

人間情報学研究科
学位審査論文公聴会

波面合成法による立体音場再生における
情報量削減手法に関する研究

名古屋大学大学院人間情報学研究科

木村敏幸

2005/11/10

研究背景

■ 演劇, オークストラ演奏, 映画

- 劇場や映画館で観賞するのが一般的
- 劇場や映画館にまで足を運ばなければならない

■ そこで,

- いつでも好きな時間に家庭でも観賞できるようにしたい
- 「臨場感」を与える技術の開発が必要

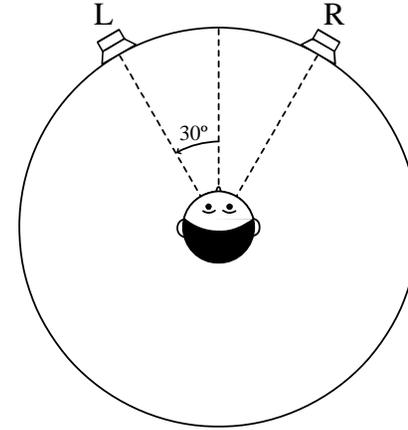


立体音響技術の開発

主な立体音響技術

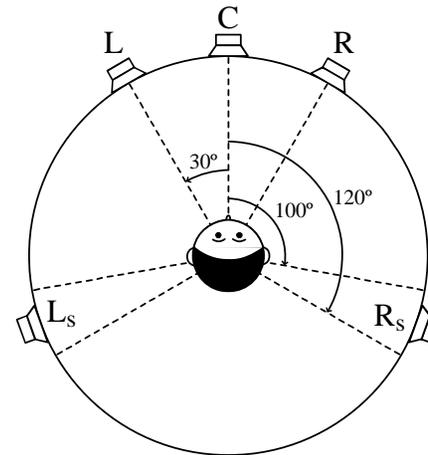
■ ステレオホニック

- 前方の2個のスピーカ
- 前方にステージを表現
- CDなどに応用



■ 3-2方式

- 前方に3個, 後方に2個
- 前方にステージを表現
- ホールの空間的な印象を表現
- DVDなどに応用



立体音響技術の更なる発展

■ 今までの立体音響技術

- 音場を表現することだけに着目(ミキシングによる合成)
- ミキシングを担当する技術者の力量に依存
- 真の臨場感を再現しているとは言い難い

■ そこで,

- 音場を忠実に再現したい
- より一層臨場感を感じ取れるようにしたい

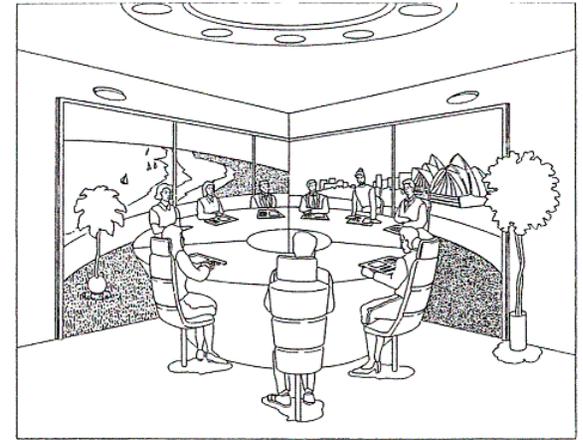


立体音場再生技術の開発

立体音場再生技術が実用化されると...

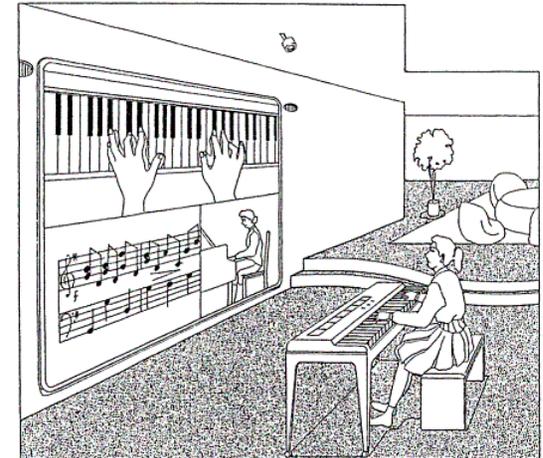
■ 遠隔通信会議

- 同じ場所で会議(本当は違う場所)
- 目の前に相手がいる(本当はいない)



■ 遠隔アンサンブル

- 同じ場所で合奏(本当は違う場所)
- 目の前に相手がいる(本当はいない)



波面合成法による立体音場再生

■ 原音場

- マイクロホンで音を収録

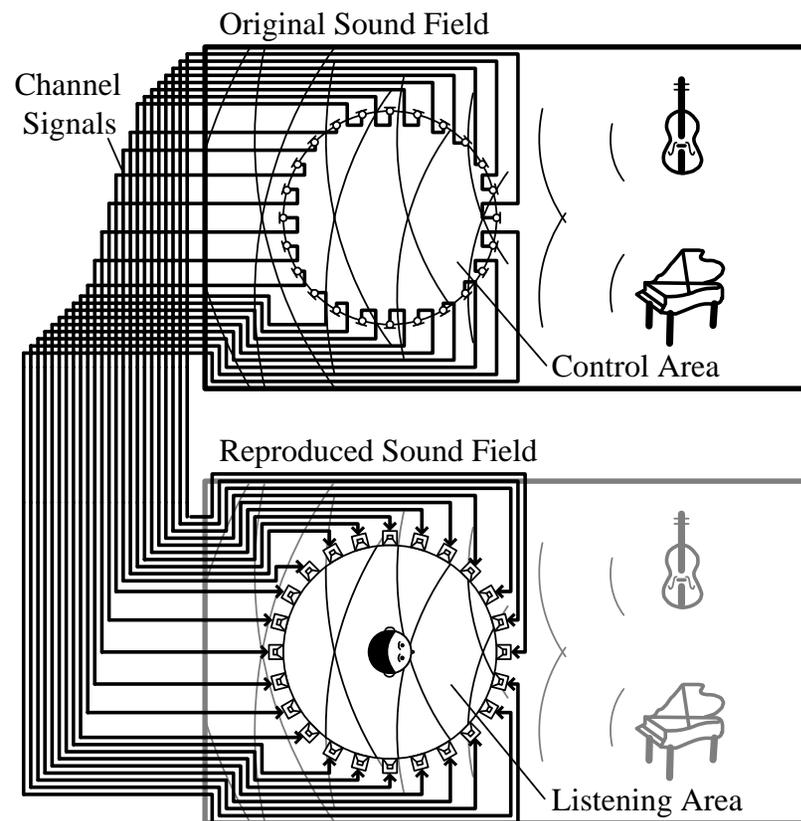
■ 再生音場

- スピーカで音を再生
- Huygensの原理によって

原音場の波面が合成

■ 特徴

- 聴取者は頭部を動かしたり
席を移動したりできる
- 制御領域を広くすれば,
多人数でも聴取が可能



研究目的

- 波面合成法による立体音場再生の問題点の解決
- 波面を忠実に合成するには
 - マイクロホンやスピーカを緻密に配置する必要がある
 - 機器の大きさの問題で、緻密に配置するには限界がある
- システムを遠隔地間で実現するには
 - 収録した音(チャンネル信号)を伝送する必要がある
 - チャンネル信号の数が多すぎるので、通信容量が足りなくなる
- 問題点：必要とする情報量が多すぎる



情報量削減手法の開発

情報量削減のためのアプローチ

- 必要とするチャネル信号の数を削減
 - チャネル信号の数が減っても聴取者が臨場感を感じるなら,
 - マイクロホンやスピーカを緻密に配置しなくても良い
 - 一般のマイクロホンやスピーカでもシステムの構築が可能
 - 本論文の第3章にて言及
- 伝送すべき情報量を圧縮
 - 伝送量を削減しても聴取者が同じ臨場感を感じるなら,
 - 現在の通信回線でも十分に情報を伝送することが可能
 - 本論文の第4章, 第5章にて言及

本論文の構成

■ 第2章(省略)

- 波面を忠実に合成する条件の検討
- スピーカ間隔を波長の1/2以下にすることが必要

■ 第3章

- スピーカ個数の減少に対する臨場感の変化の検討

■ 第4章

- 音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第5章

- 移動音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第6章

- 結論

本論文の構成

■ 第2章(省略)

- 波面を忠実に合成する条件の検討
- スピーカ間隔を波長の1/2以下にすることが必要

■ 第3章

- スピーカ個数の減少に対する臨場感の変化の検討

■ 第4章

- 音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第5章

- 移動音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第6章

- 結論

3.1. はじめに

■ 波面を忠実に合成する条件

- マイクロホン及びスピーカ間を波長の1/2以下に
- 楽音(16 kHz帯域)の場合, スピーカ間隔は約1 cm
- システムの構築は非現実的



■ チャンネル信号の数が音場知覚に及ぼす影響

- 2種類の主観評価実験(方向感, 空間印象)
- チャンネル信号の数が減っても同じように臨場感を感じるなら, 一般のスピーカでもシステムを構築可能

3.2. 主観評価実験1

—方向感への影響—

チャンネル信号の作成

- 原音場は自由空間，制御領域は半径2 mの円
- 計算機上で作成

- ◆ d_i : 音源からマイクロホンまでの距離

$$d_i = \sqrt{(d \cos \phi + \Delta_x - r \cos \theta_i)^2 + (d \sin \phi + \Delta_x - r \sin \theta_i)^2}$$

- ◆ $g_i(n)$: 室内インパルス応答

$$g_i(n) = \frac{D_i}{d_i} \delta \left[n - \text{round} \left(\frac{d_i F_s}{c} \right) \right]$$

- ◆ F_s (=48 kHz): サンプル周波数

- ◆ c (=340 m/s): 音速

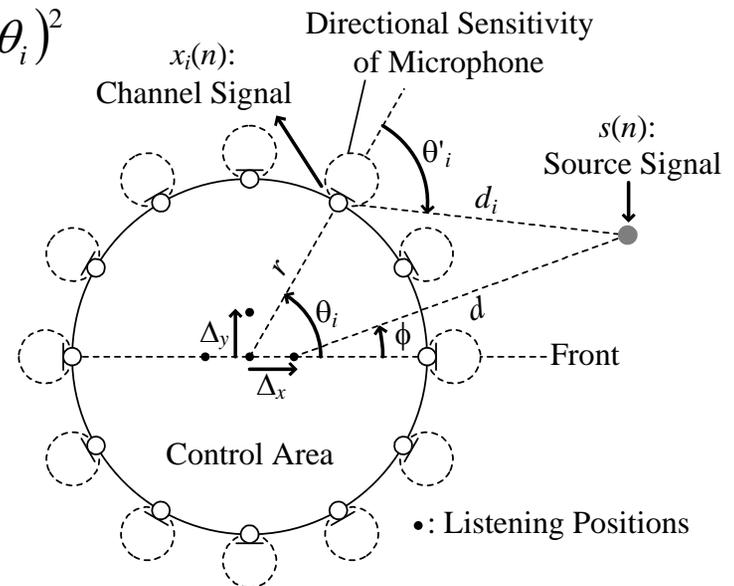
- ◆ D_i : マイクロホンの指向特性(超指向性)

$$D_i = \begin{cases} \cos \theta'_i & (|\theta'_i| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta'_i| > 90^\circ) \end{cases}$$

- ◆ $s(n)$: ドライソース (白色雑音 & 音声, 長さ...1秒)

- ◆ $x_i(n)$: チャンネル信号

$$x_i(n) = g_i(n) * s(n) = \frac{D_i}{d_i} s \left[n - \text{round} \left(\frac{d_i F_s}{c} \right) \right]$$

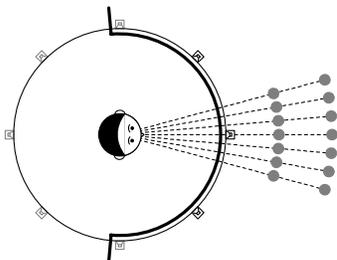


実験条件

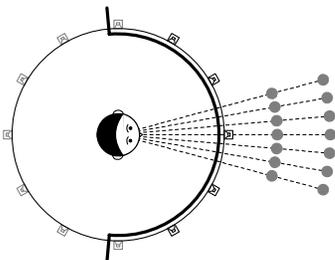
■ チャネル信号条件の結果を統制条件と比較

中心位置

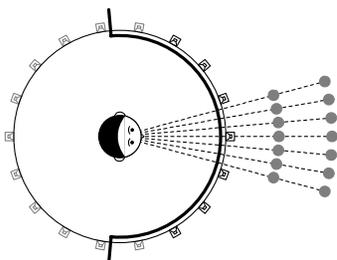
(a) 8 Channel Signals



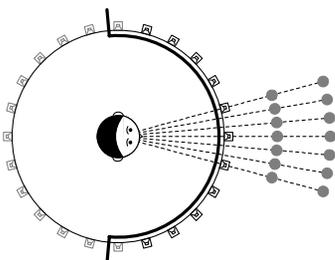
(b) 12 Channel Signals



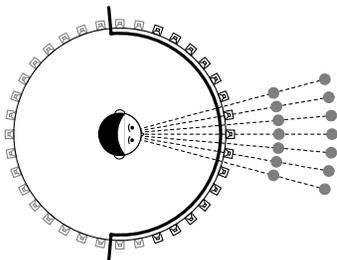
(c) 18 Channel Signals



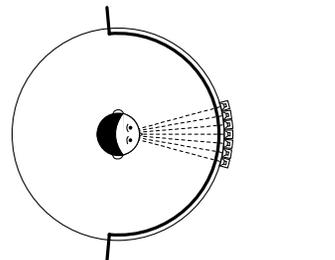
(d) 24 Channel Signals



(e) 36 Channel Signals

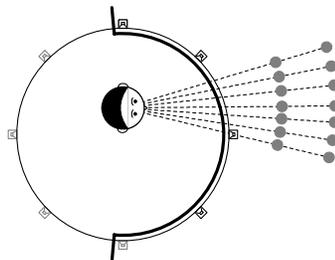


(f) Control Condition

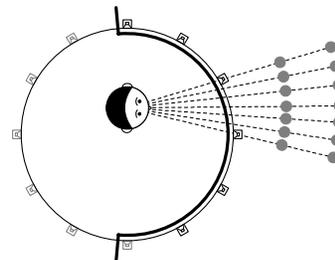


側方位置

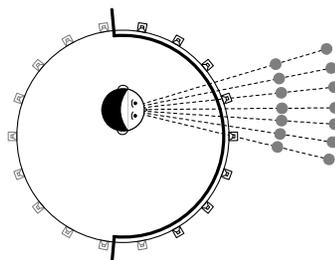
(a) 8 Channel Signals



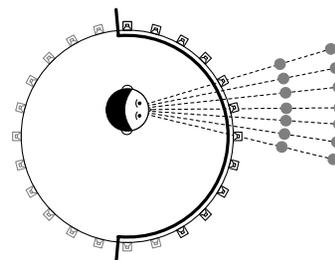
(b) 12 Channel Signals



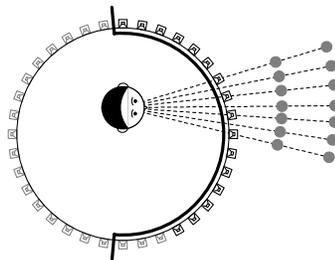
(c) 18 Channel Signals



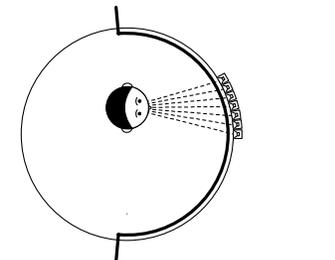
(d) 24 Channel Signals



(e) 36 Channel Signals



(f) Control Condition



実験計画

■ 被験者...12名の学生

- 男性10名, 女性2名
- 1箇所あたり3名ずつ

Subjective Assessment

Session 1		Session 2		
Order...Randomized (White Noise or Speech)				
Session				
Practice (21 trials)	Main (308 trials)			
	(77)	(77)	(77)	(77)
Trial (Procedure)				
Stimulus (1 s)	Answer (4 s)			

試行条件

	要因	備考
練習試行 (21)	= 提示方向(7) × [チャンネル信号の数(1) × 距離(2) + 統制条件]	36チャンネル 3 & 4 m
本試行 (308)	= 提示方向(7) × [チャンネル信号の数(5) × 距離(2) + 統制条件] × 繰り返し(4)	8,12,18,24,36 3 & 4 m

■ 実験手順

- 音の聞こえた方向を手持ちの回答用紙に記入
- 回答方法...被験者の正面に配置した目盛りの番号で
- 目盛り... -25° から 25° まで 2.5° 間隔でマーキング

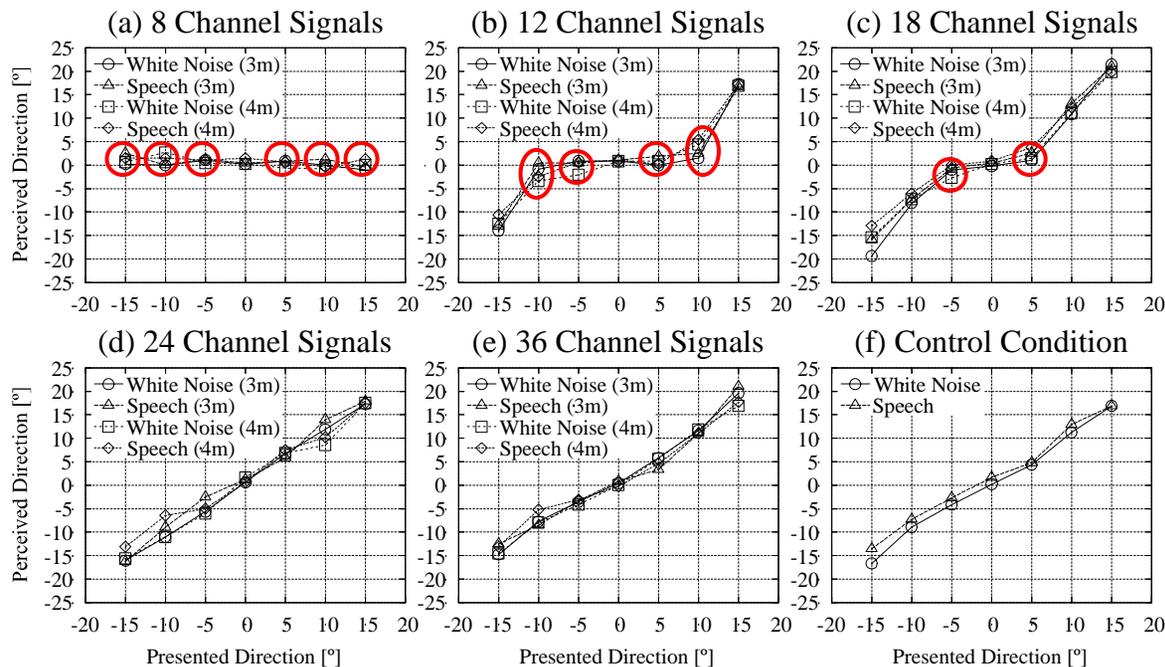
実験結果及び考察

■ 全ての聴取位置において同じ傾向

- チャンネル数24, 36...回答方向は提示方向とほぼ同じ
- チャンネル数8, 12, 18...提示方向と異なる条件が存在

⇒ 少なすぎると所望の方向に音像が定位しない

中心位置



平均二乗誤差による評価

■ 平均二乗誤差

$$\text{MSE}[\text{°}] = \sqrt{\frac{1}{7} \sum_{\phi} \{\psi(\phi) - \psi_{\text{control}}(\phi)\}^2}$$

- ◆ ϕ : 提示方向
- ◆ $\psi_{\text{control}}(\phi)$: 統制条件での回答方向
- ◆ $\psi(\phi)$: チャネル信号条件での回答方向

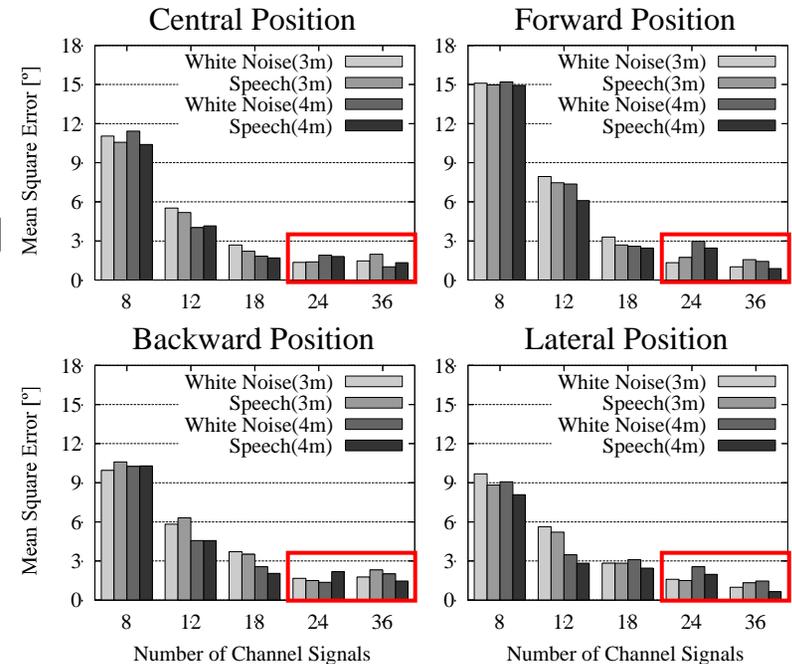
■ チャネル数24,36

- 全ての聴取位置で3° 以下
- 正面の方向弁別限より小さい



チャンネル信号の数が減っても
方向感は十分に再現される

平均二乗誤差の結果

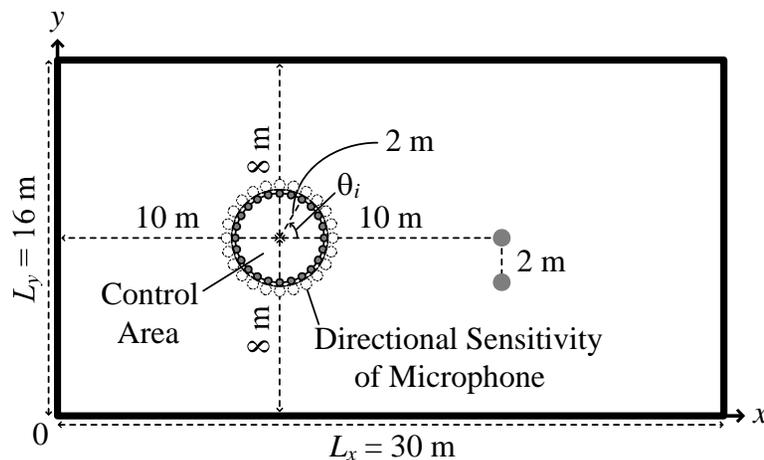


3.3. 主観評価実験2 —空間印象への影響—

チャンネル信号の作成

- 原音場は残響空間
- 制御領域は半径2 mの円
- 虚像法により計算機上で作成
- 残響時間 > 1 s ...コンサートホールを想定
- ドライソース...音声🔊, フルート🎷
- 作成した音...音声🔊, フルート🎷

作成条件



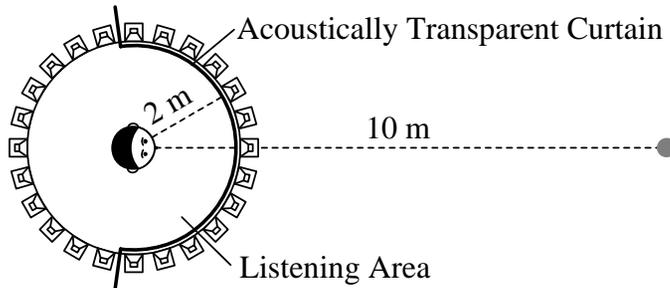
壁面反射係数	0.75
最大壁面反射回数	50
マイクロホンの指向性	超指向性
残響時間	1.3 s
サンプリング周波数	48 kHz
ドライソースの長さ	4 s

実験環境

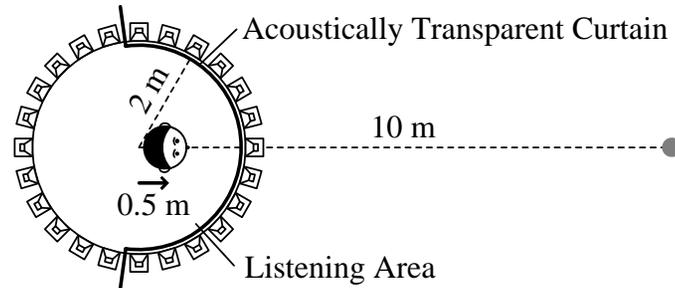
■ 聴取領域は半径2 mの円，4箇所での聴取位置

- 部屋の残響時間...約80 ms
- 音圧レベル...約70 dB(A)
- 暗騒音レベル...25.0 dB(A)
- 音響カーテンで被覆

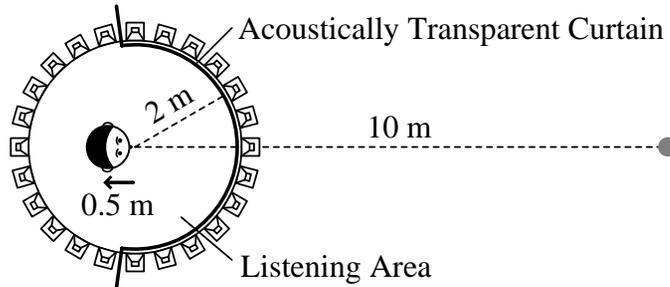
中心位置



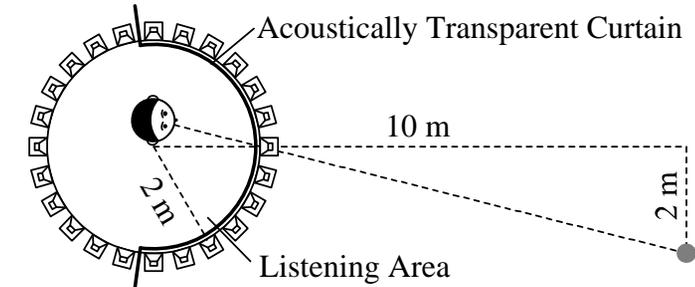
前方位置



後方位置



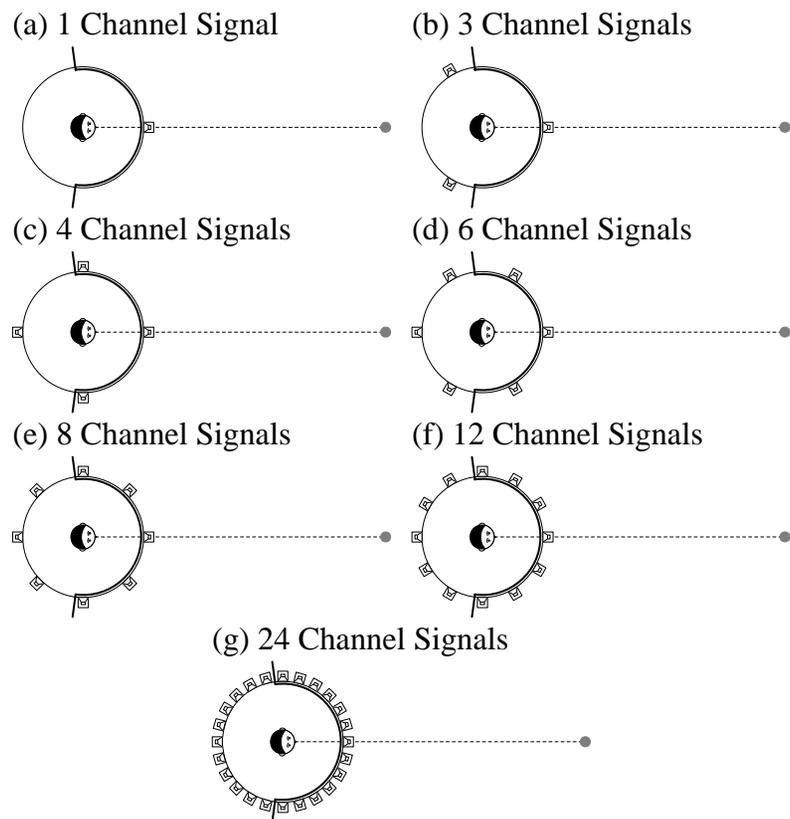
側方位置



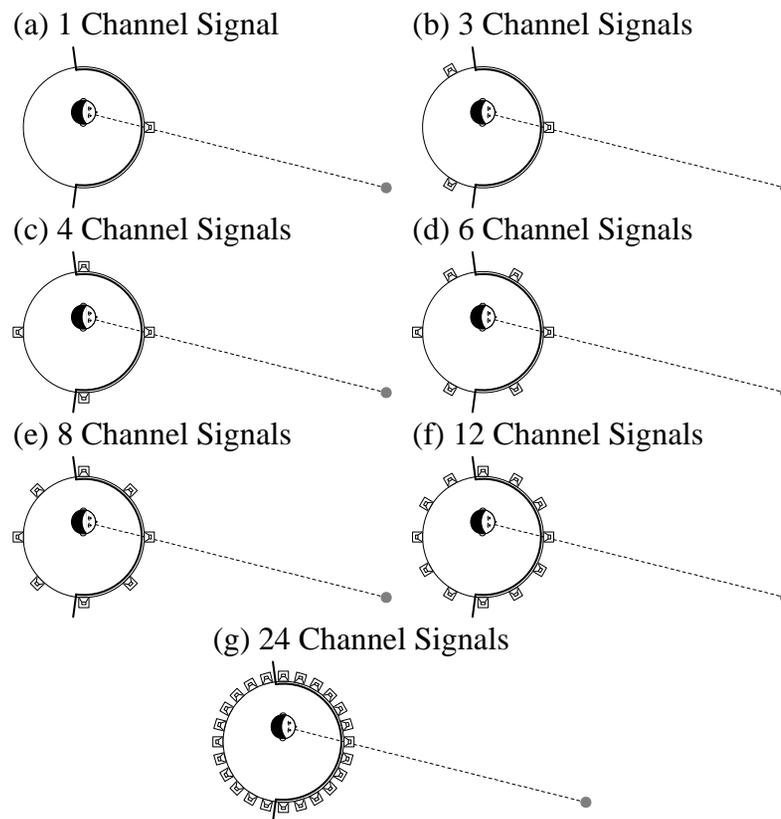
実験条件

- チャンネル数が増えるほど、音場が忠実に再現
- ある一定数以上だと、空間印象は同じに

中心位置



側方位置



実験計画

- 被験者...16名の学生(男性12名, 女性4名)

- 1箇所あたり4名ずつ

- 手法...Schefféの一对比較法

Subjective Assessment

Auditory Source Width	Listener Envelopment
-----------------------	----------------------

Evaluation

Session 1 Order...Randomized	Session 2 (Speech or Flute)
---------------------------------	--------------------------------

Session

Practice (6 trials)	Main (42 trials)
------------------------	------------------

Trial (Procedure)

Signal (0.1 s)	Break (0.9 s)	Stimulus A (4 s)	Break (2 s)	Stimulus B (4 s)	Answer (4 s)
-------------------	------------------	---------------------	----------------	---------------------	-----------------

- 刺激対の組み合わせ

- 練習試行...1, 3, 24チャンネルの順列 ($3 \times 2=6$)
- 本試行...1, 3, 4, 6, 8, 12, 24チャンネルの順列 ($7 \times 6=42$)

実験手順

■ 実験前

- 定義図を見せて、ASWとLEVの定義を理解

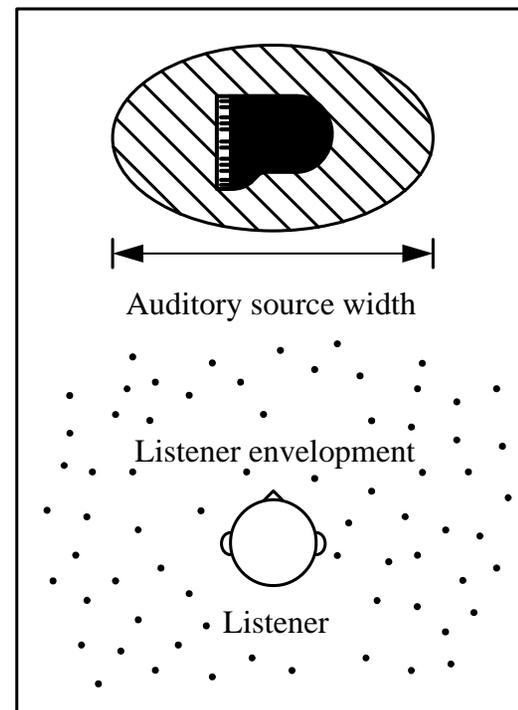
■ 実験手順

- 刺激BのASW及びLEVを刺激Aと比較して評定
- 評定表に従って、7段階評価

ASW及びLEVの定義

評定表

評定	ASW	LEV
3	非常に広い	非常に包まれる
2	かなり広い	かなり包まれる
1	少し広い	少し包まれる
0	同じ	同じ
-1	少し狭い	少し包まれない
-2	かなり狭い	かなり包まれない
-3	非常に狭い	非常に包まれない



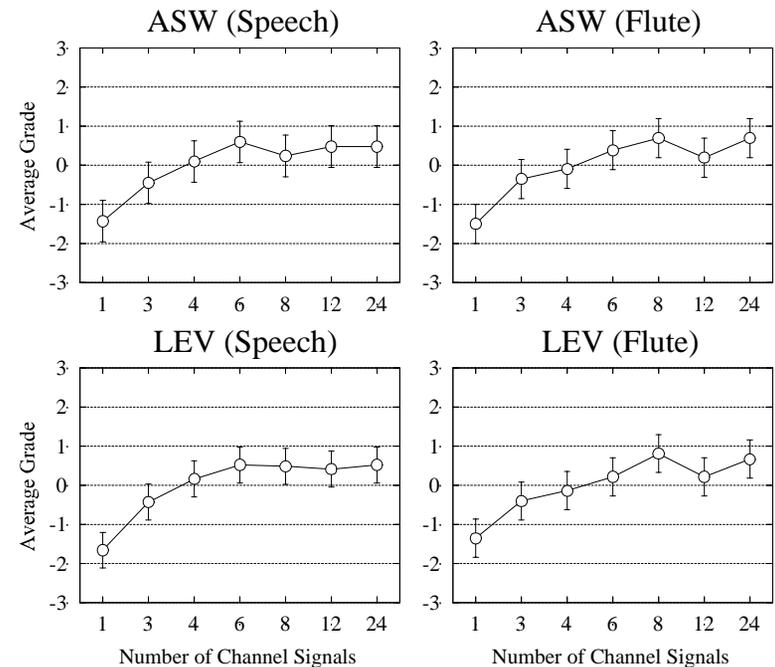
実験結果及び考察

- 全ての聴取位置において同じ傾向
 - チャンネル数1, 3, 4...チャンネル数24よりも平均評定値が低い
 - チャンネル数6, 8, 12...チャンネル数24と平均評定値が同じ
- ⇒ チャンネル数6以上ならば空間印象への影響はない



チャンネル信号の数が減っても
空間印象は十分に再現される

中心位置



3.4. まとめ

- チャンネル信号の数が音場知覚に及ぼす影響を検討
- 2種類の主観評価実験(方向感, 空間印象)
 - 方向感...チャンネル信号の数が24個でも再現される
 - 空間印象...チャンネル信号の数が6個でも再現される



- チャンネル数を24個に削減した波面合成システム
 - 聴取者は十分に臨場感を感じることができる

本論文の構成

■ 第2章(省略)

- 波面を忠実に合成する条件の検討
- スピーカ間隔を波長の1/2以下にすることが必要

■ 第3章

- スピーカ個数の減少に対する臨場感の変化の検討

■ 第4章

- 音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第5章

- 移動音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第6章

- 結論

本論文の構成

■ 第2章(省略)

- 波面を忠実に合成する条件の検討
- スピーカ間隔を波長の1/2以下にすることが必要

■ 第3章

- スピーカ個数の減少に対する臨場感の変化の検討

■ 第4章

- 音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第5章

- 移動音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第6章

- 結論

4.1. はじめに

■ 24チャンネル波面合成システム

- 従来のシステムよりも多くの伝送量を要する
 - ◆ 伝送量: 5チャンネル→24チャンネル
- 従来の伝送量削減(符号化)手法(AC-3, MPEG2 AAC)でも伝送量はチャンネル数に比例したまま
- 伝送チャンネル数を削減する手法が必要



■ 音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

- 音源の数がチャンネル数よりも少ないことに着目
- チャンネル信号から音源信号を抽出し, 伝送
- 現在の通信インフラでもシステムが構築可能

4.2. アルゴリズム

提案手法のブロック図

■ 送信側

- 収録したチャンネル信号から音源信号を抽出し、伝送

■ 受信側

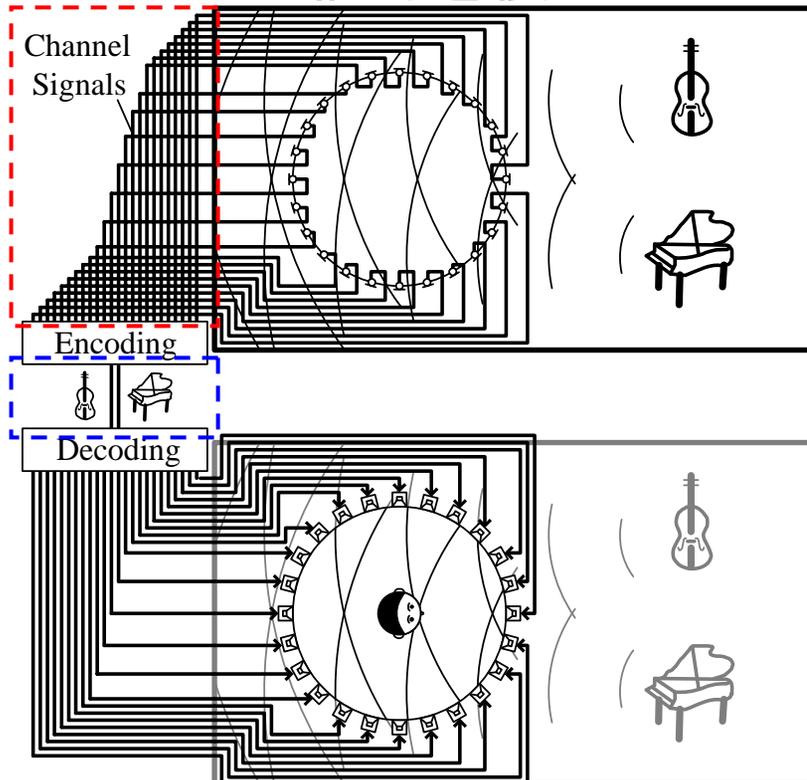
- 受信した音源信号からチャンネル信号を復元

■ 伝送量

- チャンネル信号の数



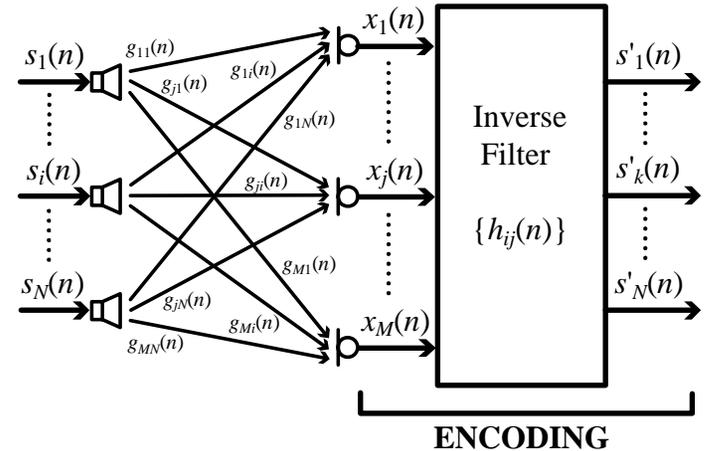
- 音源の数



音源信号の抽出

■ 収録したチャンネル信号に逆フィルタを畳み込み

- ◆ M : マイクホンの数
- ◆ N : 音源の数 ($N < M$)
- ◆ $s_i(n)$: i 番目の音源信号 ($i=1 \dots N$)
- ◆ $x_j(n)$: j 番目のチャンネル信号 ($j=1 \dots M$)
- ◆ $s'_k(n)$: k 番目の抽出した音源信号
- ◆ $g_{ji}(n)$: 室内インパルス応答 [$s_i(n) \rightarrow x_j(n)$]
- ◆ $h_{ji}(n)$: 逆フィルタ [$x_j(n) \rightarrow s'_i(n)$]



■ 逆フィルタは室内インパルス応答から算出

$$\begin{pmatrix} G_{11}(\omega) & \cdots & G_{M1}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{1N}(\omega) & \cdots & G_{MN}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_{11}(\omega) & \cdots & H_{N1}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{1M}(\omega) & \cdots & H_{NM}(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-j\omega T_0} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & e^{-j\omega T_0} \end{pmatrix}$$

$\mathbf{G}(\omega)\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{D}(\omega) \quad \longrightarrow \quad \mathbf{H}(\omega) = \mathbf{G}^+(\omega)\mathbf{D}(\omega)$

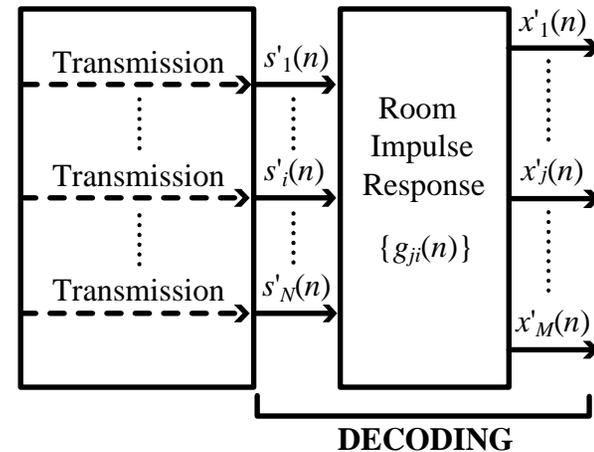
- ◆ $\mathbf{G}(\omega)$: 室内伝達関数行列
- ◆ T_0 : 設定した遅延時間
- ◆ $\mathbf{H}(\omega)$: 逆伝達関数行列
- ◆ $\mathbf{G}^+(\omega)$: $\mathbf{G}(\omega)$ のMoore-Penrose擬似逆行列

チャンネル信号の復元

■ 音源信号に室内インパルス応答を畳み込み

- 送信側と受信側で室内インパルス応答の情報は共有

- ◆ $s'_i(n)$: i 番目の抽出した音源信号
- ◆ $x'_j(n)$: j 番目の復元したチャンネル信号
- ◆ $g_{ji}(n)$: 室内インパルス応答 [$s_i(n) \rightarrow x_j(n)$]



■ 伝送量

- M チャンネル \rightarrow N 音源
- $M \gg N$ のとき, 特に有効

■ 符号化遅延時間

- 生じる遅延時間は T_0 s
- T_0 が大きすぎると会話に支障をきたす
- T_0 は会話に支障のないように設定(40ms以下)

4.3. 符号化実験

室内インパルス応答の測定

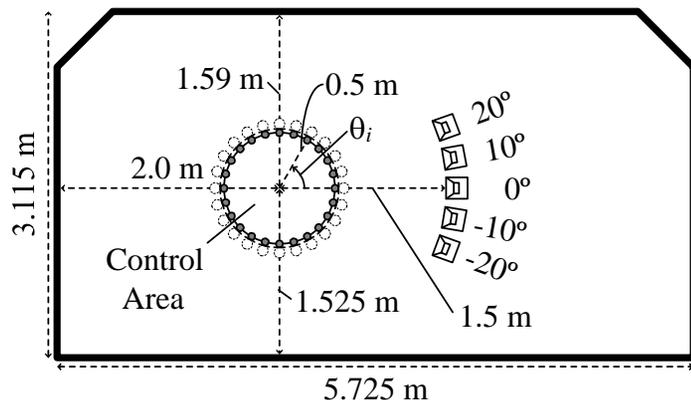
測定場所

- ◆ 可変残響室(名古屋大学工学部7号館410号室)
- ◆ 2次元音場...部屋の天井と床を吸音状態
- ◆ マイクロホンアレーとスピーカの高さ...0.835 m
- ◆ マイクロホンの指向性...単一指向性

測定条件

測定した応答

- ◆ サンプリング周波数12 kHzとする
- ◆ 残響時間...0.6 s, 1.2 s
- ◆ マイクロホンアレーの半径...2 m
- ◆ 各スピーカまでの距離...6 m



残響時間	150 ms	300 ms
室温	19.5°C	19.2°C
暗騒音レベル	20.0 dB(A)	19.4 dB(A)
音圧レベル*1	90.0 dB(A)	91.6 dB(A)
標本化周波数	48 kHz	
参照信号	TSP	
TSPの長さ	65536 samples	
同期加算	16	
FIRフィルタ次数	7200	14400

*1 スピーカーから1 m

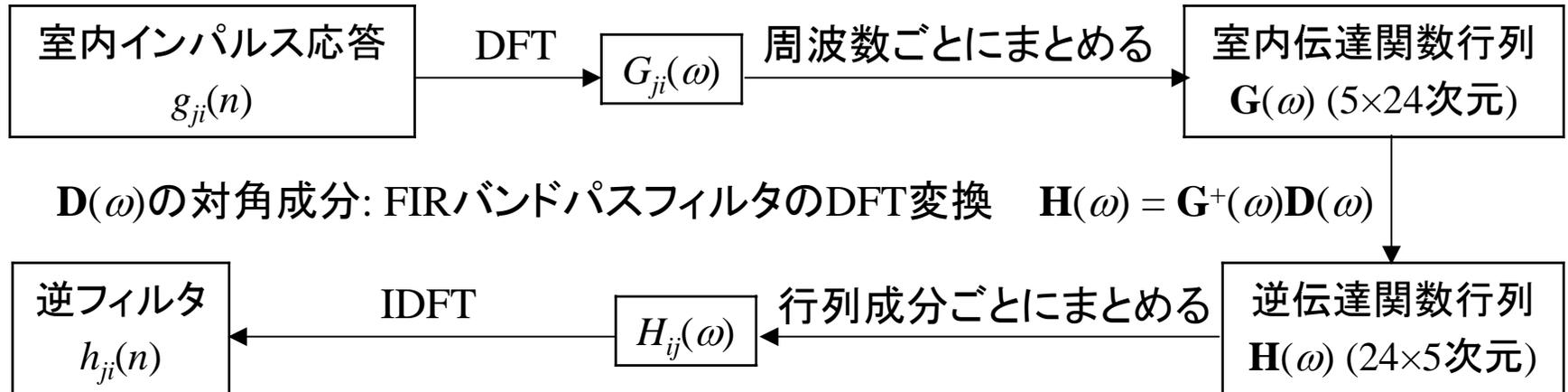
チャンネル信号の作成

■ ドライソースを室内インパルス応答に畳み込み

作成条件

ドライソース	女性音声 	木琴 	木管五重奏     
ドライソースの長さ	5 s		
サンプリング周波数	12kHz		
ドライソースの帯域	50-5000Hz		
音源の数	1	1	5
音源の方位角	0°	0°	0°, ±10°, ±20°
残響時間	0.6sec 	1.2sec 	1.2sec 

逆フィルタの算出



算出条件

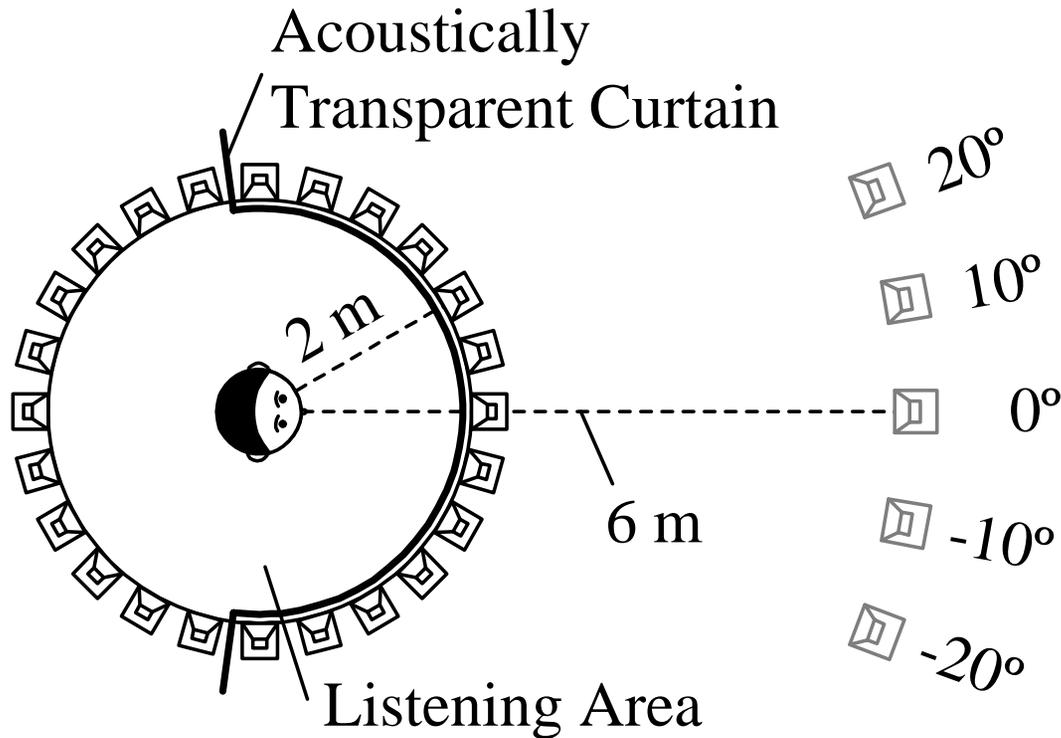
残響時間	0.6 s	1.2 s
DFTフレーム長	32768 samples	65536 samples
標本化周波数	12 kHz	
BPFの帯域	50-5000 Hz	
BPFの遅延(符号化遅延)	10 ms, 20 ms, 40 ms	
逆フィルタ長	14400	28800

4.4. 主観評価実験

実験環境

■ 聴取領域は半径2 mの円

- 部屋の残響時間...約80 ms
- 音圧レベル...約70 dB(A)
- 暗騒音レベル...25.0 dB(A)
- 音響カーテンで被覆



実験計画

■ 8名の学生(男性7名, 女性1名)

■ 三刺激二重盲験法(XAB法) 刺激の組み合わせ

Subjective Assessment

Sound Field Evaluation	Total Evaluation
------------------------	------------------

Evaluation

Session 1 (Speech, Xylophone or Windwood quintet)	Session 2	Session 3
--	-----------	-----------

Session

Practice (6 trials)	Main (12 trials)
------------------------	------------------

Trial (Procedure)

X Ref.	Break (0.5 s)	A Ref./Test	Break (0.5 s)	B Test/Ref.
-----------	------------------	----------------	------------------	----------------

X	A	B	練習試行	本試行
原音	原音	符号化音 ($T_0=10$ ms)	1	2
原音	符号化音 ($T_0=10$ ms)	原音	1	2
原音	原音	符号化音 ($T_0=20$ ms)	1	2
原音	符号化音 ($T_0=20$ ms)	原音	1	2
原音	原音	符号化音 ($T_0=40$ ms)	1	2
原音	符号化音 ($T_0=40$ ms)	原音	1	2

実験手順

■ 音場評価...部屋の知覚的な差を検討

- X...基準の部屋で再生
- A, B...どちらかは基準の部屋で再生
- AとBのうち一方を5.0と評定
- もう一方を1.0から4.9までで評定

■ 全体評価...音質も含めた知覚的な差を検討

- X...原音
- A, B...どちらかは原音と全く同じ
- AとBのうち一方を5.0と評定
- もう一方を1.0から4.9までで評定

評定表

5.0	差が分からない
4.0	差は分かるが、気にならない
3.0	差がわずかに気になる
2.0	差が気になる
1.0	差が非常に気になる

実験結果及び考察

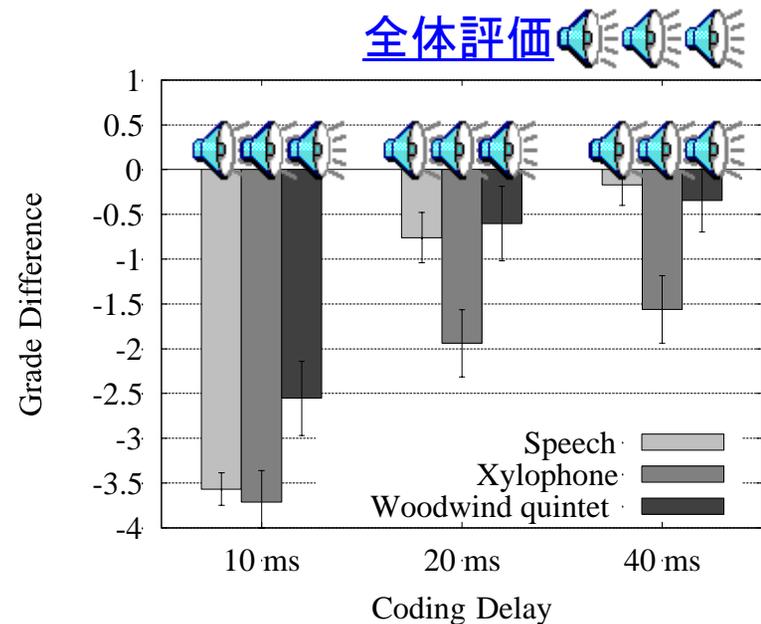
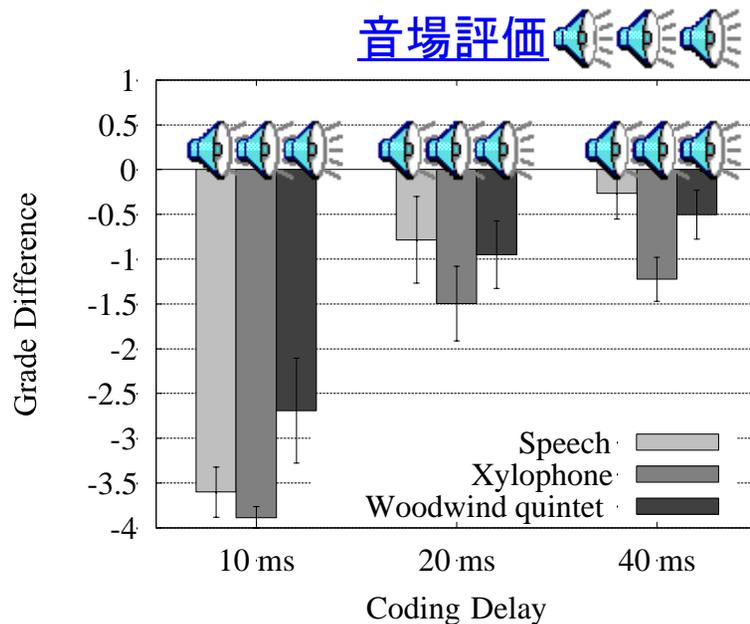
■ 符号化遅延10 ms

- 少なくとも劣化を“わずかに気にしている”

■ 符号化遅延20 ms, 40 ms

- 音声, 木管五重奏...劣化を“知覚できるが, 気にしない”

⇒ 音源が持続音の時には劣化は気にならない



4.5. まとめ

- 音源抽出に基づいた伝送量削減手法を提案
- 実環境の室内インパルス応答を基に符号化実験
 - 伝送量...24個のチャネル信号→5個の音源信号
- 主観評価実験によって性能を評価



- 以下の条件なら手法による劣化は気にならない
 - 持続する音
 - 符号化遅延を20 ms以上

本論文の構成

■ 第2章(省略)

- 波面を忠実に合成する条件の検討
- スピーカ間隔を波長の1/2以下にすることが必要

■ 第3章

- スピーカ個数の減少に対する臨場感の変化の検討

■ 第4章

- 音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第5章

- 移動音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第6章

- 結論

本論文の構成

■ 第2章(省略)

- 波面を忠実に合成する条件の検討
- スピーカ間隔を波長の1/2以下にすることが必要

■ 第3章

- スピーカ個数の減少に対する臨場感の変化の検討

■ 第4章

- 音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第5章

- 移動音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第6章

- 結論

5.1. はじめに

■ 音源抽出に基づく伝送量削減手法

- 24個のチャンネル信号を5個の音源信号に削減
- 手法による劣化は十分に許容できる
- 応用例...演劇のように音源が移動している
- 移動音源も扱える伝送量削減手法が必要



■ 移動音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

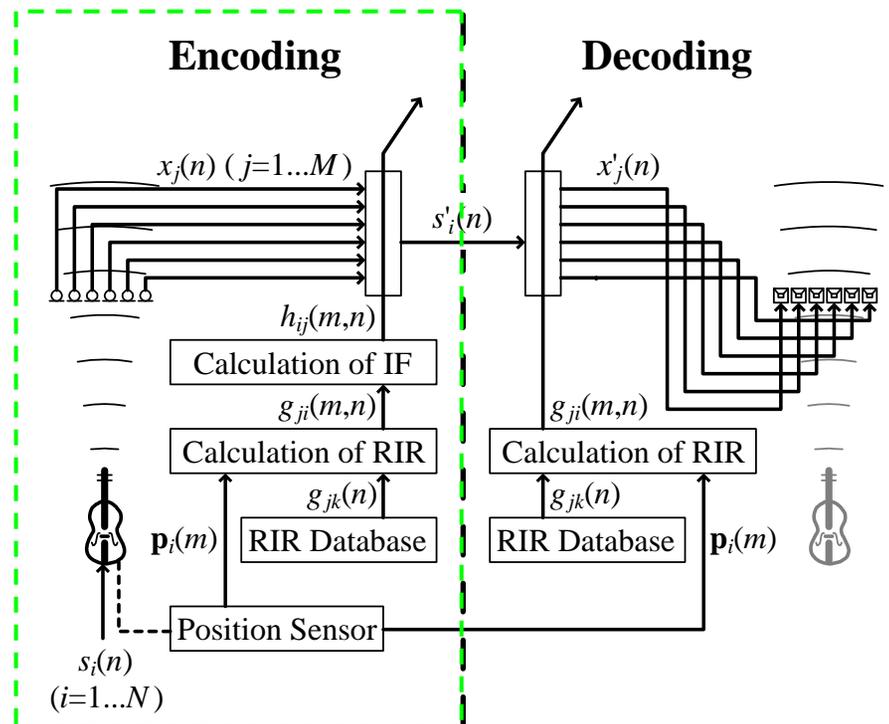
- チャンネル信号から移動音源信号を抽出し, 伝送
- 現在の通信インフラでもシステムが構築可能

5.2. アルゴリズム

提案手法のブロック図

■ 送信側

- マイクロホンアレーでチャネル信号を収録
- 位置センサで音源の位置情報も収録
- 位置情報から室内インパルス応答, 逆フィルタを算出
- 逆フィルタを畳み込んで音源信号を抽出
- 音源信号と位置情報を伝送



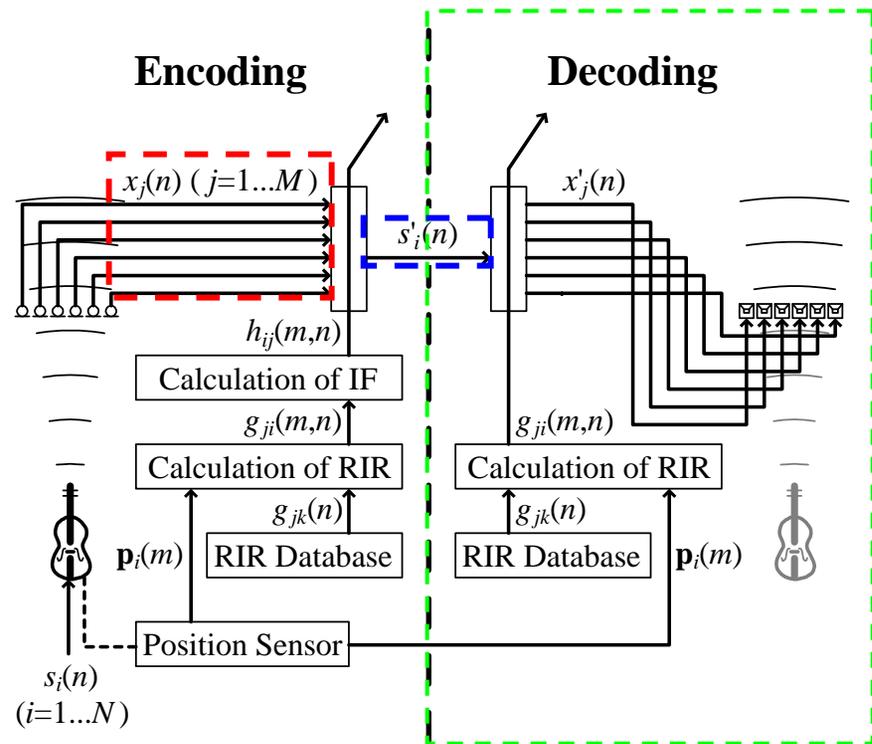
提案手法のブロック図

■ 受信側

- 位置情報から室内インパルス応答を算出
- 室内インパルス応答からチャンネル信号を復元

■ 伝送量

- チャンネル信号の数
↓
- 音源の数



逆フィルタの算出

■ ある時点での室内インパルス応答を算出

$$g_{ji}(m, n) = g_{jk}(n)$$

- ◆ m, n : 離散時間(サンプリング周波数 F_p, F_s)
 - ◆ F_p : 音源の位置情報のサンプリング周波数
 - ◆ F_s : 信号のサンプリング周波数
 - ◆ $g_{ji}(m, n)$: ある時点 m における室内インパルス応答
 - ◆ $g_{jk}(n)$: データベース内の室内インパルス応答
- 音源の位置が変わるたびに室内インパルス応答を算出

■ 室内インパルス応答から逆フィルタを算出

$$\mathbf{G}(m, \omega)\mathbf{H}(m, \omega) = \mathbf{D}(m, \omega)$$



$$\mathbf{H}(m, \omega) = \mathbf{G}^+(m, \omega)\mathbf{D}(m, \omega)$$

- ◆ $\mathbf{G}(m, \omega) = \{G_{ji}(m, \omega)\}$: 室内伝達関数行列
 - ◆ $\mathbf{H}(m, \omega) = \{H_{ij}(m, \omega)\}$: 逆伝達関数行列
 - ◆ $\mathbf{D}(m, \omega) = \text{diag}(e^{-j\omega T_c}, \dots, e^{-j\omega T_c})$
 - ◆ $\mathbf{G}^+(m, \omega)$: $\mathbf{G}(m, \omega)$ のMoore-Penrose擬似逆行列
- 音源の位置が変わるたびに逆フィルタを算出

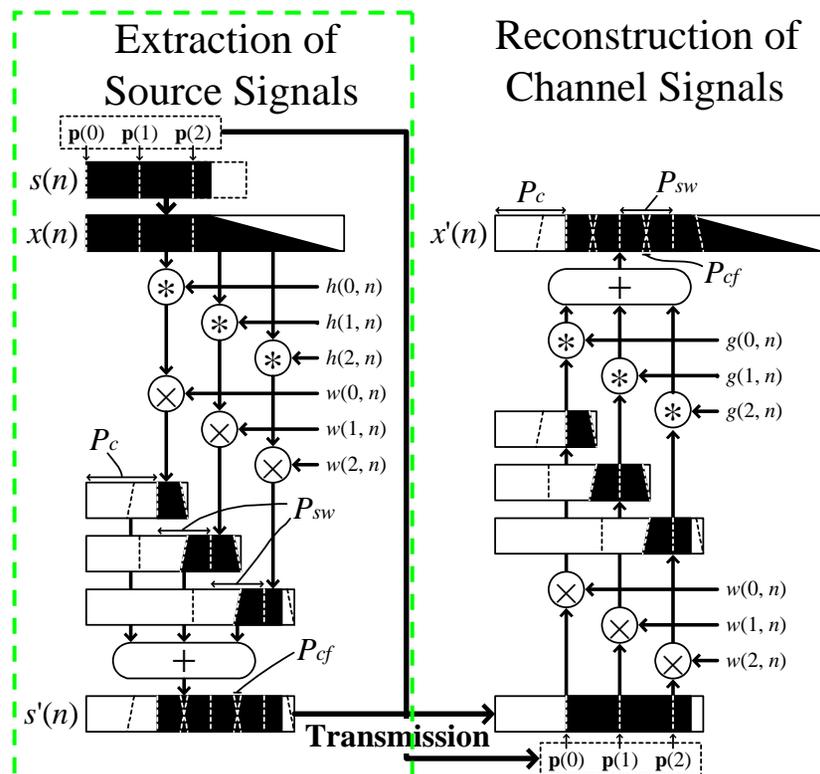
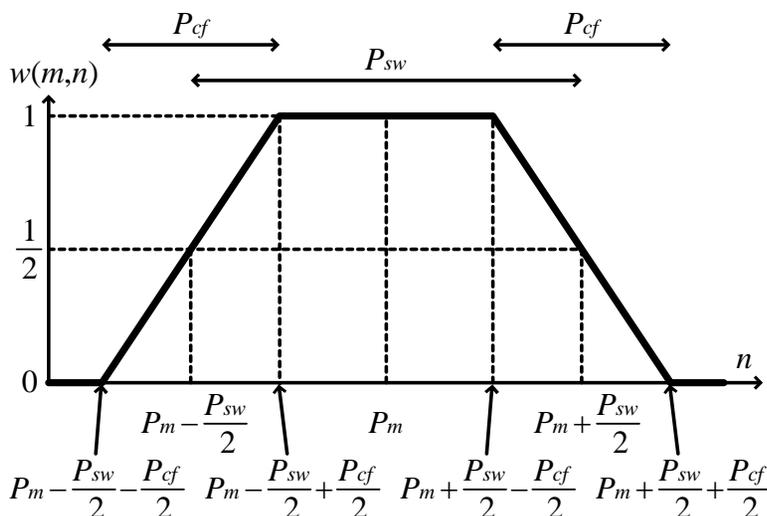
移動音源信号の抽出

収録したチャンネル信号に逆フィルタを畳み込み

$$s'_i(n) = \sum_m w(m, n) \sum_{j=1}^M h_{ij}(m, n) * x_j(n)$$

- ◆ $p_i(m)$: i 番目の音源の位置情報
- ◆ $s_i(n)$: i 番目の音源信号($i=1\dots N$)
- ◆ $x_j(n)$: j 番目のチャンネル信号($j=1\dots M$)
- ◆ $h_{ji}(m, n)$: ある時点 m における逆フィルタ
- ◆ $s'_i(n)$: i 番目の抽出した音源信号
- ◆ $w(m, n)$: 窓関数

音源の位置が変わるたびに逆フィルタを畳み込み



チャンネル信号の復元

- ある時点での室内インパルス応答を算出
- 移動音源信号に室内インパルス応答を畳み込み

$$x'_j(n) = \sum_m \sum_{i=1}^N g_{ji}(m, n) * [w(m, n) s'_i(n)]$$

音源の位置が変わるたびに
室内インパルス応答を畳み込み

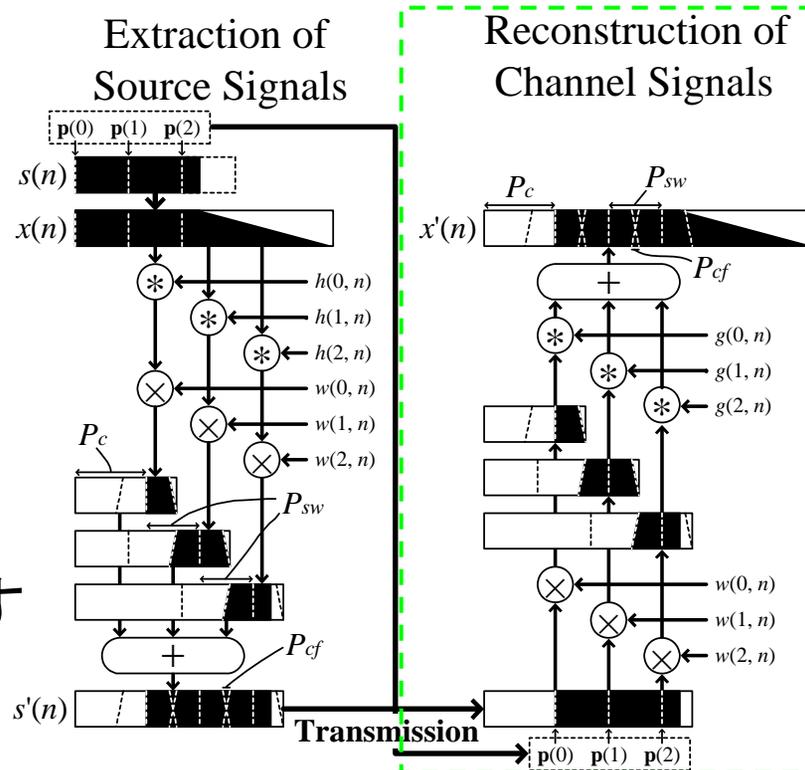
- $s'_i(n)$: i 番目の抽出した移動音源信号
- $x'_j(n)$: j 番目の復元したチャンネル信号
- $w(m, n)$: 窓関数

伝送量

- M チャンネル \rightarrow N 移動音源
- $M \gg N$ のとき, 特に有効

符号化遅延時間

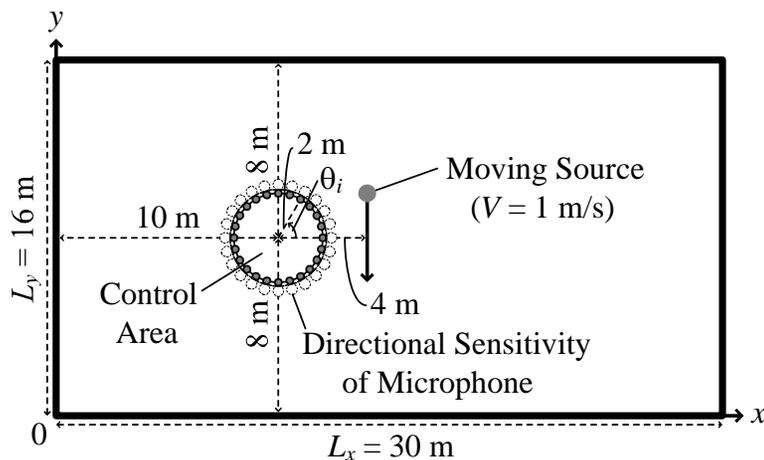
- 大きすぎると会話に支障をきたす
- 会話に支障のないように



5.3. 符号化実験

チャンネル信号の作成

- 原音場は残響空間, 制御領域は半径2 mの円
- 1個の移動音源と24個のマイクロホン
- 虚像法を用いて計算機上でチャンネル信号を作成
 - マイクロホンの指向性...単一指向性



作成条件

ドライソース	音声 	フルート 
F_s (サンプリング周波数)	48 kHz	
音源の長さ	4 s	
壁面の反射係数	0.5	0.7
最大の壁面反射回数	6	10
残響時間[second]	0.6 s	1.0 s
V (音源の移動速度)		
	1 m/s=3.6 km/h	

室内インパルス応答データベース

- 虚像法により作成
- 直線状の音源の軌跡を8.33 mmごとに区切る
- 481点から24点までの室内インパルス応答を算出
 - ◆ \mathbf{s}_k ...音源の位置ベクトル($k=1\dots481$)
 - ◆ \mathbf{r}_j ...マイクロホンの位置ベクトル($j=1\dots24$)

$$\mathbf{s}_k = \begin{pmatrix} 14 \\ 10 - \frac{k-1}{120} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}_j = \begin{pmatrix} 2 \cos \left[\frac{\pi}{12} (j-12) \right] + 10 \\ 2 \sin \left[\frac{\pi}{12} (j-12) \right] + 8 \end{pmatrix}$$

音源抽出・チャンネル復元

■ 位置情報から室内インパルス応答を算出

- ◆ F_p (=30, 60, 120 Hz): 位置情報のサンプリング周波数

$$g_{ji}(m, n) = g_{jk}(n) \quad \left(m = \frac{F_p(k-1)}{120}\right)$$

■ 逆フィルタの算出

算出条件

残響時間	0.6 s	1.0 s
FFTフレーム長[samples]	65536	131072
符号化遅延時間 T_c	20 ms	
フィルタ長[samples]	28800	48000

第4章での実験で
劣化が気にならない条件

■ 音源信号の抽出・チャンネル信号の復元

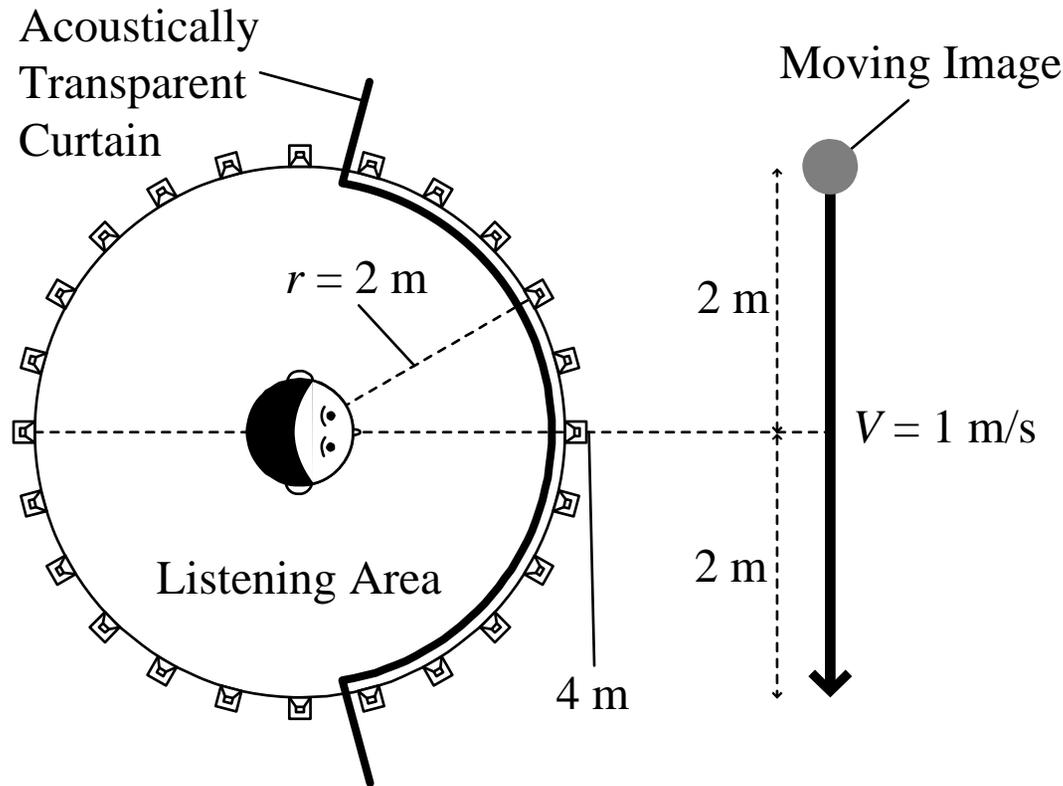
- ◆ P_{sw} (=1600, 800, 400 samples): 窓関数 $w(m, n)$ における切り替えサンプル数
[F_p (=30, 60, 120 Hz)から換算]
- ◆ T_{cf} (=1, 4 ms): 窓関数 $w(m, n)$ におけるクロスフェード時間

5.4. 主観評価実験

実験環境

■ 聴取領域は半径2 mの円

- 部屋の残響時間...約80 ms
- 音圧レベル...約70 dB(A)
- 暗騒音レベル...25.0 dB(A)
- 音響カーテンで被覆



実験計画

- 被験者...8名の男子学生
- 手法...三刺激二重盲験法(XAB法)
- 練習試行...12
 - = 6(符号化音の種類)
 - × 2(A or Bに割り当て)
- 本試行...24
 - = 6(符号化音の種類)
 - × 2(A or Bに割り当て)
 - × 2(繰り返し)

Subjective Assessment

Moving Evaluation		Total Evaluation	
Evaluation			
Session 1		Session 2	
Order...Randomized (Speech or Flute)			
Session			
Practice (12 trials)	Main (24 trials)		
Trial (Procedure)			
X Ref.	Break (0.5 s)	A Ref./Test	B Test/Ref.

符号化音の種類

	1	2	3	4	5	6
F_p	30Hz	30Hz	60Hz	60Hz	120Hz	120Hz
T_{cf}	1ms	4ms	1ms	4ms	1ms	4ms

実験手順

- 動き評価...音の動き方の知覚的な差を検討
 - X...基準となる動き方をする音
 - A, B...どちらかは必ず基準の音と同じ動き方
 - AとBのうち一方を5.0と評定
 - もう一方を1.0から4.9までで評定
- 全体評価...音質も含めた知覚的な差を検討

評定表

- X...原音
- A, B...どちらかは原音と全く同じ
- AとBのうち一方を5.0と評定
- もう一方を1.0から4.9までで評定

5.0	差が分からない
4.0	差は分かるが、気にならない
3.0	差がわずかに気になる
2.0	差が気になる
1.0	差が非常に気になる

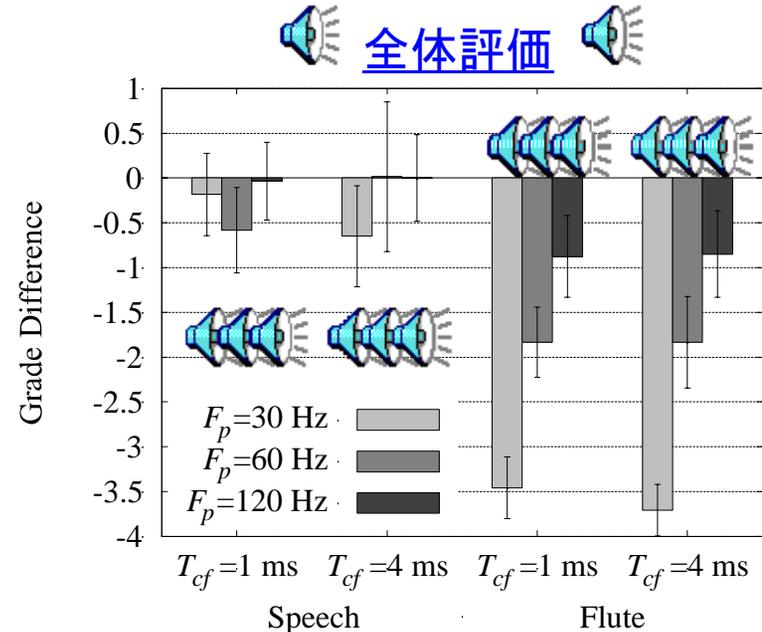
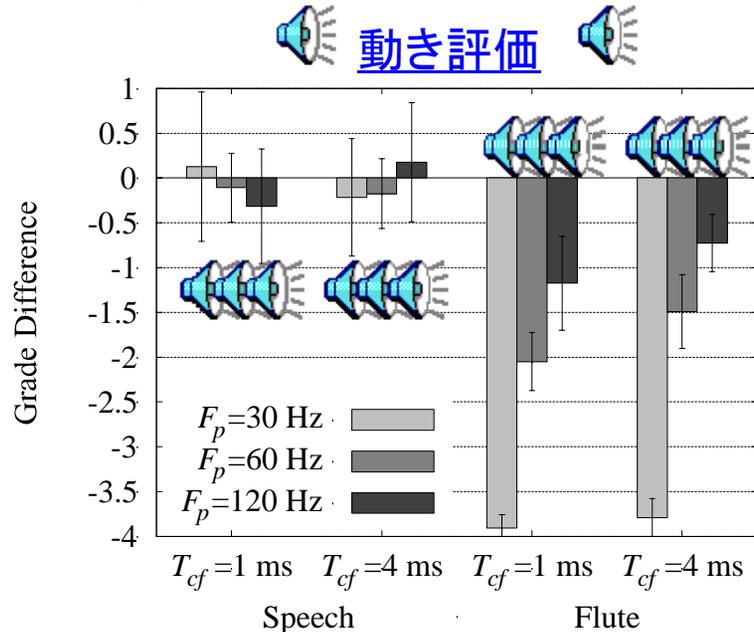
実験結果及び考察

■ フルート

- 音声よりも全体的に低い
- $F_p=120$ Hzで十分実用的なシステムを構築可能

■ 音声

- $F_p=30$ Hzでも実用的なシステムを構築可能



5.5. まとめ

- 移動音源抽出に基づいた伝送量削減手法を提案
- 虚像法による室内インパルス応答で符号化実験
 - 伝送量...24個のチャンネル信号→1個の移動音源信号
- 主観評価実験によって性能を評価



- 以下の条件で手法に劣化は許容できる
 - フルーツ...位置情報のサンプリング周波数を120 Hz以上に
 - 音声...位置情報のサンプリング周波数を30 Hz以上に

本論文の構成

■ 第2章(省略)

- 波面を忠実に合成する条件の検討
- スピーカ間隔を波長の1/2以下にすることが必要

■ 第3章

- スピーカ個数の減少に対する臨場感の変化の検討

■ 第4章

- 音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第5章

- 移動音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第6章

- 結論

本論文の構成

■ 第2章(省略)

- 波面を忠実に合成する条件の検討
- スピーカ間隔を波長の1/2以下にすることが必要

■ 第3章

- スピーカ個数の減少に対する臨場感の変化の検討

■ 第4章

- 音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第5章

- 移動音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第6章

- 結論

6.1. 要約

■ 波面合成法による立体音場再生

- 問題点: 必要となる情報量が非常に多い
- 必要な情報量の削減を主観評価実験をベースに検討

■ 第2章

- 波面が忠実に合成される条件を検討
- 波面を忠実に合成するためにはマイクロホンやスピーカの間隔を波長の $1/2$ 以下にすることが必要

■ 第3章

- チャンネル信号数が方向感や空間印象に及ぼす影響を検討
- 比較的低い周波数帯域で波面が合成されれば, 方向感や空間印象は十分に再現される
- 24チャンネルのシステムでも臨場感が再現される

6.1. 要約

■ 第4章

- 音源抽出に基づく伝送量削減手法を提案
- 主観評価実験の結果, 手法による知覚への影響は音源が持続音の場合は問題にならない

■ 第5章

- 移動音源抽出に基づく伝送量削減手法を提案
- 主観評価実験の結果, 対象となる音源に対して適切なパラメータを設定すれば, 知覚への影響はほとんどない

6.1. 要約

- 以上の結果から,
 - 24個のマイクロホンとスピーカによる立体音場再生システム
 - 十分に臨場感が再現され, 現在の通信インフラでも十分に伝送できるシステムが実現可能



波面合成法による立体音場再生システムの
実現の可能性

6.2. 今後の展望

■ 異なる制御領域

- 本論文: 半径2 mの円状
- 半径2 mの円以外, 3次元の場合の検討

■ 伝送量削減手法

- 本論文: 狭帯域, 理想環境
- 広帯域音, 実環境の場合の検討

■ オーケストラ

- チャネル信号の数より音源の数の方が多い
- 本伝送量削減手法の有効性の検討

■ 実用的なシステムの構築

本論文の構成

■ 第2章(省略)

- 波面を忠実に合成する条件の検討
- スピーカ間隔を波長の1/2以下にすることが必要

■ 第3章

- スピーカ個数の減少に対する臨場感の変化の検討

■ 第4章

- 音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第5章

- 移動音源抽出に基づく伝送量削減手法の提案

■ 第6章

- 結論

2.1. はじめに

- 波面合成法による立体音場再生システム
 - 波面が忠実に合成される条件を検討することは重要
 - 本論文で扱うシステムにおいて波面が忠実に合成される条件は十分に検討されていない



- 波面が忠実に合成される条件を検討
 - 計算機シミュレーションによる波面合成実験を実施

2.2. 波面合成実験

実験環境

■ 制御領域, 聴取領域:半径 $r(=2\text{ m})$ の円

- 音源の距離: $d=3, 10\text{ m}$
- 円状に均等配置
- 音源信号 $s_0(t)$

$$s_0(t) = \sin 2\pi ft$$

- 原音場の音圧 $p_0(\vec{r}, t)$

$$p_0(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}{c} \right) \right]$$

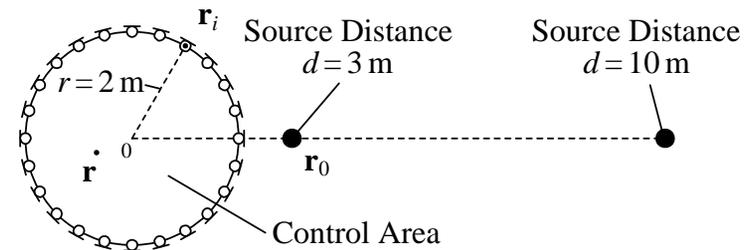
- チャンネル信号 $x_i(t)$

$$x_i(t) = \frac{D_i}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|} \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}{c} \right) \right]$$

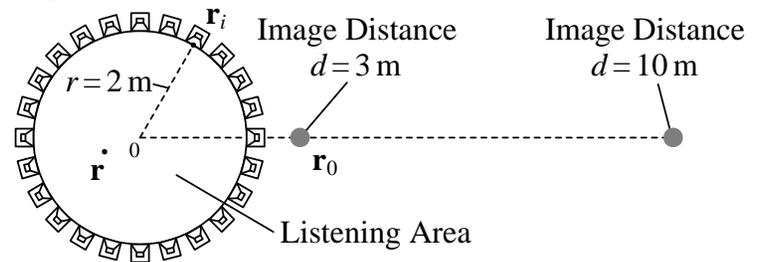
- 聴取領域内の音圧 $p(\vec{r}, t)$

$$p(\mathbf{r}, t) = \sum_{i=1}^M \frac{D_i}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|} \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| + |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}{c} \right) \right]$$

Original Sound Field



Reproduced Sound Field



\mathbf{r}_0 : 音源の位置ベクトル

\mathbf{r}_i : マイクロホンの位置ベクトル

\mathbf{r} : 任意の点の位置ベクトル

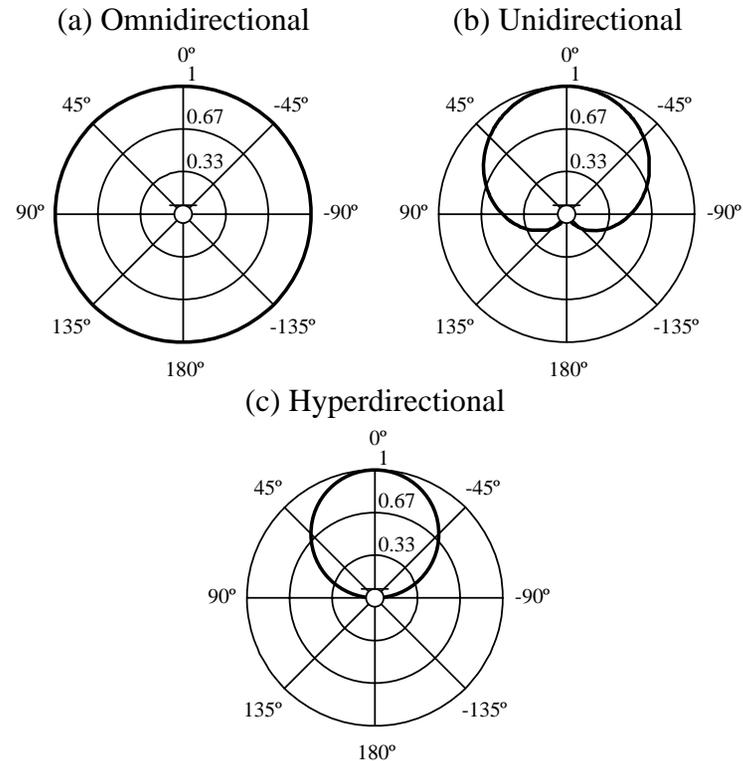
c : 音速

M : マイクロホン数

D_i : 指向特性

実験条件

マイクロホンの数: M	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 16, 20, 24, 27, 32, 36, 45, 54, 64, 72, 90, 108, 128, 160, 180, 216, 256, 300, 360, 432, 512
音源の周波数: f	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz
音源の距離: d	3, 10 m
制御領域の半径: r	2 m
音速: c	340 m/s
指向特性: D_i	無指向性, 単一指向性, 超指向性



$$\mathbf{r}_0 = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ or } \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} 2 \cos \frac{2\pi i}{M} \\ 2 \sin \frac{2\pi i}{M} \end{pmatrix} \quad \mathbf{r} = \begin{pmatrix} \nabla r_x \\ \nabla r_y \end{pmatrix} \quad (r_x^2 + r_y^2 < 2^2)$$

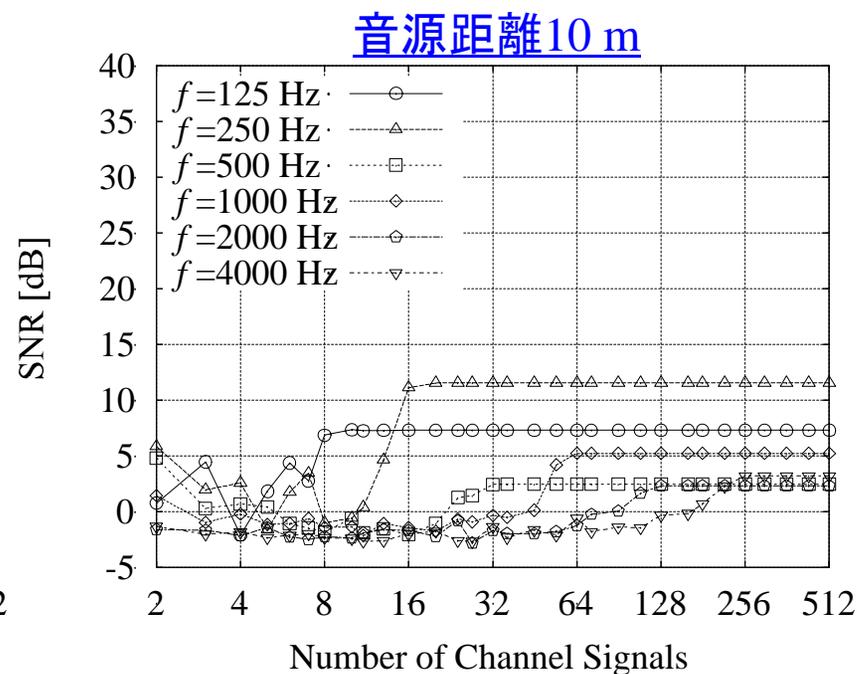
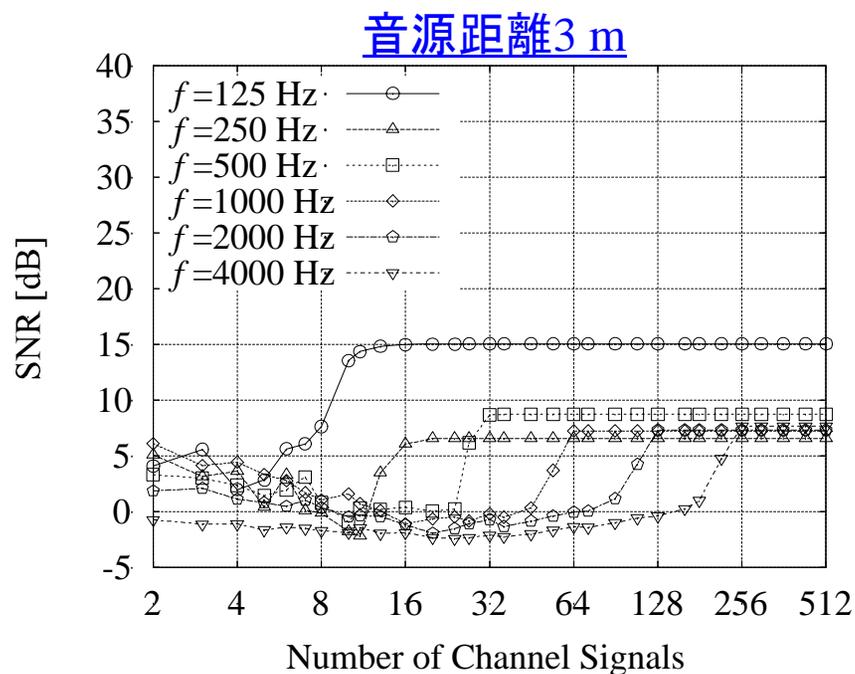
実験結果及び考察

- SNR(Signal-to-Noise Ratio)による評価
 - 算出範囲: 半径1 mの円内
 - 正規化を行ってから算出

$$\text{SNR}[\text{dB}] = 10 \log_{10} \frac{\sum_{\mathbf{r}} \{p_0(\mathbf{r}, t)\}^2}{\sum_{\mathbf{r}} \{p(\mathbf{r}, t) - p_0(\mathbf{r}, t)\}^2}$$

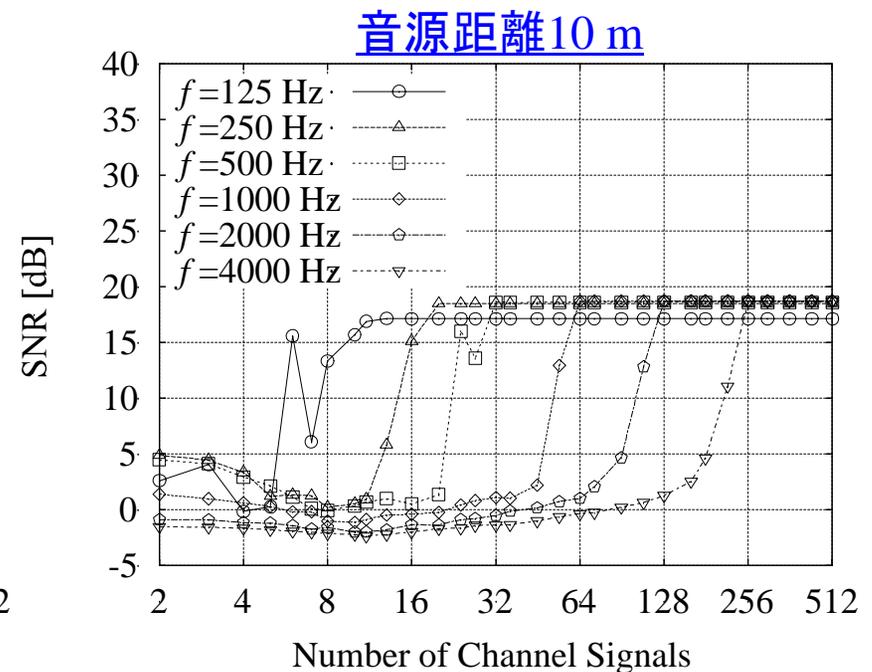
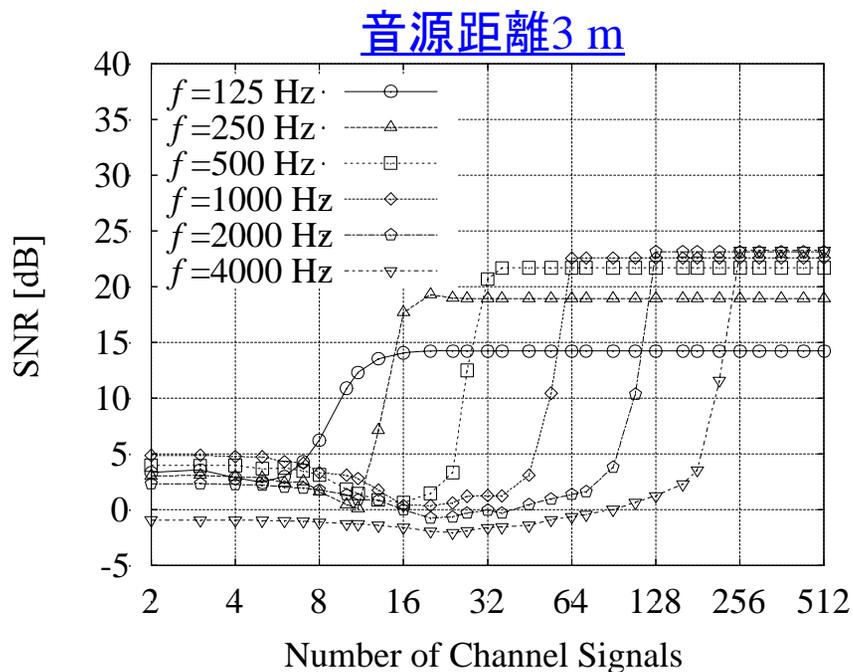
SNRの結果(無指向性)

- ある一定の閾値以上でSNRが一定に
 - 得られた閾値が波面を忠実に合成するのに必要な数
- SNRの一定値はさほど高くない
- 音源距離による影響はあまり見られない



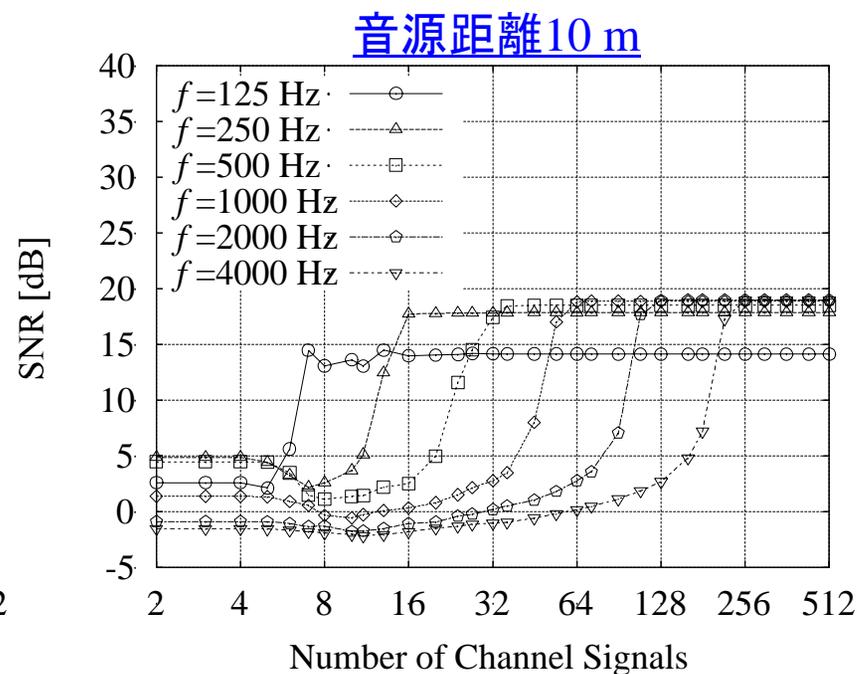
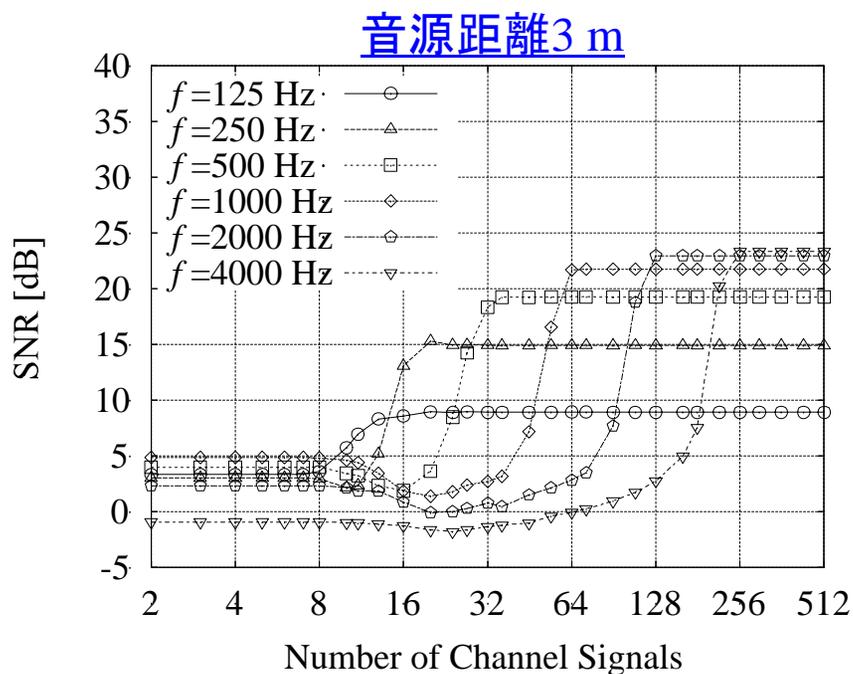
SNRの結果(単一指向性)

- ある一定の閾値以上でSNRが一定に
 - 得られた閾値が波面を忠実に合成するのに必要な数
- SNRの一定値は無指向性より高い
- 音源距離による影響はあまり見られない



SNRの結果(超指向性)

- ある一定の閾値以上でSNRが一定に
 - 得られた閾値が波面を忠実に合成するのに必要な数
- SNRの一定値は無指向性より高い
- 音源距離による影響はあまり見られない



マイクロホンの数による影響

- 周波数が2倍になると、SNRが一定になる数も2倍に
 - 以下の条件を満たせば、波面が忠実に合成される

$$M \geq 0.064 f \left(= \frac{256}{4000} f \right)$$

- $\Delta = 2\pi r/M$, $f = \lambda/c$ より,
 - ◆ Δ : マイクロホン間隔, λ : 波長

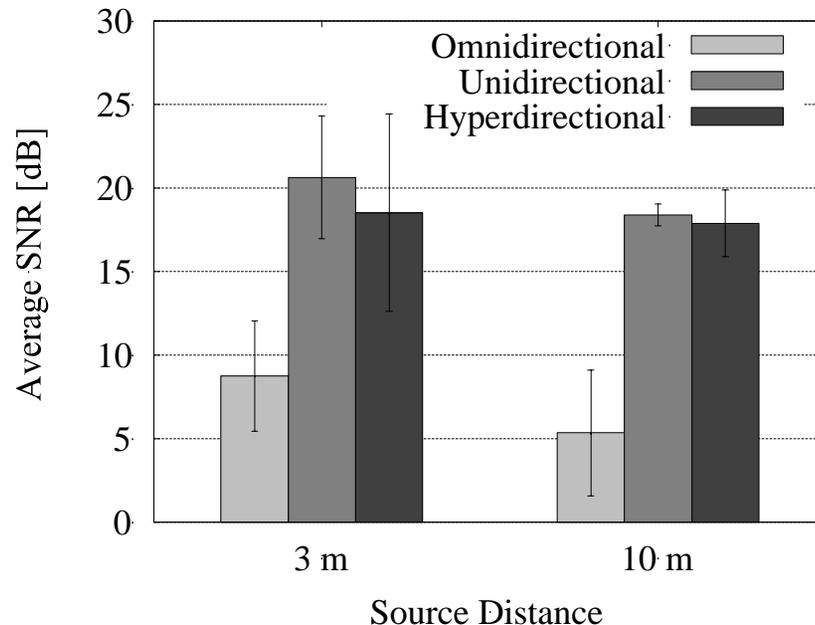
$$\Delta \leq \frac{2\pi r}{0.064c} \approx 0.57\lambda$$



波面を忠実に合成するためにはマイクロホンの間隔を波長の1/2以下にすることが必要

平均SNRの結果

- M=512におけるSNRを周波数全体での平均化
 - 無指向性よりも単一指向性, 超指向性のほうが高い



波面を忠実に合成するためには単一指向性か超指向性マイクロホンを用いることが必要

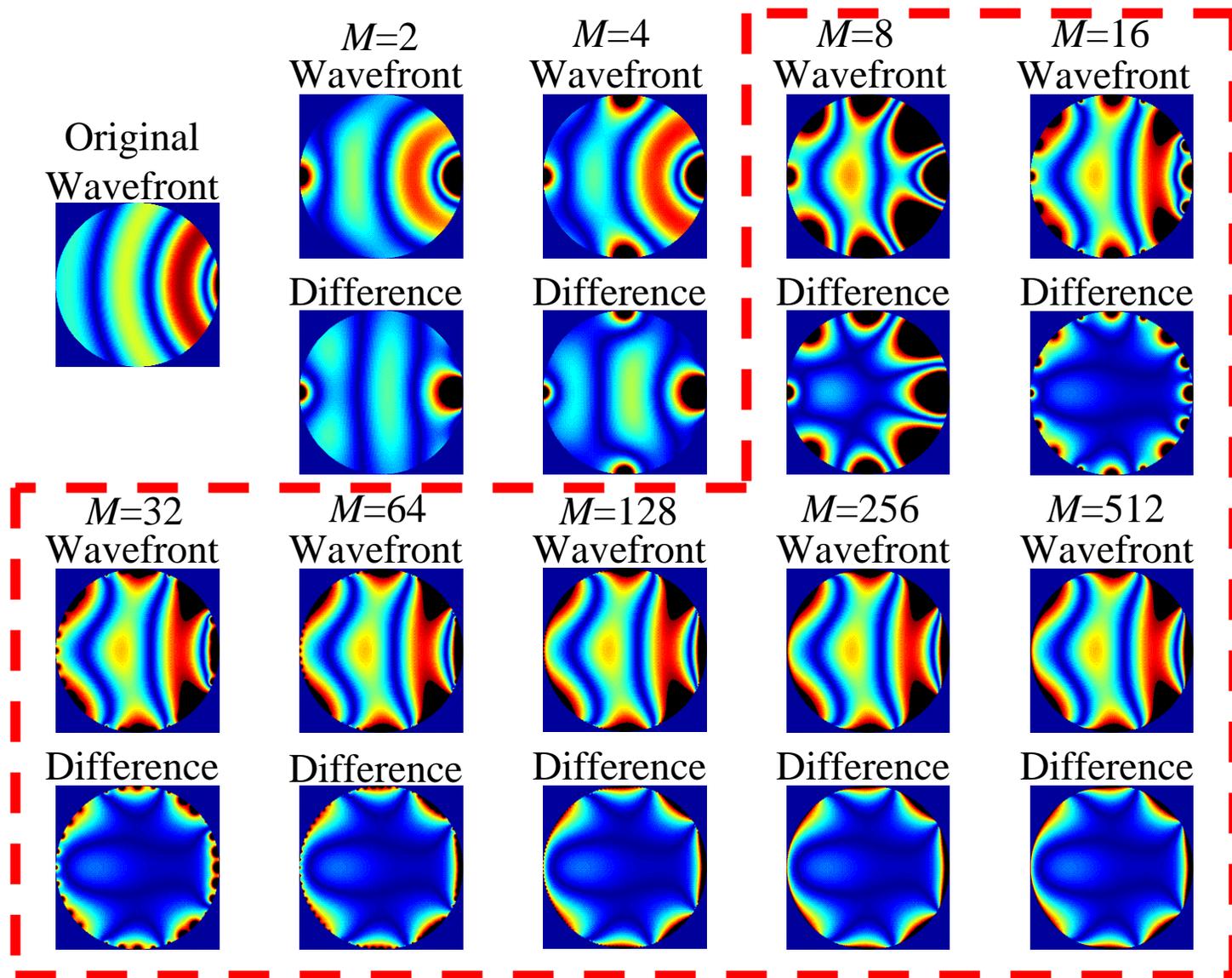
2.3. まとめ

- 波面が忠実に合成される条件を検討
 - 計算機シミュレーションによる波面合成実験を実施



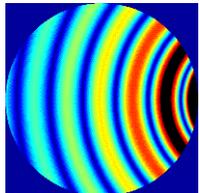
- 波面を忠実に合成するには以下の条件が必要
 - マイクロホン及びスピーカの間隔を波長の $1/2$ 以下にする
 - 単一指向性もしくは超指向性マイクロホンを用いる

無指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 125 \text{ Hz}$



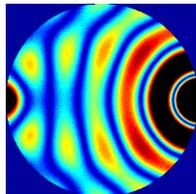
無指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 250 \text{ Hz}$

Original
Wavefront

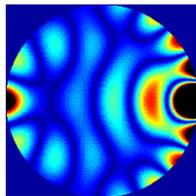


$M=2$

Wavefront

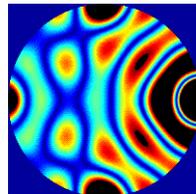


Difference

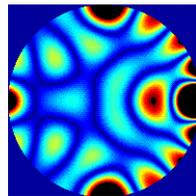


$M=4$

Wavefront

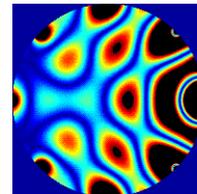


Difference

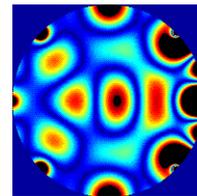


$M=8$

Wavefront

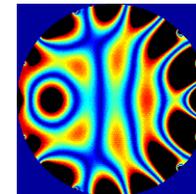


Difference

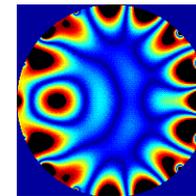


$M=16$

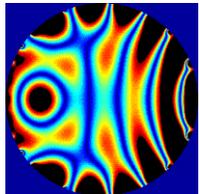
Wavefront



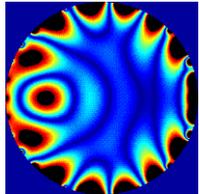
Difference



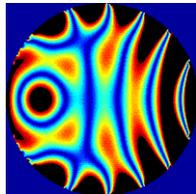
$M=32$
Wavefront



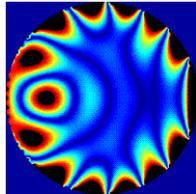
Difference



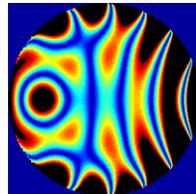
$M=64$
Wavefront



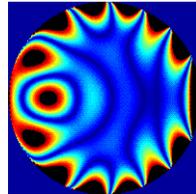
Difference



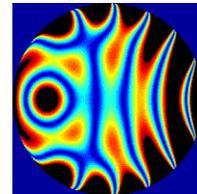
$M=128$
Wavefront



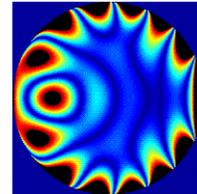
Difference



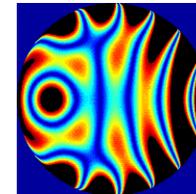
$M=256$
Wavefront



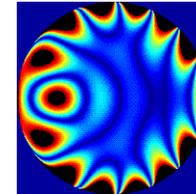
Difference



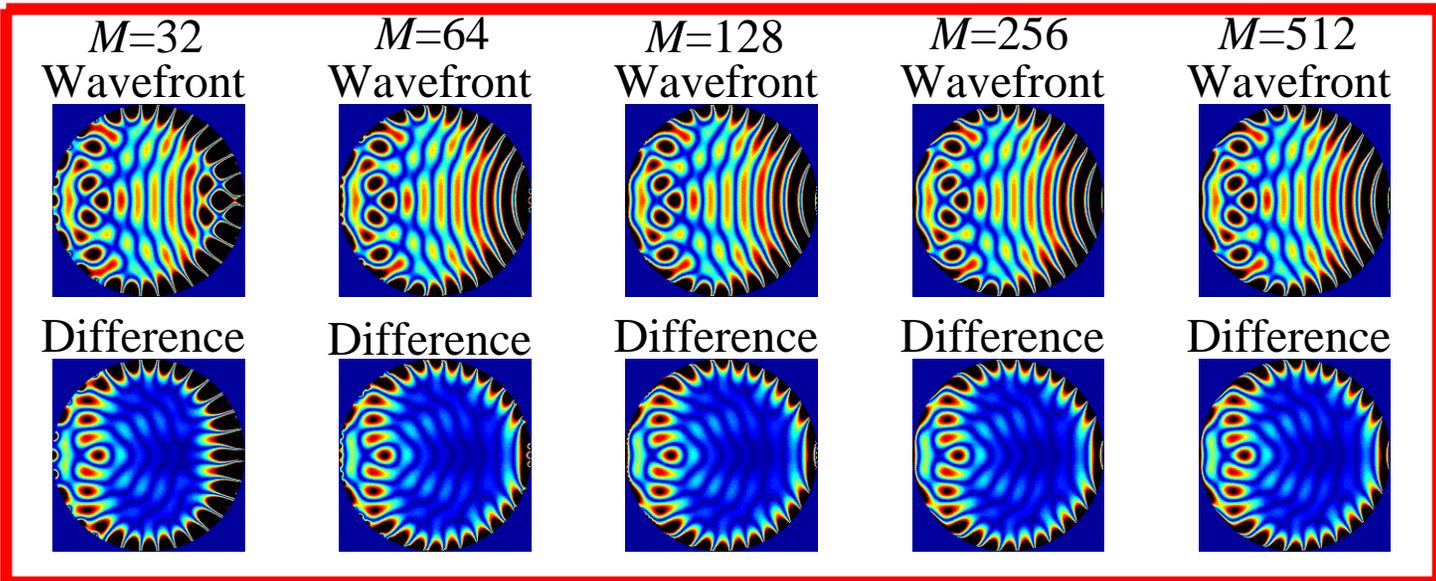
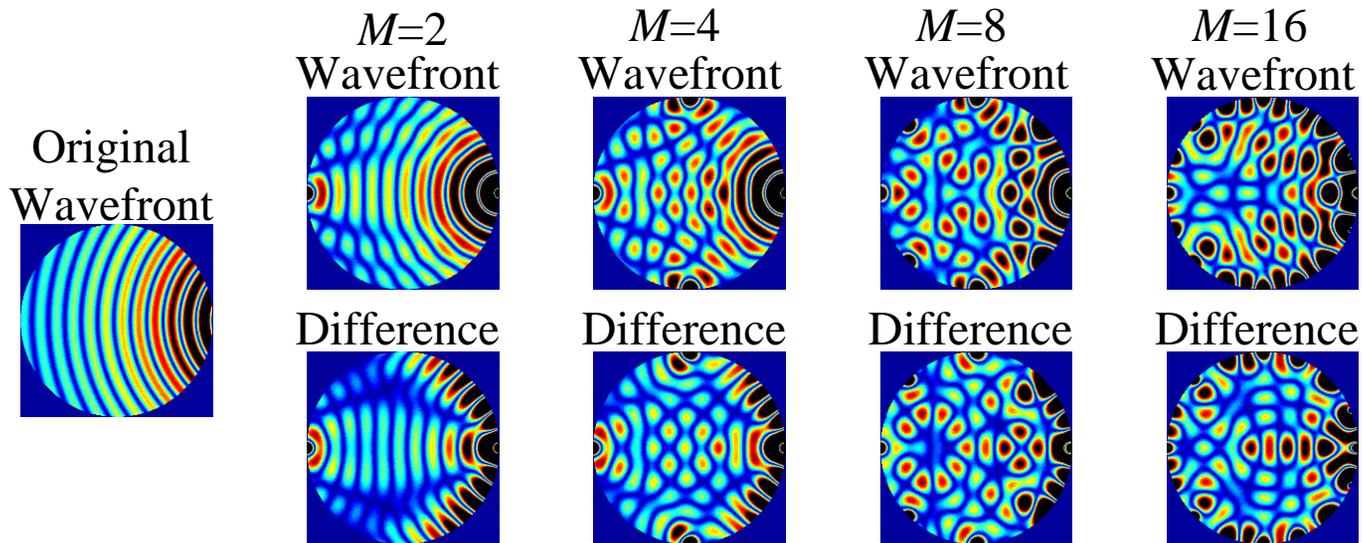
$M=512$
Wavefront



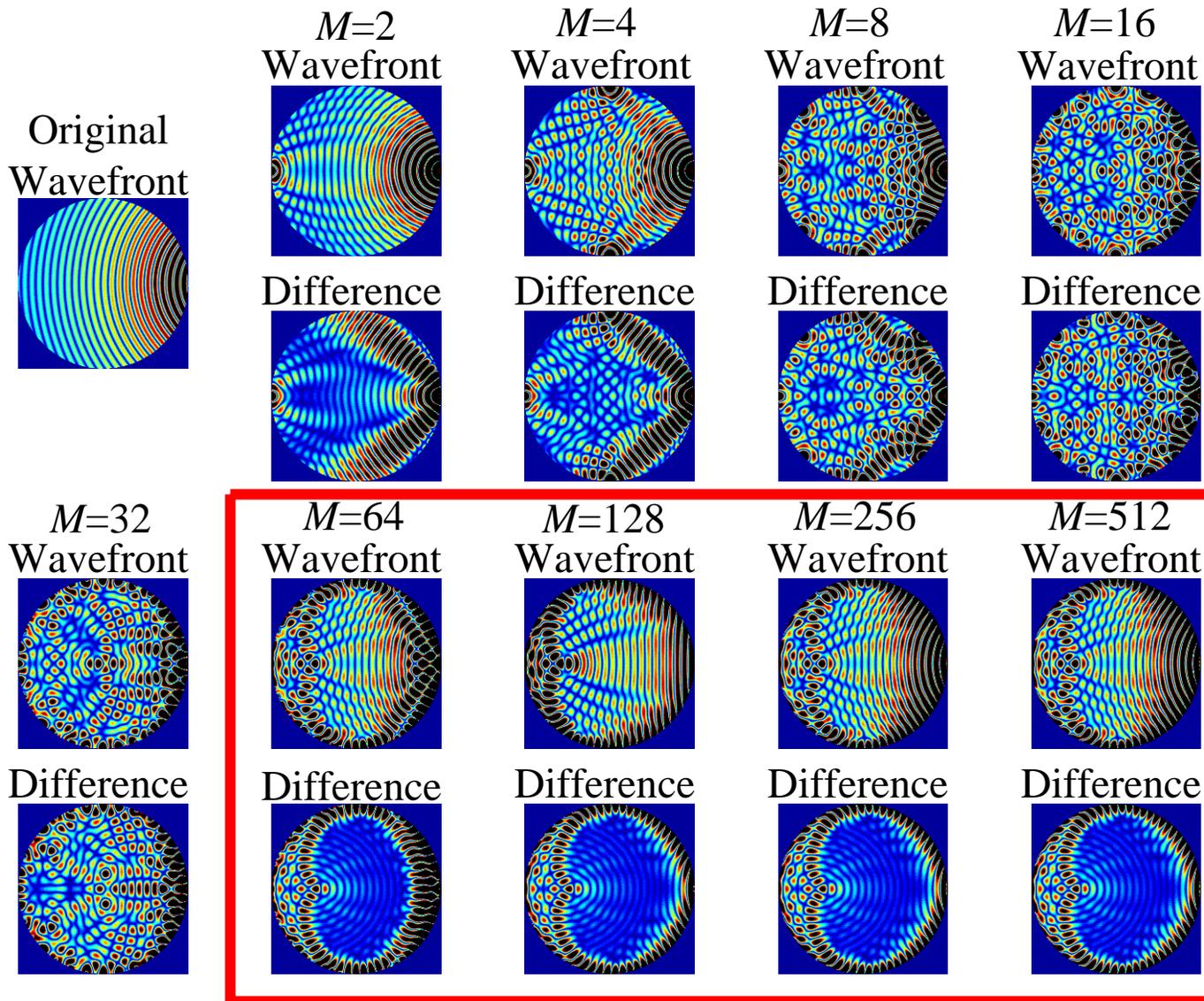
Difference



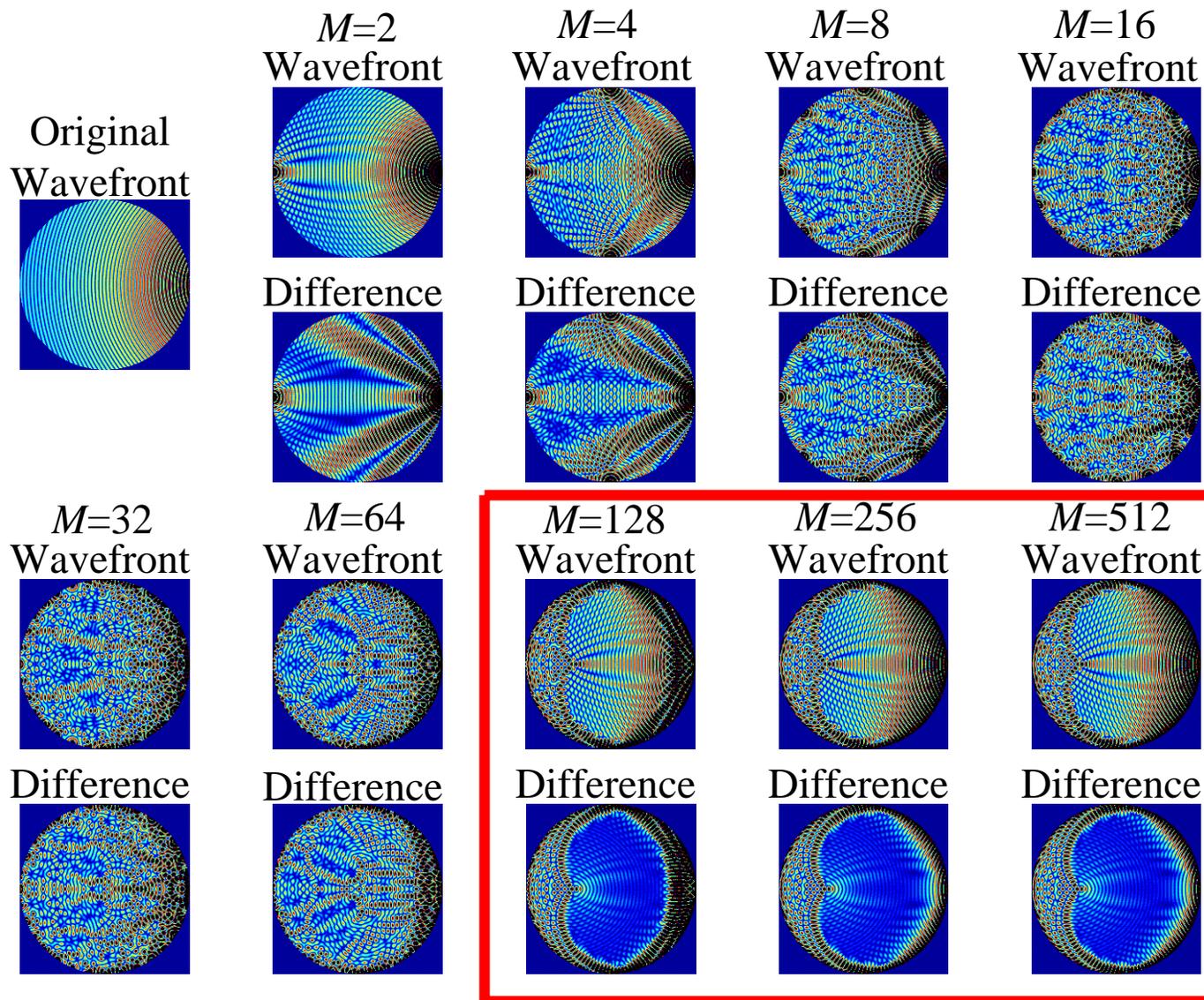
無指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 500 \text{ Hz}$



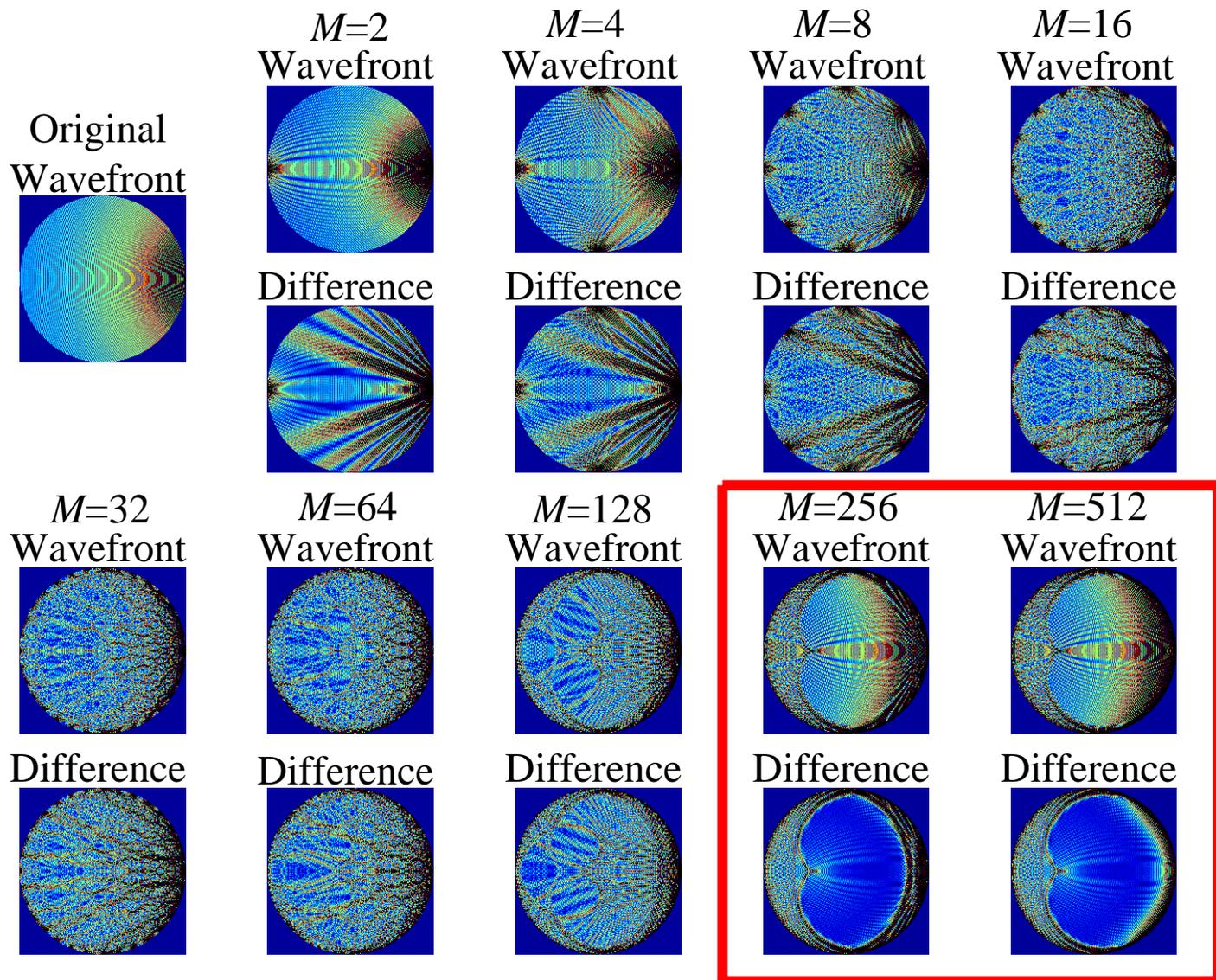
無指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 1000 \text{ Hz}$



無指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 2000 \text{ Hz}$

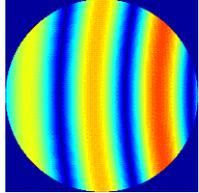


無指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 4000 \text{ Hz}$

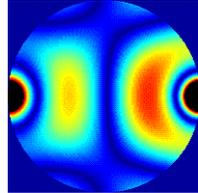


無指向性, $d = 10$ m, $f = 125$ Hz

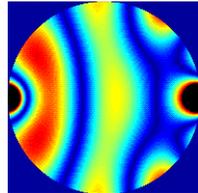
Original
Wavefront



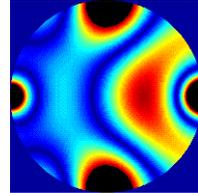
$M=2$
Wavefront



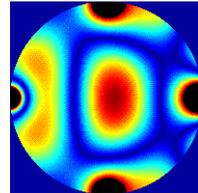
Difference



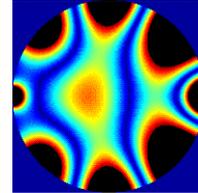
$M=4$
Wavefront



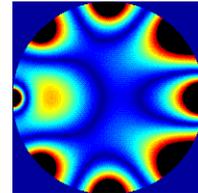
Difference



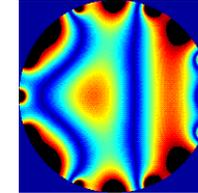
$M=8$
Wavefront



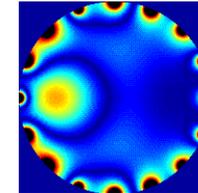
Difference



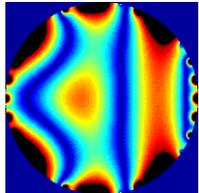
$M=16$
Wavefront



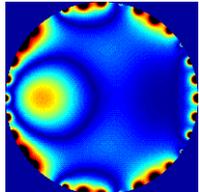
Difference



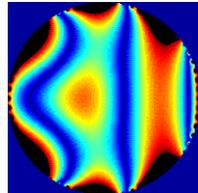
$M=32$
Wavefront



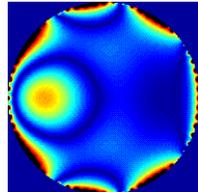
Difference



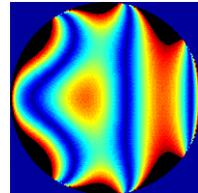
$M=64$
Wavefront



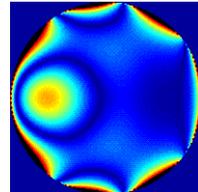
Difference



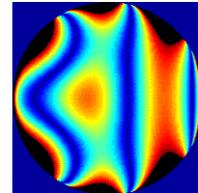
$M=128$
Wavefront



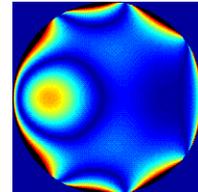
Difference



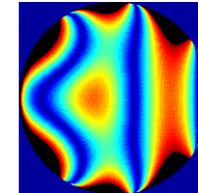
$M=256$
Wavefront



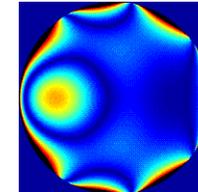
Difference



$M=512$
Wavefront

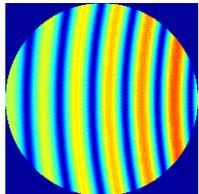


Difference

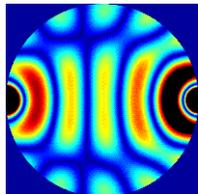


無指向性, $d = 10 \text{ m}$, $f = 250 \text{ Hz}$

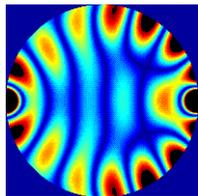
Original
Wavefront



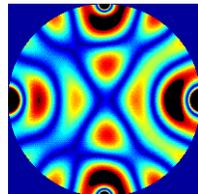
$M=2$
Wavefront



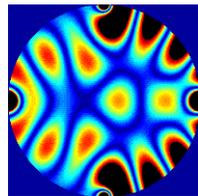
Difference



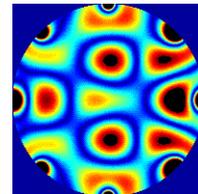
$M=4$
Wavefront



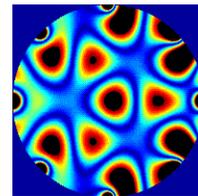
Difference



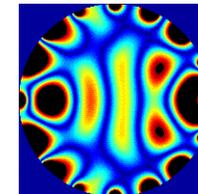
$M=8$
Wavefront



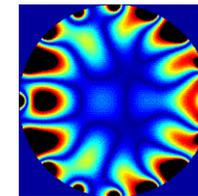
Difference



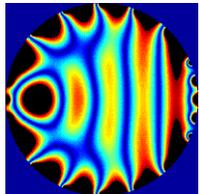
$M=16$
Wavefront



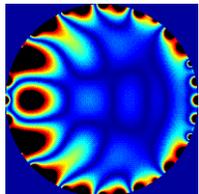
Difference



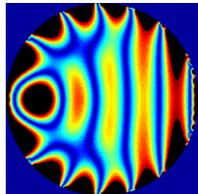
$M=32$
Wavefront



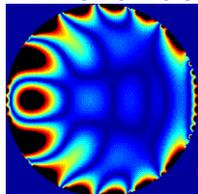
Difference



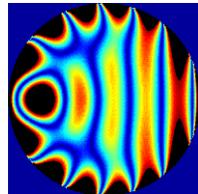
$M=64$
Wavefront



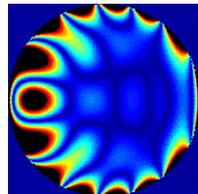
Difference



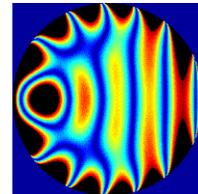
$M=128$
Wavefront



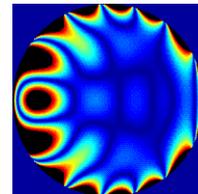
Difference



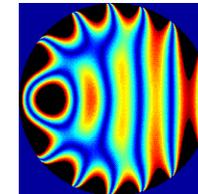
$M=256$
Wavefront



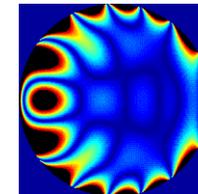
Difference



$M=512$
Wavefront

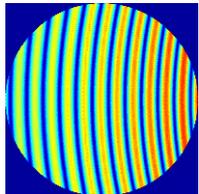


Difference

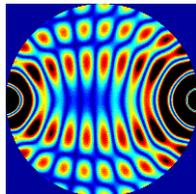


無指向性, $d = 10 \text{ m}$, $f = 500 \text{ Hz}$

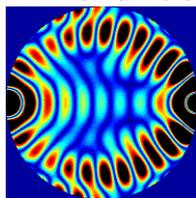
Original
Wavefront



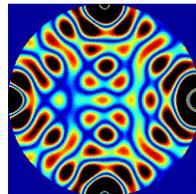
$M=2$
Wavefront



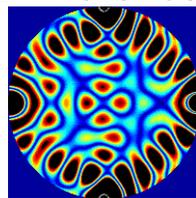
Difference



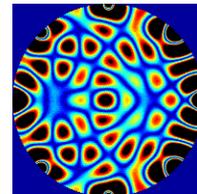
$M=4$
Wavefront



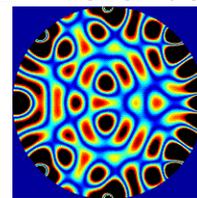
Difference



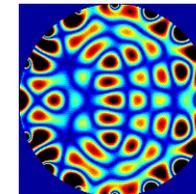
$M=8$
Wavefront



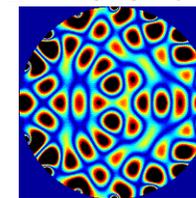
Difference



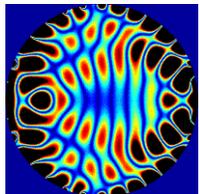
$M=16$
Wavefront



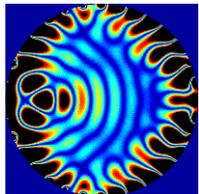
Difference



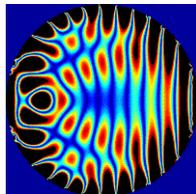
$M=32$
Wavefront



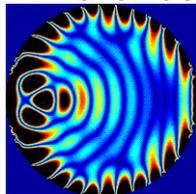
Difference



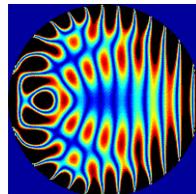
$M=64$
Wavefront



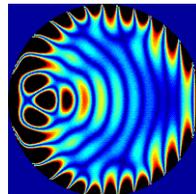
Difference



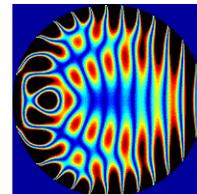
$M=128$
Wavefront



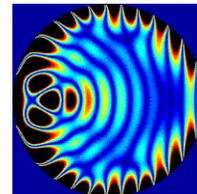
Difference



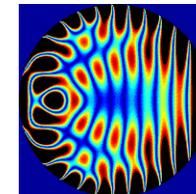
$M=256$
Wavefront



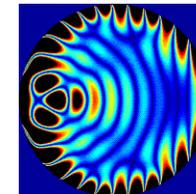
Difference



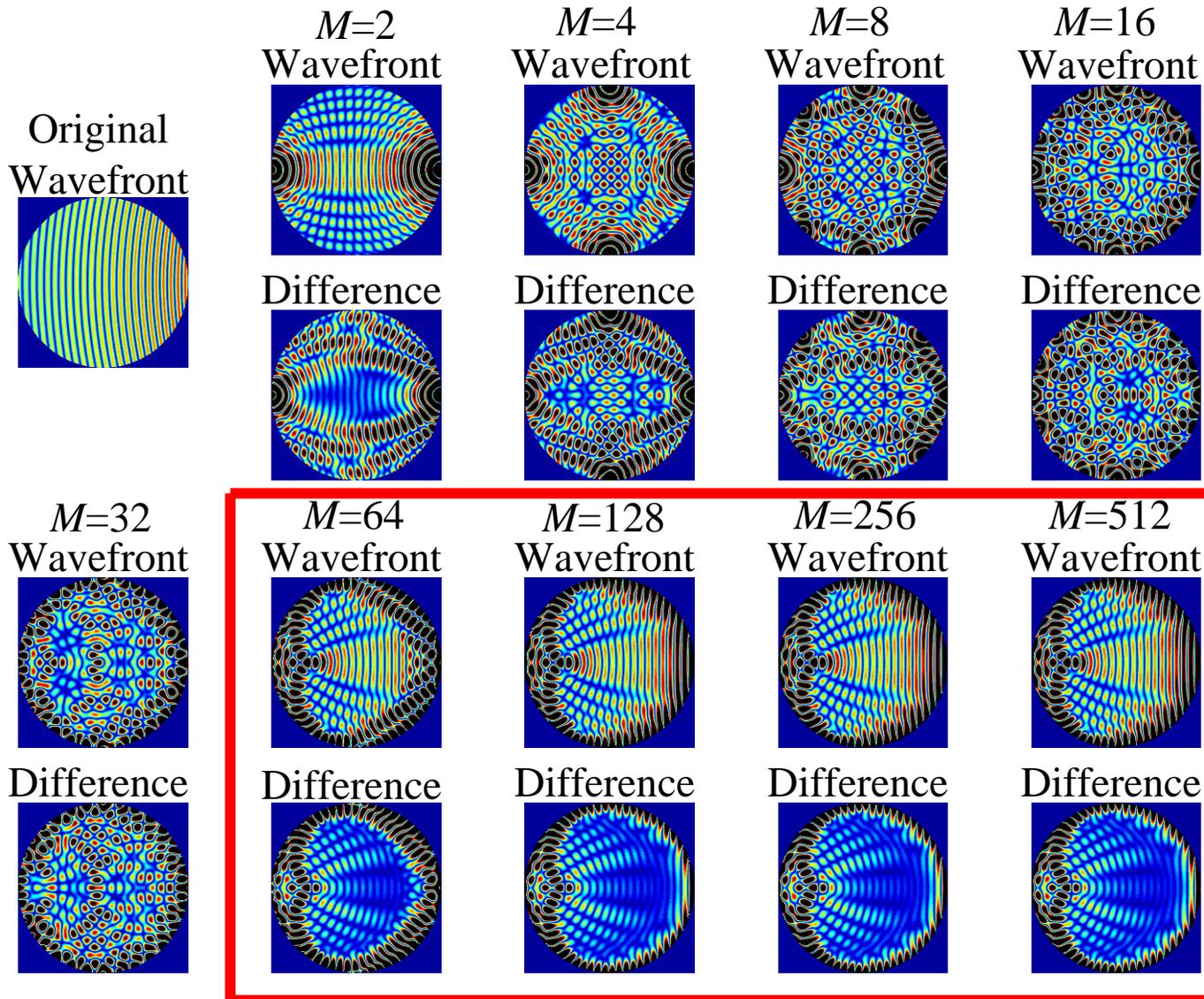
$M=512$
Wavefront



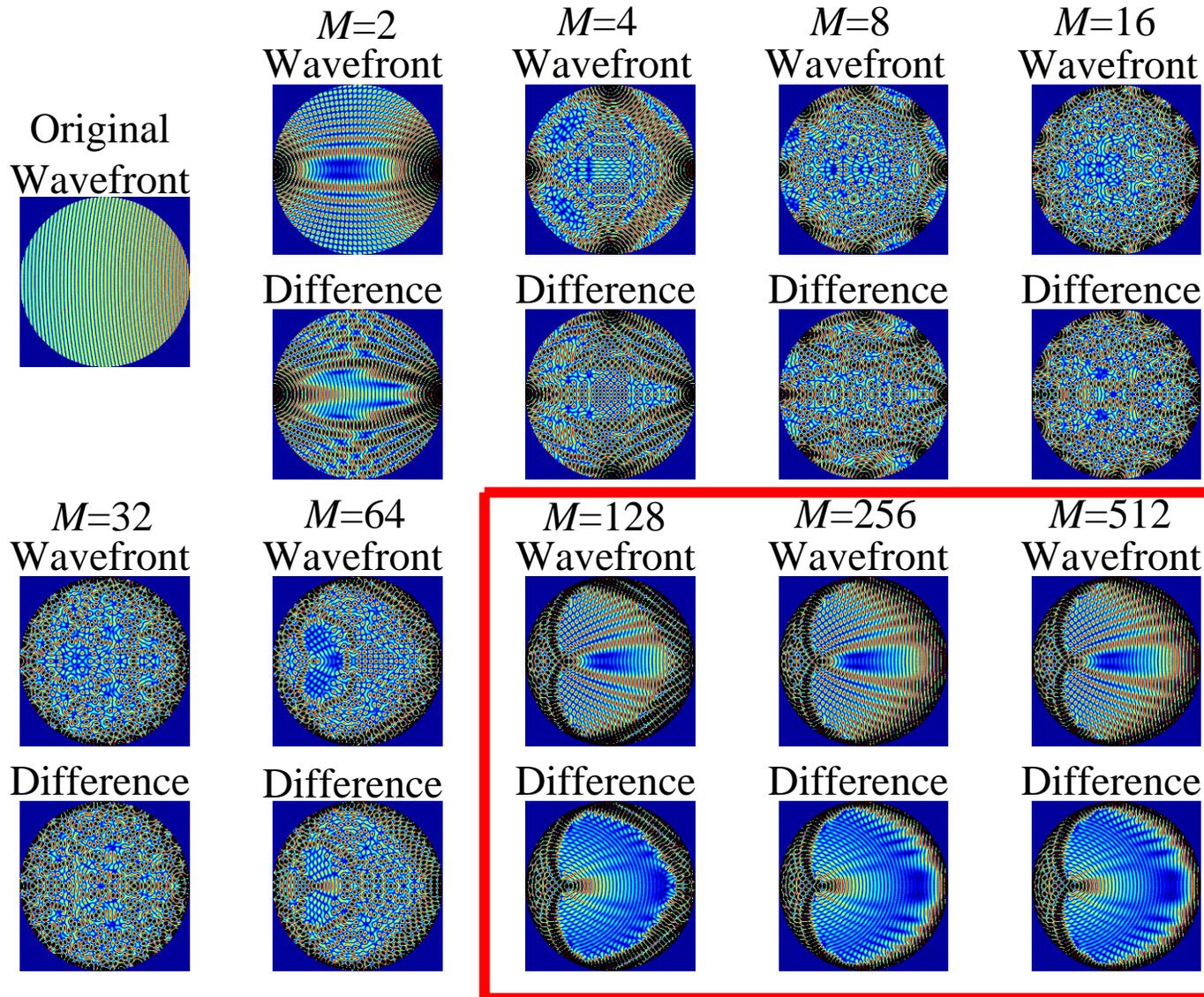
Difference



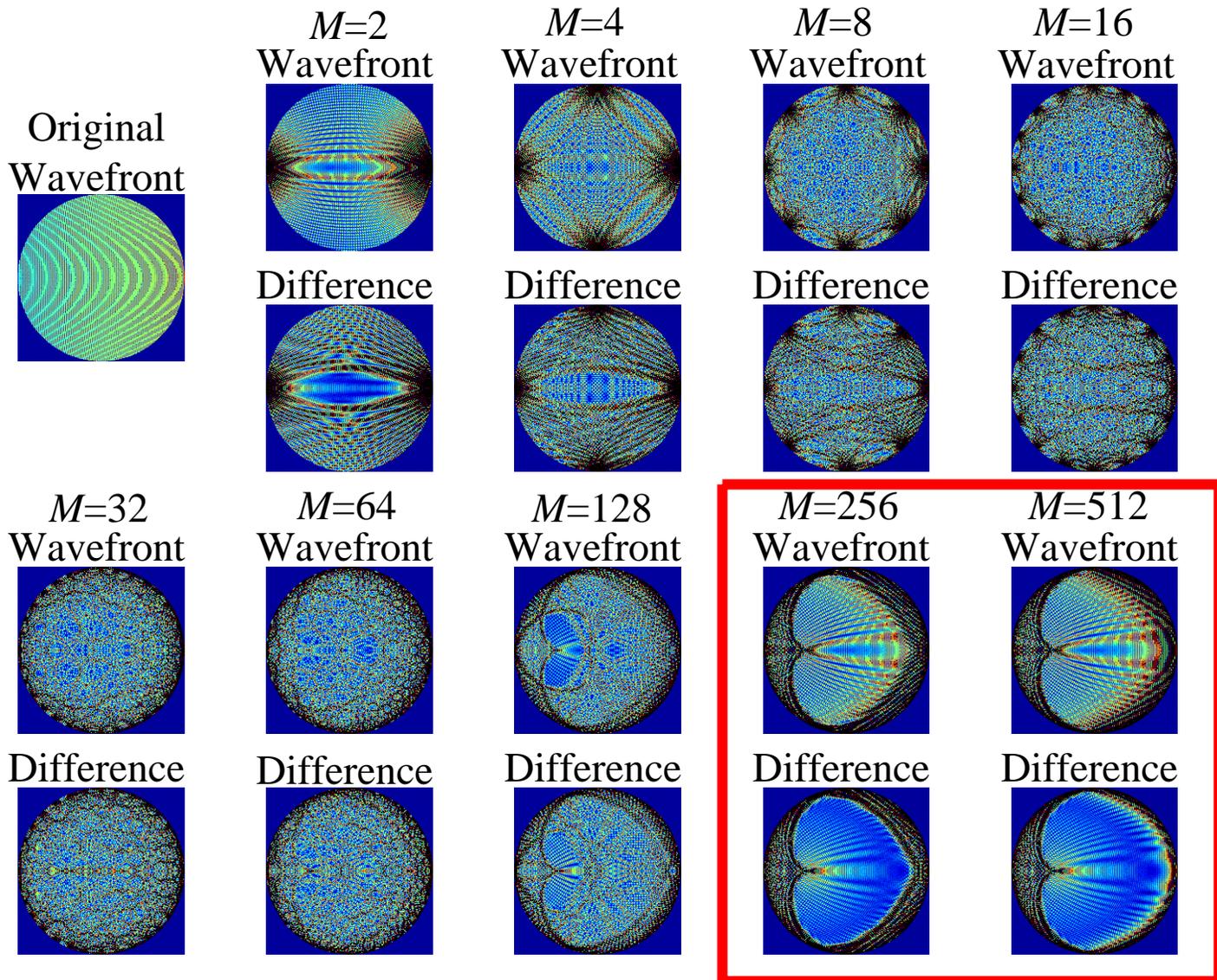
無指向性, $d = 10 \text{ m}$, $f = 1000 \text{ Hz}$



無指向性, $d = 10$ m, $f = 2000$ Hz

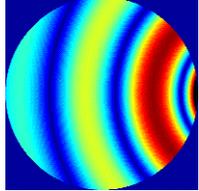


無指向性, $d = 10$ m, $f = 4000$ Hz

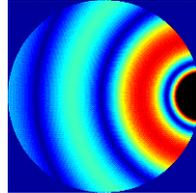


單一指向性, $d = 3$ m, $f = 125$ Hz

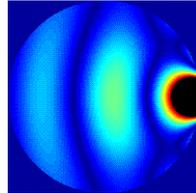
Original
Wavefront



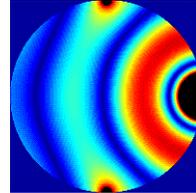
$M=2$
Wavefront



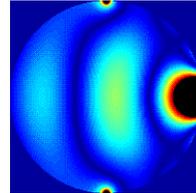
Difference



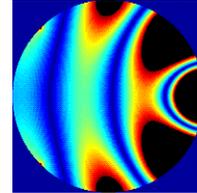
$M=4$
Wavefront



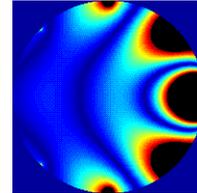
Difference



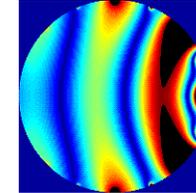
$M=8$
Wavefront



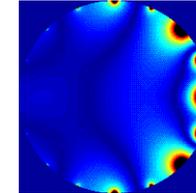
Difference



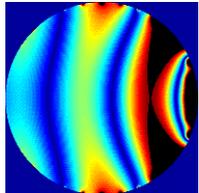
$M=16$
Wavefront



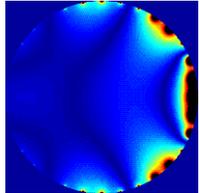
Difference



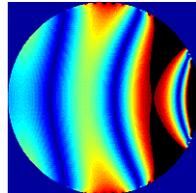
$M=32$
Wavefront



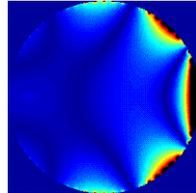
Difference



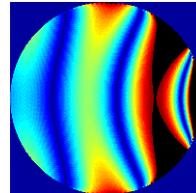
$M=64$
Wavefront



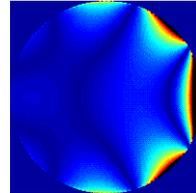
Difference



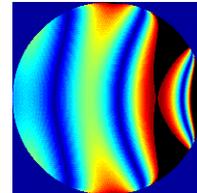
$M=128$
Wavefront



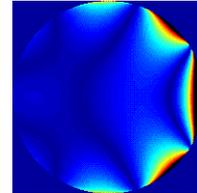
Difference



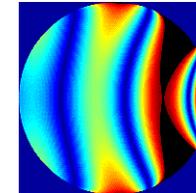
$M=256$
Wavefront



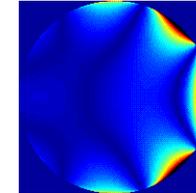
Difference



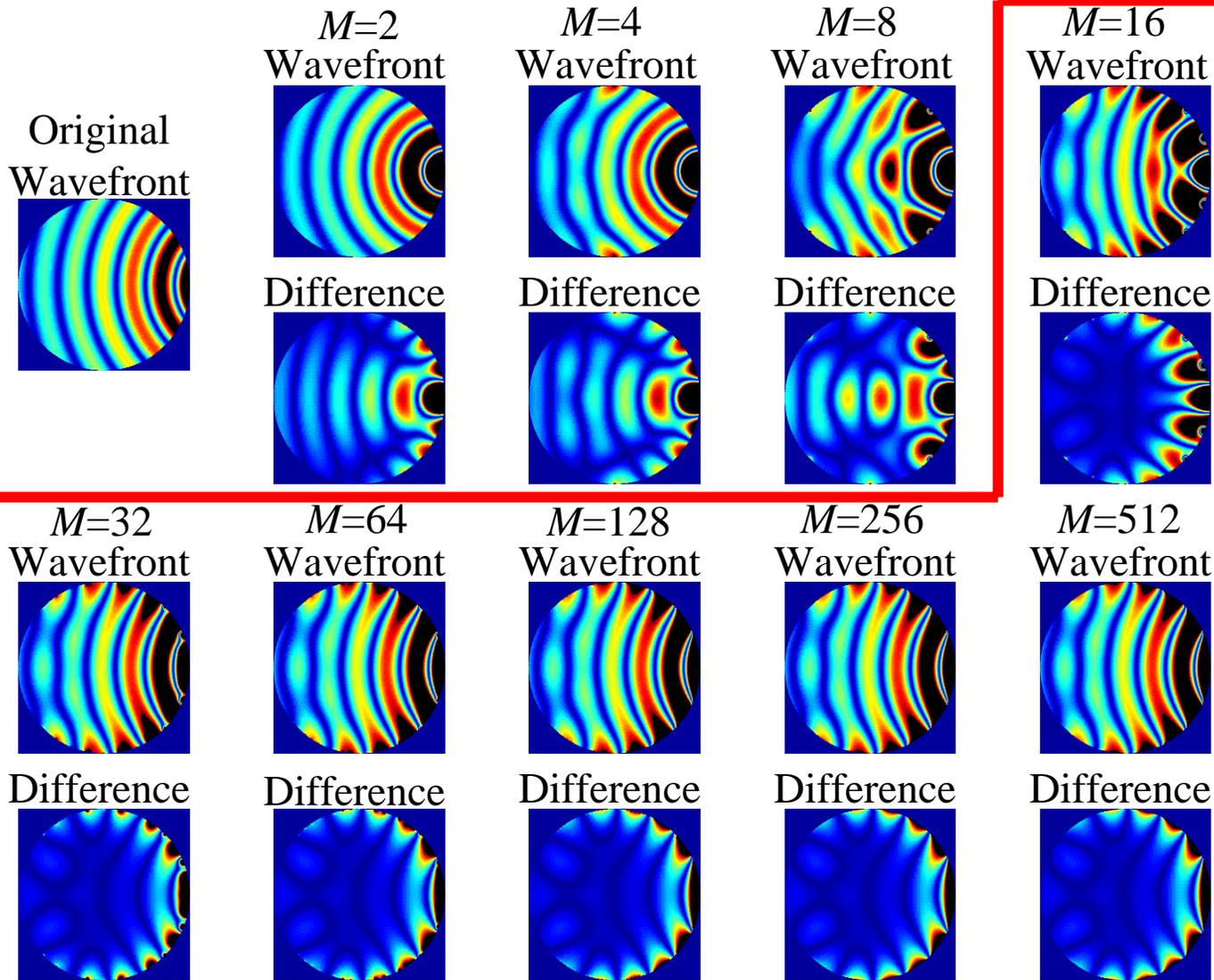
$M=512$
Wavefront



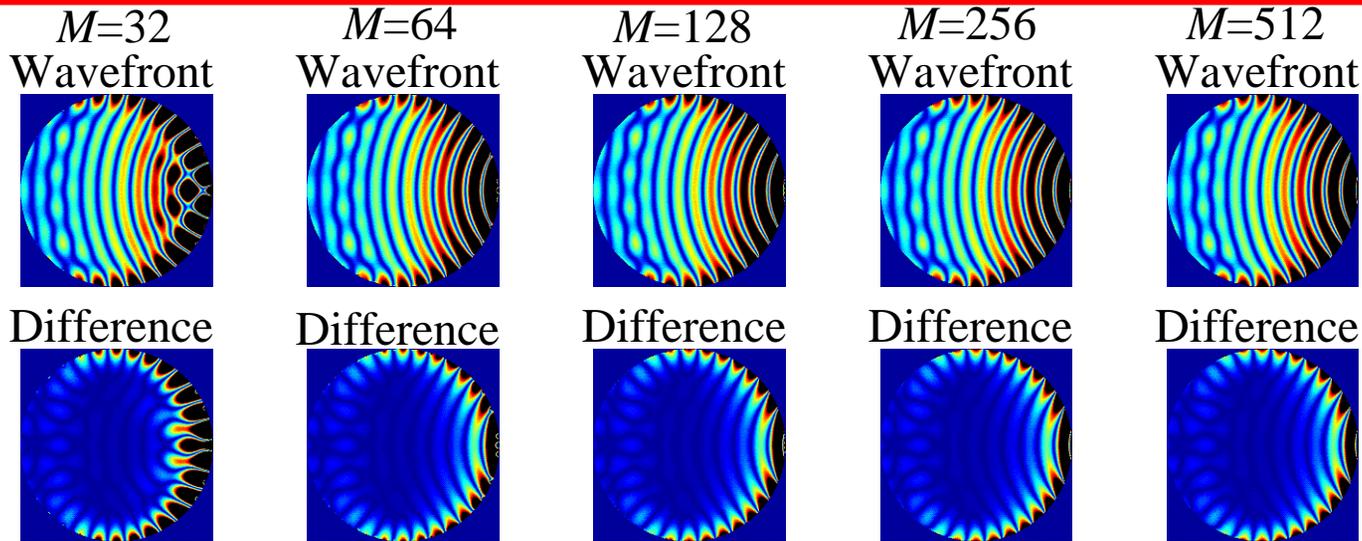
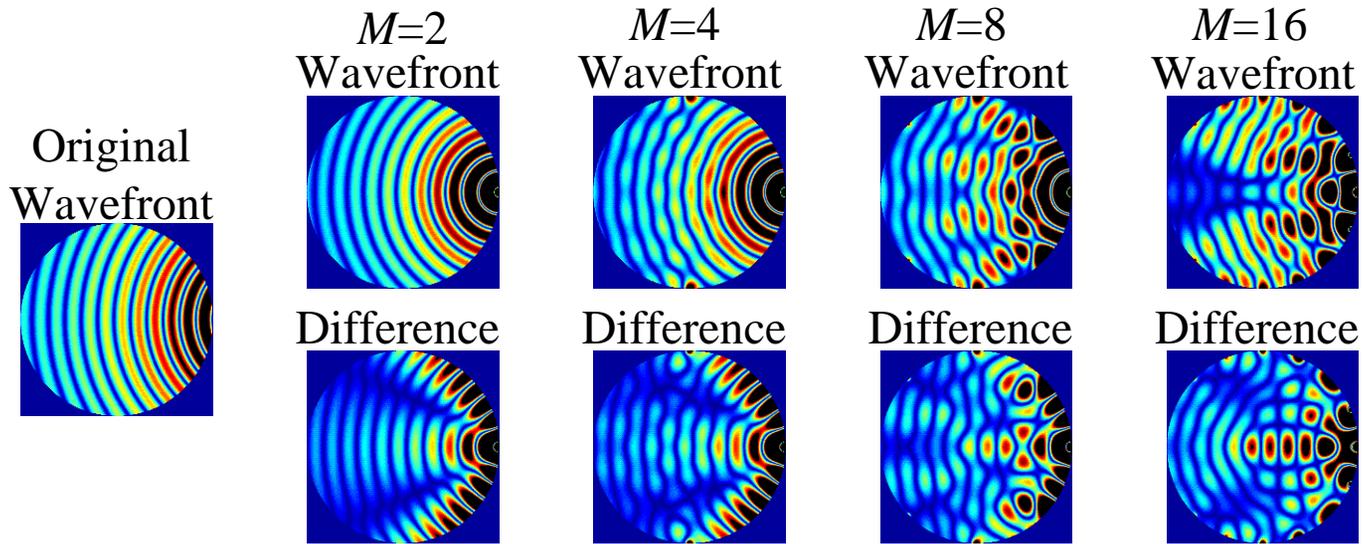
Difference



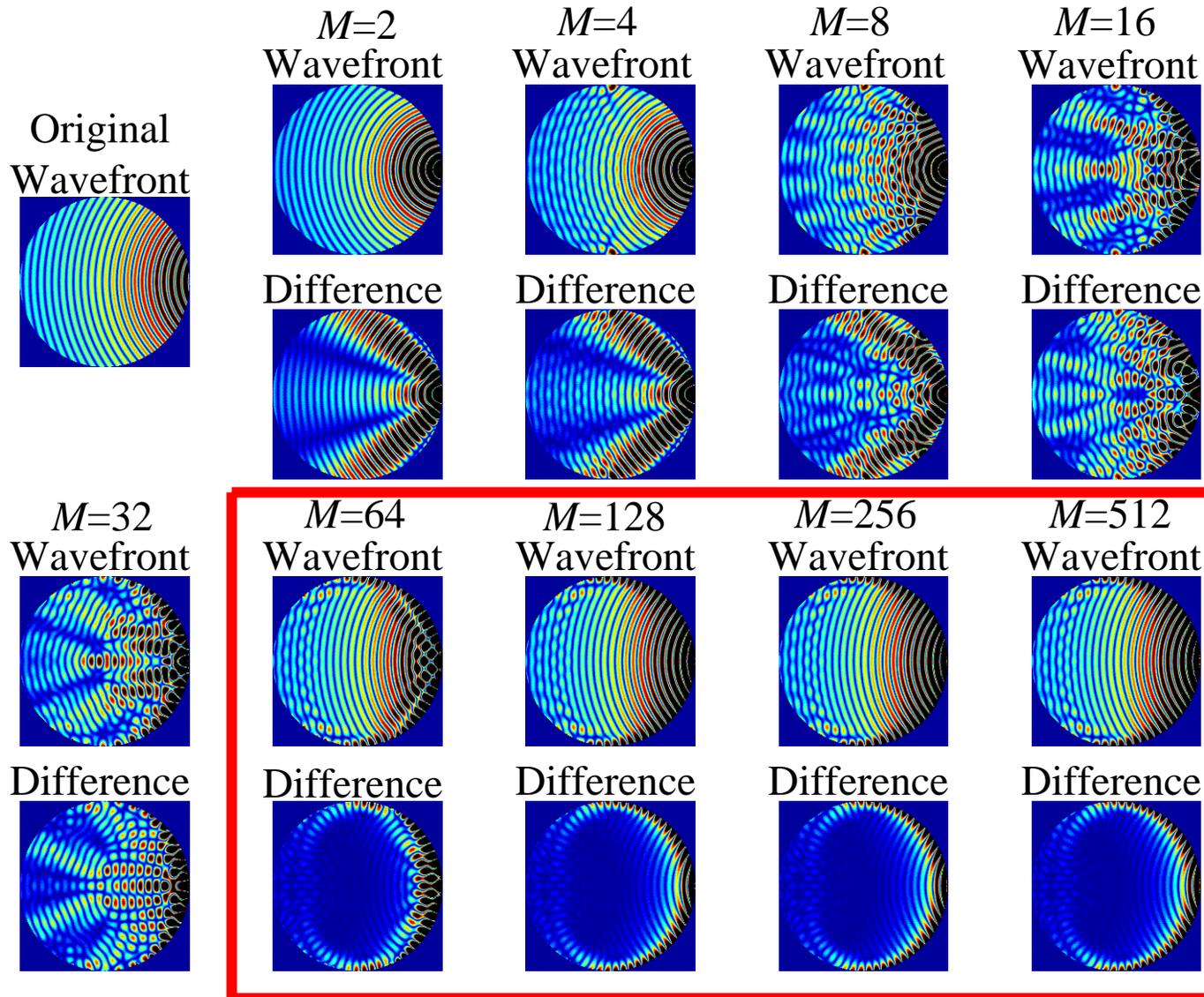
單一指向性, $d = 3$ m, $f = 250$ Hz



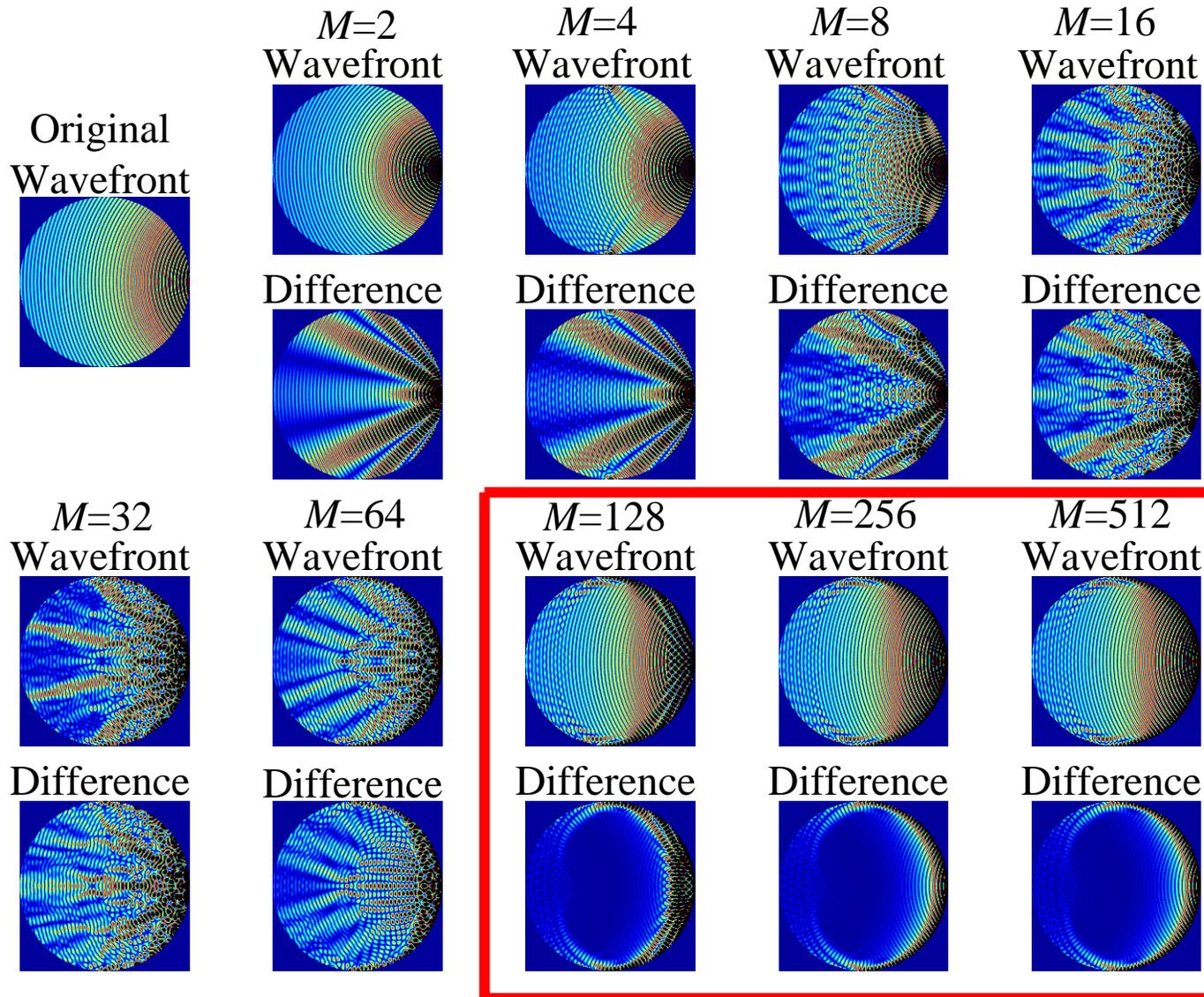
單一指向性, $d = 3$ m, $f = 500$ Hz



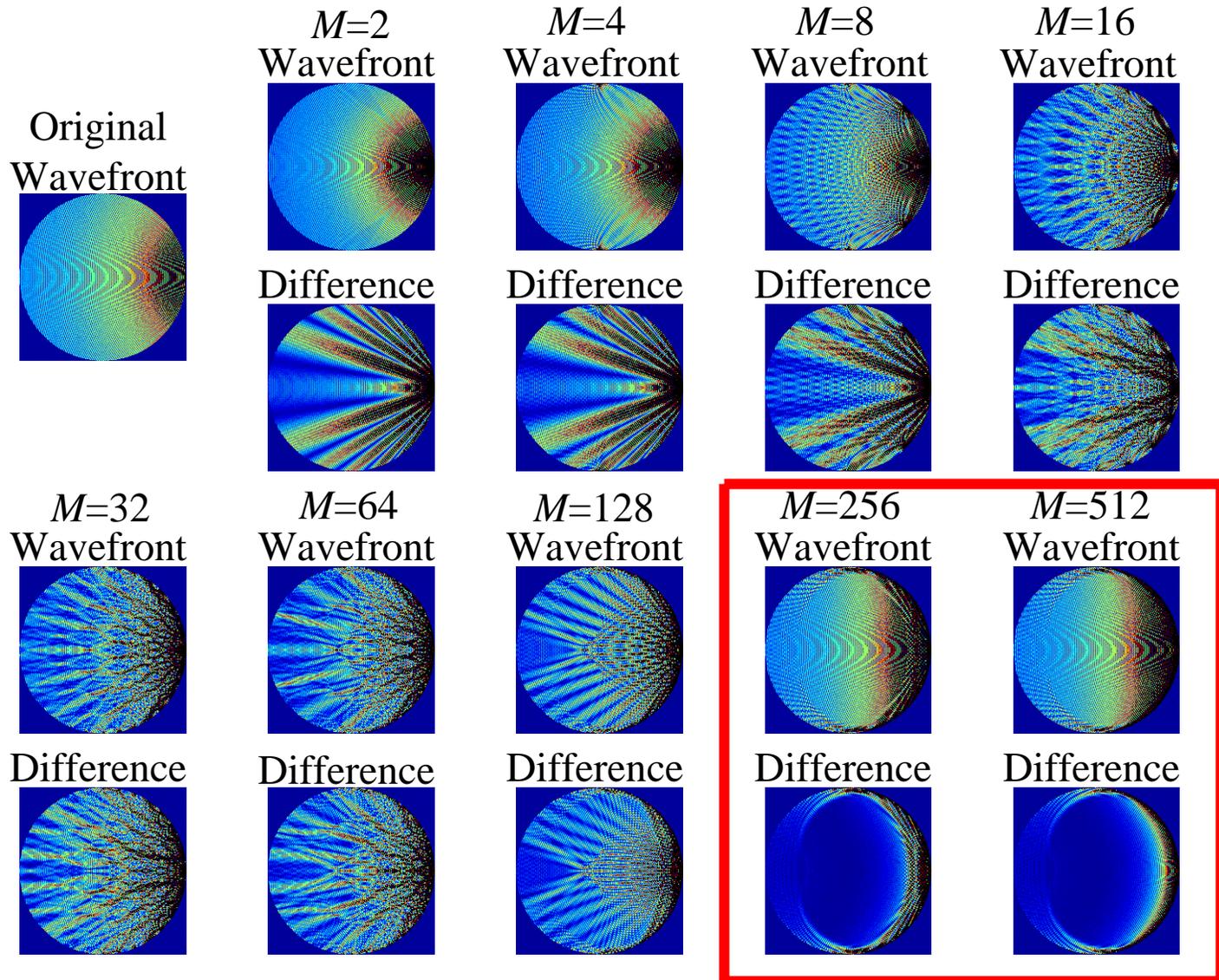
單一指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 1000 \text{ Hz}$



單一指向性, $d = 3$ m, $f = 2000$ Hz

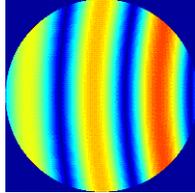


單一指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 4000 \text{ Hz}$

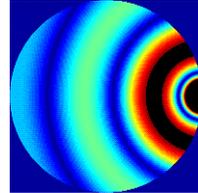


單一指向性, $d = 10$ m, $f = 125$ Hz

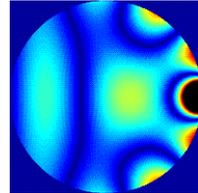
Original
Wavefront



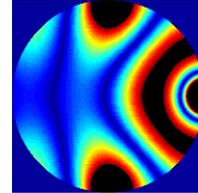
$M=2$
Wavefront



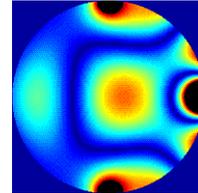
Difference



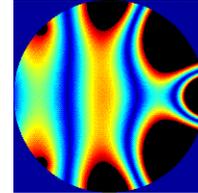
$M=4$
Wavefront



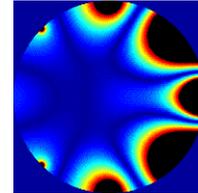
Difference



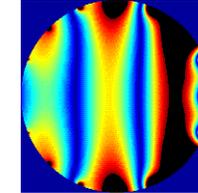
$M=8$
Wavefront



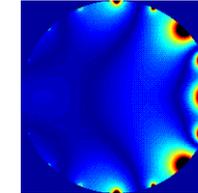
Difference



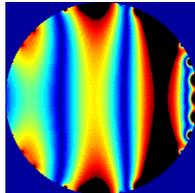
$M=16$
Wavefront



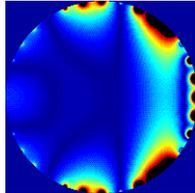
Difference



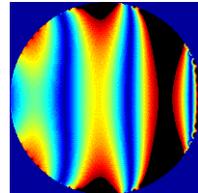
$M=32$
Wavefront



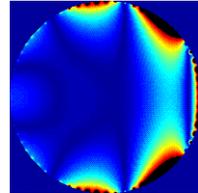
Difference



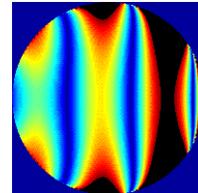
$M=64$
Wavefront



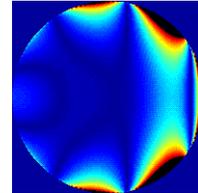
Difference



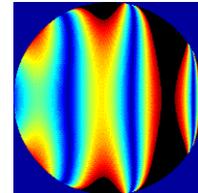
$M=128$
Wavefront



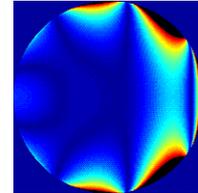
Difference



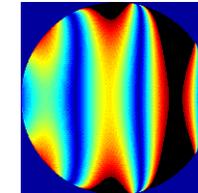
$M=256$
Wavefront



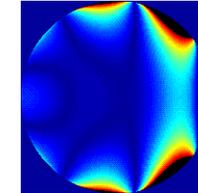
Difference



$M=512$
Wavefront

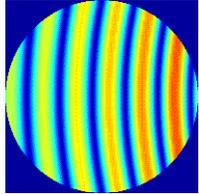


Difference

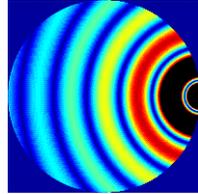


單一指向性, $d = 10$ m, $f = 250$ Hz

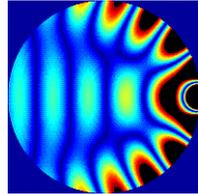
Original
Wavefront



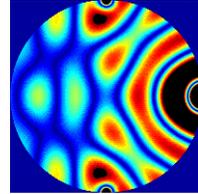
$M=2$
Wavefront



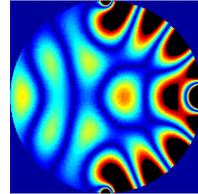
Difference



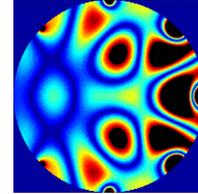
$M=4$
Wavefront



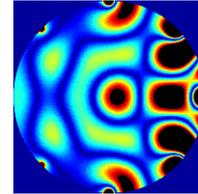
Difference



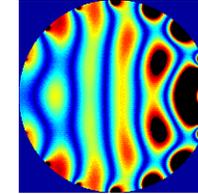
$M=8$
Wavefront



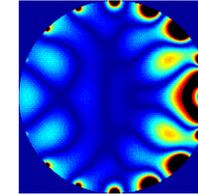
Difference



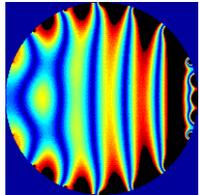
$M=16$
Wavefront



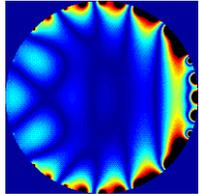
Difference



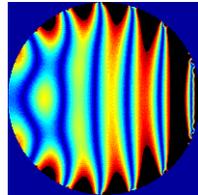
$M=32$
Wavefront



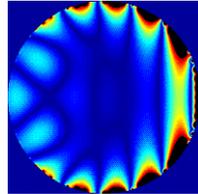
Difference



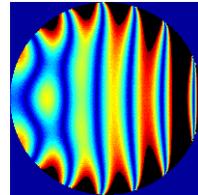
$M=64$
Wavefront



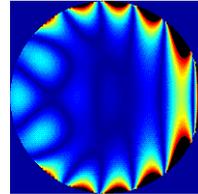
Difference



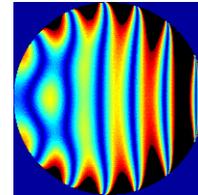
$M=128$
Wavefront



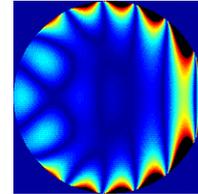
Difference



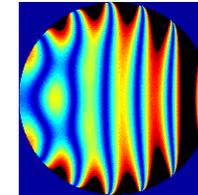
$M=256$
Wavefront



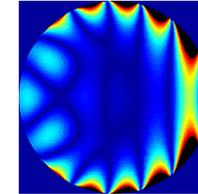
Difference



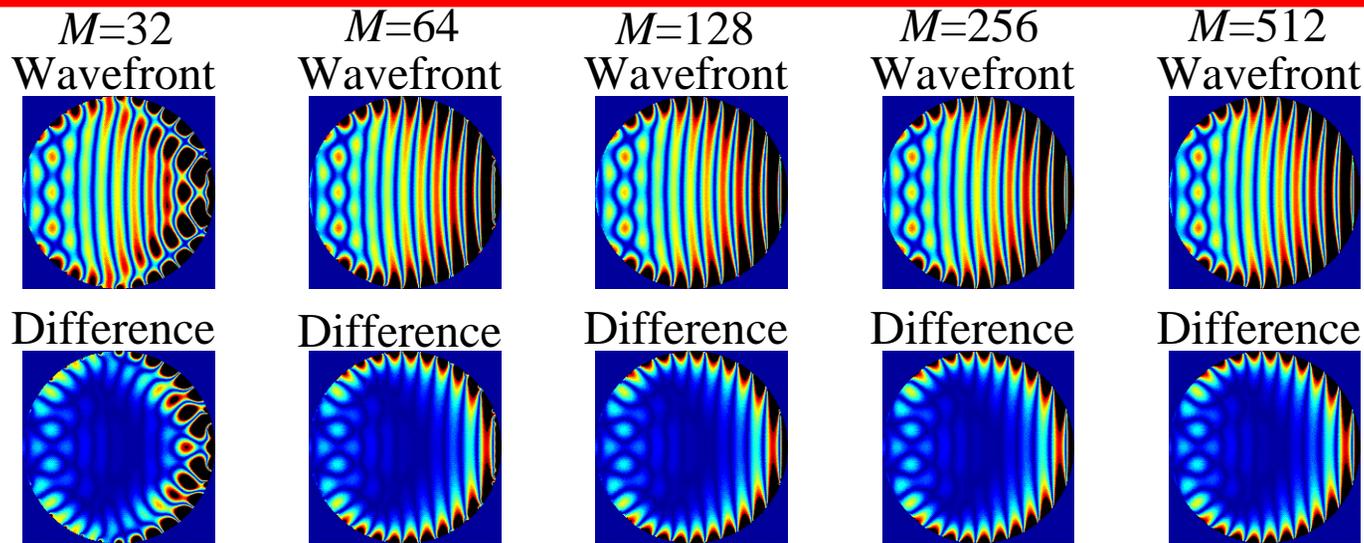
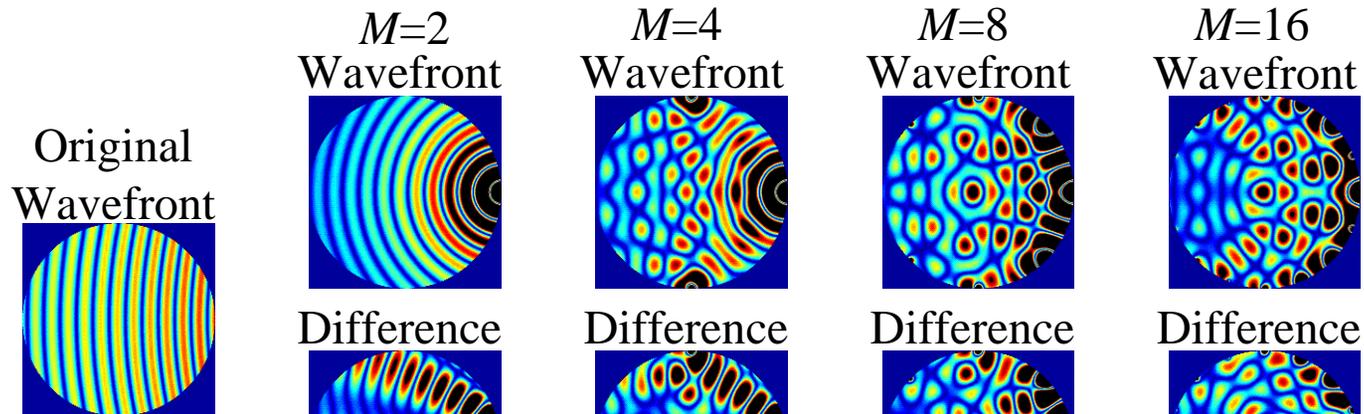
$M=512$
Wavefront



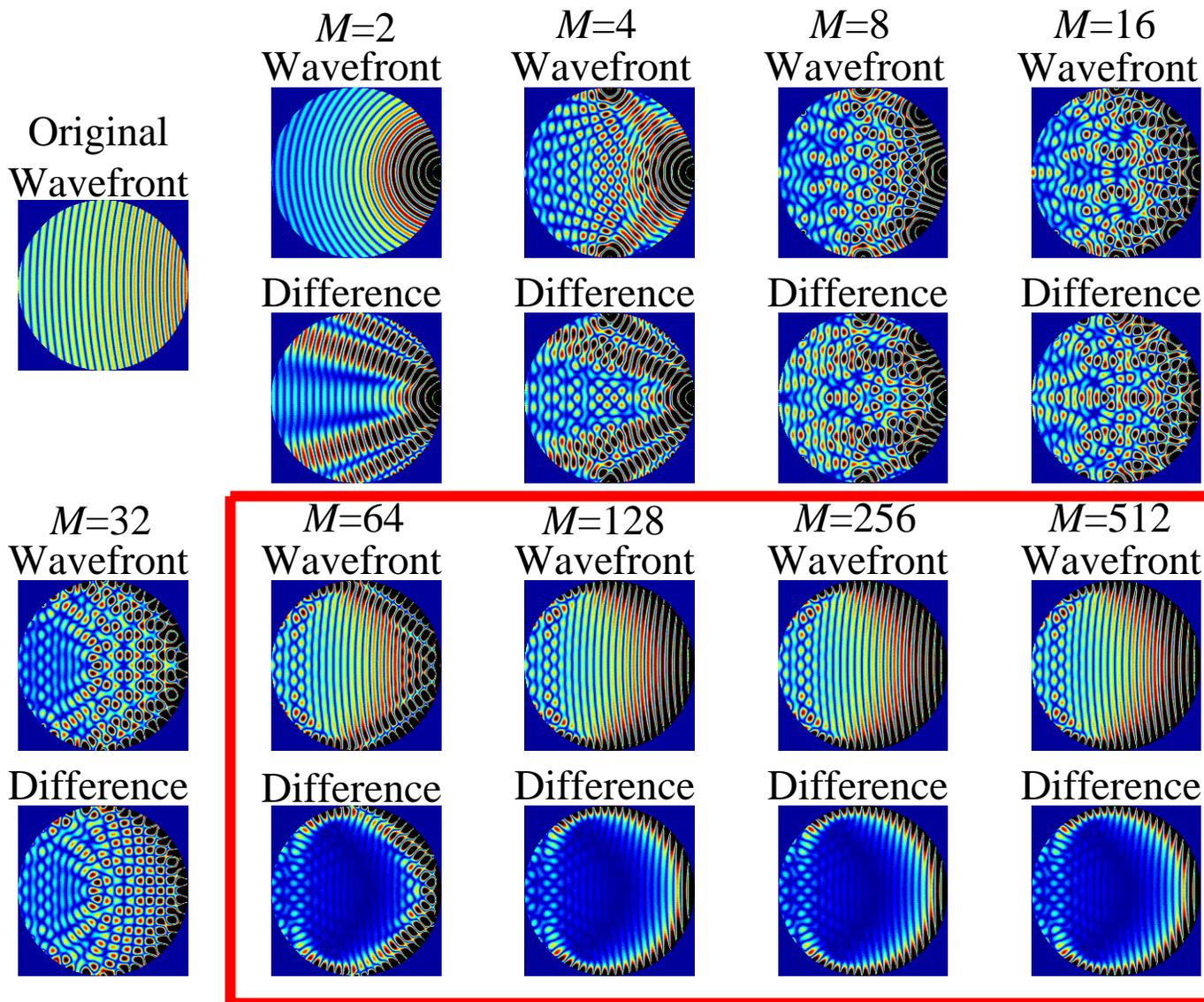
Difference



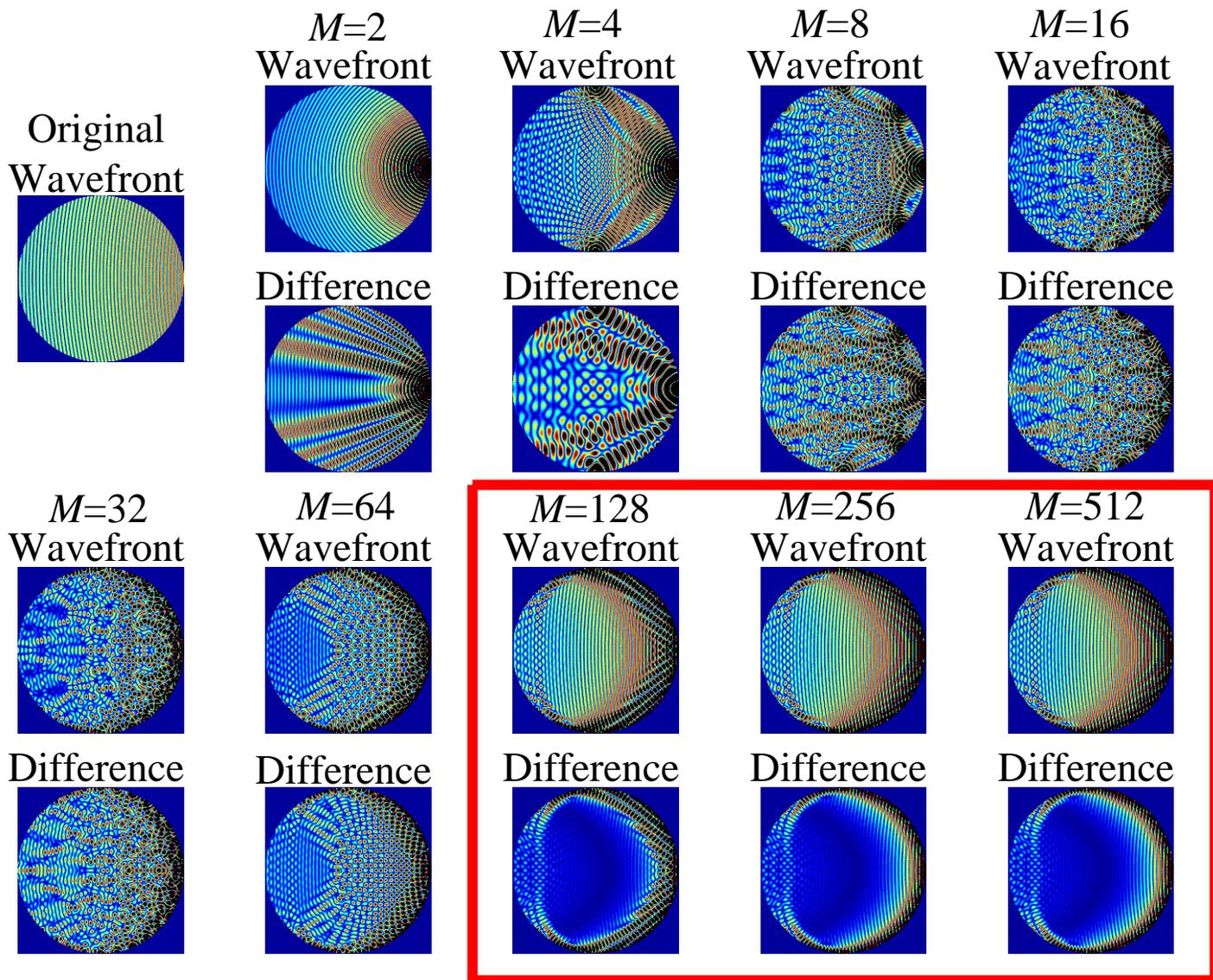
單一指向性, $d = 10$ m, $f = 500$ Hz



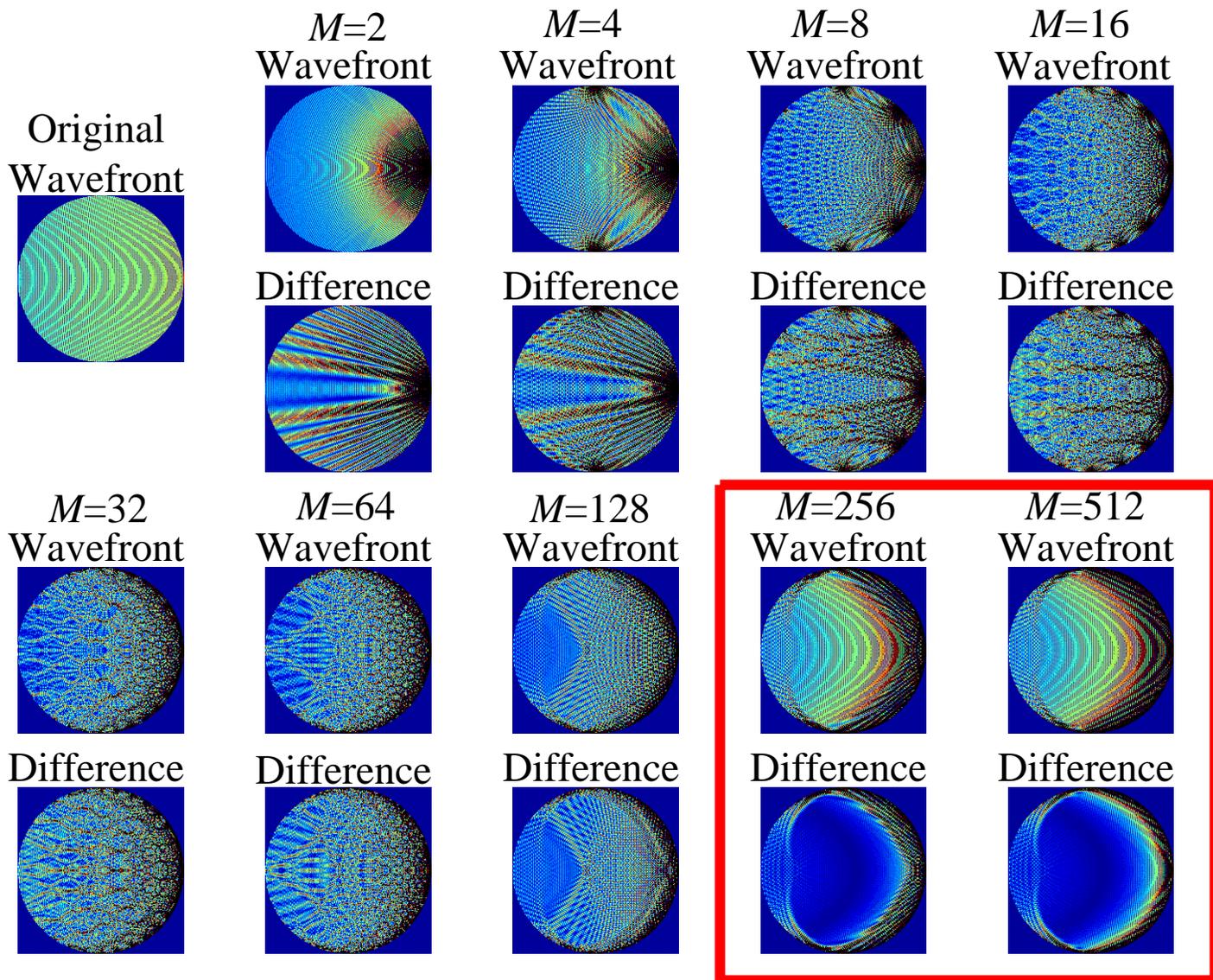
单一指向性, $d = 10$ m, $f = 1000$ Hz



單一指向性, $d = 10$ m, $f = 2000$ Hz

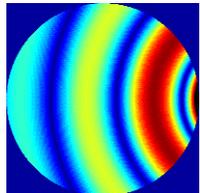


单一指向性, $d = 10$ m, $f = 4000$ Hz



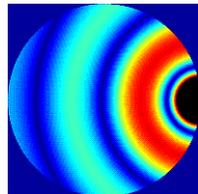
超指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 125 \text{ Hz}$

Original
Wavefront

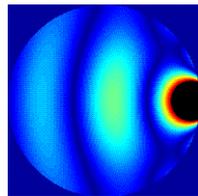


$M=2$

Wavefront

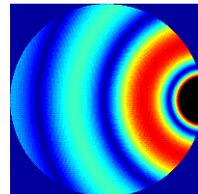


Difference

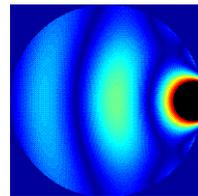


$M=4$

Wavefront

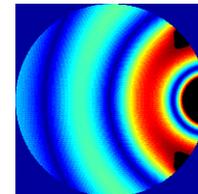


Difference

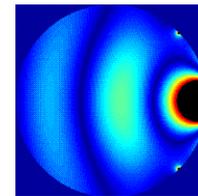


$M=8$

Wavefront

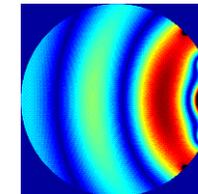


Difference

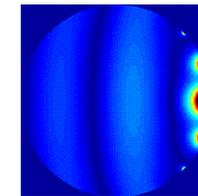


$M=16$

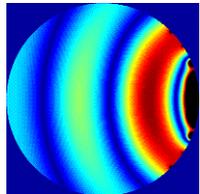
Wavefront



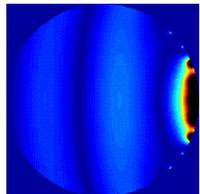
Difference



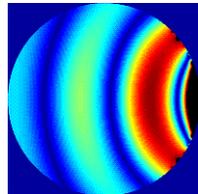
$M=32$
Wavefront



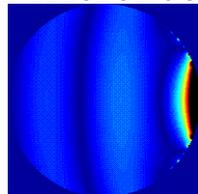
Difference



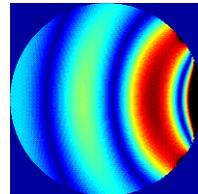
$M=64$
Wavefront



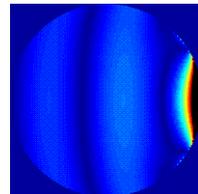
Difference



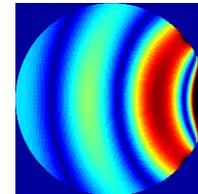
$M=128$
Wavefront



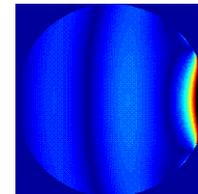
Difference



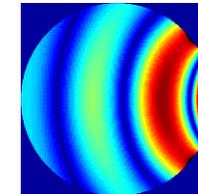
$M=256$
Wavefront



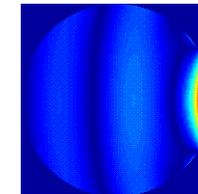
Difference



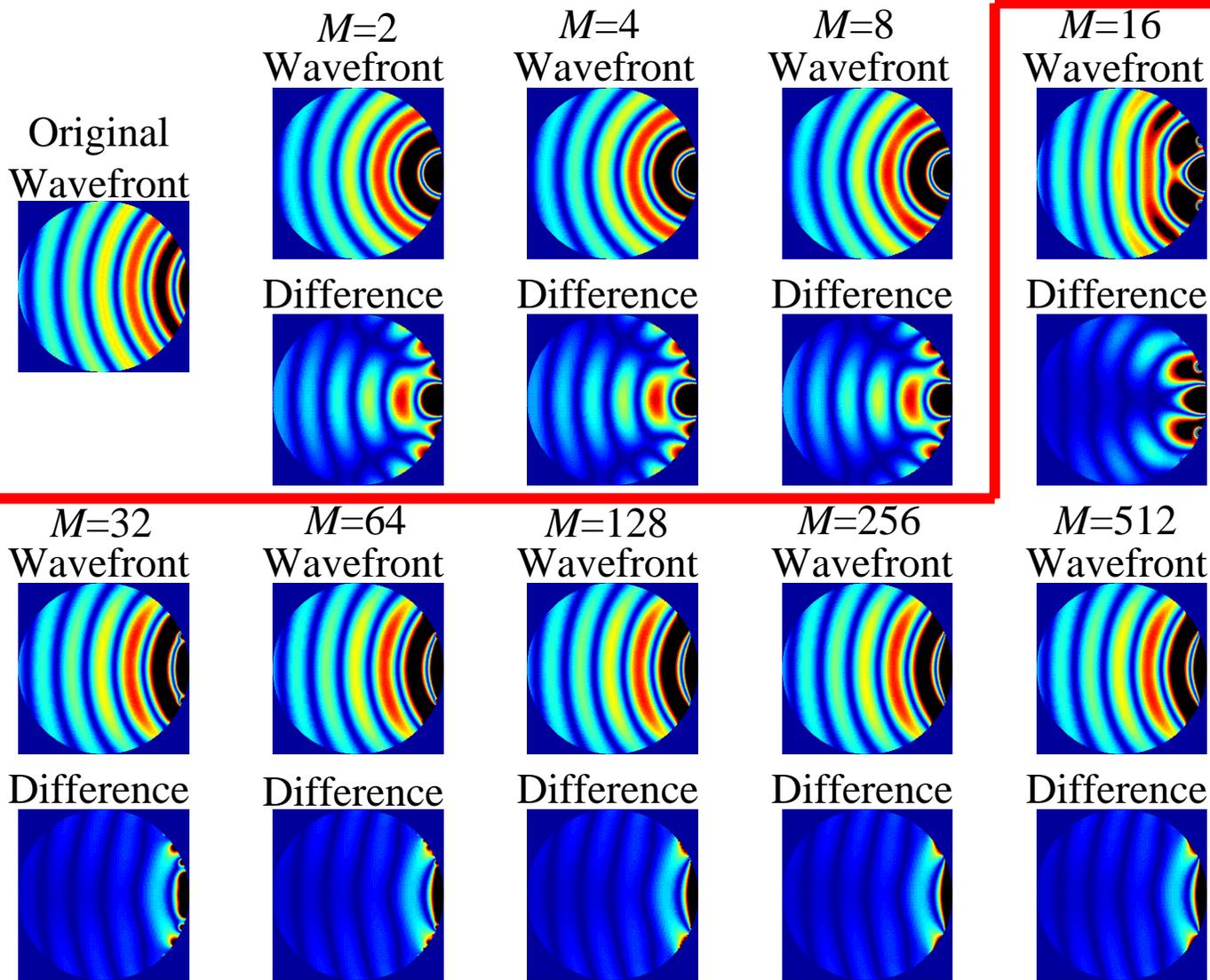
$M=512$
Wavefront



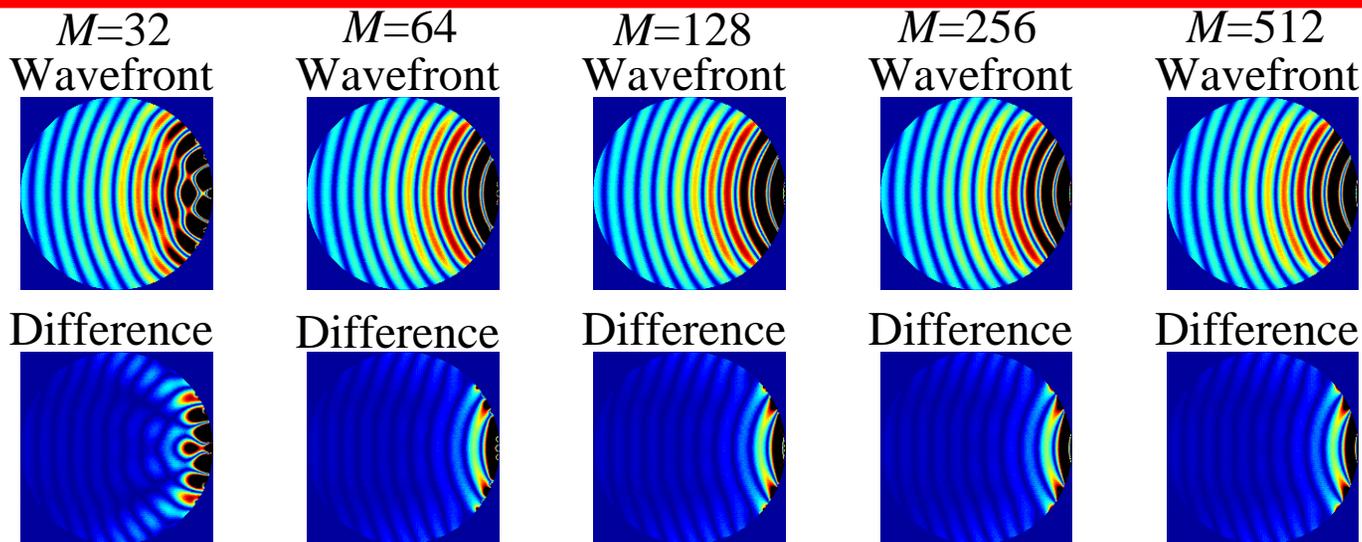
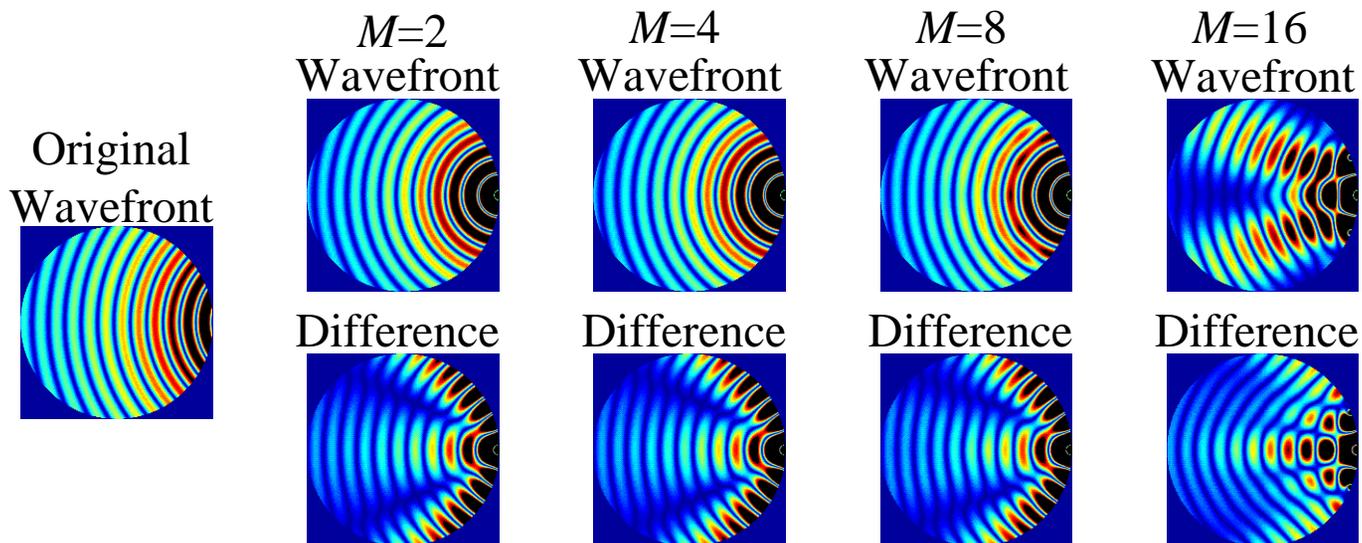
Difference



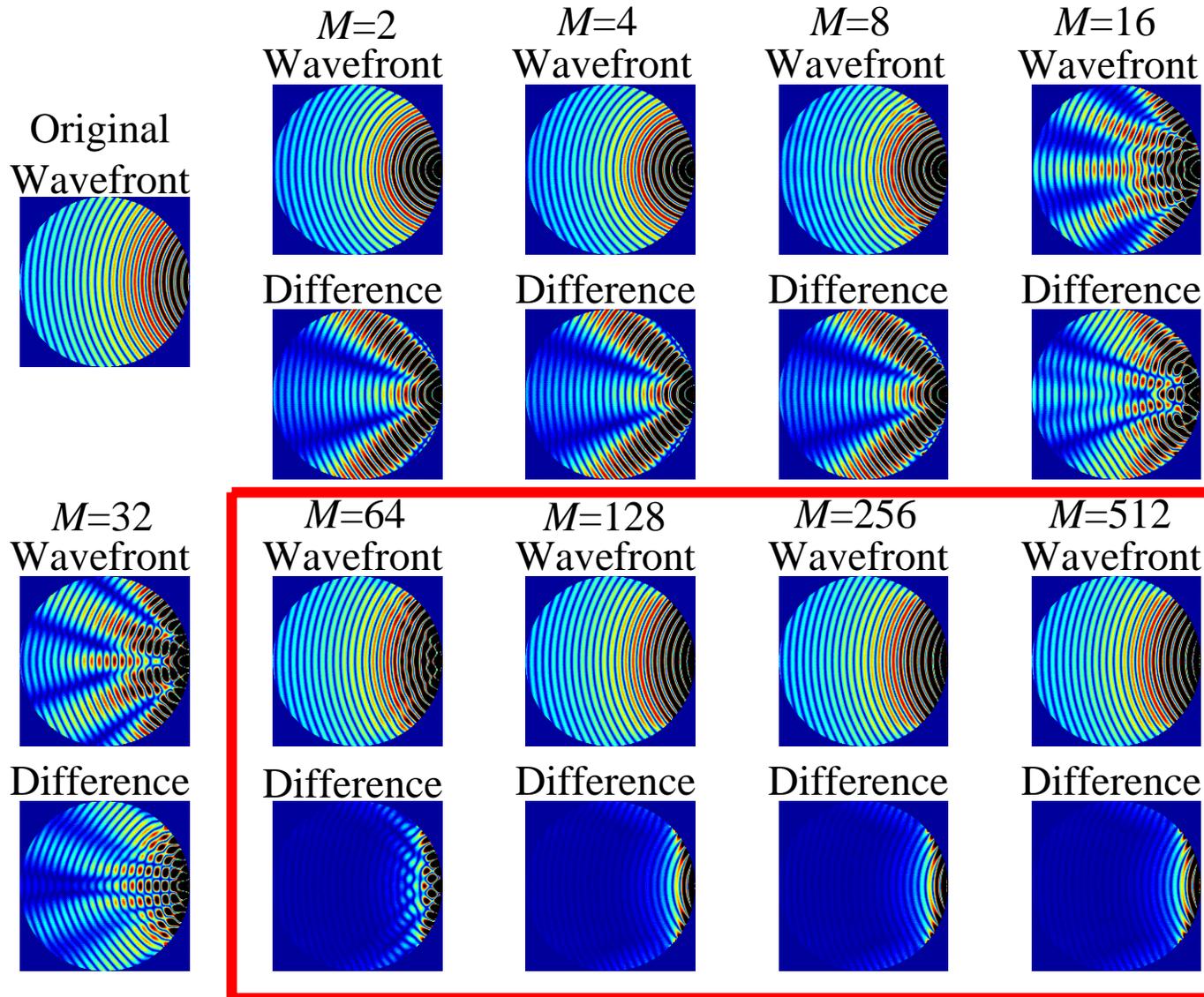
超指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 250 \text{ Hz}$



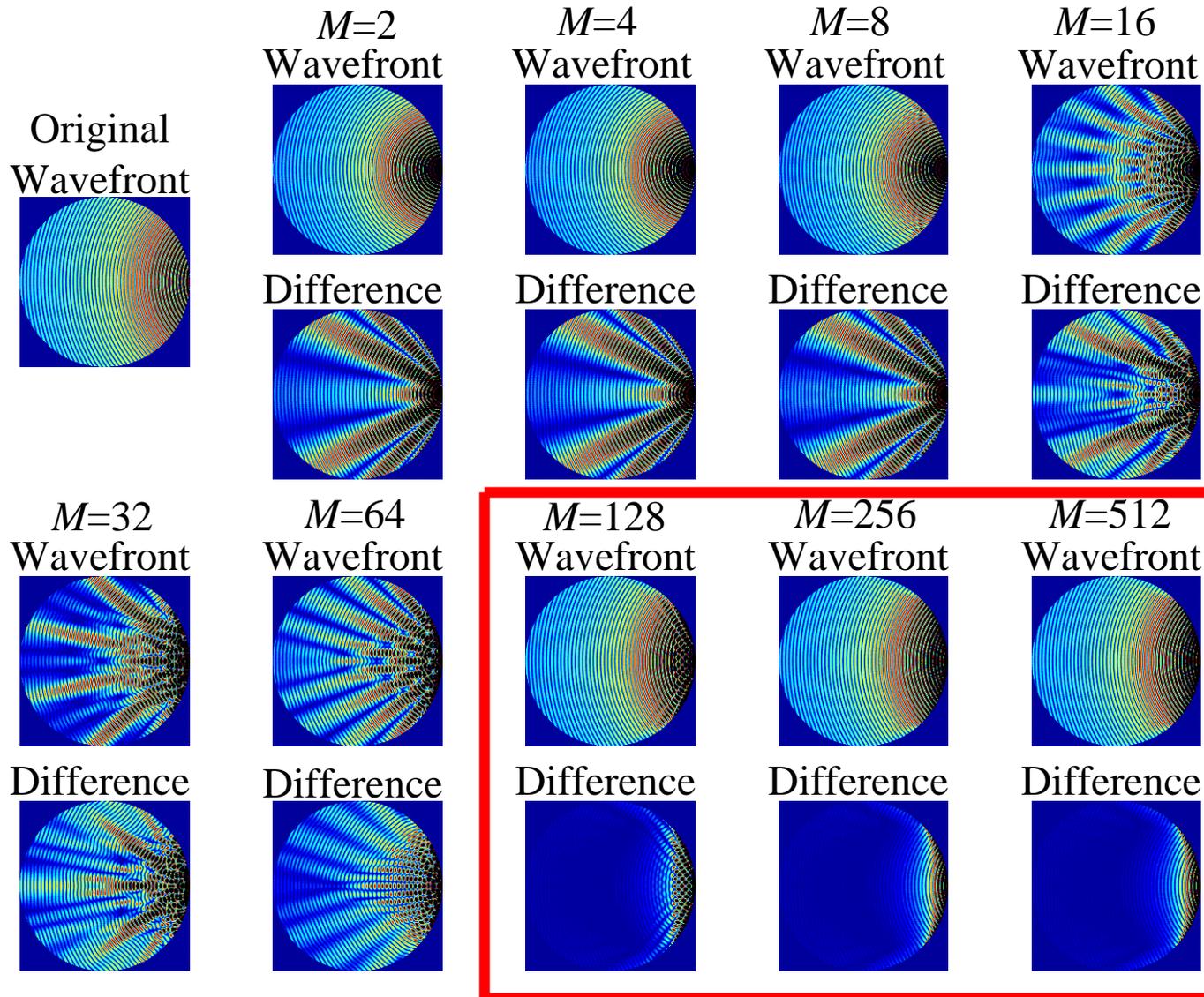
超指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 500 \text{ Hz}$



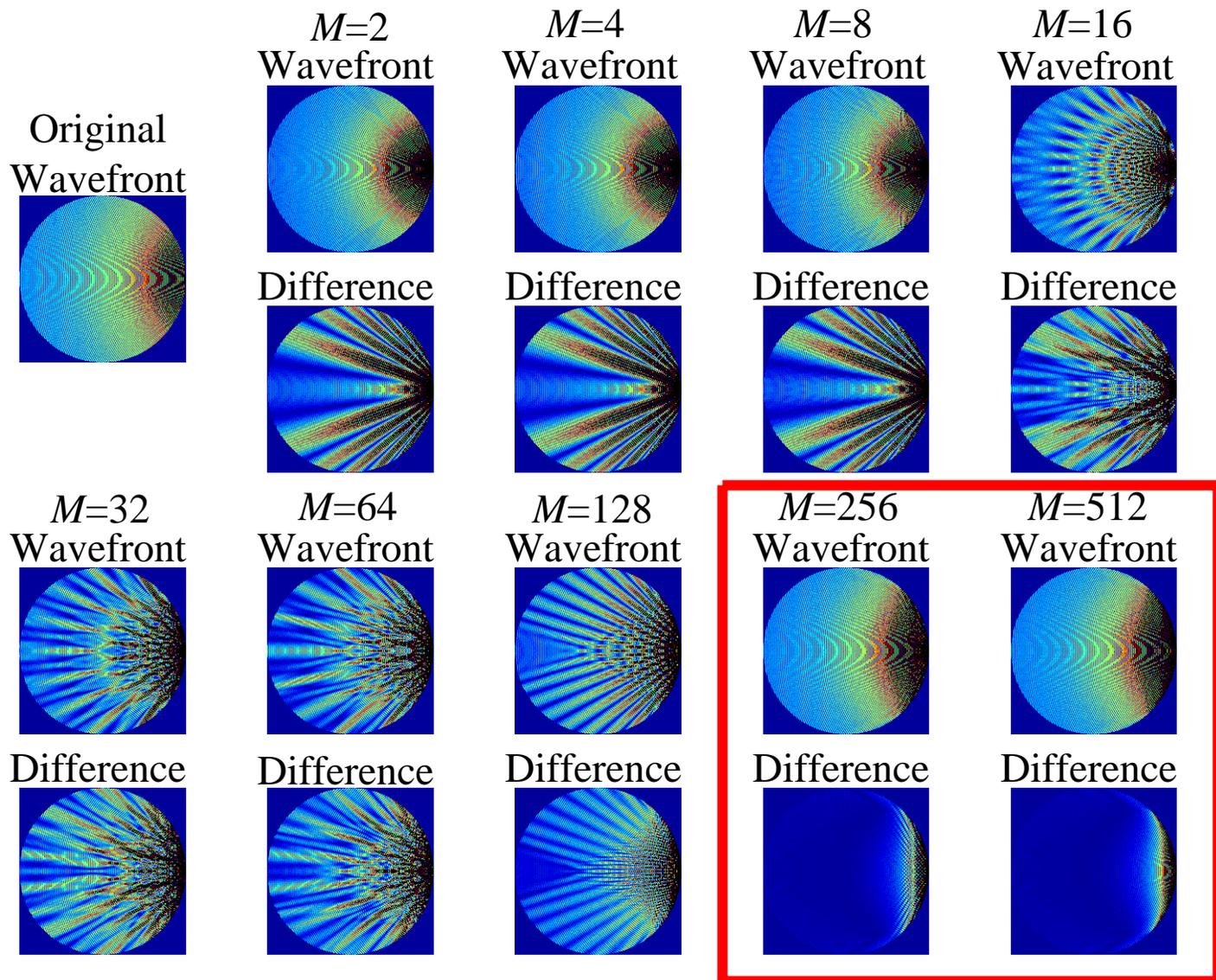
超指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 1000 \text{ Hz}$



超指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 2000 \text{ Hz}$

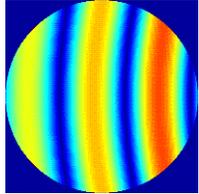


超指向性, $d = 3 \text{ m}$, $f = 4000 \text{ Hz}$

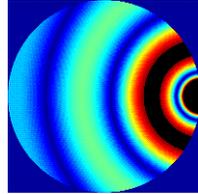


超指向性, $d = 10$ m, $f = 125$ Hz

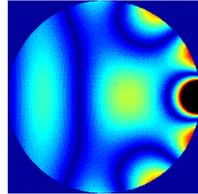
Original
Wavefront



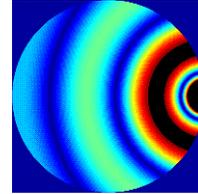
$M=2$
Wavefront



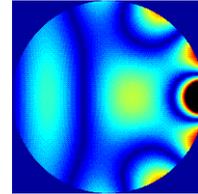
Difference



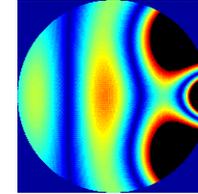
$M=4$
Wavefront



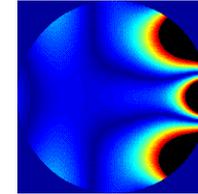
Difference



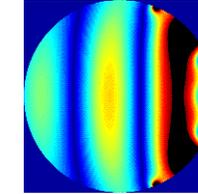
$M=8$
Wavefront



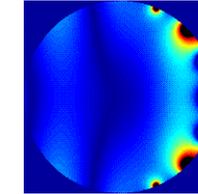
Difference



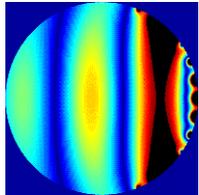
$M=16$
Wavefront



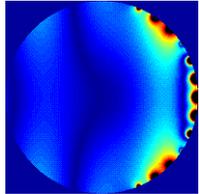
Difference



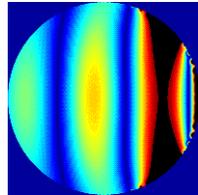
$M=32$
Wavefront



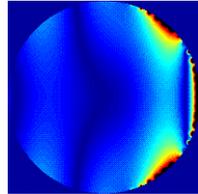
Difference



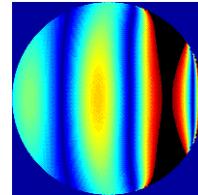
$M=64$
Wavefront



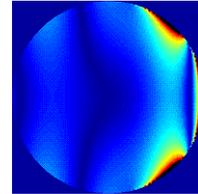
Difference



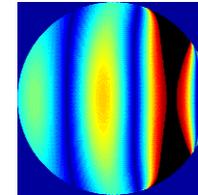
$M=128$
Wavefront



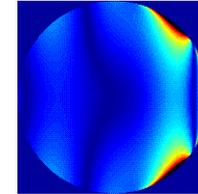
Difference



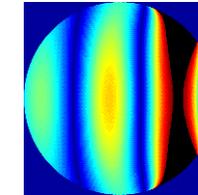
$M=256$
Wavefront



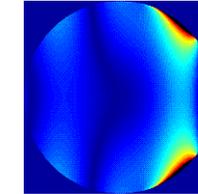
Difference



$M=512$
Wavefront

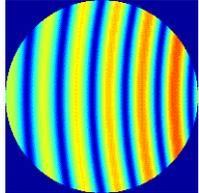


Difference

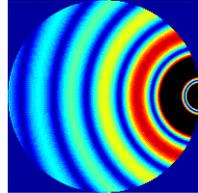


超指向性, $d = 10$ m, $f = 250$ Hz

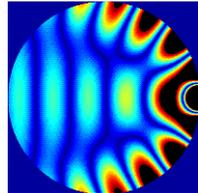
Original
Wavefront



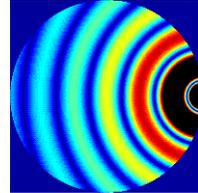
$M=2$
Wavefront



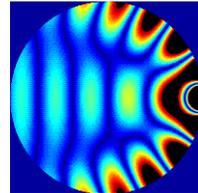
Difference



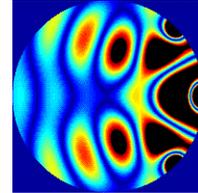
$M=4$
Wavefront



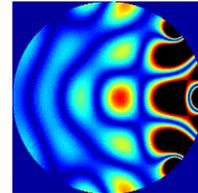
Difference



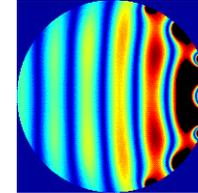
$M=8$
Wavefront



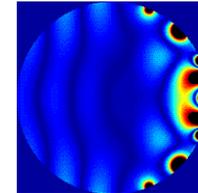
Difference



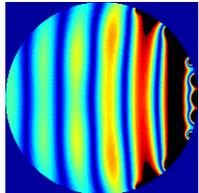
$M=16$
Wavefront



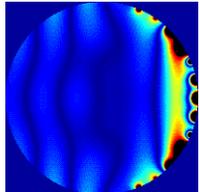
Difference



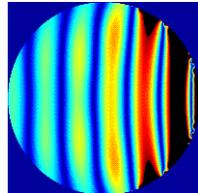
$M=32$
Wavefront



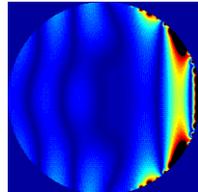
Difference



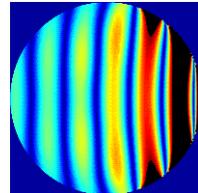
$M=64$
Wavefront



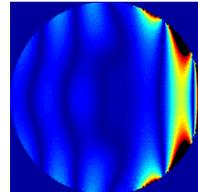
Difference



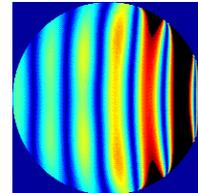
$M=128$
Wavefront



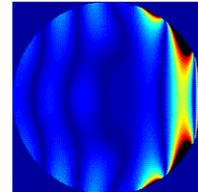
Difference



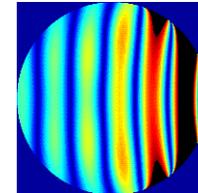
$M=256$
Wavefront



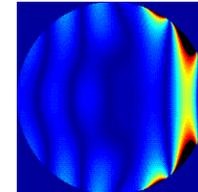
Difference



$M=512$
Wavefront

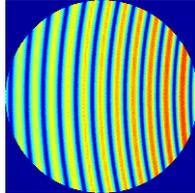


Difference

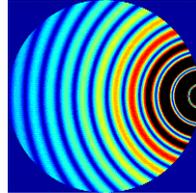


超指向性, $d = 10$ m, $f = 500$ Hz

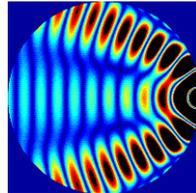
Original
Wavefront



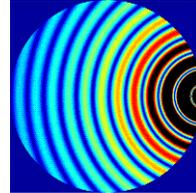
$M=2$
Wavefront



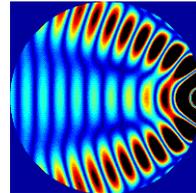
Difference



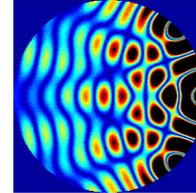
$M=4$
Wavefront



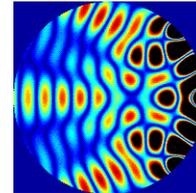
Difference



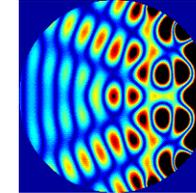
$M=8$
Wavefront



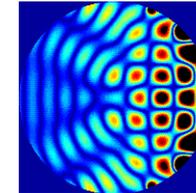
Difference



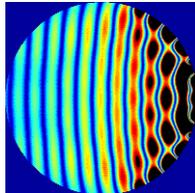
$M=16$
Wavefront



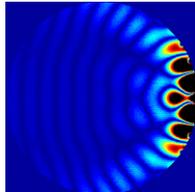
Difference



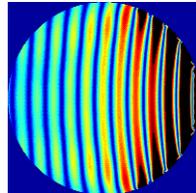
$M=32$
Wavefront



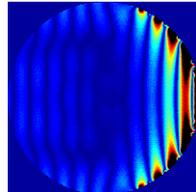
Difference



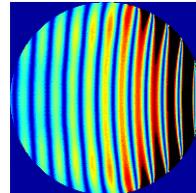
$M=64$
Wavefront



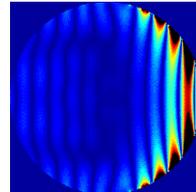
Difference



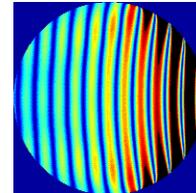
$M=128$
Wavefront



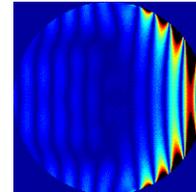
Difference



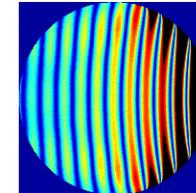
$M=256$
Wavefront



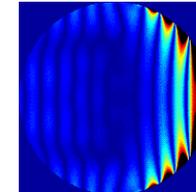
Difference



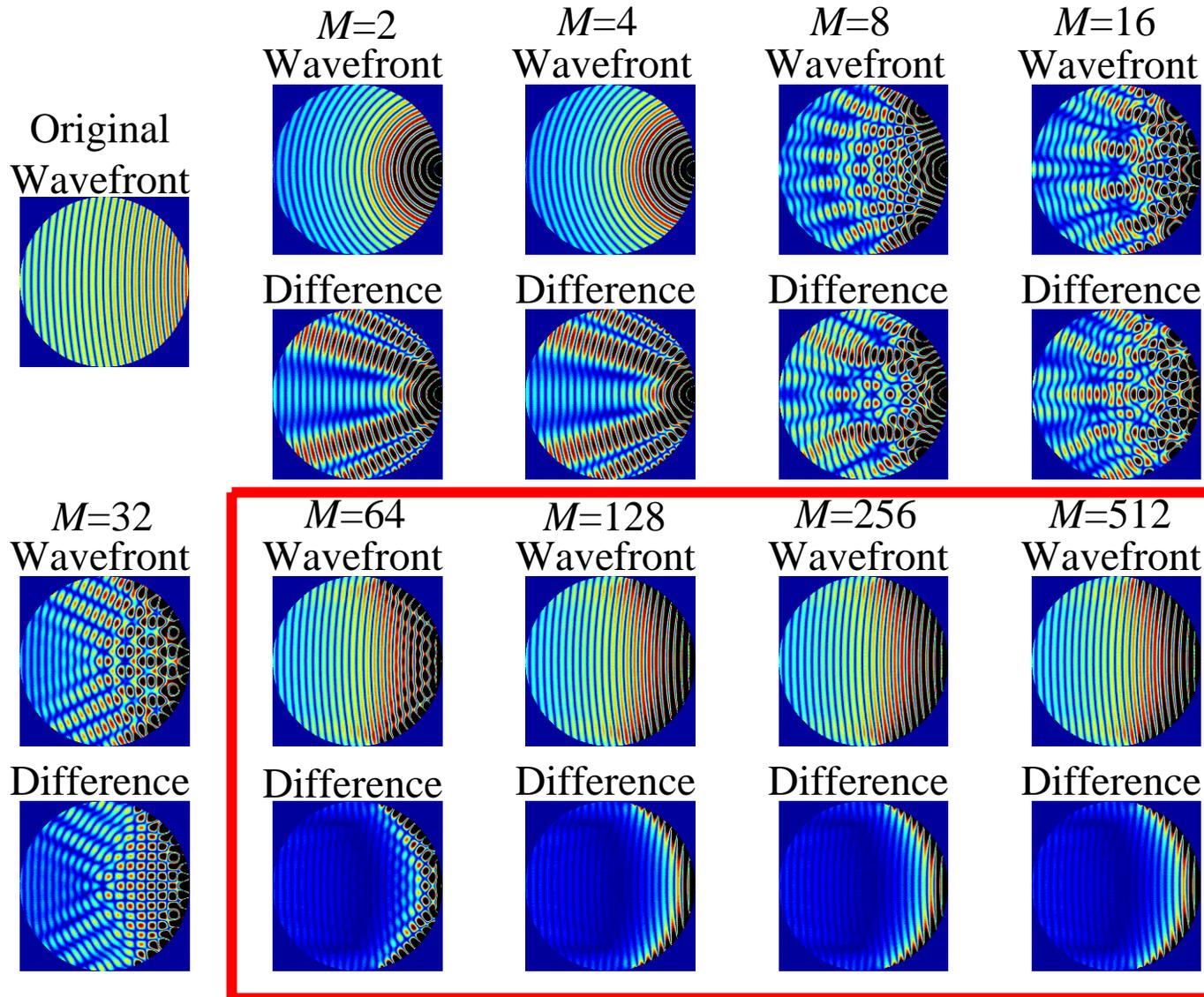
$M=512$
Wavefront



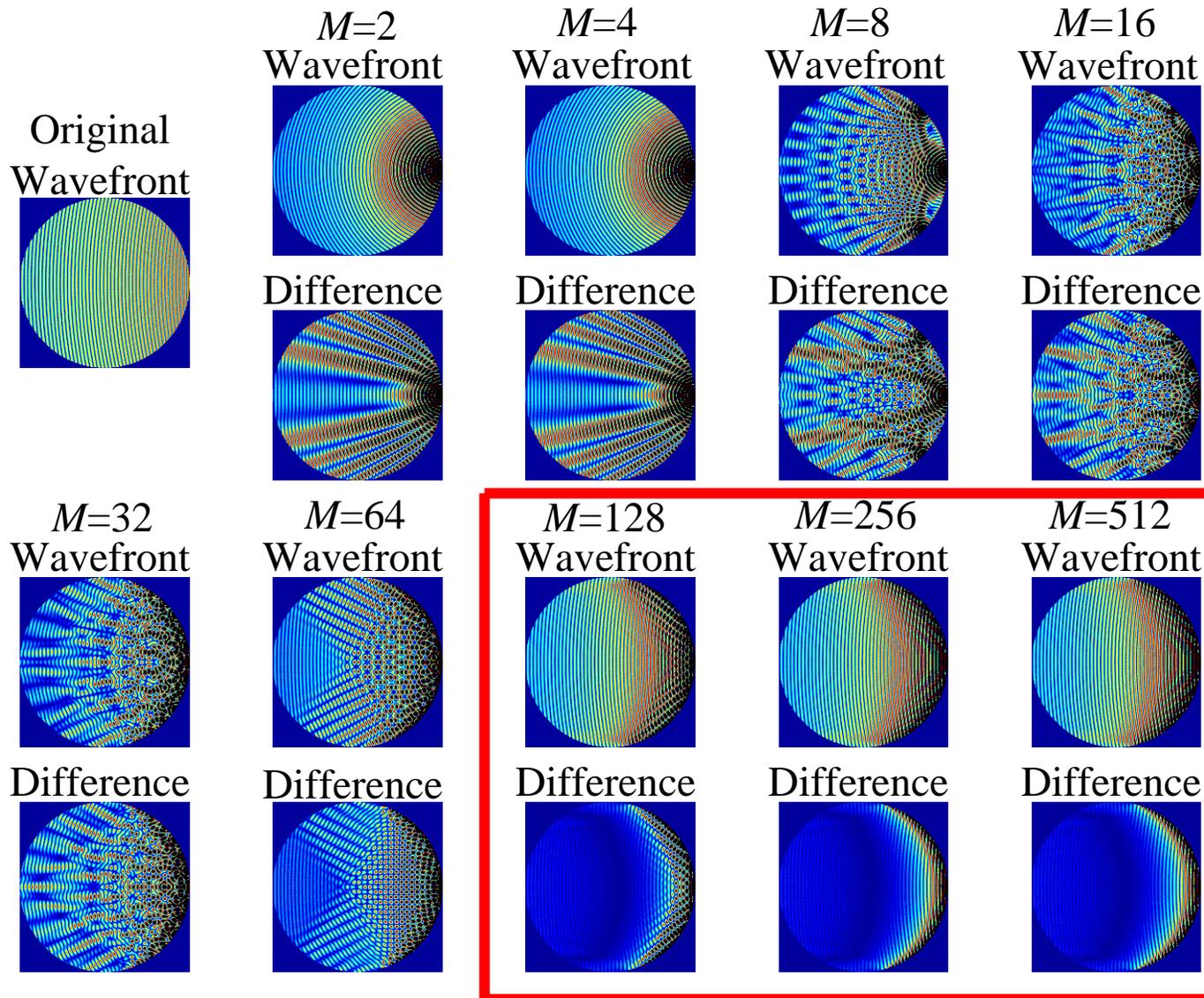
Difference



超指向性, $d = 10$ m, $f = 1000$ Hz



超指向性, $d = 10$ m, $f = 2000$ Hz



超指向性, $d = 10$ m, $f = 4000$ Hz

