

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：82629

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14451

研究課題名（和文）特徴抽出を用いた作業動作解析に基づく姿勢安定性評価法の構築

研究課題名（英文）Development of postural stability evaluation method based on working motion analysis using feature extraction

研究代表者

平内 和樹（Hiranai, Kazuki）

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・新技術安全研究グループ・任期付研究員

研究者番号：00907826

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、まず押し作業中の突発的な操作反力の減少によって引き起こされる姿勢の不安定性に、操作力の大きさと足位置が与える影響を明らかにした。次に、測定された作業姿勢を特徴抽出手法を用いて分析し、抽出された特徴と姿勢安定性または作業動作の変化との関係について明らかにした。さらに、押し作業中の突発的な操作反力の減少を最初に経験したときの試行反応による姿勢バランスの改善と力発揮戦略の変化について調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、実際の作業現場でも発生しうる工具のすっぽ抜けのような発揮している力に対する反力が減少することによって発生する転倒メカニズムの解明に寄与するものであり、学術的意義は高い。本研究により、足を前に出すことで姿勢動揺を抑制できることや、姿勢バランス喪失の経験が姿勢安定性を改善させる可能性を示唆する結果を得た。以上の結果は、作業現場における作業指針の提案などに貢献することができ、本研究の社会的意義は高いといえる。

研究成果の概要（英文）：This study clarified how handling force levels and foot positions affect postural instability evoked by momentary loss of hand reaction force during pushing tasks. Then, measured working postures were analyzed using feature extraction methods, and this study clarified the relationship between extracted features and changes in postural stability or working motions. In addition, this study examined the improvement of postural balance and the changes in force exertion strategy by the first trial response in which participants experienced the momentary loss of hand reaction force during the pushing task.

研究分野：人間工学

キーワード：姿勢動揺 操作力 COM COP 床反力 特徴抽出 機械学習

1. 研究開始当初の背景

「墜落、転落」や「転倒」などの作業者の行動による姿勢バランスの乱れに起因して発生する事故は幅広い職場で起こりうる労働災害であり、作業姿勢や動作の観点から姿勢安定性の評価を行うことは労働災害の分析において重要である。特に、転倒等の原因となりうる動作の検出や事前予測を可能にすることは、労働災害発生メカニズムの解明に大きく貢献し、労働災害の未然防止につながる事が期待される。さらに、近年の機械学習やディープラーニングの発展やウェアラブルセンサの普及により、人間の姿勢はより簡易的に取得できるようになりつつある。これにより従来は測定が困難だった多くの産業現場でも同様に姿勢計測が可能になることが予想され、測定した姿勢や動作データを分析し、評価する技術の確立が求められる。

これまでに、作業姿勢や動作に異常検知手法を応用し、作業中の姿勢や動作のわずかな変化から作業のしやすさなどの作業性の評価が行われ、作業性の低下、突発的事象の発生が作業姿勢や動作の変化として検出できることが明らかになっている。これらは、作業性を低下させるような動作の特徴を“異常”として捉えることを試みたものであり、転倒などの要因となる作業姿勢や動作の検出に機械学習や異常検知などの応用可能性を示唆するものである。

2. 研究の目的

本研究は、測定された作業動作データに対して特徴抽出手法を適用し、抽出された動作特徴と床反力計などで計測された姿勢安定性評価指標との関係を明らかにすることで、動作解析に基づく姿勢安定性評価法の構築を行うことを目的とする。具体的には、姿勢バランスの乱れを伴う作業条件を模した実験を実施し、作業動作、姿勢動揺などのデータを測定し、それらの指標の関係について分析するとともに、得られた動作データに対して特徴抽出または機械学習手法を適用し、姿勢安定性や作業動作の変化との関係について明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、姿勢バランスの乱れを伴う作業条件として、工具のすっぽ抜けのように発揮している力に対する反力が急激に消失することによって姿勢バランスが乱れる(以下、反力外乱とする)条件を対象とした。押し作業において事前に設定した閾値以上の力が加わると、力発揮方向に操作ハンドルが移動することで、反力外乱を再現する実験装置を利用し、いくつかの実験条件において、作業姿勢、床反力、重心動揺、主観評価等の測定を行った。得られた作業動作データに対して、分析の内容に適した特徴抽出手法を適用し、抽出された特徴量と姿勢安定性や作業動作の変化との関係について明らかにした。

4. 研究成果

(1) 反力外乱による姿勢動揺に操作力の大きさと足位置が与える影響の調査

ハンドルを押す作業において事前に設定した閾値以上の操作力が加わると、力発揮方向にハンドルが移動する実験装置を使用し、操作力のしきい値(最大発揮力の30%, 50%, 70%, 90%)と押し作業時の足の配置(前、揃え、後)を実験条件として変更した際の作業姿勢、床反力、操作力について計測した。本研究では、姿勢動揺は重心(Center of Mass, COM)の位置変化量と速度で表され、床反力と発揮力の水平成分の差を積分した水平力差分の力積(以下、差分力積とする)と床反力作用点(Center of Pressure, COP)が姿勢を制御する要因となると仮定した。実験では、これらの評価指標を測定するとともに、実験参加者に姿勢の不安定感等の主観評価について回答させ、反力外乱が発生したときの操作力の大きさと足位置が姿勢動揺に与える影響について明らかにした。

結果として、足位置・前条件では反力外乱発生後のCOMとCOPの位置変化量が減少し、足を出して作業を開始することが姿勢動揺の抑制に貢献することを示した(表1)。また、操作力しきい値の増加は反力外乱発生前のCOM変化量や差分力積、姿勢の不安定感に関する主観評価を増加させる傾向が見られた(表2)。これらの結果は、タスクに要求される操作力の増加がより大きな姿勢動揺を引き起こすことを示し、発揮力の増加と反力外乱による姿勢動揺の関係について明らかにした。

表1 各足位置条件のCOM・COPの  
変化量 [cm]

変 化 量	足位置条件		
	前	揃え	後
COM	9.3±6.2	10.8±7.0	9.5±6.0
COP	3.7±4.3	9.0±5.6	21.5±8.8

表2 各操作力しきい値条件における  
評価指標の変化

	bCOM [cm]	差分力積 [Ns]	主観評価 [点]
30%	7.3±5.3	-9.7±15.8	1.4±1.2
50%	8.8±6.0	-0.4±12.1	1.8±1.4
70%	10.6±6.3	1.9±14.1	2.3±1.5
90%	12.8±6.8	8.1±16.8	3.0±1.7

bCOM: 反力外乱発生前のCOM変化量

## (2) 特徴抽出の応用による作業動作と姿勢安定性の関係の解明

### (2-1) 特徴抽出を用いた姿勢不安定感に影響する関節の特定

(1)にて測定した作業姿勢のデータと主観的な姿勢の不安定感の関係について Lasso 回帰を用いて分析した。Lasso 回帰は、目的変数を主観的な姿勢の不安定感、説明変数を反力外乱が発生するまでの各関節の変化量(最大値と最小値の差)とした。交差検証を用いて最適な Lasso 回帰のモデルを求め、その際に選択された特徴量を主要な動作特徴と定義し、足位置条件による主要な動作特徴の違いについて明らかにした。さらに、各足位置条件について姿勢の不安定感の平均値を求め、平均未満を“安定”、平均以上を“不安定”とし、Support Vector Machine (SVM) による分類を試みた。主要な動作特徴のみを用いる場合と、全ての特徴量を用いた場合で SVM による分類精度を比較し、特徴抽出の有用性について検討した。

図1は足位置・前条件の主要な特徴量と姿勢変化の関係を示している。多くの実験参加者が反力外乱発生直前には、体幹を傾けて前方へ大きな操作力を発揮するとともに、操作力発揮のために床反力を利用するために膝を深く屈曲する傾向にあった。以上より、特徴抽出手法により実験参加者の力発揮戦略の変化に伴う姿勢変化を特徴として抽出できることを明らかにした。



図1 足位置・前条件と主要な特徴量と姿勢変化の関係

表3は足位置・前および揃え条件の SVM による姿勢の不安定感の分類結果を示している。足位置・前条件では、主要な特徴量のみを用いた場合に再現率が向上する一方、他の指標、特に特異度は大きく低下した。これは安定した条件の多い足位置・前条件はデータセットに偏りが見られ、姿勢分類のために十分な特徴を学習できなかった可能性を示唆している。一方で、足位置・揃え条件は、主要な特徴量のみを用いた場合の精度、特異度は全ての特徴量を用いた場合よりも低下したが、その低下の割合は足位置・前条件よりも小さかった。足位置・揃え条件は、支持基底面が小さく、力を発揮するためにとれる戦略が限定される。したがって、主要な動作の特徴の抽出が容易になり、抽出された特徴量のみで十分にモデルを説明可能になり、精度の低下が抑制されることを明らかにした。

表3 足位置・前および揃え条件の

SVM による姿勢の不安定感の分類結果

足位置	指標	全ての説明変数	抽出された特徴量のみ
前	精度	71.3±3.3%	64.7±7.5% (-6.6%)
	再現率	84.3±10.8%	89.1±10.2% (+4.8%)
	特異度	58.3±16.4%	40.3±19.9% (-18.0%)
揃え	精度	66.4±7.1%	64.4±7.2% (-2.0%)
	再現率	85.1±9.9%	85.2±8.1% (+0.1%)
	特異度	47.7±11.7%	43.7±9.1% (-4.0%)

()内の数字は全ての説明変数の場合の各割合から抽出された特徴量のみ用いた場合の割合を引いたもの

### (2-2) 作業区間別の動作特徴の抽出と反力外乱による影響の評価

人間の動作は複数の関節が連動して動作するため、単一の関節の変化の観察だけでなく複数の関節の連動度合いも1つの動作特徴として捉えることができる。グラフィカル Lasso と呼ばれる特徴抽出手法は、複数の変数の関係のうち主要な関係のみを抽出したスパースなグラフ構造を取得できる。したがって、スパースなグラフを取得したときに残っている関節のつながりを主要な協調関係と判断し、作業区間(操作力発揮前、反力外乱発生前、反力外乱発生後など)別に関節の協調関係を推定し、作業姿勢の変化と比較した。また、スパースなグラフ構造の変化に与える影響の大きい変数を定量化する相関異常度という指標を用いて、反力外乱発生前と発生後の姿勢変化について、協調関係の変化に与える影響の大きい関節を足位置や作業区間について比較した。

操作力大きい値 90%、足位置・揃え条件について、スパース構造学習により得られた各作業区間の偏相関行列を求め、偏相関係数が0となる割合、偏相関係数が正の値または負の値となる割合を計算した。表4は力発揮開始から反力外乱発生までの体幹前傾角と主要な協調関係を持つ関節とそれらの相関係数の傾向を示している。図2に示すように、足を揃えた条件では、支持基底面が小さく、体幹の前傾による体重のモーメントを利用した力発揮を行う傾向にあった。したがって、体幹部の変化とそれに連動した関節の変化が抽出

表4 力発揮開始から反力外乱発生までの体幹前傾角と主要な協調関係を持つ

関節と相関係数の傾向	
右股関節屈曲角	正の相関
左股関節屈曲角	正の相関
右足関節底屈角	負の相関
左足関節底屈角	負の相関

できることが示唆された。

操作力発揮開始から反力外乱発生までの区間における足位置・後条件の体幹前傾角の相関異常度は他の足位置条件よりも大きくなったが、反力外乱発生後には他の足位置条件よりも小さくなる傾向にあった。足位置・後条件は、図1・図2に示すような足位置・前または揃え条件とは異なり、作業開始時に足を後ろに引く傾向にあることから、力発揮の際には他の足位置条件よりも体幹を大きく屈曲する必要があったと考えられる。一方で、反力外乱発生後はすでに十分な体幹の傾斜が行われていることから、関節の協調関係の変化に与える影響が小さくなり、相関異常度が他の足位置条件よりも低くなった。以上より、作業区間による姿勢変化の違いについて、相関異常度を用いることで定量的に評価できる可能性が示唆された。

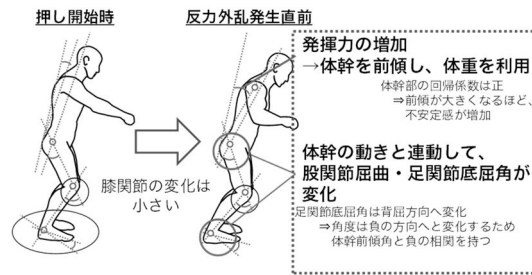


図2 足位置・揃え条件の力発揮戦略の変化に伴う姿勢変化の一例

### (3) 危険事象の経験が作業姿勢変化に与える影響の評価

(1) で使用した実験装置と同様の実験装置を使用し、実験参加者が反力外乱を経験する前と経験した後で作業姿勢、姿勢安定性、力発揮戦略に与える影響を明らかにするための実験を行った。実験開始から10試行は反力外乱の発生しない試行(未経験試行)、未経験試行終了後最初の反力外乱を伴う試行(初回試行)、通算の試行数が31試行になるまで反力外乱あり・反力外乱なしをランダムに行う試行(経験後試行)の3つのフェーズから実験が構成され、経験後試行において反力外乱のある試行は9回とし、すなわち反力外乱は全10回発生するものとした。実験参加者が力を発揮している区間を分析対象とし、COPおよび操作力の変化量(最大値と最小値の差)を各フェーズで求めた。また、力発揮戦略について確認するために、操作力の時間変化量を算出し、各フェーズの平均値を求めた。

図3は反力外乱の経験によるCOP変化量と操作力の時間変化量の傾向を示している。COP変化量は初回試行(反力外乱1回目)において最も大きな値を示し、2回目以降で大きく減少している。これらの傾向は、先行研究で議論されているFirst Trial Responseの傾向を示していると考えられ、経験によって姿勢動揺を抑えられるように姿勢制御戦略を変更したことを示唆している。また、外乱のない条件で反力外乱の経験の有無を比較すると、操作力の時間変化量は経験後の方が小さくなっている。これは、実験参加者が急激な力発揮を行うことなく、緩やかに力を加えるようになったことを示唆している。これらの知見から、危険事象の経験によって、姿勢制御戦略や力発揮戦略を修正する傾向があり、事前に事故の経験を行うことができれば転倒リスクを小さくできる戦略を獲得できることが示唆された。

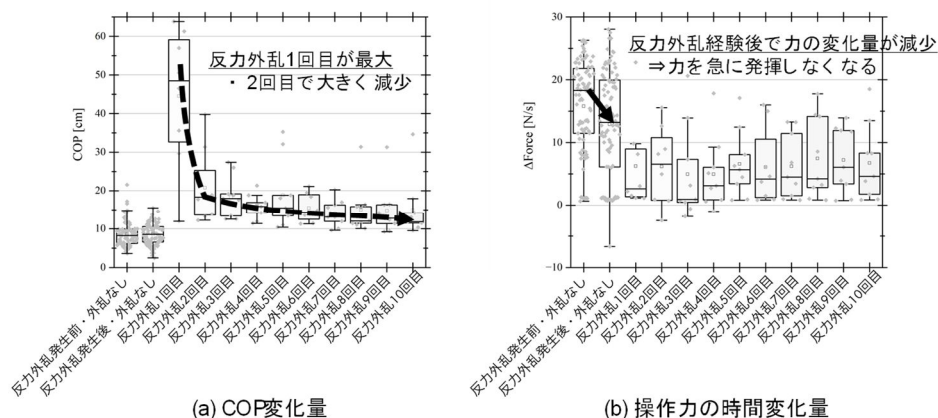


図3 反力外乱の経験によるCOP変化量と操作力の時間変化量の変化の傾向

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 平内和樹、菅間敦	4. 巻 59
2. 論文標題 押し作業中の突発的な反力減少による姿勢動揺に操作力の大きさと足位置が与える影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 人間工学	6. 最初と最後の頁 148 ~ 158
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5100/jje.59.148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 平内和樹、菅間敦
2. 発表標題 操作反力の突発的な減少により生じる作業姿勢変化の時系列特徴の抽出
3. 学会等名 日本人間工学会第63回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Hiranai, Atsushi Sugama
2. 発表標題 Effects of momentary loss of hand reaction forces on postural balance during manual pushing tasks: a time-series analysis of handling and ground reaction forces
3. 学会等名 International Conference on Slips, Trips, and Falls Sendai 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平内和樹、菅間敦
2. 発表標題 突発的な操作反力減少発生時の足の踏み出しが操作力と床反力の経時変化に与える影響の基礎的検討
3. 学会等名 日本人間工学会関東支部第52回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Hiranai, Atsushi Sugama
2. 発表標題 Investigation of efficacy of feature selection method for extracting importance of joint movement in pushing tasks with momentary loss of hand reaction forces
3. 学会等名 23rd Asian Pacific Industrial Engineering & Management System Conference (APIEMS2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平内和樹, 菅間敦
2. 発表標題 押し作業における姿勢動揺発生時の動作特徴抽出手法に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本人間工学会第64回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平内和樹, 菅間敦
2. 発表標題 突発的な反力減少が関節の協調動作に与える影響のスパース構造学習に基づく評価
3. 学会等名 日本人間工学会関東支部第53回大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuki Hiranai, Yasuhiro Hatori, Atsushi Sugama
2. 発表標題 Evaluation of changes in joint movement based on calculating correlation anomaly score: Application in the pushing tasks with momentary loss of external force
3. 学会等名 22nd Triennial Congress of the International Ergonomics Association (IEA2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1．発表者名 平内和樹，羽鳥康裕，菅間敦
2．発表標題 危険事象の経験が姿勢制御と力の発揮戦略に与える影響の基礎的検討
3．学会等名 日本人間工学会第65回大会
4．発表年 2024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
---------	---------