

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

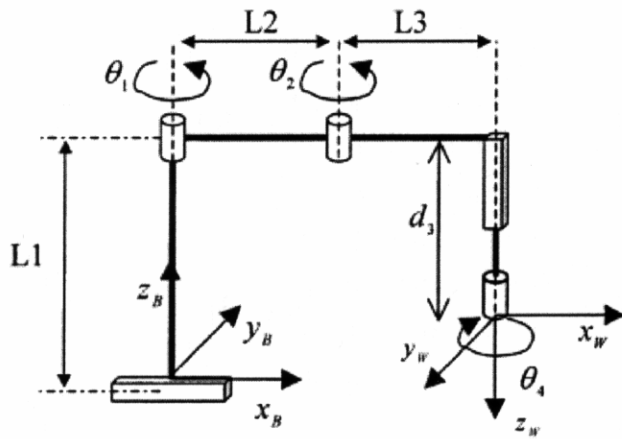
1. Robotin off-line ohjelmointi (etäohjelmointi): Toimintaperiaate? Käytön edut perinteiseen robotin on-line ohjelmointiin verrattuna? Menetelmään liittyvät kalibrointiongelmat/-tehtävät? (4 pistettä)
2. Kuvassa 1. on esitetty neljän vapausasteen SCARA-robotin kinemaattinen rakenne. Kaksi ensimmäistä vapausastetta ovat kiertyviä (olkavarren ja kyynärvarren kierrot liikuttavat käsivartta tasossa), sen jälkeen seuraa lineaaritoimilaite ylös/alas-liikkeen aikaansaamiseksi ja viimeisenä kinemaattisessa ketjussa on kiertonivel työkalun asennon ohjaamiseksi esimerkiksi B-koodinaatiston xy-tason suuntaisella alustalla olevien kappaleiden poimimiseksi.
 - a) Merkitse kuvaan ja indeksoi manipulaattorin vapausastekoordinaatitot (link-frames) suoran kinemaattisen muunnoksen muodostamiseksi manipulaattorin rannekoordinaatiston (W) paikan ja asennon kuvaamiseksi peruskoordinaatiston (B) 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 (ts. W-koordinaatiston asennon) ilmaisemiseksi kiinteän referenssikoordinaatiston (B) suhteen määritettyjen X-Y-Z kiertokulmien (eli Roll-, Pitch- ja Yaw-kulmat) avulla robotin nivelkulmien funktiona. (4p)
3. Kuvassa 2. 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). Määritä manipulaattorin käänteinen kinemaattinen muunnos. Esitä lisäksi, mille (W)-koordinaatiston origon x,y,z-ohjauspisteille käänteinen kinemaattinen ratkaisu on olemassa (vastaus esim. yhtälöiden/epäyhtälöiden muodossa)? (4p)
4. Luonnolliset rajoitukset (natural constraints) ja vastaavat ohjattavat suureet (artificial constraints) kuvien 3a) ja 3b) esimerkkityötehtävissä? Eli selvitä/luettele luonnolliset rajoitukset ja niitä vastaavat työkalun ohjaussuureet (lineaari-/kulmanopeus tai voima/momentti) kunkin tehtäväkoordinaatiston kuuden vapausasteen suhteen. (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 liitettyllä numerolla. Kuvaa vaihe vaiheelta miten lyhimmän reitin haku 'S':stä 'G':n suoritetaan, 'A*'-reitinhakualgoritmin avulla? (4p).
6. Yksiakselinen kiertyvänivelinen manipulaattori on ajanhetkellä nolla, $t = 0$, liikkumattomana asennossa $\theta = -5$ astetta. Tavoitteena on ohjata se "tasaisella liikkeellä" pysähdyksiin asentoon 80 astetta neljässä sekunnissa eli $\theta_0 = -5$, $\theta_f = 80$, $t_f = 4$. Tehtävänä on muodostaa manipulaattorin nivelen **paikan**, **nopeuden** ja **kiihtyvyyden** lausekkeet kun paikkaa kuvataan kolmannen asteen polynomiyhtälöllä: $\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$, missä

$$a_0 = \theta_0, a_1 = 0,$$

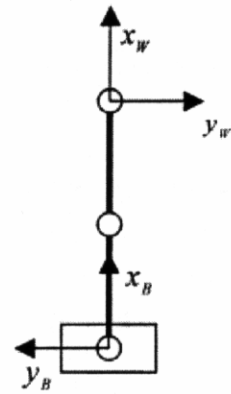
$$a_2 = \frac{3}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0)$$

$$a_3 = -\frac{2}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0)$$

Piirrä/luonnostelee lisäksi lausekkeiden mukaiset kuvaajat paikalle, nopeudelle ja kiihtyvyydelle välillä $t \in [0,4]$. (6p)



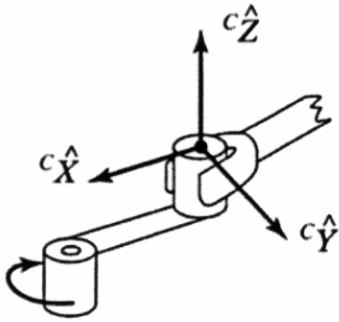
sivusta/ side view



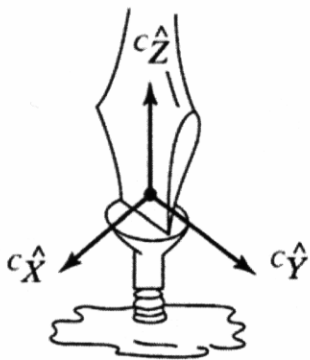
ylhäältä/ top view

Kuva/ Figure 1

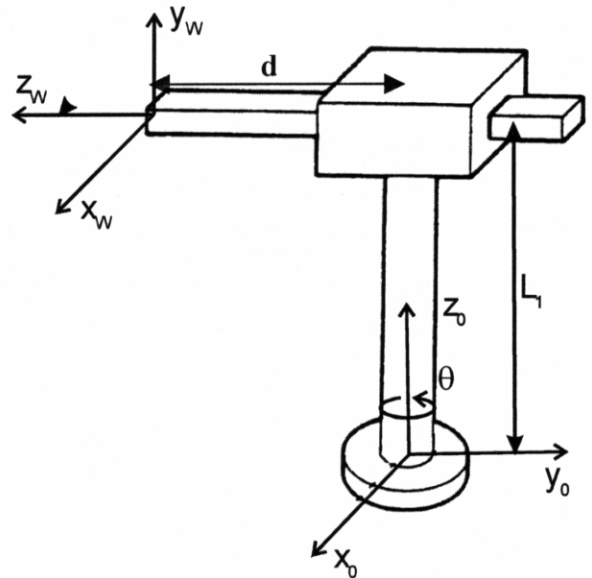
(a) Turning crank



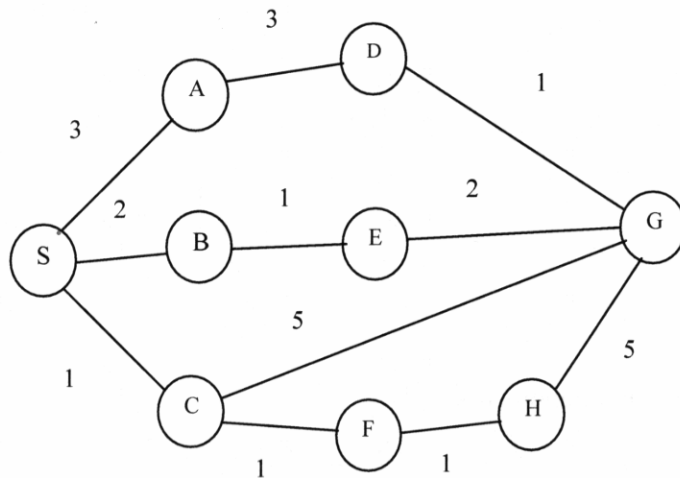
(b) Turning screwdriver



Kuva/ Figure 3



Kuva/ Figure 2



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);

$R_Y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ (A.2) $R_Z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ (A.3)

Homogenous transform:

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

X-Y-Z fixed angles:

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

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

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

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

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

Link transformation:

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

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

Inverse of a homogenous transform:

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