



Analisis Deformasi Jembatan Akibat Banjir Bandang Berbasis Fotogrametri Jarak Dekat

Larasaty Ayu Parsamardhani¹ , Martinus Edwin Tjahjadi¹ , Fransisca Dwi Agustina¹ 

¹Program Studi Teknik Geodesi, Institut Teknologi Nasional Malang, Jl. Sigura-gura No.2, Kota Malang 65152, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 November 2021

Accepted: 11 January 2022

Published: 16 January 2022

Keywords:

Bridge; Camera; Close-Range Photogrammetry; Deformation; Flash Flood

Corresponding author:

Larasaty Ayu Parsamardhani

Email: larasatyayu06@gmail.com

Read online:



Scan this QR code with your smart phone or mobile device to read online.

ABSTRACT

Monitoring the deformation of objects in the natural disaster area is one of the anticipative steps to reduce losses. In this case, this is an attempt to implement mitigation for the safety and viability of the community. Until this time, many constraint factors in the process of obtaining information regarding the strength of the structure and the changes of shape and dimension (per time unit) of the objects, one of which is the high operational cost and the duration of data processing while using a conventional measuring instrument. Through this article, a fast, cheap, easy, and accurate alternative method to detect deformation of the bridge material structure due to flash flood is only by using a Digital Single Lens Reflex (DSLR) camera. The bridge's structures were photographed and processed with proprietary software to obtain the retro-reflective coordinate of the target that has been evenly attached to the bridge surface as a reference point. From a series of periodic photoshoots conducted from July 2020 to July 2021, deformation of the bridge structure was successfully detected with a magnitude between 0.026 mm – 5.867 mm with a measurement accuracy level was 0.081 mm. With this measurement accuracy level, this system is able to detect the deformation of structures smaller than 0.1 mm, and even invisible deformation can still be detected. This article will explain the technique and methodology of deformation measurement quickly and accurately only with a DSLR camera.

How to cite: Parsamardhani, L. A., Tjahjadi, M. E., & Agustina, F. D. (2022). Analisis Deformasi Jembatan Akibat Banjir Bandang Berbasis Fotogrametri Jarak Dekat. *Jambura Geoscience Review*, 4(1), 33-47. <https://doi.org/10.34312/jgeosrev.v4i1.12013>

1. PENDAHULUAN

Sebagaimana diketahui bahwa bumi yang kita tempati tidak bersifat statis (tetap atau tidak berubah), namun selalu dinamis (berubah). Seiring berjalannya waktu, dinamika alam menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan yang dapat menjadi bencana jika bersinggungan dengan kehidupan manusia, seperti banjir bandang dan tanah longsor yang melanda Desa Pandansari, Kecamatan Ngantang, Kabupaten Malang pada awal tahun 2021 lalu (BPBD, 2021). Tentunya banyak sekali dampak yang dirasakan oleh masyarakat, mulai dari jatuhnya korban, kerusakan infrastruktur, kerugian harta benda, hingga munculnya berbagai macam penyakit. Kerugian tersebut dapat diminimalkan melalui langkah antisipatif berupa upaya pemantauan deformasi pada objek di daerah bencana seperti Jembatan Pandansari. Jembatan Pandansari merupakan satu-satunya penghubung antar dusun di Desa Pandansari yang memiliki panjang 72 meter. Manfaat dibangunnya jembatan ini yaitu menghilangkan hambatan masyarakat pedesaan untuk mendapatkan akses informasi, pendidikan, pemasaran hasil perkebunan, pertanian, peternakan, pertambangan, dan barang dan jasa. Oleh karena itu, pemantauan deformasi pada

Jembatan Pandansari sangat penting dilakukan sebagai upaya pelaksanaan mitigasi dengan tujuan untuk keselamatan kelangsungan hidup masyarakat.

Beberapa penelitian sebelumnya menggunakan pengukuran sipat datar (Lestari et al., 2018); *Electronic Distance Measurement* (EDM) (Abdillah et al., 2018); *Global Positioning System* (GPS) (Purnomo et al., 2014); *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DINSAR) (Darmawan et al., 2021), dan *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) (Vacca et al., 2016) sebagai metode untuk pemantauan deformasi. Namun, adanya beberapa kendala membuat metode di atas kurang efektif untuk digunakan, diantaranya biaya operasional yang cukup tinggi dan lamanya proses pengolahan data, terutama pada survei terestris. Selain itu, terkadang daerah topografi di sekitar area pengukuran tidak memungkinkan untuk didirikan alat, sehingga pengukuran tidak bisa dilakukan, dan juga persoalan deformasi yang ditemukan yaitu objek jembatan yang bentuk dan dimensinya tidak begitu besar sehingga metode *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DINSAR) tidak dapat diterapkan.

Pemanfaatan kamera DSLR merupakan solusi yang tepat untuk meminimalisir kendala tersebut. Dengan prinsip fotogrametri, kamera DSLR dapat mengukur objek dari berbagai sudut pemotretan dengan mudah dan cepat tanpa memerlukan kontak langsung dengan objek yang diukur (Jiang et al., 2008), menghasilkan visualisasi digital yang berisi informasi lokal secara teliti (Jiang, 2005), dan dengan perangkat lunak tertentu, nilai koordinat titik-titik deformasi yang diamati dapat dihitung untuk analisis lebih lanjut (Taşçı, 2013). Lebih dari itu, harga kamera DSLR ini relatif lebih terjangkau dibandingkan dengan alat pengukuran lainnya dan sinar yang ditangkap oleh lensa kamera adalah gelombang cahaya sehingga tingkat keakuratan koordinat yang diperoleh tidak terpengaruh oleh kondisi sekitar.

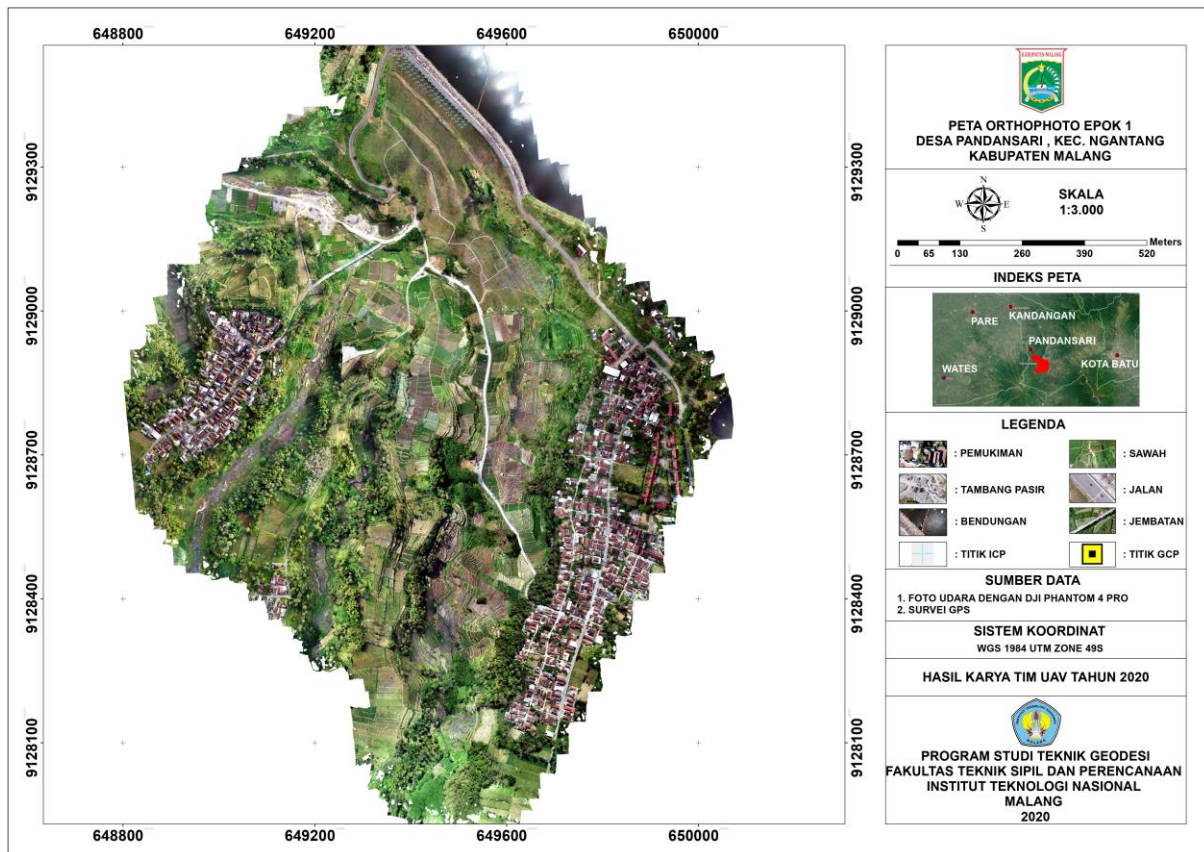
Berdasarkan uraian tersebut, kamera DSLR memiliki potensi yang besar untuk memberikan cara yang efektif dan efisien dalam proses analisa deformasi jembatan akibat banjir bandang, dalam hal ini memverifikasi bahwa deformasi yang terjadi masih berada dalam batas yang diharapkan atau untuk menilai apakah ada pemeliharaan lebih lanjut yang diperlukan pada jembatan tersebut setelah terjadinya bencana. Penelitian ini menjelaskan teknik monitoring deformasi jembatan dengan menggunakan kamera DSLR untuk memantau pergeseran posisi struktur jembatan hingga mencapai ketelitian fraksi milimeter.

2. METODE

Lokasi jembatan berada di Kawasan Bendungan Selorejo, tepatnya di Desa Pandansari, Kecamatan Ngantang, Kabupaten Malang pada koordinat geografis 7°52'47.89"LS - 112°21'32.42"BT yang merupakan wilayah terjadinya banjir bandang awal tahun 2021 lalu. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Penelitian ini menerapkan metode fotogrametri jarak dekat sebagai metode alternatif untuk melakukan analisis deformasi pada Jembatan Pandansari dengan memanfaatkan teknologi kamera DSLR. Pengamatan terhadap perubahan koordinat objek dilakukan dengan menggunakan dua data pengukuran pada waktu yang berbeda, yaitu menggunakan 3 epok data pemotretan sebelum terjadinya banjir bandang yang diambil pada Bulan Juli, Agustus, dan September 2020 dan 3 epok data pemotretan pasca terjadinya banjir bandang yang diambil pada Bulan Juli, Agustus, dan September 2021. Berikut adalah alur pemantauan deformasi dengan menggunakan teknik fotogrametri jarak dekat.

2.1. Perencanaan Jaringan dan Pemotretan

Tahapan pertama dalam penelitian ini adalah membuat suatu jaring pengukuran yang diwujudkan dengan titik yang tersebar di sekitar objek pengukuran. Mengingat semua posisi titik di atas permukaan bumi mengalami pergeseran, maka semua titik diasumsikan mengalami deformasi, sehingga tidak memiliki datum referensi yang stabil (*free network adjustment*). Titik-titik pantau deformasi sebanyak 555 titik didistribusikan secara merata pada jembatan dengan jarak yang sama untuk meningkatkan keakuratan hasil dari proses analisis nantinya. Titik-titik pantau dipotret menggunakan Kamera Nikon D5200 dengan panjang fokus 35 mm dan dilakukan sesuai *Standard Operating Procedure* (SOP) pemotretan deformasi yang dibuat berdasarkan kaidah-kaidah fotogrametri. Diantaranya mencakup sensitivitas (ketelitian) sistem pengukuran dan pola pemotretan.



Gambar 1. Peta *orthophoto* lokasi penelitian

Sensitivitas (ketelitian) sistem pengukuran sangat berpengaruh untuk mendeteksi besaran deformasi minimum. Indikator ketelitian sistem dirumuskan sebagai berikut (Fraser, 2017).

$$\bar{\sigma}_c = \frac{q}{\sqrt{k}} S\sigma \quad (1)$$

dimana: $\bar{\sigma}_c$ adalah ketelitian (RMS) dari besaran pergeseran yang ingin diamati; S adalah faktor skala pemotretan yaitu perbandingan antara jarak pemotretan dengan panjang fokus kamera pada saat pemotretan; k adalah banyaknya pemotretan untuk setiap posisi kamera; σ adalah ketelitian pengukuran koordinat foto untuk titik-titik yang akan diukur posisinya; dan q merupakan konstanta yang umumnya bernilai 0.7 (Fraser, 2017) untuk pola pemotretan konvergen.

Dari Persamaan 1 dapat dilihat bahwa semakin kecil besaran minimum pergeseran yang ingin diamati maka jumlah pemotretan harus semakin banyak, jarak pemotretan harus semakin dekat, dan ketelitian pengukuran koordinat foto harus seteliti mungkin. Jiang et al., (2008) menemukan bahwa pola pemotretan konvergen atau mengerucut ke arah objek yang dipotret dapat menghasilkan akurasi koordinat yang lebih baik (Jiang et al., 2008). Gambar 2 menampilkan pola pemotretan konvergen pada objek jembatan.

2.2. Pengukuran Koordinat Foto

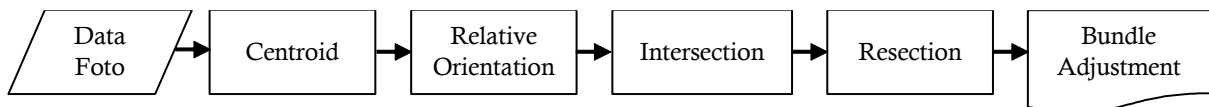
Untuk mendapatkan ketelitian pengukuran koordinat foto yang optimum, pada titik-titik objek yang akan diamati diberi tanda dengan suatu stiker yang memiliki daya pantul tinggi. Gambar 3 memperlihatkan sebaran titik-titik objek yang telah ditandai dengan stiker untuk diamati pergeserannya. Dengan daya pantulnya yang tinggi, kekontrasan stiker-stiker ini menjadi lebih dominan pada foto yang terekam ketimbang objek-objek lainnya. Gambar lingkaran putih dengan hitam merupakan fitur yang paling kontras yang terekam pada foto. Sehingga titik tengah lingkaran putih tersebut dapat dijadikan titik amat untuk pergerakan deformasi. Titik tengah lingkaran putih pada stiker ini dapat diekstrak koordinat fotonya dengan metode *centroid* (Shortis et al., 1995).



Gambar 2. Pola pemotretan konvergen pada objek jembatan



Gambar 3. Titik-titik pantau deformasi pada objek jembatan



Gambar 4. Diagram alir restitusi koordinat

2.3. Restitusi Koordinat Fotogrametri

Koordinat sistem kartesian 3 dimensi (X, Y, Z) pada datum lokal merupakan nilai utama yang dihasilkan pada sistem ini. Tahapan-tahapan penting dalam proses pengolahan data foto untuk mendapatkan koordinat 3 dimensi dapat dilihat pada Gambar 4. Adapun keterangan bagan diagram alir dijelaskan sebagai berikut:

2.3.1. Pengukuran *Centroid*

Pengukuran *centroid* dilakukan untuk masing-masing titik lingkaran putih retro target pada setiap foto dalam sistem kartesian 2 dimensi (x, y). Konversi koordinat piksel ke koordinat foto dengan persamaan sebagai berikut (Cooper & Robson, 2017).

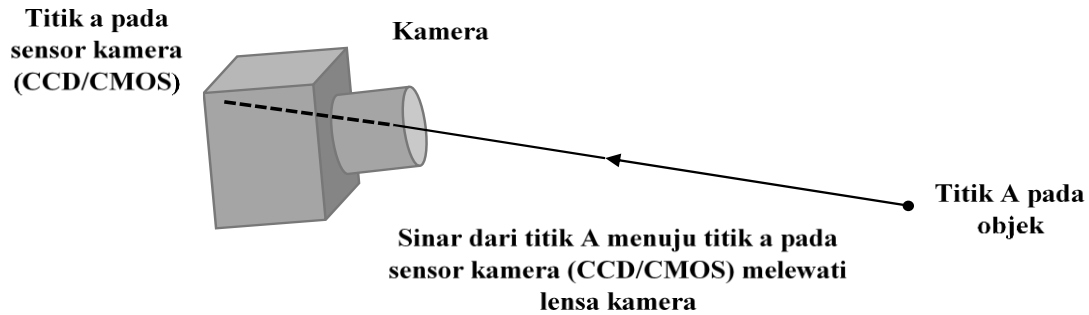
$$x = (x' - x'_c) \cdot x_{\text{PixelSize}} \quad (2)$$

$$y = (y' - y'_c) \cdot y_{\text{PixelSize}} \quad (3)$$

keterangan:

$$x'_c = \left(\frac{nx'}{2}\right) - 0,5 \quad (4)$$

$$y'_c = \left(\frac{ny'}{2}\right) - 0,5 \quad (5)$$



Gambar 5. Kondisi ideal dimana stasiun pemotretan foto, titik objek, dan gambar foto terletak pada satu garis lurus (Cooper & Robson, 2017)

dimana: x, y adalah koordinat foto; x', y' adalah koordinat piksel; x'_c, y'_c adalah koordinat *principle point*; $x_{\text{PixelSize}}, y_{\text{PixelSize}}$ adalah ukuran satu piksel; dan nx', ny' adalah resolusi foto dalam piksel.

Titik tengah yang diukur pada foto adalah posisi jatuhnya berkas sinar pada bidang sensor (CCD atau CMOS) yang dipantulkan dari objek, seperti diilustrasikan pada Gambar 5. Kondisi ideal seperti pada Gambar 5 berkas sinar terlihat berupa garis lurus. Tetapi pada kenyataannya, berkas sinar tersebut telah mengalami distorsi yang disebabkan oleh kesalahan geometrik yang ditunjukkan dari susunan lensa yang tidak sempurna atau ketidakstabilan posisi bidang sensor dalam badan kamera yang berguna untuk merekam bayangan objek. Karena kesalahan sistematis inilah kamera digital DSLR digolongkan sebagai kamera non metrik (Luhmann et al., 2006). Oleh karena itu pengamatan koordinat foto adalah proses stokastik, dimana informasi ini akan digunakan untuk memodelkan berkar-berkas sinar yang diamati. Dengan kata lain, pengamatan satu berkas sinar dilakukan dengan cara mengukur koordinat sebuah titik, dalam hal ini adalah titik pusat retro target pada foto.

Persamaan garis lurus untuk setiap titik pada foto seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5 menunjukkan kondisi kolinieritas, dua persamaan untuk koordinat foto x, y (Wolf & Dewitt, 2014).

$$x - x_0 + \Delta_x + c \frac{r_{11}(X-X_C) + r_{12}(Y-Y_C) + r_{13}(Z-Z_C)}{r_{31}(X-X_C) + r_{32}(Y-Y_C) + r_{33}(Z-Z_C)} = 0 \quad (6)$$

$$y - y_0 + \Delta_y + c \frac{r_{21}(X-X_C) + r_{22}(Y-Y_C) + r_{23}(Z-Z_C)}{r_{31}(X-X_C) + r_{32}(Y-Y_C) + r_{33}(Z-Z_C)} = 0 \quad (7)$$

dimana: x, y adalah koordinat foto; x_0, y_0 adalah koordinat *principal point*; Δ_x dan Δ_y adalah model kesalahan sistematis; c adalah panjang fokus kamera; r_{ij} merupakan elemen dari matriks rotasi; X, Y, Z adalah koordinat 3 dimensi titik-titik objek; dan X_C, Y_C, Z_C adalah koordinat 3 dimensi kamera pada saat pemotretan.

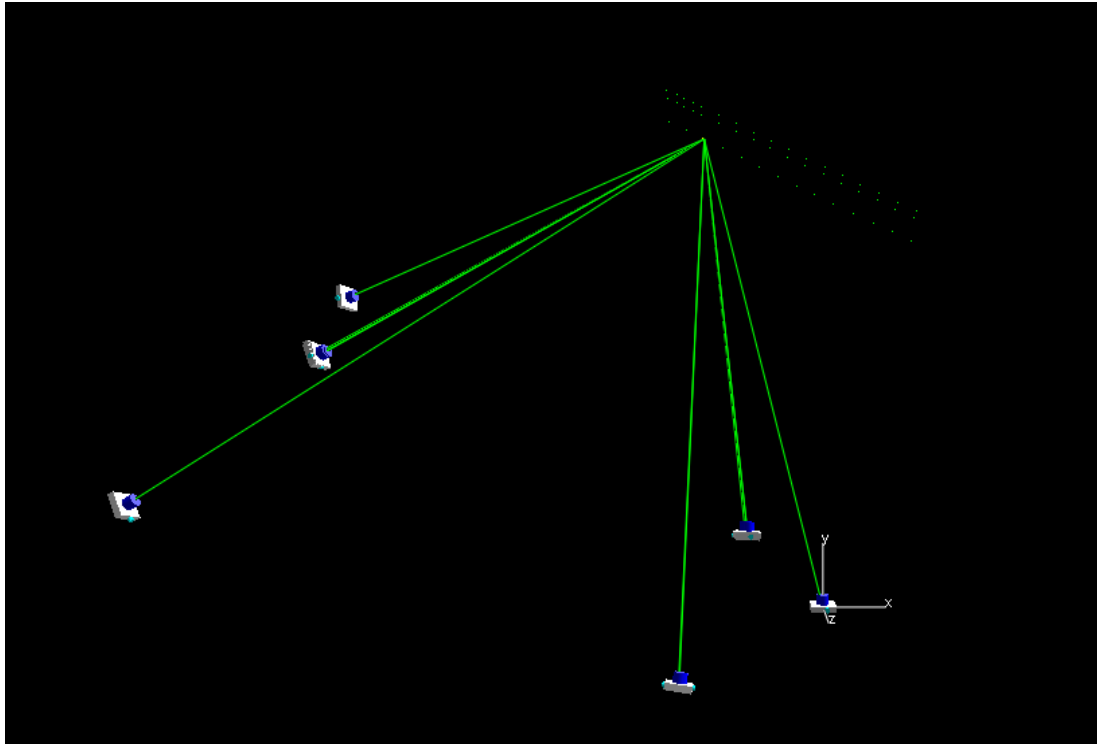
2.3.2. Relative Orientation

Karena koordinat titik objek (X, Y, Z) adalah informasi yang akan dicari nilainya, sedangkan satu-satunya informasi awal yang diketahui adalah koordinat titik pada foto, maka Persamaan 6 dan Persamaan 7 dapat diselesaikan dengan metode hitung kuadrat terkecil. Proses perhitungan ini membutuhkan nilai pendekatan awal agar proses iterasi dapat konvergen secara cepat. Nilai ini ditentukan menggunakan teknik yang digunakan oleh (Zeng & Wang, 1992). Nilai pendekatan awal juga digunakan untuk mengatur orientasi jaringan pemotretan (Fraser, 2006).

Pengorientasian jaringan dilakukan dengan melibatkan dua buah foto. Metode orientasi yang digunakan "*dependent relative orientation*". Langkah ini dilakukan untuk mendapatkan parameter orientasi luar (*Exterior Orientation* atau EO) kedua foto ini tanpa pengukuran koordinat titik-titik objek pengamatan. Dengan kata lain, parameter EO dihitung hanya berdasarkan hasil pengukuran koordinat foto (Fraser, 2006).

2.3.3. Intersection

Setelah parameter EO ditentukan, proses selanjutnya adalah perhitungan untuk mendapatkan nilai koordinat 3 dimensi pendekatan untuk titik-titik objek yang diamati. Dalam fotogrametri



Gambar 6. Ilustrasi proses *intersection* untuk mencari koordinat objek suatu titik dari enam buah stasiun kamera (foto) yang diketahui posisi dan orientasinya di dalam sistem kartesian 3 dimensi (Wolf & Dewitt, 2014).

proses ini dikenal sebagai metode *intersection* (Wolf & Dewitt, 2014). Prinsipnya, jika dua buah foto atau lebih diketahui posisi dan orientasinya dalam sistem kartesian 3 dimensi (X_C, Y_C, Z_C), maka titik objek yang terlihat dari dua foto atau lebih tersebut dapat ditentukan nilai koordinat objeknya. Orientasi foto biasanya dinyatakan dalam sudut ω, φ, κ untuk masing-masing salib sumbu sistem kartesiannya. Proses *intersection* diilustrasikan pada Gambar 6. Pada gambar ini, jika posisi dan orientasi dua buah foto atau lebih dapat diketahui, maka koordinat titik objek yang dipotret dapat dihitung.

2.3.4. Resection

Kemudian untuk mencari nilai pendekatan parameter EO untuk foto-foto lainnya, digunakan teknik *Resection* (Wolf & Dewitt, 2014). Pada prinsipnya, jika terdapat titik-titik objek yang diketahui koordinatnya dan terekam pada foto, maka posisi dan orientasi foto dalam sistem kartesian 3D dapat ditentukan. Teknik komputasi metode *resection* ini dapat dijumpai pada (Mikhail et al., 2001; Wolf & Dewitt, 2014). Langkah selanjutnya adalah memodelkan ulang seluruh berkas sinar yang terlibat dengan menggunakan teknik hitung perataan kuadrat terkecil. Pemodelan ini dinamakan teknik *Bundle Adjustment* (Mikhail et al., 2001; Wolf & Dewitt, 2014).

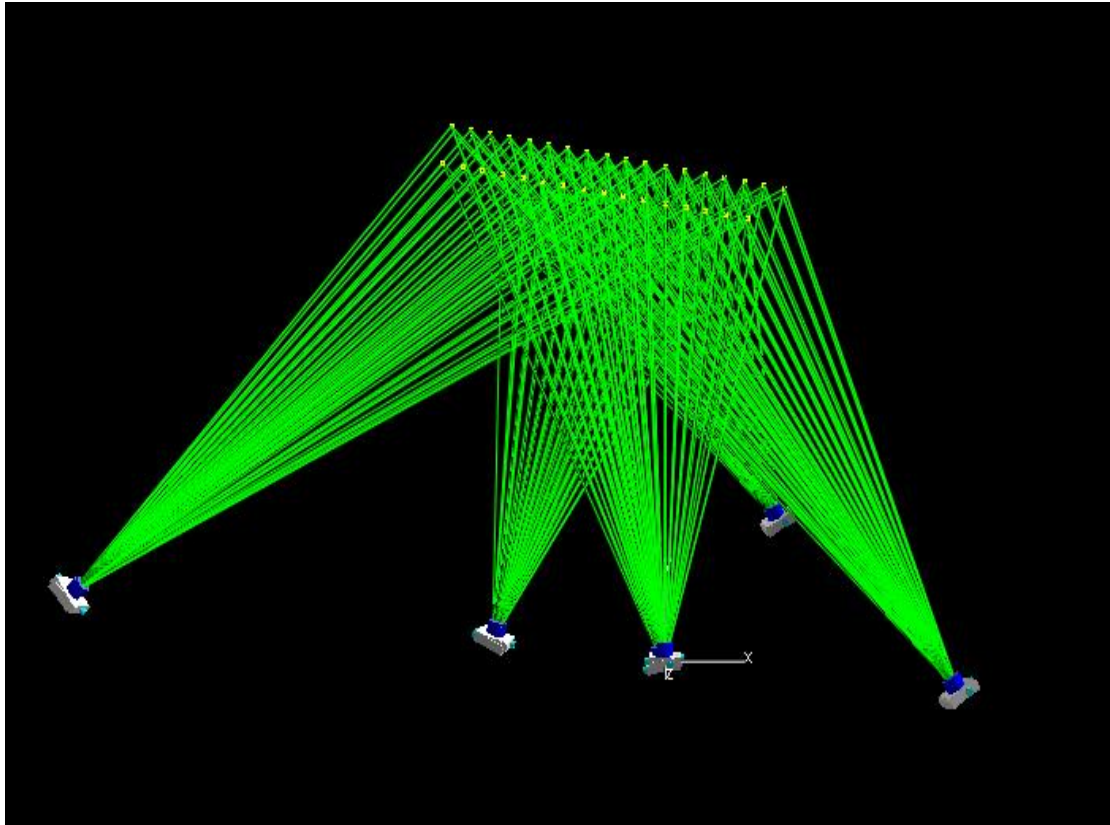
2.3.5. Bundle Adjustment

Persamaan linier hasil linierisasi Persamaan 6 dan Persamaan 7, dengan deret *Taylor* adalah:

$$v = A_1 \delta_1 + A_2 \delta_2 + A_3 \delta_3 + w \quad (8)$$

$(2mn, 1) \quad (2mn, 6m)(6m, 1) \quad (2mn, 3n) \quad (3n, 1) \quad (2mn, p) \quad (p, 1) \quad (2mn, 1)$

dimana: m adalah banyak foto dan n adalah banyak titik objek yang diamati, masing-masing adalah besar dimensi matriks baris dan kolom. Vektor v adalah nilai residu pengukuran koordinat foto; matriks A_1 adalah parameter EO; matriks A_2 adalah turunan terhadap titik-titik objek; matriks A_3 adalah turunan terhadap parameter kesalahan sistematis kamera; vektor $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ berisi nilai koreksi parameter orientasi luar, titik objek yang diamati, dan kesalahan sistematis kamera; dan vektor w adalah selisih antara nilai pengukuran dengan nilai terkoreksi dari Persamaan 6 dan Persamaan 7.



Gambar 7. Ilustrasi proses *bundle adjustment* (Wolf & Dewitt, 2014)

Proses hitungan perataan seluruh berkas sinar ini, yaitu Persamaan 8 diilustrasikan pada Gambar 7 dan proses pengulangan kembali atau iterasi dapat berhenti apabila nilai residu sudah sesuai atau telah mencapai minimum. Seperti yang terlihat pada Gambar 7, proses hitung perataan seluruh berkas sinar yang terlibat dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Helmert Blocking* (Brown, 1974) dan persamaan normalnya dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} A_1^T P A_1 & A_1^T P A_2 \\ A_2^T P A_1 & A_2^T P A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1^T P w \\ A_2^T P w \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

Dimana P adalah matriks bobot dari ketelitian (RMS) pengukuran *centroid*. Karena satu-satunya informasi pengukuran adalah hanya dari ukuran koordinat titik-titik pada foto, maka Persamaan 9 tidak dapat diselesaikan karena matriks persamaan normalnya *singular* (nilai determinannya sama dengan nol). Agar Persamaan 9 dapat diselesaikan, maka datum untuk koordinat titik-titik objek harus ditetapkan terlebih dahulu. Solusi dengan menggunakan teknik *inner constraint* (Dermanis, 1994) tidak menghasilkan ketelitian yang optimum. Artinya matriks varian-kovarian (matriks ketelitian) sangat tergantung dari pemilihan titik objek yang dijadikan titik basis/datum. Oleh karena itu kami memilih teknik *free network adjustment* (Papo & Perelmuter, 1982) untuk menyelesaikan Persamaan 9 dan menghasilkan ketelitian yang optimum tanpa tergantung dari pemilihan titik-titik objek yang akan dijadikan datum (Fraser, 2017).

Sensitivitas sistem dapat ditingkatkan dengan cara mengurangi kesalahan sistematis. Kesalahan sistematis ini dapat diakomodasi dan dimodelkan secara proporsional dengan memodifikasi Persamaan 9 menjadi Persamaan 10 (Fraser, 1997). Persamaan ini disebut sebagai teknik *Self Calibrating Bundle Adjustment* (Fraser, 1997), dan terdiri dari 10 parameter kalibrasi kamera (Fryer, 2017).

$$\begin{bmatrix} A_1^T P A_1 & A_1^T P A_3 & A_1^T P A_2 \\ A_3^T P A_1 & A_3^T P A_3 & A_3^T P A_2 \\ A_2^T P A_1 & A_2^T P A_3 & A_2^T P A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_3 \\ \delta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1^T P w \\ A_3^T P w \\ A_2^T P w \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

2.4. Analisis Pergeseran

Penyelesaian sebuah persoalan antar sistem koordinat membutuhkan suatu langkah transformasi koordinat yang dirumuskan dengan matriks transformasi (Saputra, 2015). Dalam penelitian ini, 3 epok data sebelum terjadinya banjir bandang dijadikan sebagai *benchmark* atau acuan. Dengan begitu, sebelum analisis deformasi dilakukan, perlu adanya proses transformasi koordinat antara 3 epok data sebelum terjadinya banjir bandang dan 3 epok data pasca terjadinya banjir bandang.

Besarnya perubahan struktur objek dinyatakan dalam vektor pergeseran, yaitu suatu fungsi perubahan posisi objek dalam selang waktu tertentu yang dapat dijadikan indikator terjadinya deformasi. Perhitungan vektor pergeseran dilakukan dengan menghitung selisih antara koordinat sebelum terjadinya banjir bandang dan pasca terjadinya banjir bandang.

Penentuan vektor pergeseran menurut (Handayani et al., 2015) adalah sebagai berikut:

1. Menentukan selisih koordinat untuk masing-masing komponen x, y, z dari hasil pengamatan dua waktu yang berbeda.

$$d_p = r'p - rp = d_p(x_p, y_p, z_p; t) \quad (11)$$

dimana: d_p adalah selisih koordinat masing-masing komponen x, y, z ; rp adalah posisi titik saat waktu $t = 0$ (sebelum deformasi); dan $r'p$ adalah posisi titik saat $t > 0$ (setelah deformasi)

2. Menentukan nilai vektor pergeseran untuk masing-masing titik pantau dari hasil pengamatan dua waktu yang berbeda.

$$s_p = \sqrt{(dx_p)^2 + (dy_p)^2 + (dz_p)^2} \quad (12)$$

dimana: s_p adalah vektor pergeseran; dx_p adalah selisih koordinat komponen x ; dy_p adalah selisih koordinat komponen y ; dan dz_p adalah selisih koordinat komponen z .

Setelah diketahui besaran nilai vektor pergeseran, dilakukanlah uji hipotesis sebagai uji validasi ada atau tidaknya pergeseran pada titik pantau dengan menguji nilai T pada Persamaan 13 terhadap distribusi *fisher* (Caspary, 2000) pada tingkat signifikansi 0.05. Tahap pengujiannya adalah dengan menyusun hipotesis sebagai berikut :

H_0 : Titik tidak mengalami pergeseran ($T < f$)

H_a : Titik mengalami pergeseran ($T > f$)

Nilai T adalah,

$$T = \frac{d^T C d^{-1} d}{\sigma_0^2} \quad (13)$$

dimana: d adalah nilai vektor pergeseran dan d^T adalah nilai transpose nya; $C d^{-1}$ adalah invers matriks varian kovarian pergeseran; dan σ_0^2 adalah standar deviasi total.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kalibrasi Kamera

Kamera DSLR memiliki susunan lensa dan komponen bidang sensor yang tidak stabil, sehingga dalam penggunaannya dapat mengakibatkan terjadinya perubahan pada parameter utama kamera, yaitu panjang fokus (c) dan posisi *principal point* (X_p, Y_p). Perubahan yang terjadi pada ketiga parameter tersebut akan mempengaruhi ketelitian titik-titik koordinat yang dipotret (Tjahjadi, 2013). Untuk itu, kesalahan sistematis yang terjadi harus dapat dihilangkan atau diminimalisir dengan cara memodelkannya menjadi Persamaan 10. yang disebut dengan teknik *self calibrating bundle adjustment*. Teknik ini menghasilkan 10 parameter kalibrasi kamera yang terdiri dari 3 parameter utama kamera dan 7 parameter distorsi (Fryer, 2017). Parameter kalibrasi kamera beserta ketelitiannya disajikan pada Tabel 1.

Nilai fokus terkalibrasi (c) dan nilai *principle point* atau titik utama foto (X_p, Y_p) yang dihasilkan menghasilkan nilai dengan perubahan yang tidak signifikan dengan ketelitian yang tinggi (Tabel 1). Nilai rata-rata panjang fokus dari keseluruhan epok adalah 35.075 mm, dan kemudian dapat diketahui selisih rata-rata dengan panjang fokus sebelum kamera terkalibrasi yaitu 0.075 mm, sehingga dapat disimpulkan dari hasil tersebut bahwa kalibrasi kamera pada keseluruhan epok

Tabel 1. Parameter kalibrasi kamera

Parameter Kamera	Epok 1		Epok 2		Epok 3	
	Nilai (mm)	SD (mm)	Nilai (mm)	SD (mm)	Nilai (mm)	SD (mm)
C	35.0754	3.735e-03	35.0756	3.731e-03	35.0735	6.480e-03
X _P	0.0675	2.621e-03	0.0668	2.581e-03	0.0450	7.219e-03
Y _P	-0.1105	2.866e-03	-0.1108	2.789e-03	-0.0783	7.160e-03
K1	2.50831e-05	6.888e-07	2.41908e-05	7.020e-07	1.73418e-05	1.807e-06
K2	-1.72620e-08	1.115e-08	-1.20025e-08	1.131e-08	1.28916e-07	4.203e-08
K3	-4.19132e-11	5.226e-11	-5.02824e-11	5.259e-11	-1.00556e-09	2.911e-10
P1	9.21203e-07	6.68e3-07	1.24054e-06	6.605e-07	3.43588e-06	1.979e-06
P2	2.58211e-05	7.319e-07	2.62254e-05	7.114e-07	1.77264e-05	1.984e-06
B1	2.57075e-33	2.030e-21	2.57014e-33	2.007e-21	2.78646e-33	3.671e-21
B2	-3.13813e-33	2.030e-21	-3.13589e-33	2.007e-21	-3.13469e-58	3.671e-21

SD: Standar Deviasi

dinyatakan stabil. Hal ini terjadi karena adanya variasi jarak serta keragaman *roll* (foto direkam secara horizontal dan vertikal) pada saat pengambilan gambar yang merupakan syarat dari teknik *self-calibrating bundle adjustment* (Wolf & Dewitt, 2014).

Menurut Putera & Hariyanto (2013) dengan menggunakan kamera Canon IXUS115 HS, nilai fokus terkalibrasi dan titik utama foto tidak menghasilkan nilai yang stabil dan mengalami perubahan yang sangat besar, karena hanya menggunakan satu foto yang diambil tegak lurus terhadap objek, atau dengan kata lain tidak ada variasi jarak dan keragaman *roll* pada saat pengambilan gambar. Jika objek diukur dengan elevasi atau jarak yang sama, mungkin tidak menghasilkan hasil yang memuaskan (Wolf & Dewitt, 2014).

3.2. Koordinat Objek 3D

Koordinat objek 3D merupakan nilai utama yang dihasilkan dari proses restitusi koordinat fotogrametri. Penentuan koordinat dilakukan secara lokal dengan melakukan pengukuran *centroid* pada masing-masing titik tengah retro target pada setiap foto dalam sistem 2D yang kemudian dikonversi menjadi 3D.

Nilai standar deviasi didapatkan dari nilai residu pengamatan setelah proses hitung perataan *bundle adjustment*. Akumulasi dari nilai standar deviasi direpresentasikan dengan nilai *Root Mean Square* (RMS), nilai RMS ini sangat tergantung dari kualitas tingkat keabuan (*grayscale*) retro target yang dinyatakan dalam sebuah susunan matriks (baris dan kolom) saat proses *centroid* dilakukan. RMS dengan nilai <1 mm menyatakan bahwa titik-titik koordinat yang diperoleh memiliki akurasi yang tinggi (Jensen, 2015).

3.2.1. Koordinat Objek 3D 2020 Sebelum Banjir Bandang

Hasil hitungan koordinat objek 3D titik pantau epok 1,2, dan 3 tahun 2020 sebelum terjadinya banjir bandang berturut-turut dapat dilihat pada Tabel 2, 3, dan 4. Koordinat ini merupakan *benchmark/acuan* yang digunakan dalam proses transformasi koordinat. Dalam pengolahannya, epok 1 menggunakan 293 set data foto, epok 2 menggunakan 287 set data foto, dan epok 3 menggunakan 293 set data foto.

Tabel 2, 3, dan 4 menunjukkan nilai standar deviasi untuk setiap titik koordinatnya. Nilai standar deviasi diakumulasi sehingga dapat diketahui nilai RMS total untuk masing-masing komponen X,Y,Z. Nilai RMS keseluruhan epok untuk masing-masing komponen X,Y,Z adalah 0.057 mm untuk nilai X; 0.061 mm untuk nilai Y; dan 0.041 mm untuk nilai Z. Berdasarkan nilai tersebut, dapat dinyatakan bahwa titik-titik koordinat seluruh epok yang didapatkan memiliki akurasi yang tinggi karena nilai RMS total dari masing-masing komponen X,Y,Z bernilai <1 mm (Jensen, 2015).

Akurasi tinggi yang dihasilkan tidak lepas dari SOP pemotretan yang disusun berdasarkan kaidah-kaidah fotogrametri. Kaidah ini meliputi banyaknya foto yang diambil dari berbagai sisi, adanya variasi jarak, dan keragaman *roll* pada saat pengambilan gambar, serta penggunaan pola

Tabel 2. Koordinat objek 3D epok 1 sebelum terjadinya banjir bandang

Titik	Epok 1					
	Koordinat (mm)			Standar deviasi (mm)		
	X	Y	Z	S _x	S _y	S _z
1	-1367.729	9951.288	-787.061	0.034	0.070	0.030
2	-1070.249	9940.796	-781.698	0.027	0.058	0.027
3	-777.751	9930.436	-775.465	0.027	0.059	0.026
:	:	:	:	:	:	:
553	2143.774	29909.105	3185.798	0.069	0.054	0.056
554	2140.454	30444.544	3193.487	0.071	0.061	0.063
555	2131.951	30946.729	3196.441	0.092	0.080	0.090
RMS Total				0.059	0.064	0.043

Tabel 3. Koordinat objek 3D epok 2 sebelum terjadinya banjir bandang

Titik	Epok 2					
	Koordinat (mm)			Standar deviasi (mm)		
	X	Y	Z	S _x	S _y	S _z
1	-1367.659	9951.371	-787.217	0.053	0.063	0.043
2	-1070.168	9940.843	-781.658	0.038	0.060	0.035
3	-777.679	9930.428	-775.484	0.031	0.058	0.029
:	:	:	:	:	:	:
553	2143.593	29908.530	3185.852	0.067	0.057	0.047
554	2139.819	30444.000	3194.202	0.078	0.075	0.060
555	2130.612	30946.080	3197.488	0.087	0.091	0.069
RMS Total				0.056	0.057	0.038

Tabel 4. Koordinat objek 3D epok 3 sebelum terjadinya banjir bandang

Titik	Epok 3					
	Koordinat (mm)			Standar deviasi (mm)		
	X	Y	Z	S _x	S _y	S _z
1	-1367.907	9951.176	-787.423	0.051	0.106	0.036
2	-1070.085	9940.708	-781.616	0.033	0.079	0.030
3	-777.719	9930.471	-775.407	0.027	0.071	0.026
:	:	:	:	:	:	:
553	2143.241	29908.935	3185.871	0.089	0.069	0.061
554	2139.411	30444.629	3194.117	0.100	0.083	0.070
555	2130.099	30946.770	3197.021	0.159	0.105	0.107
RMS Total				0.057	0.063	0.041

pemotretan konvergen atau mengerucut ke arah objek yang dipotret (Jiang et al., 2008). Sebaliknya, nilai RMS yang besar disebabkan oleh minimnya jumlah foto dan orientasi foto. Minimnya jumlah foto mempengaruhi pembentukan geometri dalam penentuan koordinat (*intersection geometry*). Orientasi foto yang tidak memenuhi persyaratan *self calibrating bundle adjustment*, dapat berpengaruh pada penentuan koordinat untuk mendapatkan hasil yang memuaskan (Wolf & Dewitt, 2014).

3.2.2. Koordinat Objek 3D Tahun 2021 Pasca Banjir Bandang

Hasil hitungan koordinat objek 3D titik pantau epok 1, 2, dan 3 tahun 2021 pasca terjadinya banjir bandang berturut-turut dapat dilihat pada Tabel 5, 6, dan 7. Koordinat ini merupakan hasil transformasi dengan koordinat epok 1, 2, dan 3 2020 sebelum terjadinya banjir bandang yang digunakan sebagai *benchmark* atau acuan. Dalam pengolahannya, epok 1 menggunakan 168 set data foto, epok 2 menggunakan 170 set data foto, dan epok 3 menggunakan 173 set data foto.

Tabel 5. Koordinat objek 3D epok 1 pasca terjadinya banjir bandang

Titik	Epok 1					
	Koordinat (mm)			Standar deviasi (mm)		
	X	Y	Z	S_x	S_y	S_z
1	-1367.622	9951.213	-787.256	0.034	0.052	0.029
2	-1070.178	9940.649	-781.718	0.032	0.049	0.028
3	-777.698	9930.317	-775.474	0.033	0.049	0.029
:	:	:	:	:	:	:
553	2143.306	29908.528	3185.929	0.077	0.068	0.058
554	2139.659	30444.121	3194.159	0.080	0.073	0.062
555	2130.397	30945.732	3197.049	0.096	0.081	0.074
RMS Total				0.064	0.063	0.048

Tabel 6. Koordinat objek 3D epok 2 pasca terjadinya banjir bandang

Titik	Epok 2					
	Koordinat (mm)			Standar deviasi (mm)		
	X	Y	Z	S_x	S_y	S_z
1	-1367.614	9951.261	-787.226	0.040	0.058	0.052
2	-1070.139	9940.716	-781.724	0.037	0.054	0.049
3	-777.687	9930.387	-775.480	0.037	0.054	0.047
:	:	:	:	:	:	:
553	2143.098	29908.753	3185.864	0.062	0.056	0.046
554	2139.529	30444.381	3194.072	0.063	0.060	0.049
555	2130.387	30946.146	3196.917	0.076	0.067	0.058
RMS Total				0.059	0.061	0.054

Tabel 7. Koordinat objek 3D epok 3 pasca terjadinya banjir bandang

Titik	Epok 3					
	Koordinat (mm)			Standar deviasi (mm)		
	X	Y	Z	S_x	S_y	S_z
1	-1367.692	9951.271	-787.221	0.033	0.066	0.043
2	-1070.171	9940.835	-781.778	0.032	0.062	0.041
3	-777.667	9930.437	-775.547	0.032	0.061	0.039
:	:	:	:	:	:	:
553	2143.271	29908.621	3185.888	0.079	0.071	0.058
554	2139.632	30444.217	3194.123	0.081	0.076	0.063
555	2130.388	30945.904	3197.024	0.098	0.085	0.075
RMS Total				0.068	0.068	0.054

Tabel 5, 6, dan 7 dapat diketahui nilai RMS keseluruhan epok untuk setiap koordinat X, Y, Z masing-masing adalah 0.064 mm untuk nilai X; 0.064 mm untuk nilai Y; dan 0.052 mm untuk nilai Z. Berdasarkan nilai tersebut, dapat dinyatakan bahwa titik-titik koordinat epok 1, 2, dan 3 pasca banjir bandang yang didapatkan sama halnya dengan epok 1, 2, dan 3 sebelum banjir bandang yaitu memiliki akurasi yang tinggi karena nilai RMS total dari masing-masing komponen X, Y, Z bernilai <1 mm (Jensen, 2015).

3.3. Analisis Deformasi

Vektor pergeseran dari kedua data pengukuran, yaitu sebelum terjadinya banjir bandang dan pasca terjadinya banjir bandang dicari untuk mengetahui berapa besar nilai pergeseran jembatan akibat bencana tersebut. Dimana notasi d_x , d_y , d_z menyatakan vektor pergeseran pada setiap komponen koordinat (X, Y, Z); δd_x , δd_y , δd_z menyatakan ketelitian dari vektor pergeseran setiap komponen koordinat; s menyatakan nilai vektor pergeseran total; dan δ_s menyatakan ketelitian dari vektor pergeseran total. Tabel 8, 9, dan 10 adalah ilustrasi hasil analisis deformasi sebelum

Tabel 8. Hasil analisis deformasi jembatan epok 1 sebelum dan pasca banjir bandang

Titik	d_x	d_y	d_z	δd_x	δd_y	δd_z	s	δ_s
1	0.107	-0.075	-0.196	0.048	0.087	0.042	0.235	0.059
2	0.072	-0.147	-0.020	0.042	0.076	0.039	0.165	0.052
3	0.053	-0.118	-0.009	0.042	0.076	0.038	0.130	0.052
:	:	:	:	:	:	:	:	:
553	-0.468	-0.588	0.131	0.104	0.164	0.131	0.754	0.133
554	-0.795	-0.423	0.672	0.107	0.174	0.134	1.123	0.138
555	-1.554	-0.997	0.608	0.133	0.180	0.153	1.944	0.155

Tabel 9. Hasil analisis deformasi jembatan epok 2 sebelum dan pasca banjir bandang

Titik	d_x	d_y	d_z	δd_x	δd_y	δd_z	s	δ_s
1	0.045	-0.111	-0.009	0.066	0.086	0.067	0.120	0.073
2	0.029	-0.126	-0.066	0.053	0.082	0.061	0.145	0.065
3	-0.008	-0.041	0.004	0.049	0.080	0.055	0.042	0.061
:	:	:	:	:	:	:	:	:
553	-0.495	0.223	0.012	0.092	0.080	0.066	0.543	0.079
554	-0.290	0.381	-0.131	0.101	0.097	0.078	0.497	0.092
555	-0.225	0.066	-0.571	0.116	0.114	0.091	0.617	0.107

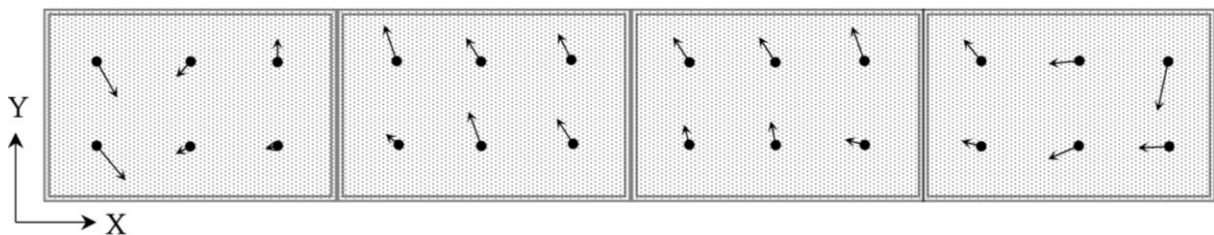
Tabel 10. Hasil analisis deformasi jembatan epok 3 sebelum dan pasca banjir bandang

Titik	d_x	d_y	d_z	δd_x	δd_y	δd_z	s	δ_s
1	0.215	0.095	0.202	0.060	0.125	0.056	0.310	0.081
2	-0.086	0.127	-0.163	0.046	0.100	0.050	0.223	0.065
3	0.052	-0.035	-0.140	0.042	0.093	0.047	0.153	0.061
:	:	:	:	:	:	:	:	:
553	-0.495	0.223	0.012	0.092	0.080	0.066	0.543	0.079
554	-0.290	0.381	-0.131	0.101	0.097	0.078	0.497	0.092
555	-0.225	0.066	-0.571	0.116	0.114	0.091	0.617	0.107

terjadinya banjir bandang dan pasca terjadinya banjir bandang. Nilai vektor pergeseran didapatkan dari selisih antara koordinat sebelum terjadinya banjir bandang dan pasca terjadinya banjir bandang.

Tabel 8, 9, dan 10 terlihat bahwa pergeseran terjadi walaupun sangat kecil magnitudenya dengan nilai rata-rata epok data sebesar 0.534 mm. Besarnya nilai bervariasi antara 0.026 mm sampai 5.867 mm di beberapa titik pantau pada badan jembatan seperti yang tersaji pada Gambar 8. Garis-garis pada gambar memperlihatkan besar dan arah vektor pergeseran struktur. Pada kolom δ_s yaitu ketelitian pergeseran terlihat nilai reratanya berkisar pada 0.082 mm, hal ini menunjukkan sensitivitas sistem, yaitu kamera DSLR mampu mendeteksi pergeseran sampai ± 0.1 mm. Namun demikian pergeseran ini belum tentu mengindikasikan telah terjadi pergeseran struktur material jembatan, untuk itu perlu dilakukan uji validasi dengan menggunakan uji pergeseran.

Uji pergeseran dilakukan untuk mengetahui apakah nilai vektor pergeseran koordinat yang ditunjukkan oleh selisih koordinat data sebelum dan pasca banjir bandang tersebut merupakan gerakan titiknya (deformasi) atau karena variabel stokastik. Kestabilan titik pantau dapat diketahui dari besarnya nilai T terhadap nilai batas yang didapatkan dari tabel *fisher*, yaitu sebesar 2.61. Hasil

**Gambar 8.** Arah dan besaran vektor pergeseran terhadap sumbu x dan y

Tabel 11. Hasil uji pergeseran sebelum dan pasca banjir bandang

Titik	Epok 1		Epok 2		Epok 3	
	Nilai T	Hasil uji	Nilai T	Hasil uji	Nilai T	Hasil uji
1	0.004	Diterima	0.000	Diterima	0.003	Diterima
2	0.001	Diterima	0.000	Diterima	0.002	Diterima
3	0.001	Diterima	0.000	Diterima	0.002	Diterima
:	:	:	:	:	:	:
553	0.006	Diterima	0.009	Diterima	0.002	Diterima
554	0.019	Diterima	0.006	Diterima	0.004	Diterima
555	0.037	Diterima	0.010	Diterima	0.008	Diterima

uji pergeseran epok 1, 2, dan 3 dari dua data pengukuran pada waktu yang berbeda, yaitu sebelum terjadinya banjir bandang dan pasca terjadinya banjir bandang ditunjukkan pada Tabel 11 di bawah ini.

Tabel 11 menunjukkan bahwa hasil uji pergeseran dengan tingkat kepercayaan 95% diterima untuk semua titik pantau pada seluruh epok data pengukuran, hal ini menyatakan bahwa tidak terjadi pergeseran pada setiap titik pantau, Jembatan Pandansari dinyatakan stabil dan tidak mengalami pergeseran akibat banjir bandang pada semua komponennya, baik horizontal (x,y) maupun vertikal (z). Pergeseran minimum hasil analisis yang terilustrasi pada Tabel 8, 9, 10, dan Gambar 8 yang terjadi mungkin karena akibat tekanan lalu lintas di atas jembatan pada saat pemotretan berlangsung atau kesalahan variabel stokastik lainnya.

Berdasarkan hasil tersebut, pemantauan kesehatan struktur jembatan tetap penting dilakukan untuk memastikan keselamatan (yaitu menguji komponen struktural untuk memperkirakan kapasitas muatan maksimumnya), dan kemudahan servis masa pakainya (yaitu melakukan prosedur pemantauan terjadwal secara teratur untuk menilai apakah ada pemeliharaan yang diperlukan pada struktur yang sudah dibangun).

4. KESIMPULAN

Metode fotogrametri jarak dekat merupakan alternatif yang tepat untuk diaplikasikan dalam pengamatan deformasi. Dengan metode ini, kamera DSLR dapat memotret suatu objek dengan mudah dan cepat, serta memberikan informasi dengan ketelitian yang cukup tinggi. Hal ini dapat dilihat pada titik koordinat objek yang diperoleh memiliki keakurasian dibawah 1 mm, dengan tingkat keakurasian tersebut maka nilai vektor pergeseran dibawah 1 mm juga dapat terdeteksi.

Perhitungan vektor pergeseran dan pengujian pergeseran dengan tingkat kepercayaan 95% menyatakan bahwa uji pada semua titik pantau diterima, dimana nilai uji tidak melebihi nilai batas pada tabel *fisher*. Berdasarkan data tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa selama pengamatan dilakukan tidak terjadi deformasi pada objek jembatan akibat banjir bandang. Pergeseran yang terjadi mungkin karena akibat tekanan lalu lintas di atas jembatan pada saat pemotretan berlangsung atau kesalahan variabel stokastik lainnya.

Penelitian ini dapat dijadikan sebagai bahan acuan/referensi pengembangan penelitian lanjutan dengan menggunakan lebih dari 3 epok data pemotretan agar diperoleh nilai vektor pergeseran 3 dimensinya, yang menyajikan nilai besaran pergeseran, kecepatan pergeseran, dan arah pergeseran dalam bentuk 3 dimensi.

5. REFERENSI

- Abdillah, L. M., Awaluddin, M., & Nugraha, A. L. (2018). Analisis Perbandingan Koreksi Data Pengukuran EDM Guna Monitoring Metode Episodik Deformasi Gunung Api. *Geodesi Undip*, 7(4), 107–118.
- BPBD Kabupaten Malang (10 Maret 2021). Banjir Bandang Kecamatan Ngantang. Mengutip Sumber Internet URL <https://bpbd.malangkab.go.id>.
- Brown, D. C. (1974). Evolution, Application and Potential of The Bundle Method of Photogrammetric Triangulation. *International Archives of Photogrammetry*, 21(3), 1-33.

- Caspary, W. F. (2000). *Concepts of Network and Deformation Analysis*. Australia: School of Geomatic Engineering, The University of New South Wales.
- Cooper, M. A. R. and Robson, S. (2017). *Theory of Close Range Photogrammetry*. In K.B. Atkinson (Ed.), *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, 9-51. Whittles Publishing.
- Darmawan, I. G. B., Manurung, Z. K. M., Nurul, M., Prihadita, W. P., & Karyanto. (2021). Aplikasi Dinsar untuk Identifikasi Deformasi Permukaan Gunung Anak Krakatau Pada Peristiwa Longsor Sebelum Tsunami Selat Sunda. *Geosaintek*, 7(2), 83–92. doi: 10.12962/j25023659.v7i2.8988.
- Dermanis, A. (1994). The Photogrammetric Inner Constraints. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 49(1), 25–39. doi: 10.1016/0924-2716(94)90053-1.
- Fraser, C. S. (1997). Digital Camera Self-Calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52, 149–159.
- Fraser, C. S. (2006). Network Orientation Models for Image-Based 3D Measurement. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing & Spasial Information Science*, 36(5), 9.
- Fraser, C. S. (2017). Network Design. In K.B. Atkinson (Ed.), *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, 256-281. Whittles Publishing.
- Fryer, J. G. (2017). Camera Calibration. In K.B. Atkinson (Ed.), *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, 156–179. Whittles Publishing.
- Handayani, H. H., Yuwono, & Taufik, M. (2015). Preliminary Study of Bridge Deformation Monitoring Using GPS and CRP (Case Study: Suramadu Bridge). *Procedia Environmental Sciences*, 24, 266–276. doi: 10.1016/j.proenv.2015.03.035.
- Jensen, J. (2015). *Introduction Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. England: Pearson.
- Jiang, R. (2005). Development of a Digital Photogrammetric System for Bridge Deflection Measurement (Vol. 48, Issue 4). doi: 10.1016/j.jaci.2012.05.050.
- Jiang, R., Jáuregui, D. V., & White, K. R. (2008). Close-range Photogrammetry Applications in Bridge Measurement: Literature review. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 41(8), 823–834. doi: j.measurement.2007.12.005.
- Lestari, D., Yulaikhah, & Sari, R. I. (2018). Time Variant Adjustment for The Solution of Control Point Unstability in Deformation Analysis of Borobudur Vertical Deformation Monitoring Network. *Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, 1(1), 43–50. doi: 10.22146/jgise.38590.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2006). *Close range photogrammetry: principles, techniques and applications* (Vol. 3). Dunbeath: Whittles publishing.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S., and McGlone, C. J. (2001). *Introduction to Modern Photogrammetry*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Papo, H. B., & Perelmutter, A. (1982). Free Net Analysis in Close-Range Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(4), 571–576.
- Purnomo, B. J., Anjasmara, I. M., & Aisyah, N. (2014). Analisa Deformasi untuk Prediksi Sumber Tekanan Magma Menggunakan Data GPS. *Geoid*, 10(01), 81–86.
- Putera, B. A. S., & Hariyanto, T. (2013). Kalibrasi Kamera Non-Metrik dengan Metode Self Calibration. *Geoid*, 8(2), 118–125.
- Saputra, C. (2015). *Matriks Transformasi Diferensial Mengubah Dua Kurva Tak berpotongan Menjadi Berhimpit*. Institut Teknologi Bandung.
- Shortis, M. R., Clarke, T. A., & Robson, S. (1995). Practical Testing of The Precision and Accuracy of Target Image Centring Algorithms. *Videometrics IV*, 2598(September), 65–76. doi: 10.1117/12.220925.
- Taşçi, L. (2013). Deformation Monitoring in Steel Arch Bridges Through Close-Range Photogrammetry and The Finite Element Method. *Experimental Techniques*, 39(3), 1–8. doi: 10.1111/ext.12022.
- Tjahjadi, E., Purwanto, H., & Sae, S. S. (2013). Studi Kelayakan Pemetaan Kadastral Teliti dari Pemotretan Udara dengan Wahana Nirawak. *Forum Ilmiah Tahunan Ikatan Surveyor*

- Indonesia, October 2013, 1–7.
- Vacca, G., Mistretta, F., Stochino, F., & Dessi, A. (2016). Terrestrial Laser Scanner for Monitoring The Deformations and The Damages of Buildings. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41(July), 453–460. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-453-2016.
- Wolf, P. R., & Dewitt, B. A. (2014). *Elements of Photogrammetry With Applications in Gis* 4 edition. New York: McGraw-Hill Education.
- Zeng, Z., & Wang, X. (1992). General Solution of a Closed-Form Space Resection. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58(3), 326–338.