

可視光通信を用いた3次元位置計測システムの実用化

Practical Applications of 3D Positioning System using Visible Light Communication

三上 博 HIROSHI MIKAMI

掛橋 孝夫 TAKAO KAKEHASHI

土木設計部 永元 直樹 NAOKI NAGAMOTO

土木技術部 中込 正貴 MASATAKA NAKAGOMI

土木営業部 武富 幸郎 YUKIO TAKETOMI

筆者らは、可視光通信と写真測量を融合した、新たな自動3次元位置計測システムを提案し、橋梁、トンネル、地すべり観測などの建設工事に伴う各種計測での適用を図っている。本システムは、写真測量を行う際の標点に、点滅するLED光源を用いている。あらかじめ設定した独自の点滅パターンを利用することにより、異なる視点から撮影された光源の照合作業を自動的に行うことができる。これにより、計測点の3次元座標を自動的かつ即時的に取得することが可能となっている。本システムを実際の建設工事の施工管理測量に用いた結果、十分な精度と経済性を有し、適用性が高いことを確認した。

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

The authors propose a new automated 3D positioning system using visible light communication combined with photogrammetric system, and have been applying this to a variety of measurements on construction projects, such as bridges, tunneling, landslide monitoring, etc. This system uses blinking LED lights as targets for photographic surveying. The matching of lights from differing viewpoints can be automatically done by using specific blinking patterns. Therefore, 3D coordinates of measurement points can be automatically obtained at the same time. Through the practical uses of surveying for construction management, it could be confirmed that this system has sufficient accuracy, economical efficiency and high applicability.

Key Words: Visible Light Communication, Photogrammetry, LED, Digital Camera, Bridge,

1. はじめに

橋梁、トンネルなどの建設工事では、施工中の構築物に関する測量を、精度良く、かつ短時間で行うことが必要不可欠である。また建設工事に伴い、周辺の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。GPSやトータルステーションなどを用いた測位技術が、現在施工現場で広く用いられるようになって来たが、測定員による人力作業を少なからず伴う場合が多く、作業の自動化は決して容易でない。また自動化を実施するためには、計測機器類に多額の費用を要する場合が多く、日常の施工管理の一部として採り入れることが難しい状況にある。

筆者らが今回開発を行った、可視光通信3次元位置計

測システムは、市販のデジタルカメラを用いた写真測量技術をベースとしたものであり、きわめて経済的なシステムである。従来からの写真測量技術は、撮影自体は短時間で行うことができ、利便性に優れるものであるが、一般的に解析処理に手間がかかり、自動化、即時性の面で課題が多かった。本開発技術は、これらの写真計測技術の課題を補うため、可視光通信によるデータ通信を採り入れたものである。本報告では、技術の概要および特徴などを示すとともに、実際の施工現場で活用事例について報告する。

2. 可視光通信とは

可視光通信は、目に見える光である“可視光”を使用して高速データ通信を行う、日本発の最先端通信技術¹⁾

である。LEDなどの照明機器を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、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。

3. 可視光通信 3次元位置計測システム

(1) システム概要

LEDを光源として測量ポイントに設置し、デジタルカメラで撮影することで、複数の点の3次元座標を一括かつ短時間で測量するシステムである。

基本システムは、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光源から構成される。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。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によって2ヶ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ヶ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。

(2) システムの特徴

本システムの特徴は以下のとおりである。

- 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行える。機材費用は、2周波GPS受信機1セット(2台1組)の1/3程度であり、経済性に優れている。
- 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(後述の4章で示す実施例参照)。

(3) 可視光通信によるID送信の仕組み

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(Nikon製D300)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

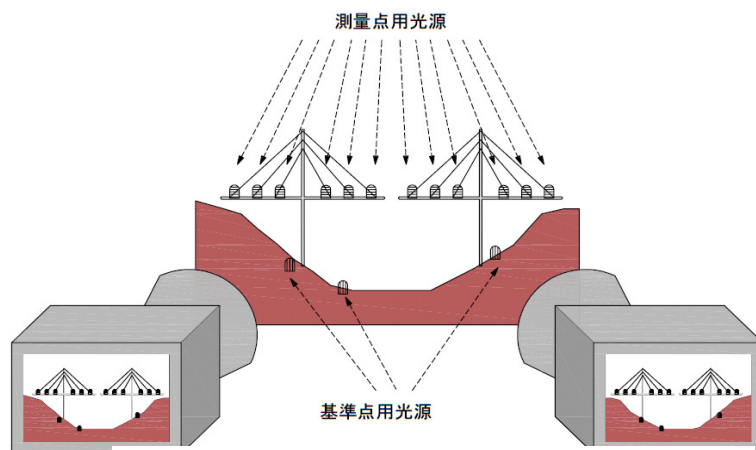


図-1 可視光通信 3次元位置計測システム概念

せてビットを表現している。

4sample → 1bit
0011 → 0
1100 → 1

たとえば、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」が送られて来たと判定する。ID番号は6bit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3bit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²⁾(CRC)3bitを付加して都合12bitのデータとしている(表-1)。一例として、10というIDを送信する場合のデータを表-2に示す。なお、ID番号を6bitのデータとして表現しているため、現在のシステムでは、使用できる最大のID番号は64となる。

表-1 送信データフォーマット

ヘッダー	データ本体	CRC
3bit	6bit	3bit

表-2 送信データの例

ID	10
ID bit	001010
ヘッダー	111111000000
CRC	011
全データ	111111000000001100111100 001111000011001111001100

(4) 光源の検出とIDの算出の手順

連続撮影された全ての画素の明るさの中央値を求め、光源判定の閾値を設定する。各画素の中から、明暗のパターンが(3)で述べたフォーマットの規則性に合致する点群を抽出して、光源の候補領域とする。このようにして得られた各光源候補領域の全ての時系列データを分析して受信データの検出を行い、巡回冗長検査(CRC)から誤りのなかった領域を光源(測量LED標点)と判定し、ID番号を算出する。光源領域の各画素を明るさの平均値による重み付けをしたうえで重心を算出し、測量標点の中心座標とする。

(5) 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²⁾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箇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箇所での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、標点の中心位置は、前述のような重心の算出によって決定される。

(6) 使用機材

建設現場で実際に使用可能な、プロトタイプシステムとして表-3に示す仕様の機材を用い、各種検証試験を行い、現場での適用を行っている。

表-3 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	5W
カメラ (受信機)	本体	Nikon製 D300
	焦点距離	28.659mm
	解像度	4,288×2,846画素
	イメージセンサー	23.6mm×15.9mm



図-2 一眼レフデジタルカメラ



図-3 LED光源(測量標点)

4. 建設工事への適用

屋外ヤードおよび建設現場での検証実験から、光源検出距離、測量精度などの確認を実施した²⁾。これらの結果²⁾に基づき、プロトタイプシステムをベースとした、自動計測システムを構築し、実際の工事現場での適用を試みた。以下に、二つの適用事例を示す。

(1) 橋梁工事への適用

開発したシステムを橋梁建設工事に適用した。工事概要を以下に示す(図-4)。

- ・発注者：独立行政法人 都市再生機構埼玉地域支社
- ・工事名：越谷レイクタウン地区 F 橋梁上部工工事
- ・施工場所：埼玉県越谷市越谷レイクタウン地区内
- ・構造形式：3 径間連続エクストラードロード橋
- ・施工方法：場所打ち固定支保工施工

本工事は、橋梁上部工を、固定式支保工を用いて施工するものであったが、一度に大量のコンクリート(最大約450m³/日)を打設するため、その重量により地盤の圧縮沈下が予想された³⁾。そこで、可視光通信 3 次元位置計測システムに自動計測システムを組み込み、約7 時間にわたるコンクリート打込み中、および打込み開始から 24 時間後までの支保工の沈下量計測を実施した。自動化システムは、2 台のカメラにより 20 分間隔で写真撮影するとともに、データ取り込み、解析および計測沈下量のリアルタイム表示を 24 時間連続で無人で行うものである(図-7)。

計測の結果、圧縮沈下量が事前に実施した平板載荷試験より予測した値(10mm)とほぼ等しいことを確認した。また、自動計測が問題なく稼働することを確認したほか、検証のために同時に実施したレベル測量とほぼ同様の挙動を示し、その差異も常に 2mm 以下であることを確認した。



図-5 コンクリート打設状況

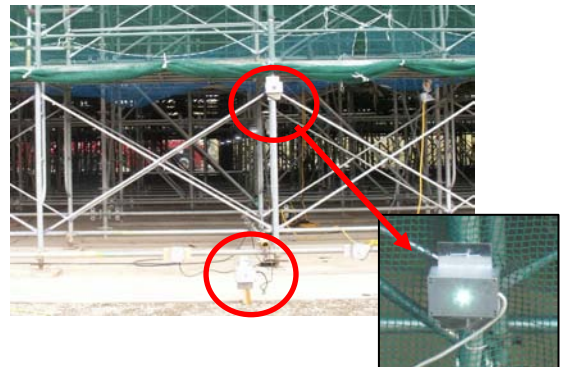


図-6 支保工へのLED光源設置状況

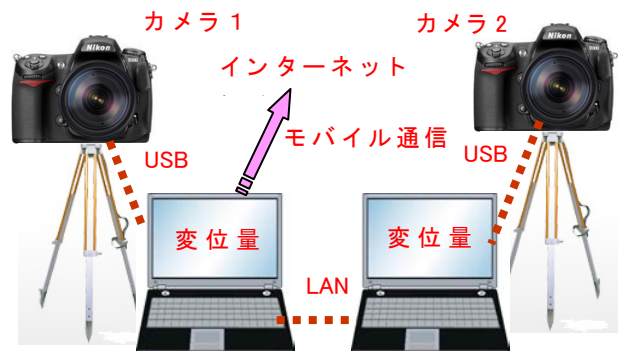


図-7 自動計測システム



図-4 越谷レイクタウン地区F橋梁

(2) 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式会社 (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
- ・工事場所 : 神戸市西区狩場台1丁目 (神戸市水道局狩場台配水場内)

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。したがって、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。

今回、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-9, 10)。これらの標点に対して、配水池から約40mの距離に設置した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 (図-11)。

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

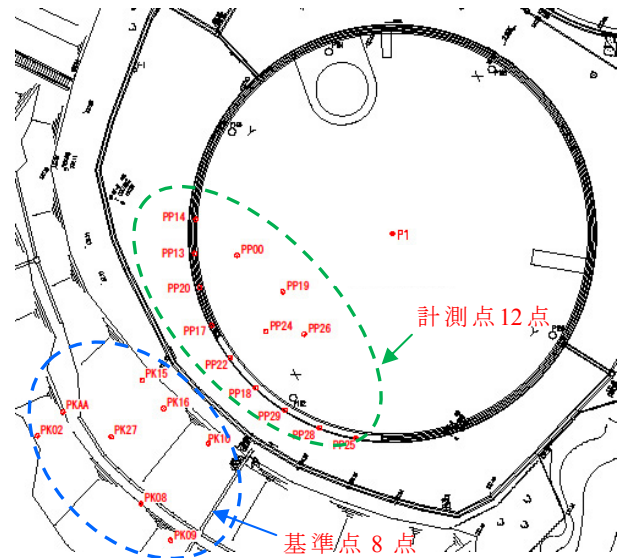


図-9 計測点および基準点設置位置



図-10 屋根端部へのLED光源設置状況

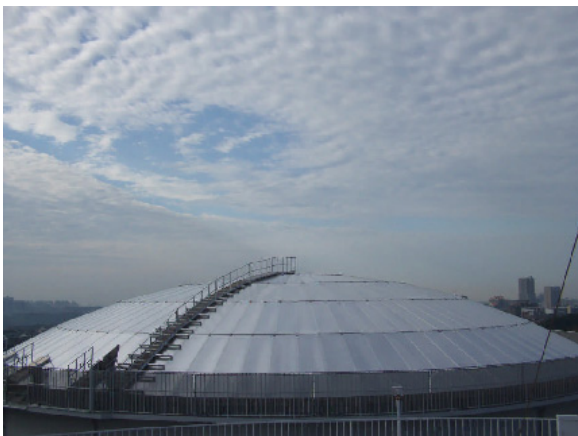


図-8 アルミドーム外観

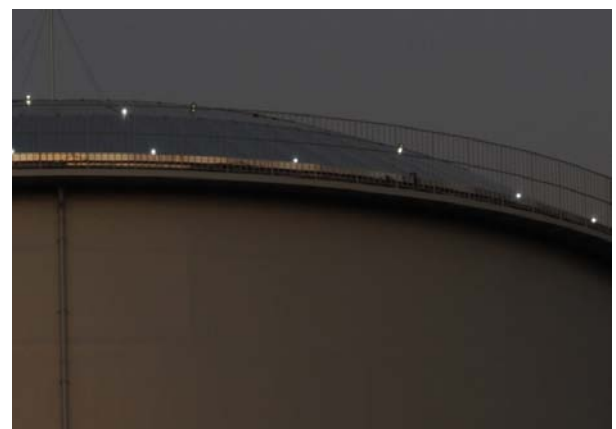


図-11 LED光源点滅状況 (夜間)

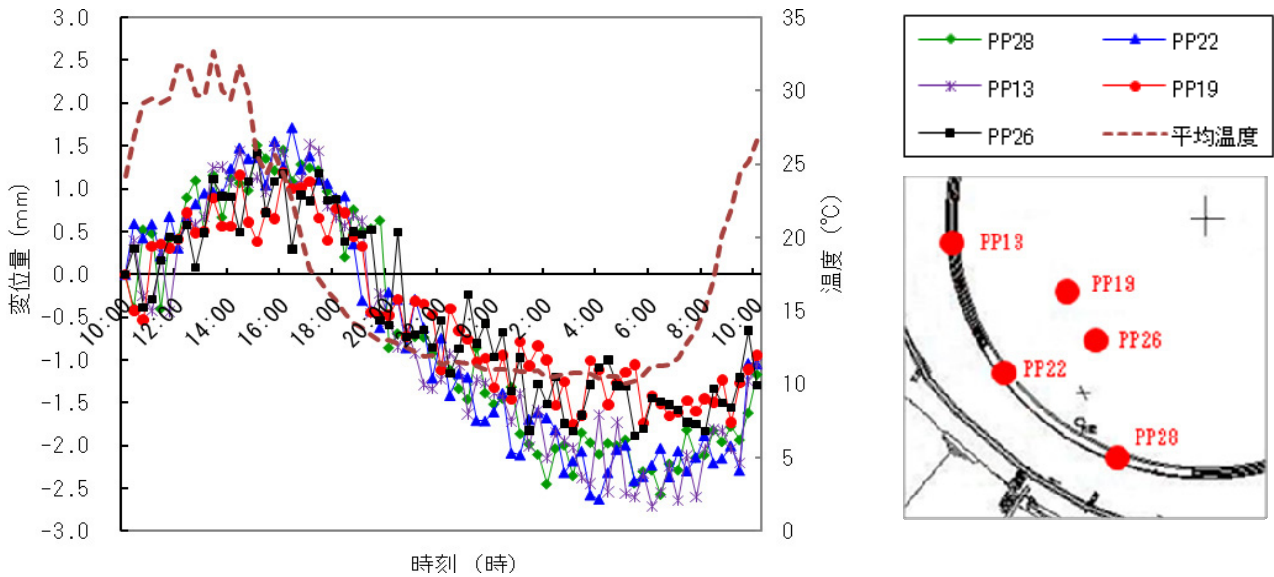


図-12 アルミドームの変位量経時変化

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解析結果などと比較した結果、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。

5. 結論

開発した技術の建設現場での実施結果から、下記の結論を得た。

- ① 開発技術を建設工事に用いた結果、約40mの距離から1mm精度の自動変位計測を行うことが可能であり、精度、操作性、即時性などの面で充分実用性を有していることを確認した。
- ② 本システムは、市販のデジタルカメラ、パソコン、LED光源のみで構成されるため、既存のGPS測量システムなどと比較して、機材費が1/3程度となり、経済性に優れる。
- ③ LED光源を一度設置した後は、計測員が測点に立

ち入る必要がないため、夜間や高所での現場計測作業において、安全性、省力化の向上面で利点を有する。

6. おわりに

本報文では、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、建設工事の施工管理におけるさまざまな側面で適用が可能と考えている。今後は、斜面の地すべり観測の分野などでも応用展開を図って行く予定である。

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。

参考文献

- 1) 内山英昭, 吉野昌樹, 春山真一郎, 斎藤英雄, 中川正雄, 掛橋孝夫, 永元直樹: “可視光通信を用いた写真測量システム”, 第14回画像センシングシンポジウム, 2008.6.
- 2) 掛橋孝夫, 三上博, 鈴木茂之, 永元直樹: 可視光通信による3次元写真解析システムの開発, 三井住友建設技術開発センター報告, 第7号, pp91-89, 2009.9.
- 3) 永元直樹, 春山真一郎, 内山英昭, 掛橋孝夫: 可視光通信を用いた3次元位置計測システムの開発, 第19回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 2010.10.