

## 地磁気・加速度センサによる 自動車組立工場内作業トレースシステム

佐藤 永 欣<sup>†1</sup> 田 島 玲<sup>†2</sup> 高 橋 俊 博<sup>†2</sup>  
小 田 島 昌 一<sup>†3</sup> 鈴 木 潤<sup>†3</sup>  
石 川 泰 二<sup>†3</sup> 村 田 嘉 利<sup>†1</sup>

製品の品質は企業活動にとってきわめて重要であり、多くの企業が製品の品質保証を重視している。工業製品の品質保証においては、設計、部品、原材料も重要であるが、組立工程において正しい手順で作業が行われることも重要である。通常、組立工程では前工程の結果を随所で確認するが、正しく行われたかを後工程で検出できない作業もある。たとえば、ある部品を複数のネジで固定する場合、部品の取り付け精度などを保つためネジを締め付ける順番が決まっている。しかし、締め付け順序を守らなくてもネジを十分締め付ければ部品は固定され、見た目からは正常な製品との区別をつけ難く、作業手順逸脱を検出するのは難しい。この場合、取り付け精度の保証はなく、製品は潜在的に不良品である可能性がある。そこで、我々は地磁気センサ、加速度センサを利用し、ルーチン作業における作業者の動きをトレースすることで作業が正しく行われたかどうかを判別するシステムを開発している。本論文では、作業者の動作の判別を行う手法に Local Outlier Factor (LOF) を計算することに基づく手法を用いることを提案し、実際の自動車組立工場でのデータによる評価を述べる。

### A Workers' Motion Tracing System by Terrestrial Magnetism and Acceleration Sensors for an Automobile Assembly Factory

NOBUYOSHI SATO,<sup>†1</sup> AKIRA TAJIMA,<sup>†2</sup>  
TOSHIHIRO TAKAHASHI,<sup>†2</sup> SHOUICHI ODASHIMA,<sup>†3</sup>  
JUN SUZUKI,<sup>†3</sup> TAJI ISHIKAWA<sup>†3</sup>  
and YOSHITOSHI MURATA<sup>†1</sup>

Quality of products is very important for company activities, and many companies regard to quality control of their products. In the guarantee of quality

in industrial products, they are important not only design, qualities of materials and parts, but also production process. Especially, it is important that determined assemble procedures are kept or not. Normally, there are many steps to confirm results of previous steps in assembly process. However, some of results of works cannot be confirmed in later processes. For example, to fix a part by some bolts, order to fasten bolts is determined to guarantee attaching precision. Even if the order is not kept, the part is fixed as long as bolts are enough fastened, and violation of the order is hard to detect by appearance of products. In this case, accuracy of attaching is not guaranteed, thus the product might have potentially defect. Therefore, we have been developing a system to confirm that a certain work have been done exactly, procedures have been kept, by tracing a worker's motion using terrestrial magnetism sensors and acceleration sensors. In this paper, we propose a new method to judge worker's motion based on calculating Local Outlier Factor (LOF), and we provide a detailed description of this new method, and show evaluations based on data in actual automobile assembly factory.

#### 1. はじめに

製品の品質は、企業にとって事業の継続性や利益を左右する大きな問題である。工業製品の品質保証では、設計、使用する原材料や部品も重要であるが、製品の製造工程もきわめて重要である。製造工程での不具合やミスが放置されると、製品がそのまま出荷され、最終的には顧客の信頼を失うこととなる。製造工程での製品の欠陥の発生原因として、人による作業のミス、組立に利用した機器やロボットなどの故障などが考えられる。このため、ある製品の製造工程が完全であるかどうかの検証は多岐にわたる。人による作業が大半を占める製造工程の場合、人による作業が正しく行われたかどうかの検証が、製造工程の正しさの検証の中で重要な位置を占めると考えられる。人が行う作業が大半を占める製造工程の例として、自動車組立工場がある。

人による作業では、部品の付け忘れ、違う部品の取り付け、取り付け手順のミスなど、作業の質そのものの問題が大きいと考えられる。これらの人為ミスを人の注意力だけに頼って完全に防止することは難しい。このため、一般的な製造工程では、前工程でのミスを発見し

<sup>†1</sup> 岩手県立大学ソフトウェア情報学部  
Faculty of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

<sup>†2</sup> 日本アイ・ピー・エム株式会社東京基礎研究所  
Tokyo Research Laboratory, IBM Japan, Ltd.

<sup>†3</sup> 関東自動車工業株式会社岩手工場  
Iwate plant, Kanto Auto Works, Ltd.

修正する工程が随所に組み込まれている。また、ミスの発見や修正などを目的としない工程でも前工程によるミスの発見、修正は推奨されている。この結果、作業ミスが発生した製品であっても、後工程で修正され、良品として出荷される。しかし、作業ミスの中には検出可能であっても修正にコストを要するもの、修正そのものが困難なもの、後工程での検出が困難なものもある。仮に後工程でミスが検出されなかったとすると、当然、不良品が見逃され出荷されてしまう。

作業完了後に作業手順のミスを検出することが困難な作業の例として、タイヤの取り付けがある。タイヤとホイールをハブに固定するときには、複数のボルトやナットを対角状に少しずつ締め付けるのが正しい手順である。これは、車軸とタイヤ・ホイールの回転の中心を合わせる必要があるためである。したがって、この手順が守られないと、乗り心地の悪化やタイヤ・ホイールが走行中に脱落するなどの重大な問題を引き起こす。しかし、ボルトやナットを十分締め込めば手順によらず外見は正常であり、作業手順のミスは発見できない。

以上から、何らかの方法で作業を監視し、ミスが発生したら、あるいは発生しそうになったら警報を発するシステムは有用と考えられる。このシステムを実現するためには、作業者が行うべき作業を識別し、腕や指先の動きがマニュアルどおりの正しい作業手順と同じか、異なるかの違いを検出し、異なっていれば何らかのリアクションを起こせばよい。

そこで我々は、地磁気センサ・加速度センサを用いて、工業製品の組立工程における作業者の動きをトレースすることで作業内容を確認するシステムを開発している<sup>1)~4)</sup>。本システムは、作業者がこれから行うべき作業を認識し、行われた作業が正当かどうかを検証し、誤った手順で作業をしたり、誤った部品を取り出したりするなど、正当でなければ警報を発する。本論文では、地磁気・加速度センサによる作業トレースを工場におけるルーチン作業をとともう工程に適用する際の一般的な議論、新たに考案した作業が正当かどうか判定する方法、実際の自動車組立工場の作業工程を対象に検証を進めた結果を報告する。

本論文の構成は以下のとおりである。2章では関連研究を述べる。3章では地磁気・加速度センサを工場に適用するにあたっての一般的な事項などについて述べる。4章で開発中のシステムについて述べる。5章で作業が正しいかどうか判別する手法を述べ、6章でその評価を述べる。最後にまとめを述べる。

## 2. 関連研究

工場における作業者の作業をトレースすることは、屋内において腕や指の位置を測位したり、指や腕の動きなどを測定・推定したりすることで実現できる。測位やモーションキャプ

チャなどの分野で様々な研究が行われている。

GPSによる測位は一般に広く用いられているが、屋内ではGPS衛星からの電波を受信できないため、屋内にGPS衛星を模擬する信号源を配置し、屋内でのGPSによる測位を実現する例がある<sup>5)</sup>。しかし、自動車組立工場では車内や車両の下側での作業が多いため、金属により電波が遮られやすい。また、建物も広いのでGPS衛星を模擬する信号源を多数設置しなければならないと考えられる。一般的にはGPSの測位誤差は10m近くあり、キネマティックGPS測位などの手法により精度を10cm程度にまで向上させることができる。しかし、総合的に考えると本研究の目的への適用は難しい。

無線LANを利用した測位は近年さかんに研究されている<sup>6),7)</sup>。これらの研究では無線LAN移動局の位置を、複数の無線LAN基地局からの電波の受信遅延時間や信号強度を利用して推定している。現状では数m程度の誤差があり、腕の動きを推定する必要がある本研究の目的には誤差が大きすぎ、適用できない。

加速度センサを用いて人の腕などの動きを推定し認証に用いる研究<sup>8)</sup>や、入力インタフェースとして加速度センサを用いる研究<sup>9)</sup>などがある。加速度は一瞬の動きの変化をとらえるには向いているが、組立工程の作業者の動きのような連続的な動きを精度良く推定するのは難しい。また、加速度センサを位置推定に利用する場合、加速度の測定誤差が時間とともに累積し、位置推定のずれとして表れるため、何らかの方法で定期的に位置を補正する必要がある。これは、ルーチン作業における組立順序のトレースなどにおいて、位置の推定精度を要求される場合に問題となる。

ビデオカメラを利用したモーションキャプチャも研究されている。ビデオカメラによる光学式モーションキャプチャは、スポーツなど<sup>10)</sup>にも適用されている。文献11)では複数のカメラを用いて光学式マーカをつけた人物のモーションキャプチャを行っている。また、仮想空間への適用をおもな目的とした研究<sup>12)</sup>も存在する。これらの研究では高精度な位置推定が可能である。しかし、複数台のカメラを利用したり、画像処理のために高い能力の計算機を必要としたりするため、大規模な工場での導入はコストの問題などから難しいと考えられる。一方、地磁気による作業トレースシステムは、画像処理のような高い計算能力を必要としない。また、センサも安価である。

我々の提案する作業トレースシステムは、地磁気センサと加速度センサを搭載したデバイスを利用し、このうち、主に地磁気センサのデータを利用している。

地磁気センサは、地球上であればほとんどの場所で方角を知るために利用することができる。局所的な磁場の変化がなければ、本質的には地磁気センサはその土地における磁北の方

角と、伏角を測定している。このため、肩、肘などを支点とする回転運動は、腕に取り付けた地磁気センサからは磁北の方向と伏角の見掛け上の変化として検出することができる。その一方で、平行移動のような地磁気センサの向きが変化しない運動の検出は難しい。当然、地磁気センサによる直接的な測位はできない。このため、作業内容の推定もセンサの向きの変化、すなわち、センサから見た方角と伏角の変化を利用して推定される。

一見すると、測位をとまなわない方角のみによる作業内容の推定は困難なように思われる。しかし、組立ラインなどでのルーチン作業の場合、作業をする場所や機器類の向きはあらかじめ固定されており、頻繁に変化することはない。また、作業中の作業者の体の向き、立ち位置、手や腕の使い方も、楽で効率が良い作業姿勢をとるため毎回ほぼ同じである。さらに、腕などを平行に動かす運動は人間にとって自然な動きではないため、部品を取ってはめ込むなどの動作をするときの腕の動きは、肩や肘などを支点とする回転運動が中心である。このため、ある瞬間に作業者が何をしているはずであるかを知ることができれば、作業者の腕の向きなどを基礎とした地磁気センサのデータによる作業内容の推定は可能である。

### 3. 適用可能性の検討

#### 3.1 工場での地磁気センサの利用

工場内では、モータや配線などから発生する電磁ノイズが懸念される。対象となる自動車組立工場内では電動無人、および有人搬送車、電動フォークリフトなどのモータを利用した機器が多数利用されている。地磁気・加速度センサによる作業データの取得中にこれらが近傍を通過しても、測定データに影響は見られなかった。電動工具も一部で利用されており、電動工具に直接地磁気・加速度センサを取り付けた場合、最大数千 mG の磁場が観測され、地磁気センサの較正に大きな影響を与えた。一方、電動工具のモータから 20 cm 程度離すとほとんど影響は見られなかった。数百 A の電流が流れる配線が通っている電気溶接ロボットのアームに地磁気・加速度センサを取り付けた場合、溶接のためのパルス状の電流による磁界の変化（数十 mG 程度）が観測された。一般に、電流などにより発生した電磁界の強度は、発生源からの距離の 2 乗に反比例するため、これらの電磁ノイズの発生源と地磁気・加速度センサの距離を離すことで急速に影響が小さくなると思われる。

電気溶接機や直流モータなどで発生するスパークによる電磁ノイズは通常、AM ラジオなどに影響を与え、その範囲はかなり広い。しかし、今回使用した地磁気・加速度センサは 40 Hz のサンプリング周波数であること、ラジオのように感度が低いことから、影響は見られなかった。

一般的に、強い電磁ノイズが発生している環境では電子制御された機器の誤動作の可能性が高くなる。現代の工場では電子制御された機器が多く使われているが、これらが誤動作したときに人がそばにいると非常に危険である。したがって、人による作業が必要な工程では、機器が外部からの電磁ノイズの影響を受けないようにするだけでなく、電磁ノイズの発生源でも対策されている。したがって、一般的に、電磁ノイズのレベルは、工場であっても一般のオフィスと比較してさほど大きくなく、地磁気・加速度センサへの影響も限定されたものとなっている。

また、定期的に磁気を帯びている可能性がある、車体、搬送機器、ロボット、金型などのような鉄製品もある。これらは何らかの原因で磁化してしまっていると考えられるが、通常、意図的に磁化することはないため強い磁気を帯びてはいない。これらに地磁気・加速度センサを直接貼り付けても、測定値が若干オフセットするだけでこれらの動きの測定には悪影響は見られなかった。定期的な磁気を帯びている物体であれば、地磁気センサがその物体に接近したことによる磁場の変化も作業の推定に利用できる可能性もあると考えられる。

これらを総合すると、磁石のような強い磁気を帯びていることが明らかな物体、モータの近くや大電流が流れる配線のそばなど、電磁ノイズが極端に強いと考えられる場所を避けて地磁気・加速度センサを取り付ければ、工場内であっても地磁気・加速度センサは十分利用可能である。

#### 3.2 作業工程の選択

対象とする作業工程を選択するため、自動車組立工場内での各種ルーチン作業への適用可能性の検討を行った。自動車組立工場内での作業の特徴として次があげられる。

- 作業場所は利用する機器の都合によりある程度の範囲に収まっている。作業者が動き回る範囲は最大で 10 m 程度だが、作業者が受け持つ作業のうち、特定の作業を行う場所はライン上を車両が動くことを考慮しても 2 m 程度の範囲に収まる。流れ作業でない場合、特定の作業を行う場所はつねに同じである。
- ルーチン作業は、部品の仕分けと組立に大きく分類される。
  - － 仕分けを担当する作業者は、部品棚から必要な部品を取り出すために動き回る範囲が比較的広く、作業姿勢も様々である。作業手順は定められているが、現実には自由度が高い。
  - － 組立では作業者が動き回る範囲は最大でも数 m 程度の範囲に限定されており、作業姿勢や特定の作業を行う位置もほぼ一定している。作業手順は細かく定められており、守られている。

- 車種・グレード・仕向け地により異なる仕様を作り分けるため、組立工程全体から見ると同じ作業であっても個々の作業の詳細は異なることが多い。たとえば、燃料タンク搭載工程では、燃料タンク、関連する部品の取り付け、関連する配線・配管の締結という大局的には同じ作業を行う。しかし、前輪駆動車と四輪駆動車で異なる形状の燃料タンクを取り付けるため、両者でボルトの締め付け順序や使用する工具が異なる。さらに、仕向け地により取り付ける部品の点数や種類、締結する配線・配管の本数や種類が異なる。

自動車組立工場にかぎらず、機械により個々の作業をモニタする場合、作業が正しく行われたかを判定するには、事前に用意した正解データと比較する手法をとることが多いと考えられる。この場合、一般的に、正解データを用意する都合上、個々の作業における作業者の自由度は低いほうがよい。すなわち、どのようなセンサや手段を用いるかにかかわらず、作業場所、作業姿勢はおおむね固定されているほうが好ましく、作業者の動きが安定的に取得でき、かつ、識別すべき個々の作業の違いが大きいくことが好ましい。

本システムの場合、地磁気・加速度センサによる方角の測定を利用するため、上記に加えて特定の作業を行うときの作業者の向きが同じである必要がある。また、個々の作業による地磁気・加速度センサの向きの変化が大きいと作業内容の判定が容易になると考えられる。逆に、作業姿勢や方角が変化したり、作業による動きが小さい場合は、地磁気・加速度センサを作業のモニタに利用することは難しい。動きが小さい作業の例として半田付けがある。半田ごとに地磁気・加速度センサを取り付けて測定したが、作業を行っても波形は大きく動かなかった。

以上のような条件を満たすルーチン作業であれば、地磁気・加速度センサを用いた作業トレースを適用できると考えられる。これらを総合し、最初の適用事例として、燃料タンク搭載工程のボルト締め付け作業を次の理由により選択した。

- 燃料タンクの種類は基本的に前輪駆動車用、四輪駆動車用の2種類のみであり、生産車両のほとんどが前輪駆動車であるため実質的に1種類と見なせる。前輪駆動車用の燃料タンクは仕向け地により2種類あるが、配管が異なるのみでタンク本体の形状は同じである。このため、前輪駆動車であればボルト締め付け手順はすべて同じである。
- 作業場所が機器の都合により固定されている。ほとんどの場合、2m以内の移動で作業は完了する。
- 作業者は燃料タンクの周囲からボルト締め付けを行うため、作業者の動きが大きく、作業内容の判定が容易と考えられる。

仕様の違いによる個々の作業の違いを吸収する必要もある。この場合、個々の作業ごとに正解データを用意する必要がある。すなわち、作業者がこれから行うべきことを判定前に確定させる必要がある。生産実行システム(Manufacturing Execution System, MES)が導入されている工場では、仕様や作業内容はMESにより作業者に指示されるため、作業開始前に比較対象となる正解データは確定できる。MESが導入されていない場合、作業内容がつねに同じである必要がある。

#### 4. 地磁気・加速度センサによる作業トレースシステム

我々は、自動車組立ラインの燃料タンク搭載工程をモデル工程として、地磁気・加速度センサを用いた作業トレースシステムの開発を行っている。本章ではシステムの概要について述べる。

まず、燃料タンク搭載工程の概要を説明する。図1に示すこの工程を含む生産ラインでは、作業者の頭上を車体が毎分5m程度の速度で移動している。作業者は頭上を移動する車体の下部に、燃料タンクを取り付け、配管などの接続を行う。このとき、燃料タンクは車体と同期して動くエレベータにより持ち上げられ、作業者は燃料タンクを固定する4本の

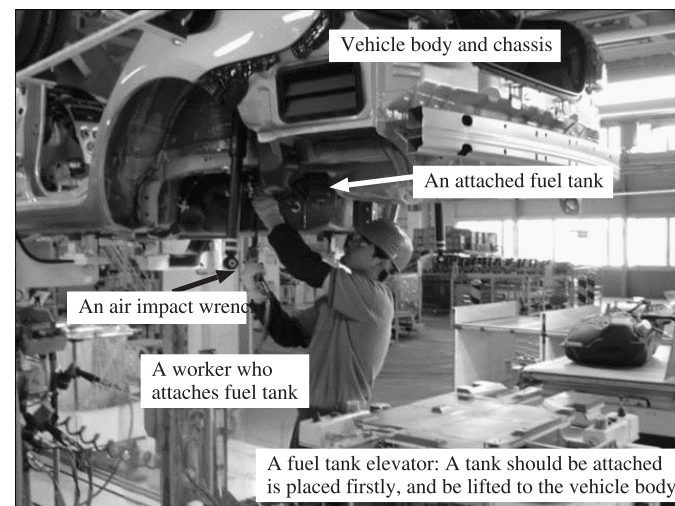


図1 燃料タンク搭載工程  
Fig. 1 A fuel tank attaching process.

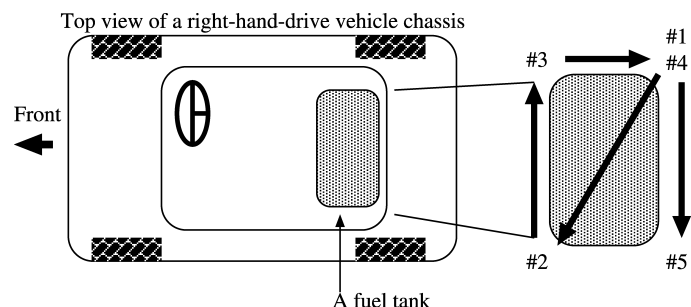


図2 燃料タンクと車体の位置関係とボルト締め付け順序  
Fig.2 A fuel tank on a vehicle chassis and the order to fasten bolts.

ボルトをエアインパクトレンチを用いて締め付ける。よって、ボルトを締め付ける作業は、エレベータの可動範囲内の約3mに限られる。ボルトの締め付けトルクと締め付け順序は、走行中の燃料タンク脱落などのトラブル防止と取り付け精度確保のため、あらかじめ定められている。燃料タンクの取り付け位置の概要とボルトの締め付け順序を図2に示す。まず、作業者は、#1のボルトを電動レンチにより仮止めする。その後、#2から#5までの4本のボルトをエアインパクトレンチにより本締めする。#1と#4は同じボルトである。

本システムは、#2から#5のボルトが、この定められた手順どおりに正しく締め付けられたかどうかを判定し、順序が誤っていれば警告を発して生産ラインを停止する。なお、本締めの締め付けトルクはすでに管理されており、締め付けトルクが不足している限り、車両は次工程に送られないようになっている。

次に、開発中のシステムの概要を述べる。開発中のシステムの構成図を図3に示す。

地磁気・加速度センサは、アイチ・マイクロ・インテリジェントのAMI-601CGを利用した。このデバイスは、ワンチップの地磁気・加速度センサと、無線送信部、バッテリーを小型の筐体に収めたものである。地磁気センサは磁気インピーダンス(Magneto-Impedance, MI)効果を利用するMIセンサである。加速度センサは、ばねによって保持された磁石の変位を地磁気測定用とは別のMIセンサを用いて測定される。また、地磁気センサ、および加速度センサの出力から、地磁気・加速度センサの回転角も計算される。地磁気・加速度は、センサのパッケージ上のXYZ軸に対する大きさとして25msごとに測定され、2.4GHz帯の無線を通じて送信される。送信されたデータはUSB接続の受信機によって受信され、PCにデータが取り込まれる。

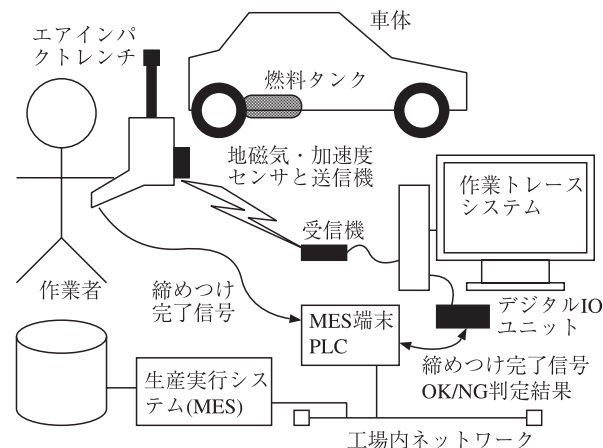


図3 地磁気センサによる作業トレースシステム  
Fig.3 A worker's motion trace system using terrestrial magnetism sensors.

作業トレースシステムは大きく分けて、次のコンポーネントからなる。

**インパクトレンチ** 本システムでは、作業者が手に持つタイプを想定している。今回使用したインパクトレンチは、ハンドガンタイプのエアインパクトレンチである。インパクトレンチは、組立ライン稼働時間中であっても、常時定められた工具置き場に置かれており、作業者はボルト締め付け時に工具置き場にあるインパクトレンチを取り上げ、締め付け作業終了後に工具置き場に戻す。圧縮空気により駆動力を得るため、地磁気センサへの影響はない。本システムを電動工具を利用する工程に適用する場合には、モータが発する磁気の影響を受けないように考慮する必要がある。

**地磁気・加速度センサ** 前述のとおり、アイチ・マイクロ・インテリジェントのAMI-601CGを使用する。地磁気・加速度センサは、両面テープを利用してインパクトレンチの平らな面に固定される。また、レシーバはPCにUSB接続される。

**PC** PCには次の3つのソフトウェアコンポーネントがインストールされる。

**地磁気・加速度センサ・MES インタフェース** 本モジュールは、地磁気・加速度センサからのデータの読み込み、作業者がインパクトレンチのトリガを引いてボルトの締め付けを行うタイミングの取得(詳細は後述)、ボルトを締め付ける順序が正しいかどうかを判断した結果のMESへの送信を行う。ボルト締め付けタイミングの



取得とボルト締め付け順序判定結果の送信は USB 接続の Digital IO Module により工場内ネットワークと通信して行う。

作業トレース・動作判別モジュール 作業者が燃料タンクを取り付ける作業を行ったときの地磁気・加速度センサの出力波形の特徴量と、正常な作業の際の波形の特徴量を比較し、作業が正しい手順どおりかどうかの判断を行う。判定手法の詳細は 5 章で述べる。

標準作業データベース 正しい手順のボルト締め付け作業のデータが格納されている。締め付け作業時の腕の動かし方の癖は作業者ごとに異なるため、作業手順判定手法によっては、作業者ごとに締め付け作業データを格納し、作業者による違いを吸収する必要がある。また、将来、複数種類の部品の取り付けに対応する場合も、部品ごとに異なる正しい手順の締め付け作業データを格納し、部品による違いを吸収する必要がある。

次に、本システムが燃料タンクを取り付ける作業において、ボルトの締め付け順序が正しいかどうかを判断し、その結果を出力するまでの手順を述べる。

- (1) 作業者がインパクトレンチを工具置き場から取り出したことを、地磁気センサの値の変化により検出する。今のところ、0.5 秒間に、XYZ 3 軸のうちの 2 軸以上の地磁気値の累積変動量が 20 mG を超えた場合に作業者がインパクトレンチを工具置き場から持ち上げたと判断している。
- (2) インパクトレンチのトリガが引かれたかどうかの信号の入力を待つ。この信号は、正確にはインパクトレンチによるボルトの締め付けトルクが規程トルクに達したかどうかを表す信号であり、この信号の立ち上りエッジまでが作業者がボルトを締め付けているタイミングである。この信号は、約 0.5~1 秒間 ON になった後、OFF に戻る。ボルトの締め付けは作業者がトリガを引いてから約 1 秒間かかる。この信号の立ち上りエッジを基準にボルトを締め付けるタイミングを取得し、作業が正しいかどうかの判断をしている。また、作業者が (1) でインパクトレンチを取り出してからの立ち上がりエッジの数により、#2 から #5 までのボルトと対応させる。
- (3) ボルトを締め付けている期間を中心とした地磁気・加速度センサの出力の特徴量を取り出し、5 章で述べる判定アルゴリズムにより、正しいボルトを締め付けているかどうかの判断を行う。
- (4) 判定の結果に基づき、4 本のボルトすべてが正しい順序で締め付けられていると判断されれば、MES に締め付け OK の信号を送る。締め付け順序が正しくないと判断さ

れた場合、同じく NG 信号を送る。NG 信号が送信された場合か、一定時間内に OK 信号が送信されない場合は、生産ラインが停止する。

- (5) 4 本のボルト締め付け完了信号を受信した 1 秒後に、作業者がインパクトレンチを工具置き場に戻したと見なし、(1) に戻る。

## 5. LOF による作業判定

### 5.1 判定方法に関する議論

本システムでは、ボルト締め付け順序の判定に、地磁気・加速度センサによる作業者の動きを表す波形から、ボルト締め付け作業に関連すると思われる部分を特徴量ベクトルの形で取り出し、その LOF (Local Outlier Factor)<sup>13)</sup> を計算して比較する手法をとっている。このとき、比較対象として、あらかじめ測定しておいた、正しい手順によりボルトを締め付けたときの地磁気・加速度センサの波形から計算した特徴量ベクトルを用いる。

以前我々が開発したシステム<sup>1)-4)</sup> では、作業が正しいかどうかの判定に地磁気のみを使用し、XYZ 各軸の値がボルト締め付け位置ごとに事前に設定した範囲に入るかどうかで行っていた。すなわち、作業者の動きを観察し、作業中に多く見られる動きをしたときの地磁気センサの出力の標準的な値と、許容できるずれの範囲を設定していた。このようなナイーブな方法による判定では、作業者の手首の向きのわずかな違いや、作業姿勢のわずかな違いによる誤判定が発生してしまう。また、他の工程に適用する際にも工程ごとに時間をかけてチューニングする必要があるという問題がある。

そこで、本論文では LOF を計算することによる判定手法を導入する。利点として、正常な作業のデータがあれば自動的に異常な作業の判別が可能、長時間の観察によるチューニングが不要という特徴があり、このため他工程に適用する際のコストが小さくなる。また、作業者の動きにも判定に用いるデータにも特定のモデルを仮定していない。LOF に基づく方法では正常な作業と異常な作業の特徴ベクトルが大きく異なれば、異常な作業の検出が可能である。よって、他工程への適用も、正常な作業と異常な作業で大きく異なる特徴ベクトルを抽出するだけで済むと考えられる。

LOF は 2000 年に Breuning らによって提案された比較的新しいはずれ値検出手法であり、最近、機械学習に使われるようになった。LOF では特徴空間内の点のはずれ具合を、比較対象の各点との距離だけでなく、密度や分布も考慮して求める。従来のはずれ値検出手法やクラスタリング手法では統計的な検定を用いたり、ユークリッド距離などを用いたりしていた。従来手法では、比較的密度の小さいデータセット近傍の点をデータセットの同類で

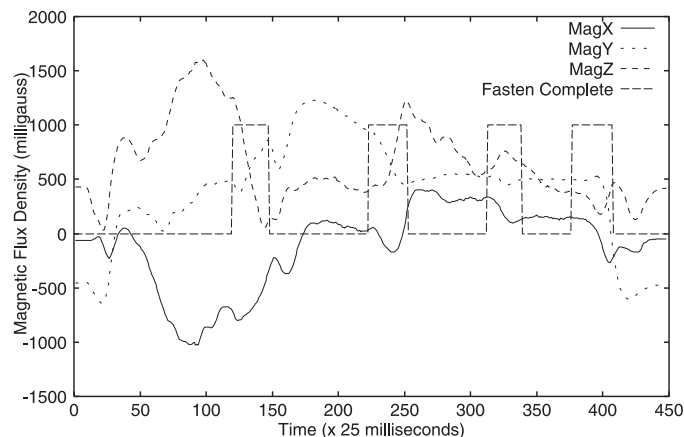


図 4 正しい締め付け順序の典型的な地磁気センサの出力波形

Fig. 4 A typical waveform of terrestrial magnetism sensor when correct fastening order.

あると判断するようにした場合、密度が高いデータセットから同程度離れた点も密度が高いデータセットの同類であると判断されやすい。また、統計的な検定を用いる方法では、データに対して何らかの分布を仮定しているため、実際のデータの分布が仮定と異なると判定結果が所望と異なることがおきやすい。これに対して、LOF を用いると密度も考慮するため、人間の直感により近い判定結果を得ることができる。

## 5.2 LOF による作業判定手法

ここでは、まず、5.2.1 項から 5.2.3 項までで特徴量を抽出する方法を述べたあと、5.2.4 項で LOF 値を計算する手法と作業者のボルト締め付け順序が正しいかどうかを LOF を使って判定する手法について述べる。

まず、地磁気・加速度センサの波形から、作業者の燃料タンク取り付けにともなうボルト締め付け作業の特徴量を特徴ベクトルとして抽出する。特徴量を抽出後、#2 から #5 までのそれぞれの締め付け位置に対して有用な特徴量を選別し、その後、選別した特徴量を白色化し、LOF の計算に用いる。図 2 に示した正しい順序による締め付けのときに地磁気センサから得られた地磁気センサの測定値を図 4 に示す。図 4 は地磁気センサによる XYZ 3 軸の測定結果と作業者がボルト締め付けを終えたことを示す締め付け完了信号を含んでいる。

### 5.2.1 参照用特徴ベクトル生成

参照用特徴ベクトルは以下のように抽出する。

- (1) ボルト締め付け位置 #2 から #5 までの 4 カ所それぞれについて、以下の項目を抽出し、特徴ベクトルを得る。
  - 作業者がトリガを引いている間の地磁気、加速度、回転角それぞれ XYZ 3 軸、合計 9 軸の平均。ただし、作業者がトリガを引いている期間を直接的に知ることができないため、インパクトレンチの締め付け完了信号で代用した。すなわち、締め付け完了信号の立ち上がり直前の 0.25 秒間を作業者が締め付けを行っているタイミングと見なした。締め付けには 0.5 秒から 1 秒弱かかるため、実際には締め付けを行っているタイミングと見なした期間よりも締め付けを行っている期間のほうが長い。
  - 上記と同じ期間における、同じ各軸の標準偏差。
  - インパクトレンチ締め付け完了信号の立ち上がりから、0.5 秒後への速度ベクトル。地磁気、加速度、回転角のそれぞれ XYZ 3 軸ずつ計 9 軸分において、締め付け完了信号の立ち上がりタイミングの値から、0.5 秒後のデータを単純に引き算して計算した。
  - 作業者が前の締め付け位置でトリガを引いてから、その次の締め付け位置でトリガを引くまでの時間間隔。ここでは、地磁気・加速度センサから 25 ms ごとに出力されるデータの個数で代用した。#2 の締め付け位置では前の締め付け位置が存在しないので、作業者がインパクトレンチを手を持った瞬間から #2 の締め付け位置でトリガを引くまでの時間間隔とした。
  - 上記の平均、標準偏差、速度ベクトルの合計 27 次元に関して、作業者がトリガを引いたと見なす区間を、0.25 秒、0.50 秒、0.75 秒、1.0 秒前へずらし、上記と同じ計算を行った計 108 次元を追加する。
- (2) 上記の 5 種類の項目を単純に結合し、#2 から #5 までのボルト締め付けの特徴を表す 136 次元のベクトル  $F_{n,pos} = (x_{1,n,pos} \ x_{2,n,pos} \ \dots \ x_{k,n,pos})$  を得る。ここで、 $n$  は燃料タンク取り付け作業 1 回分ごとに与えられた番号、 $pos$  は #2 から #5 までのボルト締め付け位置を表し、 $pos = \#2, \#3, \#4, \#5$  である。 $k$  は特徴ベクトルの次元、 $x_{1,n,pos}, x_{2,n,pos}, \dots, x_{k,n,pos}$  は上記で得られた特徴量の各次元の値である。

### 5.2.2 有用な次元の選択

次に、特徴ベクトル  $F_{n,pos}$  の各次元  $k$  から有用な特徴量を以下の手順で抽出する。

- (1) ボルト締め付け位置  $pos$  ごとに、 $F_{n,pos}$  を締め付け位置が同じベクトルの集合  $D_{pos+}$  と、異なるベクトルの集合  $D_{pos-}$  に分類する。

- (2) ベクトルの次元  $k$  ごとに,  $D_{pos+}$  に含まれるデータどうしの分散  $d_{pos,k+}$  と,  $D_{pos+}$  のデータと  $D_{pos-}$  に含まれるデータとの分散  $d_{pos,k-}$  を以下のように求める.

$$d_{pos,k+} = \frac{1}{|D_{pos+}|} \frac{1}{|D_{pos+}|} \sum_{i \in D_{pos+}} \sum_{j \in D_{pos+}} (x_{k,i,pos} - x_{k,j,pos})^2$$

$$d_{pos,k-} = \frac{1}{|D_{pos+}|} \frac{1}{|D_{pos-}|} \sum_{i \in D_{pos+}} \sum_{j \in D_{pos-}} (x_{k,i,pos} - x_{k,j,pos})^2$$

- (3)  $k$  ごとに分散比  $r_{k,pos}$  を以下のように求め,  $r_{k,pos}$  が閾値を超えた  $k$  を  $pos$  の判定に用いる特徴量として採用する. 今回は閾値として 5 を用いた.

$$r_{k,pos} = \frac{d_{pos,k-}}{d_{pos,k+}}$$

### 5.2.3 白色化

最後に, 以下の手順で特徴ベクトルを白色化するためのパラメータを計算し, LOF を計算する準備を終える. 白色化は特徴ベクトルの各次元のスケールを合わせて LOF の計算を安定させるために行う. これにより, 特徴ベクトルの分布が平均 0, 標準偏差 1 に正規化される.

- (1)  $pos$  ごとに判定に利用しない特徴量をマスクするマスク行列  $M_{pos}$  を求める.  $M_{pos}$  は対角成分のみからなり, 判定に使用する  $k$  に対応する対角成分は 1, それ以外は 0 である.
- (2) 使用する特徴のみを選択した特徴ベクトル  $F'_{n,pos}$  を  $M_{pos}$  を利用して以下のように計算する.

$$F'_{n,pos} = (x'_{1,n,pos} \ x'_{2,n,pos} \ \cdots \ x'_{k,n,pos}) = M_{pos} F_{n,pos}$$

- (3)  $pos, k$  ごとの  $n$  回分の作業の特徴量の平均  $\bar{F}_{pos} = (\bar{x}_{1,pos} \ \bar{x}_{2,pos} \ \cdots \ \bar{x}_{k,pos})$  を求める. ここで,  $\bar{x}_{k,pos}$  は  $pos$  における作業の特徴ベクトルの次元  $k$  の  $n$  回の特徴量の平均である. 利用しない  $k$  については  $\bar{x}_{k,pos} = 0$  とする.
- (4)  $F'_{n,pos}$  の分散共分散行列  $S_{pos}$  を求める.  $S_{pos}$  の  $k, l$  要素  $s_{k,l}$  は以下のように計算する.

$$s_{k,l} = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n (x'_{k,pos,a} - \bar{x}_{k,pos})(x'_{l,pos,a} - \bar{x}_{l,pos})$$

- (5)  $S_{pos}$  を以下のように特異値分解する.

$$S_{pos} = V_{pos} D_{pos} V_{pos}^T$$

- (6) 以下の式により各  $pos$  のボルト締め付け作業の特徴を現す白色化された特徴ベクトルを求め, 正しい手順でボルトを締め付けたかどうかを判定するための比較対象とする. ここで,  $D_{pos}^{-\frac{1}{2}}$  は特異値行列の平方根の逆行列である.  $D_{pos}$  は対角成分だけからなるので, 各対角成分の平方根の逆数を求めれば計算できる.

$$Z_{n,pos} = D_{pos}^{-\frac{1}{2}} V_{pos}^T M_{pos} (F'_{n,pos} - \bar{F}_{pos})$$

- (7) 白色化された点の集合  $Z_{pos} = \{Z_{n,pos}\}$  を  $pos$  の LOF 計算に用いる参照用特徴ベクトルの集合とする.

### 5.2.4 LOF 計算・作業判定

最後に, 作業による燃料タンクの取り付け作業のボルト締め付け順序が #2, #3, #4, #5 の正しい順番になっているかどうかを判定する. このとき, 判定対象となる燃料タンク取り付け作業のデータを上記の手順で白色化し, 白色化された参照用特徴ベクトルの集合と比較する. 作業者が締め付けているはずの締め付け位置の参照用特徴ベクトルと一致すれば作業は正しいと判断する.

LOF 計算・作業判定の手順を以下に示す.

- (1) 判定対象となる燃料タンク取り付け作業の地磁気・加速度センサのデータから, 5.2.1 項の手順により特徴ベクトル  $X_{pos}$  を計算する.
- (2) 5.2.3 項の手順 (1) で求めたマスク行列  $M_{pos}$  を使い, マスクを適用した特徴ベクトル  $X'_{pos}$  を以下のように求める.

$$X'_{pos} = M_{pos} X_{pos}$$

- (3)  $\bar{F}_{pos}$  と特異値分解で計算した  $D_{pos}^{-\frac{1}{2}}$  を用いて以下のように  $X'_{pos}$  を白色化する.

$$Y_{pos} = D_{pos}^{-\frac{1}{2}} V_{pos}^T M_{pos} (X'_{pos} - \bar{F}_{pos})$$

- (4)  $Y_{pos}$  の LOF 値を以下の手順で計算する.
- (a)  $Y_{pos}$  と同じ  $pos$  の特徴ベクトルの集合  $Z_{pos}$  に対する LOF 値  $LOF(Y_{pos}, Z_{pos})$  を計算する.
- (b)  $Y_{pos}$  と異なる締め付け位置の特徴ベクトルの集合  $Z_{pos-}$  に対する LOF 値  $LOF(Y_{pos}, Z_{pos-})$  を計算する. ここで  $pos- = \#2, \#3, \#4, \#5$  (ただし,  $pos \neq pos-$ ) である.
- (c) 上記 (4a), (4b) により, 4 つ得られた  $LOF(Y_{pos}, Z_{pos})$  と  $LOF(Y_{pos}, Z_{pos-})$



の中で、最小となる LOF 値  $MIN_p(LOF(Y_{pos}, Z_{pos}), LOF(Y_{pos}, Z_{pos-}))$  を探す。ここで、 $p$  は LOF 値が最小となる締め付け位置を表す。

- (d)  $MIN_p(LOF(Y_{pos}, Z_{pos}), LOF(Y_{pos}, Z_{pos-}))$  が適切な閾値  $LOF_{pos,th}$  よりも小さく、かつ  $p$  が正しい作業かどうか判定したい締め付け位置  $pos$  と一致していれば、正常作業と判断する。
- (e)  $MIN_p(LOF(Y_{pos}, Z_{pos}), LOF(Y_{pos}, Z_{pos-}))$  が適切な閾値  $LOF_{pos,th}$  よりも小さく、かつ  $p$  が  $pos$  以外の締め付け位置と一致していれば、 $pos$  以外の誤った位置の締め付け作業を行った誤作業と判断する。
- (f)  $MIN_p(LOF(Y_{pos}, Z_{pos}), LOF(Y_{pos}, Z_{pos-}))$  が適切な閾値  $LOF_{pos,th}$  よりも大きい場合は、正常作業とも誤作業とも判定できない判定不能作業とする。ここでは、すべての  $pos$  において、 $LOF_{pos,th} = 2.0$  とした。

以上により、作業者による燃料タンク 1 個の取り付け作業において行われる 4 回の締め付け作業が、正しい順序で行われたかどうかを判定することができる。すなわち、#2 から #5 までのすべての締め付け位置において、LOF を計算した結果  $p$  と  $pos$  が一致すればよい。

すべての締め付け位置において、 $p$  と  $pos$  が一致した場合、すなわちすべての締め付けが正常作業と判定された場合、本システムは MES に対し、工場内ネットワークを通じて正常に燃料タンクの取り付けが完了したという OK 信号を送信する。そうでなければ、燃料タンク搭載工程で異常が発生したという NG 信号を送信する。

各ボルト締め付け位置における作業の結果は、次の 4 種類に分類できると考えられる。  
正常作業 何事もなく正常に正しい位置のボルトの締め付けが完了した。

準正常作業 正しい位置のボルトを締め付けたが、ボルトを落として拾う、異常を発見したためラインを止める紐を引くなどの、燃料タンク取り付けと直接関係のない作業を、燃料タンク取り付け中に行った場合など。

誤作業 燃料タンクを取り付けるためのボルトを締め付けたが、本来締め付けるべき順番でない別のボルトを締め付けた。すなわち、#4 を締め付けるべきなのに #3 を締め付けた場合など。

異常作業 燃料タンクを取り付けるボルト以外を締め付けたなど、上記にあてはまらない異常な作業。

これらの作業結果をすべて識別できると、品質管理や工程管理において様々な利点があると考えられる。

LOF による作業判定は、LOF が小さな値を取り、特徴ベクトルが一致するかどうかを利

用する。したがって、正常作業は、これらの作業に一致する特徴ベクトルが参照用特徴ベクトルが存在するため容易に識別できると考えられる。準正常作業は、正常作業からの逸脱が大きくなければ、正常作業に類した作業として識別できると思われるが、逸脱が大きくなれば LOF は大きな値をとり、上記の判定手順における判定不能作業や誤作業として検出されると考えられる。誤作業は、4 カ所のボルト締め付け箇所の 1 つを誤って締め付ける作業であるため、類似した特徴ベクトルが存在する可能性が高い。しかし、作業者の姿勢や腕・手首の向きが異なる場合は類似した特徴ベクトルが存在しないことも考えられる。異常作業は参照用特徴ベクトルに誤作業のデータが含まれないため、識別はより難しいと思われる。

以上を総合すると、準正常作業、誤作業、異常作業の場合に LOF が通常より大きな値を取ることがあると考えられる。よって、上記の作業判定手順における判定不能作業は、これらのうちのどれかと考えられる。一方、正常作業からの逸脱が大きい準正常作業は、LOF がやや大きいだけで正常作業と判断されると考えられるが、このときの LOF の値などについては現時点では判断に必要な材料が揃っていないため、今後の検討を要する。

## 6. 評価

### 6.1 準備

まず、関東自動車工業岩手工場の第 2 組立ラインの燃料タンク搭載工程において、4 名の作業者による作業の地磁気・加速度センサによるデータを収集した。これら収集されたデータは、すべてが正常または準正常作業である。収集されたデータのうち、工具の異常などにより締め付け完了信号の回数が 4 回に満たないものや、地磁気センサの値がつねに一定であるなどの明らかに異常なものをのぞき、作業データとした。表 1 に作業日、データ収集日と作業データの件数を示す。

次に、これらの作業のデータから 5.2 節で述べた方法により参照用特徴ベクトルを生成した。地磁気センサの較正值が日によってずれてしまうため、作業日ごとに参照用特徴ベクトルを生成した。これに対しては、センサを自動的に較正する、センサのハードウェアの改善を待つなどが考えられるが、これに関しては今後の課題である。また、今回は作業日が異なれば作業者も異なっているが、作業者が異なれば同じ作業であっても腕の動かし方などに個人差があるため、同一作業日であっても作業者ごとに参照用特徴ベクトルを生成する必要があると考えられる。

本システムの運用の利便性を考えると複数の作業者をまとめた参照用特徴ベクトルを用い

表 1 作業員、作業データ数とデータ収集日一覧

Table 1 A list of workers, the number of working data and data gathering date.

作業員	収集日	データ件数
M 氏	2008 年 6 月 3 日	168
S 氏	2008 年 6 月 13 日	187
O 氏	2008 年 7 月 2 日	186
T 氏	2008 年 7 月 8 日	181
S 氏	2008 年 7 月 9 日	161
S 氏	2008 年 8 月 4 日	137
S 氏	2008 年 8 月 5 日	100
S 氏	2008 年 8 月 6 日	180

表 2 正常作業のテストデータに対する正常作業判定件数

Table 2 Judgment for test data of correct works.

作業員	作業実施日	ボルト締め付け位置 [件]			
		#2	#3	#4	#5
M 氏	2008 年 6 月 3 日	168	168	168	168
S 氏	2008 年 6 月 13 日	187	187	187	187
O 氏	2008 年 7 月 2 日	186	186	186	186
T 氏	2008 年 7 月 8 日	181	181	180	181
S 氏	2008 年 7 月 9 日	161	161	161	161
S 氏	2008 年 8 月 4 日	137	137	137	137
S 氏	2008 年 8 月 5 日	100	100	100	100
S 氏	2008 年 8 月 6 日	180	180	180	180

るのが最も良い。しかし、現状では誤認識の可能性があり、誤作業の見逃しやライン停止の頻発は避ける必要がある。また、出勤して実際に作業を行っている作業員がだれなのかは、MES がデータを持っているため、これを利用して参照用特徴ベクトルを切り替えてもよい。ライン稼働中に一時的に作業員が交替することもあるが、交替要員は限定されているので切替えは容易である。

このようにして生成した参照用特徴ベクトルに対して、作業員と作業実施日が同じ作業データをテストデータとして与え、次の各節で述べる評価を行った。

### 6.2 正常作業に対する判定

表 2 に正常作業のテストデータに対し、提案手法により作業判定を行った結果を示す。合計 1,300 回の燃料タンク取り付けのうち、7 月 8 日の T 氏による #4 のボルトの締め付けだけが誤作業と判定されて、残りはすべて正常作業と判断されている。

この 1 件だけの誤判定では、ネジ締め位置 #4 の LOF が 1.2043、#5 の LOF が 1.1824 のため、実際には #4 を締め付けたのに #5 を締め付けたと判断されている。地磁気・加速度センサの測定データの波形を確認すると、#4 と #5 の間で 6 秒強の時間がかかっている。作業の様子を録画したビデオデータを確認すると、#2 でボルトの締め付けに失敗して #2 をやりなおし、#3 と #4 の間で代わりのボルトをとるため 6 秒強の時間がかかっている。すなわち、締め付け完了信号と実際の締め付け位置の対応がおかしいため、このデータは本来排除すべきデータである。#2 を締め付けた際にトルクが規定に達したため締め付け完了信号が送信されたが、実際には締め付けは失敗しており、結果として締め付け完了信号が誤って入力されたのが原因と考えられる。このような場合にどう対処するか、今後の検討を要する。

T 氏はこのとき新人として、燃料タンク搭載工程における作業の訓練中であり、ボルト

のカジリ、締め付け不良、インパクトレンチの回転トルクにより腕が大幅に動いてしまうなど、作業に熟練していない様子であった。

### 6.3 正常作業における判定の安定度

本システムによる作業判定を将来、生産ラインに導入し本格的に利用した場合を考えると、本システムによる NG 信号送出は生産ラインを一時的に停止させることを意味する。頻繁な生産ライン停止は生産効率を悪化させるため避けなければならない。このため、本システムは締め付け手順ミスをすべて検出するだけでなく、正常な作業に対しては正常な作業であると安定的に判定できる必要がある。

提案手法による作業判定では、テストデータと 4 カ所の締め付け位置の参照用特徴ベクトルとの LOF を計算し、LOF が最小となった参照用特徴ベクトルの締め付け位置  $p$  を作業員が実際に締め付けを行った位置  $pos$  と見なしている。したがって、提案手法が正常作業に対して誤判定をする場合、 $p$  が実際に締め付けを行った作業位置でないことを意味する。すなわち、ある締め付け位置  $pos$  において、 $pos$  以外の各締め付け位置の LOF のうち最小のもの、 $pos$  の LOF の差がどの程度あるかを検討すればよい。

図 5 は 7 月 2 日の O 氏による作業のデータのうち、締め付け位置 #4 のテストデータにおける参照用特徴ベクトル #4 との LOF と、#4 以外との LOF のうちの最小のもの、LOF のグループは十分分離されている。なお、7 月 2 日の O 氏による作業の締め付け位置 #4 は最小の LOF のグループと次に小さい LOF のグループが、測定した作業のデータの中では最も接近している。

表 3 誤作業に対する作業判定結果  
Table 3 Judgment for wrong works.

実施日	誤作業の締め付け順序	正常作業判定の件数				異常作業判定の件数				判定不能作業の件数				検出不能
		#2	#3	#4	#5	#2	#3	#4	#5	#2	#3	#4	#5	
8月4日	#2 → #3 → #5 → #4	10	3	1	2	0	0	9	1	0	7	0	7	0
8月5日	#2 → #3 → #4 → #4	9	9	6	1	1	1	2	2	0	0	2	7	0
8月6日	#2 → #3 → #4 → #2	10	10	2	7	0	0	0	1	0	0	8	2	2
8月6日	#2 → #5 → #4 → #3	10	0	0	0	0	9	8	8	0	1	2	2	0

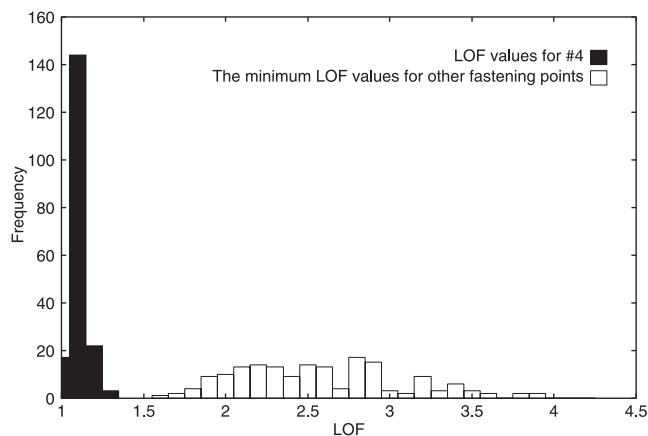


図 5 7月2日のO氏の作業の締め付け位置#4の最小LOFと次に小さなLOFの分布  
Fig. 5 A frequency distribution of the minimum and secondarily minimum LOFs on works by Mr. O in July 2.

#### 6.4 誤作業に対する判定

次に、ボルト締め付け順序を誤った作業をS氏に依頼して行い、誤作業を検出できるかの検討を行った。このとき、本工程の後に品質検査を専任で行う担当者を配置した。各誤作業におけるボルト締め付け順序と作業判定の結果を表3に示す。なお、誤作業は各10回ずつ行い、作業判定に用いる参照用特徴ベクトルは正常作業に対する作業判定と同じものを用いた。表中の検出不能は、4カ所の締め付け位置のすべてを正常作業と判定した回数を示す。また、表のタイトル行の正常作業判定、異常作業判定、判定不能作業の直下の数字は、図2に示す正しい順序における締め付け位置を表す。また、#2 → #3 → #5 → #4の順序で締め付けを行ったときの地磁気センサの出力波形を図6に示す。

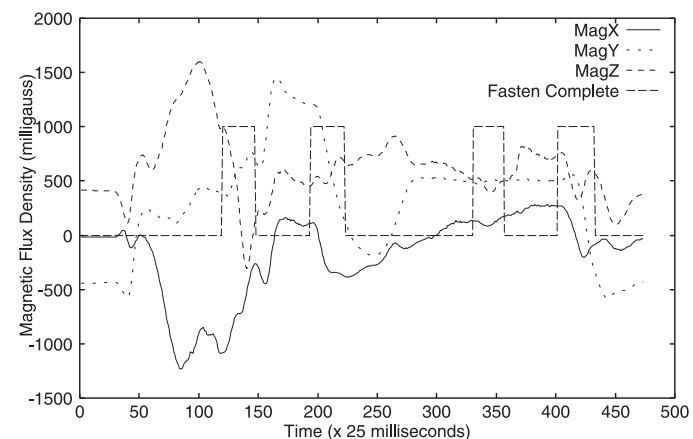


図 6 #2 → #3 → #5 → #4の順序で締め付けたときの地磁気センサの出力波形  
Fig. 6 A typical waveform of terrestrial magnetism sensor when fastening order was #2 → #3 → #5 → #4.

8月4日には#2 → #3 → #4 → #5の順序で締め付けるべきところを#2 → #3 → #5 → #4の順で締め付けた。したがって、この場合は#4と#5で誤作業と判定されるのが望ましく、#2と#3では正常作業と判断されるのが望ましい。#2においては10件すべてが正常作業と判断され、#3では正常作業または判定不能と判断された。#4と#5はそれぞれ1件、2件を除き誤作業か判定不能との結果が得られた。他の誤作業の場合でも、ほぼ同様の結果が得られた。

#2 → #3 → #4 → #2の順序で締め付けた場合の2件のデータを除き、誤作業のテストデータでは4カ所の締め付け位置のいずれかにおいて、LOFの値が大きくなり判定不能となるか、誤作業として判定されるかしている。正常作業に対する作業判定結果と総合すると、

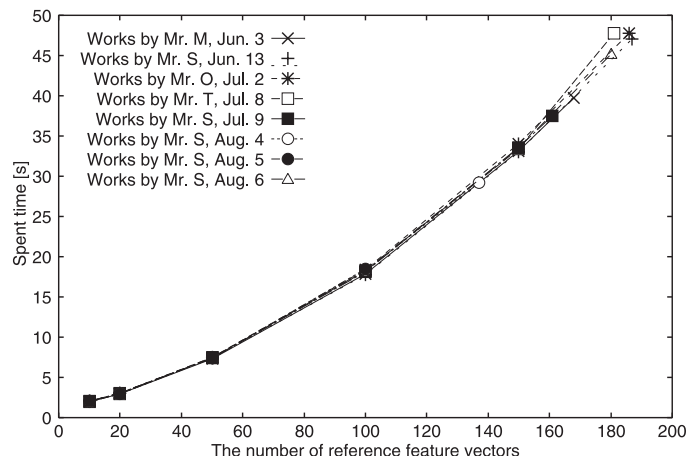


図 7 参照用特徴ベクトル数と白色化所要時間

Fig. 7 The number of reference feature vectors vs. spent time for whitening.

正常作業は正常作業としてほぼ確実に判定可能である。誤作業においては、実際に誤った締め付け位置を特定できないが、誤作業の発生はおおむね検出可能である。発生した誤作業の特定に関しては、典型的な誤作業の参照用特徴ベクトルを用意し LOF を計算するなどの方法が考えられる。

### 6.5 判定に要する計算時間

ここでは、LOF の計算に基づく作業判定の所要時間についての評価を述べる。すべての評価は Core2Duo E8500 (3.16 GHz)、メモリ 2 GB、FreeBSD 7.1-RELEASE の PC で行った。作業判定を行うプログラムは LOF の計算を含めて Perl で記述されている。Perl はバージョン 5.8 を用い、特異値分解は Perl モジュールである PDL を用いた。

図 7 に白色化の所要時間を示す。ここでは、参照用特徴ベクトルの数を 10, 20, 50, 100, 150 に制限したときと制限しなかったときの所要時間を作業データ収集日ごとにプロットした。参照用特徴ベクトルの数にほぼ比例して白色化の所要時間が伸びていることが分かる。白色化の計算内容から見て、白色化の計算量は参照データ数に対して  $O(n)$  よりも若干悪い程度と考えてよい。

図 8 にテストデータに対してオフラインで行った作業判定の所要時間を示す。ここでは、参照用特徴ベクトルの数は表 1 に示したとおりに固定している。テストデータの件数に比

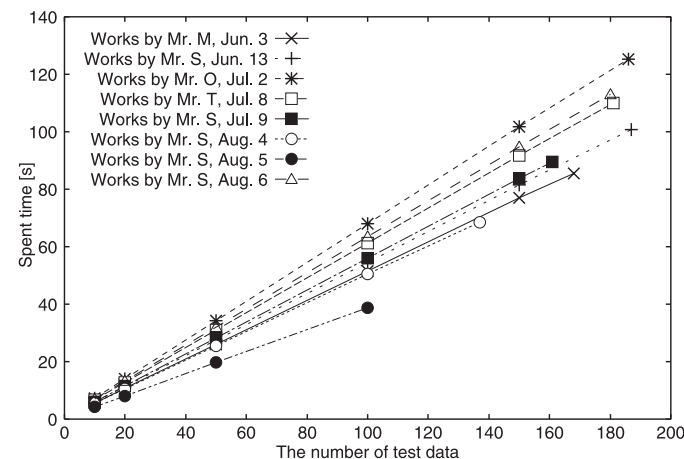


図 8 テストデータ数と作業判定所要時間

Fig. 8 The number of test data vs. spent time to judge OK/NG.

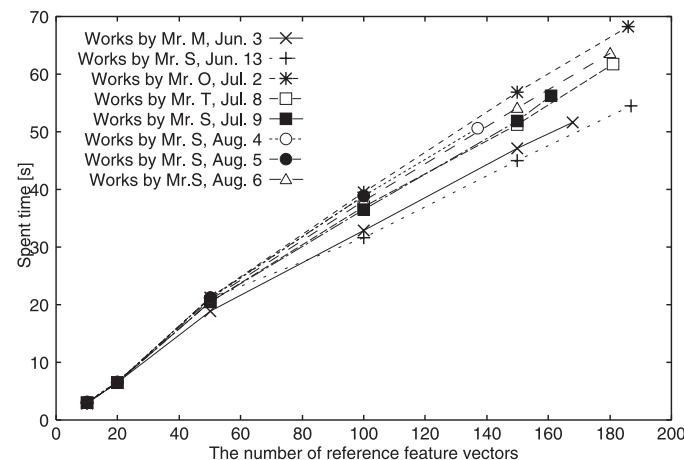


図 9 参照用特徴ベクトル数と作業判定所要時間

Fig. 9 The number of reference feature vectors vs. spent time to judge OK/NG.

例して所要時間が伸びているが、傾きがすべて異なる。傾きが異なる原因は、参照用特徴ベクトルが少ない8月5日のデータでは傾きが小さく、逆に参照用特徴ベクトルが多い7月2日、8日、8月6日のデータでは傾きが大きいなど、作業判定に用いた参照用特徴ベクトルの数と考えられる。しかし、その一方で6月13日の傾きはそれほど大きくないなど、参照用特徴ベクトルの数だけに依存しているのではないとも考えられる。テストデータ1件あたりの作業判定の所要時間は、今回評価に用いたデータすべての平均で0.56秒であった。

図9に参照用特徴ベクトル数を変化させたときの作業判定所要時間を示す。図9のテストデータ数は表1に示された作業データすべての作業判定の所要時間である。参照用特徴ベクトルの数に比例して作業判定の所要時間が伸びている。要求される作業判定の精度にもよるが、参照用特徴ベクトルを多くしても作業判定の速度が遅くなるため、参照用特徴ベクトルを適切な数に抑える必要があると思われる。

## 7. まとめ

本論文では、ルーチン作業において作業が手順どおり行われたかを工具や作業者に取り付けた地磁気・加速度センサを利用して判定する作業トレースシステムについて述べた。本論文では、関東自動車工業岩手工場の第2組立ラインの燃料タンク搭載工程における本システムの適用例を述べ、毎日、燃料タンク取り付け作業を行っている作業者の動作を地磁気・加速度センサにより測定したデータに基づいた評価を述べた。本システムで利用したLOFに基づく作業判定手法は、正常なルーチン作業に対して、正常な作業であると安定的に判定でき、かつ、誤作業の検出も可能である。

今後の課題として、以下のことが考えられる。まず、誤作業の検出洩れの解消と、検出された誤作業が、どのような誤作業なのかの正確な判定が必要である。品質管理においては、ミスの発生頻度を定量化し、発生頻度に応じて教育を行ったり教育内容や工程を改善したりなどするため、ぜひとも実現する必要がある。また、将来の実用化に向けて、計算量の削減なども必要である。

## 参考文献

- 1) 佐藤永欣, 小田島昌一, 鈴木 潤, 石川泰二, 村田嘉利: 地磁気・加速度センサを利用した作業トレースシステムのプロトタイプ, 第135回マルチメディア通信と分散処理研究会(2008-DPS-135), pp.153-158 (2008).
- 2) Sato, N. and Murata, Y.: Quality Control Schemes for Industrial Products by Workers' Motion Capture, *The 2nd International Workshop on Telecommunica-*

*tion Networking, Applications and Systems (TeNAS2008), in conjunction with The IEEE 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2008)*, pp.1480-1485 (2008). ISBN978-0-7695-3096-3.

- 3) Murata, Y. and Sato, N.: Production Management System in an Assembly Plant by Terrestrial Magnetism Sensors, *The 5th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS2008)*, pp.27-30 (2008).
- 4) Sato, N., Odashima, S., Suzuki, J., Ishikawa, T. and Murata, Y.: Prototype of a Workers' Motion Trace System Using Terrestrial Magnetism and Acceleration Sensors, *The 2nd International Conference on Network-Based Information Systems, LNCS5186*, pp.60-70, Springer (2008). ISBN978-3-540-85692-4.
- 5) 松岡 繁: 民間利用実証に係る状況報告とIMESに係る活動紹介.  
[http://qzss.jaxa.jp/is-qzss/QZSSUM\\_03\\_03.pdf](http://qzss.jaxa.jp/is-qzss/QZSSUM_03_03.pdf)
- 6) Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. IEEE INFOCOM 2000*, pp.775-784 (2000).
- 7) Kitasuka, T., Nakanishi, T. and Fukuda, A.: Wireless LAN Based Indoor Positioning System WiPS and Its Simulation, *Proc. 2003 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers, and Signal Processing*, pp.272-275 (2003).
- 8) Ohta, M., Namikata, E., Ishihara, S. and Mizuno, T.: Individual Authentication for Portable Devices using Motion Features, *Proc. 1st International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2004)*, pp.100-105 (2004).
- 9) 所 洋平, 村松邦彦, 細見心一, 塚本昌彦: ウェアラブルコンピューティングのための2つの加速度センサを用いたポインティング方式, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム論文集 (DICO2007), pp.1215-1222 (2007).
- 10) 小野美仁: モーション・キャプチャーを用いた運動機能並びに運動能力の分析, 特開2005-192968 (P2005-192968A).
- 11) Yonemoto, S., Matsumoto, A., Arita, D. and Taniguchi, R.: A Real-time Motion Capture system with Multiple Camera Fusion, *Proc. International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP)*, pp.600-605 (1999).
- 12) Trivedi, M., Huang, K.S. and Mikić, I.: Dynamic Context Capture and Distributed Video Arrays for Intelligent Spaces, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Vol.35, No.1, pp.145-163 (2005).
- 13) Breunig, M.M., Kriegel, H.-P., Ng, R.T. and Sander, J.: LOF: Identifying Density-Based Outliers, *ACM SIGMOD Record*, Vol.29, No.2, pp.93-104 (2000).  
<http://www.dbs.informatik.uni-muenchen.de/Publikationen/Papers/LOF.pdf>

(平成21年5月19日受付)

(平成21年12月17日採録)





佐藤 永欣 (正会員)

1976年生。2004年東洋大学大学院博士後期課程情報工学専攻修了。博士(工学)。同年東洋大学植物機能研究センター研究助手。2007年岩手県立大学ソフトウェア情報学部講師。分散情報検索、微量元素による野菜の産地判別等の研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



田島 玲

1992年東京大学大学院工学系研究科修了。1992~2002年日本アイ・ピー・エム(株)東京基礎研究所研究員。1997~2000年東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻社会人博士課程。博士(理学)。2002~2005年A.T.カーニー(株)コンサルタント/マネージャー。2005年より日本アイ・ピー・エム(株)東京基礎研究所に勤務, 数理科学分野を担当。



高橋 俊博

2004年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本アイ・ピー・エム(株)に入社。東京基礎研究所に所属。機械学習・データ解析の研究に従事。



小田島昌一

1954年生。1973年関東自動車工業株式会社入社。2003年岩手工場組立部主担当員。以後, 組立工程を担当。



鈴木 潤

1979年生。2005年北海道大学大学院理学研究科(地球惑星化学専攻)修了。同年関東自動車工業株式会社入社, 岩手工場組立部配属。以後, 自動車組立業務に従事。



石川 泰二

1962年生。1981年関東自動車工業株式会社入社。同年東富士工場管理部に配属。1991年本社情報システム部に配属。1993年同社岩手工場管理部に配属。以後, 車両生産システムの運用, 維持, 改善を担当。



村田 嘉利 (正会員)

1977年山梨大学工学部電気工学科卒業。1979年名古屋大学大学院電気工学専攻修了。2003年静岡大学理工学研究科後期博士課程設計科学専攻修了。博士(工学)。1979~2006年NTTおよびNTTドコモに勤務。2006年から岩手県立大学ソフトウェア情報学部教授。電子情報通信学会, IEEE各会員。