SfM を用いた仮想画像生成による 構造物の変位量抽出

1190080 島内 尚之

高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻

近年,コンクリート構造物の点検コストを削減するため,デジタルカメラ画像によるひび割れ幅を計測する研究・開発が行われている.本研究室では,2016年度に本光¹⁾が手持ち撮影による画像から構造物のひび割れを目視で計測し,精度の検証を行った.2017年度に野田²⁾がカメラ位置を固定し,同一平面に投影した画像からコンクリート表面の特徴点の変位量からひび割れ幅の変位量を測定する手法を検証した.本研究では,点群データから仮想的に同一平面画像を生成し,野田²⁾の計測手法を用いて,カメラ撮影場所・種類に依存しないひび割れ幅の変位 抽出を行い,ひび割れ幅との最大残差0.55mm,平均残差0.30mmの精度が得られた.カメラ位置を固定して行った変位抽出と比較すると,カメラ位置を固定しない手法は精度が低いという結果が得られた.精度向上には三次元点群の幾何変換精度向上が必要となる.また,カメラの種類が変わっても,良好な画像が得られれば,同様に仮想画像が 生成できると期待できる.

Key Words: コンクリート構造物, デジタルカメラ, SfM, 仮想画像

1. はじめに

現在日本では,高度経済成長期に造られたコンク リート構造物の老朽化が進み,維持管理の重要性が 高まっている. 近年では, 構造物の点検にかかるコス トを削減するため、デジタルカメラ画像によるひび 割れ幅を計測する研究・開発が行われている.本研究 室では,2016 年度に本光 ¹⁾が, デジタルカメラのドロ ーン搭載を想定し、3m, 5m, 7m の距離からの手持ち撮 影を行い,画像から構造物のひび割れを目視で計測 し,最大誤差 0.04 mm, RMSE0.06 mmの精度を示し た.2017 年度には野田²⁾が,カメラ位置を固定し,同 一平面に投影した画像を用いてひび割れの検出を行 った. コンクリート表面の特徴点の変位量からひび 割れ幅の変位量を測定する手法を提案し,残差0.1mm 未満の精度を示した.しかし,野田 2)の手法では,構 造物の点検の際に,カメラ位置を固定し続ける必要 があり(図-1),ドローン等を用いた点検で,カメラ位 置を固定し続けることは困難である.そこで本研究 の目的は,撮影場所やカメラの種類に依存しないコ ンクリート構造物の変位量抽出手法の構築であ る.SfM(Structure from Motion)は、複数枚の連続す る画像(図-2)からカメラ撮影位置を推定し,三次元 形状を復元することができる要素技術である.SfM計 測を用いて作成した点群データから,同一平面に投 影した画像を仮想的に作成し(以下,仮想画像),野田 ²⁾の手法を用いることで,カメラ位置を固定すること なく,コンクリート表面の変位抽出が可能であると 考える.



図-2 SfM を用いた測定手法

2. 点群データの作成と位置合わせ

2.1 SfM を用いた点群データ作成

本研究では,試験的に作成した鉄筋コンクリート で曲げ試験を行い,コンクリートの変化過程の撮影 を行った.変化前,変化1回目,変化2回目,変化3回 目の計4段階のコンクリートを対象に,SfM計測を用 いて,それぞれの点群データを作成した.点群データ には,点群座標と色情報(RGB)が属性として格納され ている.連続画像の撮影は,約 3m の距離から対象物 の正面を約180°の半円で等間隔に撮影を行った(図 -3).撮影する機材は表-1 を用いて,点群データ作成 には,SfM ソフトウェアの Agisoft Photo Scan Ver.1.4.4(以下,PhotoScan)を使用した. 図-4 に作 成した点群データのサンプルを示す.



図-3 SfM のイメージ



図-4 点群データのサンプル

表-1 使	用機器
--------------	-----

デジタルカメラ	PENTAX KP	
レンズ	18-35mm F1.8 DC HSM	
有効画素数	約2432万画素	
撮像素子	23.5mm×15.6mm	
焦点距離	18mm	
撮影形式	jpeg	

2.2 点群データの位置合わせ

PhotoScan を用いて作成した点群データはそれぞ れ独自の座標系を持つ.同一平面に投影されたデジ タルカメラ画像を生成するためには,それぞれの点 群データの座標系と位置を合わせる必要があるため, 三次元幾何変換を行う必要がある.幾何変換を行う ためにはそれぞれの点群データから同一の基準点を 取得する必要がある.今回使用した幾何変換手法は 三次元アフィン変換(式(a))を用いた.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Tx \\ Ty \\ Tx \end{pmatrix}$$
(a)

x,y,z: 点群座標 x',y',z': 変換後点群座標

 $C_{11} \sim C_{33}$; 変換係数 T_x, T_y, T_z : 原点移動

今回は目視にて各段階の点群データから 6 点の基 準点を取得し, python を用いて, 点群データの幾何変 換を行った. PhotoScan で作成した点群データは独自 の単位を用いているため, ピクセル単位に変換した 値で各段階の基準点の平均二乗残差(RMSE)を求めた (**表-2**). 残差が 1 ピクセル以上となったが, 変位量 の抽出には, さらに幾何変換を適用することとした.

表-2 各基準点の平均二乗誤差

RMSE	Х	Y	Z
変化1回目(px)	3.896	0.590	2.484
変化2回目(px)	2.157	0.314	0.172
変化3回目(px)	1.572	1.078	1.661

3. 仮想画像の生成

3.1 点群データを用いた仮想画像の生成

点群データから画像への投影法には、中心投影を 用いる.式(b)を用いて点群データの座標を地上座標 から画像座標へ変換し、式(c)の共線条件式で、変換 した点群座標と焦点距離の比で画像への投影を行っ た(図-5).

$$\begin{pmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_p - x_0 \\ y_p - y_0 \\ z_p - z_0 \end{pmatrix}$$
(b)

$$\begin{cases} u = -\frac{fl}{w_p} u_p \\ v = -\frac{fl}{w_p} v_p \end{cases}$$
(c)

 $x_0, y_0, z_0:$ カメラ位置座標 $x_p, y_p, z_p: 点群座標$ $u_p, v_p, w_p: 画像座標 <math>a_{11} \sim a_{33}:$ カメラ回転行列 u, v: 投影面の画像座標

fl: 焦点距離

点群データからの属性取得は仮想画像投影面の1 ピクセルごとに,視線方向の最近隣点群を抽出し,点 群の色情報(RGB)をピクセルに格納する.最近隣点群 とは,カメラの撮影位置に最も近いかつ,視線方向に 近い半径5ピクセル以内を探索範囲として抽出した 点群である.この手法によって生成した仮想画像の 精度は,点群密度に依存し,探索範囲内に点群がない 場合は,ピクセルの色情報が欠損した仮想画像(図-6)が生成される.点群の探索範囲を広げた場合は,欠 損したピクセルはなくなるが,同一の点群から色情 報が取得されることになり,低分解能の仮想画像が 生成される.



図-5 点群データから仮想画像生成のイメージ



図-6 点群の RBG を使用して作成した仮想画像

3.2 原画像の参照による仮想画像生成

コンクリート表面のピクセルの色情報が欠損する ことなく,高分解能な仮想画像を生成する方法とし ては,点群データを作成する際に使用した原画像か ら色情報を取得するという手法を用いた(図-7).原 画像は,設定した仮想画像投影面と撮影位置が近い 画像を使用する.3.1と同様に仮想画像投影面の1ピ クセルごとに最近隣点群の抽出を行った.この際,指 定した範囲内に点群が存在しない場合,同様にピク セルの色情報が欠損する.そこで視線方向から半径 15ピクセル以内を探索範囲として最近隣点群を抽出 し,その点群と最も近い視線上での位置を求め,対象 物位置とした.(図-8).算出した対象物位置が対応す る原画像のピクセル位置を算出し,原画像の色情報 を仮想画像の投影面に格納する.原画像から色情報 を取得することにより,コンクリート表面のピクセ ルの欠損がなく,高分解能な仮想画像(図-9)を生成 できる.



図-7 SfM に用いた原画像イメージ



図-8 原画像から色情報取得



図-9 原画像の参照により生成した仮想画像

- 4. 特徴点探索による変位量の抽出
- 4.1 グリッド化を用いたテンプレートの作成と位置 合わせ

コンクリートの変位量は,野田²⁾の手法を使用し て抽出する.図-10のようにコンクリート表面をグリ ッドで区切り,1つのグリッドをテンプレートとし て、テンプレートマッチングで、特徴点探索を行った. 今回は点群データの幾何変換を行った際の誤差があ るので(表-2),生成された仮想画像の位置がずれる. コンクリート表面には不動点がなく、基準点を設定 できないため、最も変位が小さいと考えられるコン クリートの中心部分から、25点を基準点とし、ヘルマ ート変換(式(d))を用いて位置合わせを行った.

$$\begin{cases} u' = au - bv + c\\ v' = bu + av + d \end{cases}$$
(d)

u,v: 画像座標 u',v' 変換後画像座標 a~d: 変換係数 変換前と変換後の平均二乗残差は表-3のようになり,特徴点の変位は図-11のようにった.1ピクセル 程度の残差がなお残るが,変位の影響とみられる.



図-10 グリッド化を用いたテンプレート作成

	変換前		変換後	
RMSE	Х	Y	Х	Y
変化1回目(px)	1.077	1.264	0.176	0.207
変化2回目(px)	1.910	2.889	0.176	0.212
変化3回目(px)	1.077	1.882	0.176	0.912

表-3 基準点の変化量



図-11 特徴点の変位量

4.2 変位量の計算手法と結果

変位量の計算は、ひび割れを挟む特徴点の距離の 変位量から、各段階のひび割れの変位量を算出した. 今回は、赤線部分(図-12)のひび割れ幅をクラックス ケールで計測したため、使用する特徴点の組み合わ せは赤線に最も近い 2 点(図-12)を使用して算出を 行った. コンクリートの作成は 100mm×100mm×400mm の型枠を使用した. そこでコンクリート表面の縦幅 を 100mm と仮定し, 目視で 1mm あたりのピクセル数 を算出した縮尺係数(6.25px/mm)を使用して単位変 換を行った. 結果(**表-4**)はひび割れ幅との最大残差 0.55mm, 平均残差 0.30mm の精度で変位抽出ができた.



図-12 ひび割れを挟んだ二つの特徴点の距離

	変位量(px)	変位量(mm)	ひび割れ幅(mm)	
変化前	0.00	0.00	0.00	
変化1回目	0.80	0.13	0.04	
変化2回目	4.12	0.66	0.40	
変化3回目	8.44	1.35	0.80	

表-4 計算結果

5. 考察

SfM から作成した点群データを用いて仮想画像を 生成した.生成した仮想画像により変位抽出を行う ことで,カメラの撮影場所に依存しないコンクリー ト構造物の変位抽出手法を構築することができた. カメラの種類が変わっても,良好な画像が得られれ ば,同様に仮想画像が生成できると期待できる.しか し,今回提案した手法では,ひび割れ幅との最大残差 が 0.55mm で,カメラ位置を固定した場合での残差 0.1mmという精度には及ばなかったため,変位抽出精 度の向上が必要である.そのためには,点群データの 高精度な幾何変換を行うための基準点の確保が今後 の課題である.

参考文献

- 本光利章: UAV を用いたデジタルカメラ画像によるひ び割れ幅計測手法の構築(2016 年度学士論文)
- 野田靖仁:デジタルカメラ画像を用いたコンクリート 構造物の面的変位状況の把握(2017年度学士論文)
- 3) 高木方隆:国土を測る技術の基礎