

**PENGGUNAAN PENYEPADANAN IMEJ BERDASARKAN
KAWASAN DALAM FOTOGRAMETRI JARAK DEKAT
BAGI PENGUKURAN PERMUKAAN STRUKTUR**

AHMAD YUSOF BIN SAHDAN

UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA

PENGGUNAAN PENYEPADANAN IMEJ BERDASARKAN
KAWASAN DALAM FOTOGRAMETRI JARAK DEKAT
BAGI PENGUKURAN PERMUKAAN STRUKTUR

AHMAD YUSOF B. SAHDAN

Tesis ini dikemukakan
sebagai memenuhi syarat penganugerahan
ijazah Sarjana Kejuruteraan Awam (Struktur)

Fakulti Kejuruteraan Awam
Universiti Teknologi Malaysia

JANUARI 2006

Tesis Ijazah Sarjana ini didedikasikan istimewa buat ;

Insan – insan yang tersayang

Ayah Sahdan b. Hj Alias

IbuKasmiati bt. Sudar

Tunang ku Nur Riefhana Zakaria

..... diatas segala jasa, pengorbanan dan kasih sayang mu,

Adik – beradik ku Kak Murni, Kak Ipah, Abang Rosli,

dan Adik Nor diatas sokongan kalian.

Penyelia yang disanjung

Prof. Madya Dr. Mushairry Mustaffar

Penyelia bersama yang dihormati

Prof. Madya Ir. Dr. Mohd Hanim Osman dan Tn. Hj. Anuar Ahmad

Serta

Rakan-rakan yang dikasihi

Sekalung budi dan terima kasih ku ucapkan diatas segala dorongan, bimbingan dan bantuan yang telah kalian berikan.

Semoga ALLAH S.W.T membalas jasa budi dan merahmati kalian semua.

Amin

PENGHARGAAN

Dimulakan dengan nama Allah, yang Maha Pemurah lagi amat Mengasihani serta Salam kepada RasulNya yang membimbing manusia ke jalan kebenaran. Alhamdulillah, dengan izinNya yang telah mengurniakan kekuatan kepada penulis, maka dapatlah tesis ini disiapkan sebagai memenuhi syarat bagi penerimaan Ijazah Sarjana Kejuruteraan Awam.

Dikesempatan ini, penulis ingin merakamkan penghargaan yang ikhlas kepada penyelia utama projek ini iaitu Prof. Madya Dr. Mushairry Mustaffar diatas segala bimbingan, dorongan, nasihat dan teguran yang telah dihulurkan sepanjang tempoh menjalankan Projek Sarjana ini.

Penghargaan juga ditujukan kepada penyelia bersama projek ini iaitu, Prof. Madya Ir. Dr. Mohd Hanim Osman dan Tn. Hj. Anuar Ahmad yang telah banyak memberi komen dan pandangan sepanjang menjalankan projek ini.

Ribuan terima kasih juga ditujukan buat semua staf Makmal Unit Ukur Kejuruteraan Awam, teman seperjuangan terutamanya Fazli, Tung Chai dan rakan-rakan lain serta kepada sesiapa jua yang terlibat secara langsung atau pun tidak langsung dalam menjayakan Projek Sarjana ini.

Semoga Allah SWT memberikan ganjaran yang setimpal diatas segala sumbangan yang telah kalian berikan. Wassalam.

ABSTRAK

Dalam kejuruteraan struktur, profil ubahbentuk web adalah berguna sebagai penunjuk atau analisis berhubung dengan kegagalannya. Kaedah makmal yang dijalankan bagi mendapatkan profil ubahbentuk web adalah melalui penggunaan peralatan LVDT. Kaedah ini agak rumit kerana memerlukan pengukuran banyak titik sebelum profil web dapat dipelotkan. Pengukuran mungkin tidak dapat dilakukan disebabkan kedudukan struktur yang tinggi atau tiada laluan. Tesis ini menunjukkan penggunaan fotogrametri digital jarak dekat untuk mendapatkan model tiga dimensi ubahbentuk web struktur keluli. Fotogrametri sememangnya mempunyai kelebihan serta kemampuannya melengkapkan pengukuran bilangan titik yang banyak dan penting pada objek bagi mempersembahkan semula rupabentuk permukaan dengan lebih baik. Kesamaan imej adalah dicapai dengan menggunakan konsep penyepadanan imej berdasarkan kawasan dan penyepadanan imej berdasarkan pemusatan titik penting untuk model permukaan yang mudah. Ujian makmal melibatkan pembebanan ke atas rasuk keluli berbentuk I (*I-beam*) telah dilaksanakan. Imej bahagian web yang telah berubah bentuk telah direkod menggunakan sepasang kamera digital yang telah dikalibrasi dan masing-masing ditetapkan kedudukannya pada satu para. Semasa proses penyepadanan imej, algoritma penyepadanan imej berdasarkan kawasan disemak dan koordinat imej diperbaiki untuk melahirkan model 3D yang diperolehi melalui operasi asas fotogrametri. Pengesahan keputusan telah dibuat dengan membandingkan purata hasil penyepadanan imej bagi kedua-dua kaedah tersebut. Keputusan menunjukkan kaedah yang dicadangkan memberikan ketepatan 1.5 kali ganda lebih baik berbanding kaedah penyepadanan imej berdasarkan pemusatan titik penting. Ini menandakan penggunaan fotogrametri digital jarak dekat berupaya dalam penghasilan profil ubahbentuk web, seterusnya merupakan suatu kaedah alternatif yang berkemampuan bagi memberi maklumat tambahan untuk menentukan ciri-ciri fizikal struktur keluli.

ABSTRACT

In civil engineering, web deformations of a structure, in particular steel, are useful indicators pertaining to its failure. Present laboratory methods employed in determining the web deformations are through the use of LVDT. This method are difficult were many points needed to be measured before plotting of the web profile. Measurement may be cannot done because the positions of structure is high or no assessment. This thesis presents the use of close range digital photogrammetry to obtain a three-dimensional model of a deformation web structure's. Since, photogrammetry has always had the advantage of being able to provide measurements on a large number of points on the object of interest, the representation of the surface deformations would be better. Image correspondence is achieved by using an area-based image matching and centroid matching which makes use of simple surface models. Laboratory tests involving load test on steel I-beams were performed. Images of the web part under loading were captured using off-the shelf digital cameras that are relatively fixed and calibrated. Whilst the image matching process employs a revised area-based matching algorithm, the image coordinate refinements and the three-dimensional model of the web profile was acquired through elementary photogrammetric operations. Validation of the results was done by means of comparing the photogrammetric output against those obtained from centroid image matching. The results show that the differences between area-based matching and centroid matching approaches are significant which suggest that the former yielded accuracy in the order of 1.5 times better than the latter. This indicates that the use of close-range digital photogrammetry in producing the profile of web deformations is a viable alternative approach to furnish information needed in determining the physical properties of steel structures.

KANDUNGAN

BAB	PERKARA	MUKA SURAT
	PENGAKUAN	ii
	DEDIKASI	iii
	PENGHARGAAN	iv
	ABSTRAK	v
	ABSTRACT	vi
	KANDUNGAN	vii
	SENARAI JADUAL	xii
	SENARAI RAJAH	xiii
	SENARAI SINGKATAN	xvii
	SENARAI LAMPIRAN	xviii
1	PENDAHULUAN	
	1.1 Pengenalan	1
	1.2 Pernyataan Masalah	4
	1.3 Objektif Kajian	4
	1.4 Skop Kajian	5
	1.5 Kepentingan Kajian	5
	1.6 Metodologi Kajian	6
	1.6.1 Kajian Literatur	8
	1.6.2 Permodelan Aturcara Komputer	8
	1.6.3 Ujian Pengesahan	8
	1.6.4 Penyepadanan Imej	9
	1.6.5 Perbandingan	9
	1.6.6 Analisis	10
	1.6.7 Kesimpulan	10

1.7	Jangkaan Keputusan	10
1.8	Susunan Tesis	11

2

KAJIAN LITERATUR

2.1	Pengenalan	13
2.2	Penyelesaian Umum Persamaan Kolineariti	14
2.2.1	Putaran Dalam Bentuk Omega, Phi dan Kappa	17
2.2.2	Pelinearan Persamaan Kekolinearan	18
2.2.3	Penggunaan Kekolinearan	19
2.2.4	Putaran Dalam Bentuk Azimut, Senget dan Pusingan	20
2.2.5	Persamaan Kekolinearan Menggunakan Putaran Azimut-Senget-Pusingan	22
2.2.6	Penukaran Daripada Satu Sistem Putaran Kepada Sistem yang Lain	22
2.3	Penjelmaan Koordinat Sama Bentuk Tiga Dimensi	25
2.4	Kaedah Matriks Dalam Pelarasan Kuasa Dua Terkecil	27
2.5	Penentuan Titik dengan Persilangan Dua atau Lebih Imej Ufuk	29
2.6	Definisi Imej Fotogrametri Berdigit	33
2.6.1	Pengukuran Fotogrametri Digital	34
2.6.2	Kelebihan Fotogrametri Berdigit	36
2.7	Teknik Dalam Penyepadanan Imej Berdasarkan Kawasan	37
2.7.1.1	Perkembangan Kaedah Penyepadanan Imej Berdasarkan Kawasan	38
2.7.1.2	Teori Penyepadanan Imej Berdasarkan Kawasan	39
2.7.1.3	Algoritma Bagi Penyepadanan Imej Berdasarkan Kawasan	40
2.7.2.1	Kekangan Geometrik	42
2.7.2.2	Enam Parameter (Affine) Kekangan Geometrik	43
2.7.3.1	Parameter Radiometrik	44
2.7.3.2	Penentuan bagi Parameter Radiometrik	44

2.7.3.3	Permodelan bagi Parameter Radiometrik	45
2.7.4	Penyelesaian bagi Penyepadanan Imej Berdasarkan Kawasan dengan Parameter Geometrik dan Radiometrik	47
2.7.5	Kejituan	49
2.7.6	Kebolehyakinan	50
2.7.7	Ketepatan Model	51
2.8	Lanjutan bagi Penyepadanan Imej Berdasarkan Kawasan	51
2.8.1	Kuasa Dua Terkecil Penyepadanan Imej Secara Kekangan Geometrikal	52
2.8.1.1	Model Fungsian bagi Kuasa Dua Terkecil Penyepadanan Imej Secara Kekangan Geometrikal	52
2.8.1.2	Penyelesaian bagi Kuasa Dua Terkecil Penyepadanan Imej Secara Kekangan Geometrik	55
2.8.2	Kuasa Dua Terkecil Penyepadanan Imej Pelbagai Titik	56
2.8.2.1	Model Fungsian bagi Kuasa Dua Terkecil Penyepadanan Imej Pelbagai Titik	57
2.8.2.2	Penyelesaian bagi Kuasa Dua Terkecil Penyepadanan Imej Pelbagai Titik	59
2.8.3	Kuasa Dua Terkecil Penyepadanan Imej Global	62
2.8.3.1	Teori bagi Kuasa Dua Terkecil Penyepadanan Imej Global	62
2.8.3.2	Model Matematik bagi Kuasa Dua Terkecil Penyepadanan Imej Global	63
2.8.4	Penyepadanan Imej Berdasarkan Kawasan Menggunakan Model Permukaan	65
2.8.4.1	Model Matematik	65
2.8.4.2	Hubungkait bagi Titik Kejiranan Kepada Titik Pusat	67
2.8.4.3	Terbitan Pertama Model Permukaan Satah	69

2.8.4.4	Terbitan yang Lebih Tinggi bagi Model Permukaan Kelengkungan	74
2.8.4.5	Penyelesaian bagi Persamaan Cerapan	75
2.8.4.6	Hitungan bagi Koordinat Ruang Objek (X, Y, Z)	78
2.9	Prinsip Tegasan-Terikan Dalam Struktur Keluli	80
2.9.1	Kegagalan Struktur	82
2.10	Kegunaan Fotogrametri Jarak Dekat Dalam Bidang Kejuruteraan Struktur	83

3 METODOLOGI KAJIAN

3.1	Pengenalan	85
3.2	Kamera	86
3.3	Prosedur Penentuan Saiz Pikel	86
3.4	Kalibrasi Kamera	88
3.5	Prosedur Mendapatkan Parameter Orientasi Relatif	90
3.6	Aturcara Komputer Yang Dibangunkan	93
3.6.1	Pendigitan Titik Penting	94
3.6.1.1	Kemasukan Data (<i>Input</i>)	95
3.6.1.2	Keluaran (<i>Output</i>)	96
3.6.2	Penyamaan Titik Penting Secara Penyepadanan	96
3.6.2.1	Kemasukan Data (<i>Input</i>)	98
3.6.2.2	Keluaran (<i>Output</i>)	98
3.7	Corak Unjuran	99
3.8	Pengesahan bagi Pendekatan	100

4 ASPEK-ASPEK HITUNGAN

4.1	Pengenalan	103
4.2	Hitungan bagi Tahap Kecerunan Kekelabuan	103
4.2.1	Interpolasi bagi Tahap Kekelabuan	105

4.3	Songsangan bagi Matriks	106
4.4	Kriteria Penghentian Iterasi	108
4.4.1	Penghentian Iterasi dengan Kuasa Pembezaan Rendah	108
4.4.2	Penghentian Iterasi dengan Kuasa Pembezaan Tinggi	109
4.5	Elips Selisih	111
4.5.1	Elips Selisih dengan Perbezaan Paksi Skala	112
4.6	Pengesanan Selisih Kasar	114
4.7	Kaedah Analisis	117

5 KEPUTUSAN DAN ANALISIS

5.1	Ujian Model Permukaan Satah	119
5.1.1	Kejituan	119
5.1.2	Ketepatan	121
5.1.3	Penumpuan bagi Iterasi	127
5.1.4	Padanan yang Berjaya	128
5.2	Ujian Model Permukaan Melengkung	129
5.2.1	Kejituan	130
5.2.2	Ketepatan	132
5.2.3	Penumpuan bagi Iterasi	137
5.2.4	Padanan yang Berjaya	139
5.3	Ujian Pada Permukaan Web Struktur Keluli	140

6 PERBINCANGAN

6.1	Pengenalan	146
6.1.1	Ketepatan	147
6.1.2	Kejituan	148
6.1.3	Penumpuan bagi Iterasi	148
6.1.4	Padanan yang Berjaya	149

7	KESIMPULAN	
	7.1 Kesimpulan	151
	7.2 Cadangan	152
	RUJUKAN	154 - 162
	LAMPIRAN	163

SENARAI JADUAL

NO. JADUAL	TAJUK	MUKA SURAT
2.1	Sukuan bagi nilai s dan α	23
2.2	Sukuan bagi nilai kappa, κ	24
3.1	Keputusan penentuan saiz piksel	87
3.2	Keputusan kalibrasi kamera	90
3.3	Nilai orientasi relatif bagi kamera yang digunakan	93
5.1	Ujian-F bagi ketepatan kaedah <i>centroid</i> σ_1 dan penyepadanan imej berdasarkan kawasan σ_2	122

SENARAI RAJAH

NO. RAJAH	TAJUK	MUKA SURAT
1.1	Carta alir metodologi kajian	7
2.1	Geometri bagi persamaan syarat kekolinearan bumi	14
2.2	Syarat Kekolinearan	16
2.3	Sistem koordinat imej diputarkan supaya ia selari kepada sistem koordinat ruang objek	17
2.4	Sistem koordinat imej pengukuran x-y-z dan terputar $x'y'z'$	18
2.5	Sudut-sudut putaran azimut, senget dan pusingan	21
2.6a	Persilangan	30
2.6b	Penempatan titik dengan persilangan daripada dua foto bumi ufuk	30
2.6c	Pandangan pelan bagi persilangan daripada dua foto bumi	32
2.7	Skema imej berdigit	34
2.8a	Contoh bagi imej silinder kiri	37
2.8b	Kesamaan titik pada imej kanan	37
2.9	Interpolasi Bilinear bagi parallax pada titik (x', y')	58
2.10	Contoh susunan titik grid pada saiz tingkap 7 x 7 piksel	59
2.11	Penggunaan kecerunan permukaan objek dalam penyepadanan imej berdasarkan kawasan	70
2.12	Langkah hitungan penyepadanan imej berdasarkan kawasan menggunakan model permukaan	77
2.13	Graf tegasan-terikan untuk struktur keluli lembut	81
3.1	Contoh struktur keluli berkeadaan bebanan statik	85
3.2	Kamera digital yang digunakan dalam eksperimen ini	86

3.3	Susunan kamera bagi penentuan saiz piksel	87
3.4	Contoh perisian yang diguna bagi penentuan saiz piksel	88
3.5	Anjakan koordinat-koordinat fotograf	89
3.6	Palang besi yang direka khas untuk perletakkan kamera	91
3.7	Susunan kedudukan kamera yang digunakan dalam eksperimen	91
3.8	Plat kalibrasi yang digunakan	92
3.9	Contoh pendigitan titik penting	94
3.10	Sebahagian aturcara MATLAB yang dibangunkan	95
3.11	Rajah skematik bagi carta alir program penyepadanan imej berdasarkan kawasan	97
3.12	Bentuk corak unjuran yang digunakan dalam eksperimen ini	99
3.13	Gambar menunjukkan silinder PVC dan plat papan lapis	100
3.14	Susunan sistem pengimejan	101
3.15	Imej bagi permukaan web keluli dengan corak unjuran yang dipancarkan keatasnya	102
4.1	Interpolasi bilinear bagi tahap kekelabuan pada koordinat piksel (x_m, y_n)	106
4.2	Elips selisih kritikal	114
4.3	Penyingkiran piksel melalui teknik <i>data snooping</i>	117
5.1a	Graf paksi semi major bagi elips selisih untuk plat papan lapis	120
5.1b	Graf paksi semi minor bagi elips selisih untuk plat papan lapis	121
5.2	Graf sisihan piawai (r.m.s) bagi plat papan lapis	122
5.3a	Pelotan kontur satah kaedah penyepadanan imej secara pemusatan titik penting	124
5.3b	Pelotan permukaan satah kaedah penyepadanan imej secara pemusatan titik penting	124
5.4a	Pelotan kontur permukaan satah kaedah penyepadanan imej berdasarkan kawasan	125

5.4b	Pelotan permukaan satah kaedah penyepadanan imej berdasarkan kawasan	125
5.5	Perbandingan pelotan kontur bagi plat papan lapis	126
5.6	Purata bilangan iterasi bagi plat papan lapis	128
5.7	Graf bilangan titik yang berjaya dipadankan	129
5.8a	Graf paksi semi major elips selisih bagi tiub PVC	130
5.8b	Graf paksi semi minor elips selisih bagi tiub PVC	131
5.9	Graf sisihan piawai bagi tiub PVC	132
5.10	Graf perbandingan sisihan piawai bagi model permukaan satah dan model permukaan melengkung	133
5.11a	Pelotan kontur kelengkungan silinder menggunakan kaedah penyepadanan imej secara pemusatan titik penting	134
5.11b	Pelotan permukaan kelengkungan silinder menggunakan kaedah penyepadanan imej secara pemusatan titik penting	135
5.12a	Pelotan kontur kelengkungan silinder menggunakan kaedah penyepadanan imej berdasarkan kawasan	135
5.12b	Pelotan permukaan silinder menggunakan kaedah penyepadanan imej berdasarkan kawasan	136
5.13	Perbandingan pelotan kontur kelengkungan silinder	137
5.14	Graf purata bilangan iterasi untuk tiub PVC	138
5.15	Graf perbandingan purata bilangan iterasi untuk model permukaan kelengkungan dan model permukaan satah	139
5.16	Graf bilangan titik yang berjaya dipadankan untuk tiub PVC	140
5.17	Imej profil ubahbentuk web keluli	141
5.18	Graf kadar penumpuan dx dan dy untuk satu titik yang dipilih	141
5.19a	Pelotan kontur profil ubahbentuk web kaedah penyepadanan imej secara pemusatan titik penting	142
5.19b	Pelotan grafik profil ubahbentuk web kaedah penyepadanan imej secara pemusatan titik penting	142

5.19c	Pelotan grafik profil ubahbentuk web kaedah penyepadanan imej secara pemusatan titik penting dari pandangan sisi	143
5.20a	Pelotan kontur profil ubahbentuk web kaedah penyepadanan imej berdasarkan kawasan	143
5.20b	Pelotan grafik profil ubahbentuk web kaedah penyepadanan imej berdasarkan kawasan	144
5.20c	Pelotan grafik profil ubahbentuk web kaedah penyepadanan imej berdasarkan kawasan dari pandangan sisi	144
5.21	Perbandingan pelotan kontur profil ubahbentuk web keluli	145

SENARAI SINGKATAN

ABM	–	penyepadanan berdasarkan kawasan (<i>Area-based Matching</i>)
FBM	–	penyepadanan berdasarkan ciri-ciri (<i>Feature-based Matching</i>)
DPW	–	stesen kerja fotogrametri digital (<i>Digital Photogrammetric Work-station</i>)
DTM	–	model rupabumi digital (<i>Digital Terrain Model</i>)
LSE	–	anggaran kuasa dua terkecil (<i>Least Square Estimation</i>)
LVDT	–	<i>Linear Voltage Displacement Transducer</i>
RMS	–	punca kuasa dua min (<i>Root Mean Square</i>)
RGB	–	merah hijau biru (<i>Red Green Blue</i>)
SVD	–	nilai dikomposisi tunggal (<i>Singular Value Dicomposition</i>)
LU	–	bawah atas (<i>Lower Upper</i>)
LAD	–	sisihan paling mutlak (<i>Least Absolute Deviation</i>)

SENARAI LAMPIRAN

LAMPIRAN	PERKARA	MUKA SURAT
A	Spesifikasi Kamera Digital Kodak DC290	163
B	Spesifikasi Kamera Digital Kodak DX4900	165
C	Kemasukan Data dan Hasil Keluaran Program Penyepadanan Imej Berdasarkan Pemusatan Titik Penting (<i>Centroid Matching</i>)	167
D	Format Fail Input dan Output Program Penyepadanan Imej Berdasarkan Kawasan (<i>Area-Based Image Matching</i>)	170
E	Hasil Penyesuaian Permukaan (<i>Surface Fitting</i>) bagi Koordinat yang Terhasil untuk Plat Papan Lapis dan Silinder	174
F	Jadual Statistik bagi Ujian – F	178

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan

Struktur keluli seperti jambatan terdiri daripada gelegar dan geladak yang direkabentuk secara optimum dengan harapan dibuat secara penuh menggunakan ciri-ciri mekanikalnya. Dalam keperluan kepada jaminan keselamatannya, ujian bagi rasuk keluli dan tiang keluli dalam bentuk herotan atau ricihannya serta perubahan rupabentuknya adalah penting kepada jurutera kejuruteraan struktur bagi menentukan pengubahsuaian atau merekabentuk struktur keluli yang lebih optimum.

Seterusnya, dengan mengharapkan pemahaman yang lebih lanjut berhubung ketepatan permodelan numerikal bagi struktur keluli, khususnya pengukuran ubahbentuk permukaan adalah amat mustahak. Pendekatan konvensional menunjukkan pengukuran herotan atau ubahbentuk web adalah dilaksanakan menggunakan *Linear Voltage Displacement Transducer (LVDT)* yang diletakkan pada suatu tempat yang sesuai untuk mendapatkan magnitud anjakan yang berlaku bagi memplotkan profil ubahbentuk yang berlaku.

Profil ubahbentuk web struktur keluli biasanya diukur menggunakan peralatan mekanikal serta memerlukan pengukuran banyak titik yang mana biasanya ditandakan dengan melukiskan grid sebelum profil web dapat diplotkan. Kaedah seperti ini, selain hanya dapat mengukur bahagian profil web secara kasar, ia juga

menjemukan atau mengambil masa yang lama dan kurang tepat. Pendekatan yang lebih praktikal untuk meringankan masalah ini ialah menggunakan teknik fotogrametri jarak dekat (*close-range photogrammetry*).

Fotogrametri ditakrifkan sebagai seni, sains dan teknologi dalam pengumpulan maklumat sebenar tentang objek fizikal dan alam sekitar melalui proses perekodan, pengukuran dan penterjemahan imej fotograf iaitu pola perekodan tenaga sinaran elektromagnet (Wolf & Dewitt, 2000). Teori fotogrametri jarak dekat akan dibincangkan dalam tesis ini di Bahagian 2.1.

Fotogrametri selalunya mempunyai kelebihan dalam teknik pengukuran dimana mampu memperlengkapkan bilangan titik ukur yang banyak dan penting pada objek. Tugas mengukur yang terlibat adalah penentuan bagi kedudukan oleh banyak titik konjugat pada pasangan imej. Dalam fotogrametri analog dan analitikal tugas ini adalah seringkali dipertimbangkan yang biasanya memerlukan dibuat berulang kali. Dalam fotogrametri digital, tugas ini adalah dirujuk sebagai penyepadanan imej (*image matching*) atau hubungan imej digital (*digital image correlation*). Seperti yang diterangkan oleh Gruen (1996), sejak konsep awal idea bagi penyepadanan imej digital dijelaskan pada era 1950-an, usaha yang hebat telah melahirkan rekabentuk atau teknik penyepadanan yang lebih yakin, cepat, berkemampuan bagi keadaan yang berbagai dan mampu menghasilkan ketepatan yang tinggi.

Penyepadanan imej berdasarkan kawasan (*Area Based Matching - ABM*) merupakan proses penyamaan lokasi atau titik konjugat antara satu atau lebih pasangan imej digital. Imej digital adalah berasaskan susunan tahap bayang yang biasanya dikenali sebagai piksel. Setiap piksel ini mempunyai nilai keamatannya tersendiri yang juga merupakan maklumat yang diperlukan untuk proses penyepadanan. Proses penyepadanan imej melibatkan manipulasi digital terhadap tahap kekelabuan piksel dan menentukan penjelmaan yang sesuai untuk mendapatkan maklumat secara 3D melalui imej yang direkod atau dirakam terhadap model.

Dalam penyepadanan imej fotogrametri digital, kaedah penyepadanan imej boleh dibahagikan kepada 2 kumpulan, iaitu kaedah berasaskan ciri (*Feature Based Matching - FBM*) dan berdasarkan kawasan (ABM). Kaedah penyepadanan berdasarkan ciri adalah pantas dan diyakini serta mampu mendapatkan padanan dengan tekstur penandaan yang lemah tetapi ketepatannya adalah terhad kepada anggaran saiz piksel bagi data tersebut (Trinder *et al.*, 1990). Manakala pendekatan penyepadanan imej berdasarkan kawasan mempunyai kelebihan iaitu kejituan yang tinggi (mampu untuk memberikan maklumat kualiti penyepadanan). Kumpulan kedua inilah yang merupakan asas kajian ini dilakukan.

Penyepadanan imej berdasarkan kawasan menggunakan penyelesaian kuasa dua terkecil bagi persamaan cerapan yang ditulis untuk setiap piksel dengan pra-penentuan bahagian sekitar titik yang hendak dipadankan. Persamaan cerapan untuk mana-mana satu piksel melibatkan perbezaan dalam keamatan imej antara piksel dan kesamaan piksel pada imej yang lain. Kedudukan bagi piksel yang sama selalunya diberikan oleh anggaran yang terbit dari transformasi affine antara imej. Nilai tak diketahui yang hendak ditentukan dalam penyelesaian adalah sebagai parameter transformasi, dua daripadanya adalah menunjukkan apa yang dipanggil secara konvensional sebagai paralaks x dan y . Tiada maklumat bagi objek yang dimasukkan ke dalam proses hitungan penyepadanan. Penyepadanan hanyalah berasaskan pada nilai keamatan (*intensity*) bagi piksel dan transformasi affine yang dianggarkan barangkali boleh ditambah dengan beberapa parameter radiometrik.

Kajian yang dilaksanakan adalah mengguna pakai kaedah ini untuk mendapatkan maklumat secara 3D melalui foto yang diambil terhadap struktur keluli berbentuk I (*I-beam*) bagi mendapatkan profil ubahbentuk webnya. Analisis yang diperhatikan adalah kesesuaian kaedah ini untuk mendapatkan ketepatan dan kejituan, berbanding kaedah penyepadanan secara pemusatan titik penting (*centroid*) sebagai satu kaedah alternatif bagi mendapatkan profil ubahbentuk web struktur keluli.

1.2 Pernyataan Masalah

Pengukuran ubahbentuk struktur merupakan satu langkah yang penting untuk mengetahui sifat-sifat mekanikal dan kekuatan struktur. Dua jenis pengukuran yang biasa dilakukan ialah pesongan keseluruhan struktur bangunan dan pengukuran ubahbentuk elemen struktur. Di dalam jenis kedua, dibawah pembebanan ricih ke atas rasuk keluli, pengukuran yang lebih terperinci ialah ke atas profil webnya.

Dalam bidang kejuruteraan awam, terdapat pendekatan konvensional untuk mengukur profil ubahbentuk web struktur seperti LVDT (*Linear Voltage Displacement Transducer*) atau tolok (*gauge*). Profil permukaan web yang berubah bentuk biasanya diukur secara manual dengan menggunakan tangan pada titik penting yang mana adalah secara normalnya ditandakan dengan melukiskan grid. Kaedah seperti ini, selain hanya dapat mengukur bahagian ubahbentuk permukaan web secara kasar, ia juga menjemukan atau mengambil masa yang lama serta kurang tepat. Pendekatan alternatif yang lebih praktikal untuk meringankan masalah ini ialah menggunakan teknik fotogrametri jarak dekat (*close-range photogrammetry*).

1.3 Objektif Kajian

Objektif kajian ini adalah seperti berikut :-

- i. Mengkaji kebolehlaksanaan pendekatan penyepadanan imej berdasarkan kawasan dalam mengukur profil ubahbentuk web struktur keluli.
- ii. Menganalisa akan ketepatan kaedah yang dicadangkan untuk diaplikasikan dalam bidang kejuruteraan awam khususnya dalam pengukuran ubahbentuk web struktur.

1.4 Skop Kajian

Secara umumnya, kajian ini merangkumi skop seperti berikut:-

- a). Membangunkan aturcara penyepadanan imej dan seterusnya menentukan kaedah yang paling sesuai untuk mendapatkan ketepatan (*accuracy*) dan kejituan (*precision*) yang tinggi.
- b). Mengenal pasti kaedah yang dicadangkan berdasarkan pelaksanaan, ketepatan dan kebolehyakinan.
- c). Mengimplementasikan kaedah yang dicadangkan di dalam keadaan makmal dan mensasarkan ketepatan tinggi sesuai dengan ukuran yang diperlukan dalam kejuruteraan struktur.

1.5 Kepentingan Kajian

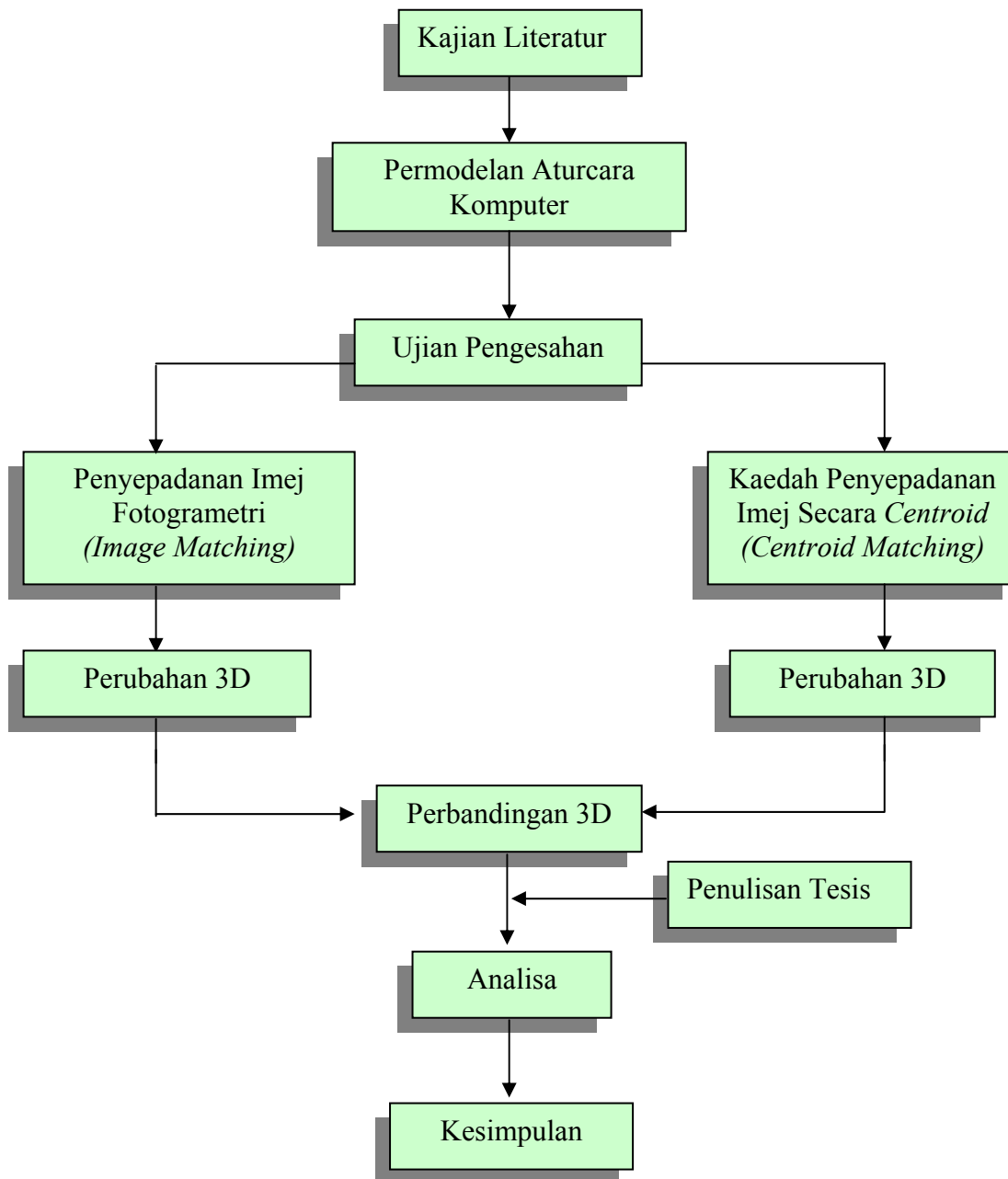
Kekukuhan rasuk keluli bergantung kepada bahagian web sebagai salah satu faktornya. Sekiranya web keratan keluli itu tidak kukuh, ia akan mengalami bengkokkan apabila rasuk keluli dibebankan. Profil bengkokkan web boleh memberi petunjuk keadaan tegasan yang dialami, seterusnya dapat digunakan maklumat tersebut dalam penerbitan formula keupayaan rasuk. Profil permukaan web boleh diukur dengan menggunakan alat pengukur mekanikal seperti LVDT. Kaedah ini agak rumit kerana ia memerlukan pengukuran banyak titik sebelum profil web dapat dipelotkan. Dalam kes pengukuran pada struktur sedia ada, pengukuran mungkin tidak dapat dilakukan disebabkan kedudukan struktur yang tinggi atau tiada laluan.

Sebagai alternatifnya kaedah fotogrametri jarak dekat diketengahkan memandangkan kaedah ini mampu memberikan keputusan pengukuran yang baik

dan diyakini (Mustaffar, 1997). Tambahan lagi, kaedah fotogrametri jarak dekat ini dilakukan hanya dengan merekod imej terhadap struktur tersebut tanpa melibatkan sentuhan ke atasnya. Kaedah tanpa sentuhan (*non-contact*) ini sudah tentunya efektif berbanding menggunakan tolok yang perlu di letakkan pada suatu tempat yang sesuai untuk mendapatkan magnitud perubahan yang berlaku. Hasil analisis menggunakan fotogrametri jarak dekat juga adalah dalam bentuk 3D, secara tidak langsung, gambaran menyeluruh berkaitan ubahbentuk bahagian web struktur tersebut dapat ditunjukkan.

1.6 Metodologi Kajian

Kaedah bagi penyelidikan ini boleh dilihat dalam bentuk carta alir seperti yang ditunjukkan oleh Rajah 1.1 :-



Rajah 1.1: Carta alir metodologi kajian

1.6.1 Kajian Literatur

Sebelum membuat penyelidikan ini, pembacaan terhadap penyelidikan yang berkaitan dengan tajuk penyelidikan telah dilakukan. Ini adalah untuk mendapatkan maklumat mengenai teori-teori, konsep dan kaedah kerja yang telah dijalankan berhubung dengan penyelidikan yang dilaksanakan.

1.6.2 Permodelan Aturcara Komputer

Permodelan aturcara ini terbahagi kepada dua bahagian. Bahagian pertama menggunakan perisian Matlab v6.1. Aturcara ini adalah untuk mendapatkan penyepadan secara pemusatan titik penting (*centroid matching*). Sementara aturcara kedua adalah aturcara penyepadan imej berdasarkan kawasan (*ABM*) menggunakan bahasa Fortran yang sedia ada di Fakulti Kejuruteraan Awam yang mana telah diubahsuai aturcaranya oleh penulis untuk disesuaikan penggunaannya dalam eksperimen ini.

1.6.3 Ujian Pengesahan

Setiap bahagian aturcara komputer yang dibangunkan diuji untuk pengesahan terhadap setiap aturcara yang dibangunkan. Ujian pengesahan ini dilakukan untuk mengelakkan kesilapan dalam menulis aturcara yang dibangunkan. Tugas ini telah dilaksanakan pada setiap peringkat pembangunannya dengan menggunakan mesin kira (kalkulator). Seterusnya ujian pengesahan terhadap objek sebagai simulasi sebelum objek sebenar yang hendak ditentukan permukaannya adalah permukaan

silinder dan satah. Imej tersebut diambil dengan menggunakan sepasang kamera yang telah dikalibrasi dan telah ditetapkan kedudukannya pada satu para serta diketahui nilai orientasi relatifnya.

1.6.4 Penyepadanan Imej

Proses penyepadanan imej telah dilakukan secara pemusatan titik sasaran menggunakan perisian Matlab melalui aturcara yang telah dibangunkan. Penyepadanan titik telah dipilih untuk imej kiri dan imej kanan dalam koordinat imej. Konsep hitungan kekolinearan dan persilangan ruang diaplikasikan bagi mendapatkan koordinat X, Y dan Z. Ujian kesepadanan permukaan dilaksanakan menggunakan program kesepadanan permukaan (*surface fitting program*) yang sedia ada di Fakulti Kejuruteraan Awam. Seterusnya, dengan menggunakan titik yang sama, penyepadanan titik menggunakan kaedah penyepadanan imej berdasarkan kawasan pula dilaksanakan. Hasil koordinat X, Y, Z daripada kaedah ini juga dilakukan ujian kesepadanan permukaan.

1.6.5 Perbandingan

Hasil koordinat X, Y dan Z bagi kedua-dua kaedah yang di ketengahkan dibandingkan untuk melihat perbezaan yang berlaku. Perbezaan ini boleh ditunjukkan oleh kontur dan bentuk permukaan yang terhasil melalui pelotan menggunakan Perisian Surfer. Tujuan perbandingan ini dibuat adalah untuk melihat kemampuan kaedah penyepadanan imej berdasarkan kawasan bagi menunjukkan rupabentuk yang lebih mewakili keadaan sebenar permukaan objek yang diukur.

1.6.6 Analisis

Daripada hasil yang diperolehi analisis dilakukan terhadap kejituan dalaman, kebolehyakinan dan ketepatan model. Kejituan dalaman ditunjukkan oleh sisihan piawai bagi parameter yang diperolehi mengikut prinsip perambatan selisih. Kebolehyakinan adalah dilihat pada kemampuan bagi kaedah yang dicadangkan dalam mengesanan selisih kasar dan membetulkan selisih rawak semasa pelarasan. Ketepatan model pula merujuk kepada model fungsian yang betul dalam mengaitkannya dengan cerapan.

1.6.7 Kesimpulan

Setelah menjalankan prosedur eksperimen ini dan hasil yang telah diperolehi, maka kesimpulan mengenai kaedah yang dicadangkan boleh dibuat. Kesimpulan yang dibuat adalah melihat secara keseluruhan terhadap pelaksanaan kerja, objektif dan jangkaan keputusan penyelidikan yang diharapkan.

1.7 Jangkaan Keputusan

Berikut merupakan jangkaan-jangkaan hasil yang diharapkan daripada kajian ini:-

- i. Kaedah ini mampu memberikan ketepatan dan kejituan yang tinggi dalam mengukur profil ubahbentuk web struktur. Oleh itu, ia boleh dijadikan sebagai satu kaedah alternatif kepada kaedah konvensional yang sedia ada.

- ii. Dengan terhasilnya maklumat keputusan secara 3 dimensi, paparan secara grafik boleh dihasilkan bagi melihat gambaran secara menyeluruh terhadap profil ubahbentuk bahagian web struktur tersebut.
- iii. Memandangkan kaedah ini adalah tanpa sentuhan (*non-contact*) bermakna pengukuran profil ubahbentuk struktur juga boleh dilakukan di luar keadaan makmal.

1.8 Susunan Tesis

Tesis ini dipersembahkan dalam 7 bahagian yang mana diringkaskan seperti berikut:-

Bab 2 – Membincangkan konsep fotogrametri jarak dekat dengan persamaan kolineariti untuk penjelmaan koordinat tiga dimensi. Bahagian ini juga menghuraikan konsep fotogrametri digital dan teori yang terlibat dalam penyepadanan imej. Perkembangan penyepadanan imej berdasarkan kawasan juga turut diterangkan. Algoritma untuk kaedah penyepadanan imej berdasarkan kawasan adalah diterangkan dengan mendalam. Teori asas berhubung dengan kegagalan struktur serta beberapa penyelidikan mengenai penggunaan fotogrametri jarak dekat dalam bidang kejuruteraan struktur juga ada dihuraikan.

Bab 3 – Menerangkan susunatur eksperimen atau metodologi kajian untuk ujian pengesahan bagi kaedah yang dicadangkan. Sistem perolehan imej dan perisian yang digunakan dalam eksperimen ini untuk pemprosesan data juga dibincangkan. Panduan aturcara komputer mengenai penyepadanan imej secara pemusatan titik penting (*centroid matching*) yang telah dibangunkan turut digariskan.

Bab 4 – Bahagian ini mempersembahkan aspek-akpek hitungan yang terlibat dalam aturcara komputer bagi kaedah penyepadanan imej berdasarkan kawasan. Model matematik, hitungan tahap kekelabuan dan huraianya turut dijelaskan. Kriteria

penghentian iterasi bagi aturcara komputer yang dibangunkan juga digariskan. Beberapa elemen analisis dari aspek numerikal bagi hitungan yang terlibat dalam kaedah yang dicadangkan turut dijelaskan.

Bab 5 – Menunjukkan keputusan yang dicapai dari ujian berdasarkan pada objek yang mudah iaitu model permukaan satah dan kelengkungan serta ujian untuk model ubahbentuk permukaan web struktur keluli. Keputusan yang dicapai dari kaedah yang dicadangkan adalah dibandingkan dengan keputusan yang diperolehi melalui kaedah penyepadanan imej secara manual. Huraian dan ulasan juga dituliskan terhadap analisis keputusan yang diperolehi mengikut kaedah analisis yang telah digariskan.

Bab 6 – Menggulung semula keputusan yang diperolehi dalam Bab 5 dengan huraian yang lebih lanjut. Perbincangan dalam bahagian ini melihat secara keseluruhan terhadap pelaksanaan eksperimen dan model fungsian yang digunakan serta faktor-faktor yang mungkin mempengaruhi keputusan yang diperolehi.

Bab 7 – Setelah menjalankan penyelidikan ini, kesimpulan yang boleh dibuat adalah merujuk kepada objektif dan matlamat yang diharapkan dimana teori penyepadanan imej digital mampu memberi sumbangan dalam bidang kejuruteraan awam khususnya lapangan kejuruteraan struktur. Cadangan kerja selanjutnya untuk meningkatkan lagi pelaksanaan bagi kaedah yang dicadangkan turut diselitkan.

ini mungkin diperlukan atau berguna terutamanya dalam mendapatkan analisis struktur yang lebih selamat. Seterusnya, membuktikan matlamat untuk mendapatkan ketepatan yang tinggi dalam pengukuran fotogrametri digital jarak dekat adalah tercapai.

Seperti yang diketahui, keputusan yang ditunjukkan dalam tesis ini adalah menggunakan kamera digital yang kukuh secara geometrinya dalam proses pengimejan. Sungguhpun matlamat eksperimen telah dicapai dengan kesesuaian penggunaan penyepadanan imej berdasarkan kawasan, peralatan pengimejan mungkin boleh diperbaiki agar pencapaian yang lebih baik mampu diperolehi bagi pendekatan ini.

Secara teorinya, adalah mungkin untuk ditingkatkan perlaksanaan secara keseluruhannya bagi kaedah yang dicadangkan sebagai kajian lebih lanjut lagi.

7.2 Cadangan

Matlamat eksperimen ini telah pun dihasilkan dengan ketepatan dan kejituan yang tinggi dalam pengukuran permukaan menggunakan kaedah fotogrametri jarak dekat. Sebagai cadangan, khususnya aplikasi dalam kejuruteraan awam, pengkajian yang lebih lanjut berkaitan dengan pengukuran permukaan boleh dilaksanakan seperti rekahan konkrit, anjakan struktur dan sebagainya. Peralatan pengimejan yang lebih canggih khususnya kamera digital yang lebih baik resolusinya boleh diaplikasikan untuk kajian tersebut. Selain itu, penggunaan suis kawalan (*remote control*) untuk merekodkan gambar tanpa menyentuh suis pada kamera mungkin boleh memberi kesan yang lebih baik bagi mendapatkan maklumat kedudukan orientasi relatif kamera. Model perletakkan kamera yang digunakan dalam eksperimen ini juga boleh diubahsuai supaya sistem pengimejan adalah lebih kukuh lagi secara geometrinya dan mudah untuk dibawa ke mana-mana. Seterusnya

membangunkan satu sistem pengukuran fotogrametri jarak dekat yang mampu mendapatkan semula permukaan objek secara automasi.

RUJUKAN

- Abd-Elrahman A, Pearlstine L, Dewitt B. A. & Smith S. E. (2001). *Detection of Positional Errors in Systems Utilizing Small-format Digital Imagery and Navigation Sensors using Area-based Matching Technique*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.67, No. 7, pp. 825-831.
- Ackermann, F. (1984). *Digital Image Correlation: Performance and Potential in Photogrammetry*. Photogrammetric Record Vol.11(64), pp.429-439.
- Ackermann, F., W. Schneider & G. Vosselmann (1986). *Empirical Investigation Into the Precision of Digital Image Correlation*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXVI, Part 3/3, pp.115-130.
- Allan, A.L. (1996). *Theodolite Intersection in Three Dimensions*. Survey Review, Vol.33, (262). pp.529-534.
- Anuar, A. & Siti Hamisah, T. (2001). Pengukuran Deformasi Struktur Keluli Menggunakan Kaedah Pengukuran Tanpa Sentuhan. *Annual Seminar Geoinformation Engineering Conference & Exhibition*, Berjaya Georgetown Hotel, Pulau Pinang.
- Atkinson, K.B (ed.) (1996). *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing, U. K., 371p.
- Bae, S. (2000). *The Component Development of Digital Close Range Photogrammetry for the Construction Structure Displacement Analysis*. Civil Eng. Daelim College, Dongan Gu, Anyang KOREA.
- Baltsavias, E.P. (1991). *Multiphoto Geometrically Constrained Matching*. Ph.D. thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH-Zurich. Mitteilungen.(49), 221p.
- Baltsavias, E.P. & Pateraki, M. (2001). *Adaptive Multi-Image Matching Algorithm for the Airborne Digital Sensor ADS40*. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH-Hoenggerberg, Zurich, Switzerland.
- Bergmann, D., R. Ritter & D. Winter (1993). Deformation Measurement by a New FAST- Vision Approach. Dlm Gruen, A.W. & Kahmen, H. (eds) *Optical 3-D Measurement Techniques II*. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 624p, 549-556.
- Beyer, H.A. (1992). *Geometric and Radiometric Analysis of a CCD Camera Based Photogrammetric Close-Range System*. ETH-Zurich. Mitteilungen. 186p.

- Bluman, A.G. (2004). *Elementary Statistics : A Step by Step Approach*. 5th Edition. McGraw-Hill, New York, NY.
- Boochs, F. & Heinz, G. (1999). Precise Target Location Using Image Matching Technique. *Proceedings of the IASTED International Conference Signal and Image Processing*, Nassau, Bahamas.
- Bosemann, W. (1994). *Geometric Model in Object Based Multi Image Matching*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXVI, Part 3/1, pp.61-68.
- Buckley, S.J., Mills, J.P., Mitchell, H.L. (2004). *Improving the Accuracy of Photogrammetric Absolute Orientation Using Surface Matching*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science XXX, Vol.34.
- Calitz, M.F. & H. Ruther, (1996). *Least Absolute Deviation (LAD) Image Matching*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol.51, pp.223-229.
- Changming, S. (1997). *A Fast Stereo Matching Method*. Digital Image Computing: Techniques and Application, pp. 95-100, Massey University, Auckland, New Zealand, December 10-12.
- Changming, S. (2001). Rectangular Subregioning and 3-D Maximum-Surface Techniques for Fast Stereo Matching. IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision. *Dlm Conjunction with IEEE CVPR*, Hawaii, pp.44-53.
- Claus, M. (1988). *Experience with induSURF in 3D Measurement of Industrial Surface*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXVII, Part B5, pp.119-129.
- Cooper, M.A.R. (1982) *Fundamentals of Survey Measurement and Analysis*. Granada Publishing, U.K., 107p.
- Cooper, M.A.R. & Robson S. (1996). Theory of Close Range Photogrammetry. *Dlm Atkinson, K.B (ed.) (1996). Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing, U. K., 371p.
- Crippa, B., Forlani, G. & de Haan, A. (1993). Automatic Deformation Measurement From Digital Images. *Dlm Gruen, A.W. & Kahmen, H. (eds) Optical 3-D Measurement Techniques II*. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 624p, 557-563.
- Cross, P.A (1990). *Advanced Least Square Applied to Positioning-Fixing*. Working Paper No.6, Polytechnic of East London, 205p.

- Di Stefano, L., Marchionni, M., Mattoccia, S., Neri, G. (2002). *A Fast Area-Based Stereo Matching Algorithm*. DEIS-ARCES, University of Bologna, Italy.
- Diehl, H. (1993). Accuracy Potential of Object Based Least Squares Matching. Dlm Gruen, A.W. & Kahmen, H. (eds) *Optical 3-D Measurement Techniques II*. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 624p, 475-482.
- Ebner, H., C. Heipke & M. Holm (1993). Global Image Matching and Surface Reconstruction in Object Space Using Aerial Images. Dlm *Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision. Proc. SPIE*, 1944, pp.44-57.
- Ebner, H., C. Heipke (1988). *Integration of Digital Image Matching and Object Surface Reconstruction* International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXVII, Part B2, pp.578-587.
- Forstner, W. (1982). *On the Geometric Precision of Digital Correlation*. International Archives of Photogrammetry, XXIV, Part 3, pp.176-189.
- Forstner, W. (1984). *Quality Assessment of Object Location and Point Transfer using Digital Image Correlation Techniques*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXV, Part B3, pp.874-882.
- Fraser, C.S. & Reidel, B. (2000). *Monitoring the Thermal Deformation of Steel Beams via Vision Metrology*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 55(4), pp.268-276.
- Fraundorfer, F. (2001). *Improving Image Matching Results by Using Trifocal Constrains*. Institute for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology, Austria.
- Fusiello, A., Trucco, E., Verri, A. (2000). *Symmetric Stereo with Multiple Windowing*. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Vol.14, pp.1053-1066.
- Gruen, A.W. (1985). *Adaptive Least Squares Correlation: A Powerful Image Matching Techique*. South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, Vol.14(3), pp.175-187.
- Gruen, A.W. & Baltsavias, E.P (1988). *Geometrically Constrained Multiphoto Matching*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 54 (5), 633-641.
- Gruen, A. W. and Baltsavias, E. P., (1987). *High Pricision Image Matching for Digital Terrain Model Generation*. Photogrammetria 42(3), pp. 97-112.

- Gruen, A.W. & Kahmen, H. (eds) (1993). *Optical 3-D Measurement Techniques II*. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 495p.
- Gruen, A.W. (1996). Least Square Matching: A Fundamental Measurement Algorithm. Dlm Atkinson, K.B. (ed) *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing, U.K, pp.217-225.
- Hahn, M & C. Brenner (1995). *Area Based Matching of Colour Images*. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, XXXI, Part 5W1, 227-234.
- Haralick, R.M. & L.G. Shapiro (1992). *Computer and Robot Vision Vol. II*. Addison-Wesley Publishing Company, Sydney, 630p.
- Haralick, R.M., Ye, M. & Shapiro, L.G. (2002). *Estimating Optical Flow using A Global Matching Formulation and Graduated Optimization*. Computer Science CUNY Graduate Center, New York.
- Hartley, R.I. & Zisserman, A. (2000). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.
- Heipke, C. (1992). *A Global Approach for Least Square Image Matching and Surface Reconstruction in Object Space*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 58(3), pp.317-323.
- Helava, U. V. (1988). *Object Least Squares Correlation*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXVII, Part B3, pp.321-331.
- Jian Xu, Fang, Z.P., Malcom, A., Wang, H. (2001). *A Robust Close Range Photogrammetric System for Industrial Metrology*. Machine Vision and Sensors Group, Nanyang Technological University, Singapore.
- Johnson A.E., Hebert M. (1997). Surface Registration by Matching Oriented Points. *International Conference on Recent Advance in 3-D Digital Imaging and Modelling*, May 12-15, Ottawa, Ontario, Canada.
- Jokinen, O. (1999). *Self-Calibration of a Light Striping System by Matching Multiple 3-D Profile Maps*. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Helsinki University of Technology, Finland.
- Karara, H.M. (1989). *Non-Topographic Photogrammetry*. Second Edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Koschan A., Rodehost V., Spiller K. (1996). Colour Stereo Vision Using Hierarchical Block Matching and Active Colour Illumination. *Proceeding. 13th Int. Conf. On Pattern Recognition ICPR '96*, Vienna, Austria, August 25-29, (1),pp.835-839.

- Lauf, G.B (1983). *The Method of Least Squares with Applications in Surveying*. TAFE Publications Unit, Victoria, Australia, 168p.
- Li, M. (1989). *Hierarchical Multi-Point Matching with Simultaneous Detection and Location of Breaklines*. Photogrammetric Report, No.55 Department of Photogrammetry, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Li, R., Wang, W., Tseng, H.Z. (1997). *Geometric Constraints in Image Sequence and Neural Networks for Object Recognition*. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, Ohio State University.
- Li, C. & King, B. (2002). *Close Range Photogrammetry for the Structural Monitoring of the Star Ferry Colonnade*. Journal of Geospatial Engineering, Vol.4, No.2, pp.135-143.
- McCormac, J. (1993). *Structural Steel Design : ASD Method* (Fourth Edition). HarperCollins Publishers, Inc. 726p.
- Mikhail, E.M. & Ackermann, F. (1976). *Observations and Least Squares*. Harper & Row, New York, 497p.
- Mikhail, E.M, Bethel, J.S & McGlone, J.C. (2001). *Introduction to Modern Photogrammetry*. John Wiley & Sons, Inc, U. S., 479p.
- Mikhail, E.M & G. Gracie (1981). *Analysis and Adjustment of Survey Measurements*. Van Nostrand Reinhold, New York, 340p.
- Ming Zhou & Fraser C.S. (2000). *Automated Surface Extraction in Real Time Photogrammetry*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS), Vol. XXXIII, Amsterdam.
- Mitchell, H.L. (1991). An Outline of Least Squares Image Matching in Digital Photogrammetry. *First Australian Photogrammetric Conference*, (University of New South Wales, Australia, 7-9 November), Paper No.8, 10p.
- Mitchell, H.L. & L.J. Pilgrim (1987). Selection of An Image Matching Algorithm. *Proceedings, Symposium on the Application of Close Range Photogrammetry*, Dept. of Surveying and Land Information, University of Melbourne.
- Mitchell, H.L. (1994). *A Comprehensive System for Automated Body Surface Measurement*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXX, Part 5, pp.265-272.
- Mitchell, H.L. & Chadwick, R.G. (1999). *Digital Photogrammetric Concepts Applied to Surface Deformation Studies*. Geomatica, 53(4), pp.405-414.

- Mokarromi, A. & Ebadi, H. (1998). *Evaluation of Geometrical Accuracy in Displacement Monitoring of Engineering Structures using Close Range Photogrammetry*. University of Technology, Faculty of Geodesy and Geomatic Eng., Valiasr Ave. Tehran, Iran.
- Mustaffar, M. & Mitchell, H.L. (2001). *Improving Area Based Matching by Using Surface Gradients in the Pixel Coordinate Transformation*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 56 pp.42-52.
- Mustaffar, M. (1997). *Accuracy Improvement in Area-Based Image Matching for Automated Surface Measurement in Digital Photogrammetry*. Phd. Thesis University of Newcastle, New South Wales, Australia.
- Mustaffar, M.. (2000). *Kursus Pendek Aplikasi Imej Foto Digital Untuk Pengukuran dan Permodelan*. CGIA & CIMES Fakulti Kejuruteraan & Sains Geoinformasi, Universiti Teknologi Malaysia.
- Nicola D'Apuzzo (2002). Modeling Human Face with Multi-Image Photogrammetry. *Proc. of SPIE, in Three-Dimensional Image Capture and Application V*, San Jose, Carlifornia, Vol.4661.
- Okutomi, M., Katayama, Y., Oka, S. (2002). *A Simple Stereo Algorithm to Recover Precise Object Boundries and Smooth Surface*. International Journal of Computer Vision, 47(1-3), pp.261-273.
- Pajares G., Cruz J. M., Aranda J. (1998). *Stereo Matching Based on the Self-Organizing Feature Mapping Algorithm*. Pattern Recognition Letters 19, pp.319-330.
- Parbery, R.D., J.G. Fryer & S. Robson (1992). *Analysis of As-built Shapes*. Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry & Surveying, 56, pp.91-109.
- Pentti, H. & Atte, H. (2002). *Failure Mode and Effects Analysis of Software-Based Automation Systems*. STUK-YTO-TR. Helsinki, 35p.
- Pertl, A. (1985). *Digital Image Correlation with an Analytical Plotter*. Photogrammetria, Vol.40, pp.9-19.
- Pilgrim, L. (1996). *Robust Estimation Applied to Surface Matching*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol.51, pp.243-257.
- Pope, A.J. (1976). *The Statistics of Residuals and the Detection of Outliers*. AOAA Technical Report NOS 65 NGS 1, Rockville, Maryland, 133p.

- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling & B.P. Flannery (1992). *Numerical Recipes in FORTRAN : The Art of Scientific Computing*. Second Edition. Cambridge University Press, UK, 818p.
- Rauhala, U.A. (1988) *Compiler Positioning System : An Array Algebra Formulation of Digital Photogrammetry*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Kyoto, XXVII, Part B9, pp.151-161.
- Reynolds, A.P. & Duvall, F. (1999). *Digital Image Correlation for Determination of Weld and Base Metal Constitutive Behavior*. Welding Research Supplement, pp.355-360.
- Rosenholm, D. (1986). *Accuracy Improvement of Digital Matching for Evaluation of Digital Terrain Models*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXVI, Part 3/2, pp.573-587.
- Rosenholm, D. (1987a). *Multi-Point Matching Using the Least Square Technique for Evaluation of Three-Dimensional Models*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 53(6), pp.621-626.
- Rosenholm, D. (1987b). *Least Squares Matching Method : Some Experimental Results*. Photogrammetric Record, 12(70), pp.493-512.
- Rosenholm, D. (1988). *Multi-point matching Along Vertical Line in SPOT Images*. International Journal of Remote Sensing, Vol.9(10&11), pp.1687-1703.
- Schmidt, T. & Tyson, J. (2003). *Full-Field Dynamic Displacement and Strain Measurement Using Advanced 3D Image Correlation Photogrammetry*. Experimental Techniques, Part I. Vol.27 (3), pp.47-50.
- Schmidt, T. & Tyson, J. (2002). Advanced Photogrammetry for Robust Deformation and Strain Measurement. *Proceedings at SEM Annual Conference*, Milwaukee.
- Shih T.Y. (2001). A Geometric Consistency Evaluation of NCU Spot Level 10 Products by the Automated Image Matching Technique. *Paper presented at the 22nd Asian Conference on Remote Sensing*, 5-9 November, Singapore.
- Shortis, M.R. (1998). The Calibration of Video Cameras for Quantitative Measurements. *39th International Instrumentation Symposium*, Albuquerque, New Mexico, pp.103-130.
- Smith M.J.&Park D.W.G. (1999). *Towards a New Approach for Absolute and Exterior Orientation*. Photogrammetric Record, Vol.16(94), pp.617-623.

- Tang, L. & C. Heipke (1993). An Approach for Automatic Relative Orientation. Dlm Gruen, A.W. & Kahmen H. (eds) *Optical 3-D Measurement Techniques II*. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 624 p, pp.347-354.
- Torlegard, K. (1981). *Accuracy Improvement in Close Range Photogrammetry*. Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen Hochschule der Bundeswehr Munchen, 68p.
- Trinder, J.C, T. Tjugiaro & B.E Donnelly. (1990). *A Digital Photogrammetry System for Close Range*. Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying Vol.53, pp.1-13.
- Tsakiri, M., Ioannidis, C., Papanikos, P. & Kattis, M. (2004). Load Testing Measurements for Structural Assessment Using Geodetic and Photogrammetric Techniques. *1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering*, Nottingham, United Kingdom.
- van der Merwe, N. (1995). *Development of An Image Matching Scheme Using Feature-Based and Area-Based Matching Techniques*. Ph.D. thesis University of Cape Town, South Africa, 200p.
- van der Vlugt & Ruther, H. (1994a). Automated Measurement of Surfaces Based on Image Matching and Free Net Adjustment. *ISPRS Commission V – Intercongress Symposium*, Melbourne, Australia.
- van der Vlugt & Ruther, H. (1994b). *Development of an Automated Surface Measurement System*. International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXX(5), pp.414-419.
- Wang S. & Y.H. Tseng (2000). *Automatic Self-Calibration of Digital Cameras for Close-Range Photogrammetry*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS), Vol. XXXIII, Amsterdam.
- Wang Y. (1998). *Principle and Applications of Structural Matching*. ISPRS Photogrammetry & Remote Sensing, Vol.53, pp.154 -165.
- Whiteman, T., Lichti, D.D. & Chandler, I. (2002). Measurement of Deflection in Concrete Beams by Close Range Digital Photogrammetry. *Symposium on Geospatial Theory, Processing and Application*, Ottawa.
- Wolf, P.R. (1988). *Elements of Photogrammetry* (Second Edition). McGraw-Hill, Sydney, 628p.

- Wolf, P.R. & Dewitt, B.A. (2000). *Elements of Photogrammetry With Application in GIS* (Third Edition). McGraw-Hill, U.S., 608p.
- Wrobel, B.P.(1987). Facets Stereo Vision (FAST Vision)-A New Approach to Computer Stereo Vision and to Digital Photogrammetry. *Proceedings of ISPRS Intercommision Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data*, Interlaken, Switzerland, June 2-4, pp.231-258.
- Wrobel, B.P., B. Kaiser & J. Hausladen.(1988). *Adaptive Regularization – A New Method for Stabilization of Surface Reconstruction from Images*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXIX, Part B3, pp.534-545.
- Wroble, B.P, B. Kaiser & J. Hausladen. (1992). Adaptive Regularization of Surface Reconstruction by Image Inversion. *Paper presented at 2nd International Workshop on Robust Computer Vision*, Bonn.
- Wrobel B.P. (1991a). *Least-Squares Methods for Surface Reconstruction From Images*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 46, pp.67-84.
- Wrobel B.P. (1991b).*The Evolution of Digital Photogrammetry from Analytical Photogrammetry*. Photogrammetric Record, 13(77), pp.765-776.
- Xiao, J., J. Liu & L. Chu (1988). *Digital Matching of SPOT Stereo Images by Finite Elements Least Square Techniques*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Kyoto, XXVII, Part 3, pp.373-382.
- Zhang, Z. (1994). *Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surface*. International Journal of Computer Vision, (13), No.2, 119-152.
- Zitnick, C.L. & Kanade, T. (2000). *A Cooperative Algorithm for Stereo Matching and Occlusion Detection*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22, No.7.