

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

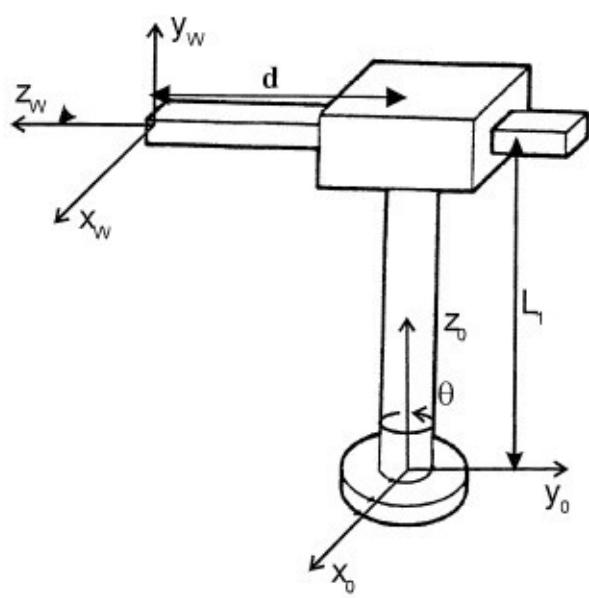
The questions are given in English on the second page.

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

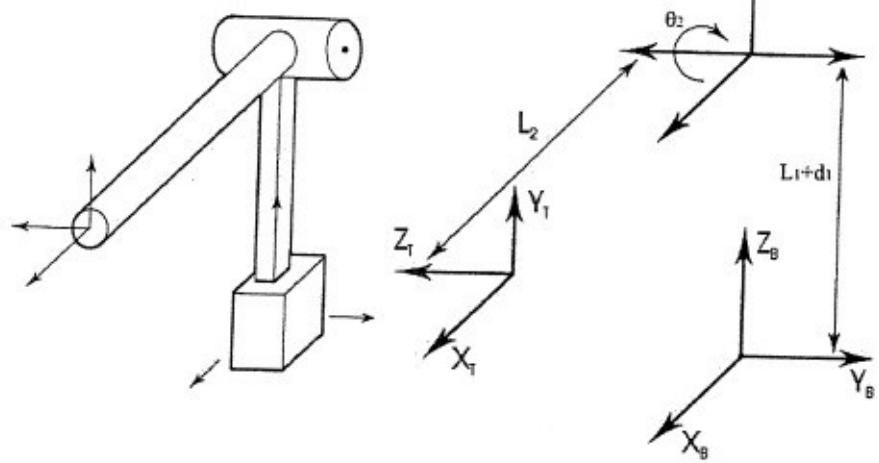
1. Määrittele lyhyesti seuraavat robotiikan käsitteet:
 - a) Robotin singulariteettipiste ? (1 piste)
 - b) Metrinen kartta ? (1 p)
 - c) Teollisuusrobotin määritelmä ? (1 p)
 - d) Aktiivinen joustavuus ? (1 p)
 - e) Sensorifusio ? (1 p)
 - f) SCARA-robotti ? (1 p)
2. Kuvassa 1 on esitetty eräs kahden 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 kierokulman θ arvo on nolla).
 - a) Merkitse kuvaan ja indeksoi manipulaattorin vapausastekoordinaatistot (link-frames) suoran kinemaattisen muunnoksen muodostamiseksi manipulaattorin rannekoordinaatiston (W) paikan ja asennon kuvaamiseksi peruskoordinaatiston (0) suhteeseen. Merkitse myös kuvaan ja anna taulukkomuodossa manipulaattorin nivelparameetrit ja -muuttujat (link parameters, Denavit-Hartenberg parameters). Määritä lisäksi vastaavat nivelmatriisit. (4p)
 - b) Muodosta yhtälöt robotin rannekoordinaatiston (W) asennon ilmaisemiseksi kiinteän referenssikoordinaatiston (0) suhteeseen määritetyjen X-Y-Z kiertokulmien (eli Roll-, Pitch- ja Yaw-kulmat) avulla robotin vapausastemuuttujien (θ, d) funktioita. (4p)
3. Kuvassa 2 on kuvattu eräs kahden vapausasteen manipulaattori, ensimmäinen vapausaste on lineaarinen (yläkäsivarren korkeuden ohjaus vaakatasoon suhteeseen) ja toinen kiertyvä (yläkäsivarren kulman ohjaus vaakatasoon suhteeseen). Määritä manipulaattorin käänneinen kinemaattinen muunnos. Esitä lisäksi, mille (T)-koordinaatiston origon x,y,z-ohjauspisteille käänneinen kinemaattinen ratkaisu on olemassa (vastaus esim. yhtälöiden/epäyhtälöiden muodossaan)? (4p)
4. Anna kuvan 3 kokoonpanotehtävän neljän työvaiheen (a,b,c ja d) osalta paikka- ja voimaohjauksen luonnolliset rajoitukset (eli ohjauksen kannalta rajoittuneet tehtäväkoordinaatiston akselien lineaari- ja kertosuunnat) sekä vastaavat ohjaussuureet. (4p).
5. Kuvassa 4 on esitetty liikkuvan robotin käytettävissä olevat reitit lähtöpisteestä (Start) tavoitepisteesseen (Goal). Ympyrät kuvavat välitavoitteita, joiden kautta robotin tulee kulkea. Toistensa suhteeseen saavutettavissa olevien välitavoiteiden keskinäiset etäisyydet on merkitty yhdysviivaan liitettyllä numerolla. Kuvaavat vaiheet miten lyhimmän reitin haku 'S':stä 'G':n suoritetaan 'A*' -reitinhakualgoritmilla. (4p)
6. Suorakulmaisten koordinaatistojen A ja B välistä siirtoa ja kiertoa kuvaa 4x4 homogeeninen muunnosmatriisi ${}^A_B T$ (vrt. kaavakokoelma). Mitä A ja B koordinaatistojen välisiä riippuvuuksia muunnosmatriisiin pysty- ja vaakavektorit kuvavat? Toisin sanoen, mikä on muunnosmatriisiin pysty- ja vaakavektorien tulkinta? (4p)

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

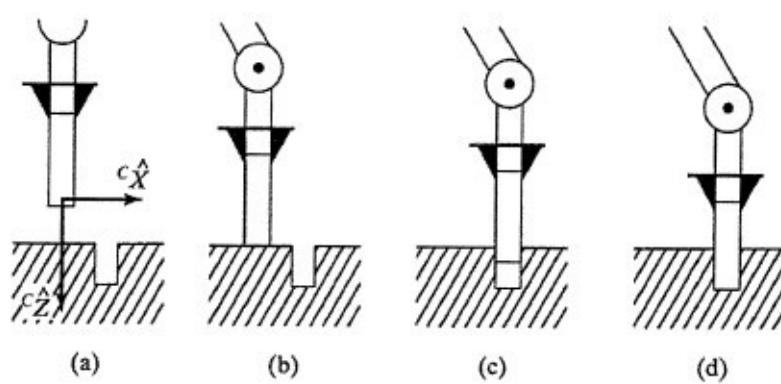
1. Define the following robotics-related terms:
 - a) Robot singularity ? (1point)
 - b) Metric map ? (1p)
 - c) Definition of an industrial robot ? (1p)
 - d) Active compliance ? (1p)
 - e) Sensor fusion ? (1p)
 - f) SCARA robot ? (1p)
2. In figure 1 a two degree-of-freedom manipulator is shown in its 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-axes 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 degree-of-freedom manipulator has been shown, the first dof is prismatic (control of the height of the upper arm with respect to the horizontal plane) and the other dof is rotational (control of the angle of the upper arm with respect to the horizontal plane).Find the inverse kinematic transform for the manipulator. Describe also, for which of the x,y,z-positions of the origin of the (T) frame a reachable inverse kinematic solution exists (answer, for example, in the form of an equation or an inequality) ? (4p)
4. For the four phases of the assembly task, illustrated in figure 3, give the natural constraints of the position and force control (i.e. translational and rotational directions of the task frame constrained in terms of control of the robot tool). Give also the corresponding control variables (i.e. artificial constraints). (4p)
5. In figure 4 the possible routes from start point (Start) to goal point (Goal) are shown. The circles represent intermediate goals through which the robot must move. The distances between two reachable intermediate goals are represented with numbers attached to the connecting lines. Describe in detail how to find the shortest path from 'S' to 'G' with the 'A*' search method? (4p)
6. The translation and rotation between rectangular coordinate frames A and B is described by the 4×4 homogenous transformation matrix ${}^A_B T$ (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.)



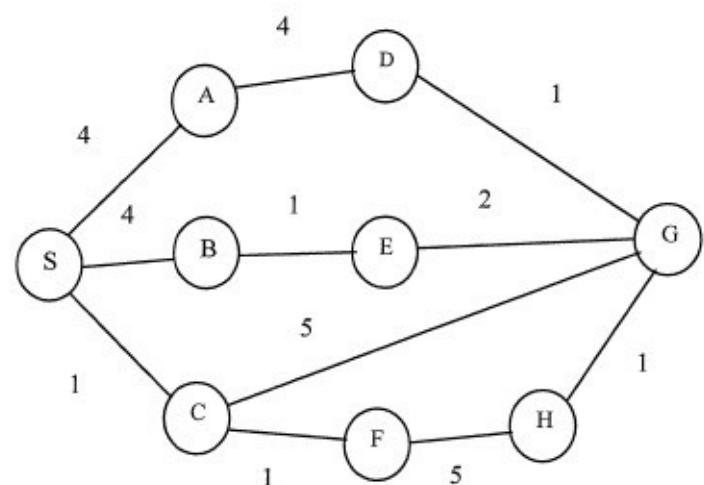
Kuva/Figure 1



Kuva/Figure 2



Kuva/Figure 3



Kuva/Figure 4

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

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

X-Y-Z fixed angles:

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

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

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

Link transformation:

$$\begin{aligned} {}^{i-1}_iT &= R_X(\alpha_{i-1})D_X(a_{i-1})R_Z(\theta_i)D_Z(d_i) \\ &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.4)+(3.6)$$

Inverse of a homogenous transform:

$${}^A_B T^{-1} = {}^A_A T = \begin{bmatrix} {}^A_B R^T & -{}^A_B R^T {}^A_B P_{BORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$