

Bab II

Tinjauan Pustaka

2.1 Perangkat Penunjuk

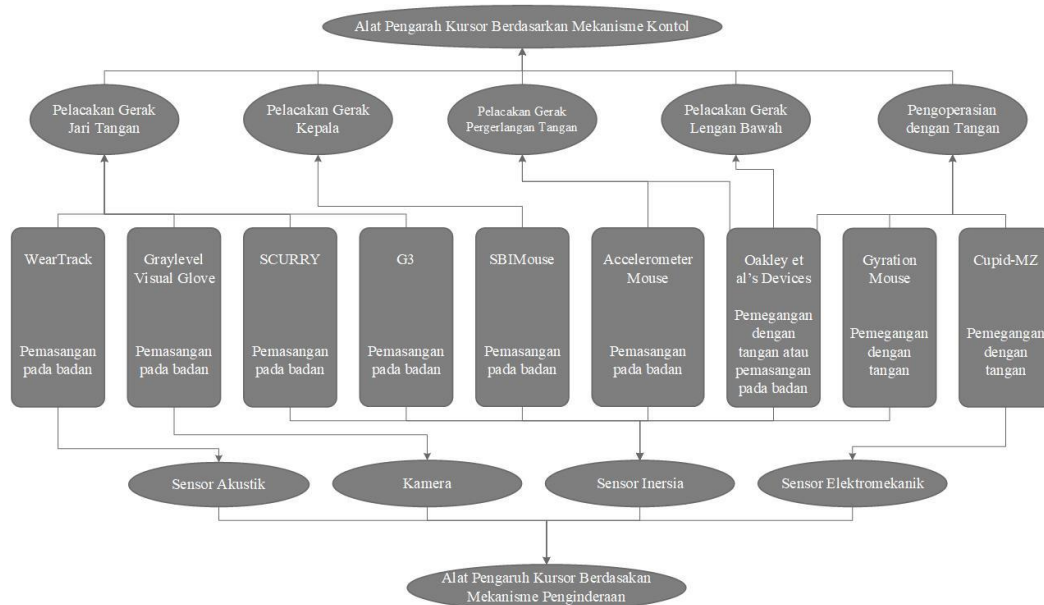
Perangkat penunjuk merupakan salah satu tipe perangkat masukan yang membuat pengguna dapat berinteraksi dengan sebuah komputer dengan cara menggerakkan kursor pada monitor untuk memilih ikon-ikon yang ada dan menjalankan aksi yang diinginkan. Seperti yang terpampang pada Gambar 1.1, terdapat berbagai jenis perangkat penunjuk. Masing-masing jenis perangkat ini memiliki kegunaan tersendiri untuk menyesuaikan dengan keperluan komputasi kekinian sesuai bidang yang dituju.

Alat penunjuk dapat digunakan bagi siapa saja dengan berbagai cara seperti alat penunjuk dengan pengoperasian telapak tangan yang memanfaatkan pergerakan telapak tangan ataupun lengan untuk menggerakkan kursor dan jari untuk memicu suatu aksi. Perangkat penunjuk juga dapat dioperasikan tanpa menggunakan tangan seperti memanfaatkan kamera untuk membaca pergerakan mata manusia sebagai acuan. Perangkat penunjuk masih dapat dikembangkan lagi untuk pengguna dengan kebutuhan khusus dengan bantuan *microcontroller*, sensor, dan bahasa pemrograman.

Gambar 2.1 memuat informasi mengenai jenis-jenis perangkat penunjuk yang dapat digunakan pada komputer. Berdasarkan gambar tersebut penelitian ini akan difokuskan pada alat penunjuk yang menerapkan pelacakan menggunakan lengan atas atau lengan bawah (*forearm-tracking*) dan mengabaikan pelacakan menggunakan jari (*finger-tracking*), pelacakan menggunakan pergelangan tangan (*wrist-tracking*), serta pelacakan menggunakan telapak tangan (*palm-tracking*). Dengan menggunakan metode pelacakan menggunakan lengan atas atau lengan bawah, sensor inersial yang merupakan gabungan dari sensor giroskop, akselerometer, dan magnetometer dapat memberikan solusi dari permasalahan dalam penelitian ini yang merupakan perancangan prototipe perangkat penunjuk komputer untuk penyandang tunadaksa.

Penggunaan sensor inersial sesuai dengan pola gerak lengan manusia yang dapat bergerak ke atas, bawah, kanan, dan kiri. Pergerakan ini nantinya akan

dijadikan dasar untuk mengatur pergerakan *cursor* pada layar komputer. Sensor inersial telah banyak dikembangkan untuk perangkat penunjuk dalam bidang *video game*, salah satu contohnya ialah perusahaan SONY Corporation yang mengusung platform PlayStation telah menanamkan sensor giroskop pada pengendali PlayStation 3 yang dirilis pertama kali di Jepang pada 11 November 2016. Sensor giroskop pada pengendali PlayStation 3 berfungsi untuk memberikan kesan permainan balap yang lebih menarik dengan cara menggerakkan pengendali ke kanan atau ke kiri dengan kemiringan sesuai keperluan untuk membelokkan kendaraan tanpa perlu menekan tombol arah. Sensor inersial ini tentunya tidak banyak dipergunakan untuk menjadi alat penunjuk komputer khususnya untuk pengguna dengan penyandang tunadaksa.



Bedasarkan Calvo & Perugini, 2014

Gambar 2.1 Bagan klasifikasi perangkat penunjuk (*pointing device*)

2.2 Disabilitas

Disabilitas merupakan suatu kondisi pada manusia yang membuat suatu individu terpengaruh secara mental dan atau fisik. Kondisi ini menyebabkan penyandang disabilitas mengalami kesulitan dalam melakukan aktivitas sehari-hari. Hal ini disebabkan oleh berbagai macam disabilitas itu sendiri seperti tunadaksa, penyandang tunadaksa memiliki keterbatasan dalam melakukan aktivitas yang

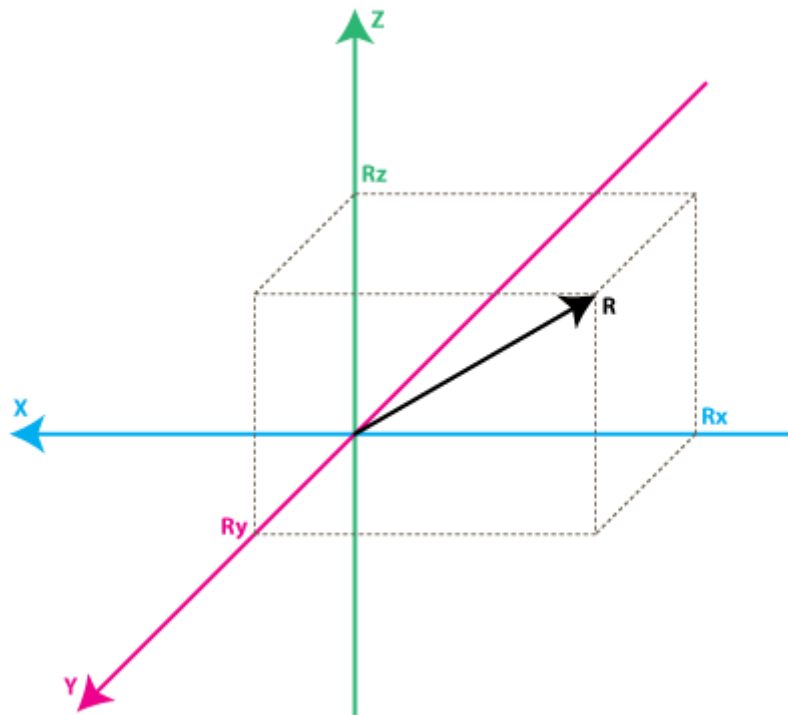
memerlukan penggunaan telapak tangan dan atau jari seperti menggerakkan perangkat penunjuk yang umum beredar di pasaran yaitu tetikus (*mouse*).

2.3 Sensor Inersial

Sensor inersial merupakan sensor yang terdiri dari akselerometer dan giroskop. Sensor inersial mengukur gaya dan tingkat belokan. Pengukuran inersial terdiri dari masing-masing tiga akselerometer dan giroskop yang saling ortogonal (Estefania Munoz Dias, dan Susanna kaiser, 2019).

2.3.1 Sensor Akselerometer

Sensor akselerometer ialah sensor inersial yang mengukur akselerasi linier sepanjang satu arah atau lebih. Seiring proporsionalnya akselerasi terhadap gaya eksternal, pengukuran dari akselerometer dapat merefleksikan frekuensi dan intensitas dari pergerakan manusia (C. Crean dan R. O'kenedy, 2012).



Gambar 2.2 Pemodelan Sumbu Pada Sensor Akselerometer

Sensor akselerometer memiliki 3 sumbu dalam pergerakannya, yakni x, y, dan z. Ketiga sumbu ini dapat dilihat pada gambar 2.2. sumbu x direpresentasikan dalam warna biru muda, sumbu y direpresentasikan dengan warna merah muda, dan

sumbu z direpresentasikan dengan warna hijau muda. Sumbu R merupakan sumbu pergerakan yang dideteksi oleh akselerometer. Untuk menghitung pergerakannya, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$R^2 = Rx^2 + Ry^2 + Rz^2 \quad (2-1)$$

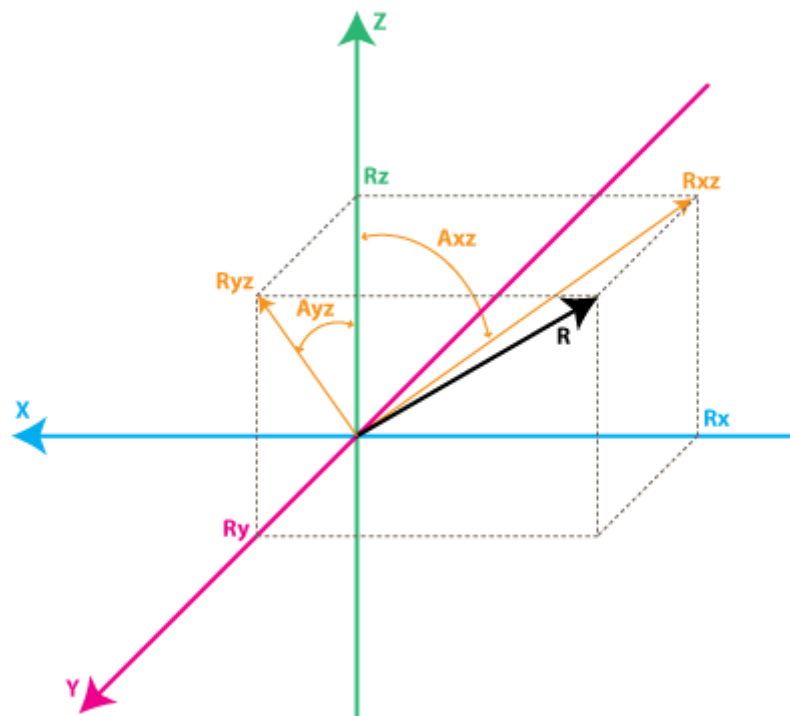
R_x = Vektor X

R_y = Vektor Y

R_z = Vektor Z

2.3.2 Sensor Girooskop

Sensor giroskop merupakan sensor inersial yang mengukur gerakan sudut rotasional dari satu hingga tiga sudut yakni sumbu x, sumbu y, dan sumbu z (C. Crean dan R. O'kenedy, 2012). Pemodelan sumbu pada sensor giroskop tercantum pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Pemodelan Sumbu Pada Sensor Girooskop

Setiap kanal pada giroskop mengukur rotasi pada masing-masing sumbunya. Sebagai contoh, pada giroskop 2 sumbu, rotasi dihitung pada sekitar

sumbu x dan y. Untuk mengekspresikannya pada persamaan matematika, dapat didefinisikan sebagai berikut:

R_{xz} : Vektor R pada sumbu x dan z.

R_{yx} : Vektor R pada sumbu y dan z.

Dari definisi di atas, dapat kita lakukan perhitungan dengan persamaan (2-2) sebagai berikut:

$$R_{xz}^2 = R_x^2 + R_z^2 \quad (2-2)$$

$$R_{yz}^2 = R_y^2 + R_z^2$$

Untuk menghitung laju perubahan nilai giroskop, dapat dilakukan dengan persamaan (2-3) berikut:

$$\text{Rate}_{Axz} = (Axz1 - Axz0) / (t1 - t0) \quad (2-3)$$

$$\text{Rate}_{Ayz} = (Ayz1 - Ayz0) / (t1 - t0)$$

Keterangan:

A_{xz} : sudut diantara sumbu x dan z.

A_{yz} : sudut diantara sumbu y dan z.

t_0 : Waktu mula-mula.

t_1 : Waktu akhir

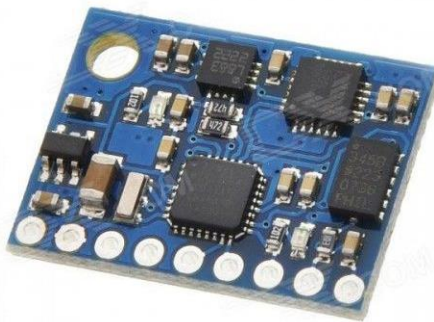
Dengan persamaan diatas, dapat diperoleh sebuah nilai dengan satuan derajat/detik atau deg/s.

2.3.3 Sensor Magnetometer

Sensor magnetometer merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur kekuatan dan arah dari medan magnet. Medan magnet pada setiap tempat memiliki perbedaan, hal ini disebabkan oleh bebatuan dan interaksi antara partikel yang dipancarkan dari matahari dan magnetosfer planet. (Yong Bai, 2019).

2.3.4 GY-951

Gambar 2.4 merupakan bentuk fisik dari modul Sensor Inersial GY-951. Modul GY-951 terdiri dari empat buah chip yang terdiri dari Atmega328 sebagai pengolah data, ITG3205 sebagai sensor giroskop, ADXL345 sebagai sensor akselerometer, dan HMC5883L sebagai magnetometer. Modul GY-951 memiliki sembilan sumbu navigasi inersial. Tiga buah sensor yang ada akan melakukan pengukuran yang nantinya hasil pengukuran ini akan diolah oleh chip ATmega328 untuk dikirim ke mikrokontroller lain melalui jalur komunikasi Serial Peripheral Interface (SPI). Dalam kasus ini, mikrokontroller yang digunakan adalah ESP32.



Gambar 2.4 Modul Sensor Inersial GY-951

2.4 ESP32 Devkit-C

ESP32 Devkit-C merupakan mikrokontroller yang didesain oleh Espressif Systems di Shanghai. ESP32 Devkit-C memiliki dua mode komunikasi yakni menggunakan media komunikasi kabel seperti SPI, I2C, Serial, dan UART, serta media komunikasi nirkabel yang terdiri dari *Bluetooth Low Energy* dan WiFi. Seperti mikrokontroller pada umumnya, ESP32 Devkit-C memiliki beberapa pin untuk masukan atau keluaran. Masukan analog akan diubah ke range 0 hingga 4095 (2^{12}) oleh ESP32 Devkit-C. Perangkat ini juga memiliki masukan dan keluaran digital yang dinotasikan dengan angka 1 dan 0 (Kolban, 2018).

Gambar 2.5 merupakan bentuk fisik ESP32 Devkit-C yang dirancang untuk dapat bertahan pada kondisi yang ekstrem. Perangkat ini mampu bekerja dengan baik di lingkungan industrial. ESP32 Devkit-C dapat berfungsi dengan andal pada suhu -40°C hingga 125°C . Adanya sirkuit kalibrasi lanjutan membuat ESP32

Devkit-C mampu untuk menghapus ketidaksempurnaan sirkuit eksternal dan beradaptasi dengan perubahan kondisi eksternal secara dinamis.



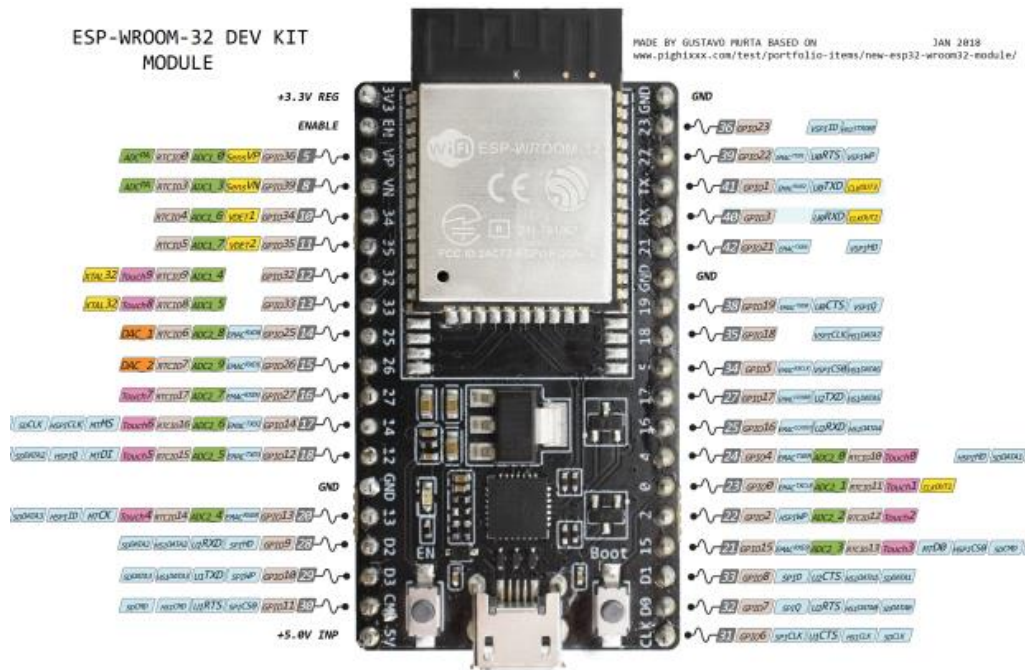
Gambar 2.5 Development Board ESP32 Devkit-C

ESP32 Devkit-C dirancang untuk peralatan mobilitas, peralatan elektronik yang bisa dipakai, dan pengaplikasian *Internet of Things*. Konsumsi daya ESP32 Devkit-C cukup rendah dibandingkan dengan mikrokontroler lain. ESP32 Devkit-C dilengkapi dengan fitur canggih seperti *fine-grained Clock Gating*, beberapa mode daya, dan penskalaan daya yang dinamis.

ESP32 Devkit-C dapat difungsikan sebagai suatu sistem mandiri atau menjadi *slave* dari unit mikrokontroler lainnya. Pengembang dapat melakukan pengendalian dan pengawasan baik secara *realtime* maupun berkala sesuai pengaturan pengembang. Tidak sedikit rumah pintar yang telah dibangun dengan memanfaatkan ESP32 Devkit-C sebagai controller untuk melakukan otomasi terhadap peralatan elektronika. ESP32 Devkit-C juga kerap digunakan untuk keperluan edukasi seperti perakitan robot. Pengembangan ESP32 Devkit-C akan terus berlanjut karena ESP32 Devkit-C memiliki banyak fitur dan bersifat *open source* sehingga siapa saja dapat menggunakan dan mengembangkannya dalam berbagai bidang keilmuan.

Terdapat 38 pin pada ESP32 Devkit-C seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.6. 38 pin tersebut memiliki beragam fungsi dan karakteristik masing-

masing. Spesifikasi ESP32 Devkit-C dapat dilihat pada tabel 2.1. Fungsi dan karakteristik pin ESP32 Devkit-C dapat dilihat pada tabel 2.2.



Gambar 2.6 Struktur Pin Development Board ESP32 Devkit-C

Tabel 2.1 Spesifikasi ESP32 Devkit-C

Komponen	Keterangan
Processor	Tensilica Xtensia 32-bit LX6 microprocessor 2 Core Clock Frequency 240Mhz Speed 600DMIPS
Konektivitas Nirkabel	Wi-Fi 802.11 b/g/n/e/i @ 2.4 GHz up to 150 Mbit/s Bluetooth Low Energy

Memori	ROM 448KiB SRAM 520KiB RTC fast SRAM 8 KiB RTC slow SRAM 8 KiB eFuse : 1 Kibit Embedded Flash : 4 MiB
GPIO	30 pin
Sensor sentuh	10 pin
Voltase	3.3 Volt

ESP32 Devkit-C menggunakan *processor* dengan 2 *core* yang bekerja pada frekuensi 240 MegaHertz. Perangkat ini mendukung dua macam media koneksi nirkabel yaitu WiFi dan *Bluetooth Low Energy*. Terdapat 30 pin yang dapat digunakan sebagai masukan ataupun keluaran, dan 10 dari 30 pin ini dapat difungsikan sebagai sensor sentuh. ESP32 Devkit-C bekerja pada tegangan 3.3 volt.

Tabel 2.2 Penjabaran Fungsi Pin ESP32 Devkit-C

Fungsi	Pin	Keterangan
General Purpose Input / Output	23, 22, 21, TX, RX, 21, 19, 18, 5, 17, 16, 4, 0, 15, D1, D0, 34, 35, 32, 33, 25, 26, 27, 14, 12, 13, D2, D3.	Masukan dan keluaran baik analog, maupun digital.
Serial Communication	RX, TX, 27, 25, D2, D3.	Akses komunikasi serial antara ESP32 Devkit-C dan perangkat lain.
Touch Sensor	24, 23, 22, 21, 13, 22, 24, 27, 33, 32	Sensor sentuh dengan tipe digital.

2.5 Saklar Kaki (*Footswitch*)

Saklar kaki merupakan sebuah saklar yang didesain khusus untuk penggunaan menggunakan kaki manusia. Saklar kaki dibuat pertama kali untuk

kebutuhan di bidang medis yaitu untuk mempermudah dalam mengoperasikan peralatan untuk operasi (Peterson, 2002). Saat ini *footswitch* telah banyak diterapkan dalam berbagai bidang lain seperti permainan video untuk pengganti tombol, dan dalam bidang musik untuk efek gitar sehingga pemain gitar tidak perlu kesusahan untuk menghidupkan atau mematikan efek gitarnya. Footswitch dapat dikembangkan lebih jauh lagi untuk berbagai macam bidang keilmuan sesuai rancangan pengembangnya. Bentuk fisik saklar kaki dimuat pada gambar 2.7.

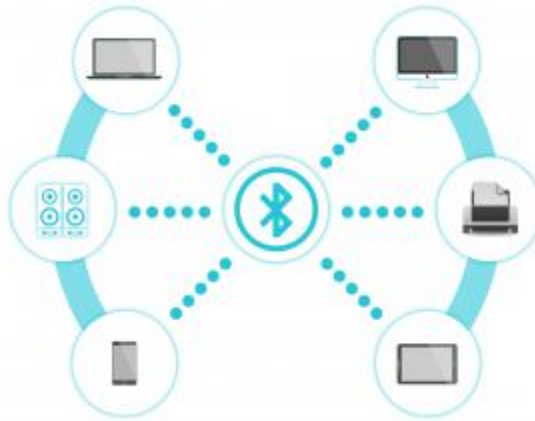


Gambar 2.7 Saklar Kaki (*Footswitch*)

2.6 *Bluetooth*

Bluetooth merupakan suatu protokol komunikasi data nirkabel yang memanfaatkan gelombang radio. Proses komunikasi data dapat dilakukan oleh 2 perangkat atau lebih. Komunikasi dapat berjalan ketika perangkat sudah tersambung antara satu sama lain, proses penyambungan ini biasa disebut dengan istilah *pairing* (Kolban, 2018).

Sambungan *bluetooth* memiliki arsitektur *slave-master*. Sebuah *master* dapat terhubung ke beberapa *slave* sekaligus, namun sebuah *slave* hanya dapat tersambung pada satu *master* seperti yang tertera pada gambar 2.8. Komunikasi antar *slave* tidak dapat dilakukan secara langsung, namun tidak berarti hal ini tidak dapat dilakukan, komunikasi tetap dapat dilakukan melalui *master*.



Gambar 2.8 Ilustrasi konektivitas *Bluetooth*

Berbagai macam perangkat dengan tipe dan jenis yang berbeda dapat berkomunikasi dengan *bluetooth* seperti komputer dan telpon genggam, komputer dan mesin cetak nirkabel, hingga perangkat permainan video. Penggunaan *bluetooth* meningkat seiring berkembangnya zaman dan sifat *bluetooth* yang fleksibel sehingga mudah untuk digunakan. Untuk spesifikasi *bluetooth* dapat dilihat pada tabel 2.3 berikut.

Tabel 2.3 Spesifikasi *Bluetooth*

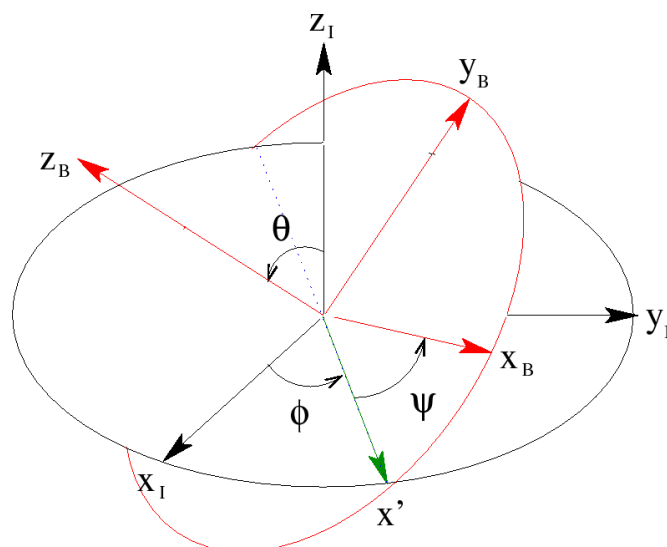
Frekuensi	2.4 GHz ISM
Saluran	79 Saluran dengan <i>spacing</i> 1 MHz
Penggunaan Saluran	<i>Frequency-Hopping Spread Spectrum</i> (FHSS)
Modulasi	GFSK, $\pi/4$ DQPSK, 8DPSK
Laju data	EDR PHY (8DPSK): 3 Mb/s EDR PHY ($\pi/4$ DQPSK): 2 Mb/s BR PHY (GFSK): 1 Mb/s
Daya transfer maksimal	Class 1: 100 mW (+20 dBm) Class 2: 2.5 mW (+4 dBm) Class 3: 1 mW (0 dBm)
Topologi jaringan	Poin ke poin

2.7 Derajat Kebebasan dan Sudut Euler

Derajat kebebasan berdasarkan definisi kinematis ialah jumlah variabel bebas atau koordinat yang digunakan untuk memastikan posisi sistem atau komponennya. Konsep dari derajat kebebasan dalam mesin kinematis digunakan dalam tiga cara yakni mekanisme, relativitas tubuh pada kerangka acuan, dan sendi kinematik (Agrawal, 2011).

Sudut Euler merupakan sebuah teori yang menjelaskan mengenai orientasi suatu objek yang terikat pada 3 sudut yakni alpha (α), beta (β), dan gamma (γ) (Fowler, 2015). ketiga sudut ini memiliki simbol yang berbeda dalam versi Euler dimana ketiga simbol tadi akan direpresentasikan sebagai phi (ϕ), theta (θ), dan psi (ψ). Dalam dunia penerbangan ketiga simbol ini disebut dengan istilah *roll*, *pitch*, dan *yaw*.

Pada gambar 2.9 dapat diketahui bahwa lingkaran hitam merepresentasikan sudut x, y, dan z seperti pada umumnya dan lingkaran merah merupakan lingkaran dengan ukuran yang sama dengan lingkaran hitam namun memiliki letak pada orientasi yang berbeda yaitu pada X_B dan Y_B . X' yang merupakan persimpangan antara kedua lingkaran ini disebut dengan garis node, garis ini melalui kedua lingkaran yang ada sebagai representasi diameter dari kedua lingkaran tersebut. Sudut antara Z_I dan Z_B adalah theta, sudut antara X_I dan X' adalah phi, dan sudut antara X' dan X_B adalah psi.



Gambar 2.9 Ilustrasi Sudut Euler

Sudut Euler atau yang biasa disebut dengan *attitude* dapat diperoleh dengan melakukan rotasi frame I (ruang inisial dengan sumbu x, y, dan z) sebanyak tiga kali terhadap sumbu x, y, dan z. Rotasi yang dilakukan memiliki aturan yang tidak membenarkan untuk melakukan rotasi dua kali berturut-turut pada sumbu yang sama, seperti $X \rightarrow X \rightarrow Y$ atau $X \rightarrow Y \rightarrow Y$. Untuk rotasi yang tidak berurutan seperti $Z \rightarrow X \rightarrow Y$, atau $Z \rightarrow X \rightarrow Z$ diperkenankan. Terdapat 12 kombinasi rotasi yang dapat dilakukan yakni,

- | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| a. $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ | e. $Y \rightarrow X \rightarrow Y$ | i. $Z \rightarrow X \rightarrow Y$ |
| b. $X \rightarrow Y \rightarrow X$ | f. $Y \rightarrow X \rightarrow Z$ | j. $Z \rightarrow X \rightarrow Z$ |
| c. $X \rightarrow Z \rightarrow X$ | g. $Y \rightarrow Z \rightarrow X$ | k. $Z \rightarrow Y \rightarrow Z$ |
| d. $X \rightarrow Z \rightarrow Y$ | h. $Y \rightarrow Z \rightarrow Y$ | l. $Z \rightarrow Y \rightarrow X$ |

Setelah melakukan rotasi, perhitungan untuk mendapatkan sudut euler dapat dilakukan dengan menggunakan DCM (*Direct Cosine Matrix*) seperti pada persamaan (2-4).

$$C^{B/I} = C^{\overline{I}}(\phi, \theta, \varphi) \quad (2-4)$$

$$C^{B/I} = \begin{bmatrix} C11(\phi, \theta, \varphi) & C12(\phi, \theta, \varphi) & C13(\phi, \theta, \varphi) \\ C21(\phi, \theta, \varphi) & C22(\phi, \theta, \varphi) & C23(\phi, \theta, \varphi) \\ C31(\phi, \theta, \varphi) & C32(\phi, \theta, \varphi) & C33(\phi, \theta, \varphi) \end{bmatrix}$$

C = *Cosine* (cosinus)

B = *Body* (frame ϕ, θ, φ)

I = *Inisial* (frame X, Y, Z)

$C^{B/I}$ = Transformasi sudut pandang objek menjadi sudut panjang pengamat

Jika perputaran terhadap sumbu X dinotasikan dengan ϕ (phi), perputaran sumbu Y dinotasikan dengan θ (theta), dan perputaran sumbu Z dinotasikan dengan φ (psi), maka DCM dari Euler terhadap masing-masing sumbu dapat dinotasikan seperti matriks berikut.

$$C_X(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} C_Y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 10 & \cos\theta & s0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$C_Z(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & -\sin\theta \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

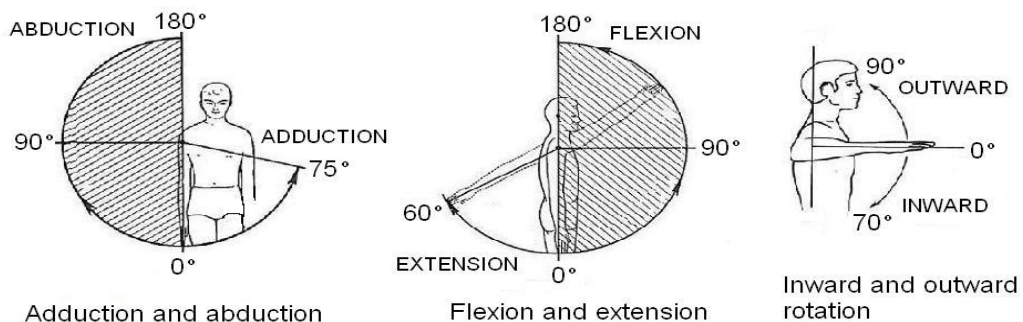
Jika urutan rotasi adalah $X \rightarrow Y \rightarrow Z$, maka penulisan diurutkan dari belakang seperti pada persamaan (2-5). Untuk pengoperasian matriks dikerjakan dari kanan ke kiri.

$$C_T^B(\phi, \theta, \varphi) = C_Z(\varphi) \cdot C_Y(\theta) \cdot C_X(\phi) \quad (2-5)$$

2.8 Pergerakan Lengan Atas Manusia

Lengan manusia memiliki empat sendi yakni sendi peluru, sendi engsel, sendi gulung, dan sendi pelana. Lengan atas terdiri dari dua sendi yakni sendi peluru dan sendi engsel. Sendi peluru memungkinkan manusia untuk melakukan pergerakan dengan tiga derajat kebebasan (Dube dan Tapson, 2009).

Pergerakan lengan atas manusia terdiri dari adduksi dan abduksi, lengkungan dan perluasan, serta rotasi ke depan dan belakang seperti yang tertera pada gambar 2.10. Lengan atas yang memiliki tiga derajat kebebasan cocok untuk digunakan sebagai penggerak sensor inersial yang menerapkan tiga derajat kebebasan yakni *yaw*, *pitch*, *roll*.



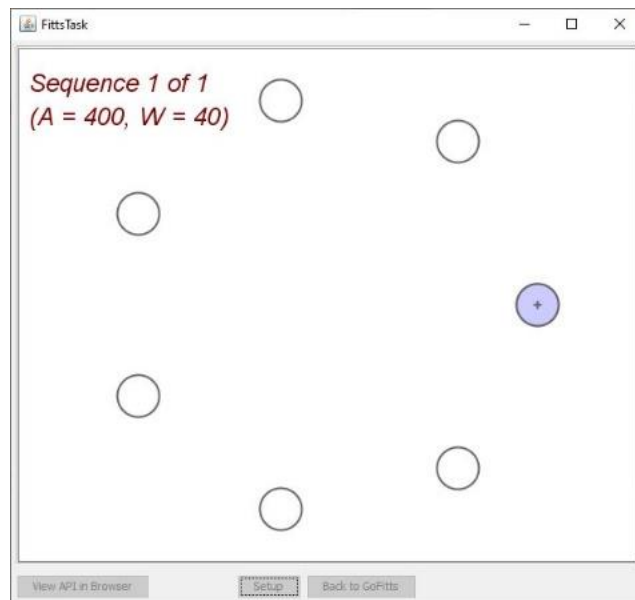
Berdasarkan Dube dan Tapson, 2009

Gambar 2.10 Pergerakan Sendi Peluru Manusia

2.9 ISO 9241-411

ISO 9241-411 merupakan suatu standar penilaian yang dapat diaplikasikan untuk Fitts' law. Standar ini dapat digunakan untuk menguji dua macam perangkat

masukannya yakni untuk perangkat tetikus dan papan tik. Terdapat empat macam jenis pengujian yang terdiri dari *One-directional tapping test*, *Multi-directional tapping test*, *Dragging test*, dan *Tracing test* (ISO, 2012). *Multi-directional tapping test* merupakan tes yang digunakan untuk mengevaluasi pergerakan penunjuk pada layar monitor. Pola *Multi-directional tapping test* dapat dilihat pada gambar 2.11. Seperti yang termuat pada gambar 2.11, terdapat beberapa lingkaran yang akan ditampilkan pada *Multi-directional tapping test*. Dalam melakukan tes, peserta tes diinstruksikan untuk menekan tombol tetikus ketika penunjuk berada pada lingkaran berwarna biru dengan penanda pada bagian tengah. Target lingkaran akan berpindah pada posisi yang berlawanan secara terus menerus hingga kembali ke titik awal.



Gambar 2.11 Pola *Multi-directional tapping test* pada aplikasi GoFitts

2.10 Fitts' Law dan Throughput

Fitts' law merupakan suatu bentuk pemodelan dalam pengukuran dan prediksi (MacKenzie, 2018). Dalam melakukan prediksi, Fitts' law diterapkan dengan melakukan perhitungan terhadap waktu yang diperlukan untuk mencapai suatu target berdasarkan ukuran dan jarak dari target tersebut. Perhitungan waktu pada Fitts' law dilakukan dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada persamaan (2-6).

$$T_m = a + b \cdot I_D = a + b \cdot \log_2\left(\frac{d+W}{w}\right) \quad (2-6)$$

- T_m = *Time of movement* (waktu pergerakan) dalam satuan detik
 a = *Intercept* (konstanta)
 b = *Slope* (kemiringan)
 I_D = *Indeks of Difficulty* (Indek Kesulitan)
 d = *Distance* (jarak target)
 W = *Width* (lebar target)

Fitts' law menyediakan sebuah metode untuk mengukur performa manusia dalam suatu satuan pengukuran yang disebut dengan istilah *Throughput* (TP). *Throughput* merupakan laju kecepatan dari transmisi informasi melalui sebuah saluran yakni saluran manusia (Mackenzie, 2018). Pengukuran nilai *Throughput* didapat dari perhitungan yang telah ditetapkan pada persamaan (2-7).

$$Throughput(TP) = \frac{I_{D_e}}{t_m} \quad (2-7)$$

Persamaan I_{D_e} ialah sebagai berikut.

$$I_{D_e} = \log_2\left(\frac{d+W_e}{W_e}\right) \quad (2-8)$$

- W_e = $4.133 \cdot S_x$
 I_{D_e} = *Effective Fitts' Index of Difficulty* (Indeks kesulitan Fitts' Efektif)
 t_m = *Time of movement* (waktu pergerakan)
 d = *Distance of movement target* (jarak target)
 W_e = *Target width (effective) of movement target* (lebar target efektif)
 S_x = Standar deviasi dari semua koordinat x saat terjadi *tapping*

Nilai 4.133 pada W_e adalah sebuah nilai entropi yang digunakan untuk melakukan normalisasi data guna meminimalisir galat pada data. Nilai ini diperoleh dari $\log_2((2\pi e)^{1/2}\sigma) = \log_2(4.133 \sigma)$ dengan σ sebagai standar deviasi dari satuan pengukuran yang digunakan (MacKenzie, 2018).

2.11 Moving Average Filter

Moving average filter merupakan sebuah penyempurnaan dari metode *semiaverage*. *Moving average filter* dapat menghilangkan fluktuasi data pada jangka pendek. *Moving average filter* didefinisikan sebagai rata-rata jumlah item tetap dalam deret waktu yang bergerak melalui rangkaian dengan membuang item teratas dari grup rata-rata sebelumnya dan menambahkan item berikutnya di setiap rata-rata yang berurutan (Molugaram dan Rao, 2017).

2.12 Analisis Statistika

Analisis yang digunakan untuk mengukur tingkat keberhasilan prototipe ialah analisis statistika yang terdiri dari analisis kuantitatif dan analisis kualitatif yang diperoleh dari pengumpulan data dengan sejumlah responden yang telah melakukan uji coba prototipe. Data yang diambil berupa kuesioner yang terdiri dari penilaian upaya dan penilaian kenyamanan. Data yang telah diambil dari setiap responden akan dikumpulkan dan diolah untuk dapat menjadi perbandingan performa prototipe dan alat penunjuk konvensional yang banyak digunakan khalayak umum. Pada analisis kuantitatif, data akan diolah menggunakan perhitungan Shapiro-Wilk *Test* untuk pengujian distribusi normal dengan memeriksa nilai variabel P guna memeriksa sifat data bersifat independen atau terikat, data yang bersifat terikat memiliki arti bahwa setiap subjek melakukan pengujian menggunakan tiga perangkat yang terdiri dari tetikus, prototipe A (saklar kaki di kaki kanan), dan prototipe B (saklar kaki di kaki kiri). Pengujian data *parametric* dilakukan apabila data bersifat terikat dengan menggunakan ANOVA atau Welch ANOVA sesuai dengan nilai variabel P dari tes Levene dan kemudian dilanjutkan dengan pengujian Post-Hoc, dan untuk uji *non-parametric* dilakukan apabila data bersifat independen dengan menggunakan Kruskal-Wallis *Test* dan dilanjutkan dengan Mann Whitney U *Test* jika nilai variabel P dari pengujian Kruskal-Wallis terpenuhi, jika tidak terpenuhi maka akan dilanjutkan langsung pada tahap perbandingan hasil uji statistik. Pengujian digunakan menggunakan sebuah perangkat lunak milik perusahaan IBM yang bernama SPSS.

2.12.1 Analisis Kuantitatif

Analisis kuantitatif merupakan analisis yang dilakukan untuk mengetahui tingkat performa prototipe yang dibuat dengan menggunakan instrumentasi kuesioner standar ISO 9241-411 yang bernama *Rating Scale (Independent)* atau penilaian bebas dan skala penilaian ketergantungan. Format instrumentasi penilaian bebas dapat dilihat pada tabel 2.4 berikut dan untuk format instrumentasi skala penilaian ketergantungan dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2.4 Format Instrumentasi Uji Kenyamanan dan Tingkat Kelelahan

Force required for actuation:						
1	2	3	4	5	6	7
Very uncomfortable				Very comfortable		
Smoothness during operation:						
1	2	3	4	5	6	7
Very rough				Very smooth		
Effort required for operation:						
1	2	3	4	5	6	7
Very high				Very low		
Accuracy						
1	2	3	4	5	6	7
Very inaccurate				Very accurate		
Operation speed:						
1	2	3	4	5	6	7
Unacceptable				Acceptable		
General Comfort:						
1	2	3	4	5	6	7
Very uncomfortable				Very comfortable		
Overall operation of input device:						
1	2	3	4	5	6	7
Very difficult (to use)				Very easy (to use)		
Finger fatigue:						

1	2	3	4	5	6	7
Very high				None		
Wrist Fatigue:						
1	2	3	4	5	6	7
Very high				None		
Arm fatigue:						
1	2	3	4	5	6	7
Very high				None		
Shoulder Fatigue						
1	2	3	4	5	6	7
Very high				None		
Neck Fatigue:						
1	2	3	4	5	6	7
Very high				None		

Instrumentasi penilaian bebas mengarah pada performa, akurasi, hingga tingkat kelelahan bagian tubuh yang digunakan dalam pengoperasian prototipe.

Tabel 2.5 Format Instrumentasi Perbandingan Tingkat Kenyamanan dan Kelelahan Antara 2 Perangkat

General Indices	Phase 1: First input device [A or B]					Phase 2: Second input device [A or B]		
	Most negative		Most positive			Worse	Same	Better
	1	2	3	4	5	-1	0	1
Actuation force								
Operation smoothnes								
Operation effort								
Accuracy								
Operation speed								

General comfort								
Overall Operation								
Fatigue indices	First input device []A or []B					Second input device []A or []B		
	Extreme		None			Worse	Same	Better
	1	2	3	4	5	-1	0	1
Finger fatigue								
Wrist fatigue								
Arm fatigue								
Shoulder fatigue								
Neck fatigue								

Skala penilaian ketergantungan memuat perbandingan antara perangkat yang digunakan pertama kali dan perangkat kedua untuk diuji mana yang lebih baik.

2.12.2 Analisis Kualitatif

Analisis kualitatif merupakan analisis yang dilakukan untuk mengetahui tingkat kenyamanan dan tingkat usaha dalam pengoperasian protitpe yang dibuat dengan menggunakan instrumentasi kuesioner standar ISO 9241-411 yang bernama *Borg Scale* (Skala Borg). Format instrumentasi skala Borg tertera pada tabel 2.6.

Tabel 2.6 Format Instrumentasi Skala Borg ISO 9241-411

Effort			Effort
Arm	Shoulder	Neck	
() 10	() 10	() 10	Very, very strong (almost max.)
() 9	() 9	() 9	
() 8	() 8	() 8	
() 7	() 7	() 7	Very strong
() 6	() 6	() 6	
() 5	() 5	() 5	Strong (heavy)
() 4	() 4	() 4	Somewhat strong
() 3	() 3	() 3	Moderate

0 2	0 2	0 2	Weak (light)
0 1	0 1	0 1	Very weak
0 0.5	0 0.5	0 0.5	Very, very weak (just noticeable)
0 0	0 0	0 0	Nothing at all

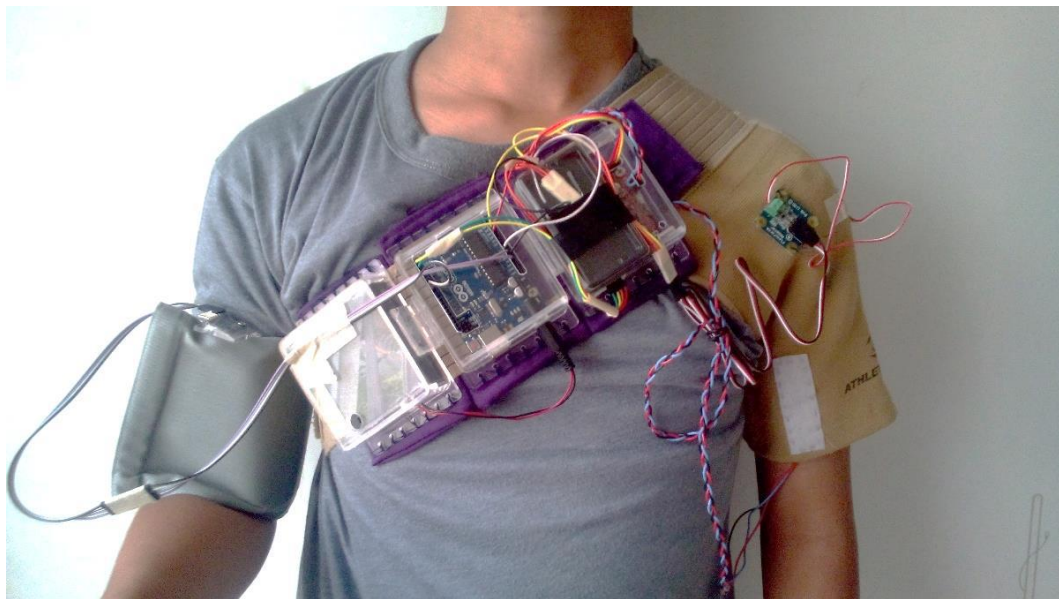
Skala Borg melakukan penilaian dengan meninjau aspek usaha pada lengan, bahu, dan leher.

2.13 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian dengan tujuan yang sama telah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya.

2.13.1 Penelitian Pusat Studi HMI Ma Chung

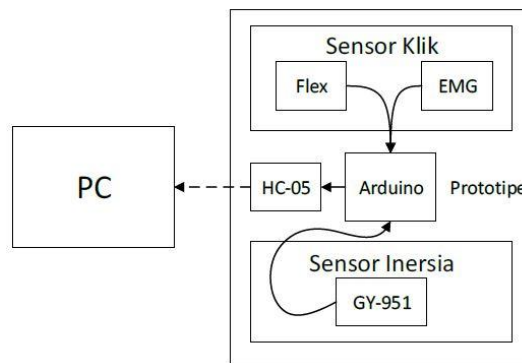
Perangkat ini menggunakan konektivitas *bluetooth*, sensor inersial, sensor *flex / bend*, dan mikrokontroller Arduino. Sensor inersial pada prototipe ini dipasang pada lengan atas, sensor *flex / bend* pada bahu, dan mikrokontroller serta perangkat pendukung lainnya pada dada penggunanya seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Prototipe Perangkat Penunjuk Terdahulu

Perangkat prototipe ini memiliki dua konektivitas yang meliputi kabel dan nirkabel. Konektivitas kabel digunakan untuk menghubungkan tiga sensor ke mikrokontroller Arduino UNO dan mikrokontroller ke modul *Bluetooth* HC-05.

Data dari sensor *Flex*, sensor EMG, dan sensor inersial mengirim data ke Arduino UNO untuk diteruskan ke modul *Bluetooth* yang akhirnya akan diteruskan ke sebuah komputer yang telah terinstall perangkat lunak untuk memproses data yang diterima dari *Bluetooth* dan mengolahnnya menjadi informasi yang akan digunakan untuk menjadi acuan pergerakan penunjuk dan klik pada perangkat prototipe (Widodo, Haryasena, Setiawan, Irawan, & Subianto. 2019). Untuk diagram blok dapat dilihat pada gambar 2.13.

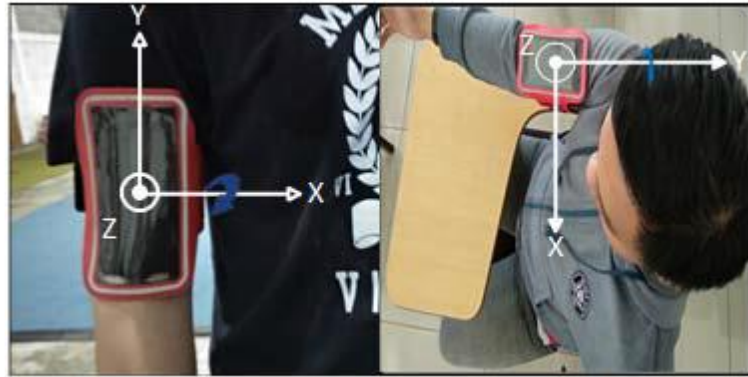


Gambar 2.13 Diagram Blok Prototipe Perangkat Penunjuk Terdahulu

Perangkat ini menjadi acuan peneliti untuk mengembangkan prototipe perangkat penunjuk menjadi lebih baik lagi agar dapat digunakan dengan lebih mudah sehingga membantu penggunaanya dalam menyelesaikan pekerjaan atau kebutuhan yang memerlukan perangkat penunjuk ini dengan baik.

2.13.2 Penelitian Pusat Studi HMI Ma Chung

Penelitian ini berbeda dari dua penelitian sebelumnya, pada penelitian ini, perangkat yang digunakan adalah sebuah smartphone berbasis android yang sudah dilengkapi dengan sensor giroskop. Data yang didapatkan dari sensor giroskop akan diolah menggunakan metode jaringan saraf tiruan sebelum diubah menjadi acuan pergerakan kursor (Widodo, Jahja, & Giovanni, 2020). Bentuk fisik prototipe ini dimuat pada gambar 2.14 berikut.



Gambar 2.14 Bentuk Fisik Prototipe Android

Perangkat ini dipasang ke badan manusia pada bagian lengan atas menggunakan sebuah *smartphone holder*. Pergerakan kursor didasari oleh pergerakan lengan atas yakni fleksion, ekstension, *inward*, dan *outward*. Perangkat ini dievaluasi menggunakan Instrumentasi ISO 9241-411.

2.13.3 Penelitian Pusat Studi HMI Ma Chung

Penelitian ini memiliki konsep yang sama seperti penelitian-penelitian sebelumnya, namun perbedaannya adalah pada penelitian ini terdapat beberapa komponen yang digantikan oleh komponen lain seperti *footswitch* untuk pemicu fungsi klik, ESP32 Devkit-C sebagai pengganti kendali utama Arduino sekaligus media komunikasi nirkabel WiFi. Bentuk fisik prototipe ini dimuat pada gambar 2.15.

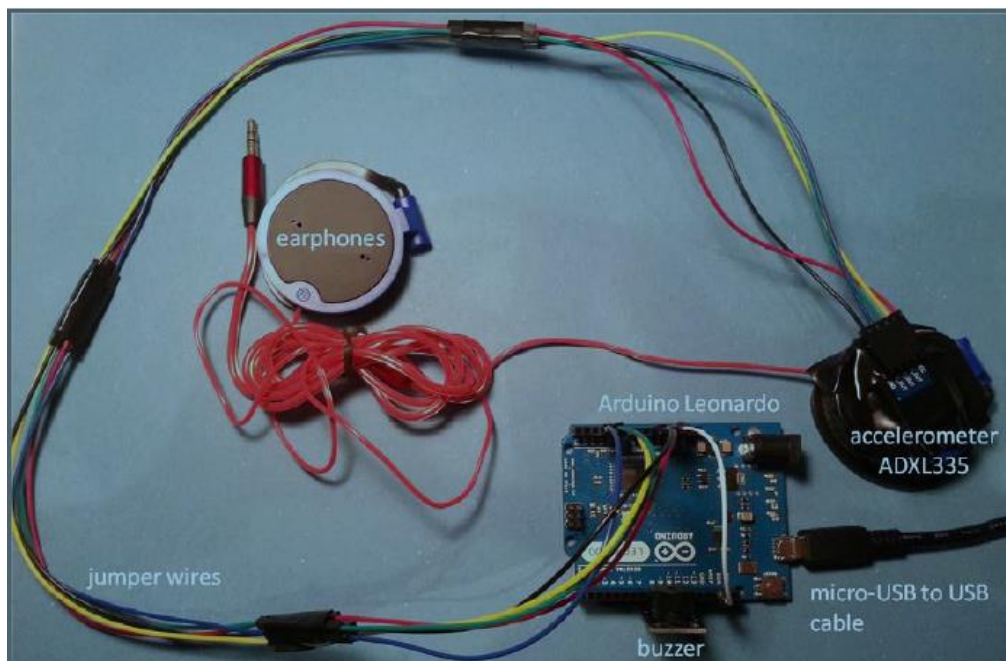


Gambar 2.15 Bentuk Fisik Prototipe ESP32 Devkit-C

Sensor inersial, *footswitch* dan beberapa komponen lain seperti baterai dan saklar terhubung ke ESP32 Devkit-C melalui sebuah *Printed Circuit Board* (PCB). Data dari sensor inersial dan *footswitch* diterima oleh ESP32 Devkit-C dan kemudian dikirim ke komputer menggunakan jaringan WiFi. Komputer melakukan penerjemahan data menjadi pergerakan kursor dan fungsi klik berdasarkan data yang telah diterima.

2.13.4 Penelitian Universitas Autonoma de Barcelona

Penelitian ini memiliki konsep yang sedikit berbeda dari penelitian-penelitian sebelumnya, perbedaannya adalah pada penelitian ini hanya menggunakan sensor akselerometer yang dipasang pada sebuah *earphone*. Perangkat ini menggunakan konektivitas kabel usb dan digerakkan menggunakan pergerakan kepala manusia (Ribas-Xirgo & Lopez-Varquiel, 2017). Bentuk rangkaian prototipe pada penelitian ini dimuat pada gambar 2.16 berikut.



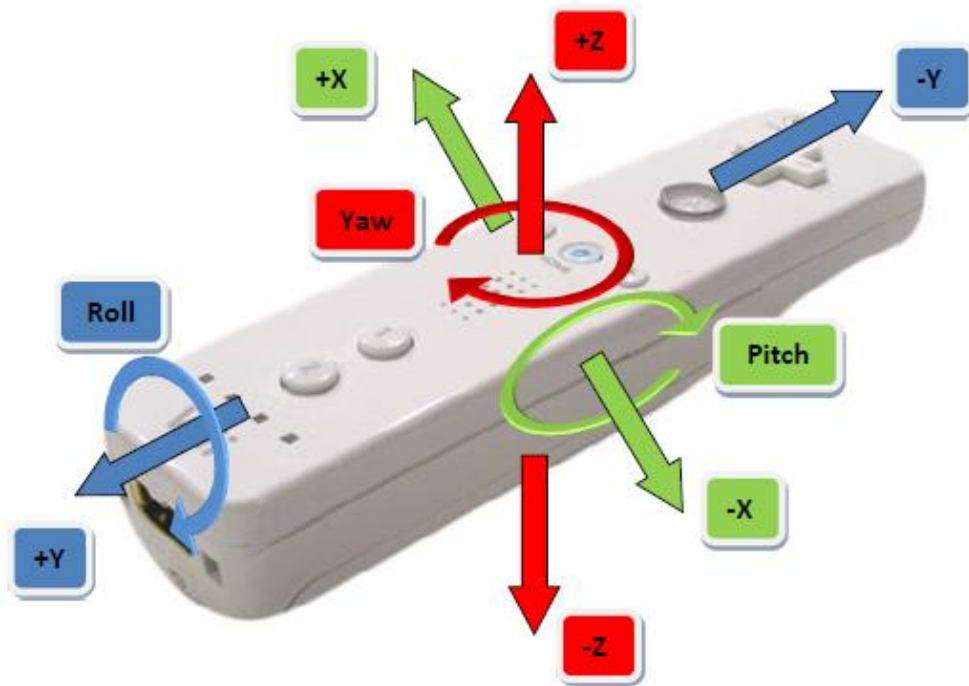
Gambar 2.16 Bentuk Fisik Prototipe Arduino Leonardo

Sensor accelerometer dihubungkan ke sebuah mikrokontroler Arduino Leonardo, data yang diterima diolah dan diproses oleh mikrokontroler, dan dijadikan sebagai acuan untuk pergerakan kursor secara langsung terhadap

komputer tanpa memerlukan perangkat lunak pendukung lainnya karena pada mikrokontroler ini sudah terdapat fitur *Human Input Device*.

2.13.4 Penelitian Universitas Manchester

Penelitian ini menggunakan kombinasi antara sensor akselerometer dan giroskop. Perangkat ini menggunakan sensor inersial yang didapatkan dari perangkat pengendali Nintendo Wii seperti yang dimuat pada gambar 2.17 dan kamera untuk melakukan kendali visualisasi (Kirkham, 2010).



Gambar 2.17 Bentuk Fisik Perangkat Pengendali Nintendo Wii

Reverse Engineering dilakukan untuk mengambil data mentah dari sensor inersial agar bisa dibaca langsung oleh komputer. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan visualisasi atau pemodelan data 3D