

IMU 搭載イヤホンとスマートフォンの連携による移動中のユーザの大まかな視線方向推定

森 友吾^{1,a)} 佐藤 光起^{1,b)} 松下 光範^{1,c)}

概要：本研究の目的は、IMU 搭載イヤホンにより、移動中のユーザの大まかな視線方向を推定することである。頭部運動は眼球運動と密接に関係するため、大まかな視線方向推定として用いることができる。磁力計を用いれば空間上の方向をキャリブレーションできるが、一般的なイヤホンには搭載されておらず、移動中の継続的な手動補正は困難である。そこで本稿では、イヤホン IMU とスマートフォン GPS を連携させ、GPS から得られる移動方向を基準に自動キャリブレーションする手法を提案する。車両移動環境で評価実験を行った結果、概ね補正可能である一方、推定結果が移動方向と反転して補正される場合が確認された。

1. はじめに

近年、位置情報を利用したガイドアプリや AR システムを用いることで、移動中のユーザに周辺環境の理解促進を目的とした手法が提案されている [13], [14]。これらのシステムは、ユーザの現在位置に応じて周辺の施設や景観に関する情報をスマートフォン上で提示することで、移動中の体験を支援する。一方で、移動中は周辺環境が連続的に変化し、対象が短時間で視界を通過するため、変化する環境をユーザが常に把握することは難しい。ユーザがどちらに注目すれば良いか誘導した上で、注意を向けている対象である着目対象に関する情報提示が可能になれば、短時間の周辺環境に対する理解促進が可能になる。

このような情報提示を実現するための手がかりとして、ユーザの視線方向が挙げられる。ユーザがどちらに注目を向けているか、およそその手がかりとして視線方向を用いることで、ユーザと周辺環境との位置関係を把握できる。これにより、ユーザの視線方向を基準として着目対象の方向を提示し、注意を誘導する。その後、その着目対象に関する解説を提示することで一連のインタラクションが可能になる。このように、ユーザの視線方向を継続的に取得し情報提示へと利用することで、連続的に変化する移動環境において、周辺対象の把握を支援できる。

近年のイヤホンには、加速度センサとジャイロセンサからなる Inertial Measurement Unit (IMU) が搭載され、装

着者の頭部運動を取得できるものがある。IMU 搭載イヤホンから取得できる頭部姿勢に基づいて、ユーザの大まかな視線方向を推定できることが明らかになっている [7], [10]。さらに、イヤホンは音声提示にも利用できるため、頭部方向の計測と対象に関する解説の提示を同一の装着デバイスで行うことができる。しかし、イヤホンの IMU から取得される方向は、イヤホン固有の基準座標系における相対方向であり、そのままでは地理空間上の方向と対応しない。ユーザの大まかな視線方向と周辺対象との位置関係を求めるためには、イヤホン基準座標系を、周辺対象の位置が表現される地理座標系へ対応づけるキャリブレーションが必要である。地磁気を基準とした絶対方位を取得できれば、その方位を基準としてイヤホンの地理座標系における視線方向を推定可能であるが、一般的な IMU 搭載イヤホンには磁力計が搭載されておらず、地磁気を基準とした絶対方位の取得は難しい [3]。

スマートフォンの GPS からは、東西南北を基準とする GPS 座標系上の移動方向を取得できる。ユーザとスマートフォン、イヤホンが同一の移動体とともに移動する状況では、移動体の加速に伴う長手方向の加速度がイヤホンにも現れると考えられる。そこで、イヤホン基準座標系で観測した代表加速度方向を GPS 移動方向へ対応づけ、両座標系間の回転を推定する。本研究では、この回転をイヤホンから得た頭部正面方向へ適用することで、磁力計を用いずに GPS 座標系上の大まかな視線方向を推定する手法を提案する。本稿では、提案手法によるキャリブレーションとあらかじめ設定された方位を向いて行う手動キャリブレーションから取得された角度差を検証し、その有効性につい

¹ 関西大学

^{a)} k737901@kansai-u.ac.jp

^{b)} k081485@kansai-u.ac.jp

^{c)} m_mat@kansai-u.ac.jp

て議論する。

2. 関連研究

2.1 イヤホンによる頭部追跡

近年、IMU やマイクなどのセンサを搭載した市販イヤホンが普及している。これらのセンサを利用して、ユーザの頭部姿勢を推定する研究や、頭部が向いている対象を識別する研究が存在する。Ferlini らは、IMU を用いた頭部追跡では、地磁気を参照する磁力計があれば絶対方位を基準とした姿勢補正が可能になる一方で、イヤホン内部のスピーカや充電ケースの磁石が磁力計に干渉するため、市販のイヤホンには磁力計が搭載されていないことを報告している [3]。同研究では、磁力計を持たないイヤホンを用いて頭部回転を推定し、条件によって数度程度の精度が得られることを示したが、長時間の運動ではドリフトによって精度が低下することも示している。この結果は、イヤホン IMU によって頭部運動を取得できる一方で、絶対方位を維持するための基準が必要になることを示している。

この制約下でも、イヤホンの IMU を移動追跡に活用する手法が提案されている。Ahuja らは、イヤホンの IMU を用いた慣性航法システム PilotEar を提案し、イヤホン位置で取得される慣性データを移動追跡へ利用できることを示した [1]。IMU に生じる累積誤差を外部情報によって補正する手法も提案されている。Hu らは、スマートフォンが送出する非可聴音をイヤホンで受信し、その音響情報を用いてイヤホン IMU による頭部軌跡のドリフトを補正する IA-Track を提案している [5]。Yang らの Ear-AR は、イヤホンとスマートフォンの IMU で位置と頭部方向を推定し、空間音響に対するユーザの反応を利用して自然なキャリブレーションを実現する [12]。Wang らは、端末から送出した超音波チャープをイヤホンの複数のマイクで受信し、音響測距によって端末に対する頭部位置および姿勢を推定する FaceOri を提案した [11]。Hashem らは、左右の BLE イヤホンから送信されるビーコンの受信信号強度差を環境中の複数機器で比較し、事前学習や姿勢キャリブレーションを行わずにユーザが向いている機器を識別する Look&Lock を提案した [4]。森らは、IMU 搭載ヘッドホンを用い、2 点を注視する手動キャリブレーションによって頭部姿勢から平面上の注視位置を推定した [15]。

このように、磁力計を持たないイヤホンの方向を外部座標系へ対応づける既存手法では、音響信号などの外部インフラを利用できる環境、またはユーザ自身による基準方向の設定が必要となる。本研究は、移動体の進行方向を基準とし、水平方向のキャリブレーションを外部環境に依存せず、自動的に可能にする。

2.2 頭部姿勢と視線方向の関係

視線計測装置を用いて視線推定を行うことは、導入・設

置コストがかかる。そのため、測定が比較的容易な頭部姿勢から視線推定を行う研究がある。Nagai らは、スマートフォンのフロントカメラから推定した頭部方向を視線方向へ変換する HandyGaze を提案しており、検証では、頭部方向と視線方向との線形のあることを示した [7]。Takaki らは、座位、立位および歩行時に対象を自由に見る際の頭部姿勢と視線角度を計測し、歩行時を含めて両者を概ね線形の関係として近似できることを示した [10]。一方で、頭部方向と眼球の視線の関係には個人差や姿勢差があり、眼球のみが動く場合には、頭部方向から視線方向を正確に推定することは難しい。そこで本研究では、イヤホン IMU から得られる頭部姿勢を移動方向に対する左・正面・右といった大まかな視線方向の手がかりとして用いる。

2.3 移動情報を用いた方向推定

自動車内では、磁気外乱により磁力計を用いた方位推定が不安定になる場合がある。この課題に対し、スマートフォンの IMU と GPS を用いて、スマートフォン座標系と車両座標系との対応関係を推定する手法が提案されている。Almazán らは、車載スマートフォンの IMU と GPS を用いて、スマートフォン座標系と車両座標系との相対ヨー角を自動推定する手法を提案した [2]。この手法は、直進中の長手方向加速度からヨー角候補を求め、Kalman filter と Gaussian Mixture Model によって IMU ノイズの影響を抑える。Larsson らは、自動車内のスマートフォンから得られる IMU 計測値のみを用いて、スマートフォン座標系と車両座標系との対応を非線形フィルタリング問題として定式化し、周辺化粒子フィルタによって端末姿勢を推定した [6]。複数の運転者が自身のスマートフォンを自由に扱う条件で評価し、推定誤差は試行の 50% で 5 度未満、90% で 20 度未満であった。Nogueira らは、低コスト IMU と GNSS を用いた移動中の車両座標系整合手法を提案した [8]。この手法では、重力を用いる水平化と直進時の車両加速度を用いる方位推定とを分け、Kalman filter によって推定を逐次更新することで、ヨー角について 15 度未満の誤差を報告している。

本研究は、移動体の長手方向加速度と GPS 進行方向に対応づける考え方を、車体に置かれたスマートフォンではなく、頭部に装着されるイヤホンへ適用する。これらの研究が車両に対して固定または車内で保持されるスマートフォンの姿勢を対象とするのに対し、本研究は、ユーザの頭部運動を含むイヤホン IMU を対象として、移動方向に対する頭部正面方向を得るための座標変換を推定する。

2.4 移動中の周辺環境に関する情報提示

移動中の位置や方向に応じた情報提示は、移動体験を拡張する手段として研究されている。古田らは、都電荒川線の車窓景観を対象としてアイマークレコードによる計測を

行い、移動速度や景観の変化が注視範囲、注視対象、注視距離に影響することを示している [16]。この知見は、車窓への視覚的注意が移動状況に応じて変化することを示している。Yang らの Ear-AR は、推定した位置と頭部方向からユーザが見ている展示物を判断し、対応する 3 次元音声注釈をイヤホンから提示する [12]。この例は、頭部方向を取得することで、画面操作を要求せずに周辺対象へ情報を対応付けられる可能性を示している。

鉄道移動を対象とした研究として、石川らは、トンネル内でも車窓外の景色を仮想的に体験できるようにするため、BLE ビーコンと AR を用いたシステムを検討している [13]。川端らは、スマートフォン上に沿線地域のスポットを仮想的な車窓として提示し、沿線地域の印象形成を支援する手法を提案している [14]。これらのシステムにユーザの大まかな視線方向を組み合わせれば、ユーザが向いている側や注意を向けた対象に応じて情報を選択し、移動体験と周辺環境との対応をより明確にできると考えられる。

3. デザイン指針

3.1 本研究の立ち位置

先行研究では、イヤホン IMU を用いて頭部運動を追跡できること、頭部方向と視線方向には概ね線形の関係があり、頭部方向を大まかな視線方向の手掛かりとして利用できることが示されている。一方、磁力計を持たないイヤホンの基準座標系からは、地理座標系に対する方向を直接得ることができない。既存手法では、外部インフラや明示的なキャリブレーションを利用して、イヤホンの位置や方向を外部座標系へ対応づけている。これに対し、車載スマートフォンを対象とした研究では、移動体由来の慣性情報や GPS/GNSS 情報を利用して、スマートフォン座標系と車両座標系との対応関係を推定している。ただし、これらの研究は車両に固定または車内で保持されるスマートフォンを対象としており、ユーザの頭部運動を含むイヤホンの方向推定を目的としていない。

そこで本研究では、この座標系の対応づけの考え方を頭部に装着されたイヤホンへ適用する。本研究は、一定方向に移動する車や電車の車内で利用する状況を対象とする。イヤホンで観測した移動体由来の水平加速度方向を GPS 移動方向へ対応づけることで、イヤホン基準座標系から GPS 座標系への水平方向の回転を推定する。これにより、日常的に使用されるイヤホンとスマートフォンのみを用いて、車内移動中の大まかな視線方向を取得することを目指す。

3.2 システム要件

以上の立ち位置から、提案システムの要件を以下のように定める。

- (1) 市販の IMU 搭載イヤホンと GPS を搭載したスマートフォンのみで構成できること。

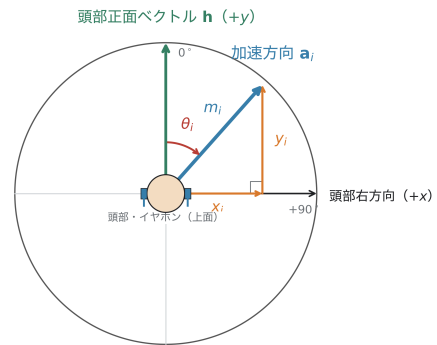


図1 イヤホン基準座標系における水平加速度ベクトルの定義

- (2) 車や電車での移動中に利用できること。
- (3) 移動方向に対するユーザの頭部正面方向を、大まかな視線方向として取得できること。
- (4) 追加機器の導入および明示的な操作を必要とせず、自動で座標系を対応づけられること。

4. 提案システム

4.1 システム構成

提案システムは、IMU 搭載イヤホン（Apple AirPods Pro 第2世代）、GPS を搭載したスマートフォン（Apple iPhone 15 Pro）から構成される。iOS アプリケーションは、Xcode 26.2 を開発環境とし、Swift を用いて実装した。イヤホンからはモーションデータを取得し、スマートフォンからは現在位置、速度、GPS コースを取得する。アプリケーションは、一定方向に走行する車両などの移動状況を想定し、キャリブレーション区間に得られた水平加速度の代表方向を進行方向として扱う。GPS 移動方向から GPS 座標系における進行方向を推定し、イヤホン基準の座標系から得られる頭部正面方向を GPS 座標系へと対応づける。キャリブレーション後は、この回転を現在の頭部正面ベクトルへ適用し、GPS 座標系における頭部正面方向と、移動方向に対する相対角度を出力する。

4.2 イヤホン加速度と頭部方向の取得

Swift の `CMHeadphoneMotionManager` ^{*1}を用い、イヤホンの加速度、重力方向、姿勢行列を 25Hz で取得する。イヤホン座標系で得られたユーザ加速度を姿勢行列により基準座標系へ変換した後、重力方向への射影成分を除去し、水平加速度を得る。水平面上の加速度ベクトルを $\mathbf{a}_i = (x_i, y_i)$ とし、その大きさ m_i と方向 θ_i を

$$m_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}, \quad (1)$$

$$\theta_i = \text{atan2}(x_i, y_i) \quad (2)$$

で表す。本システムでは、基準座標系の +y 方向を 0 度、

^{*1} Apple Inc.: `CMHeadphoneMotionManager`, <https://developer.apple.com/documentation/coremotion/cmheadphonemotionmanager> (2026/8/5 確認)。



図 2 GPS 情報の取得と GPS コース（進行方向）から移動方向ベクトルへの変換

$+x$ 方向を $+90$ 度とする．加速度が小さいときは方向がノイズに支配されるため， $m_i < 0.02 g$ のサンプルを除外する．頭部方向については，イヤホン姿勢から得た頭部前方軸を基準座標系へ変換し，水平面へ射影したベクトル $\mathbf{h}$ を頭部正面方向とする．図 1 に，イヤホン基準座標系における水平加速度ベクトルとその大きさおよび方向の関係を示す．本稿でいう大まかな視線方向は，眼球方向ではなく，この $\mathbf{h}$ が表す頭部正面方向である．

4.3 GPS 情報の取得

スマートフォンの位置情報は，iOS の Core Location を用いて取得する．Core Location から通知される最新の `CLLocation` *2から，緯度，経度，速度，水平位置精度，および `course` を取得する．本稿では，この `course` を GPS コースと呼ぶ．GPS コースは，端末が地表面上を実際に移動している進行方向を，真北を基準とした方位角で表す．これは，磁力計から得られる端末方位，すなわち端末上端が向いている方向とは異なり，車内や電車内でスマートフォンの向きを変えても，移動軌跡が同じであれば GPS コースは車両の進行方向を表す．GPS コース ϕ から，東向きを x 軸，北向きを y 軸とする単位移動方向ベクトル

$$\mathbf{t} = (\sin \phi, \cos \phi) \quad (3)$$

を求める．`course` が負値の場合は，Core Location が有効な進行方向を提供できていないことを表す．本実装では，`course` が 0 度以上，速度が 3.0 m/s 以上，かつ水平位置精度が 0 m 以上 50 m 以下のときに GPS コースを有効とする．現在のコースが有効でない場合には，直前の有効なコースを一時的に利用する．図 2 に，スマートフォン GPS から取得する情報と移動方向ベクトルの生成過程を示す．

5. 自動キャリブレーション手法

5.1 代表加速度方向の推定

図 3 に，有効加速度ベクトルから代表加速度方向を決定

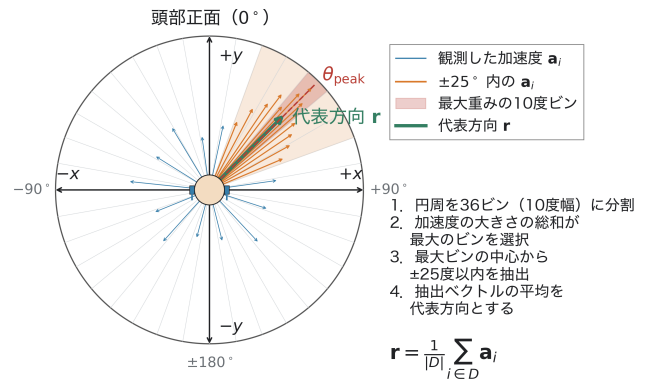


図 3 36 方向ビンを用いた代表加速度方向の決定手順

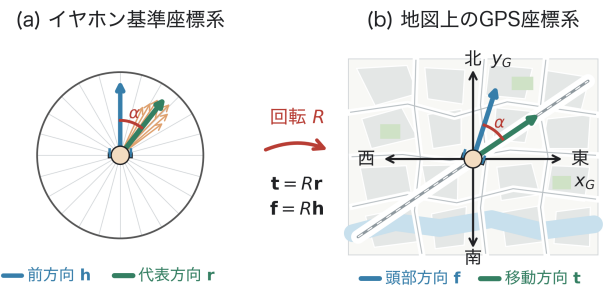


図 4 イヤホン基準座標系から地図上の GPS 座標系への変換

する手順を示す．一定時間のキャリブレーション区間に得られた有効な水平加速度を， -180 度から 180 度まで 10 度幅の 36 ビンへ分割する．各ビン b には，そのビンへ属するサンプルの加速度の大きさを重みとして加算する．

$$w_b = \sum_{i \in b} m_i \quad (4)$$

最大の重みを持つビンの中心角を θ_{peak} とする．ビン境界による量子化の影響を抑えるため， θ_{peak} から円周上で ± 25 度以内に含まれるサンプル集合 D を抽出する．この集合の平均ベクトル

$$\mathbf{r} = \frac{1}{|D|} \sum_{i \in D} \mathbf{a}_i \quad (5)$$

を代表加速度ベクトルとする．全サンプルではなく最頻方向の周辺だけを用いることで，頭部運動や一時的な揺れによって生じた少数の外れ方向の影響を抑える．加えて，有効サンプル集合を V として，方向分布の集中度

$$q = \frac{\left\| \sum_{i \in V} \mathbf{a}_i \right\|}{\sum_{i \in V} m_i} \quad (6)$$

を記録する． q は 0 から 1 の範囲を取り， 1 に近いほど加速度が単一方向へ集中し， 0 に近いほど複数方向へ分散または相殺していることを表す．現実装では q による推定結果の棄却は行わず，推定状態を分析するための指標として用いる．

5.2 GPS 座標系への変換

図 4 に，イヤホン基準座標系から地図上の GPS 座標系

*2 Apple Inc., “`CLLocation.course`,” <https://developer.apple.com/documentation/corelocation/cllocation/course> (2026/8/5 確認)．

への変換関係を示す．キャリブレーション区間における代表加速度ベクトル $\mathbf{r}$ を，キャリブレーション終了時に得られた有効な GPS 移動方向 $\mathbf{t}$ へ写す 2 次元回転 R を求める．ここで， $\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/\|\mathbf{r}\|$ とし，

$$c = \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{t}, \quad (7)$$

$$s = \hat{r}_x t_y - \hat{r}_y t_x, \quad (8)$$

$$R = \begin{pmatrix} c & -s \\ s & c \end{pmatrix} \quad (9)$$

とする．この R をイヤホン基準座標系から GPS 座標系への変換として保存する．キャリブレーション後の頭部正面方向 $\mathbf{f}$ は

$$\mathbf{f} = R\mathbf{h} \quad (10)$$

で得られる．さらに， $\mathbf{f}$ と現在の移動方向との内積および外積から，進行方向に対する左右の相対角度を算出する．

加速時と減速時の加速度は互いに 180 度反対方向で検知される．現在の実装では最大重みの方向を選ぶため，減速側のクラスが優勢な場合には， $\mathbf{r}$ の前後が反転する可能性がある．ここでは，初期実装として，加速の検知を対象とし，減速時のキャリブレーションは考慮しないこととする．

5.3 手動キャリブレーション

自動キャリブレーションの比較基準として，手動キャリブレーションも実装した．手動方式では，スマートフォンの上端方向と頭部正面方向を揃えた状態で操作を行う．その時点で Swift の Core Location から得られるスマートフォン方位と頭部正面ベクトルとを対応付け，イヤホン基準座標系から GPS 座標系への回転 R_{manual} を求める．自動方式で得た回転を R_{auto} とし，両回転角の最小円周差の絶対値をキャリブレーション誤差とする．

6. 予備検証

6.1 実験条件と手順

本検証で評価するのは，参加者の知覚・操作性能ではなく，移動時のセンサデータから推定した座標変換が手動キャリブレーションによる変換と一致するかという技術的成立性である．ここでは，参加者 1 名が車条件で 10 試行，電車条件で 10 試行の計 20 試行を行った．本検証の評価単位は参加者ではなく，各条件における個々の試行である．

5.2 節で述べた通り，加速時と減速時の加速度は逆方向 (i.e., 180 度反対) になる．本検証では，加速時のみを対象として計測を行い，加速によるキャリブレーションが可能かについて検証する．

車条件では，参加者は後部座席中央に進行方向を向いて着座し，車両が停止状態から直線区間を発進するタイミングで記録を開始した．電車条件は JR 京都線にて実施し，

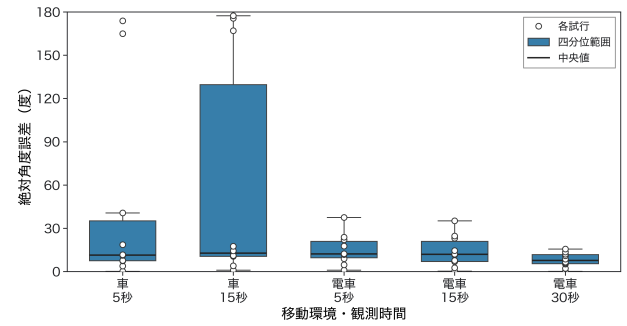


図 5 車条件および電車条件における絶対角度誤差の分布

参加者は車内で進行方向を向いて立ち，走行中のデータを記録した．天候による GPS 受信条件の差を抑えるため，いずれの実験も晴天時に実施した．計測時間は，予備的な走行時に観測された加速がおおむね収まるまでの時間を目安として設定した．具体的には，車条件では加速開始時点から 15 秒間，電車条件では 30 秒間を計測した．

本検証で用いた記録データでは，加速度の符号が上記の定義と逆で記録されていたため，解析前に加速度ベクトルの符号のみを反転した．頭部前方ベクトルおよび手動キャリブレーション値には補正を行わず，符号正規化後の加速度ベクトルから自動キャリブレーションを再計算した．

6.2 評価指標

記録されたキャリブレーション区間の先頭 5 秒，15 秒，30 秒をそれぞれ切り出し，各時間条件における自動キャリブレーションを再計算した．ただし，車データの記録時間は 15 秒であるため，車については 5 秒と 15 秒を評価対象とした．評価指標には，自動方式と手動方式の回転角の絶対誤差を用いた．各環境・時間条件について，平均，中央値，標準偏差，最小値，最大値，および誤差が 5 度，10 度，15 度以内となった試行の割合を算出した．また，加速度の方向分布を比較するため，式 (6) の方向集中度 q も確認した．

6.3 結果

表 1 にキャリブレーション誤差を，表 2 に方向集中度 q を示す．電車では観測時間が長くなるにつれて誤差が減少し，30 秒条件では平均絶対誤差 8.15 度，中央値 7.67 度となった．10 試行中 6 試行が 10 度以内，9 試行が 15 度以内であった．車では，5 秒条件の中央値が 11.47 度，15 秒条件の中央値が 12.80 度であり，15 秒条件では 10 試行中 6 試行が 15 度以内であった．一方，15 秒条件では 3 試行で 166.98 度から 177.35 度の誤差が生じ，平均絶対誤差は 58.96 度となった．図 5 に，各環境および時間条件における試行別誤差の分布を示す．電車では全試行が 15.66 度以下に収まったのに対し，車では 17.50 度以下の 7 試行と，166.98 度から 177.35 度の 3 試行とに分かれた．また，方

表 1 自動キャリブレーションと手動キャリブレーションの絶対角度誤差 (各条件 $n = 10$)

環境	時間	平均 (度)	中央値 (度)	標準偏差 (度)	最小 (度)	最大 (度)	5 度以内	10 度以内	15 度以内
車	5 秒	44.04	11.47	63.59	0.20	173.88	2/10	4/10	6/10
車	15 秒	58.96	12.80	75.05	1.07	177.35	2/10	2/10	6/10
電車	5 秒	15.21	12.23	10.02	1.00	37.51	2/10	3/10	6/10
電車	15 秒	13.88	11.90	10.31	0.32	35.17	2/10	4/10	7/10
電車	30 秒	8.15	7.67	4.72	0.21	15.66	2/10	6/10	9/10

表 2 各環境および時間条件における方向集中度 q (各条件 $n = 10$)

環境	時間	平均	最大	最小	中央値
車	5 秒	0.35	0.55	0.10	0.39
車	15 秒	0.10	0.25	0.02	0.08
電車	5 秒	0.97	0.99	0.89	0.98
電車	15 秒	0.92	0.99	0.74	0.95
電車	30 秒	0.72	0.89	0.43	0.71

向集中度 q の中央値は車の 15 秒条件で 0.08、電車の 30 秒条件で 0.71 であり、車条件では加速度方向が相殺または分散する傾向がみられた。

6.4 考察

電車の 30 秒条件では、平均絶対誤差が 10 度を下回り、15 度以内の試行が 9/10 となった。本検証の電車条件では軌道によって進行軸が制約され、30 秒間に複数の加速度サンプルを蓄積できたことから、一時的な頭部運動や揺れの影響を抑えられたと考えられる。この結果は、方向集中度の高い加速度を観測できる移動環境では、代表加速度方向を用いてイヤホン基準座標系を大まかに対応付けられることを示唆する。

車では中央値が 15 度以内であった一方、3 試行で 166.98 度から 177.35 度の誤差が生じた。この反転は、加速中に身体および頭部に生じる進行方向と反対向きの相対運動により、頭部で観測した代表加速度方向が GPS 移動方向に対して反転したことが一因と考えられる。誤差分布が二群に分かれているため、中央値が小さいことだけでは推定の信頼性を保証できない。

7. 議論

7.1 システムの応用可能性

提案システムが出力するのは精密な注視点ではなく、移動方向に対する大まかな頭部方向である。そのため、車窓の左右のどちらに注意を向けているか、前方や手元のどちらを向いているかといった粗い文脈は、移動中の情報提示に利用できる。例えば、沿線スポットを仮想的な車窓として提示するシステム [14] において、ユーザが向いている側に存在するスポットを優先して提示できる。また、トンネル内の景色を補完するシステム [13] では、ユーザの頭部方

向に合わせて映像や空間音響の提示方向を変えることができる。Ear-AR のような音声注釈システム [12] と組み合わせれば、ユーザが周辺を見回す行為に応じたハンズフリーの音声案内も実現可能である。

7.2 システムの限界

以上の応用可能性がある一方で、現段階のシステムと予備検証には以下の限界がある。第一に、本システムは頭部正面方向を視線方向の近似としているため、眼球のみを動かした注視を捉えられない。実際に、眼球視線は頭部方向よりも詳細な注意情報を含み、インタラクションの効率へ影響することが報告されている [9]。今後は、移動中の情報提示に必要な粒度で頭部方向が視線を近似できる範囲を明らかにする必要がある。

第二に、本検証の比較基準はスマートフォン方位に基づく手動キャリブレーションであり、高精度な外部計測装置による真値ではない。したがって、報告した角度差にはスマートフォン方位の誤差と、手動操作時にスマートフォンと頭部の向きを揃える際の誤差も含まれる。今後は光学式モーションキャプチャなどから座標変換の真値を取得し、自動方式と手動方式をそれぞれ評価する必要がある。

第三に、提案手法は GPS コースを利用するため、地下区間やトンネル内など GPS を取得できない環境では、新しいキャリブレーションを開始できない。最後に得られた有効な変換を保持することはできるが、長時間のずれには対応できない。鉄道の路線形状、駅間情報、スマートフォンの慣性情報などを補助的に用いることが今後の課題である。

第四に、現在の手法は加速と減速の前後を判別していない。減速時も含んだキャリブレーション区間では、システムでは進行方向と反対の加速を検知する。さらに、曲線走行、急な頭部運動、車線変更など、長手方向以外の加速度が大きい状況では代表方向が不安定になる。GPS 速度による加減速判定、直進区間の検出、推定結果の信頼度判定を導入する必要がある。

第五に、本検証では座標変換アルゴリズムの成立可能性と試行間差を確認するため、装着者を 1 名に固定した。したがって、参加者間の一般化可能性は評価しておらず、得られた角度誤差を利用者集団の性能として解釈することはできない。頭部の動かし方、体格、姿勢、イヤホンの装着

状態などが、頭部で観測される加速度と推定精度に影響する可能性がある。そのため、複数の参加者、装着状態、車種、路線を対象とした評価が必要である。

8. おわりに

本研究では、IMU 搭載イヤホンとスマートフォン GPS を連携させ、移動中のユーザの大まかな視線方向を推定するための自動キャリブレーション手法を提案した。提案手法は、移動中に観測された水平加速度を方向ヒストグラムへ集約し、最頻方向周辺の平均ベクトルを GPS 移動方向へ対応づけることで、イヤホン基準座標系から GPS 座標系への回転を求める。座標変換アルゴリズムの初期的な成立性と失敗要因を確認するため、装着者を 1 名に固定し、車および電車で各 10 試行の反復データを取得した。スマートフォン方位に基づく手動キャリブレーションとの角度差を評価した結果、電車の 30 秒条件では平均絶対誤差 8.15 度、中央値 7.67 度となった。車の 15 秒条件では中央値 12.80 度であった一方、3 試行で推定方向が反転した。この結果は参加者集団に対する性能を示すものではないが、同一装着者の反復試行から、方向集中度の高い加速度が得られる条件における自動キャリブレーションの成立可能性と、加速・減速の識別および推定信頼度の判定が主要な課題であることを確認した。今後は、GPS 速度変化に基づく加減速判定と直進区間の抽出を導入し、修正済みシステムを用いた複数参加者での評価、座標変換の外部真値との比較、および眼球視線に対する頭部方向近似の妥当性検証を行う。

参考文献

- [1] Ahuja, A., Ferlini, A. and Mascolo, C.: PilotEar: Enabling In-Ear Inertial Navigation, *Adjunct Proceedings of the 2021 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2021 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ACM, pp. 139–145 (2021).
- [2] Almazán, J., Bergasa, L. M., Yebes, J. J., Barea, R. and Arroyo, R.: Full Auto-Calibration of a Smartphone on Board a Vehicle Using IMU and GPS Embedded Sensors, *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, pp. 1374–1380 (2013).
- [3] Ferlini, A., Montanari, A., Mascolo, C. and Harle, R.: Head Motion Tracking Through In-Ear Wearables, *Proceedings of the 1st International Workshop on Earable Computing*, pp. 8–13 (2019).
- [4] Hashem, O., Alkief, K., Youssef, M. and Harras, K. A.: Leveraging Earables for Natural Calibration-Free Multi-Device Identification in Smart Environments, *Proceedings of the 22nd International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, ACM, pp. 92–98 (2021).
- [5] Hu, J., Jiang, H., Liu, D., Xiao, Z., Zhang, Q., Liu, J. and Dustdar, S.: Combining IMU With Acoustics for Head Motion Tracking Leveraging Wireless Earphone, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 23, No. 6, pp. 6835–6847 (2024).
- [6] Larsson, R., Skog, I. and Händel, P.: Inertial Sensor Driven Smartphone and Automobile Coordinate System Alignment, *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, pp. 1–6 (2017).
- [7] Nagai, T., Fujita, K., Takashima, K. and Kitamura, Y.: HandyGaze: A Gaze Tracking Technique for Room-Scale Environments using a Single Smartphone, *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, Vol. 6, No. ISS, pp. 143–160 (2022).
- [8] Nogueira, D. W. P., Bacurau, R. M., Lima, D. A., Silva, F. O. and Neto, A. M.: In Motion Low-Cost IMU-to-Vehicle Alignment for Intelligent Vehicle Applications Using Kalman Filter, *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, IEEE, pp. 92–97 (2021).
- [9] Palinko, O., Rea, F., Sandini, G. and Sciutti, A.: Robot Reading Human Gaze: Why Eye Tracking Is Better Than Head Tracking for Human-Robot Collaboration, *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, pp. 5048–5054 (2016).
- [10] Takaki, K., Kamezaki, M., Sasatani, T., Murakami, H. and Kawahara, Y.: HeadGaze: Natural Gaze Estimation While Walking From a Single IMU on Earbuds, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 26, No. 6, pp. 8849–8863 (2026).
- [11] Wang, Y., Ding, J., Chatterjee, I., Salemi Parizi, F., Zhuang, Y., Yan, Y., Patel, S. and Shi, Y.: FaceOri: Tracking Head Position and Orientation Using Ultrasonic Ranging on Earphones, *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM (2022).
- [12] Yang, Z., Wei, Y.-L., Shen, S. and Choudhury, R. R.: Ear-AR: Indoor Acoustic Augmented Reality on Earphones, *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, No. 56, ACM, pp. 1–14 (2020).
- [13] 石川空人, 伊藤恵: ICT を用いた北海道新幹線内での新たな楽しみの提供に関する研究, 日本ソフトウェア科学会第 37 回大会講演論文集, No. 42-S (2020).
- [14] 川端美由樹, 松下光範: 鉄道沿線地域の印象形成を支援する情報提示手法の提案, 第 16 回仕掛学研究会, No. SIG-TBC-016-13 (2026).
- [15] 森友吾, 佐藤光起, 松下光範: IMU 搭載ヘッドホンを用いた注視位置の簡易推定, 第 24 回情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol. 3, pp. 433–438 (2025).
- [16] 古田五波, 後藤春彦, 三宅論: 車窓シークエンス景観における注視特性に関する研究: 都電荒川線の車窓景観によるケーススタディー, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 66, No. 540, pp. 213–220 (2001).