

U.D.C 681.782.2

三次元形状計測技術の開発（その2） －試作した装置とソフトウェアによる動作検証－

遠藤 健* 井上 大輔* 小池 武史**

要 約： 本研究は、施工時に日々刻々と変わる構造物などの施工成果品の三次元形状データを日常的に取得して、品質管理や施工管理の省力化などへの利用を可能とする目的で、比較的簡単に三次元形状データを取得する手段の開発と、その利用による施工および施工管理への応用を可能とするソフトウェアの開発を目指すものである。

今回は、計測のための装置とソフトウェアを試作した。計測装置は座標変換に必要な初期ヨー角の取得を実現する機構を備える。また計測ソフトウェアは各種センサごとに個別のプラグイン形式のドライバを持ち、それぞれが出力するデータを時刻同期により関連付け、座標変換する機能を持つ。試作した装置により模擬トンネルで動作検証を行った。その結果、トータルステーションのデータ取得時間の遅れが出来形表示に異常をもたらすことが判明した。取得時間を補正した結果、出来形の異常が解消した。

キーワード： 三次元形状, CAD, 設計情報, レーザレンジファインダ, 座標変換

- 目 次：**
- | | |
|--------------|--------------|
| 1. はじめに | 5. 時間遅れの同定実験 |
| 2. 三次元形状計測装置 | 6. まとめ |
| 3. 出来形の算出法 | 7. おわりに |
| 4. システムの動作実験 | |

1. はじめに

本研究は三次元設計情報を施工の現場で活用する¹⁾ ための一つの手法として、構造物の現況出来形を三次元の位置情報として取得し、予め用意した三次元設計情報と比較することで、施工管理に必要な情報を即時に生成するシステムの開発に関する研究である。第一報²⁾ では、適用が望まれる建設構造物と計測手法のコンセプト、および要素技術に関する調査とこれらを組合せたシステム構想の概要について報告した。

本報では、計測用の試作機の詳細について述べるとともに、設計情報との比較に関する手法と、試作機で取得したデータと設計情報を比較する動作試験の結果について報告する。

2. 三次元形状計測装置

写真1は、今回試作した台車型の三次元形状計測装置の外観である。操舵式の運搬台車上に電源装置、情報処理・表示のためのPCのほか、計測のための各種計測器が配置されている。

図1に機器の構成を示す。台車上には姿勢を計測する光ファイバジャイロ（JAE JCS7402, 以下ジャイロ）・出来形形状を計測するレーザレンジファインダ（SICK LMS-151, 以下2Dスキャナ）が配置されている。位置計測器として外部に設置したトータルステーション（TOPCON GPT-9005A, 以下TS）で台車上の基準ターゲットプリズム（以下台車位置基準点）を計測する。2Dスキャナを設置した計測部は、ピッチ方向、ロール方向およびヨー方向に回転が可能で、台車の基準姿勢に対してほぼ任意の姿勢に2Dスキャナの姿勢を固定することができる。

3. 出来形の算出法

図2はある平面内において指定角度A、B間をスキャンし対象までの距離Rと角度θを出力する2Dスキャナのイメージで



写真1 三次元形状計測装置

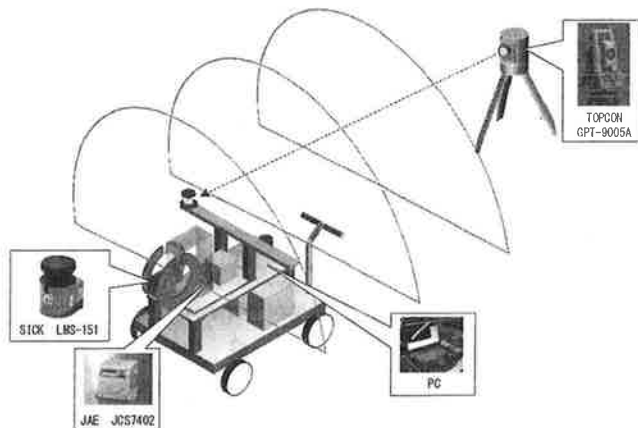


図1 三次元形状計測装置の機器構成

*メカトログループ **総務・企画グループ

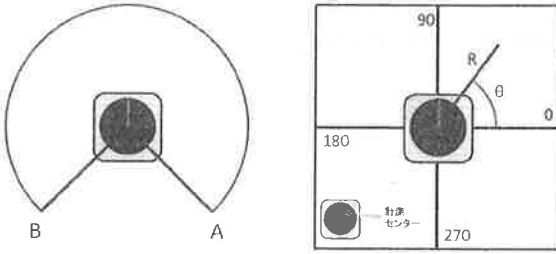


図2 指定角度A-B間で距離Rと角度θを出力する2Dスキャナのイメージ

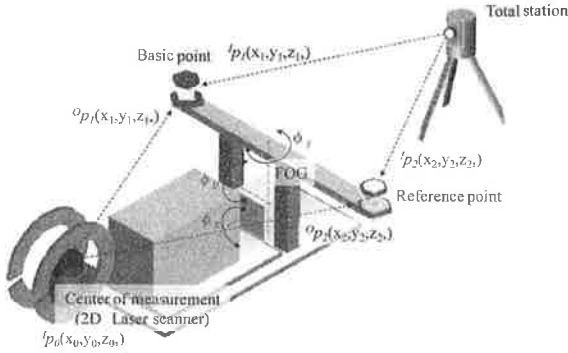


図3 台車位置基準点、計測中心、ジャイロ(FOG)およびTSの位置関係

ある。2DスキャナがCCW方向にスキャンすると仮定した場合、構造物の出来形であるスキャンデータの三次元座標は、

$${}^s v = (R \sin \theta, R \cos \theta, 0) \quad (1)$$

となる。この時2Dスキャナの台車に対する取付け角をロール ϕ'_r 、ピッチ ϕ'_p 、ヨー ϕ'_y とし、台車座標系からセンサ座標系への座標変換行列を

$${}^o A_s = R^{kz} R^{kp} R^{ky} \quad (2)$$

とすると、台車座標系上でのスキャンデータの三次元座標は、

$${}^o v = {}^o A_s {}^s v \quad (3)$$

となる。ただし $R^{kz} R^{kp} R^{ky}$ はそれぞれ台車座標系のz, x, y軸周りの回転行列である。

図3は台車位置基準点と2Dスキャナの計測中心、およびTSとの位置・姿勢関係を示したものである。 ${}^o P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 ${}^o P_2(x_2, y_2, z_2)$ は2Dスキャナの計測中心から台車位置基準点、および一時的に利用する基準点(以下参照点)の位置ベクトルを台車座標系で記述したもの、 ${}^i P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 ${}^i P_2(x_2, y_2, z_2)$ はTSにより計測する台車位置基準点、および参照点を構造物座標系の位置ベクトルで記述したものである。

TSから見たスキャンデータの位置を ${}^i v$ 、計測中心の位置を ${}^i P_0(x_0, y_0, z_0)$ 、台車位置基準点を ${}^i P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、台車のロール角、ピッチ角、ヨー角をそれぞれ ϕ'_r 、 ϕ'_p 、 ϕ'_y とすると、構造物座標系から台車座標系までの座標変換行列は

$${}^i A_o = R^{kz} R^{kp} R^{ky} \quad (4)$$

となり、 ${}^i v$ は、

$${}^i v = {}^i A_o {}^o v + {}^i P_0 \quad (5)$$

となる。ただし $R^{kz} R^{kp} R^{ky}$ はそれぞれ構造物座標系のz, x, y軸周りの回転行列である。(5)式に(3)式を代入すると、

$${}^i v = {}^i A_o {}^o A_s {}^s v + {}^i P_0 \quad (6)$$

となり、スキャンデータの位置を構造物座標系で記述することができる。

なお、計測中心位置は以下のように求まる。

$${}^i P_0 = {}^i P_1 - {}^i A_o {}^o P_1 \quad (7)$$

(7)式において ${}^i P_1$ はTSの実測で求められる。また ${}^o P_1$ は既知であり、 ${}^i A_o$ はジャイロが計測したロール角、ピッチ角、ヨー角から求められる。このため台車の移動中においても計測中心位置が把握でき、スキャンデータを構造物座標に変換できる。ただしヨー角はジャイロの初期値(0°)からの変位のみが出力されるため、台車の初期姿勢における初期ヨー角を別途求め加算する必要がある。

初期ヨー角は以下のように求める。まず ${}^i P_1$ 、 ${}^i P_2$ に対して(7)式と同様の関係式を立てる。

$${}^i P_1 = {}^i A_o {}^o P_1 + {}^i P_0 \quad (8)$$

$${}^i P_2 = {}^i A_o {}^o P_2 + {}^i P_0 \quad (9)$$

(8)式と(9)式の差を求めると ${}^i P_0$ が消去でき、

$$({}^i P_1 - {}^i P_2) = {}^i A_o ({}^o P_1 - {}^o P_2) \quad (10)$$

となる。位置ベクトルの差分を

$${}^i \Delta P = {}^i P_1 - {}^i P_2 = ({}^i \Delta x, {}^i \Delta y, {}^i \Delta z)^T \quad (11)$$

$${}^o \Delta P = {}^o P_1 - {}^o P_2 = ({}^o \Delta x, {}^o \Delta y, {}^o \Delta z)^T \quad (12)$$

という記号に置き換えると、

$${}^i \Delta P = {}^i A_o {}^o \Delta P \quad (13)$$

ここで、ロール角、ピッチ角はジャイロで計測され既知であることから、右辺未知数であるヨー角の回転行列以外をまとめて、

$$\begin{pmatrix} {}^o \Delta x' \\ {}^o \Delta y' \\ {}^o \Delta z' \end{pmatrix} = R^{kz} R^{kp} R^{ky} {}^o \Delta P$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \phi_p & \sin \phi_p \sin \phi_r & \cos \phi_p \sin \phi_r \\ 0 & \cos \phi_p & -\sin \phi_p \\ -\sin \phi_p & \sin \phi_p \cos \phi_r & \cos \phi_p \cos \phi_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^o \Delta x \\ {}^o \Delta y \\ {}^o \Delta z \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \phi_p {}^o \Delta x + \sin \phi_p \sin \phi_r {}^o \Delta y + \cos \phi_p \sin \phi_r {}^o \Delta z \\ \cos \phi_p {}^o \Delta y - \sin \phi_p {}^o \Delta z \\ -\sin \phi_p {}^o \Delta x + \sin \phi_p \cos \phi_r {}^o \Delta y + \cos \phi_p \cos \phi_r {}^o \Delta z \end{pmatrix} \quad (14)$$

と定義すると、(13)式は

$$\begin{pmatrix} {}^i \Delta x \\ {}^i \Delta y \\ {}^i \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_y & -\sin \phi_y & 0 \\ \sin \phi_y & \cos \phi_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^o \Delta x' \\ {}^o \Delta y' \\ {}^o \Delta z' \end{pmatrix} \quad (15)$$

これを ϕ_y について解くため、 $\Delta x \div \Delta y$ を計算すると ${}^i \Delta x (\sin \phi_y {}^o \Delta x' + \cos \phi_y {}^o \Delta y') = {}^i \Delta y (\cos \phi_y {}^o \Delta x' - \sin \phi_y {}^o \Delta y')$

$$\sin \phi_y {}^i \Delta x {}^o \Delta x' + \sin \phi_y {}^i \Delta y {}^o \Delta y' = \cos \phi_y {}^i \Delta y {}^o \Delta x' - \cos \phi_y {}^i \Delta x {}^o \Delta y' \quad (17)$$

$\sin \theta / \cos \theta = \tan \theta$ より、初期ヨー角は

$$\phi_y = \tan^{-1} \left(\frac{{}^i \Delta y {}^o \Delta x' - {}^i \Delta x {}^o \Delta y'}{{}^i \Delta x {}^o \Delta x' + {}^i \Delta y {}^o \Delta y'} \right) \quad (18)$$

と求まる。

4. システムの動作実験

4.1 計測用ソフトウェア

図4は計測用ソフトウェアの概念図である。位置・姿勢・形状の各計測器のドライバソフトを専用のプラグイン形式で内包し、センサの変更にも柔軟に対応できる。同期処理は、TSのデータ入力時刻を基準に最近傍のジャイロデータと2Dスキャナデータを関連付け、座標変換の元データとしてカップリングする方法を取った。

4.2 動作実験の結果と考察

図5は、開発した三次元形状計測装置による計測動作実験の実施状況である。実験に用いた模擬トンネルの仕様は、トンネル全長 80m, 勾配 0.3%, 内空断面積 77.6m² 直線であり、線形は直線の単純構造である。

図6は台車を蛇行させて計測したトンネル内空の出来形形状である。当初スキャンデータは位置および姿勢情報の逐次同期

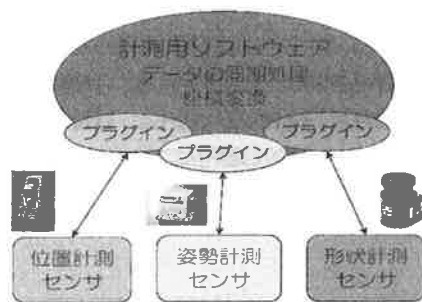


図4 計測用プログラムの概念図

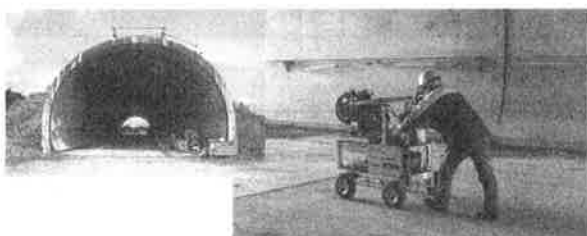


図5 模擬トンネルとシステム動作試験状況

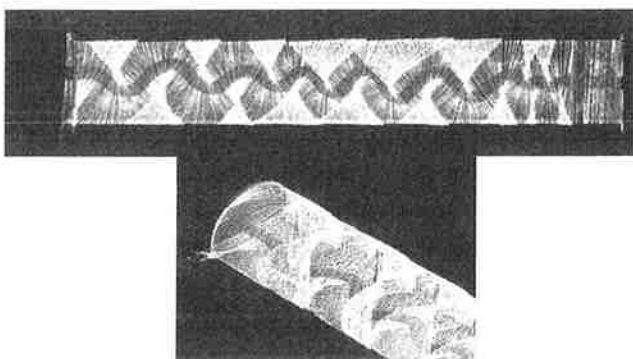


図6 蛇行計測による計測出来形
(上: 平面図, 下: 鳥瞰図)

処理による座標変換によって構造物の現況に忠実に整然と表示されることを想定した。結果はいびつな形状で明らかな出来形表示の不良であり、要因として同期処理の不良またはセンサデータの不良が推測された。文献3)等を参考に調査した結果、TS本体が位置データを取得した時刻と、そのデータがPCに取得された時刻との間に時間差が生じており、その結果、同期処理で関連付ける値が異なっていたことが判明した。

図7は各センサの時刻同期処理、およびその補正に関する概念図である。横軸は時間、各軸の目盛はそれぞれのセンサのデータ取得間隔とする。TSで計測された位置データ a をPCが取得した時刻を T_1 とし、現状の同期処理が関連付けるジャイロおよび2Dスキャナのデータがそれぞれ b および c であるとする。ここでTS本体では Δt 前の時刻 T_0 に位置データ a を計測していたとすると、本来 a と関連付けるべき他のセンサデータはそれぞれ b' および c' であることを示している。以下に Δt を求める実験を行った。

5. 時間遅れの同定実験

図8は、GPT-9005A の Δt を求めるために行った計測時間遅れの検証の様子である。レール上を等速直線運動するターゲットの位置をエンコーダで計測し、PCに記録できる装置を用意する。一方、運動するターゲット位置をTSで追尾し、TSの無線出力を同じPCで記録する。

図9は両者のデータを同一位置での時刻の差に着目するためにプロットしたものである。時間遅れが無ければ両者のグラフは一致するはずであるが、図に示されるようにTSの位置データはエンコーダの位置データに対し、約 600msec 遅れていることが分かる。GPT-9005A の Δt を 600msec とし図6の表示に用

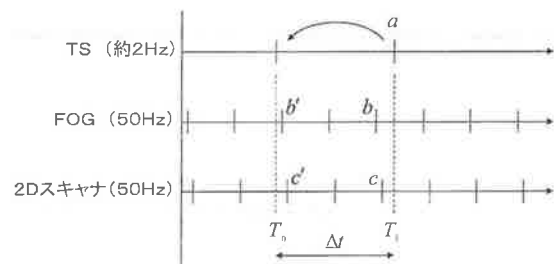


図7 時刻同期と修正の概念図

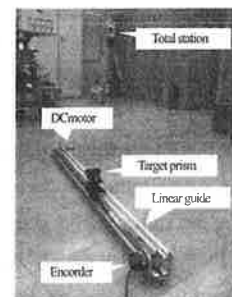


図8 TS時刻遅れ計測実験状況

いた形状データを補正表示したものが図 10 である。結果を観察すると、本来関連付けすべきデータ同士を用いたことで出来形表示の異常が解消されていることが確認できた。

6. まとめ

TSで位置を、ジャイロで姿勢を、2Dスキャナで出来形形状をそれぞれ計測し、時刻同期処理によって三次元形状を計測する三次元形状計測装置と計測ソフトウェアを試作した。

試作した装置による各センサ情報を連携した動作試験を実施

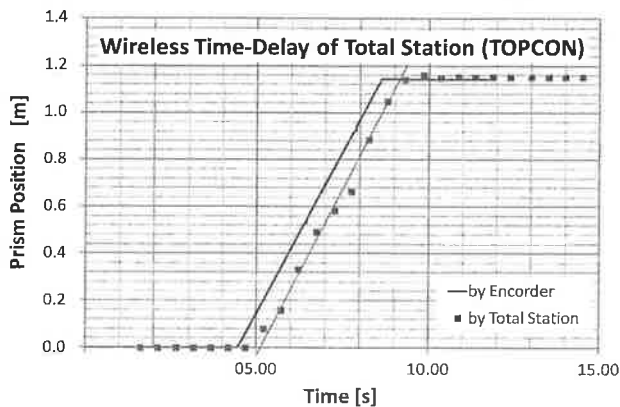


図9 GPT-9005Aの計測時刻遅れ

謝辞

本研究は九州大学大学院システム情報科学研究院との共同研究である。また本研究の一部は国土交通省 H21 年度建設技術研究開発助成制度より補助金の交付を受けて行われたものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 森下博之：情報化施工推進戦略について，建設の施工企画，pp.10-14，No.705，2008年11月
- 2) 遠藤健・小池武史・池田直広：三次元形状計測装置の開発（その1），東急建設技術研究所報，No.34，pp.33-36，2009年3月
- 3) 坪内孝司：車輪型移動ロボット制御とサンプリング時間，日本ロボット学会誌，vol.27，No.4，pp.388-391，2009年5月

DEVELOPMENT OF THE MEASUREMENT EQUIPMENT No.2 AN EXPERIMENT WITH A DEVICE PRODUCED EXPERIMENTALLY

K.Endo,D.Inoue and T.Koike

This study aims at the development of the software that acquired three-dimensional shape data of the execution result product such as the structures which changed at the time of execution every moment every day routinely, and it was developed for the purpose of enabling the use to the labor saving of quality control and the execution management. The measurement device which we produced experimentally possesses mechanism to realize the acquisition of the initial yaw angle that is necessary for coordinate transformation. In addition, the measurement software has the driver of the individual plug in form every various sensors and connects the data which each outputs by the same period at the time and has a function to do coordinate transformation. Movement inspection was performed in a sham tunnel by the device which we produced experimentally. As a result, it was recognized that a delay of data acquisition time of TS brought abnormality in shape. As a result of having revised the time for acquisition data of TS, it was confirmed that shape was revised normally.

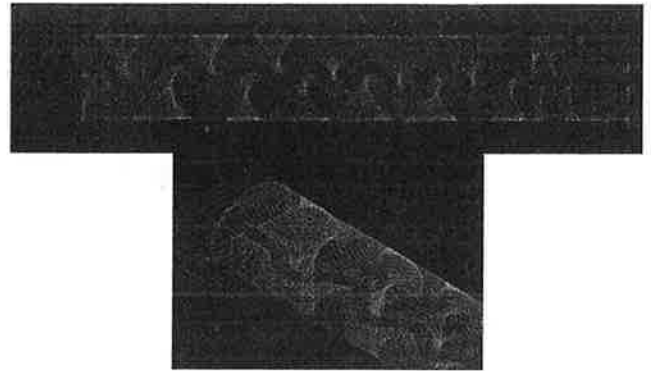


図10 TSのデータを600msec戻し補正した出来形
(上：平面図，下：鳥瞰図)

した結果，出来形表示に異常が観察されたが，TSの計測データの取得時間の遅延を求め出来形データの異常を補正した。

7. おわりに

今回，試作したシステムによる動作試験の結果，TSの時刻同期処理に対策が必要なことが判明した。今後はTSの選定を含めて同期処理対策を検討するとともに，計測精度の検証を行い，実現場における具体的な適用法について検討を進めたい。