

DICO – puheakustinen malli

Esimerkki matemaattisesta mallinnuksesta

Dos. Jarmo Malinen
(& al.)

Aalto yliopisto,
Matematiikan ja Systeemianalyysin Laitos

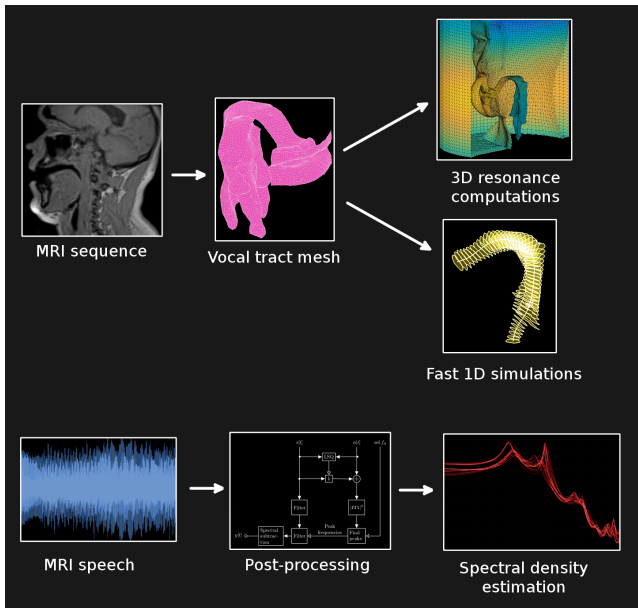
4. huhtikuuta, 2016

DICO-vokaalintuottomalli pähkinäkuoressa:

- Puheen matemaattinen mallinnus lähtien ääntöväylän muodosta magneettiresonanssikuvauksella (MRI).
- Puheäänteiden simulointi numeerisesti MRI:stä.
- Mallien hienosäätö ja tarkistus mittausdatan avulla.
- Fysikaaliset mallikokeet muovisilla 3D-printeillä.

Sovellukset **suu- ja leukakirurgiassa** sekä **puheteknologian algoritmeissa**.

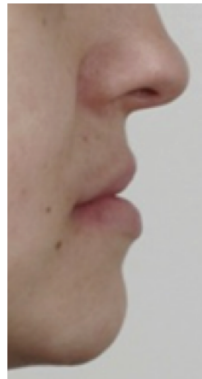
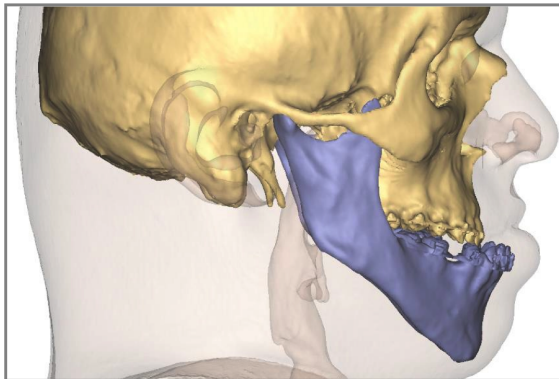
Prof. R.-P. Happonen (TU) ja akat. prof. P. Alku (Aalto)
tutkimusryhmineen.



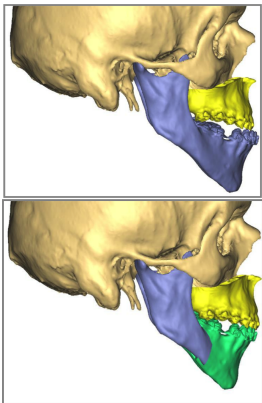
Suu ja leukakirurgian vaikutus puheeseen

Leukaluiden rekonstruktio (1)

Potilas kärsii vakavasta ristipurennasta, jonka korjaaminen pelkällä oikomishoidolla ei ole mahdollista.



Leukaluiden rekonstruktio (2)



Kysymyksiä:

- Kirurgian vaikutukset puheeseen, erityisesti vokaaleihin?
- Voidaanko **ymmärtää**, jopa **ennustaa** matemaattisella mallilla?
- Computer-assisted surgery (CAS)?

Puheakustiikan matemaattinen mallinnus

DICO-malli (1)

DICO-mallin ytimessä on kaksi yleistä akustiikkaa kuvaavaa **osittaisdifferentiaaliyhtälöä**. Tarkoille 3D geometrioille

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 t} = c^2 \Delta \phi$$

ja 3D-geometrioista johdetuille aaltojohtimille

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 t} = \frac{c(s)^2}{A(s)} \frac{\partial}{\partial s} \left(A(s) \frac{\partial \psi}{\partial s} \right) - \frac{2\pi\alpha W(s)c(s)^2}{A(s)} \frac{\partial \psi}{\partial t}.$$

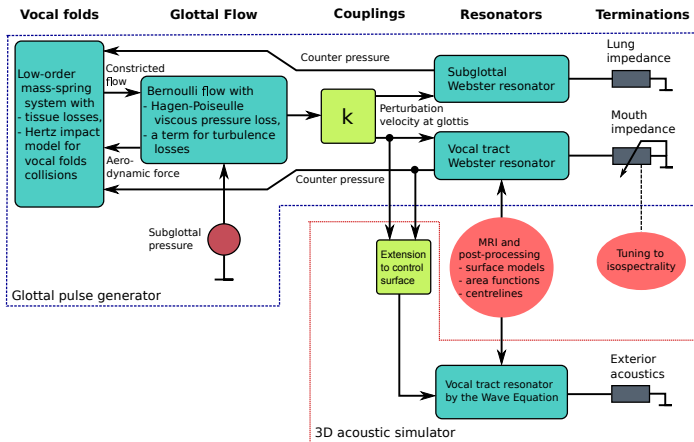
Näitä yhtälöitä kutsutaan **aaltoyhtälöksi** sekä **Websterin yhtälöksi**.

Näitä ratkaistaan numeerisesti **elementtimenetelmällä** ääntöväylän MRI-kuvauksella saaduissa eri puhekonfiguraatioissa.

Nopeuspotentiaalit ϕ ja ψ antavat ääntöväylän ilmapatsaassa lausuttua vokaalia muistuttavan äänisignaalin, jos reunaehdoilla syötetään äänihuulten “pörinää”.

DICO-malli (2)

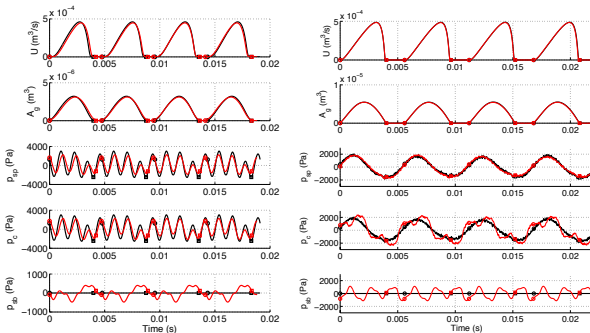
Vokaaliäännön simuloimisessa tulee ääntöväylän lisäksi mallintaa äänihuulia, ulkotilaa, ja jopa alempia ilmatiehyitä.



DICO on toisiinsa kytkettyjen mekaanisten, virtausmekaanisten ja akustisten osamallien kokonaisuus.

DICO-malli (3)

DICO:n avulla voidaan laskea akustisia signaaleja paikoista, joissa mittaaminen on vähintäänkin epämiellyttävää ellei jopa mahdotonta.



Simuloituja äänihuulten aukeamia ja äänisignaaleja **kurkunpäässä** vokaalien [ɑ] ja [i] äännön aikana.

Potilasdatan hankkiminen

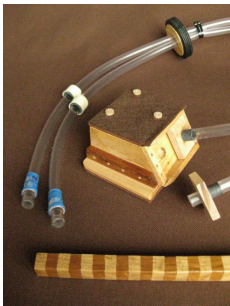
Puheen ja MRI:n tallennus (1)



- Puheentuoton mallinnus ja mallin **validaatio** vaatii **yhtäaikaista** puheen ja 3D magneettiresonanssikuvan tallennusta koehenkilöistä.
- Metallia ja elektroniikkaa ei voi viedä MRI-koneeseen.

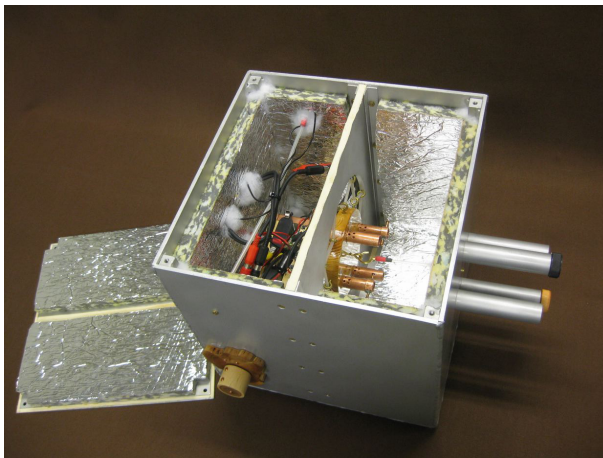
Tarvitaan siis jonkinlaista **häiveteknologiaa!**

Puheen ja MRI:n tallennus (2)



- Puhe ja MRI-koneen melunäyte tulevat “puutarhaletkussa” ensimmäiset 3 metriä.
- Kuvassa kaksikanavainen äänenkeräin ja aaltojohtimet.
- Äänenkeräin sopii Siemens Avanto 1.5T -laitteen pään alueen kelassa olevaan aukkoon. Ei liikkuvia osia, ei välitä tärinästä.

Puheen ja MRI:n tallennus (3)



“Puutarhaletkut” vievät mikrofoniaasetelmaan, joka sijaitsee äänieristetyssä Faradayn häkin sisällä, MRI-koneen vieressä.

Puheen ja MRI:n tallennus (4)

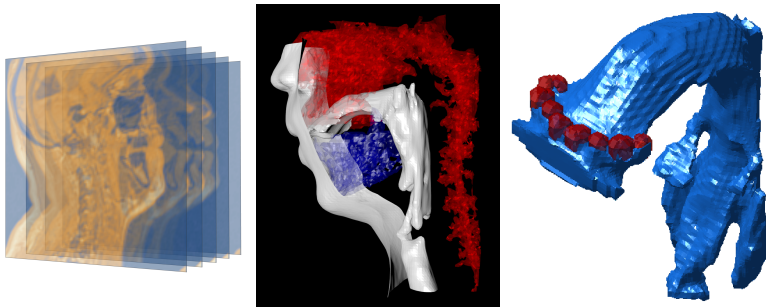


- Mikrofoneista puhe ja melunäyte siirtyy suojatulla kaapelilla esivahvistimeen “Epsilon”, jossa on mm. reaaliaikainen analoginen melunperuutuspiiri.
- Äänisignaalit käsitellään M-Audio Delta -digitointilaitteella.
- Koko koejärjestely toimii (lähes täysin) automatisoidusti.
- Laitteisto on siirrettävässä räkissä, jotta koeasetelma voidaan koota nopeasti MRI-laboratoriossa ennen potilasmittauksia.

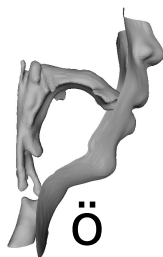
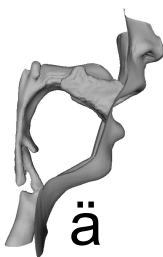
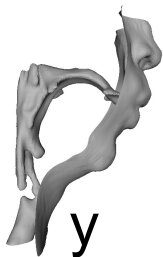
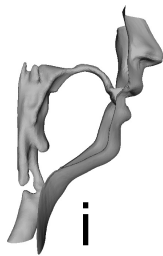
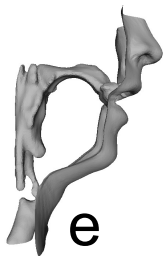
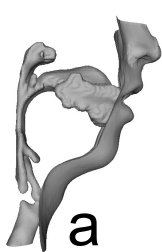
MRI-kuvan ja äänisignaalien jälkikäsittely

Pikseleistä pintamalleiksi...

3D-kuvankäsittelyalgoritmeja sisältävä koodi tuottaa (lähes) automaattisesti (hieman) epämääräisestä MRI-pikselimössöstä pintamalleja, joista ääntöväylän kudosisilma -rajapinta on erotettu muista anatomisista rakenteista.



Akustisten yhtälöiden FEM-ratkaiseminen edellyttää vielä pintamallien jatkokäsittelyä elementtiverkoiksi.



...ja jopa animaatioiksi.

<https://www.youtube.com/watch?v=4-rYuyQU92A>

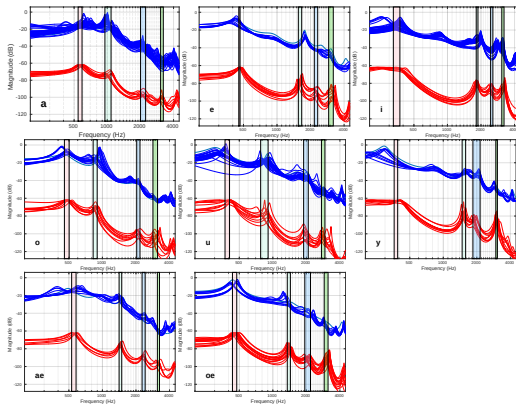
https://math.aalto.fi/~jmalinen/MyPSFilesInWeb/a_noiseless.mp4

https://www.youtube.com/watch?v=2t_UpKuSB8A

[Click me!]

Vokaalispektrit puhenäytteistä

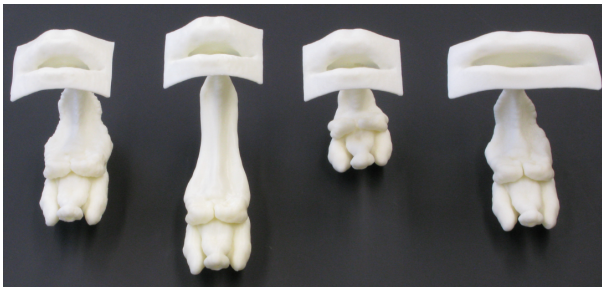
MRI-kuvauksen aikana tallennetusta ääninäytteestä melu pitää kuoria pois niin, että alla olevan puhenäyte paljastuu. **Formantit!**



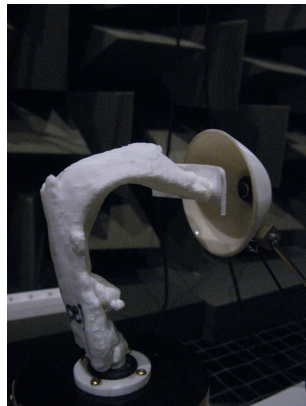
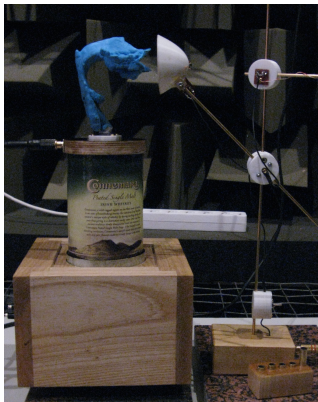
Spektrinäytteet puheesta **MRI-kuvauksen aikana** ja vertailunäyte **kaiuttomassa huoneessa**. Aina sama koehenkilö.

3D-tulostetut ääntöväylät ja akustiset mittaukset

Fysikaalisia malleja 3D-tulostamalla (1)



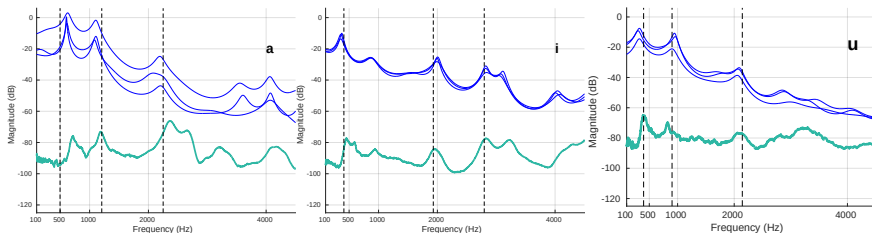
Fysikaalisia malleja 3D-tulostamalla (2)



Tekemällä laboratoriomittauksia printeistä saadaan riippumatonta vertailudataa mallivalidaatioon.

Fysikaalisia malleja 3D-tulostamalla (3)

Kuinka kaukana eri tavoin saadut spektrit ja resonanssiipiikit ovat toisistaan?



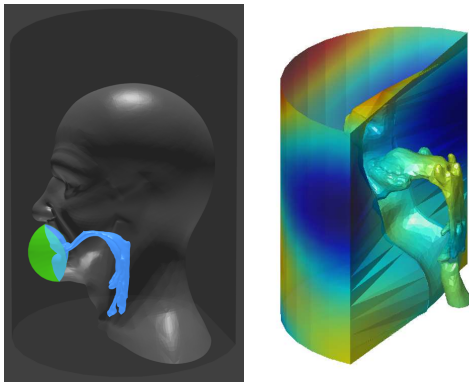
Pystyviivat resonansseja MRI-kuvasta numeerisesti, MRI-kuvauksen aikana puheesta, 3D-printistä “sweepaamalla”.

Sama koehenkilö kuin edellä.

Ympäristöakustiikka

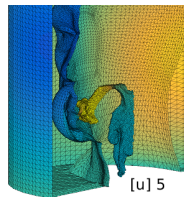
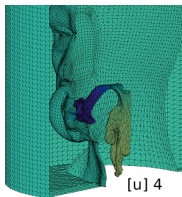
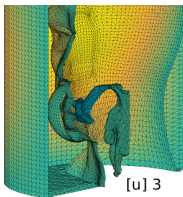
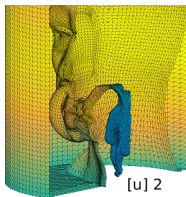
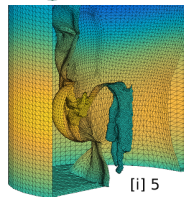
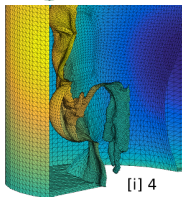
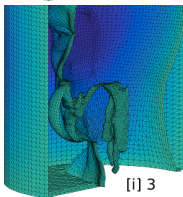
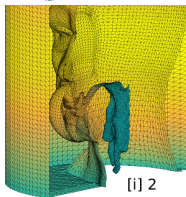
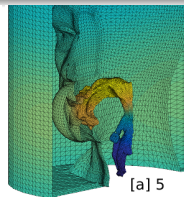
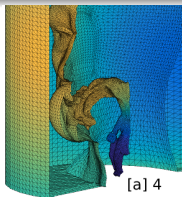
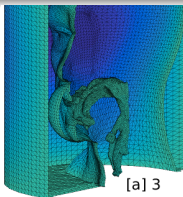
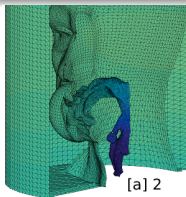
Puhujaa ympäröivän tilan vaikutus (1)

Suurin yksittäinen jäljellä oleva **akustinen** virhelähde mallissa on ympäröivän tilan vaikutus. Sen mallinnus on kesken.



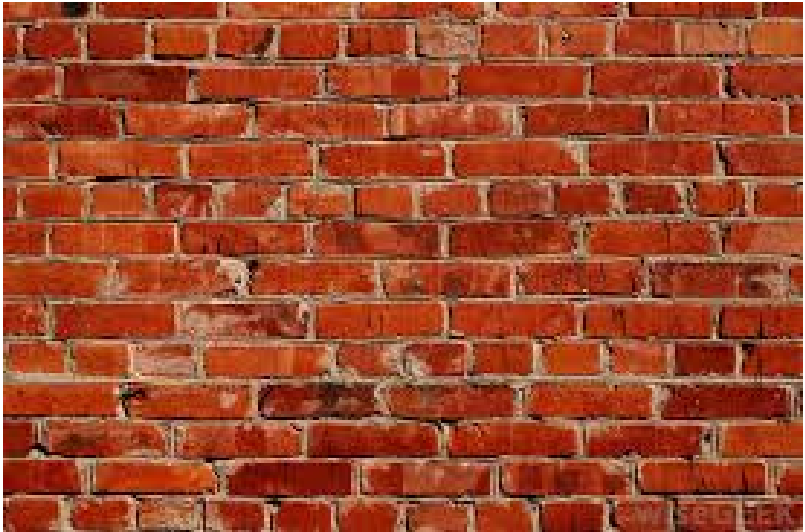
Ympäristö voi olla esim. avoin tila tai kuten MRI-laitteen kela.

Puhujaa ympäröivän tilan vaikutus (2)



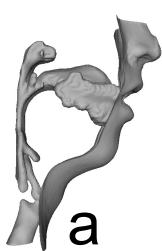
Vokaalien [a], [i], [u] resonanssikuvioita suljetussa ympäristössä.

Millaista työtä matemaattinen mallinnus oikeastaan on?

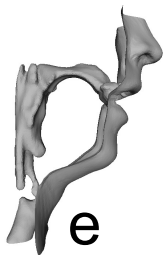


Millaista työtä matemaattinen mallinnus oikeastaan on?

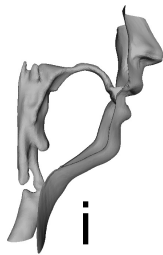




a



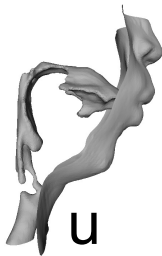
e



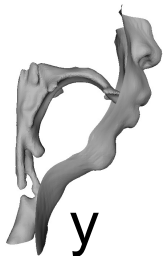
i



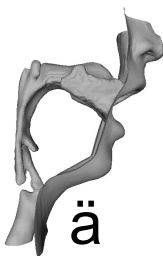
o



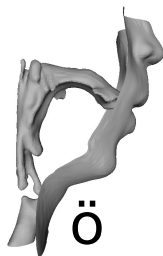
u



y



ä



ö

That's all, folks. Questions?