

Tämä tiedosto on luotu osana Erasmus+ -projektia ”Developing Digital Physics Laboratory Work for Distance Learning” (DigiPhysLab).

Lisää tietoa: www.jyu.fi/digiphyslab

Oven paiskaaminen

Ohjaajan versio

16.1.2023



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Tämä työ on julkaistu lisenssillä [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Oven paiskaaminen – Ohjaajan versio

Työn yleiskuva

- Aihe: Kiinni paiskautuvan oven kitkavaikutusten mallintaminen
- Kohderyhmä: Opintojen alkuvaiheessa olevat fysiikan opiskelijat ja fysiikan opettajakoulutuksen opiskelijat
- Ajankäyttö: vähintään 2 h, mielellään 3–4 h
- Suositeltu työskentelytapa: parityö (2 oppilasta per ryhmä)

Valmistautumisesta

Tämän työn tarkoitus on testata erilaisia kitkan mallinnuksia kiinni paiskautuvasta ovesta saadulle älypuhelimella määritetylle liikedatalle. Koska työssä keskitytään datan analysointiin, opiskelijoiden intensiivinen valmistautuminen työskentelyyn on välttämätöntä. Työn sisältöön valmistautuminen aloitetaan esimerkiksi työohjeessa ilmoitetusta julkaisusta. Lisäksi vaaditaan jonkin verran teknisiä valmisteluja, mikäli tarvittavia ohjelmia (kuten *phyphox* ja *SciDAVis* tai *Origin*) ei ole vielä asennettu. Jos kyseiset ohjelmat eivät ole oppijoille vielä tuttuja, muut perehdyttävät valmistelutehtävät ovat myös hyödyllisiä (ehdotuksia löytyy opiskelijoiden ohjeista).

Koejärjestelystä ja toteutuksesta

Työssä voidaan käyttää kiihtyvyyssensoreja (kiihtyvyys putoamiskiihtyvyyden g kanssa tai ilman sitä) ja gyroskooppia. Gyroskooppi yleensä sisältää kiihtyvyyssensoreita vähemmän kohinaa/häiriötä. Sen lisäksi se ilmoittaa suoraan kulmanopeudet, joten radiaalisia kiihtyvyyksiä ei ole tarpeen erikseen muuntaa kulmanopeuksiksi, toisin kuin kiihtyvyyssensoreilla. Putoamiskiihtyvyyden mittaamisessa on se etu, että puhelin on mahdollista kohdistaa ja asetella tarkasti reaaliaikaisen mittausdatan perusteella.

Puhelin pitää kohdistaa yhden koordinaattiakselin suhteen niin kohtisuoraan kuin mahdollista (kiihtyvyyssensorit) tai yhdensuuntaisesti pyörimisakselin kanssa (gyroskooppi). Tämä maksimoi mitatut arvot, mikä johtaa suurempaan tarkkuuteen. Joskus kannattaa vertailla yksittäisiä koordinaattiakseleita, koska sensorit tekevät mittauksia eri tarkkuuksilla eri suunnissa. Koordinaattiakselien nimet ja suunnat riippuvat laitteesta.

Älypuhelimella tehdyn mittaamisen lisäksi on kulmanopeuden päättelemiseksi tarpeellista mitata ainoastaan pyörimisakselin ja älypuhelimien sensorin välinen etäisyys, kun käytetään kiihtyvyyssensoreita. Toisaalta oven parametrejä ei vaadita, koska tukimateriaalissa (II) olevat sovituksen yhtälöt on jo normalisoitu oven hitausmomentille.

Älypuhelin pitäisi kiinnittää oven ulkosivulle (heilahdussuuntaa vastaan), jotta se ei irtoa inertian vuoksi. Kaksipuolinen teippi (varma pito, liimajälkiä voi jäädä) tai muovipussin (johon puhelin laitetaan) teippaaminen oveen ovat sopivia keinoja puhelimen kiinnittämiseksi oveen. Gyroskooppia käytettäessä mitä kauempana puhelin on pyörimisakselista, sen tarkempia mittauksia saadaan.

Datan siirtämisestä tietokoneelle

Datan siirtämiseen on periaatteessa kolme eri keinoa:

1. Käytetään *phyphoxin* etätoimintoa. Siinä älypuhelimien data siirretään tietokoneelle reaaliajassa. Myös mittausten käynnistäminen ja lopettaminen etänä onnistuu.
2. Data siirretään suoraan tietokoneelle sähköpostilla, *Bluetoothilla*, *Airdropilla* tms.
3. *Hyödyllistä vain Android-laitteille*: data tallennetaan ensin puhelimen muistiin. Koska *phyphoxilla* ei ole sinne suoraa pääsyä, tarvitaan käyttöön jokin tiedostonhallintasovellus, kuten *Total*

Commander, joka voi tallentaa tiedoston sisäisesti. Sen jälkeen tiedosto voidaan siirtää esimerkiksi tiedonsiirtokaapelilla.

Datan analysoinnista

Ennen kuin dataan tehdään sovituksia, vaaditaan muutamia valmisteluja. Seuraavia asioita tähdennetään:

- Olennainen data pitää erottaa datajoukosta. Tätä varten olennainen koordinaattiakseli pitää määritellä. Lisäksi huomioidaan data ainoastaan siitä hetkestä, kun ovi lähtee sulkeutumaan tönäisemisen vaikutuksesta (katso maksimikulmanopeus) hetkeen juuri ennen oven lokahtamista kiinni (katso kulmanopeuden nopeampi pieneneminen, kohina). Lisää tietoa löytyy ohjeissa ilmoitetusta julkaisusta.
- Kun käytetään kiihtyvyyssensoreita, kulmanopeus lasketaan yhtälöllä $\omega(t) = \sqrt{a/r}$, jossa a on radiaalinen kiihtyvyys ja r etäisyys pyörimisakseliin. Yhtälöä voidaan käyttää vain positiivisille kiihtyvyyden arvoille. Kuitenkin erityisesti matalilla kulmanopeuksilla kiihtyvyyssensorin kohina voi kasvaa niin suureksi, että jopa oikein asetellulla ja suunnatulla puhelimella saadaan negatiivisia mitattuja arvoja. Tällaiset arvot pitäisi joko poistaa taltioinneista, määrittää nolaksi tai muuttaa niiden merkkiä.
- Kokeessa voidaan tehdä myös virheanalyysit ja -laskut. Kiihtyvyyssensorin ja pyörimisakselin etäisyyden mittaamisen lisäksi erityistä huomiota tulee kiinnittää puhelimen sensorien mittaustarkkuuteen. On suositeltavaa aloittaa mittaukset muutamaa sekuntia ennen oven liikkeen alkamista, jotta taustakohina voidaan mitata ns. tyhjäkäynnillä. Näiden mittausten keskiarvo voidaan määrittää systemaattiseksi ja keskihajonta tilastolliseksi mittausepävarmuudeksi.

Kun käytetään tukimateriaalin II sovitusyhtälöitä, on noudatettava seuraavia ehtoja:

- Sovituksen parametrit a , b ja c eivät liity suoraan yhtälön $\tau_f = a + b\omega + c\omega^2$ parametreihin, vaan ne on normalisoitu oven hitausmomentille, toisin sanoen jaettu sillä. Sen seurauksena yhtälöitä voidaan käyttää mille tahansa ovelle.
- Sovituksen parametri w kuvaa kulmanopeutta alussa. Kulmanopeutta alussa pitää käyttää myös sovituksen parametrina, koska muuten algoritmista puuttuu tarvittavat vapausasteet.
- Sovituksen yhtälöt kuvaavat kitkasta aiheutuvaa kulmanopeuden ”tipahtamista”. Sen vuoksi kaikkien mitattujen arvojen merkit pitää vaihtaa vastakkaisiksi, jos puhelimen suuntaus saa aikaan negatiivisia mittaustuloksia (ja siten kulmanopeuden ”kasvun”).
- Sovituksen yhtälöitä voi käyttää vain, jos oven paiskaaminen aloitetaan ajan hetkellä $x = 0$. Koska mittausta usein aloitetaan tätä aiemmin, ajan arvot pitää korjata sitä vastaaviksi. Toisin sanoen mittaustuloksia pitää siirtää x -akselia pitkin vasemmalle vastaavan määrän verran.
- Sovitukset riippuvat piilevästi alkuarvauksista, jotka antavat sovitusalgoritmilta alkuarvot (tai *Originissa* myös hakuvälit). Epäsopivat alkuarvaukset voivat johtaa epäonnistuneisiin sovituksiin. Julkaisussa olevien yhtälöiden ja parametrien mukaisesti (muutettu erilaisella oven korkeudella ja massalla) odotetut positiiviset arvot ovat korkeintaan $w \approx 0,2 \text{ s}^{-2}$ (riippuen oven kolahtamisen voimasta), $w \approx 3 \text{ s}^{-2}$, $a \approx 0,29 \text{ Nm}$, $b \approx 1,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$ ja $c \approx 0,15 \frac{\text{Nm}}{\text{s}^2}$.

Odotetut tulokset

Kuten julkaisussa on jo todettu, kriteerien *mahdollisimman suuri R^2 ja sovitusparametrien realistinen suuruusluokka* osalta newtonilaisen kitkan sisältävien kahden mallin pitäisi kuvata kiinni paiskautuvan oven liikettä tarkemmin, kuin Stokesin tai kuivan kitkan sisältävät mallit. Newtonilaisen kitkan sisältäville malleille kitkatermien lisäämisen pitäisi kasvattaa tarkkuutta, toisin sanoen esimerkiksi DN on tarkempi kuin N ja (jos tarpeellista) DSN on puolestaan tarkempi kuin DN. Joka tapauksessa tämä arviointi riippuu todella paljon sovituksista (ja siten alkuarvauksista ja algoritmeista).

Arviointiin liittyvät ehdotukset

Jotta työ voidaan suorittaa onnistuneesti, opiskelijoilta vaaditaan intensiivistä valmistautumista sen sisältöön. Valmistautumisen takaamiseksi ja suorituskyvyn tarkistamiseksi samaan aikaan voidaan käyttää ennakkotehtävää (esim. jonkinlainen testi, tietovisa tms.). Vaihtoehtoisesti voidaan myös arvioida työn käsittelyn aikana luodut (mittauspöytäkirjan kaltaiset) yhteenvedot datan arvioimisesta. Raportin kirjoittamisen lisäksi myös posteriesitys on käyttökelpoinen hyvin keskusteltavissa olevan data-analyysin vuoksi.

Ehdotuksia työn muokkaamiseen

Opiskelijoiden ohjeissa kuvailtu Oven paiskaaminen -työtä on mahdollista muokata ja mukauttaa monin tavoin yksilöllisiin tavoitteisiin ja olosuhteisiin. Alla on epätäydellinen lista mahdollisista työn variaatioista:

- Ajan rajallisuuden vuoksi kaikkien seitsemän kitkamallin testaaminen ei välttämättä aina ole mahdollista. Tällöin pelkästään kolmen yksinkertaisen mallin (D, S, N) käsittely ei riitä, koska niiden avulla alkuarvausten merkitystä onnistuneisiin sovituksiin ei voida tunnistaa. Sen sijaan on suositeltavaa keskittyä newtonilaisen kitkan malleihin (N, DN, SN, DSN), koska myös niissä käytetään usein monimutkaisia sovituksen yhtälöitä ja newtonilaisen kitkan esiintyminen joka tapauksessa on odotusarvona. Tällöin tavoitteena on löytää edellä mainituista neljästä mallista yksinkertaisin, joka kuvaa dataa riittävän tarkasti.
- Koska datan keräämiseen keskitytään joka tapauksessa, voidaan myös ennalta määrättyä datajoukkoa (aiemmin kerätty/valmis data) käyttää ajan tai käytännön syiden (esim. vapaasti heilahtavien ovien saatavuus, opiskelijoiden määrä) vuoksi. Voidaan myös antaa datan kerääminen tehtäväksi kotona. Jos työ tehdään paikan päällä, pääpainon tulee olla paikan päällä tapahtuvassa datan arvioinnissa, koska siihen tässä työssä tulee keskittyä. Datan arviointia voidaan myös edistää paremmin paikan päällä käytävien keskustelujen avulla.
- Oven paiskaamista parhaiten kuvaavaan kitkamalliin liittyvän kysymyksen lisäksi voidaan harkita myös seuraavia kysymyksiä:
 - Mikä vaikutus puhelimen ja pyörimisakselin etäisyydellä on kitkamallien merkittävyyteen?
 - Mikä vaikutus oven kulmanopeudella alussa on kitkamallien merkittävyyteen?
 - Miten sensorien (gyroskooppi, kiihtyvyys putoamiskiihtyvyyden kanssa tai ilman) ja akselien (x, y, z) valinta vaikuttavat kitkamallien merkittävyyteen?
 - Mikä vaikutus tutkittavalla kappaleella (esim. erilaiset ovet, ikkunat jne.) on kitkamallin merkittävyyteen?

Muita huomioita

- Itse asiassa tässä työssä ja julkaisussa aiemmin mainitut seitsemän kitkamallia esittävät jo todellisen tilanteen yksinkertaistusta, koska siinä oletetaan, että on olemassa keskimääräinen vääntömomenttivektori, joka vaikuttaa oven painopisteeseen. Tarkkaan ottaen vääntömomentti kuitenkin muuttuu asteittain riippuen etäisyydestä pyörimisakseliin, koska oven kulmanopeus on pyörimisakselin suhteen nolla ja suurimmillaan oven avautuvassa reunassa. Jotta yksittäisen oven eri kohtien eri kulmanopeudet ja niistä seuraavat erilaiset asteittaiset vääntömomentit voidaan ottaa huomioon, kitkamalli sisältää sekä Stokesin kitkan (hallitsee pienillä kulmanopeuksilla, soveltuu lähellä pyörimisakselia oleville oven alueille) ja newtonilaisen kitkan (hallitsee suurilla kulmanopeuksilla, soveltuu kauempana pyörimisakselista oleville oven alueille).
- Julkaisun sivulla 32 on virhe yhtälöissä 7 ja 8. Oikeat muodot niistä ovat:

$$\Delta\omega = \sqrt{\left(\frac{\partial\omega}{\partial a_x}\Delta a_x\right)^2 + \left(\frac{\partial\omega}{\partial r}\Delta r\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2\sqrt{ra_x}}\Delta a_x\right)^2 + \left(-\frac{\sqrt{a_{x(t)}}}{2\sqrt[3]{r}}\Delta r\right)^2} = \sqrt{\frac{r^2\Delta a_x^2 + a_x^2\Delta r^2}{4r^3a_x}}$$

$$= \frac{\sqrt{r^2\Delta a_x^2 + a_x^2\Delta r^2}}{2r\sqrt{r}\sqrt{a_x}} = \frac{\sqrt{r^2\Delta a_x^2 + a_x^2\Delta r^2}}{2r\sqrt{r}\omega\sqrt{r}} = \frac{\sqrt{r^2\Delta a_x^2 + a_x^2\Delta r^2}}{2r^2\omega}$$

- Tämän työn opettajaopiskelijoiden oppimistavoitteet voidaan jakaa TPACK-malleihin:

T= technological, P = pedagogical,
C = content, K = Knowledge

