

SKRIPSI

PENYUSUNAN ALGORITMA REDUKSI DISTORSI KAMERA *CCTV* UNTUK FOTO STEREO

MILIK
PERPUSTAKAAN
ITN MALANG



Diajukan untuk memenuhi persyaratan
dalam mencapai gelar sarjana S1 Teknik Geodesi

Disusun Oleh :

RONALD YULEXI SILLA

05.25.014

**JURUSAN TEKNIK GEODESI
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
MALANG
2010**

SKRIPSI

REVISI ALGORITMA REDUKSI DISTORSI
KAMERA CIVIL UNTUK FOTO STEREO

MILIK
PERPUSTAKAAN
ITN MALANG

Dibuat oleh: ...
di bawah bimbingan: ...

: ...

...
...

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
JURUSAN TEKNIK GEODESI
MALANG
2010

LEMBAR PENGESAHAN

Penyusunan Algoritma Reduksi Distorsi Kamera CCTV untuk Foto Stereo

SKRIPSI

Dipertahankan di hadapan Majelis Penguji Sidang Skripsi
Jenjang Starata Satu (S-1)

Pada hari : Sabtu

Tanggal : 21 Agustus 2010

Dan diterima untuk memenuhi salah satu persyaratan guna memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Disusun oleh

Ronald Yulexi Silla

05.25.014

Panitia Ujian Tugas Akhir

Ketua



Hery Purwanto, ST, M.Sc

Sekretaris



Silvester Sari Sai, ST, MT

Anggota Penguji

Penguji I



Hery Purwanto, ST, M.Sc

Penguji II



Ir. Agus Darpono, MT

Penguji III



Dr. Edwin Tjahjadi, ST, M.Geo.Sc

JURUSAN TEKNIK GEODESI

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL

MALANG

2010

**LEMBAR PERSETUJUAN
SKRIPSI**

Penyusunan Algoritma Reduksi Distorsi Kamera *CCTV* untuk Foto Stereo

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Geodesi

S-1

Institut Teknologi Nasional Malang

Disusun Oleh :

Ronald Yulexi Silla

05.25.014

Meyetujui,

Dosen Pembimbing I



Silvester Sari Sai, ST, MT

Dosen Pembimbing II



Dr. Edwin Tjahjadi, ST. M.GeoM.Sc

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Geodesi S-1



Hery Purwanto, ST, M.Sc

ABSTRAKSI

Ronald Yulexi Silla, 2010, “**Penyusunan Algoritma Reduksi Distorsi Kamera CCTV untuk Foto Stereo**”

Dosen Pembimbing I : Silvester Sari Sai, ST, MT.

Dosen Pembimbing II : Dr. Edwin Tjahjadi, ST. M.Geom.Sc.

Kamera “*off the self*” tidak mempunyai lensa yang sempurna, sehingga proses perekaman yang dilakukan akan memiliki kesalahan. Agar mendapatkan nilai ukuran yang memiliki tingkat akurasi, presisi dan reliability yang tinggi maka kamera harus dilakukan kalibrasi (Nuraini, 2007). Baik yang menggunakan sensor bertipe CCD (*ChargeCoupled Devices*) maupun yang bertipe CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) memiliki susunan komponen-komponen didalamnya yang relatif kurang stabil jika dibandingkan kamera metrik, maka perhatian lebih harus tertuju pada bagaimana keakurasian parameter-parameter kalibrasi kamera bertipe ini dan bagaimana keakurasian parameter Interior Orientation (IO) beserta Exterior Orientation (EO) nya dapat dihitung (Tjahjadi, 2008).

Kata Kunci : Algoritma, *Kalibrasi kamera, Interior Orientation, Exterior Orientation*

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini.

Nama : **Ronald Yulexi Silla**

NIM : **05.25.014**

Program Studi : **Teknik Geodesi S-1**

Fakultas : **Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan**

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi saya dengan judul :

“Penyusunan Algoritma Reduksi Distorsi Kamera CCTV untuk Foto Stereo”
adalah hasil karya saya sendiri, bukan merupakan duplikat serta tidak mengutip
atau menyadur dari hasil karya orang lain kecuali disebutkan sumbernya.

Malang, 29 September 2010

Yang membuat pernyataan



Ronald Yulexi Silla

05.25.014

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadapan hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **"Penyusunan Algoritma Reduksi Distorsi Kamera CCTV untuk Foto Stereo"**, di mana penulisan skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Geodesi Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Malang.

Penulisan ini tidak akan dapat terselesaikan tanpa bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, peneliti ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Abraham Lomi, MSEE selaku Rektor Institut Teknologi Nasional Malang.
2. Bapak Ir. A. Agus Santosa, MT selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Malang.
3. Bapak Heri Purwanto, ST., M.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Geodesi Institut Teknologi Nasional Malang.
4. Bapak Dr. Edwin Tjahjadi, ST., MGeom.Sc. selaku Dosen Pembimbing II dan Dosen Penguji.
5. Bapak Silvester Sari Sai, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing I
6. Bapak Ir. Agus Darpono, MT selaku Dosen Penguji.
7. Segenap dosen, staff pengajar dan rekording Jurusan Teknik Geodesi Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Malang.

8. Bapa, Mama, Roby, Ris, Dian & Dinda serta semua Keluarga di SoE, yang selalu memberikan dukungan, semangat dan doa.
9. Team Deformasi dan Rapid mapping yang selalu memberika kerja sama dan dukungannya.
10. Semua pihak yang telah membantu peneliti yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga Allah pencipta alam semesta sumber segala kasih dan rahmat memberikan karunia atas budi baik dari semua pihak yang terlibat dalam penelitian ini. Penulis menyadari bahwa penulisan laporan ini masih belum sempurna, baik dari segi materi, sistematika pembahasan, maupun susunan bahasanya Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Hasil penelitian ini dan dengan segala keterbatasannya dipersembahkan kepada dunia pendidikan, semoga ada manfaatnya untuk pengembangan sumber daya manusia di negara tercinta ini.

Malang, 29 September 2010

Penulis

LEMBAR PERSEMBAHAN

“Jikalau kamu tinggal di dalam Aku dan Firman-Ku tinggal di dalam kamu,
mintalah apa saja yang kamu kehendaki,
dan kamu akan menerimanya.”
(Yoh 15:7)

Tiada Allah yang maha pengasih dan maha penyayang selain Engkau Ya Yesus ku
Engkau curahkan kasih-MU pada mahluk-MU yang tercela ini..
Telah banyak karunia yang Engkau berikan padaku,
telah banyak Engkau limpahkan berkat-MU padaku,
tak terhingga nikmat yang aku rasakan,
namun demikian aku sering lalai mensyukurinya,
jangan karena kealpaan itu engkau murkai aku ya ALLAH...

Dengan wajah yang tertunduk namun dengan hati yang terangkat bagimu,
Ijinkanlah anak-MU yang berdosa ini memuji rahmat-Mu
tanpa adanya nikmat terhadap yang kau beri,
tiada pula tertumpuk rasa bangga atas hati, tanpa adanya kerendahan jati diri
Ku akan berlari mengejar masa yang telah dinanti,
melepaskan belenggu dari masa yang telah kulewati

Ya ALLAH berilah arti akan hidup ini,
agar tiada penyesalan atas waktu yang berganti
Dengan tangan,kaki dan hati kuberusaha, dengan mata, mulut dan pikiran
kuberkata semoga ini semua akan berguna,
sebagai pacuan atas perjuangan dan masa depan
Dan tiadalah apa yang aku persembahkan,
melainkan segala amalan dan urusan dalam kehidupan

Dibalik kesuksesan seorang individu tentunya berdiri orang – orang hebat yang
selalu berada di belakangnya untuk mendukungnya, memberikan semangat

kepadanya dan menjadi sandaran ketika ia lelah. Oleh karena itu buku ini penulis persembahkan untuk:

Untuk Mama & Papa di So'E

Tiada Kata Yang Dapat Kurangkai Indah, Tuk Ungkapkan Terima Kasihku
Tetesan Keringatmu, Kujadikan Cambuk Dalam Meraih Citaku
Setiap Alunan Doamu....Menjadikan Kekuatan Bagiku Melangkah
Ku Tak Sanggup Menghitung Setiap Tetesan dan Peluhmu
Tiada Kau Tau Arti Panas, Hujan dan Angin Malam Yang Menerpa Tubuhmu
Tapi Yakinlah, Doamu Takkan Sia-sia
Akan Kujadikan Setiap Butiran Bening yang Menetes Diwajahmu
Ona Sayang Mama n Papa...



Untuk Roby, Ris, Dian & Brian

Buat Roby, ST biarlah
Dengan keberhasilan kita..setidaknya kita pernah membuat serta melihat
senyum kebanggaan dari raut wajah Papa & Mama..
Semua yang telah terjadi baik suka maupun duka
dalam perjalanan kehidupan kita beberapa tahun terakhir,
Semoga menjadi suatu motivasi dalam menggapai cita-cita kita...

Buat Ris, Dian & Brian

Terima kasih buat doanya ya adek-adekku, ku harap dalam doaku kalian
mendapatkan yang lebih dari yang ONA rasa hari ini, kunanti dalam harapku ini
adalah awal, jalan pemula untuk kalian melanjutkan langkah yang lebih tinggi
dari hari ini. Saudara-saudara ayo berdiri mari kita mengangkat dan
menghadihkan yang terbaik buat keluarga kita.
Kita adalah harapan bagi mereka.

Terima Kasih Juga buat
Doa dari semua keluarga di SoE, Manufui, Bosen, Oe lolok dan dimana-mana tempat
Vis Neno Nokan Kit..

Untuk para Pengajar

Buat Pa' Edwin

Terima Kasih untuk semua yang berharga ini, terlebih untuk kepercayaan yang besar demi suatu terobosan baru di Geodesi ITN ini. Walaupun dalam perjalanannya sering kali mengecewakan bapak, tapi kami salut untuk cara mendidik yang engkau bagikan buat kami. Mungkin tanpa hal tersebut kami akan selalu menjadi orang kecil yang tak tahu hal-hal besar yang terjadi di luar sana.



Buat Pa' Hery

Anda yang membawa awal perubahan di Geodesi ITN yang dapat kami rasakan, dan anda telah banyak membantu dalam study sampe pada penyelesaian TA ini. Kami rasa tak cukup terima kasih ini untuk semua itu, tapi kami pula tak bisa memberikan yang lebih dari itu.

Buat Pa' Sil, Pa' Agus, Pa' Nur, Pa Leo, Pa' Jas, Pa Jo', Pa Rinto

Terima kasih untu semua dukungan, tuntunan, bantuan, kesabaran, Kebijakan, Keramahan, nasehat dan doa, serta Ilmu yang diperoleh semoga kelak akan menjadi bekal dalam menjalani lorong kehidupan saya..

Untuk teman-teman geodesi semua angkatan,

Untuk Jendra"03" (Fausan, Indra, Andy, Beno, Irwan, Gandy, Grace, Dolly, Megi, Rosa, K'Des, Doni CS), Komendan" PUSLATPUR 04 (Hendry, Ary, Mawar, Bagus, Justin, Budy, Nopy, Bang Akbar, Titin, Elwin, Desi, Tri, Nanang, Arif, Gigih, Acul, (Yusak n Rouger)),
bt Prajurit" 06, 07,08, 09, dan 0'10

Terima Kasih atas semua dukungan dan pengalaman yang diberikan kepada kami dari setiap obrolan yang kita lewatkan. Terima kasih pula dengan sebuah konsep Geodesi Minded yang membangkitkan semangat rasa saling memiliki dan rasa sepenanggungan. Disini kita bertemu, dan semoga tak disini rasa memiliki itu berakhir.



Saudara-saudara Ku LASKAR, 2005

*Kita adalah sebuah keluarga yang terlahir dari campuran tanah dan air,
Kita adalah sebuah kebersamaan yang diilhami Theodolite dan Statif,
Dan sebuah kisah yang dijalani ber-12....*

Tanzil, Eno, Chandra, Riri, Via, Dody, Agus, Lia, Ghede, Alben, n Weni..

" Terima Kasih telah meninggalkan sejuta kenangan terindah yang pernah tertulis dalam bagian hidupku, yang tak mungkin terlupakan sampai akhir hayat..."

Persahabatan ini, telah merubah banyak hal pada diriku, hal yang membuat sikap serta pandangan hidup yang penuh ke-egoisan, berganti menjadi sebuah kepedulian yang datang seiring kebersamaan kita.

Itulah kita, dan kita akan terus bersama berjalan tuk mendapatkan ljasah dan menggapai suatu impian yang berbeda, hingga sampai saatnya kita kembali untuk melihat terbitnya fajar pagi pada tanah dimana jiwa ini terlahir....

Buat penghuni kos candi 2A 400 401 (Tahun ajaran 2006/2007)

Om Manis, Om eman, Tony, Mas Danilo, Om Selly Ani, Echa, Alyoen, Ivan, Us, Ridwan, P vian, Jansen, Jeris.." Kapan lagi kita bisa mengumbar candatawa bersama di Atas genteng merah....hahahhahaaa...."

Buat IKB NEKMESE di MALANG (ORA KONEK n SEKITARNYA)

Erik, Polla, Vando, Dody, Dhany, MB (Kapan" ktong reuni di kontrakan ko???.....hahahahhaa")

Buat Nihta makasih ow su jaga kontrakan buat brapa bulan kemarin....

Buat Dunce, papy, sony, coy, eka, jems, rio, yuston, ken, gongcang, moat, rusly, cici, osty, hendra ("yang semangat ew terus berjuang dan selalu jadi yang terbaik & jangan mudah kalah oleh rasa malas karena ia adalah musuh utama kesuksesan")

My Love "Tata"

Terima kasih atas kasih sayang, perhatian, dan kesabarannya yang telah diberikan serta semangat dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, semoga engkau pilihan yang terbaik buatku dan masa depanku

DAFTAR ISI

Halaman Sampul Depan

Halaman Judul

Lembar Pengesahan

Lembar Persetujuan

Abstraksi

Pernyataan Keaslian Skripsi

Kata Pengantar

Lembar Persembahan

Daftar Isi

Daftar Gambar

Daftar Tabel

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang Penelitian	1
1.2	Maksud dan Tujuan Penelitian	2
1.2.1	Maksud Penelitian	2
1.2.2	Tujuan Penelitian.....	2
1.3	Manfaat Penelitian	2
1.4	Perumusan Masalah.....	3
1.5	Batasan Masalah	3

BAB II DASAR TEORI

2.1	Distorsi Lensa	4
2.1.1	Distorsi radial	6
2.1.1.1	Distorsi <i>barrel</i>	9
2.1.1.2	Distorsi <i>pincushion</i>	10
2.1.2	Distorsi <i>decentring</i> (Distorsi tangensial)	10
2.1.3	Distorsi <i>affinty</i>	13
2.2	Metode Tsa'i	14
2.2.1	Model kamera.....	15
2.2.1.1	Langkah- Langkah-langkah transformasi dari koordinat bumi 3D kekoordinat kamera 3D.....	16
2.2.2	Persamaan yang berhubungan dengan koordinat dunia 3D ke koordinat foto 2D	19
2.2.2.1	Parameter ekstrinsik	20
2.2.2.2	Parameter intrinsik	20
2.2.3	Defenisi masalah	21
2.2.4	Teknik kalibrasi kamera dua tingkat baru	21
2.2.5	Kalibrasi kamera dengan menggunakan titik koplanar ...	23
2.2.5.1	Menghitung R, T_x, T_y	25
2.2.5.2	Menghitung f, k_1, T_x	28
2.2.6	Kalibrasi kamera dengan menggunakan titik nonkoplanar	29
2.2.6.1	Menghitung R, T_x, T_y dan s_x	29
2.2.6.2	Menghitung f, k_1, T_z	32

2.3	Metode Zhang	32
2.3.1	Persamaan dasar	32
2.3.2	Kesamaan bidang model dan foto	33
2.3.3	Permasalahan parameter intrinsik	34
2.3.4	Memecahkan kalibrasi kamera	35
2.3.4.1	Solusi <i>closed form</i>	35
2.3.5	Penentuan dengan distorsi radial	38
2.4	Stereo Kalibrasi	39
2.4.1	Rotasi	39
2.4.2	Translasi	44
2.4.3	Menghitung Panjang <i>Baseline</i>	45

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Persiapan Penelitian	47
3.1.1	Materi penelitian	47
3.1.2	Alat penelitian	47
3.1.2.1	Perangkat keras (<i>hardware</i>)	48
3.1.2.2	Perangkat lunak (<i>software</i>)	50
3.1.3	Diagram alir penelitian	53
3.1.4	Penjelasan diagram alir penelitian	54
3.1.5	Diagram alir kalibrasi	55
3.1.5.1	<i>Single</i> kalibrasi	55
3.1.5.2	<i>Stereo</i> kalibrasi	56
3.1.6	Penjelasan diagram alir kalibrasi	57

3.1.6.1	Penjelasan diagram alir single kalibrasi	57
3.1.6.2	Penjelasan diagram alir stereo kalibrasi	58
3.2	Pelaksanaan Penelitian	59
3.2.1	Pengukuran papan kalibrasi	59
3.2.2	Pengambilan data foto papan kalibrasi	61
3.2.2.1	Pengambilan data foto	61
3.2.2.2	<i>Capture</i> data foto	67
3.2.3	Kalibrasi kamera	69
3.2.3.1	<i>Single</i> kalibrasi	68
3.2.3.2	<i>Stereo</i> kalibrasi	74
3.3	Deskripsi dan implementasi	80

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Algoritma Dari Program Kalibrasi	88
4.1.1	Parameter intrinsik	88
4.1.1.1	Single kalibrasi	88
4.1.1.2	Stereo kalibrasi	89
4.1.2	Parameter ekstrinsik	95
4.2	Analisa Data	92
4.2.1	Data papan kalibrasi	92
4.2.2	Parameter ekstereior orientasi (EO)	95
4.2.3	Perhitungan koordinat foto stereo dari hasil interseksi ...	96
4.2.4	Perhitungan distorsi radial	97
4.2.5	Perhitungan distorsi tangensial	99

4.2.6	Perhitungan koordinat distorsi terkoreksi	100
4.3	Hasil Kalibrasi	102
4.4	Pembahasan	104

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan.....	109
5.2	Saran.....	110

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Lensa lubang jarum dari kamera lubang jarum	5
Gambar 2.2 Distorsi <i>Barrel</i>	9
Gambar 2.2 Distorsi <i>Pincushion</i>	10
Gambar 2.3 Penyebab distorsi <i>decentering</i>	11
Gambar 2.4 Distorsi <i>decentering</i> (distorsi tangensial)	12
Gambar 2.5 Distorsi <i>Affinity</i>	13
Gambar 2.6 Geometri kamera dengan proyeksi perspektif dan distorsi lensa radial	15
Gambar 2.7 Ilustrasi Garis Distorsi Radial	24
Gambar 2.8 Diagram Skematik Susunan Eksperimen untuk Kalibrasi Kamera...	24
Gambar 2.9 Rotasi pada sumbu x sebesar ω	40
Gambar 2.10 Rotasi sumbu y sebesar ϕ	41
Gambar 2.11 Rotasi sumbu z sebesar κ	42
Gambar 2.12 Konversi dari Objek ke Sistem Koordinat Kamera	45
Gambar 3.1 <i>CCTV tipe PowerCom SC-2800</i>	48
Gambar 3.2 <i>Frame Grabber</i>	48
Gambar 3.3 <i>Kabel Konektor</i>	48
Gambar 3.4 <i>Adaptor</i>	49
Gambar 3.5 Papan Kalibrasi	49
Gambar 3.6 Bar Kamera	50
Gambar 3.7 <i>Windows Media Encoder 9</i>	51
Gambar 3.8 <i>Free Video to JPG Converter 1.8.5.65</i>	51
Gambar 3.9 Tampilan Awal <i>Microsoft Visual Studio 2008</i>	52

Gambar 3.10 Diagram Alir Penelitian	53
Gambar 3.11 Diagram Alir Single Kalibrasi	55
Gambar 3.12 Diagram Alir Stereo Kalibrasi	56
Gambar 3.13 Arah Pengukuran Papan Kalibrasi	60
Gambar 3.14 Pengukuran Papan Kalibrasi	60
Gambar 3.15 Kabel Konektor dan <i>CCTV</i>	61
Gambar 3.16 Kabel Konektor dan <i>Frame Grabber</i>	61
Gambar 3.17 Kabel Konektor dan <i>Adaptor</i>	62
Gambar 3.18 Kotak Dialog <i>New Sesson</i>	62
Gambar 3.19 Kotak Dialog <i>New Sesson Wizard -EasyCap video adapter</i>	63
Gambar 3.20 Kotak Dialog <i>Broswe For Output File</i>	63
Gambar 3.21 Kotak Dialog <i>Output File Name</i>	64
Gambar 3.22 Kotak Dialog <i>Content Distribution</i>	64
Gambar 3.23 Kotak Dialog <i>New Seasson Wizard-Encoding Options</i>	65
Gambar 3.24 Kotak Dialog <i>New Seasson Wizard-Display Information</i>	65
Gambar 3.25 Kotak Dialog <i>New Seasson Wizard-Seting Review</i>	66
Gambar 3.26 Tampilan Foto Stereo Papan Kalibrasi	66
Gambar 3.27 Tampilan Awal Program <i>Free Video to JPEG converter</i>	67
Gambar 3.28 Kotak Dialog <i>Open</i>	68
Gambar 3.29 Kotak Dialog <i>Browse for Folder</i>	68
Gambar 3.30 Kotak <i>Information</i>	69
Gambar 3.31 Kotak Dialog <i>Open Project</i>	69
Gambar 3.32 Tampilan Program Kalibrasi	70
Gambar 3.33 Kotak Dialog <i>Add Images to Project</i>	70

Gambar 3.34 Tampilan program	71
Gambar 3.35 <i>Extract Corner</i> Papan Kalibrasi	71
Gambar 3.36 <i>Extract Corner</i> yang hendak diberi <i>Labeling</i>	71
Gambar 3.37 Kotak Dialog <i>Edit Label</i>	72
Gambar 3.38 Kotak Dialog <i>Set Cross Label</i>	72
Gambar 3.39 Foto Papan Kalibrasi yang Telah Terlabel	73
Gambar 3.40 Kotak Dialog <i>Delete Unwanted Cross</i>	73
Gambar 3.41 Kotak Dialog <i>Select a Calibration Plate Coordinates File</i>	74
Gambar 3.42 Kotak Dialog <i>Open Project</i>	75
Gambar 3.43 Kotak Dialog <i>Add Photo Pair</i>	75
Gambar 3.44 Kotak Dialog <i>Add Images to Project</i>	75
Gambar 3.45 Pemberian Nama <i>Pair</i>	76
Gambar 3.46 Tampilan Program Foto Stereo Tiap <i>Pair</i>	76
Gambar 3.47 Tampilan <i>Extract Corner</i>	77
Gambar 3.48 <i>Extract Corner</i> yang hendak diberi <i>Labeling</i>	77
Gambar 3.49 Kotak Dialog <i>Edit Label</i>	78
Gambar 3.50 Kotak Dialog <i>Set Cross Label</i>	78
Gambar 3.51 Foto Papan Kalibrasi yang Telah Terlabel	79
Gambar 3.52 Kotak Dialog <i>Delete Unwanted Cross</i>	79
Gambar 3.53 Kotak Dialog <i>Select a Calibration Plate Coordinates File</i>	80
Gambar 4.1 Arah Pengukuran Papan Kalibrasi	92
Gambar 4.2 Tampilan Hasil <i>Single</i> Kalibrasi untuk Foto Kiri	102
Gambar 4.3 Tampilan Hasil <i>Single</i> Kalibrasi untuk Foto Kanan	103
Gambar 4.4 Tampilan Hasil Stereo Kalibrasi	103

Gambar 4.5 Tampilan Hasil EO kiri	104
Gambar 4.5 Tampilan Hasil EO kanan	104

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data Pengukuran Jarak Langsung masing-masing Titik Arah X untuk Line I.....	93
Tabel 4.2 Data Residual dari Pengukuran Jarak Langsung.....	93
Tabel 4.3 Data Residual Kuadrat dan RMS Error dari Pengukuran Jarak Langsung	93
Tabel 4.4 Data Pengukuran Jarak Langsung masing-masing Titik Arah Y untuk Line II	94
Tabel 4.5 Data Residual dari Pengukuran Jarak Langsung	94
Tabel 4.6 Data Residual Kuadrat dan RMS Error dari Pengukuran Jarak Langsung	94
Tabel 4.7 Data Koordinat Papan Kalibrasi	95
Tabel 4.8 Nilai Parameter EO Foto Kiri	96
Tabel 4.9 Nilai Parameter EO Foto Kanan	96
Tabel 4.10 Nilai Parameter Kalibrasi Kamera Foto Kiri dan Foto Kanan	96
Tabel 4.11 Koordinat Foto Kiri dan Foto Kanan	97
Tabel 4.12 Jarak Radial Foto Kiri dan Foto Kanan	98
Tabel 4.13 Koordinat Distorsi Radial Foto Kiri dan Foto Kanan	99
Tabel 4.14 Koordinat Distorsi Tangensial Foto Kiri dan Foto Kanan	100
Tabel 4.15 Koordinat Distorsi Sebelum dan Sesudah Terkoreksi Foto Kiri dan Foto Kanan	101
Tabel 4.16 Selisih Koordinat Distorsi Sebelum dan Sesudah Terkoreksi Foto Kiri dan Foto Kanan	101
Tabel 4.17 Hasil dari algoritma single kalibrasi	106

Tabel 4.18 Hasil dari algoritma stereo kalibrasi..... 106
Tabel 4.19 Hasil dari algoritma Ekstrinsik Orientasi..... 107

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Penelitian

Perkembangan teknologi dan dunia digital membawa banyak dampak dalam bidang Fotogrametri. Beberapa tahun belakangan ini keberhasilan yang menonjol didalam fotogrametri yang disebabkan oleh perkembangan ketelitian kamera, karena kamera merupakan salah satu instrument yang terpenting dan alat yang utama dalam fotogrametri.

Kamera "*off the self*" tidak mempunyai lensa yang sempurna, sehingga proses perekaman yang dilakukan akan memiliki kesalahan. Agar mendapatkan nilai ukuran yang memiliki tingkat akurasi, presisi dan reliability yang tinggi maka kamera harus dilakukan kalibrasi (Tjahjadi, 2008). Karena proses kalibrasi tersebut dapat menentukan besarnya penyimpangan-penyimpangan yang terjadi serta dapat mengeliminasi kesalahan sistematik yang terdapat pada unsur intrinsik dari kamera tersebut. Kalibrasi kamera dilakukan untuk menentukan parameter distorsi (Nuraini, 2007).

Distorsi dengan kata lain adalah pembiasan (Wolf, 1983). Distorsi terjadi karna sinar terbelok atau berubah arahnya, sehingga setelah sinar-sinar tersebut menembus lensa akan keluar dengan arah yang tidak sejajar lagi dengan arahnya sewaktu datang (Wolf, 1983). Distorsi lensa dapat menyebabkan

bergesernya titik pada foto dari posisi yang sebenarnya, sehingga memberikan ketelitian pengukuran yang tidak baik, namun tidak mempengaruhi kualitas ketajaman citra yang dihasilkan (Wolf, 1983). Distorsi lensa dapat dibagi menjadi distorsi radial dan distorsi tangensial serta distorsi affinity (Fraser, 1998). Penelitian ini akan mencoba menganalisa Distorsi kamera non metrik dari 2 buah kamera *CCTV* dengan resolusi dan piksel yang sama.

1.2. Maksud dan Tujuan Penelitian

1.2.1. Maksud Penelitian

Maksud dari penelitian ini yang ingin dicapai yaitu untuk menentukan nilai yang tepat bagi sejumlah konstanta untuk perhitungan distorsi 2 buah kamera *CCTV*.

1.2.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah membuat algoritma reduksi distorsi kamera *CCTV* untuk foto stereo.

1.3. Manfaat Penelitian

Memungkinkan dilakukan koreksi distorsi pada kamera *CCTV* sehingga diperoleh ketelitian yang baik untuk digunakan sebagai kamera terrestrial untuk pemetaan dengan *close range photogrammetry*.

1.4. Perumusan Masalah

Dengan diketahuinya distorsi kamera *CCTV* maka diharapkan dapat memperbaiki letak atau posisi gambar sehingga didapat hasil pengukuran koordinat *object space* seakurat mungkin.

1.5. Batasan Masalah

1. Kamera yang digunakan adalah kamera non metrik yang terdiri dari 2 buah kamera *CCTV* dengan resolusi yang sama.
2. Penelitian ini menghasilkan nilai dari konstanta parameter-parameter kalibrasi kamera, yakni; Fov_x , Fov_y , f , x_0 , y_0 , $Aspect\ Ratio$, k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2 , Matriks EO, Panjang *Baseline*

BAB II

DASAR TEORI

Pada umumnya kamera non-metrik tidak mempunyai susunan lensa yang sempurna, sehingga akan mengakibatkan terjadinya kesalahan pada proses perekaman (Nuraini, 2007). Oleh karena itu perlu dilakukan pengkalibrasian kamera untuk dapat menentukan besarnya penyimpangan-penyimpangan yang terjadi. Kalibrasi kamera dilakukan untuk menentukan parameter internal kamera (*IO*) yang meliputi *principle distace* (f), titik pusat fidusial foto (x_0, y_0) (Dörstel, et. al, 2001). Distorsi lensa yang terdiri dari distorsi radial (k_1, k_2, k_3), distorsi tangensial (p_1, p_2), dan distorsi akibat perbedaan penyekalaan dan ketidak ortogonal antara sumbu X dan Y (b_1, b_2) (Fraser, 1998).

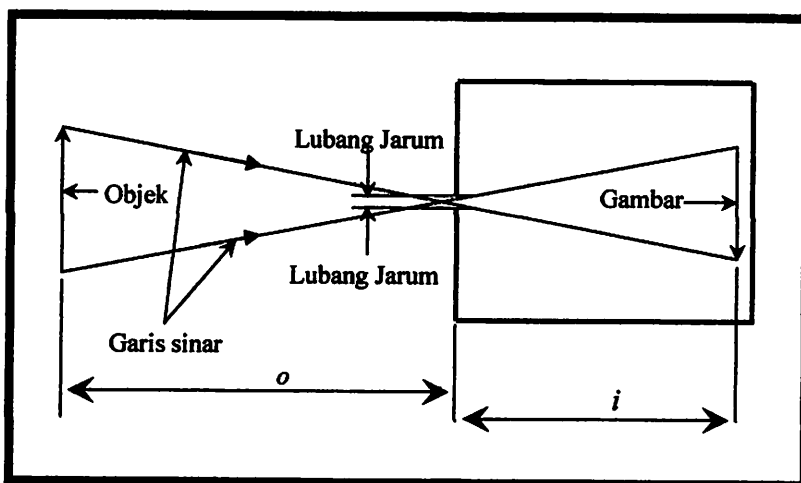
Maksud dari penulisan ini yang ingin dicapai yaitu untuk mengetahui model kamera serta defenisi dari parameter yang dikalibrasi, teori-teori yang digunakan untuk pengkalibrasian kamera sehingga dapat menentukan nilai yang tepat bagi sejumlah konstanta untuk perhitungan distorsi 2 buah kamera *CCTV*. Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penulisan ini adalah membuat algoritma reduksi distorsi kamera *CCTV* untuk foto stereo.

2.1 Distorsi Lensa

Fungsi utama dari suatu lensa ialah mengumpulkan berkas sinar yang berasal dari seluruh titik yang membentuk objek dan mengumpulkannya kearah titik api yang terletak pada jarak tertentu di sisi lain di balik lensa

(Wolf, 1983). Perkakas yang paling mudah dan sederhana guna memperagakan fungsi suatu lensa ialah sebuah lubang jarum yang secara teoretis memungkinkan masuknya sebuah sinar tunggal yang berasal dari setiap titik dari objek (Wolf, 1983).

Dengan alasan bahwa lubang jarum hanya memungkinkan untuk dilalui sinar yang sangat sedikit sehingga sinarnya sangat lemah dan tidak sesuai untuk pekerjaan fotogrametri, maka lubang jarum tersebut diganti dengan lensa kaca (Wolf, 1983).. Keunggulan suatu lensa jika dibandingkan dengan dengan lubang jarum ialah adanya peningkatan jumlah sinar yang melaluinya. Sebuah lensa mengumpulkan seluruh berkas sinar yang berasal dari setiap titik pada objek dan bukan hanya sebuah sinar tunggal saja (Wolf, 1983).



Gambar 2.1 Lensa lubang jarum dari kamera lubang jarum (Wolf,1983).

Dimana o adalah jarak objek dan i adalah jarak gambar

Menurut Tjahjadi (2008), ketidakstabilan susunan lensa yang akan mengakibatkan tidak berimpitnya sumbu fokus antar lensa . Sehingga, setelah

sinar-sinar tersebut menembus lensa akan keluar dengan arah yang tidak sejajar lagi dengan arahnya sewaktu datang atau disebut distorsi lensa (Wolf, 1983). Distorsi lensa menyebabkan bergesernya titik dari posisi sebenarnya atau merusak nilai geometrinya sehingga memberikan ketelitian letak atau posisi pengukuran yang tidak baik (Wolf, 1983). Tetapi, distorsi lensa tidak dapat mengurangi kualitas atau ketajaman gambar. (Wolf, 1983).

Apabila betul-betul terjadi distorsi yang disebabkan oleh lensa kamera, maka para ahli fotogrametri akan memperoleh kesalahan dalam pengukuran bagi letak-letak gambar dalam foto yang dihasilkannya. Distorsi lensa dibedakan menjadi tiga, yakni; distorsi radial (k_1, k_2, k_3), distorsi tangensial (p_1, p_2), dan distorsi akibat perbedaan penyekalaan dan ketidak ortogonal antara sumbu X dan Y (b_1, b_2) (Fraser, 1998). Namun hanya distorsi radial yang memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai geometri suatu gambar atau foto (Jedlička & Potůčková, 1999).

2.1.1 Distorsi radial

Sesuai dengan namanya distorsi radial, menyebabkan semua bagian gambar diubah letaknya menurut arah jari-jari, bermula dari sumbu optik. Keadaan ini disebabkan oleh kesalahan dalam pengasahan bagian-bagian lensa. Nilai distorsi radial merupakan perpindahan secara radial suatu titik dari posisi sebenarnya terhadap posisi dari *principle point* (x_p, y_p), dengan indikator bila nilainya positif maka pergeserannya mengarah keluar dan

jika nilainya negatif maka pergeserannya mengarah kedalam. (Wolf, 1983).

Secara teoritik koreksi radial dilakukan setelah dilakukan reduksi gambar ketitik utama dan koreksi oleh kesalahan pengkerutan atau pemekaran. Jumlah pengkerutan atau pemekaran pada foto ditentukan di dalam kalibrasi kamera. Sehingga koordinat foto dapat dikoreksi. Bila x_m dan y_c merupakan ukuran fidusial pada positif, sedangkan x_c dan y_c merupakan jarak fidusial terkalibrasi, maka koordianat foto pada titik "a" dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} x_a' &= \left(\frac{x_c}{x_m} \right) x_a \\ y_a' &= \left(\frac{y_c}{y_m} \right) y_a \end{aligned} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana x_a' dan y_a' adalah koordinat foto terkoreksi dan x_a dan y_a merupakan koordinat terukur (Wolf, 1993). Persamaan polinomial berdasarkan pada teori desain kamera adalah sebagai berikut (Wolf & Dewitt, 2004) :

$$\begin{aligned} \Delta x &= k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \\ \Delta y &= k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \end{aligned} \dots\dots\dots(2.2)$$

atau

$$d_r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana k_1 , k_2 , dan k_3 merupakan koefisien distorsi radial lensa, r merupakan jarak radial dari pusat foto terkalibrasi yang didapat dari :

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \dots\dots\dots(2.4)$$

Nilai \bar{x}, \bar{y} didapat dari persamaan 2.4. Setelah nilai distorsi radial Δx_r dan Δy_r didapat, selanjutnya menghitung komponen koreksi yaitu δ_x, δ_y sebagai berikut :

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\delta x}{\bar{x}} = \frac{\delta y}{\bar{y}} \dots\dots\dots(2.5)$$

Atau dapat dijabarkan menjadi :

$$\begin{aligned} \delta x &= \bar{x} \frac{\Delta r}{r} \\ \delta y &= \bar{y} \frac{\Delta r}{r} \end{aligned} \dots\dots\dots(2.6)$$

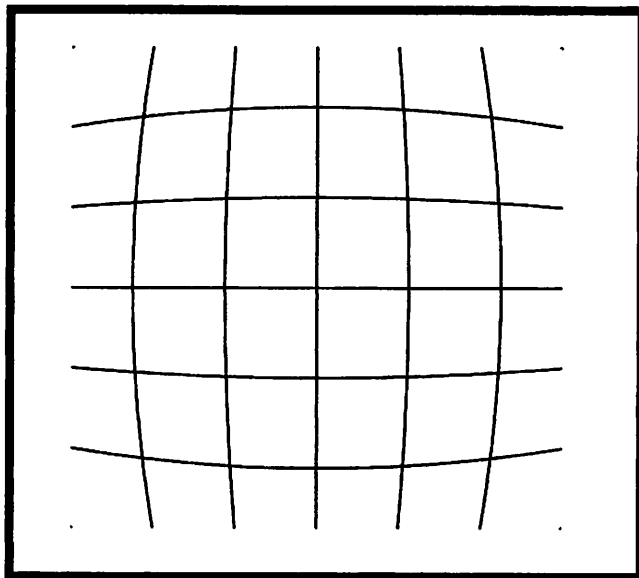
Posisi koordinat sebenarnya dapat dicari dengan menggunakan persamaan dibawah ini :

$$\begin{aligned} x &= \bar{x} - \delta x \\ y &= \bar{y} - \delta y \end{aligned} \dots\dots\dots(2.7)$$

Ada dua jenis utama dari distorsi radial (Jedlička, Potůčková, 1999).

2.1.1.1 Distorsi *barrel*

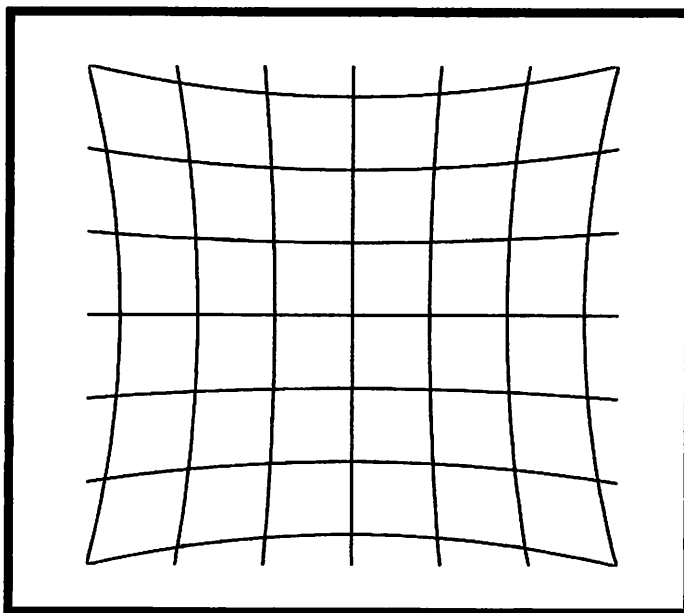
Kecenderungan garis menjadi melengkung keluar disebut distorsi *barrel* (Eternity, 2009). Distorsi *barrel* terjadi saat titik berpindah dari posisi sebenarnya terhadap pusat foto. Distorsi *barrel* sering kita jumpai pada kamera yang berlensa sudut lebar atau *wide angle*, dimana foto yang penuh dengan garis tegas seperti garis arsitektur akan menjadi tidak alami, melengkung dan terkesan tidak profesional. Tingkat kelengkungan ini berbeda-beda untuk tiap lensa, tentunya semakin baik lensa maka semakin kecil distorsi yang dihasilkan (Eternity, 2009)



Gambar 2.2 Distorsi Barrel(Wikipedia , 2006)

2.1.1.2 Distorsi *pincushion*

Tipe kedua distorsi radial adalah perpindahan positif, atau kecenderungan garis yang melengkung kedalam. Distorsi yang terjadi saat titik bergeser lebih jauh dari sumbu optik (Wolf, 1983). Tipe ini disebut juga Distorsi *Pincushion*. Dan biasanya Distorsi *Pincushion* terjadi pada kamera yang berlensa sudut sempit. Perlu diketahui juga bahwa distorsi *pincushion* tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan distorsi *barrel* (Perš & Kovačič, 2002).

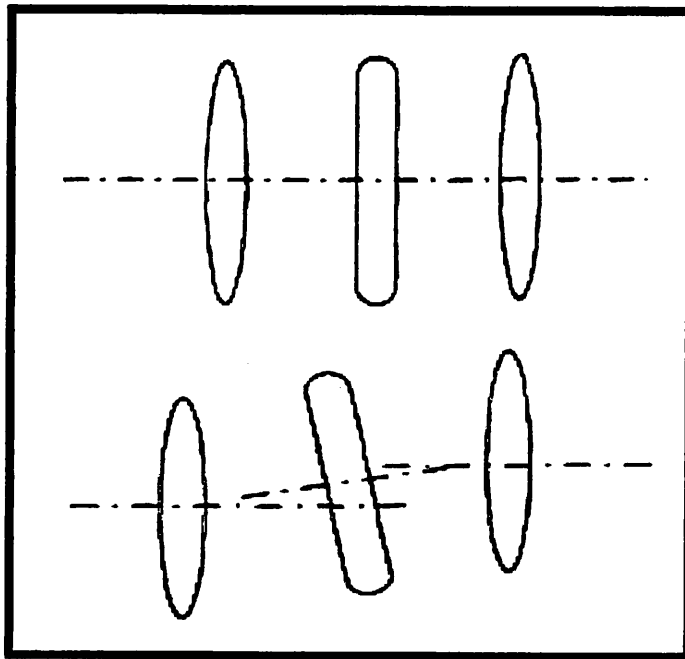


Gambar 2.2 Distorsi *Pincushion*(Wikipedia, 2006)

2.1.2 Distorsi *decentering* (Distorsi tangensial)

Pada dasarnya semua elemen pada sistem lensa kamera seharusnya berada pada suatu garis lurus. Adanya pergeseran dan perputaran dari elemen lensa ini akan menyebabkan pergeseran geometri foto yang

disebut sebagai distorsi *decentering* (Atkinson, 1996). Menurut Wolf (1983) distorsi posisi gambar dengan arah tegak lurus terhadap garis radial dari titik utama (pada umumnya sangat kecil pengaruhnya dibandingkan dengan distorsi radial dan sering kali dapat diabaikan).



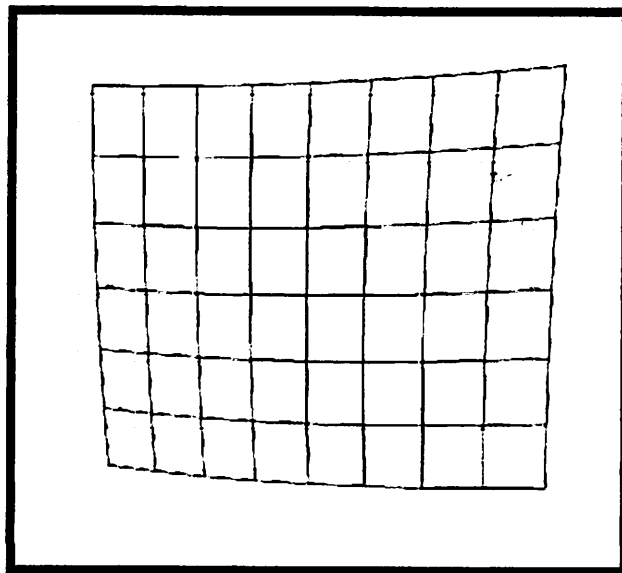
Gambar 2.3 Penyebab distorsi decentring (Atkinson, 1996).

Tidaklah mungkin mengurutkan elemen dari sistem lensa kolinier. Kekurangan ini mengakibatkan distorsi tangensial. Distorsi tangensial disebabkan kesalahan sentering elemen-elemen lensa dalam satu gabungan lensa (Atkinson, 1996). Titik pusat elemen-elemen lensa dalam gabung lensa tersebut tidak terletak pada satu garis lurus. Pergeseran ini biasa dideskripsikan dengan 2 persamaan polonomial untuk pergeseran pada

arah x (dx) dan y (dy) (Nuraini, 2007). Dari pernyataan Nuraini (2007) dua persamaan polomial diuraikan seperti berikut:

$$\begin{aligned} \Delta x_d &= P_1(3\bar{x}^2 + \bar{y}^2) + 2P_2\bar{x}\bar{y} \\ \Delta y_d &= 2P_1\bar{x}\bar{y} + P_2(3\bar{y}^2 + \bar{x}^2) \end{aligned} \dots\dots\dots(2.8)$$

P_i merupakan koefisien dari distorsi tangensial. Karena kualitas sistem lensa yang tinggi kepentingan parameter ini sangatlah kecil. Pada umumnya parameter distorsi tangensial diuji bukan untuk kepentingan. Lagipula ada ketergantungan antara parameter distorsi tangensial dan titik utama, jadi suatu sisa distorsi akan diserap dari posisi titik pusat dan oleh karena itu parameter distorsi tangensial biasanya dihilangkan pada perataan (Dörstel et al, 2002).



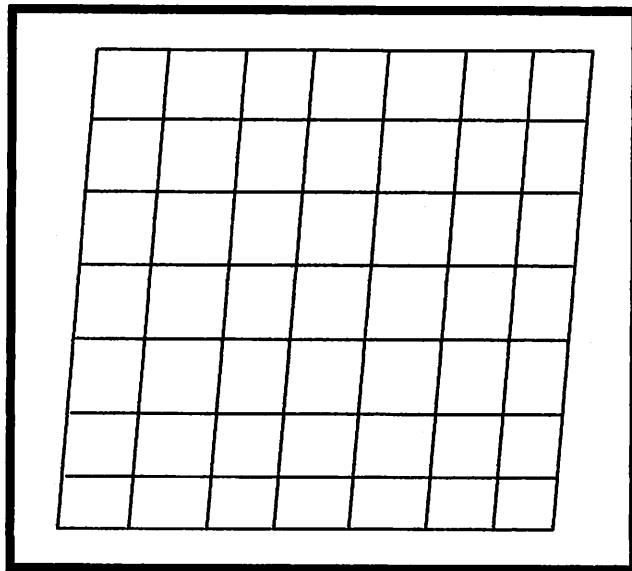
Gambar 2.4 Distorsi decentring (distorsi tangensial) (Atkinson, 1996).

2.1.3 Distorsi *Affinity*

Parameter *distorsi affinity empiris* secara alami dan dimodelkan dalam bentuk persamaan polinomial. Untuk kamera *CCTV* jumlah parameter dikurangi dari 12 parameter menjadi 2 parameter. Dimana parameter '*scale*' b_1 dan parameter '*shear*' b_2 (Dörstel et al, 2002).:

$$\begin{aligned} \Delta x_f &= b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y} \\ \Delta y_f &= 0 \end{aligned} \dots\dots\dots(2.9)$$

Distorsi *affinity* ini terjadi akibat kurang sikunya bidang *CCD* atau *CMOS* yang digunakan untuk merekam bayangan obyek, sehingga *frame* dari foto tidak akan benar-benar berbentuk sebuah bujur sangkar ataupun persegi panjang, akan tetapi membentuk sebuah jajaran genjang.



Gambar 2.5 Distorsi *Affinity*

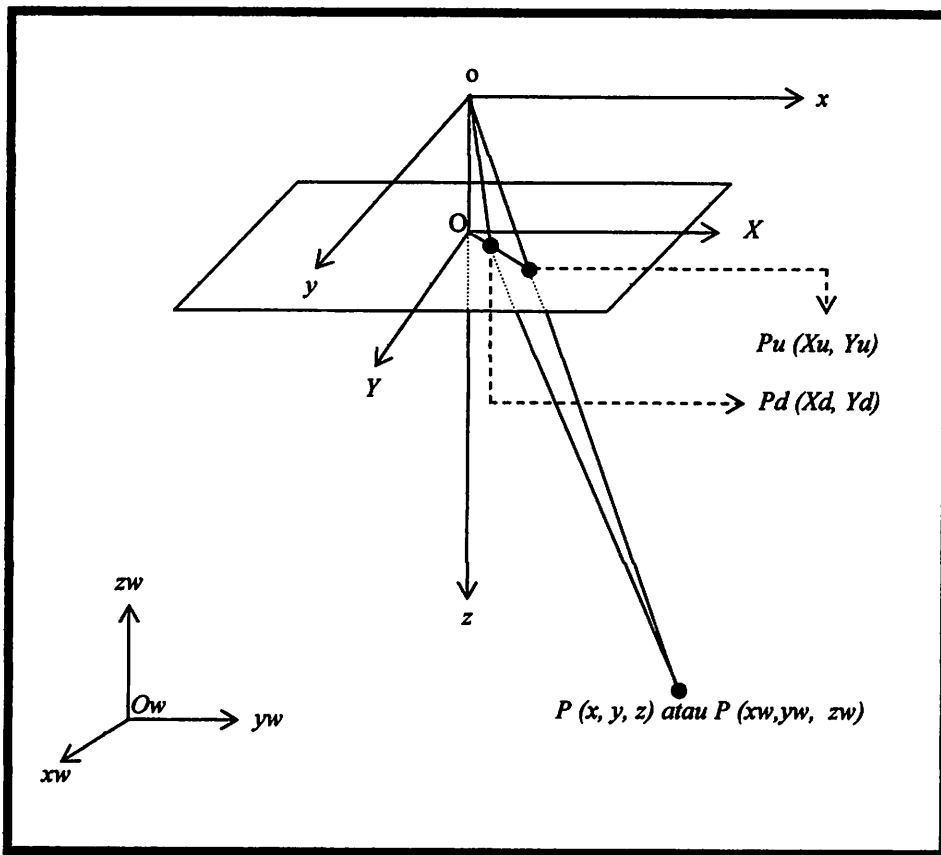
2.2 Metode Tsa'i

Metode non linear Faugeras-Toscani didasarkan pada penentuan dugaan awal tanpa mempertimbangkan distorsi lensa, model Tsai memang ekuivalen dengan model Faugeras-Toscani sebelumnya dengan distorsi (Armangu'e et al, 1999). Metode model Tsai juga merupakan distorsi lensa radial tapi mengasumsikan bahwa ada beberapa parameter kamera yang didistribusikan oleh pembuat (Salvi & Batlle, 1999). Kenyataan ini mengurangi jumlah parameter yang dikalibrasi dalam langkah pertama. Akan tetapi, semuanya secara iterasi dioptimalkan dalam langkah terakhir (Armangu'e et al, 1999).

Kalibrasi kamera memerlukan penyelesaian untuk beberapa parameter kalibrasi, yang dihasilkan dalam pendekatan klasik yang memerlukan penelitian non linear skala besar (Tsai, 1987). Cara umum untuk mencegah penelitian non linear skala besar ini adalah dengan menggunakan pendekatan yang sama pada DLT (*Direct Linear Transformation*) (Tsai, 1987). Pendekatan kami adalah untuk mencari batasan, yang mana dimaksud disini adalah batasan baris radial (Tsai, 1987). Batasan ini hanyalah merupakan fungsi rotasi dan translasi relatif (kecuali untuk komponen z) antara kamera dan titik kalibrasi (Tsai, 1987). Dimana batasannya adalah fungsi non linear dari parameter kalibrasi yang dihitung dengan persamaan proyektif normal (Tsai, 1987).

2.2.1 Model kamera

Bagian ini akan menjelaskan model kamera, defenisi dari parameter yang akan dikalibrasi. Model kamera itu sendiri pada dasarnya adalah sama seperti yang digunakan oleh setiap teknik kalibrasi kamera (Tsai, 1987)



Gambar 2.6 Geometri kamera dengan proyeksi perspektif dan distorsi lensa radial (Chiang & Boult, 1996)

Gambar 2.6 menggambarkan geometri dasar model kamera. (x_w, y_w, z_w) adalah koordinat 3D dari objek P di dalam sistem koordinat dunia 3D (Chiang & Boult, 1996). (x, y, z) adalah koordinat 3D dari titik

obyek P di dalam sistem koordinat kamera, yang berpusat pada titik o , pusat optik, dengan sumbu z sama dengan sumbu optik (Chiang & Boulton, 1996). (X, Y) adalah sistem koordinat foto yang berpusat pada O dan sejajar dengan sumbu x dan y (Tsai, 1987). f adalah jarak antara bidang foto depan dan pusat optik (Chiang & Boulton, 1996). (X_w, Y_w) adalah koordinat foto yang tidak terdistorsi atau ideal dari (x, y, z) (Chiang & Boulton, 1996). (X_d, Y_d) adalah koordinat foto yang terdistorsi dari (X_w, Y_w) karena distorsi lensa radial (Tsai, 1987).

2.2.1.1 Langkah-langkah transformasi dari koordinat bumi 3D kekoordinat kamera 3D

- 1) Transformasi *rigid body* dari sistem koordinat bumi 3D (x_w, y_w, z_w) ke sistem koordinat kamera 3D (x, y, z) (Tsai, 1987)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana R adalah matrik rotasi 3×3 .

$$R \equiv \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$$

Dan T adalah vektor translasi

$$T \equiv \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

Parameter yang dikalibrasi adalah R dan T (Chiang & Boulton, 1996).

- 2) Transformasi dari koordinat kamera 3D (x, y, z) ke koordinat yang tidak didistorsikan (X_u, Y_u) dengan menggunakan proyeksi perspektif dengan geometri lensa lubang jarum (Tsai, 1987)

$$X_u = f \frac{x}{z} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$Y_u = f \frac{y}{z} \dots\dots\dots(2.12)$$

Parameter yang akan dikalibrasikan adalah panjang fokus efektif f (Chiang & Boulton, 1996).

- 3) Distorsi lensa radial adalah

$$X_d + D_x = X_u \dots\dots\dots(2.13)$$

$$Y_d + D_y = Y_u \dots\dots\dots(2.14)$$

Di mana (X_d, Y_d) adalah koordinat foto yang terdistorsikan pada bidang foto (Tsai, 1987)

$$D_x = X_d (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \dots\dots\dots(2.15)$$

$$D_y = Y_d (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \dots\dots\dots(2.16)$$

$$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \dots\dots\dots(2.17)$$

Parameter yang akan dikalibrasikan adalah koefisien distorsi k_r (Chiang & Boulton, 1996). Untuk aplikasi industri hanya dibutuhkan koreksi terhadap distorsi radial (Manual Photogrammetry, 1980)

- 4) Transformasi koordinat foto yang terdistorsi (X_d Y_d) ke koordinat foto yang terdapat di komputer (X_f Y_f)

$$X_f = s_x d_x'^{-1} X_d + C_x \dots\dots\dots(2.18)$$

$$Y_f = s_y d_y'^{-1} Y_d + C_y \dots\dots\dots(2.19)$$

Dimana

(X_f Y_f) : jumlah baris dan kolom dari *pixel* pada foto dalam komputer

(C_x C_y) : koordinat foto di komputer pada bidang foto asli

$$d_x' = d_x \frac{N_{cx}}{N_{fx}} \dots\dots\dots(2.20)$$

d_x : jarak pusat ke pusat antara elemen sensor yang berdekatan dalam arah X (garis scan)

d_y : jarak pusat ke pusat antara sensor CCD yang berdekatan dalam arah Y

N_{cx} : jumlah elemen sensor dalam arah X

N_{fx} : jumlah *pixel* dalam garis seperti yang ditunjukkan oleh komputer

s_x : faktor skala yang akan dikalibrasi.

Parameter yang akan dikalibrasi adalah ketidaktentuan faktor skala foto (s_x) dan (C_x, C_y) (Chiang & Boult, 1996).

2.2.2 Persamaan yang berhubungan dengan koordinat dunia 3D ke koordinat foto 2D

Dengan mengombinasikan tiga langkah terakhir, koordinat komputer (X, Y) dihubungkan dengan (x, y, z), koordinat 3D dari titik objek dalam sistem koordinat kamera, dapat dijelaskan dengan persamaan berikut (Tsai, 1987):

$$s_x^{-1}d'_x X + s_x^{-1}d'_x X k_1 r^2 = f \frac{x}{z} \dots\dots\dots(2.21)$$

$$d'_y Y + d_y Y k_1 r^2 = f \frac{y}{z} \dots\dots\dots(2.22)$$

Dimana

$$r = \sqrt{(s_x^{-1}d'_x X)^2 + (d_y + Y)^2} \dots\dots\dots(2.23)$$

Subtitusikan (1) kedalam persamaan (2.21) dan (2.22) menjadi:

$$s_x^{-1}d'_x X + s_x^{-1}d'_x X k_1 r^2 = f \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z} \dots\dots\dots(2.24)$$

$$d'_y Y + d_y Y k_1 r^2 = f \frac{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_x}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z} \dots\dots\dots(2.25)$$

Dimana

$$\begin{aligned} X &= X_f - C_x \\ Y &= Y_f - C_y \end{aligned} \dots\dots\dots(2.26)$$

2.2.2.1 Parameter ekstrinsik

Pada langkah 1 untuk transformasi dari sistem koordinat bumi objek 3D ke sistem koordinat 3D terpusat pada pusat optik yang disebut dengan parameter ekstrinsik (Tsai, 1987). Terdapat enam parameter: penyimpangan sudut *euler* θ , hubungan ϕ , dan kemiringan ψ untuk rotasi (R), serta tiga komponen untuk vektor translasi (T). Matrik rotasi (R) bisa ditunjukkan sebagai fungsi θ , ϕ , ψ sebagai berikut (Tsai, 1987):

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & \sin\psi \cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\psi \cos\phi + \cos\psi \sin\theta \cos\phi & \cos\psi \cos\phi + \sin\psi \sin\theta \sin\phi & \cos\theta \sin\phi \\ \sin\psi \sin\phi + \cos\psi \sin\theta \cos\phi & -\cos\psi \sin\phi + \sin\psi \sin\theta \cos\phi & \cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} \quad 2.27$$

2.2.2.2 Parameter intrinsik

Interior Orientation (IO) adalah hubungan antara koordinat pusat kamera dan koordinat foto (Horn, 2000). Sistem koordinat kamera mempunyai koordinat asli pada titik tengah kamera, yang sumbu z sepanjang sumbu optik dan sumbu x, y sejajar menuju sumbu x, y foto (Horn, 2000). Dalam Langkah 2-4 untuk

transformasi dari koordinat obyek 3D pada sistem koordinat kamera ke koordinat gambar komputer disebut sebagai parameter intrinsik (Tsai, 1987). Pada model Tsai terdapat lima parameter intrinsik (Tsai, 1986), yaitu:

f : panjang fokus efektif atau jarak antara titik tengah kamera ke bidang foto

k_1 : koefisien distorsi radial

s_x : ketidaksesuaian faktor skala

(C_x, C_y) : pusat foto

2.2.3 Defenisi masalah

Masalah kalibrasi kamera adalah menghitung parameter intrinsik dan ekstrinsik kamera berdasarkan pada jumlah titik yang koordinat obyeknya ada dalam sistem koordinat (x_w, y_w, z_w) diketahui dan yang koordinat gambarnya (X, Y) diukur (Tsai, 1987).

2.2.4 Teknik kalibrasi kamera dua tingkat baru

Dasar awal teknik baru adalah empat observasi sebagai berikut (Tsai, 1987):

1. Observasi I

Disini diasumsikan bahwa distorsi adalah radial, maka seberapa pun distorsinya, arah vektor $\overline{O_i P_d}$ diluar O_i dalam bidang foto ke titik

foto (X_d, Y_d) masih tidak berubah dan secara radial diluruskan dengan vektor $\overline{P_{oz}P}$ di luar dari sumbu optik (atau, lebih tepatnya, titik P_{oz} pada sumbu optik yang koordinat z nya sama dengan titik obyek (x, y, z)) ke titik obyek (x, y, z) (Tsai, 1987).

2. Observasi II

Panjang fokus efektif (f) juga tidak mempengaruhi arah vektor $\overline{O_iP_d}$, karena skala f koordinat foto X_d dan Y_d mempunyai tingkat yang sama (Tsai, 1987).

3. Observasi III

Ketika sistem koordinat objek dipermukaan bumi dirotasi dan ditranslasikan ke dalam x dan y seperti dalam langkah 1 hingga O_iP_d sejajar dengan $\overline{P_{oz}P}$ untuk semua titik, maka translasi dalam z tidak akan mengubah arah O_iP_d (ini dari kenyataan bahwa, menurut persamaan (2.11) dan (2.12), z mengubah X_u dan Y_u dengan skala yang sama, sehingga $\overline{O_iP_u} // \overline{O_iP_d}$ (Tsai, 1987).

4. Observasi IV

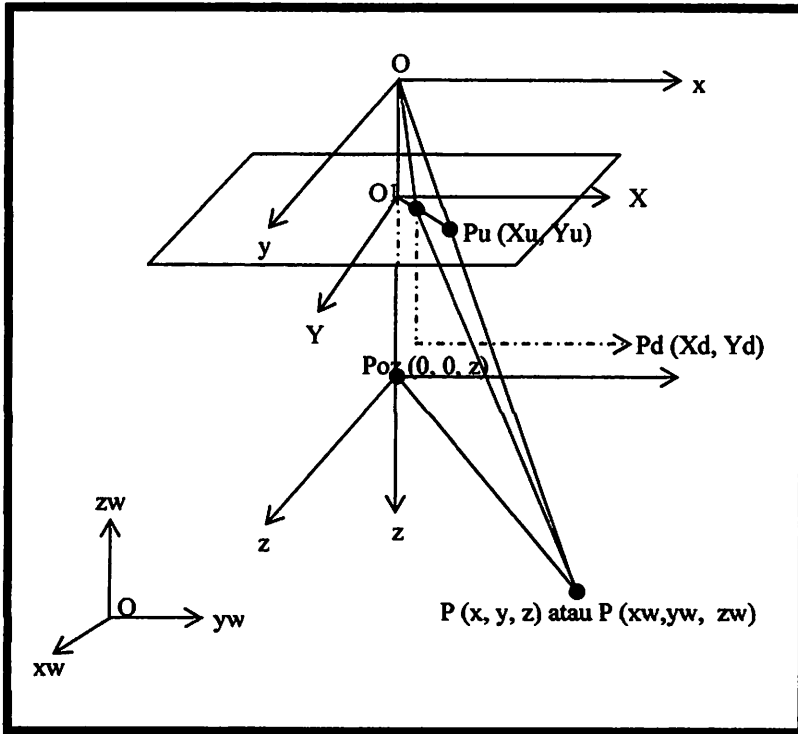
Batasan di mana O_iP_d sejajar pada $\overline{P_{oz}P}$ untuk setiap titik, akan ditunjukkan sendiri dari koefisien distorsi radial (k_1, k_2), panjang fokus

efektif (f), dan komponen z translasi 3D vektor T , sebenarnya memadai untuk menentukan rotasi 3D komponen R , X , dan Y pada translasi 3D dari sistem koordinat bumi ke sistem koordinat kamera, dan s_x dalam komponen X pada koordinat foto (Tsai, 1987).

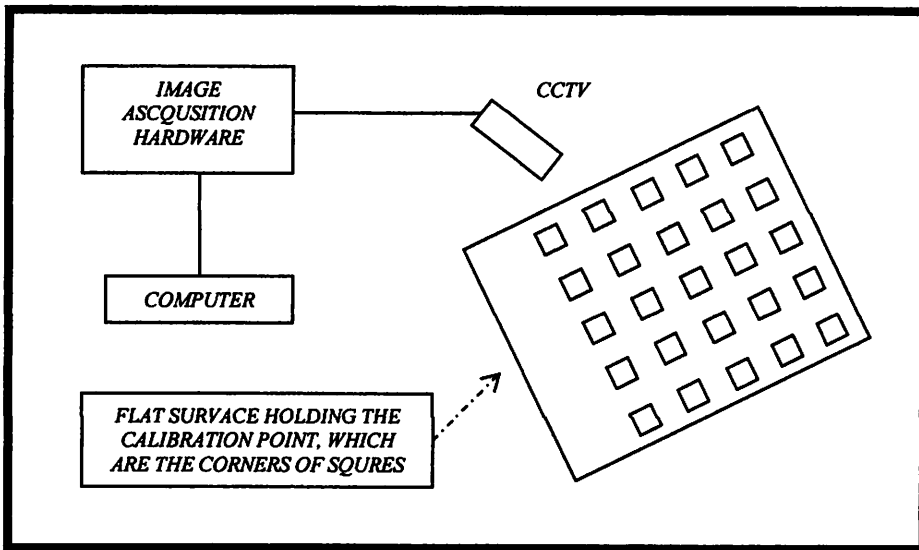
Secara normal dari empat observasi diatas hanya yang terakhir yang memerlukan optimasi non linear untuk menentukan parameter ekstrinsik (kecuali T_z) dan salah satu parameter intrinsik (s_x) (Tsai, 1986).

2.2.5 Kalibrasi kamera dengan menggunakan titik koplanar

Metode diatas tidak dapat digunakan apabila targetnya adalah bidang datar (Horn, 2000). Karena target kita berupa sebuah bidang datar maka nilai z_w diasumsikan = 0 untuk semua titik yang terdapat pada target tersebut (Tsai, 1987). Tujuan terakhir dari metode diatas adalah memastikan bahwa nilai T_y adalah tidak selalu = 0 (Tsai, 1987).



Gambar 2.7 Ilustrasi Garis Distorsi Radial (Chiang & Boult, 1996).



Gambar 2.8 Diagram Skematik Susunan Eksperimen Untuk Kalibrasi Kamera (Tsai, 1987).

2.2.5.1 Menghitung R, T_x, T_y

- 1) Menghitung koordinat foto terdistorsi (X_d, Y_d)

$$\begin{aligned} X_d^i &= s_x^i d_x^i (X_f^i - C_x) \\ Y_d^i &= d_y^i (Y_f^i - C_y) \end{aligned} \dots\dots\dots(2.28)$$

- 2) Menghitung $r_1/T_y, r_2/T_y, T_x/T_y, r_4/T_y$, dan r_5/T_y yang belum diketahui menggunakan persamaan linear (menghitung menggunakan point 1) diatas);

$$AX = b \dots\dots\dots(2.29)$$

Dimana

$$A \equiv \begin{bmatrix} Y_d^1 x_w^1 & Y_d^1 y_w^1 & Y_d^1 & -Y_d^1 x_w^1 & -Y_d^1 y_w^1 \\ Y_d^2 x_w^2 & Y_d^2 y_w^2 & Y_d^2 & -Y_d^2 x_w^2 & -Y_d^2 y_w^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_d^N x_w^N & Y_d^N y_w^N & Y_d^N & -Y_d^N x_w^N & -Y_d^N y_w^N \end{bmatrix},$$

$$x \equiv \begin{bmatrix} r_1/T_y \\ r_2/T_y \\ T_x/T_y \\ r_4/T_y \\ r_5/T_y \end{bmatrix}, \text{ dan } b \equiv \begin{bmatrix} Y_d^1 \\ Y_d^2 \\ \vdots \\ Y_d^N \end{bmatrix}$$

- 3) Menghitung R, T_x , dan T_y

- a) Menghitung $|T_y|$ dari $r_1/T_y, r_2/T_y, T_x/T_y, r_4/T_y$, dan r_5/T_y

Diketahui matriks ${}_2[C]_2$ adalah sub matriks dari matriks R . Dimana, matriks C didefenisikan sebagai berikut

$$C \equiv \begin{bmatrix} r_1' & r_2' \\ r_4' & r_5' \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} r_1/T_y & r_2/T_y \\ r_4/T_y & r_5/T_y \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.30)$$

Jika (tidak semua baris dan kolom dari matriks C dihilangkan) maka kita dapat menghitung T_y^2 dengan persamaan berikut (Tsai, 1987):

$$T_y^2 = \frac{S_r - \left| S_r^2 - 4(r_1'r_5' - r_4'r_2')^2 \right|^{1/2}}{4(r_1'r_5' - r_4'r_2')^2} \dots\dots\dots(2.31)$$

Dimana $S_r = r_1'^2 + r_2'^2 + r_4'^2 + r_5'^2$; ELSE (ini jarang terjadi, jika terjadi) kita dapat menghitung T_y^2 dengan persamaan berikut (Tsai, 1987);

$$T_y^2 = (r_i'^2 + r_j'^2)^{-1} \dots\dots\dots(2.32)$$

Dimana $r_i'^2, r_j'^2$ adalah unsur-unsur dalam baris dan kolom dari matriks C yang tidak dihilangkan (Tsai, 1987).

b) Menentukan tanda dari T_y

$$\begin{aligned} r_1 &= (r_1/T_y) \cdot T_y \\ r_2 &= (r_2/T_y) \cdot T_y \\ T_x &= (T_x/T_y) \cdot T_y \\ r_4 &= (r_4/T_y) \cdot T_y \dots\dots\dots(2.33) \\ r_5 &= (r_5/T_y) \cdot T_y \\ x &= r_1x_w + r_2y_w + r_3 \cdot 0 + T_x \\ y &= r_4x_w + r_5y_w + r_6 \cdot 0 + T_y \end{aligned}$$

Dimana $r_1/T_y, r_2/T_y, T_x/T_y, r_4/T_y$, dan r_5/T_y jika ((x dan X mempunyai tanda yang sama) dan (y dan Y) mempunyai tanda yang sama)), maka tanda $T_y = +1$, selain itu tanda $T_y = -1$.

c) Menghitung matrik rotasi (R)

Hitung persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 r_1 &= (r_1/T_y) \cdot T_y \\
 r_2 &= (r_2/T_y) \cdot T_y \\
 T_x &= (T_x/T_y) \cdot T_y \\
 r_4 &= (r_4/T_y) \cdot T_y \\
 r_5 &= (r_5/T_y) \cdot T_y
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

Dimana $r_1/T_y, r_2/T_y, T_x/T_y, r_4/T_y$, dan r_5/T_y ditentukan dalam penentuan lima parameter yang belum diketahui di bagian sebelumnya (Tsai, 1987).

Jika $f \geq 0$ maka matrik R adalah :

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & (1 - r_1^2 - r_2^2)^{1/2} \\ r_4 & r_5 & s(1 - r_4^2 - r_5^2)^{1/2} \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}
 \tag{2.35}$$

Jika $f \leq 0$ maka matrik R adalah :

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & -(1-r_1^2-r_2^2)^{1/2} \\ r_4 & r_5 & -s(1-r_4^2-r_5^2)^{1/2} \\ -r_7 & -r_8 & r_9 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.36)$$

Dimana $s = -\text{sign}(r_1r_4 + r_2r_5)$, dan r_7, r_8 dan r_9 ditentukan dengan *cross product* pada dua baris pertama menggunakan ortonormal dan kaedah tangan kanan dari matrik R (Tsai, 1987)

2.2.5.2 Menghitung f, k_1, T_x

- a) Menghitung pendekatan dari f dan T_x dengan mengabaikan distorsi lensa radial

Untuk setiap titik kalibrasi i , ditentukan dengan persamaan linear untuk nilai pendekatan f dan T_x yang belum diketahui sebagai berikut (Chiang & Boulton, 1996):

$$\begin{bmatrix} y_1 & -d_y Y_1 \\ y_2 & -d_y Y_2 \\ \vdots & \vdots \\ y_N & -d_y Y_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ T_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 d_y Y_1 \\ w_2 d_y Y_2 \\ \vdots \\ w_N d_y Y_N \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.37)$$

2.2.6 Kalibrasi kamera dengan menggunakan titik nonkoplanar

2.2.6.1 Menghitung R , T_x , T_y dan s_x

- 1) Menghitung koordinat foto terdistorsi $(\overline{X}_d, \overline{Y}_d)$, dimana $(\overline{X}_d, \overline{Y}_d)$ didefinisikan sama persis sama dengan (X_d, Y_d) dalam persamaan (6), kecuali s_x yang diasumsikan =1 (Chiang & Boulton, 1996).

$$\begin{aligned} X_d^i &= s_x^{-1} d_x' (X_f^i - C_x) \\ Y_d^i &= d_y' (Y_f^i - C_y) \end{aligned} \dots\dots\dots(2.38)$$

- 2) Menghitung

$s_x r_1/T_y, s_x r_2/T_y, s_x T_x/T_y, r_4/T_y, r_5/T_y$, dan r_6/T_y , yang belum diketahui menggunakan persamaan linear (dihitung menggunakan point 1) diatas);

$$AX = b \dots\dots\dots(2.39)$$

Dimana

$$A \equiv \begin{bmatrix} \overline{Y}_d^1 x_w^1 & \overline{Y}_d^1 y_w^1 & \overline{Y}_d^1 & -\overline{X}_d^1 x_w^1 & -\overline{X}_d^1 y_w^1 & -\overline{X}_d^1 z_w^1 \\ \overline{Y}_d^2 x_w^2 & \overline{Y}_d^2 y_w^2 & \overline{Y}_d^2 & -\overline{X}_d^2 x_w^2 & -\overline{X}_d^2 y_w^2 & -\overline{X}_d^2 z_w^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \overline{Y}_d^N x_w^N & \overline{Y}_d^N y_w^N & \overline{Y}_d^N & -\overline{X}_d^N x_w^N & -\overline{X}_d^N y_w^N & -\overline{X}_d^N z_w^N \end{bmatrix}$$

$$x \equiv \begin{bmatrix} s_x r_1 / T_y \\ s_x r_2 / T_y \\ s_x r_3 / T_y \\ s_x T_x / T_y \\ s_x r_4 / T_y \\ s_x r_5 / T_y \\ s_x r_3 / T_y \end{bmatrix}, \text{ dan } b \equiv \begin{bmatrix} \bar{X}_d^1 \\ \bar{X}_d^2 \\ \vdots \\ \bar{X}_d^N \end{bmatrix}$$

3) Menghitung R , T_x dan T_y

a) Menghitung $|T_y|$ dari

$s_x r_1 / T_y, s_x r_2 / T_y, s_x T_x / T_y, r_4 / T_y, r_5 / T_y$, dan r_6 / T_y , maka

untuk menghitung $|T_y|$ digunakan formula berikut:

$$|T_y| = 1 / \sqrt{a_5^2 + a_6^2 + a_7^2} \dots\dots\dots(2.40)$$

b) Menentukan tanda dari T_y

$$\begin{aligned} r_1 &= (r_1 / T_y) \cdot T_y \\ r_2 &= (r_2 / T_y) \cdot T_y \\ r_3 &= (r_3 / T_y) \cdot T_y \\ T_x &= (T_x / T_y) \cdot T_y \\ r_4 &= (r_4 / T_y) \cdot T_y \dots\dots\dots(2.41) \\ r_5 &= (r_5 / T_y) \cdot T_y \\ r_6 &= (r_6 / T_y) \cdot T_y \\ x &= r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x \\ y &= r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y \end{aligned}$$

Dimana $s_x r_1/T_y, s_x r_2/T_y, s_x T_x/T_y, r_4/T_y, r_5/T_y, \text{ dan } r_6/T_y$, ditentukan dari persamaan (22) diatas. Yang mana jika ((x dan X mempunyai tanda yang sama) dan (y dan Y mempunyai tanda yang sama)), maka tanda $T_y = +1$, selain itu tanda $T_y = -1$.

c) Menentukan s_x

Gunakan persamaan berikut untuk menghitung s_x

$$s_x = (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)^{1/2} |T_y| \dots\dots\dots(2.42)$$

d) Menghitung R Matriks Rotasi

Menghitung $r_{b,r} = 1, \dots, 6$, dan T_x dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} r_1 &= a_1 \cdot T_y / s_x \\ r_2 &= a_2 \cdot T_y / s_x \\ r_3 &= a_3 \cdot T_y / s_x \\ T_x &= a_4 \cdot T_y / s_x \dots\dots\dots(2.43) \\ r_5 &= a_5 \cdot T_y \\ r_6 &= a_6 \cdot T_y \\ r_7 &= a_7 \cdot T_y \end{aligned}$$

Dimana $a_{b,i} = 1, \dots, 7$ ditentukan dari point 3) diatas

Ingat $r_{b,i} = 1, \dots, 6$, dan yang mana baris pertama dan kedua merupakan elemen dari matriks R , ditentukan dengan *cross product* pada dua baris pertama menggunakan ortonormal

dan kaedah tangan kanan dari matrik R (determinan dari $R = 1$, bukan -1) (Chiang & Boulton, 1996).

2.2.6.2 Menghitung f, k_1, T_z

- a) Menghitung pendekatan dari f dan T_z dengan mengabaikan distorsi lensa radial

Untuk setiap titik kalibrasi i , ditentukan dengan persamaan linear untuk nilai pendekatan f dan T_z yang belum diketahui sebagai berikut (Chiang & Boulton, 1996):

$$\begin{bmatrix} y_1 & -d_y Y_1 \\ y_2 & -d_y Y_2 \\ \vdots & \vdots \\ y_N & -d_y Y_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 d_y Y_1 \\ w_2 d_y Y_2 \\ \vdots \\ w_N d_y Y_N \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.44)$$

Dimana $y_1 = r_4 x_w^i + r_5 y_w^i + r_6 z_w^i + T_y$ dan

$$w_1 = r_7 x_w^i + r_8 y_w^i + r_9 z_w^i$$

2.3 Metode Zhang

Kalibrasi kamera merupakan langkah penting dalam foto 3D komputer untuk mengestrak informasi metrik dari gambar 2D (Zhang, 1998).

2.3.1 Persamaan dasar

Sebuah titik 2D dinotasikan oleh $m = [u, v]^T$ (Zhang, 1998). Sebuah titik 3D dinotasikan oleh $M = [X, Y, Z]^T$ (Zhang, 1998). \tilde{x} melambangkan

vektor yang ditambahkan oleh penambahan 1 sebagai elemen terakhir, $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$ dan $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$ (Zhang, 1998). Sebuah kamera biasanya dimodelkan dengan lubang jarum: hubungan antara point 3D M dan proyeksi foto m diberikan oleh (Zhang, 1998):

$$s\tilde{m} = A[R \ t]\tilde{M} \text{ dengan } A = \begin{bmatrix} \alpha & c & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.45)$$

Dimana, s adalah sebuah faktor skala sembarang; (R, t) , disebut sebagai parameter ekstrinsik adalah rotasi dan translasi yang mana dihubungkan dengan sistem koordinat bumi dan sistem koordinat foto; A disebut matriks intrinsik foto, dan (u_0, v_0) koordinat untuk nilai dari *principle point*, α dan β faktor skala dalam sumbu foto u dan v , dan c adalah parameter yang mendeskripsikan kemiringan dari dua sumbu foto (Zhang, 1998). Disini digunakan singkatan A^{-T} untuk $(A^{-1})^T$ atau $(A^T)^{-1}$

2.3.2 Kesamaan bidang model dan foto

Tanpa menghilangkan persamaan umum, kita berasumsi bahwa bidang model pada $Z=0$ di sistem koordinat bumi (Zhang, 1998). Notasi i^{th} : kolom dari matriks rotasi R oleh r_i dari (2.45)

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Kita masih menggunakan M untuk mewakili nilai dari bidang datar, tapi $m = [X, Y]^T$ sejak Z adalah selalu sama dengan 0 (Zhang, 1998). Pada saat $\tilde{M} = [X, Y, 1]^T$. Oleh karena itu, bentuk persamaan untuk menotasikan hubungan antara M model dan m foto serta faktor skala atau yang kita kenal dengan nama matriks homography H (Zhang, 1998);

$$s\tilde{m} = H\tilde{M} \quad \text{dengan } H = A[r_1 \quad r_2 \quad t] \dots\dots\dots(2.46)$$

2.3.3 Permasalahan parameter intrinsik

Mengingat gambar dari model bidang datar, maka sebuah homografi dapat ditentukan, notasi $H = [h_1 \quad h_2 \quad h_3]$ Dari persamaan (2.46), maka diperoleh

$$[h_1 \quad h_2 \quad h_3] = \lambda A [r_1 \quad r_2 \quad t]$$

Dimana λ adalah faktor skala sembarang, dengan diketahui bahwa r_1 dan r_2 orthonormal maka, kita mempunyai persamaan (Zhang, 1998):

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0 \dots\dots\dots(2.47)$$

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \dots\dots\dots(2.48)$$

Persamaan (2.47) dan (2.48) adalah persamaan dasar pada parameter intrinsik (Zhang, 1998). Sebuah homografi mempunyai 8 derajat kebebasan dan ada 6 parameter ekstrinsik yakni terdiri dari 3

parameter untuk rotasi dan 3 parameter untuk translasi (Zhang, 1998).
 Dimana, kita hanya dapat menggunakan 2 *constrains* pada parameter intrinsik (Loung, 1992)

2.3.4 Memecahkan kalibrasi kamera

Pada bagian ini membahas secara detail bagaimana cara yang efektif guna menyelesaikan masalah kalibrasi kamera (Zhang, 1998).

2.3.4.1 Solusi *closed form*

$$B = A^{-T} A^{-1} \equiv \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \tag{2.49}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{v_0 - u_0 \beta}{\alpha^2 \beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 \beta)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0 \gamma - u_0 \beta}{\alpha^2 \beta^2} & -\frac{\gamma(v_0 \gamma - u_0 \beta)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(v_0 \gamma - u_0 \beta)^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix}$$

Catatan bahwa B adalah simetri, yang didefinisikan oleh vektor 6D

$$b = [B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33}]^T \tag{2.50}$$

Biarkan nilai i pada kolom vektor dari H menjadi $h_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}]^T$.

Maka, persamaan yang diperoleh adalah:

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b \dots\dots\dots(2.51)$$

Dengan

$$v_{ij} = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}, h_{i3}h_{j3}]^T$$

Oleh karena itu, dua *fundamental constrain* (2.47) dan (2.48) dari sebuah homografi yang diberikan, maka dapat ditulis sebagai 2 persamaan homogeneus yang berbeda dalam b (Zhang, 1998):

$$\begin{bmatrix} v_{i2}^T \\ (v_{i1} - v_{i2})^T \end{bmatrix} b = 0 \dots\dots\dots(2.52)$$

Jika foto n pada model bidang datar diobservasi, dengan memasukan nilai n pada persamaan (2.52) maka, sehingga persamaannya :

$$Vb = 0 \dots\dots\dots(2.53)$$

Dimana V adalah sebuah matriks $2n \times 6$. Jika $n \geq 3$ maka kita akan memperoleh solusi yang unik sampai pada faktor skala. Jika $n = 2$, maka kita dapat menggunakan kemiringan *constrain* $\gamma = 0$ misalnya $[0, 1, 0, 0, 0, 0]$, $b = 0$, dimana ditambahkan sebuah tanda tambahan (Shimizu, et al 1998). Solusi ini ditambahkan sebagai *eigenvector* dari $V^T V$ yang digabungkan dengan *eigenvalue* (atau

dengan kata lain, nilai matriks V dari *eigenvector* digabungkan dengan nilai terkecil dari *eigenvalue*) (Zhang, 1998).

Setelah b ditentukan, kita dapat menghitung matriks intrinsik kamera dengan menggunakan persamaan berikut (Zhang, 1998):

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & c & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dimana

$$\begin{aligned} v_0 &= (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}) / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2) \\ \lambda &= B_{33} - [B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})] / B_{11} \\ \alpha &= \sqrt{\lambda / B_{11}} \\ \beta &= \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2)} \\ c &= -B_{12}\alpha^2 \beta / \lambda \\ u_0 &= cv_0 / \alpha - B_{13}\alpha^2 / \lambda \end{aligned}$$

Setelah A diketahui, parameter ekstrinsik untuk masing-masing foto siap untuk dihitung (Zhang, 1998). Dari persamaan (2.46), kita memiliki

$$\begin{aligned} r_1 &= \lambda A^{-1} h_1 \\ r_2 &= \lambda A^{-1} h_2 \\ r_3 &= r_1 \times r_2 \\ t &= \lambda A^{-1} h_3 \end{aligned} \dots\dots\dots(2.54)$$

Dengan $\lambda = 1 / \|A^{-1} h_1\| = 1 / \|A^{-1} h_2\|$

2.3.5 Penentuan dengan distorsi radial

Suatu kamera digital biasanya mengalami distorsi lensa yang signifikan khususnya distorsi radial (Brown, 1971). Sesuai dengan namanya distorsi radial, menyebabkan semua bagian gambar diubah letaknya menurut arah jari-jari, bermula dari sumbu optik (Wolf, 1983). Kejadian ini diakibatkan oleh adanya kesalahan dalam pengasahan lensa (Wolf, 1983).

Koordinat piksel pada foto yang tidak terdistorsi (u, v) dan koordinat foto yang terdistorsi (\tilde{x}, \tilde{y}) dapat dinormalisasikan dengan persamaan berikut (Brown, 1971)

$$\tilde{x} = x + x \left[k_1 (x^2 + y^2) + k_2 (x^2 + y^2)^2 \right] \dots\dots\dots(2.55)$$

$$\tilde{y} = y + y \left[k_1 (x^2 + y^2) + k_2 (x^2 + y^2)^2 \right] \dots\dots\dots(2.56)$$

Dimana k_1 dan k_2 adalah koefisien dari radial distorsi. Pusat dari distorsi radial sama dengan titik *principle point* (Wei & Ma, 1994).

Dari
$$\tilde{u} = u + (u - u_0) \left[k_1 (x^2 + y^2) + k_2 (x^2 + y^2)^2 \right] \dots\dots\dots(2.57)$$

$$\tilde{v} = v + (v - v_0) \left[k_1 (x^2 + y^2) + k_2 (x^2 + y^2)^2 \right] \dots\dots\dots(2.58)$$

Kemudian, dari persamaan (2.57) dan (2.58) kita mempunyai dua persamaan untuk masing-masing titik di tiap foto

$$\begin{bmatrix} (u-u_0) + (x^2 + y^2) & (u-u_0)(x^2 + y^2)^2 \\ (v-v_0) + (x^2 + y^2) & (v-v_0)(x^2 + y^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u} - u \\ \tilde{v} - v \end{bmatrix} \dots\dots(2.59)$$

Solusi *least square* yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan diatas adalah:

$$k = (D^T D)^{-1} D^T d \dots\dots\dots(2.60)$$

Dimana $Dk = d$ dan $k = [k_1, k_2]^T$

2.4 Stereo Kalibrasi

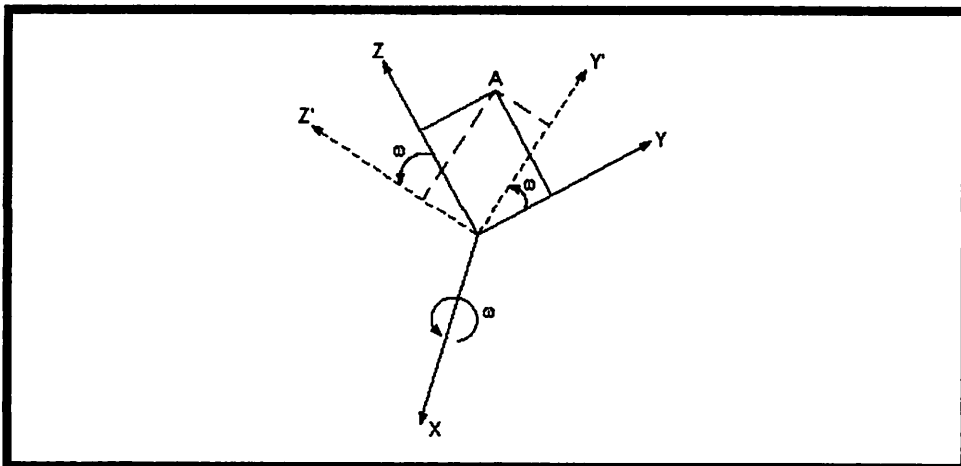
Stereo kalibrasi adalah proses menghitung hubungan geometris antara dua kamera (Bradski & Kaehler, 2008). Geometri dari dua kamera ini berkaitan dengan nilai informasi parameter eksterinsik dan parameter intrinsik untuk tiap kamera. Parameter intrinsik biasanya dipakai sebagai parameter untuk mendefinisikan nilai geometri dari kamera, sedangkan parameter ekstrinsik digunakan untuk menjelaskan hubungan secara geometri posisi kamera dan objek dalam suatu sistem koordinat referensi. Parameter ekstrinsik terdiri dari rotasi dan translasi.

2.4.1 Rotasi

Parameter posisi kamera didefinisikan dalam ruang tiga-dimensi yang merupakan posisi dari *perspektif center* (pusat kamera) X_o, Y_o, Z_o . Sedangkan parameter orientasi sudut berfungsi sebagai penghubung antara sistem koordinat kamera (x, y, z) dengan sistem koordinat referensi

(X, Y, Z). Sesuai dengan (Elias, 2007; Fraser, 2006b; Mikhail et al., 2001; Shih, 1994; Wolf & Dewitt, 2000) orientasi sudut dapat didefinisikan dalam sistem rotasi ω, φ, κ (*omega, phi, kappa*).

Dari masing-masing sistem rotasi, dapat dibangun sebuah matrik rotasi yang digunakan untuk menghubungkan kedua sistem koordinat. Sebagai contoh, akan dijelaskan proses penurunan sebuah persamaan pada matrik rotasi dalam sudut rotasi *omega* untuk rotasi sumbu x , *phi* untuk rotasi sumbu y dan *kappa* sebagai rotasi sumbu z . Dari ketiga sudut diatas didefinisikan dalam sistem rotasi tangan kanan, dimana apabila berlawanan dengan putaran arah jarum jam akan bernilai negative dan sebaliknya.



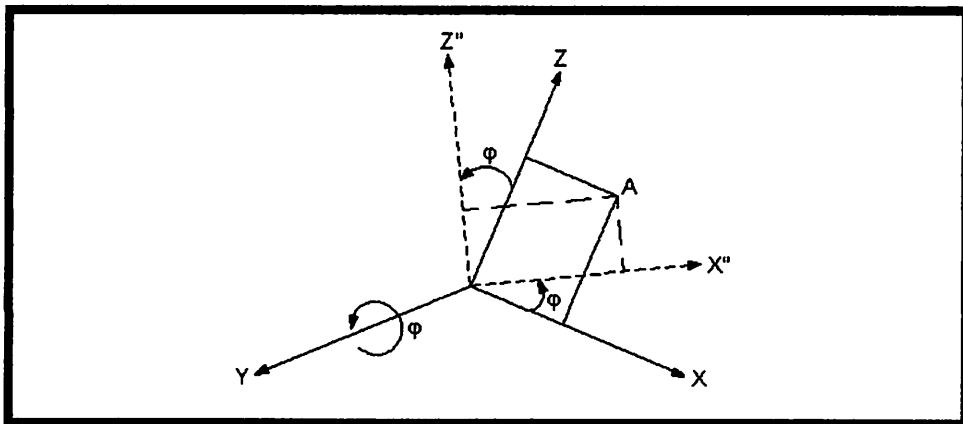
Gambar 2.9 Rotasi pada sumbu x sebesar ω

Dari gambar diatas, sumbu x positif diputar searah jarum jam, sehingga posisi titik A dalam sistem koordinat yang terotasi dapat ditulis dalam sebuah persamaan.

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = R_\omega \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2.69)$$

Dimana parameter R_ω didefinisikan sebagai :

$$R_\omega = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2.70)$$



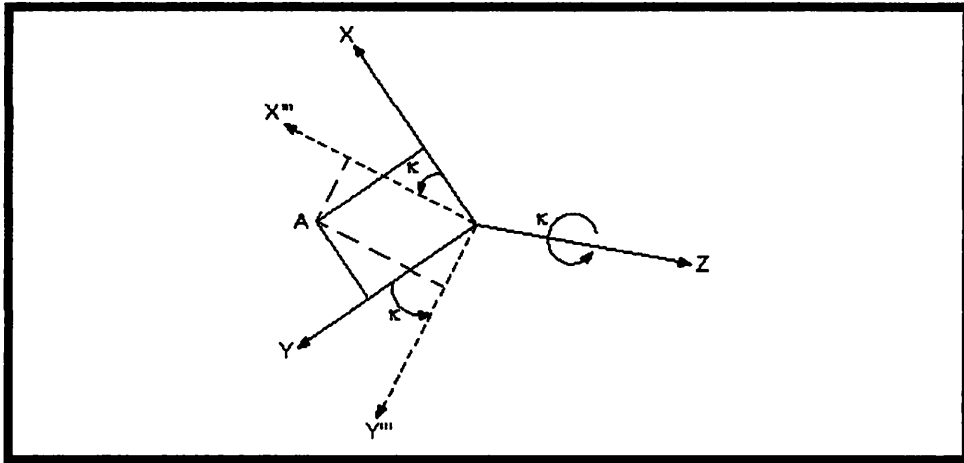
Gambar 2.10 Rotasi sumbu y sebesar φ

Selanjutnya, dilakukan rotasi terhadap sumbu y positif dengan arah rotasi positif searah dengan jarum jam seperti pada gambar 2.7. Dari hasil rotasi didapat nilai posisi titik A dalam sistem koordinat terotasi sebagai berikut.

$$\begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{pmatrix} = R_\varphi \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2.71)$$

Dengan parameter R_φ didapat dari persamaan :

$$R_\varphi = \begin{vmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{vmatrix} \dots\dots\dots(2.72)$$



Gambar 2.11 Rotasi sumbu z sebesar κ

Dan yang terakhir, sumbu positif z dirotasi positif searah jarum jam, sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2.8 diatas. Sehingga posisi titik A pada sistem rotasi sumbu z dinyatakan dalam sebuah persamaan sebagai berikut :

$$\begin{vmatrix} X''' \\ Y''' \\ Z''' \end{vmatrix} = R_x \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \dots\dots\dots(2.73)$$

Dimana parameter R_x didefinisikan sebagai :

$$R_{\kappa} = \begin{vmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \dots\dots\dots(2.74)$$

Dari perkalian $R_{\omega}R_{\varphi}R_{\kappa}$ yang merupakan matrik rotasi dari parameter ω, φ dan κ didapat nilai matrik rotasi secara utuh sebagai berikut (*Cooper & Robson, 2001*) :

$$R_{\omega\varphi\kappa} = \begin{vmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{vmatrix} \dots\dots\dots(2.75)$$

atau

$$R = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{vmatrix} \dots\dots\dots(2.76)$$

Dan apabila nilai matrik rotasi R telah diketahui, parameter sudut rotasi berupa ω, φ dan κ dapat ditentukan pula dengan menggunakan hubungan sebagai berikut (*Slabaugh, 2004; Wolf, 1993*) :

$$\sin \varphi = r_{31} ; \tan \omega = \frac{-r_{32}}{r_{33}} ; \tan \kappa = \frac{-r_{21}}{r_{11}} \dots\dots\dots(2.77)$$

Pada dasarnya, matrik rotasi merupakan matrik ortogonal. Kondisi ini dapat dibuktikan dengan melakukan perkalian antara matrik tersebut dengan nilai transposnya sehingga akan menghasilkan sebuah matrik identitas (*Stefanovic, 1973; Thompson, 1959*) :

$$R^T R = R R^T = I \dots\dots\dots(2.78)$$

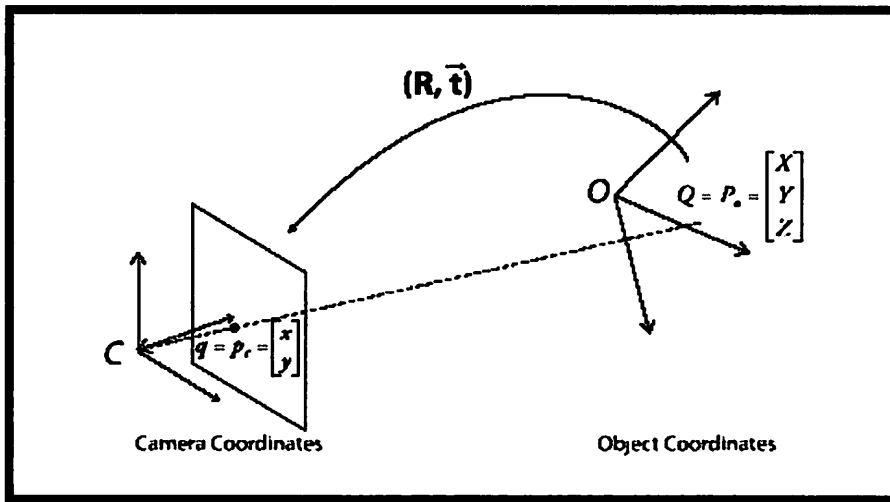
Kondisi keortogonalan matrik rotasi dapat dibuktikan juga dengan cara melakukan *invers* terhadap matrik tersebut. Apabila nilai *invers* dari matrik tersebut sama dengan nilai transposnya, maka matrik tersebut dapat dikatakan ortogonal sebagaimana yang dikemukakan oleh Cooper & Robson, 2001 sebagai berikut :

$$R^{-1} = R^T \dots\dots\dots(2.79)$$

2.4.2 Translasi

Vektor translasi adalah merupakan pergeseran dari suatu sistem koordinat ke suatu sistem koordinat sebenarnya yang dipindahkan ke lokasi lain atau dengan kata lain, vektor translasi hanya offset dari sistem koordinat sebenarnya yang pertama ke sistem koordinat sebenarnya yang kedua (Bradski & Kaehler, 2008). Jadi, untuk beralih dari pusat sistem koordinat objek ke suatu pusat kamera, vektor translasi yang tepat adalah $T = origin_{object} - origin_{camera}$. Dengan mengacu pada gambar 2.13 dimana terdapat sebuah titik q untuk sistem koordinat kamera (p_c) dan titik Q untuk sistem koordinat objek atau bumi (P_o):

$$P_c = R(P_o - T) \dots\dots\dots(2.80)$$



Gambar 2.12 Konversi dari Objek ke Sistem Koordinat Kamera: Titik P pada Objek Terlihat Sebagai Titik p pada Bidang Foto (Bradski & Kaehler, 2008).

Dari pembahasan diatas, sejauh ini terdapat enam parameter yang telah dihasilkan (ω, φ, κ dan T_x, T_y, T_z).

2.4.3 Menghitung Panjang *Baseline*

Seperti yang telah dibahas sebelumnya dari proses Stereo kalibrasi adalah proses menghitung hubungan geometris antara dua kamera (Bradski & Kaehler, 2008). Geometri dari dua kamera ini berkaitan dengan nilai informasi parameter eksterinsik dan parameter instrinsik untuk tiap kamera. Dimana dari parameter ekstrinsik parameter ini menghasilkan rotasi serta vektor translasi. Nilai dari vektor translasi dapat digunakan untuk menghitung jarak basis antara kamera kiri dan kamera kanan. Tujuan dari menghitung jarak basis adalah untuk digunakan

sebagai faktor skala pada proses interseksi. Adapun persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung panjang basis menurut *OpenCV* adalah:

$$\textit{Baseline} = \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2} \dots\dots\dots(2.81)$$

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Persiapan Penelitian

Sebelum melakukan penelitian, dilakukan persiapan terlebih dahulu agar proses penelitiannya dapat berjalan dengan lancar hingga pada hasil penyajian data. Oleh karena itu, persiapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

3.1.1 Materi penelitian

Adapun materi yang digunakan sebagai bahan dalam penelitian ini, meliputi data sebagai berikut:

- 1) Data koordinat dari papan kalibrasi yang diperoleh dari pengukuran manual menggunakan kertas millimeter blok dengan ketelitian ± 1 mm
- 2) Data koordinat foto dari 2 buah foto stereo papan kalibrasi

3.1.2 Alat penelitian

Untuk mendukung pelaksanaan kegiatan penelitian ini, maka diperlukan beberapa perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) antara lain :

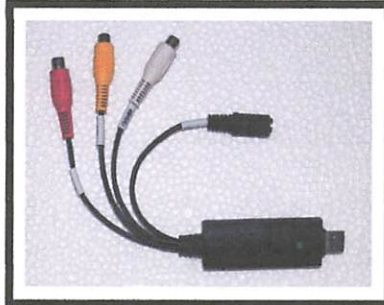
3.1.2.1 Perangkat keras (*hardware*)

- 1) Kamera *CCTV* tipe *PowerCom SC-2800* 2 buah



Gambar 3.1 CCTV tipe PowerCom SC-2800

- 2) *Frame Grabber* 2 buah



Gambar 3.2 Frame Grabber

- 3) Kabel konektor 2 buah



Gambar 3.3 Kabel Konektor

- 4) *Adaptor* 2 buah

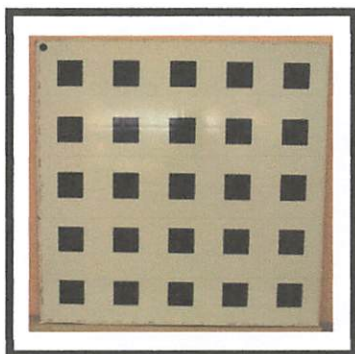


Gambar 3.4 Adaptor

- 5) Laptop

Spesifikasinya sebagai berikut;

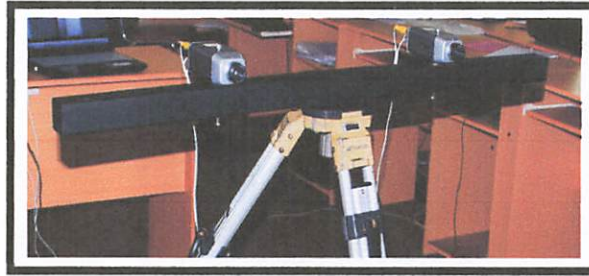
- ~ Intel Core™2 Duo 2.0 Ghz 1 unit
 - ~ Ram 2 GB DDR II 2 unit
 - ~ Hard disk 250 GB 1 unit
- 6) Papan kalibrasi 1 buah



Gambar 3.5 Papan Kalibrasi

7) Bar kamera

1 buah

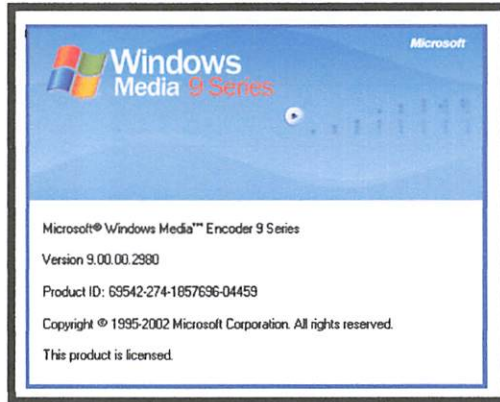


Gambar 3.6 Bar Kamera

3.1.2.2 Perangkat lunak (*software*)

- 1) *EasyCam* adalah sebuah perangkat lunak (*software*) bawaan *frame grabber* yang akan digunakan untuk mengkoneksikan kamera CCTV dengan laptop
- 2) *Windows Media Encoder 9*

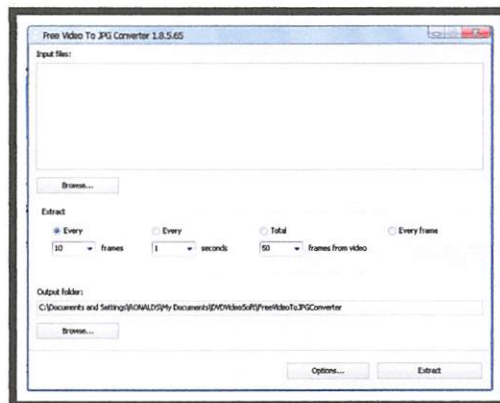
Windows Media Encoder 9 merupakan salah perangkat lunak (*software*) yang digunakan untuk mengambil data video objek yang akan disurvei sehingga dapat disimpan dalam komputer.



Gambar 3.7 Windows Media Encoder 9

3) *Free Video to JPG Converter 1.8.5.65*

Free Video to Converter 1.8.5.65 merupakan *software* tambahan yang digunakan untuk mengkonversi data video menjadi sebuah *image* agar dapat diproses.

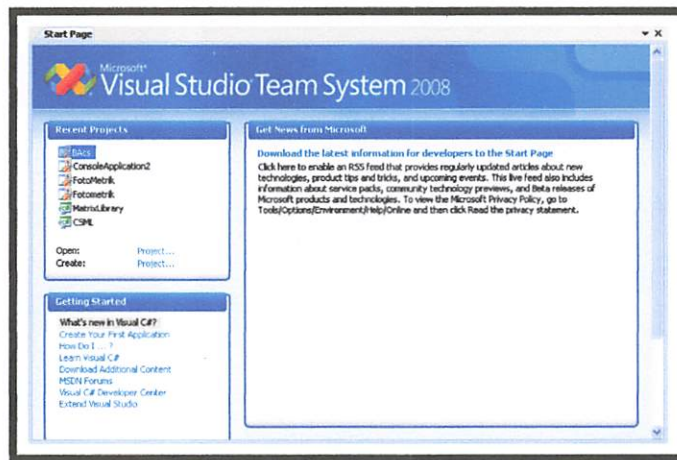


Gambar 3.8 Free Video to JPG Converter 1.8.5.65

4) *Microsoft Visual Studio 2008*

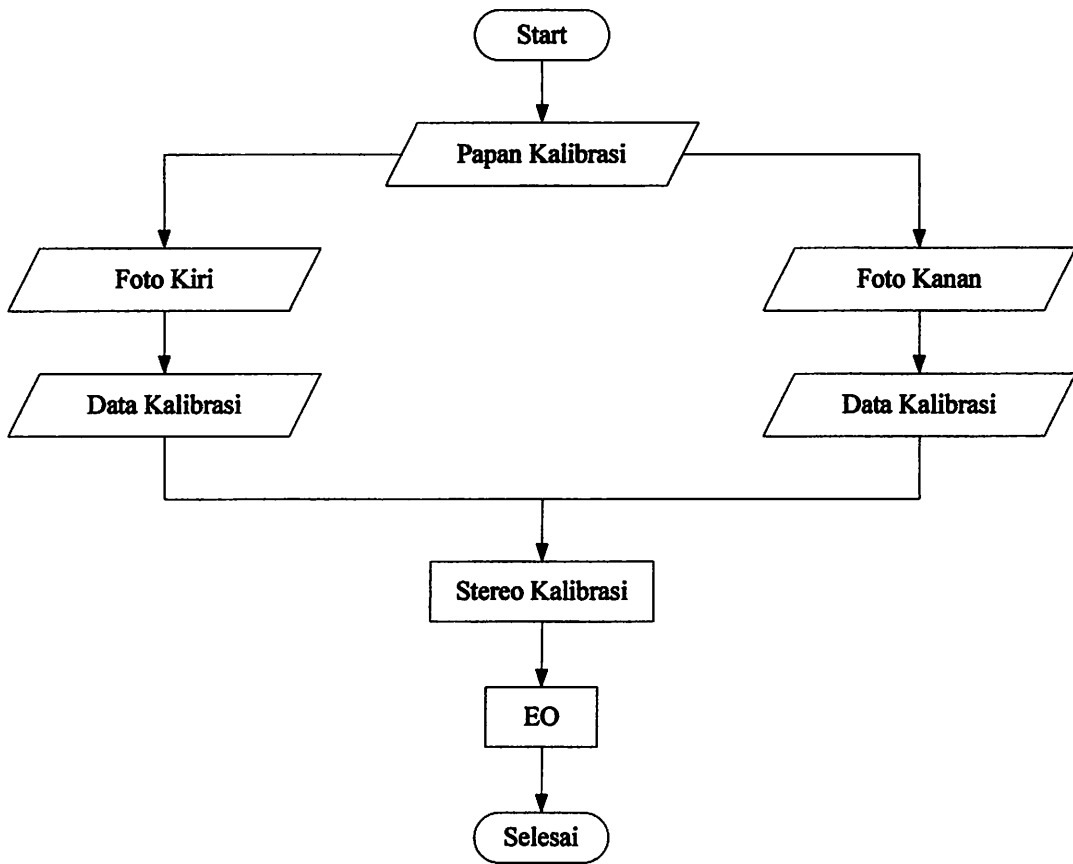
Microsoft Visual Studio 2008 merupakan salah satu perangkat lunak yang berorientasi *Object (Object-oriented*

programming disingkat *OOP*). Konsep pemrograman orientasi objek menekankan pada : *class*, *object*, *method*, *event* serta *action*.



Gambar 3.9 Tampilan Awal Microsoft Visual Studio 2008

3.1.3 Diagram alir penelitian



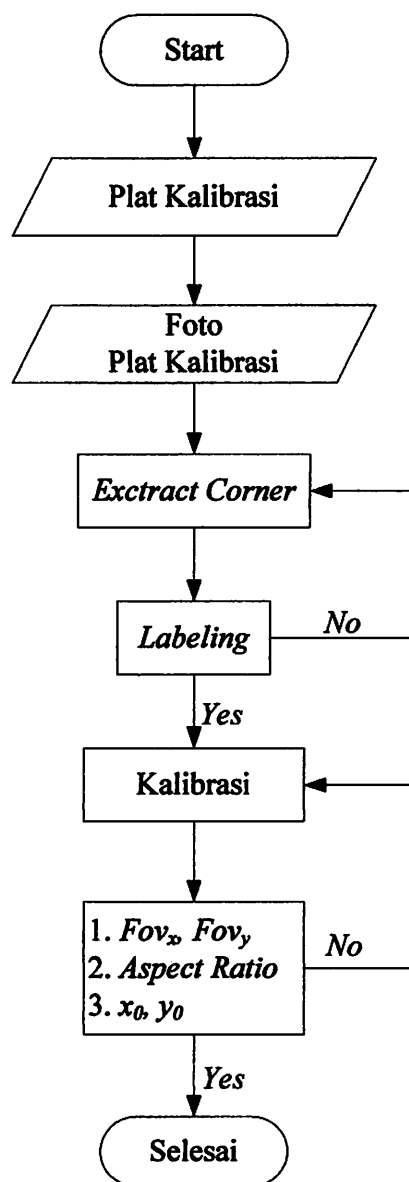
Gambar 3.10 Diagram Alir Penelitian

3.1.4 Penjelasan diagram alir penelitian

1. Persiapan papan kalibrasi
2. Pengambilan foto stereo papan kalibrasi dengan menggunakan kamera *CCTV*
3. Dari 2 buah foto stereo yang telah diperoleh akan diketahui koordinat foto dan *object space* titik-titik grid papan kalibrasi.
4. Seperti yang telah kita ketahui bahwa setiap kamera tidak mempunyai lensa yang sempurna (Atkinson, 1996). Untuk itu, setelah selesai dibuat dan sebelum digunakan maka kamera terlebih dahulu dikalibrasi.
5. Pada penelitian ini akan menggunakan stereo kalibrasi
6. Stereo kalibrasi pada penelitian ini akan menghasilkan *Exterior Orientation (EO)*

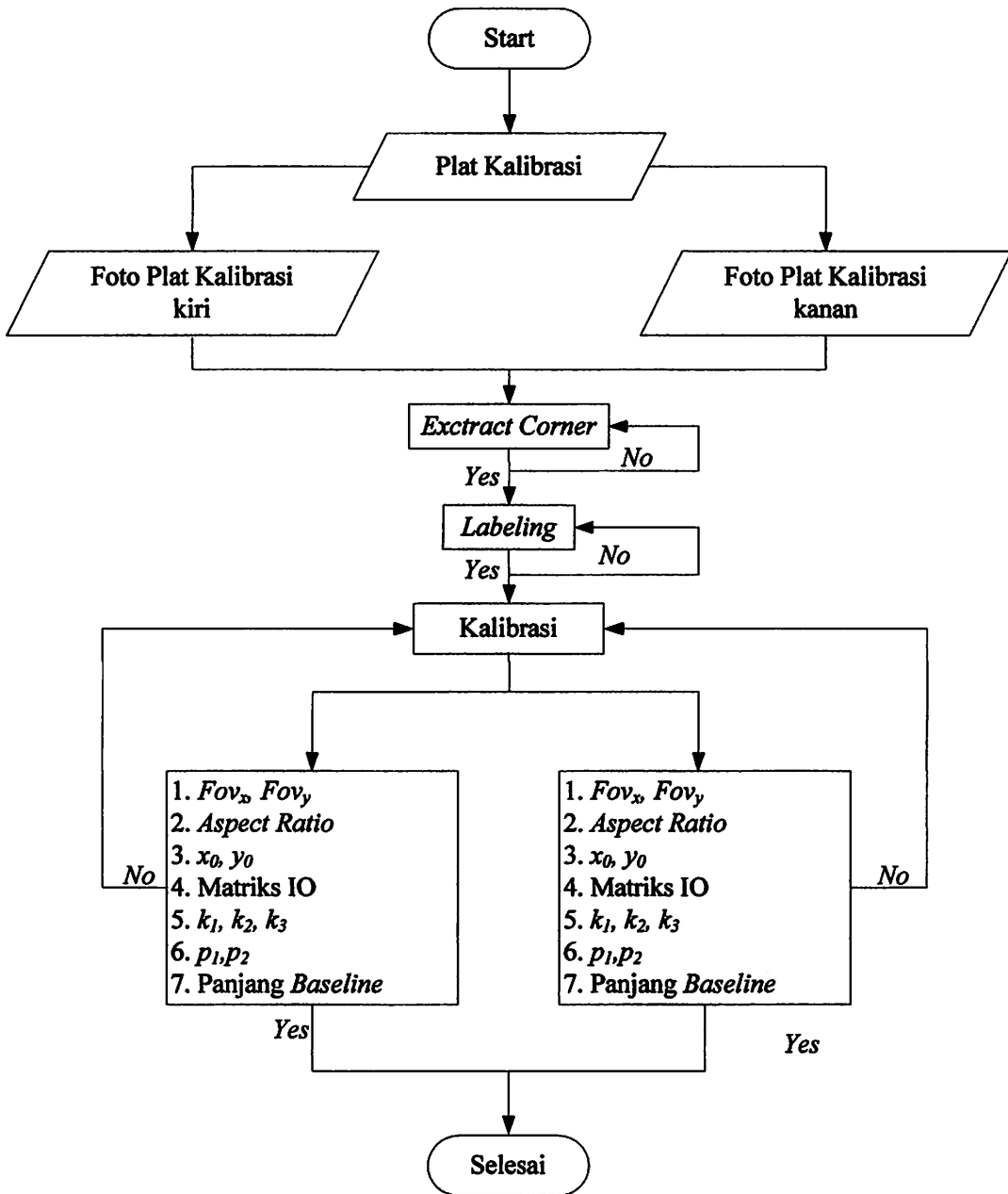
3.1.5 Diagram alir kalibrasi

3.1.5.1 *Single* kalibrasi



Gambar 3.11 Diagram Alir Single Kalibrasi

3.1.5.2 Stereo kalibrasi



Gambar 3.12 Diagram Alir Stereo Kalibrasi

3.1.6 Penjelasan diagram alir kalibrasi

3.1.6.1 Penjelasan diagram alir single kalibrasi

- 1) Persiapan papan kalibrasi
- 2) Pengambilan data foto papan kalibrasi menggunakan kamera CCTV
- 3) Proses selanjutnya adalah proses *Extract Corner* yang bertujuan untuk mengidentifikasi titik-titik grid yang terdapat pada papan kalibrasi.
- 4) Proses selanjutnya proses *labeling* dimana proses ini bertujuan untuk menyamakan posisi antara koordinat foto papan kalibrasi dan koordinat papan kalibrasi hasil pengukuran manual menggunakan kalkir millimeter blok.
- 5) Apabila proses *labeling* memiliki kesalahan maka perlu dilakukan lagi proses *Extract Corner*
- 6) Jika pada proses *labeling* tidak lagi ada kesalahan maka, proses kalibrasi kamera dapat langsung dilaksanakan.
- 7) *Single* kalibrasi ini akan menghasilkan sejumlah konstanta dari parameter-parameter kalibrasi kamera. Dimana parameter-parameter kalibrasi antara lain; Fov_x , Fov_y , f , x_0 , y_0 , *Aspect Ratio*

3.1.6.2 Penjelasan diagram alir stereo kalibrasi

- 1) **Persiapan papan kalibrasi**
- 2) **Pengambilan data foto stereo papan kalibrasi menggunakan kamera CCTV**
- 3) **1 pasang foto yang dihasilkan oleh kamera CCTV memiliki koordinat foto**
- 4) **Proses selanjutnya adalah proses Extract Corner yang bertujuan untuk mengidentifikasi titik-titik grid yang terdapat pada papan kalibrasi.**
- 5) **Proses selanjutnya proses labeling dimana proses ini bertujuan untuk menyamakan posisi antara koordinat foto papan kalibrasi dan koordinat papan kalibrasi hasil pengukuran menggunakan kalkir millimeter blok.**
- 6) **Apabila proses labeling memiliki kesalahan maka perlu dilakukan lagi proses Extract Corner**
- 7) **Jika pada proses labeling tidak lagi ada kesalahan maka, proses kalibrasi kamera dapat langsung dilaksanakan.**
- 8) **Stereo kalibrasi ini akan menghasilkan sejumlah konstanta dari parameter-parameter kalibrasi kamera. Dimana parameter-parameter**

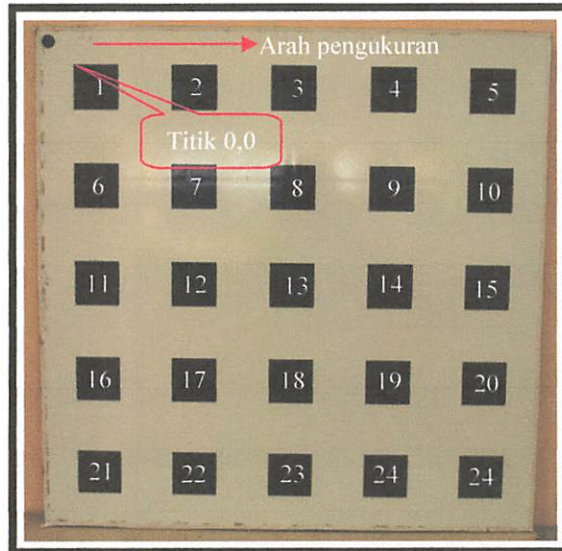
kalibrasi antara lain; Fov_x , Fov_y , f , x_0 , y_0 , *Aspect Ratio*, k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2 , Matriks *EO*, Panjang *Baseline*

3.2 Pelaksanaan Penelitian

3.2.1 Pengukuran papan kalibrasi

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa papan kalibrasi sebelum digunakan perlu diukur dahulu untuk mengetahui koordinat dari titik-titik bujur sangkar yang terdapat pada papan kalibrasi menggunakan kalkir millimeter blok. Adapun langkah-langkah pengukuran papan kalibrasi, antara lain;

- 1) Kertas kalkir millimeter dipotong sesuai dengan ukuran papan kalibrasi, dimana ukuran papan adalah 75 X 75 cm
- 2) Lekatkan kertas kalkir millimeter dan papan kalibrasi menjadi satu
- 3) Tepatkan kalkir millimeter pada titik 0,0 papan kalibrasi. Yang mana titik 0,0 dari papan kalibrasi terdapat pada pojok kiri dari kotak bujur sangkar pertama bagian kiri atas.



Gambar 3.13 Arah Pengukuran Papan Kalibrasi

- 4) Pengukuran dimulai dari kiri kekanan
- 5) Pengukuran koordinat papan kalibrasi ini dengan menggunakan data jarak masing-masing antar tiap titik



Gambar 3.14 Pengukuran Papan Kalibrasi

3.2.2 Pengambilan data foto papan kalibrasi

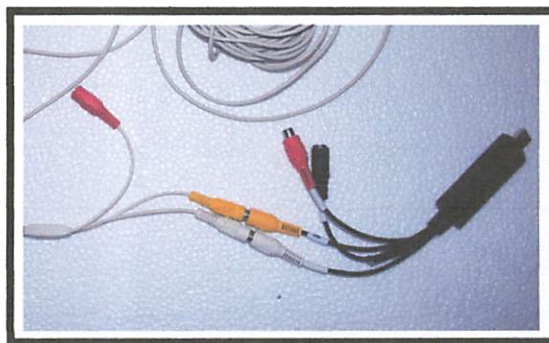
3.2.2.1 Pengambilan data foto

- 1) Pasang dua *CCTV* pada bar yang telah disiapkan
- 2) Hubungkan salah satu ujung kabel konektor dengan *CCTV*



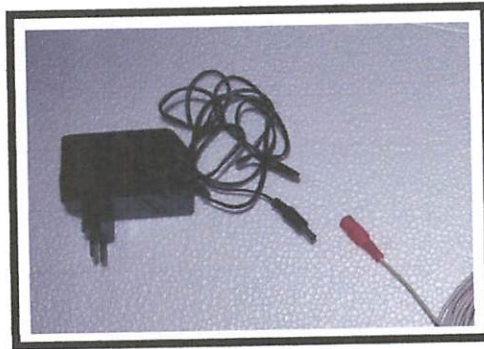
Gambar 3.15 Kabel Konektor dan CCTV

- 3) Pastikan Software EasyCap telah terinstal di laptop
- 4) Hubungkan salah satu ujung yang lain dari kabel konektor dengan *Frame Grabber* yang telah terhubung dengan laptop




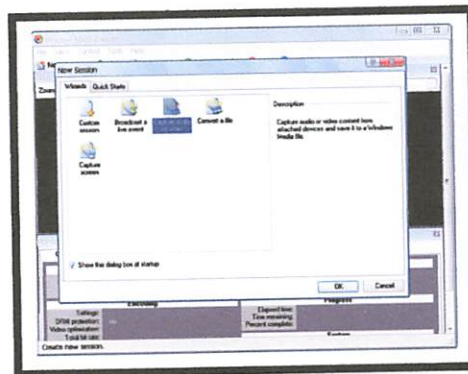
Gambar 3.16 Kabel Konektor dan Frame Grabber

- 5) Hubungkan ujung kabel konektor yang lainnya dengan kabel power (Adaptor)



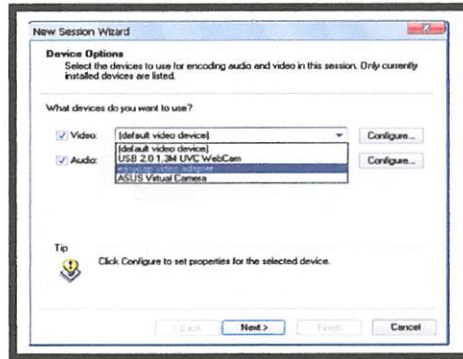
Gambar 3.17 Kabel Konektor dan Adaptor

- 6) Klik ikon  yang terdapat di desktop untuk membuka program *Windows Media Encoder*
- 7) Setelah program *Windows Media Encoder* terbuka pilih *Capture audio or video* → *OK*



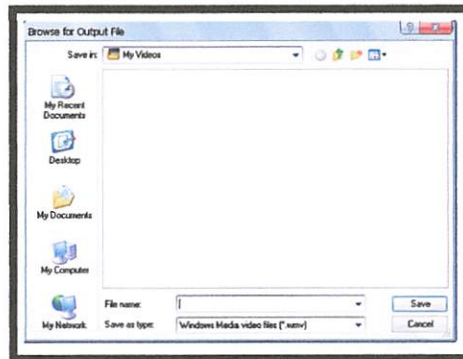
Gambar 3.18 Kotak Dialog New Sesson

- 8) Muncul kotak dialog *New Sesson Wizard* pada kotak *Configure* pilih *EasyCap video adapter* → *Next*



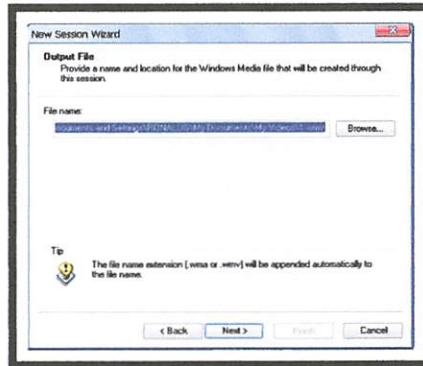
Gambar 3.19 Kotak Dialog New Sesson Wizard -EasyCap video adapter

- 9) Muncul kotak dialog *New Sesson Wizard-Output file* pilih *browse*



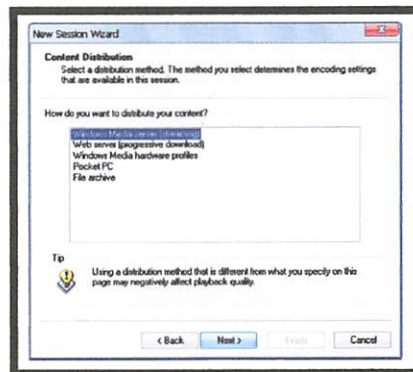
Gambar 3.20 Kotak Dialog Broswe For Output File

- 10) Masukan nama file di kotak *file name* → *Save*
- 11) Muncul kotak dialog berikut dengan kotak *file name* yang telah terisi nama *file* yang telah di berikan pada point 10), kemudian pilih *Next*



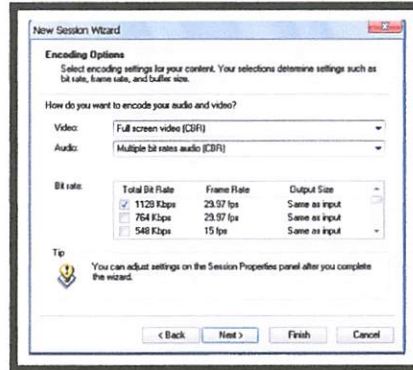
Gambar 3.21 Kotak Dialog Output File Name

- 12) Muncul kotak dialog *New Sesson Wizard-Content Distribution* pilih *Windows Media Server (Streaming)*, kemudian pilih *Next*



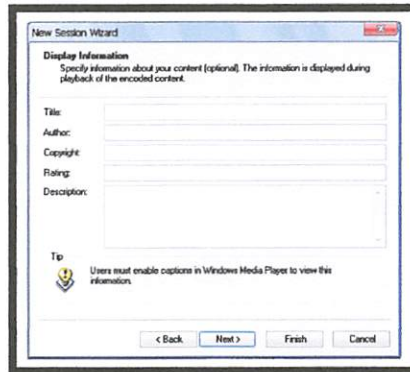
Gambar 3.22 Kotak Dialog Content Distribution

- 13) Muncul kotak dialog *New Season Wizard-Encoding Options*
- a) Pada kotak video pilih *Full screen video (CBR)*
 - b) Pada kotak audio *Multiple bit rates audio*
 - c) *Bit rate* pilih *1128 kbps*



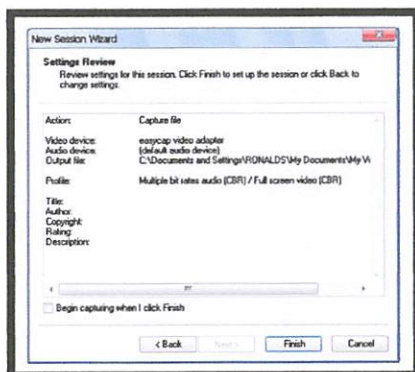
Gambar 3.23 Kotak Dialog New Season Wizard-Encoding Options

- 14) Muncul kotak dialog *New Season Wizard-Display Information* pilih *Next*



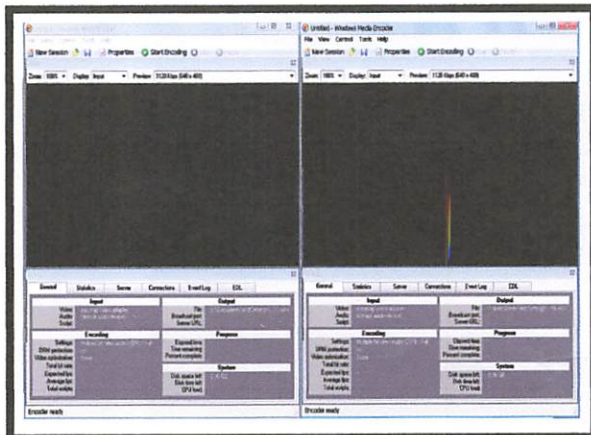
Gambar 3.24 Kotak Dialog New Season Wizard-Display Information

- 15) Muncul kotak dialog *New Season Wizard-Setting Review* pilih *Finish*



Gambar 3.25 Kotak Dialog New Season Wizard-Seting Review

- 16) Lakukan langkah pada point 6) samapi point 15) untuk CCTV yang satunya lagi
- 17) Akan muncul kotak dialog stereo seperti pada gambar berikut




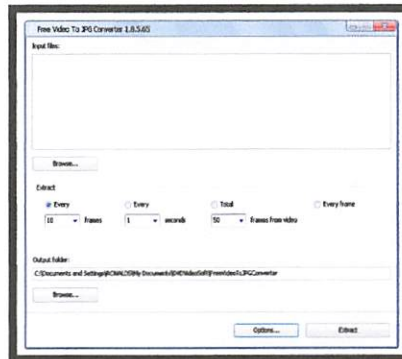
Gambar 3.26 Tampilan Foto Stereo Papan Kalibrasi

- 18) Untuk proses perekaman data perlu diperhatikan agar gambar papan yang nanti terekam pada kamera CCTV bisa terlihat maksimal untuk view 2 jendela windows pada program Windows Media Encoder

- 19) Setelah mendapatkan posisi papan terlihat maksimal pada kamera kiri dan kanan. Kemudian pilih *Start Encoding* agar proses perekaman data dapat dimulai.

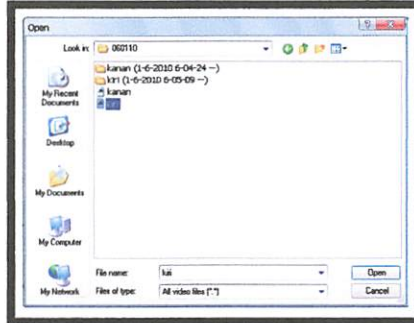
3.2.2.2 Capture data foto

- 1) Klik ikon  pada desktop untuk membuka program *Free video to JPEG converter*
- 2) Setelah program *Free video to JPEG converter* di buka seperti pada gambar dibawah ini



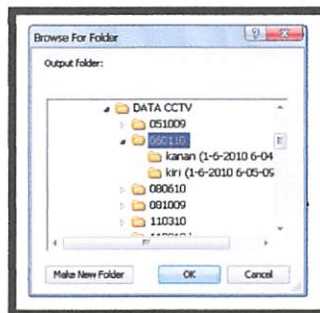
Gambar 3.27 Tampilan Awal Program *Free Video to JPEG converter*

- 3) Pilih *Browse* yang bagian atas untuk menginput *file* hasil rekaman dari *CCTV* yang terdapat dalam direktori laptop, setelah *file* ditemukan pilih *Open*



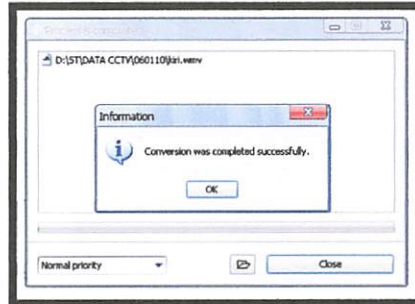
Gambar 3.28 Kotak Dialog Open

- 4) Selanjutnya pada kolom *Eextract* terdapat pilihan *frame*, *second*, *total frame from video*, *every time* keempat opsi ini dapat dipilih sesuai dengan kebutuhan.
- 5) Pilih *Browse* yang terdapat pada kotak *output* untuk memilih direktori tempat penyimpanan hasil *convert video to image*. Kemudian pilih *Ok*



Gambar 3.29 Kotak Dialog Browse for Folder

- 6) Setelah itu pilih *Extract*




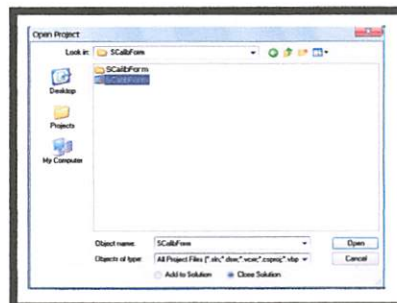
Gambar 3.30 Kotak Information

- 7) Lakukanlah langkah pada poin 3) sampai poin 6) untuk kamera kanan

3.2.3 Kalibrasi kamera

3.2.3.1 *Single* kalibrasi

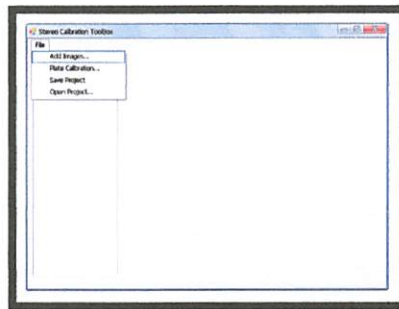
- 1) Klik ikon  untuk membuka program *Microsoft Visual Studio 2008*
- 2) Pilih *file* → *Open* → *Project/Solution* pilih *file project Scalib Form* kemudian pilih *open*



Gambar 3.31 Kotak Dialog Open Project

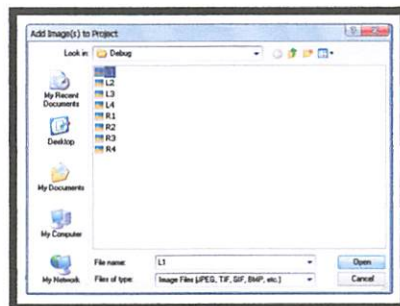
- 3) Pilih *Debug* → *Start Debugging*
- 4) Akan muncul tampilan program seperti pada gambar dibawah ini.

Pilih *file* → *Add images*



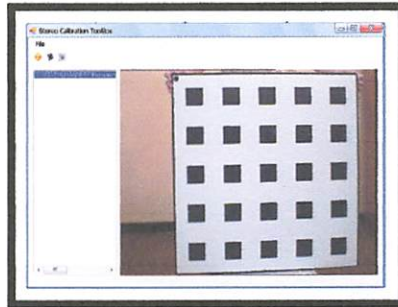
Gambar 3.32 Tampilan Program Kalibrasi

- 5) Pilih gambar yang terdapat dalam direktori laptop hasil *convert* dari *video to image* → pilih foto yang mau dikalibrasi → *Open*



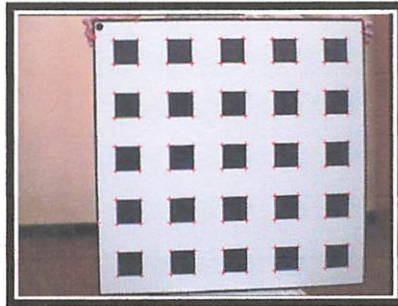
Gambar 3.33 Kotak Dialog Add Images to Project

- 6) Klik nama direktori yang terdapat pada kolom samping kiri. Sehingga akan muncul foto gambar papan kalibrasi pada kolom samping kanan.



Gambar 3.34 Tampilan program

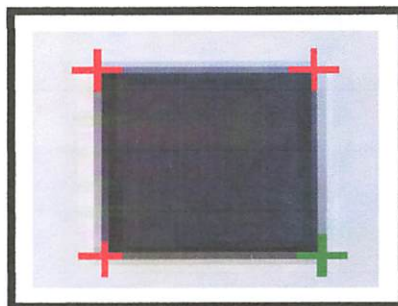
- 7) Klik ikon  *Extract Corner*



Gambar 3.35 Extract Corner Papan Kalibrasi

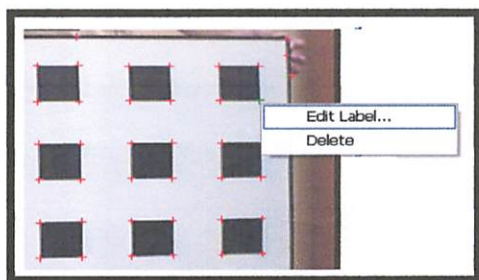
- 8) *Labeling*

- d) Dekatkan kursor ke pojok kotak hitam sehingga tanda + yang tadinya berwarna merah berubah menjadi warna hijau.



Gambar 3.36 Extract Corner yang hendak diberi Labeling

- e) Proses *labeling* dimulai dari kotak hitam pojok kanan atas
- f) Untuk kotak hitam pertama titik nomor 1 dimulai dari pojok kanan bawah. Selanjutnya untuk nomor 2 sampai 4 urutannya sesuai dengan putaran arah jarum jam.
- g) Proses *labeling* dimulai dengan klik kanan pada titik yang telah berwarna hijau pilih *Edit Label*



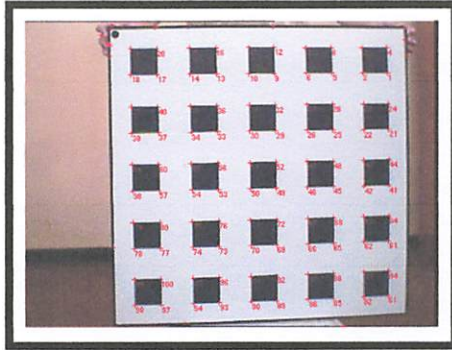
Gambar 3.37 Kotak Dialog Edit Label

- h) Muncul kotak dialog *Set Cross Label* beri nama titik sesuai dengan urutan dari kotak hitam pada poin b) dan c). Untuk titik-titik selanjutnya akan diakumulasi sesuai urutannya.



Gambar 3.38 Kotak Dialog Set Cross Label

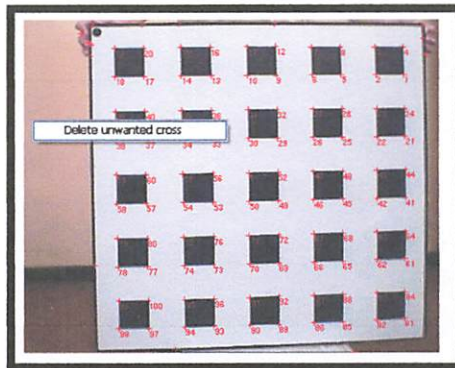
- i) Lanjutkan untuk semua titik di tiap kotak.




Gambar 3.39 Foto Papan Kalibrasi yang Telah Terlabel

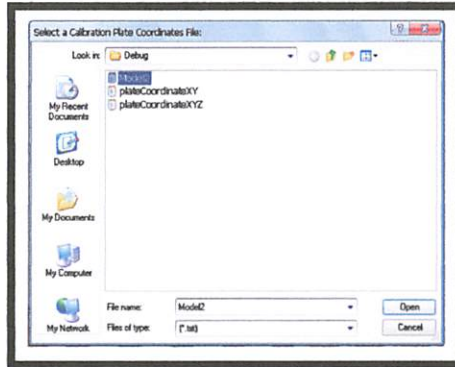
j) klik kanan diluar area foto papan kalibrasi, selanjutnya pilih

Delete Unwanted Cross




Gambar 3.40 Kotak Dialog Delete Unwanted Cross


9) Klik ikon  *Open Calibration Points* untuk menginput data koordinat papan kalibrasi yang telah diukur koordinatnya menggunakan millimeter blok kemudian pilih *Open*

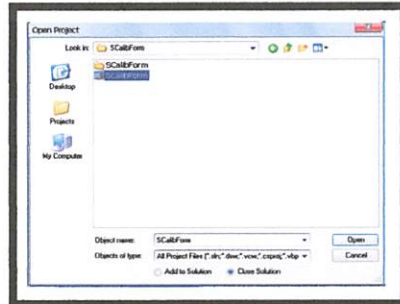


Gambar 3.41 Kotak Dialog Select a Calibration Plate Coordinates File

- 10) Klik ikon  **Calibrate Camera**
- 11) *Single* kalibrasi ini akan menghasilkan sejumlah konstanta dari parameter-parameter kalibrasi kamera. Dimana parameter-parameter kalibrasi antara lain; Fov_x , Fov_y , f , x_0 , y_0 , *Aspect Ratio*

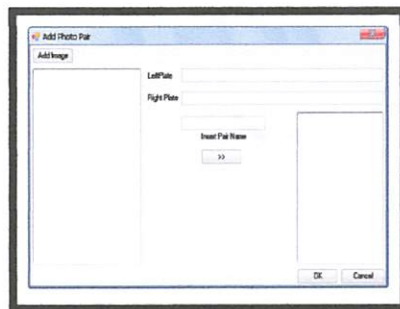
3.2.3.2 Stereo kalibrasi

- 1) Klik ikon  untuk membuka program *Microsoft Visual Studio 2008*
- 2) Pilih *file* → *Open* → *Project/Solution* pilih *file project Stereocalibration Form* kemudian pilih *open*



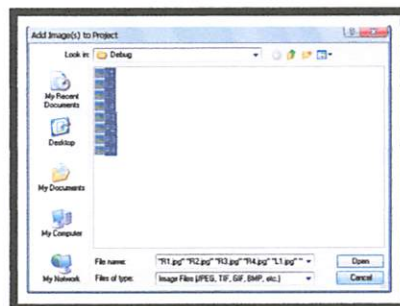
Gambar 3.42 Kotak Dialog Open Project

- 3) Pilih *file* → *Add pairs* akan muncul kotak dialog *Add photo pair*




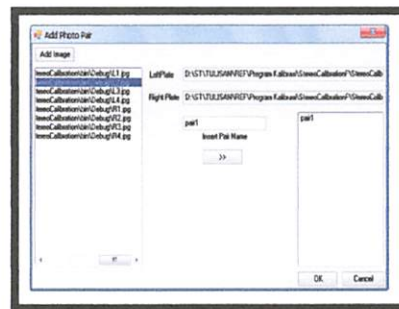
Gambar 3.43 Kotak Dialog Add Photo Pair

- 4) Pilih *Add image* muncul kotak dialog *Add images to Project* → pilih foto kiri (L 1-L 4) dan foto kanan (R1-R4) → *Open*



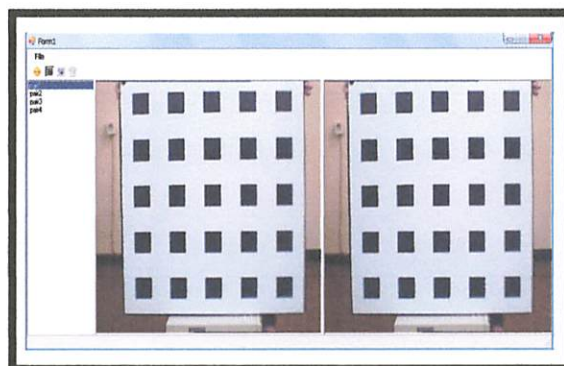
Gambar 3.44 Kotak Dialog Add Images to Project

- 5) Setelah semua foto masuk di kolom *Add images*, klik kanan pada foto kiri 1 (L1) pilih *select left image*. Kemudian klik kanan pada foto kanan 1 (R1) pilih *select right image*
- 6) Jika pada kolom *leftplate* dan *rightplate* telah terisi nama direktori dari file foto kiri dan kanan, masukan nama pair pada kolom *Insert Pair Name*, kemudian klik ikon . Sehingga pada kolom samping kanan terlihat nama pair1



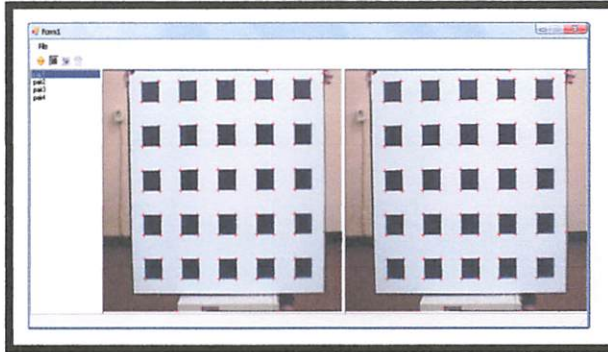
Gambar 3.45 Pemberian Nama Pair

- 7) Lanjutkan untuk foto kiri (L2-L4) dan foto kanan (R2-R4) dengan nama pair yang berbeda. Setelah semua pair telah diinput klik *Ok*



Gambar 3.46 Tampilan Program Foto Stereo Tiap Pair

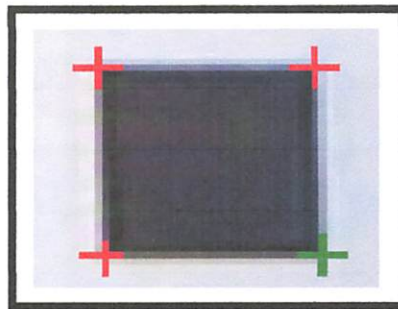
- 8) Klik ikon  *Extract Corner*



Gambar 3.47 Tampilan *Extract Corner*

- 9) *Labeling*

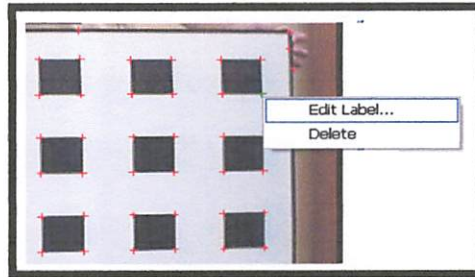
- a) Dekatkan kursor ke pojok kotak hitam sehingga tanda + yang tadinya berwarna merah berubah menjadi warna hijau.



Gambar 3.48 *Extract Corner* yang hendak diberi *Labeling*

- b) Proses *labeling* dimulai dari kotak hitam pojok kanan atas
- c) Untuk kotak hitam pertama titik nomor 1 dimulai dari pojok kanan bawah. Selanjutnya untuk nomor 2 sampai 4 urutannya sesuai dengan putaran arah jarum jam.

- d) Proses *labeling* dimulai dengan klik kanan pada titik yang telah berwarna hijau pilih *Edit Label*



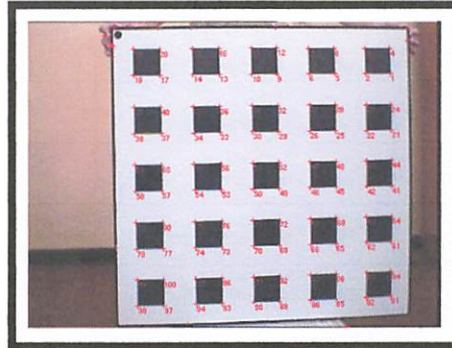
Gambar 3.49 Kotak Dialog Edit Label

- e) Muncul kotak dialog *Set Cross Label* beri nama titik sesuai dengan urutan dari kotak hitam pada poin b) dan c). Untuk titik-titik selanjutnya akan diakumulasi sesuai urutannya.



Gambar 3.50 Kotak Dialog Set Cross Label

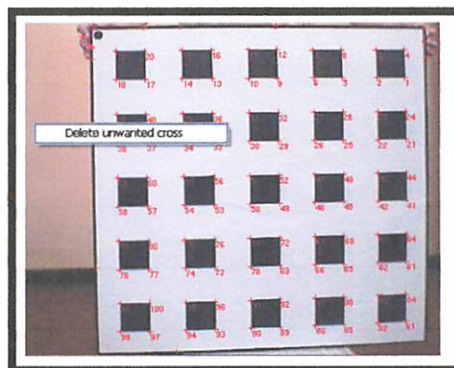
- f) Lanjutkan untuk semua titik di tiap kotak pada foto kiri dan kanan untuk semua pair




Gambar 3.51 Foto Papan Kalibrasi yang Telah Terlabel

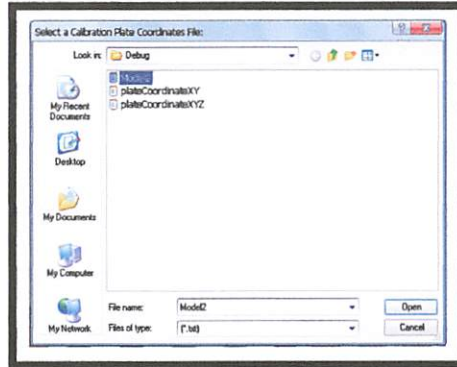
g) klik kanan diluar area foto papan kalibrasi, selanjutnya pilih

Delete Unwanted Cross




Gambar 3.52 Kotak Dialog Delete Unwanted Cross

- 10) Klik ikon  *Open Calibration Points* untuk menginput data koordinat papan kalibrasi yang telah diukur koordinatnya menggunakan millimeter blok kemudian pilih *Open*



Gambar 3.53 Kotak Dialog Select a Calibration Plate Coordinates File

- 11) Klik ikon  **Calibrate Camera**
- 12) Stereo kalibrasi ini akan menghasilkan sejumlah konstanta dari parameter-parameter kalibrasi kamera. Dimana parameter-parameter kalibrasi antara lain; Fov_x , Fov_y , f , x_0 , y_0 , *Aspect Ratio*, k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2 , Matriks *EO*, Panjang *Baseline*

3.3 Deskripsi dan implementasi

Input:

- a 4 pasang foto, dengan tiap foto terdiri dari 100 titik (koordinat foto homogeneous)
- b Koordinat Model
- c Ukuran resolusi foto (h dan w)

Langkah-langkah:

1. Membangun matriks normalisasi

$$N = \begin{bmatrix} \frac{2.0}{w} & 0 & -1 \\ 0 & \frac{2.0}{h} & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \text{matriks normalisasi.....(3.1)}$$

2. Menghitung koordinat foto hasil normalisasi ${}_{100}[N']_3$

$$N' = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{100} & y_{100} & z_{100} \end{bmatrix}_3$$

$$\begin{aligned} x_n &= N_{11} * \tilde{m}x_n + N_{12} * \tilde{m}y_n + N_{13} * \tilde{m}z_n \\ y_n &= N_{21} * \tilde{m}x_n + N_{22} * \tilde{m}y_n + N_{23} * \tilde{m}z_n \dots\dots\dots(3.2) \\ z_n &= N_{31} * \tilde{m}x_n + N_{32} * \tilde{m}y_n + N_{33} * \tilde{m}z_n \end{aligned}$$

3. Menghitung matriks Homografi ${}_{200}[H]_9$

$$H = \begin{matrix} & \begin{matrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -x_1Y_1 & -x_1W_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & -y_1X_1 & -y_1Y_1 & -y_1W_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 0 & 0 & 0 & -x_2X_2 & -x_2Y_2 & -x_2W_2 \\ 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & Z_2 & -y_2X_2 & -y_2Y_2 & -y_2W_2 \\ & & & \vdots & & & & & \\ & & & \vdots & & & & & \\ X_n & Y_n & Z_n & 0 & 0 & 0 & -x_nX_n & -y_nY_n & -z_nW_n \\ 200 \left[\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & -x_nX_n & -y_nY_n & -z_nW_n \end{matrix} \right]_9 \end{matrix} \end{matrix}$$

4. Menghitung nilai homografi dengan menggunakan solusi *eigenvalue* (nilai tunggal terkecil) yang mana nilai dari matriks homografi tersebut akan dijabarkan menggunakan solusi *Singular Value Decomposition (SVD)*

1. Matriks nilai tunggal terkecil $\rightarrow {}_{200}[S]_9$
2. Kesatuan matriks ($m*m$) $\rightarrow {}_{100}[U]_{100}$
3. Kesatuan matrik ($n*n$) $\rightarrow {}_9[V]_9$

5. Mengacu pada nilai matriks $[S]$ dan $[V]$ maka, nilai homografi untuk masing-masing foto adalah;

$$H' = \begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{21} \\ n_{31} \\ n_{41} \\ n_{51} \\ n_{61} \\ n_{71} \\ n_{81} \\ n_{91} \end{bmatrix} \rightarrow H' = {}_1[n_{11} \ n_{12} \ n_{13} \ n_{14} \ n_{15} \ n_{16} \ n_{17} \ n_{18} \ n_{19}]_9$$

6. Menghitung nilai matriks V dari masing-masing foto (4 foto)

$$V = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{11}n_{12} & (n_{11}n_{12} + n_{14}n_{12}) & n_{14}n_{15} & (n_{11}n_{18} + n_{17}n_{12}) & (n_{14}n_{18} + n_{17}n_{18}) & n_{17}n_{18} \\ n_{11}^2 - n_{12}^2 & 2(n_{11}n_{12} - n_{14}n_{12}) & n_{14}^2 - n_{15}^2 & 2(n_{11}n_{18} - n_{17}n_{12}) & 2(n_{14}n_{18} - n_{17}n_{18}) & n_{17}^2 - n_{18}^2 \end{bmatrix} \text{foto 1} \\ \begin{bmatrix} n_{11}n_{12} & (n_{11}n_{12} + n_{14}n_{12}) & n_{14}n_{15} & (n_{11}n_{18} + n_{17}n_{12}) & (n_{14}n_{18} + n_{17}n_{18}) & n_{17}n_{18} \\ n_{11}^2 - n_{12}^2 & 2(n_{11}n_{12} - n_{14}n_{12}) & n_{14}^2 - n_{15}^2 & 2(n_{11}n_{18} - n_{17}n_{12}) & 2(n_{14}n_{18} - n_{17}n_{18}) & n_{17}^2 - n_{18}^2 \end{bmatrix} \text{foto 2} \\ \begin{bmatrix} n_{11}n_{12} & (n_{11}n_{12} + n_{14}n_{12}) & n_{14}n_{15} & (n_{11}n_{18} + n_{17}n_{12}) & (n_{14}n_{18} + n_{17}n_{18}) & n_{17}n_{18} \\ n_{11}^2 - n_{12}^2 & 2(n_{11}n_{12} - n_{14}n_{12}) & n_{14}^2 - n_{15}^2 & 2(n_{11}n_{18} - n_{17}n_{12}) & 2(n_{14}n_{18} - n_{17}n_{18}) & n_{17}^2 - n_{18}^2 \end{bmatrix} \text{foto 3} \\ \begin{bmatrix} n_{11}n_{12} & (n_{11}n_{12} + n_{14}n_{12}) & n_{14}n_{15} & (n_{11}n_{18} + n_{17}n_{12}) & (n_{14}n_{18} + n_{17}n_{18}) & n_{17}n_{18} \\ n_{11}^2 - n_{12}^2 & 2(n_{11}n_{12} - n_{14}n_{12}) & n_{14}^2 - n_{15}^2 & 2(n_{11}n_{18} - n_{17}n_{12}) & 2(n_{14}n_{18} - n_{17}n_{18}) & n_{17}^2 - n_{18}^2 \end{bmatrix} \text{foto 4} \end{bmatrix}_6$$

7. Membangun matriks ${}_1[b]_6$ dengan menggunakan solusi *eigenvalue*

(nilai tunggal terkecil) yang mana nilai dari matriks ${}_1[b]_6$ tersebut

akan dijabarkan menggunakan solusi *Singular Value Decomposition*

(*SVD*). Yang mana matriks tersebut diatas dihasilkan dari; $v = V^T V$

1. Matriks nilai tunggal terkecil $\rightarrow {}_8[U]_6$

2. Kesatuan matriks ($m*m$) $\rightarrow {}_8[D]_8$

3. Kesatuan matrik ($n*n$) $\rightarrow {}_6[v]_6$

$$v = \begin{bmatrix} v_{11} = B_{11} \\ v_{21} = B_{12} \\ v_{31} = B_{22} \\ v_{41} = B_{13} \\ v_{51} = B_{23} \\ v_{61} = B_{33} \end{bmatrix} \rightarrow b = {}_1[B_{11} \ B_{12} \ B_{22} \ B_{13} \ B_{23} \ B_{33}]_6$$

8. Membangun matriks simetrik ${}_3[B]_3$ dari matriks ${}_1[b]_6$

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix}_3$$

9. Menghitung matriks homografi yang dinormalisasi ${}_3[A']_3$

$$A' = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & x_0 \\ 0 & \beta & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

a) $y_0 = \frac{B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}}{B_{13}B_{22} - B_{12}^2} \dots\dots\dots(3.3)$

$$b) \lambda = B_{33} \frac{B_{12}^2 + v'_0 (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})}{B_{11}} \dots\dots\dots(3.4)$$

$$c) \alpha' = \sqrt{\frac{\lambda'}{B_{11}}} \dots\dots\dots(3.5)$$

$$d) \beta' = \sqrt{\frac{\lambda' B_{11}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}} \dots\dots\dots(3.6)$$

$$e) \gamma' = \frac{-B_{12}\alpha'^2 \beta}{\lambda'} \dots\dots\dots(3.7)$$

$$f) x_0 = \frac{\gamma' v_0}{\beta'} - \frac{B_{13}\alpha'^2}{\lambda'} \dots\dots\dots(3.8)$$

10. Menghitung matriks parameter distorsi ${}_2[K]_1$

a) Menghitung parameter dari K

$$K = [R \ t] \dots\dots\dots(3.9)$$

$$R = \begin{bmatrix} | & | & | \\ r_1 & r_2 & r_3 \\ | & | & | \end{bmatrix}, t = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}$$

$$b) \lambda_{r_1} = \frac{1}{\|A^{-1}h_1\|} \dots\dots\dots(3.10)$$

$$c) \lambda_{r_2} = \frac{1}{\|A^{-1}h_2\|} \dots\dots\dots(3.11)$$

$$d) \lambda_{r_1} = \frac{\lambda_{r_1} + \lambda_{r_2}}{2} \dots\dots\dots(3.12)$$

$$e) r_1 = \lambda_{r_1} A^{-1} h_1 \dots\dots\dots(3.13)$$

$$f) r_2 = \lambda_{r_1} A^{-1} h_2 \dots\dots\dots(3.14)$$

$$g) r_3 = r_1 \times r_2 \dots\dots\dots(3.15)$$

$$h) t = \lambda_{r_3} A^{-1} h_3 \dots\dots\dots(3.16)$$

Meminimalkan kesalahan menggunakan *Levenberg-Marquardt*

11. Menghitung distorsi radial

$$D_i = \begin{bmatrix} (u_i - u_0)(x_i^2 + y_i^2) & (u_i - u_0)(x_i^2 + y_i^2) \\ (v_i - v_0)(x_i^2 + y_i^2) & (v_i - v_0)(x_i^2 + y_i^2) \end{bmatrix}$$

$$d_i = \begin{bmatrix} (uu_i - u_i) \\ (uv_i - v_i) \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} \quad k = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}$$

$$x_{koreksi} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \dots \dots \dots (3.17)$$

$$y_{koreksi} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \dots \dots \dots (3.18)$$

a) Puncaknya adalah matriks D dan d

b) Memecahkan sistem $Dk = d$, dimana k adalah variabel

12. Menghitung distorsi tangensial

$$x_{koreksi} = x + [2p_1 y + p_2 (r^2 + 2x^2)] \dots \dots \dots (3.19)$$

$$y_{koreksi} = x + [p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 y] \dots \dots \dots (3.20)$$

13. Menghitung panjang *baseline*

$$baseline = \sqrt{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2} \dots \dots \dots (3.21)$$

Alur perhitungan serta persamaan-persamaan diatas di buat dan dibahasakan dalam bahasa pemrograman C# yang dibuat oleh; Yusak Mnsen dengan judul skripsi; “Aplikasi Pembuatan Program Kalibrasi untuk Kamera Stereo dengan Microsoft Visual Studio C# 2008”

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Algoritma Dari Program Kalibrasi

Teknik yang diusulkan oleh Zhang(1999) hanya membutuhkan kamera untuk mengamati sebuah bidang datar yang ditampilkan oleh dua orientasi yang berbeda. Dalam model kamera teknik ini digunakan untuk menentukan parameter intrinsik, parameter ekstrinsik. Metode ini mengusulkan sebuah solusi analitis untuk memecahkan parameter tersebut serta dapat menentukan pendekatan yang baik dengan menggunakan suatu metode minimalis.

4.1.1 Parameter intrinsik

Input:

- 4 Pasang Foto Papan Kalibrasi
- Koordinat model

Langkah-langkah Algoritma Program Single Kalibrasi Dan Stereo Kalibrasi;

4.1.1.1 Single Kalibrasi

- 1 *Run* program single kalibrasi
- 2 *Input* foto papan kalibrasi untuk foto kiri dan kanan

- 3 Proses *Extract Corner* untuk masing-masing foto
- 4 Proses *Labelling* untuk masing-masing foto
- 5 Proses *Delete Unwanted Cross* untuk titik yang tidak terlabel
- 6 *Input* koordinat Model
- 7 Proses single kalibrasi
- 8 *Output* single kalibrasi;
 - f_{ovx}
 - f_{ovy}
 - *focal length*
 - *aspect ratio*
 - *principle point* (x_0, y_0)

4.1.1.2 Stereo Kalibrasi

- 1 *Run* program stereo kalibrasi
- 2 *Input* tiap pair foto papan kalibrasi
- 3 Proses *Extract Corner* untuk masing-masing pair
- 4 Proses *Labelling* untuk masing-masing pair
- 5 Proses *Delete Unwanted Cross* untuk titik yang tidak terlabel

- 6 *Input* koordinat Model
- 7 Proses stereo kalibrasi
- 8 *Output* stereo kalibrasi;
 - a. f_{ovx}
 - b. f_{ovy}
 - c. *focal length*
 - d. *aspect ratio*
 - e. *principle point (x0, y0)*
 - f. *IO Left photo stereo calibration*
 - 1) $K1$
 - 2) $K2$
 - 3) $K3$
 - 4) $P1$
 - 5) $P2$
 - g. *IO Right photo stereo calibration*
 - 1) $K1$
 - 2) $K2$
 - 3) $K3$
 - 4) $P1$
 - 5) $P2$
 - h. Translasi
 - i. *Intrinsic Matrix*
 - j. *Baseline*

4.1.2 Ekstrinsik

Input;

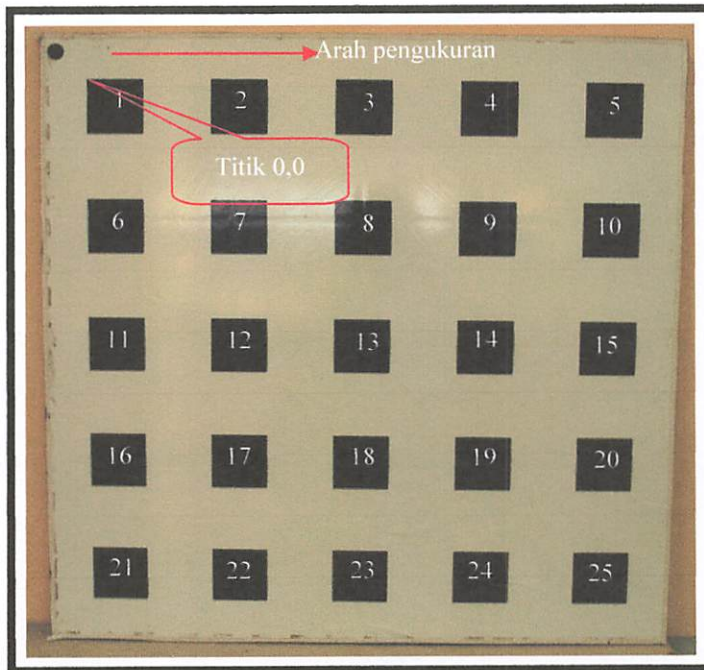
- *focal length*
- *principle point (x0, y0)*
- Koordinat Foto
- Koordinat Model

Langkah-langkah Algoritma Program Ekstrinsik EO;

- 1 *Run* program EO
- 2 *Input focal length*
- 3 *Input principle point (x0, y0)*
- 4 *Input* koordinat foto dan koordinat model (3D)
- 5 Proses Ekstrinsik
- 6 *Output;*
 - a. ω
 - b. φ
 - c. κ
 - d. X_L
 - e. Y_L
 - f. Z_L

4.2 Analisa Data

4.2.1 Data Papan Kalibrasi



Gambar 4.1 Arah Pengukuran Papan Kalibrasi

Data papan kalibrasi ini diperoleh dengan cara pengukuran menggunakan kertas kalkir millimeter blok dengan ketelitian ± 1 millimeter. Dimensi dari 1 kotak hitam bujur sangkar rata-rata adalah 6.5 X 6.5 centimeter. Jarak antara tiap kotak hitam bujur sangkar rata-rata adalah 7.9 X 7.85 centimeter. Dimana data awal yang dihasilkan adalah data jarak antara masing-masing titik yang terdapat pada kotak hitam bujur sangkar yang terdapat pada papan kalibrasi.

Tabel 4.1 Data Pengukuran Jarak Langsung masing-masing Titik Arah X untuk Line 1

LINE	JARAK	1X	2X	3X	4X	5X	6X	7X	8X	9X	10X	MPV
Line 1 ARAH X	1-2	6.53	6.52	6.51	6.52	6.52	6.52	6.52	6.51	6.52	6.52	6.52
	2-3	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40
	3-4	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90
	4-5	28.78	28.77	28.78	28.78	28.78	28.78	28.78	28.78	28.77	28.78	28.78
	5-6	35.29	35.28	35.29	35.28	35.28	35.29	35.29	35.29	35.29	35.28	35.29
	6-7	43.12	43.12	43.11	43.11	43.12	43.12	43.12	43.12	43.12	43.12	43.12
	7-8	49.64	49.63	49.63	49.64	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63
	8-9	57.50	57.49	57.49	57.49	57.49	57.49	57.49	57.49	57.50	57.49	57.49
	9-10	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00	64.00

Tabel 4.2 Data Residual dari Pengukuran Jarak Langsung

RESIDUAL									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabel 4.3 Data Residual Kuadrat dan RMS Error dari Pengukuran Jarak Langsung

RESIDUAL KUADRAT										RMS EROR
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.006
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.005
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000

Tabel 4.4 Data Pengukuran Jarak Langsung masing-masing Titik Arah Y untuk Line II

LINE	JARAK	1X	2X	3X	4X	5X	6X	7X	8X	9X	10X	MPV
Line II ARAH Y	0	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
	1-2	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
	2-3	6.49	6.49	6.49	6.49	6.49	6.49	6.49	6.49	6.49	6.49	6.49
	3-4	6.48	6.49	6.49	6.49	6.49	6.48	6.49	6.49	6.49	6.49	6.49
	4-5	6.47	6.48	6.48	6.47	6.47	6.47	6.47	6.47	6.47	6.47	6.47
	5-6	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
	6-7	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
	7-8	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51
	8-9	6.52	6.52	6.52	6.51	6.52	6.52	6.52	6.52	6.52	6.52	6.52
			6.52	6.52	6.52	6.51	6.52	6.52	6.52	6.52	6.52	6.52

Tabel 4.5 Data Residual dari Pengukuran Jarak Langsung

RESIDUAL									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.008	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0.008	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
0.001	-0.009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.001	-0.001	0.009	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001

Tabel 4.6 Data Residual Kuadrat dan RMS Error dari Pengukuran Jarak Langsung

RESIDUAL KUADRAT										RMS EROR
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003

Tabel 4.7 Data Koordinat Papan Kalibrasi

DATA KOORDINAT PAPAN KALIBRASI											
TITIK	KOORDINAT		TITIK	KOORDINAT		TITIK	KOORDINAT		TITIK	KOORDINAT	
	X (cm)	Y (cm)		X (cm)	Y (cm)		X (cm)	Y (cm)		X (cm)	Y (cm)
1	64.350	6.500	26	43.400	20.700	51	28.920	28.500	76	21.000	42.800
2	57.800	6.500	27	43.400	14.290	52	35.500	28.500	77	6.550	49.290
3	57.800	0.000	28	49.900	14.300	53	21.000	34.990	78	0.000	49.290
4	64.350	0.000	29	35.500	20.700	54	14.500	35.000	79	0.000	42.800
5	49.900	6.500	30	28.950	20.700	55	14.490	28.500	80	6.550	42.800
6	43.390	6.500	31	28.910	14.280	56	21.000	28.500	81	64.400	63.500
7	43.390	0.000	32	35.500	14.290	57	6.550	35.000	82	57.850	63.500
8	49.900	0.000	33	21.000	20.700	58	0.000	35.000	83	57.830	57.050
9	35.490	6.500	34	14.490	20.700	59	0.000	28.510	84	64.400	57.090
10	28.910	6.490	35	14.490	14.290	60	6.550	28.510	85	49.970	63.500
11	28.900	0.000	36	21.000	14.290	61	64.390	49.290	86	43.410	63.500
12	35.480	0.000	37	6.550	20.700	62	57.810	49.250	87	43.400	57.050
13	21.000	6.490	38	0.000	20.710	63	57.810	42.800	88	49.950	57.090
14	14.490	6.490	39	0.000	14.300	64	64.380	42.800	89	35.500	63.500
15	14.450	0.000	40	6.550	14.300	65	49.910	49.290	90	28.990	63.500
16	21.000	0.000	41	64.350	35.000	66	43.400	49.250	91	28.990	57.050
17	6.540	6.500	42	57.800	35.000	67	43.400	42.790	92	35.500	57.090
18	0.000	6.500	44	57.800	28.500	68	49.900	42.800	93	21.200	63.500
19	0.000	0.000	45	64.350	28.500	69	35.500	49.290	94	14.500	63.500
20	6.550	0.000	46	49.900	34.990	70	28.990	49.250	95	14.500	57.090
21	64.350	20.700	47	43.400	34.990	71	28.950	42.790	96	21.200	57.090
22	57.800	20.700	48	49.900	28.500	72	35.500	42.800	97	6.550	63.500
23	57.800	14.300	49	49.900	28.500	73	21.200	49.250	98	0.000	63.500
24	64.350	14.290	50	35.500	34.990	74	14.500	49.250	99	0.000	57.090
25	49.900	20.700	50	28.930	34.990	75	14.500	42.800	100	6.560	57.010

4.2.2 Parameter Eksterior Orientasi (EO)

Parameter ekstrinsik atau *exterior orientation* merupakan parameter posisi dan orientasi sudut kamera pada saat pengambilan foto. Parameter posisi kamera didefinisikan dalam ruang tiga-dimensi yang merupakan posisi dari *perspektif center* (pusat kamera) X_o, Y_o, Z_o . Sedangkan parameter orientasi sudut berfungsi sebagai penghubung antara sistem koordinat kamera

(x, y, z) dengan sistem koordinat referensi (X, Y, Z) . Sesuai dengan (Elias, 2007; Fraser, 2006b; Mikhail et al., 2001; Shih, 1994; Wolf & Dewitt, 2000) orientasi sudut dapat didefinisikan dalam sistem rotasi ω, ϕ, κ (*omega, phi, kappa*) atau t, α, s (*tilt, azimuth, swing*).

Tabel 4.8 Nilai Parameter EO Foto Kiri

ω KIRI	ϕ KIRI	κ KIRI	X_L KIRI	Y_L KIRI	Z_L KIRI
3.16	-1.30	-0.02	13.49	24.48	58.53

Tabel 4.9 Nilai Parameter EO Foto Kanan

ω KANAN	ϕ KANAN	κ KANAN I	X_L KANAN	Y_L KANAN	Z_L KANAN
-0.30	-0.74	2.73	64.68	34.33	20.59

4.2.3 Perhitungan Koordinat Foto Stereo dari Hasil Interseksi

Tabel 4.10 Nilai Parameter Kalibrasi Kamera Foto Kiri dan Foto Kanan

PARAMETER	FOTO KIRI	FOTO KANAN
x_0	-0.0202	0.2861
y_0	-0.0793	0.1453
k_1	-0.1233	-0.0808
k_2	0.0449	-0.1062
p_1	0.0004	-0.0013
p_2	0.0022	-0.0019
k_3	-0.0150	0.1569

Tabel 4.11 Koordinat Foto Kiri dan Foto Kanan

TITIK	KOORDINAT FOTO KIRI		KOORDINAT FOTO KANAN	
	x	y	x	y
1	10.159	3.915	1.49	4.46
2	9.207	3.863	0.424	4.372
3	9.156	4.911	0.321	5.46
4	10.115	4.953	1.394	5.543
5	8.01	3.795	-0.895	4.26
6	7.007	3.741	-1.99	4.166
7	6.948	4.807	-2.104	5.263
8	7.955	4.855	-1.005	5.355
9	5.752	3.669	-3.334	4.047
10	4.708	3.606	-4.44	3.945
11	4.642	4.691	-4.567	5.054
12	5.689	4.746	-3.456	5.153
13	3.409	3.52	-5.791	3.814
15	2.253	4.543	-7.039	4.81
16	3.337	4.612	-5.924	4.925
17	0.996	3.35	-8.249	3.56
18	-0.102	3.267	-9.344	3.44
19	-0.189	4.374	-9.493	4.549
20	0.913	4.452	-8.391	4.67

4.2.4 Perhitungan distorsi radial

a) Perhitungan jarak radial

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$$

$$r_1 = \sqrt{(10.159 - 0.286)^2 + (3.915 - 0.145)^2}$$

$$r_1 = \sqrt{(9.873)^2 + (3.770)^2}$$

$$r_1 = 2.831$$

Tabel 4.12 Jarak Radial Foto Kiri dan Foto Kanan

TITIK	JARAK RADIAL	
	FOTO KIRI	FOTO KANAN
1	2.831	10.935
2	3.296	10.034
3	4.248	10.445
4	3.888	11.316
5	4.188	8.916
6	5.073	7.998
7	5.756	8.511
8	4.985	9.378
9	6.252	6.882
10	7.266	5.995
11	7.779	6.670
12	6.833	7.475
13	8.535	4.971
15	10.004	5.151
16	8.986	5.769
17	10.897	3.577
18	11.962	3.347
19	12.307	4.457
20	11.265	4.626

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= k_1 r_1^3 + k_2 r_1^5 + k_3 r_1^7 \\ &= \left((-0.000526725 * 10.935) + (-1.35148E - 05 * 10.935) + \right. \\ &\quad \left. (2.34403E - 06 * 10.935) \right) \\ &= -0.00152 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta y_1 &= k_1 r_1^3 + k_2 r_1^5 + k_3 r_1^7 \\ &= \left((-0.000526725 * 10.935) + (-1.35148E - 05 * 10.935) + \right. \\ &\quad \left. (2.34403E - 06 * 10.935) \right) \\ &= -0.00152 \end{aligned}$$

Tabel 4.13 Koordinat Distorsi Radial Foto Kiri dan Foto Kanan

TITIK	DISTORSI RADIAL			
	FOTO KIRI		FOTO KANAN	
	x	y	x	y
1	-0.02049	-0.02049	-0.00152	-0.00152
2	-0.01880	-0.01880	-0.00177	-0.00177
3	-0.01958	-0.01958	-0.00228	-0.00228
4	-0.02121	-0.02121	-0.00209	-0.00209
5	-0.01671	-0.01671	-0.00225	-0.00225
6	-0.01499	-0.01499	-0.00273	-0.00273
7	-0.01595	-0.01595	-0.0031	-0.0031
8	-0.01758	-0.01758	-0.00268	-0.00268
9	-0.01290	-0.01290	-0.00336	-0.00336
10	-0.01123	-0.01123	-0.00391	-0.00391
11	-0.01250	-0.01250	-0.00418	-0.00418
12	-0.01401	-0.01401	-0.00368	-0.00368
13	-0.00932	-0.00932	-0.00459	-0.00459
15	-0.00965	-0.00965	-0.00538	-0.00538
16	-0.01081	-0.01081	-0.00483	-0.00483
17	-0.00670	-0.00670	-0.00586	-0.00586
18	-0.00627	-0.00627	-0.00643	-0.00643
19	-0.00835	-0.00835	-0.00662	-0.00662
20	-0.00867	-0.00867	-0.00606	-0.00606

4.2.5 Perhitungan distorsi tangensial

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= P_1(3x_1^2 + y_1^2) + 2P_2x_1y_1 \\ &= 0.0004353 * (3 * 10.159^2 + 3.915^2) + 2 * 0.002247 * 10.159 * 3.915 \\ &= 0.3202677 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta y_1 &= 2P_1x_1y_1 + P_2(3y_1^2 + x_1^2) \\ &= 2 * 0.0004353 * 10.159 * 3.915 + 0.002247(3 * 3.915^2 + 10.159^2) \\ &= 0.3699888 \end{aligned}$$

Tabel 4.14 Koordinat Distorsi Tangensial Foto Kiri dan Foto Kanan

TITIK	DISTORSI TANGENSIAL			
	FOTO KIRI		FOTO KANAN	
	x	y	x	y
1	0.32027	0.36999	-0.06103	-0.13733
2	0.27711	0.32216	-0.03332	-0.11613
3	0.32214	0.39024	-0.04686	-0.17774
4	0.36954	0.43905	-0.07852	-0.20250
5	0.22673	0.26782	-0.01261	-0.09664
6	0.18806	0.22757	-0.00686	-0.08623
7	0.22326	0.29343	-0.01173	-0.13971
8	0.26654	0.33484	-0.02139	-0.15392
9	0.14395	0.18353	-0.01402	-0.08055
10	0.11093	0.15230	-0.03171	-0.08173
11	0.13562	0.21580	-0.02804	-0.12700
12	0.17346	0.24816	-0.01418	-0.12967
13	0.07452	0.12013	-0.06788	-0.09039
15	0.06163	0.15951	-0.09773	-0.13982
16	0.09299	0.18188	-0.05961	-0.13083
17	0.02118	0.08082	-0.17503	-0.12686
18	0.00316	0.07171	-0.24010	-0.15183
19	0.00466	0.12838	-0.22042	-0.17925
20	0.02799	0.13908	-0.15866	-0.15826

4.2.6 Perhitungan koordinat distorsi terkoreksi

$$\begin{aligned}
 \Delta \bar{x}_1 &= x - x_0 + \Delta x_{1radial} + \Delta x_{1tan\ genstrial} \\
 &= 1.49 - 0.286 + (-0.001522 + (-0.06103)) \\
 &= 1.141
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta \bar{y}_1 &= y - y_0 + \Delta y_{1radial} + \Delta y_{1tan\ genstrial} \\
 &= 4.46 - 0.145 + (-0.001522 + (-0.13733)) \\
 &= 4.176
 \end{aligned}$$

Tabel 4.15 Koordinat Distorsi Sebelum dan Sesudah Terkoreksi Foto Kiri dan Foto Kanan

TTIK	KOORDINAT DISTORSI				KOORDINAT DISTORSI TERKOREKSI			
	FOTO KIRI		FOTO KANAN		FOTO KIRI		FOTO KANAN	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	10.159	3.915	1.49	4.46	10.173	4.119	1.141	4.176
2	9.207	3.863	0.424	4.372	9.179	4.021	0.103	4.109
3	9.156	4.911	0.321	5.46	9.172	5.136	-0.014	5.135
4	10.115	4.953	1.394	5.543	10.177	5.226	1.027	5.193
5	8.01	3.795	-0.895	4.26	7.934	3.901	-1.196	4.016
6	7.007	3.741	-1.99	4.166	6.894	3.808	-2.286	3.932
7	6.948	4.807	-2.104	5.263	6.869	4.939	-2.405	4.975
8	7.955	4.855	-1.005	5.355	7.918	5.027	-1.315	5.053
9	5.752	3.669	-3.334	4.047	5.597	3.694	-3.637	3.818
10	4.708	3.606	-4.44	3.945	4.522	3.602	-4.762	3.714
11	4.642	4.691	-4.567	5.054	4.479	4.749	-4.885	4.778
12	5.689	4.746	-3.456	5.153	5.562	4.835	-3.760	4.874
13	3.409	3.52	-5.791	3.814	3.188	3.486	-6.150	3.574
15	2.253	4.543	-7.039	4.81	2.019	4.548	-7.428	4.520
16	3.337	4.612	-5.924	4.925	3.133	4.638	-6.275	4.644
17	0.996	3.35	-8.249	3.56	0.724	3.279	-8.716	3.282
18	-0.102	3.267	-9.344	3.44	-0.391	3.187	-9.877	3.136
19	-0.189	4.374	-9.493	4.549	-0.479	4.349	-10.006	4.218
20	0.913	4.452	-8.391	4.67	0.646	4.437	-8.842	4.360

Tabel 4.16 Selisih Koordinat Distorsi Sebelum dan Sesudah Terkoreksi Foto Kiri dan Foto Kanan

TTIK	SELISIH KOORDINAT DISTORSI SEBELUM DAN SESUDAH TERKOREKSI			
	FOTO KIRI		FOTO KANAN	
	X	Y	X	Y
1	0.014	0.204	-0.349	-0.284
2	-0.028	0.158	-0.321	-0.263
3	0.016	0.225	-0.335	-0.325
4	0.062	0.273	-0.367	-0.350
5	-0.076	0.106	-0.301	-0.244
6	-0.113	0.067	-0.296	-0.234
7	-0.079	0.132	-0.301	-0.288
8	-0.037	0.172	-0.310	-0.302
9	-0.155	0.025	-0.303	-0.229
10	-0.186	-0.004	-0.322	-0.231
11	-0.163	0.058	-0.318	-0.276
12	-0.127	0.089	-0.304	-0.279

TITIK	SELISIH KOORDINAT DISTORSI SEBELUM DAN SESUDAH TERKOREKSI			
	FOTO KIRI		FOTO KANAN	
	x	y	x	y
13	-0.221	-0.034	-0.359	-0.240
15	-0.234	0.005	-0.389	-0.290
16	-0.204	0.026	-0.351	-0.281
17	-0.272	-0.071	-0.467	-0.278
18	-0.289	-0.080	-0.533	-0.304
19	-0.290	-0.025	-0.513	-0.331
20	-0.267	-0.015	-0.451	-0.310

4.3 Hasil Kalibrasi

a) *Single* kalibrasi

```

single kiri - Notepad
File Edit Format View Help
Intrinsic Camera Parameters:
System.Double[,]
fovx = 21.4343765451406
fovy = 16.1227163632648
focal = 12.9449713895375
aspect ratio = 1.00221669530139
principal point x,y: 1.78421425989533 , 1.58457797584115

```

Gambar 4.1 Tampilan Hasil Single Kalibrasi untuk Foto Kiri


```
single kanan - Notepad
File Edit Format View Help
Intrinsic Camera Parameters:
System.Double[,]
fovx = 21.8980403913134
fovy = 16.4217938610578
focal = 12.6643074684004
aspect ratio = 1.00551968298671
principal point x,y: 2.01569549374571 , 1.86846295229479
```

Gambar 4.2 Tampilan Hasil Single Kalibrasi untuk Foto Kanan

b) Stereo kalibrasi

```
StereoCalib - Notepad
File Edit Format View Help
fovx: 21.8789121819562
fovy: 16.4086392975548
focal leght: 12.675653666792
aspect ratio: 1.00543614243979
principal point x,y: 1.8846149392403 , 1.62819249554774

IO left photo stereo calibration:
K1 : -0.530952029858364
K2 : 4.65490393107275
K3 : -65.9639185299743
P1 : 0.000683420324641396
P2 : 0.000683420324641396

IO right photo stereo calibration:
K1 : -0.0596867732819228
K2 : -19.3485710277873
K3 : 230.016000769018
P1 : -0.000200941088888063
P2 : -0.000200941088888063

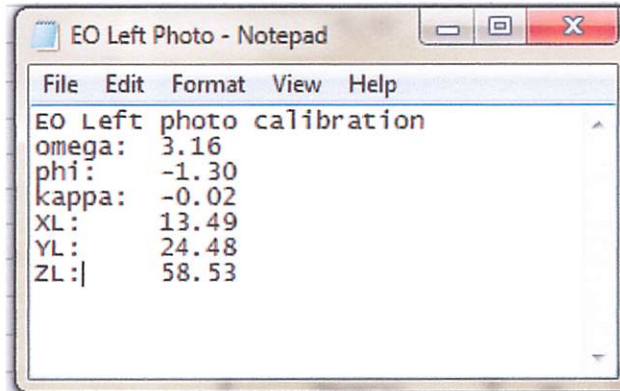
Translasi : -49.034809883906 , -0.571450820728026 ,
7.42107919844418

Intrinsic Matrix:
1655.59558096875 0 246.153787982407
0 1664.59563436958 211.224972395383
0 0 1

Base Line: 49.5964873036478
```

Gambar 4.3 Tampilan Hasil Stereo Kalibrasi

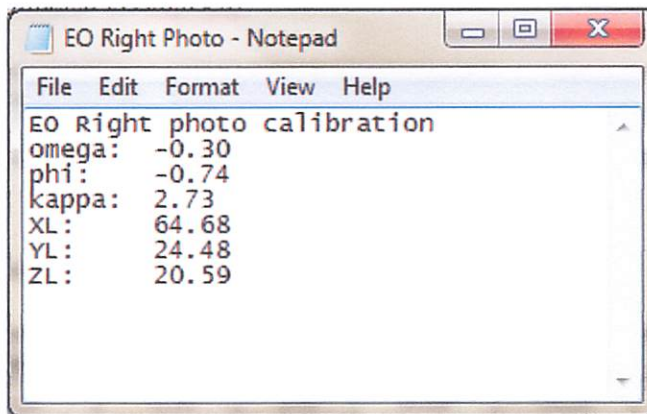
- c) Ekstrinsik foto kiri



```
EO Left photo calibration
omega: 3.16
phi: -1.30
kappa: -0.02
XL: 13.49
YL: 24.48
ZL: 58.53
```

Gambar 4.4 Tampilan Hasil EO kiri

- d) Ekstrinsik foto kanan



```
EO Right photo calibration
omega: -0.30
phi: -0.74
kappa: 2.73
XL: 64.68
YL: 24.48
ZL: 20.59
```

Gambar 4.5 Tampilan Hasil EO kanan

4.4 Pembahasan

1. Parameter intrinsik merupakan parameter yang mendefinisikan geometri dari sensor kamera pada saat melakukan pengambilan foto. Algoritma yang di peroleh dari proses IO adalah sebagai berikut;

- a) Single kalibrasi

- 1) *Run* program single kalibrasi
 - 2) *Input* foto papan kalibrasi untuk foto kiri dan kanan
 - 3) Proses *Extract Corner* untuk masing-masing foto
 - 4) Proses *Labelling* untuk masing-masing foto
 - 5) Proses *Delete Unwanted Cross* untuk titik yang tidak terlabel
 - 6) *Input* koordinat Model
 - 7) Proses single kalibrasi
- b) Stereo kalibrasi
- 1) *Run* program streo kalibrasi
 - 2) *Input* tiap pair foto papan kalibrasi
 - 3) Proses *Extract Corner* untuk masing-masing pair
 - 4) Proses *Labelling* untuk masing-masing pair
 - 5) Proses *Delete Unwanted Cross* untuk titik yang tidak terlabel
 - 6) *Input* koordinat Model
 - 7) Proses stereo kalibrasi

2. Algoritma yang di peroleh dari proses EO adalah sebagai berikut;

- 1) *Run* program EO
 - 2) *Input focal length*
 - 3) *Input principle point (x0, y0)*
 - 4) *Input koordinat foto dan koordinat model (3D)*
 - 5) *Proses Ekstrinsik*
3. Dari Algoritma diatas akan menghasilkan nilai dari beberapa parameter antara lain;

a. Single kalibrasi

Tabel 4.17 Hasil dari algoritma single kalibrasi

PARAMETER	KAMERA KIRI	KAMERA KANAN
fov _x	21.900	21.923
fov _y	16.424	16.442
focal	12.663	12.649
aspect ratio	1.005	1.005
x0	-0.020	0.286
y0	-0.079	0.145

b. Stereo kalibrasi

Tabel 4.18 Hasil dari algoritma stereo kalibrasi

PARAMETER	FOTO KIRI			FOTO KANAN		
Intrinsic Matrix	1496.521	0.000	965.847	1488.435	0.000	990.971
	0	1506.097	654.005	0	1500.202	635.582
	0	0	1	0	0	1
k1	-0.123			-0.081		
k2	0.045			-0.106		
p1	0.000			-0.001		

p2	0.002	-0.002	
k3	-0.015	0.157	
BaseLine:	49.5964873		

Parameter intrinsik merupakan parameter yang mendefinisikan geometri dari sensor kamera pada saat melakukan pengambilan foto. Mengkalibrasi titik tengah (*principal point*) bidang *CCD/CMOS* dan mengkalibrasi jarak dari *principal point* di bidang *CCD /CMOS* ke titik focus lensa. k_1, k_2, k_3 Menghilangkan efek *Barrel distortion* (efek cembung) atau *Pin Cushion distortion* (efek cekung) dari obyek yang terekam di foto. p_1, p_2 *Decentring Distortion* parameters tujuannya adalah menghilangkan efek distorsi tangensial dan radialasimetrik dari *principal point*. *Baseline* merupakan bagian dari penyekalaan.

c. Ekstrinsik Orientasi

Tabel 4.19 Hasil dari algoritma Ekstrinsik Orientasi

KAMERA	ω	ϕ	κ	X_L	Y_L	Z_L
KIRI	3.16	-1.30	-0.02	13.49	24.48	58.53
KANAN	-0.30	-0.74	2.73	64.68	34.33	20.59

Parameter ekstrinsik atau *exterior orientation* merupakan parameter posisi dan orientasi sudut kamera pada saat pengambilan foto. Dimana, sudut rotasi *omega* untuk rotasi sumbu x , *phi* untuk rotasi sumbu y dan *kappa* sebagai rotasi sumbu z . Sedangkan X_L, Y_L, Z_L merupakan posisi dari pada kamera saat pengambilan foto.

4. Validasi rata-rata antara nilai koordinat sebelum dan sesudah dikoreksi yang mana $x = 0.042$ dan $y = 0.054$ adalah dengan tujuan untuk mereduksi distorsi kamera atau dengan kata lain mengembalikan posisi koordinat foto yang terdistorsi ke posisi sebenarnya.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Algoritma yang dihasilkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut;
 - a. Single kalibrasi (masing-masing foto)
 - b. Stereo kalibrasi (1 pasang foto kiri dan foto kanan)
 - c. Penentuan nilai Eksterior orientasi (EO) yang mana terdiri atas ω , ϕ , κ , X_L , Y_L , Z_L
2. Dari perhitungan algoritma untuk penentua nilai EO dari kedua kamera *CCTV* adalah sebagai berikut;

 $\omega_{\text{KIRI}} : 3.16, \phi_{\text{KIRI}} : -1.30, \kappa_{\text{KIRI}} : -0.02, X_{L \text{ KIRI}} : 13.49, Y_{L \text{ KIRI}} : 24.48, Z_{L \text{ KIRI}} : 58.53$

 $\omega_{\text{KANAN}} : -0.30, \phi_{\text{KANAN}} : -0.74, \kappa_{\text{KANAN}} : 2.73, X_{L \text{ KANAN}} : 64.68, Y_{L \text{ KANAN}} : 34.33,$
 $Z_{L \text{ KANAN}} : 20.59$
3. Validasi rata-rata antara nilai koordinat sebelum dan sesudah dikoreksi yang mana $x = 0.042\text{mm}$ dan $y = 0.054\text{mm}$

5.2 Saran

1. **Sebaiknya menggunakan kamera yang beresolusi tinggi**
2. **Menggunakan panjang fokus lensa > 8 millimeter**
3. **Proses perekaman data sebaiknya dilaksanakan pada siang hari. Karena proses pencahayaan sangat berpengaruh dengan kamera *CCTV***

DAFTAR PUSTAKA

- Bradski, G. and A. Kaebler (2008). Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV Library. Gravenstein Highway North, Sebastopol.
- Cooper, M. A. R. and S. Robson (2001). Close Range Photogrammetry and Computer Vision : Theory of Close Range Photogrammetry. Scotland, Whittles Publishing Services.
- Dörstel, C., K. Jacobsen, et al. (2002). "DMC-Photogrammetric Accuracy-Calibration Aspects and Generation of Synthetic DMC Images." IAPRS.
- Elias, R. (2007). "Enhancing Accuracy of Camera Rotation Angles Detected by Inaccurate Sensors and Expressing them in Different Systems for Wide Baseline Stereo." Computer Science and Engineering Department.
- Eternity, M.2009.Perbaiki distorsi dan perspektif <http://majesty-eternity.blogspot.com/2010/02/perbaiki-distorsi-dan-perspektif-dengan.html>
- Fraser, C. S. (2006). "Interior Orientation and Network Design." Lecture Notes 2 University of Melbourne.
- Fryer, J. G. (1981). Camera Calibration In Non-Topographic Photogrammetry.
- Fryer, J. G. (1983). "Lens Distortion For Close Range Photogrammetry."
- Fryer, J. G. (1983). "Lens Distortion for Close Range Photogrammetry." Department of Civil Engineering and Surveying.
- George E. Karras, D. M. (2001). "Simple Calibration Techniques for Non-Metric Cameras." CIPA International Symposium, Potsdam(Department of Surveying, National Technical).
- Horn, B. K. P. (2000). "Tsai's Camera Calibration Method Revisited."
- J.Jedlička and M.Potůčková (1999). "CORRECTION OF RADIAL DISTORTION IN DIGITAL IMAGES." Charles University in Prague Faculty of Science.
- Karara, H. M., Ed. (1989). Non-Topographic Photogrammetry : Second Edition. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Lucas Teixeira, M. G., and Manuel Fernandez (2006). "Zhang's Camera Calibration: Step By Step."
- Mikhail, E. M., J. S. Bethel, et al. (2001). Introduction to Modern Photogrammetry. Brisbane, John Wiley & Sons Inc.

- Nuraini, R.(2007).Sekilas tentang Close Range Photogrammetry
<http://geodesy.gd.itb.ac.id/nrahmah/?p=9>
- Shih, T. Y. (1994). "RLT : A Closed Form Solution for Relative Orientation." IAPRS: 357-363.
- Slabaugh, G. G. (2004). "Computing Euler Angels from a Rotation Matrix." 1-6.
- Stefanovic, P. (1973). "Relative Orientation - a New Approach." ITC Journal: 417-448.
- Thompson, E. H. (1959). "A Rational Algebraic Formulation of the Problem of Relative Orientation." Photogrammetric Record Vol III.
- Tjahjadi, E. (2009). Precision Feature Extraction from Unmanned Aerial Platforms, Jurusan Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan.
- Trucco, E. and A. Verri (1998). Introductory Techniques for 3D Computer Vision. Edinburgh, Prentice Hall.
- Tsai, R. Y. (1987). "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses." IEEE(Jurnal of Robotics and Automatic).
- Wikipedia (2006). "Distortion."
- Wikipedia.(2008).Pinhole Camera Models
- Wolf, P. R. (1993). Elemen Fotogrametri. Yogyakarta, Gajah Mada University Press.
- Wolf, P. R. and B. A. Dewitt (2000). Elements of Photogrammetry : with application in GIS 3rd Edition. New York, McGraw-Hill Companies.
- Zhang, Z. (1999). "Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Uknown Orientation." IEEE.

LAMPIRAN

DATA PENGUKURAN
DATA PENGUKURAN
JARAK LANGSUNG PAPAN KALIBRASI

LAMPIRAN

DATA KOORDINAT
PIXEL DAN FOTO

Panjang Fokus Kamera 24 mm

Ukuran CCD

w 23.6 mm

h 15.8 mm

Ukuran Pixel Size

w 0.0122 mm

h 0.0122 mm

Ukuran Image

w 1936 pixels

h 1296 pixels

Nilai Prespectif Center

Xc 967.5

Yc 647.5

FOTO PAIR I									
NO TITIK	FOTO KIRI 1				NO TITIK	FOTO KANAN 1			
	KOORDINAT PIKSEL KAMERA KIRI		KOORDINAT FOTO			KOORDINAT PIKSEL KAMERA KIRI		KOORDINAT FOTO	
	u	v	x	y		u	v	x	y
1	1800.86	326.36	10.16	3.92	1	1089.703	281.669	1.49	4.46
2	1722.75	330.61	9.21	3.86	2	1002.298	288.8682	0.424	4.372
3	1718.58	244.67	9.16	4.91	3	993.8223	199.6622	0.321	5.46
4	1797.30	241.19	10.12	4.95	4	1081.841	192.7959	1.394	5.543
5	1624.57	336.19	8.01	3.80	5	894.1086	298.0421	-0.895	4.26
6	1542.31	340.61	7.01	3.74	6	804.2776	305.7531	-1.99	4.166
7	1537.46	253.24	6.95	4.81	7	794.8979	215.792	-2.104	5.263
8	1620.06	249.30	7.96	4.86	8	885.076	208.2892	-1.005	5.355
9	1439.35	346.54	5.75	3.67	9	694.0154	315.5087	-3.334	4.047
10	1353.69	351.69	4.71	3.61	10	603.2435	323.9395	-4.44	3.945
11	1348.27	262.72	4.64	4.69	11	592.8901	232.9841	-4.567	5.054
12	1434.22	258.22	5.69	4.75	12	684.0118	224.8	-3.456	5.153
13	1247.14	358.74	3.41	3.52	13	492.4166	334.6703	-5.791	3.814
14	1158.68	364.82	2.33	3.45	14	401.3679	344.1166	-6.901	3.699
15	1152.33	274.84	2.25	4.54	15	390.0265	252.9586	-7.039	4.81
16	1241.22	269.16	3.34	4.61	16	481.5501	243.5494	-5.924	4.925
17	1049.24	372.69	1.00	3.35	17	290.827	355.46	-8.249	3.56
18	959.13	379.49	-0.10	3.27	18	200.935	365.348	-9.344	3.44
19	952.02	288.75	-0.19	4.37	19	188.7168	274.3419	-9.493	4.549
20	1042.37	282.31	0.91	4.45	20	279.1783	264.4053	-8.391	4.67
21	1806.94	514.32	10.23	1.62	21	1106.327	476.4626	1.692	2.085
22	1729.67	520.23	9.29	1.55	22	1019.995	484.7741	0.64	1.984
23	1726.92	435.44	9.26	2.59	23	1011.972	397.0453	0.542	3.053
24	1804.60	430.32	10.20	2.65	24	1098.865	389.2125	1.601	3.149
25	1632.59	527.32	8.11	1.47	25	913.3679	494.9034	-0.66	1.86
26	1551.48	533.58	7.12	1.39	26	825.0546	503.5497	-1.736	1.755
27	1547.60	447.02	7.07	2.44	27	815.5883	414.8222	-1.852	2.837
28	1629.33	441.51	8.07	2.51	28	904.5917	406.5086	-0.767	2.938
29	1449.66	541.16	5.88	1.30	29	716.3341	514.0633	-3.062	1.627
30	1364.88	547.68	4.84	1.22	30	626.6226	523.1614	-4.155	1.516
31	1360.14	459.95	4.79	2.29	31	615.7469	433.9251	-4.288	2.604
32	1445.33	454.17	5.83	2.36	32	706.0779	425.1693	-3.187	2.711
33	1259.58	556.05	3.56	1.12	33	517.2042	534.1037	-5.489	1.382
34	1171.92	563.05	2.49	1.03	34	427.1566	543.715	-6.587	1.265
35	1166.14	474.33	2.42	2.11	35	415.1689	454.2047	-6.733	2.357
36	1254.18	467.55	3.50	2.19	36	505.6686	444.711	-5.63	2.472
37	1063.68	571.70	1.17	0.92	37	317.9563	555.0213	-7.918	1.127
38	974.84	578.85	0.09	0.84	38	229.108	564.6387	-9.001	1.01
39	967.79	489.72	0.00	1.92	39	215.9703	475.3492	-9.161	2.099
40	1057.23	482.52	1.09	2.01	40	305.3839	465.5734	-8.071	2.218
41	1810.25	698.49	10.27	-0.62	41	1121.811	666.2527	1.881	-0.229
42	1733.90	706.00	9.34	-0.71	42	1037.034	675.6207	0.848	-0.343
43	1732.40	623.04	9.32	0.30	43	1029.327	590.3978	0.754	0.696
44	1809.07	616.31	10.26	0.38	44	1114.809	581.4534	1.796	0.805
45	1638.13	714.94	8.18	-0.82	45	932.2843	686.7963	-0.429	-0.479
46	1558.07	722.44	7.20	-0.91	46	845.4504	696.2939	-1.488	-0.595
47	1555.38	637.99	7.17	0.12	47	836.1231	610.1735	-1.601	0.455
48	1635.74	631.27	8.15	0.20	48	923.6196	601.126	-0.535	0.565

49	1457.72	731.57	5.98	-1.03	49	738.5315	707.5312	-2.791	-0.732
50	1374.42	739.31	4.96	-1.12	50	650.4258	717.1565	-3.865	-0.849
51	1370.35	653.81	4.91	-0.08	51	639.4634	630.4166	-3.999	0.208
52	1454.38	646.56	5.94	0.01	52	728.3253	621.1059	-2.916	0.322
53	1270.50	748.54	3.69	-1.23	53	542.5896	728.4257	-5.18	-0.987
54	1184.17	756.44	2.64	-1.33	54	454.11	738.0887	-6.258	-1.104
55	1178.75	670.13	2.58	-0.28	55	441.6637	651.2596	-6.41	-0.046
56	1265.58	662.58	3.63	-0.18	56	530.8552	641.6473	-5.323	0.071
57	1077.57	765.80	1.34	-1.44	57	346.5916	749.3193	-7.569	-1.241
58	989.82	773.60	0.27	-1.54	58	258.989	758.6793	-8.637	-1.355
59	983.15	686.80	0.19	-0.48	59	245.2362	672.0751	-8.804	-0.3
60	1071.37	679.24	1.27	-0.39	60	333.3914	662.5049	-7.73	-0.183
61	1811.09	877.66	10.28	-2.81	61	1136.737	849.9958	2.063	-2.469
62	1735.77	886.46	9.37	-2.91	62	1053.524	860.2894	1.049	-2.594
63	1735.32	805.95	9.36	-1.93	63	1046.037	777.8255	0.957	-1.589
64	1810.87	797.70	10.28	-1.83	64	1130.007	767.8906	1.981	-1.468
65	1641.51	897.04	8.22	-3.04	65	950.741	872.3846	-0.204	-2.742
66	1562.69	905.70	7.26	-3.15	66	865.6116	882.4675	-1.242	-2.865
67	1560.74	824.03	7.23	-2.15	67	856.4049	799.364	-1.354	-1.851
68	1640.28	815.77	8.20	-2.05	68	942.3078	789.5291	-0.307	-1.732
69	1464.03	916.27	6.05	-3.28	69	760.6998	894.4137	-2.521	-3.01
70	1381.89	924.91	5.05	-3.38	70	674.3154	904.307	-3.574	-3.131
71	1378.63	842.11	5.01	-2.37	71	663.3949	820.669	-3.707	-2.111
72	1461.39	833.80	6.02	-2.27	72	750.52	810.9093	-2.645	-1.992
73	1279.90	935.16	3.81	-3.51	73	568.6854	915.6925	-4.862	-3.27
74	1195.21	943.72	2.78	-3.61	74	481.819	925.4498	-5.92	-3.389
75	1190.38	860.25	2.72	-2.59	75	469.1198	841.8556	-6.075	-2.369
76	1275.69	851.95	3.76	-2.49	76	556.6783	832.1784	-5.008	-2.251
77	1090.54	953.81	1.50	-3.73	77	376.4244	936.5372	-7.205	-3.524
78	1004.16	962.11	0.45	-3.84	78	290.3325	945.7587	-8.255	-3.636
79	997.63	878.15	0.37	-2.81	79	275.7458	862.3456	-8.433	-2.619
80	1084.65	870.03	1.43	-2.71	80	362.5651	852.9819	-7.374	-2.505
81	1809.54	1049.70	10.27	-4.90	81	1150.6	1025.484	2.232	-4.608
82	1735.43	1059.72	9.36	-5.03	82	1068.89	1036.581	1.236	-4.743
83	1735.72	982.76	9.37	-4.09	83	1061.928	958.2126	1.151	-3.788
84	1810.49	973.30	10.28	-3.97	84	1144.339	947.4363	2.156	-3.657
85	1642.54	1071.69	8.23	-5.17	85	968.4195	1049.507	0.011	-4.901
86	1565.19	1081.49	7.29	-5.29	86	885.1318	1060.17	-1.004	-5.031
87	1564.39	1003.42	7.28	-4.34	87	876.3184	981.184	-1.112	-4.068
88	1642.38	994.06	8.23	-4.23	88	960.4206	970.6932	-0.086	-3.94
89	1468.42	1093.09	6.11	-5.43	89	782.5816	1072.466	-2.254	-5.181
90	1387.78	1102.51	5.12	-5.55	90	698.2616	1082.699	-3.282	-5.306
91	1385.41	1023.65	5.09	-4.59	91	687.2914	1003.37	-3.416	-4.339
92	1466.53	1014.49	6.08	-4.47	92	772.6452	993.3163	-2.375	-4.216
93	1287.71	1113.78	3.90	-5.69	93	594.733	1094.373	-4.544	-5.448
94	1204.76	1122.88	2.89	-5.80	94	509.8852	1104.044	-5.578	-5.566
95	1200.53	1043.35	2.84	-4.83	95	497.1241	1024.606	-5.734	-4.597
96	1284.35	1034.47	3.86	-4.72	96	582.7983	1014.94	-4.69	-4.48
97	1102.40	1133.41	1.64	-5.92	97	406.7807	1114.823	-6.835	-5.697
98	1017.88	1142.02	0.61	-6.03	98	322.6152	1123.788	-7.861	-5.807
99	1011.77	1062.26	0.54	-5.06	99	307.8387	1044.699	-8.041	-4.842
100	1097.12	1053.68	1.58	-4.95	100	392.8481	1035.59	-7.005	-4.731

LAMPIRAN

PERHITUNGAN
PERHITUNGAN
KALIBRASI KAMERA

Parameter Kalibrasi Foto Kiri

Intrinsic Matrix

1496.5 0 965.846
 0 1506.097 654.0062
 0 0 1

$x_0 = -0.020$ $y_0 = -0.079$
 $k1 = -0.12329$ $k1^3 = -0.00187$
 $k2 = 0.044866$ $k2^5 = 1.82E-07$
 $p1 = 0.000435$
 $p2 = 0.002248$
 $k3 = -0.01503$ $k3^7 = -1.7E-13$

No. Titik	Jarak Radial	Radial Distorsi		Tangential Distorsi		X-X ₀	Y-Y ₀	X terkoreksi	Y terkoreksi	Validasi x	Validasi y
		x	y	x	y						
1	10.935	-0.020	-0.020	0.320	0.370	10.179	3.994	10.138	4.344	0.021	-0.429
2	10.034	-0.019	-0.019	0.277	0.322	9.227	3.942	9.190	4.246	0.017	-0.383
3	10.445	-0.020	-0.020	0.322	0.390	9.176	4.990	9.137	5.361	0.019	-0.450
4	11.316	-0.021	-0.021	0.370	0.439	10.135	5.032	10.093	5.450	0.022	-0.497
5	8.916	-0.017	-0.017	0.227	0.268	8.030	3.874	7.997	4.125	0.013	-0.330
6	7.998	-0.015	-0.015	0.188	0.228	7.027	3.820	6.997	4.033	0.010	-0.292
7	8.511	-0.016	-0.016	0.223	0.293	6.968	4.886	6.936	5.164	0.012	-0.357
8	9.378	-0.018	-0.018	0.267	0.335	7.975	4.934	7.940	5.252	0.015	-0.397
9	6.882	-0.013	-0.013	0.144	0.184	5.772	3.748	5.746	3.919	0.006	-0.250
10	5.995	-0.011	-0.011	0.111	0.152	4.728	3.685	4.706	3.826	0.002	-0.220
11	6.670	-0.013	-0.013	0.136	0.216	4.662	4.770	4.637	4.974	0.005	-0.283
12	7.475	-0.014	-0.014	0.173	0.248	5.709	4.825	5.681	5.059	0.008	-0.313
13	4.971	-0.009	-0.009	0.075	0.120	3.429	3.599	3.411	3.710	-0.002	-0.190
14	4.237	-0.008	-0.008	0.048	0.099	2.350	3.525	2.334	3.617	-0.004	-0.171
15	5.151	-0.010	-0.010	0.062	0.160	2.273	4.622	2.254	4.772	-0.001	-0.229
16	5.769	-0.011	-0.011	0.093	0.182	3.357	4.691	3.336	4.862	0.001	-0.250
17	3.577	-0.007	-0.007	0.021	0.081	1.016	3.429	1.003	3.503	-0.007	-0.153
18	3.347	-0.006	-0.006	0.003	0.072	-0.082	3.346	-0.094	3.412	-0.008	-0.145
19	4.457	-0.008	-0.008	0.005	0.128	-0.169	4.453	-0.186	4.573	-0.003	-0.199
20	4.626	-0.009	-0.009	0.028	0.139	0.933	4.531	0.916	4.662	-0.003	-0.210
21	10.394	-0.019	-0.019	0.213	0.268	10.253	1.703	10.214	1.951	0.019	-0.327
22	9.453	-0.018	-0.018	0.179	0.223	9.311	1.631	9.276	1.836	0.015	-0.284
23	9.652	-0.018	-0.018	0.222	0.259	9.277	2.664	9.241	2.905	0.016	-0.320
24	10.582	-0.020	-0.020	0.261	0.305	10.224	2.727	10.185	3.012	0.019	-0.364
25	8.274	-0.016	-0.016	0.140	0.173	8.128	1.544	8.097	1.701	0.011	-0.236
26	7.289	-0.014	-0.014	0.111	0.136	7.139	1.468	7.112	1.590	0.007	-0.201
27	7.527	-0.014	-0.014	0.146	0.168	7.091	2.523	7.063	2.677	0.008	-0.233
28	8.493	-0.016	-0.016	0.179	0.206	8.088	2.590	8.056	2.781	0.012	-0.270
29	6.056	-0.011	-0.011	0.080	0.096	5.898	1.375	5.875	1.460	0.003	-0.164
30	5.034	-0.009	-0.009	0.058	0.068	4.864	1.296	4.845	1.355	-0.001	-0.138
31	5.357	-0.010	-0.010	0.081	0.096	4.806	2.365	4.786	2.452	0.000	-0.166
32	6.333	-0.012	-0.012	0.108	0.126	5.845	2.436	5.821	2.550	0.004	-0.193
33	3.774	-0.007	-0.007	0.035	0.040	3.580	1.194	3.566	1.228	-0.006	-0.113
34	2.746	-0.005	-0.005	0.020	0.023	2.512	1.109	2.502	1.128	-0.010	-0.098
35	3.280	-0.006	-0.006	0.033	0.048	2.441	2.190	2.429	2.232	-0.008	-0.121
36	4.186	-0.008	-0.008	0.053	0.067	3.515	2.273	3.499	2.332	-0.004	-0.138
37	1.558	-0.003	-0.003	0.007	0.010	1.192	1.003	1.186	1.010	-0.014	-0.086
38	0.923	-0.002	-0.002	0.001	0.005	0.110	0.916	0.107	0.919	-0.017	-0.082
39	2.003	-0.004	-0.004	0.002	0.025	0.024	2.003	0.017	2.025	-0.013	-0.101
40	2.369	-0.004	-0.004	0.013	0.032	1.114	2.090	1.105	2.118	-0.011	-0.107
41	10.307	-0.019	-0.019	0.109	0.234	10.293	-0.543	10.255	-0.328	0.018	-0.294
42	9.384	-0.018	-0.018	0.084	0.194	9.362	-0.634	9.327	-0.457	0.015	-0.256
43	9.352	-0.018	-0.018	0.126	0.198	9.344	0.377	9.309	0.558	0.015	-0.260
44	10.289	-0.019	-0.019	0.155	0.241	10.279	0.459	10.241	0.681	0.018	-0.301
45	8.229	-0.015	-0.015	0.057	0.149	8.195	-0.743	8.164	-0.609	0.011	-0.213
46	7.267	-0.014	-0.014	0.038	0.116	7.219	-0.835	7.192	-0.732	0.007	-0.182
47	7.189	-0.013	-0.013	0.071	0.116	7.186	0.195	7.159	0.298	0.007	-0.182
48	8.171	-0.015	-0.015	0.094	0.151	8.166	0.277	8.136	0.413	0.010	-0.215
49	6.070	-0.011	-0.011	0.020	0.082	5.996	-0.946	5.973	-0.875	0.003	-0.150
50	5.088	-0.010	-0.010	0.008	0.059	4.980	-1.040	4.961	-0.990	-0.001	-0.129
51	4.931	-0.009	-0.009	0.030	0.054	4.931	0.002	4.913	0.047	-0.002	-0.124
52	5.956	-0.011	-0.011	0.046	0.079	5.955	0.091	5.933	0.159	0.002	-0.147
53	3.889	-0.007	-0.007	-0.002	0.037	3.714	-1.153	3.700	-1.123	-0.006	-0.109
54	2.940	-0.006	-0.006	-0.006	0.025	2.661	-1.249	2.650	-1.230	-0.009	-0.098

55	2.603	-0.005	-0.005	0.005	0.015	2.595	-0.197	2.585	-0.187	-0.010	-0.089
56	3.656	-0.007	-0.007	0.014	0.029	3.654	-0.105	3.640	-0.082	-0.006	-0.102
57	1.927	-0.004	-0.004	-0.005	0.016	1.362	-1.363	1.355	-1.350	-0.013	-0.092
58	1.487	-0.003	-0.003	-0.001	0.016	0.292	-1.458	0.287	-1.445	-0.015	-0.092
59	0.452	-0.001	-0.001	0.000	0.002	0.211	-0.400	0.209	-0.399	-0.018	-0.080
60	1.322	-0.002	-0.002	0.000	0.004	1.286	-0.308	1.281	-0.306	-0.015	-0.081
61	10.658	-0.020	-0.020	0.012	0.266	10.303	-2.727	10.263	-2.481	0.020	-0.325
62	9.804	-0.018	-0.018	-0.004	0.231	9.385	-2.834	9.348	-2.621	0.017	-0.292
63	9.561	-0.018	-0.018	0.035	0.206	9.380	-1.853	9.344	-1.664	0.016	-0.268
64	10.449	-0.020	-0.020	0.055	0.244	10.301	-1.752	10.262	-1.527	0.019	-0.304
65	8.753	-0.016	-0.016	-0.020	0.192	8.236	-2.963	8.203	-2.787	0.013	-0.255
66	7.896	-0.015	-0.015	-0.030	0.165	7.275	-3.069	7.246	-2.918	0.009	-0.230
67	7.543	-0.014	-0.014	0.000	0.135	7.252	-2.073	7.224	-1.952	0.008	-0.200
68	8.454	-0.016	-0.016	0.014	0.165	8.221	-1.972	8.189	-1.823	0.012	-0.228
69	6.864	-0.013	-0.013	-0.037	0.138	6.073	-3.198	6.047	-3.073	0.006	-0.204
70	6.052	-0.011	-0.011	-0.039	0.120	5.071	-3.303	5.048	-3.194	0.003	-0.188
71	5.530	-0.010	-0.010	-0.018	0.084	5.032	-2.294	5.011	-2.220	0.001	-0.153
72	6.426	-0.012	-0.012	-0.012	0.104	6.041	-2.192	6.017	-2.099	0.004	-0.172
73	5.138	-0.010	-0.010	-0.036	0.104	3.828	-3.428	3.809	-3.333	-0.001	-0.174
74	4.505	-0.008	-0.008	-0.029	0.097	2.796	-3.532	2.779	-3.444	-0.003	-0.167
75	3.717	-0.007	-0.007	-0.019	0.056	2.737	-2.515	2.723	-2.466	-0.006	-0.128
76	4.483	-0.008	-0.008	-0.021	0.065	3.777	-2.414	3.760	-2.357	-0.003	-0.136
77	3.958	-0.007	-0.007	-0.016	0.094	1.520	-3.655	1.505	-3.568	-0.005	-0.166
78	3.786	-0.007	-0.007	-0.001	0.098	0.467	-3.757	0.453	-3.666	-0.006	-0.170
79	2.760	-0.005	-0.005	-0.001	0.053	0.387	-2.733	0.377	-2.685	-0.010	-0.127
80	3.006	-0.006	-0.006	-0.012	0.051	1.448	-2.634	1.437	-2.588	-0.009	-0.125
81	11.360	-0.021	-0.021	-0.078	0.355	10.285	-4.824	10.243	-4.490	0.022	-0.413
82	10.605	-0.020	-0.020	-0.086	0.326	9.381	-4.947	9.341	-4.640	0.020	-0.386
83	10.205	-0.019	-0.019	-0.050	0.276	9.385	-4.008	9.347	-3.750	0.018	-0.337
84	11.007	-0.021	-0.021	-0.039	0.308	10.296	-3.893	10.255	-3.605	0.021	-0.367
85	9.694	-0.018	-0.018	-0.091	0.295	8.249	-5.092	8.213	-4.814	0.016	-0.357
86	8.974	-0.017	-0.017	-0.092	0.275	7.306	-5.212	7.273	-4.954	0.013	-0.337
87	8.449	-0.016	-0.016	-0.065	0.218	7.296	-4.260	7.264	-4.057	0.012	-0.282
88	9.231	-0.017	-0.017	-0.060	0.242	8.247	-4.146	8.213	-3.921	0.014	-0.304
89	8.135	-0.015	-0.015	-0.088	0.254	6.126	-5.353	6.096	-5.114	0.010	-0.318
90	7.507	-0.014	-0.014	-0.080	0.242	5.143	-5.468	5.115	-5.240	0.008	-0.307
91	6.817	-0.013	-0.013	-0.062	0.180	5.114	-4.507	5.089	-4.340	0.005	-0.246
92	7.521	-0.014	-0.014	-0.065	0.194	6.103	-4.395	6.075	-4.214	0.008	-0.260
93	6.842	-0.013	-0.013	-0.066	0.233	3.923	-5.606	3.898	-5.386	0.005	-0.299
94	6.416	-0.012	-0.012	-0.050	0.231	2.912	-5.717	2.888	-5.498	0.004	-0.298
95	5.542	-0.010	-0.010	-0.041	0.163	2.861	-4.747	2.840	-4.594	0.001	-0.232
96	6.049	-0.011	-0.011	-0.053	0.168	3.882	-4.639	3.859	-4.482	0.003	-0.236
97	6.077	-0.011	-0.011	-0.025	0.234	1.664	-5.845	1.641	-5.622	0.003	-0.302
98	5.983	=0.011	=0.011	0.000	0.243	0.634	=5.950	0.612	=5.718	0.002	=0.311
99	5.008	-0.009	-0.009	-0.001	0.171	0.560	-4.977	0.541	-4.815	-0.001	-0.241
100	5.129	-0.010	-0.010	-0.021	0.164	1.600	-4.873	1.581	-4.718	-0.001	-0.234

Parameter Kalibrasi Foto Kanan

Intrinsic Matrix:

1488.4 0 990.971
 0 1500.2 635.582
 0 0 1

$x_0 = 0.286$ $y_0 = 0.145$
 $k1 = -0.0808$ $k1^3 = -0.00053$
 $k2 = -0.1062$ $k2^5 = -1.4E-05$
 $p1 = -0.0013$
 $p2 = -0.0019$
 $k3 = 0.15693$ $k3^7 = 2.34E-06$

No. Titik	Jarak Radial	Radial Distorsi		Tangential Distorsi		X-X ₀	Y-Y ₀	X terkoreksi	Y terkoreksi	Validasi x	Validasi y
		x	y	x	y						
1	4.480	-0.002	-0.002	-0.061	-0.137	1.204	4.315	1.140	4.175	0.350	0.285
2	4.229	-0.002	-0.002	-0.033	-0.116	0.138	4.227	0.102	4.108	0.322	0.264
3	5.315	-0.003	-0.003	-0.047	-0.178	0.035	5.315	-0.015	5.134	0.336	0.326
4	5.510	-0.003	-0.003	-0.079	-0.202	1.108	5.398	1.026	5.192	0.368	0.351
5	4.281	-0.002	-0.002	-0.013	-0.097	-1.181	4.115	-1.196	4.016	0.301	0.244
6	4.620	-0.002	-0.002	-0.007	-0.086	-2.276	4.021	-2.285	3.932	0.295	0.234
7	5.648	-0.003	-0.003	-0.012	-0.140	-2.390	5.118	-2.405	4.975	0.301	0.288
8	5.367	-0.003	-0.003	-0.021	-0.154	-1.291	5.210	-1.315	5.053	0.310	0.302
9	5.322	-0.003	-0.003	-0.014	-0.081	-3.620	3.902	-3.637	3.818	0.303	0.229
10	6.064	-0.003	-0.003	-0.032	-0.082	-4.726	3.800	-4.761	3.715	0.321	0.230
11	6.903	-0.004	-0.004	-0.028	-0.127	-4.853	4.909	-4.885	4.778	0.318	0.276
12	6.251	-0.003	-0.003	-0.014	-0.130	-3.742	5.008	-3.760	4.875	0.304	0.278
13	7.099	-0.004	-0.004	-0.068	-0.090	-6.077	3.669	-6.149	3.574	0.358	0.240
14	8.018	-0.004	-0.004	-0.110	-0.103	-7.187	3.554	-7.301	3.446	0.400	0.253
15	8.684	-0.005	-0.005	-0.098	-0.140	-7.325	4.665	-7.428	4.520	0.389	0.290
16	7.837	-0.004	-0.004	-0.060	-0.131	-6.210	4.780	-6.274	4.645	0.350	0.280
17	9.193	-0.005	-0.005	-0.175	-0.127	-8.535	3.415	-8.715	3.283	0.466	0.277
18	10.178	-0.005	-0.005	-0.240	-0.152	-9.630	3.295	-9.876	3.137	0.532	0.303
19	10.725	-0.006	-0.006	-0.220	-0.179	-9.779	4.404	-10.005	4.219	0.512	0.330
20	9.786	-0.005	-0.005	-0.159	-0.158	-8.677	4.525	-8.841	4.361	0.450	0.309
21	2.396	-0.001	-0.001	-0.031	-0.040	1.406	1.940	1.374	1.898	0.318	0.187
22	1.872	-0.001	-0.001	-0.012	-0.027	0.354	1.839	0.341	1.811	0.299	0.173
23	2.919	-0.002	-0.002	-0.020	-0.059	0.256	2.908	0.234	2.847	0.308	0.206
24	3.279	-0.002	-0.002	-0.043	-0.076	1.315	3.004	1.270	2.926	0.331	0.223
25	1.958	-0.001	-0.001	-0.002	-0.018	-0.946	1.715	-0.949	1.696	0.289	0.164
26	2.585	-0.001	-0.001	-0.004	-0.016	-2.022	1.610	-2.028	1.593	0.292	0.162
27	3.438	-0.002	-0.002	-0.004	-0.039	-2.138	2.692	-2.144	2.651	0.292	0.186
28	2.985	-0.002	-0.002	-0.005	-0.045	-1.053	2.793	-1.060	2.746	0.293	0.192
29	3.661	-0.002	-0.002	-0.022	-0.020	-3.348	1.482	-3.372	1.460	0.310	0.167
30	4.648	-0.003	-0.003	-0.048	-0.030	-4.441	1.371	-4.491	1.338	0.336	0.178
31	5.193	-0.003	-0.003	-0.039	-0.045	-4.574	2.459	-4.616	2.411	0.328	0.193
32	4.318	-0.002	-0.002	-0.017	-0.039	-3.473	2.566	-3.492	2.524	0.305	0.187
33	5.906	-0.003	-0.003	-0.094	-0.049	-5.775	1.237	-5.872	1.184	0.383	0.198
34	6.964	-0.004	-0.004	-0.143	-0.071	-6.873	1.120	-7.020	1.045	0.433	0.220
35	7.359	-0.004	-0.004	-0.127	-0.078	-7.019	2.212	-7.150	2.130	0.417	0.227
36	6.357	-0.003	-0.003	-0.081	-0.060	-5.916	2.327	-6.000	2.264	0.370	0.208
37	8.263	-0.004	-0.004	-0.218	-0.105	-8.204	0.982	-8.426	0.872	0.508	0.255
38	9.327	-0.005	-0.005	-0.290	-0.138	-9.287	0.865	-9.582	0.721	0.581	0.289
39	9.647	-0.005	-0.005	-0.267	-0.137	-9.447	1.954	-9.719	1.812	0.558	0.287
40	8.610	-0.005	-0.005	-0.197	-0.107	-8.357	2.073	-8.559	1.961	0.488	0.257
41	1.638	-0.001	-0.001	-0.013	-0.006	1.595	-0.374	1.581	-0.381	0.300	0.152
42	0.744	0.000	0.000	-0.002	-0.001	0.562	-0.488	0.560	-0.490	0.288	0.147
43	0.723	0.000	0.000	-0.005	-0.005	0.468	0.551	0.463	0.545	0.291	0.151
44	1.648	-0.001	-0.001	-0.019	-0.014	1.510	0.660	1.490	0.645	0.306	0.160
45	0.949	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.715	-0.624	-0.717	-0.627	0.288	0.148
46	1.922	-0.001	-0.001	-0.013	-0.009	-1.774	-0.740	-1.788	-0.750	0.300	0.155
47	1.912	-0.001	-0.001	-0.008	-0.004	-1.887	0.310	-1.896	0.304	0.295	0.151
48	0.922	0.000	0.000	0.000	-0.002	-0.821	0.420	-0.822	0.418	0.287	0.147
49	3.200	-0.002	-0.002	-0.040	-0.024	-3.077	-0.877	-3.119	-0.903	0.328	0.171
50	4.269	-0.002	-0.002	-0.073	-0.042	-4.151	-0.994	-4.227	-1.038	0.362	0.189
51	4.286	-0.002	-0.002	-0.061	-0.029	-4.285	0.063	-4.348	0.031	0.349	0.177
52	3.207	-0.002	-0.002	-0.030	-0.015	-3.202	0.177	-3.234	0.160	0.318	0.162
53	5.582	-0.003	-0.003	-0.128	-0.071	-5.466	-1.132	-5.597	-1.206	0.417	0.219
54	6.662	-0.004	-0.004	-0.185	-0.101	-6.544	-1.249	-6.732	-1.354	0.474	0.250

55	6.699	-0.004	-0.004	-0.165	-0.080	-6.696	-0.191	-6.865	-0.275	0.455	0.229
56	5.610	-0.003	-0.003	-0.112	-0.054	-5.609	-0.074	-5.724	-0.131	0.401	0.202
57	7.977	-0.004	-0.004	-0.267	-0.145	-7.855	-1.386	-8.127	-1.535	0.558	0.294
58	9.048	-0.005	-0.005	-0.346	-0.186	-8.923	-1.500	-9.274	-1.691	0.637	0.336
59	9.101	-0.005	-0.005	-0.320	-0.157	-9.090	-0.445	-9.415	-0.608	0.611	0.308
60	8.023	-0.004	-0.004	-0.244	-0.119	-8.016	-0.328	-8.265	-0.452	0.535	0.269
61	3.161	-0.002	-0.002	-0.005	-0.030	1.777	-2.614	1.770	-2.646	0.293	0.177
62	2.844	-0.002	-0.002	-0.003	-0.034	0.763	-2.739	0.759	-2.775	0.290	0.181
63	1.860	-0.001	-0.001	-0.001	-0.012	0.671	-1.734	0.669	-1.748	0.288	0.159
64	2.340	-0.001	-0.001	-0.007	-0.012	1.695	-1.613	1.686	-1.627	0.295	0.159
65	2.929	-0.002	-0.002	-0.012	-0.045	-0.490	-2.887	-0.504	-2.934	0.300	0.192
66	3.376	-0.002	-0.002	-0.031	-0.060	-1.528	-3.010	-1.561	-3.072	0.319	0.207
67	2.584	-0.001	-0.001	-0.022	-0.030	-1.640	-1.996	-1.663	-2.028	0.309	0.177
68	1.969	-0.001	-0.001	-0.006	-0.019	-0.593	-1.877	-0.601	-1.897	0.294	0.165
69	4.223	-0.002	-0.002	-0.067	-0.085	-2.807	-3.155	-2.876	-3.243	0.355	0.233
70	5.063	-0.003	-0.003	-0.107	-0.111	-3.860	-3.276	-3.970	-3.390	0.396	0.259
71	4.586	-0.002	-0.002	-0.091	-0.073	-3.993	-2.256	-4.087	-2.332	0.380	0.221
72	3.628	-0.002	-0.002	-0.054	-0.051	-2.931	-2.137	-2.987	-2.190	0.342	0.198
73	6.178	-0.003	-0.003	-0.170	-0.150	-5.148	-3.415	-5.322	-3.569	0.460	0.299
74	7.142	-0.004	-0.004	-0.233	-0.188	-6.206	-3.534	-6.443	-3.726	0.523	0.337
75	6.840	-0.004	-0.004	-0.210	-0.142	-6.361	-2.514	-6.575	-2.660	0.500	0.291
76	5.811	-0.003	-0.003	-0.150	-0.108	-5.294	-2.396	-5.448	-2.507	0.440	0.256
77	8.341	-0.004	-0.004	-0.322	-0.240	-7.491	-3.669	-7.818	-3.914	0.613	0.390
78	9.341	-0.005	-0.005	-0.406	-0.288	-8.541	-3.781	-8.952	-4.075	0.697	0.439
79	9.147	-0.005	-0.005	-0.378	-0.236	-8.719	-2.764	-9.102	-3.005	0.669	0.386
80	8.106	-0.004	-0.004	-0.297	-0.191	-7.660	-2.650	-7.961	-2.845	0.587	0.340
81	5.136	-0.003	-0.003	-0.008	-0.105	1.946	-4.753	1.935	-4.861	0.297	0.253
82	4.980	-0.003	-0.003	-0.013	-0.118	0.950	-4.888	0.934	-5.009	0.302	0.266
83	4.027	-0.002	-0.002	-0.008	-0.074	0.865	-3.933	0.855	-4.010	0.296	0.222
84	4.237	-0.002	-0.002	-0.006	-0.066	1.870	-3.802	1.862	-3.870	0.294	0.213
85	5.054	-0.003	-0.003	-0.032	-0.139	-0.275	-5.046	-0.310	-5.188	0.321	0.287
86	5.335	-0.003	-0.003	-0.057	-0.162	-1.290	-5.176	-1.350	-5.341	0.346	0.310
87	4.439	-0.002	-0.002	-0.044	-0.110	-1.398	-4.213	-1.445	-4.326	0.333	0.258
88	4.102	-0.002	-0.002	-0.022	-0.091	-0.372	-4.085	-0.396	-4.178	0.310	0.238
89	5.901	-0.003	-0.003	-0.101	-0.197	-2.540	-5.326	-2.644	-5.526	0.390	0.345
90	6.515	-0.004	-0.004	-0.148	-0.230	-3.568	-5.451	-3.719	-5.685	0.437	0.379
91	5.815	-0.003	-0.003	-0.129	-0.171	-3.702	-4.484	-3.834	-4.659	0.418	0.320
92	5.109	-0.003	-0.003	-0.085	-0.141	-2.661	-4.361	-2.749	-4.505	0.374	0.289
93	7.390	-0.004	-0.004	-0.218	-0.278	-4.830	-5.593	-5.052	-5.875	0.508	0.427
94	8.186	-0.004	-0.004	-0.285	-0.322	-5.864	-5.711	-6.154	-6.038	0.576	0.472
95	7.664	-0.004	-0.004	-0.261	-0.256	-6.020	-4.742	-6.286	-5.003	0.552	0.406
96	6.794	-0.004	-0.004	-0.196	-0.215	-4.976	-4.625	-5.176	-4.844	0.486	0.364
97	9.211	-0.005	-0.005	-0.380	-0.382	-7.121	-5.842	-7.506	-6.229	0.671	0.532
98	10.090	-0.005	-0.005	-0.468	-0.437	-8.147	-5.952	-8.621	-6.394	0.760	0.587
99	9.706	-0.005	-0.005	-0.440	-0.365	-8.327	-4.987	-8.772	-5.357	0.731	0.515
100	8.771	-0.005	-0.005	-0.354	-0.313	-7.291	-4.876	-7.650	-5.194	0.645	0.463