# 論文　画像認識 AI および UWB 測位を併用した締固め管理手法の開発

王　涛[*1]・酒井　貴洋[*2]・谷口　修[*2]

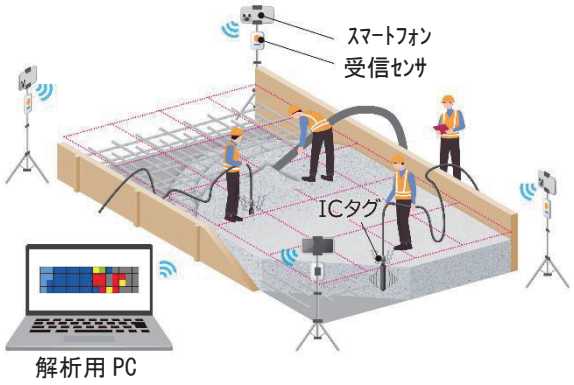
**要旨**：コンクリートの打込みでは目視主体による締固め管理が一般的であるが，打込み区画の締固め状況を目視のみで漏れなく管理することは困難であり，締固めの不十分な箇所が発生した場合，コンクリート自体の品質確保を満足できない恐れがある。このため，定量的かつ省力化を前提とした締固め管理手法の開発が求められており，筆者らは画像認識 AI および UWB 測位に着目して，内部振動機による締固め位置と振動時間を可視化して定量化する管理技術を開発した。本稿では，技術概要を示すとともに，小型スラブおよび道路橋 PCa 床版製作における 2 次元での検証，小型試験体による 3 次元での検証結果と妥当性について述べる。

**キーワード**：締固め，画像認識 AI，3 次元画像復元，UWB 測位，可視化管理

## 1. はじめに

コンクリートの打込みに関して，締固めの良否がコンクリートの品質に及ぼす影響は極めて大きく，締固めの良否がコンクリート構造物の品質を左右するといっても過言ではない。締固めの管理指標として，コンクリート標準示方書（施工編）[1)]では，「内部振動機の挿入間隔 50cm 以下，一箇所当りの振動時間 5～15 秒，挿入深さを下層のコンクリートに 10cm 程度」が示されているが，従事する者の技量等に依存しており，定量的とは言えないのが実情である。また，高齢化や担い手不足等で技量を有する従事者の確保が困難なことも，定量的な締固め管理手法の開発が望まれている理由に挙げられる。このような背景から，個人の経験や技量に依存しない定量的かつ効率的な締固め管理手法の開発が急務である。

最近では，ディープラーニングなどの人工知能（AI）技術が大きく進展し，画像認識 AI や物体検出，画像からの位置推定が幅広く活用され始めている [2)]。人工知能の活用による既往の締固め管理技術 [3)]としては，作業現場に多数 AR マーカの設置と内部振動機のホースにカラーリングを貼付し，AI モデルを用いて AR マーカとの相対位置の検出とカラーリングの色情報分析によって内部振動機振動部の平面位置や挿入深さを推定する手法等が知られている。一方，著者らは，これまでに AI による 3 次元画像復元手法を用いて内部振動機の 3 次元座標を算出する手法を構築してきた [4)]。この手法では，相対座標を算出するための AR マーカ設置が不要であるが，障害物等で振動部が撮影できない場合には，画像が認識できないという問題があった。このため，画像認識 AI による振動部検出が困難な場合には，電波を利用したセンサ測位技術も併用することを考案した。本稿では，この手法の概要を述べるとともに，小型スラブ試験体と道路 PCa 床版製作時における 2 次元管理（平面），および打込み高さを有する小型試験体製作における 3 次元管理（立体）の検証について言及する。本技術は，リアルタイムに締固め位置と振動時間を可視化することで，豆板やコンクリートの未充填箇所など初期欠陥の発生を防止し，コンクリート構造物施工時の品質確保に寄与することを開発目的としている。



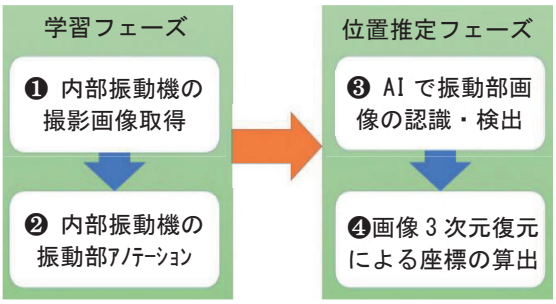

**図－1　開発技術の基本機器構成**

## 2. 締固め管理手法

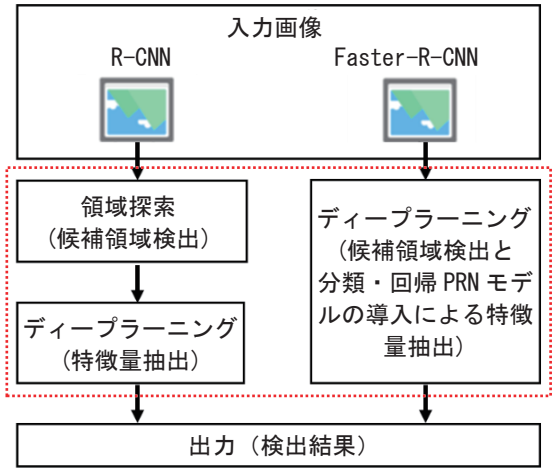
### 2.1　手法の概要

本手法は，画像認識 AI と UWB（Ultra Wide Band）測位 [5)]により内部振動機の振動部を自動で検出し，その位置と振動時間を可視化するものである。その構成は**図－1** に示すように，複数の撮影用スマートフォンおよび受信センサを打込み箇所周辺に設置し，IC タグを内部振動機に設置する。スマートフォンにより撮影した画像を解析用 PC に転送して画像認識 AI により振動部を検出するとともに，三角測量の原理を用いて振動部の 3 次元座標をリアルタイムで算出する。また，障害物等により，振動部を画像から直接検知できない場合は，電波を利用し

*1 五洋建設（株）技術研究所　工修　（正会員）
*2 五洋建設（株）技術研究所　博士（工学）　（正会員）




図－2　振動部画像認識および座標取得の手順




図－3　物体検出手法の比較

た UWB のリアルタイム位置測位技術を併用する。さらに，UWB センサと IC タグ距離およびセンサに対する IC タグ角度（方向）により IC タグの 3 次元座標を計算し振動部のコンクリート挿入も検知する。画像認識 AI による情報と UWB 測位の情報はローカル Wi-Fi を介してリアルタイムに解析用 PC に転送して表示することで，締固め位置と振動時間を可視化する。なお UWB 測位に比べ，画像認識 AI により算出した座標は推定精度が高いため，本手法では画像認識 AI を優先的に採用し，その補完として UWB 測位を用いた。

### 2.2　画像認識 AI の情報

画像認識 AI の情報は，画像認識 AI による振動部の自動認識と画像 3 次元復元による座標の取得で構成される。画像認識 AI の情報を取得する手順を**図－2** に示す。なお，その手順を実施するプロセスは学習フェーズと位置推定フェーズで構成される。

#### (1) アノテーション

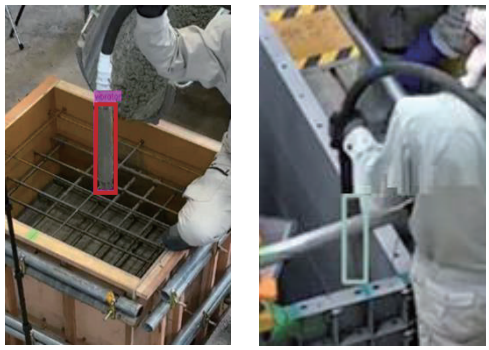
振動部検知モデルを構築するのに必要な内部振動機画像の教師データを得るため，室内の試験環境や作業現場でコンクリート締固め作業から内部振動機の動画を撮影した。その後，様々な作業現場や表面に凹凸がない通常の内部振動機や表面に凹凸があるスパイラル状の内部振動機など異なる内部振動機の状況について撮影した動画を用いて学習を繰り返した。また，動画を撮影・収集

**表－1　振動部検知モデルの認識精度検証結果**

| 物体 | 物体数 | TP*1) | FP*2) | 適合率 | 再現率 | F 値 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 振動部 | 3258 | 2836 | 580 | 0.83 | 0.87 | 0.85 |

*1) TP：物体数の中に振動部の予測が正しい数

*2) FP：物体数の中に振動部と誤って認識した数



図－4　画像認識 AI による振動部の自動検出例

する際には，明るさや天候，背景に様々なバリエーションが得られるように留意した。

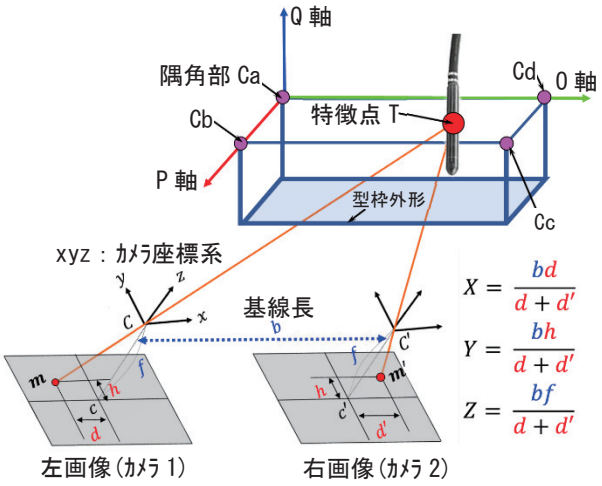
動画データからフレーム画像を抽出して，内部振動機が映る領域について機械学習作業であるアノテーションを実施した。アノテーションでは，フレーム画像上で内部振動機の振動部形状を視覚的に確認しながら，振動部領域を境界ボックス（バウンディングボックス）等で囲み，ラベルを付ける作業を行った。

#### (2) 物体検出手法の選定

アノテーション作業を終えた教師データに対して，既知の物体検出手法により振動部の検知モデルを構築した。既知の物体検出手法は複数あるが，手法選定を行うために，CNN 法（畳み込みニューラルネットワーク）とその改良手法である Faster R-CNN 法の比較を行った。両者の処理フローを**図－3** に示す。赤い線に囲まれた処理過程は，入力した画像から物体の領域候補となる特徴量を抽出し，抽出された特徴量の画像に何が映るのかを分類する。CNN 法は候補領域の全特徴量を抽出するため処理時間がかかることや，メモリを大量に消費することが問題点である。一方，Faster-R-CNN は新たな RPN（Region Proposal Network）モデルを導入することで，候補領域の特徴量の数を柔軟に制御することができるため，物体検出を高速に行うことが可能である。その結果，学習・推論に対し速度向上を期待できる手法として，Faster R-CNN 法を採用することとした。

#### (3) モデルの認識精度の検証

振動部検知モデルの認識精度検証結果を**表－1** に示す。機械学習やパターン認識の分野において，適合率と再現率という二つの評価指標がよく用いられる。この適合率とは，振動部が含まれた画像を正確に予測したときの画




図－5　ステレオビジョンによる座標取得

像から検出した振動部の画像認識率を表している。一方，再現率は正確な振動部であるものを，振動部検知モデルによりどれだけ認識できるのかを表す。つまり，誤検知を評価したい場合は適合率，見逃しを評価したい場合は再現率と理解できる。この中の F 値（0～1 の範囲）とは，適合率と再現率の調和平均になり，本手法の画像認識 AI で用いる振動部検知モデルの F 値は 0.85 である。したがって，画像中の振動部の不正解検知（誤検知と見逃し）のリスクは 0.15（15%）判断できることを示している。画像認識 AI による振動部自動検出の一例を**図－4** に示す。上述の Faster R-CNN を用いることで画像上の振動部の一部が隠れても認識・検出が可能であった。

**（4）画像からの座標取得**

画像から認識した内部振動機の振動部特徴点 T の 3 次元座標取得には，2 つのカメラ間距離と特徴点 T までの距離を繋いで測量する「三角測量の原理」を応用するステレオビジョンを用いた。振動部の 3 次元座標を算出する方法を**図－5** に示す。この時，カメラのパラメータには 2 種類がある。1 つはカメラ自身の特徴を表すもので，画像中心座標 c，レンズ中心座標 C，焦点距離 f などで構成される。他方は 2 台のカメラを使うため，カメラ間の相対的な位置関係（基線長 b）である。また，カメラの左画像上の点 m と右画像上の点 m′ は特徴点 T の同じ位置を示す。これで，2 種類のカメラパラメータと特徴点 T の画像上位置を利用して複数のカメラで振動部を同時撮影し，カメラと振動部を結ぶ直線の交点としての特徴点 T の 3 次元座標（X,Y,Z）を算出する。この特徴点 T の 3 次元座標はカメラ座標系（xyz）における座標である。その後，画像上の型枠上面（正方形）の隅角部 4 点（Ca, Cb, Cc, Cd）を基準点として指定する。カメラ座標系の特徴点 T の 3 次元座標を基準点で構成した面（O 軸と P 軸）とその面から得られた法線（Q 軸）の座標系（仮想型枠空間）に変換される。なお，型枠のパラメータ（長さ，幅，高さ）に基づく 3 次元形状は撮影画像との合成を行い，3 次元仮想空間も画像上に可視化する手法も実装した。

## 2.3　UWB（Ultra Wide Band）測位

**（1）UWB 技術**

本開発で使用した UWB 測位用 IC タグの位置取得周波数は 10Hz である。複数の受信センサからの測定値を相互参照することで IC タグの最終的な位置を決定する。電波を利用した測位技術は多数あるが，UWB 測位は従来の通信規格である Wi-Fi や BLE（Bluetooth Low Energy），RFID と比較し，位置測位の精度と電波干渉に優れる。他方法の精度がメートル単位であるのに対し，通信範囲 30m 以内の UWB 測位精度は約 20cm～50cm である。また，UWB ハイバンド帯使用（7.25～10.25GHz 周波数帯）で，短いパルス波が使われている。このため，マルチパスに強く，障害物の反射による電波干渉は生じにくいというメリットがある。

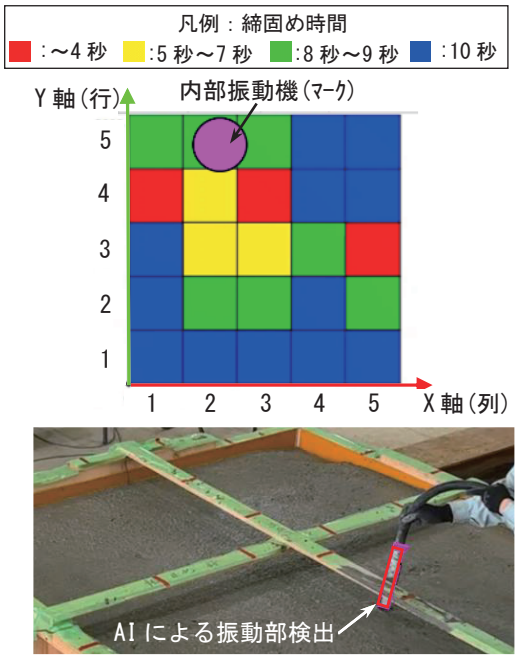
**（2）IC タグの挿入検知**

3 次元締固め管理の場合，内部振動機を型枠内の深い箇所まで挿入するため，画像認識 AI での振動部認識は不可となる。このため，振動部のコンクリートへの挿入検知を行うため，IC タグがコンクリート内では通信不可となる現象を利用し，挿入直前の z 座標を直近のコンクリート打込み高さとして管理する手法を考案した。また，締固め終了時に内部振動機を引き上げることでタグの通信が回復し，この通信途絶となった期間を締固め時間とする。通信途絶による IC タグの挿入検知を行うことで，リアルタイムに打込まれた箇所のコンクリート高さを取得しながら，3 次元の締固め位置・時間の管理を行う。

## 3.　小型コンクリート試験体による検証

### 3.1　画像認識 AI の認識精度

画像認識 AI の手法を確認するため，小型スラブ試験体 200cm（幅）×200cm（奥行）×40cm（高さ）で検証した。 1 層のみのコンクリート打込みで，内部振動機による締固めは 40cm 間隔で行うため，締固め領域を 40×40cm のグリッドで分割した。この検証に解析用 PC1 台，撮影用スマートフォン 3 台の機器を使用した。解析用 PC 上に設定したグリッドを画像に重ね合わせることで締固め位置を確認可能とした。締固め領域および締固め管理の可視化画面を**図－6** に示す。AI による内部振動機の振動部の推定位置（桃色円）は可視化管理画面（**図－6** 上図）において x 軸 2 列目および y 軸 5 行目に対応しており，締固め位置との一致を現場にて確認した。なお，x 軸と y 軸の単位を 40cm 間隔における列数と行数で示す。以降，**図－9,10,12** の x, y 軸の単位も同様である。その振動部の検出例を**図－6** 下図に示す。また，事前に設定した管理画面上の色調（赤：0～4 秒，黄：5～7 秒，緑：




図－6　画像認識 AI による振動部認識・検出例

8～9 秒，青：10 秒）は，同一グリッドにおける締固め時間を示し，締固め時間の増加に伴う色調も赤→黄→緑→青と変化する。以降，**図－7** と**図－9** の締固め時間凡例も同様である。

### 3.2　UWB 測位の精度検証

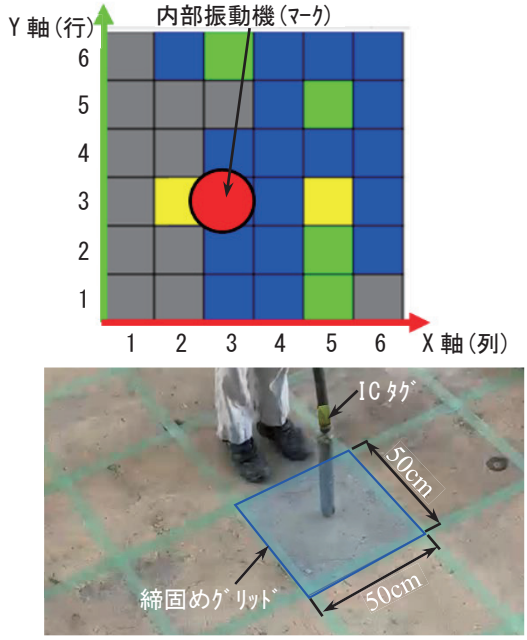
続いて，UWB 測位の精度検証を実施した。コンクリート打込み領域を簡易に模擬するため，室内の土間コン 3m×3m の区画において 50cm×50cm ごとのグリッドを設けた。UWB は画像認識 AI に比べその位置精度が劣るため，内部振動機に設置した UWB の IC タグがこのグリッドで再現可能かを検証した。なお，この検証には UWB 測位用のセンサ 4 個と IC タグ 1 個および解析用 PC1 台を用いた。その結果を**図－7** に示す。空間上の内部振動機の位置（赤線円）は可視化画面（**図－7** 上図）における x 軸 3 列目および y 軸 3 行目に対応したことを確認した。なお，UWB 測位のタグから得られた締固め位置を**図－7** 下図に示す。また，この座標取得の時刻も記録され，これを利用して同一のグリッドに振動部が留まる時間を取得することにより，締固め時間の管理も可能であった。

## 4.　道路 PCa 床版製作による検証

画像認識 AI および UWB 測位技術を併用して，道路 PCa 床版製作での締固め管理の検証を行った。床版締固め管理用のグリッド分割を**図－8** に示す。床版の寸法は約 12m×2m，厚さは約 30cm で，コンクリートの打込みにはホッパを用い，コンクリートの打込み直後に先行 2 名および後追い 2 名の体制で締固め作業を行った。

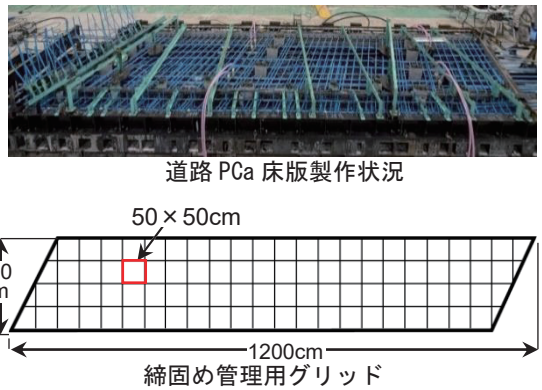
### 4.1　画像認識 AI のみの精度検証

画像認識 AI のみによる振動部検出および取得した座




図－7　UWB 測位による振動部の検出例

標から復元した振動部を可視化した結果を**図－9** に示す。**図－9** 上図の 2 本の振動部は作業時の画像認識 AI による検出例である。この作業箇所は可視化画面（**図－9** 下図）において，グリッドの 4 列 4 行および 7 列 1 行の位置に存在し，双方の位置が一致することを確認した。また締固め時間の算出では，振動部の画像認識 AI の処理が 2fps で行っており，その画像フレームの累積により行った。この方法により，締固め時間とグリッドの色調変化との一致を確認した。

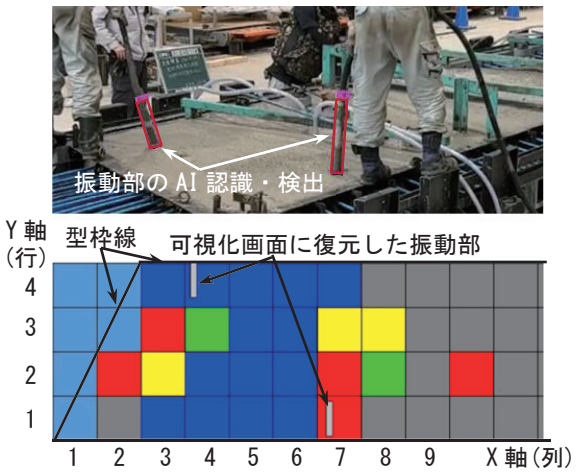



道路 PCa 床版製作状況

図－8　PCa 床版打込み前状況と締固め管理用グリッド

### 4.2　UWB 測位と併用の精度検証

実際の打込みでは従事者やホッパ等の障害物，および型枠の深くまで内部振動機を挿入した際に，画像認識 AI で振動部を直接検知・認識できない場合がある。このため，画像認識 AI による振動部検出が不可の場合，UWB 測位を併用して締固め位置および時間を可視化する。内部振動機の振動部はコンクリートに挿入され，画像認識 AI による振動部検出ができない例を**図－10** 上図に示す。**図－10** 下図において，UWB 測位から得た振動部位置は




図－9　画像認識 AI のみによる位置検出例

8 列 2 行のグリッドに位置しており，IC タグ位置と振動部の挿入箇所が一致であることを確認した。

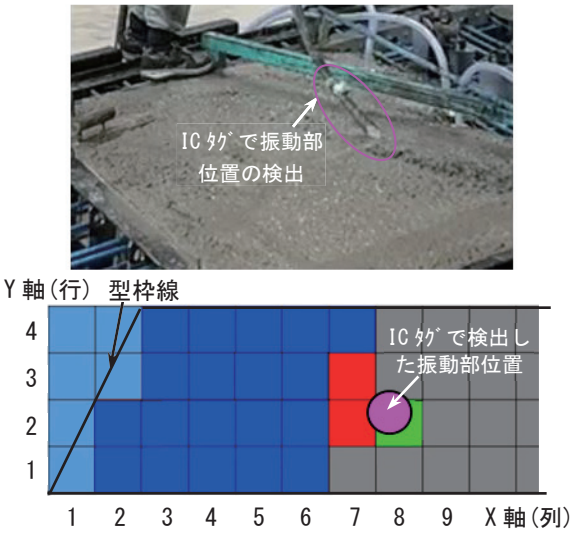
また，図－11 に示すように打設が 1 層のみの場合には振動部 IC タグの z 座標が基準高さを下回った時刻を締固め開始とし，z 座標が基準高さ以上になった時刻で締固め終了とした。つまり，開始時および終了時の時刻差を締固め時間として算出している。これにより，締固め時間は可視化画面のグリッド色調変化(赤→黄→緑→青)と概ね一致することが確認され，締固め管理の認識率は 95%以上を確保した。認識率とは，十分締め固められたことを示す青グリッドの個数と，管理対象の全グリッド個数との比である。なお，振動部が障害物等でうまく撮影できなかった場合や UWB 測位の通信不具合等により，全グリッドの約 5%は位置の取得が困難であった。

### 4.3　可視化結果のリアルタイム性の検証

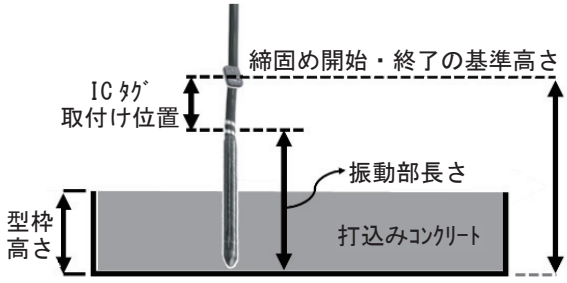
PCa 床版（約 1200cm×200cm）における撮影範囲は大きく，撮影画像の AI 解析処理に時間を要して可視化反映に遅延が生じる恐れがあった。このため，高画質な映像を低遅延で伝送する NDI（Network Device Interface の略）技術の採用および GPU の画像並列処理演算を実施した。その結果，動画伝送の遅延・中断を生じることなく，リアルタイムに管理計算機のモニタ上で締固め作業の進行動画を確認した。また，CPU 環境で 120 枚画像（1 分間）の処理時間は 10 秒ほどを要したが，GPU の場合は 0.5 秒で完了し，約 20 倍の高速化を実現した。なお，3D グラフィックスの計算処理を行うプロセッサである GPU はコアの数が数百～数千個を有するため，10 個コア程度の CPU 単体で処理する場合よりも高速の並列演算を行うことができる。

## 5. 打込み高さを有する小型試験体による検証

複数層にわたる締固め管理では，打ち込んだコンクリートの何層目において締固めを行っているのか，打上り



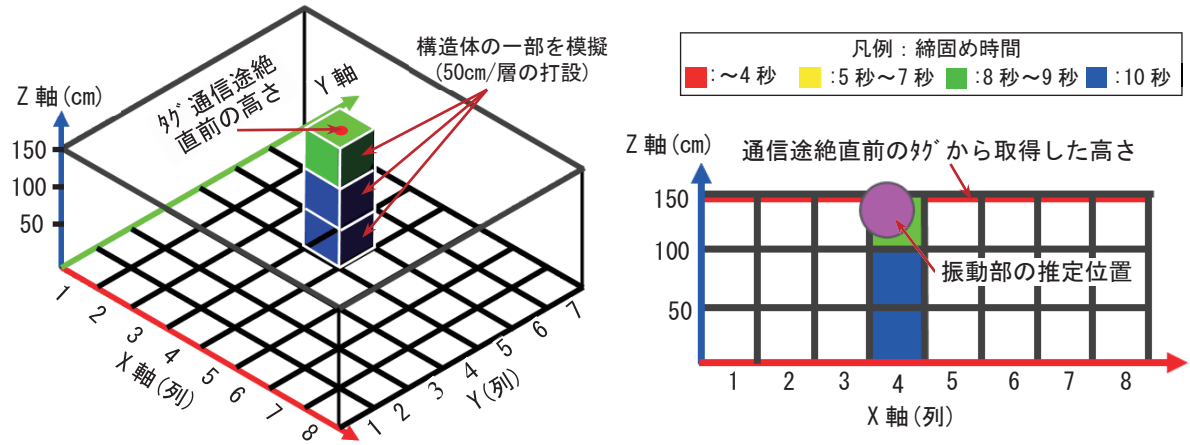

図－10　画像認識 AI と UWB 併用による位置検出例



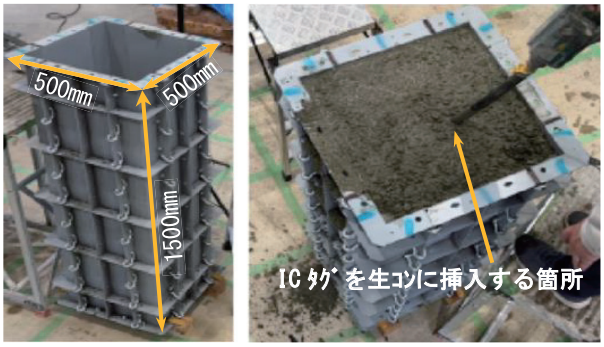

図－11　締固め基準高さの設定

高さと内部振動機との相対的な高さの関係を把握する必要がある。本稿では，締固めを行う際に振動部の付近に取り付けた UWB 測位用 IC タグを振動部とともにコンクリート内に挿入するが，コンクリート内では IC タグの通信は不可となり，IC タグが通信不可となる直前の z 座標を取得する値を打込み高さとすることができる。また，IC タグが通信不可となる直前の時刻を締固め開始の時刻とし，コンクリートから抜かれた IC タグの通信が回復した時刻を締固め終了の時刻とすることもでき，締固め時間はこの開始時刻および終了時刻の差分から求められる。

上記検証のため，UWB 測位の通信が困難と予想される鋼製型枠を用いたコンクリートの打込み高さ検証実験を実施した。実験結果と打設状況を図－12 と図－13 に示す。コンクリートは 3 層による打込みを想定し，内部振動機による締固めを 50cm 毎の高さで行うこととした。UWB 測位では，鋼製型枠の平面位置を決めるため，400cm×350cm の範囲内に 50cm のグリッド分割し，鋼製型枠を x 軸 4 列目および y 軸 5 行目（図－12）に設置した。なお，型枠寸法（図－13）は 50（幅）×50（奥行）×150cm（高さ）である。図－12 の右図にタグ通信途絶直前から取得した高さを赤線で示す。コンクリートの打




図－12　UWB から得た高さ方向の締固め可視化検証結果




図－13　鋼製型枠への打込み

込み高さは赤線と概ね一致しており，この手法により打込み高さを取得可能なことがわかった。また，IC タグの位置は型枠グリッド内に存在したことを確認した。この検証により，タグ通信途絶直前の高さと時刻が取得可能なこと，また，締固め箇所を管理グリッドで可視化可能であることが認められた。

## 6. まとめ

画像認識 AI と画像 3 次元復元および UWB 測位に基づき，内部振動機の締固め位置と締固め時間を可視化する管理システムを構築した。本技術の開発により，以下の結果を得られた。

(1) 画像認識 AI と画像 3 次元復元技術の実装により，締固め作業時の内部振動機の振動部を認識・検出して振動部の空間 3 次元座標を算出することで，締固め位置の可視化を実現した。

(2) UWB 測位技術の導入により，画像認識が不可な場合においても振動部の位置を取得するとともに，IC タグの通信途絶からコンクリートの打込み高さと締固め管理高さの位置を取得可能であった。

(3) 画像認識 AI と UWB 測位の併用により，PCa 床版製作の締固め管理の適用における本システムの締固め認識率は 95%以上を確保した。

(4) 画像 NDI 伝送方法と GPU 分散処理の高速化により，大幅な遅延なく，リアルタイムな締固め管理可視化を実現した。

最後に，本システムは情報化施工管理手法としての有用性を確認した一方で，複数の課題が残った。障害物の位置遮断によっては UWB センサと IC タグとの通信が困難になることや，センサ設置場所が締固め箇所と大きく離れることで，座標の誤差が大きくなることなど，改善策を検討する必要がある。また，コンクリートの締固め深さの推定は単に内部振動機の挿入時間だけで判断するのは難しい部分がある。さらに，コンクリート構造物の過密配筋がある場合，締固め挿入が困難になるという課題が生じる。今後，BIM モデルを活用して，締固め挿入箇所や必要な振動時間を検討する上で，本締固め管理システムとの連携により，構造物の品質向上や施工の効率化を図れることを検討する必要がある。

## 参考文献


1) 土木学会：2023 年制定コンクリート標準示方書[施工編]，pp.22，2023.3

2) Li L. and Wan L.O and Xiao G.W. and Paul F. and Jie C. and Xin W.L. and Matti P.: Deep Learning for Generic Object Detection: A Survey, International Journal of Computer Vision, Vol.1288, pp.261–318, Oct.2019

3) 今井龍一，栗原哲彦，横田哲也：コンクリート打設におけるバイブレータの差し込み深さの計測手法の開発，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.75, No.2，pp.I_12～I_21，2019

4) 王 涛，酒井貴洋：AI 画像認識を活用した締固め可視化管理システムの開発と簡易検証，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演論文集，CS14-01，2024

5) 神谷　泉:測位技術の調査と IC タグ, UWB の測位，国土地理院時報，No.106，pp.31-36，2005