



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

ELEC-C1110

Automaatio- ja systeemi- tekniikan perusteet

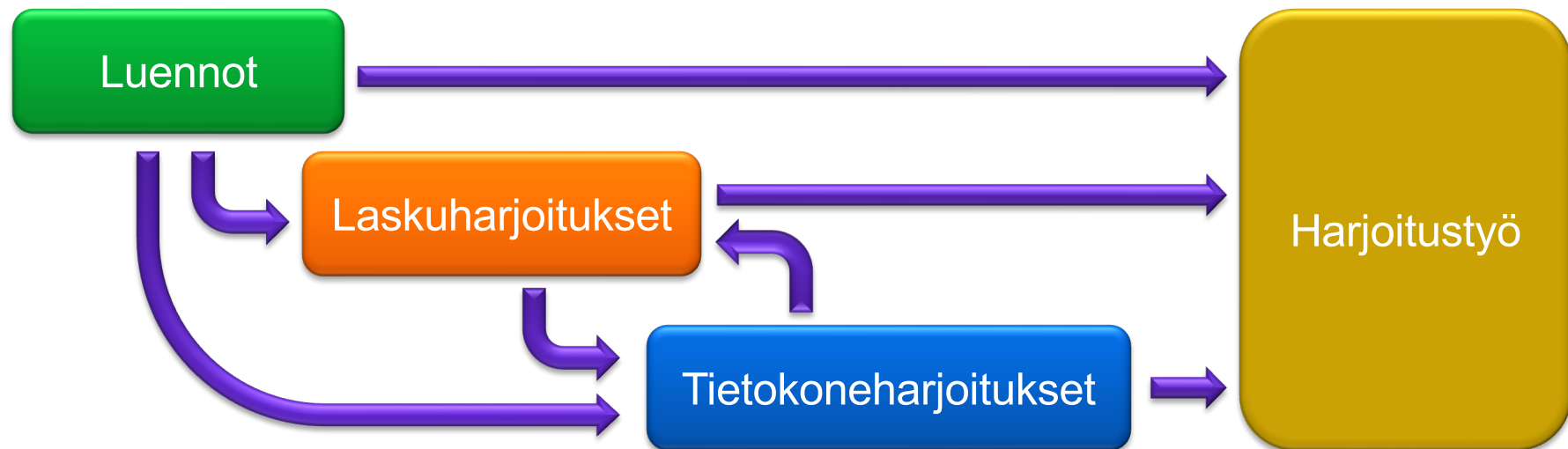
Luento 3

Anturit ja dynamiikkamallin kalibrointi

Joni Pajarinen, 29.1.2024

Tämä luento

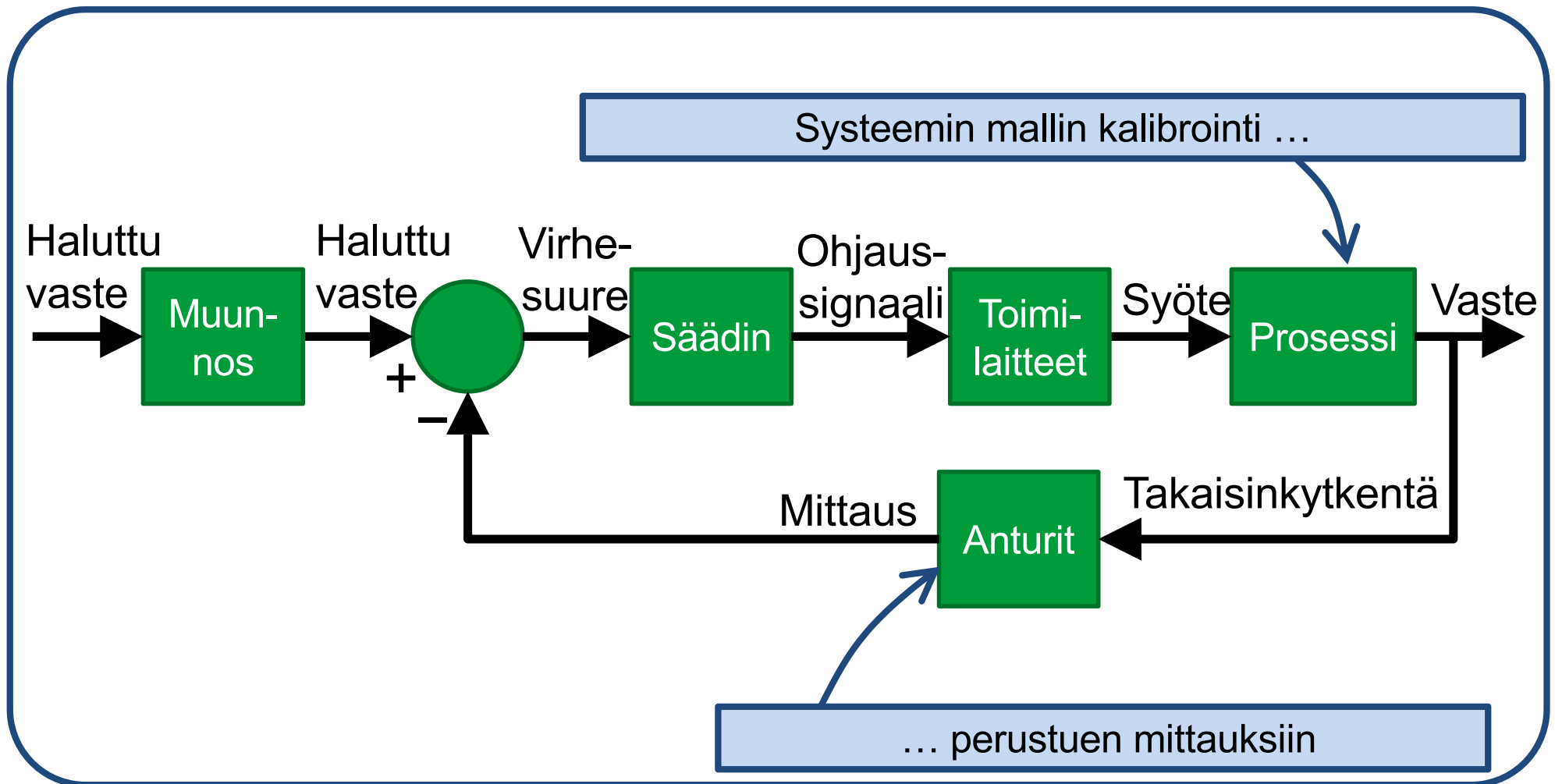
- Systemin mallin kalibrointi, mallin parametrien estimointi
- Erilaiset anturit näytteiden mittaamiseen



Tämän luennon aiheet

- Viime kerralla:
 - Fysikaalisen systeemin mallintaminen
 - Numeerinen integrointi
- Tänään:
 - Systeemin mallin kalibrointi
 - Erilaiset anturit näytteiden mittaamiseen
 - Mallin parametrien estimointi näytteistä

Tänään



Systemin mallin kalibrointi

- Kalibrointi: systeemiä kuvaavien vakioiden löytäminen
- Tiedetään järjestelmän fysiikkamalli, esimerkiksi vakiovoimakärrylle $x(t) = \frac{F}{2m}t^2$
- Mitä jos tiedetään voima F , mutta ei tiedetä massaa m ?
- Mitataan $x(t_0)$ ajan hetkellä $t_0 > 0$
- m voidaan silloin laskea

$$m = \frac{F}{2x(t_0)}t_0^2$$

kun oletetaan *tarkka mittaus*

Käytännössä mittaustarkkuus riippuu anturista!

Yleisiä virhelähteitä mittauksissa

- *Kohina*: voi johtua esim. lämpökohinasta anturin elektroniikassa
- Ei tunneta mittausmallia $y = f(x)$
- Vakiovirhe a (bias): $y = f(x) + a$
- Saturaatio: mittaus saavuttaa minimi- tai maximirajan
- Ajautuminen (drift): mitattu vaste muuttuu ajan ylin riippumatta todellisesta vasteesta. Voi johtua jostakin havaitsemattomasta fysikaalisesta muutoksesta anturissa
- Anturin tila vaikuttaa mittaukseen
- Kvantiointivirheet kun muunnetaan analoginen signaali digitaaliseksi

Instrumentointi: Anturit



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Instrumentointi

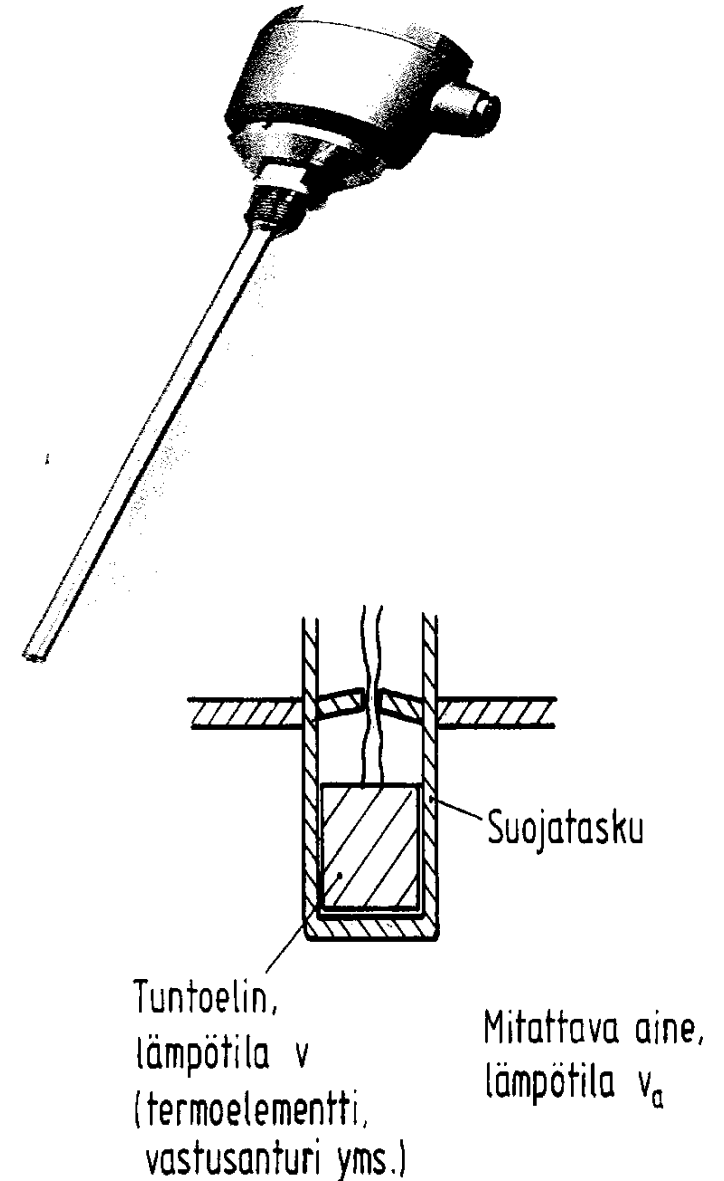
- Instrumentointiin kuuluvat:
 - **Anturit ja muut mittauslaitteet**, joilla tieto prosessin tilasta tuodaan automaatiojärjestelmän tietoon
 - Toimilaitteet, joilla automaatiojärjestelmän komennot muutetaan prosessissa vaikuttaviksi suureiksi

Anturit teollisuusautomaatiossa

- Automaatiosuunnittelussa anturiratkaisuun vaikuttavat
 - vaadittava tarkkuus / erottelutarkkuus
 - ympäristöolosuhteiden sieto
 - lämpö
 - kosteus
 - värinä
 - kemiallisesti aktiivit aineet
 - hinta
 - anturin nopeus / dynaaminen virhe (vrt. kuumemittari)

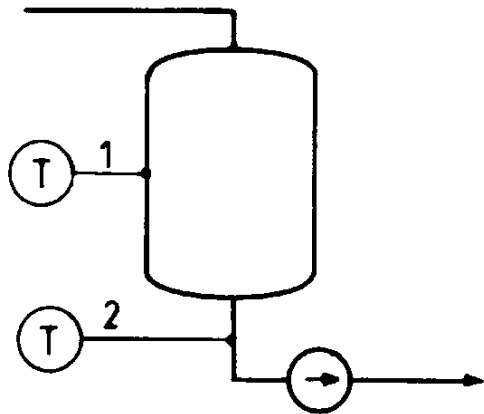
Lämpötilan mittaus

- Vastusanturit (esim. Pt100), termistorit, termoelementit
- Korkeat lämpötilat
 - esimerkiksi uuneissa tai masuuneissa
 - optisesti pyrometrilla (tai infrapunamittarilla kun kyse on suhteellisen matalista lämpötiloista)

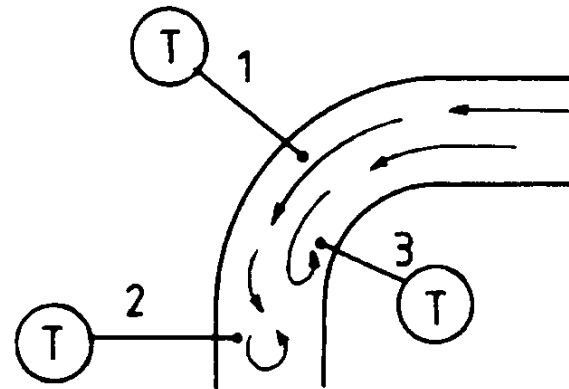


Lämpötilan mittaus

- Lämpömittari kannattaa sijoittaa paikkaan, jossa on mahdollisimman suuri virtaus



Paikka 2 parempi kuin 1



1 hyvä, 2&3 huonoja pyörteiden takia

Lämpötilan mittaus

Vastusmittaus

- Perustuu lämpötilakertoimeen

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 100^\circ\text{C}} \quad R_0 = \text{vastus } 0^\circ\text{C}, R_{100} = \text{vastus } 100^\circ\text{C}$$

- Käytännössä yleisin vastusmittaus on Pt 100 DIN, jolle

$$\alpha = (3,85 \pm 0,01) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$$

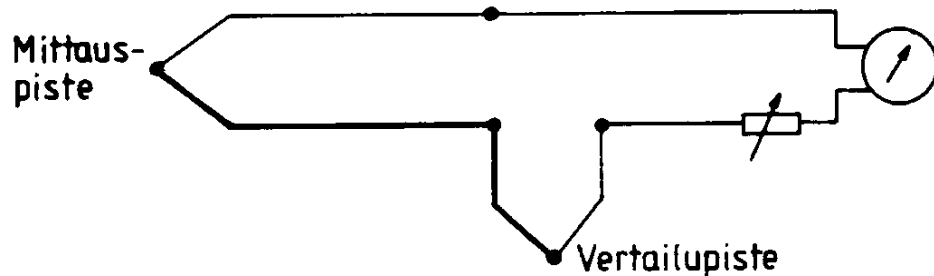
ja vastusarvo 0°C on 100Ω .

- Käytännön lämpötila-alue $-200 \dots +850$
- Muita käytettyjä Ni 100 DIN ja Cu 100 DIN

Lämpötilan mittaus

Termoelementtimittaus (termopari)

- Termopari: liitetään kaksi erityyppistä johdinta yhteen
- Mitataan termoparin generoima sähkömotorinen voima
 - Perustuu Seebeckin ilmiöön
- Mittauskytkentä sisältää yleensä vertailuelementin tunnetussa lämpötilassa (usein 0 °C tai 50 °C)



Lämpötilan mittaus

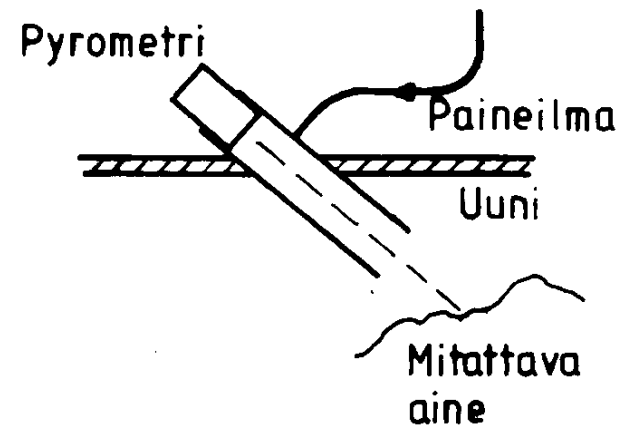
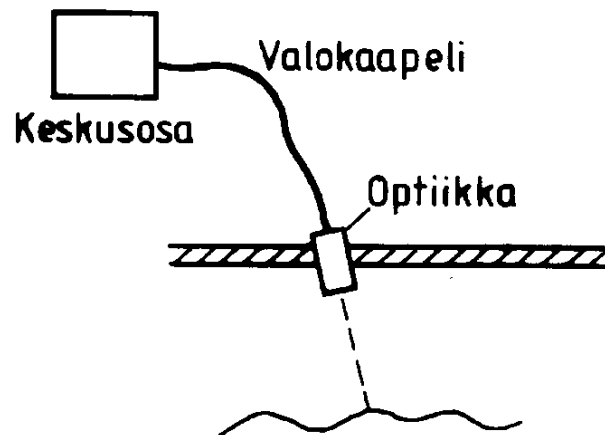
Termoelementtimittaus

- Termoparien materiaaleja kahta tyyppiä
- I jalometallit ja jalometalliseokset
 - esim. PtRh – Pt DIN
- II epäjalometallit ja seokset
 - esim. Fe – CuNi DIN, NiCr – Ni DIN
- II -ryhmän elementeillä on 5-7 kertaa korkeampi termojännite ($\sim 0,4\text{mV}/10\text{ }^\circ\text{C}$) kuin I-ryhmän elementeillä ($\sim 0,07\text{mV}/10\text{ }^\circ\text{C}$).
- I-ryhmän elementeillä on taas korkeampi sulamispiste, suurempi korroosiokesto ja parempi tarkkuus.

Lämpötilan mittaus

Pyrometrit ja infrapuna-anturit

- Perustuvat aineen lähettämän infrapunasäteilyn mittaamiseen

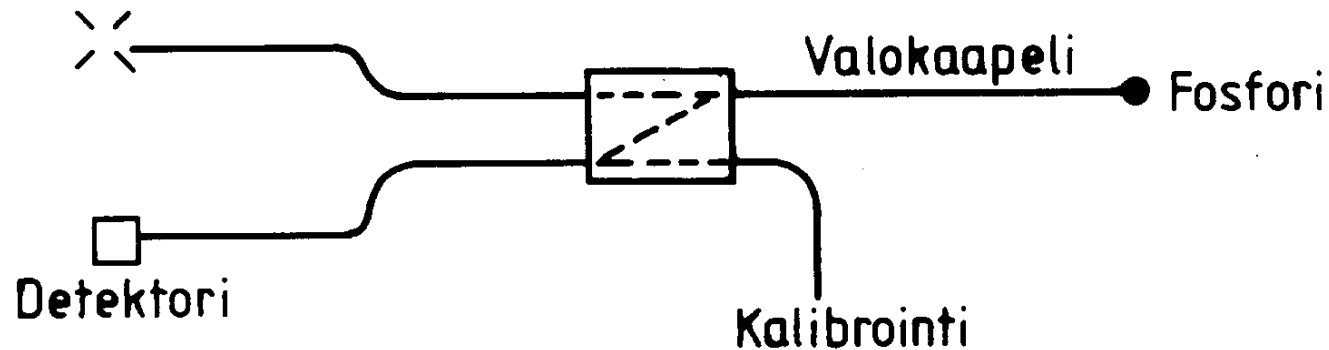


Lämpötilan mittaus

Kuituanturit

- UV-valopulssit virittävät fosforipalan
- Fosforin lähettämän valopulssin pituus riippuu lämpötilasta

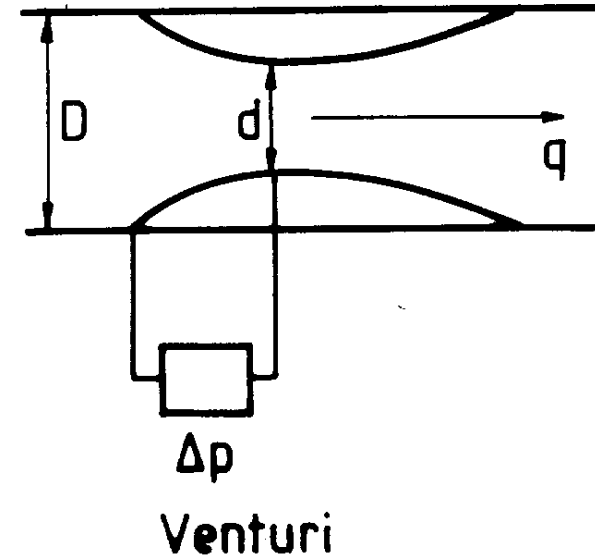
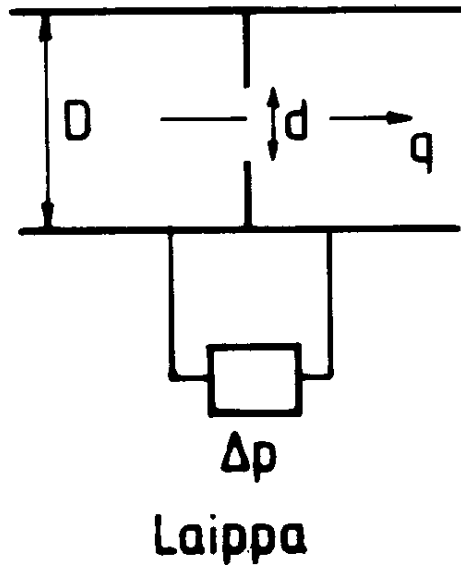
Valolähde (UV-pulsseja)



Virtausmittaus

- Teollisuuden tavallisimmat virtausmittaukset
 - kuristuslaippa ja venturi
 - rotametri
 - turbiini
 - magneettinen virtausmittaus
- Muita vähemmän käytettyjä menetelmiä
 - vortex
 - äänikaikumittaus

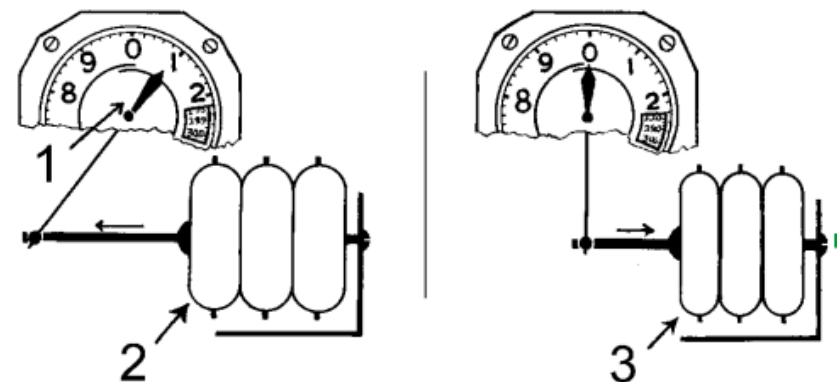
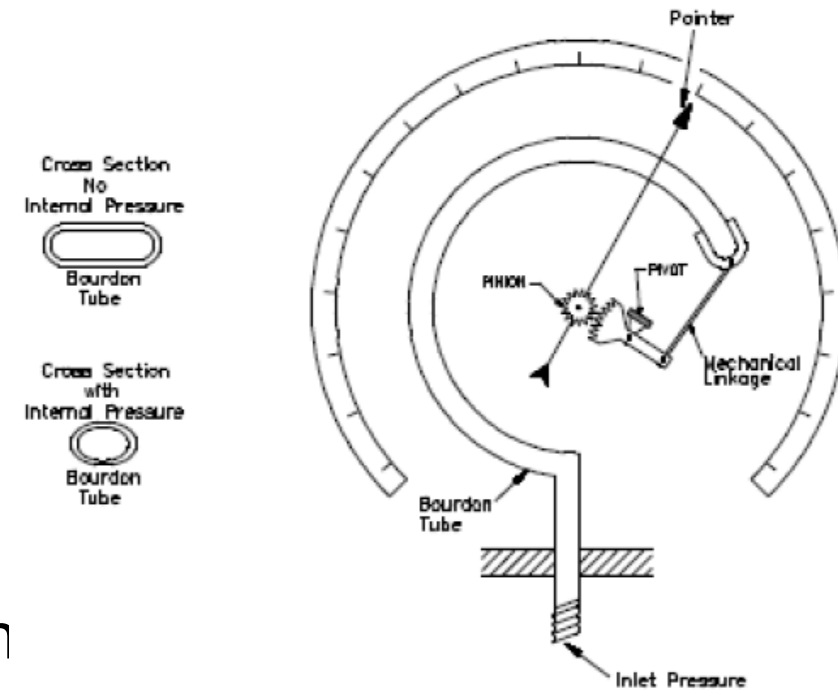
Virtausmittaus



- $q = \alpha \varepsilon A \sqrt{2\gamma \Delta p}$, missä
 α on virtauskerroin, ε ns. paisuntakerroin, A on aukon pinta-ala, γ virtaavan aineen tiheys, Δp mitattu paine-ero

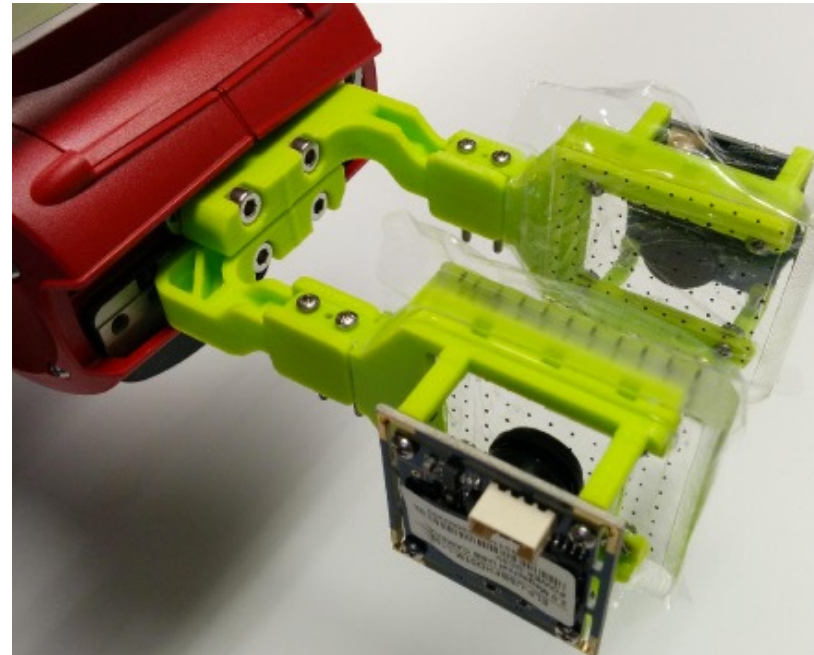
Paineen mittaus

- Tavallisimmat anturit paineenmittauksessa
 - Kalvorasia
 - paljeputki
 - painekaari (Bourdon-putki)
- MEMS ja MST anturit paineenmittauksessa (MEMS=microelectro-mechanical system, MST=micro systems technology)
 - halpoja ja tarkkoja



Paineen mittaus: optinen tunto

- Uutta teknologiaa. Yhdistää kameran ja läpinäkyvän/joustavan materiaalin.
- Erilaisia toteutuksia. Esim. [FingerVision](#)
 - Läpinäkyvä kuvioitu linssi
 - Linssi joustaa
 - Linssin takana kamera
 - Kamera tunnistaa kuviot
 - ... ja siten linssin asennon



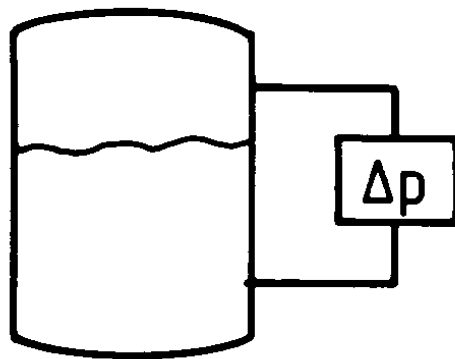
Kuva: <http://akihikoy.net/>

Pinnankorkeus

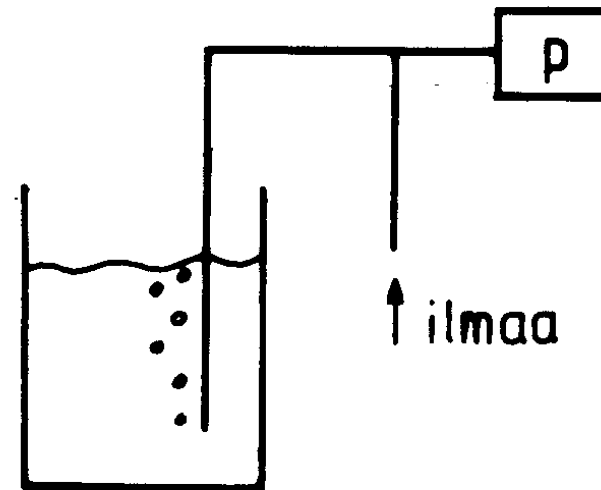
- Erilaisia mittausmenetelmiä
 - uimurityyppiset mittaukset
 - paine-eroon palautuvat mittaukset
 - kapasitiiviset mittaukset
 - vastuslankamittaukset
 - tutkaperiaatteella toimivat mittaukset
 - äänikaiku
 - valopulssin kulku aika
 - säteilymittaukset

Pinnankorkeus

- Paine-eroon perustuvia menetelmiä



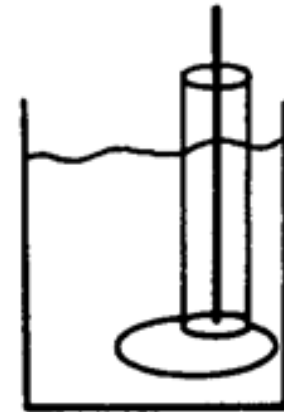
Suora paine-ero



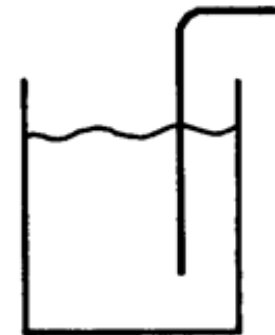
Kuplailuputki

Pinnankorkeus

- Kapasitiivinen menetelmä
 - Kapasitanssi suhteessa pinnankorkeuteen, koska veden dielektrisyysvakio eri kuin ilmalla

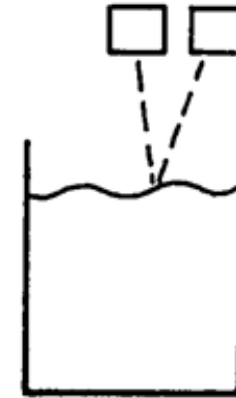


- Vastuslankamittaus
 - Vastuslangan vastus muuttuu paineen vaikutuksesta

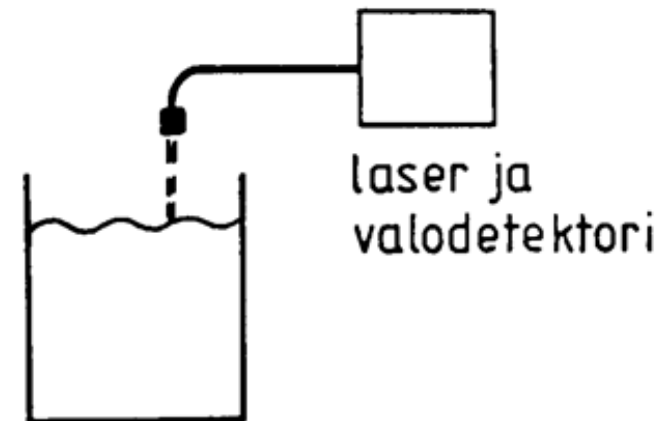


Pinnankorkeus

- Äänikaikumittaus
 - Mitataan heijastuneen äänen kulku-aika



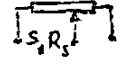
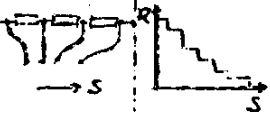
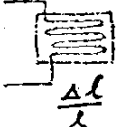

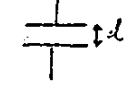

- Lasertutkamittaus
 - Mitataan valopulssin kulku-aika



Asema, asento, pyörimisnopeus

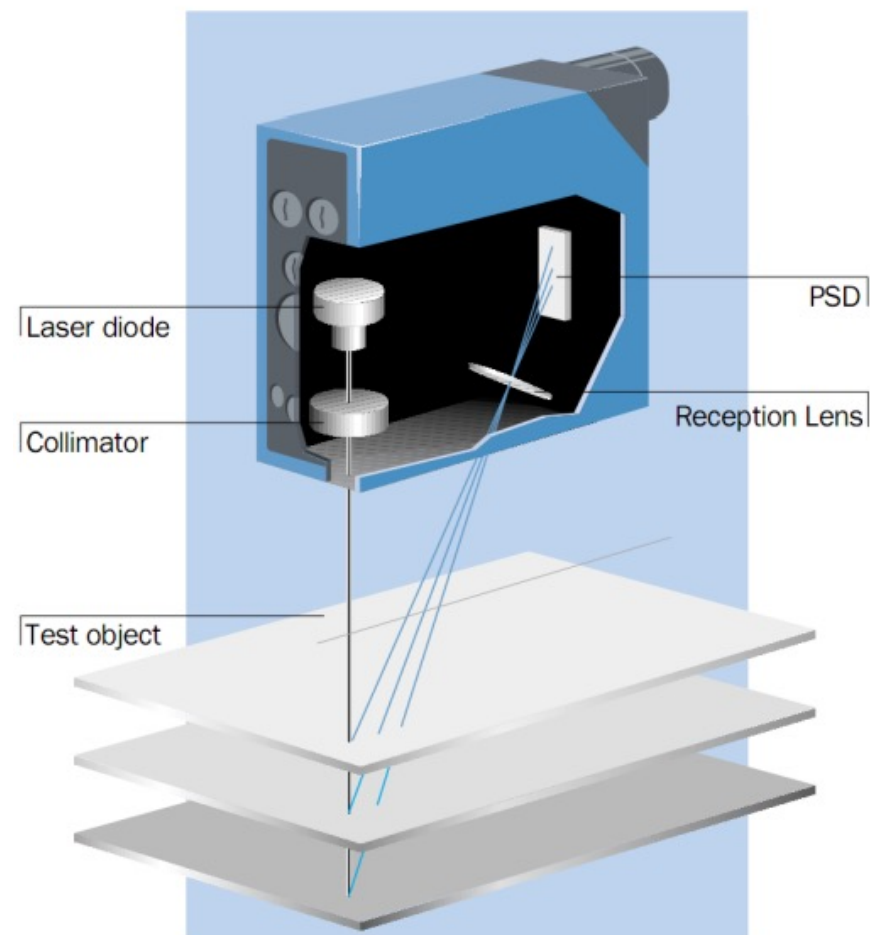
Klassisia menetelmiä

- Potentiometrit
- Kosketinanturit
- Venymäliuskat
- Puolijohdinsauvat
- Kapasitiiviset anturit
- Induktiiviset anturit
- Differentiaali-muuntimet

no	nimi	kuva	yhtälö	rajataaj. Hz	edut	haitat
1	potentiometri		$R_s = \frac{S}{S_{max}} R$	5	lineaarinen	kuluminen, kosketinhäiriöt
2	kosketinanturi			10^2	yksinkertainen välivahvistus	epäjatkuvuus
3	venymäliuska		$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l}$	10^6	tarkka, suuri rajataajuus	vaatii suurta energianottoa prosessista
4	puolijohdinsauva		$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l}$	10^6	pieni tehonotto, tarkka, suuri rajataajuus	hauras, herkkä särkyksien
5	kapasitiivinen anturi		$\frac{C}{C'} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta d}{d}}$	10^5	erittäin herkkä	epälineaarinen
6	Induktiivinen anturi			10^4	sopii myös hyvin suurille lsn. arvoille	epälineaarinen

Optiset mittaukset

- Valokytkimet
- Optiset enkooderit kulmamittauksissa
- Laser käyttö etäisyyden mittauksessa
- Laserin ja kameran yhdistelmät paikannuksissa ja muotojen mittauksissa



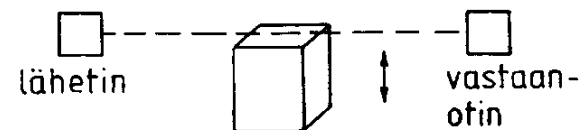
Kuva: SICK

Optiset mittaukset

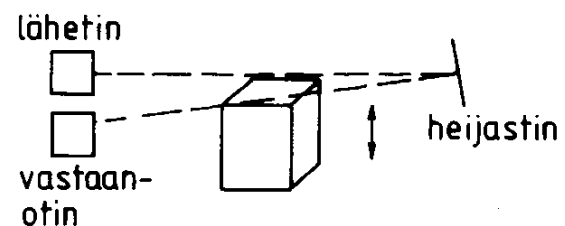
- Valokytkimet



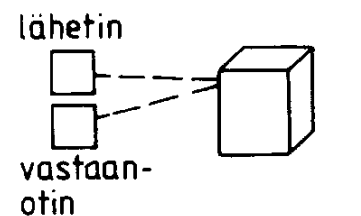
- Lähetin ja vastaanotin eri puolilla



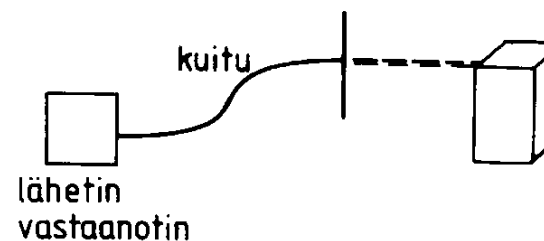
- Lähetin ja vastaanotin samalla puolella, käytetään heijastinta



- Ei käytetä erillistä heijastinta vaan detektoidaan kappaleen pinnalta heijastunut valo

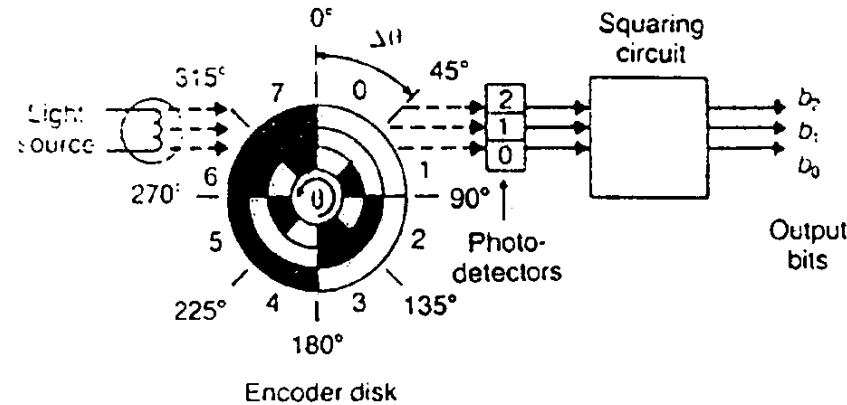


- Kuidun käyttö

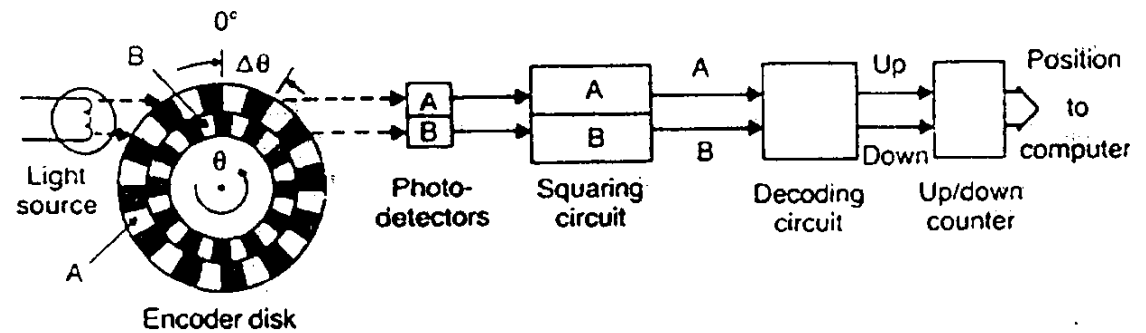


Kiertokulmamittaukset

- Optinen enkooderi
 - absoluuttinen
 - suhteellinen
- Kiertopotentiometri
- Resolveri
 - generaattorin muotoon käämitty muuntaja



n	θ (deg)	b_2	b_1	b_0
0	0 - 45	0	0	0
1	45 - 90	0	0	1
2	90 - 135	0	1	0
3	135 - 180	0	1	1
4	180 - 225	1	0	0
5	225 - 270	1	0	1
6	270 - 315	1	1	0
7	315 - 0	1	1	1



Kvantiointivirhe: optinen enkooderi on digitaalinen, mutta todellinen kiertokulma jatkuva-arvoinen

Lineaariliike

- Magnetostriktiivinen anturi
- Vaijerianturi
- Magneettinauha-anturit



Kuva: ASM



Kuvat: SICK

Nopeus

- Yleisimmin mitataan paikkaa ja derivoidaan numeerisesti
- Takogeneraattori
 - Pyörimisnopeus: jännite jonka pyörivä generaattori saa aikaiseksi
- Doppler-tutka

Mallin parametrien estimointi näytteistä

Parametrien estimointi

- Yleisemmin mitataan N näytettä

$$D = (y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_N))$$

- Jos mittaukset ovat tarkkoja $y(t) = x(t)$

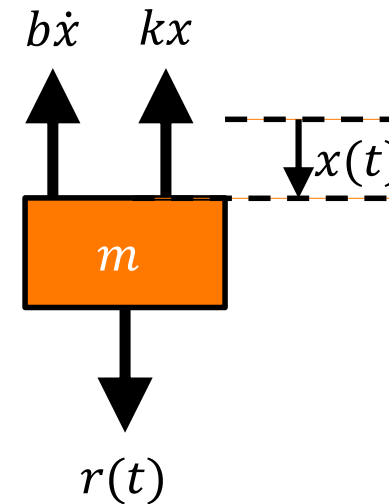
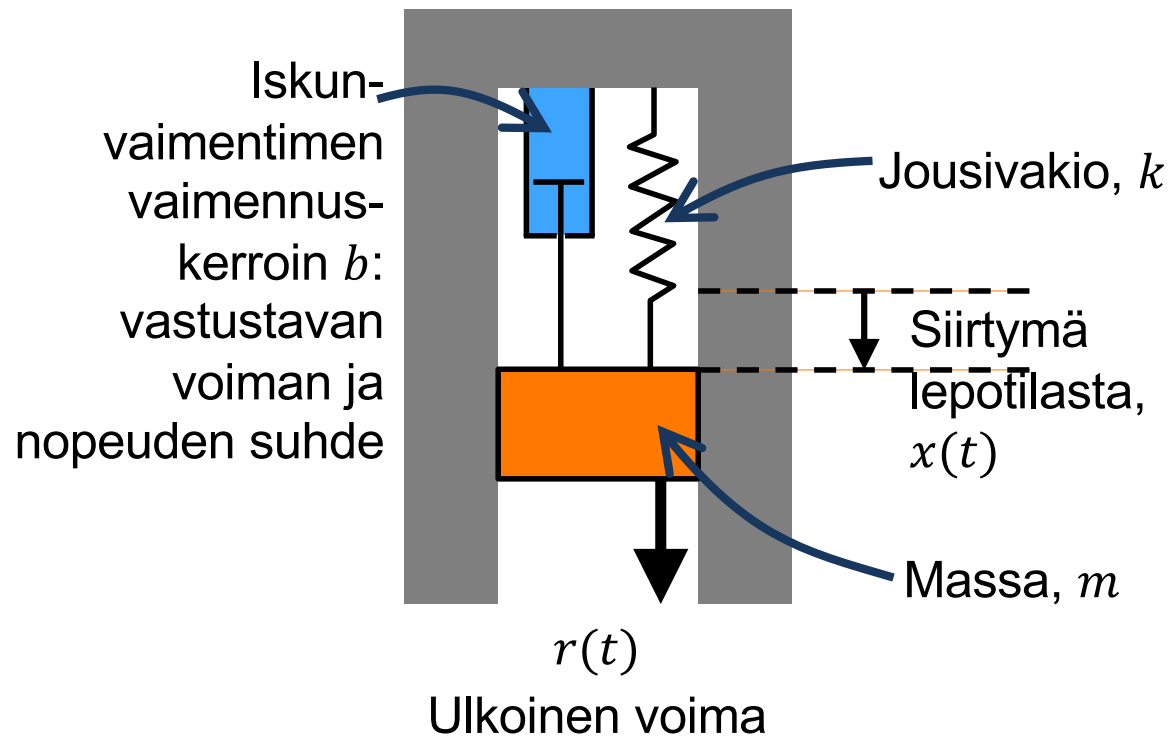
- Mutta mittauksissa voi olla virheitä,

esim. kohinaa epätarkan sensorin takia: $y(t) = x(t) + \epsilon$

ϵ satunnaismuuttuja, jolla keskiarvo μ , keskihajonta σ

- Kohinan vaikutus pienenee kun lasketaan keskiarvo $\bar{y}(t) = \sum_t y(t)/N$. Kun $N \rightarrow \infty$ saadaan tarkempi parametriarvio keskihajonnalla σ/\sqrt{N} (kuuluisa ”central limit theorem” todistaa tämän)

Jousi-massa-vaimennin -järjestelmä



$$F = ma$$
$$-b\dot{x} - kx + r = m\ddot{x}$$
$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = r$$

Toisen kertaluvun lineaarinen vakiokertoiminen differentiaaliyhtälö (ODE)

Jousi-massa-vaimennin: tuntematon parametri

- Oletetaan ainoastaan kohinaa mittausvirheenä
- Tiedetään järjestelmän fysiikkamalli $m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = r$
- Mitä jos ei tiedetä jousivakiota k ?
- Mitataan sijainti $x(t_0)$, nopeus $\dot{x}(t_0)$ ja kiihtyvyys $\ddot{x}(t_0)$ kun käytetään ulkoista voimaa $r(t_0)$ ajanhetkellä t_0
- Kun oletetaan tarkka mittaus, k voidaan laskea

$$m\ddot{x}(t_0) + b\dot{x}(t_0) + kx(t_0) = r(t_0) \Rightarrow$$
$$k = \frac{r(t_0) - m\ddot{x}(t_0) - b\dot{x}(t_0)}{x(t_0)}$$

- N kohinaista näytettä voidaan keskiarvoistaa $\sum_t k_t / N$, jos halutaan vähentää kohinaa

Jousi-massa-vaimennin: monta tuntematonta parametria

- Mitä jos ei tiedetä jousivakiota k , eikä vaimennuskerrointa b , eikä massaa m ?
- Aletaan käyttämään tuntemattomille parametreille vektoria $\theta = (m \ b \ k)$. Saadaan

$$m\ddot{x}(t_0) + b\dot{x}(t_0) + kx(t_0) = r(t_0) \Rightarrow$$
$$\begin{pmatrix} \ddot{x}(t_0) & \dot{x}(t_0) & x(t_0) \end{pmatrix} \theta^T = r(t_0)$$

Monella näytteellä saadaan

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}(t_1) & \dot{x}(t_1) & x(t_1) \end{pmatrix} \theta^T = r(t_1)$$

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}(t_2) & \dot{x}(t_2) & x(t_2) \end{pmatrix} \theta^T = r(t_2)$$

... = ...

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}(t_N) & \dot{x}(t_N) & x(t_N) \end{pmatrix} \theta^T = r(t_N)$$

Jousi-massa-vaimennin: monta tuntematonta parametria

- Kirjoitetaan matriisimuotoon:

$$X\theta^T = R$$

missä X on $N \times 3$ matriisi, jossa on $(\ddot{x}(t) \dot{x}(t) x(t))$ näyte jokaisella rivillä ja R on $N \times 1$ matriisi (vektori), jossa on $r(t)$ arvot

- Jos yritetään ratkaista θ minimoimalla pienin neliövirhe ("minimum squared error") kerrotaan molemmat puolet X^T :llä ja saadaan
- $X^T X \theta^T = X^T R \Rightarrow \theta^T = (X^T X)^{-1} X^T R$ ratkaisu!
- Yleisesti, *lineaarisen* systeemin $x\theta^T = r$ parametrit θ voidaan yrittää ratkaista keräämällä näytteet matriiseihin X ja R ja laskemalla $\theta^T = (X^T X)^{-1} X^T R$

Jousi-massa-vaimennin: monta tuntematonta parametria

- Miksi $\theta^T = (X^T X)^{-1} X^T R$ minimoi pienimmän neliövirheen?
- Neliövirhe: $\sum_n \left(\begin{pmatrix} \ddot{x}(t_n) & \dot{x}(t_n) & x(t_n) \end{pmatrix} \theta^T - r(t_n) \right)^2$
- Minimoidaan neliövirhe laskemalla derivaatta neliövirheestä ja asettamalla derivaatta nolaksi:

$$\begin{aligned} & \nabla_{\theta} \sum_n \left(\begin{pmatrix} \ddot{x}(t_n) & \dot{x}(t_n) & x(t_n) \end{pmatrix} \theta^T - r(t_n) \right)^2 \\ &= 2 \sum_n \left(\begin{pmatrix} \ddot{x}(t_n) & \dot{x}(t_n) & x(t_n) \end{pmatrix} \right)^T \left(\begin{pmatrix} \ddot{x}(t_n) & \dot{x}(t_n) & x(t_n) \end{pmatrix} \theta^T - r(t_n) \right) \\ & \qquad \qquad \qquad 2X^T X \theta^T - 2X^T R = 0 \\ & \qquad \qquad \qquad \theta^T = (X^T X)^{-1} X^T R \end{aligned}$$

Jousi-massa-vaimennin: käytännön mittaukset

- Mitä jos mitataankin vain sijainti $x(t)$, mutta ei nopeutta $\dot{x}(t)$ tai kiihtyvyyttä $\ddot{x}(t)$ erillisillä antureilla?

- $\dot{x}(t)$ on sijainnin derivaatta. Derivaatta on

$$\dot{x}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t} \right)$$

- Approksimoidaan derivaattaa käyttämällä

$$\dot{x}(t) \approx \left(\frac{x(t_{n+1}) - x(t_n)}{t_{n+1} - t_n} \right)$$

- Approksimaatio on tarkka jos $t_{n+1} - t_n$ on tarpeeksi pieni

- Samalla tavalla voidaan laskea kiihtyvyys

$$\ddot{x}(t) \approx \left(\frac{\dot{x}(t_{n+1}) - \dot{x}(t_n)}{t_{n+1} - t_n} \right)$$

Yhteenveto

- Systemin mallin kalibrointi
- Erilaiset anturit näytteiden mittaamiseen
- Mallin parametrien estimointi *lineaarisen systeemin* näytteistä. Esimerkkinä jousi-massa-vaimennin järjestelmä

Ensi kerralla

- Tuntemattoman järjestelmän kalibrointi / mallintaminen