

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi hasil pengujian dari dua jenis pengujian, pada saat kondisi statis dan kondisi dinamis. Kondisi statis merupakan kondisi ketika sensor tidak diberikan pergerakan dan kondisi dinamis ketika sensor diberi gerakan. Pengujian juga dilakukan dengan membandingkan pengukuran statis sebelum dan sesudah sensor dikalibrasi. Pelaksanaan pengujian yaitu dengan melakukan simulasi gerakan gelombang. Data dari sensor kemudian dimasukkan kedalam matlab untuk menghitung nilai jarak vertikal dan horizontal. Contoh data lihat (Gambar 4.1)

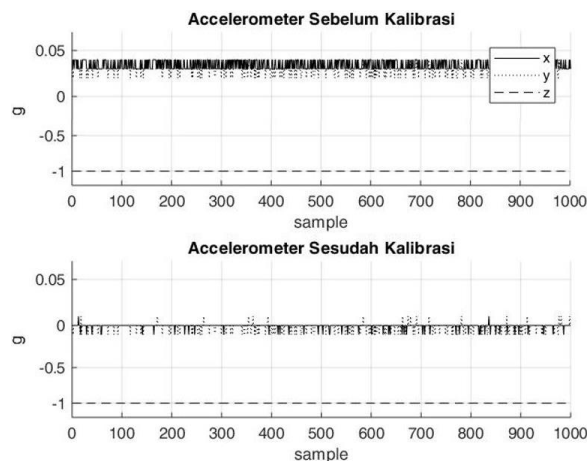
J	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
t(s)	Ax	Ay	Az	Gx	Gy	Gz	Mx	My	Mz	q0	q1	q2	q3	
1	0.000	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.79	-0.39	-0.48	0.52	-0.05	0.01	-0.85
2	0.031	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.81	-0.4	-0.42	0.52	-0.06	0	-0.85
3	0.063	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.77	-0.39	-0.5	0.51	-0.05	0.01	-0.86
4	0.094	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.79	-0.41	-0.46	0.51	-0.05	0	-0.86
5	0.125	0.02	-0.03	1	0	0	0	0.79	-0.39	-0.46	0.52	-0.05	0.01	-0.86
6	0.156	0.02	-0.03	1	0	0	0	0.8	-0.38	-0.47	0.52	-0.05	0.01	-0.85
7	0.188	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.77	-0.43	-0.48	0.5	-0.05	0	-0.86
8	0.219	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.8	-0.39	-0.46	0.52	-0.05	0	-0.85
9	0.250	0.02	-0.03	1	0.01	0	0	0.8	-0.37	-0.47	0.52	-0.05	0	-0.85
10	0.281	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.79	-0.4	-0.47	0.52	-0.05	0	-0.86
11	0.313	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.8	-0.4	-0.45	0.52	-0.05	0.01	-0.85
12	0.344	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.77	-0.42	-0.48	0.51	-0.05	0.01	-0.86
13	0.375	0.02	-0.03	1	0	0	0	0.78	-0.41	-0.47	0.51	-0.05	0.01	-0.86
14	0.406	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.78	-0.41	-0.48	0.51	-0.06	0	-0.86
15	0.438	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.78	-0.41	-0.47	0.51	-0.05	0.01	-0.86
16	0.469	0.02	-0.03	1	0	0	0	0.79	-0.42	-0.45	0.51	-0.06	0	-0.86
17	0.500	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.78	-0.41	-0.47	0.51	-0.05	0.01	-0.86
18	0.531	0.02	-0.03	1	0	0	0	0.78	-0.41	-0.48	0.51	-0.05	0	-0.86
19	0.563	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.8	-0.37	-0.47	0.52	-0.05	0	-0.85
20	0.594	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.77	-0.41	-0.49	0.51	-0.05	0	-0.86
21	0.625	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.79	-0.41	-0.46	0.51	-0.05	0	-0.86
22	0.656	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.82	-0.37	-0.44	0.53	-0.05	0	-0.85
23	0.688	0.02	-0.03	1	0	0	0	0.76	-0.42	-0.49	0.5	-0.05	0	-0.86
24	0.719	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.8	-0.37	-0.47	0.52	-0.05	0.01	-0.85
25	0.750	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.77	-0.43	-0.48	0.5	-0.05	0.01	-0.86
26	0.781	0.02	-0.03	1	0	0	0.01	0.78	-0.4	-0.48	0.51	-0.05	0.01	-0.86
27	0.813	0.02	-0.03	1	0	0	0	0.8	-0.36	-0.48	0.53	-0.05	0	-0.85

Gambar 4. 1 Contoh Data Keluaran Arduino

Data yang dikirimkan oleh arduino ke laptop sebanyak 14 jenis data, bisa dilihat pada (Gambar 4.1). MPU9250 membaca dan mengirimkan 9 data mentah dari tiga sensor dengan masing-masing sensor mengirimkan tiga data. Data-data itu lalu diproses oleh Arduino Mega 2560 berdasarkan *datasheet* dari MPU9250 sehingga menghasilkan data percepatan dalam G (*gravity*), data kecepatan sudut dalam dps (*degree per second*) dan data medan magnet dalam mG (*milli Gauss*). Data yang lain didapatkan dari hasil pengolahan data dari MPU 9250 dan juga dari arduino itu sendiri. Semua data 9 dof yang diperoleh dimasukkan sebagai masukan dari madgwick filter, hasil dari filter ini berupa 4 data quaternion, yaitu q0, q1, q2 dan q3. Data terakhir adalah data selisih waktu dalam detik pengiriman antar keseluruhan data, data *delay* ini berasal dari Arduino itu sendiri melalui fungsi *millis()* yang sudah tersedia.

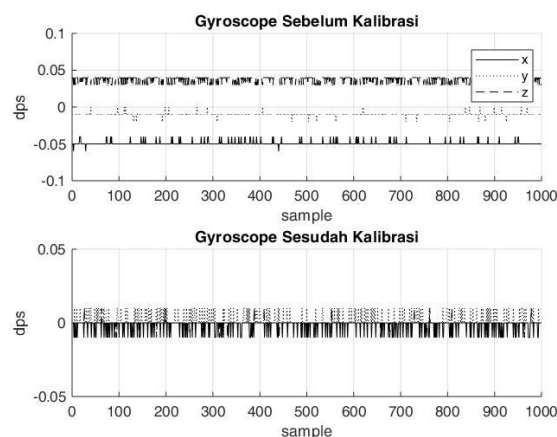
4.1 Hasil Kalibrasi

Pengambilan *sample* pada percobaan ini dilakukan dalam dua keadaan, yaitu tanpa dan dengan mengurangi nilai *offset* dari sensor. Data untuk *accelerometer* dan *gyroscope* diambil saat sensor dalam keadaan diam, sedangkan sensor *magnetometer* mengambil data dengan menggerakkan sensor secara tiga dimensi. Tujuan dari pengujian ini untuk melihat perbedaan data sebelum dan sesudah dikalibrasi. Hasil pengujian *accelerometer* dapat dilihat pada (Gambar 4.2).



Gambar 4. 2 Pengujian Kalibrasi Accelerometer

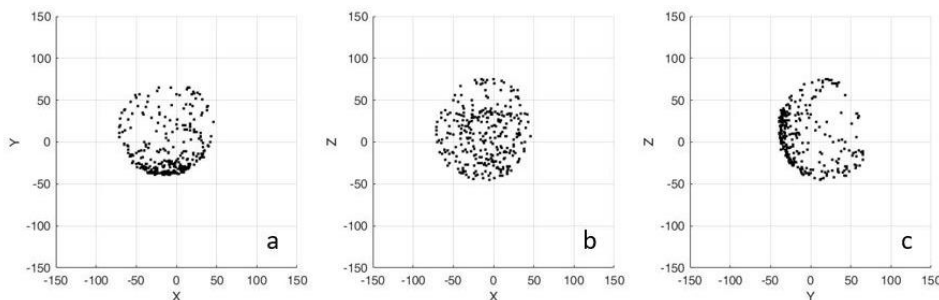
Perbandingan data *accelerometer* pada (Gambar 4.2) menunjukkan bahwa saat sensor belum dikurangi dengan *offset*, data untuk sumbu X dan Y tidak berada pada titik nol, setelah dikurangi dengan *offset* data yang didapatkan terpusat pada nilai nol. Sumbu Z baik sebelum dan setelah dikurangi dengan *offset* selalu mengukur percepatan satu. Nilai sumbu Z juga sebenarnya merupakan *offset* karena itu adalah nilai percepatan dari gravitasi. Pengujian status *gyroscope* lihat (Gambar 4.3).



Gambar 4. 3 Pengujian Kalibrasi Gyroscope

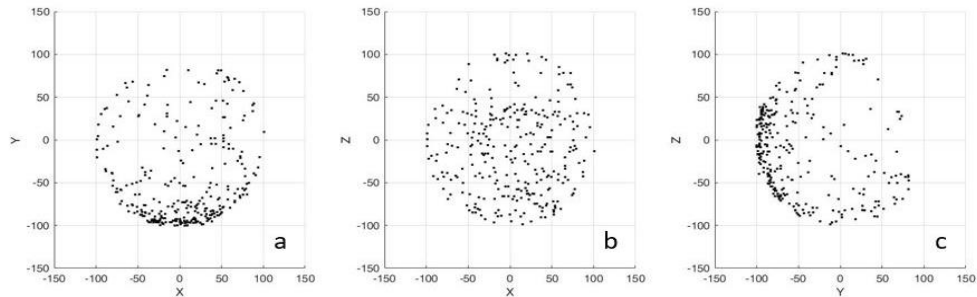
Sensor *gyroscope* juga memiliki data yang tidak sama dengan nol sebelum dikurangi dengan nilai *offset*. Setelah kalibrasi data yang didapat untuk ketiga sumbunya terpusat pada nilai nol. Nilai kesalahan dari kedua sensor ini adalah *drift* yang disebabkan oleh *DC bias* pada sinyal *acceleration*. *Drift* pada data percepatan menyebabkan nilai kesalahan yang besar saat data diintegrasikan. Kalibrasi ini dilakukan untuk mengurangi nilai kesalahan pada sensor *accelerometer* dan *gyroscope*. Sehingga, saat integrasi dilakukan, nilai kesalahan yang dihasilkan menjadi kecil. Grafik yang dihasilkan pada (Gambar 4.2) dan (Gambar 4.3) masih memiliki riak setelah kalibrasi, ini adalah kesalahan yang gagal dihilangkan.

Data dari *magnetometer* sebenarnya susah untuk direpresentasikan, hal ini karena kalibrasi dari sensor ini berbeda dari *accelerometer* dan *gyroscope* yang nilainya harus terpusat pada nol terhadap waktu saat sensor diam. *Magnetometer* dikalibrasi sehingga menghasilkan data yang membentuk bola pada 2 sumbu sensor. Kalibrasi juga dilakukan dengan menggerakkan sensor secara 3D. Data sebelum kalibrasi bisa dilihat pada (Gambar 4.4).



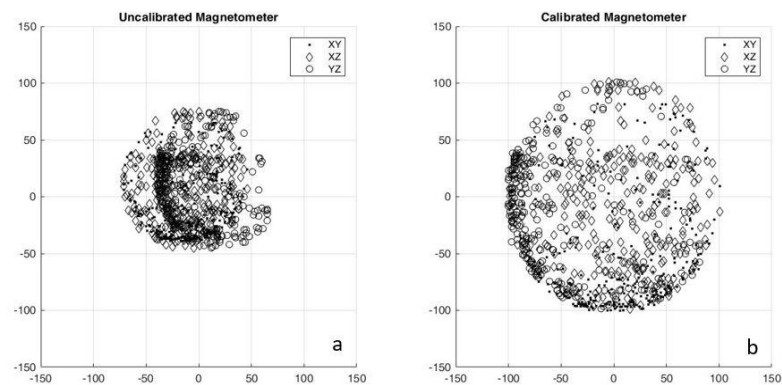
Gambar 4. 4 Magnetometer Sebelum Kalibrasi (a)XY, (b)XZ dan (c)YZ

Data mentah dari *magnetometer* ketika sensor digerakan secara 3D terpresentasikan dengan grafik 2D untuk setiap 2 kemungkinan sumbu. Grafik pada (Gambar 4.4) (a) untuk sumbu X dan Y, Grafik pada (Gambar 4.4) (b) untuk sumbu X dan Z, terakhir Grafik pada (Gambar 4.4) (c) untuk sumbu Y dan Z. Terlihat bahwa data medan magnet yang sudah dikonversi menjadi berbentuk lingkaran tidak terpusat ditengah bidang 2D untuk semua kemungkinan sumbu, ini disebabkan oleh *hard iron losses*. Lingkaran data juga tidak memiliki bentuk lingkaran yang sempurna melainkan sedikit berbentuk *oval*, untuk masalah ini penyebabnya adalah *soft iron losses*. Hasil kalibrasi magnetometer bisa dilihat pada (Gambar 4.5).



Gambar 4. 5 Magnetometer Sesudah Kalibrasi (a)XY, (b)XZ dan (c)YZ

Setelah melakukan kalibrasi dengan metode *Li's ellipsoid specific fitting algorithm*, data mentah dari *magnetometer* pada semua kemungkinan sumbu seperti yang terlihat pada (Gambar 4.5) (a) untuk sumbu X dan Y, (Gambar 4.5) (b) untuk sumbu X dan Z, (Gambar 4.5) (c) untuk sumbu Y dan Z hampir terpusat pada titik nol dan memiliki bentuk lingkaran yang lebih proporsional dibandingkan dengan grafik sebelum kalibrasi, lihat (Gambar 4.4), namun data yang sudah dikoreksi tetap memiliki bentuk lingkaran yang belum sempurna dan belum sepenuhnya terpusat pada titik nol, hal ini bisa lebih terlihat lebih jelas apabila visualisasi data digabungkan untuk semua kemungkinan sumbu, bisa dilihat pada (Gambar 4.6).

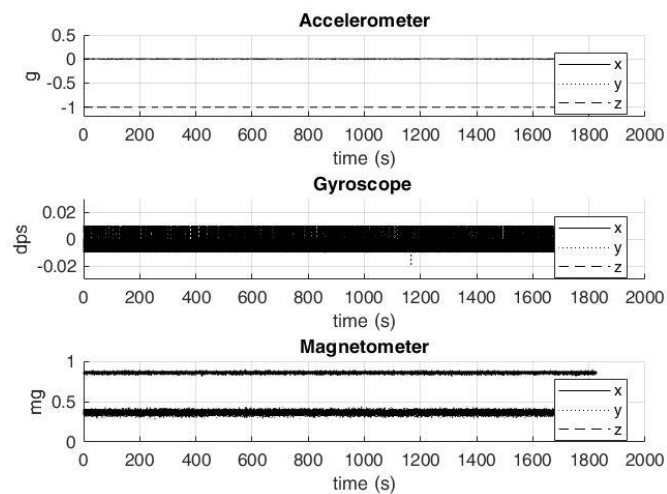


Gambar 4. 6 Kalibrasi Magnetometer (a)Uncalibrated (b)Calibrated

Gabungan nilai mentah *magnetometer* sebelum (Gambar 4.6) (a) dan sesudah kalibrasi lihat (Gambar 4.6) (b), nilai setiap sumbu digabung untuk melihat detail yang lebih jelas. Data mentah hasil kalibrasi masih memiliki nilai *offset*, ini terlihat dari bentuk lingkaran yang tidak sempurna, sehingga proses kalibrasi untuk sensor *magnetometer* tidak memenuhi kebutuhan yang diinginkan, karena *offset* tidak sepenuhnya hilang.

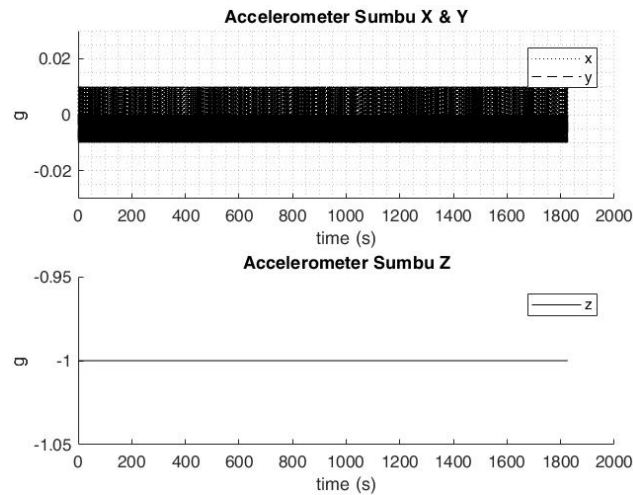
4.2 Pengukuran Statis

Pengambilan *sample* data pada percobaan ini dilakukan pada saat sensor dalam kondisi diam dengan frekuensi 30 Hz, pengambilan *sample* berlangsung selama 30 menit. Pengujian ini dilakukan setelah dilakukan kalibrasi pada semua sensor. Pengujian ini bertujuan untuk melihat apakah data dari sensor stabil atau tidak jika diambil dalam waktu yang lama, tujuan lainnya yaitu untuk melihat apakah *drift* dari pengukuran konstan atau tidak. Berikut adalah data mentah hasil pengukuran saat kondisi statis/diam (Gambar 4.7).



Gambar 4. 7 Data Statis

Sensor *gyroscope* berdasarkan (Gambar 4.7) menghasilkan nilai yang terpusat pada titik nol untuk semua sumbu. Hal ini dikarenakan sensor *gyroscope* tidak mengukur gaya dari luar sensor itu sendiri seperti gravitasi. Sehingga apabila sensor tidak mendapatkan gerakan maka data yang didapat harus bernilai nol, jika tidak maka nilai itu adalah kesalahan atau *offset* dari sensor tersebut. Data yang diukur oleh sensor *gyroscope* masih memiliki *drift* yang belum dihilangkan saat kalibrasi. Data dari *magnetometer* adalah besar medan magnet yang berasal dari bumi bukan dari sensor itu sendiri, sehingga penjelasan untuk data *magnetometer* mengacu pada sub bab 4.1 yaitu pada (Gambar 4.5) dan (Gambar 4.6). Data percepatan pada (Gambar 4.7) terlihat bahwa sumbu X dan Y selama 30 menit berada dalam titik nol, sedangkan sumbu Z bernilai negatif satu, namun grafik sebenarnya memiliki riak terutama untuk sumbu X dan Y, untuk lebih jelasnya lihat (Gambar 4.8).



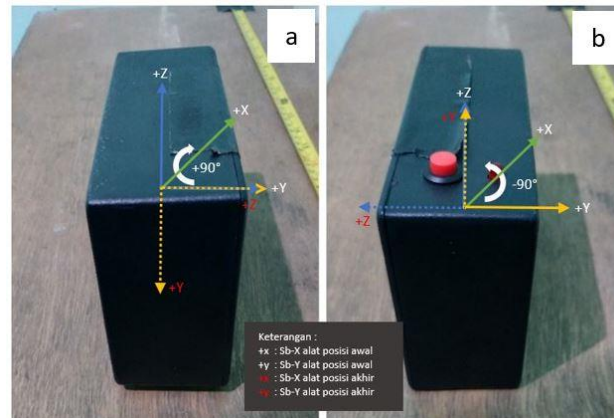
Gambar 4. 8 Data Statis *Accelerometer*

Grafik pada (Gambar 4.8) adalah data percepatan dari sensor *accelerometer* untuk semua sumbu. Data dari *accelerometer* untuk sumbu X dan sumbu Y memiliki nilai nol yang tidak stabil, sedangkan sumbu Z memiliki nilai -1 yang stabil, hal ini dikarenakan sumbu Z pada sensor *accelerometer* mengukur nilai gravitasi bumi, dimana gravitasi sendiri bernilai 1 G atau 9.81 m/s^2 , nilai gravitasi yang terukur menjadi negatif karena pada program nilai sumbu Z dikalikan -1.

Dapat dilihat pada (Gambar 4.8), data grafik untuk sumbu X dan Y pada sensor *accelerometer* masih memiliki riak, dimana ini berarti nilai pengukuran pada kondisi diam tidak sepenuhnya bernilai 0, Hal ini disebabkan kalibrasi sensor yang tidak sempurna sehingga masih menyisakan *drift*, dimana riak yang disebabkan oleh *drift* ini berasal dari mekanikal sensor itu sendiri.

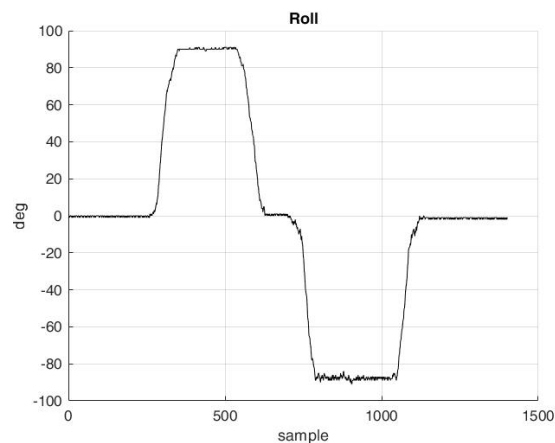
4.3 Pengujian Orientasi

Pengujian kali ini dilakukan untuk mengukur akurasi orientasi sensor dalam tiga dimensi. Pengujian dengan menggerakkan sensor 90° mengikuti orientasi gerak *roll*, *pitch* dan *yaw* secara manual menggunakan tangan. Data diambil dengan frekuensi 30 Hz. Pengujian ini dilakukan setelah data mentah dari semua sensor diproses melalui madgwick filter untuk menghasilkan nilai quaternion yang kemudian dari nilai quaternion itu dikonversi menjadi nilai sudut euler. Pengujian orientasi *roll* lihat (Gambar 4.9).



Gambar 4. 9 Orientasi Orientasi *Roll* (a) 90^0 dan (b)- 90^0

Orientasi *roll* dilakukan dengan memutar sensor 90^0 terhadap sumbu X, dimana sumbu X tetap diam dan yang berputar adalah sumbu Y dan Z. Sensor diputar 90^0 ke kanan (Gambar 4.8) (a), diam sejenak dan kemudian kembali ke posisi awal lalu diputar -90^0 ke kiri (Gambar 4.9) (b), dan terakhir sensor dikembalikan ke posisi semula. Data yang diperoleh sensor untuk orientasi sudut *roll* bisa dilihat pada (Gambar 4.10). Data untuk sudut *roll* diproses langsung oleh arduino, data lalu disimpan di *micro sd card* yang kemudian dimasukkan kedalam aplikasi matlab untuk ditampilkan dalam bentuk grafik.

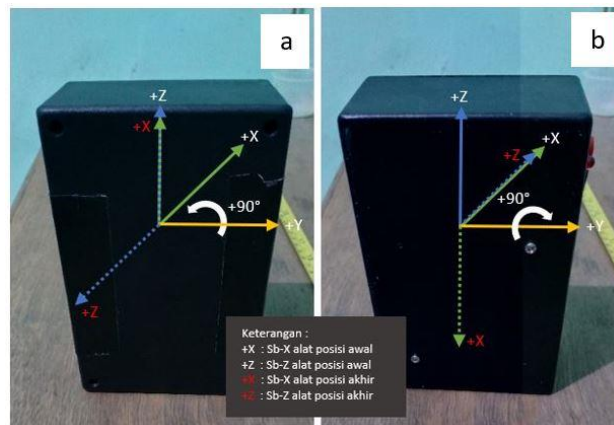


Gambar 4. 10 Data Pengujian Orientasi *Roll*

Grafik pada (Gambar 4.10) adalah data hasil dari pengujian sudut roll. Berdasarkan (Gambar 4.10) terlihat bahwa data untuk gerakan *roll* mengikuti dengan baik pergerakan sensor. Nilai yang dibaca oleh sensor juga kurang lebih 90^0 untuk sudut positif dan negatif. Data keluaran ketika membaca gerakan euler pada

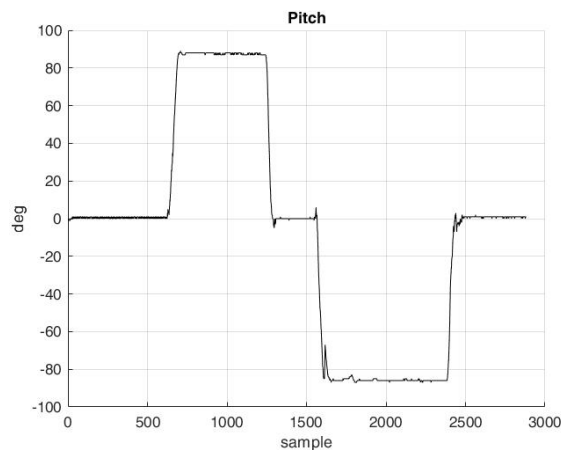
hal ini sudut *roll* masih memiliki nilai kesalahan, terlihat pada (Gambar 4.10) nilai yang dihasilkan masih memiliki riak untuk semua data yang diambil baik saat sensor sedang diam juga saat sedang bergerak, terutama ketika sensor dalam keadaan 90° , dimana riak pada grafik terlihat sangat jelas. Hal ini seharusnya tidak terjadi, data sudut seharusnya stabil mengeluarkan nilai 90° , karena saat dalam sudut 90° sensor dalam keadaan diam.

Kesalahan ini dihasilkan oleh gabungan *drift* dari *accelerometer*, *gyroscope* dan *magnetometer*, *drift* yang terbaca sebenarnya sudah difilter dengan algoritma madgwick dan juga saat melakukan kalibrasi sensor, namun kedua perlakuan itu tetap tidak bisa sepenuhnya menghilangkan *drift* dari sensor. Nilai dari *drift* ini terakumulasi saat nilai quaternion hasil dari filter madgwick dirubah menjadi nilai sudut *roll*. Nilai *drift* inilah yang membuat nilai pengukuran menjadi tidak stabil meski tidak diberikan gerakan pada alat. Data untuk sudut *roll* terutama nilai kesalahan yang terhitung terlihat lebih jelas pada pengujian selanjutnya, yaitu pengujian untuk sudut *pitch*, lihat (Gambar 4.11).



Gambar 4. 11 Pengujian Orientasi *Pitch* (a) 90° dan (b)- 90°

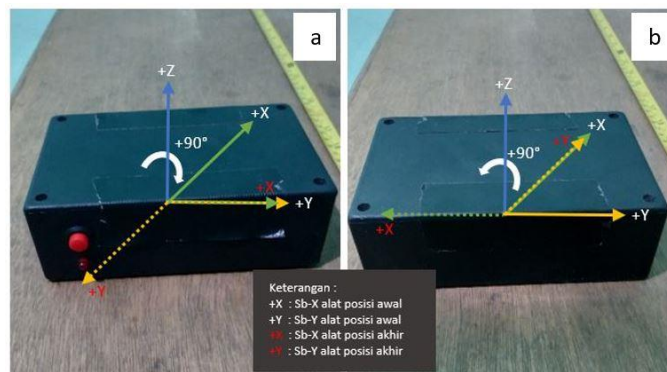
Pengujian gerakan *pitch* dilakukan dengan cara memutar sensor 90° terhadap sumbu Y, yaitu sumbu Y diam sedangkan sumbu X dan Z bergerak dari posisi awal. Pada (Gambar 4.11) (a) alat diputar 90° ke atas, lalu diam sesaat dan dikembalikan ke posisi semula, kemudian diputar kembali -90° ke bawah (Gambar 4.11) (b), terakhir sensor dikembalikan pada kedudukan semula. Pengujian ini dilakukan secara manual menggunakan tangan dan bantuan alat ukur sudut penggaris bujur. Hasil dalam bentuk grafik lihat (Gambar 4.12).



Gambar 4. 12 Data Pengujian Orientasi *Pitch*

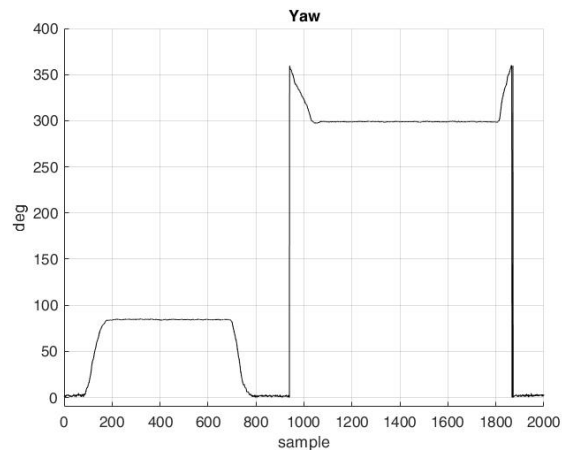
Berdasarkan (Gambar 4.12) terlihat bahwa data untuk gerakan *pitch* mengikuti dengan baik sesuai pergerakan sensor. Sensor mengambil data sudut kurang lebih 90° untuk setiap gerakan yang dilakukan oleh alat. Baik sudut positif dan juga sudut negatif berhasil diperoleh oleh sensor. Terlihat juga dari (Gambar 4.12) grafik *pitch* memiliki riak.

Sensor *fusion* dilakukan menggunakan algoritma filter madgwick untuk bisa menghasilkan sudut euler. Pada saat data dimasukkan ke dalam algoritma madgwick, data di-*filter* untuk mengurangi *drift* yang masih belum bisa dihilangkan saat melakukan kalibrasi, lihat (Gambar 4.6). Hasil data dari madgwick tetap memiliki *drift*, ini terlihat dari riak pada data (Gambar 4.12) dimana riak menandakan bahwa data keluaran untuk sudut *pitch* tidak stabil. Pada saat sensor diam seharusnya data konstan atau stabil kecuali saat sensor digerakan. Selanjutnya dilakukan pengujian orientasi *yaw*, lihat (Gambar 4.13).



Gambar 4. 13 Pengujian Orientasi *Yaw* (a) 90° dan (b) -90°

Pengujian sudut *yaw* dilakukan dengan memutar alat terhadap sumbu Z. Alat digerakan 90° ke arah positif (Gambar 4.13) (a) dan 90° negatif (Gambar 4.13) (b). Sama seperti gerakan pada sudut *roll* dan *pitch*, pengujian kali ini juga dilakukan menggunakan tangan. Hasil pengujian gerakan euler *yaw* bisa dilihat pada (Gambar 4.14) di bawah ini.



Gambar 4. 14 Data Pengujian Sudut *Yaw*

Hasil pengujian sudut *yaw* berdasarkan (Gambar 4.14), terlihat jelas perbedaan jika dibandingkan dengan data dari *roll* pada (Gambar 4.10) dan data *pitch* pada (Gambar 4.12). Sudut *yaw* tidak memiliki nilai negatif, hal ini dikarenakan sudut *yaw* difungsikan sama seperti kompas sehingga hanya memiliki besaran nilai sudut 0° sampai 360° . Pengukuran sudut *yaw* ini juga mendapatkan peran yang besar dari sensor *magnetometer* yang mengukur medan magnet bumi, sehingga nilai 0° dari *yaw* didapatkan bukan ketika sensor sedang diam, melainkan saat sumbu +X dari sensor *magnetometer* menghadap ke arah utara bumi. Saat sensor digerakan 90° derajat kekanan (X menghadap arah timur) data pada grafik terlihat berada kurang lebih pada nilai 90° , sedangkan saat diputar 90° ke kiri (X menghadap arah barat) data yang didapatkan adalah 300° . Hal ini tentu saja tidak benar karena data yang dihasilkan seharusnya adalah 280° .

Merujuk pada data kalibrasi *magnetometer* pada (Gambar 4.4), (Gambar 4.5) dan (Gambar 4.6) diketahui bahwa sensor *magnetometer* belum terkalibrasi dengan baik, sehingga nilai kesalahan yang dihasilkan *magnetometer* terlihat jelas pada pengujian sudut *yaw* ini. Sedangkan saat pengujian *roll* dan *pitch*, peran dari sensor *magnetometer* tidak terlihat pada data grafik pada (Gambar 4.12) dan (Gambar

4.10), hal ini karena data grafik hanya memperlihatkan data perubahan sudut yang dihasilkan sedangkan orientasi sensor terhadap bumi tidak terlihat. Pada paragraf sebelumnya dijelaskan bahwa *yaw* berfungsi sebagai kompas, maksudnya adalah nilai dari *yaw* yang mempengaruhi kedudukan alat terhadap bumi.

Pengujian orientasi sudut *roll* dan *pitch* dilakukan lebih lanjut, dimana sudut ini diuji dengan nilai -20° , -40° , -60° , 20° , 40° dan 60° . Hal ini dilakukan karena pengukuran gelombang terpengaruh oleh kedua sudut orientasi ini, sedangkan sudut *yaw* tidak diuji lebih lanjut karena tidak berpengaruh besar terhadap nilai posisi yang dihitung, *yaw* mempengaruhi jika menghitung arah gerakan sensor atau arah gelombang. Namun, parameter arah gelombang tidak menjadi parameter gelombang yang di uji pada penelitian ini. Hasil pengujian kemiringan sensor masing-masing untuk *roll* dan *pitch* bisa dilihat pada (Tabel 4.1).

Tabel 4. 1 Data Pengujian Sudut *Roll* dan *Pitch* ($^\circ$)

No	Pengujian Sudut <i>Roll</i> ($^\circ$)						Kesalahan Total
	-20	-40	-60	20	40	60	
1	-20,80	-40,65	-61,70	18,93	39,27	60,38	
2	-21,17	-40,85	-60,47	19,01	39,12	60,50	
3	-20,86	-41,54	-59,91	20,14	40,03	60,74	
4	-20,56	-40,12	-60,30	20,04	40,05	61,45	
5	-21,23	-39,89	-60,33	20,63	39,38	61,34	
Kesalahan Rata-rata	0,92	0,61	0,54	0,25	0,43	0,88	3,64
No	Pengujian Sudut <i>Pitch</i> ($^\circ$)						Kesalahan Total
	-20	-40	-60	20	40	60	
1	-21,75	-41,36	-62,19	20,41	41,04	61,43	
2	-21,26	-40,52	-61,81	20,73	41,89	62,25	
3	-19,41	-39,74	-60,41	19,96	40,35	60,76	
4	-20,42	-40,16	-61,64	20,68	40,87	61,14	
5	-20,95	-41,16	-63,47	20,63	40,92	61,17	
Kesalahan Rata-rata	0,76	0,59	1,90	0,48	1,01	1,35	6,10

Hasil pengujian kemiringan sensor lihat (Tabel 4.1), pengujian dilakukan sebanyak lima kali untuk setiap masing-masing besar sudut yang diuji. Kesalahan paling rendah dari pengujian ini adalah 0.25° . Kesalahan tertinggi pada pengujian ini adalah 0.92° . Total kesalahan sudut *roll* untuk semua pengujian adalah 3.64° . Data pengujian kemiringan sensor pada sudut *pitch*, lihat (Tabel 4.1). Kesalahan paling rendah dari pengujian ini adalah 0.48° . Nilai kesalahan tertinggi pada pengujian ini adalah 1.9° . Total kesalahan sudut *pitch* adalah 6.10° .

Adanya selisih pengukuran ini menandakan bahwa *drift* ketiga sensor yang digunakan tidak sepenuhnya bisa dihilangkan. Nilai Kesalahan ini sangat mempengaruhi saat pengujian perpindahan dilakukan, karena nilai kesalahan ini terakumulasi saat dilakukan integral sebanyak dua kali, dan terus bertambah dengan *drift* dari *accelerometer*.

4.4 Pengujian Perpindahan

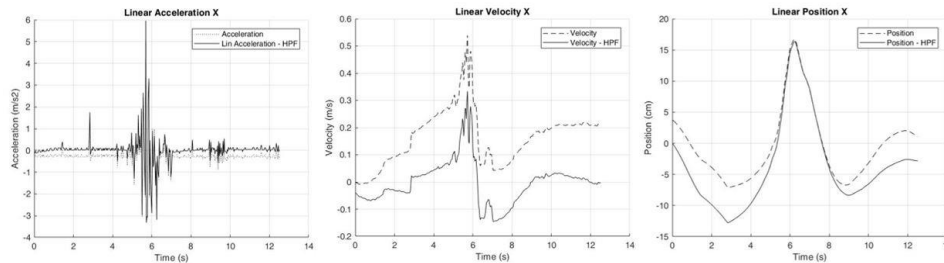
Pengujian ini dilakukan dengan menggerakkan alat ke satu arah sumbu saja, setelah itu dihitung nilai perpindahannya. Alat digerakan sepanjang 30 cm untuk masing-masing arah sumbu dengan menggunakan *roll meter* sebagai perbandingan. Semua pengujian untuk setiap sensor dilakukan sebanyak 10 kali. Alat digerakan menggunakan tangan pada bidang datar, waktu yang ditempuh alat untuk jarak 30 cm tidak ditentukan dan tidak dihitung. Data keluaran dengan frekuensi 30 Hz.

Tabel 4. 2 Pengujian Perpindahan Sb-X

No	Sensor (cm)	Roll Meter (cm)	Kesalahan (cm)
1	16,74	30	13,26
2	23,36	30	6,64
3	16,23	30	13,77
4	19,13	30	10,87
5	19,42	30	10,58
6	21,45	30	8,5
7	14,83	30	15,17
8	17,49	30	12,51
9	18,34	30	11,66
10	18,56	30	11,44
RMSE			11.68%

Berdasarkan (Tabel 4.3) dapat terlihat bahwa hasil pengujian alat memiliki nilai selisih yang sangat besar dibandingkan dengan nilai dari *roll meter*. Dimana dari 10 pengujian nilai selisih paling kecil adalah 8.55 cm dan nilai selisih terbesar mencapai 15.17 cm. Nilai kesalahan yang besar pada sumbu X ini dipengaruhi oleh *drift* gabungan dari *accelerometer*, *gyroscope* dan juga *magnetometer*. Nilai *Drift* pada sumbu x juga berasal dari mekanikal sensor *accelerometer* itu sendiri, setelah itu dipengaruhi juga oleh sensor yang tidak bergerak lurus sempurna, melainkan sumbu X pada sensor *accelerometer* miring dengan nilai kemiringan yang tidak

diketahui. Menggerakkan sensor menggunakan tangan juga tentu memberikan nilai *drift* dari ketidakstabilan gerakan, kesalahan bisa lebih jelas terlihat dengan melihat grafik pada (Gambar 4.15).



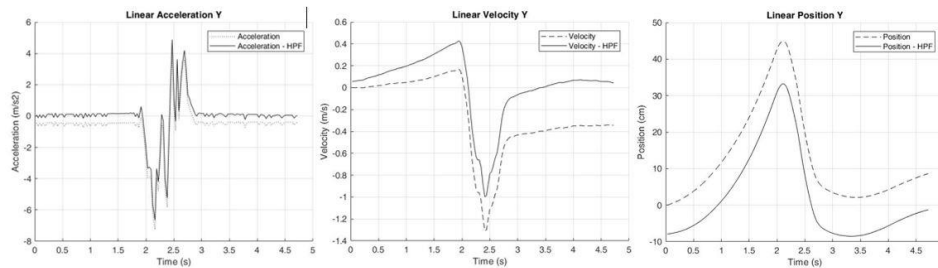
Gambar 4. 15 Grafik Pengujian Sumbu X (a)Percepatan, (b)Kecepatan dan (c) Posisi

Grafik pada (Gambar 4.15) terlihat perubahan data untuk setiap hasil integral, juga terlihat perbedaan data sebelum dan sesudah diberikan filter HPF. Data percepatan pada (Gambar 4.15) (a) sebelum diberikan HPF memiliki data awal dan akhir tidak sama dengan nol, data saat alat diam yaitu pada detik 0-4 dan 8-12 nilai yang terbaca oleh alat kurang dari nol, dimana seharusnya nilai adalah nol. Setelah diberikan HPF maka data menjadi terpusat pada nol. Grafik pada (Gambar 4.15) (b) adalah data kecepatan hasil integral dari percepatan, data kecepatan memiliki nilai awal dan akhir tidak sama dengan nol, sedangkan data percepatan memiliki nilai awal dan akhir berada pada titik nol, setelah diberikan HPF barulah data ditarik ke titik nol. Data posisi pada (Gambar 4.15) (c) juga memiliki hasil yang sama dengan percepatan dan kecepatan saat diberikan HPF. Pengujian perpindahan pada sumbu Y bisa dilihat pada (Tabel 4.4).

Tabel 4. 3 Pengujian Perpindahan Sumbu Y

No	Sensor (cm)	Roll Meter (cm)	Kesalahan (cm)
1	26,85	30	3,15
2	28,65	30	1,35
3	31,84	30	1,84
4	34,44	30	4,44
5	28,80	30	1,2
6	33,38	30	3,38
7	27,37	30	2,63
8	35,85	30	5,85
9	26,52	30	3,48
10	28,94	30	1,06
RMSE			3,19%

Hasil pengujian pada (Tabel 4.4) dapat terlihat bahwa hasil yang diukur alat memiliki nilai selisih yang cukup besar dengan nilai dari *roll meter*, namun jika dibandingkan dengan pengukuran pada sumbu X maka selisih nilai dari sumbu Y relatif kecil. Dimana dari 10 pengujian nilai selisih paling kecil adalah 1.06 cm dan nilai selisih terbesar mencapai 5.85 cm. Data grafik pengujian sumbu Y dapat dilihat pada (Gambar 4.16)



Gambar 4. 16 Grafik Pengujian Sumbu Y (a)Percepatan, (b)Kecepatan dan (c) Posisi

Grafik pada (Gambar 4.16) (a) adalah data percepatan, terlihat bahwa data awalnya tidak terpusat dititik nol hingga diberikan HPF barulah data terpusat dititik nol. Grafik pada (Gambar 4.16) (b) adalah data kecepatan, HPF membuat data akhir kembali ketitik nol dari sebelumnya bernilai minus. Grafik pada (Gambar 4.16) (c) adalah data posisi, pada data ini HPF dapat menarik data akhir menjadi nol, tetapi data awal gagal untuk dijadikan nol.

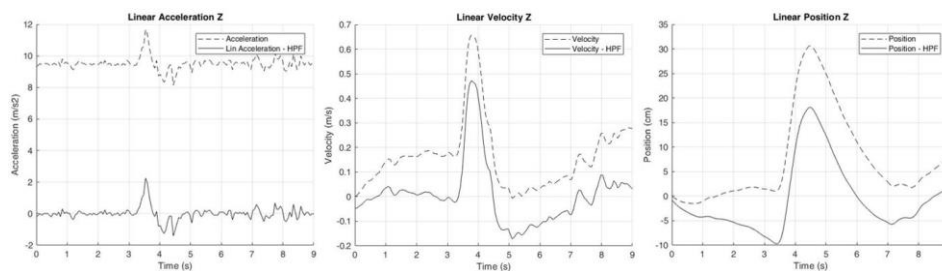
Nilai kesalahan yang pada sumbu Y ini dipengaruhi oleh *drift* dari *accelerometer*, *gyroscope* dan juga *magnetometer*. *Drift* pada sumbu Y berasal dari mekanikal sensor *accelerometer* itu sendiri, setelah itu dipengaruhi juga oleh sensor yang tidak bergerak lurus, dikarenakan sumbu Y pada *accelerometer* miring dengan nilai kemiringan yang tidak diketahui. Menggerakkan sensor menggunakan tangan juga menambah *drift* dari ketidakstabilan gerakan. Berdasarkan perbandingan (Tabel 4.3) dengan (Tabel 4.4) maka akurasi sumbu Y lebih baik dari sumbu X. Hasil pengujian sumbu Z lihat (Tabel 4.4).

Tabel 4. 4 Pengujian Perpindahan Sumbu Z

No	Sensor (cm)	Roll Meter (cm)	Kesalahan (cm)
1	10,85	30	19,15
2	8,92	30	21,08
3	12,87	30	17,13

4	13,56	30	16,44
5	13,9	30	16,1
6	13,62	30	16,38
7	18,10	30	11,9
8	13,48	30	16,52
9	12,34	30	17,66
10	15,9	30	14,1
RMSE			16,82%

Berdasarkan (Tabel 4.5) dapat terlihat bahwa hasil pengujian alat memiliki nilai selisih yang sangat besar dengan nilai dari *roll meter*, bahkan sangat besar dibandingkan dengan sumbu Y pada (Tabel 4.4). Dimana dari 10 pengujian nilai selisih paling kecil adalah 11.9 cm dan nilai selisih terbesar mencapai 21.08 cm. Nilai kesalahan yang besar pada sumbu Z ini dipengaruhi oleh *drift* dari *accelerometer*, *gyroscope* dan juga *magnetometer*. Grafik pengujian ini bisa dilihat pada (Gambar 4.17).



Gambar 4. 17 Grafik Pengujian Sumbu Z (a)Percepatan, (b)Kecepatan dan (c) Posisi

Data percepatan pada (Gambar 4.17) (a) sebelum diberikan HPF hampir 10 m/s², ini adalah nilai gravitasi yang besarnya adalah 9.81 m/s² setelah diberikan HPF dan dikurangi nilai gravitasi data menjadi terpusat pada nilai nol. Grafik pada (Gambar 4.17) (b) adalah data kecepatan hasil integral dari percepatan, HPF berhasil menarik data kecepatan awal dan akhir ke titik nol. Data posisi pada (Gambar 4.17) (c) juga diberikan HPF dan HPF berhasil menarik data awal dan akhir menjadi nol. Nilai kesalahan yang pada sumbu Z ini disebabkan oleh hal yang sama pada sumbu X dan Y, yaitu *drift*, kesalahan akibat pengujian dengan tangan dan penempatan sensor pada wadah yang tidak tegak lurus.

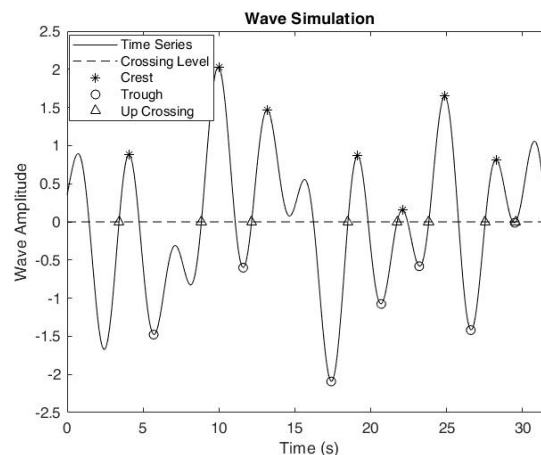
Adanya *Drift* pada sumbu Z berasal dari mekanikal sensor *accelerometer* itu sendiri, setelah itu dipengaruhi juga oleh sensor yang tidak bergerak lurus, melainkan sumbu X pada sensor *accelerometer* miring dengan nilai kemiringan

yang tidak diketahui. Menggerakkan sensor menggunakan tangan juga memberikan nilai *drift* dari ketidakstabilan gerakan. *Drift* terbesar dari sumbu Z ini adalah gravitasi, dimana nilai gravitasi yang terbaca oleh sensor mempengaruhi pembacaan nilai pergerakan sensor itu sendiri. Nilai gravitasi bumi adalah 9.81 m/s^2 yang mana itu sangatlah besar dibandingkan nilai yang terbaca oleh sensor, sehingga nilai gravitasi bisa menutupi nilai pembacaan yang kecil.

Nilai *drift* dari tiga sensor yang tidak sepenuhnya hilang saat kalibrasi terus bertambah ketika sensor bergerak dan menjadi berkali lipat saat di integralkan. *High pass filter* yang diberikan terhadap nilai percepatan sebelum dilakukan integral juga tidak sepenuhnya bisa menghilangkan *drift*. Data percepatan yang masih memiliki *drift* juga dikalikan dengan matrix rotasi yang didapatkan dari quaternion hasil dari filter madgwick. Jadi *drift* dari ketiga sensor yang terbaca terus terakumulasi oleh pembacaan sensor saat pengujian, saat melakukan filter madgwick dan juga tentu saat dilakukan integral sebanyak dua kali.

4.5 Pengujian Deteksi Parameter Gelombang

Parameter gelombang yang diukur, yaitu tinggi gelombang dan periode gelombang didapatkan dengan menggunakan algoritma *zero crossing detection*. Algoritma ini mendeteksi nilai 0 dari gelombang yang diuji. Pengujian metode ini dilakukan pertama kali dengan menggunakan sinyal *sinusoidal* untuk memastikan bahwa algoritma bisa bekerja dengan baik. Setelah memastikan algoritma bisa mendeteksi parameter gelombang dengan baik barulah digunakan masukan sinyal dari alat yang dibuat. Hasil pengujian algoritma lihat (Gambar 4.18).



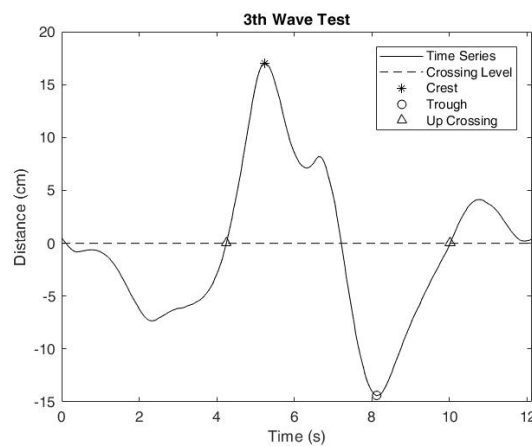
Gambar 4. 18 Pengujian Algoritma ZCD

Sinyal uji adalah sinyal sinusoidal *random* dengan parameter yang ditentukan hanya frekuensi sampling, yaitu 10Hz dan durasi yaitu 32 detik. Berdasarkan (Gambar 4.18) dapat diketahui bahwa algoritma ZCD ini bekerja dengan baik, algoritma dapat mendeteksi setiap nilai nol dalam keadaan sinyal naik, berhasil mendeteksi titik puncak dan lembah untuk setiap satu gelombang. Parameter tinggi dan perioda gelombang juga dapat dihitung, Hasilnya bisa dilihat pada (Tabel 4.5).

Tabel 4. 5 Parameter Gelombang Uji

Gelombang ke-	Tinggi Gelombang (H)	Perioda Gelombang (T)
1	2,36	5,42
2	2,63	3,31
3	3,56	6,35
4	1,94	3,24
5	0,74	2,09
6	3,07	3,72
7	0,83	2,01

Data pada (Tabel 4.5) merupakan data parameter gelombang dari sinyal masukan acak yang dihitung oleh algoritma ZCD. Algoritma ZCD berhasil mendeteksi parameter gelombang sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu tinggi dan perioda gelombang, selanjutnya melakukan pengujian menggunakan data yang didapatkan dari sensor. Pengujian ini dilakukan dengan menggerakkan sensor dengan gerakan seakan-akan terbawa gelombang laut, alat digerakan keatas dan kebawah mengikuti gerakan gelombang menggunakan tangan. Salah satu hasil pengujian bisa dilihat pada (Gambar 4.19).



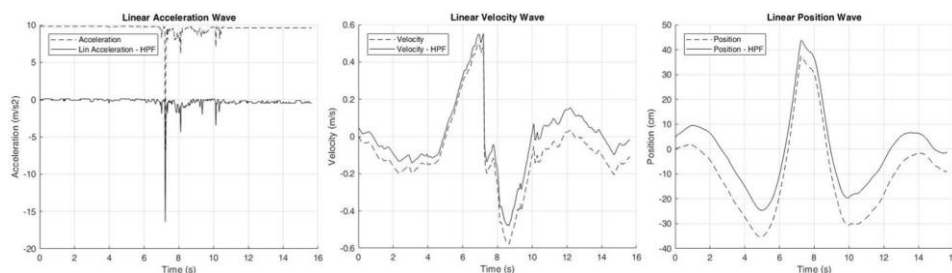
Gambar 4. 19 Hasil Pengujian ZCD

Algoritma ZCD untuk data pengujian dari alat bisa dilihat pada (Gambar 4.19). berdasarkan (Gambar 4.19), parameter tinggi gelombang dan perioda gelombang dapat dideteksi oleh algoritma ZCD. Titik nol yang dideteksi juga berhasil hanya mendeteksi titik nol dengan data yang naik, sehingga satu gelombang bisa didapatkan dengan baik. Tinggi gelombang dihitung dari lembah sampai puncak gelombang, nilai perioda dihitung berdasarkan waktu yang diperlukan oleh satu gelombang. Berikut adalah data lengkap hasil pengujian ini, lihat (Tabel 4.6).

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Tinggi Gelombang

No	Tinggi Gelombang (cm)		Kesalahan (cm)
	Uji	Aktual	
1	26,89	60	33,1
2	21,84	60	38,16
3	30,76	60	29,24
4	63,33	60	3,33
5	89,67	60	29,67
RMSE			29,32%

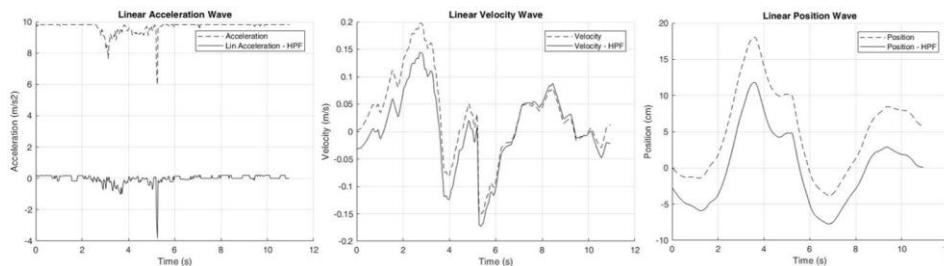
Tinggi gelombang didapatkan dari sumbu Z sensor *accelerometer*. Hasil pengujian berdasarkan data pada (Tabel 4.6) memiliki selisih yang sangat besar dan beragam untuk setiap pengambilan data. Nilai RMSE bahkan mencapai 29.32% dari 5 kali percobaan. Kesalahan yang terjadi disebabkan oleh banyak faktor, nilai *drift* yang belum sepenuhnya hilang terakumulasi ketika sensor bergerak. Data hasil pengujian ke-4, yaitu data dengan kesalahan paling kecil dalam bentuk grafik bisa dilihat pada (Gambar 4.20).



Gambar 4. 20 Grafik Pengujian Ke-4 (a)Percepatan, (b)Kecepatan dan (c) Posisi

Data percepatan yang didapatkan alat untuk pengujian ke-4 memiliki nilai percepatan tertinggi sebesar 15 m/s^2 , lihat (Gambar 4.20) (a). Nilai 15 m/s^2 didapat setelah dikurangi nilai gravitasi dan juga setelah diberikan HPF. Data percepatan

diintegrasikan menjadi kecepatan (Gambar 4.20) (b), data sebelum dan sesudah diberikan HPF memiliki perbedaan, yaitu filter mengembalikan data akhir menjadi ketitik nol. Data Posisi (Gambar 4.20) (c) yang diberikan HPF memiliki kekurangan yaitu data awal yang sudah berada pada titik nol berubah menjadi lebih tinggi. Sebagai perbandingan dengan pengujian yang memiliki nilai kesalahan tinggi, lihat (Gambar 4.21).



Gambar 4. 21 Grafik Pengujian Ke-2 (a)Percepatan, (b)Kecepatan dan (c) Posisi

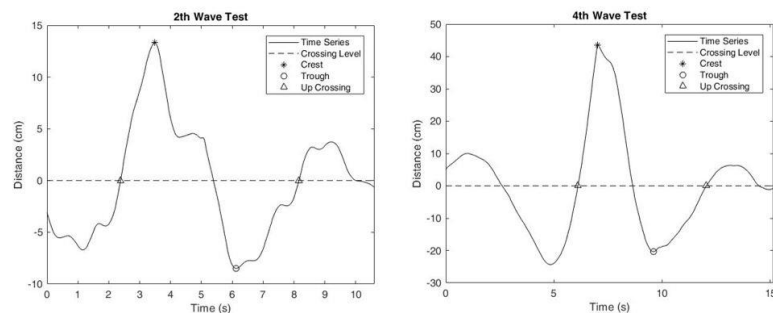
Pengujian data ke-2 berdasarkan (Tabel 4.6) yang memiliki nilai kesalahan tertinggi dimana hasil posisi terukur adalah 21,84 cm yang seharusnya adalah 60 cm, grafiknya dilihat pada (Gambar 4.21). Nilai percepatan pada (Gambar 4.21) (a) yang terukur oleh alat kurang dari $\pm 2 \text{ m/s}^2$, dimana apabila dibandingkan dengan data percepatan yang memiliki nilai kesalahan terkecil, lihat (Gambar 4.20) (a), data percepatan tertinggi yang terukur sebesar $\pm 15 \text{ m/s}^2$, selisih antara kedua data sebesar $\pm 13 \text{ m/s}^2$. Data kecepatan pada (Gambar 4.21) (b) saat diberikan HPF memiliki perubahan yaitu data awal dan akhir menjadi kurang dari nol. Data Posisi (Gambar 4.21) (c) yang diberikan HPF memiliki perubahan, dimana data keseluruhan diturunkan. Berdasarkan perbandingan ini terlihat bahwa nilai kesalahan yang besar terjadi karena sensor gagal mengukur data percepatan saat sensor bergerak.

Penyebab lainnya yang membuat RMSE sebesar 29,32% berdasarkan (Tabel 4.6) pada pengujian perpindahan secara vertikal atau pada sumbu Z memiliki nilai RMSE yang paling besar, lalu saat nilai di integral kan sebanyak dua kali maka nilai dari *drift* ikut terintegral yang mengakibatkan kesalahan menjadi semakin besar. Upaya pencegahan sudah dilakukan dengan mengimplementasikan *high pass filter* sebelum data diintegrasikan dan juga menggunakan madgwick filter dan quaternion. Hasil perioda yang berhasil dihitung dari pengujian bisa dilihat pada (Tabel 4.7).

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Perioda Gelombang

No	1	2	3	4	5
Period (s)	7,66	5.96	5,63	5,88	4,91

Berdasarkan data pada (Tabel 4.7) perioda yang dihitung adalah selang waktu (dalam detik) yang ditempuh antara satu titik *wave up zero* dengan titik *wave up zero* selanjutnya, atau dihitung dalam satu gelombang. Nilai perioda tidak ada perbandingan dikarenakan tidak ada alat yang bisa menghitung gerakan alat menggunakan tangan untuk satu gelombang penuh, dimana ujicoba dilakukan setiap satu gelombang sekali. Hasil algoritma ZCD untuk sinyal uji dari alat lihat (Gambar 4.22).



Gambar 4. 22 Grafik Perbandingan ZCD (a)Data Ke-2 dan (b)Data Ke-4

Grafik pada (Gambar 4.22) (a) adalah garfik hasil dari algoritma ZCD pada data pengujian ke-2 dan Grafik pada (Gambar 4.22) (b) adalah data uji ke-4. Berdasarkan (Gambar 4.22) maka dapat diketahui bahwa algoritma berhasil mendeteksi dan menghitung nilai dari karakteristik gelombang yang diukur pada penelitian ini berdasarkan tujuan penelitian, dimana karakteristik yang harus dideteksi adalah tinggi gelombang dan perioda gelombang.