設計対象の機能記述に基づく 設計・製造の統合化*

安 藤 公 一** 吉 川 弘 之***

Integration of Design and Manufacturing Based on Understanding
the Functional Requirements about Design Object

Koichi ANDO and Hiroyuki YOSHIKAWA

This paper deals with a method for automatic generation of intermediate manufacturing information required for linking the result of design with the tasks in process planning. The method is characterized as that such manufacturing information is derived from the designer's intention expressed in the form of functional descriptions and their related geometries, both of which can be preserved in the product design stages in the CAD system. In order to describe the designer's intention in a unified way, we develop a descriptive frame work to represent the functions of the design object by three types of basic functions about a face element; function of (1) transmission, (2) constraint, (3) fixation, and by two items of functional properties such as the mechanism utilized for realization of the basic function and the condition and direction of the motion. By using this representation, the intermediate manufacturing information can easily be obtained. To confirm the validity of the method proposed in this paper, a prototype system of intermediate manufacturing planning has been fabricated. An appropriate result is obtained. This work is carried out under full consideration to realize the integration of CAD and CAM.

Key words : CAD/CAM integration, process planning, intermediate manufacturing planning, designer's intention, functional requirement

1. 緒 言

機能の異なる複数のシステムがあつて、それらを一体のものとして利用しようとするときにシステム統合化の問題が生じる。機械製品の生産の場合、CAD と CAM を統合した一貫システムの必要性が以前から指摘されてきた。すなわち CAD の設計結果から CAM での製造計画に必要な諸情報を生成することの自動化という課題である。

CAM の役割は、狭義には製造装置の稼動指令を計算機を用いて実行することであると考えられるが、CAD システムの出力結果のみに基づいて、CAM システムを稼動させるためには、そのシステムの中に、(1) CAD の出力結果を製造の立場から理解でき、(2) 様々な製造技術に関する知識をもちかつ適用できる、能力が求められる。後者の問題は、工程設計を含めた

CAM システムの汎用性のある適用能力の面で重要であり、現在、エキスパートシステムのかたちで多くの開発例がみられる¹⁾。一方、前者の能力は、CAD/CAM 統合化の必要条件を与える。

本稿では、前者の問題に注目し、設計・製造過程の統合化の方法について検討する。ここでは、CAD の設計結果を理解し、製造向きのモデルに解釈された情報を中間製造情報とよび、その情報の自動導出によって、設計・製造過程の統合を実現する。そのため本研究では、一般的な設計結果の表現である形状情報に加え、その形状を設計者が設計した意図、すなわち形状に与えた様々な機能を CAD システム側で明示的に記述し、その機能記述から中間製造情報を導出する方法を提案する。さらに、その方法に基づいて中間製造計画システムを試作した結果について述べる。

2. 設計・製造過程の統合化

2.1. システムの統合化

本稿で述べる統合化とは、機能の異なる複数のシステム間の情報の受渡しの自動化を意味する。すなわち

* 原稿受付 平成元年 6 月 22 日、昭和 63 年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和 63 年 3 月 16 日）にて発表

** 正 会 員 芝浦工業大学（大宮市深作溜原 307）

*** 正 会 員 東京大学工学部（東京都文京区本郷 7-3-1）

Fig. 1 Comparison of methods of connecting CAD and process planning

Fig. 2 The flow of the tasks from the arrival of design specification to manufacturing

CAD システムと CAM システムの統合化の場合、CAD で得られた設計結果に、技術者等の介入なしに、製造側のシステムの入力情報として直接利用可能な形態を実現することである。この関係は図 1 のように説明できる。図において、破線で示された経路をたどる作業が従来からの方法であり、オペレータが製造法の関心から設計結果にデータの付加、修正を与える過程となる。一方、情報の受渡しの自動化では、システム内部の知識を用いて製造のための対象モデル（中間製造情報）を生成し、工程設計作業のために用意された製造技術に関する知識に適用する。

2.2 設計・製造の作業過程

機械製品の場合、設計から製造に至る作業は、図 2 に示すように幾つかの段階がある。各作業はその思考内容の違いによって、①与えられた設計仕様に基づいて、要求される機能を実現するために必要な形状や大きさ等の諸属性を決定する過程（概念設計、基本設

計、詳細設計）、②得られた諸属性に製造計画に必要な情報を付加し、設計対象のモデルを製造向きに表現されたモデルに発展させ、それに基づいて加工法や使用機械の選定などの製造準備を行う過程（中間製造計画、工程設計）に分類できる。ここで、中間製造計画は設計システムの設計結果を製造向きに再設計し、中間製造情報を作成することである。具体的には、工程設計作業のための準備データを作成する段階であり、寸法精度、表面粗さ、形状精度の付加などの作業がある。本研究では、詳細設計段階までに得られた設計結果を CAD システムの出力と考え、その出力のみを入力データとして、中間製造情報を自動生成し、製造準備作業過程への情報の受渡しの自動化を実現する。

2.3 統合化の方法

中間製造情報の自動生成のためには幾つかの方法が考えられるが、そのひとつとして、設計結果にあらわれる形状の特徴的な組合せをあらかじめ用意し、その組合せに適合する中間製造情報の各項目をパターン認識する方法が考えられる。この方法は、技術者が製作図面を作成する過程になぞらえて、その作業を自動化することに特徴があり、本稿で提案する設計対象の機能記述に基づく方法を考察する上で基礎を与える。

上記の形状の特徴的な組合せをパターン認識する方法を用いて、中間製造情報の作成過程を、図 3 の事例によって説明する。図 3 (a) に示されるフライホイール部分の穴形状 H に、図 3 (b) に示されるフランジ部品の接続部分 F をはめ合わす際に必要とされる中間製造情報（図 3 (c) に示す）を作成する問題である。一般に、これらの中間製造情報項目の作成は次のような経過をたどることになる。

- (1) 中間製造情報の作成対象として、フライホイール部品の図面に描かれた形状 H を抽出する。
- (2) 抽出された形状 H の幾何学的な特徴を認識する。
- (3) その認識結果に従って、形状 H の穴径の寸法がフランジ部品の図面に示された形状 F の端面の寸法と同一の関係にあることを見出す。
- (4) この対偶的な関係の認識により、形状 H は形状 C と接続されることを知る。
- (5) フランジ部品の形状 F には、同心円上に幾つかの貫通穴があり、その穴の位置、個数および寸法がフライホイール部品の形状 H に含まれる穴と等しいことを見出す。

Fig. 3 Understanding designer's intention based on geometrical characteristics

- (6) 穴の役割に関する知識から、形状 H と形状 F はボルトとナットを用いて固定されることを知る。
- (7) フライホイール部品の全体形状、材質、大きさから考えて、フライホイール部品は相当大きな遠心力が働くことを認識する。
- (8) したがって、フライホイール部品の回転中に、取り付けられたボルトに対する荷荷が非常に大きいことを認識する。
- (9) フライホイール部品の形状 H の機能は、ボルトに対する荷荷を低減させるために、フランジ部品の形状 F を、堅く、ぴったりとはめ合わせ、固定することであると理解する。
- (10) 最後に、フライホイール部品の形状 H に必要とされる属性として、図 3 (c) の中間製造情報の各項目を付与する。そして中間製造情報に基づく製造は形状 H の機能を満足させることができる。

以上の中間製造情報の作成過程のなかで、(1)～(8)は幾何図形全体の特徴抽出から、特定の形状の機能を認識し、理解する過程であり、(9)において認識結果に到達する。中間製造情報を得るために、形状のもつ機能の理解が不可欠である理由は、製造法は単に幾何形状のみから決定できず、同じ形状でも要求される機能の違いによって製造法が異なったものになるからである。

(9)に至る形状機能のパターン認識作業を、計算機を用いて実行するためには、上の例に述べたような設

計者と同等の能力を背景とした設計者のもつ知識をデータベースとして準備する必要がある。それは非常に複雑で膨大な作業量となることが予想され、一般的解決が困難である。

そこで本研究では、上記 (1)～(8) のパターン認識作業を回避し、(9) の形状のもつ機能に関する記述を、CAD の設計結果に明示的に保存し、その機能記述に基づいて中間製造情報を導出する方法を用いる。

形状のもつ機能は、設計者が製品の設計過程で、特定の形状を設計対象全体に割り付ける際に、設計者の意図として必ず表明される。しかし、従来の CAD システムでは幾何形状による設計結果の表現を主としており、設計対象の機能に関する情報を取り扱う能力が欠如している。提案される方法の実現のためには、有効な機能記述の方法を確立する必要がある。

3. 機能記述の枠組み

3.1 基本機能記述

形状のもつ機能は、本来、無数にあると考えられるが、本研究では記述形式を統一的に扱うために、部品間の接続関係に注目した記述方法を用いる。部品間の接続関係に注目する理由は、形状のもつ機能はそれ単独では存在し得ず、特定の形状が、特定の形状と、特定の関係で接続されたときに発現すると考えるからである。ここで、発現する機能として、

- (i) 運動伝達機能
- (ii) 運動拘束機能
- (iii) 固定機能

の 3 種類を与え、それらを基本機能と呼ぶことにする。以上の基本機能の意味は別報で説明されている²⁾。3 種類の形状のもつ基本機能は部品の部分形状間の接続図を用いて図示できるが、基本機能の記述単位を部品の部分形状とした場合、CAD システム側で設計者が機能上意味ありとする部分形状の領域を指定する必要性が生じる。ところが、設計者は実現しようとする機能に対応する形状領域に対して明確な区分概念をもつとは限らないことが起こり得る。

そこで本研究では、任意性を排除して機能を表現するために、部分形状の領域を指定するのではなくて、部品輪郭の稜線で囲まれた要素面を機能認識の単位とする。すなわち、機能記述の階層的性質を導入し、形状のもつ機能は要素面の機能に分解可能と考える。要素面に注目すると、図 4 のような要素面接続図が得られる。図 4 は、図 3 のフライホイール部品が幾つかの部品と接続するとき、要素面の基本機能記述を用いて、部品機能が網羅的に表現可能なことを示してい

Fig. 4 An example of the face element connectivity graph

る。このように、本研究の機能記述は要素面が接続されたときに発現する機能を順次述べることによって行う。

3.2 機能の詳細記述のための付帯事項

前述のように、設計対象の幾何形状情報と各要素面の機能記述に基づいて、中間製造情報を導出するのであるが、上記の3種の基本機能の記述だけではその目的に対して十分といえない。そこで、基本機能をより詳細に記述するための付帯事項として、

- (i) 基本機能を実現するために用いられたメカニズム
- (ii) 運動の方向および状態

を併記することを考える。例えば、図4の要素面②⑩はある部品と接続し、運動伝達機能をもつが、そのときの機能を実現するために用いられたメカニズムは、“摩擦機構による駆動”である。またその要素面によって伝達される運動の方向および状態は、“滑らかな回転運動”となる。このように付帯事項を基本機能と共に記述することにより、詳細な内容を伴った要素面の機能記述を得ることができるので、製造法の観点からの機能の解釈が容易になる。

付帯事項は設計対象によって様々な記述内容があり得る。幾つかの機械部品を調査し、代表的な記述内容をまとめてみると表1のようなものが考えられる。これらはデータベースとして蓄積していくべき性質のものであり、各項目をさらに豊富

な内容にすることにより、汎用的な機能表現が可能である。

4. 工程設計作業のための中間製造情報

4.1 中間製造情報の諸項目

本研究では、加工工程の工程設計作業のために必要とされる中間製造情報に限定することにし、寸法公差、穴形状面と円筒形状面間のはめあいの度合、表面粗さ、二つの要素面に対する平行度、直角度、傾斜度、同軸度、対称度などの幾何公差、および二つの要素面間のエッジ形状処理情報の導出を行う。

機械図面では多くの場合、製造法を規制する理由から、中間製造情報を含んだ記述を行うのが一般的であるが、この場合、線分などの幾何要素やそこに指示された部分形状に対して、加工の際の使用工具、様々な精度情報、その他の注記事項等を付記する表記法が用いられる。本研究での中間製造情報は、要素面のもつ機能を製造法の観点から解釈することにより導出されるので、基本的に要素面に対応して考慮することになる。また、機能記述の方法は、複数の部品が接続した時に発現する機能の認識に基づくものであるから、幾何公差等を規定する場合は、前記の5項目のように、部品内の二つの要素面間で指定できるものに限られる。

本研究では、導出すべき中間製造情報の中に、互いに隣接する二つの要素面間のエッジ形状処理情報を含めている。この理由は、詳細設計までの作業過程で陽にエッジ形状を記述しなくても、隣接する要素面のもつ機能の記述を得ることにより、そのエッジの機能も推定可能であり、その機能に対応した形状処理を容易に決定できるからである。この能力によって、CADシステムで設計者の作業負担の多い、エッジ形状処理作業を軽減することができる。

上記の中間製造情報の諸項目は、幾何形状情報と合わせて、図2の工程設計作業の実行開始に不可欠なデータを構成するのであるが、CAD/CAM統合化の

Table 1 Examples of the items about functional properties

Basic Function	Mechanism utilized for realization of the basic function	Condition and direction of the motion
Transmission of motion	1: friction-mech., 2: gear-mech., 3: link-mech., 4: cam-mech.	1: linear, 2: smooth-linear, 3: very-smooth-linear, 4: round, 5: smooth-round, 6: very-smooth-round
Constraint of motion	1: rigidity-mech., 2: ball-bearing-mech., 3: sliding-mech.	1: linear, 2: weak-radial, 3: strong-radial, 4: weak-thrust, 5: strong-thrust
Fixation of motion	1: bolt-and-nut, 2: bolt-only, 3: friction-mech., 4: bearing-fit, 5: key-fit, 6: rivet-fit, 7: shrinkage-fit	1: stationary-object, 2: revolutionary-object

観点からは、CAD の出力の製造法の立場からの再設計の結果を意味し、CAM での製造計画との直結を可能にさせるものと位置づけられる。

4.2 中間製造情報の導出方法

CAD の設計結果の中に、要素面に関する幾何形状データと機能記述データが与えられると、それらを解釈することによって中間製造情報を導出することができる。設計対象部品を構成する要素面 X は述語論理の形式を用いて、次の 6 つの式で記述する。

face-type(X , $x1$) (1)

dimension(X , $x2$) (2)

normal-vector(X , $x3$) (3)

basic-function(X , $x4$) (4)

motion(X , $x5$) (5)

mechanism(X , $x6$) (6)

ここで、述語の変数 $x1$ は要素面 X の面の種類であり、機械部品の場合、平面、円筒面、端面、円すい面、球面などが取り得る値となる。変数 $x2$ は寸法値、変数 $x3$ は座標軸上での面の向く方向が記述される。変数 $x4$ は基本機能、変数 $x5$, $x6$ は表 1 の基本機能を詳述する付帯事項が各々の変数域となる。

i) 上記の論理式で、式 (4) の値が、

basic-function(X , ('transmission' OR
'constraint' OR 'fixation'))

ならば、式 (4) は要素面 X が基本機能をもつことを意味し、要素面 X には厳密に“寸法公差”を規定することが導出される。また、式 (4) の値が、

basic-function(X , 'null')

ならば、要素面 X は基本機能をもたない外形面であり、寸法公差の規定は無視してよい。上の例で寸法公差の規定が必要な場合に、式 (3) が

normal-vector(X , ('Yaxis-plus' OR 'Yaxis-minus'))

ならば、その寸法公差は Y 軸（中心軸）方向への指定であることが判明する。この場合、要素面 X は平面または端面であり、式 (1) は、

face-type(X , ('side' OR 'plane'))

となるが、軸部品の円筒面の場合では、式 (1), (3) が

face-type(X , cylindrical)

normal-vector(X , ('Zaxis-inner' OR 'Zaxis-outer'))

となり、円周面方向への寸法関係の規定を意味し、通常、要素面 X は“はめあいの度合い”によって寸法公差域を指定する。

ii) “表面粗さ”を規定する場合は、式 (4) のほか、式 (5), (6) も参照する必要がある。例えば、

basic-function(X , 'transmission')

motion(X , 'smooth-round')

mechanism(X , 'friction-mechanism')

ならば、要素面 X は摩擦メカニズムによって滑らかな回転運動を伝達する機能をもつことがわかり、“表面粗さ”は非常に滑らかな平坦な面であることを導出する。表面粗さの程度は式 (5), (6) の変数項により決定可能である。

iii) さらに、ii) の例で、 Y 軸（中心軸）上で要素面 X と反対方向を向く（式 (1), (3) より判別可能）異なる要素面 Y があり、その記述が、

basic-function(Y , 'fixation')

motion(Y , 'revolutionary-part')

mechanism(Y , 'bolt-and-nut')

であると、二つの要素面に関する式 (4), (5), (6) の対比から、要素面 Y は、滑らかな回転運動を伝達する機能をもつ要素面 X の従動面であることが判明し、二つの要素面間には“平行度”の規定が導出される。幾何精度の規定では、寸法値の大小も関係することもあり、この場合、上記の 3 つの式と共に式 (2) の記述も参照する必要がある。

iv) エッジ形状の厳密な加工処理は、隣接する二つの要素面の少なくとも一方が基本機能をもつ場合に必要である。一つの要素面の式 (4), (6) が、

basic-function(Z , 'fixation')

mechanism(Z , 'bearing-fit')

ならば、要素面 Z の二つのエッジに対して、軸受部品の挿入部のエッジ形状処理には面取り加工を、軸受部品が接続する底面部とのエッジには、厳密な直角仕上の加工処理を必要とすることが導出される。

各要素面は以上の 6 つの式の変数値の組合せによって様々に記述されるが、各式の値が与えられると、有限個の解釈規則で中間製造情報の導出が可能である。

5. フレーム表現を用いた中間製造計画システム

5.1 試作システムの構成

設計対象の機能記述に基づく中間製造情報の自動生成方法の有効性を検証するために、中間製造計画システムを試作した。本システムはすべてのデータがフレーム形式で表現されており、現在、フレーム操作システム FRODIRD II³⁾ の上で稼動している。

本システムのフレーム表現を用いた構成法を図 5 に示す。対象部品はそれを構成する要素面の集合をフレーム形式で表現する（図 5 (A)）。各要素面の幾何形状と機能記述が「面定義フレーム」とよばれるフ