

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.

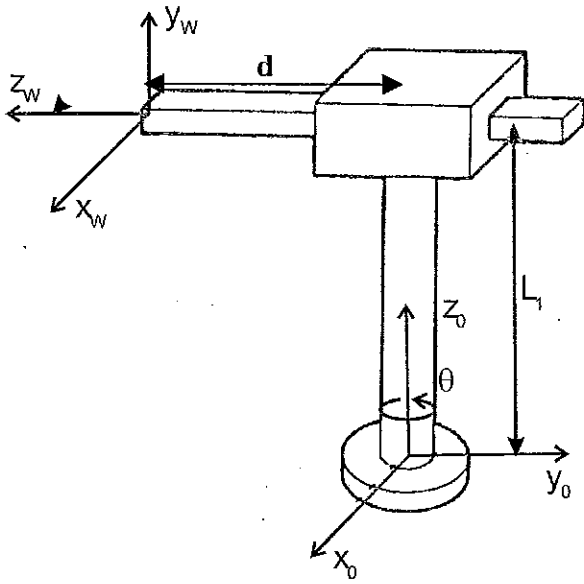
1. Suorakulmaisten koordinaatistojen A ja B välistä siirtoa ja kiertoa kuvaa 4×4 homogeeninen muunnosmatriisi ${}^A_B T$ (vrt. kaavakokoelma). Mitä A ja B koordinaatistojen välisiä riippuvuuksia muunnosmatriisin pysty- ja vaakavektorit kuvaavat? Toisin sanoen, mikä on muunnosmatriisin pysty- ja vaakavektorien tulkinta? (4 pistettä)
2. Kuvassa 1. 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 kiertokulman θ arvo on nolla).
 - a) Merkitse kuvaan ja indeksoi manipulaattorin vapausastekoordinaatitot (link-frames) suoran kinemaattisen muunnoksen muodostamiseksi manipulaattorin rannekoordinaatiston (W) paikan ja asennon kuvaamiseksi peruskoordinaatiston (0) suhteen. Merkitse myös kuvaan ja anna taulukkomuodossa manipulaattorin nivelparametrit ja -muuttujat (link parameters, Denavit-Hartenberg parameters). Määritä lisäksi vastaavat nivelmatriisit. (4p)
 - b) Muodosta yhtälöt robotin rannekoordinaatiston (W) asennon ilmaisemiseksi kiinteään referenssikoordinaatiston (0) suhteen määritettyjen X-Y-Z kiertokulmien (eli Roll-, Pitch- ja Yaw-kulmat) avulla robotin vapausastemuuttujien (θ, d) funktiona. (4p)
3. Kuvassa 2. on kuvattu eräs kahden vapausasteen manipulaattori. Manipulaattorin molemmat vapausasteet ovat kiertyviä (yläkäsivarren kierto vaakatasossa, θ_1 , ja yläkäsivarren taivutus vaakataso 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)
4. Robotin off-line ohjelmointi (etäohjelmointi): Toimintaperiaate? Käytön edut perinteiseen robotin on-line ohjelmointiin verrattuna? Menetelmään liittyvät kalibrointiongelmat/-tehtävät? (4p).
5. Laseretäisyysmittalaitteella mitataan kahden maamerkin paikat laserkoordinaatiston "L" suhteen (paikkavektorit ${}^L P_1$ ja ${}^L P_2$ kuvassa 3). Suorakulmainen koordinaatisto "B" muodostetaan mitattujen maamerkkien paikkojen avulla seuraavalla tavalla: Koordinaatiston origo kiinnitetään ensimmäisen maamerkin paikkaan. Koordinaatiston x-akseli osoittaa ensimmäisen maamerkin paikasta kohti toisen maamerkin paikkaa (xy-tasoa pitkin, ts. B-koordinaatiston x-akseli on L-koordinaatiston xy-tason suuntainen). z-akseli osoittaa ylöspäin ja y-akselin suunta saadaan oikean käden kiertosääntöä soveltamalla (vertaa kuvaa 3). (Tehtävässä oletetaan siis, että B- ja L-koordinaatistojen z-akselit ovat samansuuntaiset ja osoittavat molemmat ylöspäin).

Muodosta 4×4 homogeeninen muunnosmatriisi L-koordinaatiston paikan ja asennon esittämiseksi B-koordinaatiston suhteen paikkavektorien ${}^L P_1$ ja ${}^L P_2$ vektorikomponenttien funktiona. (6p)
6. Liikkuvien palvelurobottien tärkeimmät osajärjestelmät ? (4p)

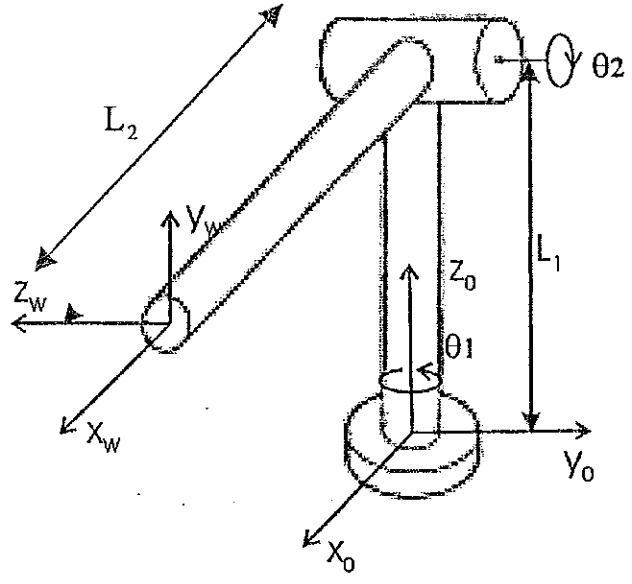
NOTE: -On the fourth page of the exam paper, there are some useful equations presented.

1. The translation and rotation between rectangular coordinate frames A and B is described by the 4x4 homogenous transformation matrix ${}^A_B\mathbf{T}$ (cf. the collection of equations on the last page). What interdependences between the two coordinate frames the different row and column vectors of the transformation matrix represent? In other words, what is the interpretation of the row and column vectors of the transformation matrix? (4 p.)
2. In figure 1 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-axis of the 0-frame when the control angle θ has a zero value).
 - 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 (0). 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 also 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) determined with respect to the fixed reference frame (0) as a function of robot joint variables (θ, d). (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. Robot off-line programming method: Working principle? Benefits compared to traditional robot on-line programming? Calibration tasks/problems related to the method? (4p)
5. The locations of two landmarks with respect to the coordinate frame "L" of the laser scanner are measured (position vectors ${}^L P_1$ and ${}^L P_2$ in figure 3). A reference frame "B" is created by means of the measured landmark locations in the following way: The origin of the frame is attached at the location of the first landmark. The x-axis points from the first towards the second landmark (along the xy-plane, in other words the x-axis of B-frame is parallel to the xy-plane of L-frame), z-axis points upwards and y-axis is given by the right hand rule (compare figure 3). (So, the z-axes of coordinate frames L and B are parallel with each other)

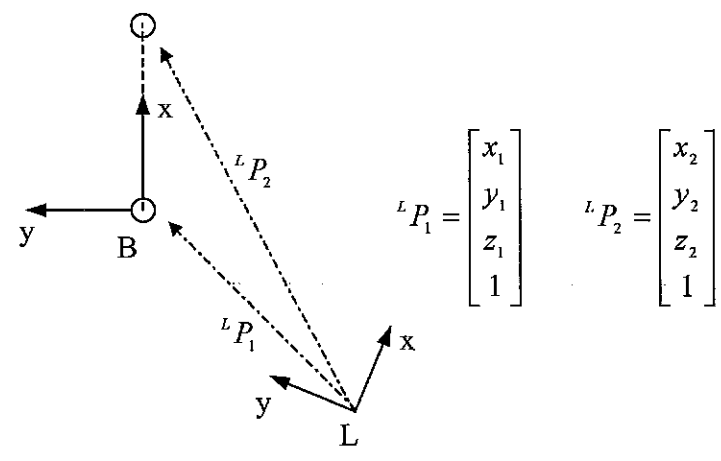
Form the 4x4 homogeneous transform matrix to express the position and orientation of the L-frame with respect to the B-frame as a function of the components of the location vectors ${}^L P_1$ and ${}^L P_2$. (6p)
6. The principal subsystems of mobile service robots. (4 p.)



Kuva/Figure 1



Kuva/Figure 2



Kuva/Figure 3

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:

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

X-Y-Z fixed angles:

$${}^A R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = R_z(\alpha)R_y(\beta)R_x(\gamma) \quad (2.63)$$

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

$${}^A R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.65) \quad \beta = a \tan 2 \left(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2} \right) \quad (2.66)$$

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

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

Link transformation:

$${}^{i-1} T_i = R_x(\alpha_{i-1})D_x(a_{i-1})R_z(\theta_i)D_z(d_i)$$

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

Inverse of a homogenous transform:

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