

5. 建設現場における危険作業の防止のための
支援方法の検討

中嶋良介

5-1. 動画画像解析を用いた脚立作業の危険検知システムの開発

研究分担者 中嶋 良介

(慶應義塾大学)

研究要旨

本研究では、脚立作業に起因する労働災害の未然防止を目指し、脚立作業中の動画画像から危険性の高い作業を検知・警告するシステムについて検討した。まず、脚立への立ち方と設置位置が脚立作業の安全性と効率性について調査した先行研究の実験データをもとに、脚立作業における危険な作業の特性について検討した。その結果、脚立作業における作業点に対して作業者の重心が中心から左右、あるいは、前後方向にずれるにつれて主観的な作業のやりにくさが高くなり、かつ、作業に要する時間も長くなることが確認された。そこで次に、脚立作業時の作業者の重心に着目し、作業者の危険検知システムを設計・開発した。具体的には、カメラで撮影された動画画像から脚立と作業者を検出し、作業者の3次元骨格データから脚立への立ち方(片側 or またぎ)と重心位置を推定する。そして、先行研究の実験データを用いて予め作成された外れ値検出プログラムを用いて、入力データが正常値(安全作業)か外れ値(危険作業)かを判定し、外れ値として検出された作業に対しては、音や光を用いて作業者に対してその危険性を警告するものである。実験室内の検証実験においては、作業者の危険を正しく検知することが可能であることが確認され、今後は本研究で開発した危険検知システムを実際の現場に適用し、その有用性を検証する予定である。また、本システムの発展的な活用方法として、作業者と本システムのインタラクションのあり方も含めて検討を進める予定である。

A. 研究目的

脚立は高所作業に使用する用具で、建設業を中心として様々な業種で用いられているが、脚立に起因する墜落・転落などの労働災害が多く発生している[1]。脚立作業の労働災害のリスクを減らし、作業者の安全を確保するためには、作業手順マニュアルなどを用いて安全教育や作業ルールを設定し、それを労働者に順守させることが望まれる。一般に、労働者に作業ルールを順守させるためには、安全管理者による作業者の管理が重要であるが、安全管理者が作業現場に赴き、常に管理・監督することは労力やコストの面で現実的でない。このような社会的背景から、機械やシステム等による作業管理の自動化が強く望まれている。

脚立作業における作業管理の自動化に関する先行研究として、カメラで撮影した動画像から脚立と作業者を検知し、画像中にある脚立等の長さ指標を基にして、作業者の地面からの高さを推定するシステムが提案されている[2]。このシステムは推定した作業者の高さが韓国労働安全衛生庁(KOSHA)の定めた安全規則を順守しているか否か、作業者がヘルメット等の安全器具を装備しているか否かを判定し、作業者の安全を確保するというものである。ただし、提案されたシステムはあくまで脚立からの墜落・転落時に被害が重篤化する可能性がある高さで作業を行っている場合に警告を発するものであり、転落の危険性がある作業自体(例えば、重心挙動など)を検知して警告するものではない。

そこで本研究では、脚立作業に起因する労働災害の未然防止を目指し、脚立作業中の動画像から危険性の高い作業を検知、警告するシステムの開発を目的とする。具体的には、脚立への立ち方と設置位置が脚立作業の安全性と効率性について調査した先行研究[3]の実験データをもとに、脚立作業における危険な作業の特性を分析する。そして、危険な作業の特性を理解した上で、脚立から墜落・転落の可能性がある作業に対して警告を発する危険検知システムを開発し、その可能性を検討する。

B. 研究方法

1) 脚立作業における危険な作業の特性の検討

脚立作業時の危険な作業が持つ特性を明らかにすることができれば、開発する危険検知システムにおいてどのパラメータを参照すべきかが明確になり、その特徴量に応じて作業者の危険を検知できると考えられる。そこで本研究では、脚立作業における姿勢の安定性評価に関する先行研究[4]を参考に、作業者の重心(以後、作業者の横方向の重心を左右重心、縦方向の重心を前後重心と呼ぶ)に着目し、作業者の主観的な作業のしやすさと作業時間、

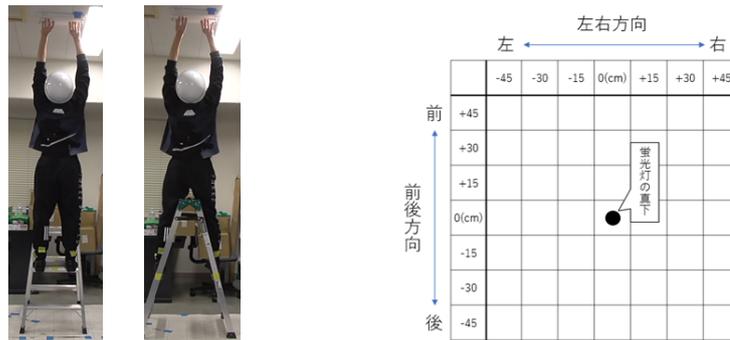
および、作業者の左右重心と前後重心の関係を分析することで、その妥当性を検討する。先行研究[3]で得られた実験データを分析対象として使用する。

この先行研究では、適切な脚立への立ち方と設置位置を明らかにすることを目的として、それらの相違が作業効率や作業安全といった作業性に及ぼす影響を実験的に検討されたものである。実験として、被験者は4段の脚立（長谷川工業株式会社製：RS2.0-12）に乗り、天井に取り付けられた蛍光灯の取り外し・取り付けるといった脚立上での上向き作業に対して、脚立への立ち方と脚立の設置位置の2つを実験要因として実験を行い、作業時間と作業姿勢のデータを収集した。実験要因である脚立への立ち方と脚立の設置位置は図1に示す通り、片側に立って作業する立ち方（以後、「片側」と呼ぶ）と脚立をまたいで作業する立ち方（以後、「またぎ」と呼ぶ）の2種類とした。また、蛍光灯の真下を原点として、左右方向と前後方向にそれぞれ45 cmまで15 cm間隔で計42点設定した。ただし、脚立上で被験者が安全に作業をできないと判断した場合は、その設置位置での試行は行なわないこととした。

本研究では、上記の先行研究で得られた実験データより、「事前評価」と「事後評価」、「作業時間」、「左右重心」、「前後重心」の5指標を分析に用いる。「事前評価」と「事後評価」は作業前と作業後に4段階（0:作業不可, 1:作業しにくい, 2:普通, 3:作業しやすい）の主観評価、「作業時間」は蛍光灯の取り付け・取り外しにかかった作業時間、「左右重心」と「前後重心」は蛍光灯の取り外し、取り付け時の様子を撮影した動画像に3次元推定した姿勢情報のデータを姿勢分析ソフトウェア（University of Michigan: 3DSSPP[5]）を用いて人体モデルを当てはめることによって推測された左右・前後方向の重心位置である。また、本研究の分析では、先行研究で得られた被験者8名の実験データの内、作業姿勢に関する「左右重心」「前後重心」に対して外れ値検出アルゴリズムのひとつである Local Outlier Factor (LOF) 法を用いて外れ値の検出を行った（以後、この分析のことを「重心分析」と呼ぶ）。分析の環境としては Python3.7 を使用し、分析データ数は 258 データであった。

2) 危険検知システムの開発

本研究で開発する危険検知システムでは、実際の現場で使用することを強く意識している。一般に、人間の作業の計測手法として、モーションキャプチャなどの計測機器を用いて動作を直接的に計測する方法とカメラで撮影した動画像データから計測する方法がある。前者は高精度でのデータ計測が可能である一方で、計測機器が高価で、複数台のカメラによ



a. 脚立の立ち方
 (左:「片側」, 右:「またぎ」)

b. 脚立の設置位置

図1 実験で採用した脚立の立ち方と設置位置

る撮影も必要なことから、遮蔽物などによるオクルージョンが発生も考慮して十分に広いスペースも必要となり、広く建設業などの現場で活用するには問題も多い。そこで本研究では、後者のカメラで撮影した動画像を解析するとともに、さらに機械学習を活用することを考えた。

開発する危険検知システムの概要を以下に示す。まず、1~2 台の単眼 RGB カメラで撮影する作業の様子を物体検出アルゴリズムの一つである YOLO[6]を用いて脚立と作業者を矩形単位で解析し、動画内の脚立作業を検出する。次に、脚立作業と判別された作業に対して、AI 姿勢推定ソフトウェア (ネクストシステム社製: Vison Pose[7]) を用いて作業者の骨格を 3 次元推定する。そして、3 次元推定された姿勢から脚立への立ち方(片側 or またぎ)を判別するとともに、3 次元推定した姿勢情報のデータを姿勢分析ソフトウェア (University of Michigan: 3DSSPP[5]) に入力することで作業者の重心位置を推定する。最後に、推定した重心データを外れ値検出プログラムに入力し、入力データが正常値 (安全作業) か外れ値 (危険作業) か判定する。なお、外れ値として検出された作業に対しては、音や光を用いて作業者に対してその危険性を警告することを想定している。

(倫理面への配慮)

実験前に被験者に対して実験の概要と方法について文書と口頭の両方で説明し、同意書に署名することによりインフォームド・コンセントを得られた被験者にのみ、実験を実施している。

C. 研究結果

1) 脚立作業における危険な作業の特性の検討

得られた実験データを用いて脚立への立ち方（「片側」と「またぎ」）ごとに LOF 法を用いた外れ値判定を行った結果を図 2 に示す。図 2 より、「片側」と「またぎ」のどちらも共通して中心部分に正常値があり、外周部に外れ値が検出されていることが確認できる。すなわち、どちらの立ち方でも外れ値は重心位置が左右前後に傾いた場合に外れ値として判定されていることが確認された。

次に、重心分析の結果、外れ値と判定された作業が実際に危険な作業であるのかについて検証するため、すべての実験データ、正常値と判定されたデータ、外れ値と判定されたデータに関して、「事後評価」と「作業時間」の観点で比較した結果を図 3 に示す。図 3 より、どちらの立ち方にも共通して、外れ値と判定されたデータ群には作業がしにくいことを表す事後評価 1 の割合が高いことが確認できる。また、作業時間についても同様に外れ値と判定されたデータ群は時間が長いことが確認できる。これらの分析結果から、外れ値と判定された作業は主観評価、作業時間ともに、作業がしにくく、かつ作業効率が低い可能性があることが確認できた。

そこで、外れ値として判定された作業と脚立の設置位置の関係について分析した結果を図 4 に示す。なお、図 4 の緑色の範囲は全 8 名の被験者の実験データで外れ値と判定されなかった範囲（安全）、黄色の範囲は 1 人以上で外れ値が判定された範囲（危険性あり）、赤色範囲は全 9 名の被験者全員が作業を行うことができなかった範囲（作業不可）を示している。その結果、安全と評価した緑色の範囲は蛍光灯の真下の周辺付近に分布していることが確認された。これは、人間工学的に安全と効率を両立できる範囲を評価した先行研究[3]の結果を追認するものであることも確認された。

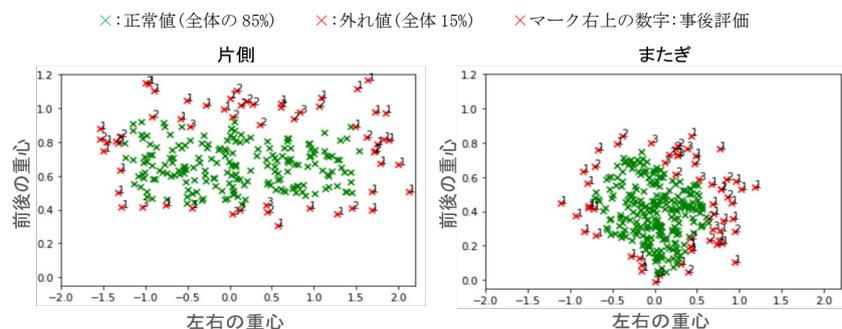


図 2 LOF 法を用いた分析結果

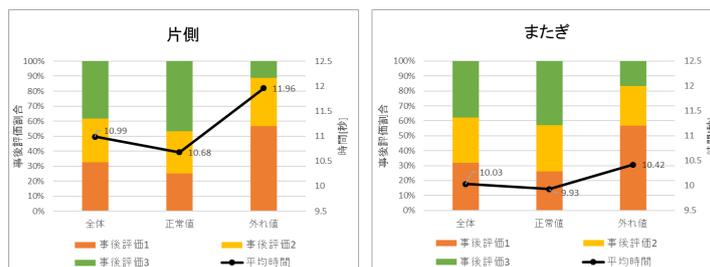


図3 事後評価・平均時間の比較

立ち方	片側	またぎ	
重心分析結果	←-4	←-4	←-4
	←-3	←-3	←-3
	←-2	←-2	←-2
	←-1	←-1	←-1
	0	0	0
	1	1	1
	→4	→4	→4

緑：外れ値の検出なし(安全)
 黄：外れ値の検出あり(危険性あり)
 赤：作業不可能

図4 重心分析の結果から求められた脚立の設置位置の分類

2) 危険検知システムの開発

開発した危険検知システムに対して、先行研究の被験者 1 名の実験データを用いて有用性を検証する。なお、検証に使用する被験者 1 名の実験データは、B-1 および C-1 の分析で使用した実験データとは別の被験者のデータを用いた。まず、被験者の作業の様子を撮影した動画像から脚立作業中の画像を抽出し、作業画像から開発したシステムで前後重心と左右重心を推定した。次に、システムで推定した重心位置のデータと重心分析で用いたデータを標準化し、B-1 および C-1 の分析で用いたデータに重ねた。その結果を図 5 に示す。

次に、検証用被験者の先行研究[3]の実験データと検証用被験者の作業写真から開発システムで推定した重心位置をそれぞれ外れ値検出させた結果を図 6 に示す。外れ値と検出された作業を危険作業として赤色とし、正常値と検出された作業を安全作業として緑色とした。その結果、推定した重心位置が外れ値として検出された点は 8 点あり、その 8 点全てが図 4 の黄色 (1 名以上で外れ値判定) の範囲で行った作業であることが確認された。これらのことから、本システムで推定した重心位置を用いても、危険範囲の作業を外れ値として検出できることが確認された。

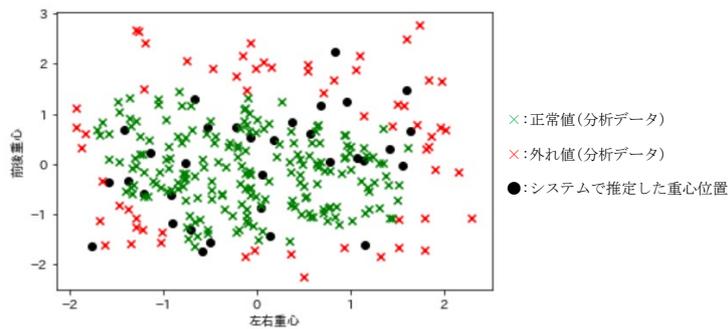
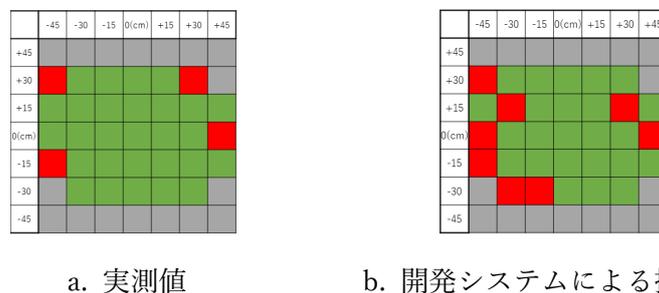


図5 重心分析と推定重心の重ね合わせの結果



a. 実測値

b. 開発システムによる推定値

図6 重心位置を外れ値判定した結果

D. 考察

C-1 および C-2 の分析結果より、LOF 法によって外れ値と評価されたデータの集団はデータ全体や正常値と比較して、「事後評価」と「作業時間」の評価が低いことが示され、脚立の設置位置から蛍光灯の真下から離れていくほど緑色、黄色、赤色と危険度が上がると捉えることができることが確認できた。すなわち、動画像解析を用いて作業者の重心位置を推定し、その値をトラッキングするとともに、その値に応じて作業者の危険を検知することは可能であり、実際の現場における脚立からの墜落・転落を未然防止に貢献する可能性があることが示された。

E. 結論

本研究では、脚立作業に起因する労働災害の未然防止を目指し、脚立作業中の動画像から危険性の高い作業を検知、警告するシステムを検討した。具体的には、脚立への立ち方と設置位置が脚立作業の安全性と効率性について調査した先行研究の実験データをもとに、脚立作業における危険な作業の特性を分析した。そして、危険な作業の特性を理解した上で、

脚立から墜落・転落の可能性がある作業に対して警告を発する危険検知システムを開発し、その可能性を検討した。

今後は、本研究で開発した危険検知システムを実際の現場に適用し、その有用性を検証する。また、本システムの発展的な活用方法として、単に作業者にその危険性をフィードバック（ネガティブ・フィードバック）するだけでなく、作業ルールに基づいて作業が遂行されているか否かを安全性の観点からフィードバック（ポジティブ・フィードバック）することも考え、作業者と本システムのインタラクションのあり方も含めて検討を進める予定である。

参考文献

- [1] 菅間敦, 大西明宏: 脚立に起因する労働災害の分析, 労働安全衛生研究, Vol. 8, No. 2, pp. 91-98, 2015.
- [2] Sharjeel Anjum, et al. : Fall Prevention From Ladders Utilizing a Deep Learning-Based Height Assessment Method, IEEE Access, Vol. 10, pp. 36725-36742, 2022.
- [3] 樺島宏樹, 中嶋良介, 菅間敦, 高橋明子: 脚立の設置位置が上向き作業時の作業性に及ぼす影響, 2020 年度日本設備管理学会秋季研究発表大会論文集, pp. 139-142, 2020.
- [4] 菅間敦, 瀬尾明彦: 脚立作業を想定した狭い足場上での静的立位姿勢の安定性評価, 人間工学, Vol. 53, No. 4, pp. 125-132, 2017.
- [5] Center for Ergonomics, Uni. of Michigan, 3DSSPP: <https://c4e.engin.umich.edu/tools/services/3dsspp-software/>, (参照 2024-03-08)
- [6] UltralyticsYOLOv5: <https://github.com/ultralytics/yolov5/>, (参照 2024-03-08)
- [7] 株式会社ネクストシステム, VISION POSE: <https://www.next-system.com/visionpose>, (参照 2024-03-08)

F. 健康危険情報

(分担研究報告書には記入せずに、総括研究報告書にまとめて記入)

G. 研究発表

1) 論文発表

なし

2) 学会発表

- [1] 西野真菜, 平内和樹, 菅間敦, 高橋明子, 島田行恭, 石垣陽, 島崎敢, 三品誠, 中嶋良介: IE 視点を用いた建設現場における新人作業者の教育方法に関する一考察, 安全工学シンポジウム 2023 予稿集, pp. 246-247, 2023.
- [2] 西野真菜, 平内和樹, 菅間敦, 高橋明子, 中嶋良介: 建設現場における作業員への作業の教示方法と作業方向の相違が作業性に及ぼす影響, 日本設備管理学会 2023 年度春季研究発表大会論文集, pp. 112-115, 2023.
- [3] 岩井俊明, 平内和樹, 菅間敦, 高橋明子, 中嶋良介: 動画解析と機械学習を活用した脚立作業の危険検知システムの開発に関する研究, 2023 年度精密工学会春季大会学術講演会, pp. 33, 2023.

H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む.)

なし

1) 特許取得

なし

2) 実用新案登録

なし

3) その他