

(財) 港湾空港建設技術サービスセンター研究開発助成事業

建設現場における先端情報技術を活用した

生産性管理データ収集・分析システムの構築に関する研究

報告書

平成 22 年 4 月

高知工科大学社会システム工学教室

教授 草柳俊二

講師 五艘隆志

目次

1. はじめに	1
2. 先行研究の整理	2
2. 1 作業員の位置情報を取得するシステムの構築（先行研究①）	2
(1) 我が国の建設産業における生産性管理データの問題	2
(2) 労務生産性管理データの収集・分析システムの構築方針	2
(3) RFID を用いた生産性管理データの収集・分析システムの構築	3
(4) 生産性向上を目的とした分析を行うために必要な作業動作の区分と定義設定	4
(5) 作業員の位置情報と加速度情報の組み合わせによる作業構成要素区分判定の概念	5
2. 2 作業員の位置情報と加速度情報から生産性管理データの収集・分析を行うシステムの構築（先行研究②）	5
(1) 作業員の動作加速度情報に基づく振動パターンの抽出と生産性区分の判別	6
(2) 位置情報と加速度情報の組み合わせによる生産性管理データの収集・分析システムの構築と建設現場における実証実験	7
2. 3 先行研究に対する本研究の位置づけ	8
3. 生産性管理データ収集・分析システムの構築	9
3. 1 ZigBee を用いた位置情報取得システムの構築	9
(1) ZigBee の概要	9
(2) 本研究で用いた ZigBee 装置の概要	10
(3) ZigBee 装置による位置データ取得実験	12
3. 2 建設現場における稼働確認	17
(1) 第 1 回稼働確認	17
(2) 第 2 回稼働確認	19
3. 3 生産性区分判別基準プロトタイプの構築	21
(1) 生産性区分 “3. Delay” の抽出と詳細分類	22
(2) 生産性区分 “1. Direct Work” 及び “2. Support” の抽出と詳細分類	23
3. 4 建設現場におけるデータ取得実験と生産性区分判別基準プロトタイプの実用性検証	26
(1) データ取得実験の概要	26
(2) 取得された位置データの精度分析	30
(3) 生産性区分判別基準プロトタイプの実用性検証	32
4. おわりに	36

1. はじめに

本研究は、先端情報技術を用い、建設プロジェクトの生産性管理データ（工事歩掛）を自動的に収集・分析するシステムを構築することを目的とするものである。

建設プロジェクトにおける生産性管理データは、建設プロジェクトにおける品質、コスト、そして時間の総合管理の基盤であり、そのデータの収集・分析作業は、建設プロジェクトの遂行において極めて重要な意味を持っている。しかし、我が国の建設プロジェクトにおける生産性管理データの収集・分析は、未だ、現場の技術者達が個人データとして収集されたものを活用している状況にあり、信頼性においては高いものとは言い難い。国土交通省等の各発注機関が積算に用いている標準歩掛等も同様な精度のものといつてよい。

昨今、生産性管理データの収集・分析に関する必要性認識が薄れつつある。理由は“市場単価”を基にした積算の拡大が挙げられる。“市場単価”を基にした積算方法は主に建築プロジェクトで用いられてきた。土木構造物の工事でも、建設現場で把握した生産性管理データを基に各工事単価を算出するといった積算方法に変わり、“市場単価”を基盤とした積算方法が主流となってきている。しかしながら、土木構造物の工事はそのつど施工条件が大きく異なり、精度の高い施工計画を行い、適正な工事単価の算出が必要となる。また、実証に基づく設計変更管理、生産性の向上活動などといった、本来の建設プロジェクトのマネジメント機能を考えると生産性管理データの収集・分析機能は必須条件となってくる。

生産性管理データの収集・分析は、労働者、建設機械、そして建設材料の動向を一定の精度をもって把握し、蓄積することが基本となる。本研究の達成目標は、無線情報技術を用い、労働者の位置と動向をリアルタイムで把握し、労働者の生産性データを自動的に収集・分析するシステムの構築である。

この技術の確立によって、現在の属人的なデータ収集・分析レベルより科学的、精度と信頼性の高いデータ収集分析が可能となる。

この研究は、日本建設情報総合センター（JACIC）の研究助成事業として 2003 年と 2005 年に高知工科大学が行った「先端情報技術を活用した高精度生産性管理データの収集・分析技術に関する研究¹⁾」（以降、「先行研究①」と記す）および「建設現場における高度情報処理技術（IT）を活用した生産性分析システムに関する研究に関する研究²⁾」（以降、「先行研究②」と記す）が基盤となっている。両先行研究では、高度情報処理技術を用いて実際の工事現場で作業している労働者の位置情報を収集する技術（位置情報把握システム）および労働者の作業状況を収集する技術（作業情報把握システム）の構築を探索した。

本研究ではこれらのシステムの実用化に向け、両先行研究を実施した時点より発達した情報通信技術を導入すると同時に、データ収集と分析を自動化するシステムの構築を試みた。なお、現場実験の結果を踏まえた改造を迅速に行うため、端末の製作および操作ソフトウェアの開発に関しては専門企業である(株)トアックと共同研究体制を構築した。

2. 先行研究の整理

本章では先に述べた先行研究①および先行研究②の概要を述べ、先行研究に対する本研究の位置づけを示す。

2. 1 作業員の位置情報を取得するシステムの構築（先行研究①）

（1）我が国の建設産業における生産性管理データの問題

我が国の公共工事の積算に使用されている標準歩掛は、標準的な施工が行われた場合に必要となる技術者や作業員の人数等を表した労務量、鉄筋やコンクリート等資材の使用量、ブルドーザー、クレーン等建設機械の作業量等の諸量の“標準的な値”を表したものとして位置付けられている。

この標準歩掛は直接的に工事現場の作業状況を把握して見出したものではなく、実態は（財）社会経済生産性本部等から得たデータを用いて設定している。先行研究①では（財）社会経済生産性本部に対して生産性データの根拠についてヒアリングを行った。その結果、下記の算出量と投入量に基づいているとの回答を得た。

産出量：経済産業省の「生産・出荷・在庫指数確報」の生産指数および「第3次産業活動指数」の活動指数（建設業活動指数）

投入量：厚生労働省の毎月勤労統計調査の常用雇用指数および労働時間指数

なお、先行研究②の中でも土木工事標準歩掛の改正・制定を行っている（財）建設物価調査会に対して同様のヒアリングが行われた。同会では選定された100程度の現場に一ヶ月に一度調査員を派遣し、現場職員から「A作業を行うには、X人数を要している」などといった経験値の聞き取りを行い、データ解析に基づいて3年に1回の割合で標準歩掛の改正・制定が行われているということであった。

これらの内容から判断すると建設現場で取得した実質的データに基づき標準歩掛を設定しているとは考え難い。標準歩掛の信頼性を高めるには、科学的手法による実作業における生産性データの収集・分析が必要となってくる。

（2）労務生産性管理データの収集・分析システムの構築方針

工事遂行資源には労務、建設機械、材料の三要素があるが、そのうち“労務”に関する生産性管理データの収集・分析システムの構築を第一ステップとして探究することとした。なお、生産性管理データの収集・分析システムの構築方針は下記の通りとした。

- 1) 一単位の仕事量を終了するためにどれだけの労働力が使用されたかを測定し、これを生産管理データとする。“使用された労働量の適否”に関する分析は先行研究②以降での研究対象とした。
- 2) 生産管理データの収集・分析は職種別（土工、鳶、大工、鉄筋工等）、役職別（現場監督、職長、熟練工、一般工等、10種程度）のデータまでとし、個々の労働者の生産性分析は行なわない。
- 3) 労働者一人一人に超軽量の発信装置を装着させ、労働者の動きをリアルタイムで受信可能にする。収集した労務生産性データは、工事現場事務所に設置した設備に集積され、生産性分析としてアウトプットできるようにする。

建設プロジェクトでの生産性管理分析は、

- ① 個々の作業者が、
- ② 何時から何時まで、
- ③ どの作業(= 何処で)を、
- ④ どのような状況で

作業に従事したかを把握しなければならない。したがって、この 4 項目のデータを定量的かつ科学的に収集・分析する技術が必要となる。先行研究①では、第 1 項目から第 3 項目までのデータを収集・分析するシステムの構築を目指し、第 4 項目については、先行研究②で実施する事とした。

(3) RFID を用いた生産性管理データの収集・分析システムの構築

図-2.1 に先行研究①で用いた機材の写真、図-2.2 にこれらの機材を用いた生産性管理データ収集・分析システムの構成図を示す。

先行研究①では RFID (Radio Frequency Identification) を活用したシステム構築を行った。このシステムは作業員の位置情報の時刻歴データを収集するものであり、下記のような構成となっている。

- ・ アンテナとリーダーを現場の適切な位置に設置する
- ・ 作業員に無線タグ（電波を発信するアクティブタイプ）を装着する
- ・ 作業員に装着した無線タグから電波が発信され、リーダーが受信する
- ・ 無線タグとリーダーの接続情報は、リーダーに接続されたアンテナから無線 LAN を介して PC へ伝達される
- ・ PC 内部で無線タグとリーダーの接続状況を時刻歴データとして整理する



図-2.1 先行研究①で用いた機材とデータの流れ（矢印）

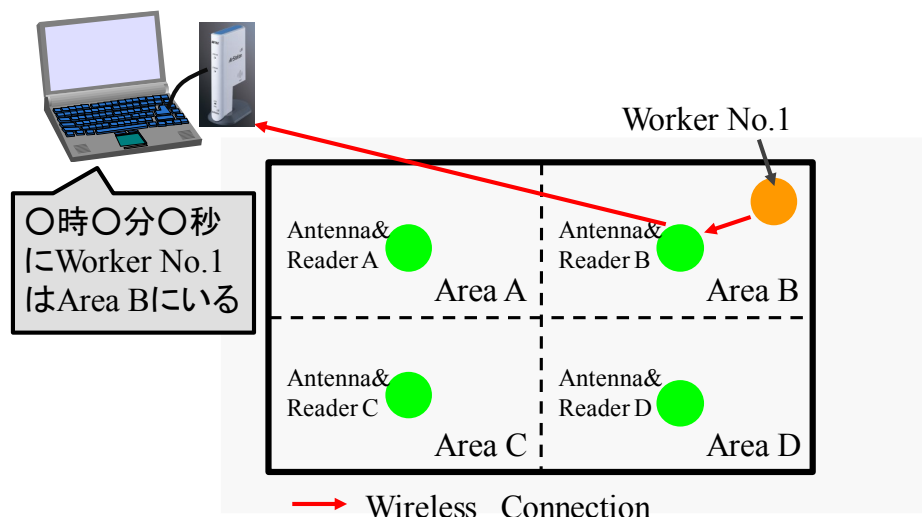


図-2.2 先行研究①における生産性管理データ収集・分析システムの構成図

こうして構築した生産性管理データ収集・分析システムの稼働実験をグラウンド等の自由空間および建設現場にて実施し、安定したデータ取得が可能であることが実証された。

(4) 生産性向上を目的とした分析を行うために必要な作業動作の区分と定義設定

上述(3)のシステムは、各作業員がどの作業にどの程度携わっていたかを把握し、生産性管理データとして蓄積するものである。これにより、建設現場で取得した実質的データに基づく投入労働量が把握できる。こうして得られた投入労働量を産出量で除することで実質的データに基づく作業歩掛の算出が可能となる。

一方で、本来の生産性管理データとは、余分な作用活動や生産性に寄与していない作業員の動向を排除したものであり、各作業員がどのような状況で当該作業に携わっていたかを検出するシステムを備えていなければならないこととなる。このシステムの構築は先行研究②および本研究の研究対象となるが、先行研究①においてはその準備段階の研究として生産性と作業員の動作の関連を分析するために必要となる作業動作(Activity)の区分と定義設定が試みられた。例えば、直接的に生産性に寄与する動作を行っていたか、作業箇所を変わるために移動していたか、材料や工具等を運んでいたか、図面や仕様書等を読む作業を行っていたか、作業を停止して休んでいたか等の、作業状況を予めカテゴライズしておくことである。表-2.1はその区分を示したものである。

表-2.1 作業動作の生産性分析区分と作業構成要素区分³⁾

生産性区分		作業構成要素区分	
①	Direct Work 直接生産動作	①	Direct Work(直接生産動作)
②	Support (補助支援動作)	②-1	Read Plans/Instruction(図面や指示の確認動作)
		②-2	Travel(作業員自身の移動動作)
		②-3	Transportation(資機材の運搬動作)
		②-4	Tools/Materials(工具/材料の準備動作)
③	Delay (作業遅延動作)	③-1	Late Start/Early Quit(作業開始遅延/切上終
		③-2	Waiting(待機)
		③-3	Personal(個人的理由での作業遅延)
		③-4	Break(定められた小休止・休憩)

（５）作業員の位置情報と加速度情報の組み合わせによる作業構成要素区分判定の概念

先行研究①において、RFID を用いて得られた作業員の位置情報と、加速度センサーを用いて得られた加速度情報の組み合わせから表-2.1 の作業構成要素区分を判定する方法の概念が提示された。図-2.3 はこの概念を図示したものである。不規則な振動は 1. Direct Work (直接生産動作)、規則的な振動は 2. 3 Travel (移動動作)、振幅の小さい振動は 7. Waiting あるいは 9. Break といった形になり、位置情報と組み合わせて作業構成要素区分の判定を行うことの可能性が提示された。次節に述べる先行研究②はこの概念に基づく生産性管理データの収集・分析システムの実現を探索するものとして行われたものである。

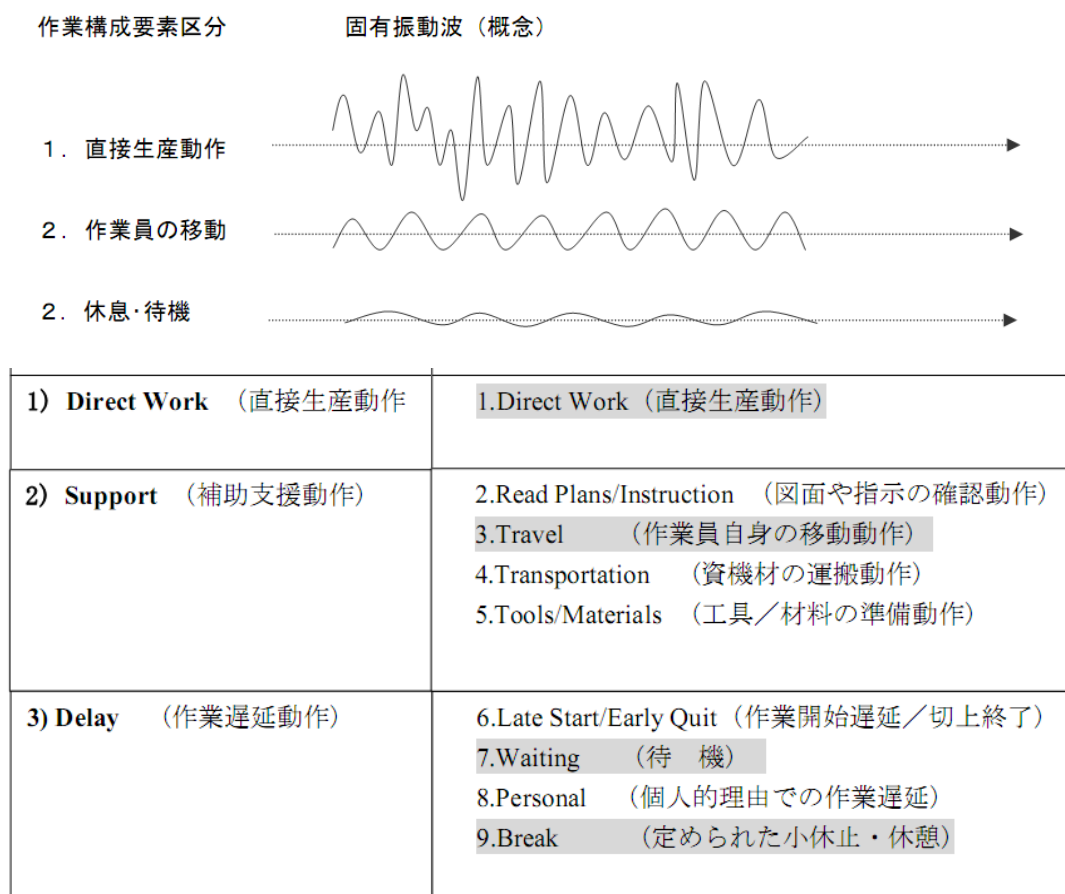


図-2.3 位置情報と、加速度情報の組み合わせから作業構成要素区分を判定する概念

2. 2 作業員の位置情報と加速度情報から生産性管理データの収集・分析を行うシステムの構築（先行研究②）

先行研究②では、労働者の生産効率を把握するために、生産性データだけではなく生産性向上活動に必要なデータの収集・分析を行うシステムの構築を試みた。方法論としては先行研究①で構築した各労働者の就労時間・位置情報把握システムと、労働者に装着した加速度センサーによって取得された加速度情報を組み合わせることとなる。これらのシステムにより表-2.1 に示した 9 つの作業構成要素区分の判別を行う。具体的には、動作によって発生する振動のパターン（図-2.3 上部に示した振動波形）を見出し、位置・時刻・作業員属性といった情報と組合せることによって、直接生産動作、補助支援動作、作業遅延動作といった生

産性区分の判定を試みた。

(1) 作業員の動作加速度情報に基づく振動パターンの抽出と生産性区分の判別

加速度センサーで得られた情報から労働者の作業を「直接生産動作」、「補助支援動作」、「作業遅延動作」に区分することが可能かどうかの検証実験を大学構内にて行った（図-2.4）。その結果、それぞれの動作区分における加速度波形には特徴が見られ、図-2.5 に示すような生産性区分の判別方法が示された。

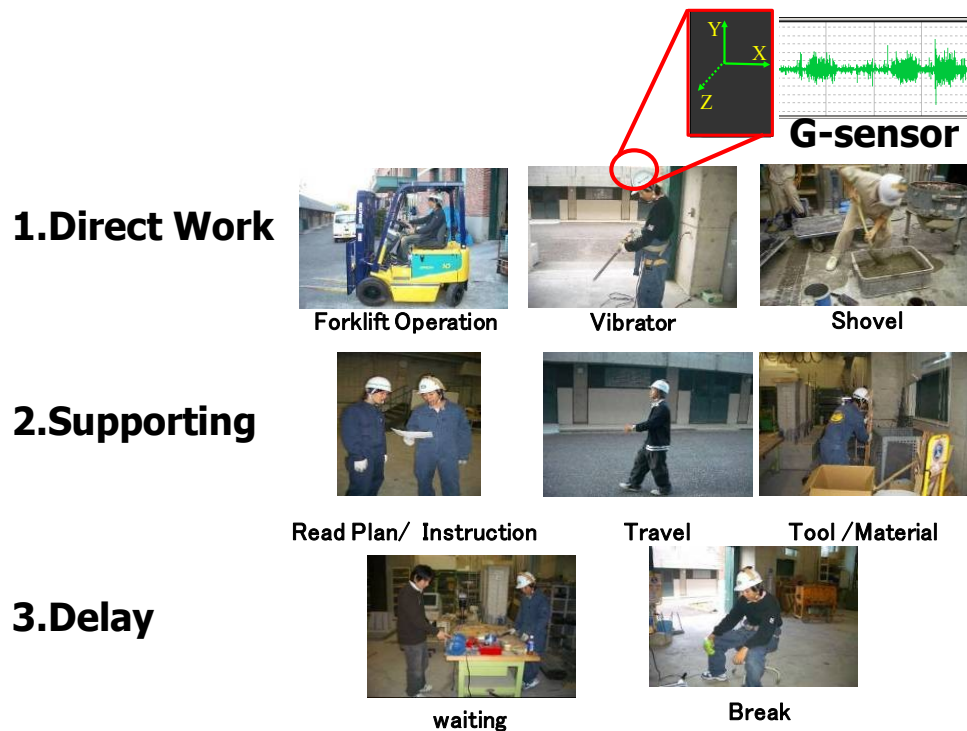


図-2.4 大学構内における各作業区分の振動パターン抽出実験

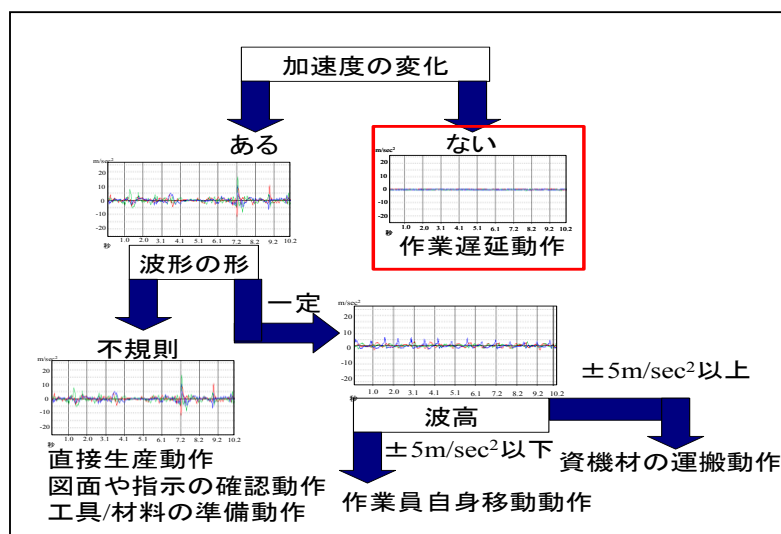


図-2.5 加速度情報に基づく生産性区分の判定方法

（２）位置情報と加速度情報の組み合わせによる生産性管理データの収集・分析システムの構築と建設現場における実証実験

さらに正確な作業構成要素区分の判別のため、位置情報と加速度情報の組み合わせによる生産性管理データの収集・分析システムの構築を試みた。その際、図-2.6 に示すような判定方法をプロトタイプとして設定し、建設現場における実証実験を行った。

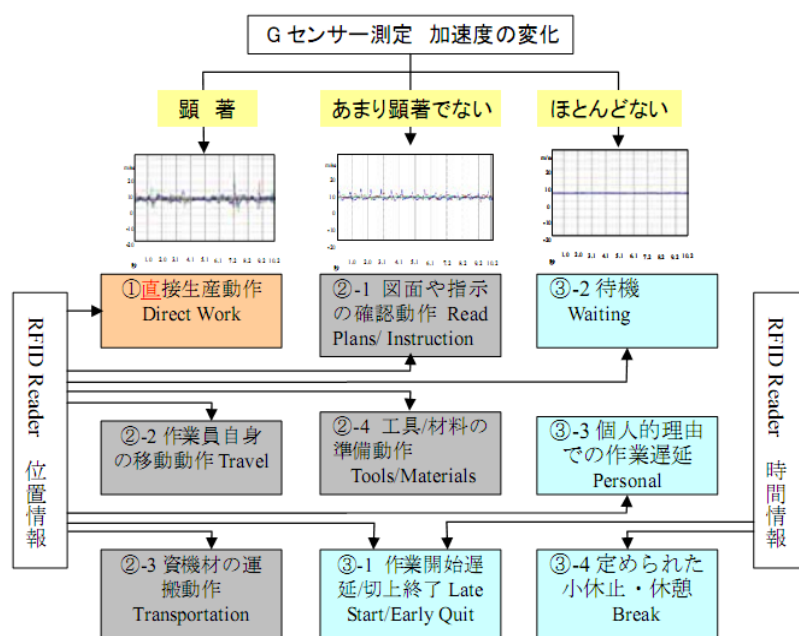


図-2.6 位置情報と、加速度情報の組み合わせによる作業構成要素区分の判定

実験の結果、位置情報、時間情報、加速度データによりある程度の作業構成要素区分の判定が可能であることが見出された。また、実験結果を踏まえた作業構成要素区分の判定方法として表-2.2 に示すような判定方法が提案された。

表-2.2 各種情報の組み合わせによる作業構成要素区分の判定方法

生産性区分	Gセンサー		Active RFID		
	振動パターン情報	加速度データ	位置情報	時間情報	職種・職位情報
1. Direct Work					
1. Direct Work					
2. Support					
2.1. Read Plans/ Instruction					
2.2. Travel					
2.3. Transportation					
2.4. Tools/Materials					
3. Delay					
3.1. Late Start/Early Quit					
3.2. Waiting					
3.3. Personal					
3.4. Break					

注）緑色セル：主判定情報

黄色セル：副判定情報

2. 3 先行研究に対する本研究の位置づけ

先行研究①および先行研究②の成果として、RFID により得られた作業員属性と位置情報、および加速度センサーから得られた加速度情報を統合し、各生産性区分に分類するシステムの全体構成は示されている。しかしながら現状のシステムには下記の課題が残されている。

- ・ 大きな RFID アンテナを建設現場に設置する必要がある
- ・ RFID と加速度センサーから得られたデータから生産性区分の分類を行う際に、人間による判断を必要とする個所が一部残されている

したがって、本研究では RFID に代わり、近年普及が進んできた無線通信規格である ZigBee を用いた位置情報取得システムの構築を行うこととした。さらに、建設現場におけるデータ収集・分析実験を行い、ZigBee 装置から得られた時間情報・位置情報・作業員属性と加速度センサーから得られた作業情報を時系列順に並べ、

- ① 個々の作業者が、
- ② 何時から何時まで、
- ③ どの作業(= 何処で)を、
- ④ どのような状況で

作業を行っていたのかを自動的に判断するシステムのプロトタイプ構築を試み、その実用性検証も行った。

3. 生産性管理データ収集・分析システムの構築

3. 1 ZigBee を用いた位置情報取得システムの構築

(1) ZigBee の概要⁴⁾

ZigBee とは、近距離無線ネットワークの世界標準規格の一つであり、信頼性のある低消費電力・低コストの無線通信として 2001 年から ZigBee Alliance にて研究が進められていたものである。蜂のようにジグザグと中継点を変更しつつ無線通信を行えることがその名前の由来となっている。端末装置の通信量を抑えることにより、アルカリ単 3 電池 2 本で数ヶ月から 2 年間の稼働という性能を目指した新世代の近距離無線通信規格である。ZigBee は PAN (Personal Area Network) に分類され、図-3.1 に示すような多様なネットワーク構成をサポートするのが特長である。

また、通信速度は 250Kbps と Bluetooth(1Mbps 程度)や UWB(Ultra Wide Band:数百 Mbps)等に比べてやや劣るものの、低消費電力である点が大きな特長であり、低コストでの導入が可能なため様々な用途での活用が期待されている。

本研究で構築する位置情報取得システムにおいて ZigBee を採用することとしたのは多様なネットワーク構成の構築が可能であることと省電力性能、および端末が小型であることによるものである。

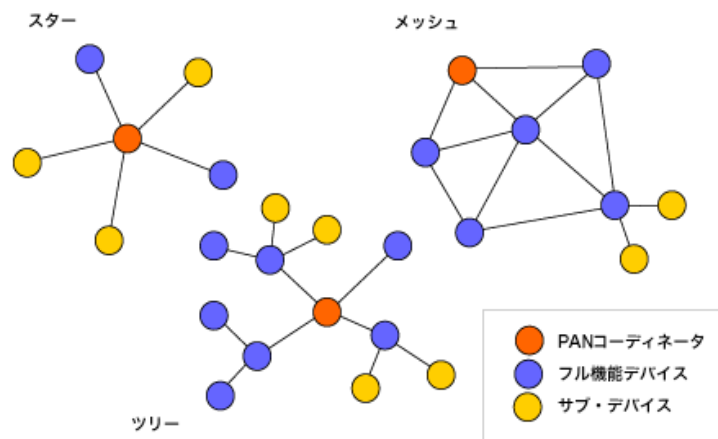


図-3.1 ZigBee 規格がサポートする多様なネットワーク構成

ZigBee ネットワークは以下 3 種類の端末から構成される。

- ① ZigBee Coordinator (ZC) : ネットワークの制御を行う端末機器。ネットワークに一つだけ存在する
- ② ZigBee Router (ZR) : データの中継機能を担う端末機器
- ③ ZigBee End Device (ZED) : データの中継機能を持たない端末機器

これらの端末は先に述べた通り多様なネットワークを構成できる。図-3.2 は Worker No. 1 に ZED を装着した場合の接続状況の例を示すものである。各端末は基本的に最も距離が近い端末（相互の通信電波強度の強い端末）と自動的に接続を行う。この機能を活用することに

よって、作業員の位置を把握することができる。一方、図-3.3 は障害物等があるために最短経路での通信ができない場合を示したものである。こういった場合は障害物を迂回する位置にある ZR が通信電波を自動的に中継するため、障害物が無い場合と同様に作業員の位置を把握することができる。

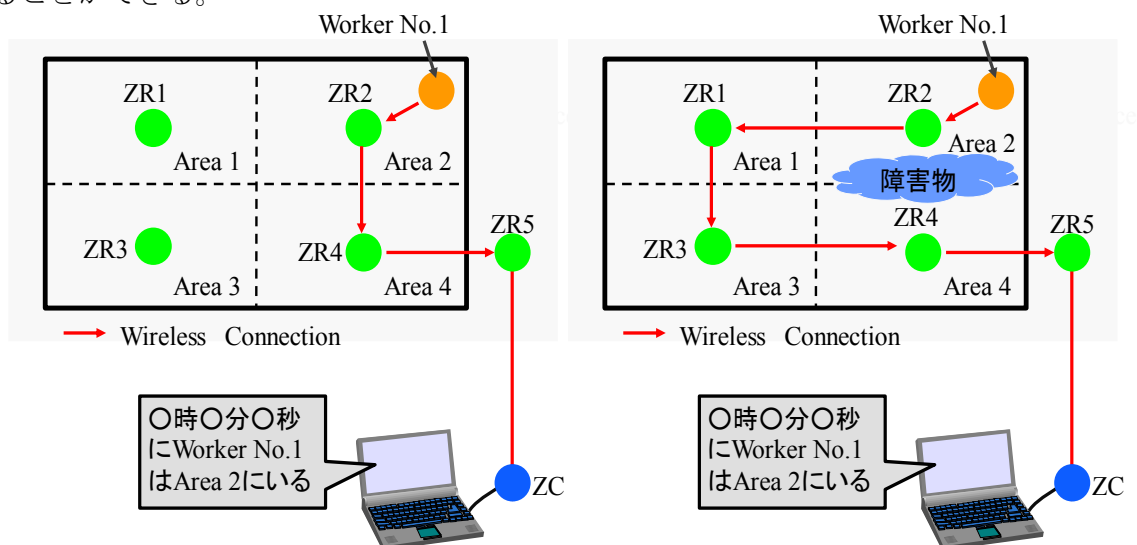


図-3.2 一般的な接続状況（近い端末と接続） 図-3.3 障害物がある場合の迂回中継接続

また、RFID リーダーとアクティブタグ間の最大通信距離が数十メートルであったのに対し、本研究で用いる ZigBee 端末の最大通信距離は約 100 メートルであることも有利な点である。広い工事現場においては中継装置である ZR を複数配置することでリレー通信を行い、データを収集することができる。

（２）本研究で用いた ZigBee 装置の概要

図-3.4 に本研究で用いた ZigBee 装置の外観を示す。これらは、ZigBee 通信用チップ、電源（単三電池 2 個）、アンテナ等、通信に必要な最小限の機器を内蔵した実験用端末である。今後、この実験用端末に加速度センサーや振動データの記憶メモリ等を組み込むことを想定し、内部空間に相当の余裕を持たせている。



図-3.4 本研究で用いた ZigBee 装置の外観（左から ZC、ZR、ZED）

内蔵した通信用モジュールは NEC 社製であり、仕様を図-3.5 に示す。

■評価実験用 ZigBee モジュール

・NEC エンジニアリング製 ZigBee モジュール

ZigBee準拠モジュール用評価キット
ZB24FM-Zスターターキット

型番	ZB24SK-Z2511-01
構成	ZB24FM-Z2501-01モジュール×10個 (ZC:1個, ZR:4個, ZED:5個)※ インターフェースボード×10台 フラットケーブル×10本 電池ケース×10個 CD-ROM×1枚 取扱説明書
電源入力	DC2.7V~3.4V入力 (インターフェースボードから入力)
本体寸法 (D×W×H)	モジュール:37mm×23mm×6mm インターフェースボード:96mm×78mm×19mm

※ ZC : ZigBee Coordinator ZR : ZigBee Router ZED : ZigBee End Device

■ネットワークポジ表示、通信試験、UART通信用
アプリケーションソフト付属
■国内電池流通取得済み
ZigBeeプラットフォーム認証取得済み
■インターフェースボードにA/Dポートがあるので、
センサ接続評価が容易
■動作確認しやすいようにパラメータを設定した
"評価モード"を用意
■インターフェースボードに温度センサを搭載
■インターフェースボードに4-20mAインターフェースを採用

使用例

・仕様

型番	ZB24FM-Z2501-01C(ZigBee Coordinator) ZB24FM-Z2501-01R(ZigBee Router) ZB24FM-Z2501-01E(ZigBee End Device)
通信周波数	2400MHz~2483.5MHz
通信方式	ZigBee仕様(2004年版)に準拠
送信方式	直接拡散方式
通信速度	250Kbps(※1)
送信出力	MAX 1mW
通信距離	見通し 約70m(※2)
インタフェース	・UARTシリアルI/F(Tx,D,RxD) ボーレート38.4Kbps/データ長8ビット/リチウム1ストップビット/1ワードフロー制御(変更可) ・汎用GPIO I/F(入力4Port, 出力4Port) ・A/D port(2Port)
電源仕様	・推奨動作電源電圧: DC 3.0V ・動作電源電圧範囲: DC 2.7V~3.4V
消費電流	・通信時: 送信時 Typ.48mA、受信時 Typ.51mA(電源電圧 3.0V時) ・待機時: 20μA以下(設定により変動します)
動作環境	・動作温度範囲: -15℃~+70℃ ・動作湿度範囲: 85%RH以下(結露なきこと)
質量	約5g
外形(D×W×H)	37mm×23mm×6mm(ケース外形寸法)
環境	RoHS指令に準拠

図-3.5 本研究で用いた ZigBee モジュールの仕様⁵⁾

ZigBee モジュールの基本的な接続構成を図-3.6 に示す。ZC は RS-232C ケーブルで直接 PC に接続し、ZR および ZED を制御する。さらに、ZC は ZR と同様のアンテナ機能を持っているため、ZED との直接接続も可能である。

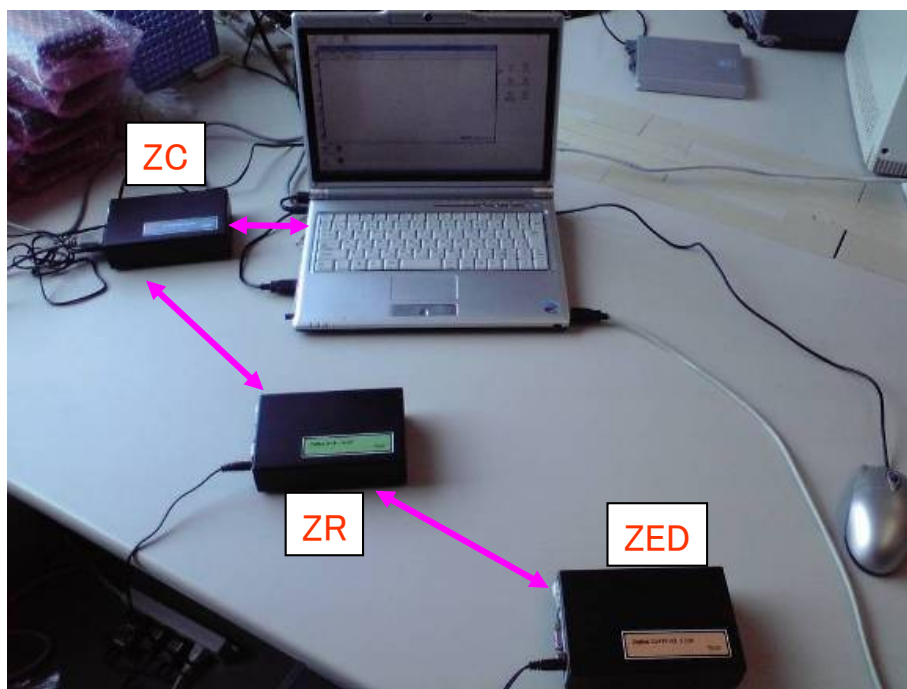


図-3.6 ZigBee モジュールの基本的な接続状況

また、これらの接続状況は、図-3.7 のように付属の管理ソフトウェア ZigBee Viewer から確認できる。

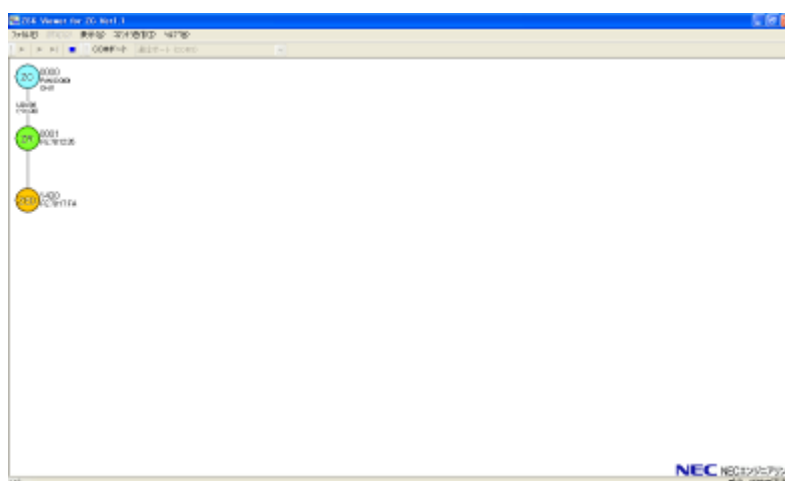


図-3.7 ZigBee Viewer による接続確認画面

(3) ZigBee 装置による位置データ取得実験

前述の機器を用いて実際に作業員の位置取得が可能かどうかを確認するため、室内での基本動作確認後に野外での動作確認実験を実施した。

1) 第1回稼働確認(最も近い端末間の接続成立確認)

a) 概要

実験日：平成21年7月18日(土)

天候：晴れ

目的：ZigBee 装置の動作確認実験

場所：高知工科大学北側グラウンド

計測時刻：8:00～12:00

b) 実験方法

本実験の主目的は、「ZED が最も近くにある ZR と接続するかどうか」を確認することである。図-3.8 に ZigBee 装置の配置状況を示す。使用した各端末は ZC1 個、ZR4 個、ZED4 個である。各端末にはシリアル番号がつけられていたため、その下 2 桁をとって各端末の識別を行うこととした。ZR は 35, 44, 47, 48, と呼称し ZED は F8, F9, FA, FB, と呼称することとした。ZC は 1 個のためそのまま ZC と呼称することとした。高知工科大学北側グラウンドにおいて一辺 5m の正形状にパイプ椅子を配置し、その上に ZR を設置した。ZC は実験エリアから約 20m 離れた倉庫の裏側に設置し、ZED が ZC と直接接続することを避けた。4 名の実験者が ZED を手に持ち、ZR の近くを移動しつつ接続状況の確認を行うことで動作確認を行った。

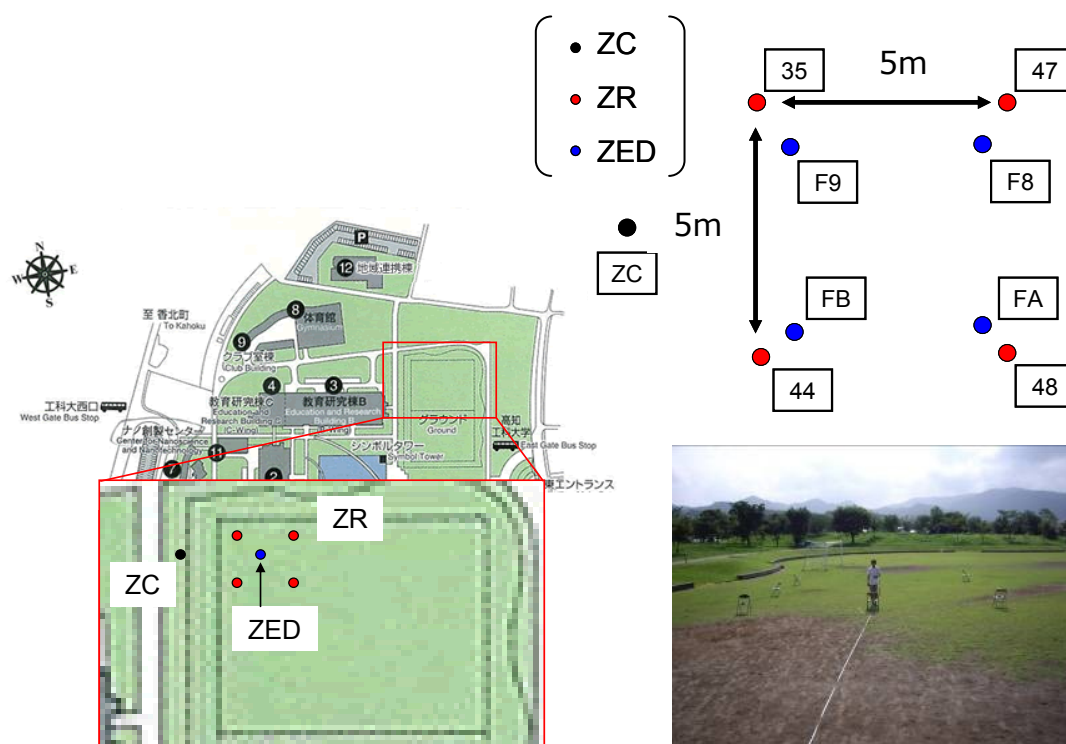


図-3.8 第1回稼働確認実験における ZigBee 装置の配置状況

c) 実験結果

図-3.8 に示した配置状況の場合、理論上は ZED-F9 は ZR-35 に接続し、ZED-FA は ZR-48 に接続するといった形で、最も近い ZR と接続することとなる。ZR の正方形配置を 1 辺 5m、10m、20m、40m と変化させて ZED と ZR の接続状況の確認を行ったが、ZED が最も近い ZR と接続しないケースも多く見られ、想定通りの結果とはならなかった。

障害物、天候等については理想的と考えられる状況を設定したにもかかわらず最も近い端末間の接続を得られなかった原因として下記のことが考えられた。

- 端末から発信する通信電波の出力が強いため、最も近い端末でなくとも通信用途として成立するために十分な強度の電波が届いたこと
- 安定した通信環境を提供する無線通信機器の用途として、接続が成立した端末は極力その接続を維持するような仕様になっていること

従って、下記の対策を行ったうえで再度実験を行うこととした。

- 通信電波の出力を変化させる
- 端末間の接続成立を確認後、強制的に接続を断ち、一定時間の後再度接続を行う

2) 第 2 回稼働確認（通信電波強度の変更）

a) 概要

実験日：平成 21 年 8 月 31 日（日）

天候：雨

目的：ZigBee 装置の動作確認実験

場所：高知工科大学体育館

計測時刻：8：00～12：00

b) 実験方法

第 1 回稼働確認では端末の通信電波の出力を仕様上の最大値で固定していたが、仕様上は 16 段階の出力変更が可能のため、通信電波の強度を変化させた接続確認実験を実施した。その他の方法については第 1 回稼働確認と同様とした。

c) 実験結果

まず、ZR を 1 辺 5m の正形状に設置し、各 ZED が最も近い ZR と接続しているかどうかを確認した。次いで 10m 四方、20m 四方、40m 四方といった形で正方形の 1 辺の距離を延長し、同様の確認作業を行った。

結果を表-4.1 に示す。出力の小さい第 1～3 段階に設定した場合は、概ね最も近い端末間の接続を得ることができ、ZigBee 装置による位置情報取得が可能であることを示すことができた。一方で、第 4 段階以上の出力においては最も近くない端末間の接続も多く見られ、広さや障害物の多さ等の現場条件に応じて通信電波の強度を変化させることが必要であることが見出された。

表-4.1 通信電波強度を変化させた場合の接続状況

		各ルータ間の距離		
電波強度		5m×5m	10m×10m	20m×20m
最小	1	△	○	○
	2	△	○	○
	3	△	○	○
	4	△	△	×
	5	△	×	×
	6	△	×	×
	7	△	×	×
	8	△	×	×

		各ルータ間の距離		
電波強度		5m×5m	10m×10m	20m×20m
	9	△	×	×
	10	×	×	×
	11	×	×	×
	12	×	×	×
	13	×	×	×
	14	×	×	×
	15	×	×	×
最大	16	×	×	×

(注) ○印は最も近い端末との接続が7割以上得られたもの
 △印は5割程度
 ×印は5割未満

3) 第3回稼働確認（障害物がある場所における接続状況確認）

a) 概要

実験日：平成21年9月5日、6日 天候：晴れ

目的：ZigBee装置の動作確認実験

場所：高知工科大学C棟四階コモンスペース

計測時刻：8：00～12：00

b) 実験方法

建設現場を想定し、障害物が多い箇所における接続状況確認の実験を行った。第2回の実験結果を考慮し、接続電波強度は最も小さい第1段階に設定した。端末の配置状況を図-3.9に示す。

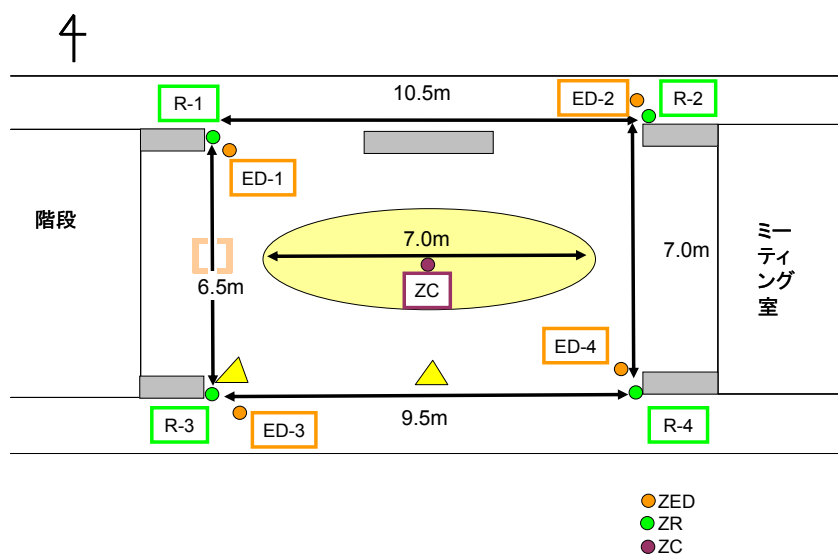


図-3.9 第3回稼働確認実験におけるZigBee装置の配置状況

まず、各 ZED と最も近い ZR の間に障害物がない状態をつくりだし、最も近い ZR と接続するかどうかにつき確認を行った。その結果、いずれの ZED も最も近い ZR と接続することが確認できた（図-3. 10）。

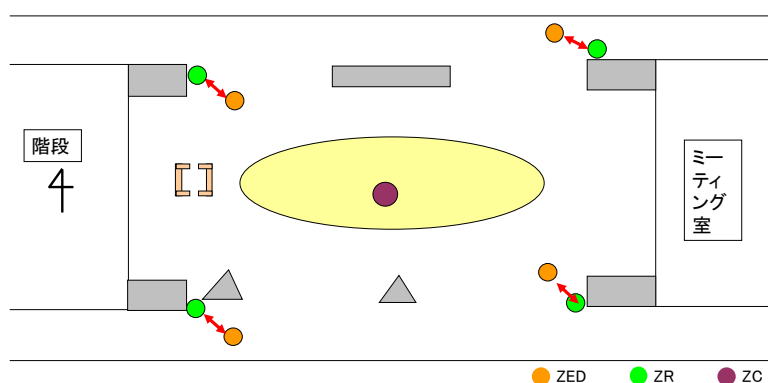


図-3. 10 端末間に障害物がない場合の ZED と ZR の接続例

次いで、ZED を移動させ、壁や柱、ボードなど ZR と ZED 間に障害物を置いた状態での接続確認を行ったところ、ZED は一番近い ZR ではなく電波が障害されない位置にある ZR と接続していることが確認された（図-3. 11）。建設現場など障害物がある場合には、障害物の周囲の適切な位置に ZR を複数配置する必要があるものと考えられる。

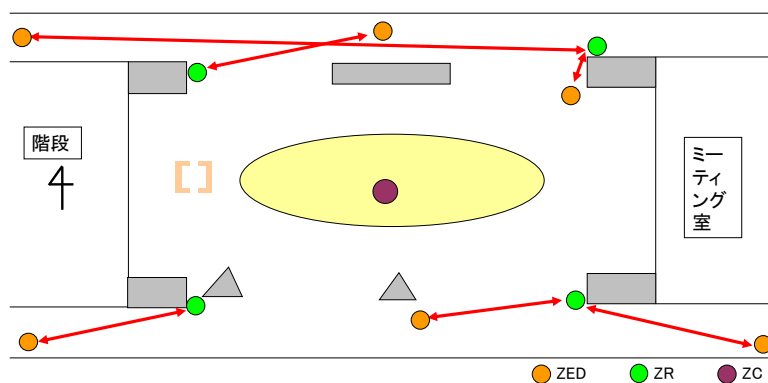


図-3. 11 端末間に障害物がある場合の ZED と ZR の接続例

3. 2 建設現場における稼働確認

ZigBee による位置情報取得システムと加速度センサーによるデータ取得システムの稼働確認のため、複数回にわたり建設現場におけるデータ取得実験を行った。同時に、調査員が作業員のワークサンプリングを行い、作業状況（時刻、位置、作業内容）を記録し、取得されたデータとの照合を行った。

なお実験を行う現場としては、比較的規模が大きく通信距離が長くなる土木工事の現場と、障害物の多い室内作業が多くなる建築現場の両方について行うこととした。

（1）第 1 回稼働確認

1) 概要

実験日：平成 21 年 12 月 7 日（月） 天候：晴れ

目的：ZigBee 装置および加速度センサーの動作確認実験

実験場所：現場①（午前）：高知県高岡郡四万十町（旧窪川）辻の川改良工事

現場②（午後）：同町 興津デイサービス・保育所新築工事

計測時刻：8：00～12：00

2) 実験方法

現場①では型枠工および鉄筋工 2 名ずつの 4 名、現場②では大工 4 名の作業員に位置情報把握用の ZigBee 装置を胸ポケットやズボンのサイドポケットに入れてもらった。なお端末の電波出力は最小の状態で接続確認を行った。また、ZR は作業に支障のない足場やコンクリートの壁、柱等に設置した（図-3.12 から図-3.14）。

ZigBee 装置の接続状況確認は、附属ソフトの ZigBee Viewer 上から接続成立を確認後、手動にて接続を断ち、再度手動にて接続するという作業を繰り返し行い、その都度接続状況を記録した。端末間の接続成立に 30 秒～1 分程度を要するため、結果的に 1 分～2 分毎の位置情報取得となった。

また、両現場とも ZigBee 装置を装着した 4 名のうち 2 名にはヘルメットに加速度センサーをガムテープで固定し、加速度情報を取得することとした。

同時に、調査員によるワークサンプリングにより各作業員の作業状況（時刻、位置、作業内容）を記録し、取得されたデータと比較した。

3) 実験結果

現場①における ZigBee 位置取得システムの接続状況はほぼ調査員によるワークサンプリングと同じ結果であったが、ZR の接続が不安定な状況も一部散見された。これはコンクリートの壁や足場などの障害物が電波を阻害しており電波が届かないためであると判断し、一時データ取得作業を中止して ZR の電波出力を上げる設定変更を行った。接続状況を確認しつつ電波出力を上げたところ、ZR の出力を 6 段階上げることにより接続が安定したので、その状態でデータ取得実験を再開した。



図-3.12 現場①の図面と全景

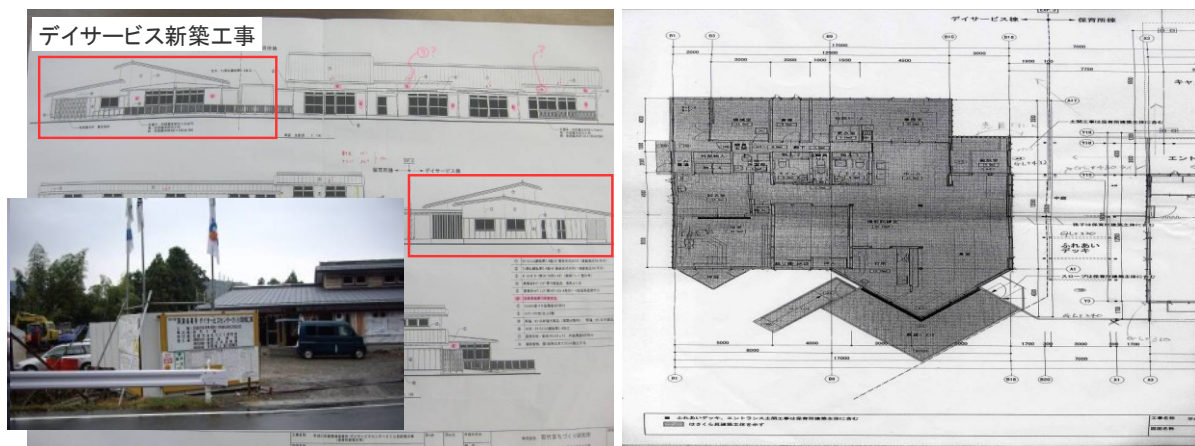


図-3.13 現場②の図面と全景



現場①

現場②

図-3.14 現場①および②における ZigBee ルータ (ZR) 設置状況

現場②においては、壁、資材等で空間が複雑な形状で遮られた状態となっている十数m四方の室内のどの場所にいるかといったレベルではZigBeeによる正確な位置取得はできなかったが、室内にいるか、室外にいるかといったレベルでの確認は可能であった。

本実験において、作業員2名には加速度センサーを装着し、加速度のデータも取得する予定であったがエラー発生によりデータの取得に失敗したため、後日に再度同現場での稼働確認を行うこととした。

(2) 第2回現場稼働確認

1) 概要

実験日：平成21年12月17日（木） 天候：晴れ時々雪

目的：ZigBee装置および加速度センサーの動作確認実験

実験場所：現場①（午前）：高知県高岡郡四万十町（旧窪川）辻の川改良工事

現場②（午後）：同町 興津デイサービス・保育所新築工事

計測時刻：8：00～12：00

2) 実験方法

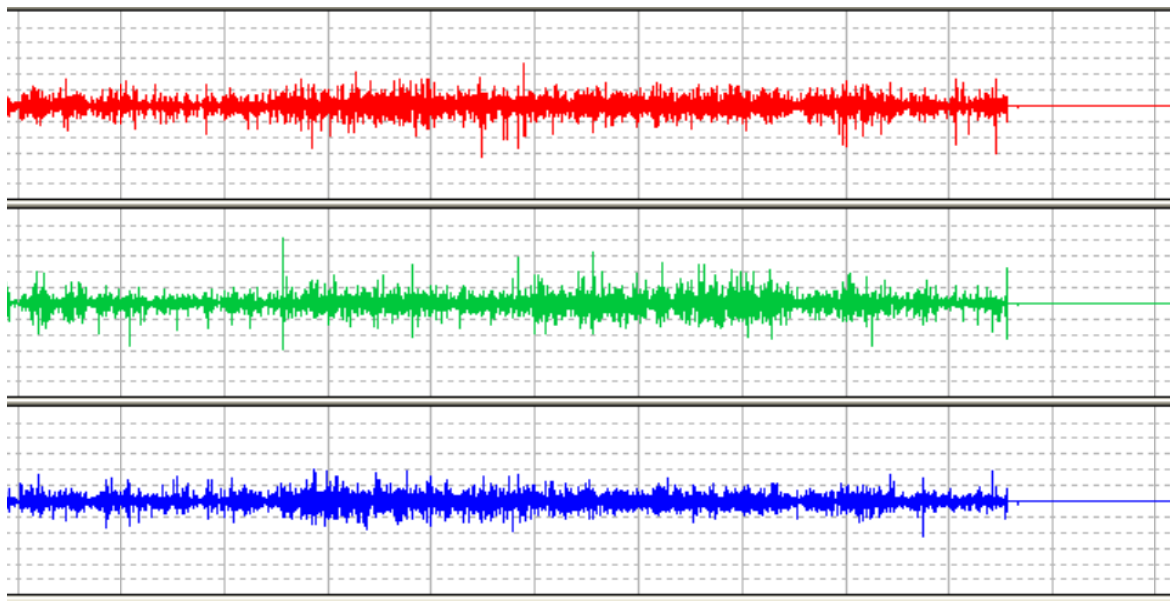
実験方法は第1回現場稼働確認実験と同じである。なお、同日の現場①における作業は型枠組み立てのみであったためZigBee装置を型枠工4名に、加速度センサーを4名のうち2名に装着した。

3) 実験結果

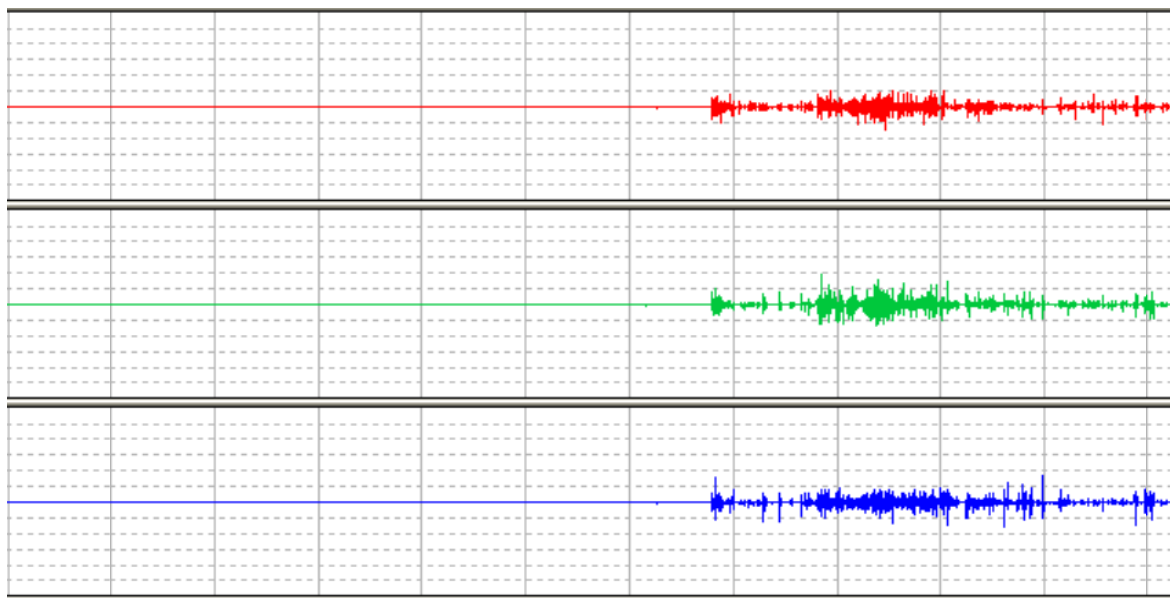
ZigBee装置の接続は現場①、現場②ともに第1回現場稼働確認実験と変わらない状況であった。図-3.15に現場②における作業員の動作加速度データとZigBee位置取得システムから得られた位置データ、および手作業のワークサンプリングによって得られた位置・作業状況の照合例結果の一例を示す。

例えば、15時からの小休止付近の位置情報と加速度情報を見ると、位置情報についてはZigBeeのZEDはほとんどZRに接続しておらず、屋外にいたことがわかる。同時に、加速度情報を見ると、15:00から15:22まで加速度はほぼゼロになっている。これは小休止中はこの作業員がヘルメットを脱いでいたためである。

定められた小休止時間（Break）において加速度がゼロで、屋外にいるということは、この時間帯におけるこの作業員の生産性区分は“Break”であったと判断できる。ちなみに、加速度の時刻暦データからは作業再開が15:22となっており、2分間の“Late Start”であったことも把握できる（図-3.16）。

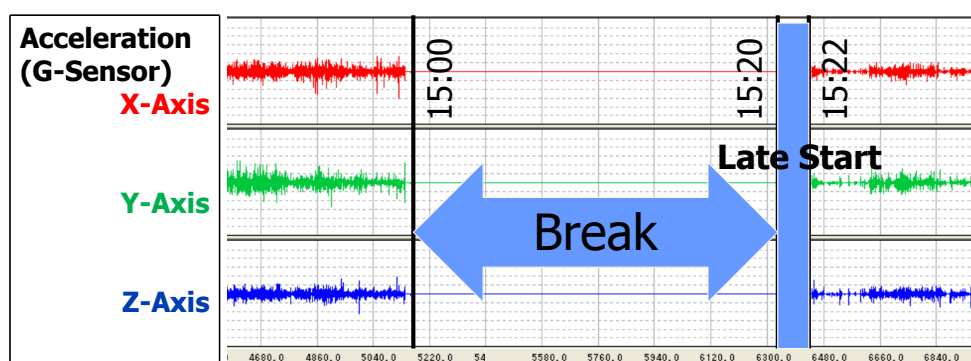


時刻	14:31	14:32	14:33	14:34	14:35	14:36	14:37	14:38	14:39	14:40	14:41	14:42	14:43	14:44	14:45	14:46	14:47	14:48	14:49	14:50	14:51	14:52	14:53	14:54	14:55	14:56	14:57	14:58	14:59	15:00	15:01	15:02	15:03	15:04
ZigBee																44	44	44	44	44	44	35	47	47	47	48	44	44	44	35				
目視	44	44	44	44	35	外	35	47	47	47	47	35	35	35	35	48	48	47	44	44	44	外	外	外	外	外	外	外	外					
作業内容					足場材運搬		足場解体										足場運搬																	
					(移動)		(移動)																											



建築工事(ディサービス)																																			
時刻	15:01	15:02	15:03	15:04	15:05	15:06	15:07	15:08	15:09	15:10	15:11	15:12	15:13	15:14	15:15	15:16	15:17	15:18	15:19	15:20	15:21	15:22	15:23	15:24	15:25	15:26	15:27	15:28	15:29	15:30	15:31	15:32	15:33	15:34	
ZigBee									47																		44	35	44	44	47	44	35	47	44
目視																					44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	47	47	44	44	
作業内容	休憩																			図面確認										木材運搬					

図-3.15 ある作業員の動作加速度データと ZigBee 位置取得システムから得られた位置データ、および手作業のワークサンプリングによって得られた位置・作業状況の照合例



Time	14:48 -14:54	14:54 -15:00	15:00 -15:06	15:06 -15:12	15:12 -15:18	15:18 -15:24	15:18 -15:24
Area (ZigBee)	Working Area		Out of Working Area				
Work Sampling	Scaffolding						

図-3.16 14:48～15:24までの加速度波形と位置・時間情報・作業情報
(図-3.15の一部拡大)

3.3 生産性区分判別基準プロトタイプの構築

第2章で述べたとおり、先行研究②では表-2.2の判定表によって、加速度センサーとRFIDから得られる位置情報を統合して作業構成要素区分を判別する方法が示されている。本研究ではこれらの知見を基盤とし、さらに具体的・定量的な判別基準として表-3.17の判定表を整備した。次節以下にその内容について述べる。

Activity Structure	Tools	G-sensor		ZigBee		
		Wave Pattern	Acceleration Velocity	Area	Time	Job Description
1.Direct Work		Random	Acceleration	Work Area	Working Time	
1.Direct Work						
2.Support		Regular	Acceleration	Material yard	Working Time	
2.1.Read Plans/Instruction						
2.2.Travel		Regular	Acceleration	Material yard	Working Time	
2.3.Transportation						
2.4.Tools/Materials		No Acceleration	No Acceleration	Out of Work Area	Break Time	
3.Delay						
3.1.Late Start/Early Quit		No Acceleration	No Acceleration	Out of Work Area	Break Time	
3.2.Waiting						
3.3.Personal						
3.4.Break						

図-3.17 本研究で構築した生産性区分の判断基準プロトタイプ

(1) 生産性区分“3. Delay”の抽出と詳細分類

表-3. 17(1)に示すとおり、加速度がほぼゼロの場合は生産性区分“3. Delay”として抽出できる。以下、この中の詳細分類である作業構成要素区分の判別について述べる。

図-3. 17(1) 生産性区分における“3. Delay”の判別

Activity Structure	Tools	G-sensor		ZigBee		
		Wave Pattern	Acceleration Velocity	Area	Time	Job Description
1.Direct Work		Random				
1.Direct Work			Acceleration			
2.Support				Work Area		
2.1.Read Plans/Instruction						
2.2.Travel		Regular				
2.3.Transportation				Material		
2.4.Tool/Materials				yard		
3.Delay		No Acceleration		Out of Work Area		
3.1.Late Start/Early Quit						
3.2.Waiting						
3.3.Personal						
3.4.Break					Break Time	

1) “3. 4 Break”の判別

“3. 4 Break”は、予め休憩時間が定められていることから時刻データを主体として判別できる。すなわち、

- ① 時刻：予め定められた休憩時間に
- ② 加速度：加速度がゼロで
- ③ 位置：現場の外（例えば事務所や駐車場，トイレなど）にいる

といった場合に“3. 4 Break”と判別できることとなる。

2) “3. 2Waiting”の判別

“3. 2Waiting”は基本的に現場内で待つことになると考えられることから、位置情報との組み合わせを主体として判別できると考えられる。すなわち、

- ① 時刻：業務時間内に
- ② 加速度：加速度がゼロで
- ③ 位置：現場の中いる

といった場合に“3. 2Waiting”と判別できることとなる。

3) “3. 3Personal”の判別

“3. 3Personal”はトイレ等が考えられ、位置情報との組み合わせを主体として判別できると考えられる。すなわち、

- ① 時刻：業務時間内に
- ② 加速度：加速度がゼロで
- ③ 位置：現場の外（例えば事務所や駐車場，トイレなど）にいる

4) “3. 1Late Start/Early Quit”の判別

“3. 1Late Start/Early Quit” は上記 “3. 3Personal” とほぼ同じ判別基準となるが、時刻データから判別できる。

すなわち、

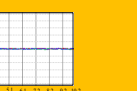
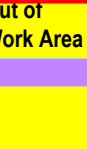
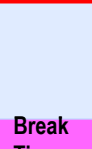
- ① 時刻：予め定められた休憩時間の直前・直後に
- ② 加速度：加速度がゼロで
- ③ 位置：現場の外（例えば事務所や駐車場，トイレなど）にいる

といった場合に “3. 1Late Start/Early Quit” と判別できることとなる。

（２） 生産性区分 “1.Direct Work” 及び “2.Support” の抽出と詳細分類

表-3. 17(2)に示すとおり、加速度がゼロでない場合は生産性区分 “1.Direct Work” あるいは “2.Support” として抽出できる。以下、この中の詳細分類である作業構成要素区分の判別について述べる。

図-3. 17(2) 生産性区分における “1.Direct Work” 及び “2.Support” の判別

Activity Structure	Tools	G-sensor		ZigBee		
		Wave Pattern	Acceleration Velocity	Area	Time	Job Description
1.Direct Work			 Acceleration	 Work Area	 Working Time	
1.Direct Work						
2.Support						
2.1.Read Plans/Instruction						
2.2.Travel						
2.3.Transportation			 No Acceleration	 Out of Work Area	 Break Time	
2.4.Tools/Materials						
3.Delay						
3.1.Late Start/Early Quit						
3.2.Waiting						
3.3.Personal						
3.4.Break						

1) “2. 4Tools/Materials” の判別

“2. 4Tools/Materials” は、位置情報から判別できる。すなわち、

- ① 時刻：業務時間内に
- ② 加速度：加速度があり
- ③ 位置：道具・資材置場にいる

といった場合に “2. 4Tools/Materials” と判別できる。

2) 「規則的な振動」と「不規則な振動」の区別

残された作業構成要素区分は “1.Direct Work”、“2.1Read Plans/Instruction”、“2.2Travel”、“2.3Transportation” の 4 種である。このうち、“2.2Travel” および “2.3Transportation” と、“1.Direct Work” および “2.1Read Plans/Instruction” は、図-2. 5 に示したように、振動特性から区別できる。

“2.2Travel” および “2.3Transportation” の振動は、歩行による周期的な振動を伴うため「規則的な振動」を示すものと考えられる。一方、“1.Direct Work” および “2.1Read Plans/Instruction” の振動は各種現場作業における不規則な動作の振動から「不規則な振動」を示すものと考えられる。

ここで、「規則的な振動」を定量化するため、本研究では振動特性の分析において普遍的な手法であるフーリエ変換を行い、卓越周波数の有無から「規則的な振動」か「不規則な振動」かの判別を行うこととした。図 3-18 上側は足場工（1.Direct Work）および歩行（2.2Travel）の加速度波形（時系列）の例を示すものである。また、図 3-18 下側は、これらの波形をフーリエ変換し、周波数を横軸に整理したものである。

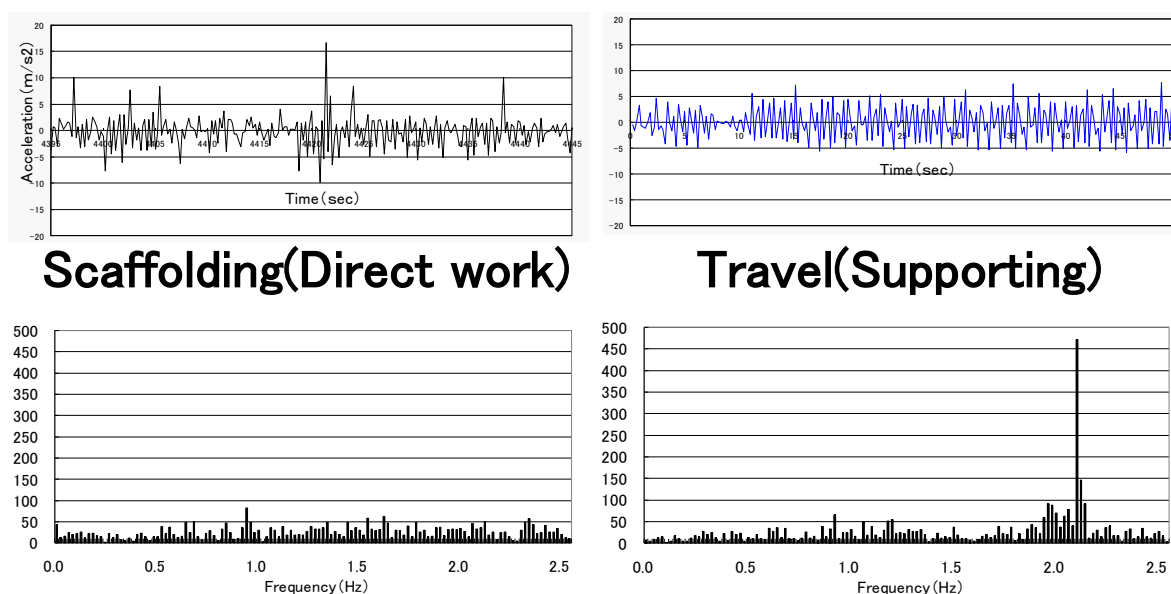


図-3.18 足場工と歩行の加速度波形とフーリエ変換の比較

足場工（1.Direct Work）において卓越周波数は見出せないが、歩行（2.2Travel）においては 2Hz 付近に明確な卓越周波数が見出される。これは人間の歩行が 1 秒に約 2 歩（即ち 2Hz）であるためであると考えられる。鉄筋等の資材を運搬する “2.3Transportation” も同様の歩行によって行われると考えると、2Hz 付近に明確な卓越周波数が見出される場合（つまり、「規則的な振動」）は “2.2Travel” または “2.3Transportation” と解釈できる。そうでない場合（つまり、「不規則な振動」）は “1.Direct Work” または “2.1Read Plans/Instruction” と解釈できることとなる。

3) 「規則的な振動」 “2.2Travel” 及び “2.3Transportation” の区別

“2.2Travel” と “2.3Transportation” の区別について、先行研究②では実データを用いて図 3-19 に示すように加速度から速度を計算し、速度の平均値と標準偏差から判別する方法を提案している。

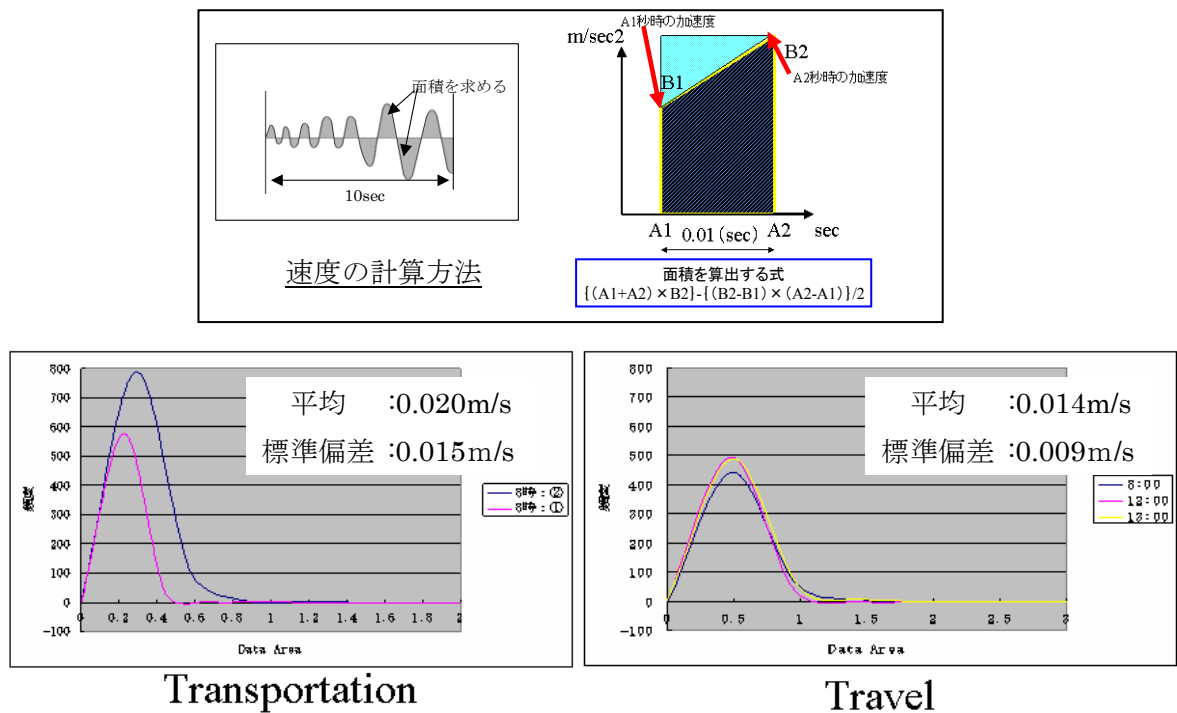


図-3.19 先行研究②で得られた“2.2Travel”及び“2.3Transportation”の速度

“2.3Transportation”はある程度重量のある資材等を運搬することから、加速度が大きくなると考えられる。そのため、速度の平均値が“2.2Travel”よりも大きいものと考えられる。同時に、資材等を運搬する“2.3Transportation”では規則的な歩行である“2.2Travel”よりも不規則な動きが生じることが考えられることから、速度振幅にばらつきが生じ、標準偏差が大きくなったものと推測される。本研究で構築する生産性区分判別基準のプロトタイプではこの考え方に準拠し、下記のとおり速度の平均値と標準偏差を判別基準のしきい値とする。

速度の平均値 : 0.017m/sec 未満 → “2. 2 Travel”

0.017m/sec 以上 → “2. 3Transportation”

※しきい値 0.017m/sec の算出根拠

$(0.0204\text{m/s} + 0.0140\text{ m/s}) \div 2 \div 0.017\text{m/sec}$

速度の平均値 : 0.012m/sec 未満 → “2. 2 Travel”

0.012m/sec 以上 → “2. 3Transportation”

※しきい値 0.012m/sec の算出根拠

$(0.0151\text{m/s} + 0.0094\text{ m/s}) \div 2 \div 0.012\text{m/sec}$

4) 「不規則な振動」“1.Direct Work”及び“2.1Read Plans/Instruction”の区別

次いで、“1.Direct Work”と“2.1Read Plans/Instruction”の区別であるが、既往研究では特にしきい値等については提案されていないものの、現場状況を見る限り加速度の大小で判別できるものと考えられる。しきい値については、現場実験の中で適切な値を見出すこととする。

3. 4 建設現場におけるデータ取得実験と生産性区分判別基準プロトタイプの実用性検証

(1) データ取得実験の概要

前節までの検討を踏まえ、改めて建設現場におけるデータ取得実験を行った。

1) 概要

実験日：平成 22 年 3 月 11 日木曜日 天候：晴れ

目的：ZigBee 装置および加速度センサーの動作確認とデータ取得

実験場所：高知県高岡郡津野町岩土 県道窪川船戸線道路改築（橋梁上部工）工事

計測時刻：8：00～12：00

2) 実験方法

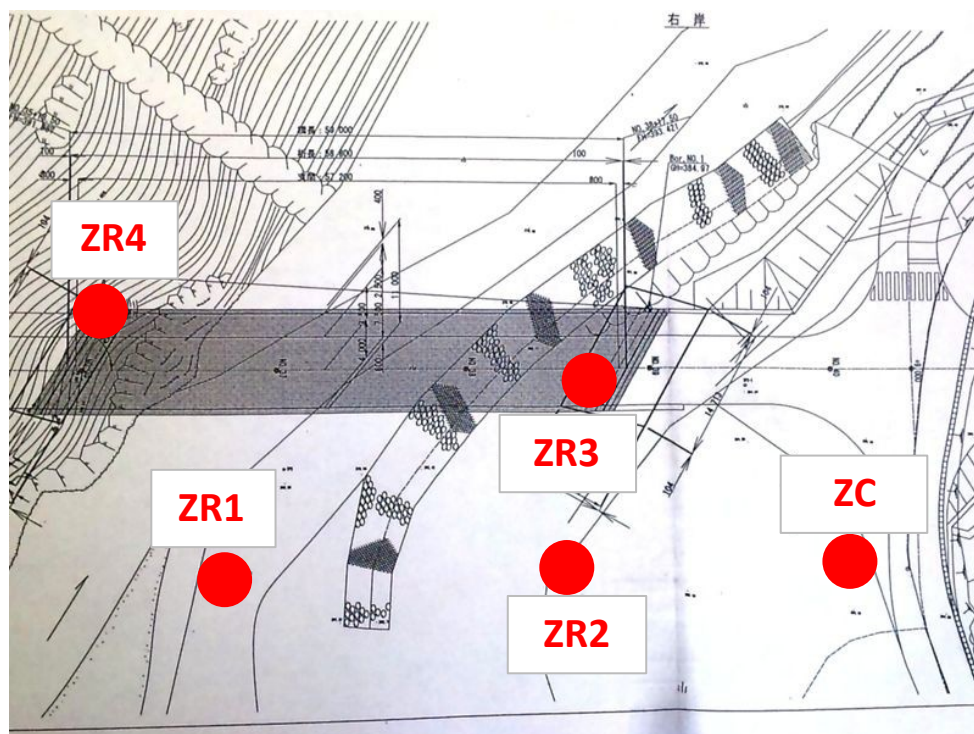
これまでの実験と同様、建設現場における実験と同様に ZigBee 位置取得システムと加速度センサーを用いた加速度データの収集、手作業によるワークサンプリングを同時に行った。本実験では 5 名の作業員に ZED と加速度センサーの両方を装着し、各作業員の位置情報、加速度情報性のデータ収集を行った。

なお、本実験にあたっては、作業員の位置をリアルタイムで PC モニター上に表示できる ZigBee 装置管理ソフトウェアを開発し、稼働確認を行った。

図 3-20 に現場全景と ZC および ZR 設置位置、図 3-21 に図面上の ZC および ZR 設置位置と ZR 設置状況、図-3. 22 に作業員と装着機材リスト、図-3. 23 に新たに開発した ZigBee 装置管理ソフトウェアの初期画面を示す。



図-3. 20 現場全景と ZC（コーディネータ）および ZR（ルーター）設置位置



ZR1				ZR2			
-----	--	--	--	-----	--	--	--



ZR3				ZR4			
-----	--	--	--	-----	--	--	--



図-3.21 図面上の ZC および ZR 設置位置と ZR 設置状況

作業員、装着機材一覧											
No.	会社名	名前	職種	Gセンサ					ZigBee		備考
				呼称	ID	午前 計測開始	午後 計測開始	午後 計測終了	呼称	ID	
1	建設	A	土工	G-01	00037A23C7A4	7:57	12:50	17:05	ZED1	00-00-4C-FF-FE-78-17-F8	白メット、青手袋
2	建設	B	土工	G-02	00037A23C80A	7:58	12:52	17:04	ZED2	00-00-4C-FF-FE-78-17-F9	白メット、迷彩服
3	建設	C	土工	G-03	00037A23C7A5	7:55	12:56	16:56	ZED3	00-00-4C-FF-FE-78-17-FA	青メット、赤服
4	建設	D	土工	G-04	00037A23C7FF	7:52	12:58	16:56	ZED4	00-00-4C-FF-FE-78-17-FB	青メット、紺色服
5	建設	E	土工	G-05	00037A23C7FE	7:59	12:54	17:04	ZED5	00-00-4C-FF-FE-78-17-FC	白メット、タオル、午前:バックホウ運転



図-3.22 作業員と装着機材リスト

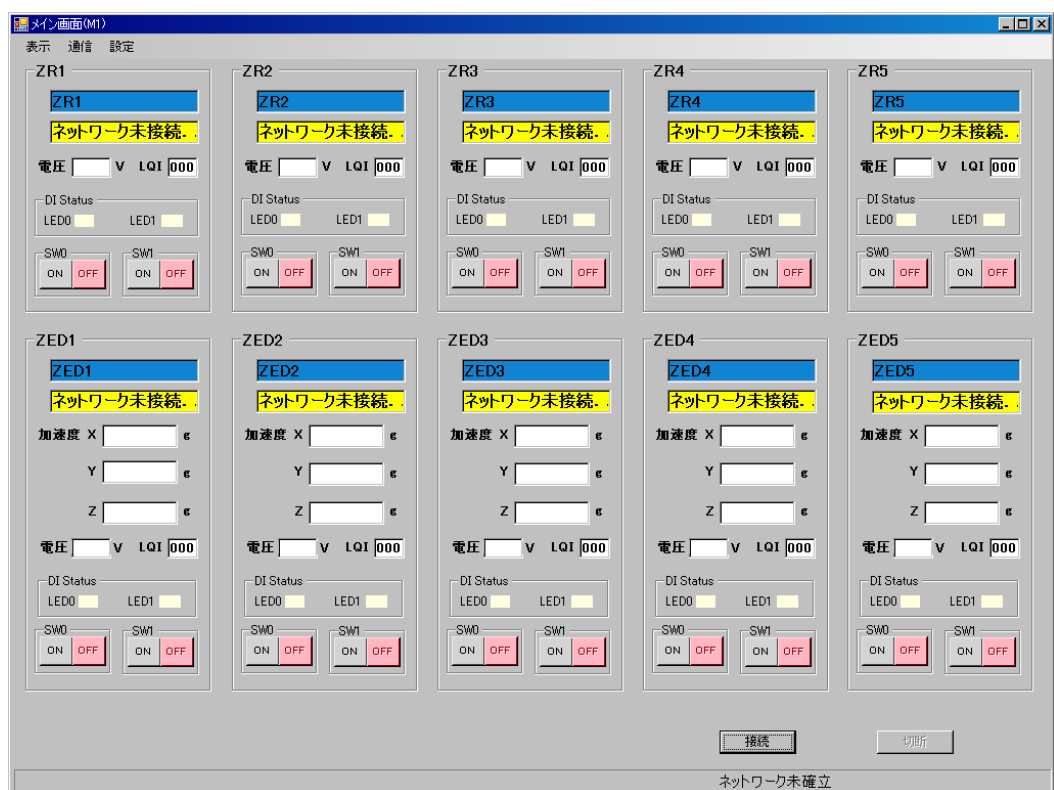


図-3.23 新たに開発した ZigBee 装置管理ソフトウェアの初期画面

3) 実験結果

図-3.24 に新たに開発した ZigBee 装置管理ソフトウェアにおける作業員位置の表示画面を示す。

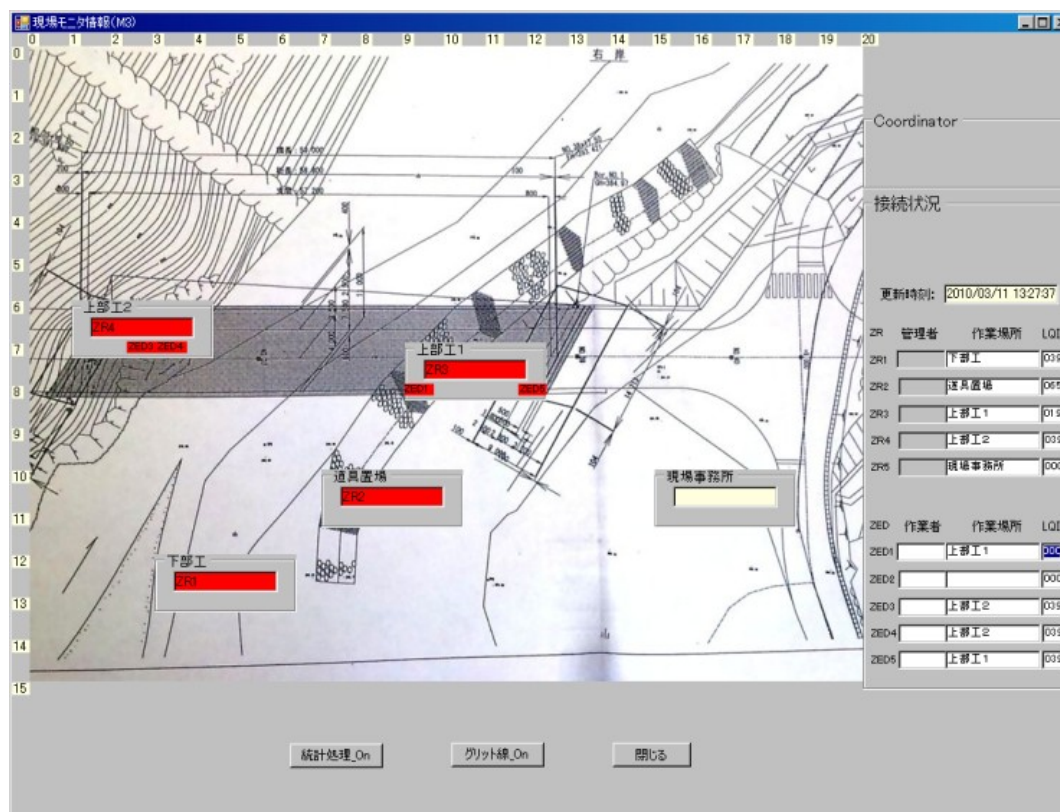


図-3.24 新たに開発した ZigBee 装置管理ソフトウェアにおける作業員位置の表示画面

大きな赤色の帯は ZR を示し、その下の小さな赤色の帯は ZED を示している。このように、図面を画像データとして取り込み、各 ZR の設置位置をローカルな位置座標として入力した上で、各 ZR と接続が成立している ZED を表示することで作業員の位置をリアルタイムで把握することが可能となる。

また、この管理ソフトウェアは位置のリアルタイム表示と並行して csv ファイルによる位置情報の記録・保存も自動的に行う機能も備えている。

時刻 接続先 ZR

20100311135257	ZR2	999
20100311135302	ZR2	58
20100311135308	ZR2	65
20100311135312	ZR2	58
20100311135317	ZR2	65
20100311135323	ZR2	65
20100311135328	ZR2	65
20100311135333	ZR2	65
20100311135338	ZR2	65
20100311135343	ZR2	65

←接続状況の品質値 LQI
(Link Quality Indication)

図-3.25 取得された位置情報を示す csv ファイルの一部

本実験において、位置情報および加速度情報を取得するシステムは順調に動作した。次節では取得された位置データの精度分析と、加速度データと併せた生産性区

分判別基準プロトタイプの実用性について検証を行う。

(2) 取得された位置データの精度分析

図-3. 26 は作業員に装着したエンドデバイス ZED1, ZED3, ZED4, ZED5 が接続した ZR の番号と、各 ZR への接続回数を示すものである。なお ZED2 については接続の際動作不良が見られたため分析から除外した。

ZED1

接続先	接続回数	接続先が最も近いルーターでなかった回数
ZR1	3	2
ZR2	46	29
ZR3	62	3
ZR4	73	13
Coordinator	34	1
全接続回数	218	48

ZED3

接続先	接続回数	接続先が最も近いルーターでなかった回数
ZR1	4	1
ZR2	38	14
ZR3	34	5
ZR4	63	1
Coordinator	41	0
全接続回数	180	21

ZED4

接続先	接続回数	接続先が最も近いルーターでなかった回数
ZR1	6	4
ZR2	57	26
ZR3	37	4
ZR4	85	0
Coordinator	30	0
全接続回数	215	34

ZED5

接続先	接続回数	接続先が最も近いルーターでなかった回数
ZR1	25	0
ZR2	29	17
ZR3	45	0
ZR4	63	0
Coordinator	36	2
全接続回数	198	19

<全ルータとの接続>

全ZEDの接続回数	811 回
接続先が最も近いルーターでなかった回数	122 回
最も近くないルーターへ接続した割合	15%

<ZR2を除いたルータとの接続>

全ZEDの接続回数	687 回
接続先が最も近いルーターでなかった回数	36 回
最も近くないルーターへ接続した割合	5%

図-3. 26 作業員に装着した各 ZED が接続した ZR の番号と、各 ZR への接続回数

各 ZED の全接続回数 811 回に対して、最も近くない ZR へ接続した割合が約 15% の結果を得た。つまり、正しい位置を示す割合が 85%であったことを示す。概ね良好な結果と考えられるが、注目すべきは各 ZED とも、本来接続するべきではない ZR2 と接続してしまうケースが多かったことである。具体的には、本来、図-3. 27 のような接続が得られるべき場合において、図-3. 28 のような接続となってしまったケースが見られた。

これは、図-3. 27 上図に示すように ZR2 の設置位置が ZC から各 ZR1,ZR3,ZR4 への接続のための中継点に位置していたためと考えられる。本実験においては、時系列の位置データ取得のため、各 ZED, ZR, ZC の接続確認後、一度全体の接続を切断し、再度ネットワークを構築するといった方式をとっていた。

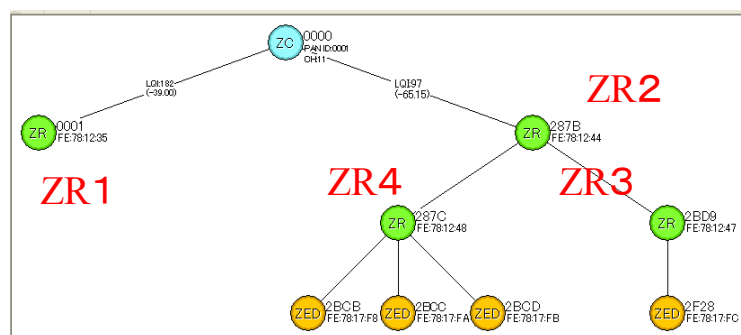


図-3.27 正しい位置データを取得できたときの ZigBee 接続ネットワーク

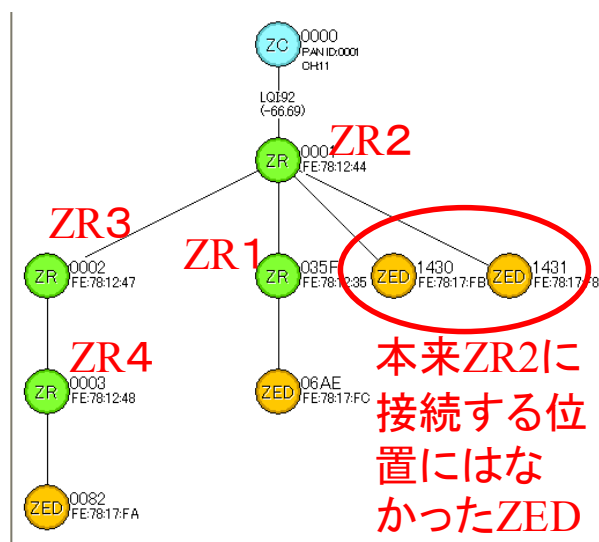


図-3.28 正しい位置データを取得できなかったときの ZigBee 接続ネットワーク

このため、ZinBee ネットワークの自動構築プロセスの際、ネットワークの上流側にある ZR2 はその他のルーターよりも早く認識されることとなる。本来接続すべきルーターがネットワーク上に認識されるのが遅れた場合、各 ZED は本来接続すべきルーターではなく、早く認識された ZR2 と接続することとなる。

この問題は、時系列の位置データ取得のための定期的な接続切断の際、ネットワーク全体の接続を切断するのではなく ZED と ZR の間の接続のみ切断することによって解決できる。具体的には ZED に定期的(例えば 1 分間隔)に ZED の電源を On-Off する装置を組み込む。これによってこの問題は解決でき、図-3.27 の「ZR2 を除いたルーターへの接続」として示した通り、最も近くないルーターに接続してしまう割合を 5%程度まで減少させることができるものと考えられる。

(3) 生産性区分別基準プロトタイプの実用性検証

図-3.29 から図-3.31 は本データ取得実験にて取得された位置データ (ZigBee より取得)、加速度データ (加速度センサーより)、および人間の手作業によるワークサンプリング結果を重ね合わせたものの一部である。これらを用いて先に提示した生産性区分別基準プロトタイプ (図-3.17) の実用性検証を行う。

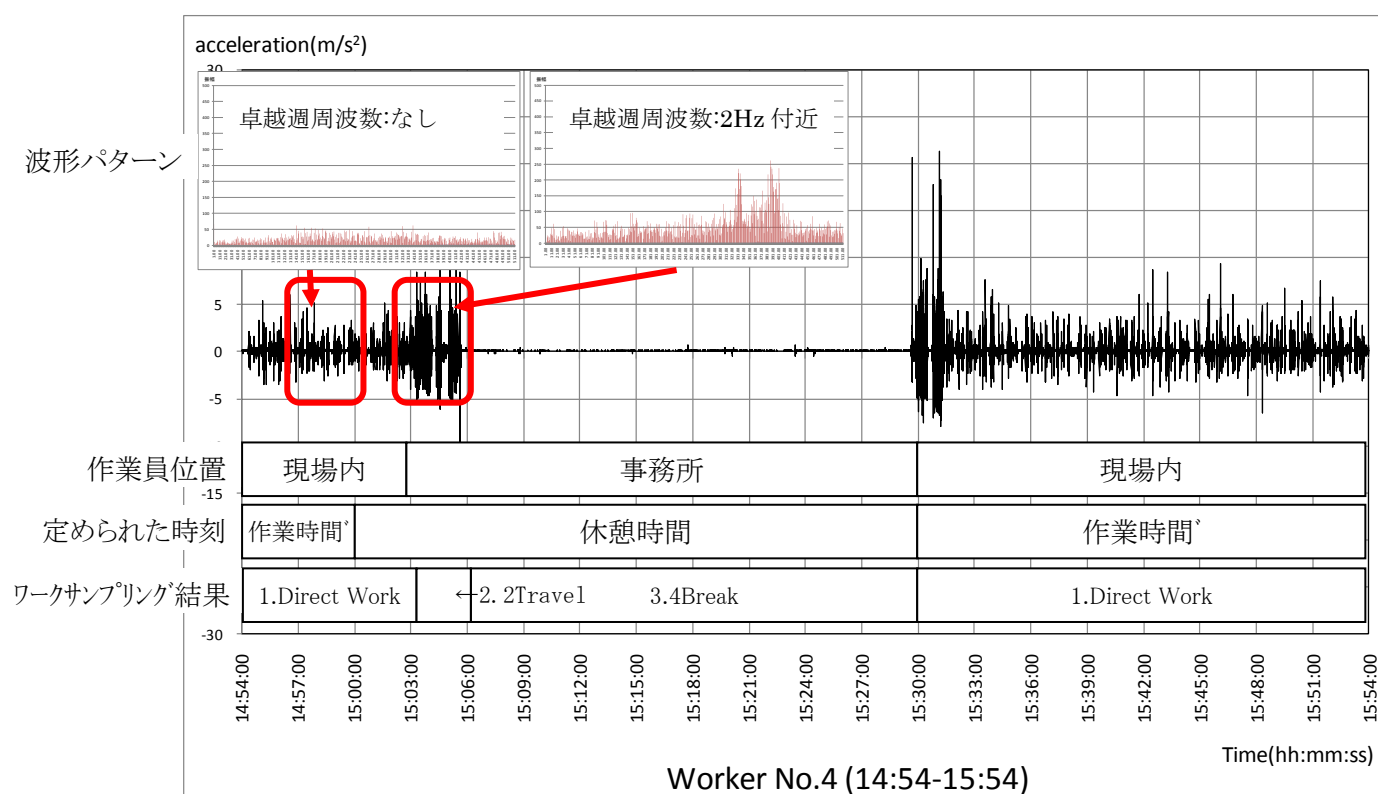


図-3.29 データ取得実験にて取得された位置データ、加速度データの重ね合わせの例 (2)

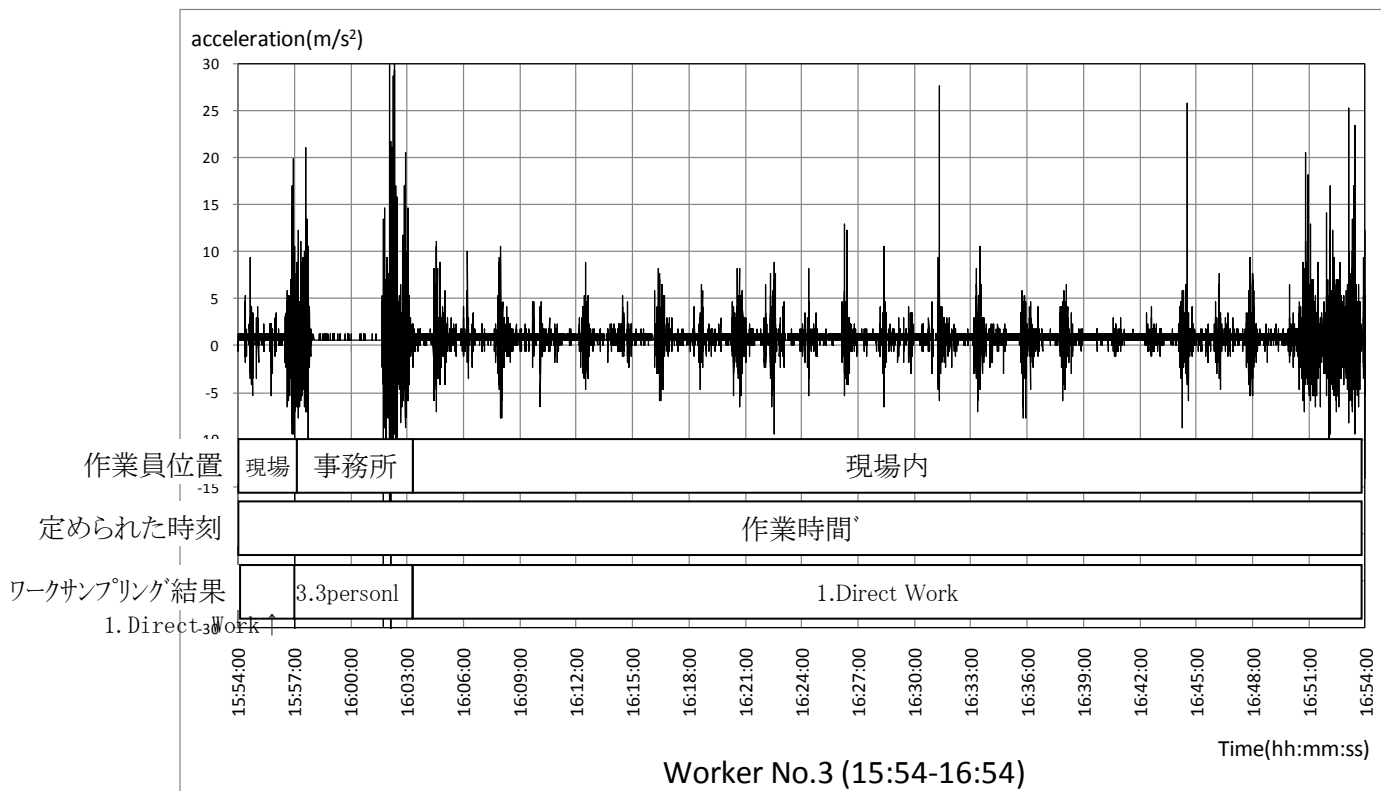


図-3.30 データ取得実験にて取得された位置データ、加速度データの重ね合わせの例（3）

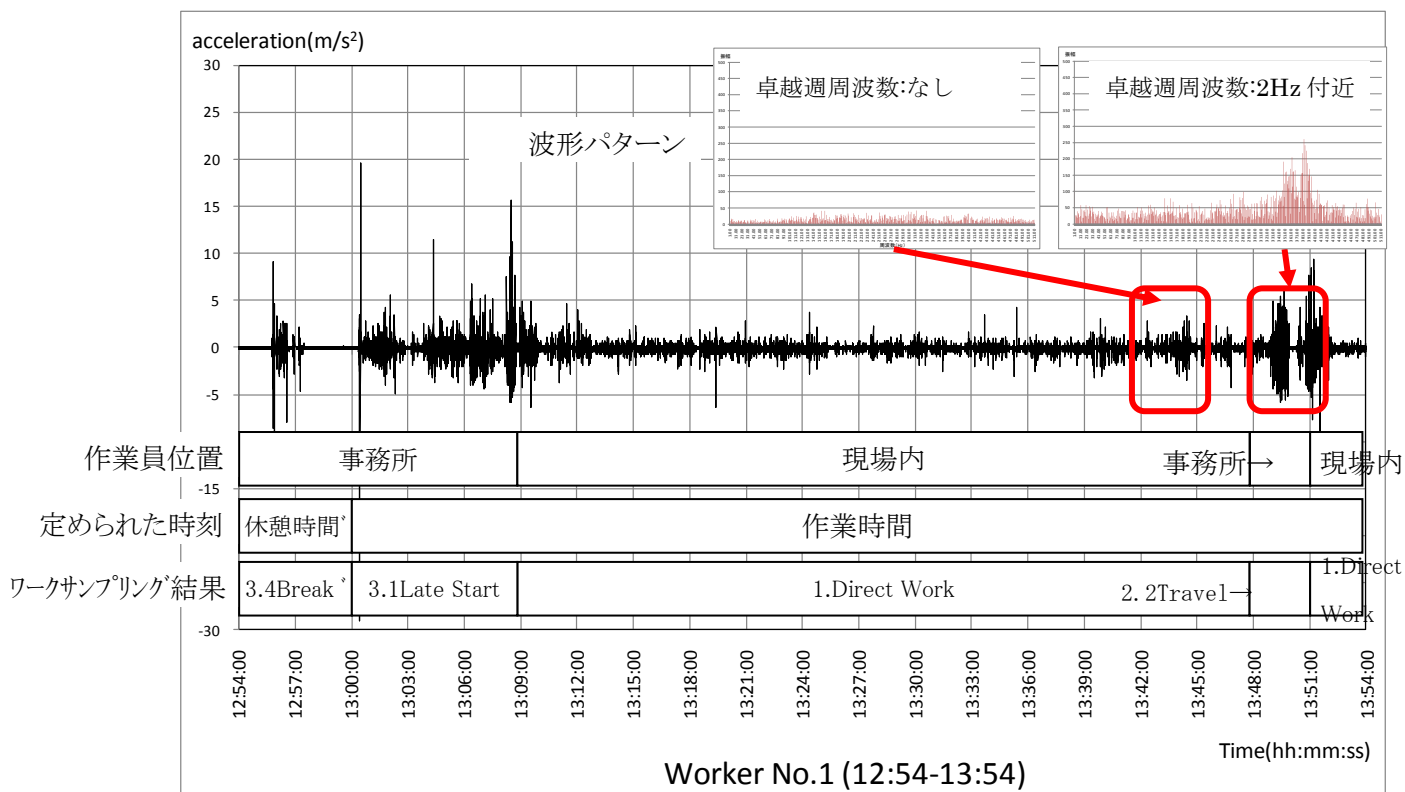


図-3.31 データ取得実験にて取得された位置データ、加速度データの重ね合わせの例（1）

1) 生産性区分 “3. Delay” の抽出

a) “3. 4 Break” の判別

先に述べた判別基準は以下の通りであった。

- ① 時刻：予め定められた休憩時間に
- ② 加速度：加速度がゼロで
- ③ 位置：現場の外（例えば事務所や駐車場，トイレなど）にいる

図-3. 29 をみると、ワークサンプリングの結果、“3. 4 Break” は 15:06～15:30 となっている。

一方、上記①～③に該当する時間帯も 15:06～15:30 であり、この時間帯は自動的に“3. 4 Break”と判別できる。上記の判別基準は妥当であると考えられる。

b) “3. 2Waiting” の判別

今回の現場作業において、“3. 2Waiting”は発生していなかったため、今後行うデータ取得実験にて特定を試みることとする。

c) “3. 3Personal” の判別

先に述べた判別基準は以下の通りであった。

- ① 時刻：業務時間内に
- ② 加速度：加速度がゼロで
- ③ 位置：現場の外（例えば事務所や駐車場，トイレなど）にいる

図-3. 30 をみると、ワークサンプリングの結果、“3. 3Personal”は 15:57～16:03 となっている。

一方、上記①～③に該当する時間帯も 15:57～16:03 であり、この時間帯は自動的に“3. 3 Personal”と判別できる。上記の判別基準は妥当であると考えられる。

d) “3. 1Late Start/Early Quit” の判別

先に述べた判別基準は以下の通りであった。

- ① 時刻：予め定められた休憩時間の直前・直後に
- ② 加速度：加速度がゼロで
- ③ 位置：現場の外（例えば事務所や駐車場，トイレなど）にいる

図-3. 31 をみると、ワークサンプリングの結果、“3. 1Late Start”は 13:00～13:09 となっている。

同時時間帯は①および③は満たされているものの、加速度が見られるため②は満たしていない。13:00 から 13:06 は休憩時間後にヘルメットを装着し、しばらく事務所付近にとどまったことが周波数特性(2Hz 付近に卓越周波数が見られない)からわかる。また、13:06～13:09 は事務所から現場への移動をしていることも周波数特性から見いだせる。

休憩時間後はヘルメットを装着することが基本であると考え、②加速度がゼロ という条件を省いた方がより実態に近い判断ができるものと考えられる。

2) 生産性区分“1. Direct Work”及び“2. Support”の抽出と詳細分類

a) “2. 4Tools/Materials”の判別

今回の現場作業において、“2. 4Tools/Materials”は発生していなかったため、今後行うデータ取得実験にて特定を試みることにする。

b) 「規則的な振動」と「不規則な振動」の区別

図-3. 31 の 13:42~13:45 および 13:48~13:51 の周波数特性を見ると、前者の波形では 2Hz 付近に卓越周波数が見られないのに対し、後者には明確に 2Hz 付近に卓越周波数が見られる。後者のワークサンプリング結果は“2. 2Travel”となっており、この卓越周波数の有無によって判別することの妥当性が確認された。

c) 「規則的な振動」「2. 2Travel」及び“2. 3Transportation”の区別

今回の現場作業はコンクリート打設前の清掃作業が主体であり、“2. 3Transportation”は発生していなかったため、今後行うデータ取得実験にて特定を試みることにする。

d) 「不規則な振動」「1. Direct Work」及び“2. 1Read Plans/Instruction”の区別

今回の現場作業はコンクリート打設前の清掃作業が主体であり、“2. 1Read Plans/Instruction”は発生していなかったため、今後行うデータ取得実験にて特定を試みることにする。

上述の検討から、本研究で構築した生産性区分判別基準プロトタイプ（図-3. 17）は一定の実用性を有していることが見出された。今後もデータ取得実験を繰り返し実施し、生産性区分判別基準の精度を高めてゆくこととする。

4. おわりに

本研究では位置情報収集システムの建設現場への適用を考慮して、先行研究にて構築した RFID によるシステムから ZigBee を用いたシステムへ変更することとし、新たな位置情報収集システムを構築した。このシステムには作業員の位置情報をリアルタイムに画面上に表示する機能を付加した。次いで、ZigBee から得られる位置データと加速度センサーより得られた加速度データを統合し、生産性区分を判別するシステムのプロトタイプを構築した。

こうして構築したシステムを現場にて運用したところ、実用性を有していることが見出された。本研究は今後も継続して行っていく覚悟であり、下記のシステム構築を目指す。

- 生産性区分判別基準の精度向上のための建設現場における稼動実験・キャリブレーションの実施
- 生産性区分判別基準のプログラム化
- ZigBee と加速度センサーを組み合わせた一体機器の開発。機器の小型化と価格の低減
- 出来高数量を把握できる機能を備えた CAD システムの開発（迅速な出来高把握システムの構築）
- 上記 CAD システムと市販のプロジェクトマネジメント・システムの活用による、出来

高・コスト・時間の連携管理システムの構築

こういったシステムの構築によって、これまで属人的手法によって収集・分析されていた生産性管理データを科学的手法によって収集・分析できることとなる。

我が国の建設産業は“結果の管理”を基盤としており、プロジェクトの“遂行過程を外部に見せる”管理技術を具備するという意識が希薄な状態にあった。このことが我が国の建設産業の透明性を低いものとし、国民からの信頼を失わせる要因ともなっていたと考えられる。信頼性回復のためには“結果の管理”から“経過の管理”への移行が必要である。

本研究で試みた生産性管理データの収集・分析を科学的に行うシステムの構築は、我が国の建設産業のプロジェクトマネジメントの基盤を“結果の管理”から“経過の管理”に移行させる第一歩であると考えている。

本研究は港湾空港建設技術サービスセンターの研究助成によって行なわれたものであり、そのご厚意に感謝する次第である。当研究グループは、現在も、この研究の成果をもとに更なる研究に取り組んでゆく計画である。

参考文献

- 1) 先端情報技術を活用した高精度生産性管理データの収集・分析技術に関する研究, 高知工科大学 社会システム工学科 生産性技術研究会, (財) 日本建設情報総合センター研究助成事業研究報告書, 2004 年 9 月
- 2) 建設現場における高度情報処理技術 (IT) を活用した生産性分析システムに関する研究に関する研究, 草柳俊二, (財) 日本建設情報総合センター研究助成事業研究報告書, 2006 年 9 月
- 3) 21 世紀型建設産業の理論と実践, 山海堂, 草柳 俊二, 2001
- 4) ZigBee ALLiance ホームページ <http://www.zigbee.org/>
- 5) 評価用 ZigBee モジュールマニュアル NEC エンジニアリング
- 6) ZigBee SIG ジャパンホームページ <http://zbsigj.org/index.htm>
- 7) 建設現場における高度情報処理技術 (IT) を活用した生産性管理データの測定技術に関する研究, 安里哲平, 2002 年度高知工科大学修士論文
- 8) 建設現場における高度情報処理技術 (IT) を活用した生産性分析システムに関する研究, 安田陽介, 2005 年度高知工科大学修士論文
- 9) 建設プロジェクトマネジメントに適用する高度情報処理技術 (IT) 活用による生産性データ分析に関する研究, 岡田茂, 2007 年度高知工科大学修士論文
- 10) 建設現場における G センサと ZigBee ネットワークシステムを用い、生産性管理データを収集・分析するシステムの構築に関する研究, 越智淳, 2009 年度高知工科大学修士論文