

2 視点映像を用いた建設用コンクリート 3D プリンタの異常検知に関する基礎的研究

ライフサイクル工学分野
山本峻大

建設用 3D プリンタ 異常検知 積層造形
教師なし学習

1. はじめに

近年、建設分野では就業者数の減少や現場作業員の高齢化が進行しており、生産性の向上および省人化を目的とした施工の自動化が強く求められている¹⁾。その中で、建設用コンクリート 3D プリンタ（以下、3DCP）は、施工工程の簡略化や設計自由度の向上といった利点から注目されている。一方で、3DCP は材料特性や施工条件のわずかな変動が積層品質に大きく影響する²⁾ため、施工中の品質を監視し、異常を早期に検知する技術の確立が重要な課題である。

これまで、単一のカメラを用いた異常検知手法が提案されている³⁾が、視点方向に依存した情報の制約により、積層状態を十分に把握できない場合がある。そこで本研究では、3DCP の積層過程を対象として、上面および側面の 2 視点から取得した動画データを用いた異常検知手法を構築し、単一視点との比較を行った。また、明度・コントラスト調整や背景削除といった画像前処理が異常検知性能に与える影響についても検討した。

2. データ取得および画像前処理

2.1 データ取得

図 1 に示すように、カメラは積層体の上面および側面が撮影できるように 3DCP のホッパーおよびノズル部に固定し、ノズルから吐出された直後の積層材料を撮影できるようにした。

撮影条件はどちらも解像度 3840×2160 ピクセルのフレームレート 30 fps である。照明環境は強い影が生じないように撮影面である上面と側面を照らすように照明を設置した。取得した動画データからは、積層中のフレームのみを抽出した。

印刷設定はノズル径 7.5 mm、層高 5 mm で直線状に長さ 300 mm とし、直線状の壁試験体を積層させた。40 層まで繰り返す一方、積層体の倒壊やノズルのつまりによって積層困難となった場合はその時点で積層を終了させた。

本研究では、設計通りの形状を保ちながら安定して積層を完了できる状態を「正常」と定義した。一方で、積層された材料の経時的な変化によって施工可能範囲を超えた結果として生じる積層挙動の不具合を「異常」と定義した。この材料状態を擬似的に再現するため、ここでは粉体に対する水分の比（以下、水分率）基準となる 14.5% から前後 0.5% でを変化させた。具体的には、積層材料の流動性不足によって吐出が断続的になり、材料に途切れが生じる状態を水分率 14% で再現し、流動性の増大によって下層が自重に耐えきれずに潰れが生じる状態を 15% で再現した。

2.2 画像前処理

画像前処理は、3840×2160 ピクセルの画像から関心領域の切り出し、明度・コントラスト調整、背景削除の 3 つを実施した。上面視点における処理前の画像を図 2 に、各処理を施した後の画像を表 1 にまとめた。

関心領域の切り出しは、積層体の画像占有率を高め、ノイズとなる背景を大まかに取り除くために行った。図 2 に上面視点における関心領域の切り出し前後の画像を示す。

明度・コントラスト調整は、輝度のばらつきが異常検知性能に与える影響を検証するために、画像処理なし（Raw）に加えて、「Normalize」「CLAHE」の 2 パターンの画像処理状態を準備した。Normalize とは、画像ごとの明度のばらつきを低減するために、画像全体を目標とする明度に近づける操作である。CLAHE とは、局所的なコントラストを強調しつつ、ノイズの過度な増幅を抑制する操作である。

背景削除は、将来的な処理の完全自動化を見据え、Convolutional Neural Network（以下、CNN）を用いたセグメンテーションによって行った。

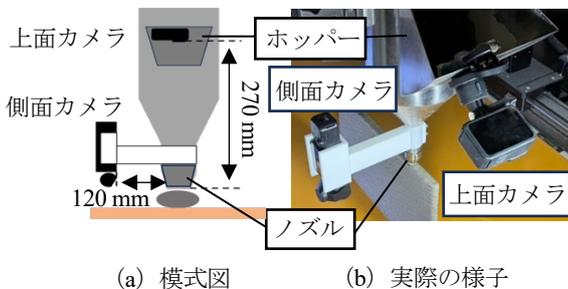


図 1 カメラの位置



図 2 上面視点の切り出し

表 1 上面視点における各画像前処理

| | Raw | Normalize | CLAHE |
|------|-----|-----------|-------|
| 背景あり | | | |
| 背景削除 | | | |

表 2 早期検出層の平均 (層)

| 水分率 15% | 上面 | 側面 | 2 視点 |
|-----------|-------|------|-------|
| Raw | 13.32 | 0.07 | 11.35 |
| Normalize | 12.81 | 検知なし | 12.80 |
| CLAHE | 14.13 | 0.00 | 10.71 |

表 3 正常区間での誤検知率 (%)

| 水分率 15% | 上面 | 側面 | 2 視点 |
|-----------|-------|----|------|
| Raw | 62.7 | 0 | 47.0 |
| Normalize | 100.0 | 0 | 47.1 |
| CLAHE | 57.0 | 0 | 62.3 |

表 4 再構成誤差の時間的推移 (-)

| 水分率 15% | 上面 | 側面 | 2 視点 |
|-----------|---------|---------|----------|
| Raw | 0.00544 | 0.00397 | -0.02847 |
| Normalize | 0.00543 | 0.00404 | -0.02847 |
| CLAHE | 0.00543 | 0.00412 | -0.02843 |

3. 異常検知手法

本研究で構築した異常検知モデルは①CNN を利用して、画像から特徴量を抽出するエンコーダと、抽出された特徴量から元の画像を再構成して出力するデコーダから構成されるニューラルネットワークである自己符号化器と、②時系列データに対して拡張量み込みを用いることで、少ない負荷で長期間の依存関係を学習することができる Temporal Convolutional Network (以下、TCN) を組み合わせた、時系列自己符号化器である。3DCP は時間経過に伴って状態が連続的に変化する動的なプロセスである。そこで、単一の静止画解析にとどまらず、時系列的な特徴を捉えるために TCN を適用した。また、画像サイズは 64×64 ピクセルとした。

この異常検知モデルは、正常状態のみを学習させることで、正常な画像が入力された場合には入力され、異常な画像の復元が十分に行われないことによって、再構成誤差が大きくなるという特性を利用し、異常検知を行った。ここで、学習には水分率 14.5% のデータを 8 つ学習させた。また、異常検知は再構成誤差が事前に決定した閾値を超えた場合を異常として検知した。閾値は学習に用いていない、積層可能層数が 35 層以上だった正常状態のデータを入力時の再構成誤差の平均 (MEAN) および標準偏差 (σ) を用いて式 (1) によって決定した。

$$\text{閾値} = \text{MEAN} + 3\sigma \quad (1)$$

4. 異常検知結果および性能比較

異常検知性能は、①早期検出性能、②正常区間での誤検知率、③再構成誤差の時間的推移の 3 つの指標に基づいて比較した。①早期検出性能とは、異常判定が、実際につまりや倒壊といった異常が発生する何層前で出力されたかを示す指標であり、この値が大きいくほど、異常を早期に予測できていることを示す。②正常区間での誤検知率とは、評価のために「異常の兆候は、実際に異常が発生する 10 層前以降に現れる」と定義した上で、それ以前の区間を正常区間とみなし、その区間において異常と判定された割合を示す指標である。この値が小さいほど、正常状態における誤検知が少なく、安定した検知が行えていることを示す。③再構成誤差の時間的推移とは、出力された再構成誤差が時間経過に対してどのように変化するかを評価するものである。3DCP において、印刷の進行に伴って材料状態の変化や不安定化が徐々に顕在化することが想定されるため、積層の後半と前半の再構成誤差の差が大きいく方が異常発生プロセスを明確に捉えられていることを示す。

早期検出性能の比較では、背景削除の方が優れている傾向を示した。明度・コントラスト調整では一貫した特徴が見られ

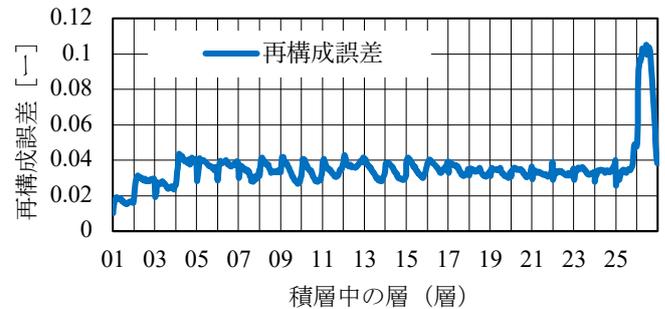


図 4 再構成誤差の時間的推移

なかった。視点構成では上面および 2 視点側面よりも優れている結果を示した。表 2 に背景削除した水分率 15% における早期検出性能を示す。

正常区間での誤検知率の比較では、背景削除の有無および明度コントラスト調整による一貫した特徴が見られなかった。視点構成においては側面および 2 視点側面が上面よりも優れている結果を示した。表 3 に背景削除した水分率 15% における正常区間での誤検知率を示す。

再構成誤差の時間的推移の比較では、背景削除の有無においては大きな差が見られなかった。明度・コントラスト調整においては CLAHE、Normalize、Raw の順番で優れている傾向が見られ、視点構成では側面と 2 視点側面が上面よりも優れている結果を示した。表 4 に背景削除した水分率 15% における異常発生直前の 5 層と、積層開始直後の 5 層の再構成誤差の平均の差を、図 4 に背景削除・CLAHE・背景削除条件下の水分率 15% における再構成誤差の推移を示す。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・ 教師なし学習を用いることで、積層中に異常の兆候を検知することが可能であることが示唆された。
- ・ 背景削除を行うことで、異常検知性能が向上することが示唆された。
- ・ 取得したデータに対して Normalize 処理を行うことで、異常検知が安定する可能性が示唆された。
- ・ 単視点と比較して、2 視点を設けた方が異常検知性能が向上する可能性が示唆された。

[参考文献]

- 1) 国土交通省：令和5年度版国土交通白書，2024
- 2) Buswell, R. A. et. al., *Cem. Con. Res.*, 112, 37-49, 2018
- 3) Kazemian, A. et. al., *Autom. Constr.*, 101, 92-105, 2019