



# Miksi polkupyörä pysyy pystyssä?

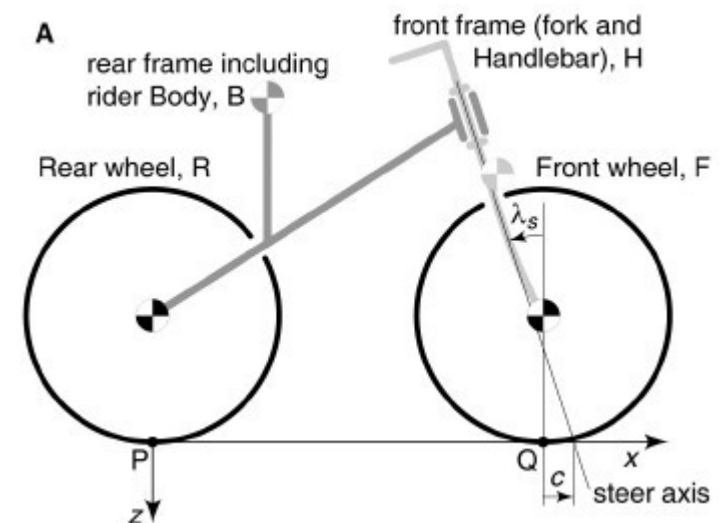
Jere Remes, Anton Saressalo ja  
Joonas Havukainen



# Tutkimuskohteen esittely

- Polkupyörän fysiikkaa on pohdittu klassisen mekaniikan keinoin jo 1800-luvulta asti, mutta reaali maailman kompleksisuuksien takia tyhjentävään selitykseen polkupyörän pystyssä pysymisestä ei ole päästy
- Itsestabiiliuden selitykseksi on tarjottu niin gyroskooppisia voimia, renkaan ja ohjausakselin välistä etäisyyttä ("trail", kuvassa  $c$ ) sekä ohjauksen epävakautta
- Kuvan lähde

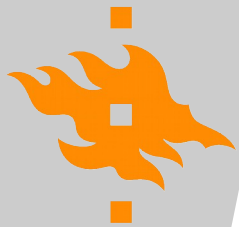
<http://bicycle.tudelft.nl/stablebicycle/StableBicyclev34Revised.pdf>





# Tutkimuskysymyksen asettelu

- Koska pystyssä pysyminen ei välttämättä ole ainoastaan yhden ominaisuuden ansiota, päädymme testaamaan, millä yhdistelmillä saamme täysin ajokelpoisesta pyörästä epävakaan ja ajokelvottoman.
- Käytännössä siis muokkaamme pyörästä joko pois jo edellä mainittuja ominaisuuksia, vahvistamme niitä tai muokkaamme massakeskipistettä, kunnes pyörä ei enää pysy pystyssä eikä sitä voi ohjata



# Tutkimuksen toteutus

- Koejärjestelystä on systeemin monimutkaisuuden ja muuttujien määrän takia vaikea saada kovinkaan kvantitatiivista
- Koe toistetaan sekä lisätyllä gyroskooppisella voimalla (renkaat täyteen vettä), muutetulla massakeskipisteellä, käännetyllä ohjauksella, murskatuilla ohjainlaakereilla sekä kaikkien edeltävien yhdistelminä
- Joka vaiheessa kokeillaan pyörän ajo-ominaisuuksia myös subjektiivisesti





# Koejärjestely

- Polkupyörälle annetaan alkuvauhti, jonka jälkeen seurataan sen etenemistä videolla
- Videolta tarkistetaan
  - **Alkunopeus** kahden ensimmäisen tolpan ohitusaikojen perusteella
  - **Kaatumisaika**, eli milloin satula osuu maahan
  - **Kaatumispaikka**, tai pyörän kaartaessa pisin etäisyys lähettäjistä
- Toistetaan mittaus kullakin polkupyörävariaatiolla useita kertoja ja lasketaan tulosten keskiarvot
- Vertailukelpoisten tulosten saamiseksi normitetaan tulokset alkunopeuksien neliöillä



# Tavallinen polkupyörä

- Aluksi suoritettiin referenssimittaukset muokkaamattomalla (joitain tarpeettomia osia kuten vaihteita lukuun ottamatta) pyörällä
- Mittaustuloksia (keskiarvot):
  - Alkuvauhti 3,22 m/s, keskihajonnalla 0,39 m/s
  - Kaatumismatka 6,85 m, kaatumisaika 4,24 s
  - Kaatumismatka/nopeus<sup>2</sup> 0,21, aika/nopeus<sup>2</sup> 0,13



# Painopisteen vaikutus

- Pyörään lisättiin etutaakkateline ja muutettiin massakeskipistettä lisäämällä sen päälle vesipulloja
  - Painon siirtyessä ohjausakselin etupuolelle, pyörästä tuli erittäin epävakaa, eikä järkeviä mittauksia voitu suorittaa
- Taakka (5 kg) takana pyörä kulki vakaammin kuin ilman painoja painopisteen siirryttyä ylös päin





# Käännetty etuhaarukka

- Eturenkaan kääntämisen jälkeen trail muuttui negatiiviseksi
- Yllättävästi pyörä kulki lähes muokkaamattoman tavalla
  - Asetelma oli tosin epävakaata pienillä nopeuksilla





# Ohjattavuuden muokkaus

- Ohjaustangon kääntyvyyttä heikennettiin rikkomalla kääntöakselin laakerointi
  - Tällä asetelmalla ohjaaminen oli vaikeampaa ohjauksen ollessa jäykempi
  - Pyörä pysyi hyvin pystyssä vasta suuremmilla nopeuksilla





# Rungon muokkaus

- Pyörän runkoa muokattiin tavoitteena muuttaa ohjausakselin kulma ( $\lambda_s$  sivulta 2) pienemmäksi tai negatiiviseksi
  - Tämä toteutettiin hakkaamalla vinoputki sisään, jolloin etupyörä siirtyi lähemmäs takapyörää
  - Ei merkittävää vaikutusta ajettavuuteen tai pystyssä pysymiseen

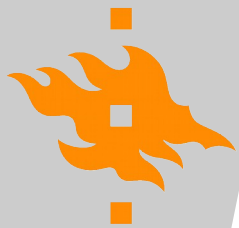




# Rungon muokkaus II

- Seuraavaksi vinoputki irrotettiin kokonaan, sekä hakattiin yläputki käyräksi
- Näin saatiin sekä trail että ohjausakselin kulma mitättömän pieniski
- Tuloksena erittäin epävakaa ja ainoastaan suoraan ajettava, mutta ilman kuljettajaa pystyssä pysyvä ajoneuvo





# Tulokset

<u>Asettelu</u>	<u>Nopeus</u> (m/s)	<u>Matka</u> (m)	<u>Aika</u> (s)	<u>Norm.</u> <u>matka</u>	<u>Norm.</u> <u>aika</u>
Tavallinen	3,22	6,85	4,24	0,21	<b>0,13</b>
Takapaino	3,95	9,83	3,51	0,15	0,05
Etuhaarukka käännetty	3,78	<b>12,33</b>	<b>4,53</b>	<b>0,24</b>	0,09
Heikennetty ohjaus	5,61	6,10	2,12	0,03	0,02
Vinoputki mutkalla	5,31	10,25	2,65	0,07	0,02
Vinoputki pois, yläputki mutkalla	4,33	9,67	3,18	0,13	0,04

- Mittausjärjestelyistä johtuen normitettu aika on ainoa selkeästi vertailukelpoinen suure
- Polkupyörän pystyssä pysymä aika soveltuu myös mitatuista suureista parhaimmin pyörän pystyssä pysymisen karakterisointiin



# Johtopäätökset

- Gyroskooppisia voimia lukuun ottamatta kaikki tiedetyt pyörän pystyssä pysymiseen vaikuttavat ominaisuudet poistettiin
  - Pyörän ajo-ominaisuudet huonontuivat selkeästi, mutta eteenpäin ajaminen oli edelleen mahdollista
  - Kaatumistesteissä ei huomattu merkittävää vaukauden heikkenemistä
    - Pyörän liikettä korjaavat efektit kuitenkin poistuivat ja kaatuvan pyörän kaarroksen säde kasvoi
    - Muunneltu pyörä vaati yleensä korkeamman lähtönopeuden pysyäkseen pystyssä



# Kehitettävää

- Gyroskooppiset voimat vaikuttavat oletettavasti pystyssä pysymiseen merkittävässä määrin, joten niiden vaikutuksen arvioiminen on tärkeää pyörän ominaisuuksien tuntemiseksi
- Mittauspaikkana käytetty kenttä olisi voinut olla tasaisempi ja lähtönopeuden säätely tarkempaa
- Tarkemmissa mittauksissa pyörän muokattavuus on suuressa osassa, joten oman prototyypin rakentaminen voisi olla perusteltua