継手仕口による納まりのプログラム言語を用いた記述に関する研究

STUDY ON REPRESENTATION OF TSUGITE-SHIGUCHI USING PROGRAMMING LANGUAGE

加戸啓太 ——— * 1 高林弘樹 ——— * 2
田中智己 ——— * 2 平沢岳人 ——— * 3

Keita KADO ——— * 1 Hiroki TAKABAYASHI — * 2
Tomoki TANAKA ——— * 2 Gakuhito HIRASAWA — * 3

キーワード：
伝統木造構法, 継手仕口, デジタルアーカイブ, プログラム言語, 三次元モデル

Keywords:
Traditional wooden building system, Tsugite-shiguchi, Digital archive, Programming language, 3D model

In this study, the authors attempt representation of procedures for tsugite-shiguchi by programming language. Classes for parts which have some joints are considered in aspects from geometry generation and information management. Based on these consideration, the authors programmed tsugite-shiguchi representation system which computes shapes of cutting for joints. Procedures for tsugite-shiguchi are compiled follow steps in this system: determining a joint pattern, calculating homogeneous transformation matrices as attitudes of each parts and its joints, creating shapes which represent subtraction from original lumbers. Detailed 3D model of Himeji castle which created with this system is also shown.

1. はじめに

著者らは伝統木造建築を対象として、部品一つ一つの形状を表現する精緻さで三次元モデル化し、デジタルアーカイブとする研究を継続的に行っている¹。精緻な三次元モデルを作成するために、部品の雛形をオブジェクト記述言語^{2,3}により定義し、それを三次元 CAD 図面上に配置・実体（インスタンス）化し、三次元モデルを作成する手法をとる。作成した三次元モデルについては、三次元プリンタ等で部品毎に出力し、スケール模型として組み上げる検証を通してその整合性を確かめている。

ところで、これまでに行われたデジタルアーカイブ化の取り組みでは、アーカイブ化の対象ごとに精緻さの程度にいくつか方針がある。法華経寺五重塔のデジタルアーカイブ化研究では、五重塔の対称性、層ごとの繰り返しが強い建築の構成から、ある層において同一呼称の部品は同じ寸法と見なす方針をとった。このため三次元モデル内には同じ形状をもつ部品が数多く存在している。姫路城大天守のアーカイブ化研究においては、部材それぞれについて幅成や継手仕口での納め方に関する情報が残されていることから、出来るだけそれらに従って三次元モデル化を行う方針をとった。例えば二層目の梁の部品では、配置位置（番付）によって幅成や長さ、納め方などの記録があるため、三次元モデル上でもこれに応じた表現を行う。後者はより精緻なアーカイブ化であり、幅広い活用を見込むことができる。一方で、柱梁などの部品では、納まりの種別や個数に起因する形状のバリエーションが増加し、増加に応じて部品雛形を定義していくと、部品雛形の総数が著しく増加して管理が難しくなり、合理化できなくなるという問題がある。納まりを有する部品の効率的かつ合理的な表現手法が求められる。

以上を背景に、継手仕口での納まりに関する知識をプログラム言

語により記述し、三次元モデル化の際に利用できないかと考えた。本稿では、納まり部を複数持つ部品の雛形のありようについて考察を行い、続いて納まりが形成される際の手続きを汎用プログラム言語である C/C++言語により記述する手法について報告を行う。また、それを利用した姫路城大天守のアーカイブ化についても報告を行う。

2. 納まりを有する部品の雛形

伝統木造建築の部品同士の納まりには継手仕口などの技法が用いられ、この構法の特徴の一つとなっている。例えば腰掛け蟻継ぎと呼ばれる継手は図 1 に示すような作図法で設計され、基本的にはその形状は部材の幅、成によって決まることがわかる。デジタルアーカイブ化研究では、こういった作図法を記述したものを雛形とし、三次元モデル化に利用している。雛形の記述は、伝統的な設計法をコンピュータ上で表現したものであり、構法の知識表現の一手法として有効であると考えている。

さて、こういった納まり方をする部品の表し方を考えた場合、いくつか異なった方法が考えられる。部品雛形での納まりの表現の仕方や納め方に関する情報の管理といった観点から考察する。

図 1：腰掛け蟻継ぎの設計

¹ 立命館大学理工学部 助教
(〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
² 千葉大学大学院工学研究科 博士後期課程
³ 千葉大学大学院工学研究科 准教授

¹ Assistant Prof., College of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.
² Graduate School of Engineering, Chiba Univ.
³ Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Chiba Univ.

2.1. 納まり方の記述の仕方

部材個々の幅成、納まりを表現する精緻さで三次元モデルを作成しようとする、部品の形状のバリエーションが増加する。これに対応する手法として、部品雛形を新たに定義する方法と、部品雛形に公開変数を追加し部品雛形の柔軟性を高める方法がある。納め方や納まりの数の異なる部品のバリエーションを考えると、前者は納まりをパラメトリックに扱わない（ノンパラメトリックな）手法、後者はパラメトリックに扱う手法であると整理できる。これらの手法について図2に示す土台のバリエーションを例に考察する。

ノンパラメトリックに扱う手法では、納め方が部品雛形に記述されているため、ある部品雛形が実体化できるのは特定の納まり方する部品のみである。図2に示すようなバリエーションの土台を三次元モデル化しようとする、部品両端の継手の種別と上木側か下木側かを扱うため雛形は三種類必要となる。雛形内部の仕組みは単純であるが、求められる部品雛形の総数は多くなることがわかる。なお、五重塔のアーカイブ化研究ではこの手法を採った。

納まり方をパラメトリックに扱う雛形を記述する場合は、ある部品がどのような継手であるかはパラメータの操作により表現する^{注2}。ノンパラメトリックな手法による雛形と比較して、柔軟性のある雛形であるといえる。部品雛形の内部の仕組みは複雑になるが、蟻継ぎの土台も鎌継ぎの土台も、同じ雛形から実体化することができ、図2に示すバリエーションは一種類の雛形から表現できる。

これら二つの手法では、納まり方の記録の仕方にも違いがある。ノンパラメトリックな手法では、部品の納まり方はその属する部品雛形内部に記述されており、パラメトリックな手法では部品のパラメータとして納まり方が記録されている。例えば三次元モデル内の鎌継ぎの個数の積算といった処理を考えると、後者ではパラメータの走査により積算が可能であり、明快な記録手法であるといえる。納まりを有する部品の雛形においては、納まりをパラメトリックに扱う仕組みのほうが部品雛形を効率的に使いまわすことができ、また、納まりの記録といった観点からも合理的であることがわかる。

図2：土台のバリエーション例

2.2. 部品雛形での納まりの形状表現

納まりをパラメトリックに扱う手法において、その部品雛形内部での納まり形状の表現を行う仕組みを図3に示す。ここでは、大工職人の加工を模したソリッド演算（減算）処理と、そのための形状を生成する納まりの雛形について述べる。

納まりを有する部品は、大工職人により、木材（母材）の切断、刻みといった加工が行われることで制作される。本研究では、こういった大工職人の加工を模し、納まりの形状は、上木側、下木側ともに、部品雛形内部において、母材から加工により欠如する部分をソリッド減算し表現する手順を採る。ソリッド減算に用いる欠落部分を加工形状と呼ぶことにすると、三次元モデルとして表現したい部品形

状は「(母材) - (加工形状)」と整理できる。大工職人による加工との対応をさせることで、伝統木造構法の知識を表現するという観点にも整合しており、合理的である。

部品雛形においては、パラメトリックに納まりを表現するために、公開変数として、任意数の納まり種別と加工形状を受け取る仕組みが必要であることがわかる。また、部品雛形内部では、形状表現のために、「(母材) - (加工形状)」のソリッド減算を行う仕組みが求められると整理できる。

なお、一般に取り合いや接合の表現では部品と部品のソリッド減算^{注3}を行う方法が用いられている。前出の土台の例でいえば、上木側の継手のみを形状化しておき、下木側については、「(下木側) - (上木側)」を行うという方法である。本研究でアーカイブ化のフロントエンドとして利用している ArchiCAD 17^{注4}でも、部品に紐付けられた勝ち負けの優先度により、部品が干渉した際に、優先度の低い部品が切り欠かれるといった、取り合い表現を自動的に行う仕組みが用意されている。しかしながら、この仕組みを納まりの表現に用いると、形状化された下木側の納まりが、上木側の部品のどの納まりによるものかが扱えないという問題がある。また、ソリッド演算による手法では表現しにくい納まりも多い。例えば、図4に示すような柱に貫が貫通して納まる場合では、通常、柱にあける貫穴は貫の成より、楔の分大きなものになり単純な「(柱) - (貫)」では表現できない。解決策として、例えば貫穴をあけるためのダミー部品を新たに配置するといった手法も考えられるが、実在しない部品が三次元モデル上に配置されるため、管理が煩雑になってしまう。

図3：納まりを表現するための部品雛形

図4：柱と貫の納まり

3. 納まりに関する手続きのプログラム言語による記述

以上の考察を踏まえ、部品と部品が納まりを形成する際の手続きを、納まりを形成する部品の幅、成および相対的な位置関係（姿勢）から、上木、下木それぞれの加工形状を生成する手続きであると整理する。この手続きについて C/C++言語を用いて記述を行い、納まり

雛形をクラスとして定義する。加工形状を生成する手続きは納まりの種別毎に異なる。納まりの種別毎の設計法をモデル化し、パラメトリックに加工形状が生成できるよう記述し、納まり種別毎に雛形を用意するが、後述する納まりのパターンが同じものには共通の処理も多いことから、クラスの派生を行い、構法の知識表現としての見通しの良さに配慮する。

三次元モデル化に際して、納まり雛形を用い納まりの表現を行おうとすると、納まりパターンの判定 (A)、加工形状の基準となる座標系 (納まり座標系) の計算 (B)、納まり雛形の実体化による加工形状の生成 (C) という手順になる。(A) (B) についても、C/C++言語により記述を行い、納まりの形成システムとして実装した。当システムにおける処理の流れを、横材と縦材による渡り腰での納まりが表現されるまでを例に、図5、①～⑥に示す。

- ① 納まりを形成する部品それぞれの、部品種別^{注5}、始点、終点の三次元座標、幅、成、芯線^{注6}を軸とする回転角をシステムに送信する。
- ② 納まりのパターンの判定 (A) を行う。ここでは芯線の交点^{注7}と部品の始点、終点の位置関係からパターンを判定する。システムでは、(二つの横材が) 納まりを形成する際のパターンを図6に示す4パターンに整理した。納まりのパターンに応じて適用可能な納まり種別のリストを作成する。適用可能な納まり種別については、納まりのパターンの他に、(ここでは簡単のために横材としているが) 部品の種別、あるいは三次元モデル化の対象とする建築の建立年代や様式などの情報をもとに列挙することも考えられる。
- ③ 二つの部品の位置関係によっては上木側となる部品と下木側となる部品が自動的に決まる場合もあるが、そうでない場合は操作者に指定を求める。また、②で作成した納まりのリストを表示し、適用する納まりの指定を求める。
- ④ 加工形状の基準となる座標系 (納まり座標系) の算出を行う (B)。まず、それぞれの部品の始点、終点および回転角から部品の姿勢を同次 (座標) 変換行列^{注8}として求める。この同次変換行列は各部品のローカル座標系を意味するものである。次に、各部品のローカル座標系を芯線の交点にオフセットしたものを納まり座標系とし同次変換行列を算出する。加えて、納まり座標系の向きを、納まり雛形として記述した際の向きとあうよう必要に応じて調整する。図5に示したX型の納まりパターンにおいては、納まり雛形の向きにあうよう下木側の納まり座標系をZ軸中心に回転を加えている。
- ⑤ 納まり雛形を実体化し加工形状を生成 (C) する。納まり雛形では、各部品の幅成、納まり座標系への同次変換行列をもとに、上木側、下木側それぞれの加工形状の生成が行われる。生成した加工形状は、部品に返した際に当部品のローカル座標系において適切な姿勢になる必要がある。④にて求めた二つの同次変換行列をもとに変換行列を算出し乗じておく。
- ⑥ 上木側、下木側の部品それぞれに納まりの種別と加工形状^{注9}がパラメータとして返される。

以上の処理の結果、部品 (雛形) の内部で「(母材) - (加工形状)」のソリッド減算が行われ、渡り腰での納まりが三次元モデル上で表現される。横材と縦材についてもシステムに手続きを記述した。横材

同士の場合と処理の流れは同様であるが、納まりのパターン整理が横材同士の場合とは異なる。

また、図5はフロントエンドである ArchiCAD の機能と、納まり形成システムの機能とを分けて図化してある。③のように途中で操作者に納まりの種別や上木側部品の指定を求める際に ArchiCAD のユーザインタフェースを借用しているが、②、④、⑤、⑥といった納まりを形成する際の手続きは、特定の CAD に依存しない独立したシステムとして実装を行った。三次元モデルの形状表現についても、ArchiCAD の機能である GDL による部品雛形では、「(母材) - (加工形状)」のソリッド減算のみを行っている。

本システムの機能を端的に述べると、納まりを形成する部品の諸情報 (幅成および位置、姿勢) に加え、納まり種別と上木側となる部品の指定を入力すると、その納まりを形成するための加工形状を返す機能である、と整理できる。これは、大工職人が部品と部品の取り合いを考える際に、納まりを設計し加工に向けた墨付けを行う工程と対応するものであるということもできる。汎用性のある C/C++言語で記述できており、他の三次元 CAD での利用が可能であると見込んでいる。

図5：納まりの形成システムでの処理の流れ

図6：納まりのパターン下段：横材と縦材

3.1. 姫路城大天守の三次元モデル化

姫路城大天守二重屋根部および三重南東部の三次元モデル化において、本システムの試作を行い、フィードバックを重ねた。主として軸部に多用される納まりについて、納まりの雛形を記述しシステムへの組み込みを行ったが、軸部の大半の部品の納まりに本システムを適用することができた。部品雛形や納め方の管理に問題が生じることもなかった。また、納まりの雛形において、下木側となる加工形状をオフセットさせることで、納まりのクリアランスを表現する実装も行った（図 7）。三次元プリンタでの出力を前提としたクリアランスであり大工職人の技巧を忠実に表現したものではないが、出力や組み上げの際に逐一調整を行う必要もなくなり、歪みの少ない模型ができたと考えている。図 8 に三次元モデルの分解図と、三次元モデルおよび三次元プリンタにより出力したスケール模型（1/30）を示す。

図 7: 模型化に向けたクリアランスの表現^{注10}

4. まとめ

伝統木造構法に特徴的な継手仕口による納まりに関して、その手続きをプログラム言語による記述を行い、知識として表現することを試行し、以下について報告した。

納まりを有する部品の雛形について考察を行い、納まりの表現のために設定する公開変数と大工職人の加工に準えソリッド減算により形状表現を行う仕組みを示した。納め方に関する手続きについては、手続きを、納まりのパターンの判定、加工の記述となる座標系の算出、納まり雛形による加工形状の生成と整理し、実装した納まりの形成システムの処理手順を示した。システムの試作と平行して行われた姫路城大天守の三次元モデルについても報告した。

本稿では納まりの知識のうち形状の表し方や形成手続きに着目し報告を行ったが、引き続き納まり雛形の記述を進めつつ、その体系化や知識ベース化といった展開も試みていきたい。

謝辞

姫路城大天守の三次元モデル化にあたり、調査協力および資料提供を受けた姫路市立城郭研究室に感謝する。また、本研究は、科学研究費補助金（25420626）、特別研究員奨励費（24005874）の助成によって行われたものである。

注釈

- 注1: 部品雛形の記述には ArchiCAD（注 5 参照）に付属のオブジェクト記述のためのプログラム言語 GDL（Geometric Description Language）を利用している。
- 注2: 具体的に操作すべきパラメータや、こういった操作を実現する部品雛形の仕組みについては、次節に記した。
- 注3: ここでのソリッド演算は、部品と部品のソリッド演算である。本研究で納まり形状に用いると記したソリッド演算は、部品雛形内部で行うものであり、納まり種別の記録や形状表現上の問題とは関連がない。
- 注4: Graphisoft 社開発の建築用三次元 CAD である。
- 注5: ここでは、部品の種別は単に「横材」としている。今後、土台や長押といった細分化した種別を扱うことを予定している。
- 注6: 始点と終点を結ぶ線を芯線と呼んでいる。また、始点と終点の高さ方向の位置は便宜上断面の中心に置いている。
- 注7: 三次元空間における線分であるので、交差しないことも多いが、最近傍点を交点として扱っている。故に、上木側の交点と下木側の交点の二つの交点を使い処理を進めていく。
- 注8: 同次変換行列は、並進（位置）と回転を表す行列であり、三次元モデル（空間）においては 4×4 の行列となる。コンピュータグラフィックスやロボットの分野でよく用いられる。
- 注9: 加工形状の雛形の記述に C/C++ 言語を用いた場合、雛形内部では BREP による形状を生成されるよう記述しているが、フロントエンドである ArchiCAD（の部品）に返す際に GDL の書式に書き換えたものを出力している。また、BREP とは頂点、稜線、による境界表現（Boundary Representation）で形状を表す手法である。三次元 CAD 内部での形状表現に一般的に用いられている。
- 注10: 幅成の異なる部品での腰掛け鎌継ぎを例示した。また、図化のためクリアランスを大きく設計している。

参考文献

- 1) 加戸啓太、平沢岳人：伝統木造建築物のデジタルアーカイブ化における部品雛形と部品に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第 76 巻 第 662 号、pp.877-886、2011.4
- 2) 富樫新三：大工宮ひな形―一間社から拝殿・鳥居まで、理工学社、2000
- 3) 木内修：現代棟梁の設計術―五意達者への道、新築社、2007
- 4) 富樫新三：木造建築の継手と仕口、オーム社、2010

図 8 姫路城大天守二重屋根部および三重南東部の三次元モデル（左、右上）とその三次元プリンタによるスケール模型（右下）

[2015 年 2 月 18 日原稿受理 2015 年 3 月 31 日採用決定]