

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) Vihivaunu ? (1 piste)
 - b) Metrinen kartta ? (1 p)
 - c) Passiivinen joustavuus (komplianssi)? (1 p)
 - d) Servosäätö ? (1 p)
 - e) Vapausaste ? (1 p)
 - e) Tahtiaika ? (1 p)
2. Kuvassa 1. on kuvattu eräs kahden vapausasteen manipulaattori, ensimmäinen vapausaste on lineaarinen (yläkäsivarren korkeuden ohjaus vaakatason suhteen) ja toinen kiertyvä (yläkäsivarren kulman ohjaus vaakatason suhteen).
 - a) Merkitse kuvaan tarvittavat nivelkoordinaatistot (0, 1 ja 2) ja anna taulukkomuodossa manipulaattorin nivelparametrit ja- muuttujat (link parameters, Denavit-Hartenberg parameters)? Määritä lisäksi vastaavat nivelmatriisit (0_1T ja 1_2T) sekä laske kokonaismuunnosmatriisi B_T . (3p)
 - b) Määritä myös muunnokset robotin tarttujan asennon ilmaisemiseksi kiinteään maailmankoordinaatiston Roll, Pitch ja Yaw ,RPY(Φ, Θ, Ψ), kulmien avulla robotin nivelkulmien funktiona? (3p)
3. Kuvassa 2. On esitetty laiva, johon kiinnitetyn koordinaatiston, S, paikka suhteessa maailmankoordinaatistoon, W, tunnetaan. Paikkaa kuvaavat maailmankoordinaatiston koordinaatit x ja y sekä kiertokulma z-akselin ympäri, ϕ . Laivan keulaan on asennettu lasertutka, johon kiinnitetyn koordinaatiston, L, paikka suhteessa laiva-koordinaatistoon, S, tunnetaan. Lasersädetä ohjataan poikkeutuskulmien **pan** ja **tilt** avulla (pan- ja tilt-kulmien nolla-arvoilla säde osoittaa L-koordinaatiston y-akselin suuntaan). Laskuharjoituksissa esitetystä tehtävästä poiketen lasersäteen suuntaus L-koordinaatiston suhteen tapahtuu siten, että ensin kierretään sädetä koordinaatiston L z-akselin ympäri kulman **pan** verran ja sen jälkeen sitä poikkeutetaan pan kulman vaikutuksesta kiertyneen koordinaatiston x-akselin ympäri **tilt** kulman verran.

Muodosta lausekkeet osuapisteiden koordinaattien (x, y, z) laskemiseksi suhteessa maailmankoordinaatistoon. (6p)
4. Kuvassa 3. 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. Kuva vaihe vaiheelta miten lyhimmän reitin haku 'S':stä 'G':n suoritetaan, 'A*'-reitinhakualgoritmin avulla ? (4p).
5. Kuvassa 4. 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. Kuva menetelmän eri vaiheet. (4p).
6. Robottimanipulaattorin yhdistetty paikka- ja voimaohjaus? (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) Servo control ? (1p)
 - e) Degree of freedom ? (1p)
 - f) Cycle time ? (1p)

2. In figure 1. 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).
 - a) Mark in the figure the link frames (0, 1 and 2) and give in a table the link parameters/Denavit-Hartenberg parameters of the manipulator arm. Determine also corresponding link matrices (i.e. 0T_1 and 1T_2) and compute the manipulator transformation matrix B_T ? (3p)
 - b) Determine also the transformations for describing the orientation of the gripper of the manipulator by means of the XYZ-fixed angles (Roll, Pitch, Yaw angles) as a function of the manipulator joint variables. (3p)

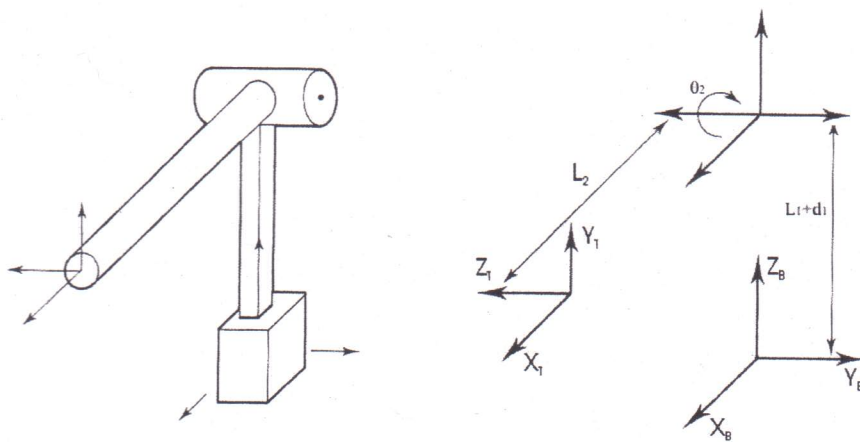
3. In figure 2 a ship is shown. The location of the ship frame, **S**, with respect to the world frame, **W**, is known. The location is determined by the **x** and **y** coordinates as well as by the orientation angle ϕ (angle around the **z**-axis). A laser radar has been placed at the bow of the ship. The location of the laser frame **L** with respect to the ship frame **S** is known. The laser beam is directed with the horizontal and vertical deviation angles **pan** and **tilt** (when the pan and tilt angles are given zero values the beam is pointing along the **y**-axis of the **L**-frame). The control of the beam can be thought to function such that first the beam is rotated around **z**-axis of the **L**-frame an amount given by the **pan**-angle and then further rotating the beam around the **x**-axis of the rotated frame an amount given by the **tilt**-angle.

Form equations to compute the coordinates of the beam hit point (**x**, **y**, **z**) with respect to the world frame. (6p)

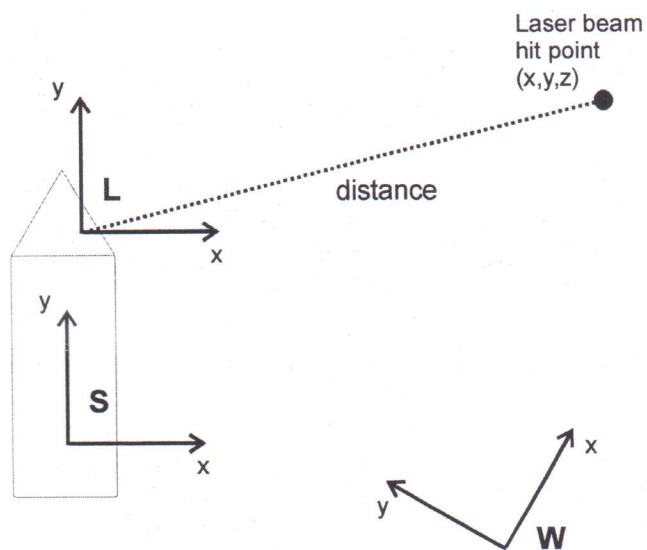
4. In figure 3. the possible routes from start point (Start) to goal point (Goal) are shown. The circles represent intermediate goals through which the robot must move. The distances between two reachable intermediate goals are represented with numbers attached to the connecting lines. Describe in detail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

5. In figure 4. 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)

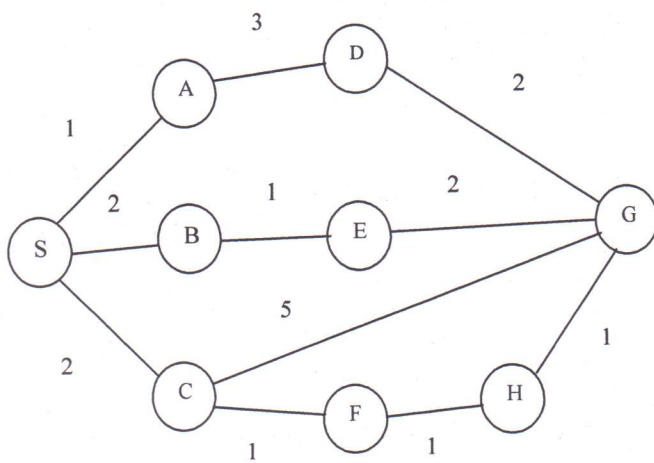
6. Hybrid position/force control of a robot manipulator ? (4 p.)



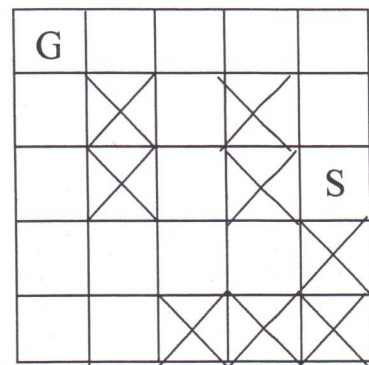
Kuva/Figure 1



Kuva/Figure 2



Kuva/Figure 3



Kuva/Figure 4

Rotation about the principal axes:

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

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

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

Homogenous transform:

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

X-Y-Z fixed angles:

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

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

$${}^A_B R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

$$\beta = a \tan 2 \left(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2} \right)$$

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

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

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:

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