

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04218

研究課題名（和文）機械学習を用いた建設現場の労働環境・生産性データ収集分析システム構築

研究課題名（英文）Development of a system for collecting and analyzing labor environment and productivity data from construction sites using machine learning

研究代表者

五艘 隆志（GOSO, TAKASHI）

東京都市大学・建築都市デザイン学部・准教授

研究者番号：60412441

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では生産性区分の自動分析システムの構築を行った。加速度情報を画像として取り扱い、「作業の有無」や「歩行の有無」などの単純動作5分類を先行して分類したうえで、9つの生産性区分に分類することとした。単純動作については、すべてを検証できたわけではないが、高い水準で判別することができたが、過学習を抑制する工夫が要求されることも判明した。一方で生産性動作区分の分類については、作業員の従事する作業は複雑で複合的な動作であるため高精度とならなかった。ただし、教師データの増加と、システムのチューニングによる精度向上の方向性も併せて示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で構築するシステムは、労働環境と生産性に関するデータを一定の精度で継続的に取得し、生産現場における問題点を定性的、定量的に認識し、関係者間で共有して向上策を講じるという当たり前のマネジメントを実現するための基盤である。我が国の建設産業ではこういった取り組みは全くなされておらず、建設現場の支援を得て取り組まれた本研究の成果は現場の生産性向上活動に寄与できるものである。

研究成果の概要（英文）： In this study, an automatic analysis system for productivity classification was constructed. Acceleration information was handled as images, and five simple actions, such as "working" and "walking", were classified first, and then classified into nine productivity categories. Although not all of the simple movements could be verified, we were able to discriminate them at a high level, but it was also found that some measures to control over-learning were required. On the other hand, the classification of the productivity motion categories was not highly accurate, because the tasks that the workers engaged in were complex and compound motions. However, the results also indicated the direction of improvement in accuracy by increasing the amount of teacher data and tuning the system.

研究分野：建設マネジメント、行政経営、公共調達

キーワード：建設 労働環境 生産性 歩掛 動作分類 機械学習

1. 研究開始当初の背景

労働環境と生産性に関するデータを一定の精度で継続的に取得し、生産現場における問題点を定性的、定量的に認識し、関係者間で共有して向上策を講じるという当たり前のマネジメントを我が国の建設現場に導入すべきというのが本課題の核心となる問いである。なお、米国を中心として1980年代からワークサンプリング調査による建設作業員の生産性管理データの取得の取り組みが行われている。この手法自体は我が国の製造業などにも広く導入されている。

一方で、我が国の建設産業(発注側、受注側)ではこういった取り組みは全くなされていない。発注者側は標準値である官積算基準の正当性に疑義を生じかねないという理由で、受注者側は利益構造の手の内をさらしたくないという理由で、ともにデータ取得そのものも含めて後ろ向きの姿勢をとっているのが現状である。しかし、労働環境と生産性の向上策を見出すためには主観や意図の入らないデータ収集が不可欠である。機械的な情報取得のための電子デバイスの整備と併せて、データ収集・分析と共有・活用の具体的方法論が必要であるが、そのような総合的な取り組みは行われていない。

2. 研究の目的

必要なことは、人手を介さない自動データ収集システムとデバイスを整備して、一定の精度で、継続的に取得することである。取得するデータは具体的には技術者や技能者が各作業に従事した時間の長さ、作業場所における気温や湿度といった項目となる。さらにこういったデータを参照して、作業員ごとの作業環境、労働強度の把握、近接・落下事故の予防、生産性阻害要因の抽出などの向上策を講じるシステムの構築を行うことを目的とする。図-1に構築システムの構成を示す。

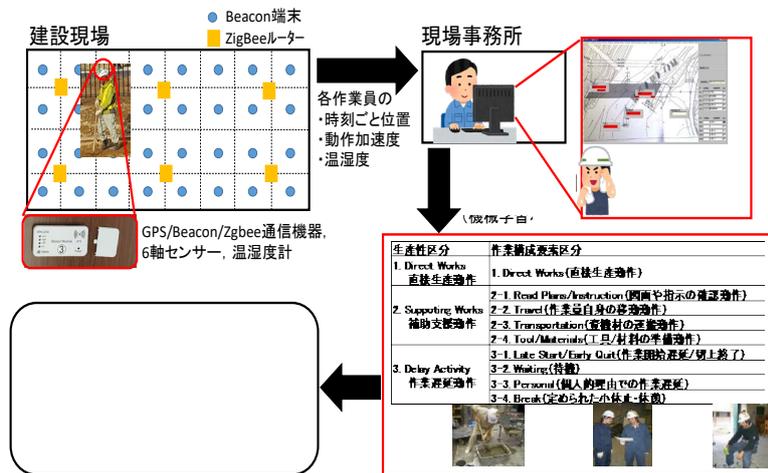


図-1 建設現場における労働実態を明らかにし、技能者・技術者の労働環境と生産性の向上策を見出すシステムの構成

3. 研究の方法

本研究では、無線通信機器の発展状況を踏まえてデータ収集システムとデバイスを製作することとした。また、作業員・技術者(ヘルメット)と建機に装着する端末には6軸センサー(3軸加速度と角速度)に加えて温度計および湿度計を内蔵し、これらセンサーを用いてシステム構築とデータ収集・分析を行う。本研究では、図-2のようにandroidスマートフォンをデータロガーとして活用して各種センサーを接続する方法(案2)として進めた。



図-2. 開発端末の構成

これらの情報収集にあたってはセンサーによる自動計測と合わせて、現場におけるデータ取得の初段階における機器校正と、機械学習のための教師データ作成を目的とした人手によるワークサンプリング調査も実施した。

4. 研究成果

(1) 5種類の単純動作の組み合わせ

本研究では時系列の情報を保持し、可能な限り自動的かつ判別処理における主観的な判断を排除することで一定の信頼性を確保することを目指した。なお、主観性の混在は、教師データ作成に際して「その動作が生産性動作区分のどの項目に該当するか」を判断するうえではある程度避けられないものであったため、教師データ作成時に撮影した映像を基に建設現場作業に共通する動作特徴を分析することで、ある程度客観的な情報によって主観による影響を低減することを試みた。まずは職種に依らず、「作業の有無」、「歩行の有無」でのみ動作を捉えた。この基準で得られた作業と歩行の有無については取得した加速度データと紐づけて教師データを作成した後、予備実験としてCNNの実用性検証に用いた。予備実験では概ね8割程度の精度で歩行の有無と作業の有無を判別することができた。

さらに現場の動作を精査すると、この作業・歩行の有無だけでは分類が困難であると考え、建設現場作業のような複合的な動作であっても、その動作一つ一つには少なからず単純で特徴的な要素が存在する、という仮定の下、分類に影響を与えそうな単純動作を「歩行の有無」、「前傾姿勢の有無」、「周期的・規則的な動作」、「周期性を持たない特徴的な動作」、「分類に寄与しないが大きい動作」の5つに定義した。

長期的な視点としてデータを蓄積して高精度に判別を行ううえで、アップデートしやすく、また加速度以外の情報として位置情報なども導入できるようなシステムが必要である。図-3は本研究で構築した枠組みの全体像を示すものである。読み込まれた加速や位置等の情報を一元化し、先述の単純動作区分判別を行った後に、目標とする9区分(統合3区分)の生産性動作区分の判別を行う設計である。

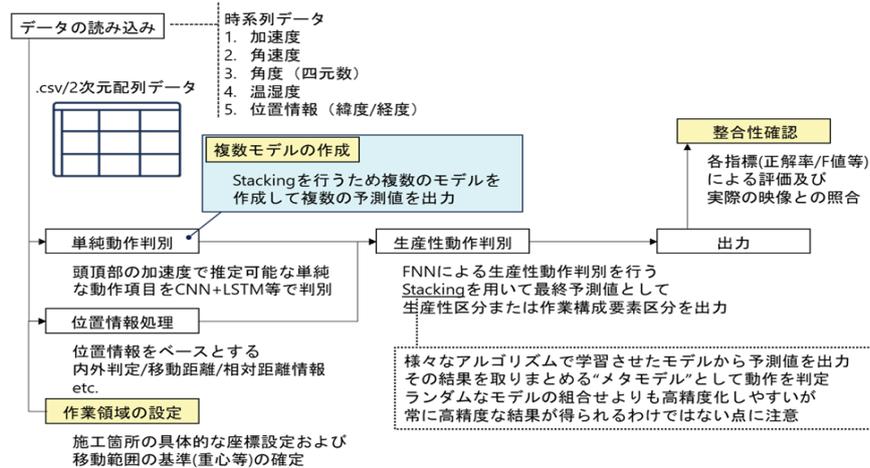


図-3 システムの全体像

(2) 生産性分類の自動分析システムの分析システムの構築

上述の枠組みによるシステム構築は、今後のシステム改善・追加を考慮してpythonにより実施した。以下、その内容について述べる。

単純動作判別には既存の HAR (Human Activity Recognition) でも導入されている深層学習手法である CNN および LSTM を採用した。本研究では前処理として加速度のセンサーデータを画像データのように 2D に展開することでさらに CNN の長所を伸ばす方法を採用した。くわえて「時間情報を必要量維持する」「時系列・順序が正しく保たれる」「多量の時刻情報をできる限り簡素にまとめることで計算負荷を少なくする」という 3 点を満たす工夫を行った。画像の生成手順は図-4 に示すフローの通りである。今回は加速度の前処理として 150 データ (3 秒ごと) の窓幅で切り取り画像として、150x150x3 のテンソルに変換した。その後、畳み込みを行って特徴を先鋭にしたのち、時系列特徴が損なわれないようにマックスプーリングを行った。さらに、50 データ (1 秒) ずつストライド幅を設けることで画像化後の 3~5 秒の時間幅の情報を保持したまま LSTM での判別が行えるように調整し、時系列情報を保持したまま動作判別を行うモデルを実現した。また汎用性を確保するべく、活性化関数には先行研究で活用されていた ReLU および Adam を用いた。

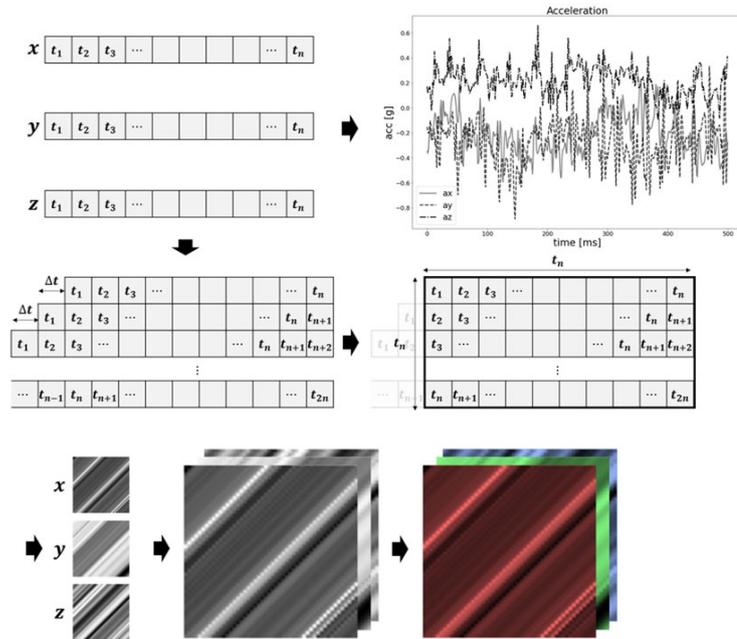


図-4. 加速度データから生成する画像の生成手順

(3) 生産性分類の自動分析結果と考察

① 深層学習を用いた単純動作分類

試験的に「歩行」と「作業」の有無を判別する CNN のみの判別モデルを作成した。学習に用いたデータは研究室の学生 6 名に現場サンプリングと同じ装備を装着して、得られた 90,000 データ、約 30 分間の動作を畳み込み、学習、検証したものである。これはヘルメットに取り付けた単一の IMU データのみで CNN による建設現場作業員の動作判別を一定の精度で行えるのかをあらかじめ検証するものである。

得られた結果は図-5 に示すものとなった。作業ありかつ歩行あり (work with walking) 作業ありかつ歩行なし (work without walking) 歩行のみ (walking) 作業・歩行ともになし (not much activity) の各項目で該当するセルのスコアに応じて色濃度が大きくなる。この予備実験の全体正解率は 87.5% となりある程度の精度で判別が行えたことから加速度を画像化したのちに畳み込みを行ってもある程度の HAR 性能が期待できることが確認された。

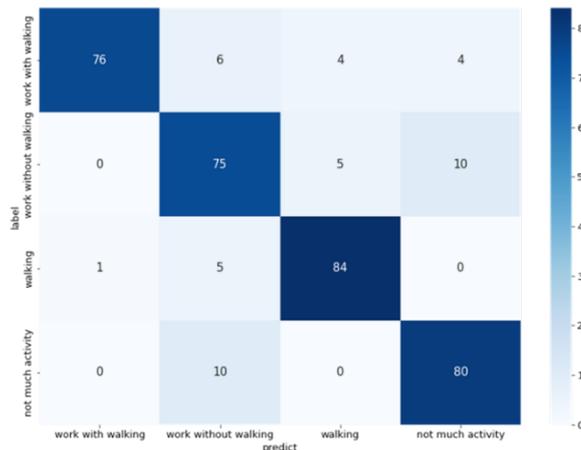


図-5. 単純動作判別の結果

その後、単純動作分類 5 項目については、実際の現場データを使用する都合から、先に加速度データの 10 分割交差検証を行った。ここでは検証が可能である母数 (約 10,000 データ) を確保できた「前傾姿勢判別」と「歩行有無判別」のみを実施した。その結果、前傾姿勢の判別については正答率 92.1%、適合率 98.5%、再現率 93.4% となった。ただ、過学習の傾向も認められた。また、歩行判別について正答率 80.0%、適合率 82.2%、再現率 84.2% と概ね良好な数値を得た。しかし、前傾姿勢と同様に検証誤差については Epoch を経るごとに上昇傾向にあるため汎化性能はやや低いことが予想される結果となった。

② 深層学習を用いた生産性動作分類

作成した CNN+LSTM モデルを用いて生産性動作区分と作業構成要素についても分類を行った。

図-6～9 はその分類結果および学習曲線である。生産性動作判別については正答率 73.3%を記録し、特に補助支援動作（Support）については一定の精度が確保でき、再現率 81.5%、適合率 84.6%となった。

また、作業構成要素区分での分類も行ったが、実際に記録された「0. 直接生産動作」「1. 図面や指示の確認動作」「2. 作業員自身の移動動作」「3. 資機材の運搬動作」「6. 待機」のみに絞って検証した。正答率は 64.0%となり単純動作と違って低い水準となった。

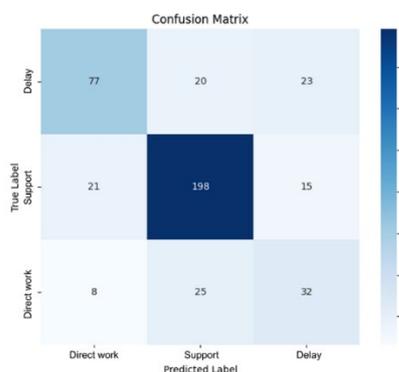


図-6. 歩行有無判別の混同行列
(分類結果)

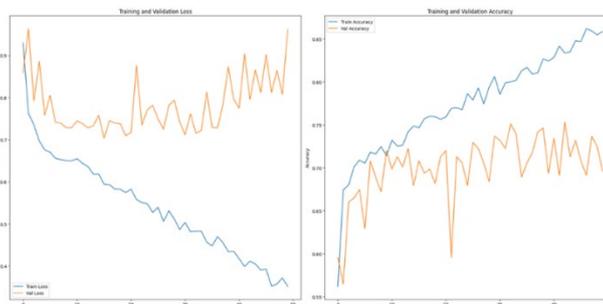


図-7. 歩行有無判別モデルの学習曲線

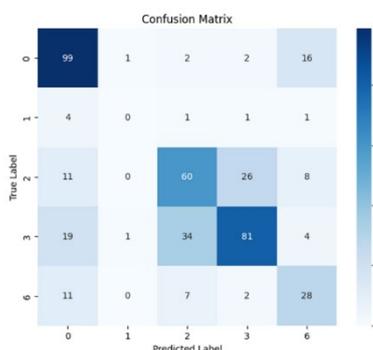


図-8. 歩行有無判別の混同行列
(分類結果)

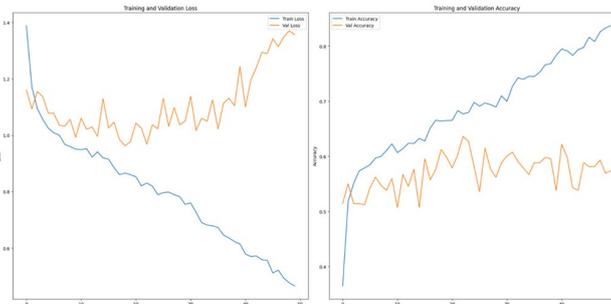


図-9. 歩行有無判別モデルの学習曲線

③分類試験結果の考察と今後の課題

既往のシステムの利点をそのままに加速度を画像化するプロセスと深層学習を用いた場合でも同水準での判別が行えることが確認された。単純動作については高い水準で判別することができた。一方で生産性動作区分の分類には過学習を抑制する工夫が要求されることも確認された。検証誤差が高くなったのは前述の通り過学習の傾向にあるためであると考えられる。また過学習が生じた原因としては、モデルの複雑さに対してデータ量が不足していることが考えられる。

今回使用した CNN+LSTM モデルでは時系列情報の保持をしつつ、データの追加に伴って更なるモデルの強化が行えるシステムとして構築ができた。特に主として利用した CNN によって既存のシステムで課題として挙げられていた教師データの蓄積と増強、そして人手による操作の減少が実現した。生産性動作区分判別については既往の統計的手法の組合せの物よりもやや正答率が低下する結果となった。ただし、これは判別のピッチが異なっており、既往の研究では 1 分毎の生産性動作を判別するものであったものであるのに対し、本研究のシステムではさらに細かい 3 秒の時間幅での判別を行っている為、より詳細度の高い判別について同程度の正答率を維持できたとも考えられる。なお判別処理に要する時間については、既往システムで 3 時間程度かかっていた学習から判別を新システムでは 25 分とおよそ 96%の時間縮減が行えた。

今後の課題として、教師データについては客観性を確保できるよう客観的な指標を組み込むほか、現在では不足している「周期的・規則的な動作 (repetitive motion)」「周期性を持たない特徴的な動作 (characteristic motion)」「分類に寄与しないが大きい動作 (ineffective motion)」の 3 項目についての有効なデータを継続的に集めて蓄積し、判別精度を確認していく必要がある。現段階の調査では新規に設定したこの単純動作 5 項目の妥当性を評価するには情報が不十分である。過学習の抑制の為にも継続的にデータを収集・集積してモデルの高精度化を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 五艘 隆志 , 武藤 一伸 , 濱野 満 , 大澤 徹郎 , 笠井 琉司	4. 巻 Vol.57, No.6
2. 論文標題 機械学習を用いた建設現場の労働環境・生産性データ収集分析システムの開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 舗装	6. 最初と最後の頁 3-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ryuji Kasai, Takashi Goso, Tetsuro Osawa
2. 発表標題 Development of a program for automatic identification of productivity of construction workers
3. 学会等名 8th International Conference of EACEF 2022 (Euro Asia Civil Engineering Forum) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大澤 徹郎・五艘 隆志
2. 発表標題 事前分類と機械学習の組み合わせによる生産性区分分類システムの構築
3. 学会等名 土木学会 第46回土木情報学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大澤 徹郎・五艘 隆志
2. 発表標題 加速度を用いた建設現場作業の自動判別プログラムの枠組み構築と実証実験
3. 学会等名 土木学会 第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------