

作業トレースによる工業製品の品質保証の試み

佐藤永欣[†] 小田島昌一[‡] 鈴木潤[‡] 石川泰二[‡] 村田嘉利[†]

{nobu-s,y-murata}@iwate-pu.ac.jp

[†]岩手県立大学ソフトウェア情報学部 [‡]関東自動車工業(株)岩手工場

工業製品の品質保証においては、使用する原材料や部品の品質、設計も重要であるが、組立工程における手順書通りに作業されているかも非常に重要な要素である。一般に、組み立てラインやセル生産方式の組立工程には、前工程の作業内容や品質を確認する後工程が随所に組み込まれている。しかし、作業内容によっては後工程では検出し難いものもある。例えば、1つの部品を複数のねじで留める場合、対角線に沿って順次締め付けていくことが望ましい。しかし、それに違反していても視覚的に検出するのは容易ではない。そこで我々は、作業内容をコンテキストとして扱い、地磁気センサと加速度センサの組み合わせによって作業員の腕などの動きをトレースすることによりコンテキストの識別と作業内容を把握し、工業製品の品質向上を図るシステムを開発している。本論文では、コンテキストとしての作業を基本動作に分割し、各コンテキスト別にトレースを試み、問題のある動作を識別可能であることを示す。また、生産工程へ導入する際の基本条件を示す。

A Trial on Quality Control for Industrial Products by Motion Capture of Workers

Nobuyoshi Sato[†] Shouichi Odashima[‡] Jun Suzuki[‡] Taiji Ishikawa[‡] Yoshitoshi Murata[†]

[†]Faculty of Software and Information Science, Iwate Prefectural University [‡]Iwate Plant, Kanto Auto Works, Ltd.

In quality control of industrial products, it is very important that not only qualities of materials and parts, design, but also a manufacturing work accords to instruction manuals for manufacturing process. Generally, most assembly process such as assembly line and cell production systems have processes in everywhere to confirm quality and work in former processes. However, there are some cases that are difficult to be confirmed in later processes. For example, to fix a part by some screws, it is desirable to drive in diagonal order little by little. However, it is not easy to detect in appearance in case of this desirable procedure is violated. Therefore, we are developing a system to improve quality of industrial products. This system deals manufacturing processes as context, and grasp manufacturing process, recognizes context by tracing motions of worker's arm/hand by using terrestrial magnetism sensors and accelerometers. In this paper, as first step, we show that violation of desirable motion is distinguishable by dividing manufacturing process as context into some fundamental motions, and tracing motions by each context. Also, we discuss on fundamental conditions to introduce the system in actual manufacturing process.

1. はじめに

工業製品の品質確保は、製造業者にとって利益や事業の継続を左右しかねない重要な問題である。

家電製品や自動車などの工業製品の品質問題は、設計、部品の品質、組み付け工程の各分野に分割される。アセンブル業者にとっては、部品は他の業者から仕入れるため、部品の納入検査、設計と組み立ての3つが品質保証の重要な要素となる。このため、製造現場での QC 活動を含めて作業ミスの低減努力は日々行われている。

組立工程での欠陥の発生は、人による標準的な作業手順からの逸脱と工作用ロボットの故障が主要な要因と考えられる。人手による作業においては、部品の付け忘れや誤った部品の取り付けといった人為的ミスを 100% 除去することは難しい。一般的にはこれらのミスは後工程で検出・修正するように工程が組まれているが、作業内容によっては目視で作業ミスを検出できないものもある。この例として、タイヤ・ホイールを取り付ける際のボルトの締め付け手順が挙げられる。複数のボルトを対角状に少しずつ順次締め付けていくのが正しい手順であるが、この手順を守らなくても外観上、区別できない。しかし、状況によっては、タイヤが外れるなどの重大な事故につながる可能性がある。

以上のことから、人為的なミスを減らすためには、作業員の動作がマニュアル通りとなっているかを検出すること

が非常に有効である。つまり、これから行う作業を識別し、各作業別に腕や指先の動きがマニュアルに則った時と同じであるかを検出できれば良いことになる。前者はどの部品を取ったかで識別可能である。続いて、腕などの動きが正常動作の時とそうでない時で違いを検出できれば良いことになる。ある部品を取る時のサインを出すシステムにおいては、間違いなく所定の部品を取っているかを含めて、動作が正常であるときとそうでない時の違いを検出する必要がある。

GPS を用いれば数センチ単位で人や物の動きをトレース可能であるが、工場などの建物内では GPS の衛星からの電波を受信できないため利用は難しい。屋内における即位として無線 LAN を用いた方法がここ数年研究されている[1][2]。これら研究では、複数の無線 LAN の親局からの信号強度や受信遅延時間を用いて無線 LAN 子局の位置を推定している。現状では数 m の誤差があるため、本研究の目的には利用できない。人の腕等に取り付けたものの位置の変化から人の動きをトレースする方法以外に、ビデオカメラを利用して作業員を常時撮影することにより動きをトレースする方法も考えられる。複数のカメラを用いて光学式のマーカをつけた人物のモーションキャプチャ[3]も行われている。マーカを使用しない例では仮想空間への適用を中心に、不審者の検出などの研究が進んでいる[4]。これらの方法は、一人の作業者に

対して複数のカメラが必要となり、コストの問題から本研究への適用は難しい。

その他に人の動きに伴う加速度の変化から動作を推定する方法も考案されており、腕の振りをを用いた個人認証[5]に適用されている。加速度は一瞬一瞬の変化であり、組み付け工程における作業員の連続的な動作を推定するには適していない。

本研究開発においては、地磁気センサと加速度センサを組み合わせることにより、人の動きに伴う方向の連続的な変化と特定の動きに伴う加速度の特徴的な変化から動作を推定できることを示す。工場内の組み立て作業を基に基本的な動作に分類し、コンテキストとした。各コンテキストを模した測定環境を用意し、地磁気と加速度それぞれに対して直交する3方向の変化を測定した。

本論文の構成は以下のとおりである。第2章では、コンテキストの分類、つまり組み付け工程における基本動作の分類と測定装置について述べる。続いて、各作業工程を模した測定環境とその実験結果について記す。第3章では、地磁気センサおよび加速度センサを作業トレースに応用する際に考慮すべきことを考察する。最後にまとめを行う。

2. 実験

工業製品の組立工程における作業動作から基本動作(コンテキスト)として、「部品の取り出し」、「部品の取り付け位置までの移動」、「部品の取り付け」の3つに分類した。更に部品の取り付けとしては、「はめ込み」、「ねじ込み」、「取り付け作業順序」の3つに分類した。

それぞれのコンテキストに対して、地磁気センサと加速度センサの直行する3軸方向の出力を測定した。実験には、アイチ・マイクロ・インテリジェント製の AMI601-CG を使用した(図1)。AMI601-CG は、地磁気センサ XYZ 3 軸、加速度センサ XYZ 3 軸とヨー、ピッチ、ロールの同時測定が可能である。X、Y、Z 各軸の方向も、図に2示す。これらのデータは、2.4GHz 帯の無線を通じて 25ms 毎に PC に送出される。

AMI601-CG はアモルファスワイヤーの磁気インピーダンス(Magneto-Impedance, MI)変化を利用している。MI センサは近年、ポータブル GPS や GPS 内蔵携帯電話の電子コンパスとして利用されている。加速度も、ばねを通して固定された磁石の動きを、地磁気測定用とは別の MI センサにより測定・計算している。

AMI601-CG を、右利きの作業員を想定し、右手首の甲に図2に示すように取り付け、以下にのべる実験を行った。

2.1 部品の取り出し

図2に示すような部品棚を用いて、正しい部品を取り出したか否かを識別する実験をおこなった。部品棚は3つの区画に仕切られ、それぞれ異なる部品が格納されていると想定する。取り出すべき部品はランプやディスプレイにより指示され、部品を取り出す直前に確認ボタンを押すことにより、どの部品を取り、その後どのような組み付け作業を行うかというコンテキストを取得する。確認ボ

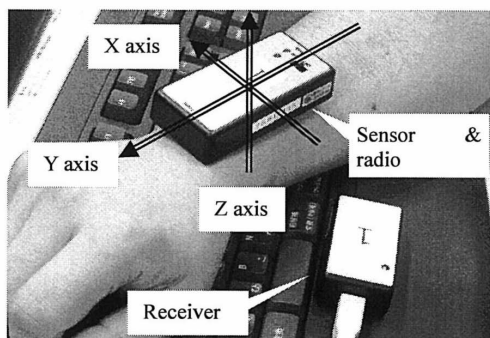


図1 AMI601-CG と作業員への取り付け方法

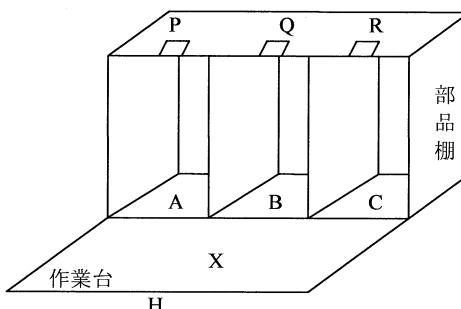


図2 部品箱からの部品取り出しの実験環境

タンと部品が格納されている棚の位置は対応している。ここでは、部品 A、B、C に対応する確認ボタンはそれぞれ P、Q、R である。部品 A、B、C の置き場所は部品箱入り口から 15cm 奥である。H は計測開始時と終了時に右手を置くホームポジション、X は部品を組み立てのために置く場所である。X は部品箱の入り口から 15cm 手前であり、H は X のさらに 15cm 手前である。B、Q が作業員の体の中心線の延長上にある。また、棚の高さは 30cm である。

作業手順は以下の通りである。

1. H に右手を移動し、静止したところから計測開始する。
2. 右手を使い Q のボタンを押す
3. 右手を使い、以下の動作のうちから 1 種類を行う
 - (a) A の部品を取り出す。(誤った動作)
 - (b) B の部品を取り出す。(正しい動作)
 - (c) C の部品を取り出す。(誤った動作)
 - (d) 部品を取り出さない。部品を取り出すために、部品箱に手を入れることもしない。したがって、2 でボタンを押した後、直ちに4の動作を行う。(誤った動作)
4. 右手を使い X に部品をおく。
5. H に右手を動かし、静止したところで計測終了。

前出の作業項目(a)-(d)に対する作業を10回ずつ行なった。各動作における地磁気測定例を図3aから図3dに示す。正しい動作の場合と左右の部品を誤って取り出す場合では、X 軸と Y 軸に特徴的な違いが現れている。ま

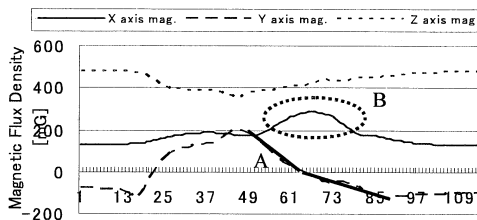


図 3a 正しく部品を取る動作(地磁気)

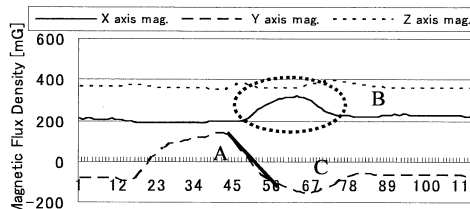


図 3b 左隣の部品を誤って取る動作(地磁気)

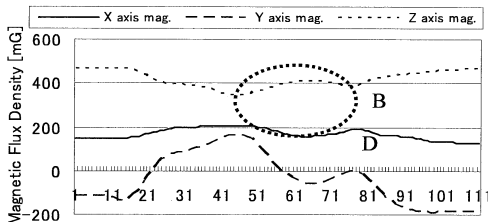


図 3c 右隣の部品を誤って取る動作(地磁気)

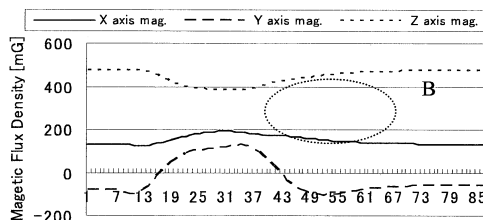


図 3d ボタンを押すのみで部品を取らない場合(地磁気)

ず、正しい動作と左の部品を取る動作では、Y 軸のピーク後の傾きが大きく違う(図 3a、図 3b 中の A の部分)。また、正しい動作と右の部品を取る動作、部品を取らない動作では、X 軸に山がない点異なる(図 3a、図 3c、図 3d 中の B の部分)。また、左隣の部品をとる場合では Y 軸はピークから下がった後にアンダーシュート(図 3b の C の部分)、右隣の部品をとる場合では Y 軸はピーク後もうひとつ山を作っている(図 3c の D の部分)。これらの特徴を用いると、正しい動作と誤った動作の識別は可能である。

図 4a と図 4b に加速度センサの出力を示す。正しい動作では部品棚の奥に手を入れることにより、Y 軸に山ができていく(図 4a の A の部分)。部品ととらない場合には山が小さい(図 4b の A の部分)。よって、加速度センサに

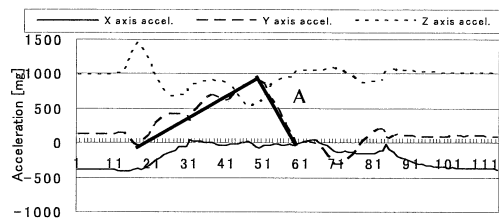


図 4a 正しく部品を取る動作(加速度)

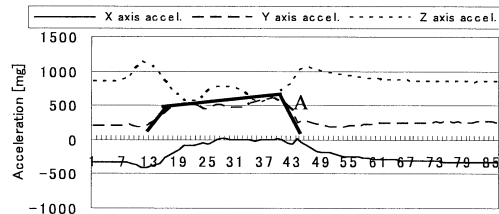


図 4b ボタンを押すのみで部品を取らない場合(加速度)

よっても、部品を取り出したかどうかの判定が可能と考えられる。

以上から、部品棚からの取り出しを地磁気と加速度によりトレースすると、ボタンを押した後に正しい部品を取り出したかを検証することが可能である。特に地磁気センサが有効であるが、必要に応じて両者を組み合わせると、より効果的に動作が正しいかどうかの判定ができる。

2.2 部品の取り付け位置

部品を正しい位置に取り付けたかどうかの検証を想定し、図 5 に示すような実験環境で右腕の動きをトレースした。P においてある部品を取り付け位置 A、B、C、D、E に運び、取り付け。B、C、D、E の間隔は 20cm、A は B、C、D、E の中心にある。P は C、E を結ぶ線から 30cm 離れている。H は計測を開始、終了する際に手を置くホームポジションである。H は D、E を結ぶ線から 15cm 手前である。作業員は H の下側に、H が正面になるように着座する。

計測の手順は以下のとおりである。

1. H に右手を移動し、静止したところから計測を開始。
2. 右手を使い P の部品をとる

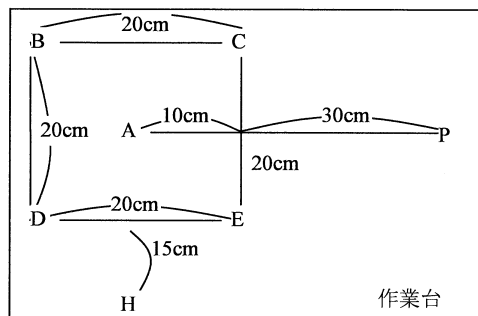


図 5 部品の取り付け位置の実験環境

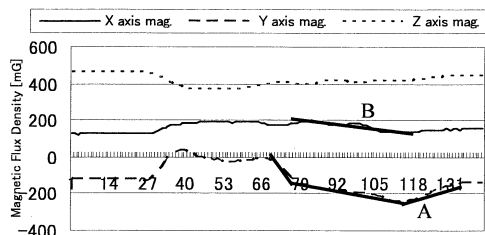


図 6a 正しい場所(点 A)に部品をおいた場合(地磁気)

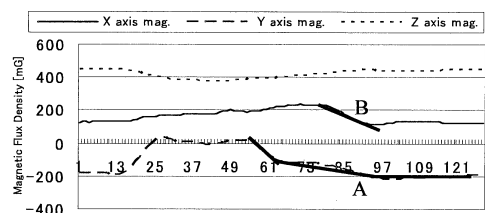


図 6b 誤った場所(点 B、左上)に部品をおいた場合(地磁気)

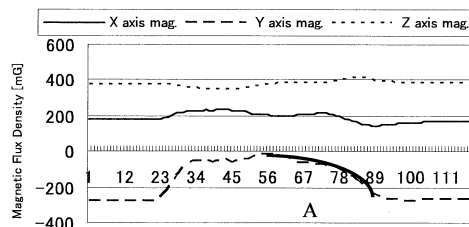


図 6c 誤った場所(点 C、右上)に部品をおいた場合(地磁気)

3. 右手で持った部品を A、B、C、D、E のいずれかの場所に部品をおく。A が正しい場所、他は間違った場所となる。
 4. 右手を H に戻し、静止したところで計測終了
- 上記の手順 3 における A-D のそれぞれに部品を運ぶ動作を 10 回ずつ行った。図 6a から図 6e に地磁気センサの出力例を示す。Y 軸に特徴的な違いが現れている。正しい場所においた場合では、Y 軸の値が谷を作ってから初期の値に戻るのに対し(図 6a の A の部分)、左上の点 B に置いた場合では初期の値まで下がり、谷を作らない(図 6b の A の部分)。右上の点 C に置いた場合では、一気に初期の値まで下がり、谷を作らない(図 6c の A の部分)。同様に、右上、右下の点 D、E においた場合も正しい場所においた場合とは異なった値の動きを示す(図 6d、図 6e の A の部分)。また、ピークを記録した後下がる時、C においた場合では上に凸、D においた場合では下に凸という違いもある。これらは、Y 軸の値を 2 階微分すればよい。

以上から、地磁気センサの Y 軸の値が、部品を取った後、ほぼ一気に下がる際の値の動きを、初期値まで戻るか、谷を作るか、上に凸となるか下に凸となるかを監視すれば、どの場所に置いたかを特定できることが分かる。

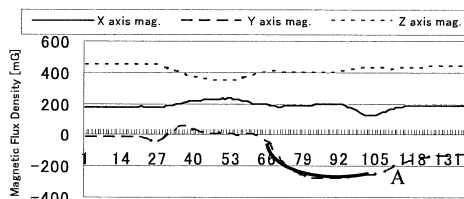


図 6d 誤った場所(点 D、左下)に部品をおいた場合(地磁気)

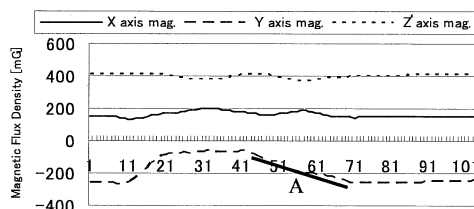


図 6e 誤った場所(点 E、右下)に部品をおいた場合(地磁気)

2.3 部品のはめ込みとねじ込み

部品の取り付け方法として、大きく部品のはめ込み、ねじ込みの2つを想定し、両方の方法で閉められるビンのふたを用いて実験を行った。本実験で使用するビンのふたは、上から強めの力で押して閉める、右に45度ひねってねじ込む、の二つの手順で閉めることができる。ピンは図 5 の A の位置に固定されている。また、ふたは同じく P の位置に置かれている。ピンの高さは 14cm、断面は 1 辺 6.5cm の正方形である。

計測の手順は以下のとおりである。

1. H に右手を移動し、静止したところから計測を開始。
 2. 右手を使い P の位置においたふたを取る
 3. 右手で持ったふたを A の位置のビンの上に運ぶ。
 4. ふたを上から押しではめ込む、45 度ねじってねじ込む、ビンの上に置くだけの動作のうちどれかをする。
 5. H に右手を戻し、静止したところで計測終了。
- 前出の動作 4 における 3 つの場合について、測定した結果を図 7a から図 7d に示す。ふたをはめ込む場合には、はめ込むときのショックによる特徴的なスパイクが加速度センサの Z 軸に出ている(図 7b の A の部分)。部品がはめ込まれたかどうかの判定は、このスパイクの検知によって可能である。地磁気センサの出力は、各軸ともビンのふたをおくだけの場合と大きな差がなかった(図 7a と図 7d 参照)。一方、ビンのふたを 45 度ひねってはめ込む動作の場合には、腕をひねることによると思われる地磁気の変化が Y 軸、X 軸に出ている。特に Y 軸が初期値から 200mG 近く上昇する大きな山を作るため(図 7c の B の部分)、容易に判断できる。

2.4 部品取り付け時の順序

次に、部品取り付け時の取り付け作業の順序の違いを検出できるかどうかの実験を図 5 に示す実験環境で行った。これは、たとえばホイールナットを締めこむときに、正

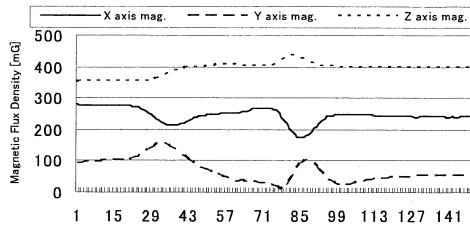


図 7a ビンのふたをはめ込む場合(地磁気)

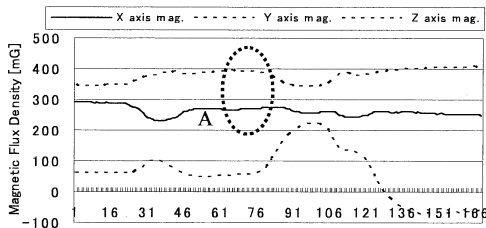


図 7b ビンのふたをはめ込む場合(加速度)

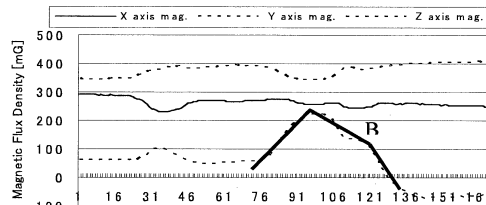


図 7c ビンのふたを 45 度ひねってねじ込む場合(地磁気)

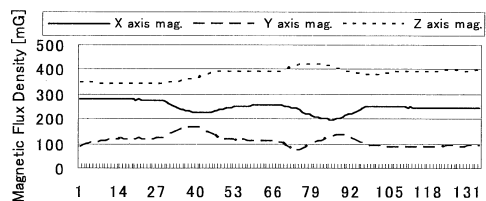


図 7d ビンのふたを置くだけではめ込まない場合(地磁気)

しく対角線状に締めるか、多角形の辺に沿って締めるかの違いを検出することを想定している。計測の手順は以下のとおりである。

- 図 5 の H に右手を移動後、静止して計測開始。
- 以下の正しい動作と正しくない動作の一方をする。
 - H→C→D→E→B の順で手を動かす(対角に手を動かす)。
 - H→C→E→D→B の順で手を動かす(辺に沿って手を動かす)。
- H に右手を戻し、静止したところで計測終了。

前出の 2 における(a)と(b)それぞれに対する地磁気センサによる測定結果を、図 8a と図 8b に示す。対角に手を動かした場合は、Y 軸がピークに達した後、谷に落ち込むときの変化率がかなり大きい(図 8a の A の部分)の対

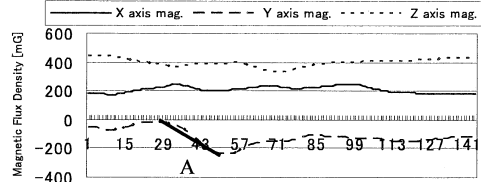


図 8a 対角に手を動かした場合(地磁気)

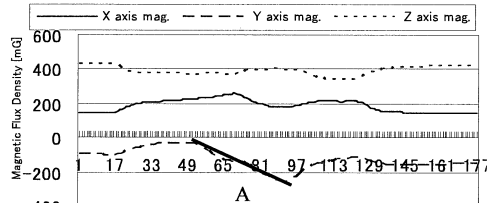


図 8b 辺に沿って手を動かした場合(地磁気)

し、変に沿って手を動かした場合は小さい変化率で落ち込んでいる(図 8b の A の部分)。

2.5 実験のまとめ

以上に示した工場内での基本的な動作のトレースの結果から、地磁気センサと加速度センサをコンテキストに応じて使い分けや組み合わせを行うことにより、正しい動作と誤った動作の識別が可能であることを示した。多くの場合、地磁気センサの 1 つあるいは 2 つの軸に特徴的な値の変化が見られる。また、加速度センサの値の変化を適宜組み合わせると、部品のはめ込みのような動作や、部品の取り出しのために棚に手を入れる動作などが容易に検出できる。

今後、上で述べたようなセンサ出力の特徴的な変化をコンピュータで検出するデータ処理方法を決める必要がある。これらの候補としては、

- ・変化率を 1 階微分により求める
- ・2階微分により、値の変化が上に凸か下に凸かしらべる
- ・最大値、最小値などを用いる

などである。今回の実験で得られた結果をみると、図 7a などの一部のグラフで細かいノイズが広く載っている。これらのノイズを除去するためには、数点の移動平均を使うと良いと思われるが、これらについても検証が必要である。

3. 工場導入に関する考察

3.1 工作機械等による地磁気センサへの影響

工場内では、工作機械や移動台車等にモータが用いられており、電磁的なノイズによる地磁気センサへの影響が懸念されたが、関東自動車工業株式会社岩手工場において、大型の工作用ロボットや作業員の腕に地磁気センサを取り付け、地磁気の変化を測定した。工作用ロボットにおける測定例を図 9 に示す。これを見る限り、磁気ノイズといえるようなものは検出されなかった。モータなどによる磁気ノイズが乗る場合、XYZ の 3 軸に同ジタ

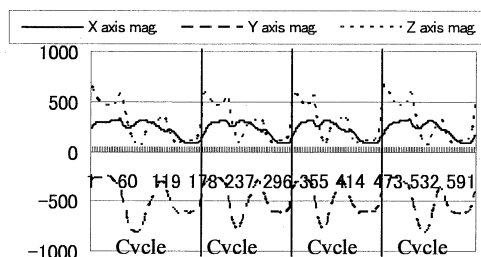


図 9 大型の回転アーム式ロボットにセンサを取り付けたときの地磁気の変化

イメージで乗ると考えられるが、図 9 を見る限りでは乗っていない。実際、文具に利用されているフェライト磁石の場合、数 cm 程度まで近づけないと今回の地磁気センサにはその影響は見られなかった。

3.2 検出条件

地磁気センサは X, Y, Z と直交する 3 軸に対する磁力を測定している。磁束は磁南極から磁北極に向かっていくことから、磁北に対する角度を測定していると言ってもよい。これは、回転運動は容易に検知できるが、平行移動の検知には適さないことを意味する。移動距離が長く、組付工程と無関係な動きが含まれる場合には、正常作業とそれ以外を識別することが困難となる。また、向きの変化を測定しているものであり、位置を測定している訳ではないので、毎回の作業動作が同一である必要がある。

以上を総合すると、地磁気センサによる作業員の腕の動作のトレースは、以下の条件を満たす場合に利用しやすいと考えられる。

- 作業内容が比較的単純であり、同じ作業の繰り返しとなる場合。毎回動作が異なる作業には適さない。
- センサを取り付けた部位が作業以外で動くことが少ない。作業員が着座しているほうが望ましい。作業員が作業中に何メートルも移動する場合には移動中と組付け作業とを切り分ける必要がある。
- センサを取り付けた部位が主に回転移動する場合。平行移動する場合は、地磁気センサは本質的に方角を測定しているので不向きである。
- 周囲に大電流を流すような大きな磁場の乱れを発生させる機器がない。但し、毎回同じ磁気の変化が加わる場合は、それも含めて変化とみなせるので、問題ないと考えられる。

この条件を満たす典型的な例として、セル生産方式や流れ作業方式による電子機器の組み立てや、小型の電子機器の梱包などの作業がある。

加速度センサに関しては、部品をはめ込むなど、加速度が大きく変化する特徴的な動きを検出する場面には非常に有効である。コンテキストによって地磁気センサと加速度センサを組み合わせることに特徴量を抽出するのが良いと考えられる。

4. まとめ

本論文では、工業製品の品質保証を目的とする、コンテキストウェアネスによる品質保証システムを開発する準備段階として、工場内での基本動作のいくつかを模した動作のトレースを、地磁気センサと加速度センサにより試み、誤った動作と正しい動作の識別が可能であることを示した。開発中の本システムを導入することにより、ミスや故意による部品の取り違いや取り付けミスなど、工業製品の生産現場における不良品発生を防止することができる。製造現場での不良品の発生は、生産効率を低下させるだけではなく、仮に不良品が検知されずに出荷されてしまうと、社会的・経済的に多大なコストが発生するので、本論文に基づく作業トレース技術の経済効果は非常に大きいといえる。

今後の課題として、以下のことがあげられる。3.6 節で述べたように、実際に作業員の動作が標準的な手順どおりであるかどうかを判断するためのセンサ出力の具体的な計算処理をつめる必要がある。本論文では、得られたデータの特徴と考えられる計算手法を述べるのみにとどまった。動作の種類や、標準的な動作で得られる地磁気センサや加速度センサの波形から、複数の計算手法を組み合わせて使うことも考えられる。今回は、作業動作が毎回同じである工程に対する作業トレースについて言及した。毎回、作業員の動きの異なるものについては、手の位置の変化を推定する必要がある。この課題に対しては、超音波ビーコンを用いた位置検出手法等を含めて、適用可能を検討する必要がある。今後は、生産工程への導入に向け、システム化を検討する。

参考文献

- [1] P. Bahl, V.N. Padmanabhan, "RADER: An In-Building RF-based User Location and Tracking System", Proc. of IEEE INFOCOM 2000, pp.775-784. (2000)
- [2] T. Kitasuka, T. Nakanishi, A. Fukuda, "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)
- [3] S. Yonemoto, A. Matsumoto, D. Arita, R. Taniguchi, "A Real-time Motion Capture system with Multiple Camera Fusion", Proc. of International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP) . pp.600-605. (1999)
- [4] M.M. Trivedi, K.S. Huang, I. Mikić, "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)
- [5] M. Ohta, E. Namikata, S. Ishihara, T. Mizuno, "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)