

画像認識 AI を活用した現場支援システムの開発

—内装工事進捗と資機材位置を図面上に表示—

中村 良平*¹

Keywords : AI, image recognition, PDR, position estimation, AR marker

AI, 画像認識, PDR, 位置推定, AR マーカ

1. はじめに

2019年に施行された改正労働基準法により、建設業では2024年から時間外労働の上限規制が設けられる。そのため、i-Construction¹⁾に代表されるようなICT活用による業務の効率化・省力化は喫緊の課題である。当社では、映像・IoTデータを活用した現場管理システム「T-iDigital Field」²⁾、Wi-Fi環境とAI・IoTを一体化したDX標準基盤「T-BasisX」³⁾など、ICTを積極的に活用した「スマート」な施工管理への推進を図っている。建設現場の施工管理で特に重要な管理項目として安全、品質、工程が挙げられる。これらの管理項目は基本的に施工管理者が現場を巡回し、目視により確認されることから画像認識との相性が良いと考えられ、とりわけAIへの期待は大きい。施工管理におけるAI画像認識の適用事例として、当社では建設機械オペレータの見守りシステム「T-iSafety Operator」⁴⁾、人体検知システム「T-iFinder」⁵⁾などが挙げられる。また、他社においても工程管理⁶⁾や現場支援⁷⁾を目的としたAI画像認識の活用が試みられており、現場施工管理へのAI活用は今後ますます拡大すると予想される。

施工管理に画像認識技術を活用するにあたっては、まず、その動画の取得方法を検討する必要がある。例えば、土木工事のように開けた場所での工事を捉える場合は定点カメラが最適である。一方、鉛直方向にフロアが並び、壁で空間が仕切られることが一般的な建築工事の場合、定点カメラのみで工事の全体状況を捉えるのは困難であるため、現場内をカメラで撮影しながら巡回することが基本となる。現場巡回は施工管理に欠かせない重要な業務の一つであるものの、特に高層建物などの大規模現場では巡回の上、施工量の多

い内装設備工事の品質確認、進捗記録等に多大な時間と労力を要する。中でも工事の進捗確認はその後の工事計画、工程計画につながる重要な業務である。また、工事に使用する仮設資材や高所作業車などの工事用資機材の多くは元請けが用意し、協力会社に貸し出して工事が行われる。特に大規模現場では資機材が数千点に上ることもあり、現場内に点在する資機材を適切に管理し使用することが円滑な工事進捗と無駄なコストの削減につながる。

以上のような背景から、筆者は現場巡回時に360度カメラで撮影した動画をAIで分析することで、内装工事における壁・天井の施工状況および工事用資機材の所在を自動認識し、図面上に表示するシステムを開発した。本稿では、本システムの概要および現場での試験結果について示す。

2. システム概要

2.1 概要

システムフローを図-1に示す。準備作業としてARマーカと呼ばれる2次元コード(図-2)を現場内に設置し

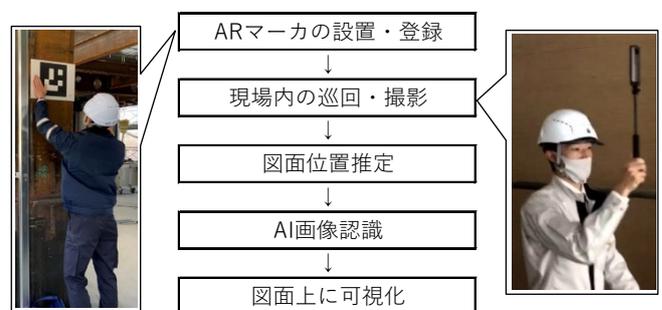


図-1 システムフロー
Fig.1 Flow of this system

*1 技術センター 先進技術開発部 AI連携技術開発室

登録を行った後、360 度カメラでの動画撮影および PDR と呼ばれる技術（詳細を 2.3 に示す）による位置測位を行いながら現場内を巡回する。次に、位置測位結果と巡回中に検出した AR マーカの情報に基づき図面位置（巡回経路）を推定するとともに、撮影動画に対する AI 画像認識を行う。その後、図面位置推定結果と AI 画像認識結果を組み合わせることで内装工事の進捗状況および資機材位置を図面上に表示する。以下に各項目の詳細を示す。

2.2 AR マーカの設置と図面登録

準備作業として、まず、現場内への AR マーカの設置と図面登録を行う。本システムでは後述するように PDR という技術を用いて位置測位を行うが、PDR 単独では図面上の絶対位置を特定することができない、また、蓄積する測位誤差を補正する必要もある。そのため、本システムではこれらを AR マーカにより行う。AR マーカは図-2 に示すように黒枠内の白マス・黒マスの配置パターンにより ID が割り付けられており、本システムで用いる 4×4 の解像度で最大 1000 通り（0～999）の ID が利用可能である。この各 ID に対し、設置した階、平面位置および設置方向を登録する。AR マーカの現場内の設置位置としては工事の進捗による盛り替えが発生しにくいガラス面や建具などの仕上げ部材が運用上最適であり、設置高さは 360 度カメラの撮影高さに合わせる。設置数はフロア規模や間取り、巡回経路に応じて適宜検討するが、ロの字など単純な巡回経路となる場合にはおよそ 50m に 1 枚程度の間隔が目安となる。

工事進捗や資機材位置を表示するための元となる図面は CAD や BIM、画像を用いる。壁・天井工事の進捗表示にはそれぞれ壁ラインおよび天井エリアの情報が必要になるため、CAD や BIM を用いる場合はそれに含まれるデータを活用することができるが、PDF や JPEG のような画像を用いる場合は壁ラインおよび天井エリアを事前に定義しておく必要がある。

2.3 現場内の巡回・撮影

AR マーカの設置・登録後、現場内を巡回・撮影する。現場内の巡回はスマートフォンと 360 度カメラを用いて行う。ここで、通常のカメラを用いることも可能であるが、現場内を漏れなく捉えるためには 360 度カメラが望ましい。スマートフォンには専用のアプリをインストールし、360 度カメラの制御および PDR による位置測位を行う。PDR（Pedestrian Dead Reckoning、歩行者自律航法）は歩行時の加速度および角速度から移動量および移動方向を推定する技術である。具体的に

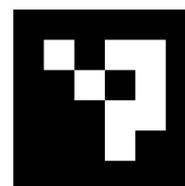


図-2 AR マーカ
Fig.2 AR marker



図-3 360 度画像に対する AR マーカの検出
Fig.3 Detection of AR marker for Equirectangular Projection

は各センサーから得られる 3 軸（X,Y,Z 方向）の値にフィルタをかけることで加速度から歩行距離、角速度から進行方向を推定する。巡回時に 360 度カメラを用いるため、動画の特徴点解析から自己位置を推定する「Visual-SLAM」の適用可能性もあるが、計算負荷が比較的高い、また、暗い場所や仕上げが進んだ場所などでは特徴点が得られにくく正確に位置推定できない可能性があることから、本システムではスマートフォン端末で計算可能で、かつ、周囲の環境の影響を受けない自律測位型の PDR を採用した。加速度と角速度はスマートフォン内蔵のセンサーから取得する。

現場巡回では、まず、AR マーカ設置位置付近を開始地点とし、360 度カメラを AR マーカの設置高さに合わせて撮影を開始する。その後、巡回中に適宜 AR マーカの傍を通過するように留意し、AR マーカ設置位置付近で撮影を終了する。AR マーカの認識可能距離は 360 度カメラでの撮影動画の解像度と AR マーカの印刷サイズによるが、360 度カメラでの 4K 解像度と A4 サイズの紙に印刷した AR マーカ（約 15cm 四方）でおよそ 3m である。以上より、撮影階、撮影開始地点および終了地点の特定を自動で行えるため、アプリ開始、現場巡回、アプリ終了の簡単な操作と行動のみで運用可能であることも本システムの特徴である。

2.4 図面位置推定

現場内の巡回・撮影後、巡回経路を図面位置として推定する。既報⁸⁾では PDR は歩行距離が延びるにつれて誤差が蓄積されることが報告されており、位置測位

誤差の補正が必ず必要となる。そこで、前述したARマーカを用いる。巡回中に撮影した動画からARマーカを検出した例を図-3に示す。360度カメラで撮影した動画は正距円筒図法 (Equirectangular Projection, 以下、360度画像と呼ぶ) と呼ばれ、同図に示すように画像の上下ほど歪んだ形となるが、中央高さ付近は歪みが少ないため、ARマーカの検出が可能である。なお、後述するように360度画像を前後・左右・上下の6面の平面画像へ変換してからARマーカを検出することも可能であるが、各平面画像の境目にARマーカが位置すると検出できない点に注意が必要である。また、建設現場のように雑然とした背景となる場合、ARマーカを設置していない箇所に対し検出されるなどの誤検出が発生しやすいため、例えば中央高さ付近以外での検出結果を排除するなど、検出座標 (コーナー4点のX,Y座標) に応じて適宜フィルタをかける。

ARマーカの検出後、その検出座標に基づいてARマーカ設置位置に対する撮影者の相対位置、すなわち図面上の絶対位置および移動方向を推定する。相対位置

については検出座標から推定できるよう事前に校正を行っておく。また、移動方向 (=カメラ正面方向) についてはARマーカの検出座標と設置方向から推定できるように事前に校正を行っておく。検出した全てのARマーカに対して図面位置と移動方向を推定したうえで、各ARマーカ間の始点と終点を定め、終点と終点における生のPDR測位位置との差分を歩行数に応じて漸減させることでPDRによる位置測位誤差を補正する。

2.5 撮影動画に対するAI画像認識

図面位置推定後、撮影動画に対するAI画像認識を行う。画像認識AIは360度画像に対して学習させることも可能であるが、学習用の画像データを集めやすい、通常のカメラを用いて巡回・撮影した動画にも適用できる点を考慮し、変換後の平面画像に対して学習を行った。撮影動画は一定の時間間隔でフレーム画像を抽出し、その画像を平面画像へ変換する。360度画像から6面の平面画像へ変換した例を図-4に示す。このうち、前後左右の4面の平面画像に対し内装壁および資機材の検出 (YOLO v4⁹⁾)、天頂側の1面の平面画像に対し

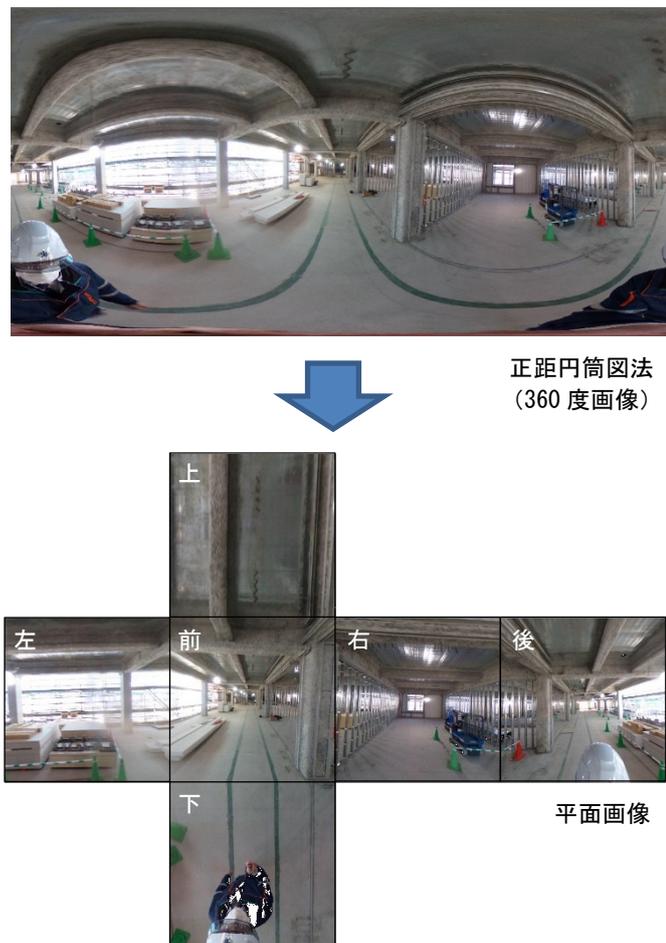


図-4 360度画像から平面画像への変換例

Fig.4 Conversion from Equirectangular Projection to plane image

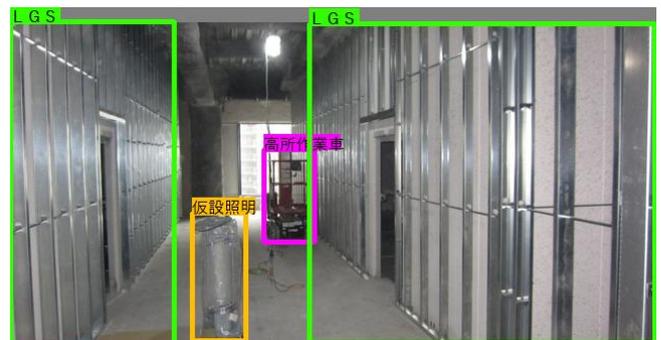


図-5 壁・資機材の検出例

Fig.5 Detection of wall and equipment

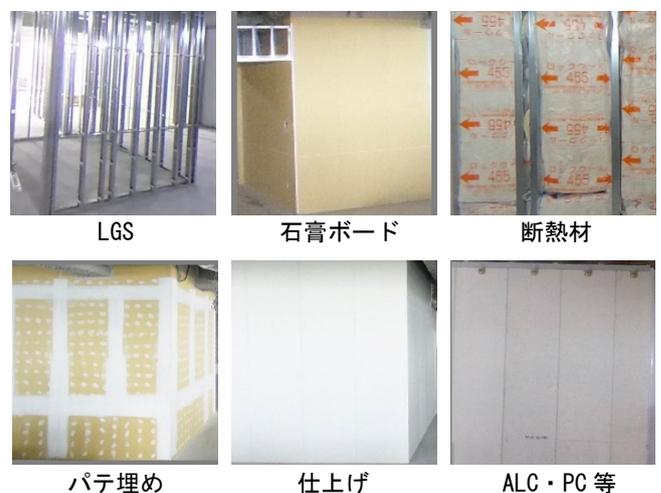


図-6 検出対象の壁工種の画像例

Fig.6 Images of wall class to be detected

3. 現場での試験結果

本章では、本システムを実際の建築現場において試行した結果について示す。なお、現場は平面の長辺方向の長さが約80mの超高層建物である。

3.1 位置測位および補正

PDRによって位置測位を行い、ARマーカによって補正した結果の一例を図-10に示す。ARマーカは東西の外壁のガラス面2カ所とコア部の建具1カ所の計3カ所に設置した。赤の数値は歩数であり、灰色の矢印が補正前、マゼンタ色の矢印が補正後の結果、水色の実線が実際に歩いた経路である。補正前においても一定程度の精度は得られているものの、補正を行うことでより実際の歩行経路に近づいている。しかし、160歩目付近や200歩目付近では実際の歩行経路をやや逸脱して壁や柱の上を通過するような軌跡となっている。資機材の所在確認の場合、数m程度の位置の誤差であっても「何階のこの辺りにある」ことが把握できれば現場支援として十分有効であるが、壁や天井の場合、このように狭い通路での位置の誤差は本来とは別の壁や天井の工事進捗として図面上に反映されてしまうことになる。このため、特に狭い通路には可能な限りARマーカを設置し、適正な歩行経路が得られるように補正させることが望ましいが、運用上、ARマーカの設置数は少ない方が好ましい。簡単かつ正確に位置測位および補正が行える方法について今後、さらなる検討が必要である。なお、次節以降の可視化結果は補正しきれなかった位置の誤差を手動で適宜修正したものとして示す。

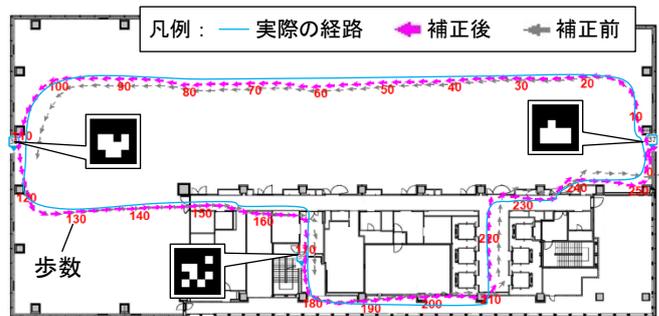


図-10 位置測位および補正結果の一例
Fig.10 Example of PDR and correction result

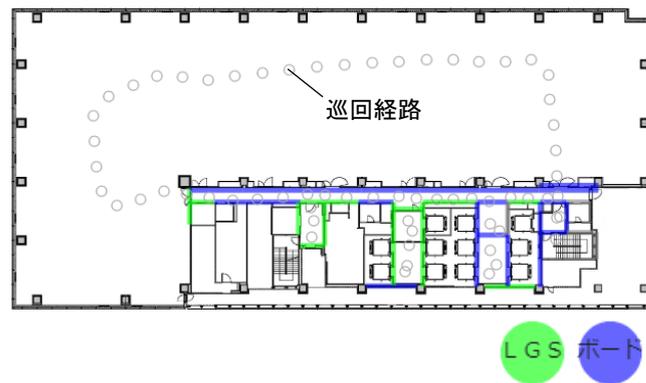


図-11 壁工事進捗の図面反映例
Fig.11 Visualization example of wall construction progress on a drawing

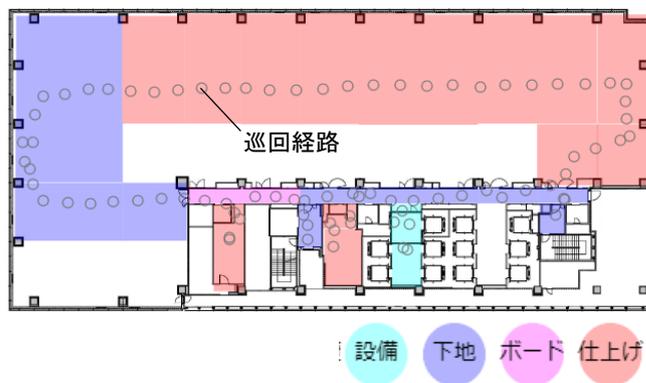


図-12 天井工事進捗の図面反映例
Fig.12 Visualization example of ceiling construction progress on a drawing

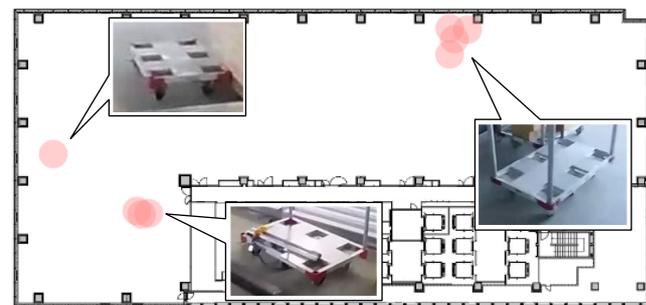


図-13 資機材検索結果の図面反映例
Fig.13 Visualization example of search result for materials and equipment on a drawing

3.2 壁・天井工事進捗の可視化

壁工事進捗の図面反映例を図-11、天井工事進捗の図面反映例を図-12に示す。灰色の○は巡回経路であり、その経路上にある壁・天井の工事進捗状況が色で示される。図-11によると、コア部に集中する壁工事はLGSと石膏ボードが施工されている段階と把握することができる。検出精度については、図-6に示すように形状や模様として特徴のあるLGSや断熱材で70%を超えるAP (Average Precision, 平均適合率) ^{注1)}が得られているが、石膏ボードや仕上げ等は壁の色が重要な判断因子になると考えられるため、現場内の明るさや動画像のノイズによって石膏ボードを仕上げ、あるいは仕上げを石膏ボードと誤って検出するケースがあり、現状は50%程度のAPである。図-12によると、天井工事は下地～仕上げ工事が多くを占めており、工程の終盤であると把握することができる。天井工事の認識精度に

については図-7 に示すように各クラスとも特徴のある画像であるため、現状で 80%近い正解率である。

3.3 資機材位置の可視化

資機材の検出結果のうち、「平台車(未使用)」の結果のみ図面に表示した例を図-13 に示す。このように特定の資機材を検索し、現場内での所在を写真とともに確認することができる。巡回中にカメラで捉えられなかった資機材は図面上に表示することはできないものの、資機材の所在が不明となったときに広大な現場内を闇雲に探し回るのではなく、まず手元の PC やスマートフォンで検索し発見できれば非常に効率的である。なお、動画を一定の時間間隔(図-11, 図-12 の灰色の○で示す位置)で切りだしたフレーム画像から資機材を検出しているため、図-13 ではその場所に資機材が 1 つしかない場合であっても当該地点に複数の検出結果がプロットされている。今後、資機材のトラッキング(追跡)により同一の資機材と判定するなどしてより明瞭な可視化方法を検討していく。資機材の検出精度については、学習用データ枚数が多い高所作業車や平台車などでは 70%を超える AP を得られているが、学習用データ枚数が少ない水中ポンプなどは現状 40%程度であり、mAP^{注2)}は現状 55%程度である。

4. おわりに

本稿では、現場巡回時に 360 度カメラによる動画撮影および PDR による位置測位を行い、AI 画像認識および図面位置推定を行った上で、内装工事における壁・天井の施工状況および工事用資機材の所在を図面上に表示するシステムの概要および現場での試験結果について示した。現状は AI 画像認識、図面位置推定ともに精度改善の余地があるものの、現場内を巡回するだけで内装壁・天井工事の大まかな進捗把握および資機材の検索が可能となる点は現場支援として有用であると考えられる。現在は結果を Web アプリケーション上で確認できる環境を整え、現場で試験運用を行っている。また、撮影動画と図面位置情報が自動で紐づけられるため、内装工事進捗や資機材位置の可視化に限らず、現場状況の画像による記録およびリモート確認の用途としても有用性を確認している。今後は「T-BasisX」³⁾などのプラットフォームとの連携やロボット等による自動巡回の適用可能性の検討を図っていく予定である。

注

注1) AP (Average Precision) : 予測したもののうちの正解の割合 (Precision, 適合率) と、実際の正解に対し正しく予測できた割合 (Recall, 再現率) の 2 つの指標から求められる評価指標。予測が正解か否かは式(1)の IoU によって判定され、本稿では 0.5 を閾値とした。IoU の概念図を図-14 に示す。

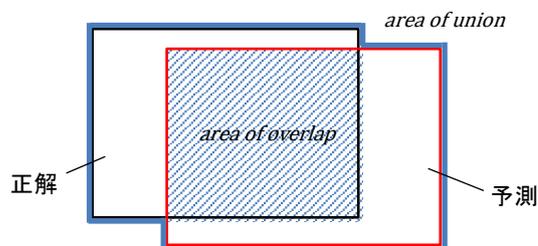


図-14 IoU の概念図
Fig.14 Outline of IoU

$$IoU = \frac{\text{area of overlap}}{\text{area of union}} \quad (1)$$

注2) mAP (mean Average Precision) : 各クラスの AP の平均値であり、物体検出モデルにおいて主に用いられる評価指標

参考文献

- 1) i-Construction : <https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>
- 2) T-iDigital Field : https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2020/200727_4966.html
- 3) T-BasisX : https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210420_8100.html
- 4) T-iSafety Operator : https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210816_8411.html
- 5) T-iFinder : https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2022/220216_8680.html
- 6) 中林拓馬, 鈴木理史, 金子智弥 : 工事写真自動認識システムの開発 その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1303-1304, 2017.
- 7) 掛谷誠, 片村立太, 天沼徹太郎 : 人工知能を活用した現場管理アシストシステムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.867-868, 2020.
- 8) 清水友理 : ハイブリッド型屋内位置測位システムの開発 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 情報システム技術, pp.157-158, 2020.
- 9) Alexey Bochkovskiy et al. : YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection, arXiv:2004.10934, 2020.
- 10) François Chollet : Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions, arXiv:1610.02357, 2016.