

ICSAF 2019

イマーシブオーディオの技術と動向

濱崎公男

ARTSRIDGE LLC

講演の内容

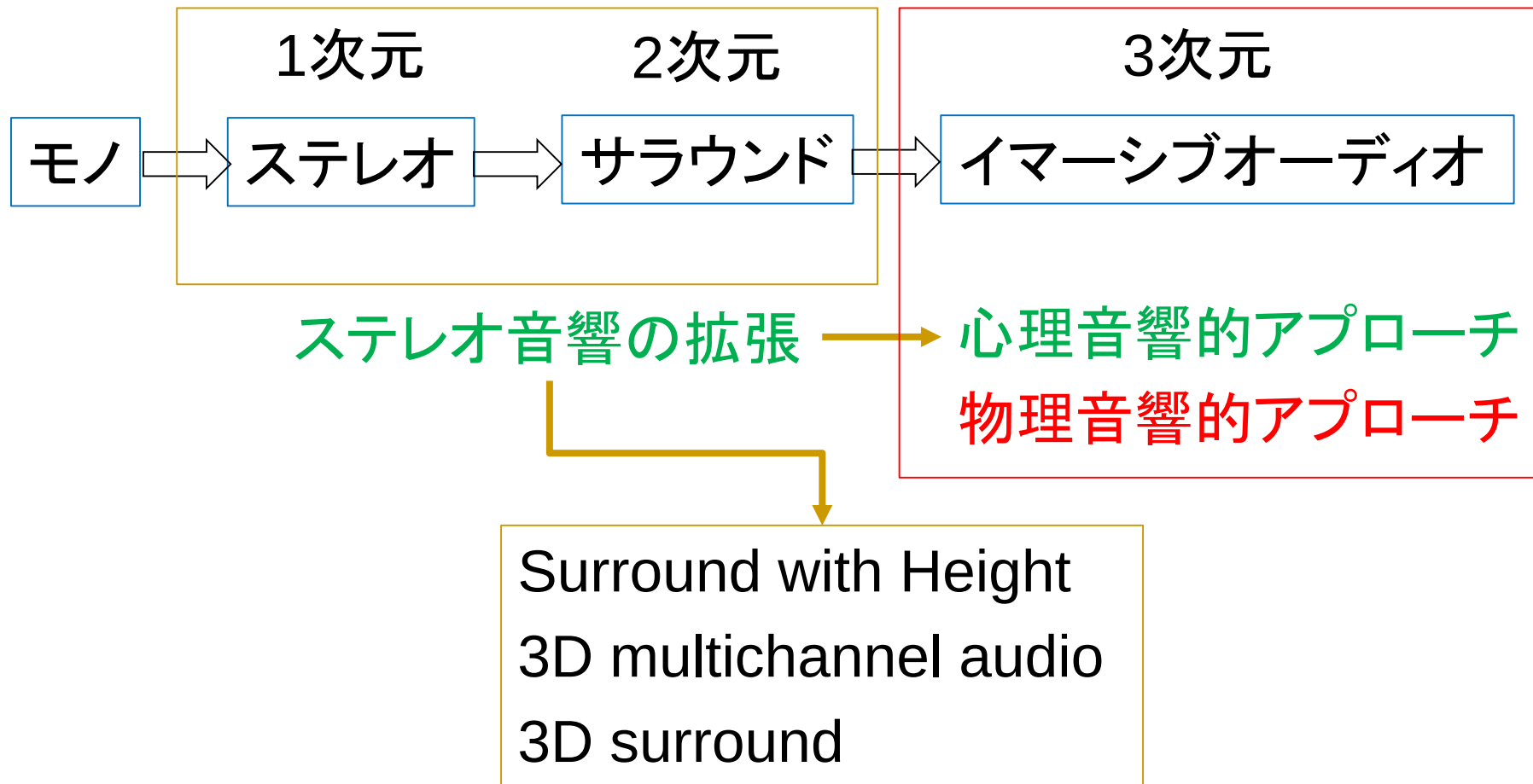
- イマーシブオーディオとは
- イマーシブオーディオに用いられる要素技術
- イマーシブオーディオの実例
- イマーシブサウンドの体験

講演の内容

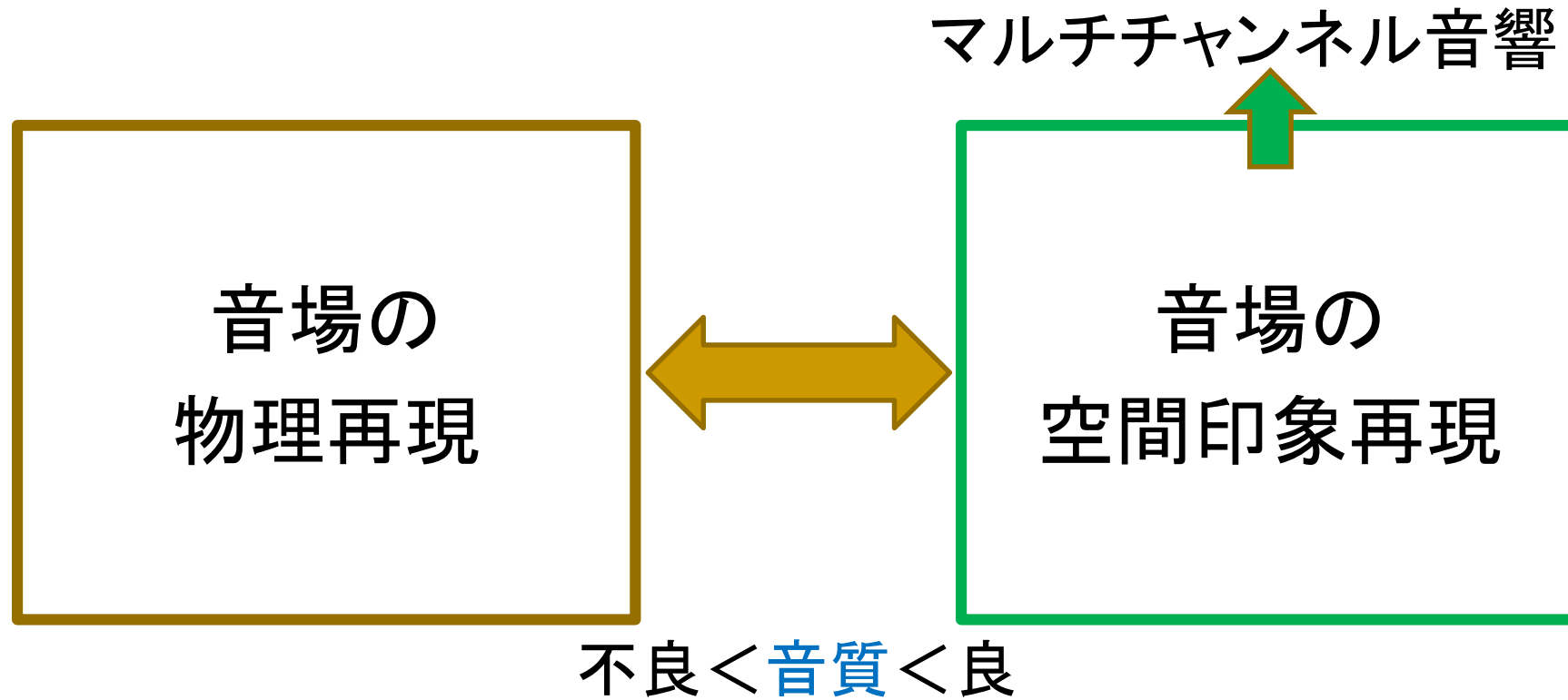
- イマーシブオーディオとは
- イマーシブオーディオに用いられる要素技術
- イマーシブオーディオの実例
- イマーシブサウンドの体験

イマーシブオーディオとは？

「私たちが聞いている音そのものを何ら制限なく収音再生する」



イマーシブオーディオの技術



容易 > 物理モデル(数学によるモデル化) > 難
大 > トランスデューサによる理論と現実の乖離 > 小
小 < 従来の高音質録音技術の適用性 < 大

音の感覚は4要素

	大きさ Loudness	高さ Pitch	音色 Timber	空間知覚 Spatial perception
表現方法	大きい／小さい	高い／低い	音色表現用語	方向、距離、広がり、 空間の大きさ、その他
物理量	音の強さ ・ 音圧 (μPa) ・ 音圧レベル (dBSPL)	周波数 (Hz)	複合物理量	複合物理量
単／両耳	単耳	単耳	単耳／両耳	両耳



これだけでも音楽芸術は成立する



実現手段: イマーシブオーディオ

- ◆ 音楽的な意味をどう求めるか
- ◆ 音響的な利点をどう利用するか

ソニックアートにおける イマーシブオーディオの役割

ダイナミクス(音の大きさ)、音階(音の高さ)、オーケストラレーションなど(音色)、リズムなどの要素で構成される音楽に対し

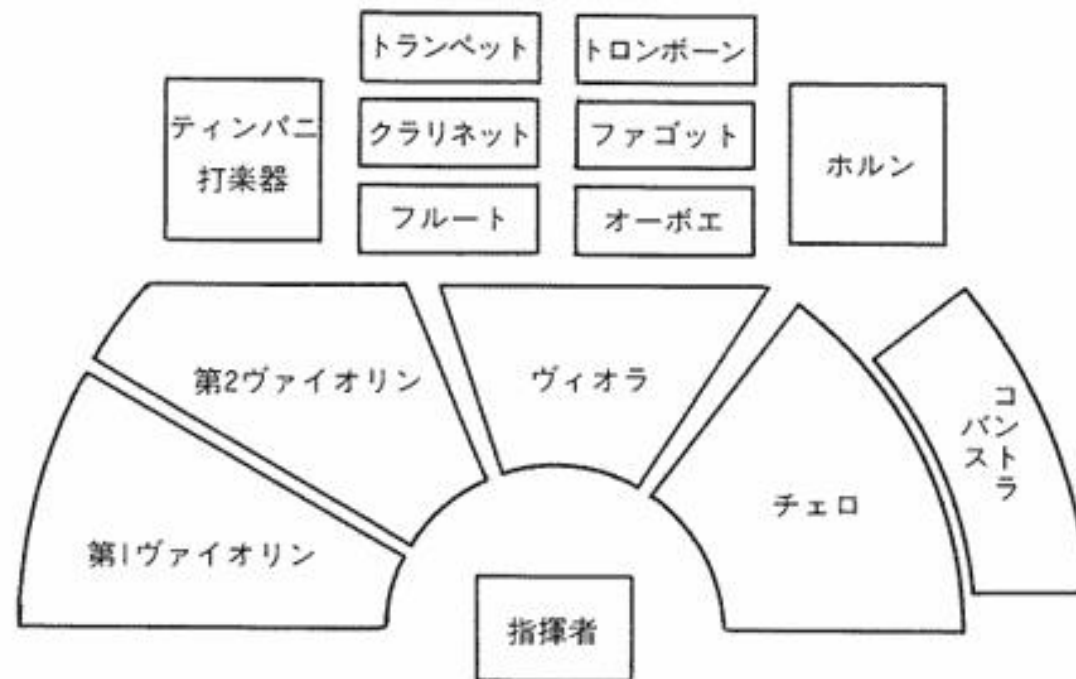
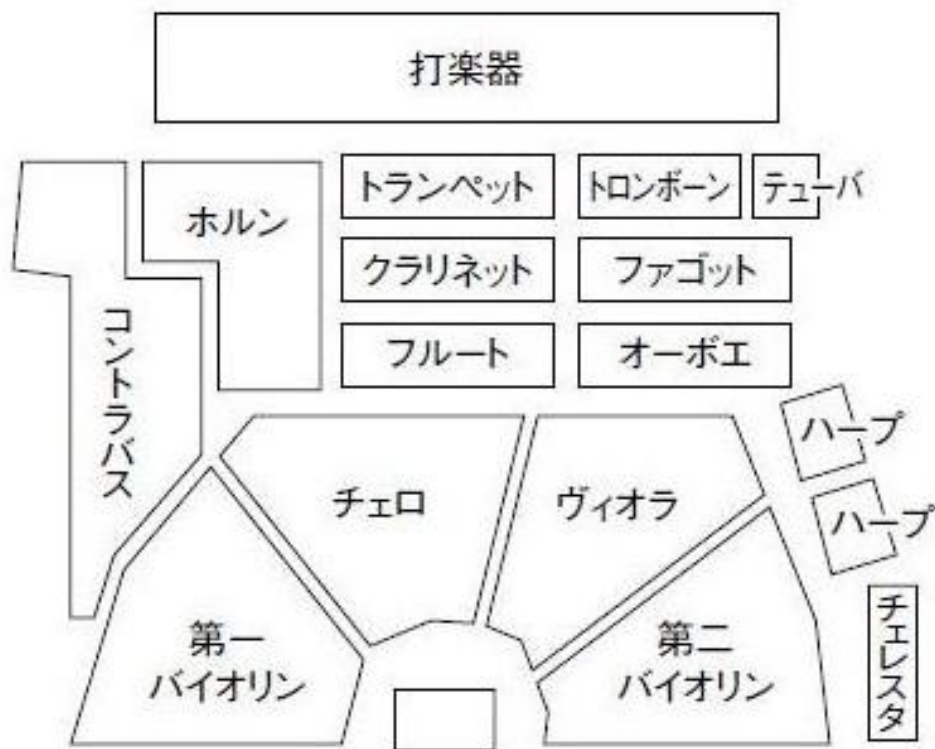


新たな要素(音の方向、距離、広がり、空間の大きさなど)を加える

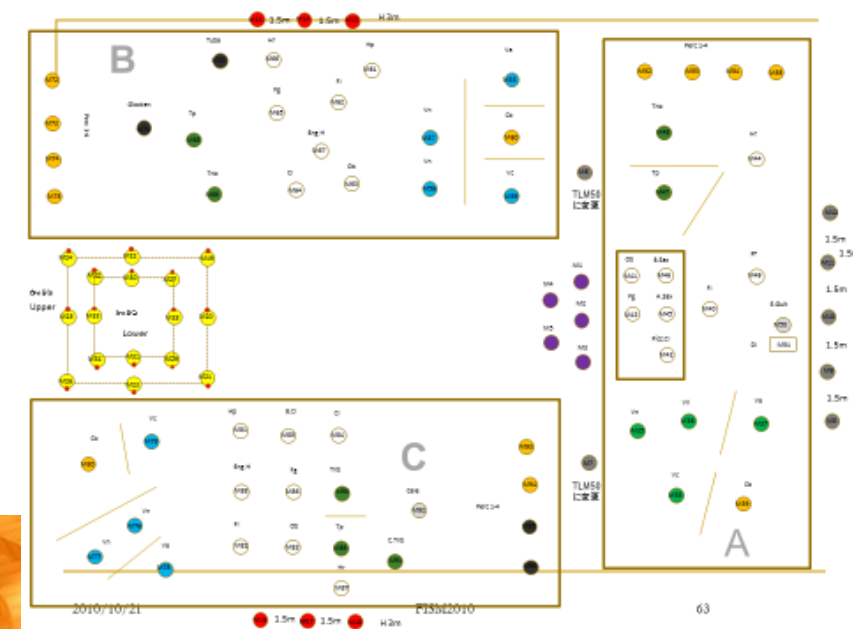


既存の要素と同じく**音楽的な表現手段となる**ことが重要

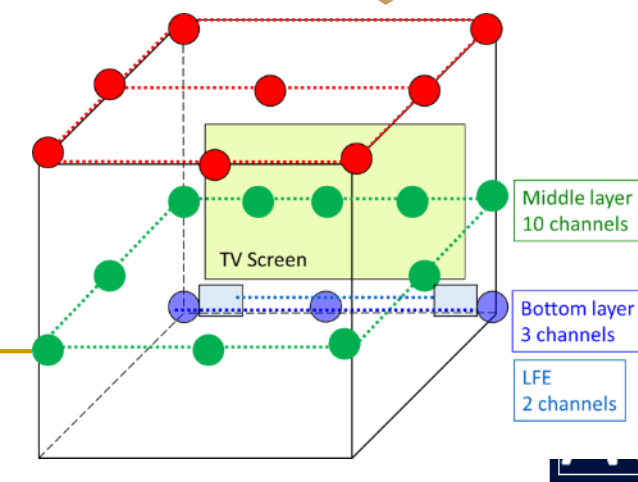
空間知覚の考慮:オーケストラ配置



空間知覚の考慮: “Gruppen” by KARLHEINZ STOCKHAUSEN

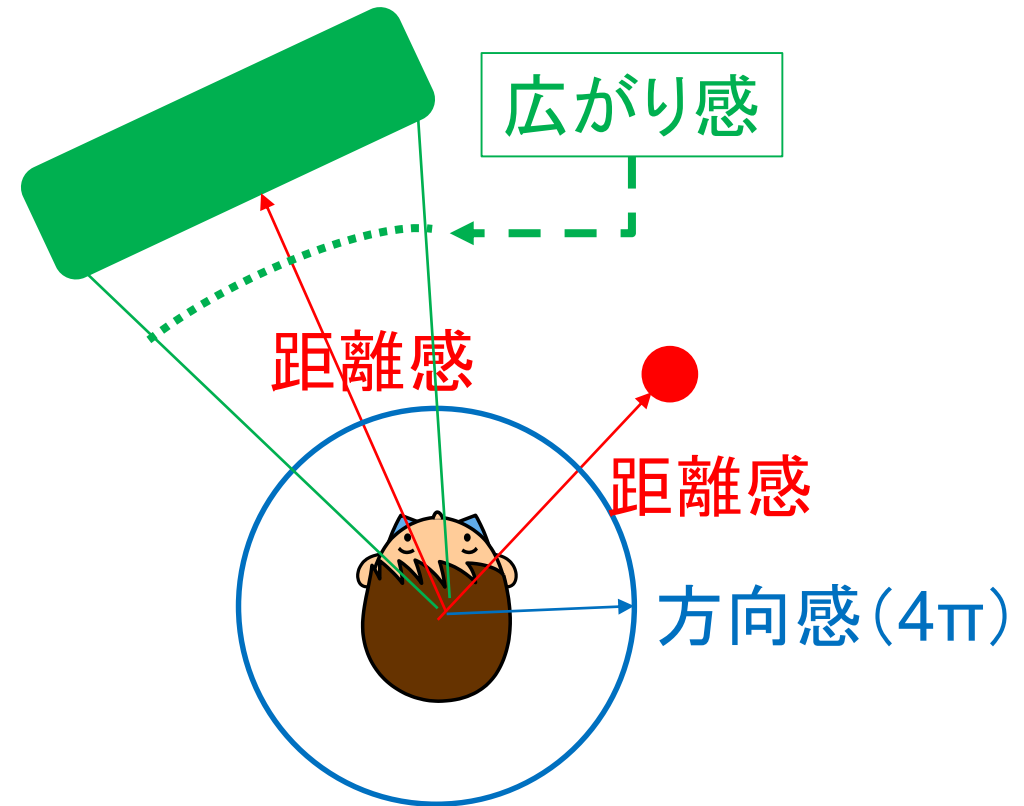


空間再現



空間知覚：音源の位置の判断

- 音像 (Sound image)
 - 知覚として生じる音の像
- 音像定位 (Sound localization)
 - 知覚される音像の位置
- 方向感、距離感、広がり感
- 音像の方向や空間分布は、必ずしも音源の物理的な位置とは一致しない



方向感



距離感



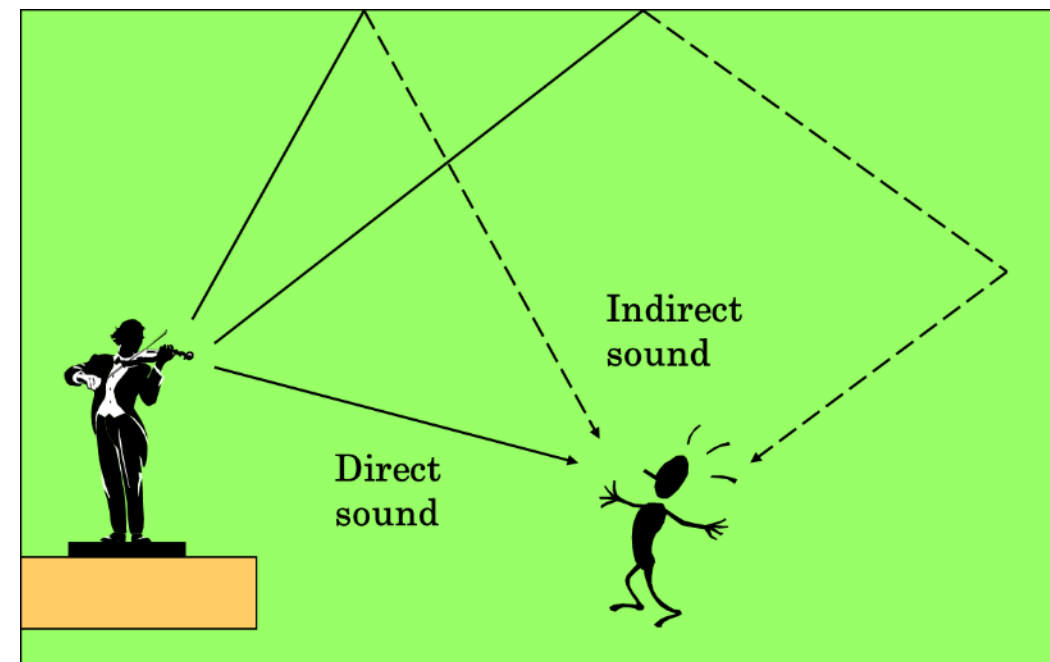
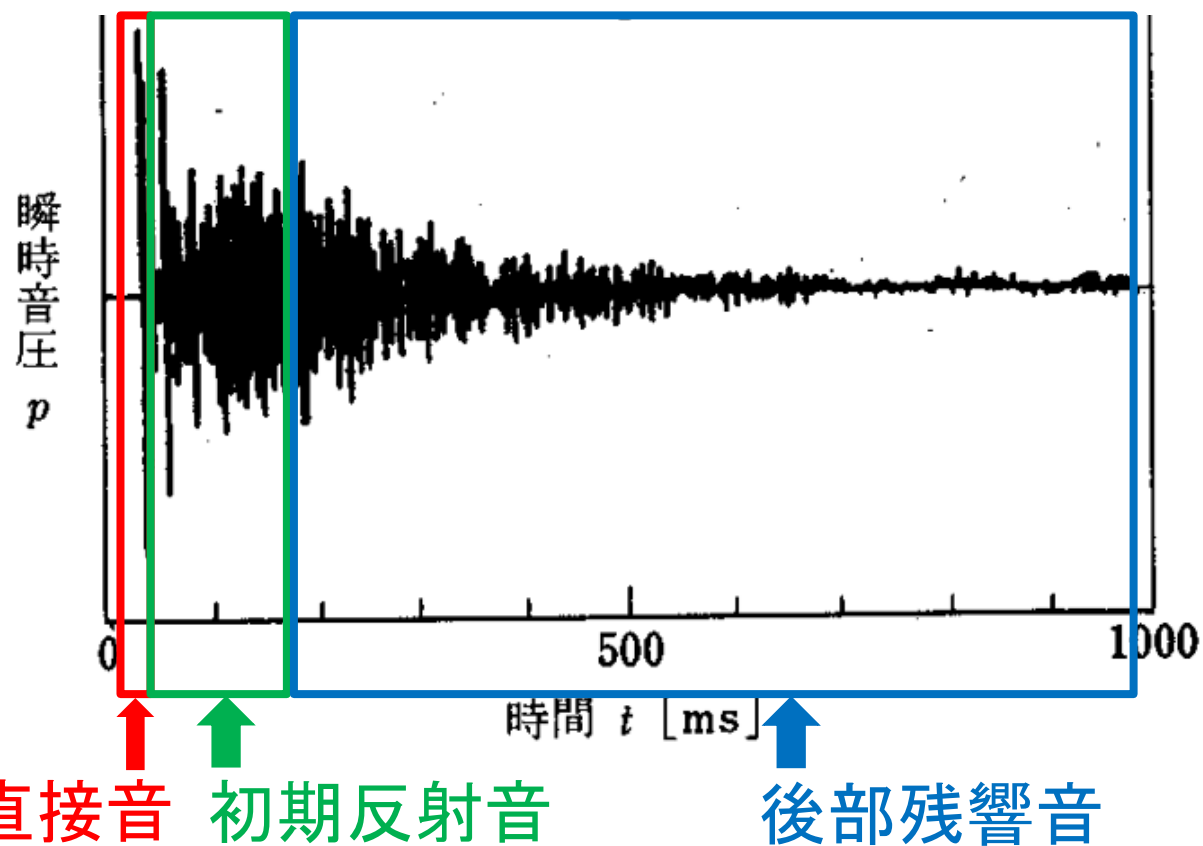
広がり感



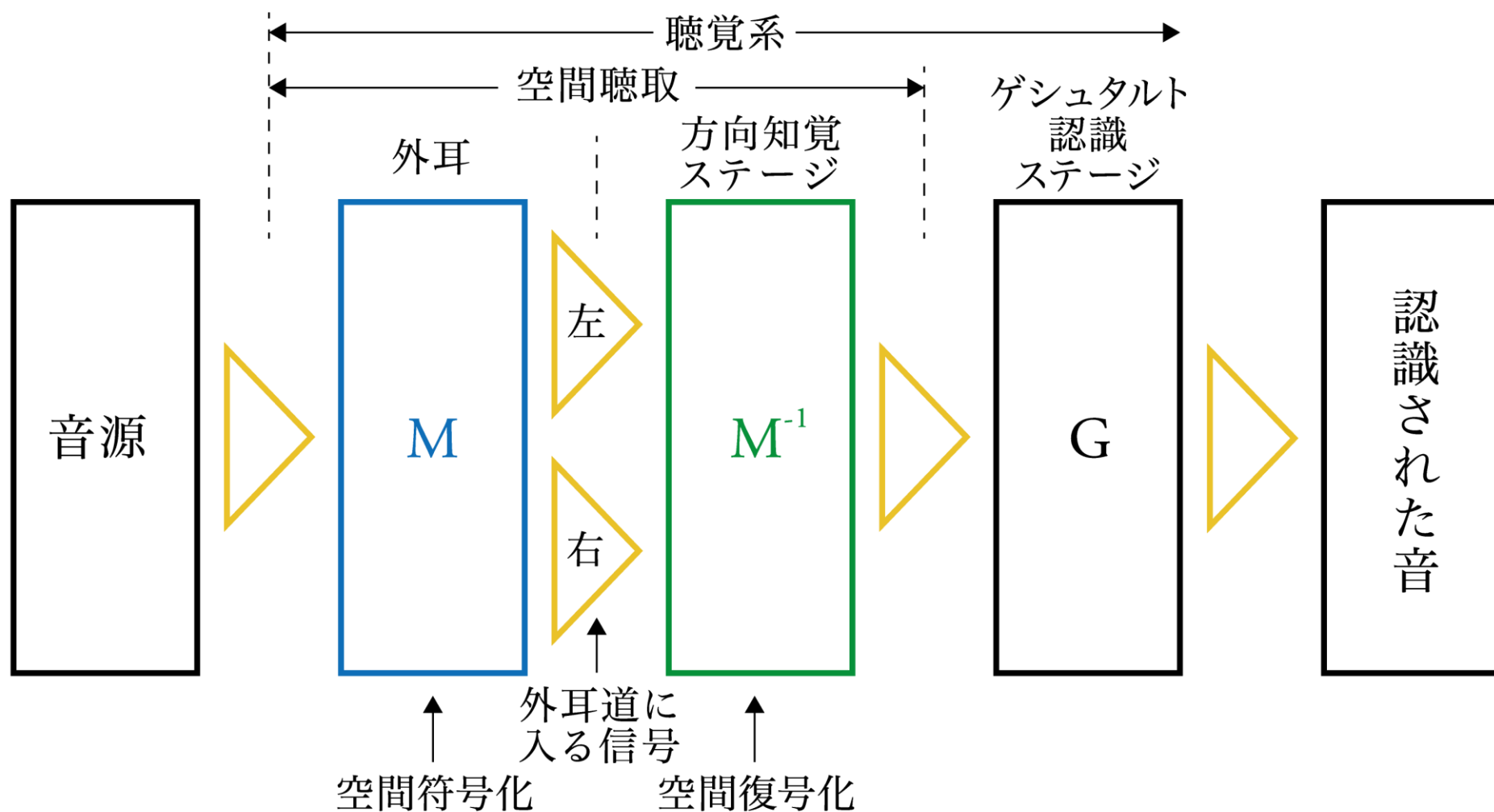
空間知覚：音場の大きさ(広さ)の判断

直接音、初期反射音、後部残響

方向別反射音の差異



聴覚の空間知覚とゲシュタルト認識



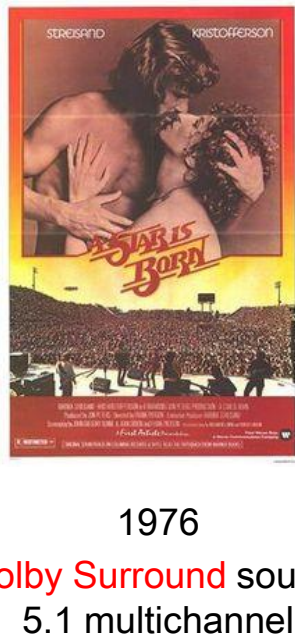
Günther Theile: On the Standardization of the Frequency Response of High-Quality Studio Headphones, JAES Vol.34, No.12, 1986 December



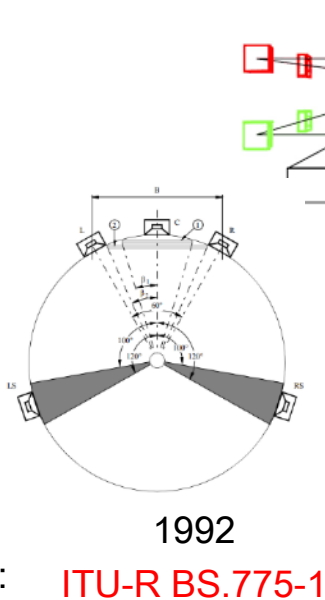
1881
Theatrophone
Stereophonic surround sound



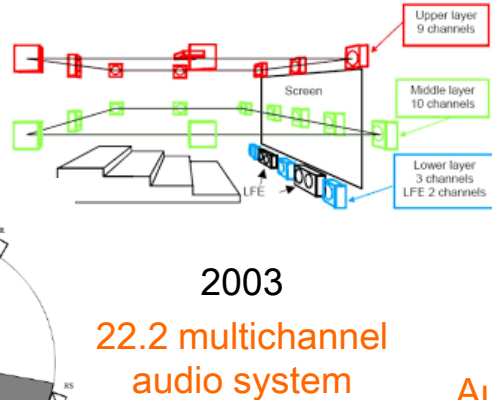
1939
Fantasia
Stereophonic surround sound



1976
Star 80
Dolby Surround sound:
5.1 multichannel



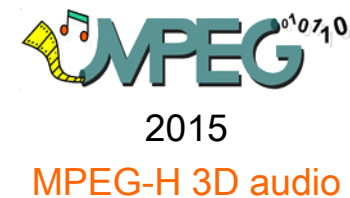
1992
ITU-R BS.775-1
22.2 multichannel audio system



2012
Dolby Atmos
immersive audio
in movie theater

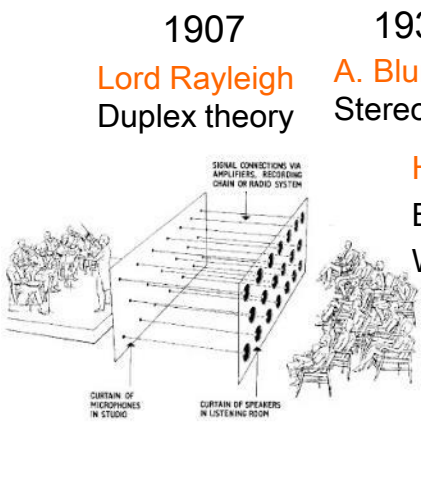


2005
Auro-3D format

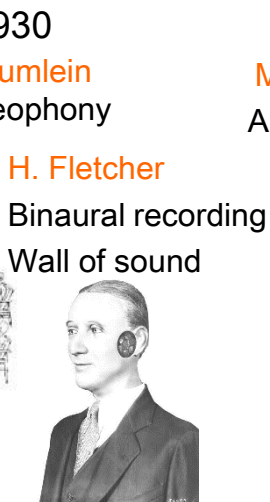


2015
MPEG-H 3D audio

2015
AES69-2015
AES standard for
file exchange -
Spatial acoustic
data file format



1907
Lord Rayleigh
Duplex theory



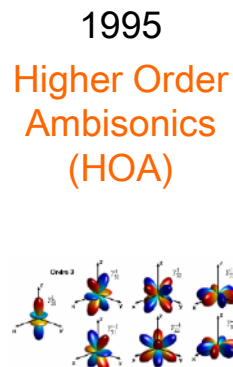
1930
A. Blumlein
Stereophony



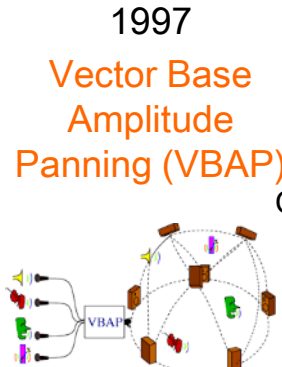
1973
M. Gerzon
Ambisonics



1988
Wave Field
Synthesis
(WFS)



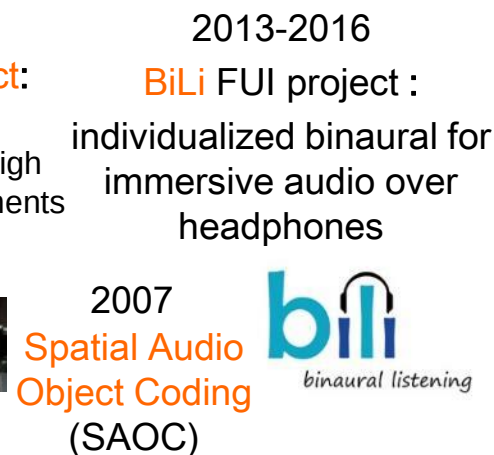
1995
Higher Order
Ambisonics
(HOA)



1997
Vector Base
Amplitude
Panning (VBAP)



2001-2003
CARROUSO IST project:
Creating, Assessing and
Rendering in Real Time of High
Quality Audio-Visual Environments
in MPEG-4 Context



2013-2016
BiLi FUI project :
individualized binaural for
immersive audio over
headphones

Rozenn Nicol: Heyser Memorial Lecture – 140th AES International Convention, June 2016,

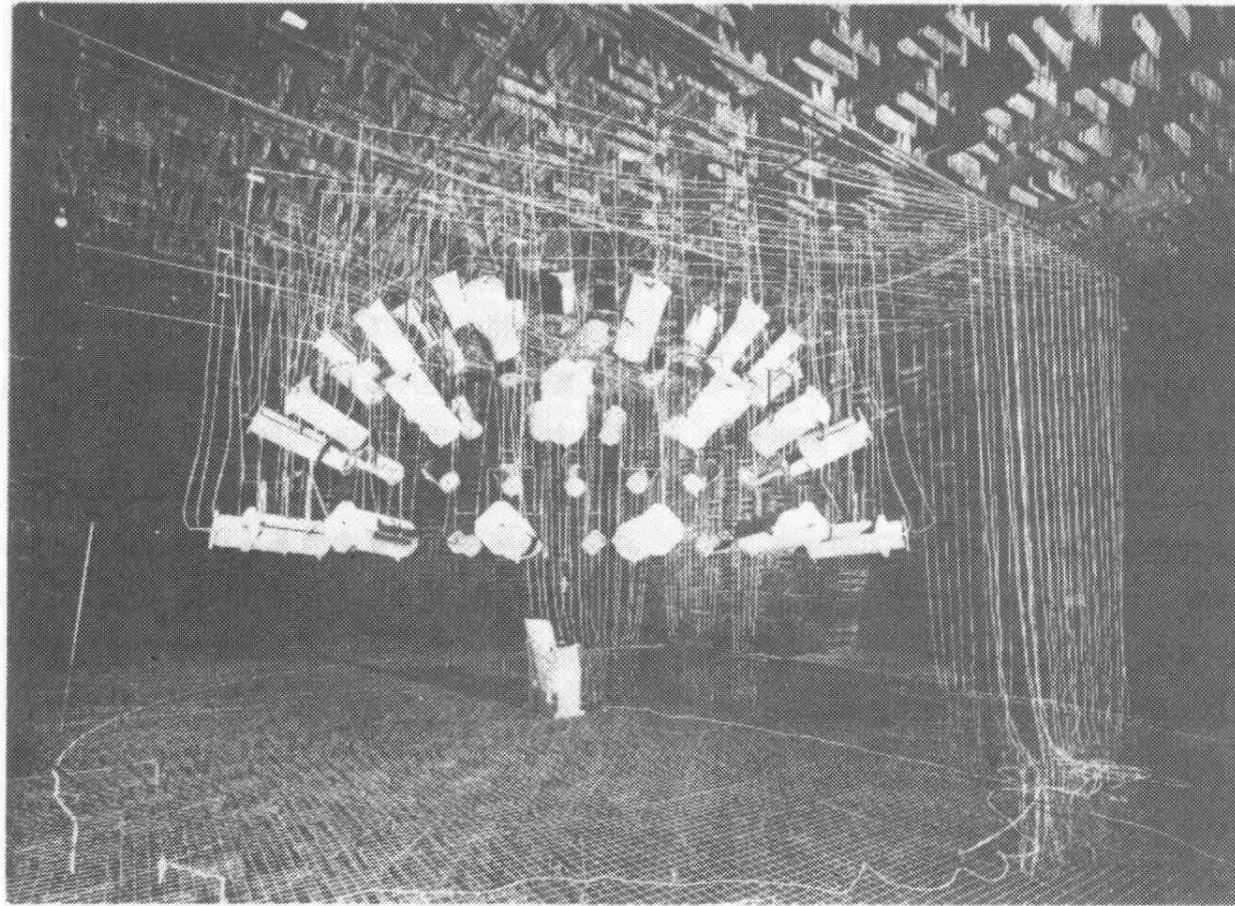
講演の内容

- イマーシブオーディオとは
- イマーシブオーディオに用いられる要素技術
- イマーシブオーディオの実例
- イマーシブサウンドの体験 at N320

分類	技術	備考
方向制御に基づく方式	2chステレオフォーニー	2つの指向性を形成して收音し、それぞれの方位に対応するスピーカで再生
	立体角分割法(マルチチャンネル音響)	複数の指向性を形成して收音し、それぞれの方位に対応するスピーカで再生
	Ambisonics	直交する指向性を形成して收音し、物理モデルに基づき、スピーカでの出力信号を決定
聴取点制御に基づく方式	バイノーラル	ヒトや頭部模型の耳元にマイクロホンを設置して收音した音をヘッドホンで再生
	伝達関数合成法	音源から聴取者までの音波伝搬を伝達関数で記述し合成。ヘッドホンによるバイノーラル再生か、スピーカによるトランスオーラル再生
空間制御に基づく方式	波面合成法(WFS, Wave Field Synthesis)	Kirchhoff-Helmholtz積分方程式の特殊な場合で、第2種Rayleigh積分に基づき、無限平面を境界面とし音場を制御
	境界音場制御	Kirchhoff-Helmholtz積分方程式に基づき、閉空間の境界面の音圧を制御することで、その領域の音場を制御
	High Order Ambisonics	球状の境界面上の音圧分布を球面調和解析で分解し、各モードで再現することで、到来方向と音圧分布を同時に制御

方向制御に基づく方式

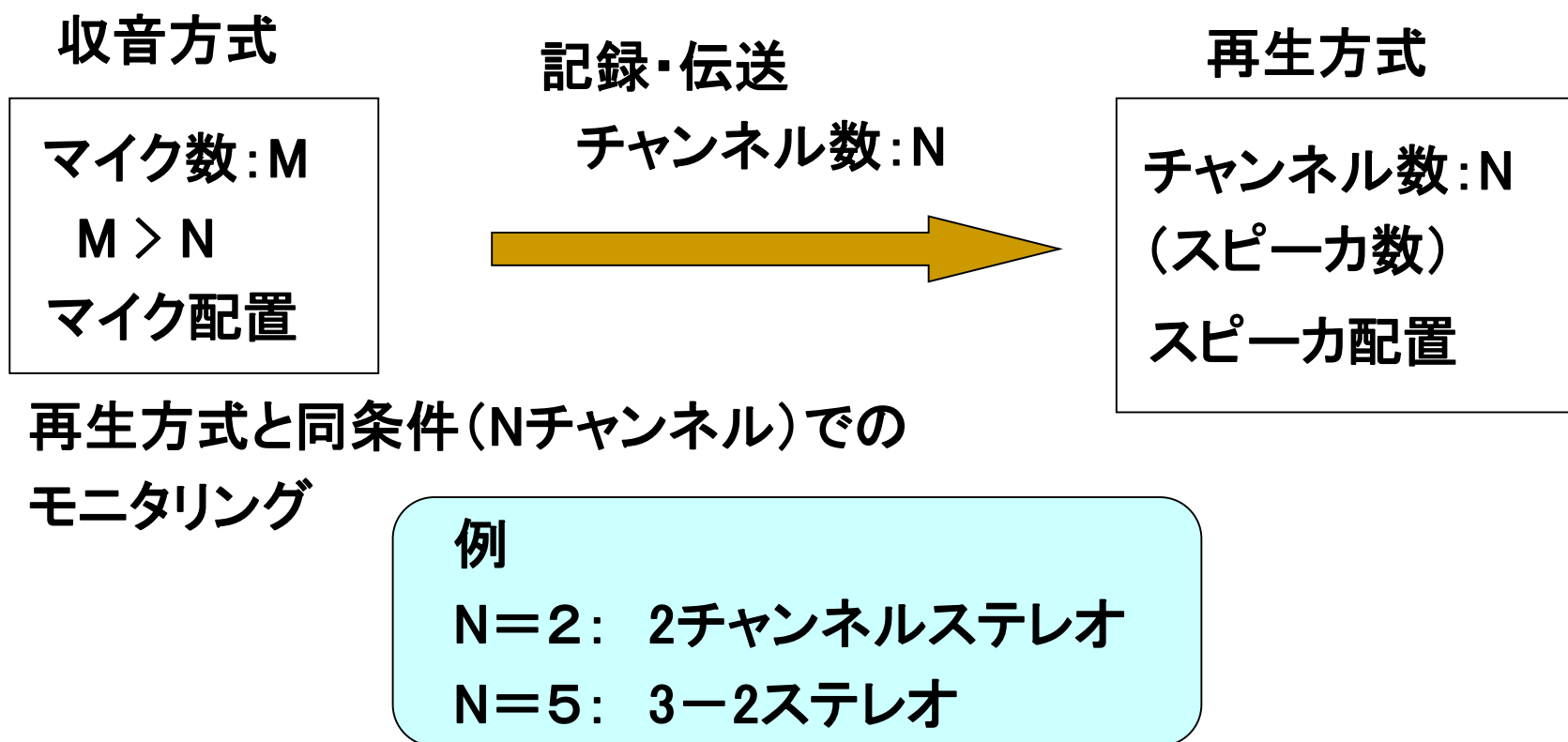
立体角分割法



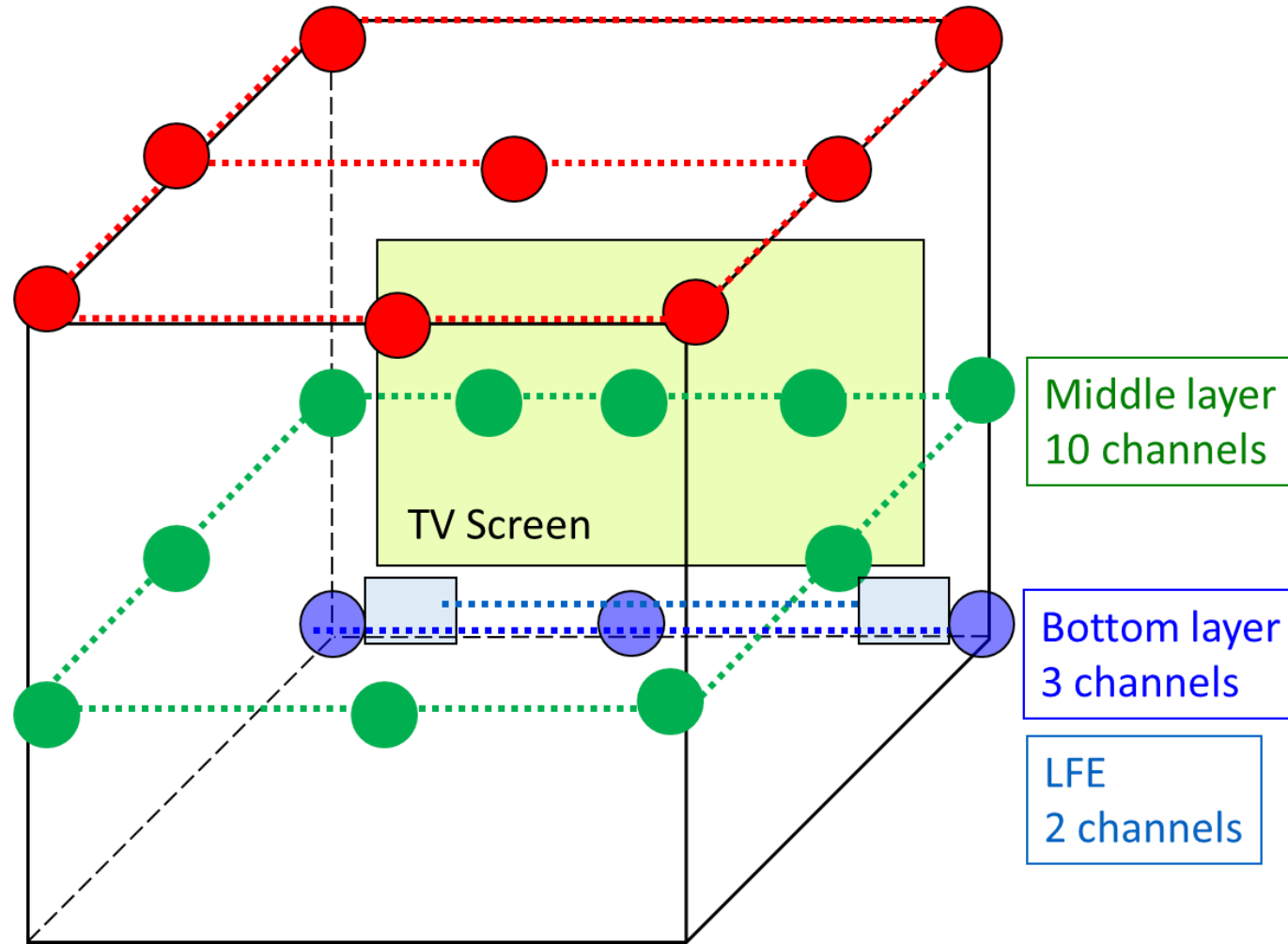
Göttingen Universtiy, Meyer, Burgtorf and Damaske, 1965

立体角分割法: マルチチャンネル音響

聴取者の周りに複数個のスピーカを配置した立体音響再生方式



22.2 マルチチャンネル音響システム



Abmisonics

1970年代 Michel Gerzon(英国Oxford大学): First-Order Ambisonics B-Format

$$W = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i \left[\frac{1}{\sqrt{(2)}} \right]$$

全方向

$$X = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\cos \phi_i \cos \theta_i]$$

X方向

$$Y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\sin \phi_i \cos \theta_i]$$

Y方向

$$Z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k s_i [\sin \theta_i]$$

Z方向

s_i : モノ信号

Φ_i : 水平角 (azimuth, phi)

Θ_i : 仰角 (elevation, theta)

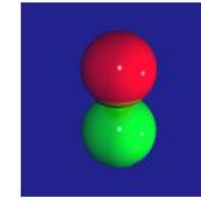
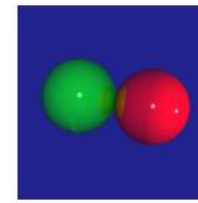
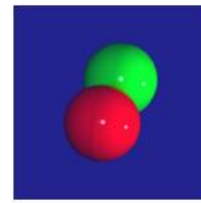
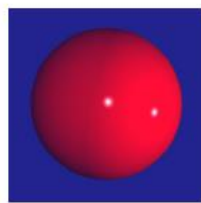
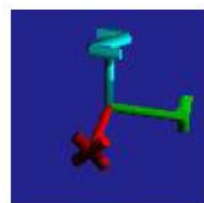
サウンドフィールドマイク

全指向 + 3両指向

実用上は4単一指向で実現



基本は4ch



First Order Ambisonic encoding functions

全方向

$$\frac{1}{\sqrt{(2)}}$$

X方向

$$\cos \phi \cos \theta$$

Y方向

$$\sin \phi \cos \theta$$

Z方向

$$\sin \theta$$

Ambisonics: Decoding

$$p_j = \frac{1}{L} \left[W \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) + X (\cos \phi_j \cos \theta_j) + Y (\sin \phi_j \cos \theta_j) + Z (\sin \phi_j) \right]$$

(Φ_i, θ_i) : i チャンネルスピーカの位置

4スピーカ再生

$$\begin{aligned} LF &= W + X + Y \\ RF &= W + X - Y \\ LB &= W - X + Y \\ RB &= W - X - Y \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} F &= W + X \\ L &= W + Y \\ R &= W - Y \\ B &= W - X \end{aligned}$$

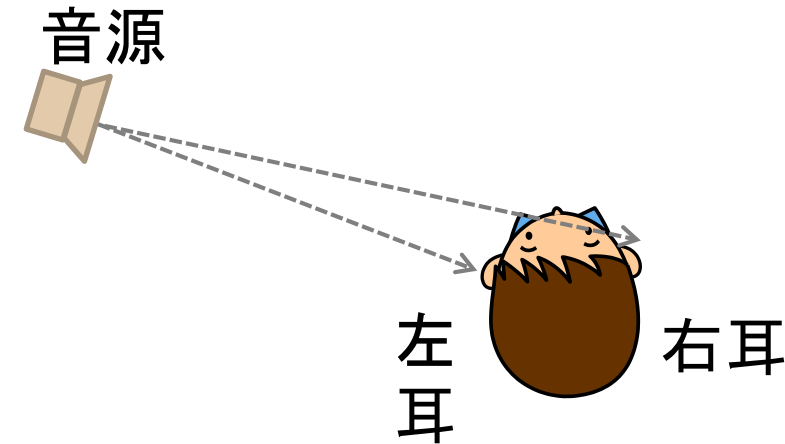


聴取点制御に基づく方式

バイノーラル: ヒトはなぜ音の方向が分かるか

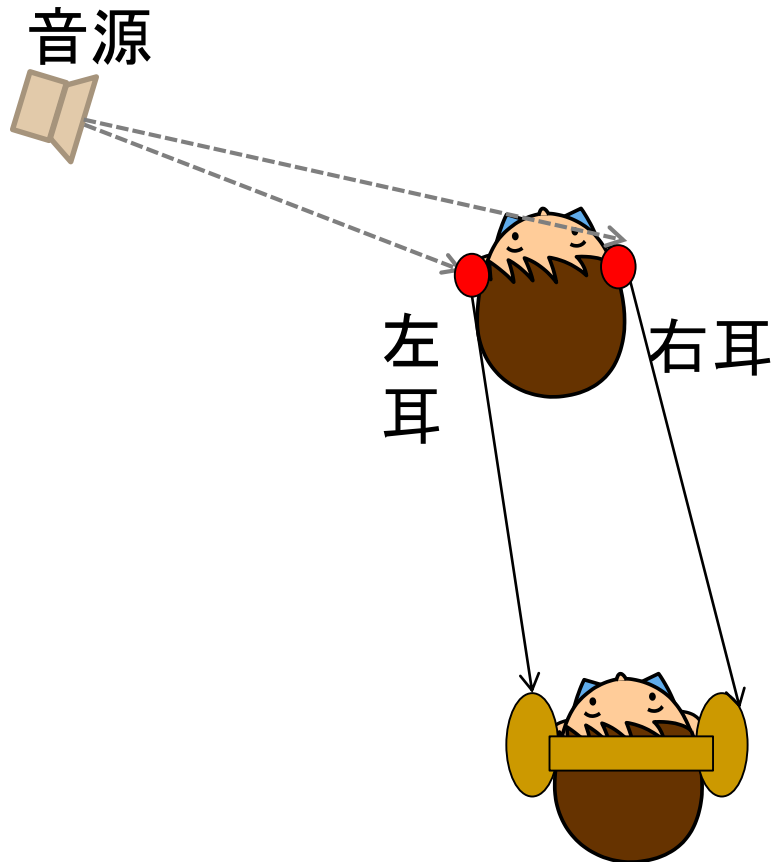
右耳に音源から到達する音は、
左耳に音源から到達する音に比べて

- 音源からの耳までの距離が少しだけ長いために
 - わずかに音の大きさが小さい ILD
 - わずかに遅れる ITD
- 左耳と右耳の間に頭があるため
 - 高い周波数(高音)成分が頭で遮られて、わずかに弱くなる HRTF
 - 音の大きさが、頭で遮られて、わずかに小さくなる ILD
- 耳介があるために
 - 音が到達する方向が前後、上下に変化することにより高い周波数(高音)成分が、わずかに変化する HRTF



このような、わずかな左耳と右耳の音の聞こえの違いを、ヒトは、大腦の聴覚野で判断し、音の方向を判断する。この能力は、人の聴覚の基本的な能力であり、また、生後、成長する間に無意識に、音の方向による左右の音のわずかな違いを学習して、その能力が高まるといわれている。

バイノーラル



ダミーヘッドマイク

- ・ 人間の頭の形や耳の形(耳たぶ、外耳道(耳の穴))などを模擬したいわば頭のマネキン
- ・ 鼓膜の位置にマイクを埋め込んである

ダミーヘッドのマイクで2ch(左右の音)を録音すると、ヒトが聞いている音に近似した音が録音できる。

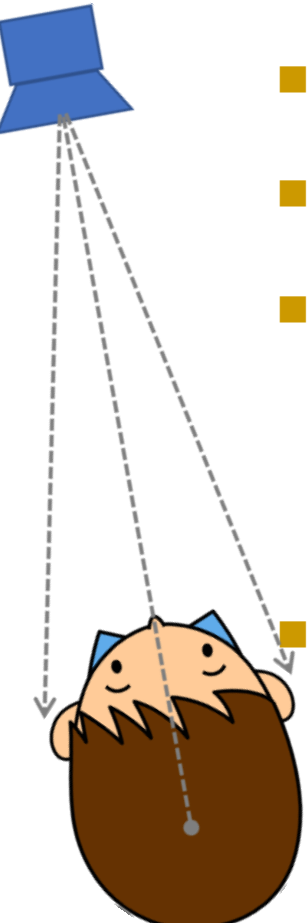


ヘッドフォン

ダミーヘッドで収音した音をヘッドホンで聴くと、自分の耳で聞くように、音の方向を聞き分けることができる

伝達関数合成法：頭部伝達関数

HRTF(Head Related Transfer Function)

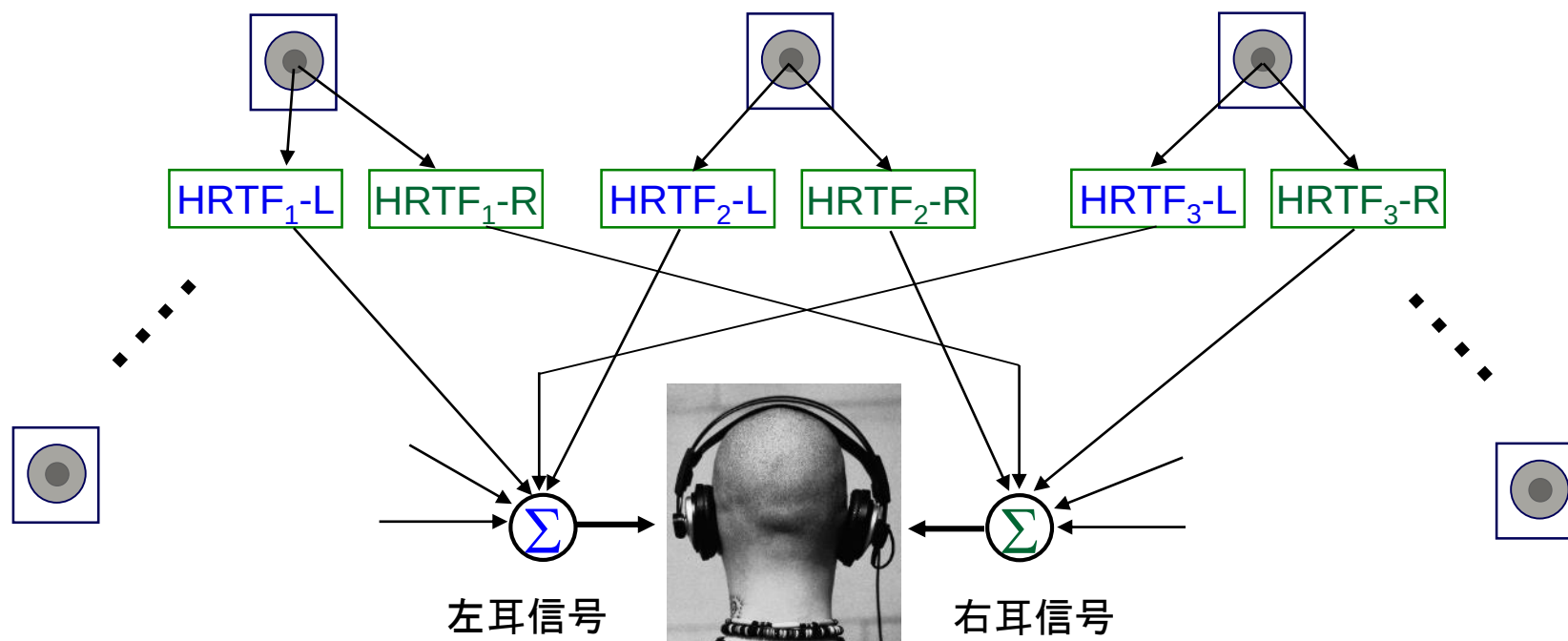
- 
- A diagram illustrating the concept of HRTF. It shows a blue speaker at the top left with three dashed lines representing sound waves traveling towards a cartoon character's head at the bottom. The character has a brown body and a blue head. The lines converge at the character's ears, demonstrating how sound from different directions is perceived.
- 様々な方向に配置した音源から、両耳の外耳道入り口にまでの伝達関数
 - 両耳への音の強度差、時間差を表現
 - 音源方向による音色の違いも表現
 - 頭部による反射、回折、耳介の反射によって、方向別に音色が変化
 - 人間は、この音色の変化も利用して、音の方向を弁別

課題

- 他人のHRTFでは、十分な効果が得られない場合がある
- 本人のHRTFでも、前後の弁別誤りが生じる？

伝達関数合成法: バイノーラルレンダリング

各方向の信号に対して、対応する方向の頭部インパルス応答(HRTFの時間領域表現)を畳み込んで加算



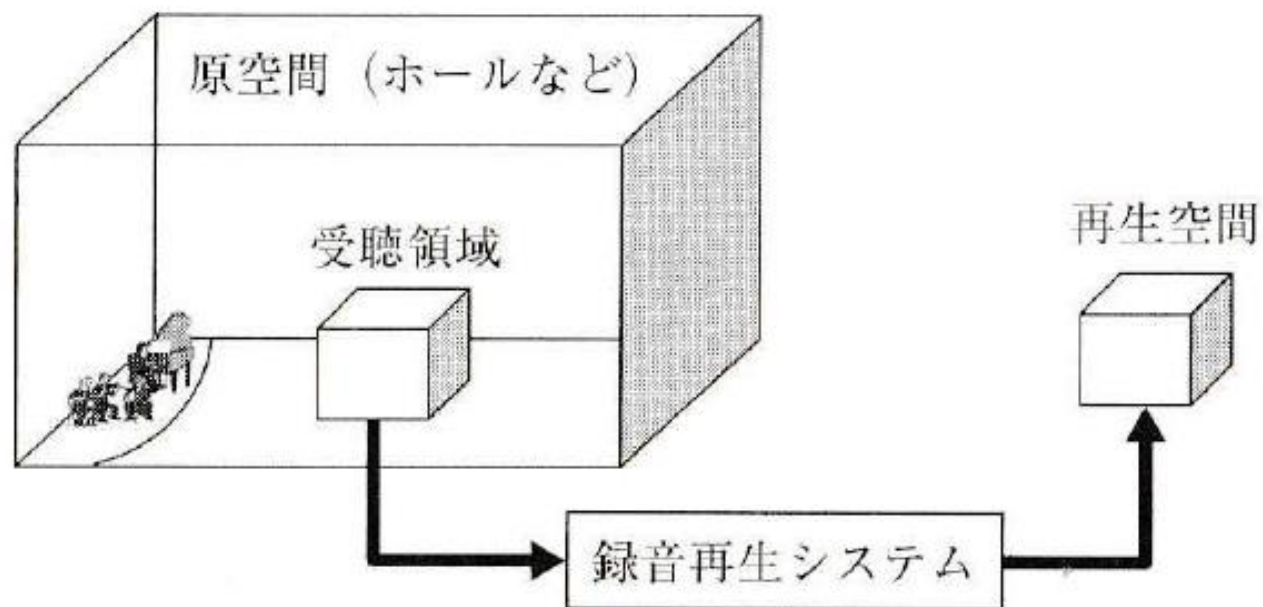
畳み込み演算とは、「二つの関数」から「一つの関数」を作る演算

$$h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(x-t)dt$$

空間制御に基づく方式

境界音場制御：物理モデル

Camrasの方法による音場再現



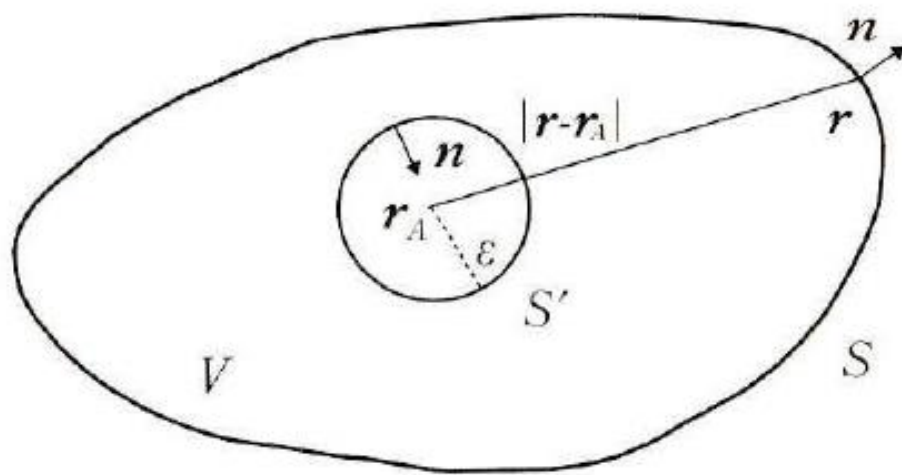
Camras の方法による音場再現

安藤彰男：超臨場感システム5.4章

境界音場制御: 物理モデル

Kirchhoff-Helmholtz積分方程式

$$p(\mathbf{r}_A, \omega) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(\frac{e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}_A|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_A|} \frac{\partial p(\mathbf{r}, \omega)}{\partial n} - p(\mathbf{r}, \omega) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}_A|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_A|} \right) \right) dS$$



音場内の領域 V

音場領域 V の中の任意の点の音圧は、境界面 S 上の音圧と音圧経度(音圧の法線方向微分)から定めることができる。



原空間の受領領域境界にマイクロホンを多数配置して音圧と音圧経度を測定し、これを再生空間境界に配置したスピーカで再生すれば、原空間の受領領域の全ての点での音圧がそのまま再生空間で再現される

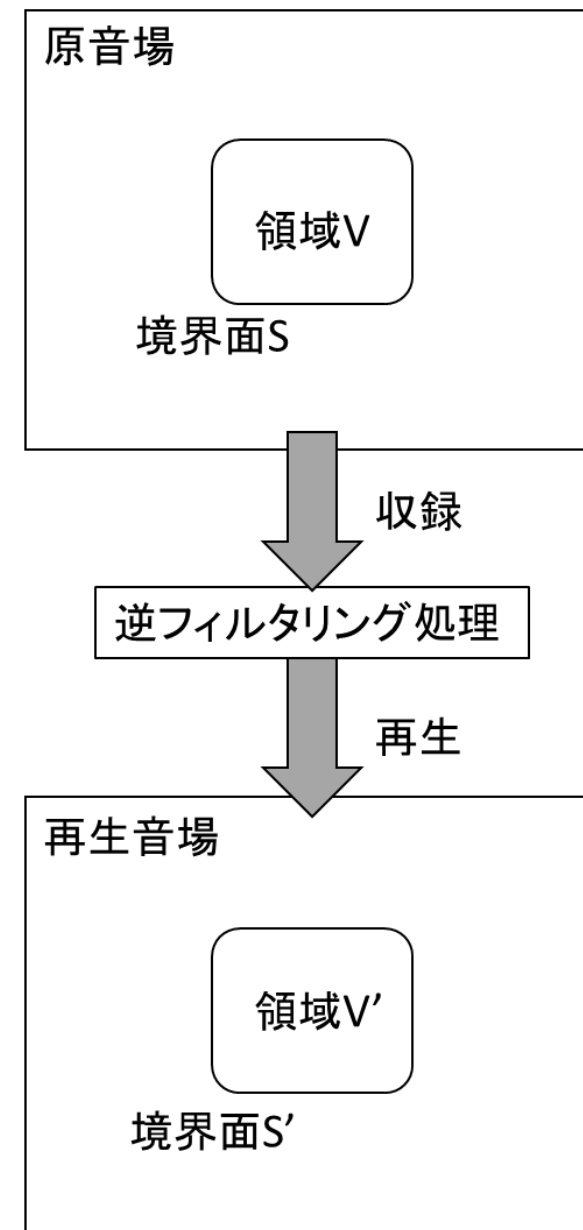
安藤彰男: 超臨場感システム5.4章

境界音場制御：音響樽

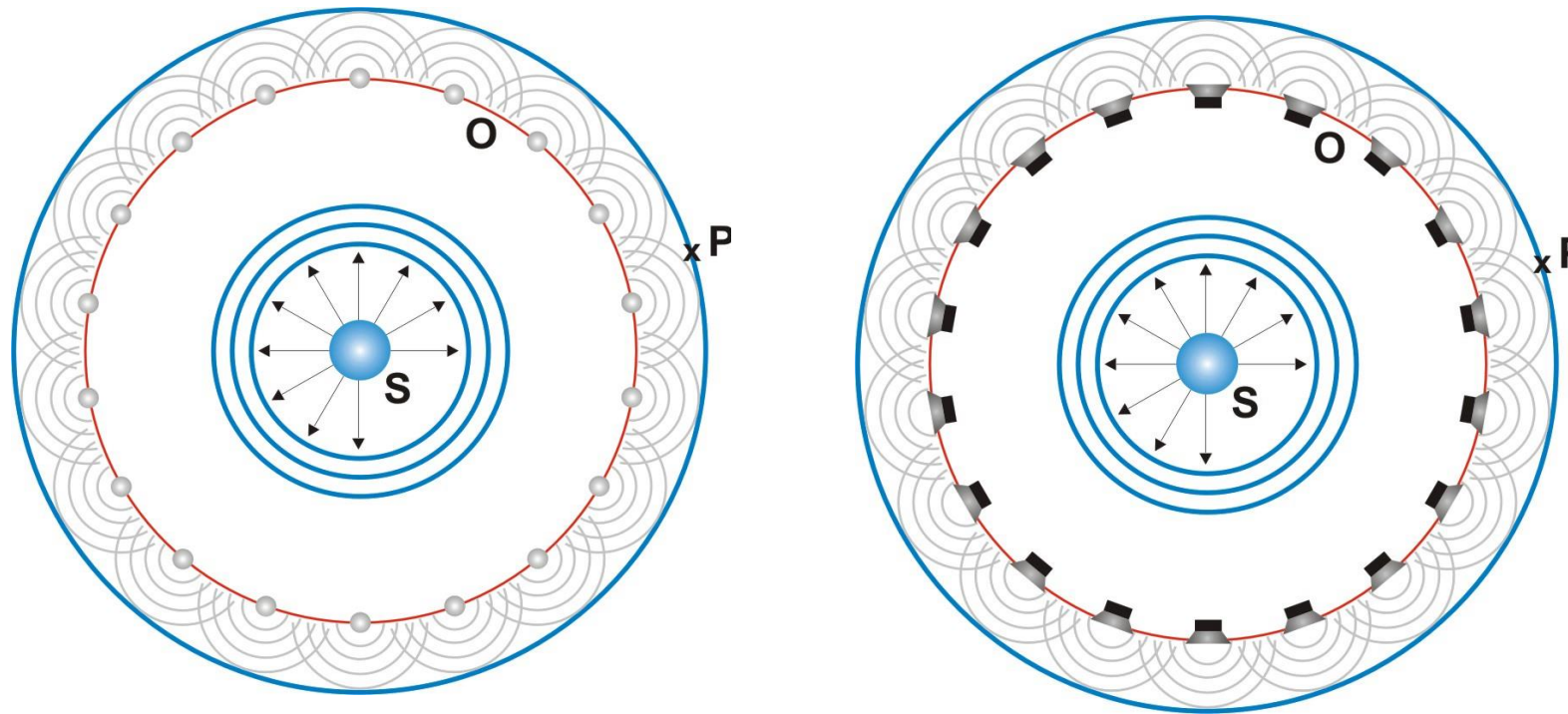
BoSC



伊勢史郎: キルヒホッフ - ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理、日本音響学会誌 53(9)、706-713 (1997.9)



波面合成法 (WFS, Wave Field Synthesis) : ホイヘンスの原理



ホイヘンスの原理

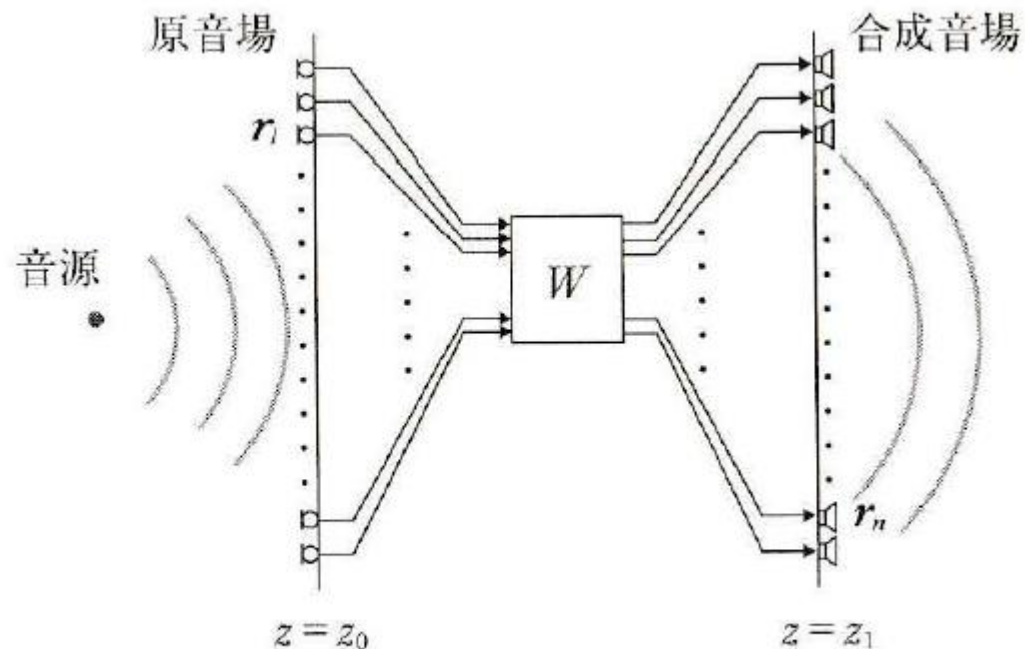
(1690年 Traite de la lumiere (光の概論) に記載)

Christiaan Huygens (1629年4月14日 - 1695年7月8日)

オランダの数学者、物理学者



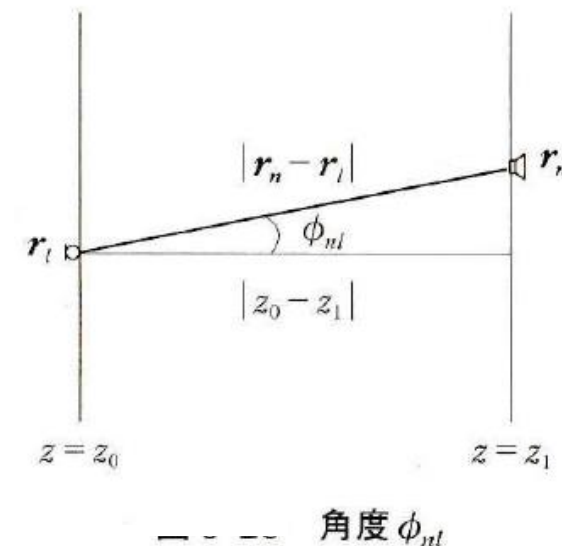
波面合成法 (WFS, Wave Field Synthesis)



音場を、原音場(1次音場)と合成音場(2次音場)に分割し、原音場における超平面上にマイクロホンのアレイ状に配置して、音圧を観測し、その音圧信号に基づいて、別空間で音場を生成する。

WFS による音場合成

$$p(\mathbf{r}_n, \omega) = \sum_l \left(p(\mathbf{r}_l, \omega) \frac{e^{-ik|\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_l|}}{2\pi |\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_l|} \right) (ik \cos \phi_{nl}) \Delta x \Delta y$$



この式に基づいて、音場を別の空間に再現する。理論的には、無限平面のスピーカアレイが必要だが、一般的には、有限の平面アレイで実装される。

安藤彰男: 超臨場感システム5.4章

HOA: High Order Ambisonics

- スイートスポットを広げ、空間解像度を向上させるために、1990年代から、Ambisonicsのチャンネルを増やす試みが行なわれている
 - 5ch: 2次Ambisonics
 - 7ch: 3次Ambisonics
 - 最小限必要なスピーカ数も増える
 - 背景にある考え方
 - 音波は平面波とみなせる
 - 平面波を再現するには無限のチャンネルが必要
- HOAはScene-based Audio (シーンベースオーディオ) ともよばれる (MPEG-H)

HOA: 2nd Order Ambisonics

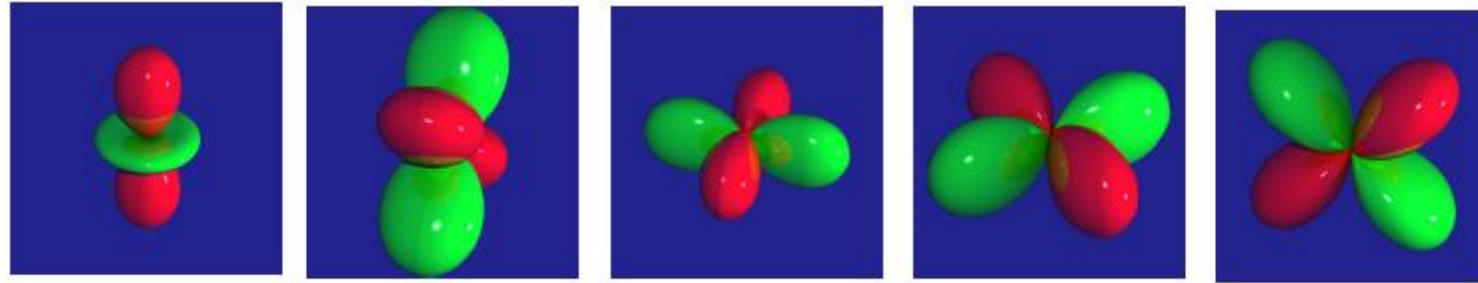


Fig. 3: Second order spherical harmonics

$$R = s \left[\frac{1}{2} (3 \sin^2 \theta - 1) \right]$$

$$S = s [\cos \phi \sin 2 \theta]$$

$$T = s [\sin \phi \sin 2 \theta]$$

$$U = s [\cos 2 \phi \cos^2 \theta]$$

$$V = s [\sin 2 \phi \cos^2 \theta]$$

HOA: 3rd Order Ambisonics

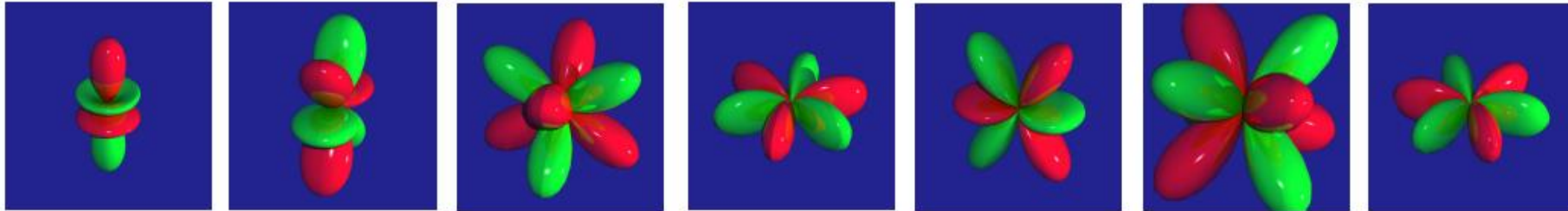


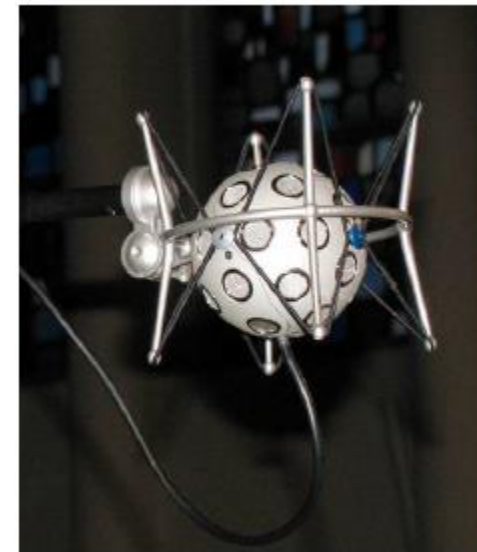
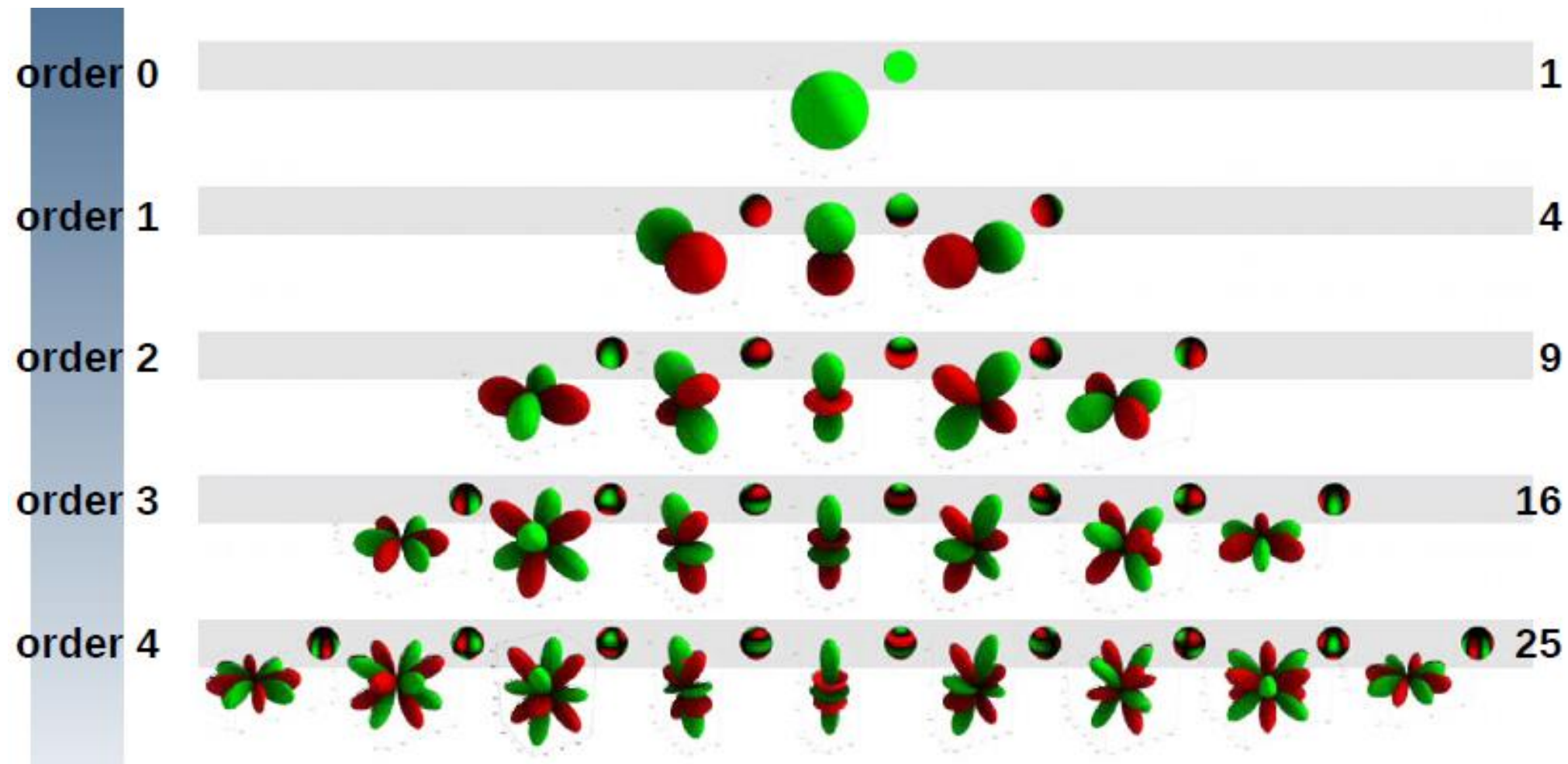
Fig. 4: Third order spherical harmonics

$$K = s \left[\frac{1}{2} \sin \theta (5 \sin^2 \theta - 3) \right]$$

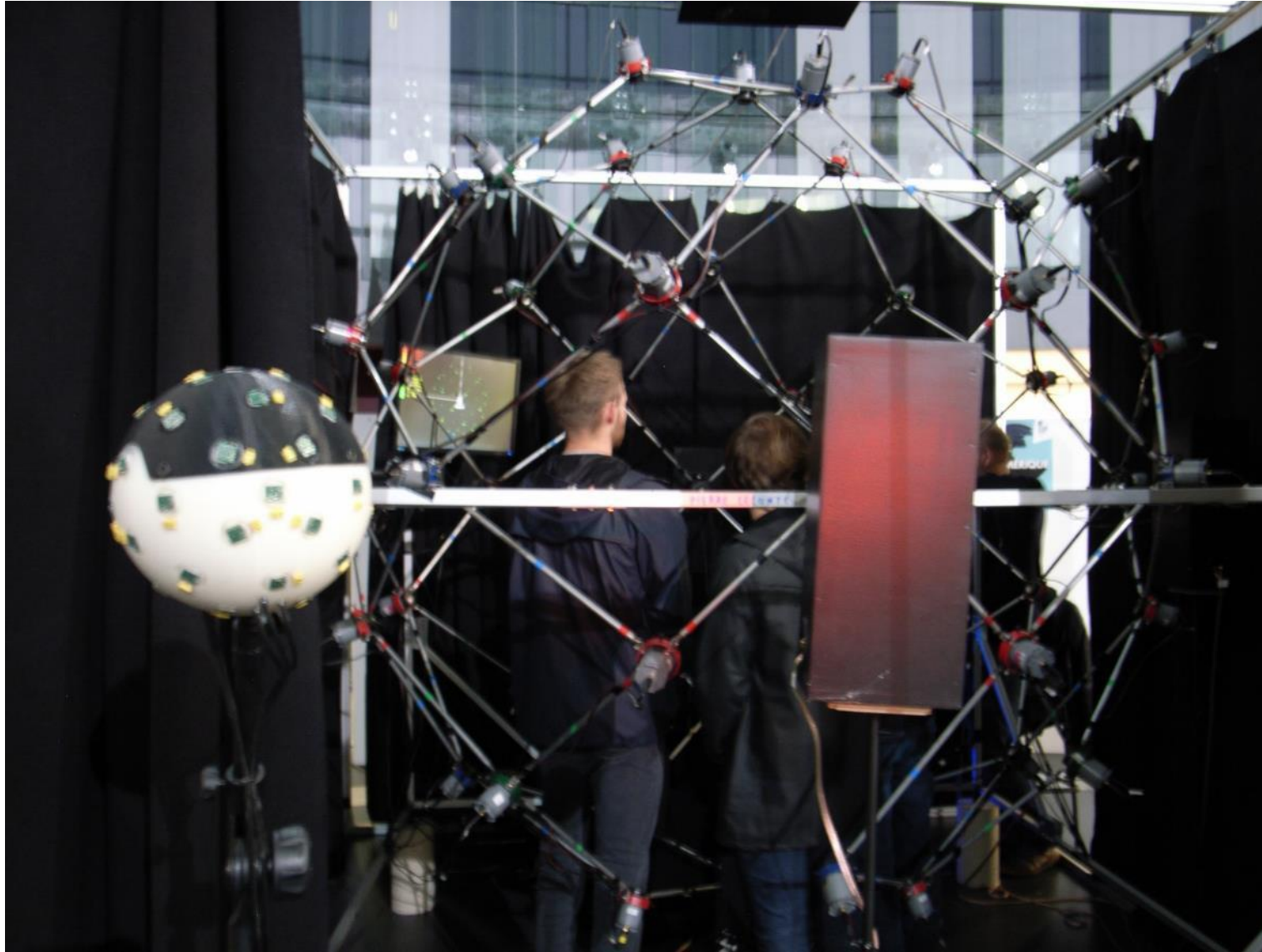
$$L = s \left[\frac{8}{11} \sin \phi \cos \theta (5 \sin^2 \theta - 1) \right]$$

... etc. for channels M, N, O, P, Q ...

HOA



HOA



Christophe Langrenne (Laboratoire de Mécanique des Structures et des Systèmes Couplés (LMSSC))

講演の内容

- イマーシブオーディオとは
- イマーシブオーディオに用いられる要素技術
- **イマーシブオーディオの実例**
- イマーシブサウンドの体験

分類	技術	実用化
方向制御に基づく方式	2chステレオ	3Dオーディオではないが最もシンプル 方向制御が課題
	立体角分割法(マルチチャンネル音響)	最も高音質な制作が可能 多様なマイクロフォンテクニックが利用可能 過去のノウハウを活かせる
	Ambisonics	ワンポイントマイクでの收音が可能でロケには最適 音質や空間再現性の点で課題
聴取点制御に基づく方式	バイノーラル	收音再生は容易 方向制御等に課題
	伝達関数合成法	他の技術で制作した3Dオーディオをレンダリング可能 ヘッドフォン再生の場合は最も現実的
空間制御に基づく方式	波面合成法(WFS, Wave Field Synthesis)	原理的に3Dオーディオに展開できない
	境界音場制御	原理的には最も理想的 音質や空間再現性の問題で実用化には課題あり
	High Order Ambisonics (HOA)	ワンポイントマイクでの收音が可能でロケには最適 1次のAmbisonicsに比べてポスト処理が大変 マルチチャンネル音響に比べて音質が課題

使用されることの多い要素テクニック

- 収音テクニック＋MCA＋レンダリング
- 収音テクニック＋HOA＋レンダリング
- 収音テクニック＋WFS＋レンダリング
- 音素材＋VBAP＋レンダリング
- 音素材＋WFS＋レンダリング
- 音素材＋HOA＋レンダリング

新たな実用的テクニック

- ADM (ITU-R BS.2075: Audio Definition Model Renderer for Advanced Sound Systems)
 - 音の方向や空間をメタデータを利用して音楽記述法に取り込めないか？
- HOA: IEM Plug-in suite up to 7th order by Institute of Electronic Music and Acoustics, Austria
- VBAP: SPARTA (Spatial Audio Real-time Applications) by Aalto university, Finland
- AES69-2015 (AES standard for file exchange - Spatial acoustic data file format)
 - SPARTA (Spatial Audio Real-time Applications) by Aalto university, Finland

收音再現と創造演奏

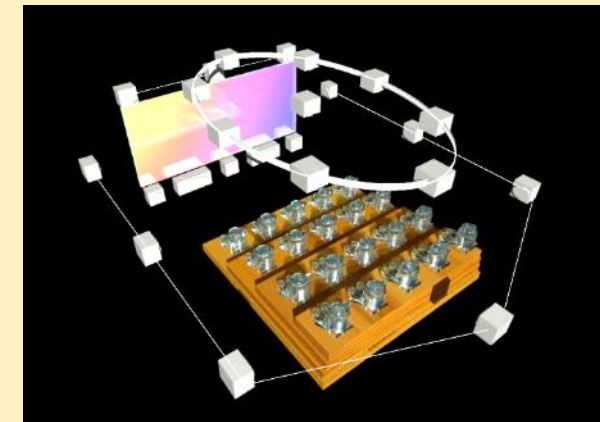
收音再現



收音・制作



記録・伝送

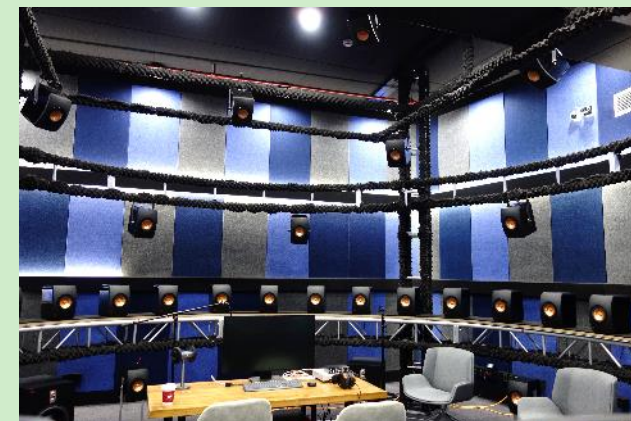


再現

創造演奏



創造

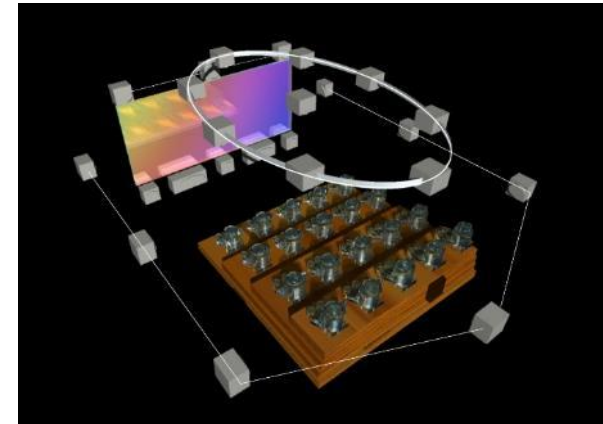


演奏

芸術の創造と鑑賞の場

環境	形態	芸術創造の場	芸術鑑賞の場	オーディオ技術
創造環境と鑑賞環境が異なる	パッケージメディア 放送番組 映画 ゲーム等	スタジオ ホール 劇場等	個人携帯端末 家庭 車 交通機関 映画館等	イマーシブオーディオ・汎用プラットフォーム
	ライブ放送や配信	スタジオ ホール 劇場等		
創造環境と鑑賞環境が同じ	インスタレーション等	屋内・屋外	屋内・屋外	独自のイマーシブオーディオシステム
	ライブ(実演)	ホール 劇場等	ホール 劇場等	

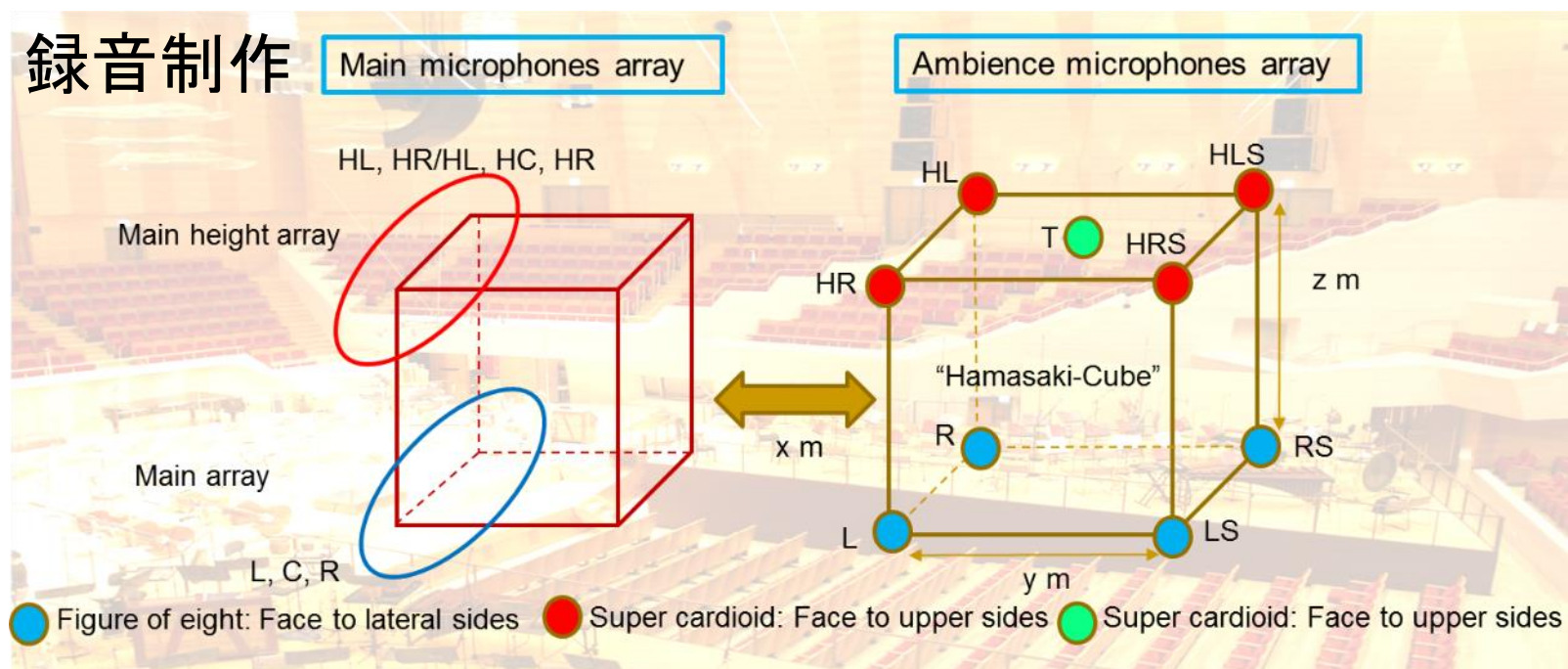
芸術実演を收音し再現する



收音・制作 → 記録・伝送 → 再生

- ・ 汎用プラットフォーム : Auro-3D、Dolby Atmosなど
- ・ 独自プラットフォーム : 高品質ライブ音場再現、WFS、音響樽など

汎用プラットフォームの実例: Auro-3D



Auro 10.1 マスタ

Auro-Codec
エンコーダ



Pure-audio Blu-ray

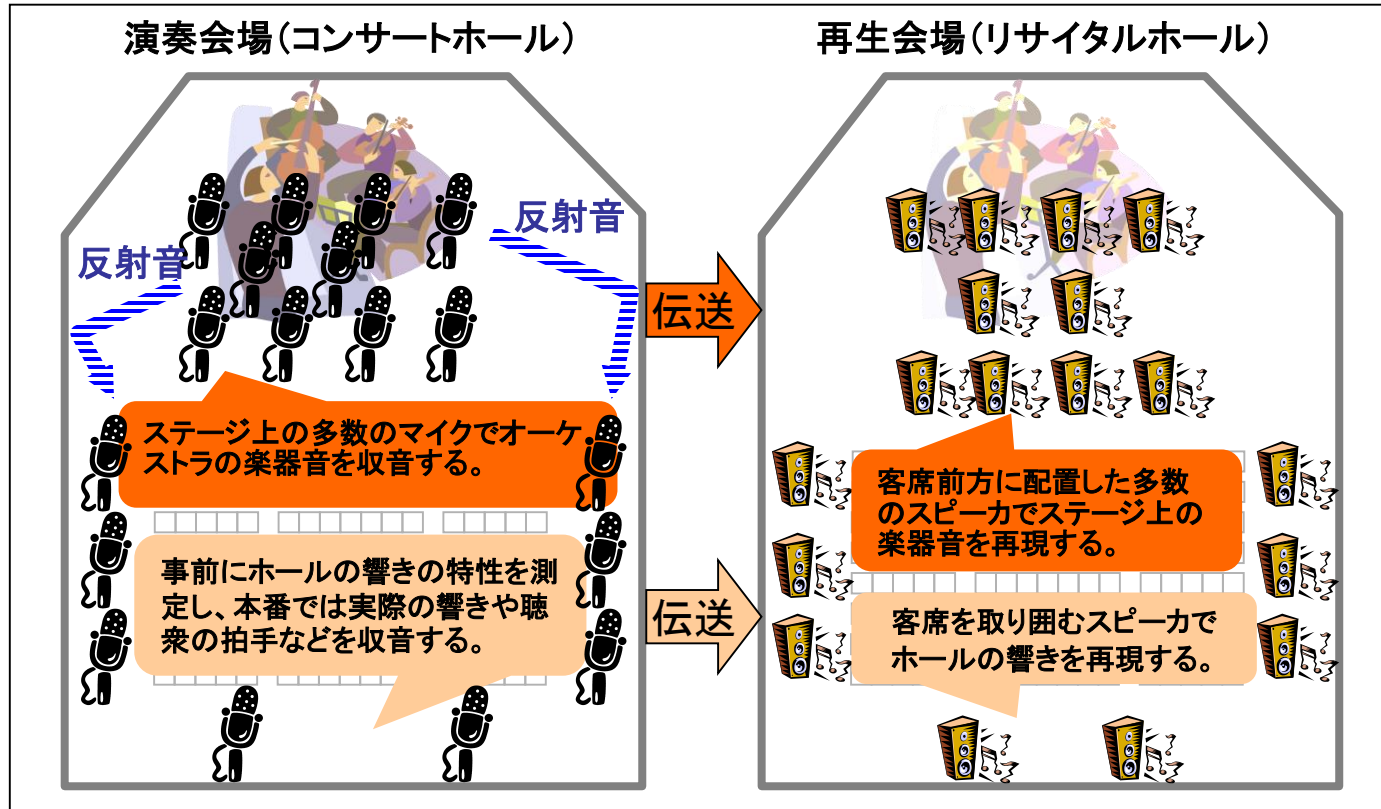


Auro 10.1再生



Auro-Codecデコーダ内蔵AVR

独自プラットフォームの実例：高品質ライブ音場再現



音源情報(直接音)と音響空間情報(間接音)を独立して收音・伝送し、遠隔地の別会場で收音場の音場に近似した音響印象を再現する

Kimio Hamasaki: "Advanced Multichannel Audio Systems with Superior Impression of Presence and Reality", AES 116th Convention, 2016

芸術を創造し演奏する



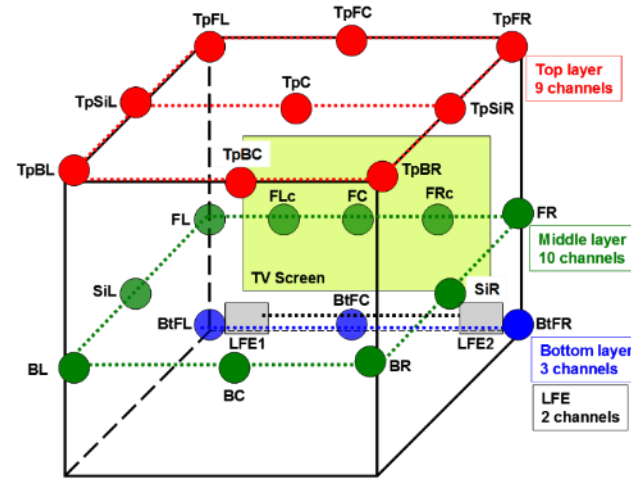
創造



演奏

- ・ 汎用プラットフォーム : 22.2マルチチャンネル音響など
- ・ 独自プラットフォーム : Empty Roomなど

汎用プラットフォームの実例: Lenna (細井美裕)



人の声のみによる
立体音響作品

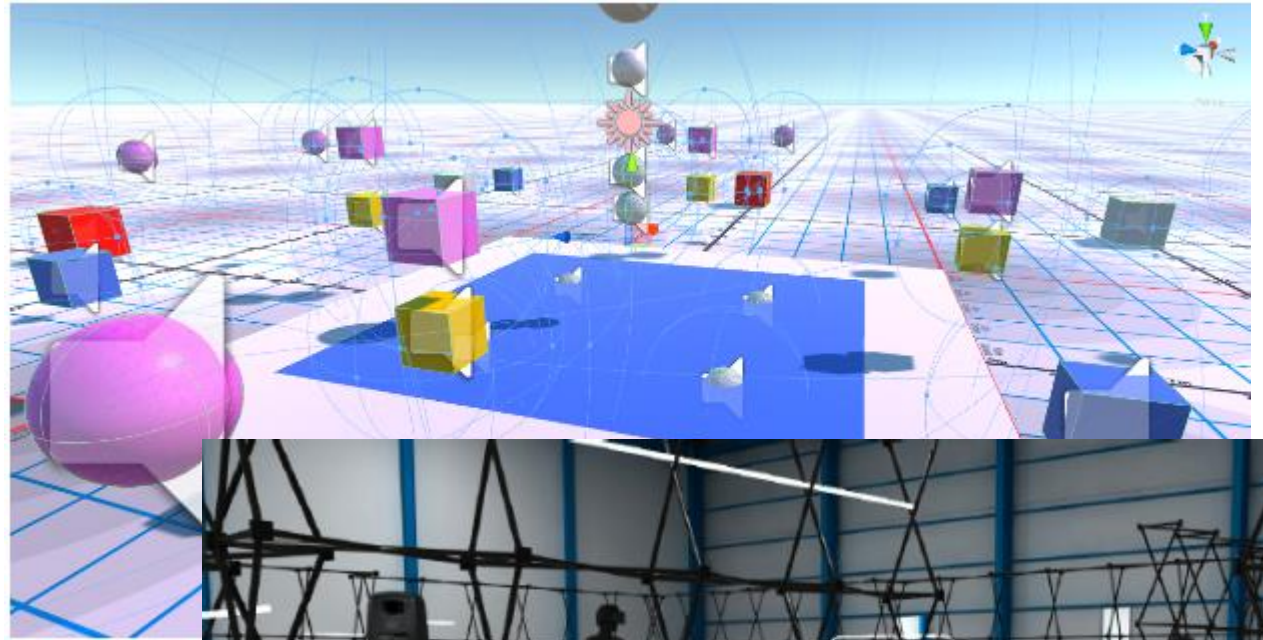


撮影: 谷康弘

写真提供: 山口情報芸術センター

 山口情報芸術センター
Yamaguchi Center for Arts and Media

独自プラットフォームの実例: Empty Room



«Empty Room », an electroacoustic immersive composition spatialized in virtual 3D space, in ambisonic and binaural.» C. WEBSTER, EDESTA Paris VIII/EnsadLab Spatial Media, F. GARNIER, EnsadLab / Spatial Media, A. SEDES , EDESTA CICM/Musidanse Paris VIII – VRIC 2017 – ACM Digital Library 2017

まとめ

- イマーシブオーディオはソニックアートに空間知覚に対する表現手法をもたらす
- 空間知覚をどのように芸術として使用するかが課題か
- イマーシブオーディオの要素技術は、收音、録音、ミキシング、レンダリングなどの分野で多種多様であり、これらをどのように組み合わせるかが課題
- 汎用プラットフォームか独自プラットフォームのどちらを使用するのもかも目的に応じて選択が必要

講演の内容

- イマーシブオーディオとは
- イマーシブオーディオに用いられる要素技術
- イマーシブオーディオの実例
- イマーシブサウンドの体験

デモ

■ イマーシブサウンドの体験

- ハイトスピーカーを組み合わせた三次元マルチチャンネル音響システムによるイマーシブサウンド at N320
 - 收音＋再生による芸術演奏場の再現
 - 收音＋創造＋再生による芸術創造の再現
- バイノーラルレンダリング技術により、ヘッドフォンでのイマーシブサウンド at N320 & N310
 - 收音＋再生による芸術演奏場の再現
 - 收音＋創造＋再生による芸術創造の再現
 - 創造＋再生による芸術創造の再現

ご質問があれば以下へご連絡ください。

<http://www.artsridge.com/index.html>

の「contact」からお問い合わせください。