

# 三次元形状自動計測システム

## 3D-Coordinate Measuring System for Transit Automated Collimating

大友 雄 二<sup>\*(1)</sup>  
Yuji OTOMO

有田 秀 昶<sup>\*(2)</sup>  
Hidenobu ARITA

森内 直 樹<sup>\*(3)</sup>  
Naoki MORIUCHI

### 抄 録

CCDカメラを内蔵した光波測量機を使用して軽量かつ高精度の三次元形状自動計測システムを開発した。このシステムは光波測量機、画像処理装置、ノート型パーソナルコンピュータで構成されており、あらかじめパーソナルコンピュータに入力された設計座標値で光波測量機を巡回させ、計測対象物上に設置された反射式ターゲットに対して測距、測角を行い画像データを取得する。画像処理装置は画像データが入力されターゲットマークの検出、画像解析を行い、その結果からパーソナルコンピュータがマーク中心座標とターゲットの取付け点(オフセット点)の座標を推定し出力する。工場における精度確認試験ではオフセット点の三次元計測座標値の12回繰り返し計測における標準偏差は30m距離で1mm以内であった。

### Abstract

A light-weight and high-precision automatic 3-dimensional shape measurement system was developed. The system comprises an optical surveying instrument that has a built-in CCD camera, an image processor and a notebook size personal computer. Flat reflective targets with a circle mark are placed offset from selected points on the measurement object such as a section of a large structure before site installation. The optical surveying instrument measures the distance and angle of each of the targets in a cyclic manner guided by design coordinate information of the object stored in the computer, and obtains image data. The image processor identifies the target marks and analyses the image data and the personal computer calculates the positions of the points on the object from the measured positions of the targets to compensate the offset amount. As a result of accuracy confirmation tests of the system at our plant, standard deviation of 3-dimensional coordinate figures of measurements repeated 12 times was less than 1 mm at a distance of 30 m.

### 1. はじめに

土木建築あるいは大型建造物の寸法測定、三次元位置座標点等の測定には、光波距離計付きのトランシットが用いられている。これまでは、作業者が視準レンズを覗き、測距のためのターゲットマークを見つけ、例えば十字線の交点を測距マークの中心に合わせる等の視準作業を行ってきた。しかし最近、CCDカメラを取付けた高精度の光波測量機が利用できるようになり、このCCDカメラで採取した画像から視準図形を画像認識することにより、ターゲットマークの視準を自動的に行う可能性がでてきた。そこで、橋梁部材の三次元形状計測を目的として、市販のCCDカメラ内蔵のモーター駆動式光波測量機と特別のターゲットマークを用い、画像処理によりその自動視準を行って三次元座標値を測定するシステムを開発したので報告する。なお本計測システムの画像処理ロジックの詳細については参考文献1を参照されたい。

開発したシステムは、大型構造上の任意の測点の三次元空間座標点をCCD付き光波測量機システムで実測確認するシステムである。すなわち、大型建造物の特徴点、重要点等三次元座標値を求めたい

ところに視準ターゲットマークを取り付け、5m~20m離れた観測点から、最初は設計座標点データに基づいて光波測量機の視線を合わせ、画像を採取して視準点を決め、測距測角を行うシステムである。システムの特徴としては、視準マークの中心点の三次元位置座標のみならず、例えばボルト穴の中心座標など見えない点を、視準マーク中心からの相対座標値(オフセット)が既知ならば、ターゲット面の傾きを考慮して求めることができることがあげられる。

評価実験の結果は、約30mの距離で、三次元座標点の位置をx, y, zそれぞれ標準偏差が1.0mm未満の繰り返し精度が達成できるところまでできている。

CCD付き光波測量機システムは、現在、建築測量、橋梁部材等の大型建造物の特定点の三次元位置座標の測定に用いられ始めているが、30mで1.0mm以内の精度で三次元位置座標が決定できる性能であれば更に広範囲の応用ができるものと期待される。

### 2. 開発の経緯とコンセプト

橋梁の製作における仮組立工程の省略という発注者側の要求に対

\*<sup>(1)</sup> 鉄構海洋事業部 若松鉄構海洋センター マネジャー  
北九州市若松区大字安瀬4 6 ☎808-0000 ☎(093)752-1808

\*<sup>(2)</sup> (株)ゼンリン 電子地図本部 研究部長

\*<sup>(3)</sup> EI事業部 産業システムソリューション第二部 マネジャー

して新日本製鐵も1993年度から本システム導入の検討に入った。一方1994年春に、測量機器メーカーがCCDカメラ搭載の光波測量機の開発を発表したので、同年夏からその計測機の使用を前提として新日本製鐵エレクトロニクス研究所(現エレクトロニクス・情報通信事業部システム開発センター)の画像認識技術をベースとした自動計測システムの開発に着手し、1995年2月に計測機の入手をもってシステムの実用性を立証した。その後本システムに種々の改良が加えられ、現在新日本製鐵若松鉄構海洋センターにおいて橋梁部材の三次元形状計測に使用している。

また、本システムは、大型構造物の全体または部品形状の設計座標値をもとに、光波距離計付きのトランシットを自動巡回させ、計測対象部材の測点上または偏位して設置されたターゲットを自動視準し、その中心の三次元座標値を求めると同時に部材上の測点の三次元座標値も推定する機能を有する、可搬式または簡単に移設可能な計測装置およびその計測システム等のコンセプトをもとに開発された。

### 3. 測点の三次元座標値の推定方法

#### 3.1 自動視準の原理<sup>2,3)</sup>

矩形反射板上に円と線分が描かれた視準ターゲットマークを計測対象構造物の三次元座標値を測定したい点(複数)に取り付け、観測点からある倍率の望遠鏡にCCDカメラを内蔵された光波距離計付きトランシット(以下、光波測量機)で、望遠鏡の視準軸とターゲットマーク交点までの距離D、視線の水平方向角Hp、垂直方向角Vpを測定し、同時にビデオ画像データも得る(図1参照)。

計測対象構造物の三次元形状は、このデータを用いてターゲットマークの中心の三次元座標T、およびマーク中心を原点とするマーク座標系で(h, f, d)の相対座標値を持つ座標点Qの観測座標系での三次元位置座標を求めることによって得られる。

ターゲットマークの中心の三次元座標

CCDカメラにより撮像された反射板上に描かれた真円のマークは、CCDカメラの視準軸と角度を持っていれば楕円の画像として捕らえられる。

この楕円マークのビデオ画像データからターゲットの中心点のCCDカメラの視準点からのずれ量(Δx, Δy, Δz)の算出する。視準軸方向をzpとし、それと直交する面をxp-yp平面とし水平方向にxp軸、それと直交する軸をyp軸として画像座標系を設定し、

ターゲット上の視準点、すなわち視準軸がターゲットと交差する点をPとし画像座標系の原点とする。このxp-yp平面上に投影されたターゲットの画像解析を行い、ターゲット像の中心Cの視準点Pからのずれ量(Δx, Δy)およびターゲット像の長径a\*と短径b\*を求める。なお、長径a\*は常に真円のターゲットの直径に等しいので既知である。この短径と長径の比から、ターゲット面7が視準軸となす角度φ(入射角)が算出される。

$$\phi = \pm \arcsin(a^*/b^*) \quad (1)$$

さらに、ターゲットの長軸(L軸)が水平軸(xp軸)となす角度αを求め、以下のような計算式によりターゲット中心点の視準軸方向のずれ量Δzを算出する。

$$\Delta z = \sqrt{(x \times x + y \times y)} \times \sin(\alpha + \arctan(\Delta x / \Delta y)) / \tan \phi \quad (2)$$

次に、対象ターゲット中心点の座標値の算出方法を説明する。計測機を原点Oとした時のターゲット中心点Tの座標系における三次元座標値(xc, yc, zc)がターゲット面の視準点Pの極座標値(D, Hp, Vp)と画像座標系における視準点Pからのずれ量(Δx, Δy, Δz)から下式により求められる。

$$\begin{pmatrix} xc \\ yc \\ zc \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} \sin Vp \times \sin Hp \\ \sin Vp \times \cos Hp \\ \cos Vp \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos Hp \sin Hp \times \cos Vp & \sin Hp \times \sin Vp \\ -\sin Hp \cos Hp \times \cos Vp & \cos Hp \times \sin Vp \\ 0 & \sin Vp \cos Vp \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (3)$$

また、測点の三次元座標値はターゲット中心Tを原点とし、基線方向をx軸とするマーク座標系において、原点Tから測点Qまで基線方向の距離をh、ターゲット面内直角方向の距離f、h-f平面に直交する方向の距離d(ターゲット座標系)とし、ターゲット像の長軸(L軸)と基線の画像のなす角度をβとすると、画像座標系においてターゲット中心点Tを原点としたときの測点Qの座標値(Δxs, Δys, Δzs)は下式により求められる。

$$D = \sqrt{(\sin \phi \times \sin \phi + \tan \beta \times \tan \beta)} \quad (4)$$

とおけば

$$\begin{pmatrix} \Delta xs \\ \Delta ys \\ \Delta zs \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (h \times \sin \phi - f \times \tan \beta) / D \\ (h \times \sin \phi \times \tan \beta + f \times \sin \phi \times \sin \phi) / D - d \cos \phi \\ (h \times \cos \phi \times \tan \beta + f \times \cos \phi \times \sin \phi) / D + d \sin \phi \end{pmatrix} \quad (5)$$

上記の測点Qの画像座標系における座標値を観測座標系に変換して、計測機本体を原点Oとした時の測点Qの三次元座標値(xt, yt, zt)は次式により求められる。

$$\begin{pmatrix} xt \\ yt \\ zt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} xc \\ yc \\ zc \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos Hp \sin Hp \times \cos Vp & \sin Hp \times \sin Vp \\ -\sin Hp \cos Hp \times \cos Vp & \cos Hp \times \sin Vp \\ 0 & \sin Vp \cos Vp \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta xs \\ \Delta ys \\ \Delta zs \end{pmatrix} \quad (6)$$

観測座標系、画像座標系、ターゲット座標系における測点の三次元座標値は数式上では上式から求められるが、CCDカメラの画素数の制約から、ターゲットと正対している場合に入射角φ(ターゲット面の傾斜角)の誤差が大きい。また画像解析から求めた楕円の主軸と基線角の誤差から、楕円の短軸と基線方向が極めて近いときに式(5)のtan βの符号の反転が生じる。このことから実機システムでは

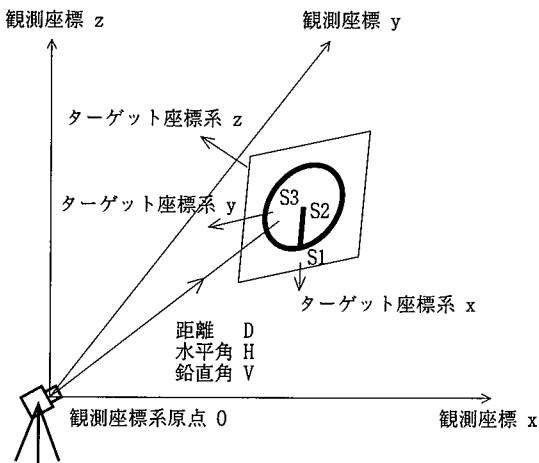


図1 ターゲット座標系と観測座標系の関係

次に述べる方法を採用している。

3.2 本システムで採用した自動視準方式<sup>4)</sup>

オフセット計測が本システムの特徴であるため、実機システムでは以下の手順でターゲット面上のマーク上の3点の測距、測角を行うことによって基線方向ベクトルを求めている。

- 1) 目標ターゲット中心までのおおよその距離、水平垂直方向角を計算して視準軸をその方向に向け、焦点を合わせ、測距、測角を行い、かつマーク画像データを採取して楕円を同定し、画像上での楕円中心位置を決定する。
- 2) マーク画像を構成する点列から求めたマーク画像の楕円の方程式と基線画像を構成する点列から求めた基線画像のマーク中心を基点とする半直線の方程式から、また楕円と直線の交点と基線からそれぞれ90° 180° 270° をなす半直線と楕円との交点を求める。
- 3) 2)で求めた楕円周上の3交点に視準軸を合わせ測距、測角を行い、この点のデータを1直線上にない3点の測距測角データを観測座標系の直交座標に変換して、ターゲット座標系と観測座標系の変換行列を求める。
- 4) 目標点Qのターゲット座標系の値(h, f, d)を、式(5)の変換行列を用いて、観測座標系の三次元座標値(xt, yt, zt)を計算する。

3.3 ターゲット座標系と観測座標系の変換行列の推定法

視準マーク上の1直線上にない3点の観測座標値データS1(x1, y1, z1), S2(x2, y2, z2), S3(x3, y3, z3)が得られたとし、S2はマーク中心座標、S1はターゲット座標系のX軸上の1点であることがわかっているとして、楕円中心位置S2を原点Oとするターゲット座標系の各軸O-X, O-Y, O-Zの方向余弦を求めて、ターゲット座標系と観測座標系の変換行列を構成することにする。簡単のために、3点のデータからS2データを引いて結果を改めてS1, S2, S3としておく。

1) まず、S1(x1, y1, z1)は、ターゲット座標系のX軸と楕円(円)の交点と定義した点の三次元座標であるから、ターゲット座標系のX軸 O-Xの観測座標系o-xyzに対する方向余弦(l1, m1, n1)は、

$$D1 = \sqrt{(x1 \times x1 + y1 \times y1 + z1 \times z1)} \tag{7}$$

とすると、

$$l1 = x1 / D1 \tag{8}$$

$$m1 = y1 / D1 \tag{9}$$

$$n1 = z1 / D1 \tag{10}$$

となる。

2) 次に、ターゲット座標系のX軸は、マーク面がO-XY平面であるから、それに直交する方向のものとなる。マーク面上の点S1, S2, S3を通る平面の方程式は、

$$\begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ x1 & y1 & z1 & 1 \\ x2 & y2 & z2 & 1 \\ x3 & y3 & z3 & 1 \end{vmatrix} = 0 \tag{11}$$

であり、これを整理して、

$$A \times x + B \times y + C \times z = 0 \tag{12}$$

となったとする。

$$D3 = \sqrt{(A \times A + B \times B + C \times C)} \tag{13}$$

とすれば、Z軸の方向余弦(l3, m3, n3)は、

$$l3 = A / D3 \tag{14}$$

$$m3 = B / D3 \tag{15}$$

$$n3 = C / D3 \tag{16}$$

となる。

3) 最後にターゲット座標系のOY軸の方向余弦を求めるため、Y正軸と円の交点の未知座標を(x4, y4, z4)とし、実マーク上での円の半径をRとすれば、(x4, y4, z4)はマーク平面上の点であるから、

$$A \times x4 + B \times y4 + C \times z4 = 0 \tag{17}$$

が成立する。また実マーク上の円の半径はRとしたから、

$$x4 \times x4 + y4 \times y4 + z4 \times z4 = R \tag{18}$$

X軸(O-X)とY軸(O-Y)は、実空間では直交するから、

$$x1 \times x4 + y1 \times y4 + z1 \times z4 = 0 \tag{19}$$

が成立する。式(17), (18), (19)を(x4, y4, z4)に関する方程式とみてこれを解けば、最終的には、

$$x4 = R / \sqrt{(1 + a \times a + b \times b)} \tag{20}$$

$$y4 = a \times x4 \tag{21}$$

$$z4 = b \times x4 \tag{22}$$

ここで

$$a = (-A \times z1 + C \times x1) / \det \tag{23}$$

$$b = (-B \times x1 + A \times y1) / \det \tag{24}$$

となる。従って、OY軸の方向余弦(l2, m2, n2)は、

$$D2 = \sqrt{(1 + a \times a + b \times b)} \tag{25}$$

とおくと、次のように決定できる。

$$l2 = 1 / D2 \tag{26}$$

$$m2 = a / D2 \tag{27}$$

$$n2 = b / D2 \tag{28}$$

4) ターゲット座標系O-XYZの原点(楕円中心)が観測座標系で(xc, yc, zc)であったとすれば、変換行列は次のものとなる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l1 & l2 & l3 \\ m1 & m2 & m3 \\ n1 & n2 & n3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} xc \\ yc \\ zc \end{pmatrix} \tag{29}$$

ターゲット座標系において、マーク中心の対して(h, f, d)のオフセット値を有している相対座標点Qの三次元座標(xt, yt, zt)は次式で計算できる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} xc \\ yc \\ zc \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l1 & l2 & l3 \\ m1 & m2 & m3 \\ n1 & n2 & n3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ f \\ d \end{pmatrix} \tag{30}$$

4. 実機システムとしての機能と性能

4.1 機器構成

本システムの構成を図2に示す。①は30倍の望遠鏡にCCDカメラを内蔵したモータ駆動式光波測量機であり、距離、水平垂直方向角、ビデオ画像データがとれ、視準方向、焦点、照明の調整等を制御できる。(ソキア社製MET-N2V, 測距精度±(0.5+測定距離×10<sup>-6</sup>)mm, 測角精度±2秒, 停止精度±5秒/±15秒(切替))

②は画像処理装置であり、コンピュータの指令により画像を採取し、画像から本方法の処理を行った後、マーク中心位置座標、長軸、短軸、主軸方向角などを出力する(横河ADS社PIP-7000)。

③はシステム制御用パーソナルコンピュータであり、光波測量機

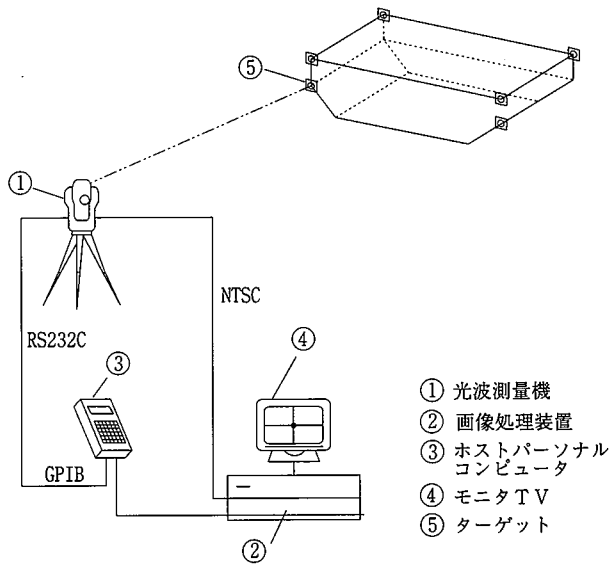


図2 三次元形状計測システム

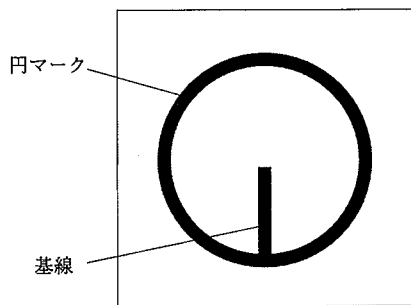


図3 円マーク・基線付ターゲット

の制御とデータ統合、座標変換、オペレータとのやりとりなどを受け持つ。

④はモニタTVで、光波測量機からのリアルタイムビデオ画像、画像処理装置からの画像処理結果をモニターする。

⑤は拡大図を図3に示す反射式ターゲットである。

また、光波測量機とパーソナルコンピュータ間はRS232c、画像処理装置とパーソナルコンピュータ間はGPIB、光波測量機、画像処理装置、TV間の画像伝送はNTSC方式である。本論文で述べた内容のうち、パーソナルコンピュータからの指令で採取されたマーク画像データ処理は主に画像処理ユニット内部の処理ソフトウェアとし、三次元座標推定に関するものはホストパーソナルコンピュータ機能として実現された。

#### 4.2 自動計測の手順

本計測システムの自動計測は計測対象物上に取付けられターゲットをその設計三次元座標にしたがって自動巡回、自動視準し、計測対象物上の座標系で測点の三次元座標を算出するものであり、その操作フローを以下に述べる。

- 1) 計測の対象となる構造物の設計あるいは計測のために作成された⑤ターゲット中心の三次元座標値(以下ターゲット座標)とそのターゲットのオフセット値を制御用パーソナルコンピュータに入力する。
- 2) 光波測量機を観測点に据え、計測対象物上に取付けられた一直線状にない3個所のターゲット内の任意の一点を手動で視準(測

距、測角)したのちに、再度自動視準を行って計測の基準となる座標系を確立されると残りのターゲット座標の座標変換が行われる。

- 3) パーソナルコンピュータは2)で変換されたターゲット座標にしたがって光波測量機を制御してターゲットの数だけ巡回させ、ターゲットごとに3.2に記載した方式で自動視準を行って、ターゲットのマーク中心座標と測点(オフセット点)の三次元座標値が算出され、制御用パーソナルコンピュータに表示、記憶される。

#### 4.3 ターゲットの三次元位置座標の推定精度

工場内部の壁面の柱などに、一直線上にはならないように、遠くから順に、番号1→6の6個のターゲットマークを配置し、ターゲット6の手前約6mの地点にトランシットを設置して三次元座標測定実験を行った。観測点から一番近いターゲット6まで約7m、最も遠いターゲット1(オフセット量50mm)まで約30mの直線距離があった。6個のターゲットのうち、ターゲット1、3、6を基準ターゲットとして用いた。すなわち、この3個のターゲットマークの中心三次元座標を手動で測定し、観測系とCAD系の変換行列を作成する。

いったん変換行列が作成されたのちは、これらの基準点も三次元座標を計測すべき一般計測点の一部とする。計測実験は自動巡回計測により行った。具体的には、ターゲット2→4→5→1→3→6→2…の順に巡回ルートを設定し、このルートを12回巡回計測する形で各ターゲットの中心Pとオフセット点Qの三次元位置座標を求めた。同一のターゲットについて、連続して12回の計測の平均ではなく、巡回パスが12回である。

本システムは、距離30m=30 000mmで、1mm以内の計測精度達成を目標にしているが、2m→30m範囲の距離で、精度1mm以内で三次元位置座標を得ることができる他の方法は利用できなかった。各ターゲット中心およびオフセット点の三次元座標値の正しい値は不明である。このため、次善の策として、本システムで同一点を多数回計測しての繰り返し精度で、三次元位置座標の推定精度を評価した。表1に各ターゲット点の計測結果データを示す。

#### 4.4 実機システムの自動計測機としての付加機能

本システムの実機化に当たってオフセット計測機能をはじめとして、以下の機能を付加した。

##### 1) オフセット計測機能

計測対象物のある測点上に偏位させて取り付けられたターゲット上の点の測距、測角値からその測点の三次元座標値を自動的に算出する。言い換えれば、ターゲットを視準しただけでその取り付け点(計測対象物上の測点)の三次元座標値を求める。

##### 2) 自動計測

CCDカメラにより撮像したターゲットを画像解析した結果で自動的にターゲットを視準し、ターゲットの中心、視準面の傾き、基線角を求めオフセット計測を行う機能。

##### 3) マニュアル計測

CCDカメラにより撮像したターゲットを直接目視して、手動でターゲットを視準し、ターゲットの中心、視準面の傾き、基線角を求めオフセット計測を行う機能。本システムでは光波測量機とパーソナルコンピュータだけでもオフセット計測を行うことができる。

##### 4) オフラインティーチング

光波測量機の制御を行うための計測対象物上の測点の三次元設計

表1 三次元座標値測定結果

Term	ターゲット中心	計測点 (オフセット点)
ターゲット1までの距離	3897.7 mm	3897.7 mm
距離の標準偏差 (mm)	0.10	0.10
(x, y, z)座標平均値 (mm)	(26964.0, 0.21, 659.5)	(26963.9, 7.0, 646.0)
(x, y, z)座標標準偏差 (mm)	(0.04, 0.12, 0.11)	(0.14, 0.15, 0.12)
基線角 (deg)		85.03 85.03
基線角の標準偏差 (deg)	0.23	0.23
ターゲット2までの距離	4633.7 mm	4624.5 mm
距離の標準偏差 (mm)	0.10	0.23
(x, y, z)座標平均値 (mm)	(22493.0, 643.0, -376.0)	(22493.5, 634.0, -358.2)
(x, y, z)座標標準偏差 (mm)	(0.08, 0.15, 0.11)	(0.18, 0.21, 0.14)
基線角 (deg)		266.8 266.8
基線角の標準偏差 (deg)	0.19	0.19
ターゲット3までの距離	13404.4 mm	13405.8 mm
距離の標準偏差 (mm)	0.12	0.41
(x, y, z)座標平均値 (mm)	(13581.0, -18.0, -104.0)	(13580.6, -2.6, -129.8)
(x, y, z)座標標準偏差 (mm)	(0.13, 0.16, 0.20)	(0.35, 0.34, 0.24)
基線角 (deg)		91.08 91.08
基線角の標準偏差 (deg)	0.62	0.62
ターゲット4までの距離	17965.4 mm	17966.0mm
距離の標準偏差 (mm)	0.15	0.27
(x, y, z)座標平均値 (mm)	(9010.5, 1.08, -0.53)	(9011.17, 24.8, -44.56)
(x, y, z)座標標準偏差 (mm)	(0.14, 0.17, 0.18)	(0.23, 0.33, 0.25)
基線角 (deg)	89.26	89.26
基線角の標準偏差 (deg)	0.40	0.40
ターゲット5までの距離	22391.7 mm	22394.9 mm
距離の標準偏差 (mm)	0.19	0.59
(x, y, z)座標平均値 (mm)	(4579.4, -105.0, 95.17)	(4577.09, -82.0, 50.9)
(x, y, z)座標標準偏差 (mm)	(0.19, 0.30, 0.37)	(0.65, 0.77, 0.45)
基線角 (deg)		89.01 89.01
基線角の標準偏差 (deg)	0.89	0.89
ターゲット6までの距離	26971.5 mm	26972.1 mm
距離の標準偏差 (mm)	0.11	0.25
(x, y, z)座標平均値 (mm)	(0.43, -0.40, -0.93)	(0.21, -44.0, -24.7)
(x, y, z)座標標準偏差 (mm)	(0.12, 0.33, 0.41)	(0.21, 0.38, 0.71)
基線角 (deg)	359.5	359.5
基線角の標準偏差 (deg)	0.59	0.59

注1: 12回巡回計測したデータの平均値, 標準偏差を示す。

注2: 計測点からの距離とは, 観測点からターゲット中心平均座標までの直線距離である。

注3: 中心座標標準偏差とは, x, y, z成分それぞれの標準偏差である。

座標値をあらかじめモデリングシステム, 三次元CAD等で作成する機能。

#### 5) オンラインティーチング

光波測量機の制御を行うための計測対象物上の測点の三次元設計座標値を, 現物に取り付けられたターゲットを直接光波測量機で視準して作成する機能。

#### 6) 自動巡回

オフラインまたはオンラインティーチングで求められたターゲットの位置(三次元座標値)をもとに光波測量機の駆動モータを制御して, 指定したターゲットの方向に光波測量機を自動的に向かせる機能。

#### 7) ワイヤレスリモートコントロール

パーソナルコンピュータから無線モデム(RS-232C)経由で光波測量機と通信, 制御を行う機能。

#### 8) リアルタイム表示

計測された個々のターゲット中心点, 測点, 基線角等の測定値及び設計値に対する誤差値がパーソナルコンピュータのディスプレイ上に順次表示する機能。計測対象物上の形状及び誤差, ターゲットの取り付け間違い, 画像処理の成功失敗がリアルタイムにわかる。

#### 9) 再計測

何らかの原因で計測に失敗したターゲットや未計測ターゲットに対して画像処理パラメータの変更, 照明の照度の変更など計測条件を変えて自動または手動計測を再度実施する機能。

## 5. 考察

### 5.1 ターゲットマーク図形について

1) 従来の目視による視準の場合には, 測りたい点を点として人間が認識できればよかったから, 十字図形などで十分であった。しかしながら, 画像データによる自動認識では, 測りたい点を点として指定でき, かつ画像処理上認識しやすい図形である必要がある。このため, 例えば正方形反射ターゲットを用い, 正方形(一般には平行四辺形)を認識して, その面積重心を求める方法等が多用されている。ターゲットの中心のみを求めるのならばそれでもよいが, ターゲットの中心とその平面に対し, 指定のオフセットがある点の座標を推定するには面の傾きを考慮した変換行列を求める必要があり, 単純図形の面積重心法では困難である。

2) そこで我々は, 単純でかつ数学的にも扱いやすいターゲットマーク図形として円を選び, この円の中心をターゲット中心とした。

ターゲット平面に描かれた円図形は、一般的には楕円として見える。この楕円としての見えかたがターゲット面の傾きの情報を持っている。また円あるいは楕円であるということから、ターゲット図形の全景が完全に見えなくても(検出できなくても)その一部から楕円を求めることができるから、ロバストな推定が可能となる。

- 3) また我々は、ターゲット図形の中心点の三次元座標だけでなく、指定のオフセットを有する点の三次元位置座標も推定可能とするため、ターゲット座標系と観測座標系の変換行列を必要とし、この関係を確立するためターゲット座標系のX軸を表す基線を導入した。

### 5.2 画像データからのオフセット計算

- 1) ターゲット画像データからのオフセット計算を行うために基線を導入したが、オフセット座標(マーク中心と測点の座標差)はターゲット座標系→画像座標系→観測座標系といった座標変換を順次行っていく方法では、ターゲット座標系→画像座標系の変換式内に特異点を持つ関数 $\tan \beta$ を含む。そのため画像解析から求めた楕円の主軸と基線角の誤差から楕円の短軸と基線方向が極めて近いときに $\tan \beta$ の符号の反転が生じることから、オフセット計算結果が不安定な領域が生じることがわかった。
- 2) また視準軸とターゲットが正対している場合には、CCDカメラの画素数の制約から楕円の長径と短径の長さ(画素数)の差が極めて小さくなり、入射角 $\phi$ (ターゲット面の傾斜角)の誤差のばらつきが大きくなる。このことはマーク中心座標の推定には問題無いが、オフセット座標値の計算にとって無視できない誤差を生じる原因となることがわかった。
- 3) 上記1), 2)の問題を解決するために、ターゲット平面内の3点(1点は基線上)を自動視準して、ターゲット座標系の観測座標系に対する方向余弦を求め、測点の三次元オフセットを直接得る方式を採用した。

### 5.3 三次元座標推定精度

- 1) 三次元位置推定精度を議論するのに、“比較すべき正しい値がない”のが一番の問題点である。しかしレーザートランシットの距離計測精度は保証されており(40mで $\pm 0.6\text{mm}$ )、また方向角分解能も角度で2秒(40mで $\pm 0.4\text{mm}$ )以内であり、表1が示す再現性=ターゲット中心に関しばらつきが大きいところでも、25.5mで標準偏差0.66mmのデータは、本方法、システムが十分実用システムとなりうることを示している。
- 2) 30mまでの範囲で1mm以下の精度で三次元座標値を計測できる可能性が実証されたと判断されるが、これを真とするためには、

今後できるだけ早い機会に適切な校正システムとリンクして、トレーサビリティを確立したいと考える。

### 5.4 オフセット計測の有効性

円と基線マークが描かれたターゲットを視準するオフセット計測機能を採用することにより、ターゲットの取付け方向の仮定なしに計測対象物上の測点の三次元座標値を推定できるようになった。このことは、個々のターゲットを視準するだけで計測対象物の三次元形状が得られることを意味しているオフセット計測では、個々のターゲットを少なくとも3回測距、測角する必要があるため、計測時間は増加するものの、計測に必要な測点が少なくすむこと、複数方向からの計測においては座標の繋ぎ点の盛り代えが不要になること、また測点の計測結果がリアルタイムに得られるなど三次元形状計測を実施するあたって大幅な効率化が図れる。

### 5.5 計測システムのコンパクト化

最近のパーソナルコンピュータの性能の著しい向上によって、画像処理装置で行っている処理をパーソナルコンピュータによって置き換えることが可能となった。ビデオキャプチャカード(PCMCIA)経由で画像データを取り込み、制御用パーソナルコンピュータで画像処理を行うことで、光波計測機とノート型パーソナルコンピュータだけで自動計測システムを構成でき、本システムをさらにコンパクト化できる。

## 6. 結論

- 1) 本方法によれば、円図形が描かれたマーク平面の画像データを用いて楕円形状を同定することにより、楕円の中心座標、長軸、短軸、長軸角度などを高精度で得ることができる。
- 2) 1)の結果とCCD付きレーザートランシットシステムを組み合わせた三次元座標位置計測システムを構成し、30mまでの距離で12回の巡回自動計測を行い、三次元座標成分 $x$ ,  $y$ ,  $z$ とも標準偏差1mm未満の計測ができた。
- 3) 種々の工夫を加えて、現状では、人工の照明および逆光でない場合の屋外ではターゲットマーク領域を抽出し、楕円をほぼ認識できるようになっている。また、本システムをさらにコンパクト化することによって、測量、土木建築分野、大型構造物の形状、位置座標測定システム等に広く適用できるものと考えられる。

### 参考文献

- 1) 有田秀利 ほか:計測自動制御学会論文集, 34(6), 470(1998)
- 2) 日本特許出願公告 平08-136218 1996-5-31
- 3) 日本特許出願公告 平08-254409 1996-10-1
- 4) 日本特許出願公告 平10-221074 1998-8-21