

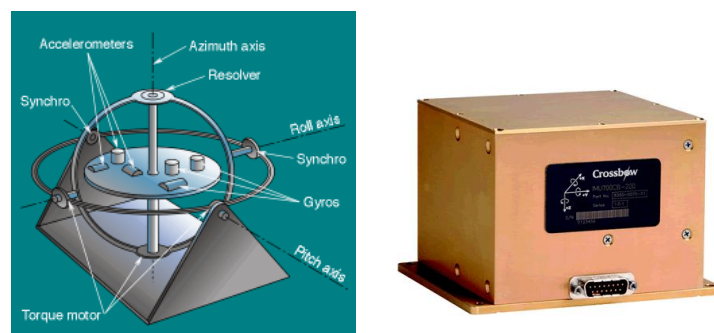
BAB II

DASAR TEORI

2.1. Pengertian *Inertial Measurement Unit* (IMU)

Inertial Measurement Unit (IMU) merupakan alat yang memanfaatkan sistem pengukuran seperti gyroskop dan akselerometer untuk memperkirakan posisi relatif, kecepatan, dan akselerasi dari gerakan motor. IMU adalah bagian dari navigasi system yang dikenal sebagai *Inertial Navigation System* atau INS. Pertama kali didemonstrasikan oleh C.S. Draper tahun 1949, IMU menjadi komponen navigasi umum dari bidang dan kapal.

Ada beberapa macam IMU yang biasa digunakan yaitu IMU *gimbaled* (Gambar 2.1(a)) dan IMU *strap-down* (Gambar 2.1 (b)). IMU *strap-down* lebih umum dipakai saat ini. IMU mempertahankan *6-degree-of-freedom* (DOF) yang memperkirakan gerakan yaitu posisi (X Y Z) dan orientasi (*roll, pitch, yaw*). Sistem seperti IMU hanya mempertahankan perhitungan terus menerus dari orientasi yang dikenal sebagai *Attitude and Heading Reference System* (AHRS) dan dipergunakan dalam cara yang sama sebagai IMU tetapi mempertahankan representasi tidak menyeluruh. Sebagai tambahan untuk mempertahankan sikap motor 6-DOF, komersial IMU juga secara khas mempertahankan perkiraan dari kecepatan dan akselerasi.

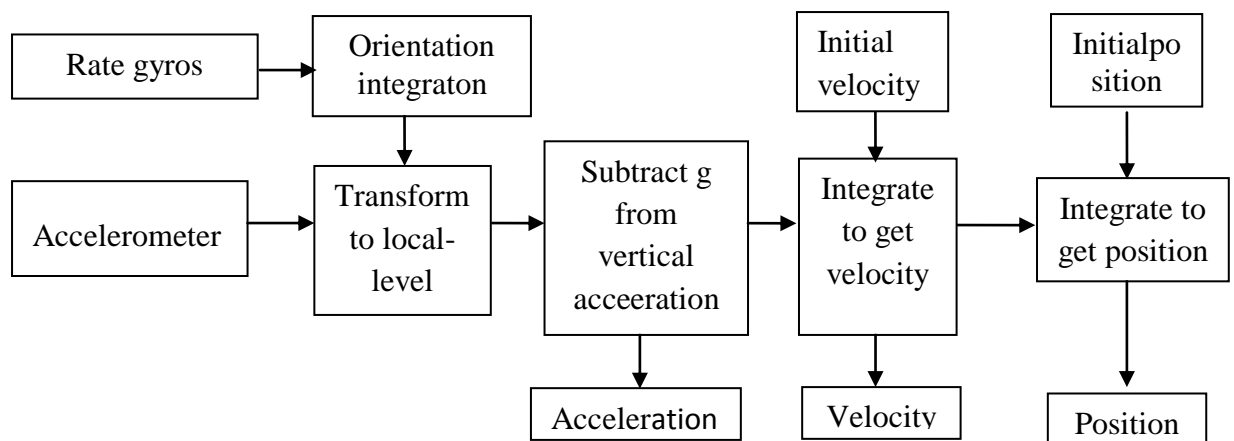


(a) (b)

Gambar 2.1 (a) *Inertial measurement unit gimbaled*.

(b) *Inertial measurement unit strap-down*[Ref. 10, hal. 483]

Perhitungan dasar dari IMU, ditunjukkan di gambar 2.2, yang menggunakan tiga akselerometer *orthogonal* dan tiga gyroskop *orthogonal*. Data gyroskop (ω) diintegrasikan untuk mempertahankan perkiraan orientasi motor (θ) secara terus menerus. Di waktu yang sama, tiga akselerometer digunakan untuk memperhitungkan akselerasi motor (a) dengan segera. Data ini kemudian ditransformasikan melalui perhitungan dari orientasi motor relatif terhadap gravitasi, sehingga *vector gravity* dapat dihitung dan diekstrak dari pengukuran. Hasil akselerasi kemudian diintegrasikan untuk mendapatkan kecepatan motor dan kemudian diintegrasikan lagi untuk mendapatkan posisi (r).



Gambar 2.2 Diagram block *inertial measurement unit*
[Ref. 10, hal. 484]

IMU sangat sensitif untuk mengukur kesalahan di gyroskop dan akselerometer yang mendasar. Penyimpangan gyroskop mengarahkan pada kesalahan perhitungan dari orientasi motor, relatif terhadap gravitasi, menghasilkan kegagalan yang tidak tepat dari vektor gravitasi, seperti data akselerometer yang diintegrasikan dua kali, sisa vektor gravitasi akan menghasilkan kesalahan *quadratic* dalam posisi. Hampir tidak mungkin untuk menghilangkan vektor gravitasi dan error yang lain diintegrasikan dari waktu ke waktu sepenuhnya, karena penyimpangan merupakan isu pokok dari IMU.

2.1.1. GYROSKOP

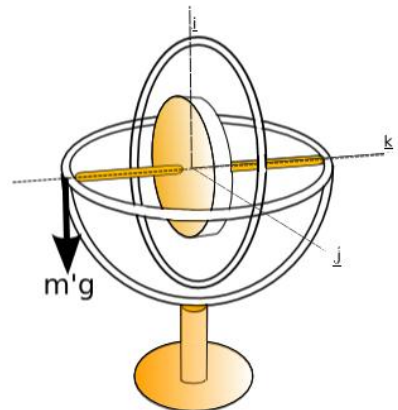
A. Pengertian gyroskop

Gyroskop mengukur perubahan sudut seputar sumbu tetap terhadap ruang inersia. Gyroskop berdasarkan pada kekekalan momentum sudut, efek *sagnac* dan efek *coriolis*. Pada perkembangan terakhir gyroskop berfokus pada teknologi *micro-photonics* dan *micro-electro-mechanics*. Sebagian besar gyroskop *Micro-Electromechanical Sistem* (MEMS) didasarkan pada elemen getar mesin untuk merasakan rotasi. Gyroskop getaran tergantung pada transfer energi antar cara getaran yang berdasar pada akselerasi *coriolis* [Ref. 2 hal.2].

Akselerasi *coriolis* adalah akselerasi nyata yang muncul dalam bidang yang berputar dari referensi. Pada efek *coriolis* objek bergerak sepanjang garis lurus di bidang yang berputar dari referensi. Untuk pengamat dari luar pada bidang inersial garis objek adalah garis lengkung, harus ada aksi untuk memaksa objek mempertahankan gerakan garis lurus seperti yang dilihat oleh pengamat berputar.

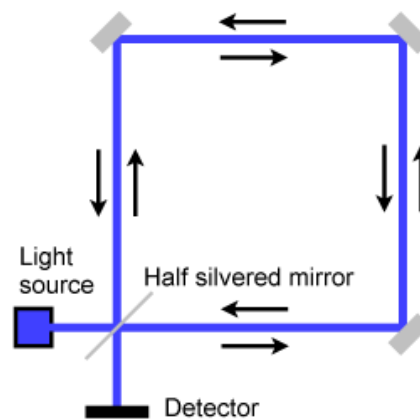
Objek bergerak di garis lurus dengan kecepatan local (v) di bidang berputar rata-rata (Ω) relatif ke bidang inersial yang akan mengalami akselerasi *coriolis*, yang diberikan oleh $a = 2v \times \Omega$. Pemindahan sejumlah akselerasi di gyroskop MEMS untuk mempengaruhi beberapa kecepatan lokal linear dan mengukur nilai yang diakibatkan paksaan *coriolis*. Terdapat tiga jenis gyroskop yang berbeda yaitu gyroskop dengan massa berputar, gyroskop optic dan gyroskop bergetar.

1. Pada gyroskop dengan massa berputar, lihat gambar 2.3, alat memiliki massa berputar dengan tunak (*steady*) terhadap sumbu yang jatuh bebas-bergerak.



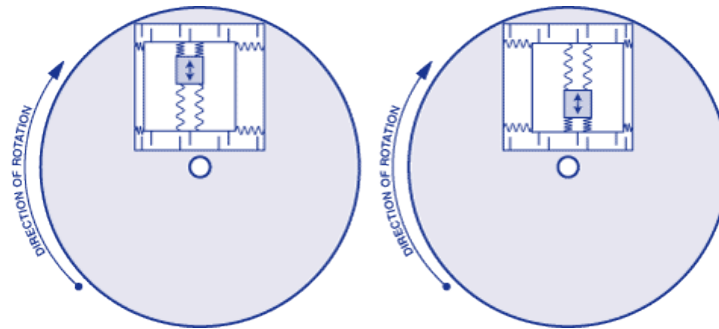
Gambar 2.3 *Spinning mass gyroscope*[Ref. 7]

2. Gyroskop optic, lihat gambar 2.4, berdasarkan pada efek *sagnac* dengan keadaan yang fasenya bergerak diantara dua gelombangberlawanan arah (*counter-propagating*) dalam gelang interferometer yang berputar adalah proposional untuk kecepatan sudut *loop*.



Gambar 2.4 *Optical gyroscope*[Ref. 10]

3. Gyroskop bergetar, lihat gambar 2.5, berdasarkan pada efek *coriolis* yang mengakibatkan kopling pada dua mode resonansi dari resonator mekanik.



Gambar 2.5 *Vibrating gyroscope*[Ref. 10]

B. Parameter Performa Gyroskop

Perbedaan teknologi gyroskop biasanya dibandingkan dalam kaitan biaya, konsumsi tenaga, reliabilitas, berat, volume, stabilitas termal, imunitas dari gangguan eksternal dan parameter performayang lainnya sangat penting menjelaskan perilaku gyroskop ketika digunakan dalam sistem yang lebih rumit.

Pada input-output statis gyroskop karakteristik sejumlah parameter performa gyroskop dapat ditetapkan seperti faktor skala, bias, *range input* dan *output*, *full range*, resolusi, *dynamic range* dan *dead band*. Skala gyroskop didefinisikan sebagai rasio antara perubahan output sensor dan variasi kecepatan sudut relevan. Umumnya dievaluasi sebagai gradient dari garis lurus yang didapatkan dengan penarikan garis linier input-output data.

Bias didefinisikan sebagai rata-rata pada interval waktu spesifik dari output gyroskop yang tidak memiliki hubungan dengan rotasi input maupun akselerasi. Bias diukur dalam satuan per waktu ($/h$ atau $/s$).

Rangeinput adalah *range* dari nilai input di mana performansi gyroskop sesuai akurasi spesifik. *Range output* adalah produk antara *range input* dan faktor skala. Perbedaan aljabar antara nilai atas dan bawah dari range output disebut *full range*.

Minimal nilai sudut atau resolusi yang dapat dideteksi (dieskpresikan dalam satuan perwaktu adalah kecepatan sudut minimum yang dapat dideteksi oleh gyroskop. Rasio antara *range* penuh dan resolusi disebut *range* dinamik (bilangan tak berdimensi).

Dead band adalah *range* antara batasan input dengan variasi dalam input yang menghasilkan perubahan output kurang lebih 10% daripada yang diharapkan. Respons frekuensi gyroskop atau *step response* memperbolehkan untuk mengkalkulasi *band-width* gyroskop dan *time response*.

C. *Noise* pada gyroskop

Noise utama yang berkontribusi pada gyroskop sebagai berikut:

1. *Quantization noise*

Quantization noise utamanya karena konversi output analog ke digital pada gyroskop dimana penyebab noise lainnya tergantung pada prinsip operasi gyroskop.

2. Ketidakstabilan bias (*bias drift*)

Ketidakstabilan bias adalah nilai puncak ke puncak dari pergeseran bias pada jangka waktu yg lama. Diekspresikan dengan satuan perwaktu ($/s$ atau $/h$).

3. *Angle random walk*

Angle random walk (ARW) adalah *noise* akibat dari nilai sudut rotasi yang didapatkan dengan mengintegrasikan kecepatan sudut.

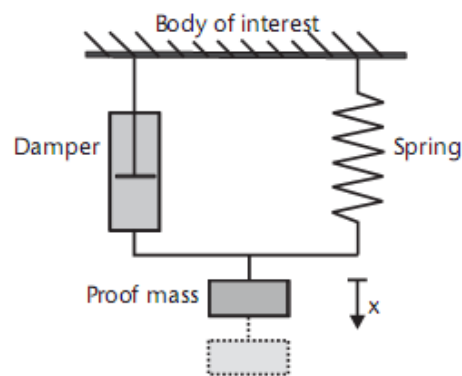
2.1.2. Akselerometer

Sensor *inertial* akselerometer digunakan untuk mengukur akselerasi pada benda. Satu faktor penting mengenai akselerometer adalah bahwa akselerometer sensitif pada semua aksi paksaan eksternal termasuk gaya berat. Akselerometer menggunakan satu dari sejumlah

mekanisme yang mengubah gaya menjadi sinyal yang dapat dibaca komputer.

A. *Micromachined* akselerometer

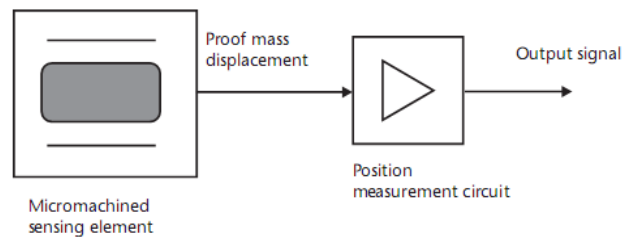
Banyak jenis *micromachined* akselerometer yang telah dikembangkan dan pada umumnya element pendeteksi mekanis terdiri dari massa yang bebas (*proof mass*) bergantung pada suspensi mekanis terhadap reference frame seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Model akselerometer dengan *proof mass* (atau *seismic mass*) [Ref. 3 hal. 175]

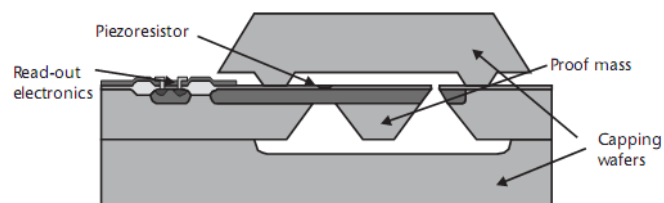
Faktor yang umum untuk semua akselerometer *micromachined* adalah perpindahan (*displacement*) dari massa bebas yang harus diukur dengan sirkuit alat ukur posisi dan dikonversi menjadi sinyal listrik. Banyak tipe dari mekanisme pendeteksi telah diketahui seperti kapasitif, *piezoresistive*, *piezoelectric*, optis, dan *tunneling current*. Setiap mekanisme tersebut memiliki keunggulan dan kekurangan. Mekanisme yang paling sering digunakan adalah kapasitif, *piezoresistive*, *piezo elektrik* dimana karakteristik dan performa dari akselerometer banyak dipengaruhi dari alat pengukur posisi dan kebutuhan utama dari alat tersebut. Karakteristik tersebut adalah *low noise*, linearitas yang tinggi, respon dinamik yang bagus, dan konsumsi daya rendah. Jika sinyal output elektrik dari alat pengukuran posisi digunakan langsung sebagai sinyal dari

akselerometer ini disebut *open loop* akselerometer yang secara konsep ditunjukkan gambar 2.7. Akselerometer *micromachines* yang paling umum digunakan adalah *openloop* karena alat tersebut mudah digunakan dan murah.



Gambar 2.7 Akselerometer *open loop* [Ref. 3, hal.176]

Piezoresistive akselerometer *micromachined* pertama menggunakan *bulk-micromachined sensing element*, terdiri dari silikon inti yang membentuk massa bebas dan *cantilever* sebagai sistem suspensi. Silikon *warper* dihubungkan (*bonded*) diantara dua *glasswafers* di mana rongga dietsa sehingga memperbolehkan massa bergerak terhadap reaksi terhadap akselerasi. Gerakan dari massa bebas dideteksi menggunakan *piezo resistor*. *Piezo resistor* dibuat darimenanamkan boron langsung pada batang (*beams*) dari suspensi silikon pada sistem massa bebas, seperti ditunjukkan pada gambar 2.8.



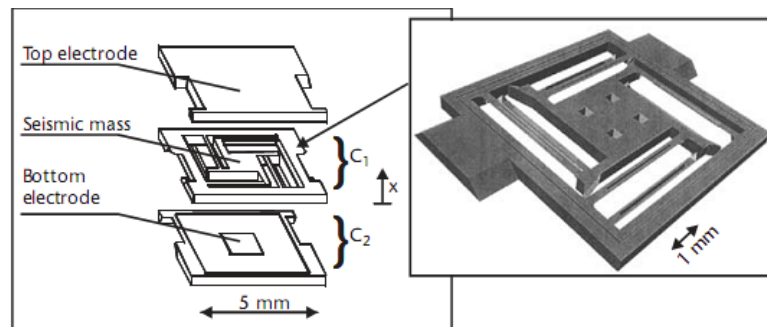
Gambar 2.8 Potongan dari akselerometer *piezoresistive* [Ref. 3, h.181]

B. Kapasitis Akselerometer

Pengukuran perpindahan (*displacement*) dari massa bebas secara kapasitif memiliki keuntungan bawaan terhadap pengambilan sinyal

piezoresistive. Kapasitif akselerometer memberikan sinyal output yang besar, respon keadaan tunak yang baik, dan sensitivitas yang lebih baik karena performa yang sedikit gangguan (*low noise*). Kelemahan utama adalah sensor kapasitif dapat terganggu karena medan elektromagnetis dari lingkungan, karena itu harus dilindungi dengan baik. Kelemahan yang lain adalah tidak dapat dihindarkan kapasitansi parasit pada input kepada alat amplifier akan mendegradasi sinyal.

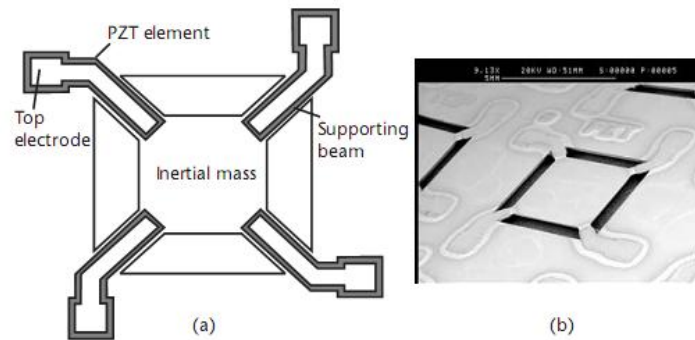
Awal sensor kapasitif dibuat *assembly* beberapa *wafer* dengan teknik penggabungan (*bonding*). *Cap wafer* berada pada atas dan bawah yang menyediakan *damping* membentuk elektroda untuk deteksi kapasitif ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Kapasitif akselerometer [Ref. 3 hal. 182]

C. Akselerometer *Piezo*elektrik

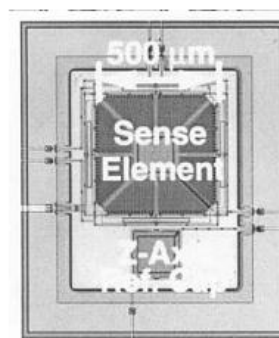
Akselerometer *macroscopic* umumnya menggunakan *piezo*elektrik material untuk mendeteksi massa bebas. Keuntungannya adalah *bandwidth* yang lebih lebar dan sensor yang dapat mencapai puluhan *kilohertz*. Kelemahan utamanya adalah *piezo* elektrik tidak merespon kepada sinyal akselerasi statis dan frekuensi rendah karena kebocoran arus yang tidak dapat dihindari. Desain dari elemen pendeteksi dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) fotografi ditunjukkan dengan gambar 2.10.



Gambar 2.10 a) Desain dari akselerometer piezoelektrik.
b) Foto *Scanning Electron Microscopy* dari elemen pendeteksi [Ref. 3, hal. 187]

D. Akselerometer Multi Axis

Inovasi yang relatif baru untuk akselerometer *micromachined* adalah sensor yang mampu mengukur akselerasi pada dua atau tiga sumbu secara bersamaan. Walaupun mungkin untuk memasang tiga akselerometer sumbu tunggal yang tegak lurus terhadap masing-masing sumbu, akan tetapi akselerometer dua atau tiga sumbu memiliki keunggulan pada harga, ukuran, dan pemasangan inersial pada sumbu pendeteksi, karena elemen pendeteksi didefinisikan dengan akurat oleh metode *photolithographic*. Gambar 2.11 menunjukkan gambar multi axis akselerometer menggunakan *surface micromachined* dengan massa bebas satu buah yang bergerak pada tiga sumbu.



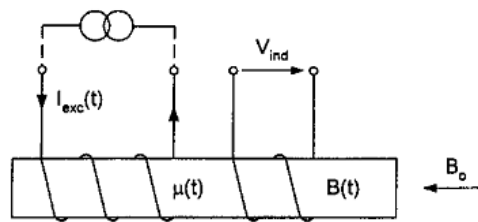
Gambar 2.11 Multi aksis akselerometer [Ref. 3, hal. 189]

2.1.3 Magnetometer

Magnetometer adalah alat pengukuran yang digunakan untuk mengukur kekuatan atau arah dari medan gaya baik yang diproduksi dalam laboratorium maupun yang ada secara alami.

A. Sensor *Fluxgate*

Sensor *fluxgate* mengukur nilai x arah dari medan magnet dc atau frekuensi rendah dengan range sekitar 10^{-10} hingga 10^{-4} T. Prinsip dasar diilustrasikan pada gambar 2.12. Material magnetik lunak inti sensor secara periodik tersaturasi oleh kedua medan eksitasi, di mana hal tersebut menghasilkan arus eksitasi melalui koil eksitasi. Karena hal tersebut permeabilitas berubah dan flux yang berasosiasi dengan medan magnet DC B_0 termodulasi.

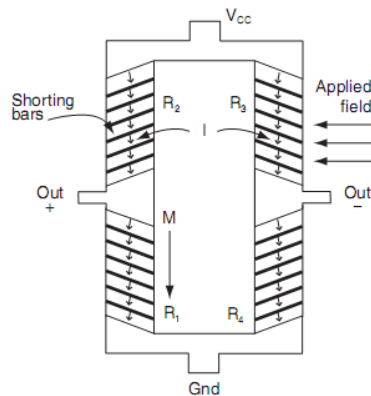


Gambar 2.12.Prinsip dasar *fluxgate*[Ref. 14, hal. 24]

B. Magnetoresistor

Sensor magneto resistor berubah nilai resistansinya sesuai dengan kerapatan *flux magnetic*. Alat ini terbuat dari *nickel-iron(Permalloy)* yang tertanam pada lapisan tipis pada permukaan semikonduktor. Hal ini membutuhkan fabrikasi khusus yang mengkonduksikan lapisan pada semikonduktor yang mudah bergerak seperti *Indium-Antimonide* atau *Indium Arsenide*. Lapisan tipis tertanam pada medan magnet yang kuat dimana mengorientasikan magnetisasi M pada arah parallel dengan resistor. Arus lalu dibuat melewati lapisan tipis pada sudut θ pada arah M . Jika sudut nol, lapisan tipis akan memiliki resistansi tertinggi. Pada sudut θ , resistansi yang terjadi adalah yang terendah. Ketika medan magnet external

diaplikasikan secara sejajar kepada M , maka θ berubah dan resistansi berubah. Prinsip dasar ini menghasilkan perubahan resistansi ketika medan magnet diaplikasikan dan memperbolahkan lapisan tipis digunakan sebagai sensor seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.13 Magneto resistor [Ref. 14 hal. 25]

Sensor *magnetoresistive* sangat sesuai untuk kekuatan magnet sedang dengan contoh navigasi medan bumi dan sistem ukur, karena *magnetoresistive* dapat diproduksi dengan mengintegalkan kepada chip dengan ukuran yang kecil dan biaya rendah.

AMR senso memiliki tiga efek yang berbeda yang mempengaruhi medan magnetis pada resistansi listrik pada konduktor solid state.

1. Hall effect didasarkan pada gaya Lorentz. Peningkatan resistansi didapatkan dengan konduktor pendek dan lebar.
2. Paramagnetik dan diamagnetik semikonduktor dan logam, contoh bismuth.
3. Lapisan tipis ferromagnetik dan ferrimagnetik .

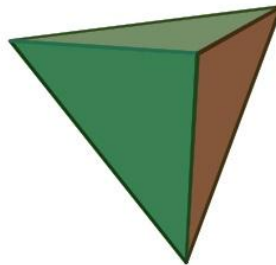
2.2 PLATFORM VALIDASI IMU

2.2.1 Platform

Platform merupakan alat kalibrasi IMU yang bertujuan menghasilkan gerakan bebas. Platform digerakkan oleh motor yang dikendalikan software, di mana software tersebut juga mencatat gerakan-gerakan yang terjadi sehingga dapat dikomparasikan dengan hasil IMU. Gerakan-gerakan tersebut berupa gerakan 4 derajat kebebasan (DOF) pitch(ϕ), roll (θ), yaw(ψ), dan akselerasi sumbu Z (a_z).

2.2.2 Desain

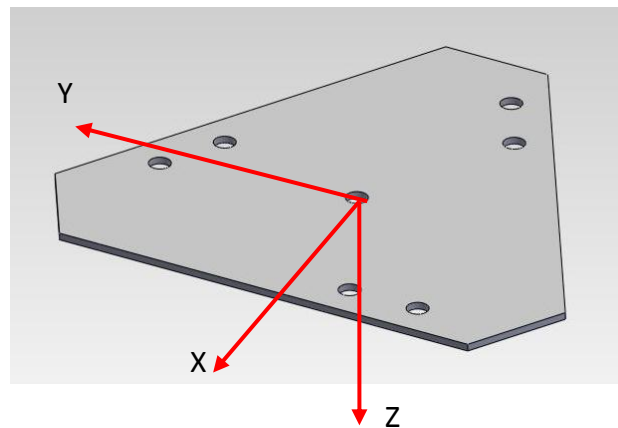
Pada tugas akhir ini, platform dibuat dengan bentuk segitiga dan memiliki empat sisi, yang dapat dilihat di gambar 2.14. Platform memiliki bentuk seperti *tetrahedron*, oleh karena itu platform disebut juga dengan platform *tetrahedron*.



Gambar 2.14 *Tetrahedron* [Ref. 22]

2.2.3 Kinematika dan Dinamika Platform

Platform yang dirancang akan memiliki sistem sumbu yang terhubung pada segitiga pemegang IMU. Digambarkan pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Sistem sumbu platform

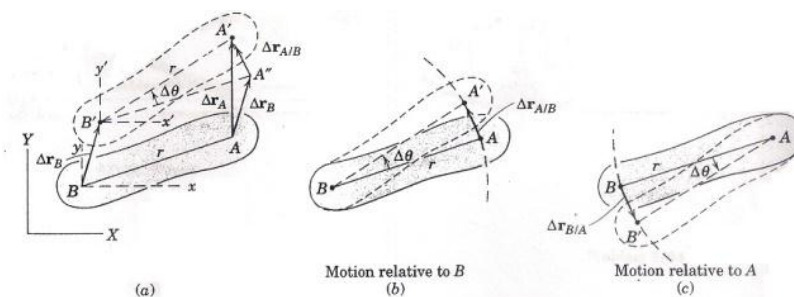
Gerakan kinematika dapat dimodelkan secara dua dimensi sehingga didapat gerakan sederhana berupa *four bar linkage*. Pada platform tugas akhir ini akan menggunakan empat servo yang akan menghasilkan gerakan *yaw, pitch, roll*, dan gerakan sumbu z.

A. *Four bar Linkage*

Pendekatan ke kinematika *rigid body* adalah menggunakan prinsip-prinsip gerakan relatif. Prinsip untuk gerakan relatif terhadap sumbu translasi dan diaplikasikan ke persamaan kecepatan relatif,

$$V_A = V_B + V_{A/B}$$

Kecepatan relatif dikarenakan rotasi, konsep ini diilustrasikan dalam gambar 2.16, yang menunjukkan gerakan *rigid body* di bidang pada gambar dari posisi AB ke $A'B'$ sepanjang waktu Δt .



Gambar 2.16 Gerakan kecepatan relatif karena rotasi [Ref. 15 hal. 357]

B sebagai poin referensi, seperti yang terlihat di gambar 2.16, di mana perpindahan total A adalah

$$\Delta r_A = \Delta r_B + \Delta r_{A/B}$$

Dimana $\Delta r_{A/B}$ memiliki besaran $r\Delta\theta$ sebagai $\Delta\theta$ mendekati nol, maka diperoleh persamaan kecepatan relatif

$$V_A = V_B + V_{A/B}$$

Nilai jarak r antara A dan B tetap konstan. Besaran dari kecepatan relatif dapat dilihat sebagai $v_{A/B} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (|\Delta r_{A/B}|/\Delta t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (|r\Delta\theta|/\Delta t)$ di mana, $\omega = \dot{\theta}$, menjadi

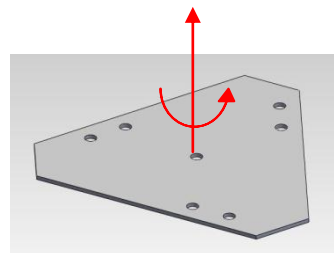
$$V_{A/B} = r\omega$$

Menggunakan r untuk menunjukkan vektor $r_{A/B}$ dari persamaan pertama, dapat dirulis kecepatan relatif sebagai vektor

$$V_{A/B} = \omega \times r$$

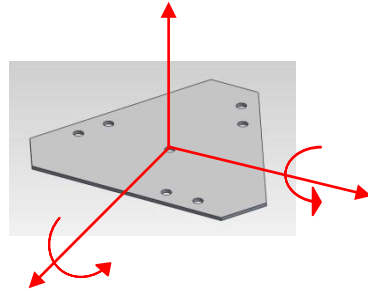
Di mana ω adalah vektor normal kecepatan sudut pada bidang terhadap gerakan yang ditentukan oleh *right-hand rule*.

Pada platform tugas akhir ini gerakan yang terjadi akibat motor servo ke-empat adalah gerakan *yaw* yaitu platform berputar pada sumbu Z seperti pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Gerakan *yaw*

Sementara motor servo menghasilkan gerakan *pitch*, *roll*, dan akselerasi sumbu Z. Seperti digambarkan pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 Gerakan *pitch,roll*, dan akselerasi sumbu Z

B. Kinematika dan Dinamika Simulink SimMechanics

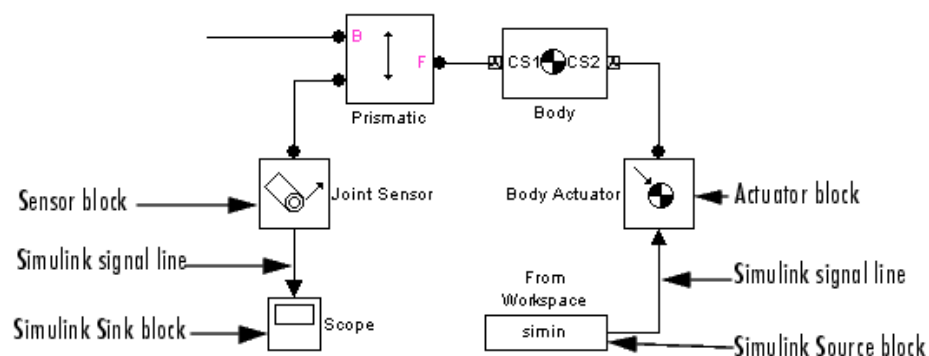
Pada kinematika dan dinamika yang lebih kompleks, analisa akan dibantu oleh software Simulink dengan menggunakan SimMechanics. Software SimMechanics adalah block diagram modeling untuk desain *engineering*, simulasi mesin *rigid multibody*, dan gerakannya menggunakan dinamika gaya dan torsi Newton standar. Menggunakan software SimMechanics, sistem dapat dimodelkan dan disimulasikan dengan alat yang sesuai dengan *bodies* dan properti massa, gerakan yang mungkin dapat terjadi, batasan kinematika, sistem koordinat, dan untuk menginisiasi dan mengukur gerakan body.

Software visualisasi dari SimMechanics menampilkan dan menganimasikan geometri mesin secara 3-D sebelum dan setelah simulasi. Software SimMechanics berdasarkan pada software Simscape™, platform tersebut merupakan produk dari Pemodelan Fisik Simulink, menunjukkan modeling dan desain terhadap prinsip dasar fisik. Software Simscape berjalan pada Simulink Environment dan saling berinteraksi dengan keseluruhan MATLAB Simulink. Tidak seperti blok Simulink, yang mempresentasikan operasi matematis, blok Simscape merepresentasikan fisik komponen dan hubungannya secara langsung.

SimMechanics block *library* memberikan blok spesifik untuk memodelkan mesin.

- Blok *body* merepresentasikan komponen mesin dan lingkungan mesin yang tak bergerak, atau *ground*
- Blok *joint* merepresentasikan derajat kebebasan (*Degree of Freedom*) salah satu *body* terhadap titik atau *ground*
- Blok *Constraint* dan *Driver* membatasi gerak dari gerakan yang terjadi relatif terhadap yang lainnya.
- Blok kondisi awal menspesifikasikan keadaan awal dari mesin
- Blok *Actuator* menspesifikasikan gaya atau gerakan yang dikenakan pada *joint* atau *body*
- Blok *Sensor* mengambil data gaya dan gerakan pada *joint* atau *body* [Ref. 12].

Blok Aktuator memiliki *port* input dari Blok Simulink standar, sehingga blok SimMechanic dapat digabungkan dengan blok Simulink. Begitupula pada blok sensor memiliki *port output blok simulink*. Pada gambar 2.19 blok SimMechanic joint sensor dihubungkan dengan sink blok yang berupa blok Simulink standar, begitu juga *body actuator* yang dihubungkan dengan *blok source* Simulink

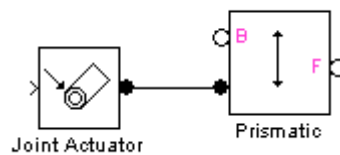


Gambar 2.19 Koneksi blok simulink dan blok SimMechanic [Ref. 19]

Model diagram yang besar cukup sulit dianalisa, karena itu memisahkan bagian-bagian menjadi subsystem dapat mempermudah

analisa.Subsystem dapat dibuat secara otomatis oleh Simulink. Berikut ini cara membuat subsystem secara otomatis:

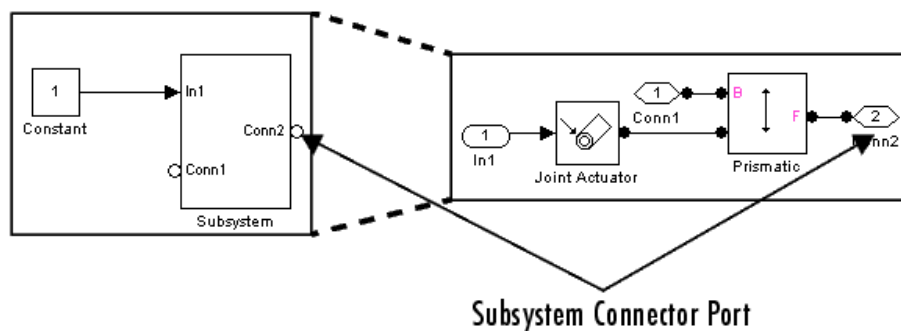
1. Membuat blok yang akan dibuat subsystem pada model window, pada contoh menggunakan blok *joint actuator* dan blok hubungan *prismatic* seperti pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 Blok SimMechanic[Ref. 19]

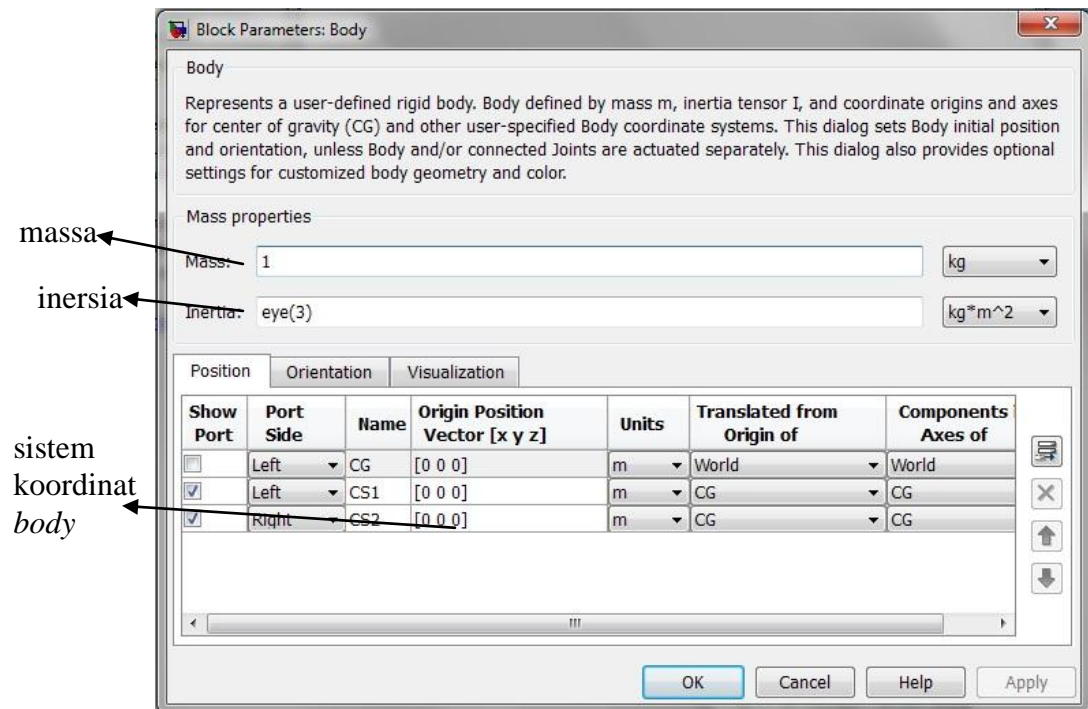
2. Memilih grup blok diagram tersebut
3. Memilih perintah “*Make Subsystem*” pada Simulink

Simulink akan secara otomatis membuat *connection port* yang berfungsi menghubungkan blok SimMechanic didalam blok subsystem dengan blok lain diluar *subsystem*, ditunjukkan pada gambar 2.21.



Gambar 2.21 Subsystem SimMechanic [Ref. 19]

Block body pada SimMechanic digunakan untuk memodelkan *rigid bodies* yang memiliki nilai massa, koordinat, dan berbagai parameter lainnya. GUI dari *body* pada gambar 2.22 menunjukkan hal tersebut.



Gambar 2.22 Parameter *body* GUI

Untuk mengetahui parameter *body* GUI perlu memperhatikan beberapa hal, sebagai berikut:

1. Massa

Massa *body* yang direpresentasikan pada satu titik pusat massa atau CG pada SimMechanic.

2. Inersia

Nilai inersia dari *body* untuk beberapa bentuk umum diberikan pada tabel 2.1. Input pada GUI *body* adalah format matriks

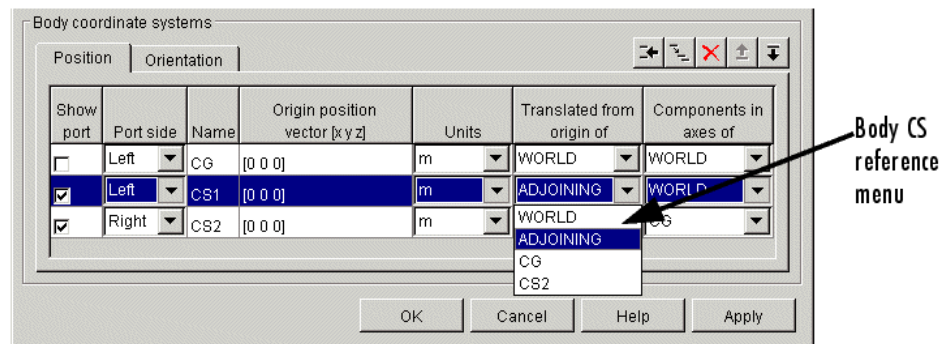
$$\begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix}$$
 yang ditulis pada GUI Inertia $[I_1 \ 0 \ 0 ; 0 \ I_2 \ 0 ; 0 \ 0 \ I_3]$.

Tabel 2.1 Formula inersia

Shape	I_1	I_2	I_3
<i>Thin rod of length L</i>	$\frac{1}{12}mL^2$	$\frac{1}{12}mL^2$	0
<i>Sphere of radius R</i>	$\frac{2}{5}mR^2$	$\frac{2}{5}mR^2$	$\frac{2}{5}mR^2$
<i>Cylinder of radius R and height h aligned along the CG CS z-axis</i>	$\frac{1}{4}m(R^2 + \frac{1}{3}h^2)$	$\frac{1}{4}m(R^2 + \frac{1}{3}h^2)$	$\frac{1}{2}mR^2$
<i>Rectangular parallelepiped of sides a, b, and c.</i>	$\frac{1}{12}m(b^2 + c^2)$	$\frac{1}{12}m(a^2 + c^2)$	$\frac{1}{12}m(a^2 + b^2)$
<i>Cone of height h and base radius R</i>	$\frac{1}{4}m(\frac{3}{5}R^2 + h^2)$	$\frac{1}{4}m(\frac{3}{5}R^2 + h^2)$	$\frac{3}{10}mR^2$
<i>Ellipsoid of semiaxes a, b, and c</i>	$\frac{1}{5}m(b^2 + c^2)$	$\frac{1}{5}m(a^2 + c^2)$	$\frac{1}{5}m(a^2 + b^2)$

3. Sistem koordinat *body*

Langkah pertama untuk menentukan posisi dari sistem koordinat *body* adalah memilih unit yang akan menentukan titik awal *body* dari daftar unit sistem koordinat. Langkah kedua adalah menentukan sistem koordinat referensi dari *body* CS, lihat gambar 2.23, contoh sistem koordinat relatif dimana hal tersebut digunakan untuk mengukur titik awal koordinat *body* dan orientasi dari sumbu koordinat *body*. Pilihan koordinat referensi adalah *world*, *the adjoining CS*, dan *body CS* lainnya dalam *body* yang sama.



Gambar 2.23 Body koordinat GUI

Titik referensi tersebut digunakan secara translasi pada titik komponen yang lainnya. Memasukkan vektor translasi $[x \ y \ z]$ menentukan lokasi dari *body* CS yang diinginkan dari titik referensi. Untuk menyimpan semua setting Klik Apply atau OK.

2.3. Pengukuran

2.3.1 Eror

Dalam penelitian tugas akhir mungkin terjadi eror. Berikut ini dua definisi eror [5, h.34-35]:

a. Eror ukuran atau kuantitas

Eror ukuran atau kuantitas adalah perbedaan antara ukuran atau kuantitas yang diinginkan atau ditentukan dari objek dengan ukuran atau kuantitas yang diukur tanpa referensi terhadap ketidak pastian apapun pada pengukuran.

Bentuk eror ini dapat ditunjukkan dalam terminologi yang absolute atau relative. Secara ringkas istilah “ukuran” akan disamakan dengan kuantitas.

b. Eror pengukuran

Eror pengukuran adalah ketidaksesuaian atau perbedaan antara hasil pengukuran dengan nilai absolute yang sebenarnya dari kuantitas yang diukur.

Eror pengukuran dalam isolasi memiliki nilai praktis yang kecil; bagaimanapun juga, sejumlah pengukuran yang hampir sama, masing-

masing membawa eror, dapat digunakan untuk memberikan informasi berharga mengenai akurasi dan *repeatability* dari pengukuran apa pun yang dibuat.

2.3.2 Karakteristik statis

a. Akurasi

Akurasi adalah kedekatan alat ukur dengan kemampuan mengukur “nilai sebenarnya” barang yang diukur pada kondisi pengukuran. Contoh kemampuan untuk “mengatakan yang sebenarnya”.

b. Sensitivitas

Sensitivitas adalah hubungan antara perubahan dalam pembacaan output dengan perubahan yang diperoleh dari input. Hubungan ini bias linier atau nonlinier. Sensitivitas sering dikenal dengan faktor skala atau pembesaran instrument dan instrument dengan sensitivitas besar (*scale factor*) akan mengindikasikan pergerakan besar pada indicator dari perubahan input kecil.

c. Linearitas

Kebanyakan instrument ditentukan untuk berfungsi melebihi *range* dan instrument dapat dikatakan menjadi linier ketika perubahan *increment* dalam input dan output konstan melebihi *range* yang ditentukan. Jumlah ketidak linearan yang diterima umumnya disebut sebagai persentase dari *range* operasi.

d. Resolusi

Resolusi didefinisikan sebagai perubahan input terkecil yang memberikan beberapa perubahan numerik kecil tapi pasti di output

e. *Threshold*

Apabila input instrument naik secara bertahap dari nol, akan terdapat nilai minimum yang diperoleh untuk memberikan perubahan output yang dapat dideteksi. Nilai minimum didefinisikan *the threshold* dari sebuah instrumen.

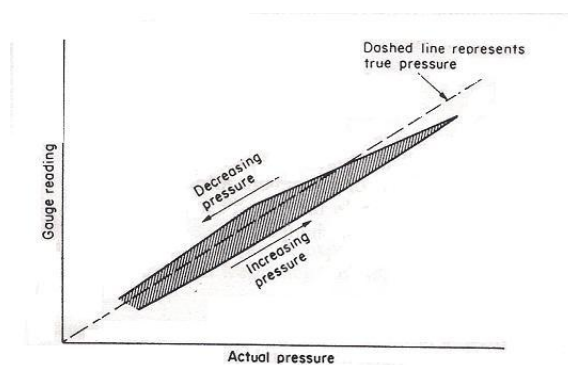
f. *Repeatability*

Repeatability adalah kemampuan mengukur instrument untuk memberikan indikasi serupa, atau respon, untuk aplikasi berulang dari nilai yang sama pada alat dan benda yang diukur pada keadaan pengukuran yang sama.

g. *Hysteresis*

Perbedaan aljabar antara eror rata-rata saat poin *corresponding* dari pengukuran ketika pendekatan dari arah yang berlawanan. Sebagai contoh meningkatkan *as opposed* untuk menurunkan nilai input.

Sistem yang bebas dari *hysteresis* akan memproduksi pembacaan yang sama tanpa tergantung dari apakah pembacaan diterima dari meningkatkan dari nilai terendah atau mengurangi dari nilai tertinggi. Karena kehadiran *hysteresis* banyak instrument yang tidak menghasilkan pembacaan yang sama dibawah kondisi ini dan kurva *hysteresis typical* untuk ukuran tekanan dapat dilihat di gambar 2.24.



Gambar 2.24 Hysteresis pada sensor tekanan [Ref. 6, h.5]

h. *Drift*

Drift adalah variasi dalam output instrument yang tidak disebabkan oleh perubahan apa pun dalam input. Error ini biasanya disebabkan oleh perubahan temperature internal dan ketidakstabilan komponen.

i. *Zero stability*

Zero stability adalah pengukuran kemampuan instrument untuk merubah pembacaan zero setelah pengukuran kembali ke zero dan variasi lain seperti temperature, tekanan, vibrasi, dll telah dihilangkan.

j. *Dead band*

Dead band adalah perubahan terbesar dalam pengukuran di mana pengukuran tidak merespon. Ini diproduksi oleh friksi, backlash atau hysteresis dalam instrument.

k. *Readability*

Readability didefinisikan sebagai kemudahan dengan pembacaan yang dapat diambil dengan instrument. Kesulitan *readability* sering terjadi pada eror pralax saat observer menandai posisi pointer/ penanda pada skala yang telah dikalibrasi.

l. *Range*

Scale range didefinisikan sebagai perbedaan antara nilai nominal dari pengukuran kuantitas *corresponding to the terminal scale mark*. Ini normalnya diekspresikan dalam bentuk 'A ke B' di mana A adalah nilai skala minimum untuk skala dengan nilai terendah, ketentuan bahwa rentang yang berdekatan tumpang tindih.