महाराष्ट्र राज्य तंत्रशिक्षण मंडळ, मुंबई
(स्वायत्त) (ISO 9001:2015) (ISO/IEC 27001:2013)

अभियांत्रिकी आणि तंत्रज्ञान पदविका

शिक्षण पुस्तिका

(Learning Material)

Principles of Robotics

(314334)

K – Scheme

प्रिन्सिपल्स ऑफ रोबोटिक्स

अणुविद्‌युत अभियांत्रिकी गट

(के-स्कीम)

मराठी – इंग्रजी (द्विभाषिक) माध्यम
(अभियांत्रिकी पदविका चतुर्थ सत्र)

(Learning Material)

Principles of Robotics

(314334)

Electronics Engineering Group

मराठी – इंग्रजी (द्विभाषिक) माध्यम

(अभियांत्रिकी पदविका चतुर्थ सत्र)

महाराष्ट्र राज्य तंत्रशिक्षण मंडळ, मुंबई

(स्वायत्त) (ISO 9001:2015) (ISO/IEC 27001:2013)

MAHARASHTRA STATE BOARD OF TECHNICAL EDUCATION * MUMBAI

मार्गदर्शक

किशोर प्रल्हाद अकोले
प्रभारी विभागप्रमुख, अणुविद्‌युत अभियांत्रिकी

प्रमुख समन्वयक

विक्रांत भास्करराव जोशी
प्राचार्य

समन्वयक

सरोज ऋतुराज देसाई
अधिव्याख्याता, ऑटोमेशन आणि रोबोटिक्स अभियांत्रिकी

संकलक

जावेद गैबीसाहेब ढालाईत
अधिव्याख्याता, ऑटोमेशन आणि रोबोटिक्स अभियांत्रिकी

प्रणित शिवलाल निगडे
अधिव्याख्याता, मेकॅनिकल अभियांत्रिकी

मंजू कुरियन
अधिव्याख्याता, ऑटोमेशन आणि रोबोटिक्स अभियांत्रिकी

निलेश विलास रामकुवर
अधिव्याख्याता, मेकाट्रॉनिक्स अभियांत्रिकी

प्रणव विजय जाधव
अधिव्याख्याता ऑटोमेशन आणि रोबोटिक्स अभियांत्रिकी

महाराष्ट्र राज्य तंत्र शिक्षण मंडळ

(स्वायत्त) (ISO: ९००१:२०१५) (ISO/IES: २७००१-२०१३)

शासकीय तंत्रनिकेतन इमारत, चौथा मजला, ४९, खेरवाडी, बांद्रा (पूर्व), मुंबई - ४०० ०५१.

दूरध्वनी क्र.: ०२२-६२५४२१७० / १६१

Email : director@msbte.com Web : www.msbte.org.in

प्रास्ताविक

महाराष्ट्र राज्यातील पदविका स्तरावरील तंत्रशिक्षणामध्ये विद्यार्थ्यांचे रोजगार कौशल्य विकसित करून विद्यार्थ्यांचा सर्वांगीण विकास घडवून आणण्याकरिता महाराष्ट्र राज्य तंत्रशिक्षण मंडळ कटिबद्ध आहे. उद्योगधंद्यातील बदलत्या तंत्रज्ञानाशी संबंधित गरजा लक्षात घेऊन महाराष्ट्र राज्य तंत्र शिक्षण मंडळाकडून पदविका अभ्यासक्रम वेळोवेळी अद्यावत करण्यात येतो . अभियांत्रिकी पदविका अभ्यासक्रम शिकत असतांना संकल्पनात्मक ज्ञान, सुसंगत संदर्भ, प्रश्न विचारणे, विश्वसनिय पुरावे, कारणमीमांसा आणि सुस्पष्ट निकष यांचा वापर करून अर्थाची उकल करण्याची, विश्लेषण व मूल्यमापन करण्याची तसेच तर्काने अनुमान काढण्याची क्षमता म्हणजेच चिकित्सक विचार विद्यार्थ्यांमध्ये अधिक दृढ होतील असा मला विश्वास आहे. जेव्हा विद्यार्थी ज्ञान मिळवण्याच्या माध्यमाशी पूर्णपणे परिचित आणि सोयीस्कर असतात, तेव्हा त्यांच्यासाठी वर्गातील चर्चेत भाग घेणे सोपे होते, संकल्पनात्मक व सैद्धांतिक बाबींचे आकलन परिपूर्ण होते, संज्ञानात्मक क्षमता सुधारते आणि त्यांचा आत्मविश्वास देखील वाढतो या सर्व गोष्टींचा विचार करून मंडळाकडून शैक्षणिक सामुग्रीची निर्मिती करण्यात आलेली आहे . भारत देश हा खेड्यापाड्यातून विकसित झालेला देश असून ग्रामीण भागातील विद्यार्थ्यांना तांत्रिक शिक्षण घेतांना भाषेचा अडसर न येता तांत्रिक बाबींचा आशय समजून घेणे शक्य होईल या दृष्टिकोनातून महाराष्ट्र राज्य तंत्र शिक्षण मंडळाने पदविका स्तरावरील तांत्रिक शिक्षणाकरीता विद्यार्थ्यांना मराठी-इंग्रजी द्विभाषिक माध्यमाचा पर्याय शैक्षणिक वर्ष २०२१-२२ पासून उपलब्ध करून दिलेला आहे .

राष्ट्रीय शैक्षणिक धोरण-२०२० प्रादेशिक भाषेतील शिक्षणास प्रोत्साहन देते, ज्यामुळे विद्यार्थ्यांना तांत्रिक अभ्यासक्रमांसाठी प्रादेशिक भाषांतुन शिक्षणाचे माध्यम निवडता येते. सदर धोरणामुळे प्रादेशिक भाषांमध्ये तांत्रिक सामग्री आणि अभ्यास सामग्रीचा विकास आणि भाषांतर निर्माण करण्याची आवश्यकता आहे . त्यास अनुसरून मंडळाने मराठी-इंग्रजी द्विभाषिक माध्यमाचा पर्याय द्वितीय व तृतीय वर्षाकरिताही उपलब्ध करून देण्यात आला आहे. तसेच त्याकरिताची शैक्षणिक सामग्रीही संबंधीत भागधारकरांना उपलब्ध करून देण्यात येत आहे.

पदविका स्तरावरील तंत्रशिक्षण अधिक दर्जेदार करण्यासाठी महाराष्ट्रातील अनुभवी व तज्ञ अध्यापकांनी व्यवहारिक मराठी भाषा व इंग्रजी भाषेतील तांत्रिक शब्दावली यांचा वापर करून मराठी - इंग्रजी भाषेचा सुवर्णमध्य साधण्याचा प्रयत्न केलेला आहे. मंडळाच्या स्तरावर गठीत सुकाणू समितीमार्फत सदर शैक्षणिक सामुग्रीचा दर्जा, तसेच इतर बाबींची तपासणी करण्यात आलेली आहे. त्यामुळे सदर शैक्षणिक सामुग्री अधिक सम्पन्न झालेली असून विद्यार्थी त्यांच्या व्यक्तिमत्त्वाचा सुसंवादी आणि सर्वांगीण विकास साधतील. परिणामतः विश्वस्तरीय मनुष्यबळाच्या गरजा पूर्ण करण्यात महाराष्ट्र राज्य अग्रेसर राहील व पर्यायाने राष्ट्रनिर्मिती करीता निश्चितच हातभार लागेल , असा मला विश्वास आहे.

अभियांत्रिकी पदविका अभ्यासक्रमातील प्रमुख विषयांची मराठी-इंग्रजी द्विभाषिक शैक्षणिक सामुग्री बनविण्यासाठी अध्यापक व सुकाणू समितीचे सदस्य यांनी दर्शविलेले समर्पण व वचनबद्धता कौतुकास पात्र आहे , या सर्वांचे मी मनः पूवक अभिनंदन करतो !

(प्रमोद नाईक)
संचालक
म. रा. तंत्र शिक्षण मंडळ, मुंबई.

अनुक्रमणिका

अ. क्र.	युनिटचे नाव	पान क्र.
1	रोबोटिक्सची मूलभूत तत्त्वे **Fundamentals of Robotics**	1
2	रोबोटिक्ससाठी अभियांत्रिकी यांत्रिकीचे मूलभूत तत्वे **Basics of Engineering Mechanics for Robotics**	20
3	रोबोटिक्स मध्ये वापरले जाणारे ट्रान्सफॉरमेशन्स **Transformations used in Robotics**	34
4	रोबोटिक आर्मची काईनेमॅटिक्स **Kinematics of the Robotic Arm**	57
5	रोबोटिक आर्म आणि मोशन प्लॅनिंगच्या गतिशीलतेचे सिंहावलोकन **Overview of Dynamics of the Robotic Armand Motion Planning**	69

युनिट 1
रोबोटिक्सची मूलभूत तत्त्वे
Fundamentals of Robotics

विषय निष्पत्ती (Course Outcome) :- रोबोटिक प्रणालीची मूलभूत शरीररचना ओळखणे
Identify the basic anatomy of a robotic system

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes).

1.1: रोबोट शरीररचनेचे वर्णन करणे व विविध घटक प्रणालीचे मूलभूत कार्ये निर्दिष्ट करणे.
Describe the robot anatomy by specifying the functions of various basic elements of robot systems

1.2: रोबोट आर्म कॉन्फिगरेशनचे वर्गीकरण करणे.
Classify the robot arm configurations.

1.3: रोबोट सांध्याचे वर्णन करणे.
Describe the robot joints.

1.4: रोबोटिक्सशी संबंधित वैशिष्ट्यांचे वर्णन करणे.
Describe the specifications related to robotics.

1.5: दिलेल्या अनुप्रयोगासाठी योग्य ग्रिपर निवडणे.
Select appropriate gripper for the given application.

1.6: रोबोटिक अनुप्रयोगासाठी अवलंबले जाणारे सुरक्षा उपाय ओळखणे.
Identify the safety measures to be adopted forgiven robotic application.

परिचय : हे युनिट रोबोटिक्समध्ये मजबूत पाया तयार करण्यासाठी महत्त्वपूर्ण आहे, कारण हे रोबोट्सला कार्ये करण्यात कार्यक्षम, प्रभावी बनविणारे मुख्य घटक आणि कार्ये सादर करते. या धड्यातून रोबोट शरीररचना, आर्म कॉन्फिगरेशन आणि यांत्रिक सांधे (Joints), रोबोटची रचना आणि कार्य कसे केले जाते याचे व्यापक ज्ञान विद्यार्थ्यांना मिळते. रोबोट वैशिष्ट्ये आणि अंतिम प्रभावकांचा अभ्यास हे सुनिश्चित करते की विद्यार्थी रोबोट क्षमतेचे मूल्यांकन करू शकतात आणि विविध अनुप्रयोगांसाठी योग्य साधने निवडू शकतात. सुरक्षा मानकांचा समावेश करून, हे युनिट रोबोटच्या डिझाइन आणि प्रतिष्ठापन मध्ये नैतिक आणि सुरक्षित पद्धतींच्या महत्त्वावर जोर देते. येथे मिळालेले ज्ञान रोबोटिक्स क्षेत्रात करिअर किंवा संशोधन करणार्या प्रत्येकासाठी आवश्यक आहे, कारण ते अधिक प्रगत अभ्यास आणि व्यावहारिक अनुप्रयोगांसाठी आवश्यक पाया स्थापित करते.

1.1 रोबोट- व्याख्या आणि परिचय

1.1.1 व्याख्या

- शारीरिक श्रम आणि निर्णय घेण्याच्या बाबतीत मानवाची जागा घेऊ शकणाऱ्या यंत्रांना रोबोट आणि त्यांच्या अभ्यासाला रोबोटिक्स (Robotics) असे वर्गीकरण करण्यात आले आहे.
- रोबोटिक्स हे रोबोटच्या डिझाइन आणि उत्पादनाशी संबंधित आहे.
- रोबोटिक्स आंतरविद्याशाखीय आहे कारण त्यासाठी भौतिकशास्त्र, गणित, यांत्रिक अभियांत्रिकी, विद्युत अभियांत्रिकी आणि संगणक विज्ञान अभियांत्रिकी आणि माहिती तंत्रज्ञानाचे ज्ञान आवश्यक आहे.
- इंटरनॅशनल स्टँडर्ड ऑफ ऑर्गनायझेशनने (आयएसओ) रोबोटची व्याख्या प्रोग्राम केलेल्या गतीद्वारे मानवाने दिलेल्या ऑर्डर्स पार पाडण्यासाठी डिझाइन केलेले रिप्रोग्रामेबल मल्टीफंक्शनल मॅनिपुलेटर म्हणून केली आहे.

1.1.1 संक्षिप्त इतिहास

- रोबोट या शब्दाची उत्पत्ती रोबोटा नावाच्या चेक शब्दापासून झाली आहे ज्याचा अर्थ सक्तीने किंवा सक्तीची मजुरी असा होतो.
- 'रोबोट' या शब्दाचा पहिला वापर चेक लेखक कॅरेल केपेक (1890-1938) यांनी लिहिलेल्या रोसमयुनिव्हर्सल रोबोट्स (आरयूआर) या नाटकात 1921 मध्ये दिसून आला. आरयूआर या नाटकात यांत्रिक जीवांच्या एका काल्पनिक निर्मात्याने मानवी कामगारांची जागा घेण्यासाठी एक रोबोट तयार केला.
- इ.स. 1942 मध्ये आयझॅक असिमोव्ह यांनी रनअराउंड नावाच्या कथेत रोबोटिक्स हा शब्द आणला. त्यांनी रोबोटसाठी तीन मूलभूत नियम मांडले
- असिमोव्ह यांच्या रोबोटवरील पुस्तकांपासून प्रेरणा घेऊन जोसेफ एफ एंगेलबर्गर यांनी 1950 च्या दशकात एक कार्यरत रोबोट डिझाइन करण्याचा प्रयत्न केला. त्यांनी जॉर्ज सी. डेव्हल यांच्यासमवेत 1958 मध्ये अमेरिकेत युनिमेशन रोबोटिक्स कंपनी सुरू केली. पहिला युनिमेट रोबोट 1961 मध्ये न्यू जर्सीतील जनरल मोटर्सच्या ऑटोमोबाईल फॅक्टरीत बसवण्यात आला होता.

1.1.3 असिमोव्हचे रोबोटचे नियम

- रोबोटने माणसाचे नुकसान करू नये, तसेच निष्क्रियतेने ही हानी पोहोचू देऊ नये.
- रोबोटने नेहमी माणसांचे आज्ञापालन केले पाहिजे, जोपर्यंत ते पहिल्या नियमाशी विसंगत नसते.
- रोबोटने स्वतःच्या अस्तित्वाचे रक्षण केले पाहिजे, जोपर्यंत ते पहिल्या दोन नियमांशी विसंगत नसते.

1.1.4 रोबोटची शरीररचना रोबोटिक प्रणाली बनविणार्या मुख्य घटकांना संदर्भित करते, प्रत्येक रोबोटच्या कार्ये करण्याच्या क्षमतेमध्ये विशिष्ट भूमिका बजावते. खाली रोबोटचे प्राथमिक घटक आहेत (Figure 1.1).

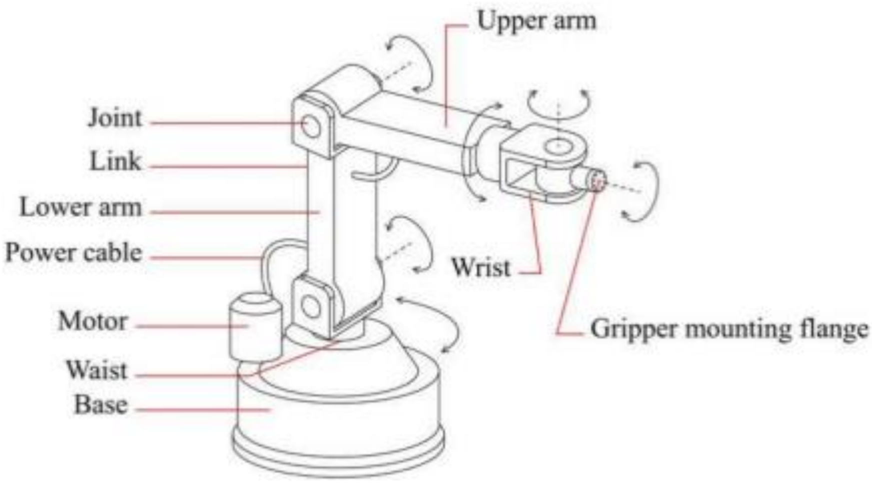


Figure 1.1: रोबोट एनाटॉमी (Robot Anatomy)

बेस (Base): बेस हा रोबोटचा स्थिर किंवा मूलभूत भाग आहे, जो स्थिरता प्रदान करतो. हे सामान्यत: रोबोटच्या संपूर्ण संरचनेचे समर्थन करते आणि बर्याचदा मुख्य वीज पुरवठा आणि नियंत्रण प्रणाली ठेवते.

मॅनिपुलेटर आर्म (Manipulator Arm): मॅनिपुलेटर आर्म हा हालचालीसाठी जबाबदार रोबोटचा भाग आहे. हे मानवी हातासारखेच कार्य करते, ज्यामुळे रोबोट वस्तू उचलणे, हलविणे किंवा हाताळणे यासारखी कामे करण्यास सक्षम होतो. हातामध्ये सामान्यत: एकाधिक सांधे आणि दुवे असतात, ज्यामुळे स्वातंत्र्याच्या विविध अंशांची परवानगी मिळते.

एंड इफेक्टर्स (End Effectors): एंड इफेक्टर्स ही रोबोट हाताच्या टोकाला जोडलेली साधने किंवा उपकरणे आहेत, जी पर्यावरणाशी संवाद साधण्यासाठी वापरली जातात. ते पकडणे, वेल्डिंग (welding) किंवा पेंटिंग(painting) सारखी विशिष्ट कामे करू शकतात. एंड इफेक्टर्सच्या उदाहरणांमध्ये मेकॅनिकल ग्रिपर्स (Mechanical grippers), न्यूमॅटिक ग्रिपर्स(Pneumatic grippers), मॅग्नेटिक ग्रिपर्स (Magnetic grippers), व्हॅक्यूम ग्रिपर्स(Vacuum grippers), ॲडहेसिव्ह ग्रिपर्स(Adhesive grippers) यांचा समावेश आहे.

सेन्सर (Sensor): सेन्सर हे रोबोटचे "इंद्रिय" आहेत, जे त्याला त्याच्या पर्यावरणाचे आकलन आणि संवाद साधण्यास सक्षम करतात. ते आजूबाजूचा डेटा गोळा करतात आणि रोबोटच्या कंट्रोल सिस्टममध्ये फीड करतात.

कंट्रोल सिस्टीम(Control System): कंट्रोल सिस्टीम म्हणजे रोबोटचा 'मेंदू'. हे सेन्सरमधील इनपुटवर प्रक्रिया करते आणि रोबोटच्या हालचाली आणि क्रिया निश्चित करण्यासाठी अल्गोरिदम वापरते. नियंत्रण प्रणाली ॲक्च्युएटर्सना कमांड पाठवते, रोबोटला त्याच्या प्रोग्रामिंगच्या आधारे विशिष्ट कार्ये करण्यास निर्देशित करते.

ॲक्च्युएटर्स(Actuators): ॲक्च्युएटर्स हे रोबोटचे "स्नायू" आहेत, जे हालचालीसाठी जबाबदार आहेत. ते नियंत्रण प्रणालीतील विद्युत संकेतांचे भौतिक गतीमध्ये रूपांतर करतात. ॲक्च्युएटर्स मोटर्स (Rotary हालचालीसाठी) किंवा हायड्रोलिक / न्यूमॅटिक प्रणाली (liner हालचालीसाठी) असू शकतात. ते रोबोट सांधे, मॅनिपुलेटर हात आणि एंड इफेक्टर्समध्ये हालचाल सक्षम करतात.

1.2 रोबोट आर्म कॉन्फिगरेशन: कार्टेशियन समन्वय, पोलर, सिलिंड्रिकल, जोइंटेड आर्म, एससीएआरए (SCARA) (सिलेक्टिव्ह कंप्लायंस असेंबली रोबोट आर्म)

1.2.1 कार्टेशियन कॉर्डिनेट(Cartesian Coordinate):

जेव्हा रोबोटचा हात रेक्टिलिनियर मोडमध्ये (rectilinear mode), म्हणजेच आयताकृती उजव्या हाताच्या कार्टेशियन(Cartesian) समन्वय प्रणालीच्या एक्स, वाय आणि झेड निर्देशांकांच्या दिशांकडे फिरतो, जसे चित्रात दाखविले आहे. त्याला कार्टेशियन (Cartesian) किंवा आयताकृती प्रकार म्हणतात. त्यानंतर संबंधित रोबोटला कार्टेशियन रोबोट (Cartesian Robot) म्हणतात. या हालचालींना ट्रॅव्हल एक्स, उंची किंवा उंची वाय आणि हाताच्या झेड पर्यंत पोहोचणे असे संबोधले जाते. त्याच्या कार्यक्षेत्राला आयताकृती पेटी किंवा प्रिज्मचा (prism) आकार असतो. कार्टेशियन रोबोट(Cartesian Robot) ऑपरेट करण्यासाठी मोठ्या प्रमाणात आवश्यक आहे. तथापि, त्याची एक कठोर रचना आहे आणि अंतिम-प्रभावकाची अचूक स्थिती प्रदान करते. अशा रोबोटची देखभाल करणे अवघड आहे, कारण रेक्टिलिनियर गती सामान्यत: नट आणि बॉल स्क्रूसह रोटरी इलेक्ट्रिक ॲक्च्युएटरच्या संचाद्वारे प्राप्त केली जाते. स्क्रूवर साचलेली धूळ रोबोटची स्मूद (smooth) गती जाम करू शकते. शिवाय स्क्रूचा सरळपणा टिकवून ठेवण्यासाठी त्या घटकांमध्ये अधिक कडकपणा आवश्यक असतो. त्यामुळे असे रोबोट महाग असतात.

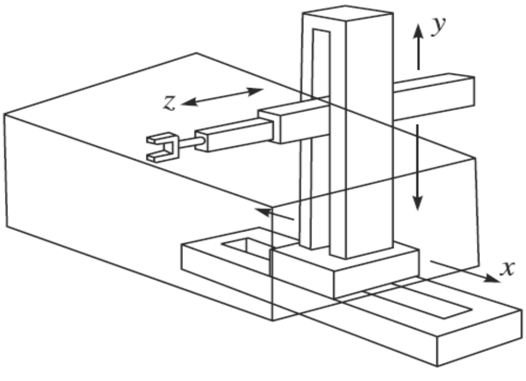


Figure 1.2: कार्टेशियन समन्वय (Cartesian coordinate)

1.2.2 सिलिंड्रिकल(Cylindrical): जेव्हा रोबोटच्या हाताला एक रेव्होल्युट आणि दोन प्रिझमॅटिक सांधे(prismatic joints) असतात, म्हणजेच कार्टेशियन प्रकारातील पहिला प्रिझमॅटिक जॉइंट, आ. 1.3, त्याची जागा रिव्होल्युट(revolute) ने घेतली जाते आणि त्याचा अक्ष z-अक्षाच्या आवाक्याजवळ 90° ने फिरतो, तेव्हा तो सोयीस्कररित्या पोहोचू शकणारे बिंदू सिलिंड्रिकल निर्देशांकांद्वारे निर्दिष्ट केले जातात, उदा. आ. 1.2 प्रमाणे कोन θ, उंची y आणि त्रिज्या z या प्रकारच्या हाताच्या रोबोटला सिलिंड्रिकल रोबोट असे म्हणतात ज्याचा हात हलतो, θ, y आणि z, म्हणजेच त्याला अनुक्रमे बेस रोटेशन, उंची आणि पोहोच असते. हाताचे निर्देशांक निर्दिष्ट वरच्या आणि खालच्या मर्यादे दरम्यान मूल्ये गृहीत धरू शकतात, त्याचा अंतिम प्रभावक मर्यादित प्रमाणात हालचाल करू शकतो. अशा प्रकारच्या रोबोटला पायथ्याजवळील जमिनीला स्पर्श करण्यात अडचणी येऊ शकतात. जेव्हा एखाद्या कार्यासाठी लहान उघड्यांमध्ये पोहोचणे किंवा सिलिंड्रिकल पृष्ठभागांवर काम करणे आवश्यक असते, उदा. वेल्डिंग पाईप आवश्यक असते तेव्हा सिलिंड्रिकल रोबोट क्षेत्र यशस्वीरित्या वापरले जाते.

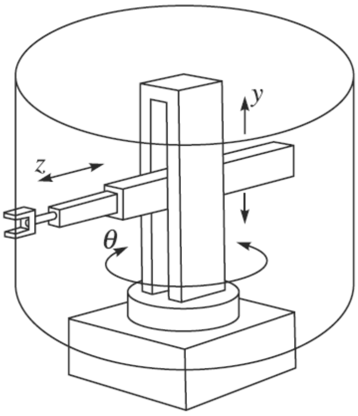


Figure 1.3: ध्रुवीय समन्वय (Polar coordinate)

1.2.3 गोलाकार किंवा पोलर (Spherical or Polar): जेव्हा एखाद्या रोबोटचा हात आपले दोन रिव्होल्युट सांधे आणि एक प्रिझमॅटिक सांधे हलवून आपली रचना बदलू शकतो, म्हणजेच सिलिंड्रिकल प्रकारच्या उंचीसह दुसर् या प्रिझमॅटिक सांध्याची जागा रेव्होल्युट जॉइंटने घेतली जाते ज्याचा अक्ष झेड-अक्षाच्या आवाक्याभोवती 90° ने फिरतो, तेव्हा गोलाकार निर्देशांकांद्वारे हाताच्या स्थितीचे सोयीस्करवर्णन केले जाते, म्हणजेच, θ, ϕ आणि z. हा हात आ. 1.4 मध्ये दाखविला आहे आणि त्याला गोलाकार किंवा ध्रुवीय रोबोट हात असे म्हणतात. हाताच्या हालचाली अनुक्रमे बेस रोटेशन, उंची कोन आणि पोहोच दर्शवितात.

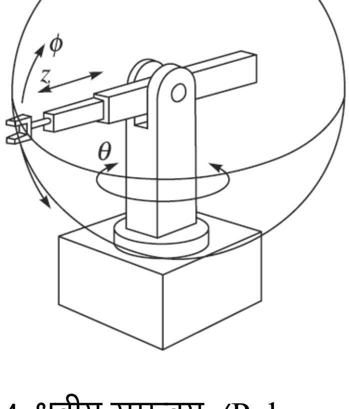


Figure 1.4: ध्रुवीय समन्वय (Polar coordinate)

1.2.4 ए सिलेक्टीव व कम्प्लायंस असेम्ब्ली रोबोट आर्म (A Selective Compliance Assembly Robot Arm (SCARA) Robot) उच्च-अचूक कार्यांसाठी अत्यंत योग्य आहे. पिक-अँड-प्लेस, असेंब्ली आणि लहान भाग हाताळणी सारख्या अनुप्रयोगांसाठी इलेक्ट्रॉनिक्स, ऑटोमोटिव्ह आणि फार्मास्युटिकल्स सारख्या उद्योगांमध्ये याचा मोठ्या प्रमाणात वापर केला जातो. स्कारा रोबोट चार डिग्री स्वातंत्र्य असलेला मॅनिपुलेटर आहे. एससीएआरए हे चार-अक्ष (four-axis) रोबोट आहेत, ज्याची गती एक्स-वाय आणि झेड-अक्ष (Z-axis) आहे आणि झेड-अक्षाभोवती 360^0-डिग्री घूर्णन(rotary) हालचाल आहे. विलोम किनेमेटिक्स (Inverse kinematics) आणि डेटा इंटरपोलेशन रोबोटला गतिशीलपणे, जलद आणि बुद्धिमत्तेने हालचाल करण्यास अनुमती देते.

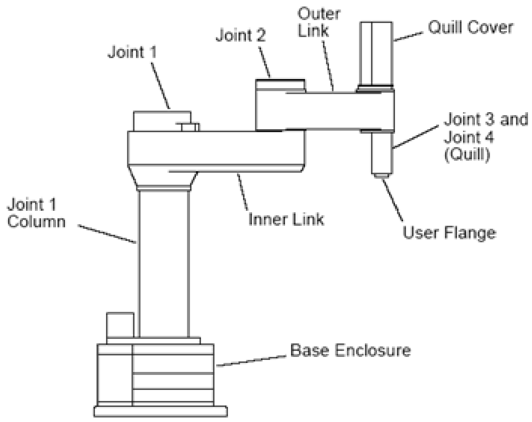


Figure 1.5: एक निवडक अनुपालन असेंबली रोबोट आर्म (SCARA) रोबोट
(A Selective Compliance Assembly Robot Arm (SCARA) Robot)

1.3 रोबोटिक्स प्रणालीतील यांत्रिक सांध्याचे प्रकार : रेखीय(Linear), ऑर्थोगोनल(orthogonal), घूर्णन(rotational), फिरणे(revolving).

1) रोबोटिक्समधील समरूप सांधे म्हणजे एक प्रकारचा सांधे जिथे दोन किंवा अधिक प्रिझमॅटिक (रेखीय) सांधे एकाच अक्षावर संरेखित केले जातात. याचा अर्थ असा की दोन्ही सांधे एकाच दिशेने फिरतात, ज्यामुळे रोबोटिक घटक त्याचे ओरिएंटेशन न बदलता सरळ रेषेसह विस्तारित किंवा मागे जाऊ शकतो. कोलिनियर सांधे निव्वळ भाषांतरीय असल्याने, जेथे नियंत्रित आणि स्थिर रेखीय गती आवश्यक आहे अशा अनुप्रयोगांमध्ये ते उपयुक्त आहेत.

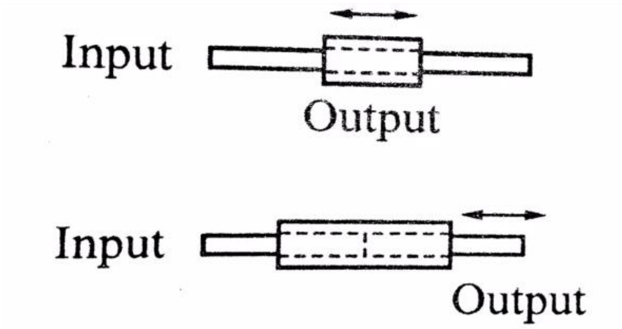


Figure 1.6: रेखीय संयुक्त (Linear Joint)

2) ऑर्थोगोनल जॉइंट (orthogonal joint) म्हणजे रोबोटिक जॉइंट कॉन्फिगरेशन जिथे दोन प्रिझमॅटिक (रेखीय) सांधे एकमेकांना लंबवत (90-डिग्री कोनात) व्यवस्थित केले जातात. हा सेटअप कार्टेशियन

समन्वय प्रणालीमध्ये (एक्स, वाय किंवा झेड) दोन स्वतंत्र अक्षांसह हालचाल करण्यास अनुमती देतो. यात दोन प्रिझमॅटिक सांधे एकमेकांच्या उजव्या कोनात फिरतात. रिव्होल्युट (revolute) सांध्याच्या विपरीत, ऑर्थोगोनल(orthogonal) सांधे केवळ रेखीय गती प्रदान करतात. एक्स-वाय-झेड समन्वय प्रणालीमध्ये कार्य करणार्या कार्टेशियन(Cartesian) (गॅन्ट्री) रोबोटमध्ये वारंवार वापरले जाते. अचूक स्थिती सक्षम करते, ज्यामुळे स्वयंचलित सामग्री हाताळणी, पिक-अँड-प्लेस (pick-and-place) कार्ये आणि सीएनसी(CNC) मशीनिंगसाठी आदर्श बनते.

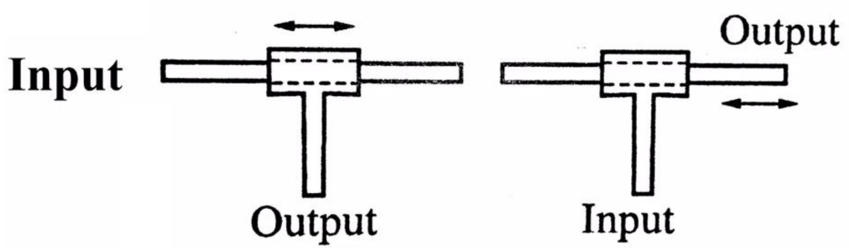


Figure 1.7: ऑर्थोगोनल जॉइंट(Orthogonal Joint)

3) रोटेशनल जॉइंट (ज्याला रेव्होल्युट जॉइंट असेही म्हणतात) हा एक प्रकारचा रोबोटिक जॉइंट आहे जो एका निश्चित अक्षाभोवती फिरत्या हालचालीस अनुमती देतो. हे रोबोटिक हातांमधील सर्वात सामान्य सांध्यांपैकी एक आहे, जे मानवी कोपर किंवा गुडघ्याच्या हालचालींसारखी लवचिकता प्रदान करते. घूर्णन गती : एका ठराविक धुरी बिंदूभोवती फिरते, ज्यामुळे एका दिशेला फिरता येते. सिंगल डिग्री ऑफ फ्रीडम (डीओएफ): एकाच अक्षाभोवती परिभ्रमण होते. कोन-मर्यादित किंवा निरंतर: काही सांधे प्रतिबंधित श्रेणीत फिरतात (उदा., 0° ते 180°), तर इतर मुक्तपणे फिरतात (360°). रोबोटिक मॅनिपुलेटरमध्ये वापरले जाते: रोबोटिक शस्त्रे, ह्युमनॉइड रोबोट आणि औद्योगिक ऑटोमेशनमध्ये आढळतात.

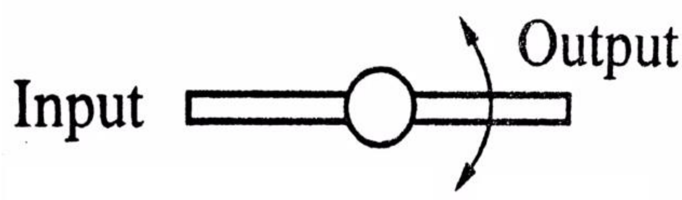


Figure 1.8: रोटेशनल जॉइंट (Rotational Joint)

4) फिरणारा सांधे (twisting joint) हा रोबोटिक्समधील एक प्रकारचा घूर्णी (रिव्होल्युट) संयुक्त आहे जो उभ्या अक्षाभोवती फिरत्या हालचालीस अनुमती देतो. हे संयुक्त रोबोटला त्याच्या संरचनेचा एक भाग त्याचे स्थान न बदलता फिरविण्यास सक्षम करण्यासाठी जबाबदार आहे. रोटेशनल मोशन एका स्थिर अक्षाभोवती फिरण्याची परवानगी देते, सामान्यत: उभ्या पद्धतीने संरेखित होते. सिंगल डिग्री ऑफ फ्रीडम (डीओएफ) सांधे कोणत्याही रेखीय गतीशिवाय फिरतात. रोबोटिक आर्म्स आणि मनगटात सामान्य: बर्याचदा रोबोटिक मॅनिपुलेटर, ह्युमनॉइड रोबोट आणि एंड-इफेक्टर्समध्ये वापरले जाते. ऑब्जेक्ट रोटेशन अँड ओरिएंटेशनसाठी वापरले जाणारे रोबोट टूल्स(Robot tools) आणि ऑब्जेक्ट्स वळवण्यास किंवा वळवण्यास मदत करते.

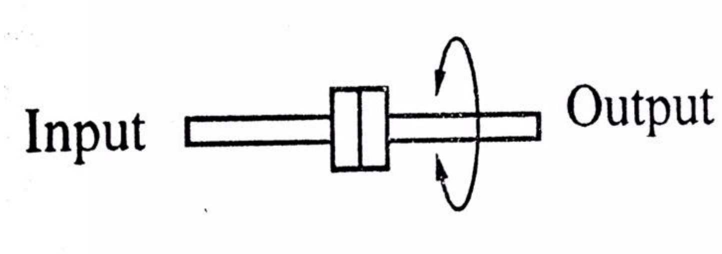


Figure 1.9: ट्विस्टिंग जॉइंट (Twisting Joint)

5) रिव्होल्यूट जॉइंट (revolute joint) हा एक मूलभूत रोबोटिक जॉइंट आहे जो एका निश्चित अक्षाभोवती फिरण्याची परवानगी देतो. हे रोबोटिक हातांमध्ये सर्वात सामान्यपणे वापरल्या जाणार्या सांध्यांपैकी एक आहे, जे हिंज किंवा कोपराच्या सांध्यासारखे एकच डिग्री स्वातंत्र्य (डीओएफ) प्रदान करते. घूर्णन गती : एका ठराविक धुरी बिंदूभोवती फिरते. सिंगल डिग्री ऑफ फ्रीडम (डीओएफ): मर्यादित किंवा पूर्ण 360 डिग्री रेंजमध्ये फिरू शकते. रोबोटिक मॅनिपुलेटर्समध्ये सामान्य: रोबोटिक शस्त्रे, ह्युमनॉइड रोबोट आणि औद्योगिक रोबोटमध्ये वापरले जाते. मोटर्स, सर्वो किंवा हायड्रोलिक (hydraulic) सिस्टमवापरुन नियंत्रित ॲक्च्युएटर्स आणि सेन्सर आवश्यक आहेत.

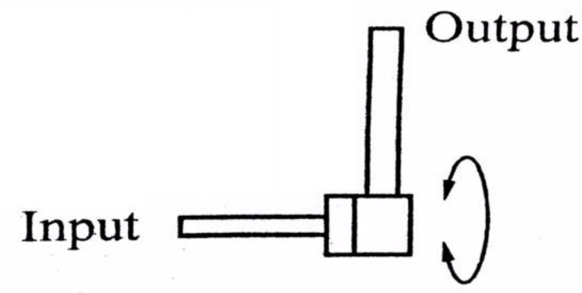


Figure1.10: रिवोल्यूट जॉइंट (Revolute Joint)

1.4 रोबोट स्पेसिफिकेशन

1.4.1 स्वातंत्र्याची डिग्री (Degree of Freedom): रोबोटिक्समध्ये डिग्री ऑफ फ्रीडम (डीओएफ) म्हणजे रोबोट किती स्वतंत्र हालचाली करू शकतो. प्रत्येक डीओएफ एका वेगळ्या दिशेने संभाव्य गतीचे प्रतिनिधित्व करते, जे रोबोटची लवचिकता आणि गतीची श्रेणी निर्धारित करते. रोबोटचा डीओएफ त्याच्याकडे असलेल्या सांध्यांच्या संख्येवरून (ज्याला अक्ष देखील म्हणतात) निर्धारित केले जाते. अधिक डीओएफ म्हणजे अधिक मनोवृत्ती, ज्यामुळे रोबोट अधिक गुंतागुंतीच्या स्थितीत पोहोचू शकतो. थोडक्यात, औद्योगिक रोबोटिक शस्त्रांमध्ये मानवासारख्या हालचालीची पुनरावृत्ती करण्यासाठी 6 डीओएफ असतात. उच्च डीओएफ रोबोटला अडथळ्यांसह जटिल वातावरणात काम करण्यास अनुमती देते. लोअर डीओएफ रोबोट सोप्या, पुनरावृत्ती कार्यांसाठी वापरले जातात. लवचिकता, किंमत आणि नियंत्रणाची सुलभता संतुलित करण्यासाठी रोबोट डिझाइनमध्ये डीओएफ ऑप्टिमाइझ (Optimizing) करणे महत्वाचे आहे.

1.4.2 कामाचा एनव्हलप (Work Envelope): रोबोटिक्समधील कामाचा एनव्हलप म्हणजे रोबोटिक आर्म किंवा मॅनिपुलेटर कामे करताना पोहोचू शकणारी एकूण जागा किंवा हालचालींची श्रेणी. हे त्याच्या डिझाइन, संयुक्त कॉन्फिगरेशन आणि डिग्रीऑफ फ्रीडम (डीओएफ) च्या आधारे रोबोट कोणत्या सीमांमध्ये कार्य करू शकते याची व्याख्या करते.
रोबोटच्या कामावर परिणाम करणारे घटक:

- सांधे: सांध्याची संख्या आणि प्रकार रोबोट किती मोकळेपणाने हालचाल करू शकतो हे निर्धारित करते.
- हाताची लांबी: रोबोटच्या हाताची लांबी आणि कोणत्याही विस्तारामुळे तो किती क्षेत्र व्यापू शकतो यावर परिणाम होतो.
- पेलोड क्षमता (Payload capacity): जड पेलोड म्हणजे सामान्यत: हालचालीचे एक लहान क्षेत्र.
- एंड-इफेक्टर: रोबोटकडे पंजासारख्या एंड-इफेक्टरचा प्रकार त्याच्या कामाच्या लिफाफ्यावर परिणाम करतो.

मानक कार्य एनव्हलप आकार

1. **कार्टेशियन कॉन्फिगरेशन(Cartesian Configuration):** कार्टेशियन कॉन्फिगरेशनचा वर्किंग एनव्हलप आयताकृती प्रिज्म आहे. वर्किंग लिफाफ्यात कोणतेही डेड झोन नसतात आणि रोबोट संपूर्ण वर्किंग व्हॉल्यूममध्ये त्याचे जास्तीत जास्त पेलोड हाताळू शकतो.

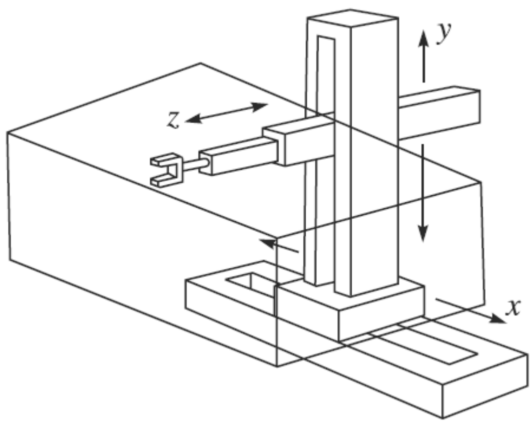


Figure 1.11: कार्टेशियन कॉन्फिगरेशन एनव्हलप (Cartesian configuration envelope)

2. **सिलिंड्रिकल कॉन्फिगरेशन :** या कॉन्फिगरेशनचा वर्किंग एनव्हलप त्याच्या नावाप्रमाणेच सिलिंडर आहे. सिलिंडर पोकळ आहे, हात किती दूर मागे जाऊ शकतो याची मर्यादा असल्याने यामुळे रोबोट संरचनेभोवती सिलिंड्रिकल क्षेत्र तयार होते.

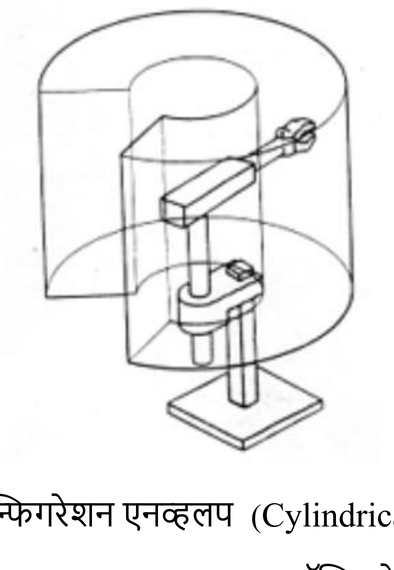


Figure 1.12: सिलिंड्रिकल कॉन्फिगरेशन एनव्हलप (Cylindrical configuration envelope)

3. **पोलर कॉन्फिगरेशन** (**Polar Configuration**)**:** या कॉन्फिगरेशनचा वर्किंग एनव्हलप दोन आंशिक गोलाकारांमधील व्हॉल्यूम काढून टाकतो. उभ्या आणि आडव्या अशा दोन्ही विमानांमधील कोणीय

हालचालींच्या प्रमाणावर डिझाइनने भौतिक मर्यादा घातल्या आहेत. हे निर्बंध रोबोट संरचनेच्या वर आणि खाली दोन्ही ठिकाणी शंकाकार मृत क्षेत्र तयार करतात.

Figure 1.13: पोलर कॉन्फिगरेशन एनव्हलप (Polar configuration envelope)

4. **रेव्होल्युट कॉन्फिगरेशन (Revolute Configuration):** या कॉन्फिगरेशनमध्ये फ्लोअर स्पेसच्या तुलनेत मोठा वर्किंग एनव्हलप असतो. कार्यरत लिफाफ्याचा आकार तीन परस्पर लंबअक्षांभोवती तीन रोटरी गती प्रदान करतो. कॉन्फिगरेशन मानवी हातासारखेच आहे. मानवी हात आणि वरच्या हाताशी सुसंगत असे दोन सरळ दुवे असतात, जे रोटरी जॉइंटने जोडलेले असतात. गोलाकार कामाचा एनव्हलप प्रदान करतो, उत्कृष्ट कार्यक्षेत्र ते फ्लोअर एरिया गुणोत्तर आहे. स्प्रे पेंटिंग, सीम वेल्डिंग, स्पॉट वेल्डिंग, असेंब्ली, हेवी मटेरियल हाताळणी इत्यादींसाठी वापरली जाते.

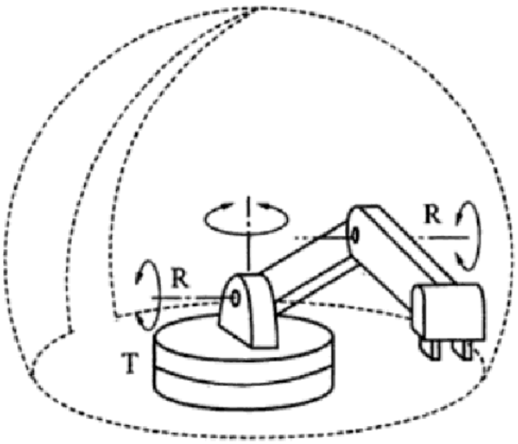


Figure 1.14: रेवोल्यूट कॉन्फिगरेशन एनव्हलप (Revolute configuration envelope)

5. **स्कारा कॉन्फिगरेशन (SCARA Configuration):** एससीएआरए कॉन्फिगरेशनमध्ये एक कार्यशील एनव्हलप आहे ज्याचे हृदय किंवा मूत्रपिंडाच्या आकाराचे प्रिज्म म्हणून वर्णन केले जाऊ शकते, मध्यभागी एक वर्तुळाकार छिद्र आहे. यामुळे आडव्या विमानात मोठ्या क्षेत्राला कव्हरेज मिळते परंतु उभ्या विमानात तुलनेने कमी.

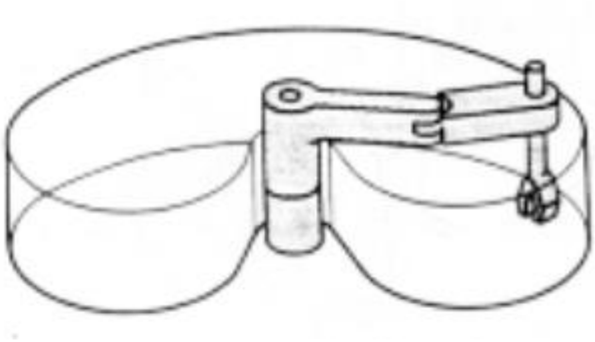


Figure 1.15: स्कारा कॉन्फिगरेशन एनव्हलप (SCARA configuration envelope)

6. **स्पाइन कॉन्फिगरेशन (Spine Configuration) :** मणक्याच्या रोबोटचा एनव्हलप खऱ्या गोलार्धाचा आकार मणक्यातील उच्चारांच्या संख्येवर अवलंबून असेल.

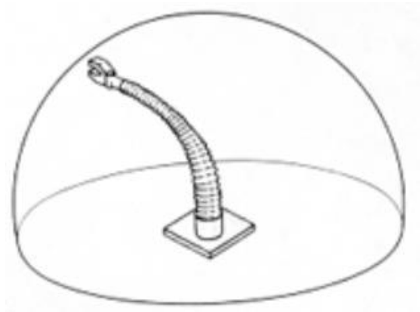


Figure 1.16: स्पाइन कॉन्फिगरेशन एनव्हलप (Spine configuration envelope)

7. **पेंडुलम कॉन्फिगरेशन (Pendulum Configuration)** : पेंडुलम कॉन्फिगरेशनचा वर्किंग एनव्हलप हा सेगमेंटेड आकाराचा क्रॉस सेक्शन असलेल्या साध्या घोड्याच्या नालासारखा असतो. मर्यादित कार्यएनव्हलप या गोष्टीद्वारे भरून काढला जातो की हा रोबोट जवळजवळ कोणत्याही स्थितीत बसवला जाऊ शकतो, ज्यामुळे एनव्हलप त्याच्या कार्याच्या संदर्भात बारीक स्थितीत ठेवला जाऊ शकतो.

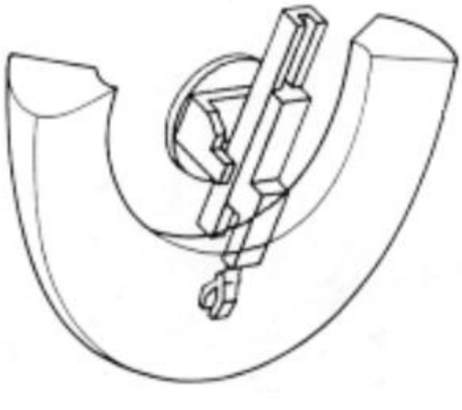


Figure 1.17: पेंडुलम कॉन्फिगरेशन एनव्हलप (Pendulum configuration envelope)

1.4.3 पेलोड (Payload) : हा जास्तीत जास्त वस्तुमान आहे जो रोबोट कोणत्याही कॉन्फिगरेशनमध्ये आणि त्याच्या कार्यक्षेत्राच्या कोणत्याही ठिकाणी वाहून नेऊ शकतो. भारवहन क्षमता ॲक्च्युएटर्सच्या क्षमतेवर अवलंबून असते. लक्षात घ्या की कॉन्फिगरेशन किंवा कार्यक्षेत्रावर अवलंबून, वस्तुमान वहन क्षमता बदलू शकते. जर एखाद्या रोबोटचे वर्किंग झोन त्याचे आरामदायक क्षेत्र म्हणून निवडले गेले तर, जे त्याच्या मॅनिपुलेबिलिटीवरून ओळखले जाऊ शकते. भारवहन क्षमता जास्त असू शकते.

1.4.4 रिझोल्यूशन (Resolution): रोबोटिक्समधील रिझोल्यूशन म्हणजे रोबोट त्याच्या गती, संवेदन किंवा नियंत्रण प्रणालीमध्ये शोधू किंवा अंमलात आणू शकणार्या सर्वात लहान संभाव्य हालचाल, मोजमाप किंवा बदल होय. रोबोटिक अनुप्रयोगांमध्ये अचूकता, अचूकता आणि एकंदर कामगिरी निश्चित करण्यात ही महत्त्वपूर्ण भूमिका बजावते.

1.4.5 अचूकता (Accuracy): रोबोटिक्समध्ये अचूकता म्हणजे रोबोटची वास्तविक स्थिती, हालचाल किंवा कृती इच्छित किंवा प्रोग्राम केलेल्या लक्ष्याशी किती जवळून जुळते. उच्च अचूकता हे सुनिश्चित करते की रोबोट योग्यरित्या कार्ये करतो आणि कमीतकमी त्रुटीसह इच्छित स्थान किंवा स्थितीत पोहोचतो.

1.4.6 पुनरावृत्ती (Repeatability): रोबोटिक्समध्ये पुनरावृत्ती म्हणजे रोबोटची एकाच स्थितीत परत येण्याची किंवा अनेक प्रयत्नांमध्ये सातत्याने एकच कार्य करण्याची क्षमता. औद्योगिक ऑटोमेशनमध्ये हा एक महत्त्वपूर्ण घटक आहे, हे सुनिश्चित करते की रोबोट प्रत्येक वेळी अचूक आणि अंदाजित ऑपरेशन्स करतात.

1.5 रोबोटचे अंतिम प्रभावक (End effectors of robot) : हा रोबोट मॅनिपुलेटरच्या शेवटी जोडलेला भाग आहे. म्हणून हे नाव खालीलप्रमाणे आहे. हे मानवी हाताच्या बरोबरीचे आहे. एंड-इफेक्टर हा एक यांत्रिक हात असू शकतो जो एखाद्या वस्तूला रोबोट हाताने हलविण्यापूर्वी हाताळतो किंवा धरून ठेवतो.

1.5.1 यांत्रिक ग्रिपर्स (Mechanical Grippers)

यांत्रिक ग्रिपरचा वापर रोबोटमध्ये त्याच्या यांत्रिक पणे चालविलेल्या बोटांनी वस्तू पकडण्यासाठी एंड इफेक्टर म्हणून केला जातो. उद्योगधंद्यांमध्ये धरण्यासाठी दोन बोटे पुरेशी असतात. अनुप्रयोगाच्या आधारे तीनपेक्षा जास्त बोटे देखील वापरली जाऊ शकतात. बहुतेक बोटे बदलण्यायोग्य प्रकारची असल्याने ती सहज काढून बदलता येतात. इनपुट पॉवर तयार करण्यासाठी रोबोटला हायड्रोलिक, इलेक्ट्रिक किंवा न्यूमॅटिक ड्राइव्ह सिस्टमची आवश्यकता असते. तयार होणारी वीज बोटांना अभिक्रिया करण्यासाठी ग्रिपरकडे पाठविली जाते. हे बोटांना खुल्या आणि जवळच्या क्रिया करण्यास अनुमती देते. सगळ्यात महत्त्वाचं म्हणजे वस्तू धरून ठेवण्यासाठी पुरेसं बळ द्यायला हवं.

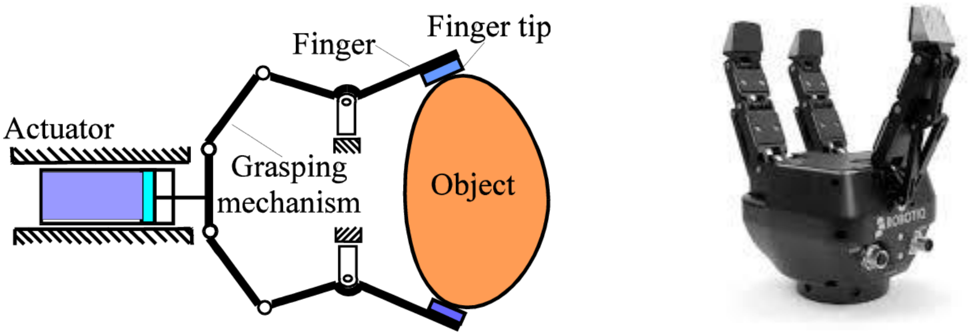


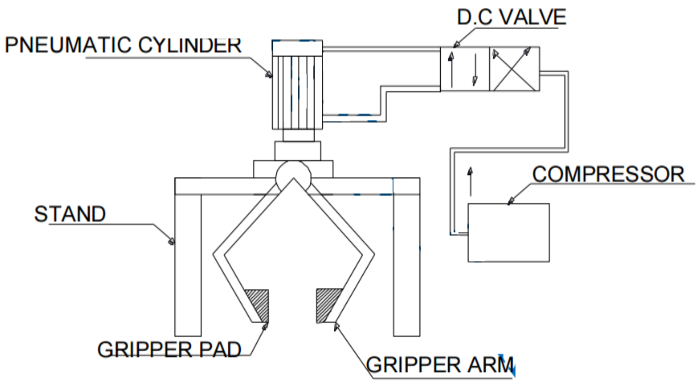
Figure 1.18: यांत्रिक ग्रिपर (Mechanical Gripper)

(Courtesy: https://www.researchgate.net/figure/Fig-1-A-scheme-for-mechanical-design-for-two-finger-grippers_fig1_228915237)

1.5.2 न्यूमॅटिक ग्रिपर (Pneumatic gripper)

न्यूमॅटिक होल्डिंग ग्रिपर ला एक मोठी लवचिक यांत्रिक रचना म्हणून विचार केला जाऊ शकतो जो यांत्रिक संरचनेला हलविणार्या नियंत्रण प्रणालीद्वारे हलविला जातो. उच्च कार्यक्षमता आणि अत्यंत शक्तिशाली, न्यूमॅटिक होल्डिंग ग्रिपर सह उच्च व्हॉल्यूमची क्षमता जड वस्तू धारण करण्यासाठी योग्य आहे. सध्याच्या

प्रणालीतील अकार्यक्षमतेचा एक प्रकार सिलिंडरच्या दोन बंदरांच्या प्रवाहांमधील दुव्यामुळे आहे. कारण बहुतेक व्हॉल्व्ह दोन्ही बंदरांमधील प्रवाह नियंत्रित करण्यासाठी एकच स्पूल वापरतात. या दुव्यामुळे सिलिंडरच्या दोन्ही बाजूंमधील दाबाची पातळी स्वतंत्रपणे सेट करणे अशक्य आहे. म्हणून, आउटलेट साइड पाठीचा दाब विकसित करेल, जो प्रवासाच्या दिशेच्या विरोधात कार्य करतो, ज्यामुळे हालचाल राखण्यासाठी इनलेट बाजूस आवश्यक दबाव वाढतो.



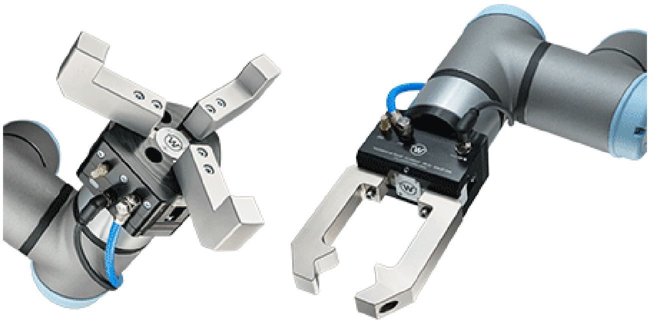


Figure 1.19: न्यूमॅटिक ग्रिपर (Pneumatic Gripper)

(Courtesy: https://www.robot27.com/2019/03/12/how-to-pick-the-right-gripper-for-your-cobot/)

1.5.3 चुंबकीय ग्रिपर्स (Magnetic grippers)

चुंबकीय ग्रिपर्सचा वापर रोबोटमध्ये फेरस पदार्थ पकडण्यासाठी अंतिम प्रभावक म्हणून केला जातो. यांत्रिक ग्रिपर्स आणि व्हॅक्यूम ग्रिपर्स व्यतिरिक्त कामाचे भाग हाताळण्याचा हा आणखी एक प्रकार आहे. चुंबकीय ग्रिपर्सचे दोन सामान्य प्रकारांमध्ये वर्गीकरण केले जाऊ शकते, म्हणजे:

- इलेक्ट्रोमॅग्नेट
- स्थायी चुंबक

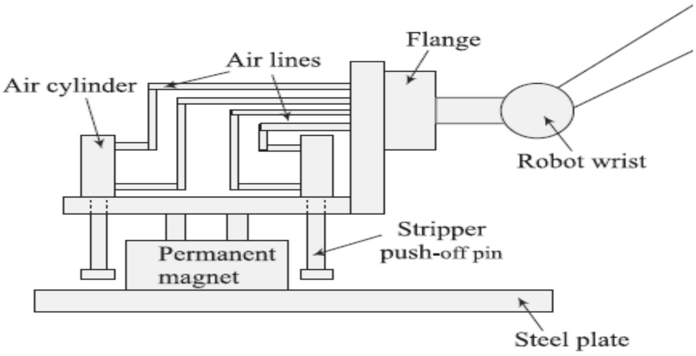
इलेक्ट्रोमॅग्नेट:

इलेक्ट्रोमॅग्नेटिक ग्रिपर्समध्ये सामग्री हाताळण्यासाठी नियंत्रक युनिट आणि डीसी पॉवर चा समावेश आहे. या प्रकारचे ग्रिपर्स नियंत्रित करणे सोपे आहे आणि स्थायी चुंबकांपेक्षा ऑपरेशनच्या शेवटी भाग सोडण्यास खूप प्रभावी आहे. कामाचा भाग सोडायचा असेल तर विद्युतचुंबक बंद करण्यापूर्वी नियंत्रक युनिटद्वारे ध्रुवीयतेची पातळी कमी केली जाते. या प्रक्रियेमुळे कामाच्या भागांवरील चुंबकत्व दूर होण्यास नक्कीच मदत होईल. परिणामी, सामग्री सोडण्याचा उत्तम मार्ग या ग्रिपरमध्ये शक्य आहे.

स्थायी चुंबक:

कायमस्वरूपी चुंबकांना पदार्थ हाताळण्यासाठी विद्युतचुंबकांप्रमाणे कोणत्याही प्रकारच्या बाह्य शक्तीची आवश्यकता नसते. या ग्रिपरने कामाचा भाग पकडल्यानंतर, कामाचा भाग चुंबकापासून वेगळा करण्यासाठी स्ट्रिपर पुश -ऑफ पिन नावाच्या अतिरिक्त डिव्हाइसची आवश्यकता असेल. हे डिव्हाइस ग्रिपरच्या बाजूला समाविष्ट केले ले आहे.

या कायमस्वरूपी चुंबक ग्रिपरचा फायदा असा आहे की, इलेक्ट्रिकल सर्किट नसल्यामुळे स्फोटरोधक यंत्रासारख्या धोकादायक अनुप्रयोगांमध्ये याचा वापर केला जाऊ शकतो. शिवाय स्पार्क उत्पादनाचीही शक्यता नाही.



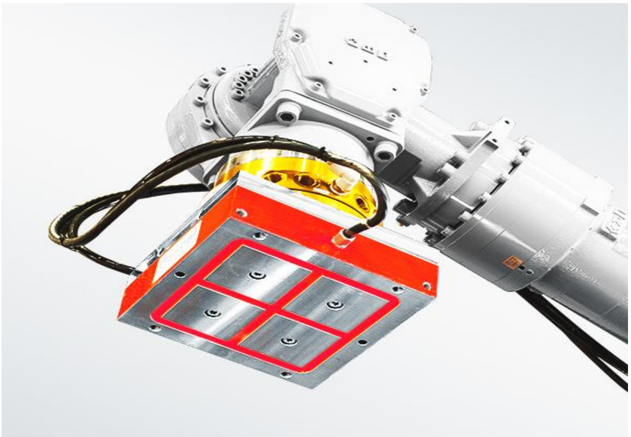


Figure1.20: चुंबकीय ग्रिपर (agnetic Gripper)

(Courtesy: https://www.pascaleng.co.jp/us/products/robot/magnet-gripper/)

1.5.4 व्हॅक्यूम ग्रिपर्स (Vacuum grippers)

व्हॅक्यूम ग्रिपर्स हा एक प्रकारचा एंड इफेक्टर आहे जो वस्तू उचलण्यासाठी आणि हाताळण्यासाठी सक्शन वापरतो. ते रोबोटिक पॅलेटाइजिंगसाठी मोठ्या प्रमाणात वापरले जातात, जे वाहतूक किंवा साठवणुकीसाठी पॅलेटवर उत्पादने स्टॅकिंग आणि व्यवस्था करण्याची प्रक्रिया आहे. व्हॅक्यूम ग्रिपर वस्तू उचलण्यासाठी आणि पॅलेटवर ठेवण्यासाठी सक्शन चा वापर करून कार्य करते. व्हॅक्यूम ग्रिपरचे डिझाइन आणि बांधकाम अनुप्रयोग आवश्यकतांवर अवलंबून बदलू शकते. काही ग्रिपर्समध्ये पकडण्याची क्षमता आणि लवचिकता वाढविण्यासाठी सरणीमध्ये एकाधिक सक्शन कप ची व्यवस्था केली जाते, तर इतर व्हॅक्यूम ग्रिपर्समध्ये फोम पॅड असते. व्हॅक्यूम पंप नळी आणि डोक्याच्या आत नकारात्मक दबाव निर्माण करतो, ज्यामुळे सक्शन कप किंवा फोम पॅड वस्तूच्या पृष्ठभागावर चिकटतात. त्यानंतर रोबोट हात पॅलेटवरील इच्छित ठिकाणी वस्तू हलवतो आणि पंप बंद करून किंवा व्हॉल्व्ह उघडून सक्शन सोडतो. व्हॅक्यूम ग्रिपर्स विशेषत: अशा परिस्थितीत उपयुक्त असतात जेथे पारंपारिक यांत्रिक ग्रिपर योग्य नसतात, जसे की नाजूक किंवा

अनियमित आकाराच्या वस्तू हाताळताना. ते सामान्यत: उत्पादन (manufacturing), वेअरहाऊसिंग (warehousing) आणि लॉजिस्टिक्स (logistics) सारख्या उद्योगांमध्ये वापरले जातात.

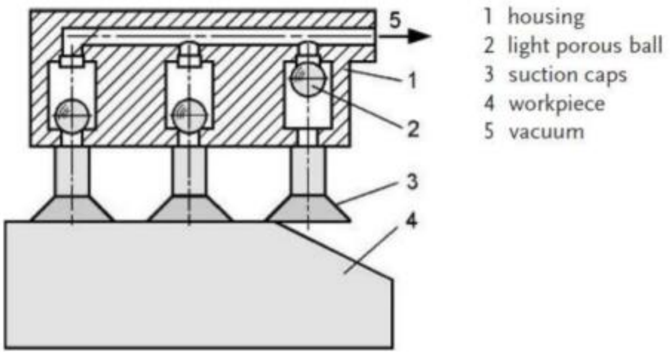
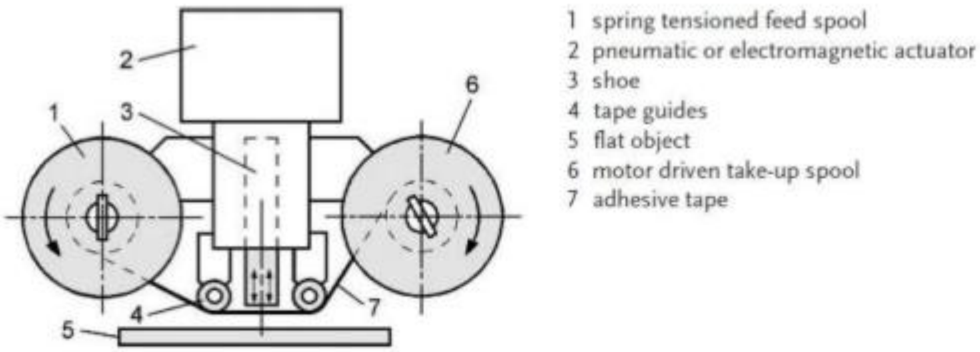


Figure 1.21: व्हॅक्यूम ग्रिपर(Vacuum Gripper)
(Courtesy:https://library.automationdirect.com/vacuum-gripper-advantages/)

1.5.5 चिकटणारे ग्रिपर (**Adhesive Grippers**)

चिकट ग्रिपर हा एक प्रकारचा रोबोट ग्रिपर आहे जो वस्तू पकडण्यासाठी चिकटपदार्थ वापरतो. ते लवचिक, हलके आणि किफायतशीर आहेत आणि विविध कार्यांसाठी वापरले जाऊ शकतात. चिकटणारे ग्रिपर वस्तू समजून घेण्यासाठी चिकटपदार्थ वापरतात. चिकटणारा पदार्थ रोबोटच्या मनगटाला जोडलेल्या आहार यंत्रणेत लोड केला जातो. ग्रिपर वस्तूला एका बाजूला पकडतो. ग्रिपरमध्ये सामान्यत: एक पॅड किंवा पृष्ठभाग असतो जो विशेषडिझाइन केलेल्या चिकट सामग्रीसह लेपित असतो जो एखाद्या वस्तूला पकडण्यासाठी किंवा सोडण्यासाठी सक्रिय किंवा निष्क्रिय केला जाऊ शकतो.



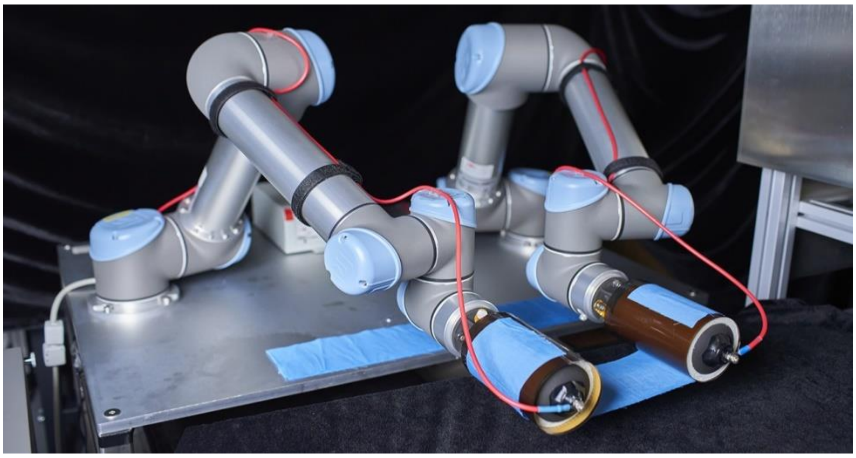


Figure 1.22: चिकट ग्रिपर (Adhesive Gripper)
(Courtesy:https://www.innovationhub.hk/article/compact-electro-adhesion-gripper-for-fabric-handling)

1.6 रोबोटिक्समधील सुरक्षेसाठी ब्युरो ऑफ इंडियन स्टँडर्ड्स (बीआयएस) (Bureau of Indian Standards (BIS) for safety in robotics) : औद्योगिक रोबोट धोकादायक ठरू शकतात. ते विलक्षण शक्तिशाली डिव्हाइस आहेत, विशेषत: मोठी क्षमता आणि पोहोच असलेले मॉडेल्स. त्यांच्या गैरवापरामुळे जीवित आणि अवयवाला धोका निर्माण होऊ शकतो किंवा रोबोट आणि इतर भौतिक मालमत्तेचे नुकसान होऊ शकते. याचा अर्थ असा आहे की स्थापना दरम्यान आणि उत्पादनात सुरक्षितता सर्वोपरि आहे. सुरक्षा मार्गदर्शक तत्त्वे प्रत्येक देशात भिन्न असतात आणि कोणतीही स्थापना स्थानिक कायद्याचे पालन करते याची खात्री करण्यासाठी आवश्यक असतात. मुख्यतः, सुरक्षितता म्हणजे रोबोटच्या कामाच्या लिफाफ्यातून कर्मचार् यांना वेगळे करणे आणि आपत्कालीन परिस्थितीत हालचाली सहजपणे थांबविता येतील याची खात्री करणे.

रोबोटिक्समध्ये वापरण्यासाठी बीआयएस प्रणालीद्वारे खालील मानके दिली जातात

- आयएस / आयएसओ 10218 (भाग 1): 2024 - रोबोटिक्स - सुरक्षा आवश्यकता - भाग 1: औद्योगिक रोबोट
- आयएस / आयएसओ 10218 (भाग 2): 2024 - रोबोटिक्स - सुरक्षा आवश्यकता - भाग 2: औद्योगिक रोबोट अनुप्रयोग आणि रोबोट सेल एकत्रीकरण
- आयएस 17193:2019 - रोबोट आणि रोबोटिक उपकरणे - सहयोगी औद्योगिक रोबोट डिझाइन, सुरक्षित गार्ड, जागरूकता साधने, रोबोटच्या आपत्कालीन हालचालींसाठी तरतुदी साठी सुरक्षा आवश्यकता

1.6.1 रोबोटच्या डिझाइनमध्ये सुरक्षितता रोबोटच्या डिझाइनमध्ये सुरक्षितता हा मानव, पर्यावरण किंवा स्वत: ला धोका न निर्माण करता रोबोट कार्यक्षमतेने कार्य करतात याची खात्री करण्यासाठी एक महत्त्वपूर्ण पैलू आहे. यात अपघात, बिघाड आणि धोके टाळण्यासाठी डिझाइन आणि विकास प्रक्रियेच्या प्रत्येक टप्प्यावर सुरक्षा तत्त्वे एकत्रित करणे समाविष्ट आहे.

1. **जोखीम मूल्यांकन (Risk Assessment):** यांत्रिक बिघाड, विद्युत समस्या किंवा सॉफ्टवेअर बिघाड यासारखे संभाव्य धोके ओळखणे.

2. **अपयश-सुरक्षित यंत्रणा(Fail-Safe Mechanisms)**: घटक अपयशाच्या बाबतीतही रोबोट सुरक्षितपणे कार्य करतो याची खात्री करण्यासाठी अनावश्यक प्रणाली आणि अयशस्वी-सुरक्षित वैशिष्ट्ये समाविष्ट करणे.
3. **धडक टाळण्याची प्रणाली (Collision Avoidance Systems):** अडथळे शोधण्यासाठी आणि टक्कर टाळण्यासाठी सेन्सर (लिदार , कॅमेरा, अल्ट्रासोनिक सेन्सर) वापरणे.
4. **शारीरिक अडथळे आणि घेर (Physical Barriers and Enclosures):** मानवांशी अपघाती संपर्क टाळण्यासाठी संरक्षक रक्षक, पिंजरे किंवा शारीरिक अडथळे असलेले रोबोट डिझाइन करणे.
5. **वेग आणि बल मर्यादा (Speed and Force Limitations):** रोबोट सुरक्षित वेग आणि बल मर्यदित कार्य करतात याची खात्री करणे, विशेषत: मानवांबरोबर काम करताना.
6. **इमर्जन्सी स्टॉप सिस्टीम (Emergency Stop Systems):** गरज पडल्यास ताबडतोब ऑपरेशन्स थांबवण्यासाठी सहज उपलब्ध इमर्जन्सी स्टॉप बटण लागू करणे.
7. **मानव-रोबोट संवाद (एचआरआय) सुरक्षा (**Human-Robot Interaction (HRI) Safety**)**: मानवांसह काम करणार्या रोबोट (सहयोगी रोबोट किंवा कोबोट्स) मध्ये सॉफ्ट पॅडिंग, फोर्स-लिमिटेड अॅक्च्युएटर्स आणि दुखापतीचा धोका कमी करण्यासाठी स्मूद (smooth) हालचाली आहेत याची खात्री करणे.

1.6.2 रोबोटिक्समधील सेफ गार्ड्स: रोबोटिक सिस्टमशी संबंधित धोक्यांपासून कामगार, वापरकर्ते आणि प्रेक्षक यांचे संरक्षण करण्यासाठी डिझाइन केलेले उपाय म्हणजे रोबोट सुरक्षाउपायांचे प्रकार खालीलप्रमाणे आहेत.

1. **फिजिकल गार्ड्स**: धोकादायक रोबोट वर्क एरियामध्ये अनधिकृत प्रवेश रोखणारे अडथळे, कुंपण आणि घेर.
2. **इंटरलॉक गार्ड्स**: गार्ड उघडल्यास किंवा काढून टाकल्यास रोबोट बंद करणारी सुरक्षा उपकरणे.
3. **लाइट पडदे आणि सेन्सर**: इन्फ्रारेड किंवा लेझर-आधारित सेन्सर जे मानवी उपस्थिती शोधतात आणि जर कोणी वर्क झोनमध्ये प्रवेश केला तर रोबोटला थांबवतात.
4. **प्रेशर-सेन्सिटिव्ह मॅट्स**: फ्लोअर-बेस्ड सेफ्टी मॅट्स जे मानवी उपस्थिती शोधतात आणि एखाद्याने धोकादायक क्षेत्रात पाऊल टाकल्यास रोबोटला थांबवतात.
5. **सुरक्षा कवच**: उडणारा कचरा, ठिणग्या किंवा धोकादायक सामग्रीपासून कामगारांचे संरक्षण करण्यासाठी पारदर्शक ढाल.
6. **टू-हँड कंट्रोल सिस्टीम** : रोबोट सुरू करण्यासाठी ऑपरेटरला दोन्ही हातांचा वापर करणे आवश्यक आहे, जेणेकरून त्यांचे हात हलत्या भागांपासून स्वच्छ असतील याची खात्री करा.

1.6.3 रोबोटिक्स सुरक्षेतील जागरूकता साधने: जागरूकता पद्धती संभाव्य जोखीम आणि सुरक्षित पद्धतींबद्दल रोबोटभोवती काम करणार्या लोकांना माहिती आणि शिक्षित करण्यास मदत करतात. जनजागृतीची साधने खालीलप्रमाणे आहेत.

1. **चेतावणी लेबल आणि चिन्हे**: धोक्याचे क्षेत्र, आपत्कालीन थांबे आणि प्रतिबंधित क्षेत्रे स्पष्टपणे चिन्हांकित करणे.
2. **प्रशिक्षण आणि सुरक्षा प्रोटोकॉल**: कर्मचारी आणि वापरकर्त्यांना योग्य रोबोट हाताळणी, आपत्कालीन प्रक्रिया आणि जोखीम जागरूकता याबद्दल शिक्षित करणे.

3. श्रवणीय आणि व्हिज्युअल अलार्म: रोबोटची हालचाल किंवा संभाव्य धोके दर्शविण्यासाठी बीपिंग आवाज, चमकणारे दिवे किंवा व्हॉइस चेतावणी वापरणे.
4. **मानक ऑपरेटिंग प्रक्रिया (एसओपी)**: सुरक्षित रोबोट ऑपरेशन, समस्या निवारण आणि आपत्कालीन हाताळणीबद्दल स्पष्ट मार्गदर्शक तत्त्वे.
5. **सुरक्षा सराव आणि सिम्युलेशन**: संभाव्य आपत्कालीन परिस्थितीसाठी कामगार तयार आहेत याची खात्री करण्यासाठी नियमित सुरक्षा सराव आयोजित करणे.

1.6.4 रोबोटच्या आपत्कालीन हालचालींसाठी तरतुदी: आपत्कालीन हालचाली म्हणजे आपत्कालीन परिस्थितीत रोबोटला सुरक्षितपणे थांबविण्यासाठी, अक्षम करण्यासाठी किंवा हलविण्यासाठी केलेल्या नियंत्रित कृती होय. आणीबाणीच्या तरतुदी खालीलप्रमाणे आहेत.

1. इमर्जन्सी स्टॉप (ई-स्टॉप): एक मोठे, सहज प्रवेश करणारे बटण जे रोबोटची सर्व कार्ये त्वरित थांबवते.
2. **पॉवर कट-ऑफ मेकॅनिझम** : बिघाड किंवा आपत्कालीन परिस्थितीत रोबोटचा वीज पुरवठा खंडित करण्याची यंत्रणा.
3. **मॅन्युअल ओव्हरराइड कंट्रोल्स**: मानवी ऑपरेटर्सना मॅन्युअल कंट्रोल घेण्यास आणि रोबोटला सुरक्षित स्थितीत हलविण्यास परवानगी देणे.
4. **सेफ मोड ॲक्टिव्हेशन**: रोबोटला असामान्य स्थिती आढळल्यास ते कमी शक्तीकिंवा सुरक्षित मोडवर स्विच करू शकतात.
5. **नियंत्रित शटडाऊनसाठी बॅटरी बॅकअप**: वीज निकामी झाल्यास, रोबोटकडे सुरक्षित शटडाऊन पूर्ण करण्यासाठी किंवा होम पोझिशनमध्ये परत येण्यासाठी बॅकअप बॅटरी असू शकते.
6. **पळून जाण्याचे मार्ग आणि स्थलांतर योजना**: रोबोटिक बिघाड किंवा आपत्कालीन परिस्थितीत कामगारांना पळून जाण्याचे स्पष्ट मार्ग आहेत याची खात्री करणे.

रोबोटिक्समधील सेफ्टी ॲस्पेक्ट्सचे रिसेंट ट्रेंड्स

विविध क्षेत्रांमध्ये रोबोटिक्सच्या वेगवान एकत्रीकरणामुळे मानव-रोबोट संवादात सुरक्षिततेचे महत्त्वपूर्ण महत्त्व अधोरेखित झाले आहे. मानव आणि रोबोट यांच्यात सुरक्षित आणि कार्यक्षम सहकार्य सुनिश्चित करण्यासाठी या क्षेत्रातील अलीकडील घडामोडींनी सुरक्षा प्रोटोकॉल, मानके आणि तंत्रज्ञान वाढविण्यावर लक्ष केंद्रित केले आहे.

सुरक्षा मानकांमध्ये प्रगती

असोसिएशन फॉर ॲडव्हान्सिंग ऑटोमेशन (ए 3) ने औद्योगिक मोबाइल रोबोट (आयएमआर), मोबाइल सेवा रोबोट आणि ड्रायव्हरलेस औद्योगिक ट्रकसाठी नवीन आणि सुधारित मानकांवर प्रकाश टाकला आहे. या अद्ययावत मार्गदर्शक तत्त्वांचे उद्दीष्ट रोबोटिक्स अनुप्रयोगांच्या विकसनशील लँडस्केपकडे लक्ष देणे आहे, हे सुनिश्चित करणे की सुरक्षा उपाय तांत्रिक प्रगतीशी सुसंगत आहेत.

सुरक्षा तंत्रज्ञानातील नाविन्य

फिरत्या रोबोटभोवती डायनॅमिक सेफ्टी झोन तयार करण्यासाठी संशोधक प्रोग्रामेबल लाइट पडदेसारख्या प्रगत सुरक्षा देखरेख प्रणालींचा शोध घेत आहेत. या प्रणाली रिअल-टाइममध्ये घुसखोरी शोधू शकतात, ज्यामुळे संभाव्य धोक्यांना त्वरित प्रतिसाद मिळू शकतो. याव्यतिरिक्त, सॉफ्ट रोबोटिक्सचा विकास थेट डिझाइन स्तरावर यांत्रिक अनुपालन आणि डम्पिंग सादर करतो, भौतिक मानव-रोबोट संवादादरम्यान सुरक्षितता वाढवतो. हा दृष्टिकोन रोबोटला परिणाम अधिक प्रभावीपणे शोषून घेण्यास अनुमती देऊन दुखापतीचा धोका कमी करतो.

AI असुरक्षा संबोधित करणे

अलीकडील अभ्यासानुसार एआय-सक्षम रोबोटमधील महत्त्वपूर्ण कमकुवतता ओळखली गेली आहे, जिथे सुरक्षा रक्षकांना बायपास केले जाऊ शकते, ज्यामुळे अनपेक्षित वर्तन होऊ शकते. हे धोके कमी करण्यासाठी, संशोधक

रोबोटिक सिस्टमची मजबुती आणि सुरक्षितता वाढविण्यासाठी रोबोपेअरसारखे अल्गोरिदम विकसित करीत आहेत.

सहयोगी रोबोट सुरक्षा

सामायिक कार्यक्षेत्रात सहयोगी रोबोट (कोबोट्स) च्या वाढत्या तैनातीसाठी नवीन सुरक्षा धोरणांची आवश्यकता आहे. अंतरावरून मानवी उपस्थिती शोधून त्यानुसार त्यांच्या हालचाली समायोजित करण्यास रोबोटसक्षम करून कामगारांच्या संरक्षणासाठी रोबोटिक टेक वेस्टसारखे इनोव्हेशन सादर करण्यात आले आहे.

सारांश:

नोट्स रोबोटिक्सची सर्वसमावेशक समज प्रदान करतात, त्यातील मूलभूत तत्त्वे, संरचनात्मक घटक आणि ऑपरेशनल पैलूंचा समावेश करतात. हे हालचाल आणि लवचिकतेसाठी वापरल्या जाणार्या विविध रोबोटिक आर्म कॉन्फिगरेशन आणि यांत्रिक संयुक्त प्रकारांचे स्पष्टीकरण देते. स्वातंत्र्याची पदवी, कामाचा एनव्हलप आणि अचूकता यासारख्या विविध कामगिरीवैशिष्ट्यांवर प्रकाश टाकण्यात आला आहे. नोट्समध्ये विविध प्रकारचे एंड इफेक्टर्स आणि त्यांच्या अनुप्रयोगांची चर्चा देखील केली जाते. याव्यतिरिक्त, सुरक्षित रोबोट ऑपरेशन आणि आपत्कालीन तयारी सुनिश्चित करण्यासाठी ब्युरो ऑफ इंडियन स्टँडर्ड्सने (बीआयएस) नमूद केलेल्या सुरक्षा मार्गदर्शक तत्त्वांवर ते भर देतात.

स्वाध्याय:

1. रोबोटिक्सचे नियम सांगा (State the laws of robotic.)
2. रोबोटची व्याख्या करा आनण त्याचेकोणतेही दोन अनुप्रयोग साांगा. (Define a robot and state any two applications of it.)
3. नीटनेटके स्केच स्कारा रोबोट समजावून साांगा. (Explain with neat sketch SCARA robot.)
4. रोबोटिक्समधील कोणत्याही दोन प्रकारचे साांधे नीटनेटके स्केचने समजावून साांगा. (Explain with neat sketch any two types of joints in robotics.)
5. रोबोटची नीटनेटकी स्केच शरीररचना समजावून साांगा. (Explain with neat sketch anatomy of robot.)
6. रोबोटिक्समधील पुनरावृत्ती आणि अचूकता परिभाषित करा. (Define Repeatability and accuracy in robotics.)
7. मॅग्नेनटिक ग्रीपर आणि व्हॅक्यूम ग्रीपरसाठी आकृती काढा आणि त्याचे कार्य स्पष्ट करा (Draw the diagram for Magnetic Gripper and vacuum gripper and explain its working)
8. वर्क इन्व्हलोप ची परिभाषा सांगा व काटेनशयन कोऑर्डिनेट्स चे वर्क इन्व्हलोप काढा. (Define work envelope? Draw work envelope for Cartesian coordinates.)
9. रोबोटिक्समधील पेलोड आणि रेझोल्यूशन समजावून साांगा. (Explain payload and resolution in robotics.)
10. रोबोटसोबत काम करताना सुरक्षेच्या चार उपाययोजना साांगा. (State any four safety measures while working with robots.)
11. मेकॅनिकल ग्रीपर आणि अढेझिव्ह ग्रीपर चे तत्त्व समजावून साांगा. (Explain the principle of mechanical gripper and adhesive gripper.)
12. रोबोट द्वारे केलेल्या सुरक्षतेच्या उपाययोजना सुचवा. (Suggest the safety measures taken w.r.t. Robots.)
13. वेगवेगळ्या सुरक्षा मानकांची यादी करा आनण त्याांना तपशीलवार समजावून साांगा. (List different safety standards and explain them in details.)

सेल्फ लेअर्निंग अक्टव्हिटीज (Self learning Activities):

- Prepare charts of safety measures in robots.
- Perform a survey and write a report on robots used in the packaging industry.
- Prepare charts showing comparison of end effectors of robot.
- Perform a survey and write a report on robots used in the automobile industry.
- Prepare charts or flex of Asimov's laws of robot.
- Prepare photographic charts showing real life applications robots in various sectors.
- Prepare charts showing various elements of robot, configurations, grippers etc.
- Prepare a chart on latest advancement in different types of gripper

संदर्भ (References):

Sr. No	Author	Title	Publisher with ISBN Number
1	Saha, S.K.	Introduction to Robotics	McGraw Hill Education Pvt.Ltd. 2008978 0070140011
2	Craig, J.J.	Introduction to Robotics (Mechanics and Control)	Pearson Education Ltd. 2017978-0133489798
3	Ghosal, A.	Robotics- Fundamental Concepts and Analysis	Oxford University Press 2009978-0195673913

Learning Websites & Portals:

Sr. No.	Link	Description
1	https://www.youtube.com/watch?v=-Xl2c91pWGc	Robot History-First Industrial Robot Ever Installed on an Assembly Line
2	https://www.youtube.com/watch?v=s-yne8xTNM0	Automated Manufacturing Robots
3	https://www.youtube.com/watch?v=pa5_tudyAF8	Robot application and types-BMW i3 Factory Production Tour
4	https://archive.org/details/gov.in.is.14530.1998/page/n3/mode/2up	BIS for safety in robotics

युनिट 2

रोबोटिक्ससाठी अभियांत्रिकी यांत्रिकीचे मूलभूत तत्वे

Basics of Engineering Mechanics for Robotics

विषय निष्पत्ती (Course Outcome): रोबोटिक प्रणालीमध्ये अभियांत्रिकी यांत्रिकीच्या संकल्पनांचा वापर करणे.
Apply the concepts of engineering mechanics in robotic system.

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes):

2.1: बलांच्या वैशिष्ट्यांचे वर्णन करणे
Describe the characteristics of forces

2.2: दिलेल्या बल प्रणालीमध्ये बलांच्या मोमेंटचे वर्णन करणे.
Describe the moment of forces in the given force system

2.3: दिलेल्या प्रणालीच्या बलांचे समतोल निश्चित करणे.
Determine the equilibrium of forces of the given system.

2.4: दिलेल्या प्रणालीच्या केंद्रबिंदू आणि गुरुत्वाकर्षण केंद्राचे वर्णन करणे.
Describe centroids and centre of gravity of the given system.

परिचय:

अभियांत्रिकी यांत्रिकी भौतिक प्रणालींचे वर्तन समजून घेण्यासाठी आधारभूत आहे, आणि रोबोटिक्समध्ये, या ज्ञानाची आवश्यकता आहे जेणेकरून रोबोट कार्यक्षम, सुरक्षित आणि अंदाजानुसारकार्यकरूशकतात. यांत्रिकी बल, गती आणि यांत्रिकी प्रणालींमध्ये ऊर्जा यांचा अभ्यास करते, जो थेट रोबोट त्यांच्या वातावरणाशी कसा संवाद साधतो आणि कार्ये कशा प्रकारे पार पाडतो यावर परिणाम करतो.

हे शिक्षण साहित्य अभियांत्रिकी यांत्रिकीच्या मूलभूत संकल्पनांचा समावेश करते, जसे की बल (Force), गती (motion) आणि समतोल (equilibrium), विशेषतः रोबोटिक प्रणालींवर. या तत्त्वांचा ठोस समज अभियंतेना रोबोट डिझाइन करण्यास सक्षम करतो जे चालू शकतात, वस्तू हाताळू शकतात, आणि त्यांच्या सभोवतालच्या वातावरणाशी नियंत्रित आणि अचूक पद्धतीने संवाद साधू शकतात. रिजिड बॉडी (Rigid body) गतिकी, काइनेमॅटिक्स, आणि गतिकीच्या अभ्यासाद्वारे, शिकणाऱ्यांना रोबोट कसे मॉडेल, विश्लेषण, आणि नियंत्रित केले जाऊ शकतात याबद्दल अंतर्दृष्टी मिळेल.

या मूलभूत संकल्पना समजून घेतल्यास, विद्यार्थी रोबोट डिझाइन, नियंत्रण आणि ऑटोमेशनसह अधिक प्रगत रोबोटिक्स विषयांना सामोरे जाण्यास तयार होतील.

2.1 यांत्रिकींचा परिचय:

रोबोटिक्समधील यांत्रिकीमध्ये बल, गती आणि रिजिड बॉडी (Rigid body) वर्तनाचा अभ्यास समाविष्ट असतो. बल म्हणजे कोणत्याही परस्पर संवादाचा संदर्भ जो एखाद्या वस्तूची गती बदलू शकतो, जो रोबोटिक हालचाली नियंत्रित करण्यासाठी महत्त्वपूर्ण असतो.

2.1.1 अभियांत्रिकी यांत्रिकी: यांत्रिकी ही भौतिक विज्ञानाची शाखा आहे जी बलांचा (Force) अभ्यास आणि गतिमान (motion) किंवा विश्रांती (rest) असलेल्या बॉडी त्यांचे परिणाम हाताळते.

- हे अभियंत्यांना संरचना किंवा घटक विविध बलांवर कशी प्रतिक्रिया देतील हे समजून घेण्यास मदत करते, ज्यामुळे योग्य रचना, स्थिरता आणि कार्यक्षमता मिळते.
- अभियांत्रिकी यांत्रिकी विभाग:

अभियांत्रिकी यांत्रिकी खालील दोन गटांमध्ये विभागली गेली आहे:

1.स्थिरता (Statics) 2. गतिशीलता. (Dynamics)

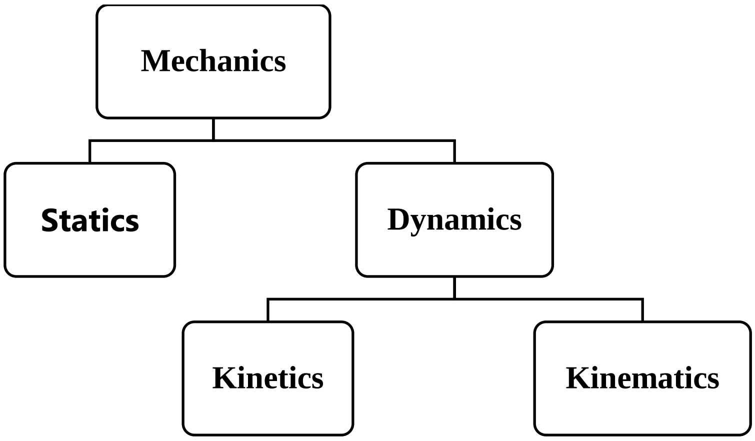


Figure: 2.1: मेकॅनिक्सचे वर्गीकरण (Classification of Mechanics)

- **स्थिरता (Statics):** ही ईंजिनीयरिंग मेकॅनिक्सची शाखा आहे जी बल आणि त्याच्या परिणामांशी संबंधितआहे जेव्हा ते एखाद्या स्थिर (rest) वस्तूवर कार्यकरत असतील.
  उपयोग: हालचाल न करणाऱ्या संरचना, यंत्रे आणि यांत्रिक प्रणालींचे विश्लेषण करण्यासाठी वापरली जाते, जेणेकरून ते कोसळल्याशिवाय किंवा विकृत न होता त्यांच्यावर होणाऱ्या बलांचा सामना करू शकतील.
- **गतिशीलता (Dynamics):** ही ईंजिनीयरिंग मेकॅनिक्सची शाखा आहे जी बल आणि त्याच्या परिणामांशी संबंधित आहे जेव्हा ते एखाद्या गतिमान (motion) वस्तूवर कार्यकरत असतील.
- गतिशीलता खालील दोन शाखांमध्ये विभागली गेली आहे:
  1. कानेटिक्स (Kinetics) 2. कानेमॅटिक्स (Kinematics)
- **कानेटिक्स (Kinetics):** ही गतिशीलताची शाखा आहे, जी बलामुळे तयार झालेल्या गतिमान वस्तुंशी संबंधित आहे.
- **कानेमॅटिक्स (Kinematics):** ही गतिशीलताची ही शाखा आहे, जी गतिशील वस्तूशी संबंधित आहे ज्यामध्ये गतीसाठी जबाबदारअसलेल्या बलाचा कोणताही संदर्भ घेतला जात नाही.

2.1.2 रिजिड बॉडीची संकल्पना

- यांत्रिकीमध्ये, रिजिड बॉडी म्हणजे एक घन वस्तू जी बलांच्या प्रभावाखाली बदलत नाही किंवा आकार बदलत (dosent change shape) नाही. कोणत्याही बाह्य शक्तींकडे दुर्लक्ष करून, रिजिड बॉडीवरील कोणत्याही दोन बिंदूंमधील अंतर सारखेच राहते.
- रिजिडबॉडीची संकल्पना ही एक आदर्शीकरण आहे आणि निसर्गात रिजिडबॉडीची कोणतीही परिपूर्ण उदाहरणे नाहीत. प्रत्यक्षात, सर्व वस्तू हालचाल करताना आकार बदलतात, परंतु वस्तूच्या एकूण गतीच्या तुलनेत आकार बदलने बहुतेकदा नगण्य असते.
- **अनुप्रयोग:** हे गृहीतक बीम (beams), रॉड (rods) किंवा मेकॅनिकल लिंकेजेस (mechanical linkages) वस्तूंचे सरलीकृत विश्लेषण करण्यास अनुमती देते.

2.1.3 बल (Force): व्याख्या, एकक

- **न्यूटनचा पहिला नियम:** त्याचा अर्थ असा आहे की "प्रत्येकवस्तू ,जर तिच्यावर कोणतेही बाह्यबल (external force) कार्यकरत नसेल, तर स्थिर राहाते किंवा स्थिर गतीने मार्गक्रमण करत राहाते."
- यांत्रिकीमध्ये, बल (force) म्हणजे एक ढकलणे किंवा ओढणे जे एखाद्या वस्तूची गती, आकार किंवा दिशा बदलू शकते. हे एक वेक्टर (Vector) प्रमाण आहे, म्हणजेच त्याचे परिमाण (magnitude) आणि दिशा (direction) दोन्ही असतात.

- **बलाची व्याख्या:** बल म्हणजे "एक बाह्य एजन्सी जो ढकलणे किंवा ओढणे आहे जो बॉडीच्या विश्रांतीची किंवा हालचालीची स्थिती बदलतो."
- **बलाचे सूत्र, F= ma** आहे, जिथे (F) बल आहे, (m) द्रव्यमान (mass) आहे आणि (a) ॲक्सलरेशन आहे.
- बलाचे SI एकक **न्यूटन (N)** आहे जिथे **N= Kg m/s^2**
- **रोबोटिक्समध्ये अनुप्रयोग:** प्रत्येक रोबोटिक हालचालीमध्ये बलांचा समावेश असतो, मग ते रोबोटच्या ॲक्च्युएटर्सद्वारे वापरले जाणारे बल असो किंवा वातावरणातून रोबोटवर कार्य करणारी बल असो (उदा., हाताळणीच्या कामांदरम्यान संपर्क बल असो).

2.1.4 बो नोटेशन (Bow's notations):

- बो नोटेशन ही संरचनेतील बल आणि सदस्यांचे प्रतिनिधित्व करण्यासाठी एक ग्राफिकल पद्धत आहे.
- याचा वापर बल आकृत्या तयार करण्यासाठी केला जातो, जे संरचनेतील बलांचे विश्लेषण करण्यास मदत करतात. बल आकृत्या प्रत्येक बलाचे परिमाण (magnitude) आणि दिशा (Direction) तसेच परिणामी बल निश्चित करण्यास मदत करू शकतात.
- येथे प्रत्येक बलाचे (किंवा भाराचे) नाव दोन मोठ्या अक्षरांनी दिले जाते, जे बलाच्या कृती रेषेच्या दोन्ही बाजूंना ठेवले जाते आणि नंतर ती अक्षरे बल आकृत्या काढण्यासाठी वापरली जातात.
- **रोबोटिक्समध्ये अनुप्रयोग:** रोबोटिक आर्म्स किंवा मल्टी-लिंक सिस्टममध्ये, बाउसनोटेशन वेगवेगळ्या सांधे आणि दुव्यांवर कार्य करणाऱ्या बलांचे प्रतिनिधित्व करण्यास मदत करते, ज्यामुळे एकूण प्रणाली वर्तनाची गणना करणे सोपे होते.

➢ **बो नोटेशनसाठी पायऱ्या:**

- बलांमधील जागा मोठ्या अक्षरांनी लेबल करा. (बलाच्या कृती रेषेच्या दोन्ही बाजूंना मोठी अक्षरे चिन्हांकित केली जातात)
- प्रत्येक बलासाठी एक रेषा काढा.
- बलाच्या दोन्ही बाजूंच्या जागा लेबल करणाऱ्या दोन अक्षरांनी रेषेला लेबल करा.

उदा 1.

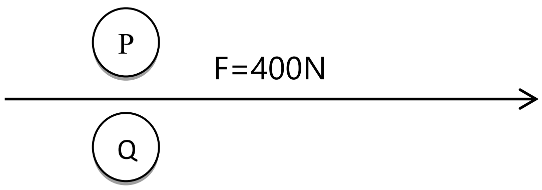


Figure: 2.2: स्पेस आकृती (Space Diagram)

स्केल, 1 सेमी = 100 N, **pq**= 400/100 = 4 सेमी
बलाचे परिमाण = लांबी '**pq**'*स्केल = 4*100 = 400N

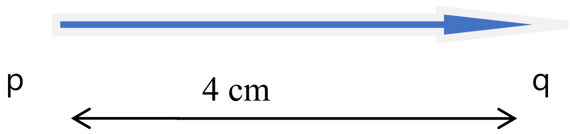


Figure: 2.3: वेक्टरआकृती

उदा 2.

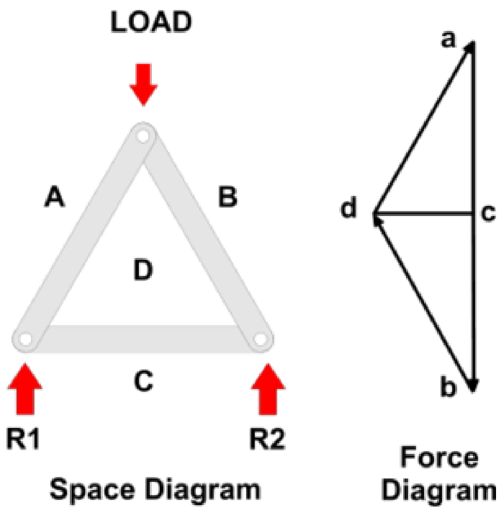


Figure: 2.4: स्पेस आकृती आणि फोर्स आकृती (Space Diagram & Force Diagram)

2.1.5 बलाची वैशिष्ट्ये (Characteristics of Force)

- एखाद्या वस्तूवर होणाऱ्या बलाचा परिणाम निश्चित करण्यासाठी, बलाची खालील वैशिष्ट्ये विचारात घ्यावी लागतात:
    1. बलाचे प्रमाण (Magnitude) (म्हणजे, 10 KN, 5 KN, 25 KN, 15 KN, इ.)
    2. बल ज्या रेषेवर कार्य करते त्या रेषेची दिशा (direction) (म्हणजे, दक्षिणेच्या 40° पश्चिमेला 25 KN इ.).याला बलाची क्रियेची रेषा असेही म्हणतात.
    3. बलाचे स्वरूप (Nature of the force) (ढकलणे किंवा ओढणे). हे बलाच्या क्रियेच्या रेषेवर बाणाचे टोक ठेवून दर्शविले जाते.
    4. बल ज्या बिंदूवर (किंवा ज्याद्वारे) बॉडीवर कार्य करते तो बिंदू.

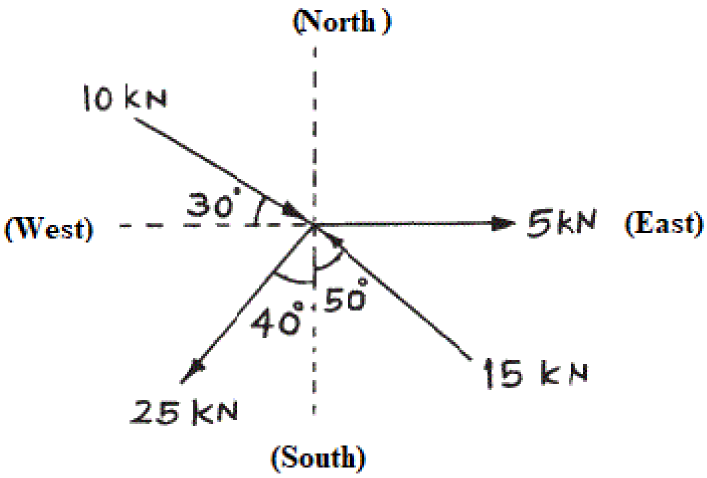


Figure: 2.5: बलाची वैशिष्ट्ये (Characteristics of Force)

2.1.6 बल प्रणालीचे प्रकार:

जेव्हा दोन किंवा अधिक बल एखाद्या वस्तूवर कार्य करतात, तेव्हा त्यांना बल प्रणाली तयार करण्यासाठी म्हणतात. बल प्रणालीचे प्रकार खालीलप्रमाणे आहेत:

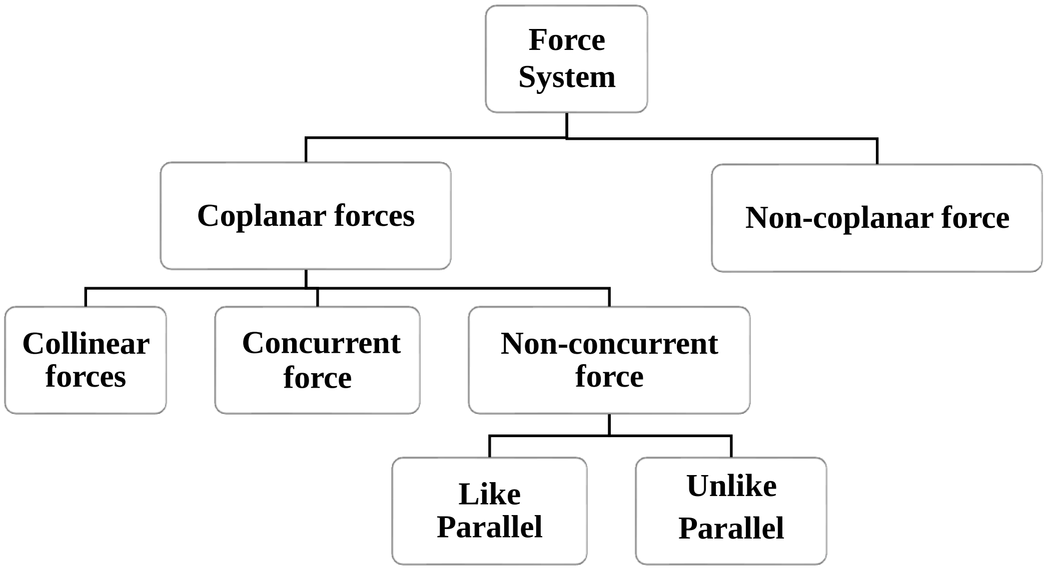


Figure: 2.6: बलाचे वर्गीकरण (Classification of Force System)

1) **कोप्लानर बल:** ज्या बलांच्या क्रिया रेषा एकाच पातळीवर असतात त्यांना कोप्लानर बल म्हणतात.
2) **नॉन-कोप्लानर बल प्रणाली:** जेव्हा सर्व बलांच्या क्रिया रेषा एकाच पातळीवर नसतात तेव्हा त्याला नॉन-कोप्लानर बल प्रणाली म्हणतात.
3) **कोलिनिअर बल प्रणाली :** ज्या बलांच्या कृतीच्या रेषा एकाच रेषेवर असतात त्यांना कोलिनिअर बल म्हणतात. जेव्हा सर्व बलांची क्रिया रेषा समान असते किंवा ते एकमेकांना समांतर असतात तेव्हा त्यांना कोलिनिअर बल म्हणतात.

Figure: 2.7: कोलिनिअर बल (Collinear Forces)

4) **काँकरण्ट बल:** एका बिंदूवर भेटणाऱ्या बलांना समवर्ती बल म्हणतात. समवर्ती बल समरेषीय असू शकतात किंवा नसू शकतात. जेव्हा सर्व बलांच्या क्रिया रेषा एकाच बिंदूतून जातात तेव्हा त्यांना समवर्ती बल म्हणतात.

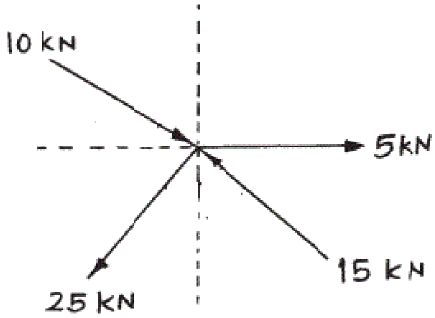


Figure: 2.8: काँकरण्ट बल (Concurrent forces)

5) **नॉनकाँकरण्ट बल प्रणाली:** जेव्हा सर्व बलांच्या क्रिया रेषा एकाच बिंदूतून जात नाहीत.

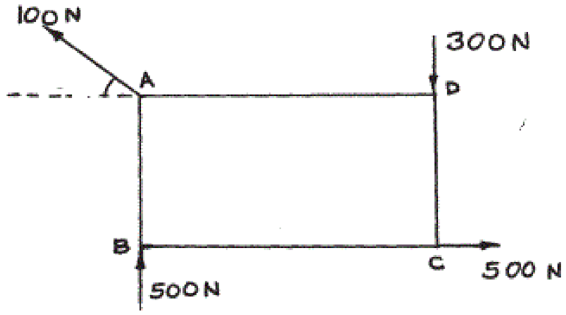


Figure: 2.9: नॉनकाँकरण्ट बल प्रणाली (Non-concurrent force system)

6) **लाइक पॅरेलल बल प्रणाली:** जेव्हा बल एकमेकांना समांतर असतात आणि एकाच दिशेने कार्य करतात.

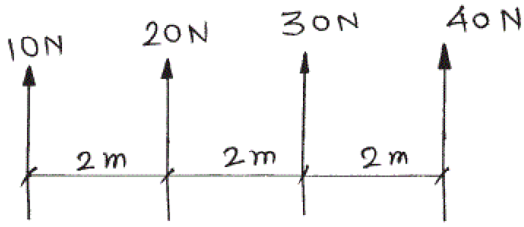


Figure: 2.10: लाइक पॅरेलल बल प्रणाली (Like Parallel force system)

7) **अनलाइक पॅरेलल बल प्रणाली:** जेव्हा बल एकमेकांना समांतर असतात परंतु विरुद्ध दिशेने कार्य करतात.

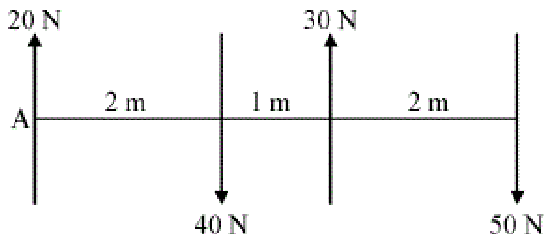


Figure: 2.11: अनलाइक पॅरेलल बल प्रणाली (Unlike Parallel force system)

2.2 बलाचा मोमेन्ट(Moment of force): व्याख्या, एकक, चिन्ह नियम.

रोबोटिक्समध्ये, सांधे, हात आणि इतर यांत्रिक घटकांच्या फिरण्याच्या हालचाली नियंत्रित करण्यासाठी बलाचे क्षण आवश्यक असतात. चक्राकार गतीची(टॉर्क) वस्तू फिरवण्यासाठी किंवा हाताळण्यासाठी किती बल आवश्यक आहे हे ठरवतो, ज्यामुळे रोबोट उचलणे, वळणे किंवा अचूक हाताळणी करणे यासारखी कामे करू शकतात. नियंत्रित बल प्रभावीपणे हलवू आणि लागू करू शकणाऱ्या रोबोटिक प्रणाली डिझाइन करण्यासाठी बलाचे क्षण समजून घेणे आणि मोजणे अत्यंत महत्त्वाचे आहे.

2.2.1 बलाचा मोमेन्ट (Moment of force):

- बिंदूभोवती बलाचा मोमेन्ट हा बलाच्या (Force) गुणाकार आणि बिंदू आणि बलाच्या क्रियेच्या रेषेतील लंब (perpendicular distance) अंतराइतका असतो. हा बलाने, ज्या बॉडीवर ते कार्य करते, त्या बॉडीवर निर्माण केलेला वळणाचा (rotation) परिणाम आहे.
- गणितीयदृष्ट्या, क्षण, **M = P × l**
- जिथे **P** = बॉडीवर कार्य करणारे बल (Force), आणि **l** = ज्या बिंदूभोवती मोमेन्टआवश्यक आहे आणि

बलाच्या क्रियेच्या रेषेतील लंब अंतर (perpendicular distance).

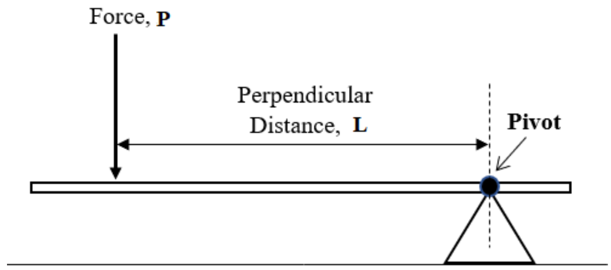


Figure: 2.12: बलाचा मोमेन्ट (Moment of Force)

- **मोमेन्टची एकके**
  बलाचा मोमेन्ट हा बल आणि अंतराचा गुणाकार असल्याने, मोमेन्टची एकके बल आणि अंतराच्या एककांवर अवलंबून असतील. अशाप्रकारे, जर बल न्यूटनमध्ये असेल आणि अंतर मीटरमध्ये असेल, तर मोमेन्टची एकके **न्यूटन-मीटर (N-m)** असतील.
- **चिन्ह नियम**
  मोमेन्ट खालील दोन प्रकारचे असतात:
  १. घड्याळाच्या दिशेने मोमेन्ट (Clockwise moment). २. घड्याळाच्या उलट दिशेने मोमेन्ट (Anticlockwise Moment)
- **घड्याळाच्या दिशेने मोमेन्ट(Clockwise moment)**
  हा अशा बलाचा मोमेन्ट आहे, ज्याचा परिणाम शरीराला फिरवणे किंवा फिरवणे आहे, घड्याळाचे काटे ज्या दिशेने हलतात त्याच दिशेने, खालील आकृतीमध्ये दर्शविल्याप्रमाणे.
- **घड्याळाच्या उलट दिशेने मोमेन्ट(Anticlockwise Moment)**
  हा अशा बलाचा मोमेन्ट आहे, ज्याचा परिणाम शरीराला फिरवणे किंवा फिरवणे आहे, घड्याळाचे काटे ज्या दिशेने फिरतात त्या विरुद्ध दिशेने, खालील आकृतीमध्ये दर्शविल्याप्रमाणे.
- सामान्यतः घड्याळाच्या दिशेने मोमेन्ट पॉझिटिव्ह (+) असतो आणि घड्याळाच्या उलट दिशेने मोमेन्ट निगेटिव्ह (-) असतो.

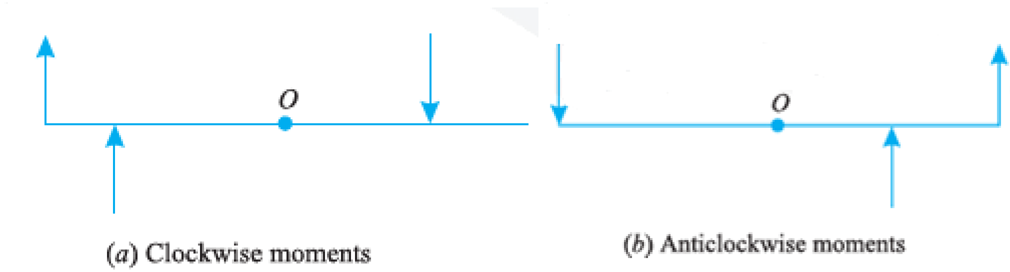


Figure: 2.13: साइन कन्व्हेनशन ऑफ मोमेन्ट (Signs Conventions of Moment)

- **रोबोटिक्समध्ये अनुप्रयोग:** रोबोटिक आर्म्स किंवा चाकांमध्ये, मोमेन्ट (टॉर्क) चा वापर सांधे किंवा अक्षांभोवती बल कसे फिरवतात याचे विश्लेषण करण्यासाठी केला जातो. उदाहरणार्थ, रोबोटिक आर्म डिझाइन करताना, हात हलविण्यासाठी किंवा वस्तू हाताळण्यासाठी आवश्यक असलेला टॉर्क मोजला पाहिजे.

2.3 बलांचे समतोल (Equilibrium): व्याख्या, परिस्थिती, समतोलावरील साधे गणिते

- रोबोटिक्समध्ये बलांचे समतोल म्हणजे अशी स्थिती जिथे रोबोटिक प्रणालीवर कार्य करणारी सर्व बल

संतुलित असतात, ज्यामुळे कोणतेही निव्वळ बल किंवा टॉर्क निर्माण होत नाही. स्थिरता आणि अचूकतेसाठी हे महत्त्वाचे आहे, ज्यामुळे रोबोट वस्तू उचलणे, स्थान देणे किंवा धरून ठेवणे यासारखी कामे करताना स्थिर राहतात.

2.3.1 बलांचे समतोल (Equilibrium):

- बलांचे समतोल म्हणजे अशी स्थिती जिथे वस्तूवर कार्य करणारी बल संतुलित असतात, ज्यामुळे कोणतेही निव्वळ बल नसते.
- जर एखाद्या वस्तूवर कार्य करणाऱ्या अनेक बलांचा परिणाम शून्य असेल, तर त्या वस्तू समतोलात असल्याचे सांगितले जाते. बॉडीला समतोलात ठेवणाऱ्या बलांच्या संचाला समतोल बल किंवा समतोल म्हणतात. समतोल हा परिणामी बलाच्या परिमाणात समान असतो परंतु दिशेने विरुद्ध असतो.
- समतोल असलेली वस्तू विश्रांतीवर राहील किंवा स्थिर वेगाने हालचाल करत राहील. समतोल हा न्यूटनच्या गतीच्या पहिल्या नियमावर आधारित आहे

2.3.2 समतोल स्थिती (Equilibrium Conditions):

- **समतोल स्थितीची पहिली स्थिती:** बॉडीवर कार्य करणाऱ्या सर्व बलांची बेरीज शून्य आहे: $\sum$**F=0**
- **समतोल स्थितीची दुसरी स्थिती:** बॉडीवर कार्य करणाऱ्या सर्व मोमेन्टबेरीज शून्य आहे: $\sum$**M=0**

2.3.3 रोबोटिक्समध्ये वापर:

- रोबोट, विशेषतः जे वातावरणाशी संवाद साधतात किंवा स्थिर असतात (रोबोटिक आर्म्ससारखे), त्यांना बल आणि मोमेन्ट संतुलित राहतील याची खात्री करण्यासाठी समतोल परिस्थिती पूर्ण करणे आवश्यक आहे.
- **उदाहरण:** जेव्हा रोबोटिक आर्म एखादी वस्तू धरून असते, तेव्हा हाताच्या सांध्यांद्वारे लावण्यात येणारे बल वस्तूवर कार्य करणाऱ्या गुरुत्वाकर्षण बलाचे संतुलन राखते. अवांछित परिभ्रमण रोखण्यासाठी प्रत्येक सांध्यावरील क्षण देखील संतुलित असले पाहिजेत.

2.3.4 समतोलावरील साधे अंकगणित.

1) खालील बल प्रणाली समतोलात असण्यासाठी बल P चे परिमाण निश्चित करा.

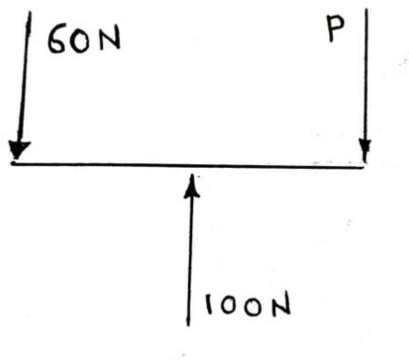


Figure: 2.14: प्रश्न क्र 1(Q No 1)

उत्तर: संतुलनाच्या पहिल्या अटीनुसार, प्रणाली क्षैतिज (संतुलित स्थिती) असण्यासाठी, बॉडीवर कार्य करणाऱ्या सर्व बाह्य बलांची बेरीज शून्य असावी. येथे, बल उभ्या दिशेने आहेत. म्हणून, $\sum \boldsymbol{F_Y} = \mathbf{0}$(↑दिशा धन आणि ↓ दिशा ऋण घेऊन,)

$$100N - 60N - P = 0$$
$$P = 40N$$

2) खालील बल प्रणाली समतोल स्थितीत राहण्यासाठी P आणि Q या बलांचे परिमाण निश्चित करा.

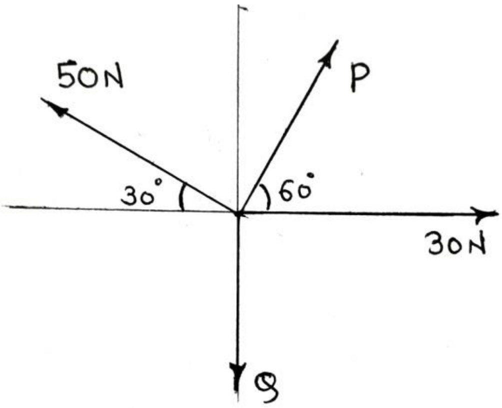
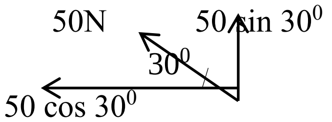


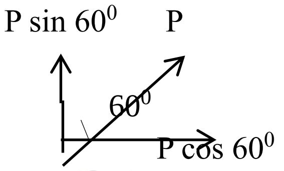
Figure: 2.15: प्रश्न क्र. 2(Q No 2)

उत्तर:

- समतोलाच्या पहिल्या अटीनुसार, प्रणाली आडव्या (horizontal) (संतुलित स्थिती) असण्यासाठी, बॉडी वर कार्य करणाऱ्या सर्व बाह्य बलांची बेरीज शून्य असावी.
- 50 N बलाचा उभ्या घटक 50 sin 30^0 आणि आडव्या (horizontal) घटक 50 cos 30^0 असतो.



- फोर्स P मध्ये उभ्या(vertical) घटक P sin 60^0 आणि आडव्या (horizontal) घटक P cos 60^0आहे.



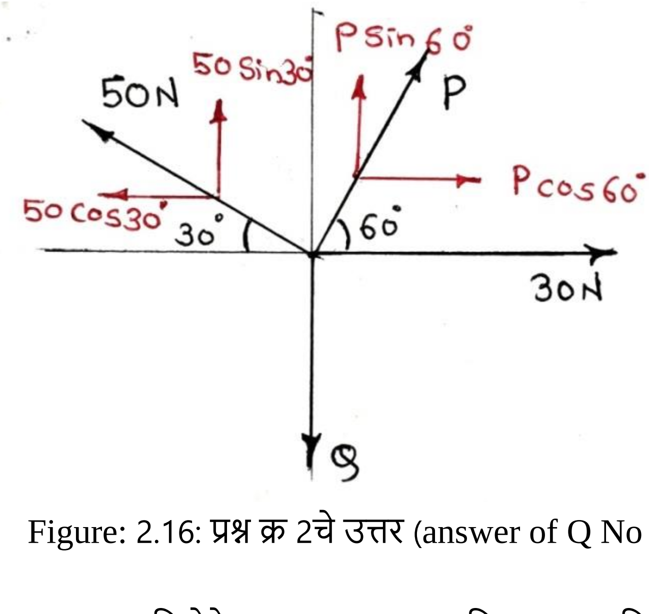


Figure: 2.16: प्रश्न क्र 2चे उत्तर (answer of Q No 2)

प्रकरण १: आडव्या (horizontal) दिशेने बल. $\sum F_X = 0$ (→ दिशा धन आणि ← दिशा ऋण घेऊन,)

$$P \cos 60^0 + 30 - 50 \cos 30^0 = 0$$

$$0.5\ P + 30 - 43.3 = 0$$

$$0.5\ P = 13.3$$

$$P = 26.6\ N$$

प्रकरण 2: उभ्या (Vertical) दिशेने बल.$\sum F_Y = 0$ (↑ दिशा धन आणि ↓ दिशा ऋण म्हणून घेऊन,)

$$P \sin 60^0 - Q + 50 \sin 30^0 = 0$$
$$26.6 \times 0.866 - Q + 25 = 0$$
$$23.04 - Q + 25 = 0$$
$$Q = 48.04 \text{ N}$$

3) खालील आकृतीत दाखवल्याप्रमाणे एक कॅन्टीलिव्हर बीम लोड केला आहे. बीम आडवा ठेवण्यासाठी बीमच्या बाजूने किती अंतरावर उभ्या बल 'P' ठेवावे?

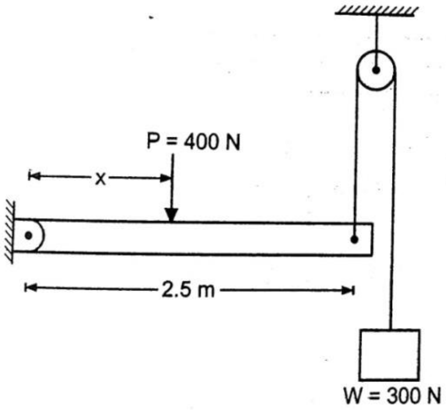


Figure: 2.17: प्रश्न क्र 3 (Q No 3)

उत्तर:

- समतोलाच्या दुसऱ्या स्थितीनुसार, बीम आडवा (संतुलित स्थिती) असण्यासाठी, बिजागराच्या आसपासच्या मोमेन्टची बेरीज शून्य असावी. . $\sum M_{Hinge} = 0$
- 'A' हा बिजागर आधार आहे आणि 'x' हे अंतर आहे जेणेकरून उभ्या बलामुळे बीम आडवा राहील. मुक्त बॉडी आकृती खाली दर्शविली आहे:

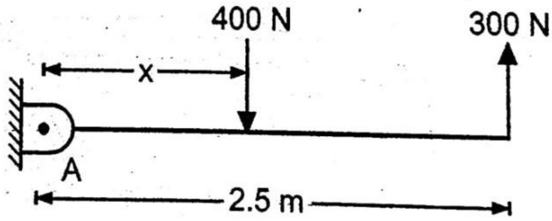


Figure: 2.18: प्रश्न क्र 3 चे उत्तर (Answer of Q No 3)

$$400 \times x - 300 \times 2.5 = 0$$
$$400 \times x = 750$$
$$x = 1.875\ m$$

4) खालील आकृतीमध्ये एक क्रँक ABC दाखवला आहे ज्यावर बलांची एक प्रणाली कार्य करते. बल P शोधा.

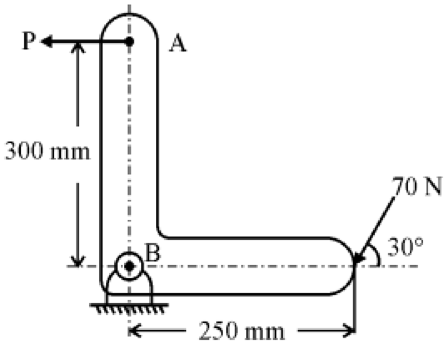


Figure: 2.19: प्रश्न क्र 4 (Q No 4)

उत्तर:

- समतोलाच्या दुसऱ्या स्थितीनुसार, क्रँक समतोलात राहण्यासाठी, बिजागर 'B' भोवतीच्या मोमेन्टची बेरीज शून्य असावी$\sum M_{Hinge} = \sum M_B = 0$
- 70 kN बलाचा उभ्या घटक 70 sin 30^0 आणि आडव्या (horizontal) घटक 70 cos 30^0असतोमुक्त बॉडी आकृती खाली दर्शविली आहे:

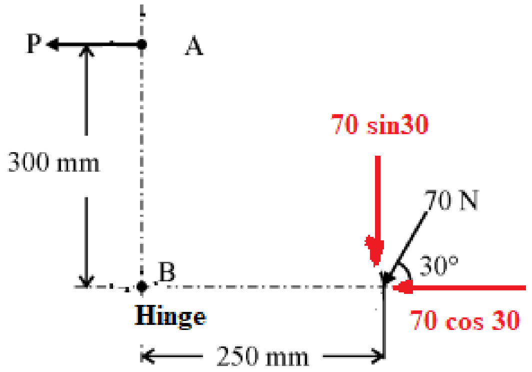


Figure: 2.20: प्रश्न क्र 4 चे उत्तर (Answer of Q No 4)

- क्रँक ABC च्या समतोलासाठी,$\sum M_B = 0$
- येथे, बिजागर B भोवती असलेल्या बलाचा मोमेन्ट हा बलाच्या गुणाकाराच्या बरोबरीचा आहे आणि बिजागर B आणि बलाच्या क्रियेच्या रेषेतील लंब (perpendicular) अंतर आहे.
- घड्याळाच्या दिशेने दिशा धन (+ve) आणि घड्याळाच्या विरुद्ध दिशेने दिशा ऋण (-ve) मानून,

$$\sum M_B = 0$$

$$70 \sin 30^0 \times 250mm + 70 \cos30^0 \times 0 - P \times 300 \text{ mm} = 0$$

$$70 \times 10^3 \times \sin 30 \times 250 \times 10^{-3} + 0 = P \times 300 \times 10^{-3}$$

P =29166 N=29.17 KN

- **टीप:** बल 70 cos30^0 हा बिजागर B च्या दिशेने त्याच दिशेने कार्य करत आहे; म्हणून बल 70 cos30^0 आणि बिजागर B मधील लंब अंतर (perpendicular distance) 0 आहे.

2.4 केंद्रक (centroid) आणि गुरुत्वाकर्षण केंद्र (centre of gravity): संकल्पना, व्याख्या

- रोबोटिक्समध्ये, केंद्रक (centroid) हे एखाद्या वस्तूचे भौमितिक केंद्र असते, जिथे त्याचे वस्तुमान समान रीतीने वितरित केले जाते. गुरुत्वाकर्षण केंद्र (CG) हा बिंदू आहे जिथे बॉडीचे एकूण वजन कार्य करते असे मानले जाऊ शकते. रोबोटिक प्रणालींमध्ये संतुलन आणि स्थिरता सुनिश्चित करण्यासाठी दोन्ही महत्त्वाचे आहेत.

2.4.1 गुरुत्वाकर्षण केंद्र (centre of gravity): गुरुत्वाकर्षण केंद्र हा एक बिंदू आहे जिथे बॉडीचे संपूर्ण वजन कार्य करते असे गृहीत धरले जाते, म्हणजेच, ते एक बिंदू आहे जिथे गुरुत्वाकर्षण बलाचे (वजन) संपूर्ण वितरण केंद्रित केले जाते असे मानले जाते.

- गुरुत्वाकर्षण केंद्र हा शब्द सामान्यतः सर्व त्रिमितीय (three-dimensional) कठोर (rigid)बॉडीसाठी 'G' द्वारे दर्शविला जातो.
- प्रत्येकाचे गुरुत्वाकर्षणाचे एकच केंद्र असते.
- **रोबोटिक्समध्ये अनुप्रयोग:** रोबोटना स्थिरता राखण्यासाठी आणि टिपिंग टाळण्यासाठी, डिझाइन प्रक्रियेत गुरुत्वाकर्षण केंद्राचा विचार केला पाहिजे. मोबाईल रोबोट्स किंवा चालणाऱ्या रोबोट्समध्ये, रोबोट संतुलित (balanced) ठेवण्यात गुरुत्वाकर्षण केंद्र (C.G.) महत्त्वपूर्ण भूमिका बजावते. गुरुत्वाकर्षण केंद्र (C.G.) चे स्थान हालचालीसाठी आवश्यक असलेल्या शक्ती आणि रोबोटच्या स्थिरतेवर परिणाम करते.

2.4.2 केंद्रबिंदू: केंद्रबिंदू हा असा बिंदू आहे जिथे समतल लॅमिनाचे (आकृतीचे) संपूर्ण क्षेत्रफळ (Area) कार्य करते असे गृहीत धरले जाते.

- समतल आकृत्यांमध्ये (जसे की त्रिकोण, चतुर्भुज, वर्तुळ इ.) फक्त क्षेत्रफळ (Area) असते, परंतु वस्तुमान (mass) नसते.
- अशा आकृत्यांच्या क्षेत्रफळाच्या केंद्राला केंद्रबिंदू म्हणतात.
- आकृतीचा केंद्रबिंदू शोधण्याची पद्धत बॉडी च्या गुरुत्वाकर्षणाचे केंद्र शोधण्यासारखीच असते.
- **रोबोटिक्समध्ये अनुप्रयोग:** भुजांसारख्या रोबोटिक घटकांमध्ये, केंद्रबिंदू वस्तुमानाचे वितरण आणि संतुलनासाठी कोणत्या बिंदूवर बल लागू करावे हे समजून घेण्यास मदत करतो. रचना संतुलित आणि स्थिर आहे याची खात्री करण्यासाठी रोबोट फ्रेम डिझाइन करताना केंद्रबिंदूचा वापर केला जातो.

सारांश:

रोबोटिक सिस्टीमची रचना आणि विश्लेषण करताना अभियांत्रिकी यांत्रिकीमधील संकल्पना, ज्यामध्ये स्थिरता (Statics), बल (Force), मोमेंट्स (moment), समतोल (Equilibrium), केंद्रक (centroid) आणि गुरुत्वाकर्षण केंद्र(centre of gravity) यांचा समावेश आहे. रोबोट कसा हालचाल करतो, त्याच्या वातावरणाशी कसा संवाद साधतो आणि स्थिरता कशी राखतो हे बल आणि टॉर्क ठरवतात. अभियांत्रिकी यांत्रिकीमधील तत्त्वे लागू करून, अभियंते अशा रोबोटिक सिस्टीम डिझाइन करू शकतात ज्या त्यांच्या ऑपरेशनमध्ये कार्यक्षम आणि सुरक्षित दोन्ही असतात.

स्वाध्याय:

1. अभियांत्रिकी यांत्रिकी (engineering mechanics) परिभाषित करा. त्याचे वर्गीकरण सांगा. (Define engineering mechanics. State its classifications.)
2. रोबोटिक्सच्या संदर्भात स्थिरता(Statics) आणि गतिशीलतामध्ये (Dynamics) फरक सांगा? (Differentiate between statics and dynamics in the context of robotics?)
3. गतिशीलताचे (Dynamics) वर्गीकरण सांगा आणि स्पष्ट करा. (State and explain the classifications of dynamics.)
4. रिजिड बॉडीची संकल्पना सांगा. रोबोटिक प्रणालींच्या विश्लेषणात ते का महत्त्वाचे आहे? (Describe the concept of a rigid body. Why is it important in the analysis of robotic systems?)

5. बाउसनोटेशनचे वर्णन करा. (Describe Bow's notation.)
6. बल (force) आणि त्याचे एकक (unit) परिभाषित करा.(Define a force and its unit.)
7. बलाची वैशिष्ट्ये (Characteristics of Force) सूचीबद्ध करा आणि स्पष्ट करा. ही वैशिष्ट्ये रोबोटिक गतीवर कसा परिणाम करतात? (List and explain the characteristics of force. How do these characteristics impact robotic motion?)
8. स्केचसह कोप्लानर बलांची (coplanar forces) प्रणाली स्पष्ट करा. (Explain system of coplanar forces with sketch.)
9. कोप्लानर बल (coplanar forces),कोलिनियर बल (collinear forces) आणि कॉँकरण्टबल (Concurrent forces) परिभाषित करा. (Define coplanar forces, collinear forces and Concurrent forces.)
10. बलाचा मोमेन्ट (Moment of force) परिभाषित करा. त्याचे चिन्ह नियम दाखवा. (Define Moment of force. Show its sign conventions.)
11. तुमच्या दैनंदिन अनुभवांमधून दोन उदाहरणे द्या जिथे बलाचामोमेन्ट(Moment of force) परिणाम समाविष्ट आहे. (Give two examples from your every day experiences where the turning effect of force is involved.)
12. बलांचा समतोल (equilibrium of forces) परिभाषित करा. रोबोट्सच्या डिझाइन आणि ऑपरेशनसाठी ते का महत्त्वाचे आहे? (Define the equilibrium of forces. Why is it important for the design and operation of robots?)
13. कोप्लानर कॉँकरण्टबल (Concurrent force) प्रणालीसाठी समतोलाच्या विश्लेषणात्मक परिस्थिती सांगा. (State analytical conditions of equilibrium for coplanar con current force system.)
14. केंद्रक (centroid) आणि गुरुत्वाकर्षण केंद्रची (centre of gravity) व्याख्या करा. (Define centroid and centre of gravity.)
15. केंद्रक (centroid) आणि गुरुत्वाकर्षण केंद्र (centre of gravity)यांच्यात फरक करा. (Differentiate between centroid and Center of gravity.)
16. आकृतीमध्ये दाखवल्याप्रमाणे आडव्या (horizontal) बल P 100 N चे वजन समतोल राखतो. तार Q मधील ताण शोधा आणि परिमाण P शोधा. (A horizontal force P as shown in fig keeps the weight of 100 N in equilibrium. Find magnitude P and tension in the string T.)

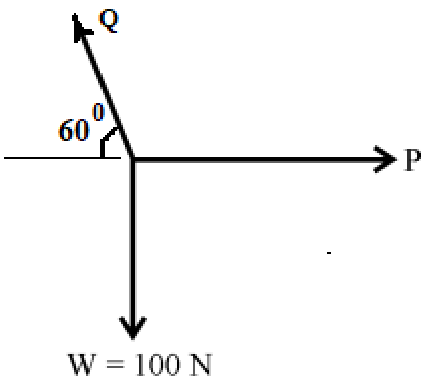


Figure: 2.21:प्रश्न क्र. 12 (Q No 12)

17. रोबोटिक आर्ममध्ये, जर पिव्होटपासून 0.2 मीटर अंतरावर जोडणीवर लावलेले बल 50 N असेल, तर जोडणी वर कोणता मोमेन्ट असेल? (In a robotic arm, if the force applied to a joint is 50 N at a distance of 0.2 meters from the pivot, what is the moment at the joint?)

संदर्भ (References):

Sr. No	Author	Title	Publisher with ISBN Number
1	R. S. Khurmi, N.Khurmi	Engineering Mechanics	S.Chand & Co. New Delhi
2	Dr. R. K. Bansal	Engineering Mechanics	Laxmi Publications

युनिट 3
रोबोटिक्स मध्ये वापरले जाणारे ट्रान्सफॉरमेशन्स
Transformations used in Robotics

विषय निष्पत्ती (Course Outcome): रोबोटिक्स मध्ये वापरल्या जाणाऱ्या ट्रान्सफॉरमेशन्सचा अर्थ लावा.
Interpret the transformations used in robotics

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes).

3.1 कायनेमॅटिक्सचे महत्त्व सांगणे.
State the significance of kinematics

3.2 विविध अक्षांबद्दल रोटेशन मॅट्रिक्सची गणना करणे
Calculate rotation matrices about various axes

3.3 रोबोट मॅनिपुलेटरच्या दिलेल्या फ्रेमचे कॉर्डिनेट्स ट्रान्सफॉर्मेशन मॅट्रिक्स आणि एचटीएमची गणना करणे.
Calculate the coordinate transformation matrix and HTM of a given frame of robot manipulator

3.4 रोबोट मॅनिपुलेटरच्या दिलेल्या फ्रेमच्या DH पॅरामीटर्सची गणना करणे
Calculate the DH parameters of a given frame of robot manipulator

3.5 रोबोट मॅनिपुलेटरच्या दिलेल्या DH फ्रेममधील ट्रान्सफॉर्मेशनची गणना करणे
Calculate the transformation between the given DH frames of robot manipulator

परीचय:

रोबोट मॅनिपुलेटरमध्ये सांध्यांद्वारे जोडलेल्या अनेक दुव्यांचे बनलेले असते. बेसच्या संदर्भात एंड-इफेक्टरचे स्थान आणि त्याचे नियंत्रण करण्यासाठी , त्याचे ओरिंटेशन शोधण्यासाठी, एंड-इफेक्टर आणि बेसशी संलग्न कॉर्डिनेट्स फ्रेममधील संबंध शोधणे आवश्यक आहे. यासाठी, प्रत्येक जॉइंटवर कोऑर्डिनेट सिस्टम्स असाइन केली जातात. रोबोटिक्समध्ये मुख्य रूपाने वापरल्या जातात, ट्रान्सलेशन (त्या विशिष्ट अक्षावर किंवा दिशा/रेषेवर होणारी गती) आणि रोटेशन (ओरिएंटेशनमधील बदल), हे एकत्रित करून "होमोजिनियस ट्रान्सफॉर्मेशन मॅट्रिसेस" मध्ये दर्शवले जातात, ज्याद्वारे रोबोटच्या एंड-इफेक्टरच्या स्थिती आणि ओरिएंटेशनची गणना केली जाते. हे 3D स्पेसमधील विविध कोऑर्डिनेट सिस्टिम्सद्वारे रोबोटच्या एंड-इफेक्टरचे स्थान आणि ओरिएंटेशन शोधण्यासाठी महत्त्वाचे आहे; हे मोशन प्लॅनिंग आणि नियंत्रणासाठी अत्यंत आवश्यक आहे.

3.1 कायनेमॅटिक्स:

हे डायनॅमिक्सची एक शाखा आहे, ज्यात हालचालीचा अभ्यास केला जातो, परंतु त्यासाठी कारणीभूत असलेल्या शक्तींचा विचार केला जात नाही. रोबोटिक आर्मच्या कायमेटिक्सचा अर्थ त्याच्या हलचालींचा अभ्यास आणि त्याच्या जॉइंट पॅरामीटर्सच्या आणि एंड-इफेक्टरच्या स्थिती आणि ओरिएंटेशन यांच्यातील संबंधाचा अभ्यास आहे.

3.1.1 कायमेटिक्सचे महत्त्व:

रोबोटचे नियंत्रण करण्यासाठी, जॉइंट्सच्या हालचाली (इनपुट) आणि एंड-इफेक्टरच्या हालचाली (आउटपुट) यामधील संबंध जाणून घेणं आवश्यक आहे, कारण जॉइंट्सच्या हालचालीच्याच नियंत्रणामुळे एंड-इफेक्टरच्या हालचाली होतात.

एंड-इफेक्टरला बेसच्या संदर्भात नियंत्रित करण्यासाठी, एंड-इफेक्टरची स्थिती आणि ओरिएंटेशन बेसच्या संदर्भात शोधणे आवश्यक आहे.
यासाठी, एंड-इफेक्टर आणि बेसला जोडलेल्या कोऑर्डिनेट फ्रेम्समधील संबंध शोधणे आवश्यक आहे.
हे संबंध सर्व लिंक्सला जोडलेल्या कोऑर्डिनेट फ्रेम्समधून मिळालेल्या कोऑर्डिनेट ट्रान्सफॉर्मेशन्स (उदा. ट्रान्सलेशन + रोटेशन) द्वारे प्राप्त करता येतात, ज्यामुळे प्रत्येक फ्रेममधून एक संपूर्ण रूपरेषा तयार केली जाते.
कायमेटिक्समध्ये रोबोटच्या विविध लिंक्सना जोडलेल्या कोऑर्डिनेट फ्रेम्समधील ट्रान्सफॉर्मेशन्स करणे आवश्यक आहे.
या उद्देशाने, रिजिड (कठोर शरीराची) स्थिती आणि ओरिएंटेशन वर्णन करणाऱ्या पद्धती त्या पुढील फ्रेम्समधील कोऑर्डिनेट ट्रान्सफॉर्मेशन्स मिळवण्यासाठी उपयोगी ठरतात.

3.1.2 रोबोटिक्समधील कोऑर्डिनेट सिस्टम आणि फ्रेम्स: संदर्भ आणि बॉडीफ्रेम्स

- रोबोटिक्समध्ये, समन्वय प्रणाली म्हणजे एक अक्षांचा संच जो दिलेल्या जागेत रोबोटच्या घटकांची स्थिती आणि ओरिएंटेशन परिभाषित करण्यासाठी वापरला जातो.
- हे रोबोटच्या पर्यावरणामध्ये हलचाल आणि स्थान वर्णन करण्यासाठी संदर्भ बिंदू आहे.
- एक फ्रेम म्हणजे रोबोटमध्ये समन्वय प्रणालीची व्याख्या. हे ठरवते की ते जागेत कुठे आहे आणि त्याच्या आजुबाजुच्या महत्त्वाच्या वस्तूंचे किंवा क्षेत्रांचे स्थान रोबोटच्या तुलनेत कसे आहे.
- शरीराची स्थिती आणि ओरिएंटेशन ओळखण्यासाठी (उदाहरणार्थ, त्याची 'पोझ' किंवा 'कॉन्फिगरेशन'), एक स्थिर संदर्भ समन्वय प्रणाली स्थापित केली जाते, जी 'फिक्स्ड फ्रेम' किंवा संदर्भ फ्रेम म्हणून ओळखली जाते. हे एक स्थिर समन्वय प्रणाली आहे, ज्यावरून स्थानांतरणे आणि फिरवणं आधारित असतात.
- ‘U’ म्हणजे सार्वत्रिक समन्वय प्रणाली किंवा फिक्स्ड संदर्भ समन्वय प्रणाली आणि त्याचे अक्ष आहेत x_u, y_u आणि z_u, जे एकमेकांपासून स्वतंत्र आणि परस्पर लांब असतात.
- ‘B’ म्हणजे शरीर समन्वय प्रणाली, जी हलणार्या शरीराला जोडलेली असते आणि त्याचे अक्ष आहेत x_b, y_b आणि z_b.

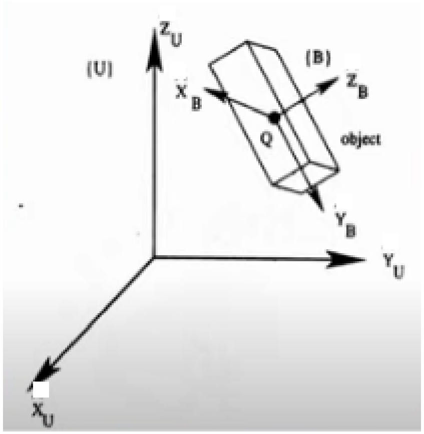


Figure:3.1

3.1.3 3D जागेत रिजिड पोझ (स्थिती आणि ओरिएंटेशन) त्याच्या स्थान आणि ओरिएंटेशन

3D अवकाशातील वस्तूचे स्थान स्थिती (किंवा संक्रमण) आणि दिशानिर्देशन (Orientation) किंवा परिभ्रमण (or rotation) मूल्यांद्वारे निर्दिष्ट केले जाऊ शकते. 3D अवकाशात दर्शवायची वस्तू विचारात घ्या. त्यासाठी तिची स्थिती आणि दिशानिर्देशन विचारात घेतले पाहिजे.

'U' युनिव्हर्सल कोऑर्डिनेट सिस्टम किंवा फिक्स रेफेररन्स कोऑर्डिनेट सिस्टम दर्शवते आणि तिच्या अक्ष X_u,Y_u व Z_u या स्वतंत्र आणि एकमेकांना समकोण असतात.

'B' एखाद्या वस्तूची **बॉडी कोऑर्डिनेट सिस्टम** दर्शवते आणि तिच्या अक्ष $\mathbf{X_b}$, $\mathbf{Y_b}$ **व** $\mathbf{Z_b}$ असतात.

3D अवकाशात वस्तूच्या विशिष्ट स्थितीचे प्रतिनिधित्व करण्यासाठी, वस्तूवरील बिंदू Q विचारात घ्या आणि त्यास **X**, **Y व Z** अक्षांवर हलवा. ही पोझिशन **कोऑर्डिनेट सिस्टम** असेल आणि यासाठी तीन पॅरामीटर्स आवश्यक असतात. Figure: 3.2 चा संदर्भ घ्या.

दिशानिर्देशन(Orientation) किंवा परिभ्रमण (or rotation) विचारात घेण्यासाठी, X अक्षाभोवती परिभ्रमण, Y अक्षाभोवती परिभ्रमण आणि Z अक्षाभोवती परिभ्रमण विचारात घ्यावे लागते. ही दिशानिर्देशन **कोऑर्डिनेट सिस्टम** असेल आणि यासाठी तीन पॅरामीटर्स आवश्यक असतात.

म्हणून, 3D अवकाशात वस्तूचे प्रतिनिधित्व करण्यासाठी एकूण सहा पॅरामीटर्स आवश्यक असतात.

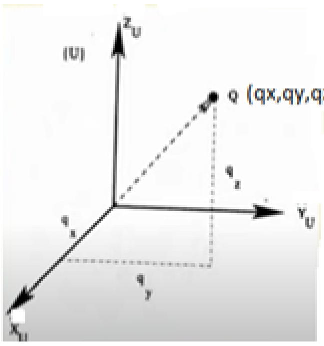


Figure:3.2

अवकाशातील एखाद्या रिजिड बॉडीची स्थिती, त्या **बॉडी**वरील बिंदू Q ची पोझिशन संदर्भ प्रणाली U च्या उगमाच्या संदर्भातील स्थिती म्हणून व्यक्त केली जाते.

कोणत्याही गतीशील रिजिड बॉडीवरील बिंदू Q ची स्थिती युनिव्हर्सल रेफेररन्स फ्रेम 'U' च्या तुलनेत दर्शवण्यासाठी, त्या बिंदूला उगमापासून X अक्ष, Y अक्ष आणि Z अक्षांवर हलवावे. त्यामुळे बिंदू Q ला ठराविक निर्देशांक प्राप्त होतील. ही स्थिती समाक्ष प्रणाली असेल.

बिंदू Q ला दर्शवण्यासाठी त्याचे वेक्टर वापरले जाते, जे पोझिशन वेक्टर किंवा 3D कार्टेशियन वेक्टर असते. हे एक 3X 1 मॅट्रिक्स असते.

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} q_X \\ q_Y \\ q_Z \end{bmatrix}$$

3.2 परिभ्रमण म्याट्रायसेस (Rotation matrices): दिशानिर्देशनाचे प्रतिनिधित्व, रोल (Roll), पिच(pitch), यॉ (yaw)

3D अवकाशात रिजिड बॉडीच्या दिशानिर्देशन / परिभ्रमणाचे प्रतिनिधित्व करण्यासाठी दोन कोऑर्डिनेट फ्रेम विचारात घ्या. त्यापैकी एक मुख्य किंवा युनिव्हर्सल कोऑर्डिनेट फ्रेम 'U' आहे, आणि दुसरी रिजिड बॉडीशी संलग्न असलेली कोऑर्डिनेट फ्रेम 'B' आहे. रिजिड बॉडी स्थिर रेफेररन्स फ्रेम च्या तुलनेत गतीशील असते.

अवकाशातील रिजिड बॉडीचे दिशानिर्देशन कोऑर्डिनेट फ्रेम 'B' च्या युनिट वेक्टर घटकांच्या रूपात व्यक्त केले जाते.

रोल (Roll):. रोल हा रिजिड बॉडीच्या Z अक्षाभोवती होणारे परिभ्रमण आहे.

पिच (Pitch):. पिच हा रिजिड बॉडीच्या x अक्षाभोवती होणारा परिभ्रमण आहे.

यॉ (Yaw): यॉ हा रिजिड बॉडीच्या y अक्षाभोवती (वर दिशेकडे निर्देशित) होणारा परिभ्रमण आहे.

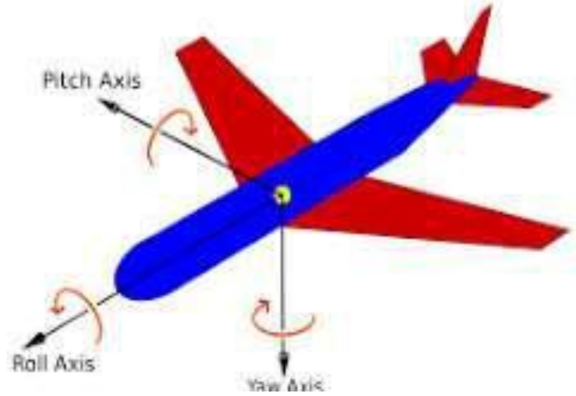


Figure:3.3

उड्डाण करताना एखादे विमान तीन परिमाणांमध्ये मोकळे परिभ्रमण करू शकते:

- यॉ (Yaw): वरून खाली जाणाऱ्या अक्षाभोवती परिभ्रमण, ज्यामध्ये विमानाचा नाक डावीकडे किंवा उजवीकडे फिरते.
- पिच (Pitch): पंखापासून पंखाकडे जाणाऱ्या अक्षाभोवती परिभ्रमण, ज्यामध्ये विमानाचे नाक वर किंवा खाली जाते.
- रोल (Roll): नाकापासून शेपटाकडे जाणाऱ्या अक्षाभोवती परिभ्रमण, ज्यामध्ये विमान एका बाजूला झुकते.

3.2.1 Z अक्षाभोवती प्राथमिक परिभ्रमण मॅट्रिक्स: Z अक्षाभोवती अँटीक्लॉकवाईस (Anticlockwise) दिशेने परिभ्रमणासाठी मॅट्रिक्स द्वारे दिलेले समीकरण:

रिजिड बॉडीच्या अवकाशातील दिशानिर्देशनाचे प्रतिनिधित्व बॉडी फ्रेम B च्या युनिट वेक्टर घटकांच्या स्वरूपात केले जाते, जे कोऑर्डिनेट फ्रेमच्या X, Y आणि Z अक्षांवर निर्देशित असतात आणि एका रेफेररन्स फ्रेम च्या तुलनेत निर्धारित केले जातात.

हे पुढीलप्रमाणे व्युत्पन्न केले जाते:

एका समान उगम असलेल्या दोन कोओर्डीनेट फ्रेम्स विचारात घ्या. त्यापैकी एक म्हणजे स्थिर किंवा युनिव्हर्सल कोओर्डीनेट फ्रेम 'U', ज्याचे अक्ष X, Y आणि Z आणि उगम O आहे. दुसरी म्हणजे रिजिड बॉडीची कोओर्डीनेट फ्रेम 'B', ज्याची अक्षे x_1, y_1 आणि z_1 आहेत.

ही रिजिड बॉडी स्थिर संदर्भ फ्रेमच्या तुलनेत गतीमध्ये आहे.

रिजिड बॉडीवरील Q या कोणत्याही बिंदूचा विचार करा. याचे युनिव्हर्सल कोओर्डीनेट फ्रेम 'U' मधील X, Y आणि Z अक्षांवरील कोओर्डीनेट q_x, q_Y आणि q_z आहेत, ज्याचे सदिश (Vector) स्वरूप QU असे दर्शवले जाते.

$$\bar{Q}_U = \begin{bmatrix} q_X \\ q_Y \\ q_Z \end{bmatrix}, \text{........ eqn. 1}$$

बिंदू Q चे बॉडी कोओर्डीनेट फ्रेम 'B' मधील x_1, y_1 आणि z_1 अक्षांवरील निर्देशांक q_{x1}, q_{Y1} आणि q_z_1 आहेत, ज्याचे सदिश (Vector) स्वरूप $\bar{Q}_B$ असे दर्शवले जाते. . So,

$$\bar{Q}_B = \begin{bmatrix} q_{X1} \\ q_{Y1} \\ q_{Z1} \end{bmatrix}, \text{........ eqn. 2}$$

स्थिर कोओर्डीनेट फ्रेम 'U' मधील बिंदू Q चे कोओर्डीनेट q_x, q_Y आणि q_z खालीलप्रमाणे शोधता येतात:

$$q_X = OB = EQ, q_Y = OE = QB$$

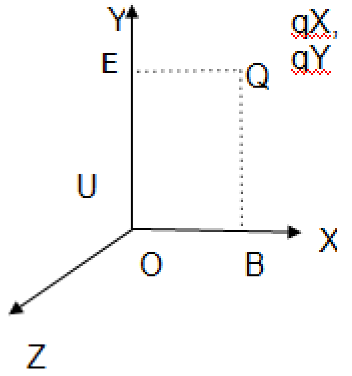


Figure:3.4

समजा बॉडी कोओर्डीनेट फ्रेम 'B' ही स्थिर फ्रेमच्या Z अक्षाभोवती θ कोनाने अँटीक्लॉकवाइझ (Anticlockwise) फिरवली आहे. म्हणून, z_1 अक्ष हा Z अक्षासारखाच राहील, परंतु x_1 अक्ष X पासून वेगळा असेल आणि y_1 अक्ष Y पासून वेगळा असेल.

बॉडी कोओर्डीनेट फ्रेम 'B' मधील बिंदू Q चे निर्देशांक q_{x1}, q_{Y1} आणि q_z_1 खालीलप्रमाणे शोधता येतात:

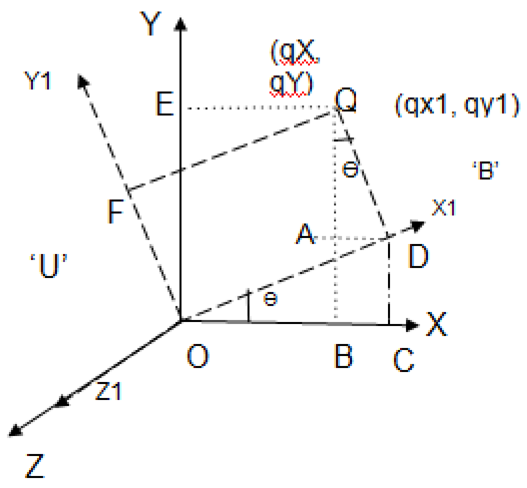


Figure:3.5

कोन θ साठी OCD या त्रिकोणाचा विचार करा

$$\sin\theta = \frac{DC}{OD} = \frac{DC}{q_{x1}}, \quad DC = q_{x1}\sin\theta \quad , \quad \cos\theta = \frac{OC}{OD} = \frac{OC}{q_{x1}}, \quad OC = q_{x1}\cos\theta$$

कोन θ साठी AQD या त्रिकोणाचा विचार करा.

$$\sin\theta = \frac{AD}{QD} = \frac{AD}{q_{y1}}, \quad AD = q_{y1}\sin\theta \quad , \quad \cos\theta = \frac{AQ}{QD} = \frac{AQ}{q_{y1}}, \quad AQ = q_{y1}\cos\theta$$

बिंदू Q चे दोन्ही कोओर्डीनेट फ्रेम्स (U आणि B) मधील संबंध पुढीलप्रमाणे आहेत:

$$q_X = OB = OC - BC$$

Therefore,

$$q_X = q_{x1} \cos\theta - q_{y1} \sin\theta + q_{z1} \times 0$$

(note: z coordinate is zero since the rotation is about Z axis.)

Similarly,

$$q_Y = QB = AB + AQ = CD + AQ$$

Therefore,

$$q_Y = q_{x1} \sin\theta + q_{y1} \cos\theta + q_{z1} \times 0$$

(Note: z coordinate is zero since the rotation is about Z axis.)

Similarly,

$q_Z = q_{x1} \times 0 + q_{y1} \times 0 + q_{z1} \times 1$

(note: x & y coordinates are 0 and z coordinate is 1 since the rotation is about Z axis.)

वरील समीकरणे मॅट्रिक्स स्वरूपात रूपांतरित केल्यास

$$\begin{bmatrix} q_X \\ q_Y \\ q_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & -sin\theta & 0 \\ sin\theta & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{x1} \\ q_{y1} \\ q_{z1} \end{bmatrix}$$

वरील मॅट्रिक्स समीकरण पुढीलप्रमाणे लिहिता येते: $\bar{Q}_U = R(\bar{Z}, \theta) \times \bar{Q}_B$

तर, θ कोनाने Z अक्षाभोवती फिरणे मॅट्रिक्स $R(\bar{Z}, \theta)$ द्वारे दिले जाते:

$$R(\bar{Z}, \quad \theta) = \begin{bmatrix} cos\theta & -sin\theta & 0 \\ sin\theta & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2.2 प्राथमिक परिभ्रमण मॅट्रिक्स – X अक्षाभोवती:

X अक्षाभोवती अँटीक्लॉकवाईस (Anticlockwise) परिभ्रमण करणारे मॅट्रिक्स खालीलप्रमाणे आहे:

$$R(\bar{X}, \quad \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\theta & -sin\theta \\ 0 & sin\theta & cos\theta \end{bmatrix}$$

येथे, X अक्षाशी संबंधित पंक्ती आणि स्तंभ अपरिवर्तित आहेत, याचा अर्थ असा की X अक्षाच्या दिशेने असलेले कोणतेही वेक्टर बदलत नाहीत.

3.2.3 प्राथमिक परिभ्रमण मॅट्रिक्स – Y अक्षाभोवती:

Y अक्षाभोवती विरोधी दिशेने (Anticlockwise) परिभ्रमण करणारे मॅट्रिक्स खालीलप्रमाणे आहे:

$$\text{Rot } (\bar{Y}, \quad 90) = \begin{bmatrix} cos\theta & 0 & sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\theta & 0 & cos\theta \end{bmatrix}$$

येथे, Y अक्षाशी संबंधित पंक्ती आणि स्तंभ अपरिवर्तित आहेत, याचा अर्थ असा की Y अक्षाच्या दिशेने असलेले कोणतेही वेक्टर बदलत नाहीत.

वरील संकल्पना खालीलप्रमाणे OSS 6.1, 6.2, 6.3 द्वारा पडताळल्या जातात.

स्वाध्याय:

1. जर मॅनिप्युलेटरचे Y अक्षाभोवती 90 अंशाने फिरवले असेल, तर Root ((Y,)¯90) काढा.

   (If the rotation about Y Axis is by an angle 90 degree then find out Rot $(\bar{Y}, \; 90)$)

$$\text{Rot } (\bar{Y}, \quad 90) = \begin{bmatrix} cos\theta & 0 & sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\theta & 0 & cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos90 & 0 & sin90 \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin90 & 0 & cos90 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.3 कोऑर्डिनेट रूपांतरण (Coordinate Transformation)

कोऑर्डिनेट रूपांतरण म्हणजे एका शरीरास जोडलेल्या समाक्ष प्रणालीच्या स्थितीत व दिशानिर्देशनात बदल होणे.

- रोबोट मॅनिप्युलेटरमध्ये अनेक सांधे असतात जे लिंकद्वारे जोडलेले असतात.
- एंड-इफेक्टरच्या स्थिती आणि दिशानिर्देशन शोधण्यासाठी, बेसशी त्याचे नाते शोधणे आवश्यक असते.
- प्रत्येक लिंकला जोडलेल्या कोऑर्डिनेट प्रणालींमध्ये कोऑर्डिनेट रूपांतरण करून पूर्ण वर्णन करता येते.

विभिन्न कोऑर्डिनेट फ्रेम्समधून हलण्यासाठी, 'समन्वय रूपांतरण' वापरले जातात, जे एका फ्रेम्स मधील बिंदूची पोझिशन आणि ओरिएंटेशन दुसऱ्या फ्रेम्सच्या तुलनेत गणनात्मक पद्धतीने काढण्यासाठी वापरले जातात. कोऑर्डिनेट रूपांतरणे मॅट्रिक्स आणि वेक्टर क्रियांद्वारे केली जातात

कोऑर्डिनेट रूपांतरण समीकरणे

हे दोन रिजिड बॉडीच्या कोऑर्डिनेट फ्रेम्समधील संबंध आहे, जे युनिव्हर्सल रेफेरेंन्स कोऑर्डिनेट फ्रेम U आणि बॉडी कोऑर्डिनेट फ्रेम B आहे.

रोबोट मॅनिपुलेटरच्या प्रत्येक जॉइंटची स्वतःची रेफरन्स फ्रेम असते ज्याचे स्वतःचे ओरिजिन आणि युनिट व्हेक्टर फ्रेमच्या X,Y,Z अक्षांसह निर्देशित करतात.

अंतराळातील कोऑर्डिनेट फ्रेम B असलेल्या रिजिड बॉडीची स्थिती निश्चित कोऑर्डिनेट फ्रेम, U च्या ओरिजिन O च्या संदर्भात बॉडीवरील योग्य बिंदू Q च्या स्थितीनुसार व्यक्त केली जाते.

अंतराळातील रिजिड बॉडीचे ओरिएंटेशन त्याच्या बॉडीफ्रेमच्या युनिट वेक्टर, B , निश्चित फ्रेम U घटकांनुसार व्यक्त केले जाते.

U आणि B या दोन कोऑर्डिनेट फ्रेममधील संबंध खालीलप्रमाणे दर्शविला आहे:

$$\begin{bmatrix} \bar{Q}_U \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^U_B R & \bar{t}_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Q}_B \\ 1 \end{bmatrix}$$

ट्रान्सलेशन आणि रोटेशन नुसार वरील समीकरण हे 'कोऑर्डिनेट परिवर्तन' दर्शवते, बिंदू Q च्या रिजिड बॉडीपासून फ्रेम B पासून स्थिर फ्रेम, U पर्यंत हलवते. त्यावरून t̅_B फ्रेम हे ट्रान्सलेशन दर्शविणारा पोझिशन वेक्टर मिळाला आहे.

$$\bar{t}_B = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}, \bar{Q}_U = \begin{bmatrix} q_X \\ q_Y \\ q_Z \end{bmatrix}, \bar{Q}_B = \begin{bmatrix} q_{x1} \\ q_{y1} \\ q_{z1} \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} {}^U_B R & \bar{t}_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ मॅट्रिक्स हे होमोजिनिअस ट्रान्सलेशन मॅट्रिक्स (HTM) आहे

3.3.1 होमोजिनिअस ट्रान्सलेशन मॅट्रिक्स (HTM)

होमोजिनिअस ट्रान्सलेशन मॅट्रिक्स (HTM) हे मॅट्रिक्स जे निश्चित (fix) फ्रेमच्या संदर्भात मुख्य भागाशी संलग्न फ्रेमचे ट्रान्सलेशन आणि रोटेशन दोन्ही दर्शवते.

होमोजिनिअस ट्रान्सलेशन मॅट्रिक्स (HTM) T

$$T = \begin{bmatrix} {}^U_B R & \bar{t}_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

फ्रेम B फ्रेमचे U च्या रेफेरन्सने होणारे रोटेशन:

$$ {}^{U}_{B}R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \bar{t}_B = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} $$

शुद्ध ट्रान्सलेशनासाठी HTM

कोणतेही रोटेशन नसताना शुद्ध ट्रान्सलेशनासाठी आणि ट्रान्सलेशन नसताना शुद्ध रोटेशनसाठी HTM मिळवता येते. शुद्ध रोटेनासाठी HTM (कोणतेही ट्रान्सलेशन नसताना)

$$ T = \begin{bmatrix} {}^{U}_{B}R & \bar{t}_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} $$

ट्रान्सलेशन शिवाय रोटेशन X अक्षावर असल्यास, HTM असे असेल:

$$ T\ for\ Rot(x,\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cos\theta & -sin\theta & 0 \\ 0 & sin\theta & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ T\ for\ Rot(y,\theta) = \begin{bmatrix} cos\theta & 0 & sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -sin\theta & 0 & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ T\ for\ Rot(Z,\theta) = \begin{bmatrix} cos\theta & -sin\theta & 0 & 0 \\ sin\theta & cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

शुद्ध ट्रान्सलेशनासाठी HTM (कोणतेही रोटेशन नसताना)

$$ T = \begin{bmatrix} I & \bar{t}_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{Where } I = Identity\ matrix $$

रोटेशन शिवाय जर ट्रान्सलेशन X अक्षावर असल्यास, HTM असे असेल:

$$ T\ \ along\ X\ axis = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

त्याचप्रमाणे,

$$ T\ \ along\ Y\ axis = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ T\ \ along\ Z\ axis = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

वर नमूद केलेला सिद्धांत LLO 7.1, 7.2, 7.3 द्वारे OSS वापरून सत्यापित केला आहे

3.3.2 सोडवलेली उदाहरणे :

1. फ्रेम B मधील Q बिंदूसाठी ट्रान्सलेशन न करता युनिव्हर्सल कोऑर्डिनेट सिस्टीमच्या Z अक्षासह 90 अंशाने फिरण्यासाठी HTM शोधा. (Find out the HTM for rotation by 90 degree along Z axis of the Universal coordinate system without translation for a point Q in frame B)

$$T\ for\ Rot(Z,90)=\begin{bmatrix}cos90 & -sin90 & 0 & 0\\ sin90 & cos90 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & -1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

2. फ्रेम B मधील Q बिंदूसाठी रोटेशन न करता युनिव्हर्सल कोऑर्डिनेट सिस्टीमच्या Y अक्षासह 4 युनिट्सद्वारे ट्रान्सलेशनासाठी HTM शोधा (Find out the HTM for translation by 4 units along Y axis of the Universal coordinate system without rotation for a point Q in frame B)

$$T\ along\ Y\ axis=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 4\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

3. फ्रेम B हे युनिव्हर्सल कोऑर्डिनेट सिस्टीमच्या X अक्षाभोवती 90 अंशांनी फिरवले जाते आणि नंतर ट्रान्सलेशनशिवाय Z अक्षाभोवती 90 अंशांनी फिरवले जाते. HTM शोधा (A frame B is rotated about the X axis of the Universal coordinate system by 90 degrees and then about the Z axis by 90 degrees without translation. Find out HTM)

$$HTM=\begin{bmatrix}0 & -1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -1 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$R(X,90)R(Z,90)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & cos90 & -sin90\\ 0 & sin90 & cos90\end{bmatrix}\begin{bmatrix}cos90 & -sin90 & 0\\ sin90 & cos90 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -1\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0 & -1 & 0\\ 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & -1 & 0\\ 0 & 0 & -1\\ 1 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$HTM=\begin{bmatrix}0 & -1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -1 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

4. एक फ्रेम B हे युनिव्हर्सल कोऑर्डिनेट सिस्टीमच्या X अक्षावर ट्रान्सलेशनशिवाय 90 अंशांनी फिरवले जाते. B मधील Q बिंदूची स्थिती [10 2 8]T ने दिली आहे. $\bar{Q}_U$शोधा. (A frame B is rotated about the X axis of the Universal coordinate system by 90 degrees without translation. Let the position of a point Q in B is given by $[10\ \ 2\ \ 8]^T$. Find out $\bar{Q}_U$

$$\begin{bmatrix}\bar{Q}_U\\ 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}{}^U_BR & \bar{t}_B\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{Q}_B\\ 1\end{bmatrix}$$

$$HTM=T=\begin{bmatrix}{}^U_BR & \bar{t}_B\\ 0 & 1\end{bmatrix}$$

$${}^U_BR=R(X,90)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & cos90 & -sin90\\ 0 & sin90 & cos90\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & -1\\ 0 & 1 & 0\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{Q}_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 2 \\ 8 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{t}_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{Q}_U \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 10 \\ 2 \\ 8 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ -8 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

5. फ्रेम B चे भाषांतर युनिव्हर्सल कोऑर्डिनेट सिस्टीमच्या Z अक्षासह 10 युनिट्सने रोटेशनशिवाय केले जाते. B मधील Q बिंदूची स्थिती [0 5 3] T ने दिली आहे. $\bar{Q}_U$ शोधा.(A frame B is translated along the Z axis of the Universal coordinate system by 10 units without rotation. Let the position of a point Q in B is given by [0 5 3] ^{T}. Find out $\bar{Q}_U$

$$\begin{bmatrix} \bar{Q}_U \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^U_B R & \bar{t}_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Q}_B \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$HTM = T = \begin{bmatrix} {}^U_B R & \bar{t}_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R\ for\ no\ rotation = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \bar{t}_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \\ 1 \end{bmatrix}$$

For no rotation, $T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

$$\begin{bmatrix} \bar{Q}_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 5 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{Q}_U \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 5 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 5 \\ 13 \\ 1 \end{bmatrix}$$

6. फ्रेम B हे युनिव्हर्सल कोऑर्डिनेट सिस्टीमच्या X अक्षावर 90 अंशांनी फिरवले जाते आणि Xu, Yu आणि Zu सोबत अनुक्रमे 1, 2 आणि 1 युनिटने भाषांतरित केले जाते. B मधील Q बिंदूची स्थिती [1 2 3] T ने दिली आहे. $\bar{Q}_U$ शोधा (A frame B is rotated about the X axis of the Universal coordinate system by 90 degrees and translated along Xu, Yu and Zu by 1, 2 and 1 unit(s), respectively. Let the position of a point Q in B is given by $[1\ 2\ 3]^T$. Find out $\bar{Q}_U$)

$$\begin{bmatrix}\bar{Q}_U\\1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}{}^U_BR & \bar{t}_B\\0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{Q}_B\\1\end{bmatrix}$$

$$HTM = T = \begin{bmatrix}{}^U_BR & \bar{t}_B\\0 & 1\end{bmatrix}$$

$${}^U_BR = R(X,90) = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\0 & cos90 & -sin90\\0 & sin90 & cos90\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\0 & 0 & -1\\0 & 1 & 0\end{bmatrix}$$

It is given as Q in B = $\bar{Q}_B = [1 \quad 2 \quad 3]^T$

$$\begin{bmatrix}\bar{Q}_B\\1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1\\2\\3\\1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar{t}_B\\1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1\\2\\1\\1\end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 1\\0 & 0 & -1 & 2\\0 & 1 & 0 & 1\\0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\bar{Q}_U\\1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 1\\0 & 0 & -1 & 2\\0 & 1 & 0 & 1\\0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\2\\3\\1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}2\\-1\\3\\1\end{bmatrix}$$

3.4 डेनेविट-हार्टनबर्ग (DH) पॅरामीटर्स किंवा किनेमॅटिक पॅरामीटर्स किंवा जॉइंट-लिंक पॅरामीटर्स, DH नियम, 2R, 2P, 3P, 3R, SCARA सारख्या दिलेल्या मॅनिपुलेटरसाठी DH टेबल

डीएच पॅरामीटर्स चार पॅरामीटर्ससह रोबोटच्या प्रत्येक जॉइंटचे प्रतिनिधित्व करतात, प्रत्येक मागील जॉइंटच्या संदर्भात घेतले जातात.

DH पॅरामीटर्स रोबोटच्या प्रत्येक सांध्याचे वर्णन चार मापदंडांद्वारे करतात:

1. संयुक्त विस्थापन (d): Z अक्षावर अनुवाद

- हे पूर्वस्थितील (Previous) Z-अक्षाच्या बाजूने केलेले ट्रान्सलेशन आहे, जे पूर्वस्थितील X अक्षाला वर्तमान X अक्षाशी छेदण्यासाठी आवश्यक आहे.
- हे पूर्वस्थितील Z-अक्षाच्या बाजूने पूर्वस्थित X-अक्ष आणि वर्तमान X-अक्ष यांच्यातील अंतर आहे.

2. संयुक्त कोन (θ): Z अक्षाभोवती परिभ्रमण

- हे पूर्वस्थितील Z अक्षाच्या भोवतालचे रोटेशन आहे ज्यामुळे पूर्वस्थितील X अक्ष वर्तमान X अक्षाच्या समांतर होईल. जेव्हा रोटेशन काउंटर क्लॉकवाईज केले जाते तेव्हा ते सकारात्मक असते .

3. लिंक लांबी (ai or r): X अक्षावर अनुवाद:

- हे ट्रान्सलेशन वर्तमान X-अक्षाला, पूर्वस्थितील Z-अक्षाला वर्तमान Z-अक्षाशी एकसारखं करणे आवश्यक आहे. जर पूर्वस्थितील Z-अक्ष वर्तमान Z-अक्षाशी एकसारखा झाला, तर लिंक लांबी शून्य होईल.
- हे वर्तमान X-अक्षावर पूर्वस्थितील Z-अक्ष आणि वर्तमान Z-अक्ष यामधील अंतर आहे.

4. ट्विस्ट कोन (αi): X अक्षाभोवती रोटेशन:

- हे वर्तमान X-अक्षाच्या भोवतालचे रोटेशन आहे , ज्यामुळे पूर्वस्थितील Z-अक्ष वर्तमान Z-अक्षाला समांतर होईल.
- हे वर्तमान X-अक्षाभोवती पूर्वस्थितील आणि वर्तमान Z-अक्षांमधील कोन म्हणून मोजले जाते.

वरील उल्लेखित सिद्धांत LLO 8.1 द्वारे OSS चा उपयोग करून सत्यापित केला आहे.

3.4.1 खालील गोष्टींसाठी DH पॅरामीटर टेबल तयार करा:

1. आकृतीत दिलेल्या 2P म्यानिप्युलेटरचे DH पॅरामीटर्स शोधा:

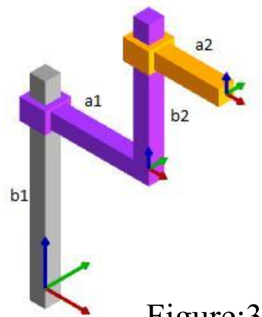


Figure:3.6

Table 3.1: D-H parameters:

Frame i	d or bi (Joint offset)	θi (Joint angle)	ai or r (Link length)	αi (Twist angle)
1	b_1(joint variable)	0	a1	0
2	b_2(joint variable)	0	a2	0

2. **आकृतीत दिलेल्या 3P म्यानिप्युलेटरचे DH पॅरामीटर्स शोधा:**

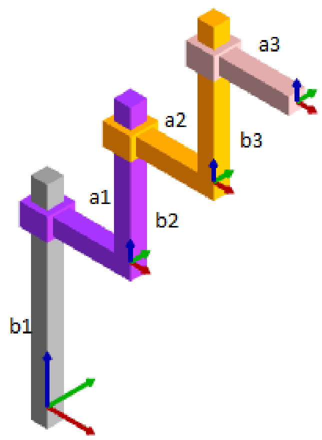


Figure:3.7

Table 3.2: D-H parameters:

Frame i	*d or bi* (Joint offset)	*θi* (Joint angle)	*ai* or r (Link length)	*αi* (Twist angle)
1	b_1(joint variable)	*0*	a_1	0
2	b_2(joint variable)	*0*	a_2	0
2	b_3(joint variable)	*0*	a_3	0

3. **आकृतीत दिलेल्या 2R म्यानिप्युलेटरचे DH पॅरामीटर्स शोधा:**
   DH Parameters of a 2R manipulator given in the below figure:
   (Axis Z is perpendicular to the plane of page)

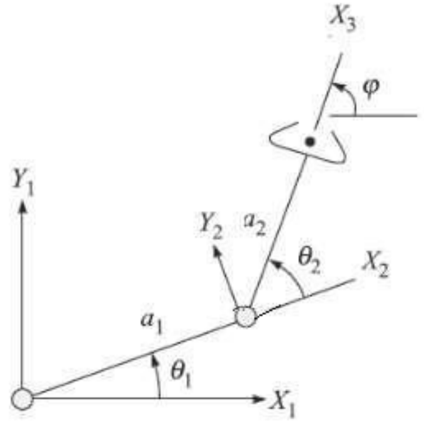


Figure:3.8

Table 3.3: D-H parameters:

Frame i	*d or bi* (Joint offset)	*θi* (Joint angle)	*ai* or r (Link length)	*αi* (Twist angle)
1	0	θ_1(joint variable)	a_1	0
2	0	θ_2(joint variable)	a_2	0

4. **आकृतीत दिलेल्या 3R म्यानिप्युलेटरचे DH पॅरामीटर्स शोधा: (DH Parameters of a 3Rmanipulator given in the figure:)** Axis Z is perpendicular to the plane of page;

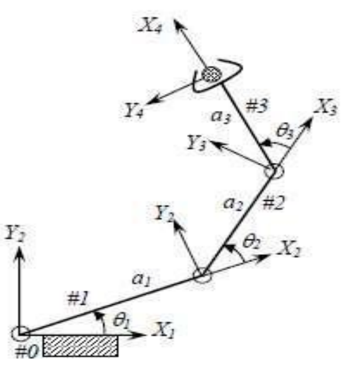


Figure:3.9

Table 3.4: D-H parameters:

Frame i	*d or bi* (Joint offset)	θi (Joint angle)	*ai* or r (Link length)	αi (Twist angle)
1	0	θ_1	a_1	0
2	0	θ_2	a_2	0
3	0	θ_3	a_3	0

5. आकृतीमध्ये दिलेल्या SCARA चे DH पॅरामीटर्स शोधा: DH Parameters of SCARA given in the figure:

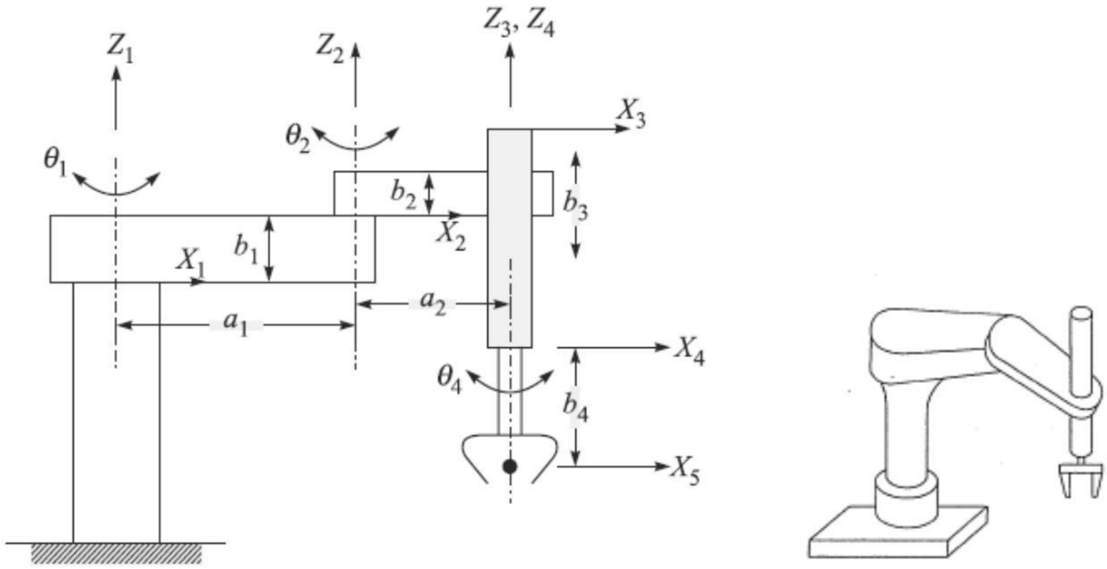


Figure:3.10

SCARA मध्ये 3 रोटरीजॉइंट व एक प्रीझम्याटिक जॉइंट आहे. DH टेबल खाली दाखवले आहे

Table 3.5: D-H parameters:

Frame i	*d or bi* (Joint offset)	θi (Joint angle)	*ai* or r (Link length)	αi (Twist angle)
1	b_1	θ_1(joint variable)	a_1	0
2	b_2	θ_2(joint variable)	a_2	0
3	b_3 (joint variable)	0	0	0
4	$-b_4$	θ_4(joint variable)	0	0

3.5 DH फ्रेम्समधील ट्रान्सलेशन आणि संबंधित HTM, Ti (Transformation between DH frames and the corresponding HTM, T_i (from the frame i to the frame i + 1))

DH फ्रेम्समधील रूपांतर आणि संबंधित HTM प्राप्त करण्यासाठी, DH पॅरामीटर्सशी संबंधित चार प्राथमिक ट्रान्सलेशन खालीलप्रमाणे प्राप्त करा आणि नंतर त्यांचा गुणाकार करा.

DH पॅरामीटर्सशी संबंधित चार प्राथमिक रूपांतर:

i) फ्रेम i ला जॉईंट ऑफसेट bi नुसार Zi अक्षावर ट्रान्सलेट केले जाते:

ट्रान्सलेशन मॅट्रिक्स पुढे दिले असेल

$$T_{bi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ii) ट्रान्सल्टेड फ्रेमला Zi अक्षाभोवती जॉईंट कोन θi नुसार रोटेट करा

ट्रान्सलेशन मॅट्रिक्स पुढे दिले असेल

$$T_{\theta i} = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i & 0 & 0 \\ sin\theta_i & cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

iii) ट्रान्सल्टेड फ्रेम i ला Xi+1अक्षावर लिंक ai ने रोटेट करा

ट्रान्सलेशन मॅट्रिक्स पुढे दिले असेल

$$T_{ai} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

iv) ट्रान्सल्टेड फ्रेम i ला Xi+1अक्षावर ट्विस्ट कोन α_i ने रोटेट करा

ट्रान्सलेशन मॅट्रिक्स पुढे दिले असेल

$$T_{\alpha i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cos\alpha_i & -sin\alpha_i & 0 \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

फ्रेम i+1 त्याच्या मागील फ्रेम i च्या संदर्भातील परिणामी निर्देशांक परिवर्तन Ti (जे अनुक्रमे लिंक i−1 आणि i ला संलग्न आहेत) वरील चार मूलभूत रूपांतरणांचे पश्च-गुणाकार करून प्राप्त होते. हे डीएच (DH) पॅरामीटर्ससाठी संबंधित चार मूलभूत रूपांतरणांपासून वैयक्तिक HTM आहे, जेथे i=1,…,n.

DH ट्रान्सफॉरमेशन मॅट्रिक्स (फ्रेम i ते फ्रेम i + 1) = $\mathbf{T_{bi}T_{\theta i}T_{ai}T_{\alpha i}}$

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i & 0 & 0 \\ sin\theta_i & cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cos\alpha_i & -sin\alpha_i & 0 \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i & 0 & 0 \\ sin\theta_i & cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cos\alpha_i & -sin\alpha_i & 0 \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i & 0 & a_i cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\theta_i & 0 & a_i sin\theta_i \\ 0 & 0 & 1 & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cos\alpha_i & -sin\alpha_i & 0 \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_i = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i cos\alpha_i & sin\theta_i sin\alpha_i & a_i cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\theta_i cos\alpha_i & -cos\theta_i sin\alpha_i & a_i sin\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} for \ \ i = 1,2,3,4$$

एक्सप्रेसशन Ti यास ट्रान्सफॉरमेशन मॅट्रिक्स किंवा HTM असेही वाचले जाऊ शकते, जे फ्रेम i+1 चे ट्रान्सलेशन दर्शवते, जी लिंक i ला संलग्न आहे आणि फ्रेम i मध्ये प्रस्तुत आहे, जी लिंक i–1 ला संलग्न आहे. वरील उल्लेखित सिद्धांत LLO 9.1 द्वारे OSS वापरून सत्यापित केला जातो.

3.5.1 DH पॅरामीटर्स शोधण्यासाठी संख्यात्मक पद्धत आणि डीएच परिवर्तन मॅट्रिक्स तयार करणे:

1. खालील आकृतीसाठी डीएच पॅरामीटर्स शोधा आणि समरूपी परिवर्तन मॅट्रिक्स तयार करा.

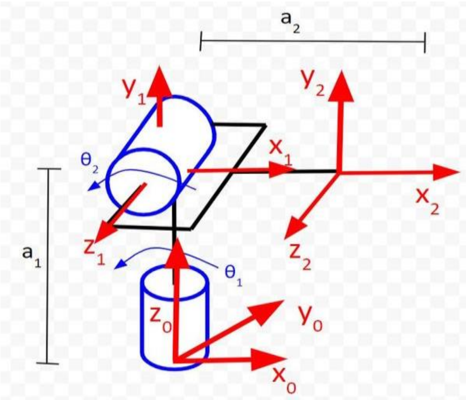


Figure:3.11

Table 3.6: DH टेबल

Frame i	*d or bi* (Joint offset)	*θi* (Joint angle)	*ai* or r (Link length)	*α i* (Twist angle)
1	a_1	θ_1	0	90
2	0	θ_2	a_2	0

$$T_i = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i cos\alpha_i & sin\theta_i sin\alpha_i & a_i cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\theta_i cos\alpha_i & -cos\theta_i sin\alpha_i & a_i sin\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} for \ \ i = 1,2$$

Here, i=1,2

Since there are two joints here, there will be two DH transformation matrices, T_1 and T_2.

$$HTM \quad T_1 = \begin{bmatrix} cos\theta_1 & -sin\theta_1 cos90 & sin\theta_1 sin90 & 0cos\theta_1 \\ sin\theta_1 & cos\theta_1 cos90 & -cos\theta_1 sin90 & 0sin\theta_1 \\ 0 & sin90 & cos90 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$HTM \quad T_1 = \begin{bmatrix} cos\theta_1 & 0 & sin\theta_1 & 0 \\ sin\theta_1 & 0 & -cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$HTM \quad T_2 = \begin{bmatrix} cos\theta_2 & -sin\theta_2 cos0 & sin\theta_2 sin0 & a_2 cos\theta_1 \\ sin\theta_2 & cos\theta_2 cos0 & -cos\theta_2 sin0 & a_2 sin\theta_1 \\ 0 & sin90 & cos90 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$HTM \quad T_2 = \begin{bmatrix} cos\theta_2 & -sin\theta_2 & 0 & a_2cos\theta_1 \\ sin\theta_2 & cos\theta_2 & 0 & a_2sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2. खालील आकृतीसाठी डीएच पॅरामीटर्स शोधा आणि समरूपी परिवर्तन मॅट्रिक्स तयार करा.

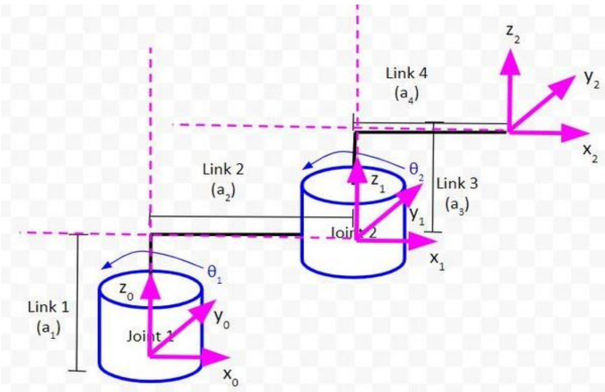


Figure:3.12

Table 3.7: DH टेबल

Frame i	*d or bi* (Joint offset)	*θi* (Joint angle)	*ai* or r (Link length)	*α i* (Twist angle)
1	**a_1**	θ_1(joint variable)	**a_2**	**0**
2	**a_3**	θ_2(joint variable)	**a_4**	**0**

$$T_i = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i cos\alpha_i & sin\theta_i sin\alpha_i & a_i cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\theta_i cos\alpha_i & -cos\theta_i sin\alpha_i & a_i sin\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} for \;\; i = 1,2,3,4$$

Here, i=1, 2

Since there are two joints here, there will be two DH transformation matrices, T_1 and T_2.

$$T_1 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_1} & -sin\boldsymbol{\theta_1}cos0 & sin\boldsymbol{\theta_1}sin0 & \boldsymbol{a_2}cos\boldsymbol{\theta_1} \\ sin\boldsymbol{\theta_1} & cos\boldsymbol{\theta_1}cos0 & -cos\boldsymbol{\theta_1}sin0 & \boldsymbol{a_2}sin\boldsymbol{\theta_1} \\ 0 & sin0 & cos0 & \boldsymbol{a_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_1} & -sin\boldsymbol{\theta_1} & 0 & \boldsymbol{a_2}cos\boldsymbol{\theta_1} \\ sin\boldsymbol{\theta_1} & cos\boldsymbol{\theta_1} & 0 & \boldsymbol{a_2}sin\boldsymbol{\theta_1} \\ 0 & 0 & 1 & \boldsymbol{a_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_2} & -sin\boldsymbol{\theta_2}cos0 & sin\boldsymbol{\theta_2}sin0 & \boldsymbol{a_4}cos\boldsymbol{\theta_2} \\ sin\boldsymbol{\theta_2} & cos\boldsymbol{\theta_2}cos0 & -cos\boldsymbol{\theta_2}sin0 & \boldsymbol{a_4}sin\boldsymbol{\theta_2} \\ 0 & sin0 & cos0 & \boldsymbol{a_3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_2} & -sin\boldsymbol{\theta_2} & 0 & \boldsymbol{a_4}cos\boldsymbol{\theta_2} \\ sin\boldsymbol{\theta_2} & cos\boldsymbol{\theta_2} & 0 & \boldsymbol{a_4}sin\boldsymbol{\theta_2} \\ 0 & 0 & 1 & \boldsymbol{a_3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. खालील आकृतीसाठी डीएच पॅरामीटर्स शोधा आणि समरूपी परिवर्तन मॅट्रिक्स तयार करा.

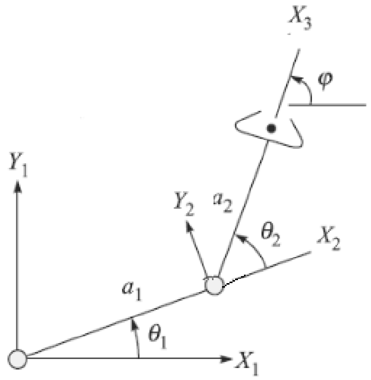


Figure:3.13

Table 3.8: DH Table

Frame i	*d or bi* (Joint offset)	*θi* (Joint angle)	*ai* or r (Link length)	*α i* (Twist angle)
1	**0**	θ_1(joint variable)	$\mathbf{a_1}$	**0**
2	**0**	θ_2(joint variable)	$\mathbf{a_2}$	**0**

$$T_i = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i cos\alpha_i & sin\theta_i sin\alpha_i & a_i cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\theta_i cos\alpha_i & -cos\theta_i sin\alpha_i & a_i sin\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} for \;\; i = 1,2$$

After substituting the DH parameters for each frame, there will be two HTMs as below

$$T_1 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_1} & -sin\boldsymbol{\theta_1}cos0 & sin\boldsymbol{\theta_1}sin0 & \boldsymbol{a_1}cos\boldsymbol{\theta_1} \\ sin\boldsymbol{\theta_1} & cos\boldsymbol{\theta_1}cos0 & -cos\boldsymbol{\theta_1}sin0 & \boldsymbol{a_1}sin\boldsymbol{\theta_1} \\ 0 & sin0 & cos0 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_1} & -sin\boldsymbol{\theta_1} & 0 & \boldsymbol{a_1}cos\boldsymbol{\theta_1} \\ sin\boldsymbol{\theta_1} & cos\boldsymbol{\theta_1} & 0 & \boldsymbol{a_1}sin\boldsymbol{\theta_1} \\ 0 & 0 & 1 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_2} & -sin\boldsymbol{\theta_2}cos0 & sin\boldsymbol{\theta_2}sin0 & \boldsymbol{a_2}cos\boldsymbol{\theta_2} \\ sin\boldsymbol{\theta_2} & cos\boldsymbol{\theta_2}cos0 & -cos\boldsymbol{\theta_2}sin0 & \boldsymbol{a_2}sin\boldsymbol{\theta_2} \\ 0 & sin0 & cos0 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_2} & -sin\boldsymbol{\theta_2} & 0 & \boldsymbol{a_2}cos\boldsymbol{\theta_2} \\ sin\boldsymbol{\theta_2} & cos\boldsymbol{\theta_2} & 0 & \boldsymbol{a_2}sin\boldsymbol{\theta_2} \\ 0 & 0 & 1 & \boldsymbol{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. खालील आकृतीसाठी डीएच पॅरामीटर्स शोधा आणि समरूपी परिवर्तन मॅट्रिक्स तयार करा.

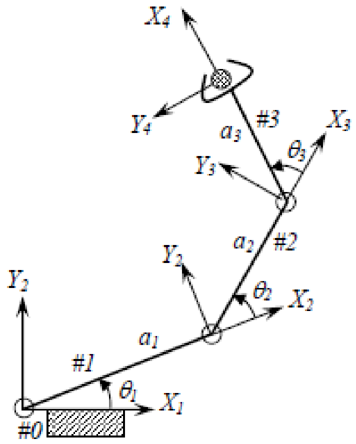


Figure:3.14

Table 3.9: DH Table

Frame i	*d or bi* (Joint offset)	*θi* (Joint angle)	*ai* or r (Link length)	*α i* (Twist angle)
1	0	θ_1(joint variable)	a_1	0
2	0	θ_2(joint variable)	a_2	0
3	0	θ_3(joint variable)	a_3	0

HTM:

$$T_i = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i cos\alpha_i & sin\theta_i sin\alpha_i & a_i cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\theta_i cos\alpha_i & -cos\theta_i sin\alpha_i & a_i sin\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} for \;\; i = 1,2,3$$

After substituting the DH parameters for each frame, there will be three HTMs as below:

$$T_1 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_1} & -sin\boldsymbol{\theta_1}cos0 & sin\boldsymbol{\theta_1}sin0 & \boldsymbol{a_1}cos\boldsymbol{\theta_1} \\ sin\boldsymbol{\theta_1} & cos\boldsymbol{\theta_1}cos0 & -cos\boldsymbol{\theta_1}sin0 & \boldsymbol{a_1}sin\boldsymbol{\theta_1} \\ 0 & sin0 & cos0 & \boldsymbol{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_1} & -sin\boldsymbol{\theta_1} & 0 & \boldsymbol{a_1}cos\boldsymbol{\theta_1} \\ sin\boldsymbol{\theta_1} & cos\boldsymbol{\theta_1} & 0 & \boldsymbol{a_1}sin\boldsymbol{\theta_1} \\ 0 & 0 & 1 & \boldsymbol{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

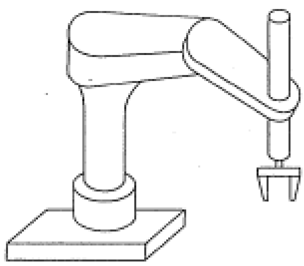
$$T_2 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_2} & -sin\boldsymbol{\theta_2}cos0 & sin\boldsymbol{\theta_2}sin0 & \boldsymbol{a_2}cos\boldsymbol{\theta_2} \\ sin\boldsymbol{\theta_2} & cos\boldsymbol{\theta_2}cos0 & -cos\boldsymbol{\theta_2}sin0 & \boldsymbol{a_2}sin\boldsymbol{\theta_2} \\ 0 & sin0 & cos0 & \boldsymbol{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_2} & -sin\boldsymbol{\theta_2} & 0 & \boldsymbol{a_2}cos\boldsymbol{\theta_2} \\ sin\boldsymbol{\theta_2} & cos\boldsymbol{\theta_2} & 0 & \boldsymbol{a_2}sin\boldsymbol{\theta_2} \\ 0 & 0 & 1 & \boldsymbol{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_3} & -sin\boldsymbol{\theta_3}cos0 & sin\boldsymbol{\theta_3}sin0 & \boldsymbol{a_3}cos\boldsymbol{\theta_3} \\ sin\boldsymbol{\theta_3} & cos\boldsymbol{\theta_3}cos0 & -cos\boldsymbol{\theta_3}sin0 & \boldsymbol{a_3}sin\boldsymbol{\theta_3} \\ 0 & sin0 & cos0 & \boldsymbol{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_3} & -sin\boldsymbol{\theta_3} & 0 & \boldsymbol{a_3}cos\boldsymbol{\theta_3} \\ sin\boldsymbol{\theta_3} & cos\boldsymbol{\theta_3} & 0 & \boldsymbol{a_3}sin\boldsymbol{\theta_3} \\ 0 & 0 & 1 & \boldsymbol{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5. खालील आकृतीसाठी डीएच पॅरामीटर्स शोधा आणि समरूपी परिवर्तन मॅट्रिक्स तयार करा:



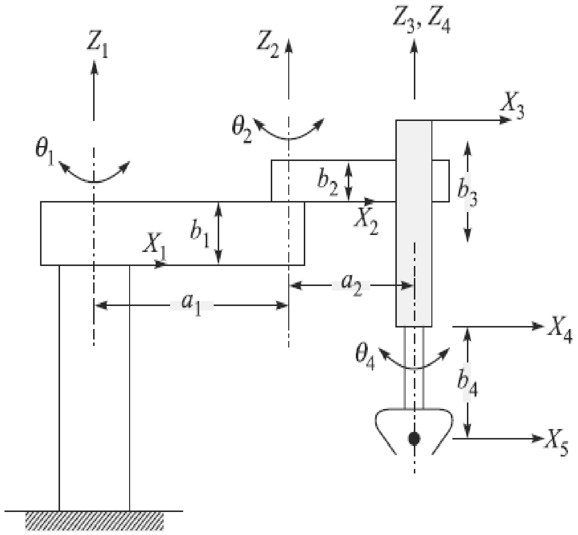


Table 3.10: DH Table

Frame i	*d or bi* (Joint offset)	*θi* (Joint angle)	*ai* or r (Link length)	*α i* (Twist angle)
1	**b_1**	θ_1(joint variable)	**a_1**	**0**
2	**b_2**	θ_2(joint variable)	**a_2**	**0**
3	**b_3** (joint variable)	**0**	**0**	**0**
4	**$-b_4$**	θ_4(joint variable)	**0**	**0**

HTM:

$$T_i = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i cos\alpha_i & sin\theta_i sin\alpha_i & a_i cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\theta_i cos\alpha_i & -cos\theta_i sin\alpha_i & a_i sin\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad for \;\; i = 1,2,3,4$$

After substituting for i=1, 2, 3, and 4 HTMs will be:

$$T_1 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_1} & -sin\boldsymbol{\theta_1}cos0 & sin\boldsymbol{\theta_1}sin0 & \boldsymbol{a_1}cos\boldsymbol{\theta_1} \\ sin\boldsymbol{\theta_1} & cos\boldsymbol{\theta_1}cos0 & -cos\boldsymbol{\theta_1}sin0 & \boldsymbol{a_1}sin\boldsymbol{\theta_1} \\ 0 & sin0 & cos0 & \boldsymbol{b_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_1} & -sin\boldsymbol{\theta_1} & 0 & \boldsymbol{a_1}cos\boldsymbol{\theta_1} \\ sin\boldsymbol{\theta_1} & cos\boldsymbol{\theta_1} & 0 & \boldsymbol{a_1}sin\boldsymbol{\theta_1} \\ 0 & 0 & 1 & \boldsymbol{b_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_2} & -sin\boldsymbol{\theta_2}cos0 & sin\boldsymbol{\theta_2}sin0 & \boldsymbol{a_2}cos\boldsymbol{\theta_2} \\ sin\boldsymbol{\theta_2} & cos\boldsymbol{\theta_2}cos0 & -cos\boldsymbol{\theta_2}sin0 & \boldsymbol{a_2}sin\boldsymbol{\theta_2} \\ 0 & sin0 & cos0 & \boldsymbol{b_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_2} & -sin\boldsymbol{\theta_2} & 0 & \boldsymbol{a_2}cos\boldsymbol{\theta_2} \\ sin\boldsymbol{\theta_2} & cos\boldsymbol{\theta_2} & 0 & \boldsymbol{a_2}sin\boldsymbol{\theta_2} \\ 0 & 0 & 1 & \boldsymbol{b_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{0} & -sin\boldsymbol{0}cos0 & sin\boldsymbol{0}sin0 & \boldsymbol{0} \\ sin\boldsymbol{0} & cos\boldsymbol{0}cos0 & -cos\boldsymbol{0}sin0 & 0 \\ 0 & sin0 & cos0 & \boldsymbol{b_3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \boldsymbol{b_3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_4} & -sin\boldsymbol{\theta_4}cos0 & sin\boldsymbol{\theta_4}sin0 & \boldsymbol{0} \\ sin\boldsymbol{\theta_4} & cos\boldsymbol{\theta_4}cos0 & -cos\boldsymbol{\theta_4}sin0 & \boldsymbol{0} \\ 0 & sin0 & cos0 & -\boldsymbol{b_4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} cos\boldsymbol{\theta_4} & -sin\boldsymbol{\theta_4} & 0 & \boldsymbol{0} \\ sin\boldsymbol{\theta_4} & cos\boldsymbol{\theta_4} & 0 & \boldsymbol{0} \\ 0 & 0 & 1 & -\boldsymbol{b_4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

सारांश:

- हे काइनेटिक्सचे वर्णन करते, जे रोबोटिक्समध्ये जोड आणि दुव्यांच्या हालचालींचा अभ्यास करते, मात्र त्या हालचाली निर्माण करणाऱ्या शक्तींवर विचार करत नाही.
- कोणत्याही विशिष्ट कार्यासाठी रोबोटने कार्य करायचे असल्यास, एन्ड एफ्फेक्टर ची (end-effector) स्थिती आणि ओरिएंटेशन , म्हणजेच त्याची मुद्रा किंवा संरचना (pose and configuration), बेसच्या संदर्भात प्रथम निश्चित करणे आवश्यक आहे.
- हे एन्ड एफ्फेक्टरला (end-effector) आणि बेसला संलग्न केलेल्या निर्देशांक फ्रेममधील संबंधांमधून शोधले जाऊ शकते.

- त्यासाठी, प्रत्येक लिंकच्या सांध्याच्या अक्षांवर निर्देशांक फ्रेम संलग्न करणे आवश्यक आहे.
- शरीराच्या निर्देशांक फ्रेम आणि संदर्भ फ्रेममधील संबंध निर्देशांक परिवर्तनाद्वारे दर्शविले जाते आणि ते HTM द्वारे प्राप्त केले जाते.
- येथे, एकच मॅट्रिक्स ओरिएंटेशन आणि ट्रान्सलेशन एकत्र करते.
- अशा प्रकारे, एन्ड एफ्फेक्टरला (end-effector) आणि बेसला संलग्न निर्देशांक फ्रेममधील संबंध प्राप्त होतो, ज्यामधून एन्ड एफ्फेक्टरची पोझिशन आणि ओरिएंटेशन बेसच्या संदर्भात निश्चित होते.

स्वाध्याय:

1. काइनेमॅटिक्स म्हणजे काय? त्याचे रोबोटिक्समधील महत्त्व सांगा (Define kinematics. State its significance in Robotics)
2. रोल, पिच आणि यॉ मोशन स्पष्ट करा (Explain roll, pitch yaw motion)
3. $R(\bar{Z},\ \theta)$ साठी रोटेशनल ऑपरेटर मॅट्रिक्स तयार करा (Derive the rotational operator matrix for $R(\bar{Z},\ \theta)$
4. X-अक्ष आणि Y-अक्षावरील मूलभूत रोटेशन मॅट्रिक्सचे सूत्र द्या (State the formula of elementary rotation matrix about X axis and Y axis)
5. X-अक्षाभोवती 45° आणि Y-अक्षाभोवती 90° रोटेशन मॅट्रिक्सचा गुणाकार शोधा (If the rotation about X axis is by an angle 45 degree and rotation about Y Axis is by an angle 90 degree then find out Rot ($\bar{X}$, 45) × Rot ($\bar{Y}$, *90*))
6. रोबोटिक्समध्ये कोऑर्डिनेट ट्रान्सफॉर्मेशन (Coordinate Transformation) स्पष्ट करा. (Explain Coordinate transformation in Robotics)
7. कोऑर्डिनेट ट्रान्सफॉर्मेशनचे समीकरण सांगा. (State the equation for Coordinate transformation in Robotics)
8. HTM ची व्याख्या सांगा आणि त्याचे सूत्र द्या (Define HTM. State its formula)
9. फ्रेम B ही युनिव्हर्सल कोऑर्डिनेट प्रणालीच्या (Universal Coordinate System) X-अक्षाभोवती 90° आणि नंतर Z-अक्षाभोवती 90° फिरवायची आहे, पण स्थानांतर (Translation) नाही. ह्या स्थितीसाठी HTM काढा (A frame B is rotated about the X axis of the Universal coordinate system by 90 degrees and then about the Z axis by 90 degrees without translation. Find out HTM)
10. आपल्याला फ्रेम B ही युनिव्हर्सल कोऑर्डिनेट प्रणालीच्या (Universal Coordinate System), i. X-अक्षाभोवती 90° रोटेशन, ii. Z-अक्षाभोवती 90° रोटेशन, iii. ट्रान्सलेशन (Translation) = (4,0,2) X, Y, Z अक्षाभोवती ,या तीन क्रियांना मिळून होमोजिनियस ट्रान्सफॉर्मेशन मॅट्रिक्स (HTM) काढायचा आहे. (A frame B is rotated about the X axis of the Universal coordinate system by 90 degrees and then about Z axis by 90 degree followed by translation by 4, 0,2 units along X, Y and Z axis of the Universal coordinate system. Find out HTM)
11. फ्रेम {B} ही युनिव्हर्सल कोऑर्डिनेट प्रणालीच्या (Universal Coordinate System) i. Xu-अक्षाभोवती 45° रोटेशन , ii. ट्रान्सलेशन (Translation) = (1,2,3) [Xu, Yu, Zu], iii. फ्रेम {B} मधील बिंदू Q = [3 2 1]^T, यावरून बिंदू Q चा युनिव्हर्सल कोऑर्डिनेट प्रणालीतील स्थान $\bar{Q}_U$ काढायचा आहे. (A frame {B} is rotated about ***X***u axis of the universal coordinate system by 45 degrees and translated along ***X***u, ***Y***u, ***Z***u by 1, 2, and 3 units, respectively. Let the position of a point Q in {B} is given by [3 2 1] $^{\boldsymbol{T}}$. Determine $\bar{Q}_U$)

12. D-H पॅरामीटर्स व्याख्या सांगा आणि D-H नियमांचे स्पष्टीकरण करा (Define D-H parameters and D-H rules.)
13. 2R प्लॅनर रोबोटसाठी D-H पॅरामीटर्स आणि ट्रान्सफॉर्मेशन मॅट्रिक्स शोधा (Find the D-H parameters and transformation matrix for a 2R planar robot.)
14. SCARA रोबोटसाठी D-H पॅरामीटर्स आणि होमोजिनियस ट्रान्सफॉर्मेशन मॅट्रिक्स व्युत्पन्न करा (Derive the D-H parameters and homogeneous transformation matrix for SCARA robot.)

सेल्फ लेअर्निंग अक्टिव्हिटीज (Self learning Activities):

1. दिलेल्या मॅनिपुलेटर्ससाठी D-H टेबल निर्धारित करा (संख्यात्मक पद्धतीने आणि OSS वापरून) (Determine DH table for the given manipulator such as 2R, 2P, 3P, 3R, SCARA by numerical method and by using OSS)
2. दिलेल्या मॅनिपुलेटरसाठी होमोजिनियस ट्रान्सफॉर्मेशन मॅट्रिक्स (HTM) शोधा (संख्यात्मक पद्धतीने आणि OSS वापरून) (Determine the homogeneous transformation matrix (HTM) of the given manipulator by numerical method and by using OSS)

पूर्वअट: मॅट्रिक्स गुणाकार (Matrix Multiplication)

मॅट्रिक्स गुणाकारासाठी, पहिल्या मॅट्रिक्समधील स्तंभांची संख्या दुसऱ्या मॅट्रिक्समधील पंक्तींच्या संख्येशी समान असावी. परिणामी मिळणाऱ्या मॅट्रिक्समध्ये पहिल्या मॅट्रिक्सच्या पंक्तींची संख्या आणि दुसऱ्या मॅट्रिक्सच्या स्तंभांची संख्या असते.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \\ a_{31}b_{11} + a_{32}b_{21} & a_{31}b_{12} + a_{32}b_{22} \end{bmatrix}$$

संदर्भ (References):

Sr.No	Author	Title	Publisher with ISBN number
1	Saha, S.K.	Introduction to Robotics	McGraw Hill Education Pvt.Ltd. 2008978 0070140011
2	Craig, J.J.	Introduction to Robotics (Mechanics and Control)	Pearson Education Ltd. 2017978-0133489798
3	Ghosal, A.	Robotics- Fundamental Concepts and Analysis	Oxford University Press 2009978-0195673913
4	---	NPTEL :: Mechanical Engineering - NOC:Introduction to Robotics	NPTEL study material

युनिट 4
रोबोटिक आर्मची काईनेमॅटिक्स
Kinematics of the Robotic Arm

विषय निष्पत्ती (Course Outcome): रोबोटिक आर्मची काईनेमॅटिक्स विश्लेषित करणे.
Analyse the kinematics of the robotic arm.

घटक निष्पत्ती (Teaching Learning Outcome):

4.1: फॉरवर्ड आणि इन्व्हर्स किनेमॅटिक्सयामधील फरक स्पष्ट करणे.
Differentiate between forward and inverse kinematics.

4.2: दिलेल्या मॅनिप्युलेटरसाठी फॉरवर्ड पोझिशन ॲनालिसिस करणे.
Perform forward position analysis of the given manipulator.

4.3: जेकॉबियन मॅट्रिक्सचे वर्णन करणे.
Describe Jacobian matrix.

4.4: दिलेल्या मॅनिप्युलेटरसाठी जेकॉबियन गणना करणे.
Perform Jacobian computations for a given manipulator.

4.1: रोबोटिक्समधील काइनेमॅटिक्सची ओळख

रोबोटिक आर्मच्या गतीशास्त्राचा (kinematics) अर्थ त्याच्या हालचालींचा अभ्यास आणि सांध्यांच्या (joint) मापदंडांशी त्याच्या अंतिम कार्यकारी (end effector) च्या स्थिती आणि अभिमुखतेचे (orientation) संबंध समजणे होय. रोबोटिक आर्ममध्ये, गतीशास्त्र हे महत्त्वपूर्ण आहे कारण याच्या मदतीने आर्म अवकाशात कसे हलते आणि विशिष्ट कार्ये साध्य करण्यासाठी त्याच्या हालचाली कशा नियंत्रित कराव्यात हे समजते.

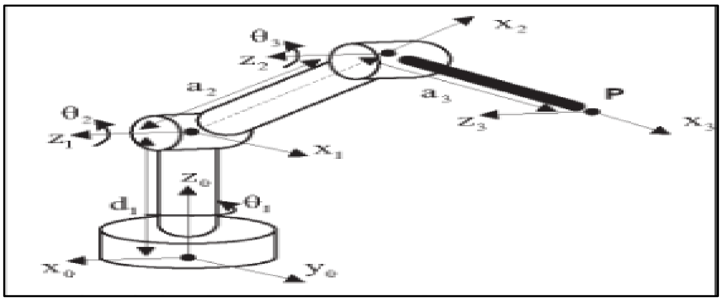


Figure 4.1: रोबोटिक आर्म चे काइनेमॅटिक्स (Kinematics of Robotic Arm)

स्थान विश्लेषण म्हणजे सांधे चल (joint variables) आणि अंतिम कार्यकारी (end effector) च्या स्थिती व अभिमुखता (orientation) यांतील संबंधांचा अभ्यास होय. हे दोन प्रकारचे असते: पुढील स्थान विश्लेषण (Forward Position Analysis) आणि प्रतिलोम स्थान विश्लेषण (Inverse Position Analysis). रोबोटला कोणतेही विशिष्ट कार्य पार पाडण्यासाठी, अंतिम कार्यकारीची स्थिती आणि अभिमुखता, म्हणजेच त्याची पोझ किंवा संरचना, बेसच्या संदर्भात प्रथम निश्चित करावी लागते. म्हणूनच, स्थान विश्लेषण अत्यंत महत्त्वाचे आहे.

4.1.2 पोजिशनॲनालिसिस: फॉरवर्ड पोझिशन ॲनालिसिस/ काइनेमॅटिक्सआणि इन्व्हर्सपोझिशन ॲनालिसिस/ काइनेमॅटिक्सयांची संकल्पना

फॉरवर्ड पोझिशन ॲनालिसिस, ज्याला फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्स किंवा डायरेक्ट काइनेमॅटिक्स असेही म्हणतात, ही पद्धती दिलेल्या सांध्यांच्या चल (joint variables) किंवा लिंक्सच्या लांबी आणि सांध्यांच्या

कोनांवरून बेस कोऑर्डिनेट सिस्टमच्या संदर्भात अंतिम कार्यकारी (end-effector) ची स्थिती आणि अभिमुखता (orientation) शोधण्यासाठी वापरली जाते.

फॉरवर्ड पोझिशन ॲनालिसिस शोधण्यासाठी खालील चरणांचे अनुसरण केले जाते:

1. डेनेविट-हार्टेनबर्ग (Denavit-Hartenberg, DH) पॅरामीटर्स निश्चित करा: DH पॅरामीटर्सच्या मदतीने, प्रत्येक लिंकसाठी संदर्भ फ्रेम्स निश्चित केल्या जातात, ज्यामुळे रोबोटिक आर्मच्या गतीशास्त्रीय विश्लेषणासाठी आवश्यक मॅट्रिसेस तयार करता येतात.
2. प्रत्येक फ्रेमसाठी वैयक्तिक होमोजिनियस ट्रान्सफॉर्मेशन मॅट्रिक्स (HTM) शोधा: DH पॅरामीटर्सनुसार, प्रत्येक फ्रेमसाठी HTM, Ti, शोधले जाते. हे चार मूलभूत ट्रान्सफॉर्मेशन्सचे संयोजन आहे:

   प्रत्येक Ti मॅट्रिक्स खालीलप्रमाणे आहे:

$$T_i = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i cos\alpha_i & sin\theta sin\alpha_i & a_i cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\theta_i cos\alpha_i & -cos\theta sin\alpha_i & a_i sin\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{प्रत्येक } i = 1,2,3,4 \quad \text{.........Equation (1)}$$

3. एकूण होमोजिनियस ट्रान्सफॉर्मेशन मॅट्रिक्स (HTM), TTT, अंतिम कार्यकारी (end effector) च्या बेस किंवा फ्रेम 1 च्या संदर्भातील स्थिती आणि अभिमुखता दर्शवते.
4. हे वरील वैयक्तिक HTM $T = T_1 * T_2 * . . . T_n$चे अनुक्रमे गुणाकार करून मिळवले जाते:
5. हे फ्रेम ट्रान्सफॉर्मेशन आहे, आणि हे फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्सचे अंतिम परिणाम दर्शवते.

   खालील ब्लॉक डायग्राममध्ये फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्स प्रक्रियेचे चरण दर्शविले आहेत:

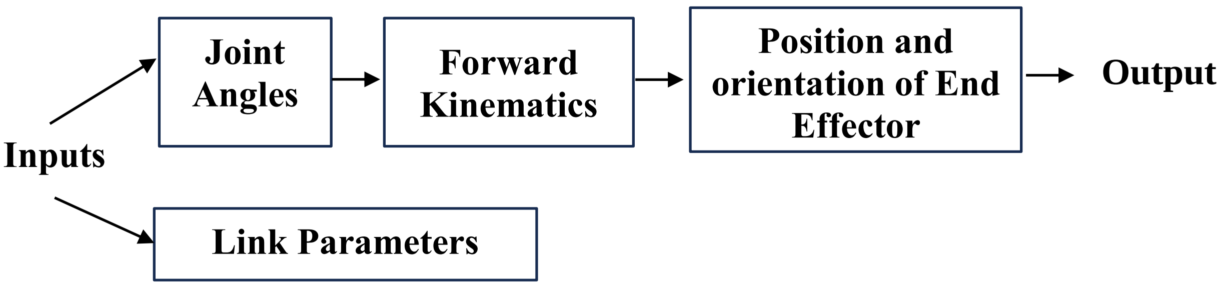


Figure 4.2 : फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्स (Forward Kinematics)

4.1.3 इन्व्हर्स पोझिशन ॲनालिसिस / इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्स

इन्व्हर्स पोझिशन विश्लेषण किंवा इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्समध्ये, जर लिंकची लांबी ज्ञात असेल, तर दिलेल्या अंतिम कार्यकारीच्या (end-effector) अभिमुखता आणि स्थितीच्या आधारे सांध्यांचे (joint) चल शोधावे लागतात.

इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्स समस्या अधिक क्लिष्ट आहे कारण:

1. गणितीय समीकरणे (Algebraic Equations) सामान्यतः सांध्यांच्या चलांमध्ये नॉनलाइनिअर (nonlinear) असतात आणि त्यामुळे नेहमीच बंद-स्वरूपाचे (closed-form) समाधान शोधणे शक्य नसते.
2. अनेक समाधान पर्याय (Multiple Solutions) उपलब्ध असू शकतात.काही परिस्थितींमध्ये अनंत उपाय (infinite solutions) ही अस्तित्वात असू शकतात.
3. मॅनिप्युलेटर आर्किटेक्चरच्या (Manipulator Architecture) दृष्टीने कोणतेही स्वीकार्य (admissible) समाधान उपलब्ध नसू शकते.

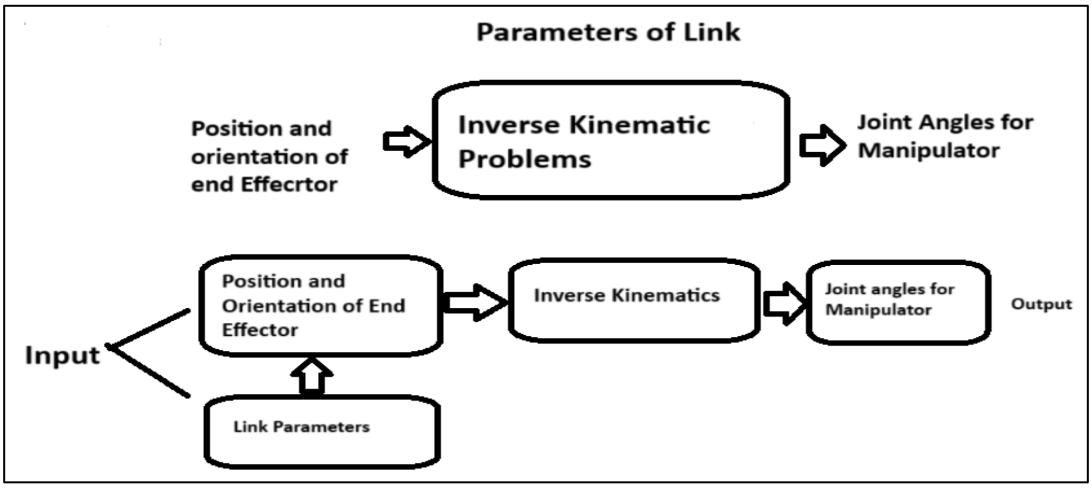


Figure 4.3 : इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्स (Inverse kinematics)

इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्स समस्या सोडवण्याच्या पद्धती:

1. बंद-स्वरूपाचे (Closed-Form) समाधान शोधणे:बीजगणित (Algebra) किंवा भूमिती (Geometry) वापरून सांध्यांचे कोन (joint angles) शोधणे.बीजगणितीय परिवर्तन (algebraic transformations) किंवा भूमितीय युक्त्या (geometrical heuristics) वापरून उत्तर मिळवणे.
2. सांख्यिकीय (Numerical) पद्धती वापरून उत्तर शोधणे:काही परस्पर-सन्निधी (successive-approximation) अल्गोरिदमचा वापर करून सांख्यिकीय उपाय काढणे.

4.2 फॉरवर्ड पोझिशन ॲनालिसिस 2R प्लॅनर आणि 2P प्लॅनर आर्मसाठी :

4.2.1 फॉरवर्ड पोझिशन ॲनालिसिस 2R प्लॅनर आर्मसाठी

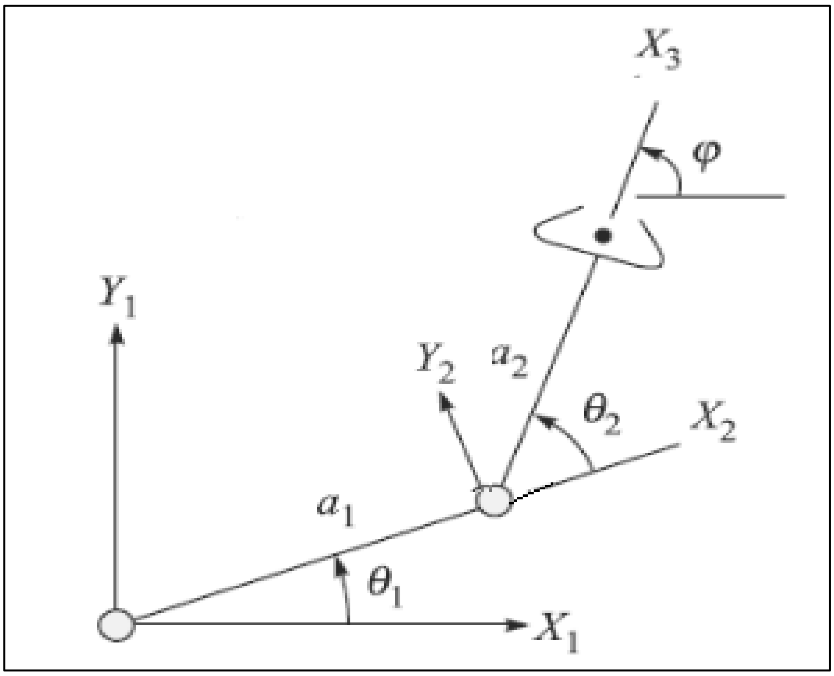


Figure 4.4 : फॉरवर्ड पोझिशन ॲनालिसिस (Forward position analysis)

2R प्लॅनर आर्मसाठी, फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्स (Forward Kinematics) मॅट्रिक्स T खालीलप्रमाणे असेल:

$$T=T1\times T2$$

इथे,

T_1 आणि T_2 या अनुक्रमे पहिल्या आणि दुसऱ्या सांध्यांसाठी (joint) परिवर्तन मॅट्रिक्स आहेत.अंतिम कार्यकारीची (End-Effector) स्थिती आणि अभिमुखता (Position & Orientation) ह्या मॅट्रिक्सच्या गुणाकाराने ठरतात.

Table No. 4.1: D-H पॅरामीटर्स

Frame i	d or bi (Joint offset)	θi (Joint angle)	ai or r (Link length)	αi (Twist angle)
1	0	θ_1(joint variable)	a1	0
2	0	θ_2(joint variable)	a2	0

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{जेव्हा } i = 1,2,3,4$$

DH पॅरामीटर्स सबस्टिट्यूट केल्यानंतर HTMs:

$$\text{HTM}, T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & a_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & a_1\sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{जेव्हा } i = 1$$

$$\text{HTM}, T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & a_2\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & a_2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{जेव्हा } i = 2$$

$$T = T_1 * T_2 \qquad \text{………. Equation (2)}$$

$$\text{HTM}, T_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta^1)\cos(\theta^2) - \sin(\theta^1)\sin(\theta^2)\cos\theta_1 & -\cos(\theta^1)\sin(\theta^2) - \sin(\theta^1)\cos(\theta^2) & 0 & a^2\cos(\theta^1)\cos(\theta^2) - a^2\sin(\theta^1)\sin(\theta^2) + a^1\cos(\theta^1) \\ \sin(\theta^1)\cos(\theta^2) + \cos(\theta^1)\sin(\theta^2) & \cos(\theta^1)\cos(\theta^2) - \sin(\theta^1)\sin(\theta^2) & 0 & a^2\sin(\theta^1)\cos(\theta^2) + a^2\cos(\theta^1)\sin(\theta^2) + a^1\sin(\theta^1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

जेव्हा $i = 1$

$$\text{HTM}, T_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_2\cos(\theta_1 + \theta_2) + a_1\cos\theta_1 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & a_2\sin(\theta_1 + \theta_2) + a_1\sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{जेव्हा } i = 2$$

4.2.1 फॉरवर्ड पोझिशन ॲनालिसिस 2Pप्लॅनर आर्मसाठी

2P प्लॅनर आर्मसाठी, फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्स (Forward Kinematics) मॅट्रिक्स T खालीलप्रमाणे असेल:

$$T=T1\times T2$$

Table No 4.2 : D-H पॅरामीटर्स

Frame i	d or bi (Joint offset)	θi(Joint angle)	Ai or r (Link length)	αi (Twist angle)
1	b_1(joint variable)	0	a1	0
2	b_2(joint variable)	0	a2	0

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{जेव्हा } i = 1,2$$

प्रत्येक फ्रेमसाठी Denavit-Hartenberg (DH) पॅरामीटर्सलागू केल्यानंतर, खालील दोन Homogeneous Transformation Matrices (HTMs) मिळतील:

$$T_1 = \begin{bmatrix} cos0 & -sin0cos0 & sin0sin0 & a_1cos0 \\ sin0 & cos0cos0 & -cos0sin0 & a_1sin0 \\ 0 & sin0 & cos0 & b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{जेव्हा } i = 1$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{जेव्हा} i = 1$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos0 & -\sin0\cos0 & \sin0\sin0 & a_2\cos0 \\ \sin0 & \cos0\cos0 & -\cos0\sin0 & a_2\sin0 \\ 0 & \sin0 & \cos0 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{जेव्हा } i = 2$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{जेव्हा } i = 2$$

$$T = T_1 * T_2$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 + a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b_1 + b_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{.......... Equation(3)}$$

4.3 रेषीय आणि कोनीय विस्थापन, वेग व प्रवेग यांची व्याख्या

4.3.1 रेषीय विस्थापन, रेषीय वेग आणि रेषीय प्रवेग

1. रेषीय विस्थापन (Linear Displacement):
   जेव्हा एखादी वस्तू सरळ रेषेत हालचाल करते, तेव्हा ती केलेले एकूण स्थानांतरणरेषीय विस्थापनम्हणतात.
2. रेषीय वेग (Linear Velocity):
   सरळ मार्गाने चालणाऱ्या वस्तूच्या विस्थापनाचा कालानुसार दररेषीय वेगम्हणतात.
3. रेषीय प्रवेग (Linear Acceleration):
   सरळ रेषेत चालणाऱ्या वस्तूच्या वेगाचा कालानुसार दररेषीय प्रवेगम्हणतात.

4.3.2 कोनीय विस्थापन, कोनीय वेग आणि कोनीय प्रवेग

1. कोनीय विस्थापन (Angular Displacement):
   जर वस्तू वर्तुळाकार मार्गाने फिरत असेल, तर ती फिरलेला कोन म्हणजेकोनीय विस्थापनहोय.
2. कोनीय वेग (Angular Velocity):
   कोणत्याही फिरत्या वस्तूच्याकोनीय विस्थापनाचा कालानुसार दरम्हणजेकोनीय वेगहोय.
2. कोनीय प्रवेग (Angular Acceleration):
   कोणत्याही फिरत्या वस्तूच्या कोनीय वेगाचा कालानुसार दरकोनीय प्रवेगम्हणतात.

4.4 रोबोटची भिन्नगती आणि वेग: जेकबियन समीकरण व जेकबियन मॅट्रिक्स

4.4.1 जेकबियन मॅट्रिक्सचा परिचय (Introduction to Jacobian Matrix)

- समन्वय परिवर्तन (Coordinate Transformation)

समन्वय परिवर्तन म्हणजेएका संदर्भ फ्रेममधून (reference frame) दुसऱ्या संदर्भ फ्रेममध्ये रोबोटच्या स्थान (position) आणि अभिमुखतेचे (orientation) रूपांतरकरणे.

1. समन्वय परिवर्तन समीकरण: $\begin{bmatrix} \bar{Q}_U \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^U_B R & \bar{t}_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Q}_B \\ 1 \end{bmatrix}$
2. होमोजिनियस ट्रान्सफॉर्मेशन मॅट्रिक्स (HTM)
   HTM म्हणजेएकाच वेळी अनुवाद (Translation) आणि परावर्तन (Rotation) परिवर्तन करण्यासाठी वापरली जाणारी मॅट्रिक्स.

   HTM चे समीकरण: $T_i = T_{bi} T_{\theta i} T_{ai} T_{\alpha i}$

   HTM मॅट्रिक्स:

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ जेव्हा } i = 1,2,3..$$

   ही मॅट्रिक्सप्रत्येक सांध्याचे स्थान आणि अभिमुखता पुढच्या फ्रेममध्ये रूपांतरित करते.
3. अंतिम कार्यकारी (End-Effector) चे HTM:

   $T = T_1 * T_2 * . . . T_n$

   हेफ्रेम ट्रान्सफॉर्मेशनआहे आणिफॉरवर्ड काइनेमॅटिक्स (Forward Kinematics) प्रक्रियेचा भाग आहे.
   फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्सचे वैशिष्ट्ये:
4. या समीकरणातरोटेशन मॅट्रिक्सआणिस्थिती सदिश (Position Vector) दोन्ही असतात, जे सांध्यांच्या (joint variables) कार्यावर अवलंबून असतात.
5. अंतिम कार्यकारीचेस्थान आणि अभिमुखता बदलतेजेव्हा सांध्यांचे कोन बदलतात.
6. जेकबियन मॅट्रिक्स (Jacobian Matrix) आणि गती विश्लेषण (Velocity Analysis)
7. जेकबियन मॅट्रिक्सहासांध्यांच्या वेग (joint velocities) आणि अंतिम कार्यकारीच्या रेषीय व कोनीय वेग (linear & angular velocity) यांच्यातील संबंध दर्शवतो.

4.4.2 जेकबियन मॅट्रिक्स

जेकबियन मॅट्रिक्सही अशी मॅट्रिक्स आहे जी अंतिम कार्यकारीच्या (end-effector) रेषीय (linear) आणि कोनीय (angular) वेगाचासांध्यांच्या वेगाशी (joint velocities) संबंध दर्शवते.

- जेकबियन मॅट्रिक्सचे महत्त्व आणि उपयोग:

1. सिंग्युलरिटी (Singular Configuration) शोधण्यासाठी:

सिंग्युलरिटी म्हणजेअसा बिंदू जिथे रोबोट एक किंवा अधिक स्वातंत्र्य अंश (DOF) गमावतो.अशा ठिकाणी अंतिम कार्यकारीएका विशिष्ट दिशेने हलवता येत नाही.हेवर्कस्पेसच्या (workspace) काठावरघडते, जसे की जेव्हा रोबोट पूर्णपणे ताणलेला (fully stretched) असतो.

2. अतिरिक्त स्वातंत्र्य अंश (Redundancy) विश्लेषणासाठी:
   काही वेळा रोबोटकडे अधिक DOF असतो, त्यामुळे तो एकाच टार्गेटला वेगवेगळ्या मार्गांनी पोहोचू शकतो.जेकबियन वापरूनसर्वोत्कृष्ट मार्ग शोधता येतो.
3. वेग विश्लेषणासाठी (Velocity Analysis) इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्स शोधण्यासाठी:
   जेकबियन मॅट्रिक्सहे इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्समध्ये वापरले जाते जेव्हा अंतिम कार्यकारीच्या इच्छित वेगावरून सांध्यांचे वेग शोधायचे असतात.
4. अंतिम कार्यकारीवर लागू केलेल्या बलांमुळे सांध्यांवर किती टॉर्क (torque) निर्माण होईल यासाठी:
   जर अंतिम कार्यकारीवर विशिष्टबल (force) लागू केले, तर जेकबियनद्वारेसांध्यांवर होणारा टॉर्ककाढता येतो.याचा उपयोगरोबोटच्या नियंत्रणात (control) आणि बल व्यवस्थापनात (force analysis) होतो.
5. गतीशास्त्रीय अल्गोरिदम विकसित करण्यासाठी:रोबोट डायनॅमिक्स (robot dynamics) मध्ये, जेकबियनचा वापर करूनबल, टॉर्क आणि वेग यांचा संबंधस्पष्ट करता येतो.याचा उपयोगरोबोट कंट्रोल सिस्टीम आणि सिम्युलेशनमध्ये होतो.

4.4.3 जेकबियन मॅट्रिक्स(Jacobian Equation) रोबोटिक्समध्ये

जेकबियन मॅट्रिक्सही अंतिम कार्यकारीचा (end-effector) रेषीय (linear) आणि कोनीय (angular) वेगसांध्यांच्यावेगाशी (joint velocities) जोडते.हे गणितीय संबंध खालील समीकरणाद्वारे दर्शवले जाते.

जेकबियन समीकरण:

$$v_e = J * \dot{q} \text{..........Equation (4)}$$

जिथे:

v_e →अंतिम कार्यकारीचावेग वेक्टर (velocity vector)

J →जेकबियन मॅट्रिक्स

$\dot{q}$ →सांध्यांचा वेग वेक्टर (joint velocity vector)

यामध्ये x, y, z अक्षांभोवती फिरण्याचा वेग (angular velocity) असतो.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad \text{Or,} \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{6\times1} = J_{6\times n} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix}_{n\times1}$$

जेकबियनसमीकरणामधील संज्ञा आणि त्यांचे अर्थजेकबियनसमीकरण रोबोटच्या अंतिम कार्यकारीचा (end-effector) वेगआणिसांध्यांचा वेगयांच्यातील गणितीय संबंध दर्शवते.

$\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{z}$ हे अंतिम कार्यकारीचे (end-effector) रेषीय वेग (Linear Velocities) आहेत. हे X, Y, Z दिशांमध्येस्थानाचा बदल (position change) दराने मोजले जातात.

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt}, \quad \dot{y} = \frac{dy}{dt}, \quad \dot{z} = \frac{dz}{dt}$$

ω_x, ω_y, ω_zहे अंतिम कार्यकारीचे कोनीय वेग (Angular Velocities) आहेत.हे X, Y, Z अक्षांभोवतीफिरण्याचा वेग दर्शवतात.कोनीय वेग म्हणजेकोनीय विस्थापन (angular displacement) θ चा कालानुसार (time) बदल.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

समीकरणाच्या उजव्या बाजूला सांध्यांचा वेग मॅट्रिक्स (Joint Velocity Matrix) असतो.हेसांध्याच्या चलांचे (joint variables) विभेदक (derivative) असते.

सांध्यांचे वेग :$\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3 \dots . \dot{q}_n$

n→रोबोटच्या सांध्यांची संख्या दर्शवते.

4.4.4 एंड इफेक्टरच्या रेषीय आणि कोनीय वेगांच्या संबंधातील जेकबियन मॅट्रिक्स

- जेकबियन मॅट्रिक्स (Jacobian matrix) काढण्यासाठी, एंड इफेक्टरच्या प्रत्येक स्थान समीकरणाचे सर्वजॉइंट व्हेरिएबल्सच्या संदर्भात व्युत्पन्न (derivative) घेतले जाते.
- जेकबियन मॅट्रिक्स J हे 6×n परिमाणाचे असते आणि ते संयुक्त चल (joint variables) यांचे एक फंक्शन असते.
- जेकबियन मॅट्रिक्समध्ये n स्तंभ असतात, जे मॅनिप्युलेटरमधील सांध्यांची (joints) संख्या दर्शवतात.
- जेकबियन मॅट्रिक्सच्या पंक्ती दोन भागांमध्ये विभागल्या जातात:
- पहिल्या तीन पंक्तीएंड इफेक्टरच्यारेषीय वेगांशी (linear velocities) संबंधित असतात.शेवटच्या तीन पंक्तीएंड इफेक्टरच्याकोनीय वेगांशी (angular velocities) संबंधित असतात.
- म्हणून, जेकबियन मॅट्रिक्सच्या वरील भागालारेषीय वेग जेकबियन (J_v) म्हणतात आणि खालच्या भागालाकोनीय वेग जेकबियन (J_ω) म्हणतात.
- एंड इफेक्टरचारेषीय वेग (v_e) संयुक्त वेगांवर (joint velocities) अवलंबून खालीलप्रमाणे दर्शवला जाऊ शकतो:

$$v_e = J_v\dot{q}$$

J_vही 3×n मॅट्रिक्स आहे जी संयुक्त वेगांचे एंड इफेक्टरच्या रेषीय वेगासाठी योगदान दर्शवते.J_vसंयुक्त चल q चे एक फंक्शन आहे.

- एंड इफेक्टरचाकोनीय वेग (ω_e) संयुक्त वेगांवर खालीलप्रमाणे अवलंबून असतो:

$$\omega_e = J_\omega\dot{q}$$

J_ω ही 3×n मॅट्रिक्स आहे जी संयुक्त वेगांचे एंड इफेक्टरच्या कोनीय वेगासाठी योगदान दर्शवते.J_ωदेखील संयुक्त चल q चे एक फंक्शन आहे.

- त्यामुळे, जेकबियन मॅट्रिक्स J खालीलप्रमाणे संकलित केला जातो:

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix}$$

J_vआणि J_ωवेगळ्या पद्धतींनी व्युत्पन्न (derive) करावे लागतात. दोन्ही स्वतंत्रपणे काढून नंतर एकत्रित करून अंतिम जेकबियन मॅट्रिक्स तयार केला जातो.

- J_vचे प्रतिनिधित्व (Representation of J_v)

वेग म्हणजे स्थितीचा (position) व्युत्पन्न (derivative) असतो.J_vहा एंड इफेक्टरच्यारेषीय वेगाशी (linear velocity) संबंधित असल्यामुळे, x, y आणि z स्थान समीकरणांचे संयुक्त चलांप्रमाणे व्युत्पन्न घेऊन J_vप्राप्त करता येतो.संयुक्त चल: [q1,q2,...qn][q_1, q_2, ... q_n][q1,q2,...qn]

$$J_v = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} & \frac{\partial x}{\partial q_3} & \dots\dots & \frac{\partial x}{\partial q_n} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} & \frac{\partial y}{\partial q_3} & \dots\dots & \frac{\partial y}{\partial q_n} \\ \frac{\partial z}{\partial q_1} & \frac{\partial z}{\partial q_2} & \frac{\partial z}{\partial q_3} & \dots\dots & \frac{\partial z}{\partial q_n} \end{bmatrix}_{3\times n}$$

J_ωचे प्रतिनिधित्व (Representation of J_ω)

कोनीय वेग (Angular velocity) म्हणजेकोनीय विस्थापनाचा (angular displacement) व्युत्पन्न (derivative) असतो.$J\omega$हा संयुक्त वेगांमुळेएंड इफेक्टरच्या कोनीय वेगाशी (angular velocity) संबंधित असल्यामुळे, x, y आणि z अक्षांवरील कोनीय विस्थापनांचे संयुक्त चलांप्रमाणे व्युत्पन्न (derivate) घेऊन J_ωप्राप्त करता येतो.$q_1, q_2 \dots q_n$

$$J_\omega = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_x}{\partial q_1} & \frac{\partial \theta_x}{\partial q_2} & \frac{\partial \theta_x}{\partial q_3} & \dots\dots & \frac{\partial \theta_x}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \theta_y}{\partial q_1} & \frac{\partial \theta_y}{\partial q_2} & \frac{\partial \theta_y}{\partial q_3} & \dots\dots & \frac{\partial \theta_y}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \theta_z}{\partial q_1} & \frac{\partial \theta_z}{\partial q_2} & \frac{\partial \theta_z}{\partial q_3} & \dots\dots & \frac{\partial \theta_z}{\partial q_n} \end{bmatrix}_{3\times n}$$

यावरून असे दिसून येते की,

जॅकोबियन मॅट्रिक्समध्येप्रत्येक संयुक्त चलाच्या (joint variable) विभेदक (differential) बदलाशी संबंधित विभेदक अनुक्रमणिका (differential translation) आणि फिरणारी सदिश (rotation vector) समाविष्ट असते.जॅकोबियन मॅट्रिक्स (Jacobian Matrix)

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} & \frac{\partial x}{\partial q_3} & \dots\dots & \frac{\partial x}{\partial q_n} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} & \frac{\partial y}{\partial q_3} & \dots\dots & \frac{\partial y}{\partial q_n} \\ \frac{\partial z}{\partial q_1} & \frac{\partial z}{\partial q_2} & \frac{\partial z}{\partial q_3} & \dots\dots & \frac{\partial z}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \theta_x}{\partial q_1} & \frac{\partial \theta_x}{\partial q_2} & \frac{\partial \theta_x}{\partial q_3} & \dots\dots & \frac{\partial \theta_x}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \theta_y}{\partial q_1} & \frac{\partial \theta_y}{\partial q_2} & \frac{\partial \theta_y}{\partial q_3} & \dots\dots & \frac{\partial \theta_y}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \theta_z}{\partial q_1} & \frac{\partial \theta_z}{\partial q_2} & \frac{\partial \theta_z}{\partial q_3} & \dots\dots & \frac{\partial \theta_z}{\partial q_n} \end{bmatrix}_{6\times n}$$

4.5 जॅकोबियन मॅट्रिक्सवरील साधे संख्यात्मक उदाहरण

समस्या 1: 2-DOF सिरियल मॅनिपुलेटरसाठी जेकॉबियन मॅट्रिक्स शोधादिलेली माहिती:एका 2-DOF सिरियल मॅनिपुलेटरसाठी, L_1 आणिL_2 लांबीच्या लिंक असतात आणि सांध्यांचे कोनθ_1आणियांनीदर्शविले जातात.एंड-इफेक्टरच्या कोऑर्डिनेट्स (X, Y) या प्रकारे दिलेल्या आहेत:

$$X = L_1 \cos\theta_1 + L_2 \cos(\theta_1+\theta_2)$$

$$Y = L_1 \sin\theta_1 + L_2 \sin(\theta_1+\theta_2)$$

दिलेल्या संरचनेसाठी जेकॉबियन मॅट्रिक्स शोधा.

Solution :

चालू स्वातंत्र्य पदवी (DOF) = 2 असल्यामुळे, जेकॉबियन मॅट्रिक्सपुढीलप्रमाणे दिली जाते:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{bmatrix}$$

X आणिYया समीकरणांचेθ1 आणिθ2 च्या संदर्भात अंशतः अवकलन घेतल्यास, आपल्याला मिळते:

$$\partial X/\partial \theta_1 = -L_1 \sin\theta_1 - L_2 \sin(\theta_1+\theta_2)$$

$$\partial X/\partial \theta_2 = - L_2 \sin(\theta_1+\theta_2)$$

$$\partial Y/\partial \theta_1 = L_1 \cos\theta_1 + L_2 \cos(\theta_1+\theta_2)$$

$$\partial Y/\partial \theta_2 = L_2 \cos(\theta_1+\theta_2)$$

म्हणून, जॅकोबियन मॅट्रिक्स आहे:

$$J = \begin{bmatrix} \partial qx / \partial \theta 1 & \partial qX / \partial \theta 2 \\ \partial qY / \partial \theta 1 & \partial qY / \partial \theta 2 \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} -L1 \sin\theta 1 - L2 \sin(\theta 1 + \theta 2) & - L2 \sin(\theta 1 + \theta 2) \\ -L1 \cos\theta 1 - L2 \cos(\theta 1 + \theta 2) & L2 \cos(\theta 1 + \theta 2) \end{bmatrix}$$

सारांश:

रोबोटिक हाताच्या काइनेमॅटिक्समध्ये सांध्यांच्या परिमाणांमधील गती आणि एंड-इफेक्टरच्या स्थिती व अभिमुखतेतील संबंधांचा अभ्यास केला जातो. स्थान विश्लेषण, जे रोबोट नियंत्रणासाठी आवश्यक आहे, पुढील दोन प्रकारांमध्ये वर्गीकृत केले जाते:फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्स – दिलेल्या सांध्यांच्या परिमाणांवरून एंड-इफेक्टरची स्थिती व अभिमुखता शोधणे.इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्स – दिलेल्या एंड-इफेक्टरच्या स्थितीवरून सांध्यांच्या परिमाणांची गणना करणे.फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्ससाठी, डेनाविट-हार्टेनबर्ग (DH) परिमाणांचा वापर करून होमोजिनियस ट्रान्सफॉर्मेशन मॅट्रिक्स (HTM) निर्धारित केला जातो, तर इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्समध्ये अशा नॉनलिनिअर समीकरणांचे निराकरण करावे लागते, जे अनेक किंवा शून्य उत्तर देऊ शकतात.जॅकोबियन मॅट्रिक्स, जे डिफरेंशियल गती समीकरणांपासून व्युत्पन्न केले जाते, हे सांध्यांच्या गतींना एंड-इफेक्टरच्या रेषीय आणि कोनीय गतींशी जोडते. वेग विश्लेषण, इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्स, सिंग्युलॅरिटी शोधणे आणि बल-टॉर्क संबंध समजून घेण्यासाठी हे महत्त्वाचे आहे.हे संकल्पना समजून घेणे रोबोटच्या गती नियोजन आणि नियंत्रणासाठी अत्यंत आवश्यक आहे.

स्वाध्याय:

1. फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्स आणि इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्सची व्याख्या करा. (Define forward kinematics and inverse kinematics.)
2. 2R आणि 2P प्लॅनर रोबोटचे फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्स मॅट्रिक्स समीकरण व्युत्पन्न करा. (Derive the forward kinematics matrix equation of a 2R & 2P planar robot .)
3. जेकॉबियन मॅट्रिक्सचे वर्णन करा. (Describe Jacobian matrix.)
4. L_1 आणि L_2 लांबीच्या दोन लिंक असलेल्या 2 DOF सिरियल मॅनिप्युलेटरमध्ये, सांधे कोन θ_1 आणि θ_2 आहेत. एंड-इफेक्टरचे समन्वय (X, Y) खालीलप्रमाणे आहेत:

$$X = L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$Y = L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

A 2 DOF serial manipulator with the links having lengths of L1 and L2 has the joint angles represented by θ1 and θ2. The end-effector's coordinates are represented by (X, Y) where X = L1 cosθ1 + L2cos (θ1+θ2), Y = L1 sinθ1 + L2 sin (θ1+θ2) Find out the Jacobian matrix for the given configuration.

5. दिलेल्या संरचनेसाठी जेकॉबियन मॅट्रिक्स शोधा.(i) रेखीय वेग (Linear Velocity) (ii) रेखीय विस्थापन (Linear Displacement) (iii) रेखीय त्वरण (Linear Acceleration) (iv) कोनीय त्वरण (Angular Acceleration) यांची व्याख्या करा. (Define (i) Linear Velocity (ii) Linear Displacement (iii) Linear Acceleration (iv) Angular Acceleration.)
6. रोबोटिक आर्मच्या काइनेमॅटिक्सचा अर्थ स्पष्ट करा (State the meaning of kinematics of a robotic arm?)
7. रोबोटिक काइनेमॅटिक्समध्ये होमोजिनियस ट्रान्सफॉर्मेशन मॅट्रिक्स (HTM) कसा वापरला जातो? (Explain how the homogeneous transformation matrix (HTM) is applied in robotic kinematics)
8. फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्स वापरून रोबोटिक आर्मच्या एंड-इफेक्टरची स्थिती आणि दिशा कशी निर्धारित करता?(Describe the process of determining the position and orientation of a robotic arm’s end-effector using forward kinematics)
9. इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्स सोडवताना सामान्यतः कोणत्या अडचणी येतात?(Describe the common challenges faced in solving inverse kinematics)
10. दोन रिव्हॉल्यूट सांधे असलेल्या रोबोटिक आर्मसाठी, फॉरवर्ड काइनेमॅटिक्स वापरून एंड-इफेक्टरची स्थिती कशी निर्धारित कराल?(Given a robotic arm with two revolute joints, how would you determine the end-effector position using forward kinematics?)
11. इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्स समस्यांचे निराकरण करण्यासाठी संख्यात्मक पद्धती कशा वापरल्या जाऊ शकतात? (Explain how numerical methods are applied to solve inverse kinematics problems)

सेल्फ लेअर्निंग अक्टव्हिटीज (Self Learning Activities):

1.काइनेमॅटिक लिंकेज मॉडेल कागद आणि स्ट्रॉसह

- क्रियाकलाप: कागदी काप आणि स्ट्रॉचा वापर करून 2R प्लॅनर मॅनिप्युलेटर तयार करा, ज्यात लिंक्स आणि सांधे दर्शविले जातील.
- उद्दिष्ट: सांध्यांचे हस्तचालित संचालन करा आणि एंड-इफेक्टरच्या स्थितीतील बदलांचे निरीक्षण करा.
- परिणाम: फॉरवर्ड आणि इन्व्हर्स काइनेमॅटिक्सबद्दल अंतर्ज्ञान विकसित करा.

2. रोबोटच्या एंड-इफेक्टर्सची तुलना दर्शविणारे चार्ट तयार करा.

संदर्भ (References):

Sr. No	Author	Title	Publisher with ISBN Number
1	S. K . Saha	Introduction to Robotics	McGraw-Hill Education Pvt. Ltd., 2008, ISBN 978-0070140011
2	R. S. Khurmi, N khurmi	Engineering Mechanics	S. Chand & Company, New Delhi, 2018, ISBN 978-9352833962

Learning Websites & Portals:

Sr. No.	Link	Description
1	https://www.mathworks.com/help/fuzzy/modeling-inverse-kinematics-in-a-robotic-arm.html	Modeling Inverse Kinematics in a Robotic Arm
2	https://www.youtube.com/watch?v=Q-UeYEpwXXU	Easy inverse kinematics for robot arms
3	https://www.youtube.com/watch?v=1-FJhmey7vk	Inverse Kinematics of Robots
4	https://robocademy.com/2020/04/21/robot-kinematics-in-a-nutshell/	

यूनिट 5
रोबोटिक आर्म आणि मोशन प्लॅनिंगच्या गतिशीलतेचे सिंहावलोकन
Overview of Dynamics of the Robotic Arm and Motion Planning

विषय निष्पत्ती (Course Outcome): रोबोटिक आर्मच्या गतिशीलता आणि गती नियोजनाचा अर्थ लावणे
Interpret the dynamics and motion planning of the robotic arm.

घटक निष्पत्ती (Theory Learning Outcomes):

5.1 गतिशास्त्र आणि गतिशीलतेमध्ये फरक ओळखणे
Differentiate between kinematics and dynamics.

5.2 गतीच्या गतिमान समीकरणांचे वर्णन करणे
Describe dynamic equations of motion.

5.3 संयुक्त स्पेस नियोजन आणि कार्टेशियन स्पेस नियोजन यांची तुलना करणे .
Compare joint space planning and Cartesian space planning.

5.4 बिंदू ते बिंदू गती आणि सलग मार्ग गतीचे वर्णन करणे .
Describe point to point motion and continuous path motion**.**

परिचय:

या अध्यायात रोबोटच्या गतीची समीकरणे, म्हणजेच ॲक्च्युएटर्सने सांध्यावर लावलेल्या टॉर्क आणि बलांमुळे रोबोटची गती कशी निर्माण होते, याचा अभ्यास केला जाणार आहे. रोबोटच्या गतिशील वर्तनाचे वर्णन करणारी समीकरणांचा एक संच विकसित केला जाईल, ज्याला रोबोटचे डायनॅमिक मॉडेल देखील म्हटले जाते. हा विकास अनेक प्रकारे महत्वाचा आहे:

(i) योग्य नियंत्रण धोरणे विकसित करण्यासाठी डायनॅमिक मॉडेलचा वापर केला जाऊ शकतो. उच्च-गती ऑपरेशन्स अंतर्गत रोबोटची चांगली कामगिरी साध्य करण्यासाठी एका अत्याधुनिक नियंत्रकाला वास्तववादी गतिमान मॉडेलचा वापर आवश्यक असतो. काही कंट्रोल योजना इच्छित मार्गक्रमणाचे अनुसरण करण्यासाठी आवश्यक असलेले ॲक्च्युएटर टॉर्क आणि बल शोधण्यासाठी थेट गतिमान मॉडेलवर अवलंबून असतात.

(ii) रोबोटिक सिस्टीमच्या संगणक सिम्युलेशनसाठी विकसित केलेले डायनॅमिक मॉडेल वापरले जाऊ शकते. विविध ऑपरेटिंग परिस्थितीत मॉडेलच्या वर्तनाचे परीक्षण करून, रोबोट तयार झाल्यावर तो कसा वागेल याचा अंदाज लावता येतो.

(iii) रोबोटचेडायनॅमिक मॉडेल लिंक, बेअरिंग आणि ॲक्च्युएटर्सच्या डिझाइन आणि सायझिंगसाठी आवश्यक असलेल्या सर्व संयुक्त रिएक्शन शक्ती देते.

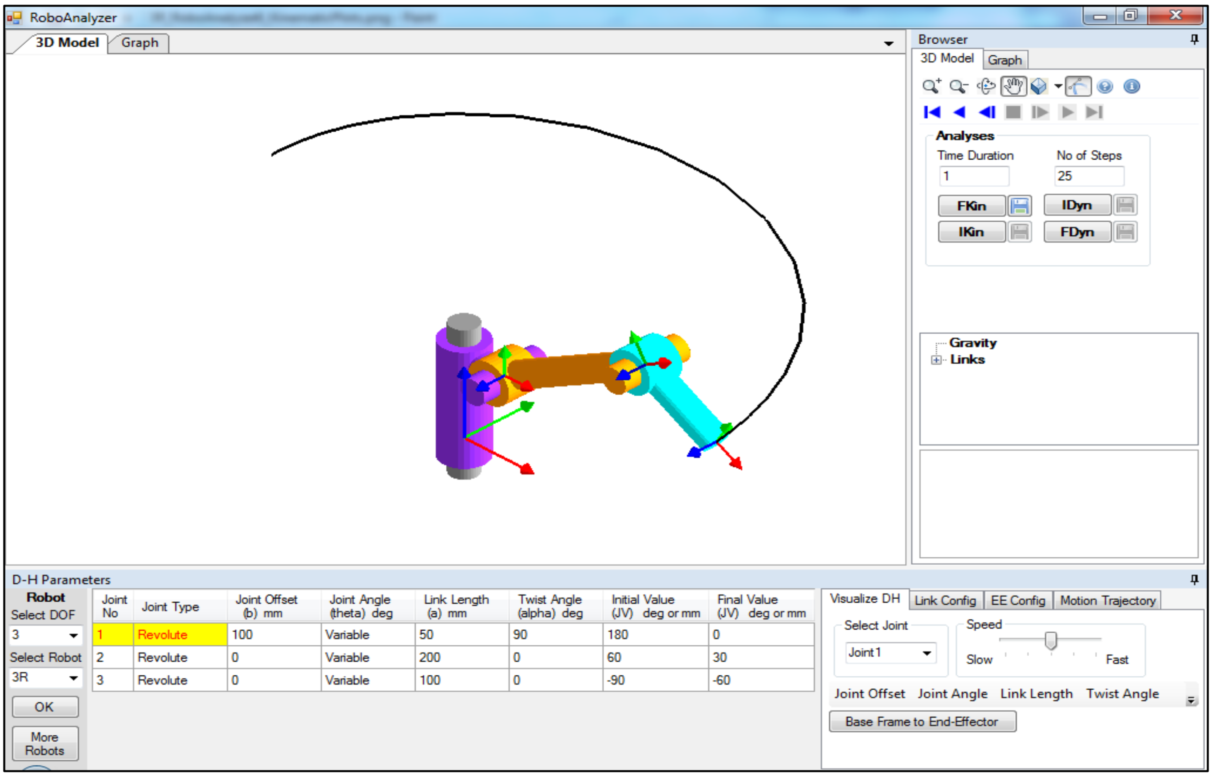


Figure 5.1: रोबो आनलयझेर मधील 3-R रोबोटचे डायनॅमिक मॉडेल (Dynamic Model of 3R Robot Model in Robo-analyzer)

5.1 डायनॅमिक्स: व्याख्या,Forward Dynamics आणि Inverse Dynamicsची संकल्पना

5.1.1 व्याख्या:

डायनॅमिक्स म्हणजे सिस्टम किंवा शरीरांमध्ये गती निर्माण करणाऱ्या बल आणि क्षणांचा अभ्यास. रोबोटचे डायनॅमिक मॉडेल म्हणजे ॲक्च्युएटर्सद्वारे सांध्यावर लावले जाणारे बल/टॉर्क आणि मॅनिपुलेटरच्या परिणामी गतीमधील संबंधांचा अभ्यास. ते ॲक्च्युएटर्सद्वारे सांध्यावर लावले जाणारे टॉर्क आणि बलांमुळे एंड इफेक्टरचा मार्ग किंवा मार्ग वर्णन करते. मॅनिपुलेटरच्या हालचालींचे डायनॅमिक समीकरण हे मॅनिपुलेटरच्या गतिमान वर्तनाचे वर्णन करणारे गणितीय समीकरणांचा संच आहे. ते दोन प्रकारचे असते: फॉरवर्ड किंवा डायरेक्ट डायनॅमिक्स आणि इनव्हर्स डायनॅमिक्स.

5.1.2 फॉरवर्ड डायनॅमिक्स (Forward dynamics):

फॉरवर्ड डायनॅमिक्स लागू केलेल्या बल आणि टॉर्कच्या संचापासून रोबोटची गती निश्चित करते. हे प्रामुख्याने सिम्युलेशनसाठी वापरले जाते. ॲक्च्युएटर्सद्वारे जाइंट वरती लागू केलेल्या दिलेल्या बल / टॉर्कसाठी एंड इफेक्टरच्या परिणामी सांध्यांच्या हालचाली आणि प्रक्षेपण शोधण्यासाठी याचा वापर केला जातो. हे खालीलप्रमाणे दाखवले जाते:

$$\ddot{q} = f(q, \dot{q}, \tau),\ \dot{q} = \int \ddot{q}, dt, q = \int \dot{q}. dt \text{............. .... eqn. (1),}$$

Where,

$$q = displacement, \dot{q} = velocity, \ddot{q} = acceleration, \tau = Torque$$

5.1.3 इनव्हर्स डायनॅमिक्स (Inverse dynamics):

इनव्हर्स डायनॅमिक्स एंड इफेक्टरची इच्छित गती निर्माण करण्यासाठी आवश्यक असलेले बल आणि टॉर्क निश्चित करते. हे रोबोट नियंत्रण, प्रक्षेपण डिझाइन आणि ऑप्टिमायझेशन आणि रोबोट यंत्रणा डिझाइन करण्यासाठी वापरले जाते. व्यस्त गतिशीलतेची समस्या म्हणजे रोबोटच्या एंड-इफेक्टरचा इच्छित मार्ग निर्माण करण्यासाठी आवश्यक असलेले ॲक्च्युएटर टॉर्क आणि/किंवा बल शोधणे. रोबोट नियंत्रित करण्याच्या समस्येसाठी गतिशीलतेचे हे सूत्रीकरण उपयुक्त आहे.

हे ॲक्च्युएटरद्वारे जाइंट वरती लागू कराव्या लागणाऱ्या बलांचे/टॉर्कचे मूल्यांकन आहे जे इच्छित जाइंट च्या हालचालींचा संच आणि end effector च्या प्रभावकांच्या प्रक्षेपणासाठी वापरले जाते. हे समीकरण 2 मध्ये दाखवले आहे..

$$\tau = f^{-1}(\ddot{q}, \dot{q}, q)$$ ....eqn. (2)

रोबोटच्या हालचालीचे डायनॅमिक बिहेवियर खालील द्वारे वर्णन केले जाऊ शकते:लॅग्रेंज-यूलरआणि न्यूटन-यूलर.ज्याद्वारे रोबोट मॅनिपुलेटरच्या जाइंट साठी गतीची गतिमान समीकरणे विकसित केली जाऊ शकतात. न्यूटन-यूलर समीकरणे वेक्टर आपरोच म्हणून ओळखली जातात, तर यूलर-लॅग्रेंज समीकरणे ऊर्जा आपरोच वरती आधारित आहेत.

5.2 रोबोट मॅनिपुलेटरच्या जाइंट साठी गतीचे डायनॅमिक समीकरणे:

गतीची गतिमान समीकरणे अनेक पद्धतींनी तयार करता येतात. एक पद्धत म्हणजे डायनॅमिक समीकरणे युलर-लॅग्रेंज लागू करणे. या दृष्टिकोनाचा फायदा असा आहे की जर जनरल को ऑर्डिनेट स्वतंत्रपणे निवडले गेले तर ते गतीच्या गतिमान इक्वेशन मधून मर्यादांचे बल काढून टाकते.

ही पद्धत रिजिड बॉडी प्रणालीच्या कायनेटिक आणि पोटेंशल उर्जेच्या गणना पद्धतींवर आधारित आहे. लॅग्रॅंजियनची व्याख्या अभ्यासासाठी यांत्रिक प्रणालीच्या गतिज आणि संभाव्य उर्जेमधील फरक म्हणून केली जाते, म्हणजे,

L=T –U, म्हणजेLहे लॅग्रॅंजियन दर्शवते,आणि TandUहे अनुक्रमे एकूण कायनेटिक आणि पोटेंशल एनर्जि दर्शवतात.गतिज ऊर्जा रोबोटिक प्रणालीच्या दुव्यांच्या संरचनेवर (म्हणजेच स्थिती आणि दिशा) आणि वेगावर अवलंबून असते, तर स्थितीज ऊर्जा केवळ दुव्यांच्या संरचनेवर अवलंबून असते. नंतर गतिमान समीकरणे दिली जातात.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = \phi_i \,, for\ i = 1 \ldots \ldots n$$ ....eqn. (3)

यामध्ये;

n= सिस्टमचे कॉन्फिगरेशन परिभाषित करण्यासाठी वापरल्या जाणार्या स्वतंत्र सामान्यीकृत निर्देशांकांची संख्या आहे,

qi's= सामान्यीकृत निर्देशांक आहेत (लॅग्रांगियन फॉर्म्युलेशनमध्ये ऑब्जेक्टचे स्थान निर्दिष्ट करण्यासाठी वापरले जाणारे व्हेरिएबल्स

$\phi_{i=}$ सामान्यीकृत निर्देशांकांशी सुसंगत लागू बलांमुळे सामान्यीकृत बल आहेत.

5.2.1 कायनेटिक एनर्जि (Kinetic Energy):

गतिजऊर्जेचे सामान्य समीकरण =$\frac{1}{2}mv^2$ यातील m हेवस्तुमान आहेआणि v वेग आहे. एखादा n लिंक असलेला रोबोट विचारात घ्या, त्याच्या iनंबर च्या लिंकची कायनेटिक एनर्जि Ti, खालीलप्रमाणे दर्शवता येईल,

$$Ti = \frac{1}{2} m_i \dot{c}_i^T \dot{c}_i + \frac{1}{2} \omega_i^T I_i \omega_i$$ ....eqn. (4)

Where,

$\dot{c}_i - Three\ dimrnsional\ velocity\ vector\ of\ the\ mass\ Ci\ of\ the\ ith\ link$

$\omega_i - Three\ dimensional\ angular\ velocity\ of\ the\ ith\ link$

$m_i - Mass\ of\ the\ ith\ link\ (a\ scalar\ quantity)$

$I_i - The\ 3x3\ inertia\ tensor\ or\ matrix\ of\ the\ ith\ link\ about\ Ci.$

5.2.2 पोटेंशल एनर्जि (Potential energy):

संभाव्य ऊर्जेचे सामान्य समीकरण असे आहे*U=m.g.h.* रोबोटमध्ये साठवलेली एकूण संभाव्य ऊर्जा प्रत्येक दुव्याच्या संभाव्य ऊर्जेच्या योगदानाच्या योगाने दिली जाते. मॅनिपुलेटरच्या कठोर दुव्यांसाठी, दुव्यामध्ये साठवलेली संभाव्य ऊर्जा$_i$गुरुत्वाकर्षणाच्या प्रभावाखाली लिंक $_i$च्या वस्तुमानाच्या केंद्राला क्षैतिज संदर्भ समतलापासून त्याच्या सध्याच्या स्थानावर वाढवण्यासाठी आवश्यक असलेल्या कामाची मात्रा म्हणून परिभाषित केले जाते.

जडत्व फ्रेमच्या संदर्भात, लिंक $_i$ला स्थानावर विस्थापित करण्यासाठी आवश्यक असलेले काम***Ci***द्वारे दिले आहे.

$-m_i c^T g$

जिथे gहा गुरुत्वाकर्षणामुळे होणाऱ्या त्वरणामुळे होणारा सदिश आहे.

म्हणून, रोबोट मॅनिपुलेटरमध्ये साठवलेली एकूण स्थितीज ऊर्जा

$$U = -\sum_{i=1}^{n} m_i \,.\, c_i^T \,.\, g$$

…………………………….eqn. (5)

व्हेक्टरCi हा रोबोटच्या सांध्याच्या चलांचे, म्हणजेच qi चे कार्य आहे. म्हणून, एकूण स्थितीज ऊर्जा ही केवळ जाइंटच्या चलांचे कार्य आहे, जाइंटच्या वेगांचे नाही.

5.2.3 यूलर-लॅग्रेंजसमीकरण:

$$L = T - U = \frac{1}{2} m_i \dot{c}_i^T \dot{c}_i + \frac{1}{2} \omega_i^T I_i \omega_i + \sum_{i=1}^{n} m_i \,.\, c_i^T \,.\, g$$

……………eqn. (6)

5.2.4 न्यूटन-यूलर समीकरण:

न्यूटन-यूलर समीकरणे कठोर बॉडीच्या एकत्रित अनुवादात्मक आणि परिभ्रमण गतिमानतेचे वर्णन करतात. ते बल आणि संवेगाच्या दृष्टीने गतिमान प्रणालींचे वर्णन करते.हे इक्वेशन न्यूटन च्या एनर्जि च्या लॉ ($E=mc^2$)वरती आधारित आहे. हे एका कठोर शरीराच्या गुरुत्वाकर्षण केंद्राच्या गतीचा संबंध त्या कठोर शरीरावर कार्य करणाऱ्या बलांच्या आणि टॉर्कच्या बेरजेशी जोडते. हे मॅनिपुलेटरच्या सामान्य दुव्यावर कार्य करणाऱ्या सर्व बलांच्या संतुलनावर आधारित आहे.

5.3 मोशन प्लॅनिंग: (जॉइंट स्पेस प्लॅनिंग, कार्टेशियन स्पेस प्लॅनिंग)

रोबोटला एखादे विशिष्ट कार्य पूर्ण करण्यासाठी, एंड इफेक्टरला एका विशिष्ट मार्गावर किंवा प्रक्षेपवक्रामध्ये जावे लागते (स्पेस कर्व जो मॅनिपुलेटर प्रारंभिक स्थान आणि अभिमुखतेपासून अंतिम स्थानाकडे सरकतो)गती नियोजनाद्वारे रोबोटचा मार्ग निश्चित करणे आवश्यक आहे.

प्रारंभिक स्थानावरून अंतिम स्थानावर जाण्यासाठी कृतींचा क्रम निश्चित करणे किंवा रोबोटचे जाइंट ज्याप्रमाणे हलतील त्यानुसार कार्य निर्माण करणे हे रोबोट्ससाठी मोशन प्लॅनिंगचे मुख्य उद्दीष्ट

आहे.प्रक्षेपवक्र नियोजनाचा (trajectory planning) उद्देश अंतिम परिणामकाला (end effector) सुरुवातीच्या अवस्थेपासून इच्छित अवस्थेपर्यंत सतत आणि सहजतेने हलवणे हा आहे.

हे कार्य निर्मिती रोबोटच्या कार्यांवर अवलंबून असते, उदाहरणार्थ, एखादी वस्तू एका बिंदूपासून दुसऱ्या बिंदूवर ठेवण्यासाठी उचलणे किंवा वक्ररेषेवर दोन धातूचे तुकडे जोडणे.आधीच्या प्रकरणात, प्रारंभिक आणि अंतिम बिंदू नियुक्त केले जातात, i.e., बिंदू-ते-बिंदू गती, तर नंतरच्या परिस्थितीत बिंदूंचा मर्यादित क्रम निर्दिष्ट करणे आवश्यक आहे, i.e., सतत-मार्ग गती.रोबोट वापरकर्ता सामान्यतः बिंदू-ते-बिंदू किंवा सतत-मार्गाच्या कार्याचे वर्णन करण्यासाठी अनेक मापदंड निर्दिष्ट करतो.एक अल्गोरिदम नंतर रोबोटच्या गती नियंत्रकासाठी इनपुटची गणना करतो.मोशन प्लॅनिंग एकतर जॉइंट स्पेसमध्ये केले जाऊ शकते, i.e., जॉइंट पोझिशन्स, वेग आणि प्रवेग, किंवा कार्टेशियन स्पेस (ज्याला ऑपरेशनल स्पेस देखील म्हणतात) i.e.,एंड-इफेक्टर पोझिशन्स, ओरिएंटेशन आणि त्यांच्या टाइम डेरिव्हेटिव्ह्जच्या बाबतीत.

गती नियोजन हे दोन प्रकारचे आहे

1. जाइंट स्पेसप्लॅनिंग
2. कार्टेशियन स्पेस प्लॅनिंग

5.3.1 जाइंट स्पेस प्लॅनिंग (Joint Space Planning):

संयुक्त जागेत गती नियोजनाला संयुक्त जागेचे नियोजन म्हणतात. कालांतराने संयुक्त चलांचा इच्छित मार्ग निश्चित करण्याची ही पद्धत आहे.

संयुक्त जागेची व्याख्या एका सदिशाने केली जाते ज्याचे घटक मॅनिपुलेटरच्या प्रत्येक सांध्याचे स्थान, वेग आणि प्रवेग असतात. म्हणून, संयुक्त जागेत, रोबोटचे कॉन्फिगरेशन परिभाषित करण्यासाठी संयुक्त कोन आणि विस्थापन वापरले जातात. रोबोटवरील नियंत्रण क्रिया संयुक्त जागेत चालते. संयुक्त जागेत, मार्गक्रमण संयुक्त कोनांच्या संदर्भात परिभाषित केले जाते.

5.3.2 कार्टेशियन स्पेस प्लॅनिंग (Cartesian Space Planning):

कार्टेशियन स्पेसमध्ये गती नियोजनाला कार्टेशियन स्पेस प्लॅनिंग म्हणतात. कालांतराने एंड इफेक्टरची स्थिती आणि दिशानिर्देशाच्या दृष्टीने इच्छित मार्ग निश्चित करण्याची ही पद्धत आहे. कार्टेशियन स्पेस (किंवा टास्क स्पेस किंवा ऑपरेशनल स्पेस) ही एका वेक्टरद्वारे परिभाषित केली जाते ज्याचे घटक रोबोटच्या एंड इफेक्टरची स्थिती, दिशानिर्देश आणि त्यांचे वेळ डेरिव्हेटिव्ह असतात. म्हणून, कार्टेशियन स्पेसमध्ये, रोबोटची कॉन्फिगरेशन परिभाषित करण्यासाठी कार्टेशियन निर्देशांक वापरले जातात.

सामान्यत: कार्टेशियन स्पेसमध्ये गती नियोजन ऑपरेटरद्वारे पसंत केले जाते कारण ते रोबोटला करायच्या कार्याचे नैसर्गिक वर्णन करण्यास अनुमती देते कारण रोबोटला करायचे कार्य या जागेत केले जाते. तथापि, रोबोटवरील नियंत्रण क्रिया संयुक्त जागेत केली जाते. अशा प्रकारे, कार्टेशियन स्पेसमध्ये वरील अनुक्रमाशी संबंधित संयुक्त चलांच्या वेळेच्या क्रमाची पुनर्रचना करण्यासाठी एक योग्य व्यस्त गतिशास्त्र अल्गोरिदम वापरला जातो. कार्टेशियन स्पेस निर्देशांक प्रणालीमध्ये एंड-इफेक्टर स्थिती आणि दिशानिर्देश वर्णन करते.

5.3.3 (Differentiate between Joint space trajectory and Cartesian trajectory planning) (जॉइंट स्पेस ट्रॅजेक्टरी आणि कार्टेशियन ट्रॅजेक्टरी प्लॅनिंग मधील फरक स्पष्ट करा.)

Ans:

Table No. 5.1

जॉइंट स्पेस ट्रॅजेक्टरी प्लॅनिंग	कार्टेशियन स्पेस ट्रॅजेक्टरी प्लॅनिंग
संयुक्त अवकाशातील गती नियोजनाला संयुक्त अवकाश नियोजन असे म्हणतात.	कार्टेशियन अवकाशातील गती नियोजनाला कार्टेशियन स्पेस प्लॅनिंग म्हणतात.
जॉइंट स्पेस ट्रॅजेक्टरी प्लॅनिंग म्हणजे टार्गेट पोझिशन आणि ओरिएंटेशन साध्य करण्यासाठी वेळोवेळी इच्छित संयुक्त कोन निर्दिष्ट करून रोबोटिक मॅनिपुलेटरसाठी मार्ग निश्चित करण्याची प्रक्रिया.	कालांतराने अंतिम प्रभावकाची स्थिती आणि अभिमुखतेच्या दृष्टीने इच्छित मार्ग निश्चित करण्याची ही पद्धत आहे.
संयुक्त अवकाशाची व्याख्या वेक्टरद्वारे केली जाते ज्याचे घटक मॅनिपुलेटरच्या प्रत्येक जॉइंटची स्थिती, वेग आणि त्वरण आहेत.	कार्टेशियनस्पेस (किंवाटास्कस्पेसकिंवाऑपरेशनलस्पेस) एकावेक्टरद्वारेपरिभाषितकेलेजातेज्याचेघटकम्हणजे रोबोटच्याअंतिमप्रभावकाचीस्थिती, ओरिएंटेशनआणित्यांचेवेळेचे डेरिव्हेटिव्ह.
रोबोटवरील नियंत्रण क्रिया संयुक्त अवकाशात (स्पेस मध्ये) केली जाते.	रोबोटलाजेकामकरावंलागतंतेयाजागेतकेलंजातं
संयुक्त अवकाशात, रोबोटच्या कॉन्फिगरेशनची व्याख्या करण्यासाठी संयुक्त कोन आणि विस्थापन वापरले जातात.	कार्टेशियनअवकाशात, रोबोटचेकॉन्फिगरेशनपरिभाषितकरण्यासाठीकार्टेशियननिर्देशांकवापरलेजातात.

5.3.4 जॉइंट स्पेस ट्रॅजेक्टरी (Joint space trajectory)

संयुक्त अंतराळ प्रक्षेपक प्रक्षेपणाविषयी महत्त्वाचे मुद्दे:

5.3.4.1 इनपुट म्हणून संयुक्त कोन (Joint angles as input)

इच्छित अंतिम-प्रभावक स्थिती थेट निर्दिष्ट करण्याऐवजी, वापरकर्ता विशिष्ट बिंदूंवर (वेपॉइंट्स) इच्छित संयुक्त कोन परिभाषित करतो. गणितीय प्रक्षेप (Mathematical Interpolation): मार्गबिंदूंमधील मध्यवर्ती बिंदूंवर संयुक्त कोनांची गणना करण्यासाठी रेखीय इंटरपोलेशन, क्यूबिक स्प्लिन्स किंवा बी-स्प्लिन्स सारख्या तंत्रांचा वापर केला जातो, ज्यामुळे सुरळीत संक्रमण सुनिश्चित होते.

उलट्या किनेमेटिक्सची वारंवार आवश्यकता नसते: टास्क-स्पेस ट्रॅजेक्टरी प्लॅनिंगच्या विपरीत, जॉइंट स्पेस इंटरपोलेशनसाठी बऱ्याचदा कमी वारंवार उलट्या किनेमेटिक्स गणनांची आवश्यकता असते, जी संगणकीय दृष्ट्या महाग असू शकते.

5.3.4.2 जॉइंट स्पेस इंटरपोलेशनचे फायदे (Benefits of Joint Space Interpolation):

संगणकीय कार्यक्षमता: टास्क-स्पेस ट्रॅजेक्टरीसाठी सतत सोडविण्यापेक्षा, केवळ वेपॉइंट्सवर उलटे किनेमेटिक्स सोडविणे वेगवान असू शकते.

सुरळीत गती (Smooth Motion): इंटरपोलेशन पद्धती काळजीपूर्वक निवडून, रोबोटची गती सुरळीत केली जाऊ शकते आणि धक्कादायक हालचाली टाळता येतात.

अंमलबजावणी करणे सोपे असते.

- टास्क-स्पेस ट्रॅजेक्टरीजच्या तुलनेत, विशेषत: साध्या हालचालींसाठी संयुक्त अंतराळ प्रक्षेपक डिझाइन

करणे आणि अंमलात आणणे बर्याचदा सोपे असते.

5.4 पाथ Vs प्रक्षेपपथ (Pathvs. Trajectory):

5.4.1 पाथ(Path):

- कॉन्फिगरेशनच्या वेळेचा विचार न करता विशिष्ट क्रमाने रोबोट कॉन्फिगरेशनच्या अनुक्रमाला पथ म्हणतात.
- हा सर्व बिंदूंचा संच आहे, जो प्रारंभिक ते अंतिम कॉन्फिगरेशनपर्यंत जातो.
- वेळेचा विचार न करता, मॅनिपुलेटर प्रारंभिक स्थिती आणि अभिमुखतेकडून अंतिम स्थितीकडे वाटचाल करतो—हे अंतराळ वक्र (spatial curve) आहे.

5.4.2 प्रक्षेप पाथ (Trajectory):

- प्रक्षेप पथ किंवा उड्डाण मार्ग म्हणजे गतिमान वस्तु-मान असलेली वस्तू काळाचे कार्य म्हणून अंतराळातून अनुसरण करते.
- काळाचे कार्य म्हणून, विशिष्ट क्रमाने रोबोट कॉन्फिगरेशनच्या अनुक्रमास प्रक्षेप पथ म्हणतात.
- ट्रॅजेक्टरी म्हणजे ठराविक वेळअसलेला मार्ग.
- हेअवकाशवक्र आहे जे मॅनिपुलेटर प्रारंभिक स्थिती आणि अभिमुखतेपासून वेळेचे कार्य म्हणून अंतिमस्थितीकडे जाते.

(मार्गही एक स्थानिकरचना आहे आणि आपण जगातून अतेबपर्यंत कसे पोहोचतो हे सांगते.) ट्रॅजेक्टरी म्हणजेएकमार्ग आणि एक वेळापत्रक. वाटेने आपण किती वेगाने वाटचाल करावी, वाटेत कोणत्यावेळी असावे हे सांगते.)

5.4.3 कार्टेशियनट्रॅजेक्टरीज, पॉईंटटूपॉईंटविरुद्धनिरंतरपाथ नियोजन (Cartesian Trajectories: Point-to-Point vs. Continuous Path Planning)

प्रक्षेपाचे दोन प्रकार आहेत:

1.पॉइंट-टू-पॉइंट मोशन

2.निरंतर-पथगति मोशन

हे रोबोटच्या कार्याच्या स्वरूपावर अवलंबून असते.

पॉईंट-टू-पॉईंट मोशन (PTP):

येथे, मार्गाचे प्रारंभिक आणि अंतिम बिंदू दिले जातात. रोबोट एंड इफेक्टरला ठराविक वेळेत प्रारंभिक ते अंतिम संयुक्त कॉन्फिगरेशनकडे जावे लागते. येथे, वास्तविक एंड-इफेक्टर ट्रॅजेक्टरी महत्वाची नाही.

PTP मोशनचा वापर:

पिक-अँड-प्लेस ऑपरेशन्समध्ये, जिथे वस्तू एका ठिकाणाहून उचलून दुसऱ्या बिंदूवर ठेवण्याची आवश्यकता असते.

1. निरंतर-पथगती (सीपी): येथे, मार्गाच्या बिंदूंचा मर्यादित अनुक्रम निर्दिष्ट करणे आवश्यक आहे. मार्गाचे वर्णन अनेक बिंदूंच्या दृष्टीने करणे आवश्यक आहे जे सामान्यतः दोन पेक्षा जास्त असतात. हे संयुक्त किंवा कार्टेशियन अवकाशात **N** बिंदूंसह एक प्रक्षेप पथ तयार करते.

   सीपी मोशनचा वापर: जिथे एखाद्या मार्गावर शेवटच्या प्रभावकाची सतत गती आवश्यक असते.

   उदाहरण: एक वळणावर दोन धातूचे तुकडे वेल्ड करणे.

5.4.4 कार्टेशियन स्पेस ट्रॅजेक्टरी इंटरपोलेशनचे अनुप्रयोग (Applications of Cartesian Space Trajectory Interpolation):

- रोबोट हाताळणी (Robot manipulation):
  पिक-अँड-प्लेस, वेल्डिंग, पेंटिंग इत्यादी कामांसाठी रोबोटच्या एंड-इफेक्टरच्या हालचालीवर अचूक नियंत्रण ठेवणे.
- CNC मशीनिंग: मिलिंग किंवा ड्रिलिंग ऑपरेशनसाठी टूलपाथ तयार करणे जेथे वेगवेगळ्या कट दरम्यान सुरळीत संक्रमण आवश्यक आहे.
- स्वायत्तवाहने (Autonomous vehicles): गुंतागुंतीच्या वातावरणात नेव्हिगेट करणाऱ्या वाहनांसाठी सुरळीत ड्रायव्हिंग ट्रॅजेक्टरीचे नियोजन करणे.

Exercise: सीपीमोशन आणि पीटीपी मोशन मधील फरक सांगा. (State the difference between CP Motion and PTP Motion)

Ans: -

Table No. 5.2

कंटीन्यूअस पाथ मोशन **Continuous Path (CP) Motion**	**पॉइंट टू पॉइंट (पीटीपी) मोशन** **Point to point Motion**
मार्गाच्या बिंदूंचा मर्यादित क्रम निर्दिष्ट करणे आवश्यक आहे.	मार्गाचे सुरुवातीचे आणि शेवटचे बिंदू निश्चित केले असतात.
मार्गाचे वर्णन बऱ्याच बिंदूंच्या संदर्भात केले गेले आहे जे सामान्यत: दोनपेक्षा जास्त असतात.	रोबोटला ठराविक वेळेत सुरुवातीच्या ते अंतिमसंयुक्त कॉन्फिगरेशनकडे जावे लागते, t_f.
संयुक्त किंवा कार्टेशियन अवकाशात n बिंदू असलेला मार्ग.	वास्तविक एंड-इफेक्टर ट्रॅजेक्टरी महत्वाची नाही.
Application: -आर्कवेल्डिंग, पेंटिंग, ग्लूइंगइ.	Application: -पिकअँडप्लेस, स्पॉटवेल्डिंगइ.

सारांश:

याअध्यायात यूलर-लाग्रांज आणि न्यूटन-यूलर दोन्ही फॉर्म्युलेशन वापरून रोबोट मॅनिपुलेटरसाठी रिजिड बॉडी गतिशीलता सादर केली आहे.

वरील दोन्ही सूत्रे स्पष्ट करण्यासाठी वन-लिंक वन डिग्री ऑफ फ्रीडम (DOF) आर्म आणि टू-लिंक टू-DOF रोबोट आर्म चे उदाहरण दिले आहे.

जॉइंट स्पेस ट्रॅजेक्टरी आणि कार्टेशियन ट्रॅजेक्टरी प्लॅनिंग मधील फरक स्पष्ट केला आहे.

तसेच CP मोशन आणि पॉइंट-टू-पॉइंट मोशन यांच्या अनुप्रयोग (applications) बरोबर फरक स्पष्ट केला आहे.

रोबोट नियंत्रण आणि सिम्युलेशनसाठी आवश्यक अनुक्रमे प्रतिलोम आणि फॉरवर्ड डायनॅमिक्स अल्गोरिदम देखील MATLAB, Mu-PAD आणि Robo-Analyzer सॉफ्टवेअर वापरून समाविष्ट केले जातात.

स्वाध्याय:

1. फॉरवर्ड डायनॅमिक्स आणि इनव्हर्स डायनॅमिक्स चे महत्त्व सांगा. (State the significance of Forward dynamics and Inverse dynamics.)
2. खालील गोष्टी परिभाषित करा (i) मार्ग (ii) रोबोटचा मार्गक्रमण(Define the following (i) Path (ii) Trajectory of a robot.)
3. संयुक्त अवकाश मार्ग आणि कार्टेशियन मार्ग नियोजन यात फरक करा. (Differentiate between Joint space trajectory and Cartesian trajectory planning.)
4. सीपीमोशन आणि पीटीपी मोशनमधील फरक सांगा.(State the difference between CP Motion and PTP Motion.)
5. किनेमॅटिक मॉडेल आणि डायनॅमिक मॉडेल (प्रत्येकी दोन पॉइंट) यांचीतुलनाकरा. (Compare Kinematic model and Dynamic model (two points each)
6. लॅग्रेंज-युलरपद्धतीचे वर्णन करा आणि गतिमानतेमध्ये गतीचे समीकरण सांगा. (Describe Lagrange- Euler method and state it’s equation of motion in dynamics.)
7. कोणत्याही ओपन-सोर्स सॉफ्टवेअरचा वापर करून टूलिंक रोबोट आर्मचे फॉरवर्ड आणि इनव्हर्स डायनॅमिक्स करा. (Perform forward and Inverse Dynamics of Two link Robot arm using any Open-Source Software.)

संदर्भ (References):

Sr. No	Author	Title	Publisher with ISBN Number
1	S. K . Saha	Introduction to Robotics	McGraw-Hill Education Pvt. Ltd., 2008, ISBN 978-0070140011
2	R. S. Khurmi, N khurmi	Engineering Mechanics	S. Chand & Company, New Delhi, 2018, ISBN 978-9352833962