

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

# 博士論文概要

改修工事における 3次元レーザー計測と  
内装プレカット部材の配置の最適化に関する研究

Study on 3D Laser Scanning and Optimum Design of  
Pre-Cut Interior Finishing Components for Renovation Works

申請者

石田	航星
Kosei	ISHIDA

建築学専攻 建築生産マネジメント研究

2013年11月

本論文は鉄筋コンクリート建築物における内装工事において、3次元レーザースキャナーを用いて躯体の3次元形状を取得することにより、現場での加工を不要とするプレカット部材による組立施工を実現する技術に関する研究である。

第1章においては、本論文の研究背景と目的について述べている。第1節においては、研究の背景について述べている。近年、鉄筋コンクリート建築物における、内装の改修工事の需要が増加しているが、居ながら施工が必要とされる場合が多く、工事騒音が少なく現場廃棄物が発生しない、プレカット部材の使用による施工が必要とされている。鉄筋コンクリート建築物の躯体形状は、型枠により施工されているため施工誤差による微小な凹凸があるが、これを内装工事实施前の僅かな時間で把握する手段がなく、内装工事では現場加工による施工が行われてきたが、躯体の3次元形状を点群データとして取得できる3次元レーザースキャナーの性能が建築生産で使用可能な水準に達してきたため、躯体の形状把握を事前に行える環境が整いつつある。しかしながら、この点群データに基づいて3次元CAD上で内装のプレカット部材を作成し、施工するには、内装工事において重要な情報である地墨のように形状のない情報を計測する手法やノイズ除去などの点群データの処理手法が必要である。また、従来の内装工事とは全く異なる工法となるため、内装のプレカット部材を点群データに基づいて設計する手法も必要である。これらの背景を踏まえ、第2節においては「点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握に関する研究」、「内装工事におけるボード材の割付図と加工図の最適化に関する研究」、「内装プレカット部材を用いた改修工法の体系化に関する研究」に関する既往の研究について述べている。第3節では、研究の目的を述べた上で、3つの手法における研究項目について述べている。

第一に、内装のプレカット部材の加工形状を点群データから求めるには、施工箇所、点群データ、設計CADデータの座標系を一致させたうえで、点群データを設計CAD上で利用しやすいデータに変換する手法が必要である。

第二に、内装のプレカット部材を作成するために、事前に、膨大な数になるプレカット部材のCADモデル作成を行う必要がある。そのため、内装部材の詳細設計をコンピュータ上で最適化する計算手法が必要である。

第三に計測、詳細設計、プレカット部材の作成と取り付け、工事完了後の出来形の計測に至る一連の流れで施工を行う手法を考案し、その上で施工実験を実施し、本章で考案した改修工法の実現性の検証を行う必要がある。

本論文ではこれら3つの手法を確立し、論文とした。

第2章においては点群データに基づいて鉄筋コンクリート建築物の形状を把握する技術について述べている。第1節においては内装部材の詳細設計に適した点群データを取得する手法に関して概要を述べている。3次元レーザースキャナー

により躯体や取り付けた内装部材の3次元形状を取得し、設計CAD上で利用するには3次元計測と点群データ処理に関する2つの技術が新たに必要となることを指摘している。第2節においては、3次元レーザースキャナーによる計測技術として、施工箇所、点群データ、設計CADの座標系を一致させる手法について述べている。施工箇所の躯体に描かれている地墨の位置を正確に取得できる専用の地墨取得用球ターゲットを開発したことにより点群データへの地墨の記録を実現した。また、複数の点群データを同一座標系に統合する必要が生じるため、異なる点群データ上のターゲットを自動的に対応させる手法も開発した。第3節では、鉄筋コンクリート躯体を計測した点群データを設計CADに読み込むのに適したポリゴンモデルへと変換する前にすべき、ノイズの除去と線形状の点群の認識に関して述べている。計測対象の端部を計測した場合、ノイズが発生するため、このノイズを除去する手法として、点群の取得順序ごとの相互距離と点群の密度の二種類の手法を併用するノイズ除去手法を開発した。また、配線などの曲線の点群を除去するために、新たに線形状の点群を抽出する手法を開発した。第4節では、施工箇所、点群データ、設計CADデータの座標系を一致させる手法を設備の改修工事において適用し、設計CADと既存設備の点群データの重なりにより、干渉する部分を工事前段階で発見した。また、躯体やスタッドの点群に、本章で述べた手法により作成したシステムを適用し、ノイズの除去と、線形状の点群を抽出が正確に行えていることを確認した。

第3章では内装部材の詳細設計のうち、ボード材の割付図と加工図の最適化を実施する手法について述べている。第1節では内装のプレカット部材の詳細設計の必要性を述べた上で、ボード材の割付図と加工図の最適化の手順を述べている。その上で、第2節では、「残材量」が少なく、「目地長さ」「部材数」が最小となるボード材の割付図と加工図の設計手法について述べている。これまで3次元CAD上でモデルを作成する必要がなかった内装部材1つ1つのモデルを作成する手法として、ボード材の割付図と加工図の最適化手法を開発した。ボード材割付の最適化は複数の割付図の作成と、各割付図を構成するボード部材を最小の残材量で切り出す加工図の作成が必要となる。割付図は、ボード材を割付ける配置領域の頂点に基づいて、複数の配置開始点を作成し、この配置開始点から定尺ボード材を配置領域に隙間なく均等に敷き詰めたのち、配置領域と定尺ボード材の共通部分を抽出することにより作成した。また、加工図作成においては、長方形詰込み問題で用いられるBL(Bottom-up Left-justified)法を基にした最適化計算手法を開発し、少ない計算回数で最適化する手法を実現した。第3節では、ボード部材の割付図と加工図の最適化手法に関して、間仕切り壁を想定した計算実験を行った。この計算実験では割付領域に4種類の定尺ボード材の割付を実施し、

残材量が理論上の最小値を取る割付図と加工図を求められることを確認した。また、防音性能や目地埋め作業に掛かる時間に影響がある目地長さの最小値を求めることにも成功している。

第4章では、第2章と第3章で研究した手法を用いて、改修工事における内装のプレカット部材を作成し、施工する改修工法を考案し、間仕切り壁の施工実験を実施し、その検証結果について述べている。第1節では内装のプレカット部材を作成する手順を述べた上で、軸組材のプレカット部材の設計手法について述べた。第2節では、本研究において実施した施工実験の概要について述べた。本施工実験では、鉄筋コンクリート建築物の一室に2面からなる間仕切り壁を施工した。第3節では3次元レーザースキャナーによる躯体の計測と点群データの処理に関して述べている。3次元レーザースキャナーにより躯体を計測し、点群データにおける地墨の位置を、開発した球ターゲットから抽出し、設計CAD上の通り芯に座標系を一致させた。第4節では、点群データをポリゴンモデルに変換する手順について述べている。第5節では設計CAD上に読み込んだポリゴンモデルに基づいてプレカット部材の詳細設計を行う手順について述べている。まず、ポリゴンモデルからLGSとせっこうボード材が躯体に接する部分を切り出し、切り出した断面形状に基づいて各内装部材の寸法を求めた。ボード材の割付図と加工図の作成は、現場作業員の助言に基づき作成した。その後、施工実験で作成した壁面に対して第3章の割付図と加工図の最適化手法を適用する計算実験も併せて実施した。残材量が最も少なく、次いで目地長さが短い設計案が2つあり、その内の1つが現場作業員の助言に基づいて作成した割付図と加工図に一致する案であることが確認でき、第3章で示した手法の妥当性を示すことが出来た。第6節では、プレカット部材を実際に作成し、施工箇所に取り付ける実験について述べている。施工完了後、プレカット部材同士や、躯体に生じた隙間を調査し、プレカット部材の加工寸法が正確に求められていることを確認した。加えて、施工完了後に計測を行い、差分分析により間仕切り壁部分の点群データを抽出し、設計CADデータと重ね合わせた結果、間仕切り壁がほぼ正しい位置に設置できていることを確認し、プレカット部材による施工が正確に行えたことを示した。

第5章においては本研究の成果を総括している。建築物の施工では、通常、逃げ寸法を用意しておき、施工箇所の形状に合わせて、現場加工を行う工法が一般的であった。これに対して本研究では3次元レーザースキャナーにより施工箇所の凹凸を正確に計測する技術を考案し、この計測結果に基づいて躯体に隙間なく取りつく内装のプレカット部材を作成する手法を開発することにより、逃げ寸法を必要としない内装プレカット部材を用いた改修工法の開発に成功し、騒音・振動や粉塵などが生じない改修工法を実現した。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 石田 航星 印

(2014年 2月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文○	<p>題目：内装間仕切壁におけるボード材の割付図と加工図の最適化に関する研究  出典：日本建築学会計画系論文集 第78巻 第692号, p.2173-2180  著者：石田航星, 嘉納成男, 五十嵐健  発表年：2013年10月</p>
論文○	<p>題目：内装部材のプレカット化のための3次元レーザースキャナーを用いた計測と生産設計の手法に関する研究  出典：日本建築学会計画系論文集 第78巻 第688号, p.1355-1363  著者：石田航星, 嘉納成男, 五十嵐健, 他4名  発表年：2013年6月</p>
論文○	<p>題目：A Study on Measuring of Reinforced-Concrete Structure by 3D Laser Scanner and Making Design of Precut Interior Finishing Components with Polygon Model  投稿先：30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction(ISARC 2013), 8ページ(データ版のみのためページはなし)  著者：Kosei Ishida, Naruo Kano, Takeshi Igarashi  発表年月：2013年08月</p>
論文○	<p>題目：Shape Recognition with Point Clouds in Rebars  投稿先：29th International Symposium on Automation and Robotics in Construction(ISARC 2012), 8ページ(データ版のみのためページはなし)  著者：Kosei Ishida, Naruo Kano  発表年月：2012年06月</p>
講演○	<p>題目：内装間仕切壁におけるボード材と軸組材の詳細設計の最適化に関する研究  出典：日本建築学会第29回建築生産シンポジウム論文集 p.297-304  著者：石田航星, 嘉納成男, 五十嵐健  発表年月 2013年7月</p>
講演○	<p>題目：内装間仕切壁におけるボード材割り付けの最適化に関する研究  出典：日本建築学会第27回建築生産シンポジウム論文集 p.231-238  著者：石田航星, 嘉納成男, 五十嵐健  発表年月 2011年7月</p>
講演○	<p>題目：品質管理における3次元スキャナーの活用に関する研究 - 点群データに基づく各種寸法の解析について-  出典：日本建築学会第27回建築生産シンポジウム論文集 p.297-304  著者：嘉納成男, 木本健二, 五十嵐健, 石田航星, 他5名  発表年月 2011年7月</p>
講演	<p>題目：点群データに基づく配筋状況の把握のためのシステムに関する研究  出典：日本建築学会第26回建築生産シンポジウム論文集 p.187-194  著者：石田航星, 嘉納成男, 木本健二, 五十嵐健, 四釜侑也, 福田結磨, 帯包知成  発表年月 2010年7月</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	<p>題目：鉄筋を計測した点群データの形状認識に関する研究 -点群データからの帯筋の抽出-</p> <p>出典：日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集 F-1 分冊, p. 11-12</p> <p>著者：石田航星, 嘉納成男, 木本健二, 五十嵐健</p> <p>発表年月：2012 年 9 月</p>
講演	<p>題目：改修工事におけるエコ生産のための 3 次元レーザースキャナーを用いた計測技術の開発 (その 4) 既存設備配管・ダクト類の計測と点群モデルの解析</p> <p>出典：日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集 F-1 分冊, p. 23-24</p> <p>著者：嘉納成男・五十嵐健・石田航星・福田結磨・酒本晋太郎・富田裕行・藤井裕彦・曾根巨充</p> <p>発表年月：2012 年 9 月</p>
講演	<p>題目：改修工事におけるエコ生産のための 3 次元レーザースキャナーを用いた計測技術の開発 (その 6) 既存躯体の点群を利用した 3 次元 CAD モデル作成</p> <p>出典：日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集 F-1 分冊, p. 27-28</p> <p>著者：三上瑛・嘉納成男・藤井裕彦・曾根巨充・大澤雄司・石田航星・酒本晋太郎・富田裕行</p> <p>発表年月：2012 年 9 月</p>
講演	<p>題目：写真計測に基づく既存建物における正射投影画像付き 3 次元モデルの作成 計測精度の確認と 3 次元モデルの作成</p> <p>出典：日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集 F-1 分冊, p. 13-14</p> <p>著者：中村友也・嘉納成男・佐藤康弘・石田航星</p> <p>発表年月：2012 年 9 月</p>
講演	<p>題目：3 次元 CAD を利用した作業工程シミュレーションに関する研究</p> <p>出典：日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集 F-1 分冊, p. 5-6</p> <p>著者：渡辺文志朗・嘉納成男・石田航星</p> <p>発表年月：2012 年 9 月</p>
講演	<p>題目：面材の割り付け最適化に関する研究 一定尺ボード材の残材量の最小化-</p> <p>投稿先：日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集 F-1 分冊, p. 1299-1300</p> <p>著者：石田航星, 嘉納成男, 五十嵐健</p> <p>発表年月：2011 年 8 月</p>
講演	<p>題目：改修工事におけるエコ生産のための 3 次元レーザースキャナーを用いた計測技術の開発 (その 1) 既存建築物の計測と点群データの解析に基づく躯体モデルの作成</p> <p>投稿先：日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集 F-1 分冊, p. 1303-1304</p> <p>著者：嘉納成男・五十嵐健・石田航星・福田結磨・酒本晋太郎・富田裕行・藤井裕彦・曾根巨充</p> <p>発表年月：2011 年 8 月</p>
講演	<p>題目：改修工事におけるエコ生産のための 3 次元レーザースキャナーを用いた計測技術の開発 その 2 プレカット部材の 3 次元 CAD による設計と部材の切断・加工</p> <p>投稿先：日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集 F-1 分冊, p. 1305-1306</p> <p>著者：藤井裕彦・嘉納成男・曾根巨充・大澤雄司・五十嵐健・石田航星・酒本晋太郎・富田裕行</p> <p>発表年月：2011 年 8 月</p>
講演	<p>題目：改修工事におけるエコ生産のための 3 次元レーザースキャナーを用いた計測技術の開発 その 3 プレカット部材のレーザー照射による位置決めと取り付け</p> <p>投稿先：日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集 F-1 分冊, p. 1307-1308</p> <p>著者：富田裕行・嘉納成男・酒本晋太郎・田中幸悦・五十嵐健・石田航星・藤井裕彦・曾根巨充</p> <p>発表年月：2011 年 8 月</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	<p>題目：A Study on the Optimization Method for Panel Layout Problem in Drywall          投稿先：28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction(ISARC 2011)          著者：<u>Kosei Ishida</u>, Naruo Kano          発表年月：2011年06月</p>
講演	<p>題目：品質確保のための建築各部の3次元情報の取得と設計図との照合に関する研究（その1）鉄筋工事における品質情報とその検査項目          出典：日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），p.1307-1308          著者：五十嵐健・嘉納成男・木本健二・<u>石田航星</u>・四釜侑也          発表年月：2010年9月</p>
講演	<p>題目：品質確保のための建築各部の3次元情報の取得と設計図との照合に関する研究（その2）品質管理に適した3次元オブジェクトのモデリング方法          出典：日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），p.1309-1310          著者：四釜侑也・木本健二・嘉納成男・五十嵐健・<u>石田航星</u>          発表年月：2010年9月</p>
講演	<p>題目：品質確保のための建築各部の3次元情報の取得と設計図との照合に関する研究（その3）点群データに基づく配筋状況の把握に関するシステムの開発          出典：日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），p.1311-1312          著者：<u>石田航星</u>、嘉納成男、木本健二、五十嵐健、四釜侑也、福田結磨、帯包知成          発表年月：2010年9月</p>
講演	<p>題目：建築工事のモニタリング手法に関する研究—Kinectを用いた測定精度の検証          出典：日本建築学会関東支部研究報告集 83(II)，p.493-496          著者：太田裕輔、嘉納成男、<u>石田航星</u>          発表年月：2013年3月</p>
講演	<p>題目：施工シミュレーション手法に関する研究 —3次元モデルを用いた施工情報の視覚化—          出典：日本建築学会関東支部研究報告集 83(II)，p.501-504          著者：田口直也、嘉納成男、<u>石田航星</u>          発表年月：2013年3月</p>
講演	<p>題目：施工シミュレーション手法に関する研究 —鉄筋コンクリート工事における作業者人数による作業効率の比較—          出典：日本建築学会関東支部研究報告集 83(II)，p.505-508          著者：岩崎辰哉、嘉納成男、<u>石田航星</u>、渡辺文志朗          発表年月：2013年3月</p>
講演	<p>題目：建築生産における3次元モデルの情報構造に関する研究：建築関係者の多様な観点に対応した階層的          情報構造の提案          出典：日本建築学会関東支部研究報告集 82(II)，p.517-520          著者：有坂 徹，嘉納 成男，<u>石田 航星</u>          発表年月：2012年3月</p>
その他 （総説）	<p>題目：3次元レーザーキャナーによるコンクリート躯体の計測とその形状解析          出典：コンクリート工学 Concrete journal 50(9)，p.856-862,          著者：嘉納成男，<u>石田航星</u>          発表年：2012年09月</p>