



TESIS - TE142599

**KALIBRASI MAGNETIC TRACKER MENGGUNAKAN POLYNOMIAL  
FITTING**

JOKO PRIAMBODO  
07111650050009

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Eko Mulyanto Yuniarno, ST., MT.  
Dr. I Ketut Eddy Purnama, ST., MT.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN JARINGAN CERDAS MULTIMEDIA  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018





**TESIS - TE142599**

# **KALIBRASI MAGNETIC TRACKER MENGGUNAKAN POLYNOMIAL FITTING**

**JOKO PRIAMBODO**  
**07111650050009**

**DOSEN PEMBIMBING**  
**Dr. Eko Mulyanto Y., S.T., M.T.**  
**Dr. I Ketut Eddy P., S.T., M.T.**

**PROGRAM MAGISTER**  
**BIDANG KEAHLIAN JARINGAN CERDAS MULTIMEDIA**  
**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**  
**FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO**  
**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**SURABAYA**  
**2018**



## LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T)

di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Joko Priambodo  
NRP. 07111650050009

Tanggal Ujian : 26 Juni 2018  
Periode Wisuda : September 2018

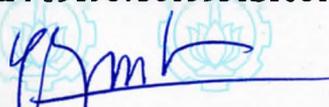
Disetujui oleh:

  
1. Dr. Eko Mulyanto Y., ST., MT.  
NIP: 196806011995121009

(Pembimbing I)

  
2. Dr. I Ketut Eddy P., ST., MT.  
NIP: 196907301995121001

(Pembimbing II)

  
3. Prof. Dr. Ir. Yoyon Kusnendar S., M.Sc.  
NIP: 195409251978031001

(Penguji)

  
4. Dr. Supeno Mardj Susiki N., ST., MT.  
NIP: 197003131995121001

(Penguji)

  
Dekan Fakultas Teknologi Elektro

  
Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT.  
NIP: 197002121995121001

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **PERNYATAAN KEASLIAN TESIS**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**KALIBRASI MAGNETIC TRACKER MENGGUNAKAN POLYNOMIAL FITTING**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Mei 2018

Joko Priambodo

NRP: 07111650050009

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **KALIBRASI MAGNETIC TRACKER MENGGUNAKAN POLYNOMIAL FITTING**

Nama mahasiswa : Joko Priambodo  
NRP : 07111650050009  
Pembimbing : 1. Dr. Eko Mulyanto Y., S.T., M.T.  
2. Dr. I Ketut Eddy P., S.T., M.T

## **ABSTRAK**

Pelacak magnetik digunakan untuk melacak posisi suatu objek. Namun, pelacak magnetik rentan terhadap distorsi yang disebabkan oleh benda-benda ferromagnetik di sekitar pelacak magnetik atau benda-benda yang menghasilkan medan magnet. Untuk menghilangkan distorsi, itu tidak mungkin. Oleh karena itu perlu mengkalibrasi pelacak magnetik yang disesuaikan dengan kondisi ruangan. Akibatnya kami menciptakan ruang kalibrasi terukur yang digunakan untuk memetakan posisi pelacak magnetik. Pemetaan pelacak magnetik menggunakan metode pemasangan polinomial. Total data yang dipetakan sebanyak 4195 data. Dengan metode pemasangan polinomial, kesalahan terendah adalah pada pemasangan polinomial orde 5 dengan kesalahan pada sumbu  $x = 0,19$  mm,  $y = 0,3$  mm sumbu, dan  $z = 0.3$  mm sumbu. Total kesalahan dihitung pada urutan ke-5 adalah 0,47 mm dengan total standar deviasi mencapai 0,27 mm

Kata kunci: Magnetic Tracker , Polynomial Fitting, Kalibrasi

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **CALIBRATION MAGNETIC TRACKER USING POLYNOMIAL FITTING**

By : Joko Priambodo  
Student Identity Number : 07111650050009  
Supervisor(s) : 1. Dr. Eko Mulyanto Y., S.T., M.T.  
2. Dr. I Ketut Eddy P., S.T., M.T.

## **ABSTRACT**

Magnetic tracker is used to track the position of an object. However, Magnetic trackers are susceptible to distortions caused by ferromagnetic objects around magnetic trackers or objects that produce a magnetic field. To eliminate distortion, it is not possible. Therefore it is necessary to calibrate the magnetic tracker adjusted to the condition of the room. Consequently we created a measurable calibration space used to map the position of the magnetic tracker. Magnetic tracker mapping using polynomial fitting method. Total data mapped as many as 4195 data. By polynomial fitting method, the lowest error is in 5th order polynomial fitting with error on axis  $x = 0,189\text{mm}$ ,  $y = 0.3$  axis, and  $z = 0.3\text{mm}$  axis. The total error calculated at 5th order is  $0.47$  mm with the total standard deviation reaching  $0.2$  mm

Key words: magnetic tracker, polinomial fitting, calibration

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas berkat dan rahmat Allah yang Mahakuasa yang senantiasa menyertai saya dalam menuntaskan pelaksanaan Thesis ini dengan judul : Kalibrasi Magnetic Tracker Menggunakan Polynomial Fitting

Adapun pelaksanaan tugas akhir ini dilaksanakan demi memenuhi kewajiban yang telah diutarakan pada Tri Dharma Perguruan Tinggi di bidang penelitian dengan harapan dapat berguna untuk perkembangan keilmuan masyarakat pada umumnya dan teknologi biomedik pada khususnya.

Pelaksanaan Thesis di kampus perjuangan Teknik Elektro ITS ini dapat dilaksanakan dengan baik, tentunya tidak terlepas dari bantuan orang-orang disekitar saya. Maka dari itu saya mengucapkan terimakasih kepada :

1. Keluarga dan kerabat saya khususnya pada Ayah dan Ibu terkasih saya yang selama ini memberikan dukungan pikiran, tenaga, dan spiritual yang selalu mendorong semangat saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
  2. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T. selaku Ketua Fakultas Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
  3. Kepada dosen pembimbing saya Bapak Dr. Eko Mulyanto Yuniarno S.T., M.T. dan Bapak Dr. Ketut Eddy P., S.T., M.T. yang selalu mengarahkan pelaksanaan tugas akhir ini. Beliau selalu memberikan dukungan dengan berbagi pengalaman, dan keilmuannya.
  4. Bapak Dr. Supeno Mardi S.N., S.T., M.T. selaku pemberi dukungan dan bimbingan
  5. Seluruh civitas akademika Teknik Komputer dan Telematika, Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
  7. Keluarga , kakak , beserta saudara yang tidak dapat disebutkan disini yang membantu proses penyelesaian tugas akhir ini
- ”manusia tidak ada yang sempurna, sehingga manusia tidak akan pernah berhenti belajar”, adapun hasil pelaporan pada pelaksanaan tugas akhir ini pasti ada yang tidak sempurna. Maka dari itu kritik dan saran dari pembaca atas tugas akhir ini

sangat diharapkan dan diterima demi perbaikan kualitas pendidikan dan penelitian.  
Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi yang membutuhkan.

Surabaya, Mei 2015

Joko Priambodo.

2211100054

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....	v
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	ix
KATA PENGANTAR .....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xvii
DAFTAR NOMENKLATUR .....	xix
BAB 2 PENDAHULUAN .....	1
2.1 Latar Belakang .....	1
2.2 Rumusan Masalah .....	1
2.3 Tujuan .....	2
2.4 Batasan Masalah .....	2
2.5 Kontribusi .....	2
2.6 Metodologi Penelitian .....	3
BAB 3 KAJIAN PUSTAKA .....	5
3.1 Kajian Penelitian Terkait .....	5
3.2 Teori Dasar .....	6
3.2.1 Kalibrasi .....	6
3.2.2 Sistem Penjejakan .....	9
3.2.3 Sistem Pemosisian .....	12
3.2.4 Sistem pemosisian dalam ruangan .....	14
3.2.5 Pelacakan Posisi .....	15
3.2.6 Penjejak Magnetic .....	18
3.2.7 Ruang Pendeteksian Magnetik .....	22
3.2.8 Penyesuaian Kurva .....	23
3.2.9 Polynomial fitting .....	25
3.2.10 Penyesuaian Polinomial sumbu ganda .....	25

3.2.11	Perkiraan Kuadrat Minimal .....	27
3.2.12	Metode Statistik.....	29
<b>BAB 4</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>35</b>
4.1	Tahap persiapan.....	36
4.1.1	Pembuatan ruang kalibrasi.....	36
4.1.2	Data Magnetic tracker .....	38
4.1.3	Data referensi.....	39
4.2	Tahap Uji coba metode.....	40
4.3	Tahap Pengujian.....	42
<b>BAB 5</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>47</b>
5.1	Koefisien dari Polinomial Fitting .....	47
5.2	Pengukuran Error dan Standard deviasi .....	48
<b>BAB 6</b>	<b>KESIMPULAN .....</b>	<b>57</b>
	<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>59</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Enam Derajat Kebebasan .....	10
Gambar 2. 2 Pembagian Perangkat Indoor dan Outdoor .....	12
Gambar 2. 3 Sistem posisi menggunakan satelit.....	13
Gambar 2. 4 Indoor Positional Tracking.....	16
Gambar 2. 5 System Magnetic tracker.....	18
Gambar 2. 6 Magnetic tracker pada penelitian .....	21
Gambar 2. 7 Sensing dari Magnetic tracker.....	22
Gambar 2. 8 contoh curve fitting .....	23
Gambar 2. 9 Kurva Polynomial .....	24
Gambar 2. 10 Contoh Polynomial fitting.....	25
Gambar 2. 11 Contoh data statistik.....	29
Gambar 2. 12 Contoh Mean dari data .....	31
Gambar 3. 1 Metodologi Penelitian .....	35
Gambar 3. 2 ruang kalibrasi dengan magnetic source .....	36
Gambar 3. 3 Bidang Kalibrasi.....	37
Gambar 3. 4 Pemasangan Sensor ke Penggaris .....	38
Gambar 3. 5 posisi magnetic tracker dan ruang kalibrasi .....	39
Gambar 3. 6 bidang kalibrasi .....	40

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 koefisien polynomial fitting orde 4.....	47
Tabel 4. 2 koefisien polynomial fitting orde 5.....	47
Tabel 4. 3 Koefisien Polynomial fitting Orde 6.....	48
Tabel 4. 4 Data Sebelum dan Sesudah Magnetic tracker.....	49
Tabel 4. 5 hasil polynomial fitting orde 4.....	49
Tabel 4. 6 hasil polynomial fitting orde 5.....	50
Tabel 4. 7 Hasil Polynomial fitting Orde 6.....	50
Tabel 4. 8 error tiap sumbu dengan rata-rata error total .....	51
Tabel 4. 9 tingkat linier diamat di sumbu z.....	52
Tabel 4. 10 simpangan error dan rata-rata simpangan .....	53
Tabel 4. 11 nilai minimum tiap – tiap sumbu .....	54
Tabel 4. 12 nilai maximum tiap – tiap sumbu.....	54
Tabel 4. 13 persentase error pada tiap jarak.....	55

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR NOMENKLATUR

1.  $xm$  : Koordinat sumbu x magnetic tracker
2.  $ym$  : Koordinat sumbu y magnetic tracker
3.  $zm$  : Koordinat sumbu z magnetic tracker
4.  $xk$  : Koordinat sumbu x ruang kalibrasi
5.  $yk$  : Koordinat sumbu y ruang kalibrasi
6.  $zk$  : Koordinat sumbu z ruang kalibrasi
7.  $B$  : kuat medan magnet
8.  $R$  : jarak antara source dan *sensor*
9.  $\epsilon_0$  : Permittivitas ruang hampa
10.  $Bd$  : kerapatan flux magnetic
11.  $xr$  : posisi receiver
12.  $xd$  : posisi transmitter
13.  $R$  : Selisih  $xr$  dengan  $xd$
14.  $md$  : momen dipole
15.  $\mu$  : permeabilitas dari suatu medium
16.  $Ns$  : jumlah *sensor*
17.  $Bo$  : keluaran *receiver*
18.  $Oi$  : Orientasi sensor ke i
19.  $B_t$  : Medan magnet total
20.  $Be$  : Medan magnet distorsi
21.  $Bd$  : Medan magnet transmitter
22.  $Br$  : komponen polar
23.  $a_i$  : Variabel dependen ke i
24.  $b_i$  : Variabel independen ke i
25.  $\beta$  : Konstanta polynomial fitting
26.  $c$  : Konstanta polynomial fitting multiAxis
27.  $pa$  : Pangkat polynomial fitting
28.  $xm'$  : Koordinat sumbu x magnetic tracker setelah kalibrasi
29.  $ym'$  : Koordinat sumbu y magnetic tracker setelah kalibrasi
30.  $zm'$  : Koordinat sumbu z magnetic tracker setelah kalibrasi
31.  $m$  : Gradien garis
32.  $e$  : Nilai error
33.  $T$  : Adalah matriks  $[a_i \ 1]$
34.  $f$  : Fungsi Jarak minimum dua sensor
35.  $Bd(R, md)$  : Fungsi Medan magnet transmitter

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

*Magnetic tracker system* sering digunakan untuk menjejak posisi suatu obyek pada ruang tiga dimensi. Pemanfaatan *magnetic tracker* digunakan pada *virtual reality* untuk mensimulasikan posisi *sensor*. Pada beberapa penelitian, *magnetic tracker* tidak akurat dalam melakukann pengukuran dikarenakan *magnetic tracker* rentan terhadap distorsi medan elektromagnetik (Livingston,2001). Untuk membersihkan ruangan dari distorsi medan magnet tidak dapat dilakukan. Dikarenakan kita tidak tahu ada berapa banyak pembuat distorsi dalam satu ruangan. Selain itu posisi yang didapat dari *magnetic tracker* memiliki error yang diakibatkan jarak antara *magnetic source* dan *sensor*. Semakin jauh posisi *magnetic sensor* dari *magnetic source* maka distorsi yang terjadi akan semakin besar. untuk posisi yang terukur pada bidang yang sama , posisi bidang tersebut akan memiliki nilai yang berbeda. Walaupun pemasangan *magnetic tracker* telah dibuat sejajar dengan ruang kalibrasi dan sudah disesuaikan dengan titik asal yang tertera pada *magnetic tracker*. Selain itu nilai asal dari *magnetic tracker* tidak dapat diketahui. Tidak ada titik pada *magnetic tracker* yang membuat *sensor magnetic tracker* bernilai nol di semua titik. Untuk mengukur jarak dari sebuah obyek diperlukan titik asal. Agar dapat diketahui titik sesungguhnya. Apabila diketahui titik sesungguhnya dari *magnetic tracker* maka jarak sesungguhnya dapat terukur secara akurat.

### 1.2 Rumusan Masalah

. Untuk mengkalibrasi *magnetic tracker* beberapa penelitian menggunakan *polynomial fitting* sebagai metode kalibrasi(Ikits et al.,2001)(Nakamoto et al.2008). *Polynomial fitting* memperbaiki posisi dari *magnetic tracker* dengan cara membandingkan data posisi yang didapat oleh *magnetic tracker*, dibandingkan dengan data posisi sesungguhnya. Mendapatkan pusat koordinat dari *magnetic tracker* tidak dapat dilakukan. Dikarenakan mendapatkan posisi sama dengan nol

pada *magnetic sensor* tidak dapat dilakukan. Oleh karena itu tidak dapat diukur posisi sesungguhnya dari *sensor* berdasarkan *magnetic source*. Pada tulisan ini kami mengusulkan metode kalibrasi *magnetic tracker* dengan memindahkan pusat koordinat *magnetic tracker* ke ruang kalibrasi yang telah dibuat. Perpindahan pusat koordinat *magnetic* ke koordinat bidang kalibrasi, bertujuan untuk mendapatkan titik asal pengukuran. Sehingga jarak sesungguhnya dapat diukur secara akurat. Untuk memindahkan pusat koordinat digunakan metode *polynomial fitting* untuk memetakan posisi *magnetic tracker* agar sesuai dengan titik-titik pada ruang kalibrasi. Hasil dari *polynomial fitting* merupakan jarak yang terukur dari titik asal dari ruang kalibrasi

### **1.3 Tujuan**

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan pemetaan dari *magnetic tracker* ke ruang kalibrasi. Berupa konstanta *polynomial fitting* yang digunakan untuk memetakan *magnetic tracker* ke ruang kalibrasi sehingga perpindahan posisi dari magnetik tracker dapat linier dan terukur.

### **1.4 Batasan Masalah**

Adapun Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini agar penelitian ini berjalan dengan baik antara lain:

1. *Magnetic tracker* yang digunakan adalah *magnetic tracker* dengan arus AC
2. *Magnetic tracker* yang digunakan adalah polhemus g4
3. Ruangan kalibrasi minim benda logam dan benda yang dapat menghasilkan distorsi

### **1.5 Kontribusi**

Penelitian ini akan memberikan cara baru untuk digunakan pada metode kalibrasi, yang dapat digunakan pada *magnetic tracker* agar semakin akurat dalam menjejak. Selain itu metode ini juga dapat digunakan agar *magnetic tracker* dapat bergerak secara linier

## 1.6 Metodologi Penelitian

Dalam penelitian ini, penulis mengembangkan suatu cara pada metode kalibrasi *magnetic tracker*. Data dari *magnetic tracker* tidak linier, semakin jauh *magnetic sensor*, maka nilai posisi yang ditangkap semakin tidak linier. Perlu diperbaiki posisi-posisi yang ada pada *magnetic tracker*. Digunakanlah pemetaan untuk mengkalibrasi *magnetic tracker* agar posisi dari *magnetic tracker* sesuai dengan referensi. Selain itu tujuan dari pemetaan ini adalah memindahkan nilai asal dari pengukuran.

Proses kalibrasi *magnetic tracker* dimulai dengan membuat ruang kalibrasi. Dimana semua posisi dari ruang kalibrasi ini diketahui. Ruang kalibrasi terbuat dari bahan non logam agar tidak menimbulkan distorsi. Selain itu setiap titik pada ruang kalibrasi digunakan sebagai titik acuan pemetaan. Sehingga *magnetic tracker* yang terkalibrasi harus mengacu ke titik referensi

Setelah ruang kalibrasi dibuat, *magnetic tracker* dijadikan satu system dengan ruang kalibrasi untuk dipetakan. Prosedur pengambilan data, setiap titik referensi harus berpasangan dengan posisi *magnetic tracker* pada titik tersebut. Jadi titik pada referensi dibaca oleh *magnetic tracker* pada posisi berapa. Dari titik-titik yang saling berkaitan tersebut dibuatlah pemetaan.

Metode yang digunakan untuk pemetaan adalah *polynomial fitting* dengan multi axis. *Polynomial fitting* multi axis adalah metode fitting dengan memasukkan 3 variable independen. Dikarenakan distorsi dipengaruhi oleh posisi pada sumbu x, y, dan z maka digunakanlah metode *polynomial fitting* multi axis.

Pengambilan data diambil 5 kali pertitik dengan total titik adalah 839 titik. Sehingga total data yang dipetakan ada 4195 data *magnetic tracker* yang dikorelasikan titik referensi. Dari data yang diperoleh, diolah menggunakan *polynomial fitting* multi axis untuk mendapatkan konstanta *polynomial fitting* untuk digunakan pada *magnetic tracker*. Untuk menyelesaikan persamaan *polynomial fitting* digunakan *least square estimation*. Dengan tujuan membuat selisih dari *magnetic tracker* dengan titik referensi mendekati nol.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA**

Pada bab ini akan dibahas mengenai kajian pustaka yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya. Kelebihan dan kekurangan pada setiap penelitian yang sudah dilakukan akan dibahas juga dalam bagian ini. Selain itu juga dibahas mengenai teori penunjang yang berkaitan dengan penelitian ini. Agar pembaca memiliki kesamaan istilah yang digunakan pada penelitian ini.

#### **2.1 Kajian Penelitian Terkait**

Beberapa penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan penelitian ini dan mendukung penelitian ini antara lain :

- a. Penelitian dengan judul “*Self-Correcting Magnetic Tracking in Dynamic Medical Environment*” yang ditulis oleh Zubiao Xiong dan rekan-rekan tahun 2015. Meneliti tentang pengaruh medan magnet lain yang berada di lingkungan mengakibatkan medan magnet pada *magnetic tracker* mengalami distorsi. Sehingga tracking posisi pada *magnetic tracker* akan mengalami error pendekatan yang digunakan dengan menguatkan medan magnet
- b. “*Linear tracking for 3D medical ultrasound imaging*” yang ditulis oleh Qing-hua Huang dan rekan-rekan tahun 2013. Meneliti tentang kalibrasi citra ultrasound dua dimensi ke koordinat tiga dimensi menggunakan *sensor* jarak dengan sistem yang sudah diatur. Tujuannya adalah mendapatkan transformasi matrik dari koordinat dua dimensi ke koordinat tiga dimensi menggunakan desain sistem yang mereka usulkan. Tetapi dalam penelitian ini, nilai *origin* dari *magnetic tracker* tidak dibahas. Penelitian ini mentransformasikan *magnetic tracker* dari titik yang bukan merupakan *origin* dari *magnetic tracker*.
- c. Paper dengan judul “*Intraoperative Magnetic tracker Calibration Using a Magneto-Optic Hybrid Tracker for 3-D Ultrasound-Based Navigation in Laparoscopic Surgery*” yang ditulis oleh Masahiko Nakamoto dan rekan-rekan tahun 2008. Penelitian ini membahas tentang rekonstruksi citra hasil

operasi laparoskopi. Sebelum rekonstruksi dari teknik laparoskopi ini dibuat dilakukan kalibrasi. Perangkat yang digunakan pada penelitian ini adalah *magnetic tracker* dan optical tracker. *Magnetic tracker* yang terdistorsi akan dikalibrasi dengan optical tracker sehingga sistem yang mereka tawarkan berupa *hybrid* dari kedua sistem. Hanya saja pembahasan origin dari *magnetic tracker* tidak dibahas. Sehingga titik tengah dari *magnetic tracker* berupa perkiraan wilayah

## **2.2 Teori Dasar**

Pada sub bab ini dibahas mengenai teori penunjang selama penelitian kalibrasi *magnetic tracker*. Dalam sub-bab ini akan banyak berisikan rumus matematis permodelan dan juga rumus fisika yang digunakan pada *magnetic tracker*

### **2.2.1 Kalibrasi**

Menurut *ISO/IEC Guide 17025:2005* dan *Vocabulary of International Metrology* (VIM) adalah serangkaian kegiatan yang membentuk hubungan antara nilai yang ditunjukkan oleh instrumen ukur atau sistem pengukuran, atau nilai yang diwakili oleh bahan ukur, dengan nilai-nilai yang sudah diketahui yang berkaitan dari besaran yang diukur dalam kondisi tertentu.

Dengan kata lain: Kalibrasi adalah kegiatan untuk menentukan kebenaran nilai penunjukkan alat ukur dan bahan ukur dengan cara membandingkan terhadap standar ukur yang mampu ditelusur ke standar nasional maupun internasional untuk satuan ukuran internasional dan bahan-bahan acuan tersertifikasi.

Tujuan Kalibrasi yaitu mencapai ketertelusuran pengukuran. Hasil pengukuran dapat dikaitkan/ditelusur sampai ke standar yang lebih tinggi/teliti (standar primer nasional dan / internasional), melalui rangkaian perbandingan yang tak terputus. Menentukan deviasi (penyimpangan) kebenaran nilai konvensional penunjukan suatu instrument ukur. Menjamin hasil-hasil pengukuran sesuai dengan standar Nasional maupun Internasional.

Manfaat Kalibrasi adalah menjaga kondisi instrumen ukur dan bahan ukur agar tetap sesuai dengan spesifikasinya. Untuk mendukung sistem mutu yang diterapkan di berbagai industri pada peralatan laboratorium dan produksi yang

dimiliki. Bisa mengetahui perbedaan (penyimpangan) antara nilai yang benar dengan nilai yang ditunjukkan oleh alat ukur.

#### Prinsip Dasar Kalibrasi

- Objek ukur (Unit Under Test)
- Standar ukur (Alat standar kalibrasi, Prosedur/Metrode standar (Mengacu ke standar kalibrasi internasional atau prosedur yg dikembangkan sendiri oleh laboratorium yg sudah teruji)
- Operator / Teknisi (Dipersyaratkan operator/teknisi yg mempunyai kemampuan teknis kalibrasi (bersertifikat))

Menurut *ISO/IEC Guide 17025:2005* bahwa semua alat ukur setelah melewati mobilisasi atau pergeseran dari satu tempat ke tempat lainnya, maka sebaiknya dilakukan kalibrasi menyeluruh untuk mendapatkan keakuratan. Lingkungan yg dikondisikan (Suhu dan kelembaban selalu dikontrol, Gangguan faktor lingkungan luar selalu diminimalkan & sumber ketidakpastian pengukuran)

Hasil Kalibrasi antara lain:

- Nilai Objek Ukur
- Nilai Koreksi/Penyimpangan
- Nilai Ketidakpastian Pengukuran (Besarnya kesalahan yang mungkin terjadi dalam pengukuran, dievaluasi setelah ada hasil pekerjaan yang diukur & analisis ketidakpastian yang benar dengan memperhitungkan semua sumber ketidakpastian yang ada di dalam metode perbandingan yang digunakan serta besarnya kesalahan yang mungkin terjadi dalam pengukuran)
- Sifat metrologi lain seperti faktor kalibrasi, kurva kalibrasi.
- Persyaratan Kalibrasi Standar acuan yang mampu telusur ke standar Nasional / Internasional
  - Metode kalibrasi yang diakui secara Nasional / Internasional
  - Personil kalibrasi yang terlatih, yang dibuktikan dengan sertifikasi dari laboratorium yang terakreditasi
  - Ruang / tempat kalibrasi yang terkondisi, seperti suhu, kelembaban, tekanan udara, aliran udara, dan kedap getaran

- Alat yang dikalibrasi dalam keadaan berfungsi baik / tidak rusak

Sistem manajemen kualitas memerlukan sistem pengukuran yang efektif, termasuk di dalamnya kalibrasi formal, periodik dan terdokumentasi, untuk semua perangkat pengukuran. *ISO 9000* dan *ISO 17025* memerlukan sistem kalibrasi yang efektif.

Kalibrasi diperlukan untuk:

- Perangkat baru
- Suatu perangkat setiap waktu tertentu
- Suatu perangkat setiap waktu penggunaan tertentu (jam operasi)
- Ketika suatu perangkat mengalami tumbukan atau getaran yang berpotensi mengubah kalibrasi
- Ketika hasil pengamatan dipertanyakan

Kalibrasi, pada umumnya, merupakan proses untuk menyesuaikan keluaran atau indikasi dari suatu perangkat pengukuran agar sesuai dengan besaran dari standar yang digunakan dalam akurasi tertentu. Contohnya, termometer dapat dikalibrasi sehingga kesalahan indikasi atau koreksi dapat ditentukan dan disesuaikan (melalui konstanta kalibrasi), sehingga termometer tersebut menunjukkan temperatur yang sebenarnya dalam celcius pada titik-titik tertentu di skala.

Di beberapa negara termasuk Indonesia, memiliki lembaga metrologi nasional (*National metrology institute*). Di Indonesia terdapat Pusat Penelitian Kalibrasi Instrumentasi dan Metrologi (Puslit KIM LIPI) yang memiliki standar pengukuran tertinggi (dalam SI dan satuan-satuan turunannya) yang akan digunakan sebagai acuan bagi perangkat yang dikalibrasi. Puslit KIM LIPI juga mendukung infrastruktur metrologi di suatu negara (dan, seringkali, negara lain) dengan membangun rantai pengukuran dari standar tingkat tinggi/internasional dengan perangkat yang digunakan.

Hasil kalibrasi harus disertai pernyataan "traceable uncertainty" untuk menentukan tingkat kepercayaan yang di evaluasi dengan saksama dengan analisis ketidakpastian.

### 2.2.2 Sistem Penjejakan

*Tracking system* atau Sistem penjejakan digunakan untuk mengamati orang atau benda yang sedang bergerak dan menyediakan urutan data lokasi yang tepat waktu untuk diproses lebih lanjut.

Terdapat dua jenis sistem penjejakan berdasarkan waktu respons. Diantaranya ada sistem penjejakan bersifat *realtime* dan ada sistem penjejakan bersifat *non realtime*. Sistem penjejakan dengan menggunakan *non realtime* biasanya digunakan pada pengiriman barang. Ketika barang sampai ke tujuan sistem pelacak akan mengirimkan posisinya. Sebagai contoh pengiriman posisi hanya berada pada pos-pos tertentu. Penjejakan dengan system ini tidak dapat menjejak posisi secara terus-menerus. Tidak ada data posisi apabila barang hilang ditengah jalan. Alat yang dipasang pada system ini adalah label atau Qr code dan system penerima data label atau QR code. Salah satu contohnya adalah sistem absensi sekolah yang digunakan di Texas ketika siswa datang ke sekolah (Jensen, R. C. ,2008).

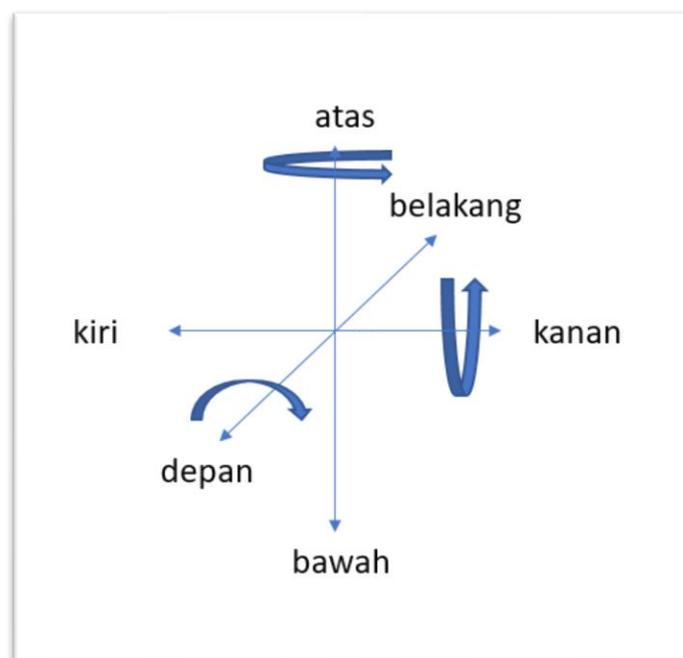
Sistem penjejakan yang lain bersifat *realtime*. Setiap milidetik data posisi akan terus dikirimkan dan disimpan posisi terakhir dari pengirim. Biasanya digunakan pada peralatan masukan untuk *virtual reality* atau perangkat navigasi. Kecepatan respon yang cukup tinggi hingga ukuran milidetik dapat melacak perpindahan posisi obyek setiap saat. Beberapa contoh alat yang menggunakan sistem *realtime* adalah *GPS*, *magnetic tracker*, dan *optic tracker*.

*Global Positioning system* atau lebih dikenal dengan *GPS*, awalnya *GPS* (Zaidman S,2008) adalah sistem navigasi radio berbasis satelit yang dimiliki oleh pemerintah Amerika Serikat dan dioperasikan oleh Angkatan Udara Amerika Serikat. (*Department of defence*,2008) Ini adalah sistem satelit navigasi global yang menyediakan informasi geolokasi dan waktu ke penerima GPS di mana saja di atau dekat Bumi di mana terdapat garis pandang yang tidak terhalang ke empat atau lebih satelit GPS. Hambatan seperti gunung dan bangunan menghalangi sinyal GPS yang relatif lemah.

GPS tidak mengharuskan pengguna untuk mengirim data apa pun, dan ia beroperasi secara independen dari penerimaan lewat telepon atau internet, meskipun teknologi ini dapat meningkatkan kegunaan informasi penentuan posisi

GPS. GPS menyediakan kemampuan penentuan posisi yang penting untuk pengguna militer, sipil, dan komersial di seluruh dunia. Pemerintah Amerika Serikat menciptakan sistem, mempertahankannya, dan membuatnya dapat diakses secara bebas oleh siapa saja yang memiliki penerima GPS. Untuk system GPS jangkauan yang dicapai cukup luas sehingga GPS juga memiliki error yang cukup besar. Rata-rata error dari GPS berada dikisaran 1 km.

GPS digunakan untuk penjejakan dengan area yang luas. Terdapat alat penjejak dengan skala yang lebih kecil jika dibandingkan dengan GPS. Alat ini hanya mampu menjejak dengan luas arena satu ruangan. Alat ini adalah *magnetic* dan *optical tracker*. *Tracker* jenis *magnetic* dan *optic* dapat menjejak obyek hingga ketelitian 1 milimeter. Sehingga alat ini ditujukan untuk mendapatkan pola gerakan atau digunakan sebagai inputan dari *virtual reality*. Ada enam derajat kebebasan pada pengukuran dapat diliha pada Gambar 2.1..



Gambar 2. 1 Enam Derajat kebebasan

Informasi yang dibutuhkan oleh *virtual reality* atau yang disebut juga dengan VR, adalah posisi dan orientasi *sensor* sesuai dengan gambar 2.1, yang diperlukan untuk *me-render* gambar yang tepat. Selain itu bagian lain dari obyek yang dapat dilacak misalnya, tangan - untuk memungkinkan interaksi, dada atau kaki - untuk memungkinkan representasi pengguna grafis dll. Benda tiga dimensi

memiliki enam derajat kebebasan (DOF): koordinat posisi (sumbu x, y dan z) dan orientasi (yaw, pitch dan roll angle). Setiap pelacak harus mendukung data DOF atau sebagian dari DOF. Secara umum ada dua jenis pelacak: mereka yang memberikan data absolut (nilai posisi / orientasi total) dan yang memberikan data relatif (yaitu perubahan data dari keadaan terakhir).

Sifat yang paling penting dari pelacak 6 DOF adalah harus mempertimbangkan untuk memilih perangkat yang tepat untuk aplikasi yang diberikan antara lain :

- tingkat pembaruan - menentukan berapa banyak pengukuran per detik (diukur dalam Hz) yang dibuat. Nilai tingkat pembaruan yang lebih tinggi mendukung pelacakan gerakan yang lebih mulus, tetapi membutuhkan lebih banyak pemrosesan.

- latensi - jumlah waktu (biasanya diukur dalam ms) antara tindakan nyata (fisik) pengguna dan awal transmisi laporan yang mewakili tindakan ini. Nilai yang lebih rendah berkontribusi pada kinerja yang lebih baik.

- akurasi - ukuran kesalahan dalam posisi dan orientasi yang dilaporkan. Ditetapkan secara umum dalam nilai absolut (misalnya, dalam mm untuk posisi, atau dalam derajat untuk orientasi). Nilai yang lebih kecil berarti akurasi yang lebih baik.

- resolusi - perubahan terkecil dalam posisi dan orientasi yang dapat dideteksi oleh pelacak. Diukur seperti akurasi dalam nilai absolut. Nilai yang lebih kecil berarti kinerja yang lebih baik.

- rentang - volume kerja, di mana pelacak dapat mengukur posisi dan orientasi dengan keakuratan dan resolusi yang ditentukan, dan cakupan sudut pelacak.

Selain sifat-sifat ini, beberapa aspek lain tidak dapat dilupakan seperti kemudahan penggunaan, ukuran dan berat dll dari perangkat. Karakteristik ini akan digunakan lebih lanjut untuk menentukan kualitas dan kegunaan dari berbagai jenis pelacak.

Fungsi dari penjejak pada bidang *virtual reality* bisa dikembangkan pada perangkat-perangkat yang memerlukan operator khusus. Dengan adanya data posisi

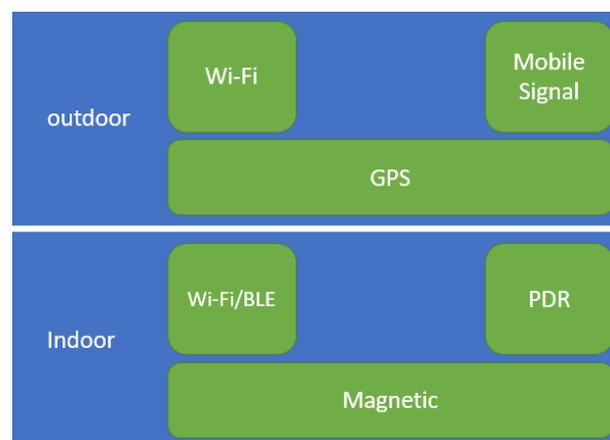
yang dipasangkan pada pengguna. Seorang operator dapat menjalankan perangkat yang sangat jauh posisi dari operator.

### 2.2.3 Sistem Pemosisian

*Position System* adalah mekanisme untuk menentukan lokasi objek dalam ruang. Teknologi ini ada mulai dari cakupan di seluruh dunia dengan akurasi meter, untuk cakupan ruang kerja dengan akurasi sub-milimeter. Hampir sama dengan tracker system namun *position system* cenderung digunakan untuk penentuan posisi. Bedanya adalah *position system* mengukur hanya posisi sedangkan *tracker* mengikuti hingga pergerakan dari obyek. Jangkauan dari *position system* beragam. Ada yang memiliki jangkauan antar planet. Dan ada juga yang memiliki jangkauan hanya satu ruangan.

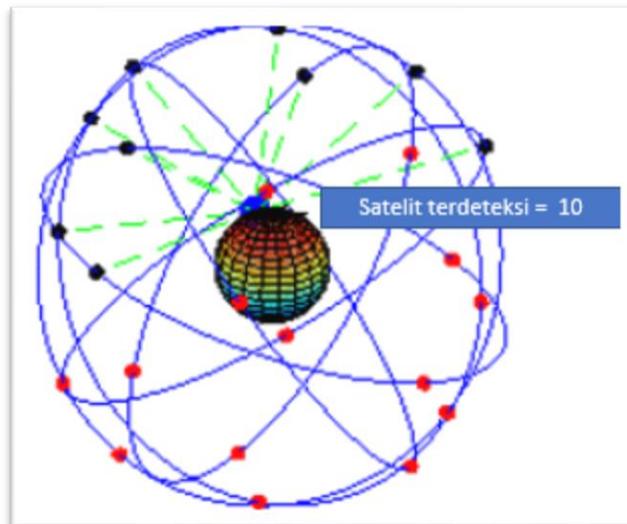
Jangkauan antar planet disebut dengan *Interplanetary systems*. sistem komunikasi radio antar planet tidak hanya berkomunikasi dengan pesawat ruang angkasa, tetapi juga digunakan untuk menentukan posisi mereka. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan *transponder* di atas pesawat angkasa yang menggemakan kembali sinyal radio, atau menggunakan radar. Informasi orientasi dapat diperoleh menggunakan pelacak bintang.

Terdapat *positioning system* pada jangkauan global dibagai menjaid dua Outdoor dan Indoor dapat diamati pada Gambar 2.2. Sistem satelit navigasi global memungkinkan penerima radio khusus untuk menentukan posisi ruang tiga dimensi mereka dan waktu dengan akurasi 2–20 meter atau puluhan nano detik untuk waktu. Sistem yang saat ini digunakan menggunakan sinyal *microwave* yang hanya dapat



Gambar 2. 2 Pembagian Perangkat *Indoor* dan *Outdoor*

diterima di luar ruangan dan yang menutupi sebagian besar permukaan Bumi. Minimal terdapat empat satelit yang menangkap gelombang dari perangkat. Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Sistem posisi menggunakan satelit

Jaringan pemancar berbasis pemancar darat memungkinkan penerima radio khusus untuk menentukan posisi 2-D mereka di permukaan Bumi. Mereka umumnya kurang akurat daripada Sistem satelit navigasi global karena sinyal mereka tidak sepenuhnya terbatas pada propagasi *Line of Sight*, dan hanya memiliki cakupan regional. Namun, tetap berguna untuk tujuan khusus dan sebagai cadangan di mana sinyal diterima lebih andal, termasuk di bawah tanah, dan di dalam ruangan. receiver dapat dibangun yang mengkonsumsi daya baterai sangat rendah. LoRA (*Long Range Area*) adalah salah satu contoh dari system dengan pemancar regional.

Untuk cakupan wilayah yang lebih kecil, terdapat sistem pemosisian dalam ruangan. Cakupannya tidak begitu luas hanya seluas ruangan. Sistem pemosisian dalam ruangan dioptimalkan untuk digunakan dalam ruangan, bangunan, atau situs konstruksi. Biasanya, memiliki tingkat akurasi centimeter. Beberapa memberikan informasi, lokasi dan dimensi yang digunakan berada di enam dimensi.

Dan yang terakhir ini dirancang untuk hanya mencakup ruang kerja yang terbatas, biasanya beberapa meter kubik, tetapi dapat menawarkan akurasi dalam

kisaran milimeter atau lebih baik. Mereka biasanya menyediakan posisi dan orientasi 6-D. Contoh aplikasi termasuk *virtual reality*, alat penyelarasan untuk operasi atau radiologi yang dibantu komputer, dan sinematografi (penangkapan gerakan).

#### **2.2.4 Sistem pemosisian dalam ruangan**

*Indoor Position System* atau dalam Bahasa Indonesia Sistem pemosisian dalam ruangan adalah sistem untuk menemukan objek atau orang-orang di dalam ruangan menggunakan gelombang radio, medan magnet, sinyal akustik, atau informasi sensorik lainnya yang dikumpulkan oleh perangkat (Curran et. al. ,2011) Ada beberapa sistem komersial di pasar, tetapi tidak ada standar untuk sistem IPS (Indoor Position System).

menggunakan teknologi yang berbeda, termasuk pengukuran jarak ke titik asal terdekat (node dengan posisi yang diketahui, misalnya titik akses WiFi atau pusat Bluetooth), posisi magnetik (Chen qiu et. al. 2016). Alat pengukur tersebut juga secara aktif mencari perangkat dan tag ponsel atau menyediakan lokasi ambien atau konteks lingkungan untuk perangkat agar dapat merasakan. Sifat lokal dari IPS telah menghasilkan fragmentasi desain, dengan sistem yang menggunakan berbagai teknologi optik, radio, atau bahkan akustik .

Desain sistem harus memperhitungkan bahwa setidaknya tiga pengukuran independen diperlukan untuk menemukan lokasi secara jelas untuk mengukur digunakan triangulasi. Untuk menghaluskan kompensasi kesalahan stokastik harus ada metode untuk mengurangi kesalahan secara signifikan. Sistem mungkin termasuk informasi dari sistem lain untuk mengatasi ambiguitas fisik dan untuk memungkinkan kompensasi kesalahan.

Mendeteksi orientasi perangkat (sering disebut sebagai arah kompas untuk membedakannya dari orientasi vertikal smartphone) dapat dicapai baik dengan mendeteksi tengara di dalam gambar yang diambil secara waktu nyata, atau dengan menggunakan trilaterasi dengan beacon. (H Hile, 2008). MIT mengembangkan teknologi untuk mendeteksi informasi magnenometric di dalam gedung atau lokasi dengan struktur baja atau di tambang bijih besi.

Karena atenuasi sinyal yang disebabkan oleh bahan-bahan pembuat atau bahan-bahan yang berada di suatu lingkungan, Sistem Pemosisian Global berbasis satelit kehilangan daya yang signifikan di dalam ruangan yang mempengaruhi cakupan yang diperlukan untuk penerima oleh setidaknya empat satelit. Selain itu, beberapa refleksi di permukaan menyebabkan kesalahan yang tidak terkendali. Efek yang sama ini melemahkan semua titik yang diketahui untuk lokasi dalam ruangan yang menggunakan gelombang elektromagnetik dari pemancar dalam ruangan ke penerima di dalam ruangan. Suatu metode fisik dan matematika diterapkan untuk mengimbangi masalah ini. Membuat koreksi kesalahan penentuan posisi frekuensi radio dibuka dengan menggunakan sumber alternatif informasi navigasi, seperti unit pengukuran inersia, dan kamera monocular. Lokalisasi simultan dan pemetaan dengan WiFi. Integrasi data dari berbagai sistem navigasi dengan prinsip-prinsip fisik yang berbeda dapat meningkatkan akurasi dan solusi secara keseluruhan. (V Maximov,2013)

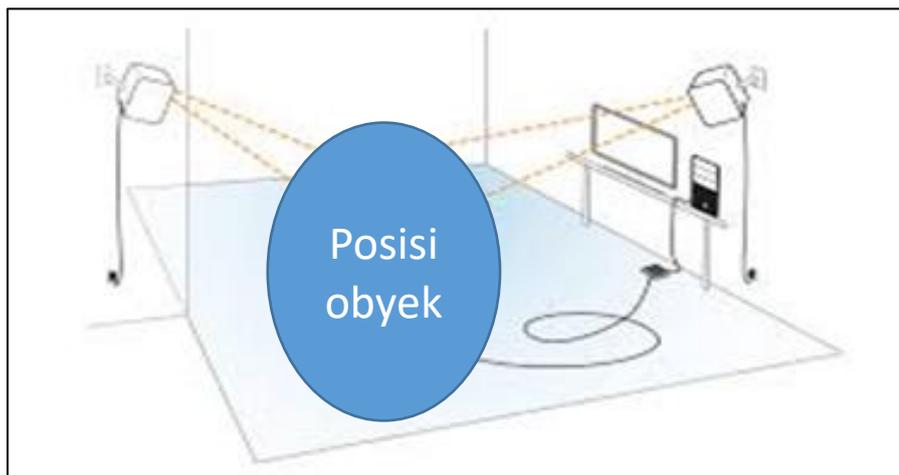
Salah satu metode untuk yang dikembangkan agar nilai operasional mencukupi adalah dengan menggunakan pelacakan. Urutan lokasi yang ditentukan membentuk lintasan dari lokasi pertama sampai yang paling aktual. Metode statistik kemudian berfungsi untuk merapikan lokasi yang ditentukan dalam lintasan menyerupai kemampuan fisik objek untuk bergerak. Data harus dibuat halus agar dapat diterapkan, ketika target bergerak dan juga untuk target diam, untuk mengimbangi langkah-langkah yang tidak menentu. Jika tidak, lokasi obyek tunggal atau bahkan lintasan yang diikuti akan menyusun urutan lompatan.

Posisi magnetik dapat membuat pejalan kaki terjejak posisinya menggunakan smartphone dengan akurasi dalam ruangan 1-2 meter dengan tingkat persentase 90%, tanpa menggunakan infrastruktur nirkabel tambahan untuk pemosisian. Posisi magnetik didasarkan pada besi di dalam bangunan yang menciptakan variasi lokal di medan magnet Bumi. Chip kompas yang tidak dioptimalkan di dalam smartphone dapat merasakan dan merekam variasi magnetik ini untuk memetakan lokasi dalam ruangan. (Geospatial World ,2014)

### **2.2.5 Pelacakan Posisi**

Positional Tracking atau pelacakan posisi mendeteksi posisi yang tepat dari *head mounted display*, controller, objek lain atau bagian tubuh dalam ruang

Euclidean Gambar 2.4. Pelacakan posisional mencatat posisi yang tepat karena pengenalan rotasi (*pitch*, *yaw* dan *roll*) dan pencatatan gerakan translasi. Dikarenakan *virtual reality*(VR) adalah tentang meniru dan mengubah realitas, penting bagi kita untuk melacak secara akurat sebuah objek (seperti kepala atau tangan) bergerak dalam kehidupan nyata untuk mewakili mereka di dalam VR. Menentukan posisi dan orientasi obyek nyata di suatu ruang ditentukan dengan bantuan *sensor* atau penanda khusus. *Sensor* merekam sinyal dari objek nyata ketika bergerak atau dipindahkan dan mengirimkan informasi yang diterima ke komputer.



Gambar 2. 4 Pelacakan Posisi dalam ruangan

Terdapat dua pelacakan berdasarkan nirkabel yaitu pelacakan magnetik dan pelacakan optik. Pelacakan nirkabel menggunakan satu set titik awal yang ditempatkan di sekeliling ruangan pelacakan dan satu atau lebih tag yang dilacak. Sistem ini serupa dalam konsep untuk GPS, tetapi hanya berfungsi baik di dalam ruangan maupun di luar ruangan pada jangkauan tertentu. Terkadang disebut sebagai GPS dalam ruangan. Tag-tag tersebut melakukan triangulasi posisi 3D mereka menggunakan titik pusat yang ditempatkan di sekeliling perimeter. Teknologi nirkabel yang disebut *Ultra Wideband* telah memungkinkan pelacakan posisi untuk mencapai presisi di bawah 100 mm. Dengan menggunakan *sensor fusion* dan algoritma kecepatan tinggi, presisi pelacakan dapat mencapai 5 mm dengan kecepatan update 200 Hz atau 5 ms latency.

Sedangkan untuk metode optic, seperangkat algoritma visi komputer dan perangkat pelacakan seperti kamera rentang yang dapat terlihat atau inframerah, kamera stereo, dan kamera kedalaman. Pelacakan optik didasarkan pada prinsip yang sama dengan penglihatan manusia secara stereoskopis. Ketika seseorang melihat suatu objek menggunakan penglihatan binokular, ia mampu mendefinisikan kira-kira pada jarak berapa objek itu ditempatkan. Tidak cukup hanya memasang sepasang kamera untuk mensimulasikan pandangan stereoskopik seseorang. Kamera harus menentukan jarak ke objek dan posisinya di suatu ruang, jadi perlu dikalibrasi. Bayi belajar mengkalibrasi penglihatan mereka ketika mereka mencoba mengambil sesuatu, menghubungkan lokasi objek dengan tangan yang terulur. Sistem optik dapat diandalkan dan relatif tidak mahal tetapi sulit dikalibrasi. Selain itu, sistem ini membutuhkan garis cahaya langsung tanpa oklusi, jika tidak kami menerima data yang salah.

Berikutnya, terdapat *magnetic tracker* (atau pelacakan elektromagnetik) didasarkan pada prinsip yang sama seperti theremin. Bergantung pada pengukuran intensitas medan magnet inhomogenous dengan *sensor* elektromagnetik. Sebuah stasiun pangkalan, sering disebut sebagai pemancar atau generator medan sistem, menghasilkan medan elektromagnetik bolak atau statis, tergantung pada arsitektur sistem.

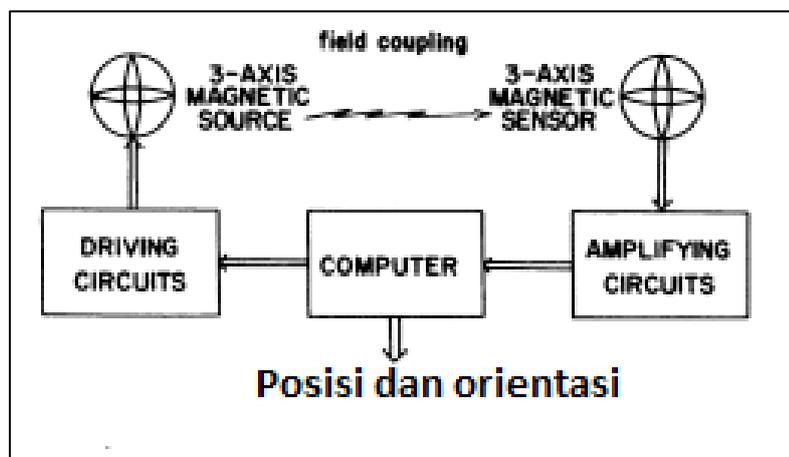
Untuk mencakup semua arah dalam ruang tiga dimensi, tiga medan magnet dihasilkan secara berurutan. Medan magnet dihasilkan oleh tiga kumparan elektromagnetik yang saling tegak lurus satu sama lain. Gulungan-gulungan ini harus diletakkan di perumahan kecil yang dipasang pada target bergerak yang perlu dilacak posisi. Arus, secara berurutan melewati kumparan, mengubahnya menjadi elektromagnet, yang memungkinkan untuk menentukan posisi dan orientasi mereka di ruang angkasa. Pelacakan magnetik telah dilaksanakan oleh Polhemus dan Razor Hydra oleh Sixsense. (Mazuryk, T. et al.) Sistem bekerja dengan buruk di dekat material konduktif listrik, seperti benda logam dan perangkat, yang dapat mempengaruhi medan elektromagnetik. Area skalabel terbatas dan tidak boleh lebih dari 5 meter.

Untuk optic dan magnetic menggunakan marker sebagai penanda posisi. Dalam metode ini, target dipasang dengan penanda yang membentuk pola yang

diketahui. Sumber cahaya inframerah (aktif dan pasif) untuk optik, penanda yang terlihat seperti kode QR (atau bisa melingkar) biasanya berfungsi sebagai penanda untuk pelacakan optik. Kamera atau beberapa kamera terus mencari penanda dan kemudian menggunakan berbagai algoritme (misalnya, algoritma POSIT) untuk mengekstraksi posisi objek dari penanda. Algoritma semacam itu juga harus bersaing dengan data yang hilang dalam kasus satu atau lebih dari penanda di luar tampilan kamera atau sementara terhalang. Penanda dapat aktif atau pasif. Yang pertama biasanya adalah lampu inframerah yang secara berkala berkedip atau menyala sepanjang waktu. Dengan menyinkronkan waktu yang digunakan dengan kamera, lebih mudah untuk memblokir lampu inframerah lainnya di area pelacakan. Yang terakhir adalah retroreflector yang memantulkan cahaya IR kembali ke sumber hampir tanpa hamburan. (Mehling, M. (2006))

### 2.2.6 Penjejak Magnetic

Penjejak magnetik atau *Magnetic tracker* adalah suatu perangkat yang sering digunakan untuk menjejak posisi dan orientasi dari suatu object. Terdiri dari transmitter yang biasa disebut *source* dan receiver yang biasa disebut *sensor*. Dapat diamati pada Gambar 2.5 merupakan system yang digunakan pada *magnetic tracker*. Pada umumnya *magnetic tracker* digunakan pada augmented reality dan aplikasi-aplikasi yang memerlukan fungsi immersive didalamnya (Mazuryk, T. et al.). Ada dua jenis *magnetic tracker* yang yang digunakan diantaranya menggunakan arus AC dan Arus DC.



Gambar 2. 5 System *Magnetic tracker*

Perubahan dari arus AC pada *magnetic tracker* source yang menginduksi lilitan berada pada *magnetic sensor*. Induksi dari *source* menghasilkan tegangan pada *magnetic sensor* di tiap-tiap sumbu. Sehingga dapat diukur perbandingan

tegangan di masing-masing sumbu untuk pengukuran jarak. Arus AC yang selalu berubah juga dapat mengakibatkan induksi ke benda logam non *sensor*, sehingga terjadi induksi *eddy current*. Akibat yang ditimbulkan dari *eddy current* adalah terjadi medan magnet baru yang mengakibatkan distorsi. Distorsi mengakibatkan perubahan pengukuran yang terjadi pada alat. Semakin jauh posisi *sensor* dengan *source*, maka *sensor* akan terdistorsi semakin kuat. Akibatnya *magnetic tracker* akan mudah error pada jarak yang cukup jauh dari *sensor*. Dikarenakan nilai distorsi dengan nilai yang didapat dari magnetic source akan sama persis. Dengan nilai yang sama persis maka nilai distorsi akan sangat mempengaruhi error yang terjadi pada magnetic tracker.

Untuk mengukur jarak menggunakan kuat medan magnet memenuhi persamaan berikut (2.1).

$$B = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2.1)$$

Dimana :  $B$  = kuat medan magnet

$Q$  = muatan Colomb

$r$  = jarak antara source dan *sensor*

$\epsilon_0$  = Permittivitas ruang hampa

Jika diamati pada Persamaan 2.1 maka jarak kuadrat berbanding terbalik dengan besar kuat medan. Oleh karena itu semakin kecil kuat medan maka semakin jauh jarak antara source dengan *sensor*. *Magnetic tracker* mendeteksi posisi penanda yang berada pada lingkup medan magnetnya. Pendeteksian posisi dari penanda ini didapat dari kuat medan yang tertangkap pada transmitter (Xiong, X., McGary, J.E. & Chen, J., 2015), akan ditangkap oleh receiver dan dikalkulasi dengan persamaan 2.2:

$$Bd(R, md) = \frac{\mu}{4\pi} \left[ \frac{3R \cdot Md \cdot R}{|R|^5} - \frac{Md}{|R|^3} \right] \quad (2.2)$$

Dimana  $Bd$  adalah kerapatan flux magnetic yang dihasilkan transmitter.  $R$  adalah perubahan vector dari transmitter tracker ke receiver. Dan  $md$  merupakan momen dipole. Dalam ruang bebas  $\mu$  merupakan nilai permeabilitas dari suatu medium. Pada medium ruang bebas nilai permeabilitasnya sekitar  $4\mu \times 10^7$ .

Parameter transmitter  $xd$  dan  $md$  dapat diselesaikan dari pengukuran secara posisi ganda (setidaknya ada 6 parameter). Dari pengukuran ganda dapat diturunkan persamaan 2.3 secara iterative.  $f$  merupakan nilai minimum jarak yang terukur dari source.

$$f(R, md) = \min \sum_{i=1}^{Ns} [Bo - Bd(R, md) \cdot Oi]^2 \quad (2.3)$$

Dimana  $Ns$  adalah jumlah *sensor*, dan  $Bo$ , dan  $Oi$  secara berturut-turut keluaran *receiver*, posisi dan orientasi vector dari banyaknya *sensor*. Pada Persamaan 2.5 *sensor* yang digunakan merupakan *sensor* uni *axial* yaitu *sensor* dengan satu sumbu. Sedangkan untuk *sensor* yang digunakan pada penelitian ini menggunakan *triaxial*. *Triaxial sensor* ini dapat dianggap sebagai tiga uniaxial *sensor*.

Namun distorsi magnetic ini dapat terjadi dikarenakan ada benda feromagnetic atau benda-benda lain yang mengeluarkan medan magnet yang berada didekat transmitter sehingga menambah medan magnet dari transmitter hingga muncul Persamaan 2.4.

$$B_t = Bd + Be \quad (2.4)$$

Dimana  $B_t$  Adalah total medan magnet yang dihasilkan.  $Bd$  medan magnet transmitter. dan  $Be$  merupakan medan magnet lain yang mempengaruhi transmitter. Apabila Nilai  $Be$  ini dapat diamati perubahannya berdasarkan perubahan nilai posisi dari *magnetic tracker*. Maka, Persamaan 2.4 dapat diturunkan menjadi Persamaan 2.5

$$f(R, md) = \min \sum_{i=1}^{Ns} [Bo - [Bd(R, md) + Be] \cdot Oi] \quad (2.5)$$

Persamaan 2.5 yang berbentuk nonlinear ini dapat diselesaikan dengan algoritma optimasi seperti Gauss-Newton algorithm atau Levenberg Marquard algorithm. Masalah berikutnya adalah mengestimasi nilai dari  $Be$ . Dimana nilai ini bergantung dari kondisi lingkungannya.

Pada penelitian ini digunakan *magnetic tracker* polhemus G4. *Magnetic tracker* ini berjenis *magnetic tracker* dengan arus AC. *Magnetic tracker* dengan

arus ac dapat menginduksi benda logam lainnya sehingga menimbulkan distorsi. Dapat dilihat pada Gambar 2.6 model magnetic tracker. Adapun kelebihan dan kekurangan pada penggunaan *magnetic tracker* diantaranya:

Keuntungan:

- *sensor* kecil, ringan dan praktis
- tidak memiliki batasan line-of-sight
- tidak sensitif terhadap interferensi akustik
- tingkat pembaruan yang relatif tinggi dan latensi rendah



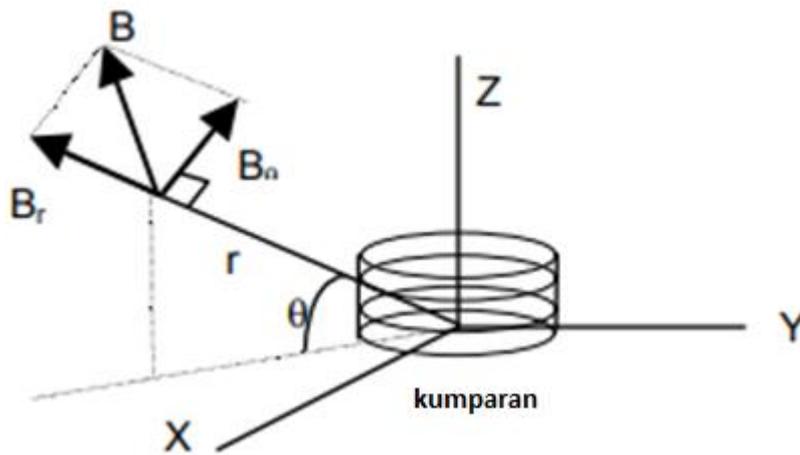
Gambar 2. 6 *Magnetic tracker* pada penelitian

Kekurangan:

- karena medan magnet sangat menurun dengan jarak dari emitor, volume kerja pelacak magnetik sangat terbatas dan resolusinya semakin memburuk ketika jarak penerima emitor semakin besar.
- medan magnet dikenakan distorsi, yang disebabkan oleh benda-benda logam di dalamnya (pelacak AC saja). Selain itu, setiap medan magnet eksternal yang dihasilkan misalnya, oleh CRT menampilkan atau oleh benda-benda ferromagnetik di sekitarnya (baik AC dan pelacak DC) dapat menyebabkan distorsi tambahan yang mengarah ke pengukuran yang tidak akurat.

### 2.2.7 Ruang Pendeteksian Magnetik

Untuk mengukur Dengan mensirkulasi arus listrik dalam kumparan untuk mengukur jarak, medan magnet dihasilkan melalui kumparan. Gambar 2.7 bidang dengan jarak  $r$  memiliki komponen polar  $B_r$  (sepanjang radial arah) dan  $B_\theta$  (tegak lurus terhadap arah radial) diwakili dalam Gambar 2.7. Jika penerima (beberapa magnet *sensor* medan) ditempatkan di sekitarnya, menginduksi fluks magnet penerima. Ini disebut sebagai koping magnetik antara memancarkan koil dan penerima. Output *sensor* yang dihasilkan dari fluks induksi kemudian dapat diukur. Fluks di sekitar penerima adalah fungsi jarak penerima dari koil dan orientasinya relatif terhadap koil.



Gambar 2. 7 Sensing dari *Magnetic tracker*

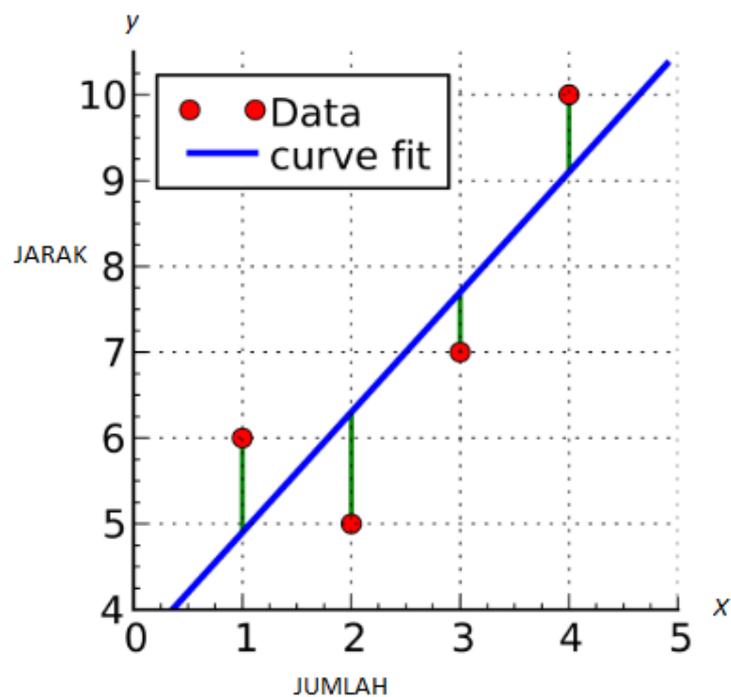
Untuk mengukur posisi dan orientasi penerima di ruang angkasa, emitor harus terdiri dari tiga kumparan ditempatkan tegak lurus satu sama lain, sehingga mendefinisikan spasial referensial dari mana medan magnet dapat keluar ke segala arah. Arah diberikan oleh hasil dari tiga arah ortogonal dasar. Di penerima, tiga *sensor* mengukur komponen fluks lapangan yang diterima sebagai konsekuensi dari koping magnetik. Berdasarkan langkah-langkah ini, sistem menentukan posisi dan orientasi penerima sehubungan dengan emitor yang melekat pada referensi. Biasanya diperlukan bahwa  $r \gg R$  dan  $r \gg L$ , di mana  $r$  adalah jarak penerima dari kumparan, dan  $R$  dan  $L$  adalah jari-jari dan panjang kumparan, masing-masing seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2.7.

Sebagaimana dinyatakan, posisi dan orientasi penerima dapat dicapai hanya dengan memancarkan bidang sepanjang setiap koil dari kesatuan yang memancarkan, tetapi ditemukan dengan pendekatan ini, yang sulit dipecahkan untuk posisi dan orientasi. Solusi praktis sebenarnya melibatkan emisi tiga bidang ortogonal: satu dalam arah yang diperkirakan dari target dan dua lainnya dalam arah ortogonal.

Karena pelacak magnetik murah, ringan, dan mereka banyak digunakan dalam lingkungan virtual. Volume kerja dibatasi oleh atenuasi sinyal dengan jarak. Namun, bidang tersebut tidak dapat ditingkatkan tanpa batas untuk meningkatkan volume kerja karena efek medan elektromagnetik yang signifikan manusia tidak sepenuhnya ditemukan. Tingkat pembaruan mungkin terbatas jika pemfilteran diterapkan untuk menghaluskan sinyal yang diterima. Sebuah trade-off harus dilakukan antara kerja volume, akurasi dan resolusi, dan tingkat pembaruan

### 2.2.8 Penyesuaian Kurva

Penyesuaian kurva atau biasa disebut dengan curve fitting, digunakan untuk mendapatkan 'Best fit' sesuai gambar 2.8 yaitu garis ataupun kurva dari



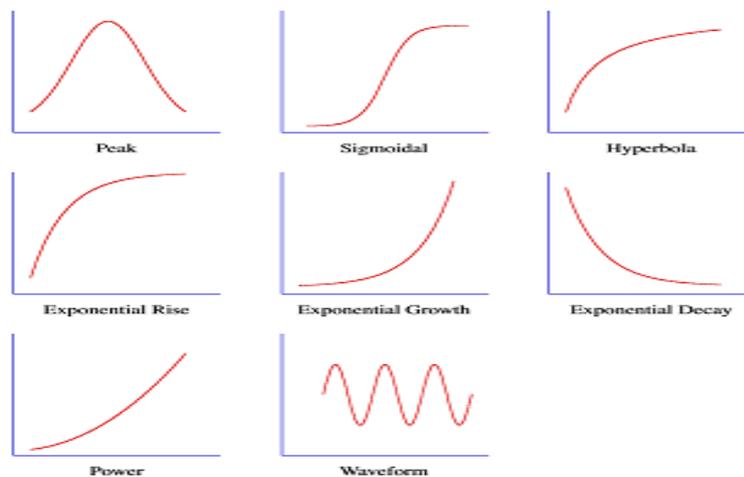
Gambar 2. 8 contoh curve fitting

rangkaian data yang berurutan. Pada umumnya, Curve fitting digunakan untuk mendapatkan persamaan dari garis atau kurve yang digunakan untuk mendapatkan semua data pada persamaan garis. Beberapa kasus tidak mempedulikan data yang didapat dari curve fitting. Beberapa kasus membutuhkan data yang lebih

smooth untuk kurva data yang dimiliki. Ada beberapa tipe dari Curve fitting. Diantaranya adalah :

1. Least Square Curve Fits
2. Nonlinear Curve Fits
3. Smoothing Curve Fits

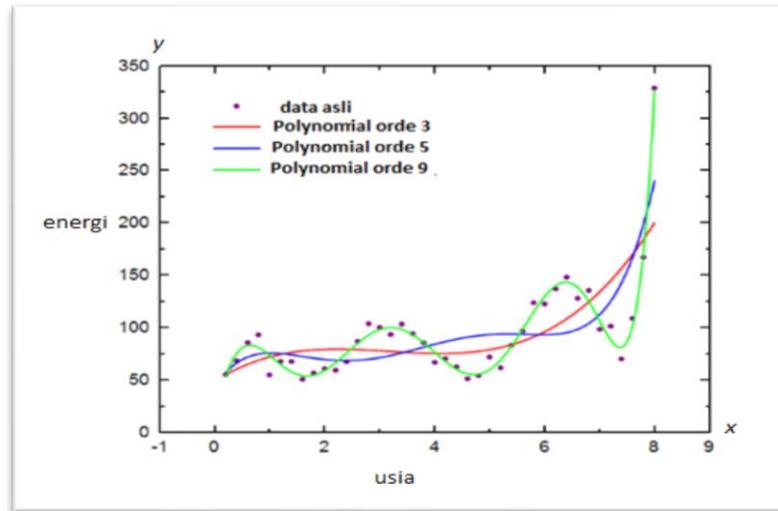
Penelitian ini menggunakan salah satu bagian dari Least Square Curve Fits dikarenakan tujuan dari penelitian ini adalah kalibrasi. Dinamakan kalibrasi dikarenakan tujuan dari penelitian ini adalah mencari error terkecil dari data yang diperoleh. Metode Least Square Curve Fits ini mencari error terkecil dari data yang diberikan. Permasalahan yang dialami menggunakan least square estimation adalah adanya data *outlier* yang akan mengganggu pada perhitungan. Metode least square estimation rentan terhadap outlier sehingga apabila ada data outlier akan menggeser persamaan garis. Oleh karena itu, sebelum data diolah, sebaiknya sudah dipahami hubungan antara variable dependent dan variable independennya. Beberapa metode yang berada pada least square estimation adalah: *Linear fitting*, *Polynomial fitting*, *Exponential Fitting*, *Logarithmic Fitting*, dan *Power Fitting*. Beberapa model kurva yang dapat diselesaikan pada Gambar 2.9



Gambar 2. 9 Kurva Polynomial

### 2.2.9 Polynomial fitting

Pada ilmu statistik, polinomial regresi atau dikenal dengan *polynomial fitting* adalah bentuk analisa regresi di mana hubungan antara variabel independen  $x$  dan variabel dependen  $y$  dimodelkan sebagai polinomial derajat  $n$  pada variabel  $x$  dapat diamati pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Contoh *Polynomial fitting*

Regresi polinomial cocok dengan hubungan nonlinear antara nilai  $x$  dan rata-rata kondisional nilai  $y$  yang bersesuaian, dilambangkan dengan  $E(y | x)$ . Meskipun polinomial regresi cocok dengan model nonlinier ke data, sebagai masalah estimasi statistik itu linear, dalam arti bahwa fungsi regresi  $E(y | x)$  adalah linear dalam parameter yang tidak diketahui yang diperkirakan dari data. Untuk alasan ini, regresi polinomial dianggap sebagai kasus khusus dari regresi linier berganda. Bentuk umum dari *polynomial fitting* dapat diamati pada Persamaan 2.7

$$a_i = \sum_{j=0}^m \beta_j b_i^j \quad (2.7)$$

Dimana  $y_i$  adalah data yang digunakan sebagai referensi. Sedangkan  $x_i$  adalah data yang akan dipetakan. Konstanta *polynomial fitting* pada Persamaan 2.7 adalah  $\beta$ . Tujuan dari *polynomial fitting* adalah mencari nilai konstanta yang memenuhi hubungan antara referensi dan data yang dipetakan

### 2.2.10 Penyesuaian Polinomial sumbu ganda

Pada penelitian kalibrasi magnetic membahas tentang kalibrasi menggunakan *polynomial fitting*. Namun pada *polynomial fitting* yang digunakan

pada penelitian kalibrasi magnetik (Ikits, M. *et al.* ,2001) sedikit berbeda. Persamaan polynomial yang digunakan menggunakan tiga variabel dependen. Pada umumnya *polynomial fitting* menggunakan satu variable independen didalam persamaan. Variabel independen yang digunakan pada penelitian Ikits, M. *et al.* (2001) adalah variable posisi dari *magnetic tracker* pada tiga sumbu x, y, dan z. sehingga didapat istilah *polynomial fitting* Multi Axis. Persamaan 2.8 – 2.10 adalah persamaan *polynomial fitting* multi axis. Pada persamaan 2.8 hingga 2.10 menunjukkan persamaan *magnetic tracker* multi axis. Dimana  $x_{p_1}, y_{p_1}$  dan  $z_{p_1}$  adalah titik titik yang akan memiliki nilai sesungguhnya sedangkan  $x_{p_1}', y_{p_1}'$  dan  $z_{p_1}'$  adalah nilai yang memiliki error. Sedangkan  $c$  adalah konstanta polynomial. Nilai konstanta yang tidak diketahui. Dan  $pa', pa'',$  dan  $pa'''$  secara berturut-turut adalah pangkat turunan pertama, kedua, dan ke tiga. Oleh karena itu persamaan ini menghasilkan nilai konstanta untuk kalibrasi. Dimana nilai konstanta yang dicari dapat diselesaikan menggunakan least square estimation. Setelah mendapatkan konstanta polynomial, maka didapatkan persamaan hasil *polynomial fitting*.

$$x_{p_1}' = x_{p_1} + \sum_{j=1}^n c x_j x_{p_1}^{pa'} y_{p_1}^{pa''} z_{p_1}^{pa'''} \quad (2.8)$$

$$y_{p_1}' = y_{p_1} + \sum_{j=1}^n c y_j x_{p_1}^{pa'} y_{p_1}^{pa''} z_{p_1}^{pa'''} \quad (2.9)$$

$$z_{p_1}' = z_{p_1} + \sum_{j=1}^n c z_j x_{p_1}^{pa'} y_{p_1}^{pa''} z_{p_1}^{pa'''} \quad (2.10)$$

Ide yang mendasari *polynomial fitting* multi axis adalah hubungan antara nilai sesungguhnya dengan nilai terdistorsi. Asumsinya adalah nilai sesungguhnya akan sama dengan nilai total distorsi ditambah dengan nilai distorsi pada titik tersebut. Oleh karena itu dibuatlah persamaan *polynomial fitting* dengan menggunakan asumsi error terkecil.

### 2.2.11 Perkiraan Kuadrat Minimal

Metode Perkiraan Kuadrat Minimal atau *Least Square Estimation* atau kuadrat terkecil adalah pendekatan standar dalam analisis regresi untuk mendekati solusi sistem overdetermined, yaitu set persamaan di mana ada lebih banyak persamaan daripada tidak diketahui. "Least squares" berarti bahwa solusi keseluruhan meminimalkan jumlah kuadrat residual yang dibuat dalam hasil setiap persamaan tunggal.

Aplikasi yang paling penting adalah pemasangan data. Paling sesuai dalam arti kuadrat-terkecil meminimalkan jumlah residual kuadrat (suatu residu: perbedaan antara nilai yang diamati, dan nilai pas yang disediakan oleh model). Ketika masalah memiliki ketidakpastian substansial dalam variabel independen (variabel  $x$ ), maka regresi sederhana dan metode kuadrat terkecil memiliki masalah; dalam kasus seperti itu, metodologi yang diperlukan untuk model kesalahan-dalam-variabel pas dapat dipertimbangkan sebagai ganti untuk kuadrat terkecil.

Masalah kuadrat-terkecil dibagi menjadi dua kategori: kuadrat terkecil linear atau biasa dan kuadrat terkecil nonlinier, tergantung pada apakah residu tidak linier dalam semua tidak diketahui. Masalah linear kuadrat terkecil terjadi dalam analisis regresi statistik; ini memiliki solusi bentuk tertutup. Masalah nonlinier biasanya diselesaikan dengan penyempurnaan berulang; pada setiap iterasi sistem diperkirakan oleh satu linear, dan dengan demikian perhitungan inti serupa dalam kedua kasus.

Polinomial kuadrat terkecil menggambarkan varians dalam prediksi variabel dependen sebagai fungsi dari variabel independen dan penyimpangan dari kurva pas. Ketika pengamatan berasal dari keluarga eksponensial dan kondisi ringan puas, perkiraan kuadrat terkecil dan perkiraan kemungkinan maksimum identik. Metode kuadrat terkecil juga dapat diturunkan sebagai metode estimator momen. Diskusi berikut ini sebagian besar disajikan dalam bentuk fungsi linear tetapi penggunaan kuadrat terkecil valid dan praktis untuk keluarga fungsi yang lebih umum. Juga, dengan secara iteratif menerapkan aproksimasi kuadratik lokal ke likelihood (melalui informasi Fisher), metode kuadrat terkecil dapat digunakan untuk memasang model linear umum. Metode kuadrat-terkecil biasanya

dikreditkan ke Carl Friedrich Gauss (1795) tetapi pertama kali diterbitkan oleh Adrien-Marie Legendre (1805).

Penyelesaian dair least square estimation memenuhi persamaan berikut misal persamaan yang diketahui berbentuk persamaan 2.11

$$a_i = mb_i + e \quad (2.11)$$

Dari persamaan 2.11 diubah kebentuk persamaan matriks menjadi persamaan 2.12 agar dapat diselesaikan menggunakan pemrograman.

$$a_i = [b_i \ 1] \begin{bmatrix} m \\ e \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Pada persamaan 2.12,  $b_i$  adalah data ke  $i$  yang memiliki error , dengan  $i$  adalah banyaknya data. Sedangkan  $a_i$  adalah nilai sesungguhnya. Konstanta pada persamaan tersebut dilambangkan dengan  $m$ . Dan error dari data dilambangkan dengan  $e$  . persamaan tersebut harus sedikit diubah agar dapat diselesaikan dengan cara mengubah  $[b_i \ 1]$  menjadi  $T$ . Tujuan dari persamaan 2.12 adalah mendapatkan nilai  $m$  dan  $e$ . Agar bisa diselesaikan maka  $[b_i \ 1] = T$  ,harus dipindah ruaskan agar. Untuk memindahkan ruas perlu invers. Namun bentuk matrik dari  $T$  tidak persegi sehingga  $T$  harus dibuat persegi terlebih dahulu. Cara membuat persegi adalah dengan mengalikan  $T$  dengan  $T^t$  transposenya. Persamaan 2.12 berubah menjadi Persamaan 2.13

$$T^t a_i = T^t T \begin{bmatrix} m \\ e \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Persamaan 2.13 akan dapat diselesaikan ketika  $T^t T$  dikalikan dengan inversnya. Dengan meng kalikan dengan inversnya kita mendapatkan nilai dari  $m$  dan  $e$ . persamaan 2.14 – 2.15 adalah penyelesaian dengan least square. Pada persamaan 2.15 didapat persamaan dari variable  $m$  dan  $e$ . Banyaknya koefisien  $m$  dan  $e$  bergantung dari polynomial yang digunakan. Pada contoh persamaan 2.11 polynomial fitting yang digunakan adalah polynomial orde 2 atau persamaan linier sehingga menghasilkan dua konstanta. Apabila ada orde 3 maka akan ada 3 konstanta

$$a_i = [T^t T]^{-1} T^t T \begin{bmatrix} m \\ e \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

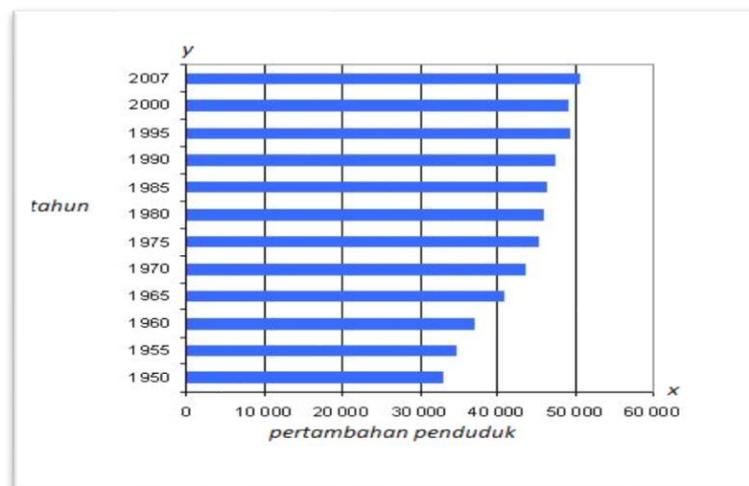
$$[T^t T]^{-1} T^t a_i = \begin{bmatrix} m \\ e \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

## 2.2.12 Metode Statistik

Metode statistika adalah bagaimana cara-cara mengumpulkan data atau fakta, mengolah, menyajikan, dan menganalisa, penarikan kesimpulan serta pembuatan keputusan yang cukup beralasan berdasarkan fakta dan penganalisaan yang dilakukan sesuai Gambar 2.11. Statistik terbagi dua menjadi dua

1) Statistik Deskriptif (deduktif) atau sederhana, yaitu statistik yang tingkat pengerjaannya mencakup cara-cara menghitung, menyusun atau mengatur, mengolah, menyajikan, dan menganalisa data agar dapat memberikan gambaran yang ringkas mengenai suatu keadaan.

2) Statistik Inferensial, yaitu yang menyediakan aturan-aturan atau cara yang dapat digunakan suatu alat dalam rangka menarik kesimpulan yang bersifat umum dari suatu data yang telah disusun dan diolah.



Gambar 2. 11 Contoh data statistik

### 2.2.12.1 Ciri-ciri statistik :

1. Statistik selalu bekerja dengan angka atau bilangan.
2. Statistik bersifat obyektif (menurut apa adanya).
3. Statistik bersifat universal (ruang lingkungannya luas).

### 2.2.12.2 Data statistik

Untuk dapat dikatakan data statistik angka tersebut haruslah menunjukkan dari suatu Penelitian yang bersifat agretatif serta mencerminkan suatu kegiatan dalam bidang atau lapangan tertentu. Pengertian agretatif ada dua, yaitu :

1) Penelitian boleh hanya satu individu saja tetapi pencatatannya harus dilakukan lebih dari satu kali.

2) Penelitian hanya dilakukan satu kali saja tetapi individunya lebih dari satu.

### **2.2.12.3      *Penggolongan Data Statistik***

Berdasarkan sifatnya; 1) Data kontinu, yaitu data yang angka-angkanya merupakan deretan angka yang sambung menyambung atau berkelanjutan, contoh : tinggi badan, berat badan. 2) Data diskrit, yaitu data statistik yang tidak mungkin berbentuk pecahan, contoh : jumlah anak

### **2.2.12.4      *Penggolongan data berdasarkan cara menyusunnya :***

1) Data nominal, yaitu data statistik yang cara menyusunnya atas golongan atau klasifikasi tertentu, contoh : Jumlah mahasiswa dari segi tingkat kelas dan jenis kelamin.

2) Data ordinal, yaitu data statistik yang cara menyusunnya didasarkan urutan kedudukan dan ranking, contoh : pandai, kurang pandai, dan tidak pandai.

3) Data interval, yaitu data statistik dimana terdapat jarak yang sama diantara hal-hal yang sedang diselidiki atau dipersoalkan, contoh : 10 orang mahasiswa mendapat nilai hasil tes dengan variasi antara 1 dan 10.

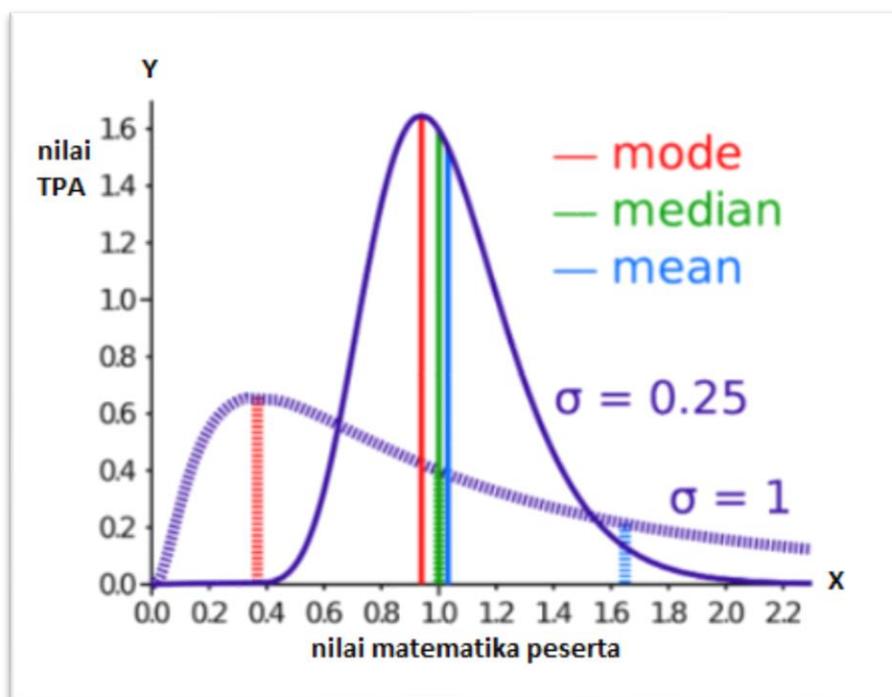
4) Data rasio, yaitu data yang tergolong ke dalam data kontinum tetapi mempunyai ciri tertentu, contoh : berat badan ibu adalah 50 kg, berat badan Ani 10 kg, dengan demikian berat badan ibu adalah 5 kali berat badan Ani.

Banyaknya data yang diperoleh dari sebuah penelitian, sering disajikan dalam data kelompok. Hal ini dikarenakan agar data yang disajikan lebih sederhana dan mudah untuk dibaca atau dianalisis. Salah satu analisis data yang penting dilakukan adalah mencari ukuran pemusatan data yang meliputi data mean (rata-rata), standard deviasi, nilai maksimum dan nilai minimum.

### **2.2.12.5      *Rata-Rata***

Dalam matematika, mean atau rata-rata memiliki beberapa definisi yang berbeda tergantung pada konteksnya. Dalam probabilitas dan statistik, mean populasi dan nilai yang diharapkan digunakan secara sinonim untuk merujuk pada satu ukuran dari tendensi sentral baik dari distribusi probabilitas atau dari variabel acak yang dicirikan oleh distribusi tersebut. Dalam kasus distribusi probabilitas diskrit dari variabel acak, mean sama dengan jumlah atas setiap kemungkinan nilai

yang ditimbang oleh probabilitas nilai itu; yaitu, dihitung dengan mengambil produk dari setiap kemungkinan nilai dari populasi dan probabilitasnya, dan kemudian menambahkan semua produk ini bersama-sama Rumus analog berlaku untuk kasus distribusi probabilitas berkelanjutan. Tidak setiap distribusi probabilitas memiliki arti yang jelas; lihat distribusi Cauchy sebagai contoh. Selain itu, untuk beberapa distribusi rata-rata tidak terbatas. Contoh *mean* ada pada gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Contoh *Mean* dari data

Untuk set data, rata-rata digunakan secara sinonim untuk merujuk ke nilai pusat dari serangkaian angka yang terpisah: khususnya, jumlah dari nilai dibagi dengan jumlah nilai. Mean dari himpunan bilangan  $x_1, x_2, \dots, x_n$  biasanya dilambangkan dengan " $\bar{x}$ " diucapkan. Jika kumpulan data didasarkan pada serangkaian pengamatan yang diperoleh dengan sampling dari populasi statistik, mean aritmatika disebut mean sampel

Untuk populasi yang terbatas, mean populasi suatu properti sama dengan mean aritmetik dari properti yang diberikan sambil mempertimbangkan setiap anggota populasi. Misalnya, rata-rata tinggi populasi sama dengan jumlah tinggi setiap individu dibagi dengan jumlah total individu. Mean sampel mungkin berbeda

dari mean populasi, terutama untuk sampel kecil. Hukum dalam jumlah besar menyatakan bahwa semakin besar ukuran sampel, semakin besar kemungkinan bahwa mean sampel akan mendekati mean populasi.

#### 2.2.12.6 *Standard Deviasi*

Standar deviasi adalah suatu nilai statistik yang digunakan untuk menentukan bagaimana sebaran data dalam sampel, dan juga seberapa dekat titik data individu ke mean - atau rata-rata - nilai sampel.

Sebuah standar deviasi terdiri dari kumpulan data sama dengan nol menunjukkan bahwa setiap nilai-nilai dalam himpunan tersebut adalah sama. Sebuah nilai deviasi yang lebih besar akan memberikan makna bahwa titik data individu jauh dari nilai rata-rata.

Dalam distribusi normal data, dikenal pula sebagai kurva lonceng, sebagian besar data dalam distribusi – sekitar 68% – akan jatuh dalam, kurang ataupun lebih satu standar deviasi dari mean ( $-\sigma$  atau  $+\sigma$ ). Sebagai contoh, apabila standar deviasi dari satu kumpulan data adalah 2, maka sebagian besar data pada kumpulan akan berjarak plus ataupun minus 2 dari rata-rata. Sekitar 95,5% dari data yang terdistribusi normal merupakan dalam dua standar deviasi dari mean, dan lebih dari 99% berada dalam jarak 3 standar deviasi dari rata-rata.

Untuk menghitung standar deviasi, ahli statistik pertama-tama menghitung nilai rata-rata dari semua titik data. Rata-rata ialah sama dengan jumlah dari semua nilai dalam kumpulan data dibagi dengan jumlah total titik data. Selanjutnya, penyimpangan setiap titik data dari rata-rata dihitung dengan mengurangkan nilai dari nilai rata-rata tersebut.

Deviasi setiap titik data akan dikuadratkan, dan kemudian dicari penyimpangan kuadrat individu rata-rata. Nilai yang dihasilkan dikenal juga sebagai varians. Deviasi standar adalah akar kuadrat dari varians tersebut.

Biasanya, ahli statistik menemukan deviasi standar sampel dari populasi dan menggunakan itu agar dapat mewakili seluruh populasi. Menemukan data yang tepat untuk populasi yang besar tidak praktis, dan juga sedikit mustahil, sehingga menggunakan sampel yang representatif sering digunakan sebagai metode terbaik.

Sebagai contoh, apabila seseorang ingin menemukan jumlah orang dewasa di negara bagian California yang beratnya antara 180 dan 200 pound, ia bisa

mengukur bobot sejumlah kecil pria dan menghitung rata-rata mereka, varians dan standar deviasi, dan nilai yang diperoleh akan sama dan berlaku untuk populasi secara keseluruhan.

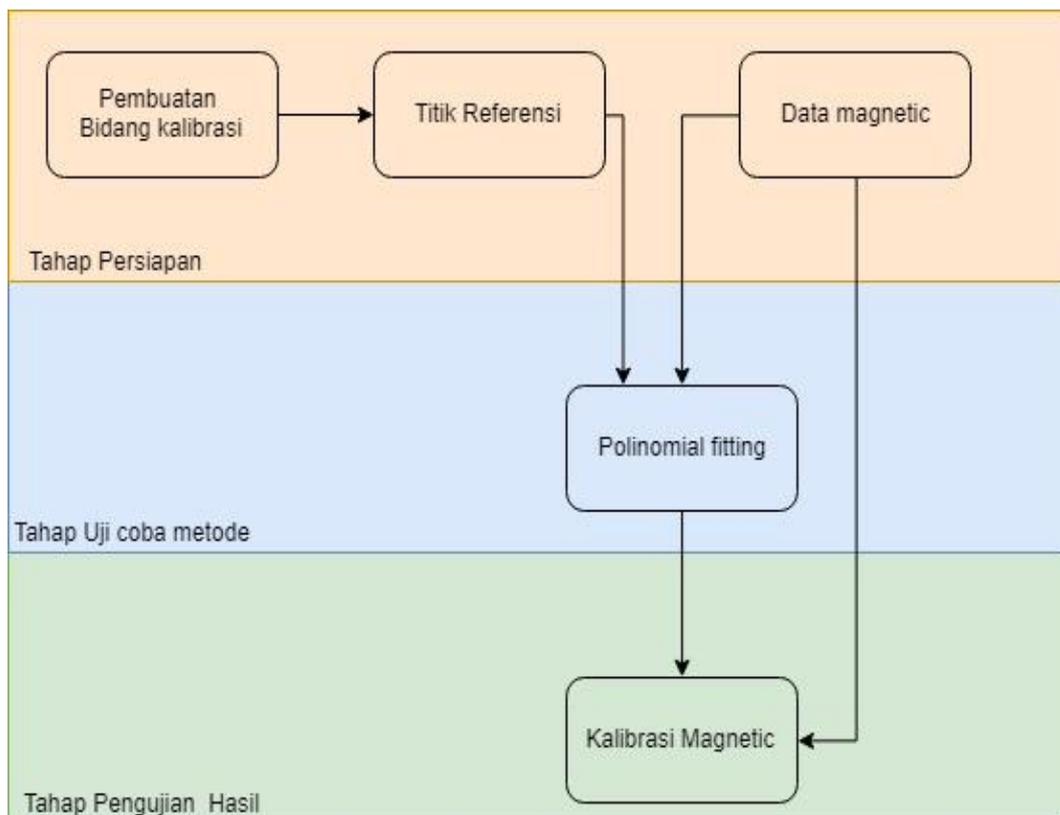
Selain menggunakan analisis statistik, standar deviasi juga bisa digunakan untuk menentukan jumlah risiko dan volatilitas terkait dengan investasi tertentu. Investor bisa menghitung standar deviasi tahunan pengembalian investasi dan menggunakan angka itu untuk menentukan seberapa stabil investasi tersebut. Suatu standar deviasi yang lebih besar akan berarti investasi yang lebih berisiko, dengan asumsi stabilitas itu merupakan hasil yang diinginkan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

### BAB 3

## METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai pengerjaan kalibrasi *magnetic tracker* menggunakan *polynomial fitting*. Langkah-langkah dalam penelitian ini juga dibahas agar penelitian ini fokus dengan rencana awal penelitian. Penelitian ini bertujuan untuk mengkalibrasi *magnetic tracker* agar *magnetic tracker* dapat diukur secara langsung. Pengukuran secara langsung akan dapat langsung diukur menggunakan penggaris atau alat ukur metric yang lain. Penelitian ini khusus untuk meneliti hasil dari *polynomial fitting* yang digunakan untuk memindahkan posisi pusat koordinat *magnetic tracker* ke ruang kalibrasi. Penelitian ini mengukur nilai error setelah dilakukan *polynomial fitting* pada *magnetic tracker* agar bisa diukur penggunaan metode *polynomial fitting*. Alur pengerjaan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1. Penelitian ini dibagi menjadi 3 tahap.



Gambar 3. 1 Metodologi Penelitian

Tahap pertama merupakan tahap persiapan. Untuk mengkalibrasi *magnetic tracker* ke ruang kalibrasi, perlu adanya ruang kalibrasi yang terukur ke segala sumbu. Oleh karena itu tahap persiapan berisi persiapan-persiapan yang dibutuhkan untuk pengambilan data. Tahap kedua adalah tahap uji coba metode. Data *magnetic tracker* dan titik referensi yang sudah diperoleh dari tahap persiapan diolah menggunakan *polynomial fitting* untuk dipetakan ke titik referensi. Dan tahap ketiga, tujuan dari *polynomial fitting* adalah mendapatkan koefisien persamaan *polynomial fitting* yang memenuhi nilai dari pemetaan ruang kalibrasi. Koefisien *polynomial* dimasukkan kembali ke persamaan *magnetic* untuk mendapatkan posisi *magnetic tracker* yang telah dikalibrasi.

### 3.1 Tahap persiapan

Tahap ini berisikan persiapan dalam pengambilan data meliputi : pembuatan ruang kalibrasi, pengambilan data titik referensi, dan pengambilan data *magnetic tracker*.

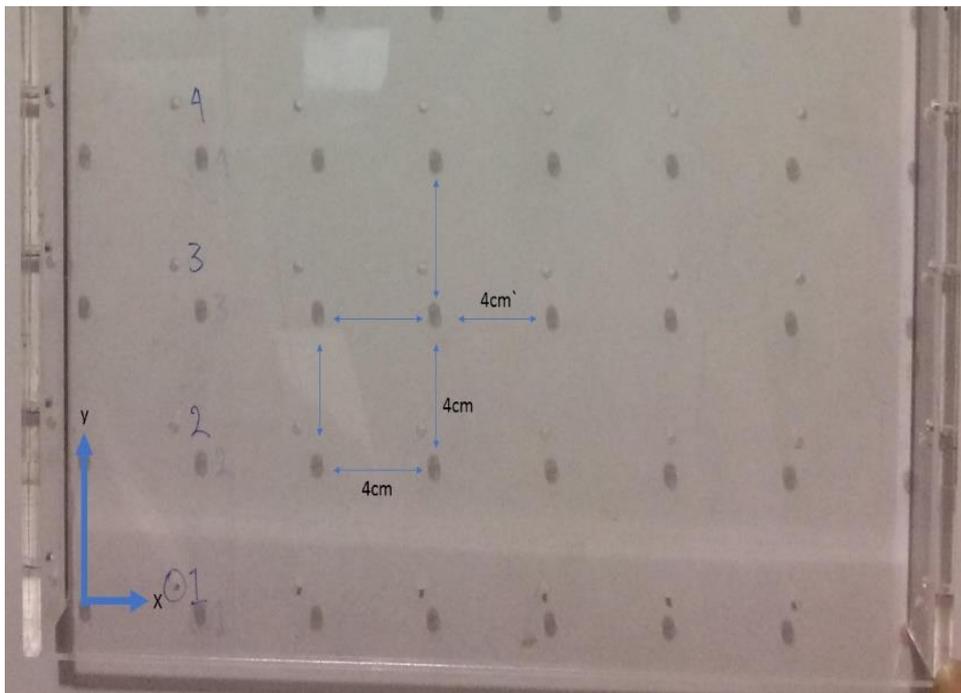
#### 3.1.1 Pembuatan ruang kalibrasi

Untuk mengkalibrasi *magnetic tracker* perlu adanya suatu ruang yang sudah terukur. Sehingga dibuatkan ruang kalibrasi *magnetic tracker*. Ruang kalibrasi ini berukuran x,y,z cm dengan ketebalan setiap bidang sekitar 5 mm. ruang kalibrasi terbuat dari bahan *acrylic*, yang ditujukan untuk mengurangi distorsi akibat induksi *electromagnetic* atau adanya pengaruh dari medan elektro *magnetic* yang lain. Untuk system besar dapat diamati pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 ruang kalibrasi dengan magnetic source

Ruang kalibrasi yang terpasang memiliki banyak lubang dengan jarak tiap lubangnya sejauh 4 cm ke arah sumbu x, y, dan z. Lubang tersebut akan digunakan sebagai penanda dan pengunci *magnetic tracker* ke ruang kalibrasi. Pada ruang kalibrasi, dibuat juga bidang kalibrasi yang digunakan untuk memastikan bahwa pergerakan x, y, dan z berada pada satu bidang yang sama. Bidang kalibrasi ini bertujuan untuk memindahkan posisi bidang pada arah sumbu z. sama seperti ruang kalibrasi, terbuat dari akrilik dan memiliki banyak lubang dengan jarak diantara lubang sejauh 4 cm. Gambar 3.3 menunjukkan bentuk dari bidang kalibrasi.

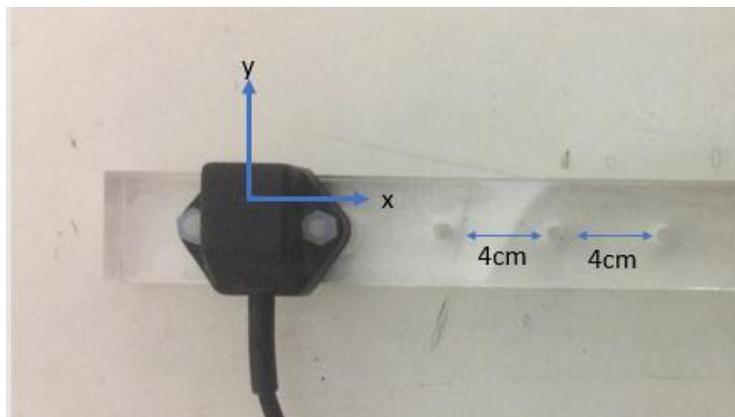


Gambar 3. 3 Bidang kalibrasi yang digunakan

Pada Gambar 3.3., lingkaran gelap ada lubang dengan jarak masing-masing 4 cm. jika diamati terdapat titik disamping bidang kalibrasi sebagai pengunci samping yang digunakan untuk pergerakan ke arah sumbu z. Sumbu z tegak lurus pada arah sumbu x dan y. Terdapat satu lagi tambahan yaitu penggaris kalibrasi. Penggaris kalibrasi digunakan untuk mengukur perpindahan dari satu titik ke titik yang lain sebesar satu gerakan. Satu gerakan dari penggaris ini berjarak 4 cm.

pembuatan penggaris ini menggunakan laser cutting agar mendapatkan presisi yang cukup tinggi. Sehingga pergerakan satu gerakannya tepat mencapai 4 cm

Gambar 3.4 merupakan bentuk dan posisi pemasangan penggaris kalibrasi dengan *sensor*. Penggaris ini digunakan untuk meletakkan *sensor magnetic tracker* agar dapat terkunci dengan bidang kalibrasi. Terbuat dari akrilik dengan lubang searah berjarak 4cm. memiliki tebal sekitar 10mm agar penggaris tidak mudah bengkok. Obyek yang berwarna hitam adalah posisi *magnetic tracker*. Dari lubang-lubang penggaris kalibras, dimasukkan kebidang kalibrasi. Kemudian setelah bidang kalibrasi dan penggaris kalibrasi terkunci, satu dengan yang lain. Maka bidang kalibrasi akan dilanjutkan untuk mengunci ke ruang kalibrasi.



Gambar 3. 4 Pemasangan *Sensor* ke Penggaris

### 3.1.2 Data *Magnetic tracker*

*Magnetic tracker* yang digunakan adalah polhemus g4 dengan jarak maksimal sekitar 2.5 meter. *Magnetic tracker* dipasang sebidang dengan ruang kalibrasi, namun jarak dengan bidang kalibrasi tidak boleh melebihi 2.5 meter dikarenakan kuat medan pada magnetic source dengan jarak lebih dari 2.5 meter sudah tidak ada. Oleh karena itu kami memposisikan *magnetic tracker* sejauh 30 cm dari bidang kalibrasi agar kuat medan dari magnetic tidak terlalu besar sehingga menghasilkan error pada *magnetic tracker*.

*Magnetic tracker* yang digunakan memiliki error pada bidang yang sama. Semakin jauh dari *magnetic tracker* maka error posisi yang didapat juga akan

semakin besar. Variabel  $x_m$ ,  $y_m$ , dan  $z_m$  adalah posisi yang terukur pada sumbu  $x, y, z$ . Pada bidang  $z$  yang sama, *magnetic tracker* memiliki posisi yang berbeda tergantung dari jarak antara magnetic source dengan magnetic *sensor*. Semakin jauh *sensor* maka efek dari distorsi akan semakin besar.

### 3.1.3 Data referensi

Setelah bidang referensi dibuat dan *magnetic tracker* sudah siap dipasang datanya maka semua perangkat digabung menjadi satu kesatuan system agar dapat diukur posisi pada masing-masing titik. Gambar 3.5 menjelaskan posisi *magnetic tracker* dan bidang kalibrasi. Pada Gambar 3.5  $x_m$  dan  $y_m$  adalah vector arah pada sumbu  $x$  dan  $y$  *magnetic tracker*. Untuk sumbu  $z$  tidak dapat ditampilkan dikarenakan arahnya tegak lurus kebawah *magnetic tracker*. Sedangkan untuk  $x_k$ ,  $y_k$ , dan  $z_k$  adalah arah vektor bidang pada sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . Untuk menjelaskan arah  $z_m$  maka arah vector  $z_m$  dengan  $z_k$  saling berlawanan.



Gambar 3. 5 posisi *magnetic tracker* dan ruang kalibrasi

Terdapat prosedur untuk pengambilan data referensi pada *magnetic tracker*. Prosedur pertama dalam menentukan titik referensi adalah menentukan pusat koordinat referensi. Bidang kalibrasi dan penggaris dijadikan satu dengan pengunci dan posisi pengunci pada penggaris tidak boleh berpindah. Salah satu titik pada bidang kalibrasi dijadikan pusat koordinat pada ruang kalibrasi. Setelah itu dibuat titik acuan pada pengunci. Posisi dari pengunci tidak boleh berpindah dikarenakan jarak pengunci adalah referensi posisi pada bidang kalibrasi. Posisi pengunci akan

relatif terhadap titik acuan pada ruang kalibrasi. Posisi perubahan pengunci akan relative tetap dikarenakan menyesuaikan posisi lubang yang ada.

Lubang yang terpasang pada bidang kalibrasi dan ruang kalibrasi berjarak 4 centimeter. Perpindahan posisi menuju ke zk positif akan relative konstan. Agar lebih mudah, dapat diamati pada Gambar 3.6. Jika diamati pada Gambar 3.6 terdapat angka berwarna merah ke arah horizontal dan angka berwarna biru ke arah vertical. Angka tersebut merepresentasikan posisi pada sumbu vertika dan horizontal. Dan jika diamati seksama terdapat lingkaran biru, yaitu titik yang digunakan sebagai posisi referensi terhadap pusat ruang kalibrasi.



Gambar 3. 6 bidang kalibrasi

Titik referensi dengan *magnetic tracker* berada pada bidang yang sama oleh karena itu diambil data dari titik tersebut sebanyak lima kali pada semua titik. Total titik ada 839 sehingga total data yang diambil terdapat 4195 data titik referensi dan data magnetic.

### 3.2 Tahap Uji coba metode

Pada tahap ini semua data telah diperoleh sehingga data tersebut tinggal diolah menggunakan *polynomial fitting*. Tujuan dari *polynomial fitting* adalah

mendapatkan persamaan *polynomial fitting* untuk mengubah posisi yang relative terhadap magnetic source berpindah ke ruang kalibrasi. Persamaan *polynomial fitting* memenuhi Persamaan 3.1 , 3.2 dan, 3.3

$$xk_1' = xm + \sum_{j=1}^n cx_j xm_1^{pa'} ym_1^{pa''} zm_1^{pa'''} \quad (2.8)$$

$$yk_1' = ym_1 + \sum_{j=1}^n cy_j xm_1^{pa'} ym_1^{pa''} zm_1^{pa'''} \quad (2.9)$$

$$zk_1' = zm_1 + \sum_{j=1}^n cz_j xm_1^{pa'} ym_1^{pa''} zm_1^{pa'''} \quad (2.10)$$

Persamaan 3.1 , 3.2 dan 3.3 merupakan persamaan *polynomial fitting* multi axis. Dimana persamaan tersebut memetakan suatu titik bergantung dari posisi dari titik tersebut. Pada persamaan 3.1 ,3.2 dan 3.3 secara berurutan  $xm$  ,  $ym$  dan  $zm$  adalah posisi yang terukur dar *magnetic tracker* sedangkan  $xk_2$  ,  $yk_2$  dan  $zk_2$  adalah posisi yang terukur dari titik referensi. Dari persamaan 3.1-3.3 titik referensi adalah titik *magnetic tracker* ditambah dengan distorsi. Distorsi merupakan persamaan *polynomial fitting* dengan parameter posisi magnetic,  $n$  sebagai orde dari *polynomial fitting*  $c$  adalah koefisien *polynomial fitting* dan  $p_j$  adalah pangkat dari orde tertinggi. Persamaan 3.1 ,3.2 dan 3.3 disederhanakan menjadi persamaan dengan bentuk seperti persamaan 3.4 agar dapat diselesaikan.

$$\delta x = at \quad (3.4)$$

Persamaan 3.4 berisikan  $\delta x$  yaitu selisih nilai awal dan nilai yang dituju. Dengan  $a$  adalah koefisien dari parameter polinomial. Sedangkan  $t$  adalah parameter. Jika Persamaan 3.1 hingga Persamaan 3.3 diubah ke persamaan 3.4 maka akan menjadi Persamaan 3.5

$$\begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \vdots \\ \delta x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m,1} & \dots & a_{m,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_m \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Dimana  $\delta x$  adalah selisih antar  $xm$  dan  $xk$  dan  $a_{m,n}$  adalah  $xm_1^{pn'} ym_1^{pn''} zm_1^{pn'''}$  dan  $t_m$  adalah koefisien magnetic yang dicari. Dari

persamaan 3.5 dimasukkan semua data referensi dibandingkan dengan *magnetic tracker*. Persamaan 3.5 berlaku untuk semua sumbu. Setelah data dimasukkan maka operasi *polynomial fitting* dapat dilakukan. Tujuan dari *polynomial fitting* adalah mendapatkan nilai koefisien *polynomial fitting*. Jika dalam persamaan, yang dicari adalah nilai  $t_1$  hingga  $t_m$ . Banyaknya koefisien bergantung dengan nilai orde yang digunakan semakin besar nilai orde maka koefisien dari *polynomial fitting* semakin banyak.

Untuk menyelesaikan Persamaan 3.5 harus disederhanakan terlebih dahulu agar persamaan tersebut lebih mudah. Persamaan 3.5 dimisalkan menjadi persamaan 3.6. Dari Persamaan 3.1 hingga Persamaan 3.3 adalah penyelesaian secara bertahap untuk mendapatkan koefisien.

$$\delta x = at \quad (3.6)$$

$$a^t \delta x = a^t at \quad (3.7)$$

$$(a^t a)^{-1} a^t \delta x = (a^t a)^{-1} a^t at \quad (3.8)$$

$$(a^t a)^{-1} a^t \delta x = t \quad (3.9)$$

Pada Persamaan 3.6 nilai matrix  $a$  dikalikan dengan matriks  $a^t$  menjadi Persamaan 3.7 agar mendapatkan matrik persegi. Dengan adanya matriks persegi maka dapat dibuat invers dari matrik tersebut sesuai persamaan 3.8 . Dari persamaan 3.8 , apabila matriks dikalikan dengan invers matriks tersebut maka akan menghasilkan nilai satu sesuai persamaan 3.9 . Sehingga meninggalkan nilai dari matrix koefisien  $t$  saja. Koefisien dari  $t$  adalah matriks yang berisikan koefisien dari *polynomial fitting*, sedangkan  $\delta x$  adalah selisih error. Dan  $a$  adalah parameter dari *polynomial fitting*.

### 3.3 Tahap Pengujian

Pada tahap ini koefisien *polynomial fitting* telah didapatkan. Koefisien *polynomial fitting* dikembalikan ke Persamaan 3.1 hingga 3.3 untuk mendapatkan data *magnetic tracker* yang telah dikalibrasi. Pada tahap ini kami mengujikan beberapa orde *polynomial fitting* yang tepat agar mendapatkan nilai error terkecil. Namun, semakin tinggi orde yang digunakan maka koefisien *polynomial fitting* akan semakin besar. Semakin tinggi orde dari *polynomial fitting* maka nilai dari *magnetic*

akan sama persis dengan nilai yang didapat oleh ruang kalibrasi. Namun semakin besar nilai orde maka belum tentu koefisien yang didapat dari *polynomial fitting* akan membuat *magnetic tracker* semakin mirip dengan ruang kalibrasi.

Setiap orde dimasukkan Persamaan 3.1 , 3.2, dan 3.3 untuk mendapatkan posisi x , y ,dan z dari *magnetic tracker* yang telah terkalibrasi. Hasil dari *magnetic tracker* kemudian dibandingkan dengan posisi ruang kalibrasi. Selisih dari *magnetic tracker* setelah kalibrasi dengan ruang kalibrasi, merupakan error yang terjadi di setiap titik. Error tiap titik dibuat dalam bentuk rata-rata yang memenuhi persamaan 3.10

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n e_i \right) \quad (3.10)$$

Dimana  $\bar{e}$  adalah error total dari titik kalibrasi dengan *magnetic tracker* setelah kalibrasi. Sedangkan n adalah jumlah data  $e_i$  adalah error ke i sebanyak jumlah data. Error yang didapat akan diamati setiap sumbu x,y, dan z kemudian dari error tiap-tiap sumbu dijadikan satu error total, yang berisikan semua error dari titik-titik yang telah dibuat. Selain rata-rata, Standart deviasi juga dapat dilakukan untuk mengukur error dari *magnetic tracker*. Persamaan standard deviasi memenuhi persamaan 3.11.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n - 1}} \quad (3.11)$$

Parameter s adalah standard deviasi pada error *magnetic tracker* yang telah terkalibrasi. Sedangkan  $(e_i - \bar{e})$  adalah selisih error dengan rata-rata error *magnetic tracker* yang sudah dikalibrasi. Dan n adalah jumlah data yang digunakan pada penelitian ini. Dari standard deviasi didapatkan data mengenai persebaran data dari nilai tengahnya.

Dari nilai tengah dan standard deviasi masih kurang untuk mengamati data. Oleh karena itu digunakan pendekatan statistik yang lain untuk mendapatkan

pengamatan yang lebih dalam. Mencari nilai tertinggi dan terendah juga merupakan bagian dari analisa. Sehingga dari nilai tertinggi bisa dipastikan data terjauh akan menyimpang sejauh apa. Selain itu juga dapat diamati data minimum. Untuk mengestimasi posisi nilai terendah. Tujuan dari pengujian statistic ini untuk mendapatkan gambaran dari seluruh data hasil *magnetic tracker*. Pengolahan statistik mencakup analisa nilai rata-rata error, standard deviasi, nilai tertinggi dan terendah data. Masing- masing pengujian ditujukan untuk mengestimasi nilai error yang terjadi setelah dilakukan *polynomial fitting*.

Penghitungan rata-rata error digunakan untuk melihat error yang terjadi dari seluruh data yang sudah di mapping. Dari rata-rata error, bisa dianalisa kondisi setelah metode *polynomial fitting* ini dilakukan. Apabila melihat titik secara satu persatu maka ada sekita 4195 data yang harus diamati sehingga seluruh error dijadikan nilai rata-rata tiap sumbu dengan orde yang berbeda

Selain nilai tengah digunakan juga standard deviasi untuk mengukur persebaran data. Standard deviasi digunakan untuk mengukur persebaran data dari titik tengah. Sehingga dari persebaran dapat diketahui jarak error dari nilai tengah. Dengan melihat persebaran error, maka tidak perlu melihat satu persatu data. Dari nilai tengah dan standard deviasi sudah cukup merepresentasikan data.

Kemudian data diamati melalui nilai terkecil dan terbesarnya untuk diamati penyimpangan terjauh dari hasil *polynomial fitting*. Dari penyimpangan terjauh, dapat dianalisa kemungkinan data error masih dalam batas toleransi. Nilai maksimal dan nila minimal merupakan data error dengan nilai terjauh dari nilai yang seharusnya. Data minimum dan maksimum ditampilkan dalam bentuk tabel dengan berbagai macam orde untuk melihat orde mana yang memiliki jangkauan error terpendek

Selain itu diamati jumlah data yang memiliki error kurang dari nilai rata-rata data a. Agar error sangat kecil maka perlu diamati jumlah data yang memiliki error dibawah nilai rata-rata daya agar dapat dilihat persentase data yang memiliki error yang sangat kecil. Dipilih nilai rata-rata error dikarenakan nilai rata-rata error agar persentase persebaran data dapat diamati lebih jauh

Dari pengujian dengan menggunakan metode statistik. Data sebanyak 4195 dapat diamati dengan lebih sedikit. Dari metode statistik ini, sudah dapat

digunakan untuk mewakili data dengan jumlah ribuan. Setiap data yang diolah menggunakan statistik akan merepresentasikan kondisi dari data yang diolah. Sehingga data statistic dapat digunakan untuk menganalisa kondisi dari metode *polynomial fitting*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan dibahas mengenai hasil dari polinomial fitting dan pembahasan mengenai hasil polinomial fitting. Beberapa grafik akan menjelaskan hasil dan perbandingan magnetic kalibrasi dengan ruang kalibrasi. Beberapa bagian akan dibahas melalui sub bab secara terperinci

#### 4.1 Koefisien dari Polinomial Fitting

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai koefisien hasil dari *polynomial fitting*. Beberapa orde diujicobakan untuk melihat perbandingan nilai koefisien setiap orde polynomial. Dikarenakan hasil dari polynomial cukup banyak, kami menampilkan 5 data koefisien dari hasil polynomial fitting. Tabel 4.1 merupakan hasil dari *polynomial fitting* menggunakan orde 4. Untuk orde 4

Tabel 4. 1 koefisien *polynomial fitting* orde 4

$cx$	$cy$	$cz$
-157.70	-726.00	588.56
-13.05	-73.46	65.13
-0.53	-3.78	4.04
-0.01	-0.09	0.12
0.00	0.00	0.00

total koefisien yang dihasilkan terdapat 125 koefisien yang mengisi parameter. Pada tabel 4.1 ditampilkan enam data awal yang digunakan untuk pembandingan dengan tabel yang lain. Tabel 4.2 merupakan hasil dari *polynomial fitting* menggunakan orde 5.

Tabel 4. 2 koefisien *polynomial fitting* orde 5

$cx$	$cy$	$cz$
-126.89	80.42	-152.39
-21.22	-84.77	0.36
-1.79	-7.078	-0.09
-0.06	-0.19	-0.04
0.00	-0.00	0.00

Untuk orde 5 total koefisien yang dihasilkan terdapat 216 koefisien yang mengisi parameter. Pada tabel 4.2 ditampilkan enam data awal yang digunakan untuk pembandingan dengan tabel yang lain. Tabel 4.3 merupakan hasil dari *polynomial fitting* menggunakan orde 6

Tabel 4. 3 Koefisien *Polynomial fitting* Orde 6

$Cx$	$cy$	$cz$
-1639.00	1939.00	-280.00
-597.80	881.93	-229.40
-40.50	52.89	-1.99
-0.09	-0.67	1.45
0.03	-0.07	0.05

. Untuk orde 6 total koefisien yang dihasilkan terdapat 343 koefisien yang mengisi parameter. Pada tabel 4.3 ditampilkan enam data awal yang digunakan untuk pembandingan dengan tabel yang lain.

Pada tabel 4.1-4.3,  $cx$ ,  $cy$ , dan  $cz$  adalah koefisien polinomial fitting pada tiap sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . Nilai  $cx$  didapat dari persamaan 3.1, nilai  $cy$  didapat dari persamaan 3.2, dan nilai  $cz$  didapat dari persamaan 3.3. Dari Tabel 4.3, lima data yang ditampilkan merupakan lima koefisien awal dari *polynomial fitting*. Jika diamati lagi setiap data awal memiliki nilai  $cx$ ,  $cy$ , dan  $cz$  yang berbeda. Dikarenakan perbedaan orde yang terjadi. Semakin besar orde maka nilai awal koefisien akan semakin besar. Nilai yang semakin besar dikarenakan orde dalam *polynomial fitting* memiliki arti pangkat yang besar pada persamaan *polynomial*.

Tabel yang ditampilkan hanya tiga tabel dengan pemilihan orde 4 hingga 6 dikarenakan, orde 4 hingga 6 merupakan orde yang paling tinggi dari penelitian ini. sehingga dengan adanya orde yang tinggi akan berefek ke hasil yang diterapkan. Untuk order 1 hingga 3 tidak ditampilkan dikarenakan hasil dari *polynomial fitting* memiliki error yang cukup tinggi. Akan dibahas pada sub bab 4.2

#### 4.2 Pengukuran Error dan Standard deviasi

Dari sub bab 4.1 telah didapat koefisien untuk *polynomial fitting*. Dengan adanya koefisien *polynomial fitting* maka persamaan *polynomial fitting* dapat

mengeluarkan nilai kalibrasi dari *magnetic tracker*. Hasil dari pemetaan akan mengubah nilai *magnetic tracker* dengan titik referensi. Tabel 4.4 adalah perubahan dari *magnetic tracker* sebelum dan sesudah kalibrasi.

Tabel 4. 4 Data Sebelum dan Sesudah *Magnetic tracker*

$xm$	$ym$	$zm$	$xm'$	$ym'$	$zm'$
14.57	35.69	-3.98	3.97	4.04	3.92
18.57	35.74	-3.96	8.01	3.98	4.05
22.58	35.79	-3.91	12.00	3.95	4.01
26.62	35.86	-3.86	15.99	4.01	3.98
30.67	35.90	-3.84	20.01	4.06	4.06
34.73	35.84	-3.69	23.98	3.96	3.91

Dimana  $xm$ ,  $ym$ , dan  $zm$  adalah posisi *magnetic tracker* sebelum kalibrasi pada sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . sedangkan untuk  $xm'$ ,  $ym'$ , dan  $zm'$  adalah posisi *magnetic tracker* sesudah kalibrasi. perubahan nilai dari sebelum dan sesudah pemetaan cukup jauh. Hasil dari perpindahan nilai pusat pengukuran tidak merubah jarak dari satu titik ketitik yang lain. Dari tabel 4.4 perpindahan titik tetap 4 cm walaupun titik asal sudah dipindahkan ketitik yang baru.

Dari nilai koefisien pada tabel 4.1 hingga 4.3 dikembalikan ke persamaan 3.1 hingga persamaan 3.3 untuk mendapatkan posisi dari magnet terkalibrasi. Pada tabel 4.5 – 4.7 akan ditampilkan contoh hasil *polynomial fitting* menggunakan orde 4-6. Pada Tabel 4.5 adalah hasil dari *polynomial fitting* orde 4 dengan  $xm'$ ,  $ym'$ , dan  $zm'$  adalah posisi *magnetic tracker* pada sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$  setelah kalibrasi.

Tabel 4. 5 hasil *polynomial fitting* orde 4

$xk$	$yk$	$zk$	$xm'$	$ym'$	$zm'$
4.00	4.00	4.00	3.99	3.91	4.06
8.00	4.00	4.00	8.03	4.02	3.94
12.00	4.00	4.00	12.03	4.05	3.90
48.00	48.00	48.00	47.99	47.95	48.01
52.00	48.00	48.00	52.01	47.88	47.99
56.00	48.00	48.00	55.96	48.07	47.96

pada tabel 4.5 data yang ditampilkan adalah tiga data awal adalah data terdekat dengan *magnetic tracker* sedangkan tiga data terakhir adalah data terjauh

dari *magnetic tracker*. dari tabel diamati bahwa setiap data hampir mendekati nilai referensi yang digunakan. Pada Tabel 4.6 adalah hasil dari *polynomial fitting* orde 5 dengan  $xm'$ ,  $ym'$ , dan  $zm'$  adalah posisi *magnetic tracker* pada sumbu x,y, dan z setelah kalibrasi.

Tabel 4. 6 hasil *polynomial fitting* orde 5

$xk$	$Yk$	$zk$	$xm'$	$ym'$	$zm'$
4.00	4.00	4.00	4.05	3.99	4.01
8.00	4.00	4.00	8.03	3.99	4.02
12.00	4.00	4.00	12.01	4.00	4.00
48.00	40.00	48.00	47.99	40.01	48
52.00	40.00	48.00	52.00	40	48.06
56.00	40.00	48.00	56.00	40.	48.02

pada Tabel 4.6 data yang ditampilkan adalah tiga data awal adalah data terdekat dengan *magnetic tracker* sedangkan tiga data terakhir adalah data terjauh dari *magnetic tracker*. dari tabel diamati bahwa setiap data hampir mendekati nilai referensi yang digunakan. Beberapa data mendekati nilai yang sama dengan nilai referensi. Pada tabel 4.7 adalah hasil dari *polynomial fitting* orde 6 dengan  $xm'$ ,  $ym'$ , dan  $zm'$  adalah posisi *magnetic tracker* pada sumbu x,y, dan z setelah kalibrasi.

Tabel 4. 7 Hasil *Polynomial fitting* Orde 6

$xk$	$yk$	$zk$	$xm'$	$ym'$	$zm'$
4.00	4.00	4.00	3.81	4.16	4.02
8.00	4.00	4.00	8.21	3.69	3.96
12.00	4.00	4.00	12.00	3.94	3.97
48.00	48.00	48.00	48.02	47.92	48.07
52.00	48.00	48.00	52.04	47.99	47.95
56.00	48.00	48.00	55.93	48.09	47.97

pada tabel 4.7 data yang ditampilkan adalah tiga data awal adalah data terdekat dengan *magnetic tracker* sedangkan tiga data terakhir adalah data terjauh dari *magnetic tracker*. dari tabel diamati bahwa setiap data hampir mendekati nilai referensi yang digunakan.

Penjelasan untuk Tabel 4.5-4.7 adalah :  $x_k$ ,  $y_k$ , dan  $z_k$  adalah posisi titik referensi yang terdapat pada ruang kalibrasi. Sedangkan  $x_m'$ ,  $y_m'$ , dan  $z_m'$  adalah posisi *magnetic tracker* setelah dilakukan kalibrasi. Dari tabel 4.5-4.7 , tiga data awal adalah posisi titik dengan nilai terdekat dengan *magnetic tracker*. Sedangkan tiga data akhir merupakan posisi terjauh dari *magnetic tracker*. Jika diamati pada tabel 4.5-4.7, semua data hasil kalibrasi *magnetic tracker* sudah mendekati titik referensi. Dari ketiga tabel yang memiliki nilai terendah adalah tabel dengan orde 5. Dari data didapat adanya titik yang bernilai sama persis dengan titik referensi.

Jika dibandingkan dengan yang lain, titik-titik yang hasil dari *polynomial fitting* yang paling mendekati titik di nilai referensi. Oleh karena itu semua titik *magnetic tracke* yang sudah dikalibrasi dibandingkan dengan titik referensi untuk melihat error yang terjadi disetiap titik. Titik-titik error kemudian dijumlahkan pada setiap sumbu kemudian di ambil rata-ratanya untuk melihat total rata-rata error tiap sumbu. Tabel 4.8 menunjukkan error tiap sumbu dan error total dengan berbagai orde.

Tabel 4. 8 error tiap sumbu dengan rata-rata error total satuan milimeter

Orde	Error magnetic pada sumbu x	Error magnetic pada sumbu y	Error magnetic pada sumbu z	Rata-rata total
1	0.7	0.8	3.2	3.4
2	0.3	0.5	0.7	0.9
3	0.2	0.3	0.4	0.6
4	0.2	0.3	0.3	0.5
5	0.1	0.3	0.3	0.4
6	0.5	0.9	0.5	1.2

Dengan adanya tabel 4.8, dapat dilihat hasil dari *polynomial fitting* setiap orde dan setiap sumbunya. Data pada tabel 4.8 memiliki satuan centimeter. Polynomial dengan orde 5 adalah polynomial dengan nilai error terkecil yaitu 0.47 milimeter. Atau sekitar 0.4 milimeter. Angka ini cukup kecil jika dibandingkan dengan nilai awal dari *magnetic tracker* yang memiliki error hingga lebih dari 4 cm pada tabel 4.9. Data setelah dilakukan kalibrasi lebih linier jika dibandingkan dengan data sebelum kalibrasi. Jika diamati pada bidang yang sama. Nilai pada *magnetic tracker* sebelum kalibrasi akan semakin besar. Sedangkan jika sudah dilakukan kalibrasi nilai yang didapat akan relatif stabil. *Magnetic tracker* akan error dengan adanya jarak yang semakin jauh dari *magnetic tracker* Pada tabel 4.9 menunjukkan hasil posisi *magnetic tracker* pada bidang yang sama, sebelum dan sesudah kalibrasi.

Tabel 4. 9 tingkat linier diamat di sumbu z satuan centimeter

xk	yk	zk	xm	ym	zm	xm'	ym'	zm'
4	4	4	14.57	35.69	-3.98	3.97	4.04	3.92
8	4	4	18.57	35.74	-3.96	8.01	3.98	4.05
12	4	4	22.58	35.79	-3.91	12.00	3.95	4.01
44	48	4	54.25	80.39	2.58	44.00	48.00	4.00
48	48	4	58.20	80.37	3.35	47.99	47.97	3.97
52	48	4	62.18	80.39	4.18	51.99	48.01	4.01

Diamati pada tabel 4.9, tiga data awal merupakan posisi terdekat dengan *magnetic tracker* dan tiga data terakhir adalah posisi terjauh *magnetic tracker* pada bidang yang sama bahwa seluruh data berada pada bidang yang sama yaitu pada bidang dengan  $z = 4$  relatif terhadap titik referensi. Jika diamati pada bagian z1 yang merupakan posisi pada sumbu z *magnetic tracker*. Terlihat bahwa z1 tidak konstan terhadap bidang  $z = 4$ . Semakin jauh nilainya semakin positif nilai posisi z pada *magnetic tracker* padahal berada pada bidang yang sama. Sehingga *magnetic tracker* ini tidak linier pada bidang yang sama. Namun *magnetic tracker* setelah kalibrasi memiliki nilai yang relative konstan terhadap  $z = 4$ . Walaupun terdapat, error, namun posisi dari *magnetic tracker* relative konstan. *Magnetic tracker* setelah kalibrasi dapat dikatakan linier dengan bidang yang sama.

Dengan sebagian data yang ditampilkan, belum dapat merepresentasikan error yang terjadi pada bidang. Oleh karena itu harus diamati data persebaran error yang terjadi. Untuk mengukur persebaran data digunakan standard deviasi untuk mengukur simpangan error dari total error yang terjadi. Tabel 4.10 menunjukkan simpangan error data. simpangan error dilihat dari sumbu x, y, dan z kemudian diambil rata-rata dari ketiga sumbu. Apabila nilai standar deviasi tinggi maka persebaran error cukup jauh dari nilai tengah.

Tabel 4. 10 simpangan error dan rata-rata simpangan satuan milimeter

<b>Orde</b>	<b>Simpangan error pada sumbu x</b>	<b>Simpangan error pada sumbu y</b>	<b>Simpangan error pada sumbu z</b>	<b>rata-rata Simpangan error</b>
1	0.5	0.7	2.3	1.2
2	0.3	0.4	0.5	0.4
3	0.2	0.3	0.4	0.3
4	0.2	0.3	0.3	0.3
5	0.2	0.3	0.3	0.2
6	0.4	0.8	0.4	0.5

Dari tabel 4.10 yang berisi simpangan baku, Simpangan terukur dalam satuan cm. Pada tabel 4.10 disajikan beberapa orde untuk memastikan orde terbaik pada *polynomial fitting*. Jika diamati pada tabel 4.10 , *polynomial fitting* dengan simpangan terkecil berada pada orde 5 dengan simpangan pada sumbu x,y, dan z secara berturut-turut adalah 0.2mm,0.3mm,dan 0.32mm. nilai simpangan yang terukur adalah simpangan dari nilai rata-rata

Jika dipahami lebih mendalam maka simpangan baku merupakan simpangan yang terjadi pada nilai tengah. Dapat dikatakan bahwa error total yang terjadi berada dikisaran nilai tengah dan simpangan baku. Dengan adanya tabel 4.10 diambil data dengan orde 5 maka persebaran data error berada dikisaran  $0.47 \text{ mm} \pm 0.27 \text{ mm}$ . Dengan adanya simpangan baku maka persebaran error berada diantara 0.19 mm hingga 0.74 mm.

Agar lebih yakin dengan error yang terjadi. Dibuatkan tabel mengenai error tertinggi dan terendah tiap orde agar dapat diamati jangkauan terjauh error. Dengan adanya data terjauh dari nilai referensi diharapkan dapat menjadi Analisa dalam penelitian ini. Nilai terjauh adalah nilai batas error yang terbesar sedangkan nilai

error minimum adalah nilai dengan error terkecil. Berikut tabel 4.11 berisikan error terkecil tiap sumbu pada tiap orde

Tabel 4. 11 nilai minimum tiap – tiap sumbu satuan milimeter

Orde	Min error magnetic pada sumbu x	Min error magnetic pada sumbu y	Min error magnetic pada sumbu z
1	9.29E-05	2.27E-04	2.19E-04
2	2.98E-05	9.12E-05	4.58E-05
3	8.95E-06	4.18E-05	6.40E-05
4	3.15E-05	5.80E-05	5.28E-05
5	3.88E-05	1.79E-05	6.54E-05
6	2.51E-05	6.51E-05	3.40E-05

Tabel 4.11 berisikan data error untuk posisi pada sumbu x,y, dan z dengan nilai terkecil. Dengan adanya Tabel 4.11, dapat diamati bahwa orde dengan error terkecil berada pada orde 5. Selain nilai minimum ditampilkan data tabel dengan nilai tertinggi pada tiap- tiap orde. Berikut tabel 4.12 nilai maksimum tiap sumbu

Tabel 4. 12 nilai maximum tiap – tiap sumbu satuan milimeter

Orde	Max error magnetic pada sumbu x	Max error magnetic pada sumbu y	Max error magnetic pada sumbu z
1	0.38	0.52	1.35
2	0.22	0.29	0.30
3	0.18	0.21	0.33
4	0.15	0.19	0.25
5	0.12	0.18	0.22
6	0.29	0.53	0.29

Dari tabel 4.12 merupakan maksimum error pada tiap-tiap sumbu. Dapat diamati bahwa maksimum error terendah berada pada orde 5. Nilai error maksimal tidak melebihi 1cm. pada tabel satuan metric yang digunakan adalah cm. sehingga data hasil kalibrasi tidak melenceng lebih dari 2.27 milimeter.

Agar keseluruhan data dapat terlihat jelas, dibuatkan tabel yang berisi persentase dari hasil *polynomial fitting*. Persentase ini disajikan dalam bentuk

rentang error dari 0.1 hingga 0.3 milimeter dengan berbagai orde. Berikut ditampilkan data dari Tabel 4.13 mengenai persentase error.

Tabel 4. 13 persentase error pada tiap jarak

Orde	Error < 0.1mm	0.1mm< Error < 0.2mm	0.2mm< Error < 0.3mm	Error > 0.3mm
1	0.0%	0.0%	3.0%	96.0%
2	2.0%	9.2%	14.0%	74.7%
3	4.4%	24.2%	25.0%	46.6%
4	5.6%	28.1%	24.0%	41.8%
5	15.4%	30.5%	26.0%	28.2%
6	2.7%	8.5%	3.0%	76.0%

Tabel 4.13 adalah persentase error di tiap wilayah error. Wilayah error dibagi menjadi tiga bagian untuk melihat keseluruhan data berada pada wilayah berapa. Wilayah pertama adalah error yang memiliki nilai kurang dari 0.1 milimeter. Nilai 0.1 milimeter adalah nilai dengan error terkecil. Dari data didapat bahwa persentase data dengan nilai error 0.1 milimeter terbanyak di orde 5 dengan kisaran 15% data. jadi ada 15% data yang memiliki error kurang dari 0.1 milimeter. Sedangkan 30% data berada dikisaran error 0.1 hingga 0.2 milimeter. Jarak nilai dari 0.1 hingga 0.2 milimeter masih terbilang memiliki error yang cukup kecil dikarenakan dengan nilai error tersebut, posisi tidak akan jauh bergeser. Kemudian dilanjutkan dengan error berkisar antara 0.2 milimeter hingga error 0.3 milimeter. Dari data yang diperoleh ada sekitar 26% data berada dikisaran 0.2 milimeter hingga 0.3 milimeter. Nilai tersebut masih wajar sebagai error dikarenakan nilai tersebut sangat lah kecil. Untuk data bernilai diatas 0.3 milimeter, masih dalam nilai toleransi.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

Akurasi posisi dari *magnetic tracker* sangatlah penting dalam melakukan penjejukan. Dimana posisi obyek dapat berubah diakibatkan error yang terjadi. *Magnetic tracker* rentan terhadap error sehingga jika dilakukan rekonstruksi menggunakan magnetic akan terjadi banyak error dikarenakan distorsi medan magnet. Semakin jauh magnetic source dengan magnetic *sensor* maka distorsi yang terjadi akan semakin besar.

Dari penelitian yang dilakukan, metode *Polynomial fitting*, dapat digunakan untuk memetakan titik-titik dari magnetik tracker dipetakan sesuai dengan bidang kalibrasi. Dengan dipetakan magnetik ke bidang kalibrasi, pusat pengukuran berpindah dari *magnetic tracker*, ke ruang kalibrasi. Dengan dipindahkannya titik origin magnetic ke ruang kalibrasi, Jarak sesungguhnya dari *magnetic tracker* dapat diukur. Pemetaan data yang didapat dari *magnetic tracker* ke ruang kalibrasi mendekati nilai yang sama. Selain itu hasil dari *magnetic tracker* terkalibrasi menggunakan *polynomial fitting* lebih linier jika dibandingkan dengan *magnetic tracker* yang belum terkalibrasi.

Dari hasil percobaan pengukuran asal dari magnetic tracker dapat dipindahkan ke koordinat ruang yang lain sehingga magnetic tracker dapat terukur secara nyata. Dari percobaan didapatkan beberapa data, Hasil dari polynomial terkecil berada pada orde 5 dengan error pada sumbu  $x = 0,1$  mm, sumbu  $y = 0.3$  mm, dan sumbu  $z = 0.3$  mm. Total error yang terhitung pada orde 5 adalah 0.4 mm. dengan error total 0.4 mm *magnetic tracker* telah relative linier pada setiap titik pada bidang kalibrasi. Selain itu data juga diamati dari standard deviasi untuk melihat persebaran data. Dari standard deviasi, didapatkan bahwa orde terbaik dengan persebaran data paling dekat adalah orde 5 dengan nilai tiap sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$  adalah 0.2 mm 0.3 mm dan 0.32 mm dengan range error rata-rata diantara  $0.47 \pm 0.27$  mm. pada bidang kalibrasi. Dengan persebaran error dengan error posisi kurang dari 0.1 mm sebanyak 5.6% data. Error diantara 0.1mm hingga 0.2 mm terdapat 28.1% . Dan error diantara 0.2 mm hingga 0.3 mm sebanyak 24%.

Terakhir error hingga lebih dari 0.3 mm sebanyak 41.8%. Agar error semakin kecil maka data yang di petakan harus lebih banyak lagi untuk semua titik yang terukur.

## DAFTAR PUSTAKA

- Livingston, M. A. (2001) 'Magnetic tracker Calibration for Improved Augmented Reality Registration', 6(5), pp. 1–14.
- Ikits, M. *et al.* (2001) 'An improved calibration framework for electromagnetic tracking devices', *Proceedings IEEE Virtual reality 2001*, pp. 63–70. doi: 10.1109/VR.2001.913771.
- Nakamoto, M. *et al.* (2008) 'Intraoperative magnetic tracker calibration using a magneto-optic hybrid tracker for 3-D ultrasound-based navigation in laparoscopic surgery', *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 27(2), pp. 255–270. doi: 10.1109/TMI.2007.911003.
- Jensen, R. C. (2008). "Can I Come in?". T.H.E. Journal. 35 (10): S4–S6. New access-control devices are an important addition to the sophisticated work that one Texas school district is doing to protect its students.
- Zaidman, S. (FAA) (2008) 'Global Positioning System Wide Area Augmentation System (Waas) Performance Standard', *US Government Document*, (1), p. 60. doi: 10.2514/1.32531.
- Department Of Defense, U. S. . (2008) 'Global Positioning System Standard Positioning Service', *Www.Gps.Gov*, (September), pp. 1–160
- Curran *et al.* (2011). "An Evaluation of Indoor Location Determination Technologies". *Journal of Location Based Services*. 5 (2): 61–78.
- Qiu, Chen; Mutka, Matt (2016). "CRISP: cooperation among smartphones to improve indoor position information". *Wireless Networks* (Springer)
- Hile, H. and Borriello, G. (2008) 'Positioning and orientation in indoor environments using camera phones', *IEEE Computer Graphics and Applications*, 28(4), pp. 32–39. doi: 10.1109/MCG.2008.80.
- Maximov, V. and Tabarovsky, O. (2013) 'Survey of Accuracy Improvement Approaches for Tightly Coupled ToA / IMU Personal Indoor Navigation System', *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, (October), pp. 7–10.

- Geospatial World (2014) 'Geospatial world', *Geospatial World*, 05(01). Available at: <http://geospatialworld.net/uploads/magazine/Geospatial-World-August-2014.pdf>.
- Mazuryk, T. and Gervautz, M 'Virtual Reality History , Applications , Technology and Future History'.
- Mehling, M. (2006) 'Implementation of a Low Cost Marker Based Infrared Optical Tracking System', *Master Thesis*, p. 101.
- Xiong, X.,Mcgary,J.E. & Chen, J., 2015. *Self Correcting Magnetic Tracking in Dynamic Medical Environment.*,51(2)
- Ikits, M. *et al.* (2001) 'Calibration of 6DOF Electromagnetic Tracking Devices', *IEEE ,Vr2001*, pp. 63–70.