

Kokemuksia 3D-tulostetuista ääntöväylämalleista

Puheentutkimuksen kansallinen professoriseminaari, Fiskars

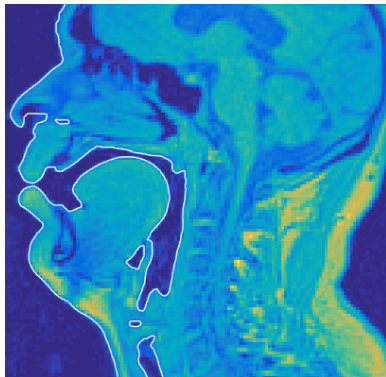
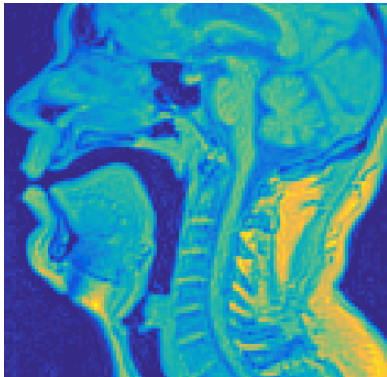
Jarmo Malinen

Aalto-yliopisto,
Matematiikan ja systeemianalyysin laitos
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos

16. kesäkuuta, 2017

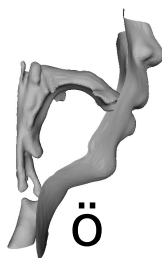
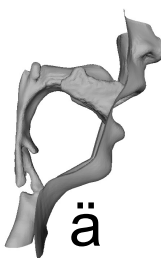
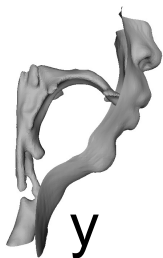
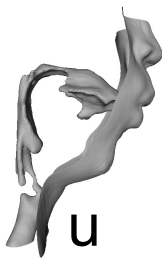
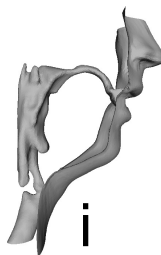
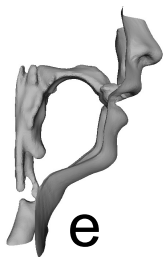
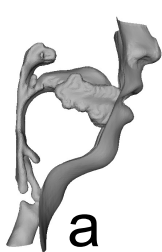
Ääntöväylän vokaaligeometriat MRI:llä

MRI-datan prosessointi vektoreiksi



Entistä vähemmän käsityötä vaativa uusi kuvankäsittelyalgoritmi kykenee etsimään MRI-koneen tuottamasta vokselikuvasta 3D-mallin kudosis/ilmajäsenrajapinnalle.

Suomen kielen digitaaliset vokaalimallit



Ääntöväylägeometrioiden 3D-tulostus

Materiaalit ja laitteet (1)

- Tähän mennessä olemme tulostaneet ääntöväyliä seuraavilla laitteilla: **Ultimaker Original** (0.4 mm pursotuspää), **Stratasys uPrint SE plus**, ja **EOS Formiga P110** (0.1 mm kerrospaksuus).
- Tulostusmateriaaleina PLA (Ultimaker), ABS käyttäen PLA-tukirakenteita (Stratasys), sekä Nylon-materiaali PA 2200 (EOS Formiga).
- Ultimaker ja Stratasys ovat Fused Deposition Manufacturing -tekniikkaan perustuvia filamenttiprinttereitä. EOS Formiga perustuu laserilla tapahtuvaan jauheen kuumasintraukseen.
- Akustisiin mittauksiin riittävä seinäpaksuus 2 mm.
- Materiaalikustannus per malli on muutaman euron luokkaa Ultimakerilla ja Stratasysillä. OS Formigan kustannus on noin 70 euroa.

Materiaalit ja laitteet (2)

- Tulostusajat Ultimakerilla ja Stratasysillä noin 12h/printti. PLA-tukirakenteiden poisto ultraäänipesurilla ja liuottimella hidasta, ja tarvitaan usein mekaanista työstämistä.
- Sintraantumatta jäävä nylon-jauhe toimii EOS Formigassa tukimateriaalina, ja sen poistaminen ääntöväyläprintin ahtaista sisäosista on työlästä. Printin laatu on kuitenkin ylivertainen FDM-tekniikalla tehtyihin tulosteisiin verrattuna.
- Mitä halvempi tulostin, sitä enemmän työtä tulostuksen valmisteluun, laitteen huoltoon ja tulosteiden pinnan jälkikäsittelyyn tarvitaan.
- Työstötarkkuus on riittävä halvimmillakin laitteilla (mikäli ovat mekaniikaltaan kunnossa).
- Haasteina naisten ääntöväylät sekä pintaekstraktion että tulostamisen kannalta.

Vokaaligeometriat [a,i,u]



[Electrolarynx-kokeiluja]

Mittaustekniikka

Signaalilähde (1)



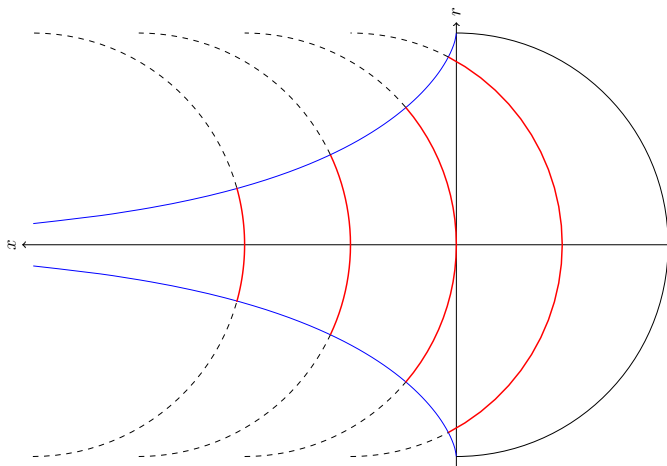
Koteloitu kaiuttimelementti sekä impedanssisovitinorvi.

Signaalilähde (2)



Ääntöväylän mittausasetelma koottuna sekä ei-resonantti keinokuorma.

Signaalilähde (3)

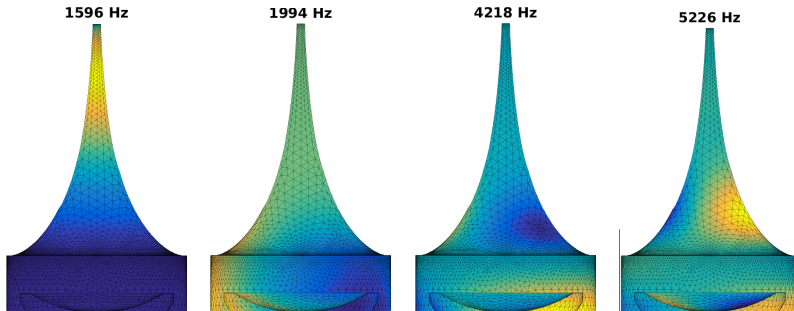


Impedanssisovitus tratrix-torvella, joka on optimaalinen palloaaltorintamalle.



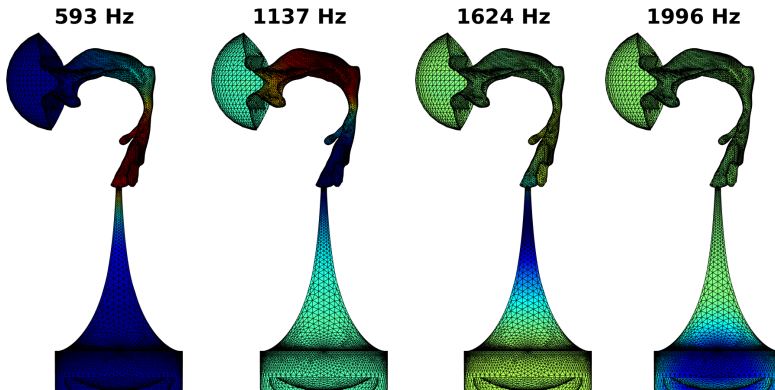
Torvi ja sen sovituskammio kaiuttimelementin kartiota varten.

Modaalianalyysiä (1)



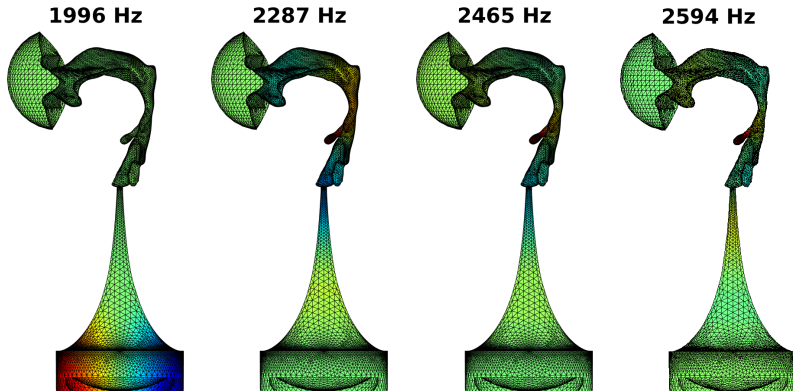
FEM/Helmholtz-resonanssianalyysin tuottamat tärkeimmät moodit impedanssisovittimelle ilman kuormaa.

Modaalianalyysiä (2)



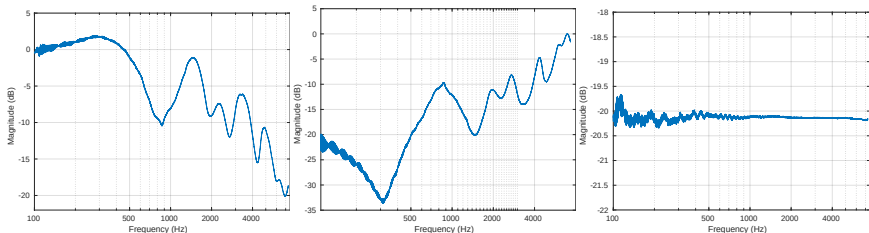
Resonanssianalyysi [ɑ] kuormalla, jossa vasemmanpuolimmaisat vastaavat formantteja F1 ja F2...

Modaalianalyysiä (3)



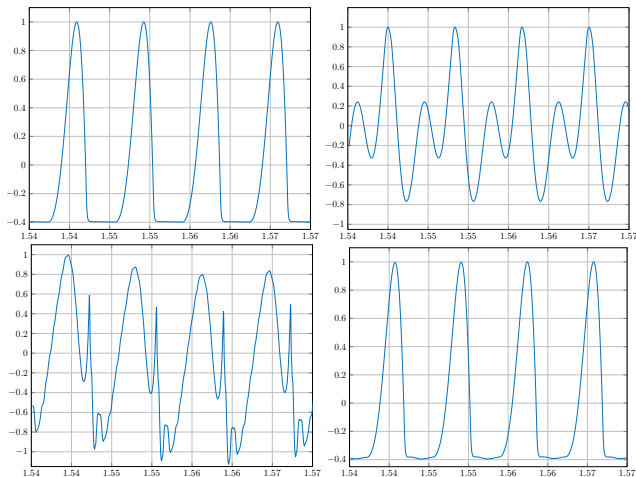
... ja toinen vasemmalta vastaa formanttia F3.

Kalibrointi ja kompensointi (1)



Automatisoitu, iteratiivinen kalibrointimenetelmä tuottaa taajuudesta riippuvan painon, jolla kompensoitu logaritminen sinisweep antaa lähteen ulostuloon (t.s., referenssimikrofonin paikkaan) tasaisen äänenpaineen **taajuusvastemittauksia** varten.

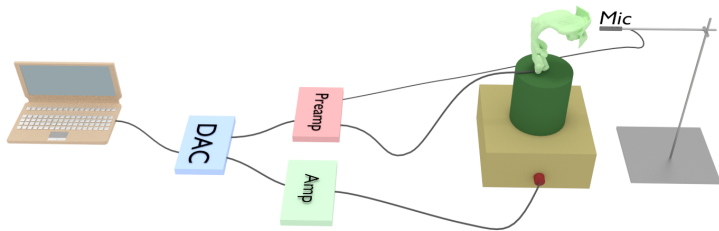
Kalibrointi ja kompensointi (2)



LF-pulssin rekonstruktio referenssimikrofonin paikkaan käyttämällä numeerista, regularisoitua dekonvoluutiota ja impulssivastemittausta.

- ① Numeerinen modaalianalyysi auttaa signaalilähteen epäideaalisuuksien kuten **poikittaismoodien** hallinnassa.
- ② Poikittaisten moodien vaimentaminen tapahtuu lisäämällä kriittisiin kohtiin rakenteita kuten vaimennusmateriaalia.
- ③ Jäljelle jäävät epäideaalisuudet kompensoidaan numeerisesti rakentamalla (MATLAB-ympäristössä) tarvittavat **käänteismallit** signaalilähteelle.
- ④ Käytämme taajuusvastemittauksiin ja LF-pulssin rekonstruktioon täysin erilaisia käänteismalleja.
- ⑤ Kuumalanka-anemometri referenssimikrofonin paikalle mahdollistaisi LF-pulssin rekonstruktion virtausnopeussignaaliaksi.

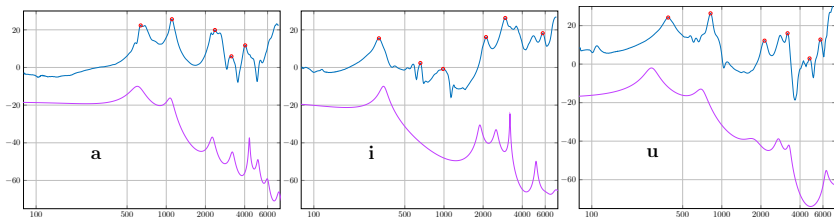
Mittaustuloksia



Sekä taajuusvaste- että vokaalirekonstruktiomittauksissa mittausasetelma kaiuttomassa huoneessa on identtinen.

Taajuusvaste (1)

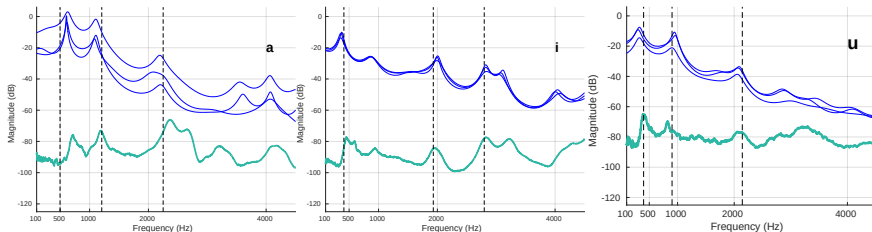
Vokaalit [a], [i], ja [u], koehenkilönä 26-vuotias mies.



Printin taajuusvaste (ylempi) verrattuna vokaalispektrin verhoikäyrään samasta koehenkilöstä kaiuttomassa huoneessa (alempi).

Taajuusvaste (2)

Printin taajuusvaste (alempi) verrattuna perheeseen vokaalispektrin verhoikäyriä, jotka on mitattu saman koehenkilön puheesta MRI-tutkimuksen aikana.



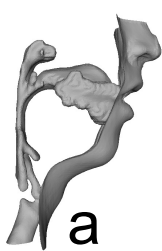
Pystysuorat viivat ovat ääntöväylägeometriasta numeerisesti laskettuja resonansseja.

[Ääninäyte annostellaan parhaiten korvien kautta]

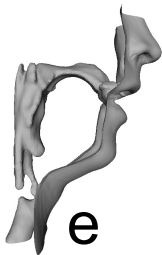
Sine quibus non:

- 1 Paavo Alku
- 2 Antti Hannukainen
- 3 Juha Kuortti
- 4 Antti Ojalammi
- 5 Mika Salmi

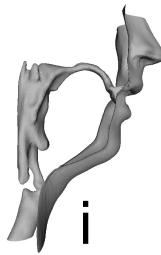
... ja suuri joukko väkeä Turussa ja ympäri maailmaa, jotka ovat olleet mukana tekemässä MRI-dataa.



a



e



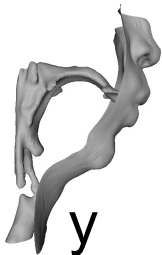
i



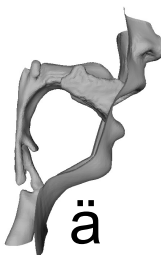
o



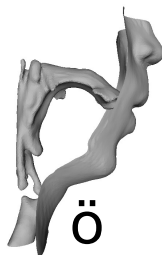
u



y



ä



ö

Siinäpä se oli. Kysymyksiä?