AS-84.1137 Robotiikka Tentti 10.1.2007
Laatija: Pekka Forsman, puh. 4513309
Kirjoita paperiin myös minä vuonna olet suorittanut harjoitustyön.

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) Sensorifuusio ? (1 piste)
   b) Jakobiaanimatriisi ? (1 p)
   c) Hybridi paikka/voima ohjaus? (1 p)
   d) Rinnakkaisrakenteinen robotti ? (1 p)
   e) Kaksoismerkitys ? (1 p)
   f) Passiivinen joustavuus (komplianssi)? (1 p)

2. Kuvassa 1. on kuvattu eräs kahden vapausasteen manipulaattori, ensimmäinen vapausaste on lineaarinen (yläkäsivarren korkeuden ohjaus vaakatason suhteen, d_1) ja toinen kiertyvä (yläkäsivarren kulman ohjaus vaakatason suhteen, θ_2).
   a) Merkitse kuvaan ja indeksoi manipulaattorin vapausastekoordinaatistot (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 tarttujan asennon ilmaisemiseksi kiinteän referenssikoordinaatiston suhteen määritettyjen X-Y-Z kiertokulmien (eli Roll-, Pitch- ja Yaw-kulmat) avulla robotin nivelkulmien funktiona. (4p)

3. 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 muodosssa)? (4p)

4. 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 muuunnosmatriisille, joka kuvaa laivan paikan ja asennon suhteessa majakkaan (4p).

5. 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 liitetyllä numerolla. Kuvaa vaihe vaiheelta miten lyhimmän reitin haku 'S':stä 'G':n suoritetaan, 'A*'-reitinhakualgoritmin avulla ? (4p).

6. 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. In figure 1. a two decrees-of-freedom manipulator is shown. The first dof is linear (controlling the height of the upper arm from the horizontal plane, d_1) and the other dof is rotational (controlling the tilt angle with respect to the horizontal plane, θ_2).

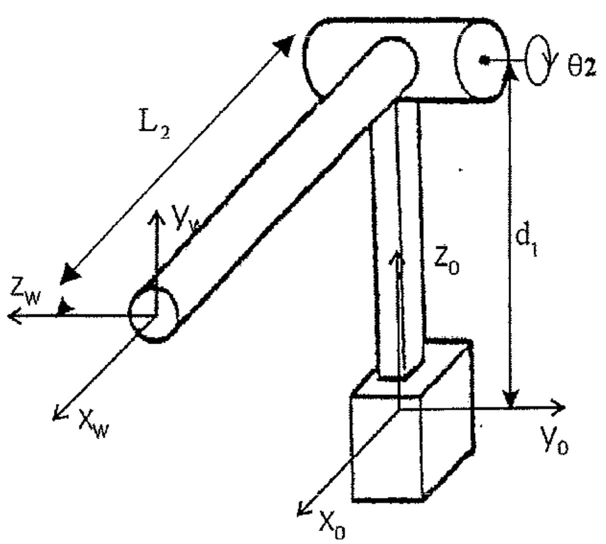
   a) Number and mark in the figure the link-frames required for constructing the direct kinematic transformation of the manipulator for describing the wrist frame (W) with respect to the base frame (0). Also draw into the figure and give in a table the link parameters and variables (i.e. Denavit-Hartenberg 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) as a function of robot joint angles. (4p)

3. In figure 2. a two decrees-of-freedom manipulator is shown. Both decrees-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)

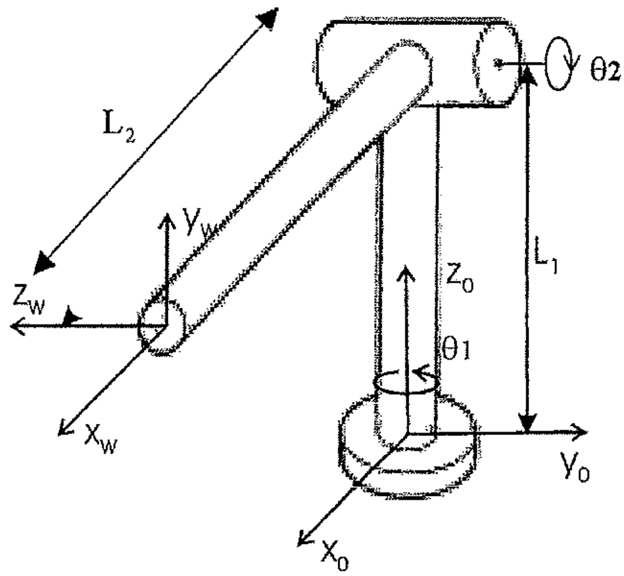
4. In figure 3. a ship, the base frame of which is marked with $\mathbf{S}$, has been depicted. At the bow of the ship there is a radar, with a coordinate frame $\mathbf{R}$. On the shore there is a beacon, with a coordinate frame $\mathbf{B}$. The location of the beacon with respect to the radar, ${}^{R}_{B}T$,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

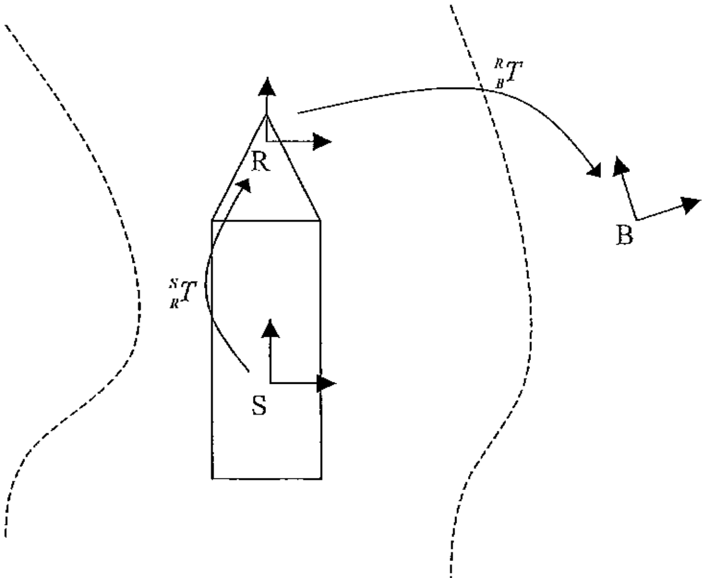
6. Different application areas of robotics? (4 p.)



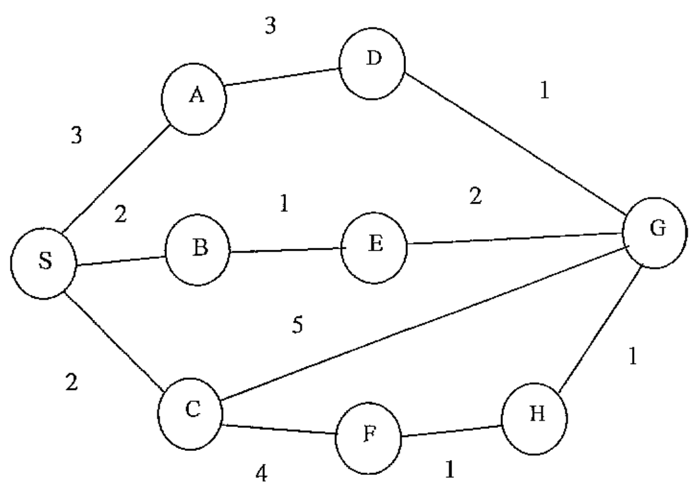
Kuva/Figure 1



Kuva/Figure 2



Kuva/Figure 3



Kuva/Figure 4

Rotation about the principal axes:

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

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

Homogenous transform:

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

X-Y-Z fixed angles:

$$^{A}_{B}R_{XYZ}(\gamma,\beta,\alpha)=R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) \qquad \text{(2.63)}$$

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

Link transformation:

$$^{i-1}_{i}T=R_X(\alpha_{i-1})D_X(a_{i-1})R_Z(\theta_i)D_Z(d_i)$$

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

Link transformation for those taking the exam for the <u>old version</u> of the course (**AS-84.137**):

$$\mathbf{A}_n=\mathbf{Rot}(z,\theta)\mathbf{Trans}(0,0,d)\mathbf{Trans}(l,0,0)\mathbf{Rot}(x,\alpha)$$

$$=\begin{bmatrix}\cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0\\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & l\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & d\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0\\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\cos(\theta) & -\sin(\theta)\cos(\alpha) & \sin(\theta)\sin(\alpha) & l\cos(\theta)\\ \sin(\theta) & \cos(\theta)\cos(\alpha) & -\cos(\theta)\sin(\alpha) & l\sin(\theta)\\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & d\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \qquad \textbf{(4.6)}$$