

小型センサノードを用いた作業支援システムにおける センサデータからの動作抽出手法

笹間 亮平[†] 柳沢 豊^{††} 岡留 剛^{††} 服部 正嗣^{††}

[†] 京都大学大学院 情報学研究科

^{††} 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所

E-mail: †sasama@sys.i.kyoto-u.ac.jp, ††{takashi_hattori, yutaka}@cslab.kecl.ntt.co.jp,
houmi@idea.brl.ntt.co.jp

あらまし 本研究は、人間の製品の組立作業を支援するシステムの構築を目指している。人間の作業を支援するためには、システムが作業中の人間の動作を自動的に認識できる必要がある。これを実現する方法として筆者らは、作業者と組立部品に取り付けたセンサノードから取得したデータを分析し、作業の過程を自動的に抽出する方法を提案する。本稿では、センサノードを用いたデータ収集システムの詳細と、収集したセンサデータを分析して、作業を構成する個々の動作である「作用素」を抽出する方法について述べる。
キーワード コンテキストウェア、センシング、作業分析、作業支援

Workflow Analysis Using Sensor Data for Assembly Support System

Ryohei SASAMA[†], Yutaka YANAGISAWA^{††},
Takeshi OKADOME^{††}, and Takashi HATTORI^{††}

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University

^{††} NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation

E-mail: †sasama@sys.i.kyoto-u.ac.jp, ††{takashi_hattori, yutaka}@cslab.kecl.ntt.co.jp,
houmi@idea.brl.ntt.co.jp

Abstract Our goal is development of the system to support assembly work processes. For supporting human work processes, it is necessary to recognize automatically the motions included in a process. Therefore, in this paper, we proposed a method to extract such human motions, which we call 'elemental physical effects,' from a work process using sensor data obtained by sensor nodes, which attached to workers and assembly parts, for supporting assembly work. We described our proposed system to obtain sensor data using many small wireless sensor nodes, moreover we mentioned experiments to evaluate our method in several assembly work processes.

Key words context-aware, sensing, work flow analysis, work support

1. はじめに

近年、人間のさまざまな作業の効率化を目指す workflow management と呼ばれる研究が盛んに行われている [1] ~ [4]。この研究の特徴は、作業者と作業に関わる物に取り付けたセンサノードから取得したセンサデータを利用して、作業過程を促進あるいは自動化する。例えば Lampe らのシステム [1] は、飛行機工場の工具に RFID

を取り付け、センシングした位置データを用いて工具の管理を支援する。このように、現在 workflow management 研究においてさまざま作業支援が実現されている。

こうした workflow management 研究を製品の組立作業の効率化に応用するという試みがなされている。例えば Antifakos らは、接触センサと LED を用いた家具の組立作業を支援するシステムを構築している [2]。このシステムは組立部品に取り付けられた接触センサを用いて、

家具がどこまで組み立てられたかという情報を取得する。そして、作業者が次に組み立てるべき部品を組立部品に取り付けられた LED を使って指示することで、大幅に作業時間を短縮することに成功した。しかしこのシステムは、組立手順の誤りという作業の効率化を妨げる要因の 1 つを解決したに留まっている。例えばこのシステムは、片手のみで組立作業をする傾向のある作業者に、もう片方の手を有効に利用するようにアドバイスすることができない。このような作業員個別の特性も作業の改善の対象とするためには、作業員の細かな動作も取得し、作業を詳細に分析する必要がある。しかし、組立作業の中の「どのような動作をセンサで取得すれば作業の分析ができるか」という取得すべき動作の種類について、これまで議論が少なかった。

このため、筆者らはまず作業を構成する最小構成要素である「作用素」という動作セットを定義した。そしてこの作用素をセンサを使って抽出し、作業の過程を作用素のシーケンスとして表現する方法を提案した [5]。さらにこの方法を用いることで、家具を組み立てる作業を詳細に分析し、効率が作用素の数や時間などを調べることで評価できることを示した [6]。しかし、作業過程を自動的に作用素へ分類する具体的な手法については、実現していなかった。そこで本研究では、センサデータから作用素へ自動的に分類する具体的な方法を提案し、この手法の評価実験を行う。本手法は、作業員と作業に関わる物に取り付けたセンサノードから取得できる加速度・方位・照度の変化を利用して、作用素へ分類を行う。

本手法で用いる作用素は、作業中の人間の細かな動作を表現でき、さらに、作用素を用いた分類の結果からさまざまな作業を分析可能でなければならない。そこで、作業過程の冗長性を除去し生産性の向上を目指す Industry Engineering (IE) [8] の研究成果を利用する。IE の特徴は、作業過程を基本動作の組み合わせで表現することである。代表的な IE の手法の一つに、Gilbreth により約 100 年前に提案された Therblig 分析法 [9] がある。この分析法では、作業員の動作を 17 の基本動作 (Therblig) へ分類した結果を利用して、分析する。作用素を選定では、この Therblig に加えて、道具の機能を表現する Work Functions (WF) [10] も基にしている。このため、作用素を用いて作業員の細かな動作だけでなく道具や部品の状態も表現でき、さまざまな作業過程を記述できる。

本研究では、作用素のセンシングのために、筆者らが開発したセンサノードを用いた [7]。このセンサノードは加速度・方位・照度・温度をセンシングすることができる。このセンサノードは小型軽量であり、作業員に取り付けても負担を掛けることなく動作を取得することができる。取得したセンサデータは無線でサーバに収集された後、データベースに蓄えられる。

さらに評価実験では、組立作業において出現する作用素のうち作業の分析に必要な作用素を、提案した分類手法を用いてどの程度の精度で検出できるか調べた。この

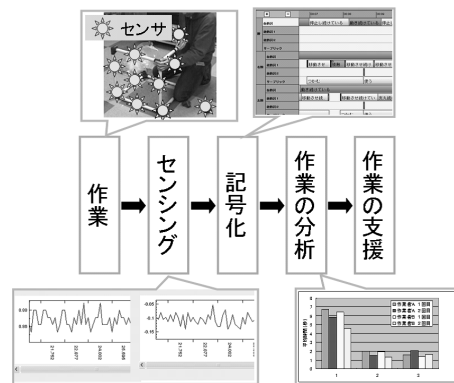


図 1 作業支援のためのアプローチ

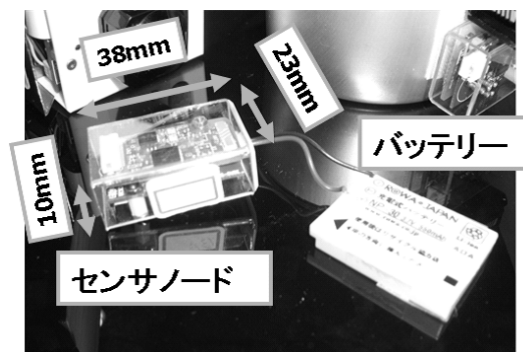


図 2 センサノードの外形

実験の結果、本分類手法を使うことで、作業の分析に必要な作用素を少なくとも 88% 以上の精度でセンシングできることを確認した。

2. アプローチ

さまざまな作業を支援するシステムを構築するために、図 1 に示すアプローチを取る。このアプローチでは、まずセンサノードを用いて作業過程をセンシングする。次に、作業を解析するためには、センシングしたセンサデータを人間が解釈できるような記号に変換する必要がある。本研究ではこの変換処理を記号化と呼ぶ。そして記号化した結果を用いて作業を分析し、作業の効率を推定する。作業効率を推定することができれば、「作業効率が低下したら休憩を促す」、「作業効率の良い熟練者と作業効率の悪い初心者の作業方法の違いを初心者に指摘する」といった作業支援が可能となる。

2.1 センシング

本研究では、位置情報だけでなく作業員の細かな動作も取得するために、加速度 (3 軸)・方位 (2 軸)・照度・温度をセンシングできるセンサノードを複数用いた。利用するセンサノードの外形を図 2 に示す。センサノードのサイズは $10[mm] \times 23[mm] \times 38[mm]$ であり、バッテリーと合わせての重さは $28[g]$ と小型軽量である。このサイズは、作業員にセンサノードとバッテリーを取り付けても、作業員の負担にはならない程度である。センサノードは、バッテリーを使用することで 11 時間連続で稼

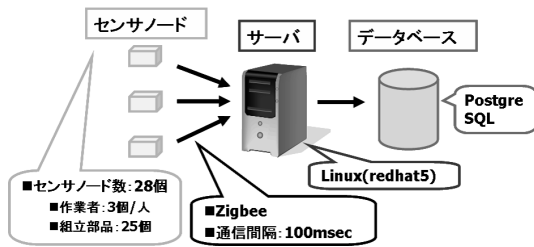
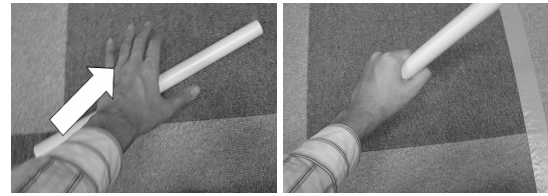


図 3 センサデータの収集方法

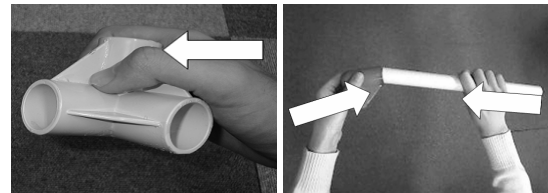
- ・ 状態:動き続けている 自身が位置を変化している
- ・ 状態:停止し続けている 自身が位置を変化していない、何にも作用していない
- ・ 状態:接触し続けている 対象に接している
 - 状態:押し続けている 対象に圧力を掛けている
 - 状態:支え続けている 対象を支えている
- ・ 状態:移動させ続けている 対象の位置を変化させている
- ・ 状態の変化:接触する 対象に接する
 - 状態の変化:圧する 対象に圧力を掛ける
- ・ 状態の変化:離す 対象を離す
- ・ 状態の変化:接触させる 複数の対象を接触させる
- ・ 状態の変化:分離させる 対象を複数に分ける

図 4 選定した作用素



(a) 接触する

(b) 支え続けている



(c) 支え続けているかつ移動させ続けている

(d) 接触させる

図 5 作用素の例

動可能である。

図 3 に示すように、取得したセンサデータは無線で Linux サーバに収集された後、データベースに蓄えられる。本研究での検証実験において、最大で 28 個（作業員 3 名、部品 25 個）のセンサーノードを使用した。センサーノードと Linux サーバとの無線通信には、Zigbee を利用した。センサデータの通信間隔は 100[msec] であった。サーバに集められたセンサデータは、PostgreSQL に蓄えられる。

2.2 記号化

作業過程をセンシングしたデータを記号化するためには、作業員の細かな動作を表現できる専用の語彙セットが必要である。この語彙セットを得るための基本的な方針として、センシング可能でかつ作業を十分に記述できる語彙セットを用意する。このため、人の動作を表現する Therblig と道具の機能を表現する Work Functions (WF)[10] を語彙セットの基とした。なぜなら Therblig と WF は長年使用されている単語セットであり、さまざまな作業を記述することができるためである。Therblig と WF を基とした語彙セットの選定方法については、すでに文献 [5] で報告しているためここでは説明を割愛する。

図 4 に選定した作用素とその作用素の種類及び単語の説明を示す。提案する作用素には、包括関係と種類がある。作用素は、状態を表すものと状態の変化を表すものの 2 種類に分類される。図 4 において、包含関係は箇条書きの中の「 “ ” 印の単語」が「 “ ” 印の単語」に対して下位である。

提案した作用素を用いることで、さまざまな作業過程を表現できる。11 の作用素のうち、特に組立作業に出現する動作の例をいくつか示す。図 5(a) は左手がパイプに

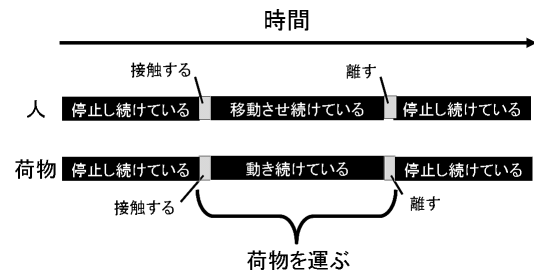


図 6 「荷物を運ぶ」を作用素で表現した例

「接触する」瞬間であり、図 5(b) は左手がパイプを「支え続けている」状態である。また、図 5(c) は右手がパイプを「支え続けている」と同時に「移動させ続けている」状態である。この例のように、作用素は同時に複数割り当てられることもある。図 5(d) は右手と左手がそれぞれパイプを「接触させている」状態を発生させている瞬間である。このような作用素を組み合わせることで、一般的な単語を表現できる。例えば、「荷物を運ぶ」という作業過程を作用素で表現すると図 6 のようになる。

2.3 作業の分析

さまざまな作業を支援するためには、記号化の結果を用いて作業を分析して作業効率を推定する必要がある。筆者らは文献 [6] において、作業効率を比較するために「同じ作業員が、同じタスクを繰り返し行ったケースの 1 回目と 2 回目」「違う作業員が、同じタスクを行ったケース」を対象として、作業員と作業に関わる物に対して記号化した。そして、これらの作業の効率を、観測された作用素の数・出現割合・平均時間を用いて分析した。この結果、作用素の観測される個数、継続の作用素の実施に要する時間の割合、継続の作用素の実施に要する平均時間を用いることで作業効率を推定できた。また、作用

素の中で特に「動き続けている」、「停止し続けている」、「分離させる」、「移動させ続けている」、「接触し続けている」という5つの作用素が、効率の良し悪しに直接影響を及ぼしていることがわかった。なお、作業の分析についての詳細は文献[6]を参照されたい。

3. センサデータの分類

2.3に示したように、作業の分析を目指す際、11の作用素の全てをセンシングする必要はない。

作用素は、動作の「主体」と動作の「対象」とり得る。例えば、作用素「接触する」の主体と対象は、手がパイプと接触する場合、手が主体でありパイプが対象となる。作用素には主体と対象が可換なものとは非可換なものがある。例えば、可換なものには「接触する」があり、非可換なものには「支え続けている」がある。11の作用素はセンシングの方法によって、次の3種類に分けることができる。

自身および対象の動きに関わる作用素「動き続けている、停止し続けている、移動させ続けている」

自身と対象の接触に関わる作用素「接触し続けている、支え続けている、接触する、放す、接触させる、分離させる」

自身と対象の圧力に関わる作用素「押し続けている、押す」

ここで、「動き」、「接触」、「圧力」に関わる作用素は、それぞれ加速度センサ、近接センサ、圧センサを使ってセンシングできる。

2.3の議論により、作用素「支え続けている」と「圧力」に関わる作用素「押し続けている、押す」は作業効率を評価する上で重要ではない。よって、提案した11の作用素の内、「動き」と「接触」に関わる8つの作用素（動き続けている、停止し続けている、移動させ続けている、接触し続けている、接触する、放す、接触させる、分離させる）についてセンシングを試みる。本研究では、センサノードより取得したセンサデータを記号化する処理を、センサデータから記号への分類と呼ぶ。本節では、この8つの作用素をセンサデータから作用素へ分類する具体的な手法を説明する。

本研究でセンシングを目指す8つの作用素のうち4つは、作業過程からセンサノードを用いて取得したセンサデータの加速度・方位・照度を用いてセンシング可能である。「動き」に関わる作用素の中の「動き続けている、停止し続けている」は、センサデータの加速度の変化から分類する。「接触」に関わる作用素「接触する、放す」の分類については、物体と物体が接触する場合と人と物体が接触する場合で、それぞれセンサデータの照度と方位を利用する。本研究では作業分析の対象として組立作業を想定しているため、物体と物体の接触は組立部品同士の接触であり、人と物体の接触は作業者と組立部品の接触である。

これらの4つの作用素の分類結果を利用することで、

センサデータから直接分類できない残りの4つの作用素へ分類することができる。例えば、作用素「移動させ続けている」への分類は、作業者の手と物体に作用素「動き続けている」が割り当てられていれば、作業者の手に対して作用素「移動させ続けている」を割り当てる。

3.1 動き

まず、センサデータの加速度の変化を用いて作用素「動き続けている、停止し続けている」へ分類する方法について述べる。対象に取り付けられたセンサノードの加速度の変化がある閾値以上かどうかで、対象が「動いている又は停止している」を推定する。以下に具体的な手順を述べる。時刻 $t(t = 0, \dots, n)$ における、ある対象の x, y, z 軸方向の加速度を

$$\mathbf{a}[t] = \begin{bmatrix} a_x[t] \\ a_y[t] \\ a_z[t] \end{bmatrix}$$

とする。センサデータを平滑化するため a の N_a 項移動平均を求めると、

$$a_a[t] = \frac{\sum_{\tau=t-N_a-1}^t a[\tau]}{N_a} \quad (1)$$

となる。加速度の1時刻前との差 $a_d[t]$ は

$$a_d[t] = a_a[t] - a_a[t-1]$$

で求められるので、時刻 t の加速度の変化の大きさ $a_n[t]$ は、

$$a_n[t] = \sqrt{a_{dx}[t]^2 + a_{dy}[t]^2 + a_{dz}[t]^2} \quad (2)$$

対象が「動いている又は停止している」と判定するための閾値を T_a で与え、 $a_n[t] \geq T_a$ ならば「動き続けている」とし、 $a_n[t] < T_a$ ならば「停止し続けている」とする。

3.2 組立部品同士の接触

次に、作用素「接触する、放す」の分類法のうち、センサデータの照度を利用して、組立部品同士の接触をセンシングする場合について述べる。組立部品の接触部分に埋め込まれたセンサノードの照度を利用すれば、組立部品同士が接触しているかどうかを推定することができる。すなわち、接触部分の照度がある閾値 T_l 未満に低下すれば、組立部品同士の接触によって光が遮断されたと推定できるため、作用素「接触する」を割り当てる。逆に、照度がある閾値以上に上昇すれば、組立部品同士が分離されたと推定できるため、作用素「放す」を割り当てる。具体的には、以下の手順で作用素「接触する、放す」への分類を行う。時刻 $t(t = 0, \dots, n)$ におけるある組立部品内部に取り付けたセンサノードの照度を $l[t]$ とする。センサデータを平滑化するため、式(1)と同様に a の N_l 項移動平均を $l_a[t]$ 求める。ある組立部品が「接触している又は分離している」の閾値を T_l で与えたとき、 $l_a[t] \geq T_l$ から $l_a[t] < T_l$ へ変化した場合はその

瞬間を作用素「接触する」とする．逆に， $l_a[t] < T_l$ から $l_a[t] \geq T_l$ へ変化した場合はその瞬間を作用素「放す」とする．

3.3 作業者と組立部品の接触

続いて作用素「接触する，放す」の分類法のうち，センサデータの方位を利用して，人と物体の接触をセンシングする場合について述べる．作業者が組立部品を「掴む，離す」動作をセンサデータから検出するために，作業者が組立部品を「掴む，離す」直前に作業者に「組立部品を一定時間回転させる」作業の妨げにならない程度のジェスチャーを行ってもらおう．センサデータの方位の変化がある閾値以上であれば，ジェスチャーを行っていると推定して作用素「接触する，放す」を交互に割り当てる．分類の具体的な手順は以下である．時刻 $t(t = 0, \dots, n)$ におけるある対象の x, y 軸の方位を，

$$d[t] = \begin{bmatrix} d_x[t] \\ d_y[t] \end{bmatrix}$$

とする．方位の1時刻前との差 $d_d[t]$ は $d[t] - d[t-1]$ であるので，式(2)と同様にして方位の変化の大きさ $d_n[t]$ を求める．ジェスチャーを行う瞬間を切り出すため，式(1)と同様にして $d_n[t]$ の N_d 項移動平均を求める．作業者がジェスチャーを行っているかないかの閾値を T_d で与えたとき， $d_n[t] \geq T_d$ ならば作業者がジェスチャーを行っていると推定し，作用素「接触する，放す」を交互に割り当てる．

3.4 その他の分類法

以上の4つの作用素の分類の結果を利用して，残りの4つの作用素「移動させ続けている，接触し続けている，接触させる，分離させる」へ分類することが可能である．例えば図6のように，人と荷物に対して同時に作用素「動き続けている」が割り当てられていれば，人に対して作用素「移動させ続けている」を割り当てればよい．作用素「接触し続けている」は，作用素「接触する」が割り当てられた瞬間から，作用素「放す」が割り当てられた瞬間までに割り当てればよい．作用素「接触させる，分離させる」は，作業者の複数の組立部品に対する動作である．組立部品同士に対して作用素「接触する」が割り当てられた瞬間に，その組立部品と作業者の手に作用素「接触し続けている」が割り当てられている状態であれば，作業者の手に対して作用素「接触させる」を割り当てる．同様に，組立部品同士に作用素「放す」が割り当てられた瞬間に，その組立部品と作業者の手に作用素「接触し続けている」が割り当てられている状態であれば，作業者の手に対して作用素「分離させる」を割り当てる．

4. センサデータの分類実験

本節では，前節で提案した分類法を評価することを目的として，実際に作業過程からセンシングしたデータを作用素へ分類した実験について述べる．本実験において

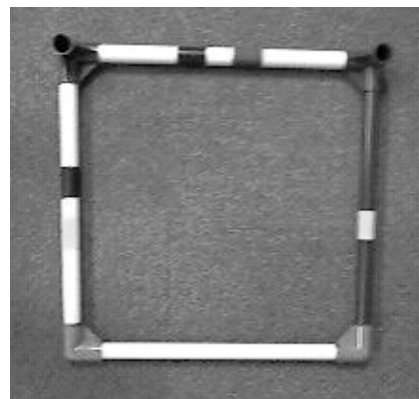
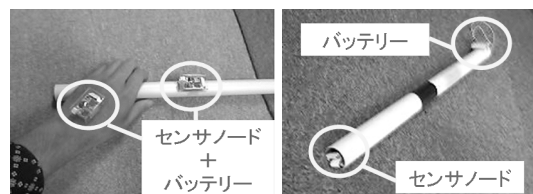


図7 組立てられた四角形



(a) 測定対象の表面

(b) 測定対象の内部

図8 センサノードの取り付け箇所

分類の対象とする作業は，パイプとジョイントを組み立てる作業である．この作業過程からセンサノードによって取得したセンサデータの作用素への分類を試みた．センサデータを作用素へ分類した結果を可視化するために，Anvil[11]を利用した．Anvilは，Kippによって開発された動画像に対するアノテーションツールである．Anvilを用いることによって，作業を撮影した映像を参照しながら，XML形式でデータベース化された作用素への分類結果に，GUIを通してアクセスすることができる．

4.1 実験の内容

本実験の目的は，3.1で述べた「動き」，3.2の「組立部品同士の接触」，および3.3の「作業者と組立部品の接触」に対応する動作をそれぞれセンシングする．このうち「動き」と「作業者と組立部品の接触」についての分類の実験は，パイプとジョイントで簡単な形を組み立てる作業を対象にした．「組立部品同士の接触」についての分類の実験は，パイプとジョイントの接触と分離を繰り返す作業を対象にした．分類の実験は下記のとおり2種類行った．

実験1 この実験は，組立作業中の「動き」と「作業者と組立部品の接触」を加速度と方位を用いてセンシングして作用素へ分類する．組立作業に使用する部品としては，エレクターとして一般に販売されている長さ30cmのパイプ4本，二足ジョイント2個，三足ジョイント2個を用いた．作業者は，これらの部品を用いて図7に示す四角形を組み立てる．図8(a)のように作業者と各部品にセンサノードを取り付けることで，四角形を組み立て

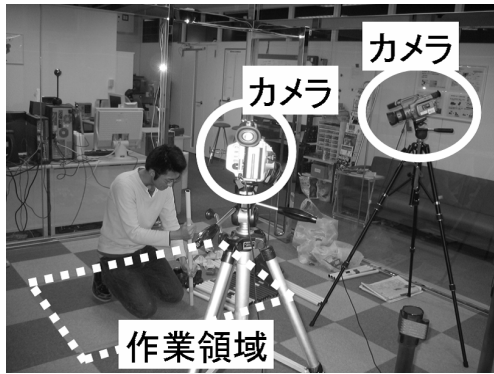


図 9 実験の様子

		+	-	01:26	01:27	01:28
左腕	自動詞	動き続...	停止し続け...	動き続けている		停止し続け...
	他動詞 1					
緑パイプ	自動詞			動き続けている		停止し続け...
	他動詞 1					
白黄黒パイプ	自動詞			動き続けている		停止し続け...
	他動詞 1					
白黒パイプ	自動詞			動き続けている		停止し続け...
	他動詞 1					

図 10 分類の結果

際に表示される動作をセンシングした。

実験 2 この実験では、パイプとジョイントの接触と分離を繰り返す作業の「組立部品同士の接触」を照度を用いてセンシングして作用素へ分類する。この分類を行うために、組立部品内部にセンサーノードの埋め込み、組立部品の接触部分の照度を取得した。センサーノードの取り付け箇所は、図 8(b) のようにパイプの内部である。パイプとジョイントの接触と分離を繰り返す作業で使用する部品としては、実験 1 で使用した長さ 30cm のパイプ 1 本、二足ジョイント 1 個である。実験 2 において作業者は、このパイプとジョイントの接触と分離を 5 回繰り返す。本実験における分類の処理は、パイプの内部に取り付けた 1 つのセンサーノードより取得したセンサデータに対して行った。

4.2 実験の設定と結果

作業過程の記録については、図 9 のように 2 台のカメラを配置して撮影した。タスク開始時に、組立部品を予め作業領域内に置いておき、作業者は作業領域内で作業を行うようにすることで、作業者の手元が常に映るようした。

実験 1 の作用素「動き続けている、停止し続けている」への分類を行った結果を図 10 に示す。図 10 の分類結果の表示には、ANVIL を利用している。実験 1 において、作業者は四角形の組み立てを 30 秒程度で行った。一方実験 2 では、作業者はパイプとジョイントの接触と分離を 5 回繰り返す作業を 1, 2 分程度で行った。

実験 1 の「動き」については、1 人の作業者に 1 回四

角形を組み立てる作業の際の、作業者の右手と左手に加え、パイプ 4 本とジョイント 4 個に取り付けた計 10 個のセンサーノードより取得したセンサデータに対して、分類を試みた。また、実験 1 の「作業者と組立部品の接触」については、2 人の作業者に 1 回四角形を組み立てる作業の際の、8 つの組立部品のうちパイプ 2 本とジョイント 1 個に取り付けた計 3 個のセンサーノードより取得したセンサデータに対して分類を行った。一方実験 2 の「組立部品同士の接触」については、3 人の作業者がパイプとジョイントの接触と分離を 5 回繰り返す作業の際の、パイプに取り付けた 1 個のセンサーノードより取得したセンサデータに対して分類を行った。

5. 分類法の評価

本節では、前節で述べた実験結果を利用した、提案する分類法の評価について述べる。この評価は、同じ作業に対する作用素への分類を「人手によって行った場合」と「本分類法を用いて行った場合」の結果を比較する。比較の際には、人手による分類を正解として、本分類法を用いた分類の正解率を調べた。

5.1 評価

前節では、パイプとジョイントで簡単な形を組み立てる作業を対象として「動き」と「作業者と組立部品の接触」について作用素へ分類する実験（実験 1）と、パイプとジョイントの接触と分離を繰り返す作業を対象として「組立部品同士の接触」について分類する実験（実験 2）を説明した。以下、それぞれの実験の分類結果を使って分類手法を評価する。

5.1.1 実験 1

実験 1 における「動き」については、センサデータの加速度を利用して、作用素「動き続けている、停止し続けている」へ分類した。この分類の結果、2 種類の作用素「動き続けている、停止し続けている」が合計で 68 回センシングされた。この本分類手法による分類結果を、人手による分類結果を正解として比較すると、作業者が行っていない動作を誤まって検出したケースが 6 回、行った動作を誤って検出できなかったケースが 2 回あった。この結果より「動き」については、センサデータから作用素への分類の正答率は $60/68 = 88.2\%$ となる。なお、この分類においてパラメータの値は、実験的に求めた結果、 $N_a = 10, T_a = 0.9$ であった。閾値 T_a を大きくしすぎると、行った動作を誤って検出できないケースが増え、逆に T_a を小さくしすぎると、行っていない動作を誤まって検出するケースが増える。

なお「動き」についての分類では、1 秒以下の動きがあったとしても停止しているものとするルールを用いた。この短時間の動きを無視するルールを使った場合でも作業の分析が可能であることは、すでに [6] で確認している。

実験 1 における「作業者と組立部品の接触」については、センサデータの方位の変化を利用することで作用素「接触する、放す」へ分類した。この分類の結果、2 種類

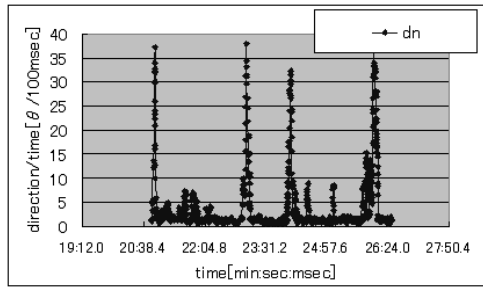


図 11 方位ベクトルの時間変化の大きさ

表 1 分類の正答率

動き	接触（作業者と組立部品）	接触（組立部品同士）
88.2%	94.1%	93.8%

の作用素「接触する，放す」が合計で 17 回センシングされた．人手による分類結果を正解として，この分類結果を見ると，作業者が行った動作を誤って検出できなかったケースが 1 回あった．よって「作業者と組立部品の接触」における，センサデータから作用素への分類の正答率は $16/17 = 94.1\%$ となった．この分類でのパラメータの値は，実験的に求めた結果， $N_d = 10, T_d = 24$ であった．

図 11 に，パイプに取り付けたセンサノードの方位から計算される d_n を示す． d_n は 3.3 で説明した，方位ベクトルの時間変化の大きさである．図 11 より，閾値 T_d が 24 であるため， d_n が 24 以上の時刻（20 分 54 秒，23 分 3 秒，24 分 5 秒，26 分 4 秒）に作用素「接触する，放す」を交互に分類できる．

5.1.2 実験 2

実験 2 における「組立部品同士の接触」については，センサデータの方位の変化を利用して作用素「接触する，放す」へ分類した．この分類の結果，2 種類の作用素「接触する，放す」が合計で 32 回センシングされた．人手による分類結果を正解として，この分類結果を見ると，作業者が行っていない動作を誤まって検出したケースが 2 回あった．よって「組立部品同士の接触」については，センサデータから作用素への分類の正答率は $30/32 = 93.8\%$ であった．誤認識は，パイプとジョイントが接触しているにも関わらず，パイプの向きの変化によりパイプ内に取り付けたセンサノードが照明の光を直接検出して，照度の値が一時的に高くなったためであった．この分類においてパラメータの値は，実験的に求めた結果， $N_i = 10, T_i = 4$ であった．

5.2 まとめ

提案した分類手法の「動き，作業者と組立部品の接触，部品同士の接触組立」の正答率を表 1 にまとめる．表 1 より，作業の効率を測るためにセンシングする必要のある 4 つの作用素（動き続けている，停止し続けている，接触する，放す）は，88% 以上という高い精度でセンシング可能であることが確認できる．この結果を利用することで，センサノードを用いた自動的な作業の分析が可

能となると考えられる．

6. おわりに

本研究では，センサデータを作用素へ自動的に分類する具体的な方法を提案し，この手法の評価実験を行った．本分類手法は，作業者と作業に関わる物に取り付けたセンサノードから取得できる加速度・方位・照度の変化を見ることで，作用素へ分類を目指す．評価実験では，組立作業において出現する作用素のうち作業の分析に必要な作用素を，提案した分類手法を用いることでどの程度正確に検出できるか調べた．実験の結果，本分類手法を用いることで，作業の分析に必要な 4 つの作用素を少なくとも 88% 以上という高い精度でセンシングできることを確認した．

謝 辞

本研究を推進するにあたり，ご指導いただきました片井修教授（京都大学大学院 情報学研究所），下原勝憲教授（同志社大学大学院 工学研究科），NTT コミュニケーション科学基礎研究所協創情報研究部の皆様に感謝の意を表します．

文 献

- [1] Lampe, M., Strassner, M., and Fleisch, E.: A ubiquitous computing environment for aircraft maintenance, 2004 ACM Symposium on Applied Computing Proceedings, 14–17, pp1586–1592, 2004.
- [2] Antifakos, S., Michahelles F., and Schiele B.: Towards Situation-Aware Affordances: An Experimental Study, In Proc. of the Intl. Conf. on Pervasive Computing, 2004.
- [3] Beigl, M., Gellersen, H.W., and Schmidt, A.: MediaCups: Experience with Design and Use of Computer-Augmented Everyday Objects, Computer Networks, Vol. 35, No. 4, Elsevier, pp 401–409, 2001.
- [4] 安藤 英幸, 広野 康平, 大和 裕幸: マルチエージェントによるチーム航行支援, In Proc. of the 10th Workshop on Multi-Agent and Cooperative Computation (MACC2001), 2001
- [5] 笹間 亮平, 服部 正嗣, 柳沢 豊, 岡留 剛: 作業過程をセンシングするための作用素に基づくアノテーション実験, 情報研報 Vol.2006, No.14, pp157–162, 2006.
- [6] 笹間 亮平, 服部 正嗣, 柳沢 豊, 岡留 剛: 作業効率化のためのセンサデータに基づくアノテーション手法の検討, 情報処理学会関西支部 支部大会 講演論文集, pp143–146, 2006.
- [7] Okadome, T., Hattori, T., Hiramatsu, K., and Yanagisawa, Y.: A Real-World Event Search System in Sensor Network Environments, In Proc. of the 7th Intl. Conf. on Mobile Data Management (MDM2006), 2006.
- [8] 藤田彰久: IE の基礎, 健常社, 1978.
- [9] 日本モダブツ協会 (編): モダブツ法実践マニュアル, 技報堂出版, 1995.
- [10] Mukhopadhyaya, A.K.: Value Engineering Concepts, Techniques and Applications, A division of Sage Publications, 2003.
- [11] Kipp, M.: Gesture Generation by Imitation - From Human Behavior to Computer Character Animation, Boca Raton, Florida, Dissertation.com, 2004.