

電子ペーパーサイネージにおける 人の移動を通信媒介とした情報配達手法の提案

秋葉 貴文^{1,a)} 湯村 翼^{1,b)}

概要：

通信インフラが不安定な環境では、電子ペーパーサイネージを遠隔で更新することが困難である。本研究は、人の移動を通信媒介として活用し、電子ペーパーサイネージ間でコンテンツを配達する手法を提案する。さらに、人の接近・接触をトリガーとしてスリープ解除や発電を行う仕組みの導入を視野に入れ、省電力性向上に関する考察を行う。本稿では、プロトタイプ実装を提示し、基本動作を検証することで提案手法の有効性を評価する。

1. はじめに

デジタルサイネージは公共空間や商業施設において広告や情報を提示するメディアとして普及している。従来の液晶ディスプレイや有機ELディスプレイを用いたシステムは、高い視認性や動画表現の柔軟性を持つ一方で、常時駆動電力と直射日光下での視認性に課題がある。電子ペーパーディスプレイは、軽量、高視認性、低消費電力という特徴を持ち、既に価格表示タグ[1]や電子書籍リーダー[2]に加え、バス停時刻表[3]や広告ボード[4]などの用途での活用事例がある。また、画面の更新時にのみ電力を消費し、それ以外の時間は電力をほぼ必要としないといいため低消費電力である。

デジタルサイネージの種類の1つに電子ペーパー技術を活用した、電子ペーパーサイネージ(Electric Paper Signage: EPS)[4]がある。EPSとは、このEPDを情報提示部に採用したデジタルサイネージであり、EPDの特性を活かすことで長時間の稼働や屋外設置が可能になると期待されている。屋外設置例では、太陽光電池と組み合わせることで、電源を確保しにくい場所でも動作することが示されている[5]。災害時の停電環境や通信手段が制限される状況においても、低消費電力と高視認性という利点から、情報提供手段としての有用性が期待されている。

EPSの運用を行う上で、管理の効率性向上のため、コンテンツを遠隔からネットワークインフラを利用して更新する手段が必要である。コンテンツ更新方法は、ローカル

更新とネットワーク更新の2つに分類される。ローカル更新は、SDカードやUSBメモリを用いて直接データを更新する方法と近距離無線通信による方式である。ネットワークインフラが不要なため、設置場所の自由度が高いが、更新作業が主導となるため大規模運用には向きである。ネットワーク更新は、Wi-Fi、セルラー通信(LTE/5G)、LoRaWANなどを活用し、遠隔地からコンテンツを更新する方式である。しかし、通信インフラが未整備、または一時的に利用不能な環境下ではコンテンツの即時更新が困難となる。屋外環境や災害現場では、電力供給の制約に加えてネットワーク接続が不安定となる場合が多い。そのため、ネットワーク更新では、災害時や通信インフラが不安定な環境下で、信頼性の面から安定した運用を確保することが困難である。

著者ら[6]はこれまでに、待機電力を最小化するNormally-off Network Electronic Paper Signage(NNEPS)を提案し、制御用PCを常時オフとすることで従来方式に比べ約33%の待機電力削減を実現した。しかしNNEPSでは、コンテンツ更新をIPネットワーク経由で行う前提であるため、通信インフラが未整備または一時的に利用不能な環境では更新が停止してしまうという課題が残されていた。

そこで本研究では、通信インフラが不安定である制約下でもEPSへコンテンツを配達し、情報の更新が可能な、人の移動を通信媒介としたEPSシステムを提案する。

2. 関連研究

本節では、通信インフラが利用困難な環境における情報伝達方式のうち、人の移動と近距離無線通信を活用して情

¹ 北海道情報大学

a) s2481102@s.do-johodai.ac.jp

b) yumu@yumulab.org

報を搬送する研究を概観し、本研究との位置づけを明らかにする。

中壺ら [7] は、災害時の避難誘導を対象としてスマートフォン同士のすれ違い通信を用い、遅延耐性ネットワーク (Delay Tolerant Networking:DTN) アーキテクチャに基づく自律分散的メッセージ伝搬手法を提案し、シミュレーションによって避難目的地情報の拡散特性を評価している。中央集権型の避難指示が单一障害点となるリスクや、SNS 情報の信頼性・プライバシ問題を背景課題として指摘している点が特徴である。

上田 [8] は、通信インフラに依存しない情報伝達ネットワークの構築を目指し、今後普及が見込まれるウェアラブル端末を人が携行する「情報キャリア」として用いるアプローチを提案している。所定エリア内での情報伝達に必要なキャリア数、キャリア密度と伝達範囲・遅延時間の関係、情報源とキャリア端末間のインターフェース設計などを段階的に検証する研究計画を示し、インフラ非依存型ヒューマンキャリアネットワークの可能性を議論している。

これらの研究はいずれも、人の移動を活用してインフラ途絶下での情報伝播を可能にしようとする点で共通する。しかし、中壺らは移動端末間での避難情報伝達を主題とし、上田は概念検討段階であり、表示デバイスを備えた静置ノード群（電子ペーパーサイネージ；EPS）の双方向コンテンツ同期や省電力運用までは扱っていない。

本研究ではこれらの先行研究を踏まえ、データを一時的に蓄積しながら移動して運搬し、接続可能なタイミングで他端末へ転送して情報伝達を仲介する移動体端末（以下、データミュール）としてスマートフォンを用い、EPS を固定ノードに設定する。遭遇時には省電力 Bluetooth Low Energy (BLE) で近距離通信を行い、双方のデータ・バージョンを比較して双方向に更新することで、通信インフラに依存せず EPS 間で最新コンテンツを段階的に伝播させる情報配信手法を提案する。

3. 提案手法

本研究では、常時接続を必要としないデータ配信方式を EPS に適用し、通信が不安定な環境でも更新を可能にする手法を提案する（図 1）。

提案手法では、人が携行するスマートフォンをデータミュールとして利用し、EPS から取得した更新データを一時的に保存したうえで移動先で別の EPS と接近した際に転送する。このデータ配信は、端末が移動する過程でデータを保持し、接触タイミングで転送を行う。近距離無線通信には低消費電力で接続確立が可能な Bluetooth Low Energy (BLE) を用い、EPS は周囲のデータミュールを検知して遭遇時に更新データの受け渡しを行う。これにより、通信インフラが利用できない状況でも偶発的な接続を通じてデータが伝播する。

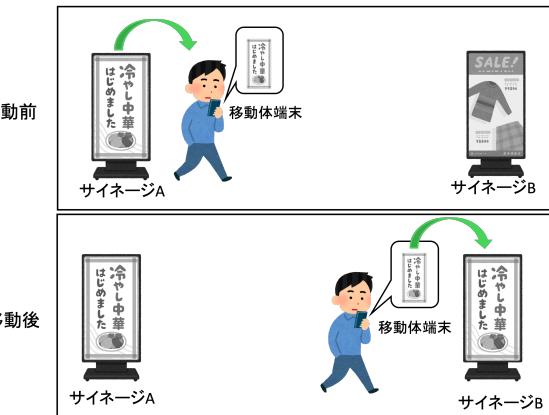


図 1 概要図

4. 設計

本システムは、EPS と移動体端末が通信した際に、双方で最新のコンテンツデータを比較・更新しながら情報を伝播させる設計とした。移動体端末が配信するコンテンツを最新のデータを保ち、EPS の画面へ確実に反映させることが目的である。この設計を実現するため、EPS 側は複数の機能モジュールを協調動作させる。処理フローを図 2 に示す。

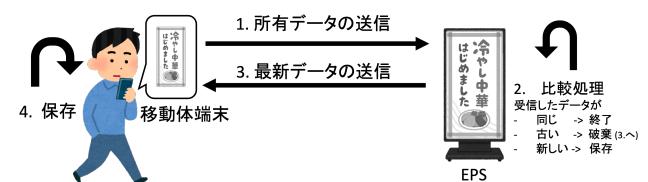


図 2 移動体端末と EPS の処理フロー

EPS 側の動作を以下に示す

- (1) データ送受信モジュールは BLE スキャナとして移動体端末を検出して通信を開始する。
- (2) バージョン管理モジュールは受信データと内部保持データをバージョンおよびタイムスタンプで比較して最新性を判定する。
- (3) 画面制御モジュールは新しいデータで表示を更新した後にスリープモードへ移行させ、「省電力制御モジュール」がスリープ間隔や通信距離を管理して消費電力を最小化します。

移動体端末の動作を以下に示す。

- (1) 常時アドバタイズを行って自身の存在とコンテンツ情報を知らせる。
 - (2) EPS からの要求に応じてデータを送信する
 - (3) データ送受信モジュールと、EPS からデータを受信した際にその最新性を確認し、必要に応じて内部にデータを保存・更新する
- コネクション確立後に移動体端末からデータを送り EPS

で最新性の比較を行うことでデータ通信の回数を削減した。また、本設計では省電力と安定運用を特に重視した。EPS 側に、消費電力の少ない BLE スキャナを使用し、コネクション確立後に一括して最新性を比較することで通信回数を削減した。さらに、EPS のメモリ容量を考慮してコンテンツの JSON データサイズを単一パケットで送受信可能な範囲に制限することで、通信の確実性を高め、データ損失に対する再送制御も行う。

5. プロトタイプ実装

提案手法の実現可能性を検証するために、EPS および移動体端末の双方を M5Stack 社製 M5Paper v1.1 を用いてプロトタイプを実装した（図 3）。M5Paper は ESP32 を搭載した開発ボードであり、電子ペーパーの表示制御と無線通信を同一ハードウェア上で実現できる。本研究では、この特性を活かし、サイネージ側と移動体側を統一したプラットフォーム上で実装することで、ソフトウェアの互換性と開発効率を高めた。

開発には C++ 言語を用い、ESP32 用に公開されているライブラリを活用した。電子ペーパー制御には M5Paper 標準の EPD 制御ライブラリを用い、BLE 通信には ESP32 向け BLE ライブラリを利用している。これにより、画面表示・無線通信・省電力制御といった機能を統合した実装が可能である。

通信は、BLE を採用し、通信範囲は 5 m 以内とした。まず TxPower (送信電力) を調整し、送信する電波の強度を弱く設定した。電波が物理的に遠くまで届かなくなり、通信できる範囲そのものを狭めた。さらに、RSSI (受信電波強度) を利用し、受信する側で相手からの電波の強さを測定する。そして、あらかじめ決めておいた基準より弱い電波は「遠すぎる」と判断して通信を受け付けない。このように、送信側で飛距離を抑え、受信側で近接判定するという二つの仕組みを組み合わせた。

EPS 側は BLE スキャナとして動作し、周囲のデバイスを 1 分間スキャンした後、2 分間ディープスリープ状態に移行する動作サイクルを繰り返す。これにより、省電力を維持しつつ定期的に周辺の移動体端末の探索を行う。

移動体端末側は、BLE アドバタイズを定期的に発信し続けるよう実装した。移動体端末は常に待機状態であり、EPS がスキャンを行うタイミングで検出され、接続が確立する。双方が同一ハードウェアを用いることで、ハードウェア性能差に起因する通信トラブルを回避し、安定した評価環境を構築した。

交換データのフォーマットは、JSON を用いて独自に設計した（表 1）。ContentData という論理構造を定義し、そのフィールドとして「バージョン識別子」「画面に表示する文字列」「作成時刻」を保持させた。プロトタイプでは、EPS 側のメモリ容量や BLE 通信の帯域制約を考慮し、画

像データを対象外とし、テキストデータのみを送受信の対象とした。

表 1 ContentData のフィールドと説明

フィールド名	説明
version_id	データのバージョンを示す識別子 バージョン比較に用い数値が大きい方を最新と判定する
content	表示する文字列データ 文字列のみを対象とした
timestamp	データの作成時刻を表す Unix タイムスタンプ (秒単位)

通信シーケンスを図 4 に示す。まず移動体端末が自ら保持しているコンテンツデータを JSON に変換し、接続確立後に EPS へ送信する。EPS は受信データを内部形式に復元し、内部に保持しているデータと比較する。この比較では、バージョン識別子を数値として評価し、値が大きいほうを最新とみなす。もし受信データが EPS の保持データより新しい場合、EPS はそのデータをメモリに保存し、画面制御モジュールを起動し、更新する。逆に受信データが古い場合は、受信データを破棄し、EPS 側が保持する最新データを JSON に変換して移動体端末に返送する。移動体端末は返送されたデータを内部表現に変換し、自身の記憶領域に保存することで、次回以降に他の EPS と接続する際にはより新しいデータを提供できる状態を維持する。

本実装では、両デバイス間で共通のデータ形式と処理フローを用いることで、送受信を対称的かつ簡潔に保。JSON の生成・解析の処理は、EPS 側・移動体端末側で同一のロジックを用いることで実装の整合性を確保し、保守性を高めたまた、接続から切断までを 1 回のやり取りで完結させるように設計することで、通信時間の短縮と省電力化を実現した。ディープスリープ動作とスキャン動作を組み合わせた省電力設計により、EPS 側は常時稼働させることなく電力消費を抑える実装とした。

6. おわりに

本研究では、プロトタイプの作成を行った。プロトタイプ実装では、ハードウェアとソフトウェアの両面でシンプルかつ拡張性のある構成を備えており、今後の機能追加や画像データ対応への発展にも対応可能な設計となっている。また、M5Paper 同士を用いた低消費電力環境において、移動体端末を経由したコンテンツの受け渡しと画面更新が確実に行えることを確認した。

本システムのさらなる省電力化を目指すにあたり、待機状態におけるマイクロコントローラーの消費電力を限りなくゼロに近づけることが課題となる。電子ペーパーディスプレイは、その特性上、画面の書き換え時にしか電力を消費しない。この利点を最大限に活かすため、接触や接近を

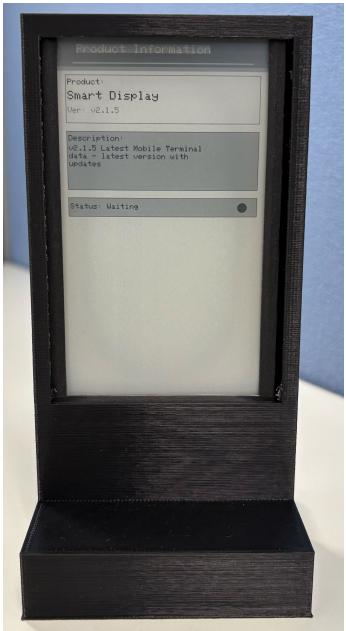


図 3 EPS のプロトタイプ

- [2] Amazon: Kindle (キンドル) 電子書籍リーダー, <https://www.amazon.co.jp/b?node=3933932051>.
- [3] Maconie, C.: Papercast launches ultra-low power alternative to LED bus stop displays - Papercast, <https://www.papercast.com/product/papercast-launches-ultra-low-power-alternative-to-led-bus-stop-displays/>.
- [4] Japan, A.: E Paper Signage, <https://www.a-japan.co.jp/epd/eps.html>.
- [5] 新田健人, 長崎健, 戸田真志, 平田圭二, 松原仁ほか: ノーマリーオフ知的バス停実運用を想定した消費電力実装評価, 研究報告組込みシステム(EMB), Vol. 2015, No. 22, pp. 1–5 (2015).
- [6] Akiba, T. and Yumura, T.: NNEPS: A Power-efficient e-Paper Signage System with Remote Content Updates, *International Journal on Advances in Networks and Services*, Vol. 18, No. 1&2, pp. 1–11 (2025).
- [7] 中壇恵貴, 柏崎礼生, 井口信和: 災害時の避難誘導におけるDTNを活用した自律分散手法のシミュレーション評価, 2024年度情報処理学会関西支部大会講演論文集(2024). G-06.
- [8] 上田敏樹: 通信インフラに依存しない情報伝達ネットワークについての研究, 第77回情報処理学会全国大会講演論文集, Vol. 2015, No. 1, pp. 13–14 (2015).

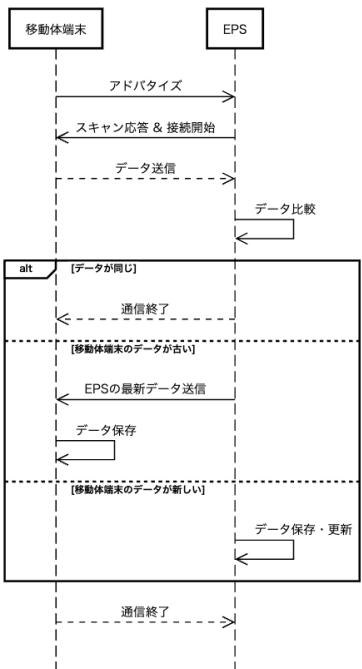


図 4 移動体端末と EPS の通信シーケンス図

トリガーとしてスリープ解除機構の追加を検討する。圧電素子などを用いて、利用者による物理的な接触をトリガーとして発電し、微小な電力によって生じる電圧を検知し、ディープスリープ状態のマイコンを起動する。これにより、電子ペーパーディスプレイの省電力特性を活かしたEPSシステムを目指す。

参考文献

- [1] ヤマトサイネージ株式会社: 電子棚札・電子ペーパー | ヤマトサイネージ, <https://yamato-signage.com/digital-signage/esl/>.
- [2] Amazon: Kindle (キンドル) 電子書籍リーダー, <https://www.amazon.co.jp/b?node=3933932051>.
- [3] Maconie, C.: Papercast launches ultra-low power alternative to LED bus stop displays - Papercast, <https://www.papercast.com/product/papercast-launches-ultra-low-power-alternative-to-led-bus-stop-displays/>.
- [4] Japan, A.: E Paper Signage, <https://www.a-japan.co.jp/epd/eps.html>.
- [5] 新田健人, 長崎健, 戸田真志, 平田圭二, 松原仁ほか: ノーマリーオフ知的バス停実運用を想定した消費電力実装評価, 研究報告組込みシステム(EMB), Vol. 2015, No. 22, pp. 1–5 (2015).
- [6] Akiba, T. and Yumura, T.: NNEPS: A Power-efficient e-Paper Signage System with Remote Content Updates, *International Journal on Advances in Networks and Services*, Vol. 18, No. 1&2, pp. 1–11 (2025).
- [7] 中壇恵貴, 柏崎礼生, 井口信和: 災害時の避難誘導におけるDTNを活用した自律分散手法のシミュレーション評価, 2024年度情報処理学会関西支部大会講演論文集(2024). G-06.
- [8] 上田敏樹: 通信インフラに依存しない情報伝達ネットワークについての研究, 第77回情報処理学会全国大会講演論文集, Vol. 2015, No. 1, pp. 13–14 (2015).