

可視光通信 3次元位置計測システムを 現場に適用し実用化

三 上 博

建設工事の施工管理において必要とされる構造物等の変位計測を、目で見える「可視光」をデータ通信手段として利用することにより、市販のデジタルカメラを用いて、自動的かつ経済的に行う新たな技術を開発した。本システムは、点滅する LED 光源を測定対象物に多点配置し、2ヶ所からデジタルカメラで撮影することによって、3次元位置を自動的に計測できるものである。工事の施工管理で必要な測量や、近接構造物の変位計測などへの適用性が高く、今後の用途拡大が期待される。本報では、このシステムの概要および、建設工事の施工管理における二つの実施例について紹介する。

キーワード：可視光通信, 写真測量, LED, デジタルカメラ, 橋梁, アルミドーム屋根

1. はじめに

橋梁、トンネルなどの建設工事では、施工中の構築物の測量を精度良く、かつ短時間で行うことが必要不可欠である。また建設工事に伴う、周辺近接構造物への影響や、造成に伴う切土斜面の安定などの把握のため、即時的かつ継続的な変位計測が求められる機会も多い。しかしながら、既存の測量技術は、測定員による人力作業を伴う場合が多く、また一方で自動計測化を実施するためには、計測機器類やそれらの設置に多額の費用を要する場合が多い。可視光通信を用いた3次元位置計測システムは、デジタル写真測量技術と最新の通信技術である可視光通信を融合することにより、自動化に優れる3次元測量システムを、経済的に実現するものである。以下に、技術概要と、工事への適用事例を紹介する。

2. 技術の概要

(1) 可視光通信とは

可視光通信は、人間の目に見える光—「可視光」を使って通信を行う最新の通信技術である。LEDなどの照明機器を人間の目には感じられないほどの高速で点滅させることによって、大容量のデータ通信が可能で、以下のような特徴を有している。

- ①通常の照明機器に通信機能を付加するだけで通信環境が整備できる。
- ②通信範囲が目で確認できる。

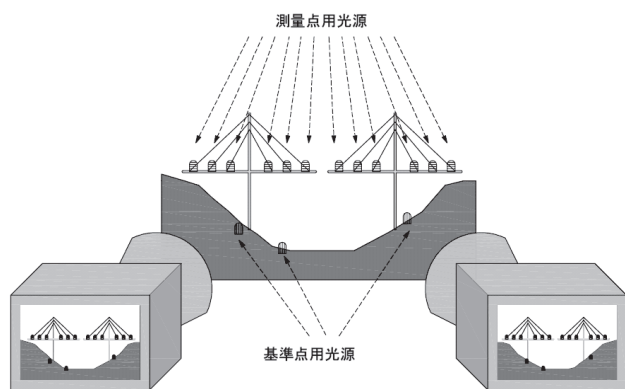
- ③電磁波などのように人体や精密機械に影響を与える心配がなく、病院などでも使用できる。

現在は、LEDなどの可視光素子を照明や信号機、電光掲示などに利用しつつ、データ発信も同時に行う高速、安全でユビキタスな可視光通信システムについて、可視光通信コンソーシアム (<http://www.vlcc.net/>) を中心に研究、開発、標準化、普及などの取り組みがなされている。

(2) 可視光通信 3次元位置計測システム概要

本計測システムの測位の基本原理は、従来から行われているステレオ写真測量と同一である。計測対象物に標点を設置して、これを2ヶ所から同時に写真撮影することによって、その座標を算出する技術である。本システムは、測量標点に点滅する LED 光源を用いることを特徴としている。LED 光源は、固有の ID 番号などを表すデータパターンに従って点滅を繰り返すことによって、光で情報を発信する (図-1)。一般的な可視光通信によるデータ通信では、人間の目には感じられないほどのスピードで高速に LED の点滅を行うが、本システムでは、受信装置としてデジタルカメラの連続撮影機能を用いるため、約 0.6 秒間隔程度のゆっくりとした点滅パターンを用いている。

システムのハードウェア基本構成は、市販の高解像度デジタル一眼レフカメラと画像解析用のパソコンおよび標点となる LED 光源からなる。適用方法は、まず、座標が既知の基準点と、測量しようとする標点の両者に LED 光源を設置し、それら全体をデジタルカメラ



図一1 可視光通信 3次元位置計測システム概念

によって2カ所より一定の時間連写撮影する。その撮影データを連結しているパソコンに取り込み、画像解析を行うことによって各光源の位置の算出およびID番号を受信する。そして、2カ所で撮影したデータを用いて、各測量点の3次元座標を算出する。

(3) 可視光通信による ID 送信方法

本システムでは、可視光で送られる ID 情報の受信機として、市販のデジタルカメラを使用している。現在システムで用いている機種では、約 16 秒間で連続 100 枚の撮影が可能である。ID の通信は、送信側と受信側を非同期で行うため、1 パケットの通信で使用する撮影枚数は 50 枚以内とする必要がある。本システムでは、連続した約 0.16 秒間隔の 4 枚の撮影（4 回のサンプリング）で 1 ビットのデータを受け取る方式を採用している。LED 光源が光っている場合を「1」、光っていない場合を「0」として、下記のような組み合わせでビットを表現している。

4sample → 1bit
 0011 → 0
 1100 → 1

例えば、ある標点の変化を写真撮影で調べた場合、「光っている (1), 光っている (1), 光っていない (0), 光っていない (0)」という順番で 4 枚の画像が得られた場合、2 進数の「1」が送られて来たかと判定する。ID 番号は 6 bit のデータとして送信するものとしており、さらにデータの始まりを示す 3 bit のヘッダー、データの最後尾に受信データの誤りの有無を判定するための、多項式による巡回冗長検査 (CRC) 3 bit を付加して都合 12 bit のデータとしている。

(4) 写真測量の手順

撮影された光源から、3次元座標 (x, y, z) を求める手順に関しては、一般的なステレオ写真測量と同

一の手順による。まず、基準点 (座標既知点) に対する後方交会によってカメラの位置姿勢を求める。本システムでは、撮影計測対象範囲の中に、少なくとも 4 点以上の基準点を設け、測定対象未知点と同じように LED 光源として、写真撮影で同時に撮り込む。これらの基準点は、測定対象系とは異なる不動点に設け、あらかじめトータルステーションを用いた測量により座標値を求めておく。

次に、2カ所のカメラ位置から撮影された画像から、三角測量の原理により、各光源の 3次元座標 (x, y, z) を求める。ここで、2カ所で撮影された光源のマッチングは、受信された ID 番号から自動的に行うことができる。

(5) 使用機材

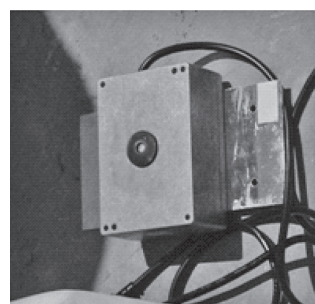
本システムでは、表一に示す仕様の機材を用い、建設現場での適用を行っている。写真一に使用するデジタルカメラを、写真二に LED 光源を示す。また計測データを直ちに解析処理して、結果を即時に表示する自動計測システムとして、図二に示す構

表一 使用機材仕様

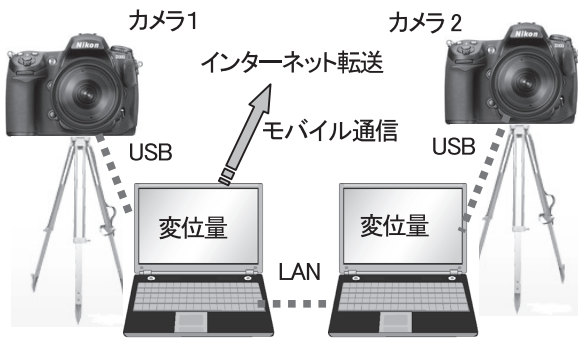
LED 光源 (送信機)	データレート	1.61bps
	変調方式	2PPM
	平均送信電力	5 W
カメラ (受信機)	本体	Nikon 製 D300
	焦点距離	28.659 mm
	解像度	4,288 × 2,846 画素
	イメージセンサー	23.6 mm × 15.9 mm



写真一1 一眼レフデジタルカメラ



写真一2 LED 光源 (測量標点)



図一 自動計測システムの構成

成を用いている。カメラで撮影した画像をネットワークで接続された2台のパソコンに自動的に取り込み、直ちに計測された変位量を表示するものである。

(6) システムの特徴と利点

本システムは、従来の写真測量技術や変位自動計測システム等と比較して、多くの利点を有していると考えられる。以下に、システムの特徴と利点を列挙する。

- ① 標点の座標とそのID情報を同時に取得するため、多点の3次元座標算出の完全自動化が可能となり、測量作業の大幅な省力化が達成できる。
- ② 市販のデジタルカメラやパソコンで構成されるシステムによって、GPS測量に匹敵する精度の測量が経済的に行える。
- ③ 夜間の無人自動測量が可能である。測量のたびに技術者が測点に行く必要がなく、安全性の向上と省力化が可能となる。
- ④ このシステムの測量精度は、使用するデジタルカメラの画素数および測定距離に依存する。一例として市販の1,200万画素のデジタル一眼レフカメラを使用した場合、計測対象が40m×40m程度の範囲であれば1mmの精度(分解能)で計測が可能である。

3. 建設工事での適用事例

(1) 配水池アルミドーム屋根計測への適用

アルミニウム合金製ドーム屋根の日照などによる温度変化によって生じる変位量の確認のため、本計測システムを適用した。工事概要を以下に示す。

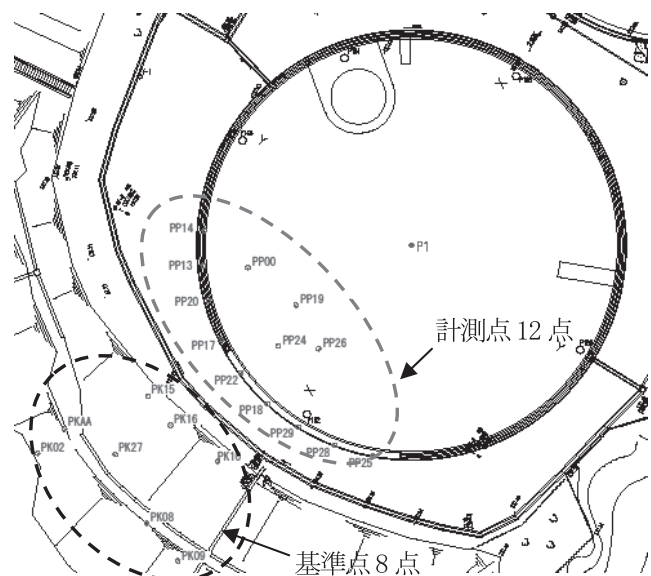
- ・発注者：JFEエンジニアリング株
(元発注：神戸市)
- ・工事名：狩場台特1高区配水池増設本体工事の内アルミドーム屋根工事
- ・施工場所：神戸市西区狩場台1丁目
(神戸市水道局狩場台配水場内)



写真一 3 アルミドーム屋根外観

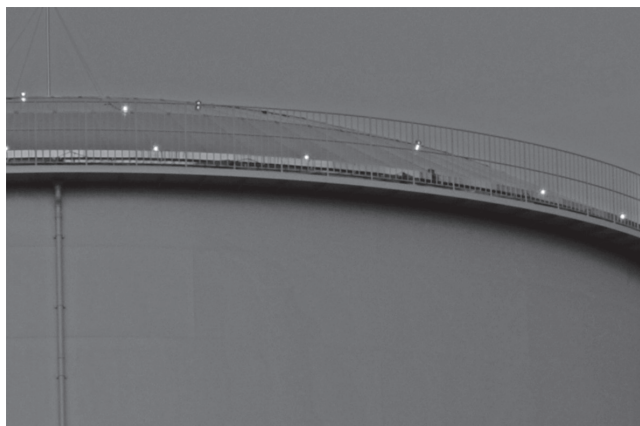
本工事は、鋼製配水池(直径43.5m)の上部にアルミニウム合金製ドーム屋根(以下、アルミドーム)を建設するものである。アルミドームは、自重、上載荷重、積雪荷重、温度荷重などによる鉛直力は下部の躯体(鋼製側壁)に伝達するが、水平力はスライド支承を介し、躯体に伝達しない構造となっている。アルミニウム合金は線膨張係数が大きいため、特に日照などによる部材の温度変化に伴う変位量が多い。従ってスライド支承が正常に機能することが構造上重要な確認点となっている。

本事例では、実際に架設されたアルミドームが日照などによる温度変化によって、膨張・収縮する際の変位量やスライド支承の動きを確認するために、昼夜連続の変位計測を実施した。屋根の計測点12点および地盤面上の基準点8点にLED光源を設けた(図一3)。これらの標点に対して、配水池から約40mの距離に



図一 3 計測点および基準点設置位置

設置した2台のカメラを用いて20分間隔、24時間連続の自動撮影を行った。撮影した画像は直ちに各カメラに接続されたパソコンに取り込まれ、変位量が算出された。夜間配水池の上部に測量員が上る必要もなく、安全かつ効率的に測量が実施できた（写真—4）。



写真—4 LED光源点滅状況（夜間）

計測結果の一例として、12点の計測点のなかから、代表する5点を選んで、変位の経時変化図を作成した（図—4）。また、図中には、アルミドームの5ヵ所で計測した部材の温度（5点平均値）を同時に示している。

各点の変位は、アルミドームの中心（頂点）を原点として、放射方向への水平変位成分を示したものである。伸長側を正とし、圧縮側を負として表示している。測定日の部材の最大温度変化23℃に対して、屋根の水平変位は屋根端部の計測点（PP13, 22, 28）で約4mm、屋根中間部の計測点（PP19, 26）で約2.5mmであったことが分かる。また温度上昇に伴って屋根は伸長し、温度減少時には圧縮するが、温度変化に対して数時間の遅れを伴って屋根変位が追従していることが分かった。20分毎の各計測点の値を見ると、0.5mm

程度のゆらぎを伴ったものであるが、今回の計測条件（撮影距離約40m、撮影範囲約40m、カメラ1,200万画素）では、おおむね1mm程度の分解能で変位を測定することが可能であった。

計測結果を別途実施したFEM解析結果等と比較した結果、アルミドームのスライド支承機構が適正に機能していることが確認できた。

(2) 橋脚基礎工事に近接した既存構造物動態観測への適用

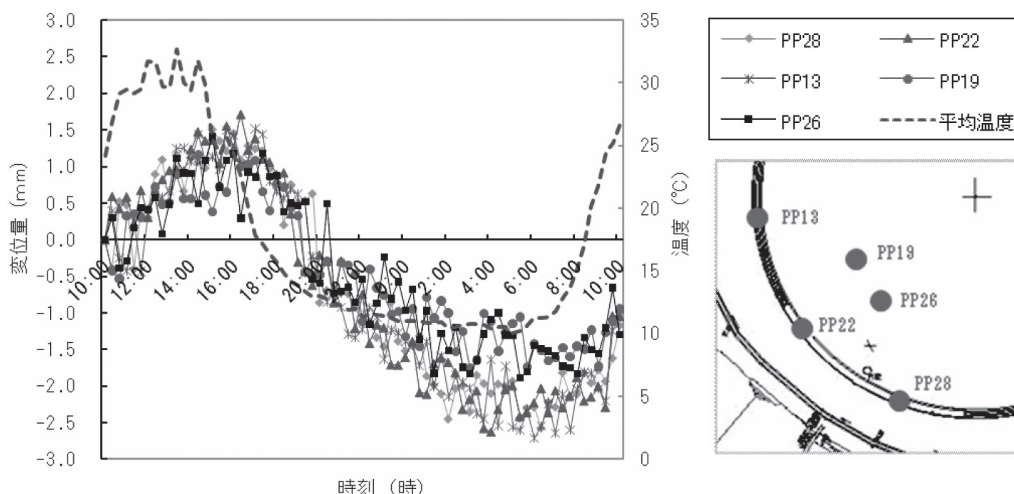
橋脚工事に近接した既設構造物に対する変位計測事例について紹介する。以下に、当該工事の概要を示す。

工 事 名：平成21年度緊急地方道路（街路）整備工事（県単）（その2）

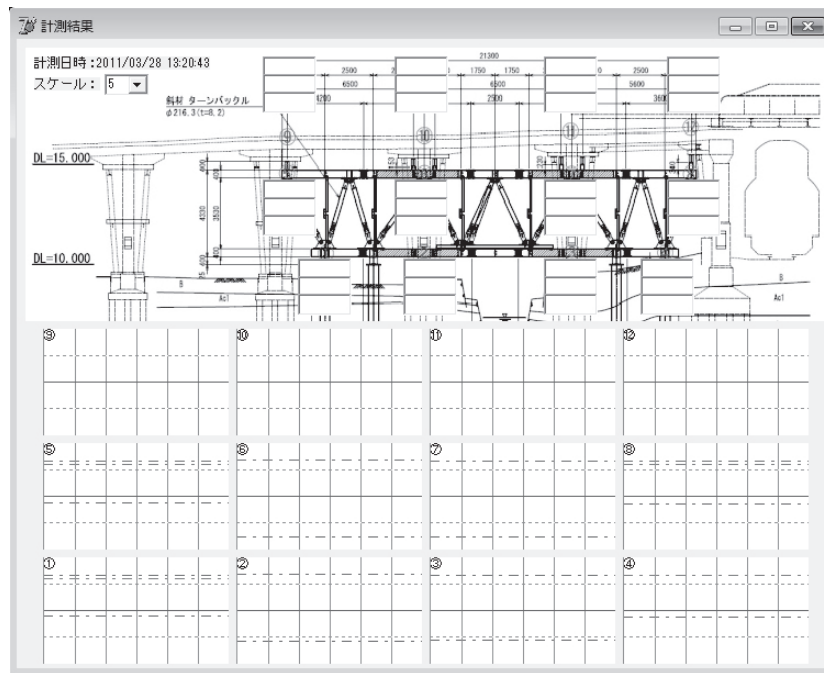
発 注 者：神奈川県藤沢土木事務所

施工場所：神奈川県鎌倉市小袋谷～台

本工事は、JR大船駅近くにおいて、JR横須賀線を跨ぐ道路橋の架け替えなどを行う、大船立体整備事業の一環として施工されたものである。当社はこの事業の中で、新設橋梁の橋脚工事（P2～P4の3橋脚）の施工などを行った。工事における技術的課題としては、橋脚（P2）の基礎杭（直径3mの場所打ち杭）の施工位置が、既存の老朽化した跨線橋（1931年完成）に近接しており、最小の離隔が14cmという、非常に厳しい制約下での施工条件が挙げられた。地盤が軟弱（N値0～2）であることから、場所打ち杭の施工中に、既設跨線橋に許容値を超える変位が発生することが懸念された。詳細な事前解析検討を行い、既設橋を仮設のトラス桁で支持する対策工を施すとともに、施工中においては、地盤水平変位計測や、既存橋の変位、ひずみ計測をリアルタイムに実施し監視を



図—4 アルミドームの変位量経時変化



図一五 パソコン上の監視画面表示例



写真一五 既設跨線橋と仮設トラス桁

行った。これらの計測のなかで、既設橋と仮設トラス桁（写真一五）の変位計測に対して、可視光通信を用いた3次元位置計測システムを適用した。

12ヵ所の計測地点に設置したLED光源を、現場内の2ヵ所に設置したデジタルカメラで、5分間隔で計測を行った。変位計測の精度（分解能）は、LED光源とカメラの距離に依存するが、本事例では、距離に応じ0.4～0.8mm程度であり、1mm単位の変位測定が可能であった。

計測解析結果は直ちにモバイルデータ通信でサーバーに転送して、現場事務所のパソコン上で、12点の変位の経時変化グラフを常に表示できるものとした（図一五）。さらに、測定値があらかじめ設定した警戒値を超えた場合には、登録した携帯電話にメールで一

斉報知する機能を付加した。

変位計測は、2011年3月中旬より4月中旬までの約1ヵ月間、24時間連続で行われたが、本システムは良好に稼働した。別途実施した、トータルステーションによる従来式変位計測とも整合した結果が得られた。綿密な監視体制の下で工事は慎重に進められ、既存構造物に影響を与えることなく、無事に竣工に至った。

4. おわりに

本報では、開発技術の二つの適用事例を示したが、本技術は、きわめて経済的に自動計測を実施できるため、様々な用途での利用が可能と考えている。今後、建設工事の施工管理における様々な場面において活用促進を図っていく予定である。

謝辞

本技術は、慶應義塾大学、(株)中川研究所、三井住友建設(株)の共同研究により開発されたものです。開発の過程で、多くの方々よりご指導、ご協力をいただきました。関係各位に深く謝意を表します。

JICMA

【筆者紹介】

三上 博（みかみ ひろし）

三井住友建設(株)

技術研究開発本部 技術開発センター

主席研究員

