

令和3年度とくしま政策研究センター委託調査研究

木造住宅耐震工事時の消費者トラブル  
発生防止に寄与する隠蔽部の検査範囲  
を拡大する機械化検査法の開発

令和4年3月

阿南工業高等専門学校

創造技術工学科

准教授 多田 豊

准教授 川畑 成之

教授 岡本 浩行

# 目次

1. はじめに	3
(1) 研究の背景	3
1) 徳島県の住宅耐震化の現状と課題	3
2) 耐震診断実施上の課題	4
3) 機械化調査法の現状と課題	7
(2) 研究の目的・方法	7
1) 研究の目的	7
2) 研究の方法	8
2. 検査ロボットの基本システム開発	9
(1) 開発要件	9
(2) 従来の検査・点検ロボット	9
(3) 開発ロボットの概要	10
(4) 試験走行結果	12
1) 走行試験概要	12
2) 試験結果	13
(5) 成果と課題	13
1) フェーズ1実施で得られた成果	13
2) ロボット開発における今後の課題	14
3. 画像認識技術開発	15
(1) 画像認識	15
(2) 画像認識結果	16
(3) 画像認識における成果と課題	17
4. まとめ	18

# 1. はじめに

## (1) 研究の背景

### 1) 徳島県の住宅耐震化の現状と課題

平成30年住宅・土地統計調査によれば、徳島県内の総住宅数380,700戸のうち、居住世帯のある住宅は305,300戸<sup>1</sup>となっている。なお、住宅とは戸建て住宅だけでなく、長屋や集合住宅を含み、また構造についても木造だけでなく、鉄筋コンクリート造(以下、RC造)や鉄骨造(以下、S造)等を含む。

徳島県耐震改修促進計画(令和3年7月改定)<sup>2</sup>によれば、このうち耐震性があるとされる住宅は250,109戸(81.9%)とされている。耐震性があるとは旧耐震(1981年5月建築基準法改正以前に建設されたもの)の住宅のうち耐震改修等を行ったものと、新耐震(1981年5月建築基準法改正以後に建設されたもの)の住宅とされている。

しかしながら、RC造やS造と異なり、木造については、1981年5月建築基準法改正時点では耐力壁のバランスのよい配置等の規定がなく、接合部等の使用が明確化されていない等耐震性が不十分であり、1995年兵庫県南部地震における多大なる被害を受けて、2000年6月建築基準法改正にて四分割法他様々な耐震性能を向上させる制度が制定された。この結果、2016年熊本地震時における日本建築学会による益城町中心部における建築物の被

害に関する悉皆調査<sup>3</sup>では、新耐震(2000年～)については無被害の割合(61.4%)が、新耐震(1981～2000年)(20.4%)や旧耐震(1981年以前)(5.1%)と比較して各段に大きく、また軽微・小破れ・中破程度の被害についても新耐震(2000年～)32.6%に対して、新耐震(1981～2000年)(61.2%)、旧耐震(1981年以前)(49.1%)であったと報告されている。このように、新耐震(2000年～)にあつては木造であっても、RC造やS造と同等の耐震性を有しているととらえることができる。

よって、木造住宅については、旧耐震、新耐震(1981～2000年)、新耐震(2000年～)と3段階に分けて耐震性を評価する必要がある。徳島県内の木造住宅198,000戸について年代別の耐震化率を見たのが、表1-1<sup>4</sup>である。

表1-1 徳島県内木造住宅の年代別耐震化率

	総数	耐震性のある住宅	耐震性のない住宅	耐震化率
旧耐震	91,000	2,700	88,200	2.97%
新耐震 (1981～2000)	62,400	1,700	60,800	2.72%
新耐震 (2000～)	44,600	44,600	0	100%
計	198,000	49,000	192,400	24.7%

旧耐震の木造住宅は91,000戸あり、うち耐震性のある(耐震工事済)住宅は2,700戸(耐震化率2.97%

<sup>1</sup> 平成30年住宅・土地統計調査 住宅及び世帯に関する基本集計 第1-1表 居住世帯の有無(9区分)別住宅数及び建物の種類(4区分)別住宅以外で人が居住する建物数一全国、都道府県、21大都市

<sup>2</sup> 徳島県、徳島県耐震改修促進計画、<https://www.pref.tokushima.lg.jp/taishinka/keikaku/>

<sup>3</sup> 熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書概要、図3 学会悉皆調査結果による木造の建築時期別の被害状況、p.3

<https://www.mlit.go.jp/common/001155088.pdf>

<sup>4</sup> 平成30年住宅・土地統計調査 住宅の構造等に関する集計 第177-1表 2014年以降のリフォーム工事の状況(2区分)、腐朽・破損の有無(2区分)、住宅の建築の時期(14区分)別持ち家数一全国、都道府県、21大都市

)であった。新耐震(1981～2000年)の木造住宅は62,400戸あり、うち耐震性のある(耐震工事済)住宅は1,200戸(耐震化率2.72%)であった。新耐震(2000年～)の木造住宅は44,600戸あり、これらを全て耐震性があるとした場合に、耐震性のある木造住宅は49,000戸(24.7%)となる。

2022年1月13日、地震調査委員会は、南海トラフで今後40年以内にM8.0～9.0級の地震(以下、南海トラフ巨大地震)が発生する確率を、80～90%から90%程度に引き上げた。1995年兵庫県南部地震における死者、重傷者の発生率は住宅の倒壊率、被害率が高まる程上昇し、特に死亡については住宅の倒壊により下敷きとなり圧迫され窒息死に至る機構が典型とされている<sup>5</sup>。人間が窒息死に至る重量や時間等について正確な研究はないが、一般に数時間程度とされている。南海トラフ巨大地震発生時に倒壊した住宅から数時間のうちに多数の人命を救助することは現実的に難しく、災害前に「耐震改修」を行うことが重要となる。

## 2)耐震診断実施上の課題

近年、徳島県内において1990年代以降に建設された木造住宅が、中古住宅市場に多数流通している。ここで、売買にあたり、既存住宅状況調査を実施することが推奨されるが、耐震性に関する書類の確認に留まる<sup>6</sup>。

公益社団法人住宅リフォーム・紛争処理支援センターへの2019年度の電話相談における住宅トラブ

ルに関する相談のうち、戸建て住宅における耐震性を含む性能不足に関する相談は全体の12.2%(1,067件)であり、3番目に多い相談であった<sup>7</sup>ことから、売買時に住宅性能を正確に理解したいという消費者の関心が伺える。また、令和3年3月に公表された住生活基本計画では、リフォーム前に、より一層正確な耐震診断等を行い、消費者に情報提供をすることが求められており、この課題に答える必要がある。

実際に耐震性を確認するには、「耐震診断」を行う必要がある。耐震診断には一般診断法と詳細診断法とがあり(表1-2)、一般診断法は専門家(国土交通大臣登録耐震診断資格者等)が非破壊による目視を基本とした検査を行い精密検査(精密診断法)に移るべきかどうかを判定する。精密診断法は、耐震改修の必要性を判定するために行い、必要に応じて天井や壁等の破壊を行った上で、目視、打診等により検査を行うものである。

表1-2 耐震診断の種類別の目的と検査方法

	目的	検査方法
一般診断法	精密検査(精密診断法)に移るべきかどうかを判定	・非破壊 ・目視
精密診断法	耐震改修の必要性を判定	・破壊を含む ・目視、打診等

ここで、1981～2000年に建設された木造住宅の耐震診断については、「新耐震基準の木造住宅の耐震性能検証法」<sup>8</sup>(図1-1)が示されている。

<sup>5</sup> 生田英輔他、統合データベースに基づく兵庫県南部地震による人的被害の発生機構に関する分析、日本建築学会計画系論文集、第590巻、pp.117-pp.123、2005.4

<sup>6</sup> 国土交通省、既存住宅状況調査方法基準の解説、<https://www.mlit.go.jp/common/001171265.pdf>

<sup>7</sup> 公益財団法人住宅リフォーム・紛争処理支援センター、住宅相談統計年報 2020、2019年度の住宅相談と紛争処理の集計分、2020.9

<sup>8</sup> 一般財団法人日本建築防災協会、新耐震基準の木造住宅の耐震性能検証、<https://www.mlit.go.jp/common/001184898.pdf>

この検証では、ステップ1として所有者等(購入希望者を含む)による検証として4つのチェックを行うが、このうち、チェック2:接合部金物の仕様を確認する上で、1980年代以降の木造建築物は、次の理由により、仕様の確認が困難となる場合がある。

)<sup>9</sup>に整理されている。図1-2は、徳島県内の年代の異なる住宅の2階床部分のインスペクション可能範囲の実例である。左:1950年頃の住宅はほぼ全ての範囲を検査可能であるが、年代が進むほど洋室化や面材(図1-3,図1-4)、断熱材(図1-5,図1-6)の使用が進み、また設備機器等の設置(図1-7)により、検査範囲が狭まること分かる。1970年頃の住宅でおよそ80%程度、2000年の住宅では10%程度しか調査できない場合がある。

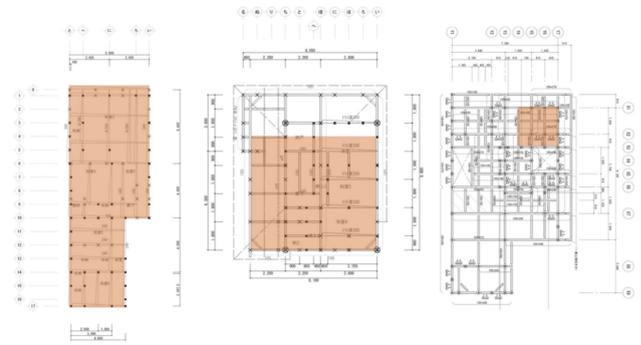
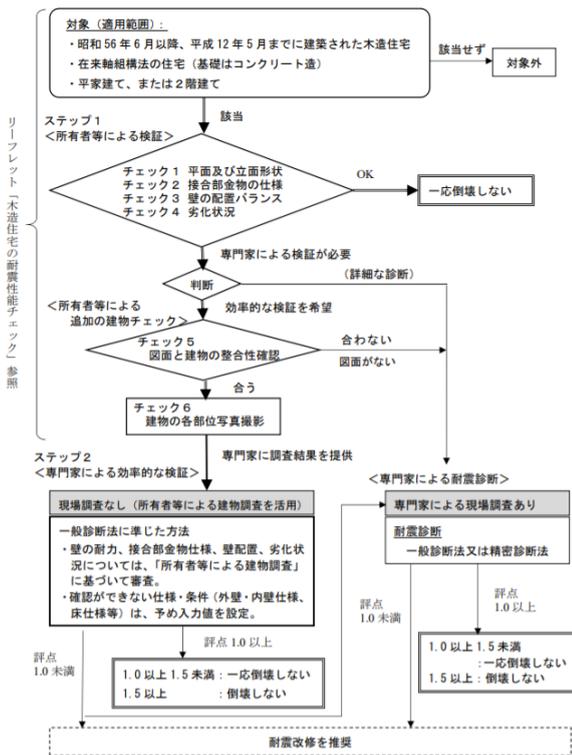


図1-2 年代別の木造住宅の2階床部分の検査可能範囲(左:1950年頃, 中:1970年頃, 右:2000年頃)

図1-1 新耐震基準の木造住宅の耐震性能検証法のフロー図(「新耐震基準の木造住宅の耐震性能検証法」図I.2より引用)

1階天井に点検口等がある場合であっても、天井裏が狭小で外周部まで目視することが不可能であったり、目視できた場合にも外周部に断熱材や面材等が施工されており、2階床組み部分の接合部を確認することが難しい場合がある。

こうした事例について全国的な統計を扱った研究はないが、徳島県内の事例については多田(2020

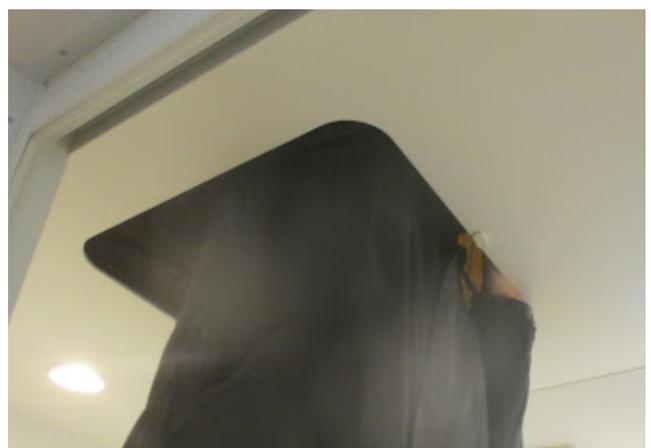


図1-3 ユニットバス点検口からの検査の様子

<sup>9</sup> 多田豊, 費用対効果の高い性能向上インスペクションの住宅性能と検査方法別の安定性確認及び作業効率性に関する研究, 2020.3



図1-4 面材等使用により検査範囲狭小となる事例



図1-7 設備により検査範囲狭小となる事例



図1-5 点検口非設置のため換気口からファイバースコープによる検査を行う事例



図1-6 断熱材施工により検査範囲狭小となる事例

この場合に、ステップ2である専門家による効果的な検証(一般診断法程度)に進むことになるが、接合部金物仕様はステップ1に基づいて評価するため、目視が出来ない場合には、柱頭・柱脚接合部の評価が減少するため、評点を正確に算出することが難しい。

また、精密診断法を行う場合にあっても、既往研究<sup>10</sup>において1990年以降に建設された木造住宅については、上記の理由(天井点検口からの検査が難しいこと)に加えて、洋室化により畳床から板床の使用が進んでおり、2階の畳を上げて、床板の一部を切断する等して、2階床組み部分の接合部を確認することが難しい場合があることが示されている。そのため、精密診断を行うにあたり、小規模な工事が必要となったり、日数がかかること等から、居住者に金銭的・精神的な負担が生じ、耐震診断が進みにくい状況を生み出している。

かつて消費者委員会が予想したように「耐震リフォームの等各種リフォーム需要増が見込まれる

<sup>10</sup> 多田豊, 目視等により仕様確認不能な木造一戸建住宅に対応した新しい性能向上インスペクションの評価方法の考案とその安定性及び作業効率性に関する研究, 2021.3

状況にあり、これに伴い更なる消費者トラブルの増加が懸念される<sup>11</sup>状況が、2階床組み部分の接合部の非破壊による目視が困難であるため発生しており、本研究ではこの課題解決を目指し、隠蔽部の検査範囲を拡大する機械化検査法の開発を行う。

### 3) 機械化調査法の現状と課題

耐震診断の具体的な方法は、「木造住宅の耐震診断と補強方法」<sup>12</sup>、及び「日本住宅性能表示基準評価方法基準技術解説(既存住宅・個別性能)2020」<sup>13</sup>における耐震性能(構造躯体の倒壊等防止)に示されているが、目視及び打診からなり、機械化調査法は示されていない。

既存住宅状況調査を含む1次的なインスペクションについては、劣化事象を把握するため、床下点検ロボット、高性能カメラによる画像処理、サーモグラフィ、ドローン、含水率等の機械化検査法の開発等が提案<sup>14</sup>されている(表1-3)。

表1-3 1次的なインスペクションにおける  
機械化検査法の民間導入事例

機械化検査法	民間導入
点検ロボット	・1階床下部分については実装済 ・2階床下部分については研究開発が行われていない
ドローン	・ビル等については研究開発中

<sup>11</sup> 消費者委員会, 住宅リフォームに関する消費者問題への取組についての実態調査報告, 2011.8

<sup>12</sup> 日本建築防災協会, 木造住宅の耐震診断と補強方法

<sup>13</sup> (一財)日本建築センター, 日本住宅性能表示基準 評価方法基準技術解説(既存住宅・個別性能)2020, 2020.7

<sup>14</sup> 一般社団法人 住宅瑕疵担保責任保険協会, 既存住宅の利用目的に合わせた1次的なインスペクション及び二次的なインスペクションのあり方に関する検討業務, 2020.3

・住宅については研究開発が行われていない

このうち、床下点検ロボットについてはハウスメーカー等による1階床下を対象とした点検ロボット(カメラ搭載)が実装されている。しかしながら、2階床下部分については野縁等があるため段差乗越機構が必要なことや、狭小部のため機体自体を縮小化させる必要があること、断熱材等の柔軟性の高い素材がある等、点検ロボット開発の難易度が高く、研究開発が進められていないのが現状である。ドローンについては、外部からの外壁調査<sup>15</sup>や、ビル等の天井裏部分での三次元測量等の研究<sup>16,17</sup>が進められているが、住宅等の狭小部については研究開発が行われていない。なお、精密診断法において必要となる打診機能を持つロボットについても、これまで研究開発は見られない。本研究では、将来的に打診機能を搭載することを鑑み、点検ロボットの開発を行う。

## (2) 研究の目的・方法

### 1) 研究の目的

本研究では、現在民間で開発研究が行われていない2階床下部分の点検ロボットの開発を行う一連の研究の序である。研究は多段階かつ多分野に渡りため、3段階のフェーズを設定し、研究開発を行うこととした(表1-4)。

<sup>15</sup> 眞方山美穂他, ドローンに搭載した赤外線装置による外壁調査手法の実証実験, 日本建築学会技術報告集, 第27巻, 第65号, pp.75-80, 2021. 2

<sup>16</sup> 宮内博之, 建築分野におけるドローン技術の動向と展望, BRI-H30講演会テキスト

<sup>17</sup> 二村 憲太郎他, 実大実験棟を活用したドローンによる点検の有効性の検証とドローンによる点検方法の確立のための実験の報告, 日本建築学会技術報告集, 第25巻, 第59号, 2019

表1-4 研究開発のフェーズ

	フェーズ1	フェーズ2	フェーズ3
移動面	硬面移動	凹凸面	柔面移動
移動機構	二輪移動	段差乗越	柔面移動対応型機構
昇降機構	100mm	200mm	400mm
操作機構	手動移動	自動移動	自律移動
計測機構	2次元レーザ	2次元レーザ (高精度)	2次元レーザ による3次元 計測
撮影機構	非搭載	手動撮影	自動撮影
打診機構	非搭載	インパルスの 打診機能の 検討	インパルスの 打診機能、衝 撃軽減機構

フェーズ1は、移動面を硬面と想定し、移動機構を一般的な二輪移動とする。昇降機構は100mmとする。移動及び昇降に係る操作は手動とする。特殊機構として、計測機能のみを持たせ、撮影機構、打診機構については搭載をしない。計測機構は最も安価な二次元レーザ(LiDAR)を搭載する。

フェーズ2では、天井裏の野縁等を想定し、移動面を凹凸面と設定する。そのため、移動機構には段差乗越機構を搭載する。昇降機構はフェーズ1の2倍となる200mmと設定する。操作機構は自動制御を可能とする。特殊機構として、計測機能のみ、撮影機構、打診機構のいずれもを搭載させ、計測機構は2次元レーザとし、測量精度を向上させる。撮影機構は手動撮影とし、打診機構はインパルスの打診機能(構造材の樹種別を1種類とし、かつ劣化状況を固定した上で打診時の力積一定の周波数特性分析)を検討したアームを搭載するための課題を検証する。

フェーズ3では、天井裏に断熱材等があると想定し、移動面を柔面と設定する。そのため、移動機構には、柔面移動機構を設ける。昇降機能はフェーズ1の4倍となる400mmと設定する。操作機構は自律移動とする。特殊機構として、計測機能のみ、撮影機構、打診機構のいずれもを搭載させ、計測機構は2次元レーザを活用し、3次元レーザ的な計測を可能とする。撮影機構は自動撮影とし、打診機構はインパルスの打診機能(構造材の樹種別、劣化状況別に打診時の力積一定の周波数特性分析)及び衝撃軽減機構を搭載する。

これらのフェーズ分けは概念的な区分であり、例えばフェーズ1.5(特殊機能のうち一部を先行して掲載する等)等の開発段階を多段階的に含むものとなる。

## 2) 研究の方法

### ・フェーズ1の開発

フェーズ1においては、LiDARセンサによる検査領域のマッピング性能に関する評価を重点的に実施することから、LiDARセンサ搭載機体の基本フレームの開発ならびにLiDARセンサ昇降機構の開発を実施することとした。開発した機体の詳細は第2章において述べる。

さらに2階床下部分の構造を把握するための構造認識技術が必要となる。フェーズ1においては検査ロボットに掲載されたカメラ画像の認識を行った。認識に関して実施した内容について第3章で述べる。

## 2. 検査ロボットの基本システム開発

### (1) 開発要件

本課題においてロボットの基本システムとして最終的に解決すべき技術的課題は以下の6項目である。

- ① 障害物の有る空間を自由に走行可能な駆動系システムの開発
- ② 通常走行時に上空の梁に接触することなく走行するために低位置を保持しながら、マッピング時には天井高までLiDARセンサを上昇させることのできる昇降機構の開発
- ③ 暗所での半自動、自律走行を可能とするための自己位置推定システムの開発
- ④ 2階床下という特殊な環境で安全な運用を可能とするための軽量化
- ⑤ 自在な打診機能を実現するための反力キャンセル機構の開発
- ⑥ 微細な埃などが存在する空間で安定して動作するための筐体の開発

本報告ではこれらの課題のうち、前章で示したフェーズ1の課題として、①および②に取り組むこととした。

### (2) 従来の検査・点検ロボット

従来より構造物の健全性検査を目的としたロボットの開発が多くの企業により行われている。図2-1は大和ハウス工業株式会社が開発した床下点検ロボット「moogle (モーグル)」である。当該ロボットはクローラー方式の駆動輪を有し、凹凸の多い悪路が想定される床下環境に適した走行システムを備え

ている。また、走行用カメラと点検用カメラを別に備えるなど、多彩な機能を有している。しかしながら全体重量が13kg、全高24cmと比較的大型のロボットであり、2階床下での運用には適していない。導入コストも高いものとなっている。



図2-1 moogle (大和ハウス工業株式会社)

図2-2はトピー工業株式会社が開発、販売している床下・設備点検ロボット「エニーライト」である。本ロボットはクローラー方式の駆動輪にカメラ1台を搭載したシンプルなシステムであり、本体重量9kg、全高22cmとmoogleと比較してやや小型の製品となっている。しかしながら最大段差踏破性能が7.5cmとなっており、2階床下での運用においてはやや性能に不足がある。



図2-2 エニーライト (トピー工業株式会社)

図2-3は千葉工業大学と大成建設株式会社により開発された天井裏点検ロボット「CHERI」である。



図2-3 CHERI  
(千葉工業大学, 大成建設株式会社)

当該ロボットは原子炉点検ロボットを小型化したシステムとなっており、天井裏の狭小空間においても高い踏破性能を持ち、カメラのリフトアップ機構によって様々な映像を撮影することが可能となっている。しかしながら複雑なマルチクローラによる走行系はオペレータによる遠隔操作が必須のシステムとなっている。

以上のように、検査・点検ロボットは多数開発例が見られるが、既存の製品は1階床下で活用するには大型のものが多く、また、遠隔操縦を前提としたシステムとなっており、梁の配置状況など不明な状態で、マッピングしつつ自律走行を可能とするようなロボットシステムはほとんど見られない。

### (3) 開発ロボットの概要

本課題の最終ゴールは周囲環境のマッピングを行いながら、自律走行により2階床下の狭小空間内における構造健全性診断を可能とする小型軽量ロボットの開発である。

フェーズ1においては段差を乗り越える機構を搭載せず、平面上のみを走行し、LiDARを低天井高

の条件下で昇降させる機構の開発に取り組むことと

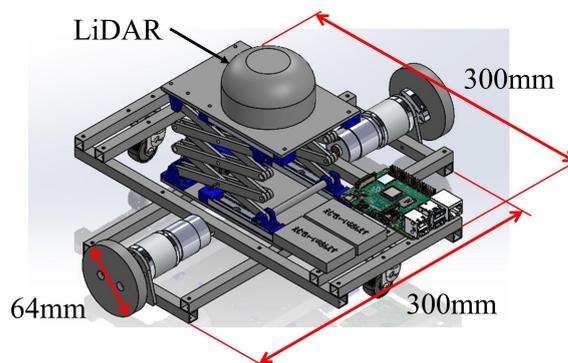


図2-4 点検ロボット3Dモデル



図2-5 試作機外観

表2-1 主要諸元

走行方式	対向2輪差動転回式
走行モーター	RS-385PH
減速比	1:100
昇降機構	パンタグラフ式
昇降機構モーター	DS-3218
最低地上高 <sup>*1</sup>	100mm
最高地上高 <sup>*1</sup>	171.7mm
駆動系動力	6.6V Li-Feバッテリー
制御系動力	5V Li-ionバッテリー
制御マイコン	Raspberry Pi 4 Model-B
モータードライバ	Cytron MD13S
LiDARセンサ	SLAMTECH RPLIDAR A2M8
手動制御方式	bluetooth方式コントローラ

データ転送方式	有線LAN接続方式
---------	-----------

\*1 LiDAR受光部高さ

した。本フェーズを通して開発した点検ロボットの3次元モデルを図2-4に、製作した試験機を図2-5に、主要諸元を表2-1にそれぞれ示す。

フェーズ1における開発要件と開発状況を以下に述べる。

① 狭小空間内での自由な移動を実現する走行システム

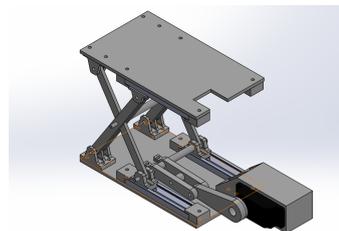
フェーズ1での走行機構には最も基本的な対向2輪型の差動転回方式を採用した。重心を考慮し、シャシー前後方向中央付近にモーター駆動される直径64mmの車輪を1対備えており、狭い空間でもその場旋回が可能な機構となっている。車体前後にはピッチ回転を安定性を向上させるキャスターを備える。フェーズ1では平面上の走行を想定していることから単純な車輪駆動方式となっているが、今後、低い段差がある空間ではクローラ方式、高い段差がある空間ではロッカーボギー機構などの採用が考えられる。

② 天井高に適合したLiDARセンサの昇降機構

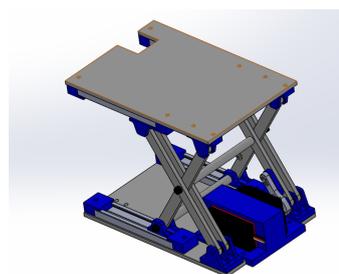
昇降機構にはエレベータ方式、テレスコピック方式(入れ子方式)、ネジ昇降方式などが通常利用されることが多いが、本開発で求められている低天井高の環境においては通常走行時にLiDARを低い位置で保持する必要がある。そのうえで点検動作時には天井付近までLiDARを上げることが要求されることから、本開発ではパンタグラフ式昇降機構を採用することとした。

図2-6には開発時における(a)初期案と(b)最終案を示す。初期案では構造高さを低くすることを狙って機構駆動モーターが機構外部設置されていたが

、ロボット全体のサイズが大きくなること、LiDARセンサによる計測時に一部干渉してしまうこと、昇降動



(a) 初期案



(b) 最終案

図2-6 昇降機構設計案



(a) 低位置



(b) 高位置

図2-7 昇降機構完成品

作時にせん断変形を伴うぶれが生じてしまうことなど、基礎的な駆動試験を通して様々な課題が明らかとなった。試験結果を踏まえて改良方法を検討した結果、最終案にあるように、内部構造を工夫することで駆動モーターを機構内部に設置することが可能となり、LiDARセンサ計測への干渉を防止するとともに、機構のコンパクト化を実現した。また同時にリンクアームの2重化によりせん断方向への強度を高め、昇降動作の安定性向上に成功した。最終案に基づいて開発した昇降機構を図2-7に示す。低位置(図2-7(a))では車体上面から100mmの高さにLiDAR受光部があり、高位置(図2-7(b))では171.7mmまで上昇させることが可能となっている。

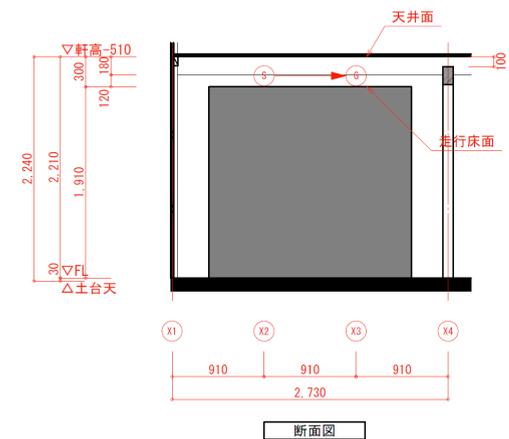
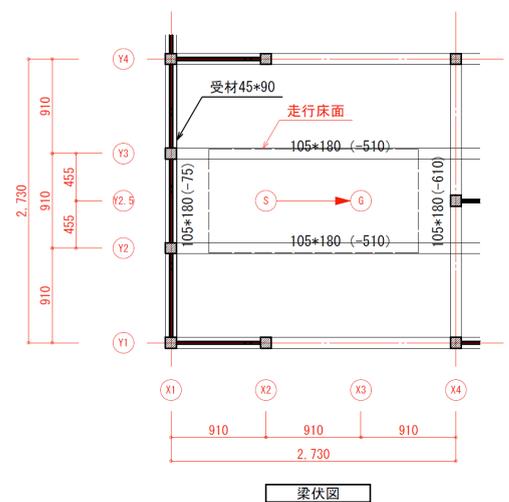
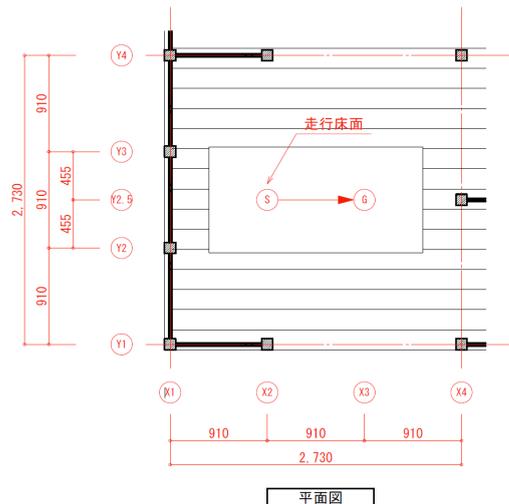
#### (4) 試験走行結果

##### 1) 走行試験概要

走行試験は図2-8、図2-9に示すような、2階床下を想定した狭小空間において実施した。フィールド広さ・高さは2730mm×2730mm×2210mmであり、走行面広さは2000mm×1000mm、走行面からの天井高さは300mmであった。



図2-8 走行試験フィールド



2-9 走行試験フィールド図面



試験条件はX2-Y2をスタート地点(図2-10)とし、スタート地点での低位置、高位置でのLiDARセンサによる計測を行ったのち、X3-Y2(図2-11)まで900mmの距離を遠隔操作により直進走行を行い、再度低位置、高位置での計測を行うこととした。LiDARセンサデータに関し、本報告で開発した機体では制御用マイコンと外部PCを有線LAN接続し収録した(図2-12)。



図2-10 スタート地点

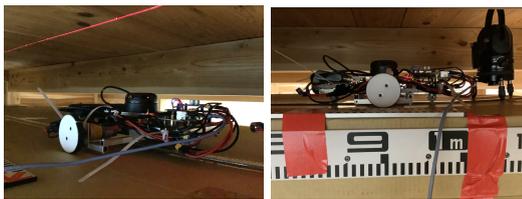


図2-11 ゴール地点



図2-12 システム

## 2) 試験結果

基本的走行試験および計測試験を実施したところ、ロボットの直進走行には特に課題なく、コントローラで指示したとおりに走行することができた。また昇降機構の動作にも問題なく、スムーズにLiDARセンサの高さを変化させることが可能であった。LiDARセンサによる計測の様子を図2-13に示す。

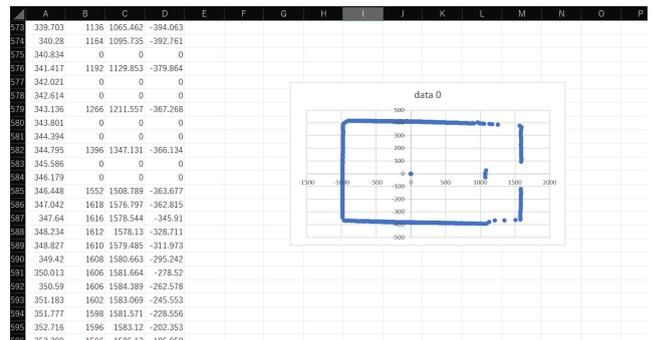


図2-13 LiDARセンサによる計測の様子(スクリーンショット)

計測は前節で述べたように、位置を変えて行うことになるが、ロボットの移動距離をパラメータとして与えることで、移動中に連続して計測を行うことなく、フィールド全体のマップを作成できた。

## (5) 成果と課題

### 1) フェーズ1実施で得られた成果

本報告では検査ロボット開発のフェーズ1として、基本的な平面走行システムの開発とLiDARセンサ昇降機構の開発を行った。非常に天井高の低い2階床下という特殊な環境で運用することを想定し、可能な限り通常走行時の機体高さを低くする一方、天井付近のマッピングをLiDARセンサにより実現するために高さ変化率の大きい昇降機構を新たに

開発する必要があった。これらの課題に対し、設計上の工夫を含んだパンタグラフ方式による昇降機構を開発することにより実現できた。

## 2) ロボット開発における今後の課題

今後、フェーズ2を進めるにあたり、現在の対向2輪型走行機構では障害物の乗り越えに対応できない。既存の検査ロボットで多く用いられているクローラー方式は安定性が高く、ある程度の高さ(一般的にはクローラーホイール半径の1.5倍程度)を乗り越えられるものの、搭載機器を保護しつつ、2階床下に想定される障害物を安定的に乗り越えるためには通常のクローラー方式では対応が困難である。一方、大きな障害物のある悪路走行に適用されることが多いマルチクローラー方式を採用できる可能性があるが、自律走行可能なシステムには走行機構の制御が複雑となり、適しているとは言えない。そのためフェーズ2の段階で、自律走行システムの実装を想定した障害物乗り越え機構を開発する必要がある。また柔軟な床面であることも想定されることからそれらを考慮した走行システムの開発が急務であり、すでに製品化されている段差乗り越えキャスターの原理を応用した機構の開発を進めていく。LiDARセンサ昇降機構についてはパンタグラフ方式を基本としつつ、さらに伸縮率を向上させたコンパクトな機構の開発を進めていく。

### 3. 画像認識技術開発

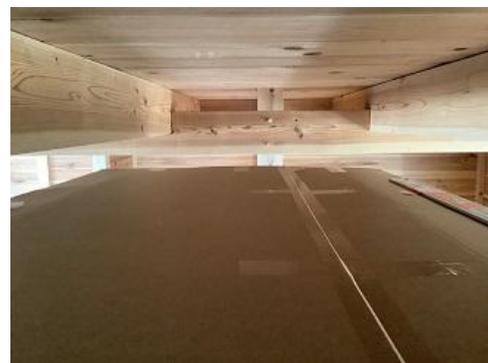
フェーズ2における自動移動を実現するために2階床下部分の構造を把握するための構造認識技術が必要となる。構造を認識するためには画像データなどを活用することで可能となる。フェーズ1においては検査ロボットに掲載されたカメラ画像の認識を行った。既に機械学習を用いた画像認識技術による構造物の点検(山田ら, 日本建築学会技術報告集, 第27巻, 第67号, pp. 1578-1583, 2021年)や機械学習を用いた打音における構造物の異常検知(松永ら, 日本計算工学会論文集, 第2021巻, 第1号, p. 20211002)が行われている。しかし, 本研究の目的である2階床下部分の点検において機械学習を利用した画像認識や異常検知などに関する報告はない。そのため, 本研究のフェーズ1では, 検査ロボットに掲載された画像データから, 画像認識技術を用いて2階床下部分の梁の検出について評価を実施した。

#### (1) 画像認識

評価に用いた画像を図3-1(a)-(c)に示す。図3-1(a)に示す梁が画像中央に撮影された画像, 図3-1(b)に示す梁が画像両側に撮影された画像, 図3-1(c)に示す梁が画像の一部に撮影された画像を用い画像認識を行った。本研究では, 評価用の木造家屋の2階床下部分の画像のため, 明るい環境での撮影となっている。実際の木造家屋の2階床下部分では, 照明などを利用した環境での撮影となるため, 画像の明るさは本研究の環境とは異なることが予想される。まずは本研究では, 画像認識による2階床下部分の構造の把握についての可否を確認することを目的として実施した。



(a) 梁が中央に撮影された画像



(b) 梁が両側に撮影された画像



(c) 梁が一部に撮影された画像

図3-1 2階床下部分画像

画像認識にはGoogle社の深層学習フレームワークTensorflowで提供されているEfficientDetB7モデル(M. Tan et al., Proceedings of the IEEE/CVF pp. 10781-10790, 2020)を利用し, 2階床下部分

の画像から梁を検出できるようファインチューニングを行った。認識に用いた画像のサイズは512ピクセル×512ピクセルのRGBデータとして、学習データ及び評価データとして、2階床下部分の画像130枚(学習データ:100枚, 評価データ:30枚)を用いて評価を行った。画像を認識した結果について梁である割合が0.85以上の場合は梁として検出するように設定している。学習データ及び評価データには人間により画像における梁の位置情報を付加している。

## (2) 画像認識結果

画像から梁を検出するためのファインチューニングによるモデル構築を行うために学習を3000回繰り返した。学習時におけるloss値(学習データにおける梁の位置の誤差の絶対値)の変化の様子を図3-2に示す。

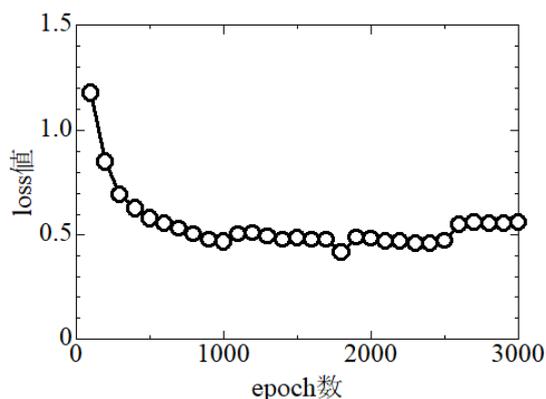


図3-2 学習時のloss値の変化の様子

図3-2より、学習回数が増加するに従い、loss値が減少していることが分かる。学習回数が1000回以下では1.0以上であったloss値は学習回数が1000

回程度で0.5程度まで減少しており、1000回を超えるとloss値は0.5程度で一定となっている。この結果から学習が正常に行われており、画像から



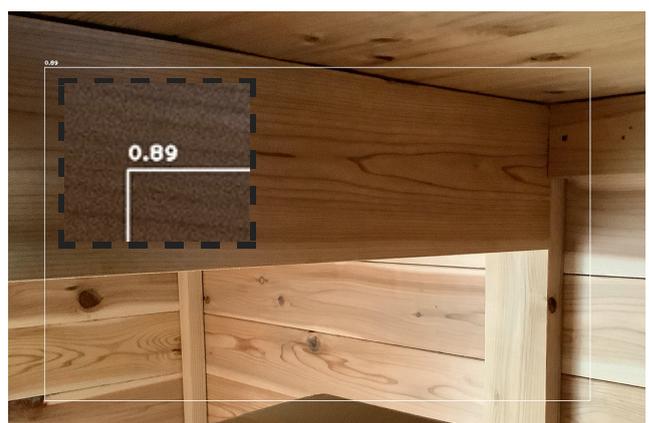
(a) 梁が中央に撮影された画像の認識結果

(0.95の割合で梁と認識)



(b) 梁が両側に撮影された画像の認識

(左側:0.85, 右側:0.87の割合で梁と認識)



(c) 梁が一部に撮影された画像

(認識結果部分拡大)の認識結果

(0.89の割合で梁と認識)

図3-3 2階床下部分の梁の検出結果

梁を検出するためのモデルのファインチューニングが進んでいることが分かる。梁を検出するためのファインチューニングが完了したモデルを用いて学習データ及び評価データに含まれない画像について認識した結果を図3-3(a)-(c)に示す。

画像認識結果では、梁と認識された部分が白い枠で囲われる。図3-3(a)では中央に撮影された梁が白い枠に囲われており、0.95の割合で梁と認識する結果となった。ただし、梁のサイズについては、白い枠から梁がはみ出しており、小さいサイズで認識されている。図3-3(b)では、両側にある梁について両方とも白い枠で囲われており、左側は0.85、右側は0.87の割合で梁として認識された。また、梁のサイズについても認識された部分は、ほぼ梁全体を囲んでおり、正しく認識できている。図3-3(c)では、一部に撮影された梁を認識できている。認識は0.89の割合で梁として認識しており、サイズについては、一部白い枠から梁がはみ出しているが、ほぼ認識したサイズは梁と一致している。これらの結果から、画像認識を用いることで2階床下部分の構造把握は可能であると考えられる。

### (3) 画像認識における成果と課題

本研究では、2階床下部分の構造把握のために検査ロボットに掲載されたカメラ画像を用いて画像の認識による梁の検出を行った。その結果、画像に撮影された梁の検出は可能であることが明らかになった。また、梁のサイズについても認識することが可能であることも明らかになった。

しかし、本研究で用いた画像は評価用の木造家屋あり、2階床下部分においても明るい環境で撮影可能な状態であった。実際の木造家屋の2階床下

部分の撮影には、照明が必要である。そのため、今後は、実際の木造家屋の2階床下部分の画像について評価を実施する必要がある。この場合に明るさを確保するための照明について十分な検討が必要であり、利用可能な照明で十分な明るさを得られない場合は、赤外線画像による評価なども検討する予定である。

## 4.まとめ

本研究は、現在民間で開発研究が行われていない2階床下部分の点検ロボットの開発を行う一連の研究の序として、3段階のフェーズのうちフェーズ1を達成した(表4-1)。

阿南工業高等専門学校創造技術工学科  
5年 情報コース 島田 豊藏  
4年 情報コース 土岡 弓人  
3年 情報コース 高橋 圭  
3年 建設コース 上塚 雄大, 藤川 大輝

表4-1 研究開発のフェーズ(再掲)

	フェーズ1	フェーズ2	フェーズ3
移動面	硬面移動	凹凸面	柔面移動
移動機構	二輪移動	段差乗越	柔面移動対応型機構
昇降機構	100mm	200mm	400mm
操作機構	手動移動	自動移動	自律移動
計測機構	2次元レーザ	2次元レーザ(高精度)	2次元レーザによる3次元計測
撮影機構	非搭載	手動撮影	自動撮影
打診機構	非搭載	インパルスの打診機能の検討	インパルスの打診機能、衝撃軽減機構

達成した内容は、手動にて、硬面を二輪により移動でき、100mmの昇降機構と計測機器として2次元レーザを備えた点検ロボットとなる。また、フェーズ2段階における自動移動を目指し、明視域における梁に関する画像の認識検出を実現している。

今後、当該、機械化検査法の開発を進めるとともに、一般化をしていくため、2022年2月に徳島県内に所在するハウスメーカー・工務店5社に対して研究成果説明を行い、重要性の高い研究であるとの評価を受けるとともに、次年度以降の研究開発を協働にて実施していくこととなった。

本研究を進めるにあたり、次の学生の協力を得ました。記して感謝します。