



DISERTASI

**REKONSTRUKSI CITRA 3D PERMUKAAN
DASAR LAUT MENGGUNAKAN *MULTIVIEW*
CAMERA BERBASIS REGISTRASI CITRA**

Pulung Nurtantio Andono
2209 301 015

DOSEN PEMBIMBING

Mochamad Hariadi, S.T., M.Sc., Ph.D.
Dr. I Ketut Eddy Purnama, S.T., M.T.

PROGRAM DOKTOR

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2014



DISERTATION – TE093099

**3D SURFACES RECONSTRUCTION OF
SEAFLOOR IMAGES USING
MULTIVIEW CAMERA BASED ON
IMAGE REGISTRATION**

Pulung Nurtantio Andono

2209 301 015

PROMOTOR

Mochamad Hariadi, S.T., M.Sc., Ph.D.

Dr. I Ketut Eddy Purnama, S.T., M.T.

DOCTORAL PROGRAM

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2014

Rekonstruksi Citra 3D Permukaan Dasar Laut Menggunakan *Multiview Camera* Berbasis Registrasi Citra

ABSTRAK

Rekonstruksi obyek 3D merupakan salah satu bidang penelitian dari *computer vision* yang banyak diteliti. Beberapa penelitian rekonstruksi obyek 3D menggunakan konsep *stereo vision* berbasis registrasi citra. Dalam penelitian ini konsep *stereo vision* berbasis registrasi citra tersebut digunakan untuk melakukan rekonstruksi 3D permukaan dasar laut yang bermanfaat untuk pemetaan dasar laut. Permasalahan dari penelitian ini disebabkan oleh hamburan cahaya matahari, gelombang air laut yang membuat pengambilan citra tidak stabil sehingga mempengaruhi kualitas citra bawah laut dan bentuk obyek-obyek dasar laut yang beraneka macam. Kendala-kendala tersebut berpengaruh terhadap hasil rekonstruksi 3D obyek-obyek permukaan dasar laut.

Tahapan pertama dari penelitian ini adalah kalibrasi kamera di dalam laut agar didapatkan *focal length* kamera yang cocok untuk kondisi tersebut menggunakan metode Zhang. Hasil eksperimen pada tahapan pertama didapat bahwa terjadi perbedaan nilai *focal length* kamera pada kalibrasi yang dilakukan di bawah laut dan kalibrasi kamera yang dilakukan di darat sebesar 36%. Tahapan kedua adalah memperbaiki kualitas registrasi citra 2D dengan menerapkan CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*). Hal ini dilakukan untuk meningkatkan jumlah titik-titik korespondensi pada citra stereo yang dihasilkan oleh algoritma SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*). Pada tahapan kedua tersebut didapat bahwa CLAHE mampu meningkatkan jumlah titik-titik korespondensi sebesar 26% hingga 30%. Tahapan ketiga adalah perbaikan kualitas registrasi citra 3D permukaan dasar laut menggunakan algoritma *Generalized Procrustes Analysis - Iterative Closest Point* (GPA-ICP). Pada eksperimen ketiga ini didapatkan bahwa kinerja GPA-ICP lebih baik dibandingkan dengan penggunaan algoritma ICP. GPA-ICP menghasilkan nilai MSE sebesar 37,43 dengan rata-rata komputasi sebesar 81,35 detik. Sedangkan ICP menghasilkan nilai MSE sebesar 1497,59 dengan rata-rata waktu komputasi sebesar 157,32 detik. Sehingga nilai MSE yang dihasilkan oleh registrasi citra 3D mengalami penurunan sebesar 98% dan waktu komputasi menurun hingga 48%. Semakin rendahnya nilai MSE tersebut menunjukkan hasil registrasi citra 3D yang lebih baik.

Kata kunci—Rekonstruksi 3D, permukaan dasar laut, kalibrasi kamera, kamera stereo, registrasi citra, SIFT, GPA, ICP.

3D Surfaces Reconstruction of Seafloor Images Using Multiview Camera Based on Image Registration

ABSTRACT

3D object reconstruction is one of the widely studied research areas of computer vision. Several studies of 3D object reconstruction use the concept of stereo vision based on image registration. In this study the concept of stereo vision based on image registration is used to perform a 3D reconstruction of the seafloor that are useful for mapping the ocean surface. The problem of this study is caused by the scattering of sunlight, sea water waves which make the image retrieval unstable that affect the quality of the image and the shape of the underwater seafloor objects of various kinds. These constraints affect the results of the 3D reconstruction surface of the seafloor.

The first stage of this research is the camera calibration in the sea in order to have a focal length of the camera. Zhang's calibration method is used to calibrate our camera. The experimental results obtained in the first stage show that there was a difference in the value of the focal length between camera calibration is carried out under the sea and in the land by 36% . The second stage is to improve the quality of 2D image registration by applying CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization). This is performed to increase the number of correspondence points in the stereo images produced by SIFT (Scale Invariant Feature Transform) algorithm. The result of second stage showed that CLAHE increases the number of correspondence points of 26% to 30 %. The third stage is the improvement of the quality of the 3D image registration using Generalized Procrustes Analysis-Iterative Closest Point (ICP-GPA). In the third experiment showed that the performance of GPA-ICP is better than original ICP algorithm. GPA-ICP produces MSE of 37.43 with an average computational time of 81.35 seconds. While the ICP produces MSE of 1497.59 with an average computational time of 157.32 seconds. Therefore, GPA-ICP decreases the MSE and the computational time of 3D image registration by 98 % and 48 % respectively . The lower the MSE shows that a 3D image registration has a better results.

Keywords—*3D reconstruction, seafloor surface, camera calibration, stereo camera, image registration, SIFT, GPA, ICP.*

LEMBAR PENGESAHAN

Rekonstruksi Citra 3D Permukaan Dasar Laut Menggunakan *Multiview*

Camera Berbasis Registrasi Citra

Disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Doktor (Dr.)
Di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:
Pulung Nurtantio Andono
NRP. 2209 301 015
Tanggal Ujian: 2 Desember 2013

Mochamad Hariadi, ST., M.Sc., PhD
NIP. 1969 12 09 1997 03 1002



(Pembimbing I)

Dr. I Ketut Eddy Purnama, ST., MT.
NIP. 1969 07 30 1995 12 1001



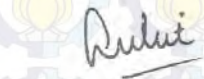
(Pembimbing II)

Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo,
M.Eng
NIP. 1958 09 16 1986 01 1001



(Penguji I)

Dr. Ir. Lukito Edi Nugroho, M.Sc
NIP. 1966 03 27 1991 03 1002



(Penguji II)

Dr. Surya Sumpeno, ST., M.Sc
NIP. 1969 06 13 1997 02 1003



(Penguji III)

Mengetahui,
Direktur Program Pascasarjana



Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT
NIP. 1964 04 05 1990 02 1001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbiil 'aalamiin, segala puji bagi Allah Tuhan seluruh alam, penulis panjatkan syukur kepada Allah SWT. Dengan berkat dan karuniaNya, penulis akhirnya dapat menyelesaikan disertasi ini. Dengan selesainya disertasi ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Mochamad Hariadi, S.T., M.Sc., Ph.D dan Dr. I Ketut Eddy Purnama, ST., MT, selaku pembimbing I dan II. Para pembimbing telah membimbing penulis dengan sabar, mendorong semangat untuk melakukan penelitian dan memberikan arahan dalam menyelesaikan persoalan pada penelitian.
2. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng, Dr. Ir. Lukito Edi Nugroho, M.Sc, dan Dr. Surya Sumpeno, ST., M.Sc, selaku penguji yang memberikan banyak masukan pada disertasi ini.
3. Ir. Djoko Purwanto, Ph.D., selaku Ka. Prodi Pasca Sarjana Jurusan Teknik Elektro ITS.
4. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT., Direktur Pasca Sarjana ITS.
5. Orang tua, adik, istri, dan anak-anakku yang telah memberikan dukungan dan doa dalam menyelesaikan studi dan penulisan disertasi ini.
6. Valentijn Venus mijn grote broer van de nederland.
7. Prof. Kunio Kondo dan Prof. Taichi Watanabe selaku pembimbing selama mengikuti Program Sandwich di Tokyo University of Technology - Jepang.
8. Dr. Abdul Syukur, MM., Direktur Pasca Sarjana UDINUS.
9. Catur Supriyanto, M.CS., Ricardus Anggi Pramunendar, M.CS., Pujiono, M.Kom., Arief Soeleman, M.Kom., Ruri Suko Basuki, M.Kom., Fauzi Adi dan rekan-rekan di lab Pasca Sarjana UDINUS.

Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang tidak disebutkan di atas yang telah membantu penulis dalam penyelesaian penulisan disertasi ini.

Surabaya, Februari 2014

Penulis

DAFTAR ISI

<i>ABSTRACT</i>	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Definisi Masalah.....	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Batasan Masalah.....	8
1.5 Kontribusi Penelitian.....	8
1.6 Metode Penelitian.....	11
1.7 Format dan Struktur Penulisan Disertasi.....	12
BAB 2 LANDASAN TEORI TENTANG REKONSTRUKSI CITRA 3D.....	14
2.1 Pendahuluan.....	14
2.2 Model Kamera Pinhole.....	14
2.3 Kalibrasi Kamera.....	15
2.4 Peningkatan Kualitas Citra (<i>Image Enhancement</i>).....	17
2.4.1 Contrast Stretching.....	18

2.4.2	Histogram Equalization	19
2.4.3	Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)	23
2.5	Algoritma <i>Image matching</i>	24
2.5.1	Scale Invariant Feature Transform (SIFT).....	24
2.5.2	Speed-Up Robust Features (SURF).....	27
2.6	Iterative Closest Point.....	28
2.7	Uji- <i>t</i> Berpasangan	29
2.8	Analisis Varians.....	31
2.9	Tukey's HSD Post Hoc Test.....	35
BAB 3 ANALISA PENGARUH PERBEDAAN MEDIUM AIR DAN UDARA		
TERHADAP KALIBRASI KAMERA		37
3.1	Pendahuluan.....	37
3.2	Metode Kalibrasi Zhang	38
3.3	Hasil Eksperimen.....	39
BAB 4 PENINGKATAN KUALITAS CITRA BAWAH LAUT MENGGUNAKAN		
FILTER ADAPTIF		44
4.1	Pendahuluan.....	44
4.2	Metode Peningkatan Kualitas Citra	48
4.3	Peningkatan Kualitas Citra oleh CLAHE	50
4.4	Analisa Perbandingan CLAHE pada Algoritma SIFT dan SURF	61
BAB 5 REKONSTRUKSI CITRA 3D PERMUKAAN DASAR LAUT		
MENGGUNAKAN <i>MULTIVIEW CAMERA</i>		69
5.1	Pendahuluan.....	69

5.2	Penelitian Terkait.....	70
5.3	Sistem Rekonstruksi 3D dengan <i>Multiview Camera</i>	71
5.4	Hasil Eksperimen.....	74
BAB 6 REKONSTRUKSI CITRA 3D PERMUKAAN DASAR LAUT		
MENGUNAKAN <i>POINT CLOUD</i> DARI <i>MULTIVIEW CAMERA</i> BERBASIS		
REGISTRASI CITRA		
6.1	Pendahuluan.....	79
6.2	Procrustes Analysis	81
6.3	Generalized Procrustes Analysis.....	82
6.4	Generalized Iterative Closest Point.....	83
6.5	Hasil Eksperimen.....	85
BAB 7 KESIMPULAN DAN RENCANA PENELITIAN SELANJUTNYA.....		
7.1	Kesimpulan	100
7.2	Rencana Penelitian Selanjutnya.....	101
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN A: FOTO DOKUMENTASI.....		
LAMPIRAN B: DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1: Permukaan Dasar Laut Karimunjawa.....	2
Gambar 1.2: <i>Autonomous Underwater Vehicle</i> (AUV) [7].	3
Gambar 1.3: Kamera poket.....	3
Gambar 1.4: Pulau Karimunjawa.....	6
Gambar 1.5: Pengambilan citra permukaan dasar laut.	6
Gambar 1.6: Posisi Penelitian.....	9
Gambar 1.7: Blok Diagram Penelitian.....	11
Gambar 1.8: Sistematika penulisan disertasi dikaitkan dengan struktur bab.	13
Gambar 2.1: Model Kamera Pinhole	15
Gambar 2.2: Peningkatan kualitas citra dengan <i>contrast stretching</i> [29].....	18
Gambar 2.3: Nilai intensitas keabuan citra asal.....	20
Gambar 2.4: Nilai intensitas keabuan sebelum dan sesudah HE.....	21
Gambar 2.5: Histogram sebelum dan sesudah HE	22
Gambar 3.1: Pola Papan Catur (<i>Checkerboard Pattern</i>).	38
Gambar 3.2: Citra stereo di <i>scene 1</i>	40
Gambar 3.3: Citra stereo di <i>scene 2</i>	40
Gambar 3.4: Citra stereo di <i>scene 3</i>	40
Gambar 3.5: Citra stereo di <i>scene 4</i>	41
Gambar 4.1: Efek permukaan air [50]	45
Gambar 4.2: Perbaikan kualitas citra oleh CLAHE untuk SIFT	49

Gambar 4.3: Jumlah keypoint tanpa peningkatan kualitas citra, dengan peningkatan <i>contrast stretching</i> and dengan peningkatan CLAHE.	50
Gambar 4.4: Jumlah titik korespondensi tanpa peningkatan kualitas citra, dengan peningkatan <i>contrast stretching</i> and dengan peningkatan CLAHE.....	51
Gambar 4.5: Perbandingan kualitas citra sebelum dan sesudah peningkatan.....	56
Gambar 4.6: Contoh hasil peningkatan kualitas citra.....	58
Gambar 4.7: Contoh rekonstruksi citra 3D permukaan dasar laut.....	60
Gambar 4.8: Jumlah titik korespondensi algoritma SIFT dengan <i>outlier removal</i> ...	61
Gambar 4.9: Jumlah titik korespondensi algoritma SIFT tanpa <i>outlier removal</i>	61
Gambar 4.10: Jumlah titik korespondensi algoritma SURF dengan <i>outlier removal</i>	62
Gambar 4.11: Jumlah titik korespondensi algoritma SURF tanpa <i>outlier removal</i> ...	63
Gambar 4.12: Jumlah titik korespondensi antara SIFT and SURF menggunakan CLAHE dan <i>outlier removal</i>	64
Gambar 4.13: Jumlah titik korespondensi antara SIFT and SURF menggunakan CLAHE tanpa <i>outlier removal</i>	64
Gambar 4.14: Jumlah <i>outlier</i> antara SIFT dan SURF dengan menggunakan CLAHE.	65
Gambar 5.1: Model Rekonstruksi 3D	71
Gambar 5.2: Kalibrasi Kamera dengan Papan Catur	72
Gambar 5.3: Parameter Intrinsik dan Ekstrinsik.....	72
Gambar 5.4: (a) Citra kamera kiri, (b) Citra kamera kanan dan (c) Hasil koresponding fitur oleh SIFT.....	74
Gambar 5.5: Posisi Kamera	75
Gambar 5.6: Akurasi dari <i>image matching</i> skenario 1	76

Gambar 5.7: Akurasi dari <i>image matching</i> skenario 2	77
Gambar 5.8: Skenario no 1, rekonstruksi permukaan 3D dari (a) kamera A, (b) kamera B, dan (c) kamera C	77
Gambar 5.9: Skenario no 2, rekonstruksi permukaan 3D dari (a) kamera A, (b) kamera B, dan (c) kamera C	77
Gambar 6.1: Ilustrasi GPA-ICP dengan tiga <i>point cloud</i> (titik-titik 3D warna merah, hijau, dan hitam) [14].....	84
Gambar 6.2: MSE proses registrasi antara ICP dan GPA-ICP	87
Gambar 6.3: Waktu komputasi antara ICP dan GPA-ICP.....	87
Gambar 6.4: Jumlah titik-titik 3D antara ICP dan GPA-ICP.	88
Gambar 6.5: Kumpulan titik korespondensi, hasil dari proses <i>image matching</i> algoritma SIFT.....	89
Gambar 6.6: 3D <i>point cloud</i> dari 90 frame menggunakan ICP.	90
Gambar 6.7: 3D <i>point cloud</i> dari 90 frame menggunakan GPA-ICP.....	90
Gambar 6.8: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan ICP (jumlah frame = 3).....	91
Gambar 6.9: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan ICP (jumlah frame = 6).....	92
Gambar 6.10: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan ICP (jumlah frame = 9).....	93
Gambar 6.11: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan ICP (jumlah frame = 12).....	94
Gambar 6.12: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan ICP (jumlah frame = 40).....	95

Gambar 6.13: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan ICP (jumlah frame = 90).....	96
Gambar 6.14: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan GPA-ICP (jumlah frame = 40).	97
Gambar 6.15: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan GPA-ICP (jumlah frame = 90).	98
Gambar A.1: Persiapan Pengambilan Citra Dasar Laut.	113
Gambar A.2: Pengambilan Citra Dasar Laut.	114
Gambar A.3: Keindahan Terumbu Karang di Pulau Karimunjawa.	115
Gambar A.4: Foto Dokumentasi saat menghadiri konferen internasional ICMCS'12	116
Gambar A.5: Foto Dokumentasi saat menghadiri konferen internasional ICAIT'13	117
Gambar A.6: <i>Lecture Notes in Information Technology</i> . Publikasi konferen	118
Gambar A.7: Presentasi di acara ジョイント シンポジウム - 2nd KMUTT-TUT	119
Gambar A.8: Sertifikat telah melaksanakan penelitian magang di Tokyo	120

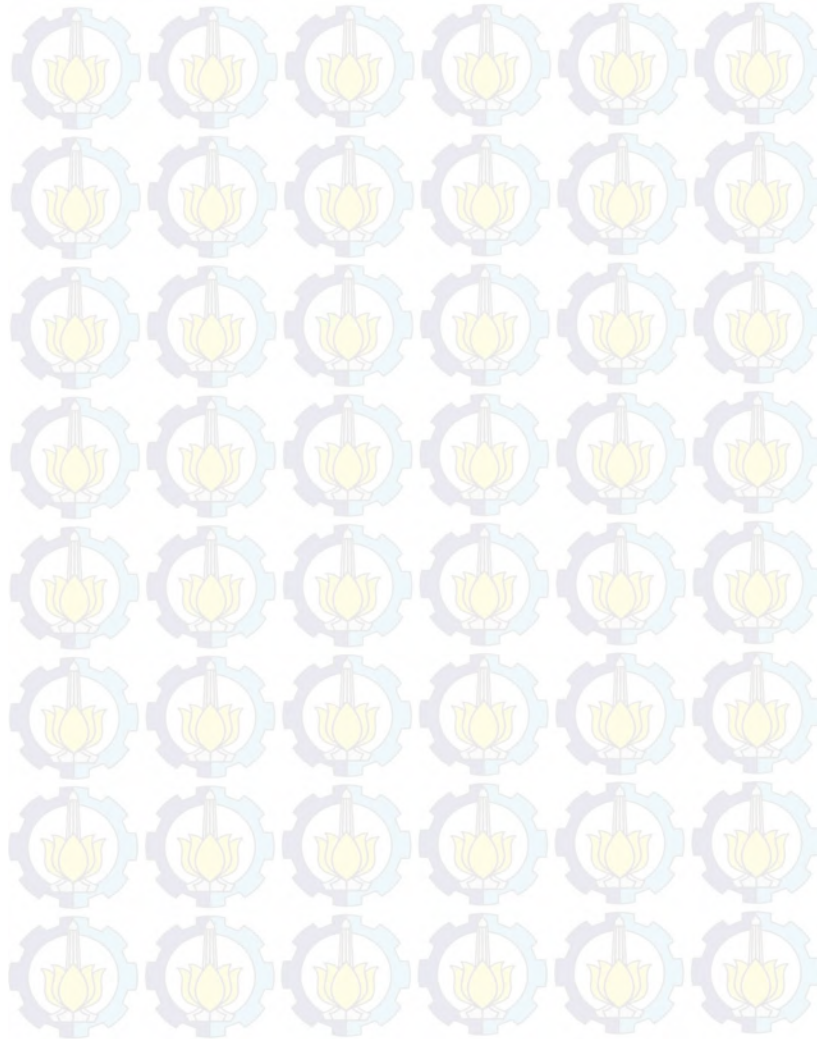
DAFTAR TABEL

Tabel 1.1: Matriks Kontribusi Penelitian.....	10
Tabel 2.1: Perhitungan <i>probability density function</i>	20
Tabel 2.2: Perhitungan hasil <i>histogram equalization</i>	21
Tabel 2.3: Tabel ANOVA.....	34
Tabel 3.1: Proses kalibrasi pada empat <i>scene</i> yang berbeda.	40
Tabel 3.2: Parameter Internal Kamera A (<i>scene 1</i>)	42
Tabel 3.3: Parameter Internal Kamera B (<i>scene 1</i>).....	42
Tabel 3.4: Parameter Internal Kamera A (<i>scene 2</i>)	42
Tabel 3.5: Parameter Internal Kamera B (<i>scene 2</i>).....	42
Tabel 3.6: Parameter Internal Kamera A (<i>scene 3</i>)	42
Tabel 3.7: Parameter Internal Kamera B (<i>scene 3</i>).....	42
Tabel 3.8: Parameter Internal Kamera A (<i>scene 4</i>)	43
Tabel 3.9: Parameter Internal Kamera B (<i>scene 4</i>).....	43
Tabel 3.10: Rasio <i>Focal Length</i> di Air (<i>Scene 1</i>) dan Udara (<i>Scene 3</i>).....	43
Tabel 3.11: Rasio <i>Focal Length</i> di Air (<i>Scene 2</i>) dan Udara (<i>Scene 4</i>)	43
Tabel 4.1: Jumlah titik korespondensi pada setiap pasang citra stereo	52
Tabel 4.2: Uji- <i>t</i> 2 sampel	53
Tabel 4.3: Analysis of Variance (ANOVA)	53
Tabel 4.4: Post-Hoc Test.	54
Tabel 4.5: Jumlah titik korespondensi dari beberapa distribusi CLAHE dengan dan tanpa <i>outlier removal</i>	56

Tabel 4.6: Prosentase kenaikan jumlah titik korespondensi dari beberapa distribusi
CLAHE dengan dan tanpa *outlier removal* 57

Tabel 4.7: Jumlah titik korespondensi dan jumlah *outlier* algoritma SIFT 65

Tabel 4.8: Jumlah titik korespondensi dan jumlah outlier algoritma SURF 67



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagian wilayah Indonesia terdiri atas lautan. Sama seperti daratan, dasar laut juga memiliki relief yang bervariasi seperti dangkalan, palung laut, gunung laut, ambang laut, parit laut dan lubuk laut. Pemetaan dasar laut diperlukan untuk menentukan kedalaman dasar laut akibat kondisi relief dasar laut yang berubah-ubah [1]. Peta yang menggambarkan relief atau kontur permukaan dasar laut tersebut dinamakan peta batimetri. Dengan semakin berkembangnya teknologi, peta batimetri dapat digambarkan dalam tampilan citra 3D (Tiga Dimensi), sehingga memudahkan para peneliti di bidang ilmu kelautan, biologi, geologi atau arkeologi untuk mengeksplorasi permukaan bumi bawah laut[2].

Pemetaan dasar laut juga dapat dimanfaatkan untuk melindungi ekosistem dasar laut. Permukaan dasar laut dapat terdiri dari berbagai jenis ekosistem seperti terumbu karang, rumput laut dan padang lamun yang merupakan habitat dari berbagai flora dan fauna. Ekosistem tersebut dapat mengalami kerusakan akibat ulah manusia, seperti penggunaan bahan peledak untuk mencari ikan dan penggunaan rantai untuk mengukur kesehatan terumbu karang. Gambar 1.1 menunjukkan salah satu ekosistem terumbu karang yang berada di Taman Laut Nasional Karimunjawa yang merupakan salah satu dari sembilan taman laut nasional di Indonesia dengan tingkat keanekaragaman hayati yang cukup tinggi.

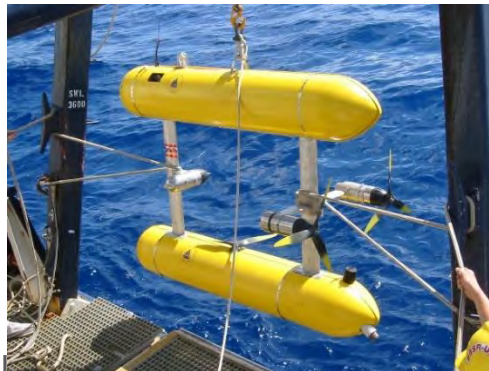


Gambar 1.1: Permukaan Dasar Laut Karimunjawa.

Beberapa penelitian sebelumnya dilakukan untuk menggambarkan permukaan dasar laut dalam bentuk citra 3D. Brock dan Wright [3] menggunakan LIDAR (*Light Detection and Ranging*) untuk mengetahui bentuk permukaan dasar laut. LIDAR merupakan teknologi peraba jarak jauh yang dapat digunakan untuk mengetahui jarak suatu obyek. Penggunaan LIDAR sangat terbatas karena pancaran sinar LIDAR yang meredup seiring dengan bertambah dalamnya permukaan dasar laut [4]. *Autonomous Underwater Vehicles* (AUVs) dan *Remotely Operated Vehicles* (ROV) juga biasa digunakan untuk menggambarkan permukaan dasar laut [5] [6] [7] [8]. Kelebihan penggunaan AUVs adalah kemampuan navigasi dan pengambilan data dengan tingkat presisi yang tinggi [4]. Namun, biaya yang sangat mahal harus dikeluarkan untuk dapat menerapkan AUVs/ROV dalam pengambilan citra permukaan dasar laut.

Penelitian ini mengusulkan penggunaan kamera poket yang disusun secara stereo. Kelebihan kamera poket dalam rekonstruksi 3D permukaan dasar laut

adalah biayanya yang murah dan instalasinya yang sederhana. Namun, sangat dimungkinkan pengambilan data yang kurang maksimal yang disebabkan oleh hamburan cahaya matahari dan gelombang air laut yang membuat pengambilan data tidak stabil sehingga mempengaruhi kualitas citra dasar laut. Gambar 1.2 menunjukkan penggunaan AUVs untuk pengambilan citra dasar laut dan Gambar 1.3 menunjukkan penggunaan kamera poket yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 1.2: *Autonomous Underwater Vehicle (AUV)* [7].



Gambar 1.3: Kamera poket.

Fokus penelitian yang dilakukan pada disertasi ini adalah menghasilkan kualitas rekonstruksi citra 3D permukaan dasar laut yang lebih baik. Beberapa tahapan perlu dilakukan untuk melakukan rekonstruksi citra 3D dasar laut, seperti pengambilan citra dasar laut, kalibrasi kamera, pencarian titik-titik korespondensi citra stereo, dan rekonstruksi citra 3D [6]. Setiap tahapan sangat berpengaruh

terhadap keberhasilan rekonstruksi citra 3D. Kalibrasi kamera diperlukan untuk mendapatkan parameter intrinsik dan ekstrinsik dari kamera yang digunakan. Parameter intrinsik meliputi jarak antara lensa kamera terhadap bidang gambar (*focal length*), faktor skala, pusat gambar (*principal point*), dan koefisien tingkat kelengkungan lensa (koefisien distorsi), sedangkan parameter ekstrinsik meliputi orientasi posisi dari kamera terhadap koordinat dunia [9]. Dalam penelitian ini digunakan metode kalibrasi tradisional, yaitu kalibrasi kamera yang dilakukan dengan menggunakan papan catur (*chessboard*). Walaupun kalibrasi secara tradisional memiliki tingkat fleksibilitas rendah, namun memiliki tingkat akurasi dan ketahanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan *self-calibration* yaitu kalibrasi yang dilakukan secara otomatis [10].

Pencarian titik-titik korespondensi citra stereo merupakan salah satu tahapan rekonstruksi 3D yang tidak kalah penting. *Scale Invariant Feature Matching* (SIFT) adalah algoritma *image matching* yang sering digunakan oleh para peneliti. SIFT diusulkan dengan alasan lebih stabil dan akurat dalam menentukan titik-titik korespondensi [11]. Luo Juan dkk. [12] telah membandingkan antara SIFT dan SURF untuk *image matching* udara. Hasil perbandingan tersebut dalam hal waktu komputasi, uji perubahan skala, rotasi, blur, iluminasi dan perubahan *affine* menunjukkan bahwa SIFT mendominasi keunggulan dibandingkan dengan SURF. Pembuktian keunggulan SIFT tersebut dilakukan pada bab 4 dalam disertasi ini. Titik-titik 2D yang ditemukan oleh SIFT kemudian akan diubah menjadi titik-titik 3D dengan bantuan informasi parameter intrinsik dan ekstrinsik yang diperoleh saat melakukan kalibrasi

kamera. Titik-titik 3D pada tiap frame kemudian diregistrasi satu sama lain untuk membentuk model 3D permukaan dasar laut.

Dalam rekonstruksi citra 3D, pengambilan citra dapat dilakukan dengan pendekatan *single view* dan *multiview*. Perbedaan antar keduanya adalah *single view* menggunakan satu sudut pandang saja untuk rekonstruksi 3D sedangkan *multiview* menggunakan banyak sudut pandang untuk rekonstruksi 3D. Dikarenakan penggunaan *single view* menyebabkan pembentukan citra 3D yang tidak sempurna [13] [14], maka pengambilan citra dasar laut dalam disertasi ini menggunakan kamera *multiview* yaitu citra permukaan dasar laut yang diambil dari berbagai sudut pandang untuk dapat memodelkan obyek 3D secara utuh.

Data citra permukaan dasar laut dalam penelitian ini diambil dari pulau Karimunjawa Jawa Tengah. Karimunjawa merupakan area konservasi alam yang berlokasi di $5^{\circ}49' - 5^{\circ}57'$ Lintang Selatan dan $110^{\circ}04' - 110^{\circ}40'$ Bujur Timur laut Jawa Selatan, Indonesia. Lokasi pulau Karimunjawa tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.4. Diperlukan beberapa hari dalam pengambilan dataset citra bawah laut tersebut. Dokumentasi pengambilan citra permukaan dasar laut tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.5. Pengambilan citra dasar laut menggunakan kamera yang diinstalasi secara stereo seperti yang terlihat pada Gambar 1.3.



Gambar 1.4: Pulau Karimunjawa.



Gambar 1.5: Pengambilan citra permukaan dasar laut.

1.2 Definisi Masalah

1. Kalibrasi kamera merupakan salah satu langkah penting untuk mendapatkan rekonstruksi citra 3D yang presisi di dalam *computer vision* [15]. Pada kamera stereo, kalibrasi kamera harus dilalui untuk mendapatkan posisi relatif antara kedua kamera dengan objek citranya. Dengan posisi relatif tersebut, rekonstruksi objek 3D dapat dilakukan. Medium air bawah laut sangat mempengaruhi proses kalibrasi kamera.

2. Rekonstruksi citra 3D berbasis *stereo vision* membutuhkan pencarian titik-titik korespondensi pada citra stereo. Citra stereo banyak dimanfaatkan untuk rekonstruksi citra 3D [16] [17] [18] [19]. Pencarian titik-titik korespondensi tersebut dapat digunakan untuk pelacakan dan pengenalan obyek bawah laut [20]. Citra dasar laut memiliki resolusi yang rendah apabila dibandingkan dengan citra udara. Citra dasar laut juga memiliki karakteristik hamburan dan penyerapan cahaya yang sangat kuat [21]. Hal ini dapat menyebabkan sedikitnya titik-titik korespondensi yang ditemukan pada saat *image matching* stereo. Rendahnya jumlah titik-titik korespondensi tersebut juga dipengaruhi oleh penggunaan kamera poket yang sederhana (*low cost camera*) yang akan digunakan dalam penelitian ini. Peningkatan kualitas citra dasar laut sangat diperlukan untuk mendapatkan titik-titik korespondensi yang lebih banyak sehingga obyek citra dasar laut dapat direkonstruksi dengan lebih akurat.
3. Rekonstruksi citra 3D dari satu pasang citra *stereo vision* tidak cukup untuk menghasilkan rekonstruksi citra 3D yang akurat, karena bentuk permukaan dasar laut yang tidak beraturan.

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengukur tingkat perbedaan nilai kalibrasi kamera pada medium air dan udara.
2. Meningkatkan akurasi registrasi citra 2D dengan cara memperbaiki kualitas citra dasar laut.

3. Melakukan rekonstruksi citra 3D permukaan dasar laut dengan menggunakan kamera *multiview* berbasis registrasi citra 3D.

1.4 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang ada dalam disertasi ini bisa diuraikan sebagai berikut:

1. Kalibrasi kamera untuk rekonstruksi citra 3D dilakukan di Laut Karimunjawa.
2. Pengambilan citra dasar laut menggunakan kamera poket yang diinstalasi secara stereo.
3. Keterbatasan alat hanya digunakan untuk melakukan rekonstruksi citra 3D permukaan dasar laut.
4. Permukaan dasar laut yang direkonstruksi hanya sampai kedalaman 5 meter di bawah permukaan air laut.

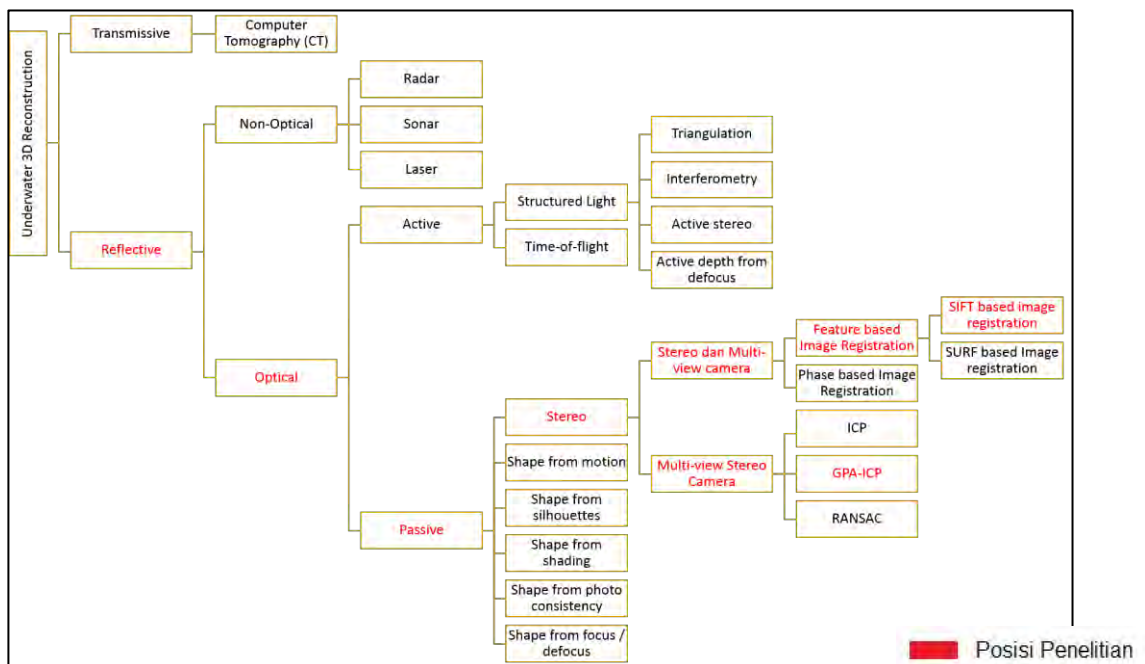
1.5 Kontribusi Penelitian

Terdapat tiga kontribusi dalam disertasi ini, yaitu:

1. Penelitian ini melakukan kalibrasi kamera di dasar laut untuk rekonstruksi citra 3D permukaan dasar laut. Hamburan cahaya dan partikel-partikel di bawah laut mempengaruhi perbedaan kalibrasi di darat dan di laut. Dari hasil pengukuran kalibrasi tersebut, didapat bahwa terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara kalibrasi kamera di darat dan di laut.

2. Peningkatan registrasi citra 2D supaya rekonstruksi citra 3D permukaan dasar laut dapat dilakukan lebih akurat akibat dari peningkatan titik matching yang didapatkan. Peningkatan registrasi tersebut dilakukan dengan cara memperbaiki kualitas citra dasar laut. Hasil penelitian menunjukkan perbaikan registrasi citra 2D yang ditunjukkan dengan penambahan titik-titik korespondensi citra stereo.

3. Rekonstruksi 3D menggunakan sepasang citra stereo tidak cukup untuk menghasilkan citra 3D permukaan dasar laut, sehingga disertai ini menggunakan sejumlah pasang citra stereo untuk melakukan rekonstruksi 3D. *Point cloud* atau titik-titik 3D dari tiap pasang citra stereo akan dilakukan proses registrasi 3D sehingga membentuk citra 3D permukaan dasar laut. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kualitas citra 3D permukaan dasar laut.



Gambar 1.6: Posisi Penelitian.

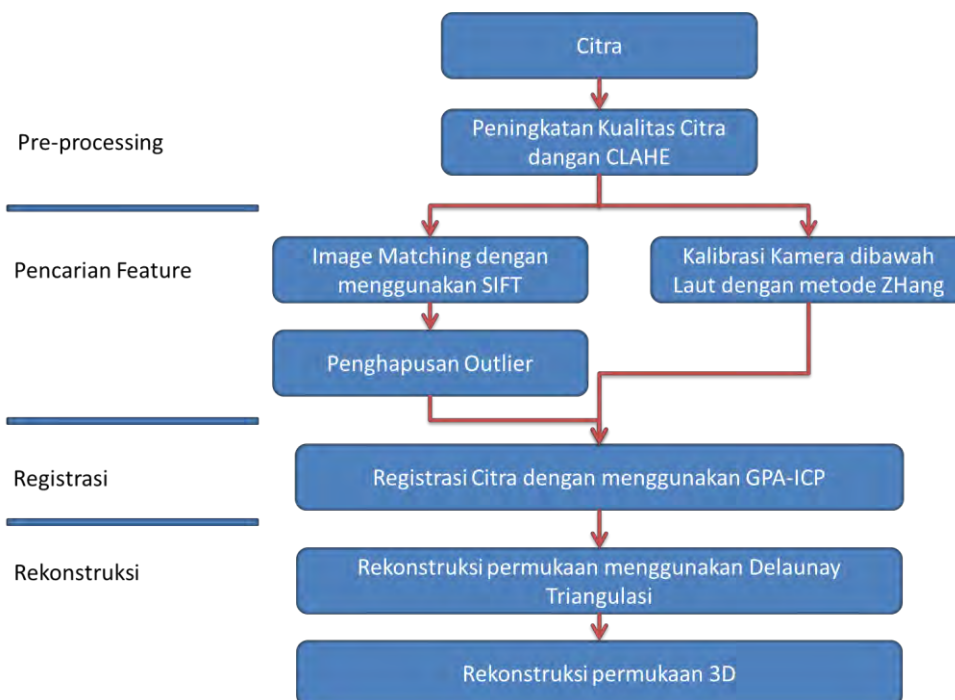
Pada Gambar 1.6 menunjukkan posisi penelitian yang dilakukan pada disertasi ini. Pada tabel 1.1 disajikan beberapa penelitian terkait dengan disertasi ini.

Tabel 1.1: Matriks Kontribusi Penelitian

No	Peneliti	Hasil Penelitian	Kontribusi oleh Penulis
1	Prabakhar dan Kumar [5]	Mengusulkan kombinasi dari empat metode peningkatan kualitas citra, seperti <i>homomorphic filtering</i> , <i>wavelet denoising</i> , <i>bilateral filter</i> dan <i>contrast stretching</i> tanpa membahas <i>image matching</i> dan rekonstruksi citra 3D. Metode yang diusulkan mampu mengatasi rendahnya nilai kontras citra bawah laut.	Penulis mengusulkan penggunaan <i>Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization</i> (CLAHE) untuk meningkatkan kualitas citra dasar laut.
2	Brandou, dkk. [6]	Rekonstruksi citra 3D berhasil diperoleh dengan hanya menggunakan dua citra stereo. Pengambilan citra bawah laut menggunakan AUVs. Tanpa menggunakan registrasi citra 3D.	Penulis menunjukkan bahwa banyaknya <i>view</i> yang digunakan akan menambah rekonstruksi citra 3D yang lebih akurat. Penulis mengusulkan penggunaan registrasi citra 3D. Pengambilan citra dasar laut menggunakan kamera poket.
3	Iqbal, dkk. [22]	Mengusulkan penggunaan <i>contrast stretching</i> untuk memperbaiki kualitas citra bawah laut. Tanpa membahas <i>image matching</i> dan rekonstruksi citra 3D.	Penulis mengusulkan penggunaan <i>Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization</i> (CLAHE) untuk meningkatkan kinerja <i>image matching</i> dan meningkatkan kualitas rekonstruksi citra 3D.
4	Pizarro, dkk. [7]	Memfaatkan penggunaan navigasi sensor dari sebuah ROVs untuk menghasilkan pemetaan dasar laut. Tanpa melakukan perbaikan kualitas citra dasar laut.	Penulis menggunakan kamera kamera poket untuk menghasilkan citra 3D permukaan dasar laut.

1.6 Metode Penelitian

Metode penelitian disertasi ini ditunjukkan pada Gambar 1.7. Diawali dengan pengambilan citra dasar laut di kepulauan Karimunjawa. Selanjutnya citra dasar laut perlu diperbaiki kualitasnya menggunakan CLAHE untuk mendapatkan titik korespondensi yang lebih banyak dari proses SIFT *image matching*. Sebagian titik korespondensi merupakan *outlier*, jadi diperlukan penghapusan *outlier*. Kalibrasi kamera perlu dilakukan untuk mendapatkan *focal length* kamera. Dengan menggunakan *focal length*, jarak sebuah obyek terhadap kamera dapat diketahui. Setelah titik-titik 3D dari tiap frame didapatkan, selanjutnya dilakukan registrasi citra untuk menyatukan titik-titik 3D tiap frame yang saling berkorespondensi. Sehingga dengan menggunakan algoritma *Delaunay*, titik-titik 3D tersebut dapat membentuk citra 3D permukaan dasar laut.



Gambar 1.7: Blok Diagram Penelitian

1.7 Format dan Struktur Penulisan Disertasi

Disertasi ini terdiri dari 7 bab dengan rincian bab 1 adalah pendahuluan, bab 2 adalah landasan teori terkait dengan rekonstruksi citra 3D, bab 3 sampai bab 6 adalah pembahasan dari urutan karya ilmiah yang sudah diterbitkan melalui beberapa konferen dan jurnal, dan bab 7 adalah kesimpulan dan rencana penelitian selanjutnya. Sistematika penulisan disertasi ditunjukkan pada Gambar 1.8.

REKONSTRUKSI CITRA 3D PERMUKAAN DASAR LAUT MENGGUNAKAN MULTIVIEW CAMERA BERBASIS REGISTRASI CITRA	
BAB 1 PENDAHULUAN	<ul style="list-style-type: none"> •Definisi Masalah •Tujuan Penelitian •Originalitas dan Kontribusi Ilmiah •Sistematika Penulisan Disertasi •Publikasi Karya Ilmiah
BAB 2 LANDASAN TEORI	<ul style="list-style-type: none"> •Model Kamera Pinhole •Kalibrasi Kamera •Ruang Warna •Peningkatan Kualitas Citra •Algoritma Pencocokan Citra 2D •Interactive Close Point •Uji-t Berpasangan
BAB 3 ANALISA PENGARUH PERBEDAAN MEDIUM AIR DAN UDARA TERHADAP KALIBRASI KAMERA	<ul style="list-style-type: none"> •Pencarian Kalibrasi Kamera di dalam air dan di atas air dengan menggunakan Stereo Kamera •Pencarian Parameter Intrinsik dan Ekstrinsik •Perbandingan Kalibrasi didalam air dan di atas air
BAB 4 PENINGKATAN KUALITAS CITRA BAWAH LAUT MENGGUNAKAN FILTER ADAPTIVE	<ul style="list-style-type: none"> •Metode Peningkatan Kualitas Citra 2D pada citra stereo •Peningkatan Kualitas Citra 2D oleh CLAHE •Analisa kehandalan CLAHE pada Algoritma SIFT dan SURF dengan menggunakan stereo kamera
BAB 5 REKONSTRUKSI 3D CITRA TERUMBU KARANG BAWAH LAUT MENGGUNAKAN MULTIVIEW CAMERA	<ul style="list-style-type: none"> •Sistem Rekonstruksi 3D dengan kamera Multiview •Peningkatan Kalibrasi Kamera dengan data kamera multiview yang lebih akurat •Dilakukan pembersihan outlier pada hasil registrasi citra 2D •Rekonstruksi berbasis registrasi citra 2D menggunakan Delaunay Triangulasi
BAB 6 REKONSTRUKSI CITRA 3D TERUMBU KARANG MENGGUNAKAN POINT CLOUD DARI MULTIVIEW CAMERA BERBASIS REGISTRASI	<ul style="list-style-type: none"> •Sistem Rekonstruksi 3D menggunakan point cloud •Generalized Procastes Analisis •Rekonstruksi berbasis registrasi citra 3D menggunakan Algoritma Generalized Iterative Closest Point (GPA-ICP)
BAB 7 KESIMPULAN DAN RENCANA PENELITIAN SELANJUTNYA	

Gambar 1.8: Sistematika penulisan disertasi dikaitkan dengan struktur bab.

BAB 2

LANDASAN TEORI TENTANG

REKONSTRUKSI CITRA 3D

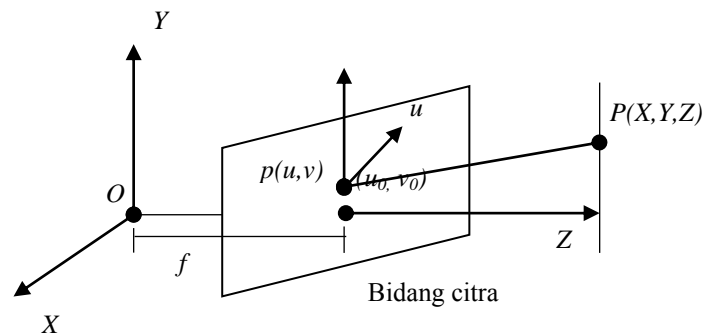
2.1 Pendahuluan

Telah dijelaskan pada bab sebelumnya bahwa untuk merekonstruksi citra 3D diperlukan beberapa tahapan seperti pengambilan citra stereo, kalibrasi kamera, *image matching*, dan registrasi citra. Pada bab 2 ini dipaparkan beberapa teknik terkait dengan tahapan-tahapan tersebut.

2.2 Model Kamera Pinhole

Kamera memiliki peranan penting dalam rekonstruksi citra 3D. Kamera digunakan untuk memproyeksikan obyek dalam ruang 3D ke ruang 2D [23]. Terdapat beberapa pendekatan untuk memodelkan geometri kamera yaitu Kamera Pinhole (*Pinhole Camera*), *Weak-Perspective Camera*, *Thin Lens Camera*, dan *Thick Lens Camera* [24]. Dalam disertasi ini digunakan kamera pinhole karena kamera pinhole dapat dijadikan sebagai acuan untuk rekonstruksi 3D [11]. Dalam penelitian rekonstruksi 3D, kamera pinhole digunakan sebagai sebuah pendekatan untuk menggambarkan proyeksi sebuah obyek dalam sebuah citra ke dalam dunia nyata [15]. Dengan menggunakan pendekatan kamera pinhole, kedalaman suatu obyek atau jarak antara obyek terhadap kamera dapat diketahui. Model kamera pinhole terdiri dari bidang citra dan pusat proyeksi. Bidang citra adalah tempat dimana obyek direfleksikan sedangkan pusat proyeksi adalah tempat dimana arah

sinar menuju. Jarak antar pusat proyeksi dengan bidang citra disebut *focal length* (f).



Gambar 2.1: Model Kamera Pinhole

Gambar 2.1 menunjukkan sebuah kamera dengan pusat proyeksi O . Bidang citra berada pada fokus dan karenanya *focal length* f jauh dari O . (X, Y, Z) adalah koordinat dari sebuah titik 3D di ruang koordinat dunia; (u, v) adalah koordinat sebuah titik pada citra; (u_0, v_0) adalah *principal point* atau pusat citra.

2.3 Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera adalah proses yang penting dalam rekonstruksi objek 3D dari sebuah citra 2D [25]. Kalibrasi kamera digunakan untuk mendapatkan parameter intrinsik dan ekstrinsik dari sebuah kamera. Parameter ekstrinsik menggambarkan posisi dari sebuah kamera terhadap sistem koordinat dunia, sedangkan parameter intrinsik meliputi fokus kamera yang merupakan jarak kamera terhadap bidang gambar (*focal length*), titik pusat proyeksi yang merupakan titik tengah bidang gambar, koefisien distorsi lensa dan faktor skala citra. Nilai dari parameter intrinsik bersifat konstan karena parameter dari sebuah

optik kamera tidak berubah dalam kondisi apapun, sedangkan parameter ekstrinsik bergantung pada posisi kamera [26]. Jika posisi dari kamera berubah maka nilai parameter ekstrinsik juga berubah.

Kamera kalibrasi dapat digolongkan menjadi 2 kategori yaitu *photogrammetric calibration* dan *self calibration* [27]. *Photogrammetric calibration* adalah proses kalibrasi yang geometri dalam ruang 3D yang sudah diketahui, sedangkan *self calibration* adalah proses kalibrasi yang digunakan pada objek statis sehingga beberapa gambar yang diambil dari kamera yang sama dan parameter intrinsik yang sama cukup untuk mendapatkan parameter eksternalnya.

Matriks proyeksi kamera H adalah matriks 3×4 yang mendeskripsikan bagaimana sebuah titik $P(X, Y, Z)$ pada ruang tiga dimensi terproyeksikan ke sebuah titik $p(x, y)$ pada sebuah gambar. Dengan menggunakan representasi homogen, formula tersebut adalah sebagai berikut:

$$p = \begin{bmatrix} sx \\ sy \\ s \end{bmatrix} = HP = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Dengan s adalah faktor skala.

Matriks proyeksi H dapat disusun dengan menggunakan kalibrasi kamera. Formulasnya adalah sebagai berikut :

$$H = K[R | -RT] \quad (2.2)$$

K adalah matriks 3×3 sebagai berikut

$$K = \begin{bmatrix} \frac{f}{d_x} & 0 & c_x \\ 0 & \frac{f}{d_y} & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Dengan d_x adalah ukuran horisontal *pixel*, d_y adalah ukuran vertikal *pixel*, c_x adalah posisi pusat horisontal gambar, c_y adalah posisi pusat vertikal gambar, f adalah *focal length*.

Matriks R adalah matriks rotasi 3×3 yang mendeskripsikan orientasi dari kamera. R mempunyai tiga derajat kebebasan yang dideskripsikan sebagai (ψ, θ, ϕ) dimana masing-masing merepresentasikan x , y dan z .

$$R = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}$$

Matriks yang terakhir adalah matriks

$$T = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T \quad (2.4)$$

Matriks ini merupakan matriks posisi pusat proyeksi kamera pada koordinat dunia.

2.4 Peningkatan Kualitas Citra (*Image Enhancement*)

Peningkatan kualitas citra digunakan untuk mempertajam atau memperjelas suatu citra. Peningkatan kualitas citra dapat dilakukan dengan

beberapa cara, yaitu pengubahan kecerahan citra, manipulasi tingkat keabuan (*graylevel*) dan kontras, penajaman tepian, *filtering* atau penyaringan, dan pengurangan derau atau *noise reduction*. Peningkatan kualitas citra diperlukan karena kualitas citra asli yang buruk yang bisa diakibatkan oleh banyak faktor. Dalam penelitian ini, peningkatan kualitas citra diperlukan karena data citra diambil dari bawah laut. Penyerapan dan hamburan cahaya air laut menyebabkan penurunan kualitas citra.

2.4.1 Contrast Stretching

Solomon dan Breckon [28] menyatakan bahwa *contrast stretching* dapat juga dikatakan sebagai metode normalisasi yang bekerja dengan cara merenggangkan skala intensitas piksel dari sebuah citra masukan untuk memenuhi ruang skala yang lebih lebar.

$$P_{out} = (P_{in} - c) \frac{(b - a)}{(d - c)} + a \quad (2.5)$$



a. Citra Asli



b. Citra Hasil Contrast Stretching

Gambar 2.2: Peningkatan kualitas citra dengan *contrast stretching* [29].

Langkah pertama pada tahapan *contrast stretching* adalah menentukan batas ambang bawah a dan batas ambang atas b dari citra yang akan diperbaiki

kualitasnya. Untuk citra skala keabuan 8-bit biasanya nilai a dan b berturut-turut adalah 0 dan 255. Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai intensitas yang maksimum d dan minimum c pada citra tersebut. Gambar 2.2 menunjukkan perbedaan kualitas citra sebelum dan sesudah penerapan *contrast stretching* pada citra bawah laut.

2.4.2 Histogram Equalization

Histogram Equalization (HE) merupakan proses perataan distribusi nilai derajat keabuan pada histogram suatu citra. Proses perataan histogram dapat digunakan untuk memperbaiki nilai kontras suatu citra. Histogram adalah grafik yang menggambarkan penyebaran nilai intensitas pixel dari suatu citra.

Misalkan sebuah citra f yang berdimensi $M \times N$, dengan nilai skala keabuan r_k dengan k merupakan banyaknya kemungkinan nilai intensitas derajat keabuan yang biasanya bernilai 0–255. Langkah awal HE adalah melakukan normalisasi histogram atau menghitung *probability density function* $p(r_k)$ untuk setiap nilai derajat keabuan dengan menggunakan rumus (2.6).

$$p(r_k) = \frac{n_k}{M \times N} \quad (2.6)$$

Dengan n_k adalah jumlah piksel dengan intensitas k .

Dengan menggunakan hasil perhitungan *probability density function*, maka hasil *histogram equalization* s_k dapat dihasilkan dengan menggunakan Persamaan 2.7.

$$s_k = T(r_k) = \text{floor} \left((L-1) \sum_{k=0}^n p(r_k) \right) \quad (2.7)$$

Dengan $T(r_k)$ adalah transformasi nilai s_k keabuan hasil *histogram equalization*, n_k jumlah piksel dengan intensitas k .

Sebagai contoh, sebuah citra f yang berukuran 5×6 piksel dengan nilai derajat keabuan seperti Gambar 2.3. Dengan menggunakan Persamaan 2.6 maka didapat nilai *probability density function* $p(r_k)$ untuk setiap nilai derajat keabuan seperti pada tabel 2.1.

$$f = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 1 & 4 & 4 \\ 3 & 1 & 3 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 5 & 6 & 1 & 7 & 1 \\ 4 & 5 & 5 & 6 & 7 & 7 \\ 4 & 5 & 6 & 6 & 7 & 7 \end{bmatrix}$$

Gambar 2.3: Nilai intensitas keabuan citra asal

Tabel 2.1: Perhitungan *probability density function*

k	r_k	n_k	$p(r_k)$
0	0/7	1	0,033
1	1/7	4	0,133
2	2/7	3	0,1
3	3/7	3	0,1
4	4/7	6	0,2
5	5/7	4	0,133
6	6/7	4	0,133
7	1	5	0,166

Dengan menggunakan Persamaan 2.7, maka:

$$s_0 = T(r_0) = (8-1) \times \sum_{k=0}^0 p(r_k) = 7 \times 0,033 = 0,233$$

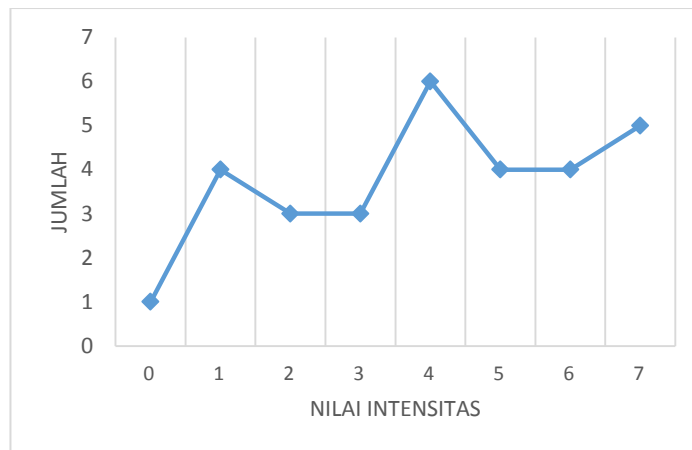
$$s_1 = T(r_1) = (8-1) \times \sum_{k=0}^1 p(r_k) = 7 \times (0,033 + 0,133) = 0,022$$

Tabel 2.2: Perhitungan hasil *histogram equalization*

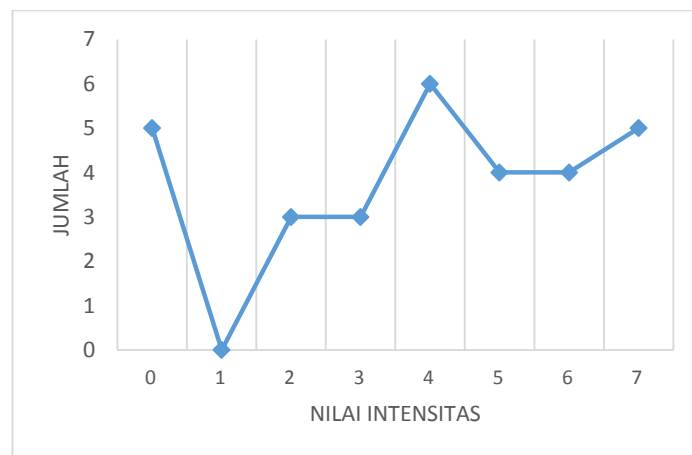
k	r_k	n_k	$p(r_k)$	$(L-1) \sum_{k=0}^n p(r_k)$	S_k
0	0/7	1	0,033	0.233	0
1	1/7	4	0,133	0.022	0
2	2/7	3	0,1	1.866	2
3	3/7	3	0,1	2.566	3
4	4/7	6	0,2	3.966	4
5	5/7	4	0,133	4.9	5
6	6/7	4	0,133	5.833	6
7	1	5	0,166	7	7

$$f = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 1 & 4 & 4 \\ 3 & 1 & 3 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 5 & 6 & 1 & 7 & 1 \\ 4 & 5 & 5 & 6 & 7 & 7 \\ 4 & 5 & 6 & 6 & 7 & 7 \end{bmatrix} \longrightarrow f = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 0 & 4 & 4 \\ 3 & 0 & 3 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 5 & 6 & 0 & 7 & 0 \\ 4 & 5 & 5 & 6 & 7 & 7 \\ 4 & 5 & 6 & 6 & 7 & 7 \end{bmatrix}$$

Gambar 2.4: Nilai intensitas keabuan sebelum dan sesudah HE



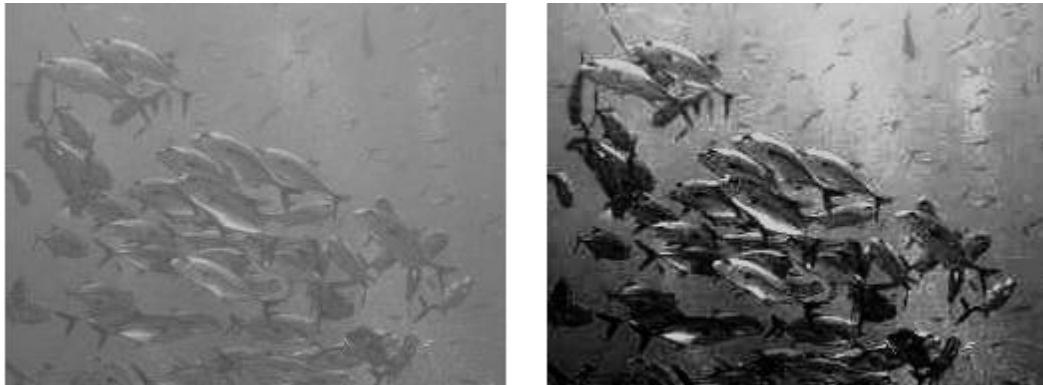
a. Sebelum



b. Sesudah

Gambar 2.5: Histogram sebelum dan sesudah HE

Citra yang telah diterapkan *histogram equalization* akan memiliki histogram yang terdistribusi merata pada seluruh tingkat keabuan. Histogram citra yang mengumpul pada daerah gelap akan memiliki citra yang redup, sedangkan histogram citra yang mengumpul pada daerah terang atau terkonsentrasi pada intensitas citra yang tinggi menampilkan citra yang terang.



a. Citra sebelum HE

b. Citra sesudah HE

Gambar 2.6: Perbedaan kualitas citra sebelum dan sesudah HE [29].

2.4.3 Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)

Adaptive Histogram Equalization (AHE) merupakan teknik yang dapat mengatasi kekurangan Histogram Equalization (HE) dengan cara meningkatkan nilai kontras pada area lokal sebuah citra, namun peningkatan nilai kontras tersebut terjadi secara berlebihan. Dengan menggunakan *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLAHE), peningkatan nilai kontras yang berlebihan pada AHE dapat diatasi dengan pemberian nilai batas (*clip limit*) pada histogram sehingga kontras dapat meningkat namun tidak berlebihan walaupun bekerja pada area lokal.

CLAHE beroperasi pada daerah kecil di citra yang disebut blok. Setiap blok ditingkatkan nilai kontrasnya, sehingga histogram dari wilayah sekitar cocok untuk histogram tertentu. Setelah melakukan pemerataan, CLAHE menggabungkan blok tetangga menggunakan interpolasi bilinier untuk menghilangkan batas-batas artifisial. CLAHE juga dapat digunakan untuk menghindari derau yang ada pada citra dengan membatasi kontras pada daerah

homogen. Gambar 2.7 menunjukkan perbedaan histogram antara citra sebelum dan sesudah penerapan CLAHE.



a. Citra sebelum CLAHE



b. Citra sesudah CLAHE

Gambar 2.7: Perbedaan kualitas citra sebelum dan sesudah CLAHE [29].

2.5 Algoritma *Image matching*

Image matching banyak digunakan untuk kebanyakan masalah *computer vision*, seperti pengenalan obyek atau benda yang diambil dari pergerakan kamera [30] [31] dan klasifikasi scene [32]. Dalam disertasi ini, *image matching* digunakan untuk menemukan titik korespondensi pada citra stereo permukaan dasar laut. Ada dua algoritma *image matching* yang dibahas dalam disertasi ini yaitu *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT) dan *Speeded up Robust Features* (SURF). Dari beberapa pustaka, SIFT lebih unggul dibandingkan dengan SURF. Penelitian yang dilakukan oleh Juan dan Gwun [12] menyatakan bahwa SIFT lebih unggul dibandingkan dengan SURF setelah pengujian terhadap perubahan skala, rotasi, blur. SIFT lebih banyak menemukan titik korespondensi dibandingkan dengan SURF [14]. Kelebihan SURF terletak pada kecepatan prosesnya dibandingkan dengan SIFT [12].

2.5.1 Scale Invariant Feature Transform (SIFT)

Image matching dan pemodelan 3D adalah konsep yang sering digunakan dalam bidang *computer vision*. *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT) merupakan salah satu algoritma *image matching* yang sangat handal. Algoritma SIFT terdiri dari beberapa tahap, yaitu: menentukan nilai ekstrim pada ruang skala, penentuan keypoint, penentuan orientasi, dan deskriptor keypoint.

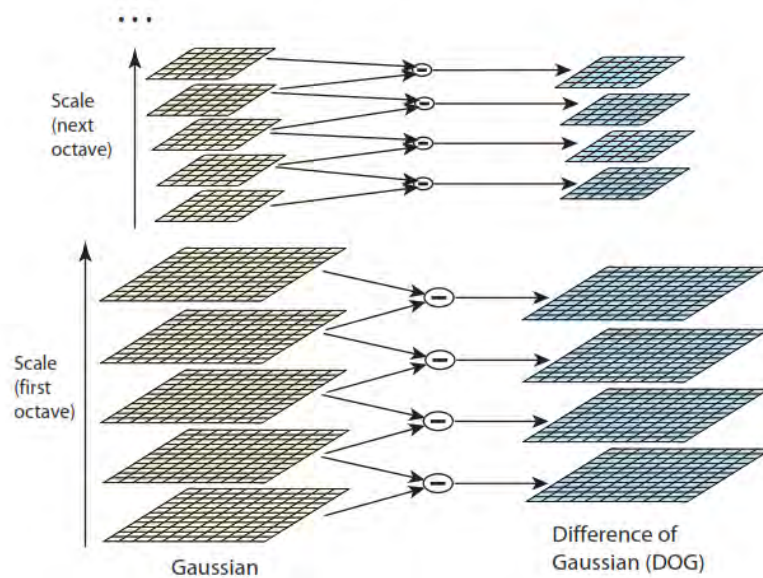
Tahap awal algoritma SIFT adalah pendefinisian jumlah *octave* dan *scale* sebelum proses penentuan nilai ekstrim pada ruang skala. Untuk menentukan nilai ekstrim, ukuran citra harus diperkecil dan dikaburkan (*blur*) dalam beberapa tingkatan dengan menggunakan fungsi Gaussian Blur untuk dapat menentukan titik ekstrimnya. Pada dasarnya SIFT menentukan 4 *octave* dan 5 tingkatan blur. Citra akan diperkecil menjadi setengah ukuran semula. Hasil perhitungan Gaussian citra saat ini, sebelumnya dan sesudahnya atau *Difference of Gaussian* (DoG) akan digunakan untuk menghasilkan nilai ekstrim. Ilustrasi penggunaan DoG ditunjukkan pada Gambar 2.8. Citra pada ruang skala didefinisikan sebagai fungsi $L(x, y, \sigma)$ yang diperoleh dari hasil konvolusi skala variabel Gaussian $G(x, y, \sigma)$ dengan citra masukan $I(x, y)$, sesuai dengan Persamaan 2.10. Hasil konvolusi citra dengan filter DoG $G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)$ merupakan selisih citra blur dengan skala $k\sigma$ dan σ yang ditunjukkan oleh Persamaan 2.10.

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (2.8)$$

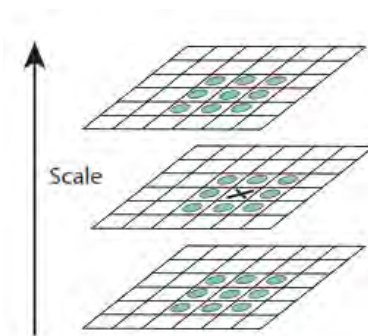
$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (2.9)$$

$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (2.10)$$

Keypoint ditentukan berdasarkan nilai minimum dan maksimum dari citra DoG. Setiap piksel didalam citra DoG akan dibandingkan dengan 26 piksel disekitarnya. Piksel yang memiliki nilai minimum atau maksimum maka piksel tersebut dipilih sebagai kandidat *keypoint*. Keypoint yang memiliki kontras rendah akan dihilangkan. Gambar 2.9 menggambarkan ilustrasi tentang pemilihan *local extrema*.



Gambar 2.8: Diagram *Difference of Gaussian* [34].



Gambar 2.9: Deteksi *Local Extrema* [34].

Kandidat keypoint yang didapat kemudian akan ditentukan orientasinya berdasarkan gradient yang terbentuk dari citra yang sudah di konvolusi dengan fungsi Gaussian. Untuk citra $L(x, y, \sigma)$ pada skala σ , magnitudo $m(x, y)$, dan orientasi $\theta(x, y)$ ditentukan dengan Persamaan 2.11 dan 2.12.

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (2.11)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1}(((L(x, y+1) - L(x, y-1)) / L(x+1, y) - L(x-1, y))) \quad (2.12)$$

Masing-masing keypoint yang telah diorientasikan akan diberikan pencirian khusus (*descriptor*) dengan tujuan untuk mendapatkan keypoint yang invariant terhadap perubahan intensitas cahaya atau perubahan sudut pandang tiga dimensi. *Descriptor* akan diukur sebagai suatu histogram orientasi pada wilayah piksel 4×4 . Nilai orientasi diperoleh dari citra Gaussian yang memiliki skala terdekat dengan skala keypoint yang akan dihitung. Koordinat dari descriptor dan gradient orientasi akan di rotasi relatif terhadap orientasi dari keypoint. Keypoint yang berhasil diperoleh akan menjadi fitur-fitur lokal pada suatu citra dan akan dicocokkan dengan keypoint-keypoint yang terdapat pada citra lain.

2.5.2 Speed-Up Robust Features (SURF)

SURF terdiri dari dua tahapan utama, yaitu deteksi keypoint (*keypoint detection*) dan deskripsi keypoint (*keypoint descriptor*). Tahapan algoritma SURF diawali dengan mengubah citra RGB 24-bit menjadi citra *grayscale* 32-bit dengan menghitung nilai representasi citra integral. Penggunaan citra integral tersebut mampu mengurangi waktu komputasi *image matching*. Berbeda dengan SIFT yang menggunakan *Difference of Gaussian*, SURF menggunakan matrik *Hessian*

untuk mendeteksi keypoint. *Gaussian* memang optimal untuk analisa ruang skala, namun dalam prakteknya *Gaussian* membutuhkan proses diskritisasi dan pengecilan citra [35]. Matrik *Hessian* $H(x, \alpha)$ untuk setiap poin $x = (x, y)$ pada sebuah citra pada skala α ditunjukkan pada Persamaan 2.13.

$$H = \begin{bmatrix} L_{xx} & L_{xy} \\ L_{yx} & L_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Dengan L_{xx}, L_{xy}, L_{yy} merupakan konvolusi dari *Gaussian* turunan ke dua

$\frac{\partial^2}{\partial x^2} g(\sigma), \frac{\partial^2}{\partial xy^2} g(\sigma), \frac{\partial^2}{\partial y^2} g(\sigma)$, berturut-turut dengan citra I pada point x .

Dalam pembentukan piramid citra, SURF melakukan konvolusi tapis kotak dengan ukuran yang semakin besar dengan citra untuk membentuk piramid citra. Proses selanjutnya menghitung nilai dari determinan matriks *Hessian* kemudian mencari nilai ekstremanya (nilai maksima atau minima dibandingkan dengan nilai-nilai tetangganya). Lokalisasi calon fitur dilakukan dengan cara mencari lokasi calon fitur pada setiap ruang skala (*scale space*) dengan menggunakan metoda *non-maximum supression* terhadap ekstrema dari determinan matriks *Hessian*. Pemberian orientasi dilakukan kepada fitur-fitur yang sudah terdeteksi dengan menggunakan respon *Haar wavelet*. Tahapan terakhir menghitung deskriptor vektor dari titik-titik fitur yang sudah diberikan orientasi.

2.6 Iterative Closest Point

Iterative Closest Point (ICP) merupakan algoritma yang bersifat *iterative* atau algoritma yang mengandung proses perulangan. Dimisalkan bahwa terdapat dua kumpulan titik-titik 3D (*3D point cloud*) yang akan diregristrasikan. Titik data $p_i \{i=1, \dots, m\}$ dan $q_i \{i=1, \dots, n\}$ dengan m dan n adalah jumlah titik pada kumpulan titik di P dan Q . Algoritma ICP secara ringkas dijelaskan pada pseudocode berikut ini [36]:

1. Untuk setiap titik p_i , hitung titik terdekat antara p_i dan q_i menggunakan *euclidean distance*, misal $\{p_i, q_i\}$ merupakan pasangan titik-titik yang sudah berkorespondensi dengan jarak *euclidean distance* yang paling kecil.
2. Dengan menggunakan pasangan titik yang saling berkorespondensi tersebut, hitung rotasi R dan translasi t , sehingga meminimalkan nilai MSE dari pasangan titik tersebut. Dengan MSE ditunjukkan pada Persamaan 2.14:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|(R \cdot p_i + t) - q_i\|^2 \quad (2.14)$$

Dengan N adalah jumlah titik dari *point cloud* P dan Q .

3. Transformasikan P sesuai dengan (R, t) yang sudah dihasilkan pada proses sebelumnya. Ulangi dari langkah pertama jika nilai MSE masih

lebih besar dari nilai threshold τ yang telah ditetapkan sebelumnya atau jumlah iterasi melebihi jumlah iterasi k_{\max} yang telah ditetapkan.

2.7 Uji-t Berpasangan

Evaluasi pencocokan fitur oleh SIFT biasanya dilakukan dengan menghitung banyaknya jumlah titik yang saling berkorespondensi antara sebelum dan sesudah peningkatan kinerja algoritma SIFT. Namun dalam penelitian ini juga digunakan uji-*t* yang merupakan salah satu uji statistik untuk mengetahui apakah ada perbedaan rata-rata yang signifikan antara 2 kelompok data uji. Dalam disertasi ini, uji-*t* digunakan untuk mengetahui perbedaan rata-rata jumlah titik korespondensi antara sebelum dan sesudah perbaikan kualitas citra apakah signifikan atau tidak.

Uji-*t* dibedakan menjadi 3 macam, yaitu uji-*t* satu sampel (*one sample t-test*), uji-*t* sampel bebas (*independent samples t-test*), dan uji-*t* untuk sampel berpasangan (*paired samples t-test*). Tiap-tiap jenis uji-*t* memiliki fungsi yang berbeda-beda. Uji-*t* satu sampel digunakan untuk menentukan apakah sampel memiliki nilai rata-rata yang berbeda dengan nilai rata-rata acuan. Uji-*t* sampel bebas digunakan untuk menguji kesamaan rata-rata dari 2 populasi yang bersifat independen dimana populasi yang satu tidak dipengaruhi atau tidak berhubungan dengan populasi yang lain. Uji-*t* sampel berpasangan digunakan untuk membandingkan rata-rata 2 kelompok yang saling berpasangan. Dua sampel berpasangan artinya sampel dengan subyek yang sama namun mengalami dua perlakuan atau pengukuran yang berbeda.

Disertasi ini menambahkan uji- t berpasangan untuk mengetahui kinerja SIFT secara statistik. Uji- t berpasangan digunakan untuk mengetahui perbedaan antara 2 pengamatan, dalam kasus penelitian ini pengamatan tersebut adalah kinerja SIFT sebelum dan sesudah perbaikan kualitas citra. Uji- t berpasangan ditunjukkan pada Persamaan 2.19. Terdapat pengujian 2 hipotesa dalam uji- t , yaitu menolak hipotesa null atau menerima hipotesa null. Hipotesa null diterima jika $t_{hitung} \leq t_{tabel}$ yang artinya tidak ada perbedaan rata-rata yang signifikan diantara 2 sampel yang diuji, namun jika $t_{hitung} > t_{tabel}$ maka hipotesa null ditolak yang artinya terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan diantara 2 sampel yang diuji. t_{tabel} diketahui dengan cara mencari perpotongan antara baris dan kolom pada tabel t . Baris pada tabel t mewakili nilai df (*degree of freedom*) dan kolom mewakili tingkat kepercayaan 0.05 (95%) atau 0.01 (99%).

$$df = n - 1 \quad (2.15)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (2.16)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (2.17)$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2}{n - 1}} \quad (2.18)$$

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d / \sqrt{n}} \quad (2.19)$$

Dengan n adalah jumlah data sampel, x adalah data pada kelompok x , y adalah data pada kelompok y , d adalah selisih diantara masing-masing obyek yang berpasangan, \bar{d} adalah nilai rata-rata dari d , S_d adalah standar deviasi dari d .

2.8 Analisis Varians

Analisis varians atau Analysis of Varians (ANOVA) merupakan pengembangan dari uji-t. Perbedaan dari uji-t dan ANOVA adalah uji-t hanya digunakan untuk menguji perbedaan rata-rata μ antara 2 sampel atau 2 kelompok, sedangkan ANOVA dapat digunakan untuk menguji perbedaan rata-rata antara 2 sampel atau lebih. Perbedaan rata-rata yang besar belum tentu signifikan, sehingga diperlukan uji-t atau uji ANOVA untuk mengetahui tingkat signifikan perbedaan rata-rata antar kelompok. Secara sederhana, tahapan-tahapan uji ANOVA adalah sebagai berikut:

1. Menentukan hipotesis nol dan hipotesis alternatif

Terdapat 2 pengujian hipotesa di dalam ANOVA, yaitu hipotesa nol dan hipotesa alternatif yang masing masing disimbolkan oleh H_0 dan H_1 . Jika hipotesa nol terpenuhi maka dapat disimpulkan tidak ada perbedaan rata-rata yang signifikan antar kelompok, namun sebaliknya jika hipotesa alternatif terpenuhi maka dapat disimpulkan terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antar kelompok.

$$H_0 : \mu_A = \mu_B = \mu_C$$

$$H_1 : \mu_A \neq \mu_B \neq \mu_C$$

2. Menghitung Variabilitas Sampel (SS)

Perhitungan variabilitas data dikelompokkan dalam 3 bagian, yaitu:

- a. Total of Sum Square (SS_t) merupakan jumlah kuadrat selisih antara skor individual dengan rata-rata totalnya.

$$SS_t = \sum x^2 - \frac{G^2}{N} \quad (2.20)$$

- b. Variabilitas Antar Kelompok (SS_b)

$$SS_b = \sum \frac{T^2}{n} - \frac{G^2}{N} \quad (2.21)$$

- c. Variabilitas Dalam Kelompok (SS_w)

$$SS_w = SS_t - SS_b \quad (2.22)$$

Dengan x adalah data pada masing-masing kelompok, k adalah jumlah kelompok, T adalah total x dari masing-masing kelompok, G adalah total x dari seluruh kelompok.

3. Derajat Kebebasan (df)

Terdapat 3 derajat kebebasan dalam ANOVA, yaitu:

- a. Derajat kebebasan untuk SS_t yang dilambangkan dengan v_{SS_t} ,

$$v_{SS_t} = N - 1 \quad (2.23)$$

b. Derajat kebebasan untuk SSb

$$v_{SSb} = k - 1 \quad (2.24)$$

c. Derajat kebebasan untuk SSw

$$v_{SSw} = N - k \quad (2.25)$$

Dengan N adalah jumlah sampel keseluruhan, n adalah jumlah sampel masing-masing kelompok, dan k adalah jumlah kelompok.

4. Menghitung variance antar kelompok dan dalam kelompok

$$MS_b = \frac{SSb}{v_{SSb}} \quad (2.26)$$

$$MS_w = \frac{SSw}{v_{SSw}} \quad (2.27)$$

5. Menghitung distribusi F_{hitung}

Penarikan kesimpulan dilakukan dengan membandingkan antara F_{Tabel} dan F_{hitung} . F_{hitung} dihitug dengan melihat nilai α , v_{SSb} sebagai pembilang (kolom atas dari kiri ke kanan), sedangkan v_{SSw} merupakan penyebut (kolom kiri atas ke bawah). Perpotongan antara v_{SSb} dan v_{SSw} merupakan nilai F_{Tabel} . Hasil dari semua perhitungan di ANOVA diilustrasikan di tabel 2.3.

$$F_{hitung} = \frac{MSb}{MSw} \quad (2.28)$$

Jika $F_{hitung} > F_{tabel}$ maka H_0 ditolak

Jika $F_{hitung} \leq F_{tabel}$ maka H_0 diterima

Tabel 2.3: Tabel ANOVA

Sumber Keragaman	df	SS	MS	F_{Hitung}
Antar Perlakuan	$V_{SSb} = k - 1$	SSb	$MSb = \frac{SSb}{V_{SSb}}$	$F_{Hitung} = \frac{MSb}{MSw}$
Dalam Perlakuan	$V_{SSw} = N - k$	$SSw = SS_t - SSb$	$MSw = \frac{SSw}{V_{SSw}}$	
Total	$V_{SS_t} = N - 1$	SS_t		

2.9 Tukey's HSD Post Hoc Test

Post hoc test merupakan kelanjutan dari pengujian ANOVA yang dapat digunakan untuk mengetahui kelompok sampel manakah yang memiliki perbedaan yang signifikan. Dalam penelitian ini digunakan Tukey's HSD post hoc test. HSD merupakan kepanjangan dari *Honestly Significant Difference*. Berikut langkah-langkah perhitungan Tukey's HSD:

1. Menghitung rata-rata tiap kelompok sampel.
2. Menghitung selisih rata-rata antar kelompok sampel.
3. Menghitung nilai HSD dengan Persamaan 2.29.

$$HSD = q \sqrt{\frac{MS_w}{n}} \quad (2.29)$$

Dengan n adalah jumlah sampel yang digunakan, MS_w adalah nilai varian dalam kelompok yang diperoleh dari perhitungan ANOVA, dan q adalah nilai dari tabel Q yang didapat dengan cara mencari perpotongan nilai antara baris nilai $df = N - k$ dan kolom nilai k . Pada tabel Q tersebut terdapat 2 baris nilai, secara berturut-turut baris pertama dan kedua menunjukkan nilai pada tingkat kepercayaan 0.05 dan 0.01.

4. Membandingkan selisih rata-rata tiap kelompok dengan nilai HSD . Jika selisih rata-rata tersebut lebih besar dari nilai HSD , maka pada kelompok tersebut terjadi perbedaan rata-rata yang signifikan.

BAB 3

ANALISA PENGARUH PERBEDAAN MEDIUM AIR DAN UDARA TERHADAP KALIBRASI KAMERA

3.1 Pendahuluan

Kalibrasi kamera adalah salah satu langkah awal untuk melakukan rekonstruksi citra 3D [37]. Pada kamera stereo, proses kalibrasi harus dilalui untuk mendapatkan posisi relatif antara kamera dengan obyek citranya. Kalibrasi kamera digunakan untuk mendapatkan nilai parameter intrinsik dan ekstrinsik dari setiap kamera yang kemudian digunakan untuk proses pencarian titik-titik 3D [38].

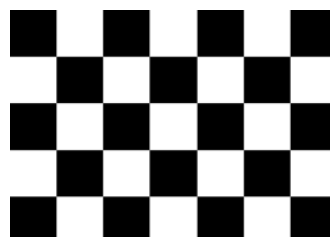
Terdapat beberapa penelitian yang berkaitan dengan proses metode kalibrasi kamera diantaranya proses kalibrasi pada kamera tunggal [39] [40] [41] [42] [43], semua metode ini menggunakan pendekatan bahwa titik fitur kalibrasi koordinat dunianya telah diketahui. Sebuah algoritma kalibrasi yang paling populer ialah dengan metode Tsai [39] menggunakan *radial alignment constraint*, akan tetapi pada metode ini memerlukan inisialisasi awal kamera dan hanya berlaku untuk lensa distorsi radial saja. Selain itu penelitian oleh Weng [41]

mengusulkan kalibrasi kamera dengan model distorsi. Selanjutnya Zhang [40] mengusulkan sebuah teknik yang fleksibel untuk kalibrasi kamera dengan melihat obyek dari perspektif yang berbeda. Walaupun algoritmanya cukup kompleks, namun *Zhang's Calibration* dapat mengatasi permasalahan distorsi pada lensa kamera [44].

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh perbedaan medium air dan udara terhadap hasil kalibrasi kamera. Teknik kalibrasi yang digunakan pada penelitian ini ialah dengan metode Zhang [40]. Metode ini tergolong teknik kalibrasi yang fleksibel karena hanya memerlukan observasi pola planar paling sedikit dua dengan orientasi pola yang berbeda dengan arah pergerakan yang bebas. Metode Zhang juga mampu menghasilkan hasil yang akurat [45]. Model kamera pinhole digunakan untuk mendapatkan perbedaan *focal length* tersebut.

3.2 Metode Kalibrasi Zhang

Penelitian ini menggunakan MATLAB sebagai tool untuk melakukan kalibrasi dengan metode Zhang. MATLAB *Calibration Toolbox* digunakan untuk memperoleh parameter intrinsik dan ekstrinsik. Penelitian ini menggunakan papan catur berukuran 17.5×22.5 cm untuk melakukan kamera kalibrasi. Pola papan catur tersebut berukuran 2.5×2.5 cm. Pola papan catur ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1: Pola Papan Catur (*Checkerboard Pattern*).

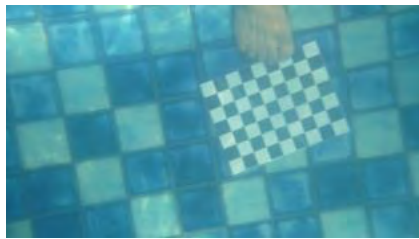
Tahapan pertama pada proses kalibrasi adalah mengambil video dari papan catur tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Pengambilan video menggunakan sepasang kamera stereo tahan air. Video yang berhasil direkam kemudian diekstrak hingga mendapatkan citra tunggal untuk setiap frame-nya. Citra tersebut akan digunakan untuk menentukan titik-titik pada citra papan catur menggunakan *MATLAB Calibration Toolbox*. Dengan mengetahui lokasi titik pada citra papan catur di koordinat dunia dan koordinat citra, parameter intrinsik dan ekstrinsik dapat diketahui.

3.3 Hasil Eksperimen

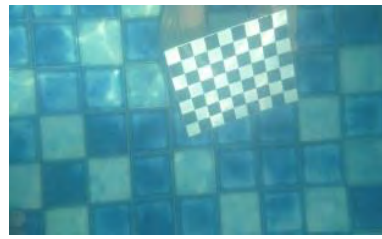
Bab ini memaparkan perbedaan hasil kalibrasi kamera yang dilakukan di darat dan di air. Eksperimen ini perlu dilakukan karena rekonstruksi 3D dilakukan untuk permukaan dasar laut sehingga kalibrasi kamera yang digunakan adalah kalibrasi yang dilakukan pada medium air. Eksperimen dilakukan pada empat *scene* yang berbeda. Tabel 3.1 memberikan keterangan bagaimana proses kalibrasi pada masing-masing *scene* dilakukan. Pada proses pengambilan citra tersebut, kamera berjarak 1 meter terhadap papan catur. Gambar 3.2-3.5 menggambarkan citra stereo pada masing-masing *scene*.

Tabel 3.1: Proses kalibrasi pada empat *scene* yang berbeda.

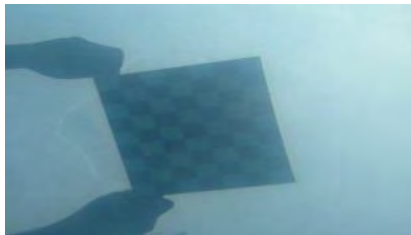
<i>Scene</i>	Medium	Keterangan
1	Air	Kalibrasi dilakukan dengan cara meletakkan papan catur di dasar kolam renang (Gambar 3.2)
2	Air	Kalibrasi dilakukan dengan meletakkan kamera di dasar kolam renang (Gambar 3.3)
3	Udara	Kalibrasi dilakukan dengan meletakkan papan catur diatas permukaan tanah (Gambar 3.4)
4	Udara	Kalibrasi dilakukan dengan meletakkan kamera diatas permukaan tanah (Gambar 3.5)



a. Citra pada kamera A



b. Citra pada kamera B

Gambar 3.2: Citra stereo di *scene* 1.

a. Citra pada kamera A

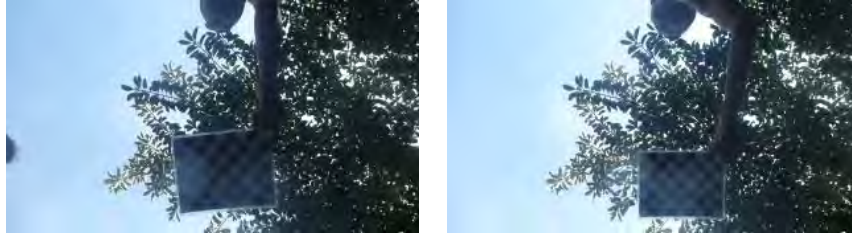


b. Citra pada kamera B

Gambar 3.3: Citra stereo di *scene* 2.

- a. Citra pada kamera A b. Citra pada kamera B

Gambar 3.4: Citra stereo di *scene 3*.



- a. Citra pada kamera A b. Citra pada kamera B

Gambar 3.5: Citra stereo di *scene 4*.

Dari hasil kamera kalibrasi didapatkan parameter intrinsik yang berupa *focal length* kamera (dalam satuan milimeter) seperti yang terlihat pada Tabel 3.2 sampai Tabel 3.9. Hasil perbandingan kalibrasi ini fokus pada perbandingan *focal length*, karena erat kaitannya dengan jarak antara kamera terhadap obyek. Dalam tabel tersebut tampak dua angka *focal length*. Angka pertama menunjukkan *Front Focal Length* (FFL) dan angka kedua menunjukkan *Back Focal Length* (BFL). FFL adalah jarak dari titik fokus depan sistem ke simpul permukaan optik pertama dan BFL adalah jarak dari titik dari permukaan terakhir dari sistem optik ke titik fokus belakang. Perhitungan FFL dan BFL ditunjukkan pada Persamaan 3.1 dan 3.2.

$$FFL = f \left(1 + \frac{(n-1)d}{nR_2} \right) \quad (3.1)$$

$$BFL = f \left(1 - \frac{(n-1)d}{nR_1} \right) \quad (3.2)$$

Dengan f adalah *focal length*, d adalah ketebalan lensa, R_1 dan R_2 adalah jari-jari kelengkungan permukaan lensa, n adalah indeks bias perbandingan antara

kecepatan cahaya dalam ruang hampa udara dengan cepat rambat cahaya pada suatu medium. Secara matematis, indeks bias dirumuskan pada Persamaan 3.3:

$$n = \frac{c}{v_p} \quad (3.3)$$

Dengan c adalah kecepatan cahaya dan v_p adalah cepat rambat cahaya pada suatu medium. Perbandingan rasio dari *focal length* tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.10 dan Tabel 3.11. Dari perbandingan rasio *focal length* tampak bahwa perbedaan *focal length* antara kalibrasi kamera di medium udara dan air berkisar antara 34% hingga 36%.

Tabel 3.2: Parameter Internal Kamera A (*scene 1*)

Focal Length	[2336.55142 ; 2251.54179]
Principal point	[1015.42741 ; 612.80567]
Skew	[0.000]
Distortion	[1.80762 ; 23.57775 ; 0.04045 ; 0.02659 ; 0.00000]

Tabel 3.3: Parameter Internal Kamera B (*scene 1*)

Focal Length	[3546.58038 ; 3536.72590]
Principal point	[775.06783 ; 554.34043]
Skew	[0.000]
Distortion	[1.07388 ; -1.48081; 0.01339 ; -0.07995 ; 0.00000]

Tabel 3.4: Parameter Internal Kamera A (*scene 2*)

Focal Length	[3248.88908 ; 3189.11039]
Principal point	[588.55092 ; 627.59114]
Skew	[0.000]
Distortion	[0.37051 ; 1.46346 ; -0.00325 ; -0.07250; 0.00000]

Tabel 3.5: Parameter Internal Kamera B (*scene 2*)

Focal Length	[3196.54243 ; 3462.76878]
Principal point	[984.69315 ; 1098.80372]
Skew	[0.000]
Distortion	[0.66753 ; 0.658630; 0.18290 ; 0.00682 ; 0.00000]

Tabel 3.6: Parameter Internal Kamera A (*scene 3*)

Focal Length	[1432.84688 ; 1462.41673]
Principal point	[933.07662 ; 569.87149]

Tabel 3.7: Parameter Internal Kamera B (*scene 3*)

Focal Length	[2304.29348 ; 2335.68072]
Principal point	[1144.41940 ; 769.30768]

Skew	[0.000]
Distortion	[0.13133 ; -0.06792 ; -0.02047 ; -0.00328 ; 0.00000]

Tabel 3.8: Parameter Internal Kamera A (*scene 4*)

Skew	[0.000]
Distortion	[0.38146 ; -0.02739 ; 0.05637 ; 0.02428 ; 0.00000]

Tabel 3.9: Parameter Internal Kamera B (*scene 4*)

Focal Length	[2186.89151 ; 2213.47632]
Principal point	[886.12285 ; 561.48380]
Skew	[0.000]
Distortion	[0.13097 ; 0.19313 ; 0.00289 ; -0.00976 ; 0.00000]

Focal Length	[2015.58720 ; 2320.56201]
Principal point	[913.13798 ; 542.45916]
Skew	[0.000]
Distortion	[0.22558 ; -0.01755 ; - 0.01510 ; -0.00291 ; 0.00000]

Tabel 3.10: Rasio *Focal Length* di Air (*Scene 1*) dan Udara (*Scene 3*)

	Kamera A	Kamera B	Rata-rata
Scene 1 (Medium air)	[2336; 2251]	[3546; 3536]	
Scene 3 (Medium udara)	[1432; 1462]	[2304; 2335]	
Rasio	[1432/2336=0.61 ; 1462/2251=0.65]	[2304/3546=0.65 ; 2335/3536=0.66]	0.64
			1-0.64=0.36

Tabel 3.11: Rasio *Focal Length* di Air (*Scene 2*) dan Udara (*Scene 4*)

	Kamera A	Kamera B	Rata-rata
Scene 2 (air)	[3248; 3189]	[3196; 3462]	
Scene 4 (udara)	[2186; 2213]	[2015; 2320]	
Rasio	[2186/3248=0.67 ; 2213/3189=0.69]	[2015/3196=0.63 ; 2320/3462=0.67]	0.66
			1-0.66=0.34

Dari hasil eksperimen yang didapat ternyata ada perbedaan hasil kalibrasi kamera yang dilakukan di darat dan di air. Perbedaan hasil kalibrasi tersebut tentunya mempengaruhi kualitas rekonstruksi citra 3D permukaan dasar laut.

Sehingga dalam eksperimen selanjutnya hasil kalibrasi yang dilakukan di dalam air akan digunakan untuk membentuk citra 3D permukaan dasar laut.

BAB 4

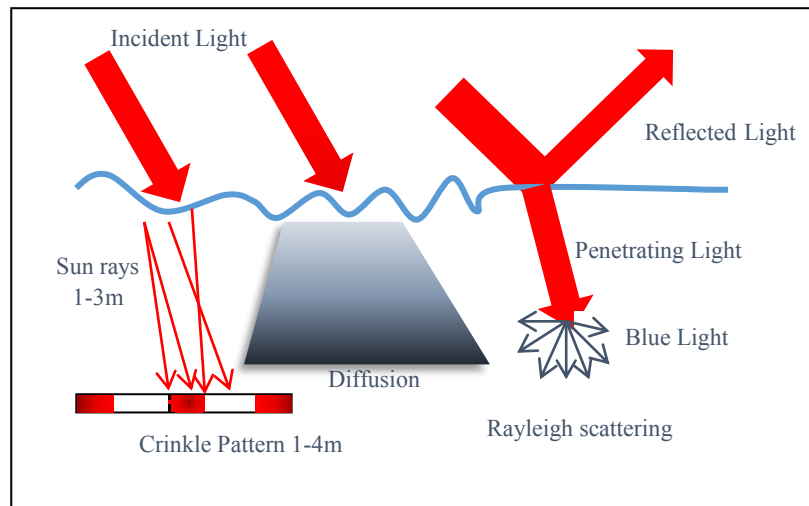
PENINGKATAN KUALITAS CITRA BAWAH LAUT MENGGUNAKAN FILTER ADAPTIF

4.1 Pendahuluan

Pemetaan permukaan dasar laut menjadi sebuah teknologi yang efisien dan murah yang dapat diterapkan untuk beberapa aplikasi, seperti pendataan warisan budaya yang terendam di bawah laut atau pemantauan lingkungan bawah laut yang terancam punah yang disebabkan oleh sumber-sumber yang berbahaya [37].

Keberhasilan proses rekonstruksi 3D permukaan dasar laut sangat tergantung pada kualitas citra dasar laut yang diperoleh. Rendahnya kualitas citra dasar laut dapat disebabkan oleh penyerapan dan hamburan cahaya [22]. Beberapa metode diusulkan untuk meningkatkan kualitas citra dasar laut tersebut [22] [46] [47] [29] [48]. Peningkatan kualitas citra dasar laut menjadi tahapan yang penting untuk aplikasi dasar laut yang berkenaan dengan *computer vision* dan *photogrammetry*, sebagai contoh rekonstruksi 3D menggunakan *stereo vision*. Hogue, dkk. [49] membangun perangkat penginderaan visi-inersia stereo untuk rekonstruksi struktur 3D yang kompleks di daerah permukaan bawah laut dan darat.

Dengan penyerapan dan polarisasi cahaya oleh air laut, beberapa piksel dalam sebuah citra dapat menjadi lebih terang dibandingkan dengan piksel yang lain. Gambar 4.1 menggambarkan sebuah proses yang menunjukkan interaksi antara cahaya dan gelombang air laut.



Gambar 1.1: Efek permukaan air [50]

Perbaikan kualitas citra dapat dikategorikan menjadi 2, yaitu teknik restorasi atau pemugaran citra (*image restoration technique*) dan teknik perbaikan citra (*image enhancement technique*) [46]. Keduanya memiliki tujuan yang sama yaitu untuk memperbaiki kualitas citra. Perbedaan keduanya adalah untuk teknik restorasi citra, penyebab degradasi atau penurunan kualitas citra perlu diketahui terlebih dahulu. Degradasi citra tersebut mungkin disebabkan oleh blur karena kamera tidak fokus atau pergerakan kamera [51]. Sedangkan teknik perbaikan citra fokus pada penajaman fitur sebuah citra, seperti penajaman tepi obyek citra dan kontras. Dengan perbedaan tersebut, disertasi ini mengusulkan penggunaan teknik perbaikan kualitas citra untuk meningkatkan kinerja algoritma SIFT.

Iqbal, dkk. mengusulkan sebuah pendekatan berbasis *slide stretching* untuk memperbaiki kualitas citra. Langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan *contrast stretching* terhadap warna *Red Green Blue* (RGB) sebuah citra untuk menyamakan kontras warna dalam citra. Langkah berikutnya adalah peregangan saturasi dan intensitas *Hue Saturation Intensity* (HSI) untuk meningkatkan warna dan mengatasi masalah pencahayaan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu meningkatkan kualitas citra piksel laut.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Iqbal, dkk. [48] mengusulkan penggunaan *Unsupervised Color Correction Method* (UCM) untuk perbaikan kualitas citra. Penelitian tersebut menerapkan 3 tahapan, yaitu equalisasi terhadap warna RGB, koreksi kontras terhadap warna RGB, dan koreksi kontras terhadap warna HSI. Deteksi tepi dan histogram digunakan untuk mengevaluasi metode yang diusulkan. Semakin banyak tepi yang berhasil dideteksi dan semakin lebar histogram, maka semakin tinggi kualitas citra yang dihasilkan. Pada penelitian tersebut, UCM dibandingkan dengan 3 metode, yaitu *Gray World* (GW), *Adobe Photoshop Histogram Equalisation* (APHE), dan *White Patch* (WP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang diusulkan menghasilkan hasil yang terbaik dibandingkan metode yang sudah ada. UCM mampu menghilangkan warna kebiruan, serta mampu meningkatkan nilai intensitas warna merah, pencahayaan yang rendah, dan warna asli dari citra dasar laut.

Prabhakar dan Kumar [5] mengusulkan kombinasi antara *homomorphic filtering*, *wavelet denoising*, *bilateral filter* dan *contrast equalization* untuk

perbaikan kualitas citra. Kombinasi metode tersebut digunakan secara sekuensial. Metode yang diusulkan di evaluasi menggunakan metode deteksi tepi. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu meningkatkan kualitas citra dasar laut. Beberapa metode peningkatan kualitas citra diusulkan termasuk manipulasi nilai *grayscale*, *filtering*, dan penggunaan *Histogram Equalization* (HE) [52].

Dalam disertasi ini diusulkan penggunaan filter adaptif dalam memperbaiki kualitas citra. Teknik filter adaptif yang diusulkan adalah *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLAHE) yang bekerja secara adaptif dengan cara meningkatkan kontras lokal suatu citra, berbeda dengan HE yang bekerja dengan meningkatkan kontras global suatu citra. Walaupun HE merupakan salah satu teknik yang sangat populer untuk meningkatkan kontras suatu citra [52], namun HE tidak dapat bekerja secara efektif jika citra memiliki daerah yang berdominan terang atau gelap.

CLAHE merupakan pengembangan dari *Adaptive Histogram Equalization* (AHE). Berbeda dengan HE yang bekerja pada seluruh region citra, AHE bekerja pada region kecil citra grayscale. Citra akan dibagi menjadi beberapa region yang disebut dengan *tile*. *Tile* tersebut akan diperbaiki kontrasnya dan *tile* yang saling bertetangga akan disatukan lagi. Permasalahan yang muncul dalam penggunaan AHE adalah peningkatan kontras yang terlalu berlebih. Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan CLAHE dengan memberikan nilai batas maksimum (*clip limit*) suatu histogram. CLAHE menjadi metode equalisasi

histogram yang sangat berhasil dalam mengatasi rendahnya kontras sebuah citra [53].

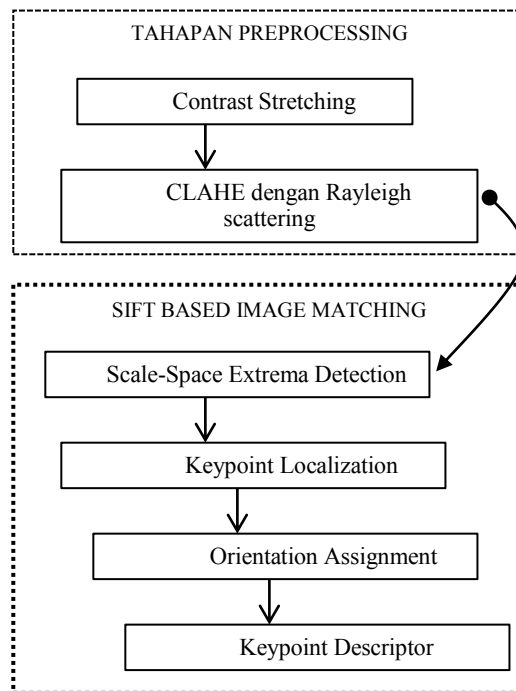
Kinerja algoritma CLAHE, *contrast stretching*, dan HE telah dibandingkan dan di analisa oleh Singh, dkk. [29], yang menyimpulkan bahwa CLAHE mampu meningkatkan kualitas citra secara efisien. Dalam penelitian yang lain, beberapa penggunaan distribusi histogram seperti *uniform*, *exponential*, dan *Rayleigh* telah dibandingkan untuk keperluan citra film berbasis radiografi panoramik gigi [54]. Dalam penelitian tersebut, CLAHE dengan distribusi Rayleigh menghasilkan citra yang memiliki kualitas yang paling baik.

Karena pengumpulan data diperoleh dari lingkungan terumbu karang bawah laut di daerah sekitar Pulau Karimunajawa, kendala yang muncul seperti penyerapan dan hamburan cahaya akan menghambat atau menurunkan kinerja dari algoritma SIFT. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan penggunaan filter adaptif yang berbasis CLAHE dengan menggunakan distribusi *Rayleigh* untuk meningkatkan kinerja dari algoritma SIFT. Kinerja dari algoritma SIFT tersebut di evaluasi dengan menghitung jumlah titik korespondensi seperti yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya [11] [32] [55] [56].

4.2 Metode Peningkatan Kualitas Citra

Sub bab ini mengusulkan penggunaan CLAHE untuk memperbaiki kualitas citra dasar laut. Banyaknya titik-titik korespondensi digunakan untuk mengevaluasi penggunaan CLAHE terhadap SIFT. Rekonstruksi permukaan 3D dasar laut juga dilakukan untuk melihat hasil nyata dari penggunaan CLAHE.

Gambar 4.2 memperlihatkan urutan langkah-langkah perbaikan kualitas citra oleh CLAHE untuk kinerja SIFT.



Gambar 1.2: Perbaikan kualitas citra oleh CLAHE untuk SIFT

Tidak semua titik korespondensi yang dihasilkan oleh SIFT adalah benar-benar titik yang saling berkorespondensi. Diantara titik korespondensi tersebut ada beberapa titik korespondensi yang dianggap outlier. Berikut tahapan-tahapan dalam menentukan outlier.

1. Mencari jarak maksimum dari titik-titik korespondensi yang ada.

2. Menentukan batasan jarak minimum dan maksimum untuk titik-titik yang benar-benar saling berkorespondensi dengan Persamaan 4.1 dan 4.2.

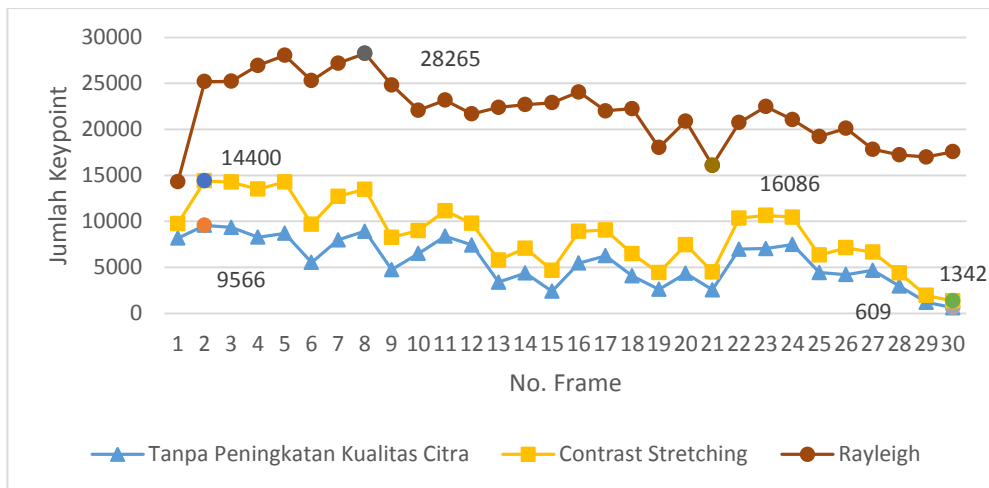
$$\text{BatasanJarakMinimum} = \frac{1}{3} \times \text{JarakMaksimum} \quad (4.1)$$

$$\text{BatasanJarakMaksimum} = \frac{2}{3} \times \text{JarakMaksimum} \quad (4.2)$$

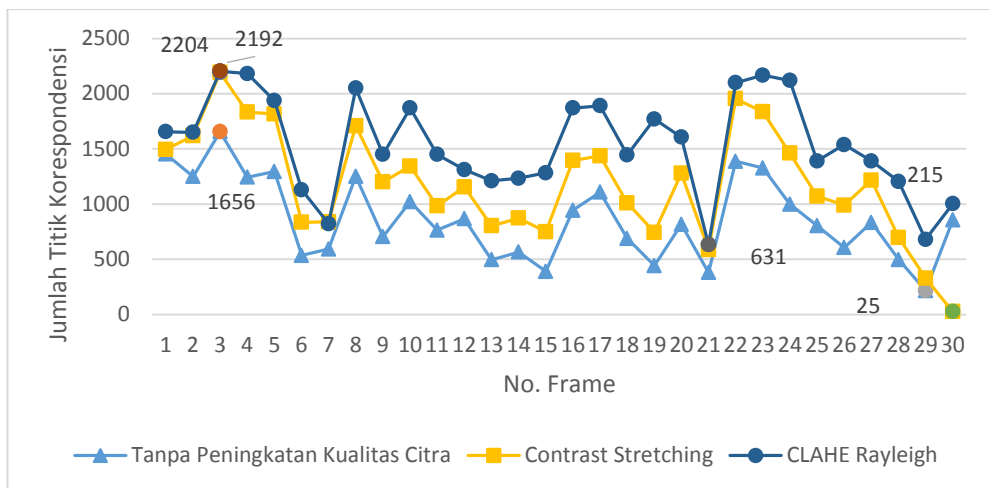
3. Titik-titik korespondensi dengan jarak lebih kecil dari batasan jarak minimum dan lebih besar dari batasan jarak maksimum dianggap outlier.

4.3 Peningkatan Kualitas Citra oleh CLAHE

Sub bab ini membahas hasil dari perbandingan metode peningkatan kualitas citra yang digunakan terhadap algoritma SIFT. Gambar 4.3 menunjukkan banyaknya jumlah keypoint yang diperoleh dari kamera. Jumlah keypoint yang dihasilkan oleh CLAHE dengan distribusi *Rayleigh* lebih banyak dibandingkan dengan jumlah keypoint yang dihasilkan oleh *contrast stretching* pada keseluruhan citra yang digunakan. Gambar 4.4 menunjukkan bahwa CLAHE dengan distribusi *Rayleigh* meningkatkan jumlah titik korespondensi. Jumlah titik korespondensi pada setiap citra ditunjukkan pada tabel 4.1.



Gambar 1.3: Jumlah keypoint tanpa peningkatan kualitas citra, dengan peningkatan *contrast stretching* and dengan peningkatan CLAHE.



Gambar 1.4: Jumlah titik korespondensi tanpa peningkatan kualitas citra, dengan peningkatan *contrast stretching* and dengan peningkatan CLAHE.

Uji-*t* berpasangan digunakan untuk mengetahui apakah ada perbedaan yang nyata antara jumlah titik korespondensi yang dihasilkan oleh algoritma SIFT sebelum dan sesudah perbaikan kualitas citra. Uji-*t* tersebut dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.19 berdasarkan jumlah titik korespondensi setiap citra

stereo pada Tabel 4.1. Hasil dari pengujian uji- t tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.2. Dengan mengabaikan tanda negatif, ternyata nilai t_{hitung} lebih besar dibandingkan dengan nilai t_{tabel} sebesar 2.045. Sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil dari uji- t adalah menolak hipotesa null pada level signifikan 5% yang artinya terdapat perbedaan rata-rata jumlah titik korespondensi yang signifikan antara SIFT sebelum dan sesudah peningkatan kualitas citra. Uji- t berpasangan membuktikan bahwa antara *contrast stretching* dan CLAHE meningkatkan kinerja algoritma SIFT dalam mencari keypoint dan titik korespondensi pada citra stereo dasar laut. Hasil yang signifikan diperoleh pada peningkatan kualitas citra menggunakan CLAHE Rayleigh.

Tabel 1.1: Jumlah titik korespondensi pada setiap pasang citra stereo

No. Frame	Tanpa Peningkatan Kualitas Citra	Contrast Stretching	CLAHE Rayleigh
1	1452	1494	1656
2	1249	1620	1650
3	1656	2192	2204
4	1244	1833	2182
5	1294	1817	1937
6	535	835	1129
7	593	839	822
8	1251	1710	2050
9	704	1200	1450
10	1022	1344	1870
11	763	982	1450
12	866	1155	1312
13	496	803	1211
14	565	873	1233
15	389	749	1283
16	944	1395	1870
17	1108	1436	1890
18	688	1010	1445
19	441	743	1770
20	816	1279	1607
21	380	587	631
22	1388	1954	2100
23	1326	1835	2167

24	999	1462	2120
25	804	1071	1390
26	606	990	1538
27	834	1216	1390
28	497	697	1204
29	215	329	680
30	855	25	1003
Rata-rata (\bar{X})	866,00	1182,5	1541,5

Tabel 1.2: Uji- t 2 sampel

	t_{hitung}	Degree of Freedom (df)	Standar Deviasi (sd)
Tanpa Peningkatan Kualitas	-3.0195	58	445.5985
Contrast Stretching			
Tanpa Peningkatan Kualitas	-7.1968	58	424.4952
CLAHE Rayleigh			
Contrast Stretching	-9.114	58	442.3956
CLAHE Rayleigh			

Setelah perhitungan uji- t yang digunakan untuk mengetahui perbedaan rata-rata antar dua kelompok, selanjutnya dilakukan uji ANOVA yang digunakan untuk mengetahui perbedaan rata-rata antar kelompok. Tabel 4.3 merupakan hasil dari uji ANOVA yang menunjukkan bahwa nilai F_{hitung} pada tabel ANOVA sebesar

23.41 lebih tinggi daripada nilai F_{tabel} sebesar 3.10. Sehingga dapat disimpulkan bahwa hipotesa null ditolak yang artinya terdapat perbedaan yang signifikan rata-rata jumlah titik korespondensi antara SIFT tanpa peningkatan kualitas citra, SIFT dengan contrast stretching, dan SIFT dengan CLAHE Rayleigh.

Tabel 1.3: Analysis of Variance (ANOVA)

Source	SS	df	MS	F_{hitung}
Between groups	9.38e+06	2	4.69e+06	23.41
Within groups	1.74e+07	87	2.00e+05	
Total	2.68e+07	89		

Tabel 1.4: Post-Hoc Test.

Tukey's HSD Test				
$\alpha = 0.05$				
Conditions	Mean Square	p	Significant	
Without Enhancement vs. Contrast Stretching	1857662.069	0.003291	Yes	
Without Enhancement vs. CLAHE	9489165.517	1.25402E-09	Yes	
Contrast Stretching vs. CLAHE	2949765.517	0.00068693	Yes	

Tabel 4.4 menunjukkan bahwa perbedaan jumlah titik korespondensi antara contrast stretching dan CLAHE-Rayleigh signifikan terhadap peningkatan kualitas citra pada level signifikan 5%. Dengan menggunakan Persamaan 2.29, dimana $q = 3,37$, $n = 30$ dan $MSw = 2.00e + 05$ maka nilai dari Honestly Significant Difference (HSD) adalah 275,16. Karena selisih rata-rata jumlah titik korespondensi antara SIFT sebelum dan sesudah contrast stretching atau CLAHE

lebih besar dibandingkan dengan nilai HSD maka perbedaan jumlah titik korespondensi sebelum dan sesudah peningkatan kualitas citra dinyatakan signifikan. Dengan menggunakan rata-rata sampel titik korespondensi, prosentase peningkatan jumlah titik korespondensi SIFT menggunakan *contrast stretching* dan CLAHE distribusi Rayleigh mencapai 37% dan 78%. Banyaknya titik korespondensi yang dihasilkan oleh algoritma SIFT meningkat sebanyak 41% (dari 37% ke 78%) menggunakan CLAHE dengan distribusi Rayleigh dengan confident interval ± 161.52 and confident level 95%. Dengan hasil seperti itu, penelitian ini menyimpulkan bahwa CLAHE dengan distribusi *Rayleigh* lebih baik dibandingkan dengan *contrast stretching*. Prosentase peningkatan titik korespondensi tersebut dihitung dengan menggunakan rumus (4.3):

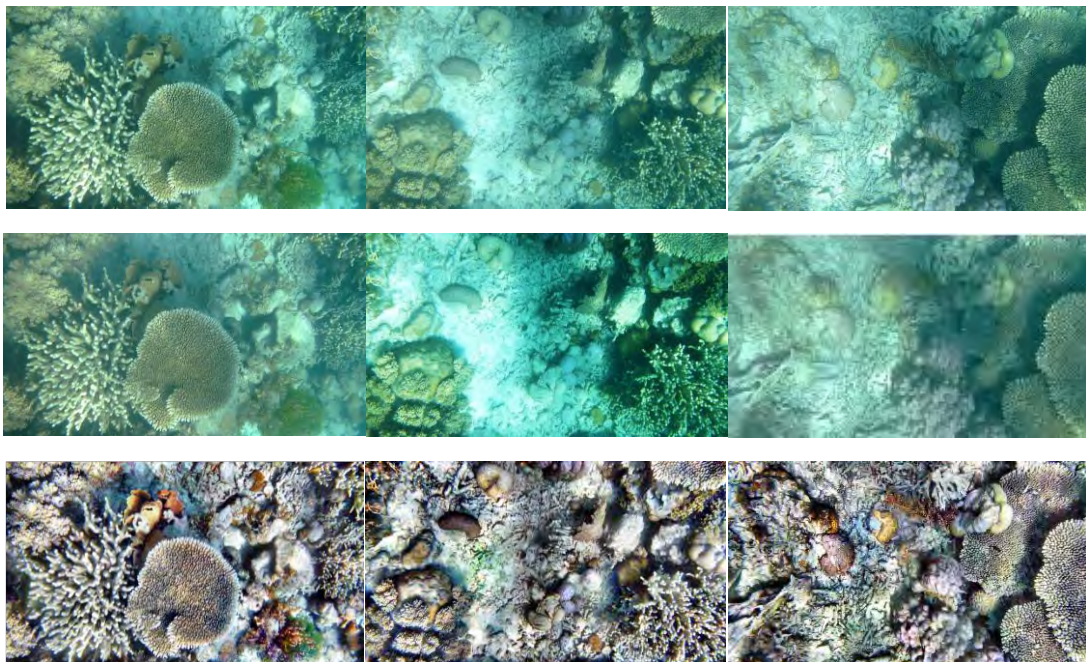
$$\text{improveRate}(\%) = \frac{\overline{X_b} - \overline{X_a}}{\overline{X_a}} \quad (4.3)$$

Dengan $\overline{X_a}$ adalah rata-rata sampel titik korespondensi tanpa peningkatan kualitas citra dan $\overline{X_b}$ adalah rata-rata sampel titik korespondensi dengan peningkatan kualitas citra.

Percobaan diatas membuktikan bahwa CLAHE mampu meningkatkan jumlah titik korespondensi dari algoritma SIFT. Tahapan selanjutnya adalah melakukan rekonstruksi 3D permukaan dasar laut untuk mengetahui pengaruh perbaikan citra dengan menggunakan CLAHE terhadap rekonstruksi 3D tersebut.

Rekonstruksi 3D citra bawah laut ini menggunakan lima pasang citra bawah air untuk dilakukan rekonstruksi permukaannya. Tabel 4.5 menunjukkan

perbedaan jumlah titik korespondensi antara sebelum dan sesudah penggunaan CLAHE terhadap kelima pasang citra tersebut. Dengan melihat jumlah titik korespondensi tersebut, CLAHE mampu meningkatkan jumlah titik korespondensi sebesar 26% hingga 30%. Prosentase kenaikan jumlah titik korespondensi tersebut ditunjukkan pada tabel 4.6. Perbandingan kualitas citra dasar laut sebelum dan sesudah peningkatan kualitas citra ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 1.5: Perbandingan kualitas citra sebelum dan sesudah peningkatan. **Baris Pertama.** Tanpa peningkatan kualitas. **Baris Kedua.** Peningkatan kualitas citra menggunakan *contrast stretching*. **Baris Ketiga.** Peningkatan kualitas citra menggunakan CLAHE dengan distribusi *Rayleigh*.

Tabel 1.5: Jumlah titik korespondensi dari beberapa distribusi CLAHE dengan dan tanpa *outlier removal*

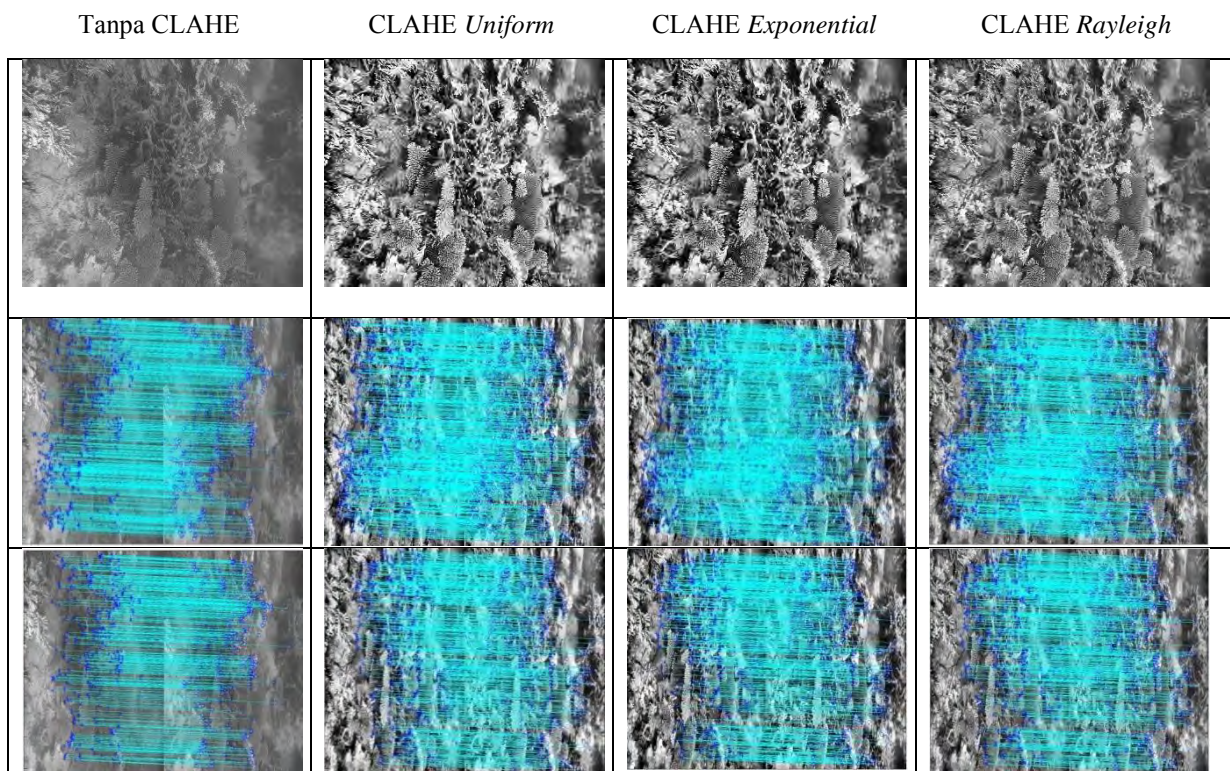
Sepasang citra stereo	tanpa CLAHE		CLAHE <i>Exponential</i>		CLAHE <i>Uniform</i>		CLAHE <i>Rayleigh</i>	
	Sebelum <i>outlier removal</i>	Sesudah <i>outlier removal</i>	Sebelum <i>outlier removal</i>	Sesudah <i>outlier removal</i>	Sebelum <i>outlier removal</i>	Sesudah <i>outlier removal</i>	Sebelum <i>outlier removal</i>	Sesudah <i>outlier removal</i>
1	652	441	1054	643	1004	639	1002	610
2	1294	1208	1363	1254	1307	1206	1430	1322
3	1617	880	2019	1139	1924	1070	1997	1053
4	1295	767	1498	907	1428	852	1420	861
5	1309	789	1788	1310	1777	1310	1733	1264

Tabel 1.6: Prosentase kenaikan jumlah titik korespondensi dari beberapa distribusi CLAHE dengan dan tanpa *outlier removal*

	Citra Stereo	Sebelum dan Sesudah CLAHE- <i>Exponential</i>	Sebelum dan Sesudah CLAHE- <i>Uniform</i>	Sebelum dan Sesudah CLAHE- <i>Rayleigh</i>	Rata-Rata Peningkatan Prosentase Kenaikan Jumlah Titik Korespondensi
Sebelum <i>Outlier removal</i>	1	62%	54%	54%	
	2	5%	1%	11%	
	3	25%	19%	24%	
	4	16%	10%	10%	
	5	37%	36%	32%	
	Rata-rata	29%	24%	26%	26%
Sesudah <i>Outlier removal</i>	1	46%	45%	38%	
	2	4%	0%	9%	
	3	29%	22%	20%	
	4	18%	11%	12%	
	5	66%	66%	60%	
	Rata-rata	33%	29%	28%	30%

Sedangkan Gambar 4.6 menunjukkan hasil *image matching* sebelum dan sesudah peningkatan kualitas citra. Secara visual hasil *image matching* antara

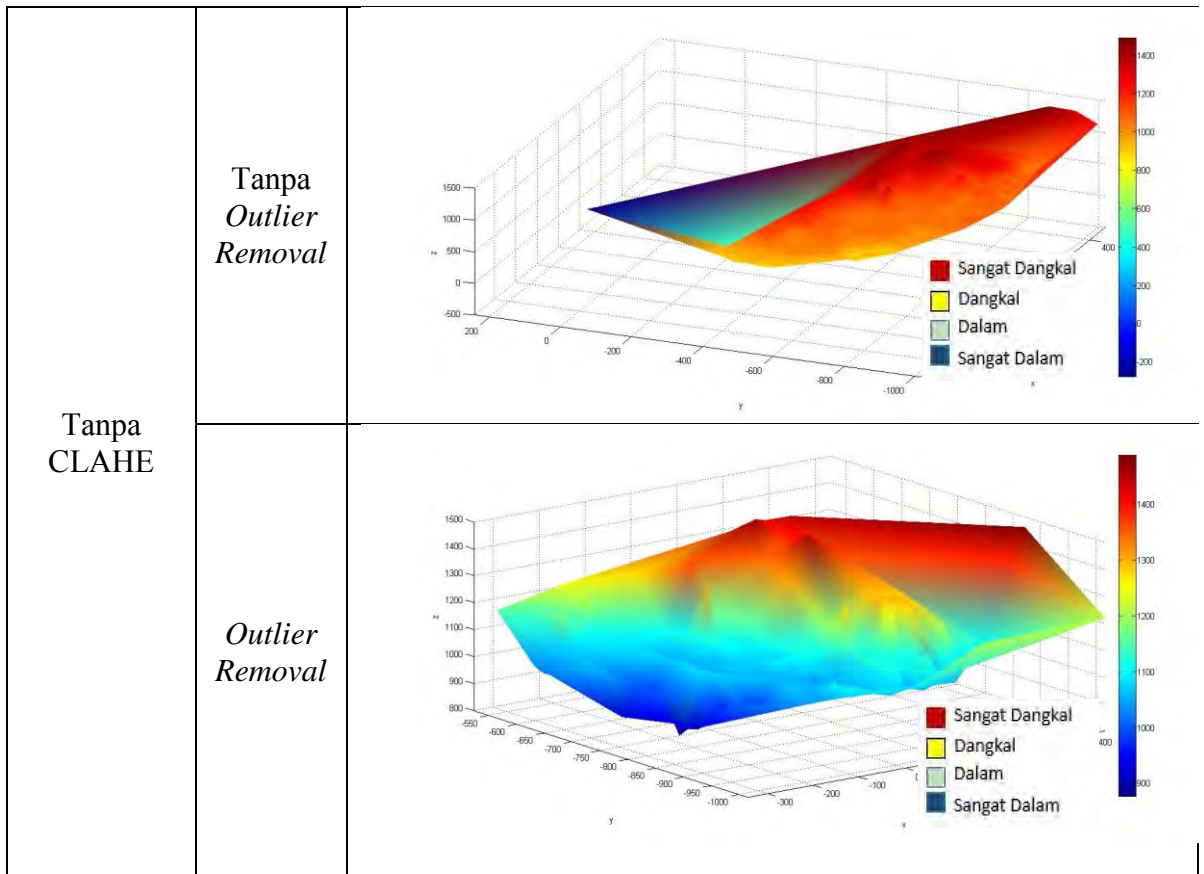
perbaikan kualitas dengan CLAHE distribusi *Rayleigh*, *Exponential*, dan *Uniform* tidak mengalami perbedaan yang signifikan.

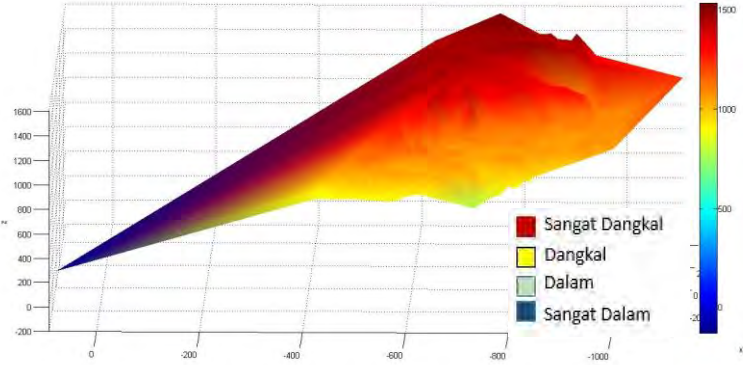
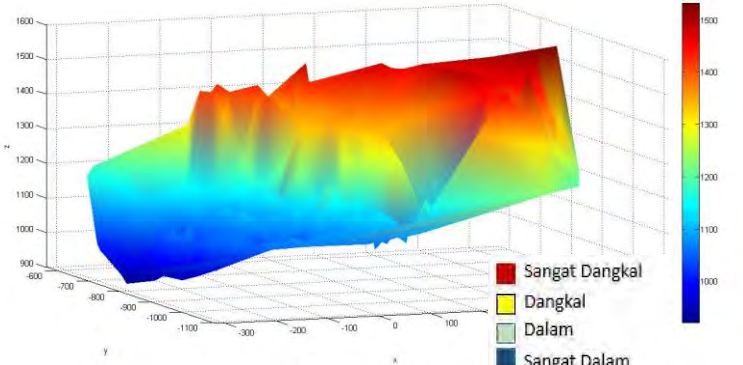
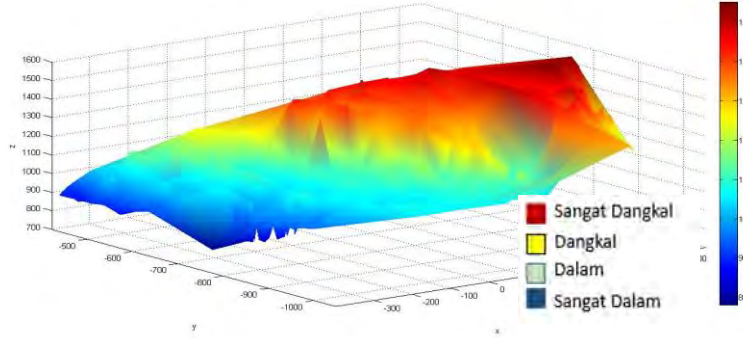
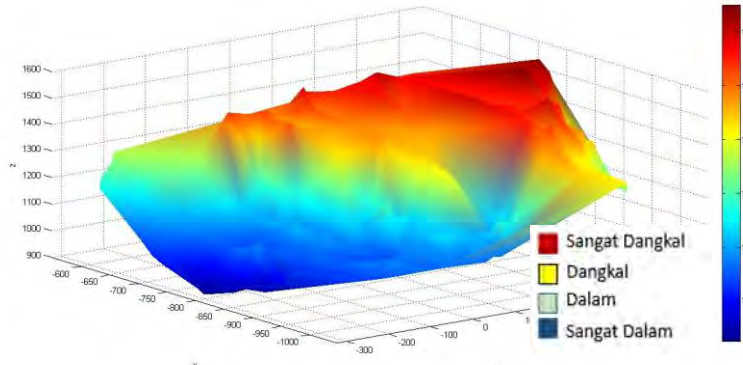


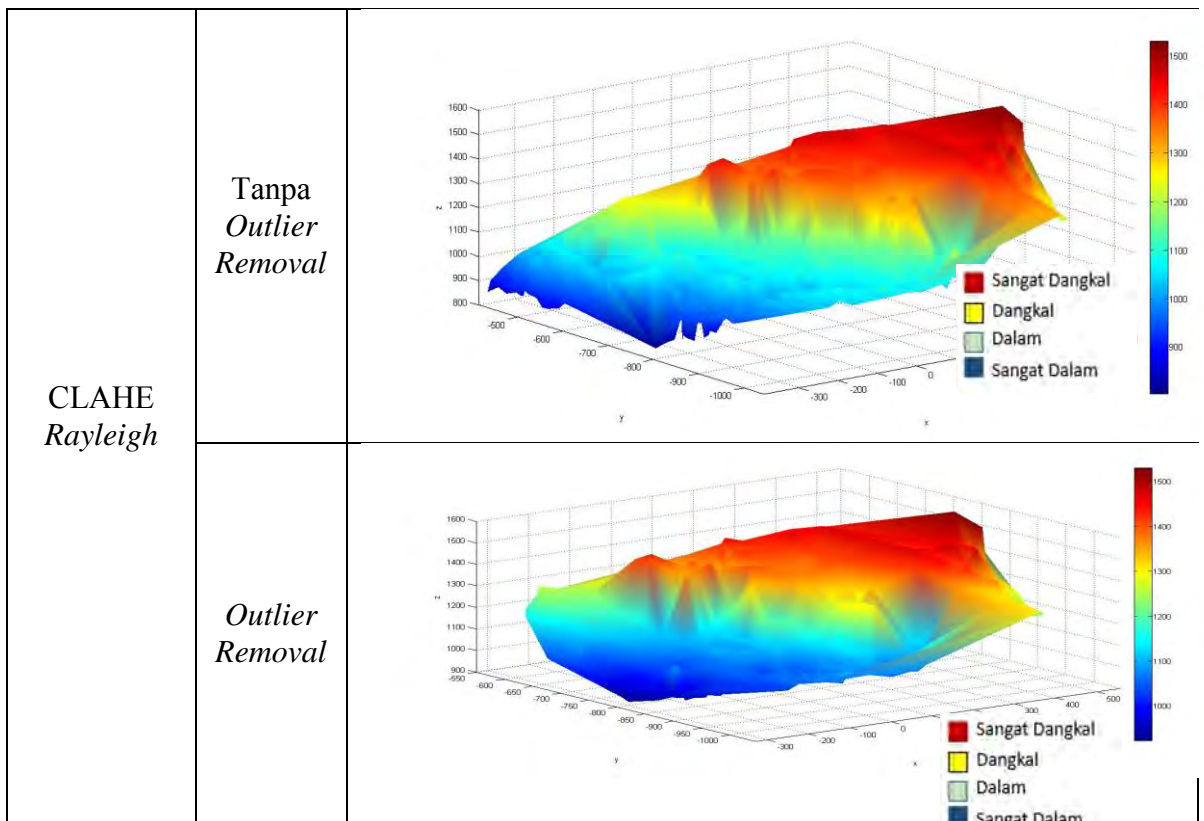
Gambar 1.6: Contoh hasil peningkatan kualitas citra. **Baris pertama**, citra grayscale sebelum dan sesudah perbaikan kualitas citra. **Baris kedua**, *image matching* sebelum dan sesudah perbaikan kualitas citra tanpa *outlier removal*. **Baris ketiga**, *image matching*

sebelum dan sesudah peningkatan kualitas citra dengan *outlier removal*.

Gambar 4.7 menunjukkan hasil rekonstruksi citra sebelum dan sesudah peningkatan kualitas citra dari sampel Gambar 4.6. Tanpa menggunakan CLAHE, terlihat bahwa rekonstruksi citra 3D tampak lebih datar dibandingkan dengan rekonstruksi citra 3D menggunakan peningkatan kualitas citra. Hasil rekonstruksi citra 3D permukaan dasar laut yang baik diperoleh dengan memanfaatkan CLAHE *exponensial* dan *Rayleigh* untuk memperbaiki kualitas citra dasar laut.,



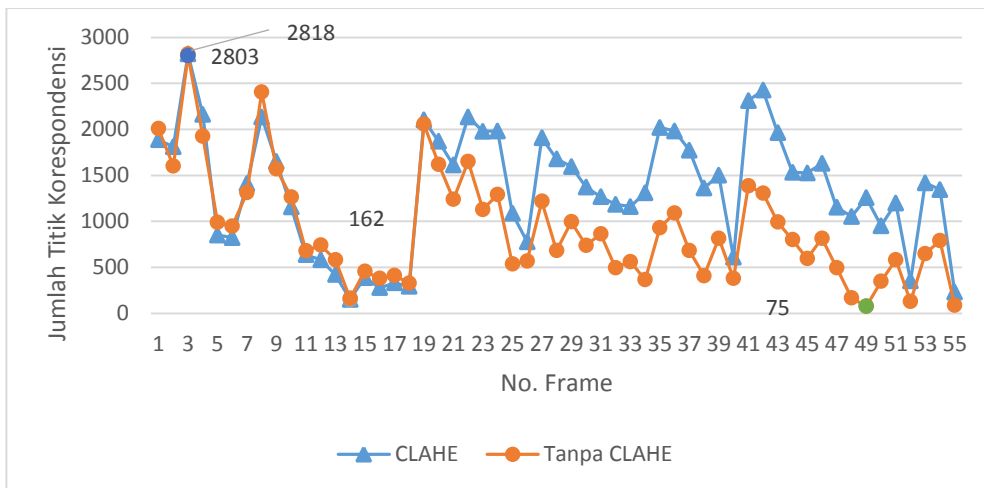
CLAHE <i>Uniform</i>	Tanpa <i>Outlier Removal</i>	
	<i>Outlier Removal</i>	
CLAHE <i>Exponential</i>	Tanpa <i>Outlier Removal</i>	
	<i>Outlier Removal</i>	



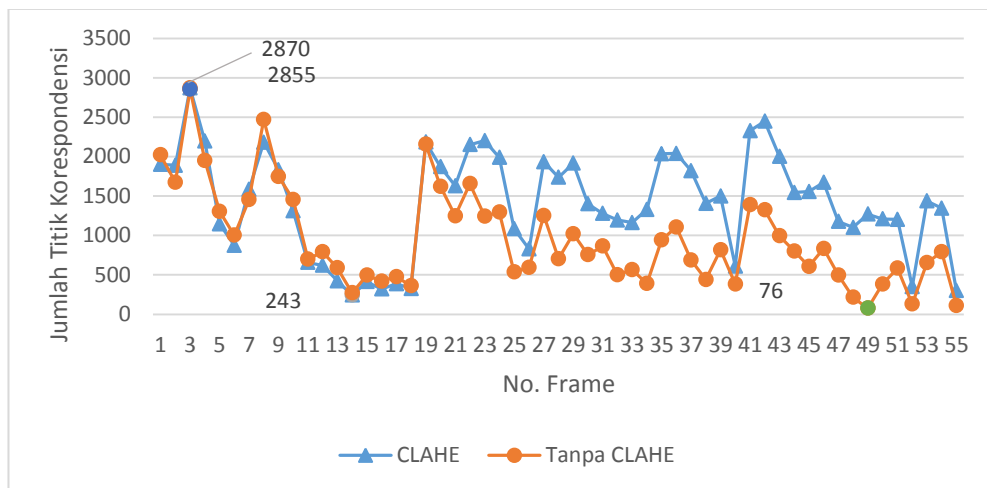
Gambar 1.7: Contoh rekonstruksi citra 3D permukaan dasar laut

4.4 Analisa Perbandingan CLAHE pada Algoritma SIFT dan SURF

Sub bab ini membandingkan penggunaan CLAHE pada algoritma SIFT dan SURF. Pada uji coba perbandingan antara SIFT dan SURF ini menggunakan 55 pasang citra stereo. Gambar 4.8 dan 4.9 menunjukkan jumlah titik korespondensi algoritma SIFT dengan dan tanpa *outlier removal*.



Gambar 1.8: Jumlah titik korespondensi algoritma SIFT dengan *outlier removal*

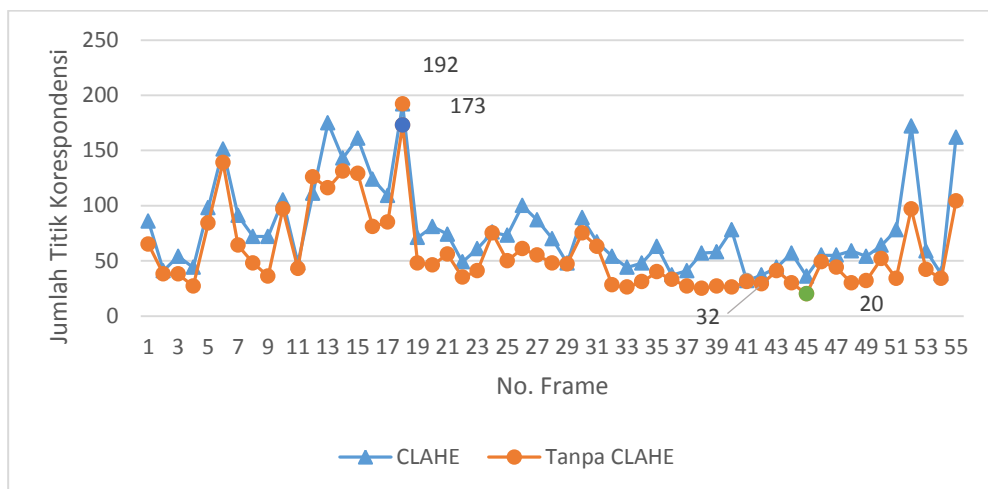


Gambar 1.9: Jumlah titik korespondensi algoritma SIFT tanpa *outlier removal*

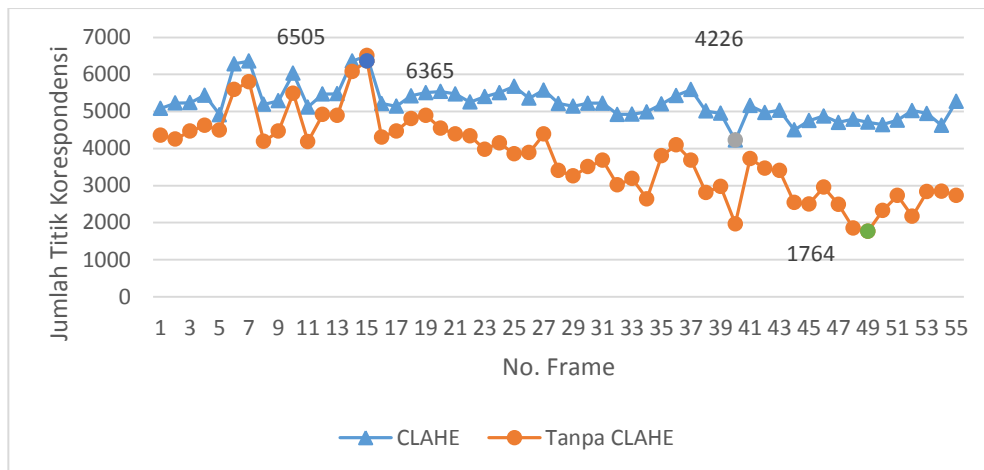
Dari Gambar 4.8 dan 4.9 tampak bahwa CLAHE mampu meningkatkan jumlah titik korespondensi dari algoritma SIFT. Hasil tersebut dibuktikan dengan penggunaan uji-*t* yang menyatakan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan terhadap rata-rata jumlah titik korespondensi antara sebelum dan sesudah penggunaan CLAHE. Dengan menggunakan *outlier removal* didapat t_{hitung}

sebesar 7,7098 lebih tinggi daripada t_{tabel} 2,005. Sedangkan tanpa menggunakan *outlier removal* didapat t_{hitung} sebesar 7,7087 lebih tinggi daripada t_{tabel} 2,005.

Hal serupa juga didapat oleh SURF. CLAHE dengan dan tanpa *outlier removal* mampu meningkatkan jumlah titik korespondensi algoritma SURF seperti yang tampak pada Gambar 4.10 dan 4.11. Dengan menggunakan uji- t , juga terdapat perbedaan yang signifikan rata-rata jumlah titik korespondensi antara sebelum dan sesudah penggunaan CLAHE. Dengan menggunakan *outlier removal* didapat t_{hitung} sebesar 9,457 lebih tinggi daripada t_{tabel} 2,005. Sedangkan tanpa menggunakan *outlier removal* didapat t_{hitung} sebesar 14,911 lebih tinggi daripada t_{tabel} 2,005.

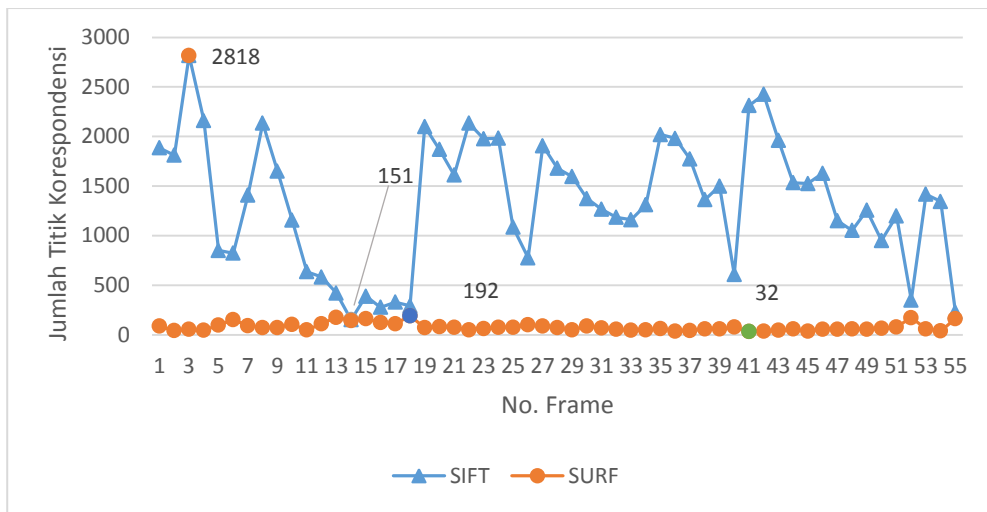


Gambar 1.10: Jumlah titik korespondensi algoritma SURF dengan *outlier removal*

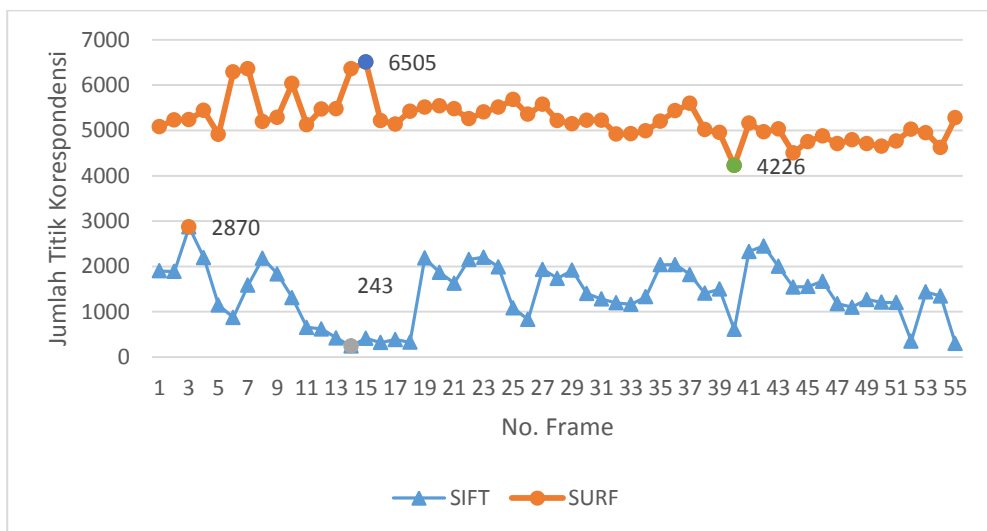


Gambar 1.11: Jumlah titik korespondensi algoritma SURF tanpa *outlier removal*

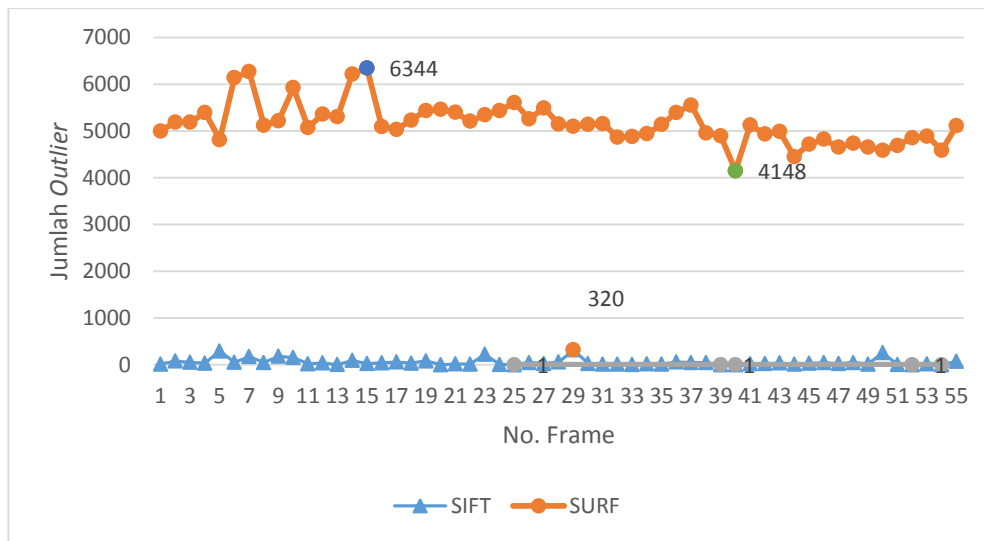
Dalam eksperimen ini juga dibandingkan jumlah titik korespondensi yang dihasilkan oleh algoritma SIFT dan SURF dengan menggunakan CLAHE sebelum dan sesudah penggunaan *outlier removal*. Dari Gambar 4.12, dengan menggunakan *outlier removal* didapat bahwa jumlah titik korespondensi algoritma SIFT lebih unggul dibandingkan dengan SURF. Sedangkan tanpa menggunakan *outlier removal*, Gambar 4.13 menunjukkan jumlah titik korespondensi algoritma SURF lebih banyak dari pada SIFT, namun kebanyakan jumlah titik korespondensi yang dihasilkan oleh SURF merupakan outlier. Gambar 4.14 menunjukkan jumlah outlier yang dihasilkan oleh SIFT dan SURF. Detail angka jumlah titik korespondensi dan jumlah *outlier* algoritma SIFT dan SURF ditunjukkan pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8.



Gambar 1.12: Jumlah titik korespondensi antara SIFT and SURF menggunakan CLAHE dan outlier removal.



Gambar 1.13: Jumlah titik korespondensi antara SIFT and SURF menggunakan CLAHE tanpa outlier removal.



Gambar 1.14: Jumlah outlier antara SIFT dan SURF dengan menggunakan CLAHE.

Tabel 1.7: Jumlah titik korespondensi dan jumlah outlier algoritma SIFT

No. Frame	Tanpa CLAHE			CLAHE		
	Tanpa Oulier Removal	Oulier removal	Jumlah Oulier	Tanpa Oulier Removal	Oulier removal	Jumlah Oulier
1	2022	2007	15	1901	1886	15
2	1674	1603	71	1889	1811	78
3	2855	2803	52	2870	2818	52
4	1950	1926	24	2196	2161	35
5	1304	987	317	1147	851	296
6	1003	947	56	875	823	52
7	1453	1311	142	1583	1409	174
8	2470	2406	64	2182	2135	47
9	1748	1569	179	1833	1651	182
10	1454	1265	189	1311	1155	156
11	700	679	21	657	636	21
12	790	740	50	620	583	37
13	588	583	5	424	421	3
14	272	162	110	243	151	92
15	494	457	37	414	388	26
16	419	379	40	319	277	42
17	476	410	66	387	329	58

No. Frame	Tanpa CLAHE			CLAHE		
	Tanpa Oulier Removal	<i>Outlier removal</i>	Jumlah Outlier	Tanpa Oulier Removal	<i>Outlier removal</i>	Jumlah Outlier
18	361	328	33	326	292	34
19	2157	2056	101	2184	2101	83
20	1621	1619	2	1871	1869	2
21	1248	1239	9	1630	1611	19
22	1655	1651	4	2151	2135	16
23	1244	1128	116	2202	1978	224
24	1294	1291	3	1989	1982	7
25	535	535	0	1086	1085	1
26	593	568	25	827	777	50
27	1252	1217	35	1935	1907	28
28	704	682	22	1737	1679	58
29	1020	995	25	1915	1595	320
30	754	738	16	1400	1373	27
31	865	863	2	1279	1266	13
32	498	496	2	1195	1185	10
33	565	561	4	1163	1160	3
34	389	365	24	1330	1310	20
35	944	931	13	2036	2020	16
36	1106	1091	15	2039	1981	58
37	688	682	6	1820	1773	47
38	440	409	31	1406	1362	44
39	817	816	1	1500	1499	1
40	382	379	3	610	609	1
41	1388	1384	4	2329	2312	17
42	1322	1307	15	2448	2425	23
43	994	992	2	2002	1962	40
44	802	800	2	1544	1533	11
45	606	594	12	1557	1525	32
46	834	816	18	1673	1629	44
47	497	496	1	1177	1151	26
48	215	166	49	1101	1052	49
49	76	75	1	1270	1256	14
50	382	348	34	1210	951	259
51	583	582	1	1204	1199	5
52	128	128	0	351	350	1
53	655	649	6	1437	1418	19
54	790	789	1	1346	1345	1
55	111	86	25	300	229	71

Tabel 1.8: Jumlah titik korespondensi dan jumlah outlier algoritma SURF

No. Frame	Tanpa CLAHE			CLAHE		
	Tanpa Oulier Removal	<i>Outlier removal</i>	Jumlah Outlier	Tanpa Oulier Removal	<i>Outlier removal</i>	Jumlah Outlier
1	4360	65	4295	5083	86	4997
2	4255	38	4217	5229	41	5188
3	4468	38	4430	5238	54	5184
4	4625	27	4598	5440	44	5396
5	4495	84	4411	4911	98	4813
6	5592	139	5453	6287	151	6136
7	5804	64	5740	6359	91	6268
8	4191	48	4143	5193	72	5121
9	4469	36	4433	5287	72	5215
10	5493	97	5396	6031	105	5926
11	4189	43	4146	5122	48	5074
12	4915	126	4789	5470	111	5359
13	4897	116	4781	5478	175	5303
14	6076	131	5945	6358	143	6215
15	6365	129	6236	6505	161	6344
16	4310	81	4229	5217	124	5093
17	4474	85	4389	5140	109	5031
18	4806	173	4633	5422	192	5230
19	4897	48	4849	5508	71	5437
20	4550	46	4504	5540	81	5459
21	4391	56	4335	5473	74	5399
22	4342	35	4307	5255	49	5206
23	3974	41	3933	5403	61	5342
24	4151	75	4076	5509	76	5433
25	3853	50	3803	5679	73	5606
26	3887	61	3826	5356	100	5256
27	4389	55	4334	5578	87	5491
28	3407	48	3359	5217	70	5147
29	3260	47	3213	5143	48	5095
30	3509	75	3434	5225	89	5136
31	3681	63	3618	5222	67	5155
32	3018	28	2990	4920	54	4866
33	3189	26	3163	4924	44	4880
34	2642	31	2611	4991	48	4943
35	3805	40	3765	5201	63	5138
36	4096	33	4063	5432	37	5395

No. Frame	Tanpa CLAHE			CLAHE		
	Tanpa <i>Oulier Removal</i>	<i>Outlier removal</i>	Jumlah <i>Outlier</i>	Tanpa <i>Oulier Removal</i>	<i>Outlier removal</i>	Jumlah <i>Outlier</i>
37	3683	27	3656	5593	41	5552
38	2813	25	2788	5014	57	4957
39	2979	27	2952	4951	58	4893
40	1966	26	1940	4226	78	4148
41	3728	31	3697	5158	32	5126
42	3467	29	3438	4968	37	4931
43	3404	41	3363	5033	44	4989
44	2539	30	2509	4502	57	4445
45	2500	20	2480	4752	36	4716
46	2954	49	2905	4879	55	4824
47	2494	44	2450	4706	55	4651
48	1855	30	1825	4792	59	4733
49	1764	32	1732	4708	54	4654
50	2324	52	2272	4647	64	4583
51	2732	34	2698	4766	78	4688
52	2170	97	2073	5025	172	4853
53	2834	42	2792	4947	59	4888
54	2847	34	2813	4623	38	4585
55	2735	104	2631	5276	162	5114

Pada Bab ini diusulkan penggunaan CLAHE dengan menggunakan distribusi Rayleigh untuk memperbaiki kualitas citra dasar laut. Dengan perbaikan kualitas citra, jumlah titik korespondensi yang dihasilkan oleh SIFT dapat meningkat. Dari eksperimen yang dilakukan, didapatkan bahwa penerapan CLAHE dengan distribusi *Rayleigh* mampu meningkatkan jumlah titik korespondensi pada algoritma SIFT hingga 41% dibandingkan dengan perbaikan kualitas citra yang menggunakan *contrast stretching*. Dari hasil perhitungan ANOVA yang dilakukan menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan untuk hasil *image matching* antara SIFT tanpa peningkatan kualitas citra, SIFT dengan peningkatan *contrast stretching*, dan SIFT dengan peningkatan CLAHE.

BAB 5

REKONSTRUKSI CITRA 3D PERMUKAAN

DASAR LAUT MENGGUNAKAN *MULTIVIEW*

CAMERA

5.1 Pendahuluan

Rekonstruksi citra 3D merupakan salah satu teknik *computer vision* yang dapat diimplementasikan untuk citra dasar laut [57]. Visualisasi 3D tersebut berguna untuk pengawasan dan eksplorasi permukaan dasar laut. Dengan memanfaatkan dua kamera atau lebih, rekonstruksi citra 3D dapat digunakan untuk memperoleh informasi kedalaman suatu obyek atau jarak obyek terhadap kamera [58] [59] [60]. Dalam rekonstruksi 3D permukaan dasar laut, penggunaan citra stereo saja tidak cukup, karena tidak dapat membentuk model 3D secara utuh. Oleh karena itu, disertasi ini mengusulkan penggunaan *multiview camera*, sehingga dapat memodelkan 3D permukaan dasar laut secara utuh. Sepasang kamera stereo akan bergerak searah untuk merekam permukaan dasar laut. Titik-titik 3D akan di ekstrak dari tiap pasang stereo atau pada tiap frame yang nantinya akan dilakukan registrasi sehingga membentuk citra 3D permukaan dasar laut.

Penelitian ini mengusulkan sebuah teknik untuk membuat rekonstruksi 3D menggunakan *low cost multi-view camera system* yang dikonfigurasi ke dalam kamera *stereo-based*. Kamera *low cost* (kamera poket) diusulkan karena kemudahan dan biaya yang murah dibandingkan dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang menggunakan menggunakan LIDAR (*Light Detection and Ranging*) atau *Autonomous Underwater Vehicles* (AUVs) [3] [4] [6] [7]. Titik-titik korespondensi citra stereo diperoleh dengan menggunakan algoritma *image matching* SIFT. Titik korespondensi tersebut kemudian di transformasi menjadi titik-titik 3D. Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut di peroleh dengan meregistrasi titik-titik 3D menggunakan algoritma Delaunay.

5.2 Penelitian Terkait

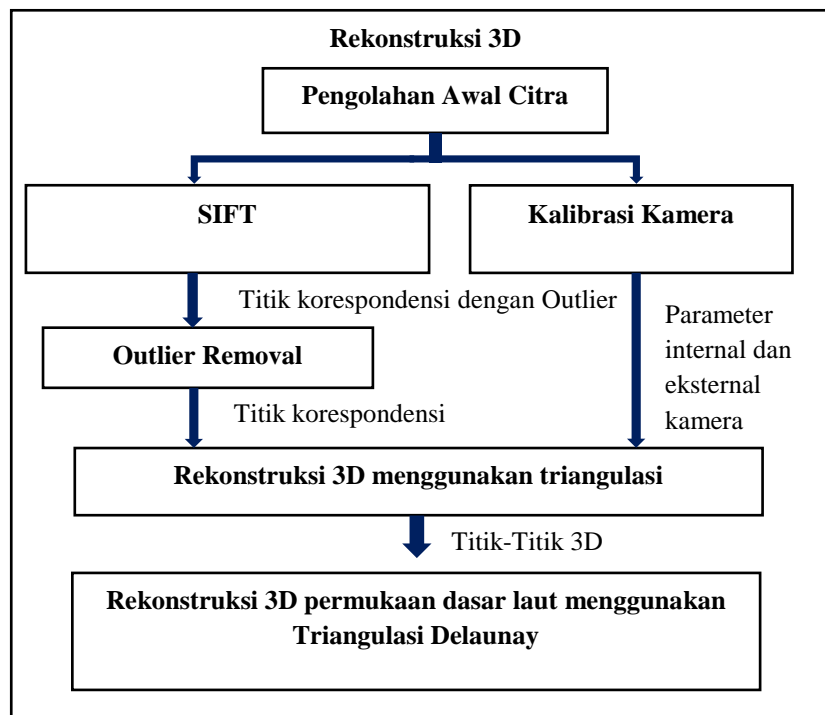
Dalam bidang studi kelautan, rekonstruksi 3D dan pengukuran citra bawah air dapat dilakukan dengan pengamatan visual 3D. Rekonstruksi struktur 3D berguna dalam aplikasi di bawah air. Mosaicking 3D merupakan salah satu metode untuk eksplorasi, visualisasi, navigasi bawah air, dan dapat memperkirakan ukuran obyek yang menarik seperti organisme dan struktur [6].

Beberapa tahapan yang perlu dilakukan untuk rekonstruksi 3D permukaan dasar laut. Sebuah teknik tahap awal pemetaan dasar laut 3D diperkenalkan pada [61] yang dioperasikan melalui *Remotely Operated Vehicles* (ROVs). Sedlazeck, dkk. [62] mengusulkan sebuah teknik untuk merekonstruksi permukaan dasar laut. Teknik tersebut diawali dengan pengambilan citra stereo, mendeteksi titik

korespondensi, menghasilkan titik-titik 3D dan memperkirakan pergerakan kamera. Berdasarkan informasi di atas, belum ada penelitian khusus yang merekonstruksi permukaan dasar laut menggunakan algoritma *image matching* SIFT berbasis kamera *multiview*.

5.3 Sistem Rekonstruksi 3D dengan *Multiview Camera*

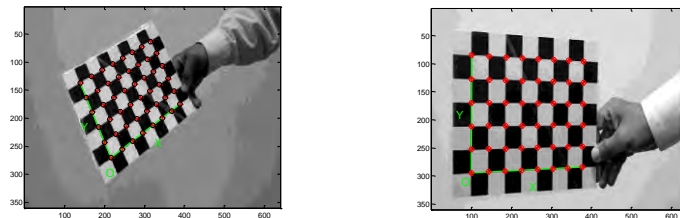
Bagian ini menjelaskan tahapan-tahapan rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan sistem kamera *multiview*. Alur tahapan-tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 5.1. Penjelasan detail untuk setiap urutannya dijelaskan pada sub-bagian selanjutnya.



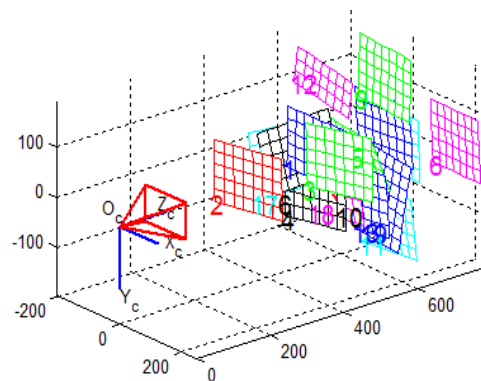
Gambar 4.1: Model Rekonstruksi 3D

1. Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera dilakukan untuk mendapatkan parameter intrinsik dan ekstrinsik. Penelitian ini menggunakan papan catur $17,5 \times 22,5$ cm untuk melakukan kalibrasi kamera. Ukuran persegi didalam papan catur adalah $2,5 \times 2,5$ cm (Gambar 5.2). Langkah pertama untuk kalibrasi citra adalah mengambil beberapa foto dari pola papan catur, kemudian mencari pola papan catur poin dalam Gambar. Dengan mengetahui letak titik pada koordinat dunia dan pixel koordinat, dapat dicari matriks yang menghubungkan keduanya. Matriks disebut matriks intrinsik dan ekstrinsik. Parameter intrinsik dan ekstrinsik ditunjukkan pada Gambar 5.3.



Gambar 4.2: Kalibrasi Kamera dengan Papan Catur



Gambar 4.3: Parameter Intrinsik dan Ekstrinsik

2. Preprocessing

Proses *Preprocessing* dilakukan oleh bantuan manusia langsung, seperti pemilihan citra stereo yang cocok untuk menghasilkan rekonstruksi yang baik. Hal ini dilakukan untuk dapat meningkatkan titik korespondensi citra stereo sehingga menghasilkan rekonstruksi citra 3D permukaan dasar yang akurat.

3. Deteksi Keypoint dengan SIFT

Algoritma SIFT diterapkan untuk menghasilkan titik korespondensi citra stereo. Gambar 5.4 (a) dan (b) menunjukkan citra stereo yang kemudian diproses oleh algoritma SIFT. Hasil dari pasangan citra yang sama dan telah dipetakan titik koordinatnya dapat dilihat di Gambar 5.4 (c).

4. Penghapusan *Outlier*

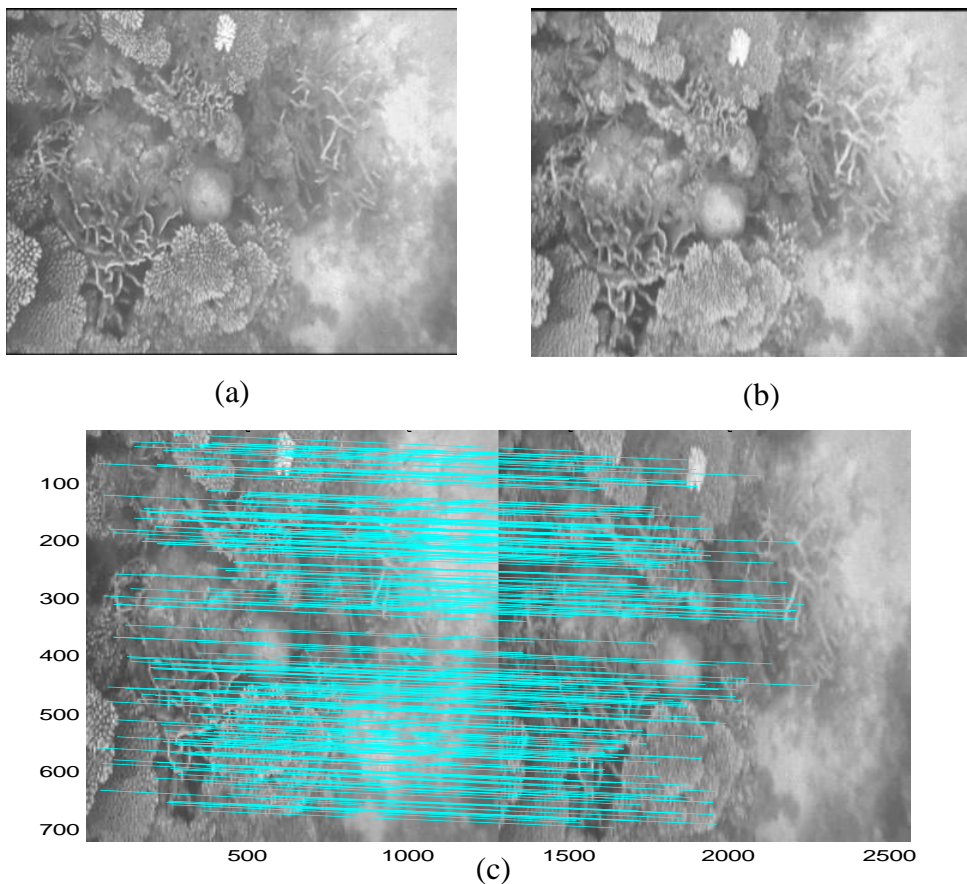
Proses pembersihan *outlier* dilakukan dengan cara mencari rata-rata jarak antar titik-titik yang saling berkorespondensi. Titik korespondensi yang memiliki jarak melebihi jarak rata-rata tersebut akan dianggap *outlier*.

5. Rekonstruksi 3D dengan Triangulasi

Proses untuk menghasilkan titik koordinat 3D, yang didapat dengan mengkalkulasi korespondensi pasangan titik koordinat dari sepasang citra dengan menggunakan teknik *triangulasi*.

6. Rekonstruksi permukaan dengan Triangulasi Delaunay

Merupakan proses untuk rekonstruksi titik koordinat 3D, yang diperoleh dari rumus triangulasi. Algoritma *triangulasi Delaunay* digunakan untuk menghasilkan 3D rekonstruksi permukaan dasar laut.

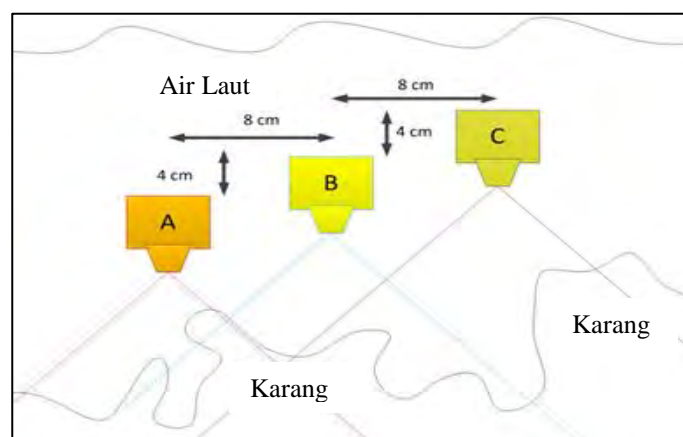


Gambar 4.4: (a) Citra kamera kiri, (b) Citra kamera kanan dan (c) Hasil

koresponding fitur oleh SIFT

5.4 Hasil Eksperimen

Penelitian ini menggunakan 1350 frame dari setiap kamera A, B dan C. Kinerja model diamati dengan menghitung jumlah titik korespondensi dari citra stereo. Citra stereo yang dimaksud dalam eksperimen ini adalah citra antara frame pertama dan frame kedua pada kamera yang sama. Untuk melakukan *image matching*, pasangan citra dikumpulkan dari setiap kamera A, B dan C. Posisi dari kamera A, B dan C ditunjukkan pada Gambar 5.5. Perbedaan posisi kamera dapat mempengaruhi ketajaman citra bawah laut tiap kamera. Kemungkinan yang didapat dengan konfigurasi ini ialah mendapatkan citra yang lebih tajam dari salah satu kamera. Citra yang tajam akan meningkatkan kinerja algoritma *image matching*. Akurasi yang digunakan untuk mengukur kinerja model yang diusulkan adalah jumlah titik korespondensi dibagi jumlah titik korespondensi ditambah outlier yang ditunjukkan pada Persamaan 5.1.



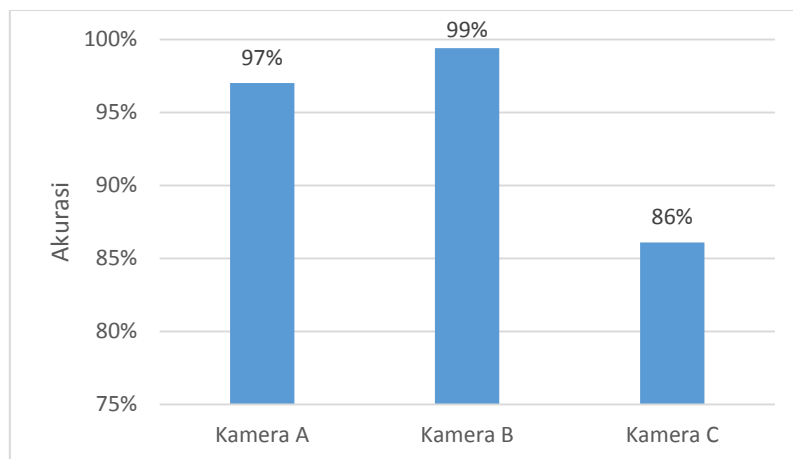
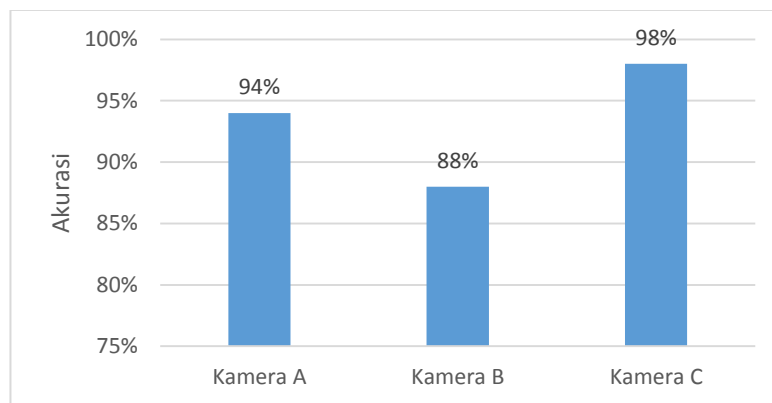
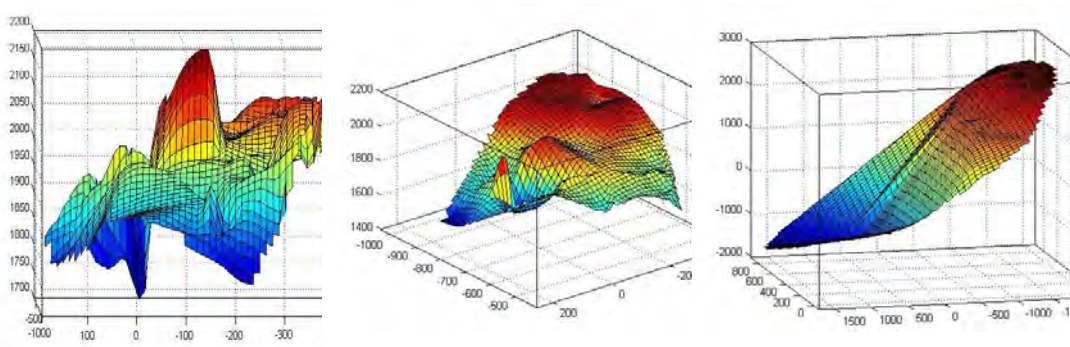
Gambar 4.5: Posisi Kamera

$$Akurasi = \frac{JumlahTitikKorespondensi}{JumlahTitikKorespondensi + JumlahOutlier} \quad (5.1)$$

Untuk mendapatkan keseluruhan performa pengukuran, rata-rata akurasi diukur menggunakan Persamaan 5.2, dimana N adalah jumlah citra stereo.

$$Akurasi_{Rata-rata} = \frac{\sum_{i=1}^N Akurasi_i}{N} \times 100\% \quad (5.2)$$

Hasil penelitian pada Gambar 5.6 dan 5.7 menunjukkan akurasi *image matching* setiap kamera di skenario yang berbeda. Gambar 5.6 menjelaskan performa kamera A dimana akurasinya lebih baik dari B maupun C di skenario 1, pada sisi yang lain Gambar 5.7 menunjukkan hal yang sebaliknya di skenario 2. Skenario 1 dan 2 tersebut merupakan hasil rekonstruksi dari Gambar 5.4. Gambar 5.8 dan 5.9 menggambarkan visualisasi rekonstruksi 3D dari masing-masing skenario pertama dan kedua. Dari skenario yang pertama dan kedua tersebut, Gambar 5.8b dan 5.9b adalah rekonstruksi 3D yang menyerupai citra sebenarnya. Pada, Gambar 5.8.(a) dan Gambar 5.9.(c) menunjukkan hasil rekonstruksi 3D yang masih banyak mengandung outlier sehingga bentuknya yang tidak beraturan. Sedangkan Gambar 5.8.(c) dan Gambar 5.9.(a) rekonstruksi 3D yang dihasilkan terlalu datar.

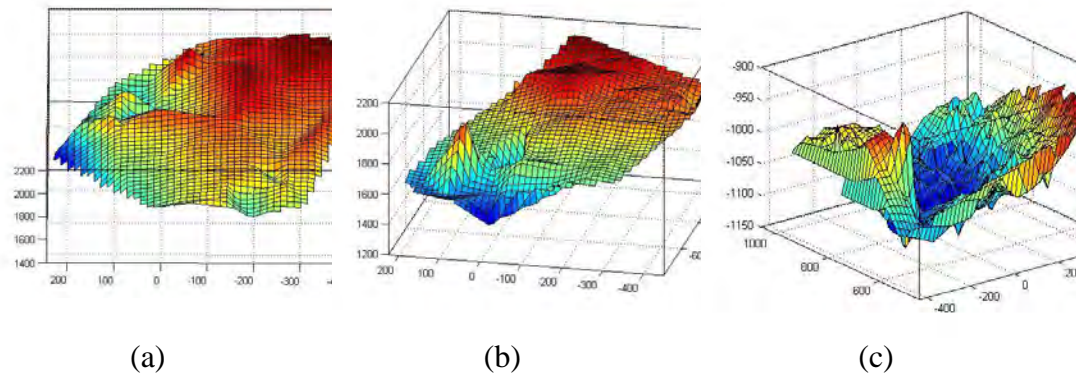
Gambar 4.6: Akurasi dari *image matching* skenario 1Gambar 4.7: Akurasi dari *image matching* skenario 2

(a)

(b)

(c)

Gambar 4.8: Skenario no 1, rekonstruksi permukaan 3D dari (a) kamera A, (b) kamera B, dan (c) kamera C



Gambar 4.9: Skenario no 2, rekonstruksi permukaan 3D dari (a) kamera A, (b) kamera B, dan (c) kamera C

Bab ini mengembangkan *low cost multiview camera* untuk rekonstruksi 3D permukaan dasar laut. Pengambilan citra dasar laut menggunakan 3 kamera dengan *focal length* yang sama dan dikonfigurasi seperti kamera stereo. Hasil eksperimen menunjukkan rekonstruksi 3D yang *robust*. Akurasi yang didapat dari titik korespondensi dari tiap citra stereo lebih dari 87%.

BAB 6

REKONSTRUKSI CITRA 3D PERMUKAAN

DASAR LAUT MENGGUNAKAN *POINT CLOUD*

DARI *MULTIVIEW CAMERA* BERBASIS

REGISTRASI CITRA

6.1 Pendahuluan

Rekonstruksi citra 3D bertujuan untuk memodelkan obyek nyata ke dalam ruang 3D dengan menggunakan citra 2D. Proses rekonstruksi diawali dengan pencarian titik-titik 2D pada citra stereo dengan menggunakan algoritma *image matching*. Perubahan titik-titik 2D menjadi titik-titik 3D memerlukan informasi kedalaman dari obyek yang ada di dalam citra 2D. Sehingga kamera yang digunakan untuk pengambilan citra perlu dilakukan proses kalibrasi kamera. Kumpulan titik-titik 3D pada citra stereo (*3D point cloud*) merupakan kumpulan titik-titik yang mewakili permukaan dasar laut dalam koordinat 3D. Proses penyatuan atau registrasi titik-titik 3D pada tiap frame tersebut akan membentuk permukaan dasar laut.

Rekonstruksi citra 3D permukaan dasar laut dilakukan dengan melakukan registrasi atau menyatukan titik-titik 3D yang bersesuaian antara dua citra stereo

I_1 dan I_2 . Citra I_2 merupakan citra I_1 yang mengalami perubahan skala, rotasi atau translasi. Rekonstruksi citra 3D dapat diterapkan dengan menggunakan *single image* (citra tunggal) atau *multiview image*. Namun penggunaan *single image* tersebut dapat menyebabkan pembentukan citra 3D yang tidak sempurna [13] [14]. Sehingga diperlukan pengambilan citra 2D dari berbagai sudut pandang (*multiview*) untuk dapat memodelkan obyek 3D secara utuh. Dalam rekonstruksi citra 3D, tiap *view* diwakili oleh *point cloud* yang sebagian titik dapat saling tumpang tindih (*overlap*) satu sama lain. *Overlap* tersebut disebabkan oleh titik-titik 3D yang bersesuaian antar dua *point cloud*.

Pemodelan citra 3D dengan menggunakan registrasi *multiview* tidaklah mudah. Terdapat dua cara untuk mengatasi masalah tersebut, yaitu registrasi lokal (*local registration*) dan registrasi global (*global registration*) [14]. Registrasi lokal dilakukan dengan cara meregistrasi dua *point cloud* secara bergantian sepanjang jumlah *point cloud* yang digunakan untuk membentuk citra 3D. Algoritma *Iterative Closest Point* (ICP) adalah solusi yang paling umum digunakan untuk meregistrasi dua *point cloud* [63] [64]. ICP akan mendekatkan titik-titik 3D yang bersesuaian antar dua *point cloud*. ICP bekerja secara berulang-ulang (*iterative*) mendekatkan titik-titik 3D yang bersesuaian sehingga meminimalkan jarak antar titik-titik 3D pada dua *point cloud*. Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk registrasi *point cloud* dengan menerapkan algoritma ICP [7] [65] [66].

Dalam rekonstruksi citra 3D, registrasi lokal dianggap tidak optimal karena kesalahan registrasi akan bertambah seiring dengan bertambahnya *point cloud*

yang diregistrasikan [14]. ICP juga dianggap tidak akan menghasilkan hasil registrasi yang bagus [67]. Sehingga registrasi global menjadi solusi yang efektif untuk meregistrasi banyak *point cloud* secara bersamaan.

Bab ini mengusulkan penggunaan *Generalized Procrustes Analysis* (GPA) yang diintegrasikan dengan algoritma ICP untuk registrasi citra 3D permukaan dasar laut. GPA-ICP merupakan teknik registrasi global yang mampu meregistrasi banyak *point cloud* secara bersamaan.

6.2 Procrustes Analysis

Procrustes Analysis digunakan untuk menentukan transformasi linier (translasi, rotasi, refleksi dan skala) dari matrik pola A sehingga dapat menyatu dengan matrik pola B . Dengan A dan B adalah dua pola matrik data point, tiap matrik berdimensi $p \times q$ dimana p adalah jumlah data point dan q adalah besaran ruang dimensi. Proses penyatuan pola tersebut dikatakan berhasil jika menghasilkan perbedaan jarak (*sum of squared error*) paling kecil antar kedua pola. Proses penyatuan pola tersebut terdiri dari empat tahap:

1. Menentukan *centroid* atau titik tengah dari pola yang ada.
2. Ubah skala tiap-tiap pola hingga mempunyai ukuran pola yang sama dengan *centroid*.
3. Sejajarkan posisi dari kedua pola terhadap *centroid*.
4. Rotasikan kedua pola sesuai *centroid*.

Jarak antar pola atau *squared procrustes distance* antara dua pola ditentukan dengan Persamaan 6.1. Sedangkan *centroid* dari kedua pola ditentukan dengan Persamaan 6.2. *Procrustes Analysis* dapat juga digunakan untuk menyatukan tiga pola atau lebih.

$$P_d^2 = \sum_{j=1}^n \left[(x_{j1} - x_{j2})^2 + (y_{j1} - y_{j2})^2 \right] \quad (6.1)$$

$$(\bar{x}, \bar{y}) = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \right) \quad (6.2)$$

Dengan P_d^2 adalah *squared Procrustes distance* atau jarak antara dua pola, x_1 adalah data point pola x_1 , x_2 adalah data point pola x_2 .

6.3 Generalized Procrustes Analysis

Generalized Procrustes Analysis (GPA) merupakan pengembangan dari *Procrustes Analysis*. Perbedaan antara GPA dan *Procrustes Analysis* terletak pada pemilihan pola referensi. GPA menentukan pola referensi dengan memilih dari pola-pola yang ada, sedangkan *Procrustes Analysis* menentukan pola referensi dengan cara menentukan *centroid* atau merata-rata pola yang ada. Berikut merupakan algoritma dari GPA:

1. Inisialisasi pola awal dengan memilih pola diantara pola-pola yang ada.
2. Menyatukan pola berikutnya ke pola awal.
3. Menghitung rata-rata point dari proses penyatuan pola.

4. Jika ada perbedaan rata-rata point dengan iterasi sebelumnya atau *procrustes distance* antara pola rata-rata dan pola awal diatas nilai batas ambang (*threshold*), kembali ke tahap kedua.

Cara yang paling sering digunakan untuk menentukan rata-rata point adalah dengan menggunakan Persamaan 6.3.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (6.3)$$

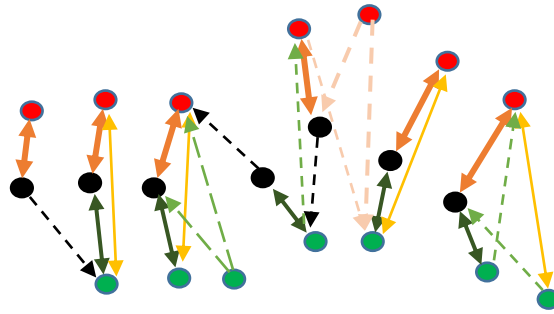
Dengan N adalah jumlah pola dan x_i adalah data point pola i .

6.4 Generalized Iterative Closest Point

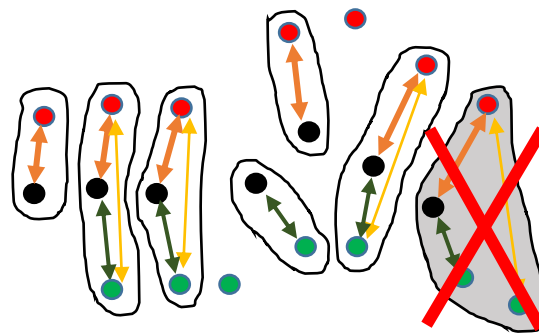
Perbedaan mendasar GPA dan ICP terletak pada penentuan titik korespondensi antar data point 3D yang saling bersesuaian. GPA menentukan korespondensi antar titik secara manual, sedangkan ICP dilakukan dengan menggunakan pendekatan *nearest neighbor* (titik terdekat) untuk menentukan korespondensi titik. Sama seperti ICP, GPA-ICP mengusulkan cara yang otomatis dalam menentukan korespondensi titik yaitu dengan menerapkan *mutual nearest neighbor* daripada menerapkan *nearest neighbor*. Berikut algoritma GPA-ICP [14]:

1. Mencari pasangan titik *mutual nearest neighbor*.
2. Menentukan *centroid* atau titik pusat dari tiap-tiap set *mutual nearest neighbor*.
3. Menentukan Rotasi, Translasi dan Skala (RTS).

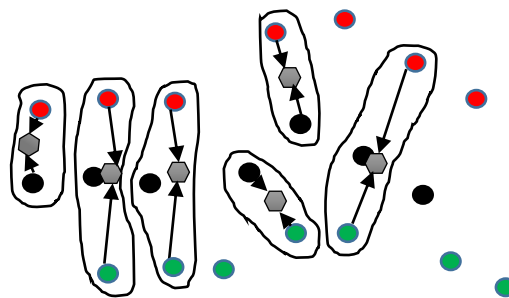
4. Transformasikan tiap *point cloud* menggunakan RTS yang sudah ditentukan.
5. Jika ada perbedaan *centroid* dengan iterasi sebelumnya, kembali ke tahap pertama.



(a) *Nearest Neighbor* dan *Mutual Nearest Neighbor*



(b) *Set Independen*



(c) *Korespondensi Centroid*

Gambar 6.1: Ilustrasi GPA-ICP dengan tiga *point cloud* (titik-titik 3D warna merah, hijau, dan hitam) [14].

Gambar 6.1 menunjukkan perbedaan penentuan titik korespondensi antara GPA-ICP dan ICP. Garis dengan satu anak panah pada Gambar 6.1(a) menggambarkan relasi *nearest neighbor* dan garis dengan dua anak panah menggambarkan *mutual nearest neighbor*. Hasil dari *mutual nearest neighbor* ditunjukkan pada Gambar 6.1(b). Korespondensi yang mengandung dua titik warna hijau diabaikan karena hanya satu titik pada pola yang boleh saling berkorespondensi. Gambar 6.1(c) menunjukkan ilustrasi korespondensi titik-titik 3D tiap pola terhadap *centroid*.

6.5 Hasil Eksperimen

Pada bagian ini akan dipaparkan hasil eksperimen dari rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan algoritma registrasi ICP dan GPA-ICP. Eksperimen menggunakan 90 frame untuk melakukan proses registrasi dengan menggunakan Matlab. Penelitian ini menggunakan skrip pemrograman Matlab yang dibangun oleh Toldo¹ untuk algoritma GPA-ICP. Tingkat kinerja algoritma registrasi di evaluasi berdasarkan waktu komputasi, tingkat kesalahan atau jarak titik-titik 3D yang saling berkorespondensi antar *point cloud* (*distance error*), jumlah titik-titik 3D setelah proses registrasi dan kualitas rekonstruksi 3D permukaan dasar laut secara visual. Semakin kecil jarak titik-titik 3D yang saling berkorespondensi diantara dua *point cloud*, maka semakin akurat proses registrasinya. Dalam eksperimen ini digunakan *Mean Square Error* (MSE) untuk mengukur *distance error* atau jarak titik-titik 3D yang saling berkorespondensi setelah dilakukan registrasi dengan menggunakan Persamaan 6.4. Semakin kecil

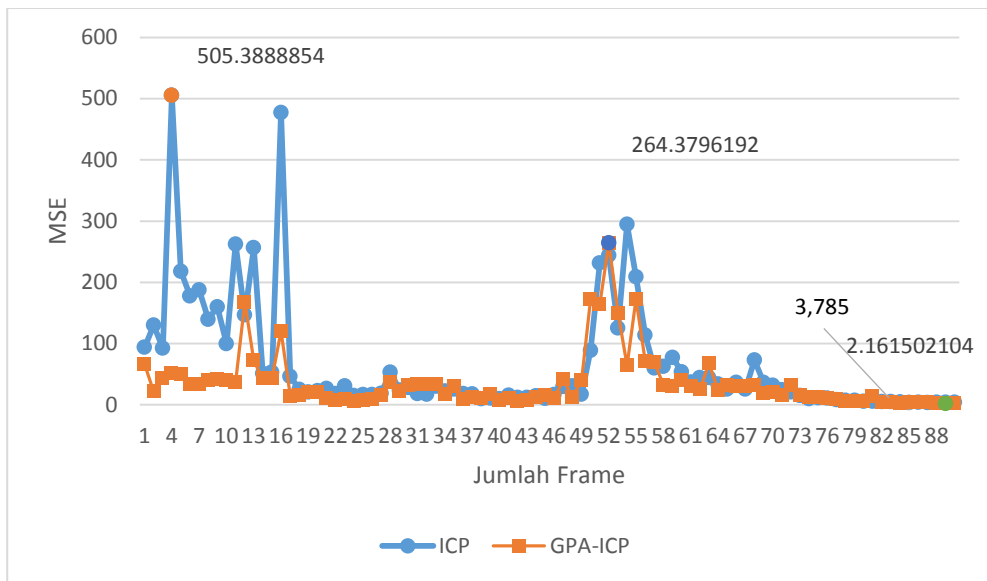
¹ http://www.toldo.info/roberto/?page_id=46

nilai MSE, waktu komputasi dan jumlah titik-titik 3D setelah proses registrasi maka semakin akurat algoritma registrasi dalam menyatukan beberapa *point cloud*.

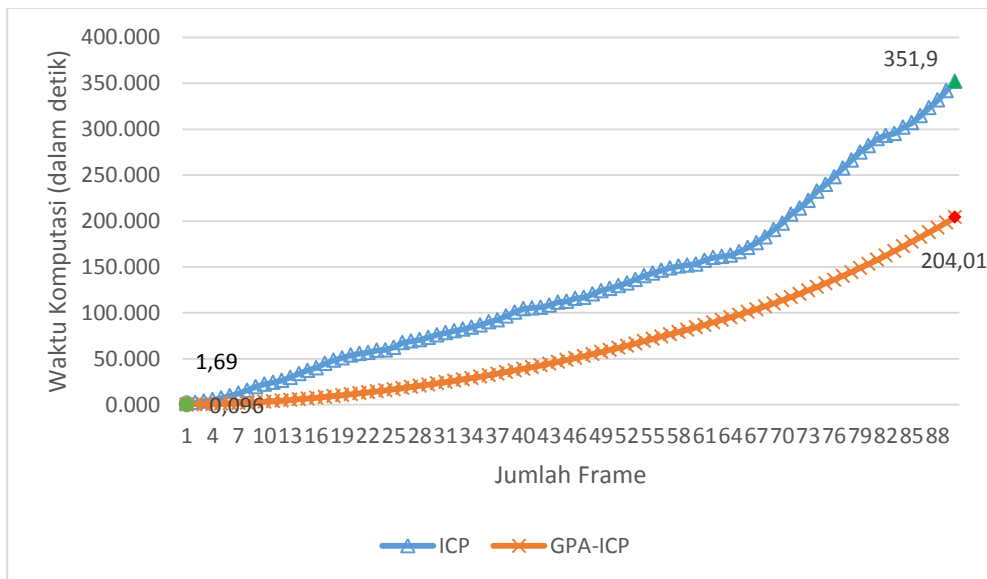
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\hat{Y}_i - Y_i \right)^2 \quad (6.4)$$

Dengan n adalah jumlah pola atau *point cloud*, \hat{Y}_i adalah titik-titik 3D pola \hat{Y} dan Y_i adalah titik-titik 3D pola Y .

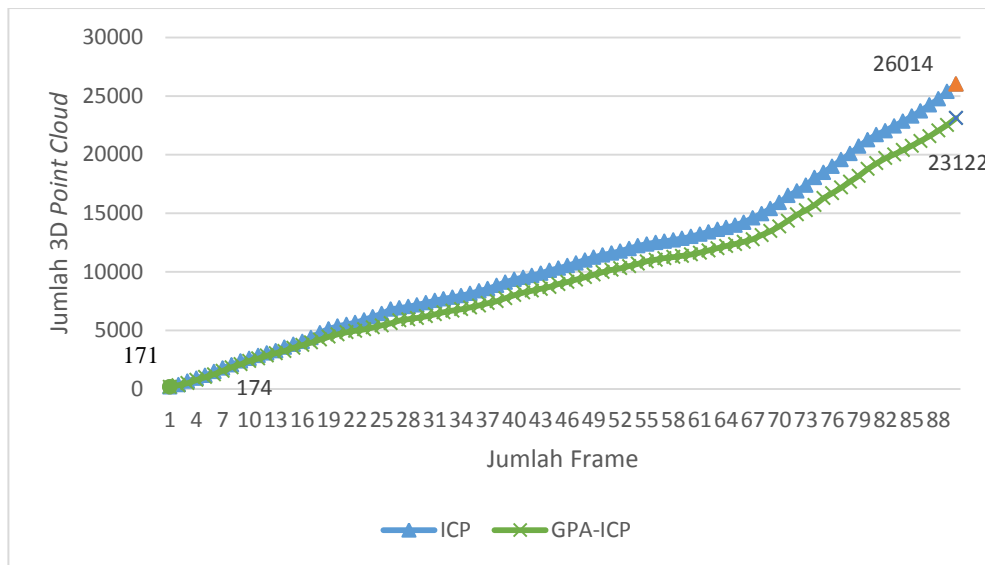
Gambar 6.2 menunjukkan nilai MSE proses registrasi dengan berbagai jumlah *point cloud*. Dari gambar tersebut tampak bahwa dari beberapa jumlah *point cloud*, ICP menunjukkan nilai MSE yang sangat tinggi. Hal ini disebabkan karena ICP kurang dapat mengatasi outlier yang dihasilkan dari proses *image matching* SIFT. Outlier adalah titik-titik 3D yang memiliki jarak terjauh terhadap titik-titik 3D pola referen yang disebabkan oleh ketidak-akuratan penentuan titik-titik fitur atau kesalahan proses penentuan titik-titik korespondensi [68]. Dengan MSE untuk ICP sebesar 1497,59 dan MSE untuk GPA-ICP sebesar 37,43. Dari segi waktu komputasi, jelas terlihat pada Gambar 6.3 bahwa GPA-ICP memiliki waktu komputasi yang lebih cepat dibandingkan dengan ICP untuk semua jumlah *point cloud*. Dengan rata-rata waktu komputasi ICP sebesar 157,32 detik dan GPA-ICP sebesar 81,35 detik. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai MSE yang dihasilkan oleh ICP mengalami penurunan sebesar 98% dan waktu komputasi menurun hingga 48%.



Gambar 6.2: MSE proses registrasi antara ICP dan GPA-ICP



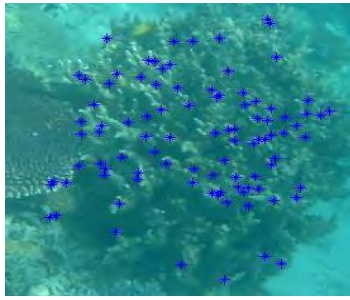
Gambar 6.3: Waktu komputasi antara ICP dan GPA-ICP.



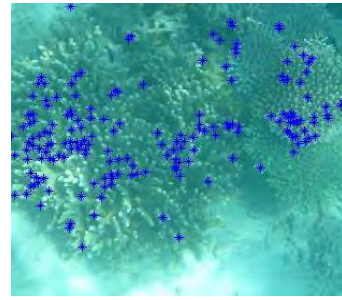
Gambar 6.4: Jumlah titik-titik 3D antara ICP dan GPA-ICP.

Gambar 6.4 menunjukkan jumlah titik-titik 3D antara ICP dan GPA-ICP setelah proses registrasi. Rendahnya jumlah titik-titik 3D yang diregistrasikan oleh GPA-ICP disebabkan karena jumlah titik-titik korespondensi yang ditemukan oleh GPA-ICP lebih besar dibandingkan dengan jumlah titik-titik korespondensi yang ditemukan oleh ICP. Hal ini menyebabkan nilai MSE yang dihasilkan oleh GPA-ICP lebih kecil dibandingkan dengan nilai MSE yang dihasilkan oleh ICP.

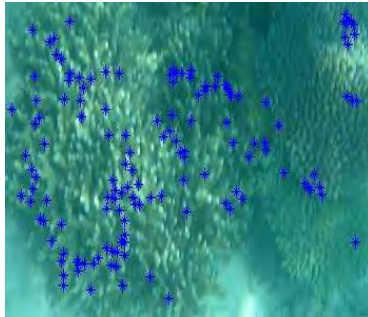
Gambar 6.5 menunjukkan titik-titik korespondensi yang dihasilkan dari algoritma SIFT. Titik-titik korespondensi yang ada pada tiap frame tersebut akan dilakukan proses registrasi dengan algoritma ICP dan GPA-ICP.



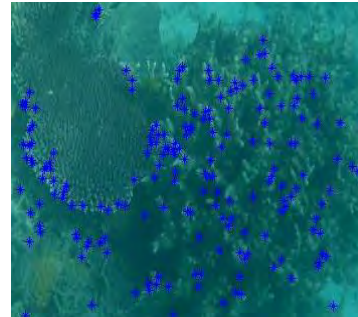
a. Titik korespondensi pada frame ke-20



b. Titik korespondensi pada frame ke-40



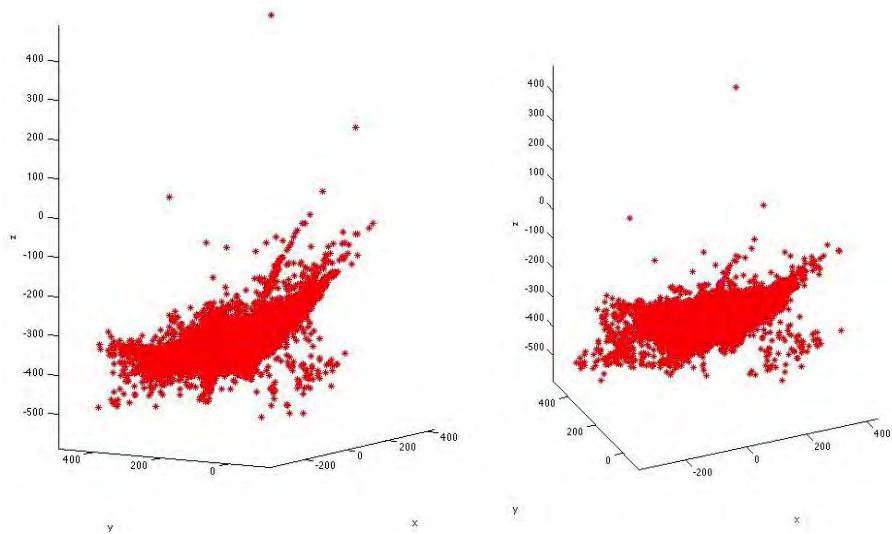
c. Titik korespondensi pada frame ke-60



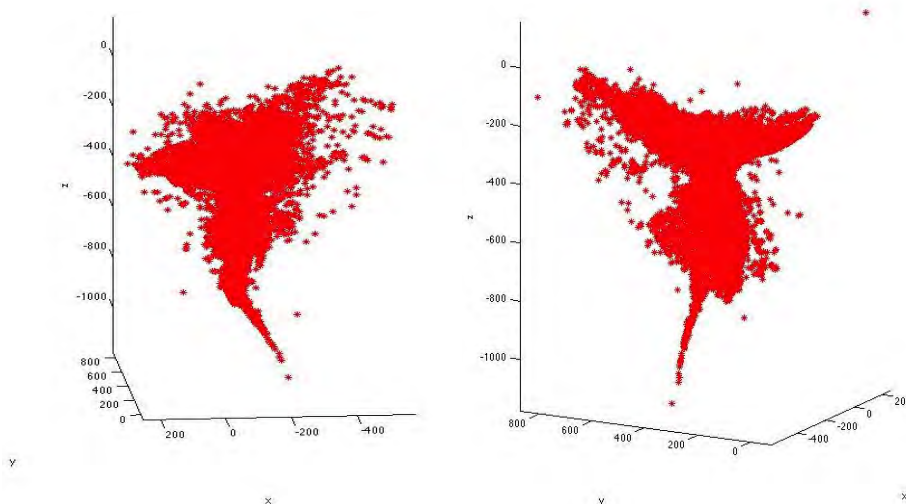
d. Titik korespondensi pada frame ke-80

Gambar 6.5: Kumpulan titik korespondensi, hasil dari proses *image matching* algoritma SIFT.

Berturut-turut, Gambar 6.6 dan 6.7 merupakan titik-titik 3D atau *point cloud* yang merupakan hasil registrasi dari algoritma ICP dan GPA-ICP terhadap 90 frame. Titik-titik 3D hasil dari registrasi ICP tampak lebih melebar dibandingkan dengan GPA-ICP. Hal ini yang menyebabkan nilai MSE hasil registrasi ICP lebih tinggi daripada nilai MSE hasil registrasi GPA-ICP. Registrasi dari titik-titik 3D tersebut akan membentuk permukaan dasar laut.



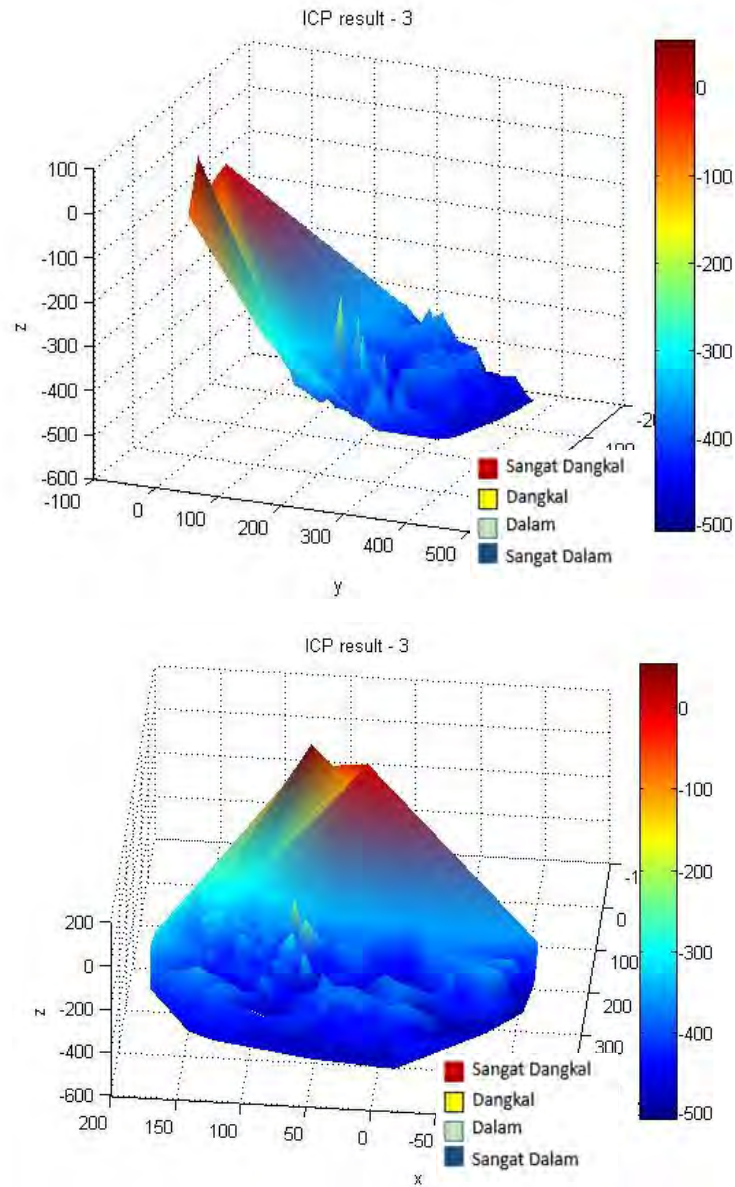
Gambar 6.6: 3D *point cloud* dari 90 frame menggunakan ICP.



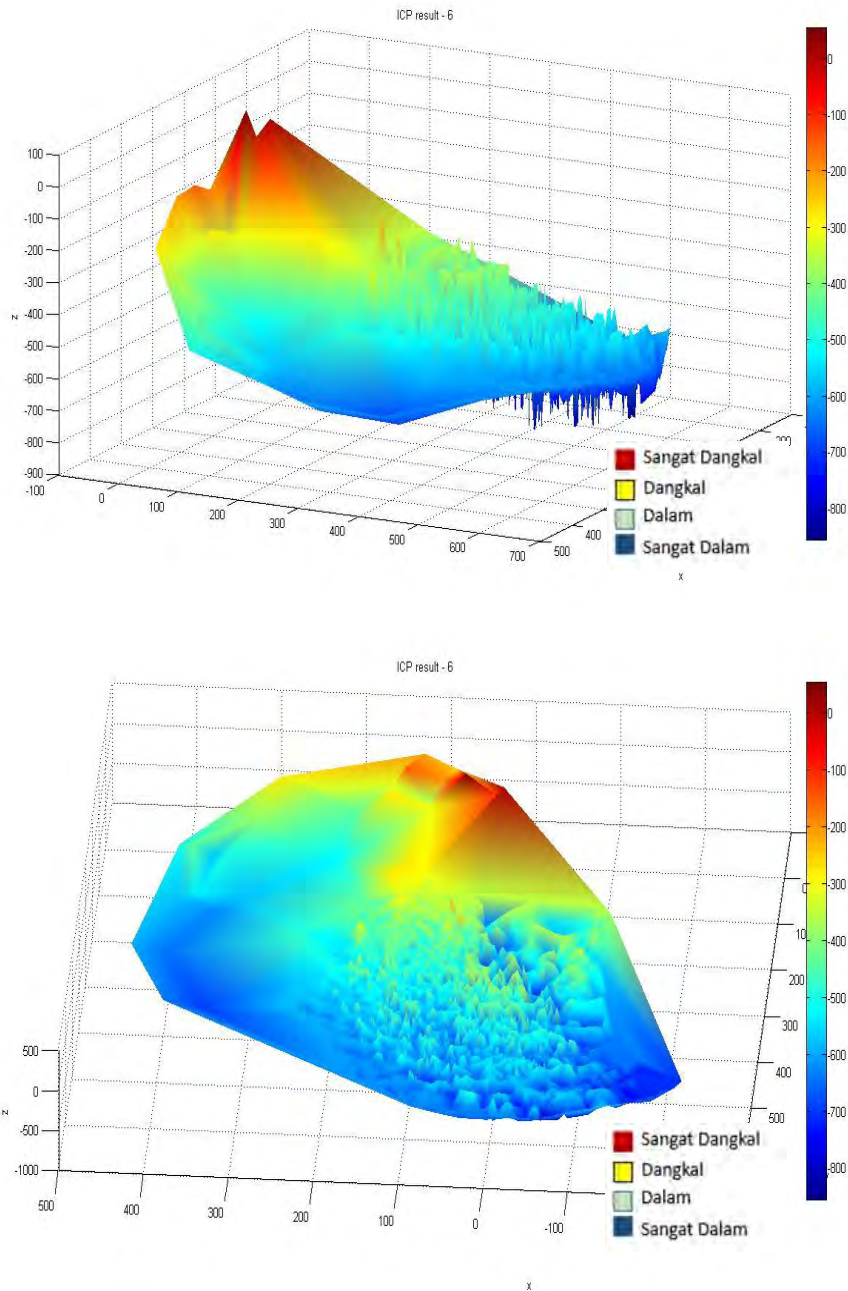
Gambar 6.7: 3D *point cloud* dari 90 frame menggunakan GPA-ICP.

Hasil rekonstruksi 3D permukaan dasar laut yang dihasilkan oleh ICP ditunjukkan oleh Gambar 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, dan 6.13 dengan jumlah frame berturut-turut sebesar 3, 6, 9, 12, 40, dan 90. Sedangkan rekonstruksi citra 3D yang dihasilkan oleh GPA-ICP untuk jumlah frame 40 dan 90 ditunjukkan pada Gambar 6.14 dan 6.15. Semakin bertambahnya *point cloud* maka citra 3D

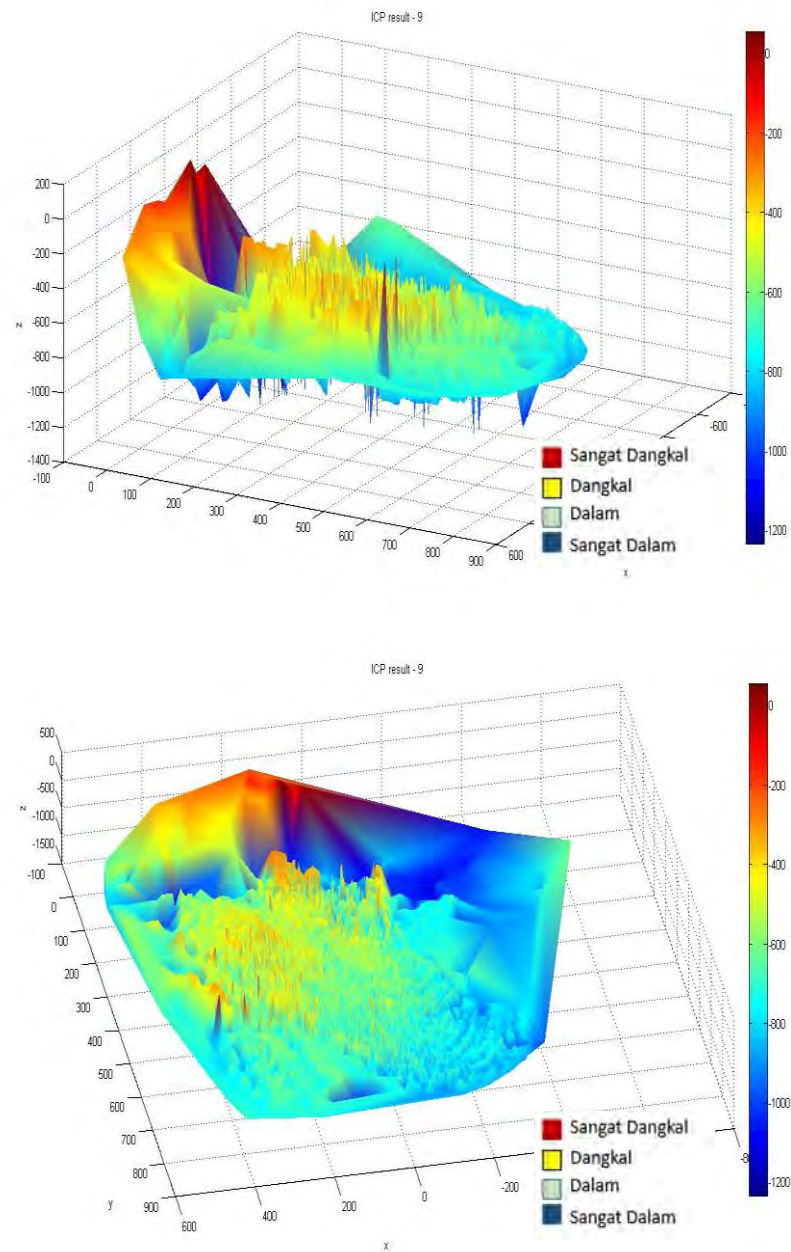
permukaan dasar laut tampak memiliki lebih banyak kontour. Warna biru dalam gambar menunjukkan bahwa permukaan dasar laut semakin dalam.



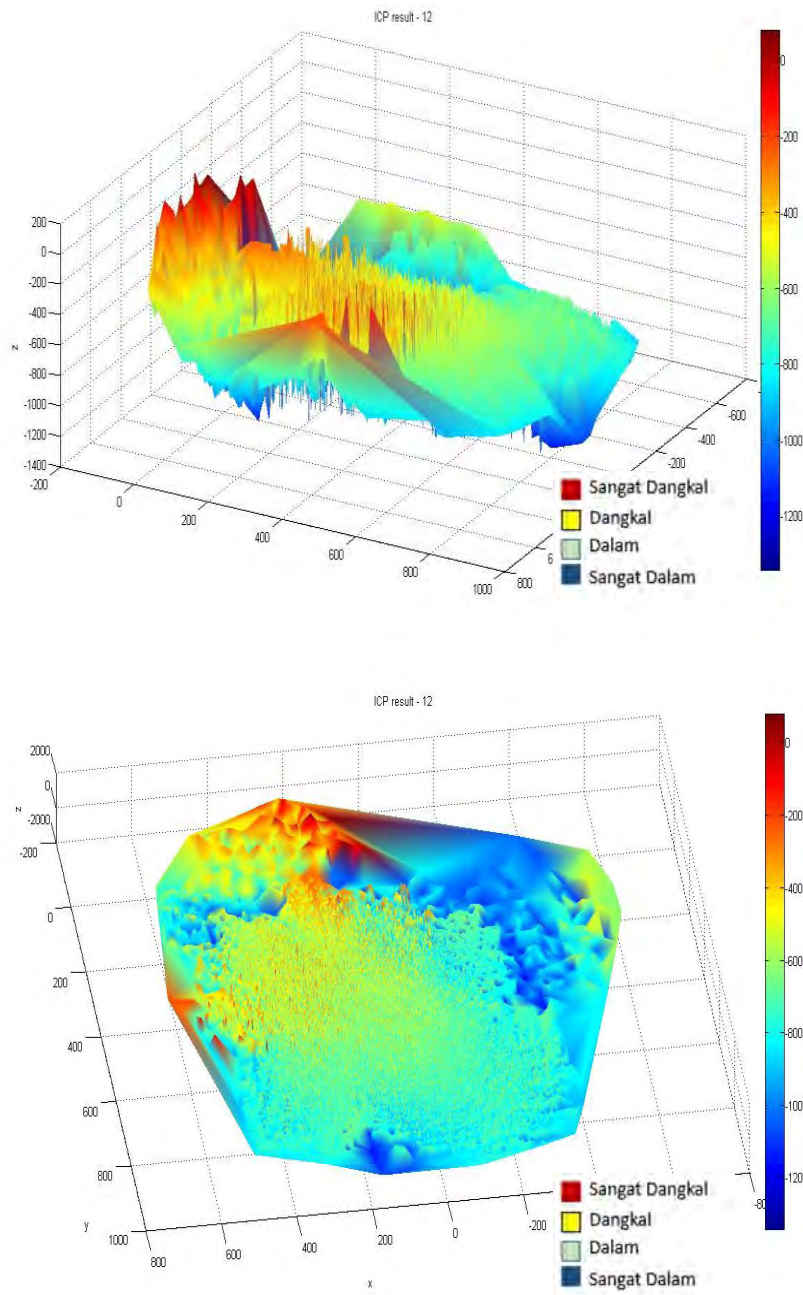
Gambar 6.8: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan ICP (jumlah frame = 3).



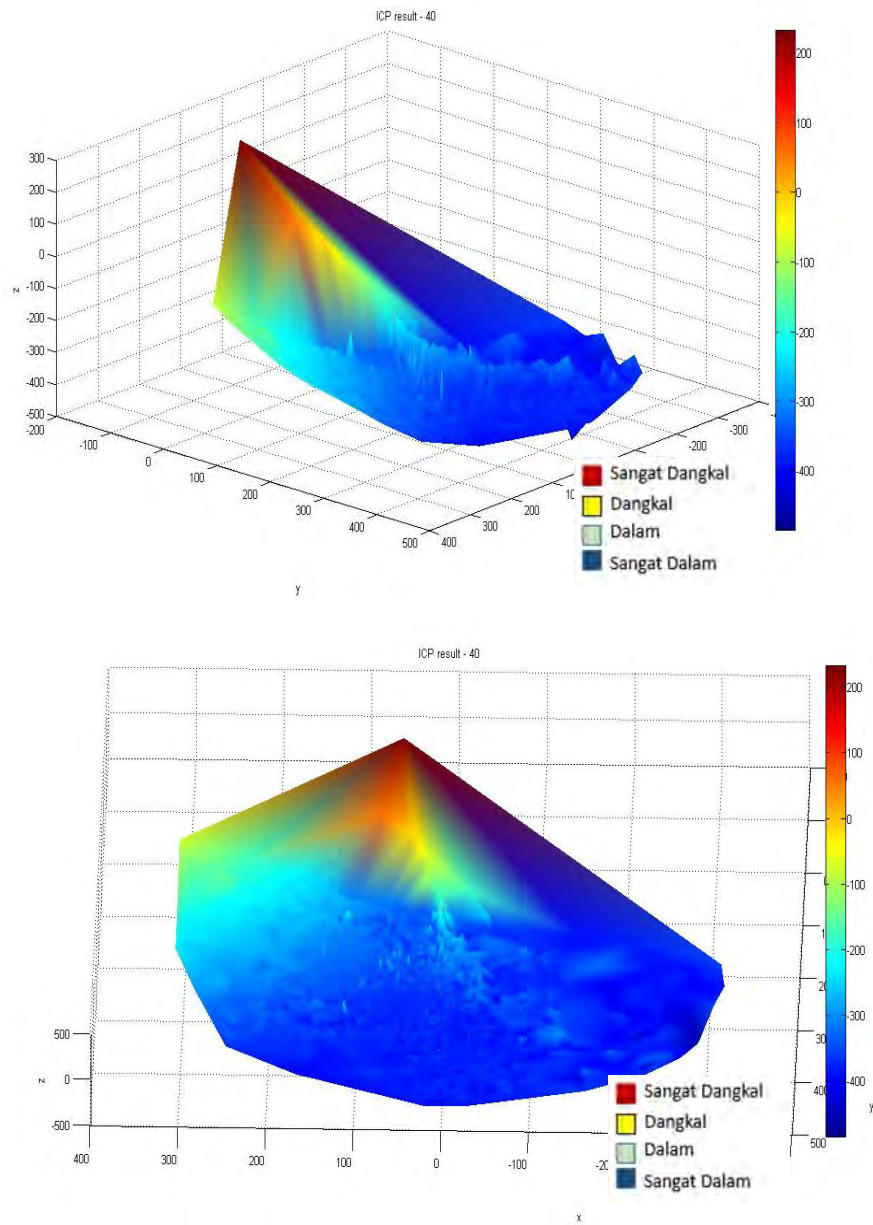
Gambar 6.9: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan ICP (jumlah frame = 6).



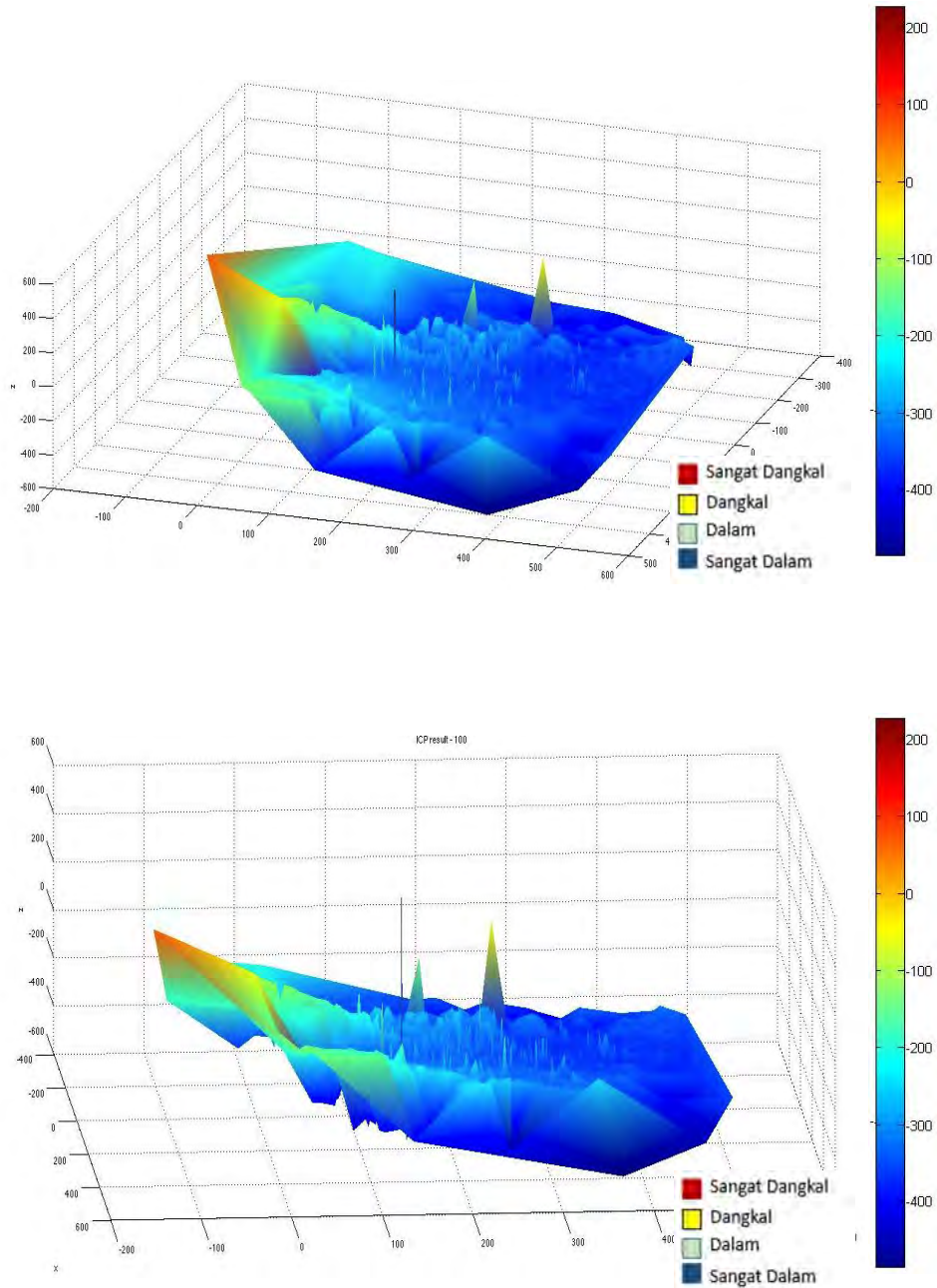
Gambar 6.10: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan ICP (jumlah frame = 9).



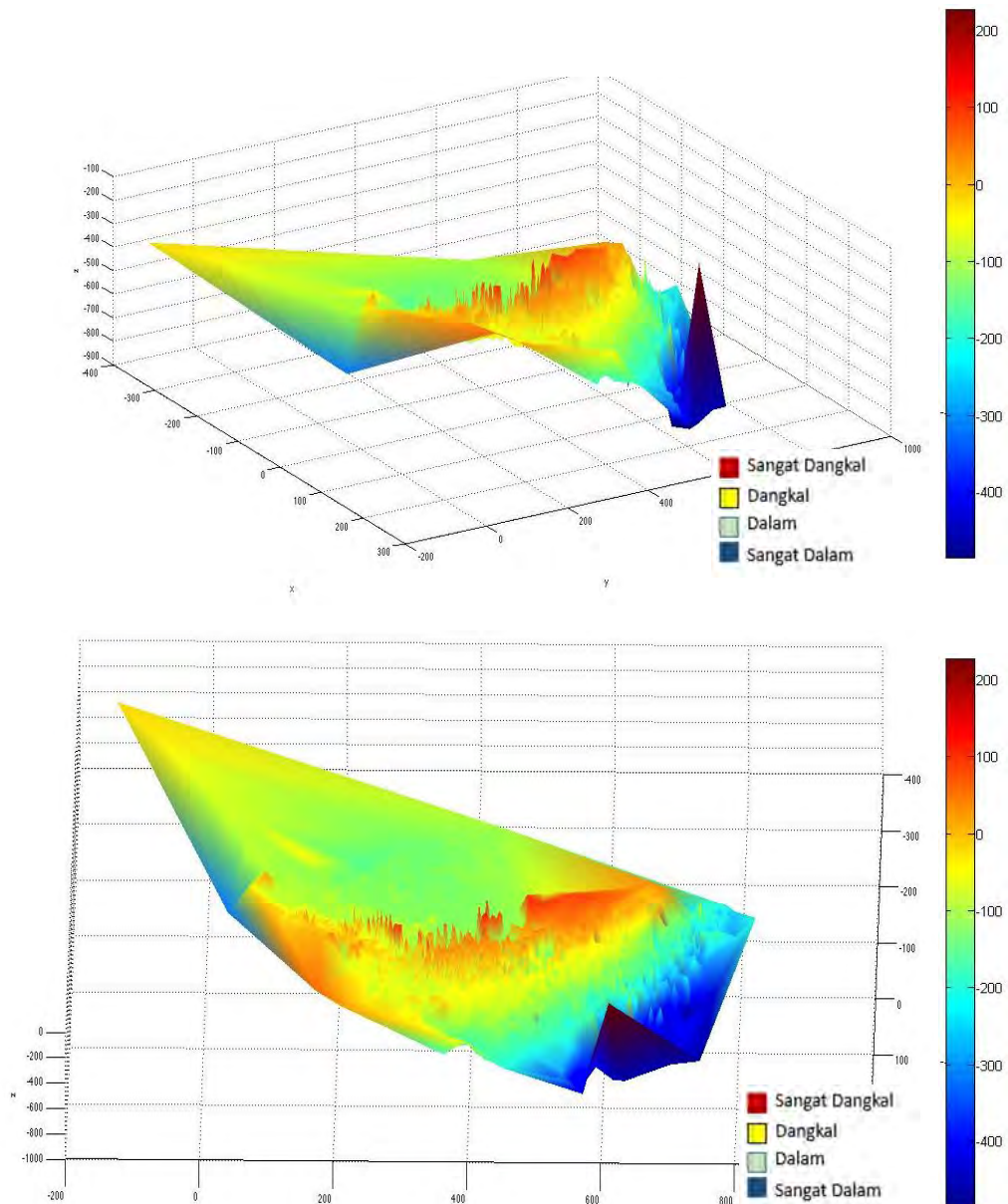
Gambar 6.11: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan ICP (jumlah frame = 12).



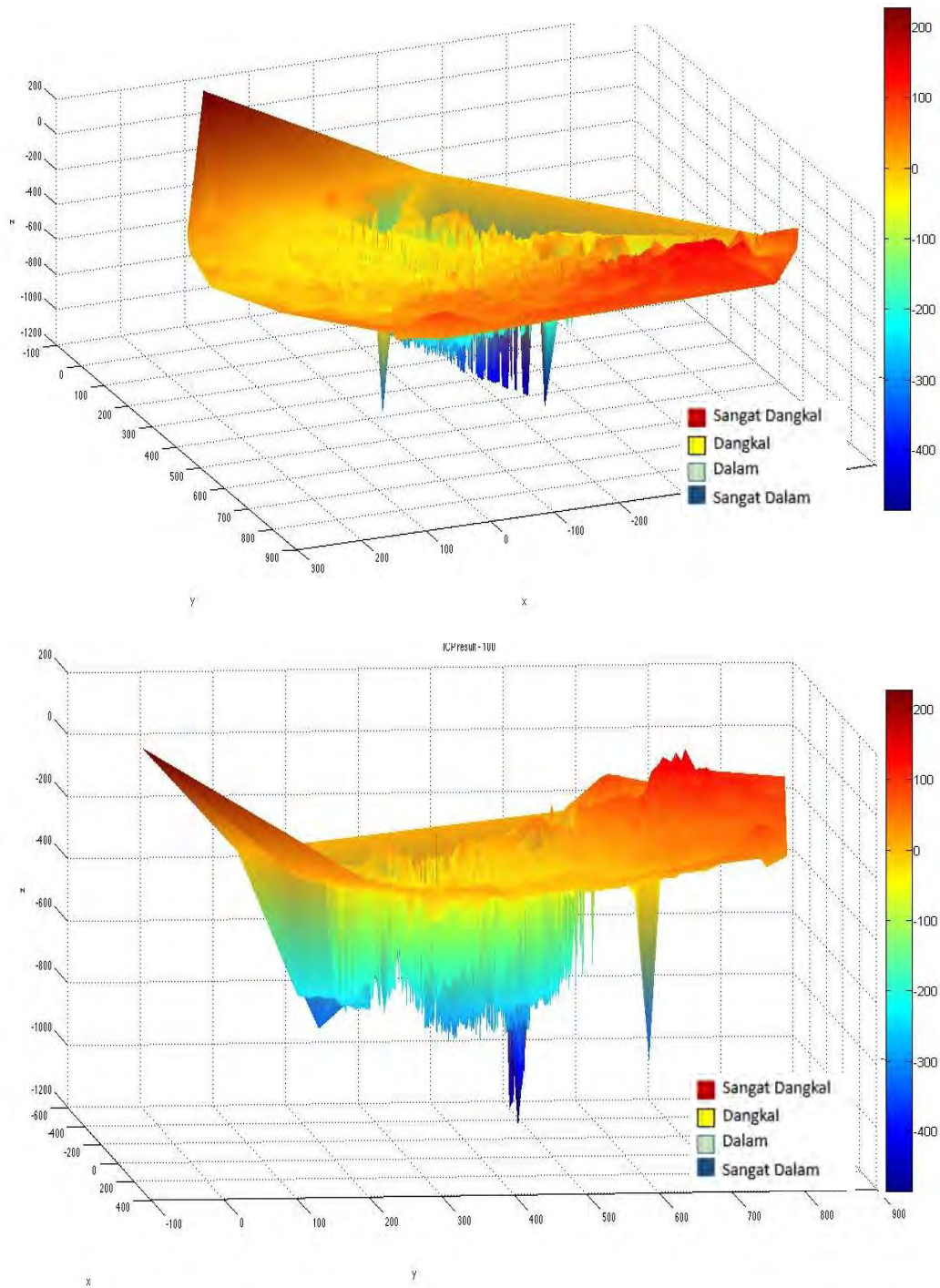
Gambar 6.12: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan ICP (jumlah frame = 40).



Gambar 6.13: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan ICP (jumlah frame = 90).



Gambar 6.14: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan GPA-ICP (jumlah frame = 40).



Gambar 6.15: Rekonstruksi 3D permukaan dasar laut menggunakan GPA-ICP (jumlah frame = 90).

Bab ini mengusulkan penggunaan GPA-ICP untuk melakukan proses registrasi titik-titik 3D sehingga membentuk citra 3D permukaan dasar laut. Dari hasil eksperimen disimpulkan bahwa metode kombinasi GPA dan ICP mampu menghasilkan rekonstruksi 3D permukaan dasar laut yang lebih baik dibandingkan dengan ICP. Hal tersebut dibuktikan melalui hasil kuantitatif yang berupa pengukuran MSE, jumlah titik-titik 3D setelah proses registrasi, dan waktu komputasi dari proses registrasi antara GPA-ICP dan ICP. Nilai MSE, jumlah titik-titik 3D setelah proses registrasi, dan waktu komputasi dari proses GPA-ICP lebih kecil dibandingkan dengan ICP.

BAB 7

KESIMPULAN DAN RENCANA PENELITIAN SELANJUTNYA

7.1 Kesimpulan

Dari penelitian di atas dapat disimpulkan beberapa poin kesimpulan sebagai berikut:

1. Rekonstruksi citra 3D yang presisi pada kamera stereo membutuhkan kalibrasi kamera. Medium air bawah laut tentunya sangat mempengaruhi proses kalibrasi kamera dengan perbedaan nilai kalibrasi kamera pada medium air dan udara sebesar 36%.
2. Registrasi citra 2D berbasis SIFT mampu menghasilkan kinerja yang lebih baik dengan cara menambahkan CLAHE untuk memperbaiki kualitas citra. Dari hasil penelitian didapat bahwa CLAHE mampu meningkatkan jumlah titik korespondensi algoritma SIFT sebesar 26% hingga 30%. Banyaknya jumlah titik korespondensi ini sangat mempengaruhi kualitas rekonstruksi citra 3D permukaan dasar laut.
3. Rekonstruksi citra 3D dari satu pasang citra *stereo vision* tidak cukup untuk menghasilkan rekonstruksi citra 3D yang akurat. Hal ini disebabkan karena citra tersebut hanya dilihat dari satu sisi saja. Dengan menggunakan

point cloud hasil dari CLAHE dan SIFT pada setiap frame yang kemudian diregistrasikan dengan menggunakan metode GPA-ICP, maka hasil rekonstruksi 3D permukaan dasar laut tampak mendekati dengan kondisi yang sebenarnya. Hasil penelitian juga dibuktikan secara kuantitatif dengan menunjukkan bahwa MSE yang dihasilkan oleh algoritma GPA-ICP lebih kecil dibandingkan dengan algoritma ICP. Nilai MSE yang dihasilkan mengalami penurunan sebesar 98% dan waktu komputasi menurun hingga 48%.

7.2 Rencana Penelitian Selanjutnya

Penelitian selanjutnya supaya dapat menerapkan rekonstruksi citra 3D permukaan dasar laut berbasis registrasi citra 3D untuk pembuatan rantai virtual yang berguna untuk pengukuran *rugosity*. Yang merupakan salah satu indikator untuk mengetahui kesehatan terumbu karang. Sehingga dapat lebih bermanfaat bagi peneliti-peneliti di bidang kelautan dalam memonitor kondisi dasar laut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yuwono, "Pemanfaatan Survei Dan Pemetaan Laut Untuk Menyongsong Kadaster Laut (Marine Cadaster)," in *Pertemuan Ilmiah Tahunan III – Teknik Geomatika*, Surabaya, 2006.
- [2] A. E. Johnson and M. Hebert, "Seafloor Map Generation for Autonomous Underwater Vehicle Navigation," *Autonomous Robots*, vol. 3, no. 2, pp. 145-168.
- [3] J. C. Brock, C. W. Wright, I. B. Kuffner, R. Hernandez and P. Thompson, "Airborne lidar sensing of massive stony coral colonies on patch reefs in the northern Florida reef tract," *Remote Sensing of Environment*, vol. 104, no. 1, p. 31–42, 2006.
- [4] A. Friedman, O. Pizarro and S. B. Williams, "Rugosity, Slope and Aspect from Bathymetric Stereo Image Reconstruction," in *OCEANS 2010 IEEE*, Sydney, 2010.
- [5] C. J. Prabhakar and P. U. P. Kumar, "An Image Based Technique for Enhancement of Underwater Images," *International Journal of Machine Intelligence*, vol. 3, no. 4, pp. 217-224, 2011.
- [6] V. Brandou, A. G. Allais, M. Perrier, E. Malis, P. Rives, J. Sarrazin and P. M. Sarradin, "3D Reconstruction of Natural Underwater Scenes Using the Stereovision System IRIS," in *OCEANS 2007 - Europe*, Aberdeen, 2007.

- [7] O. Pizarro, R. M. Eustice and H. Singh, "Large Area 3-D Reconstructions From Underwater Optical Surveys," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 34, no. 2, pp. 150-169, April 2010.
- [8] L. Zhang, B. Jouvencel, Z. Fang and X. Xiang, "3D Reconstruction of seabed surface through sonar data of AUVs," *Indian Journal of Geo-Marine Sciences (IJMS)*, vol. 41, no. 6, Desember 2012.
- [9] Q. Memon and S. Khan, "Camera calibration and three-dimensional world reconstruction of stereo-vision using neural networks," *International Journal of Systems Science*, vol. 32, no. 9, pp. 1155-1159, 2001.
- [10] L. Ran, Z. Hua, L. Manlu, X. Xianfeng and H. Tianlian, "Stereo Cameras Self-calibration Based on SIFT," in *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2009.
- [11] K. Peng, X. Chen, D. Zhou and Y. Liu, "3D Reconstruction Based on SIFT and Harris Feature Points," in *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Guilin, China, 2009.
- [12] L. Juan and O. Gwun, "A Comparison of SIFT, PCA-SIFT and SURF," *International Journal of Image Processing (IJIP)*, vol. 3, no. 4, pp. 143-152, 2009.
- [13] A. Saxena, M. Sun and A. Y. Ng, "3D Reconstruction from Sparse Views using Monocular Vision," in *IEEE 11th International Conference on Computer Vision*, Rio de Janeiro, 2007.

- [14] R. Toldo, A. Beinat and F. Crosilla, "Global registration of multiple point clouds embedding the Generalized Procrustes Analysis into an ICP framework," in *3DPVT 2010 Conference*, Paris, 2010 .
- [15] L. Li, Z. Feng and Y. Feng, "Accurate Calibration of Stereo Cameras for Machine Vision," *JCS&T*, vol. 4, no. 3, October 2004.
- [16] G. Dudek, M. Jenkin and E. Miliotis, "Topological Exploration of Unknown Environments with Multiple Robots," in *Proc. of the World Automation Congress (WAC '98)*, Anchorage, Alaska, 1998.
- [17] R. Gershon, M. Benady and T. Shalom, "3D reconstruction from multiple 2D views using trilinear tensor technology," in *SPIE Photonics West Conf*, San Jose, CA, 2001.
- [18] T. Heimonen, J. Hannuksela, J. Heikkil, J. Leinonen and M. Manninen, "Experiments in 3D measurements by using single camera and accurate motion," in *Proc. IEEE Int. Symp. Assembly Task Planning (ISATP'01)*, 2001.
- [19] V. Uffenkamp, "State of the art of high precision industrial photogrammetry, ch. II," in *Proc. 3rd Int. Workshop Accelerator Alignment*, Annecy, France, 1993.
- [20] H. G. Nquyen, J. Heckman, P. J and Pai, "Real-time pattern recognition for guidance of an autonomous undersea submersible," *Robotics and Automation*, vol. 3, p. 1767–1770, 24-29 April 1988.

- [21] H. Wang, H. Sun, J. Shen and Z. Chen, "A Research on Stereo Matching Algorithm for Underwater Image," in *4th International Congress on Image and Signal Processing*, 2011.
- [22] K. Iqbal, R. A. Salam, A. Osman and A. Z. Talib, "Underwater Image Enhancement Using an Integrated Colour Model," *IAENG International Journal of Computer Science*, vol. 34, no. 2, 2007.
- [23] S. Ito and N. Otsu, "Detection and Recognition of Moving Objects by Using Motion Invariants," in *Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)*, Hong Kong, 2006.
- [24] A. Barth, "Visual Inspection of Fast Moving Heat Shrink Tubes in Real-Time," Bonn-Rhein-Sieg University, 2005.
- [25] H. G. J. Sun, "Research of Linear Camera Calibration Based on Planar Pattern," in *Engineering and Technology*, 2009.
- [26] J. Steele, C. Vincent and M. Whitehorn, "Developing stereovision and 3D modelling for LHD automation," in *6th International Symposium on Mine Mechanization and Automation*, 2001.
- [27] R. Adipranata, K. Gunadi and V. J. Lipesik, "Rekonstruksi Obyek Tiga Dimensi Dari Gambar Dua Dimensi Menggunakan Metode Generalized Voxel Coloring–Layered Depth Image," *Jurnal Informatika*, vol. 9, no. 1, pp. 43 - 50 , 2008 .

- [28] C. Solomon and T. Breckon, *Fundamentals of Digital Image Processing*, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [29] B. Singh, R. S. Mishra and P. Gour, "Analysis of Contrast Enhancement Techniques For Underwater Image," *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering*, pp. pp. 190-194., Vol. 1, Issue 2, October 2011.
- [30] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige and G. Bradski, "ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF," in *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Barcelona, 2011.
- [31] H. Kandil and A. Atwan, "A Comparative Study between SIFT- Particle and SURF-Particle Video Tracking Algorithms," *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, vol. 5, no. 3, pp. 111-122, 2012.
- [32] N. Y. Khan, B. McCane and G. Wyvill, "SIFT and SURF Performance Evaluation Against Various Image Deformations on Benchmark Dataset," in *International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications*, Noosa, QLD, 2011.
- [33] M. G. Peña, "A Comparative Study of Three Image Matcing Algorithms: SIFT, SURF, and FAST," Utah State University, Logan, Utah, 2011.
- [34] D. G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," *International Journal of Computer Vision*, 2004.

- [35] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars and L. V. Gool, "Speeded-Up Robust Features (SURF)," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 110, pp. 346-359, 2008.
- [36] A. Almhdie, C. Léger, M. Deriche and R. Lédée, "A New Implementation of the ICP Algorithm for 3D Surface Registration Using a Comprehensive Look Up Matrix," in *14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2006)*, Florence, Italy, 2006.
- [37] C. Beall, B. J. Lawrence, V. Ila and F. Dellaert, "3D Reconstruction of Underwater Structures," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Taipei, 2010.
- [38] M. Mozerov, A. Amato, M. A. Haj and J. González, "A Simple Method of Multiple Camera Calibration for the Joint Top View Projection," in *Computer Recognition Systems 2*, Springer, 2007, pp. 164-170.
- [39] Tsai, A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off the shelf tv cameras and lenses, *IEEE Journal of Robotics and Automations*, 1987.
- [40] Z. Zhang, "A Flexible New Technique For Camera Calibration.," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, 2000.
- [41] J. Weng, P. Cohen and M. Herniou, "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis*

and Machine Intelligence, vol. 14, no. 10, p. 965–980, 1992.

- [42] E. Honkavaara, E. Ahokas, J. Hyypä, J. Jaakkola, H. Kaartinen, R. Kuittinen, L. Markelin and K. Nurminen, "Geometric test field calibration of digital photogrammetric sensors," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 60, no. 6, p. 387–399, 2006.
- [43] L. Grammatikopoulos, G. Karras and E. Petsa, "An automatic approach for camera calibration from vanishing points," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 62, no. 1, p. 64–76, 2007.
- [44] W. Qi, F. Li and L. Zhenzhong, "Review on Camera Calibration," in *Chinese Control and Decision Conference*, Xuzhou, China, 2010.
- [45] D. Moreno and G. Taubin, "Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration," in *Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT)*, Zurich, 2012.
- [46] A. Mahiddine, J. Seinturier, J. M. Boï and P. D. D. Merad, "Performances Analysis of Underwater Image Preprocessing Techniques on the Repeatability of SIFT and SURF Descriptors," in *WSCG 2012: 20th International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, 2012.
- [47] P. Subashini, M. M. Kumar, S. K. Thakur and G. Padmavathi, "Comparison of Filters used for Underwater Image Pre-Processing," *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 10, no. 1, pp. 58-65, 2010.

- [48] K. Iqbal, M. Odetayo, A. James and R. A. Salam, "Enhancing The Low Quality Images Using Unsupervised Colour Correction Method," in *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC)*, 2010.
- [49] A. Hogue, A. German and M. Jenkin, "Underwater environment reconstruction using stereo and inertial data," in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2007 .
- [50] J. F. Anthoni, 2005. [Online]. Available:
<http://www.seafriends.org.nz/phgraph/water.htm>.
- [51] L. M. Patnaik and K. Rajan, "Target detection through image processing and resilient propagation algorithms," *Neurocomputing*, vol. 35, pp. 123-135, 2000.
- [52] R. Garg, B. Mittal and S. Garg, "Histogram Equalization Techniques For Image Enhancement," *International Journal on Electronics & Communication Technology*, vol. 2, no. 1, 2011.
- [53] R. K. Rai, P. Gour and B. Singh, "Underwater Image Segmentation using CLAHE Enhancement and Thresholding," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 118-123, January 2012.
- [54] Suprijanto, Gianto, E. Juliastuti, Azhari and L. Epsilawati, "Image Contrast Enhancement for Film-Based Dental Panoramic Radiography," in *International Conference on System Engineering and Technology*, Bandung,

Indonesia, 2012.

- [55] X. Yu and T. Huang, "A SIFT-based Image Fingerprinting Approach Robust to Geometric Transformations," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Taipei, 2009.
- [56] U. Park, S. Pankanti and A. K. Jain, "Fingerprint Verification Using SIFT Features," in *SPIE Defense and Security Symposium*, Orlando, Florida, 2008.
- [57] L. Wei, "3D Seafloor Mapping," Department of Computer Architecture and Technology University of Girona, Girona, Spain, 2010.
- [58] T. Nicosevici, S. Negahdaripour and R. Garcia, "Monocular-Based 3-D Seafloor Reconstruction and Ortho-Mosaicing by Piecewise Planar Representation," in *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*, Washington, DC, 2005.
- [59] D. Scharstein and R. Szeliski, "A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms," *International Journal of Computer Vision*, vol. 47, no. 1, pp. 7-42, 2002.
- [60] D. A. Forsyth and J. Ponce, *Computer Vision : A Modern Approach*, Prentice Hall, 2003.
- [61] A. Leone, G. Diarco and C. Distanto, "A Stereo Vision Framework for 3-D Underwater Mosaicking," in *Stereo Vision*, InTech, 2008, pp. 173-196.
- [62] S. Negahdaripour and H. Madjidi, ""Stereovision Imaging on Submersible

Platforms for 3D Mapping of Benthic Habitats and Sea Floor Structures","
Oceanic Engineering, IEEE Journal vol.28,no 4, pp. 625-650, 2003.

- [63] P. Besl and H. McKay, "A method for registration of 3-D shapes," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine*, vol. 14, no. 2, p. 239–256, 1992.
- [64] S. Rusinkiewicz and M. Levoy, "Efficient variants of the ICP algorithm," in *International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM)*, Quebec City, Canada, 2001.
- [65] N. Uchida, T. Shibahara, T. Aoki, H. Nakajima and K. Kobayashi, "3D Face Recognition Using Passive Stereo Vision," in *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2005.
- [66] G. K. Tam, Z.-Q. Cheng, Y.-K. Lai, F. C. Langbein, Y. Liu, D. Marshall, R. R. Martin, X.-F. Sun and P. L. Rosin, "Registration of 3D Point Clouds and Meshes: A Survey From Rigid to Non-Rigid," *Journal of latex Files*, vol. 6, no. 1, pp. 1-20, 2007.
- [67] S. Prakash, "Human Recognition using 2D and 3D Ear Images," *Indiana Institut of Technology Kanpur, Kanpur*, 2012.
- [68] K. Cordes, P. Mikulastik, A. Vais and J. Ostermann, "Extrinsic Calibration of A Stereo Camera System using A 3D CAD Model Considering The Uncertainties of Estimated Feature Points," in *Conference for Visual Media Production*, London, 2009.

LAMPIRAN B: DAFTAR RIWAYAT HIDUP

I. BIODATA

Nama : Pulung Nurtantio Andono, ST., M.Kom
NRP : 2209 301 015
Jenis Kelamin : Laki-laki
Pekerjaan : Tenaga Pengajar Program Studi Teknik
Informatika, Fakultas Ilmu Komputer,
Universitas Dian Nuswantoro (UDINUS)
Jabatan Fungsional : Asisten Ahli (III/b)
Jabatan Struktural : Direktur Kantor Urusan Internasional
(KUI- UDINUS)
Tempat Tanggal Lahir: Jakarta, 10 September 1982
Alamat : Jalan Durian Raya no 39, Srandol Wetan,
Banyumanik, Semarang 50263
Telepon : 024-7498175
Handphone : 0811855768
Email : pulung@dinus.ac.id, pulung@research.dinus.ac.id,
pulung.nurtatio@yahoo.com

II. PENDIDIKAN

1. Sarjana Teknik Informatika di Universitas Trisakti Jakarta (2000-2006)

Skripsi : Analisa Perbedaan Transfer Rate antara Wireless dan
Wired Menggunakan SNMP Protokol

Pembimbing : Gatot Budi Santoso, M.Kom dan Abdul Rochman,
M.Kom

2. Magister Teknik Informatika di Universitas Dian Nuswantoro (2007-2009)

Tesis : *Real Time Streaming Multimedia Menggunakan Real Time Streaming Protocol untuk Peningkatan Image*

Branding Perusahaan

Pembimbing : Dr. Ir. Edi Noersasongko, M.Kom dan
Dr. Eng Yuliman Purwanto

III. RISET

1. **Pulung Nurtantio Andono**, Ricardus Anggi Pramunendar, Catur Supriyanto, dan Guruh Fajar Shidik. “Penentuan Kualitas Kayu Kelapa Secara Artificial Neural Network”. Universitas Dian Nuswantoro. 2013.

IV. SIMPOSIUM INTERNASIONAL

1. Presenter di Acara 2nd KMUTT-TUT Joint Symposium
Penyelenggara: King Mongkut's University of Technology Thonburi
(KMUTT), Tokyo University of Technology (TUT), dan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Tanggal : 28 Juni 2013

Tempat : Hachioji City, Tokyo, JAPAN

V. KONFERENSI DAN JURNAL

1. **Pulung Nurtantio Andono**, I Ketut Eddy Purnama, Mochamad Hariadi, Taichi Watanabe, dan Kunio Kondo, “3D Surfaces Reconstruction of Seafloor Images Using Multiview Camera Based on Image Registration”, *International Conference on Advances in Information Technology (ICAIT 2013)*, Desember, 2013. KOREA. Indexed by Scopus (Elsevier), EI Compendex, ISI proceeding. Published by lecturer notes in Information Technology. ISSN: 2070-1918.
2. **Pulung Nurtantio Andono**, I Ketut Eddy Purnama, dan Mochamad Hariadi, “Underwater Image Enhancement Using Adaptive Filtering For Enhanced SIFT-Based Image Matching”, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology (JATIT)*, vol. 52. no. 3. pp. 273-280. Juni, 2013. Indexed by Scopus. ISSN: 1992-8645.
3. **Pulung Nurtantio Andono**, Ricardus Anggi Pramunendar, Catur Supriyanto, Guruh Fajar Shidik, I Ketut Eddy Purnama, dan Mochamad Hariadi, “Enhancement of 3D Surface Reconstruction of Underwater Coral Reef Base on SIFT Image Matching Using Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization and Outlier Removal”, *KURSOR*, vol. 7 no. 1, Januari, 2013. ISSN: 0216-544.
4. **Pulung Nurtantio Andono**, Eko M. Yuniarno, Mochamad Hariadi, dan Valentijn Venus, “3D Reconstruction of Under Water Coral Reef Images Using Low Cost Multi-View Cameras”, *Proceedings of International*

Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS) / IEEE,
2012, TANGIER, MAROKO.

5. **Pulung Nurtantio Andono**, Guruh Fajar Shidik, Ricardus Anggi Pramunendar, Catur Supriyanto, dan Mochamad Hariadi “Analisa Pengaruh Perbedaan Medium Air dan Udara Terhadap Kalibrasi Kamera Dengan Menggunakan Metode Zhang”, *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Komunikasi Terapan (SEMANTIK)*, 2012, ISSN: 979-26-0255-0.
6. Catur Supriyanto, Guruh Fajar Shidik, Ricardus Anggi Pramunendar, dan **Pulung Nurtantio Andono**, “Performance Enhancement of Image Clustering using Singular Value Decomposition in Color Histogram Content-Based Image Retrieval”, *International Journal of Computer and Communication Engineering (IJCCE)*, vol, 1. no. 4, pp. 317-320, November, 2012. ISSN: 2010-3743. Indexed by DOAJ, ProQuest. Di konferenkan di *International Conference on Information and Computer Technology (ICICT)*, BEIJING, CHINA.
7. Ricardus Anggi Pramunendar, Guruh Fajar Shidik, Catur Supriyanto, **Pulung Nurtantio Andono**, dan Mochamad Hariadi, “Auto Level Color Correction for Underwater Image Matching Optimization”, *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, vol. 13. no. 1, pp. 18-23, Januari, 2013. ISSN: 1738-7906.
8. Guruh Fajar Shidik, Fajrian Nur Adnan, Ricardus Anggi Pramunendar, Catur Supriyanto, dan **Pulung Nurtantio Andono**, “Deteksi Api dengan Multi Color Feature, Background Subtraction, dan Morphology”, *Seminar*

Nasional Teknologi Informasi dan Komunikasi Terapan (SEMANTIK),
2013, ISSN: 979-26-0266-6.

9. Ricardus Anggi Pramunendar, Catur Supriyanto, Dwi Hermawan Novianto, Ignatius Ngesti Yuwono, Guruh Fajar Shidik, dan **Pulung Nurtantio Andono**, “A Classification Method of Coconut Wood Quality Based on Gray Level Co-Occurrence Matrices”, *Proceedings of International Conference on Robotics, Biomimetics, Intelligent Computational Systems (ROBIONETICS) / IEEE*, November 25-27, 2013, Jogjakarta.
10. Guruh Fajar Shidik, Fajrian Nur Adnan, Catur Supriyanto, Ricardus Anggi Pramunendar, dan **Pulung Nurtantio Andono**, “Multi Color Feature, Background Subtraction and Time Frame Selection for Fire Detection”, *Proceedings of International Conference on Robotics, Biomimetics, Intelligent Computational Systems (ROBIONETICS) / IEEE*, November 25-27, 2013, Jogjakarta.

VI. PUBLIKASI BUKU

1. **Pulung Nurtantio Andono, ST, M.Kom** dan Arry Maulana Syarif, M.Kom. “Kreasikan Animasi-mu dengan Adobe Flash dalam membuat Sistem Multimedia Interaktif”. *ANDI*. 2013. ISBN: 978-979-29-3494-6.
2. DR. Ir. Edi Noersasongko, M.Kom dan **Pulung Nurtantio Andono, ST, M.Kom**. “Mengenal Dunia Komputer”. *Elex Media Komputindo*. 2010. ISBN: 978-979-27-8320-9.

LAMPIRAN A: FOTO DOKUMENTASI



Gambar A.1: Persiapan Pengambilan Citra Dasar Laut.



Gambar A.2: Pengambilan Citra Dasar Laut.



Gambar A.3: Keindahan Terumbu Karang di Pulau Karimunjawa.

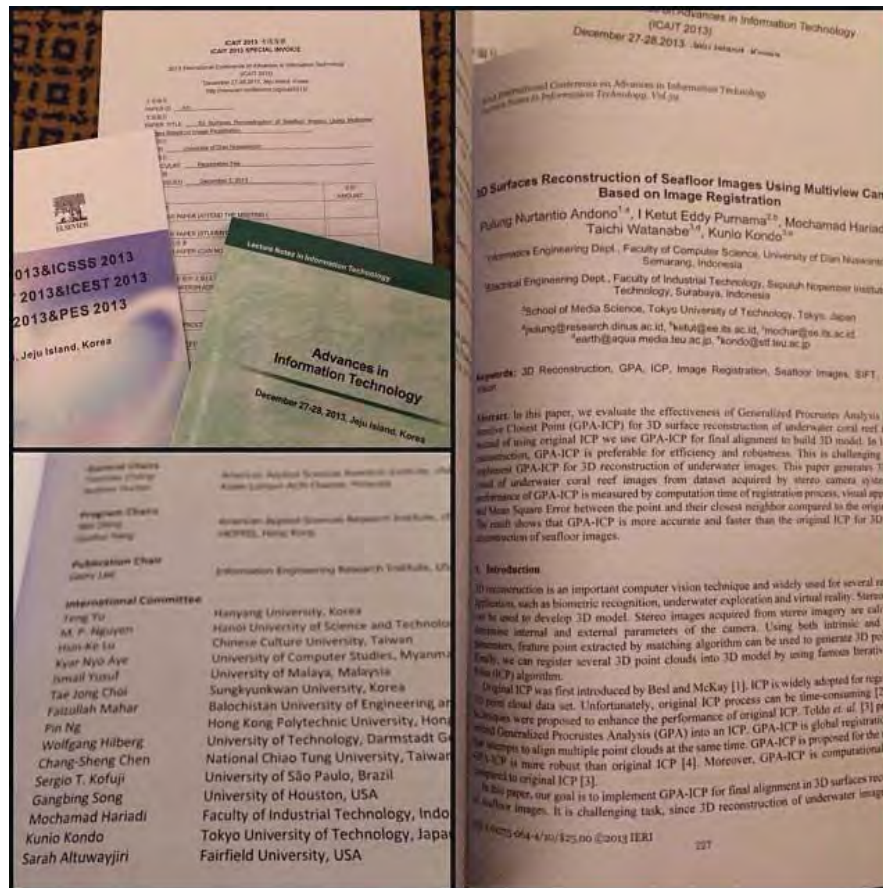


Gambar A.4: Foto Dokumentasi saat menghadiri konferensi internasional (ICMCS'12) IEEE di Tangier-MAROKO.



Gambar A.5: Foto Dokumentasi saat menghadiri konferensi internasional

ICAIT 2013 di Jeju Island – KOREA.



Gambar A.6: *Lecture Notes in Information Technology*. Publikasi konferensi internasional ICAIT 2013 di Jeju Island – KOREA.



Gambar A.7: Presentasi di acara ジョイント シンポジウム - 2nd KMUTT-TUT
Joint Symposium 2013, Japan

July 5, 2013

Letter of Statement

To whom it may concern:

Mr. Pulung Nurtantio Andono has finished his internship here in Graduate School of Bionics, Computer and Media Sciences, Tokyo University of Technology in 2 months from 12 May 2013 to 8 July 2013. His research in TUT was about 3D SURFACE RECONSTRUCTION OF CORAL REEF USING TRIANGULATION OF SIFT IMAGE MATCHING FOR RUGOSITY MEASUREMENT, and the result of his study was excellent. He presented his research work at KMUTT-TUT Joint symposium on 28th June. We hope will make a good joint collaboration between two institutions.

Sincerely yours.



Kunio KONDO, Professor
School of Media Science
Tokyo University of Technology
Japan



Taichi Watanabe Lecturer

Kunio KONDO, Taichi Watanabe School of Media Science, Tokyo University of Technology
1404-1 Katakuramachi, Hachioji City, Tokyo 192-0982, JAPAN.
E-mail: kondo@stf.teu.ac.jp, earth@stf.teu.ac.jp

Gambar A.8: Sertifikat telah melaksanakan penelitian magang di Tokyo
University of Technology