

# Syntéza zvuku pre počítačovú grafiku

Matej Marko

# Plán prednášky

- Úvod
- Syntéza kontaktných zvukov
- Syntéza zvukov kvapalín

# Syntéza zvuku v PG??

- Simulácia okolitého sveta – zvuk je jeho neoddeliteľnou súčasťou
- Sluchové vnímanie poskytuje veľké množstvo informácií: vzdialenosť zdroja, rozmery a materiál objektu, ďalšie vlastnosti zdroja, ktoré má ľudský pozorovateľ asociované s daným zvukom
- Syntéza pomocou fyzikálnej simulácie - „nekonštantnosť“ zvukov

# Čo je to zvuk

- Zvuk spôsobujú oscilácie tlaku v prostredí, ktoré majú frekvenciu v počuteľnom pásme (cca 20 – 20000 Hz)
- Oscilácie tlaku sú najčastejšie spôsobené vibráciami povrchu objektov, ktoré vytvárajú tlakové vlny
- Tlakové vlny sa šíria prostredím, až k poslucháčovi
- Poslucháč vníma vlnu, ktorá je rozptýlená geometriou jeho hlavy/uší

# Čo je to zvuk



- Časti pipeline môžu byť riešené nezávisle
- Presné riešenie vyžaduje určenia vibrácií zdroja, z toho vyplývajúce tlakové pole na mieste poslucháča
- V praxi sa používajú zjednodušenia – bodový zdroj, nahraté zvuky, propagácia ako rovinná vlna

# Reprezentácia zvuku

- 1-dimenzionálny signál, ktorého vzorky „reprezentujú tlak pri vstupe do ucha“
- Vzorkovanie je najčastejšie pravidelné – časový interval medzi vzorkami je konštantný
- Nyquistov-Shannonov teorém

$$F_s > 2F_{max}$$

# Computer music, VST, ...

- Zameranie na simulovanie hudobných nástrojov, resp. syntézu nových, zaujímavých zvukov
- Značné množstvo výskumu, výsledky sa používajú v praxi
- Syntéza často využíva nahraté sample
- Okrem hudobných nástrojov sa simulujú ostatné prvky hudobného reťazca – efekty, zosilňovače, mikrofóny, ...

# Zvuky vo virtuálnom prostredí

- Najčastejšie dopredu nahraté sample
- Výhody: nízke nároky na výkon, celkovo jednoduchší systém
- Nevýhody: zvuky sú statické a dovoľujú už iba minimálnu úpravu, nároky na miesto (najmä pri kvalitných samploch), všetky zvuky dopredu dané



# Zvuky kontaktov medzi objektami

- Interakcie medzi objektami sú jedným z najčastejších zdrojov okolo nás
- Výsledný zvuk objektu závisí od:
  - Tvaru a materiálu → frekvenčné spektrum
  - Mieste kontaktu → „farba“ (angl. Timbre), amplitúdy jednotlivých frekvenčných komponent
  - Sila úderu → veľkosť amplitúd
  - Materiál druhého kontaktného telesa

# Modálna syntéza

- Spôsob syntézy vhodný pre kontaktné zvuky
- Model objektu:  $\{ f, d, A \}$ 
  - $f$  - vektor dĺžky  $N$ , ktorý obsahuje frekvencie modelu
  - $d$  - vektor dĺžky  $N$ , ktorý obsahuje tlmiace faktory pre jednotlivé frekvenčné zložky
  - $A$  - matica  $N \times K$ , ktorá udáva amplitúdy zložiek (pre  $K$  rôznych pozícií kontaktu)
- Pre kontakt v bode  $k$

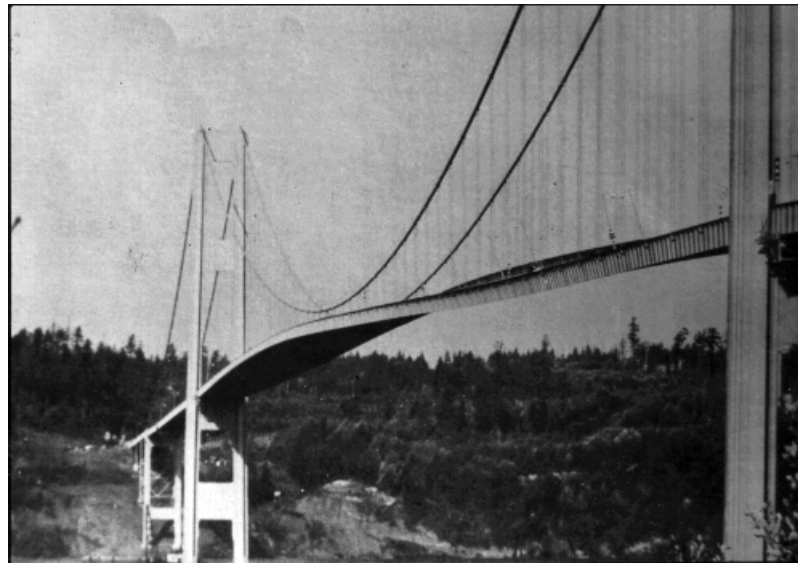
$$y_k(t) = \sum_{i=1}^N a_{ik} e^{-d_i t} \sin(2\pi f_i t)$$

# Modálna syntéza

- Ako získať modálny model objektu?
  - Ručne - „podľa ucha“
  - Analyticky pre jednoduché tvary (kruh, štvorec)
  - Odhad parametrov modelu z nahratých zvukov
  - Modelovaním predmetu a modálnou analýzou

# Modálna analýza

- Nájdenie/meranie dynamickej odozvy objektu na vonkajší vplyv
- Fyzickým testovaním
- Analýzou modelu (FEM)

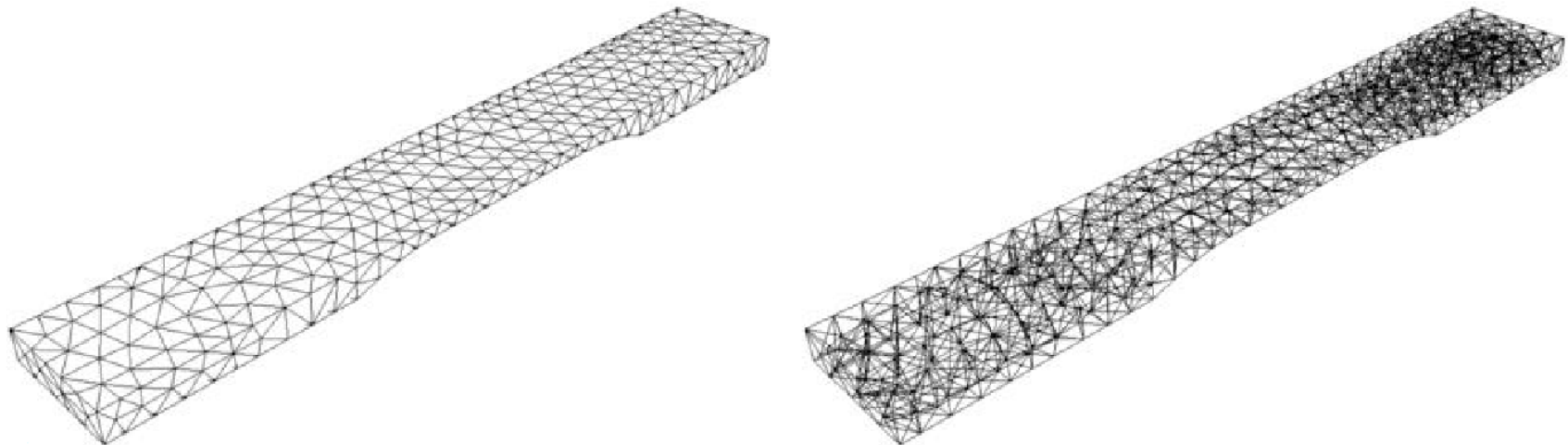


# Modálna analýza pre syntézu zvuku

- O'Brien et al. - Synthesizing Sounds from Rigid-Body Simulations (2002)
- Vibrácie objektov, ktoré spôsobujú zvuk sú príliš malé, aby mali vizuálny vplyv
- Ľubovoľný rigid-body simulátor, ktorý poskytuje informácie o kontaktoch a kontaktných silách sa dá rozšíriť o generovanie zvuku

# Modálna analýza pre syntézu zvuku

- Pre teleso, ktorého zvuk nás zaujíma zostavíme „deformačný“ model – FEM, spring-mass model, ..
- Objem telesa je diskretizovaný na konečný počet uzlov



# Modálna analýza pre syntézu zvuku

- Správanie uzlov popisuje rovnica:

$$Kd + C \dot{d} + M \ddot{d} = f$$

- $d$  - vektor posunutí uzlov (pre každý uzol: „o koľko je posunutý od počiatkovej polohy“)
- $K$  - matica tuhosti (stiffness matrix)
- $C$  - matica tlmenia (damping matrix)
- $M$  - matica hmotnosti (mass matrix)
- $f$  - externá sila

# Modálna analýza pre syntézu zvuku

- Rayleigh damping:

$$C = \alpha_1 K + \alpha_2 M$$

- Nepotrebuje maticu  $C$
- Výpočet je jednoduchší

$$Kd + (\alpha_1 K + \alpha_2 M)\dot{d} + M\ddot{d} = f$$

$$K(d + \alpha_1 \dot{d}) + M(\alpha_2 \dot{d} + \ddot{d}) = f$$



# Modálna analýza pre syntézu zvuku

- Choleského rozklad:  $M = L L^T$

$$y = L^T d$$

$$L^{-1} K L^{-T} (y + \alpha_1 \dot{y}) + (\alpha_2 \dot{y} + \ddot{y}) = L^{-1} f$$

- $L^{-1} K L^{-T}$  - symetrická reálna matica, existuje rozklad pomocou vlastných čísel a vlastných vektorov

$$L^{-1} K L^{-T} = V \Lambda V^T$$

- $\Lambda$  - diagonálna matica obsahujúca vl. čísla
- $V$  - matica obsahujúca vl. vektory

# Modálna analýza pre syntézu zvuku

$$z = V^T y$$

$$\Lambda(z + \alpha_1 \dot{z}) + (\alpha_2 \dot{z} + \ddot{z}) = V^T L^{-1} f$$

$$g = V^T L^{-1} f$$

$$\Lambda z + (\alpha_1 \Lambda + \alpha_2 I) \dot{z} + \ddot{z} = g$$

$$\Lambda_i z_i + (\alpha_1 \Lambda_i + \alpha_2) \dot{z}_i + \ddot{z}_i = g_i$$

# Modálna analýza pre syntézu zvuku

- Sústavu sme rozložili na N nezávislých rovníc
- Analytické riešenie pre i-tu rovnicu

$$z_i = c_1 e^{t\omega_i^+} + c_2 e^{t\omega_i^-}$$

- $c_1, c_2$  - ľubovoľné konštanty
- $\omega_i$  - komplexná frekvencia
  - Reálna zložka – tlmiaci faktor
  - Abs. imaginárnej zložky - frekvencia

$$\omega_i = \frac{-(\alpha_1 \lambda_i + \alpha_2) \pm \sqrt{(\alpha_1 \lambda_i + \alpha_2)^2 - 4\lambda_i}}{2}$$

# Modálna analýza pre syntézu zvuku

- Predpríprava (offline)
  - Zostavenie modelu a matic  $K, C, M$
  - Diagonalizácia a nájdenie frekvencií
- Výpočet (online)
  - Získanie údajov z rigid-body simulátora – vonkajšie sily  $f$
  - $g = V^T L^{-1} f$
  - Výpočet  $c_1, c_2$
  - Generovanie zvuku  $z_i = c_1 e^{t\omega_i^+} + c_2 e^{t\omega_i^-}$

# Modálna analýza pre syntézu zvuku

$$c_1 = \frac{2 \Delta t g_i}{\omega_i^+ - \omega_i^-}$$

$$c_2 = \frac{2 \Delta t g_i}{\omega_i^- - \omega_i^+}$$

- $\Delta t$  - trvanie pôsobenia vonkajšej sily
- Po dosadení a úpravách (zaujímá nás iba reálna zložka  $z_i$ )

$$z_i = \frac{2 \Delta t g_i}{|\operatorname{Im}(\omega_i)|} e^{t \operatorname{Re}(\omega_i)} \sin(t |\operatorname{Im}(\omega_i)|)$$

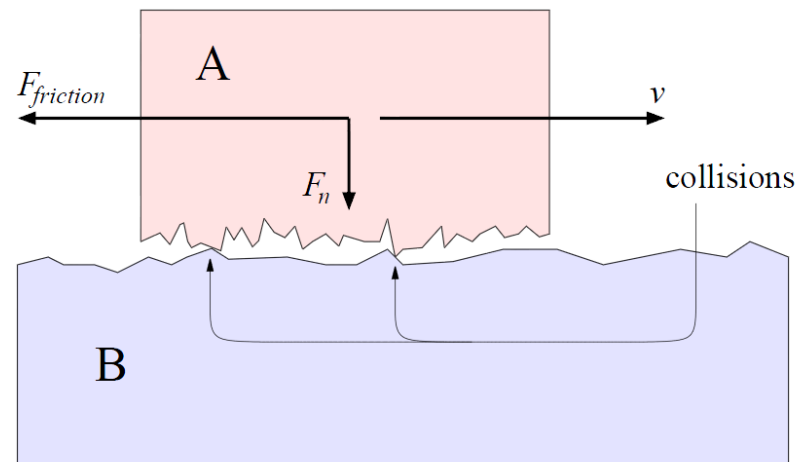
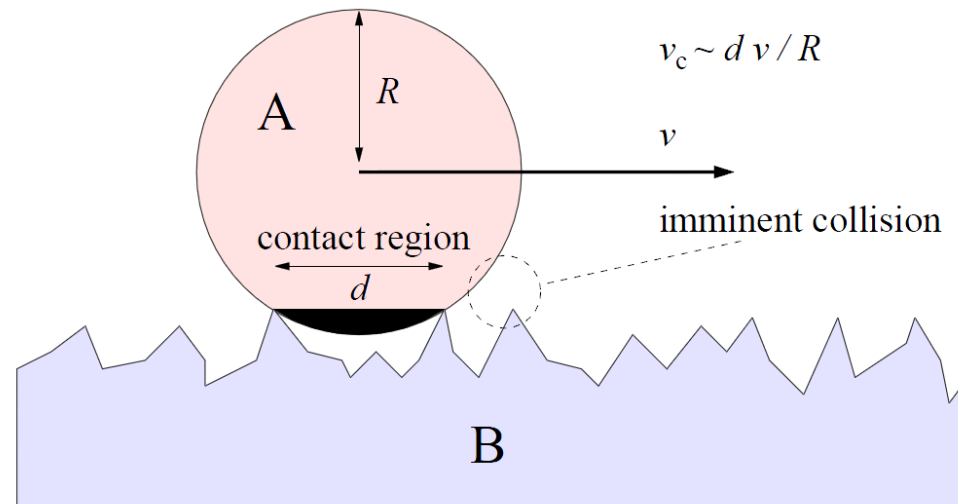
# Zrýchlenia

- Zaujímajú nás iba frekvencie v počuteľnom pásme, 20-20000Hz
- Počet použitých frekvenčných zložiek – faktor kvality (prvých „niekoľko sto“ stačí)
- Vyhodnotenie vzorca pomocou  $e^{t+s} = e^t + e^s$
- Kompresia zložiek odvodená od kvality ľudského vnímania
- Syntéza vo frekvenčnej oblasti

# Nie len jednoduché kontakty

- Model syntézy zvukov na základe sily a pozície kontaktu telies sa dá rozšíriť
- Vhodným generovaním vstupnej sily môžeme syntetizovať spojité kontakty – šmýkanie a kotúľanie telies, ...

# Nie len jednoduché kontakty





# Zvuky kvapalín

- Dobre rozpoznateľné ľudským poslucháčom
- Významné pokroky vo vizuálnej simulácii kvapalín, zvuk bol vždy iba pripravená nahrávka
- Nevýhody pred-pripraveného zvuku: opakovanie, nekonzistencia s obrazom

# Zvuky kvapalín

- Zheng & James – Harmonic Fluids (2009)
- Prvý pokus o procedurálne generovanie zvukov kvapalín prostredníctvom rozšírenia simulátora kvapalín
- Cieľ: generovať zvuk, ktorý bude zodpovedať simulácii kvapaliny, bez toho, aby výpočet prebiehal na vzorkovacej frekvencii zvuku

# Príčina zvuku kvapalín

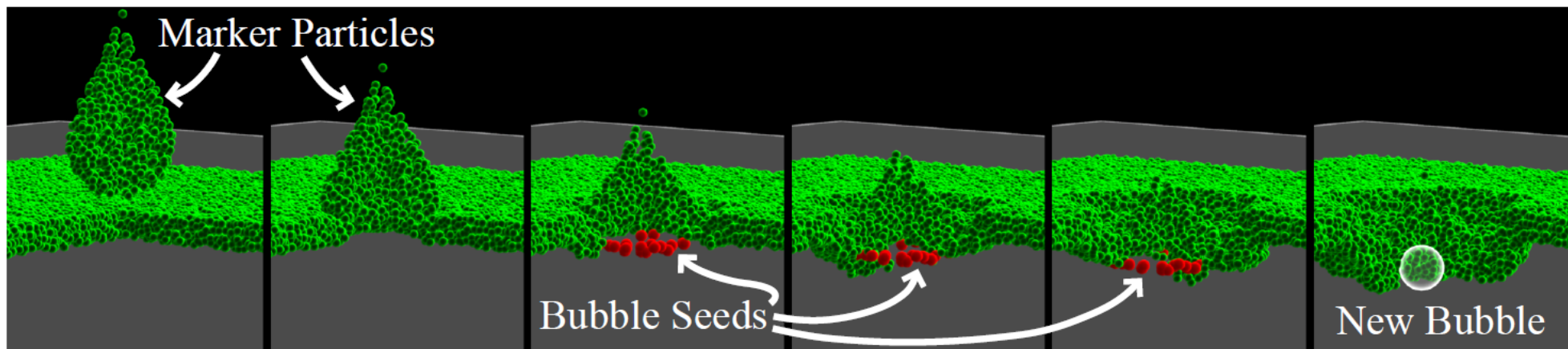
- Viditeľný pohyb hladiny – minimálny príspevok
- Malé bubliny vzduchu, ktoré sú vtiahnuté pod hladinu a oscilujú, tým spôsobujú harmonické oscilácie hladiny
- M. Minnaert – On musical air-bubbles nad sounds of running water (1933)

# Zvukové bubliny

- Bubliny majú rozmery približne 1mm
- Považujú sa za monofrekvenčný oscilátor, ktorého kmitania riadia povrchové napätie, tlak kvapaliny a počiatočný impulz (súvisí so vznikom bubliny)

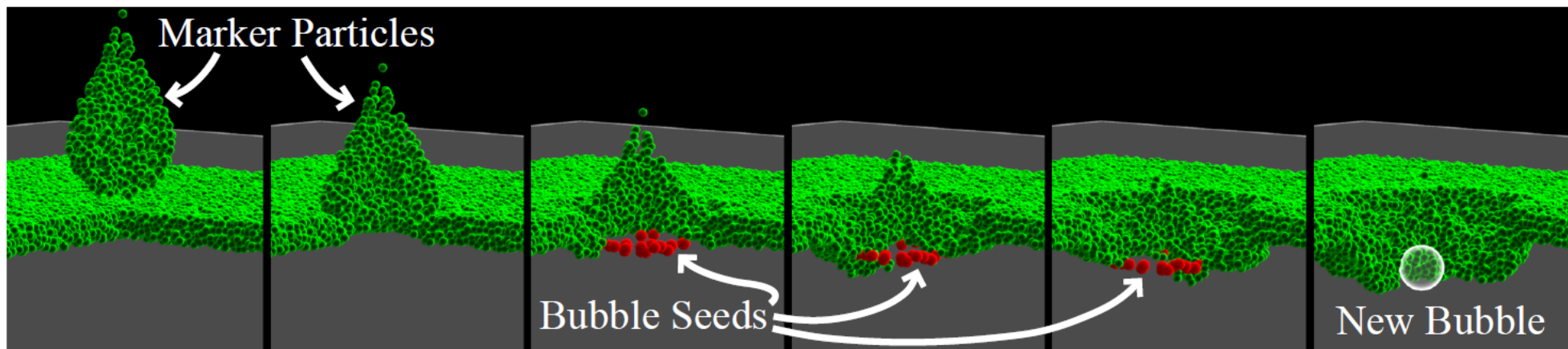
# Vznik bublín

- V skutočnosti komplikovaný proces ako následok pohybu rozhrania vzduch/kvapalina
- Zjednodušené model – sledujú sa náhle pohyby tekutiny z oblasti blízko hladiny smerom „do kvapaliny“



# Vznik bublín

- Častice blízko hladiny sa označia
- Ak sa detekuje dostatočné potopenenie označených, vytvoria sa „bubble seeds“



# Vznik bublín

- Každý seed má čas vzniku a dobu života
- Na základe uplynutého času od vytvorenia vieme určiť potenciál na vytvorenie bubliny
- Celkový súčet potenciálov určuje počet pokusov o vytvorenie nových bublín

# Vznik bublín

- Pre počet pokusov sa náhodne vyberie veľkosť bubliny (od jej polomeru závisí frekvencia – rozdelenie veľkostí ovplyvňuje výsledný zvuk)
- Pozícia sa náhodne vyberie zo seedov (density based sampling)
- Ak v okolí nieje dost seedov, pre danú veľkosť bubliny, je zamietnutá

5.0 mm (1.3 kHz) → 

2.0 mm (3.3 kHz) → 

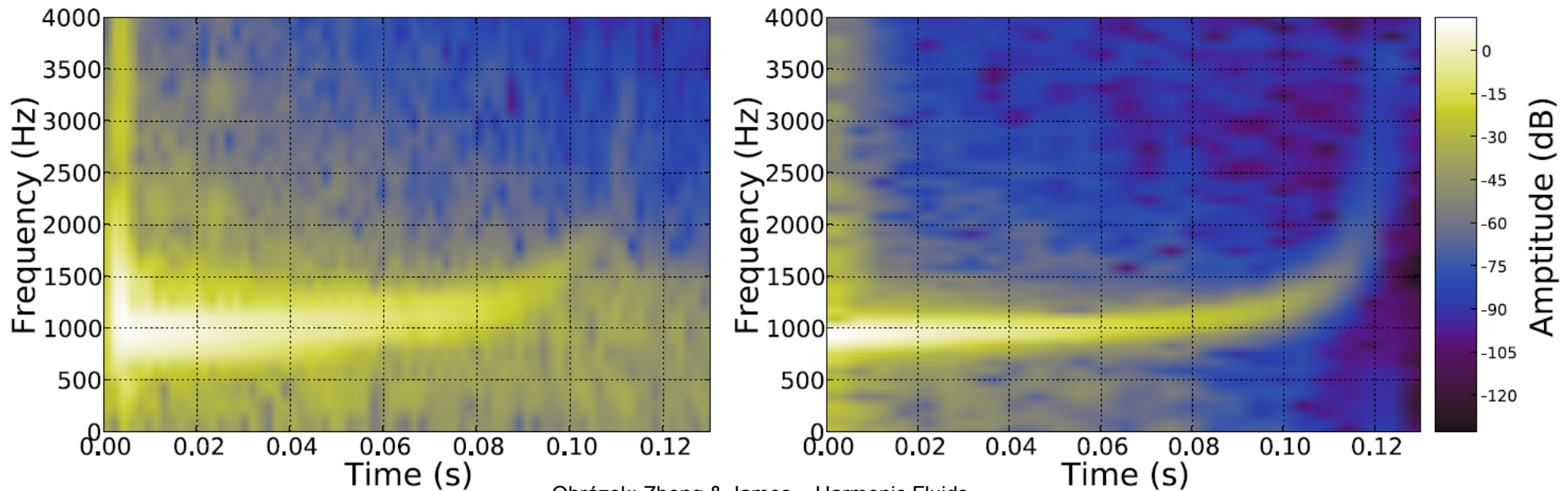
1.0 mm (6.6 kHz) → 

0.5 mm (13. kHz) → 



# Transport bublín

- Modelujú sa ako stúpajúce častice
- Každá nezávisle na ostatných – kolízie sa zanedbávajú
- Z približovaním k hladine sa mení frekvencia bubliny



# Syntéza zvuku

- „Heavy math“
- Rýchlosť zvuku v kvapalinách je výrazne vyššia ako vo vzduchu – pri výpočte šírenia zvuku v kvapaline sa geometria kvapaliny považuje za statickú
- 2-krokový algoritmus
  - Výpočet tlaku na hladine vyplývajúceho z oscilácie bublín
  - Výpočet tlaku vzduchu, ktorý je spôsobený vibráciami hladiny

# Syntéza zvuku

- Výsledkom je prechodová funkcia (transfer function), ktorá pre pozíciu bubliny a pozíciu poslucháča určí ako sa prejaví oscilácia bubliny

$$|P(x_b, x)|q(t)$$

- $x_b$  - pozícia bubliny
- $x$  - pozícia poslucháča
- $q(t)$  - oscilátor spojený s bublinou

# Syntéza zvuku

- Výpočty na vizuálnej frekvencii
  - Simulácia kvapaliny
  - Výtvaranie a transport bublín
  - Výpočet prechodovej funkcie
- Výpočty na audio frekvencii
  - Úprava frekvencií bublín podľa hĺbky
  - Vzorkovanie prechodovej funkcie a hodnoty oscilátora spojeného s bublinou

# Zhrnutie

- Algoritmus procedurálne generujúci zvuky kvapalín na základe vizuálnej simulácie kvapaliny
- Paralelizovateľnosť – jednotlivé bubliny sú nezávislé