

Kaji Awal Pengembangan Metode Visi Komputer Berbasis Deteksi Tepi untuk Pengukuran Sebidang Defleksi Struktur

Trihono Sewoyo^{1, a *}, Andi Isra Mahyuddin^{2, b}, Tatacipta Dirgantara^{3, c}, Indra Nurhadi^{4, d}

^{1,2,3,4} Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

^atrihonosewoyo@gmail.com, ^bandiisra@yahoo.com, ^ctdirgantara@ftmd.itb.ac.id,
^dindro.nurhadi@gmail.com

Abstrak

Kegagalan struktur yang bersifat katastrofik akan menimbulkan korban jiwa serta kerugian material yang tidak sedikit. Kegagalan tersebut mungkin dapat dicegah jika dilakukan pemantauan secara kontinyu maupun periodik terhadap kondisi struktur tersebut. Pemantauan kondisi struktur dikenal dengan istilah SHM (*structural health monitoring*) yang berkembang pesat dewasa ini. Sebagian kondisi struktur dapat dipantau melalui parameter statik maupun dinamik. Kelebihan pemantauan parameter statik dibanding dinamik adalah kemudahan pengukuran dan biaya operasional yang lebih murah sehingga sistem pengukuran defleksi statik struktur menarik untuk diteliti. Salah satu metode pengukuran defleksi statik yang bersifat non-kontak dan menjadi perhatian banyak peneliti adalah metode berbasis visi (*vision*) dengan kamera sebagai sensor utama. Dalam makalah ini akan dibandingkan metode pengukuran sebidang berbasis deteksi tepi dengan hasil pengukuran yang dianggap sebagai referensi (*dialgauge*). Obyek uji berupa batang ditumpu sederhana (*engsel – gelinding*). Kamera yang digunakan adalah kamera Canon EOS 7D dengan lensa fix 50mm. Sebagai referensi pengukuran, *dialgauge* dipasang pada tiga titik yang berbeda pada obyek uji. Ketelitian dihitung berdasarkan pererataan hasil pengukuran dari ketiga titik tersebut. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa ketelitian yang dicapai oleh metode yang dikembangkan berkisar 6%. Hal ini dianggap cukup baik, mengingat penelitian ini adalah penelitian awal dan akan dilakukan studi parametrik terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi ketelitian metode pengukuran yang dikembangkan.

Kata Kunci: Deteksi Tepi, Defleksi Struktur, Kamera, Struktur, Visi Komputer

Pendahuluan

Pada saat ini, penelitian dalam metode pengukuran struktur dalam kerangka SHM (*structural health monitoring*) mengarah pada pengukuran berbasis visi (*vision based measurement*). Metode pengukuran ini banyak yang bersifat menyeluruh (*full-field*), 2 Dimensi (2D) maupun 3 Dimensi (3D), dan non-kontak.

Dibanding pengukuran konvensional seperti LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*), jam ukur, inclinometer, potensiometer, dan DCDT (*Direct Current Differential Transformer*) [1] metode berbasis visi ini lebih mudah dalam pelaksanaannya, dan lebih murah dari sisi biaya.

Metode pengukuran dengan kamera sebagai sensor utama pada awalnya

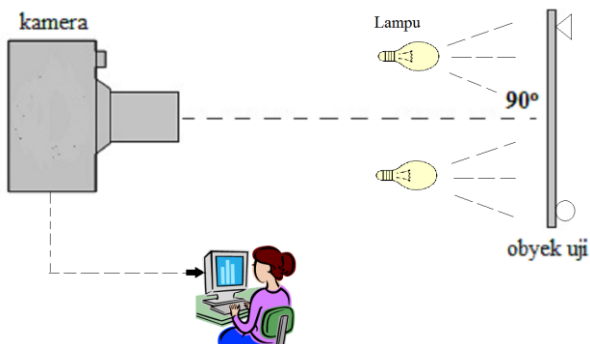
dikembangkan dari bidang fotogrammetri. Seiring dengan perkembangan teknologi komputer dan optik, pengukuran dengan menggunakan kamera sebagai sensor utama menjadi semakin murah [2].

Pada saat ini, metode pengukuran non-kontak yang banyak digunakan adalah fotogrammetri dan visi komputer (*computer vision*). Walaupun sama-sama menggunakan kamera sebagai sensor utama, tujuan utama fotogrammetri adalah ketelitian, sedangkan visi komputer mengutamakan fleksibilitas [3]. Teknik yang banyak digunakan dalam fotogrammetri untuk pengukuran defleksi struktur ada dua yaitu konvensional dan berbasis deteksi tepi [2]. Sedangkan pada bidang visi komputer, metode yang paling luas digunakan adalah teknik korelasi citra digital

(DIC – *digital image correlation*). Pengukuran defleksi struktur dapat menggunakan satu kamera (*in-plane measurement*) atau menggunakan dua kamera (*stereo vision measurement*). Dalam pengukuran sebidang, bidang ukur dengan bidang sensor kamera haruslah sejajar (*in-plane*). Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh metode pengukuran defleksi struktur yang lebih mudah, murah dengan ketelitian yang memadai.

Pengukuran Sebidang

Pengukuran sebidang berbasis visi adalah pengukuran yang dilakukan dengan satu kamera pada obyek ukur, dimana perubahan posisi obyek yang diukur ada pada bidang yang sejajar dengan bidang sensor kamera[5]. Sistem pengukuran sebidang dapat dilihat pada Gambar 1 berikut,



Gambar 1. Sistem pengukuran sebidang berbasis visi

Peralatan pengukuran terdiri dari satu kamera sebagai sensor dan komputer sebagai alat pengolah data. Sumber sinar digunakan jika pengukuran dilakukan pada ruangan atau kondisi yang gelap. Tahapan pengukuran sebidang adalah[4]: 1. Kalibrasi: Sebelum melakukan pengukuran, perlu dilakukan proses kalibrasi yang bertujuan untuk memperoleh hubungan antara piksel citra kamera dengan ukuran metrik dunia nyata. 2. Pengambilan citra obyek: Pengambilan citra dilakukan dua kali yaitu, sebelum dan sesudah pembebanan. 3. Deteksi Tepi: Citra yang diperoleh digunakan sebagai masukan pada perangkat lunak deteksi tepi. 4. Proses suaian kurva: Garis tepi yang diperoleh dicari persamaannya.

Deteksi Tepi

Deteksi tepi pada citra merupakan masalah penting dalam pemrosesan citra selama lebih dari 65 tahun [6]. Pada citra level abu-abu (*grey level image*) sebuah tepi didefinisikan sebagai perubahan intensitas yang signifikan. Deteksi tepi adalah proses yang mendeteksi keberadaan dan lokasi transisi intensitas ini [6]. Proses ini adalah salah satu operasi yang paling sering digunakan pada analisis citra dan ada banyak algoritma untuk mendeteksi tepi dibanding topik lain. Hal ini disebabkan tepi membentuk garis yang mewakili bentuk obyek. Representasi tepi pada sebuah citra secara drastis juga menurunkan jumlah data yang diproses. Ini berarti bahwa jika tepi pada sebuah citra dapat diidentifikasi secara teliti, semua obyek dapat dilokasikan dan berbagai sifat dasar seperti luas, keliling, dan bentuk obyek dapat diukur. Oleh karena bidang visi komputer meliputi identifikasi dan klasifikasi obyek pada citra, maka deteksi tepi merupakan perangkat yang penting dalam bidang visi komputer[7].

Metode deteksi tepi ada beberapa macam dan dikelompokkan menjadi tiga [8], yaitu:

1. Turunan orde pertama/ metode gradien seperti: Operator Roberts, Operator Sobel, Operator Prewitt
2. Turunan orde kedua seperti: *Laplacian*, *Laplacian of Gaussian (LoG)*, *Difference of Gaussian (DoG)*
3. Deteksi Tepi Optimal seperti Deteksi Tepi Canny

Secara umum, langkah utama dalam deteksi tepi adalah sebagai berikut:

1. *Smoothing*: menekan derau (*noise*) semaksimal mungkin tanpa merusak tepi. Pada prakteknya hal ini dilakukan dengan proses pentapisan (*filtering*).
2. *Enhancement/sharpening*: menerapkan proses diferensiasi untuk meningkatkan kualitas tepi (penajaman tepi).
3. *Thresholding*: menentukan piksel tepi mana yang harus dibuang sebagai derau sehingga menyisakan tepi yang ‘benar’.
4. *Localization*: menentukan secara eksak lokasi tepi.

Set-up Pengujian

Set-up pengujian terdiri dari batang ditumpu engsel–gelinding seperti terlihat pada

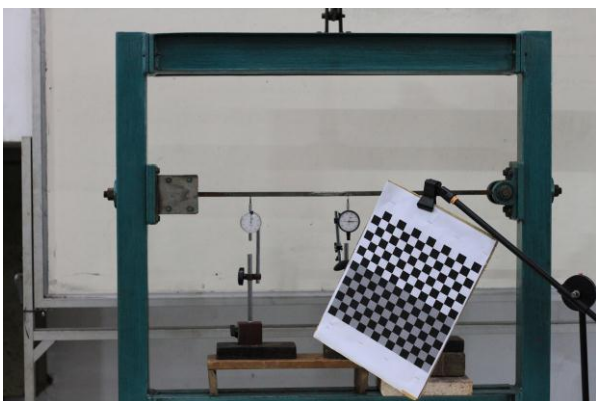
Gambar 2. Tiga buah jam ukur digunakan untuk mengukur defleksi yang terjadi jika batang diberi beban. Pada kondisi ini, sebuah kamera yang diletakkan sedemikian rupa sehingga bidang sensor kamera dianggap sebidang dengan bidang pergerakan vertikal batang. Untuk mendekati kondisi ini, digunakan *waterpass* pada tumpuan kamera.



Gambar 1. Set-up pengujian

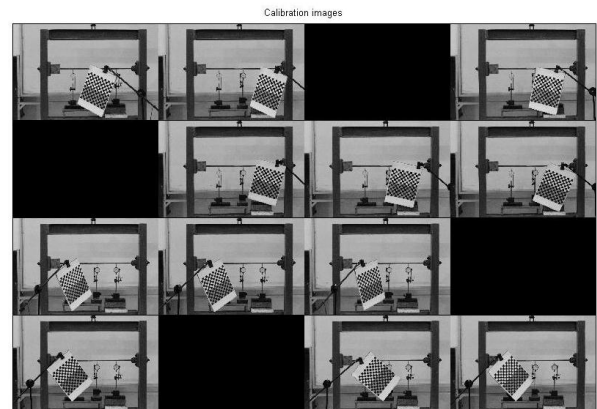
Kalibrasi

Langkah pertama dari metode pengukuran adalah kalibrasi. Proses ini bertujuan untuk memperoleh hubungan piksel citra dengan ukuran metrik dunia nyata (*real world*). Hal ini dilakukan dengan cara memotret papan kalibrasi yang dalam hal ini berupa papan dengan pola papan catur (*chessboard pattern*). Dimensi kotak-kotak ini telah diketahui. Papan ini diletakkan di depan obyek uji dengan posisi yang bervariasi. Gambar 2 memperlihatkan hal ini. Setiap posisi kemudian diambil citranya. Set-up pengujian diatur sedemikian rupa dan tidak boleh ada perubahan posisi setelahnya. Kamera juga di atur sedemikian rupa sehingga bidang sensor kamera dianggap sejajar dengan bidang geseran obyek uji. Kamera inipun tidak boleh ada geseran setelah proses kalibrasi.



Gambar 2. Salah satu posisi papan kalibrasi

Pada pengujian ini, pengambilan citra papan kalibrasi dilakukan 12 kali dengan berbagai posisi. Berbagai posisi papan kalibrasi ini dapat dilihat pada Gambar 3.



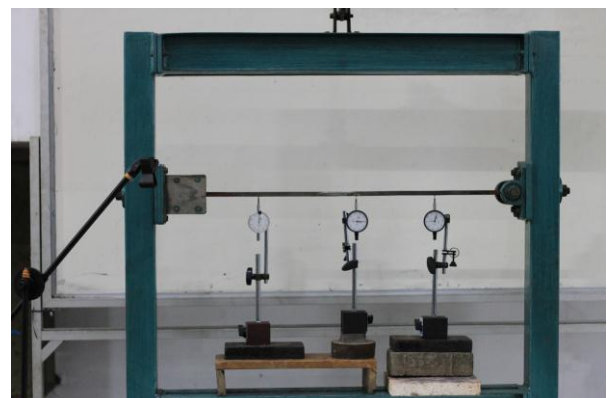
Gambar 3. Berbagai posisi papan kalibrasi

Semua citra ini kemudian diolah dengan menggunakan program kalibrasi. Luaran program berupa panjang fokus arah x dan y dalam piksel, koordinat titik prinsip, ketegak-lurusan sisi piksel (*skewness*), distorsi lensa, dan kesalahan piksel.

Dalam model lubang jarum, data-data ini kemudian digunakan untuk menghitung jarak proyeksi titik P dunia nyata pada arah y pada bidang sensor. Setelah jarak ini diketahui, faktor yang menghubungkan piksel citra dengan ukuran metrik dunia nyata diperoleh.

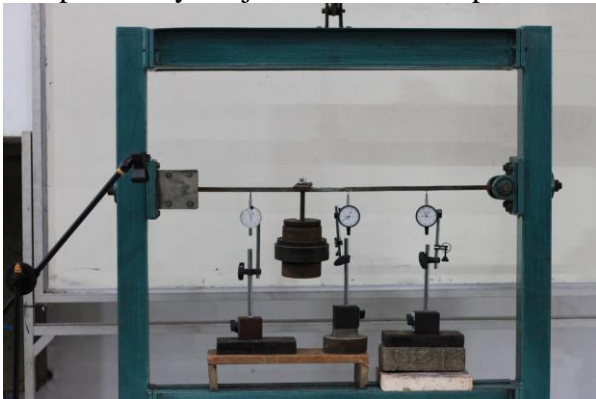
Pengambilan Citra Obyek Uji

Setelah proses kalibrasi, langkah selanjutnya adalah mengambil citra obyek uji sebelum dan setelah pembebanan. Kondisi ini dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Citra obyek uji pra pembebanan

Pada kondisi ini, obyek uji dan kamera tidak boleh bergeser dari saat proses kalibrasi. Jadi posisi obyek uji dan kamera tetap.



Gambar 5. Citra obyek uji pasca pembebanan

Konversi Piksel ke Metrik (mm)

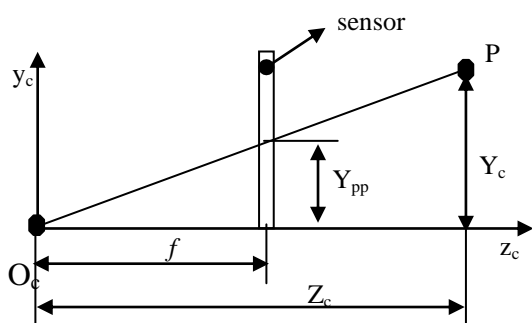
Metode kalibrasi yang digunakan dalam pengukuran ini adalah metode yang dikembangkan oleh Bouguet [9]

Transformasi koordinat titik dalam dunia nyata dengan koordinat sebarang ke koordinat kamera yang berpusat pada titik fokus dinyakan oleh

$$XX_c = R_{c-n} * XX + T_{c-n} \quad (1)$$

XX_c adalah koordinat P dalam dunia nyata terhadap koordinat kamera. XX adalah koordinat titik P terhadap koordinat dunia nyata (pemilihan koordinat sebarang). R_{c-n} adalah matriks rotasi citra 1 hasil kalibrasi. T_{c-n} adalah matriks translasi citra ke n. Dengan demikian ada sejumlah n matriks rotasi dan translasi jika pengukuran dilakukan n kali.

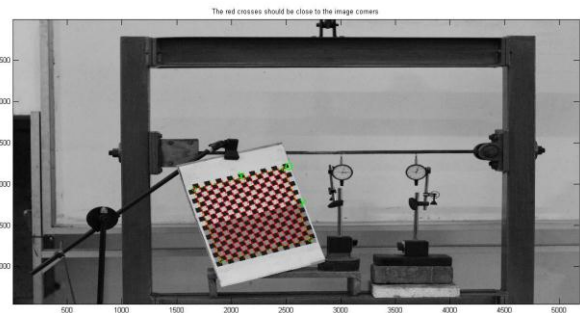
Gambar 6 berikut merupakan sistem proyeksi lubang jarum (*pinhole model*) kamera sistem koordinat kamera yang berpusat pada titik fokus kamera O_c .



Gambar 6. Proyeksi lubang jarum

f adalah panjang fokal yang diperoleh dari kalibrasi. Z_c dan Y_c diperoleh dari persamaan (1). Sedangkan X, Y, Z adalah sebarang titik P yang dipilih dari papan kalibrasi, dengan sistem koordinat dunia nyata yang telah dipilih pada saat proses ekstraksi pojok grid seperti Gambar 7.

Jadi besaran yang dicari adalah Y_{pp} dalam satuan piksel. Y_{pp} ini adalah proyeksi Y_c pada bidang sensor kamera (*image plane*).



Gambar 7. Koordinat dunia nyata

Dari Gambar 6 diperoleh hubungan,

$$Y_{pp} / f = Y_c / Z_c \quad \text{atau}$$

$$Y_{pp} = Y_c f / Z_c \quad (2)$$

Posisi real titik P arah y_c pada bidang sensor kamera Y_p , dengan melibatkan distorsi lensa, diperoleh dari persamaan,

$$Y_p = fc_2 Y_d + cc_2 \quad (3)$$

fc_2 adalah panjang fokal arah y_c hasil kalibrasi. cc_2 adalah koordinat titik prinsip arah y_c hasil kalibrasi.

Y_d adalah koordinat yang dinormalkan, yang diperoleh dari hubungan,

$$x_n = \begin{bmatrix} X_c / Z_c \\ Y_c / Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Y_d = (1 + kc_1 r^2 + kc_2 r^4 + kc_5 r^6) y + dx \quad (5)$$

dx adalah vektor distorsi tangensial yang diperoleh dari persamaan

$$dx = kc_3 (r^2 + 2y^2) + 2 kc_4 x y \quad (6)$$

dimana,

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (7)$$

kc_n adalah konstanta distorsi ke-n yang diperoleh dari kalibrasi.

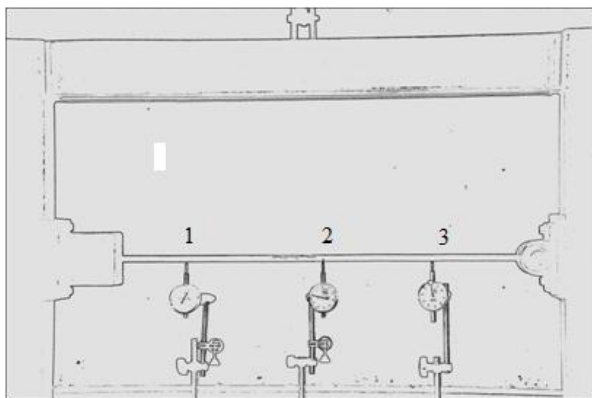
Persamaan (4) sampai (7), digunakan untuk menghitung lokasi titik P dalam arah y pada bidang sensor kamera, dengan melibatkan distorsi lensa.

Hasil dan Pembahasan

Berikut data yang terkait dengan pengukuran: kamera yang digunakan Canon EOS 7D yang mempunyai resolusi 4.5MP – 18MP; kamera di atur pada resolusi 18MP yang terkait dengan ukuran citra 5184x3456 piksel; pengukuran dilakukan di laboratorium dengan penyinaran matahari dan lampu lab sekitar pukul 14.30 WIB.

Papan kalibrasi berukuran 12 x 12 kotak dengan ukuran sisi kotak 18 x 18 mm.

Posisi jam ukur (*dialgage*) ditandai dengan penomoran seperti Gambar 8.



Gambar 8. Penomoran posisi dialgage

Defleksi yang terukur oleh dial gage: titik 1 sebesar 0.929 mm; titik 2 sebesar 1.408 mm; titik 3 sebesar 0.885 mm.

Defleksi dalam piksel dicari dengan cara mencari selisih posisi vertikal titik-titik 1,2, dan 3 pada citra hasil olahan deteksi tepi sebelum dan sesudah pembebanan. Metode deteksi tepi yang digunakan adalah metode Canny. Defleksi titik 1 sebesar 3 piksel, defleksi titik 2 sebesar 5 piksel, dan defleksi titik 3 sebesar 3 piksel.

Berdasarkan hasil kalibrasi dapat dihitung koordinat y_c pada bidang sensor kamera, baik koordinat model lubang jarum maupun koordinat yang melibatkan distorsi lensa. Dari kedua koordinat ini diperoleh faktor konversi piksel ke ukuran metrik. Hasil yang diperoleh

adalah 0.278 untuk model lubang jarum dan 0.277 untuk distorsi.

Hasil ini kemudian dikalikan dengan jarak piksel dan akan diperoleh defleksi dalam satuan metrik. Hasilnya ditabelkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Defleksi

Titik	Defleksi (mm)		
	Pinhole	Distorsi	Dialgage
1	0.834	0.831	0.930
2	1.39	1.385	1.410
3	0.834	0.831	0.885

Kesalahan per titik model pinhole dan model yang melibatkan distorsi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kesalahan

Titik	Kesalahan (%)	
	Pinhole	Distorsi
1	10.3	10.6
2	1.4	1.8
3	5.8	6.1
Rerata	5.8	6.2

Kesalahan yang dicapai di ketiga titik mempunyai rentang yang cukup lebar. Titik 2 yang terletak di sekitar tengah batang, mempunyai kesalahan yang paling kecil yakni sekitar 1.6% untuk kedua model proyeksi.

Titik 1 dan 3 mempunyai perbedaan kesalahan yang cukup berarti. Kedua titik mempunyai geseran skala piksel yang sama yaitu 3 piksel. Hal ini mengindikasikan bahwa skala piksel tidak mampu mendeteksi perbedaan jarak pergeseran kedua titik. Jarak ini adalah 0.045 mm. Hal ini wajar, karena faktor konversi yang diperoleh adalah berkisar 0.28. Untuk mengatasi hal ini, perlu dilakukan suaian kurva terhadap lengkungan tepi batang pada skala subpiksel.

Dari sisi proses pengukuran, tahap kalibrasi merupakan proses yang paling banyak pekerjaan. Dalam hal ini pengambilan citra dilakukan sebanyak 12 kali dan saat komputasi untuk ekstraksi pojok dilakukan secara manual sehingga potensi kesalahan cukup besar.

Dari sisi biaya, metode yang dikembangkan dianggap murah karena hanya menyediakan kamera dan tumpuannya, papan kalibrasi yang terbuat dari bahan yang murah dan komputer yang semakin murah harganya.

Kesimpulan

Dari kegiatan yang dilakukan, terlihat bahwa metode yang dikembangkan cukup mudah untuk dilakukan. Dari sisi biaya juga cukup murah. Ketelitian yang dicapai cukup baik yakni berkisar 6%.

Rekomendasi

Perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk meningkatkan kinerja metode pengukuran defleksi struktur yang dikembangkan. Diantaranya adalah melakukan studi parametrik dan suaian kurva skala subpiksel.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kemenristekdikti atas beasiswa BPPDN Program Doktorat di FTMD ITB dan juga kepada Universitas Muhammadiyah Malang atas dukungan dananya.

Referensi

- U. Attanayake, P. Tang, A. Servi, H. Aktan, "Non-contact Bridge Deflection Measurement: Application of Laser Technology", http://academia.edu/2717212/Non-Contact_Bridge_Deflection_Measurement_Application_of_Laser_Technology, diakses tanggal 5 Juli 2013
- J. Ye, G. Fu, U. P. Poudel, "Edge-Based Close-Range Digital Photogrammetry for Structural Deformation Measurement", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, pp. 475-483, 2011
- W. Forstner, "Computer Vision and Photogrammetry – Mutual Questions: Geometry, Statistics, and Cognition", <http://www.ipb.uni-bonn.de/fileadmin/publication/pdf/Forstner2002Computer.pdf>, diakses tanggal 1 September 2014.
- Sewoyo, T. Mahyuddin, A.I., Dirgantara, T., Nurhadi, I., "Perbandingan Metode Deteksi Tepi untuk Pengukuran Defleksi Struktur"

- M. A. Sutton, S. R. McNeill, J. D. Helm, Y. J. Chao (2000), "Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision", *Photomechanics, Topics Appl. Phys.* 77, 323-372.
- M. Basu (2002), "Gaussian-Based Edge-Detection Methods – A Survey", *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics – Part C: Applications and Reviews*, Vol. 32, No. 3, 252 – 260.
- E. Nadernejad, S. Sharifzadeh, H. Hassanpour, (2008) "Edge Detection Techniques: Evaluations and Comparisons", *Applied Mathematical Sciences*, Vol. 2, no. 31, 1507 – 1520.
- S. Tandon, *Edge Detection - Course # EE6358 Computer Vision*, 2005.
- www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/htmls/example.html, diakses tgl 2 September 2015.