

## 地磁気・加速度センサによる作業トレースシステムの 作業録画機能の改善

佐藤 永欣<sup>†1</sup> 及川 正基<sup>†1</sup> 上田 浩市<sup>†2</sup>  
鈴木 潤<sup>†2</sup> 石川 泰二<sup>†2</sup>  
高山 毅<sup>†1</sup> 村田 嘉利<sup>†1</sup>

工業製品の品質保証は、設計、原材料、部品の品質保証のほかに、製品自体の製造工程での品質保証も重要である。これは規定通りの作業が製造工程で行われたかどうかを確認することで実現でき、通常は製品自体を検査することで確認されている。しかし、中には作業完了後に規定を満たして製造されたかの確認が難しい場合がある。そこで、我々は地磁気・加速度センサを用いて自動車組立工場の作業をモニタするシステムの開発を行ってきた。標準作業手順から逸脱した作業を行った場合、警告を発し、ラインを停止する。標準的でない作業の検出がほぼ 100% 可能になったので工場内で利用を始めたが、実用化にあたりさまざまな問題が発見された。そのうちのひとつが、ボルトの締め付け順序は正しいものの、システムが異常と判断し、なおかつ地磁気・加速度センサのデータが通常と異なる場合である。このような場合に何が起きたのかを知るために録画機能を追加したが、ファイル書き出しのための十分な時間を確保できないため無圧縮で記録していた。本論文では圧縮機能を追加したので報告する。

### Improvement of Working Recording Feature on Worker's Motion Tracing System using Terrestrial Magnetism Sensors

NOBUYOSHI SATO,<sup>†1</sup> MASAKI OIKAWA,<sup>†1</sup>  
KOUICHI UEDA,<sup>†2</sup> JUN SUZUKI,<sup>†2</sup> TAIJI ISHIKAWA,<sup>†2</sup>  
TSUYOSHI TAKAYAMA<sup>†1</sup> and YOSHITOSHI MURATA<sup>†1</sup>

In guarantee of industrial products, it is important not only design, materials and quality of parts but also quality of each of works in production process of the products themselves. This quality of works can be guaranteed by checking whether each of works accords to regulation on working procedure. This is

normally done by checking the produced products themselves. However, there are some works to check whether the regulation is obeyed or not is difficult once the work have finished. Therefore, we have been developing a worker's motion tracing system that uses terrestrial magnetism and acceleration sensor to monitor works on automobile assembly factory. This system detects if a worker violates standard procedure for particular work, the system warns and stops a production line to correct this violation. Since almost 100% of violation became to be able to be detected, we began to operate the system in factory, however, we founded some problems for practical use. One of them is that a case the order to fasten bolts is correct for particular work, the system judges the work is not correct, and waveforms of terrestrial magnetism sensor is very different to correct works. So we have added video recording feature onto our system, however, we did not compress recorded files since interval times for each works may be too short to compress them. In this paper, we added compression feature for recorded video files.

#### 1. はじめに

工業製品の品質保証は、原材料、部品、組立、加工などが規定を満たしているかを検証することが基本である。設計、原材料、部品などの検証も重要であるが、部品や最終製品の組立や加工も重要である。中でも組立は作業の内容によっては、作業完了後に規定を満たしているかどうかを確認することが難しい場合がある。たとえば、複数のネジで部品を固定する場合は、部品の取り付け精度の保証を目的としてネジの締め付け順序が決まっていることがある。しかし、誤った順序でネジを締め付けても部品は固定されるため、単なる見た目からは手順違反を検出できない。このような手順違反を検出するためには、詳細な検査が必要になってしまうが、検査を行っても偶然に高い精度が出ている場合は手順違反を検出できない。このような手順違反があった場合、部品の取り付け精度に保証は無く、製品は潜在的な不良品の可能性がある。このような製品の潜在的問題点が製品のリコールにつながった場合、企業にとっては大きな負担が発生する。

そこで、我々は地磁気・加速度センサを利用した、ルーチン作業モニタシステムを開発している。<sup>1)2)3)4)5)</sup> 本システムは、工具や作業者に地磁気・加速度センサをとりつけ、その出

<sup>†1</sup> 岩手県立大学

Iwate Prefectural University

<sup>†2</sup> 関東自動車工業(株)

Kanto Auto Works, Ltd.

力データを利用して作業が正しく行われたかどうかを判定する。我々は以前、ほぼ正確な誤作業の検出を実現し、自動車組立工場での試験運用をはじめた。しかし、どのような誤作業が行われたかまでは、本システムで知ることができない。また、ボルトの締め付け順序は正しいものの、システムが異常と判断し、なおかつ地磁気・加速度センサのデータが通常と異なる場合が発見された。このような場合に、実際に何が起きたのかを把握するには、作業者の報告に頼ることになる。しかし、作業者の報告は休憩時間や終業後にまとめて行われるので、どのような誤作業があったのか、どのような通常通りでない作業になったのかがはっきりしないことが多い。そこで、品質管理の向上を目的として、ルーチン作業モニタシステムにビデオ撮影機能を追加した。これにより、作業者の報告に頼らずにどのような誤作業があったのか、どのような通常でない事態が発生したのかをあとから検証することができるようになる。本論文ではその設計と実装について述べる。

## 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可能である。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>6)</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、建物も広いため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が10cm程度にまで向上できる。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盛んに研究されている<sup>7)8)</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過ぎ、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>9)</sup>や、入力インターフェースとして加速度センサを用いる研究<sup>10)</sup>などがある。加速度は一瞬の動きの変化を捉えるには向いているが、組立工程の作業員の動きのような連続的な動きを精度よ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、なん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>11)</sup>にも適用されている。文献12)では複数のカメラを用いて光学式マーカー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>13)</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適用は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。

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。工場内では、モーターや配線などから発生する磁気ノイズが懸念されるが、地磁気センサの取り付け位置を、これらからある程度離すことで、磁気ノイズの影響は無視してよいレベルになる。また、定常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利用できると思われる。

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無ければ、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、肘等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角と伏角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の変化を利用して推定される。

一見すると、測位を伴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、組立ライン等でのルーチン作業の場合、作業をする場所や機器類が設置される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、作業中の作業員の体の向き、立ち位置、手や腕の使い方も、楽な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、ある瞬間に作業員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

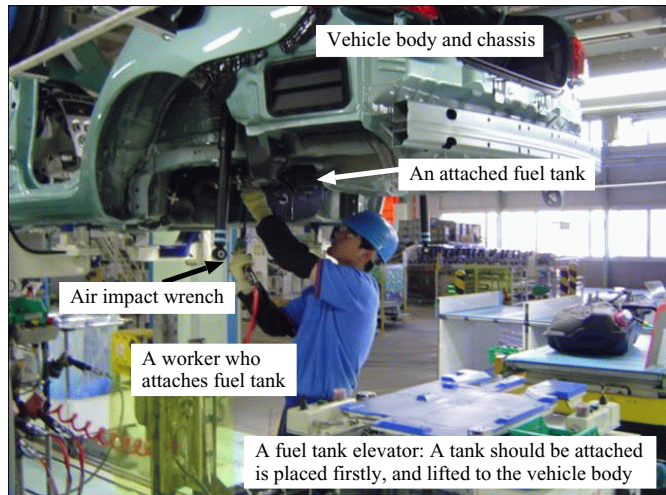


図1 燃料タンク搭載工程  
Fig. 1 A fuel tank attaching process

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. 地磁気・加速度センサによる作業モニタシステム

まず、燃料タンク搭載工程の概要を説明する。この工程の様子を図1に示す。当該工程を含む生産ラインでは、作業員の頭上を車体が毎分約6m程度の速度で移動している。作業員は頭上を移動する車体の下部に、燃料タンクを取り付ける。このとき、4本のボルトを図2に示す順序でエアインパクトレンチを用いて締め付ける。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。

本システムは、図2の#2から#5のボルトが、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。

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

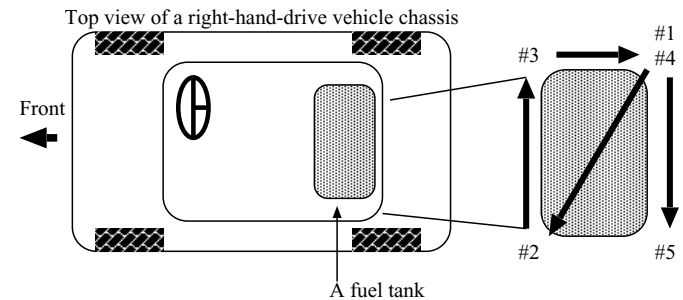


図2 燃料タンクと車体の位置関係とボルト締めつけ順序  
Fig. 2 A fuel tank on a vehicle chassis and the order to fasten bolts

型の筐体に取り付けたものである。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 3 軸に対する大きさに分解されて測定される。測定間隔は 25ms であり、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。

地磁気・加速度センサを利用して人やものの動きを取得するときに、いくつかの留意事項がある。

次に、本システムの概要を述べる。本システムの構成図を図3に示す。本システムは以下の各部から構成される。

**地磁気加速度センサ** 今回はアイチ・マイクロインテリジェント製の AMI-601CG を利用した。地磁気・加速度センサは、作業員や工具に取り付けられる。燃料タンク搭載工程の場合、地磁気・加速度センサはエアインパクトレンチに取り付けられている。エアインパクトレンチは、使用していないときは常に定められた工具置き場に同じ向きでおいてある。

**PC** 地磁気加速度センサからのデータと、締め付けタイミングの信号に基づき、作業が正しいかどうかを判断する。燃料タンク搭載工程の場合、デジタル IO ユニットとともにライン脇の空きスペースに設置した。この PC では次章で述べるように、作業判定モジュール、センサとデジタル IO ユニットとのインターフェースなどのようなソフト

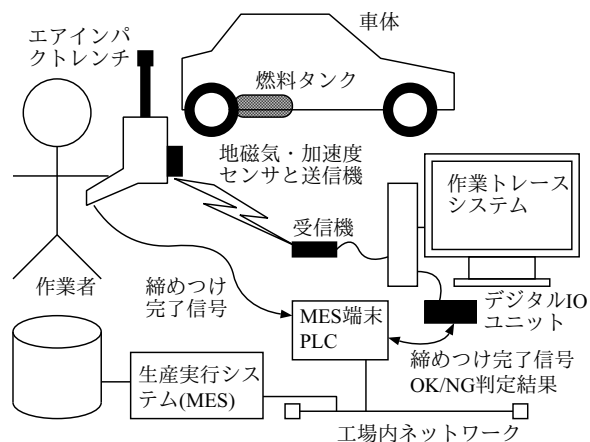


図 3 地磁気センサによる作業トレースシステム

Fig. 3 A worker's motion trace system using terrestrial magnetism sensors

ウェアモジュールが動作している。

デジタル IO ユニット 締め付けタイミング信号の取得を行い、生産実行システム (Manufacturing Execution System, MES) へ作業が正しく行われたかどうかの判定結果を送信する。燃料タンク取り付け工程の場合は、締め付けタイミング信号は、エアインパクトレンチの締め付けトルクを用いて取得している。すなわち、エアインパクトレンチの締め付けトルクが規定に達したことを、エアインパクトレンチを制御しているエアレギュレータの圧力が規定に達したことを用いて検出し、電気信号の形でデジタル IO ユニットに入力している。また、作業が正しいかどうかを判定した結果を生産実行システムに送信している。

本システムは、生産実行システムやエアインパクトレンチと連携して次の手順で作業手順の判定を行う。

- (1) インパクトレンチは、使用されないときは所定の工具置き場に置かれている。
- (2) 作業者が燃料タンクのボルトを締め付けるために、インパクトレンチを取り上げる。本システムはこれによる地磁気センサの出力の変化を検出し、判定を開始する
- (3) 作業者が締付を開始し、締め付けトルクが規定トルクに達すると、インパクトレンチのエアレギュレータから締め付け完了信号が送信される。

- (4) 本システムは締め付け完了信号を受信し、その前後の地磁気・加速度・回転角の測定値をもとに特徴ベクトルを生成する。
- (5) 特徴ベクトルをあらかじめ学習させた対照データとの LOF を計算し比較する。これにより、あるボルトを締め付ける作業手順が正しいかどうかを判定する。
- (6) 4本の締め付けが完了するまで3から5を繰り返す。
- (7) 4本全ての作業手順が正しければ OK 信号を、1本でも間違っていれば NG 信号を生産実行システムに送信する。
- (8) 生産実行システムは NG 信号を受信した場合、生産ラインを停止し、確認作業が行われるまで再開しない。OK 信号を受信した場合は生産を継続する。

図 4 に上記の手順で作業手順を判定するために測定された、正常な作業の典型的な地磁気センサによる波形を示す。この波形には締め付け完了の信号などを含んでいる。すなわち、図 4 中の Trigger の立上りエッジが、上記のエアインパクトレンチによる締め付けトルクが規定トルクに達し、作業者による締め付けが完了したことを示している。したがって、作業者は立上りエッジの直前の 0.5 秒から 1 秒の間、締め付け作業を行っている。この間の作業者の姿勢は基本的に大きく変わらないので、地磁気センサによる波形はほぼ水平となっている。

#### 4. 作業録画機構

ここでは、以前<sup>5)</sup> 地磁気・加速度センサによる作業トレースシステムに追加した作業録画機能について簡単に述べ、新たに追加した作業録画データの圧縮処理の実施方法について述べる。

まず、作業録画機能に要求された条件は次の通りである。

- 地磁気・加速度センサによって作業者の動きをモニタしているときに録画が必要となることがある。これらの記録は関連づけられて保存されている必要がある。録画が不要な場合は録画機器も不要としたい。
- 車両の生産台数から、最大で 1 日あたり 600 件以上の録画が必要である。また、解析は週単位などのある程度の期間をまとめて行うと考えられるので、少なくとも数千件の録画データを保管できる必要がある。
- 1 分強に 1 台車両が生産されているため、次の車両の作業が始まる前に圧縮が完了していなければならない。圧縮に使用できる時間は最小で 10 秒程度しかない一方で、作業にトラブルが発生した場合、作業時間は 40 秒を越えることがある。

このような条件を満たすため、図 5 に示すようなモジュール構成として録画機能を追加し



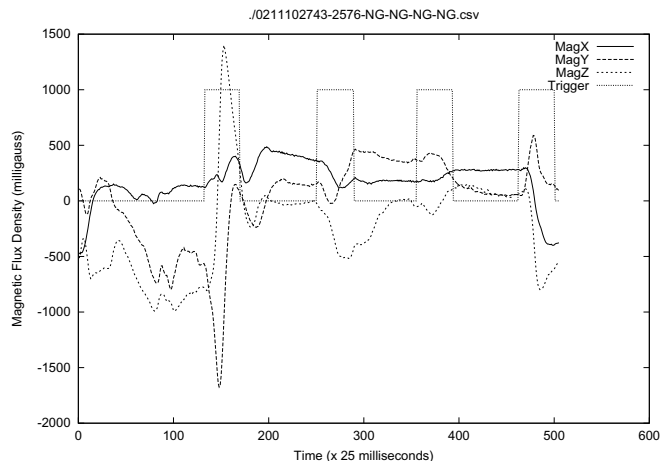


図 4 正しい締め付け順序の典型的な地磁気センサの出力波形

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

た。録画が不要な場合は、カメラ IO モジュール以下は起動されず、カメラの接続も不要である。試作に用いた環境では、録画したデータを圧縮して書き出すには、録画に要した時間より若干短い程度の時間を要する。このため、40 秒を越えることがある作業内容を圧縮しながら書き出すことはできない。このため、無圧縮で HDD に書き出すこととした。録画ファイルの大きさは作業 1 件当たり 200MB 強であるので、1 日の生産台数全てである 600 台分を録画したとしても、120GB 程度の容量で済む。無圧縮で書き出す場合、録画データ 1 件の書き出しに要する時間は最長でも 10 秒以内であり、上記の要件を満たしている。

このように無圧縮で録画を行うと、10 稼働日で 1.5TB の HDD を概ね使いきってしまうため、きわめて非効率である。そこで今回、録画システムとは別個に、新たに録画された無圧縮ビデオデータを特定のディレクトリに発見したら、優先度を下げたプロセスで圧縮を行うプログラムを作成した。圧縮プログラムは圧縮を行う C++ で書かれたプログラム本体と、それを制御する Perl で書かれた部分からなる。これらは全て Windows 上で稼働する。

Perl で書かれた制御部は常時起動し、5 秒おきに特定のディレクトリを監視している。監視対象のディレクトリ内に AVI ファイルが増え、かつ、そのファイルが無圧縮 CODEC を使用している場合は、そのファイルを圧縮する処理を起動する。この際、作業トレースシ

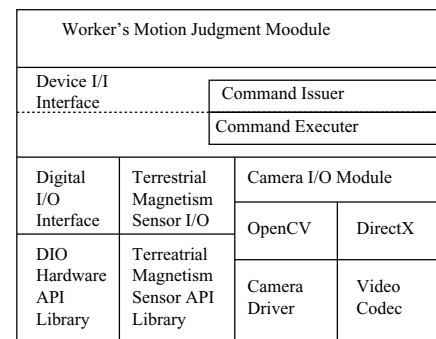


図 5 ソフトウェアモジュール構成

Fig. 5 Software modules

テムのカメラ録画モジュールによる無圧縮 AVI ファイルの書き込みと圧縮処理が同時に行われなように、カメラ録画モジュールは無圧縮 AVI ファイル書き出し中はロックファイルを作成し、ロックファイルが存在する間は Perl で書かれた制御部は何もしない。ロックファイルが存在しない場合に限り、制御部は圧縮プログラムを起動する。この際、優先度を通常よりも下げて作業トレースシステムの録画モジュールの実行に影響がでないようにしている。圧縮プログラムは XVID CODEC を用いて一つのファイルの圧縮を行い、その都度終了する。

作業の様様を録画したファイルの圧縮を行う評価を行った。まず、作業の様様を 17 件録画した。録画時間は最大で 18.15 秒、最小で 0.93 秒、平均で 12.38 秒であった。これらの作業は概ね正常な作業であり、18 秒かかっている場合には、次の車両の作業に使用するの燃料タンクの位置を調整するという余計な作業が入ったのみであった。1 日に 1、2 回程度、インパクトレンチの異常などにより 40 秒以上の作業となることがある。これらの録画ファイルの無圧縮での書き出しに要する時間は全て 3 秒前後であった。また、無圧縮 AVI ファイルの大きさは、最小で 157MB、最大で 319MB、平均 215MB であった。

次に、今回作成した、無圧縮 AVI ファイルを発見し、圧縮を行うプログラムにより圧縮を行った。圧縮に要した時間は最小で 6.81 秒、最大で 12.94 秒、平均 9.05 秒であった。圧縮後のサイズは最大で 6528KB、最小で 3216KB、平均 4556KB であった。

## 5. まとめと今後の課題

本論文では、地磁気・加速度センサによる作業トレースシステムに追加した作業録画機能に、圧縮機能を追加した。通常は録画時に圧縮を行うが、本システムでは10秒以内の短時間で最長40～50秒程度の録画をHDDに書き出すことを求められている。通常は10秒強の長さの録画だけで十分であるが、異常な作業が発生した場合、録画時間が長くなってしまふ。この結果、圧縮を行うと録画データの書き出しに時間がかかってしまい、次の作業の録画に間に合わない。並列処理により回避することも考えられるが古いPCが多いため、録画処理への影響が懸念される。このため、優先度を下げた別プロセスとして圧縮処理を動かすことにした。

今後の課題として、次のことが考えられる。まず、現在のところ、単に録画データのため込んでいるだけであり、録画データの有効利用はほとんどされていない。したがって、通常とは若干異なる作業者の動きによる異常作業判定を減らす、ボルトを落して拾う、何かに躓くなどによる作業手順逸脱の検出、異常作業判定区分の細分化などが必要である。また、このような通常でない作業の発生原因を究明し、作業工程を改善するために本システムの録画機能を使うことも可能である。

## 参 考 文 献

- 1) Sato, N. and Murata, Y.: Quality Control Schemes for Industrial Products by Workers' Motion Capture, *The 2nd International Workshop on Telecommunication 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.
- 2) Murata, Y. and Sato, N.: Production Management System in an Assembly Plant by Terrestrial Magnetism Sensors, *Fifth International Conference on Networked Sensing Systems (INSS2008)*, pp.27–30 (2008).
- 3) Sato, N., Takahashi, T., Tajima, A., Odashima, .S., Suzuki, J., Ishikawa, T. and Murata, .Y.: Improvement of a Worker's Motion Trace System Using a Terrestrial Magnetism Sensor, *The 12th International Conference on Network-Based Information Systems*, pp.67–74 (2009).
- 4) 佐藤永欣, 高橋俊博, 田島 玲, 小田島昌一, 鈴木 潤, 石川泰二, 村田嘉利: 地磁気・加速度センサによる自動車組立工場内作業トレースシステム, *情報処理学会論文誌*, Vol.51, No.3, pp.810–823 (2010).
- 5) 佐藤永欣, 高橋俊博, 田島 玲, 小田島昌一, 鈴木 潤, 石川泰二, 高山 毅, 村田嘉

利: 地磁気加速度センサを用いた作業トレースシステムにおける作業録画システムの設計と実装, *マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム 2010*, pp.1527–1535 (2010).

- 6) 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).
- 7) Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. of IEEE INFOCOM 2000*, pp.775–784 (2000).
- 8) Kitasuka, T., Nakanishi, T. and Fukuda, A.: Wireless LAN Based Indoor Positioning System WiPS and Its Simulation, *Proc. of 2003 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers, and Signal Processing*, pp.272–275 (2003).
- 9) Ohta, M., Namikata, E., Ishihara, S. and Mizuno, T.: Individual Authentication for Portable Devices using Motion Features, *Proc. of the 1st International Conference on Mobile computing and Ubiquitous networking (ICMU2004)*, pp.100–105 (2004).
- 10) 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 (DICOMO2007)*, pp.1215–1222 (2007).
- 11) 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).
- 12) Yonemoto, S., Matsumoto, A., Arita, D. and Taniguchi, R.: A Real-time Motion Capture system with Multiple Camera Fusion, *Proc. of International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP)*, pp.600–605 (1999).
- 13) Trivedi, M., K.S., Huang and Mikié, I.: Dynamic Context Capture and Distributed Video Arrays for Intelligent Spaces, *IEEE Transactions of Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, Vol.35, No.1, pp.145–163 (2005).