

映像 IoT による見守りシステムにおけるプライバシー保護機能の構築

鈴木臣（愛知大学）

概要

少子高齢化や新型コロナウイルス感染症、慢性的な人材不足を背景に、看護・介護分野では画像を用いた ICT 技術の導入が強く求められている。一方で、プライバシー保護の観点から映像技術の活用は慎重になる傾向にある。本研究では、Optical Flow に基づく映像解析を用いて、就寝中の高齢者の離床と転倒を検知する手法を確立した。得られるベクトルデータのみを記録することで、個人の顔や身体の詳細情報を扱わず、プライバシーに配慮した見守りシステムを実現している。また、Raspberry Pi 上でのリアルタイム処理に向けて計算時間の短縮を調査し現場での適用の可能性を示した。実際の介護施設での転倒発生は確認されなかったものの、本技術はプライバシーを尊重しながら安全性を確保する基盤技術として期待される。今後は検知精度と処理速度のさらなる向上、環境センサとの連携による多面的な解析を進め、実用化を目指す。

1 共同研究に関する情報

1.1 共同研究を実施した拠点名

- 京都大学 学術情報メディアセンター

1.2 課題分野

- データ科学・データ利活用課題分野

1.3 参加研究者の役割分担

鈴木臣（愛知大学地域政策学部）：研究総括、画像処理システム開発、データ解析
深沢圭一郎（京都大学学術情報メディアセンター）：画像処理システム開発、データ管理
村井孝子（純真学園大学保健医療学部）：対象者や家族・施設への対応、データ分析と解釈
竹田原俊介（京都大学大学院情報学研究科）：画像処理システム開発、データ解析
高橋幸弘（北海道大学理学研究院）：画像処理

システム開発、データ解析

長聡子（福岡女学院看護大学）：対象者や家族・施設への対応、データ分析と解釈

2 研究の目的と意義

日本国内における 65 歳以上の認知症の人は増加傾向にあり、2025 年には 65 歳以上の約 5 人に 1 人が認知症になると予測されている。一方で、少子高齢化と労働人口が減少から、介護される側とする側の数的なアンバランスが顕著となり、2025 年には最大 34 万人の介護職員が不足するとされている。また近年の新型コロナウイルス感染症の拡大により現場職員の負担はさらに増大している。このような中、看護・介護の現場では ICT や AI 技術を用いて、効果的な看護・介護を目指す機運が高まっている。ICT・AI 技術の導入は介護保健施設介護者の

負担緩和にもつながる。しかしながら、これらの技術を利用した機器にはプライバシーに対するケアを考えられているとは言い難い。さらに費用の問題も重なり、対象者やその家族だけでなく介護者も機器の利用を敬遠する傾向にある。特に既存の映像機器は、画像データを取得したのち、それを適切な場所に保存し、利用の際にプライバシー情報をデータ処理により削除する。このため、一時的であってもプライバシーを含んだ情報が取得されることになる。保存データは暗号化される場合が多く、万が一のデータ漏洩にも対応はされているが、このプライバシー情報を含んだデータが取得されること自体が機器の利用の大きな障害になり、中小規模の介護保健施設や病児を含む保育施設、病院では ICT や AI 技術の導入が進んでいないのが現状である。この問題を解決するためには、プライバシー情報を含むデータを全く保存しない技術が必要だが、プライバシー情報を含まないデータを用いた ICT や AI 技術による行動等の認識などが、精度良く行えるのかは未解決な問題である。

本研究代表者らのグループではプライバシー情報の削除・低減・調整をおこないつつ対象者の行動を検知する技術の開発（科研費 C「対象・状況に応じたプライバシー情報調整可能な見守りシステム開発と実証研究」研究代表者：村井孝子，期間：2023-2025 年度）をおこなっている。本申請研究では、京都大学 HPC 資源を用いて当該研究の核となる映像解析方法を確立する。特に最も介護現場で懸念されている室内での転倒を検出することを目的とする。本研究で開発する手法は他の映像機器に応用することができるため、人的リソースが限られている看護・介護・保育など幅広い分野において高齢者や児童、乳幼児などあらゆる世代の「プライバシーを考慮した見守り」の実現につながり、

波及効果も非常に大きいといえる。

3 当拠点公募型研究として実施した意義

本課題は大気の撮像観測、看護、計算・情報科学を専門とする研究者による分野融合研究である。これまでの看護・介護分野の IoT の活用は、情報系の研究者が主導的であったが、本研究は現場からのアイデアであり、より現場に即した問題解決型の研究といえる。特に、HPC の知見を備えた研究者とともに共同研究を進めることで、効率的なデータ処理をおこなうことが可能となる。申請者らは介護施設に同居している 4 名の協力者について 2023 年 10 月から居室の映像データを収集している。取得データは 10 分ごとに分割した MP4 形式の動画ファイルとして記録される。1 ファイルあたりのサイズは約 40 MB であり現在注目している夜間（21:00~30:00）に限定しても 1 名あたり 1 晩で 2 GB 超のサイズとなる。テストとして PC（MacBook Pro: macOS 13.1, Apple M2 Chip, 24 GB Memory）を利用して、10 秒間の動画を用いてフレーム差 ΔF を 1~60 まで変化させながら差分画像のパワーを計算したところ処理時間は約 35 分であり、上記の 1 晩分の計算では 470 日以上かかると想定された。これらの動画データを処理するためには個人の計算機環境では非常に時間がかかり解析には膨大な時間を要する。そのため、高速なメモリを搭載した京大のスーパーコンピュータ（スパコン）を用いることで効率化を図り、現実的な時間内での解析を実現した。また、動画データの効率的な受信と検出された行動データを介護者に提供するために京都大学のスパコンストレージを sshfs でマウント可能な京都大学仮想サーバホスティング（VM）を利用した。

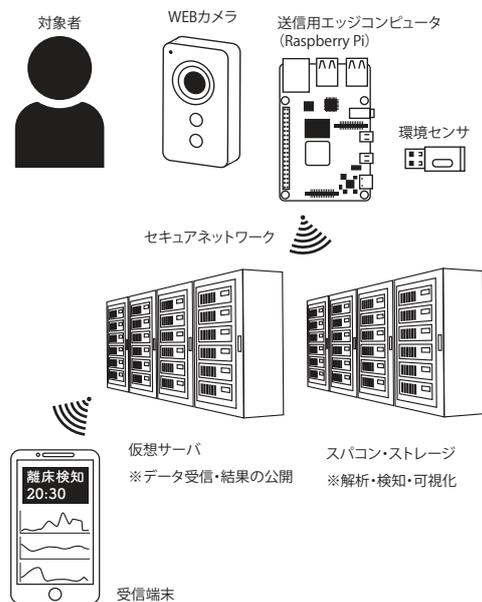


図 1 本研究の概要図

4 前年度までに得られた研究成果の概要

該当なし

5 今年度の研究成果の詳細

5.1 システム

本研究では、映像データからプライバシーを保護しつつ対象者の動きを検知する。計測系は、環境センサ、WEB カメラ、送信用エッジコンピュータ (Raspberry Pi) から成る (図 1)。すべて比較的安価な商用品で構成されているため入手性が良く、故障からの復帰 (データの連続性) の面でメリットが大きい。環境センサは、気温、湿度、気圧、照度、騒音、TVOC 濃度、CO₂ 濃度を測定できる。我々の先行研究から、これらの居室環境のデータから対象者の基本的な行動 (起床、就寝、外室) を推定することが可能である (e.g., 鈴木ら, 2023)。センサで得られた測定データおよび WEB カメラ

で記録された映像は、エッジコンピュータに送信され、暗号化された後、仮想サーバ (VM) に格納される。スパコンから仮想サーバのデータにアクセスし、測定データを基に対象者の行動の認識が自動でおこなわれ、データの可視化と行動推定結果が指定された受信端末に表示される。送信されるデータは対象者 1 人につき、環境センサの 5 分ごとのテキストデータ (1 日あたり 30 KB)、WEB カメラで取得される動画データ (1 日あたり 5.76 GB) となる。2024 年 10 月現在までに 5 台のシステムを組み上げ、協力が得られた介護施設入居者 5 名 (3 施設) の居室に装置を設置し、データ取得を開始した。

将来的には現地のエッジコンピュータ上で処理をおこない生データは保存しないことでプライバシーを保護する。そのため下記の映像処理に対するエッジコンピュータの負荷調査もおこなっている。

5.2 行動認識アルゴリズムの開発

行動の検知には、画像処理技術である Optical Flow を用いた。Optical Flow は、連続する画像フレーム間で各ピクセルの移動ベクトルを計算し、物体の動きを解析する手法である。具体的には、各フレームの輝度パターン (ピクセルの明るさや色の分布) を解析し、その変化を追跡することで、速度ベクトル (方向と大きさ) を算出する。これにより、動く物体がどの方向にどれだけ移動したかを視覚的かつ数値的に把握できる。ただし本研究では、算出される強度の時系列データを用いることで計算リソースの軽減を試みた。強度データにすることで、保存される結果においてもプライバシー情報は極めて限定的となり、対象者の心理的負担が軽減される。

はじめに、テストデータとして大学の実習室において、臥床状態から離床、転倒に至るまで

[Frame:539/945, 426x240]



図2 テスト動画のサンプル画像. 画像中の緑の点は、フローベクトルを算出する位置を示す.

の様子を撮影した映像 (FHD 1920×1080 ピクセル, 30FPS, 動画時間 30 秒程度) を取得し, このデータを元に Optical Flow による動きの解析をおこなった. なお, 撮影時の画像解像度およびフレームレートは, 実際の装置の仕様と同じである.

図2に, テスト動画のサンプル画像を示す. 転倒の検知が目的であるが, 実際に, 高齢者の夜間の転倒を防止するためには, 離床を介護職員に知らせる必要がある. したがって, 本研究では, ベッドから出たタイミング (ベッド端への移動と床に足を下ろす起立行為) を転倒とともに自動で判定した. 検出の処理は以下の通りである.

1. 映像の各フレームを 246×240 ピクセル (240p) に解像度を落とし, 時間的に連続する 2 フレーム毎に, Optical Flow を用いて画像中の色の変化から対象者の動きを得る. フローベクトルの空間分解能は 20 ピクセル (x 方向は 22 点, y 方向は 12 点) とした (図2の緑色の位置). なお, この解像度は, 動きの認識精度と計算時間の兼ね合いで決定した.
2. フレームごとに得られた各ポイントにおけ

るフローベクトルの x 成分と y 成分のみを, テキストデータで記録する.

3. 各フレームについてベクトルの大きさ (x 方向, y 方向) について積算する. ベッド外でのみベクトルが検出されたタイミングを離床, 離床後にベクトルの大きさが急激に変化するタイミングを転倒として検出する.

図3にテスト動画の 167 番目のフレームの結果を示す. 図3aの画像内のマゼンタの四角形はベッドの領域を定義したものであり, 緑色の矢印が動きが検出されたピクセルでのフローベクトルを表す. また, 時系列データ (下の3つのパネル) における水色の線は, 表示画像のフレームを示す. このフレームは離床前の動作として, 上肢を用いて布団をめくり, 身体の移動を開始しようとしている場面である. そのため, 布団を持ち上げる動きが特に y 成分 (図3c) に顕著に現れており, ベクトルの大きさも増加している (図3d).

図4に離床検出の結果を示す. 図4aは, Optical Flow を用いた離床検出のフレーム (580 フレーム目) であり, 図4bは, YOLOv5s で対象者を検出後に, MediaPipe Pose によって骨格推定を実行し, 両膝がベッド外に出たタイミングを離床と判定したフレーム (572 フレーム目) である. 図4には骨格推定の結果として赤い丸が鼻, 青い丸が左膝, 水色の丸が右膝を示している.

この2つの手法の検出には 8 フレームの差が見られるが, 本研究においてこの差は許容範囲内であり, 離床検出精度に大きな影響を与えない. なお本研究の対象は就寝中の行動であり, 対象者は布団をかけた状態で観察される. そのため, 骨格推定の精度は布団による遮蔽の影響を受けやすく, 特に上半身の関節は認識が難し

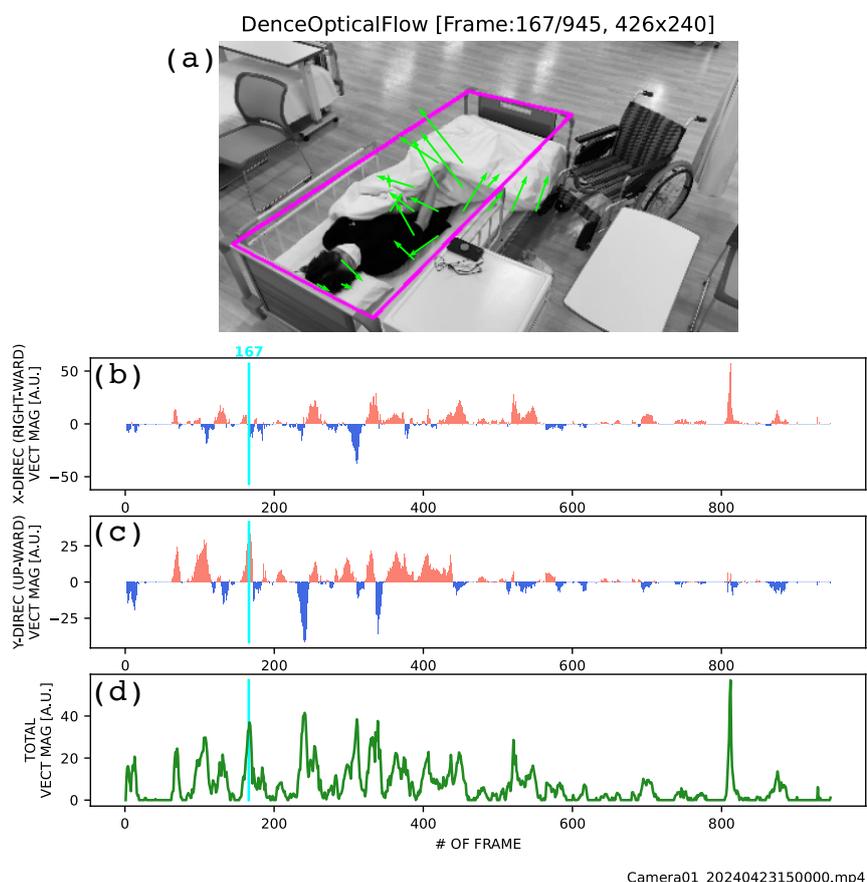


図3 テスト動画を用いた解析結果。(a) 実際の画像, (b) フローベクトルの x 成分 (正の値は画像の右方向に対応), (c) y 成分 (正の値は画像の上方向に対応), (d) フローベクトルの大きさを示す。

くなる。このため離床判定においては比較的安定して推定可能であり、布団の影響を受けにくい「膝」を指標として採用した。

一般に、人の姿勢を正確に検出するためには、物体検出と骨格推定を組み合わせた手法が用いられることが多い。具体的には、物体検出により対象者の領域を特定し、その領域に対して骨格推定アルゴリズムを適用することで、関節の位置や体の姿勢を解析できる。しかし、このアプローチには明確な課題が存在する。まず、物体検出と骨格推定という2つのモデルが

メモリ上に常駐し、両方の計算が同時に実行されるため、処理負荷が大きくリアルタイム性が低下する。

一方、本研究で使用する Optical Flow は連続する2フレーム間で各ピクセルの移動ベクトルを直接計算する手法であり、モデルを使用する必要がない。そのため、メモリ使用量が少なく、計算負荷も大幅に軽減できる。さらに、Optical Flow はピクセル単位で動きを検知できるため、特定の部位に依存せず、全体の動作を総合的に解析できるメリットもある。

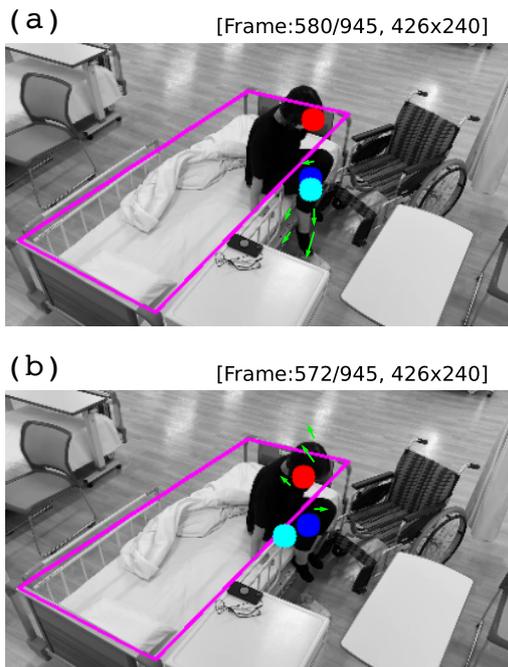


図4 (a) Optical Flow で検出された離床のフレーム, (b) YOLOv5s + MediaPipe Pose によって検出された離床のフレーム.

特に本研究では、将来的にエッジコンピュータ (Raspberry Pi) を用いて対象者の行動を推定し、検知結果のみをサーバに送信する。カメラ映像を直接送信せずに現場で動作解析をおこなうことで個人情報排除した見守りシステムとなる。このような環境下では、メモリ消費と計算効率に優れた Optical Flow の採用が特に有効であり、限られたリソースでもリアルタイムに動作可能なシステム構築が可能である。

図5は、転倒を検知したタイミングでの解析結果である。図5aでは、転倒に伴って顕著なフローベクトルが確認され、その大きさは図5cで急激な増大として表れている。このような転倒に伴う増大は、布団をめくるなどのベッド上での動作(図5)に比べ、短時間で発生し、ベクトルの大きさも明らかに大きくなる。布団をめくる動作では、上肢の動きおよびそれに伴

う布団の動きにより徐々にベクトルが生成される。一方で、転倒の場合は身体全体が急速に移動するため、フローベクトルの増大は急峻となる。本研究においては、転倒は離床後に発生する設定し、転倒を離床後のフローベクトルの急峻な変化と定義したが、離床判定ができない場合(清掃や模様替えでベッドの位置が変わった場合など)においても、Optical Flowを用いることで、睡眠中の自然な動き(寝返りなど)と転倒は明確に区別できるため、転倒の検出精度が担保されると考えられる。また、この転倒は離床直後に発生しており、ベッドから離れる方向(x 成分が正:図5b)および床方向(y 成分が負:図5c)への動きが明確に示されている。

実際に協力していただいた施設では転倒は確認されていないが、上述のアルゴリズムにより、Optical Flowを用いた就寝中の対象者の離床および転倒の検出方法を確定した。

5.3 機械学習による転倒の検出と計算時間の短縮の検討

最後に、Optical Flowによるテスト動画のベクトルデータから機械学習を用いて転倒の検出をおこなった。Isolation Forestモデルを使用し、ベクトルデータ中の異常な動きを自動的に検出する。Isolation Forestは教師なし学習による異常検知アルゴリズムであり、正常な動きと異常な動き(本研究では転倒)を高精度に区別できる。各フレームにおけるベクトルの大きさを特徴量として入力し、転倒に伴う急激なベクトル変化を異常として識別した。転倒だけでなく起床時の変化の急峻な複数のフレームで異常(転倒)と判定されることはあるものの、すべてのテストデータにおいても転倒自体は見逃していないことは確認できた。転倒の検知が確実であることは、看護・介護において非常に重要であり、本手法の有用性を示しているとい

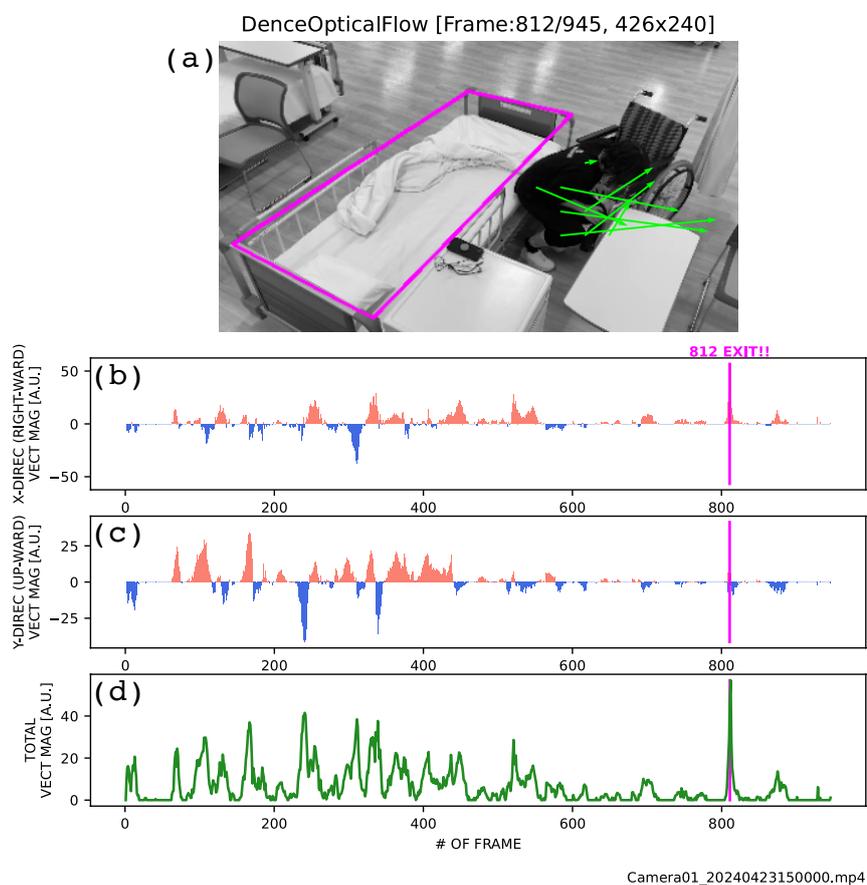


図5 図3と同じ。ただし、対象者が転倒したと認識されたフレームの結果。

える。

また、転倒検知までの処理において、最も計算時間を要するのが Optical Flow の計算である。Optical Flow には複数のアルゴリズムが存在し、本研究では精度の速度のバランスが優れる Farneback を採用した。他の代表的なアルゴリズムとしては、リアルタイム性に優れた Dense Inverse Search (DIS) や高速かつ軽量の Pyramidal Lucas-Kanade (PyrLK) が挙げられる。今後のさらなる高速化と効率化に向けて、これらのアルゴリズム (Farneback, PyrLK, DIS) の速度を比較した。その結果、

PyrLK は他のアルゴリズムに比べて計算時間が著しく短いことが確認された。

これらの結果は公表前であるため本稿では詳細を控える。

5.4 人権の保護及び法令等への対応

本課題は個人情報を取り扱うため、所属大学以外にも実際に研究データが蓄積される京都大学学術情報メディアセンターにおいて、倫理審査委員会の承認を受けて研究を実施した。

特に対象者の画像・映像データ、室内の環境データは、京都大学のスパコン上にある暗号化

された保存領域に保存し、情報管理をおこなった。スパコン上ではデータに付随する氏名など個人情報には保存せず、対応表等の情報（テーブル）と照合しない限り特定の個人を識別することができない。データ保存領域はアクセス制限があり、研究者が解析する際は、パスフレーズ付きの SSH 鍵認証をおこない、アクセスログも保存するとともにアクセス状況は定期的に確認した。生体情報、インタビュー内容（対象者の行動記録等）については、氏名等個人情報に該当する箇所を廃棄し、共通 ID を付加して匿名化した。

また、本課題に参加される対象者および介護者や施設に対しては、人権を尊重し、本課題の目的・意義・研究方法、参加や参加撤回の自由、個人情報保護や取得したデータの取り扱い、成果公表等について説明し、同意を得ている。

6 今年度の進捗状況と今後の展望

本年度は、就寝中の高齢者の行動検知を目的とした見守りシステムの構築に取り組み、基盤技術の整備を進めた。大学実習室で撮影したテスト動画を用い、Optical Flow（ベクトルの大きさの時系列データ）を用いた離床および転倒検知のアルゴリズムを確立した。また、Raspberry Pi 上でのリアルタイム実装を目指し、解像度変更による計算時間の短縮を確認し、エッジデバイスでの効率的な動作が可能であることを示した。一方、実際に協力していただいた施設での観察期間中には転倒は確認されず、開発したアルゴリズムの有効性を直接検証する機会は得られなかった。また、環境センサーデータと組み合わせた多面的な行動解析の導入は実現に至らず、申請時に設定した計画の達成率は7割程度と評価できる。

仮想サーバホスティングを用いた大量の映

像データの収集と、JHPCN 資源を利用した大量の映像解析はほぼ想定通りおこなわれた。特に、本研究でおこなった検出アルゴリズムの開発にかかる試行錯誤や、検知精度を確保しながらエッジコンピュータでの現実的な計算時間、メモリ使用量に収めるためのパラメータサーベイは個人の計算機環境では膨大な時間がかかるため、これらの効率的な処理にはスパコンの利用が必須であったといえる。

今後は、検知精度のさらなる向上と計算負荷の軽減を目指し、他の Optical Flow アルゴリズム (PyrLK) の導入も検討する。また、介護施設での実証実験を通じて、より包括的な検知に発展させる。さらに、現場での適用性を評価し、プライバシーを保護しつつ安全性を確保するためのインターフェース改良も進めていく予定である。