

BAB II DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka merupakan kajian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan topik robot arm dan metode *inverse kinematics*. Beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Tinjauan Pustaka

No	Judul Referensi	Penulis/ Tahun	Keterangan
1.	Introduction to Robotics: Mechanics and Control	Jhon J.Craig (2005)	Membahas mengenai dasar-dasar robotika, termasuk konsep kinematika robot yang terdiri dari forward kinematics dan <i>inverse kinematics</i> dan juga menjelaskan bahwa <i>inverse kinematics</i> digunakan untuk menentukan sudut setiap joint berdasarkan posisi end-effector yang diinginkan, namun memiliki tingkat kesulitan yang lebih tinggi karena melibatkan persamaan non-linear.
2.	Robot Modeling and Control.	Mark W. Spong, Seth Hutchinson, dan M. Vidyasagar (2006)	Penelitian ini membahas tentang pemodelan matematis dan sistem kontrol pada robot manipulator. Dalam buku ini dijelaskan bagaimana hubungan antara koordinat

posisi dengan sudut joint dapat dimodelkan menggunakan metode kinematika, serta pentingnya *inverse kinematics* dalam pengendalian robot secara akurat.

3.	Robotics: Modelling, Planning and Control	Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, dan Giuseppe Oriolo (2009)	Penelitian ini membahas perencanaan gerak (motion planning) dan pengendalian robot, termasuk penggunaan metode <i>inverse kinematics</i> dalam menentukan lintasan dan posisi robot. Selain itu, dibahas juga mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja robot seperti akurasi dan presisi.
<hr/>			
4.	<i>Inverse kinematics</i> Overview	MathWorks (2023)	Penelitian ini menjelaskan konsep <i>inverse kinematics</i> secara praktis menggunakan pendekatan komputasi. Dibahas mengenai bagaimana metode <i>inverse kinematics</i> digunakan dalam sistem robot modern untuk menghitung sudut joint berdasarkan target posisi, serta implementasinya dalam

			simulasi dan sistem kontrol robot.
5.	Panduan Penggunaan Robot Arm RNV3	Ruskomponen (2023)	Pada panduan ini dibahas mengenai spesifikasi, cara pengoperasian, serta sistem kontrol robot arm RNV3. Robot ini menggunakan sistem koordinat kartesian dalam pengoperasiannya dan dapat dikontrol melalui komunikasi serial serta pemrograman berbasis Python. Panduan ini menjadi dasar dalam memahami cara kerja dan pengendalian robot yang digunakan dalam penelitian ini.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode *inverse kinematics* memiliki peran penting dalam pengendalian robot arm, khususnya dalam menentukan hubungan antara posisi target dengan sudut pergerakan joint. Selain itu, pemodelan matematis dan sistem koordinat menjadi faktor utama dalam menentukan akurasi dan kinerja robot. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada penerapan metode *inverse kinematics* pada robot arm 3 DOF tipe RNV3 untuk menganalisis kinerja robot dalam mencapai posisi target.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Robotika

Robotika merupakan cabang ilmu teknik yang mempelajari tentang perancangan, pembuatan, pengoperasian, serta pengendalian robot. Robot dapat diartikan sebagai suatu sistem elektromekanik yang mampu melakukan pekerjaan tertentu secara otomatis maupun semi-otomatis berdasarkan program yang telah ditentukan. Dalam perkembangannya, robot tidak hanya digunakan untuk membantu pekerjaan manusia, tetapi juga untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, serta kualitas hasil kerja, khususnya dalam dunia industri.

Perkembangan robotika saat ini sangat pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan otomasi di berbagai sektor. Dalam industri manufaktur, robot digunakan untuk melakukan pekerjaan yang bersifat berulang, membutuhkan tingkat ketelitian tinggi, serta berisiko bagi keselamatan manusia. Selain itu, robot juga mulai banyak diterapkan di bidang pendidikan sebagai media pembelajaran untuk memahami konsep dasar sistem kontrol, pemrograman, serta mekanika.

1. Struktur Sistem Robotika

Secara umum, sistem robotika terdiri dari beberapa bagian utama yang saling terintegrasi sehingga mampu bekerja secara optimal. Komponen-komponen tersebut meliputi sistem mekanik, aktuator, sensor, sistem kontrol, serta perangkat lunak. Setiap bagian memiliki peran penting dan tidak dapat dipisahkan satu sama lain dalam membentuk suatu sistem robot yang utuh.

Integrasi antar komponen ini memungkinkan robot untuk menerima perintah, memproses informasi, serta menghasilkan gerakan yang sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Tanpa adanya keterpaduan antar sistem tersebut, robot tidak akan dapat berfungsi dengan baik.

2. Sistem Mekanik

Sistem mekanik merupakan bagian fisik dari robot yang berfungsi sebagai struktur utama. Bagian ini meliputi rangka, link, dan joint yang membentuk bentuk serta

pergerakan robot. Sistem mekanik dirancang sedemikian rupa agar mampu menopang beban serta menghasilkan gerakan yang stabil dan presisi.

Pada robot arm, sistem mekanik sangat berpengaruh terhadap jangkauan gerak serta fleksibilitas robot. Desain mekanik yang baik akan mempermudah dalam proses pengendalian serta meningkatkan kinerja robot secara keseluruhan.

3. Aktuator

Aktuator merupakan komponen yang berfungsi sebagai penggerak pada robot. Aktuator mengubah energi listrik menjadi energi mekanik sehingga robot dapat melakukan pergerakan. Jenis aktuator yang umum digunakan pada robot arm adalah motor servo dan motor DC.

Pemilihan aktuator sangat berpengaruh terhadap performa robot, terutama dalam hal kecepatan, kekuatan, dan ketelitian gerakan. Aktuator yang baik akan menghasilkan gerakan yang halus serta responsif terhadap perintah yang diberikan.

4. Sensor

Sensor merupakan komponen yang berfungsi untuk mendeteksi kondisi lingkungan maupun posisi robot. Sensor memberikan umpan balik (feedback) kepada sistem kontrol sehingga robot dapat menyesuaikan gerakannya sesuai dengan kondisi yang terjadi.

Dalam sistem robotika, sensor memiliki peran penting dalam meningkatkan akurasi dan keamanan. Contoh sensor yang sering digunakan antara lain sensor posisi, sensor jarak, serta sensor arus.

5. Sistem Kontrol

Sistem kontrol merupakan bagian yang berfungsi untuk mengatur seluruh aktivitas robot. Sistem ini menerima input dari pengguna maupun sensor, kemudian memprosesnya menjadi perintah yang dikirimkan ke aktuator.

Sistem kontrol dapat berupa mikrokontroler, PLC, maupun komputer. Dalam penelitian ini, sistem kontrol berperan penting dalam mengimplementasikan

metode *inverse kinematics* agar robot dapat bergerak sesuai dengan koordinat yang diinginkan.

6. Perangkat Lunak (*Software*)

Perangkat lunak merupakan bagian yang digunakan untuk memprogram dan mengendalikan robot. *Software* berfungsi sebagai media komunikasi antara pengguna dengan sistem robot.

Melalui perangkat lunak, pengguna dapat memberikan perintah berupa koordinat, mengatur gerakan robot, serta melakukan monitoring terhadap kondisi sistem. Penggunaan *Software* yang tepat akan mempermudah dalam proses pengoperasian serta pengembangan robot.

2.2.2 Robot Arm (Manipulator)

Robot arm atau manipulator merupakan salah satu jenis robot yang memiliki struktur menyerupai lengan manusia dan digunakan untuk melakukan berbagai pekerjaan mekanik. Robot ini terdiri dari beberapa bagian yang saling terhubung dan bekerja secara terkoordinasi untuk menghasilkan gerakan tertentu. Pergerakan robot arm ditentukan oleh hubungan antara bagian-bagian tersebut sehingga mampu menghasilkan posisi yang diinginkan pada ujung robot atau end-effector.

Robot arm banyak digunakan dalam dunia industri karena memiliki fleksibilitas yang tinggi serta dapat diprogram sesuai kebutuhan. Penggunaannya meliputi berbagai aplikasi seperti pemindahan barang, perakitan, pengelasan, pengecatan, hingga inspeksi produk. Dengan kemampuan tersebut, robot arm menjadi salah satu komponen penting dalam sistem otomasi industri modern.

Dalam pengoperasiannya, robot arm bekerja dengan mengatur sudut pada setiap sambungan atau joint. Kombinasi pergerakan dari setiap joint akan menghasilkan posisi tertentu pada end-effector. Oleh karena itu, diperlukan sistem kontrol yang baik agar robot dapat bergerak secara akurat dan sesuai dengan perintah yang diberikan.



Gambar 2.1 Robot Arm

2.2.3 Derajat Kebebasan (*Degree Of Freedom/DOF*)

Derajat kebebasan atau *Degree of Freedom* (DOF) merupakan jumlah gerakan independen yang dapat dilakukan oleh suatu robot. Setiap sambungan atau joint pada robot memberikan kontribusi terhadap jumlah derajat kebebasan yang dimiliki. Semakin banyak derajat kebebasan yang dimiliki oleh robot, maka semakin fleksibel robot tersebut dalam menjangkau berbagai posisi dan melakukan gerakan yang kompleks.

Namun demikian, peningkatan jumlah derajat kebebasan juga menyebabkan sistem pengendalian menjadi lebih kompleks. Hal ini dikarenakan setiap tambahan joint memerlukan perhitungan yang lebih rumit, terutama dalam proses kinematika. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan robot arm dengan tiga derajat kebebasan yang dianggap cukup untuk melakukan berbagai gerakan dasar namun masih mudah dalam pengendaliannya.

Robot arm dengan 3 DOF umumnya mampu bergerak dalam ruang tiga dimensi, sehingga dapat digunakan untuk aplikasi sederhana seperti pemindahan objek dari satu titik ke titik lain. Konfigurasi ini juga sering digunakan dalam pembelajaran karena memberikan keseimbangan antara kompleksitas dan kemudahan dalam pemahaman.



Gambar 2.2 Derajat Kebebasan (DOF)

2.2.4 Robot Arm RNV3

Robot arm RNV3 merupakan robot berbasis desktop yang dirancang untuk kebutuhan edukasi dan penelitian di bidang robotika dan otomasi. Robot ini dapat dikontrol melalui komputer menggunakan komunikasi serial serta perangkat lunak yang telah disediakan oleh pabrik. Dengan sistem ini, pengguna dapat dengan mudah mengatur pergerakan robot melalui antarmuka yang tersedia.



Gambar 2.3 Robot Arm RNV3

Robot RNV3 menggunakan sistem koordinat kartesian dalam pengoperasiannya, sehingga pengguna hanya perlu memasukkan nilai koordinat tertentu untuk menentukan posisi yang diinginkan. Selain itu, robot ini juga mendukung pemrograman berbasis Python serta perintah berbasis G-code, yang

memungkinkan pengguna untuk membuat program pengendalian yang lebih kompleks dan fleksibel.

Robot ini juga dilengkapi dengan fitur kalibrasi untuk menentukan posisi awal serta sistem monitoring untuk melihat kondisi input dan output. Dengan fitur-fitur tersebut, robot RNV3 menjadi salah satu media pembelajaran yang efektif dalam memahami konsep dasar robotika, khususnya dalam hal pengendalian pergerakan robot.

2.2.5 Komponen Sistem Robot

Dalam penelitian ini, sistem robot arm terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terintegrasi untuk mendukung proses pengendalian dan implementasi metode inverse kinematics. Setiap komponen memiliki fungsi tertentu sehingga robot dapat bekerja secara optimal dalam mencapai posisi target yang diinginkan. Komponen-komponen tersebut meliputi sistem kontrol, aktuator, komunikasi serial, serta perangkat lunak pendukung.

2.2.5.1 Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 merupakan papan mikrokontroler berbasis ATmega2560 yang digunakan sebagai sistem kontrol utama pada robot arm. Arduino berfungsi untuk menerima data hasil perhitungan *inverse kinematics* dari komputer, kemudian memproses data tersebut menjadi sinyal kendali untuk aktuator berupa motor servo.

Arduino Mega 2560 dipilih karena memiliki jumlah pin input-output yang cukup banyak dibandingkan jenis Arduino lainnya, sehingga mampu mendukung kebutuhan sistem robotika dengan beberapa aktuator dan komunikasi serial secara bersamaan. Selain itu, Arduino juga mudah diprogram menggunakan Arduino IDE dan mendukung integrasi dengan bahasa pemrograman Python maupun perintah berbasis serial.

Pada penelitian ini, Arduino digunakan sebagai penghubung antara perangkat lunak pengendali dengan sistem mekanik robot arm. Setelah

komputer melakukan perhitungan *inverse kinematics* berdasarkan koordinat target yang diberikan, data sudut joint akan dikirimkan ke Arduino melalui komunikasi serial. Selanjutnya, Arduino menerjemahkan data tersebut menjadi sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) yang digunakan untuk mengontrol pergerakan motor servo.

Selain sebagai pengendali utama, Arduino juga berfungsi untuk mengatur sinkronisasi gerakan antar joint sehingga robot dapat bergerak secara lebih stabil dan terkoordinasi. Kemampuan ini sangat penting dalam sistem robot arm karena setiap joint harus bergerak sesuai urutan dan sudut yang telah dihitung agar posisi end-effector dapat mencapai target secara akurat.

Arduino Mega 2560 memiliki kelebihan dalam hal kemudahan penggunaan, fleksibilitas pengembangan, serta kompatibilitas dengan berbagai sensor dan aktuator. Oleh karena itu, Arduino banyak digunakan dalam penelitian robotika, sistem otomasi, serta pengembangan prototype karena lebih praktis dan ekonomis.

2.2.5.2 Motor Servo

Motor servo merupakan aktuator yang digunakan untuk menggerakkan joint pada robot arm. Servo bekerja dengan mengubah sinyal kendali menjadi pergerakan sudut tertentu sesuai dengan nilai yang diberikan oleh sistem kontrol.

Pada robot arm RNV3, setiap joint digerakkan menggunakan motor servo sehingga robot dapat bergerak menuju posisi target berdasarkan hasil perhitungan *inverse kinematics*. Penggunaan servo motor dipilih karena memiliki tingkat presisi yang cukup baik, respons cepat, serta mampu mempertahankan posisi sudut sesuai perintah.

Motor servo terdiri dari beberapa bagian utama yaitu motor DC, gearbox, sensor posisi, dan sistem kontrol internal. Gearbox berfungsi untuk meningkatkan torsi sehingga motor mampu menggerakkan beban pada lengan robot, sedangkan sensor posisi digunakan untuk membaca sudut aktual dari

servo. Dengan adanya sistem kontrol internal, servo mampu mempertahankan posisi sudut yang telah diperintahkan.

Pada penelitian ini, motor servo digunakan untuk menggerakkan setiap derajat kebebasan atau Degree of Freedom (DOF) pada robot arm. Kombinasi pergerakan beberapa servo menghasilkan gerakan yang terkoordinasi sehingga end-effector dapat mencapai posisi target yang diinginkan.

Kinerja motor servo sangat mempengaruhi akurasi dan stabilitas pergerakan robot. Apabila servo mengalami keterlambatan respon atau ketidaksesuaian sudut, maka posisi robot dapat mengalami error. Oleh karena itu, pemilihan servo yang tepat sangat penting untuk meningkatkan performa sistem robotika.

Selain itu, servo motor juga memiliki keunggulan dalam hal kemudahan pengendalian karena hanya memerlukan sinyal PWM untuk mengatur posisi sudut. Hal ini membuat servo menjadi salah satu aktuator yang paling banyak digunakan dalam sistem robot arm skala pendidikan maupun industri.

2.2.5.3 Power Supply

Power supply merupakan komponen yang berfungsi sebagai sumber daya listrik untuk seluruh sistem robot arm. Power supply digunakan untuk menyuplai energi listrik ke sistem kontrol, motor servo, dan komponen pendukung lainnya agar robot dapat bekerja dengan baik.

Pada sistem robot arm, kestabilan tegangan sangat penting karena motor servo membutuhkan arus yang cukup besar ketika bergerak. Apabila suplai daya tidak stabil, maka pergerakan robot dapat terganggu dan menyebabkan sistem bekerja tidak optimal.

Dalam penelitian ini, *power supply* digunakan untuk memberikan tegangan kerja yang sesuai dengan kebutuhan robot arm RNV3. Sumber daya listrik akan didistribusikan ke sistem kontrol dan aktuator sehingga seluruh komponen dapat bekerja secara bersamaan.

Power supply yang baik harus mampu memberikan tegangan yang stabil dan arus yang cukup agar motor servo dapat bergerak dengan maksimal. Selain itu, sistem proteksi pada *power supply* juga penting untuk mencegah kerusakan akibat arus berlebih maupun hubungan singkat.

Penggunaan *power supply* yang sesuai akan meningkatkan kestabilan sistem robot serta mengurangi kemungkinan terjadinya error saat robot melakukan pergerakan menuju posisi target.

2.2.5.4 Komunikasi Serial USB

Komunikasi serial digunakan sebagai media pertukaran data antara komputer dan sistem kontrol robot. Pada penelitian ini, komunikasi dilakukan menggunakan kabel USB yang terhubung langsung ke sistem robot arm. Data berupa hasil perhitungan *inverse kinematics* dikirimkan dari komputer menuju Arduino melalui komunikasi serial. Selanjutnya, data tersebut diproses menjadi sinyal kendali untuk menggerakkan motor servo pada robot arm.

Komunikasi serial bekerja dengan cara mengirimkan data secara berurutan melalui jalur komunikasi tertentu. Metode ini dipilih karena lebih sederhana, stabil, dan mudah diimplementasikan pada sistem robotika berbasis mikrokontroler. Pada implementasinya, komunikasi serial memungkinkan komputer dan robot saling bertukar data secara real-time. Dengan sistem ini, pengguna dapat mengirimkan koordinat target sekaligus melakukan monitoring terhadap kondisi robot selama proses pengujian berlangsung. Selain itu, komunikasi serial juga mendukung proses debugging dan pengembangan sistem karena data dapat ditampilkan langsung pada serial monitor. Hal ini mempermudah proses analisis apabila terjadi kesalahan pada sistem.

Kecepatan komunikasi serial diatur menggunakan baud rate tertentu agar proses pengiriman data dapat berjalan dengan stabil dan minim error. Oleh karena itu, konfigurasi komunikasi serial menjadi bagian penting dalam sistem pengendalian robot arm.

2.2.5.5 Python

Python merupakan bahasa pemrograman yang digunakan untuk melakukan perhitungan *inverse kinematics* serta mengontrol pergerakan robot arm. Bahasa pemrograman ini dipilih karena memiliki sintaks yang sederhana, mudah dipahami, serta mendukung berbagai library yang berkaitan dengan sistem robotika dan komunikasi serial. Dalam penelitian ini, Python digunakan untuk menghitung sudut joint berdasarkan koordinat target yang diberikan pengguna. Hasil perhitungan kemudian dikirimkan ke sistem kontrol robot melalui komunikasi serial.

Python memiliki banyak keunggulan dalam pengembangan sistem robotika, seperti kemudahan integrasi dengan perangkat keras, kemampuan pengolahan data yang baik, serta dukungan library matematika dan visualisasi. Hal tersebut membuat Python menjadi salah satu bahasa pemrograman yang banyak digunakan dalam penelitian robotika modern. Selain digunakan untuk pengolahan data, Python juga mempermudah proses pengembangan program karena mampu melakukan monitoring dan pengujian sistem secara fleksibel. Dengan menggunakan Python, proses implementasi *inverse kinematics* dapat dilakukan secara lebih cepat dan efisien. Pada penelitian ini, Python digunakan untuk melakukan proses input koordinat posisi target, perhitungan sudut joint, pengiriman data ke Arduino, serta pengujian sistem robot arm secara keseluruhan.

2.2.5.6 G-Code

G-code merupakan bahasa perintah yang umum digunakan pada sistem otomasi dan mesin berbasis koordinat seperti CNC dan robot arm. Pada robot RNV3, G-code digunakan sebagai salah satu metode untuk memberikan instruksi pergerakan robot berdasarkan koordinat tertentu. Perintah G-code memungkinkan robot bergerak menuju posisi target secara otomatis sesuai parameter yang diberikan. Penggunaan G-code pada robot arm RNV3

mempermudah proses pengendalian karena pengguna cukup menentukan koordinat tujuan tanpa perlu mengatur sudut joint secara manual.

Dalam implementasinya, G-code bekerja dengan memberikan instruksi berupa koordinat gerakan, kecepatan, dan posisi tertentu kepada sistem kontrol robot. Selanjutnya, sistem akan menerjemahkan instruksi tersebut menjadi pergerakan pada motor servo. Penggunaan G-code dalam sistem robotika memiliki beberapa kelebihan, seperti struktur perintah yang sederhana, mudah dipahami, dan kompatibel dengan berbagai sistem otomasi. Oleh karena itu, G-code banyak digunakan pada mesin CNC, printer 3D, maupun robot manipulator. Dalam penelitian ini, G-code digunakan sebagai pendukung sistem kontrol untuk mengimplementasikan pergerakan robot berdasarkan hasil perhitungan inverse kinematics. Dengan adanya G-code, proses pengendalian robot menjadi lebih mudah dan terstruktur. Perlu dicatat bahwa dalam penelitian ini pengendalian robot dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python melalui komunikasi serial, sehingga G-code berfungsi sebagai dasar teoritis pemahaman sistem perintah pergerakan robot, bukan sebagai metode implementasi yang digunakan secara langsung.

2.2.6 Sistem Koordinat Kartesian

Sistem koordinat kartesian merupakan sistem yang digunakan untuk menentukan posisi suatu titik dalam ruang berdasarkan tiga sumbu utama, yaitu sumbu X, Y, dan Z. Dalam sistem ini, setiap titik dinyatakan dalam bentuk koordinat yang menunjukkan jarak terhadap masing-masing sumbu. Dalam aplikasi robot arm, sistem koordinat kartesian digunakan untuk menentukan posisi end-effector secara intuitif. Sebagai contoh, pengguna dapat menentukan posisi target dengan memasukkan nilai koordinat tertentu, seperti (x, y, z) , tanpa perlu mengetahui sudut dari masing-masing joint. Hal ini membuat sistem lebih mudah digunakan, terutama dalam aplikasi berbasis pemrograman.

Dalam sistem koordinat Kartesian, ketiga sumbu tersebut saling tegak lurus sehingga membentuk suatu sistem koordinat tiga dimensi yang mampu

merepresentasikan posisi suatu objek secara akurat. Setiap perubahan nilai pada salah satu sumbu akan mengakibatkan perubahan posisi objek terhadap titik origin, sedangkan perubahan pada dua atau tiga sumbu secara bersamaan akan menghasilkan perpindahan posisi dalam ruang tiga dimensi.

Namun demikian, robot secara fisik tidak bergerak berdasarkan koordinat, melainkan berdasarkan sudut pada setiap joint. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang mampu mengubah koordinat kartesian menjadi sudut joint. Proses ini dikenal sebagai *inverse kinematics*. Dengan kata lain, sistem koordinat kartesian berperan sebagai input, sedangkan sistem kinematika bertugas menerjemahkan input tersebut menjadi gerakan nyata pada robot.

Penggunaan sistem koordinat Kartesian memberikan keuntungan karena pengguna tidak perlu melakukan perhitungan sudut joint secara manual. Seluruh proses konversi koordinat menjadi sudut pergerakan dilakukan secara otomatis oleh algoritma *inverse kinematics*, sehingga pengoperasian robot menjadi lebih sederhana, efisien, dan meminimalkan kemungkinan kesalahan perhitungan oleh pengguna.

Diagram koordinat Kartesian merupakan sistem koordinat tiga dimensi yang digunakan untuk menentukan posisi suatu titik berdasarkan tiga sumbu utama, yaitu sumbu X, sumbu Y, dan sumbu Z. Sistem koordinat ini diperkenalkan oleh René Descartes dan banyak diterapkan dalam bidang matematika, teknik, serta robotika sebagai acuan dalam menentukan posisi suatu objek di dalam ruang tiga dimensi.

Pada robot manipulator, sistem koordinat Kartesian digunakan untuk menyatakan posisi **end-effector** terhadap titik referensi (**origin**) yang umumnya berada pada pusat **base** robot. Posisi end-effector dinyatakan dalam bentuk koordinat (**X**, **Y**, **Z**) sehingga setiap titik target dapat direpresentasikan secara numerik dan diproses oleh sistem kendali robot.

Pada penelitian ini, sistem koordinat Kartesian digunakan sebagai masukan utama pada Graphical User Interface (GUI). Pengguna memasukkan nilai koordinat X, Y, dan Z sebagai posisi target yang diinginkan. Selanjutnya koordinat tersebut diproses menggunakan metode *inverse kinematics* untuk menghitung besar sudut masing-masing joint robot, yaitu **Rot (θ_1)**, **Low (θ_2)**, dan **High (θ_3)**. Sudut hasil perhitungan kemudian dikirimkan ke aktuator servo sehingga end-effector bergerak menuju posisi target.

Selain sebagai masukan utama sistem, koordinat Kartesian juga digunakan sebagai parameter dalam proses simulasi dan visualisasi robot pada aplikasi. Dengan adanya visualisasi tersebut, pengguna dapat mengetahui terlebih dahulu apakah posisi target yang dimasukkan dapat dijangkau oleh robot sebelum perintah dikirimkan ke aktuator servo.

Pada penelitian ini, titik acuan (origin) ditetapkan pada pusat base Robot Arm RNV3. Seluruh koordinat target dihitung relatif terhadap titik tersebut sehingga setiap perubahan posisi end-effector dapat direpresentasikan dalam bentuk perubahan nilai koordinat X, Y, dan Z. Penentuan titik origin yang tetap bertujuan agar proses perhitungan inverse kinematics dapat dilakukan secara konsisten pada setiap pengujian.

Adapun fungsi masing-masing sumbu koordinat pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

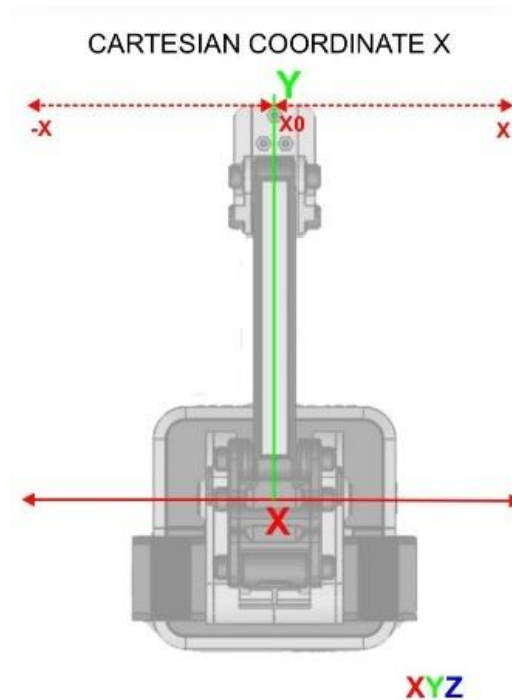
Sumbu X menyatakan perpindahan end-effector ke arah kanan (+) dan kiri (-).

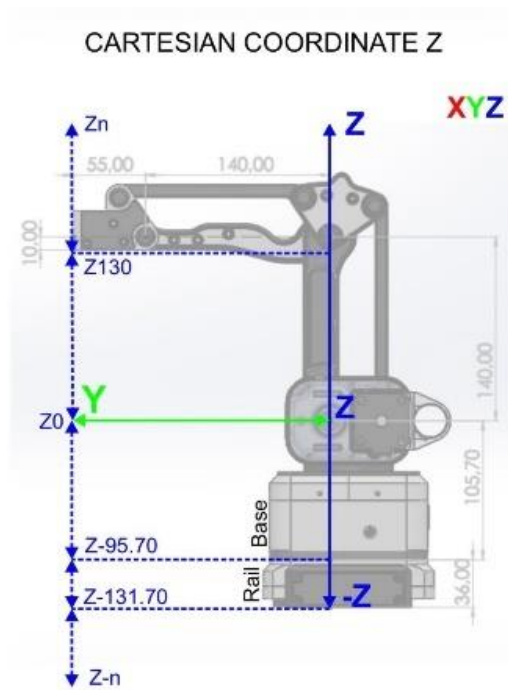
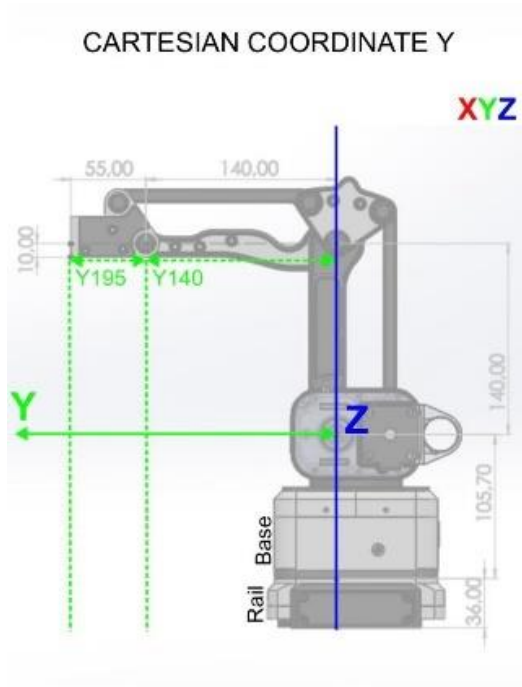
Sumbu Y menyatakan perpindahan end-effector ke arah depan (+) dan belakang (-).

Sumbu Z menyatakan perpindahan end-effector ke arah atas (+) dan bawah (-).

Pemisahan fungsi masing-masing sumbu bertujuan untuk mempermudah proses analisis pergerakan robot. Sebagai contoh, perubahan nilai pada sumbu X akan menyebabkan end-effector bergerak ke arah kanan atau kiri tanpa mengubah tinggi posisi secara signifikan. Demikian pula perubahan pada sumbu Y akan memengaruhi jarak jangkauan robot terhadap base, sedangkan perubahan pada sumbu Z akan memengaruhi ketinggian end-effector terhadap bidang kerja.

Dengan demikian, sistem koordinat Kartesian tidak hanya berfungsi sebagai representasi posisi target, tetapi juga menjadi dasar dalam proses pengendalian, simulasi, validasi workspace, serta evaluasi hasil pengujian pada Robot Arm RNV3 3 DOF. Oleh karena itu, pemahaman mengenai sistem koordinat Kartesian sangat penting karena seluruh proses pergerakan robot pada penelitian ini diawali dari koordinat target yang diberikan pengguna dan diakhiri dengan pergerakan aktual end-effector menuju posisi tersebut.



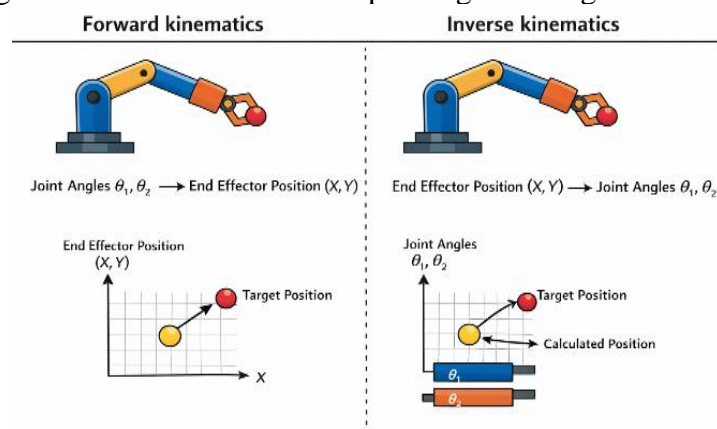


Gambar 2.4 Koordinat Kartesian

2.2.7 Kinematika Robot

Kinematika robot merupakan cabang ilmu yang mempelajari hubungan antara pergerakan joint dengan posisi dan orientasi end-effector tanpa memperhitungkan gaya atau torsi yang bekerja. Kinematika menjadi dasar dalam perancangan dan pengendalian robot karena menentukan bagaimana robot bergerak untuk mencapai posisi tertentu.

Kinematika robot terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu forward kinematics dan inverse kinematics. Forward kinematics digunakan untuk menentukan posisi end-effector berdasarkan nilai sudut joint yang diketahui. Metode ini relatif lebih sederhana karena hanya melibatkan perhitungan dari joint menuju posisi akhir. Sebaliknya, *inverse kinematics* digunakan untuk menentukan nilai sudut pada setiap joint berdasarkan posisi target yang diinginkan. Metode ini lebih kompleks karena melibatkan persamaan matematis yang tidak linier dan dapat menghasilkan lebih dari satu solusi. Selain itu, pada kondisi tertentu, solusi *inverse kinematics* mungkin tidak ada jika posisi target berada di luar jangkauan robot. Dalam penelitian ini, *inverse kinematics* menjadi fokus utama karena digunakan untuk mengontrol pergerakan robot berdasarkan koordinat posisi. Oleh karena itu, pemahaman terhadap konsep kinematika sangat penting untuk memastikan robot dapat bergerak dengan akurat dan efisien.



Gambar 2.5 Kinematika Robot

2.2.8 Metode Invers Kinematik

Metode *inverse kinematics* merupakan metode yang digunakan untuk menentukan nilai sudut pada setiap joint robot agar end-effector dapat mencapai posisi target tertentu. Berbeda dengan forward kinematics yang menghitung posisi berdasarkan sudut joint, *inverse kinematics* bekerja sebaliknya, yaitu menentukan sudut joint berdasarkan koordinat posisi yang diinginkan.

Pada penelitian ini, metode *inverse kinematics* diterapkan pada robot arm dengan konfigurasi 3 DOF. Untuk menyederhanakan perhitungan, sistem dimodelkan sebagai manipulator planar dua link pada bidang X-Y, sedangkan satu derajat kebebasan lainnya digunakan sebagai rotasi basis atau penyesuaian orientasi. Pendekatan yang digunakan adalah metode geometris, yaitu dengan membentuk hubungan segitiga antara panjang link robot dan posisi target. Dengan pendekatan ini, perhitungan sudut dapat dilakukan menggunakan fungsi trigonometri seperti cosinus, sinus, dan tangen.

Sudut pada joint kedua (θ_2) dihitung menggunakan hukum cosinus sebagai berikut:

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right)$$

Persamaan tersebut digunakan untuk menentukan sudut pada joint kedua (elbow) berdasarkan panjang link (L_1 dan L_2) serta posisi target (x, y). Nilai cosinus digunakan karena berkaitan dengan hubungan antar sisi dalam segitiga yang terbentuk antara kedua link dan titik target. Setelah nilai θ_2 diperoleh, sudut joint pertama (θ_1) dapat dihitung menggunakan hubungan trigonometri sebagai berikut:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{L_2 \sin \theta_2}{L_1 + L_2 \cos \theta_2} \right)$$

Sudut θ_1 merepresentasikan sudut pada joint basis terhadap sumbu koordinat, yang menentukan arah pergerakan robot menuju posisi target.

Sedangkan derajat kebebasan ketiga pada robot arm digunakan untuk penyesuaian tambahan, seperti orientasi *end-effector* atau pergerakan vertikal, yang

dalam penelitian ini tidak menjadi fokus utama dalam perhitungan kinematika. Dalam implementasinya, metode *inverse kinematics* tidak hanya melibatkan perhitungan matematis, tetapi juga mempertimbangkan kondisi fisik robot seperti panjang link, batas sudut joint, serta kemungkinan terjadinya singularitas. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian agar hasil perhitungan dapat diterapkan secara nyata pada sistem robot. Pendekatan geometris dipilih karena lebih sederhana dan sesuai untuk implementasi pada robot dengan jumlah derajat kebebasan terbatas seperti 3 DOF.

2.2.9 Kinerja Robot

Kinerja robot merupakan parameter penting yang digunakan untuk mengevaluasi keberhasilan sistem yang telah dirancang. Dalam konteks robot arm, kinerja biasanya diukur berdasarkan kemampuan robot dalam mencapai posisi target yang diinginkan serta konsistensi dalam melakukan gerakan. Akurasi merupakan kemampuan robot dalam mencapai posisi target secara tepat sesuai dengan nilai yang telah ditentukan. Presisi menunjukkan kemampuan robot dalam mengulang posisi yang sama secara konsisten, sedangkan repeatability mengacu pada kemampuan robot untuk kembali ke posisi yang sama dalam beberapa kali percobaan.

Pengujian kinerja robot dilakukan dengan membandingkan posisi target yang diberikan dengan posisi aktual yang dicapai oleh robot. Selisih antara kedua posisi tersebut disebut sebagai error. Semakin kecil nilai error, maka semakin baik kinerja robot. Selain itu, faktor seperti kualitas aktuator, kondisi mekanik, serta proses kalibrasi juga sangat mempengaruhi hasil pengujian. Dalam penelitian ini, evaluasi kinerja robot dilakukan untuk mengetahui sejauh mana metode *inverse kinematics* yang diterapkan mampu menghasilkan pergerakan yang akurat dan konsisten. Hasil pengujian ini nantinya akan menjadi dasar dalam menarik kesimpulan mengenai keberhasilan sistem yang dikembangkan.