



Doctoral Thesis

Virtual middle ear: a dynamic mathematical model based on the finite element method

Author(s):

Ferrazzini, Mattia

Publication Date:

2003

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004624384> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH no 15294

**VIRTUAL MIDDLE EAR:
A DYNAMIC MATHEMATICAL MODEL BASED ON FINITE ELEMENT METHOD**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

for the degree of
Doctor of Technical Science

presented by
Mattia Ferrazzini
Dipl Masch. Ing. ETH
born January 14, 1972
citizen of Mendrisio, TI

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Peter Niederer, examiner
PD Dr. Norbert Dillier, co-examiner

2003

SUMMARY

Several million people suffer from chronic inflammatory middle ear diseases. The surgical treatment often necessary to treat the disease is unsatisfactory in preserving or improving hearing. The restoration of the sound conduction often requires the substitution of some middle ear components by prostheses. The success rate of the reconstruction is still not optimal and remnant air-bone gaps of up to 20-30 dB can be measured.

In order to improve the reconstruction of the middle ear, a specific tool for testing the mechanical behavior of the prostheses is necessary. Furthermore this tool should permit analysis of the effect of middle ear diseases on the sound conduction, and analysis the contribution of each middle ear component, so that indications can be given to otologists concerning the possible consequences of a surgical intervention.

A mathematical model of the middle ear is therefore developed. The model is based on the finite element method.

The key to success of any model lies in the knowledge of the physical problem that will be idealized in the model. In the specific case of the middle ear, detailed information on the middle ear anatomy and physiology is necessary.

Beside a thorough review of the literature, selected aspects of the middle ear physiology and anatomy were investigated by performing the following measurements on fresh temporal bones:

- mass and volume of the isolated middle ear ossicles.
The volume and the mass of several sets of the three ossicles were measured in order to derive the density of the ossicles.
- geometry and spatial distribution of the middle ear structures.
The geometry of the three ossicles was measured with high resolution micro-CT machine ($13 \times 13 \times 13 \mu\text{m}^3$). A partial 3-dimensional reconstruction of the internal cavity of the malleus and incus was also performed.
- dynamical behavior of the tympanic membrane by means of modal analysis.
The modeshapes and resonance frequencies of the tympanic membrane were detected in a restricted frequency band from 200 to 4500 Hz.
- dynamical behavior of the isolated ossicles by means of modal analysis.
The position of the first resonance frequency was investigated and found to lie well above the upper limit of audible frequency band, so that the individual ossicles can be considered to behave like rigid bodies within the audible frequency range.

- motion state of the stapes.
The translational velocity and the two rotational velocities around the main axes of the stapes footplate were detected using a custom developed technique. The measurements were performed in a frequency band from 200 to 8000 Hz and with drained cochlea.
- the dynamic behavior of the incudo-malleal joint.
The incudo-malleal joint was found to be mobile under physiological sound pressure levels.

The results of these investigations were used in the construction phase of the mathematical model in order to produce an accurate model. Furthermore the results of the dynamical measurements were used to validate the model. The model contains 37,037 hexa8-elements and 58,865 nodes for a total of 161,751 degrees of freedom. The material properties are described by 95 parameters. The tympanic membrane is modeled with orthotropic material description while all the others middle ear structures are modeled using isotropic material description.

The behavior of the tympanic membrane in the model is very similar to the measurement data. Only in the lower frequency range, below 800 Hz, is the overall response slightly underestimated (5-10 dB).

The stapes movement of the model in the case of drained cochlea is very similar to the measured values across the whole frequency range; again the response in the low frequencies is slightly underestimated.

The cochlea was simulated using stiffness, damping and mass elements, allowing a very fine reconstruction of the cochlear load. Comparison of the cochlea input impedance computed from the model to measurement data from the literature confirmed the accuracy of the cochlea model across the whole frequency range.

The mathematical model reproduce quite well the dynamical behavior of the middle ear in a frequency range from 200 to 8000 Hz. Some inaccuracies still exist in the lower frequencies and in the dynamics of the incudo-malleal joint above 5 kHz. A better description of the tympanic membrane structure and of the joint would eliminate these inaccuracies.

SOMMARIO

Parecchi milioni di persone soffrono di infiammazioni croniche dell' orecchio medio. Il trattamento chirurgico spesso necessario per eliminare l' infiammazione riesce solo in parte a preservare o a migliorare la funzione dell' udito. La ricostruzione della conduzione del suono richiede spesso la sostituzione di alcune componenti dell' orecchio medio per mezzo di protesi. Il risultato di tali ricostruzioni è tuttavia ancora poco soddisfacente e air-bone gap di 20-30 dB possono essere osservati.

Allo scopo di migliorare la ricostruzione dell' orecchio medio il funzionamento delle protesi deve essere analizzato nel dettaglio. È quindi necessario sviluppare un nuovo strumento che permetta di studiarne il comportamento meccanico.

Questo strumento dovrebbe inoltre permettere di analizzare gli effetti delle varie patologie dell' orecchio medio sulla conduzione del suono, così come di analizzare il contributo di ciascun elemento dell' orecchio medio, in modo da poter dare indicazione ai chirurghi riguardo le possibili conseguenze degli interventi.

A tal fine è stato sviluppato un modello matematico dell' orecchio medio basato sul metodo degli elementi finiti.

La chiave del successo per l'elaborazione di un modello matematico risiede in una approfondita conoscenza del problema fisico che deve essere descritto. Nel caso specifico dell' orecchio medio è stato di conseguenza necessario raccogliere informazioni dettagliate riguardo alla sua anatomia e fisiologia.

Oltre ad un accurato studio della letteratura medica, alcuni elementi di anatomia e fisiologia sono stati studiati per mezzo delle seguenti misurazioni effettuate *in vitro* su ossa temporali fresche:

- Misurazione della massa e del volume dei singoli ossicini dell' orecchio medio. Il volume e la massa di varie serie di ossicini sono stati misurati, così da poterne determinare la densità.
- Misurazione della geometria e della distribuzione spaziale delle strutture dell' orecchio medio. La geometria dei tre ossicini è stata misurata per mezzo di una tomografia computerizzata ad alta risoluzione ($13 \times 13 \times 13 \mu\text{m}^3$). È stata pure possibile una parziale ricostruzione tridimensionale delle cavità interne del martello e dell'incudine.
- Misurazione del comportamento dinamico della membrana del timpano, per mezzo dell' analisi modale. Le forme proprie e le frequenze di risonanza della membrana del timpano sono state identificate in una banda di frequenze tra i 200 ed i 4500 Hz.

- Misurazioni del comportamento dinamico dei singoli ossicini per mezzo dell'analisi modale. La posizione della prima frequenza di risonanza è stata analizzata e trovata essere oltre i 30 kHz. Ne consegue che il comportamento degli ossicini dell'orecchio medio nel campo delle frequenze udibili corrisponde a quello di un corpo rigido.
- Misurazioni del movimento della staffa. Per mezzo di una tecnica di analisi appositamente sviluppata, sono state misurate la velocità di traslazione e le velocità di rotazione attorno ai due assi principali del piatto della staffa. Queste misurazioni sono state effettuate in una fascia di frequenze tra i 200 ed gli 8000 Hz e dopo la parziale distruzione della coclea.
- Misurazioni del comportamento dinamico dell'articolazione tra l'incudine ed il martello. Dalle misurazioni effettuate a varie frequenze l'articolazione risulta essere mobile in caso di stimolo acustico.

I risultati di queste analisi sono stati utilizzati per produrre un modello della conduzione del suono nell'orecchio medio che fosse il più accurato il possibile. Oltre a ciò i dati sul funzionamento delle varie componenti sono serviti per calibrare i parametri che descrivono il comportamento dinamico dei materiali.

Il modello ad elementi finiti è composto da 37'037 elementi di volume (hexa8) e da 58'865 nodi, per un totale di 161'751 gradi di libertà. Le proprietà dei materiali sono descritte per mezzo di 95 parametri. Per la membrana del timpano è stata utilizzata una descrizione ortotropica del materiale, mentre per tutte le altre strutture è stata utilizzata una descrizione isotropica.

Il comportamento della membrana del timpano nel modello è molto simile a quanto misurato; soltanto a basse frequenze, sotto gli 800 Hz, la risposta è leggermente sottostimata (5-10 dB). Il movimento della staffa riprodotto dal modello senza carico cocleare è molto simile ai valori misurati nell'intero campo di frequenze, ma anche qui la risposta alle basse frequenze è leggermente sottostimata.

Nel modello della coclea si sono introdotti elementi di rigidità, di smorzamento e di massa tali da riprodurre nel dettaglio i suoi effetti sull'orecchio medio, come confermato dal confronto tra l'impedenza della coclea calcolata dal modello e valori misurati pubblicati nelle letterature.

Il modello matematico riproduce correttamente il comportamento dinamico dell'orecchio medio nel campo di frequenze tra i 200 ed gli 8000 Hz. Alcune imprecisioni sussistono nella risposta alle basse frequenze e nel comportamento dell'articolazione tra l'incudine ed il martello sopra i 5 kHz; imprecisioni che potranno essere corrette migliorando la descrizione della struttura della membrana del timpano e dell'articolazione suddetta.