 大阪大学

1

## Proposal and Evaluation of Wireless Signal Mapping and Navigation for Mobile Robotic Cellular Base Stations

大阪大学大学院 情報科学研究科 情報ネットワーク学専攻  
 先進ネットワークアーキテクチャ講座 (村田研究室)  
 33E23023 扶間 敦久  
 修士論文発表会 2025.2.7

1

### 研究背景

2


- **5G 技術を用いた移動通信システム**
  - 法令上、基地局は固定であることが原則
- **移動型の基地局による様々な活用形態**
  - 情報および情報交換が必要な時・場所が限定される場合
    - 例：山間地や離島などの非生活圏で、商用系セルラーネットワークが展開されていない場所
    - 例：トンネルや高層ビルでの建設土木工事現場
  - 固定型の基地局が設計時に前提としていた環境条件が変わって通信ができない場合
    - 例：地震などの災害時に 固定基地局が使用不能になった場合
    - 例：花火大会や野外フェスなどで多くの人が密集し通信環境が劣化している場合
- **小型の移動基地局の重要性**
  - 人の密集や障害物の発生により通信品質が劣化する場合、大型の移動基地局では対応が困難
    - 複数の端末の電波環境をセンシングし、最適な位置へ移動基地局を移動させることが必要
  - 現在の基地局設備は 20 kg 以上の機材で動作するため、市販の移動体へ搭載するためには軽量化が必要

2

### 研究目的・研究手順

3

- **研究目的**
  - 移動基地局の移動制御により、5G 環境において偏りのない通信品質を提供
- **研究手順**
  - 小型 5G 移動基地局の製作とそれを利用した電波環境センシングに基づく移動制御実験
    - 5G通信技術を用いた小型5G移動基地局の製作
    - 電波環境センシングによる1次元電波マップの作成
    - 1次元電波マップに基づいた移動基地局の移動制御により通信品質が改善されるかを評価
  - **移動基地局のための無線信号マッピングおよび移動制御シミュレーション**
    - Bayesian Compressive Sensing (BCS) を活用した無線信号推定
    - Superimposed Signal Map (SSM) の構築
    - SSMに基づく移動制御の実現



製作した移動基地局

3

### 移動基地局における課題

4

- **リアルタイム適応の必要性**
  - 電波環境は常に激しく変化
    - 例：端末の位置の変化、人の密集による電波干渉、障害物による電波減衰
  - 安定した通信品質を維持するため、継続的な電波環境の把握が必要
  - 全エリアを直接観測しては変化に対応できない
- **解決策**
  - リアルタイムでの電波環境推定
  - 限られた観測データからの動的な信号マップ構築
  - 変化する環境に応じた移動基地局の移動制御

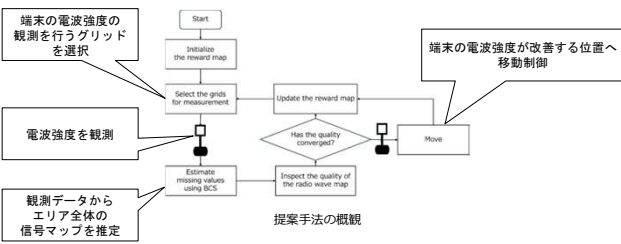
4

### 提案手法

5

- **無線信号推定による移動基地局の電波マッピングと移動制御**

提案手法の概観



5

### 無線信号推定手法

6

- Bayesian Compressive Sensing (BCS)[11] を活用し、限られた観測値から電波環境を推定

元信号と推定値の差分

$$p(\Delta x_t, \alpha, \beta | \Delta y_t) = p(\Delta x_t | \alpha, \beta, \Delta y_t) p(\alpha, \beta | \Delta y_t)$$

事後平均  $\mu$  と 共分散  $\Sigma$  を算出

Bayes' Theorem

Type-II Maximum Likelihood を適用

元信号と推定値の差分

Uncertainty (不確実性) を算出

[11] S. He and K. G. Shin, "Steering crowdsourced signal map construction via bayesian compressive sensing," in Proceedings of IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications, Apr. 2018, pp. 1016–1024.

6

### Superimposed Signal Map (SSM)

- 移動基地局に対する全端末の電波品質を、移動基地局の位置ごとに取得し地図に投影したもの
  - 移動基地局が各位置で複数の端末の電波強度を取得
  - 取得された電波強度の平均値を各座標にマッピング

Coordinates of Mobile Base Station  
Superimposed Signal Map の概念図

7

### Superimposed Signal Map (SSM) の構築

- SSM 構築手順
  - 電波強度の観測を行うグリッドを決定
  - 決定したグリッドに対し観測を行い各座標に電波強度の平均を記録
  - グリッド間の電波強度の相関性を表す相関行列を計算
    - $\Phi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m, \dots, \psi_M]^T$
    - 距離と信号強度の相関性により定義
  - BCS によりエリア全体の SSM を推定

計測前      計測の実行  
 相関行列を計算      BCS による SSM 推定

注:  $\psi$ : Correlation Coefficient  
 グリッド間の相関性を計算      BCS による SSM 推定

8

### 観測を行うグリッドの決定

- Uncertainty (不確実性) に基づいた報酬マップを構築
  - Uncertainty が大きく移動基地局からの距離が小さい地点に高い報酬を設定
- Uncertainty の高い地点を優先的に選択することで観測回数を削減

Uncertainty の大きい地点を観測      観測した地点の Uncertainty が減少

Uncertainty マップ (観測前)      Uncertainty マップ (観測後)

9

### 観測終了条件と移動先の決定

- 観測終了条件
  - 以下のいずれかを満たすと観測のループを終了し、移動基地局が最終的な移動先を決定
    - エリア全体の不確実性の平均値がある閾値以下になった場合
    - 最大観測時間を超過した場合
- 移動基地局の移動先の決定
  - SSM において、端末の受信電波強度が最大となる地点へ移動基地局を移動制御

提案手法

10

### シミュレーション環境

- 大阪大学大学院情報科学研究科棟屋外を想定
  - 建物 (障害物) が複数存在
- 環境サイズ
  - 100m × 100m = 10,000 m<sup>2</sup>
- グリッドの設定
  - 1グリッド: 5m × 5m = 25 m<sup>2</sup>
  - エリア全体を計 400 個のグリッドに分割

シミュレーション環境 (3D)      シミュレーション環境 (2D)

11

### 電波データの生成

- 電波シミュレータを使用
  - 電波シミュレータ: Wireless InSite
- 基地局が各グリッド中央に存在する場合の端末の RSRP の平均値を取得
  - 送信電波強度: 36.6 dBm
  - 端末の台数: 2台、3台
  - 建物が存在する領域に関しては除外
    - 計283個のグリッドにおいてデータを生成
  - 電波が接続されない端末に関しては -250 dBm に設定

シミュレーション環境 (2D)

端末の位置

電波強度の平均値が最大となる地点

生成された電波データ (端末2台)

12

## 評価方法

13

### ● 評価方法

- 移動基地局の移動制御前後での各端末のRSRPを比較
  - 移動制御前後で端末の電波品質が改善されるかを確認
- 以下を比較し結果を分析
  - 真値のSSM
  - 推定されたSSM
- MATLAB上で実行
- 端末が2台の場合と3台の場合でシミュレーションを実行
  - 2台の場合の結果について説明

13

## シミュレーション結果1

14

### ● RSRP

- 移動制御により、端末1,2ともにRSRPが向上
- 端末1, 2の平均RSRPは約110 dBm向上

移動制御前後における端末のRSRP (端末2台)

端末	RSRP [dBm]	
	移動制御前	移動制御後
端末1	-84.375	-58.050
端末2	-250.000	-54.871
端末1,2の平均値	-167.188	-56.461
端末1,2の平均値の向上	110.727	

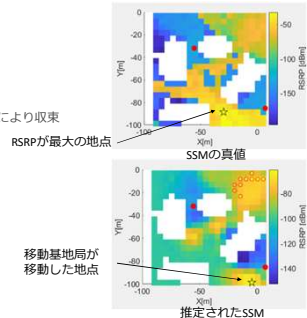
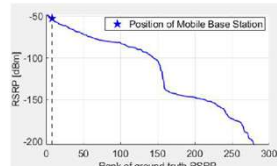
14

## シミュレーション結果2

15

### ● SSM推定結果

- 推定されたSSMにおけるRSRPの最大地点が真値のSSMにおける最大地点と近い距離に位置
  - 7グリッド以内の距離に位置
  - 真値の中でもRSRPが上位の地点に移動
- 全グリッドのうち24.7%のグリッドにおける観測により収束



15

## まとめ

16

### ● SSM構築による移動基地局の移動制御手法を提案

- BCSを活用した電波推定
- Superimposed Signal Map (SSM)の構築
- SSMに基づく移動制御の実現

### ● 評価シミュレーションを行うことにより手法の有効性を確認

- 不確実性に応じた電波計測により、SSMを構築
- 端末の電波強度が向上する地点を推定可能であることを確認 (端末が3台の場合も同様の結果を取得)

### ● 今後の課題

- 提案手法を実環境において実験を行い有効性を確認
- 環境センサーデータを活用し、より動的で高精度なSSM構築を目指す

16