

ヒューマンエラー防止のための作業律の判定手法

Judging Working Rhythm from Body Movement to Prevent Human Errors

問谷 洋平[†] 西出 恭平[§] 早川 孝之[§] 原田 史子[†] 島川 博光[†]

Yohei Tontani Kyohei Nishide Takayuki Hayakawa Fumiko Harada Hiromotsu Shimakawa

1. はじめに

作業現場では、事故や製品の品質不良などの問題がある。作業者がいる製造現場で、事故が発生すると作業者が怪我をし、最悪の場合、命を落とす。製品の品質不良があると顧客からの信頼を失う、工程の後戻りが発生し、生産コストが大きくなるなど、ゆゆしき損害をもたらす[1]。事故や、製品不良の原因に、作業現場の機器の不調による外的要因によるものと、ヒューマンエラーなどの内的要因がある[2]。外的要因は、日常の保守作業などの事前の準備によりなくすることができるが、ヒューマンエラーは、事前の準備だけでは防ぎきれない。

ヒューマンエラー削減のため、ファクトリーオートメーション技術を用いた製造の自動化が考えられる。しかし、その技術のコストは莫大で、採算が取れない。そのため、依然として人の手による製造工程がある。

ヒューマンエラーを防止するために、作業現場では指差確認喚呼[3]などの作業手順を作業者が遵守したり、作業者が疲労しないように適度に勤務時間を管理したりするなど、作業者の注意力の低下を防ぐ対策がとられている。作業者の集中力の低下を防げるので、ヒューマンエラーをある程度、減らすことはできる。しかし、作業中の作業者の集中力の低下を完全に防ぐことは難しい。ヒューマンエラーを完全に防ぐには、作業している作業者の集中力が低下している状態を発見する必要がある。本論文では、ヒューマンエラーを防止するため、作業者が集中している状態にあるときの体の動きを検出する。

2. 単調作業とヒューマンエラー

2.1 ライン生産方式

ライン生産方式は、作業現場において単一の製品を大量に製造するための方法である。この方式は、作業員の配置を一連化し、ベルトコンベアなどにより流れてくる機械に部品の取り付けや小加工を行う作業である。主に家電製品、車の組立や、食品加工がある。例えば、車の組立工程において、作業者はある部品にねじをうちつけるという単純な作業をする。ライン生産方式では作業者はその単純な作業を繰り返し行う。ライン生産方式では、職人的な技量は求められない。

この方式において、作業者は、単調作業を強いられるため労働意欲を保ちづらくヒューマンエラーを起こしやすい。ねじをうちつける単純作業を例に上げると、ねじの締め具合が弱くなってしまったり、誤って手にネジをうってしまったりする。ヒューマンエラーの発生は、作業者のけがにつながる事故や、不良品発生の原因になる。さらにライン生産方式は、作業が一連化されているため、工程の一部分でエラーが起こるだけで、工程全体に影響してしまう。単調作業中の作業者のヒューマンエラーを

なくす方法があれば、事故がなくなる。作業者や資源を守れるうえに不良品発生もなくなり、巻き戻し工程がなくなるので作業効率が向上する。

2.2 ヒューマンエラーと作業の調子

単調作業における集中力の低下は事故要因の8%を占めている[4]。そのためエラーなく単調作業をするために作業者は集中力を維持しなければならない。集中力が維持されている場合、ひとつの動きを繰り返す作業者の動きに変動がなくなる[5]。また作業者ごとに集中しているときの動きは異なる。そのため、集中力が維持されているときの、体の動きは作業者ごとに固有のパターンが存在すると考えられる。現作業中の作業者の動きが、その作業者が集中しているときの固有のパターンと同じ動きをしていれば集中力は維持されていると考えられる。

2.3 関連研究

ヒューマンエラーを防止するために作業者の体の動きに着目したものがある。カメラを用いて作業者の動きを見守る手法[6]はカメラで撮影した映像から製品組立作業の中に含まれるネジ締め動作を検出し、その動作の回数や動きの違いからミスの発生を発見する。しかし、カメラで作業者を撮影すると、作業者は監視されているという不快感を覚えてしまう。また、そもそもカメラの視野角外では手法を適用できない。

加速度センサを椅子に取り付け、作業者を見守る研究[7]がある。これは、作業者の着席・離席を推定し集中度合いを判定している。作業者が、より多く離着席を繰り返したとき集中力が低下したと判断する。しかし、この手法では椅子を用いない作業には適用できない。作業者に負担をかけず、作業者の集中力を広い範囲で検出できる手法が必要である。

3. 作業律の判定

3.1 加速度センサを用いた判定

作業者が集中しているときには、作業者の動きは安定しており、作業者固有のパターンにそった動きが現れると考えられる。そのため、本論文では体の動きに着目し、作業者が集中を維持できているときにとる動きのパターンを抽出する。本論文では、繰り返し作業での体の動きを取得することにより作業律を判定する手法を提案する。

作業律とは、現在の作業者の動きと、集中しているときの固有パターンとの類似度を表す指標である。集中しているときには作業の調子が良いと考えられるため、作業律が良いときには作業の調子が良いと考えられる。体の動きは6軸加速度センサを作業者に装着することで取得する。6軸加速度センサは、体の動きをあらゆる加速度と体の回転をあらゆる角速度を計測できる。加速度センサを用いることでカメラを使用する場合に比べ、より細かな動きまで取得できる。加速度センサは非常に小さいので、作業者に装着しても負担が少なく、作業を妨げない利点がある。加速度センサを用いて、異常動作を発

[†]立命館大学情報理工学部[‡]立命館大学大学院情報理工学研究科[§]三菱電機株式会社

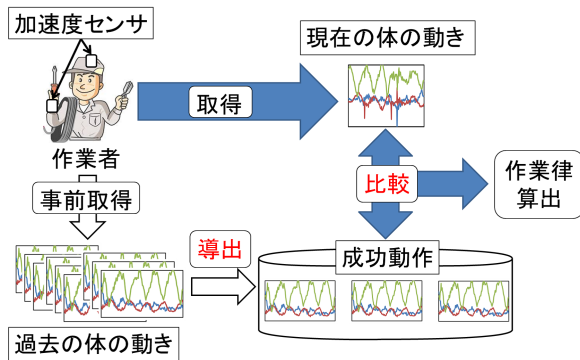


図1: 手法の概要図

見する研究 [8] などもあり、加速度センサを用いて作業中の異常時と正常時の差を見つけることは可能であると考えられる。本手法の概要を図1に示す。

本手法では、作業者は頭と手首に加速度センサを装着した状態で作業する。作業律は、作業の調子を表わすため、作業に必要な動作をする部位で算出可能である。そのため加速度センサは作業者の必要最小部位に装着すればよい。手首につけた加速度センサは、作業者の手の動きを取得し、作業にもっとも必要な動きを取得できる。また、作業中の頭の動きと作業者の集中度に相関がある [9] ため、頭に加速度センサを装着している。本手法では、部品のネジ付けのように一人の作業者が同じ動作を何度も繰り返す作業を対象とする。また、取得する加速度の時系列データは、作業一回の開始から終了までの加速度を細かい周期で取得したものである。

作業者は同じ作業を繰り返すと作業に慣れて集中し始める。作業者が集中しているときの加速度の時系列データは似通ったものになると考えられる。加速度の時系列データは波形になるため、定量的に類似度を求めることができる。本論文では過去において、集中を維持し同じパターンの動作をできていた作業時の加速度の時系列データ群を成功動作と定義し、成功動作と現在の作業の加速度の時系列データを比較することで、作業律を算出する。作業律が算出できると、作業者の調子の良さがわかる。作業律が大きく低下した場合、疲労や慢心などが原因で集中力が低下していると考えられる。作業者に集中力の低下を検知し、注意をうながすことで、ヒューマンエラーの発生を未然に防止できる。

3.2 タイムワーピング距離による成功動作の導出

成功動作は、作業者が集中しており、同じ動作を繰り返せていたときの加速度の時系列データ群である。成功動作の波形は、似通うと考えられる。同じ作業をしているかを判定するために作業の類似度を表す必要がある。

同じ作業をしていても、作業時間は異なるため、作業実施回ごとに取得される加速度の時系列データの長さも異なる。本手法では、長さの異なる時系列データの類似度を示すためにダイナミックタイムワーピング距離 (DTW) を用いる。DTW は、時間軸のずれに柔軟性を持っており、長さの異なる時系列データの類似度を算出するときに用いられる。DTW の値が小さければ小さいほど、2つの時系列データは類似している。成功動作導出法を図2に示す。

作業をやり始めてから、やり終わるまでの区間を1作業とする。連続単調作業のなかで、エラーが発生していない、連続した作業群をひとつの区間を考える。この区間にある n 回の作業の加速度の時系列データを取得する。

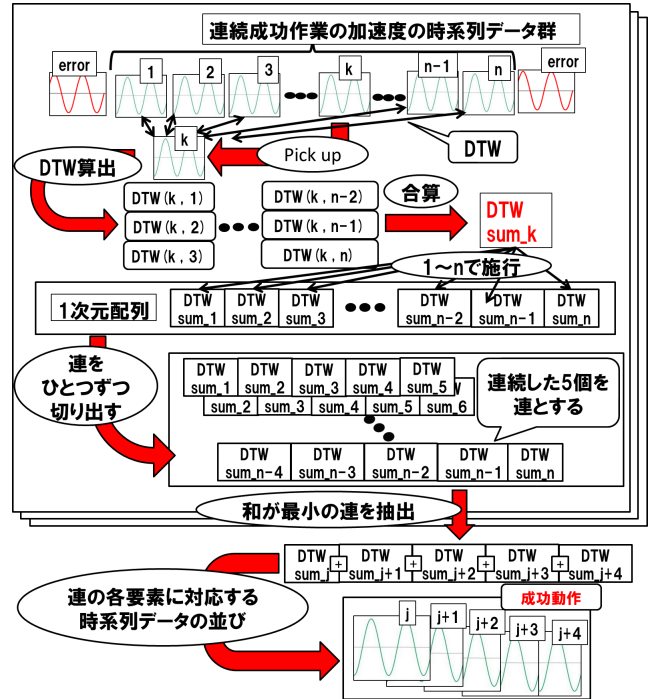


図2: 成功動作導出法の概要図

この n 個の時系列データの中から k 番目の時系列データをとりだす。とりだした1作業の加速度の時系列データとそれ以外のすべての1作業の加速度の時系列データでDTWを算出する。算出したすべてのDTWの合計を DTW_{sum_k} とする。1番目から n 番目までの時系列データすべてに対し DTW_{sum} を算出し、 n 個の要素からなる1次元配列を作る。配列の中から図2のように連続した5個をひとつの連とする。配列内の要素を1つずつずらしながら、連を切り出す。各連内の DTW_{sum} の和をとり、和が最小である連を見つける。他のすべての区間においても同様の処理をおこない、すべての区間を通じて和が最小の連を決定する。決定した連の各要素に対応する加速度の時系列データ群を成功動作とする。DTW_{sum} の和が最小である連は、もっともぶれの少ない動きをしているときに相当する。すなわち成功動作はその作業が連続作業内において無駄な動きが少なく、もっとも集中して調子よく作業をしていた状況を示す。

3.3 作業律判定値導出

作業律の判定は、前節で求めた成功動作と、現在の作業における、加速度の時系列データとがどれだけ類似しているかで求める。成功動作と類似しているということは、作業者は調子よく作業をしている時の動作と類似した動作をしていることを表す。作業律の算出法を図3に示す。

成功動作の各加速度の時系列データと、現在作業中の加速度の時系列データも長さが異なる。そのため類似度の算出には、DTWを用いる。現在の加速度の時系列データと、成功動作の各加速度の時系列データ群でそれぞれDTWを算出する。現在作業中の加速度の時系列データを c とする。作業律判定値 ρ を以下の式で求める。

$$\rho = \frac{1}{1 + \sum_{k=0}^4 DTW(c, j+k)} \quad (1)$$

式1より作業律判定値が小さいと成功動作と比べて類似度が下がったといえる。作業律判定値が著しく下がった

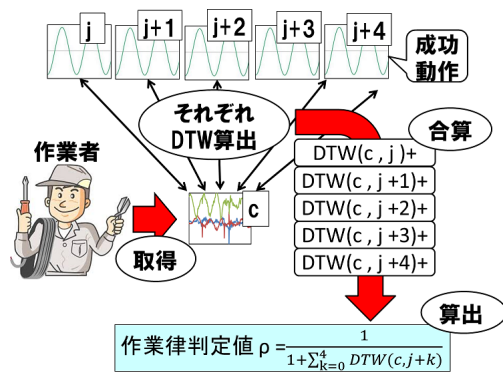


図 3: 作業律判定値導出の概要図

とき、作業管理者は作業者に警告したり、休憩を促す。

4. 模擬作業による実験

4.1 模擬作業

作業律判定値の有効性を示すうえでは、ライン生産で頻出するだれでもできる単調な作業を考えるべきである。本論文ではタブレット PC に連続してあらかじめ描画されている円をなぞりながら円を描く模擬単調作業を対象とする。円を描く作業はだれでもでき、かつ、集中力が途切れたときには、正解円よりずれた図形が描かれると考えられる。円を描くための画面を図 4 に示す。タブレット PC は J-Applet によって、描くべき正解円を表示する。タブレット PC はタッチペンになぞられた箇所の座標に太さ w の線を引く。本実装において w を 8 ピクセルとした。ペンを置いたとき書き終わり判定が赤色に変わる。円を一周書き終わると書き終わりインディケータが赤から青に色が変わる。本実装では正解円の半径を r 、中心を (x, y) 、タッチペンの接地点を (x_k, y_k) とすると、正解円からはみ出したという判定を式 2 に示す。

$$\left| \sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2} - r \right| > \frac{w}{2} \quad (2)$$

正解円を大きくはみ出して書いた場合、ずれインディケータが青から赤に色が変わる。上部には制限時間をあらわすタイムバーを表示する。このプログラムは、制限時間内に円を描けなかった、または正解円から大きくはみ出した場合に失敗と判定する。制限時間は 7 秒である。

4.2 実験概要

作業律は、作業者が集中力を維持して作業をしているか判定する指標である。本実験では、作業律判定値を用いて集中して作業をしていた状態を検出できたかを検証する。被験者は集中力を維持しているとき作業において質の高い成果物を作れる。作業の成果物と作業律の関係

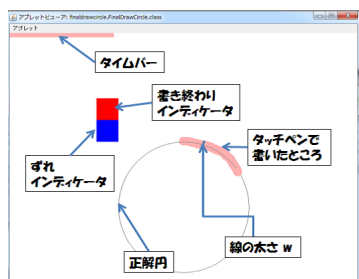


図 4: 実装画面

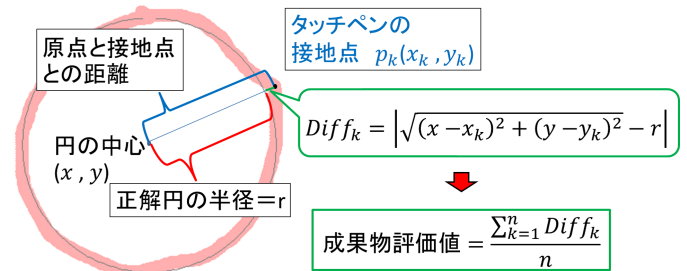


図 5: 成果物評価値判定の概要図

を調べることで、作業律の有用性を検証する。作業律判定値が大きいと成果物の質が上がり、作業律判定値が小さいと成果物の質が下がったとき作業律は作業者が集中している状態を検出できたといえる。本論文では、4.1 節で実装したタブレット PC に円を描く模擬単調作業で実験する。本実験は 20 代を中心とした男女 20 名を被験者とする。被験者はタブレット PC に円を描く作業の練習をしたのちに実験する。本実験中、被験者は頭と手首に加速度センサを装着する。本論文では、ATR-Promotion 社の小型無線ハイブリッドセンサ WAA-010 を用いた。重さは 20 グラムで非常に軽く、作業者は違和感なしに作業することができる。被験者は、タブレット PC に円を描く作業を 100 回繰り返す。

4.3 解析方法

作業律判定値と成果物の質の相関を調べることで、本手法の有用性を示す。本実験において、タブレット PC にタッチペンを接地した時刻から、タブレット PC に円を書き終わりタッチペンを離れた時刻までが 1 作業である。本実験では、作業者の加速度の時系列データを 100 個生成できる。100 個の連続した加速度の時系列データのうちシステムが 10 回以上連続でエラーしなかったと判定した区間から 3.2 節の手法を用いて成功パターンを導出する。成功パターンは連続した 5 作業の加速度の時系列データである。成功パターンと連続した 100 作業の加速度の時系列データのうち、被験者がエラーしなかったとシステムが判定したときの加速度の時系列データから、各作業における作業律判定値を算出する。本模擬作業において質の高い成果物を作成していることは、被験者がタブレット PC の画面上に描いた円、あらかじめ画面上に表示された正解円との差異が小さいことを意味する。成果物の質を求めるために、図 5 のようにタッチペンの接地点と正解円との距離を用いる。

1 作業において、タッチペンがはじめに接地した点を $p_1(x_1, y_1)$ からタッチペンを離れた点 $p_n(x_n, y_n)$ とする。タッチペンの接地点 p_k の座標を $p_k(x_k, y_k)$ 、円の中心を (x, y) とし、接地点 p_k から円までの距離を $Diff_k = \left| \sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2} - r \right|$ とする。成果物評価値は $\sum_{k=1}^n Diff_k / n$ であらわす。この値は、タッチペンが置かれた点と円との距離の平均の値である。平均を用いた理由は、1 作業ごとに成果物の大きさは違うためタッチペンの接地点の数が異なるからである。そのため 1 点あたりの距離を成果物の質とすることですべての円に対応できる。成果物評価値が小さいほど正解円に近く、値が大きいと作業者は正解円からずれながら円を描いたことを示す。そのため、作業律判定値と成果物評価値が負の相関を示せば、手法の有用性を示せる。

表 1: 手首の作業律判定値と成果物評価値の相関

	加 x	加 y	加 z	角 x	角 y	角 z
A	0.066	-0.016	-0.086	-0.119	-0.086	-0.241
B	-0.154	-0.125	-0.166	-0.222	-0.248	-0.259
C						
D	-0.512	-0.383	-0.426	-0.270	-0.461	-0.399
E	0.141	0.010	0.210	0.075	-0.120	0.009
F	0.329	-0.095	0.316	-0.024	-0.189	-0.000
G	0.021	-0.187	-0.178	-0.138	-0.144	-0.217
H	-0.111	0.211	0.000	-0.027	-0.019	0.153
I	-0.123	0.074	0.041	0.179	-0.013	-0.165
J	-0.072	-0.235	-0.031	-0.179	-0.181	-0.211
K	-0.021	-0.125	-0.203	-0.001	-0.125	-0.097
L	-0.152	-0.024	-0.202	-0.144	0.024	-0.065
M	-0.052	-0.166	-0.072	-0.071	-0.037	0.152
N	0.118	-0.016	-0.078	-0.034	-0.233	-0.077
O	-0.148	-0.162	-0.219	-0.175	-0.130	-0.200
P	-0.298	-0.483	-0.445	-0.041	-0.008	0.324
Q	0.090	0.069	0.066	0.069	-0.041	-0.118
R	-0.279	-0.394	-0.054	0.017	-0.130	-0.274
S	-0.049	-0.164	-0.194	-0.159	-0.114	-0.167
T	-0.133	-0.261	-0.251	-0.090	0.037	-0.017

表 2: 頭の作業律判定値と成果物評価値の相関

	加 x	加 y	加 z	角 x	角 y	角 z
A	-0.184	0.027	-0.125	-0.171	-0.207	-0.065
B	-0.188	-0.233	-0.128	-0.080	-0.162	-0.117
C						
D	-0.172	-0.499	-0.013	-0.590	-0.614	-0.638
E	0.010	0.020	-0.025	0.034	0.162	0.096
F	0.046	-0.060	0.028	0.103	0.226	0.173
G	0.021	-0.187	-0.178	-0.138	-0.144	-0.217
H	0.195	0.147	0.206	0.090	0.120	0.145
I	0.040	-0.161	-0.039	-0.064	-0.166	-0.181
J	-0.134	-0.163	-0.166	-0.108	-0.149	-0.104
K	0.125	0.064	0.096	-0.007	0.025	0.163
L	-0.039	-0.091	-0.149	-0.010	-0.023	-0.045
M	-0.125	0.049	-0.091	0.034	-0.002	-0.120
N	0.085	0.091	-0.018	-0.077	0.055	-0.023
O	-0.325	-0.285	-0.026	-0.175	-0.053	-0.274
P	0.089	-0.330	0.490	-0.369	0.489	-0.157
Q	0.112	-0.088	0.071	-0.021	-0.015	0.027
R	-0.153	0.004	-0.274	-0.100	-0.275	-0.270
S	-0.165	-0.295	-0.152	-0.320	-0.370	-0.341
T	-0.157	-0.094	-0.228	0.069	-0.038	-0.069

5. 実験結果・考察

実験結果を表1と表2に示す。

表1は手首の作業律判定値と成果物評価値の相関、表2は頭の作業律判定値と成果物評価値の結果である。表の各行はAからTまでの被験者を表し、各列は加速度3軸と角速度3軸を表す。被験者1人において、どれかひとつでも大きな相関があれば、その人の固有の集中していたときの動きがわかるので、作業者が集中して作業した状態を検出できる。20人中5人で-0.3を下回る相関があった。被験者Cはエラーがなかった作業を10回以上続けることができなかったため作業律を算出されていない。20人中14人に相関が見られなかった理由は、作業者にこの作業の練習を十分にさせていなかったためだと考えられる。被験者D以外の作業者は多くとも50回、通常は30回程度の練習しかしていない。大半の被験者は実験中によりよい書き方を模索していた。よって、集中している時の固有のパターンが発見できなかったと考えられる。そのため、作業中の加速度の時系列データが似通らず、相関係数が低くなってしまった。しかし、特に強い相関が見られた被験者Dは、少なくとも150回の練習をしている。この十分な練習の間に動きを最適化できたため強い相関が得られたと思われる。他の被験者も十分に練習をし、固有のパターンを発見できれば、同様に強い相関が期待できる。

6. おわりに

本論文では、ライン生産方式のような作業者が同じ動きを繰り返す作業における、ヒューマンエラーを防止するために、作業者の作業中の集中力を測定する手法を提案した。集中力が下がった作業者に対して、警告を提示することでヒューマンエラーを未然に防ぐことができる。本手法の有用性を示すために、被験者20名に対して、タブレットPCに表示された円をなぞる模擬実験を行った。この作業を100回させ、なぞった円のずれ具合と手法で判定した作業者の集中度合いとの相関を算出した。その

結果、十分に練習をして、作業を最適化できていた被験者に対して、-0.6を下回る相関を示した。円がずれればずれるほど、体の動きが一定ではないことがわかったので、本手法によって作業中にどのくらい集中していたかを検出できることがわかった。今後は模擬実験以外でも、本手法の有用性を示していく予定である。

参考文献

- [1] 国土交通省自動車交通局：平成21年度自動車のリコール届出内容の分析結果について（2010）。
- [2] 小松原明哲：ヒューマンエラー第2版，丸善株式会社（2008）。
- [3] 篠原一光，森本克彦，久保田敏裕：指差喚呼が視覚的注意の定位に及ぼす影響，The Japanese journal of ergonomics 45(1)，54-57（2009）。
- [4] 井筒由幸：ヒューマンエラーに起因する事故対策について，建設マネジメント技術 57-59（2006）。
- [5] 林利毅：進捗管理のための頭部の動きに着目した集中度判定，情報科学技術フォーラム講演論文集 9(1)，47-50（2010）。
- [6] 清水早苗，平湯秀和，浅井博次：カメラを用いたものづくり現場における締め付け作業のポカヨケシステムの開発，電気学会論文誌 C，129(5)，916-922（2009）。
- [7] 大久保雅史，藤村安耶：加速度センサを用いた着座状態推定法の提案，情報処理学会全国大会講演論文集 70(4)，4-197-4-198，（2008）。
- [8] 多田昌裕，納谷太，大村廉，岡田昌也，野間春生，島山朋二，小暮潔：無線加速度センサを用いた運転者行動の計測・解析手法，電子情報通信学会論文誌 D 分冊，91(4)，1115-1129（2008）。
- [9] 鷲見和彦，田中 宏一，松山 隆司：三次元姿勢計測を用いた人の動作特徴の記述，画像の認識理解シンポジウム MIRU2004，1，660-665，（2004）。