

HAR 不確実度に基づく BLE 広告間隔の適応制御に関する研究

萩原 圭島 (指導教員：木村 秀明)

中部大学大学院 工学研究科 情報工学専攻

1. はじめに

ウェアラブル等のエッジ端末における行動認識 (Human Activity Recognition; HAR) では、推論と通信が電力消費を支配しやすい. Bluetooth Low Energy (BLE) 広告とは簡便なブロードキャスト手段である一方、スマートフォン受信 (スキャン) が非理想であるため、固定広告間隔では遅延分布の裾が悪化し得る [1][2]. 本研究は、HAR の不確実度に応じて BLE 広告間隔を適応させ、期限超過率 $P_{\text{out}}(\tau)$ を満たしつつ送信側消費を抑えることを目的とする.

固定間隔を短くすると平均消費が増え、長くすると発見遅延が増えるため、単純な固定設定では省電力と QoS の両立が難しい．そこで本研究では、QoS 制約を $P_{\text{out}}(\tau) \leq \epsilon$ (本稿では $\tau = 1 \text{ s}$, $\epsilon = 0.1$) で表し、これを満たしつつ送信イベント当たり電荷 q_{event} ($\mu\text{C}/\text{event}$) を小さくする設計問題として扱う．

本研究の貢献は、(i) HAR 不確実度から広告間隔を切り替えるルールベース制御（最小構成として 2 値切替）を実装し、(ii) TX/TXSD/RX の三ノード計測により電力と QoS を同一試行で比較できる評価系を整備し、(iii) 実機において固定間隔より良い運用点が存在することを確認した点である。

2. 提案手法

不確実度の指標にはエントロピー等が知られるが、実装上は計算量や確率の校正 (calibration) の影響が重要である。本研究では HAR モデルの出力確信度と時系列安定度から通信信頼度指標 CCS (Communication Confidence Score) を構成する。CCS に基づいて広告間隔を切り替え、本アプストでは実装の最小構成として 100 ms と 500 ms の 2 値切替方策を扱う。CCS が低い (遷移・不確実) 区間では短間隔へ寄せて QoS を守り、それ以外は長間隔へ寄せて平均消費を下げる。評価指標は、送信イベント当たり電荷 q_{event} (pC/event) と遅延指標 TL および期限超過率 $P_{\text{out}}(\tau)$ とし、平均電力は補助的に用いる。

2.1 CCS と 2 値切替

CCS は、モデル出力の確信度と、推定ラベルの時間的一貫性（安定度）を合成して定義する．具体例として、確信度と安定度の加重和を用い、閾値とヒステリシスによ

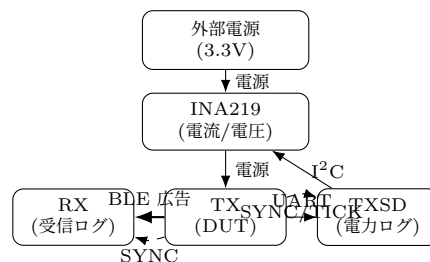


図 1 計測系の信号関係 (簡易)

り状態 (ACTIVE/QUIET 等) を切り替える。これにより、遷移が多い区間ほど短間隔に滞在し、定常区間は長間隔に滞在する設計とする。

切替が閾値のみに依存すると振動し得るため、ヒステリシスに加えて最小滞在時間を設ける。さらに、受信側の QoS 悪化が観測された場合は強制的に短間隔へ退避するフェイルセーフを導入し、制約違反を抑制する。

3. 実験

計測は TX (DUT), TXSD (電力ログ), RX (受信ログ) の三ノード構成とし, 同期信号で試行区間を揃える. TXSD は電流・電圧をログ化し, 試行ごとに総エネルギーと平均電力を算出する. RX は受信時刻とタグを記録し, truth (100 ms 格子) と定数オフセットで時間同期した上で, 遷移に対する TL と $P_{out}(\tau)$ を算出する.

scan90 (scan duty 90%) で S1/S4 の 2 条件について固定 100 ms, 固定 500 ms, 方策を比較した (各条件 $n = 6$). さらに, 受信条件悪化として scan70 (scan duty 70%) を設定し, S4 で同様の比較を行った (各条件 $n = 3$). 加えて, 制御入力¹の寄与を切り分けるため, U-shuffle (不確実度 U の時間整合を破壊) および CCS-off (U のみ) のアブレーションを scan90/S4 で実施した (各条件 $n = 3$).

4. 結果

図 2 に、固定 100 ms / 固定 500 ms と方策の関係を、scan90/scan70 およびアブレーションを含めて示す（横軸：平均電力、縦軸： $P_{out}(1s)$ ）。

scan90 の D2b (S1/S4, 各条件 $n = 6$) では, 方策は固定 100 ms より 7.9 mW to 12.6 mW 低電力であり, 固定 500 ms より低い $P_{\text{out}}(1\text{s})$ を示す運用点になり得た (例: S4 で固定 500 が 0.146 に対し方策は 0.069).

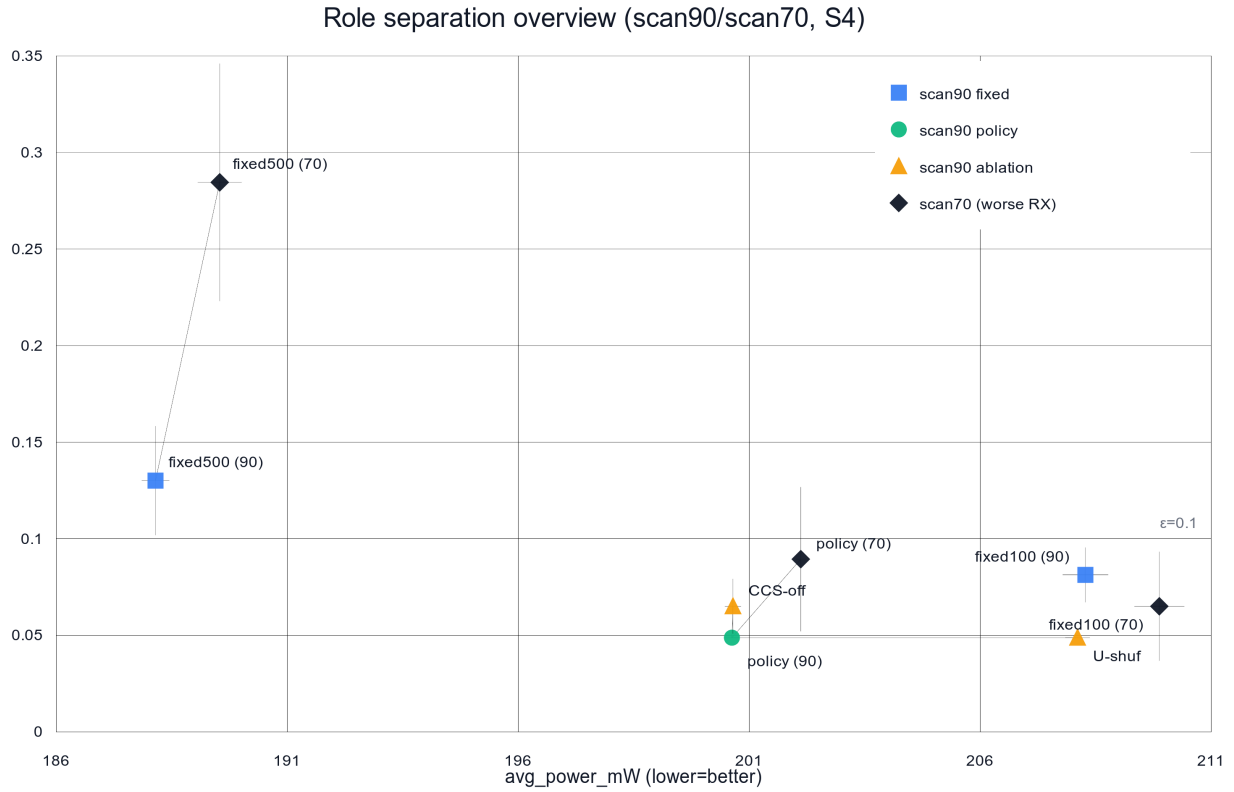


図 2 固定・方策・アブレーション (S4, scan90/70) の power- $P_{\text{out}}(1\text{s})$ 俯瞰. scan70 では固定 500 ms が制約 ($P_{\text{out}}(1\text{s}) \leq 0.1$) を満たさない一方, 方策は制約を満たし固定 100 ms より低電力となる. 矢印は U/CCS の寄与を示す.

受信条件を悪化させた scan70 の D3 (S4, 各条件 $n = 3$) では, 固定 500 ms が $P_{\text{out}}(1\text{s}) = 0.285 \pm 0.061$ と大きく悪化した一方, 方策は 0.089 ± 0.037 に抑え, 固定 100 ms ($209.9 \pm 0.5\text{ mW}$) より低い平均電力 ($202.1 \pm 0.1\text{ mW}$) で $\epsilon = 0.1$ を満たした.

5. 考察

U-shuffle (D4, scan90/S4) では短間隔への張り付きが増加し, 平均電力が固定 100 ms 近傍まで戻ったことから, 不確実度 U の時間整合が短間隔滞在量 (電力) を規定することが示唆される. 一方で CCS-off (D4B, scan90/S4) では, 平均電力がほぼ同一のまま $P_{\text{out}}(1\text{s})$ が悪化したことから, CCS は短間隔滞在量ではなく「短間隔を使うタイミング」により QoS を改善すると解釈できる.

固定条件の平均電力を P_{100}, P_{500} とすると, 方策の短間隔滞在比率 $\hat{\rho}_{100}$ は平均電力 P から

$$\hat{\rho}_{100} = \frac{P - P_{500}}{P_{100} - P_{500}}$$

と推定できる. この推定により, 省電力効果の支配要因を「sleep 設定」ではなく「短間隔滞在量」に帰着でき, 制御則設計や学習 (Bandit) への拡張時の目的関数設計

にも接続できる.

6. まとめ

HAR 不確実度に基づく 2 値広告間隔制御が, 固定間隔の中間的電力で QoS 制約 $P_{\text{out}}(\tau) \leq \epsilon$ を満たす運用点になり得ることを実機で示した. さらに, U と CCS のアブレーションにより, U は短間隔滞在量 (電力), CCS は同電力での QoS 改善を担うことを示唆した. 今後は, 広告間隔候補の多段化と, 制約下で広告間隔を選択する Safe Contextual Bandit へ展開する [3].

文献

- [1] *Bluetooth Core Specification*. Bluetooth SIG. <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification/>.
- [2] *BluetoothLeScanner*. Android Developers. <https://developer.android.com/reference/android/bluetooth/le/BluetoothLeScanner>.
- [3] Tor Lattimore and Csaba Szepesvári. *Bandit Algorithms*. Cambridge University Press, 2020.