

5 軸加工機によるプレカット生産を前提としたツーバイフォー工法の BIM システムに関する研究

千葉大学大学院 平沢岳人

1. はじめに

近年では、建築を三次元部品（モデル）の集合として組み上げ、部品それぞれに寸法や素材などの諸情報を紐付けて管理する、BIM (Building Information Modeling) の概念が普及してきている。三次元モデルにより直感的に形状を捉えられることから、設計段階に大きな効用があるが、三次元モデルへ集約された諸情報の生産・施工段階での活用にも将来性がある。

ツーバイフォーメーカーの実務には、ツーバイフォー工法に特化した生産系 CAD/CAM システムが組み込まれ、このシステムへの入力データを整える生産設計プロセスがある。このプロセスでは図面によって部材レベルでの情報伝達がおこなわれており、プレカット工場においても図面データを入力として、五軸加工機などの数値制御工作機により規格材から部材を切り出している。しかし、これらのシステムでは、二次元図面での情報伝達が主であり、三次元表現やそれらによる視覚的なシミュレーションといった機能を持たないという点で BIM の理想を満たしていない。

本研究では、ツーバイフォー工法の生産方式を踏まえ、部品の加工法や部位の構成法をスクリプトとして記述する。これらを雛形として実体化した部品の情報モデルを関係データベースにて管理・運用することで、建築生産プロセスの上流から下流までに適用できる BIM を実現するシステムを開発する。本稿では屋根部概形から生成した各部材の情報モデルを利用し、仮想の五軸加工機に加工データを直接入力して、規格材から部品を切り出すオペレーションまでをおこない、生産プロセス間のデータ統合の実現可能性を検証する。

2. ツーバイフォー工法の BIM システム

2.1 構法の知識表現としての BIM

先行研究⁽¹⁾で構築したツーバイフォー住宅建築の精緻な三次元モデルは、部品の形状や属性、部品同士の納まりまで表現している。また三次元モデルだけでなく、部品の雛形（以下、部品雛形とする）にはツーバイフォー工法の生産工程における特徴も考慮した、部品の加工法もスクリプトとして記述されている。著者らのいうところの「構法の知識表現」とは、部品の納まりまで表現した精緻な三次元モデルと、それら部品の設計法が記述された部品の雛形や後述する部位の雛形までを含めた知識の集合を意味している。

2.2 ツーバイフォー工法の生産方式

ツーバイフォー工法の建物を構成する部品の多くは規格化された構造用製材を加工したものである。近年では在来軸組工法と同様にツーバイフォー工法においてもプレカット化が進んでおり、工場でのプレカット加工には全自動クロスカットソーなどの数値制御工作機が導入されている。加工機内では製材が固定され、回転刃が駆動して製材を裁断する。柱、梁を始めとする多くの部品は部品全長の寸法でのカットのみで加工機による工程は終了する。一方、小屋組を構成する部品、例えば垂木の場合では、部品全長でのカットの他に、屋根勾配に応じた小口の切り落とし、頭つなぎとの接合部の切り欠きなどの工程が加わる (Fig.1)。

このように、ツーバイフォー工法の生産方式には、規格材から加工される部品は「数値制御加工機によるカット」という共通の工程を辿るという特徴がある。本研究では加工機によるプレカット生産を前提とした部品雛形の記述を試みる。



Fig.1 Cross cut saw

2.3 部品構成の形式知化

建築モデルとしての部品には一般に部位と呼ばれる階層上位（抽象）概念がある。ツバイフォー工法は、壁組や小屋組といった部位の部品構成のルールが明快であるため、部位の概形や構成方法の種類などを決定すると、具体である部品の構成をある程度自動的に導出することができる。例えば小屋組の場合では、垂木、棟木、天井根太などの小屋組を構成する材の寸法形式（「2x4」や「2x6」など）や、屋根勾配、桁行、梁間などの概形情報、切妻や寄棟といった屋根形状の種類を決定すると、小屋組を構成する部品群の数量やそれぞれの材の長さ、位置姿勢、部品同士の納まり方などを導出することができる。

本研究では、部位に関する諸情報から、部位を構成する部品群へと展開するまでの手続きを、部位の雛形（以下、構成雛形とする）として記述することを試みる。

2.4 システムの概要

構法の知識表現をおこなうシステムの活用を考えれば、特定のソフトウェアに依らない、汎用的な運用ができるデータとして構築される事が望ましい。BIMの概念が、先天的に構法知識の集約であるという側面を持っている以上、本システムも同様に、汎用的なデータ運用をおこなうべきである。BIMデータの運用手法については、様々な動向がみられるが、本研究では関係データベースを中核としてシステムを構築する。関係データベースが多様な開発言語に対する開放的なインターフェイスを用意していることから、多種多様なアプリケーションとの直接的なデータ連携が可能となる。本システムの概要を Fig.2 に示す。構成雛形の実体化から部品雛形の实体化による部品群の展開までのプロセスは次のとおりである。

3. 雛形の定義と機能

ツバイフォー工法における部品の加工法や部位の構成法を汎用プログラミング言語である C/C++により記述し、これらをツバイフォー工法の建築モデルを作成（実体化）するための雛形とする。本システム

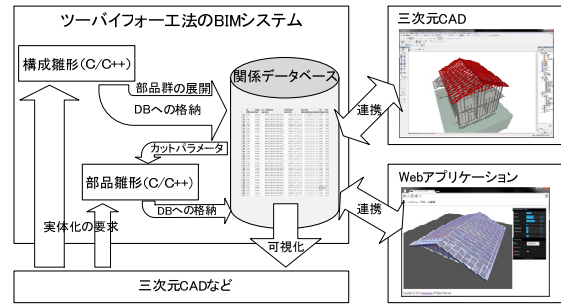


Fig.2 System summary

の雛形は関係データベースに接続する機能を持ち、実体化に用いるパラメータの問い合わせや、実体化された部品モデルのデータの格納をおこなう。

3.1 部品雛形

本稿では、ツバイフォー工法の建築構造を構成する部品のうち、規格材を加工して生産される部品の雛形について言及する。前述のように、実務において、規格材の加工は数値制御の加工機によっておこなわれる。本研究では、これらの生産に関する知識を部品雛形へ記述することを試みる。具体的には、雛形から部品モデルを実体化する際に値を与える引数の設定を、実務に導入されている五軸加工機への入力に用いられるカット位置算出用の引数リストを参考におこなう。Fig.3 に部品雛形に設定するカット用引数を示す。

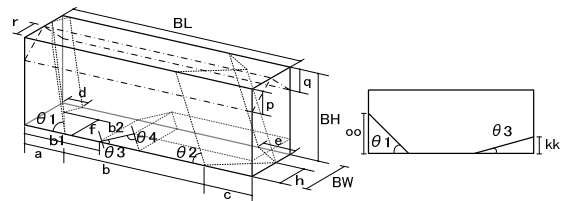


Fig.3 Arguments of lumber model

部品雛形には、部品の幾何形状や寸法形式といった生産に必要な情報、部品の呼称（「棟木」や「垂木」など）といった構法知識として保持すべき情報を持たせる。また、部品の三次元モデルを仮想空間上に配置する際の位置・姿勢情報も保持する。このように、部品の生産方法に着目して雛形を定義することで、部品モデルに生産の情報を付与できるうえに、呼称や形状、構造上の役割が違う種々の部品を一つの雛形で管理できる。

部品雛形のカット用引数に入力された値（以下、カットパラメータとする）による形状データの算出には、独自に開発した CSG（Constructive Solid Geometry）ライブラリを用いる。切り落としや切り欠きにより元の規格材から欠如する部分のジオメトリ・オブジェクトをカットパラメータから算出し、規格材のジオメトリ・オブジェクトに対して減算をおこない、結果として得られた幾何形状を生産設計に相当する形状データとする。Fig.4 に元となる規格材と被減算部分の三次元モデルの関係を示す。

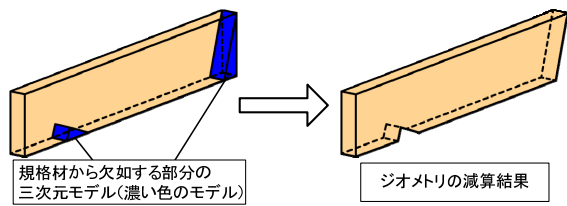


Fig.4 3D model of lumber and lack parts

3.2 構成雛形

構成雛形は、ある建築部位に内包される各部品を部品雛形から実体化するための適切な値（カットパラメータや位置・姿勢など）を算出し、部品群を自動展開する機能を持つ。本研究では、自動展開の実装の初期段階として、単純な概形（平面が矩形で妻側が切妻造・寄棟造のいずれか一方）による小屋組の構成雛形について言及する。小屋組の構成雛形に設定する引数を Fig.5 に示す。ツーバイフォー工法における小屋組の構成法から、構成雛形の内部で部品群を展開する処理の概要は次のとおりである。

- ① 切妻・寄棟で大別する。
- ② モジュールと各寸法を用いて梁、垂木、ころび止めといった種類（部品呼称）ごとに部品数を算出する。
- ③ 部品呼称と部品数から、各部品について、位置・姿勢やカットパラメータなど、規格材の部品雛形から部品モデルを実体化する値を算出する。
- ④ データベースに③のデータを格納する。

Fig.6 は構成雛形から実体化した小屋組（切妻造）のモデルと、自動展開された部品モデル群を、それぞれのモデルに含まれる形状データにより視覚化したものである。

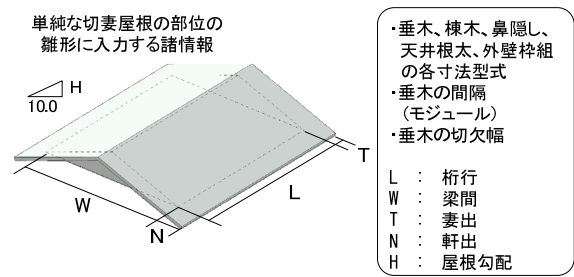


Fig.5 Arguments of roof frame model

屋根の雛形に屋根勾配や桁行、梁間などの情報を与えて実体化

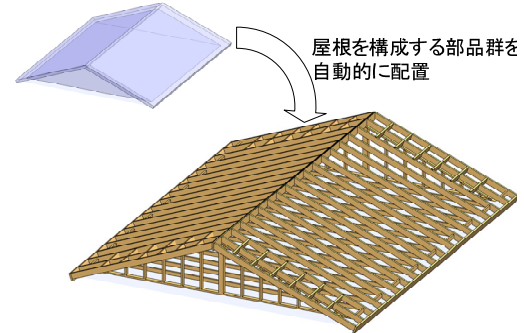


Fig.6 Arrangement of lumber instances

4. 関係データベースによるデータ運用

部品・部位の雛形プログラムと部品モデル管理のデータベースを連携させることで、ツーバイフォー工法の BIM データを生産プロセス間で統合的に扱うシステムを構築する。小屋組と、規格材から加工される部品のモデルの情報を運用する基本的なスキーマを Fig.8 に示す。小屋組のテーブルには、「妻側の造り」、「規格材の寸法型式や梁間・桁行などの寸法」といった、小屋組の実体化に際して構成雛形に与えるパラメータ（以下、小屋組パラメータとする）を格納できるようにしておく。規格材のテーブルには、「その部品を実体化した小屋組モデルの ID」と「部品呼称」、「カットパラメータ」、「幾何形状情報」、「位置・姿勢」といったデータを記録する。Fig.7 に規格材テーブルに格納されたレコードの例を示す。なお、関係データベースには PostgreSQL を用いた。

id	pk	serial	ptype	src	cutparams	ifcid	breps	proc	mat	ref	tris
				text	text	intex	text	intex	double precision	intex	integer
31	1578		RaFter	BH=38, BM=140, BL=3695,	v3433.04,-19.03		[0.328477,0,-0.11548	v343			
32	1579		Ridge	BH=38, BM=184, BL=329,	v3180,-19.03		[2.22645e+16,1.41548	v318			
33	1580		Joist	BH=38, BM=140, BL=3229,	v3229.5,-19.03		[1.0,0.0,0,-1.11548	v322			
34	1581		Soegi	BH=38, BM=140, BL=400,	v400,-19.03		[1.0,0.0,0,-1.11548	v400			
35	1582		Joist	BH=38, BM=140, BL=3229,	v3181.46,-19.03		[1.0,0.0,0,-1.11548	v318			
36	1583		Joist	BH=38, BM=140, BL=3229,	v3229.5,-19.03		[1.0,0.0,0,-1.11548	v322			

Fig.7 Records of lumber instance

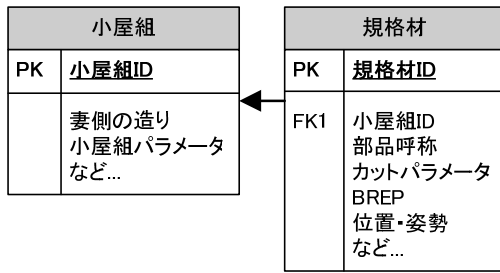


Fig.8 RDB scheme

部品の幾何形状情報のデータ形式については、BREP形式（Fig.9）を採用し、ジオメトリの面を多角形ポリゴンで表現したものと、三角形分割したものの二種類を用意した。これは、複雑な形状を持つ部品への対応、データ連携時のデータ容量の削減、多様な描画ライブラリへの対応といった複数のシステム要件をなるべく満たすためである。

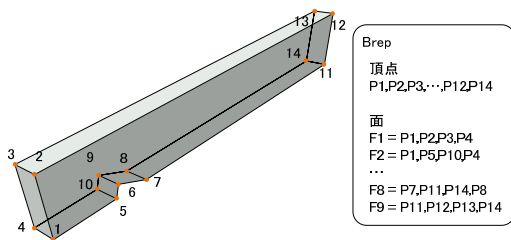


Fig.9 BREP model

5. 本システムによる建築モデルの利活用

本システムが提供するツバイフォー工法の構法知識は、三次元 CAD ソフトウェアや Web アプリケーションに、本システムのデータベースへアクセスする機能を付加することで、利用することが可能である。

5.1 外部のソフトウェア・アプリケーションによる入出力 本システムを利用する例として、開発した Web アプリケーションを Fig.10 に示す。本アプリケーションは画面中央の描画領域と画面右の小屋組パラメータ入力用 GUI よりなる。描画には小屋組の抽象モデルが表示されており、パラメータ入力用 GUI により値を変更させることで、抽象モデルの概形が変化する。ユーザがパラメータの入力を終え、GUI 下の展開のボタンを押下すると、サーバ上のシステムとのデータの交換がおこなわれる。パラメータ入力後に、サーバで行われる処理は次の

とおりである。

- ① クライアントから小屋組パラメータを受け取りデータベースに格納する。
- ② 構成雛形のプログラムが起動して、データベースの小屋組パラメータを読み込み、構成雛形の実体化をおこなう。
- ③ 構成雛形の実体化により自動展開された部品モデルのデータをデータベースに格納する。
- ④ 自動展開の結果として部品モデル群を表示するための形状データをクライアントへ返信する。

なお、描画領域はマウス操作により直観的に視点を変更でき、展開された部品の三次元モデルを詳細に閲覧することができる。

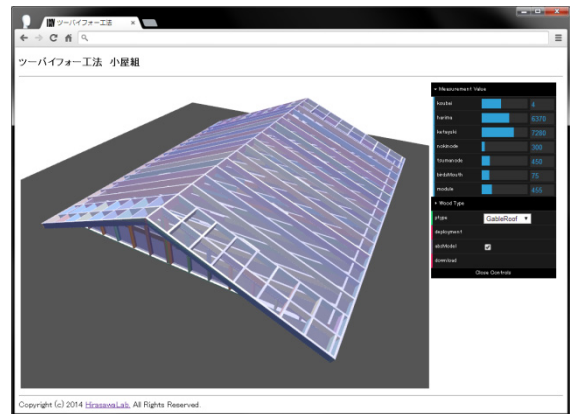


Fig.10 Online viewer

アプリケーションにより展開された部品モデル群のデータは、サーバ上のデータベースにて保管されているため、異種三次元 CAD ソフトウェアや Web アプリケーション間で建築モデルを共有できる（Fig.11）。

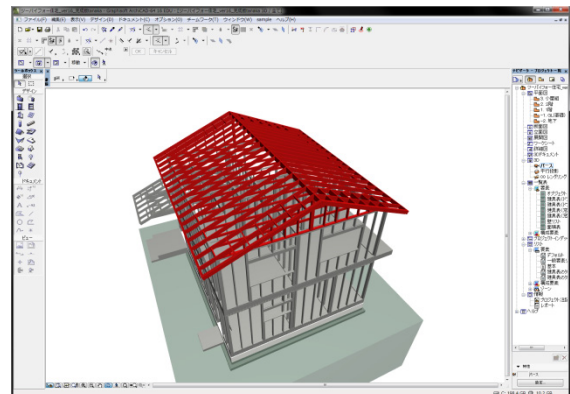


Fig.11 Lumber instances via RDB

6. 仮想五軸加工機によるカットシミュレーション

データベースに格納された規格材のカットパラメータは、五軸加工機を数値制御するオペレーションコマンドとなることを想定したものである。カットパラメータの入力により五軸加工機で加工した部品の形状と、データベースに格納された形状を比較することで、五軸加工機で加工した部品の出来形を検証することもできるだろう。本研究では、現実の五軸加工機を使用した検証の代替として、仮想空間に五軸加工機を設置し、規格材のカットシミュレーションをおこなうプログラムを実装した。

6.1 シミュレーションの概要

このカットシミュレータは、五軸加工機の挙動をモデル化したものである。このシミュレータでは、入力されたカットパラメータをGコードに代表される数値制御コードに変換するのではなく、回転刃の挙動へとダイレクトに変換している。シミュレーションの結果はOpenGLによるアニメーションで表示する。以下にシミュレーションの流れを示す。

- ① 規格材IDをキーとしてデータベースに問い合わせ、規格材テーブルからカットパラメータを読み込む。
- ② カットパラメータから、回転刃の挙動を算出し、時系列でバッファへ登録する。
- ③ ②で求めた値を用いて五軸加工機の挙動を制御する。
- ④ 予め登録している回転刃のジオメトリ・オブジェクトと、カットパラメータから作成した加工前の規格材オブジェクトとの減算処理をキーフレームごとにおこなう。
- ⑤ 規格材オブジェクトが回転刃オブジェクトにより両断された時点で、規格材オブジェクトを分割し、部品となるオブジェクトと端材のオブジェクトの識別をおこなう。
- ⑥ ②のバッファが空になるまで、③～⑤を繰り返す。
- ⑦ 結果として得られたジオメトリ・オブ

ジェクトの幾何形状と、データベースに格納されている部品の幾何形状を比較する。

なお、回転刃オブジェクトによる規格材オブジェクトの減算処理には、規格材の部品雛形内で用いたものと同様のCSGライブラリを使用しているが、部品雛形での処理が生産設計に相当していることに対し、カットシミュレーションでの処理が五軸加工機の挙動の抽象化であるという点で、アプローチの異なる試行である。

6.2 検証結果

五軸加工機の挙動や規格材がカットされる様子をアニメーションにより確認できた(Fig.12)。シミュレーションの結果として得られたオブジェクトの形状は、部品の形状と一致しており、五軸加工機の挙動が正しいことが確認できた。

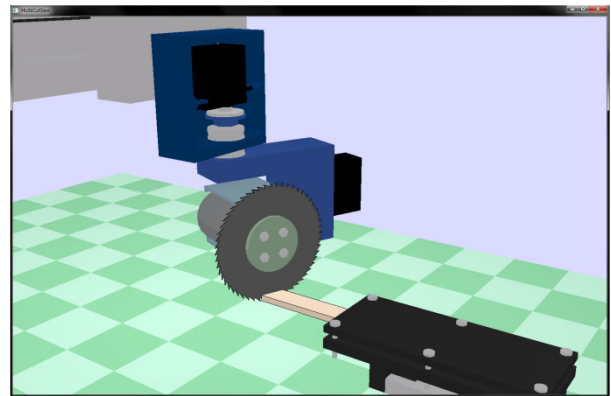


Fig.12 Virtual five axis CNC machine

7. まとめ

ツーバイフォー工法の明快な部品構成のルールや、五軸加工機によるプレカット処理という現代のツーバイフォー工法の生産方式を部品・部位の雛形として記述し、雛形から実体化した建築モデルを関係データベースで運用するBIMシステムの可能性を示した。本システムの手法によれば、三次元CADソフトウェア、Webアプリケーション間で構法知識を持った建築情報モデルのデータ連携が可能である。また、コンピュータシミュレーションにとどまるものの、本システムで作成するカットパラメータから、五軸加工機の動作を正しく制御できることを確認した。