

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

The questions are given in English on the second page.

On the fourth page, some equations to help solving the problems are given.

- Määrittele lyhyesti seuraavat robotiikan käsitteet:
 - Vihivaunu ? (1 piste)
 - Metrinen kartta ? (1 p)
 - Passiivinen joustavuus (komplianssi)? (1 p)
 - Kaksoismerkitys? (1 p)
 - Jakobiaanimatriisi ? (1 p)
 - SCARA-robotti ? (1 p)
- Kuvassa 1. on esitetty neljän vapausasteen SCARA-robotin kinemaattinen rakenne. Kaksi ensimmäistä vapausastetta ovat kiertyviä (olkavarren ja kyynärvarren kierrot liikuttavat käsivartta tasossa), sen jälkeen seuraa lineaaritoimilaite ylös/alas-liikkeen aikaansaamiseksi ja viimeisenä kinemaattisessa ketjussa on kiertonivel työkalun asennon ohjaamiseksi esimerkiksi B-koodinaatiston xy-tason suuntaisella alustalla olevien kappaleiden poimimiseksi.
 - 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. (4p)
 - Muodosta yhtälöt robotin tarttujan asennon (ts. W-koordinaatiston asennon) ilmaisemiseksi kiinteän referenssikoordinaatiston suhteen määritettyjen X-Y-Z kiertokulmien (eli Roll-, Pitch- ja Yaw-kulmat) avulla robotin nivelsuhteiden funktiona. (4p)
- Kuvassa 2. on kuvattu eräs kahden vapausasteen manipulaattori. Manipulaattorin molemmat vapausasteet ovat kiertyviä (yläkäsivarren kierto vaakatasossa, θ_1 , ja yläkäsivarren taivutus vaakatason suhteen, θ_2). Määritä manipulaattorin käänteinen kinemaattinen muunnos. Esitä lisäksi, mille (W)-koordinaatiston origon x,y,z-ohjauspisteille käänteinen kinemaattinen ratkaisu on olemassa (vastaus esim. yhtälön/epäyhtälön muodossa)? (4p)
- Kuvassa 3 on laiva, jonka peruskoordinaatistoa merkitään **S**:llä. Laivan keulassa on tutka, johon kiinnitettyä koordinaatistoa merkitään **R**:llä. Rannalla on majakka, johon kiinnitetyn koordinaatiston, **B**, paikka ja asento suhteessa tutkaan, ${}^R_B T$, voidaan määrittää mittadatasta. Myös tutkan kiinnityspiste suhteessa laivan peruskoordinaatistoon, ${}^S_R T$, on tiedossa. Muodosta lauseke homogeeniselle muunnosmatriisille, joka kuvaa laivan paikan ja asennon suhteessa majakkaan (4p).
- Kuvassa 4 on esitetty liikkuvan robotin käytettävissä olevat reitit lähtöpisteestä (Start) tavoitepisteeseen (Goal). Ympyrät kuvaavat välitavoitteita, joiden kautta robotin tulee kulkea. Toistensa suhteen saavutettavissa olevien välitavoitepisteiden keskinäiset etäisyydet on merkitty yhdysviivaan liitettyllä numerolla. Kuvaa vaihe vaiheelta miten lyhimmän reitin haku 'S':stä 'G':n suoritetaan, 'A*'-reitin hakualgoritmin avulla ? (4p).
- Liikkuvien palvelurobottien tärkeimmät osajärjestelmät ? (4p)

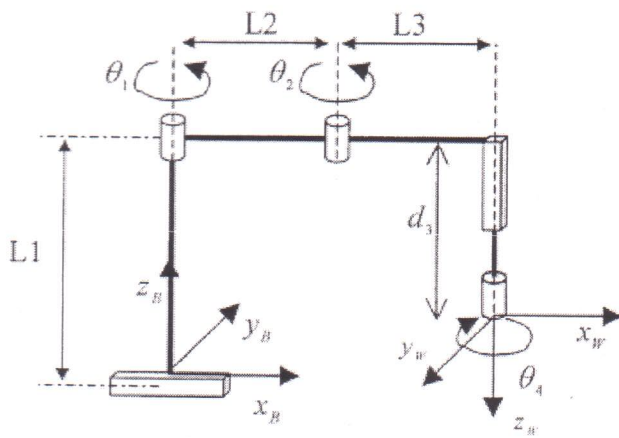
NOTE: -On the fourth page of the exam paper, there are some useful equations presented.

1. Define the following robotics-related terms:
 - a) Automated guided vehicle ? (1point)
 - b) Metric map ? (1p)
 - c) Passive compliance ? (1p)
 - d) Double (multiple) solutions ? (1p)
 - e) Jacobian matrix? (1p)
 - f) SCARA-robot ? (1p)

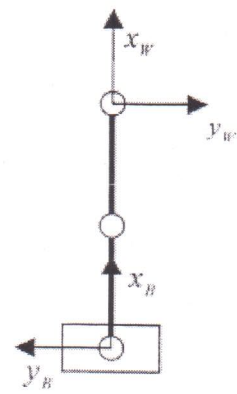
2. In figure 1 the kinematic structure of a four degree-of-freedom SCARA robot is shown. The first two joints are rotational (shoulder and elbow joints move the arm on a plane), then a prismatic joint follows, which moves the tool up and down. And finally, in the kinematic chain, a rotational joint adjusts 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. (4p)
 - 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. (4p)

3. In figure 2. a two degrees-of-freedom manipulator is shown. Both degrees-of-freedom (dof) are rotational (the first rotating the upper link on the horizontal plane, θ_1 , and the second tilting the upper link with respect to the horizontal plane, θ_2). 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 an equation or an inequality) ? (4p)

4. In figure 3. a ship, the base frame of which is marked with **S**, has been depicted. At the bow of the ship there is a radar, with a coordinate frame **R**. On the shore there is a beacon, with a coordinate frame **B**. The location of the beacon with respect to the radar, ${}^R T_B$, can be determined from the measurement data. Also, the location of the radar with respect to the base frame of the ship, ${}^S T_R$, is known. Derive an equation for the transformation matrix describing the relative position and orientation of the ship with respect to the beacon ? (4p)

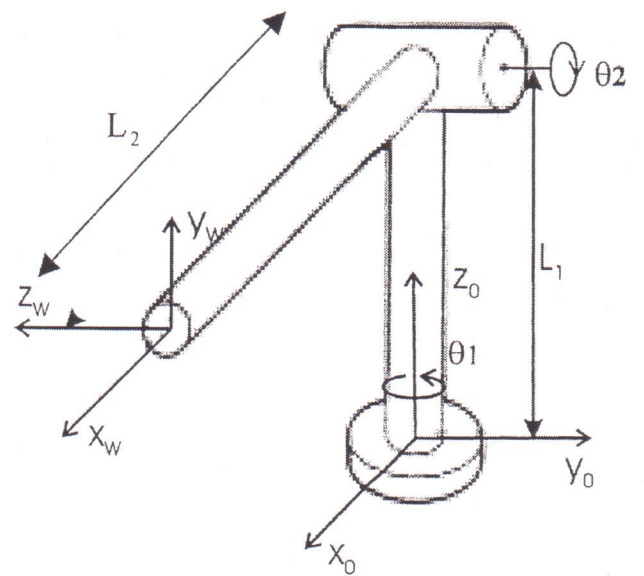


sivusta/ side view

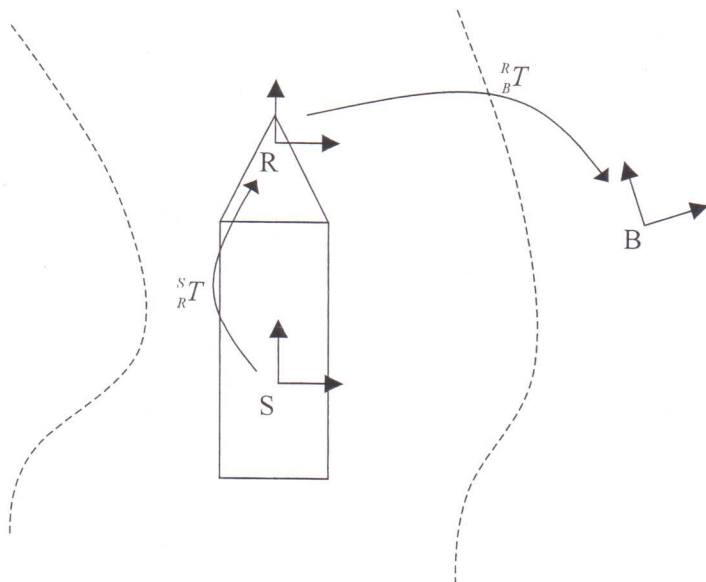


ylhäältä/ top view

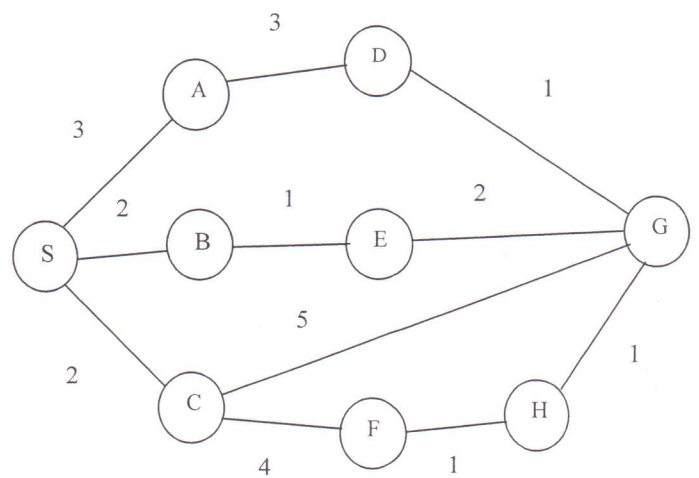
Kuva/Figure 1



Kuva/Figure 2



Kuva/Figure 3



Kuva/Figure 4

Rotation about the principal axes:

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

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

Homogenous transform:

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

X-Y-Z fixed angles:

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

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

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:

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