非同期分散マイクロフォンアレイの概要と研究動向

音声言語情報処理特論 ゲスト講義

2025 年 12 月 16 日

山岡 洸瑛

情報理工学系研究科 システム情報学専攻 助教

自己紹介

- 名前: 山岡 洸瑛 (YAMAOKA Kouei)

  Email: kouei_yamaoka@ipc.i.u-tokyo.ac.jp

- 略歴
  - 2019 年: 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 修士（工学）
  - 2024 年: 東京都立大学大学院システムデザイン研究科 博士（情報科学）
  - 2024 年 –: 東京大学 システム第一研究室（猿渡・齋藤研究室）助教
- 専門
  - 多チャネル音響信号処理，分散マイクロフォンアレイ
    ビームフォーミング，時間差推定

研究歴

- 研究開始前 (〜2016)：ブレインマシンインターフェースに興味
  - 情報科学を選択 & 当時情報系に強かった筑波大を選択
- 学部＆修士課程での研究 (〜2019)
  - 脳波 > 画像 > 音の順に興味があったので，音&脳波の研究室を選択
  - 配属された年に脳波の研究が終了...
  - 音響信号処理の研究に従事し，仮想マイクロフォン技術やスイッチングビームフォーマを研究・提案
- 博士課程での研究 (〜2024)
  - 非同期分散マイクロフォンアレイに惹かれ，世界的に見ても一流の研究者であった（もちろん今も）小野教授の研究室に進学
  - 補助関数法や最小全域木に基づく時間差推定などを提案

今日の内容

- 非同期分散マイクロフォンアレイと関連研究の紹介
  - 分野全体を概説
  - 2 つの技術について少し深掘り
- 伝えたいこと
  - 非同期分散マイクロフォンアレイの面白さ
  - 自分が研究する上で大切にしている（したいと思っている）こと：
    1. 何らかの尺度で，理論的に，最適な処理を行うこと
    2. それに解釈を与えること

非同期分散マイクロフォンアレイの概要

信号処理とは

- “A branch of electrical engineering which pulls meaning from the broad sources of data all around us”
  - IEEE Signal Processing Society の動画 What is Signal Processing? より引用
  - YouTube: `https://www.youtube.com/watch?v=R90ciUoxcJU`
- 物理的な出来事を 1. モデル化し，2. 分析する学問
  - 対象：音響，画像，無線，電気，生体など
  - 分野：音声・音響信号処理，画像処理，データサイエンスなど
  - 応用：補聴器，自動運転，電話，テレビ，通信機器，計算機など
  - ▶ 現代を支える重要な学問

多チャネル音響信号処理とは

- マイクロフォンアレイ（アレイ）信号処理
  - 複数のセンサで観測された音信号を対象とした信号処理
  - 観測信号が有する音の空間的な情報を活用



RWCP-SSD [S.Nakamura+, 2002] より引用



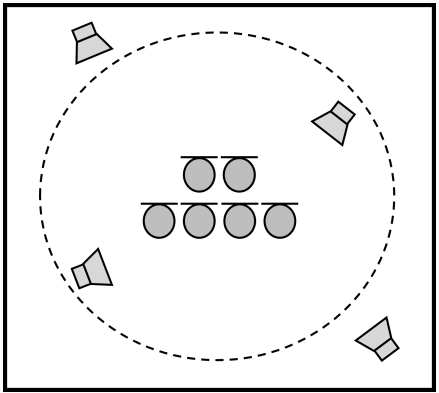
Meeting Owl [meetingowl.jp] より引用



Sony ICD-SX813

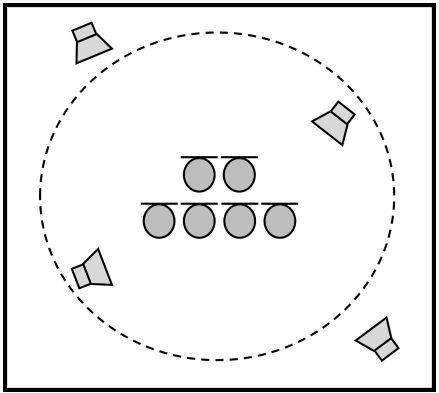
分散マイクロフォンアレイとは

- 従来のアレイ信号処理の限界
  - 音源とアレイの近接が前提
  - ▶ 大規模な装置が必要

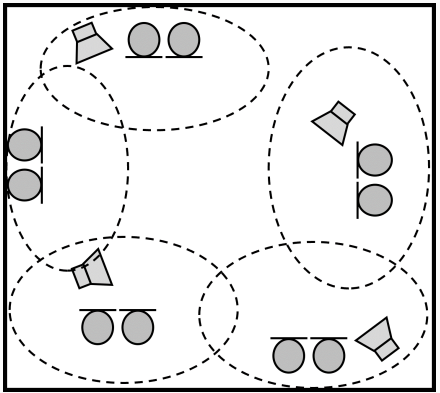


分散マイクロフォンアレイとは

- 従来のアレイ信号処理の限界
  - 音源とアレイの近接が前提
  - ▶ 大規模な装置が必要



- 分散マイクロフォンアレイ
  - 分散配置されたマイクを連携
  - ▶ 広範囲における信号処理を実現



非同期分散マイクロフォンアレイとは

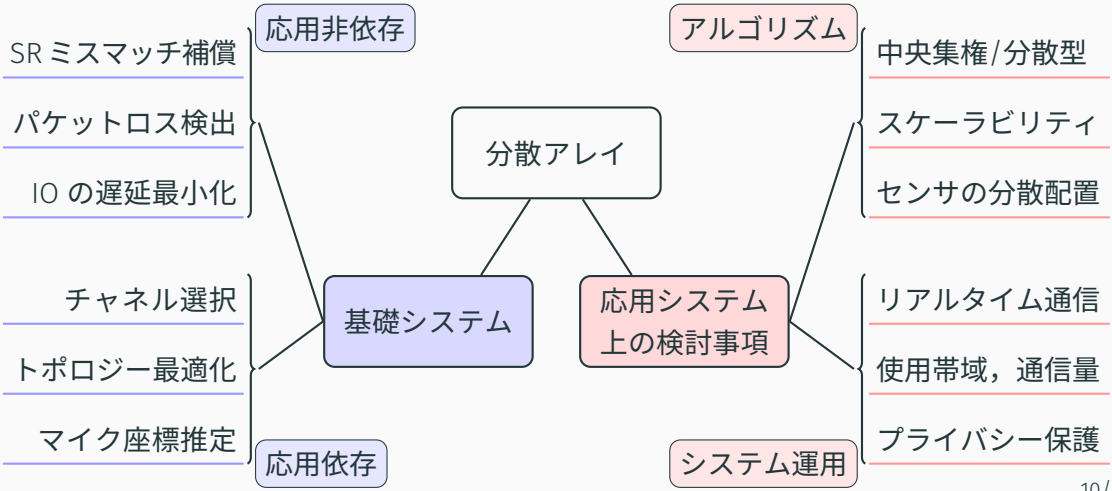
- 非同期分散マイクロフォンアレイ（分散アレイ）
  - 多数のマイクロフォン（アレイ）を分散配置・連携させることで，広範囲におけるアレイ信号処理を簡便に実現する枠組み
  - 個々のアレイとして，専用の機器から普及している小型機器まで，幅広いデバイスが利用可能
  - 個々のアレイは独立に動作する $\rightarrow$ 観測信号は非同期
- 応用と課題
  - 応用：広い空間における従来のアレイ信号処理（音源分離，音源定位など）
  - 課題：分散や非同期，無線通信に起因する分野横断的なタスク

分散アレイの応用例

- ハンズフリー音声対話・音声認識
  - マイクロフォンが多いほど，効果的な雑音抑圧が可能
  - 多数のアレイを用いることで，口元付近での観測が不要に
- 補聴器支援
  - 分散配置されたアレイは，各雑音の参照信号を提供しうる
  - 補聴器外のマイクロフォンを活用した，効果的な音源分離が可能
- 音響モニタリング
  - 対象領域全体の音情報が取得可能
  - マイクロフォンは死角を持たず，消音は難しい

▶ Society 5.0「サイバー空間とフィジカル空間の融合」

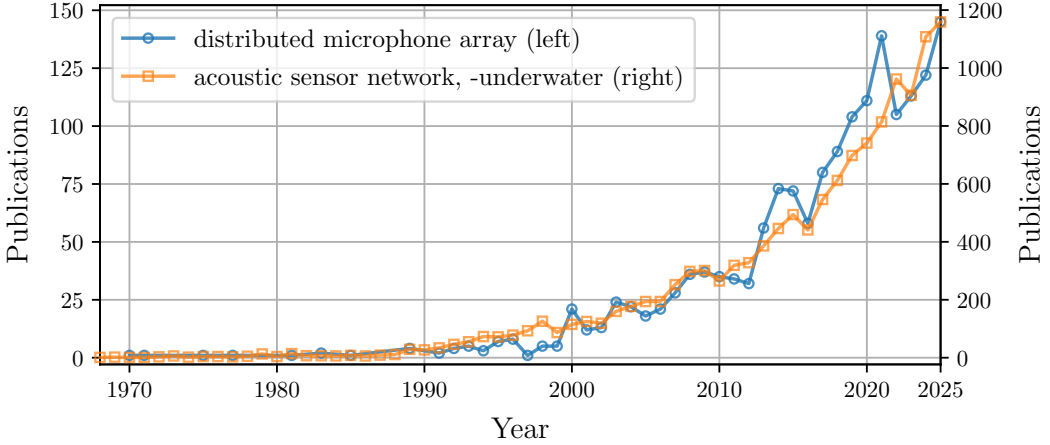
分散アレイにおける研究トピック



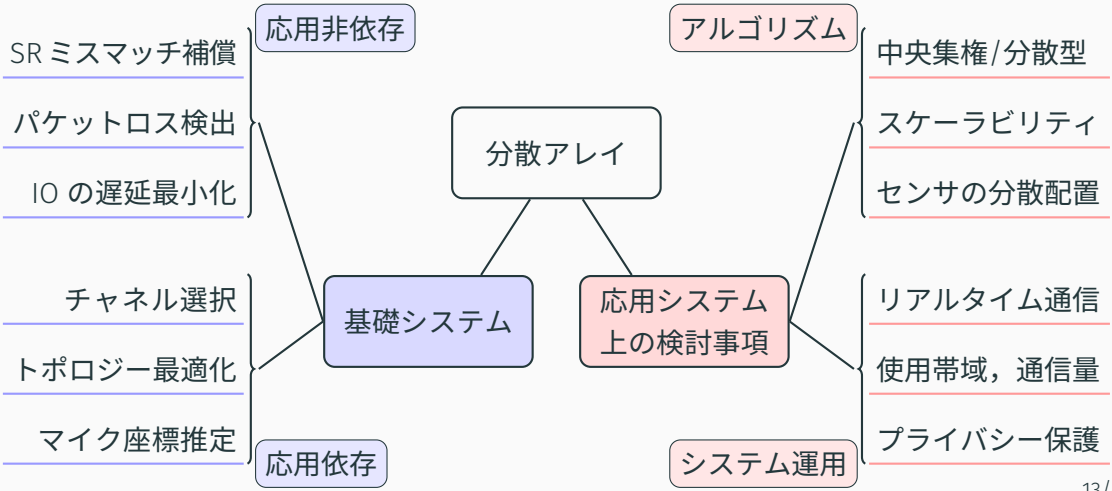
分散アレイ or 音響センサネットワーク

- 用語が統一されていない
  - （非同期）分散マイクロフォンアレイ
  - （ワイヤレス）音響センサネットワーク，アドホックマイクロフォンアレイ
  - (microphone array network, ad-hoc microphone network, etc.)
  - 比較的新しく，かつ，研究分野が幅広いのが一因？
- 個人的な印象
  - 分散アレイ：アレイ信号処理の立場から使用される
    「非同期」を使っていたのはほぼ日本人か
  - 音響センサネットワーク：より一般的な立場から使用される
    ただし，空気中を伝搬する音以外も対象とする (e.g., underwater acoustics)

分散アレイの研究動向 (Web of Science より)



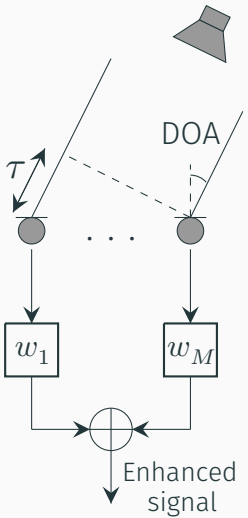
分散アレイにおける研究トピック



基礎システム: 信号の同期化

空間情報とは

- マイクアレイ信号処理において時間差 τ は重要な空間情報である
  - アレイ信号処理の多くは，（暗黙的に）時間差を利用
  - 例) 目的信号を同期し，足し合わせる
    $\rightarrow$ 遅延和ビームフォーマ
  - その他，音源分離，音源到来方向推定，非同期信号の同期化，マイクの自己位置推定など
- アレイ信号処理では，ごく僅かな時間差を扱う
  - 例) $3.4\,\mathrm{cm}$ 間隔のアレイでは，$0.1\,\mathrm{ms}$ (音速 $340\,\mathrm{m/s}$)
  - 厳密な時刻同期（単一の A/D 変換器の使用）が前提

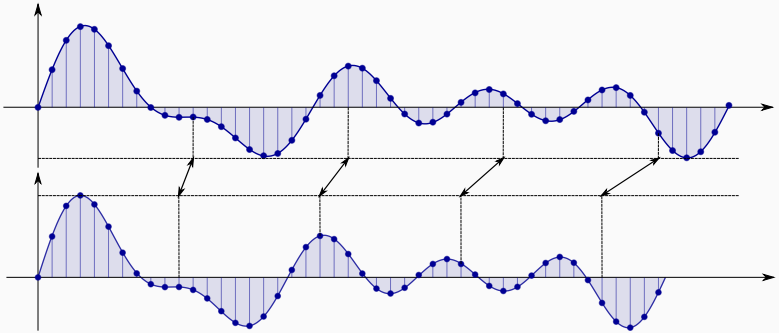


非同期信号: 録音開始時刻のズレ

- 分散アレイでは信号が非同期
  - 異なる機器を用いて，同時に録音開始することは不可能
  - 録音開始時刻のズレ (sampling-time offset; STO)
- アレイ信号処理への影響
  - 音源分離系: 信号の時間同期が取れれば良い
    → STO に依存せず，問題にならないことが多い
  - 音源定位系: STO の補償（絶対的な時間原点の設定）が必須

非同期信号: サンプリング周波数のズレ (1/2)

- 分散アレイでは信号が非同期
  - 異なる機器ではサンプリング周波数がわずかに異なる
  - サンプリング周波数の微小なズレ (sampling-rate offset; SRO)
    (日本では，サンプリング周波数ミスマッチ)



補足

- SRO の極端な例
  - 信号 1：1 s，8 kHz サンプリング
  - 信号 2：1 s，4 kHz サンプリング
    → 8 kHz サンプリングだと思うと 0.5 s の信号になる
- SRO は時変で，その安定性も重要
  - > 高精度 OCXO(恒温槽付水晶発振器) を採用し、+/-0.01ppm*1 のクロック精度、+/-0.005ppm/日の周波数安定性を誇ります。



非同期信号: サンプリング周波数のズレ (2/2)

- SRO ε のモデル ($|\varepsilon| \ll 1$)
  - f_s: SR，$x[\cdot]$ 離散信号，$x(\cdot)$: 連続信号

$$x_1[n] = x_1(n/f_s)$$
$$x_2[n] = x_2(n/(1+\varepsilon)f_s + \mathrm{STO})$$

- SRO ε とその影響
  - 例：16 000 Hz および 16 001 Hz サンプリングのとき，62.5 ppm (10^{-6}) の SRO
    (16 kHz サンプリングのとき，1 サンプルは 62.5 µs)
  - 一般的な機器では ± 20 ppm 程度の SRO が生じる
  - ▶ 時間差を利用する任意のアレイ信号処理の前段の処理として
    ブラインド同期（ε を推定，$x_2[n]$ を適切にリサンプリング）が必須

SRO のアレイ信号処理への影響

- 音源分離への影響 [L. Wang+, 2016]
  - 1 Hz 相当の SRO で 15 dB 以上雑音抑圧性能が低下

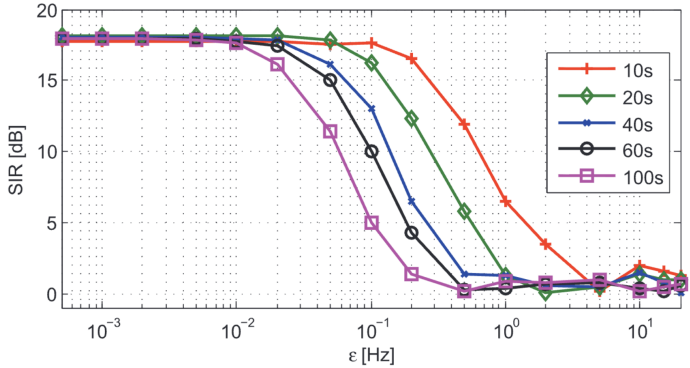


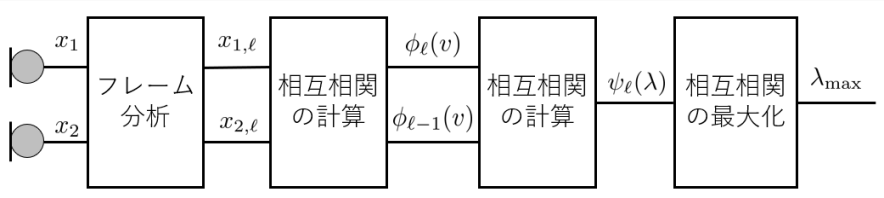
Fig. 11. BSS performance in terms of output SIR for various SROs and signal lengths without sampling rate compensation.

代表的なブラインドSRO推定法

- （おそらく）最初のブラインド同期化手法 [Z. Liu, 2008]
  - 音源分離のための同期化手法として提案
- 相互相関関数に関連する手法
  - 相互相関ベース: [L. Wang+, 2016], [A. Chinaev+, 2021] など
  - 最尤推定ベース: [S. Miyabe+, 2015], [S. Araki+, 2019] など
- コヒーレンスに基づく手法
  - [S. Markovich-Golan+, 2012], [J. Schmalenstroeer+, 2017] など
- 多チャネルの情報を活用した手法
  - 最尤推定ベースの拡張．補助関数法を導入することで実現 [Y. Masuyama+, 2024]
  - SRO 推定としては，十分な精度が得られている

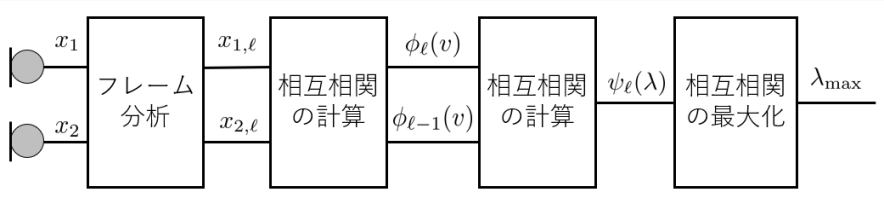
DXCP 法 [A. Chinaev+, 2021]

- Double-cross-correlation processor (DXCP)
  - 相互相関の最大化に基づく SRO 推定法
  - 従来法: 波形を伸縮させながら，相互相関を最大化する伸縮パラメータを探索 [L. Wang+, 2016]
  - DXCP 法: 相互相関自体ではなく，相互相関の相互相関を最大化



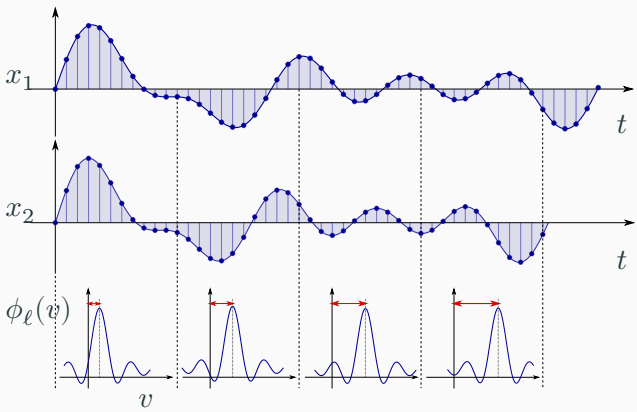
DXCP 法 [A. Chinaev+, 2021]

- Double-cross-correlation processor (DXCP) の処理フロー
  1. 観測信号 x_1, x_2 のフレーム分析を行う
  2. ℓ 番目のフレームに対して相互相関 $\phi_\ell(v)$ を計算
  3. 相互相関 $\phi_\ell(v)$ 及び $\phi_{\ell-1}(v)$ に対して相互相関 $\psi_\ell(\lambda)$ を計算
  4. $\psi_\ell(\lambda)$ を最大化する時間差 $\lambda_{\max}$ を推定 $\rightarrow$ SRO に対応



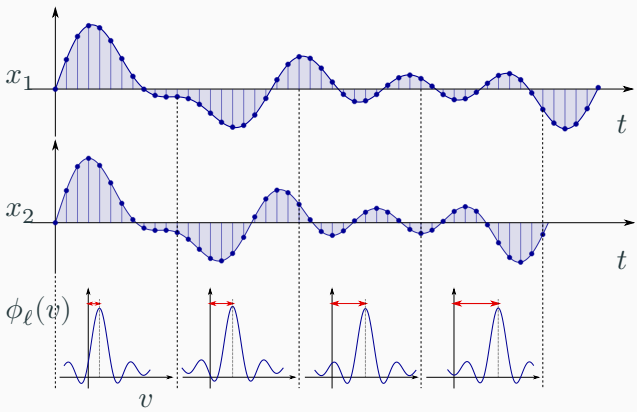
相互相関とSRO

- 線形位相ドリフトモデル
  - 仮定:
    SRO は十分に小さい
  - フレーム分析を行ったとき，
    SRO による信号のずれは，
    1. フレーム内では一定，
    2. フレーム間では線形に変化



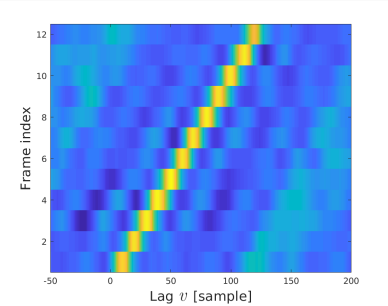
相互相関とSRO

- 線形位相ドリフトモデル
  - 仮定:
    SRO は十分に小さい
  - フレーム分析を行ったとき，
    SRO による信号のずれは，
    1. フレーム内では一定，
    2. フレーム間では線形に変化
  - ▶ 短時間フレーム毎に計算された
    相互相関のピーク位置が
    線形に変化



観測信号の相互相関とその相互相関

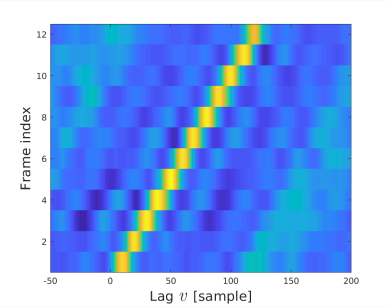
- 観測信号の相互相関: $\phi_\ell(v)$
  - ピークの傾きが SRO に対応



$$\phi_\ell(v) = \sum_{m=1}^{M} x_{1,\ell}(m)\, x_{2,\ell}(m+v)$$

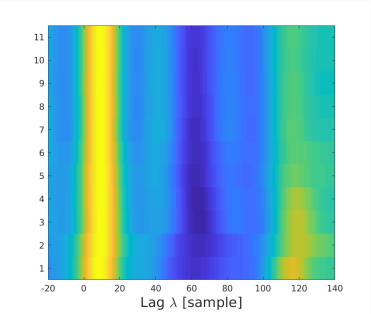
観測信号の相互相関とその相互相関

- 観測信号の相互相関: $\phi_\ell(v)$
  - ピークの傾きが SRO に対応



$$\phi_\ell(v) = \sum_{m=1}^{M} x_{1,\ell}(m)\, x_{2,\ell}(m+v)$$

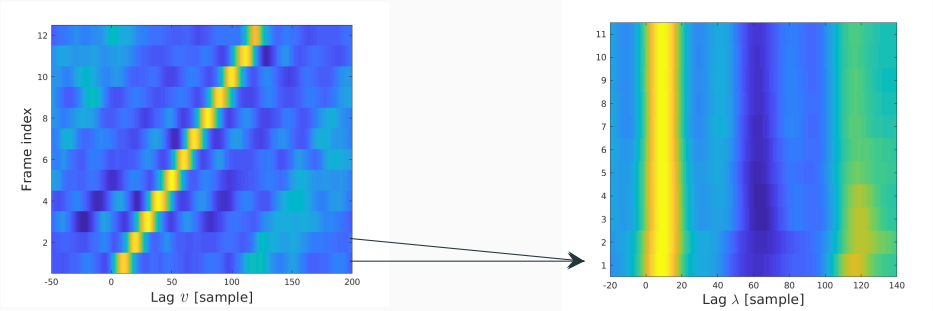
- 相互相関の相互相関: $\psi_\ell(\lambda)$
  - ピーク位置が SRO に対応



$$\psi_\ell(\lambda) = \sum_{v} \phi_\ell(v)\, \phi_{\ell-1}(v+\lambda)$$

観測信号の相互相関とその相互相関

- 観測信号の相互相関: $\phi_\ell(v)$
  - ピークの傾きが SRO に対応
- 相互相関の相互相関: $\psi_\ell(\lambda)$
  - ピーク位置が SRO に対応

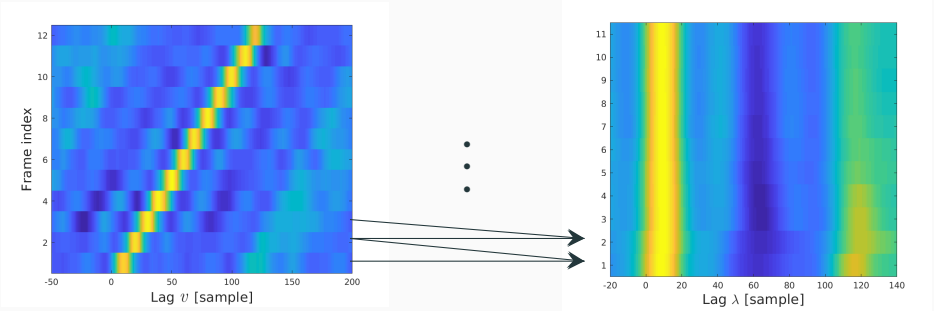


$$\phi_\ell(v) = \sum_{m=1}^{M} x_{1,\ell}(m)\, x_{2,\ell}(m+v)$$

$$\psi_\ell(\lambda) = \sum_{v} \phi_\ell(v)\, \phi_{\ell-1}(v+\lambda)$$

観測信号の相互相関とその相互相関

- 観測信号の相互相関: $\phi_\ell(v)$
  - ピークの傾きが SRO に対応
- 相互相関の相互相関: $\psi_\ell(\lambda)$
  - ピーク位置が SRO に対応

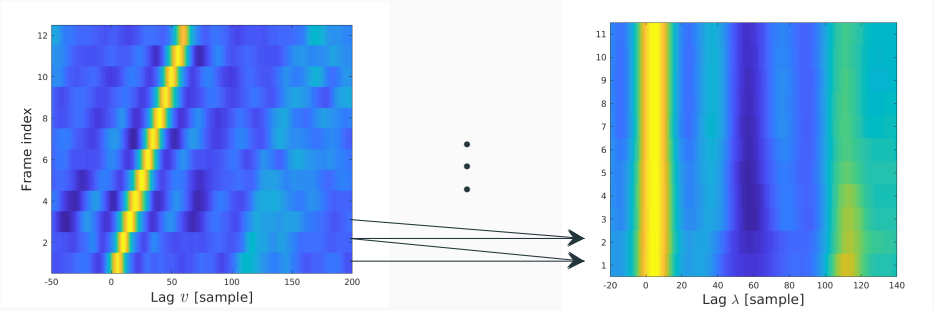


$$\phi_\ell(v) = \sum_{m=1}^{M} x_{1,\ell}(m)\, x_{2,\ell}(m+v)$$

$$\psi_\ell(\lambda) = \sum_{v} \phi_\ell(v)\, \phi_{\ell-1}(v+\lambda)$$

観測信号の相互相関とその相互相関

- 観測信号の相互相関: $\phi_\ell(v)$
  - ピークの傾きが SRO に対応
- 相互相関の相互相関: $\psi_\ell(\lambda)$
  - ピーク位置が SRO に対応

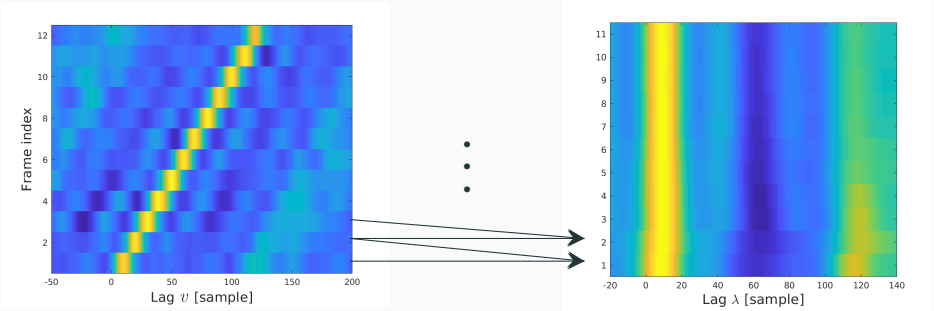


$$\phi_\ell(v) = \sum_{m=1}^{M} x_{1,\ell}(m)\, x_{2,\ell}(m+v)$$

$$\psi_\ell(\lambda) = \sum_{v} \phi_\ell(v)\, \phi_{\ell-1}(v+\lambda)$$

観測信号の相互相関とその相互相関

- 観測信号の相互相関: $\phi_\ell(v)$
  - ピークの傾きが SRO に対応
- 相互相関の相互相関: $\psi_\ell(\lambda)$
  - ピーク位置が SRO に対応

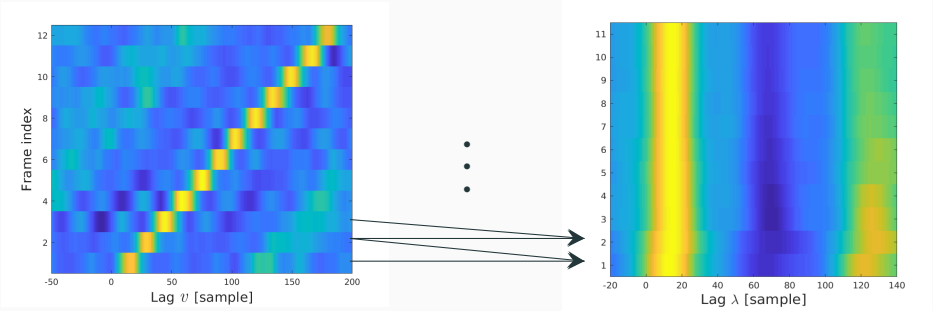


$$\phi_\ell(v) = \sum_{m=1}^{M} x_{1,\ell}(m)\, x_{2,\ell}(m+v)$$

$$\psi_\ell(\lambda) = \sum_{v} \phi_\ell(v)\, \phi_{\ell-1}(v+\lambda)$$

観測信号の相互相関とその相互相関

- 観測信号の相互相関: $\phi_\ell(v)$
  - ピークの傾きが SRO に対応
- 相互相関の相互相関: $\psi_\ell(\lambda)$
  - ピーク位置が SRO に対応

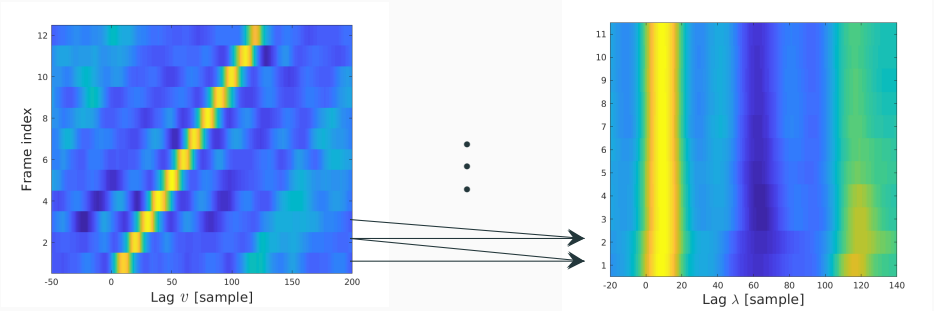


$$\phi_\ell(v) = \sum_{m=1}^{M} x_{1,\ell}(m)\, x_{2,\ell}(m+v)$$

$$\psi_\ell(\lambda) = \sum_{v} \phi_\ell(v)\, \phi_{\ell-1}(v+\lambda)$$

観測信号の相互相関とその相互相関

- 観測信号の相互相関: $\phi_\ell(v)$
  - ピークの傾きが SRO に対応
- 相互相関の相互相関: $\psi_\ell(\lambda)$
  - ピーク位置が SRO に対応



$$\phi_\ell(v) = \sum_{m=1}^{M} x_{1,\ell}(m)\, x_{2,\ell}(m+v)$$

$$\psi_\ell(\lambda) = \sum_{v} \phi_\ell(v)\, \phi_{\ell-1}(v+\lambda)$$

最尤推定に基づく SRO 推定 [S. Miyabe+, 2015]

- 線形位相ドリフトモデルに基づき，SRO を最尤推定で求める
- 観測モデル
  - STFT：短時間フーリエ変換，k, n: 周波数，フレームインデックス

$$
\begin{aligned}
x_1[k,n] &= \mathrm{STFT}(x_1(n'/f_s)) \\
x_2[k,n;\varepsilon] &= \mathrm{STFT}(x_2(n'/(1+\varepsilon)f_s)) \\
\boldsymbol{x}[k,n;\varepsilon] &= [x_1[k,n], x_2[k,n;\varepsilon]]^{\mathsf{T}}
\end{aligned}
$$

- 問題設定
  - 入力：$\boldsymbol{x}[k,n;\varepsilon]$ のみ
  - 出力：ε の推定値

目的関数の導出 (1/2)

- 観測がゼロ平均多変量複素正規分布に従うと仮定
  - $\boldsymbol{V}[k], \mathcal{V}$: 共分散行列とその集合

$$p(\boldsymbol{x}[k,n;\varepsilon], \boldsymbol{V}[k]) = \frac{1}{\pi^2 \det \boldsymbol{V}[k]} \exp(-\boldsymbol{x}[k,n;\varepsilon]^{\mathsf{H}} \boldsymbol{V}[k]^{-1} \boldsymbol{x}[k,n;\varepsilon])$$

- 対数尤度

$$\mathcal{J}(\varepsilon, \mathcal{V}) = -\sum_{k,n} (\log \pi^2 + \log \det \boldsymbol{V}[k] + \boldsymbol{x}[k,n;\varepsilon]^{\mathsf{H}} \boldsymbol{V}[k]^{-1} \boldsymbol{x}[k,n;\varepsilon])$$

目的関数の導出 (2/2)

- 共分散行列 $\boldsymbol{V}[k]$ の推定

$$\boldsymbol{V}[k] \leftarrow \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{x}[k, n; \varepsilon] \boldsymbol{x}[k, n; \varepsilon]^{\mathsf{H}}$$

- 代入し，目的関数は

$$\begin{aligned} \mathcal{J}(\varepsilon) &= -\sum_{k,n} \left(\log \pi^2 + \log \det \boldsymbol{V}[k] + \boldsymbol{x}[k, n; \varepsilon]^{\mathsf{H}} \boldsymbol{V}[k]^{-1} \boldsymbol{x}[k, n; \varepsilon] \right) \\ &= -\sum_{k} \log \det \sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{x}[k, n; \varepsilon] \boldsymbol{x}[k, n; \varepsilon]^{\mathsf{H}} + \mathrm{Const.} \end{aligned}$$

最尤推定と相互相関関数の最大化の関係

- 最適化問題は

$$\arg\max_{\varepsilon} \quad -\sum_{k} \log\left(-\left|\sum_{n} x_1[k,n]x_2^*[k,n;\varepsilon]\right|^2 + \text{Const.}\right)$$

相互相関関数に相当

- 実際の推定精度は [L. Wang+, 2016]

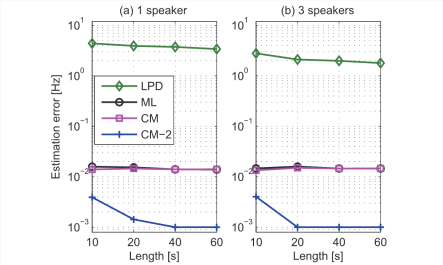
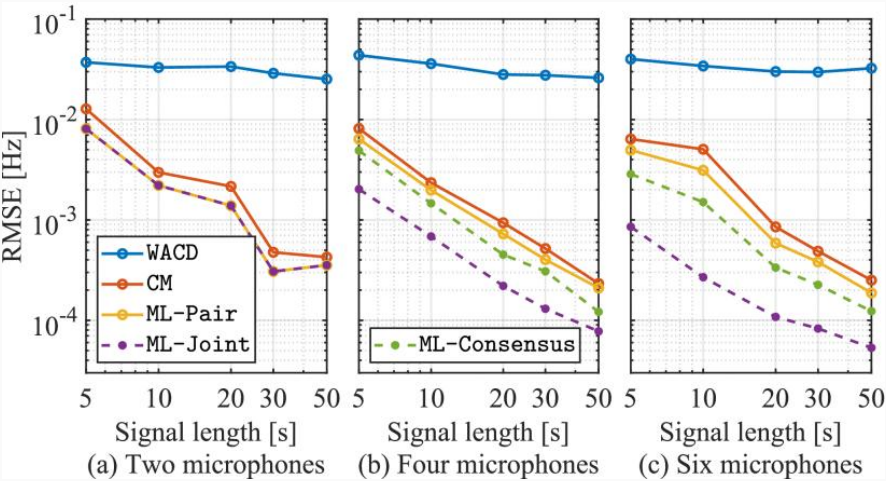


Fig. 8. Average SRO estimation error for the considered algorithms in a static acoustic environment with (a) 1 speaker and (b) 3 speakers.

最尤推定 vs 相互相関関数の最大化

- 推定精度
  - ほぼ同等
  - （共に最尤推定と言っても良いぐらいなので）
  - 相互相関関数の最大化は工夫の余地あり（DXCP 法など）
- 空間情報の利用
  - 相互相関関数の最大化は 2 チャネル専用
  - 最尤推定は多変量複素正規分布を考えているため
    拡張可能 [Y. Masuyama+, 2024] $\rightarrow$ マイク数を増やす価値あり

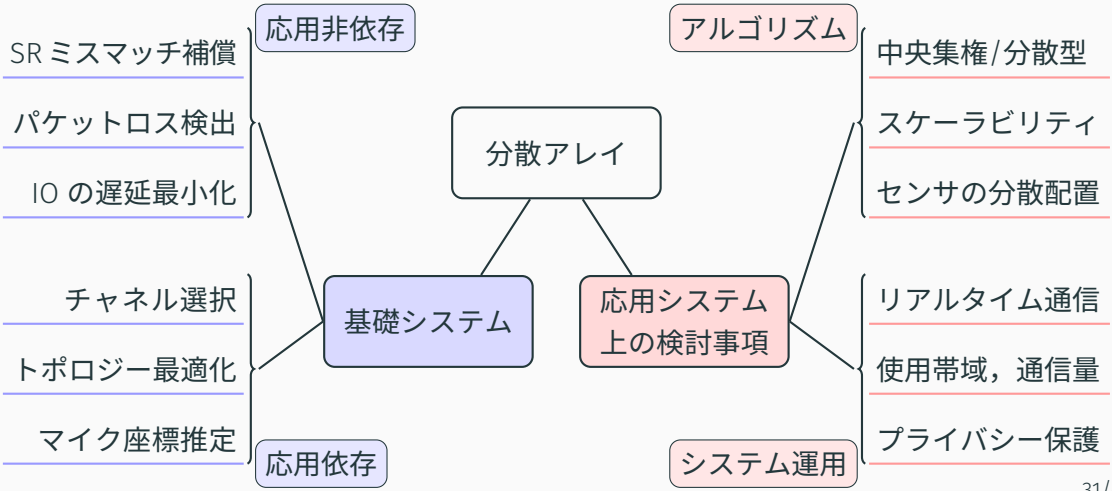
SRO 推定の実験結果の例 [Y. Masuyama+, 2024]



ここまでのまとめ

- 分散マイクロフォンアレイ信号処理における空間情報の活用
  - マイク間で観測される時間差が重要な役割
  - 非同期分散アレイでは SRO が生じ，これを補償する必要あり
  - 最尤推定，相互相関法など，複数のブラインド同期化手法が提案
- 同期化後は...
  - 従来のアレイ信号処理がそのまま適用可能
  - そのまま適用するのがベスト？

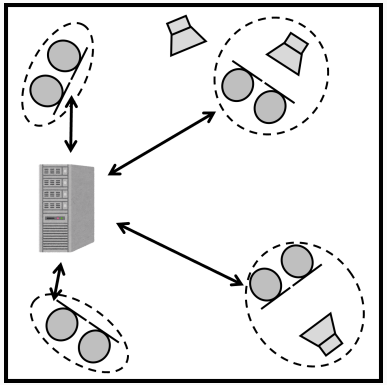
分散アレイにおける研究トピック



応用システム: 中央集権/分散型処理

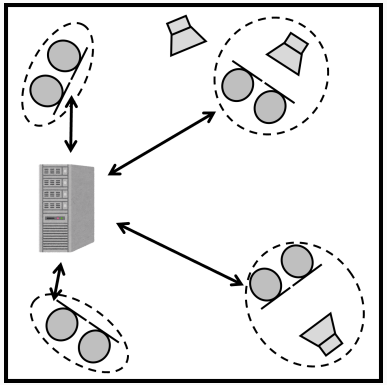
中央集権/分散型アルゴリズム (1/2)

- 中央集権型 (centralized)
  - 強力な計算機に情報を集約
  - 巨大な単一アレイとみなせる

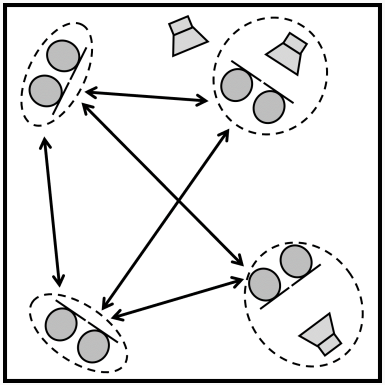


中央集権/分散型アルゴリズム (1/2)

- 中央集権型 (centralized)
  - 強力な計算機に情報を集約
  - 巨大な単一アレイとみなせる



- 分散型 (decentralized)
  - 分散配置されたアレイ内で処理
  - エッジコンピューティング的



中央集権/分散型アルゴリズム (2/2)

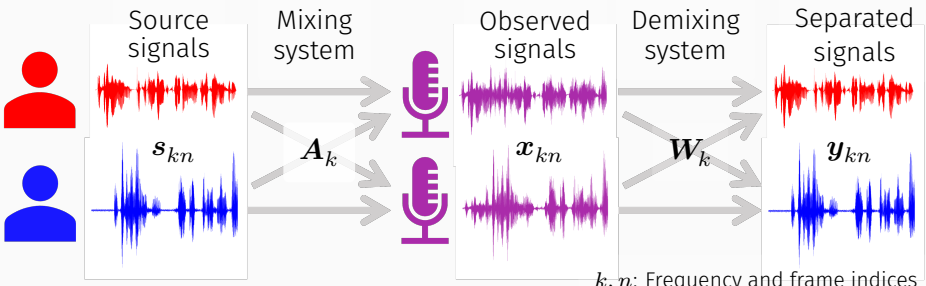
- 中央集権型 (centralized)
  - 利点: 性能面ではベスト
    基礎システムを前提に，従来のアレイ信号処理がそのまま利用可能
  - 欠点: 情報の集約に懸念（通信量・プライバシーなど）
- 分散型 (decentralized)
  - 利点: 限られた情報や各アレイの出力信号のみ通信
  - 欠点（？）: 新たなアルゴリズムが必要
    例: どのようにモデル化するか，通信する情報はなにか，どのアレイ間で通信するか，参照マイクはどのように選ぶべきか，中央集権型の性能に到達しうるか，など

分散型アルゴリズムの研究動向

- 音源分離
  - 信号そのものではなく，信号を要素毎に 2 乗したものを通信する，分散型独立ベクトル分析 [N. P. Wojtalewicz+, 2017]（対象は画像）
  - 補助関数法に基づく分散型独立ベクトル分析 [森田他, 2025], [K. Yamaoka+, 2025]
- 音源定位
  - グラフニューラルネットワークを音源定位に応用 [E. Grinstein+, 2023]
  - 各アレイで 2 次元の音源方向を推定，方向情報のみを集約 [D. Albertini+, 2023]
- 所感
  - 分散アレイをグラフとみなして処理する研究が増えつつある
  - 音源定位はチャネル間の情報を利用することから分散型が自然
  - 一方音源分離は発展の余地がある

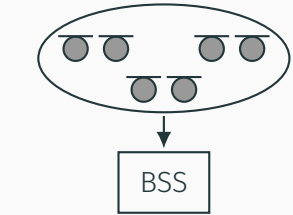
音源分離とは

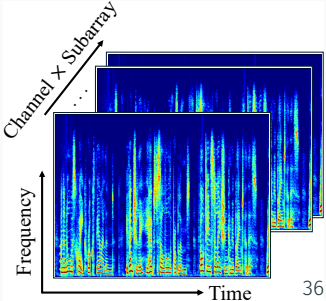
- ブラインド音源分離 (BSS)
  - 複数の音源が混ざった信号から各音源を分離・抽出する技術
  - 応用：音声認識，補聴器やロボット聴覚
  - 代表例：独立ベクトル分析 (IVA) や独立低ランク行列分析 [D. Kitamura+, 2016]
  - 混合：$\boldsymbol{x}_{kn} = \boldsymbol{A}_k \boldsymbol{s}_{kn}$，分離：$\boldsymbol{y}_{kn} = \boldsymbol{W}_k \boldsymbol{x}_{kn}$



中央集権型アルゴリズム

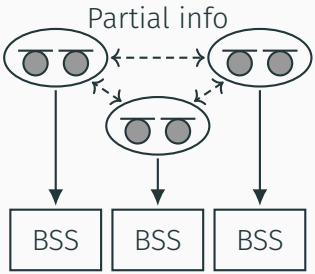
- Centralized BSS
  - 観測を中央演算装置に集約し，巨大なマイクアレイとみなす．
    前処理として同期化処理が必須
- 利点
  - 従来法が直接適用できる
  - 高い分離性能が期待される
- 欠点
  - 離れたマイク間の空間情報は信用できるのか非自明
  - 計算量が多い





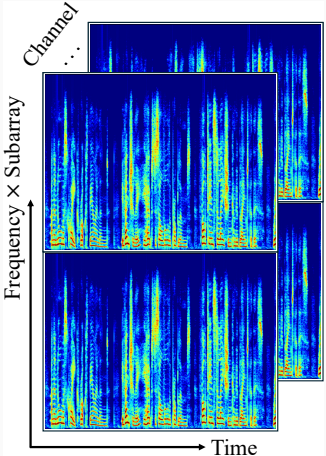
分散型アルゴリズム

- Decentralized BSS
  - 画像の文脈で分散型 IVA が提案 [N. P. Wojtalewicz+, 2017]
  - 各サブアレイで音源分離，一部の情報のみ通信
  - 音響では補助関数法に基づく手法を提案 [森田他, 2025]
- 利点
  - 通信量・計算量が少ない
  - サブアレイ内の情報のみを使用
- 欠点
  - 仮定が厳しい
  - 中央集権型 BSS に応じたアルゴリズム開発が必要



分散型 IVA のモデル

- 観測モデル
  $$\boldsymbol{x}_{k'n} = \boldsymbol{A}_{k'}\boldsymbol{s}_{k'n} \qquad (k' = k + (p-1)K)$$
  - 観測を周波数軸方向に結合したモデル
  - 仮定: 全てのサブアレイでチャネル数が音源数に等しい（劣決定でなければ，主成分分析で対応可能）
- 従来の IVA との関係
  - IVA は信号の周波数方向の共起性を利用し，周波数方向のパーミュテーション問題を軽減
  - イメージ：$(y_1, y_2) = (1, 10), (1, 10)$ の時，
    $\sqrt{1^2 + 1^2} + \sqrt{10^2 + 10^2} < \sqrt{1^2 + 10^2} + \sqrt{10^2 + 1^2}$
  - 提案法も同様



従来法における最適化

- 補助関数型独立ベクトル分析 (AuxIVA) [N. Ono, 11]
  - フィルタ更新 (iterative projection [N. Ono, 11]) (q: 音源インデックス)

$$\boldsymbol{w}_{kq} \leftarrow (\boldsymbol{W}_k \boldsymbol{V}_{kq})^{-1} \boldsymbol{e}_q, \quad \boldsymbol{w}_{kq} \leftarrow \frac{\boldsymbol{w}_{kq}}{\sqrt{\boldsymbol{w}_{kq}^{\mathsf{H}} \boldsymbol{V}_{kq} \boldsymbol{w}_{kq}}}$$

  - 補助変数の更新

$$\boldsymbol{V}_{kq} = \frac{1}{N} \sum_n \frac{\boldsymbol{x}_{kn} \boldsymbol{x}_{kn}^{\mathsf{H}}}{r_{nq}}$$

- 周波数方向の共起性をみる部分

$$r_{nq} = \sqrt{\sum_k |\boldsymbol{w}_{kq}^{\mathsf{H}} \boldsymbol{x}_{kn}|^2}$$

提案法における最適化

- サブアレイ内の情報のみを使用したサブアレイ内での更新
  - フィルタ更新 (iterative projection [N. Ono, 11]) (p: サブアレイインデックス)

$$\boldsymbol{w}_{p,kq} \leftarrow (\boldsymbol{W}_{p,k}\boldsymbol{V}_{p,kq})^{-1}\boldsymbol{e}_q, \quad \boldsymbol{w}_{p,kq} \leftarrow \frac{\boldsymbol{w}_{p,kq}}{\sqrt{\boldsymbol{w}_{p,kq}^{\mathsf{H}}\boldsymbol{V}_{p,kq}\boldsymbol{w}_{p,kq}}}$$

  - 補助変数の更新

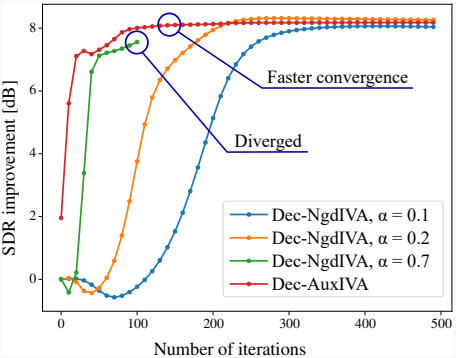
$$\boldsymbol{V}_{p,kq} = \frac{1}{N}\sum_n \frac{\boldsymbol{x}_{p,kn}\boldsymbol{x}_{p,kn}^{\mathsf{H}}}{r_{nq}}$$

- 信号パワーの和を共有したアレイ全体での更新

$$r_{nq} = \sqrt{\sum_p \sum_k |\boldsymbol{w}_{p,kq}^{\mathsf{H}}\boldsymbol{x}_{p,kn}|^2}$$

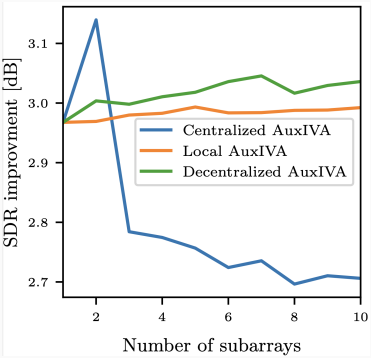
実験結果

- 分離性能の変化



  - 高速かつ安定した収束

- 分離性能



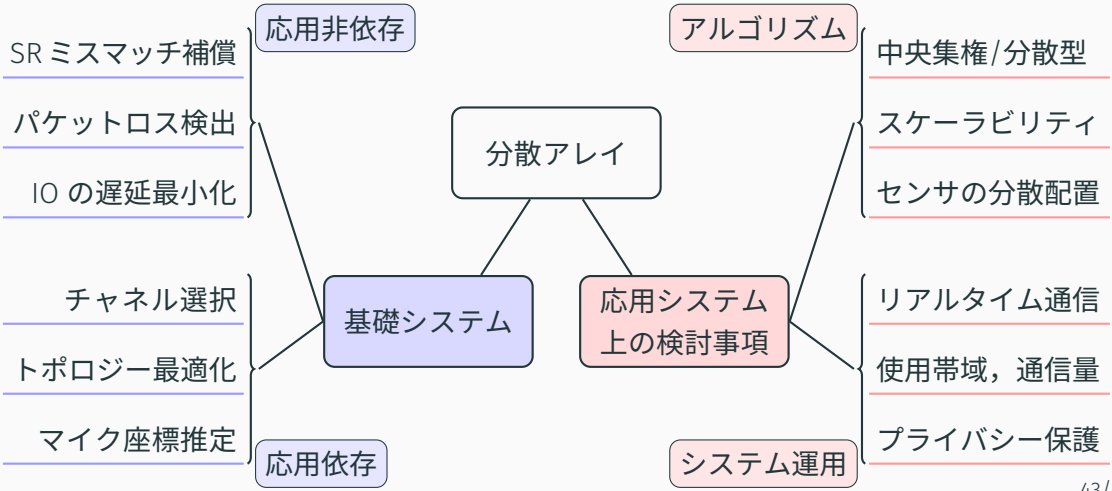
  - 若干の改善（ほぼ同じ）

ここまでのまとめ

- 分散マイクロフォンアレイにおける BSS
  - 複数の音源が混ざった信号から各音源を分離
  - 中央集権型 vs 分散型アルゴリズム
  - 分散型音源分離アルゴリズムを新たに提案
- 今後どうなるか
  - 独立低ランク行列分析やマルチチャネル非負値行列因子分解などへ展開中
  - まさに今研究中でどうなるかわからない

終わりに

分散アレイにおける研究トピック



まとめ

- 非同期分散マイクロフォンアレイ
  - 小型機器を空間的に分散配置，連携させることで広い空間におけるマイクロフォンアレイ信号処理を実現する枠組み
  - 従来の信号処理から通信，システム運用まで，幅広く，数多い課題が存在
- 近年の研究動向
  - 個々のタスクを対象に研究が進められている．いくつかは解決しつつある
  - IoT との関わりも深く，より一般のセンサネットワークも広く研究されている
  - グラフ理論との相性がよく，グラフニューラルネットワークも使われる
  - 分散アレイの「分散」という特徴を活かした研究が流行る予感
  - （音響信号処理全般に言えるが）日本はまだ存在感のある分野

今後の動向予想

- 分野横断的な研究の増加
  - 分散アレイ自体が分野横断的，実応用のためには幅広い視野が必要
- 深層学習との連携
  - 伝達関数自体の学習は困難
  - 一方で，トポロジー最適化など，学習が応用できる分野も多い
    （グラフニューラルネットワークとか）
- リアルタイム化を見据えたアルゴリズム設計
  - 従来のアレイ信号処理でも，従来のアルゴリズムのリアルタイム化が盛んに研究されている
  - 分散アレイを実環境で利用するためには，リアルタイム処理が必須