

材料界面における詳細な挙動計測のための コンクリート CT 画像の超解像

尾崎 崇幸¹ 麓 隆行² 波部 齊^{3,4}近畿大学大学院総合理工学研究科¹近畿大学理工学部社会環境工学科²近畿大学情報学部情報学科³近畿大学情報学研究所⁴

1. はじめに

コンクリートは様々な材料を混合して製造されている。混合された材料の種類や比率によって資源の有効利用に貢献できる[1]。しかし、応力や温度などの周辺環境の変化によって、コンクリート内部の各材料の界面に大きな変形差が生じ、強度等の性能低下に繋がる。

そこで、微小粒子を混入したコンクリートの供試体内部の X 線 CT 画像を撮影することで、コンクリート内部の界面を可視化し、界面挙動の計測を行う研究[1, 2]が様々な行われてきた。図1はコンクリートの供試体の撮影の様子であり、また、撮影されたコンクリートの CT 画像と、その一部を拡大させた画像の例を図2に示す。このようにコンクリートの界面の挙動を捉えられるが、解像度の限界により、その詳細を明らかにすることは難しい。

近年の機械学習の発展に伴い、高解像度画像から画素のパターンを学習し、低解像度画像を高解像度化させる超解像技術が確立してきている。この高解像度画像を用いれば、計測精度の向上が期待される。本研究では、超解像により補間された画素値が元々の CT 画像に対して正しく推測できているかを、機械学習を用いない補間法と比較する。一連の評価を行い、超解像手法が有用であるかどうかを検討する。



図1 X線CT装置の供試体の撮影の様子

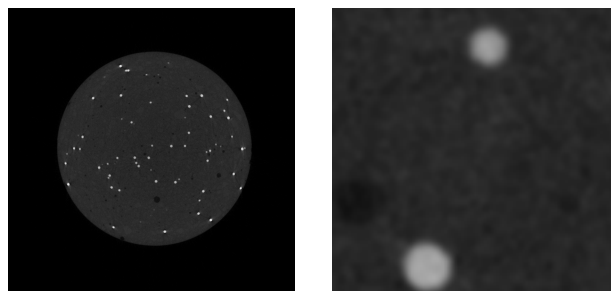


図2 コンクリート CT 画像(左)とその一部拡大(右)

2. 画素の補間

単なる画像処理における補間は、近傍の画素を利用して滑らかになるように拡大画像を生成する手法である。この時、高周波成分の情報は存在しないため、全体的にぼやけた画像になる。超解像技術は高解像度画像から高周波成分を学習し、画素の補間を行う。

本研究では、超解像手法に SRCNN[3]を用いる。SRCNN は入力画像である低解像度画像をバイキュービック補間により出力画像と同じ大きさまで画素数を増加させた画像に対して、3層の畳み込み層により、モデルを学習し、高解像度化を図る手法となっている。活性化関数には ReLU、また、損失関数には平均二乗誤差を利用している。

モデルの学習には、コンクリート CT 画像を訓練用に 1108 枚、検証用に 150 枚用いて、エポック数は 1000 とした。

3. 評価実験

超解像の有用性を検討するため、SRCNN により補間された画像と、バイキュービック法のみを利用し補間された画像とを比較し、評価を行う。元の CT 画像の画素数が縦 1792、横 1792 であり、その画像を縦、横それぞれ 4 分の 1 倍に縮小した画像を作成し、その画像に対して、それぞれの補間法で 4 倍の画素数に補間した画像を生成し、生成画像とする。

3.1. 生成画像に対する評価

生成画像を評価するために、Peak Signal to

Super-resolution of Concrete CT Images for Measuring Detailed Behavior at the Material Interface

†TAKAYUKI OZAKI, Graduate School of Science and Engineering, Kindai University.

‡TAKAYUKI FUMOTO, HITOSHI HABE, Kindai University.

Noise Ratio(以下 PSNR)と、コサイン類似度を利用する。撮影されたコンクリート CT 画像の内、ランダムに10枚抽出し、SRCNNとバイキュービック法により生成画像に対して、PSNRとコサイン類似度の平均値と標準偏差を算出する。

3.2. 微小粒子に対する評価

供試体の中には微小粒子として直径1mmのジルコニア球が混入されており、このジルコニア球の重心を追跡することにより、界面の挙動計測が可能となる。したがって、CT画像において、この白く写っている粒子の円形度が損なわれてしまうと正確な重心予測が行われないため、円形度について評価を行う。円形度は二値化した際の粒子の白色領域と、その円周の長さを利用して算出される。円形度は1に近ければ近いほど円形であることを示しているが、真円に近いかどうかは判定しづらい。そこで、二値化した際の外接矩形のアスペクト比について評価を行う。

また、元画像との重心座標のずれについても評価する。二値化した際に輪郭を抽出し、その後、その輪郭の内側の座標と画素値を利用し、粒子の重心を算出する。その後、元画像との重心の距離を計算する。微小粒子に対する評価の概要について図3に示す。

それぞれ1枚の生成画像に対して、円形度、アスペクト比、重心座標のずれの平均値と標準偏差を算出する。

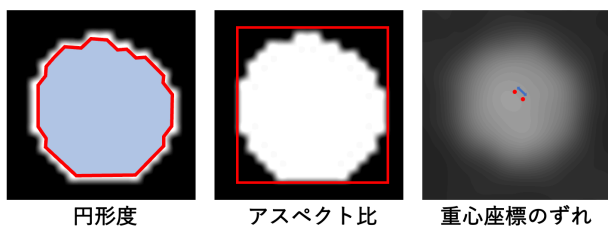


図3 微小粒子に対する評価の概要

4. 実験結果と考察

まず、PSNRを E_{PSNR} 、コサイン類似度を E_{cos} として、生成画像の結果について、表1に示す。なお、小数点第4位以下は切り捨てている。コサイン類似度はあまり差がない結果となったが、PSNRに関してはSRCNNの方が良い結果となった。

表1 生成画像に対する評価結果

	バイキュービック	SRCNN
	平均値(標準偏差)	平均値(標準偏差)
E_{PSNR}	44.937 (0.353)	52.569 (0.0655)
E_{cos}	0.979 (0.006)	0.999 (5.33×10^{-5})

次に粒子の円形度を E_{Cir} 、アスペクト比を E_{As} 、重心座標のずれを E_{Dis} として、微小粒子の結果について表2に示す。表1と同様に、小数点第4位以下は切り捨てている。

表2 微小粒子に対する評価結果

	バイキュービック	SRCNN
	平均値(標準偏差)	平均値(標準偏差)
E_{Cir}	0.857 (0.068)	0.860 (0.052)
E_{As}	0.978 (0.182)	0.994 (0.184)
E_{Dis}	0.090 (0.085)	0.027 (0.029)

円形度、アスペクト比ともにSRCNNの方がバイキュービックに比べて高い数値となったが、元画像の円形度の平均値が0.858、アスペクト比の平均値が0.985であったため、元画像を復元するという目的の本研究においては、一概にSRCNNの方が良いとは言えない結果となった。一方で、重心座標に関してSRCNNの方が誤差は小さいという結果になり、これは円形度、アスペクト比が二値化した結果を利用し、形状を重視しているのに対し、重心座標は画素値を利用しているため、SRCNNの方がうまく画素値を補間していることを表していると考えられる。

5. まとめ

コンクリートX線CT画像に対してSRCNNを用いて高解像度画像を生成し、PSNRや微小粒子の重心座標のずれを算出することで、単純な画像処理であるバイキュービック法よりも高精度に高解像度画像を生成することができた。したがって、コンクリートの界面の挙動をより詳細に捉えることが可能になると考えられる。

本研究の一部は科研費JP23K11158の補助を受けて行った。

参考文献

- [1] 麓 隆行 他, X線CTによる圧縮応力下のコンクリート内部の3次元ひずみ分布計測向上のための基礎研究, 土木学会論文集A2(応用力学), 2020年76巻2号p. I_337-I_346.
- [2] 麓 隆行 他, X線CTを用いた乾燥によるモルタル内部の密度および体積変化分布の評価, 土木学会論文集A2(応用力学), 2021年77巻2号p. I_349-I_358.
- [3] C. Dong et al., "Image super-resolution using deep convolutional networks", IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 38, no. 2, pp. 295-307, Feb. 2016.