

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:
 - Sensorifuusio ? (1 piste)
 - Jakobiaanimatriisi ? (1 p)
 - Hybridi paikka/voima ohjaus? (1 p)
 - Rinnakkaisrakenteinen robotti ? (1 p)
 - Kaksoismerkitys ? (1 p)
 - Passiivinen joustavuus (komplianssi)? (1 p)
- Määritä kuvassa 1. hahmotellun kolmen vapausasteen manipulaattorin käänteinen kinemaattinen muunnos. Toisin sanoen

$$\Theta_1 = f(x, y, z)$$

$$\Theta_2 = f(x, y, z)$$

$$d_3 = f(x, y, z)$$
 Koordinaatit x , y ja z ovat tarttujakoordinaatiston, H , origon koordinaatit suhteessa peruskoordinaatistoon R . Vapausastemuuttuja Θ_1 on kiertokulma robottikäsivarren peruskoordinaatiston z -akselin ympäri, Θ_2 olkavarren kiertokulma vaakatason suhteen ja d_3 olkavarren pituus. Nollatilanteessa (kulmamuuttujien nollakohdat) olkavarsi on R -koordinaatiston x -akselin suuntainen. (6p)
- Kuvassa 2. 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*'-reitinhakualgoritmien avulla ? (4p).
- Kuvassa 3. 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.
 - Kiinnitä vapausastekoordinaatit ja anna niitä vastaavat Denavit-Hartenberg parametrit. (3p)
 - Määritä ko. Kolmen vapausasteen robotin suora kinemaattinen muunnos (toisinsanoen laske robottikäsivarren muunnosmatriisi (eli käsivarsimatriisi)). (3p)
- Kuvassa 4. on esitetty laseretäisyysmittalaite kahdessa eri mittausasemassa, joita kuvaavat koordinaatit $L1$ ja $L2$. Mittausasetelmassa ovat tunnettuja kuvaan nuolilla merkityt koordinaatistojen väliset siirrokset (eli koordinaatistomuunnokset). Määritä kohteeseen C kiinnitetyn koordinaatiston paikka ja asento suhteessa maailmankoordinaatistoon B . (4p).
- Robotiikan sovellusalueet ? (4p)

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

1. Define the following robotics-related terms:

- a) Sensor fusion ? (1point)
- b) Jacobian matrix ? (1p)
- c) Hybrid position/force control ? (1p)
- d) Parallel link manipulator ? (1p)
- e) Double (multiple) solutions ? (1p)
- f) Passive compliance ? (1p)

2. Determine the inverse kinematic transform for the three degree-of-freedom manipulator, described in figure 1. So, you should find:

$$\Theta_1 = f(x,y,z)$$

$$\Theta_2 = f(x,y,z)$$

$$d_3 = f(x,y,z)$$

The coordinates x , y and z describe the position of the origin of frame H with respect to the manipulator base frame R . The joint variable Θ_1 is the rotation angle of the robot arm around the z -axis of the base frame, Θ_2 is the rotation angle of the upper arm with respect to the horizontal plane and d_3 is the length of the upper arm. In the zero configuration/position (i.e. all rotation angles equal zero) the upper arm is parallel to the x -axis of the R -frame. (6p)

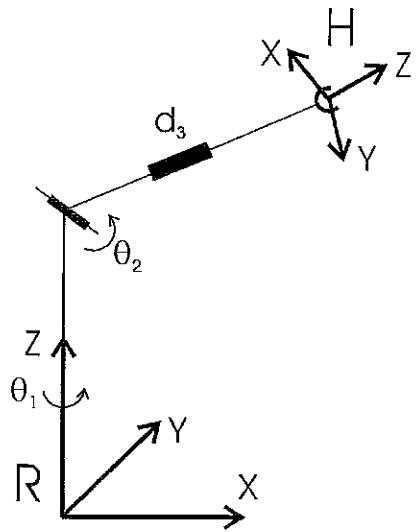
3. In figure 2. the possible routes from start point (Start) to goal point (Goal) are shown. The circles represent intermediate goals through which the robot must move. The distances between two reachable intermediate goals are represented with numbers attached to the connecting lines. Describe in detail how to find the shortest path from 'S' to 'G' with the 'A*' search method ? (4p)

4. In figure 3., 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 3). 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.

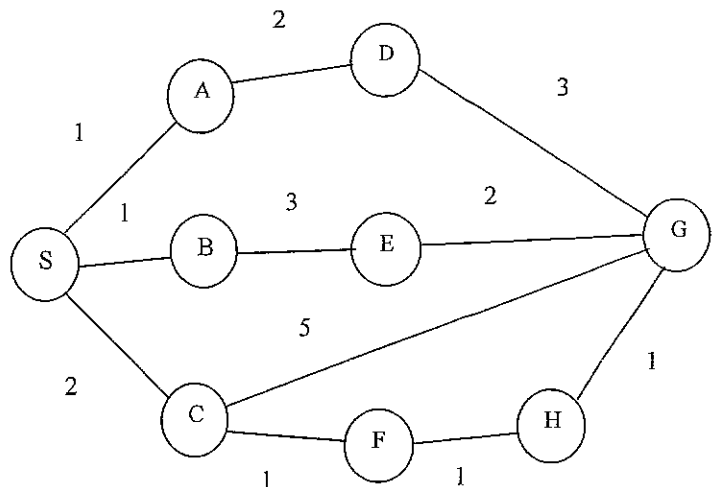
- a) Assign the link frames and give corresponding Denavit-Hartenberg parameters. (3p)
- b) Determine the direct kinematic transformation of the robot (i.e. compute the transformation matrix of the robot arm). (3p)

5. In figure 3. a laser measuring device has been shown in two different measurement positions, which are indicated by the frames $L1$ ja $L2$. In the measurement system transformations between the coordinate systems, which are known, are indicated with the corresponding arrows. The task is to determine the position and orientation of the target frame C with respect to the world reference frame B . (4p)

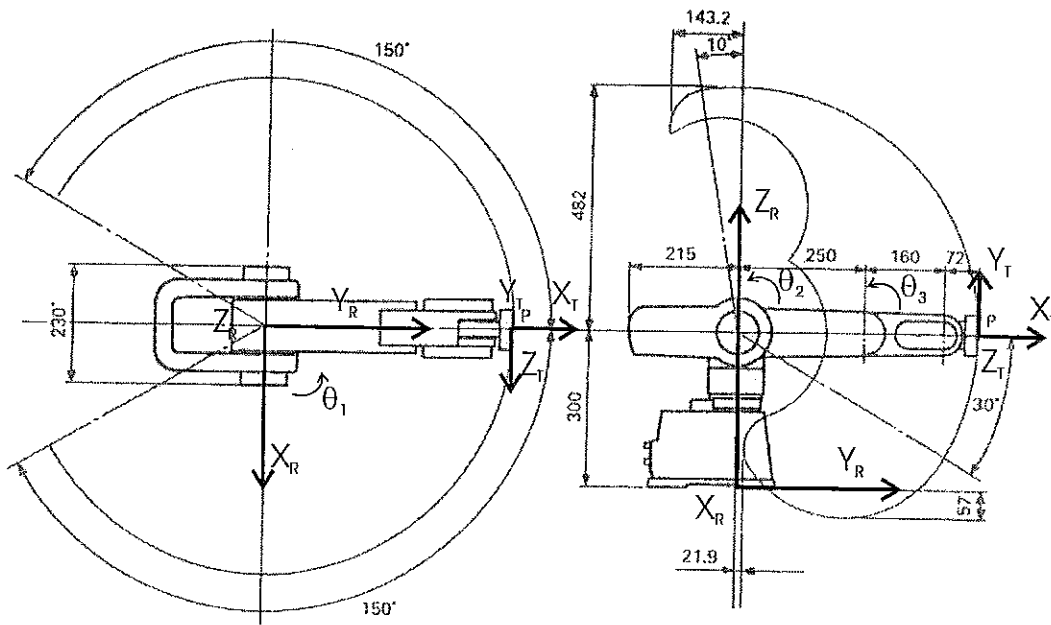
6. Different application areas of robotics ? (4p)



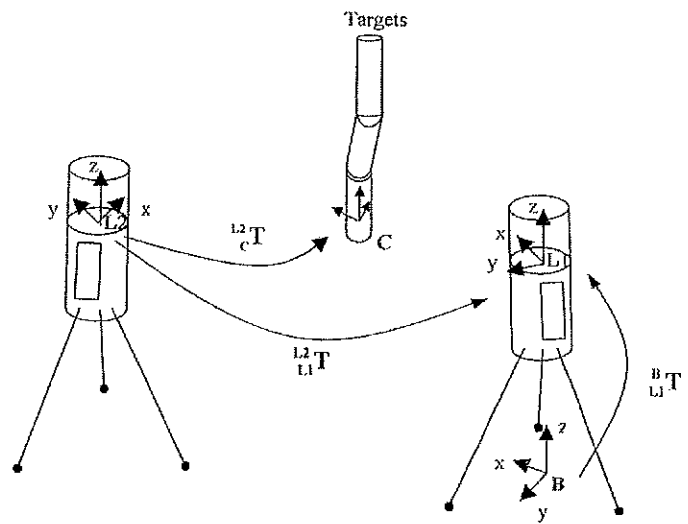
Kuva/Figure 1



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:

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

X-Y-Z fixed angles:

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

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

Link transformation:

$${}^{i-1} T_i = R_x(\alpha_{i-1})D_x(a_{i-1})R_z(\theta_i)D_z(d_i) \\ = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{3.4})+(\text{3.6})$$

Inverse of a homogenous transform:

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