

Analisis Perbandingan Metode *Perceptron* Dengan *Pseudo Invers* Dalam Menentukan Matriks Fundamental Pada Citra Stereo Kamera

Amillia Dyah Sukmawati ¹, Farrady Alif Fiolana ², Iska Yanuartanti ³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam Kediri-Kediri

Jl. Sersan Sutarmaji No.38, Manisrenggo, Kec. Kota, Kota Kediri Jawa Timur

Email : amilliasukma@gmail.com ¹, farradyalif@uniska-kediri.ac.id ², iska.yanuartanti@uniska-kediri.ac.id ³

ARTICLE INFO

Article history:

Submitted:
July 16, 2024

Accepted:
July 18, 2024

Published:
July 31, 2024

ABSTRACT

3D object reconstruction is a technology that continues to develop and plays an important role in various industries. This technology allows the creation of three-dimensional models of real objects, which is useful in a variety of applications such as medicine, manufacturing, archeology, and entertainment. A commonly used method for reconstructing 3D objects is to use a stereo camera. This technology imitates the way the human eye sees the world by taking images from two different viewpoints and then combining them into a 3D model. This stage begins by taking 2D images from 2 cameras of the same type with different camera positions. Then, the 2D image is processed to find world coordinates and pixel coordinates with the center point being the center point. After that, the coordinate point data is processed to find the fundamental matrix value. The fundamental matrix is a matrix that shows the geometric relationship between two cameras with different viewpoints in capturing 2D images. The matrix states whether the two cameras are calibrated or not. The matrix is calculated using the pseudo-inverse method and perceptron artificial neural network (ANN). From these two methods, the mean squared error (MSE) for the pseudo-inverse method was 4.11 and for the artificial neural network method, it was 4.77. This shows that the pseudo-inverse method is better and more accurate than the perceptron artificial neural network (ANN) method for finding fundamental matrix values.

ABSTRAK

Rekonstruksi objek 3D merupakan teknologi yang terus berkembang dan memainkan peran penting dalam berbagai industri. Teknologi ini memungkinkan pembuatan model tiga dimensi dari objek nyata, yang berguna dalam berbagai aplikasi seperti medis, manufaktur, arkeologi, dan hiburan. Metode yang umum digunakan untuk rekonstruksi objek 3D adalah dengan menggunakan stereo kamera. Teknologi ini meniru cara mata manusia melihat dunia dengan mengambil gambar dari dua sudut pandang yang berbeda untuk kemudian digabungkan menjadi model 3D. Tahap ini diawali dengan mengambil citra 2D dari 2 kamera yang memiliki tipe sama dengan posisi kamera yang berbeda. Kemudian, dari citra 2D tersebut diolah untuk mencari titik koordinat dunia dan titik koordinat pixel dengan titik tengah menjadi titik pusatnya. Setelah itu, data titik koordinat diolah untuk mencari nilai matriks fundamental. Matriks fundamental merupakan sebuah matriks yang menunjukkan hubungan geometri antara dua kamera yang berbeda sudut pandang dalam menangkap citra 2D. Matriks tersebut menyatakan terkalibrasi atau tidaknya kedua kamera tersebut. Matriks tersebut dihitung menggunakan metode *pseudo invers* dan jaringan syaraf

Keywords:

Camera Stereo, Fundamental Matrix, Pseudo Inverse, perceptron

Kata Kunci:

Stereo Kamera, Pseudo Invers, Matriks Fundamental, perceptron

tiruan (JST) *perceptron*. Dari dua metode tersebut didapatkan hasil *mean squared error* (MSE) dari metode pseudo invers 4,11 dan pada metode jaringan syaraf tiruan sebesar 4,77. Hal ini menunjukkan bahwa metode *pseudo invers* lebih baik dan teliti daripada metode jaringan syaraf tiruan (JST) *perceptron* untuk mencari nilai matriks fundamental.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



Corresponding Author:

Amillia Dyah Sukmawati,
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Islam Kadiri
Jalan Sersan Suharmadji No. 38, Kota Kediri, Jawa Timur, Indonesia.
Email: amilliasukma@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Era pesatnya perkembangan teknologi, pemrosesan citra dan penglihatan komputer telah menjadi fokus utama penelitian di berbagai bidang, dengan pengembangan teknologi rekayasa 3D menjadi salah satu aspek yang paling menarik. Salah satu aplikasi yang menonjol adalah rekonstruksi objek 3D menggunakan stereo kamera. Proses rekonstruksi ini melibatkan pengambilan objek dari dunia nyata dan menciptakan model 3D yang dapat diakses melalui komputer. Keberhasilan rekonstruksi 3D ini memiliki dampak yang signifikan di berbagai sektor seperti kedokteran, game, robotika, arkeologi, dan kota virtual, yang semuanya mendapat manfaat dari representasi objek yang lebih realistis dan detail [1][2].

Salah satu elemen kunci dalam proses rekonstruksi 3D adalah matriks fundamental. Matriks fundamental F merupakan sebuah matriks yang menunjukkan hubungan geometri antara dua kamera yang berbeda sudut pandang dalam menangkap citra 2D [3]. Matriks ini merupakan langkah awal yang sangat penting untuk menentukan apakah dua kamera telah terkalibrasi dengan benar atau belum. Dengan membedah matriks fundamental menjadi matriks intrinsik dan ekstrinsik kamera, kita dapat memahami secara mendalam informasi geometris dan posisi relatif dari kamera-kamera tersebut. Matriks intrinsik kamera mencakup informasi mengenai kemiringan, titik pusat, dan panjang fokus (focal length) dalam satuan piksel dari kaca kamera [4].

Di sisi lain, matriks ekstrinsik terdiri dari matriks rotasi dan matriks translasi. Matriks rotasi menunjukkan adanya perputaran antara sumbu x dan y , sementara matriks translasi menunjukkan adanya pergeseran [5]. Kombinasi dari kedua matriks ini memberikan gambaran lengkap tentang bagaimana satu kamera bergerak dan berorientasi relatif terhadap yang lain. Parameter-parameter ini sangat penting untuk memastikan bahwa kamera stereo telah terkalibrasi dengan tepat. Stereo kamera sendiri terdiri dari dua buah kamera identik yang diletakkan secara sejajar dengan jarak tertentu, memungkinkan pengambilan gambar dari dua sudut pandang yang sedikit berbeda untuk menciptakan efek stereoskopik [6][7].

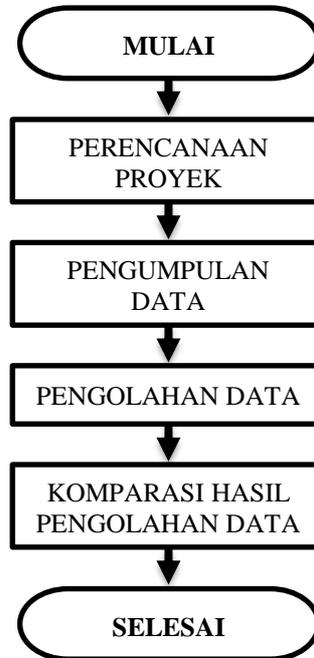
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis metode pseudo-invers dan jaringan saraf tiruan (JST) *perceptron* untuk menghitung tingkat ketelitian dengan melihat nilai error yang dihasilkan dalam mencari matriks fundamental pada kalibrasi kamera. Dengan menggunakan metode pseudo-invers, kita dapat mengestimasi matriks fundamental dengan pendekatan matematis yang akurat. Sementara itu, penerapan JST *perceptron* memberikan alternatif pendekatan yang berbasis pembelajaran mesin, yang berpotensi meningkatkan akurasi melalui proses pelatihan jaringan dengan data sampel. Dengan menggabungkan kedua metode ini, diharapkan dapat diperoleh solusi yang lebih efektif dan efisien dalam proses kalibrasi kamera stereo, sehingga mendukung perkembangan lebih lanjut dalam teknologi rekayasa 3D.

2. METODE PENELITIAN

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini merupakan metodologi analisis. Penelitian ini menganalisa hasil perhitungan nilai keluaran yang dihitung menggunakan persamaan matematis dengan target yang dilihat dari hasil sampel pengambilan data. Kemudian, dari hasil perhitungan tersebut dihitung tingkat kesalahan menggunakan *Mean Squared Error* (MSE) dan dianalisa penyebab dari tingkat *error* yang dihasilkan. Setelah itu, menentukan metode yang lebih baik digunakan untuk perhitungan dalam mencari nilai matriks fundamental.

2.1. Metode Penelitian

Penelitian ini melibatkan serangkaian tahapan yang perlu dilakukan guna mencapai hasil akhir yang diinginkan. Tahapan – tahapan tersebut dapat diuraikan lebih lanjut sebagai berikut:



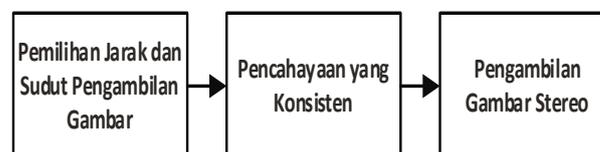
Gambar 2.1 Alur Metodologi Penelitian

2.1.1. Perencanaan Proyek

Pada tahap perencanaan proyek dilakukan penentuan objek yang akan diambil. Setelah itu, menentukan kamera apa yang akan digunakan untuk menangkap objek. kemudian, menentukan jarak antar kamera dan jarak kamera terhadap objek serta satuan yang digunakan dalam pengukuran. Selain itu, menentukan metode apa saja yang akan digunakan untuk proses membandingkan guna mendapatkan hasil yang sesuai dengan tingkat akurasi yang tinggi. Sehingga, memperoleh metode yang baik dengan tingkat ketelitian yang tinggi untuk menghitung nilai matriks fundamental dan nilai kedalaman piksel.

2.1.2. Pengumpulan Data

Pada penelitian ini melalui beberapa tahapan untuk mendapatkan data yang akan diolah pada proses berikutnya, yang akan dijelaskan pada gambar dibawah :



Gambar 2. 1 Alur Pengumpulan Data

Tahapan – tahapan dari teknik pengumpulan data :

a. Pemilihan jarak dan sudut

Pada tahap perencanaan proyek, jarak-jarak dan sudut telah dirancang. Data dari perencanaan proyek tersebut selanjutnya dikumpulkan dan dijadikan target. Jarak pada perencanaan proyek tersebut dinyatakan dalam satuan sentimeter (cm). Pada penelitian ini, data didapatkan dari hasil pengukuran manual menggunakan penggaris dan meteran kain yang dibendungkan dari titik fokus kamera ke objek dan dari titik fokus kamera kanan ke titik fokus kamera kiri.

b. Pencahayaan yang konstan

Setelah menentukan jarak antar kamera dan jarak kamera terhadap objek langkah selanjutnya yaitu mengatur pencahayaan. Dalam proses pengambilan data diperlukan pencahayaan yang konstan dari seluruh sesi pengambilan data, supaya mempermudah pencocokan titik korespondensi.

c. Pengambilan gambar stereo

Apabila semua proses sebelumnya sudah terpenuhi, maka proses pengambilan gambar dapat dilakukan. Pengambilan gambar dilakukan dengan cara menyambungkan kamera stereo ke laptop kemudian untuk pengambilannya dibantu menggunakan codingan. Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan bahasa pemrograman python yang dibantu oleh.

d. Pengolahan data

Setelah mendapatkan data gambar dari proses sebelumnya, pengolahan data menjadi tahapan kunci untuk menghasilkan model 3D yang akurat. Berikut adalah penjelasan untuk setiap langkah pengolahan data:

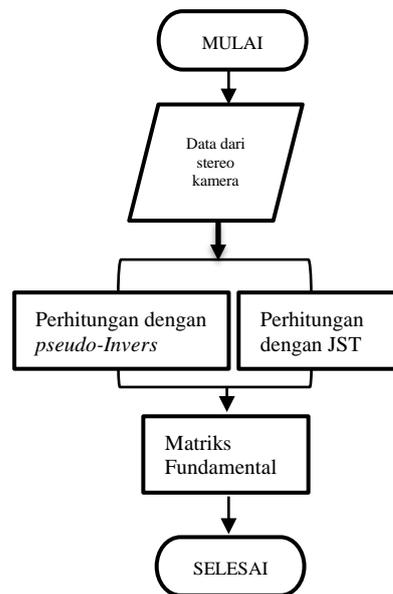


Figure 1 Flowchart pengolahan data

2.1.3 Komparasi Data

Setelah dilakukan pengolahan data, langkah selanjutnya yaitu membandingkan data hasil perhitungan matematis dengan perhitungan manual yang menggunakan alat ukur. Hasil komparasi dilakukan menggunakan metode *Mean Squared Error* (MSE). Menggunakan persamaan sebagai berikut :

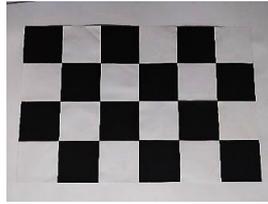
$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n} \dots\dots\dots (2.1)$$

perbandingan tersebut dilakukan dengan tujuan mencari metode yang terbaik dalam mencari nilai kedalaman pixel untuk rekonstruksi objek 3D.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perencanaan Proyek

Hasil perencanaan proyek pada penelitian ini terdiri dari jarak antar kamera, jarak kamera terhadap objek, dan ukuran lebar pada gambar papan catur. Pada gambar 4.1 menunjukkan ukuran lebar papan catur, gambar 4.2 menunjukkan jarak antar kamera, 4.3 menunjukkan jarak kamera terhadap objek.



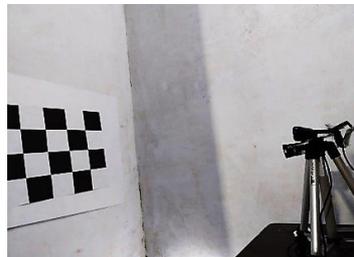
Gambar 3. 1 Ukuran Gambar Papan Catur

Pada penelitian ini objek untuk kalibrasi kamera adalah gambar papan catur. Gambar papan catur ini memiliki lebar pada masing-masing persegi berukuran 10 cm dengan jumlah persegi sebanyak 24.



Gambar 3. 2 Stereo Kamera, Jarak Antar Kamera

Pemilihan jarak antar kamera dilakukan dengan tujuan agar seluruh bagian objek bisa tertangkap oleh 2 kamera. Pada penelitian ini dengan pertimbangan luas ruangan pengambilan gambar yaitu 1,5 m x 2,7 m, maka jarak antar kamera yang cukup baik pada penelitian ini adalah 9 cm.



Gambar 3. 3 Jarak Kamera Ke Objek

Panjang Jarak kamera terhadap objek dengan pertimbangan gambar semua bisa tertangkap sepanjang 101,5 cm. Jarak tersebut dihasilkan dengan mengukur titik lensa ke objek papan catur.

3.2 Hasil Pengumpulan Data

Hasil data yang didapatkan dari pengambilan gambar meliputi jarak antar kamera, jarak kamera terhadap objek, lebar masing-masing persegi pada papan catur, titik koordinat pixel dan titik koordinat dunia. Data tersebut terdapat pada table 4.1, table 4.2, dan table 4.3.

Tabel 3. 1 Hasil Panjang Jarak

Antar Kamera	Kamera ke Objek	Lebar Kotak Papan Catur
9 cm	101.5 cm	10 cm

Dari tabel diatas diketahui nilai hasil pengukuran jarak antar kamera, kamera terhadap objek, dan lebar papan catur. Data tersebut digunakan sebagai acuan pengukuran untuk melakukan perhitungan dalam mencari nilai kedalaman piksel.

Tabel 3. 2 Titik Koordinat Dunia

<i>Leftcam</i>			<i>Rightcam</i>		
X	y	z	x	y	z
-30	20	101.5	-30	20	101.5
-20	20	101.5	-20	20	101.5
-10	20	101.5	-10	20	101.5
0	20	101.5	0	20	101.5
10	20	101.5	10	20	101.5
20	20	101.5	20	20	101.5
30	20	101.5	30	20	101.5
30	10	101.5	30	10	101.5
20	10	101.5	20	10	101.5
10	10	101.5	10	10	101.5
0	10	101.5	0	10	101.5
-10	10	101.5	-10	10	101.5
-20	10	101.5	-20	10	101.5
-30	10	101.5	-30	10	101.5
-30	0	101.5	-30	0	101.5
-20	0	101.5	-20	0	101.5
-10	0	101.5	-10	0	101.5
0	0	101.5	0	0	101.5
10	0	101.5	10	0	101.5
20	0	101.5	20	0	101.5
30	0	101.5	30	0	101.5
30	-10	101.5	30	-10	101.5
20	-10	101.5	20	-10	101.5
10	-10	101.5	10	-10	101.5
0	-10	101.5	0	-10	101.5
-10	-10	101.5	-10	-10	101.5
-20	-10	101.5	-20	-10	101.5
-30	-10	101.5	-30	-10	101.5
-30	-20	101.5	-30	-20	101.5
-20	-20	101.5	-20	-20	101.5
-10	-20	101.5	-10	-20	101.5
0	-20	101.5	0	-20	101.5
10	-20	101.5	10	-20	101.5
20	-20	101.5	20	-20	101.5
30	-20	101.5	30	-20	101.5

Titik koordinat dunia merupakan parameter pengukuran yang dilihat dari jarak kamera terhadap titik-titik pada gambar papan catur. Sehingga baik dari kamera kanan ataupun kamera kiri memiliki titik koordinat yang sama. Dari gambar papan catur dengan ukuran lebar tiap persegi 10 cm dan banyak persegi 24 buah didapatkan titik koordinat sebanyak 35. Dengan titik pusat (0,0) berada pada tepat ditengah gambar papan catur dan memperhatikan sumbu x dan sumbu y.

Tabel 3. 3 Titik Koordinat *Pixel*

<i>leftcam</i>		<i>Rightcam</i>	
x	y	x	y
128	100	63	100
207	97	143	95
285	93	221	93
371	94	301	93
449	89	379	94
529	84	458	87
607	81	537	87
612	159	542	166
532	163	460	166
451	165	382	169

372	169	300	169
290	173	222	169
209	176	141	171
130	178	60	173
132	259	62	251
210	256	140	250
292	252	221	251
376	248	302	248
456	246	383	247
536	243	465	244
620	241	543	244
626	322	548	324
544	323	465	325
459	326	385	329
379	331	303	329
298	334	222	331
213	339	140	332
133	341	55	333
131	425	53	418
217	421	136	415
300	417	222	413
381	413	304	413
466	411	386	411
549	407	468	410
630	403	553	408

Titik koordinat pixel pada table 4.3 didapatkan dari menentukan titik yang sama dari citra 2D baik dari kamera kanan maupun kiri dengan bantuan *software python*. Titik koordinat pixel mempunyai hasil yang tidak sama dikarenakan oleh perbedaan letak antar kamera. Hal ini juga mempengaruhi hasil tangkapan citra 2D dari kamera kanan dan kiri berbeda sehingga nilai pixel tiap titik antar 2 kamera berbeda.

3.3 Hasil Pengolahan Data

3.3.1 Perhitungan Menggunakan Metode *Pseudo-Inverse*

Persamaan umum yang digunakan:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{maka} \quad \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad [8]$$

Dimana:

- $x', y', 1$ merupakan titik koordinat pixel yang terdapat pada tabel 3.3
- $x, y, z, 1$ merupakan titik koordinat dunia yang terdapat pada tabel 3.2
- p_{11}, \dots, p_{34} merupakan matriks proyeksi yang akan dihitung

Karena pada matriks titik koordinat dunia tidak simetris maka sehingga nilai invers matriks pada titik koordinat dunia

tidak dapat dihitung maka, untuk menghitung $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}^{-1}$ menggunakan metode *pseudo-invers* dengan persamaan $(A)^+ =$

$A^T (A A^T)^{-1} [9]$ dengan memisalkan bahwa titik koordinat dunia adalah sebuah matriks A. Didapatkan hasil sebagai berikut:

➤ Hasil perhitungan matriks $(A A^T)$

$$\begin{bmatrix} 14000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 360579 & 3552.5 \\ 0 & 0 & 3552.5 & 35 \end{bmatrix}$$

Saat perhitungan, matriks $(A A^T)^{-1}$ nilai determinan = 0, dengan hal ini nilai invers matriks $(A A^T)^{-1}$ tidak dapat dihitung secara biasa dan harus menggunakan metode SVD untuk menghitungnya, untuk menghitungnya menggunakan persamaan $A = U \Sigma V^T$ [10] Dengan memisalkan matriks $(A A^T)$ sebagai matriks W.

➤ Hasil perhitungan matriks W

1. Hasil perhitungan matriks $(A A^T)$ sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} 196000000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 490000000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 130029655207.812 & 1281080346.875 \\ 0 & 0 & 1281080346.875 & 12621481.25 \end{bmatrix}$$

2. Hasil perhitungan nilai eigen dengan persamaan $\det \lambda \mathbf{I} - A^T A$ sebagai berikut:

• Pada blok pertama

$$\det \begin{bmatrix} 196000000 - \lambda & 0 \\ 0 & 490000000 - \lambda \end{bmatrix}$$

Sehingga didapatkan nilai eigen $\lambda_1 = 196000000$ dan $\lambda_2 = 490000000$.

• Pada blok kedua

$$\det \begin{bmatrix} 130029655207.812 - \lambda & 1281080346.875 \\ 1281080346.875 & 12621481.25 - \lambda \end{bmatrix}$$

Dari matriks diatas diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$= \lambda^2 - 130042276689.06\lambda$$

Dari persamaan diatas, dapat dihitung nilai λ_3 dan λ_4 menggunakan persamaan kuadrat yaitu $\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2}$ dimana nilai a = 1, b = -130042276689.0, dan c = 0 didapatkan hasil $\lambda_3 =$ dan $\lambda_4 = 0$.

3. Hasil perhitungan pada nilai eigen vektor dengan persamaan $(\lambda \mathbf{I} - A^T A)x$ sebagai berikut:

• Nilai eigen vektor dari blok pertama yaitu sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ dan } \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

• Nilai eigen vektor dari blok kedua yaitu sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} -1 \\ -0.00985 \end{bmatrix} \text{ dan } \begin{bmatrix} -0.00985 \\ 1 \end{bmatrix}$$

4. Hasil perhitungan pada nilai singular dengan persamaan $\sigma = \sqrt{\lambda}$ sebagai berikut:

$$\sigma_1 = \sqrt{196000000} = 14000$$

$$\sigma_2 = \sqrt{490000000} = 7000$$

$$\sigma_3 = \sqrt{130042276689.06} = 361000$$

$$\sigma_4 = \sqrt{0} = 0$$

5. Hasil Perhitungan membangun matriks U sebagai berikut:

Didapatkan hasil nilai matriks U dari nilai eigen vektor, yang mana nilai eigen disusun dari yang terbesar ke yang terkecil sebagai berikut:

$$U = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -0.00985 \\ -0.00985 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

6. Hasil perhitungan matriks V sebagai berikut:

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -0.00985 \\ -0.00985 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

7. Matriks Σ didapatkan dari hasil nilai singular dengan mengurutkan nilai terbesar ke terkecil, hasil yang diperoleh yaitu sebagai berikut:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 360613.75 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 14000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Jika sudah mendapatkan vektor dari matriks W maka, langkah selanjutnya yaitu memastikan apakah matriks W bernilai sama dengan hasil perkalian dari matriks $U \Sigma V^T$. Hasil perhitungan yang didapat yaitu sebagai berikut:

$$U \Sigma V^T = \begin{bmatrix} 14000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 360579 & 3552.5 \\ 0 & 0 & 3552.5 & 35 \end{bmatrix}$$

Hasil sudah sesuai, kemudian menghitung nilai invers dari matriks W menggunakan vektor dari matriks W, didapatkan hasil sebagai berikut:

$$W/(A A^T)^- = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.01 & 0.64 \\ 0 & 0 & 0.64 & -65.35 \end{bmatrix}$$

Maka, hasil dari perhitungan dari persamaan $(A)^+ = A^T (A A^T)^-$ yaitu sebagai berikut:

$(A)^+ = A^T (A A^T)^-$			
-0.002142857	0.002857143	0.000426	0.000426
-0.001428571	0.002857143	0.000426	-0.01470026
-0.000714286	0.002857143	0.000426	-0.01470026
0	0.002857143	0.000426	-0.01470026
0.000714286	0.002857143	0.000426	-0.01470026
0.001428571	0.002857143	0.000426	-0.01470026
0.002142857	0.002857143	0.000426	-0.01470026
0.002142857	0.001428571	0.000426	-0.01470026
0.001428571	0.001428571	0.000426	-0.01470026
0.000714286	0.001428571	0.000426	-0.01470026
0	0.001428571	0.000426	-0.01470026
-0.000714286	0.001428571	0.000426	-0.01470026
-0.001428571	0.001428571	0.000426	-0.01470026
-0.002142857	0.001428571	0.000426	-0.01470026
-0.002142857	0	0.000426	-0.01470026
-0.001428571	0	0.000426	-0.01470026
-0.000714286	0	0.000426	-0.01470026
0	0	0.000426	-0.01470026
0.000714286	0	0.000426	-0.01470026
0.001428571	0	0.000426	-0.01470026
0.002142857	0	0.000426	-0.01470026
0.002142857	-0.001428571	0.000426	-0.01470026
0.001428571	-0.001428571	0.000426	-0.01470026
0.000714286	-0.001428571	0.000426	-0.01470026
0	-0.001428571	0.000426	-0.01470026
-0.000714286	-0.001428571	0.000426	-0.01470026
-0.001428571	-0.001428571	0.000426	-0.01470026
-0.002142857	-0.001428571	0.000426	-0.01470026
-0.002142857	-0.002857143	0.000426	-0.01470026
-0.001428571	-0.002857143	0.000426	-0.01470026

-0.000714286	-0.002857143	0.000426	-0.01470026
0	-0.002857143	0.000426	-0.01470026
0.000714286	-0.002857143	0.000426	-0.01470026
0.001428571	-0.002857143	0.000426	-0.01470026
0.002142857	-0.002857143	0.000426	-0.01470026

Baik dari kamera kanan dan kamera kiri, hasil perhitungan pada persamaan $(A)^+ = A^T (A A^T)^{-1}$ sama. Tetapi untuk hasil nilai matriks fundamental pada kamera kanan dan kiri didapatkan hasil yang berbeda yaitu sebagai berikut:

- Pada kamera kiri

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix}^{-1} \text{ atau } \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \text{tabel 3.3 (leftcam)} * \text{Matriks } A^T (A A^T)^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.15 & -0.36 & 5.59 & -192.87 \\ -0.33 & -8.07 & 3.74 & -129.05 \\ 0 & 0 & 0.01 & -0.51 \end{bmatrix}$$

- Pada kamera kanan

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix}^{-1} \text{ atau } \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \text{tabel 3.3 (rightcam)} * \text{Matriks } A^T (A A^T)^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.09 & -0.07 & 4.50 & -155.31 \\ -0.15 & -8.00 & 3.73 & -128.74 \\ 0 & 0 & 0.01 & -0.51 \end{bmatrix}$$

3.3.2 Perhitungan Menggunakan Metode Jaringan Saraf Tiruan *Perceptron*

Pada metode ini, menggunakan perhitungan jaringan saraf tiruan perceptron karena hanya menggunakan satu lapisan pembobot yang menghubungkan input ke output tanpa adanya lapisan tersembunyi. Hasil yang didapat yaitu sebagai berikut:

- Mempersiapkan kelompok sampel masukan (l_n) yaitu pada tabel 4.2
- Mempersiapkan kelompok sampel keluaran yaitu pada tabel 4.3
- Kemudian mengacak nilai pembobot dengan odro 3x4 dengan memberikan nilai pada setiap pembobot nilai acak antara -1 dan 1
- Menghitung nilai *error* (\mathcal{E}) yaitu dengan mengurangi tabel 4.3 dengan hasil output
- Memperbarui pembobot menggunakan persamaan $w_n^{+1} = w_n + r \cdot \mathcal{E} \cdot l_n$ Dimana *learning rate* (r) sebesar 0,0001, hasil pembaruan pembobot yaitu sebagai berikut:

- a. Kamera kiri

$$w_{left}^{+1} = \begin{bmatrix} 8.16 & -0.51 & 3.69 & 0.94 \\ -0.46 & -8.27 & 2.48 & 0.13 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0.14 \end{bmatrix}$$

- b. Kamera kanan

$$w_{right}^{+1} = \begin{bmatrix} 8.09 & -0.50 & 2.96 & 0.30 \\ -0.33 & -8.35 & 2.47 & 0.16 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0.02 \end{bmatrix}$$

3.4 Hasil Komparasi

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan beberapa metode untuk mencari nilai matriks fundamental dan nilai kedalaman pixel, dapat dibandingkan metode mana yang lebih baik dan memiliki tingkat ketelitian yang tinggi. Hasil komparasi tersebut yaitu sebagai berikut:

Tabel 3.4 Hasil komparasi menggunakan metode MSE saat menghitung matriks fundamental

Metode	MSE Tiap Sumbu			MSE
	x	y	z	
pseudo-Invers Kamera Kanan	5.53	0	0	1.84
pseudo-Invers Kamera Kiri	6.66	2.95	0	3.21
JST Kamera Kanan	46.41	43.29	0	0.27
JST Kamera Kiri	10.72	17.11	0	9.27

Tabel 3.4 menunjukkan hasil komparasi dalam mencari nilai matriks fundamental menggunakan metode *pseudo-inverse* dan Jaringan Saraf Tiruan (JST). Hasil tersebut didapatkan dengan cara mengalikan nilai matriks fundamental yang dihitung menggunakan kedua metode dengan titik koordinat dunia. Hasil dari pengalihan tersebut merupakan hasil output prediksi nilai titik koordinat pixel. Kemudian hasil prediksi titik koordinat pixel tersebut dikurangi dengan nilai titik koordinat pixel yang sebenarnya. Kemudian dicari nilai *error* menggunakan metode MSE. Berdasarkan hasil pada tabel 3.4, metode *pseudo-inverse* memiliki Tingkat keakurasian lebih baik dibandingkan dengan metode jaringan saraf tiruan (JST). Pada kamera kiri pada metode jaringan saraf tiruan memiliki tingkat *error* yang paling tinggi. Hal tersebut disebabkan karena posisi kamera kiri yang kurang baik sehingga menghasilkan nilai tangkapan gambar yang kurang presisi. Tangkapan gambar tersebut berpengaruh terhadap hasil dari nilai titik koordinat pixel yang mana titik tersebut menjadi acuan dalam menghitung nilai matrik fundamental menggunakan persamaan jaringan saraf tiruan. Berdasarkan hasil perhitungan komparasi *Mean Squared Error* (MSE) dari metode *pseudo-invers* dan jaringan saraf tiruan (*Perceptron*) metode yang lebih baik digunakan untuk perhitungan matriks fundamental adalah metode *pseudo-invers*.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perencanaan proyek, pengambilan data, pengolahan data dan komparasi data pada penelitian ini, terdapat beberapa Kesimpulan yang harus peneliti sampaikan. Kesimpulan tersebut yaitu sebagai berikut:

1. Posisi atau kedudukan kamera kanan dan kamera kiri berpengaruh terhadap hasil tangkapan gambar dan berpengaruh terhadap hasil perhitungan matematis. Hal tersebut dapat terjadi karena titik yang saling berkorespondensi memiliki *disparsi* atau selisih yang sangat besar sehingga menghasilkan nilai *error* yang cukup besar pula. Selain itu, jarak dan posisi antar kamera juga dapat menyatakan terkalibrasi atau tidaknya kamera tersebut dilihat dari hasil perhitungan dengan target dan hasil analisis perhitungan sesuai dengan persamaan yang sudah ditetapkan.
2. Pada penelitian ini, hasil dari perencanaan proyek yang meliputi penentuan jarak antar kamera yaitu 9 cm, jarak kamera terhadap objek yaitu 101,5 cm mendapatkan hasil tangkapan gambar yang cukup baik. Dimana semua gambar pada gambar papan catur yang berukuran 10 cm per persegi dengan jumlah persegi 24 dapat tertangkap.
3. Pada saat pengambilan data titik koordinat pixel, hasil dari kamera kanan dan kiri memiliki selisih. Dimana pada perhitungan matematis pada metode *pseudo invers* nilai titik koordinat pixel pada kamera kanan dengan pengambilan data menggunakan *software python* menghasilkan nilai *error* pada sumbu x sebesar 5,53 dan pada sumbu y sebesar 0 dengan rata-rata error antar sumbu sebesar 1,84. Kemudian pada kamera kiri menghasilkan nilai error pada sumbu x sebesar 6,66 dan sumbu y sebesar 2,96 dengan rata-rata error antar sumbu sebesar 3,21. Sedangkan pada perhitungan menggunakan metode jaringan saraf tiruan menghasilkan *error* pada sumbu x kamera kanan sebesar 46,41 dan sumbu y sebesar 43,29 dengan rata-rata *error* antar sumbu sebesar 0,27. Sedangkan pada kamera kiri menghasilkan nilai error pada sumbu x sebesar 10,72 dan pada sumbu y menghasilkan nilai error sebesar 17,11 dengan rata-rata error antar sumbu sebesar 9.27. Dari hasil kedua metode tersebut metode yang memiliki nilai *error* tinggi untuk mencari nilai matriks fundamental dengan pertimbangan hasil target dan output

adalah titik koordinat pixel dan titik koordinat dunia adalah metode jaringan saraf tiruan yaitu 6,22. Sedangkan pada metode *pseudo-inverse* memiliki *error* antar kamera sebesar 4,11. Kamera kiri lebih banyak menghasilkan nilai *error* karena posisi kamera kiri cenderung lebih keatas sehingga hasil tangkapan kamera kiri kurang ke arah target dan menyebabkan perbedaan titik koordinat pixel yang cukup banyak dengan perhitungan. Dari analisis nilai *error* dapat disimpulkan bahwa metode yang lebih baik digunakan dalam menghitung atau membangun matriks fundamental adalah metode *pseudo-invers*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sugiyono, "Dokumen Karya Ilmiah | Skripsi | Prodi Teknik Informatika - S1 | FIK | UDINUS | 2016," *Fik*, vol. 1, no. 1, pp. 1–2, 2016.
- [2] F. Oktariko and Lina, "Kajian Tentang Rekonstruksi Objek 3D Menggunakan Stereo Vision Dengan Metode Harris Interest Point Dan Ransac," *J. Ilmu Komput. dan Sist. Inf.*, pp. 71–76, 2018.
- [3] F. L. Afriansyah and N. Muna, "Deteksi Tungkai Bayi Pada Image Sequence Berbasis Vector Depth Estimation," *J. Inform. Polinema*, vol. 7, no. 3, pp. 35–42, 2021, doi: 10.33795/jip.v7i3.665.
- [4] T. Urip, K. Adi, D. Catur, and E. Widodo, "Pengukuran jarak objek pejalan kaki terhadap kamera menggunakan kamera stereo terkalibrasi dengan segmentasi objek histogram of oriented gradient," *Youngster Phys. J.*, vol. 6, no. 3, pp. 249–262, 2017.
- [5] K. Xi, I. P. A. Sma, and M. Yogyakarta, "Rekonstruksi Objek 3D dari citra 2D," vol. 5, no. 2, pp. 1–7, 2023.
- [6] R Dimas Adityo, "Kalibrasi Parameter Kamera dengan Menggunakan Projector untuk Rekonstruksi 3D berbasis Metode Structured Light," *Pros. SNATIF Ke-1*, pp. 309–318, 2014.
- [7] S. S. Rani and A. Prahara, "Rekonstruksi 3D Untuk Model Wajah Virtual Akademik Menggunakan Sensor Kinect 2," *JSTIE (Jurnal Sarj. Tek. Inform.)*, 2021.
- [8] R. Rachmawati, R. Hidayat, and S. Wibirama, "Rekonstruksi Objek 3D dari Multiple Images," 2013.
- [9] M. Safi'i, K. Wardati, and M. F. Quadratullah, "Aplikasi Invers Semu (Pseudoinverse) Dengan Metode Greville'S Pada Analisis Regresi Linear Berganda," *Kaunia*, vol. IX, no. 1, pp. 40–52, 2013.
- [10] Subiono, "Komputasi SVD suatu Matriks A," no. April, 2023.