

UJI LENDUT DEFORMASI JEMBATAN DENGAN TEKNIK PEMOTRETAN KONVERGEN MENGUNAKAN TEKNOLOGI *DRONE*

(Studi kasus : Kecamatan Lowokwaru, Kota Malang)

1) Fransisca Dwi A, 2) Martinus Edwin Tjahjadi 3) Muhammad Zhorif Nasri

1) Program Studi Teknik Geodesi, FTSP, ITN Malang 2) Program Studi Teknik Geodesi, FTSP, ITN Malang 3) Program Studi Teknik Geodesi, FTSP, ITN Malang

e-mail : 1) siscaagustina@lecturer.itn.ac.id 2) edwin@lecturer.itn.ac.id

Abstrak. Pada umumnya objek jembatan merupakan infrastruktur transportasi yang memiliki konstruksi untuk dipantau secara periodik, salah satunya melalui monitoring deformasi. Dengan melihat beberapa teknologi yang berkembang untuk monitoring deformasi, diantaranya teknologi di bidang survei terestris seperti GPS, *total station*, dan *waterpass* yang pada dasarnya memiliki kelemahan tersendiri dari segi biaya dan waktu monitoring. Di bidang fotogrametri berkembang teknologi *drone DJI Phantom 4 Pro* yang dapat digunakan untuk monitoring deformasi. Penelitian ini berfokus untuk melakukan pengujian kemampuan pada teknologi *drone DJI Phantom 4 Pro* untuk pemantauan deformasi jembatan. Studi kasus deformasi berupa uji lendut jembatan dalam kondisi terbebani. Pengujian dilakukan dengan memanfaatkan teknik pemotretan konvergen pada akuisisi foto tanpa beban dan dengan beban. Proses data uji deformasi jembatan menggunakan metode *bundle adjustment* multi foto. Berdasarkan hasil pengujian teknologi *drone* untuk deformasi jembatan maka dapat mendeteksi lendutan dan pergeseran ke arah z positif yang relatif kecil (tidak terjadi kerusakan struktur) pada Jembatan Sambong dengan kisaran antara $\pm 0,025$ mm - 1,281 mm serta ketelitian antara $\pm 0,181$ mm - 0,773 mm. Berdasarkan tingkat ketelitian pergeseran tersebut, maka teknologi *drone DJI Phantom 4 Pro* mampu mendeteksi lendutan pada konstruksi jembatan hingga di bawah 1 mm.

Kata Kunci : deformasi; *bundle adjustment*; pemotretan konvergen; *drone*

Abstract. In general, the bridge object is a transportation infrastructure that has construction to be monitored periodically, one of which is through deformation monitoring. By looking at several technologies that have been developed for monitoring deformation, including technology in the field of terrestrial surveys such as GPS, total stations, and waterpass, which have their weaknesses in terms of cost and monitoring time. In the field of photogrammetry, the DJI Phantom 4 Pro drone technology has been developed which can be used for deformation monitoring. This research focuses on testing the capabilities of the DJI Phantom 4 Pro drone technology for monitoring bridge deformation. Case study of deformation in the form of bridge deflection test under loaded conditions. The test is carried out by utilizing convergent shooting techniques on photo acquisition without load and with a load. The bridge deformation test data process uses the multi-photo bundle adjustment method. Based on the results of testing drone technology for bridge deformation, it can detect relatively small deflections and shifts in the positive z-direction (no structural damage) on the Sambong Bridge with a range between ± 0.025 mm - 1.281 mm and accuracy between ± 0.181 mm - 0.773 mm. Based on the level of accuracy of the shift, the DJI Phantom 4 Pro drone technology can detect deflections in the bridge construction to below 1 mm.

Keywords : deformation; *bundle adjustment*; convergent; *drone*

PENDAHULUAN

Pada umumnya saat melakukan monitoring deformasi, terdapat teknologi akuisisi data yang umum digunakan yakni teknologi survei terestris *total station* (Layli, 2019), *waterpass* (Ludfi, 2018), dan GPS (Safi'i, 2014). Teknologi yang digunakan dalam memonitoring deformasi memiliki tingkat sensitivitas (ketelitian) yang berbeda-beda dalam mendeteksi deformasi. Tingkat sensitivitas dari

teknologi yang digunakan sangat berpengaruh untuk mendeteksi perubahan atau deformasi sekecil mungkin (Tjahjadi, 2010).

Pada saat ini, terdapat teknologi lain di bidang fotogrametri yang dapat digunakan untuk memonitor deformasi pada objek jembatan, salah satunya *drone DJI Phantom 4 Pro* (Pillon, 2020). Objek jembatan sebagai salah satu komponen jalan dengan peranan cukup vital (Santoso, 2020),

jembatan yang dibangun harus melalui beberapa tahap pengerjaan, mulai dari tahap perencanaan awal hingga tahap pengujian beban jembatan (Setiati, 2013). Jembatan yang telah lolos uji beban dan telah digunakan masih harus dilakukan monitoring secara kontinu dalam jangka waktu tertentu untuk mengetahui kesehatan struktur jembatan (PUPR, 2016). Jika terjadi pergeseran atau deformasi pada jembatan dari hasil monitoring tersebut, dapat segera diambil tindakan rasional, sehingga nantinya tidak terjadi kerusakan yang lebih parah dan membahayakan pengguna jembatan (Septinurriandiani, 2011).

Teknologi *drone* tersebut nantinya dapat digunakan untuk memonitor deformasi jembatan. Beberapa keunggulan yang dapat dilihat secara nyata bahwa biaya teknologi tersebut yang relatif lebih terjangkau. Menurut (Pillon, 2020) saat ini, terdapat teknologi lain yang dapat digunakan untuk monitoring deformasi pada jembatan yaitu *drone DJI Phantom 4 Pro*. Teknologi *drone DJI Phantom 4 Pro* yang dilengkapi dengan sensor CMOS 1" memungkinkan *drone* untuk mengambil gambar dalam frekuensi yang tinggi dan noise yang lebih sedikit (Aulejtner, 2011).

Penelitian ini nantinya akan dilakukan pengujian terhadap monitoring deformasi pada jembatan Sambong menggunakan metode *bundle adjustment* multi foto untuk memperoleh ketelitian maksimum di bawah 1 mm. *Bundle adjustment* merupakan suatu proses penyempurnaan rekonstruksi visual untuk menghasilkan struktur 3D yang optimal dan posisi serta orientasi kamera yang lebih akurat (Fauzan, 2020). Studi kasus pengujian deformasi adalah uji lendut jembatan dalam kondisi terbebani muatan dengan variasi konfigurasi pemotretan multi foto.

METODOLOGI

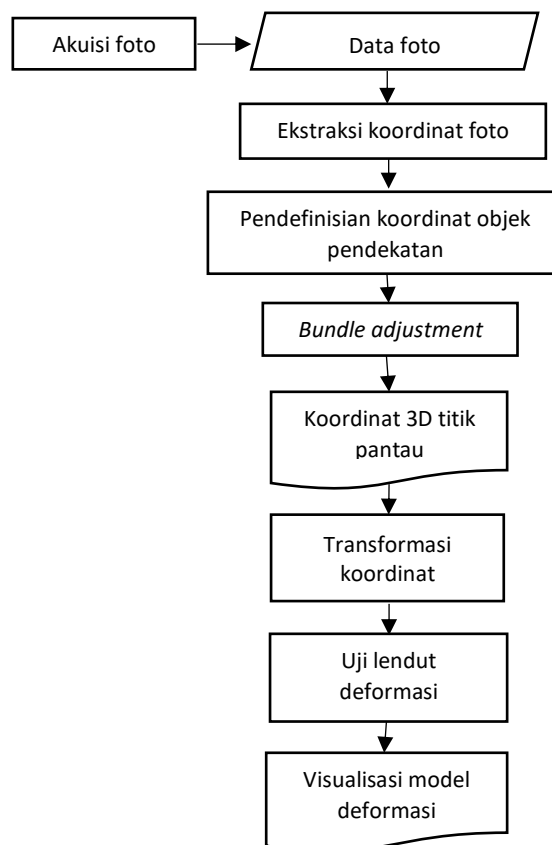
Lokasi penelitian tersebut berada di Jembatan Sambong, Desa Pandansari, Kecamatan Ngantang, Kabupaten Malang secara geografis terletak pada 07°52'45" LS dan 112°21'45" BT. Lokasi tersebut digunakan penelitian karena terdapat aktivitas penambangan pasir di sekitar area jembatan,

sehingga memungkinkan terjadinya pergeseran struktur jembatan akibat aktivitas tersebut. Adapun gambaran umum lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi penelitian

Monitoring deformasi pada jembatan dilakukan dengan memanfaatkan *drone DJI Phantom 4 Pro* untuk menguji kemampuan teknologi akuisisi data deformasi. Adapun tahapan pelaksanaan uji lendut deformasi jembatan dengan teknik pemotretan konvergen teknologi *drone* dapat dilihat pada Gambar 2. Tahapan pelaksanaan meliputi tahap akuisisi foto, ekstraksi koordinat foto, pendefinisian koordinat 3D pendekatan, *bundle adjustment*, dan pengujian pergeseran terhadap sumbu z.



Gambar 2. Tahapan penelitian

Akuisisi Foto dengan Teknik Pemotretan Konvergen

Akuisisi foto digital menggunakan teknologi *drone* dilakukan dengan mengikuti alur kerja pemotretan dalam proses *bundle adjustment* multi foto. Alur kerja tersebut seperti penetapan nilai panjang fokus kamera *drone*, penggunaan resolusi gambar maksimum, dan orientasi kamera pada saat akuisisi foto. Penggunaan alur kerja tersebut berdasarkan spesifikasi *drone DJI Phantom 4 Pro* pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi kamera *drone DJI Phantom 4 Pro*

Parameter spesifikasi	Nilai
Panjang fokus (mm)	8,8
Resolusi maksimum (piksel)	5472×3648
Ukuran sensor (mm)	13,2×8,8
Ukuran piksel (mm)	0,0024

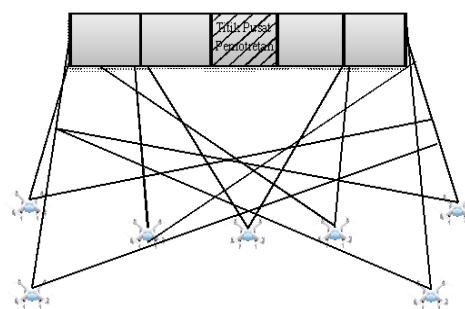
Proses akuisisi foto digital dilakukan untuk memperoleh nilai vektor pergeseran. Akuisisi foto dilakukan pada dua waktu dan keadaan yang berbeda, dalam hal ini pada saat monitoring deformasi jembatan menggunakan *drone* dilakukan pada keadaan normal tanpa beban statis dan dengan penambahan beban statis berupa *pick up* berisi muatan pasir seperti terlihat pada Gambar 3.



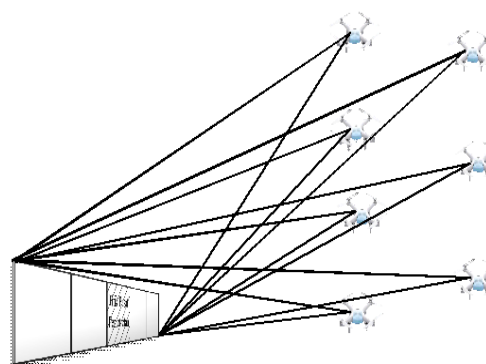
Gambar 3. Penambahan beban statis berupa *pick up* berisi muatan pasir

Proses akuisisi foto dilakukan dengan teknik konfigurasi pemotretan konvergen horizontal, vertikal, dan kombinasi. Konfigurasi konvergen horizontal, vertikal, dan kombinasi merupakan konfigurasi yang arah pemotretannya berpusat pada

satu area yang sama. Perbedaan dari ketiga konfigurasi ini terletak pada arah perpindahan kamera, posisi *drone* berpindah secara horizontal (kanan ke kiri) terhadap objek jembatan pada konfigurasi horizontal dan posisi *drone* berpindah secara vertikal (bawah ke atas) pada konfigurasi vertikal, sementara untuk konfigurasi kombinasi merupakan gabungan dari kedua konfigurasi konvergen horizontal dan vertikal. Ilustrasi dari konfigurasi horizontal dan vertikal dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.



Gambar 4. Konfigurasi konvergen horizontal



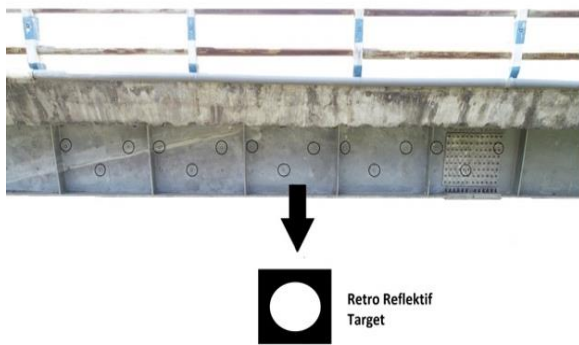
Gambar 5. Konfigurasi konvergen vertikal

Penggunaan metode konvergen sebagai metode pemotretan pada dasarnya mempunyai keunggulan tersendiri karena telah terbukti dapat meningkatkan nilai keakuratan koordinat yang dihasilkan (Zhang dkk, 2012; Udin, 2011).

Ekstraksi Koordinat Foto

Proses ekstraksi koordinat dilakukan pada titik-target reflektif yang sudah tersebar pada konstruksi jembatan secara merata pada sisi subjek penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Reflektif target tersebut dibuat khusus agar memiliki daya pantul

tinggi dan kontras lebih dominan dibanding area lain yang terpotret (Tjahjadi, 2010), sehingga dapat mempermudah proses ekstraksi koordinat foto secara semi otomatis dan menghasilkan koordinat yang lebih presisi (Ribeiro, 2021). Proses ekstraksi koordinat foto secara semi otomatis ini dilakukan dengan menggunakan metode *centroid* seperti yang dibahas dalam (Luhmann, 2011; Matsuoka, 2010; 2011; 2015; Shortis, 1995).



Gambar 6. Persebaran titik retro reflektif target dan contoh titik target reflektif yang dipasang

Pendefinisian Koordinat Pendekatan

Dalam proses ini, *output* yang dihasilkan berupa koordinat titik tengah retro dalam sistem kartesian 3 dimensi. *Output* tersebut diperoleh dari hasil pengukuran koordinat foto (*xy*) dengan metode *centroid* pada masing-masing retro untuk setiap foto (Tjahjadi, 2010). Titik pusat tengah retro pada foto yang diamati merupakan lokasi jatuhnya berkas sinar pada bidang sensor yang dipantulkan dari objek dan memenuhi kondisi kolinieritas, di mana pusat perspektif (*O*), titik *P* pada bidang sensor, dan objek *P* yang dicitrakan semuanya berada pada satu garis lurus (Tjahjadi, 2017), kondisi kolinieritas ini dimodelkan secara matematis di dalam (Luhmann, 2011; Wolf, 2000; 2013).

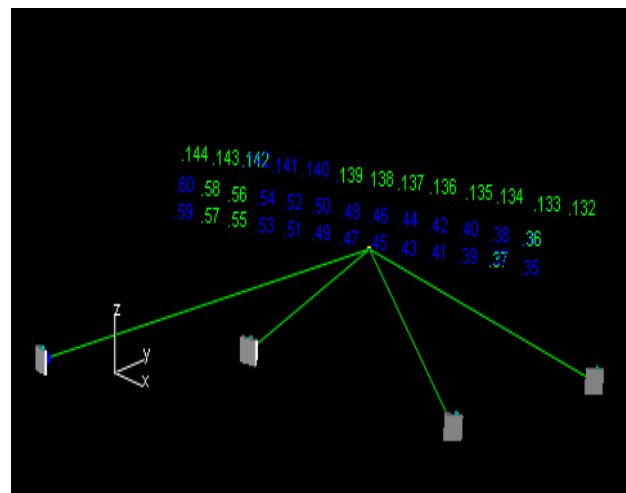
Model matematis kolinieritas (Wolf, 2013) dapat diselesaikan menggunakan teknik *least square adjustment*, namun karena satu-satunya nilai yang diketahui yaitu koordinat foto, maka dibutuhkan koordinat pendekatan titik tengah pada retro dalam kartesian 3D sehingga model matematis kolinieritas dapat diselesaikan. Koordinat 3D pendekatan tersebut dapat diperoleh dengan

terlebih dahulu melakukan perhitungan parameter EO. Pendekatan tersebut menggunakan metode *dependent relative orientation*, metode ini dilakukan dengan hanya melibatkan hasil pengukuran koordinat foto pada dua buah foto (Tjahjadi, 2010).

Setelah nilai parameter EO pendekatan diketahui, nilai tersebut dapat digunakan untuk memperoleh koordinat objek 3D pendekatan menggunakan metode *intersection* atau triangulasi (Fraser, 2005). Pada dasarnya, jika dua foto atau lebih diketahui posisi dan orientasinya, maka titik-titik yang berada pada dua foto atau lebih tersebut akan dapat diketahui koordinat 3D-nya (Tjahjadi, 2010). Koordinat objek 3D tersebut diperoleh dengan menghitung persamaan kolinieritas pada persamaan (1) dan (2) (Odumosu, 2021). Adapun ilustrasi proses *intersection* ditunjukkan pada Gambar 7.

$$vx_a = b_{14}X_a + b_{15}Z_a - b_{16}Y_a + J \quad (1)$$

$$vy_a = b_{24}X_a + b_{25}Z_a - b_{26}Y_a + K \quad (2)$$



Gambar 7. Ilustrasi proses *intersection*

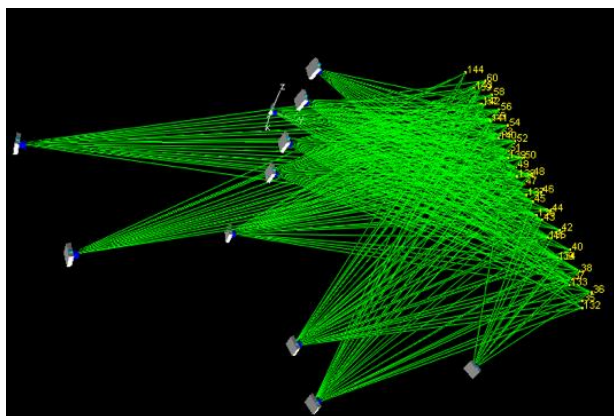
Selanjutnya, proses mendapatkan nilai parameter EO pendekatan untuk foto-foto lainnya dapat menggunakan metode *resection*. Metode tersebut memanfaatkan koordinat objek 3D titik-titik retro pendekatan yang telah diperoleh sebelumnya dari proses *intersection* untuk mendapatkan parameter posisi dan orientasi (EO) dalam sistem kartesian 3-dimensi (Photometric, 2014).

Bundle Adjustment

Bundle adjustment merupakan proses penyempurnaan rekonstruksi visual untuk menghasilkan struktur 3D yang optimal (Fauzan, 2021). Pada proses ini, seluruh berkas sinar pemotretan yang terlibat dimodelkan kembali melalui teknik *least square adjustment* seperti diilustrasikan pada Gambar 8, dengan bentuk umum persamaan *least square adjustment* sebagaimana dijelaskan dalam Rokhmana (2019) ditunjukkan pada persamaan (3).

$$v = A_1\delta_1 + A_2\delta_2 + A_3\delta_3 - l \quad (3)$$

Di mana v adalah vektor residual pengukuran koordinat foto A_1, A_2, A_3 berturut-turut adalah matriks turunan parsial terhadap parameter EO, koordinat objek titik retro, dan kesalahan sistematis kamera; adalah selisih antara nilai pengukuran dengan nilai terkoreksi dari model kolinieritas.



Gambar 8. Ilustrasi *bundle adjustment*

Pada proses komputasi *bundle adjustment* yang diilustrasikan pada Gambar 8, proses hitung perataan dilakukan secara iteratif menggunakan serangkaian persamaan linier sampai memperoleh nilai kuadrat residu minimum. Disamping itu, kesalahan sistematis pada kamera yang digunakan dapat diminimalisir pengaruhnya dengan menggunakan persamaan (4) (Rokhmana, 2019).

$$\begin{bmatrix} A_1^T P A_1 & A_1^T P A_2 & A_1^T P A_3 \\ A_2^T P A_1 & A_2^T P A_2 & A_2^T P A_3 \\ A_3^T P A_1 & A_3^T P A_2 & A_3^T P A_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1^T P l \\ A_2^T P l \\ A_3^T P l \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

Di mana P adalah matriks bobot dari ketelitian (RMS)

Uji Deformasi

Proses pengujian dilakukan dari dua data pengamatan, maka kedua data tersebut harus mempunyai sistem koordinat datum yang sama. Penyesuaian sistem koordinat datum dilakukan menggunakan transformasi koordinat konform 3D (Wolf, 2000; Ghilani, 2018) dengan menggunakan sistem koordinat epok 1 sebagai acuan untuk transformasi epok 2. Selanjutnya, koordinat titik retro XYZ epok 1 dan epok 2 hasil transformasi digunakan untuk mengetahui vektor pergeseran titik-titik pantau pada jembatan menggunakan persamaan (5) (Kayikci, 2015). Di mana d_i adalah vektor pergeseran

$$d_i = \begin{bmatrix} x_{2i} - x_{1i} \\ y_{2i} - y_{1i} \\ z_{2i} - z_{1i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Setelah diperoleh nilai vektor pergeseran melalui persamaan (5), maka dilakukan proses uji signifikan dengan tingkat kepercayaan 95% untuk mengetahui ada atau tidaknya pergeseran yang terjadi pada titik pantau (Yildirim, 2019). Uji ini dilakukan dengan hipotesa awal sebagai berikut.

- H0 : Titik pantau tidak mengalami deformasi (T<F)
- Ha : Titik pantau mengalami deformasi (T>F)

Untuk memperoleh kesimpulan dari hipotesa tersebut, maka terlebih dahulu melakukan penentuan nilai F berdasarkan nilai DOF total (*degrees of freedom*) pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha=0,05$). Proses selanjutnya, karena nilai T pada uji signifikan belum diketahui, maka dilakukan perhitungan nilai T dengan menggunakan persamaan (6) (Setan, 2001).

$$T = \frac{d_i^T Q_{d_i}^{-1} d_i}{h \hat{\sigma}_0^2} \quad (6)$$

Di mana $Q_{d_i}^{-1}$ adalah matriks bobot; $\hat{\sigma}_0^2$ adalah varian aposteriori; h adalah rank dari matriks bobot.

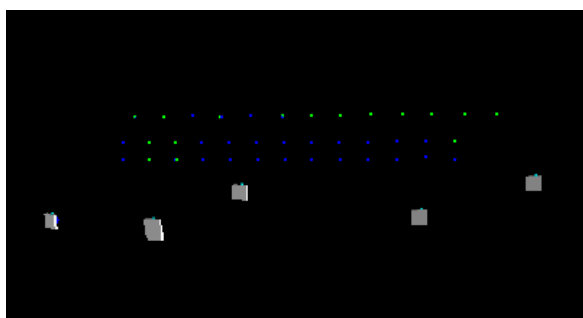
HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter Kalibrasi

Parameter kalibrasi kamera diperoleh dari hasil komputasi *bundle adjustment* (Rokhmana, 2019),

menggunakan perataan jaring dengan persamaan (4) dilakukan pada 44 titik pantau yang telah tersebar secara merata pada area pemantauan seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Proses tersebut menghasilkan parameter kalibrasi yaitu tiga parameter utama kamera (c,xp,yp) dan tujuh parameter distorsi kamera (K1,K2,K3,P1,P2,B1,B2) (Tjahjadi, 2013).

Pendefinisian parameter kalibrasi kamera dilakukan pada tiga kondisi pemotretan untuk mengetahui pengaruh konfigurasi pemotretan konvergen terhadap kualitas hasil kalibrasi kamera. Tiga kondisi pemotretan tersebut diantaranya yang pertama adalah pemotretan konvergen horizontal (tanpa data vertikal) seperti terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Visualisasi konfigurasi konvergen horizontal

Pendefinisian parameter hasil kalibrasi pada komputasi data pemotretan konvergen horizontal (tanpa data foto vertikal) melibatkan masing-masing 6 buah foto untuk epok 1 dan 2. Parameter hasil kalibrasi kamera tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter hasil kalibrasi kamera drone DJI Phantom 4 Pro konfigurasi konvergen horizontal

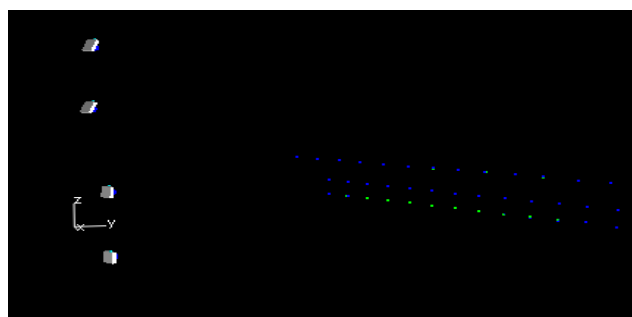
Parameter kalibrasi	Pemotretan tanpa beban		Pemotretan dengan beban	
	Nilai	So (mm)	Nilai	So (mm)
	C	8,867	2,1e-02	8,904
Xp	-0,137	5,2e-02	-0,028	3,1e-02
Yp	0,161	3,1e-02	0,091	2,2e-02
K1	8,9e-05	5,3e-05	9,8e-05	1,9e-05
K2	5,6e-06	2,0e-07	3,4e-06	9,7e-07
K3	-1,2e-07	2,9e-08	-7,9e-08	1,6e-08
P1	4,1e-04	1,6e-04	1,1e-04	1,1e-04

P2	-2,6e-04	4,9e-05	-2,0e-04	2,7e-05
B1	-1,3e-33	3,1e-20	-1,4e-33	3,1e-20
B2	-8,5e-34	3,1e-20	-5,7e-34	3,1e-20

Keterangan tabel :

So : Standar deviasi

Kondisi kedua adalah komputasi data pemotretan konvergen vertikal (tanpa data horizontal) seperti diilustrasikan pada Gambar 10. Proses komputasi data pemotretan pada kondisi tersebut melibatkan 5 buah foto (epok 1) dan 4 buah foto (epok 2) untuk mendapatkan parameter kalibrasi kamera. Adapun hasil kalibrasi kamera DJI Phantom 4 Pro pada kondisi ini ditampilkan pada Tabel 3.



Gambar 10. Visualisasi model konfigurasi konvergen vertikal

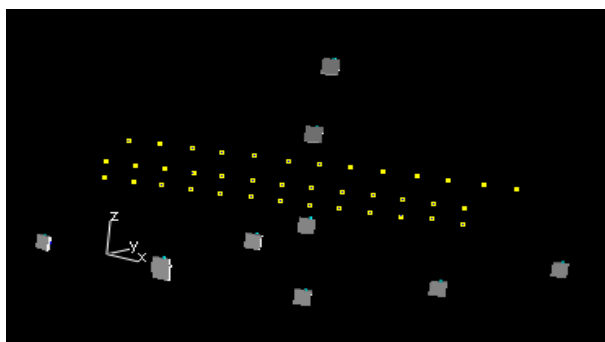
Tabel 3. Parameter hasil kalibrasi kamera drone DJI Phantom 4 Pro konfigurasi konvergen vertikal

Parameter kalibrasi	Pemotretan tanpa beban		Pemotretan dengan beban	
	Nilai	So (mm)	Nilai	So (mm)
	C	8,949	4,7e-02	8,823
Xp	-0,134	7,4e-02	-0,112	3,3e-01
Yp	0,163	9,1e-02	0,051	1,6e-01
K1	7,7e-05	5,2e-05	-1,0e-04	6,1e-05
K2	3,0e-06	2,2e-06	2,2e-05	4,9e-06
K3	-5,9e-08	4,5e-08	-5,1e-07	1,3e-07
P1	4,1e-04	2,8e-04	1,3e-04	9,9e-04

P2	-5,1e-04	3,6e-04	-1,5e-04	2,7e-05
B1	-1,3e-33	3,1e-20	-1,4e-33	3,2e-20
B2	-8,6e-34	3,1e-20	-5,6e-34	3,2e-20

Keterangan tabel :
So : Standar deviasi

Kemudian, pada kondisi ketiga adalah kombinasi pemotretan konvergen horizontal dan vertikal seperti divisualisasikan pada Gambar 11. Pada komputasi data pemotretan konvergen kombinasi horizontal-vertikal, terdapat 11 foto (epok 1) dan 10 foto (epok 2) yang terlibat dalam pendefinisian parameter kalibrasi kamera. Hasil kalibrasi kamera pada pemotretan konvergen kombinasi horizontal-vertikal tersebut ditampilkan pada Tabel 4.



Gambar 11. Visualisasi model konfigurasi konvergen kombinasi

Tabel 4. Parameter hasil kalibrasi kamera drone DJI Phantom 4 Pro konfigurasi kombinasi

Parameter kalibrasi	Pemotretan tanpa beban		Pemotretan dengan beban	
	Nilai	So (mm)	Nilai	So (mm)
C	8,917	7,3e-03	8,918	5,2e-03
Xp	-	1,9e-02	-0,022	2,4e-02
Yp	0,101	1,0e-02	0,039	6,0e-03
K1	5,6e-05	1,6e-05	6,8e-05	1,3e-05
K2	3,9e-06	7,4e-07	5,7e-06	6,9e-07
K3	-8,2e-08	1,1e-08	-1,2e-07	1,2e-08
P1	3,5e-04	6,1e-05	1,1e-04	8,1e-05

P2	-1,2e-04	2,7e-05	-1,8e-04	1,9e-05
B1	-1,3e-33	3,4e-20	-1,4e-33	3,4e-20
B2	-8,5e-34	3,4e-20	-5,7e-34	3,4e-20

Keterangan Tabel :
So : Standar deviasi

Berdasarkan parameter hasil kalibrasi kamera pada Tabel 2, 3, dan 4, menunjukkan bahwa nilai parameter kamera utama yaitu panjang fokus (c), dan *principal point* (x_p, y_p) menghasilkan perubahan nilai yang tidak signifikan, dengan nilai standar deviasi yang kecil. Nilai standar deviasi rata-rata terkecil untuk panjang fokus, dan *principal point* (x_p, y_p) dihasilkan dari komputasi data pemotretan konvergen kombinasi horizontal-vertikal pada Tabel 4 dengan nilai standar deviasi panjang fokus $\pm 0,0063$ mm, dan *principal point* x_p, y_p berturut-turut sebesar $\pm 0,0022$ mm dan $\pm 0,0082$ mm. Nilai standar deviasi tersebut mengindikasikan konfigurasi pemotretan konvergen kombinasi horizontal vertikal lebih teliti dibanding dua konfigurasi lainnya.

Koordinat Objek Titik Pantau Deformasi

Koordinat objek titik pantau merupakan nilai koordinat 3D yang diperoleh dari hasil ekstraksi koordinat titik-titik retro yang tersebar di area pemantauan deformasi. Koordinat objek titik pantau tersebut merupakan hasil komputasi konfigurasi pemotretan konvergen horizontal-vertikal yang merupakan konfigurasi dengan ketelitian terbaik. Adapun nilai koordinat objek titik pantau pemotretan tanpa beban dan dengan pembebanan dapat dilihat pada Tabel 5 dan 6.

Maka dapat dilihat pada tabel 5 dan 6, di dapatkan nilai RMS tiap komponen dua epok data pemotretan tanpa beban dan dengan pembebanan.

Tabel 5. Koordinat objek titik pantau deformasi tanpa beban

Nama Titik	Koordinat (mm)			Standar deviasi (mm)		
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	-80,105	6434,216	-171,237	0,274	0,347	0,226
2	-79,532	6431,808	140,452	0,279	0,332	0,200
3	-579,999	6373,631	-167,077	0,224	0,283	0,176
:	:	:	:	:	:	:
14	-3082	6069,979	153,345	0,189	0,283	0,136
:	:	:	:	:	:	:
60	-1454,504	4060,673	790,713	0,588	0,533	0,439
:	:	:	:	:	:	:
371	2277,336	5121,571	1339,555	0,705	0,846	0,515
RMS				0,673	0,639	0,284

Tabel 6. Koordinat objek titik pantau deformasi dengan pembebanan

Nama Titik	Koordinat (mm)			Standar deviasi (mm)		
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	-79,522	6434,345	-170,841	0,398	0,614	0,419
2	-79,048	6432,439	140,693	0,423	0,667	0,248
3	-579,479	6374,415	-166,905	0,419	0,527	0,329
:	:	:	:	:	:	:
14	-3082,206	6069,823	153,341	0,385	0,549	0,213
:	:	:	:	:	:	:
60	-1451,846	4060,089	792,464	1,491	1,041	0,697
:	:	:	:	:	:	:
371	2277,791	5120,249	1340,183	1,003	1,834	0,600
RMS				0,555	0,598	0,269

Tabel 7. Arah dan besar pergeseran

Nama Titik	Vektor pergeseran (mm)			ds_i (mm)	Ketelitian vektor pergeseran			δs_i (mm)
	dx_i	dy_i	dz_i		δx_i	δy_i	δz_i	
1	0,584	0,129	0,397	0,717	0,483	0,706	0,476	0,555
2	0,483	0,631	0,241	0,830	0,507	0,745	0,319	0,524
3	0,520	0,784	0,172	0,956	0,476	0,598	0,373	0,482
:	:	:	:	:	:	:	:	:
14	-0,113	-0,157	-0,005	0,193	0,429	0,618	0,258	0,435
:	:	:	:	:	:	:	:	:
60	2,658	-0,583	1,751	3,235	1,603	1,169	0,824	1,199
:	:	:	:	:	:	:	:	:
371	0,454	-1,321	0,628	1,532	1,225	2,019	0,790	1,345

Keterangan Tabel :

ds_i : Besar pergeseran

δs_i : Ketelitian pergeseran

Nilai RMS pemotretan tanpa beban untuk

komponen X, Y, dan Z berturut-turut sebesar 0,472 mm, 0,466 mm, dan 0,255 mm, sementara untuk nilai RMS dengan beban untuk komponen X, Y, dan Z berturut-turut sebesar 1,311 mm, 0,882 mm, dan 0,411 mm.

Hasil tersebut menunjukkan komponen Z memiliki nilai RMS yang lebih kecil dibanding komponen X dan Y, selain itu nilai RMS pada komponen Z dapat dikatakan memiliki akurasi yang tinggi (RMS total <1 mm).

Uji Lendut Deformasi

Pengujian deformasi digunakan untuk mengetahui arah pergeseran (dx_i, dy_i, dz_i) dan besar pergeseran (d_i) yang terjadi dari masing-masing titik pantau beserta ketelitian pergeseran (δd) dengan menggunakan persamaan (5). Adapun besar dan arah pergeseran tersebut disajikan dalam Tabel 7 sebagai berikut.

Berdasarkan Tabel 7 pada kolom dz_i , dapat diketahui bahwa 19 titik pantau deformasi menunjukkan terjadinya lendutan yang relatif kecil dan 25 titik lain menunjukkan pergeseran ke arah z positif. Pergeseran terkecil terjadi pada titik 16 dengan besar nilai lendutan $\pm 0,025$ mm dan pergeseran terbesar terjadi pada titik 31 dengan nilai lendutan $\pm 1,281$ mm. Hasil pengujian pergeseran terhadap sumbu z (kolom dz_i) yang dapat dilihat pada Tabel 7 memiliki ketelitian pergeseran yang relatif kecil, berkisar diantara $\pm 0,181$ mm - 0,773 mm, hal ini menunjukkan tingkat sensitivitas kamera *drone DJI Phantom 4 Pro* dapat mendeteksi pergeseran terhadap sumbu z hingga di bawah 1 mm.

Pada Gambar 12 dan 13 terlihat bahwa seluruh titik pantau sebanyak (16 titik) yang berada tepat di bawah beban menunjukkan pergeseran ke arah z positif.

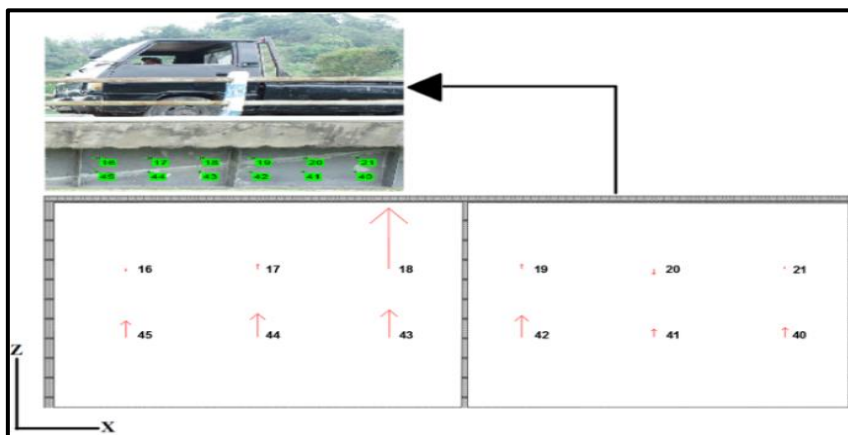
Sementara, dapat dilihat pada Gambar 14 bahwa titik yang tidak berada tepat di bawah beban memiliki pergeseran yang relatif sama dengan titik di bawah beban, di mana arah pergeseran cenderung ke arah sumbu z positif. Hal ini diindikasikan sebagai akibat adanya aktivitas truk tambang pasir yang melewati area bawah jembatan pada saat pemotretan, bobot truk yang lebih besar dari pada massa beban di atas jembatan mengakibatkan arah pergeseran terhadap sumbu z menjadi tidak stabil.

Hasil pengujian pergeseran terhadap sumbu z disajikan pada Tabel 6. Secara visualisasi terlihat pada Gambar 11 dan 12 memperlihatkan bahwa belum bisa menunjukkan titik pantau terdeformasi, maka perlu dilakukan uji signifikan pada tingkat kepercayaan 95% berdasarkan nilai parameter dan *degrees of freedom*, berikut hasil pengujian tersebut.

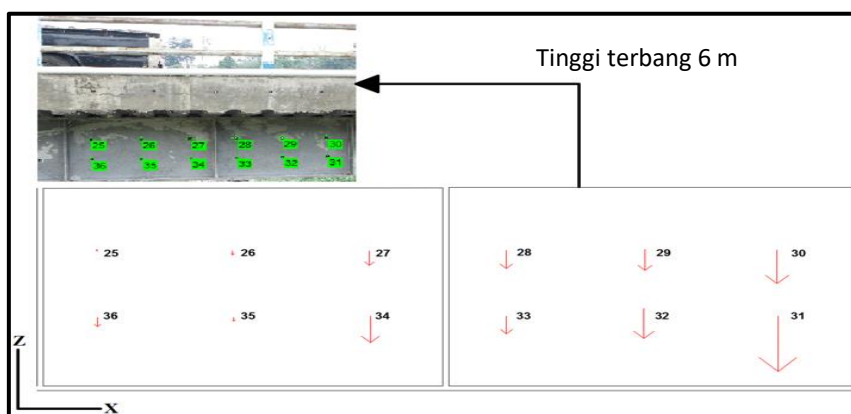
Tabel 8. Hasil uji signifikan pada tingkat kepercayaan 95%

Nama titik	Nilai T	Nilai F pada tabel fisher	Hasil uji
1	-0,033	2,61	Diterima
2	-0,092	2,61	Diterima
3	-0,100	2,61	Diterima
:	:	:	:
14	-0,002	2,61	Diterima
:	:	:	:
60	0,089	2,62	Diterima
:	:	:	:
371	0,046	2,61	Diterima

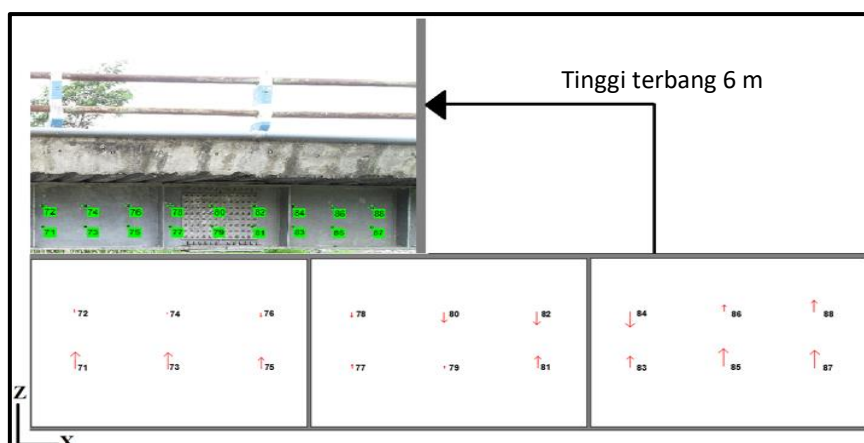
Tabel 8 menunjukkan bahwa hasil uji signifikan pada tingkat kepercayaan 95% diterima untuk seluruh titik, artinya seluruh titik pantau tidak terdeformasi (stabil) pada tingkat signifikan tersebut.



Gambar 12. Visualisasi model pergeseran terhadap sumbu Z pada titik yang berada tepat di bawah beban



Gambar 13. Visualisasi model pergeseran terhadap sumbu Z pada titik yang berada tepat di bawah beban



Gambar 14. Visualisasi model pergeseran terhadap sumbu Z pada titik yang tidak berada tepat di bawah beban

PENUTUP

Simpulan

Teknologi drone *DJI Phantom 4 Pro* mampu digunakan sebagai akuisisi data deformasi untuk uji lendut jembatan dengan ketelitian maksimum di bawah 1 mm, artinya *drone* mampu mendeteksi lendutan maupun pergeseran ke arah z positif pada jembatan hingga di bawah 1 mm. Ketelitian ini

dicapai melalui penerapan konfigurasi konvergen kombinasi yang merupakan konfigurasi pemotretan dengan ketelitian kalibrasi terbaik.

Dalam proses pengujian *drone DJI Phantom 4 Pro* untuk uji lendut, 19 titik pantau menunjukkan adanya lendutan yang relatif kecil akibat pembebanan dan 25 titik lainnya tidak menunjukkan adanya lendutan. 25 titik pantau yang tidak

menunjukkan adanya lendutan setelah pembebanan diakibatkan oleh adanya aktivitas kendaraan truk pasir di bawah jembatan yang memiliki bobot lebih besar dari massa beban di atas jembatan, sehingga mengakibatkan arah pergeseran terhadap sumbu z menjadi tidak stabil.

Saran

Pemantauan deformasi direkomendasikan untuk dilakukan sebanyak lebih dari dua kali (>2 epok) untuk memperoleh kesimpulan dari pengujian deformasi yang lebih sesuai.

Ucapan Terima Kasih

1. Teknik Geodesi FTSP ITN Malang
2. Desa Pandansari Kabupaten Malang

DAFTAR PUSTAKA

- Aulejtner, M. (2011). Investigation on Methods for Making Detailed Digital Models of Sculptures and Other Artefacts. *Master Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, AGH University of Science and Technology.*
- Fauzan, K. N., Suwardhi, D., Murtiyoso, A., Gumilar, I., & Sidiq, T. P. (2021). Close-Range Photogrammetry Method for SF6 Gas Insulated Line (GIL) Deformation Monitoring. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43, 503-510. doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-503-2021
- Fraser, C. S. (2005). Network Orientation Models for Image-Based 3D Measurement. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing & Spasial Information Science*, 36(5), 9.
- Ghilani, C. D. (2018). *Adjustment Computations Spatial Data Analysis 6 Edition*. Unites States: John Wiley & Sons, Inc.
- Kayikci, E. T., & Yalcinkaya, M. (2015). Determination of Horizontal Movements by Static Deformation Models: A Case Study on the Mining Area. *Experimental Techniques*, 39(6), 70–81.
- Ke, T., Zhang, Z. X., & Huang, S. (2012). The Scanning Photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 345–349.
- Layli, B.A.A,. (2019). Analisis Deformasi Jembatan Luk Barat Kecamatan Gangga Pasca Gempa Lombok 2018 Menggunakan Metode metode Empiris dan Numerik. *Artikel Ilmiah, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Mataram.*
- Ludfi, A. (2018). Analisis deformasi vertikal bangunan Bertingkat Kampus ITS Sukolilo Menggunakan Metode Terrestrial. *Tugas Akhir, Departemen Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.*
- Luhmann, T. (2011)., Robson, S., & Harley, I. *Close Range Photogrammetry*. Soctland: Whittles Publishing.
- Matsuoka, R. (2011). *Measurement Accuracy of Center Location of a Circle by Centroid Method. Photogrammetric Image Analysis*, 6592, 297–308.
- Matsuoka, R. (2015). Measurement precision and accuracy of the centre location of an ellipse by weighted centroid method. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2, 111–118. doi: 10.5194/isprsannals-II-3-W4-111-2015.
- Odumosu, J. O., Ajayi, O. G., Nnam, V. C., & Ajayi, S. (2021). Achieving close range photogrammetry with non-metric mobile phone cameras. *Geodesy and Cartography*, 47, 71–79. doi: 10.3846/gac.2021.12241.
- Pillon, Simone. (2020). Monitoring of a Landslide Through the Use of UAV Survey. EGU General Assembly. doi: 10.5194/egusphere-egu2020-7696.
- Rokhmana, C.A., Tjahjadi, M.E., dan Agustina, F.D. (2019). Cadastral Surveys with Non-metric Camera Using Uav: A Feasibility Study. *KnE Engineering*, 2019, 227–237. doi: 10.18502/keg.v4i3.5856.
- Setan, H., & Singh, R. (2001). Deformation analysis of a geodetic monitoring network. *Geomatica*, 55(3), 333–346.
- Setiati, N. R., & Surviyanto, A. (2013). Analisis Uji Beban Kendaraan Terhadap Jembatan (Loading Test Analysis of Full Integral Bridge). *Jurnal Jalan-Jembatan*, 30(3), 190–204.
- Shortis, M. R. (1995). *Practical Testing of the Precision and Accuracy of Target Image Centring Algorithms. Videometrics IV*, 2598, 65–76.
- Tjahjadi, E. (2010). Evaluasi Pemanfaatan Kamera Dijital SLR Untuk Pemantauan Deformasi Bangunan. *Sondir*, 4(7), 1-12.
- 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.*
- Tjahjadi, M. E., & Handoko, F. (2017). Single frame resection of compact digital cameras for UAV imagery.

International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI).

Wolf, P. R., & Dewitt, B. A. (2000). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS 3 Edition*. Unites States: The McGraw-Hill Companies.

Wolf, P. R., Dewitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2013). *Elements of Photogrammetry with Applications in Gis 4 Editions*. United States: McGraw-Hill Company.

Yildirim, U.K., dan Sisman, Y. (2019). the Deformation Analysis Using Hypothesis Tests. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 4(2), 88–93. doi: 10.26833/ijeg.473944.
