異なる3層の3つのモジュールに分かれており、人工物の情報は3つのモジュールに分かれて確保されている。上位階層を司るモジュールは機能情報を記号で確保し、下位階層のモジュールは人工物の形状の全体印象を画像イメージ情報として確保する。そして、上下階層を繋ぐための特徴形状を扱う中位の階層は、情報表現体系としてはイメージ表現である画像データを採用した。これは、工具・文具等の機能を有する人工物は、突起などの部分的形状が機能概念に直結する可能性が高いので、画像イメージ情報ではあっても記号表現された機能情報との直接的対応関係を取ることが出来き、異なった情報表現体系の接続層として適していると考えた。

前大会では、知識ベースの上位・下位モジュール間の接続が一元的である故、脆弱であることが指摘された。そこで本大会では、中間層を二つのモジュールによって構成す

る知識ベースを提案する。また、下位・中位モジュールで必要なイメージ情報に関しては、被験者の感性により対象物の類似関係を決定すると報告していたが、今回の提案では類似関係の設定に自己組織化マップ[Kohonen 90, Kohonen 96]の手法を導入し、知識ベース構築手法から人間の感性の介在を減らしている。

2. 知識ベースの構成

知識ベースは、対象に関して全体形状、特徴形状、質感として視覚情報からもある程度正しくかつ客観的な情報の取得が可能であると想定できる重量感、機能の4つのモジュールからなる三階層構造である。(図1参照)

各モジュールの内部には、知識ベースに蓄積する人工物数に相当するノードが存在し、そのノードを類似関係で分類してグループを編成する。

全体形状と特徴形状モジュールでは、それぞれ(1)ノード間の類似度、(2)類似関係にあるノード同士で編成するグループの所属度に関する情報、(3)編成されたグループ同士の類似度を保持する。グループを編成することによって、形状モジュール内に、例えば「丸いもの」や「細長いもの」といった形状カテゴリーに関する概念を発生させる。

重量感モジュールの各ノードには、人工物の材質を想定しての重量感を設定する。各ノード間には、質感の類似関係を持たせる。

機能モジュールには、与えられた機能同士の類似関係を保持させ、かつ単一機能内に内部構造を形成させる。この内部構造は詳細機能に相当し、例えば「切る」などの広い概念を指し示していた記号を、「はさんで切る」「ひいて切る」などと細分化して扱うことを目的とする。

知識ベース構築の手順は、STSモデル[今井 96]の段階的学習の概念をベースに、下位から上位に向けて行うこととした。まず、下位層である全体形状モジュール内の類似関係を保持するグループ生成を、自己組織化マップ手法で作成した分類マップを元に構築する。次に、中位層の特徴形状モジュール内のグループ関係を、全体形状モジュールの分類マップを初期値として自己組織化マップ手法で構築する。同時に視覚で判断できる対象物の物質的質感から、対象の重量感を取得する。上位層の機能モジュールには、蓄積対象の基本機能を、記号表現された情報として与える。機能モジュール内の機能間の類似関係は、主に中位の層の

連絡先：東京工芸大学 知識情報工学研究室、
〒243-0213 神奈川県厚木市飯山 1583
Tel: 046-242-9567, E-mail: k-kamura@ee.t-kougei.ac.jp

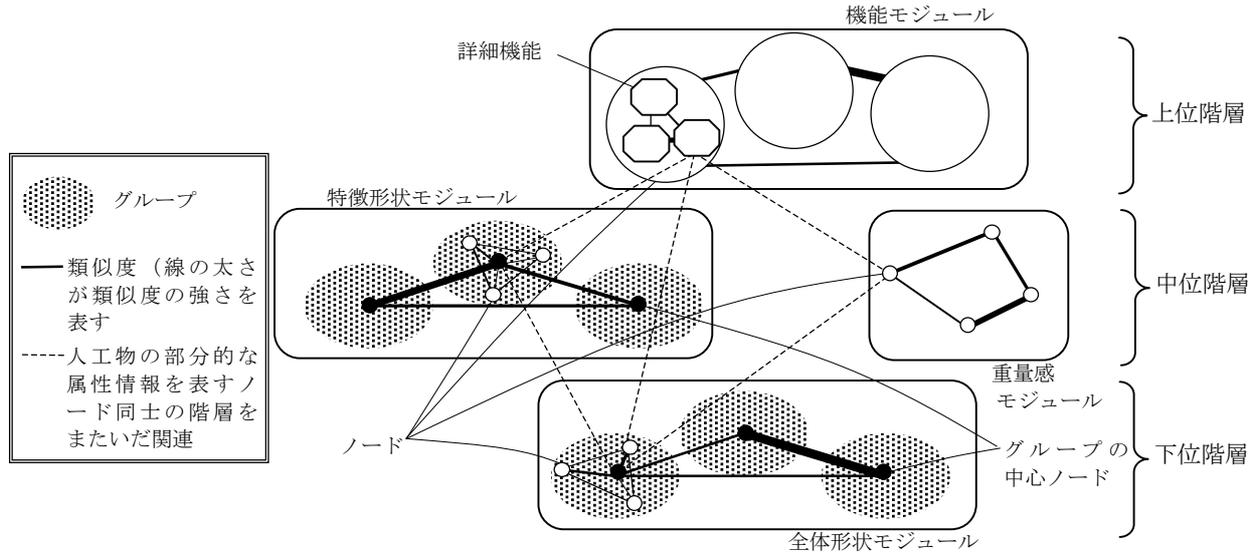


図1 知識ベース

類似関係から構築するが、下位層の全体形状モジュールの類似関係からの影響も受け、微調整を行う。また、一つの機能内に存在する人工物のノードを、中位層、下位層のモジュールの類似関係によって分類した内部構造を構築する。

取りうる値を0~100とすると x (重量感 Mx)と y (重量感 My)の類似度は以下のように決定する。

$$S_w(x,y) = 100 \sqrt{\sqrt{Mx} \sqrt{My}} \quad \dots \text{式 3-2}$$

3. モジュール構築とモジュール間の関係構築

3.4 機能モジュール

3.1 全体形状モジュール

人工物の機能情報は、記号表現の形式で確保する。知識ベース構築の初期において各機能は孤立しており、互いの類似関係は存在しないが、中位・下位層のモジュール内の調整が進むと、それらからの影響を受け、孤立していた機能間に関係が形成される。そして更に段階が進むと、それぞれの機能が内部分化を開始し、内部構造の形成が始まる。

知識ベースへの蓄積対象となる人工物の全体的な印象を、三方向から撮影した画像データとして取得し、自己組織化マップの手法により分類マップを生成する。得られたマップから各対象の形状の類似関係を抽出し、類似度が高い形状同士にグループを形成させる。

全体形状モジュール、特徴形状モジュールが、機能間の類似関係へ及ぼす影響は、それらの機能と関連のある全体形状、特徴形状同士が、それぞれどのような類似関係を持っているかに依存している。機能 a と機能 b の間の類似度は以下で表現される。

画像データから抽出したベクトル $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ と $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ の距離を $D(x,y)$ とすると、形状データの類似度 $S_s(x,y)$ は以下のように決定する。

$$S_s(x,y) = 100 \sqrt{\frac{D(x,y)}{\sqrt{n}}} \quad \dots \text{式 3-1}$$

$$\left(D(x,y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} \right)$$

機能 a, b を持った人工物をそれぞれ Xa_n, Yb_m 、全体形状と特徴形状の類似度の平均を $S_{Ave}(Xa_n, Yb_m)$ とすると、

$$S_f(0) = 0$$

$$S_f(t) = S_f(t-1) + \{S_f(t-1) \cdot S_{Ave}(Xa_n, Yb_m)\} \cdot N_f(t) \quad \dots \text{式 3-3}$$

グループ間の類似度は、グループの中央に位置する代表データ同士の類似度を 3-1 式より求めて決定する。

ここで $N_f(t) = 0.5(1/t/T)$ T =学習回数 とする。
(t 増加毎に n,m 変化、全パターンをランダムに学習)

3.2 特徴形状モジュール

また、全体形状モジュール、特徴形状モジュール内に形成されたグループ関係と、重量感モジュール内に形成された類似関係から、機能の内部分化を進める。全体形状モジュールと特徴形状モジュールを生成するために利用したそれぞれの自己組織化マップに、ひとつの機能を付与された人工物のデータを入力して分類し、機能の内部分化の結果として生成された詳細機能同士の類似度は、まず 3-1 式と同様に求め、これに重量感の類似度 $S_w(x,y)$ による調整を行う。ここで、 x,y はそれぞれ、詳細機能を持った人工物をしめす重量感モジュールのノードである。類似度を $S_f(t), t = 0, 1, 2, \dots, T$ とすると、

扱うデータは、人工物の部分的形状を三方向から撮影した画像である。このモジュールの構築方法、及び各形状間の類似度の決定方法は、全体形状モジュールの場合と同様である。ただし、下位層で形成された形状に関する認識基準を上位層の形成の種とするために、自己組織化マップ手法での分類マップ生成の際には、全体形状モジュールで作られたマップデータを初期マップとして入力する。

$$S_f(0) = S_s(x,y)$$

$$S_f(t) = S_f(t-1) + (S_f(t-1) \cdot S_w(x,y)) \cdot N_f(t) \quad \dots \text{式 3-4}$$

ここで $N_f(t) = 0.2(1/t/T)$ T =学習回数 とする。

3.3 重量感モジュール

人工物の重量感情報を保持する。対象の質感から大きさに対する重量感を、被験者が目視にて推定する。あくまでも質感としてデータを利用するのが目的であるので、計測レベルでの正確さは求めない。データは一元的な数値情報で表され、近似値関係がそのまま類似関係となるが、微妙なレベルの重量感の上下は強い影響を持たない。重量感の

3.5 階層間の関連度

階層をまたぐ関係の強さは有向であり、関連度と呼ばれる。関連度は (1)全体形状モジュール内のグループから特徴形状モジュール内のグループへ、(2)特徴形状モジュール内のグループから全体形状モジュール内のグループへ、(3)全体形状モジュール内のグループから重量感モジュールのノードへ、(4)重量感モジュールのノードから全体形状モジュール内のグループへ、(5)特徴形状モジュール内のグループから機能モジュール内のノードへ、(6)機能モジュール内のノードから特徴形状モジュール内のグループへ、(7)重量感モジュール内のノードから機能モジュール内のノードへ、(8)機能モジュール内のノードから重量感モジュール内のノードへ、(9)全体形状モジュール内のグループから機能モジュール内のノードへ、(10)機能モジュール内のノードから全体形状モジュール内のグループへ、のような依存関係の強さを示している。

全体形状モジュール内の、ひとつのグループに属するノードが指す人工物の特徴形状が、特徴形状モジュール内のどのグループに存在するかをグループ毎にカウントする。そして、そのカウント数の全体形状モジュール内の該当のグループに含まれるノードが示す人工物数に占める割合を求めて、関連度を決定する。(図2参照)

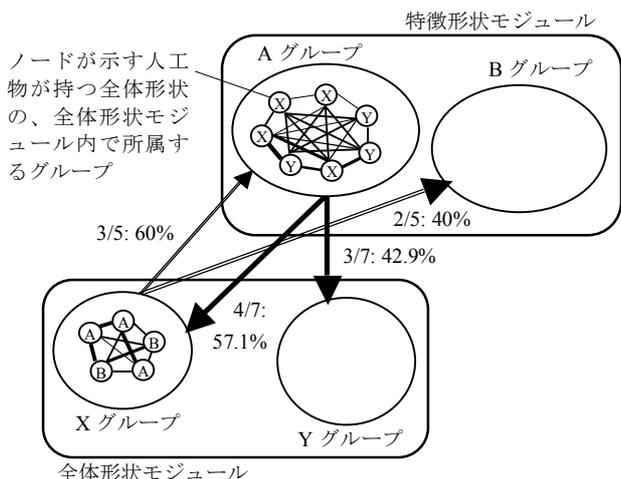


図2 関連度の決定例

例えば、特徴形状モジュール内の A グループには、全体形状モジュール内の X グループに所属する全体形状を持つ人工物を示すノードが 4 個あり、ノードの総数が 7 個である場合、特徴形状モジュールの A グループから全体形状モジュールの X グループへの関連度は 4/7 で 57.1%とする。

4. 代替物探索テスト

知識ベースの評価の為に、指定した人工物の代替物を実験環境から選択させるテストを行う。選択結果が代替物として認められるかの判断するために、被験者に同様の環境から代替物を選択させた。形状情報だけを与えて代替物を探し出させる課題と、機能情報だけを示して代替物を探し出させる課題を行う。前者の課題の評価に関しては、上位層の機能モジュールを切断した知識ベースを用いて代替物を選択させた場合の正答率と比較することにより、知識ベースの多層化の効果を検討する。後者については、環境内には指定された機能を直接持つ代替物が存在していないので、下位の形状に関するモジュールとの関係無しには代替

物は選択出来ない。従って、算出された正答率そのものが知識ベースの評価値となる。

知識ベースの構築には、473 個の人工物の情報を使用した。各人工物に関して、全体形状の画像、平坦では無い部分の部分画像、重量感、機能名のデータを知識ベースに与えた。各人工物には、その物について最も本質的と思われる機能名が一つ付与されており、その機能名は、切る (69 物体)、刺す (50 物体)、筋を付ける (77 物体)、叩く (172 物体)、搦う (60 物体)、混ぜる (15 物体)、挟む (30 物体) である。

4.1 人工物の形状情報指定による代替物の選択

(1) 探索方法

まず、自己組織化マップ手法で生成された、全体形状モジュールと特徴形状モジュールの各分類マップ上に、指定物体の位置を決定する。次に、実験環境内に存在する全人工物の分類マップ上の位置を抽出し、指定物体と環境内の各人工物の距離を求めることで類似度を算出する。マップ上の位置から指定物体の全体形状モジュールと特徴形状モジュール内の所属グループを抽出し、実験環境内の人工物が所属するグループとの類似度を求める。重量感の類似度は 3-2 式より求める。さらに指定物体の機能を、所属する全体形状・特徴形状モジュールのグループと関連度が高い機能から判定し、そのグループと実験環境内の人工物の機能との類似度を求める。

以上の 4 つの類似度の平均を指定物体と実験環境内の人工物間の類似度とし、類似度が上位に位置する物体を代替物として提案する。

(2) テストの前提条件

代替物を探索する実験環境は、知識ベースに蓄積した人工物のうちランダムにピックアップされた 50 個を用いる。これは過去に遭遇した人工物ばかりが存在する部屋から、指定された人工物の代替を選択することと同値ではあるが、知識ベースに格納した人工物と実験環境にある人工物の間には直接の対応関係はついていないので、知識ベースに格納されている人工物データの中から直接代替物を探すことにはならない。

実験環境を 5 回構築し直し、実験環境毎に知識ベースの構築には用いていない 50 個の人工物の代替物に関する探索を行う。知識ベース全体を稼働させた場合と、上位層の機能モジュールを切断して知識ベースを稼働させた場合に比べて、代替物を選択した結果を比較する。

(3) 結果

$$\text{正答率} = 100 \times \frac{\text{被験者回答とシステム提案の一致数}}{\text{探索を指定する人工物の総数}} \quad \dots \text{式 4-1}$$

表1 形状情報指定の正答率

	正答率	機能の評価を行わない場合の正答率
1 回目	60%	48%
2 回目	56%	44%
3 回目	56%	48%
4 回目	58%	50%
5 回目	66%	52%
平均	59.2%	48.4%

知識ベース全体を稼働した実験では、指定物体に対して平均 60%の正答率で代替物が選択できた。機能モジュール

を切断した場合の正答率が 48%であることから、画像データだけを示して代替物を選択した場合でも、記号表現で与えられた情報を確保する機能層との関係が、人工物のトータルな認識に役割を果たしていると言える。しかしながら 48%の結果は、機能層の影響を受けて類似関係が調整された後のモジュールの情報によるものであり、純粋な形状照合による結果ではない。より正確な評価を下すには、純粋な形状照合による代替物の選択結果との比較が必要である。

4.2 機能名の直接指定による選択

(1) 探索方法

探索したい人工物の機能名（指定機能）を入力すると、その機能と関連度の高い全体・特徴形状モジュールのグループを判断し、実験環境に存在する人工物の分類マップ上の位置との類似度を求める。同時に、実験環境の人工物が保持する機能を、その人工物の形状情報と機能の類似度から推測し、指定機能との類似度を求める。この 2 つの類似度の平均が高い人工物を代替物として提示する。

(2) テストの前提条件

実験環境は、4.1 同様に知識ベースに蓄積した人工物のうちの 50 個を用いる。ただし、この実験環境には指定する機能名を付与されている人工物は存在しないものとする。指定する各機能に対して 20 回ずつ実験環境を構築し、機能を次善に満足すると判断される人工物の選択を行う。この実験は、知識ベース全体を稼働させて行う。

(3) 結果

表 2 機能名指定の正答率

機能名	正答率
切る	75%
刺す	90%
筋をつける	85%
叩く	40%
すくう	65%
混ぜる	90%
挟む	30%

概ね良好な正答率を得たが、「挟む」と「叩く」では正答率が 1/2 を下回った。「挟む」はその機能を持つ人工物の形状が極端に限定されているので、「叩く」は逆に形状への依存度が非常に低い機能であるので、それぞれ機能モジュール内で、形状的な類似関係を受けての他機能との関係形成が進まなかったと考えられる。

4.3 知識ベースに与えた機能名の内部構造として抽出される詳細機能を指定

(1) 探索方法

探索したい人工物の詳細機能を指定すると、その詳細機能と関連度の高い全体・特徴形状モジュールの各グループを判断し、実験環境に存在する人工物の分類マップ上の位置との類似度を求める。同時に、実験環境の人工物が保持する機能を形状モジュールと機能モジュールとの関連度から推測し、指定した詳細機能との類似度を求める。この 2 つの類似度の平均が高い人工物を代替物として提示する。

(2) テストの前提条件

実験環境は、4.1 同様に知識ベースに蓄積した人工物のうちの 50 個を用いる。ただし、この実験環境には、指定する詳細機能を持つ人工物は存在しないものとする。人工

物の種類によって詳細機能への分化がはっきり出ると想定できる「切る」「刺す」と、4.2 で正答率の低かった「叩く」「挟む」に関して、詳細機能を 2 種類ずつ選択する。知識ベース全体を稼働させて、実験環境を 20 回構築し直して、詳細機能を次善に満足すると判断される人工物の選択を行う。

(3) 結果

表 3 詳細機能指定の正答率

詳細機能	正答率	詳細機能	正答率
切る 1	85%	叩く 1	65%
切る 2	80%	叩く 2	70%
刺す 1	100%	挟む 1	65%
刺す 2	90%	挟む 2	40%

内部構造の分化による詳細機能の指定で、機能指定による代替物の探索よりも正答率が上昇することが示された。

5. まとめ

記号表現された情報とイメージ表現された情報の間に接続を作るという観点から、人工物に関する知識ベースの階層化構造を提案した。また、構築した知識ベースを元に実験環境内から指定した人工物の代替物を選択するテストを行い、提案した知識ベースの有効性を評価した。

4.1 のテストは、提示した人工物の代替物を実験環境から選択するという設定であるが、この課題に関して平均 60%程度の正答率を得たことは、結果単独としてはまずまずの結果と言えるだろう。しかしそれが階層化した知識ベースの使用によって顕著に現れた結果なのかは、純粋な形状照合による選択結果と比較して更に検討する必要がある。

4.2, 4.3 のテスト結果では、機能情報を指定するだけで、環境より適当な人工物の選択が行えることを示している。機能情報は記号表現で知識ベースに与えられ、それぞれが孤立した情報である。与えられた機能情報を独立させて確保しては、指定した機能そのものが付与された人工物が実験環境に存在し無いかぎり、人工物の選択は不可能である。連続した類似関係の設定が可能なイメージ情報の階層と関連を持たせたことにより、記号表現させた情報同士に機能に関する意味情報を持たせることが出来たと考える。

今後の課題としては、(1)知識ベースの構築に用いる人工物を増やしてテストを重ねること、(2)現実世界に存在する様々な人工物を蓄積するために必要な機能名の種類と数の適性値を検討すること、(3)人工物の様々な属性を検討し、上下層の妥当な接続を作りだす中間層のモジュールの種類を認知科学等の観点から検討すること、(4)生成される詳細機能が影響を及ぼす対象に関する情報を組み込む必要性の検討が上げられる。

参考文献

- [Harnad 90] Harnad, S.: The Symbol Grounding Problem, *Physica D* 42, 335-346, 1990.
- [加村 02] 加村和範, 山下哲央, 都筑重幸, 上里福美: 階層化知識ベースを用いた代替物検索, 2002 年人工知能学会全国大会, 2F2-08, 2002.
- [Kohonen 90] T.Kohonen: The self-organizing map, *Proceedings Of The IEEE*, Volume 78, Number 9, pp.1464-1480, 1990.
- [Kohonen 96] T.Kohonen 著, 徳高平蔵他 訳: 自己組織化マップ, シュプリンガーフェアラーク東京, 1996.
- [今井 96] 今井むつみ: 言葉の学習のパラドックス, 並立出版, 1996.