Tabel 4.9 Hasil *double* integrasi data percepatan pada sumbu yang tidak bergerak.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Jarak (cm) | Pergeseran sumbu x | | Pergeseran sumbu y | | Pergeseran sumbu z | |
| y | z | x | z | x | y |
| 10 | 0.3 | 4.6 | -1.6 | -5.2 | -2.6 | 2.3 |
| 20 | 2.7 | 6.4 | -1.9 | -4.1 | 5.7 | 5.8 |
| 30 | 0.4 | 12.1 | 0 | 2.3 | 3.8 | 1.7 |
| 40 | 4.4 | 12.3 | -2.5 | -15.5 | 6 | 11.7 |
| 50 | -4.5 | -14.7 | 9 | -9 | 0 | 1.9 |
| -10 | -1 | -2 | 0 | -2.5 | -1.6 | -0.2 |
| -20 | 4.8 | -4.1 | 2.4 | 0.4 | -4.7 | 2.5 |
| -30 | -1.9 | 1.7 | -1.8 | -5.2 | -0.9 | -2.4 |
| -40 | -7.3 | 1.1 | 0.4 | -7.3 | -1.4 | -2.8 |
| -50 | 1 | -4.1 | 1.4 | -11 | 13 | 8.7 |

Bentuk grafik dari data percepatan, kecepatan dan jarak perpindahan dari hasil pengujian pergerakan satu sumbu pada akselerometer H48C dapat dilihat pada lampiran 2.

### Reduksi Error Pada Pengukuran Dan Perhitungan

Jika hanya menggunakan metode pengukuran dan perhitungan diatas, dapat diamati bahwa tingkat kesalahan dari pengukuran dan perhitungan cukup tinggi jika dibandingkan dengan nilai sesungguhnya.

Untuk meminimalisir tingkat kesalahan dilakukan perbaikan proses pengolahan sinyal lebih lanjut. Dimaulai dari sinyal yang didapat dari sensor akselerometer.

Sinyal dari akselerometer terdapat banyak derau untuk itu diperlukan filter. Terdapat banyak macam filter digital yang dapat diaplikasikan untuk sinyal dari akselerometer ini. Pemilihan filter didasarkan pada sinyal yang didapat.

Data percepatan dari akselerometer merupakan sinyal yang informasinya direpresentasikan dalam runtun waktu diskret. Sehingga dipilih filter IIR (*Infinite Impulse Response*) dan *prototype* filter analog yang dipilih adalah LPF *Bessel Filter*.

Langkah selanjutnya adalah menentukan parameter – parameter fiter yaitu frekuensi sampling, frekuensi *cutt off*, dan orde filter.

Pengambilan data akselerometer dalam 1 detik sebanyak 125 data sehingga frekuensi sampling adalah 125 Hz, sedangkan frekuensi *cutt off* dibuat 5 Hz.

Respon frekuensi dari filter digital adalah pada [0,1] sedangkan 1 merepresentasikan π yang merupakan frekuensi *Nyquist* sehingga π = 62.5 Hz. Frekuensi *cutt off* dari filter digital adalah ωc = *fc / fs* = 0.04 rad/s.

Untuk mencari koefisien rekursi dari fungsi alih filter yang akan dibuat pada pengujian ini dilakukan dengan menggunakan program *Filter* *helper* yang tersedia pada website <http://www-users.cs.york.ac.uk/~fisher/mkfilter> dengan memasukan parameter frekuensi sampling, frekuensi *cut off* (*corner frequency*) dan orde filter.

* + 1. **Penentuan Orde Filter**

Untuk menentukan orde filter yang optimal dilakukan pengujian terhadap data yang didapat dari pembacaan akselerometer. Tabel 4.10 menunjukan fungsi alih atau persamaan rekursif untuk tiap orde dari orde 1 hingga orde 10.

Tabel 4.10 Persamaan rekursi filter besel orde 1 hingga 10 dengan frekuensi *cut off* 5 Hz dan frekuensi sampling 125 Hz

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Orde | gain | Persamaan Rekursi |
| 1 | 8.915815088 | y[n] =(x[n-1])+(x[n-0])+(0.7756795110 \* y[n-1]) |
| 2 | 5.050469146e+01 | y[n] =(x[n-2])+(2 \* x[n-1])+(x[n-0])+ (-0.5731643146 \* y[n-2])+ (1.4939637515 \* y[n-1]) |
| 3 | 2.711023309e+02 | y[n] =(x[n-3])+(3 \* x[n-2])+(3 \* x[n-1])+ (x[n-0])+(0.4226750651 \* y[n-3])+ (-1.6550518354 \* y[n-2])+ (2.2028676179 \* y[n-1]) |
| 4 | 1.330668083e+03 | y[n] =(x[n-4])+(4 \* x[n-3])+(6 \* x[n-2])+(4 \* x[n-1])+(x[n-0])+(-0.3041592568 \* y[n-4])+(1.5960375869 \* y[n-3])+ (-3.1910200543 \* y[n-2])+ (2.8871176889 \* y[n-1]) |
| 5 | 5.908173436e+03 | y[n] =(x[n-5])+(5 \* x[n-4])+(10 \* x[n-3])+(10 \* x[n-2])+(5 \* x[n-1]) +(x[n-0])+(0.2116396822 \* y[n-5]) +(-1.3993115731 \* y[n-4]) +(3.7525227570 \* y[n-3])+ (-5.1097576527 \* y[n-2])+ (3.5394905611 \* y[n- 1]) |
| 6 | 2.395969255e+04 | y[n] =(x[n-6])+(6 \* x[n-5])+(15 \* x[n-4])+ (20 \* x[n-3])+(15 \* x[n-2])+(6 \* x[n-1])+(x[n-0])+(-0.1422802283 \* y[n-6]) +(1.1395670964 \* y[n-5])+ (-3.8512763692 \* y[n-4])+ (7.0384217426 \* y[n-3])+ (-7.3466431593 \* y[n-2])+ (4.1595397650 \* y[n-1]) |
| 7 | 9.018718382e+04 | y[n] =(x[n-7])+(7 \* x[n-6])+(21 \* x[n-5])+ (35 \* x[n-4])+(35 \* x[n-3])+ (21 \* x[n-2])+(7 \* x[n-1])+ (x[n-0])+(0.0926657569 \* y[n-7])+ (-0.8744780076 \* y[n-6])+ (3.5784963076 \* y[n-5])+ (-8.2397847975 \* y[n-4])+ (11.5430252792 \* y[n-3])+ (-9.8512532460 \* y[n-2])+ (4.7499094369 \* y[n-1]) |
| 8 | 3.193776579e+05 | y[n] =(x[n-8])+(8 \* x[n-7])+(28 \* x[n-6])+ (56 \* x[n-5])+(70 \* x[n-4])+(56 \* x[n-3])+(28 \* x[n-2])+(8 \* x[n-1])+ (x[n-0])+(-0.0586383381 \* y[n-8])+ (0.6386514185 \* y[n-7])+ (-3.0770659006 \* y[n-6])+ (8.5735247895 \* y[n-5])+ (-15.1242655856 \* y[n-4])+ (17.3167118101 \* y[n-3])+ (-12.5831540162 \* y[n-2])+ (5.3134342636 \* y[n-1]) |
| 9 | 1.074367989e+06 | y[n] =(x[n-9])+(9 \* x[n-8])+(36 \* x[n-7])+ (84 \* x[n-6])+(126 \* x[n-5])+(126 \* x[n-4])+(84 \* x[n-3])+(36 \* x[n-2])+ (9 \* x[n-1])+(x[n-0])+(0.0361333089 \* y[n-9])+(-0.4469788612 \* y[n-8])+ (2.4835321686 \* y[n-7])+ (-8.1411261514 \* y[n-6])+ (17.3659057828 \* y[n-5])+ (-25.0218054775 \* y[n-4])+ (24.3792419665 \* y[n-3])+ (-15.5077379518 \* y[n-2])+ (5.8523586558 \* y[n-1]) |
| 10 | 3.457215320e+06 | y[n] =(x[n-10])+(10 \* x[n-9])+(45 \* x[n-8])+ (120 \* x[n-7])+(210 \* x[n-6])+(252 \* x[n-5])+(210 \* x[n-4])+(120 \*x[n-3])+ (45 \* x[n-2])+(10 \*x[n-1])+(x[n-0])+ (-0.0217192171 \* y[n-10])+ (0.3012846437 \* y[n-9])+ (-1.8998620952 \* y[n-8])+ (7.1765621146 \* y[n-7])+ (-17.9969646061 \* y[n-6])+ (31.3334899657 \* y[n-5])+ (-38.3927239217 \* y[n-4])+ (32.7257173947 \* y[n-3])+ (-18.5945171308 \* y[n-2])+ (6.3684366602 \* y[n-1]) |

Setelah mendapatkan persamaan rekursi dan gain dari tiap – tiap orde, langkah selanjutnya adalah melakukan pengambilan data.

Data yang diambil adalah data pergerakan pada sumbu x sejauh -30 cm. Data yang diambil sebanyak 10 kali kemudian dari sekumpulan data percobaan dilakukan integrasi kedua untuk memperoleh data perpindahan. Dari data perpindahan dapat diambil nilai error dalam rMSE (root Mean Square Error).

Orde filter yang dipilih adalah orde filter yang memberikan nilai rMSE paling kecil. Hasil pengujian filter tiap orde ditunjukan oleh tabel 4.11 dibawah. Sedangkan grafik data percepatan sebelum dan sesudah menggunakan filter dari orde 1 hingga 10 ditunjukan oleh gambar 4.29.

Tabel 4.11 Nilai rMSE pada pengujian filter dari orde 1 hingga 10 dan data yang tidak difilter.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Filter | Percobaan ke - | | | | | | | | | | rMSE |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Tidak difilter | -0.255 | -0.386 | -0.276 | -0.239 | -0.309 | -0.368 | -0.340 | -0.337 | -0.348 | -0.355 | 0.0474 |
| Orde 1 | -0.256 | -0.381 | -0.279 | -0.243 | -0.309 | -0.364 | -0.339 | -0.335 | -0.347 | -0.352 | 0.0450 |
| Orde 2 | -0.257 | -0.379 | -0.280 | -0.244 | -0.309 | -0.363 | -0.339 | -0.335 | -0.346 | -0.351 | 0.0441 |
| Orde 3 | -0.257 | -0.377 | -0.281 | -0.246 | -0.310 | -0.362 | -0.339 | -0.334 | -0.345 | -0.350 | 0.0432 |
| Orde 4 | -0.258 | -0.375 | -0.283 | -0.248 | -0.310 | -0.361 | -0.339 | -0.333 | -0.345 | -0.349 | 0.0423 |
| Orde 5 | -0.259 | -0.374 | -0.284 | -0.249 | -0.310 | -0.360 | -0.340 | -0.333 | -0.344 | -0.349 | 0.0416 |
| Orde 6 | -0.260 | -0.372 | -0.285 | -0.251 | -0.310 | -0.359 | -0.340 | -0.332 | -0.344 | -0.348 | 0.0409 |
| Orde 7 | -0.261 | -0.371 | -0.286 | -0.252 | -0.310 | -0.358 | -0.340 | -0.332 | -0.344 | -0.347 | 0.0404 |
| Orde 8 | -0.262 | -0.370 | -0.286 | -0.253 | -0.310 | -0.357 | -0.340 | -0.332 | -0.344 | -0.347 | 0.0398 |
| Orde 9 | -0.262 | -0.369 | -0.287 | -0.254 | -0.310 | -0.356 | -0.340 | -0.332 | -0.343 | -0.346 | 0.0393 |
| Orde 10 | -0.263 | -0.369 | -0.288 | -0.255 | -0.310 | -0.356 | -0.340 | -0.331 | -0.343 | -0.346 | 0.0389 |

1. Tidak di filter
2. Orde 1
3. Orde 2
4. Orde 3
5. Orde 4
6. Orde 5
7. Orde 6
8. Orde 7
9. Orde 8
10. Orde 9
11. Orde 10

*Gambar 4.29 Grafik nilai percepatan sebelum dan sesudah menggunakan filter orde 1 hingga 10*

Grafik nilai rMSE ditunjukan oleh gambar 4.30 dibawah. Tampak bahwa filter orde 10 memberikan nilai rMSE yang paling kecil.

*Gambar 4.30 Grafik nilai rMSE hasil integrasi kedua (data perpindahan) pada tiap – tiap orde filter dan data yang tidak menggunakan filter.*

Selain itu dapat diamati juga *cross axis effect* dari setiap percobaan. Tabel 4.12 menunjukan nilai rata – rata *cross axis effect* pada pengujian tidak menggunakan filter dan menggunakan filter orde 1 hingga 10 sedangkan grafiknya ditunjukan oleh gambar 4.31.

Dari hasil yang didapat tampak bahwa filter orde 10 memberikan nilai rata – rata pergerakan pada sumbu Y dan sumbu Z paling kecil. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *cross axis effect* pada penggunaan filter orde 10 paling kecil.

Berdasarkan nilai rMSE dan *cross axis effect* maka dipilih filter dengan orde 10.

Tabel 4.12 *Cross Axis Effect* pada pengujian tidak menggunakan filter dan menggunakan filter orde 1 hingga 10.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Filter** | **Rata - rata Y** | **Rata - rata Z** |
| Tidak difilter | 0.0265 | 0.0280 |
| Orde 1 | 0.0243 | 0.0266 |
| Orde 2 | 0.0235 | 0.0261 |
| Orde 3 | 0.0226 | 0.0256 |
| Orde 4 | 0.0218 | 0.0251 |
| Orde 5 | 0.0211 | 0.0247 |
| Orde 6 | 0.0205 | 0.0244 |
| Orde 7 | 0.0200 | 0.0240 |
| Orde 8 | 0.0195 | 0.0237 |
| Orde 9 | 0.0191 | 0.0234 |
| Orde 10 | 0.0186 | 0.0232 |

*Gambar 4.31 Grafik cross axis effect pada pengujian tidak menggunakan filter dan menggunakan filter orde 1 hingga 10*

* + 1. **Penerapan Pada Algoritma Program**

Pada tabel 4.10 ditunjukan persamaan rekursi dari fungsi alih filter yang dihasilkan dengan x[n] adalah sebagai input dan y[n] sebagai output. Langkah selanjutnya adalah menerapkanya kedalam program arduino.

Berikut fungsi filter IIR pada arduino yang diigunakan.

// LPF Bessel, fc = 5 Hz Fs = 125 Hz Orde=10

#define GAIN 3.457215320e+06

**float** IIR(**float** value, **float** xv[], **float** yv[]) {

xv[0] = xv[1];

xv[1] = xv[2];

xv[2] = xv[3];

xv[3] = xv[4];

xv[4] = xv[5];

xv[5] = xv[6];

xv[6] = xv[7];

xv[7] = xv[8];

xv[8] = xv[9];

xv[9] = xv[10];

xv[10] = value / GAIN;

yv[1] = yv[2];

yv[2] = yv[3];

yv[3] = yv[4];

yv[4] = yv[5];

yv[5] = yv[6];

yv[6] = yv[7];

yv[7] = yv[8];

yv[8] = yv[9];

yv[9] = yv[10];

yv[10] = (xv[0]+xv[10]) + 10\*(xv[1]+xv[9]) + 45\*(xv[2]+xv[8]) + 120\*(xv[3]+xv[7]) + 210\*(xv[4]+xv[6]) + 252\*xv[5] + (-0.0217192171\*yv[0]) + (0.3012846437\*yv[1]) + (-1.8998620952\*yv[2]) + (7.1765621146\*yv[3]) + (-17.9969646061\*yv[4]) + (31.3334899657\*yv[5]) + (-38.3927239217\*yv[6]) + (32.7257173947\*yv[7]) + (-18.5945171308\*yv[8]) + (6.3684366602\*yv[9]);

**return** yv[10];

}

Untuk memanggil fungsi IIR diatas dilakukan dengan cara sebagai berikut.

//============ Filtering data akselerometer==========//

**float** accelXIn[11], accelXIn[11], accelXIn[11];

**float** accelXOut[11], accelXOut[11], accelXOut[11];

**float** accelX = IIR(Ax, accelXIn, accelXOut);

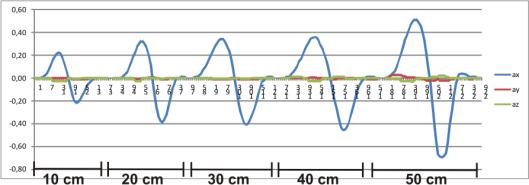
**float** accelY = IIR(Ay, accelYIn, accelYOut);

**float** accelZ = IIR(Az, accelZIn, accelZOut);

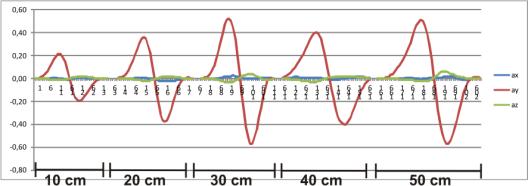
* + 1. **Hasil Pengukuran Setelah Menggunakan Filter**

Pengukuran kembali dilakukan dengan metode mengukur percepatan pada masing-masing sumbu dengan arah pergerakan positif dan negatif untuk mengetahui efek penggunaan filter pada modul.

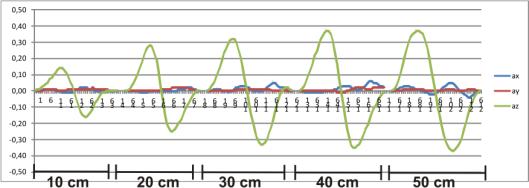
Hasil yang didapat pada pengukuran sumbu X, Y, dan Z pada arah positif maupun negatif ditunjukan oleh gambar 4.32 berikut.



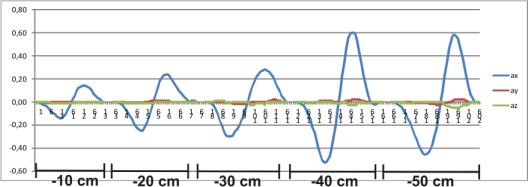
(a)



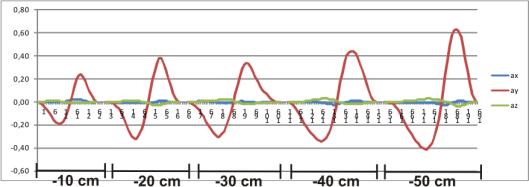
(b)



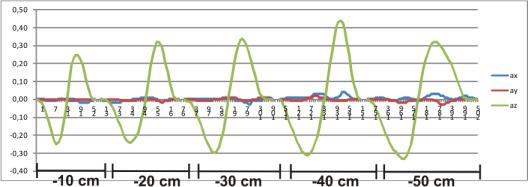
(c)



(d)



(e)



(f)

*Gambar 4.32 Hasil pengujian akselerometer setelah difilter (a) Sumbu x arah positif, (b) Sumbu x arah positif, (c) Sumbu z arah positif, (d)Sumbu x arah negatif,(e) Sumbu y arah negatif,(f) Sumbu z arah negatif*

Berdasarkan grafik yang ditunjukan oleh gambar 4.32 diatas tampak bahwa hasil yang didapatkan setelah menerapkan filter pada akusisi data akselerometer menunjukan kurva pergerakan lebih halus dan lebih baik. Tampak bahwa noise pada tiap – tiap sumbu dapat dikurangi. Hal ini menunjukan bahwa filter bekerja sesuai dengan yang diharapkan.

Langkah selanjutnya adalah melakukan double integral untuk mendapatkan data jarak perpindahan. Untuk hasil masing – masing pergerakan sumbu, hasil double integral ditunjukan oleh tabel 4.13 dibawah.

Tabel 4.13 Data hasil pengujian pergerakan akselerometer pada sumbu x, y, dan z setelah difilter

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Jarak (cm) | X | | Y | | Z | |
| Terukur | *Error* | Terukur | *Error* | Terukur | *Error* |
| 10 | 11.02 | 1.02 | 11.24 | 1.24 | 11.75 | 1.75 |
| 20 | 20.03 | 0.03 | 20.94 | 0.94 | 20.79 | 0.79 |
| 30 | 33.75 | 3.75 | 31.99 | 1.99 | 32.29 | 2.29 |
| 40 | 45.08 | 5.08 | 43.09 | 3.09 | 42.71 | 2.71 |
| 50 | 54.10 | 4.10 | 51.95 | 1.95 | 53.18 | 3.18 |
| -10 | -9.61 | 0.39 | -10.43 | 0.43 | -11.45 | 1.45 |
| -20 | -19.70 | 0.30 | -21.81 | 1.81 | -21.80 | 1.80 |
| -30 | -31.79 | 1.79 | -30.41 | 0.41 | -29.56 | 0.44 |
| -40 | -43.04 | 3.04 | -42.74 | 2.74 | -39.92 | 0.08 |
| -50 | -50.10 | 0.10 | -54.22 | 4.22 | -53.10 | 3.10 |
| Error rata - rata | | 1.96 |  | 1.88 |  | 1.76 |

Sedangkan pengaruh pergerakan terhadap sumbu yang tidak digerakan ditunjukan oleh tabel 4.14 berikut.

Tabel 4.14 Hasil *double* integrasi data percepatan pada sumbu yang tidak bergerak setelah difilter

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Jarak (cm) | Pergeseran Sumbu X | | Pergeseran Sumbu Y | | Pergeseran Sumbu Z | |
| Y | Z | X | Z | X | Y |
| 10 | -0.01 | -0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.04 |
| 20 | -0.01 | -0.02 | -0.01 | -0.01 | 0.00 | 0.02 |
| 30 | -0.05 | -0.05 | 0.03 | -0.02 | 0.06 | 0.02 |
| 40 | 0.00 | -0.03 | 0.04 | -0.03 | 0.04 | 0.01 |
| 50 | 0.03 | -0.07 | 0.03 | 0.01 | 0.05 | 0.03 |
| -10 | -0.01 | -0.01 | 0.01 | 0.00 | -0.01 | 0.00 |
| -20 | -0.01 | -0.03 | -0.03 | -0.01 | -0.04 | -0.02 |
| -30 | -0.03 | -0.01 | 0.00 | 0.02 | -0.02 | -0.01 |
| -40 | 0.01 | -0.03 | -0.02 | 0.03 | 0.06 | 0.00 |
| -50 | -0.03 | -0.05 | -0.06 | 0.03 | 0.03 | -0.06 |

Jika dibandingkan dengan data perhitungan yang belum menggunakan filter, data hasil perhitungan yang menggunakan filter jauh lebih baik walaupun pengaruh gravitasi dan *cross axis efect* belum bisa dihilangkan.