

■11 群 (社会情報システム) -2 編 (電子航法・ナビゲーションシステム)

3 章 陸上システム

(執筆者：岩本雅史) [2009 年 11 月 受領]

■概要■

本章では、陸上で用いられる電子航法・ナビゲーションシステムについて述べる。

まず、自動車や鉄道における利用技術と最近の利用動向について述べ、次にそれ以外の技術として、室内の測位技術、及び地形変位や地中構造の計測技術を解説する。また、今後は位置情報を利用したサービスが発展することが期待されるので、その一例として LBS 技術について述べる。

【本章の構成】

本章は、3-1 節 自動車のナビゲーション、3-2 節 鉄道のナビゲーション、3-3 節 その他のナビゲーションとして、室内の測位技術 (3-3-1 項) と地形や変位計測技術 (3-3-2 項)、地中計測技術 (3-3-3 項)、LBS 技術 (3-3-4 項) で構成する。

■11 群-2 編-3 章

3-1 自動車のナビゲーション

(執筆著：西川訓利) [2008年5月 受領]

3-1-1 カーナビゲーション技術

カーナビゲーションシステムの基本構成を図 3・1 に示す。システムは GPS (Global Positioning System) や自律航法装置などの自車位置や走行状態を特定する装置と、DVD メディアなどのデジタル地図データなどからなり、運転者に対して現在位置、目的地への走行経路、交通情報などをディスプレイ画面や音声で提供する。

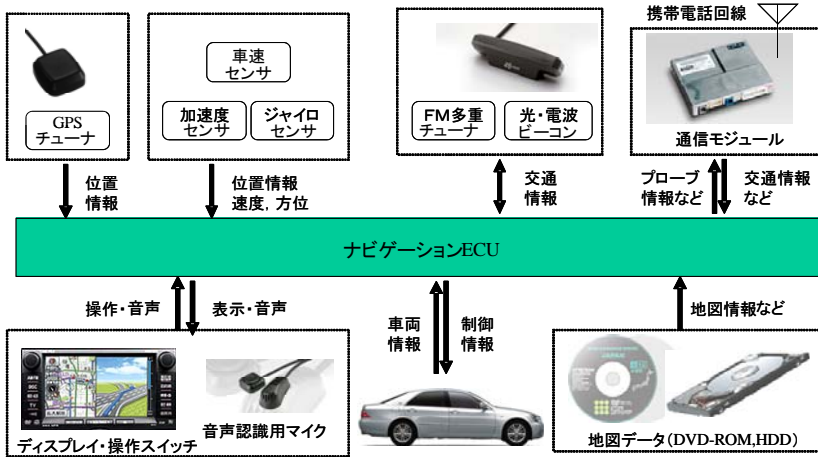


図 3・1 カーナビゲーションシステムの基本構成

自律航法装置は GPS 情報を補正する手段として用いられ、車両の車速パルスから車速や移動距離を求める車速センサや、図 3・2 に示すような左右折時の方位変化を検出するジャイロセンサ、進行方向の加速度を検出する加速度センサなどがある。これらを組み合わせることによって、トンネルや地下道、高架下など GPS 受信が安定しない場所でも自車位置などの計測が可能となり、位置精度も向上させることが可能となる。

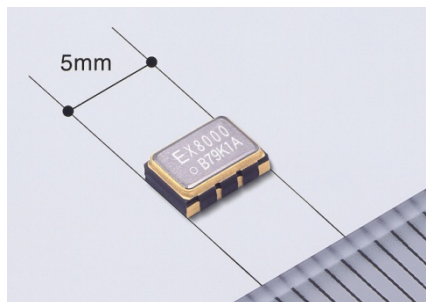


図 3・2 ジャイロセンサ (出典：エプソントヨコム株式会社ホームページ)

経路案内のもととなる地図データは、(財)日本デジタル道路地図協会の DRM (Digital Road Map) や航空写真をもとに作成される。地図データには、経路探索のための道路の接続情報だけでなく、交通情報表示のための VICS リンク情報、経路案内のための車線情報、POI 情報 (Point Of Interest : 施設情報、スポット情報など位置情報と連動したデータ)、規制情報などが格納される。地図のデータ形式は多くは独自規格であるが、共通化規格として ISO 標準をねらった Kiwi フォーマットが提案されている。地図を記録する媒体は、1987 年の CD-ROM に始まり、DVD-ROM、HDD と大容量化及び読み取りの高速化が図られてきた。HDD では、データの書き換えが可能になるため、**図 3・3** に示す例のように無線通信手段を使って最新地図の部分更新をするサービスが提供されている。

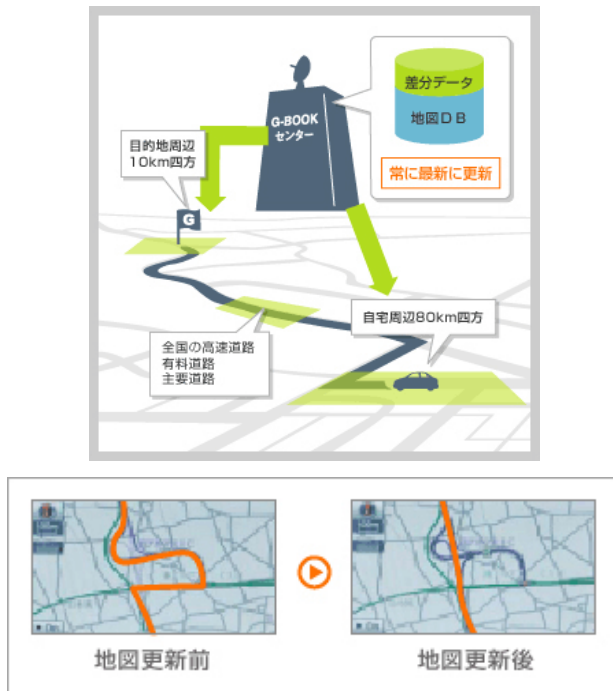


図 3・3 G-BOOK mX マップオンデマンドサービス (出典 : G-BOOK ホームページ)

(1) 交通情報提供

日本では世界に先駆け、交通情報を車載機にリアルタイムに提供するシステムとして、(財)道路交通情報通信システム (VICS : Vehicle Information and Communication System) センターが 1996 年 4 月より交通情報提供サービスを開始し、2003 年にはサービスエリアの全国展開が完了した。VICS の構成を **図 3・4** に示す。VICS によって提供される情報としては、渋滞情報、所要時間、事故・故障車・工事情報、速度規制・車線規制情報、駐車場の位置、駐車場・サービスエリア・パーキングエリアの満車・空車情報などがある。



図 3・4 VICS の構成 (出典 : VICS ホームページ)

(2) テレマティクスサービス

携帯電話の普及に伴い、1990 年代後半から MONET (トヨタ)、コンパスリンク (日産など)、インターナビ (ホンダ) などカーナビゲーションと情報センターを携帯電話で接続して情報提供するサービスが開始された。そして、携帯電話回線のデジタル化、高速化に伴い、高速・大容量のデータ通信を活用してサービス内容をより拡大した G-BOOK (トヨタ)、カーウィングス (日産)、インターナビプレミアムクラブ (ホンダ) の第 2 世代のテレマティクスサービスが 2002 年あたりから開始された。

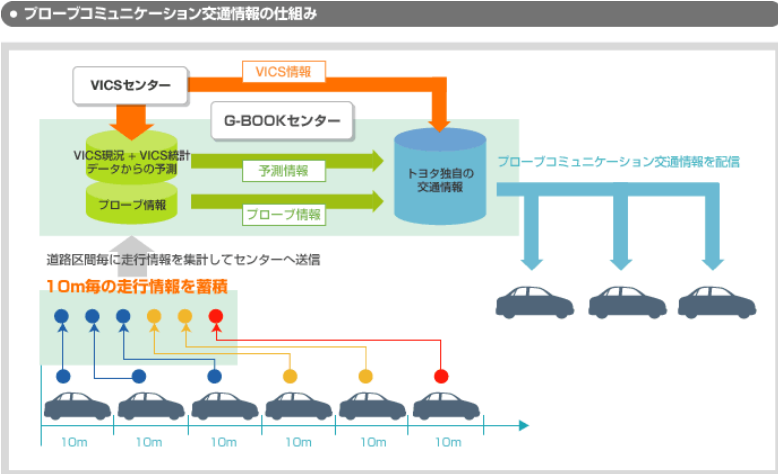


図 3・5 プローブカーによる情報収集の構成例 (出典 : G-BOOK ホームページ)

(3) プローブカーによる交通情報

VICS に比べ、より広範囲の交通状況を収集する方式として、**図 3・5** に示すプローブカー（フローティングカー）システムが実用化された。プローブカーによる情報収集は道路を走行中の車から直接行っており、推定する収集エリアの拡大だけでなく、VICS 情報にはない情報も提供可能になる。例えば、方向別に旅行時間を集計することにより、高速道路の分岐点においては車線別の情報を提供することが可能になる。

3-1-2 周辺監視技術

自動車の周辺を監視することは安全の確保という観点から非常に重要であり、カーナビゲーションシステムが普及するに従い、そのディスプレイと超音波センサやカメラなどを組み合わせた種々の監視システムが市販されるようになった。以下に代表的なものを示す。

(1) 超音波センサによる周辺監視

これは**図 3・6**に示されるような超音波センサを用い、周辺の障害物を検出して警報音と表示により障害物の存在を知らせるシステムである。検知範囲は0~50 cm程度のものが一般的であるが、1 m程度まで検知できるものもある。また、ステアリング舵角を参照して、回避できる障害物に対しては警報をしないようにしたシステムもある。

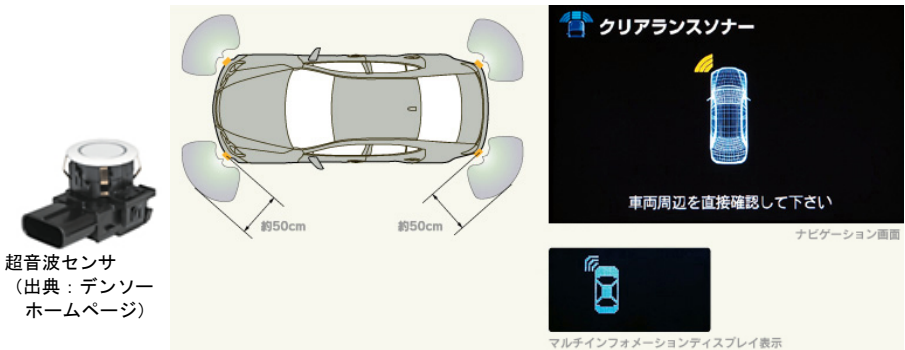


図 3・6 クリアランスソナーシステムの構成例 (出典：トヨタ自動車ホームページ)

(2) カメラ映像による周辺監視

運転席からは直接視認できない死角領域に対し、カメラ映像を運転者に提示することによって間接的に視認できるようにするシステムであり、カーナビゲーションシステムのディスプレイを利用できるようになってから本格的に普及した。バックモニタの例を**図 3・7**に示す。自車の後方、数メートルの範囲を監視するため、車両後端に水平画角 100 度以上の広角カメラが使用されている。また、自車幅を延長した線や自車からの距離の目安となる線をオーバーレイ表示する機能もある。



バックモニタカメラ
(出典：アイシン精機
ホームページ)



図 3・7 バックモニタの表示画面例 (出典：トヨタ自動車ホームページ)

フロントモニタは、フロント直下モニタ、ブラインドコーナーモニタ、ワイドビューフロントモニタといったバリエーションがある。フロント直下モニタは、自車の直前直下、ボンネットで死角となる領域をモニタするものであり、ブラインドコーナーモニタは、図 3・8 のように見通しの悪い交差点やT字路において側壁の死角となる領域をモニタするものである。カメラを車両先端に設置することで、交差点やT字路への車両の進入を最小限にとどめながら、運転席からは死角になる領域をモニタするものである。

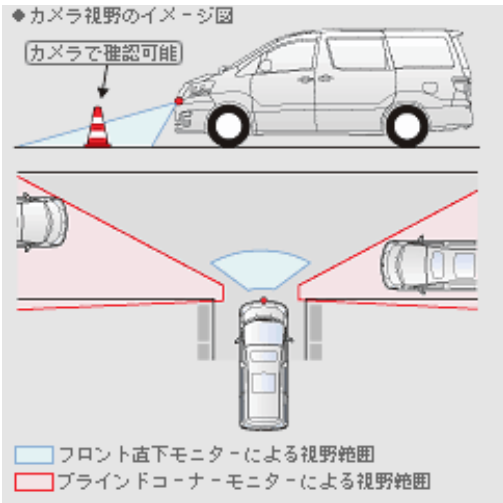


図 3・8 フロント直下モニタとブラインドコーナーモニタ (出典：トヨタ自動車ホームページ)

全周モニタ (図 3・9) は、車両の周囲に配した複数のカメラによる映像を視点変換により仮想視点からの映像に変換したうえで合成することにより、自車周辺を上空から見下ろした、いわゆるトップビュー映像を表示するものである。自車の映像は実写映像ではなく、予め保存している映像を合成している。

■ 視点変換

カメラ映像を仮想視点からの映像に変換します。

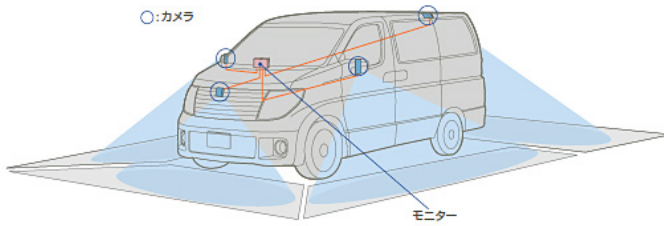


図 3・9 全周モニタ (出典：日産自動車ホームページ)

■11 群-2 編-3 章

3-2 鉄道のナビゲーション

(執筆者：中村英夫) [2009年2月 受領]

鉄道におけるナビゲーションは、訓練された乗務員によって運転操作が行われるため、要求される機能も通常のカーナビゲーションと異なる。しかし、ナビゲーションを、「運転操縦を支援する案内システム」という視点で見れば、いくつかの特徴ある機能が見られる。

乗り物の運転補助においては、走行路の地図情報の案内や物理的状態の案内が重要になる。しかし、鉄道の場合、乗務員は、訓練により運転する線区の地理的・物理的状態を習熟することはもとより、ダイヤに従った運転操縦の基本を身体で覚えこむ。更に、設備面でも、曲線や勾配、そしてその状況に応じた速度制限情報まで、標識として線路沿線に設置されている。したがって、地理的物理的状況のナビゲーションは、鉄道の運転手にとっては、今のところ二次的なサービスになる。ただ、今後状況が変わり、インターオペラビリティの要求が進んで乗務員が他社線区も自由自在に運転するような状況が出現したり、自社線区でも運転線区が固定されないような乗務員運用が出現したりすると、地理的状況や線路状態、速度制限に対する情報の適切なナビゲーションが必要になる可能性もある。

一方、鉄道輸送に要求される運転といえば、安全な操縦とダイヤに従った定時刻運転である。この視点でナビゲーション機能を吟味する。定時刻運転に必要な情報について乗務員は運転時刻表を携行し、各駅の停車時刻と発車時刻（通過列車の場合には通過時刻）を運転の拠りどころとする。運転時刻表は通常縦長のカードとして運転席に置かれる。この部分に対する電子化の開発も行われている。車上で計測した走行位置情報をもとに次駅の到着や出発の計画時刻がディスプレイに表示されるものであるが、ここまで装置化されればナビゲーションシステムといってもよいであろう。

次に、保安制御についてナビゲーションの観点から考察する。走行する列車運転の安全は列車相互の間隔制御を誤りなく行うことであり、閉塞と呼ばれる1区間に1列車しか走行させないことを基本として実現されている。実際には、この閉塞制御を前提に、色灯信号機の制御やATCなどの速度制御が行われる。沿線に配置された色灯信号機の見逃しは直接事故につながるため、ATSなどのバックアップ装置も設備される。しかし、安全のためには情報を沿線ではなく運転台に表示させた方が分かりやすい。その実現には地上と車上を結ぶ伝送系の整備が必要になるため、多くの線区では未だに色灯信号機が用いられている。一方、ATC線区では車内信号に置き換わっている。運転席に安全な運転のための情報が表示され、運転士はその情報を下に運転すればよい。しかも、このATCには自動的なブレーキ制御機能をも備えており、単なるナビゲーションの範疇を超えている。

近年のデジタルATCでは、走行が許可された地点までの距離から定まる走行限界速度を情報として表示する形態に移行している。乗務員はこの速度以下で乗り心地や定時刻での到着を目的とした運転に専念すればよい。

■11 群-2 編-3 章

3-3 その他のナビゲーション

3-3-1 室内の測位技術

(執筆者：中嶋信生) [2009年1月 受領]

室内における人や物の位置を検出するニーズは色々あるといわれながら、課題の難しさから以前は技術的検討例が少なく、最近になってやっと各種の研究報告や実用化の例が見られるようになってきた。難しさとは、膨大なインフラにかかるコストとマルチパス（構造物からの電波の反射）である。屋外ならば20数個の衛星で一挙に全世界をカバーできるが、室内で特にナビゲーションなどを目的とする場合には、個々の建物やエリアすべてに測位システムを展開する必要がある。測位では電波を用いる方法が一般的であるが、マルチパスは測距精度を著しく損なう。

これらの問題を克服しつつ実用的な室内測位を実現する技術は、まだ開発途上にある。一つの技術で成り立つかも知れないし、複数の技術が協調しあって初めて実現する可能性もある。用途に応じて様々な技術が適材適所で利用されるかもしれない。ここでは、室内測位を目的として検討されている技術全般を概説する。

表 3・1 は室内測位技術の一覧である。GPS のように電波を使用するだけでなく、光、画像なども利用される。

表 3・1 室内測位方式一覧

	レンジフリー	レンジベース	手段
GPS技術利用	(1) (2)		電波
無線LAN方式	(3)	(4)	電波
Bluetooth方式	(5)	(6)	電波
赤外・可視光方式	(7)		光
微弱電波、RFタグ	(8)		電波
UWB方式		(9)	電波
Zigbee方式 (IEEE802.15.4)	(10)		電波
マーカー方式	(11)		映像
ハイブリッド測位	(12)		自律航法

レンジフリーとは測距に基づかない方式で、情報発信源から位置情報を得てそれを現在地と見なす。精度は低いが、構成が簡単でコスト面で有利である。

レンジベースとは、**図 3・10** に示すように基準点までの距離を測定し、三辺測量などの原理で高精度測位が可能である。この方式では、移動体から常に3箇所以上の基準点が見える必要があり、インフラコストが嵩む。マルチパス環境下では、正確な距離推定も大きな課題である。

別の分類としては、移動体側の測位かシステム側の測位かがある。ナビゲーションでは前

者が用いられ、位置監視には後者が適している。しかし、携帯電話などの情報伝達手段が使えるならばどちらでもよく、本質的問題ではない。以下、個別の技術内容と特徴を順次説明する。

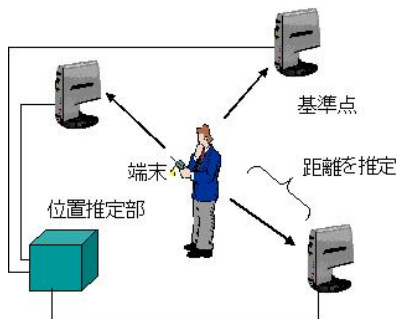


図 3・10 レンジベース測位方式

(1) GPS 技術利用

GPS レピータ (表 3・1 の(1)) と PSEUDOLITE (表 3・1 の(2)) がある。

GPS レピータは、屋外で受信した GPS の電波を、復調せずにそのまま同軸や光ケーブルで室内に導き、必要なレベルまで増幅して再放射する。したがって、受信者は屋外の受信機的位置情報を得るので、屋外受信機と室内の中継器は同じ位置(緯度経度)である必要がある。最近の携帯電話端末は GPS 受信機を内蔵しているので、そのまま機能追加することなく利用できる特徴がある。ケーブル工事が必要なことと、連続測位できないことが欠点である。

PSEUDOLITE は、擬似 GPS 衛星とも呼ばれる。室内に固定した送信装置で GPS と同じ種類の信号を発し、移動体は三辺測量で位置を得ることができる。装置コスト、遠近問題、同期が必要ななどの問題があるが、測位精度は高い。擬似衛星の形式をとりつつ、より簡易な方式(IMES)が提案されている。GPS 送信波の付帯情報の中に位置を含ませて送信する。レンジフリーの測位方式である。既存の GPS 受信機に僅かの改造を加えるだけで使用できる。

(2) 無線 LAN 方式

IEEE 802.11 系のアクセスポイントを利用する。三辺測量の原理を用いる方法(表 3・1 の(4))と、アクセスポイント ID (表 3・1 の(3))を利用する方法がある。三辺測量の原理を用いる方法は、アクセスポイントに測距機能をもたせる方法と、受信レベル情報を用いる方法がある。測距法は専用アクセスポイントの使用や同期などが必要となるが、精度は高い。マルチパスの影響を軽減する技術も開発されている。受信レベルのみだと精度が落ちるので、過去の履歴の学習や統計的手法で精度を上げている例も見られる。

アクセスポイント ID を利用する方法では、各アクセスポイントの ID と位置の対応テーブルを作成しルックアップするレンジフリー方式で位置を知る。すでに全国展開している無線 LAN を利用するので、新たなインフラコストがかからない特徴がある。

(3) Bluetooth 方式

無線 LAN とほぼ同様な方式であるが、測距に特徴がある。Bluetooth は周波数ホッピング技術を使用している。そこで、レンジベースの方式(表 3・1 の(6))では各周波数で往復の通信を行い伝達関数の複素値を得る。ホッピングを利用することで複素伝達関数周波数特性が求められるので、そのフーリエ変換からインパルス応答、すなわち伝搬遅延が求まり、距離に換算できる。マルチパスを分離して、室内環境下でも誤差 1~2 m の精度を得ることができる。一方、レンジフリーな測位システム(表 3・1 の(5))も商用化されている。

(4) 赤外・可視光方式

基準送信点が発する位置情報を移動体が受信するレンジフリー方式である(表 3・1 の(7))。光は直進性が強いので、移動体は検出部を送信点に向ける必要がある。赤外方式がすでに商用化されている。可視光方式は、一般の照明が白色 LED に置き換えられたときに非常に有効である。LED の一部または全部に位置情報を含ませる。人がいる室内ではほとんどの場所で照明が使用されているので、ナビゲーションなどの用途ならばどこでも利用できる。

(5) 微弱電波、RF タグ

レンジフリー方式の典型である(表 3・1 の(8))。もともと電波が弱く受信範囲が狭いことが利点となっている。低コストなので、広域エリア展開に適している。RF タグはアクティブ型が適しているが、コストの観点ではパッシブ型も考えられる。

(6) UWB 方式(表 3・1 の(9))

三辺測量との相性がよい。UWB は非常に狭いパルスが用いられるので、マルチパスの分離が容易で高精度な距離推定ができるからである。ただし、他システムへの干渉問題から送信出力を厳しく抑えられているので、長い距離の測位は困難である。図 3・11 は適用例で、移動体が発したパルスを 3 個以上の固定受信機が受信して相対遅延から距離を算出する。同期を不要とするために、時間基準用の移動局を置いている。この方式は無線 LAN などにも有効である。

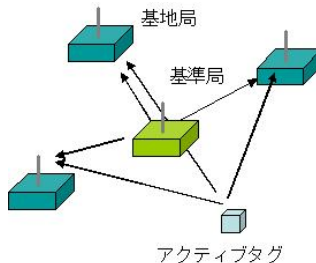


図 3・11 UWB で用いた測位の例

(7) Zigbee 方式(表 3・1 の(10))

Zigbee は無線規格 IEEE 802.15.4 を用いたアドホックネットワーク機能を備えた無線通信方式

の名称である。送信電力が 1 mW 程度で到達距離も短い、無線モジュールは他の無線方式に比べて低価格なことが大きな特徴であり、測位利用の研究が最も多い無線方式である。Zigbee はもともと家庭のリモコンなどが用途であったが、最近になって測位機能を付加した無線モジュールが得られるようになってきた。

(8) マーカー方式 (表 3・1 の(11))

バーコードなどの情報を埋め込んだタグを天井や読み取り可能な場所に配置しておき、カメラで画像として取り込み分析して位置情報を読み取る方式である。ロボットの誘導などに用いられる。インフラ側コストが非常に安いので、ナビゲーションなど他への用途も考えられる。

(9) ハイブリッド測位 (表 3・1 の(12))

複数の測位方式を組み合わせると欠点を補うことができる。一例としてレンジフリー測位と自律航法の組合せを説明する。自律航法とは、他の測位手段を使用せずに自分の位置の変化を求める方式である。人の場合、方位計や歩数計を用いて位置の変化を検出する。レンジフリー測位で位置を知り、その後は自律航法で連続した位置情報を得るという組合せがある。自律航法の累積誤差をレンジフリー測位ごとに 0 にする。低インフラコストと連続測位を両立させられる方式として興味深い。新宿地下下での実験例を図 3・12 に示す。二つの測位方式の組合せで誤差は 2 m 程度に抑えられている。

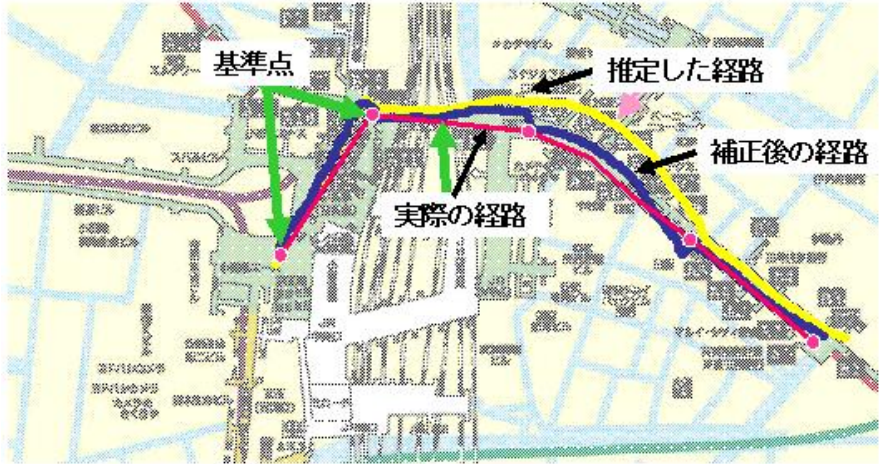


図 3・12 新宿地下下街におけるハイブリッド測位実験結果例

以上各種の測位方式を紹介した。ユビキタス社会では、物や人の位置情報は極めて重要である。今後、室内の測位技術は大きく発展する可能性があるといえる。

3-3-2 地形・変位計測技術

(執筆者：岡村 敦) [2008年6月 受領]

土砂面などの地形のわずかな変位を連続して計測すれば、がけ崩れや地すべり、崩落の予知が可能といわれている⁵⁾。被計測対象である地形全体を覆う複数の計測点に電波発信機を設置し、複数のアンテナで受信された信号の位相差から計測点位置を推定する電波を利用した測位方式がある¹⁾。この計測技術は当初、ビルなどの建造物の耐震試験における壁面の精密変位として開発され^{1)~3)}、土砂面監視へ応用されてきた⁴⁾⁵⁾。測位の根本原理は位相差 GPS (Global Positioning System)⁶⁾ やロランなど電波航法システムなどと共通である。このような電波による計測では、カメラやレーザ測量儀など光学センサを用いる場合に比べ、比較的広い範囲(広視野)を同時に、天候に左右されることなく計測できる利点を有する。

図 3・13 に電波の位相差を利用した本変位計測系の基本構成を示す。各計測点に設置された電波発信機は周波数 f_c を基準にそれぞれ $(f_c + f_1), \dots, (f_c + f_m), \dots, (f_c + f_M)$ の周波数の電波を送信する。ここで $f_1, \dots, f_m, \dots, f_M$ は f_c に比べて十分に小さな値とする。これらの電波を、異なる位置に設置された少なくとも M 個の受信アンテナで受信する。ここで、第 m 受信アンテナの位置を $\mathbf{q}_m = [X_m, Y_m, Z_m]^T$ (T は転置) と表すことにする。それぞれのアンテナの受信信号は f_c の局発信号と乗じられ、それぞれ $f_1, \dots, f_m, \dots, f_M$ の周波数の信号にダウンコンバートされる。これらの受信信号は A/D 変換器でデジタル信号に変換された後、帯域通過フィルタを通過することにより、発信機ごとの信号に弁別される。すなわち、帯域通過フィルタから出力される信号は、第 n 計測点に設置された電波発信機 $\#n$ からの受信信号 $\xi_{n,m}$ のみになる。上記とは異なり、発信機ごとに異なるスペクトル拡散変調を用いて信号を弁別することもできる。これらのように、複数の発信機からの電波をそれぞれ独立して処理することができるので、以降、第 n 計測点の位置 $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ を推定する処理を代表して説明する。

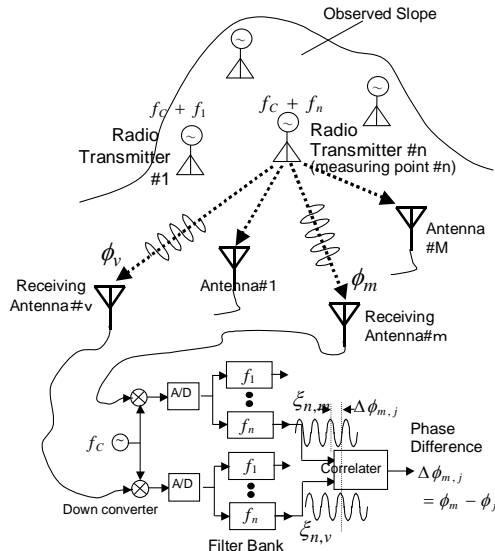


図 3・13 変位計測系の基本構成

第 n 計測点に設置された電波発信機から電波 $s(t) = \exp[j2\pi(f_c + f_n)t]$ が放射されるとき、第 m 、第 v 受信アンテナで受信され、第 n 帯域通過フィルタから出力される受信信号はそれぞれ次式で与えられる。

$$\xi_{n,m} = \exp[j(2\pi f_n t + \phi_0)] \exp[j\phi_m] \quad (1)$$

$$\xi_{n,v} = \exp[j(2\pi f_n t + \phi_0)] \exp[j\phi_v] \quad (2)$$

上式中の ϕ_m はそれぞれ第 m 受信アンテナにおける受信信号の位相であるが、 $\|\mathbf{p} - \mathbf{q}_m\|$ を電波発信機から第 m 受信アンテナまでの距離、 $\lambda (\equiv c/f_c)$ を電波の波長 (c は電波伝搬速度)、 k_m を整数として、次式のように表すことができる。

$$\phi_m = (2\pi/\lambda) [\|\mathbf{p} - \mathbf{q}_m\| - k_m \lambda] \quad (3)$$

受信信号の位相差 $\Delta\phi_{mv} \equiv \phi_m - \phi_v$ は、受信信号の相関を次式のように求めることにより観測できる。

$$\Delta\phi_{mv} = \text{Arg} \langle \xi_{n,m}(t) \xi_{n,v}^*(t) \rangle \quad (4)$$

ここで $\langle \rangle$ は時間 t に関する平均操作、 $*$ は複素共役を表す。

このように、例えば受信信号の位相差 $\Delta\phi_{12}$ 、 $\Delta\phi_{13}$ 、 $\Delta\phi_{14}$ などと、4 組以上のアンテナ間の位相差を観測すれば、第 n 計測点の位置 $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ は、 $N_{mv} (\equiv k_m - k_v)$ を整数値パイアスとして、次の連立方程式の解として決定することができる。

$$f_{mv}(x, y, z) = (\lambda/2\pi) \Delta\phi_{mv} + \lambda N_{mv} \quad (m, v \in \{1, \dots, M\}; m \neq v), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} f_{mv}(x, y, z) &\equiv \|\mathbf{p} - \mathbf{q}_m\| - \|\mathbf{p} - \mathbf{q}_v\| \\ &= \sqrt{(x - X_m)^2 + (y - Y_m)^2 + (z - Z_m)^2} - \sqrt{(x - X_v)^2 + (y - Y_v)^2 + (z - Z_v)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

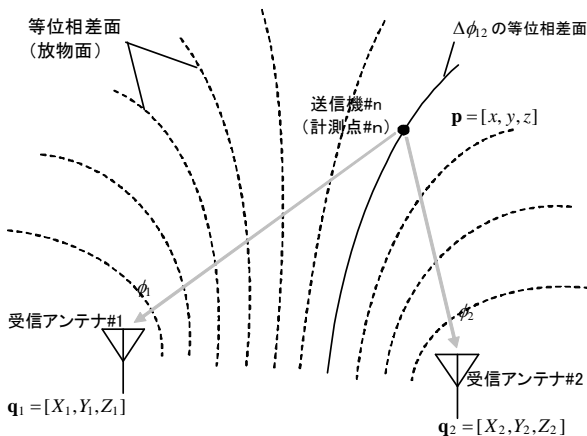


図 3・14 等位相差面の例

式(5)は、計測点からアンテナまでの各経路長の距離差と観測位相差 $\Delta\phi_{mv}$ との関係を示している。例えば、 $m=1, v=2$ についての式(5)を満足する $[x, y, z]$ は、**図 3・14** に示すような放物面で表される位相差 $\Delta\phi_2$ の等位相差面上にあることになる。計測点の位置は、別の受信アンテナの組合せから得られる等位相差面との交点から推定される。

整数値バイアス N_{mv} は、例えば変位観測を開始する際の発信機位置からの位相変動を追跡し積算することにより決定することができる。この際、 N_{mv} を正確に追跡するために、**図 3・15** に示すように、位相差の観測間隔を測定点の変位速度に比べて十分に小さくする必要がある。また、観測中に長い時間電波が遮断されるとサイクルスリップにより整数値バイアスの推定が不正確になる恐れもあるが、GPS の位相差を用いた相対測位⁶⁾と同様に冗長な個数のアンテナで観測する、追尾フィルタを適用するなどの防止策がある。

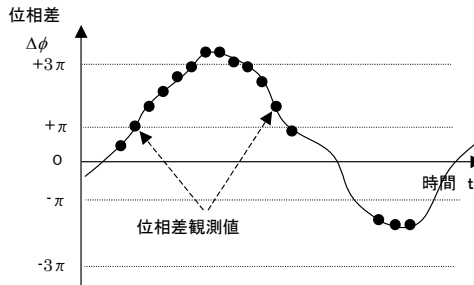


図 3・15 位相差と観測間隔

なお、この測位方式では、計測点に設置する電波発信機の周波数ゆらぎは相殺されるため、発信機の周波数安定度は比較的低いもので済み、小型、安価なものが使用できる特長を有する。

計測点（電波発信機）の位置 $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ は式(5)の非線形連立方程式から決定されるが、実際には適当な近似解 $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]^T$ の周りに展開して補正量 $\delta\mathbf{p} = [\delta x, \delta y, \delta z]^T$ を逐次的に求めることにより解くことができる。 $\Delta\phi_2, \Delta\phi_3, \Delta\phi_4$ 観測時の $\delta\mathbf{p}$ は次式に例示される^{1), 2)}。

$$\hat{\mathbf{A}}\delta\mathbf{p} = \delta\mathbf{r}, \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{13}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{13}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{13}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{14}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{14}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{14}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial z} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\delta\mathbf{r} = \begin{bmatrix} f_{12}(x, y, z) - f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \\ f_{13}(x, y, z) - f_{13}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \\ f_{14}(x, y, z) - f_{14}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

実際の測定では雑音やマルチパスなどの外乱により観測位相差 $\Delta\phi_{mv}$ には誤差 $\varepsilon_{\phi mv}$ が加わる。十分小さな位相観測誤差 $\mathbf{e}_\phi = [\varepsilon_{\phi 12}, \varepsilon_{\phi 13}, \varepsilon_{\phi 14}]^T$ と測位誤差 $\mathbf{e}_p = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z]^T$ の関係は次式のように表される。

$$\mathbf{e}_p = (\lambda/2\pi)\mathbf{A}^{-1}\mathbf{e}_\phi \quad (10)$$

ここに、 \mathbf{A} は式(8)の $\hat{\mathbf{A}}$ で $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$ を $[x, y, z]$ に置き換えた行列である。なお、4 以上の観測位相を用いて測位する際は、式(10)で \mathbf{A} の逆行列の代わりに擬逆行列を用いた最小二乗問題となる。このとき、測位誤差の大きさ $\sigma_p = \sqrt{E[\varepsilon_x^2] + E[\varepsilon_y^2] + E[\varepsilon_z^2]}$ は

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= E[\text{trace}\{\mathbf{e}_p \mathbf{e}_p^T\}] \\ &= (\lambda/2\pi)^2 \text{trace}[(\mathbf{A}^{-1})^T \mathbf{A}^{-1} E\{\mathbf{e}_\phi \mathbf{e}_\phi^T\}] \end{aligned} \quad (11)$$

となる。位相観測誤差 $\varepsilon_{\phi mv}$ が互いに独立で、その分散が共通に σ_ϕ^2 であるならば、測位誤差の大きさ σ_p は式(11)より次式で見積もることができる^{1), 2)}。

$$\sigma_p = \sigma_\phi (\lambda/2\pi) \sqrt{\text{trace}[(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}]} \quad (12)$$

すなわち、 $\sqrt{\text{trace}[(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}]}$ が本測位の GDOP (Geometrical Dilution Of Precision) であり、本測位の誤差は、計測点 (発信機) と受信アンテナとの幾何学的配置に依存することを意味する。

本変位計測法による長期間の野外実験結果も報告されている。変位する地形モデルとしてビルの壁面に 2.5 GHz 帯 10 mW の電波発信機を設置し、複数の発信機を 40 日間にわたり動させながらその位置を計測したところ 40 日間の変位の rms 誤差は 2~4 mm であった^{4), 5)}。

■参考文献

- 岡村 敦, 御子柴 正, 関口高志, 菊地 宏, “多点振動変位の位相差による計測法,” 信学技報 AP2000-145 / SANE2000-145, Jan. 2001.
- A. Okamura, T. Mikoshiba, W. Yoshizaki, H. Nagai, A. Mogi, T. Sekiguchi, and H. Kikuchi, “A Multi-point Radio Displacement Measurement Method for Testing Quake-proof Structure,” Proc. ASME PVPC, PVP-vol.455-1, pp.83-90, Aug. 2002.
- N. Suzuki, T. Mikoshiba, and A. Mogi, “A Multi-path Tolerant Displacement Measurement System Using Radio Wave Phase Differences,” Proc. ASME PVPC, PVP-vol.486-1, pp.181-187, Jul. 2004.
- 鈴木信弘, 網嶋 武, 吉崎 互, 岡村 敦, 西山 哲, 大西有三, “電波位相差変位計測システムの長期屋外実験,” 2006 年信学総大 B-2-28, 2006.
- N. Suzuki, T. Amishima, A. Okamura, W. Yoshizaki, K. Nishikawa, Y. Onishi, S. Nishiyama, T. Yano, D. Lee, and J. Wu, “Radio Phase Displacement Measurement Method for Disaster Prevention and Monitoring,” 台日地下空間建設工程調査・計測技術交流検討会論文集, pp.117-123, Nov. 2005.
- 日本測地学会, “GPS,” 日本測量協会, 1989.

3-3-3 地中計測技術

(執筆: 佐藤源之) [2008 年 5 月 受領]

土壌や岩石など地下媒質の比誘電率 ε_r は体積水分率 θ に依存し、その関係は Topp により実験式が与えられている¹⁾。

$$\theta = -0.0503 + 0.0292\varepsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon_r^3 \quad (1)$$

また、地層中の水の導電率は地層導電率 σ の大きな決定要因である。 $\delta = \sigma / \omega \epsilon$ を媒質の誘電正接 (Loss Tangent) とすると電磁波の減衰定数 α と位相定数 β は次式で与えられる。

$$\alpha = \left[\frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2} \left\{ (1 + \delta^2)^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \beta = \left[\frac{\omega^2 \mu \epsilon}{2} \left\{ (1 + \delta^2)^{\frac{1}{2}} + 1 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式(2)において $\delta \gg 1$ のとき媒質は導電的であり、抵抗法、電磁法が利用でき、 $\delta \ll 1$ のときは誘電的であり、地中レーダ (GPR) ^{2), 3), 4)} の利用により適している。

直流抵抗法 ⁵⁾ は、導電的な媒質に対して電極を介して地中に電流を流し、導電率に比例して発生する電位分布を計測することで、地中の導電率分布を計測する手法である。電極の空間的な配置を変えて計測を行えば、逆問題手法などの導入により、複雑な構造の分布も推定できる。また、空間的な感度分布を考慮した電極配置の方法が提案されている。簡易な計測方法であり、深度 10 m 程度までの浅い地層を対象とする土木分野などでの計測に多く利用されている。

媒質が誘電的な場合より低い周波数を用いる電磁探査法 ⁵⁾ も、媒質の導電率を計測する手法である。数 10 kHz 程度より低い周波数の交流磁界は導電性の高い媒質にも容易に浸透する。交流磁界により導電性媒質中に発生した「うず電流」は導電率に比例した 2 次磁界を発生するので、これを受信センサで計測する。本手法は交流磁界を利用するので電極を媒質に非接触で計測可能である。そこで、センサを航空機に搭載し、空中から計測することなども可能である。また、送信磁界は人工的に発生する方法以外に、自然界に起因する低周波磁界を広域に利用することも可能である。こうした方法による地下 10 km 以上の深部探査にも応用できる。一方、小型センサは非接触性を利用し、地下水探査や地雷検知などにも利用できる。この方法は金属探知機と同義である。また、電磁探査ではセンサ位置に加え周波数も計測パラメータとして逆解析に利用できる。

媒質が誘電的であるとき、電波の位相速度は式(2)より近似的に次のように求められる。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} (m/s) \quad (3)$$

このとき、周波数分散性が消え、電波が媒質中を伝搬するので地中レーダ (Ground penetrating radar : GPR) による地下イメージングが行える。電波は地中の不均質な物質で反射を受ける。半無限地層境界面に垂直に入射する電波の反射はフレネルの反射係数に従う。

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (4)$$

また、媒質が導体である場合、反射係数は $\Gamma = -1$ となり、誘電体より大きな反射が起きる。したがって、GPR は金属と同時に非金属の検知も行えることに特徴をもつ。実際のターゲットは有限の大きさをもつので、フレネル反射係数は直接適用できないが、物質の誘電率や導電率に対する反射強度を知る目安として利用できる。

媒質が誘電的でも周波数が高いほど減衰は大きく探知距離を縮める。レーダ分解能と探知距離は周波数に対して相反するため、周波数の選択は計測の特性を支配する最も重要な要因である ^{3), 6), 7)}。GPR では十分な分解能を確保するため直流成分を含むパルスが送信に使われ

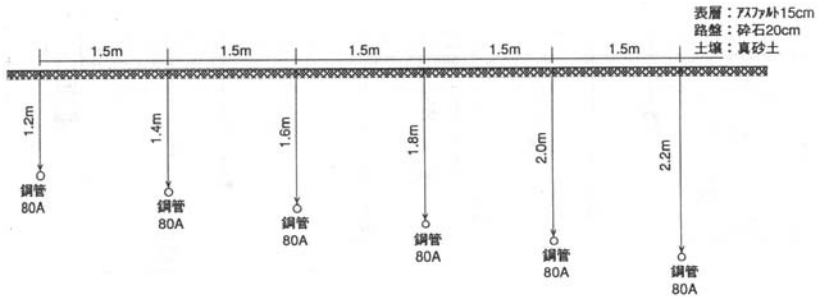
る。実効的な中心周波数は地質、地下水調査などでは数 m の探査深度を達成するため 300 MHz 以下、1 m 程度の埋設管検知では 500 MHz 付近、コンクリート調査などでは 1 GHz 以上である。

GPR 装置は短いパルスを送信するインパルスレーダと、周波数を掃引しながら連続波を送信する CW レーダに大別される。GPR 用アンテナは広帯域性が要求されるため、ボータイ型ダイポールアンテナ、ビバルディアンテナ、キャビティバック・スパイラルアンテナなどが利用されている。図 3・16 に GPR 装置の一例を示す。測定者は画面に表示される GPR 波形を見ながら歩行速度で移動して測定する。GPR はアンテナが地面に非接触でも計測が可能であり、自動車や航空機に搭載した高速測定も実用化されている。GPR は計測しながら地下の断面図を観測できる即時性に大きな特長をもつが、記録した波形を信号処理することで明確な解析が可能となる。信号処理には波形を明瞭にするためにフィルタリングのほかに、移動しながら計測した波形を合成開口処理（マイグレーション処理、SAR プロセッシング）が用いられる⁸⁾。合成開口処理は回折効果を取り除くうえ、より分解能の高い画像再構成を実現する。

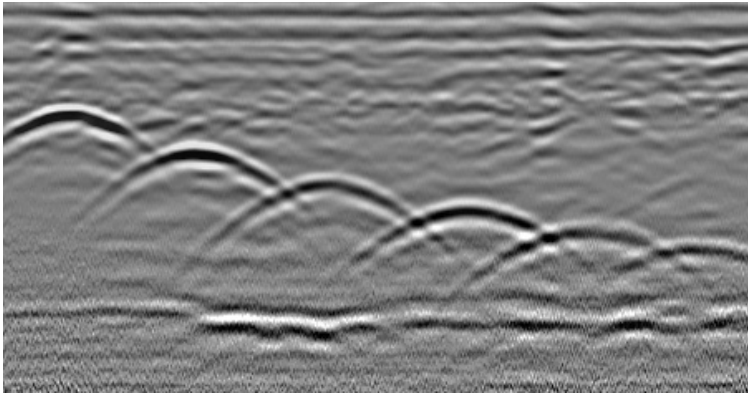


図 3・16 地中レーダ (GPR) 装置

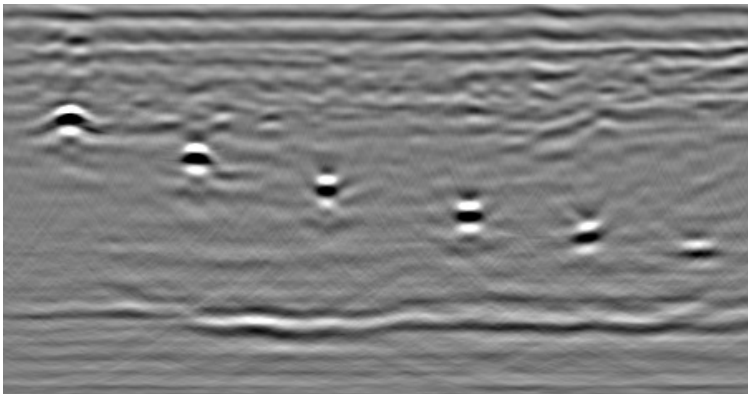
図 3・17 に GPR プロファイルの例を示す。このときの真の地下構造は図 3・17(a) に示すように 6 本の鋼管が埋設されている。図 3・17(b) に示した GPR プロファイルでは使用する波長が対象物と同程度であり、散乱の効果が大きい。このため、GPR 原波形は実際の地中構造物とは大きく異なる。計測対象が波長に比べて十分大きくない場合、GPR は十分な水平方向解像度をもたない。そこで、アンテナを移動しながら計測・記録した信号を利用した合成開口レーダ (SAR) 信号処理により分解能の向上を図る。



(a) 埋設物の構造



(b) GPR 原波形



(c) マイグレーション後の波形

図 3・17 金属埋設管の GPR による検知 (大阪ガス早川秀樹氏提供)

現在 GPR が最も広く利用されているのは、路面下のガス管や信号ケーブルなど人工地中埋設物の検知である。深度 2 m 程度までの埋設物検知については実用性が高い。コンクリート内部の空洞や、割れ目、また鉄筋の錆などコンクリート構造物の非破壊検査に GPR は有効である^{9), 10)}。同様に舗装道路表面や、トンネル壁面を測定することでコンクリート内部の空洞やひび割れ、また舗装下の空洞を検知する技術が開発されている。地下水調査は地下水源探査や建造物保全に重要である。GPR は非掘削計測法であるうえ、水分率の変化に敏感であるから地下水計測に適している^{11), 12)}。また、地下水の流動検知は、土壌汚染、地下水汚染の検知技術としても期待されている。遺跡調査では埋没した住居跡や古墳内部などに GPR が応用されている¹³⁾⁻¹⁶⁾。

GPR による埋設物計測の最大の長は、金属・非金属を問わない検知能力にある。地雷検知には電磁法である金属探知器が使用されてきたが、金属をほとんど含まないプラスチック製地雷の検知が難しいのと同時に砲弾の破片など地雷以外の金属片による誤検知が問題となっている。GPR の可視化能力により地雷とそれ以外の物体の識別技術が期待されている(図 3・18)¹⁷⁾⁻¹⁹⁾。



図 3・18 GPR による地雷検知 (東北大学 ALIS)

本項で紹介した地中計測法は、いずれもボアホール (坑井) 計測にも利用でき、石油探査などで成果をあげてきたが、今後、廃棄物地層処分など多くの工学的応用が検討されている²⁰⁾⁻²²⁾。

■参考文献

- 1) G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan, "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines," *Water Resour. Res.*, 16(1), pp.574-588, 1980.
- 2) 佐藤, 利岡, "物理探査ハンドブック," 手法編 第 7 章 地中レーダ, 物理探査学会, 1998.
- 3) D. Daniels (Ed.), "Ground penetrating radar, 2nd Edition," IEE Radar, Sonar and Navigation series 15, IEE,

2004.

- 4) 鈴木 務, 荒井郁男, “電磁波による地下探査,” 山下栄一(編), “応用電磁波工学,” 近代科学社, pp.172-192, 1992.
- 5) “物理探査ハンドブック,” 物理探査学会 (1998)
- 6) J. C. Cook, “Radar transparencies of mine and tunnel rocks,” *Geophysics*, 40, pp.865-885, 1975.
- 7) 中内啓雅, 網崎 勝, 早川秀樹, 岸 雅樹, 佐藤源之, “配管用探査用地中レーダの探査性能改善に関する研究,” *物理探査*, vol.57, no.3, pp.233-243, 2004.
- 8) 佐藤源之, “地中レーダによる地下イメージング,” *電子情報通信学会論文誌 C*, vol.J85-C, no.7, pp.520-530, 2002.
- 9) 佐藤源之, “見えない地中世界もここまで解る,” *OHM* 2003.8, pp.23-28, Aug. 2003.
- 10) 佐藤源之, “地中レーダ技術,” *セメント・コンクリート*, no.593, pp.1-8, Oct. 1996.
- 11) Lu Qi, Motoyuki Sato, “Estimation of Hydraulic Property of an Unconfined Aquifer by GPR,” *Sensing and Imaging*, 8(2), pp.83-99, 2007.
- 12) Y. Nakashima, H. Zhou, and M. Sato, “Estimation of groundwater level by GPR in an area with multiple ambiguous reflections,” *Journal of Applied Geophysics*, vol.47, Issue 3-4, pp.241-249, Jul. 2001.
- 13) 西村 康, “遺跡の探査,” *日本の美術*, No.422, 至文堂, 2001.
- 14) L. Conyers, D. Goodman, “Ground-Penetrating Radar - An Introduction for Archaeology,” Altamira Press, Walnut Creek, CA, USA, 1997.
- 15) H. Zhou and M. Sato, “Application of Vertical Radar Profiling Technique to Sendai Castle,” *Geophysics*, vol.65, no.2, pp.533-539, Mar. 2000.
- 16) H. Zhou and M. Sato, “Archaeological Investigation in Sendai Castle using Ground-Penetrating Radar,” *Archaeological Prospection*, 8, pp.1-11, Mar. 2001.
- 17) Motoyuki Sato, Yusuke Hamada, Xuan Feng, Fan-Nian Kong, Zhaofa Zeng, Guangyou Fang, “GPR using an array antenna for landmine detection,” *Near Surface Geophysics*, 2, pp.7-13, Feb. 2004.
- 18) Motoyuki Sato and Kazunori Takahashi, “The Evaluation Test of Hand Held Sensor ALIS in Croatia and Cambodia,” *Proc. SPIE*, 6553, 65531D-1-65531D-9, 2007.
- 19) 佐藤源之, 路原, 新妻弘明, “ボアホールを利用した地中レーダ計測 - 群馬県田尻遺跡への応用 -,” *物理探査*, 50, pp.196-207, 1997.
- 20) 佐藤源之, “ボアホールレーダ,” *地質ニュース*, 537, pp.29-35, 1999.
- 21) Kazunori Takahashi, Motoyuki Sato, “Parametric Inversion Technique for Location of Cylindrical Structures by Cross-Hole Measurements,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11), pp.3348-3355, 2006.

3-3-4 LBS (Location Based Service) 技術

(執筆者: 西川啓一・島 光秀) [2008年12月受領]

(1) 概要

地理情報システム (GIS : Geographic Information Systems) は, 「地理的位置や空間に関する情報をもった自然, 社会, 経済などの属性データ (空間データ) を統合的に処理, 表示するコンピュータ情報処理体系」である. 阪神淡路大震災以降, データの共用やインターネットによる配信技術が飛躍的に伸長し, 従来の紙地図管理から, デジタル処理された2次元 GIS が実用化されるのと相俟って, 様々な分野で利用が進んでいる. 一方, 米国が開発した GPS (Global Positioning System) は, 当初の軍用目的の利用から発展し, 現在では世界中で広く民生分野で利用されている衛星測位システムである.

これらの地理情報にリアルタイムで位置情報とコンテンツ情報を融合し, モバイル通信技術を用いて社会活動の広範な分野での利用を示す新しい概念として, Location Based Services (LBS) という言葉が用いられるようになった.

LBS の特長は、位置依存性、リアルタイム性、ユビキタス性、統合性・包括性、メディア融合性などにある。また、LBS の実現に必要な社会基盤と主要な技術課題に、GPS 衛星が利用できる屋外のみならず屋内を含むシームレス測位システム、高精度 3 次元空間データ、通信システム、端末・表示技術などがある。

(2) 高精度空間データ取得技術

LBS において特に必要性が高いものに高精度の 3 次元空間データがある。地震、津波、洪水などを想定した防災システムでは、自然地形に加え構築物や建物の 3 次元形状が必要である。広範囲の空間データ取得には衛星、航空機などによる上空からの撮影が一般的であるが、高精度 3 次元空間データの取得手段として現在最も注目されているのはレーザ測量方式（航空機/車両搭載レーザスキャナ）である。この外に、デジタルカメラ方式（CCD 方式）、画像レーダ方式などがある。

(3) 3D 空間情報技術

高精度空間データ取得技術で取得された 3 次元地形データ+空中写真画像による 3D 表示をベースとする、情報共有と、迅速・的確な意思決定を支援する 3 次元空間情報システムがある。

人工衛星や航空機にて取得した空中写真画像を、地形データである DSM もしくはデジタル標高モデル（DEM：Digital Elevation Model）に貼り付け、地物オブジェクト（建物、道路など）を付加することによって 3 次元空間モデルを構成するデータ統合機能と、携帯/車載 GPS 端末からの「位置情報」、水位・雨量・変位や、交通渋滞など各種の「センサ情報」、プレイバック可能な「監視カメラ映像」など位置に依存する情報を、リアルタイムに統合・管理するデータ管理機能と、マルチ大画面、PC 環境、Web 環境、携帯電話に対応した高速な 3 次元空間モデルの表示・操作が行える高速 3 次元表示・操作機能が必要となる。

(4) シームレス測位技術

携帯電話の普及に伴い、携帯電話からの 110 番通報が固定電話のそれを上回るようになったことを背景に、日本版 E 911（E 110/119/118：携帯電話を用いた高精度位置情報を伴う緊急通報システム）が 2007 年 4 月より運用されている。GPS 携帯が普及してきており、屋内からの緊急通報の要望も予想される。位置情報取得は非常時の緊急通報に限らず、地図情報配信とセットで屋内外での高精度なナビゲーションも期待されてきている。

前述の GPS は屋外でのみ利用可能であるが、中長距離 RFID の登場により、屋内測位ができる環境が整ってきている。RFID（Radio Frequency Identification）は従来から物流利用が主であるが、パッシブ型で 7 m 級通信距離を実現する UHF 帯高精度電子タグも商品化されており、この RFID タグ/リーダを床や壁に貼り、RFID リーダ/タグ内蔵の携帯端末により位置情報の取得が可能となっている。

(5) 応用事例

(a) 施設管理や防災対策のための先進ソリューション

近年、我が国では都市型災害や大規模災害が頻発し、これまでに経験したことのない大き

な被害が発生している。こういった状況に対応して、社会施設の管理や防災対策のための先進ソリューションが存在する。

大画面ディスプレイまたは机上/携帯のパソコンにて、現在の河川・海岸・道路などの状況を、分かりやすく 3 次元で表示する。3 次元表示により、現場の地形・環境を理解でき、監視カメラの映像により現在の状況を把握、テレメータ情報などを同時に表示することにより、状況判断を支援する。河川における防災応用システムとして利用することで、緊急対策や応急復旧作業を支援できる。

(b) 携帯ナビゲーション

GPS 携帯の普及とともに、地図情報配信も一般的になっており、利用者が目的地を指定することで経路検索し、地図上で経路を表示して道案内するものである。また、このサービス提供に加盟するレストランなどのショップ情報が、GPS だけでなく RFID と組み合わせて、その近傍でポップアップ表示するようなサービスの展開が考えられる。

(6) まとめ

LBS の目指すところは、いつでもどこでも享受することが可能な位置情報に基づくサービスである。すなわち、LBS では、ユーザの位置や環境に応じて適切なサービスとコンテンツが提供される。これらは(5)項で述べた代表的な応用事例、特定の分野だけでなく、位置情報を媒体として異なったサービスの統合や異なる情報の統合にも広げることができる。例えば、携帯電話に搭載した GPS による歩行者ナビゲーションシステム上で、ほかの様々なサービスを統一的なインタフェースで利用することになりつつある。