製品の2次元組立図の自動3次元化

—規格部品の多い2次元組立図への適用—

田 中 雅 次** 金 枝 敏 明** 広 岡 諄 二*** 岡 部 成 行†

Reconstruction of 3D Models from 2D Assembly Drawings

— Application to 2D Assembly Drawings Consisting of Many Standardized Parts —

Masaji TANAKA, Toshiaki KANEEDA, Junji HIROOKA and Shigeyuki OKABE

Solid models play a primary role in modern CAD systems. However, 2D CAD systems are still commonly used for designing products having no complex curved faces. Automatic systems to reconstruct solid models from 2D drawings have been needed but actual systems cannot exist. One of the reason is that many products consist of standardized parts such as bars and plates, and they are drawn as 2D assembly drawings. In these cases, it is not necessary to draw all part drawings of the products. However, the objects of all the previously proposed methods have been limited to one component. In this paper, a method is proposed that solid models are reconstructed from 2D assembly drawings consisting of many standardized parts. Many solutions could be obtained easily in 2D assembly drawings because they are more complex than part drawings. On the other hand, this method can generate a few solutions regardless of the complexity of them by using their dimensions, part numbers and parts lists.

Key words: assembly drawing, part drawing, orthographic view, solid model, 2D, 3D

1. 結 言

現在の機械系 CAD においては、製品を3次元のソリッドモデルで設計するソリッドモデラの導入が盛んにアピールされているが、ソリッドモデルが必要とされるのは、基本的に自動車やカメラのボディなど複雑な曲面を用いる場合であり、それが必要でない製品では、2次元 CAD が現在でも広く利用されている。また、2次元図面では、部品数が多い製品の場合、全体図としての組立図から詳細な部品図へと階層的に図面を描くことが容易であり、さらに、製造において外形線以上に必要となる寸法の多様な記入方法、および断面図や省略図などの適用による図面の簡略的な表現が可能である。

しかしながら、ソリッドモデルは CAPP、CAM や電子カタログ、マニュアルなどにおいて、今後一層必要になることが予想され、結果として、2次元 CAD で描かれた図面をソリッドモデルに変換する必要がある。現在の CAD では、この変換作業は基本的に手作業で行われており、このことが、現在のソリッドモデルの開発は盛んであるが、普及は緩慢である主な原因になっていると考えられる。2次元図面をソリッドモデルに自動変換する研究は古くから行われ¹⁾²⁾、現在、数種の自動変換システムが市販されるまでに至っているが、これらは、ほとんどの実際の図面に適用できない。その原因として、これまでの研究が対象物の幾何形状のみに着目して、他の設計・製造に必要な情報である寸法や部品表などを全て無視したことが第一に挙げられる。その結

果、自動変換の対象物は一個の部品に限定され、図面の簡略的表現は対象外とされた。現在でもいくつかの研究成果が見られるが³⁾⁴⁾、この基本姿勢は変わっていない。

本論文では、実用的な自動変換システムを目指した手法を提案する。変換の対象物は、市販の製品として標準化されている規格部品を主とする製品の2次元組立図であり、寸法や部品表などの情報を活用することで、設計者の意図する適切な解が容易に得られるようにする。一般的に、2次元組立図は2次元部品図よりも図面が複雑になるので、それだけ解の数も増大しやすいが、本手法では、2次元組立図の複雑さに関係なく少数の解を求められるようにする。また、断面図や省略図にも対応しやすいことを例題を挙げて示し、本手法の、実際の多種多様な2次元図面への拡張性が高いことを明らかにする。以下、第2章では、本手法に関連する主要な研究について述べ、第3章では、本手法の基礎となる従来の手法を説明し、第4章で本手法を述べる。次に、第5章で二つの例題を示し、第6章で考察を述べる。

2. 従来の研究と本研究の関係

2次元図面をソリッドモデルに自動変換する研究は、三面図からもとの立体を自動的に復元させる問題として古くから取り組まれてきた。主要な研究として、第一に出沢は、三面図から立体の稜線や面を、ワイヤフレームモデル、サーフェスモデルとして作成する手法を考案し、実際には存在しない虚稜線や虚面の存在を明らかにした。また、解は、面の組合せ探索より求め、複数解の存在を明らかにした⁵⁾。

次に Wesley らは、サーフェスモデルより面で囲まれた領域をブロックとして認識し、解をブロックの組合せ探索より求める手法を提案した⁶⁾。基本的に、サーフェスモデルを構成する面が

* 原稿受付 平成 15 年 7 月 14 日

** 正 会 員 岡山理科大学 (岡山市理大町1-1)

*** 山陽設計工業 (株) (岡山県玉野市宇3-1-9)

† 日本情報管理システム (株) (岡山県玉野市宇野1-11-1)

n 個ある場合、 2^n 通りの組合せが、面による解の探索の対象となる。ブロックの数は、面の数に対して飛躍的に少なくできるので、解の探索量も少なくなる。しかしながら、Wesley らの手法では、解の探索に関する明確なアルゴリズムが示されてなく、結果としてブロックの 2^n 通りの組合せが、解の探索に必要であった。

Wesley らの手法では、ブロックを構成する面が平面に限られたが、Sakurai らは、円柱面や円錐面、球面、トーラス面を含むブロックを作成した⁷⁾。また、2次元図面の多くは、二面図で表されるが、Dutta らは、二面図を対象とする自動立体復元の研究を行った⁸⁾。

著者らは、先にブロックの組合せ探索を連立式に変換することで、効率的に解を求める手法を開発し、さらにその手法の対象を2次元組立図に拡張した⁹⁾¹⁰⁾。ところが、2次元組立図では、解の数が図面の複雑さに対して急激に増大することが問題として残された。基本的に2次元組立図では、部品数を m 、ブロック数を n とすると、 $(m+1)^n$ 通りのブロックの組合せが、解の探索の対象となる。一般的に、解の数はブロックの組合せ数に比例して増大するので、実用上の大きな問題となる。

本手法では、2次元図面の自動3次元化の問題を、単に形状処理の問題として捉えるのではなく、2次元図面に描かれた、寸法や部品表などのあらゆる情報を活用することで、設計者の意図するようなソリッドモデルを、組立図の複雑さに拘わらずに、極力少数に自動生成できるようにする。

なお、本手法の適用対象として、2次元図面は、Sakurai ら⁷⁾に倣って、直線と円弧、円から外形線が描かれるものとし、そこから作成されるブロックの面は、平面、円柱面、円錐面、球面、トーラス面に限定される。また、面図の数は、断面図としての単一図以外は、2面または3面とする。

3. 従来の2次元組立図の自動3次元化手法

3.1 従来の手法の基本アルゴリズム

本手法は、著者らが先に開発した手法¹⁰⁾を基礎としたものであり、本章では、これを従来の手法として説明する。その基本アルゴリズムは次の通りであり、以下、このアルゴリズムの詳細を、図1に示す簡単な本棚を例題1として説明する。

- (1) ワイヤフレームモデルの作成 (2) サーフェスモデルの作成 (3) ブロックの作成 (4) ブロック間の関係の連立式化 (5) 解の探索

3.2 ワイヤフレームモデルの作成

与えられた2次元組立図に対して、最初に行う処理は、外形線の構成要素である直線と円、円弧において、交点または接点を2D頂点として認識し、2個の2D頂点を両端とする直線分または円弧分を2D線分として認識することである。なお、円または円弧が図面に存在する場合は、円柱面などの曲面の輪郭線となる2D線分および2D頂点を3次元化のために追加することになる。図2に例題1の2D頂点と2D線分を示す。

異なる面図間における2D頂点の組合せで、3次元の頂点を作成し、これらの間に2D線分に対応できる3次元の稜線を作成すると、対象物のワイヤフレームモデルが作成される。図3に例題1のワイヤフレームモデルを示す。なお、輪郭線としての稜線は、シルエット稜線と呼ばれる。図2の一点鎖線は、シルエット稜線を作成するために追加された2D線分の例である。また、3次元の頂点以外で交差するワイヤ同士は、明らかに不要な解を増加させる原因となる(詳細は、⁹⁾ 参照)ので、本手法では作成

しないようにしている。

3.3 サーフェスモデルの作成

ワイヤフレームモデルにおいて、稜線で囲まれた個々の閉領域を3次元の面として認識する。これらの面は、対象物のサーフェスモデルを表す。図4に図3より認識された例題1の面の例を示す。図3、4より各モデルには、対象物において、実際には存在しない稜線や面が含まれることがわかる。

3.4 ブロックの作成

サーフェスモデルにおいて、面で囲まれた個々の閉領域をブロックとして認識する。図5に例題1より認識された各ブロック($B_1, B_2, \dots, B_9$)を示す。実際に存在しない面があると、実際に存在しないブロックが作成されることがある(例えば、図5の B_8 など)。ここで、実際に存在するブロックを真とし、実際に存在しないブロックを偽として、解は、各部品における各ブロックの真偽を判別することで求めるようにする。

3.5 2D面と部品番号の認識

解を構成するブロックの探索には、2次元組立図において、2D線分で囲まれる閉じた面として認識された2D面を利用する。また、2次元組立図に記入された各部品番号は、一個の2D面を指示するので、これらも同時に認識させる。図6に、例題1の各2D面と部品番号を示す。各2D面は、ブロックの面と一対一に対応する。例題1におけるこれらの関係を図7に示す。

Fig.1 Example 1

Fig.2 2D vertices and 2D lines in Example 1

Fig.3 The wireframe model in Example 1

Fig.4 Examples of the faces in Example 1

Fig.5 The blocks in Example 1

Fig.6 The 2D faces and part numbers in Example 1

Fig.7 The relationships between 2D faces and blocks in Example 1

3.6 解の探索

解は、図7のようなブロック間の関係を連立式に変換して求める。連立式は、次の三つの条件より立てる。

- (1) 存在条件：任意の部品とブロックを各々 A, B とする。仮に B を A において偽とすると、対応する2D線分や部品番号が存在しなくなるか、または A が1個の物体にならないならば、 B は A において真である。
- (2) 実線条件：実線である任意の2D線分 E が、二つの2D面 F_p, F_q 間に存在するとき、 F_p, F_q に対応する面を持つ二つのブロック B_p, B_q は、 E を形成できなければならない。もし、形成できない場合は、 B_p と B_q は共に真でないか、または別々の部品に属する。この関係を、 $B_p \times B_q$ と表す。
- (3) 破線条件：前述の実線条件において、2D線分 E が破線であるとき、 B_p と B_q が E を形成できなければ、これらは共に真でない。また、形成できるとき、これらの真偽は等しい。この関係を、 $B_p = B_q$ と表す。

図7の正面図からは、 $B_5 \times B_6, B_6 \times B_7, B_5 \times B_9, B_6 \times B_9, B_7 \times B_9$ の関係と、各部品番号の指し示すブロックとして、①— B_7 、②— B_5 、③— B_6 、④— B_9 の関係が得られる。これらの関係は、図8(a)のように連立式としてまとめられる。また、図7の側面図からは、 $B_7 \times B_8, B_3 \times B_9, B_7 \times B_9, B_3 = B_7$ の関係が得られる。これらの関係は、図8(b)のように連立式としてまとめられる。これらの連立式には、共通するブロックが存在するので、図8(c)のように一つにまとめることができる。これを、例題1のブロック

Fig.8 The equations of blocks in Example 1

Fig.9 Two examples of the solutions in Example 1

の連立式とする。この連立式から明確になることは、 B_9 が存在条件より部品4に属することのみとなる。

結果として、例えば、部品1の解は、 $(B_3, B_7), (B_3, B_7, B_2), (B_3, B_7, B_2, B_1)$ の3通りとなる。部品2, 3, 4の解は各々3, 14, 4通りであり、これらを組み合わせると、合計64通りの解が得られる。図9に解の例を二つ示す。

4. 本手法における2次元組立図の自動3次元化

4.1 本手法の基本アルゴリズム

本手法の基本アルゴリズムは、次の通りである。

- (1) ブロックの作成と部品情報の認識
- (2) 規格部品に対する仮想部品図の作成
- (3) 規格部品に関するブロックの特定
- (4) ブロック間の関係の連立式化
- (5) 解の探索

一般的に2次元組立図では、対象物である製品の設計・製造に必要な情報が全て含まれている。本手法では、外形線のみでなく、図面に記入された寸法や部品表の情報も3次元化のために活用する。例題1の本棚を一般的な図面として表したのが、図10の例題2である。なお、製品名称や材質、尺度などは、本手法で利用しないので省略している。以下、アルゴリズムの詳細について述べる。

4.2 ブロックの作成と部品情報の認識

2次元組立図より、従来の手法と同様にワイヤフレームモデル、サーフェスモデル、ブロックを順次作成する。本手法では、さらに部品表より各部品の名称と個数を認識する。一般的に、部品が規格品である場合は、その大きさが名称として記入されることが多い。例題2では、全て規格品である板材を使用している。例えば、部品1は、大きさ $20 \times 180 \times 200$ で、2個存在することが認識される。

4.3 規格部品に対する仮想部品図の作成

部品表に示された各規格部品について、その大きさに合致する寸法の組合せを、組立図において探索する。次に、その寸法の組合せにしたがって、組立図から対象となる部品に関わる2D線分を全て切り出す。この切り出した図面は、対象となる部品の部品図を含んでおり、これを仮想部品図とする。なお、切り出した2D線分は、仮想部品図において2D面を形成しなければならない

Fig.10 Example 2

いものとし、部品番号に指示された2D面が仮想部品図に存在する場合は、その部品番号も仮想部品図に含めることとする。

また、部品数が n 個 ($n > 1$) がある場合は、 n 通りの仮想部品図を切り出す。図11に例題2の仮想部品図を示す。なお、図11において、部品1の2個の仮想部品図は一致しているので、一方を省略している。

4.4 規格部品に関するブロックの特定

各仮想部品図において、各2D面に対応するブロックを認識する。図12に、例題2におけるこれらの対応関係を示す。各仮想部品図に対応するブロックの集合は、対象となる部品を構成するのに十分である。さらに不要なブロックを除去するために、次の三つの条件を適用する。ここで、ある部品 A の仮想部品図に対応する任意のブロックを B とする。

- (1) 規格部品の存在条件：仮に B を A において偽とすると、もとの寸法が変化したり、部品番号の指示するブロックが存在しなくなる、あるいは、部品が1個の物体でなくなるならば、 B は A において真である。
- (2) 重複条件：異なる複数の部品間で共有されるブロックが存在する場合、そのブロックは1個の部品においてのみ真である。
- (3) 同一条件：対象物において、同一の部品が複数個存在する場合、それらの形状は全て同一である。

例題2では、部品番号の付いた部品1の仮想部品図において、 B_3, B_7 が真となり、他方の部品1の仮想部品図において、 B_1, B_5 が真となる。また、部品2は B_2 が解となり、部品3は B_9 が解となることがわかる。また、同一条件より、 B_4 と B_8 の真偽は同じであることがわかる。これらの関係に前述の条件式を適用すると、① - $B_3=B_7$, ① - $B_1=B_5$, ② - B_2 , ③ - B_9 , $B_4=B_8$ が得られる。

4.5 解の探索

図8(c)の連立式に、上述より明らかにされたブロック間の関係式を、部品番号の違いに注意して合成すると、例題2の連立式は、図13となる。この連立式には、全てのブロック ($B_1, B_2, \dots, B_9$) が現れているので、解を得るのに探索的処理は不要となる。解として、部品1の一方は、 B_3 と B_7 からなり、他方は、 B_1 と B_5 からなることがわかる。また、部品2は B_2 であり、部品3は B_9 である。したがって、他のブロック B_4, B_6, B_7, B_8 は全て偽となる。図14に例題2の解である各部品を示し、図15には、これらの部品から構成される、解である3次元の組立物を示す。

5. 例題

本手法の有効性を示す例題を二つ示す。図16の例題3は、簡

Fig.11 The virtual 2D part drawings in Example 2

Fig.12 The relationships between 2D faces and blocks in Fig.11

$$\begin{array}{c}
 \textcircled{2} - B_2 \\
 \textcircled{1} - B_1 = B_5 \times B_6 \times B_7 = B_3 \\
 \textcircled{3} - B_9 \\
 B_8 = B_4 \\
 \times \\
 \times \\
 \times
 \end{array}$$

Fig.13 The equations of blocks in Example 2

Fig.14 Each part of the solution in Example 2

Fig.15 The 3D assembly model in Example 2

単なコーナースhellを表す。図17に例題3より作成される各ブロック($B_1, B_2, \dots, B_{26}$)を示す。従来の手法では、解が729通り発生する。また、棚の数が増えれば、解の数はさらに指数関数的に増大することは明らかである。

本手法では、次の手順で解が求まる。

(1) 仮想部品図の作成

例題3では、部品1, 4が規格外の部品となる。したがって、仮想部品図は、部品2, 3について作成する。図18にこれらの仮想部品図を示す。

図18に対応するブロックに規格部品の存在条件と重複条件、同一条件を適用すると、部品2では、(B_2, B_3, B_{11}), (B_5, B_6, B_{14}), (B_8, B_9, B_{17})の3組が真となり、部品3では、 B_{10} と B_{20} が2個の各部品において真となる。また、 $B_3, B_6, B_9, B_{13}, B_{16}, B_{19}$ が、部品3において偽となる。

(2) 全条件の適用

図16の組立図に対して、存在条件を適用すると、 B_7 は部品1で真となり、 B_{25}, B_{26} は部品4で真となる。このことから、同一条件より、 B_1 と B_4 が部品1で真となり、また、(B_{21}, B_{22}), (B_{23}, B_{24})の2組が部品4で真となる。さらに $B_{12}, B_{13}, B_{15}, B_{16}, B_{18}, B_{19}$ は、部品4以外で偽となる。

(3) 解の探索

結果として、真偽の確定しないブロックは、 $B_{12}, B_{13}, B_{15}, B_{16}, B_{18}, B_{19}$ であり、これらは、全て部品4に属するか、または全て偽となる。したがって、解は2通りとなるが、真偽の確定しないブロックを基本的に真とすれば、解は1通りのみとなる。図19に例題3の解である各部品を示し、図20には、これらの部品から構成される3次元の組立物を示す。

図21の例題4は、機械部品の軸受け用シールを概略的に表現したものであり、図面は断面図としての単一図となる。また、省略的表現も含まれている。従来の手法では、ワイヤフレームモデルすら全くできないが、本手法では、寸法値や部品表により3次元化が可能である。一般的に、単一図で表される製品は、軸対称な形状と考えられる。このことは、製品全体の大きさを示す寸法値の一方が、直径 ϕ で表されていれば、より明確となる。

また、軸対称部品を図面に表す際には、不明瞭となる破線なるべく使用しないで、断面図を用いて実線のみで描く場合が多い。描かれた単一図が断面図である条件としては、破線が存在しないこと、および、その単一図を軸まわりに一回転させたとき、破線に変わる実線が存在しないことが挙げられる。

単一図としての断面図では、軸対称の性質から、各2D面と各部品が一対一に対応することになる。例題4において、部品番号に指示された2D面について取り出すと、図22のようになり、部品2については、部品表の寸法値と一致することがわかる。また、部品1では、外径がわかる寸法値が一つわかれば、大きさは一意に確定する。ここでは、最大径である $\phi 60$ を利用している。

図23には、解である各部品のソリッドモデルを、半分に分割したものを示す。これらの部品を組み合わせると、図24の解である3次元の組立物が得られる。図25には、その解の一断面を示す。

6. 考 察

本手法のアルゴリズムは、基本的に規格部品からなる製品の2次元組立図を対象にしている。したがって、全てが規格外部品であるような製品では、従来の手法のみが適用されることになり、結果として、解の数は部品数に対して急激に増大することにな

Fig.16 Example 3

Fig.17 The blocks in Example 3

Fig.18 The virtual 2D part drawings in Example 3

Fig.19 Each part of the solution in Example 3

Fig.20 The 3D assembly model in Example 3

Fig.21 Example 4

Fig.22 The 2D faces and part numbers in Example 4

Fig.23 The half of parts in Example 4

Fig.24 The 3D assembly model in Example 4

Fig.25 A cross section in Fig.24

る。しかしながら、一般的な製品の設計・製造では、規格部品の利用はコスト面や利便性などにおいて大変有効であり、結果として規格外部品の数は、特殊な実験装置などを除けば、規格部品に対して少数となる。本手法では、このような組立物としての製品の構造の性質に着目し、規格外部品が多少含まれても、得られる解の数に影響しないアルゴリズムを開発した。

本手法では、2次元組立図に記入された部品表と寸法、部品番号のみで、解である3次元モデルの外観程度を作成することが可能である。したがって、2次元組立図に記入された製品の外形線における簡略的表現や作図の誤り、誤差には、例題4のように、それらの自動認識のレベルを向上させることで、解の精度を高めるように、柔軟に対応できると考えられる。なお、寸法記入に過不足があると、外形線から実寸を求める場合も出てくるので、結果として仮想部品図を探索的に求めることになる。本研究では、さらに寸法など外形線以外の情報の誤差にも、柔軟に対応できるように、手法の拡張を試みる予定である。

また、部品点数の多い製品の2次元図面では、製品の図面から個々の詳細な部品図に至るまで、多数の図面が階層的に描かれることが多い。このような場合でも、各図面間の対応関係を正確に認識し、解である3次元モデルを階層的に作成できるように、本手法の拡張を進めていく予定である。

7. 結 言

板材や棒材などの規格部品を主とする2次元組立図の3次元自動変換手法を開発した。規格部品のみでの組立図では、設計者の意図するような、唯一の解が得られ、また、規格外部品を少量含む組立図でも、解の数の増加を防ぎながら、自動3次元化ができた。また、断面図や省略図など、多様な図面にも本手法が容易に適用可能であることを示した。

なお、本手法の実験用システムは、Windows環境下のPC上にVisual C++で実装した。実際の処理時間は、組立図の複雑さに比例する程度で、問題にならないと考えられる。また、適用するソリッドモデラとしては、ミッドレンジ系のthinkdesignやSolidWorksなどを基本としている。

謝 辞

本研究を進める上で、積極的に協力された岡山理科大学工学部機械システム工学科田中研究室の古田 望氏他 2002 年度卒業生、および軸受けシールの情報を提供していただいた内山工業(株)の諸氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 青村茂：図面から立体を作成するシステムの研究動向とその実用化、日本機械学会論文誌(C), **61**, 586 (1995), 2180.
- 2) Nagendra, I. V. and Gujar, U. G. : 3-D Objects from 2-D Orthographic Views - A Survey, Comput. & Graphics, **12**, 1 (1988) 111.
- 3) 酒井健作, 西原清一：特徴的幾何パターンに基づく不完全三面図の概略理解, 情報処理学会論文誌, **41**, 8 (2000) 2309.
- 4) Chen, K. Z., Zhang, X. W., Ou, Z. Y. and Feng, X. A. : Holo-Extraction of Information from Paper Drawings for 3D Reconstruction, Computer-Aided Design, **34**, 9 (2002), 665.

- 5) 出沢正徳：三面図から立体形成のためのシステム，日本機械学会論文集, **38**, 310 (1972) 1267.
- 6) Wesley, M. A. and Markowsky, G. : Fleshing Out Projections, IBM J. Res. Dev., **25**, 6 (1981) 934.
- 7) Sakurai, H. and Gossard, D. C. : Solid Model Input Through Orthographic Views, Computer Graphics, **17**, 3 (1983) 243.
- 8) Dutta, D. and Srinivas, Y. L. : Reconstruction of Curved Solids from Two Polygonal Orthographic Views, Computer-Aided Design, **24**, 3 (1992) 149.
- 9) 田中雅次：立体要素連立式による三面図からの自動立体作成法，情報処理学会論文誌, **34**, 9 (1993) 1956.
- 10) Tanaka, M., Iwama, K., Hosada, A. and Watanabe, T. : Decomposition of a 2D Assembly Drawing into 3D Part Drawings, Computer-Aided Design, **30**, 1 (1998), 37.