MobiEPS：人の移動を通信媒介とする電子ペーパーサイネージ向け情報配送システム

MobiEPS: A Human Mobility-Based Information Delivery System for Electronic Paper Signage

秋葉 貴文（Takafumi Akiba）　湯村 翼（Tsubasa Yumura）

北海道情報大学（Hokkaido Information University）

yumu@yumulab.org

2026 年 8 月 7 日

概要

電子ペーパーサイネージ（Electronic Paper Signage: EPS）は，低消費電力で動作する表示基盤として注目される．通信インフラの整備が不十分な環境では紙媒体による掲示が用いられるが，情報更新のたびに現地巡回が必要となるため更新コストが高く，更新遅延や情報の陳腐化が課題となる．このような紙媒体の掲示を EPS に置き換えるには，通信インフラに依存しない情報更新手法が求められる．そこで本研究では，人が携行するモバイル端末を情報配送の媒介として利用し，近接時のみ EPS を起動して更新を行う情報配送システム MobiEPS を提案する．MobiEPS では，人が EPS に近接した際にデータ送信を行う．人の近接を契機に起動してデータ送受信を行うことで，待機消費電力を抑制する．本研究では，MobiEPS のプロトタイプ実装を行い，シミュレーションとユーザー評価により提案手法の性能と実現性を検証した．シミュレーション評価では，更新データサイズの増加に伴う遅延や失敗率の増大を分析し，近接駆動方式の成立条件を確認した．さらにユーザー評価により，歩行中でも EPS の存在認知は得られる一方で，表示更新の知覚や可読性には改善余地があることを明らかにした．

キーワード：電子ペーパーサイネージ，省電力，人流，遅延耐性ネットワーク，近接駆動

Abstract: Electronic Paper Signage (EPS) has attracted attention as a low-power display platform. In environments where communication infrastructure is insufficient, paper-based signage is commonly used; however, updating such signage requires on-site patrols, resulting in high update costs, delayed updates, and information obsolescence. To replace paper-based signage with EPS in such environments, an information update method that does not rely on communication infrastructure is required. In this study, we propose MobiEPS, an information delivery system in which mobile devices carried by users serve as intermediaries for information delivery, and EPS is activated only when users come into proximity. In MobiEPS, data transmission is performed when a user approaches an EPS node. By activating the EPS and performing data communication only upon human proximity, standby power consumption can be reduced. We implemented a prototype of MobiEPS and evaluated its performance and feasibility through simulations and user studies. The simulation results analyzed the increase in latency and failure rate as the update data size increased, confirming the feasibility conditions of the proximity-triggered communication scheme. Furthermore, the user study revealed that although users could recognize the presence of EPS while walking, there remains room for improvement in the perceptibility of display updates and the readability of displayed content.

Keywords: electronic paper signage, low power consumption, human mobility, delay tolerant networking, proximity-driven activation

1　はじめに

情報を表示するデジタルサイネージが広告や掲示板などのさまざまな用途で普及する．現在デジタルサイネージのディスプレイとして液晶ディスプレイが一般的に用いられるが，電力を常に消費することや直射日光下での視認性の低さなどの課題がある．これらを解決するデバイスとして，電子ペーパーサイネージ（Electronic Paper Signage：EPS）が注目される．電子ペーパーは，更新時のみ電力を消費し表示に電力を必要としないという特徴を持ち，電子書籍リーダーや電子棚札などの活用が進む [1]．EPS は，時刻表や案内ボード等で利用され

る．たとえば，新田ら [2] の研究では，知的バス停においてバス到着予定時刻の表示装置として電子ペーパーを用いた．

EPS に表示するコンテンツ更新はローカル更新とネットワーク更新に大別される．ローカル更新は，SD カードや USB メモリを用いて，管理者が直接データを転送する方式である．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，更新作業が手動となるため大規模運用には不向きである．ネットワーク更新は，Wi-Fi，セルラー通信（LTE/5G）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．ネットワーク更新型 EPS では，コンテンツの受信待機のために制御 PC が常に電力を消費するという問題がある．この問題に対し，我々は，過去の研究 [3] においてに EPS の待機電力を最小化する Normally-off Network EPS（NNEPS）を提案した．NNEPS では，電子ペーパー制御用のコンピュータを常時オフにし，画面の更新が必要な時のみオンとする設計とした．評価実験の結果，従来の方式に比べて待機電力を削減できることを示した．

EPS は，その省電力性を活かして，電源が十分に整備されていない大規模イベント会場や自然公園などでの活用が期待できる．電源は，短期間の運用の場合にはポータブルバッテリー，長期間の運用の場合には太陽光発電などで確保が可能である．しかし，電源が整備されていない環境では，同様に通信インフラも整備されていない可能性が高い．電源と通信インフラが十分に整備されていない，たとえば山岳地帯の登山道のような環境では，従来，紙媒体による案内や注意喚起が用いられてきた．紙媒体の掲示は，情報更新のたびに管理者が現地を巡回する必要があり，更新コストが高いという課題がある．また，更新コストの高さが原因となり，Web サイトのような高頻度な情報更新が困難であり，情報更新の遅れにより，掲示内容が陳腐化する問題がある．これらの環境で紙媒体を EPS に置き換えるには，通信インフラに依存することなく EPS のコンテンツ更新を実現することが重要である．加えて，更新が必要な時点に限って EPS を起動し更新処理を実行することで，待機時の消費電力を抑制しつつ，長期的かつ継続的な運用を可能とする設計が求められる．

そこで本研究では，人が携行するモバイル端末を情報配送の媒介として利用し，人の近接したときのみ EPS を起動させる MobiEPS を提案する．本研究の目的は，通信インフラに依存せず，かつノーマリーオフ設計を維持したまま EPS の情報更新を可能とすることである．提案手法により，更新のたびに管理者が計画的に巡回する必要を低減し，通信や電力インフラが整備されていない環境においても，必要な情報を低消費電力で EPS に届けることが可能となり，継続的な運用が期待できる．

本研究の主要な貢献は

- 通信インフラに依存せず，ノーマリーオフ設計を維持したまま EPS の情報更新を可能とする情報配送システム MobiEPS の提案
- MobiEPS の通信方式をモデル化しシミュレーションにより評価
- プロトタイプ実装とユーザー評価による実現性検証と課題の整理

である．以前の我々の研究報告 [4] において，本研究の提案手法と，その評価について報告した．本論文では，これらに加えてユーザー評価の実施について追記した．また，関連研究との比較の記載を拡充し，本研究の位置付けを明確化した．

2 関連研究

ネットワーク接続が断続的であり，送信元から宛先までの通信経路が常時存在しない環境におけるデータ配送を実現するためのネットワークモデルとして，遅延耐性ネットワーク（Delay/Disruption/Disconnection Tolerant Network：DTN）が広く研究される [5]．特に，中間ノードがデータを一時的に保持し接続可能な通信機会に転送を行う手法は機会主義的ネットワーク（Opportunistic Network）[6] と呼ばれる．機会主義的ネットワークのような環境において，移動体を用いてデータを物理的に運搬する手法として，Shah ら [7] は Data MULEs を提案した．Data MULEs では，センサノード，中継移動体（データミュール），アクセスポイントから構成される 3 層アーキテクチャを採用し，データミュールがセンサノード付近を通過する際にデータを収集し，別の場所へ運搬することで通信を実現する．この手法は，センサノードが常時通信を行う必要がないため，低消費電力なセンサネットワークを実現可能である．Zhao ら [8] は，疎なモバイルアドホックネットワーク向けに Message Ferrying を提案した．Message Ferrying では，専用移動ノードがネットワーク内を巡回し，各ノード間のデータ配送を仲介することで，エンドツーエンド経路が存在しない環境における通信を実現している．

一般消費者向けに普及したシステムとして，携帯ゲーム機ニンテンドー DS およびニンテンドー 3DS に搭載されたすれちがい通信 [9] がある．すれちがい通信で

は，端末同士が近接した際に無線通信を行い，ゲームデータやユーザ情報を交換する．機会主義的ネットワークと類似した性質を持ち，人の移動を通信機会として利用した実用例と位置付けられる．

近年では，Bluetooth Low Energy (BLE) を利用したデータミュール型システムも Aguilar ら [10] や Teixeira ら [11] によって提案される．Aguilar らは，機会主義的通信によるセンサデータ収集システムを BLE を用いて構築し，パラメータと性能の関係を分析した．Teixeira の FloatingBlue では，BLE アドバタイズメントを利用して移動ノード間で情報を伝播し，人や車両の移動による分散型情報共有を実現した．これらの研究は，移動体を利用して分断環境における情報配送を実現する点で本研究と共通する．ただし，これらの研究ではセンサノードから移動体へのデータ収集を主目的としており，情報伝達は一方向である．本研究では，人が携帯する端末を通信媒介として利用し，電子ペーパーサイネージと携帯端末の双方でデータ交換を行う双方向型の情報配送を実現するという点に特徴がある．

また，Ishimaru ら [12] は，通信インフラが整備されていない環境における観光客同士での観光スポットの口コミ情報の交換を目的として，携帯端末の移動を利用したデータ配信方式を提案した．この研究では，観光スポットに InfoBox と呼ばれるポータブルサーバが設置され，観光客が携帯端末を InfoBox に近づけることで口コミ情報や画像データを送信し蓄積する．さらに，観光客はリクエストにより InfoBox に蓄積した情報を携帯端末で取得することもできる．この研究は，中継移動体と固定ノードの端末が双方向に情報配送を実現する点で本研究と共通する．ただし，本研究では，全ての固定ノードに共通のコンテンツを伝搬させることを目的とする点が異なる．

3　MobiEPS

本研究は，人が携行する端末が更新データを運搬し，EPS が人の近接をきっかけに起動して更新を行うことで，通信インフラに依存せず EPS を継続的に更新できる MobiEPS を提案する．EPS を固定ノードとして位置付け，人の移動を通信経路とし，携行するモバイル端末にコンテンツを一時保存することで，通信インフラが不十分または不安定な環境下においても更新データの確実な到達を可能とする．モバイル端末を伝搬媒体として扱う DTN に基づいており，モバイル端末と EPS の接触機会を利用した段階的データ伝搬により，EPS の表示情報の更新を実現する．さらに，EPS は省電力な利



図 1　MobiEPS-Net の概念図（人の移動を媒介としたコンテンツ配送・更新フロー）

点を最大限に活かすために，人の近接時のみ起動して処理を行う近接駆動機能を提案する．これにより，通信インフラや電力設備が不十分な環境下においても省電力で稼働しつつ情報更新が可能な EPS を実現できる．

MobiEPS は，モバイル端末を介してコンテンツを配送・同期する機能である MobiEPS-Net と，人の近接を検知して EPS を復帰させるノーマリーオフ運用の機能である MobiEPS-Prox から構成される．

3.1　MobiEPS-Net: 人の移動を通信媒介としたコンテンツ配信手法

MobiEPS-Net では，モバイル端末を介し人の移動を通信経路とすることでコンテンツの配送と更新を実現する（図 1）．

MobiEPS-Net は，人が携行するスマートフォンなどのモバイル端末と EPS から構成される．モバイル端末は，コンテンツデータを一時的に保存し，移動先で遭遇した EPS へデータを転送する役割を担う．モバイル端末と EPS は近距離無線通信を用いてデータの受け渡しを行う．これにより，通信インフラが整っていない環境においても，データを段階的に伝播させることが可能となる．

EPS は，固定ノードとして，コンテンツの送受信やコンテンツバージョン管理，情報表示の役割を担う．

3.2　設計

MobiEPS-Net では，モバイル端末と EPS が通信した際にお互いの持つコンテンツのバージョン情報を比較し，最新のバージョンへ更新する方法で，情報を段階的に伝播させる設計とした．本設計の目的は，モバイル端末と EPS が通信時にコンテンツバージョンを比較し，新しいバージョンを採用することで，EPS ネットワーク全体のコンテンツを最新状態へ収束させることである．

本設計では，コネクション確立後にモバイル端末から EPS へコンテンツデータを送信し，EPS 側でバージョンの比較を行う．図 2 に全体の流れを示し，以下にその詳細な処理手順について述べる．

モバイル端末と EPS の通信処理は以下のように進行

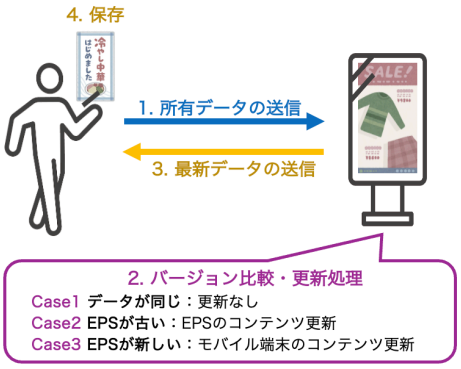


図 2　モバイル端末と EPS におけるバージョン比較・更新処理のシーケンス

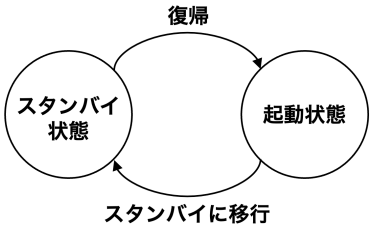


図 3　EPS のノーマリーオフにおける状態遷移

する：

(1) モバイル端末から EPS へコンテンツデータを送信
(2) 更新処理（version_id を比較）
    1. データが同じ：更新なし
    2. EPS のデータが古い：EPS のコンテンツ更新
    3. EPS のデータが新しい：モバイル端末のコンテンツ更新
(3) (Case3 の場合)
    1. EPS からモバイル端末へコンテンツデータを送信
    2. モバイル端末でコンテンツを保存

3.3　MobiEPS-Prox: 近接駆動機能

MobiEPS-Prox では，スタンバイ状態にある EPS を人の近接をきっかけに復帰させ，更新処理を行う近接駆動設計とした．EPS は，通常時において無線通信および制御系を完全に停止させたスタンバイ状態に置き，消費電力を最小化するノーマリーオフ設計とする．近接駆動モジュールでは，復帰信号の受信機能のみを有効化する．人の踏圧による圧力で発電し，その出力を復帰信号として用いてシステムを起動する．

3.3.1　ノーマリーオフ設計

EPS のノーマリーオフにおける状態遷移を図 3 に示す．

EPS は，スタンバイ状態から近接駆動モジュールからの復帰信号をトリガとして復帰し，通信および更新処理の終了後に再びスタンバイに移行する．

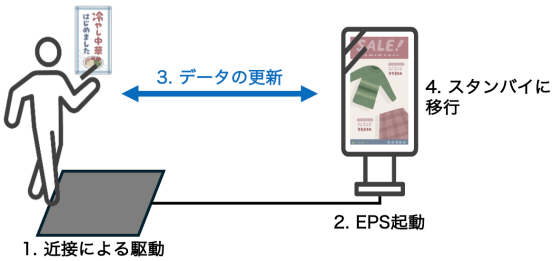


図 4　圧電素子による復帰トリガと通信・復帰遷移図

図 3 に示すノーマリーオフ状態は，次の 4 つで構成される．

1. **スタンバイ状態**：通信および表示処理を停止し，復帰のための入力信号のみを待ち受ける状態である．
2. **起動状態**：EPS が起動し，通信・更新処理が実行可能な状態である．
3. **復帰**：スタンバイ状態から起動状態へと移行する操作である．
4. **スタンバイに移行**：起動状態からスタンバイ状態へと移行する操作である．

3.3.2　近接駆動モジュールに求められる条件

EPS をスタンバイ状態からの復帰させる近接駆動モジュールは，外部給電なしで EPS の復帰を実現するため，発電機能を備えた自励式モジュールを採用する．人の接近により駆動した時に発生する電力を用いて復帰信号を出力し，EPS 本体をスタンバイ状態から復帰させる．これにより，不要な待機電力をほぼゼロに抑えたスタンバイ状態からバッテリーなどの外部電力を必要とせず EPS の復帰を可能とする．

3.3.3　MobiEPS-Prox の全体構成

システム全体の構成を図 4 に示す．MobiEPS-Prox は，EPS と近接駆動モジュールから構成される．EPS は通常はスタンバイ状態で待機し，近接駆動モジュールが人の接近により駆動し，復帰信号を送ることで EPS をスタンバイ状態から復帰させる．更新処理終了後はスタンバイに移行する．

4　プロトタイプ実装

本研究では，提案手法の有効性を確認するため，EPS と近接駆動モジュール，モバイル端末から構成されるプロトタイプを実装した（図 5）．

4.1　使用機材・通信規格

EPS は，M5Paper v1.1 [13] を用いて実装した．M5Pper v1.1 は，4.7 インチ電子ペーパーディスプレイ，マイクロコンピュータに ESP32-D0WDQ6-V3 を搭載しているため，Deep Sleep による低消費電力運用

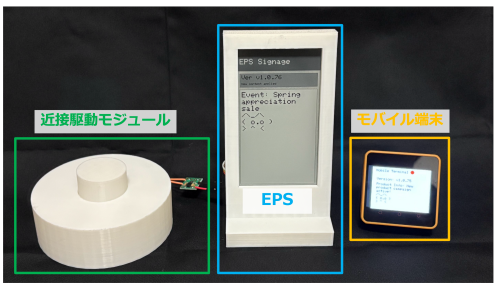


図 5　MobiEPS プロトタイプ実装（左：近接駆動モジュール，中央：EPS，右：モバイル端末）

が可能である．Deep Sleep とは，ESP32 の省電力モードの一つであり，CPU や大部分の周辺機器を停止させることで極めて低い消費電力を実現する．この機能を活用し，EPS のスタンバイ状態を実装した．

モバイル端末には，M5Stack Core2 for AWS [14] を用いた．M5Stack Core2 for AWS は，マイクロコンピュータに ESP32-D0WDQ6-V3 を搭載し，2 インチ TFT 液晶ディスプレイを備えており，

近接駆動モジュールには，振動エネルギーや圧力を電力へ変換する圧電素子を採用した．出力電圧は，LTC3588[15] を用いて安定化させ，3.3V 出力を得た．圧電素子を用いたエナジーハーベスティングにより得られる電力を復帰信号として用いることで，外部給電なしで EPS のスタンバイ状態からの復帰を実現した．

モバイル端末と EPS 間の近距離無線通信は，Bluetooth Low Energy（BLE）を用いて実装した．

4.2　MobiEPS-Net 実装

MobiEPS-Net では，人の移動を通信媒介としたコンテンツ配信を実装する．

モバイル端末側を BLE アドバタイズ，EPS 側をペリフェラルとして実装を行なった．モバイル端末は，自らの存在を知らせるために，簡潔な通知信号を一定間隔で周囲へ送出する．EPS では，モバイル端末が送信する電波をスキャンする．EPS がモバイル端末を検出すると接続を開始し，コネクション確立後にバージョン比較および更新処理を行う．

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 version_id, content, timestamp を保持させた．プロトタイプでは，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．

4.3　MobiEPS-Prox 実装

4.3.1　近接駆動モジュールの設計

EPS をノーマリーオフ状態で運用するための起動機構として，近接駆動モジュールを設計・実装した．近接

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．数値が大きい方を最新と判定する．
contents	表示する文字列データのみを格納する．
timestamp	データの作成時刻を表す Unix タイムスタンプ（秒単位）．

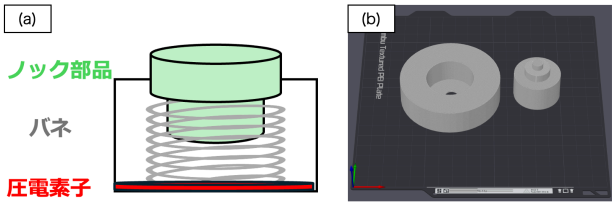


図 6　設計した近接駆動モジュール (a) 構造の断面図 (b) 設計した外装

駆動モジュールは，人の接近や踏圧といった接触をトリガとして EPS の制御用マイコンを復帰させる機構である．

4.3.2　近接駆動モジュールの動作原理

EPS をスタンバイ状態から復帰させる方法として，ESP32 の RTC 外部割込み機能を用いる．圧電素子からの出力電圧を LTC3588 を用いて 3.3V 出力に安定化させ，EXT1 割込みピンに接続する．電圧が一定値を超えたタイミングで EPS を復帰させる．これにより，外部給電なしで EPS のスタンバイ状態からの復帰を実現する．

EPS は通信完了後に一定時間が経過するとスタンバイ状態へ移行する．また，スタンバイ状態からの復帰後，一定時間内に通信が行われなかった場合もスタンバイ状態へ移行する．

4.3.3　近接駆動モジュールの外装設計

圧電素子は踏圧や振動を検知するため，外力を効率的に伝達できる一方で，素子自体は薄く，外部からの衝撃や環境要因による破損のリスクが高い．そこで，圧電素子を用いた起動機構を実装するにあたり，一点に圧力が集中することで，圧電素子に十分な圧力が加わることを想定した外装設計を行い，3D プリンターを用いて生成した（図 6）．

5　シミュレーション評価

モバイル端末と EPS が一対一で通信する構成を仮定し，近接時の同期が完了する通信成功率を数値計算により評価する．更新データサイズ，通信スループット，および近接時間のばらつきが成功率に与える影響を整

理し，成功率を満たす更新データサイズの条件を検討する．

5.1 データサイズと同期時間の相関モデル

間欠接続を前提とするネットワーク環境においては，モバイル端末と EPS 間の接続時間は有限かつ変動的である．したがって，一回の遭遇において転送可能なデータ容量は，接触時間に大きく左右される．

モバイル端末と EPS におけるデータ転送の成否は，対象データの同期完了に要する所要時間（T_{req}）と，端末が通信可能範囲内に滞在する利用可能時間（T_{avail}）の大小関係によって決定される．MobiEPS の評価において，実機を用いた実証実験は実装の妥当性を示す上で重要であるが，歩行者の移動特性，無線干渉，OS の実装依存といった環境要因によるばらつきが大きく，結果の一般化や網羅的な検証が困難である．これに対して，論理評価では，データサイズ，通信範囲，歩行速度，通信スループット等のパラメータを変動させた多角的な解析が可能となる．これにより，MobiEPS の設計における最適な更新データサイズや，通信モジュールの要件を定量的に導出することが可能となる．

5.1.1 時間制約に基づく通信成功率の定式化

モバイル端末と EPS が構成するネットワークは，ノード間の物理的な近接によってのみ通信路が確立される．このような環境では，通信可能な時間がネットワークの容量を決定づける主な要因となる．すなわち，一回の遭遇において運べるデータ量には，接触時間の長さに応じた上限が存在する．したがって，単一遭遇における通信の成功は，以下の二つの時間変数と成功条件の関係となる．

1. 所要時間: 特定のデータサイズを転送・同期するためにシステムが必要とする時間．
2. 利用可能時間: ユーザーの移動速度や滞留時間によって決まる，物理的な通信可能時間．

通信が成功するための条件は

$$T_{\mathrm{req}}(S) \le T_{\mathrm{avail}} \tag{1}$$

が満たされることである．

本研究では，データサイズと同期時間の相関関係を定量的に示すことで，通信成功率を導出するための基礎モデルを構築する．データサイズ S の同期に要する総時間 $T_{\mathrm{req}}(S)$ は，接続確立や内部処理に伴う固定的なオーバーヘッドと，データ転送に伴う可変的な時間の和として，以下の一次式で近似できる．

$$T_{\mathrm{req}}(S) = T_{\mathrm{setup}} + T_{\mathrm{proc}} + \frac{S}{R_{\mathrm{goodput}}} \tag{2}$$

ここで，T_{setup} は接続確立やハンドシェイクに要する時間，T_{proc} はデータ準備などの処理時間，R_{goodput} は実効スループット（Goodput）を表す．特に BLE の無線通信方式では，MTU（Maximum Transmission Unit）サイズや接続間隔の設定が R_{goodput} に強く影響する．ただし本評価では，MTU や接続間隔を個別のパラメーターとしては扱わず，それらの影響を R_{goodput} に集約して扱う．このモデル化により，現実の通信パラメータとプロトコル固有の遅延を数式内に明示的に埋め込むことが可能となる．近接駆動では接触時点から通信が開始されるため，通信に使える通過距離は半径分の R とみなし，接触継続時間は

$$T_{\mathrm{touch}} = \frac{R}{V} \tag{3}$$

となる．利用可能時間は起動・探索時間を差し引いた

$$T_{\mathrm{avail}} = \max(0,\ T_{\mathrm{touch}} - T_{\mathrm{boot}} - T_{\mathrm{scan}}) \tag{4}$$

で与える．以上より，歩行速度の分布に基づく通信成功率 $P_{\mathrm{succ}}(S)$ は

$$P_{\mathrm{succ}}(S) = \Pr(T_{\mathrm{avail}} \ge T_{\mathrm{req}}(S)) = \Pr\left(V \le \frac{R}{T_{\mathrm{req}}(S)}\right) \tag{5}$$

と記述できる．ここで，$\Pr(\cdot)$ は歩行速度 V の確率分布に関する確率である．

5.1.2 パラメーター設定

式 (1)〜(5) で定義したモデルに基づき，パラメータ値と設定理由を示す．

■ 接続確立時間 T_{setup} と処理時間 T_{proc} の設定理由
T_{setup}（接続確立時間）は BLE 接続確立から GATT 準備完了までの固定時間，T_{proc}（処理時間）はアプリ側のデータ整形・準備に要する固定時間として扱う．本評価では ESP32（M5Paper v1.1）での実装を想定するが，T_{setup} と T_{proc} は実測に基づく値ではなく，評価条件として置いた仮定値である．具体的には $T_{\mathrm{setup}} = 0.5\,\mathrm{s}$, $T_{\mathrm{proc}} = 0.2\,\mathrm{s}$ を採用し，デバイス条件を揃えて比較するための基準パラメータとする．

■通信範囲と歩行速度　本評価では，BLE の屋内到達距離として一般的に報告される値に基づき半径 $R = 10\,\mathrm{m}$ を採用し [16]，歩行速度は，健康成人（20–79 歳）の快適歩行速度の参照値に基づき平均 $\mu_v = 1.4\,\mathrm{m/s}$ とする [17]．個人差を表現するため，歩行中の速度は標準偏差 $\sigma_v = 0.2\,\mathrm{m/s}$ の正規分布を $[0.8, 2.0]\,\mathrm{m/s}$ で切り詰めた分布としてモデル化する．また，広告閲覧に伴う立ち止まりが生じることを考慮し，停留確率 p_{stop} で $V = 0$ となる混合分布を導入し，本評価では $p_{\mathrm{stop}} = 0.05$ とした．歩行中成分の代表値として μ_v を代入すると，式

(3) より $T_{\text{touch}} \approx 7.1\,\text{s}$ となり，利用可能時間は式 (4) に従って評価する．

■BLE 実行スループットの設定　EPS との通信対象をスマートフォン（iOS/Android）を通信対象とし，アプリケーションが実際に得る実効データ転送量（goodput）を BLE 実行スループット S_{BLE} として定義する．BLE の性能は接続間隔や上位層・再送等の影響で変動し得るため，数理モデルでは上限を算出した上で，実環境要因を係数で吸収した固定値を用いる．なお，BLE の Connection Interval は仕様上 7.5 ms から 4.0 s の範囲で定義される [18]．

(1) 理想（上限）スループットの算出

Bluetooth 4.2 以降では Data Length Extension（DLE）により，リンク層データ長を用いた高スループット化が可能である [19, 20]．実装例として，1 M PHY，DLE 有効，1 回の接続間隔内に 5 パケットを詰められるように $CI = 12.5\,\text{ms}$ を選ぶと，上限のスループットは

$$S_{\text{ideal}} = \frac{251\,\text{B} \times 5}{12.5\,\text{ms}} = 100.4\,\text{kB/s} \approx 0.803\,\text{Mbps} \quad (6)$$

となる．ここで S_{ideal} は BLE の理想（上限）スループットを表す．

(2) 実環境係数による固定値化

実環境では，処理オーバヘッドおよび再送等により理論値が達成できないことが報告されているため [21] [22]，実環境係数 $(0 < \gamma < 1)$ を導入して

$$S_{\text{BLE}} = \gamma S_{\text{ideal}} \quad (7)$$

と置く．現代の iOS ／ Android 端末を対象とした実務上の指標として，DLE 有効かつ 1 M PHY において 50 kB/s 程度が達成可能とされる [21] [22]．そこで本研究では，式 (6) の上限値に対して $\gamma = 0.5$ を採用し，

$$S_{\text{BLE}} = 0.5 \times 100.4\,\text{kB/s} = 50.2\,\text{kB/s} \approx 0.40\,\text{Mbps} \quad (8)$$

を固定パラメータとして用いる．固定値は，上限を超えず，かつ実端末での達成可能レンジに整合するため，スマートフォンを通信相手とするモデル化における代表値として妥当であると考える．本研究では $R_{\text{goodput}} \equiv S_{\text{BLE}} = 5.02 \times 10^4\,\text{B/s}$ として用いる．

5.2　MobiEPS：コンテンツ拡散効率の評価

MobiEPS の全体性能は，個々の通信成功率だけでなく，モバイル端末と EPS が近接して通信可能となる機会の時系列と，その機会におけるデータ複製に基づく情報拡散過程に依存する．そこで，空間内での複数人の移動を個別に追跡するシミュレーションモデルではなく，

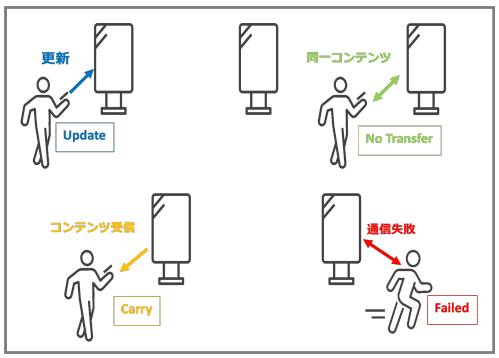


図 7　MobiEPS 評価シミュレーションの概要図

離散時間の確率的接触モデルに基づくモンテカルロ・シミュレーションにより，時間経過に伴う情報伝搬挙動を数値的に評価する．

評価シナリオとして，初期情報保持者となる 1 台のモバイル端末が最新のコンテンツデータを保持した状態でエリア内に進入し，未更新の EPS 群に対して情報を拡散する更新プロセスを想定する（図 7）．本評価では，データサイズが全 EPS の更新完了時間に与える影響を評価する．

図に示すように，モバイル端末と EPS 集団の相互作用を通じて情報が段階的に伝播する過程を分析する．情報拡散を，離散時間の確率的接触モデルとして定式化する．

5.2.1　ネットワークモデルと状態定義

ネットワークを構成する全ノード集合を $\mathcal{N}$ とし，EPS ノード集合 $\mathcal{E}$ とモバイル端末ノード集合 $\mathcal{M}$ の和集合で表す（$\mathcal{N} = \mathcal{E} \cup \mathcal{M}$）．時刻 t における各ノード $i \in \mathcal{N}$ の保持データ状態を $s_i(t) \in \{0, 1\}$ と定義する．ここで，0 は旧バージョン（更新待ち），1 は新バージョン（更新済み）を表す．

初期時刻 $t = 0$ において，新データを保持するモバイル端末は 1 台のみであり，その他の全ノードは旧データを保持しているとする．すなわち，

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} s_m(0) = 1, \quad \forall e \in \mathcal{E},\, s_e(0) = 0 \quad (9)$$

5.2.2　モバイル端末—EPS 間の通信機会モデル

各時間ステップ t において，各モバイル端末 $m \in \mathcal{M}$ は高々 1 回の接触機会を持つ．接触が発生するか否かは成功確率 p_{c} のベルヌーイ試行に従い，各モバイル端末の接触発生は端末間で独立，かつ時刻間で独立に生成されると仮定する．接触が発生した場合，接触相手は EPS 集合 $\mathcal{E}$ から一様に 1 台選択される．本モデルでは，接触は Mobile $\leftrightarrow$ EPS のみを扱い，Mobile $\leftrightarrow$ Mobile および EPS $\leftrightarrow$ EPS の直接通信は考慮しない．

5.2.3 状態遷移

モバイル端末が EPS と接触したとき，状態遷移は以下の 2 ケースのみで発生し得る．

- **Update:** $s_m(t) = 1$ かつ $s_e(t) = 0$ のとき，EPS の更新が試行される．
- **Carry:** $s_m(t) = 0$ かつ $s_e(t) = 1$ のとき，モバイル端末への複製が試行される．

データサイズ S に依存する通信成功率 $P_{\mathrm{succ}}(S)$ に基づき，接触が発生し，かつ上記の必要条件が満たされた場合にのみ確率的な状態遷移が生じる．例えば Update の場合，

$$\Pr(s_e(t+1) = 1 \mid s_m(t) = 1,\, s_e(t) = 0) = P_{\mathrm{succ}}(S) \tag{10}$$

Carry の場合も同様に，

$$\Pr(s_m(t+1) = 1 \mid s_e(t) = 1,\, s_m(t) = 0) = P_{\mathrm{succ}}(S) \tag{11}$$

とする．通信に失敗した場合，データの更新状態は維持される．

5.2.4 通信成功率モデルとパラメータ

通信成功率モデルは 5.1 節で定義した式 (2)〜(5) を用いる．要求時間 $T_{\mathrm{req}}(S)$ の固定時間項は接続確立やプロトコル制御に要する時間（$T_{\mathrm{setup}} + T_{\mathrm{proc}}$）であり，実効スループット R_{goodput} と歩行速度分布の設定値も 5.1.2 の条件を踏襲する．接触継続時間 T_{touch} と利用可能時間 T_{avail} は式 (3), (4) に従う．

5.2.5 インタラクションの分類

モバイル端末と EPS の各接触を，接触時点の状態 $(s_m(t), s_e(t)) \in \{0,1\}^2$ と通信の成否に基づいて以下の 4 種に分類し，ステップごとの発生回数を集計する．ここで，Mobile の状態 $s_m(t)$，EPS の状態 $s_e(t)$ は，OLD $= 0$，NEW $= 1$ のどちらかを取るものとする．また，各接触では確率 $P_{\mathrm{succ}}(S)$ で通信が成功し，失敗時は状態更新を伴わない．

- **Update（$\mathcal{E}_{upd}$）：** Mobile が NEW，EPS が OLD のとき（$s_m(t) = 1, s_e(t) = 0$）に通信が成功し，EPS が NEW に更新される事象である．
- **Carry（$\mathcal{E}_{cry}$）：** Mobile が OLD，EPS が NEW のとき（$s_m(t) = 0, s_e(t) = 1$）に通信が成功し，Mobile が NEW を複製して保持する事象である．
- **NoTransfer（$\mathcal{E}_{no}$）：** 接触時点で両者の状態が一致しており（$(s_m(t), s_e(t)) = (1,1)$ または $(0,0)$），通信は成功したが状態変化が生じない事象である．
- **Failed（$\mathcal{E}_{fail}$）：** 上記いずれの状態組合せにおいても，通信が失敗した事象である（`p_succ` 不成立）．すなわち，Update ／ Carry を試行したが失敗した場合に加えて，`NEW--NEW` や `OLD--OLD` における通信のみ失敗も本分類に含める．

全 EPS ノードにおける更新完了率は，

$$R_{\mathrm{cov}}(t) = \frac{1}{|\mathcal{E}|} \sum_{e \in \mathcal{E}} s_e(t) \tag{12}$$

として観測する．$R_{\mathrm{cov}}(t)$ が所定の閾値に到達する時刻および全 EPS 更新完了時刻（T_{all}）の分布を評価する．

5.3 シミュレーション処理

各ステップで生成された接触イベントについて停留判定を含めて歩行速度 V をサンプルし，式 (3) に従って T_{touch} を算出し，式 (4) により T_{avail} を計算して，$P_{\mathrm{succ}}(S)$ により通信成否を判定する．成功時は状態 $(s_m(t), s_e(t))$ に応じて Update/Carry/NoTransfer を計数し，Update/Carry の場合のみ状態遷移を行う．失敗時は Failed を計数し，状態は維持する．

5.4 結果

データサイズ S の増加により $P_{\mathrm{succ}}(S)$ が低下し（図 11），Update/Carry の成立頻度が下がるため，更新率の立ち上がり遅延と失敗増が生じる．図 9 では，S が小さい条件ほど更新率の立ち上がりが速く，高い更新率へ到達しやすい．一方で S が大きい条件では立ち上がりが遅延し，信頼区間が広がることで試行間のばらつきも増える．図 10 では，S の増加に伴い Failed の相対頻度が増大し，Update/Carry が抑制される．また，イベント比率の時間推移（図 8）から，拡散が進むにつれて NoTransfer が増える一方，大容量条件では Failed が相対的に高止まりすることが読み取れる．運用上は，$P_{\mathrm{succ}}(S)$ が極端に小さくならない範囲に S を設定することが重要である（図 11）．

6 ユーザー評価

6.1 評価環境と手順

ユーザー評価では，3 台の EPS を設置し，モバイル端末を携行して指定経路を巡回する歩行タスクを被験者に課した（図 12）．実施場所は北海道情報大学の大学院生室内の居住エリアおよび講義室である．被験者は 14 名で，いずれも 20 代の男女である．経路は EPS の近傍を必ず通過するように設定したが，EPS の注視や立ち止まりについては指示せず，日常的な移動に近い条件で評価した．タスク終了直後に，EPS の存在認知，表示更新の知覚，可読性，更新理解，立ち止まり意図，および実運用上の懸念に関するアンケート（表 2）へ回答してもらった．

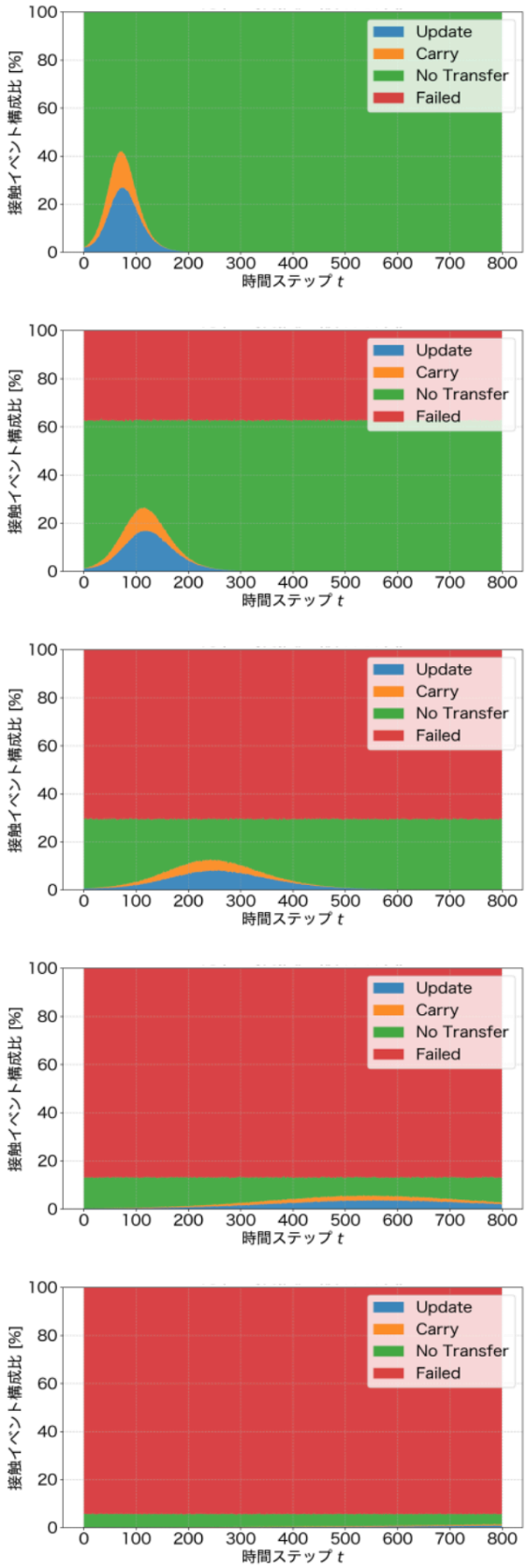


図 8　接触イベント比率の時間推移：上から 100 KB, 300 KB, 350 KB, 400 KB, 500 KB

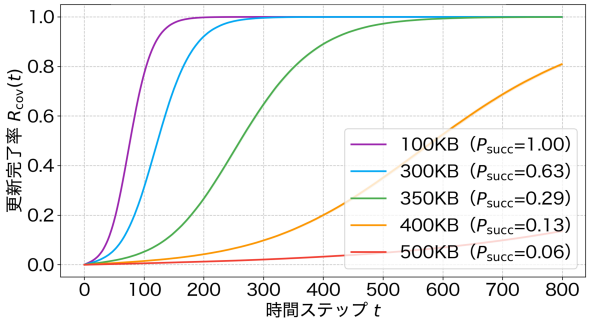


図 9　情報伝播の時間推移

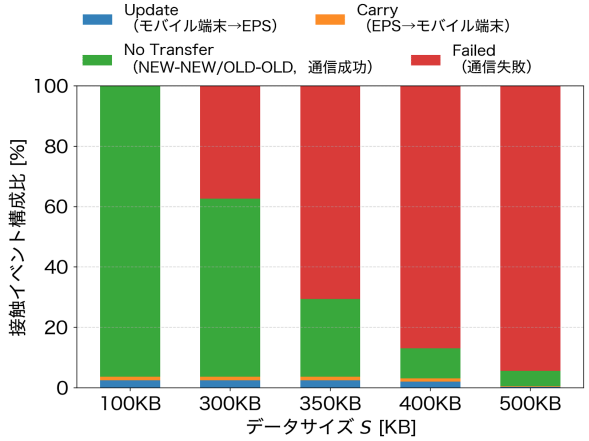


図　10　接触イベント内訳：Update/Carry/NoTransfer/Failed の比率

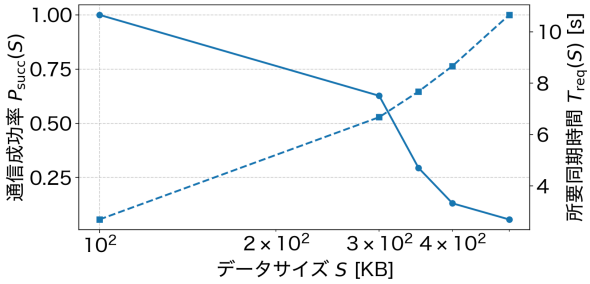


図 11　成功率モデルの確認：$P_{\mathrm{succ}}(S)$ と時間閾値のデータサイズ依存

6.2　結果と考察

歩行中に EPS の存在に気がついた台数は，「3 台」が 12 名（85.7%），「2 台」が 1 名（7.1%），「1 台」が 1 名（7.1%）であり，「気がつかなかった」と回答した参加者はいなかった．この結果から，EPS は歩行中であっても設置物としては比較的認知されやすいことが分かる．一方で，これは EPS の存在に気がついたことを示す結果であり，表示内容や更新動作まで認識できたことを意味するものではない．

表示が変化したことに気がついた台数については，「気がつかなかった」が 8 名（57.1%）で最も多かった．表示変化に気がついた参加者の内訳は，「1 台」が 3 名（21.4%），「2 台」が 1 名（7.1%），「3 台」が 2 名（14.3%）であった．したがって，EPS の存在認知は得られた一方で，歩行中に表示更新そのものを知覚できた参加者は限定的であった．このことから，更新機構自体が成立し

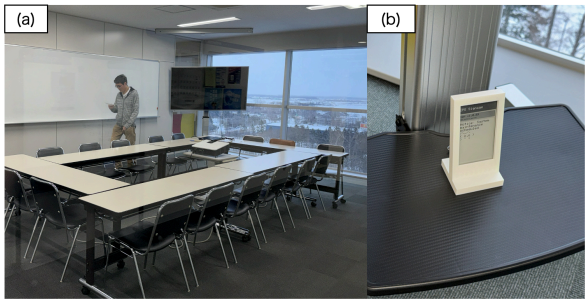


図 12　ユーザー評価の様子 (a) 巡回タスク実施 (b) 設置した EPS

ても，歩行中の利用者に更新を確実に認識させるには，表示切替時の視覚的キューや，変化箇所を強調する提示方法が必要である．

歩行中の可読性（5 件法）は平均 $M = 1.86$，標準偏差 $SD = 0.86$ であり，十分に高いとはいえなかった．回答分布では，1 が 5 名（35.7%），2 が 7 名（50.0%）であり，1 または 2 の低評価が 12 名（85.7%）を占めた．3 は 1 名（7.1%），4 は 1 名（7.1%）であり，5 と回答した参加者はいなかった．この結果は，現状の表示内容では，歩行しながら情報を読み取る用途に対して可読性が不足していることを示している．

視認を妨げた要因としては，「文字サイズ」12 名（85.7%），「歩行速度」8 名（57.1%）が多く挙げられた．また，「表示の情報量」は 3 名（21.4%），「文字背景のコントラスト」は 2 名（14.3%）であり，「周囲の照明」を選択した参加者はいなかった．このことから，本評価環境では照明条件よりも，移動中に短時間で視認するための文字サイズや情報量の設計が主な課題であったと考えられる．

画面の変化を「更新によるもの」だと理解できたかを問う 5 件法では，回答 $n = 13$ に対して平均 $M = 3.08$，標準偏差 $SD = 1.80$ であり，理解には個人差が見られた．回答分布は，1 が 5 名（38.5%），2 が 0 名（0.0%），3 が 1 名（7.7%），4 が 3 名（23.1%），5 が 4 名（30.8%）であった．高く理解できた参加者が一定数いる一方で，まったく理解できなかった参加者も多いため，表示更新の意味を利用者が自然に解釈できるとは限らない．そのため，更新前後の差分が分かる表示，更新中であることを示す明示的なラベル，または更新後の状態を示すキューが必要である．

更新のために立ち止まろうと思ったかを問う 5 件法は平均 $M = 2.43$，標準偏差 $SD = 1.60$ であり，立ち止まり意図は全体として高くなかった．回答分布は，1 が 6 名（42.9%），2 が 3 名（21.4%），3 が 0 名（0.0%），4 が 3 名（21.4%），5 が 2 名（14.3%）であった．この結果から，EPS の更新を成立させるために利用者が自発的に停止することを前提にする設計は，実運用上は成立しにくいと考えられる．

また，立ち止まるとしても許容時間は，「1–5 秒」と「6–10 秒」がそれぞれ 6 名（42.9%）であり，10 秒以内の回答が全体の 85.7% を占めた．「11–20 秒」と「30–60 秒」はそれぞれ 1 名（7.1%）であり，21 秒以上の停止を許容する回答は少なかった．したがって，実運用では利用者の長時間停止を前提にせず，短時間の遭遇でも認知と理解が成立する表示設計および同期設計が求められる．

日常運用で守ることが難しい条件については，回答 $n = 11$ のうち，「端末の設定維持が不安（権限，通信設定など）」が 8 名（72.7%）で最も多く，「バッテリー消費への懸念」が 7 名（63.6%），「プライバシー保護への不安」が 5 名（45.5%），「端末を携行することが難しい」が 2 名（18.2%）であった．この結果から，MobiEPS を実環境で運用する場合には，通信成立率や表示可読性だけでなく，ユーザー端末側の設定維持，消費電力，プライバシーに対する心理的負担を低減する運用設計も重要である．

自由記述では，更新に気づきやすくする演出や通知の必要性も指摘された．以上より，MobiEPS の実運用に向けては，通信成立だけでなく，視認性の高い提示方法，更新を伝える明示的な演出，短時間の遭遇を前提とした同期処理，および端末設定負担を抑える運用設計が重要である．

7　おわりに

本研究は，通信インフラに依存せずノーマリーオフ設計を維持したまま EPS の情報更新を可能とすることを目的に，人の移動を媒介としたコンテンツ配送と近接時のみ起動する駆動方式を統合した MobiEPS を提案した．

プロトタイプ実装では，EPS，近接駆動モジュール，モバイル端末の実装を行った．提案方式の近接駆動プロトタイプでは，単一の衝撃（踏圧等）で EPS を確実に起動できない場合が確認された．このため，日常的な動作のみでは起動が成立せず，運用時にユーザーの明示的な操作を要する点が課題である．この課題に対し，圧電素子を格子状に配置して並列接続することで蓄電量の増加を図る設計改善を検討している．加えて，電磁誘導発電モジュール等，別方式の発電手段の導入も含めて検討し，少ない動作入力でも起動可能な近接駆動機構へ改良することも考えられる．

拡散評価では，S の増大が更新率の立ち上がり遅延，

分位到達時間の増大，Failed の増加として現れることを確認した．また，ユーザー評価では，歩行中でも EPS の存在認知は得られる一方で，表示更新の知覚は限定的であり，可読性は文字サイズや歩行速度の影響を強く受けることを確認した．加えて，立ち止まり意図は全体として低く，許容される停止時間は 10 秒以内が大半であったことから，短時間で理解できる情報設計と更新を伝える視覚的キューが実運用上の重要課題であることが示唆された．

生成 AI の利用に関する開示

本研究では，研究用プログラムの設計・実装・デバッグ，論文の構成検討・文章作成・校正，および組版の支援に生成 AI を利用した．生成 AI による出力については，著者が内容を確認し，必要に応じて修正した．研究の実施ならびに本プレプリントの内容に関する最終的な判断と責任は，すべて著者に帰属する．

参考文献

[1] Peng Fei Bai, Robert Andrew Hayes, Mingliang Jin, Lingling Shui, Zi Chuan Yi, Li Wang, Xiao Zhang, and Guofu Zhou. Review of paper-like display technologies (invited review). *Progress in electromagnetics research*, Vol. 147, pp. 95–116, 2014.

[2] 新田健人, 長崎健, 戸田真志, 平田圭二, 松原仁. 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. 情報処理学会研究報告（EMB）, Vol. 2015, No. 22, pp. 1–5, 2015.

[3] Takafumi Akiba and Tsubasa Yumura. 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.

[4] 秋葉貴文, 湯村翼. 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送手法の開発と評価. 情報処理学会研究報告（UBI）, Vol. 2026, No. 14, pp. 1–8, Feb 2026.

[5] Kevin Fall. A delay-tolerant network architecture for challenged internets. In *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pp. 27–34, 2003.

[6] Chung-Ming Huang, Kun-chan Lan, and Chang-Zhou Tsai. A survey of opportunistic networks. In *22nd International conference on advanced information networking and applications-workshops (aina workshops 2008)*, pp. 1672–1677. IEEE, 2008.

[7] Rahul C Shah, Sumit Roy, Sushant Jain, and Waylon Brunette. Data mules: Modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks. *Ad hoc networks*, Vol. 1, No. 2-3, pp. 215–233, 2003.

[8] Wenrui Zhao, Mostafa Ammar, and Ellen Zegura. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pp. 187–198, 2004.

[9] Nintendo. Streetpass feature overview. `https://en-americas-support.nintendo.com/app/answers/detail/a_id/404/~/streetpass-feature-overview`. Accessed: 2026-05-08.

[10] Sergio Aguilar, Rafael Vidal, and Carles Gomez. Opportunistic sensor data collection with bluetooth low energy. *Sensors*, Vol. 17, No. 1, p. 159, 2017.

[11] Ruan CM Teixeira, Celso B Carvalho, Carlos T Calafate, Edjair Mota, Rubens A Fernandes, Andre L Printes, and Lennon BF Nascimento. Floatingblue: A delay tolerant networks-enabled internet of things architecture for remote areas combining data mules and low power communications. *Sensors*, Vol. 24, No. 19, p. 6218, 2024.

[12] Yasuhiro Ishimaru, Weihua Sun, Keiichi Yasumoto, and Minoru Ito. Dtn-based delivery of word-of-mouth information with priority and deadline. In *Proc. 5th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking*, pp. 179–185, 2010.

[13] M5Stack. M5paper v1.1 documentation. `https://docs.m5stack.com/ja/core/m5paper_v1.1`, 2024. `https://docs.m5stack.com/ja/core/m5paper_v1.1`.

[14] M5Stack. M5stack core2 for aws documentation. `https://docs.m5stack.com/ja/core/core2_for_aws`, 2024. Accessed: 2026-05-08.

[15] Analog Devices. Ltc3588-1 piezoelectric energy

harvesting power supply. https://www.analog.com/en/products/ltc3588-1.html, 2024. Accessed: 2026-05-08.

[16] Carles Gomez, Joaquim Oller, and Josep Paradells. Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology. *Sensors*, Vol. 12, No. 9, pp. 11734–11753, 2012.

[17] Richard W. Bohannon. Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20–79 years: Reference values and determinants. *Age and Ageing*, Vol. 26, No. 1, pp. 15–19, 1997.

[18] Bluetooth SIG. Bluetooth core specification v5.4: Low energy controller, link layer specification (conninterval range). https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Files/Specification/HTML/Core-54/out/en/low-energy-controller/link-layer-specification.html. Accessed: 2026-05-08.

[19] Jacopo Tosi, Fabrizio Taffoni, Marco Santacatterina, Roberto Sannino, and Domenico Formica. Performance evaluation of bluetooth low energy: A systematic review. *Sensors*, Vol. 17, No. 12, p. 2898, 2017.

[20] Kristof T'Jonck, Bozheng Pang, Hans Hallez, and Jeroen Boydens. Optimizing the bluetooth low energy service discovery process. *Sensors*, Vol. 21, No. 11, p. 3812, 2021.

[21] Chris Coleman. A practical guide to ble throughput. https://interrupt.memfault.com/blog/ble-throughput-primer, 2019. Accessed: 2026-01-20.

[22] Punch Through. Maximizing ble throughput part 4: Everything you need to know. https://punchthrough.com/ble-throughput-part-4/, 2020. Accessed: 2026-01-20.

表 2　ユーザー評価のアンケート項目

番号	質問	選択肢
Q1	大学院生室を日常的に利用していますか（必須）	日常的に利用している / ときどき利用している / 初めて利用する
Q2	歩行中に，設置されていた EPS の存在に気がついた台数を教えてください（必須）	1 台 / 2 台 / 3 台 / 気がつかなかった
Q3	EPS に気がついた理由として当てはまるものを選んでください	1. 視界に入りやすい位置にあった / 2. 画面の表示内容が目に留まった / 3. 周囲と比べて目立っていた（色，サイズ，配置） / 4. たまたま視線が向いた / 5. その他（自由記述）
Q4	EPS に気がつきにくかった要因があれば選んでください	1. 設置場所がわかりにくい / 2. 照明の影響（暗い／反射など） / 3. 周囲に目を向けていなかった / 4. EPS のサイズが小さい / 5. その他（自由記述）
Q5	歩行中に表示が変化したことに気がつきましたか？（必須）	1 台 / 2 台 / 3 台 / 気がつかなかった
Q6	表示変化に気がついた理由として当てはまるものを選んでください	1. 画面全体が切り替わった / 2. 特定の領域が変化した / 3. 更新動作（画面のちらつき）のような挙動が見えた / 4. 表示内容が目に入り違いに気がついた / 5. その他（自由記述）
Q7	歩行中でも表示内容を読み取れましたか？	1. まったく読み取れない 〜 5. 十分読み取れる
Q8	視認を妨げた要因を教えてください	1. 文字サイズ / 2. 周囲の照明 / 3. 表示の情報量 / 4. 歩行速度 / 5. 文字背景のコントラスト / 6. その他（自由記述）
Q9	表示内容を読み取れなかった具体例があれば教えてください（文字が小さい，暗くて見えない，など）	自由記述
Q10	画面の変化を「更新によるもの」だと理解できましたか？	1. まったく理解できなかった 〜 5. 明確に理解できた
Q11	更新のために，歩行中に立ち止まろうと思いましたか（必須）	1. まったくそう思わない 〜 5. 強くそう思う
Q12	立ち止まろうと思った（または思わなかった）理由を教えてください（必須）	自由記述
Q13	もし立ち止まるとしたら立ち止まれる時間はどのくらいですか（必須）	1〜5 秒 / 6〜10 秒 / 11〜20 秒 / 21〜30 秒 / 30〜60 秒 / 60 秒以上 / 分からない / 立ち止まらない
Q14	日常的な利用で守ることが難しいと感じた条件があれば選んでください	1. バッテリー消費への懸念 / 2. プライバシー保護への不安 / 3. 端末の設定維持が不安（権限，通信設定など） / 4. 端末を携行することが難しい / 5. その他（自由記述）
Q15	本システムの実運用について懸念点があれば教えてください	自由記述
Q16	改善して欲しい点・追加して欲しい機能があれば教えてください	自由記述
Q17	このシステムが役立つと思う利用場面（ユースケース）があれば教えてください	自由記述