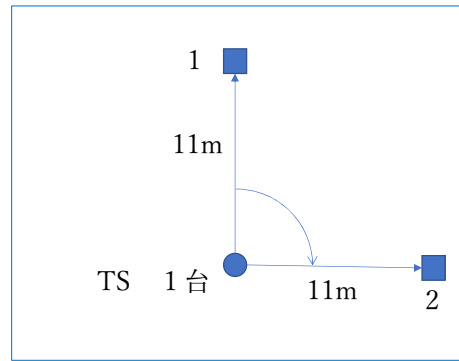


TSを用いる多角測量の 位置決定の不確かさ(その1)

反射鏡の致心誤差の測定実験

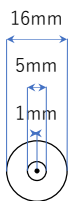
反射鏡整置の致心誤差 実験の方法

- 角観測：2方向 3対回1セット
- 測距：測角と同時に方向1と2への測距を対回正反毎に1回ずつ計6回ずつ実施し、平均値を1セットとする。
- 上記方法で1セット毎に方向2の反射鏡を整置し直す(毎回、同一人物による整置)。観測を30回繰り返す。この間、方向1とTSの位置は固定する。
- 30回の観測終了後、観測者を変更して再度同じ観測(30回)を繰り返す。
- 通常の測量作業を再現するため、致心作業において通常を超えるような注意は払わない(頑張っても精度良くしようとはしない)。
- 実験日時：2021年2月4日9:00-17:00
- 実験場所：つくば測量技術センター構内

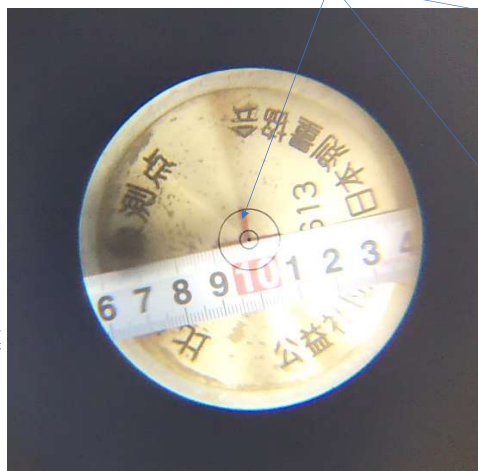


3

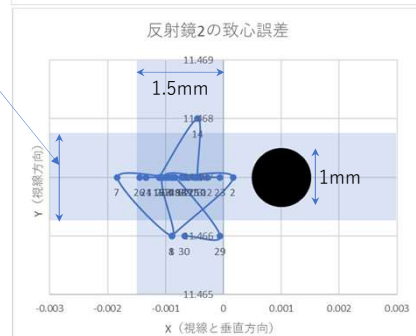
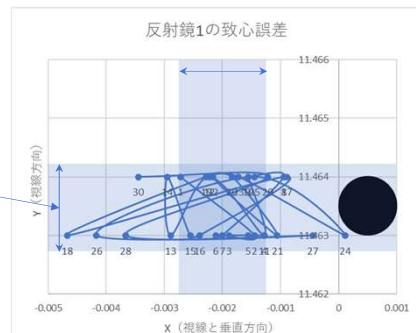
反射鏡光学求心器



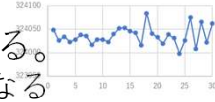
レチクルの指標の大きさ



十字線の幅：1.5mm



実験結果の解釈 ～視線と垂直方向（測角方向）～

- 1夾角の測角の精度は標準偏差で3.4秒（反射鏡1）、3.3秒（反射鏡2）なので、致心誤差（角度）の標準偏差の値(18.8秒、7.6秒)は信頼できる。
 - 角度を距離に換算すると、視線と垂直方向の致心誤差は標準偏差で1.0mm（反射鏡1）、0.4mm（反射鏡2）である。
- 反射鏡1では後半の測定に大きなばらつきがある。
 - 16回目までの測定値を取ると標準偏差が0.6mmになる
 - 視線方向成分の標準偏差と比較しても視線と垂直方向成分の標準偏差1.0mmは過大
 - 致心誤差の特定方向のみが大きくなるとは考えにくいので、視線と垂直方向成分の後半の大きなばらつきは致心誤差ではなく、他の要因の誤差と推定

5

実験結果とその解釈からの結論

- 光学求心器のレチクル（望遠鏡の視野内に設けられた円形の指標）の中心の黒丸は直径が1.0mm、測量標の十字線の刻印の幅が1.5mmである。
- 反射鏡2の致心のずれは十字線の交点（1.5mm角の正方形）の中または近傍に納まっている。
- 反射鏡1の致心のずれは測定の後半で十字線の交点から大きく離れる。大きなずれは整置とは別の要因による可能性がある。
- したがって、致心誤差は反射鏡1の前半の標準偏差と反射鏡2の標準偏差を勘案して0.6mmと想定する。
 - 視線方向と測角方向（視線と垂直方向）は同じ標準偏差と想定。

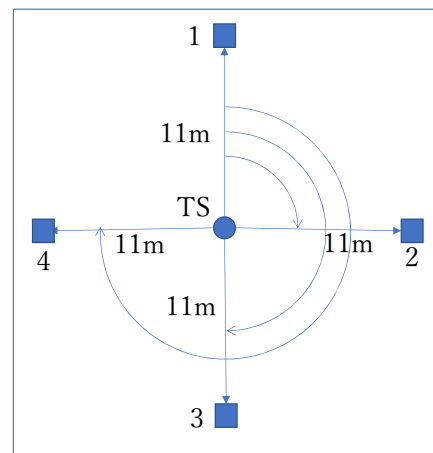
6

TSの致心誤差の測定実験

7

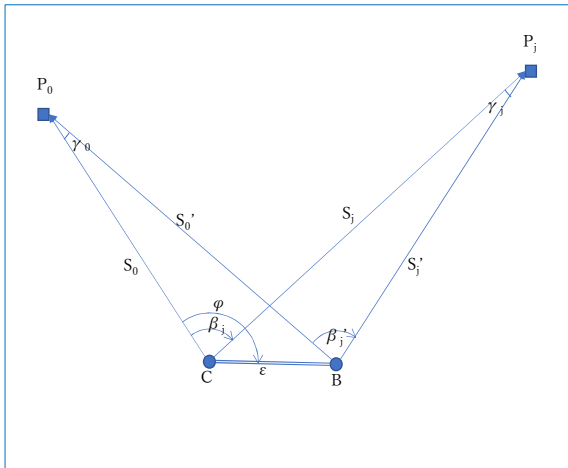
TS整置の致心誤差 実験の方法

- 角観測：4方向 3対回1セット
- 測距：測角と同時に方向1~4への測距を対回正反毎に1回ずつ計6回ずつ実施し、平均値を1セットとする。
- 上記方法で1セット毎にTSを整置し直す(毎回、同一人物による整置)。観測を30回繰り返す。この間、方向1~4の反射鏡の位置は固定する。
- 通常の測量作業を再現するため、致心作業において通常を超えるような注意は払わない(頑張って精度良くしようとはしない)。
- 実験日時：2021年2月8日9:00-16:30
- 実験場所：つくば測量技術センター構内



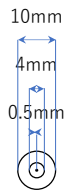
8

TSの致心誤差と夾角観測の誤差のモデル化

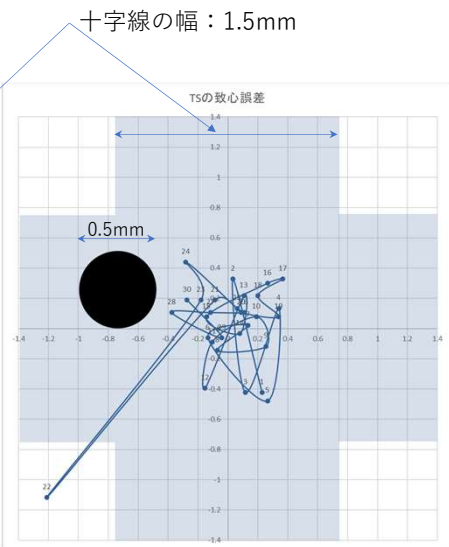


P_0 : 基準となる方向の目標点
 P_j : j 番目の目標点
 C : 標石中心
 B : 器械中心
 S_0' : B- P_0 間の観測距離 S_0 : C- P_0 間の距離
 S_j' : B- P_j 間の観測距離 S_j : C- P_j 間の距離
 β_j' : P_0 - P_j 間の観測夾角 β_j : 点Cから見た P_0 - P_j 間の夾角
 γ_0 : P_0 方向の補正角 γ_j : P_j 方向の補正角
 ϵ : 致心誤差の大きさ (C→Bの長さ), $0 \leq \epsilon \leq a \ll S_0$
 (aはC- P_0 間の距離 S_0 より十分小さい数)
 ϕ : Cから見たBの方向 (P_0 方向を基準), $0 \leq \phi \leq 2\pi$
 (Cを中心にBの位置が円形状に分布するという想定なので、 ϕ はCを中心として測る角とする。偏心計算のようにBを中心として測る角ではないことに注意)

TS光学求心器



レチクルの指標の大きさ



実験結果の解釈

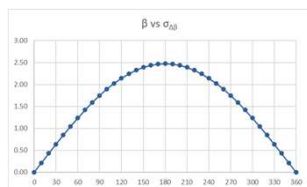
- 30回の測定値のうち、No.22のみが測量標の十字の刻印から外れている。測定後に致心の確認は行っていないので、TSの整置後から測定までの間に致心の大誤差が生じたものと推定できる。
 - 観測終了後に致心の確認を行うことで大誤差の発生を抑えることができる。
- それ以外の致心誤差は標準偏差で0.24mm以下であり、TSの致心誤差としては0.3mmを見込んでおけば十分である。
- 反射鏡の致心誤差0.6mmとの差の原因：
 - 反射鏡の致心誤差の推定が他の誤差要因に影響されて過大となった可能性
 - 反射鏡の光学求心器のレチクル（望遠鏡の視野内に設けられた円形の指標）がTSのものよりも大きいために測量標の十字の中心からのずれが大きくなった可能性

11

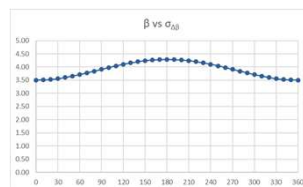
反射鏡及びTSの致心誤差による 夾角の誤差

12

- 野外における1夾角1対回観測値の不確かさは2.5秒と見積もれる。
- 致心誤差を距離50mにおける夾角の誤差に換算
 - 反射鏡の致心誤差(0.6mm)の影響は1方向につき約2.5秒
 - 1夾角の観測では二つの反射鏡の致心誤差が合成されるので、約3.5秒の影響を夾角観測に与える。
 - TSの致心誤差(0.3mm)の影響は夾角に依存するが、夾角が180°に近いところでは約2.5秒の影響を夾角観測に与える。
 - 致心誤差に起因する1夾角の観測の合成不確かさは約4.3秒
 - 致心誤差に起因する不確かさは距離に反比例する。
 - 致心誤差に起因する不確かさは対回数を増やしても小さくはならない。



TS致心誤差



反射鏡とTSの合成

TS測量における気象補正の不確かさ

気象要素の測定誤差による測距誤差

- 気象補正式

$$\frac{dD}{D} = (dt - 0.3dp + 0.04de) \text{ ppm}$$

D : 距離, t : 気温($^{\circ}\text{C}$), p : 気圧(hPa), e : 水蒸気圧(hPa)

- $dt < 1.2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}\text{C}$ の矩形分布の σ) ならば、 $dD/D < 1.2\text{ppm}$
 - $D=50\text{m}$ で $dD < 0.06\text{mm}$
 - $D=200\text{m}$ で $dD < 0.24\text{mm}$ (反射鏡定数の不確かさ以下)
 - 偶然誤差として測距の不確かさに加える
- 高さとの関係 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}^{(*)}$ から、 200m の高度差では気温差 1.3°C 、 $dt=0.65^{\circ}\text{C}$ とすると、 $dD/D = 0.65\text{ppm}$ である。
 - $D=283\text{m}$ (水平距離 200m) で $dD=0.18\text{mm}$

(*)気象庁「気象観測の手引き」では $0.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$

15

- $dp < 4.0\text{hPa}$ ($\pm 7\text{hPa}$ の矩形分布の σ) ならば、 $dD/D < 1.2\text{ppm}$
 - $D=50\text{m}$ で $dD < 0.06\text{mm}$
 - $D=200\text{m}$ で $dD < 0.24\text{mm}$ (反射鏡定数の不確かさ以下)
 - 気圧補正を行う場合は偶然誤差として測距の不確かさに加える
 - 気圧補正を省略する場合は一連の観測中には気圧はほぼ変わらないと仮定して一定の系統誤差として扱う；なお、準則では3~4級で気圧測定が省略が可能とされている
- 高さとの関係式は複雑なので、例として標高 0m と 200m の地点で気温 25°C のときの気圧差を計算すると約 24hPa 、 $dp = 12\text{hPa}$ とすると $dD/D = 3.6\text{ppm}$ である。
 - $D=283\text{m}$ (水平距離 200m) で $dD=1.0\text{mm}$

16

気圧補正の省略の影響

- 気圧 1013 ± 20 hPa (993hPa~1033hPa) で気圧補正を省略した場合の誤差：
 $dD/D = \pm 6$ ppm (最小値、最大値) ; 3.45ppm (± 20 hPaの矩形分布の標準偏差)
 - $D=50$ mとすると $dD=0.3$ mm (最大値) ; 0.17mm (標準偏差)
 - $D=500$ mとすると $dD=3$ mm (最大値) ; 1.7mm (標準偏差)
 - $D=1000$ mとすると $dD=6$ mm (最大値) ; 3.5mm (標準偏差)
- 気圧補正を省略した場合の影響は路線長が長距離になると小さくはない

17

- 水蒸気圧の影響は通常の気象下では無視できる
 - $d_e < 25$ hPaのとき、 $dD/D < 1.0$ ppm
 - $T=30^\circ\text{C}$ での飽和水蒸気圧が約42hPaであり、相対湿度65%の水蒸気圧が約27hPa
→相対湿度0~100%にわたって、相対湿度65%の水蒸気圧に対して $d_e < 27$ hPaであり、影響は小さい。
- $T=35^\circ\text{C}$ (飽和水蒸気圧：約56hPa、相対湿度65%の水蒸気圧：37hPa) で、かつ相対湿度0%のような極端な気象下では水蒸気圧の影響は約1.5ppmに及ぶ。相対湿度100%であれば影響は1ppm未満。

18