

三次元形状計測技術の開発（その1）

— 二次元レーザスキャナによる三次元形状の計測 —

遠藤 健* 小池 武史** 池田 直広***

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・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。三次元形状データの活用に関する調査を元に、ニーズの多い施工管理工種を明確にし、計測手段に求められる要求仕様を整理した。要求仕様に基づいた機能イメージを作成し、要素機器の選定と、機能イメージを実現するために必要な計測データの座標変換の計算ステップを明らかにした。PCを用いた汎用的な座標変換システムの構築を目指し、Microsoft DirectXを利用したプログラムを構築した。

キーワード： 三次元形状, CAD, 設計情報, レーザスキャナ, 座標変換

目次：	1. はじめに	4. 座標変換
	2. 要求仕様	5. まとめ
	3. 三次元計測用実験機の構想	6. 終わりに

1. はじめに

一般に多くの建設工事の施工・施工管理の現場では、出来形などの品質管理には平面図・縦断面といった二次元データを用いることが多い。しかし施工による成果物が三次元的な建造物である以上、三次元情報による設計と、その設計データを基にした施工や品質管理がなされるのが理想的である。近年、国策による情報化施工技術の推進や、品確法の策定⁽¹⁾などにより、公共工事における三次元形状データの施工や施工管理への利用事例が増してきている⁽²⁾。また一方では、CADソフトなどにおいても比較的安価ながら三次元設計機能を標準装備するものが市場に出てきており、三次元形状データを活用するための施工環境が徐々に整い始めている。

本研究は、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、取得データの施工・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。施工時に日々刻々と変わる施工成果物の三次元形状データを、日常的に取得・管理して、品質管理や施工管理の省力化と精度向上に寄与することを目的としている。今回は、データ取得装置に関する調査研究結果を報告する。

2. 要求仕様

三次元形状データを利用した施工・施工管理を実現するために、どのような工種に適用するのが効果的かを調べるためヒアリングを中心とした調査を実施した。その結果、トンネルやシールド、あるいは鉄道関連といった延長方向に距離を持つ構造物の断面形状と設計値とを

表1 三次元形状取得ニーズ調査における
主な工種一覧

工種	用途	計測部位
トンネル工事	覆工巻厚管理	一次覆工内空面
	掘削数量管理	切羽
		インバート
	出来形管理	内空断面
	現況測量	坑口付近
シールド工事	出来形管理	内空断面
鉄道工事	建築限界確認	内空断面
	残置物	内空断面
道路工事	出来形管理	舗装表面

比較することによる施工管理工種にニーズが潜在していることが分かった(表1)。これらは一部現行でも行われている施工管理工種である。現状断面形状で比較しているものを、三次元データで立体的に比較することにより、任意断面における管理や、連続的な数量管理に応用することを期待している。

例えばトンネル工事では、掘削終了時と一次覆工終了時の仕上がり形状をそれぞれ三次元的にデータ化する。ここで設計値(設計形状)、掘削形状、一次覆工形状それぞれを三次元的に比較することによって、吹付けコンクリート消費量、掘削余掘り量、覆工出来形を知ることが可能となる。同様に他の工種においても、現況の構造物形状を三次元的に取得し、設計値や一工程前の現況形

*メカトログループ *総務・企画グループ ***土木総本部 機械技術部

表2 主な三次元計測器の比較（一般的な性能等）

	光波距離計	2Dレーザスキャナ	3Dレーザスキャナ	ステレオビジョン	トータルステーション
実用計測距離	数十cm～数十m	数m～十数m	数m～数十m	数m～十数m	数m～数百m
上記における精度	±1.5～3mm	±10～50mm	±10mm～30mm	±数mm～50mm	±3～5mm
計測時間	1点/秒	数百点/秒	数百～数千点/秒	数万点/秒	数点/秒
価格	数万円	数十万円	数十万円	数十万円	3～4百万円

状と比較することによって、出来形、出来高などの施工情報を把握でき、施工管理に生かすことが可能となる。

この調査結果を踏まえ、用途に合致するような計測機構を備えた計測装置のイメージを検討するにあたり、装置に求められる要求仕様を整理した。

2.1 三次元形状計測器の特長

三次元形状を取得する計測機には、レーザスキャナ、ステレオビジョン、トータルステーションがある。主な特長を表2にまとめた。

2.1.1 光波距離計

変調した光波を放射し対象物に当て、対象物からの反射光の位相差を計測して距離に換算する。小型・軽量で安価なうえ精度も良いという特長がある一方、一度に1点しか計れない、距離値のみしか得られないという点が欠点である。

2.1.2 レーザスキャナ

パルス状に放射したレーザ光を回転ミラーにあて、扇状に照射した範囲の対象物の座標を計測するものである。二次元的な線状に計測するタイプ（以下2Dタイプ）と、三次元的な立体的に計測するタイプ（以下3Dタイプ）があり、精度は比較的良く広範囲を計測できる。ただし3Dタイプは大型なうえ、設置手間や、高価格などの問題もあり日常的な施工管理には使いにくい。

2.1.3 ステレオビジョン

撮影した映像から三次元情報を作成する方式である。二台のカメラで同一視野を撮影し、それぞれの画像の同一点同士を対応させると、一意的に対応点の三次元座標情報が求まる。設備が軽微で広範囲の情報を瞬時に取得するのに向いているが、分解能と三次元化処理時間が相反関係にあるなど課題もある。

2.1.4 トータルステーション

レーザ光を用いた測距装置に測角機能を持たせ、計測点の三次元情報を求める計測器である。最も一般的で精度も良好である一方、計測に時間を要する、取り扱いに注意を要する、設置手間などの課題がある。

2.2 構造物の特長

トンネル、鉄道、道路等構造物の三次元形状とは、構造物表面の三次元位置データに他ならない。これらの構造物は、いずれも中心線の距離とこれに直交する断面形状で出来形を管理する点で共通している。これらの三次

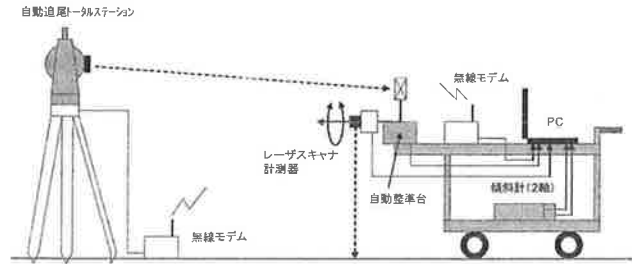


図1 計測装置のイメージ

元形状データの取得を考えると、計測の範囲は断面的な方向には限定的であるが、延長方向にはほぼ無制限という特長が挙げられる。よって延長方向へは計測器の設置場所を逐次変更することで対応せざるを得ないとすれば、断面的な形状を手早く取得することが可能な計測器を選択し、速やかに次回計測の段取りに移行できる工夫をすることが合理的である。

なお計測器に必要な計測範囲は、前述の構造物を対象とした断面的なスケールを網羅できれば良いことになり、5m～15mの計測に適した光波距離計、2Dタイプレーザスキャナなどが有力な候補として挙げられる。

3. 三次元計測用実験機の構想

計測対象とする構造物の特長から、断面的な方向への計測と延長方向への移設を繰り返し、それぞれをごく短時間で実施できるようにすれば、対象物の全体を計測し、かつ日常的な施工管理に用いることは可能であると考えられる。そこで、延長方向への移設手段を有し、断面方向の計測を行う計測装置をイメージした（図1）。

まず、延長方向への移設手段を持つ必要から、台車状のプラットフォーム（以下台車）に設置することとした。また、構造物の座標系における計測器の位置を特定するために、台車は位置の基準点を有し、これを外部の位置計測器（トータルステーション）で計測する構成とした。

主計測器は、断面方向における短時間計測という観点と、表2で整理した概略性能から、2Dタイプのレーザスキャナを選定すべきと考えた。ただし施工管理上、特に精度が求められる場合を想定し、同じ台車上に光波距離計を併設し、切り替えて計測できるような拡張性を持たせることとした。

4. 座標変換

4.1 座標系

写真1は、図1のイメージに基づき座標変換検証用に構築した実験機である。主計測器にはレーザ測域センサ(URG-04LX)、自動整準台(オートステージAS-21)、その他位置計測用に自動追尾型トータルステーション(GTS-823A)を用いている。図3は実験機における主計測器と台車、および外部に置いた位置計測器との座標の関係を図示したもので、三脚の頂部に設置した自動整準台上のメインフレームには、台車原点となる全周プリズム(P_1)、および主計測器であるレーザ測域センサ(K_1)を設置している。外部に設置した自動追尾型トータルステーション(O_1)で全周プリズムを視準する。全周プリズムは台車の基準軸に沿って直線状に水平移動できる仕組みとなっている。

レーザ測域センサは、原則として台車に対して任意の向きに設置されている。回転するレーザは*i-h*平面を走査し、対象物表面の三次元形状を、 $K_1(h_0, i_0, j_0)$ を原点とするセンサ座標系で座標データとして取得する。次に取得したデータを、 P_1 を原点とする台車座標系に変換する。このとき台車座標系における K_1 の併進成分(x_1, y_1, z_1)と姿勢角(θ_2, ϕ_2, ψ_2)が、センサ系-台車系間の座標変換のパラメータ群(以下群1)となる。

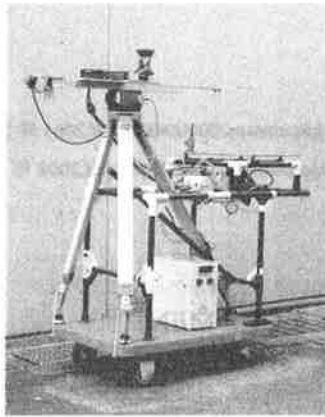


写真1 座標変換検証用実験機

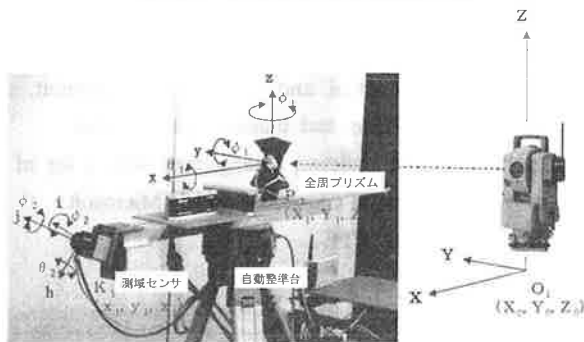


図2 座標系の関連図

さらに台車座標系に変換したデータを、 O_1 を原点とする外部座標系(現場座標系)に変換する。同様に外部座標系における P_1 の併進成分(X_1, Y_1, Z_1)と姿勢角(θ_1, ϕ_1, ψ_1)が、台車系-外座標系間の座標変換のパラメータ群(以下群2)となる。レーザ測域センサで取得したデータは、最終的にトータルステーション O_1 を原点とした外部座標系の値として得ることができる。

4.2 座標変換プログラム

以下の①、②に留意して座標変換プログラムを試作した。なお、プログラム言語はMicrosoft DirectX(Visual Basic)によって記述し、同D3DMATRIXによって定義される回転行列モジュールを用いている。なお、プログラムの情報の流れを概略図示したものを図4および図5に記す。

①センサ取付調整に応じた群1の変更機能

2Dタイプのレーザスキャナはある程度死角を有するのが一般的である。今回の計測対象は、いずれも全ての断面方向(上下左右)が計測対象となる可能性があることから、計測対象が走査範囲内に収まるように計測姿勢を調整する必要がある。計測器の設置向きを任意に調整可能な機構と、それに応じて群1も調整可能であるようなプログラムであることが望ましい。

②計測速度と計測精度

計測速度を重視する場合は、台車を移動しながら計測できるようにすること。また計測精度が求められる場合は台車を停止し、精密計測ができるようにすること。

図3は計測速度を重視した場合の情報の処理ステップを示したもので、スタート後、レーザ測域センサによる形状計測、トータルステーションによる自己位置計測、傾斜計による姿勢角計測を一斉に開始する。PCの時計を計測のトリガに用い、トリガ発生直後の情報を集結して座標変換し、データを取得すると直ちに次のイベント処理に移行しストップの入力まで計測を繰り返すものである。現在はソフト動作の検証段階であるため、姿勢角には1軸の出力を持つ傾斜センサを2台用いてロール角、ピッチ角の想定で2角のみ入力しているが、将来的には高速出力の可能な3軸のジャイロセンサを使用する予定である。

図4は計測精度を重視した場合のもので、スタート後、台車を計測位置に移動して停止し、計測の準備動作である整準動作に移る。整準完了の信号をトリガとして、レーザ測域センサによる形状計測、トータルステーションによる自己位置計測、および方向角計測を実施した後、各情報を集結して座標変換する。

計測時に停止していることが特長で、同じ姿勢のまま何スキャン分ものデータを取得し、平均処理することで品質を向上することが可能である。

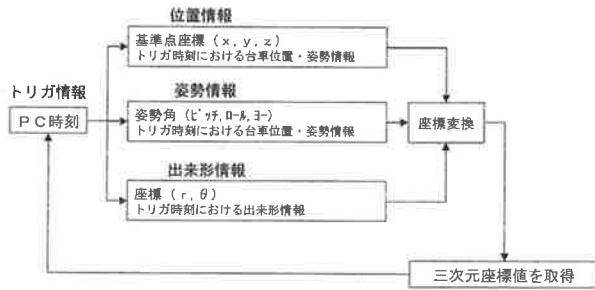


図3 計測速度を重視する場合の処理ステップ

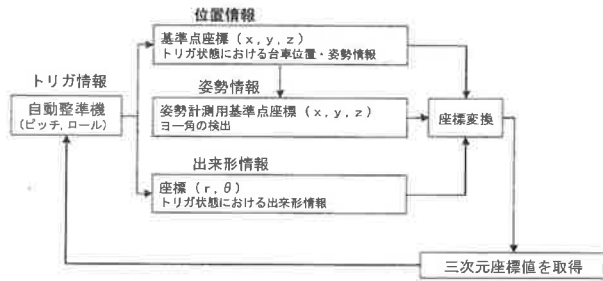


図4 計測精度を重視する場合の処理ステップ

5. まとめ

- 1) 三次元形状情報を利活用可能な施工管理工種，ならびに計測装置に関する調査を行い，三次元形状情報の計測装置に関する要求仕様を整理した。
- 2) 要求仕様を元に三次元形状計測装置の構想をまとめ，概略設計に基づき実験機を試作した。
- 3) 座標変換に関する機能を整理し，実装するプログラムを試作した。

6. おわりに

建設業における施工時の三次元形状データの利活用は，製造業における生産工程のそれと比較すると一般的に遅れているが，設計情報と現況形状の比較という点においては，スケールに飛躍的な違いがあるものの，品質管理の考え方は同様である。ゆえに製造業で普及したように建設業でも徐々に浸透していくものと考えられる。

今回は三次元形状の計測装置に関しての概略設計の部分について述べた。今後は座標変換プログラムと計測器を実装した計測装置の試作機による実証実験を進める予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり，社）日本建設協会施工技術総合研究所の関係者の方々に大変お世話になりました。ここに謝意を表し御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP,公共工事における品質確保の促進に関する法律,<http://www.mlit.go.jp/common/000004840.pdf>,2005年3月
- 2) 国土交通省 HP,報道発表資料:「情報化施工推進戦略」について,<http://www.mlit.go.jp/common/000020669.pdf>,2008年7月

DEVELOPMENT OF THE MEASUREMENT EQUIPMENT TO MEASURE THE 3-DEMENSIONAL SHAPE

K.Endo, T.Koike, and N.Ikeda

This research is concerned with development of the means to acquire three-dimensional shape data of the structure which changes every moment during building, for labor-saving of quality control and building management, and development of the software which applies three-dimensional shape data to building and building management.

We investigated about utilization of three-dimensional shape data, made some building management with a lot of needs clear and put the necessary specification in order. Moreover, programs to change coordinate which Microsoft DirectX was used were built aiming at a general-purpose system configuration using a PC.