

## レーザー距離計による地形測量と空間内挿

### I 実験目的

近年、乗用車や工場内搬送車などの安全対策として1次元・2次元レーザー距離計が用いられている。特に2次元レーザースキャナは周辺状況を面的に捉えることができ、走査面を変化させることで3次元データを構成することも可能である。そこで、パン・チルト運動の可能な雲台上や一定速度で走行する車両前方に2次元レーザースキャナを取り付け、一定周期で走査することで、周辺の地形測量を行う。また、測定したデータは離散データであるため、それらを空間的に内挿することで面的な地形データを構築する。

### II レーザースキャナの計測原理

#### 1. レーザースキャナ

レーザー測距システムは伝播時間の測定原理に基づいて周辺環境の距離情報を取得することができる。投光部からパルス・レーザービームが発射され、物体に当たると反射し、反射光はスキャナの受光部で認識され、投光と受光の時間差と光速との関係から物体の距離を測定する。パルス・レーザービームは、内部の回転ミラーで方向を変え、周囲のエリアを扇形にスキャンする。連続的にパルスを受光することで周辺環境の輪郭を2次元的に測位することができる。北陽電機社製レーザースキャナ UTM-30LX は、距離測定距離は 30m、走査角度は 270°、角度分解能は 0.25°である。測位誤差は 1m から 10m の範囲内であれば 30mm、10m から 30m の範囲内であれば 50mm で保証されている。



図1 UTM-30LX

#### 2. スキャンデータの座標変換

角度範囲を 270°、角度分解能 0.25°としたときの UTM-30LX による測定の概念図を図2に示す。UTM-30LX から投光したレーザーは図の 0°から 0.25°毎に対象物までの距離  $r_i$  を出力する。1スキャンでは 0°から 270°までの 1081 個のデータが得られ、それらは  $(r_i, \theta_i)$  の極座標系で表すことができる。しかし、このままでは扱いにくいので、

$$x_{Li} = r_i \cos\left(\frac{5}{4}\pi - \theta_i\right) \quad (1)$$

$$y_{Li} = r_i \sin\left(\frac{5}{4}\pi - \theta_i\right) \quad (2)$$

を用いて、UTM-30LX の右向きを  $x_L$  軸正の向き、UTM-30LX の正面向きを  $y_L$  軸正の向きとした直行座標系に変換する事ができる。変換されたデータ  $(x_{Li}, y_{Li})$  は UTM-30LX の測定中心を原点とした直行座標系となる。

#### 3. チルト角のある座標変換

UTM-30LX を可動式雲台に取り付け、チルト(上下運動)角を与える事で、UTM-30LX で得られるデータが2次元であるのに対して、3次元データを得る事ができる。チルト角を  $\phi_i$  としたときの概

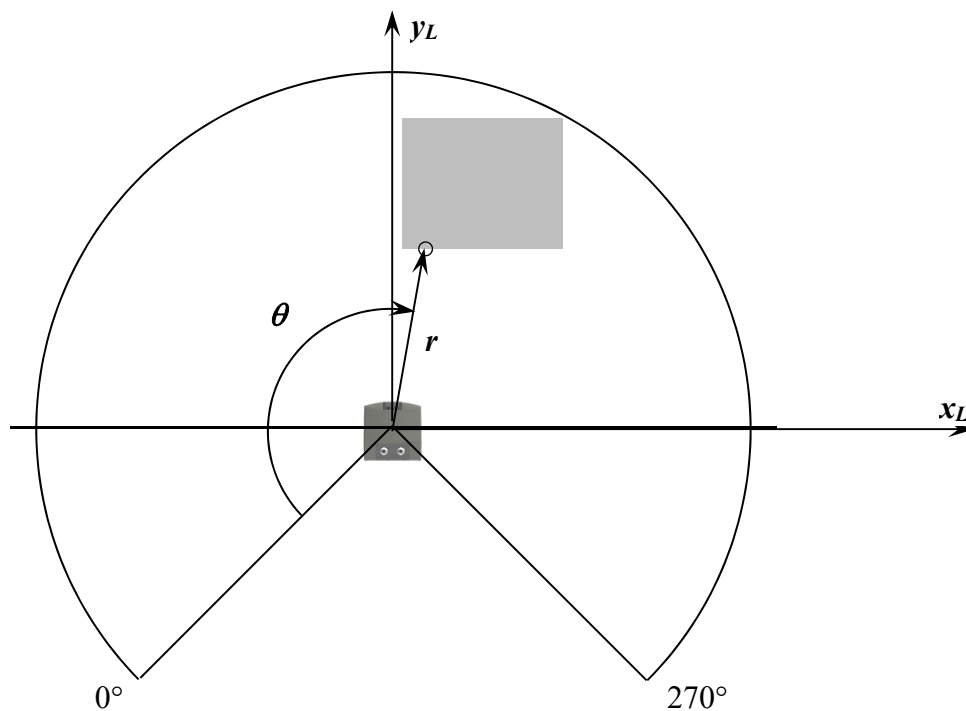


図2 UTM-30LX の測定データ

念図を図3に示す。

UTM-30LX から得られた $(x_{Li}, y_{Li})$ は、UTM-30LX のスキャン平面上的対象物の座標である。雲台の回転運動がチルトのみの場合、 $x_L$  軸と  $x$  軸は共通となるため、原点と  $y_{Li}$  を結ぶ直線は  $yz$  平面上にあることがわかる。チルト角  $\varphi_i$  を用いて  $y_{Li}$  から  $y_i$ 、 $z_i$  を求めると、

$$y_i = y_{Li} \cos \varphi_i \quad (3)$$

$$z_i = y_{Li} \sin \varphi_i \quad (4)$$

となり、UTM-30LX で得られる2次元データは3次元データとして扱う事が可能となる。

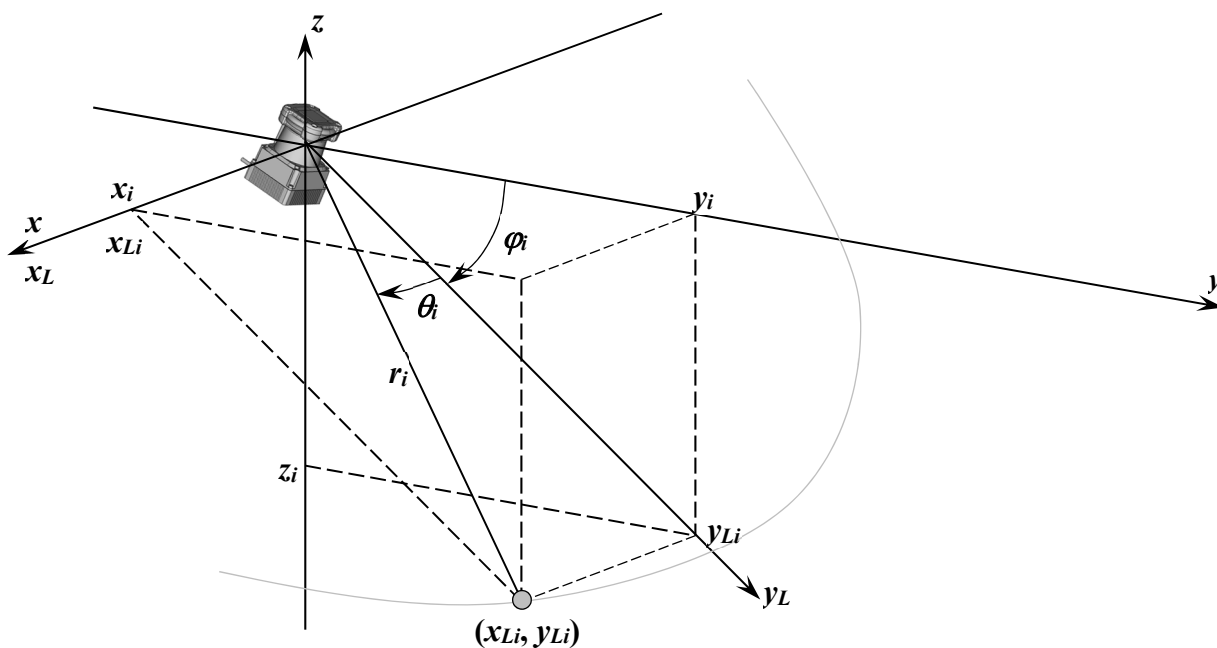


図3 3次元空間の中の UTM-30LX 測定値

### Ⅲ データのモデル化

#### 1. 最小自乗法

測定されたデータをモデル化するためには、モデル関数と測定値から誤差を算出し、それを最小とするモデルを求めることが大切となる。誤差を最小化する方法は様々にあるが、誤差の分散を最小とする方法が一般的であり、その中でも最小自乗法が最も多く用いられる。これは、測定データには系統誤差と偶然誤差が含まれるが、系統誤差が無視できる場合、偶然誤差は正規分布に従うことに起因する。もし、系統誤差が大きい場合には、最小自乗法によって求められるモデルはもっともらしいものとはならないことに注意する。

#### 2. 直線回帰

2次元平面上のデータが直線で近似できる場合を考えると、推定モデルは、 $f(x_i) = ax_i + b$  と表す事ができる。測定されたデータ  $y_i$  との  $y$  方向の誤差  $\varepsilon_i$  は、 $\varepsilon_i = |y_i - f(x_i)|$  となる。よって、測定データ全体の分散  $J$  は、

$$\begin{aligned} J &= \sum \{y_i - f(x_i)\}^2 \\ &= \sum \{y_i - (ax_i + b)\}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

と表す事ができる。この分散  $J$  を最小とする  $a$ 、 $b$  を求める事で、測定データを推定直線モデルで表す事ができる。分散  $J$  は、 $a$  と  $b$  に関する2次関数となり、それぞれの変数に対して下に凸な形となる。そこで、分散  $J$  を  $a$ 、 $b$  それぞれで偏微分し、これらが 0 となる組み合わせを求めることで、最適な  $a$ 、 $b$  を求める事ができる。

$$\frac{\partial J}{\partial a} = 2 \sum -x_i \{y_i - (ax_i + b)\} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = 2 \sum -\{y_i - (ax_i + b)\} = 0 \quad (7)$$

これらは単純な線形結合なので、それぞれ

$$\frac{\partial J}{\partial a} = -2 \sum x_i y_i + 2a \sum x_i^2 - 2b \sum x_i = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = -2 \sum y_i + 2a \sum x_i - 2b \sum 1 = 0 \quad (9)$$

となる。全体を2で除して、行列形式で表すと、

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^2 & -\sum x_i \\ \sum x_i & -\sum 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i y_i \\ \sum y_i \end{pmatrix} \quad (10)$$

となり、

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & -\sum x_i \\ \sum x_i & -\sum 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \sum x_i y_i \\ \sum y_i \end{pmatrix} \quad (11)$$

より、 $a$ 、 $b$  を求める事ができる。

#### 3. 平面回帰

3次元空間上のデータが平面で近似できる場合を考えると、推定モデルは、 $f(x_i, y_i) = ax_i + by_i + c$  と表す事ができる。測定されたデータ  $z_i$  との  $z$  方向の誤差  $\varepsilon_i$  は、 $\varepsilon_i = |z_i - f(x_i, y_i)|$  となる。よって、

測定データ全体の分散  $J$  は、

$$\begin{aligned} J &= \sum \{z_i - f(x_i, y_i)\}^2 \\ &= \sum \{z_i - (ax_i + by_i + c)\}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

と表す事ができる。この分散  $J$  を最小とする  $a$ 、 $b$ 、 $c$  を求める事で、測定データを推定直線モデルで表すことができる。分散  $J$  は、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  に関する2次関数となり、それぞれの変数に対して下に凸な形となる。そこで、分散  $J$  を  $a$ 、 $b$ 、 $c$  それぞれで偏微分し、これらが 0 となる組み合わせを求め、最適な  $a$ 、 $b$ 、 $c$  を求める事ができる。

$$\frac{\partial J}{\partial a} = 2 \sum -x_i \{z_i - (ax_i + by_i + c)\} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = 2 \sum -y_i \{z_i - (ax_i + by_i + c)\} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial J}{\partial c} = 2 \sum -\{z_i - (ax_i + by_i + c)\} = 0 \quad (15)$$

これらは単純な線形結合なので、それぞれ

$$\frac{\partial J}{\partial a} = -2 \sum x_i z_i + 2a \sum x_i^2 + 2b \sum x_i y_i - 2c \sum x_i = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = -2 \sum y_i z_i + 2a \sum x_i y_i + 2b \sum y_i^2 - 2c \sum y_i = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial J}{\partial c} = -2 \sum z_i + 2a \sum x_i + 2b \sum y_i - 2c \sum 1 = 0 \quad (18)$$

となる。全体を2で除して、行列形式で表すと、

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & -\sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & -\sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & \sum 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum z_i \end{pmatrix} \quad (19)$$

となり、

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & -\sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & -\sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & \sum 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum z_i \end{pmatrix} \quad (20)$$

より、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  を求める事ができる。

## IV 実験方法

### 1. 地面の認識

UTM-30LX を雲台に固定し、その上に傾斜センサ (VN-100 Rugged) を取り付ける。雲台チルト角を約 20° に調整して地面が写るように設定し、そこから約 5° 刻みに約 45° までチルト角を変化させながら UTM-30LX のスキャンデータを計測する。同時に傾斜センサによって、正確なチルト角を計測する。

- チルト角 20° から 45° までの6スキャンデータをそれぞれ、極座標系から UTM-30LX の右方向を  $x_L$  軸、正面方向を  $y_L$  軸とする直行座標系データに変換し、図示せよ。
- それぞれのスキャンデータから地面と推測される部分を抽出し、傾斜センサから測定されたチ

ルト角を用いて、UTM-30LX を原点とし、水平面右方向を  $x$  軸、水平面正面方向を  $y$  軸、鉛直方向を  $z$  軸とするローカル座標系データに変換せよ。

- 6スキャンで測定されたローカル座標系における地面データを全て用いて、ローカル座標系における地面の方程式を求めよ。
- 求められた地面の方程式と原点との距離は、UTM-30LX の地面に対する取り付け高さを表す。この値を求めよ。

## 2. 地面に置いた物体の認識

UTM-30LX で測定できる範囲内に段ボール等の立方体の物体を置き、これを UTM-30LX で複数回スキャンする事で、その大きさを推定する。推定精度が良くなるよう、あらかじめ UTM-30LX に対する物体の置き方、スキャン方法をグループで検討してから測定する。

- 事前に立方体の縦、横、高さの値を巻き尺を用いて測定し UTM-30LX によって推定した大きさと比較せよ。
- 比較した結果より、UTM-30LX によって得られるデータの特徴を検討せよ。

レポートの提出は、1班は 月 日( )16:30、2班は 月 日( )16:30 まで。S264 生物生産応用工学研究室に提出すること。メールでの提出も可だが、1つのワードファイルもしくは PDF にまとめること。計算がわかりにくい場合は質問に来ること。