

## I-10 3次元衛星電波経路シミュレーションに関する研究開発

## Development of 3D Simulation System for Electric Wave Route of Satellite

村木広和<sup>1</sup>・北川悦司<sup>2</sup>・田中成典<sup>3</sup>・古田均<sup>3</sup>・野中一希<sup>4</sup>

Muraki Hirokazu, Kitagawa Etsuji, Tanaka Shigenori, Furuta Hitoshi, and Nonaka Kazuki

**抄録**：近年、3次元GIS(地理情報システム)の技術の発展に伴い、都市構造物の3次元モデル化が進んできている。都市構造物の3次元モデルに属性情報を付与することにより、GISをもちいた3次元空間解析が可能となった。また、可視化技術の発達により、3次元空間解析結果の視覚化が容易に行えるようになった。そこで、本研究では、都市域に実在する構造物の3次元空間データと主要な静止衛星および測位衛星の軌道情報を用いて、衛星位置を計算し電波経路上の障害物による遮蔽を考慮した電波経路シミュレーションシステムの開発を行う。また、本システムによるシミュレーション結果をもとに現実空間において衛星観測を行い、どの程度予測値と整合しているかの実験を行った。

**Abstract**: Recently, the technology of 3D-GIS (Geography Information System) has developed. And, three-dimensional modeling of the city structure had proceeded rapidly. Furthermore, it became possible that a three-dimensional space can be analyzed by the combination with the attribute information of the three-dimensional model. And, it is easy to express the result of the analysis.

In this research, we studied about an electric wave route for satellite simulation system based on the development of 3D-GIS technology. Then, we must consider electric wave route being blocked by structures. Moreover, we verified the result of this system.

**キーワード**：3次元GIS、静止衛星、測位衛星、電波経路シミュレーション

**Keywords**：3D-GIS, Measured Satellite, Stationary Satellite, Simulation System for Electric Wave Route

## 1. はじめに

近年、通信や放送、測位を目的とする衛星が百数十機以上も地球上を周回している<sup>1)2)</sup>上に、毎年新しい衛星が打ち上げられようとしている。特に、通信衛星は、同報性、広域性および耐災害性などの特長を持ち、CSデジタル放送、映像や音声の多チャンネル配信、インターネット接続など全家庭に向けて多様なサービスを提供している<sup>3)4)</sup>。今後は、移動体へのマルチメディア通信、大規模災害対策や遠隔医療などますます適用範囲を広げ、必要不可欠な社会基盤となることが予想される。

また、建設構造物や地形を考慮し、都市部や山間部における電波の受信状況を事前にシミュレーションできれば、測量業務の効率化が図れ、新たな技術革新も生まれると考えられる。そのため、衛星電波の受信可能域と不感地帯を特定する衛星電波経路シミュレーションシステムに対して需要が高まっている。

現在、衛星からの電波受信状況を把握するためのソフトウェア<sup>5)8)</sup>はいくつか存在する。しかし、それらは、周囲の地形や建物の形状や高さを考慮しておらず、あくまでも周囲に電波を遮る障害物が何も存在しない<sup>9)</sup>ことを前提としている。そのため、都市のビルの谷間や急峻な地形の山間部においては、現地調査を実施して初めて測位できるか否かが判断される。

また、衛星からの電波受信状況は、個々の場所では、概ね推測できる。しかし、都市再開発事業などの場面では、任意の視点から建物階数ごとの不感地帯を視覚化したり、地域全体として状況を的確に把握したりすることが困難である。

そこで、本研究では、遮蔽物を考慮した電波経路のシミュレーションを可能とし、衛星電波のシミュレーション結果を実景観上に可視化して表示し、誰もが簡単に視覚的に受信可能域と不感地帯を特定できるシステムの研究開発を目的とする。

1：正会員 修士 関西大学大学院 総合情報学研究科, アジア航測(株)

(〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺2-1-1, Tel :0726-90-2404, E-mail : m-hiro@wd6.so-net.ne.jp)

2：正会員 修士 関西大学大学院 総合情報学研究科

3：正会員 工博 関西大学 教授 総合情報学部

4：正会員 学士 関西大学大学院 総合情報学研究科

## 2. システムの概要

本システムは、都市域に実在する地上構造物などの3次元GISデータと主要な静止衛星および測位衛星の軌道データを用いて、電波経路中の地上障害物による遮蔽を考慮し、受信可能域と不感地帯を特定する。さらに、この結果を建物景観とともに3次元立体可視化表示する<sup>10)</sup>ことで、誰もが容易に電波状況を視覚的に捉えることを可能とする。

### (1) 入力データ

本システムでは、入力データとして3次元GISデータを使用した。このデータは、総務省が平成11年度から平成14年度にかけて行った「GIS構築のための情報通信技術の研究」において取り組んだデータ獲得技術、データ更新技術の成果として得られたものである。また、観測地点 (X,Y,Z)、観測地点高さ (h)、衛星の指定 (GPS, GLONASS)、可視化表現する球体の大きさを入力データとする。

### (2) システムの処理の流れ

本システムでは、図-1に示すように大別して、衛星電波経路計算機能と3次元表示機能の2つの機能を実装する。

衛星電波経路計算機能では、まず、任意の観測点における衛星電波の受信状況を計算する。次に、衛星位置と地上観測点を結ぶ直線上に建物などの遮断物が存在するか否かを判定する。そして、観測点において電波を直接受信できるか否かの可視・不可視属性を決定する。最後に、測位衛星の場合のみ、DOP (Dilution Of Precision) 値を計算し、最適なGDOP (Geometric Dilution of Precision: 幾何学的精度低下率) 値を求める。

3次元表示機能では、まず、データのアクセスや表示処理における負荷を抑えるため、VRMLフォーマットの3次元GISデータをDirectXフォーマットに変換する機能を実装する。次に、受信可能域と測位可能率をモデル化する視覚化モデル表示機能を実装する。最後に、視点の位置と方向を連続的に変換し、都市空間を移動しながら建築構造物と電波受信域を3次元表示する3次元電波受信域分布表示機能を実装する。3次元表示機能により、高速な3次元モデルの表示を実現する。周囲建物の遮蔽により、場所と時刻をともに変化させ、測位可能域と測位精度がどのように変化するかを表現する。本システムの処理の流れを図-1に示す。

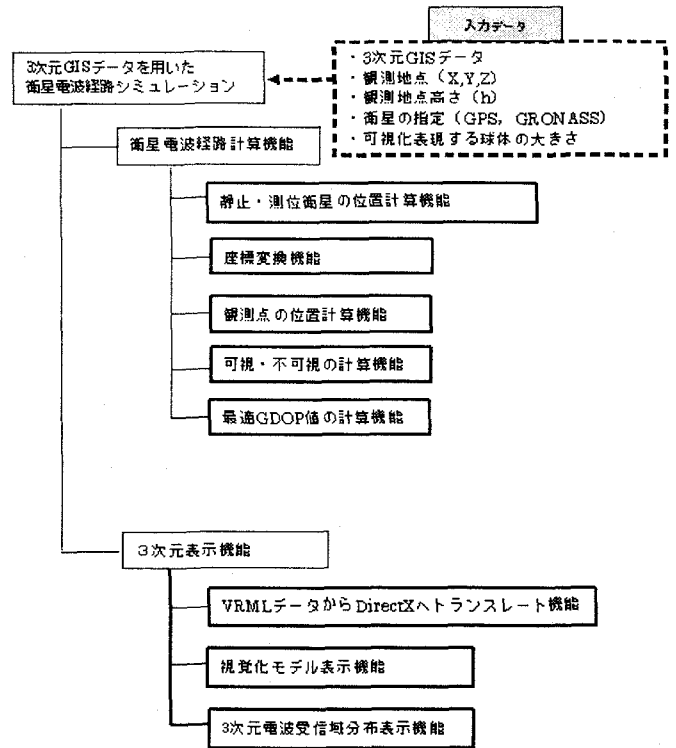


図-1 システムの処理の流れ

## 3. 衛星電波経路計算機能

### (1) 静止・測位衛星の位置計算機能

#### a) 静止衛星の位置計算

ある時刻の衛星と観測地点の経緯度を用いて、静止衛星の見かけの方位、高度(地平座標)を求める。以下の計算手順を用いて、3次元座標変換で求める。

衛星と観測地点の直角座標差を求める。

$$\begin{aligned} x1 &= AS \times \cos(\phi_s) \times \cos(\lambda_s) - AE \times \cos(\phi_v) \times \cos(\lambda_v) \\ y1 &= AS \times \cos(\phi_s) \times \sin(\lambda_s) - AE \times \cos(\phi_v) \times \sin(\lambda_v) \\ z1 &= AS \times \sin(\phi_s) - AE \times \sin(\phi_v) \end{aligned}$$

(3.1)

ここでは、

- $\lambda_v$  : 観測地点の経度
- $\phi_v$  : 観測地点の緯度
- $AE$  : 地球半径(6378km)
- $\lambda_s$  : 地心から見た衛星の経度  
(ほとんど変化なし)
- $\phi_s$  : 地心から見た衛星の緯度  
(概ね0)
- $AS$  : 衛星までの地心距離  
(概ね42200km)

とする。

まず、 $x$  軸を真南方向に向けるため、衛星と観測地点の直交座標差を地平座標への変換で  $z$  軸に対して観測地点経度分の座標回転を行う。

$$\begin{aligned} x2 &= x1 \times \cos(\lambda s) + y1 \times \sin(\lambda v) \\ y2 &= x1 \times -\sin(\lambda s) + y1 \times \cos(\lambda v) \\ z2 &= z1 \end{aligned} \tag{3.2}$$

次に、観測地点の  $z$  軸を天頂に向けるため、 $y$  軸回りに  $-90^\circ$  座標回転を行う。これにより、求められた座標を地平直交座標という。

$$\begin{aligned} x3 &= x2 \times \sin(\phi v) + z2 \times -\cos(\phi v) \\ y3 &= y2 \\ z3 &= x2 \times \cos(\phi v) + z2 \times \sin(\phi v) \end{aligned} \tag{3.3}$$

最後に、地平直交座標から地平極座標を求める。

$$\begin{aligned} az &= 180 - a \tan(y3/x3) \\ el &= a \tan(z3/\sqrt{x3^2 + y3^2}) \end{aligned} \tag{3.4}$$

ここで、

$az$  : 北を 0 として東回りに測った方位角  
 $el$  : 地平高度

とする。

**b) 測位衛星の位置計算**

測位衛星の楕円運動は、観測点から見ると複雑な 3 次元運動<sup>11)~13)</sup>をしているが、測位衛星は、ケプラーの方程式にしたがって単純な回転楕円運動をしている。測位衛星の位置計算は、この軌道平面上から最終的に知りたい衛星の  $XY$  座標値を求める。 $X$  座標は地球の重心（近地点に近い楕円の焦点）を原点として近地点方向に取り、 $Y$  座標は  $X$  軸から反時計回りに  $90$  度方向となる。測位衛星の  $XY$  座標を求めるために必要なパラメータは、軌道の形状を表す軌道長半径  $a$ （平均運動から計算する）と離心率  $e$ 、軌道上の何処にいるかを表す平均近点角  $M$  である。長半径  $a$ 、離心率  $e$ 、平均近点角  $M$  から衛星の  $XY$  座標を求めるための計算手順を示す。

まず、平均近点角  $M$  から離心近点角  $E$  を求める。

平均近点角  $M$  は、長半径  $a$  から決まる平均的な角速度で衛星が動いたと仮定した場合における近地点からの角度である。離心近点角  $E$  との関係を下に示す。

$$E - e \times \sin E = M \tag{3.5}$$

式(3.5)のケプラーの方程式は、 $E$  について解いた形に書き直すことができないため、数値的に解く必要がある。本アプリケーションでは、ニュートン近似法を用いて式(3.5)を解いて  $E$  を求める。

次に、離心近点角  $E$  から真近点角  $V$  を式(3.9)を用いて求める。 $E$  と  $V$  との関係を下に示す。

$$\sin V = \sqrt{(1-e^2)} \times \sin E / (1-e \times \cos E) \tag{3.6}$$

$$\cos V = (\cos E - e) / (1-e \times \cos E) \tag{3.7}$$

$$\tan V = \sqrt{(1-e^2)} \times \sin E / (\cos E - e) \tag{3.8}$$

$$V = \tan^{-1}(\sqrt{(1-e^2)} \times \sin E / (\cos E - e)) \tag{3.9}$$

$\cos(E-e) >= V$  は、第 1, 第 4 象限となる。  
 $\cos(E-e) < V$  は、第 2, 第 3 象限となる。

そして、離心近点角  $E$  から動径  $R$  を求める。動径  $R$  は、地球重心から測位衛星までの距離で  $E$  または  $V$  から式(3.10)により求めることができる。 $E$  または  $V$  は、どちらから求めてもよいが、 $E$  から求めた方が計算時間は短くなる。

$$\begin{aligned} R &= a(1 - e \times \cos E) \\ R &= a(1 - e^2) / (1 + e \times \cos V) \end{aligned} \tag{3.10}$$

最後に、動径  $R$  と真近点角  $V$  から衛星の  $XY$  座標を求める。これまでの計算手順で得られた値から、軌道面上での測位衛星の  $XY$  座標を求める。

$$\begin{aligned} X &= R \times \cos V \\ Y &= R \times \sin V \end{aligned} \tag{3.11}$$

以上の計算により、長半径  $a$ 、離心率  $e$ 、平均近点角  $M$ 、離心近点角  $E$ 、真近点角  $V$ 、動径  $R$  を用いて測位衛星の軌道平面上における  $XY$  座標を計算できる。 $Z$  については、この段階では 0 とする。この座標を軌道平面座標という。

**(2) 座標変換機能**

軌道平面座標から天球固定座標へ変換する。本機能では、春分方向を  $X$  方向とした軸を 0 方向とし、左まわりに  $90^\circ$  回転した方向を  $Y$  軸とし、北極方向を  $Z$  軸とした座標に変換する。ここで変換した座標系を天球固定座標系という。

まず、式(3.11)で求めた軌道平面内の  $X, Y, Z$  を用いて天球固定座標に変換する。軌道平面座標から天球固定座標へ変換するための計算式を以下に示す。

$$\begin{aligned} x1 &= X \times a11 + Y \times a12 \\ y1 &= X \times a21 + Y \times a22 \\ z1 &= X \times a31 + Y \times a32 \end{aligned} \tag{3.12}$$

式(3.12)の  $a11 \sim a32$  の内容を以下に示す。

$$\begin{aligned} a11 &= \cos(\Omega_0) \times \cos(\omega) - \sin(\Omega_0) \times \cos(i_0) \times \sin(\omega) \\ a12 &= -\cos(\Omega_0) \times \sin(\omega) - \sin(\Omega_0) \times \cos(i_0) \times \cos(\omega) \\ a21 &= \sin(\Omega_0) \times \cos(\omega) + \cos(\Omega_0) \times \cos(i_0) \times \sin(\omega) \\ a22 &= -\sin(\Omega_0) \times \sin(\omega) + \cos(\Omega_0) \times \cos(i_0) \times \cos(\omega) \\ a31 &= \sin(i_0) \times \sin(\omega) \\ a32 &= \sin(i_0) \times \cos(\omega) \end{aligned}$$

$$(3.13)$$

ここでは、

- $i_0$  : 軌道傾斜角
- $\Omega_0$  : 昇交点赤系
- $\omega$  : 近地点引数

とする。

次に、天球固定座標からグリニッジ子午線方向を  $x$  軸とした地心直交座標系へ変換する。

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 \times \cos(\Theta) + y_1 \times \sin(\Theta) \\ y_2 &= x_1 \times -\sin(\Theta) + y_1 \times \cos(\Theta) \\ z_2 &= z_1 \end{aligned} \quad (3.14)$$

ここでは、

- $\Theta$  : グリニッジ平均恒星時

とする。

式(3.14)において、求めた座標値  $x_2, y_2, z_2$  が地球中心を原点にした空間座標となる。

### (3) 観測点の位置計算機能

地球上で特定の場所を表す方法としては、北緯や東経などの経緯度がある。一方、衛星の位置を表す軌道要素では、地球の重心を原点に赤道平面で春分方向を  $x$  軸、 $x$  軸から東に 90 度方向を  $y$  軸、北極方向を  $z$  軸で表す。この座標を地心赤道直交座標という。したがって、観測点の経度  $\lambda$ 、緯度  $\phi$ 、高さ  $h$  と  $x, y, z$  を関係付ける必要がある。地球上での位置を表す方法について以下に示す。一般的に地球は、回転楕円体として扱われ、その大きさも年々正確な大きさとなってきている。

赤道半径  $a = 6378.137\text{km}$  (GRS80 楕円体の例)

離心率の 2 乗  $e^2 = 0.006694380022901$

地球は、地心から赤道までの距離に比べて、地心から極方向までの距離が短くなる。観測点と経緯度、北極、南極、地心を通る子午面を考えるとその面は楕円となり、中心が地球の重心となる。楕円の性質として楕円の接線に垂直な線（法線）は赤道上と両極以外では中心を通らない。一方、緯度は法線と赤道面のなす角であり、中心を通る角度と違いが生じる。また、観測点と中心までの距離に比べて、法線に沿って北極と南極を結ぶ線と交差する点までの距離（東西線曲率半径： $N$  と呼ぶ）に違いが生じる。東西線曲率半径  $N$  は、赤道半径  $a$ 、離心率  $e$ 、緯度  $\phi$  から以下の式で求めることができる。

$$N = a / \sqrt{1 - e^2 \times \sin^2(\phi)} \quad (3.15)$$

したがって、経度 0 度方向を  $x_j$ 、東経 90 方向を  $y_j$ 、北極方向を  $z_j$  とする直交座標系に変換する場合には、以上のことを考慮しなければならない。これらの関

係を以下に示す。

$$\begin{aligned} x_j &= (N + h) \times \cos(\phi) \times \cos(\lambda) \\ y_j &= (N + h) \times \cos(\phi) \times \sin(\lambda) \\ z_j &= (N(1 - e^2) + h) \times \sin(\phi) \end{aligned} \quad (3.16)$$

この  $x_j, y_j, z_j$  は、日本測地系と呼ばれているが、この中心は地球の重心を通過していない。地球の重心に一致させるには、各座標を次の値だけ平行移動する必要がある。ここで、平行移動した後の座標を  $x_g, y_g, z_g$  とする。これらの関係を以下に示す。

$$\begin{aligned} x_g &= x_j - 136 \\ y_g &= y_j + 521 \\ z_g &= z_j + 681 \end{aligned} \quad (3.17)$$

以上の計算により、座標変換を行うことで、経緯度と高さが、地球重心を原点とした地心直交座標（地球に固定した座標）に変換することができる。

### (4) 可視・不可視の計算機能

可視・不可視は、図-2に示すように指定された時刻における任意の地点の地心座標値 ( $x, y, z$ ) から見た衛星と各衛星の地心座標値 ( $x, y, z$ ) との直線上において障害物があるかを判定する。これを、すべての衛星に対して求める<sup>14)15)</sup>。可視・不可視計算のイメージを図-2に示す。

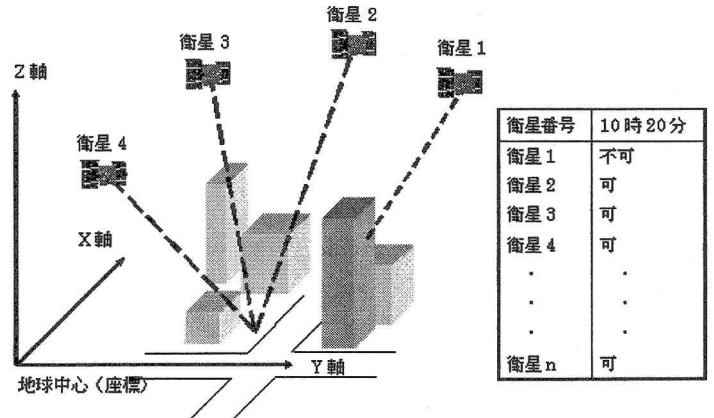


図-2 可視・不可視計算のイメージ

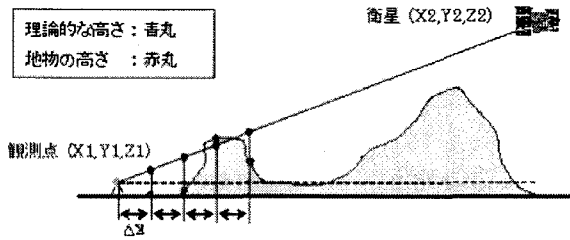


図-3 可視・不可視の計算方法

可視・不可視の計算手順を以下に示す。まず、全てのGPS衛星について地球中心からの $x, y, z$ 座標を求める。次に、観測点位置座標を地球重心座標に変換する。そして、観測点位置と各衛星位置との関係から3次元的な方向角を求める。このとき、 $xy$ 面に対して負の $z$ 値をもつ衛星は全て除外する。最後に、観測点位置から各視通可能と思われる衛星間で直線を引き、その線上における1m間隔毎の理論的高さを求める。その場所における3次元高さデータを用いて実際の高さを求め、理論値より実際の高さが高い場合は不可視とする。可視・不可視の計算方法を図-3に示す。

(5) 単独測位原理と最適GDOPの計算方法

単独測位では、電波の受信時刻を測定する受信機の時計が不正確であることを前提条件とする。本機能では、時計誤差と観測点の $x, y, z$ の合計4つを未知数として設定し、4つの衛星を同時に観測し、4つの方程式を解くことで観測点の空間座標<sup>5)16)</sup>を求める。

必要なパラメータは、観測点のGPS受信機で観測された軌道情報から計算された $i$ 番目の衛星の位置 $x_{si}, y_{si}, z_{si}$ 、およびその衛星と観測点の擬似距離 $r_i$ は電波の伝搬時刻から測定される。これらの関係を以下に示す。

$$r_i = \sqrt{(x - x_{si})^2 + (y - y_{si})^2 + (z - z_{si})^2} + s \tag{3.18}$$

$s$ は、GPS受信機の時計誤差による距離への影響を表す。衛星の位置 $x_{si}, y_{si}, z_{si}$ は、衛星から送信される軌道情報をもとに求める。しかし、式(3.18)は、非線形であるため未知数をその近似値と補正值との和で表し、式をその補正值について展開し、補正值は微小であると仮定し2次以上の高次項を無視して線形化する。これにより、補正值についての連立一次方程式となり、逐次近似計算法により必要な精度まで計算を繰り返し、未知数を求める。

まず、 $n$ 回目の演算後の観測点位置を $x_n, y_n, z_n$ とする。このとき $i$ 番衛星と利用者間の近似距離 $r_{n,i}$ は、以下のような関係が成り立つ。

$$r_{n,i} = \sqrt{(x_n - x_{si})^2 + (y_n - y_{si})^2 + (z_n - z_{si})^2} \tag{3.19}$$

で表される。

また、近似値 $x_n, y_n, z_n$ に対するそれぞれ補正值は $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ である。これらの関係を以下に示す。

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + \Delta x \\ y_{n+1} &= y_n + \Delta y \\ z_{n+1} &= z_n + \Delta z \end{aligned} \tag{3.20}$$

式(3.18)を補正值 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ で展開して、2次以上の高次項を無視すると線形方程式が求められる。求められた線形方程式を以下に示す。

$$r_i = r_{n,i} + \frac{\partial r_i}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial r_i}{\partial y} \Delta y_i + \frac{\partial r_i}{\partial z} \Delta z_i + s \tag{3.21}$$

そして、 $\partial r / \partial x, \partial r / \partial y, \partial r / \partial z$ は、式(3.22)のようになり、それぞれ衛星方向のベクトルの $x, y, z$ 方向への射影、すなわち方向余弦となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial x} &= \frac{x - x_s}{\sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2}} \\ \frac{\partial r}{\partial y} &= \frac{y - y_s}{\sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2}} \\ \frac{\partial r}{\partial z} &= \frac{z - z_s}{\sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2}} \end{aligned} \tag{3.22}$$

ここで、

$$\begin{aligned} l &= \partial r / \partial x \\ m &= \partial r / \partial y \\ n &= \partial r / \partial z \\ \Delta r &= r_n - r_{n-1} \end{aligned}$$

とする。

$i$ 番目の衛星からの擬似距離の補正值 $\Delta r_i$ は、以下のように表すことができる。

$$\Delta r_i = l_i \Delta x + m_i \Delta y + n_i \Delta z + s \tag{3.23}$$

また、4つの衛星に対して(3.24)のような4つ方程式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} \Delta r_1 \\ \Delta r_2 \\ \Delta r_3 \\ \Delta r_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 1 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 1 \\ l_3 & m_3 & n_3 & 1 \\ l_4 & m_4 & n_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ s \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

ここで、

$$A = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 1 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 1 \\ l_3 & m_3 & n_3 & 1 \\ l_4 & m_4 & n_4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\delta R = \begin{bmatrix} \Delta r1 \\ \Delta r2 \\ \Delta r3 \\ \Delta r4 \end{bmatrix}$$

$$\delta X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ s \end{bmatrix}$$

とする。

これらにより、式(3.24)は、以下のような関係が成り立つ。

$$\delta R = A \cdot \delta X \tag{3.25}$$

GDOP は、共分散行列という。この行列  $(A^T A)^{-1}$  は、各要素を  $\sigma_{ij}$  として、以下のように示す。

$$(A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_{zz}^2 & \sigma_{zt}^2 \\ \sigma_{tx}^2 & \sigma_{ty}^2 & \sigma_{tz}^2 & \sigma_{tt}^2 \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

$$GDOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + \sigma_{tt}^2} \tag{3.27}$$

$\sigma_{xx}$  : 経度方向への擬似距離位置誤差  
 $\sigma_{yy}$  : 緯度方向への擬似距離位置誤差  
 $\sigma_{zz}$  : 高度方向への擬似距離位置誤差

この式(3.27)から GDOP は、観測点位置を原点とする東西、南北、高さの各方向成分の誤差の近似値である。したがって、GDOP が最小となる値を観測点の最適 GDOP 値として採用する。

#### 4. 3次元表示機能

##### (1) VRML フォーマットから DirectX フォーマットへの変換機能

本機能は、表示の負荷を抑えるため、DirectX の機能を用いて、視点位置から 500m の範囲の対象物のみ表示する。また、使用するデータは、約 2km 四方の領域に建物形状と画像データが VRML フォーマットで定義された 3次元 GIS データである。このデータは、約 5M バイトのデータ容量があり、建物の形状を定義しているデータは約 15 万行である。そのため、3次元表示機能では、自動的に VRML フォーマットを DirectX フォーマットに変換する。この変換には約 10 秒かかるが、一旦、DirectX フォーマットに変換された 3次元 CG データは、視点位置と方

向が変化してもほぼリアルタイムに 3次元実景観を表示することが可能となる。3次元表示した結果を図-4に示す。

##### (2) 視覚化モデル表示機能

受信可能域と測位可能率の表現方法については、属性としての時間的・空間的な特性、周辺建物景観の視認性<sup>12)</sup>など考慮して表示形状、表示色を図-5のように表示する。静止衛星の視覚化モデルは、指定された格子点間隔に球体として表示する。受信可能であれば球体を青色で、受信不能であれば赤色で表示する。測位衛星の視覚化モデルは、測位精度である DOP 値を 5 段階で表示する。また、受信衛星数については、測位精度を示す球体の周りにドーナツ状の輪を追加し、衛星数に応じて 3 段階で表示する。また、視覚化モデルは、建物の階数ごとに受信状況を確認可能とするため、壁面付近に表示できることを考慮する。視覚化モデルを図-5に示す。

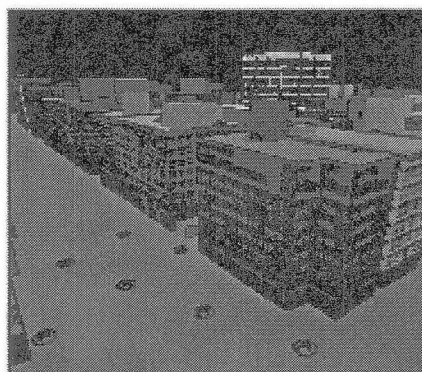


図-4 視点から 500m 範囲表示例

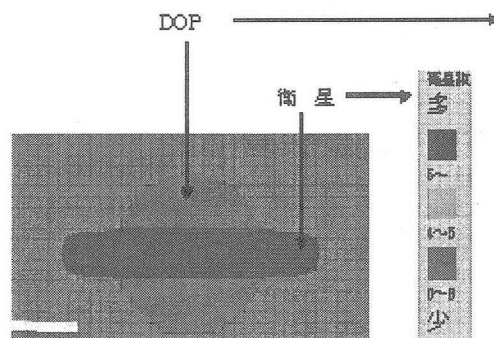


図-5 測位衛星の DOP 値と衛星数の表示例

表-1 衛星数および DOP 値の精度検証

時刻	X 座標	Y 座標	衛星数 (現地の観測データ)	衛星数 (シミュレーション結果)	DOP 値 (現地の観測データ)	DOP 値 (シミュレーション結果)	DOP 値 (表示色)
13 時 04 分	-5158.09	-34940.20	6	6	48.65	54.89	赤
13 時 04 分	-5121.24	-35054.50	6	6	18.65	21.11	紫
13 時 04 分	-5081.49	-35168.10	6	6	17.10	17.91	黄色
13 時 04 分	-5043.86	-35285.40	6	6	9.04	13.10	緑
13 時 04 分	-5035.94	-35406.50	6	6	10.54	11.44	緑
13 時 05 分	-5080.96	-35530.40	6	4	8.68	11.44	緑
14 時 05 分	-5134.96	-35623.90	6	6	57.09	56.81	赤
15 時 05 分	-5184.00	-35725.10	4	3	5.43	10.45	緑

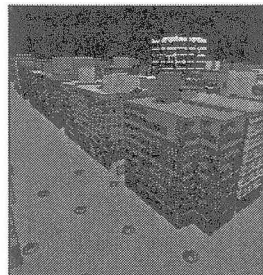


図-6 2次元地図上における位置の表示例

(3) 3次元電波受信域分布表示機能

3次元電波受信域分布の表示は、視点の位置と方向を連続して変更することにより、都市空間を移動しながら都市構造物と電波受信域を3次元表示する。その際、2次元地図を表示させることで、現在位置を視覚的に把握できるようにする。2次元地図上における位置の表示例を図-6に示す。

5. 実証実験

実証実験は、東京駅周辺（日本橋付近）の3次元GISデータを用いて、シミュレーションを行った。今回の検証でシミュレーションした経路を図-7に示す。

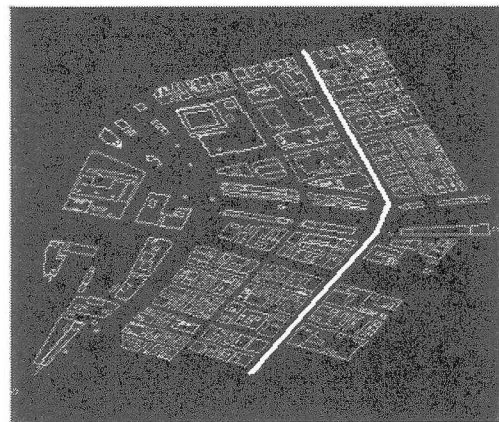


図-7 シミュレーションした経路

(1) 衛星電波経路計算機能の検証

今回のシミュレーション結果では、DOP値における残差平均が2.15と十分な精度が得られた。本システムは、衛星電波の反射や遮蔽物の材質による電波の透過度などを考慮していないため、観測点によっては、DOP値の誤差が少し生じる場合があると考えられる。しかし、今回のシミュレーション結果から、参照可能な衛星の数とDOP値も誤差は許容範囲内であるため、本研究は有用であることを確認した。

表-2 可視・不可視および DOP 値の計算時間

PC の性能	格子点数	計算時間(秒)
ノート PC	3	4
CPU Pentium III 500	6	7
メモリ 128MB	9	10
	12	14
デスクトップ PC	3	ほぼリアルタイム
CPU Pentium IV 1700	6	ほぼリアルタイム
メモリ 256MB	10	3
	20	6
	30	9

(2) 3次元表示機能

3次元表示機能の検証方法は、上空から見た2次元画面上で検索したい範囲を指定して、可視・不可視計算、DOP値計算を実行した時の処理にかかる時間を計測した。今回の2種類のPCによるGPS衛星とGLONASS衛星を併用した場合の、可視・不可視計算、とDOP値計算の合計処理時間を表-2に示す。

今回の処理時間は、表示に大きな負荷がからず、違和感のない滑らかな景観表示を実現し、実用に耐えうる処理時間である。そのため、3次元表示機能として、有用であることが確認できた。

### (3) 考察

本システムでは、視点から 500m 範囲の制限を設け、描画負荷を軽減することで違和感のない滑らかな景観表示を実現した。しかしながら、建物による可視・不可視計算と DOP 値計算の処理時間を考えた場合、3次元 GIS は 2次元 GIS に比べデータ容量、計算容量とも遥かに膨大となるため、標準的な PC 動作環境では解析計算・描画および表示負荷が高く、今後、これらの分野の効率的なアルゴリズムの開発が必要となる。また、今回の DOP 値は、遮蔽物の材質による電波の反射や透過性を考慮していないため、計算結果に小さな誤差が出た。今後、構造物の材質などの細かい情報をデータベースに蓄えておき、その情報を利用することにより、さらに高精度な計算結果が求められると考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、東京駅周辺の建物などの 3次元 GIS データを用いて、通信・放送衛星、測地衛星から送信される電波の地上遮蔽物を考慮した受信可能性と測位可能性を推定するシミュレーションシステムを開発した。

これまで、建物や道路を含む都市の空間的構造を忠実に再現できる 3次元 GIS データが存在しなかったため、衛星電波の受信可能地域を事前に特定することができなかった。特に、測位衛星では、時々刻々と視線方向が変化するため可視衛星数と測位精度を予測することは困難であった。本研究により、地上遮蔽物を考慮した受信可能地域、可視衛星数および GDOP 値を 3次元建物景観とともにビジュアル表現することが可能となった。また、今後打上げが計画されているガリレオ衛星、準天頂衛星そして地上に配置される擬似衛星（スードライト）装置に対しても、GPS 衛星とのハイブリッド測位の効果を評価する有効なツールとなり得ることが確認された。システムの開発や導入に向けて、測位利用率や測位精度への影響を視覚的に表現することができ、実用化に向けた課題の検討や衛星ビジネス市場の潜在的可能性を示せるものと思われる。

一方、3次元建物の検索や表示だけでなくシミュレーション結果の計算、表示についても、3次元 GIS は 2次元 GIS に比べ、データ容量、計算量が遥かに膨大であり、標準的な PC 動作環境では解析計算・表示に負荷が大きくなる。そのため、3次元 GIS において処理に大きな負荷がかからないデータの蓄積、検索、取得、表現、計算方法などを考える必要性がある。将来、3次元 GIS データを全国的に整備することで、地形や建物を考慮した電波受信域や測位可

能率を事前に評価することが可能となり、道路や鉄道周辺のどの箇所にもどの程度、スードライト送信機を整備すればよいかなどの事前検討も可能となる。これらの高精度・高信頼性測位技術を利用して、ITS の自動走行支援や鉄道の車両管理などこれまで実現が困難とされていた分野のビジネスが活発になると思われる。なお、本研究は、総務省情報通信政策局宇宙通信調査室で公募された「3次元 GIS アプリケーションの研究開発」を請負、共同研究を行ったものである。

## 参考文献

- 1) 総務省情報通信政策局宇宙通信調査室:GIS 構築のための情報通信技術の研究開発,平成 13 年度報告書,2001 年.
- 2) 総務省情報通信政策局宇宙通信調査室:GIS 構築のための情報通信技術の研究開発,平成 14 年度報告書,2002 年.
- 3) 安田明生:GPS の現状と展望,電子情報通信学会誌,Vol.182 No.12, pp.1207-1215,1999 年.
- 4) 電気学会・空間情報統合化技術調査専門委員会:GIS の基礎と応用,オーム社,2001 年.
- 5) 日本測地学会:新改定版 GPS—人工衛星による精密測位システム—,日本測量協会,1989 年.
- 6) 日本測量協会 GPS 小委員会:測量,日本測量協会,2001~2002 年.
- 7) B. W. Parkinson, et al.: Global Positioning System Theory and Application, AIAA, Vol.1, pp.481-483, 1995.
- 8) J. B. Armor: Navstar Global Positioning system, Proceeding of ION Tech. Meeting, 1999.
- 9) 吉村優子, 吉川真, 山野高志:GIS データを用いた 3次元都市モデルの生成,年次学術講演会講演概要集第 4 部,土木学会,2001 年.
- 10) 安田明生,ほか:DGPS のデータ伝送遅延に対する測位精度評価,日本航海学会論文集, No.93, pp.7-10, 1996 年.
- 11) R. J. Gurney, J. L. Foster, C. L. Parkinson:Atlas of Satellite Observations related to Global Change, Cambridge U.P., pp.410, 1993.
- 12) 長谷川一郎:天文計算入門—球面三角から軌道計算まで—,恒星社厚生閣,1997 年.
- 13) 国立天文台:理科年表 平成 15 年版,丸善,2003 年.
- 14) 小西勇介,柴崎亮介:GPS とスードライトの利用可能範囲シミュレーションに関する研究, GPS シンポジウムピギナーズセッション,2001 年.
- 15) Y. Konishi, Y. Shibasaki: Development of a Simulation System to Estimate Available Area of GPS and Pseudolite, ACRS2001, 2001.
- 16) 土屋淳,今給黎哲郎:GPS 測量と基線解析の手引,日本測量協会,1994 年.

(2004.5.21受付)