

平成 30 年 5 月 17 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18196

研究課題名(和文) コンピュータ言語による伝統木造構法の記述

研究課題名(英文) Knowledge representation for traditional wooden building system with computer language

研究代表者

加戸 啓太 (KADO, Keita)

千葉大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：60727379

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、コンピュータ言語による伝統木造構法の記述について研究を行った。木割に代表される寸法体系、継手仕口といった部材の納め方に関する知識、規矩術を含めた部材部位の作図設計法を、汎用プログラミング言語と関係データベースにより表現し、知識ベースとしての実装を試みた。継手仕口はC/C++言語、寸法体系、部材の設計法や部位の構成法については独自に実装したビジュアルプログラミング言語により表現を試みた。汎用のプログラミング言語での実装を通して表現のありようを含めた考察ができた。

研究成果の概要(英文)：In this research, the authors attempt representation of traditional wooden building system by programming language. The following results were obtained.

1. Procedures for tsugite-shiguchi can be represented by determining a joint pattern, calculating attitudes of each parts and its joints, and creating shapes that represent subtraction from original lumbers. parametrical Classes for the joints were developed and detailed 3D model of Himeji castle, a conventional house and a traditional wooden temple gate were created with this system. 2.

Systematized proportionality relations which are typified as kiwari, part classes including the design method, and the parts structure were studied through the development of a visual programming system. The authors conclude that executable graphical description with visual programming could be used for knowledge representation for building system.

研究分野：建築構法

キーワード：伝統木造構法 三次元モデル 知識表現 パラメトリックデザイン

## 1. 研究開始当初の背景

申請者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を行い、デジタルアーカイブとする研究を継続的に行っている。

伝統木造建築においては、継手仕口による複雑な納まりや屋根部の水平垂直でない、あるいは曲面のある部材が三次元 CAD でのモデリングを難しくしている。他方、伝統木造建築は大工職人の属人的な知識のみでなく木割・規矩術に代表される体系化された構法に基づいて成立している。個々の部材の形状は基準となる寸法にパラメトリックに決定されており、基準となる寸法や部位の構成（位置関係）も系統的に設計されるという性格も持ち合わせている。

これまでにいくつかの伝統木造建築を対象にデジタルアーカイブ化を行い、基準となる寸法（パラメータ）から形状が決定されていく手続きを CAD システムのスクリプトとして記述し、部品雛形を定義する手法により、精緻な三次元モデル化を実現してきた（図 1）。また、膨大な数の部品からなる三次元モデルの整合性を維持するために、CAD システムと外部の関係データベースを連携させて、部品情報の管理を行う手法をとっており、この外部データベースに関連する写真や説明文を追加し、Web アプリケーションによる一般公開も行っている（図 2）。部品レベルの形状まで表現された三次元モデルと、それに紐付くかたちで記録された諸情報は、歴史的価値の保存手法の一形態となりうると考えている。

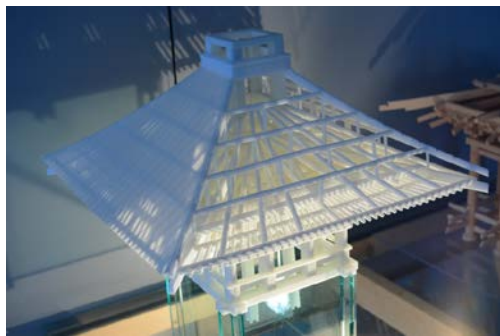


図 1：デジタルアーカイブから三次元プリンタにより出力した 1/15 スケール模型  
法華経寺五重塔（千葉県市川市、重要文化財）



図 2：ブラウザ上で三次元モデルを操作しながら関連情報を呼び出すことのできる Web アプリケーション  
<http://yanaka50.hlab-arch.jp/da/hokeykyo/>

さて、これまでの研究は個別の伝統建築のデジタルアーカイブ化を目的に行われたものであり、個別の伝統建築の三次元モデル化手法の確立と結果出来上がった三次元モデルの記録や公開方法に重点が置かれている。伝統木造建築を成り立たせている構法については、その記述手法も含めて十分に考察できていない。こういった背景から、本研究では構法のデジタルアーカイブ化を目的に、寸法体系や部材部位の設計法、納まりの知識のコンピュータ言語による記述に関して研究を行い、知識ベースとしての実装を試みる。

## 2. 研究の目的

本研究では、コンピュータ言語による伝統木造構法の記述について研究を行う。木割に代表される寸法体系、継手仕口といった部材の納め方に関する知識、規矩術を含めた部材部位の作図設計法を、汎用プログラミング言語と関係データベースにより表現し、知識ベースとしての実装を試みる。

## 3. 研究の方法

木割に代表される寸法体系では部材の断面寸法やプロポーションが比率で表されており、これが伝統建築の美しさを生み出している。これまでの研究においても、関係データベースにて寸法（パラメータ）の管理を行ってきたが、これらは前述のように個別の伝統建築の三次元モデル化の整合性を保つためのものであり、部品間に跨った寸法の制約として主にパラメータ同士が等しくなることを記録しているものである。本研究においては、寸法体系は個別の伝統建築とは切り離して考えつつ、知識表現として、寸法間の関係性をグラフィカルに表現するためのビジュアルプログラミングによる実装というかたちでの記述を試行する。

納め方の知識についても同様に個別の伝統建築における部材と部材の納め方を扱うのではなく、継手仕口毎の適用箇所などを整理し、個別の伝統建築の三次元モデル化の際の問い合わせにより、納まりの三次元形状を導出するといった仕組みとしての実装を行う。こちらについては、接続関係の表現はビジュアルプログラミングにより表現するが、その仕組みの実装は C/C++ 言語を用いる。

規矩術を含めた部材部位の設計法は、ビジュアルプログラミング言語での記述を行う。これまでの研究における部品雛形に相当するものも含まれるが、これまでの部品雛形は、CAD システムに付属のスクリプトでの記述を行っており、CAD システムなしでは利用できないため汎用性が低く、また、低級言語であるためスクリプトの構造が整理しにくいといった問題があった。構法の表現のためのビジュアルプログラミングの姿を考察しつつ、独自のビジュアルプログラミングを試作することを通して、構法の知識ベースとして見通しの良い表現を試みる。

#### 4. 研究成果

本研究では、寸法体系、継手仕口などの納め方、部材部位の設計法の三点について記述を試みたが、寸法体系および部材部位の設計法はビジュアルプログラミングにより、継手仕口などの納め方は C/C++ 言語により行った。ここでは、表現に用いた言語に整理し、まず、継手仕口などの納め方に関して述べ、次に、寸法体系、部材部位の設計法に関する成果を示す。

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3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。

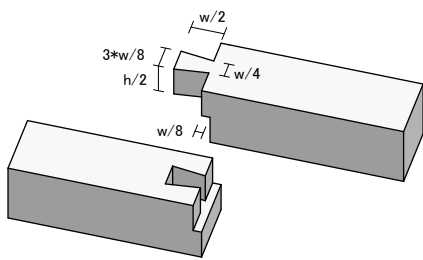


図3：腰掛け蟻継ぎの設計

こういった納まり方をする部品の表し方を考えると、単純に蟻継ぎを有する部品雛形として定義していくと、部品の形状のバリエーションの多さが問題となる。例えば、図4は継手のある土台の一例であるが、これらの雛形を用意しようとする、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。求められる部品雛形の総数は非常に多くなることがわかる。このような問題にはパラメトリックな仕組みが有効である。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ことで、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3に示したバリエーションは一種類の雛形から表現できる。

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4に示す。納まりを有する部品は、大工職人により、木材（ワーク）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、ワーク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「(ワーク) - (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、「(ワーク) - (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。

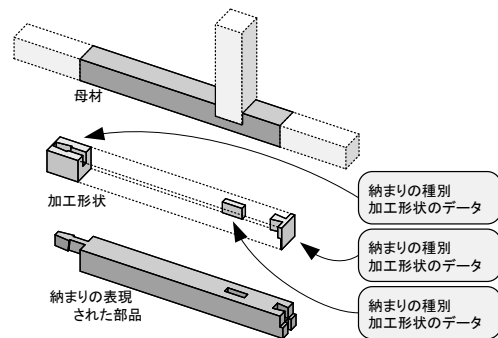


図4：納まりを表現するための部品雛形

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した。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に記述し、納まり種別毎に雛形を用意するが、図5に示す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は、納まりパターンの判定、加工形状の基準となる座標系（納まり座標系）の計算、納まり雛形の実体化による加工形状の生成（C）という手順となる。それぞれ、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。

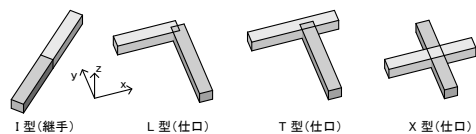


図5：納まりのパターン下段：横材と縦材

この仕組みを姫路城大天守二重屋根部および三重南東部、在来木造住宅（図6）、楼門初重軸部（図7）について適用し、納まりの三次

元モデル化が合理的に行えるという点に加え、以下の成果を確認することができた。

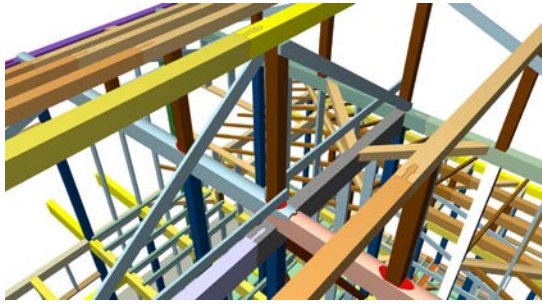


図 6：在来木造住宅の三次元モデルとその検証のための三次元プリンタ出力

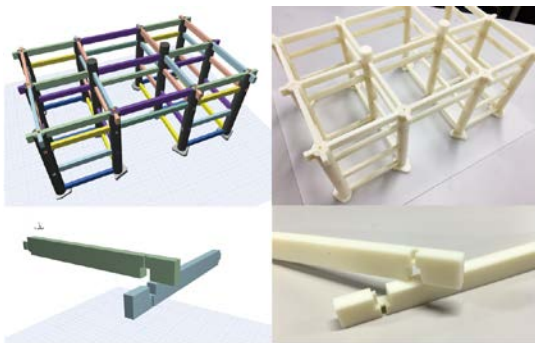


図 7：楼門初重の三次元モデルとその検証のための三次元プリンタ出力

まず、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、三次元プリンタなどでの出力時のクリアランスを表現する実装が可能であることを確認した(図 8)。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。次に、納まり部に関してその情報をデータベースにて管理しておく(図 9)ことで、納め方に関する基本的な情報管理はもちろん、部材の移動に伴う再計算などに活用できることを確認した。最後に、加工形状を更に大工加工における工程に細分化(図 10)することで、加工手順を可視化することや、機械加工への入力に活用できることを確認できた。

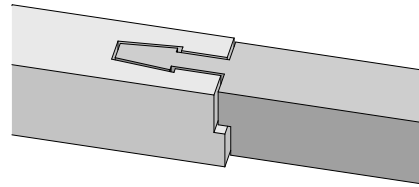


図 8：模型化に向けたクリアランスの表現

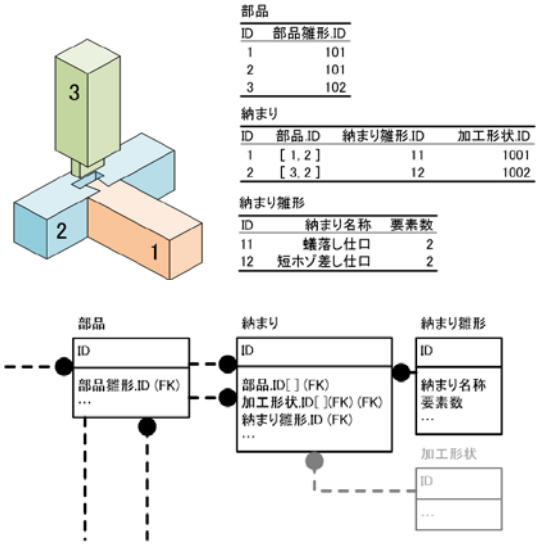


図 7：納め方のデータベースでの管理

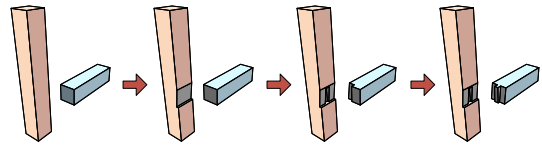


図 8：工程毎に細分化して表現した加工形状

寸法体系および部材部位の設計法については、ビジュアルプログラミング(以下 VPL)による表現を試みた。VPL は基本的にはアルゴリズムなどのフローチャートや、データベース設計の ER (Entity Relation) 図などで広く目にする矩形(コンポーネント)と矢印(コネクタ)による表現に基づくものである。このような表現においては、単に図化されていけばよいということではなく、矩形の意味する物事が理解しやすいよう適切に象徴化されていることが重要である。ここでは、独自に実装した VPL によりその表現の姿を含めて考察を行った。以下、成果について簡単に説明する。

部品雛形は、作図法 (designMethod) とそれへの入力となる公開変数 (parameter)、公開変数をもとに計算される内部変数 (variable)、そして他の部品と納まる際の接続情報によって構成されると整理した。この整理に基づき斗拱部(図 9)を構成する部品雛形を VPL にて記述すると、図 10 のようになる。なお、ここでは紙面の都合で作図法をまとめたコンポーネントとして表現しているが、この内部で行われる材木(ワーク)の用意や伝統的な作図法による墨付け、加工なども形状化のための手続きも VPL による表現を行っている。

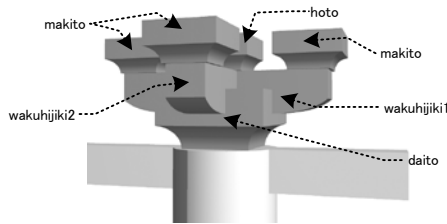


図 9 : 斗棋部

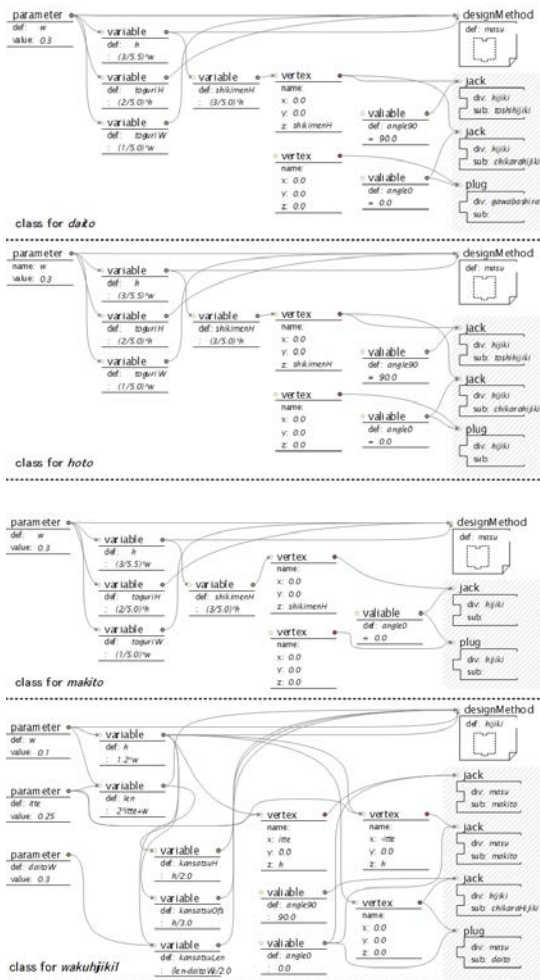


図 10 : 部品雛形の VPL 表現

部品の構成についても同様に VPL による表現を行った。単に、部点を表現するために、各部材の配置位置を VPL で記述すると、部品の数だけ配置位置の計算が必要となり、全体の表現として煩雑になることが確認できた。加えて、計算の重複が多く見られるようになり、整合性を損なう恐れもある。一連の試行から、接続する部品間の相対的な位置関係に関する情報を部品雛形に含めておくのが合理的であると考え、図 10 に示したように部品雛形に接続情報として、この部品（雛形）に取り付け部品とその相対的な姿勢(jack)と、この部品が取り付け先の部品と相対的な姿勢(plug)を加えている。このような考えを取り入れたことで、図 11 のように三手先の部点を表現することができた。

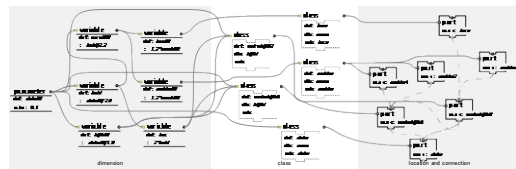


図 11 : 斗棋部 (部点) の表現

これまで示した VPL が、これらがコンピュータで解釈（実行）できるものでないと単なる模式図になってしまい、構法知識の記述としての価値が減る。ビジュアルプログラミングにて表現したものを実行するシステムの概要を図 12 に示す。データベースは図 13 のような構成となっており、コンポーネント類の接続関係などが管理されている。VPL 表現と、このシステムにおける実行例を図 14 に示す。

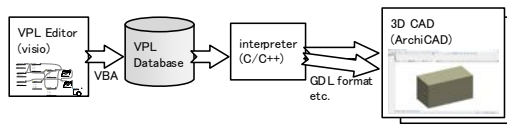


図 12 : 実行システムの概要

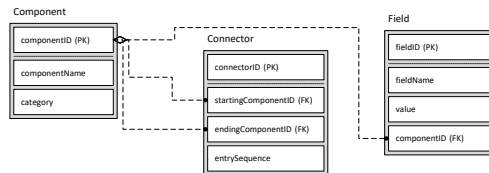
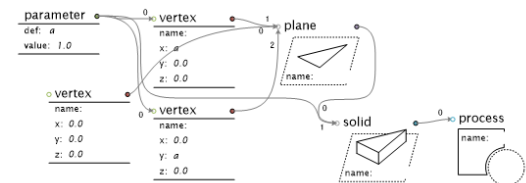


図 13 : データベースの構成



Component			Field			
ID	name	category	ID	name	value	componentID
101	parameter	sample	201	a	1.0	101
102	vertex	sample	202	name		102
103	vertex	sample	203	x	0.0	102
104	vertex	sample	204	y	0.0	102
105	plane	sample	205	z	0.0	102
106	solid	sample	206	name		103
107	process	sample	207	x	0	103
			208	y	0.0	103
			209	z	0.0	103
301	101	103	210	name		104
302	101	104	211	x	0.0	104
303	101	106	212	y	0	104
304	102	105	213	z	0.0	104
305	103	105	214	name		105
306	104	105	215	name		106
307	105	106	216	name		107
308	106	107				

```

PARAMETERS : a = 1.0
-----
!! vertex @ 102
v102,x = 0.0 : v102,y = 0.0 : v102,z = 0.0
!! vertex @ 103
v103,x = a : v103,y = 0.0 : v103,z = 0.0
!! vertex @ 104
v104,x = 0.0 : v104,y = a : v104,z = 0.0

!! plane @ 105
p105,x = v102,x : p105,y = v102,y : p105,z = v102,z
p105_oPdct_x = (v103,y - p105,y) * (v104,z - p105,z) - (v103,z - p105,z) * (v104,y - p105,y)
p105_oPdct_y = (v103,z - p105,z) * (v104,x - p105,x) - (v103,x - p105,x) * (v104,z - p105,z)
p105_oPdct_z = (v103,x - p105,x) * (v104,y - p105,y) - (v103,y - p105,y) * (v104,x - p105,x)
p105_norm_len = SQR(p105_oPdct_x ^ 2 + p105_oPdct_y ^ 2 + p105_oPdct_z ^ 2)
p105_norm_x = p105_oPdct_x / p105_norm_len
p105_norm_y = p105_oPdct_y / p105_norm_len
p105_norm_z = p105_oPdct_z / p105_norm_len
...

!! solid @ 106
GROUP "s106"
SWEEP 3, 2, 0, 1, 1+2+4+16+32+64,
v102,x, v102,y, v102,z, v103,x, v103,y, v103,z, v104,x, v104,y, v104,z,
p105,x, p105,y, p105,z,
p105,x + (p105_norm_x * a), p105,y + (p105_norm_y * a), p105,z + (p105_norm_z * a)
ENDGROUP
PLACEGROUP "s106"

```

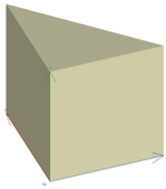


図 14 : VPL 表現と実行例

本研究では、伝統木造構法のコンピュータ言語による記述をテーマに、継手仕口などの納まり、寸法体系や部品、部位の構成の知識表現を試みた。汎用のプログラミング言語や独自に実装した VPL により、表現のありようを含めた考察ができたと考えている。一方で、個別の建築への適用や公開などを通じた検討は十分には行えなかった。これらについては引き続き研究を行っていきたい。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ①. 加戸啓太、青野敏紀、平沢岳人、ビジュアルプログラミングによる斗拱部の部品・部位表現に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第 82 巻 第 742 号、pp. 3259-3268、2017. 12、  
doi:10. 3130/aija. 82. 3259
- ②. 高林弘樹、元池遼、加戸啓太、平沢岳人、多関節ロボットによる木材加工におけるツールパス生成に関する研究、日本建築学会技術報告集、第 22 巻 第 51 号、pp. 813-816、2016. 6、  
doi:10. 3130/aijt. 22. 813
- ③. 高林弘樹、元池遼、會田健太郎、加戸啓太、平沢岳人、多関節ロボットによる伝統木造構法の部品加工に関する研究、日本建築学会技術報告集、第 22 巻 第 50 号、pp. 331-334、2016. 2、  
doi:10. 3130/aijt. 22. 331
- ④. 加戸啓太、高林弘樹、田中智己、平沢岳人、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、日本建築学会技術報告集、第 21 巻 第 49 号、pp. 1297-1300、2015. 10、  
doi:10. 3130/aijt. 21. 1297

[学会発表] (計 7 件)

- ①. 大野湧人、高橋洋祐、田中智己、加戸啓太、平沢岳人、大規模城郭姫路城の CG 復元に関する研究 その 1、日本建築学会大会(中国)、学術講演梗概集、(社)日本建築学会、pp.101-102、広島、2017.9
- ②. 高橋洋祐、大野湧人、田中智己、加戸啓太、平沢岳人、大規模城郭姫路城の CG 復元に関する研究 その 2、日本建築学会大会(中国)、学術講演梗概集、(社)日本建築学会、pp.103-104、広島、2017.9
- ③. 加戸啓太、青野敏紀、平沢岳人、斗拱部の部品雛形を対象としたビジュアルプログラミング表現に関する研究、日本建築学会関東支部 2016 年度 (第 87 回) 研究発表会、関東支部研究報告集 II、pp.303-306、2017.3
- ④. 大内泰貴、石島透、高林弘樹、加戸啓太、平沢岳人、在来軸組構法に関する三次元モデルとその模型の教材利用、日本建築学会大会(九州)、学術講演梗概集、(社)日本建築学会、2016.8
- ⑤. 戸田勇登、佐藤清貴、青野敏紀、高林弘樹、加戸啓太、平沢岳人、ビジュアルプログラミングによる伝統木造の構法表現に関する研究 その 1、日本建築学会大会(九州)、学術講演梗概集、(社)日本建築学会、2016.8
- ⑥. 佐藤清貴、戸田勇登、青野敏紀、高林弘樹、加戸啓太、平沢岳人、ビジュアルプログラミングによる伝統木造の構法表現に関する研究 その 2、日本建築学会大会(九州)、学術講演梗概集、(社)日本建築学会、2016.8
- ⑦. 加戸啓太、高林弘樹、田中智己、平沢岳人、継手仕口のプログラム言語による記述とその管理に関する研究、日本建築学会大会(関東)、学術講演梗概集、(社)日本建築学会、2015.9

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.hlab-arch.jp>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

加戸 啓太 (KADO, Keita)

千葉大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号 : 60727379