

## (40) 加速度データと LSTM を用いた建設作業員の姿勢推定システムに関する基礎的検討

田中 陸人<sup>1</sup>・矢吹 信喜<sup>2</sup>・福田 知弘<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻 博士前期課程  
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

E-mail: rikuto.tanaka@it.sec.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>2</sup> フェロー会員 大阪大学教授 大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻

E-mail: yabuki@sec.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻

E-mail: fukuda@sec.eng.osaka-u.ac.jp

近年、建設現場の安全性や効率的な施工計画を検討する際に必要となる科学的根拠に基づく作業員の行動データの収集を目的として、センシングデータを利用した建設作業員の行動推定手法が提案されている。既往研究で提案された手法はモーションキャプチャシステム等の高価な装置を採用しているため、システム導入コストの増大や機材の運用に要する人的資源の確保が制約となる。本研究では、既に建設現場への導入が開始されているヘルメット装着型の端末を活用することにより、既往研究におけるコストと運用の課題に配慮した上で、LSTM (Long Short-Term Memory) を用いた作業員の姿勢推定手法を提案する。検証結果から、提案手法を用いることで作業員の前傾姿勢やしゃがみ姿勢等の作業員の身体負荷の大きい姿勢を高い精度で検出できることを確認した。

**Key Words:** construction worker, sensing data, long short-term memory, posture estimation system

### 1. はじめに

国内における建設現場での労働災害の発生件数は減少傾向にある一方で、死亡事故等の重大事故の発生件数は他産業と比較して多い状態が続いており、現場において組織と技術双方の面を考慮した改善策を講じる必要がある。労働生産性に関しても同様に、今後の建設需要の安定が見込まれる中で、若年入職者数の減少や熟年技能者の高齢化による労働力不足が懸念されていることから、安全性に配慮した上で、省力化による効率的な施工計画を策定する必要がある。

近年、建設現場における安全性と効率性に配慮した施工計画を検討する際に、過去の蓄積された大量のデータを用いて、現場の作業員や機材等の状況を可視化する機能を有した、施工管理支援システムの開発が進められている<sup>1)</sup>。可視化の対象となる作業員や機材の状態に関する定量的なデータの収集には、カメラ映像やセンシングデータが用いられ、収集したデータを処理することで、作業員の行動状態等の現場関係者に有用なデータに変換する必要がある。

建設作業員の行動データ取得には、RGB カメラ等により取得した映像データを用いる手法とウェアラブル端末等により取得したセンシングデータが用いられる。本研究では、現場の障害物による遮蔽に影響されない、センシングデータを用いた手法を採用し、作業員の姿勢・運動・作業状態等の推定を行う。行動推定の際に、教師あり学習を用いた分類を採用することにより、作業員個人の過去の行動データに基づく行動推定が可能となることが既往研究<sup>2)</sup>で示されている。建設現場への応用として作業員が使用する工具の推定や待機時間の算出が行われている<sup>3)</sup>。一方で、既往研究において提案された行動推定システムでは、慣性センサを内蔵したスマートフォンや複数の慣性センサを作業員の関節点に装着するモーションキャプチャシステムが採用されている。それらの機器の導入コストは高額である上に、機器の盗難対策や維持管理に要する人的資源の確保が必須となるため、現場に適用するにはプロジェクトの規模や予算等の制約条件を考慮しなければならない。

そこで本研究では、作業員の行動データの収集を目的として、現場への導入時の制約条件に配慮した建設作業

員の行動推定システムを提案する。また、行動推定アルゴリズムとして、時系列データの予測に対応したモデルを採用することにより、サンプリング周波数等のデータ収集時の制約条件に対応した予測手法を提案する。さらに、実際の建築工事現場で取得した作業員のセンシングデータを用いた検証実験を行うことにより、提案した手法による姿勢推定精度を検証し、提案システムの利用可能性を検討する。

## 2. 提案システム

既往研究で述べた建設現場への機器の導入コストを考慮し、本研究では既に建設現場への導入及びデータ収集が行われているヘルメット装着型の端末を活用した建設作業員の行動推定システムを提案する。建設現場での利用を含めた提案システムの全体図を図-1に示す。複合センサが内蔵された端末では3軸加速度、気圧、位置情報が1秒毎に端末により取得され、端末内のメモリに蓄積される。蓄積されたデータは当該作業日の作業終了時に現場に設置された設備を経由して、管理用PC内のデータベースに転送される仕様となっている。本研究では端末で取得したデータに対して、時系列データの予測問題に対して高い精度を発揮することが報告されているLSTM (Long Short-Term Memory)<sup>4)</sup>を組み込むことで、入力されたセンシングデータから作業員の状態を推定するシステムを構築する。

### (1) 端末によるセンシングデータの取得

本研究では、株式会社日立製作所が建設現場の安全管理と生産管理を目的として開発した「建設現場作業モニタリングシステム<sup>5)</sup>」(以下、既存システムと呼ぶ)を作業員に装着するセンシングデータ取得用端末として使用する。端末では3軸加速度、気圧、温度等のセンシング

データと Beacon または GPS (Global Positioning System) により取得した位置情報が1秒毎に端末内メモリに蓄積される。蓄積されたセンシングデータは、当該作業日の作業終了時に現場に設置されたクレードルに接続することにより、現場の管理用PCに集約される。集約された蓄積データは専用のデータ閲覧用ソフトウェアを用いることで、現場関係者は各作業員の当該作業日における移動軌跡の確認や転倒等の危険動作を把握できる仕様となっている。

しかし、既存システムでは、現場の危険エリアへの接近や転倒の検知等の機能、毎秒取得した3軸加速度値を基にした作業員姿勢の算出機能が実装済みである一方で、時系列的な作業員の状態変化を考慮した行動推定を行う機能は実装されていない。そのため、行動推定によって得られた作業員の過去の行動履歴情報を用いた生産性分析や安全管理対策の検討には利用できないことが課題として残されている。

### (2) センシングデータを用いた行動推定

#### a) 行動推定処理フロー

既存システムにおいて作業員の行動推定機能が実装されていない点に着目し、本研究では、端末で取得した加速度とその時系列情報を利用した作業員の姿勢推定処理を実装する。本研究において提案する姿勢推定処理フローを図-2に示す。処理の開始後、データベース内に登録されている、作業員リストとセンシングデータから推定に必要なデータを読み込む。その後の前処理では、読み込んだデータに対して、加速度等の行動推定に必要なデータを抽出し、行動推定モデルへの入力に合わせたデータ形式に整形する。その後、整形したデータをシステム内に組み込んでおいた推定モデルに入力することで、対象となる作業員の姿勢状態を推定し、その時刻における作業員の姿勢データとして出力する。

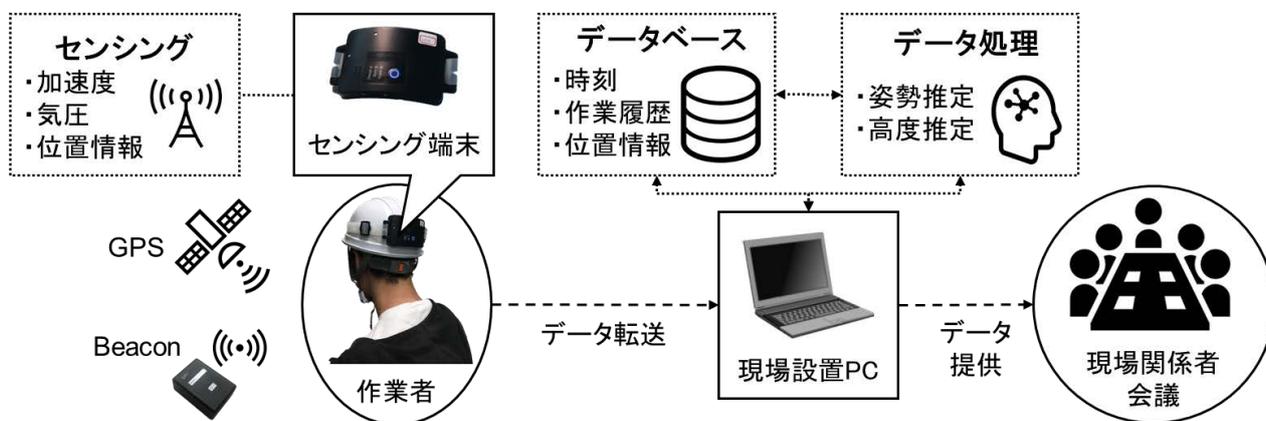


図-1 提案システムの全体概要

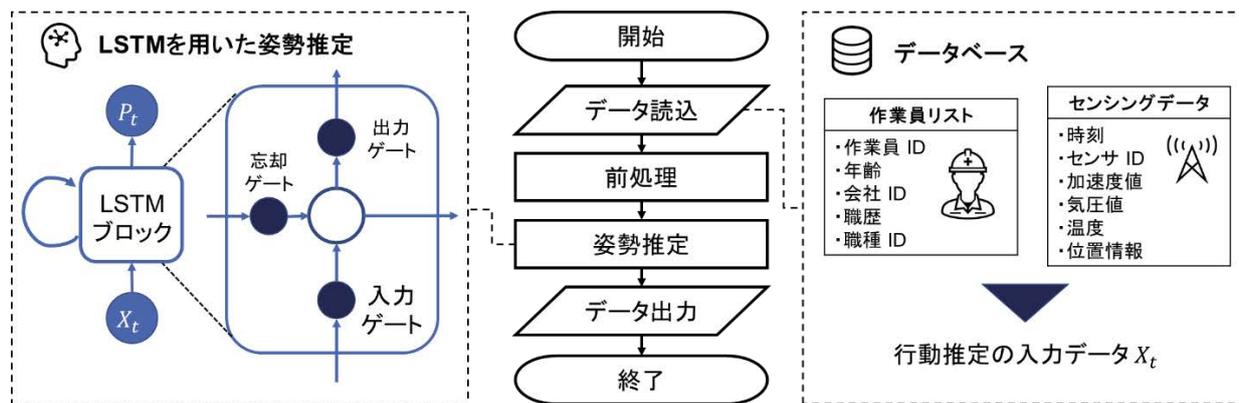


図-2 提案システムにおける姿勢推定処理のフロー

## b) 推定に用いるデータセット

本手法で姿勢の推定及び推定モデルの学習に使用するデータセットの構造を式(1)に示す。本研究では、ある時刻 $t$ における作業員の状態は、時刻 $t$ 以前の作業員の状態と時刻 $t$ の周辺の時間窓範囲内における加速度値から決定されると仮定し、時刻 $t$ における姿勢ラベル $P_t$ と時刻 $t$ 周辺の加速度値の対応付けしたものをデータセットとして定義する。

$$P_t \leftrightarrow \begin{bmatrix} x_{t-n} & y_{t-n} & z_{t-n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_t & y_t & z_t \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{t+n} & y_{t+n} & z_{t+n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$P_t$ : 時刻 $t$ における姿勢ラベル  
 $x_t, y_t, z_t$ : 時刻 $t$ における各軸の加速度値  
 $2n + 1$ : 時間窓幅

## c) 推定アルゴリズム

センシングデータを用いた行動推定では、センシングに用いる機器の仕様、個人の行動特性を考慮した特徴量・分類アルゴリズムを選択する必要がある<sup>2)</sup>。本研究では、建設現場における多様な職種及び個人差に対応した姿勢推定を検討していることから、入力した教師データから自動的に特徴量の抽出・学習を行うニューラルネットワークモデルを採用する。また、本研究で使用する端末は1秒毎のサンプリングとなっており、各時刻におけるセンシングデータに加えて、行動の時系列情報を考慮した推定が有効とされる。そのため、ニューラルネットワークモデルの中でも、時系列データの予測に対して高い性能を発揮することが報告されている LSTM を使用する。LSTM は再帰型ニューラルネットワークの一種である RNN (Recurrent Neural Network) における隠れ層を、LSTM ブロックと呼ばれるモジュールで置き換えた構造を有している。LSTM では LSTM ブロックを採用することにより、RNN において次の時刻の層に引き継がれる隠れ層の

値が減衰し、消失する勾配消失問題に対応したモデルであり、長期依存性を有する時系列データの予測問題に対して、RNN と比べて高い性能を発揮することが報告されている<sup>4)</sup>。

## 3. 検証実験

### (1) 実験方法

提案システムによる行動推定精度を検証するために、実際の建築工事現場の作業員を対象として、センシングデータ内の加速度データを用いた姿勢推定精度の評価を行う実験を実施した。床スラブの鉄筋結束作業を行う鉄筋工の作業員1名(50代男性、経験年数37年)を対象として、ヘルメット装着型の端末の装着を依頼し、端末によるセンシングと併せて作業の様子を録画した。床スラブの鉄筋結束作業は、立位状態から前傾姿勢やしゃがみ姿勢への移行が繰り返し発生することによる、作業員自身の腰部への負担が大きく、筋骨格障害系障害の要因となる。そのため、推定によって姿勢状態の定量化を図ることによる、筋骨格系障害の予防対策等への利用が期待されることから検証実験の対象とした。

端末によるセンシングと録画が終了した後、映像内から正解となる姿勢(以下、正解ラベルと呼ぶ)の抽出を1秒毎に行い、センシングデータと正解ラベルを対応付けした。その際の作業員の姿勢の区分については、各作業姿勢において人体の腰部にかかる負荷の大きさを基準として、人間工学的な見地から姿勢を定義した「長町式作業姿勢区分<sup>6)</sup>」を参考とし、その中から映像データ内に含まれる姿勢と一致した、立位、前傾、しゃがみの3種類の状態を静止状態として抜粋した。また、運動中の動作については、歩行動作による作業員自身の移動、立位から前傾姿勢等への姿勢状態の遷移の2種類の状態を設定した。以上で設定した姿勢の区分及び各状態の定義を表-1にまとめる。

正解ラベルの時間対応付けが終了した後、センシング

表-1 検証実験における作業員の状態<sup>6)</sup>

区分	状態	定義
静止	立位	膝を伸ばし直立した姿勢
	前傾	膝を伸ばした状態で腰が 30° 以上曲がった姿勢
	しゃがみ	かかとが着地したままで腰を落とした姿勢
運動	遷移	姿勢の変化中にある状態
	移動	歩行による作業員自身の移動

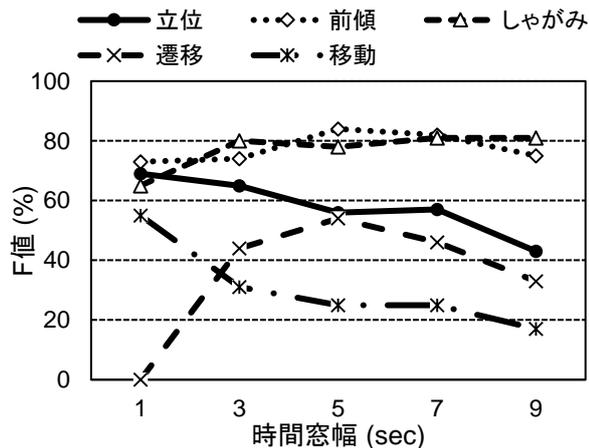


図-3 時間窓幅と各姿勢の推定精度の比較

データを用いた推定により取得した推定ラベルと映像データから抽出した正解ラベルを照合することにより、提案システムにおける姿勢推定精度を評価した。本実験では、時刻 $t$ における入力データの時間窓の範囲(時間窓幅:  $2n + 1$ ) を可変パラメータとして設定し、時間窓長を設定するパラメータ $n$ を0から4までの5段階(時間窓範囲は1, 3, 5, 7, 9秒の5段階)に場合分けし、推定精度を評価した。

## (2) 実験結果

時刻 $t$ 周辺における入力データのサイズ(時間窓幅:  $2n + 1$ ) を可変パラメータとした、各状態の推定結果を図-3に示す。各状態の推定精度の評価には適合率と再現率の調和平均で表されるF値を用いることによって、推定精度を総合的に評価した。

## (3) 考察

図-3の結果より遷移状態のF値は、時間窓幅1秒の際に0%となり他の状態と比べて低い推定精度となった。この理由として、姿勢遷移の状態は複数の時間に跨って発生する連続動作であり、瞬間的な加速度値のみでは姿勢の変化の途中にある状態か偶然発生したノイズがどう

かを区別できないからであると考察する。一方、前傾姿勢やしゃがみ姿勢については、時間窓幅が1秒の場合を除いて、F値80%程度と他の状態と比較して高い精度で推定できることを確認した。この理由としては、端末を装着した頭部の傾きによって生じる重力加速度が検出される方向の変化を、LSTMモデルが姿勢推定に有効となる特徴量として学習したためと考えられる。この結果から、前傾姿勢を始めとする腰部にかかる負荷の大きい姿勢の検出への応用が期待できる。

## 4. まとめ

本研究では、建設作業員の行動データの収集を目的として、既に現場での利用が開始されている端末及びLSTMを使用した作業員の行動推定システムを提案した。端末で取得した3軸加速度データを用いた作業員の姿勢推定の結果から、前傾姿勢やしゃがみ姿勢の推定は他の状態と比較して高い精度で検出できる結果を得た。この結果を利用し、作業員の作業従事時間内に占める前傾姿勢やしゃがみ姿勢の時間の割合を算出することにより、作業員の身体への負荷を定量的に算出する等の人間工学的な作業環境改善への利用が期待できる。

今後の課題として、推定の対象とする職種・姿勢の拡大及び学習による推定精度改善のためのデータ収集、既存システムで利用されていない気圧値、位置情報等のデータの活用による推定精度の向上が挙げられる。

## 参考文献

- 1) Park, C. and Kim, H.: A framework for construction safety management and visualization system, *Automation in Construction*, Vol.33, pp.95-103, 2013.
- 2) Bao, L. and Intille, S.S.: Activity Recognition from User-Annotated Acceleration Data, *Pervasive Computing*, pp.1-17, 2004.
- 3) Akhavian, R. and Behzadan, A.H.: Smartphone-based construction workers' activity recognition and classification, *Automation in Construction*, Vol.71, pp.198-209, 2016.
- 4) Hochreiter, S. and Schmidhuber, J.: Long short-term memory, *Neural Computation*, Vol.9, No.8, pp.1735-1780, 1997.
- 5) 日立製作所: 「ニュースリリース～IoT技術を活用した建設現場の生産性・安全性向上を実現するシステムを開発～」, 2018.3, <[http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2018/03/03\\_27.html](http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2018/03/03_27.html)>, (入手2019.2.7) .
- 6) 長町三生: Participatory Ergonomicsによる作業改善の研究, 日本経営工学会論文誌, Vol.53, pp.410-417, 2002