

## Makalah Seminar Tugas Akhir

# Aplikasi Sensor Accelerometer Pada Deteksi Posisi

Vidi Rahman Alma<sup>1</sup>, Wahyudi, S.T, M.T<sup>2</sup>, Iwan Setiawan, S.T, M.T<sup>2</sup>

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jln. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia

### Abstrak

Saat ini, penentuan posisi dan orientasi yang tepat dalam suatu sistem teknis mempunyai peranan yang penting, terutama dalam hal pengendalian pada suatu sistem navigasi. Salah satu instrumen yang digunakan pada sistem navigasi adalah Inertial Measurement Unit (IMU). IMU terdiri dari kombinasi sensor percepatan (accelerometer) dan sensor angular (gyroscope) untuk menjejaki keberadaan dan pergerakan suatu benda. Accelerometer merupakan salah satu sensor yang telah mengalami kemajuan dan banyak diaplikasikan untuk mengukur kemiringan, vibrasi, percepatan, dan posisi.

Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan dan pembuatan instrumentasi accelerometer sebagai salah satu komponen IMU untuk mendeteksi posisi/jarak dengan 3 sumbu kebebasan. Data berupa posisi diperoleh dari hasil proses integral ganda terhadap keluaran accelerometer yang berupa percepatan (gravitasi). Sistem instrumentasi ini terdiri dari sensor accelerometer, pengondisi sinyal, mikrokontroler ATmega 8535 sebagai unit pemroses utama, dan komputer yang akan mengolah data masukan dan menampilkan data keluaran dengan menggunakan pemrograman Borland Delphi 7.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sinyal keluaran sensor berbentuk sinusoida yang dipengaruhi oleh proses pergerakan dan arah gerak benda. Ketika sensor bergerak ke sumbu negatif maka respon keluaran berbentuk sinusoida dan ketika sensor bergerak ke sumbu positif maka respon keluaran berbentuk sinusoida terbalik. Sinyal keluaran accelerometer terdiri dari sinyal informasi dan derau, sehingga diperlukan filter dan algoritma untuk mengompensasi derau tersebut. Algoritma terbaik pada sumbu x adalah algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan filter eksponensial dengan error sebesar 2,03 %. Algoritma terbaik pada sumbu y adalah algoritma 2 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan filter eksponensial dengan error sebesar 2 %. Algoritma terbaik pada sumbu z adalah algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan filter FIR dengan error sebesar 2,61%.

**Kata kunci :** Accelerometer, Mikrokontroler ATmega 8535, Integral Ganda, Posisi

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Salah satu hal terpenting dalam pengendalian sistem navigasi adalah dalam hal penentuan posisi dan orientasi. Oleh karena itu dibutuhkan suatu instrumen yang dapat mendeteksi keadaan dan keberadaan suatu benda. Sensor-sensor yang biasa dipakai untuk mengetahui data keadaan suatu benda diantaranya adalah GPS (posisi koordinat 3 dimensi), sensor *altimeter* (sensor ketinggian), dan sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*).

IMU banyak digunakan untuk keperluan navigasi suatu roket. Teknologi ini sudah banyak diterapkan di beberapa negara maju, tetapi juga masih menjadi teknologi yang sulit diperoleh di beberapa negara lain. IMU merupakan suatu unit dalam modul elektronik yang mengumpulkan data percepatan angular dan akselerasi linear, yang kemudian dikirim ke unit pemroses utama. IMU terdiri dari kombinasi *accelerometer* (sensor percepatan) dan *gyroscope* (sensor angular) untuk

menjejaki keberadaan dan pergerakan suatu benda. *Accelerometer* digunakan untuk mengukur percepatan suatu benda dan *gyroscope* digunakan untuk mengukur rotasi dari suatu benda.

Sebuah penelitian terhadap sistem instrumentasi IMU dapat dilakukan dengan memanfaatkan sensor *accelerometer* dan sensor *gyroscope* yang dijual di pasaran. Suatu informasi posisi/jarak dapat diperoleh dari keluaran sensor *accelerometer* melalui proses algoritma tertentu.

### 1.2 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah merancang dan membuat sistem instrumentasi *accelerometer* sebagai salah satu komponen IMU untuk mendeteksi posisi/jarak suatu benda dengan menggunakan mikrokontroler ATmega 8535.

### 1.3 Pembatasan Masalah

Dalam pembuatan tugas akhir ini penulis membatasi permasalahan sebagai berikut :

1. Sensor *accelerometer* yang digunakan memiliki 3 derajat kebebasan.

<sup>1</sup> Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP

<sup>2</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro UNDIP

2. Pembuatan sistem instrumentasi untuk menerapkan sensor *accelerometer* sebagai pendeteksi jarak/posisi.
3. Dalam pengujian sistem pendeteksi jarak ini hanya digunakan untuk arah sumbu negatif.
4. *Range* percepatan yang digunakan sebesar 1,5 g.
5. Tidak membahas secara mendetail rangkaian di dalam sensor *accelerometer*.
6. Sistem monitoring yang digunakan adalah komputer dengan bantuan bahasa pemrograman *Borland Delphi 7*.
7. Mikrokontroler yang digunakan adalah mikrokontroler ATmega 8535 dengan pemrograman *Code Vision AVR*.

## II. DASAR TEORI

### 2.1 Sensor Accelerometer

*Accelerometer* adalah alat yang digunakan untuk mengukur percepatan, mendeteksi dan mengukur getaran (vibrasi), dan mengukur percepatan akibat gravitasi (inklinasi). Sensor *accelerometer* mengukur percepatan akibat gerakan benda yang melekat padanya.

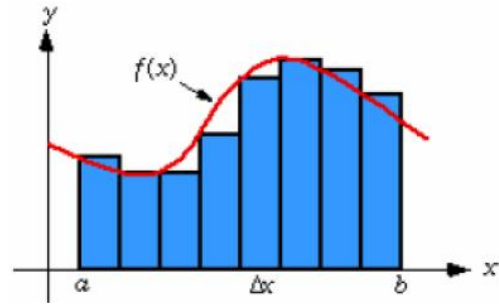
*Accelerometer* dapat digunakan untuk mengukur getaran pada mobil, mesin, bangunan, dan instalasi pengamanan. Sensor *accelerometer* juga dapat diaplikasikan pada pengukuran aktivitas gempa bumi dan peralatan-peralatan elektronik, seperti permainan 3 dimensi, *mouse* komputer, dan telepon. Untuk aplikasi yang lebih lanjut, sensor ini banyak digunakan untuk keperluan navigasi.

Percepatan merupakan suatu keadaan berubahnya kecepatan terhadap waktu. Bertambahnya suatu kecepatan dalam suatu rentang waktu disebut juga percepatan (*acceleration*). Jika kecepatan semakin berkurang daripada kecepatan sebelumnya, disebut *deceleration*. Percepatan juga bergantung pada arah/orientasi karena merupakan penurunan kecepatan yang merupakan besaran vektor. Berubahnya arah pergerakan suatu benda akan menimbulkan percepatan pula. Untuk memperoleh data jarak dari sensor *accelerometer*, diperlukan proses integral ganda terhadap keluaran sensor.

$$\vec{s} = \int (\int (\vec{a}) dt) dt \dots\dots\dots (1)$$

Proses penghitungan ini dipengaruhi oleh waktu cuplik data, sehingga jeda waktu cuplik data (*dt*) harus selalu konstan dan dibuat sekecil mungkin

Secara sederhana, integral merupakan luas daerah di bawah suatu sinyal selama rentang waktu tertentu. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Pengintegralan sederhana terhadap suatu sinyal .

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f(x_i) \Delta x \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta x = \frac{b - a}{n} \dots\dots\dots (3)$$

Persamaan pengintegralan pada persamaan (2) masih memiliki *error* yang cukup besar. Untuk lebih mengoptimalkan hasil pengintegralan maka dapat digunakan metode Runge-Kutta dengan pendekatan *trapezoidal* seperti pada persamaan (4).

$$x_k = x_{k-1} + \frac{h}{2} [f(x_k, t_k) + f(x_{k-1}, t_{k-1})] \dots\dots\dots (4)$$

Dari persamaan (4) dapat diketahui bahwa hasil integral saat ini ( $x_k$ ) dipengaruhi oleh hasil integral sebelumnya ( $x_{k-1}$ ), masukan saat ini ( $f(x_k, t_k)$ ), dan masukan sebelumnya, serta waktu cuplik antar data masukan (*h*).

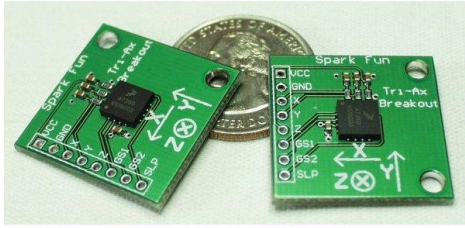
Percepatan yang diperoleh dari hasil pengukuran *accelerometer* pada kenyataannya bukanlah data percepatan benda murni, melainkan juga terdapat derau.

$$\dot{U} = a + r + d \dots\dots\dots (5)$$

Nilai *a* merupakan percepatan benda sesungguhnya, nilai *r* adalah *random noise*, dan *d* adalah *drift noise*.

### 2.2 Accelerometer MMA7260Q

Pada tugas akhir ini digunakan sensor *accelerometer* MMA7260Q dengan tiga sumbu pengukuran, yaitu terhadap sumbu x, sumbu y, dan sumbu z. Sensor *accelerometer* ini digunakan untuk mengukur percepatan benda dalam satuan gravitasi (g). Sensor ini dapat mengukur percepatan dari -1,5 g sampai 6 g. Sensor *accelerometer* MMA7260Q dengan rangkaian pendukung yang terintegrasi dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Break out accelerometer MMA7260Q.

Pada sensor *accelerometer* MMA7260Q ini memiliki fasilitas *g-select* yang memungkinkan sensor bekerja pada tingkat sensitivitas yang berbeda-beda. Penguatan internal pada sensor akan berubah sesuai dengan tingkat sensitivitas yang dipilih, yaitu 1,5 g, 2 g, 4 g, atau 6 g. Pemilihan tingkat sensitivitas ini dilakukan dengan memberikan input logika pada pin *g-select1* dan *g-select2*. Deskripsi pemilihan tingkat sensitivitas pada sensor *accelerometer* MMA7260Q dapat diamati pada Tabel 1.

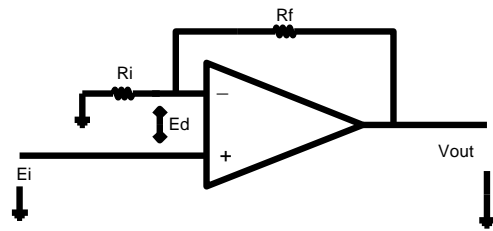
Tabel 1 Deskripsi tingkat sensitivitas *accelerometer* MMA7260Q.

<i>g-select1</i>	<i>g-select2</i>	<i>g-Range</i>	<i>Sensitivity</i>
0	0	1,5 g	800 mV/g
0	1	2 g	600 mV/g
1	0	4 g	300 mV/g
1	1	6 g	200 mV/g

Sensor *accelerometer* MMA7260Q dapat digunakan untuk mengukur baik percepatan positif maupun percepatan negatif. Ketika sensor dalam keadaan diam, keluaran sensor pada sumbu x akan menghasilkan tegangan *offset* yang besarnya setengah dari tegangan masukan sensor ( $V_{dd}$ ). Tegangan *offset accelerometer* dipengaruhi oleh orientasi sensor dan percepatan statis tiap sumbu akibat gaya gravitasi bumi. Untuk percepatan positif maka sinyal keluaran akan meningkat di atas tegangan *offset*, sedangkan untuk percepatan negatif sinyal keluaran akan semakin menurun di bawah tegangan *offset*.

### 2.3 Penguat Tak Membalik

Pada penguat tak membalik tegangan masukan berada pada terminal (+). Tegangan keluaran pada rangkaian penguat tak membalik memiliki polaritas yang sama dengan tegangan masukannya. Rangkaian penguat tak membalik ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Rangkaian penguat tak membalik.

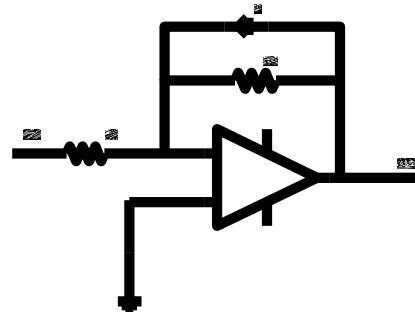
Persamaan perolehan tegangannya dapat dilihat pada persamaan (6).

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_i} \dots\dots\dots (6)$$

### 2.4 Low Pass Filter Aktif

Filter aktif selain menggunakan beberapa komponen pasif seperti resistor dan kapasitor, juga menggunakan komponen aktif seperti penguat operasional yang penguatannya bisa diatur sesuai dengan yang diinginkan.

Salah satu jenis filter aktif adalah *low pass filter* aktif. Filter ini menggabungkan rangkaian *low pass filter* pasif berupa rangkaian R-C dengan komponen aktif berupa penguat operasional. Contoh rangkaian *low pass filter* aktif dapat dilihat pada Gambar 4.

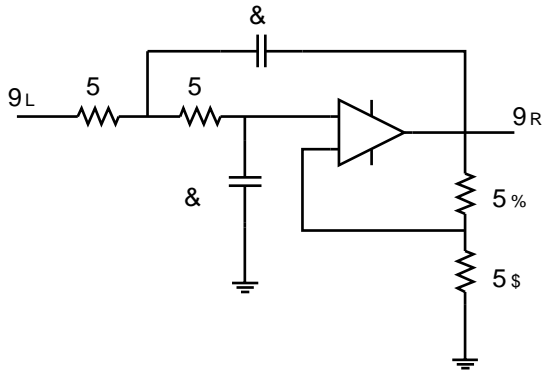


Gambar 4 Rangkaian *low pass filter* aktif sederhana.

Pada kapasitor, semakin rendah frekuensinya maka hambatannya semakin tinggi. Pada frekuensi yang sangat rendah, kapasitor akan tampak seperti terbuka, sehingga rangkaian bekerja seperti penguat pembalik (*inverting*) dengan penguatan  $-R_2/R_1$ . Jika frekuensi bertambah, reaktansi kapasitif berkurang, menyebabkan penguatan tegangan turun (*drop off*). Jika frekuensi mendekati tak terhingga, kapasitor menjadi seperti terhubung singkat dan penguatan tegangan mendekati nol. Sinyal keluaran maksimum terjadi ketika frekuensi rendah.

Filter aktif orde 2 terdiri dari 2 buah rangkaian filter R-C dan rangkaian penguat operasional. Filter aktif orde 2 yang paling sederhana adalah rangkaian *voltage-controlled-*

voltage-source (VCVS) yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Filter Aktif Orde 2.

Frekuensi *cut off* dari rangkaian pada Gambar 5 ditunjukkan pada persamaan 7.

$$f_c = \frac{1}{2\pi(R_1 R_2 C_1 C_2)^{1/2}} \dots\dots\dots (7)$$

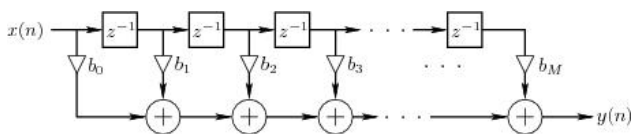
**2.5 Filter Digital**

Filter digital adalah semua filter elektronik yang bekerja dengan menerapkan operasi matematika digital atau algoritma pada suatu pemrosesan sinyal. Salah satu batasan utama pada filter digital adalah dalam hal keterbatasan kecepatan pemrosesan/waktu komputasi yang sangat tergantung dengan kemampuan komputer.

**2.5.1 Finite Impulse Response**

Salah satu jenis filter digital adalah filter *finite impulse response* (FIR). Filter FIR adalah salah satu jenis filter digital yang mempunyai respon *impulse* yang berhingga.

Pada model FIR, sinyal masukan akan mengalami tundaan. Banyaknya tundaan akan tergantung dari orde model. Jika modelnya adalah orde 1 maka banyaknya tundaan adalah satu kali, jika orde 2 maka banyaknya tundaan adalah dua kali, dan seterusnya. Pada FIR tiap-tiap masukan tersebut akan diboboti dengan suatu nilai yang pada dasarnya akan mewakili nilai parameter dari *plant* yang dimodelkan. Secara umum struktur FIR orde ke-M dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Blok diagram filter FIR orde M.

Persamaan (8) merupakan persamaan filter FIR orde ke-M dalam kawasan diskrit.

$$y(n) = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + b_2 x[n-2] + \dots + b_M x[n-M] \dots (8)$$

**2.5.2 Filter Eksponensial**

Filter eksponensial merupakan filter rekursif linear yang sangat sederhana dan biasanya digunakan dalam analisis terhadap waktu. Persamaan filter eksponensial orde 1 dapat dilihat pada persamaan (9) dan orde 2 pada persamaan (10).

$$y(t) = (1 - a) \cdot y(t - 1) + a \cdot x(t) \dots\dots\dots (9)$$

$$y(t)^{[2]} = (1 - a) \cdot y(t - 1)^{[2]} + a \cdot y(t) \dots\dots\dots (10)$$

Secara umum parameter *a* dapat ditentukan dengan persamaan (11).

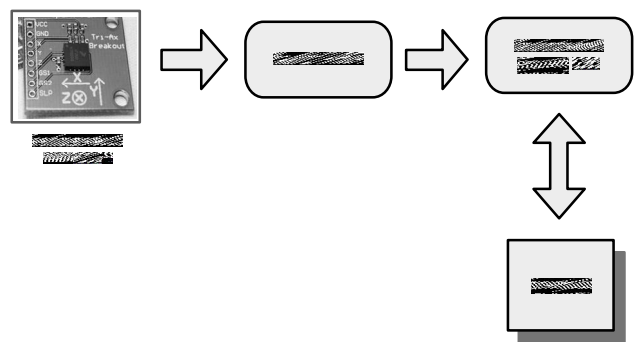
$$a = 1 - \frac{1}{2\pi f_c} \dots\dots\dots (11)$$

Dengan *fc* merupakan frekuensi *cut off* dan *fs* merupakan frekuensi *sampling* data.

**III. PERANCANGAN SISTEM**

**3.1 Perancangan Perangkat Keras (Hardware)**

Secara umum perancangan perangkat keras dari sistem instrumentasi *accelerometer* meliputi perancangan sensor *accelerometer* MMA7260Q, pengondisi sinyal, unit masukan dan keluaran pada mikrokontroler ATmega 8535. Secara umum perancangan perangkat keras dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Diagram blok perancangan instrumentasi *accelerometer*.

Tiap-tiap bagian dari diagram blok sistem pada Gambar 7 dapat dijelaskan sebagai berikut :

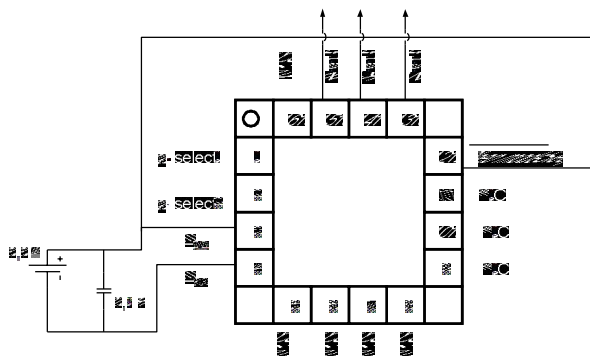
1. Sensor *accelerometer* MMA7260Q digunakan untuk mengetahui besarnya percepatan suatu benda dalam 3 derajat kebebasan.
2. Pengondisi sinyal berfungsi untuk memfilter dan menguatkan sinyal keluaran dari sensor.

3. Mikrokontroler ATmega 8535 digunakan untuk menerima data dari sensor, mengubahnya menjadi data digital, memfilter data secara digital, dan melakukan komunikasi serial antara mikrokontroler dengan komputer.

Sensor *accelerometer* ini beroperasi pada tegangan 2,2 – 3,6 volt dengan tegangan tipikal 3,3 volt (Vdd). Keluaran sensor *accelerometer* berupa tegangan analog yang merepresentasikan data percepatan dalam satuan gravitasi (g).

Sensor *accelerometer* MMA7260Q memiliki tingkat sensitivitas yang dapat dipilih yaitu 1,5 g/ 2 g/ 4 g/ 6 g. Tingkat sensitivitas dapat dipilih dengan melakukan pengesetan pada pin *g-select1* dan *g-select2*. Koneksi masukan dan keluaran pin-pin pada *accelerometer* MMA7260Q dapat dilihat pada Gambar 8.

Tugas akhir ini menggunakan *g-range* 1,5 g dengan tingkat sensitivitas 800 mV/g pada tegangan tipikal 3,3 volt. Pengesetan dilakukan dengan memberikan input logika 0 pada pin 1 dan pin 2 pada pin *g-select1* dan *g-select2*.



Gambar 8 Konfigurasi pin-pin *accelerometer* MMA7260Q.

### 3.2 Perancangan Perangkat Lunak (Software)

#### 3.2.1 Perancangan Filter Digital

##### A. Finite Impulse Response

Langkah awal dalam pemrograman FIR adalah menentukan orde dan koefisien filter yang sesuai dengan frekuensi *cut off* dan waktu cupliknya. Frekuensi *cut off* ( $f_{-3dB}$ ) pada sumbu x dan sumbu y ditentukan sebesar 350 Hz dan sumbu z sebesar 150 Hz. Penentuan koefisien dan orde filter dilakukan dengan bantuan *FDA tools* pada pemrograman Matlab.

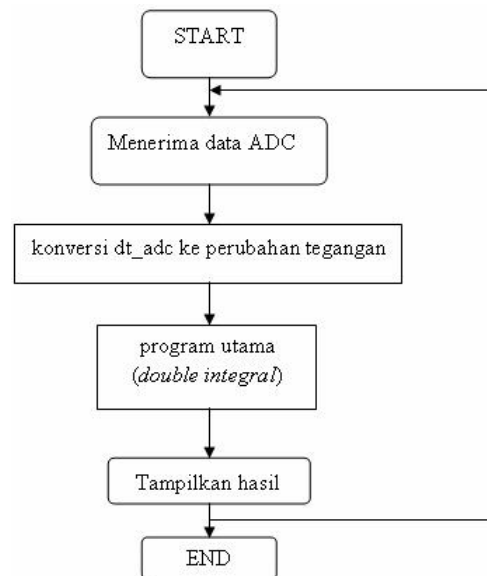
Dari hasil percobaan, pendekatan orde filter yang sesuai untuk sumbu x dan y adalah orde 15. Pada sumbu z, dengan pertimbangan lamanya waktu komputasi dan kualitas sinyal keluaran, maka ditentukan orde sumbu z sebesar 15.

##### B. Filter Eksponensial

Filter eksponensial yang digunakan adalah filter eksponensial orde 2. Pengujian dilakukan dengan menentukan nilai parameter faktor pengali ( $a$ ), kemudian mengamati sinyal keluaran yang optimal. Parameter  $a$  dapat dicari dengan persamaan (11). Nilai parameter  $a$  pada sumbu x dan y adalah 0,17 dan nilai parameter  $a$  pada sumbu z adalah 0,08.

#### 3.2.2 Pemrograman pada Borland Delphi 7.0

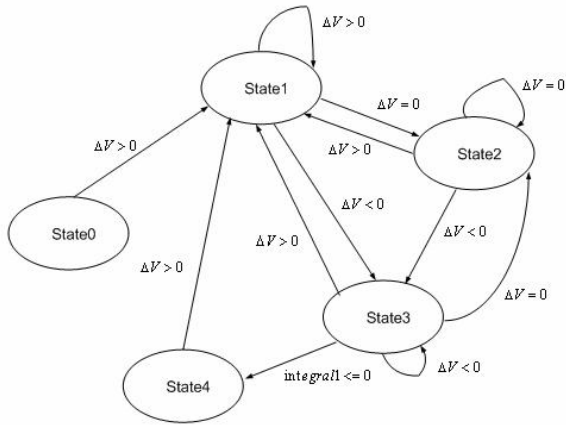
Pemrograman dalam komputer dengan menggunakan Borland Delphi ini meliputi pembacaan data 8 bit dari ADC mikrokontroler, konversi data ADC menjadi tegangan dan percepatan, dan pengintegralan ganda dengan *finite state machine*. Secara umum, diagram alir dari pemrograman sistem deteksi jarak pada komputer dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Diagram alir dari pemrograman utama sistem deteksi jarak.

##### A. Perancangan Finite State Machine

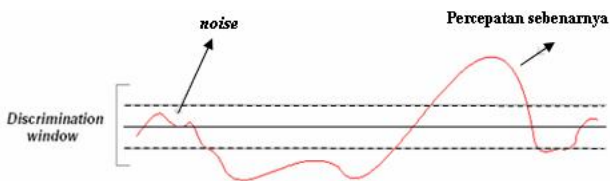
Perancangan *finite state machine* menggunakan prinsip kinematika gerak benda. Suatu benda yang akan bergerak menempuh suatu jarak tertentu dari kondisi diam ( $a_0=0$ ), pada awalnya akan mengalami suatu percepatan ( $a>0$ ). Hingga suatu saat ia mengalami sedikit perlambatan untuk kemudian berada pada kondisi kecepatannya konstan ( $a=0$ ). Sebelum benda tersebut berhenti di suatu jarak tertentu, ia akan mengalami percepatan negatif ( $a<0$ ). Dalam kondisi  $a<0$ , benda akan berhenti ketika kecepatannya nol ( $v=0$ ). Proses tersebut dapat dijelaskan dalam diagram state pada Gambar 10.



Gambar 10 Perancangan *finite state machine* pendeteksi jarak.

### B. Kompensasi Derau Mekanik

Derau mekanik ini terjadi pada *micromachine*, yang antara lain disebabkan oleh vibrasi mekanik dan pergerakan elektron. Ketika sensor dalam kondisi tidak bergerak sejumlah *error* kecil masih tampak pada sinyal keluaran sehingga nantinya sejumlah *error* tersebut akan terjumlahkan. Pada kondisi ideal, ketika sensor dalam kondisi tidak bergerak maka sinyal keluaran akan konstan pada tegangan *offset*. Oleh karena itu dibutuhkan metode yang dapat mengasumsikan sejumlah *error* kecil tadi sebagai tegangan *offset* yang konstan. Metode tersebut disebut dengan *filtering window* atau *discrimination window*. Dengan adanya *discrimination window* maka daerah yang terletak antara data yang valid dengan data yang tidak valid akan mendapatkan perlakuan khusus.



Gambar 11 Metode *discrimination window* sinyal keluaran sensor.

Beberapa algoritma yang dapat digunakan pada metode *discrimination window*, yaitu :

#### 1. Algoritma 1

Dengan menganggap derau yang terjadi sama dengan tegangan *offset*, sehingga derau tersebut tidak tampak.

#### 2. Algoritma 2

Algoritma ini hampir sama dengan algoritma yang pertama. Perbedaannya terletak pada data referensi yang digunakan sebagai acuan dalam perhitungan selisih tegangan. Data percepatan sebenarnya adalah data diluar batasan *noise*.

### C. Pengecekan Akhir Pergerakan

Pada kondisi ideal, suatu benda yang menempuh jarak tertentu, pada awalnya kecepatannya akan semakin bertambah, kemudian kecepatan akan mencapai nilai maksimal, dan pada akhirnya kecepatan akan kembali ke nilai nol. Pada kenyataannya, ketika benda sudah mencapai akhir pergerakan, hasil integral 1 dari percepatan (kecepatan) tidak mencapai nilai nol kembali. Ada 2 metode yang dapat digunakan untuk pengecekan akhir gerak benda :

#### 1. Metode batas akhir integral pertama

Kecepatan merupakan hasil integral pertama dari percepatan. Untuk memastikan kecepatan bernilai nol ketika benda berhenti, maka hasil integral 1 perlu dibatasi pada nilai akhir tertentu.

#### 2. Metode batas akhir integral pertama dengan pencuplikan

Metode ini hampir sama dengan metode 1, yaitu dengan menggunakan batas akhir integral 1. Setelah integral 1 mencapai batas yang ditentukan, akan dilakukan penambahan 2 pencuplikan terhadap data percepatan.

### 3.2.3 Penentuan Faktor Kalibrasi

Faktor kalibrasi merupakan suatu konstanta yang digunakan untuk mengkalibrasi antara hasil integral ganda dari percepatan dengan jarak sebenarnya. Pada tugas akhir ini, akan dicari faktor kalibrasi hasil integral dari berbagai macam algoritma pada kompensasi derau mekanik, pembatasan integral 1, dan filter digital yang digunakan. Pada akhirnya, pengujian dengan berbagai algoritma tadi bertujuan untuk menentukan algoritma dan metode yang paling sesuai sehingga menghasilkan data jarak yang paling mendekati jarak sebenarnya atau dengan kata lain tingkat kesalahannya kecil.

### A. Algoritma 1 Kompensasi Derau dan Batas Akhir Integral Pertama

Tabel 2 Pengujian faktor kalibrasi sumbu x algoritma 1 dan batas integral 1.

Percobaan	Jarak tercatat (cm)	Jarak sebenarnya (cm)	Faktor kalibrasi
1.	6,448	15	2,32630273
2.	14,069	30	2,13234771
3.	22,414	45	2,00767378
4.	28,018	60	2,14148048
5.	38,04	75	1,97160883
Faktor kalibrasi rata-rata			2,11588271

Tabel 3 Pengujian faktor kalibrasi sumbu y algoritma 1 dan batas integral 1.

Percobaan	Jarak tercatat (cm)	Jarak sebenarnya (cm)	Faktor kalibrasi
1.	7,139	15	2,10113461
2.	17,339	30	1,73020359
3.	28,899	45	1,55714731
4.	40,446	60	1,48345943
5.	47,935	75	1,56461875
Faktor kalibrasi rata-rata			1,68731274

Tabel 4 Pengujian faktor kalibrasi sumbu z algoritma 1 dan batas integral 1.

Percobaan	Jarak tercatat (cm)	Jarak sebenarnya (cm)	Faktor kalibrasi
1.	7,206	15	2,081598668
2.	10,267	20	1,947988702
3.	12,824	25	1,949469744
4.	12,889	30	2,327566142
5.	16,24	40	2,463054187
Faktor kalibrasi rata-rata			2,153935489

### B. Algoritma 1 Kompensasi Derau dan Batas Akhir Integral Pertama dengan Pencuplikan

Dengan cara yang sama dengan percobaan penentuan faktor kalibrasi pada algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama pada poin A, maka dapat diperoleh hasil penentuan faktor kalibrasi pada algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan pencuplikan untuk masing-masing sumbu keluaran. Faktor kalibrasi rata-rata pada sumbu x sebesar 2,073, pada sumbu y sebesar 1,598, dan pada sumbu z sebesar 2,447.

### C. Algoritma 2 Kompensasi Derau dan Batas Akhir Integral Pertama

Dengan cara yang sama dengan percobaan penentuan faktor kalibrasi pada algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama pada poin A, maka dapat diperoleh hasil penentuan faktor kalibrasi pada algoritma 2 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama untuk masing-masing sumbu keluaran. Faktor kalibrasi rata-rata pada sumbu x sebesar 2,089, pada sumbu y sebesar 1,567, dan pada sumbu z sebesar 2,368.

### D. Algoritma 2 Kompensasi Derau dan Batas Akhir Integral Pertama dengan Pencuplikan

Dengan cara yang sama dengan percobaan penentuan faktor kalibrasi pada algoritma 1

kompensasi derau dan batas akhir integral pertama pada poin A, maka dapat diperoleh hasil penentuan faktor kalibrasi pada algoritma 2 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan pencuplikan untuk masing-masing sumbu keluaran. Faktor kalibrasi rata-rata pada sumbu x sebesar 2,019, pada sumbu y sebesar 1,555, dan pada sumbu z sebesar 2,536.

### E. Pengujian Faktor Kalibrasi dengan Filter FIR

Hasil pengujian jarak dengan berbagai algoritma dari A-D dapat dilihat pada poin 4. Dari beberapa pengujian tersebut diperoleh bahwa hasil pengujian sumbu x yang memiliki tingkat kesalahan terendah adalah pada algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama. Hasil percobaan dengan tingkat kesalahan terendah pada sumbu z adalah pada algoritma 1 batas integral pertama dan hasil percobaan dengan tingkat kesalahan terendah pada sumbu y adalah pada algoritma 2 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama. Langkah selanjutnya adalah menentukan faktor kalibrasi dari algoritma terbaik pada tiap-tiap sumbu dengan filter FIR dan filter eksponensial.

Dengan cara yang sama dengan percobaan penentuan faktor kalibrasi pada algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama pada poin A, maka dapat diperoleh hasil penentuan faktor kalibrasi pada algoritma terbaik tiap sumbu dengan filter FIR. Faktor kalibrasi rata-rata pada sumbu x sebesar 2,085, pada sumbu y sebesar 2,464 dan pada sumbu z sebesar 3,153.

### F. Pengujian Faktor Kalibrasi dengan Filter Eksponensial

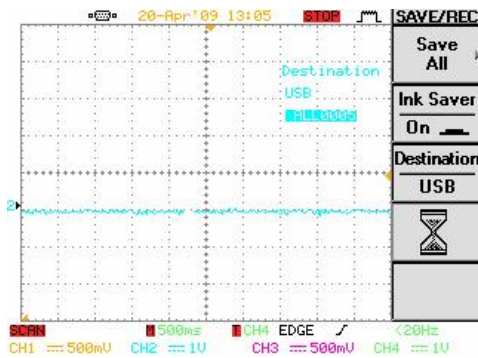
Dengan cara yang sama dengan percobaan penentuan faktor kalibrasi pada algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama pada poin A, maka dapat diperoleh hasil penentuan faktor kalibrasi pada algoritma terbaik tiap sumbu dengan filter eksponensial. Faktor kalibrasi rata-rata pada sumbu x sebesar 1,334, pada sumbu y sebesar 1,528 dan pada sumbu z sebesar 2,621.

## IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

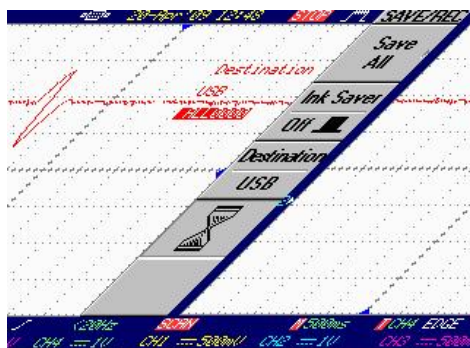
### 4.1 Pengujian Pengondisi Sinyal

Pengondisi sinyal berupa *low pass filter* aktif orde 2 diperlukan karena sinyal respon keluaran sensor masih terdapat derau. Contoh respon keluaran pada masing-masing sumbu arah negatif setelah melalui pengondisi sinyal dapat dilihat pada Gambar 13. Pengujian sinyal keluaran pengondisi sinyal dilakukan dengan menggunakan osiloskop digital dengan ukuran 1 V/div. Tegangan

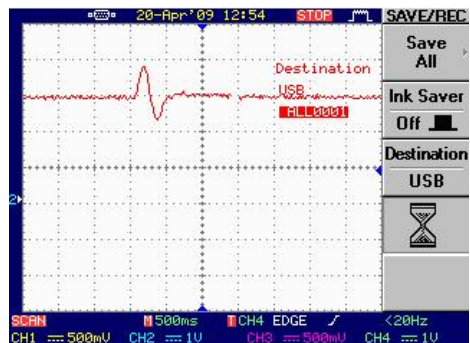
referensi 0 V pada pengujian pengondisi sinyal ini ditunjukkan pada Gambar 12.



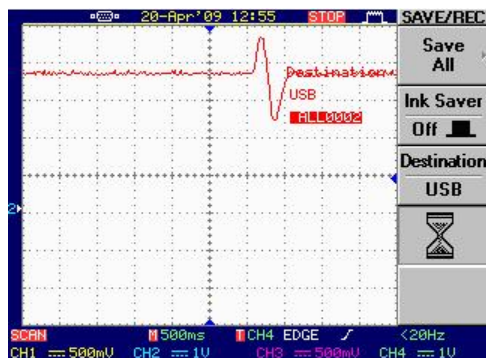
Gambar 12 Tegangan referensi 0 V pengujian pengondisi sinyal.



(a) Respon sumbu x negatif dengan filter aktif.



(b) Respon sumbu y negatif dengan filter aktif.



(c) Respon sumbu z negatif dengan filter aktif.

Gambar 13 Hasil pengujian respon sumbu negatif dengan filter aktif.

Secara grafis, pada Gambar 13 dapat dilihat bahwa derau yang terdapat pada respon sensor pada masing-masing sumbu setelah menggunakan filter aktif LPF orde 2 belum sepenuhnya hilang. Di dalam mikrokontroler sinyal akan difilter kembali secara digital sebelum melalui proses pengintegralan.

## 4.2 Pengujian Jarak

### 4.2.1 Algoritma 1 Kompensasi Derau dan Batas Akhir Integral Pertama

Tabel 5 Pengujian jarak sumbu x algoritma 1 batas integral 1.

No.	Jarak tercatat (cm)	Jarak sebenarnya (cm)	Error jarak (cm)	Persentase Error (%)
1.	15,868	15	0,868	5,786666667
2.	30,996	30	0,996	3,32
3.	45,691	45	0,691	1,535555556
4.	59,601	60	0,399	0,665
5.	77,26	75	2,26	3,013333333
Error rata-rata				2,864111111

Tabel 6 Pengujian jarak sumbu y algoritma 1 batas integral 1.

No.	Jarak tercatat (cm)	Jarak sebenarnya (cm)	Error jarak (cm)	Persentase Error (%)
1.	14,933	15	0,067	0,446666667
2.	28,431	30	1,569	5,23
3.	47,658	45	2,658	5,906666667
4.	60,891	60	0,891	1,485
5.	80,491	75	5,491	7,321333333
Error rata-rata				4,077933333

Tabel 7 Pengujian jarak sumbu z algoritma 1 batas integral 1.

No.	Jarak tercatat (cm)	Jarak sebenarnya (cm)	Error jarak (cm)	Persentase Error (%)
1.	15,539	15	0,539	3,593333333
2.	19,637	30	0,363	1,815
3.	25,155	45	0,155	0,62
4.	31,056	60	1,056	3,52
5.	41,738	75	1,738	4,345
Error rata-rata				2,778666667

### 4.2.2 Algoritma 1 Kompensasi Derau dan Batas Akhir Integral Pertama dengan Pencuplikan

Dengan cara yang sama dengan pengujian jarak pada 4.2.1, maka dapat diperoleh error rata-rata pengujian jarak dengan algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan



pencuplikan. *Error* rata-rata pada sumbu x sebesar 2,96 %, pada sumbu y sebesar 5,07 %, dan pada sumbu z sebesar 5,57 %.

#### 4.2.3 Algoritma 2 Kompensasi Derau dan Batas Akhir Integral Pertama

Dengan cara yang sama dengan pengujian jarak pada 4.2.1, maka dapat diperoleh *error* rata-rata pengujian jarak dengan algoritma 2 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama. *Error* rata-rata pada sumbu x sebesar 4,18 %, pada sumbu y sebesar 3,81 %, dan pada sumbu z sebesar 4,57 %.

#### 4.2.4 Algoritma 2 Kompensasi Derau dan Batas Akhir Integral Pertama dengan Pencuplikan

Dengan cara yang sama dengan pengujian jarak pada 4.2.1, maka dapat diperoleh *error* rata-rata pengujian jarak dengan algoritma 2 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan pencuplikan. *Error* rata-rata pada sumbu x sebesar 3,76 %, pada sumbu y sebesar 5,57 %, dan pada sumbu z sebesar 5,47 %.

#### 4.2.5 Pengujian Jarak dengan Filter FIR

Pengujian jarak dengan filter FIR dilakukan pada algoritma terbaik tiap sumbu. Berdasarkan pengujian jarak dari 4.2.1 sampai 4.2.4 dapat diketahui bahwa algoritma terbaik untuk sumbu x adalah algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan *error* rata-rata sebesar 2,86 %, algoritma terbaik untuk sumbu y adalah algoritma 2 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan *error* rata-rata sebesar 3,81 %, dan algoritma terbaik untuk sumbu z adalah algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan *error* rata-rata sebesar 2,78 %.

Dengan cara yang sama dengan pengujian jarak pada 4.2.1, maka dapat diperoleh *error* rata-rata pengujian jarak algoritma terbaik tiap sumbu dengan filter FIR. *Error* rata-rata pengujian jarak sumbu x dengan algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan filter FIR sebesar 4,13 %, *error* rata-rata pengujian jarak sumbu y algoritma 2 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan filter FIR sebesar 2,3 %, dan *error* rata-rata pengujian jarak sumbu z algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan filter FIR sebesar 2,61 %.

#### 4.2.6 Pengujian Jarak dengan Filter Eksponensial

Pengujian jarak dengan filter eksponensial dilakukan pada algoritma terbaik tiap sumbu. Dengan cara yang sama dengan pengujian jarak pada 4.2.1, maka dapat diperoleh *error* rata-rata

pengujian jarak algoritma terbaik tiap sumbu dengan filter eksponensial. *Error* rata-rata pengujian jarak sumbu x dengan algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan filter eksponensial sebesar 2,03 %, *error* rata-rata pengujian jarak sumbu y algoritma 2 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan filter eksponensial sebesar 1,99 %, dan *error* rata-rata pengujian jarak sumbu z algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan filter eksponensial sebesar 5,01 %.

Dari beberapa pengujian dengan variasi algoritma dan filter digital, hasil pembacaan jarak masih terdapat *error*. Hal ini antara lain disebabkan oleh adanya derau pada sinyal keluaran sensor. Proses integral ganda akan mengakibatkan *error* semakin besar.

## V. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Tidak selamanya ketika benda berhenti bergerak, hasil integral 1 dari percepatan akan kembali ke nilai nol.
2. Algoritma terbaik pada sumbu x adalah algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan filter eksponensial dengan *error* sebesar 2,03 %.
3. Algoritma terbaik pada sumbu y adalah algoritma 2 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan filter eksponensial dengan *error* sebesar 2 %.
4. Algoritma terbaik pada sumbu z adalah algoritma 1 kompensasi derau dan batas akhir integral pertama dengan filter FIR dengan *error* sebesar 2,61%.
5. Respon keluaran *accelerometer* saat terdeteksi percepatan berbentuk sinusoida.
6. Ketika *accelerometer* digerakkan ke arah sumbu negatif maka respon keluarannya berbentuk sinusoida.
7. Ketika *accelerometer* digerakkan ke arah sumbu positif maka respon keluarannya berbentuk sinusoida terbalik atau sinusoida dengan beda fase 180°.

### 5.2 Saran

Untuk pengembangan sistem lebih lanjut, maka dapat diberikan saran-saran sebagai berikut:

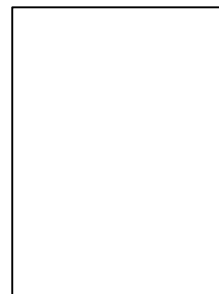
1. Sensor *accelerometer* MMA7260Q memiliki tingkat sensitivitas yang sangat tinggi, sehingga segala hal yang memungkinkan

- terjadinya *error* pada sinyal keluaran perlu diminimalisasi, seperti kestabilan tegangan masukan dan koneksi antar komponen.
2. Pemrograman integral ganda dapat dikembangkan dengan berbagai variasi algoritma pengintegralan.
  3. Aplikasi *accelerometer* sebagai pendeteksi posisi dapat dikembangkan dengan perancangan instrumentasi yang dapat dibawa ke mana-mana (*portable*).

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bejo, A., *C&AVR Rahasia Kemudahan Bahasa C dalam Mikrokontroler ATmega 8535*, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2008.
- [2] Berlin, H.M., *Mendisain Rangkaian Op-Amp*, Binatronika.
- [3] Elert, G., *Acceleration*, <http://www.hypertextbook.com/physics/mechanics/Acceleration>, November 2008.
- [4] Gayakwad, R.A., *Opamps and Linear Integrated Circuits*, Prentice-Hall, 2000.
- [5] Laviola, J.J., *Double Exponential Smoothing : An Anternative to Kalman Filter-Based Predictive Tracking*, The Eurographics Association, 2003.
- [6] Padiyar, K.R., *Power System Dynamics Stability and Control*, John Wiley & Sons, Singapore.
- [7] Seifert, K. dan Camacho, O., *Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers*, Freescale Semiconductor, 2007.
- [8] Wardhana, L., *Belajar Sendiri Mikrokontroler AVR Seri ATmega 8535*, Andi Offset, Yogyakarta, 2006.
- [9] Widada, W., "Aplikasi Digital Exponential Filtering untuk Embedded Sensor Payload Roket", Prosiding Semiloka Teknologi Simulasi dan Komputasi serta Aplikasi, 2005.
- [10] -----, *LM317 Data Sheet*, <http://www.fairchildsemi.com>, November 2008.
- [11] -----, *ATmega 8535 Data Sheet*, <http://www.atmel.com>, Maret 2004.
- [12] -----, *MMA7260Q Data Sheet*, <http://www.freescale.com>, April 2008.
- [13] -----, *Solutions Based in Accelerometers*, <http://www.freescale.com>, Maret 2009.
- [14] -----, *LM 741 Operational Amplifier Data Sheet*, <http://www.national.com>, Agustus 2008.
- [15] -----, *Finite Impulse Response*, <http://www.en.wikipedia.org/wiki>, Januari 2009.
- [16] -----, *Exponential Filter*, <http://www.statistics.com>, Juli 2008.
- [17] -----, *Filter Aktif*, <http://www.elka.brawijaya.ac.id/praktikum/analog>, Desember 2007.

### Vidi Rahman Alma'i (L2F 003 546)



Lahir di Semarang. Saat ini sedang menyelesaikan studi pendidikan strata I di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Konsentrasi Kontrol.

Mengetahui dan mengesahkan,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Wahyudi, S.T., M.T.

Iwan Setiawan, S.T., M.T.

NIP. 132 086 662

NIP. 132 283 183

Tanggal: \_\_\_\_\_

Tanggal: \_\_\_\_\_