無線発信機を活用した作業所内の高所作業車の位置把握システムに関する研究

STUDY OF INDOOR LOCATION ESTIMATION OF CONSTRUCTION MACHINERIES ON CONSTRUCTION SITE BY RADIO TRANSMITTER

染谷俊介 — * 1 多葉井 宏 — * 2

Shunsuke SOMEYA — * 1 Hiroshi TABAI — * 2

キーワード：
BLE, 屋内位置測位, 建設機械

Keywords:
BLE, Indoor location estimation, Construction machinery

In construction site, many workers want to grasp the position of construction machineries. However, that is difficult by previous technologies because there are many change, and often the indoor in construction site. So this time, we developed a indoor location estimation system by iBeacon that can be used recently. This system was developed with emphasis on cost and ease of preparation for easily using in construction site. In addition, we applied that system to an actual project.

1. 緒言

建設工事では、建設機械の位置把握技術に対するニーズが大きい。特に、大規模作業所では数多くの建設機械を使用しており、高所作業車は同時に数百台を使用する。現場監督はこれらの配置管理を目視で行っており、日々多くの手間を要している。その業務効率化のため、建設機械の位置情報を自動的に共有する技術に対する期待は大きい。位置把握技術については既往研究において様々な種類の要素技術が報告されているが、建設工事は、日々変化する屋内環境という厳しい条件が制約となり、実用化が難しかった。

本報では、建設機械の位置把握という用途に着目し、新しい技術を活用することで建設工事においても実用的な位置把握システムの開発を試みた。実際に、本システムを作業所で運用を開始したので、その結果を報告する。

2. 既往の研究と本研究の目的

2.1 既往の研究

建築分野での既往研究では、例えば高精度な位置把握を目的とした研究として、金・他¹⁾が工事写真とVR画像を重ね合わせるため、ノンブリズム測量機による光波測量と画像解析技術を活用し、カメラ位置を推定した例がある。より簡易に位置を推定する技術としては、蔡・他²⁾がRFIDタグを活用し、1台の建設機械を中心とした10m単位での接近状態の推定を提案している。広範囲かつ不特定多数を対象とした例では、宮崎³⁾がスーパーマーケット内でショッピングカートにRFIDタグを設置することによる動線把握手法を報告している。他分野では、GPSやWIFI⁴⁾、IMES⁵⁾、PDR⁶⁾、音波⁷⁾、といった様々な要素技術を活用し、1～数m精度の位置把握システムを中心に報告されている。

2.2 本研究の目的

本報では、建設機械、特に高所作業車およびフォークリフトと、それを管理する現場監督の位置把握を目的とする。筆者は、建設工事で技術を実用化するためには、作業所は日々変化する屋内環境で

あること、高所作業車・フォークリフトのリース費用が月額数千円と安価なこと、およびユーザーへ要求する操作を極力減らすこと、を考慮したシステムが必要と考えた。そのために、要素技術に対する必要条件として、①屋内対応②無線電源(電池・バッテリー駆動)③低コスト④専用受信機不要⑤システムの自動稼働、の5点を挙げた。例えば既往研究で使用されている要素技術では、GPSは①、その他無線発信機を使った技術では③④が課題となる場合が多い。一方で、本報の用途では、各対象物の位置はスパン単位の把握で十分であること、ほぼ全員の現場監督がセルラーモデルの携帯端末を常に携帯していることから、精度・通信環境は低優先項目とした。

そこで、本報では新しい無線発信機であるBLE端末^{注1)}に着目し、上記必要条件を満たす位置把握システムの開発を試みた。位置把握システムに使用する要素技術と必要条件の対比を表1に示す。

表1 位置把握システムに使用する要素技術と必要条件の対比表

要素技術	必要条件					低優先項目	
	屋内対応	無線電源	低コスト	専用受信機	自動稼働	精度	通信環境
光波測量	○	○	×	×	×	◎ 数mm	○ 不要
GPS	×	○	○	○ 不要	○	△ 数m	△※
RFID	○	○	○	×	○	○ 1～数m	△※
WIFI	○	×	△ 量産無	×	○	○ 1～数m	△※
IMES	○	×	△ 量産無	×	○	○ 1～数m	△※
音波	○	○	△ 量産無	○ 不要	○	○ 1～数m	△※
PDR	○	○	◎ 発信機無	○ 不要	×	○ 1～数m	○ 不要
BLE	○	○	○	○ 不要	○	△ 数m	△※

※単独であれば不要だが、複数の位置情報を共有する場合は必要となる。

3. 位置情報の取得方法と活用方法

3.1 位置情報の取得方法

使用機器は、①発信機: BLE端末②受信機: 携帯端末③サーバー、

¹⁾ ㈱竹中工務店 BIM 推進室 主任生産担当
(〒136-0075 東京都江東区新砂1-1-1)

²⁾ ㈱竹中工務店技術研究所新生産システム部 情報化グループ長

¹⁾ Construction Chief, BIM Promotion Department, Takenaka Corporation

²⁾ Group Leader, Research & Development Institute, Takenaka Corporation

の3種類である。機器はほぼ市販製品を使用し、ソフトウェアを独自に開発することで、今回の用途に適したシステムを構築した。

無線発信機にBLE端末を採用した理由としては、表1に示す通り、今回の用途に必要な条件を全て満たしているためである。例えば、BLE端末を発信機として作業所場内に設置することで、屋内対応が可能である。また、BLEは通信距離が10～15mと近距離で、発信可能な情報も限られている代わりに、省電力であり乾電池で1～2年稼働するため、有線での電力供給が必要なく、工事期間中の電池交換も不要である。コストは、量産型の市販製品を採用することで低減できる。今回は、専用の受信機を不要とするため、BLEの中でもiBeacon^{注2)}という規格に準拠した端末を採用した。この規格は建設会社で多く使われている携帯端末のOSが標準で対応している。

また、本報では一部特殊な無線発信機を開発した。通常、携帯端末上で同時に稼働させることができるソフトウェアは1つであり、未起動であったり、起動中でもバックグラウンドに存在すると、処理を実行することができない。そのため、通常はユーザー全員が常にソフトウェアをフォアグラウンドに起動させておく必要があり、現実的に運用が難しかった。そこで筆者は、ソフトウェアが未起動であっても自動で処理が実行されるよう、独自のコマンドを発信する無線発信機（以下、起動用ビーコン）を開発し、場内に設置することで、解決を図った。電波の発信間隔は、制御を受ける携帯端末のバッテリー消費を考慮し、3分間隔とした。電波の発信強度は、3分間隔の発信を乾電池で1～2年連続させることが可能な範囲で設定し、通信距離60m程度とした。

開発したシステムの構成を図1に示す。事前準備として、BLE端末を無線標識として利用するため、作業所場内に事前に固定しておく（以下、固定ビーコン）。携帯端末を持った現場監督が固定ビーコンの通信距離である10～15m以内に近づくと、位置座標がサーバーに送信され、ソフトウェア上の図面に現場監督のアイコンが描画される。建設機械へも、BLE端末を設置しておく（以下、移動ビーコン）。携帯端末を持った現場監督が建設機械に近づいた際に、その位置情報がサーバーに送信・共有される仕組みとした。なお、本来であれば建設機械にも現場監督と同様に携帯端末を設置すれば情報の更新頻度がより密になるが、コスト・故障の危険・セキュリティを考慮すると実用的でないため、今回の方法とした。

ソフトウェア側で位置を判定するためのフローを図2に示す。まず事前準備として、ソフトウェア上で表示する図面の画像データをサーバーに登録する。図面はフロア別に用意する。携帯端末のソフトウェア側では、BLE端末のUUIDに対応した个体番号、BLE端末が配置されているフロア番号、および2次元位置座標のリストを用意する。また、携帯端末のUDIDに対応した現場監督の属性情報（ユーザーID、氏名、連絡先等）を別途用意する。なお、UUIDとは、BLE端末に付与されている个体ユニークな32桁の英数字であり、UDIDとは、携帯端末に付与されている个体ユニークな40桁の英数字である。携帯端末がBLE端末から発信されるUUIDを受信すると、ソフトウェア内で、複数のUUIDの中から受信強度を基に最も近接した固定ビーコンを判定し、先述のリストを使って位置座標・フロアを算出する。位置情報・フロアは携帯端末のユーザー情報と紐づけられ、サーバーに送信される。移動ビーコンを受信した

図1 システムの構成図

図2 位置座標の判定フロー図

場合、そのときに最も近接した固定ビーコンの位置座標・フロアが紐づけられる。サーバーでは複数の携帯端末から受信した情報を集約し、各携帯端末へ配信することで、位置情報を共有する。

3.2 位置情報の活用方法

取得した位置情報は、最終的に業務で活用する形式に変換する必要がある。本報で対象とする用途は建設機械の配置管理であり、具

体的な業務としては、位置の探索および移動履歴の把握である。

建設機械の探索では、従来方法の効率化が望まれている。建設機械の大部分は施工者がリース会社から借り、専門工事会社へ貸与している。作業所に導入した建設機械には固有の号車番号を付与し、本体とエンジンキーがその番号で管理される。リース期間中、本体は作業所場内に残置されており、現場監督は使用者に対し、エンジンキーを貸出・返却することで、日々の配置管理を行っている。具体的には、現場監督は使用者に対し、作業場所のなるべく近傍に残置されている建設機械を割り当てるとともに、フロアや工区単位のおおよその所在を伝える必要がある。そのため、現場監督は前日の作業終了後もしくは当日の朝に建設機械の所在の棚卸しを行っている。従来は、各建設機械に近づくて掲示された号車番号を確認する必要があるため、場内をくまなく巡回しており手間が掛かっていた。

また、仮設費低減のために、現場監督は工程に応じて建設機械の追加・返却を行うが、その判断根拠として移動履歴が必要となる。従来は、使用者の自己申告等、把握する手段が限られており、適正な台数管理が難しかった。特に、貸与したものの移動が少ない建設機械の把握が求められている。

これらの課題解決のために、取得した位置情報を以下の通り活用した。また、システムでの表示画面の例を図3に示す。

(1) 建設機械の探索

取得した位置情報を探索業務に活用するため、携帯端末の図面上に建設機械・現場監督のアイコンおよび属性をリアルタイムに表示させた。属性とは、建設機械であれば号車番号、現場監督であれば所属と氏名である。さらに、特定の建設機械・現場監督を探索するため、属性から所在地の検索も可能とした。

(2) 建設機械の稼働状況の把握

移動の少ない建設機械を把握するため、取得した位置情報を基に、一定時間以上移動のない建設機械のアイコンをリアルタイムで赤く表示させた。また、サーバー側では位置情報のログを集計しており、移動履歴の把握を可能とした。次章では開発したシステムを作業所で実運用することで、有効性を検証したので、その概要を報告する。

4. 有効性の検証方法

4.1 プロジェクト概要

建設機械・現場監督の配置管理の効率化効果が大きいと考えられる工事は、ショッピングモールのように、建築面積が広大かつ間仕切り等で見通しの良くない建物種別である。そこで、本システムの有効性を検証するため、堺市にある大型ショッピングモールの新築工事に適用した。

本工事は建築面積が 39,656.1 m²、延床面積が 136,819.3 m²、構造は S 造、地上 4 階建て、工期は 2014 年 10 月～2016 年 3 月の 17 か月であった。施工中の外観を写真 1 に示す。

技術系の現場監督は最大配員数 32 名であった。建設機械は、最大で同時に約 800 台の高所作業車・フォークリフトが使用された。これらの内訳は、専門工事会社が独自に持ち込む 400 台と、ゼネコンから専門工事会社へ貸与する 400 台があった。さらに後者では、使用者が固定されている 300 台と、日々使用者が変わるスポット機 100 台に分かれていた。高所作業車の使用例を写真 2 に示す。

図3 表示画面の例

写真1 施工中の作業所外観

写真2 高所作業車を使った作業例

本システムの適用期間は、鉄骨建方開始時期である 2015 年 2 月から竣工検査前の 2016 年 2 月までである。システムの適用対象は、現場監督の管理業務への影響が大きい貸与スポット機 100 台と、現場監督 32 名全員とした。計測範囲は、多くの間仕切りによって見通しが良くない店舗エリアが含まれる 1～3 階の 3 フロアとした。多くの現場監督が、作業開始・終了時および休憩時間である 8・10・13・15・17 時頃に場内を巡回しており、定期的な情報更新が可能であった。

4.2 作業所場内のインフラ環境

施工中の通信環境については、場内に WIFI 等の通信設備はなかったが、現場監督全員にセルラーモデルの携帯端末が支給されていた。携帯端末は図面閲覧やメール確認等の日常業務用途で使用されているため、場内でも常に全員が携帯しており、常に通信は可能な環境であった。その他仮設電気設備については、一般的な鉄骨造の工事と同様、デッキスラブが打設された工区から順次、デッキ吊り下げ型の仮設照明・分電盤が設置されていった。仮設照明は、天井ボードが張られても多くが残置されており、本設照明機器が設置される工期終盤に全て撤去された。

4.3 使用機器

使用した機器は、①固定ビーコン：1フロア 100 個×3フロア＝300 個②移動ビーコン：100 個③起動用ビーコン：1フロア 3 個×3フロア＝9 個④携帯端末 32 台⑤レンタルサーバー1 台、の 4 種類である。①②のビーコンは市販品を使用した。これらは出荷時に割り当てられている UUID に加えて、majorID・minorID をユーザー側で設定することができる。本検証では、majorID にフロア番号、minorID に端末固有の番号を割り当てた。これら情報は、毎秒一回、自動で発信される。また、ケース外側に端末固有の番号を印字し、目視で確認可能とした。③起動用ビーコンについては独自に製作した。④携帯端末は、本検証と関係なく、技術系社員全員に予め配備されているものを使用し、事前に開発アプリケーションをインストールした。⑤レンタルサーバーは市販品を使用し、事前に開発アプリケーションをインストールした。

4.4 ビーコン端末の設置方法

固定ビーコンは、仮設照明に設置した。その理由は、①仮設電気工によって仮設照明と同時に設置可能であり、設置手間が少ない②天井本設照明の施工直前まで残置予定であり、盛り替えが少ない③竣工後は撤去される仮設材であり、回収漏れの恐れがない、の 3 点である。端末は防水・防塵のためにビニール袋で養生し、袋は印字された番号を目視できるよう透明なものを使用した。設置方法は、まず仮設電気工にフロア別に仕分けした固定ビーコンと配置計画図（既存の仮設照明配置図に、固定ビーコンの位置を重ねたもの）を支給し、仮設照明施工と同時に照明上部へ設置してもらった。設置状況を写真 3 に示す。本システムでは先述の通り、最も近接した固定ビーコン位置を現在地として判定する仕組みとしたため、設置密度が位置精度に直結する。今回の用途では、1 スパン（9 m）四方程度のエリア区分けで位置を把握できれば十分であった。そこで、図 4 に示す通り、1 スパンごとに設置されている仮設照明に対し、固定ビーコンは 2 スパン（18m）に 1 つの割合で、千鳥形状に配置した。配置後、現場監督が現地で固定ビーコンに印字された番号を目視し、アプリケーション上で配置位置を登録した。なお、現場監督の配置管理では、仮設事務所での在籍有無も重要であるため、仮設事務所内にも固定ビーコンを設置した。

移動ビーコンは、写真 4 に示す通り、運転席のコンソール回りにテープ等で固定した。

起動用ビーコンは、設置場所が位置判定に関わらないため、各端末の通信距離 60m で敷地内を漏れなく包含できていればよく、厳密に固定する必要がない。そこで、メンテナンス性を考慮して、資機材倉庫等等、地上から手が届き、かつ移動の少ない場所を選んで、各フロア 3 個を設置した。設置状況の例を写真 5 に示す。

4.5 アプリケーションの設定

アプリケーションではフロア別に図面を登録しており、①事務所 1F②事務所 2F③作業所 1F④作業所 2F⑤作業所 3F、の 5 種類を選択可能とした。アプリケーションの表示は、起動している間は常時サーバーに接続し、最新の情報に更新した。各携帯端末とサーバー間の位置情報の送受信は、アプリケーションが起動している場合は 1 秒間隔とした。未起動時は起動用ビーコンの制御コマンドを受信する都度（最大で 3 分間隔）送信し、その後アプリケーションが起動された際にサーバーから最新の位置情報を受信する設定とした。

写真 3 仮設照明に設定した無線発信機（左）

写真 4 高所作業車に設置した無線発信機（中）

写真 5 倉庫に設置した 77° リアクション起動用 BLE 端末（右）

図 4 作業所場内における無線発信機の配置方法

4.6 サーバー側の設定

サーバーには、各携帯端末から①日時②無線発信機 ID③ユーザー ID（号車番号）④XY 座標⑤フロア番号が送信される。これらをデータベースとして整理し、各ユーザー・建設機械の最新のフロア・位置座標・3 時間以上滞留の有無を算出した。データの履歴は、ファイルサイズの軽量化を考慮して SQL 形式で保存し、管理者がいつでも抽出することができる仕組みとした。

5. 検証結果および考察

5.1 データの取得結果および考察

取得したデータの例として、建設機械 1 週間分のログの一部を図 5 に示す。1 週間のデータを抽出した理由は、スポット用の建設機械を貸与する場合、同一ユーザーが連続して使用する期間が 1 週間である場合が多かったからである。抽出期間は鉄骨建方と設備工事が混在する 7 月 28 日～8 月 4 日とし、対象となる建設機械は 99 台であった。これらのログデータを分析することにより、建設機械の移動履歴を把握することができた。図 6 に、1 台の高所作業車を題材に、3 日間の移動履歴を示す。このように、期間中の移動状況や、よく使用されている場所を視覚的に把握することができる。

一方で、対象期間では、1 週間で 42870 個の位置データが記録されており、その内 2495 個が 3 時間以上移動のないデータ（以下、滞留データという。）であった。滞留データが 1 以上であったものが 37 台、0 であったものが 62 台であった。ただし、業務時間外となる 0 時～8 時、17 時～24 時のデータは除外している。滞留データを活用することにより、建設機械の導入・返却計画に役立てることが可能となる。

また、取得したデータの位置精度を、3 つの固定ビーコンで囲まれた 9m×18m のエリアで実測した。方法としては、図 7 に示す通り、水平 1,500mm×1,500mm グリッドで計 55 箇所の計測箇所を設定

し、①最近接ビーコンを正しく判定できているか②最大誤差、の2点を確認した。①最近接ビーコンの判定精度は、計測箇所55箇所の内、正しい判定が46か所、誤った判定が9か所であり、正判定率は83.6%であった。誤った判定となった箇所は2つの固定ビーコンの中間距離付近に集中しており、各固定ビーコンが発する電波の個体差や、BLE電波自体の出力の不安定性が影響しているものと考察できる。②最大誤差については、最近接ビーコンを全て正しく判定できていれば理論的には9mとなる配置であるが、実測では最近接ビーコンの判定の違いにより最大10.1mであった。その他、位置精度に影響があったケースとしては、外壁のない建物外周部のみ、上下フロアの固定ビーコンの電波を誤受信する場合があった。

5.2 効果

従来、現場監督による建設機械の目視探索は、担当の1人が1日30分～1時間程度を要している。一方、本プロジェクトでは、全ての現場監督が作業の進捗確認のために巡回行為を通じて、建設機械の位置情報を自動で更新しており、担当の現場監督による探索作業を削減することができた。削減効果は、システムが順調に稼働した期間が6か月であり、1日の削減時間を30分とすると、計72時間と試算することができる。

また、定性的効果としては、専門工事が誤って異なる高所作業車を使用した場合にも、本システムを使用して位置を特定し、迅速な作業は正が可能となった。

6. 結言

本報では、BLE端末を使った位置把握システムを開発し、作業所に適用した。作業所では高所作業車・フォークリフトの位置を屋内で最大誤差10.1m以内の精度で算出することで、日々の配置管理に必要なスパン単位での位置把握を可能とした。運用面では、現場監督に配備されている携帯端末を受信機として活用するとともに、場内の巡回時に位置情報を自動で共有する仕組みを構築することで、導入や運用を容易にした。本報では、現場監督の巡回時に高所作業車・フォークリフトの位置を自動的に把握・記録することを目的に置いたが、今後は、位置の把握間隔を密にすることによって稼働率まで求めるなど、より詳細な管理情報の取得にも展開したい。

参考文献

- 1) 金 炯根, 嘉納成男, 蔡 成浩: 建築工事における写真画像とVR画像を用いた進捗管理に関する研究—工事写真の撮影方法及び視点位置・方向の取得—, 日本建築学会計画系論文集 第599号, pp.119～126, 2006.1
- 2) 蔡 成浩, 土橋稔美, 吉田知洋, 中村隆寛: 建築工事における建設機械の接触災害の防止に関する研究—無線ICタグデータに基づく作業者と建設機械の接近状態の推定方法の検討—, 日本建築学会計画系論文集 第75巻第656号, pp.2451～2458, 2010.10
- 3) 宮崎慎也: RFID技術を用いて取得したスーパーマーケット内の顧客動線の可視化, 日本建築学会技術報告集 第18巻 第40号, pp.1033～1037, 2012.1
- 4) 中島史郎, 中川貴文, 根本かおり, 杉山 央, 古賀純子: 構造躯体の検査情報の記録・検索へのICタグの活用, 日本建築学会技術報告集 第15巻第29号, pp.31～35, 2009.2
- 5) 河口星也, 小神野和貴, 石井 真, 浅子正浩, ディネス・マナnder, セルゲイ・ピチェンコフ, 鳥本秀幸: IMESによるシームレス3次元ナビの実用化, GPS/GNSSシンポジウム2010, 2010.11
- 6) 興侶正克, 石川智也, 蔵田武志: 歩行者デッドレコニングに基づくハンド

移動ビーコン	uuid	固定ビーコン	X座標	Y座標	滞留有無	電波受信時刻	サーバ側の時刻
8041	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:02	2015/7/27 15:03
8073	00000000-65CC-	9902	24.31	5.78	N	2015/7/28 0:01	2015/7/27 15:03
8041	00000000-65CC-	9902	24.31	5.78	N	2015/7/28 0:05	2015/7/27 15:06
8073	00000000-65CC-	9902	24.31	5.78	N	2015/7/28 0:04	2015/7/27 15:06
8041	00000000-65CC-	9902	24.31	5.78	N	2015/7/28 0:08	2015/7/27 15:09
8073	00000000-65CC-	9901	1.3	10.1	N	2015/7/28 0:08	2015/7/27 15:09
8041	00000000-65CC-	9901	1.3	10.1	N	2015/7/28 0:12	2015/7/27 15:12
8073	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:11	2015/7/27 15:12
8041	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:14	2015/7/27 15:15
8073	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:14	2015/7/27 15:15
8041	00000000-65CC-	9902	24.31	5.78	N	2015/7/28 0:17	2015/7/27 15:18
8073	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:16	2015/7/27 15:18
8041	00000000-65CC-	9902	17.41	5.78	N	2015/7/28 0:21	2015/7/27 15:21

図5 取得したログの例

図6 高所作業車の移動履歴

図7 最近接ビーコンの判定精度と最大誤差

- ヘルド端末の屋内外測位技術, 電子情報通信学会技術研究報告. MVE マルチメディア・仮想環境基礎 110-382, pp.171～176, 2011.1
- 7) 吉澤菜津子, 遠藤貴裕, 永見健一: 屋内位置情報における推定技術の開発と新しいサービスの展開について, INTEC TECHNICAL JOURNAL 2013年 第13号, pp.44～51, 2013.2

注

注1) BLEとは、Bluetooth Low Energyの略で、近距離無線通信規格Bluetoothの拡張仕様の一つであり、使用電波は2.4GHz帯。Bluetoothは規格によっては100m程度まで通信可能だが、BLEは通信距離を15m程度とし、通信するデータを20バイト程度に制限しているため、端末が低電力で動作することが特徴である。

注2) iBeaconとは、Apple Inc.の登録商標である。

[2016年10月5日原稿受理 2017年1月6日採用決定]