

OD CHLADNIHO K 3D PULSESPI

– PŘEHLED METOD ZVIDITELŇOVÁNÍ KMITŮ U HUDEBNÍCH NÁSTROJŮ

Václav Syrový

Musical Acoustics Research Centre (MARC)
Sound Studio of Music Faculty, Academy of Performing Arts in Prague,
Malostranské. nám. 13, 11800 Praha 1, Czech Republic
syrovy@hamu.cz
www.hamu.cz/sound

Abstract: This paper is directed to an overview of the most used methods for visualization of oscillations on musical instruments and their parts. At the beginning the well-known Chladni's patterns are situated, then the classical stroboscopy follows and videokymography, which is concurrently substituting with the digital high-frequency stroboscopy. The second group of the visualisation methods is the modal analysis. The third and largest contemporary methods are based on the general interferometry. We can divide them into optical and laser holographic methods, continual and pulse methods, scanning and speckle methods, on line and off line methods etc. The methods are demonstrated on practical examples with an explanation of the principle and evaluation their availability and non-availability. All the examples of Electronic Speckle Pattern Interferometry were realized in the Musical Acoustics Research Centre by the Dantec Dynamics 3D PulsESPI System Q-600.

1 Úvod

Snaha zviditelnit zvuk, co by naším zrakem v podstatě nepostřehnutelný kmitavý pohyb pružné hmoty, je téměř stará jako akustika sama. Zviditelnění zvuku resp. kmitů u hudebních nástrojů je vedle překonání prahových hodnot zrakového vjemu – amplitudy a rychlosti pohybu motivováno hlavně podstatně větší objektivitou zraku oproti sluchu. Současně se jedná o zobrazení fyzikální příčinnosti zvuku, kterou reprezentuje celá množina kmitajících bodů např. rezonanční desky hudebního nástroje nebo vymezená část zvukového pole před tímto nástrojem, oproti pouhé registraci rychlosti a amplitudy kmitu v jednom konkrétním místě desky či pole snímačem kmitů nebo měřicím mikrofonom.

První skupinu metod tvoří Chladniho obrazce, klasická a vysokofrekvenční stroboskopie a videokymografie, druhou skupinu modální analýza a třetí skupina je obecně založena na interferometrii, optické a laserové, kontinuální a pulzní, skenovací a “speckle” obrazců atd. Metody zviditelnění kmitů lze též rozdělit na metody pracující “on line”, které transformují rychlost resp. čas a amplitudu do zrakem vnímatelných hodnot v reálném čase, a na metody pracující “off line”, které transformují pouze amplitudu jako snímek daného časového okamžiku. Postupná animace více snímků za sebou potom nahrazuje transformaci rychlosti kmitání v reálném čase.

Následující přehled metod, které zobrazují ve statické či dynamické podobě kmity hudebních nástrojů jako celku a jejich jednotlivých částí, se nezabývá funkčními principy jednotlivých metod, ale interpretovatelností a využitelností získaných výsledků ve výzkumu zvuku hudebních nástrojů. Praktické příklady jsou demonstrovány na 3D PulsESPI systému Q-600 firmy Dantec Dynamics, který Výzkumné centrum hudební akustiky vlastní.

2 Chladniho obrazce

Chladniho obrazce, tzn. uzlové čáry stojatého vlnění dvourozměrných předmětů (membrán a desek) představují nejstarší, nejjednodušší a nejužívanější metodu zviditelnění paradoxně nekmitajících bodů kmitajícího tělesa, které se nachází v rezonanci s vnějšími budícími kmity. Tvar Chladniho obrazců souvisí s tvarem kmitající membrány či desky, typem a pořadím rezonančního módu. Odchylky od teoretického tvaru pak do určité míry odrážejí změnu jejich tloušťky, materiálovou nehomogenitu, napětí či pnutí. Každý Chladniho obrazec vzniká pouze na konkrétní rezonanční frekvenci a vedle její absolutní hodnoty jsou velmi důležité též poměry mezi jednotlivými rezonanční módy. Využití Chladniho obrazců je spojováno zejména se zkoumáním rezonančních vlastností desek smyčcových nástrojů, kytar a membrán. Avšak jedinou jednoduše kvantifikovatelnou veličinou je frekvence, přesnost jejího stanovení je ovlivňována nejenom kvalitou příslušné rezonance, ale též způsobem, místem a intenzitou buzení kmitů a do jisté míry též použitým práškem, který se při kmitání shromažďuje na uzlových čarách. Nevýhodou této nenáročné metody je nesnadná kvantifikace pozorovaných obrazců.

3 Stroboskopie

Klasické stroboskopické metody pracují na principu osvětlení určité fáze kmitu pozorovaného tělesa, čímž dochází k zdánlivému zpomalení nebo zastavení kmitání. Rozlišitelnost amplitudy kmitání je zcela nezávislá na zdánlivé transformaci času a je omezena pozorovacími podmínkami. Vysokorychlostní či vysokofrekvenční stroboskopie vychází z vysoké snímkovací frekvence obrazového záznamu, který je pro účely následného pozorování zpomalen. Podmínky rozlišitelnosti amplitudy jsou podobné jako u klasické stroboskopie. U hudebních nástrojů se stroboskopie využívá při zkoumání kmitů běžně postřehnutelných amplitud, např. při pozorování kmitů rtů hráčů na plechové dechové nástroje, kmitů klarinetových plátků apod., nebo např. při pozorování kmitů hlasivek za účelem diagnostiky jejich funkce. Klasická stroboskopie je relativně dostupná metoda, u které podobně jako u Chladniho obrazců lze jenom velmi obtížně kvantifikovat vlastnosti analyzovaného kmitání. Proto se využívají náročnější metody jako např. videokymografie nebo již zmíněná vysokofrekvenční stroboskopie s digitálním zpracováním obrazu.

4 Videokymografie

Videokymografie představuje metodický přechod od klasické analogové stroboskopie k vysokofrekvenční digitální stroboskopii a je založena na jednořádkovém vysokorychlostním obrazovém záznamu. Po seřazení jednotlivých řádkových záznamů pořízených v konkrétním řezu kmitajícího tělesa do dvourozměrných snímků lze pozorovat všechny základní parametry rozvinutého kmitavého pohybu v daném řezu. U hudebních nástrojů se videokymografie používá jenom zřídka, zato u hlasivek představuje velmi účinný diagnostický prostředek.

5 Modální analýza

Modální analýza představuje typickou metodu zviditelnění kmitů hudebních nástrojů pracujících “off line”. Princip modální analýzy spočívá v měření a zpracování impulzních přenosových charakteristik mezi předem stanovenými body sítě na povrchu sledovaného tělesa do podoby jeho animovaného pohybu. Nevýhodou modální analýzy je poměrně velká pracnost a časová náročnost, v případě hudebních nástrojů může být mechanický poklep kladívkem se snímačem síly považován dokonce za nežádoucí. Když pomineme tyto spíše formální nevýhody, tak modální analýza představuje jak z hlediska názornosti, tak analytických

možností velmi efektivní metodu. Její současné možnosti dnes už zahrnují též analýzu zvukového pole před hudebním nástrojem.

6 Interferometrie

6.1 Optická interferometrie

První pokusy o zviditelnění kmitů byly realizovány s dnes už klasickým uspořádáním Michelsonova interferometru. U hudebních nástrojů to byl v polovině šedesátých let 20. stol. Hartmut Ising [6], který zviditelnil pohyb vzdušného jazýčku v ústech retné varhanní píšťaly. Pro hustotní ohraničení kmitajícího jazýčku použil k buzení píšťaly místo vzduchu acetylen. Celé uspořádání experimentu se realizovalo na mohutném betonovém kvádru z důvodu vysoké tuhosti a nízké rezonanční frekvence měřícího zařízení. Tento problém ostatně dodnes provází laserové kontinuální interferometrické metody.

6.2 Laserová holografická interferometrie

Využití holografické interferometrie při zviditelnění kmitů bylo realizováno na nejrůznějších hudebních nástrojích a jejich částích, nejrozsáhlejšího využití doznalo na případu měření houslí. Interferogramy v mnohém připomínají již zmíněné Chladniho obrazce, avšak v zásadě se jedná o interferenční proužky, nikoliv uzlové čáry nebo izokřivky odměřující stejnou deformaci kmitající desky. Proto se také při analýze rezonančních vlastností desek či kompletních nástrojů posuzuje pouze tvar interferenčních křivek a odpovídající frekvence, méně často se vypočítává absolutní hodnota deformace. Velkou výhodou této interferometrie je možnost ji použít „on line“, tzn. v reálném čase pozorovat změny tvaru interferenčních křivek v závislosti na budící frekvenci kmitající desky. Rozkmitání zkoumaného objektu může být ryze mechanické (např. vibrační hlavou), nebo akustické (reproduktorem). Získané interferogramy jsou pouze statické obrázky, které však lze sestavovat do animovaných posloupností.

6.3 Pulzní “stroboskopická” interferometrie

Snaha zpomalit čas resp. snížit frekvenci kmitajícího tělesa na okem registrovatelný pohyb vedla k využití stroboskopického efektu, kde místo klasické výbojky s bílým světlem byl použit pulzní laser synchronizovaný frekvencí kmitání. Tímto způsobem byly zopakovány Isingova pozorování a bylo možné kromě stacionárního stavu sledovat též rozkmitávání vzdušného jazýčku u retné varhanní píšťaly. Jako budící plyn byl použit kysličník uhličitý.

7 Skenovací vibrometrie

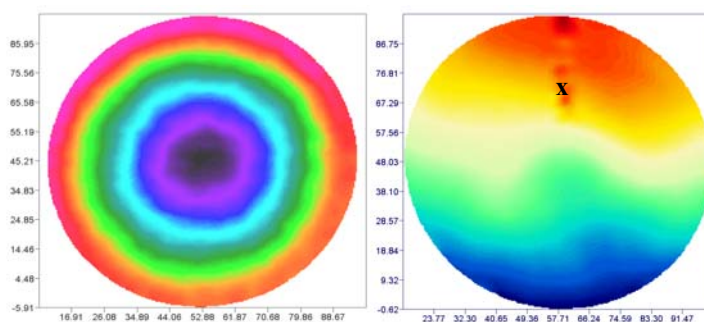
Vibrometry pracující se laserovým paprskem umožňují bezdotykové snímání kmitů tělesa v konkrétním bodě. Vychylování paprsku skenovací hlavou po fiktivní síti bodů povrchu tělesa a snímání odpovídajících kmitů či impulzových odezev je do jisté míry obdobou modální analýzy se všemi jejími přednostmi. Metoda však nepracuje “on line” a během skenování je zapotřebí zajistit stabilitu vstupních podmínek, zejména co se týče opakovaného buzení kmitů. Není však zapotřebí zajišťovat extrémně stabilní uspořádání jako u interferenčních metod. Skenovací vibrometrie je schopna též podchytit kmity vymezené části zvukového pole např. před hudebním nástrojem.

8 ESPI interferometrie

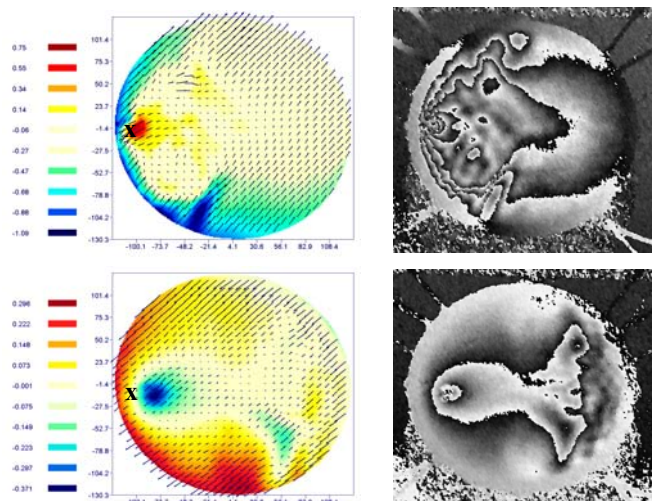
Elektronická interferometrie “speckle” obrazců využívá rozptylu laserového světla na nerovnostech povrchu zkoumaného tělesa. Kmitající povrch je osvětlen dvěma krátkými po sobě jdoucími pulzy rozptýleného laserového paprsku, jehož odraz snímá sensor (CCD

kamera). Počítač pak zpracovává interferenční obrazce prvního pulzu mezi referenčním paprskem a paprskem odraženým od plochy nedeforované kmitáním a druhého pulzu mezi tímž referenčním paprskem a paprskem odraženým od plochy deformované kmitáním. Přes výpočet dvourozměrné FFT je získána tzv. fázová a následně amplitudová mapa, která postihuje absolutní deformaci plochy v mikrometrech pro konkrétní budicí frekvenci. Metoda ESPI nepracuje sice “on line”, přesto výsledky jsou k dispozici bezprostředně po osvětlení kmitajícího tělesa laserovým dvojpulzem. Opakování osvětlení je limitováno dobou nabíjení laseru cca 10 až 15 sec. Výsledky měření jsou minimálně ovlivňovány nežádoucími kmity či nestabilitou polohy měřeného objektu. Kmity měřeného objektu mohou být snímány též třemi sensory, a to buď v režimu 3D, tzn. ve směrech XYZ (viz Obrázek 2.), nebo v režimu 1D, kdy každý sensor snímá kmity různého místa měřeného objektu. Měřená plocha může standardně dosahovat velikosti až 1,5 m², další zvětšení plochy je omezeno požadovanou intenzitou osvětlení a zorným úhlem sensorů. Rozptýlený laserový paprsek lze též odrážet zrcadly, což umožňuje pozorovat kmitající objekt současně z více směrů (viz Obrázek 3.).

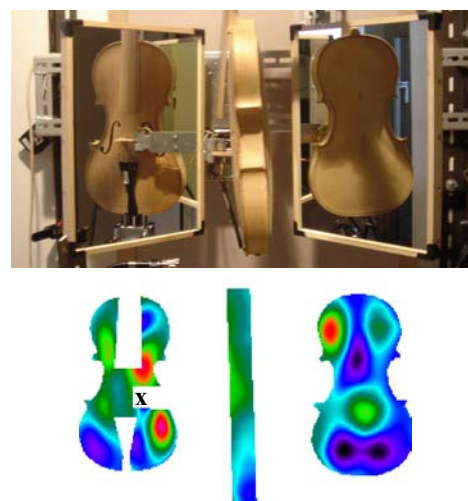
8.1 Příklady měření hudebních nástrojů systémem Q-600 (viz foto)



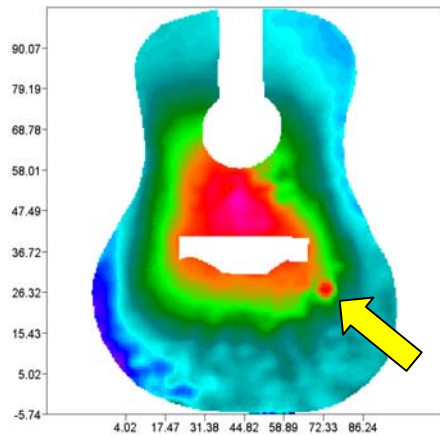
Obrázek 1. Rezonanční módy membrány tamburíny (01) 100 Hz a (11) 180 Hz. Kruhový mód byl buzen reproduktorem, radiální mód byl buzen úderem paličkou v místě x



Obrázek 2. 3D amplitudová a 1D fázová mapa membrány tamburíny 0,5 msec a 1 msec po úderu paličkou v místě x



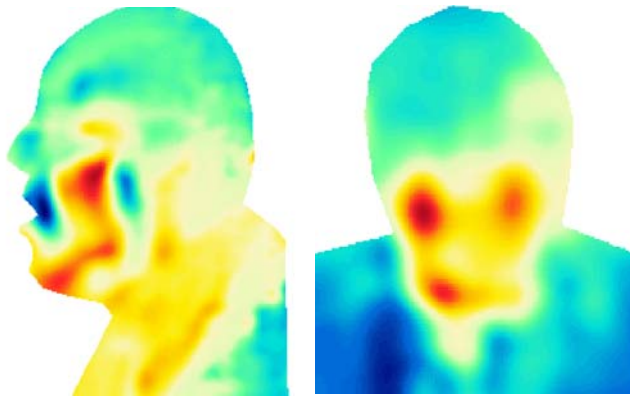
Obrázek 3. Kmity houslí (2004 Hz) buzených Dünnwaldovým budičem na kobylce v místě x



Obrázek 4. Identifikace špatně přilepeného žebra u kytary v okolí prvního rezonančního módu (203 Hz)



Obrázek 5. Změny hustoty vzduchu vně a uvnitř otevřené průhledné varhanní píšťaly (buzené plynem CO₂) na počátku nasazení tónu



Obrázek 6. Kmity obličeje zpěváka na vokálu „A“ (100 Hz)

Uznání

Projekt Výzkumného centra hudební akustiky je podporován Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky (čís. projektu 1M6138498401).

Odkazy

- [1] Jones, R., Wykes, C. (1989): Holographic and Speckle Interferometry, Cambridge University Press, ISBN 0 521 34878 1.
- [2] Syrový, V. (2005): Using of Pulse Interferometry on Musical Instruments, *Proceedings of the 12th International User Meeting*, Dantec Dynamics, Ulm, chapter 7.
- [3] Wang, Z., Etemeyer, A. (1997): Pulsed ESPI to Solve Dynamic Problems, Dr. Etemeyer Application Report No. 04-97, www.ettemeyer.de
- [4] Wernicke, G., Osten, W. (1982): Holografische Interferometrie, VEB Fachbundverlag, Leipzig.
- [5] Urgela, S. (1999): Holografická interferometria pri nedeštruktívnom testovaní dosák, MATCENTRUM, Zvolen.
- [6] Ising, H. (1969): Über die Klangerzeugung in Orgelpfeifen, Technische Universität, Berlin.