

## 鉄道沿線環境のモデリングに関する研究



服部 鉄範\*



加藤 尚志\*



渡邊 貴志\*

車両にレーザスキャナやラインセンサカメラ等を搭載し、それらから得られる沿線構造物の形状に関する情報を処理して三次元モデルを構築するモバイルマッピング技術の開発・実用化が進んでいる。この技術により沿線からの空間情報の取得ができれば、例えば無線システムの伝搬シミュレーションのモデルに応用して、構造物の遮蔽や反射等を考慮した厳密なシミュレーションが可能となり、設計品質の向上と測定の簡素化が期待できる。本研究では主に無線設備のシステム設計を行う際の伝搬シミュレーション用モデルの構築を目的として、まず鉄道沿線環境での三次元空間情報の収集方法を検討し、点群モデルを作成した。またシミュレーションに直接用いるためのポリゴンモデルを汎用ソフトウェアにより構築した。さらにこのモデルによる受信レベルに関するシミュレーションを実施し、測定値との整合性を確認した。

キーワード：モデリング、レーザスキャナ、ポリゴンモデル、伝搬シミュレーション

### 1 はじめに

従来、地形および構造物の三次元形状データの取得手法は地上からは測距測角儀やGPSなどを使った測量と、写真撮影あるいはステレオ写真を用いた地上写真測量が主であり、上空からでは航空写真による写真測量が主に利用されている。測距測角儀による地上からの測量は1点1点の計測精度は高いが、現地での人手による計測であり地物の形状計測には膨大な時間と労力がかかる。また、地上写真測量は主に限られた対象に対して1～数モデルのステレオ写真ペアを用いた計測に適しており、多くのモデル接合が必要な広範囲の計測には効率的、経済的な手法とは言えない。効率的に広範囲の地形・構造物データを取得する手法としては現状、空中写真測量が広く利用されてきた。

一方、三次元空間情報の取得手法については、最近の計測技術の発達により測量の高度化が進み、レーザやデジタル画像を利用したデータ取得手法が実用化されてきた。多くの三次元空間情報はデジタルデータとして獲得されるため、その後のデータ編集の自動化が可能となっている。また、搭載されたレーザスキャナやラインセンサカメラは、GPSやINS (Inertial Navigation System 慣性航法装置) との同期により位置や姿勢が正確にわかるため、従来の空中写真測量では必要な基準点を用いることなく、直接計測結果が得られる<sup>1)</sup>。

本研究では、主に無線設備のシステム設計を行う際の伝搬シミュレーション用三次元モデルの構築を目的とし、沿線構造物の三次元情報を詳細に取得する必要があったことから、

鉄道沿線環境での三次元空間情報の収集および編集方法について検討した。

### 2 鉄道車両による三次元空間情報の収集

本研究で必要な空間情報は、鉄道沿線のみに限られるとして、鉄道車両に三次元空間情報の計測装置を搭載する方式について実験を行った。すなわち、各種装置を鉄道車両に搭載し走行実験を行い、鉄道環境におけるモデリング手法の有効性を検証するデータを取得した。図1に計測イメージ、図2にセンサ設置状況を示す。



図1：計測イメージ



図2：レーザスキャナとラインセンサカメラ設置状況

レーザスキャナについては、屋根上に一定角度傾けて2台設置し(図2左)、ラインセンサカメラは三眼式のCCDを客室内

左右に設置した(図2右)、さらに屋根上にGPSアンテナ、客室内にINSを設置した。これら装置類の時刻同期をとることにより、三次元モデルの構築に必要なデータを得ることができる。

### 3 空間情報のモデル化

ここでは、空間情報の表現手法として、レーザスキャナで計測した測定点座標の集まりである点群モデル形式と、空間を多角形面(ポリゴン)の集まりで近似したポリゴンモデル形式について述べる。

#### 3.1 点群モデル

レーザスキャナで記録された対象物までの距離情報および角度情報を空間座標に結びつけるために、レーザスキャナの位置と姿勢をGPSおよびINSで記録しておき、時刻情報に基づいて同期をとり、計測点の三次元座標値を求める方式を採用した。

##### 3.1.1 取得データ

空間形状を点群で表現する手法では、レーザスキャナで計測した測定点のみを点として三次元表示している。図3に計測物の画像と点群表現との比較を示す。点群表現では空間形状が計測点そのものの集まりとして再現される。これは面的な形状を持っていないため、景観確認のためのテクスチャ付きモデルの作成、電波伝搬シミュレーションなどにはこのままでは利用できない。

また、レーザスキャナで計測したデータの中には各種誤差が含まれる。図4に、遮蔽物によりできるデータ未取得部の例

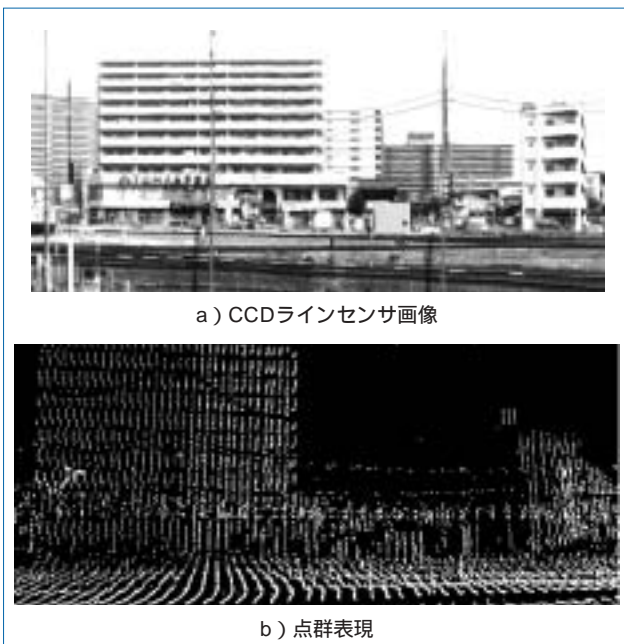


図3：画像と点群表現の比較

例を示す。建物とレーザスキャナを搭載した列車との間に存在する歩道橋や他の建物に遮られて建物の一部の形状が取得できない場合がある。

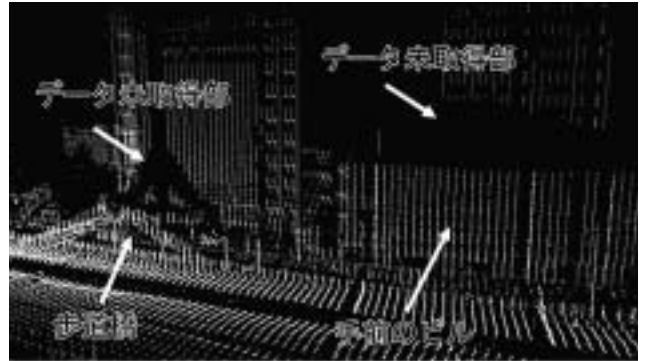


図4：遮蔽物によるデータ未取得部の例

##### 3.1.2 計測密度

計測密度は点群データの品質に最も影響する要因の1つである。計測点の密度が高いほど、点群表現した際の形状再現性が向上する。今回使用したレーザスキャナは光学系部分の一回転で1つの断面形状を計測するタイプのものであるが、進行方向に垂直な断面を計測しながら走行するような場合、計測方向は車両の走行に伴って変化する。そのため、計測点の密度が進行方向と計測断面方向とで異なる。スキャン周波数が一定のレーザスキャナでは進行方向の点群間隔は車両の走行速度に依存し、車両速度が速いほど間隔が粗く、遅いほど間隔が密になる。進行方向における単位時間当たりの計測点数はスキャン周波数に依存し、今回使用した回転式レーザスキャナでは、進行方向に1秒間で20点が計測される。

またレーザスキャナの計測断面方向の点群間隔は、対象物までの距離によって変化する。今回利用したレーザスキャナの計測角度間隔は計測断面方向で0.5度となっており、計測する対象物までの距離が遠いほど計測点の間隔は広がり、トンネルなどの様に対象物が近くにあるほど計測点間隔は密になる。スキャナから10m以内にある線路付近の施設などは概ね10cm以下の間隔で、スキャナから20m~50mの線路周辺の建築物、法面などは数十cmの間隔で点群が取得される。実際に列車にレーザスキャナを搭載し時速40~80kmの走行速度で計測した場合、進行方向の計測間隔は50cm~1m程度、計測断面方向はおおよそ線路敷地内で数cm、敷地外では数十cm程度になる。列車の走行速度を時速80kmとした場合では、断面方向の点群間隔が進行方向と比べて20倍程度、密に取得される。

図5にトンネルを計測した例を示す。トンネルではセンサから対象物までの距離が比較的短くなるため、計測断面方向に密に点が並んだ形状で表現される。その結果、点群によるトンネルの三次元表現はその形状が把握しやすくなっている。なお、トンネル上面には架線の影となっている部分が見られる。

図6に線路周辺の計測例を示す。法面などの地形は概ねその形状が把握できる。支柱など棒状の構造物はその一部が取得されている。架線は、計測装置を搭載した列車の真上に存在する場合は点の並びとしてはっきりと確認できたが、レーザスキャナから離れた位置にある場合は不明瞭となる。



図5：トンネル計測



図6：線路周辺形状（法面・支柱・架線）

### 3.2 ポリゴンモデル

各種シミュレーション用に三次元モデルを利用する場合、沿線の構造物を物体としてポリゴン化すべき場合が多い。今回の目的である電波のシミュレーションの場合も幾何学的手法を用いる際に構造物の面的な要素を考慮しなければならない<sup>2)</sup>。ここでは汎用のソフトウェア（点群モデラー）によりポリゴン化を実施した結果について述べる。

最初に沿線の建築物をポリゴン化した場合について示す。建物壁面は平らで一定以上の面的広がりを持つ四辺形であることが多い。そのため理想的には1つの四辺形（2つの三角形ポリゴン）での表現が望ましいが、実際の壁面は付帯設備が存在するために起伏に富む多角形（三角形ポリゴンの集合体）モデルとして生成される。

図7に建物壁面のポリゴンモデルと画像を比較した。図7b)に示すように建物上空から見た場合、沿線に面した壁面のみがモデル化されている。また建物面に窓や付帯設備がある部分では起伏のある構造となっている。

図8に、トンネル形状をポリゴン化した例を示す。なお、ポリゴン形状を分かりやすく表示するためワイヤーフレーム表示としている。これは箱型の断面形状を持つトンネルで、その形状が多数の三角形ポリゴンの集まりで構成されていることがわかる。また、基となった点群データ（図5）では、列車の走行した真下方向の形状がスキャナの性能上、得られていなかったが、ポリゴン化の際に抜けている線路面を三角形で補った。



a) ラインセンサ画像



b) ポリゴン化例（建物を上空から見る）

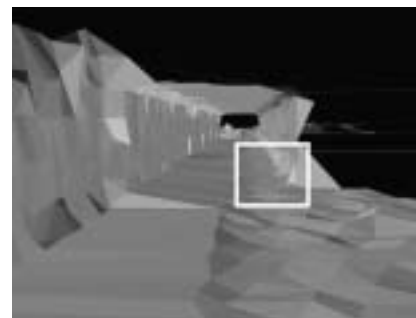
図7：ポリゴン化形状と画像の比較

図9に同じトンネルの色付きポリゴンの例を示す。図9b)に示すように自動的にポリゴンを生成した段階ではトンネルの隅で鋸状の不正確な形状が発生し



図8：ワイヤフレーム（トンネル）

ているが、編集作業により修正することが可能である。



a) トンネル入り口より



b) トンネル隅部分拡大（左：一括生成 右：修正）

図9：ポリゴン化例（トンネル）



## 4 三次元電波シミュレーションへの応用

構築されたポリゴンモデルを電波伝搬シミュレーションのモデルとして用いた場合の測定値との整合性について述べる。各種無線システムを鉄道沿線において実現するには、所要の伝送品質を確保するようにシステムの設計を行う必要がある。そのシステム設計の中で、受信レベル（電界強度）のシミュレーションを行うことにより受信状況の概要を事前に把握することができる。本研究では鉄道沿線の三次元モデルが得られているので、このモデル内の構造物に電波がどのように反射して伝わるかを幾何学的に計算し、結果として受信レベルを算定するシミュレーション<sup>2)</sup>を実施した。

### 4.1 三次元モデルと計算地点

地上・列車間の電波伝搬シミュレーションに際して、首都圏の実際の1駅分の区間をモデル化した。具体的な無線システムとして今回は在来線列車無線を対象とした。図10にポリゴンモデルの俯瞰図を示す。モデルの環境はほとんどが図10a)の様な法面を含む区間であるが、区間の中央付近に図10b)の様なトンネルがある。また図中の点は列車の車上アンテナ位置であり、GPSおよびINSによって測定した1秒毎の位置を表示している。シミュレーションでは駅に設置された基地局アンテナから車上アンテナに到達した電波の受信レベルをトンネル内について算定した。なお電波の到達経路および受信レベルの

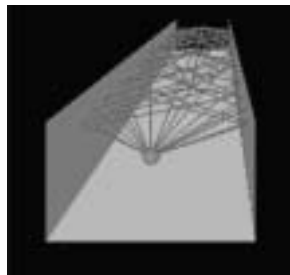


図11：伝搬経路の可視化



a) 法面を含むポリゴンモデル



b) トンネルを含むポリゴンモデル

図10：三次元モデルとアンテナ移動経路

計算法については主にレイトレーシング法<sup>2)</sup>を採用した。本手法は図11の例に示す様に送信点から受信点に至る電波の経路を幾何学的に求める方法である。本研究では将来的な実務への活用を想定し、三次元の経路を可視化する仕組みをVRML (Virtual Reality Modeling Language) により開発した。

### 4.2 測定値との整合性

図12に1駅区間を列車が走行した場合の受信レベルを示す。図で上の部分は、電気検測車による測定値であり、1.75km付近でレベルが急激に落ち込んでいる部分がトンネル内である。この部分を理論的にシミュレーションした結果、図12左下の様になった。定性的、定量的に測定値に近い結果が得られている。ただし今後は、より多くの場所について検証する必要がある。

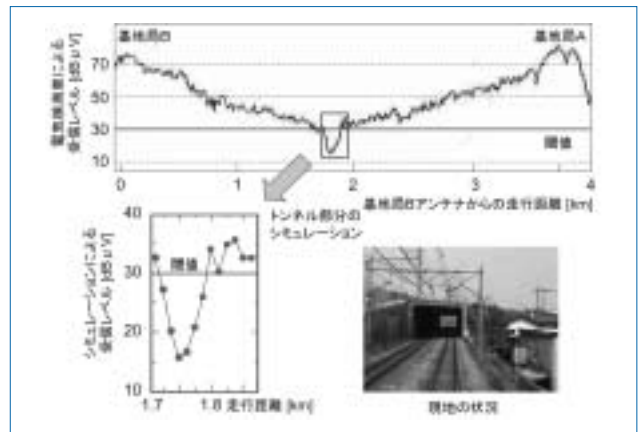


図12：受信レベルのシミュレーション

## 5 まとめ

本稿では鉄道車両を用いて沿線の三次元空間情報を取得するための方法およびモデル構築手法について述べた。また電波シミュレーション用のモデルとしての応用例について概要を示した。本手法により、鉄道沿線の実用的な三次元モデル構築を実現できる可能性が示されたと考える。将来的に各種計測装置の性能向上によっては、無線分野への応用に留まらず、設備管理や各種シミュレータなど、他分野への応用を検討していきたい。

### 参考文献

- 1) 辻求, 今野達夫, 下垣豊: 車両搭載型センサを用いた3次元都市空間モデルの自動構築, 第12回機能図形情報システムシンポジウム, 2001.5.
- 2) 服部鉄範, 阿部紘士, 塩川孝泰, 阿部健一: マイクロ波による鉄道通信システムにおける伝搬特性, 電気学会論文誌, Vol.120 - C, pp.740 - 747, 2000.5.