

HUOM: Tentin tehtäväpaperin neljännellä sivulla on annettu muutamia tehtävien ratkaisun kannalta hyödyllisiä kaavoja.

1. Kuvassa 1. on esitetty viiden vapausasteen Mitsubishi Movemaster RV-M1 robotin rakenne. Tehtävässä huomioidaan ainoastaan robotin kolme ensimmäistä vapausastetta robotin rungosta lähtien (ts. Vartalon kierto Θ_1 , olkavarren kierto Θ_2 ja kyynärvarren kierto Θ_3). Huom. Θ_2 on olkavarren kiertokulma **R**-koordinaatiston **xy**-tason suhteen ja Θ_3 kyynärvarren kiertokulma olkavarren suhteen (positiiviset kiertosuunnat ja kulmien nolla-arvot kuvan 1 mukaiset). Robottikäsivarren kyynärvarsi (kuvassa pituus 160mm) ja ranne (72) on lukittu suoraksi yhtenäiseksi varreksi. Robotin peruskoordinaatisto, **R**, ja työkalukoordinaatisto, **T**, on myös merkitty kuvaan.
 - a) Kiinnitä vapausastekoordinaatistot ja anna niitä vastaavat Denavit-Hartenberg parametrit. (3p)
 - b) Määritä ko. Kolmen vapausasteen robotin suora kinemaattinen muunnos (toisin sanoen laske robottikäsivarren muunnosmatriisi (eli käsivarsimatriisi)). (3p)
2. Kuvassa 2. on esitetty neljän vapausasteen SCARA-robotin kinemaattinen rakenne. Kaksi ensimmäistä vapausastetta ovat kiertyviä (olkavarren ja kyynärvarren kierrot liikuttavat käsiavartta tasossa), sen jälkeen seuraa lineaaritoimilaitte ylös/alas-liikkeen aikaansaamiseksi ja viimeisenä kinemaattisessa ketjussa on kiertonivel työkalun asennon ohjaamiseksi esimerkiksi B-koordinaatiston **xy**-tason suuntaisella alustalla olevien kappaleiden poimimiseksi.
 - a) Merkitse kuvaan ja indeksoi manipulaattorin vapausastekoordinaatistot (link-frames) suoran kinemaattisen muunnoksen muodostamiseksi manipulaattorin rannekoordinaatiston (**W**) paikan ja asennon kuvaamiseksi peruskoordinaatiston (**B**) suhteen. Merkitse myös kuvaan ja anna taulukkomuodossa manipulaattorin nivelparametrit ja -muuttujat (link parameters, Denavit-Hartenberg parameters). Määritä lisäksi vastaavat nivelmatriisit. (3p)
 - b) Muodosta yhtälöt robotin tarttujan asennon (ts. **W**-koordinaatiston asennon) ilmaisemiseksi kiinteän referenssikoordinaatiston (**B**) suhteen määritettyjen **X-Y-Z** kiertokulmien (eli Roll-, Pitch- ja Yaw-kulmat) avulla robotin nivelnkulmien funktiona. (3p)
3. Kuvassa 3. on esitetty eräs kahden vapausasteen manipulaattori kotiasennossaan, ensimmäinen vapausaste on kiertyvä (yläkäsivarren kierto vaakatasossa), θ , ja toinen lineaarinen (yläkäsivarren pituuden ohjaus), d . (Yläkäsivarsi on 0-koordinaatiston negatiivisen **y**-akselin päällä kun kierokulman θ arvo on nolla). Määritä manipulaattorin käänteinen kinemaattinen muunnos. Esitä lisäksi, mille (**W**)-koordinaatiston origon **x,y,z**-ohjauspisteille käänteinen kinemaattinen ratkaisu on olemassa (vastaus esim. yhtälöiden/epäyhtälöiden muodossa)? (6p)
4. Määritä luonnolliset rajoitukset (natural constraints) ja vastaavat ohjattavat suureet (artificial constraints) kuvien 4a) ja 4b) esimerkkityötehtävissä? Eli selvitä/luettele luonnolliset rajoitukset ja niitä vastaavat työkalun ohjaussuureet (lineaari-/kulmanopeus tai voima/momentti) kunkin tehtäväkoordinaatiston kuuden vapausasteen suhteen. (4p).
5. Kuvassa 5. on esitetty robotin toiminta-avaruutta kuvaava ruudukko. Esteiden paikkoja kuvaavat ruudut on merkitty **X**:llä. Valkoiset ruudut kuvaavat robotin vapaata liikeavaruutta. Alkuperäisten esteiden kokoa ruudukolla on kasvatettu niin, että robotti voidaan olettaa pistemäiseksi. Muodosta 'Etäisyysmuunnos'-menetelmällä robotin törmäysvapaa liikerata kuvan ruudukolla. Robotin lähtöpistettä merkitään '**S**':llä ja tavoitepistettä '**G**':llä. Kuvaa menetelmän eri vaiheet. (4p).
6. Robotin off-line ohjelmointi (etäohjelmointi): Toimintaperiaate? Käytön edut perinteiseen robotin on-line ohjelmointiin verrattuna? Menetelmään liittyvät kalibrointiongelmät/-tehtävät? (4p)

Below, the same questions are given in English:

NOTE: -On the fourth page of the exam paper, there are some useful equations presented.

1. In figure 1., the (kinematic) structure of the five degree-of-freedom Mitsubishi Movemaster RV-M1 robot is shown. In the problem only the three first degrees of freedom are considered (i.e. robot body rotation Θ_1 , shoulder rotation Θ_2 and elbow rotation Θ_3). Note that Θ_2 is the rotation angle with respect to the xy -plane of R -frame and Θ_3 is the rotation of the forearm with respect to the upper arm (directions of positive rotations and zero values of rotations are shown in figure 1). The forearm (length in the figure 160mm) and wrist (72mm) have been locked together to form a single rigid link. The robot base frame, R , and tool frame, T , have also been marked in the figure.
 - a) Assign the link frames and give corresponding Denavit-Hartenberg parameters. (3p)
 - b) Determine the direct kinematic transformation of the robot (i.e. compute the transformation matrix of the robot arm). (3p)

2. In figure 2 the kinematic structure of a four degree-of-freedom SCARA robot is shown. The first two joints are rotational (shoulder and elbow joints move the arm on a plane), then a prismatic joint follows, which moves the tool up and down. And finally, in the kinematic chain, a rotational joint adjusts the orientation of the tool, for example, to grasp objects, which are laying on pallet, oriented parallel to the xy -plane of the B-frame.
 - a) Number and mark in the figure the link-frames required for constructing the direct kinematic transformation of the manipulator for describing the wrist frame (W) with respect to the base frame (B). Also draw into the figure and give in a table the link parameters and variables (i.e. Denavit-Hartenberg parameters). Define also the corresponding homogenous link transformation matrices. (3p)
 - b) Define the transformation equations for describing the orientation of the wrist frame (W) by means of the X - Y - Z fixed angles (i.e. Roll, Pitch Yaw angles) as a function of robot joint angles. (3p)

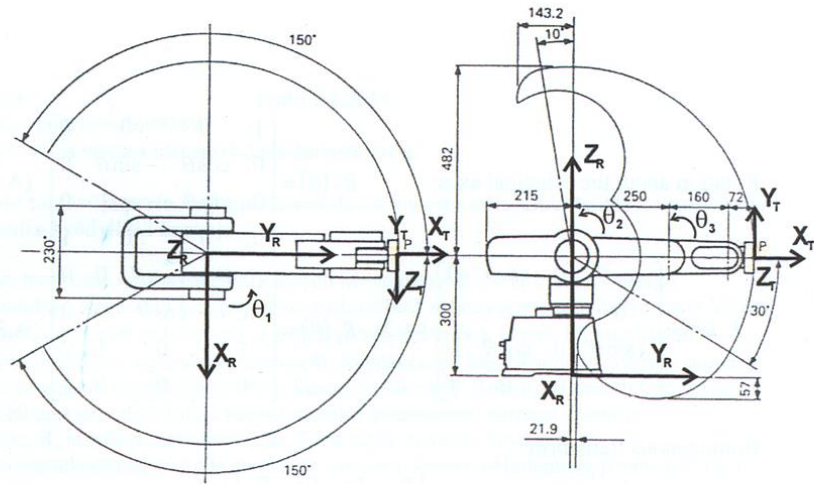
3. In figure 3 a two degree-of-freedom manipulator is shown in its home/zero position, the first dof is a rotational joint (controlling the orientation of the upper link on the horizontal plane), θ , and the second dof is a translational joint (controlling the length of the upper link), d . (The upper link is above the negative y -axes of the 0-frame when the control angle θ has a zero value). Find the inverse kinematic transform for the manipulator. Describe also, for which of the x,y,z -positions of the origin of the (W) frame a reachable inverse kinematic solution exists (answer, for example, in the form of equations or inequalities)? (6p)

4. Give natural constraints and corresponding controllable parameters (artificial constraints) in the example tasks of figures 4a) and 4b). In other words, explain natural constraints and corresponding control values (linear/angular velocity or force/moment) with respect to each of the six degrees of freedom of the task frame? (4p)

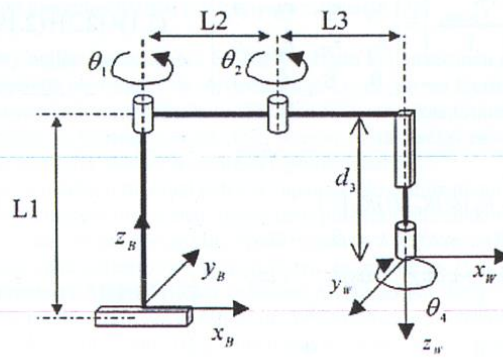
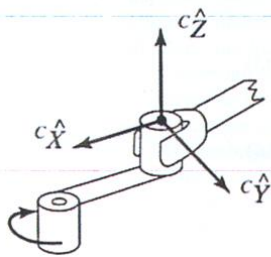
5. In figure 5. the grid of the operation space of a mobile robot is shown. The locations of obstacles are marked with X . White grid cells represent free motion space of the robot. The initial size of the obstacles has been grown on the grid such that the robot can be considered dimensionless (i.e. a point). Plan a collision free path on the grid by using the distance transform method. The start location of the robot is marked with 'S' and the goal location with 'G'. Explain how the different phases of the method are applied. (4p)

6. Robot off-line programming method: Working principle? Benefits compared to traditional robot on-line programming? Calibration tasks/problems related to the method? (4 p.)

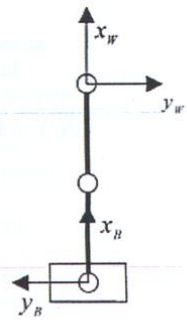
Kuva/Figure 1



(a) Turning crank

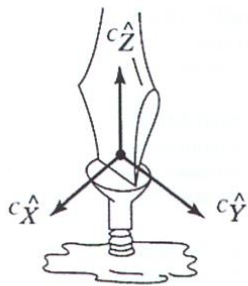


sivusta/ side view



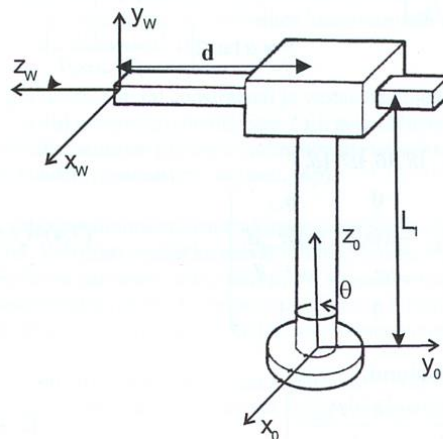
ylhäältä/ top view

(b) Turning screwdriver

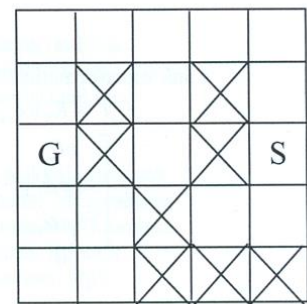


Kuva/Figure 4

Kuva/Figure 2



Kuva/Figure 3



Kuva/Figure 5

Rotation about the principal axes: $R_X(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ (A.1);

$$R_Y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A.2) \quad R_Z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A.3)$$

Homogenous transform:

$${}^A_B T = \left[\begin{array}{ccc|c} {}^A_B R & {}^A P_{BORG} & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)+(2.2)+(2.19)$$

X-Y-Z fixed angles:

$${}^A_B R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) \quad (2.63)$$

$$= \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta\gamma - s\alpha\gamma & c\alpha s\beta\gamma + s\alpha\gamma & 0 \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta\gamma + c\alpha\gamma & s\alpha s\beta\gamma - c\alpha\gamma & 0 \\ -s\beta & c\beta\gamma & c\beta\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

$${}^A_B R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.65) \quad \beta = a \tan 2 \left(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2} \right)$$

$$\alpha = a \tan 2 \left(\frac{r_{21}}{\cos \beta}, \frac{r_{11}}{\cos \beta} \right) \quad (2.66)$$

$$\gamma = a \tan 2 \left(\frac{r_{32}}{\cos \beta}, \frac{r_{33}}{\cos \beta} \right)$$

Link transformation:

$${}^{i-1}_i T = R_X(\alpha_{i-1})D_X(a_{i-1})R_Z(\theta_i)D_Z(d_i)$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)+(3.6)$$

Inverse of a homogenous transform:

$${}^A_B T^{-1} = {}^B_A T = \left[\begin{array}{ccc|c} {}^A_B R^T & -{}^A_B R^T A P_{BORG} & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (2.45)$$