

PEMBANGUNGAN SISTEM MULTI-KAMERA PADA SISTEM TANGKAP GERAK SEDERHANA

Laporan Tugas Akhir - Capstone

Disusun sebagai syarat kelulusan tingkat sarjana

Oleh

Moses Ananta

NIM : 13519076



**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
SEKOLAH TEKNIK ELEKTRO DAN INFORMATIKA
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG**

Juni 2023

**PEMBANGUNAN SISTEM MULTI-KAMERA PADA SISTEM
TANGKAP GERAK SEDERHANA**

Laporan Tugas Akhir

Oleh

Moses Ananta

NIM : 13519076

Program Studi Teknik Informatika

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika

Institut Teknologi Bandung

Telah disetujui dan disahkan sebagai Laporan Tugas Akhir
di Bandung, pada tanggal 23 Juni 2023

Pembimbing,

Nugraha Priya Utama, S.T, M.A., Ph.D.

NIP 118110074

LEMBAR IDENTITAS TUGAS AKHIR CAPSTONE

Judul Proyek TA : Pembangunan Sistem Tangkap Gerak Multi-Kamera dengan Penanda sebagai Ground Truth Penilaian Akurasi Sistem Tangkap Gerak Monokuler Tanpa Penanda

Anggota Tim dan Pembagian Peran:

No.	NIM	Nama	Peran
1	13519022	Jose Galbraith Hasintongan	Membuat Mocap berbasis AI untuk gerak sederhana
2	13519076	Moses Ananta	Pembangunan sistem multi-kamera, kalibrasi dan perbaikan distorsi kamera, dan konfigurasi serta estimasi kedalaman kamera
3	13519093	Wisnu Aditya Samiadji	Integrasi Sistem Tangkap Gerak dengan Avatar Digital
4	13519149	Syihabuddin Yahya Muhammad	object detection dan object tracking

Bandung, 23 Juni 2023
Mengetahui,
Pembimbing I,

Nugraha Priya Utama, S.T, M.A., Ph.D.
NIP. 118110074

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Pengerjaan dan penulisan Laporan Tugas Akhir ini dilakukan tanpa menggunakan bantuan yang tidak dibenarkan.
2. Segala bentuk kutipan dan acuan terhadap tulisan orang lain yang digunakan di dalam penyusunan laporan tugas akhir ini telah dituliskan dengan baik dan benar.
3. Laporan Tugas Akhir ini belum pernah diajukan pada program pendidikan di perguruan tinggi mana pun.

Jika terbukti melanggar hal-hal di atas, saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan Peraturan Akademik dan Kemahasiswaan Institut Teknologi Bandung bagian Penegakan Norma Akademik dan Kemahasiswaan khususnya Pasal 2.1 dan Pasal 2.2.

Bandung, 23 Juni 2023



Moses Ananta

NIM 13519076

ABSTRAK

PEMBANGUNAN SISTEM MULTI-KAMERA PADA SISTEM TANGKAP GERAK SEDERHANA

Oleh

MOSES ANANTA

NIM : 13519076

Dengan semakin berkembangnya teknologi berbasis kecerdasan buatan (AI), biaya produksi dan kompleksitas dalam membuat sebuah sistem tangkap gerak menjadi lebih murah, sederhana, dan terjangkau bagi industri-industri pembuat konten kecil. Namun, dikarenakan proses estimasi gerakan dari sistem tangkap gerak tersebut tidak berdasarkan penanda, seperti pada sistem tangkap gerak konvensional, dan hanya memperkirakan titik-titik penting tubuh aktor berdasarkan bagian tubuh yang terlihat, akurasi dari sistem tangkap gerak berbasis AI dapat menjadi sebuah permasalahan untuk industri yang menginginkan sistem tangkap geraknya menghasilkan hasil yang akurat tanpa harus mengeluarkan biaya yang besar seperti yang terdapat pada sistem tangkap gerak konvensional.

Berdasarkan permasalahan tersebut, akan dibuat sebuah versi murah dan sederhana dari sistem tangkap gerak konvensional yang memanfaatkan penanda berbasis warna dan beberapa kamera RGB untuk menangkap Gerakan aktor. Fokus dari tugas akhir ini adalah mengonfigurasi sistem multi-kamera yang akan digunakan untuk dilakukan kalibrasi serta mengestimasi koordinat 3 dimensi dari penanda-penanda yang terdeteksi menggunakan teknik triangulasi yang kemudian dilakukan optimasi dengan metode *bundle adjustment*.

Kata kunci: sistem tangkap gerak, kalibrasi multi-kamera, triangulasi, *bundle adjustment*.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberkati saya dalam segala proses pembuatan hingga penyelesaian tugas akhir ini dengan judul “Pembangunan Sistem Multi-Kamera Pada Sistem Tangkap Gerak Sederhana”. Laporan tugas akhir ini juga tidak akan terselesaikan jika bukan dari bantuan, bimbingan, doa, dan dukungan, dari pihak-pihak berikut ini:

1. Bapak Nugraha Priya Utama, S.T, M.A., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah membimbing penulis selama seluruh proses pembuatan tugas akhir ini,
2. Orang tua saya,
3. Teman-teman sekelompok tugas akhir ini,
4. Teman-teman lainnya.

Bandung, 23 Juni 2022

Penulis

DAFTAR ISI

BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Rumusan Masalah.....	2
I.3 Tujuan	3
I.4 Batasan Masalah	3
I.5 Metodologi.....	4
I.6 Sistematika Pembahasan.....	5
BAB II STUDI LITERATUR	6
II.1 Pembentukan Gambar Pada Kamera	6
II.2 Distorsi Lensa	8
II.3 Kalibrasi Kamera Tunggal.....	11
II.4 Kalibrasi Kamera Stereo.....	12
II.5 Triangulasi	12
BAB III PENGEMBANGAN SISTEM MULTI-KAMERA.....	13
III.1 Analisis Persoalan	13
III.2 Analisis Solusi	14
III.3 Rancangan Solusi	15
III.3.1 Kalibrasi Kamera Monokuler	15
III.3.2 Kalibrasi Kamera Stereo.....	15
III.3.3 Estimasi Koordinat 3D Titik-Titik Penting Aktor Dengan Triangulasi.....	16
BAB IV EVALUASI SISTEM	17

IV.1	Lingkungan Uji.....	17
IV.2	Hasil Koordinat 3D Titik-Titik Penting Aktor Hasil Triangulasi	18
IV.3	Evaluasi dan Analisis	20
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	21

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Contoh Judul Lampiran.....	23
A.1 Contoh Judul Anak Lampiran.....	23

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1. Model Kamera Lubang Jarum (Hartley & Zisserman, 2004).....	6
Gambar II.2. Dampak Bukaan Kamera Terhadap Kejelasan Gambar (Hata & Savarese)	9
Gambar II.3. Penggunaan Lensa Untuk Memperjelas Gambar (Hata & Savarese)	9
Gambar II.4. Jenis-Jenis Distorsi Kamera (Hata & Savarese).....	10
Gambar II.5. Distorsi Tangensial (Kaehler & Bradski, 2017)	11

DAFTAR TABEL

Tabel IV.1. Parameter Intrinsik dan Distorsi Lensa Hasil Kalibrasi Kamera Monokuler	17
Tabel IV.2. Tabel Rotasi dan Translasi Kamera	18
Tabel IV.3. Tabel Rata-rata Kesalahan Proyeksi Balik	19

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Sistem tangkap gerak merupakan sistem yang menangkap gerakan dari aktor gerakan dan menerjemahkan gerakan yang ditangkap tersebut ke dalam suatu karakter pada dunia digital untuk dapat dilihat visualisasinya. Sistem ini sangat berguna untuk industri animasi baik untuk bidang hiburan atau film maupun untuk bidang gim 3 dimensi karena dapat meringankan kerja dari para pembuat animasi sehingga mereka tidak perlu menganimasikan gerakan setiap poin penting yang terdapat pada karakter digital secara manual tetapi teknisi dapat merekam gerakan aktor dan memproyeksikan gerakan tersebut kepada karakter digital kemudian pembuat animasi dapat memperbaiki beberapa poin penting dalam animasi hasil proyeksi yang menurutnya janggal.

Untuk menghemat biaya produksi dan implementasi sistem tangkap gerak, khususnya untuk perusahaan kecil, sistem tangkap gerak yang digunakan adalah yang berbasis AI (*Artificial Intelligence*) untuk mengestimasi keberadaan poin-poin penting pada tubuh aktor kemudian merekam pergerakan berdasarkan hasil estimasi tersebut. Dengan sistem ini, biaya produksi dapat dikurangi secara signifikan karena dihilangkan komponen penanda dan peralatan lainnya yang umumnya digunakan oleh sistem tangkap gerak profesional digantikan dengan kamera yang dapat berupa kamera amatir atau bahkan kamera biasa yang terdapat pada ponsel pintar.

Kendala utama yang muncul dari penggunaan sistem tangkap gerak berbasis AI ini adalah proses penangkapan poin-poin penting pada tubuh aktor hanyalah merupakan estimasi dikarenakan sistem tidak mengetahui letak pasti dari poin-poin penting tersebut dan hanya mengira-ngira di mana poin-poin tersebut mungkin

berada. Masalah ini adalah masalah yang penting karena sistem ini tidak dapat dipastikan apakah benar-benar menangkap gerakan nyata secara akurat.

Untuk mengetahui akurasi dari sistem tangkap gerak berbasis AI tersebut, maka diperlukan sistem tangkap gerak pembanding yang lebih akurat untuk membandingkan perbedaan gerakan yang dihasilkan kedua sistem dan menilai akurasi estimasi gerakan dari sistem tangkap gerak berbasis AI terhadap gerakan dari sistem tangkap gerak ini. Salah satu sistem yang menghasilkan tangkap gerak yang akurat adalah sistem tangkap gerak berbasis penanda yang merupakan standar bagi industri perfilman. Namun sistem tangkap gerak tersebut memerlukan peralatan-peralatan canggih seperti baju penanda, peralatan multi-kamera yang harganya umumnya tidak terjangkau oleh industri-industri kecil. Dibutuhkan suatu sistem tangkap gerak berbasis penanda sederhana yang biaya produksinya lebih terjangkau dibandingkan sistem tangkap gerak berbasis penanda profesional, namun memiliki akurasi yang tidak jauh berbeda dari sistem profesional sehingga dapat dijadikan sebagai pembanding untuk menilai akurasi sistem tangkap gerak berbasis AI.

I.2 Rumusan Masalah

Saat ini, sistem tangkap gerak berbasis AI hanya dapat mengestimasi posisi poin-poin penting dari tubuh aktor berdasarkan masukan gambar atau video yang tidak bisa dijamin akurasinya. Untuk mengetahui seberapa akurat sistem tangkap gerak berbasis AI tersebut, diperlukan sistem tangkap gerak pembanding yang lebih akurat daripada sistem tangkap gerak AI seperti sistem tangkap gerak berbasis penanda yang banyak digunakan di industri perfilman. Namun meskipun lebih akurat, sistem tersebut memiliki biaya produksi yang mahal dan peralatan Multi-kamera yang canggih yang hanya dapat dijangkau oleh industri-industri profesional. Dari permasalahan tersebut, rumusan masalah yang akan diselesaikan adalah:

“Pembangunan sistem Multi-kamera untuk sistem tangkap gerak sederhana berbasis penanda sebagai pembanding untuk menilai akurasi dari estimasi gerakan poin-poin pada tubuh aktor pada sistem tangkap gerak berbasis AI.”

Adapun sistem yang dihasilkan dapat memproyeksikan gerakan yang ditangkapnya ke dalam suatu karakter digital dan dapat menghitung perbedaan gerakan dari karakter digital yang dibuat oleh sistem ini dengan gerakan dari karakter digital yang diperoleh dari sistem tangkap gerak berbasis AI.

Pada tugas akhir ini, permasalahan yang akan diselesaikan adalah:

“Pembangunan sistem Multi-kamera untuk sistem tangkap gerak sederhana.”

I.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disampaikan sebelumnya, tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Membuat sebuah sistem tangkap gerak sederhana berbasis penanda yang dapat memproyeksikan hasil tangkap gerakan ke dalam suatu karakter digital,
2. Membandingkan perbedaan gerakan karakter digital hasil proyeksi sistem tangkap gerak sederhana berbasis penanda dengan hasil proyeksi sistem tangkap gerak berbasis AI.

I.4 Batasan Masalah

Agar membatasi lingkup dari permasalahan yang telah disampaikan, didefinisikan beberapa batasan masalah sebagai berikut,

1. Jumlah kamera yang digunakan untuk menangkap gerakan aktor dapat berjumlah lebih dari satu untuk meningkatkan akurasi dari sistem,
2. Kamera-kamera yang digunakan untuk menangkap gerakan aktor tidak mengalami perpindahan posisi atau rotasi,
3. Pembangunan sistem tangkap gerak tidak menggunakan teknologi berbasis model AI untuk setiap prosesnya yaitu dimulai dari akuisisi gerakan hingga proyeksi gerakan ke karakter digital,

4. Pembangunan sistem tangkap gerak menggunakan peralatan bantuan non-digital seperti penanda untuk menandakan poin-poin penting pada tubuh aktor yang dapat diperoleh dengan mudah oleh pengguna rumah tangga,
5. Fokus sistem hanyalah penangkapan gerakan aktor hingga proyeksinya ke dalam suatu karakter digital. Perolehan atau pembuatan karakter digital tersebut berada di luar lingkup tugas akhir
6. Sistem tangkap gerak hanya menangkap gerakan tubuh tanpa menangkap secara detail gerakan pada tangan dan wajah.

I.5 Metodologi

Metodologi adalah sebagai berikut,

1. Identifikasi Masalah

Metodologi pengerjaan tugas akhir dimulai dari pertama-tama mengidentifikasi permasalahan serta kebutuhan untuk menjawab permasalahan tersebut. Bagian ini meliputi perumusan masalah, tujuan penyelesaian masalah, serta pendefinisian lingkup dan batasan permasalahan.

2. Perumusan Solusi

Pada bagian ini, akan dikaji kebutuhan, teknik, serta algoritma yang akan dipakai untuk membangun sebuah sistem sebagai jawaban untuk menjawab kebutuhan dan permasalahan yang sudah diidentifikasi sebelumnya dalam rupa studi literatur.

3. Pendefinisian Sistem

Pada bagian ini, sistem, sebagai bentuk solusi dari permasalahan yang telah dirumuskan sebelumnya, didefinisikan dan dirangkai menggunakan teknik-teknik dan algoritma yang telah dikaji sebelumnya menghasilkan *proof-of-concept* yang dituliskan pada rencana penyelesaian masalah.

I.6 Sistematika Pembahasan

Laporan tugas akhir ini dibagi ke dalam lima bab. Pada bab pertama akan dijelaskan mengenai dasar dan tujuan dilakukannya tugas akhir ini. Penjelasan tersebut akan dibagi menjadi beberapa bagian yaitu latar belakang, rumusan masalah, tujuan tugas akhir, batasan masalah, dan metodologi yang digunakan.

Pada bab kedua akan dijelaskan mengenai dasar teori dan studi literatur terkait yang berhubungan dan yang digunakan pada tugas akhir ini.

Pada bab ketiga akan dijelaskan lebih detail mengenai permasalahan yang telah disampaikan pada bagian latar belakang serta memberikan alternatif solusi serta rancangannya untuk menjawab permasalahan. tersebut

Pada bab keempat akan dijelaskan mengenai hasil implementasi rancangan solusi yang telah dibuat dan evaluasi serta analisis terhadap hasil implementasi tersebut.

Pada bab kelima akan diberikan kesimpulan serta saran-saran dari proses-proses yang telah dijalani pada tugas akhir ini.

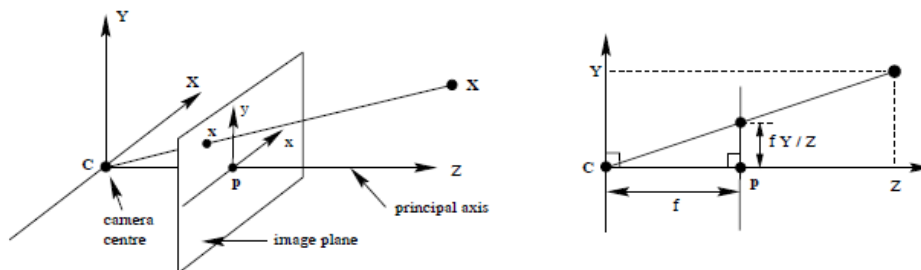
BAB II

STUDI LITERATUR

II.1 Pembentukan Gambar Pada Kamera

Pembentukan gambar pada kamera adalah sebuah proses pemetaan titik-titik pada ruang dunia 3 dimensi ke dalam bidang gambar 2 dimensi (...). Untuk melakukan transformasi pada proses pemetaan tersebut, perlu didefinisikan terlebih dahulu model kamera yang mendasari transformasi yang terjadi pada proses pemetaan. Salah satu jenis model kamera yang umum digunakan sebagai acuan dan titik awal untuk mendefinisikan model matematis yang digunakan pada proses transformasi adalah kamera lubang jarum.

Kamera lubang jarum adalah sebuah model kamera yang paling sederhana dengan memanfaatkan sebuah lubang kecil sebagai titik masuknya cahaya. Ukuran lubang pada kamera lubang jarum dibuat kecil supaya hanya satu sinar cahaya pada suatu titik pada dunia dapat melewati lubang tersebut dan jatuh pada bidang gambar sehingga gambar yang terbentuk pada bidang gambar dapat terlihat lebih jelas.



Gambar II.1. Model Kamera Lubang Jarum (Hartley & Zisserman, 2004)

Pada model kamera lubang jarum, titik pada koordinat dunia $\mathbf{X} = (X, Y, Z)$ dipetakan ke dalam titik pada bidang gambar di mana lokasi titik pada bidang gambar ditentukan oleh perpotongan antara garis yang terdapat antara titik \mathbf{X}

dengan titik tengah proyeksi kamera **C** dengan bidang gambar seperti yang terdapat pada Gambar II.1.. Menggunakan perbandingan segitiga serupa, titik (X, Y, Z) pada koordinat dunia dipetakan ke titik $\left(\frac{fX}{Z}, \frac{fY}{Z}, f\right)$ pada bidang gambar. Dengan membuat koordinat terakhir gambar, proses pemetaan titik-titik pada ruang dunia 3 dimensi ke dalam bidang gambar 2 dimensi dapat digambarkan dengan persamaan berikut,

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \mapsto \begin{bmatrix} \frac{fX}{Z} \\ \frac{fY}{Z} \\ f \end{bmatrix} \quad (\text{II. 1})$$

Atau dengan persamaan berikut jika transformasi dilakukan menggunakan sistem koordinat homogen,

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \mapsto \begin{bmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & & 0 \\ & f & 0 \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 2})$$

Pada persamaan II.1, diasumsikan bahwa titik asal koordinat bidang gambar terletak pada titik utamanya. Namun pada umumnya, terdapat deviasi antara titik asal koordinat bidang gambar dengan titik utamanya sehingga deviasi tersebut perlu diperhitungkan ke dalam persamaan sehingga membentuk persamaan berikut,

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \mapsto \begin{bmatrix} \frac{fX}{Z} + p_x \\ \frac{fY}{Z} + p_y \\ f \end{bmatrix} \quad (\text{II. 3})$$

Dengan persamaan pada sistem koordinat homogen sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \mapsto \begin{bmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & p_x & 0 \\ & f & p_y \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 4})$$

Adapun pada umumnya ditulis sebuah matriks K yang biasa disebut matriks kalibrasi dengan persamaan seperti berikut,

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 5})$$

Sehingga didapati bentuk rangkap dari persamaan II.4 menjadi seperti berikut,

$$x = K[I|0] X_{cam} \quad (\text{II. 6})$$

Adapun persamaan II.6 mengasumsikan bahwa titik (X, Y, Z) terletak sistem koordinat kamera yang disebut kerangka koordinat kamera (*camera coordinate frame*). Namun, kenyataannya adalah titik tersebut terletak pada sistem koordinat yang berbeda yang dinamakan kerangka koordinat dunia (*world coordinate frame*). Kedua kerangka koordinat ini dapat dihubungkan dengan proses transformasi rotasi dan translasi sebagai berikut,

$$X_{cam} = [R|t] X \quad (\text{II. 6})$$

Dengan X_{cam} adalah titik pada kerangka koordinat kamera, R adalah matriks rotasi berukuran 3×3 , t adalah matriks translasi berukuran 3×1 , dan X yang adalah titik pada kerangka koordinat dunia.

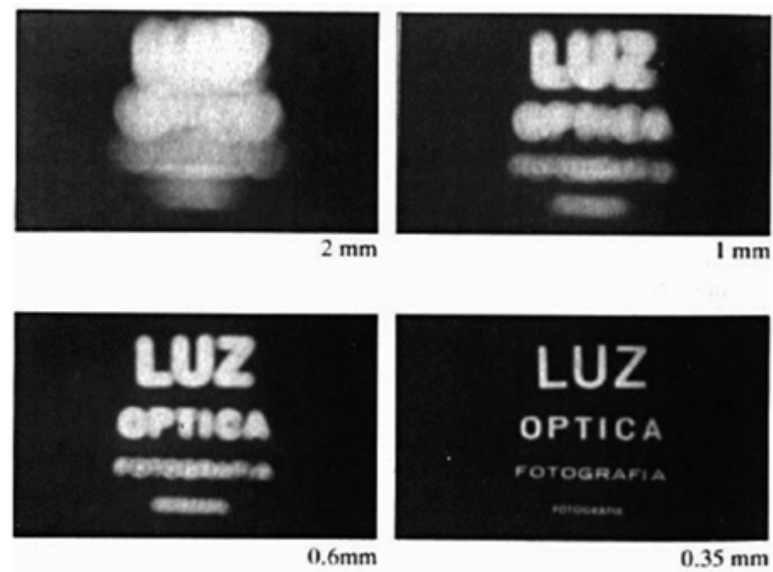
Dengan menggabungkan persamaan II.6 dengan persamaan II.4, terbentuk persamaan berikut,

$$x = K[R|t] X \quad (\text{II. 6})$$

K biasa disebut unsur intrinsik kamera dan R dan t disebut unsur ekstrinsik kamera.

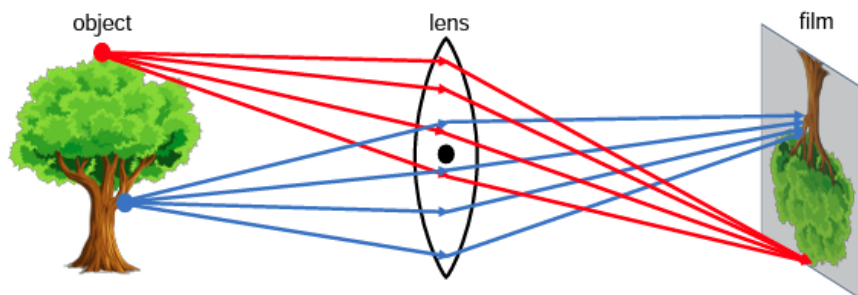
II.2 Distorsi Lensa

Salah satu kelemahan dari kamera lubang jarum adalah untuk mendapatkan gambar yang lebih jelas, lubang kamera (*aperture*) perlu diperkecil sehingga hanya satu sinar cahaya dari satu titik pada dunia dapat terproyeksi pada bidang gambar sehingga gambar terlihat semakin jelas dan fokus. Namun kelemahan dari lubang kamera yang semakin mengecil adalah gambar yang terproyeksi terlihat semakin gelap dikarenakan kurangnya pencahayaan.



Gambar II.2. Dampak Buka-an Kamera Terhadap Kejelasan Gambar (Hata & Savarese)

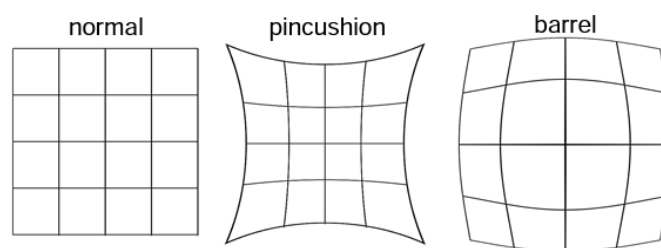
Salah satu upaya untuk mengatasi kendala ini adalah dengan menggunakan lensa yang dapat memfokuskan atau menghamburkan cahaya. Menggunakan lensa ini, sinar-sinar cahaya yang dipancarkan oleh suatu titik pada dunia dapat difokuskan oleh lensa ke suatu titik pada bidang gambar sehingga hasil proyeksi gambar tidak hanya terlihat jelas namun juga lebih cerah dibandingkan jika tidak menggunakan lensa.



Gambar II.3. Penggunaan Lensa Untuk Memperjelas Gambar (Hata & Savarese)

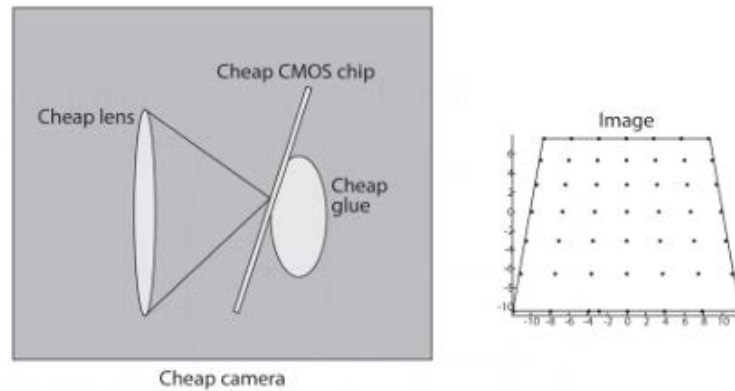
Namun, penggunaan lensa pada kamera ini menimbulkan beberapa masalah baru yaitu salah satunya yang menjadi pokok bahasan pada subbab ini adalah timbulnya distorsi geometrik pada gambar yang dihasilkan. Pada umumnya, lensa-lensa khususnya lensa-lensa sudut lebar (*wide-angle lenses*) menimbulkan distorsi geometrik yang disebut distorsi radial (*radial distortion*) yang cukup signifikan pada gambar hasil yang menyebabkan efek lengkungan pada daerah gambar dekat sudut-sudut gambar.

Terdapat 2 jenis distorsi radial yaitu distorsi *barrel* dan distorsi *pincushion*. Distorsi *barrel* membuat lengkungan-lengkungan di sekitar sudut-sudut gambar mengarah ke luar menjauhi titik tengah gambar dan membuat efek ‘menggembung’ pada gambar. Distorsi *pincushion* membuat lengkungan-lengkungan di sekitar sudut-sudut gambar mengarah ke dalam mendekati titik tengah gambar dan membuat efek ‘menciut’ pada gambar.



Gambar II.4. Jenis-Jenis Distorsi Kamera (Hata & Savarese)

Selain daripada distorsi radial, terdapat pula jenis distorsi lainnya dapat terjadi saat pengambilan gambar yaitu distorsi tangensial yang membuat gambar hasil terlihat miring dikarenakan sumbu x dan sumbu y pada sistem koordinat gambar tidak tegak lurus. Umumnya, distorsi ini disebabkan oleh kecacatan pada saat proses manufaktur kamera yang membuat lensa kamera tidak sejajar dengan bidang gambar sehingga distorsi ini muncul.



Gambar II.5. Distorsi Tangensial (Kaehler & Bradski, 2017)

II.3 Kalibrasi Kamera Tunggal

Pada dasarnya kalibrasi kamera adalah pencarian matriks proyeksi yang mentransformasikan titik-titik pada koordinat dunia ke dalam koordinat gambar. Tujuan utama dari dilakukannya kalibrasi kamera ini adalah jika terdapat sejumlah n titik pada koordinat dunia dan titik proyeksinya pada koordinat gambar, akan dicari unsur intrinsik dan ekstrinsik kamera yang melakukan transformasi proyeksi tersebut.

Salah satu algoritma kalibrasi kamera yang umum digunakan adalah algoritma kalibrasi Zhang (...) yang menggunakan sebuah pola kalibrasi datar yang susunan dan dimensinya diketahui. Proses kalibrasinya adalah sebagai berikut:

1. Sejumlah M gambar pola kalibrasi diambil dari berbagai sudut yang berbeda dengan menggerakkan pola kalibrasi atau menggerakkan kamera.
2. Untuk setiap gambar yang telah diambil, sejumlah N titik pada gambar pola kalibrasi diambil. Titik-titik yang diambil tersebut diasumsikan memiliki korespondensi 1:1 dengan titik-titik 3D pada bidang pola kalibrasi.
3. Untuk setiap titik pada masing-masing gambar, akan dicari homografi H_0, \dots, H_M yang memetakan titik 3D pada bidang pola kalibrasi ke dalam titik 2D yang telah diambil pada gambar.
4. Untuk setiap homografi yang telah didapati, akan diestimasi unsur intrinsik kamera dengan mengabaikan terlebih dahulu unsur distorsi pada kamera.

5. Setelah unsur intrinsik didapati, akan diestimasi unsur ekstrinsik kamera untuk setiap gambar yang diambil.
6. Estimasi distorsi kamera menggunakan teknik kuadrat terkecil linier.
7. Melakukan optimasi non-linier untuk setiap parameter-parameter yang telah diestimasi (unsur intrinsik kamera, unsur ekstrinsik kamera, unsur distorsi kamera).

II.4 Kalibrasi Kamera Stereo

Stereo kalibrasi adalah

II.5 Triangulasi

Triangulasi kalibrasi adalah

BAB III

PENGEMBANGAN SISTEM MULTI-KAMERA

III.1 Analisis Persoalan

Dibalik tren saat ini di mana AI adalah solusi untuk hampir semua masalah, termasuk dalam pengembangan sistem tangkap gerak. Kemajuan dalam teknologi AI membuat sistem tangkap gerak menjadi lebih praktis dan murah, yang mana jika menggunakan sistem konvensional memerlukan bahan, alat, dan teknisi yang menghabiskan biaya yang cukup tinggi yang umumnya tidak terjangkau oleh industri-industri kecil. Teknologi AI memungkinkan tangkap gerak dengan hanya bermodal sebuah kamera sederhana seperti kamera pada ponsel dan seorang aktor untuk ditangkap gerakannya, lalu membiarkan sistem AI untuk mengestimasi gerakan aktor dari hasil gambar atau rekaman yang didapati dari kamera ponsel tersebut. Di sisi lain, sistem tangkap gerak konvensional membutuhkan lebih dari satu kamera untuk menangkap gerakan aktor dalam 3 dimensi dan memerlukan penanda dan perlengkapan khusus untuk menangkap titik penting pada tubuh aktor dengan akurat.

Adapun kendala utama yang terdapat pada sistem tangkap gerak berbasis AI adalah dikarenakan sistem tersebut hanya mendeteksi ... sehingga meskipun didapati hasil yang terlihat bagus, namun segi akurasi dari hasil sistem tersebut dapat dipertanyakan. Berdasarkan (...), sistem tangkap gerak konvensional mampu menghasilkan Gerakan yang lebih akurat dibandingkan dengan sistem tangkap gerak berbasis AI. Namun, dikarenakan pembuatan sistem tangkap gerak konvensional tersebut membutuhkan biaya yang mahal, maka replikasi dari sistem dan kinerjanya tidak dilakukan pada laporan ini.

Untuk melakukan perbandingan sistem tangkap gerak berbasis AI diperlukan sebuah sistem tangkap gerak yang tidak menggunakan teknologi berbasis AI dan

mampu mendekati kinerja dari sistem tangkap gerak konvensional tanpa menggunakan alat-alat dan bahan-bahan mahal untuk melakukan estimasi Gerakan aktor.

III.2 Analisis Solusi

Untuk dapat membangun sistem tangkap gerak tanpa menggunakan teknologi berbasis AI dan tanpa menggunakan bahan dan peralatan mahal dari sistem tangkap gerak konvensional, akan dicari alternatif solusi tangkap gerak yang memiliki biaya produksi yang lebih murah dibandingkan sistem tangkap gerak konvensional dengan menyederhanakan kebutuhan dari sistem tersebut. Solusi yang akan digunakan melibatkan beberapa kamera RGB yang mudah terjangkau, seperti kamera yang terdapat pada ponsel pintar, serta penanda berbasis warna untuk menandai titik-titik penting pada aktor untuk ditangkap gerakannya.

Untuk mendapatkan posisi 3 dimensi dari titik-titik penting pada tubuh aktor, akan digunakan teknik triangulasi seperti yang sudah dibahas pada (...). Supaya teknik triangulasi dapat berfungsi dengan baik, dibutuhkan setidaknya 2 kamera yang dapat melihat titik-titik penting dari aktor. Untuk menangani titik-titik penting yang tidak terlihat oleh salah satu kamera, yang dapat dikarenakan oleh unsur oklusi dari gerakan, maka umumnya digunakan beberapa kamera untuk melihat aktor dari beberapa sudut. Dikarenakan keterbatasan dari peralatan yang dimiliki serta untuk memudahkan perbandingan gerakan hasil estimasi oleh sistem tangkap gerak berbasis AI, digunakan jumlah kamera yang ganjil yaitu 3 yang hanya melihat sisi depan dari aktor.

Adapun untuk menerapkan teknik triangulasi perlu diketahui parameter intrinsik, ekstrinsik, dan distorsi lensa dari masing-masing kamera yang digunakan, serta hubungan rotasi dan translasi antara kamera-kamera yang berhubungan. Parameter-parameter tersebut dapat didapatkan dengan melakukan kalibrasi monokuler untuk setiap kamera dan kalibrasi stereo untuk setiap pasangan kamera.

Setelah kamera-kamera yang digunakan terkalibrasi dan parameter-parameter yang dibutuhkan oleh teknik triangulasi didapatkan, langkah selanjutnya adalah mengestimasi koordinat 3 dimensi dari titik-titik penting pada tubuh aktor, lalu mengevaluasi titik-titik 3d yang dihasilkan.

III.3 Rancangan Solusi

Secara keseluruhan, diagram alur proses adalah seperti yang ditunjukkan pada (Gambar ...) berikut. (Menjelaskan Diagram ...)

Untuk laporan ini, proses yang akan dibahas adalah proses (...).

III.3.1 Kalibrasi Kamera Monokuler

Untuk melakukan kalibrasi kamera monokuler untuk masing-masing kamera diperlukan sebuah pola kalibrasi untuk kemudian diambil gambarnya dari berbagai sudut untuk masing-masing kamera. Pola kalibrasi yang digunakan adalah sebuah papan catur berukuran 6*8 dengan besar sisi untuk setiap persegi pada catur adalah 4.5 cm.

Setelah beberapa gambar pola kalibrasi tersebut didapatkan untuk masing-masing kamera akan dicari parameter intrinsik, ekstrinsik, dan distorsi lensa menggunakan kaskas dari pustaka OpenCV untuk melakukan proses kalibrasi.

III.3.2 Kalibrasi Kamera Stereo

Untuk melakukan kalibrasi kamera stereo akan ditentukan pasangan-pasangan kamera sebagai berikut.

Untuk setiap pasang kamera akan diambil beberapa gambar pola kalibrasi dengan berbagai sudut untuk masing-masing pasangan kamera. Kemudian serupa dengan proses sebelumnya akan digunakan kaskas dari pustaka OpenCV untuk melakukan proses kalibrasi stereo untuk mendapatkan matriks rotasi dan translasi pasangan kamera.

III.3.3 Estimasi Koordinat 3D Titik-Titik Penting Aktor Dengan Triangulasi

Setelah mendapatkan parameter intrinsik, ekstrinsik, dan distorsi masing-masing kamera serta matriks rotasi dan matriks translasi setiap pasang kamera, akan dilakukan triangulasi berdasarkan teori yang sudah dibahas pada (subbab ...).

Untuk mencari pasangan kamera yang menghasilkan estimasi triangulasi terbaik, akan dilakukan triangulasi untuk setiap kombinasi pasangan kamera yang mungkin yaitu (...), seperti pada diagram (gambar) di atas. Kemudian akan dilakukan juga optimasi menggunakan metode *bundle adjustment* seperti yang telah dibahas pada (Bab).

BAB IV

EVALUASI SISTEM

IV.1 Lingkungan Uji

Pengujian dilakukan di ruangan tertutup dengan pencahayaan yang menyebar ke seluruh ruangan secara merata serta memiliki latar warna yang homogen. Kriteria ruangan tersebut diperlukan supaya pendeteksian penanda titik-titik penting aktor yang berbasis warna tidak mendeteksi latar ruangan dan hanya mendeteksi penanda-penanda pada tubuh aktor dengan akurat.

Digunakan juga 3 kamera RGB menggunakan kamera yang terdapat pada ponsel pintar, yang memiliki parameter intrinsik dan distorsi lensa hasil kalibrasi kamera monokuler sebagai berikut.

Tabel IV.1. Parameter Intrinsik dan Distorsi Lensa Hasil Kalibrasi Kamera Monokuler

Komponen	Matriks Kamera	Matriks Distorsi
Kamera kiri	$\begin{bmatrix} 1436.854 & 0 & 951.71 \\ 0 & 1437.605 & 548.9 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6.37 \\ -46.576 \\ 0.0022 \\ -0.0011 \\ 138.793 \\ 6.389 \\ -47.004 \\ 139.1384 \end{bmatrix}$
Kamera tengah	$\begin{bmatrix} 1473.503 & 0 & 950.21 \\ 0 & 1471.862 & 545.757 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -2.194 \\ 79.834 \\ 0.0003 \\ 0.0013 \\ -115.973 \\ -2.485 \\ 8 \\ -116.852 \end{bmatrix}$

Komponen	Matriks Kamera	Matriks Distorsi
Kamera kanan	$\begin{bmatrix} 1346.381 & 0 & 983.342 \\ 0 & 1346.383 & 530.83 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -17.635 \\ -26.373 \\ 0.0036 \\ 0.0008 \\ 1353.113 \\ -17.941 \\ -18.649 \\ 1301.006 \end{bmatrix}$

IV.2 Hasil Koordinat 3D Titik-Titik Penting Aktor Hasil Triangulasi

Untuk mendapatkan hasil triangulasi terbaik, akan dilakukan pengujian terhadap 4 rentang rotasi dan jarak antar kamera yaitu 0-10, 25-35, 40-50, 51-70. Hasil kalibrasi ekstrinsik menghasilkan nilai rotasi dan translasi kamera seperti yang terdapat pada Tabel IV.2 di bawah ini.

Tabel IV.2. Tabel Rotasi dan Translasi Kamera

No. Uji	Pasangan Kamera	Rotasi Kamera	Translasi Kamera
Pengujian 1	Kiri-tengah	$\begin{bmatrix} 2.350 \\ -5.857 \\ 3.035 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -8.004 \\ 71.802 \\ 10.348 \end{bmatrix}$
	Tengah-kanan	$\begin{bmatrix} -2.046 \\ 3.396 \\ -0.184 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -8.004 \\ 71.802 \\ 10.348 \end{bmatrix}$
Pengujian 2	Kiri-tengah	$\begin{bmatrix} 0.138 \\ -25.507 \\ -3.863 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 142.416 \\ 2.622 \\ 24.636 \end{bmatrix}$
	Tengah-kanan	$\begin{bmatrix} -4.4 \\ 28.068 \\ 2.922 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -8.004 \\ 71.802 \\ 10.348 \end{bmatrix}$
Pengujian 3	Kiri-tengah	$\begin{bmatrix} -5.107 \\ -43.253 \\ -7.118 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 130.589 \\ -2.923 \\ 33.548 \end{bmatrix}$
	Tengah-kanan	$\begin{bmatrix} -5.13 \\ 46.452 \\ 5.7732 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -152.713 \\ 18.2 \\ 67.064 \end{bmatrix}$

No. Uji	Pasangan Kamera	Rotasi Kamera	Translasi Kamera
Pengujian 4	Kiri-tengah	2.375 -54.465 -8.408	234.541 4.299 108.937
	Tengah-kanan	-8.004 71.802 10.348	-170.365 -16.114 76.514

Didapati nilai kesalahan proyeksi balik untuk setiap pengujian pada table IV.3. berikut.

Tabel IV.3. Tabel Rata-rata Kesalahan Proyeksi Balik

No. Uji	Pasangan Kamera Triangulasi	Rata-rata Kesalahan Proyeksi Balik		
		Tidak dilakukan penghilangan distorsi	Dilakukan penghilangan distorsi	Dilakukan penghilangan distorsi dan dioptimasi dengan <i>bundle adjustment</i>
Pengujian 1	Kiri-tengah	25.915	25.474	18.205
	Tengah-kanan	22.94	22.455	15.85
	Kiri-kanan	19.558	19.217	17.315
	Ketiga kamera secara bersamaan	18.822	18.525	16.937
Pengujian 2	Kiri-tengah	142.103	140.548	30.501
	Tengah-kanan	139.292	137.93	24.726
	Kiri-kanan	152.431	150.386	49.454
	Ketiga kamera secara bersamaan	121.275	120.145	25.79
Pengujian 3	Kiri-tengah	67.843	64.369	45.702
	Tengah-kanan	109.127	104.406	57.745
	Kiri-kanan	65.628	63.189	57.388
	Ketiga kamera secara bersamaan	62.858	60.327	34.52
Pengujian 4	Kiri-tengah	101.812	99.748	47.071
	Tengah-kanan	156.466	154.639	68.957
	Kiri-kanan	717.119	619.775	262.18

No. Uji	Pasangan Kamera Triangulasi	Rata-rata Kesalahan Proyeksi Balik		
		Tidak dilakukan penghilangan distorsi	Dilakukan penghilangan distorsi	Dilakukan penghilangan distorsi dan dioptimasi dengan <i>bundle adjustment</i>
	Ketiga kamera secara bersamaan	123.695	122.13	41.234

...

IV.3 Evaluasi dan Analisis

Dari Tabel IV.2 dan Tabel IV.3 didapatkan beberapa temuan sebagai berikut,

1. Semakin besar sudut dan jarak antar kamera, semakin buruk hasil proyeksi balik yang dihasilkan dari proses triangulasi.
2. Kamera yang belum dilakukan perbaikan distorsi dapat memperburuk hasil proyeksi balik dibandingkan kamera yang sudah diperbaiki distorsinya, meskipun selisih rata-rata kesalahannya proyeksi baliknya cukup kecil.
3. Penggunaan optimasi *bundle adjustment* terhadap hasil triangulasi sangat mempengaruhi penurunan rata-rata kesalahan proyeksi balik.
4. Triangulasi menggunakan ketiga kamera secara bersamaan pada umumnya menghasilkan nilai rata-rata kesalahan proyeksi balik yang paling rendah.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Bab Kesimpulan dan Saran merupakan penutup dari bagian utama Laporan Tugas Akhir. Fokuskan kesimpulan pada hal-hal baru yang relevan dengan ketercapaian tujuan Tugas Akhir terkait dengan permasalahan yang diselesaikan dalam Tugas Akhir. Saran berisi kajian hal-hal yang masih dapat dikembangkan lebih lanjut.

DAFTAR REFERENSI

- Hartley, R., & Zisserman, A. (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.
- Hata, K., & Savarese, S. (t.thn.). *CS231A Course Notes 1: Camera Models*. Diambil kembali dari https://web.stanford.edu/class/cs231a/course_notes/01-camera-models.pdf.
- Kaehler, A., & Bradski, G. R. (2017). *Learning OpenCV 3 : computer vision in C++ with the OpenCV library*. O'reilly Media.

Lampiran A. Contoh Judul Lampiran

A.1 Contoh Judul Anak Lampiran

Contoh anak lampiran