

# 位置と伝搬チャネルの能動的推論による 基地局間協調送受信

---

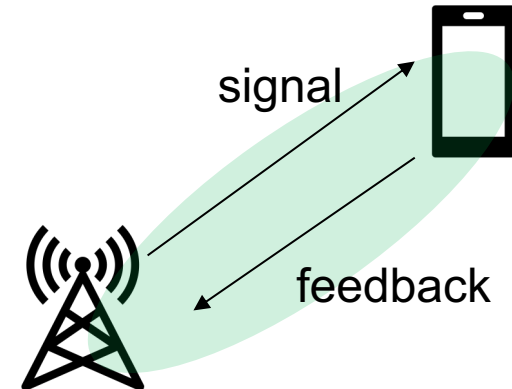
大歳達也<sup>†</sup>, 村田正幸<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>大阪大学大学院経済学研究科

<sup>‡</sup>大阪大学大学院情報科学研究科

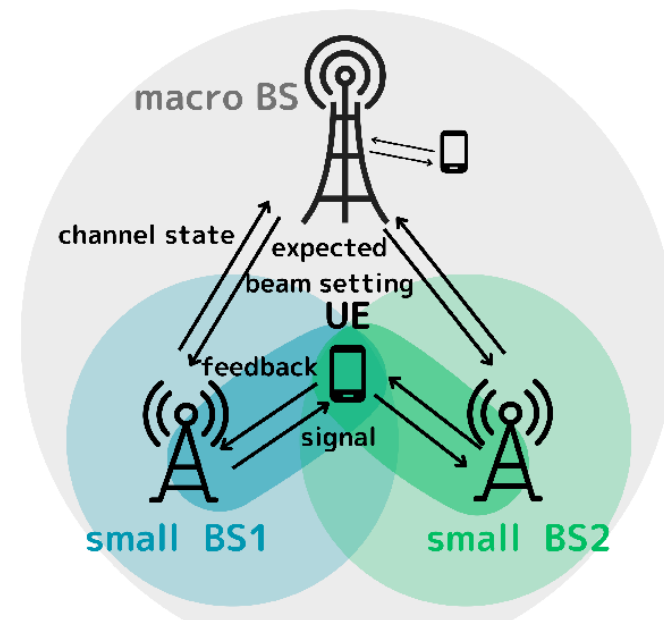
# Beamforming

- 基地局における多数のアンテナの有効利用
  - 一般的に、基地局は多くのアンテナを持ち、端末は少ないアンテナしか持たない
  - 端末側のアンテナが少ないため、MIMOのスループット利得を受けにくい。
  - 基地局側のアンテナ数を多くすることで、信号伝搬の指向性を高めることができる
- チャンネルの伝搬状態に応じた信号制御が必要
  - 基地局は端末からのフィードバックにより伝搬状態を推定
  - 伝搬状態に基づき、端末が受信した信号を増幅するように送信する信号を制御する。
- チャンネル状態の変動への対応が課題



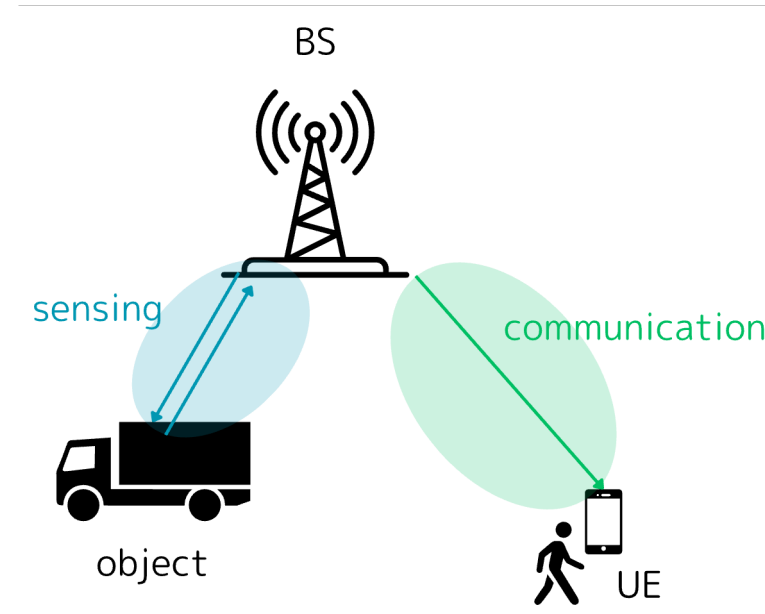
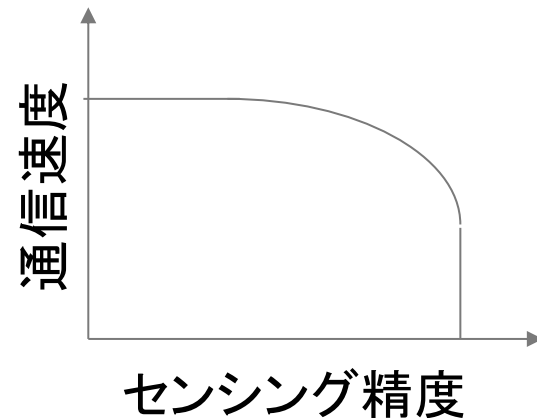
# 基地局連携ビームフォーミング

- 基地局間で協調してビームフォーミングを行うことで電波資源を効率的に利用
- 利用可能な情報の正確さによって適切な協調の方法が異なる
  - Joint Transmission:
    - 複数基地局から同信号を送り信号を増幅させる
    - 正確なチャネル情報が必要
  - Coordinated Beamforming:
    - 基地局同士が干渉を避けるようにビームフォーミングを行う
    - 正確なチャネル情報より大まかな位置が重要



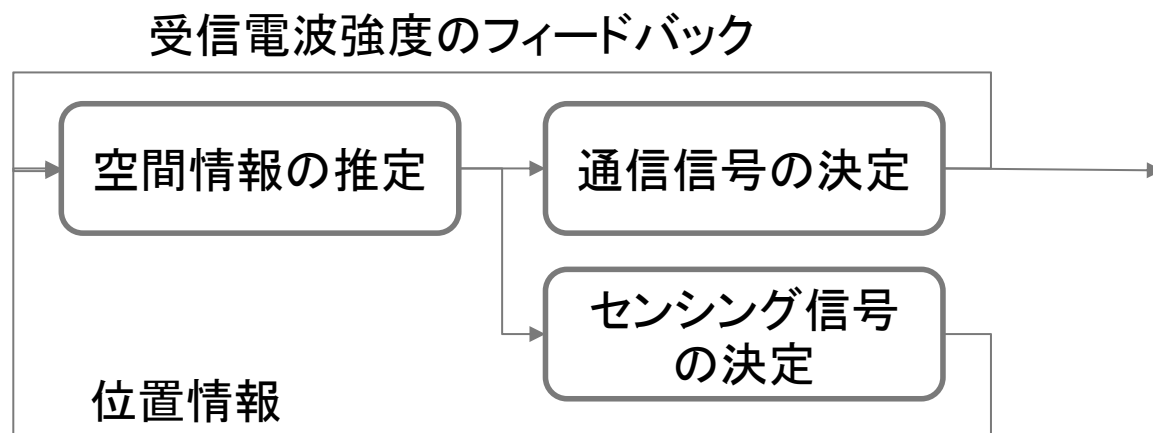
# Integrated Sensing and Communication(ISAC)

- 電波を用いた通信とセンシングの統合
  - 通信信号とセンシング信号を同時に送信
  - 信号分離によって通信とセンシングを同時に行う
    - 対象物で反射したセンシング信号を基地局で受信
    - 通信信号は通信端末が受信
- 信号の設計によってセンシングと通信の性能のトレードオフがある



# センシング情報の通信制御への利用

- 無線通信の制御では伝搬チャネル情報(CSI)が重要
- 通信信号を使った直接的なCSIの推定では通信オーバーヘッドが大きい
  - 端末・アンテナ毎の通信のフィードバック情報が必要
- 空間のセンシング情報をCSIの推定に利用することで通信オーバーヘッドを削減
  - CSIは空間上の電波の伝搬経路によって決まる
  - 端末の位置情報をCSIの推定に利用
  - 空間上の反射物の情報をCSIの推定に利用

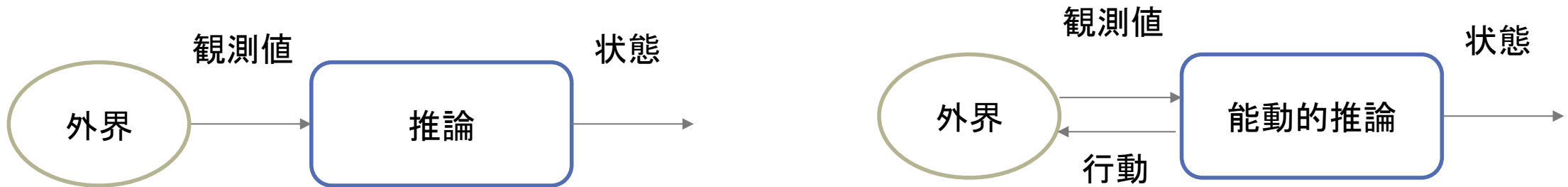


# 推定精度と制御性能のトレードオフ

- 変動する環境で正確に情報を把握するためには通信信号のリソースが犠牲となる
  - 環境の変化を把握するために測定用の信号にリソースを割り当てる
    - CSIフィードバックのための通信信号を増やす
    - センシングのための信号を増やす
  - 一定の精度は通信信号の最適化に必要であるがそれ以上は逆に通信性能の低下を招く
- 人は変動する環境の不確実性の中で精度と目的達成のトレードオフを常に解決している
  - 環境の変動時に不確実性を減らすために能動的に行動して情報を取得する
  - 安定した環境でも不確実性ゼロを目指さずにある程度情報が集まった時点で判断をする
- 人の能動的推論を応用することで推定精度と制御性能のトレードオフを解決

# 能動的推論

- 通常の推論は与えられた観測値のもとで「良い」状態を推定する
- 能動的推論では行動によって観測値を変えることも含めて「良い」状態を推定する
  - 例: テーブルの下に隠れているものの正体確かめるために、テーブルの下を覗く
  - 例: チャンネル状態を推定するために、様々なビームを切り替える
- 良さの基準として自由エネルギーを使う



# 自由エネルギー原理

- 脳の働きを統合的に記述する理論
  - 推論および行動を「自由エネルギー」の最小化として記述する
- 自由エネルギー
  - $F = D_{KL}[Q(s)|P(s|x)] - \log P(x)$ 
    - 第一項: 状態 $s$ の事後分布  $P(s|x)$  と近似分布  $Q(s)$  のカルバックライブラー情報量
    - 第二項: 観測値 $x$ に対するシャノンサプライズ
- 推論
  - 与えられた観測値 $x$ の元で事後分布 $p(s|x)$ を推定する
- 行動
  - 推論の精度に加えてシャノンサプライズが小さくなるような観測値 $x$ が得られる行動を選択する



# 推論

- 観測値 $\mathbf{x}$ 
  - 端末からの電波強度のフィードバック
  - 端末の位置情報

- 状態 $\mathbf{s}$ 
  - 伝搬チャネル情報

- 状態の推定

- $\frac{\partial F_\tau}{\partial q^f} = 0$

$$\implies Q^*(s_\tau^f) = \sigma \left( \mathbb{E}_{q^{i \setminus f}} [\ln P(\mathbf{o}_\tau | \mathbf{s}_\tau)] + \ln \left( \mathbb{E}_{P(s_{\tau-1}^f, u_{\tau-1}^f)} [P(s_\tau^f | s_{\tau-1}^f, u_{\tau-1}^f)] \right) \right)$$

# 行動

- 行動  $u$ 
  - ビームベクター  $w$
  - 送信電力  $p$
- ポリシー  $P(u_t|\pi)$ 
  - 行動の分布をポリシーとしてポリシーの推定により行動を決定する (control as inference)
  - 実際の行動は最も確率の高い行動を選択するものとする

## • ポリシーの推定

$$Q^*(\pi) = \operatorname{argmin}_{Q(\pi)} \mathcal{F}$$

$$\Rightarrow Q^*(\pi) = \sigma(-\mathbf{G}(\pi) + \ln P(\pi_0) - F(\pi))$$

観測値  $o$  に対する直接的な利得  
(観測値に対する選好)

$$\mathbf{G}(\pi) = \sum_{\tau} \mathbf{G}_{\tau}(\pi) \quad \mathbf{G}_{\tau}(\pi) \geq \underbrace{-\mathbb{E}_{Q(o_{\tau}|\pi)} [\mathbf{D}_{KL}[Q(s_{\tau}|o_{\tau}, \pi) \parallel Q(s_{\tau}|\pi)]]}_{\text{Epistemic Value}} - \underbrace{\mathbb{E}_{Q(o_{\tau}|\pi)} [\ln \tilde{P}(o_{\tau})]}_{\text{Utility}}$$

観測値  $o$  を得たことによる推定上の価値

# 選好分布

- 行動の決定において得られる観測値それ自体の良さを表す確率分布
  - 報酬関数や目的関数に対応する
  - 観測値の予測分布
    - サプライズ最小化 = 確率の高い観測値を得る = 選好の強い観測値を得る
- 目的関数
  - 伝送レート
- 目的関数を反映した選好分布
  - 負の伝送レートをエネルギーとしたボルツマン分布

$$\tilde{P}(o_t) \propto \exp(-\beta\epsilon) = \exp(\beta R(o_t))$$

# モデルの学習

## 観測モデル: A

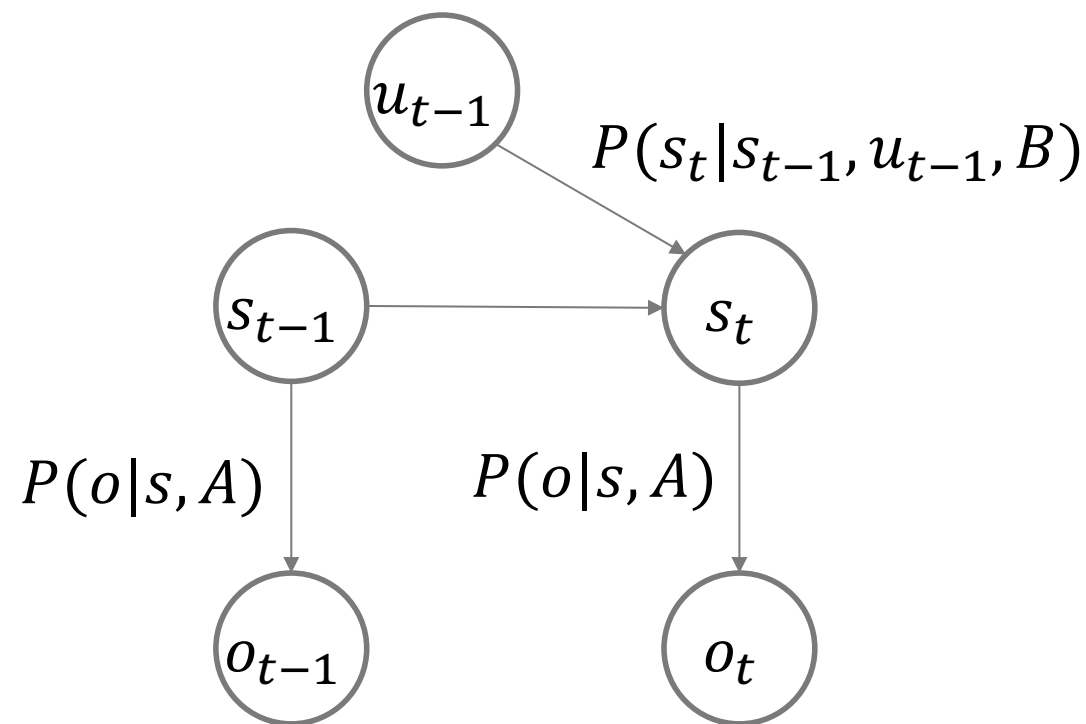
- 状態 $s$ と観測値 $o$ の関係を表す確率モデル
- 観測値から状態の推定や観測値の予測に用いる

$$\frac{\partial F}{\partial \ln A} \implies \mathbf{a}^* = a + \sum_{\tau=1}^T o_{\tau} \otimes \mathbf{s}_{\tau}$$

## 状態遷移モデル: B

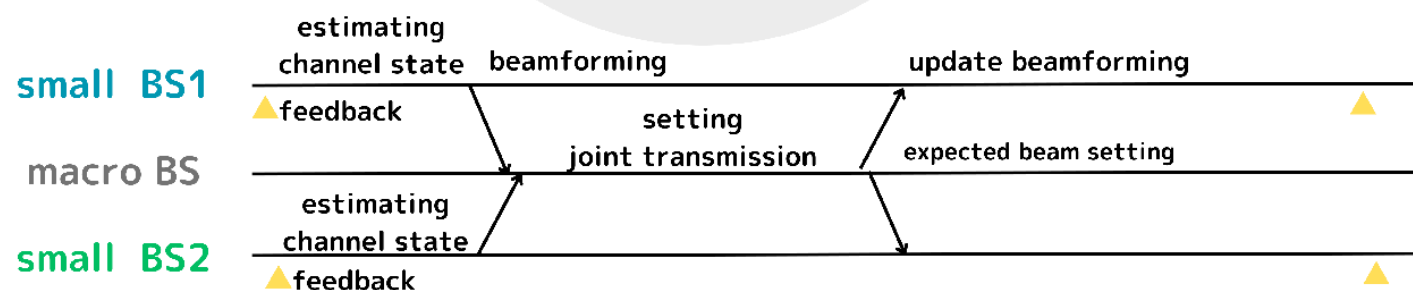
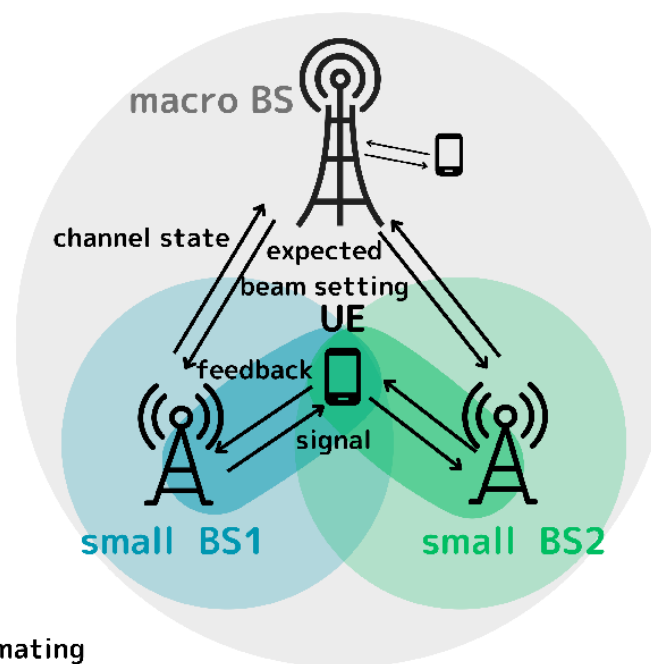
- 行動 $u$ による状態 $s$ の時間変化を表す確率モデル
- 行動の決定の際の状態の予測に用いる

$$\frac{\partial F}{\partial \ln B} \implies \mathbf{b}_u^* = b_u + \sum_{\tau=2}^T \sum_{\pi} Q(u_{\tau}|\pi)Q(\pi) (Q(s_{\tau}|\pi) \otimes Q(s_{\tau-1}|\pi))$$



# 基地局間の協調

- 基地局間で情報を交換することで協調動作を行う
  - CSI情報の共有、位置情報の共有
- 情報交換の方法
  - 上位基地局を介した共有
    - 上位基地局で情報を統合
    - 基地局間の調停を含めて下位基地局に情報伝達
    - 上位層に負荷が集中する可能性がある
  - 隣接基地局間での共有
    - 隣接基地局間で情報を交換
    - 各基地局が独自に判断を行う
    - 基地局間で制御が競合する可能性がある



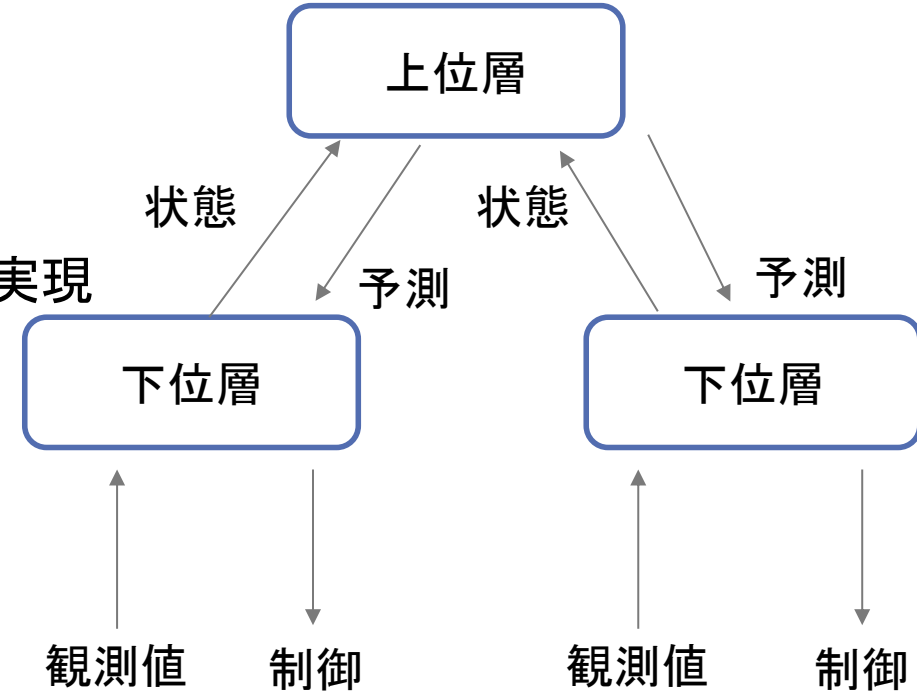
# 階層的なFEPエージェント間の協調

## • 上位層エージェント

- 各下位層の推論の結果としての状態を観測値とする
  - 状態の低次元化により上位層に集中する負荷を軽減可能
- 下位層の協調が実現した際の望ましい状況を予測して下位層にフィードバック

## • 下位層エージェント

- 実際の観測値から状態の推論を行い制御を決定する
- 上位層エージェントの予測を推論の事前分布とすることで協調を実現
  - 予測誤差最小化として推論、制御することで協調を実現



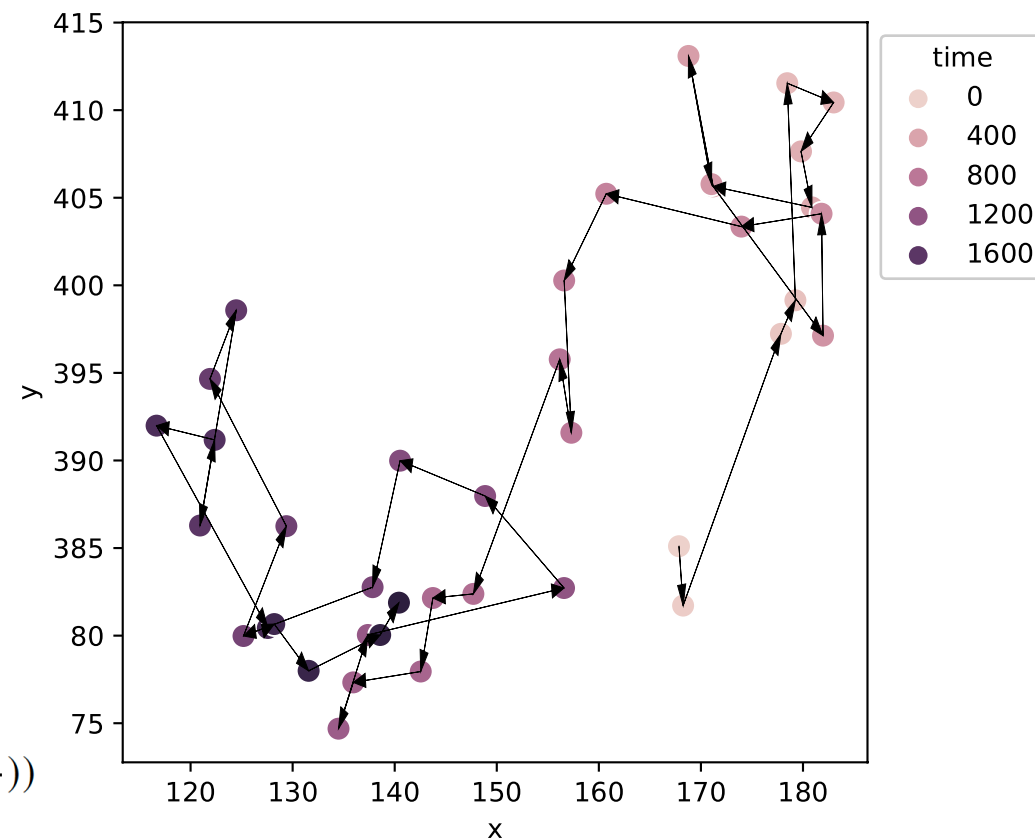
# シミュレーション環境

- 基地局
  - 2台
  - アンテナ4本
- チャネル係数
  - マルチパスフェージング
    - 4パス
    - 各パスは複素ガウス
- 端末
  - 1台
  - アンテナ1本
  - ランダムウォーク(右図)
- ビーム
  - 方向:4種
  - 電力:5段階

$$h_{ij} = \sqrt{\frac{\beta_{i,j}}{L}} \sum_l^L a_{i,j}^\dagger(\theta_l)$$

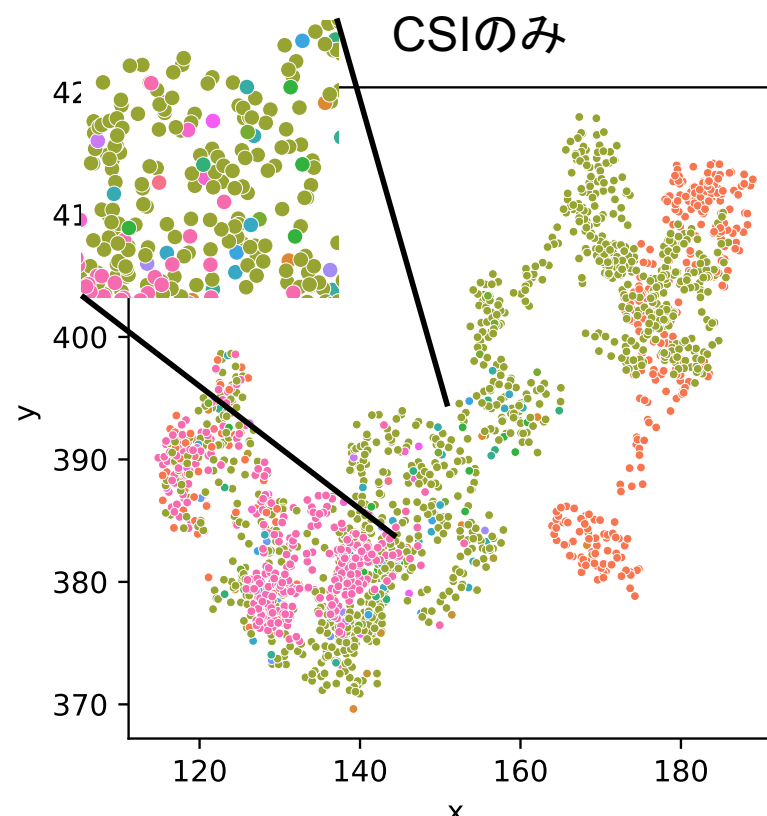
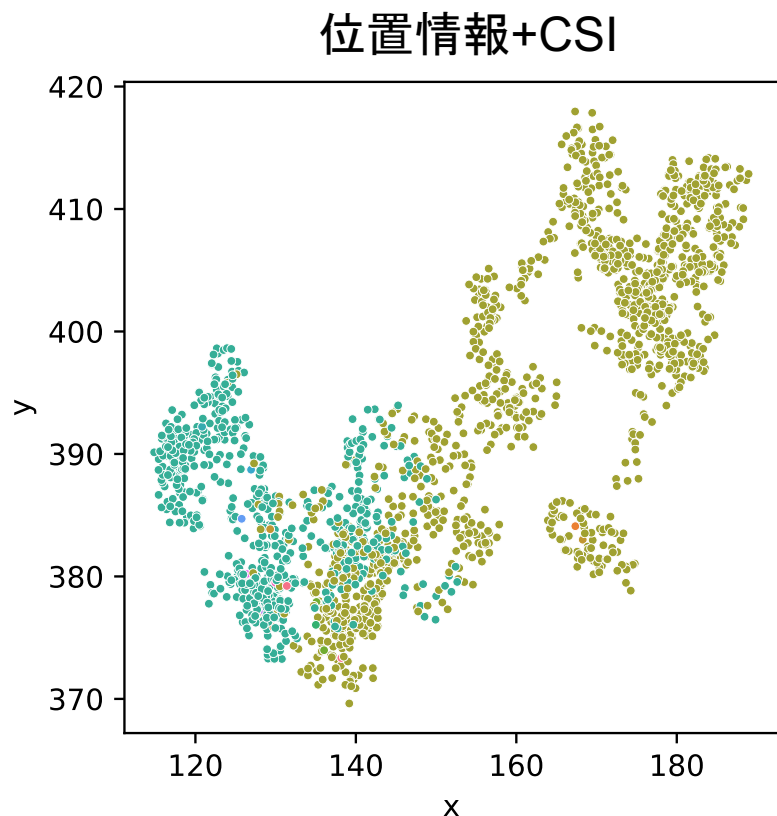
$$a_{i,j}(\theta_l) = \frac{1}{\sqrt{N}} (1, \exp(\pi i l \cdot 1 \cos \theta_l), \dots, \exp(\pi i l \cdot (N-1) \cos \theta_l))$$

$$\vec{w}_n = \left( \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(\frac{2\pi i(n-1)0}{N}\right), \dots, \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(\frac{2\pi i(n-1)(N-1)}{N}\right) \right)$$



# 端末の位置と選択されたビーム

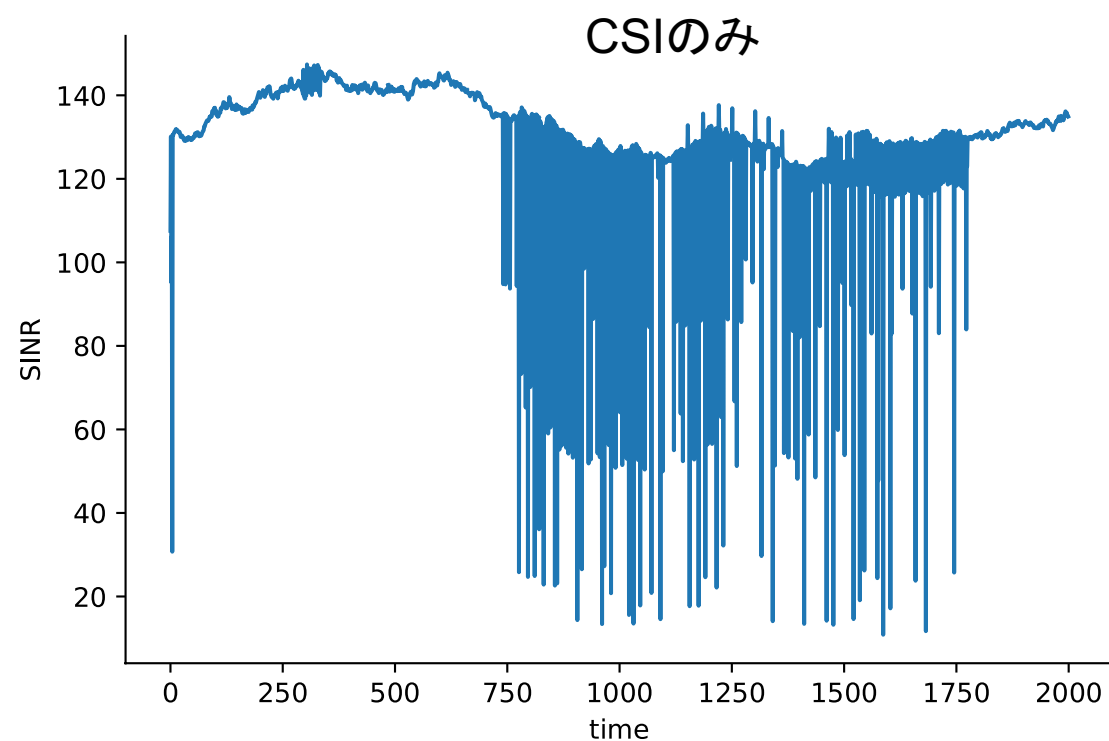
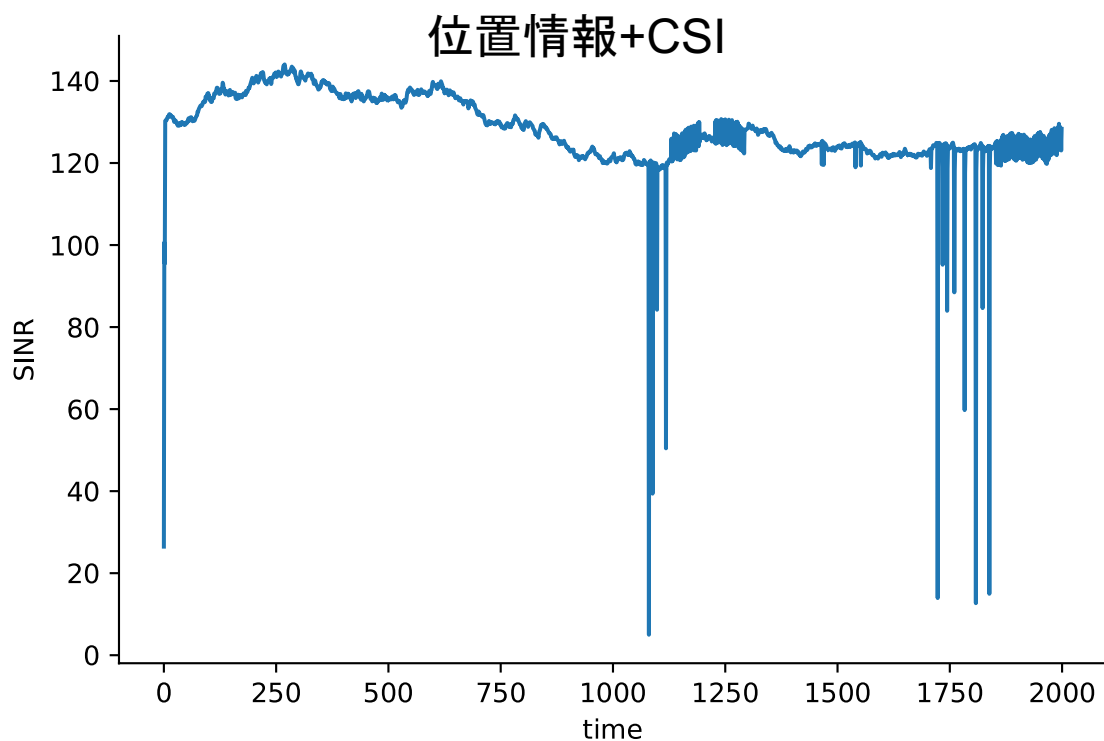
- 位置情報を併用した場合、ほぼ端末の位置に応じてビームが切り替わっている
- CSIのみの場合は、特に境界において探索的に様々なビームを細かく切り替えている
  - CSIから間接的に端末の移動を知る必要があるため、不確実性を下げるための探索が必要





# SINRの時間変化

- 位置情報を併用することでSINRが高い時間を維持できる
  - 取得可能な情報が増えたことで不要な探索が抑制される
  - CISのみの場合、状況の変化をトリガーとして内部モデルの不確実性を下げるための探索が頻繁に行われSINRの低下が増えている



# まとめと今後の課題

- まとめ

- 基地局境界のビームフォーミングにおいて位置センシングとCSIの情報を統合して利用
- 情報の取得と制御のトレードオフをFEPによって扱う
- 基地局間の連携は上位のFEPエージェントを介して予測誤差最小化として実現

- 今後の課題

- PRSなど通信を利用した位置情報の取得の考慮
- 上位を介さない高速な連携方法の検討
- 実際の利用シーンに近い環境での評価