

Dampak Ukuran Sensor Kamera Dijital Dalam Kemampuan Untuk Mendeteksi Pergeseran Deformasi Struktur

Martinus Edwin Tjahjadi¹, Fransisca Dwi Agustina², Rudyat Wisnu Hardika³

Email edwin@lecturer.itn.ac.id¹, siscaagustina@lecturer.itn.ac.id², rudyathardika2@gmail.com³

^{1,2,3} Institut Teknologi Nasional Malang

Informasi Artikel

Diterima : 27 Agu 2024

Direvisi : 29 Nov 2024

Disetujui : 30 Des 2024

Kata Kunci

Sensor Kamera,
Deformasi, Fotogrametri,
komputer Visi,
Pengukuran Dimensi

Abstrak

Sensor kamera digital seperti CCD (Charge Coupled Device) atau CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) adalah perangkat semikonduktor yang berfungsi menangkap cahaya yang diteruskan lensa untuk diubah menjadi foto digital. Alat ini memiliki berbagai macam dimensi yang berbeda-beda antar merek dan tipe kamera yang beredar di pasaran. Artikel ini mengulas apakah perbedaan ukuran sensor kamera dapat mempengaruhi kemampuan kamera untuk mendeteksi pergeseran terkecil yang mungkin terjadi dari deformasi struktur. Dua tipe ukuran sensor yang berbeda yaitu tipe full frame dan APSC (Advanced Photo System type C) dari dua merk kamera yang berbeda akan dikaji kemampuan sensor itu dalam pendeteksian deformasi. Pengujian menggunakan teknik close range photogrammetry (CRP) terhadap struktur pilar jembatan yang diduga mengalami deformasi vertikal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perbedaan ukuran sensor mempengaruhi kemampuan kamera untuk mendeteksi deformasi. Semakin besar ukuran sensor kamera maka akan semakin detail deformasi atau pergeseran struktur yang dapat dideteksi.

Keywords

Camera Sensor, Deformation,
Photogrammetry, Computer
Vision, Dimensional
Inspection

Abstract

Digital camera sensors such as CCD (Charge Coupled Device) or CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) are semiconductor devices for converting a captured light passing through the lens into digital photos. Their size and dimension are varied among camera's brands and types available on the market. This article reviews whether their size differences could affect on the camera's ability to detect the smallest possible shifts in structural deformation. Two different types of sensor sizes, namely full frame type and APSC (Advanced Photo System type C) from two different camera brands are evaluated on the sensor's ability to detect deformation. Close range photogrammetry (CRP) technique is used to observe on bridge pillar structures that were suspected of experiencing vertical movement. results show that sensor differences affect the camera's ability to distinguish smallest possible deformation. The larger the camera sensor size, the more detailed the deformation or structural shift that can be discerned

A. Pendahuluan

Dalam satu dekade terakhir ini kamera digital DSLR (*Digital Single Lens Reflector*) semakin populer digunakan dalam pemotretan untuk monitoring deformasi struktur seperti jembatan, bendungan, gedung bertingkat, jalan raya, dll. [1]–[3]. Berbagai macam merek dan tipe kamera telah beredar luas di pasaran. Pada saat ini berbagai merek dan tipe kamera pada umumnya menggunakan tipe sensor CCD atau CMOS [4]–[7]. Kedua jenis solid state sensor ini berfungsi untuk mengubah cahaya menjadi elektron melalui perangkat *opto-electronic* sehingga partikel cahaya (photon) yang kontinue dapat diukur dan dikuantisasi secara diskrit menjadi nilai intensitas radiometrik [5], [6]. Sensor kamera digital tersusun dari susunan matrik array dengan jutaan elemen individual yang biasanya disebut dengan sensor elemen atau dikenal sebagai picture elemen (piksel) [8], [9].

Jumlah piksel yang berbentuk array persegi panjang atau bujur sangkar pada sensor CCD/CMOS ini memiliki karakteristik utama [10] yaitu setiap piksel memiliki ukuran (*pixel size*) dan kumpulan piksel (*number of pixels*), serta sensitivitas spektral [11], [12]. Kumpulan piksel memiliki elemen array berupa baris (rows) dan kolom (columns) yang disebut sebagai resolusi dan dinyatakan dalam megapiksel (MP). Ukuran piksel berkorelasi dengan sensitivitas spektral, noise, dan optical resolving power (ORP) yaitu kemampuan untuk membedakan obyek yang berdekatan menjadi gambar yang terpisah [13]. Dimensi sensor secara fisik yang melekat pada *electronic board* sangat tergantung dari jumlah kumpulan piksel dan ukuran individu piksel tersebut. Ada kondisi tarik-ulur disini, dimana ukuran sebuah piksel akan berbanding terbalik dengan ukuran kumpulan pikselnya [14].

Pada ukuran atau dimensi opto-electronic wafer atau sensor yang sama, jika ukuran sebuah piksel semakin kecil maka akan semakin banyak jumlah kumpulan pikselnya, demikian pula berlaku untuk kondisi sebaliknya [15]. Namun jika ukuran piksel terlalu kecil akan berdampak pada kemampuan elemen piksel untuk menangkap photon, yang mengakibatkan nilai radiometriknya akan didominasi oleh noise. Semakin kecil ukuran piksel maka akan semakin besar noise yang terekam, atau dikenal sebagai efek difraksi [13], [16]. Sebaliknya jika ukuran sebuah piksel semakin besar maka noise akan semakin rendah dan waktu exposure kamera akan semakin cepat, akan tetapi resolusi gambar akan berkurang. Karena kondisi yang antagonis ini maka pengkategorian tipe kamera berdasarkan ukuran sensor (*solid state sensor size*) merupakan hal yang lazim diulas oleh para pakar kamera [13], [17]–[22].

Para praktisi pemantau deformasi struktur saat ini banyak menggunakan kamera DSLR dengan sensor CCD/CMOS [4], [5]. Ketepatan estimasi perubahan minimum dari bentuk dan dimensi struktur yang masih dapat dideteksi oleh kamera sangatlah tergantung dari keakurasian geometri dari array sensor [12], [13], dimana keakurasian ini tergantung pula dari ketelitian (kelurusan dan kesikuan), dan kedataran (*flatness*) dari penempatan setiap elemen-elemen piksel pada sensor [23], [24]. Dari kondisi ini dapat dipahami bahwa ukuran sensor dapat mempengaruhi keakurasian dari pergeseran deformasi yang diamati. Semakin besar ukuran elemen piksel dan array sensornya maka akan semakin rendah noise yang didapatkan, akan tetapi potensi ketidaktelitian dan ketidakdataran dari penempatan setiap elemen piksel akan semakin besar sehingga dapat

mempengaruhi keakurasian hasil pemotretan[12], [25]–[27]. Hal sebaliknya, jika ukuran array sensor semakin kecil maka jumlah elemen piksel akan semakin berkurang, sehingga potensi ketidakteelitian dan ketidakdataran dari penempatan setiap elemen piksel akan semakin kecil dan hal ini dapat meningkatkan keakurasian hasil pemotretan.

Oleh karena itu penelitian ini akan mengevaluasi dua tipe ukuran sensor kamera yang ada di pasaran yaitu sensor dengan dimensi yang paling besar (maximum) dikenal sebagai sensor *full-frame*, dan sensor dengan dimensi yang lebih kecil yaitu tipe APSC. Pada umumnya, sensor CCD/CMOS dengan tipe full-frame memiliki ukuran 36mm x 24mm, dan tipe APSC memiliki dimensi 22,3mm x 14,8mm. Ukuran sebuah elemen piksel tergantung dari besar resolusi MP foto digital dan dimensi sensornya. Dan untuk membedakan tingkat kelurusan, kesikuan, dan kedataran penempatan elemen-elemen piksel dipilih kamera dari dua merek yang berbeda, karena setiap pabrikan akan memiliki teknik/metode yang berbeda dalam memproduksi kamera sensor. Setiap merek kamera terdiri dari dua tipe ukuran sensor, dan akan digunakan empat buah kamera. Tujuan dari investigasi ini adalah untuk memberikan informasi kepada praktisi surveyor deformasi atau pihak lain tentang pengaruh ukuran sensor kamera terhadap keakurasian geometri dari obyek yang dipotret, dalam hal ini adalah informasi pergeseran deformasi. Kegunaan dari studi ini adalah agar praktisi dapat memilih tipe kamera yang sesuai untuk nilai minimum besaran deformasi yang akan dideteksi.

B. Metode Penelitian

Praktik pengukuran dimensi obyek tanpa menyentuh langsung obyek yang diamati dapat dilakukan melalui pemotretan dengan kamera digital, seperti kamera DSLR. Metode CRP telah lama digunakan oleh praktisi surveyor dalam pengukuran dengan ketelitian yang tinggi (hingga sub milimeter). Agar dapat mengukur kuantitas minimum dari shift, crack, atau pergeseran yang masih dapat dideteksi (*minimally detectable quantity*) maka alat ukur yang digunakan, dalam hal ini adalah kamera, haruslah memiliki ketelitian yang setara atau lebih kecil dari nilai minimum pergeseran yang akan diamati. Untuk mengetahui kemampuan kamera dalam mendeteksi dan mengukur besaran minimum ini maka kamera tersebut haruslah terkalibrasi.

Penelitian ini menggunakan teknik kalibrasi diri atau dikenal sebagai *camera self-calibrating bundle adjustment* [12], [28]–[30] untuk mengevaluasi potensi akurasi geometrik kamera dalam pemantauan deformasi. Salah satu keunggulan teknik kalibrasi diri ini terletak pada kemudahan dalam proses kalibrasi. Pada umumnya proses kalibrasi dilakukan di laboratorium dengan cara mengintervensi perangkat keras kamera agar dapat menghasilkan ketelitian pengukuran yang optimal. Teknik kalibrasi diri ini sebaliknya, melakukan kalibrasi bukan pada kameranya, tetapi pada foto-foto digital hasil pemotretan, sehingga kamera dapat langsung digunakan seperti pemotretan biasa di lapangan. Foto-foto terkalibrasi berasal dari foto-foto hasil pemotretan yang telah dikoreksi secara matematika berdasarkan prinsip teori kesegaran (kolinieritas)[31]. Teori ini menyebutkan bahwa distorsi yang terdapat pada lensa dan noise yang terdapat pada sensor CCD/CMOS akan membelokkan cahaya dari obyek yang melalui lensa dan diterima

pada permukaan bidang sensor[12]. Jika seandainya tidak terdapat distorsi dan noise pada kamera, maka cahaya ini akan merupakan garis lurus. Berdasarkan postulat ini, jika secara matematika kelurusan berkas cahaya tersebut dapat direkonstruksikan kembali dan akan dapat dihasilkan foto-foto digital yang telah terbebas dari distorsi dan noise, atau diistilahkan sebagai foto terkalibrasi. Foto terkalibrasi ini dapat dikategorikan dalam dua tipe. Yang pertama adalah foto yang secara fisik telah terkoreksi melalui proses rektifikasi foto digital, dan yang kedua adalah foto hasil pemotretan, yang belum terkalibrasi, namun pada saat melakukan diseminasi informasi spasial harus dikoreksikan terlebih dahulu dari distorsi dan noise yang telah dihitung. Sehingga informasi yang didapat tetaplah informasi spasial yang telah terbebas dari distorsi dan noise tersebut. Penelitian ini menggunakan cara yang kedua dalam melakukan pembacaan koordinat foto untuk titik-titik fitur pada obyek yang dipotret.

Setelah kamera terkalibrasi, maka setiap berkas sinar yang masuk melalui lensa akan merupakan garis lurus yang akan diterima elemen piksel pada bidang sensor. Beberapa faktor pada sensor CCD/CMOS seperti antara lain ukuran piksel, kumpulan piksel, serta kedataran, kesikuan dan kelurusan penempatan elemen-elemen piksel akan mempengaruhi proses perekaman dan kuantisasi proporsi photon yang terdeteksi pada setiap elemen-elemen piksel. Proporsi photon yang terekam pada suatu elemen piksel akan dapat mempengaruhi kondisi kelurusan garis tersebut pada foto digitalnya, atau dikenal sebagai *departure from colinearity condition* [12], [13], [25], [32], dan hal ini merupakan kesalahan sistematis yang masih mengkontaminasi sensor kamera digital. Kesalahan sistematis ini akan mempengaruhi kemampuan pendeteksian kamera terhadap besaran minimum pergeseran deformasi yang diamati [1], [7].

Setelah foto-foto terkalibrasi didapatkan, langkah selanjutnya adalah menghitung koordinat titik-titik amat pada obyek struktur yang akan dipantau pergeserannya. Proses tersebut dikenal sebagai teknik triangulasi atau interseksi ruang. Jika suatu titik fitur obyek terlihat dari minimum dua buah foto maka garis-garis lurus (berkas sinar) dari setiap foto-foto yang bertampalan akan dipertemukan atau diinterseksikan pada permukaan obyek struktur yang dimaksud. Hasil interseksi ini akan menghasilkan koordinat 3D dalam sistem koordinat obyek. Pergeseran deformasi dapat dihitung nilainya apabila koordinat titik yang dimaksud dapat dihitung dari dua rentang waktu (epok) pemotretan yang berbeda. Dari perbedaan nilai koordinat titik fitur inilah dapat dilakukan asesmen apakah perbedaan ini murni bersumber dari terjadinya pergeseran struktur ataukah berasal dari ketidaktelitian, atau kesalahan sistematis, yang masih mengkontaminasi kamera.

Berdasarkan metodologi diatas, agar dapat melakukan analisa kemampuan kamera dipilihlah dua obyek struktur pilar jembatan yang diduga mengalami penurunan seperti tersaji pada Gambar 1. Kedua pilar ini adalah pilar jembatan Tunggulmas yang menghubungkan Jalan Tlogomas di Kelurahan Tlogomas dengan Jalan Saxophone, Kelurahan Tunggul Wulung, Kota Malang, Jawa Timur. Kedua pilar itu memiliki lebar sekitar 6 meter, dan tinggi pilar 1 kurang 19 meter dan tinggi pilar 2 kurang lebih 16 meter.



Gambar 1. Retro target yang dilekatkan pada struktur pilar

Pada permukaan kedua pilar tersebut dilekatkan stiker adhesive retro reflektif target yang memiliki refletansi cahaya sangat tinggi, sehingga akan terlihat lebih tajam dan lebih kontras terhadap obyek sekitarnya jika dilihat pada fotonya. Kegunaan stiker ini adalah sebagai titik amat deformasi struktur pilar. Pada pilar 1 dilekatkan 60 retro target dan pada pilar 2 dilekatkan 90 stiker.

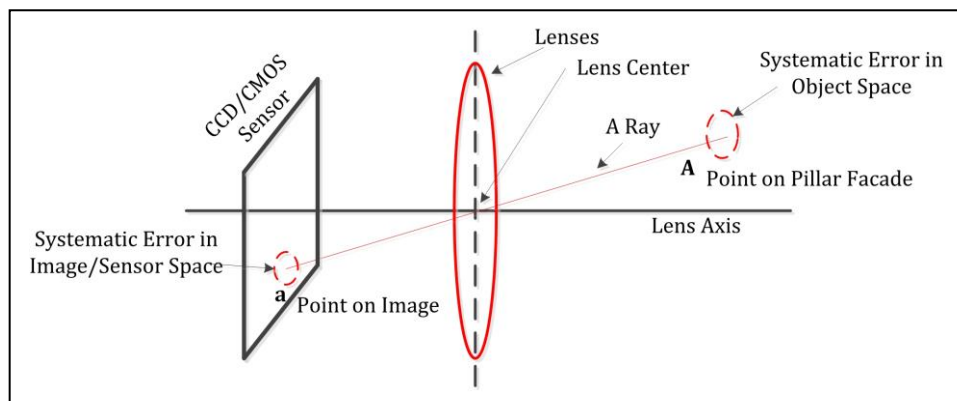
Setelah itu dilakukan pemotretan dengan teknik CRP terhadap seluruh stiker yang melekat pada kedua pilar sebanyak dua kali atau dua epok. Rentang waktu pemotretan antara epok pertama dan epok kedua adalah sekitar tiga bulan. Pada setiap epok, masing-masing pilar dipotret dengan menggunakan empat kamera yang berbeda, seperti tersaji pada Tabel 1. Untuk merek kamera yang sama terdapat dua tipe sensor yang berbeda yaitu APSC dan Full Frame. Dari tabel ini terlihat bahwa walaupun kameranya bertipe sama tapi dari merek yang berbeda, ukuran real dimensi sensornya dapat berbeda, dan akan mengakibatkan ukuran untuk sebuah pikselnya menjadi berbeda pula. Sebagai tambahan, panjang fokus lensa sebelum proses kalibrasi diri dilakukan adalah 35mm untuk seluruh kamera.

Tabel 1. Karakteristik sensor kamera dari dua merek dan dua tipe yang berbeda [24]

Merek	Tipe	Dimensi Sensor (mm)		Resolusi Sensor (piksel)		Ukuran Piksel (mm)	
		Horisontal	Vertikal	Horisontal	Vertikal	Horisontal	Vertikal
Canon EOS 700D	APSC	22,3	14,9	5184	3456	0,00430	0,00430
NIKON D7100		23,5	15,6	6000	4000	0,00392	0,00392
Canon EOS 5D Mark III	Full Frame	36	24	5760	3840	0,00625	0,00625
NIKON D750		35,9	24	6016	4016	0,00597	0,00597

Proses perhitungan koordinat titik-titik retro dan kalibrasi diri dilakukan secara simultan bersamaan dengan teknik *self-calibrating bundle adjustment* menggunakan perangkat lunak berbasis *open source*. Proses perhitungan diawali dengan melakukan proses registrasi foto untuk titik-titik amat. Pada setiap epok, dihitung empat set data koordinat titik-titik amat dan data parameter kalibrasi kamera. Dengan kata lain, setiap sesi pemotretan akan menghasilkan satu set data koordinat titik-titik amat dan parameter kalibrasi kameranya. Data parameter kalibrasi yang diperoleh akan digunakan untuk mengkoreksi data koordinat titik amat dari distorsi lensa dan noise sensor kamera.

Data koordinat yang terkalibrasi inilah yang dipakai untuk melakukan proses interseksi koordinat titik amat di setiap foto yang bertampalan untuk menghasilkan koordinat 3D obyek struktur pilar. Dari sepasang informasi koordinat 3D pada fitur obyek dan informasi koordinat 2D untuk fitur yang sama pada foto akan memiliki hubungan satu-satu yang mengkonstruksikan kelurusan sebuah berkas sinar. Dari kondisi inilah kesalahan sistematis dari sensor kamera yang masih mengkontaminasi kelurusan berkas sinar dapat dikuantisasi besaran nilainya berdasarkan dari aspek spasial di obyek 3D dan permukaan foto 2D. Kondisi kelurusan berkas sinar ini dapat dijelaskan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Kondisi kesegarisan berkas sinar dari obyek ke foto yang melalui pusat lensa

Pada Gambar 2 kesalahan sistematis yang masih terdapat pada sensor digambarkan sebagai lingkaran atau elips baik pada permukaan foto maupun pada obyek pilar. Semakin besar diameter lingkaran/elips menandakan semakin besar pula dampak dari kesalahan sistematis tersebut. Dengan kata lain, semakin kecil ukuran lingkaran/elips akan semakin teliti pula hasil pemotretan. Untuk kondisi sempurna yaitu sensor tanpa noise maka kedua lingkaran/elips kesalahan sistematis itu akan tidak ada lagi. Kesalahan sistematis yang terdapat pada bidang sensor secara langsung akan mempengaruhi ketelitian pengukuran koordinat obyek pada pilar. Dari kondisi diatas, apabila informasi ketelitian pengukuran yang diwakili oleh lingkaran/elips dapat diketahui besaran nilainya baik pada permukaan foto atau pada obyek maka toleransi ketelitian pemotretan yang masih dapat dilakukan akan dapat ditentukan nilainya. Penentuan besar nilai tersebut tentunya dilakukan dengan menyandingkan dengan tujuan pengukuran deformasi,

yaitu nilai pergeseran minimum deformasi yang akan dideteksi. Uraian selanjutnya akan menjelaskan hasil-hasil dari setiap tahapan metodologi yang telah dijelaskan.

C. Hasil dan Pembahasan

Data parameter kalibrasi diri kamera akan dikategorikan berdasarkan obyek pilar dan epok pengukuran untuk setiap merek dan tipe kamera seperti tersaji pada Tabel 2 dan Tabel 3. Keempat kamera yang digunakan memakai lensa kamera *fixed-lens* dengan panjang fokus 35mm. Setiap sesi pemotretan menggunakan jumlah foto yang sama yaitu 12 foto untuk pemotretan masing-masing pilar dan untuk setiap epoknya.

Tabel 2. Parameter kalibrasi diri kamera bertipe APSC: Canon EOS 700D dan Nikon D7100

Parameter	Canon EOS 700D				Nikon D7100			
	Pilar 1		Pilar 2		Pilar 1		Pilar 2	
	Epok 1	Epok 2	Epok 1	Epok 2	Epok 1	Epok 2	Epok 1	Epok 2
c (mm)	35.0929	35.1323	34.9991	36.88	35.9062	36.3529	35.9575	35.1788
x_p (mm)	-0.5301	0.0993	-0.2987	-0.4526	0.0065	-0.1343	-0.1318	-0.1056
y_p (mm)	-0.1318	-0.3028	-0.3198	-0.1492	-0.3339	-0.402	-0.3407	-0.2969
K₁	4.606E-05	4.745E-05	4.295E-05	1.151E-04	-1.264E-04	-1.086E-04	-1.036E-04	-1.166E-04
K₂	3.052E-07	-1.753E-07	1.602E-08	6.926E-07	2.039E-07	1.105E-08	-1.054E-06	-9.135E-07
K₃	-6.815E-09	4.968E-10	-8.353E-10	-3.968E-09	-1.377E-09	-3.436E-09	6.990E-09	4.708E-09
P₁	6.929E-05	2.804E-04	-6.175E-06	-7.986E-05	-2.739E-05	-1.539E-05	-1.897E-05	5.772E-06
P₂	2.412E-05	1.548E-04	6.321E-05	-9.637E-06	4.581E-05	6.648E-05	6.078E-05	3.711E-05
B₁	8.402E-06	-9.391E-04	6.860E-05	-7.642E-06	1.229E-03	1.044E-03	4.030E-04	-4.827E-04
B₂	2.782E-05	-1.059E-03	-1.064E-04	7.286E-05	9.274E-05	2.546E-04	-1.782E-04	-1.244E-04

Tabel 3. Parameter kalibrasi diri kamera bertipe Full Frame: Canon EOS 5D Mark III dan Nikon D750

Parameter	Canon EOS 700D				Nikon D7100			
	Pilar 1		Pilar 2		Pilar 1		Pilar 2	
	Epok 1	Epok 2	Epok 1	Epok 2	Epok 1	Epok 2	Epok 1	Epok 2
c (mm)	34.6266	33.2247	34.3347	33.6881	34.0577	34.1014	34.0072	34.113
x_p (mm)	-0.0512	0.1668	-0.0923	0.1233	-0.0584	-0.0562	-0.0673	-0.0757
y_p (mm)	-0.0011	-0.354	-0.0216	-0.1502	-0.1358	-0.1406	-0.122	-0.1269
K₁	3.462E-05	3.570E-05	2.714E-05	1.922E-05	7.060E-05	6.365E-05	7.001E-05	6.395E-05
K₂	-2.556E-07	-1.741E-07	-1.914E-07	-1.017E-07	-2.159E-07	-1.031E-07	-1.784E-07	-8.223E-08
K₃	7.381E-10	2.435E-10	3.707E-10	4.400E-11	4.856E-10	4.036E-11	2.753E-10	-9.621E-11
P₁	3.001E-05	-3.108E-05	3.847E-05	-2.933E-05	4.711E-06	6.687E-06	5.835E-06	6.074E-06
P₂	8.396E-06	6.877E-05	7.870E-06	3.505E-05	-9.594E-06	-3.714E-06	-1.271E-05	-4.206E-06
B₁	-8.196E-05	2.330E-04	-2.577E-04	-3.677E-05	3.481E-04	4.899E-04	2.055E-04	5.106E-04
B₂	1.855E-05	8.234E-05	-2.750E-05	2.008E-05	-7.493E-05	-2.207E-04	-6.620E-05	-3.047E-04

Tabel 2 dan Tabel 3 memperlihatkan hasil perhitungan 10 parameter teknik kalibrasi diri kamera digital. Parameter $K_1 - K_3$ dan $P_1 - P_2$ adalah parameter untuk mengkompensasikan distorsi lensa yaitu distorsi radial dan tangential. Kedua distorsi tersebut pada foto akan mengakibatkan garis lurus akan terlihat melengkung. Parameter B_1 dan B_2 akan mengkompensasikan ketidaklurusan, ketidaksikuan, dan ketidakdataran bidang sensor CCD/CMOS. Sedangkan tiga parameter sisanya digunakan untuk mengkoreksi sumbu lensa kamera (Gambar 2). Parameter c digunakan untuk mengkoreksi panjang fokus lensa, walaupun

nominal panjang lensa yang sesungguhnya berbeda. Parameter x_p dan y_p akan mengoreksi ketegaklurusan sumbu lensa terhadap bidang sensor CCD/CMOS dan juga berfungsi sebagai titik nol (datum) pengukuran koordinat foto.

Kesepuluh parameter ini digunakan untuk mengoreksi kelurusan berkas/garis sinar yang terdeviasi oleh lensa dan bidang sensor. Parameter-parameter inilah yang dipakai untuk mengoreksikan koordinat foto titik-titik amat retro target menjadi koordinat foto yang terkalibrasi. Untuk setiap sesi pemotretan, dapat dihitung ketelitian pengukuran koordinat foto. Semakin besar distorsi dan noise yang dapat dikompensasikan akan semakin kecil / semakin teliti pula pengukurannya. Semakin teliti pengukuran koordinat foto akan semakin teliti pula pengukuran koordinat titik-titik amat retro target (Gambar 2). Dengan kata lain, semakin lurus proyeksi berkas garis yang masuk ke lensa kamera dari obyek menuju bidang sensor, akan semakin presisi pengukuran koordinat fotonya dan akan semakin teliti pula perhitungan koordinat 3D obyek. Hal ini dapat diilustrasikan pada tabel berikut.

Tabel 4. Kesalahan sistematis yang masih mengkontaminasi pada pengukuran koordinat foto dan perhitungan koordinat obyek dari kamera bertipe APSC: Canon EOS 700D dan Nikon D7100

RMS	APSC Canon EOS 700D				APSC Nikon D7100			
	PILAR 1		PILAR 2		PILAR 1		PILAR 2	
	EPOK 1	EPOK2	EPOK 1	EPOK2	EPOK 1	EPOK2	EPOK 1	EPOK2
Koordinat foto (piksel)	0.08	0.09	0.14	0.35	0.18	0.2	0.28	0.22
Koordinat foto (Mikron)	0.344	0.387	0.602	1.505	0.7056	0.784	1.0976	0.8624
Koordinat obyek (mm)	0.308	0.336	0.273	1.542	0.295	0.794	0.538	0.371

Tabel 5. Kesalahan sistematis yang masih mengkontaminasi pada pengukuran koordinat foto dan perhitungan koordinat obyek dari kamera bertipe Full Frame: Canon EOS 5D Mark III dan Nikon D750

RMS	Canon EOS 5D Mark III				Nikon D750			
	PILAR 1		PILAR 2		PILAR 1		PILAR 2	
	EPOK 1	EPOK2	EPOK 1	EPOK2	EPOK 1	EPOK2	EPOK 1	EPOK2
Koordinat foto (piksel)	0.07	0.08	0.1	0.1	0.04	0.05	0.05	0.06
Koordinat foto (Mikron)	0.4375	0.5	0.625	0.625	0.2388	0.2985	0.2985	0.3582
Koordinat obyek (mm)	0.273	0.524	0.304	0.360	0.116	0.129	0.087	0.132

Tabel 4 dan Tabel 5 memperlihatkan besaran nilai RMS kesalahan sistematis yang masih mengkontaminasi nilai koordinat foto yang terkalibrasi dan dinyatakan dalam satuan piksel dan micrometer. Dengan menyandingkan data parameter kalibrasi di Tabel 2 dan 3, dapat diamati bahwa walaupun koordinat foto terkalibrasi dari titik-titik amat telah dikoreksi nilainya, namun masih ada kesalahan sistematis yang masih belum bisa dihilangkan. Kesalahan sistematis yang belum terkompensasikan ini belum termodelkan dalam kesepuluh parameter kalibrasi. Dampak dari fakta ini adalah mempengaruhi ketelitian perhitungan koordinat obyek dan pada akhirnya akan berpengaruh pada nilai besaran minimum pergeseran deformasi yang masih bisa terdeteksi.

Kedua tabel memperlihatkan bahwa korelasi ketelitian pada koordinat foto sebanding dengan ketelitian perhitungan koordinat obyek. Secara umum untuk semua kamera dan semua pilar, ketelitian pengukuran di epok 1 masih lebih baik

daripada ketelitian pengukuran di epok 2. Untuk setiap kamera yang dipakai memotret kedua pilar dari dua epok, terlihat bahwa semua kamera memberikan ketelitian pengukuran koordinat obyek dibawah atau setara dengan 0,5mm, kecuali kamera Canon 700D yang memberikan nilai berkisar 0,615 mm. Namun dari kategori tipe sensor, sensor full frame memberikan ketelitian yang lebih unggul yaitu berkisar 0,24mm dibandingkan kamera APSC yang hanya berkisar pada ketelitian 0,56mm. Dari hal ini dapat dipahami bahwa kamera bertipe full frame dapat digunakan untuk mendeteksi pergeseran deformasi dengan nilai minimum pergeseran yang masih mampu untuk dideteksi adalah sebesar 0,24mm, sedangkan untuk kamera APSC akan berkurang kemampuannya yaitu hanya mampu mendeteksi pergeseran minimum 0,56mm. Untuk mengklarifikasi temuan ini, mari kita lihat data pengukuran koordinatnya yang tersaji pada Tabel 6 sampai Tabel 13 berikut.

Tabel 6. Koordinat 3D obyek dari kamera APSC Canon EOS 700D epok 1 dan epok 2 pada pilar 1 jembatan Tunggalmas

No	Epok 1 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	-1806.857	18912.538	2341.468	0.1488	0.2895	0.1049
2	-1328.64	19058.369	2335.019	0.1300	0.2707	0.0848
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
59	3054.573	20283.181	-534.2083	0.0999	0.273	0.0747
60	3536.247	20434.764	-603.9036	0.1115	0.2916	0.086
SUM				0.1172	0.2746	0.076
RMSE:	0.31mm					
No	Epok 2 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	-1807.546	18911.827	2340.897	0.1414	0.3305	0.0844
2	-1329.511	19058.254	2334.45	0.1198	0.3087	0.0782
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
59	3055.169	20283.316	-534.3576	0.094	0.2982	0.0792
60	3536.692	20434.895	-603.6661	0.107	0.3092	0.0888
SUM				0.106	0.3108	0.0729
RMSE:	0.34mm					

Tabel 7. Koordinat 3D obyek dari kamera APSC Canon EOS 700D epok 1 dan epok 2 pada pilar 2 jembatan Tunggalmas

No	Epok 1 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	1878.4404	14707.741	1535.584	0.0886	0.3231	0.1158
2	1404.2909	14549.131	1540.591	0.08	0.3016	0.1039
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.

89	-1430.704	13126.239	-1463.848	0.1139	0.285	0.0724
90	-1850.045	12976.313	-1473.336	0.1262	0.2835	0.0749
SUM				0.0929	0.2465	0.0699
RMSE:	0.27mm					

No	Epok 2 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	1881.7091	14699.777	1535.207	0.4235	1.3048	0.2788
2	1406.2961	14544.989	1539.795	0.404	1.261	0.2472
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
89	-1430.417	13123.481	-1464.71	0.824	2.2847	0.4578
90	-1843.963	12953.678	-1471.402	0.9024	2.3172	0.4768
SUM				0.5239	1.4240	0.2748
RMSE:	1.54mm					

Tabel 8. Koordinat 3D obyek dari kamera Full Frame Canon EOS 5D Mark III epok 1 dan epok 2 pada pilar 1 jembatan Tunggulmas

No	Epok 1 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	-3619.572	16174.696	898.6377	0.1004	0.2679	0.0845
2	-3125.56	16098.24	908.9678	0.0816	0.2481	0.0792
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
59	1407.428	15043.383	-1780.29	0.1104	0.2444	0.0748
60	1907.761	14965.305	-1832.89	0.1189	0.2601	0.0786
SUM				0.0900	0.2476	0.0706
RMSE:	0.27mm					

No	Epok 2 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	-3618.308	16175.654	897.4657	0.1665	0.5792	0.1373
2	-3124.631	16099	908.2326	0.1143	0.4973	0.1129
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
59	1409.029	15044.686	-1780.088	0.2011	0.5331	0.0975
60	1909.689	14966.841	-1832.567	0.2454	0.6022	0.1105
SUM				0.1357	0.4976	0.0936
RMSE	0.52mm					

Table 9. Koordinat 3D obyek dari kamera Full Frame Canon EOS 5D Mark III epok 1 dan epok 2 pada pilar 2 jembatan Tunggulmas

No	Epok 1 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	1872.274	13814.2458	1880.7432	0.0967	0.2969	0.0946
2	1395.8901	13666.402	1915.3929	0.095	0.2885	0.0923
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
89	-1615.8847	12219.0612	-885.2964	0.1346	0.246	0.0771
90	-2036.7996	12079.4764	-868.3822	0.1518	0.327	0.0824

SUM				0.1153	0.2715	0.0732
RMSE:	0.3mm					
Epok 2 (mm)						
No	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	1871.8081	13814.5265	1880.4367	0.0833	0.3546	0.0935
2	1395.8899	13665.7861	1915.0736	0.0762	0.3395	0.0899
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
89	-1616.949	12219.7652	-885.888	0.1446	0.3102	0.0622
90	-2037.9198	12080.5501	-868.9625	0.1653	0.3372	0.0737
SUM				0.1122	0.336	0.0653
RMSE:	0.36mm					

Tabel 6 – Tabel 9 menunjukkan nilai ketelitian atau RMSE koordinat 3D titik-titik amat dari perhitungan interseksi dengan menggunakan kamera canon bertipe APSC dan Full Frame untuk kedua pilar jembatan. Jika Tabel 6 diperbandingkan dengan Tabel 4, ketidakpastian hasil ukuran koordinat pilar 1 di epok 1 sebesar 0,31mm adalah setara dengan kesalahan sistematis koordinat obyek sebesar 0,308mm pada Tabel 4. Demikian pula untuk ketelitian pengukuran pilar1 di epok 2 setara dengan kesalahan sistematisnya pada Tabel 4 yaitu sebesar 0,336 mm versus 0,34mm. Kesetaraan hasil-hasil antara ketelitian pengukuran obyek dengan nominal kesalahan sistematis hasil kalibrasi berlaku pula untuk Tabel 7 – 9. Secara rerata, ketelitian koordinat 3D obyek hasil pemotretan tidak melebihi dari residu kesalahan sistematis yang tersisa. Dengan kata lain, kamera Canon baik bertipe APSC maupun Full Frame masih mampu mendeteksi pergeseran koordinat obyek yang nilai minimum pergeserannya 0,5mm atau lebih besar. Tetapi untuk kamera yang bertipe full frame mampu mendeteksi perseran minimum hingga 0,36mm saja.

Table 10. Koordinat 3D obyek dari kamera APSC Nikon D7100 epok 1 dan epok 2 pada pilar 1 jembatan Tunggulmas

Epok 1 (mm)						
No	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	-2618.858	19726.48	1042.713	0.1797	0.2631	0.1705
2	-2118.922	19727.72	1034.79	0.1433	0.228	0.151
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
59	2413.2212	19580.24	-1836.97	0.1745	0.2163	0.13
60	2916.1119	19583.83	-1907.98	0.2111	0.2272	0.1443
SUM				0.1474	0.2217	0.1272
RMSE:	0.3mm					
Epok 2 (mm)						
No	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	-2619.807	19726.66	1043.78	0.2079	0.6836	0.1845
2	-2119.355	19728.09	1035.865	0.1935	0.6658	0.1802
.	.	.	.	.	.	.

59	2411.096	19580.55	-1837.84	0.1756	0.8712	0.1805
60	2914.1611	19585.44	-1909.25	0.1831	0.8847	0.1849
SUM				0.1839	0.7544	0.1676
RMSE:	0.79mm					

Table 11. Koordinat 3D obyek dari kamera APSC Nikon D7100 epok 1 dan epok 2 pada pilar 2 jembatan Tunggulmas

No	Epok 1 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	1610.7715	14408.606	1518.238	0.1874	0.5659	0.1835
2	1111.4739	14434.742	1513.895	0.174	0.5189	0.1724
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
89	-1981.639	14150.7	-1539.48	0.155	0.5345	0.1534
90	-2424.107	14164.142	-1557.02	0.1878	0.6112	0.1707
SUM				0.1596	0.4948	0.1398
RMSE	0.54mm					

No	Epok 2 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	1610.9689	14412.884	1519.416	0.126	0.3367	0.1182
2	1111.8456	14438.1	1515.385	0.1194	0.3312	0.1155
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
89	-1980.78	14152.219	-1540.52	0.123	0.3428	0.1177
90	-2422.712	14167.641	-1558.29	0.1365	0.3833	0.1238
SUM				0.1127	0.3383	0.1038
RMSE	0.37mm					

Table 12. Koordinat 3D obyek dari kamera Full Frame Nikon D750 epok 1 dan epok 2 pada pilar 1 jembatan Tunggulmas

No	Epok 1 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	-2884.6	14342.7	1456.69	0.038	0.1096	0.0425
2	-2384.7	14335.4	1459.39	0.0328	0.1041	0.0397
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
59	2212.95	13963.2	-1309.2	0.0603	0.0993	0.0321
60	2719.21	13956.7	-1369.6	0.0645	0.1057	0.0348
SUM				0.0443	0.1013	0.034
RMSE:	0.12mm					

No	Epok 2 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	-2884.5	14342.5	1456.47	0.0608	0.1209	0.0492
2	-2384.8	14335.5	1459.31	0.0546	0.1181	0.0472
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
59	2213.03	13963.5	-1309.2	0.0389	0.1131	0.0351

60	2719.29	13956.8	-1369.5	0.0384	0.1187	0.0352
SUM				0.0455	0.1139	0.0391
RMSE:	0.13mm					

Table 13. Koordinat 3D obyek dari kamera Full Frame Nikon D750 epok 1 dan epok 2 pada pilar jembatan Tunggulmas

No	Epok 1 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	1876.9	12155.6	1014.24	0.0444	0.0735	0.0368
2	1393.02	12279.7	993.301	0.0432	0.0725	0.036
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
89	-1703.3	12206.4	-2081.4	0.0382	0.0653	0.0335
90	-2135.3	12307.5	-2113.1	0.0398	0.068	0.0347
SUM				0.0405	0.0707	0.0318
RMSE:	0.09mm					
No	Epok 2 (mm)					
	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
1	1876.67	12155.2	1014.03	0.0632	0.1159	0.0433
2	1393.03	12279.4	993.152	0.0596	0.1123	0.0422
3	949.944	12400.2	988.563	0.0569	0.1127	0.0417
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
88	-1265.8	12096.1	-2054.7	0.0454	0.1042	0.0416
89	-1703.5	12206.5	-2081.3	0.0451	0.107	0.0428
90	-2135.4	12307.7	-2113	0.0473	0.1144	0.045
SUM				0.0549	0.1140	0.0378
RMSE:	0.13mm					

Tabel 10 – Tabel 13 menunjukkan nilai ketelitian atau RMSE koordinat 3D titik-titik amat dari perhitungan interseksi dengan menggunakan kamera Nikon bertipe APSC dan Full Frame untuk kedua pilar jembatan. Jika kamera Nikon Full Frame pada Tabel 13 diperbandingkan dengan Tabel 5, ketidakpastian hasil ukuran koordinat pilar 1 di epok 1 sebesar 0,12mm adalah setara dengan kesalahan sistematis koordinat obyek sebesar 0,128mm pada Tabel 5. Demikian pula untuk ketelitian pengukuran pilar1 di epok 2 setara dengan kesalahan sistematisnya pada Tabel 5 yaitu sebesar 0,129 mm versus 0,13mm. kesetaraan hasil-hasil antara ketelitian pengukuran obyek dengan nominal kesalahan sistematis hasil kalibrasi berlaku pula untuk Tabel 10 – 12. Secara rerata ketelitian koordinat 3D obyek hasil pemotretan tidak melebihi dari residu kesalahan sistematis yang tersisa. Dengan kata lain, kamera Nikon baik bertipe APSC maupun full frame masih mampu mendeteksi pergeseran koordinat obyek yang nilai minimum pergeserannya 0,31mm atau lebih besar. Tetapi untuk kamera yang bertipe full frame mampu mendeteksi perseran minimum hingga 0,12mm.

Sebagai penutup, jika kamera DSLR yang dilengkapi dengan lensa *fixed-lens* 35mm digunakan untuk memonitor pergeseran deformasi struktur dengan titik-titik amatnya berupa stiker retro target, maka untuk kamera yang sensornya bertipe APSC, pergeseran minimum yang masih mampu dideteksi adalah sebesar

0,56mm. Untuk kamera DSLR dengan sensor full frame masih mampu mendeteksi pergerakan minimal hingga 0,24mm. Kamera bertipe full frame lebih mampu untuk mendeteksi pergeseran yang lebih kecil. Dengan kata lain, semakin besar ukuran sebuah elemen piksel sensornya akan semakin kecil pergeseran minimum yang masih dapat dideteksi. Ketelitian pengukuran koordinat obyek dapat dijadikan indikator utama dalam sensitifitas kamera untuk mendeteksi pergeseran minimum deformasi.

D. Simpulan

Ukuran sensor kamera dan ukuran piksel sangat berpengaruh terhadap ketelitian pengukuran koordinat obyek dalam survei deformasi dengan menggunakan kamera DSLR. Kamera dengan sensor Full Frame cenderung lebih stabil hasilnya dan memiliki sensitivitas yang lebih peka dalam mendeteksi pergeseran minimum deformasi. Nilai minimum pergeseran deformasi yang masih mampu dideteksi oleh kamera akan tergantung dari sisa kesalahan sistematis yang masih belum terkompensasikan.

E. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Institut Teknologi Nasional Malang yang telah memfasilitasi keberlangsungan penelitian, dan mengucapkan terimakasih pula kepada tim penelitian Jembatan Tunggulmas Program Studi Teknik Geodesi ITN Malang.

F. Referensi

- [1] M. E. Tjahjadi, L. A. Parsamardhani, and K. T. Suhari, "Bridge Structural Deformation Monitoring Using Digital Camera," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1051, no. 1, p. 012009, Jul. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1051/1/012009.
- [2] S. Abu Dabous and S. Feroz, "Condition monitoring of bridges with non-contact testing technologies," *Autom. Constr.*, vol. 116, p. 103224, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103224>.
- [3] İ. E. Bal, D. Dais, E. Smyrou, and V. Sarhosis, "Novel invisible markers for monitoring cracks on masonry structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 300, p. 124013, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124013>.
- [4] F. Nex *et al.*, "UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 184, pp. 215–242, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006>.
- [5] M. Wang, Y. Cheng, B. Guo, and S. Jin, "Parameters determination and sensor correction method based on virtual CMOS with distortion for the GaoFen6 WFV camera," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 156, pp. 51–62, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.08.001>.
- [6] X. Liu *et al.*, "High-speed videogrammetric measurement of the deformation of shaking table multi-layer structures," *Measurement*, vol. 154, p. 107486, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107486>.
- [7] M. E. Tjahjadi, S. S. Sai, and F. Handoko, "Assessing a 35mm fixed-lens sony alpha-5000 intrinsic parameters prior to, during, and post uav flight

- mission,” in *The 1st International Conference on Geodesy, Geomatics, and Land Administration 2019*, 2019, p. xx, [Online]. Available: <http://geodesi.undip.ac.id/geodeta2019/>.
- [8] J. Li and Z. Liu, “Camera Geometric Calibration Using Dynamic Single-Pixel Illumination With Deep Learning Networks,” *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 30, no. 8, pp. 2550–2558, 2020, doi: 10.1109/tcsvt.2019.2927550.
- [9] V. K. Reja, K. Varghese, and Q. P. Ha, “Computer vision-based construction progress monitoring,” *Autom. Constr.*, vol. 138, p. 104245, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104245>.
- [10] Y. Tan, G. Li, R. Cai, J. Ma, and M. Wang, “Mapping and modelling defect data from UAV captured images to BIM for building external wall inspection,” *Autom. Constr.*, vol. 139, p. 104284, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104284>.
- [11] G. Guillet, T. Guillet, and L. Ravanel, “Camera orientation, calibration and inverse perspective with uncertainties: A Bayesian method applied to area estimation from diverse photographs,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 159, pp. 237–255, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.013>.
- [12] T. Luhmann, C. Fraser, and H.-G. Maas, “Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 115, pp. 37–46, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.006>.
- [13] T. A. Clarke, X. Wang, and J. G. Fryer, “The Principal Point and CCD Cameras,” *Photogramm. Rec.*, vol. 16, no. 92, pp. 293–312, 1998, [Online]. Available: <http://www.blackwell-synergy.com/links/doi/10.1111/0031-868X.00127/abs>.
- [14] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and I. Harley, *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*. Scotland, UK.: Whittles Publishing, 2006.
- [15] J. C. McGlone, *Manual of Photogrammetry: 6th Edition*. Bethesda, Maryland: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2013.
- [16] G. Zhang, S. Yang, P. Hu, and H. Deng, “Advances and Prospects of Vision-Based 3D Shape Measurement Methods,” *Machines*, vol. 10, no. 2, p. 124, 2022, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/machines10020124>.
- [17] M. E. Tjahjadi and F. D. D. Agustina, “Single image orientation of UAV’s imagery using orthogonal projection model,” in *2017 International Symposium on Geoinformatics, ISyG 2017*, 2017, pp. 19–24, doi: 10.1109/ISYG.2017.8280668.
- [18] S. S. Sai, M. E. Tjahjadi, M. Ajiza, and H. Purwanto, “Geometric quality of orthophoto from aerial images obtained by UAV’s consumer grade camera: Lesson learnt,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 3077, no. 1, p. 50062, 2024, doi: 10.1063/5.0202468.
- [19] S. N. Yaryshev, L. Li, M. B. Marinov, and T. S. Djamiykov, “Development of a Digital Camera-Based Method for Bridge Deformation Measurement,” in *2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET)*, 2020, pp. 1–4, doi: 10.1109/et50336.2020.9238322.

- [20] X. Zhang, P. Zhao, Q. Hu, M. Ai, D. Hu, and J. Li, "A UAV-based panoramic oblique photogrammetry (POP) approach using spherical projection," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 159, pp. 198–219, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.016>.
- [21] M. E. Tjahjadi and L. A. Parsamardhani, "Mathematics of projective versus perspective collineations in camera orientation and calibration," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2614, no. 1, p. 40010, Jun. 2023, doi: 10.1063/5.0125841.
- [22] M. Kedzierski and P. Delis, "Fast Orientation of Video Images of Buildings Acquired from a UAV without Stabilization," *Sensors*, vol. 16, no. 951, pp. 1–16, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s16070951>.
- [23] M. R. Shortis, S. Robson, and H. A. Beyer, "Principal Point Behaviour And Calibration Parameter Models for Kodak DCS Cameras," *Photogramm. Rec.*, vol. 16, no. 92, pp. 165–186, 1998.
- [24] R. Wackrow, J. H. Chandler, and P. Bryan, "Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement," *Photogramm. Rec.*, vol. 22, no. 118, pp. 121–134, 2007.
- [25] S. S. Sai, M. E. Tjahjadi, A. Norani, and K. T. Suhari, "Geometric quality of UAV's consumer grade camera: Lessons learnt," *AIP Conf. Proc.*, vol. 3077, no. 1, p. 50063, 2024, doi: 10.1063/5.0202469.
- [26] H. Yanagi and H. Chikatsu, "Camera Calibration in 3D Modelling for UAV Application," in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, 4th ed., vol. XL-4/W5, pp. 223–226, doi: <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-W5-223-2015>.
- [27] F. Remondino and C. Fraser, "Digital camera calibration methods: considerations and comparisons," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 36, no. 5, pp. 266–272, 2006.
- [28] R. Wackrow and J. H. Chandler, "A convergent image configuration for DEM extraction that minimises the systematic effects caused by an inaccurate lens model," *Photogramm. Rec.*, vol. 23, no. 121, pp. 6–18, 2008, doi: 10.1111/j.1477-9730.2008.00467.x.
- [29] D. Cosandier, M. A. Chapman, and SPIE, "High precision target location for industrial metrology," in *Videometrics*, 1992, vol. SPIE 1820, pp. 111–122.
- [30] M. E. Tjahjadi, L. A. Parsamardhani, and K. T. Suhari, "Bridge Structural Deformation Monitoring Using Digital Camera," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1051, no. 1, p. 012009, Jul. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1051/1/012009.
- [31] S. I. Granshaw, "Bundle Adjustment Methods in Engineering Photogrammetry," *Photogramm. Rec.*, vol. 10, no. 56, pp. 181–207, 1980.
- [32] C. S. Fraser, "Network Orientation Models for Image-Based 3D Measurement," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spasial Inf. Sci.*, vol. 36, no. 5, p. 9, 2005.