

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Mobile Robot Omni-Wheel*

Mobile robot merupakan sistem mekanik yang mampu bergerak otonom di lingkungannya untuk melakukan tugas tertentu (Naema et al., 2022). Berdasarkan sistem geraknya, robot beroda dibedakan menjadi *non-holonomik* dan *holonomik*. Robot *non-holonomik* adalah sistem robot yang memiliki batasan kinematik yang mengharuskannya untuk berputar terlebih dahulu sebelum dapat bergerak ke arah yang baru, seperti mobil, memerlukan manuver berputar dan memiliki batasan gerak. Sebaliknya, robot *holonomik* dapat bergerak bebas ke segala arah (*translasi* pada sumbu x dan sumbu y, serta rotasi) secara independen dan simultan.

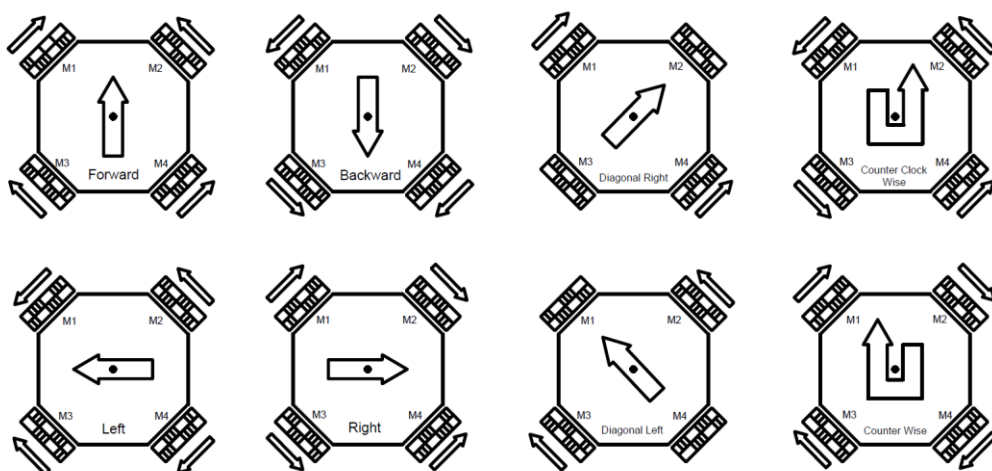
Robot *omni-wheel* adalah jenis robot *holonomik* yang menggunakan roda *omni* (Gambar 2.1) dengan memiliki *roller-roller* kecil di sekelilingnya dengan sumbu rotasi tegak lurus terhadap sumbu utama roda (Rijalusalam & Iswanto, 2021). Jenis roda omni memungkinkan gerak lateral (menyamping), memberikan manuverabilitas yang jauh lebih superior dibanding roda konvensional, terutama di lingkungan sempit dan padat seperti pabrik atau gudang (Saefudin et al., 2023). Untuk mencapai stabilitas gerak yang optimal, konfigurasi empat roda yang dipasang secara simetris, sering disebut sebagai konfigurasi X (Hijikata et al., 2022).



Gambar 2. 1 Omni wheel

(Sumber: Purnata et al., 2022)

Desain mekanik roda omni memang lebih kompleks dibanding dengan roda konvensional, namun memiliki keunggulan dalam menjaga kestabilan. Pada umumnya, robot bergerak dengan roda terdiri atas roda utama dan sejumlah *roller* kecil yang di pasang di sekeliling-keliling roda dengan sudut 90° terhadap arah rotasinya. Kombinasi kecepatan dan arah putar setiap roda menghasilkan gaya resultan yang memungkinkan robot bergerak secara linear ke segala arah tanpa perlu mengubah orientasi sudut atau tubuh rodanya. Dengan demikian, roda ini memberikan mobilitas tinggi tanpa memerlukan rotasi arah hadap robot (Gambar 2.2).

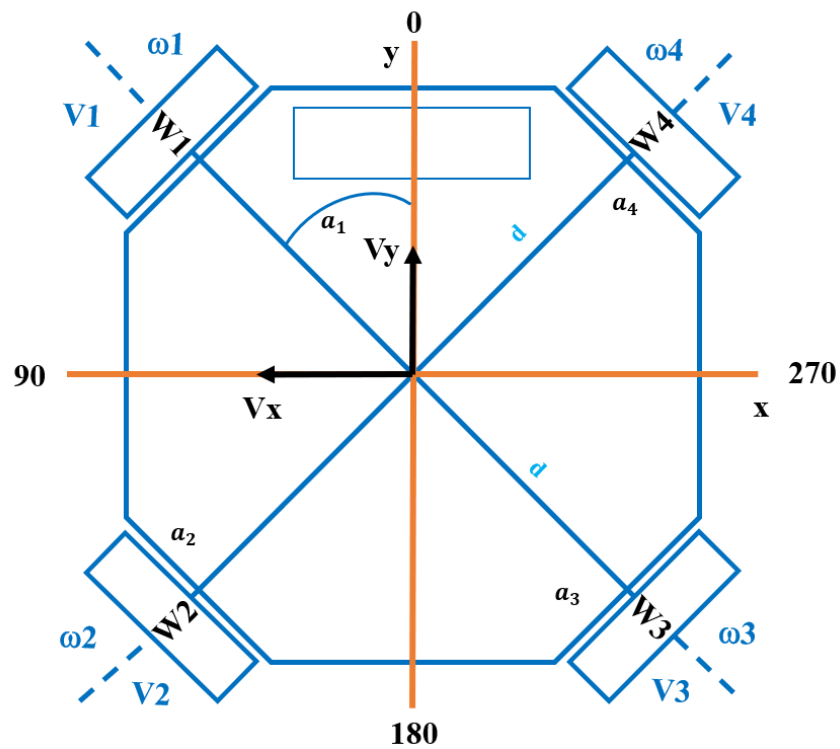


Gambar 2. 2 Omni drive

(Sumber: Pribadi Desain AutoCAD, 2025)

2.2 Model Kinematik Robot Omni-Wheel

Model kinematik merupakan fondasi matematis yang mendeskripsikan hubungan antara pergerakan robot secara keseluruhan dengan pergerakan komponen-komponen individualnya, dalam hal ini adalah roda, dimana tanpa mempertimbangkan torsi atau gaya yang terlibat. Untuk robot *omni-wheel*, model ini menjadi jembatan esensial yang menghubungkan perintah gerak tingkat tinggi dengan aksi aktuator tingkat rendah. Model kinematika yang digunakan dengan kinematika balik merupakan komponen yang paling krusial dalam arsitektur kontrol gerak. Fungsinya untuk menerjemahkan perintah kecepatan robot yang diinginkan dalam kerangka acuan global yang dinyatakan sebagai vektor kecepatan V_x , V_y dan ω menjadi kecepatan putaran *setpoint* (target) yang harus dicapai oleh masing-masing roda (ω_1 , ω_2 , ω_3 , dan ω_4) secara individual (Fahmizal et al., 2019). Pada penelitian ini digunakan robot omni-wheel dengan konfigurasi empat roda yang dipasang membentuk huruf "X". Setiap roda ditempatkan pada sudut tertentu terhadap sumbu y robot, yaitu $\alpha_1=45^\circ$, $\alpha_2=135^\circ$, $\alpha_3=225^\circ$, dan $\alpha_4=315^\circ$. Susunan roda tersebut memungkinkan robot bergerak secara holonomik ke berbagai arah. Gambar 2.3 menunjukkan konfigurasi geometris robot yang digunakan.



Gambar 2. 3 Skematik susunan roda *omni* dengan empat roda

Berdasarkan konfigurasi pada Gambar 2.3, terdapat beberapa parameter yang digunakan dalam pemodelan kinematika robot, seperti posisi robot, sudut pemasangan roda, kecepatan translasi, dan kecepatan sudut roda. Tabel 2.1 menunjukkan keterangan simbol dan parameter robot omni.

Tabel 2. 1 Spesifikasi robot omni

No.	Simbol	Keterangan
1	x dan y	Koordinat posisi robot dari acuan peta global
2	a_1, a_2, a_3, a_4	Sudut antara roda dengan sumbu y pada robot
3	$W1, W2, W3, W4$	Simbol untuk roda pada setiap sisi robot
4	d	Jarak antara roda dan pusat roda
5	v_1, v_2, v_3, v_4 [m/s]	Kecepatan linear roda robot
6	$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ [rad/s]	Kecepatan sudut roda
7	V_x	Kecepatan terhadap sumbu x robot
8	V_y	Kecepatan terhadap sumbu y robot

Kecepatan linear pada setiap roda (v_i) merupakan hasil superposisi dari dua komponen gerak yaitu gerak rotasi dan gerak translasi robot. Kontribusi dari gerak translasi diperoleh dengan memproyeksikan vektor kecepatan $[x, y]$ ke arah putaran roda. Sementara itu, kontribusi dari gerak rotasi bergantung pada kecepatan sudut robot θ dan jarak dari pusat robot ke roda R . Hubungan ini dirumuskan dengan persamaan (2.1).

$$v_i = -\sin(a_i)x + \cos(a_i)y + R\theta \quad (2.1)$$

Selanjutnya, kecepatan linear roda v_i memiliki hubungan langsung dengan kecepatan sudutnya ω_i melalui parameter jari-jari roda r , seperti ditunjukkan pada persamaan (2.2).

$$v_i = r\omega_i \quad (2.2)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan (2.1) ke dalam persamaan (2.2), diperoleh model kinematika balik untuk satu roda, seperti yang disajikan pada persamaan (2.3).

$$\omega_i = \frac{1}{r}(-\sin(a_i)x + \cos(a_i)y + R\theta) \quad (2.3)$$

Persamaan (2.3) di susun untuk setiap roda dengan persamaan (2.4).

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{1}{r}(-\sin(a_1)x + \cos(a_1)y + R\theta) \\ \omega_2 &= \frac{1}{r}(-\sin(a_2)x + \cos(a_2)y + R\theta) \\ \omega_3 &= \frac{1}{r}(-\sin(a_3)x + \cos(a_3)y + R\theta) \\ \omega_4 &= \frac{1}{r}(-\sin(a_4)x + \cos(a_4)y + R\theta) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Untuk merepresentasikan sistem secara keseluruhan, persamaan (2.4) disusun ke dalam bentuk matriks persamaan (2.5).

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -\sin(a_1)x + \cos(a_1)y + R \\ -\sin(a_2)x + \cos(a_2)y + R \\ -\sin(a_3)x + \cos(a_3)y + R \\ -\sin(a_4)x + \cos(a_4)y + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Dengan mensubstitusikan nilai-nilai sudut spesifik ($a_1, a_2, a_3, \text{ dan } a_4$) dari persamaan (2.5), konfigurasi robot digunakan dalam penelitian ini diperoleh persamaan (2.6).

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -\sin(45^\circ)x + \cos(45^\circ)y + R \\ -\sin(135^\circ)x + \cos(135^\circ)y + R \\ -\sin(225^\circ)x + \cos(225^\circ)y + R \\ -\sin(315^\circ)x + \cos(315^\circ)y + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Pada persamaan (2.6) menjadi inti dari algoritma kontrol gerak, yang memungkinkan perhitungan kecepatan putar motor secara presisi untuk mencapai tujuan yang akurat. Untuk implementasi komputasi, nilai sudut dalam derajat dikonversi ke dalam satuan radian pada persamaan (2.7).

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)x + \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)y + R \\ -\sin\left(\frac{3\pi}{4}\right)x + \cos\left(\frac{3\pi}{4}\right)y + R \\ -\sin\left(\frac{5\pi}{4}\right)x + \cos\left(\frac{5\pi}{4}\right)y + R \\ -\sin\left(\frac{7\pi}{4}\right)x + \cos\left(\frac{7\pi}{4}\right)y + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.3 Artificial Potential Field (APF)

Artificial Potential Field merupakan metode perencanaan jalur dan penghindaran rintangan secara *real-time* yang populer karena kesederhanaan dan efisiensi komputasi serta salah satu pendekatan yang paling populer dalam

perancangan lintasan robot bergerak secara otonom. Dalam dasar metode pada bidang potensial, suatu robot mendeteksi rintangan sebagai medan potensial tolak-menolak dan titik tujuan sebagai medan tarik-menarik (Nurhalim et al., 2022). Dengan pendekatan tersebut, robot akan bergerak mengikuti arah hasil gaya total dari kedua medan tersebut hingga mencapai titik tujuan dengan tanpa menabrak rintangan. Secara matematis, total medan potensial yang dialami robot dapat dituliskan sebagai pada persamaan (2.8).

$$U(x) = U_{att}(x) + U_{rep}(x) \quad (2.8)$$

$U_{att}(x)$ menunjukkan medan tarik-menarik dan $U_{rep}(x)$ menyatakan medan tolak-menolak. Dengan gaya total yang bekerja pada robot adalah negatif dari gradien fungsi potensial pada persamaan (2.9).

$$F(x) = -\nabla_x U(x) \quad (2.9)$$

Menurut (Nurhalim et al., 2022), pada implementasinya medan tarik didefinisikan sebagai fungsi jarak antara posisi robot terhadap posisi target, sedangkan medan tolak bergantung dengan jarak antara robot dan rintangan di sekitarnya. Fungsi gaya tarik dan gaya tolak dapat dirumuskan pada persamaan (2.10) dan (2.11).

$$U_{att}(x) = \frac{1}{2} k_{att} ||X - X_{sasaran}||^2 \quad (2.10)$$

$$U_{rep}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(x)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, & \text{Jika } \rho(x) \leq \rho_0 \\ 0, & \text{Jika } \rho(x) > \rho_0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Di mana $k_{att}(x)$ dan $k_{rep}(x)$ merupakan konstanta gaya tarik dan tolak, $\rho(x)$ adalah jarak robot terhadap rintangan, dan ρ_0 jarak ambang pengaruh gaya tolak.

2.4 Kontrol Robot Menghindari Rintangan

Pengendalian robot dalam menghindari rintangan dengan metode *artificial potential field* bekerja dengan menghitung gaya total antara gaya tarik menuju tujuan dan gaya tolak dari rintangan. Pada setiap gaya ini kemudian diterjemahkan menjadi arah gerak dan kecepatan robot berdasarkan kinematika *omni-direction* (Nurhalim et al., 2022). gaya tarik-menarik dalam memproyeksikan gaya pada arah sumbu x dengan persamaan (2.12).

$$F_{att,x} = k_{att}(x^* - x) \quad (2.12)$$

Keterangan:

$F_{att,x}$ = Gaya tarik menarik pada sumbu x.

k_{att} = Konstanta gaya tarik.

x^* = Sumbu x tujuan.

x = Sumbu x titik awal.

Dan pada arah sumbu y sebagai gaya tarik-menarik dengan persamaan (2.13).

$$F_{att,y} = k_{att}(y^* - y) \quad (2.13)$$

Proyeksi selanjutnya pada gaya tolak menolak pada arah sumbu x dan sumbu y dengan persamaan repulsive pada persamaan (2.14).

$$F_{rep,x}^{(n)} = k_{rep} \frac{(x - x_o^{(n)})}{(d_o^{(n)})^4} \quad (2.14)$$

Dengan $F_{rep,x}^{(n)}$, menunjukkan daya tolak menolak dari $d_o^{(n)}$ jarak antara robot dan rintangan ke-n pada sumbu x. Dari persamaan (2.14) sama berlaku untuk mendapatkan gaya tolak menolak pada arah sumbu y pada persamaan (2.15).

$$F_{rep,y}^{(n)} = k_{rep} \frac{(y - y_o^{(n)})}{(d_o^{(n)})^4} \quad (2.15)$$

Hasil gaya yang diperoleh digunakan untuk menghitung arah gerak pada persamaan (2.16).

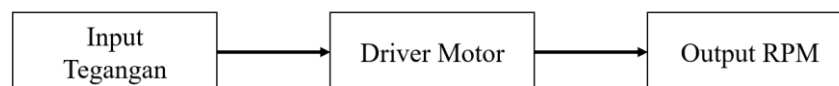
$$\theta = \arctan \frac{F_y}{F_x} \quad (2.16)$$

2.5 Sistem Kontrol

Sistem kontrol merupakan gabungan dari berbagai komponen yang saling bekerja sama untuk melakukan suatu pekerjaan spesifik. Komponen-komponen ini dapat secara aktif memerintah dan mengarahkan suatu sistem. Secara umum, sistem kontrol terdiri dari tiga bagian diantaranya *input* sebagai data atau informasi masukan dari luar, proses sebagai pengendalian yang dilakukan sistem untuk menerapkan keluaran dan masukan, serta *output* sebuah hasil atau tanggapan yang dihasilkan oleh sistem tersebut. Sebuah sistem kontrol agar berfungsi dengan baik harus memenuhi beberapa persyaratan umum, yaitu harus memiliki kestabilan yang baik, kecepatan respon dengan cepat, serta kemampuan untuk meminimalkan kesalahan hingga mencapai nilai sesuai dengan toleransi yang diizinkan (Nurhalim et al., 2022).

2.5.1 Sistem kontrol terbuka (*Open Loop*)

Dalam sistem kontrol *loop* terbuka, robot beroperasi berdasarkan *input* atau perintah yang diberikan tanpa memanfaatkan *output* sistem sebagai umpan balik untuk melakukan koreksi. Sebagai ilustrasi, Gambar 2.4 menunjukkan sistem kontrol *loop* terbuka pada motor listrik, dimana tegangan berfungsi sebagai *input* dan kecepatan putaran motor sebagai output. Semakin besar tegangan yang diberikan, semakin tinggi kecepatan putaran motor yang dihasilkan. Namun, apabila terdapat gangguan eksternal seperti penambahan beban, kecepatan motor akan menurun. Karena tidak memiliki mekanisme umpan balik, sistem tidak dapat mendeteksi perubahan tersebut dan tidak mampu melakukan penyesuaian terhadap *input* yang diberikan. Akibatnya, terjadi *error* antara kecepatan aktual dan kecepatan yang diharapkan (Nugraha, 2010).



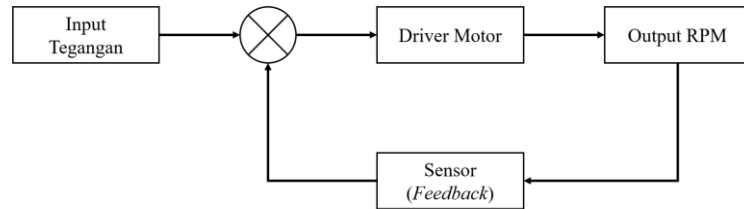
Gambar 2. 4 Sistem open-loop

(Sumber: Nugraha, 2010)

2.5.2 Sistem kontrol tertutup (*Closed Loop*)

Sistem *loop* tertutup memiliki fungsi untuk mengatasi kelemahan yang terdapat pada sistem *loop* terbuka. Berdasarkan contoh sebelumnya, perubahan kecepatan yang disebabkan oleh adanya beban akan diumpan balikkan (*feedback*) untuk dibandingkan dengan nilai referensi. Selisih antara nilai referensi dan keluaran sistem digunakan sebagai dasar untuk melakukan koreksi sehingga nilai masukan dapat disesuaikan secara otomatis. Dengan demikian, sistem mampu beradaptasi terhadap perubahan beban dan mempertahankan keluaran sesuai

dengan nilai yang diinginkan. Konsep sistem kontrol *loop* tertutup ditunjukkan pada Gambar 2.5 (Nugraha, 2010).

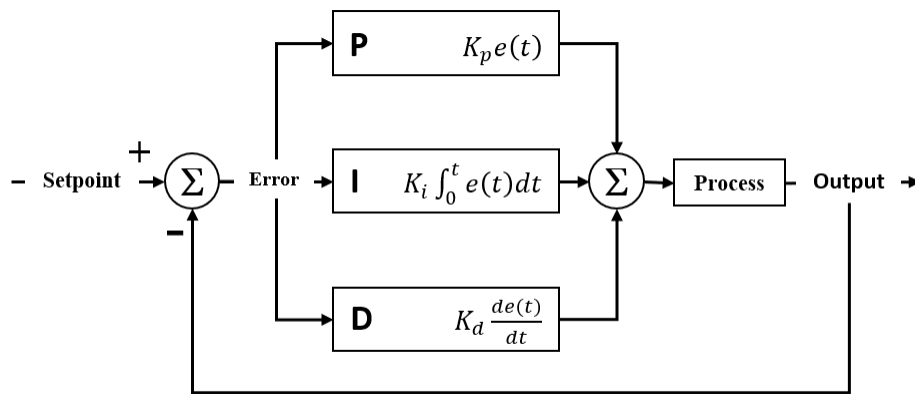


Gambar 2. 5 Sistem Closed Loop

(Sumber: Nugraha, 2010)

2.5.3 Kontrol PID (Proportional-Integrative-Derivative)

Pengendalian PID (*Proportional-Integral-Derivative*) merupakan algoritma kontrol umpan balik yang berfungsi meminimalkan tiga aksi pengendalian, yaitu proporsional, integral, dan derivatif. Komponen proporsional (K_p) menghasilkan keluaran yang sebanding dengan besar *error* saat ini, sehingga mempercepat respon sistem. Komponen integral (K_i) yang mana mengakumulasi *error* yang tersisa dari waktu ke waktu untuk menghilangkan *steady-state error* agar sistem mencapai kondisi tunak yang stabil. Sementara itu, komponen derivatif (K_d) memperkirakan laju perubahan *error* untuk meredam osilasi dan mengatasi *overshoot*. Ketiga parameter ini bekerja secara sinergis untuk pengendalian kecepatan motor DC, algoritma PID mengolah sinyal umpan balik dari sensor *encoder* dan menyesuaikan tegangan masukan motor melalui lebar pulsa (PWM), sehingga kecepatan motor dapat dipertahankan pada nilai referensi meskipun terjadi perubahan beban atau gangguan eksternal. Blok diagram kontrol PID ditunjukkan pada Gambar 2.6 (Nurkholis Putera & Hidayat, 2022).



Gambar 2. 6 Blok Diagram Kontrol PID

(Sumber: Marjanto, 2020)

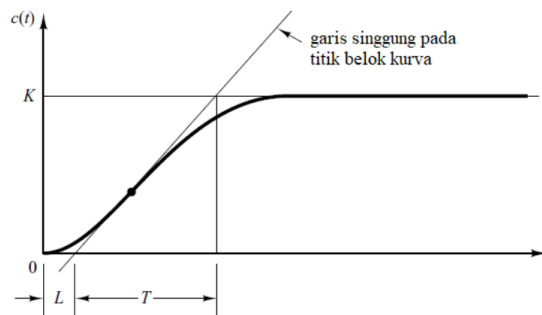
Secara matematis, sinyal kontrol PID dapat dituliskan dengan persamaan (2.17) sebagai berikut.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.17)$$

2.5.4 Metode Tuning *Ziegler-Nichols*

Selama bertahun-tahun, berbagai metode telah dikembangkan untuk memecahkan permasalahan dalam penyetelan pengendali PID, yaitu proses menentukan parameter yang tepat agar sistem memenuhi kinerja yang diinginkan. Salah satu metode yang paling dikenal dan banyak digunakan adalah metode *Ziegler-Nichols*. Proses penentuan nilai parameter pengendali seperti K_p , T_i , dan T_d ini dikenal sebagai *controller tuning* atau penalaan pengendali. *Ziegler* dan *Nichols* mengusulkan seperangkat aturan yang memungkinkan penentuan parameter tersebut berdasarkan karakteristik respon *transien* sistem. Terdapat dua pendekatan utama dalam metode *Ziegler-Nichols*, yang dikenal sebagai metode pertama dan metode kedua. Pada metode pertama, respon sistem terhadap masukan fungsi langkah satuan (*step input*) diperoleh secara eksperimental. Apabila hasil

respon sistem, baik dari percobaan langsung maupun simulasi dinamis, menunjukkan kurva berbentuk huruf S, maka metode ini dapat diterapkan untuk melakukan penyetelan parameter PID secara efektif (Hamid & Mansur, 2021). Pada Gambar 2.7 menunjukkan bahwa kurva berbentuk S dapat dicirikan oleh dua konstanta yaitu waktu tunda (L) dan konstanta waktu (T). Nilai kedua parameter tersebut diperoleh dengan menarik garis singgung pada titik belok kurva S, dimana perpotongan garis singgung dengan sumbu waktu serta garis $c(t) = K$ digunakan untuk menentukan konstanta L dan T .



Gambar 2. 7 Respon Sistem Kurva S

Parameter K_p , T_i , dan T_d yang diperoleh dari metode pertama *Ziegler-Nichols* ditentukan berdasarkan Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Aturan *Ziegler-Nichols* Metode Pertama

Pengendalian	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PD	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

2.6 Motor DC

Motor DC (*Direct Current*) merupakan perangkat elektromekanis dasar yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor ini bekerja menggunakan sumber daya arus searah, di mana perbedaan tegangan pada kedua terminalnya akan menyebabkan motor berputar ke satu arah. Jika polaritas tegangan dibalik, arah putaran motor juga akan berbalik. Dengan demikian, arah putaran motor ditentukan oleh polaritas tegangan pada terminalnya, sedangkan kecepatan putaran bergantung pada besarnya perbedaan tegangan tersebut (Kusuma & Santoso, 2023).

2.6.1 Komponen Utama Motor DC

1. Stator

Stator merupakan komponen tetap pada motor DC yang berperan dalam menghasilkan medan magnet. Di dalam stator terdapat magnet permanen atau kumparan medan (*field winding*) yang akan membentuk medan magnet ketika dialiri arus searah (DC) (Hudati et al., 2021). Medan magnet tersebut berinteraksi dengan rotor sehingga rotor dapat berputar. Dengan demikian, stator berfungsi sebagai sumber utama pembangkit medan magnet pada motor DC.

2. Rotor

Rotor merupakan bagian yang berlawanan dengan stator, di mana rotor adalah komponen motor DC yang bergerak. Rotor tersusun dari inti besi yang dililit oleh kumparan. Kumparan tersebut dikenal sebagai kumparan jangkar, yang berperan dalam menghasilkan Gaya Gerak Listrik (GGL)

induksi pada motor. Dalam bidang robotika, rotor berfungsi untuk menggerakkan roda pada robot sehingga memungkinkan terjadinya putaran dan pergerakan yang stabil di sepanjang lintasan. Kecepatan putaran rotor dipengaruhi oleh besarnya tegangan sumber serta kuatnya medan magnet yang terbentuk. Semakin tinggi tegangan yang diberikan, semakin cepat pula rotor berputar, karena keduanya memiliki hubungan yang berbanding lurus.

3. Komutator

Batang tembaga yang diperkuat dan dilapisi bahan isolator seperti mika berfungsi sebagai pengumpul arus listrik yang dihasilkan dari induksi pada kumparan jangkar. Arus tersebut kemudian diubah menjadi arus searah melalui kontak dengan sikat (*brushes*), sehingga motor DC dapat bekerja dengan lebih efisien.

4. *Air Gap*/celah udara

Air gap atau celah udara merupakan jarak pemisah antara rotor dan stator pada motor DC. Keberadaan celah udara ini sangat penting agar motor dapat berputar dengan baik. Tanpa adanya celah tersebut, rotor dan stator akan saling bergesekan atau bersentuhan, sehingga perputaran motor tidak dapat terjadi.

5. *Brushes*

Brushes merupakan komponen yang terletak di sisi komutator dan berfungsi menyalurkan arus listrik ke motor. Umumnya, *brushes* dibuat dari bahan karbon atau logam grafit, yaitu campuran antara karbon dan grafit, serta dilengkapi dengan pegas penekan danudukan sikat. Material karbon

yang digunakan harus memiliki konduktivitas listrik yang tinggi agar dapat meminimalkan rugi-rugi daya, sekaligus memiliki koefisien gesekan rendah untuk mengurangi tingkat keausan saat motor beroperasi.

2.6.2 Prinsip Kerja Motor DC

Motor DC bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi energi mekanik melalui interaksi medan magnet. Ketika arus listrik mengalir pada konduktor di dalam medan magnet stator, terbentuk fluks magnet yang menimbulkan gaya sesuai dengan prinsip *Lorentz*, sehingga rotor mulai berputar. Arah putaran ditentukan oleh arah arus, medan magnet, dan gaya yang dapat diketahui menggunakan kaidah tangan kanan. Komutator bersama sikat (*brushes*) berperan dalam menjaga agar arus di kumparan jangkar tetap searah sehingga putaran dapat dipertahankan. Tegangan induksi yang timbul, disebut Gaya Gerak Listrik (GGL) lawan, bekerja melawan tegangan sumber dan memengaruhi kecepatan putaran, sehingga motor DC dapat beroperasi secara stabil dan efisien (Hudati et al., 2021).

2.6.3 Motor DC JGA25-370

Motor DC JGA25-370 merupakan motor yang dilengkapi dengan encoder, yang berfungsi untuk meningkatkan kemampuan kontrol posisi dan kecepatan. Bentuk fisik motor JGA25-370 yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.8. Encoder bawaan tersebut memungkinkan pendeteksian posisi rotor secara *real-time*, sehingga sistem dapat menyesuaikan arus dan tegangan guna mencapai performa yang optimal. Motor ini dirancang untuk memberikan torsi tinggi dalam ukuran yang kompak, sehingga sangat cocok digunakan pada aplikasi yang memerlukan presisi tinggi seperti robotika dan sistem otomasi industri.

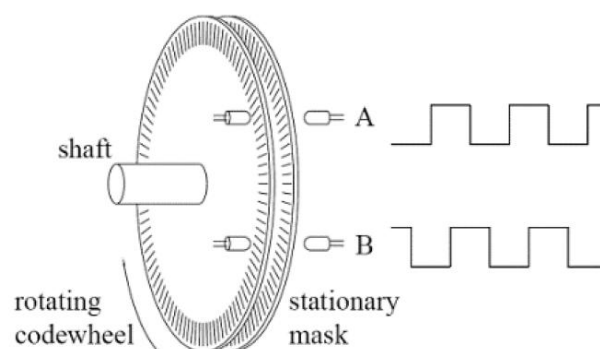
Dibandingkan dengan motor DC tanpa encoder, JGA25-270 memberikan kontrol yang lebih akurat dan responsif terhadap perubahan kondisi operasi, sehingga meningkatkan efisiensi kinerja sistem secara keseluruhan.



Gambar 2. 8 Motor DC JGA25-370

2.7 Rotary Encoder

Rotary encoder merupakan perangkat yang berfungsi mengubah gerakan mekanik menjadi rangkaian sinyal digital. Alat ini dapat digunakan untuk mendeteksi posisi, arah, maupun kecepatan putaran. *Rotary encoder* biasanya tersusun dari piringan kaca atau plastik yang memiliki pola garis atau lubang pada setiap jalurnya. Prinsip kerjanya adalah ketika garis atau lubang tersebut memutus sinar di antara pasangan *photoemitter* dan *photodetector*, maka sinyal digital akan terbentuk (Distara & Rohman, 2020).



Gambar 2. 9 Sensor *rotary encoder*

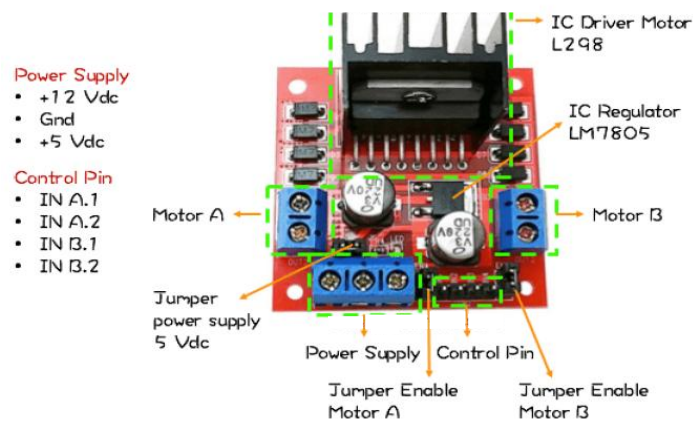
(Sumber: Distara & Rohman, 2020)

Berdasarkan Gambar 2.9, *rotary encoder* terdiri dari piringan *encoder*, sumber cahaya (*photoemitter*), penerima cahaya (*photodetector*), serta keluaran sinyal berupa kanal A dan kanal B. Kedua kanal tersebut menghasilkan pulsa digital yang berbeda *fase* sehingga dapat digunakan untuk menentukan jumlah putaran, arah putaran, dan kecepatan putaran motor secara akurat.

2.8 Driver Motor

Driver motor L298N merupakan modul pengendali motor DC yang sangat populer dalam dunia elektronika dan berfungsi untuk mengatur kecepatan serta arah putaran motor. IC L298 yang digunakan pada modul ini adalah tipe H-bridge, yang mampu mengendalikan beban induktif seperti *relay*, *solenoid*, motor DC, maupun motor stepper. Keunggulan utama dari modul L298N terletak pada kemampuannya dalam memberikan kontrol yang presisi terhadap motor, sehingga pengoperasian motor menjadi lebih stabil dan mudah dikendalikan (Muttaqin & Santoso, 2021).

Driver motor L298N memanfaatkan IC L298 dengan konfigurasi H-Bridge yang tersusun dari transistor-transistor logika (TTL) menggunakan gerbang NAND. IC ini bekerja berdasarkan prinsip *H-Bridge*, yang memungkinkan pengaturan arah putaran motor DC. Arah putaran motor dikendalikan melalui logika gerbang NAND, sedangkan sinyal keluaran TTL dari mikrokontroler digunakan untuk mengatur operasi motor. IC ini mampu menangani tegangan hingga 46 VDC dan arus sebesar 2A pada setiap kanalnya. Selain itu, L298 dapat mengendalikan dua motor DC secara bersama karena memiliki dua rangkaian H-Bridge yang terintegrasi dalam satu modul (Meidi et al., 2020). Bentuk fisik dan konfigurasi pin pada *driver* motor L298N ditunjukkan pada Gambar 2.10.

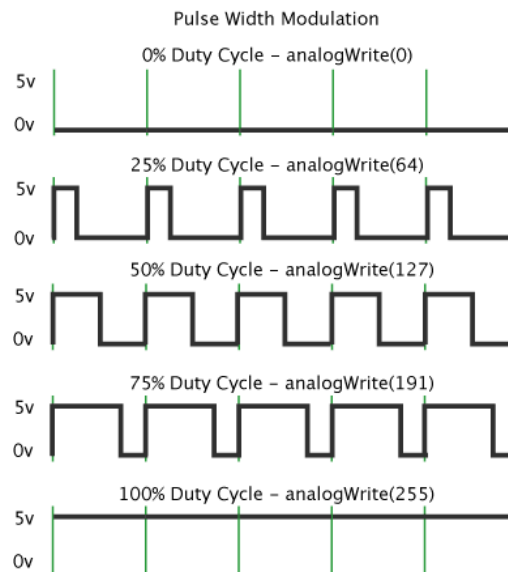


Gambar 2. 10 Driver motor

(Sumber: Meidi et al., 2020)

2.9 Pulse Width Modulation (PWM)

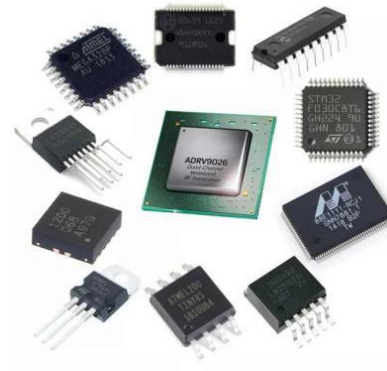
Pulse Width Modulation (PWM) merupakan teknik yang digunakan untuk mengatur tegangan rata-rata yang diterapkan pada suatu perangkat elektronik dengan cara menyalakan dan mematikan daya secara cepat dan berulang. Besarnya tegangan rata-rata ditentukan oleh *duty cycle*, yaitu rasio antara lamanya waktu sinyal berada pada kondisi ON terhadap total waktu satu siklus. Dalam aplikasi pengendalian motor DC, PWM digunakan untuk mengatur kecepatan motor dengan mengubah lebar pulsa pada sinyal tegangan berbentuk gelombang persegi, sehingga memungkinkan kontrol yang efisien dan presisi (Maung et al., 2018). Gambar 2.11 menunjukkan PWM dengan *duty cycle* yang berbeda-beda.



Gambar 2. 11 PWM dengan *duty cycle* yang berbeda-beda

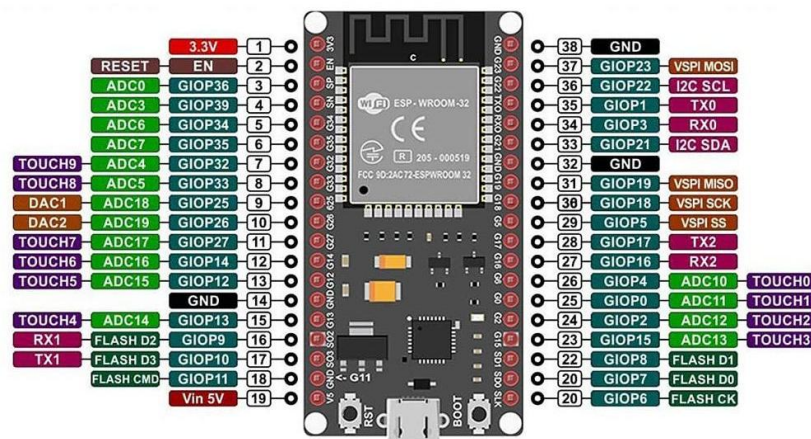
2.10 Mikrokontroler ESP32

Mikrokontroler merupakan sebuah sistem komputer lengkap yang dikemas dalam satu chip (serpih). Di dalamnya sudah terintegrasi berbagai komponen penting seperti ROM (*Read-Only Memory*) untuk menyimpan program, RAM (*Read-Write Memory*) untuk menyimpan data sementara, serta sejumlah port *input* dan *output* (I/O) yang berfungsi sebagai antarmuka dengan perangkat eksternal. Selain itu, mikrokontroler juga biasanya dilengkapi dengan pewaktu (*timer*), ADC (*Analog to Digital Converter*), DAC (*Digital to Analog Converter*), dan komunikasi serial yang memungkinkan pertukaran data dengan perangkat lain. Berbeda dengan mikroprosesor yang hanya berfungsi sebagai unit pemroses utama dan memerlukan komponen eksternal tambahan agar dapat bekerja, mikrokontroler sudah memiliki seluruh elemen dasar sistem komputer di dalam satu chip sehingga dapat berdiri sendiri dalam menjalankan suatu sistem kendali (Susanto et al., 2015). Gambar 2.12 menunjukkan bentuk-bentuk IC Mikrokontroler.



Gambar 2. 12 IC Mikrokontroler

Mikrokontroler ESP32 merupakan penerus sistem ESP8266 dan banyak digunakan pada berbagai perangkat otomatis. Mikrokontroler yang dikembangkan oleh *Espressif System* ini dirancang agar mudah dalam pembuatan perangkat keras karena membutuhkan sedikit komponen eksternal. Mikrokontroler ini kompatibel dengan Arduino IDE menawarkan performa tinggi cocok digunakan dalam berbagai aplikasi. Mikrokontroler 32-bit ini mendukung konektivitas nirkabel wifi 802.11 b/g/n pada frekuensi 2,4 GHz serta *Bluetooth* v4.2. Dari sisi perangkat keras, ESP32 dibangun dengan prosesor *Xtensa LX6 dual-core* atau *single-core* 32-bit yang beroperasi pada 160-240 MHz, dilengkapi dengan 520 KB SRAM, serta mendukung berbagai fitur seperti ADC 12-bit hingga 18 kanal, dua DAC 8-bit, sepuluh sensor sentuh kapasitif, beberapa antarmuka komunikasi (SPI, I2S, I2C, UART), pengendali SD/SDIO, *Ethernet* MAC, CAN bus 2.0, *infrared controller*, motor PWM, LED PWM, sensor efek Hall, serta *pre-amplifier* analog ultra rendah daya. Dari sisi keamanan, EPS32 sudah mendukung standar IEEE 802.11, *source boot*, *enkripsi flash*, OTP hingga 768-bit, akselerasi perangkat keras untuk AES, SHA-2, RSA, dan ECC, serta generator angka acak, menjadikannya mikrokontroler yang kuat, fleksibel, dan aman untuk berbagai kebutuhan sistem tertanam modern (Susilo et al., 2023). Gambar 2.13 menunjukkan komponen ESP32 Devkit v1.



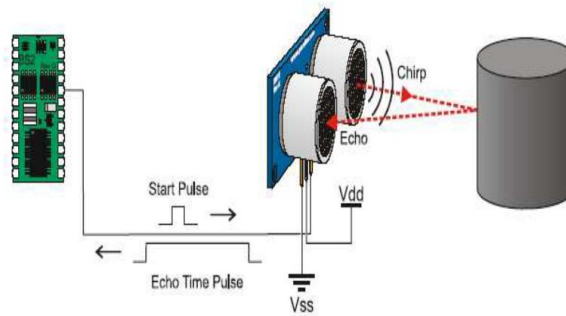
Gambar 2. 13 ESP32 Devkit v1

(Sumber: <https://fineartkr8schematicfix.z21.web.core.windows.net/esp32-devkit-v1-bluetooth.html>)

2.11 Ultrasonic

Sensor merupakan perangkat yang berfungsi mengubah suatu besaran fisik menjadi besaran listrik sehingga dapat diolah atau dianalisis melalui rangkaian elektronik tertentu. Hampir semua perangkat elektronik modern kini telah dilengkapi dengan berbagai jenis sensor di dalamnya. Saat ini, teknologi sensor telah berkembang hingga mencapai ukuran yang sangat kecil, bahkan pada skala nanometer, sehingga memungkinkan penggunaan yang lebih efisien dan hemat energi (Budiarto & Prihandono, 2015).

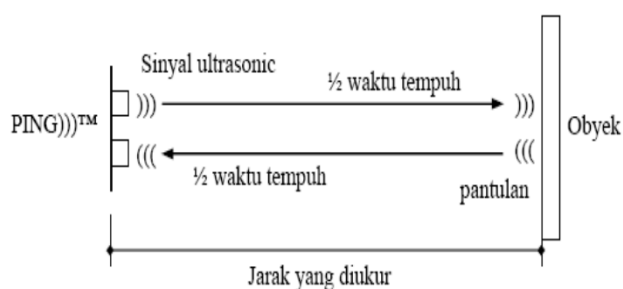
Dalam penelitian ini digunakan sensor ultrasonik *Parallax Ping*, yang bekerja berdasarkan prinsip pantulan gelombang ultrasonik. Sensor ini terdiri atas dua komponen utama, yaitu pemancar yang menghasilkan gelombang ultrasonik dengan frekuensi 40 KHz dan penerima yang menangkap pantulan gelombang dari objek di depannya. Jarak antara sensor dan objek dapat dihitung berdasarkan waktu tempuh gelombang ultrasonik dari saat dipancarkan hingga diterima kembali. Ilustrasi mengenai prinsip kerja sensor ini dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2. 14 Cara kerja sensor ultrasonik

(Sumber: Budiarmo & Prihandono, 2015)

Sensor ultrasonik *Parallax Ping* terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu sensor ultrasonik itu sendiri, chip pembangkit gelombang, penerima gelombang, serta rangkaian pembangkit pulsa. Saat rangkaian elektronik sensor memperoleh catu daya, chip pembangkit akan menghasilkan pulsa ultrasonik yang dipancarkan melalui bagian *transmitter*. Ketika terdapat objek di depan sensor, gelombang ultrasonik tersebut akan dipantulkan kembali dan diterima oleh *receiver*. Waktu tempuh pulsa dari saat dipancarkan hingga diterima kembali digunakan untuk menghitung jarak objek terhadap sensor, di mana jarak tempuh total gelombang merupakan dua kali jarak antara sensor dan objek (Budiarmo & Prihandono, 2015). Proses perhitungan jarak ini digambarkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2. 15 Perhitungan jarak sensor dan objek

Gambar 2.15 menjelaskan prinsip kerja sensor ultrasonik *Parallax Ping* dalam mengukur jarak suatu objek. Sensor ini beroperasi dengan cara memancarkan

gelombang ultrasonik ke arah depan untuk mendeteksi keberadaan objek. Setelah gelombang dipancarkan, pin SIG pada sensor akan menghasilkan pulsa *output high* sebagai tanda bahwa proses pemancaran sedang berlangsung. Ketika gelombang pantulan dari objek diterima kembali oleh sensor, kondisi pin SIG akan berubah menjadi *output low*. Lebar pulsa *high* (tIN) yang dihasilkan menunjukkan lamanya waktu tempuh gelombang ultrasonik dari sensor ke objek dan kembali lagi ke sensor, atau setara dengan dua kali jarak antara sensor dan objek. Nilai waktu tempuh inilah yang kemudian digunakan untuk menghitung jarak sebenarnya dari objek yang terdeteksi. Berdasarkan waktu yang diukur, sensor menghasilkan sinyal berupa pulsa yang proporsional dengan jarak objek, jarak dapat dihitung menggunakan rumus (2.18),

$$Jarak = \frac{(Kecepatan \times Waktu)}{2} \quad (2.18)$$

2.12 IMU (*Inertial Measurement Unit*) MPU6050

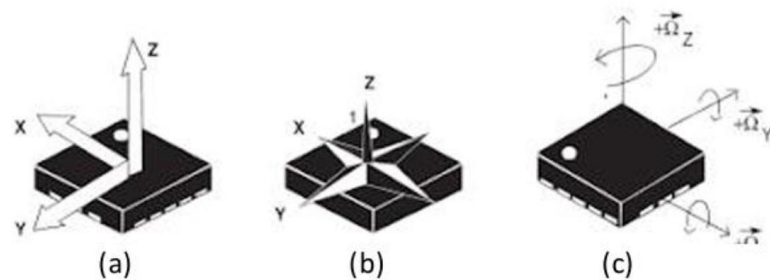
Inertial Measurement Unit (IMU) merupakan perangkat sensor berbasis MEMS yang mengintegrasikan *akselerometer*, *giroskop*, dan *magnetometer*, dimana masing-masing sensor bekerja pada tiga sumbu utama, IMU berfungsi untuk memperkirakan posisi *relative*, kecepatan, percepatan, serta sudut kemiringan suatu objek terhadap orientasi tertentu (Mudarris & Zain, 2020). Gambar 2.16 menunjukkan sensor MPU6050.



Gambar 2. 16 Sensor MPU6050

(Sumber: Mudarris & Zain, 2020)

Prinsip kerja *Inertial Measurement Unit* (IMU) didasarkan pada pemanfaatan sifat inersia atau kelembaman, yang secara matematis direpresentasikan oleh massa, untuk mendeteksi orientasi suatu objek. IMU secara terus-menerus menghitung perubahan nilai inersia guna menentukan arah gerak dan orientasi sistem. Sensor *magnetometer* di dalamnya berfungsi membaca arah dalam satuan derajat berdasarkan medan magnet bumi, sehingga dapat menunjukkan orientasi robot terhadap arah mata angin. Data yang dihasilkan oleh magnetometer masih berupa data mentah (raw data) dan memerlukan proses pengolahan lebih lanjut agar dapat dimanfaatkan oleh sistem kontrol (Alfiansyah & Dikairono, 2012). Gambar 2.17 menunjukkan ilustrasi sensor IMU pada (a) *accelerometer*, (b) *magnetometer*, (c) *gyroscope*.



Gambar 2. 17 Ilustrasi Sensor IMU pada (a) *accelerometer*, (b) *magnetometer*, (c) *gyroscope*

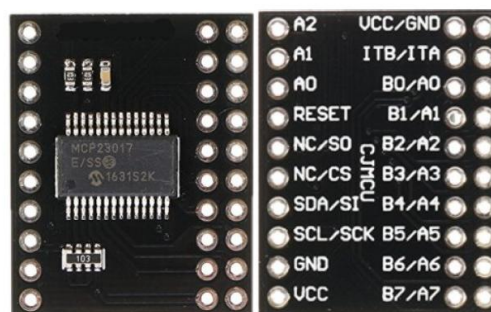
(Sumber: Alfiansyah & Dikairono, 2012)

2.13 IC MCP23017 (I/O Expander)

Dalam pengembangan sistem robotika dengan tingkat kompleksitas tinggi, keterbatasan jumlah pin *General Purpose Input Output* (GPIO) pada mikrokontroler kerap menjadi permasalahan yang signifikan. Salah satu solusi yang dapat diterapkan untuk mengatasi keterbatasan tersebut adalah penggunaan I/O Expander, seperti MCP23017. Perangkat ini merupakan slave berkecepatan tinggi

dengan antarmuka komunikasi I2C yang mampu menyediakan hingga 16 pin *input/output* tambahan yang bersifat *bidirectional* (dua arah), sehingga memperluas kemampuan antarmuka mikrokontroler secara signifikan (Microchip Technology I, 2007).

MCP23017 hanya memerlukan dua pin utama, yaitu SDA dan SCL, untuk mengendalikan seluruh pin tambahannya, sehingga penggunaan pin pada mikrokontroler seperti ESP32 menjadi lebih efisien. Selain itu, perangkat ini memiliki dua port 8-bit yang dapat dikonfigurasi secara independen serta dilengkapi fitur *interupsi* yang memungkinkan mikrokontroler mendeteksi perubahan logika *input* tanpa melakukan *polling* secara terus-menerus. Hal ini mempermudah integrasi sensor dan aktuator serta meningkatkan efisiensi kerja sistem secara keseluruhan (Gavioli, 2020). Gambar 2.18 menunjukkan MCP23017 *port expander*.



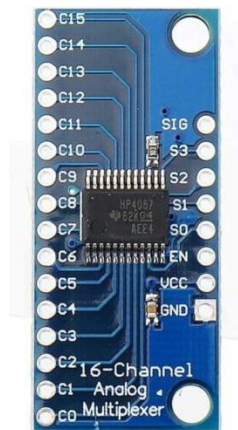
Gambar 2. 18 MCP-23017 *Port Expander*

(Sumber: Gavioli, 2020)

2.14 IC CD74HC4067 (*Multiplexer*)

Pada sistem mikrokontroler yang memiliki keterbatasan jumlah pin *input* analog, seperti ESP32 yang digunakan dalam penelitian ini, diperlukan komponen tambahan untuk memperluas kemampuan pembacaan sensor. Salah satu solusi yang efektif dalam penggunaan *multiplexer*. IC CD74HC4067 merupakan analog

multiplexer atau *demultiplexer* CMOS berkecepatan tinggi dengan 16 kanal yang berfungsi sebagai saklar pemilih sinyal analog secara bergantian (Instruments, 1998). Bentuk fisik dan konfigurasi pin dari IC CD74HC4067 ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2. 19 CD74HC4067

(Sumber: <https://leantec.es/>)

CD74HC4067 memiliki 16 kanal *input* atau *output* dan satu pin *common*, dengan pemilihan kanal yang dikendalikan melalui empat pin *selector* menggunakan kombinasi logika biner. Dengan mekanisme ini, mikrokontroler hanya membutuhkan empat pin digital untuk membaca hingga 16 sensor secara bergantian, sehingga penggunaan pin menjadi lebih efisien (Hartono et al., 2025). Karakteristik logika pemilihan kanal dijelaskan melalui tabel kebenaran yang disajikan pada Tabel 2.3. Selain itu, IC ini memiliki resistansi on yang rendah, mampu menangani rentang tegangan analog yang luas, serta dilengkapi pin enable untuk mengaktifkan atau menonaktifkan seluruh kanal. Fitur-fitur tersebut menjadikan CD74HC4067 sesuai untuk sistem robot omni-wheel yang menggunakan banyak sensor ultrasonik dalam proses deteksi rintangan.

Tabel 2. 3 Logika Pengendalian Kanal CD74HC4067

S0	S1	S2	S3	E	Saluran Terpilih
X	X	X	X	1	None
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	0	2
1	1	0	0	0	3
0	0	1	0	0	4
1	0	1	0	0	5
0	1	1	0	0	6
1	1	1	0	0	7
0	0	0	1	0	8
1	0	0	1	0	9
0	1	0	1	0	10
1	1	0	1	0	11
0	0	1	1	0	12
1	0	1	1	0	13
0	1	1	1	0	14
1	1	1	1	0	15

Keterangan:

1 = High Level

0 = Low Level

X = Tidak Ada

2.15 Penelitian Terkait

Penelitian tentang implementasi metode *Artificial Potential Field* dan PID kontrol untuk menuju titik tujuan dengan menghindari rintangan pada *Mobile Robot Omni Wheels* ini telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya dengan variasi komponen dan variabel yang berbeda. Hasil dari penelitian tersebut telah

dipublikasikan dalam berbagai jurnal ilmiah dan dapat dijadikan sebagai referensi pembandingan pada Tabel 2.4, guna mendukung proses identifikasi serta analisis terhadap penelitian yang sedang dilaksanakan.

Tabel 2. 4 Jurnal Penelitian Terkait

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1.	<i>Implementasi Algoritma Potential Field Obstacle Avoidance pada Robot Beroda 4 Omni Wheels Simetris</i>	Dwiky Widya Pangestu, Rian Ferdianm Indra Adji Sulistijono	Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, 2020	Penelitian ini membahas penerapan <i>Algoritma Artificial Potential Field</i> (APF) pada robot <i>omni wheel simetris</i> untuk menghindari rintangan (<i>obstacle avoidance</i>). Sistem dirancang agar robot dapat bergerak menuju titik tujuan dengan mempertimbangkan gaya tolak dari <i>obstacle</i> dan gaya tarik menuju target. Proses perhitungan vektor gaya total dilakukan secara <i>real-time</i> menggunakan sensor jarak ultrasonik dan kinematika robot omni. Algoritma APF diimplementasikan dalam lingkungan simulasi dan eksperimen

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				nyata, menghasilkan pergerakan yang halus dan responsif terhadap perubahan posisi <i>obstacle</i> . Hasil penelitian menunjukkan robot mampu menghindari rintangan secara efektif dengan jalur gerak yang optimal menuju target.
2.	PID Control Schematic Design for Omni-directional Wheel Mobile Robot	Hendi Purnata, Syahrul Ramadan, Muhammad Arif Hidayat, Irvan Maulana.	2022	Penelitian ini membahas tentang perancangan sistem kontrol berbasis PID (<i>Proportional-Integral-Derivative</i>) pada robot <i>Omnidirectional Mobile Robot (OMR)</i> yang memiliki kemampuan bergerak ke segala arah tanpa bergantung pada orientasi tubuh robot. Robot ini dirancang dengan tiga roda omni yang masing-masing memiliki sudut 120 derajat, sehingga memungkinkan pergerakan yang

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				fleksibel dan stabil. Tujuan utama penelitian adalah untuk membuat sistem kontrol yang mampu mengarahkan robot menuju titik tujuan tertentu secara akurat melalui simulasi berbasis MATLAB. Tahapan penelitian meliputi beberapa proses penting, yaitu desain mekanik dan elektrik robot, pemilihan serta konfigurasi komponen utama seperti <i>rotary encoder</i>, sensor MPU6050, mikrokontroler ESP32, dan driver motor BTS7960, serta penentuan model kinematika maju (<i>forward kinematic</i>) dan kinematika balik (<i>inverse kinematic</i>). Setelah model matematis sistem ditetapkan, peneliti menerapkan algoritma kontrol PID

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				untuk mengatur kecepatan motor DC dan menjaga kestabilan posisi robot. Pengujian dilakukan dengan menentukan beberapa titik lintasan (<i>trajectory</i>) pada waktu 3, 6, 9, 12, dan 15 detik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa robot mampu mengikuti lintasan yang telah ditentukan dengan baik, walaupun terdapat sedikit deviasi pada beberapa titik akibat pengaturan konstanta PID yang belum optimal. Sistem kontrol PID berhasil mengoreksi kesalahan posisi (<i>error</i>) antara nilai <i>setpoint</i> dan data sensor dalam bentuk koordinat (x, y, dan θ), sehingga pergerakan robot menjadi lebih halus dan stabil. Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				menunjukkan bahwa penggunaan kontrol PID pada OMR efektif untuk meningkatkan ketepatan posisi dan kestabilan gerak robot. Temuan ini dapat menjadi dasar pengembangan lebih lanjut, khususnya dalam penerapan pada kompetisi KRSBI (Kontes Robot Sepak Bola Indonesia) dan sistem robotika berbasis navigasi otonom lainnya.
3.	<i>Trajectory Tracking</i> pada Robot Omni dengan Metode <i>Odometry</i>	Fahmizal, Dhiya Uddin Rijalussalam, Ma'un Budiyanto, Afrizal Mayub	Universitas Gadjah Mada (UGM) dan Universitas Bengkulu, 2019	Penelitian ini membahas metode <i>odometry</i> dan PID control pada robot <i>omni wheel</i> berkonfigurasi empat roda untuk melakukan <i>trajectory tracking</i> . <i>Odometry</i> digunakan untuk memperkirakan posisi relatif robot terhadap posisi awal menggunakan sensor <i>rotary encoder</i> pada sumbu X dan Y. Data ini diolah bersama

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				kinematika balik untuk menentukan kecepatan masing-masing roda DC. Kendali PID independen digunakan untuk menjaga kestabilan kecepatan motor. Hasil pengujian pada lintasan berbentuk persegi panjang, segitiga sama sisi, dan segitiga sama kaki menunjukkan tingkat kesalahan posisi di bawah 5%, membuktikan bahwa
4.	<i>Metode Potential Field</i> sebagai kendali Robot Roda Omni untuk Menuju Target dan Menghindari Rintangan	Faisal Wahab	Teknik Elektronika, Universitas Katolik Parahyangan, 2022	Penelitian ini merancang dan mensimulasikan OMR dengan tiga roda omni (konfigurasi 120 °) menggunakan <i>metode Artificial Potential Field</i> untuk mencapai titik tujuan dan menghindari rintangan. Sistem dibangun berdasarkan model kinematika maju dan mundur OMR, serta integrasi gaya <i>attractive</i> (menuju target) dan <i>repulsive</i> (menghindari

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				<i>obstacle</i>). Simulasi dilakukan dalam MATLAB 2D, dengan dua rintangan dan satu titik tujuan. Hasil menunjukkan bahwa OMR dapat bergerak ke segala arah tanpa mengubah orientasi tubuh, berhasil menuju target, dan menghindari dua rintangan dengan orientasi tetap stabil. Penelitian ini membuktikan efektivitas APF dalam kendali gerak dan penghindaran rintangan pada robot <i>omni</i> secara simulatif.
5.	Pengaturan Navigasi Gerak Robot 3 <i>Wheels Omni-Directional</i> Menggunakan Metode Kontrol PID	Rukmana Putra Marjanto, Joko Subur	Teknik Elektro, Universitas Han Tuah, Surabaya, 2019	Penelitian ini mengembangkan robot 3 <i>wheels omni-directional</i> dengan sistem kendali PID (<i>Proportional, Integral, Derivative</i>) untuk menjaga jarak robot terhadap dinding, kemudian sinyal <i>error</i> dihitung berdasarkan <i>setpoint</i> yang ditetapkan.

No.	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
				Nilai PID dikalibrasi menggunakan metode <i>trial and error</i> dengan parameter $K_p = 30$, $K_i = 10$, dan $K_d = 20$. Sinyal keluaran PID digunakan untuk mengatur PWM motor DC melalui driver L298N yang dikendalikan oleh Arduino Mega 2560. Hasil pengujian menunjukkan bahwa robot mampu bernavigasi stabil, menjaga jarak minimum 10 cm dari dinding tanpa menyentuhnya, serta memiliki respon cepat terhadap perubahan posisi. Efektivitas kontrol PID untuk menjaga kestabilan arah dan jarak gerak.

Sumber: Hasil Studi Literatur, 2025