

## JCMA 報告

## 平成 24 年度 研究開発助成 成果報告 (その 1)

## 超広帯域通信 IC タグと 3 次元モデルを用いた建設施工管理システム

矢吹 信喜

## 1. はじめに

建設生産プロセスにおいて、生産性の向上や品質の確保を図るため、国土交通省は、情報化施工を推進している。情報化施工では、GPS (Global Positioning System) などの GNSS (Global Navigation Satellite System) により位置情報を自動的に取得して利用する。しかし、トンネルや岩盤貯蔵施設などの地下構造物や建物内部では衛星からの電波が届かないため利用できない。一方、UWB (Ultra Wideband, 超広帯域通信) の IC タグを用いることにより、閉鎖空間でも位置情報の取得と個体識別情報を取得できる<sup>1)</sup>。建設施工現場において、各施工機械、作業員、重要資材に UWB-IC タグを取り付け、3 次元モデルと連携させることで、これらの各種建設資源を安全かつ合理的に管理することができるようになると考えられる。しかし、UWB-IC タグは米国やカナダでは幅広く研究されているが、日本では UWB の製品が少なく高価であり、ほとんど研究されておらず、特に建設分野への利用は進んでいない。

そこで本研究では、まず UWB-IC タグの屋内測位の精度に関する基礎的な実験を行い、UWB の送受信を行うアンテナを大規模な閉鎖空間の現場に適切に配置するための研究を行った。次に、建設作業員のヘルメットやバックホウ、ダンプトラック等の建設機械に UWB-IC タグを取り付けることを想定し、今後 CIM で作られる施工現場の 3 次元モデルの中で、各 UWB-IC タグの位置情報を基に、これら対象物の 3 次元モデルをリアルタイムに表示するプログラムを開発し、遠隔の工事事務所でも施工や安全の管理が行えるシステムを構築することを目的とした。

## 2. 超広帯域通信 (UWB)

超広帯域通信 (UWB) を用いた IC タグは、米国で軍事的な目的で開発された技術である。IC タグは、バーコードに取って代わる可能性のある技術であり大いに期待されているが、これまでの IC タグは、移動

する物体に取り付けた場合、アンテナに近づいた時、そのアンテナの近くにいることは認識できる。また、アンテナを持った物体が固定物に取り付けた IC タグに近づいた時、その物体の位置情報は概ね把握することはできる。しかし、GPS のように移動物体の位置情報をリアルタイムに得ることはできない。ところが、UWB は、周辺に 3 個以上のアンテナを設置することによって、cm 級の比較的高精度の測位を屋内でもリアルタイムに行うことが期待できる。さらに、IC タグには個体識別情報が付加されているため、IC タグが貼り付けてある各々の物がどこにあり、どの方向にどれだけの速度で移動しているかを、建設施工現場の事務所などで把握することができるようになる。

わが国で利用されている IC タグは、125 GHz 帯、13.56 GHz 帯、950 MHz 帯、2.45 GHz 帯が中心であり、アクティブ・タグではこれに加えて 300 ~ 400 MHz 帯の利用が可能である。一方で、UWB は、マイクロ波と呼ばれる 3 ~ 30 GHz の周波数帯のうち、3.1 ~ 10.6 GHz の非常に広い周波数帯を利用する通信方式である<sup>2)</sup>。FCC (Federal Communications Commission) の定義によると、帯域幅が 500MHz 以上または帯域幅の中心周波数に対する比が 20% 以上の通信方式が UWB である<sup>3)</sup>。

UWB にはインパルス無線方式、MB-OFDM (Multi Band-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, マルチバンド直交周波数分割多重方式)、DS-UWB (Direct Sequence-UWB, 直接拡散 UWB) の 3 つの方式が存在する。測位を行う際には、インパルス無線方式が利用される。インパルス無線方式は、搬送波による変調を用いず、1 ナノ秒以下という非常に短いインパルス状のパルス信号列を無線で送受信する方式である。この方式は短いパルス波を利用するので時間分解能が高く、高精度な測位を行うことが可能となる。

米国において、UWB は、周囲のシステムに影響を与えないために、3.1 ~ 10.6 GHz の範囲で -41.3 dBm/MHz 以下の出力に制限されている。また、利用に免許は不要で、屋外での利用も可能である。

一方で、わが国においては、3.4 ~ 4.8 GHz では -41.3

dBm/MHz 以下, 4.8 ~ 10.25 GHz では -70 dBm/MHz 以下の出力に制限されているほか, 利用には総務省に実験局の申請及び陸上特殊無線技士 3 級の免許が必要であり, 屋外利用も不可であり<sup>4)</sup>, 米国と比較して厳しい規制が行われている。さらに, UWB を利用する商品が少なく, 高価なこともあり, 特に建設分野での利用に関して, 日本ではほとんど研究がなされていない。

海外では, Zhang ら<sup>5)</sup> はクレーンのアームに UWB-IC タグを取り付け, リアルタイムに位置情報を取得し, 効率的なクレーン操作を計算するシステムの開発を行った。Cheng ら<sup>6)</sup> は, UWB 測位システムを利用して, コンピュータが自動的に作業員に指示するシステムを提案した。

### 3. UWB を用いた屋内測位に関する基礎実験

UWB-IC タグを用いた測位システムを利用したシステムを開発するに当たり, 屋内での UWB-IC タグを用いた測位精度の調査を行った。本研究では, UC テクノロジ社によって開発された UWB-IC タグの UWB dice を用いて実験を行った。このシステムは, UWB-IC タグ, 基地局, 基準局, 測位サーバ PC, 無線 LAN アクセスポイントから構成される。測位には, TDOA (Time Difference of Arrival) 方式が利用されている。具体的には, 図-1 に示すように, IC タグから測位信号が発信され, 測位信号は位置が既知の基地局及び基準局において受信される。測位信号を受信した基準局からは基準信号が発信され, 基準信号は基地局において受信される。基地局のアンテナは測位信号と基準信号という 2 つの信号が受信し, 基地局内部においてこれらの 2 つの信号の到着時間差がピコ秒単位で計算され, 無線 LAN アクセスポイントを通じてサーバ PC にアップロードされる。この到着時間差

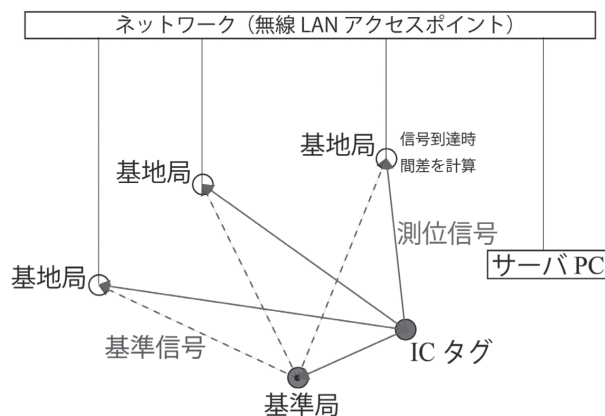


図-1 UWB の測位システム

を基に, 基地局から IC タグまでの距離と, 基準局から IC タグまでの距離の差を計算するサーバ PC は測位サーバがインストールされたコンピュータで, 基地局及び基準局の位置は予めサーバ PC に入力されており, 基地局からアップロードされた 2 つの信号の到達時間差から三辺測量方式を用いて IC タグの位置座標を特定する。測位を行うためには, 基地局及び基準局は無線 LAN アクセスポイントを通じてネットワークに接続されている必要がある。また, このシステムでは三辺測量方式を用いるので, 測位を行うためには基地局 3 台以上及び基準局 1 台以上が IC タグとの間で電波のやり取りを行える 30 m 以内の場所にあることが必要だ。

実験は, 大阪大学吹田キャンパス S4 棟 1 階 111 講義室において, 図-2 に示すように 4 台の基地局を部屋の四隅に, 中央に基準局を中央に設置し, 60 cm 間隔の 9 × 9 の格子交点上の高さ 1.5 m の地点に UWB-IC タグを制止させた状態で測位し, その精度を求めた。実験結果を表-1 に示す。平均誤差は, 24 cm であり, メーカーの仕様 (30 cm) と同程度であった。

本研究では, 静的精度実験の他に, 動的精度実験, アンテナ指向性実験, 静的遮蔽影響実験を行ったが, 誌面の都合で本稿では省略する。

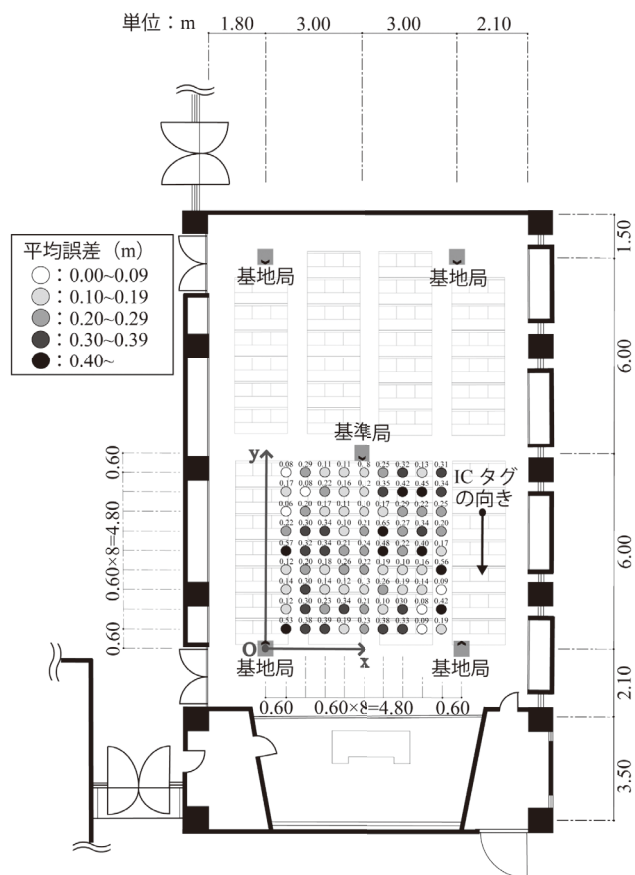


図-2 実験を実施した講義室における機器類の配置及び測位点の位置

表一 静的精度実験結果

| 項目   | 計測結果 (m) |
|------|----------|
| 平均   | 0.24 m   |
| 最大   | 0.65 m   |
| 最小   | 0.06 m   |
| 標準偏差 | 0.13 m   |

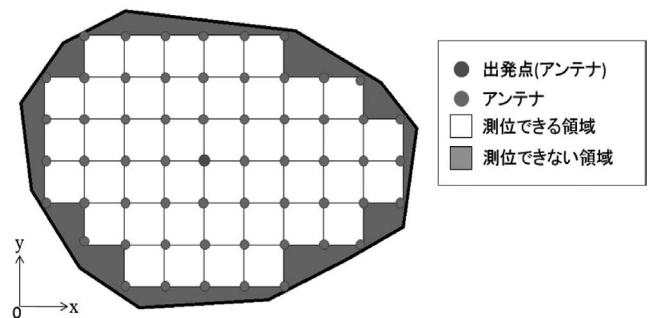
#### 4. UWB のアンテナ設置最適化システムの開発

前述のように UWB-IC タグで測位するためには、平面上であれば、3 台以上のアンテナ基地局と同時に交信できる必要がある。地下空洞などの施工現場において、できるだけ少ない台数のアンテナで、できるだけ広い範囲において測位できるようにしたい。そこで、電波の到達範囲から最少の個数のアンテナで、現場のほとんどの範囲をカバーする最適に近いアンテナ配置方法を求める手法を開発した。

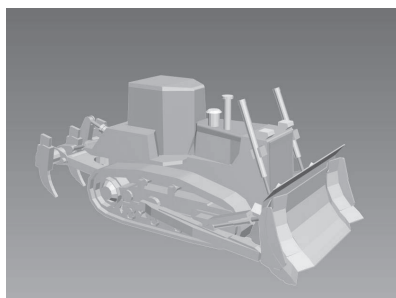
本研究では、簡略化のため、3 台ではなく 4 台のアンテナを、最大可能通信距離を対角線とする正方形の頂点に配置し、この正方形を施工現場領域内に最大数配置できる最少のアンテナ個数を求めるアルゴリズム

を開発した。

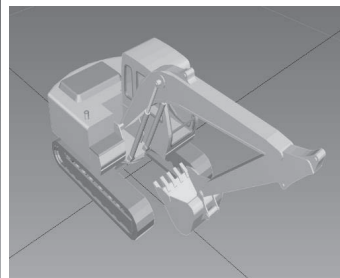
具体的には、図一 3 に示すような領域が与えられた場合、領域内の任意の位置に出発点を設け、アンテナを置く。次に、X 軸方向に直線を引き、正方形の一辺の長さ毎に領域内に点をプロットし、各点から Y 軸方向に直線を引き、同様に点をプロットし、正方形を描き、正方形の個数とアンテナの台数を求める。正方形の個数の最大値とその場合のアンテナの台数を求めるために、モンテカルロ法により出発点をランダムに発生させるようにした。



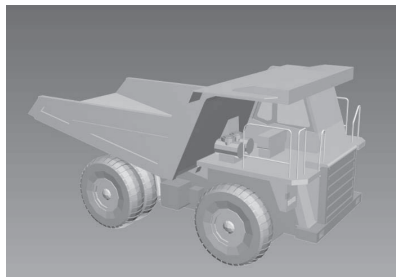
図一 3 領域内に正方形を配置したサンプル



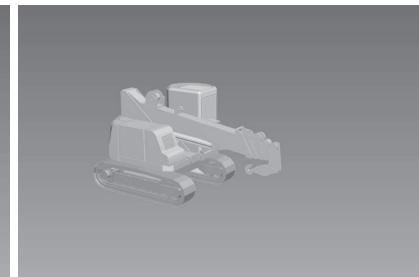
ブルドーザ



バックホウ



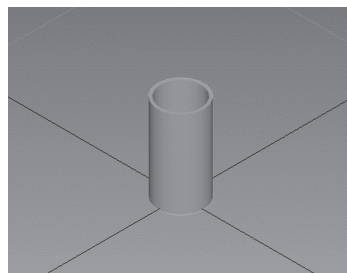
リジッドダンプトラック



クローラークレーン



作業員



PC管

図一 4 UWB-IC タグを取り付けた建設機械、作業員、重要建設資材の3次元CG



図一5 空間内に表示された建設機械，作業員，重要建設資材の3次元CG

## 5. UWB-IC タグを用いた現場状況のリアルタイム3次元表示システム

3次元表示システムは、建設施工現場において作業員、各種建設機械、重要資材等にUWB-ICタグを取り付けて位置情報と個体識別情報を同時に取得し、それらの情報を基に、コンピュータ上の3次元空間に建設施工現場を再現するシステムである。本システムの利用により、見通しの悪く、全体を一望することが困難な地下空間でも建設施工状況の全体を把握することが可能となり、より効率的な指示を出し、安全確認を行うことができるようになると考えられる。

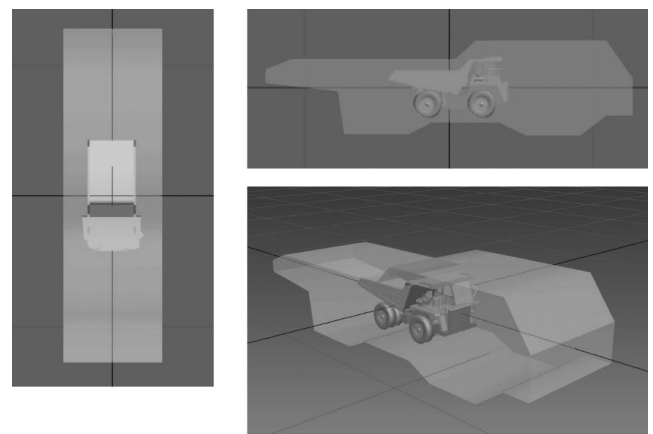
本システムでは、UWB-ICタグの測位データと個体識別番号から、対応する建設機械、重要建設資材、作業員などの位置情報をリアルタイムに得て、予め作成してあるそれらの3次元CGオブジェクト（図一4）を地下空洞あるいは建物の3次元モデル内に表示するものである（図一5）。

## 6. UWB-IC タグを用いた自動警告システム

本研究で開発した自動警報システムは、建設施工現場においてUWB-ICタグを用いて取得した作業員、各種建設機械、重要資材等の位置情報を基に、作業員が建設機械や資材とぶつかりそうになったときに自動的に危険を知らせるシステムである。本システムは前節で記した3次元表示システムを動作させることによって自動的に起動し、3次元表示システムが動作している間、機能する。現状の本システムでは、オブジェクト同士が一定の距離以上に近づいた場合にオブジェ

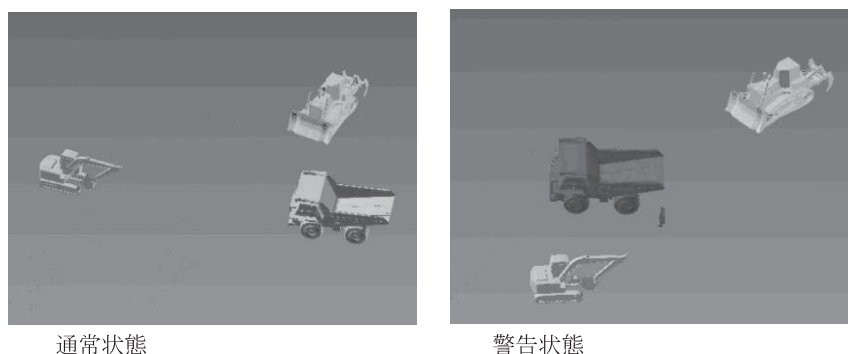
クトの色の変化によって危険を知らせるだけであるが、実際の建設現場に適用する際は、作業員と建設機械のオペレータに直接、警告するようにする予定である。本システムの利用により、見通しが悪い、あるいは大きな音により危険に気づきにくい場所であっても、危険を把握しやすくなると考えられる。また、事務所のモニター上でも危険な状況をリアルタイムに確認することができ、より安全性を向上させることに役立つと考えられる。

本システムの方法は、お互いの接近状態を判別するために、UWB-ICタグが設置してある各種オブジェクトの3次元モデルの周囲に判定領域を設置し、それらが少しでも触れるか、重複した場合を危険状態と考え警告を行うものである。判定領域の考え方としては、図一6に示すように、各3次元オブジェクトを前後、左右、上下方向にそれぞれ一定の倍率で拡大した範囲を危険領域としている。



図一6 リジッドダンプトラックの危険領域





図ー7 自動警告システムの動作状況のサンプル

自動警告システムの動作状況のサンプルを図ー7に示す。通常の状態では色が変わっていないが、作業員がダンプトラックの近くにいるため、両者が赤色に変化し、警告状態となっている。

## 7. おわりに

本研究では、UWB-IC タグの測位精度の調査実験を行い、UWB-IC タグの利用のために必要なアンテナの設置の最適化を行うシステム、UWB-IC タグから得た情報を基に建設施工現場をコンピュータ上に再現する3次元表示システム、現場に危険が生じている場合に自動的に知らせる自動警報システムの3つのシステムの開発を行った。

将来的に、建設施工現場にある全ての建設機械、作業員や技術者、部材や資材にUWB-IC タグを取り付けて本研究で開発したシステムを用いることによって、事務所のコンピュータのみならず、無線LANでつながっている全てのタブレットPCやスマートフォンなどで、3次元モデル内をUWB-IC タグが取り付けである全てのモノが動いている様子を、目視できない場所であっても確認することができるようになる。また、3次元モデルは、オブジェクト指向技術によるものであるから、各部材には様々な属性データが埋め込むことが可能である。こうした属性データを持つオブジェクトとUWB-IC タグを取り付けた機械、人、部材などの距離や位置関係、あるいは軌跡などの情報から、自動的にコンピュータが指示を出すことによって、生産性や安全性をさらに向上させることができるようになると考えられる。さらに、UWB-IC タグに各種セ

ンサーを埋め込むことによって、UWB-IC タグから得られる位置情報と個体識別情報に加え、機械の温度や音響、振動、加速度などをモニタリングして、さらに高度な判断の自動化につなげ、建設現場のみならず、工場、建築、都市空間等様々な環境に応用する可能性も考えられる。

## 謝 辞

本研究は、一般社団法人日本建設機械施工協会の研究助成により実施した。尚、本稿の成果の一部は一般財団レントオール奨学財団の研究助成によるものを含む。ここに謝意を表する。

JCM A

## 《参考文献》

- 1) 神谷泉：測位技術の調査とICタグ、UWBの測位への応用、国土地理院時報、第106集、pp.31-36、2005。  
<http://www.gsi.go.jp/common/00004817.pdf>
- 2) 阪田史郎：UWB/ワイヤレスUSB教科書、インプレス、2006。
- 3) Gary Breed: A summary of FCC rules for ultra wideband communications, High frequency electronics, pp.42-44, 2005.
- 4) 東芝：ウルトラワイドバンド技術と動向、2009。  
[http://www.cistec.or.jp/service/iinkaidayori/houkokusho2009/data\\_kamotsu/kamotsu5-1.pdf](http://www.cistec.or.jp/service/iinkaidayori/houkokusho2009/data_kamotsu/kamotsu5-1.pdf)
- 5) C. Zhang, A. Hammad, S. Rodriguez: Crane Pose Estimation Using UWB Real-Time Location System, J. Comput. Civ. Eng., 26, pp.625-637, 2012.
- 6) Tao Cheng, Jochen Teizer, Giovanni C. Migliaccio, Umberto C. Gatti: Automated task-level activity analysis through fusion of real time location sensors and worker's thoracic posture data, Automation in Construction, Vol.29, pp.24-39, 2013.

矢吹 信喜（やぶき のぶよし）

大阪大学 大学院工学研究科

環境・エネルギー工学専攻 教授