



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 184835

ANALISA DINAMIS PADA MEKANISME ROBOT PARALEL 3-(rR)PS DENGAN TIGA SUMBU REVOLUTE BERPOTONGAN DALAM REKONFIGURASI KUBIK DENGAN METODE NEWTON-EULER

ADRIAN PAMUNGKAS
NRP 0211164000097

Dosen Pembimbing
Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



TUGAS AKHIR - TM 184835

**ANALISA DINAMIS PADA MEKANISME ROBOT
PARALEL 3-(rR)PS DENGAN TIGA SUMBU
REVOLUTE BERPOTONGAN DALAM
REKONFIGURASI KUBIK MENGGUNAKAN
METODE NEWTON-EULER**

ADRIAN PAMUNGKAS
NRP. 0211164000097

Dosen Pembimbing:
Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020



FINAL PROJECT - TM 184835

**DYNAMIC ANALYSIS ON 3-(rR)PS PARALLEL
ROBOT MECHANISM WITH THREE
INTERSECTED REVOLUTE AXES IN CUBIC
RECONFIGURATION WITH NEWTON-EULER
METHOD**

ADRIAN PAMUNGKAS
NRP. 0211164000097

Supervisors:
Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISA DINAMIS PADA MEKANISME ROBOT PARALEL 3-(rR)PS DENGAN TIGA SUMBU REVOLUTE BERPOTONGAN DALAM REKONFIGURASI KUBIK MENGGUNAKAN METODE NEWTON-EULER

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:



Adrian Pamungkas
NRP. 0211164000097

Disetujui oleh:

1. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP.1986201712037



(Pembimbing)

2. Dr.Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc.
NIP.197805102001121001



(Penguji II)

3. Bambang Pramujati, S.T., M.Sc., Eng. Ph.D.
NIP.196912031994031001



(Penguji III)



**ANALISA DINAMIS PADA MEKANISME ROBOT
PARALEL 3-(rR)PS DENGAN TIGA SUMBU
REVOLUTE BERPOTONGAN DALAM
REKONFIGURASI KUBIK MENGGUNAKAN
METODE NEWTON-EULER**

Nama : Adrian Pamungkas
NRP : 0211164000097
Pembimbing : Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstrak

Pada akhir-akhir ini penggunaan mekanisme robot paralel semakin banyak untuk memenuhi berbagai macam kebutuhan. Untuk memenuhi kebutuhan yang bermacam-macam itu mekanisme robot paralel harus mampu beradaptasi sesuai dengan *topografinya*, sehingga diperlukan kemampuan *metamorphic*. Sebelumnya, beberapa robot mekanisme robot paralel dengan kemampuan *metamorphic* memiliki bagian yang dapat dikonfigurasi ulang (*reconfigurable*). Beberapa penelitian telah menganalisa mekanisme robot paralel lain baik dari segi kinematisnya maupun dari segi dinamisnya. Penelitian yang telah dilakukan contohnya seperti 3RPS *parallel robot cube mechanism*, dan 3-(rT)P(rT). Pada penelitian kali ini dianalisa mekanisme robot paralel 3(rR)PS, dimana penelitian akan membahas lebih lanjut mengenai aspek dinamis dari mekanisme tersebut.

Proses analisa dinamis menggunakan metode *Newton-Euler* dilakukan dengan mengetahui terlebih dahulu arsitektur mekanisme yang akan digunakan. Selanjutnya, dilakukan analisa posisi dengan mencari matriks rotasi pada tiap kaki terhadap *fixed*

frame. Matriks rotasi nantinya akan digunakan untuk menyamakan orientasi dari tiap kaki terhadap *fixed frame*. Besarnya sudut rotasi pada tiap kaki dapat dicari dari persamaan kesetimbangan unit vektornya, antara unit vektor terhadap *fixed frame* dan unit vektor terhadap *local frame* yang telah dikali matriks rotasinya. Selanjutnya akan dicari analisa kecepatan dan percepatan sesaat. Data tersebut digunakan untuk mendapatkan kecepatan dan percepatan dari *moving platform* dan setiap kaki. Setelah kecepatan dan percepatan dari *moving platform* dan setiap kaki telah diperoleh, maka dilakukan analisa dinamis pada kaki dan *moving platform*. Persamaan yang diperoleh dari analisa dinamis pada *moving platform* dan kaki digunakan untuk menentukan gaya reaksi, dan gaya aktuasi pada kaki-kaki manipulator 3(rR)PS.

Hasil dari penelitian kali ini berupa gaya reaksi maupun gaya aktuasi yang didapatkan pada kaki-kaki manipulator. Dalam penelitian kali ini digunakan lintasan yang didapatkan dari matriks transformasi yang ada. Lintasan yang muncul kali ini tergantung dari konfigurasi yang digunakan. Selanjutnya, berdasarkan konfigurasi yang ada maka gaya reaksi dan gaya aktuasi dapat dibentuk plotnya. Adapun hasil plot gaya reaksi dan gaya aktuasi pada masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Karakteristik yang berbeda tersebut dapat dilihat dari amplitudo gaya masing-masing kaki dan perubahan gaya secara mendadak dengan besaran yang signifikan pada daerah tertentu. Apabila terjadi perubahan gaya secara mendadak dan signifikan pada tiap kaki maka akan terjadi *singularity* yang menyebabkan munculnya *shaky motion* yang dapat mengakibatkan berkurangnya kepresisian pada gerak mekanisme tersebut.

Kata kunci: *metamorphic*, gaya aktuasi, *singularity*

DYNAMIC ANALYSIS ON 3-(rR)PS PARALLEL ROBOT MECHANISM WITH THREE INTERSECTED REVOLUTE AXES IN CUBIC RECONFIGURATION WITH NEWTON-EULER METHOD

Name : Adrian Pamungkas
NRP : 0211164000097
Supervisors : Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstract

Lately, the usage of parallel robot mechanism is expanding to fulfil many necessities. To make sure those necessities are being fulfilled, the parallel robot must have the ability to adapt with its own topography, so a metamorphic ability is needed. Previously, some parallel robot mechanism with metamorphic ability have some parts that can be reconfigured (*reconfigurable*). Some of the experiments have analysed other parallel robot mechanism in terms of kinematics and in terms of dynamics. Finished experiments are such as 3RPS parallel robot cube mechanism and 3-(rT)P(rT). In this experiment, 3(rR)PS parallel robot mechanism will be analysed, where the experiment will discuss further about the dynamic aspect of the mechanism.

The process of dynamic analysis by using *Newton-Euler* method is done by knowing the mechanism architecture that will be used. Next, position analysis is done by finding the rotation matrix on each leg with respect to the fixed frame. Rotation matrix will be used to readjust the orientation of each leg towards the fixed frame. The magnitude of rotation angle on each leg can be found from the equilibrium equation between the unit vector with respect to fixed

frame and unit vector with respect to local frame that has been multiplied with the rotation matrix. Next, instantaneous kinematic analysis is implemented. The data from the analysis is used to find the velocity and acceleration of the moving platform and each leg of parallel robot mechanism. After the velocity and acceleration of the moving platform and each leg have been found, then dynamic analysis on each leg and moving platform is done. Equation from the dynamic analysis on the moving platform and each leg will be used to determine the reaction force and actuating force on each leg of 3(rR)PS manipulator.

The result of this experiment is reaction force and actuating force that is obtained from each leg of the manipulator. In this experiment, trajectory is used from the transformation matrix. The trajectory that appear is dependent with the configuration that being used. Next, based on the configuration that being used, the actuating and reaction force could be plotted. As for the reaction force and actuating force have different characteristics. The different characteristics could be seen from the amplitude of force on each leg and sudden and significant transformation of the force on each leg on certain areas. If there are sudden and significant transformation on the force on each leg there will be singularities that bring shaky motion to the legs which reduce the precision on the movement of the mechanism.

Keyword: *metamorphic*, actuating force, singularity

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat-Nya laporan Tugas Akhir yang berjudul “**ANALISA DINAMIS PADA MEKANISME ROBOT PARALEL 3-(rR)PS DENGAN TIGA SUMBU REVOLUTE BERPOTONGAN DALAM REKONFIGURASI KUBIK MENGGUNAKAN METODE NEWTON-EULER**”. Pada kesempatan kali ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam bentuk apapun, baik secara langsung maupun tidak langsung, diantaranya kepada:

1. Ayah Soegiono, Ibu Kinarti dan, Saudara Alva serta keluarga besar yang tiada lelah memberi dukungan.
2. Ibu Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku pembimbing Tugas Akhir penulis.
3. Teman-teman Laboratorium Otomasi Industri Departemen Teknik Mesin ITS.
4. Seluruh tenaga pengajar dan staff Departemen Teknik Mesin ITS.
5. Teman-teman mahasiswa angkatan 2016 Departemen Teknik Mesin ITS.
6. Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat dituliskan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa pengerjaan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan jika terdapat kritik dan saran pada Tugas Akhir ini. Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Surabaya, Agustus 2020

DAFTAR ISI

Abstrak	iv
Abstract	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL.....	xvi
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar belakang	1
1.2. Rumusan Masalah Penelitian	2
1.3. Batasan Masalah Penelitian.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat penelitian:.....	3
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Dasar Teori	5
2.1.1 Pengertian <i>Metamorphic Parallel Mechanism</i>	5
2.1.2 Analisa Kinematika	6
2.1.2.1 Transformasi Homogen.....	6
2.1.2.2 Koordinat Homogen	7
2.1.2.3 Matriks Transformasi Homogen	8

2.1.3 Instantaneous Screw Axis.....	8
2.1.4 Matriks Inersia.....	10
2.1.4.1 Principal Moments of Inertia.....	12
2.1.4.2 Transformasi dari Matriks Inersia ..	13
2.1.5 Keseimbangan Dinamis Menurut Hukum <i>Newton Euler</i>	14
2.1.6 Analisa Dinamis Stewart- Gough Platform ...	15
2.1.6.1 Analisa Posisi	16
2.1.6.2 Analisa Kecepatan.....	17
2.1.6.3 Analisa Percepatan	19
2.1.6.4 Analisa Dinamis Kaki	20
2.1.6.5 Analisa dinamis platform	21
2.2 Penelitian Terdahulu.....	22
2.2.1. 3RPS <i>Cube Parallel Mechanism</i>	22
2.2.2. 3-(rT)P(rT).....	23
2.2.3. 3(rR)PS	24
BAB III.....	27
METODOLOGI PERCOBAAN	27
3.1 Flowchart Percobaan	27
3.2 Proses Penelitian.....	27
3.2.1. Perumusan Masalah.....	28
3.2.2. Studi Literatur.....	28
3.2.3. Arsitektur Mekanisme	28

3.2.4. Analisa Posisi	28
3.2.5. <i>Instantaneous Kinematics</i>	29
3.2.6. Analisa Kecepatan dan Percepatan Kaki	29
3.2.7. Analisa Dinamis	29
3.2.7.1. Analisa Dinamis pada Kaki	29
3.2.7.2. Analisa Dinamis pada Platform.....	30
BAB IV	31
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1. Proses Analisis.....	31
4.1.1. Arsitekur Mekanisme 3(rR)PS	31
4.1.2. Analisa Posisi	32
4.1.3. Kecepatan dan Percepatan Sesaat.....	35
4.1.4. Analisa Kecepatan Axial dan Angular tiap Kaki	37
4.1.5. Analisa Percepatan Axial dan Angular tiap Kaki	37
4.1.6. Analisa Kecepatan dan Percepatan Silinder dan Piston tiap Kaki.....	38
4.1.7. Analisa Dinamis pada Kaki Manipulator	38
4.1.8. Analisa Dinamis pada Platform Manipulator.....	41
4.1.9. Desain Robot Paralel	42
Tabel 4.1 Parameter Desain Robot 3(rR)PS	43
4.1.10. Lintasan	43
4.2. Pembahasan Analisa Dinamis	45

4.2.1. Analisa Dinamis dengan konfigurasi variabel β sebesar 30 derajat	45
4.2.2. Analisa Dinamis dengan konfigurasi variabel β sebesar 45 derajat	49
4.2.3. Analisa Dinamis dengan konfigurasi variabel β sebesar 54,7 derajat	53
4.2.4. Analisa Dinamis dengan konfigurasi variabel β sebesar 60 derajat	57
BAB V	62
KESIMPULAN DAN SARAN	63
5.1. Kesimpulan	63
5.2. Saran	63
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN	67
BIODATA	70

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Prototipe Robot Parallel 3(rR)PS	2
Gambar 2.1 Contoh Rekonfigurasi pada mekanisme spasial	5
Gambar 2.2. Posisi vektor P terhadap <i>frame</i> A	6
Gambar 2.3. Instantaneous Screw Axis.....	9
Gambar 2.4. Massa Momen terhadap titik referensi	11
Gambar 2.5. Pelat Segi Empat.....	12
Gambar 2.6. Resultan Gaya dan Momen pada Rigid Body B.....	15
Gambar 2.7. Skema dari Stewart-Gough Platform.....	16
Gambar 2.8. Sudut Euler dari Kaki	16
Gambar 2.9. Free Body Diagram (FBD) dari Kaki	20
Gambar 2.10 3RPS Cube Parallel Manipulator.....	23
Gambar 2.11 3(rT)P(rT) Parallel Manipulator	24
Gambar 2.12 Sistem Koordinat $\{A\}$ (atas) dan $\{B\}$ (bawah)	25
Gambar 3.1 Flowchart Percobaan	27
Gambar 4.1 Koordinat $\{B\}$ pada Robot Parallel Manipulator 3-(rR)PS.....	32
Gambar 4.2 Koordinat lokal pada kaki 1 paralel manipulator 3(rR)PS.....	32
Gambar 4.3 Kecepatan dan Percepatan sesaat	36
Gambar 4.4 Plot <i>Trajectory</i> berdasarkan sumbu X_{1B} , Y_{1B} , Z_{1B} ($\beta=30^\circ$).....	46
Gambar 4.5 Lintasan Parameter ($\beta=30^\circ$)	46
Gambar 4.6 Plot Gaya Aktuasi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=30^\circ$).....	47
Gambar 4.7 Torsi Aktuasi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=30^\circ$).....	49

Gambar 4.8 Plot Trajectory berdasarkan sumbu X1B, Y1B, Z1B ($\beta=45^\circ$).....	50
Gambar 4.9 Lintasan Parameter ($\beta=45^\circ$).....	50
Gambar 4.10 Plot Gaya Aktuasi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=45^\circ$).....	51
Gambar 4.11 Plot Torsi Aktuasi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=45^\circ$).....	53
Gambar 4.12 Plot Trajectory berdasarkan sumbu X1B, Y1B, Z1B ($\beta=54.7^\circ$).....	54
Gambar 4.13 Lintasan Parameter saat ($\beta=54.7^\circ$).....	55
Gambar 4.14 Plot Gaya Aktuasi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=54.7^\circ$).....	55
Gambar 4.15 Plot Torsi Aktuasi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=54.7^\circ$).....	57
Gambar 4.16 Plot Trajectory berdasarkan sumbu X1B, Y1B, Z1B ($\beta=60^\circ$).....	58
Gambar.4.17 Lintasan Parameter saat ($\beta=60^\circ$).....	58
Gambar 4.18 Plot Gaya Aktuasi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=60^\circ$).....	59
Gambar 4.19 Plot Torsi Aktuasi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=60^\circ$).....	61

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Parameter Desain Robot 3(rR)PS.....	43
-----------------------------------------------	----

DAFTAR SIMBOL

$(rR)PS$: <i>Reconfigurable Revolute Prismatic Spherical</i>
$1T2R$: 1-Translasi 2-Rotasi
\mathbf{R}	: Matriks Rotasi
\mathbf{T}	: Matriks Transformasi
Ω <i>frame</i>	: Matriks kecepatan <i>moving frame</i> terhadap <i>fixed frame</i>
\mathbf{M} <i>frame</i>	: Matriks percepatan <i>moving frame</i> terhadap <i>fixed frame</i>
Σ_A	: Sistem koordinat <i>fixed frame</i>
Σ_i	: Sistem koordinat kaki
Σ_B	: Sistem koordinat <i>moving platform</i>
\mathbf{e}	: <i>unit vector</i> sepanjang kaki
\mathbf{f}_{bi}	: Gaya reaksi pada titik B_i
\mathbf{f}_{ai}	: Gaya reaksi pada titik A_i
\mathbf{h}_i	: Momentum sudut kaki ke- i
\mathbf{f}	: Resultan gaya
\mathbf{n}	: Resultan momen
I_i	: Matriks inersia kaki ke- i
I_p	: Matriks inersia <i>moving platform</i>
ω_i	: Kecepatan sudut kaki ke- i
α_i	: Percepatan sudut kaki ke- i

g : Vektor gravitasi

BAB I

PENDAHULUAN

1.1.Latar belakang

Akhir-akhir ini penggunaan robot semakin banyak dan berkembang, aplikasinya pun banyak sehingga memunculkan tantangan yang baru dimana scenario yang terjadi membutuhkan adaptasi serta fleksibilitas yang tinggi. Seperti permesinan sederhana maupun kompleks dalam industry, maupun rehabilitasi sendi pada manusia. Oleh karena itu dibutuhkan mekanisme yang dapat membantu perubahan ini dengan dapat merubah *reconfigurable* terhadap aplikasi yang dibutuhkan dengan tetap mempertahankan topologi yang sederhana. Sehingga diciptakanlah *Metamorphic Parallel Mechanisms* (MPM) dimana MPM ini merupakan mekanisme yang memiliki keunggulan seperti mekanisme parallel tradisional namun memiliki kemampuan adaptasi dan fleksibilitas yang bagus terhadap topologinya.

Salah satu mekanisme parallel yang memiliki kemampuan *metamorphic* tersebut adalah mekanisme robot paralel 3(rR)PS (*reconfigurable Revolute Prismatic Spherical*). Dimana robot tersebut merupakan robot parallel yang penggunaan nantinya akan memiliki banyak fungsi dengan mengatur *joint reconfigurable*-nya pada bagian *joint revolute*. *Moving platform* dari manipulator tersebut akan mampu bergerak secara 1T2R dengan gerakan translasi ke suatu sumbu dan rotasi pada sumbu yang lainnya



Gambar 1.1. Prototipe Robot Parallel 3(rR)PS

Pada riset sebelumnya yang telah dibuat oleh Dongmin Gan *et al.* Pembahasan yang dilakukan dilakukan dengan bertujuan untuk mencari gaya aktuasi dan gaya reaksi yang diberikan dari motor terhadap moving platform. Dengan didapatkannya torsi aktuasi dan gaya reaksi dari permodelan dinamis. Maka setelah didapatkannya torsi aktuasi dan gaya reaksi ini kita dapat memilih actuator yang nantinya akan dipakai.

Tugas akhir pada kali ini, bertujuan untuk menyempurnakan riset yang telah dilakukan dengan melakukan analisa dinamis pada mekanisme 3(rR)PS dengan mengubah koordinat mekanisme dan mengubah variabel nilai sudut antara *rotation bar* dengan titik Q menjadi nol sehingga didapatkan persamaan dinamis pada robot parallel 3(rR)PS.

1.2. Rumusan Masalah Penelitian

Rumusan Masalah Penelitian adalah sebagai berikut:

- Bagaimana analisa kinematis robot paralel 3(rR)PS?
- Bagaimana persamaan dinamis robot paralel 3(rR)PS dengan metode *Newton Euler*?
- Bagaimana besarnya gaya reaksi dan gaya aktuasi yang dihasilkan robot paralel 3(rR)PS serta polanya dalam konfigurasi tertentu?
- Bagaimana perilaku dinamis robot paralel tersebut ketika parameter desain diubah?

1.3. Batasan Masalah Penelitian

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Joint yang diaktuasi adalah *prismatic joint*.
2. Bentuk *base* dan *moving platform* adalah segitiga sama sisi.
3. Jenis motor tidak dibahas.
4. Konfigurasi mekanisme yang diteliti hanya satu jenis saja.
5. Gaya *constraint* tidak dipertimbangkan

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merumuskan persamaan kinematis robot paralel 3(rR)PS
2. Merumuskan persamaan dinamis dengan metode *Newton Euler*
3. Mendapatkan besarnya gaya reaksi, gaya aktuasi serta perilaku pada konfigurasi kubik.
4. Melihat perubahan perilaku dinamis ketika terjadi perubahan konfigurasi

1.5. Manfaat penelitian:

1. Memberikan wawasan terkait dengan mekanisme robot parallel 3(rR)PS
2. Mendapatkan metode untuk memperoleh gaya reaksi dan gaya aktuasi mengenai mekanisme paralel tersebut.

BAB II

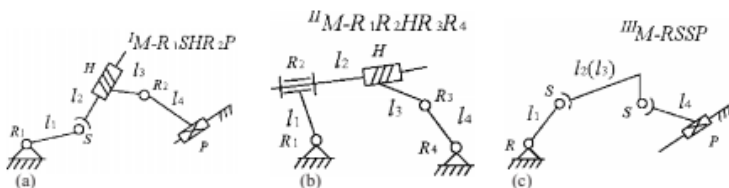
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar Teori

2.1.1 Pengertian *Metamorphic Parallel Mechanism*

Ketika *Wohlhart* meneliti sebuah mekanisme spasial ia menemukan sebuah sifat yang bernama *Kinematotropy*. Mekanisme dapat dikatakan memiliki sifat *Kinematotropy* bila mekanisme tersebut dapat dapat mengganti siklus mobilitasnya atau derajat kebebasannya secara permanen, tidak terpengaruh jenis gerakannya dengan konfigurasi yang bervariasi.

Pada waktu yang bersamaan, sebuah konsep yang berbeda dicetuskan. Konsep tersebut memungkinkan pergerakan yang berbeda dapat dicapai dengan memodifikasi arsitektur dari mekanisme. Mekanisme ini dapat beradaptasi dengan struktur dan pergerakannya sehingga dinamakan mekanisme metamorfik. Konsep awal dari mekanisme metamorfik sendiri berasal dari kata "*metamorfosis*" sehingga menjelaskan perubahan pada bentuk pergerakan dan konfigurasinya. Gambar 2.1 menunjukkan rekonfigurasi yang terjadi pada salah satu mekanisme spasial.



Gambar 2.1 Contoh Rekonfigurasi pada mekanisme spasial

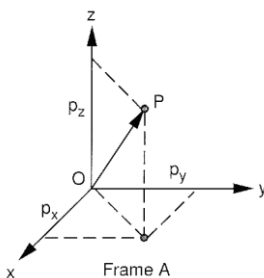
Konsep tersebut akhirnya dilanjutkan terhadap mekanisme parallel yang nantinya dikenal sebagai

Metamorphic Parallel Mechanism yang memiliki adaptabilitas lebih tinggi dibandingkan mekanisme parallel tradisional serta mempunyai kemampuan khusus untuk melakukan konfigurasi ulang strukturnya untuk mencapai suatu DOF dan gerakan tertentu.

2.1.2 Analisa Kinematika

2.1.2.1 Transformasi Homogen

Dalam studi kinematis, lokasi dari suatu benda dapat diidentifikasi dari sebuah sistem koordinat referensi. Sistem koordinat referensi ini biasa disebut *fixed frame*. Contoh dari sebuah titik didasarkan pada *reference frame* dapat dideskripsikan dalam vektor 3×1 . Contohnya, pada gambar 2.2 dimana posisi dari titik P terhadap *reference frame* A ditulis sebagai berikut:



Gambar 2.2. Posisi vektor P terhadap *frame* A

$${}^A\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Biasanya orientasi sebuah benda terhadap *fixed frame* dapat ditentukan dengan beberapa metode. Salah satunya

adalah metode euler dimana terdapat tiga matrix rotasi dasar dengan sumbu putar masing-masing.

Jika benda berputar terhadap semua sumbu pada *fixed frame*, maka matriks rotasi dapat ditulis sebagai berikut:

$$\mathbf{R}(\psi, \theta, \phi) = \mathbf{R}(z, \theta)\mathbf{R}(y, \phi)\mathbf{R}(x, \psi) \quad (2.2)$$

$$= \begin{bmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ s\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Dari matrix rotasi tersebut, dapat dianggap sebagai orientasi dari *moving frame* B terhadap *fixed frame* A. Dari orientasi tersebut, dapat dicari lokasi titik P dari rigid body terhadap *fixed frame* A. Maka lokasi titik P dari titik origin Q dapat ditulis sebagai persamaan berikut:

$${}^A\mathbf{p} = {}^A\mathbf{R}_B {}^B\mathbf{p} + {}^A\mathbf{q}. \quad (2.4)$$

Matriks rotasi 3×3 tersebut tidak mencakup gerakan translasi, maka perlu konsep koordinat homogen dan matriks transformasi homogen untuk mengetahui lokasi dari sebuah benda tersebut (Tsai,1999).

2.1.2.2 Koordinat Homogen

Apabila $\mathbf{p} = [px, py, pz]^T$ merupakan vektor posisi dengan titik terhadap *fixed frame* dalam ruangan tiga dimensi, maka koordinat homogen dari p adalah:

$$\hat{\mathbf{P}} = [\rho px, \rho py, \rho pz]^T \quad (2.5)$$

Persamaan koordinat homogen pada point \mathbf{p} dalam frame A direpresentasikan dengan vektor $\hat{\mathbf{P}}$ dalam ruangan 4 dimensi. Koordinat keempat ρ adalah factor skala bukan nol. Umumnya, N-dimensional vektor posisi menjadi (N+1)-

dimensi di system koordinat homogen. Konsep dari koordinat homogen digunakan untuk membuat matriks transformasi yang meliputi transformasi rotasi, translasi, skala, dan perspektif. Dari definisi tersebut, vektor tiga dimensi dapat diambil dari koordinat homogen empat dimensi dengan membagi tiga koordinat homogen pertama dengan koordinat keempat seperti dibawah ini:

$$p_x = \frac{\widehat{px}}{\rho}, \quad p_y = \frac{\widehat{py}}{\rho}, \quad p_z = \frac{\widehat{pz}}{\rho}. \quad (2.6)$$

2.1.2.3 Matriks Transformasi Homogen

Matrix transformasi homogen adalah matriks 4×4 yang memiliki tujuan penggambaran posisi vektor homogen dari suatu koordinat sistem kedalam koordinat lainnya. Matrix tersebut dibagi menjadi empat submatrix dengan bentuk sebagai berikut:

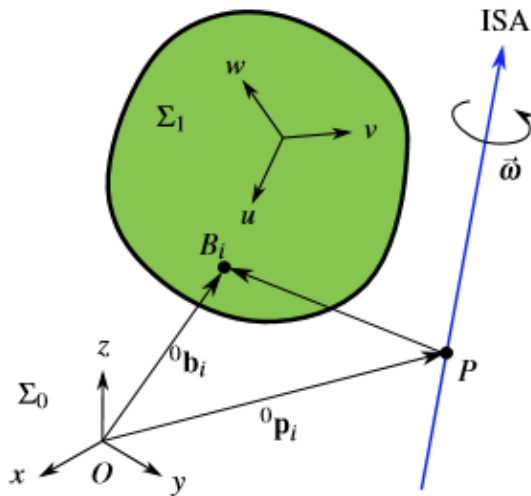
$${}^A\mathbf{T}_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B(3 \times 3) & \vdots & {}^A q(3 \times 1) \\ \dots\dots\dots & \vdots & \dots\dots\dots \\ 0(1 \times 3) & \vdots & \rho(1 \times 1) \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Submatriks ${}^A R_B(3 \times 3)$ menggambarkan orientasi dari *moving frame* B terhadap *fixed frame* A, submatriks ${}^A q(3 \times 1)$ menggambarkan posisi dari *moving frame* relatif terhadap *fixed frame*, dan submatriks $\rho(1 \times 1)$ adalah faktor skala. Untuk kinematika dari mekanisme dan manipulator robot, faktor skala adalah satu (Tsai, 1999).

2.1.3 Instantaneous Screw Axis

Instantaneous Screw Axis (ISA) merupakan sumbu yang digunakan sebagai acuan dalam pergerakan parasitis. ISA sendiri dapat digunakan untuk menurunkan bagian-bagian kecepatan dan percepatan tanpa menghitung matrix jacobian.

Dengan menggunakan ISA, dapat ditemukan bahwa mekanisme ini dapat melakukan pergerakan dalam parameter garis lurus yang dinamakan *Vertical Darboux Motion* (VDM) (Nurahmi,2019).



Gambar 2.3. Instantaneous Screw Axis

ISA memberikan sumbu terhadap benda yang mengalami rotasi dan translasi secara bersamaan seperti pada gambar 2.3 yang nantinya akan dinamakan Teorema *Mozzi-Chasles*. Kumpulan ISA nantinya akan membentuk permukaan yang dinamakan *axodes*. ISA pada *moving platform* ini dapat diperoleh dari matriks kecepatan *moving frame* terhadap *fixed frame* sebagai berikut:

$$\Omega = \dot{T}T^{-1} \quad (2.8)$$

Dimana T merupakan transformasi matrix yang telah didapatkan untuk mengubah orientasi *moving frame* terhadap *fixed frame*. Untuk matrix Ω sendiri memiliki bentuk *skew-symmetric*, sehingga bentuk matriksnya adalah sebagai berikut:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ V_{px} & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ V_{py} & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ V_{pz} & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Kecepatan linear dan angular pada *moving platform* terhadap ISA dapat diambil dari matrix Ω sebagai $\mathbf{v}_p = [v_{px}, v_{py}, v_{pz}]^T$ dan $\vec{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$. Lalu, untuk memperoleh matriks percepatannya maka dapat diturunkan persamaan tersebut sehingga menjadi persamaan baru seperti:

$$M = \ddot{\Omega} + \dot{\Omega}\dot{\Omega} \quad (2.10)$$

Dari persamaan-persamaan yang telah didapatkan, bisa dibuat persamaan general transformasi vektor posisi dari *moving frame* ke *fixed frame*. Sehingga persamaan vektor posisi untuk kecepatan *moving frame* terhadap *fixed frame* adalah sebagai berikut:

$${}^0\dot{\mathbf{p}} = \Omega {}^0\mathbf{p} \quad (2.11)$$

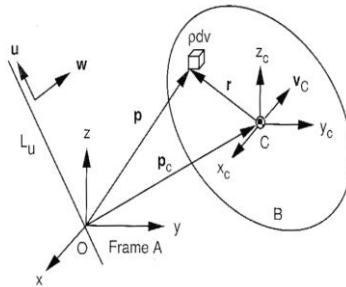
Untuk persamaan vektor posisi percepatan *moving frame* terhadap *fixed frame* adalah sebagai berikut:

$${}^0\ddot{\mathbf{p}} = M {}^0\mathbf{p} \quad (2.12)$$

2.1.4 Matriks Inersia

Matrix Inersia digunakan dalam perhitungan momentum sebagai *mass moment of inertia* yang direpresentasikan dalam koordinat tiga dimensi. Matrix inersia

rigid body B terhadap titik origin O seperti pada gambar 2.4 dapat dituliskan sebagai berikut:



Gambar 2.4. Massa Momen terhadap titik referensi

$$\mathbf{I}_B^O = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

di mana

$$I_{xx} = \int_V (y^2 + z^2) \rho dV \quad (2.14)$$

$$I_{yy} = \int_V (z^2 + x^2) \rho dV, \quad (2.15)$$

$$I_{zz} = \int_V (x^2 + y^2) \rho dV, \quad (2.16)$$

$$I_{xy} = I_{yx} = - \int_V xy \rho dV, \quad (2.17)$$

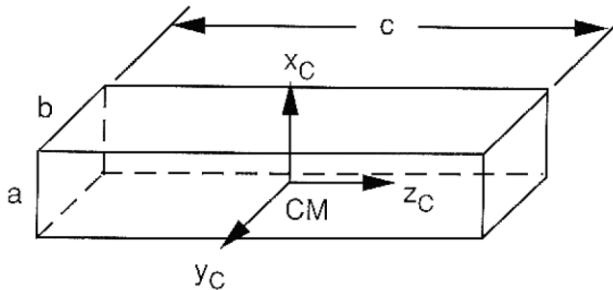
$$I_{yz} = I_{zy} = - \int_V yz \rho dV, \quad (2.18)$$

$$I_{xz} = I_{zx} = - \int_V xz \rho dV, \quad (2.19)$$

Serta x, y , dan z merupakan koordinat turunan volume dari massa ρdV terhadap *fixed frame* (Tsai,1999).

2.1.4.1 Principal Moments of Inertia

Sebelumnya telah ditunjukkan bahwa matriks inersia tergantung dari pemilihan titik dan orientasi *reference frame*. Ternyata pada orientasi tertentu, produk inersia dapat hilang. Sumbu koordinat ini disebut sebagai *principal axes* dan matrix inersiannya disebut *principal moments of inertia* (Tsai,1999).



Gambar 2.5. Pelat Segi Empat

Gambar 2.5 adalah sebuah pelat segi empat dengan panjang, lebar, tinggi, dan sumbu koordinat yang telah ditentukan yaitu $a \times b$ sebagai *cross sectional area* dan c sebagai panjangnya. Asumsi bahwa material pada pelat tersebut adalah homogen, maka massa m pada pelat setimbang dengan ρabc . Pada gambar, dapat dilihat bahwa sumbu pusat gravitasi dari pelat selaras dengan *principal axis*. Maka produk inersia dari pelat tersebut bernilai nol, sehingga nilai matriks inersiannya adalah sebagai berikut:

$$\mathbf{I}_B^C = \begin{bmatrix} b^2 + c^2 & 0 & 0 \\ 0 & c^2 + a^2 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 + b^2 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

2.1.4.2 Transformasi dari Matriks Inersia

Persamaan transformasi dari matriks inersia didapatkan dari persamaan *angular momentum* dari *rigid body* B terhadap *fixed frame* A dan *moving frame* C sebagai berikut

$${}^A\mathbf{h} = {}^A\mathbf{I}_B {}^A\boldsymbol{\omega}_B, \quad (2.21)$$

dan

$${}^C\mathbf{h} = {}^C\mathbf{I}_B {}^C\boldsymbol{\omega}_B, \quad (2.22)$$

Dimana ${}^C\boldsymbol{\omega}_B$ merupakan kecepatan sudut dari benda B relatif terhadap *fixed frame* A dan diekspresikan di *frame* C. Maka, ${}^C\boldsymbol{\omega}_B = {}^A\mathbf{R}_C^T {}^A\boldsymbol{\omega}_B$, dimana ${}^A\mathbf{R}_C$ merupakan matriks rotasi yang mendeskripsikan orientasi C relatif terhadap A.

Karena \mathbf{h} adalah sebuah vektor, maka transformasi dari vektor \mathbf{h} adalah:

$${}^A\mathbf{h} = {}^A\mathbf{R}_B {}^C\mathbf{h}, \quad (2.23)$$

dan dengan mensubstitusi persamaan 2.21 dan 2.22 ke 2.23 maka diperoleh

$${}^A\mathbf{I}_B {}^A\boldsymbol{\omega}_B = {}^A\mathbf{R}_C {}^C\mathbf{I}_B {}^C\boldsymbol{\omega}_B. \quad (2.24)$$

Substitusi ${}^C\boldsymbol{\omega}_B = {}^A\mathbf{R}_C^T {}^A\boldsymbol{\omega}_B$ ke persamaan 2.22 sehingga dihasilkan

$${}^A\mathbf{I}_B = {}^A\mathbf{R}_C {}^C\mathbf{I}_B {}^A\mathbf{R}_C^T. \quad (2.25)$$

Persamaan 2.29 mengubah sebuah matriks inersia dari satu *reference frame* ke *reference frame* yang lain. Kedua matriks inersia didapatkan dari pusat massa C. Elemen dari ${}^C\mathbf{I}_B$ bersifat tetap dikarenakan matriks tersebut diekspresikan di sistem koordinat C. Sedangkan elemen dari ${}^A\mathbf{I}_B$ bergantung pada matriks rotasi ${}^A\mathbf{R}_C$ (Tsai, 1999).

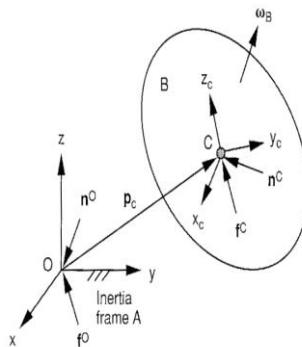
2.1.5 Kesetimbangan Dinamis Menurut Hukum *Newton Euler*

Hukum ini didapatkan dari melakukan eksperimen dengan memberikan gaya sebesar \mathbf{F} pada sebuah partikel, dan kemudian mengukur kecepatan \mathbf{a} . Karena gaya dan percepatan selalu proposional, maka massa partikel (\mathbf{m}) dapat ditentukan dengan perbandingan $m = \frac{F}{a}$. Jika ditulis secara matematis, maka persamaan hukum Newton II adalah:

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a} . \quad (2.26)$$

Ketika ada lebih dari satu gaya yang bekerja pada partikel tersebut, maka resultant gaya ditentukan dengan jumlah dari semua vektor gaya. Persamaanya dapat ditulis sebagai

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a} \quad (2.27)$$



Gambar 2.6. Resultan Gaya dan Momen pada Rigid Body B

Pada gambar 2.6, $A(x, y, z)$ merupakan inertia frame, \mathbf{I}^O merupakan momentum linear dari rigid body B terhadap origin O dan diekspresikan di A, dan \mathbf{h}^O merupakan momentum angular. Apabila \mathbf{f}^O dan \mathbf{n}^O merupakan resultan gaya dan momen yang diberikan ke rigid body B terhadap origin O, maka persamaan Newton-Euler dapat dinyatakan dengan

$$\mathbf{f}^O = \frac{d\mathbf{I}^O}{dt}, \quad (2.28)$$

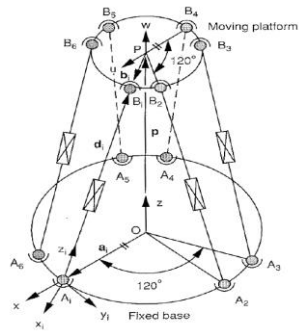
$$\mathbf{n}^O = \frac{d\mathbf{h}^O}{dt}, \quad (2.29)$$

Kedua persamaan tersebut adalah persamaan gerak dinamis yang fundamental. Perbedaan utama dari persamaan dinamis dan kinematik adalah persamaan dinamis diterapkan hanya pada *inertia frame*, sedangkan persamaan kinematik valid untuk semua *frame*. Dalam aplikasi teknik, semua *frame* yang tetap di permukaan dapat disebut *inertia frame* (Tsai, 1999).

2.1.6 Analisa Dinamis Stewart- Gough Platform

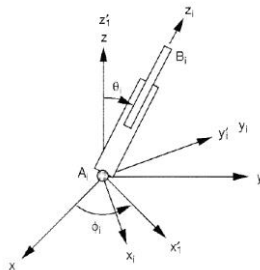
Analisa dinamis pada manipulator parallel *Stewart-Gough Platform* akan dibahas pada subbab ini, dimana manipulator parallel tersebut dianalisa menggunakan Hukum *Newton-Euler* (Tsai, 1999).

Gambar 2.7 memperlihatkan diagram skematik dari *Stewart-Gough Platform*. Untuk menganalisa manipulator parallel tersebut, sumbu koordinat $A(x, y, z)$ diletakkan pada *fixed base*, sumbu koordinat $B(x, y, z)$ diletakkan pada *moving platform*, dan sumbu koordinat $C(x_i, y_i, z_i)$ pada setiap kaki.



Gambar 2.7. Skema dari Stewart-Gough Platform

2.1.6.1 Analisa Posisi



Gambar 2.8. Sudut Euler dari Kaki

Setiap kaki diasumsikan tersambung dengan *fixed base* melalui *universal joint* sehingga *joint* tersebut tidak dapat berputar terhadap sumbu longitudinal. Orientasi dari kaki terhadap *fixed base* dapat dideskripsikan melalui dua sudut *Euler* yaitu rotasi sebesar ϕ_i terhadap sumbu z_i dan rotasi sebesar θ_i terhadap sumbu y_i seperti pada gambar 2.8. Matriks rotasi dari kaki tersebut adalah:

$${}^A\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} c\phi_i c\theta_i & -s\phi_i & c\phi_i s\theta_i \\ s\phi_i c\theta_i & c\phi_i & s\phi_i s\theta_i \\ -s\theta_i & 0 & c\theta_i \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

Unit Vector \mathbf{s}_i terhadap sumbu kaki ke- i adalah sebagai berikut:

$${}^i\mathbf{s}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

Dengan mensubstitusi *unit vector* ${}^i\hat{\mathbf{s}}_i$ ke persamaan $\hat{\mathbf{s}}_i = {}^A\mathbf{R}_i {}^i\hat{\mathbf{s}}_i$, maka didapatkan

$$\mathbf{s}_i = \begin{bmatrix} c\phi_i c\theta_i \\ s\phi_i c\theta_i \\ c\theta_i \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

dimana,

$$c\theta_i = s_{iz}, \quad (2.33)$$

$$s\theta_i = \sqrt{s_{ix}^2 + s_{iy}^2} \quad (2.34)$$

$$s\phi_i = \frac{s_{iy}}{s\theta_i}, \quad (2.35)$$

$$c\phi_i = \frac{s_{ix}}{s\theta_i}. \quad (2.36)$$

Adapun hasil analisa posisi silinder dan piston pada tiap kaki adalah sebagai berikut:

$$r1_i = a_i + e1\mathbf{s}_i \quad (2.37)$$

$$r2_i = a_i + (d_i - e2)\mathbf{s}_i \quad (2.38)$$

2.1.6.2 Analisa Kecepatan

Pada tiap kaki dari stewart gough ini bisa didapatkan kecepatan linear dan sudut. Kecepatan dari titik B_i terhadap sumbu koordinat kaki ditulis sebagai berikut:

$$\mathbf{v}_{bi} = \mathbf{v}_p + \boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{b}_i. \quad (2.39)$$

Ditransformasikan terhadap *limb frame* menjadi:

$${}^i\mathbf{v}_{bi} = {}^i\mathbf{R}_A \mathbf{V}_{bi}, \quad (2.40)$$

dimana ${}^i\mathbf{v}_{bi} = [{}^i v_{bi_x}, {}^i v_{bi_y}, {}^i v_{bi_z}]^T$ menandakan kecepatan B_i diekspresikan terhadap *limb frame*, dan ${}^i\mathbf{R}_A = {}^A\mathbf{R}_i^T$.

Kecepatan di titik B_i terhadap sumbu koordinat kaki dalam kecepatan sudut dengan menurunkan persamaan pada sisi kiri dituliskan menjadi:

$${}^i\mathbf{v}_{bi} = d_i {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times {}^i\mathbf{s} + \dot{d}_i {}^i\mathbf{s}_i. \quad (2.41)$$

Lalu, dengan mengalikan *dot* dengan ${}^i\mathbf{s}_i$ pada kedua sisi, diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\dot{d}_i = {}^i v_{biz} \quad (2.42)$$

Dengan mengalikan *cross* dengan *unit vector* ${}^i\mathbf{s}_i$ pada kedua sisi maka diperoleh persamaan kecepatan sudut dari kaki ke- i sebagai berikut:

$${}^i\boldsymbol{\omega}_i = \frac{1}{d_i} ({}^i\mathbf{s} \times {}^i\mathbf{v}_{bi}). \quad (2.43)$$

Setelah ditemukan kecepatan sudut pada tiap kaki, kecepatan pada titik pusat massa silinder dan piston tiap kaki

ditemukan, ${}^i\mathbf{v}_{1i}$ dan ${}^i\mathbf{v}_{2i}$ dengan persamaanya adalah sebagai berikut:

$${}^i\mathbf{v}_{1i} = e_1 {}^i\omega_i \times {}^i\mathbf{s}_i \quad (2.44)$$

$${}^i\mathbf{v}_{2i} = (d_i - e_2) {}^i\omega_i \times {}^i\mathbf{s}_i + \dot{d}_i {}^i\mathbf{s}_i \quad (2.45)$$

2.1.6.3 Analisa Percepatan

Percepatan dari titik B_i yang digambarkan pada *fixed frame* ditemukan dengan menurunkan persamaan menjadi:

$$\dot{\mathbf{v}}_{bi} = \dot{\mathbf{v}}_p + \dot{\boldsymbol{\omega}}_p \times \mathbf{b}_i + \boldsymbol{\omega}_p \times (\boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{b}_i). \quad (2.46)$$

Ekspressi $\dot{\mathbf{v}}_{bi}$ di tiap kaki menjadi

$${}^i\dot{\mathbf{v}}_{bi} = {}^i\mathbf{R}_A \dot{\mathbf{v}}_{bi} \quad (2.47)$$

Percepatan sudut pada titik B_i terhadap tiap kaki dapat diperoleh dengan menurunkan persamaan 2.39 sehingga menjadi:

$${}^i\dot{\mathbf{v}}_{bi} = \ddot{d}_i {}^i\mathbf{s}_i + {}^i\dot{\mathbf{s}}_i + d_i {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i\mathbf{s}_i) + 2\dot{d}_i {}^i\omega_i \times {}^i\mathbf{s}_i \quad (2.48)$$

Dengan mengalikan *dot* dengan ${}^i\mathbf{s}_i$ pada kedua sisi maka diperoleh persamaan percepatan linear dari kaki ke- i sebagai berikut:

$$\ddot{\mathbf{d}}_i = {}^i\dot{\mathbf{v}}_{bix} + d_i {}^i\omega_i^2 = {}^i\dot{\mathbf{v}}_{bix} + \frac{{}^i\mathbf{v}_{bix}^2 + {}^i\mathbf{v}_{biy}^2}{d_i} \quad (2.49)$$

Dengan mengalikan *cross* dengan *unit vector* ${}^i\mathbf{s}_i$ pada kedua sisi maka diperoleh persamaan percepatan sudut dari kaki ke- i sebagai berikut:

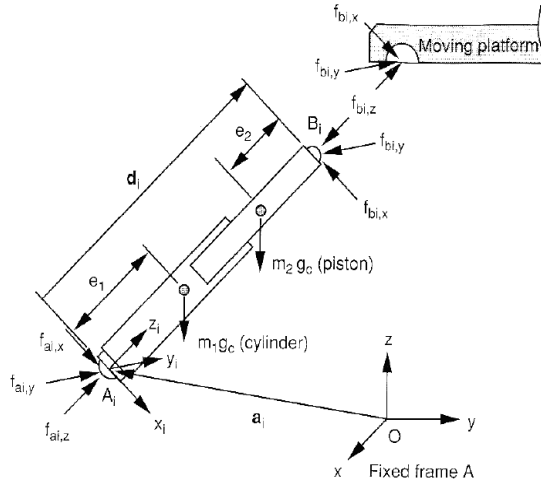
$${}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \frac{1}{d_i} {}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\dot{\mathbf{v}}_{bi} - \frac{2\dot{d}_i}{d_i} {}^i\boldsymbol{\omega}_i. \quad (2.50)$$

Setelah ditemukan percepatan sudut di setiap kaki, maka percepatan di titik pusat massa silinder dan piston didapatkan dengan menurunkan persamaan 2.44 dan 2.45 sebagai berikut:

$${}^i\dot{\mathbf{v}}_{1i} = e_1 {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times {}^i\mathbf{s}_i + e_1 {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i\mathbf{s}_i) \quad (2.51)$$

$${}^i \mathbf{v}_{2i} = \ddot{d}_i {}^i \mathbf{s}_i + (d_i - e_2) {}^i \dot{\omega}_i \times {}^i \mathbf{s}_i + (d_i - e_2) {}^i \omega_i \times ({}^i \omega_i \times {}^i \mathbf{s}_i) \quad (2.52)$$

2.1.6.4 Analisa Dinamis Kaki



Gambar 2.9. Free Body Diagram (FBD) dari Kaki

Gambar 2.9 memperlihatkan *Free Body Diagram* (FBD) dari kaki. Persamaan gerak Euler dari kaki tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$${}^i \mathbf{n}_i^A = \frac{d}{dt} ({}^i \mathbf{h}_i^A), \quad (2.53)$$

dimana ${}^i \mathbf{n}_i^A$ menggambarkan resultan momen yang diberikan pada kaki ke- i terhadap point A_i dan ${}^i \mathbf{h}_i^A$ merupakan momentum angular dari silinder dan piston dalam titik yang sama. Kedua vektor diekspresikan dalam tiap kaki. Momentum sudut dari silinder dan piston diperoleh dari persamaan:

$$\begin{aligned} {}^i \mathbf{h}_i^A = & m_1 e_1 ({}^i \mathbf{s}_i \times {}^i \mathbf{v}_{1i}) \\ & + m_2 (d_i - e_2) ({}^i \mathbf{s}_i \times {}^i \mathbf{v}_{2i}) \\ & + {}^i \mathbf{I}_{1i} {}^i \omega_i + {}^i \mathbf{I}_{2i} {}^i \omega_i, \end{aligned} \quad (2.54)$$

dan dengan menurunkan persamaan 2.54 diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} {}^i\mathbf{h}_i^A &= m_1 e_1 ({}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\dot{\mathbf{v}}_{1i}) \\ &+ m_2 (d_i - e_2) ({}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\dot{\mathbf{v}}_{2i}) \\ &+ {}^i\mathbf{I}_{1i} {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times ({}^i\mathbf{I}_{1i} {}^i\boldsymbol{\omega}_i) \\ &+ {}^i\mathbf{I}_{2i} {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times ({}^i\mathbf{I}_{2i} {}^i\boldsymbol{\omega}_i). \end{aligned} \quad (2.55)$$

Resultan momen yang bekerja pada kaki i terhadap A_i adalah:

$$\begin{aligned} {}^i\mathbf{n}_i^A &= d_i {}^i\mathbf{s}_i \times (-{}^i\mathbf{f}_{bi}) \\ &+ [m_1 e_1 \\ &+ m_2 (d_i - e_2)] ({}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\mathbf{R}_A {}^A\mathbf{g}). \end{aligned} \quad (2.56)$$

Persamaan dinamis diperoleh dari mensubstitusi persamaan 2.55 dan 2.56 sehingga didapatkan nilai ${}^i\mathbf{f}_{bix}$ dan ${}^i\mathbf{f}_{biy}$.

2.1.6.5 Analisa dinamis platform

Di bagian ini diformulasikan persamaan dinamis dari *moving platform*. Persamaan ini diekspresikan pada *fixed frame* A dan *moving frame* B. Untuk memperoleh gaya reaksi pada titik B terhadap *fixed frame* A maka gaya reaksi ${}^i\mathbf{f}_{bi}$ harus ditransformasikan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$${}^A\mathbf{f}_{bi} = {}^A\mathbf{R}_i {}^i\mathbf{f}_{bi}. \quad (2.57)$$

Persamaan dinamis diperoleh berdasarkan Hukum Newton II pada *moving platform* sebagai berikut:

$$\sum {}^A\mathbf{f}_{bi} + m_p {}^A\mathbf{g} = m_p {}^A\dot{\mathbf{v}}_p. \quad (2.58)$$

Gaya pada titik B ditransformasi pada *moving frame* B dengan persamaan sebagai berikut:

$${}^B\mathbf{f}_{bi} = {}^B\mathbf{R}_A {}^A\mathbf{f}_{bi}. \quad (2.59)$$

Untuk memperoleh persamaan dinamis, persamaan 2.59 disubstitusi pada persamaan *Euler* sebagai berikut:

$$\sum {}^B \mathbf{b}_i \times {}^B \mathbf{f}_{bi} = {}^i \mathbf{I}_p {}^i \dot{\boldsymbol{\omega}}_p + {}^i \boldsymbol{\omega}_p \times ({}^i \mathbf{I}_p {}^i \boldsymbol{\omega}_p). \quad (2.60)$$

Nilai dari ${}^i f_{biz}$ untuk $i=1,2, \dots, 6$ dapat diperoleh dari persamaan 2.58 dan 2.60 melalui metode *Gauss Elimination* (Tsai,1999).

Dari persamaan gaya-gaya reaksi yang telah didapatkan, gaya aktuasi dapat dicari dengan menjumlahkan semua gaya yang bekerja pada piston sepanjang kaki pada sumbu z. Sehingga persamaanya adalah:

$$\tau_i = {}^i f_{biz} + m_2 g_c c \theta_i + m_2 {}^i \dot{v}_{2iz}. \quad (2.61)$$

Lalu untuk gaya- gaya *constraint* yang bekerja pada *fixed ball joints* dapat diformulasikan dengan persamaan sebagai berikut:

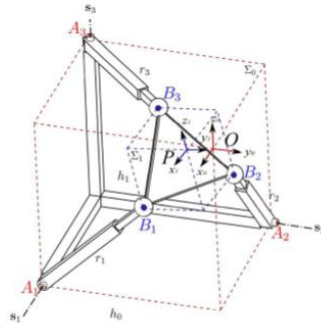
$$\begin{aligned} {}^i f_{ai} + {}^i f_{bi} + (m_1 + m_2) {}^i R_A^A g \\ = m_1 {}^i \dot{v}_{1i} + m_2 {}^i \dot{v}_{2i}. \end{aligned} \quad (2.62)$$

2.2 Penelitian Terdahulu

2.2.1. 3RPS *Cube Parallel Mechanism*

Sebelumnya telah dilaksanakan penelitian mengenai *Metamorphic Parallel Mechanism* yaitu berupa *3RPS Cube Parallel Mechanism* dimana pada penelitian tersebut dilakukan analisa kinematis manipulator. *3RPS Cube Parallel Mechanism* sendiri terbuat dari *cube-shaped base*, moving platform seperti pada gambar 2.10 yaitu berupa segitiga sama kaki, dan kaki-kaki yang identik satu sama lain dengan komposisi *revolute*, *prismatic*, dan *spherical joint*. Pada percobaan ini manipulator bergerak secara *parasitic* dimana gerakan translasi dan rotasi terkouple satu sama lain. Percobaan ini merumuskan *constraint equations* untuk menentukan jumlah mode operasi yang berjumlah satu. Selanjutnya dilakukan analisa kinematis dan mencari terjadinya *singularity* yang ada dari geometri tersebut. Adapun hasil penelitian yang diambil yang selanjutnya akan dipakai disini yaitu untuk mencari matriks rotasi dari 3rRPS

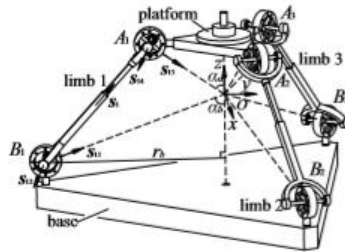
dimana diambil dari koordinat 3RPS *Cube Parallel Mechanism* tersebut.



Gambar 2.10 3RPS Cube Parallel Manipulator

2.2.2. 3-(rT)P(rT)

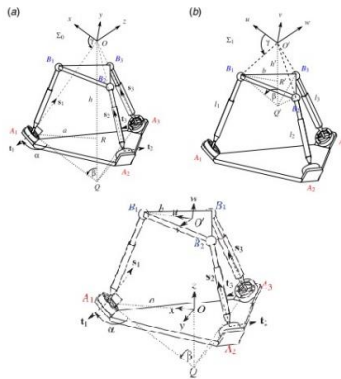
Untuk manipulator 3-(rT)P(rT) dilakukan percobaan untuk meneliti *kinematics* dan *dynamics* nya. Dengan merubah sumbu rotasi pada *reconfigurable Hooke* (rT) seperti pada gambar 2.11 dapat diubah menjadi salah satu fasa dari dua fasa yang tersedia yaitu rotasi sepenuhnya (*pure rotation*) dan translasi sepenuhnya (*pure translation*). Metode *Newton* digunakan untuk mengembangkan model dinamisnya dengan menggabungkan persamaan pada *task space* dan *joint space*. Hasil akhir yang didapatkan nantinya merupakan gaya aktuasi dan reaksi yang terjadi pada joint rT. Adapun hasil penelitian yang diambil yang selanjutnya akan dipakai disini yaitu untuk mencari model dinamis nya dimana penelitian ini menjadi referensi sebagai mekanisme yang mirip dengan 3(rR)PS.



Gambar 2.11 3(rT)P(rT) Parallel Manipulator

2.2.3. 3(rR)PS

Pada penelitian sebelumnya 3(rR)PS menggunakan dua jenis sistem koordinat yaitu ΠA dan ΠB . Pada penelitian tersebut digunakan konfigurasi IB dan II pada sistem koordinat ΠA dan konfigurasi IA, IC, dan III pada koordinat ΠB . Konfigurasi IA yaitu menyatakan bahwa sudut $\alpha = 0^\circ$ dan $\beta = 0^\circ$ sedangkan pada sumbu $\mathbf{t1}$, $\mathbf{t2}$, dan $\mathbf{t3}$ bersifat paralel dan berpotongan di titik Q pada lokasi tak hingga. Selanjutnya, untuk konfigurasi IB memiliki karakteristik bahwa sudut $\alpha = 0^\circ$, dan $0^\circ < \beta < 90^\circ$. Sedangkan sumbu $\mathbf{t1}$, $\mathbf{t2}$, dan $\mathbf{t3}$ berpotongan pada titik Q. Untuk konfigurasi IC, sudut $\alpha = 0^\circ$ dan $\beta = 90^\circ$ serta sumbu $\mathbf{t1}$, $\mathbf{t2}$, dan $\mathbf{t3}$ bersifat sebidang dan berpotongan titik Q, Pada konfigurasi II artinya sudut $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ dan untuk sumbu $\mathbf{t1}$, $\mathbf{t2}$, dan $\mathbf{t3}$ bersifat condong dan tidak paralel dibidang yang sama. Terakhir, konfigurasi III memiliki sudut $\alpha = 90^\circ$ serta sumbu $\mathbf{t1}$, $\mathbf{t2}$, dan $\mathbf{t3}$ bersifat koplanar dan tidak paralel terhadap satu sama lain.



Gambar 2.12 Sistem Koordinat Σ_0 (atas) dan Σ_i (bawah)

Jenis gerakan yang terjadi pada mekanisme ini dipengaruhi oleh konfigurasinya. Berdasarkan *constraint equation* yang ada mekanisme ini terbentuk atas dua parameter yaitu parameter rotasional dan translasional. Setelah dilakukan dekomposisi bilangan primer dari perumusan $(\mathbf{r}_{Bi}^0 - \mathbf{r}_{Ai}^0)^T \cdot \mathbf{t}_i = 0$ dapat ditentukan mode operasi pada mekanisme tersebut tergantung jenis konfigurasinya. Pada Konfigurasi IB dekomposisi bilangan primer menghasilkan satu mode operasi karena hasil dari perumusannya sudah menghasilkan bilangan primer ideal. Nantinya akan didapatkan parameter translasi berupa X, Y, dan Z yang bisa disubstitusi kedalam matriks transformasi. Parameter ini menunjukkan bahwa *moving platform* dapat melakukan pergerakan rotasi yang tidak tetap hanya pada suatu sumbu atau titik dimana ia ditentukan dari nilai $x_0, x_1, x_2,$ dan x_3 pada matriks transformasi yang merupakan parameter euler dan ditambah gerak translasinya yang ditentukan di komponen X, Y, dan Z. Maka sifat gerakan dari *moving platform* tersebut bersifat *parasitic* artinya gerakan rotasi yang terjadi tidak sepenuhnya murni rotasi. Adapun bentuk transformasi matriks nya adalah sebagai berikut:

$$T1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} X & Y & Z \end{matrix} \\ \begin{matrix} x0^2 + x1^2 + x2^2 + x3^2 \\ x0^2 + x1^2 - x2^2 - x3^2 \\ 2(x1x2 + x0x3) \\ 2(x1x3 - x0x2) \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 2(x1x2 - x0x3) \\ x0^2 - x1^2 + x2^2 \\ 2(x2x3 + x0x1) \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 2(x1x2 - x0x3) \\ x0^2 - x1^2 + x2^2 \\ 2(x2x3 + x0x1) \end{matrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} (2.6) \\ 3) \end{matrix}$$

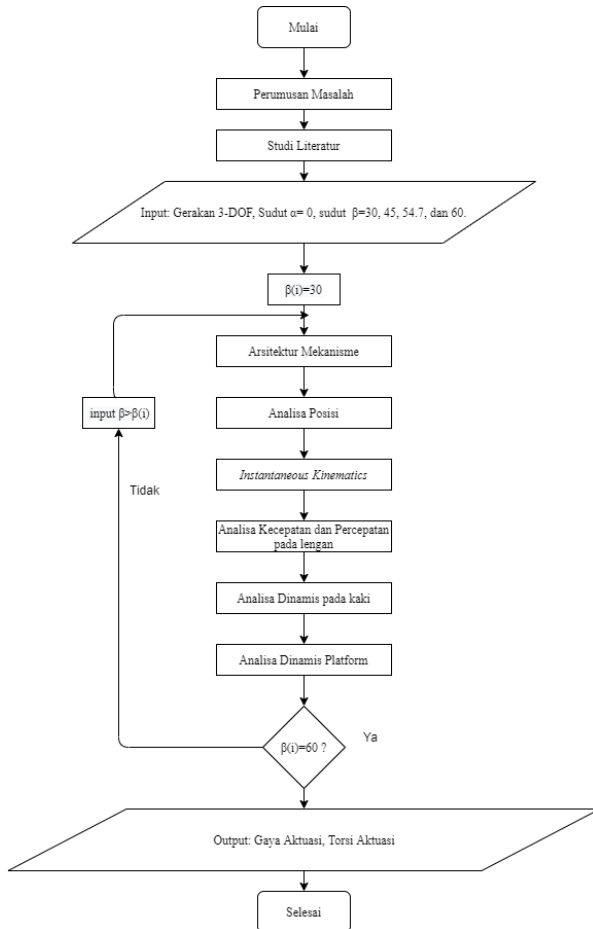
$$T2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} X \\ Y \\ Z \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ x0^2 + x1^2 - x2^2 - x3^2 \\ 2(x1x2 + x0x3) \\ 2(x1x3 - x0x2) \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ x0^2 + x1^2 + x2^2 + x3^2 \\ x0^2 - x1^2 + x2^2 - x3^2 \\ 2(x2x3 + x0x1) \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ x0^2 + x1^2 + x2^2 + x3^2 \\ x0^2 - x1^2 + x2^2 - x3^2 \\ 2(x2x3 + x0x1) \end{matrix} & \begin{matrix} x0^2 \\ x0^2 \\ x0^2 \\ x0^2 \end{matrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} (2.6) \\ 4) \end{matrix}$$

$$Mr_a = \begin{matrix} & \begin{matrix} X \\ Y \\ Z \end{matrix} \\ \begin{matrix} x0^2 + x1^2 - x2^2 - x3^2 \\ 2(x1x2 + x0x3) \\ 2(x1x3 - x0x2) \end{matrix} & \begin{matrix} 2(x1x2 - x0x3) \\ x0^2 - x1^2 + x2^2 - x3^2 \\ 2(x2x3 + x0x1) \end{matrix} & \begin{matrix} 2(x1x2 - x0x3) \\ x0^2 - x1^2 + x2^2 - x3^2 \\ 2(x2x3 + x0x1) \end{matrix} & \begin{matrix} 2(x1x2 - x0x3) \\ 2(x1x2 - x0x3) \\ x0^2 - x1^2 + x2^2 - x3^2 \end{matrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} (2.6) \\ 5) \end{matrix}$$

BAB III

METODOLOGI PERCOBAAN

3.1 Flowchart Percobaan



Gambar 3.1 Flowchart Percobaan Proses Penelitian

Pada proses penelitian yang dilakukan mencakup perumusan masalah, studi literatur, arsitektur mekanisme, analisa posisi, *Instantaneous Kinematics*, analisa kecepatan dan percepatan pada kaki, analisa dinamis pada kaki, dan analisa dinamis pada platform. Berikut penjelasan pada tiap proses penelitian:

3.2.1. Perumusan Masalah

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data mengenai mekanisme robot 3 DoF yaitu secara 1T2R melalui penelitian yang telah dilakukan. Data tersebut nantinya akan digunakan sebagai parameter untuk analisa dinamis pada robot 3DoF tersebut dengan menggunakan metode *Newton-Euler*. Perumusan masalah dilakukan dengan menggunakan data yang telah diperoleh serta dari rumusan masalah tersebut nantinya didapatkan batasan dan tujuan penelitian.

3.2.2. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan studi literatur yang mencakup arsitektur mekanisme 3(rR)PS dan analisa posisinya. Studi literatur dilakukan dengan cara membaca jurnal dari penelitian terdahulu, dan buku. Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Dongmin *et al* diperoleh desain robot 3(rR)PS (*reconfigurable revolute prismatic spherical*).

3.2.3. Arsitektur Mekanisme

Tahap ini membahas arsitektur mekanisme manipulator paralel 3(rR)PS. Adapun pembahasan yang dimaksud meliputi sistem koordinat yang digunakan, konfigurasi pada manipulator paralel, dan komponen pembentuk manipulator tersebut.

3.2.4. Analisa Posisi

Analisa posisi dilakukan untuk mengetahui koordinat lokal tiap kaki serta unit vektor yang bekerja pada kaki-kaki tersebut. Dalam pembahasan kali ini juga dapat dicari matriks rotasi terhadap *fixed frame* dari tiap-tiap kaki robot paralel tersebut. Untuk besar sudut dari matriks rotasi tersebut nantinya dapat dicari dari persamaan unit vektor tiap kaki terhadap *fixed frame* dengan unit vektor tiap kaki terhadap dirinya sendiri dikalikan matriks rotasinya.

3.2.5. *Instantaneous Kinematics*

Analisa *Instantaneous Kinematics* dilakukan untuk mencari kecepatan dan percepatan sesaat pada platform manipulator. Dari analisa inilah nantinya didapatkan kecepatan linear dan angular yang dapat digunakan untuk melakukan analisa selanjutnya.

3.2.6. Analisa Kecepatan dan Percepatan Kaki

Analisa Kecepatan dan Percepatan Kaki dilakukan setelah mengetahui komponen kecepatan linear dan angular dari analisa posisi terhadap komponen moving frame. Hasil akhirnya akan berupa kecepatan linear kaki terhadap dirinya sendiri dan kecepatan angular kaki terhadap dirinya sendiri. Sedangkan untuk mencari percepatan dapat dicari dengan menurunkan persamaan kecepatan linear dan kecepatan angular.

3.2.7. Analisa Dinamis

3.2.7.1. Analisa Dinamis pada Kaki

Analisa Dinamis pada kaki didapatkan dengan menurunkan persamaan momentum angular kaki manipulator, lalu dibuat persamaan dengan resultan momennya. Hasil yang akan didapatkan berupa ${}^i f_{bix}$ dan ${}^i f_{biy}$.

3.2.7.2. Analisa Dinamis pada Platform

Analisa Dinamis pada platform didapatkan dengan cara mentransformasikan gaya reaksi ${}^i f_{bi}$ terhadap *fixed frame*. Sehingga pada akhirnya bisa mencari gaya aktuasi dan gaya reaksi yang bekerja pada robot paralel.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

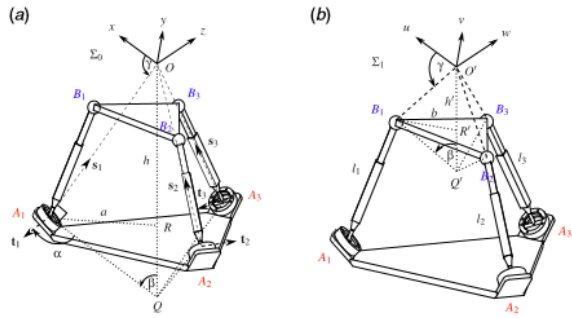
4.1. Proses Analisis

4.1.1. Arsitekur Mekanisme 3(rR)PS

Sistem Koordinat yang digunakan pada uji coba kali ini menggunakan koordinat sistem Σ_0 dimana titik pusat O dari Σ_0 terletak pada ketinggian h dari titik R. R sendiri merupakan titik tengah base seperti yang digambarkan di gambar 4.1 Selanjutnya, untuk O' pada frame bergerak terletak pada ketinggian h' dari titik R', dimana R' merupakan titik tengah dari moving platform. Tinggi h dan h' adalah bentuk *euclidan norm* dari vektor (\overline{OR}) dan $(\overline{O'R'})$. Reconfigurable ((rR)) Joint sendiri terdiri atas ring base dengan sumbu s_i dan sumbu *rotation bar* dengan sumbu t_i dimana $i=1,2,3$. Sudut antara sumbu *rotation bar* t_i dan vektor $(\overline{QA_i})$ ditulis sebagai α . Sudut β mendefinisikan sudut pada $\angle OQA$ dan sudut $\angle O'Q'B_i$ pada base dan moving platform. Sudut antara tiap sumbu *fixed frame* Σ_0 dan vektor (\overline{OQ}) konstan dinamakan δ , begitu juga antara sumbu moving frame Σ_1 dan vektor $(\overline{O'Q'})$ dinamakan δ . Sudut γ didefinisikan sebagai sudut antara sumbu x,y,z dan vektor $s_1, s_2, \text{ dan } s_3$. Begitu juga dengan sudut antara u, v, w dengan vektor $(\overline{O'B_1}), (\overline{O'B_2}), \text{ dan } (\overline{O'B_3})$. Pada penelitian ini yang digunakan adalah konfigurasi IB dimana besar sudut α sebesar 0 . Akar norm vektor AB yang terbentuk dari vektor B dikurangi vektor A menghasilkan panjang kaki robot r, sehingga persamaan yang terbentuk adalah sebagai berikut:

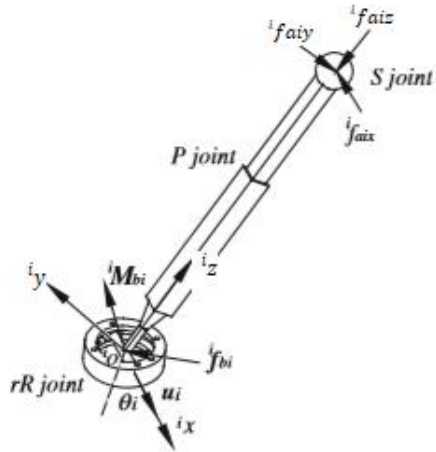
$$\|AB\|_i - r_i^2 = 0 \quad (4.1)$$

$$\sqrt{\|AB\|_i} = r_i. \quad (4.2)$$



Gambar 4.1 Koordinat $\{B\}$ pada Robot Parallel Manipulator 3-(rR)PS

4.1.2. Analisa Posisi



Gambar 4.2 Koordinat lokal pada kaki 1 paralel manipulator 3(rR)PS

Analisa posisi dilakukan pada kaki yang terhubung pada *base* melalui *revolute joint*. Dengan mengasumsikan *revolute joint* berputar sebesar β pada nilai antara 0 derajat hingga 90 derajat, serta α memiliki besaran nilai yang telah ditetapkan sesuai dengan konfigurasi yang dipakai pada mekanisme ini yaitu θ . *Revolute joint* sendiri akan berputar terhadap sumbu x, y, dan z mengikuti koordinat tetap pada paralel manipulator tersebut. Untuk pada kaki 1 seperti pada gambar 4.2 diputar di sumbu x, pada kaki 2 diputar di sumbu y, dan di kaki 3 diputar di sumbu z. Sehingga diperoleh matriks rotasi masing-masing kaki terhadap fixed frame sebagai berikut:

$${}^0R_1(x, q1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & cq1 & -sq1 \\ 0 & 0 & sq1 & cq1 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

$${}^0R_2(y, q2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cq2 & 0 & sq2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -sq2 & 0 & cq2 \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

$${}^0R_3(z, q3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cq3 & -sq3 & 0 \\ 0 & sq3 & cq3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

Untuk mengetahui besarnya nilai sudut q masing-masing kaki. Maka digunakan perhitungan dengan menggunakan unit vektor tiap kaki dari *fixed coordinate* dan

local coordinate. Pada unit vektor kaki terhadap fixed frame, perumusannya adalah sebagai berikut:

$$\overrightarrow{AB}_i = \overrightarrow{OB}_i - \overrightarrow{OA}_i \quad (4.6)$$

$$\sqrt{|\overrightarrow{AB}_i|} = \sqrt{(\overrightarrow{AB}_i) \cdot (\overrightarrow{AB}_i)^t} \quad (4.7)$$

$${}^0\hat{s}_i = \overrightarrow{AB}_i / \sqrt{|\overrightarrow{AB}_i|} \quad (4.8)$$

Selanjutnya, unit vektor kaki terhadap *local coordinate* seperti berikut:

$${}^i\hat{s}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$${}^i\hat{s}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$${}^i\hat{s}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Dari unit vektor kaki terhadap *local coordinate* tersebut nantinya akan diubah kedalam *fixed coordinate* sehingga menjadi sebagai berikut:

$${}^0\hat{s}_i = {}^0R_i \cdot {}^i\hat{s}_i \quad (4.12)$$

$$\frac{\overrightarrow{AB}_i}{\sqrt{|\overrightarrow{AB}_i|}} = {}^0R_i \cdot {}^i\hat{s}_i \quad (4.13)$$

Dalam persamaan tersebut nantinya akan didapatkan persamaan sudut q pada masing-masing kaki robot. Sehingga sudut-sudut q memiliki besaran sebagai berikut:

$$Q_1^3 = {}^0\vec{s}_1 - ({}^0R_1 \cdot {}^1\vec{s}_1) \quad (4.14)$$

$$Q_2^1 = {}^0\vec{s}_2 - ({}^0R_1 \cdot {}^1\vec{s}_2) \quad (4.15)$$

$$Q_3^2 = {}^0\vec{s}_3 - ({}^0R_1 \cdot {}^1\vec{s}_3) \quad (4.16)$$

Selanjutnya, pengaruh *beta* sebagai variabel perubah dimasukan kedalam perhitungan dengan cara membuat rotation matrixnya yang nanti akan dikalikan dengan masing-masing rotation matriks dari masing-masing kaki robot. Adapun bentuk rotation matriksnya adalah sebagai berikut:

$$\mathbf{Rt} = \begin{bmatrix} \kappa_1 & \kappa_2 & \kappa_2 \\ \kappa_2 & \kappa_1 & \kappa_2 \\ \kappa_2 & \kappa_2 & \kappa_1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

dimana,

$$\kappa_1 = -\frac{\sqrt{3} \cos \alpha}{3} (\sqrt{2} \sin \beta + \cos \beta) \quad (4.18)$$

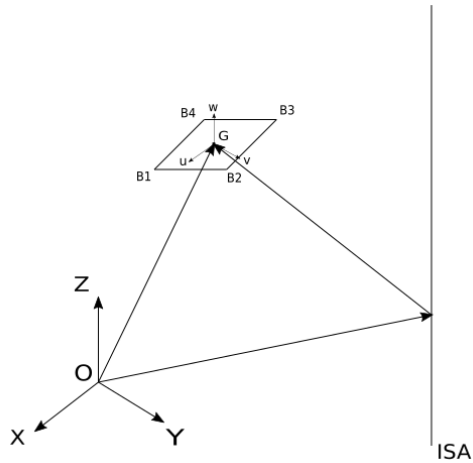
$$\kappa_2 = -\frac{\sqrt{2}}{6} (\sqrt{6} \cos \alpha \cos \beta - \sqrt{3} \cos \alpha \sin \beta + 3 \sin \alpha) \quad (4.19)$$

4.1.3. Kecepatan dan Percepatan Sesaat

Analisa selanjutnya adalah mengetahui kecepatan dan percepatan sesaat pada titik B pada moving *platform* seperti pada gambar 4.3. Adapun persamaan kecepatan dan percepatan sesaat nya adalah sebagai berikut:

$$\mathbf{\Omega}(t) = \dot{\mathbf{T}}(t)\mathbf{T}^{-1}(t), \quad (4.20)$$

$$\mathbf{M}(t) = \dot{\mathbf{\Omega}}(t) \cdot \mathbf{\Omega}^t(t) + \ddot{\mathbf{\Omega}}(t) \quad (4.21)$$



Gambar 4.3 Kecepatan dan Percepatan sesaat

Adapun matriks yang didapatkan dari persamaan 4.20 adalah sebagai berikut:

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_{px} & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ v_{py} & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ v_{pz} & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.22)$$

Kecepatan linear dan angular sesaat dari *rigid body* terhadap *ISA* dapat diekstrak dari matriks $\mathbf{\Omega}$ dan \mathbf{M} pada persamaan 4.20 dan 4.21. Maka kecepatan pada titik *B* terhadap *fixed coordinate A* dapat ditulis sebagai berikut:

$${}^0\dot{\mathbf{B}}_i = \mathbf{\Omega} \cdot {}^0\mathbf{B}_i, \quad (4.20)$$

dan dengan menurunkan persamaan 4.16 maka diperoleh persamaan percepatan titik B terhadap *fixed coordinate* O sebagai berikut:

$${}^0\ddot{\mathbf{B}}_i = \mathbf{M} \cdot {}^0\mathbf{B}_i. \quad (4.21)$$

4.1.4. Analisa Kecepatan Axial dan Angular tiap Kaki

Dalam melakukan analisa kecepatan pada kaki dilakukan dengan transformasi kecepatan pada titik B dengan dikalikan transpose rotation matriksnya. seperti dibawah:

$${}^i\dot{\mathbf{B}}_i = (\mathbf{RM}_i)^T \cdot {}^0\dot{\mathbf{B}}_i \quad (4.22)$$

dimana,

$$\mathbf{RM}_i = \mathbf{R}t \cdot {}^0\mathbf{R}_i \quad (4.23)$$

Selanjutnya, dari rumus 4.20 didapatkan kecepatan dalam bentuk axial dan angular. Dimana kecepatan axial didapatkan dengan mengalikan *dot* ${}^i\vec{s}_i$ dengan ${}^i\dot{\mathbf{B}}_i$ dan kecepatan angular didapatkan dengan mengalikan *cross* ${}^i s_i$ dengan ${}^i\dot{\mathbf{B}}_i$. Hasil perkalian *dot* dan *cross product* tersebut adalah sebagai berikut:

$$\dot{r}_i = {}^i\dot{\mathbf{B}}_i \cdot {}^i\vec{s}_i, \quad (4.24)$$

$$\omega_i = \frac{1}{r_i} ({}^i\dot{\mathbf{B}}_i \times {}^i\vec{s}_i). \quad (4.25)$$

4.1.5. Analisa Percepatan Axial dan Angular tiap Kaki

Dalam melakukan analisa percepatan pada kaki, percepatan didapatkan dengan cara mentransformasikan rumus 4.21 dengan dikalikan *transpose* matriks rotasi sebagai berikut:

$${}^i\ddot{\mathbf{B}}_i = (\mathbf{RM}_i)^T \cdot {}^0\ddot{\mathbf{B}}_i \quad (4.26)$$

dimana,

$${}^R\mathbf{M}_i = R\mathbf{t} \cdot {}^0\mathbf{R}_i \quad (4.27)$$

Selanjutnya, dari rumus 4.26 didapatkan percepatan dalam bentuk axial dan angular. Dimana percepatan axial didapatkan dengan mengalikan dot ${}^i\vec{s}_i$ dengan ${}^i\ddot{\mathbf{B}}_i$ dan kecepatan angular didapatkan dengan mengalikan cross ${}^i\vec{s}_i$ dengan ${}^i\dot{\mathbf{B}}_i$. Hasil perkalian dot dan *cross product* tersebut adalah sebagai berikut:

$$\ddot{r}_i = {}^i\ddot{\mathbf{B}}_i \cdot {}^i\vec{s}_i + r_i \dot{\omega}_i^2 \quad (4.28)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{r_i} ({}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\dot{\mathbf{B}}_i) - \frac{2\dot{r}_i}{r_i} ({}^i\omega_i) \quad (4.29)$$

4.1.6. Analisa Kecepatan dan Percepatan Silinder dan Piston tiap Kaki

Analisa kecepatan silinder dan piston tiap kaki manipulator dapat dirumuskan sebagai berikut:

$${}^i v_{g1} = e1 ({}^i\omega_i \times {}^i\vec{s}_i) \quad (4.30)$$

$${}^i v_{g2} = (ri - e2) ({}^i\omega_i \times {}^i\vec{s}_i) + \dot{r}_i {}^i\vec{s}_i \quad (4.31)$$

sedangkan analisa percepatan dan silinder dan piston pada tiap kaki manipulator dapat dirumuskan sebagai berikut:

$${}^i a_{g1} = e1 ({}^i\dot{\omega}_i \times {}^i\vec{s}_i) + e1 {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i\mathbf{s}_i) \quad (4.32)$$

$${}^i a_{g2} = (ri - e2) ({}^i\dot{\omega}_i \times {}^i\vec{s}_i) + (ri - e2) {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i\vec{s}_i) + \ddot{r}_i {}^i\vec{s}_i + 2\dot{r}_i ({}^i\omega_i \times {}^i\vec{s}_i). \quad (4.33)$$

4.1.7. Analisa Dinamis pada Kaki Manipulator

Analisa dinamis pada kaki manipulator didapatkan dari persamaan antara penurunan momentum angular dan resultan momen yang terdapat pada masing-masing kaki manipulator. Sehingga persamaannya adalah sebagai berikut

$${}^i\mathbf{n}_i^A = \frac{d}{dt} ({}^i\mathbf{h}_i^A) \quad (4.34)$$

dimana ${}^i\mathbf{n}_i^A$ menggambarkan resultan momen yang diberikan pada kaki ke- i terhadap point A_i dan ${}^i\mathbf{h}_i^A$ merupakan momentum angular dari silinder dan piston dalam titik yang sama. Kedua vektor diekspresikan dalam tiap kaki. Momentum sudut dari silinder dan piston diperoleh dari persamaan

$$\begin{aligned} {}^i\mathbf{h}_i^A = & m_1 e_1 ({}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\mathbf{v}_{1i}) \\ & + m_2 (r_i - e_2) ({}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\mathbf{v}_{2i}) \\ & + {}^i\mathbf{I}_1 {}^i\boldsymbol{\omega}_i + {}^i\mathbf{I}_2 {}^i\boldsymbol{\omega}_i \end{aligned} \quad (4.35)$$

dan dengan menurunkan persamaan diatas diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} {}^i\mathbf{h}_i^A = & m_1 e_1 ({}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\dot{\mathbf{v}}_{1i}) \\ & + m_2 (r_i - e_2) ({}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\dot{\mathbf{v}}_{2i}) \\ & + {}^i\mathbf{I}_1 {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times ({}^i\mathbf{I}_1 {}^i\boldsymbol{\omega}_i) \\ & + {}^i\mathbf{I}_2 {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times ({}^i\mathbf{I}_2 {}^i\boldsymbol{\omega}_i). \end{aligned} \quad (4.36)$$

Resultan momen yang bekerja pada kaki i terhadap A_i adalah:

$$\begin{aligned} {}^i\mathbf{n}_i^A = & r_i ({}^i\mathbf{s}_i \times {}^i\mathbf{f}b_i) \\ & + [m_1 e_1 \\ & + m_2 (r_i - e_2)] ({}^i\mathbf{s}_i \times {}^A\mathbf{g}_i). \end{aligned} \quad (4.37)$$

Adapun matriks inersia terhadap titik pusat massa silinder dan piston pada masing kaki-kaki manipulator bergantung pada unit vektor masing-masing kaki sehingga

matriks inersianya pada masing-masing kaki adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & {}^i\mathbf{I}_1 \\ &= \frac{M1}{12} \begin{bmatrix} 2e_1^2 + (di)_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2e_1^2 + (di)_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & (di)_1^2 + (di)_1^2 \end{bmatrix} \quad (4.38) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & {}^i\mathbf{I}_2 \\ &= \frac{M2}{12} \begin{bmatrix} 2e_2^2 + (di)_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2e_2^2 + (di)_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & (di)_2^2 + (di)_2^2 \end{bmatrix} \quad (4.39) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & {}^2\mathbf{I}_1 \\ &= \frac{M1}{12} \begin{bmatrix} (di)_1^2 + (di)_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2e_1^2 + (di)_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2e_1^2 + (di)_1^2 \end{bmatrix} \quad (4.40) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & {}^2\mathbf{I}_2 \\ &= \frac{M2}{12} \begin{bmatrix} (di)_2^2 + (di)_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2e_2^2 + (di)_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2e_2^2 + (di)_2^2 \end{bmatrix} \quad (4.41) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & {}^3\mathbf{I}_1 \\ &= \frac{M1}{12} \begin{bmatrix} 2e_1^2 + (di)_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & (di)_1^2 + (di)_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2e_1^2 + (di)_1^2 \end{bmatrix} \quad (4.42) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & {}^i\mathbf{I}_2 \\
 &= \frac{M_2}{12} \begin{bmatrix} 2e_2^2 + (di)_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & (di)_2^2 + (di)_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2e_2^2 + (di)_2^2 \end{bmatrix} \quad (4.43)
 \end{aligned}$$

Dari hasil persamaan resultan momen dan penurunan momentum angular tersebut maka bisa didapatkan gaya reaksi pada titik B dengan perumusan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 & {}^i f b_i \\
 &= \frac{d}{dt} \frac{{}^i \mathbf{h}_i^A - \{[m_1 e_1 + m_2 (r_i - e_2)]({}^i \mathbf{s}_i \times {}^A \mathbf{g}_i)\}}{\mathbf{r}_i} \quad (4.44)
 \end{aligned}$$

Dari rumus perhitungan 4.44 nantinya didapatkan ${}^i f b_i$ pada 2 sumbu yang tegak lurus terhadap kaki manipulator. Padahal dalam menentukan gaya reaksi dan gaya aktuasi memerlukan ${}^i f b_i$ pada ketiga sumbu kaki manipulator masing-masing. Oleh karena itu dilakukan lah analisa dinamis pada platform manipulator.

4.1.8. Analisa Dinamis pada Platform Manipulator

Dalam melakukan analisa dinamis pada platform dibutuhkan matriks inersia platform terhadap dirinya sendiri yang didapatkan setelah mentransformasi matriks inersia platform terhadap sumbu utama (*Principal Axis*). Adapun matriks dari persamaan diatas, didapatkan matriks rotasi pada platform sebagai berikut:

$$R_p = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{6}}{6} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{12}}{6} \\ \frac{\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{12}}{6} \\ -\frac{\sqrt{6}}{3} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

Selanjutnya, setelah didapatkan matriks inersia terhadap platform maka bisa didapatkan gaya reaksi pada platform. Yaitu dengan cara *Newton-Euler*. Adapun persamaan *Newton* pada platform ini adalah:

$$\Sigma_{fb_i}^A = m_g [(\mathbf{a}_p) - {}^A \mathbf{g}] \quad (4.46)$$

Sehingga nanti akan dimunculkan tiga persamaan *Newton* dengan masing-masing kaki memiliki gaya ${}^i \mathbf{f} \mathbf{b}_i$ yang dicari. Tidak cukup hanya dengan persamaan *Newton*, perlu juga dilakukan persamaan *Euler* pada titik platform G dengan perumusan sebagai berikut:

$${}^A \mathbf{n}^G = \frac{d}{dt} ({}^A \mathbf{h}^G) \quad (4.47)$$

$$\Sigma ({}^0 \mathbf{b}_i \times \mathbf{f} \mathbf{b}_i) = Imp. \vec{\alpha} + \vec{\omega} \times (Imp. \vec{\omega}). \quad (4.48)$$

Terakhir, dari gaya ${}^i \mathbf{f} \mathbf{b}_i$ yang telah dicari maka didapatkan gaya aktuasi yang didapatkan dengan persamaan dibawah:

$$\boldsymbol{\tau}_i = ({}^i \mathbf{f} \mathbf{b}_i + m_2 {}^i \mathbf{g}_i + m_2 {}^i \mathbf{a}_{g2i}) {}^i \mathbf{s}_i \quad (4.49)$$

4.1.9. Desain Robot Paralel

Desain robot paralel 3(rR)PS pada penelitian ini memiliki parameter desain yang dijelaskan pada tabel 4.1 sebagai berikut:

Tabel 4.1 Parameter Desain Robot 3(rR)PS

No	Spesifikasi	Data
1	Panjang antara titik tengah platform tetap dengan titik A	0.5
2	Panjang antara titik tengah platform bergerak dengan titik B	0.3
3	Panjang antara pusat massa silinder dengan titik A	0.2
4	Panjang antara pusat massa piston dengan titik B	0.2
5	Massa silinder	1
6	Massa piston	1
7	Massa platform bergerak	1
8	Tebal platform bergerak	0.2
9	Sisi platform bergerak	0.52

4.1.10. Lintasan

Lintasan parametrik pada kali ini didasarkan pada matriks transformasi T . Pada bagian translasi dari matriks transformasi dengan komponen $X1b$, $Y1b$, dan $Z1b$ digunakan sebagai parameter dari lintasan dan memiliki bentuk persamaan sebagai berikut:

X1B

$$\begin{aligned}
&= -\frac{1}{9 \cos \beta \sin \beta} \left(\sqrt{3}b(2\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_1^2 \right. \\
&\quad - 2\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_1 x_2 \\
&\quad - 2\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_1 x_3 - \sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_2^2 \\
&\quad + 4\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_2 x_3 - \sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_3^2 \quad (4.55) \\
&\quad + 8 \cos(\beta)^2 x_1^2 + 10 \cos(\beta)^2 x_1 x_2 \\
&\quad + 10 \cos(\beta)^2 x_1 x_3 - 4 \cos(\beta)^2 x_2^2 \\
&\quad - 2 \cos(\beta)^2 x_2 x_3 - 4 \cos(\beta)^2 x_3^2 - 6x_0 x_2 \\
&\quad + 6x_0 x_3 - 4x_1^2 - 8x_1 x_2 - 8x_1 x_3 + 2x_2^2 - 2x_2 x_3 \\
&\quad \left. + 2x_3^2 \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y1B &= \frac{1}{9 \cos \beta \sin \beta} \left(\sqrt{3}b(\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_1^2 \right. \\
&\quad + 2\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_1 x_2 \\
&\quad - 4\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_1 x_3 \\
&\quad - 2\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_2^2 \\
&\quad + 2\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_2 x_3 \\
&\quad + \sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_3^2 \quad (4.56) \\
&\quad + 4 \cos(\beta)^2 x_1^2 - 10 \cos(\beta)^2 x_1 x_2 \\
&\quad + 2 \cos(\beta)^2 x_1 x_3 - 8 \cos(\beta)^2 x_2^2 \\
&\quad - 10 \cos(\beta)^2 x_2 x_3 + 4 \cos(\beta)^2 x_3^2 \\
&\quad - 6x_0 x_1 + 6x_0 x_3 - 2x_1^2 + 8x_1 x_2 \\
&\quad \left. + 2x_1 x_3 + 4x_2^2 + 8x_2 x_3 - 2x_3^2 \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z1B = \frac{1}{9 \cos \beta \sin \beta} & \left(\sqrt{3}b(\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_1^2 \right. \\
& - 4\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_1 x_2 \\
& + 2\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_1 x_3 \\
& + \sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_2^2 \\
& + 2\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_2 x_3 \\
& - 2\sqrt{2} \cos(\beta) \sin(\beta) x_3^2 \\
& + 4\cos(\beta)^2 x_1^2 + 2 \cos(\beta)^2 x_1 x_2 \\
& - 10 \cos(\beta)^2 x_1 x_3 + 4\cos(\beta)^2 x_2^2 \\
& - 10\cos(\beta)^2 x_2 x_3 - 8 \cos(\beta)^2 x_3^2 \\
& + 6x_0 x_1 - 6x_0 x_2 - 2x_1^2 + 2x_1 x_2 \\
& \left. + 8x_1 x_3 - 2x_2^2 + 8x_2 x_3 + 4x_3^2 \right) \quad (4.57)
\end{aligned}$$

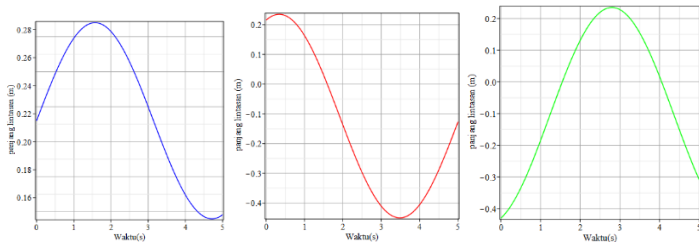
4.2. Pembahasan Analisa Dinamis

4.2.1. Analisa Dinamis dengan konfigurasi variabel β sebesar 30 derajat

Pada variabel β sebesar 30 derajat, bentuk plot gaya reaksi di tiap kaki serta plot torsi aktuasinya dimunculkan setelah ditemukan gaya-gaya yang berkerja pada kaki. Pada pengujian kali ini digunakan nilai parameter euler yang telah ditentukan yaitu:

$$\phi = \pi, \theta = t, \psi = 0 \quad (4.58)$$

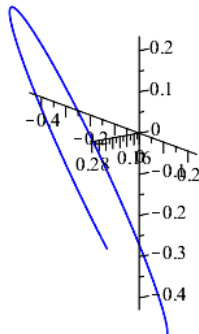
Dari nilai parameter yang telah ditentukan bisa didapatkan tersebut dapat dibuat grafik *trajectory* pada masing-masing sumbu X1B, Y1B, dan Z1B. Hasil dari plot sumbu adalah sebagai berikut:



(a)X1B (b) Y1B (c) Z1B

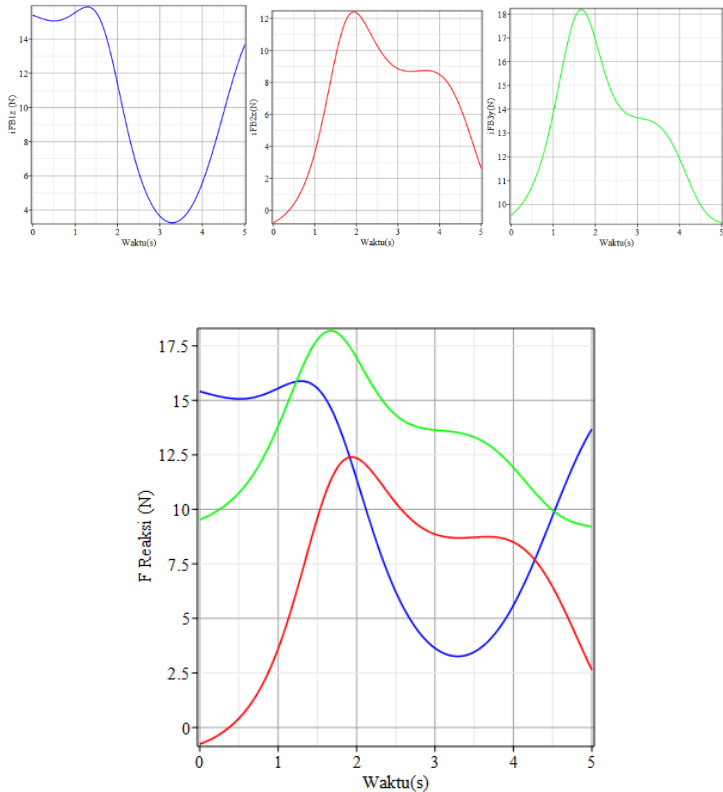
Gambar 4.4 Plot *Trajectory* berdasarkan sumbu X1B, Y1B, Z1B ($\beta=30^\circ$)

Pada plot *trajectory* yang telah dibuat grafik yang muncul berbentuk sinusoidal dan identik satu sama lain. Hal ini menyebabkan lintasan parameter yang dilewati platform bergerak berbentuk seperti pada gambar 4.5 sebagai berikut:



Gambar 4.5 Lintasan Parameter ($\beta=30^\circ$)

Sedangkan untuk hasil dari gaya reaksi yang bekerja di titik B_i terhadap masing-masing kaki manipulator bisa dilihat dalam gambar 4.5 sebagai berikut:



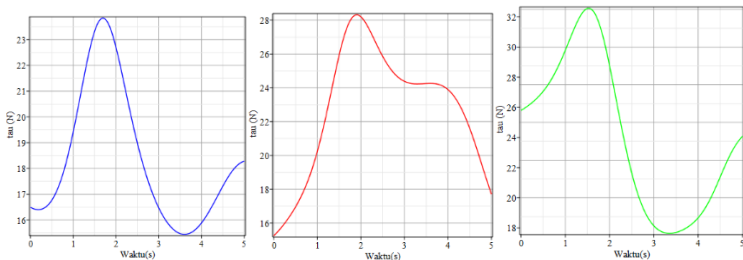
Gambar 4.6 Plot Gaya Reaksi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=30^\circ$)

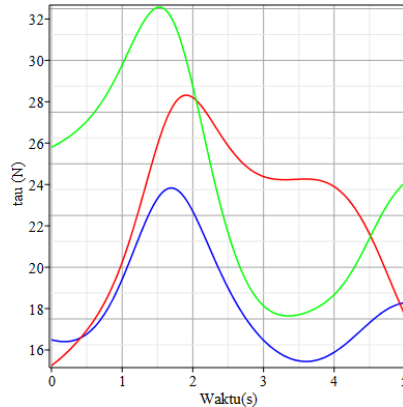
Pada gambar 4.6 diatas dapat dilihat bahwa gaya reaksi antar kaki memiliki bentuk sinusoidal dimana gaya pada masing-masing kaki mengalami perubahan gaya yang bergantung dari waktunya. Pada kaki 1 gaya yang bekerja berada di sumbu z lokal. Kaki 1 memiliki nilai amplitudo gaya reaksi sebesar 15 N. Sedangkan, pada kaki 2 gaya yang bekerja berada di sumbu x lokal. Kaki 2 memiliki besaran nilai amplitudo gaya reaksi sebesar 12 N. Terakhir, untuk kaki 3 gaya

yang bekerja pada sumbu y lokal. Kaki 3 memiliki nilai amplitudo gaya reaksi dengan nilai 17,5 N.

Adapun perubahan gaya yang terjadi pada masing-masing kaki tidak menunjukkan bahwa robot paralel melintasi daerah *singularity* sebab perubahan gaya yang terjadi tidak terjadi secara mendadak dan menuju arah tak hingga. Pengertian dari *singularity* sendiri yaitu kejadian apabila motor tidak dapat mentransfer daya atau gaya aktuasi yang dibutuhkan oleh *moving platform* untuk bekerja, maka *moving platform* dapat mengalami *shaky motion* yang disebabkan oleh massa platform, gaya berat kaki, dan inersia.

Dari gaya reaksi yang telah didapatkan tersebut maka kita bisa mendapatkan gaya aktuasinya dengan plot pada gambar 4.7 sebagai berikut:





Gambar 4.7 Gaya Aktuasi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=30^\circ$)

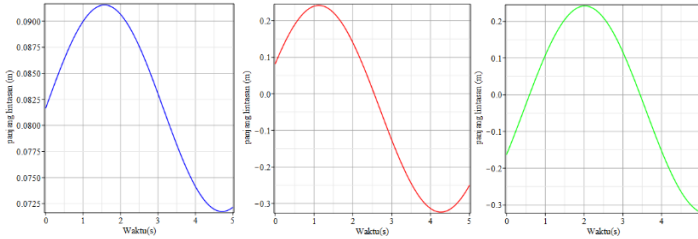
Untuk gaya aktuasi pada $\beta=30^\circ$ disini dapat dilihat bahwa terjadi perubahan amplitudo pada masing-masing kaki. Kaki 1 yang bekerja pada sumbu z lokal memiliki nilai amplitudo gaya aktuasi sebesar 24 N. Selanjutnya, kaki 2 yang bekerja pada sumbu x lokal memiliki nilai amplitudo gaya aktuasi sebesar 28 N. Terakhir, kaki 3 yang bekerja pada sumbu y lokal memiliki amplitudo gaya aktuasi sebesar 32 N.

4.2.2. Analisa Dinamis dengan konfigurasi variabel β sebesar 45 derajat

Pada variabel β sebesar 45 derajat, bentuk plot gaya reaksi di tiap kaki serta plot gaya aktuasinya dimunculkan setelah ditemukan gaya-gaya yang berkerja pada kaki. Pada pengujian kali ini digunakan nilai parameter euler yang telah ditentukan yaitu:

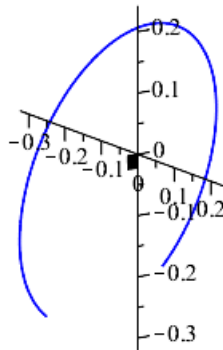
$$\phi = \pi, \theta = t, \psi = 0. \quad (4.59)$$

dari nilai parameter yang telah ditentukan dapat dibuat grafik *trajectory* pada masing-masing sumbu X1B, Y1B, dan Z1B. Hasil dari plot sumbu adalah sebagai berikut:



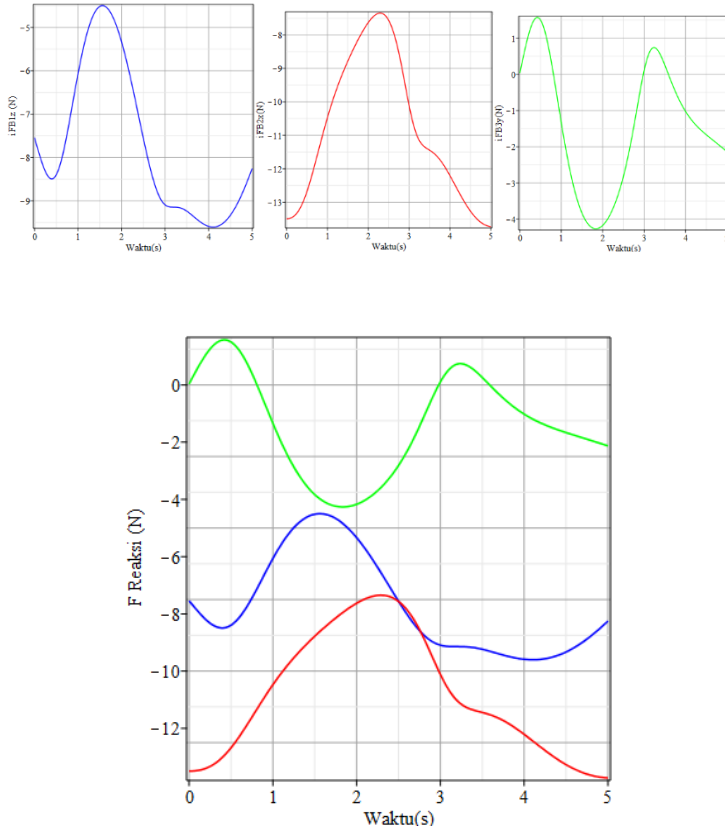
Gambar 4.8 Plot *Trajectory* berdasarkan sumbu X1B, Y1B, Z1B ($\beta=45^\circ$)

Pada plot *trajectory* yang telah dibuat grafik yang muncul berbentuk sinusoidal dan identik satu sama lain. Hal ini menyebabkan lintasan parameter yang dilewati platform bergerak seperti pada gambar 4.9 sebagai berikut:



Gambar 4.9 Lintasan Parameter ($\beta=45^\circ$)

Sedangkan untuk hasil dari gaya reaksi yang bekerja di titik B_i terhadap masing-masing kaki manipulator bisa dilihat dalam gambar 4.10 sebagai berikut:



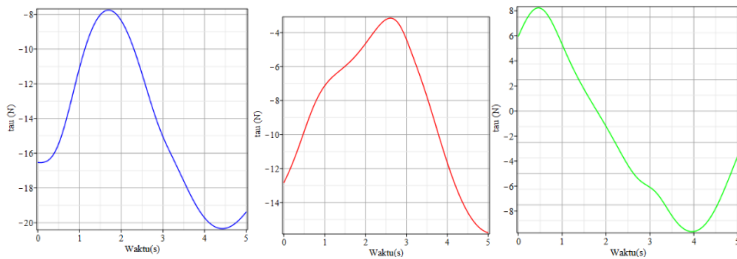
Gambar 4.10 Plot Gaya Reaksi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=45^\circ$)

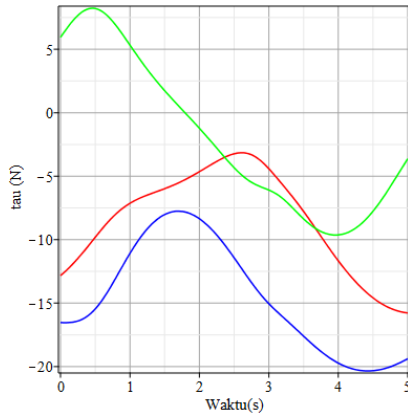
Pada gambar 4.10 dapat dilihat bahwa gaya reaksi antar kaki memiliki bentuk sinusoidal dimana gaya pada masing-masing kaki mengalami perubahan gaya yang bergantung dari

waktunya. Pada kaki 1 gaya yang bekerja berada di sumbu z lokal. Kaki 1 memiliki nilai amplitudo gaya reaksi sebesar -5 N. Sedangkan, pada kaki 2 gaya yang bekerja berada di sumbu x lokal. Kaki 2 memiliki besaran nilai amplitudo gaya reaksi sebesar -8 N. Terakhir, untuk kaki 3 gaya yang bekerja pada sumbu y lokal. Kaki 3 memiliki nilai amplitudo gaya reaksi dengan nilai 1,5 N.

Pada konfigurasi $\beta=45^\circ$ perubahan gaya yang terjadi pada masing-masing kaki tidak menunjukkan bahwa robot paralel melintasi daerah *singularity* sebab perubahan gaya yang terjadi tidak terjadi secara mendadak dan menuju arah tak hingga. Pengertian dari *singularity* sendiri yaitu kejadian apabila motor tidak dapat mentransfer daya atau gaya aktuasi yang dibutuhkan oleh *moving platform* untuk bekerja, maka *moving platform* dapat mengalami *shaky motion* yang disebabkan oleh massa platform, gaya berat kaki, dan inersia.

Selanjutnya dari gaya reaksi yang telah didapatkan kita bisa mencari gaya aktuasinya yang dibentuk plot pada gambar 4.11 sebagai berikut:





Gambar 4.11 Plot Gaya Aktuasi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=45^\circ$)

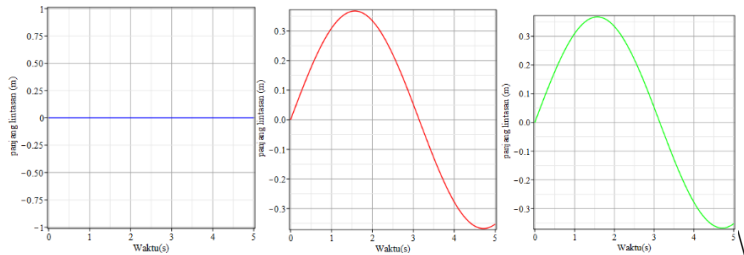
Pada plot gaya aktuasi didapatkan bahwa pola dari plot tersebut mirip dengan pola pada plot gaya reaksi yaitu sama-sama berbentuk sinusoidal. Perbedaan terjadi pada besaran amplitudo dimana amplitudo gaya aktuasi pada kaki 1 yang bekerja di sumbu z lokal memiliki nilai amplitudo sebesar 8 N. Lalu, kaki 2 yang bekerja pada sumbu x lokal memiliki amplitudo sebesar 4 N. Terakhir, kaki3 yang bekerja di sumbu z lokal memiliki nilai amplitudo sebesar 8N.

4.2.3. Analisa Dinamis dengan konfigurasi variabel β sebesar 54,7 derajat

Pada variabel β sebesar 45 derajat, bentuk plot gaya reaksi di tiap kaki serta plot gaya aktuasinya dimunculkan setelah ditemukan gaya-gaya yang berkerja pada kaki. Pada pengujian kali ini digunakan nilai parameter euler yang telah ditentukan yaitu:

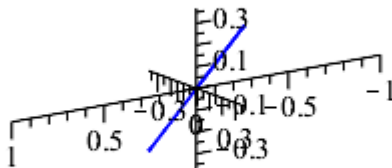
$$\phi = \pi, \theta = t, \psi = 0 \quad (4.60)$$

Dari nilai parameter yang telah ditentukan bisa didapatkan tersebut dapat dibuat grafik trajectory pada masing-masing sumbu X1B, Y1B, dan Z1B. Hasil dari plot sumbu adalah sebagai berikut:



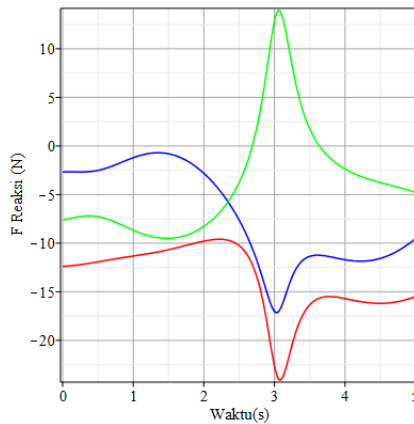
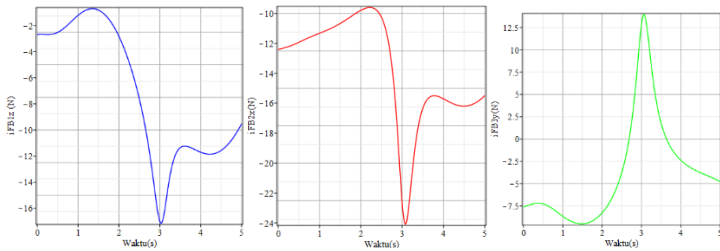
Gambar 4.12 Plot Trajectory berdasarkan sumbu X1B, Y1B, Z1B ($\beta=54.7$)

Pada plot *trajectory* yang telah dibuat grafik yang muncul berbentuk linear dan sinusoidal. Hal ini menyebabkan lintasan parameter yang dilewati platform bergerak berbentuk garis lurus seperti pada gambar 4.13 sebagai berikut:



Gambar 4.13 Lintasan Parameter saat ($\beta=54.7$)

Untuk hasil dari gaya reaksi yang bekerja di titik B_i terhadap masing-masing kaki manipulator bisa dilihat dalam gambar 4.14 sebagai berikut:



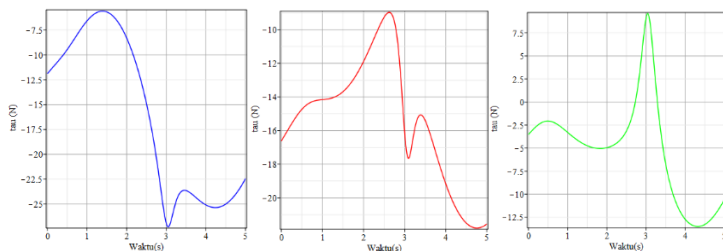
Gambar 4.14 Plot Gaya Reaksi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=54.7$)

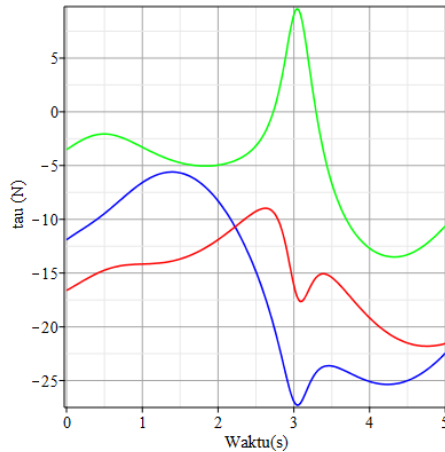
Pada gambar 4.14 diatas setiap kaki memiliki pola gaya reaksi terhadap waktu yang berbeda-beda. Pada kaki 1 disini pola gaya reaksinya fluktuatif ditemukan perubahan gaya yang signifikan dan bersifat mendadak pada daerah $t \approx 3$.

Selanjutnya pada kaki 2 memiliki pola reaksi yang fluktuatif dan ditemukan perubahan gaya yang signifikan pada daerah $t \approx 3$. dan bersifat mendadak. Terakhir pada kaki ketiga juga memiliki pola gaya reaksi yang fluktuatif dengan adanya perubahan gaya yang signifikan dan bersifat mendadak pada daerah $t \approx 3$. Adapun nilai amplitudo dari masing-masing kaki memiliki nilai yang bervariasi. Pada kaki 1 yang bekerja pada sumbu z lokal nilai amplitudo memiliki besaran sebesar -16 N. Lalu, kaki 2 yang bekerja pada sumbu x lokal mempunyai nilai amplitudo sebesar -24 N. Terakhir, kaki 3 yang bekerja pada sumbu y lokal mempunyai nilai amplitudo sebesar 12,5 N.

Pada plot gaya reaksi diatas kaki yang mengalami perubahan gaya terhadap waktu yang signifikan sehingga dapat dikatakan bahwa gaya reaksi mengalami *singularity* atau dengan kata lain daya yang ditransfer dari motor terhadap moving platform tidak tercukupi kebutuhannya sehingga mengalami gerakan yang *shaky* (bergejolak). Dimana hal ini bisa disebabkan akibat oleh massa platform, gaya berat kaki, dan inersia.

Selanjutnya dari gaya reaksi yang telah didapatkan kita bisa mencari gaya aktuasinya yang dibentuk plot pada gambar 4.15 sebagai berikut:





Gambar 4.15 Plot Gaya Aktuasi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=54.7$)

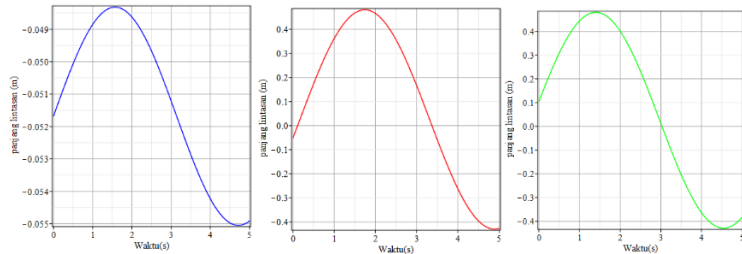
Pada plot gaya aktuasi didapatkan bahwa pola dari plot tersebut mirip dengan pola pada gaya reaksi. Perbedaan nya terjadi dimana nilai amplitudo pada masing-masing kaki memiliki perubahan yang berbeda. Kaki 1 memiliki nilai amplitudo sebesar -5 N. Selanjutnya, kaki 2 memiliki nilai amplitudo sebesar -9 N. Terakhir, kaki 3 memiliki nilai amplitudo sebesar 8 N.

4.2.4. Analisa Dinamis dengan konfigurasi variabel β sebesar 60 derajat

Pada variabel β sebesar 45 derajat, bentuk plot gaya reaksi di tiap kaki serta plot torsi aktuasinya dimunculkan setelah ditemukan gaya-gaya yang berkerja pada kaki. Pada pengujian kali ini digunakan nilai parameter euler yang telah ditentukan yaitu:

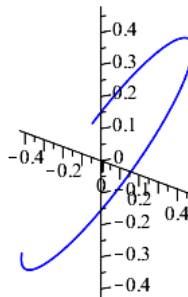
$$\phi = \pi, \theta = t, \psi = 0 \quad (4.61)$$

Dari nilai parameter yang telah ditentukan bisa didapatkan tersebut dapat dibuat grafik trajectory pada masing-masing sumbu X1B, Y1B, dan Z1B. Hasil dari plot sumbu adalah sebagai berikut:



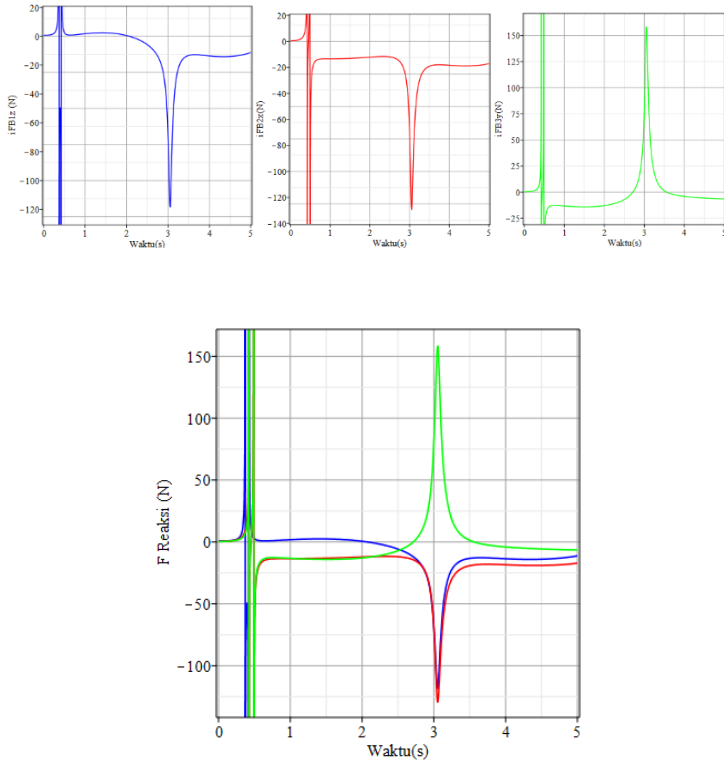
Gambar 4.16 Plot Trajectory berdasarkan sumbu X1B, Y1B, Z1B ($\beta=60^\circ$)

Pada plot *trajectory* yang telah dibuat grafik yang muncul berbentuk sinusoidal dan identik satu sama lain. Hal ini menyebabkan lintasan parameter yang dilewati platform bergerak berbentuk lingkaran seperti pada gambar 4.17 sebagai berikut:



Gambar.4.17 Lintasan Parameter saat ($\beta=60^\circ$)

Sedangkan untuk hasil dari gaya reaksi yang bekerja di titik B_i terhadap masing-masing kaki manipulator bisa dilihat dalam gambar 4.18 sebagai berikut:



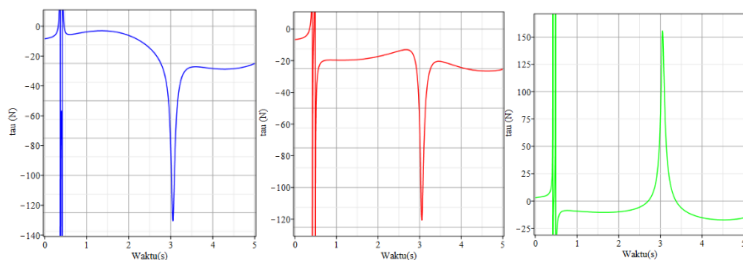
Gambar 4.18 Plot Gaya Reaksi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=60^\circ$)

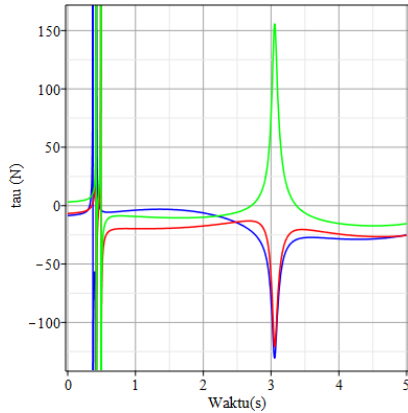
Gambar diatas setiap kaki memiliki pola gaya reaksi terhadap waktu yang berbeda-beda. Pada kaki 1 disini pola gaya reaksinya fluktuatif ditemukan perubahan gaya yang signifikan dan bersifat mendadak pada daerah $t \approx 0.5$, dan $t \approx 3$. Lalu pada kaki 2 memiliki pola reaksi yang fluktuatif dan ditemukan

perubahan gaya yang signifikan dan bersifat mendadak pada daerah $t \approx 0.5$, dan $t \approx 3$. Terakhir pada kaki ketiga juga memiliki pola gaya reaksi yang fluktuatif dengan adanya perubahan gaya yang signifikan dan bersifat mendadak pada daerah $t \approx 0.5$, dan $t \approx 3$. Untuk besaran nilai amplitudo masing-masing dari tiap kaki juga memiliki besaran nilai yang bervariasi. Pada kaki 1 yang bekerja di sumbu z lokal memiliki besaran nilai amplitudo gaya reaksi sebesar -120 N. Selanjutnya, kaki 2 yang bekerja di sumbu x lokal memiliki besaran nilai amplitudo sebesar -120 N. Terakhir pada kaki 3 yang bekerja di sumbu y lokal memiliki besaran nilai amplitudo sebesar 150 N.

Pada plot gaya reaksi diatas ada kaki yang mengalami perubahan gaya terhadap waktu yang signifikan sehingga dapat dikatakan bahwa gaya aktuasi mengalami *singularity* atau dengan kata lain daya yang ditransfer dari motor terhadap moving platform tidak tercukupi kebutuhannya sehingga mengalami gerakan yang *shaky* (bergejolak). Dimana hal ini bisa disebabkan akibat oleh massa platform, gaya berat kaki, dan inersia.

Selanjutnya dari gaya reaksi yang telah didapatkan kita bisa mencari gaya aktuasinya yang dibentuk plot pada gambar 4.19 sebagai berikut:





Gambar 4.19 Plot Gaya Aktuasi pada masing-masing kaki manipulator ($\beta=60^\circ$)

Pada plot gaya aktuasi didapatkan bahwa pola dari plot tersebut mirip dengan pola pada plot gaya reaksi. Hanya ada sedikit perbedaan saja bila diteliti dengan seksama.

(Halaman ini sengaja dikosongkan).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil penurunan persamaan kinematis pada robot 3(rR)PS adalah berupa persamaan posisi, kecepatan dan percepatan sesaat, kecepatan axial dan angular tiap kaki manipulator, percepatan axial dan angular tiap kaki manipulator, kecepatan silinder dan piston masing-masing kaki manipulator, dan percepatan silinder dan piston masing-masing kaki manipulator.

2. Perumusan dinamis dengan metode *Newton-Euler* dilakukan dengan menghitung persamaan dinamis dari kaki dan platform bergerak pada mekanisme. Adapun persamaan dinamis tersebut nantinya menghasilkan persamaan gaya reaksi dan gaya aktuasi pada masing-masing kaki.

3. Gaya reaksi dan gaya aktuasi dari empat konfigurasi yang digunakan memiliki karakteristik yang berbeda-beda dengan digambarkan dari plot yang telah dibuat. Dimana karakteristik yang gaya masing-masing kaki digambarkan pada perubahan gaya yang signifikan.

4. Perubahan perilaku dinamis dapat dilihat dari lintasan yang dilintasi oleh moving platform dimana lintasan tersebut bergantung dari konfigurasi yang digunakan.

5.2. Saran

1. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai karakteristik dinamis pada robot paralel 3(rR)PS dengan menambahkan gaya *constraint*.

-
2. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai karakteristik dinamis pada robot paralel 3(rR)PS dengan konfigurasi lainnya.

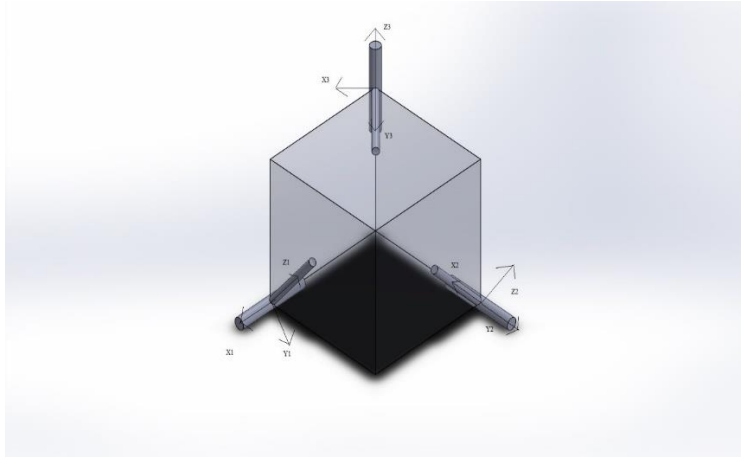
DAFTAR PUSTAKA

- Nurahmi, L., & Gan, D. (2019). “*Dynamic Analysis of The 3-(RR)PS Metamorphic Parallel Mechanism Based on Instantaneous Screw Axis*”. International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conferences. California: ASME.
- Nurahmi, L., & Gan, D. (2019). “*Reconfiguration of a 3-(RR)PS Metamorphic Parallel Mechanism Based on Complete Workspace and Operation Mode*”. International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conferences. California: ASME.
- Nurahmi, L., Schadlbauer, J., Caro, S., Husty, M., & Wenger, P. (2015). “*Kinematic Analysis of the 3-RPS Cube Parallel Manipulator*”. ASME Journal of Mechanisms and Robotics.
- Gan, D., Dias, M.J., & Dai, S.J. (2015). “*Joint force decomposition and variation in unified inverse dynamics analysis of a metamorphic parallel mechanism*”. Meccanica
- Dai, S.J., & Liping, Zhang. (2009). “*Reconfiguration of Spatial Metamorphic Mechanism*”. ASME Journal of Mechanism and Robotics.
- M. Carricato., & C. Gosselin. (2008). “*On the Modeling of Leg Constraints in the Dynamic Analysis of Gough/ Stewart Type Platforms*”. ASME Journal of Computational Non-Linear Dynamics.

Tsai, L. W. (1999). *Robot Analysis : The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.

LAMPIRAN

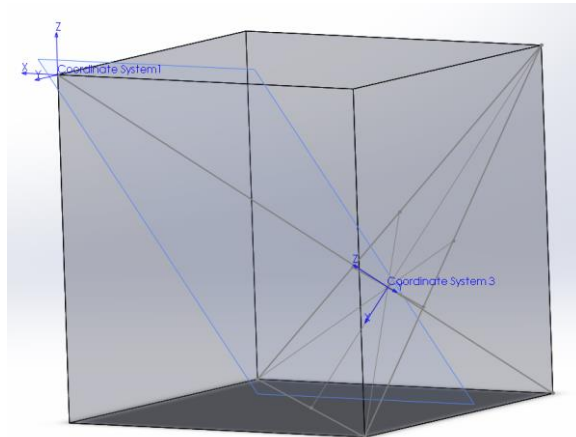
Koordinat Konfigurasi Kubik 3(rR)PS



Langkah Perhitungan Inersia Pada Moving Platform

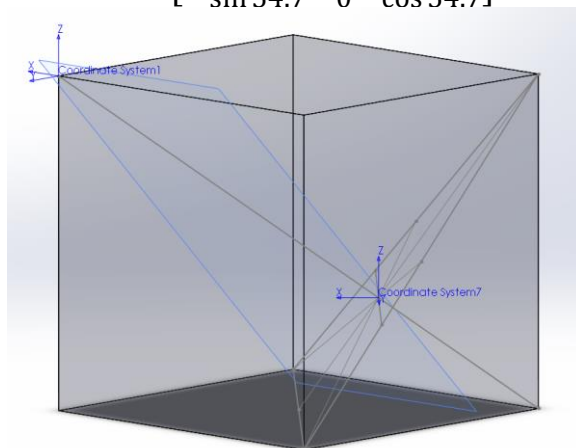
1. Matriks Inersia Platform terhadap arah sumbu utamanya sendiri

$$I_{cB} = \begin{bmatrix} \frac{mp(s^2 + 2t^2)}{24} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{mp(s^2 + 2t^2)}{24} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{mp(s^2)}{12} \end{bmatrix}$$



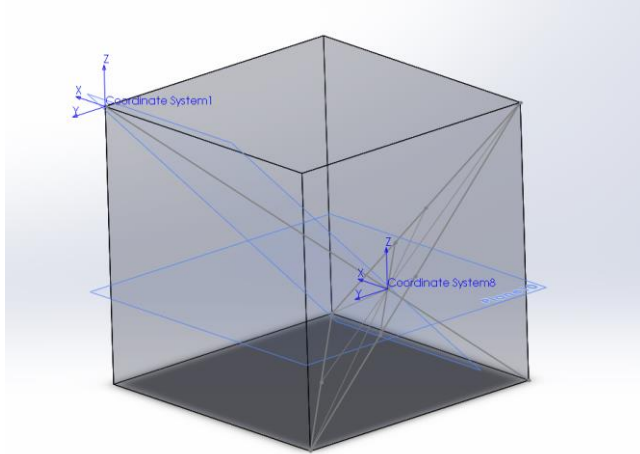
2. Matriks Inersia Platform dirotasikan pada sumbu y milik sumbu utamanya sendiri sebesar 54.7 derajat.

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos 54.7 & 0 & \sin 54.7 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin 54.7 & 0 & \cos 54.7 \end{bmatrix}$$



3. Matriks Inersia Platform dirotasikan pada sumbu z milik sumbu utamanya sendiri sebesar 45 derajat.

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos 45 & -\sin 45 & 0 \\ \sin 45 & \cos 45 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



4. Matriks Inersia Platform ditransformasikan dari terhadap sumbu utama menjadi terhadap *fixed frame*

$$I_{mp} = (R_z \cdot R_y) \cdot I_{cB} \cdot (R_z \cdot R_y)^T$$

BIODATA



Adrian Pamungkas merupakan anak bungsu dari dua bersaudara dan putra dari Bapak Soegiono dan Ibu Kinarti. Penulis lahir di Semarang, 7 Agustus 1998. Penulis memulai pendidikan di TK PL Santo Yusup, Semarang. Penulis melanjutkan jenjang pendidikan dasar di SD PL Santo Yusup, Kota Semarang, jenjang pendidikan menengah di SMP PL Domenico Savio, Kota Semarang, dan pendidikan menengah atas di SMA Kolese Loyola, Kota Semarang.

Penulis lalu melanjutkan pendidikan tinggi sarjana sebagai mahasiswa Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember angkatan 2016.

Semasa kuliah di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, penulis aktif dalam beberapa kegiatan. Pertama penulis merupakan mantan anggota Keluarga Mahasiswa Katolik ITS. Kedua, penulis juga tergabung dalam lembaga jurnalistik mahasiswa Departemen Teknik Mesin ITS. Terakhir, penulis aktif sebagai anggota di Laboratorium Otomasi Industri, Departemen Teknik Mesin ITS.

Untuk informasi dan saran yang dibutuhkan dari dan kepada penulis dapat menghubungi penulis melalui email sebagai berikut: pamungkasadrian1@gmail.com