

測量機の技術開発

株式会社ソキア
技術研究室長 中村 豊

1. はじめに

測量は、我々が目的とする地球上の点を、相対的な位置や絶対的な位置として測定することにより、その位置を基に地形や地上の現況などを数値や図面に表す技術である。

測量の歴史は、紀元前3000年頃までに遡るといわれている。古代エジプトの時代に、ナイル川の氾濫によって流域の農耕地がたびたび壊され、その損壊から修復、耕地の境界などを決定するために、土地を測定することから始まったとされている。

これは古代エジプト人が生活を営む上で、土地の回復、維持、そして作物の収穫のために、もっとも基本的で重要な技術であったと思われる。現代においても測量はその形態を変えながら国土の開発、社会的なインフラストラクチャなどを構築する上で、なくてはな

らない技術である。

その測量技術を、測定機としてのハードウェア、測定の効率化を促進するソフトウェアの面から一体となって支えるのが測量機械である。測量機械の発達は、測量技術の進展を促し、複雑な建造物の建築や、河川、道路等の高度な工事を支えてきている。また測量の精度や測量成果の良否は、この測量機械の測定能力に依存するといっても過言ではない。このような背景から近年の測量機は、その測定精度や測定原理の点から見ても非常に高いレベルに達している。

2. 測量の基本データ

測量の基本は2点の位置関係を平面上に表すことである。いま平面上で図1に示すような2点A、Bを考えると、A点を基準にしてB点を求めるには基準方向からの角度とA、B

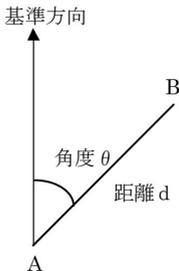


図1

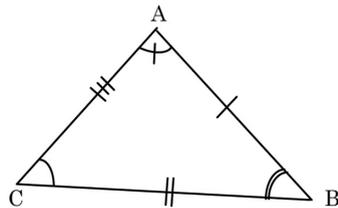


図2

間の距離を求めれば、極座標を用いて表すことができる。また、同じく平面上で3点の関係を表す場合には三角形の合同条件と同様に、その3点を作る三角形において、二辺夾角、二角夾辺、三辺の測定データによって表すことができる。

測量結果を平面上に表すには、この方法でそれぞれの点を座標値として扱い、計算、図化していくことになる。

次に平面に垂直な方向、すなわち高さに関する測量は水準測量を行って求めていく。例えば図3のA点とB点の高低差を求める場合、まずA点に標尺（ものさし）を立て、水準測量機で目盛り*h*を読み、次にB点に標尺を立てて同じように、その目盛り*i*を読んでその差を計算する。A、B間の距離が離れている場合は、この測定をある距離の区間に区切りながら（また2点が見えるようにしながら）、繰り返し高低差を求めていく。山の標高などは、このようにして平均海面からの高低差として測定をする。

このように、測量で測定する基本データは、それぞれの点の相互関係を数値で示すためのもっとも基本的な、高さ、角度、距離という物理的な測定値になる。

近年これらのデータを測量機で測定する能力は非常に高まっており、その測定データの安定性も非常に優れたものになってきている。角度を測る場合、そのオーダーは秒1桁の精度、すなわち5秒から1秒の角度精度測定が一般的に可能である。以前のセオドライトや

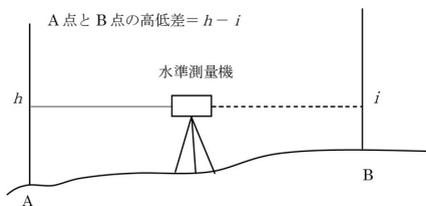


図 3

トランシット（いずれも測角儀）では秒2桁の角度測定であったが、現在はエンコーダを用いた高精度電子測角に置き換わっている。5秒の角度をわかりやすく表すと、図4に示すように200mの距離で5mmだけ横に動いた時にできる角度に相当する。

次に、距離の測定については、距離計による光波を用いた測定でmmの精度で測定することができる。測定値の精度は測定した距離の100万分の1（=ppm）を基本単位としている。例えば1kmを測定した場合、その精度が±（3mm+2ppm）とされていれば、1kmの100万分2すなわち2mmと、定数である3mmを加えて±5mmがその測定精度である。

3. 高さ、角度、距離を測定する最新技術

3.1 高さを測定するデジタルレベル

高さを測定する測量機は水準測量機で、光学と機構のみで構成されるレベルが一般的であった。このレベルを電子化し、自動化した測量機がデジタルレベルあるいは電子レベルと呼ばれるものである。測量機の中でも長い間、電子化されなかった機械の1つである。海外のメーカーがいち早く電子化を行い国内でも製品を販売したが、高価であったためそれほど販売数量は伸びることはなかった。

その後、国産の電子レベルが開発され、価格も廉価となり操作性や機能も向上したが、まだまだ光学機構式のレベルの普及台数には及んでいない。

レベルを電子化するうえで、非常に重要な基本技術となったものは標尺のバーコード化である。従来の標尺には数字と推読用の目盛

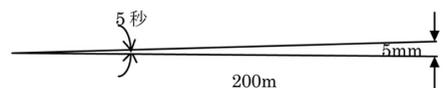


図 4



図5 電子レベルSDL30（ソキア製）

りが書かれているが、これを黒と白のバーコードに置き換えて高さの目盛りを構成している。電子レベルはこのバーコードをラインCCDの数 μm の画素数千個で読み取り、アナログデータからデジタルデータに変換した後、マイクロプロセッサでコードの解読、 mm 以下の桁までの内挿計算を行って精密測定の数値を得る。測定操作は標尺に望遠鏡を向け、フォーカスを合わせてボタンを押すだけで高さを測ることができる。同時に高さだけでなく、標尺までの距離も自動測定できる。このことによって従来必要とした測定のための熟練した技術が必ずしも必要ではなくなった。また、地面や測量機の振動によって目盛りの値が不安定な場合でも、測量機のプロセッサが信号処理を行って適切な測定値を出力するようになっている。レベルの測定精度をあらゆる 1 km 往復標準偏差と呼ばれる値は 1 mm 以下となっている。これは 1 km の距離を往復して高低差を測定することを想定した検査の値である。実測の理論上の値は、往復測定で高さは元に戻る（閉合）ため、開始点と終了点の高低差は 0 になる。

3.2 測角技術と高精度アブソリュートエンコーダシステム

角度を測定するエンジンに相当するものは、エンコーダ測角システムである。従来は、このエンコーダには回転角に比例した角度値を得るインクリメンタルエンコーダを採用し

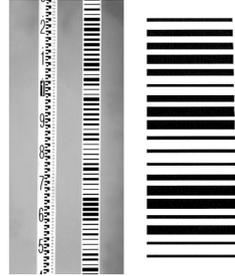


図6 従来の標尺とバーコード標尺、右はバーコード拡大図
ていた。これは相対的な角度を出力するため、測量作業を行う前に 0 度の位置を必ず読み込む操作を行わなければならなかった。

近年、このエンコーダはアブソリュートエンコーダに置き換わり、測角システムが高度化した。高度化は機構的には極めてシンプルな構成の上に、信号の高度な処理によって達成されているため、その信頼性がより高められている。アブソリュートエンコーダシステムは、絶対角の目盛りを搭載することによって 0 度の読み込みは不要となるほか、（1）シンプルな構造、（2）高い信頼性、（3）ローコストという特徴を持つ。

ハードウェアの構造は極めて簡単で、図8のようにエンコーダを片側からLEDで照明し、その反対側でCCDによってエンコーダに刻まれたコードを読み取るだけである。しかし、ハードウェア自体はこのようにシンプルな構成になっているが、読み取ったコードを処理するマイクロコンピュータによる信号処理の部分は非常に複雑になっている。コードの構成は光を透過するガラスエンコーダ上に太いスリットと細いスリットを組み合わせて 360 度分の目盛りを作り上げている。太いスリットを $1''$ 、細いスリットを $0''$ として複数のスリットを同時に読むことにより、角度値としてのコードを解読している。コードの構成は情報符号を応用することにより、万一読み誤ったとしても、ある誤りの数以内であれ

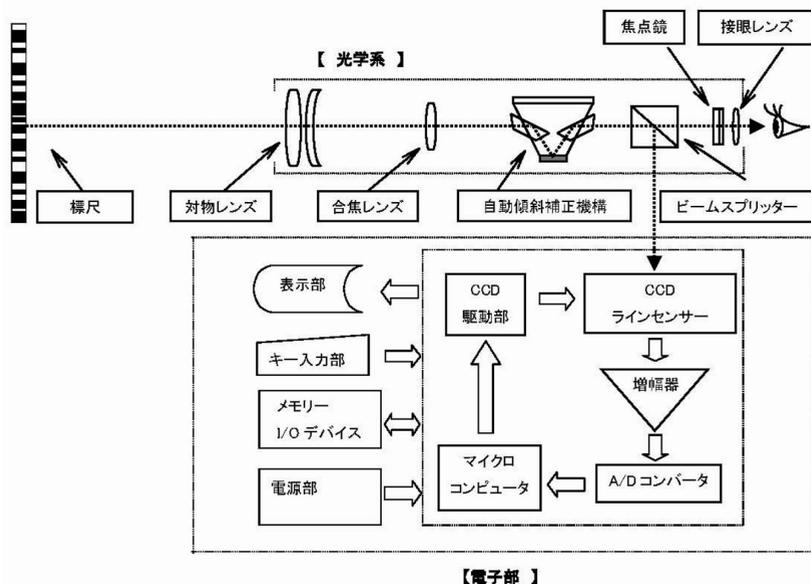


図7 電子レベルの構成

ば、それを訂正できるようになっている。又訂正できない場合でも、ある数まで誤りを検出できる機能も備えている。このことによって、測角の信頼性を非常に高めている。現在の測量機は、このアブソリュートエンコーダシステムによって、測角の表示分解能は0.5秒、測角精度は1秒までの仕様を達成している。

3.3 距離を測定するEDM (Electronic Distance Meter)

3つ目の測定技術である距離測定は光波を用いている。距離計から出された光波が、測定する対象（従来は反射プリズムであった）

で反射し、距離計まで戻ってきたときの光波の位相を計測する。位相の計測は光の強度を変化させて（変調させて）、正弦波状にした光波の送信時の位相と、反射してきた光波の受信時の位相との差を検出して距離を測定する。この変調する周波数を高くすることによって、測定精度を上げることができ（素子の特性や回路の安定性から、周波数を高くすることには限界があるが）、多くのEDMにはこの位相差検出方式が採用されている。変調周波数を30MHzとすると、光速をこの周波数で割ると1波長は10mとなる。光

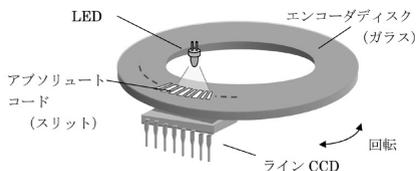


図8 アブソリュートエンコーダシステムの構成



図9 アブソリュートコードの拡大写真

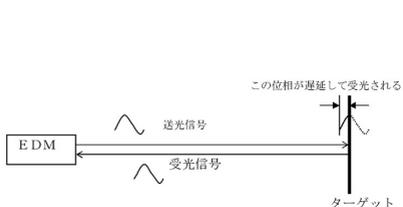
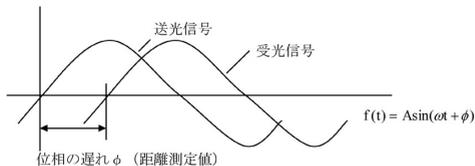


図10 光波で距離を測定する概念図

はEDMとターゲットの間を往復するため、1波長で測定できる長さは5mになる。ここで送信と受信信号の位相差を ϕ とすると5mに $\phi/2\pi$ を乗じた値が測定距離となる。

光波距離計も先の測定技術と同様に信号処理を複雑に駆使して、測定の精度や信頼性を高めている。それにはデジタル信号処理による環境温度やノイズに影響を受けない安定した動作を基本としている。アナログデータをデジタルサンプリングすることによって、プロセッサのフレキシブルな信号処理やデータ処理が実現でき、その信頼性が十分に活かされている。図12に従来の回路と信号処理を多く用いた回路をブロック図の比較で示す。

現在の光波距離計は、目標対象物に直接光を照射して距離を測ることができる。これを



周波数が30MHzのとき、1波長は5mに相当する。
位相の遅延 ϕ が距離測定データとなる。距離(m) $=5 \times \phi/2\pi$

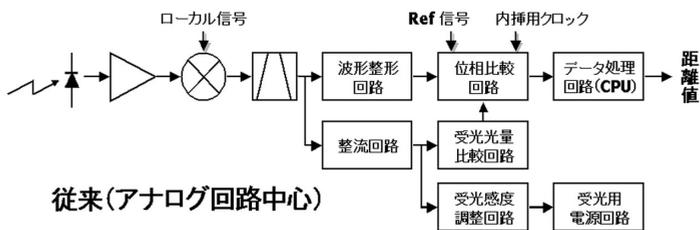
図11 位相差による距離測定

ノンプリズムEDMと呼んでいる。ノンプリズムで150m以上の距離が測定でき、精度は $\pm(3\text{mm} + 2\text{ppm})$ である。今後は測量分野だけでなく、計測の分野にも広く応用されていくと考えられる。

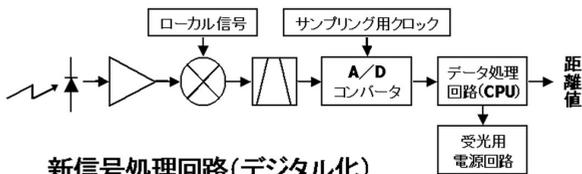
3.4 その他の技術開発

これまで高さ、角度、距離を測定する技術を中心に述べてきたが、その他にも、測定したデータを蓄えるデータコレクタ、モータ駆動測量機、そしてレーザ光でマーキングを行うレーザ測量機、そしてナビゲーションと同様にGPS衛星の電波を受信してmm精度の距離を測定するGPS測量機などがある。

最近の技術を取り入れたものに、測量分野にインターネットの技術を導入するための通信機能を搭載した測量機がある。携帯電話と



従来(アナログ回路中心)



新信号処理回路(デジタル化)

図12 EDMのデジタル信号処理化



図13 トータルステーション（シリーズ30R）
レンズのついている部分がEDM（ソキア製）

測量機を結合しインターネットを介して、測量フィールドで通信ができる機能を測量機に搭載したものである。これは測量現場で観測したデータを、携帯電話で無線回線を通じて事務所に送信し、事務所ではそのデータを直ちに計算図化できるというシステムである。従来は観測データを持ち帰った後、計算処理にかけていたのであるが、このシステムを用いることによって、現場にいながらにして計算や図面の作成が並行してできるのである。また現場へ直行、現場から直接帰宅できるという勤務形態も可能になる。作業の効率化の面でも、くい打ち作業のデータを事務所設計した後すぐに現場に通信で送れば、午後の作業は設計したばかりのデータで行うなどという、極めて迅速な作業も実現することができる。このシステムは今後、測量の業務に欠かせないものとなるであろう。

今後も、先に述べてきた3種類のデータを測定する機能を、更に強化していくことはもちろん、この通信技術を取り入れた測量機のような新しい測量システムを開発していくことが測量技術の発展に寄与していくと考えられる。

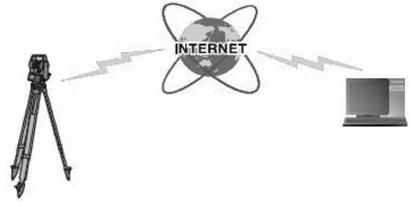


図14 インターネットと結合した測量システム（概念図）



図15 携帯電話を接続した測量機（ソキア製）

おわりに

測量機は誰もが使うものではない。一般にはなじみが薄く、地味な存在である。しかし、いままで述べてきたように精度の追求、新技術の開発と研究していかなければならない領域は広大である。測量機によって、土地を測り、建造物を測り、橋梁や鉄塔を測る公的な利益に寄与する技術開発が、社会発展のために他の技術分野と同様に高度化していくことも重要である。

参考文献

現代測量学	日本測量協会
測量	オーム社
最新測量機器便覧	日本測量機器工業会