

能動的推論によるセンシングと通信の統合型ビームフォーミング制御

大歳達也[†]

[†] 大阪大学 経済学研究科
大阪府豊中市待兼山町 1 - 7
E-mail: †-otoshi@econ.osaka-u.ac.jp

あらまし 本報告では、Integrated Sensing and Communication (ISAC) 環境下におけるビームフォーミング技術について検討した。ISAC は、通信とセンシングの統合により、スペクトル効率の向上、ハードウェアコストの削減、遅延の低減を実現する技術である。しかし、通信とセンシングが同じリソースを共有するため、リソース配分にはトレードオフが存在し、この課題に対する解決策が必要である。本報告では、能動推論と自由エネルギー原理に基づく新しいアプローチを提案する。能動推論により、観測データを用いて環境状態を推定し、予測と観測の誤差を最小化することで、通信性能を最大化しながら未知の情報を効率的に探索する手法を構築した。さらに、階層的コードブックを利用したビームフォーミング技術を導入し、段階的な探索によりフィードバック負荷を削減しつつ、通信品質を維持可能であることを示した。また、基地局間の協調による情報交換において、上位層と下位層エージェントの協調的な運用が、動的な環境変化に迅速に対応するために有効であることを示した。さらに、位置情報を活用したビームフォーミング手法により、チャンネル状態情報の推定精度を向上させ、動的な環境下でも通信性能を向上させる可能性を示唆した。

キーワード Integrated Sensing and Communication, 能動的推論, 位置推定, 伝搬チャンネル推定, 基地局間協調送受信

Beamforming by Active Inference in Integrated Sensing and Communication

Tatsuya OTOSHI[†]

[†] Graduate School of Economics, Osaka University
1-7 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan
E-mail: †-otoshi@econ.osaka-u.ac.jp

Abstract Beamforming techniques in an Integrated Sensing and Communication (ISAC) environment are considered in this report. ISAC is a technology that integrates communication and sensing to improve spectral efficiency, reduce hardware costs and reduce delay. ISAC is a technology that integrates communications and sensing to improve spectral efficiency, reduce hardware costs and reduce delay. However, as communication and sensing share the same resources, there is a trade-off in resource allocation and a solution to this challenge is needed. In this paper, a new approach based on active inference and the free energy principle is proposed. Active inference is used to estimate the state of the environment using observed data and minimise the error between prediction and observation, thereby establishing an efficient method to search for unknown information while maximising communication performance. Furthermore, a beamforming technique using a hierarchical codebook was introduced, and it was shown that the communication quality can be maintained while reducing the feedback load through step-by-step search. In addition, the co-operative operation of upper and lower layer agents in the exchange of information through co-operation between base stations is shown to be effective in quickly responding to dynamic changes in the environment. Furthermore, it was suggested that a location-based beamforming technique could improve the accuracy of channel state information estimation and enhance communication performance in a dynamic environment.

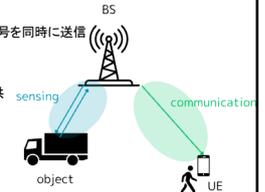
Key words Integrated Sensing and Communication, Active Inference, Position Estimation, Propagation Channel Estimation, Coordinated Multi-Point

目次

- Integrated Sensing and Communication環境下におけるビームフォーミング
- 自由エネルギー原理に基づく能動推論
- 能動推論を用いたビームフォーミング
 - 階層的コードブックの利用
 - 基地局間協調
 - 端末の位置情報を利用したビームフォーミング

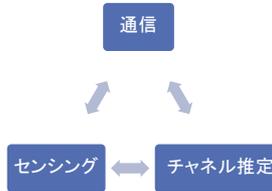
Integrated Sensing and Communication (ISAC)

- 通信とセンシングの統合**
 - 通信とセンシングの機能を同時に実現
 - スペクトル効率の向上、ハードウェアコスト削減、遅延の低減
- 通信信号とセンシング信号の同時送信**
 - 通信端末向けの通信信号と、対象物検出のセンシング信号を同時に送信
- 信号分離で同時動作**
 - センシング信号: 対象物からの反射を基地局で受信
 - 通信信号: 通信端末で受信し、通常の通信サービスを提供



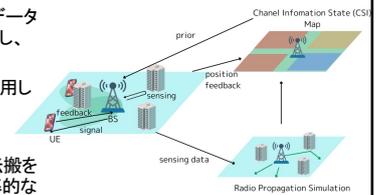
トレードオフ下でのリソース配分の課題

- トレードオフ**
 - チャネル推定、通信、センシングの3つは同じリソース(周波数、時間、電力など)を共有するため、リソース配分にトレードオフが発生
- 既存のアプローチ**
 - 通信 vs チャネル推定
 - 計測用の信号を送るタイミングを静的に決めてしまう
 - センシング vs 通信+チャネル推定
 - 他方に影響ない範囲で利用
 - それぞれ独立した要求として要求を満たすように配分
- 課題**
 - それぞれの相関を考慮した配分が必要
 - チャネル推定の精度は通信制度に影響する
 - センシング情報は通信・チャネル推定に活用しうる



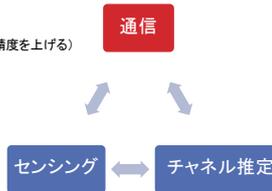
センシングと通信を統合したビームフォーミング

- CSIマップ作成**
 - 位置情報とセンシングデータを基にCSIマップを作成し、チャネル特性を予測
 - 過去の推定結果を再利用し効率化
- 電波伝搬シミュレーション**
 - デジタルツインで電波伝搬をシミュレーションし、効率的なビームフォーミングを実行



探索と活用のトレードオフ

- 目的の統合**
 - センシング・チャネル推定を通信性能の最大化に活用するという観点で全体最適化
- 探索と活用のトレードオフ**
 - 探索: 未知の情報を知る(センシング・チャネル推定の精度を上げる)
 - 活用: 既知の情報をもとに通信性能を向上させる
- 適応的なリソース制御が必要**
 - 状況に応じて探索と活用のバランスを動的に調整
 - 変動時は探索に重点を置き、安定時は活用を優先
 - ヒューリスティック法などのアドホックな探索では不十分



能動的推論

- 能動推論とは**
 - 能動推論は、エージェントが環境と相互作用しながら自身の信念を更新し、行動を選択する理論的枠組み
- ベイズ推論による意思決定**
 - エージェントは、環境からの観測データをもとにベイズ推論を行い、最も確からしい状態を推定
 - 状態推定に基づき、将来の不確実性を最小化する行動を選択
- 探索と活用のバランス**
 - 環境の理解を深めるための「探索」と、既存の知識を利用した「活用」のバランスを取る
- 応用例**
 - 自動運転車のナビゲーション、ロボットの意思決定、脳の認知プロセスのモデル化



自由エネルギー原理

自由エネルギー原理とは

- 自由エネルギー原理は、エージェントが環境と相互作用しながら予測と観測の誤差（自由エネルギー）を最小化することで生存や適応を達成する理論的枠組み
- 予測と観測の誤差の最小化
 - エージェントは環境をモデル化し、観測されたデータと予測されたデータの差を最小化することで、より正確な世界の理解を得る
- 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ブプライズ

推論

推論の役割

- 自由エネルギー原理に基づく推論は、エージェントが観測データに基づいて環境の状態を推定

ベイズ推論による状態推定

- エージェントはベイズ推論を用いて、環境の隠れた状態を確率的に推定
- 観測されたデータに基づき、内部モデルを更新し、最も可能性の高い状態を選択

自由エネルギーの最小化

- 推論の目的は自由エネルギーを最小化するような状態の事後分布を得ること
- 観測(尤度)と予測(事前確率)の間の誤差を減らす

$$\frac{\partial F}{\partial q} = 0$$

$$\Rightarrow Q^*(s_t^i) = \sigma \left(\mathbb{E}_{p(s_t^i)} [\ln P(o_t | s_t)] + \ln \left(\mathbb{E}_{P(s_t^i, u_{t-1}^i)} [P(s_t^i | s_{t-1}^i, u_{t-1}^i)] \right) \right)$$

推論としての行動選択

行動の役割

- 自由エネルギー原理に基づく行動は、エージェントが現在の状態に基づいて行動のポリシーを決定
- ポリシー: 一連の行動を表す
- 自由エネルギーの最小化
 - ポリシーを変数として自由エネルギーの最小化
 - 観測値を得ることによる状態の誤差の低下と期待される観測値を得る確率(選好事前分布)の最大化

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

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

観測値oに対する直接的な利得
(観測値に対する選好)

$$G(\pi) = \sum_{\tau} G_{\tau}(\pi) \quad G_{\tau}(\pi) \geq -\mathbb{E}_{Q(o_{\tau}|\pi)} [D_{KL}[Q(s_{\tau}|o_{\tau}, \pi) \| Q(s_{\tau}|\pi)]] - \mathbb{E}_{Q(o_{\tau}|\pi)} [\ln P(o_{\tau})]$$

観測値oを得たことによる推定上の価値

階層的コードブック

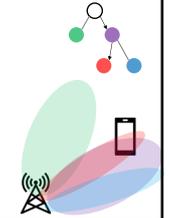
- 伝搬状態の推定はアンテナ数が増えるほど困難

- アンテナ数が増えるほど必要なフィードバックの数が増える
- 測定のための信号送信によるオーバーヘッドの増加→スループットの低下

階層コードブックによるビーム探索

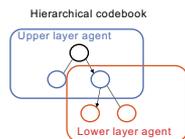
- あらかじめ候補ビームをコードブックとして用意
- 空間的に荒いビームから細かいビームへと階層的なコードブックを構築
- 探索範囲を限定することでフィードバック信号を削減

- 伝搬条件が変化した場合に探索をやり直す必要がある



FEPによる階層コードブック探索

- 階層コードブックの各レベルにおけるFEPエージェント
 - 能動的推論により各レベルでビームを決定
- 上層と下層のエージェント間で情報を共有し、協調的な運用を実現
 - 小さな変化は下位レイヤーが処理
 - 下位レイヤーで対応できない場合は上層レイヤーに切り替える



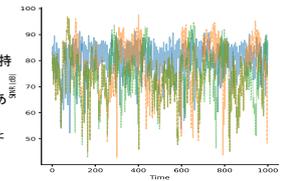
通信性能の評価

手法

- FEPベースのBF
- BT: ビームトレーニングを定期的に行う
- fixBT: ビームトレーニング

結果

- FEPベースのBFは安定した高SNRを維持
 - 環境の時間変化に対して適応的に制御
- BTとfixBTは一時的に低SNRの期間がある
 - 環境変動に適したビーム選択ができなかったため



ビームフォーミングにおける位置情報の利用

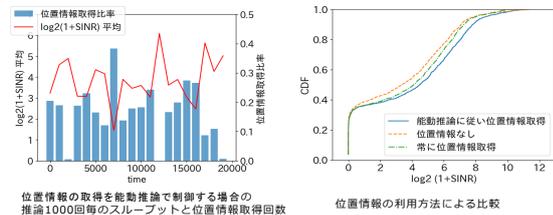
- ・ **位置情報を利用したビームフォーミング**
 - ・ チャネル状態情報は基地局と端末の位置関係に大きく依存
 - ・ より正確なチャネル状態情報の推測が期待
- ・ **PRS (Position Reference Signal) による位置情報取得**
 - ・ 基地局と端末間で PRS を送受信し、位置情報を測定
 - ・ 基地局と端末間で完結するため、屋内含め場所を問わずに利用可能
 - ・ PRS の送受信に通信リソースを使用
 - ・ 位置情報の取得時にスループットが低下する課題

エージェントの設計

- ・ 基地局が観測する情報
 - ・ SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio)
 - ・ 位置情報を取得する際はスループットが伝送レートの最悪 13/14 に低下
 - ・ PRS の送受信に OFDM サブキャリアの14個のシンボルのうち1つを使用
 - ・ シミュレーションでは SINR を補正
 - ・ **位置情報**
 - ・ 基地局が位置情報の取得を決定した際に基地局から見たモバイル端末の距離・角度を観測
 - ・ 位置情報を取得しない際は最後に観測した位置情報を観測
- ・ 基地局が**能動推論**により決定する行動
 - ・ ビームの形状を電力と位相の組で指定
 - ・ **位置情報の取得の有無**を決定

実行結果 (歩行者想定)

- ・ SINR の低下に応じて位置情報を取得することで、ビームフォーミングの性能を上げながらも位置情報取得コストを抑制

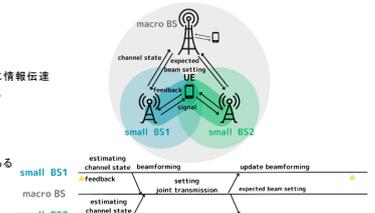


基地局間の協調

- ・ 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

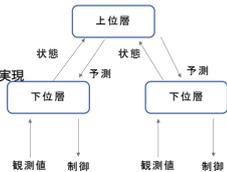
情報交換の方法

- ・ **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



通信性能の評価

- ・ 上位レイヤーを介した情報交換により、適切なビームが迅速に選択される
- ・ 上位レイヤーのエージェントがいないと、収束するまでに何度も大きなSINRの低下が起こる

