調査研究報告　　No.435
RESEARCH REPORT 2023. 3

AI 技術を用いた建物外壁点検の合理化に関する検討

Study on Rationalization of Building Exterior Wall Inspection Using AI Technology

齊藤　隆典[1)]，糸毛　治[2)]，飯泉　元気[3)]
Takasuke Saito[1)], Osamu Itoge[2)], Genki Iizumi[3)]

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部
北方建築総合研究所
Northern Building Research Institute
Building Research Department
Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization

1) 建築研究部建築システムグループ 主査，2) 建築研究部建築システムグループ 研究主幹，3) 建築研究部環境システムグループ 研究職員
1) Chief of Building Engineering System Group, 2) Senior Research Manager of Building Engineering System Group, 3) Researcher of Environment System Group

本書の全部および一部の無断での転載はご遠慮ください。

No unauthorized reproduction

概　要
Abstract

AI 技術を用いた建物外壁点検の合理化に関する検討
Study on Rationalization of Building Exterior Wall Inspection Using AI Technology

齊藤 隆典[1)]，糸毛 治[2)]，飯泉 元気[3)]
Takasuke Saito[1)], Osamu Itoge[2)], Genki Iizumi[3)]

キーワード ***：*** *建物長寿命化，AI 画像検出，劣化調査・点検*
Keywords : *Building longevity, AI image detection, Deterioration investigation and inspection*

1．研究概要

1）研究の背景

・建物の長寿命化や安全性確保の観点から，定期的な点検や適切な調査に基づく維持管理が必須である。
・経年劣化した建物には，安全性や美観性，使用性，耐久性などの性能低下が生じ，外壁表面に観察できる変状として，ひび割れや剥落等の現象が現れる。
・外壁の剥落は第三者被害につながる可能性があるため，劣化状態等を的確に把握する必要がある。
・点検調査では外壁に生じた変状の外観観察が不可欠であるが，人的労力やコストの課題，人口減少や高齢化による技術者不足等の問題から，実施困難になるケースも予想される。
・そのため，建物の長寿命化や安全性確保を実現するためには，建物外壁の点検の合理化を図ることのできる調査手法の開発が喫緊の課題となっている。
・一方で，デジタル画像や AI 技術を用いてひび割れ等を自動検出する研究開発が近年盛んになってきており，調査点検の合理化への期待が高まっているが，仕上げ種類が多様な建物外壁に対応できる技術確立には至っていないのが現状である。

2）研究の目的

建物外壁の変状把握が可能な画像認識 AI を構築し，外壁点検手法での活用について検討する。

2．研究内容

1）建物外壁の変状を対象とした画像認識 AI の構築（R3～R4 年度）

・ねらい：外装仕上げの色や種類の違い，各種変状（ひび割れ，剥落等）の検出に対応できる AI を構築する。AI の学習に必要な教師画像データセットを作成し，経常研究（R1-R2 年度）で開発したひび割れ画像認識 AI の検出範囲を拡張する。
・試験項目等：教師画像データセットの作成，画像認識 AI の構築

2）変状検出に関する撮影条件・定量評価の検討（R3～R4 年度）

・ねらい：仕上げ表面に模擬変状を設けたモデル試験体を作製し，これを用いた撮影カメラの必要性能や撮影条件（距離，角度等）の検討を行う。また，画像解析による変状箇所の数量等の定量評価について検討を行う。
・試験項目等：模擬変状検出，画像解析プログラムの作成

[1)] 建築研究部建築システムグループ 主査　[2)] 建築研究部建築システムグループ 研究主幹　[3)] 建築研究部環境システムグループ 研究職員
[1)] Chief of Building Engineering System Group [2)] Senior Research Manager of Building Engineering System Group [3)] Researcher of Environment System Group

3）実建物を対象としたケーススタディ（R4 年度）

・ねらい：道と連携し，改修予定の道有建物を対象に実測調査を実施し，従来手法による改修設計時の変状数量と画像認識 AI により検出した変状数量の比較から，本手法の適用限界の検討を行う。

・試験項目等：実測調査

3．研究成果

1）建物外壁の変状を対象とした画像認識 AI の構築（R3～R4 年度）

・塗り仕上げ RC 造建物の外壁劣化（ひび割れ，はく離，鉄筋露出等）の画像データを用い，AI 学習を行うための教師画像データセットを作成した（図１）。

・作成した教師画像データセットに，R1-R2 経常研究において作成したデータを加えて AI の学習を行い，外装仕上げ種類の違いや各種劣化の検出に対応できる AI を構築した。

2）変状検出に関する撮影条件・定量評価の検討（R3～R4 年度）

・本手法の適用限界を考慮しつつ，モデル試験体を用いた検討から，AI による劣化検出に必要な画像分解能を定め，これを満足するための撮影条件を示した。

・劣化箇所の数量（ひび割れ長さ，欠損面積等）を求めるための画像処理プログラムを作成した（図２）。

3）実建物を対象としたケーススタディ（R4 年度）

・実建物を対象に AI による劣化検出を実施し（図３），目視調査結果との比較から，本手法の妥当性を確認した（図４）。

・今後の検出精度向上に向け，ひび割れ以外の劣化（はく落・鉄筋露出等）の検出や低照度箇所の検出に課題があることを明らかにした。

＜具体的データ＞

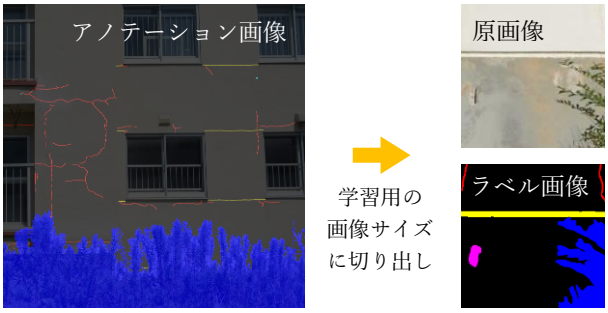


図１　教師画像データセットの作成

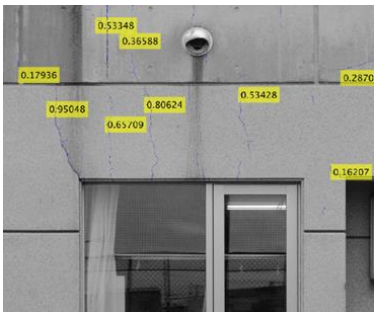


図２　画像処理プログラムによる劣化量計算

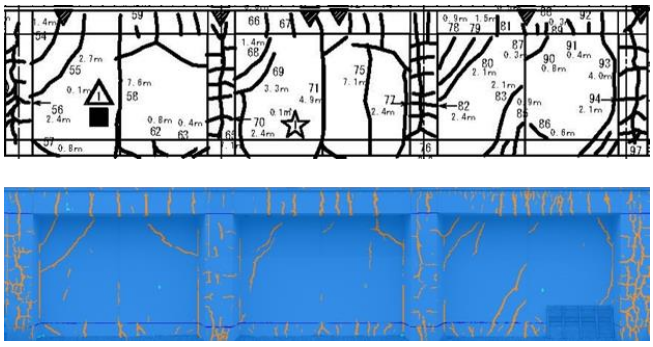


図３　実建物外壁を対象とした AI による劣化検出の例

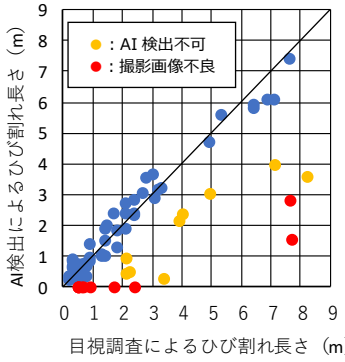


図４　ひび割れ検出結果の対応関係

4．今後の見通し

・本研究で開発した劣化検出 AI や画像処理プログラムは，次年度以降の研究における基盤技術として活用し，外壁調査・診断等の支援技術の実用化に向けた検討を行う。

・本研究で定めた外壁の撮影条件・撮影方法は，今後の AI 技術を用いた点検・調査における活用や教師画像データ収集時の方法として使用する。

目　次

1．研究の背景と目的 1
（1）背景 1
（2）目的 1
（3）研究項目 1

2．AI による画像セグメンテーション手法の概要 1

3．建物外壁の劣化検出に関する AI の構築 2
（1）検出対象とする劣化現象 2
（2）教師画像データセットの作成 2
（3）AI 学習モデルの作成 3

4．劣化検出に関する撮影条件・定量評価の検討 3
（1）検討の目的 3
（2）撮影条件の検討方法 3
（3）モデル試験体の概要 4
（4）劣化検出に必要な画像分解能の検討 4
（5）必要分解能を満たす撮影条件 4
（6）高所部撮影時の撮影条件 6
（7）劣化の定量値算出プログラムの作成 9

5．実建物を対象とした AI による劣化検出の試行 9
（1）対象建物の概要 9
（2）実測調査の概要 9
（3）劣化検出結果の検討 9

6．まとめ 10

1．研究の背景と目的

（1）背景

建築物の長寿命化や安全性確保の観点から，定期的な点検や適切な調査に基づく維持管理が必須となっている。経年劣化によって建築物の外壁表面には目視で観察できる，ひび割れや仕上げ材のはがれ，欠損等の劣化現象（図 1-1）が現れる。さらに劣化が進行すると，外壁のはく落等が生じる場合がある。

これらは，建築物の耐久性や機能を維持するための保全実施や適切な改善・更新時期の判断，外壁落下による第三者被害の防止等につながる重要な情報を含むため，劣化状態を的確に把握する必要がある。

建築物外壁の点検調査では，発生している劣化の外観観察が不可欠となるため，労力を要する。また，調査者が目視で劣化箇所を確認し記録するため，人的ミスの発生や調査結果に個人差が生じる等の可能性があり，調査の正確性についても課題がある。以上より，建築物の外壁点検の合理化を図ることのできる調査手法が求められている。

こうした課題に対し，デジタル技術や AI 等を用いて，ひび割れ等の劣化箇所を自動検出する研究開発が近年行われており，点検調査の合理化への期待が高まっている。コンクリート打放し仕上げが主となる土木構造物への AI の適用は多く見られるものの，仕上げ種類が多様で劣化種類も様々な建物外壁に対応できる技術確立には至っていないのが現状である。

（2）目的

本研究では前節の背景を受け，建物外壁に生じた劣化の把握が可能な AI を構築し，外壁点検手法への活用に向けた基盤技術を確立することを目的とする。

（3）研究項目

第 2 章では，本研究で AI の学習に採用した画像セグメンテーション手法について概説する。

第 3 章では，これまでの建物調査において取得した外壁劣化の画像を活用し，学習用の教師画像データセットを作成し，このデータを用いて，仕上げのある外壁劣化を検出可能な AI を構築する。

続いて，第 4 章では，第 3 章で構築した AI を用いて劣化検出を行うために必要な撮影条件を定めるため，模擬的に劣化を生じさせたモデル試験体を用いた検討を行う。この検討結果から，AI の劣化検出に必要な画像分解能を明らかにし，撮影用カメラの性能に合わせて，この画像分解能を満足するための撮影方法の提案を行う。また，AI の検出結果から劣化量を求めるための画像処理に基づく計算プログラムを作成する。

第 5 章では，第 4 章までの検討を受け，外壁仕上げを持つ実建物を対象とした，本手法による劣化検出の試行を行い，目視調査と AI による検出結果の比較から，本手法の妥当性の検証を行う。



図 1-1　外壁劣化の代表例

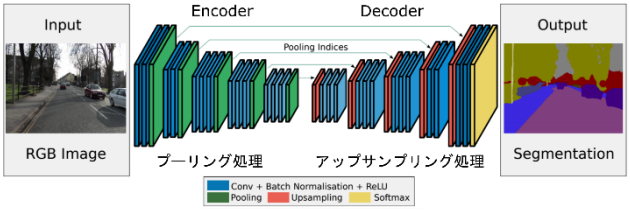


図 2-1　SegNet による学習プロセス 文献 1)抜粋に加筆

2．AI による画像セグメンテーション手法の概要

本研究では，外壁の劣化検出が可能な AI を構築するにあたり，画像中の物体分類の手法の一種であるセマンティックセグメンテーション[注1]を用いる。学習用のニューラルネットワークとしては SegNet[1)]を採用し，学習プロセスを実施する方針とする。

図 2-1 に SegNet による学習プロセスを示す。これは，Encoder-Decoder 型の完全畳み込みネットワークと呼ばれる機械学習アルゴリズムで，入力画像と同サイズの画像で結果を出力でき，情報の一貫性が保持されている。また，ピクセル単位で意味付けされた検出結果が得られ，画像から複数箇所，複数種

類の対象物を検出できる等の特徴がある。

注 1：デジタル画像を構成する全画素にラベルやカテゴリを関連付けて分類を行うための機械学習アルゴリズムの一つで，ピクセル単位での物体認識が可能。

3．建物外壁の劣化検出に関する AI の構築

（1）検出対象とする劣化現象

表 3-1 に，本研究で AI による検出対象とする外壁仕上げおよび劣化現象等を示す。

（2）教師画像データセットの作成

セマンティックセグメンテーションによる画像分類では，図 3-1 に示すような教師画像データセットが必要となる。これは検出対象について，例題となる原画像とその検出対象の種類と位置の正解値であるラベル画像をセットとしたデータ群である。図に示すように，ラベル画像は原画像を基に，検出対象とする劣化種類ごとにそれぞれ色情報に基づいてアノテーション[注2]を行い，作成した。

表 3-2 に，作成した教師画像データセットの概要を示す。画像解像度は 448×448 pixel とし，劣化種類ごとに表中に示す教師画像データセットを作成した。また，劣化部のみのデータでは，情報の偏りにより過学習と呼ばれる不具合が生じる可能性があるため，これを防ぐ目的で，画像内に劣化が存在しないデータセットを全体数の 25 %を別途作成した。

表 3-1　検出対象の外壁仕上げおよび対象劣化等

外壁仕上げ
・コンクリート打放し仕上げ ・リシン吹付塗装仕上げ ・マスチック塗装仕上げ ・弾性タイル塗装仕上げ
対象劣化等
・ひび割れ（0.2 mm 幅以上） ・欠損部 ・鉄筋爆裂部 ・塗装のはがれ／ふくれ ・外壁目地（劣化の誤検出回避のため） ・植栽部分（劣化の誤検出回避のため）

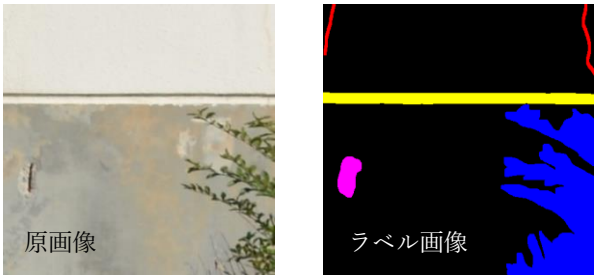


図 3-1 教師画像データセットの例

表 3-2　教師画像データセットの概要

画像解像度	448×448 pixel
データセット内訳	ひび割れ：約 40,000 セット 欠損部：約 2,200 セット 鉄筋爆裂：約 2,500 セット 塗装はがれ:約 2,500 セット 塗装ふくれ:約 1,000 セット
ラベル付け定義 （R 値，G 値，B 値）	ひび割れ：(255, 0, 0) 欠損部：(0, 255, 255) 鉄筋爆裂：(255, 0 ,255) 塗装はがれ：(255, 127, 0) 塗装ふくれ：(0, 255, 0) 外壁目地：(255, 255, 0) 植栽部分：(0, 0, 255) その他・背景：(0, 0, 0)

表 3-3　学習用の設定値

学習用ソルバー	SGDM
最大エポック数	50
ミニバッチサイズ	2
初期学習率	1.0×10^{-2}
学習率の低下係数	0.8／10 エポック毎

表 3-4　データ拡張の概要

水平方向移動量	0-10 pixel
鉛直方向移動量	0-10 pixel
回転量	0° -10°
拡大・縮小量	0.8 倍-1.25 倍

データセット作成は膨大な作業を必要とするため，別途作成した処理プログラムを使用した。デジタルカメラで撮影した通常サイズの画像上で，ラベル情報のアノテーションを行った後，規定した画像解像

度で，原画像およびラベル画像の同一位置の自動切り出しを行うことで，作成の効率化を図った。

注 2：AI に学習させるための画像等データに，分類情報や位置情報等の意味付けを行う作業のこと。

（3）AI 学習モデルの作成

表 3-3 に AI の学習時に，学習アルゴリズムの挙動を制御する条件とした設定項目について示す。これらの決定には，学習プロセスを繰り返し試行し，過学習が生じず，かつ検出精度の向上が確認できた組み合わせを採用した。作成した教師画像データセットを用いて，最大エポック数の到達時点で 160,000 回の学習の反復を行い，学習曲線から精度が 95 %程度に収束することを確認した。

また，学習時には同一の画像データセットを繰り返し入力した場合，過学習が発生する可能性や未知の情報に対する検出の汎用性が頭打ちになることが課題となる。そのため，学習時にはデータ拡張を併せて行った。データ拡張では教師画像データセットの入力時に，表 3-4 に示す範囲で水平方向や鉛直方向に移動，画像中心での回転，画像の拡大・縮小させる処理をランダムで複合的に加える。この処理により，データセット量が少ない場合でも学習用のデータ量を増加させた効果を得ることができる。

4．劣化検出に関する撮影条件・定量評価の検討

（1）検討の目的

AI による劣化検出に必要な撮影条件を明らかにするため，撮影画像の分解能に着目した検討を行った。模擬的に劣化を生じさせたモデル試験体の撮影を行い，劣化検出の可否から必要となる画像分解能を確認し，その撮影方法について検討する。また，AI により検出した劣化部の定量値を求めるため，画像処理を用いた計算プログラムを作成する。

（2）撮影条件の検討方法

図 4-1 に，劣化検出に必要となる画像分解能を検討するためのモデル試験体の撮影方法を示す。試験体は，北方建築総合研究所庁舎バルコニー部に設置して地上から撮影を行った。設置高さは 2 階から 4 階の 3 ケースとし，試験体とカメラ間の水平方向の撮影距離は 5 m，10m を設定した。撮影に使用したカメラは，一般的な撮影機材を想定し，デジタル一眼レフカメラとコンパクトデジタルカメラを使用した。モデル試験体の撮影条件と撮影に使用した機材

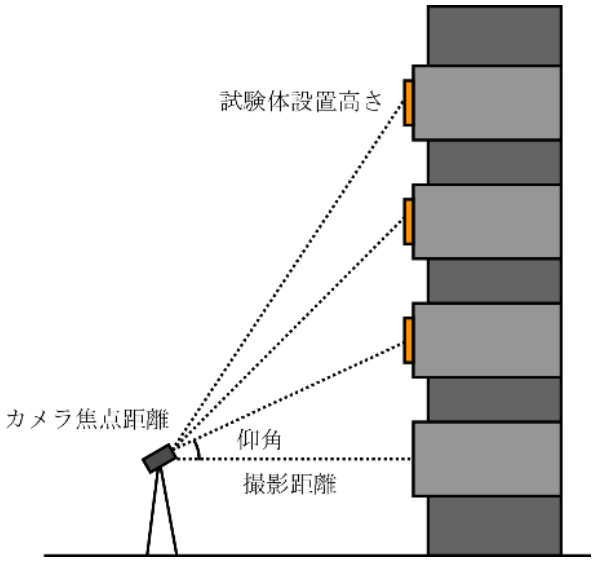


図 4-1　モデル試験体の撮影方法

表 4-1　試験体の撮影状況と撮影機材の概要

設置高さ	5 m，9 m，13 m
撮影距離	5 m，10 m
撮影機材	Nikon D7100（一眼レフ） Nikon CoolPix W300（コンパクト）
センササイズ	APS-C（一眼レフ） 1/2.3 型（コンパクト）
焦点距離	18～105 mm（一眼レフ） 18～70 mm （コンパクト）
記録画素数	6000×4000 pixel（一眼レフ） 4608×3456 pixel（コンパクト）

表 4-2　モデル試験体の作製条件

試験体サイズ	L400×W400×D20 mm
試験体主材	EPS ボード
モルタル厚さ	約 2 mm
使用塗材	合成樹脂エマルション（白色）
ひび割れ幅	0.1 mm, 0.2 mm, 0.4 mm, 0.6 mm, 0.8 mm, 1.0 mm

の概要を表 4-1 に示す。

（3）モデル試験体の概要

表 4-2 にモデル試験体の作製条件を示す。試験体はポリスチレンフォーム（EPS）ボードをベースとして，下地モルタルを塗り付け，その上から合成樹脂エマルション塗料をマスチックローラーで塗装した。AI の検出対象とする劣化のうち，最も検出の難易度が高いと考えられるひび割れを，試験体中央位置に線状に生じさせ，表中のひび割れ幅となるよう作製した。

（4）劣化検出に必要な画像分解能の検討

表 4-3 および表 4-4 に AI による劣化検出の可否と画像分解能の関係について，使用カメラ毎の結果をそれぞれ示す。これらの結果より，0.2 mm 幅のひび割れを AI により検出が可能な画像分解能は「0.6～1.1 mm/px」となった。既往の研究[2),3)]においても，デジタル画像からの検出に必要な画像分解能は，対象サイズの 3～5 倍程度が必要であることが示されており，本検討でも同様の傾向が得られている。

この結果を踏まえ本研究では，0.2 mm 幅のひび割れを AI により検出するための画像分解能を，撮影時のばらつきも考慮して「0.8±0.2 mm/px」と定め，これを目標値とする。

（5）必要分解能を満たす撮影条件

前節での検討に基づき，目標とする画像分解能の中間値「0.8 mm/px」を基準値と設定し，これを満足するための撮影条件について検討する。

撮影画像の分解能を決定する因子としては，以下の 4 つが挙げられる。

・「センササイズ」
・「記録画素数」（ただし，機材性能の最大設定）
・「レンズ焦点距離」
・「撮影距離」（カメラと外壁間の距離）

このうち，センササイズと記録画素数は撮影機材に固有であるため，機材選定時に設定値が決定する。一方，目標分解能を満足する画像を取得するには，レンズ焦点距離と撮影距離は，撮影者が現場で適切

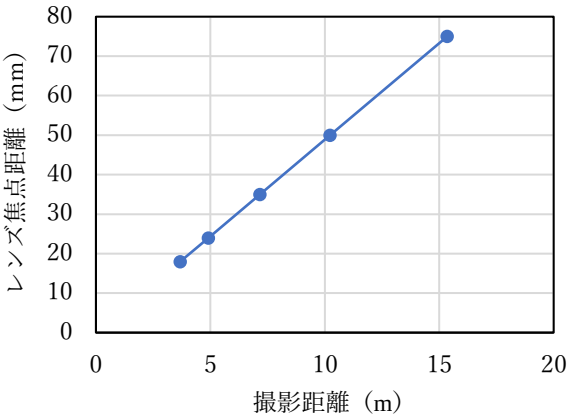


図 4-2　レンズ焦点距離－撮影距離関係の例



（a）APS-C センササイズの場合



（b）1/2.3 型センササイズの場合

図 4-3　目標分解能を満たす撮影画角の例

な値を設定する必要がある。しかし，実際の点検調査における撮影では，カメラの仕様上，レンズ焦点距離の設定値が撮影者には容易に判断できず，現場での設定が困難なケースが多い。

また，目標分解能を固定（0.8 mm/px）とした場合，レンズ焦点距離と撮影距離は線形の関係となる（図 4-2）。この関係性を利用すると，目標とする画

表 4-3　AI による劣化検出可否と画像分解能の関係（デジタル一眼レフカメラ使用の場合）

試験体高さ：5 m	
△：一部検出不可　　分解能：1.5 mm/px （f = 18 mm，撮影距離：5 m）	△：一部検出不可　　分解能：2.5 mm/px （f = 18 mm，撮影距離：10 m）
○：0.2mm 検出可　　分解能：0.8 mm/px （f = 35 mm，撮影距離：5 m）	○：0.2mm 検出可　　分解能：1.3 mm/px （f = 35 mm，撮影距離：10 m）
○：0.2mm 検出可　　分解能：0.6 mm/px （f = 50 mm，撮影距離：5 m）	○：0.2mm 検出可　　分解能：0.8 mm/px （f = 50 mm，撮影距離：10 m）
試験体高さ：9 m	
×：検出不可　　分解能：2.3 mm/px （f = 18 mm，撮影距離：5 m）	×：検出不可　　分解能：2.9 mm/px （f = 18 mm，撮影距離：10 m）
△：一部検出不可　　分解能：1.2 mm/px （f = 35 mm，撮影距離：5 m）	△：一部検出不可　　分解能：1.5 mm/px （f = 35 mm，撮影距離：10 m）
○：0.2mm 検出可　　分解能：0.8 mm/px （f = 50 mm，撮影距離：5 m）	○：0.2mm 検出可　　分解能：1.1 mm/px （f = 50 mm，撮影距離：10 m）
試験体高さ：13 m	
×：検出不可　　分解能 3.0 mm/px （f = 18 mm，撮影距離：5 m）	×：検出不可　　分解能：3.6 mm/px （f = 18 mm，撮影距離：10 m）
×：検出不可　　分解能：1.6 mm/px （f = 35 mm，撮影距離：5 m）	×：検出不可　　分解能：1.9 mm/px （f = 35 mm，撮影距離：10 m）
△：一部検出不可　　分解能：1.2 mm/px （f = 50 mm，撮影距離：5 m）	△：一部検出不可　　分解能：1.3 mm/px （f = 50 mm，撮影距離：10 m）

表 4-4　AI による劣化検出可否と画像分解能の関係（コンパクトデジタルカメラ使用の場合）

試験体高さ：5 m	
△：一部検出不可　　分解能：2.3 mm/px （f = 24 mm（換算値），撮影距離：5 m）	×：検出不可　　分解能：3.5 mm/px （f = 24 mm（換算値），撮影距離：10 m）
△：一部検出不可　　分解能：1.6 mm/px （f = 35 mm（換算値），撮影距離：5 m）	△：一部検出不可　　分解能：2.4 mm/px （f = 35 mm（換算値），撮影距離：10 m）
○：0.2mm 検出可　　分解能：0.7 mm/px （f = 70 mm（換算値），撮影距離：5 m）	○：0.2mm 検出可　　分解能：1.1 mm/px （f = 70 mm（換算値），撮影距離：10 m）
試験体高さ：9 m	
×：検出不可　　分解能：3.2 mm/px （f = 24 mm（換算値），撮影距離：5 m）	×：検出不可　　分解能：4.2 mm/px （f = 24 mm（換算値），撮影距離：10 m）
△：一部検出不可　　分解能：2.2 mm/px （f = 35 mm（換算値），撮影距離：5 m）	△：一部検出不可　　分解能：2.9 mm/px （f = 35 mm（換算値），撮影距離：10 m）
○：0.2mm 検出可　　分解能：1.1 mm/px （f = 70 mm（換算値），撮影距離：5 m）	○：0.2mm 検出可　　分解能：1.3 mm/px （f = 70 mm（換算値），撮影距離：10 m）
試験体高さ：13 m	
×：検出不可　　分解能：4.4 mm/px （f = 24 mm（換算値），撮影距離：5 m）	×：検出不可　　分解能：5.2 mm/px （f = 24 mm（換算値），撮影距離：10 m）
×：検出不可　　分解能：3.0 mm/px （f = 35 mm（換算値），撮影距離：5 m）	×：検出不可　　分解能：3.6 mm/px （f = 35 mm（換算値），撮影距離：10 m）
△：一部検出不可　　分解能：1.4 mm/px （f = 70 mm（換算値），撮影距離：5 m）	△：一部検出不可　　分解能：1.7 mm/px （f = 70 mm（換算値），撮影距離：10 m）

像分解能を満たすための撮影画角は常に一定となり，次式で計算することができる。

$$V_h = \frac{R \times S_h}{f \times iFov} \quad (1)$$

$$V_V = \frac{R \times S_v}{f \times iFov} \quad (2)$$

ただし，V_h：水平方向画角，V_v：鉛直方向画角，R：目標とする画像分解能，S_h：センサ水平サイズ，S_v：センサ鉛直サイズ，f：レンズ焦点距離，$iFov$：瞬時視野

そのため，点検者が撮影を行う際，レンズ焦点距離や撮影距離の設定を行う必要はなく，撮影時には対象範囲の設定に注力することで，目標とする画像分解能を持つ画像を取得することができる。

図 4-3 に目標分解能を満足するための撮影画角をカメラのセンササイズ毎に示す。撮影画角のおおよその目安としては，集合住宅 1 階部分で例示すると 1 住戸の半分程度の面積を 1 枚の画像で撮影できる画角となる。

尚，本検討で使用したサイズ以外のセンサを搭載したカメラを使用する場合も，(1) 式，(2) 式を用いることで，容易に目標とする画像分解能を満たすための撮影画角を求めることができる。

（6）高所部撮影時の撮影条件

地上から外壁撮影を行う場合，2 階以上の外壁撮影では，仰角等の影響により撮影対象となる外壁までの撮影距離が増加するとともに，あおりによる対象物撮像の圧縮が生じるため，画像分解能の低下が生じる（図 4-4）。そこで，目標とする画像分解能，撮影距離，レンズ焦点距離との関係から，仰角による画像分解能への影響について検討を行った。

表 4-5 および表 4-6 にセンササイズ毎の仰角による画像分解能への影響を示す。表中に示した撮影距離は，目標分解能を 0.8 mm/px に固定し，設定した焦点距離毎に求めた値で，これを基準として各階高さまでの撮影仰角，画像中心部の撮影距離をカメラ位置と撮影対象との幾何学的関係から計算している。また，表中では，図 4-4 で例示した画像の上端，中央，下端における画像分解能を各階高さで示しており，4.（4）で定めた目標分解能「0.8±0.2 mm/px」の範囲の内外で色分けして表示している。これらの結果より，地上撮影の場合，低層部と高層部で同一の撮影設定（撮影距離、焦点距離等）を用いて，画像分解能の目標値を満たした撮影を行うことは難しい。そのため，地上撮影で高層部の撮影が必要な場合は，検討結果を踏まえ，以下の撮影方針とした。

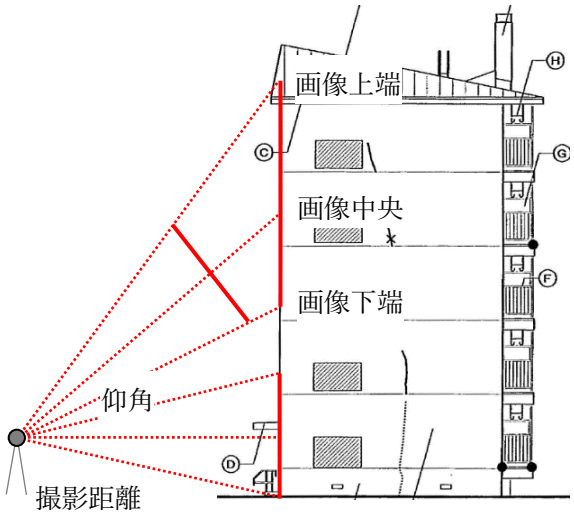


図 4-4　高所部撮影時の仰角の影響

・APS-C（デジタル一眼レフ相当）の場合
　3 階高さまで：撮影距離 10 m 程度を確保する
　4 階高さ以上：撮影距離 15 m 以上を確保する
　※いずれの場合も 4.（5）の撮影画角による外壁範囲の撮影を行う

・1/2.3 型（コンパクトカメラ相当）の場合
　2 階高さまで：撮影距離 8m 程度を確保する
　3 階高さ：撮影距離 11 m 程度を確保する
　4 階高さ：撮影距離 13 m 程度を確保する
　※いずれの場合も 4.（5）の撮影画角による外壁範囲の撮影を行う

表 4-5　撮影時の仰角が画像分解能に与える影響（APS-C センササイズの場合）

撮影距離（mm）		焦点距離（mm）		目標分解能（mm/px）	
7164.2		35		0.8	
	撮影仰角（度）	中心距離（mm）	画像上端分解能	画像中央分解能	画像下端分解能
5 階相当	59.16	13975.9	2.55	1.56	1.16
4 階相当	51.48	11503.3	1.82	1.28	1.03
3 階相当	39.95	9344.8	1.31	1.04	0.90
2 階相当	22.72	7767.0	0.98	0.87	0.81

撮影距離（mm）		焦点距離（mm）		目標分解能（mm/px）	
10234.6		50		0.8	
	撮影仰角（度）	中心距離（mm）	画像上端分解能	画像中央分解能	画像下端分解能
5 階相当	49.54	15771.7	1.53	1.23	1.06
4 階相当	41.33	13628.9	1.25	1.07	0.95
3 階相当	30.38	11863.7	1.03	0.93	0.86
2 階相当	16.34	10322.2	0.88	0.83	0.81

撮影距離（mm）		焦点距離（mm）		目標分解能（mm/px）	
15351.8		75		0.8	
	撮影仰角（度）	中心距離（mm）	画像上端分解能	画像中央分解能	画像下端分解能
5 階相当	49.54	19485.4	1.11	1.02	0.94
4 階相当	41.33	17795.5	0.99	0.93	0.88
3 階相当	30.38	16482.7	0.90	0.86	0.83
2 階相当	16.34	15642.2	0.84	0.82	0.80

表 4-6　撮影時の仰角が画像分解能に与える影響（1/2.3 型センササイズの場合）

撮影距離（mm）		焦点距離（mm）		目標分解能（mm/px）	
5297.8		50（35mm 換算値）		0.8	
	撮影仰角（度）	中心距離（mm）	画像上端分解能	画像中央分解能	画像下端分解能
5 階相当	66.18	13117.4	5.05	1.98	1.28
4 階相当	59.52	10443.5	2.94	1.58	1.13
3 階相当	48.56	8004.2	1.78	1.21	0.96
2 階相当	29.52	6088.3	1.12	0.92	0.83

撮影距離（mm）		焦点距離（mm）		目標分解能（mm/px）	
7947.1		75（35mm 換算値）		0.8	
	撮影仰角（度）	中心距離（mm）	画像上端分解能	画像中央分解能	画像下端分解能
5 階相当	56.49	14392.9	2.00	1.45	1.16
4 階相当	48.56	12006.5	1.53	1.21	1.02
3 階相当	37.05	9957.7	1.17	1.00	0.90
2 階相当	20.68	8494.5	0.93	0.86	0.81

撮影距離（mm）		焦点距離（mm）		目標分解能（mm/px）	
11125.9		105（35mm 換算値）		0.8	
	撮影仰角（度）	中心距離（mm）	画像上端分解能	画像中央分解能	画像下端分解能
5 階相当	47.16	16364.2	1.37	1.18	1.05
4 階相当	38.97	14310.3	1.15	1.03	0.94
3 階相当	28.34	12640.6	0.98	0.91	0.86
2 階相当	15.10	11523.3	0.86	0.83	0.81

撮影距離（mm）		焦点距離（mm）		目標分解能（mm/px）	
12715.3		120（35mm 換算値）		0.8	
	撮影仰角（度）	中心距離（mm）	画像上端分解能	画像中央分解能	画像下端分解能
5 階相当	43.34	17483.7	1.23	1.10	1.00
4 階相当	35.29	15578.2	1.07	0.98	0.92
3 階相当	25.26	14059.8	0.94	0.88	0.85
2 階相当	13.28	13064.4	0.85	0.82	0.81

（7）劣化の定量値算出プログラムの作成

図 4-5 に劣化の定量値算出プログラムのフローを示す。本研究で AI 構築にあたり採用したセマンティックセグメンテーション手法では，画像中の検出対象を種類ごとの整数値データとして分類，出力することができる。計算プログラムではこのデータから各劣化箇所のラベリング処理を行い，各種画像処理の手法[4]を用いて，以下の定量値を算出できる。

・ひび割れ：検出箇所長さ（mm）

・欠損，鉄筋爆裂等：検出箇所面積（mm^2）

また，検出箇所毎にラベリング処理を施しているため，劣化種類ごとの発生数量や定量値の総量も同時に求めることができる。

尚，画像処理段階ではピクセル単位での計算値を得ている状態のため，画像中で寸法が既知である箇所のピクセル数と実寸から変換係数を求め，これを計算値に乗ずることにより，実空間上と同じ単位系における定量値が求められる。

図 4-6 に本プログラムによる定量値の出力例を示す。画像上の検出箇所に各劣化量を表示するとともに，テキスト形式による結果出力も可能である。

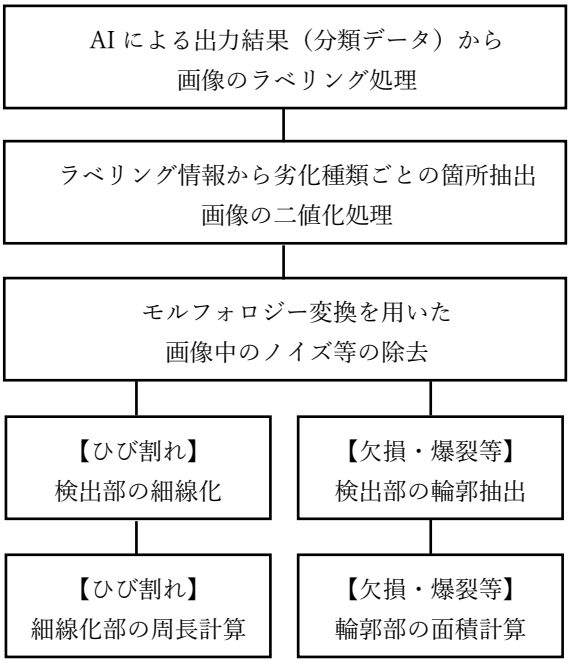


図 4-5　劣化の定量値算出プログラムのフロー

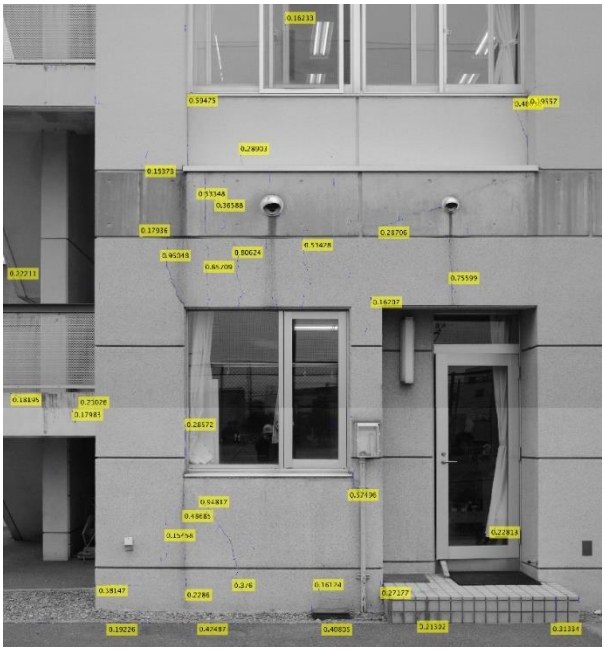


図 4-6　定量値算出プログラムによる出力例

5．実建物を対象とした AI による劣化検出の試行

前章までに示した外壁劣化の検出用 AI および定量値計算プログラムを用いて，実建物を対象とした試行を行った。

（1）対象建物の概要

表 5-1 に対象建物の概要について示す。対象建物は道有の高等学校で，竣工から 24 年（調査時）が経過しており，令和 3 年に改修設計が行われ，令和 4～5 年にかけて改修が実施されている。校舎棟は RC 造 4 階建て，屋内体育館棟は SRC 造 2 階建ての構造，規模の建物である。外装仕上げは主に複層塗材によるマスチック塗装仕上げ，一部吹付塗装が使用されている。

（2）実測調査の概要

表 5-2 に実測調査の概要を示す。調査では，改修設計時の調査図面に基づき，劣化状況の確認および外壁の撮影を実施した。外壁撮影は，前章にて検討した画像分解能を満たす撮影画角を確保し，目視による事前調査が実施されている校舎棟および屋内体育館棟の外壁を対象に実施した。

（3）劣化検出結果の検討

図 5-1 に校舎棟南東の外壁を対象とした，目視調

査と AI による外壁の劣化検出結果を示す。この比較より，目視調査での結果に対し，AI による検出は一部対応が見られるものの，全体的な検出精度は低い結果となった。これは校舎棟外壁の色が関係していると推測され，今後の教師画像データを補強する上での課題である。また，誤検出の回避を目的に教師画像でアノテーションを行った「目地部」「植栽部」についても明確に分類できることが確認できた。

図 5-2 に屋内体育館棟南東の外壁を対象とした，目視調査と AI による外壁の劣化検出結果を示す。両者を比較すると，目視調査の結果で示されている 0.2 mm 幅以上のひび割れについて，AI による検出結果は概ね目視調査の結果と対応することが確認できた。しかしながら，低照度となる日影部や目地内部に発生したひび割れの検出精度は低い結果となった。また，教師画像データセット数がひび割れに比べて少ない，欠損部やはがれ箇所の検出精度も低いことが確認できたため，今後は先述の外壁色への対応と併せ，これら教師画像データの補強が検出精度の向上において必要である。

図 5-3 に，屋内体育館棟南東外壁を対象とした目視調査および AI により検出したひび割れ長さの関係を示す。AI の検出結果は，目視調査の記録と対応する検出箇所について，定量値計算プログラムを用いてひび割れ長さを求めている。遮蔽物等により撮影が困難であった箇所や先述の低照度部での検出精度が低い箇所を除くと，AI により検出したひび割れ長さは，目視調査の結果と概ね対応する結果が得られた。この結果より，AI による検出精度を確保できれば，本研究で作成した定量値計算プログラムを用いて，目視調査と同等程度で劣化箇所の定量値の抽出が可能であることを確認した。

6．まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す。

・塗り仕上げ RC 造建物の外壁劣化（ひび割れ，はく離，鉄筋露出等）の撮影画像を用い，AI の学習を行うための教師画像データセットを作成した。

表 5-1　対象建物の概要

竣工年	平成 10 年（1998 年）
履歴	外部改修なし　災害等の損傷なし
構造	校舎棟：RC 造 4 階 屋内体育館棟：SRC 造 2 階
外壁仕上げ	校舎棟：複層塗材 E（2～4 階） 天然石調塗材吹付（1 階） 屋内体育館棟：複層塗材 E

表 5-2　実測調査時の撮影条件

撮影対象	校舎棟南東外壁 1～3 階（薄赤色） 屋内体育館棟 南東外壁 1 階(白色)
撮影機器	Nikon D7100（デジタル一眼レフ）
使用レンズ	AF-S NIKKOR 18-300 mm
センサ	APS-C（23.5 mm×15.6 mm）
撮影距離	10 m
焦点距離	50 mm
記録サイズ	6,000×4,000 px
画像分解能	0.8～0.96 mm/px
撮影時照度	曇り　校舎棟撮影時：22,000 lx 体育館棟撮影時：26,500 lx

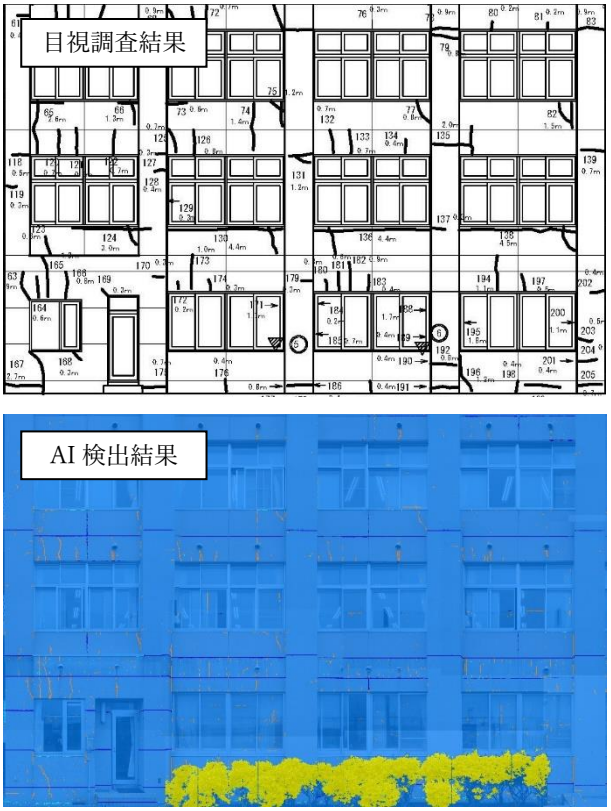


図 5-1　外壁の劣化検出結果（校舎棟南東外壁）

・本研究内で作成した教師画像データセットに，既往研究（R1-R2 経常研究）で作成したデータセット（打放し仕上げのひび割れ）を加えた AI の学習を行い，外装仕上げ種類の違いや各種劣化の検出に対応できる AI の基盤を構築した。
・本手法の適用限界を考慮しつつ，模擬的に劣化を付与したモデル試験体を用いた検討から，AI による劣化検出に必要な画像分解能を定め，これを満足するための撮影条件を示した。
・AI により検出した劣化箇所の定量値（ひび割れ長さ，欠損面積等）を求めるための画像処理プログラムを作成した。
・実建物を対象に AI による外壁劣化の検出を実施し，改修設計時の目視調査結果との比較から，本手法の妥当性と検出上の課題について確認した。
・今後の検出精度向上に向けて，ひび割れ以外の劣化（はく落・鉄筋露出等）の検出や低照度箇所の検出，外壁色への対応に課題があることを明らかにした。

今後は，本研究で構築した AI や画像処理プログラムを基盤技術として活用し，建物の維持管理に必要な外壁の調査･点検への AI の実用化に向けた取り組みを進める予定である。

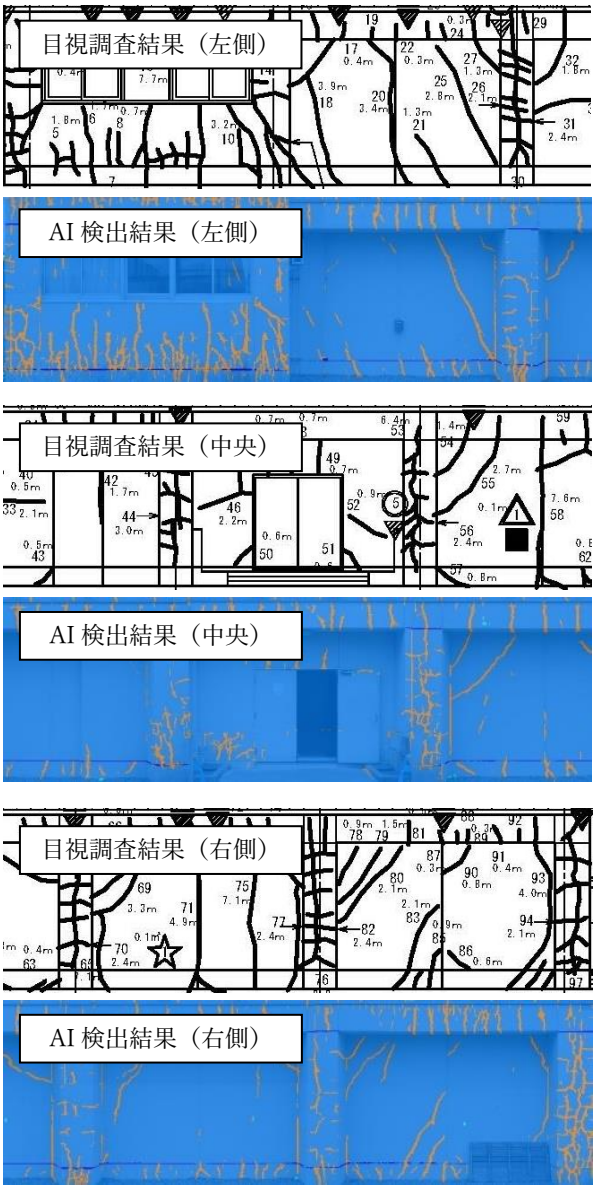


図 5-2　外壁の劣化検出結果（体育館棟南東外壁）

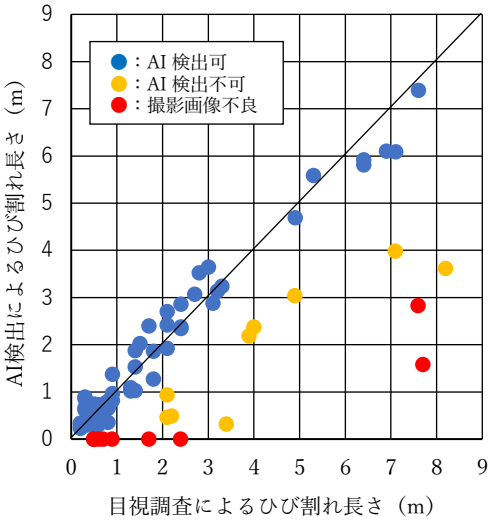


図 5-3　ひび割れ長さの目視検出－AI 検出関係

[参考文献]

1) V. Badrinarayanan, A. Kendall, and R. Cipolla, Segnet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.39, pp.2481-2495, 2017
2) デジタル画像の画素分解能とコンクリートの視認可能なひびわれ幅に関する検証：木本啓介，松田浩，土木構造・材料論文集 第 35 号，2019.12
3) AI と画像解析を用いたコンクリートのひび割れの自動検出・定量評価技術：堀口賢一，本澤昌美，野村価生，計測と制御，第 60 巻，第 11 号，2021.11
4) 新編 画像解析ハンドブック：高木幹雄，下田陽久，財団法人東京大学出版会，2011 年 11 月 30 日（第 3 刷）