UNIVERSITETET I OSLO

Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet

Eksamen i:	**INF3480 - Introduksjon til Robotteknologi**
Eksamensdag:	**31 mai, 2017**
Tid for eksamen:	**14:30, 4 timer**

Oppgavesettet er på 6 sider + 3 sider appendiks

Vedlegg:	**Ingen**

Tillatte hjelpemidler:

- **Spong, Hutchinson and Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, 2005**
- **Karl Rottman, Matematisk formelsamling (alle utgaver)**
- **Godkjent kalkulator**

Kontroller at oppgavesettet er komplett
før du begynner å besvare spørsmålene.

Oppgave 1 (20 %)

a) (5 %) Hva er forskjellen mellom et lukket og et åpen sløyfe system? Tegn opp et blokkdiagram av begge. Hva er fordelen med et lukket sløyfe system? (Det holder å nevne en grunn).

b) (5 %) Når vi jobber med åpen/lukket sløyfesystemer benytter vi ofte Laplace transform. Hvorfor er Laplace transform nyttig når man skal analysere robotens styresystem (kontrolsystem)? (Det holder å nevne en grunn).

c) (5 %) Hva er den grunnleggende fordelen ved å bruke ROS (Robot Operating System)? Nevn minst tre tekniske muligheter/kapasiteter (separate ROS moduler/pakker) som kan anvendes i en industrirobotapplikasjon.

d) (5 %) Beskriv hva konseptet ”reality gap” betyr innenfor Evolutionær robotikk. Forklar minst en metode som kan anvendes for å håndtere denne utfordringen.

Oppgave 2 (45 %)

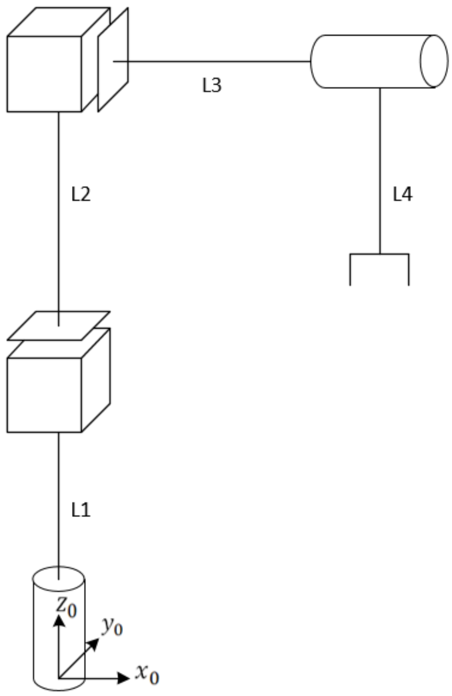


Figure 1: Robot

Figur 1 viser robotkonfigurasjonen som skal benyttes i oppgaven. I utgangsposisjon, vist i Figur 1, roterer det første rotasjonsleddet omkring Z_0 aksen, det første prismatiske leddet beveger seg langs Z_0 aksen og det andre prismatiske leddet beveger seg vinkelrett på Z_0 aksen (langs X_0), det andre rotasjonsleddet (ledd 4) roterer omkring en akse some er parallel med X_0 i denne utgangsposisjonen. L_1, L_2, L_3 and L_4 er gitte lengder. Det første rotasjonsleddet er plassert i basen til til roboten med nullposisjon som vist i figuren.

a) (10 %) Angi koordinatsystemene på roboten i figur 1 ved å bruke Denavit-Hertenberg konvensjonen. Sett opp Denavit-Hertenberg parametrene til dette systemet i en tabell.

b) (5 %) Utled foroverkinematikken til roboten fra basekoordinatsystemet til verktøykoordinatsystemet i enden av roboten.

c) (10 %) Utled Jacobian (hastighetskinematikken) for roboten.

d) (10 %) Forutsett at du kjenner leddvinkelen til første rotasjonsledd. Utled inverskinematikken for roboten, ved å bruke det faktum at du allerede kjenner vinkelen til det første rotasjonsleddet.

e) (5 %) Hvordan vil du gå frem for å finne de singulære punktene til roboten? Hva er forskjellen mellom "work space" og "joint space" sigulariteter? Nevn ulike konsekvenser ved hver av dem.

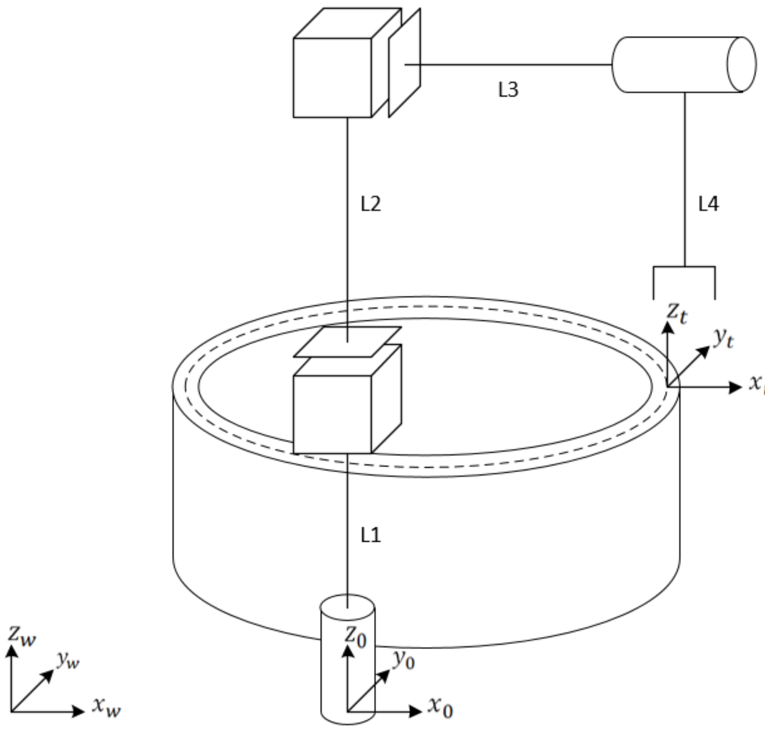


Figure 2: Robot in a welding station

f) (5 %) Vi skal nå anvende roboten vår i en virkelig anvendelse. Omgivelsene som roboten skal operere i er vist i figur 2. Et sveiseverktøy er festet til endestykket til roboten, og roboten skal sveise sammen to rør ved å starte i (0,0,0) i "target" (t) koordinatsystemet. Target koordinatsystemet er lokalisert i P_t^W = (x,y,z). Robotens basekoordinatsystem er lokalisert i P_b^W = (x,y,z). Finn leddkonfigurasjonen som plasserer arbeidspunktet på sveiseverktøyet TCP (Tool Center Point, i enden av verktyet/"end effector") i (0,0,0) i "target" koordinatsystemet. Beskriv fremgangsmåten din grundig.

Oppgave 3 (15 %)

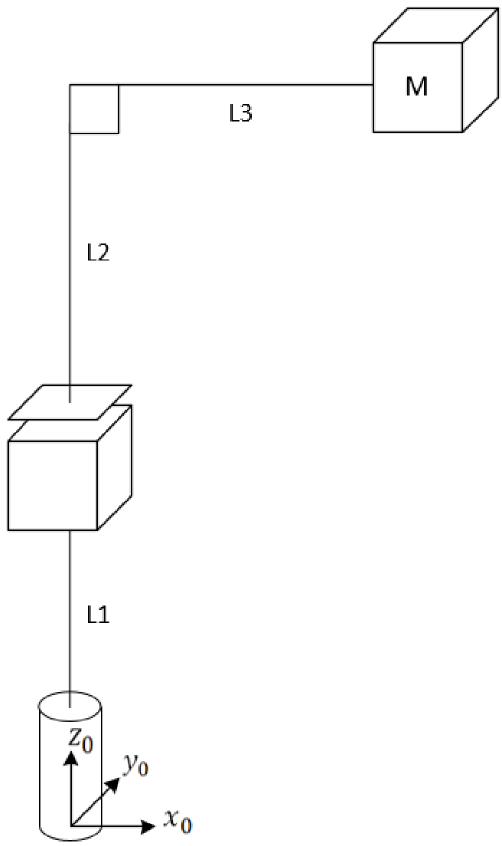


Figure 3: Simplified robot

Figur 3 viser en robot med to frihetsgrader. Dette er en forenkling av roboten i oppgave 2. Anta at den eneste massen er en punktmasse M ved verktøyet til roboten. Vi vil ikke ta høyde for de dynamiske kreftene generert av systemets treghetsmoment.

a) (10 %) Finn Lagrangian $\mathcal{L}$ for robotsystemet i figur 3.

b) (5 %) Utled de dynamiske ligningene for roboten ved bruk av Euler-Lagrange metoden. Uttrykk Euler-Lagrange likningene på formen $M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau$

Oppgave 4 (20 %)

Vi har systemet $J\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta}(t) + K\theta(t) = \tau$. Ved å anvende Laplacetransformasjon på dette systemet får vi $Js^2\theta(s) + Bs\theta(s) + K\theta(s) = \tau$.

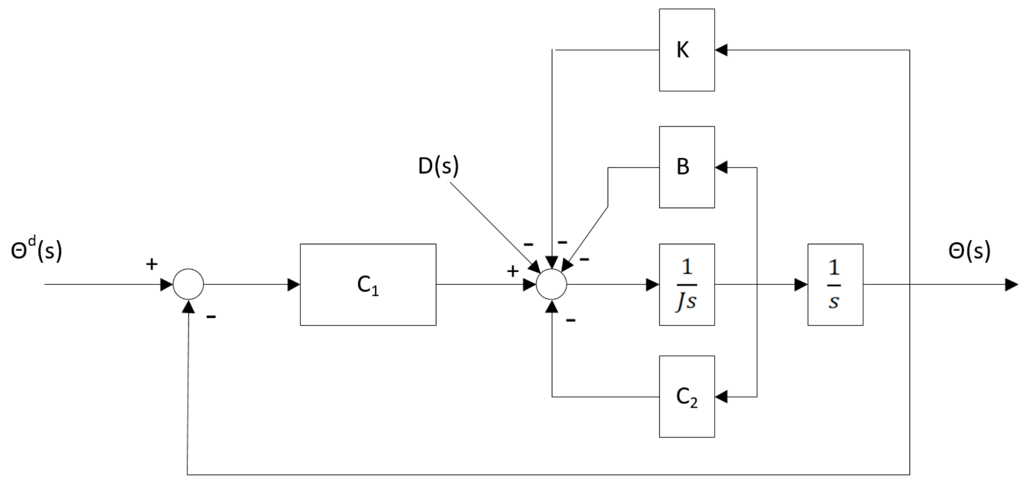


Figure 4: Control system

a) (2.5 %) Figur 4 viser systemet med regulator i Laplacedomenet. Hva kalles regulatoren som er anvendt her?

b) (10 %) Hvis vi videreutvikler regulatoren i figur 4, hvordan kan vi fjerne "steady state error" og fortsatt ha et raskt responsivt system som reagerer i henhold til endringshastigheten på prosessverdiene? Hva kaller vi den nye regulatoren? Finn lukket sløyfe transfer funksjon mellom inputverdi ($\Theta^d(s)$ - ønsket vinkel) og outputverdi ($\Theta(s)$ - faktisk/målt vinkel) for systemet med denne nye forbedrede regulatoren. Bruk sluttverditeoremet og finn "steady state error" for lukket sløyfe systemet med den nye forbedrede regulatoren, når både ønsket vinkel $\Theta^d(s)$ og forstyrrelse $D(s)$ er "step inputs". Kommenter resultatet.

c) (2.5 %) Generelt, hvordan ville du gå frem for å analysere stabiliteten til et styresystem som systemet i deloppgave a)? Hva skal til for å ha et stabilt system?

d) (5 %) Vi analyserer stegresponsen ("step response") til et lukket sløyfe system;

$$s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2 \tag{1}$$

Dette er et underdempet andreordens system ($\zeta < 1$) som gir oss rask respons, men dessverre oscillasjoner, se figur 5.

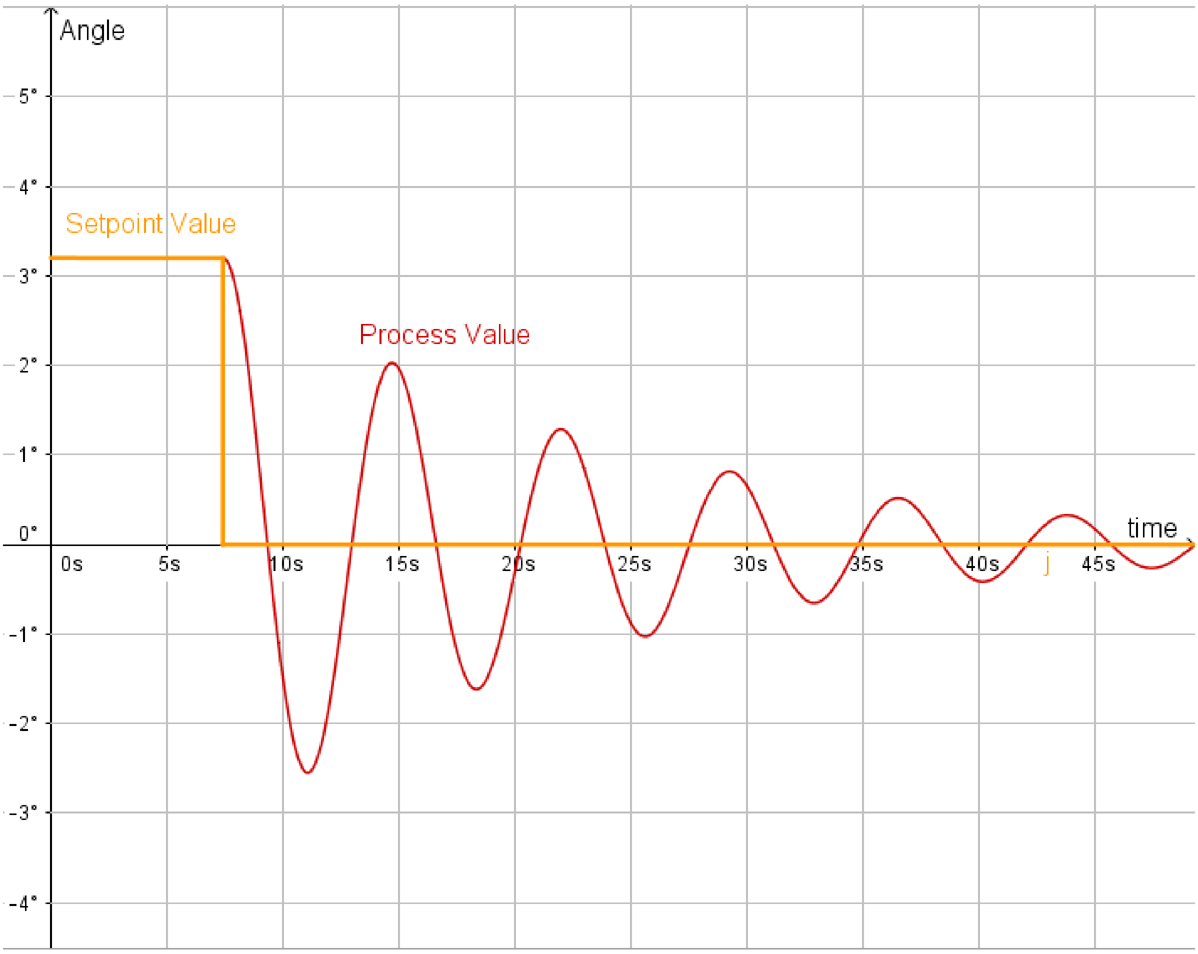
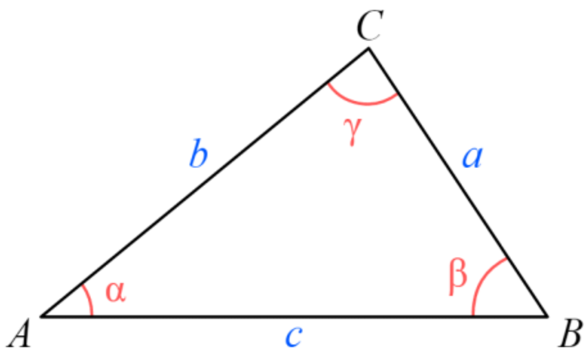


Figure 5: Under damped system

Her er dempningen ("damping ratio") $\zeta < 1$. Prosessen vår kan ikke tolerere oscillasjoner, men vi ønsker et raskest mulig system. Hva kaller vi et slikt ønsket system, og hva vil verdien til ζ være da?

Rules & Formulas INF3480/INF4380

23. januar 2017 16:46



$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\ \cos\gamma$$

$$\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$$

$$\sin(-u) = -\sin u \qquad \cos(-u) = \cos u$$

$$\begin{aligned}\cos 2\theta &= \cos^2\theta - \sin^2\theta \\ &= 2\cos^2\theta - 1 \\ &= 1 - 2\sin^2\theta \\ &= \frac{1-\tan^2\theta}{1+\tan^2\theta}\end{aligned}$$

$$\sin(u+v) = \sin u\cos v + \cos u\sin v$$

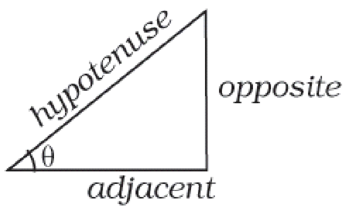
$$\cos(u+v) = \cos u\cos v - \sin u\sin v$$

$$\tan(u+v) = \frac{\tan u + \tan v}{1 - \tan u\tan v}$$

$$\sin(u-v) = \sin u\cos v - \cos u\sin v$$

$$\cos(u-v) = \cos u\cos v + \sin u\sin v$$

$$\tan(u-v) = \frac{\tan u - \tan v}{1 + \tan u\tan v}$$



$$\sin\theta = \frac{o}{h}$$

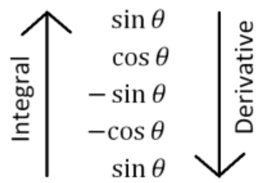
$$\cos\theta = \frac{a}{h}$$

$$\tan\theta = \frac{o}{a}$$

$$\tan\theta = \frac{\sin\theta}{\cos\theta}$$

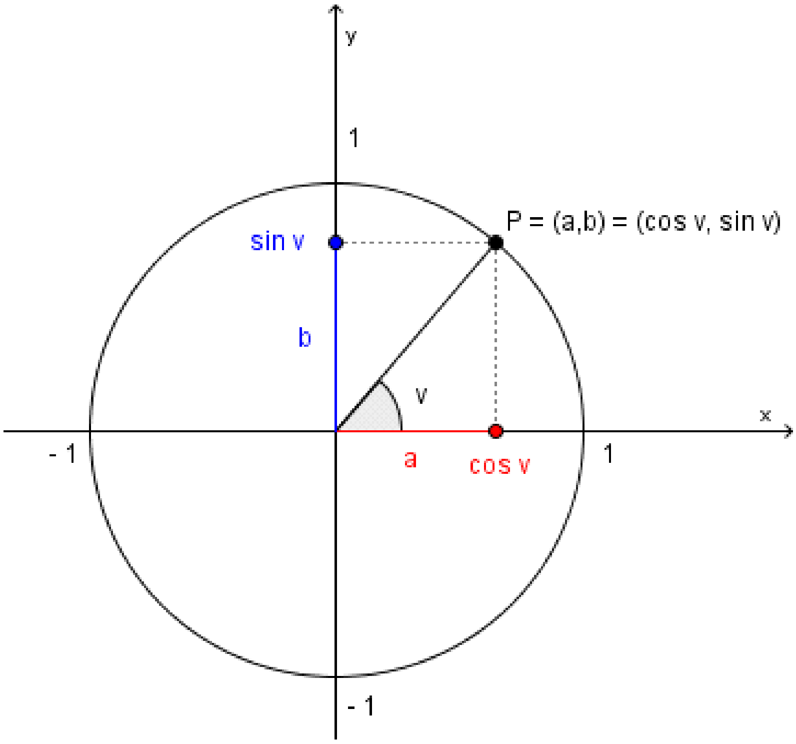
$$\text{radians} = \text{degrees} \times \frac{\pi}{180}$$

$$\begin{aligned}\sin^2 u &= \frac{1-\cos(2u)}{2} \\ \cos^2 u &= \frac{1+\cos(2u)}{2} \\ \tan^2 u &= \frac{1-\cos(2u)}{1+\cos(2u)}\end{aligned}$$



$$\sin\frac{\theta}{2} = \pm\sqrt{\frac{1-\cos\theta}{2}} \qquad \cos\frac{\theta}{2} = \pm\sqrt{\frac{1+\cos\theta}{2}}$$

$$\begin{aligned}\sin 2\theta &= 2\sin\theta\cos\theta \\ &= \frac{2\tan\theta}{1+\tan^2\theta}\end{aligned}$$



$$\tan 2\theta = \frac{2\tan\theta}{1-\tan^2\theta}$$

$$\operatorname{atan2}(y,x) = \begin{cases} \arctan(\frac{y}{x}) & \text{if } x > 0, \\ \arctan(\frac{y}{x}) + \pi & \text{if } x < 0 \text{ and } y \geq 0, \\ \arctan(\frac{y}{x}) - \pi & \text{if } x < 0 \text{ and } y < 0, \\ +\frac{\pi}{2} & \text{if } x = 0 \text{ and } y > 0, \\ -\frac{\pi}{2} & \text{if } x = 0 \text{ and } y < 0, \\ \text{undefined} & \text{if } x = 0 \text{ and } y = 0. \end{cases}$$

Deg	0	30	45	60	90
Rad	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$
Sin	0	$\frac{\sqrt{1}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{4}}{2}$
Cos	$\frac{\sqrt{4}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{1}}{2}$	0
Tan	0	$\sqrt{3}^{-1}$	$\sqrt{3}^{0}$	$\sqrt{3}^{1}$	Not defined

$\mathbf{A} = [a, b, c]$ $\qquad$ $B = [d, e, f]$

x y z x y
a b c a b
d e f d e

$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = [(bf - ce), (cd - af), (ae - bd)]$

Consider the matrices

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 2 & 3 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 0 \end{bmatrix}$$

Multiplying gives

$$AB = \begin{bmatrix} -1 & -2 \\ 11 & 4 \end{bmatrix}, \quad BA = \begin{bmatrix} 3 & 6 \\ -3 & 0 \end{bmatrix}$$

Thus, $AB \neq BA$.

$$
\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \end{bmatrix}
$$

$$
3 \times 2 \quad \times \quad 2 \times 5 \quad = \quad 3 \times 5
$$

$$
\underbrace{\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}}_{A} \text{X} \underbrace{\begin{bmatrix} e & f \\ g & h \end{bmatrix}}_{B} = \underbrace{\begin{bmatrix} ae + bg & af + bh \\ ce + dg & cf + dh \end{bmatrix}}_{C}
$$

A, B and C are square metrices of size N x N
a, b, c and d are submatrices of A, of size N/2 x N/2
e, f, g and h are submatrices of B, of size N/2 x N/2

Time domain	Laplace domain
$x(t)$	$x(s) = L\{x(t)\} = \int_0^\infty e^{-st}x(t)dt$
$\dot{x}(t)$	$sx(s) - x(0)$
$\ddot{x}(t)$	$s^2x(s) - sx(0) - \dot{x}(0)$
Ct	$\frac{C}{s^2}$
step	$\frac{1}{s}$
$\cos(\omega t)$	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$
$\sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$

Time domain	Laplace domain
$x(t-\alpha)H(t-\alpha)$	$e^{-\alpha s}x(s)$
$e^{-at}x(t)$	$x(s+a)$
$x(at)$	$\frac{1}{a}x\left(\frac{s}{a}\right)$
$C\delta(t)$	C