

Peetu Ojala

# USB-KÄSIJARRUN SUUNNITTELU, MITOITUS JA OHJELMOINTI

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Huhtikuu 2021

## TIIVISTELMÄ

Peetu Ojala: USB-käsijarrun suunnittelu, mitoitus ja ohjelmointi  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma  
Huhtikuu 2021

---

Tässä työssä suunnitellaan ja mitoitetaan USB-käsijarrun toiminnan kannalta tärkeimmät komponentit sekä ohjelmoidaan mittausjärjestelmä käsijarrulle. Lopuksi tehtyjä valintoja verrataan vaihtoehtoihin ratkaisuihin. Työssä esitellään myös käsijarrulle kriittisten komponenttien ja fyysikaalisten ilmiöiden teoriaa.

Teoriaosuudessa pyritään esittelemään käsijarrun toiminnan kannalta tärkeimmät ilmiöt sekä komponentit. Komponentteihin ja ilmiöihin ei pureuduta erityisen syvällisesti, mutta niistä esitellään helposti kyseiseen työhön soveltuvat osat. Teoriaosuuden on tarkoitus helpottaa suunnittelua ja mitoitusta.

Mitoitus, suunnittelu ja ohjelmointiosuudessa pyritään luomaan mahdollisimman hyvä ja todellisia käsijarruja mukaileva tuote. Työssä ei kuitenkaan mitoiteta jokaista komponenttia, mutta käydään läpi toiminnan kannalta tärkeimmät ja mielenkiintoisimmat komponentit. Ohjelmointiosuudessa pureudutaan kahvan paikan mittaukseen. Käsijarrun mittaus tapahtuu Arduino micron sekä potentiometrin avulla, joiden optimointia osuudessa käsitellään.

Työn tarkoituksena on luoda pohja käsijarrulle, jotta sen rakentaminen on mahdollista. Tarkoituksena on myös selvittää mitkä ratkaisut ovat parhaita ja vertailla tehtyjä ratkaisuja seuraavia iteraatioita varten.

Avainsanat: Arduino, potentiometri, mitoitus, jousi, mekatroniikka, sim racing

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

## **ABSTRACT**

Peetu Ojala: Design, programming, and dimensioning of a USB handbrake  
Bachelor's thesis  
Tampere University  
Mechanical Engineering  
April 2021

---

In this bachelor's thesis a USB handbrake is developed. The most important components of the handbrake are designed and dimensioned. A position measuring system for the handle is also designed, dimensioned, and programmed.

Theory about the components and phenomena regarding the handbrake is also explained to help with the development process. Theory about components that are not in the final product is also explained. This is to get a better understanding of which components are the optimal choice for this purpose.

The point of this thesis is to create a foundation for a USB-handbrake to be built. After this thesis it is possible to use the components chosen here to build a functional USB-handbrake.

## **ALKUSANAT**

Tämä työ alkoi henkilökohtaisena harrastusprojektina, mutta muovautui lopulta kandidaatintyöksi. Työ oli erittäin mielenkiintoinen ja toivon siitä olevan hyötyä myös muille.

Kiitos ohjaajalleni Saara Väänäselle, joka antoi hyvää ohjausta työn aikana sekä tarkasti työn. Kiitos myös läheisilleni tuesta työn tekemisen aikana.

Kehoitan lukijaa katsomaan liitteen A ennen työn lukemista, sillä se helpottaa ymmärtämään tekstin kulkua.

Tampereella, 27.04.2021

Peetu Ojala

## SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TYÖN LÄHTÖKOHDAT JA TEORIA .....	2
2.1 Potentiometrit .....	2
2.2 Voima-anturit .....	3
2.3 Rattaat .....	3
2.4 Jouset .....	4
2.5 Taivutus .....	5
2.6 Tasapaino ja voiman jako komponentteihin .....	6
3. AINEISTO JA MENETELMÄT .....	8
3.1 Työn vaiheet .....	8
3.2 Koneensuunnittelun metodiikat .....	9
4. SUUNNITTELU JA MITOITUS .....	10
4.1 Ratasmekanismi .....	10
4.1.1 Välyksen eliminointi .....	10
4.1.2 Rattaiden mitoitus .....	11
4.2 Potentiometri .....	12
4.3 Jousimekanismi .....	13
4.3.1 Jousimekanismin kiinnitys .....	14
4.3.2 Jousen puristuma .....	15
4.4 Kiinnitykset ja pysäytys .....	18
4.5 Akselien mitoitus .....	19
4.6 Käsijarrun ohjelmointi .....	19
5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	22
5.1 Vaihtoehtoisia ratkaisuja .....	22
5.2 Valitut komponentit .....	23
LÄHTEET .....	24
LIITE A .....	26

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnitteluohjelmisto
D	Rataan halkaisija
dx	Jousen puristuma
E	Potentiometrin vertailujännite
e(t)	Potentiometrillä saatava jännite ajanhetkellä $t$
F	Jousen aiheuttama vastavoima
$F_i$	Kappaleeseen kohdistuva voima
$F_{ix}$	Voiman x-suuntainen komponentti
$F_{iy}$	Voiman y-suuntainen komponentti
h	Kappaleen painokeskipisteen ja poikkipinnan reunan välimatka
$I_z$	Neliömomentti
k	Jousivakio
$K_s$	Potentiometrin muuntokerroin
$L_1$	Jousimekanismin ja kahvan horisontaali välimatka lepoasennossa
$L_2$	Kahvan horisontaali välimatka jousirungon alakiinnitykselle puristuksessa
$L_3$	Kahvan horisontaali välimatka pisteeseen ennen puristusta
$L_m$	Palkin pituus
$M_t$	Taivutusjännitys
N	Potentiometrin kääntöalue
n	Varmuuskerroin
$N_1, N_2$	Rattaiden hampaiden lukumäärä
p	Rataan jako
R	Ympyrän säde
r	Akselin säde
$r_1, r_2$	Rattaiden säteet
$R_e$	Materiaalin myötöraja
$r_i$	Voiman etäisyys kappaleesta
$r_s$	Jousirungon alapään kiinnityskorkeus
$W_z$	Taivutusvastus
x	Jousen pään paikanmuutos x-akselilla
$x_1$	Jousen pituus, kun kahva on jännittämättömänä
$x_2$	Jousen pituus, kun kahva on ääriasennossaan
$y_k$	Kahvan pituus/tarttumispisteen matka kääntöakselista
$y_{kp}$	Jousirungon alapään kiinnityskorkeus
$\alpha$	Jousirungon kiinnityskulma
$\beta$	Jousirungon kiinnityskulma kolmion sisällä
$\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$	Rattaiden kiertymät
$\theta$	Kahvan kääntökulma
$\theta_c(t)$	Potentiometrin akselin kääntökulma
$\sigma_r$	Normaalijännitys
$\sigma_{sall}$	Suurin sallittu jännitys palkissa

# 1. JOHDANTO

Sim racingin eli simulaatiokilpa-ajamisen suosio on noussut nopeasti Covid-19 -pandemian myötä. Tämän takia jo valmiiksi kalliiden oheislaitteiden hinta on noussut voimakkaasti viimeisen vuoden aikana. Kuitenkin suurimmat oheislaitteet ovat toiminnoiltaan suhteellisen yksinkertaisia ja niiden valmistus kotona ilman erikoistyökaluja on mahdollista.

Tämän työn tarkoituksena on suunnitella, mitoittaa ja ohjelmoida simulaatioajamiseen soveltuva USB-käsijarru. Työssä mitoitetaan käsijarrun toiminnan kannalta kriittisimmät komponentit ja esitellään perusteluita valituille toimintamekanismeille. Työssä pureudutaan myös siihen, kuinka kahvan asemaa mitataan ja kuinka mitattu data lähetetään tietokoneelle.

Työn 2. luvussa esitellään käsijarrun komponentteihin liittyviä fysikaalisia ilmiöitä ja ominaisuuksia. Luvussa 3 esitellään käsijarrun työn lähtökohdat sekä esitellään suunnittelu-prosessissa tarvittavia koneensuunnittelun metodiikkoja. Tämän jälkeen luvussa 4 pureudutaan käsijarrun komponenttien suunnitteluun, mitoitukseen ja ohjelmointiin. Luvussa 5 esitellään vaihtoehtoisia ratkaisuja jo valituille toimintamekanismeille ja kootaan yhteen työstä saadut tulokset.

Tuotteen tai systeemin suunnittelulle on järkevää asettaa vaatimuksia. Faisendier et.al [1] määrittelee nämä vaatimukset rajoituksina ja toimintoina, mitkä tuotteella tai systeemillä halutaan olevan. Tässä projektissa noudatetaan seuraavia vaatimuksia:

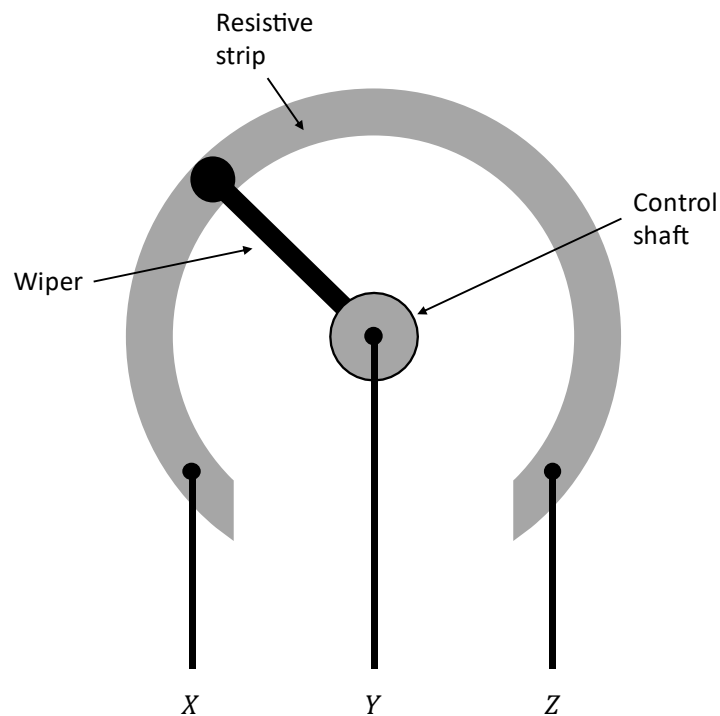
- Käsijarrun tulee kestää sille tuotuja voimia myötämättä.
- Kitkan täytyy olla mahdollisimman pieni mekanismeissa.
- Kahvan liikkeen tulee olla n.  $20^\circ$ .
- Kahvan palautuminen tulee olla nopeaa, mutta hallittua.
- Käden kokema vastus tulee olla n.  $2,5 \text{ kg}$ .

## 2. TYÖN LÄHTÖKOHDAT JA TEORIA

Tässä luvussa käsitellään käsijarrun toimintaperiaatteille tärkeitä komponentteja kuten potentiometrejä, rattaita ja jousia. Komponenteille esitellään niiden toimintaperiaatteita sekä fysiikkaa. Jotkin luvussa esitellyt komponentit ovat toisilleen vaihtoehtoisia eivätkä tule osaksi valmista järjestelmää, mutta on järkevää esitellä ne ratkaisujen vertailua varten.

### 2.1 Potentiometrit

Potentiometri toimii elektromeekaanisena muuntajana, joka muuttaa mekaanista energiaa sähköenergiaksi. Potentiometriin kuljetettava mekaaninen liike voi olla lineaarista tai pyörivää liikettä. Kun potentiometrin paikallaan olevien kontaktien yli kytketään jänniteero, voidaan liikkuvasta kontaktista mitata jännite, joka riippuu liikkuvan kontaktin paikasta. [2, s. 259-265] Potentiometri on siis säätövastus, jossa vastuksen suuruutta voidaan säätää kääntämällä tai liu'uttamalla sen akselia. Tämä yhteys paikan ja ulostulojännitteen välillä voi olla joko lineaarista tai logaritmistä. [3, s. 75-78]



**Kuva 1.** Potentiometrin toimintaperiaate. Kontaktit *x* ja *z* pysyvät paikoillaan, kun taas *y* pääsee pyörimään vapaasti [20].



Kun kuvassa 1 olevien, paikallaan pysyvien kontaktien  $x$  ja  $z$  yli asetetaan jännite, voidaan akselin paikkaa mitata. Akselin paikka  $\theta_c$  on verrannollinen kontaktista  $Y$  saatavaan jännitteeseen  $e(t)$ , kun kyse on pyörimisliikkeestä. Tätä yhteyttä kuvaa yhtälö

$$e(t) = K_s \theta_c(t), \quad (1)$$

jossa  $K_s$  on muuntokerroin ja  $\theta_c(t)$  akselin kääntökulma ajanhetkellä  $t$ . Kun potentiometri pääsee kääntymään  $N$  kertaa ja potentiometrin kontaktien yli oleva vertailujännite on  $E$  seuraa että

$$K_s = \frac{E}{2\pi N}, \quad (2)$$

jossa  $2\pi N$  on potentiometrin akselin kääntöalue radiaaneissa. [2, s. 259-265]

## 2.2 Voima-anturit

Load cellit ovat voima-antureita, jotka mittaavat niihin kohdistuvaa mekaanista voimaa. Ne koostuvat jousielementistä sekä venymäliuskasta. Kun load cellin jousielementtiin kohdistetaan voimaa, se muuttuu elastisesti. Tämä elastinen muutos on joko venymää tai puristumaa. [4, 5, s. 15-19]

Load cellissä tapahtuva muodonmuutos voidaan muuttaa resistanssin muutokseksi, koska elastista muutosta mittaavalla venymäliuskalla on yhteys resistanssin sekä venymän välillä [4, 5, s. 15-19]. Jotta load cell voi toimia, tulee venymän olla käyttökohteessa täysin elastista. Mikäli venymä on plastista, kärsii jousielementti pysyvää muodonmuutosta, joka vääristää seuraavia mittauksia. [5, s. 15-19]

## 2.3 Rattaat

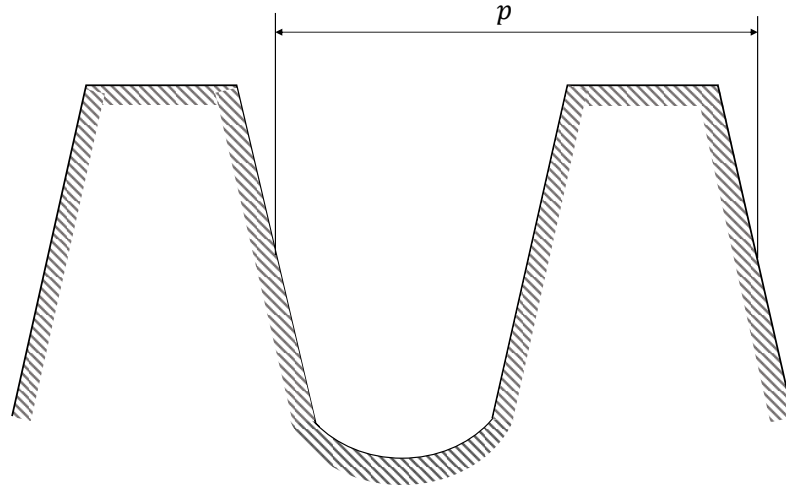
Rattaiden tehtävä on siirtää liikettä. Mikäli oletetaan, että rattaat eivät pääse liukumaan toisiinsa nähden, liikkuu jokainen piste molemmilla rattailta saman lineaarisen matkan. Tästä seuraa, että

$$\Delta\theta_1 r_1 = \Delta\theta_2 r_2, \quad (3)$$

jossa  $\Delta\theta$  on rattaan kääntymä ja  $r$  rattaan säde. Tästä voidaan johtaa välityssuhde  $N_v$ , joka on muotoa

$$N_v = \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{N_2}{N_1}, \quad (4)$$

jossa  $N_1$  ja  $N_2$  ovat rattaiden 1 ja 2 hampaiden lukumäärä. [6, s. 133-137]



**Kuva 2.** *Hammasrataan jako [21].*

Suunniteltaessa rattaita on hampaiden profiili tärkeässä osassa prosessia. Kuvassa 2 esitelty hammasjako  $p$ , on järkevää määrittellä ympyrällä. Hammasjako kuvaa etäisyyttä hampaan pisteestä seuraavan hampaan vastaavaan pisteeseen. Hammasjako voidaan määrittellä kaavalla

$$p = \frac{\pi D}{N}, \quad (5)$$

jossa  $D$  on rattaan halkaisija ja  $N$  on hampaiden lukumäärä. [7, s. 1052-1054]

## 2.4 Jouset

Jouset varastoivat mekaanista energiaa elastisen muodonmuutoksen avulla. Jouseen varastoitunut energia voidaan myöhemmin vapauttaa, jolloin jousi palautuu takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Jouset voivat olla lineaarisia tai radiaalisia. Jousia voidaan valmistaa mistä tahansa materiaalista, mutta ideaalimateriaalilla on korkea myötöpiste ja alhainen kimmokerroin. [8, s. 225]

Jousta venytettäessä tai puristettaessa voidaan huomata sen noudattavan Hooken lakia. Hooken laki kertoo tilanteesta, jossa jousi kiinnitetään tukevasti toisesta päästään, mutta toisen pään annetaan liikkua vapaasti. Jousen läpi kulkee x-akseli, ja jousen vapaaseen

päähän kohdistetaan voima. Voiman suuruus on suoraa verrannollinen jousen vapaan pään paikan muutokseen  $x$  ja jousivakioon  $k$ . Voima  $F$  saadaan selville kaavasta

$$F = -kx, \quad (6)$$

jossa miinusmerkki kuvaa jousen aiheuttamaa vastustavaa voimaa, joka on yhtä suuri kuin jousen puristamiseen tarvittava voima kohdassa  $x$ . [9, s. 531-532]

## 2.5 Taivutus

Palkki saattaa taipua, mikäli siihen kohdistetaan voimaa [10, s. 165-179]. Ääritilanteessa tämä taipuma on niin suurta, että palkki myötää tai taipuma estää palkilta halutun toiminnan. Jotta ääritilanteita ei pääse syntymään, on järkevää estää palkin taipuminen tässä sovelluskohteessa.

Materiaalin myötörajan ollessa  $R_e$  on palkissa esiintyvä suurin sallittu jännitys  $\sigma_{tsall}$  muotoa

$$\sigma_{tsall} = \frac{R_e}{n}, \quad (7)$$

jossa  $n$  on haluttu varmuuskerroin [10, s. 165-179].

Tätä tietoa voidaan hyödyntää laskettaessa kestääkö jokin palkki taivutusta myötämättä.

Tätä taivutusvoiman vastusta kuvaa taivutusvastus  $W_z$ , joka toteuttaa yhtälön

$$W_z = \frac{I_z}{h}. \quad (8)$$

Kaavassa (8)  $h$  on painokeskipisteen sekä palkin poikki-pinnan reunan välimatka taivutuksen suuntaisella akselilla ja  $I_z$  on palkin poikki-pinnan neliömomentti. Neliömomentti akselille on muotoa

$$I_z = \frac{\pi r^4}{4}, \quad (9)$$

jossa  $r$  on akselin säde. [10, s. 165-179]

Toisaalta palkin suurimmat jännitykset esiintyvät sen ylä- ja alareunassa. Nämä jännitykset voidaan selvittää kaavalla

$$\sigma_r = \frac{M_t}{W_z}, \quad (10)$$

jossa  $M_t$  on palkkiin kohdistuva taivutusjännitys ja  $\sigma_r$  on palkin reunajännitys. Taivutusjännitys palkin päässä saadaan selville kaavasta

$$M_t = -FL_m, \quad (11)$$

jossa  $F$  on palkkiin nähden kohtisuora voima ja  $L_m$  on palkin pituus. [10, s. 165-179]

Koska suurin jännitys esiintyy kaavan (10) mukaan palkin reunoilla ja kaava (7) kuvaa palkin suurinta sallittua jännitystä, voidaan osoittaa, että

$$\sigma_r = \sigma_{tsall}. \quad (12)$$

Käyttäen tätä yhteyttä on mahdollista selvittää, kestääkö palkki siihen kohdistuvaa jännitystä myötämättä. [10, s. 165-179]

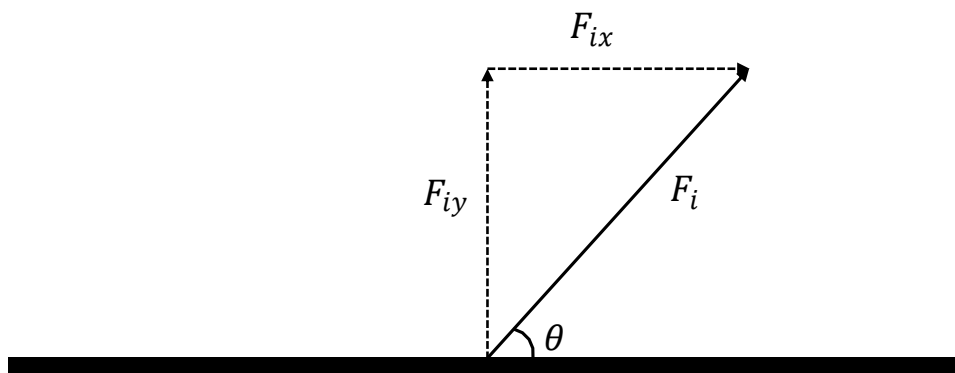
## 2.6 Tasapaino ja voiman jako komponentteihin

Jotta suunnittelu ja mitoitus onnistuisivat mahdollisimman hyvin, tulee ymmärtää sovel-  
luskohteen mekaniikkaa. Koska tässä sovelluskohteessa halutaan jäljitellä käsijarrun  
vastusvoimaa, on voimien tunteminen systeemissä tärkeää.

Mikäli systeemi on tasapainossa, tulee momenttien summan olla nolla. Tämä tasapaino  
voidaan ilmaista yhtälöllä

$$\Sigma M = F_i r_i, \quad (13)$$

jossa  $r_i$  on voiman  $F_i$  kohtisuora etäisyys kappaleesta. [11, s. 39-41]



**Kuva 3.** Voiman jako komponentteihin [11].

Koska voima  $F_i$  ei aina ole kohtisuorassa sen vaikuttamaan kappaleeseen, voidaan  
voima jakaa komponentteihin kuvan 3 mukaisesti. Kuvasta 3 voidaan johtaa yhtälöt

$$F_{ix} = F_i \cos(\theta) \quad (14)$$

$$F_{iy} = F_i \sin(\theta), \quad (15)$$

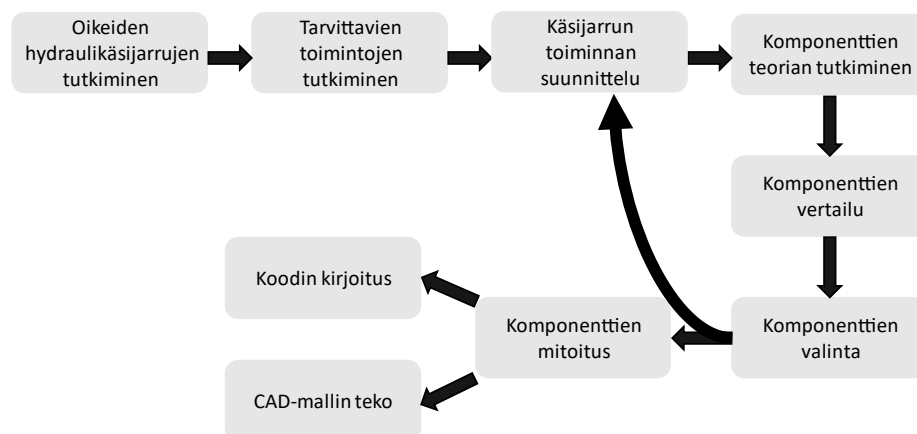
joissa  $F_{ix}$  on kappaleen koordinaatiston x-akselin suuntainen voima ja  $F_{iy}$  on kappaleen koordinaatiston y-akselin suuntainen voima [11, s. 9-10].

## 3. AINEISTO JA MENETELMÄT

Tämän luvun tarkoituksena on taustoittaa työn lähtökohtia ja sen kulkua. Luvussa kuvataan, kuinka työssä on edetty ja mistä lähtökohdista työ on alkanut. Luvussa annetaan myös järjestelmän yleiskuvaus sekä esitellään suunnittelussa käytettyjä metodiikkoja.

### 3.1 Työn vaiheet

Kuten kuvasta 4 nähdään, työn aluksi tutkitaan oikeita hydraulikäsisijarruja ja niiden toimintaperiaatteita. Tarkoituksena on kehittää USB-käsisijaru, joka vastaa riittäväällä tasolla oikean hydraulikäsisijarrun toimintaa ja kykenee kommunikoimaan simulaattorien kanssa. Täten on tärkeää tuntea mm. kuinka vastus esiintyy oikeassa käsisijarrussa, jotta sitä voidaan imitoida tässä työssä.



**Kuva 4.** Vuokaavio projektin työvaiheista.

Työ jatkuu suunnittelemalla käsisijarrun toimintaperiaate sekä tutkimalla mitä komponentteja ja toimintoja USB-käsisijarru tarvitsee. USB-käsisijarrun tärkeimmiksi komponenteiksi osoittautuvat liikkeen siirtäjä, kahvan vastus sekä mittajärjestelmä. On tärkeää tutkia erilaisia vaihtoehtoja näille komponenteille ja siksi työn seuraavassa vaiheessa tutkitaan eri komponenttien teoriaa.

Kun teoriaa on tutkittu, vertaillaan komponentteja kerätyn informaation perusteella ja valitaan otollisimmat komponentit. Otollisimpien komponenttien valitsemisen jälkeen

tarkastellaan aikaan saatua järjestelmää ja palataan tarkentamaan suunnitelmaa sekä kehittämään siihen parannuksia. Kun suunnitelma on saavuttanut hyväksyttävän pisteen ja komponenttien rajoitukset ovat tiedossa, komponentit mitoitetaan.

Komponenttien mitoituksesta ja valitsemisesta siirrytään koodin kirjoittamiseen. Mikrokontrollerina käytetään Arduino micro -piiriä. Myös CAD-malli piirretään komponenttien mitoituksen jälkeen.

## 3.2 Koneensuunnittelun metodiikat

Tässä luvussa esitellään kolme koneensuunnittelun metodiikkaa, joita tuotteen suunnittelussa tullaan noudattamaan. Nämä metodiikat antavat suunnittelulle perusteita sekä helpottavat suunnittelutyötä. Näillä metodiikoilla pyritään estämään suunnitteluvirheitä, jotka johtaisivat huonoon tai käyttökelvottomaan tuotteeseen.

Sensitive direction -periaatteen ideana on muistuttaa suunnittelijaa siitä, että jokainen suunta ei ole yhtä tärkeä. Suunnittelussa tarvitaan tarkkuutta, mutta jotkin suunnat ovat tarkkuuden kannalta toisia tärkeämpiä. Kuitenkaan tarkkuuden kannalta vähemmän tärkeitä suuntia ei saa unohtaa, mutta on syytä asettaa suurempaa huomiota suunnille, joissa laitteen tärkeä liike tapahtuu tai jossa välyksen minimoiminen on tärkeää. [12]

Preload eli esijännitys pyrkii eliminoimaan komponenttien välillä olevia toleranssieroja painamalla komponentteja toisiaan vasten. Erilaisten komponenttien välille syntyy välyksiä, jotka häiritsevät laitteen tarkkuutta ja toimintaa. Tämä ilmiö voidaan huomata esimerkiksi rattaissa. [12]

Stabiilisuus kuvaa systeemin tilaa. Jokainen systeemi on joko stabiili, neutraali tai epästabiili. Systeemin tila voi vaihtua, jos siihen kohdistetaan ulkoista voimaa. Yleisesti halutaan systeemin pysyvän stabiilina, jotta se toimii halutulla ja ennustettavalla tavalla. Stabiilisuus helpottaa suunnittelijaa ajattelemaan systeemin toimintaa ja sitä mikä voi estää sen. [12]

## 4. SUUNNITTELU JA MITOITUS

Tässä luvussa esitellään valitut toimintamekanismit ja mitoitetaan tärkeimmät komponentit liittyen näihin mekanismeihin. Suunnitteluun ja mitoitukseen sovelletaan aikaisemmin esiteltyä teoriaa sekä koneensuunnittelun metodiikkoja.

### 4.1 Ratsmekanismi

Rattaat ovat oleellinen osa sovelluskohdetta, sillä ne mahdollistavat liikkeen siirtämisen kahvasta potentiometrille. Täten niiden mitoitus on liikeratojen kannalta tärkeää. Rattaat valmistetaan 3D-tulostamalla, koska niiden läpi ei kulje suuria voimia.

Rattaiden käyttöön liittyy kuitenkin tässä sovelluskohteessa ongelmia, jotka huomattiin sensitive directions -tarkastelussa. Koska liikkeen suunta vaihtuu kahvan palatessa takaisin alkuasentoonsa, kärsii mekanismi välyksestä. Myös rattaiden koko osoittautui ongelmaksi. Mekanismista tulisi myös todella suuri, mikäli siinä käytettäisiin kokonaisia rattaita. Täten rattaiden geometriaa on syytä muokata.

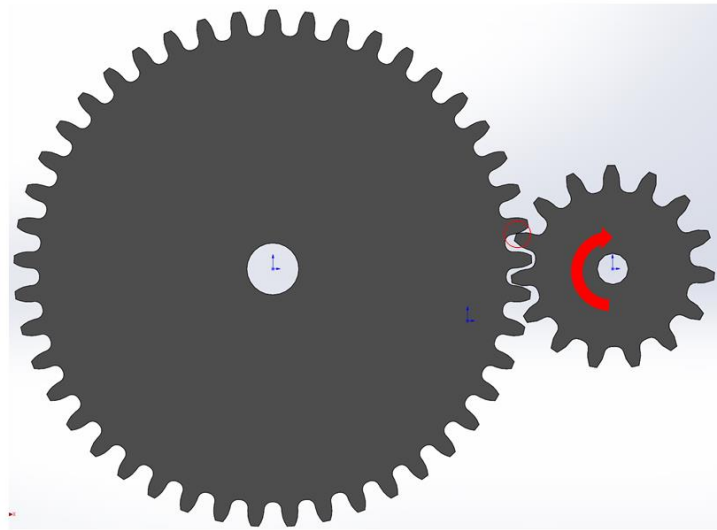
#### 4.1.1 Välyksen eliminointi

Välys johtuu rattaiden hampaiden välillä olevasta tyhjästä tilasta. Tilanteessa, jossa hampaat eivät ole koko ajan kontaktissa havaitaan niiden vapaata liikettä. Tämä paheenee rattaiden kuluessa. Välys voidaan kuitenkin eliminoida tuomalla rattaita yhteen, mutta silloin rattaisiin syntyy suurempia kitkoja. [13, s. 75]

Tässä sovelluskohteessa rattaat eivät pääse kääntymään suuria määriä, eikä niiden läpi kulje suuria voimia. Tämän vuoksi välyksen minimointi onnistuu käyttämällä esijännitystä kierrejousen avulla. Kierrejousi vääntää potentiometrirattaan hampaita hammaskontaktivälin ylimpiä hampaita vasten. Tämä eliminoo välyksen ja varmistaa potentiometrin palautumisen alkuasentoonsa, mutta on käytettävissä vain rattaiden rajatun liikeradan vuoksi. Mikäli rattaat pääsisivät kääntymään monia kierroksia olisi jousen käyttö hankalaa.

Käyttäjän vetäessä kahvasta, hänen ei haluta tuntevan rattaissa olevaa välystä. Myös potentiometrin halutaan aktivoituvan heti käyttäjän tahdosta ja palautuvan varmasti lepoasentoonsa. Täten on järkevää asettaa jousen jännitys siten, että rattaat ovat kontaktissa kuvan 5 mukaisesti.





**Kuva 5.** Rattaiden välyksen eliminointi jousen avulla. Nuoli osoittaa jousen antaman momentin suunnan.

#### 4.1.2 Rattaiden mitoitus

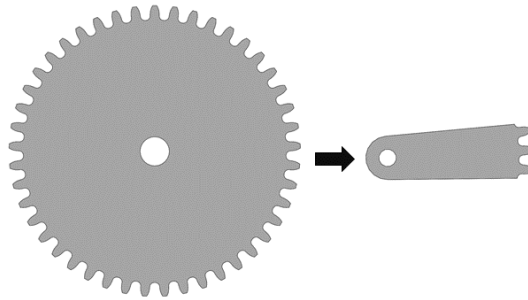
Koska kahvan halutaan kääntyvän  $20^\circ$  ja ratas on kytketty sen akselille, pääsee ratas kääntymään myös  $20^\circ$ . Potentiometrillä halutaan tarkkuuden säilyttämiseksi kääntyvän  $60^\circ$ , joten kaavan (4) mukaan välityssuhde on  $1/3$ .

Oletetaan, että kahvan rattaassa on 90 hammasta. Tästä voidaan kaavan (4) avulla johtaa potentiometrirattaalle 30 hammasta. Oletetaan myös kahvarattaan säteen olevan  $45\text{ mm}$ . Hyödyntäen edelleen kaavaa (4) saadaan potentiometrirattaan säteeksi  $15\text{ mm}$ . Tästä voidaan laskea rattaan jako kaavalla (5). Koska suuremmalle rattaalle on valittu 90 hammasta ja sen halkaisija on  $90\text{ mm}$ , rattaiden jako  $p$  saa arvon  $3,14\text{ cm}$ . Rattaiden ominaisuudet on esitelty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 1. Rattaiden ominaisuudet.

Potentiometrirattaan säde (mm)	15,0
Kahvarattaan säde (mm)	45,0
Rattaiden jako (mm)	3,14

Tilan säästämiseksi rattaat ovat kuvitteellisia ja määräävät vain hampaiden lukumäärän, jaon sekä välityssuhteen. Kuvitteellisten rattaiden profiilista otetaan käyttöön vain tarvittava sektori kuvan 6 mukaisesti.



**Kuva 6.** Rattaasta otettu sektori.

## 4.2 Potentiometri

Käsijarrun mittauslaitteeksi valittiin potentiometri. Potentiometrin käyttö on suunnittelu-kohteessa luontevaa, sillä mitattava liike on pyörimisliikettä. Valitun potentiometrin liike-alue on  $0 - 300^\circ$ . Toisenlainen vaihtoehto voiman tai paikan mittaamiseksi olisi ollut edellä esitelty load cell.

Potentiometrin liike on rajoitettu  $60^\circ$ :seen. Tämä valinta on tehty, jotta kahvan akselin ja potentiometrin välinen välityssuhde saadaan pidettyä mahdollisimman pienenä. Tämä kuitenkin säilyttää potentiometrin analogisuudesta saatavan edun. Mikäli hyödynnettäisiin koko liikerataa, tulisi tarvittavista rattaista todella suuria. Tämän valinnan takia potentiometrin mittaustarkkuus kahvan kääntökulmalle on pienempi, kuin vaihtoehto, jossa liikettä ei ole rajoitettu. Kuitenkin tarkkuus on riittävä.

Vakiosta  $K_s$  johtuen potentiometrin mittausalue on aina sama, eikä sitä voida rajoittaa menettämättä mittaustarkkuutta [2, s. 259-265]. Tässä sovelluskohteessa ei muuteta kyseistä vakiota vaan rajoitetaan potentiometrin fyysistä kääntökulmaa. Tämä ratkaisu olisi voitu kiertää käyttämällä potentiometriä, jonka kääntökulma on  $60^\circ$ . Tällaisten potentiometriä löytäminen on kuitenkin hankalaa ja kalliimpaa, kuin tavallisen  $300^\circ$ :n potentiometrin.

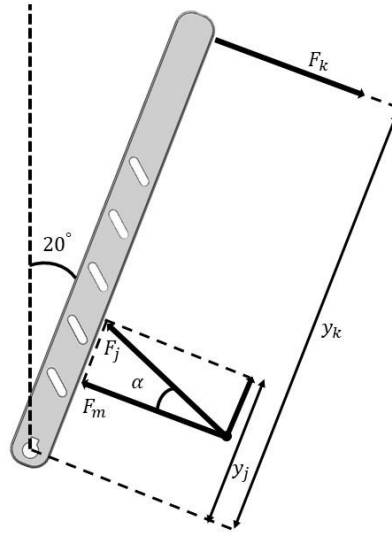
### 4.3 Jousimekanismi

Jousirungoksi valittiin kuvassa 7 esitelty ratkaisu. Koska tarkoitus on kehittää mahdollisimman hyvä kopio oikean elämän hydraulikäsijarrusta, päädyttiin suunnittelussa oikeaa elämää mukailevaan ratkaisuun. Tässä ratkaisussa hydraulinen vastus on korvattu jousivastuksella. Myös stabiilisuuden säilyminen on tärkeää. Tästä syystä jousi on asetettu suurempaan kulmaan, jotta se ei pääse painettaessa kääntymään vaakatason yli ja lukkiutu väärälle puolelle.



*Kuva 7. Jousirungon konseptikuva.*

Jotta valittaisiin oikeat komponentit, on tärkeää tuntea kättä vastustavan jousivoiman suuruus sekä jousen puristuma. Kun jousimekanismi vastaa kuvassa 7 esitettyä mallia, voidaan piirtää vapaakappalekuva, joka on esitelty alla olevassa kuvassa.



**Kuva 8.** Kahvan vapaakappalekuva.

### 4.3.1 Jousimekanismin kiinnitys

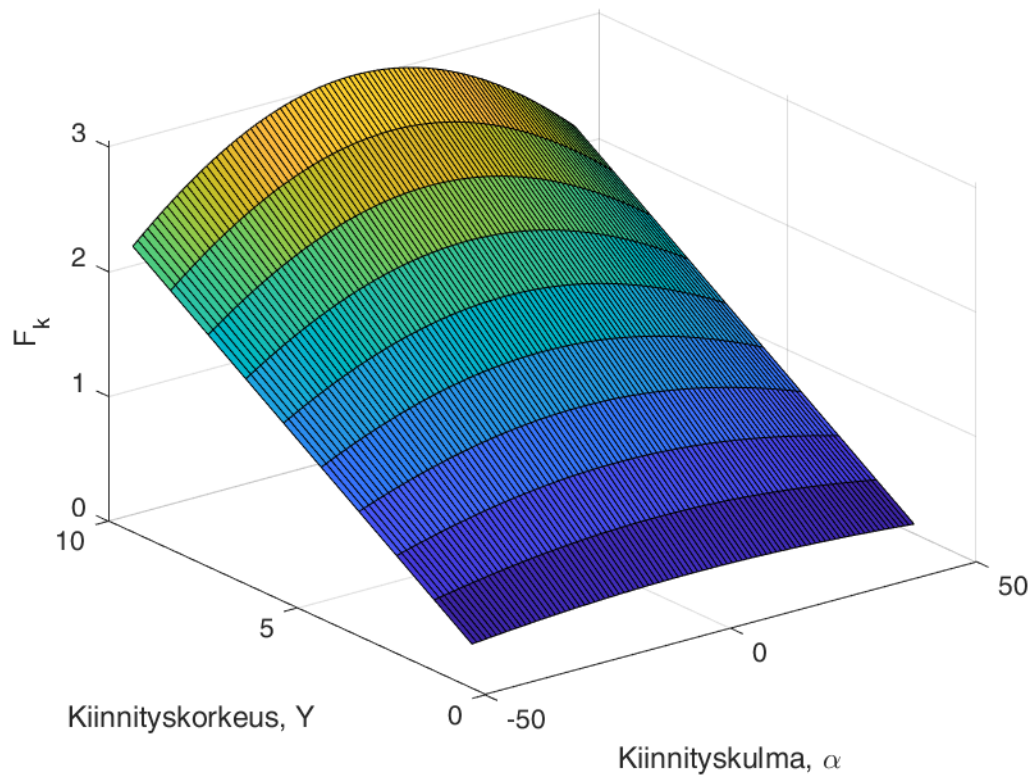
Vapaakappalekuva tarkastellessa huomataan, että jousimekanismin kulmalla sekä sen kiinnityskorkeudella kahvaan on vaikutus vastustavaan voimaan. Voimakuviosta voidaan johtaa tasapainoyhtälö kaavan (13) avulla.

Käden kokema kohtisuora voima on  $F_k$ ,  $y_k$  on käden etäisyys pyörimisakselista,  $F_m$  on jousimekanismin aiheuttama kohtisuora voima ja  $y_j$  on jousen kiinnityksen etäisyys pyörimisakselista. Voidaan todeta, että  $F_m$  riippuu jousen kulmasta ja jousen antamasta voimasta kaavan (14) mukaan. Jousi aiheuttaa puristuessaan voimaa kaavan (6) mukaisesti. Tähän sovellukseen valitaan katalogista jousi, jolla on seuraavassa taulukossa esitellyt ominaisuudet.

Taulukko 2. Valitun jousen ominaisuudet.

<b>Pituus (mm)</b>	50,80
<b>Maksimipuristuma (mm)</b>	30,68
<b>Jousivakio (N/mm)</b>	2,43
<b>Maksimivoima (N)</b>	74,55

Jousen maksimivoimaa käyttäen voidaan piirtää kaavojen (13) ja (14) avulla kuvaaja, joka on esitelty kuvassa 9. Kuvaajan akseleina ovat jousimekanismin kääntökulma, kiinnityskorkeus, sekä käden havaitsema maksimivoima  $F_k$ .



**Kuva 9.** Käden kokema voima jousen kiinnityskorkeuden ja kiinnityskulman funktiona.

Kun käden kokema kuorma on 2,5 kg, kuvan 9 kuvaajasta saadaan jousen kiinnitykselle seuraavassa taulukossa esitellyt arvot.

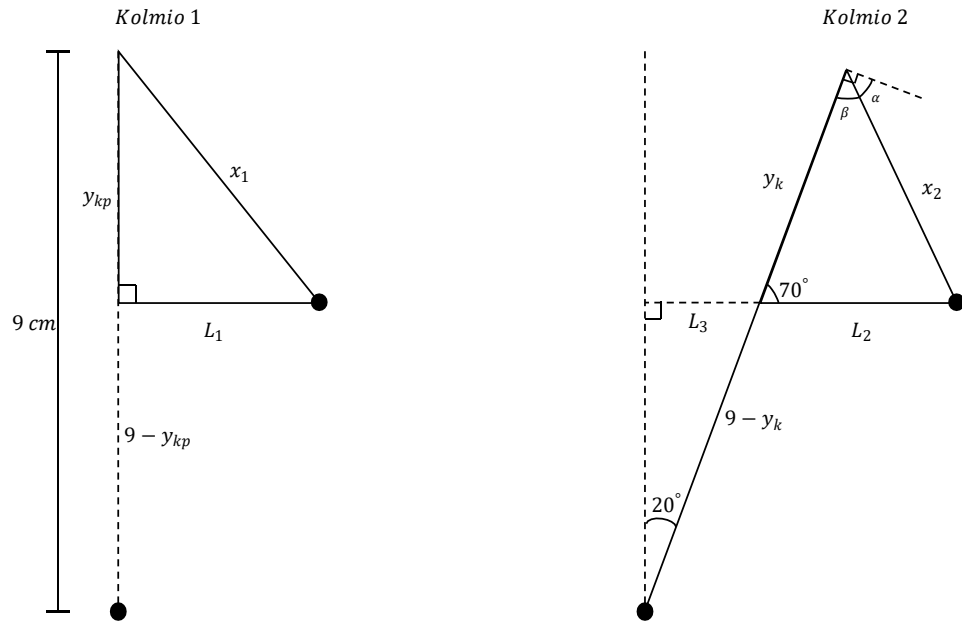
Taulukko 3. Jousen kiinnityskorkeus ja kiinnityskulma, kun käden kokema vastuskuorma on 2,5 kg.

Kiinnityskorkeus (mm)	90
Kiinnityskulma (°)	24

### 4.3.2 Jousen puristuma

Jousen puristus pituus on myös tärkeä selvittää, jotta kahva pääsee kääntymään halutun astemäärän. Jouselle voidaan asettaa myös esijännitys, jotta mekanismin ollessaan ääri-asennossaan saadaan siltä haluttu voima. Jousella on mekanismissa kaksi ääripituutta.

Minimipituus, kun se on puristettu täysin kasaan ja maksimipituus, kun kahva on alkua-asennossaan. Molemmista tilanteista voidaan piirtää kuvio, jotka ovat esiteltynä kuvassa 10.



**Kuva 10.** Kahvan ja jousen asento. Kolmiossa 1 kahva on jännittämättömänä, kun taas kolmiossa 2 kahva on ääriasennossaan.

Yllä olevan kuvan perusteella jousen pituuden muutos  $dx$  on

$$dx = x_1 - x_2, \quad (16)$$

jossa  $x_1$  on jousen pituus lepoasennossa ja  $x_2$  on jousen pituus puristettuna ääriasentoon. Koska kolmio 1 on suorakulmainen, voidaan osoittaa, että

$$x_1 = \sqrt{y_{kp}^2 + L_1^2}, \quad (17)$$

jossa  $L_1$  on kahvan pyörimispisteen ja jousimekanismin pyörimispisteen horisontaali välimatka ja  $y_{kp}$  on jousimekanismin alapään ja yläpään korkeusero pystyasennossa.

Koska kahva pyörii ympyräradalla, on  $y_{kp}$  suurempi kuin  $y_k$ . Korkeus  $y_{kp}$  voidaan selvittää segmentin avulla. Korkeus ympyrän keskipisteestä segmenttiviivalle on muotoa

$$r_s = R \cos(\theta), \quad (18)$$

jossa  $r_s$  on jousirunkokiinnityksen korkeus,  $R$  on ympyrän säde ja  $\theta$  on kahvan käänkökulma [14]. Koska säteen tiedetään olevan  $9 - y_k$  ja  $r_s$ :n tiedetään olevan  $9 - y_{kp}$ , seuraavaa, että

$$9 - y_{kp} = (9 - y_k) \cos(20^\circ). \quad (19)$$

Kaavasta (19) voidaan ratkaista  $y_k$ , joka on kolmiossa 2 esiintyvä pituus. Kolmiosta 2 voidaan sinilauseetta hyväksikäyttäen johtaa, että

$$\frac{L_2}{\sin(\beta)} = \frac{x_2}{\sin(70^\circ)} = \frac{y_k}{\sin(180^\circ - 70^\circ - \beta)}. \quad (20)$$

Kuvasta 10 voidaan myös päätellä pituus  $L_1$ . Pituus  $L_1$  on kuvan mukaan

$$L_1 = L_2 + L_3. \quad (21)$$

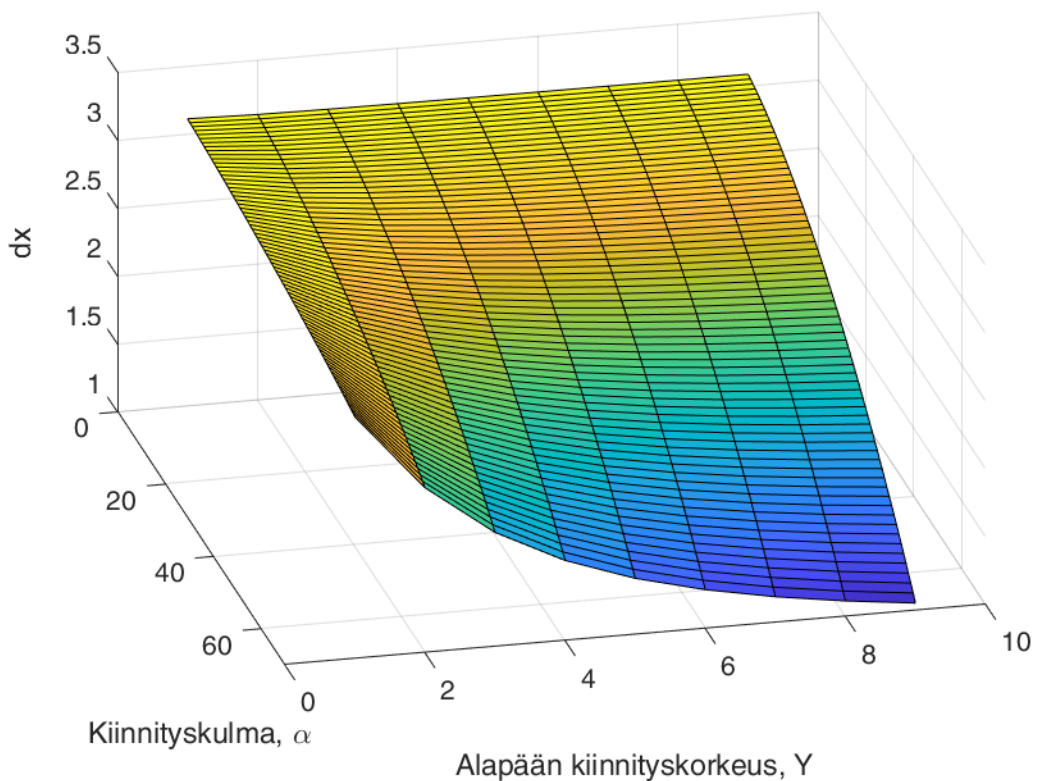
Pituus  $L_3$  voidaan myös selvittää kuvasta 10.  $L_3$  on kuvan mukaan muotoa

$$L_3 = \sin(20^\circ)(9 - y_k), \quad (22)$$

kun jousirungon yläpään kiinnityskorkeudeksi on määritetty  $9 \text{ cm}$ . Koska on järkevää käyttää samaa kulmaa laskuissa, kuin kahvan vapaakappalekuvassa, määritellään että

$$\beta = 90^\circ - \alpha. \quad (23)$$

Edellä olevassa kaavassa  $\beta$  on kolmion sisällä esiintyvä kulma kuvan 10 mukaisesti ja  $\alpha$  on kuvassa 8 esiintyvä kulma. Saatujen yhtälöiden perusteella voidaan piirtää kuvaaja, jossa x-akselina on kiinnityskulma  $\alpha$ , y-akselina kuvan 10 kolmiossa 1 esiintyvä korkeus  $y_{kp}$  ja z-akselina jousen puristuma  $dx$ . Kuvaaja on esitelty kuvassa 11.



**Kuva 11.** Jousen puristuma  $dx$  kiinnityskulman ja jousirungon alapään kiinnityskorkeuden funktiona.

Koska jousen kiinnityskulma on jo määritetty ja  $y_{kp}$ :n halutaan olevan 50 mm, voidaan laskea jousen puristuma. Puristuman tulee olla pienempi kuin taulukossa 2 esitelty jousen maksimipuristuma. Kuvan 11 kuvaajasta saadaan halutuilla arvoilla seuraavassa taulukossa esitelty piste.

Taulukko 4. *Jousirungon maksimipuristuma ja siihen vaikuttavat arvot.*

<b>Kiinnityskulma (°)</b>	24
<b>Alapään kiinnityskorkeus (mm)</b>	50
<b>Puristuma (mm)</b>	27,59

Kun jousen kiinnityskulma  $\alpha$  on 24° ja kiinnityskorkeus  $y_{kp}$  on 50 mm, jousen puristuma  $dx$  on 27,59 mm.

#### 4.4 Kiinnitykset ja pysäytys

Kitkan minimoiminen on tärkeää tässä sovelluskohteessa, jotta kädelle tuleva voima voidaan mitoittaa mahdollisimman tarkasti. Kiinnitysten tulee olla riittävän kestäviä, jotta ne kestävät niihin kohdistuvat voimat. Koko laitteesta ei ole kuitenkaan tarvetta poistaa kaikkea väljyyttä, mutta laitteen toimivuus ja stabiilisuuden säilyminen on taattava.

Jotta kitka voidaan minimoida, on akselit järkevää asettaa laakereille. Laakerien koko määräytyy mitoitettavien akselien mukaan. Laakereita tarvitaan neljä kappaletta.

Rattaat kiinnitetään akseleihin tappien avulla. Tapit liittävät rattaat ja akselit toisiinsa ahdistusovitteella. Akselit kiinnittyvät laakereihin muotosulkeisesti.

Rungon eri osat kiinnitetään yhteen muotosulkeisesti ja pienillä pulteilla. Laakerit kiinnitetään runkoon ahdistusovitteella. Rungon seinämiin porataan syventymät, joihin laakerit voidaan kiinnittää. Laakerien tuenta voidaan jättää vähemmälle huomiolle sensitive directions -periaatteen mukaisesti, sillä niihin ei kohdistu suuria aksiaalisia voimia, voimakuvion mukaan.

Jousimekanismin annetaan pyöriä vapaasti akselinsa ympäri, mutta sen ei anneta liikkua akselinsa pituussuunnassa, jotta mekanismi ei jumitu. Se liitetään kahvaan pallonivelillä.

Jotta jousimekanismia ei hajoteta ja akseleita voidaan keventää, asetetaan mekanismin pysäytyspiste kahvan akselille. Painettaessa kahva ääriasentoon kahvan akselilla tulee



olla jokin muotosulkeisesti voimaa vastaanottava geometria. Tämä geometria ottaa voiman vastaan ennen, kuin jousi on täysin puristunut kokoonsa. Näin jousimekanismin akselille ei tuoda suurempia taivutusvoimia, kuin jousi kykenee tuottamaan ja ne voidaan pitää kevyenä.

## 4.5 Akselien mitoitus

Kokoonpanossa on kaksi akselia. Kahvan akseli, jossa ovat kahva ja suurempi ratas sekä jousimekanismin akseli. Kahvan akseliin kohdistuvat voimat ovat vääntöjä, mutta jousimekanismin kiinnitysakseli joutuu vastustamaan taivutusta. Koska jousimekanismin akseli on rasitetuin akseli kokoonpanossa, on järkevää mitoittaa tämä akseli ja käyttää samaa akselipaksuutta myös muualla.

Yksinkertaistetaan jousimekanismin akselin tilanne sellaiseksi, jossa kaksi toisesta päästään liikkumattomasti tuettua palkkia vastustavat  $8\text{ kg}$ :n kuormaa. Oletetaan palkkien pituudeksi  $50\text{ mm}$ , materiaaliksi S235JRC+C -teräs ja kuorman olevan puhtaasti taivuttavaa. Lähtötiedoista voimme kaavan (8) avulla selvittää, kuinka suuren halkaisijan palkki kestää  $8\text{ kg}$ :n kuormaa myötämättä.

Kaavan (8) mukaan palkki kestää  $4\text{ kg}$ :n kuorman myötämättä varmuuskertoimella 2, jos sen säde on suurempi kuin  $2,77\text{ mm}$ . Koska akseli on katkaistu keskeltä ja tuettu myös toisesta päästään, kestävät katkaistut akselit yhdessä  $8\text{ kg}$ :n kuorman.

## 4.6 Käsijarrun ohjelmointi

Käsijarrun kahvan paikkaa mitataan hyödyntäen potentiometriä sekä Arduino micro -mikrokontrolleria. Tässä luvussa esitellään Arduinolle kirjoitettu koodi, jolla potentiometrin kääntökulmaa mitataan ja informaatio lähetetään tietokoneelle sekä simulaattorille.

Koodin tarkoituksena on mitata potentiometrin paikkaa ja lähettää signaali tietokoneelle. Koodissa rajoitetaan myös luvussa 4.2 käsitelty potentiometrin liikealue. Koodissa hyödynnetään Arduinon Joystick-kirjastoa, joka on saatavilla ilmaiseksi [15].

Joystick-kirjasto mahdollistaa erilaisten mittausdatojen lähettämisen Arduinon kautta tietokoneeseen siten, että tietokone tunnistaa lähetetyn datan Joystick-ohjaimen eri ulostuloina [15]. Kirjasto tarjoaa monia erilaisia vaihtoehtoja, mutta tässä sovelluksessa käytetään Throttle-toimintoja.

```

2 // Code created by Peetu Ojala
2 // 01/2021
4 #include <Joystick.h>
6 //Create the Joystick
  Joystick_ Joystick;
8
10 // The potentiometer has 300 degrees of rotation for 1023 steps
  float stepsInDegree = 3.41;
12 // Maximum physical rotation of the potentiometer in degrees
  float maxRotation = 60;
14
16 // Value of steps for 60 degrees of rotation
  float cutOffValue = maxRotation*stepsInDegree;
18 void setup()
  {
20 // Set the autosendstate to false so the Arduino is not always
  sending information
22   Joystick.begin(false);
24 //Setting the range of values the throttle can have, maximum
  being 60 degrees of rotation
26   Joystick.setThrottleRange(0, cutOffValue);
28   Serial.begin(9600);
30
32   }
34 // Value of the A0 pin
  int pinValue = 0;
36
38 void loop()
  {
40   pinValue = analogRead(A0);
42   if (pinValue <= cutOffValue){
     Joystick.setThrottle(pinValue);
44   }
     Joystick.sendState();
  }

```

**Ohjelma 1.** Potentiometrin mittaus ja datan lähetys tietokoneelle.

Koodin alussa määritellään kirjaston dokumentaation mukaan tarvittavat muuttujat sekä aloitetaan tiettyjen funktioiden ajaminen. Joystick-olion automaattidatalähetys asetetaan pois päältä koodin alussa, koska lähetystä halutaan rajoittaa. Alussa asetetaan myös potentiometrin kierokulmalle  $\theta_c$  arvoväli. Tämä arvoväli vastaa potentiometrin käännöstä

0 – 60°:n välillä. Tämä arvoväli mahdollistaa sen, että signaalin maksimiarvo rekisteröityy 60°, eikä 300°:ssa [15].

Arduino pystyy mittaamaan analogisesta sisääntulostaan arvoja vain siten, että se jakaa mittausdata-alueen 0 ja 1023 välille [16]. Koska potentiometrin rotaatio on 300° ja se halutaan rajoittaa 60°:seen, menetetään mittaustarkkuutta kahvan liikkeestä. Potentiometriin kytketään 5V:n vertailujännite, jonka muutosta Arduino mittaa [17]. Koska potentiometrin liike rajoitetaan 60°:seen, rajoitetaan jännitte välille 0 – 1V. Tämän takia mitauksessa on käytössä vain 204 diskreettiä pistettä.

Kun loop on aloitettu, mittaa Arduino jokaisella kierroksella analogisen sisääntulonsa. Tämä sisääntulo tallennetaan pinValue-muuttujaan ja sitä verrataan cutOffValue-muuttujaan. CutOffValue-muuttujan arvo on 204. Tämän arvon ylitys tarkoittaa, että potentiometri on ylittänyt 60°:een rotaation. Mikäli arvoa ei ole ylitetty, asetetaan Joystick-oliolle arvoksi tämänhetkinen diskreetti arvo sisääntulosta. Lopuksi Joystick-olio lähettää tämän arvon signaalina tietokoneelle. Mikäli sisääntulosta saatava arvo on korkeampi kuin 204, lähetetään arvo 204 uudestaan tietokoneelle. Arvo 204 tarkoittaa jarrun olevan pohjassa.

## 5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä luvussa käsitellään vaihtoehtoisia ratkaisuja valituille komponenteille ja toiminta-periaatteille sekä esitellään yhteenveto valitusta komponenteista. Komponenttien esittely ja vertailu on tärkeää, jotta voidaan varmistua siitä, että on päädytty järkevimpiin ratkaisuihin olosuhteisiin nähden.

### 5.1 Vaihtoehtoisia ratkaisuja

Liikkeen siirtämisessä kahvalta potentiometrille olisi rattaiden sijasta olisi voitu käyttää mm. hammastankoa ja ratasta tai hihnaa ja väkipyöriä. Kuitenkin hihna ja väkipyörä olisivat vaatineet monimutkaisemman 3D-tulostettavan rakenteen sekä monimutkaistanut käsijarrun rakennetta hihnan jännitysmekanismeilla. Hammastanko olisi ollut hyvä vaihtoehtoinen tapa kuljettaa liikettä kahvan akselilta potentiometrille, mutta sen koko olisi vaatinut enemmän optimointia. Rattaat ovat myös luonnollisempi valinta, koska siirrettävä liike on pyörivää, eikä sitä ole tarvetta muuttaa lineaariseksi. Tämä ratkaisu olisi tuonut myös lisää osia ja kompleksisuutta verrattuna rattaisiin.

Potentiometrin sijaan olisi ollut järkevämpää, mutta monimutkaisempaa käyttää load celliä. Load cellin käyttö olisi vaatinut enemmän elektroniikkaa, mutta sen avulla olisi ollut mahdollista mitata sensorille tuotua voimaa [18]. Näin olisi saatu aikaan oikeaa elämää tarkemmin mukaileva mittaus. Oikeissa kilpa-autoissa jarrutusvoima kasvaa suhteessa jalan tuottamaan paineeseen, eikä kahvan liikematkkaan [19]. Täten mittaus vain kahvan liikkeestä on huonompi, mutta halvempi ja riittävä vaihtoehto.

Suora jousirunko on kömpelö ja tilaa vievä ratkaisu. Jousimekanismin rungon rakentaminen olisi voitu välttää mm. kierrejousella. Kuitenkin tutkittaessa oikeita hydraulikäsijarruja huomataan, että niissä vastus ei ole radiaalista. Jotta käsijarru mukailisi oikeaa elämää mahdollisimman tarkasti, päädyttiin rungolliseen ratkaisuun. Kuitenkin oikeissa hydraulikäsijarruissa, vastus syntyy hydraulipaineesta. Tämän ominaisuuden hyödyntäminen tässä sovelluskohteessa olisi ollut kallista ja vaatinut paljon erikoiskomponentteja. Myös mahdollisuus hydraulinesteen vuodoille olisi ollut mahdollinen ja saattanut aiheuttaa vaaratilanteita.

## 5.2 Valitut komponentit

Koska käsijarru tulee rakentaa helposti saatavilla olevista komponenteista, on valitut valmiskomponentit saatavilla rautakaupoista ja elektroniikkaliikkeistä. Muut erikoiskomponentit ovat valmistettavissa Tampereen yliopiston Fablabissa.

Akselin säteeksi määriteltiin mitoituksessa  $2,77\text{ mm}$ , joten akseliksi valittiin pyörötanko, jonka halkaisija on  $6\text{ mm}$ . Tankoon kiinnitettävät rattaat 3D-tulostetaan Tampereen yliopiston Fablabissa käyttäen "Markforged Tough nylon" – materiaalia. Käsijarrun runko valmistetaan  $2\text{ mm}$  paksusta teräslevystä.

Jousimekanismiin valittiin jousi, jonka vapaa pituus on  $50,8\text{ mm}$  ja puristuma on  $30,68\text{ mm}$ . Täydessä puristuksessa jousesta saadaan  $74,55\text{ N}$  voimaa. Kuitenkaan tätä koko voimaa ei päästä hyödyntämään, koska jousia ei voida jännittää äärimmilleen pysäytyksen epätarkkuuden takia. Jousimekanismin materiaalina voidaan käyttää joko alumiinia tai se voidaan 3D-tulostaa.

Käsijarru kytketään tietokoneeseen Arduinon USB-portin avulla. Arduinoon kytkettäväksi potentiometriksi valittiin  $300^\circ$ :n yksiterminaalinen potentiometri, jossa on rihloitettu akseli. Potentiometrin liike rajoitettiin  $60^\circ$ :seen.

# LÄHTEET

- [1] Faisandier A, Roedler, Turner, Adcock, Sofer., System Requirements, 2020, Saatavilla: [https://www.sebokwiki.org/wiki/System\\_Requirements](https://www.sebokwiki.org/wiki/System_Requirements), Viitattu:24.02.2021.
- [2] Dr FG, Dr. Benjamin C. Kuo., SENSORS AND ENCODERS IN CONTROL SYSTEMS, McGraw-Hill Education, 2017, s. 259-265.
- [3] Elliott BS., ELECTRICAL CONTROLS, McGraw-Hill Education, 2007, s. 75-78.
- [4] KIM N, LEE B., Stack structured hybrid load cell for a high-stroke system, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing ,2019, s. JAMDSM0029.
- [5] I. Muller, R. M. de Brito, C. E. Pereira, V. Brusamarello., Load cells in force sensing analysis -- theory and a novel application, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine 2010s. 15-19.
- [6] Cetinkunt S., Mechatronics with Experiments, John Wiley & Sons, Incorporated, 2015, s. 133-137.
- [7] Mobley RK., Plant engineer's handbook, Butterworth-Heinemann, 2001, s. 1052-1054.
- [8] Childs PRN., Mechanical design, Butterworth-Heinemann, 2004, s. 225.
- [9] Shukla RK., Mechanics, New Age International Ltd, 2006, s. 531-532.
- [10] Salmi T, Pajunen S., Lujuusoppi, Pressus, 2010, s. 165-179.
- [11] Hall AS, Archer FE, Gilbert RI., Engineering statics, UNSW Press, 1999, s. 39-41.
- [12] Slocum A., FUNdaMENTALS of Design 2008.
- [13] Miller MR, Miller R., Drives, McGraw-Hill Education, 2017, s. 75.
- [14] Weisstein E., Circular Segment, 2021, Saatavilla: <https://mathworld.wolfram.com/CircularSegment.html>, Viitattu: 13.03.2021.
- [15] Matthew Heironimus, Stéphane Lepin, per1234, e-bonner., Arduino Joystick library 2020, Aug.20, Viitattu: 10.02.2021
- [16] , Arduino reference, Saatavilla: <https://www.arduino.cc/reference/en/>, Viitattu: 11.02.2021.
- [17] , Reading a Potentiometer (analog input), Saatavilla: <https://www.arduino.cc/en/tutorial/potentiometer>, Viitattu: 02.02.2021.

[18] electropeak. , Digital Force Gauge & Weight Scale w/ Loadcell & Arduino, 2019, Saatavilla: <https://create.arduino.cc/projecthub/electropeak/digital-force-gauge-weight-scale-w-loadcell-arduino-7a7fd5>, Viitattu:15.02.2021.

[19] Thomas A. Dow, Ph. D., FRICTION BRAKES, McGraw-Hill Education, 2006.

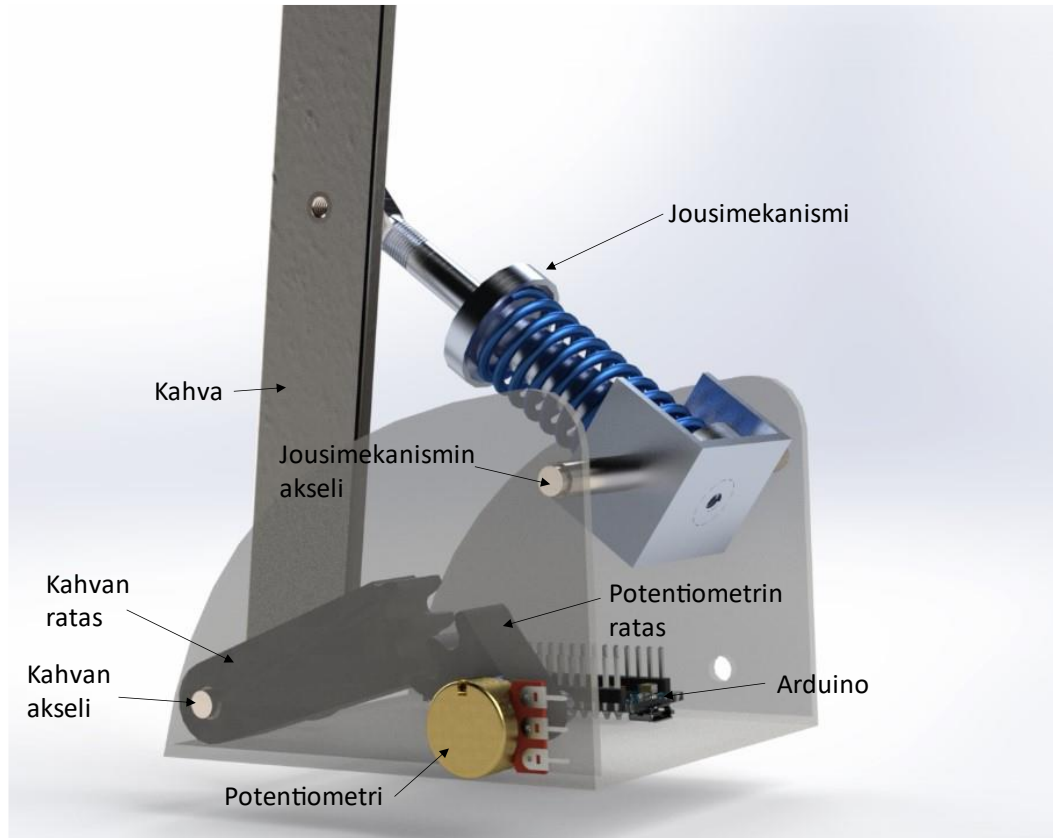
[20] Gibilisco S, Dr SM., The Potentiometer, McGraw-Hill Education, 2016.

[21] SFS-ISO 53, 03.09.2012.

[22] DonLabs, Potentiometer, 2020, Saatavilla: <https://grabcad.com/library/potentiometer-32>, Viitattu: 15.03.2021.

[23] Whitham A. , Arduino Micro, 2015, Saatavilla: <https://grabcad.com/library/arduino-micro-1>, Viitattu: 15.03.2021.

# LIITE A



**Kuva 12.** Käsijarrun rakenne mukaillen [22, 23].