

II-56 橋梁の仮組立省略における部材計測の自動化

トピー工業(株) 技術研究所 林 健治
トピー工業(株) 技術研究所 松本博幸

1. はじめに

鋼橋の製作工程において、工程の短縮とコストの低減の観点から、仮組立の省略・省力化は、橋梁メーカーにとって最も重要な課題の一つである。既に可搬型の精密トータルステーションを用いた数値仮組立検査システム¹⁾が開発され、仮組立の省略が可能となりつつある。同システムに使用したトータルステーションの測定精度²⁾は、橋梁部材の計測では1mm以内であり、仮組立のシミュレーションを行う上では十分であると考えられるが、計測作業員がターゲットを視準し、手動で計測を行っているため、計測データの信頼性や作業性については十分であるとは言い難い。

このような状況の下、視準部に超小型オートフォーカスCCDカメラを内蔵し、モータードライブ機構を搭載した精密トータルステーションが開発された³⁾。計測システムの自動化は、計測結果の信頼性や作業性の向上に大きく寄与すると考えられるので、著者らは、同トータルステーションを用い、設計CADデータの活用システムと画像処理システムを併用して、橋梁部材の自動計測システムを新たに開発した。

本報告では、橋梁における部材計測の自動化の概要を述べるとともに、2、3の計測実験を通して、自動計測システムの有効性を明らかにする。

2. 計測の自動化

図-1に示す数値仮組立検査システム¹⁾は、部材計測システムと仮組立シミュレーション・システムの2つのサブシステムから構成される。従来使用されているトータルステーションの計測精度は、公称で測角部が2秒、測距部が $\pm(0.8 + 1 \text{ ppm} \cdot D)$ mmであり(ここに、Dは測定距離を表し、単位はmmである)、実用上十分な精度を有すると考えられるので、同トータルステーションは、仮組立検査²⁾や数値仮組立検査における部材計測装置として多用されている。しかし、計測作業員がマイクロプリズム反射ターゲットを視準し、電子野帳を用いて手動で計測を行っていることから、計測データの信頼性や作業性は、作業員の技量や経験に依存するので、熟練作業員の減少や作業の効率化が深刻な問題となっている現状を考慮すると、計測システムの自動化は不可欠である。

最近、一部で自動追尾トータルステーション(CCDカメラ内蔵、白黒2値化処理)を導入し、計測の自動化を計る事例も見受けられるが、多数の測定点を有する部材をモニター画面から遠隔操作により1点1点計測することは煩雑であり、作業効率の観点から改良が望まれる。また、鋼桁の連結部のような多数のターゲットが混在する部位では、個々のターゲットを識別することが困難であり、計測面から問題となる。

著者らは、このような問題点を解決するため、CCDカメラを内蔵し、モータードライブ機構を搭載したトータルステーションを導入して、以下のような工夫を行い、パソコンによるオンライン制御の自動計測システムを開発した。

①設計CAD(基準)データを活用し、計測の教示点を与え、測定点の位置決めを自動化した。但し、部材内の任意の3点を予め教示基準点とし、遠隔操作により座標値を求め、座標変換などの処理に用いた。

②ターゲットの識別を容易にし、番号付けの処理を誤らないようにするために、カラー(赤、青、黄、緑、黒)の反射プリズムシートをターゲットとして使用し、3原

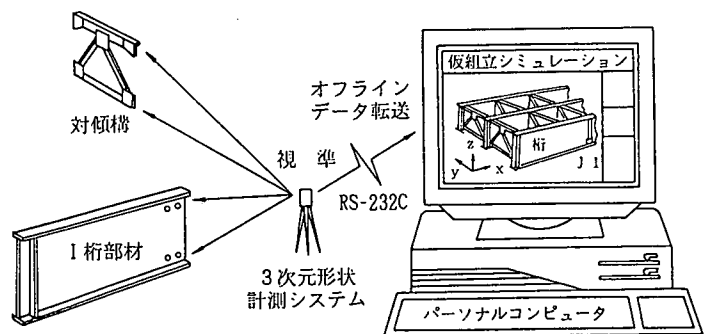


図-1 数値仮組立検査システムの構成

色の階調（濃淡）に基づく画像処理を行った。

上記の①と②を組み合わせることで計測を行うことにより、測定点の3次元座標値を自動的に、かつ、効率的に得ることができる。なお、上記のトータルステーションの公称の計測精度³⁾は、測角部が2秒、測距部が $\pm(0.5 + 1 \text{ ppm} \cdot D) \text{ mm}$ であり、従来のトータルステーションと比較して同等以上の性能を有する。

つぎに、本システムの操作手順を以下に要約する。

- ①全体座標系の設計CAD（基準）データの中から部材データを用意し、部材座標系に変換する。
- ②部材データから設計用に使用されたダミー点などの不要なデータを取り除き、計測ターゲットの3次元オフセット量を立体幾何の手法により算出する。
- ③計測の対象となる部材内の任意の複数点（3点以上）を教示基準点とするため、遠隔操作により計測する。これらの計測データを用いて、座標変換により計測座標系を部材座標系に一致させる。
- ④変換されたデータを基準として、計測位置（ターゲット）を自動サーチする。
- ⑤CCDカメラから画像を取り込み、指定されたターゲット色の重心を求め、重心位置まで移動処理を行う。ここで、重心法では、CCDカメラの各画素から条件を満足する画素のみ検出し、その画素のX、Y座標の平均値を求め、大まかな位置決めを行う。
- ⑥ターゲットまでの距離を装置本体の光波により計測し、移動量を精算する。なお、④と⑤の移動量は、設計値から算出する。
- ⑦再度画像を取り込み、詳細な位置決め処理を行う。ここで、詳細位置は、ターゲット中心から放射状に投影された8方向の画素のエッジ検出を行い、条件を満足した画素の座標から最小自乗円を算出し、その中心座標とした。
- ⑧詳細位置決めで算出した座標まで移動し、移動後の座標とターゲットまでの距離を再計測する。
- ⑨上記の⑦で求めた中心座標と⑧で求めた中心座標を照査し、両者の差が規定値内に収まるまで、⑦と⑧の操作を繰り返す。
- ⑩上記の④～⑨の操作を全計測データに関して実施する。

本システムを使用して工場内で部材計測を実施した状況を写真-1に示す。ここに、計測対象は、鋼I桁部材であり、計測部位の照度を一定とするため、写真に示すようなハロゲンランプを用いた。同写真で白く光っている部位は、ターゲットを設置した箇所である。また、ボルト孔の位置を計測するターゲットには、2方向に回転可能な回転ターゲットが使用されており、視準角の影響を極力抑えることができる。なお、使用したターゲットは、すべて部材軸から一定（既知）量だけオフセットしており、仮組立シミュレーションを実施する際に、立体幾何の手法を用いて部材軸上の任意点に補間される。

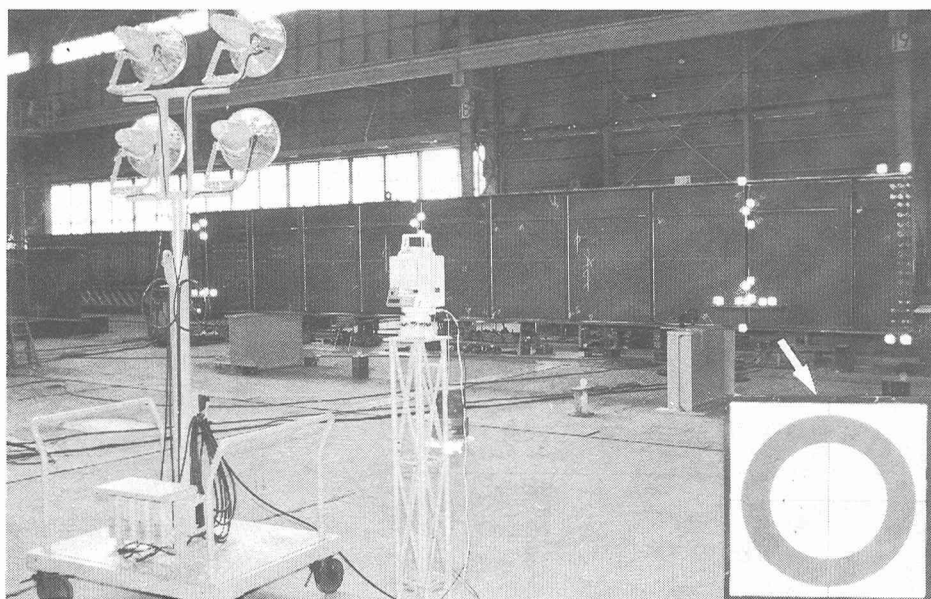


写真-1 自動計測システムによる鋼I桁の3次元座標位置の測定状況

3. 計測精度と再現性

本システムの計測精度に影響を及ぼす因子として従来の3次元計測システム²⁾と同様に、1)けがき誤差、2)ターゲットの製作精度、3)ターゲットの取付け精度、4)測距誤差・測角誤差、5)ターゲット傾斜の影響、6)ターゲット寸法の影響、7)計測データの結合誤差、8)温度の影響などが挙げられる。本システムでは、計測範囲を2m～30mと固定しているため、使用するターゲットの大きさを一定とし、また、シミュレーション用のデータとして使用されるボルト孔位置の計測には回転ターゲットが用いられるので、5)と6)の影響は小さく、無視して差し支えないものと判断される。1)～3)の精度は ± 0.1 mm程度と考えられ、これらと7)、8)の影響を極力抑えるように配慮・工夫する必要がある。座標位置決めの際の機械的な視準誤差は、4)に含まれると考えてよい。

上記の他に、本システムの計測精度に大きな影響を及ぼす因子として、季節、時間帯及び天候等によって変動する計測場所の照度が挙げられる。照度の変動は画像の状態を不安定にし、視準を妨げる要因となる。特に、本システムでは、入力画像をカラー処理しているため、照度の変動は色の識別を妨げる。そこで、直射日光の侵入を防ぐとともに、写真-1に示すように照明設備を用意して、極力一定・同一の照度が得られるように、計測環境を整えた。本システムでは、計測時の照度が最低500ルクス、最高照度が1500ルクス以内となるようにした。

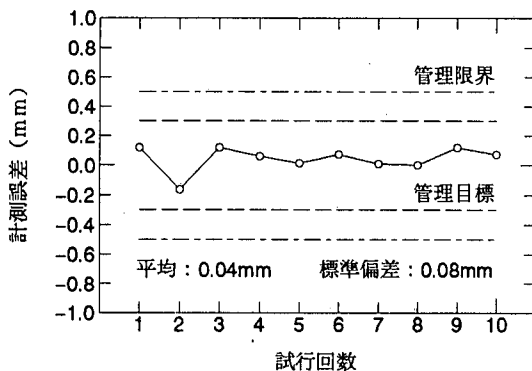


図-2 本システムの計測誤差

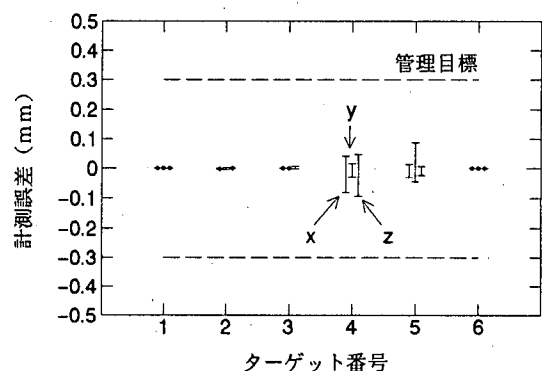


図-3 座標成分の計測誤差の変動量

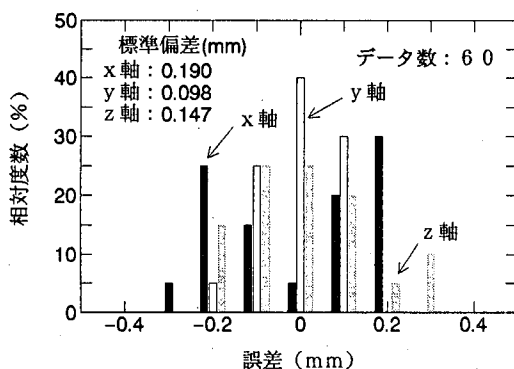


図-4 座標成分の計測誤差分布

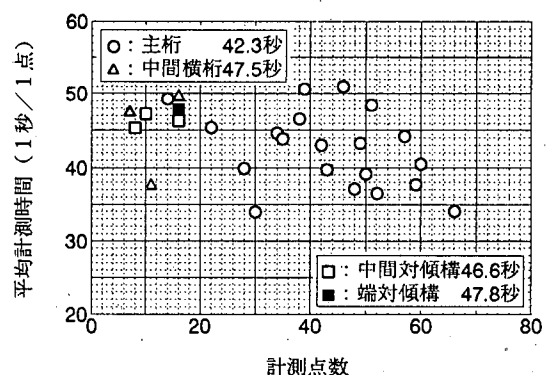


図-5 各部材の計測時間分布

道路橋示方書⁴⁾では、部材検査や仮組立検査におけるフランジ幅やトラスの部材長の許容誤差を ± 2 mmと規定している。従来の3次元計測システムの計測精度¹⁾は ± 0.3 mm～ ± 0.5 mmであり、実用的な観点から、同システムを部材計測や仮組立計測における計測装置として使用することに問題はない。それゆえ、本システムに要求される精度は、管理目標として ± 0.3 mm、管理限界として ± 0.5 mmと考えて差し支えない。

つぎに、従来の部材計測において長さの基準となる基準テープ(10mで ± 0.1 mmの誤差を有する)を用いて本システムの計測精度を調べた結果を図-2に示す。ここで、基準テープ上の2点(長さ7569

mm) にターゲットを設置し、本システムにより 2 点を交互に 10 回計測した。同図の縦軸は本システムにより 2 点間の距離を求め、基準テープの値との差を、横軸は試行回数を取った。計測誤差は ± 0.2 mm 未満であり、誤差の平均は 0.04 mm、標準偏差は 0.08 mm であった。したがって、本システムは管理目標を満足し、従来の 3 次元計測システム²⁾ と同等以上の性能を有する。また、基準テープとほぼ同程度の精度を有する。

システムの信頼性を検証する上では、再現性を検討することも重要である。そこで、6 水準のターゲット (No. 1 ~ No. 6 : トータルステーションとの直線距離が 6 m ~ 15 m で、通常計測される範囲内である) を順次繰返し計測し、試行回数が 5 回の中でのばらつきを検討した。その結果を図-3 に示す。ここで縦軸は座標値の各成分 (x、y、z) の誤差の変動幅を、横軸はターゲットの番号をとった。各成分の誤差は ± 0.1 mm の範囲内にあり、非常に高い再現性を有することが判明した。同様に、装置から 9 m、 10 m、 13 m の位置にあるターゲットの座標位置を 20 回計測し、各成分 (x、y、z) の繰返し誤差の分布を調べた結果を図-4 に示す。ここで、縦軸は誤差量の相対度数を、横軸は誤差量を表す。各成分の誤差量は、管理目標値内に入り、また、誤差量の標準偏差はそれぞれ 0.19 mm、 0.10 mm、 0.15 mm と小さく、繰返し精度 (再現性) は高い。3 成分の合成誤差も、各成分が個々に独立し、誤差伝播則で評価できるものとする、 0.26 mm と比較的小さく、管理目標値内に収まっている。

以上より、計測精度の絶対的評価を行うことはできないが、誤差の要因を考慮し、誤差が混入しないように配慮して計測を行えば、本システムにより管理目標値 (± 0.3 mm) 内の精度で 3 次元計測を実施することができる。それゆえ、本システムは、従来の 3 次元計測システム²⁾ と比較して、高い信頼性を有すると言えることができる。

さらに、本システムの作業性に大きな影響を与える計測時間について、以下のような検討を行った。従来の 3 次元計測²⁾ では、1 計測点当たりの計測時間は約 40 秒 ~ 45 秒であった。本システムでも、同様に部材計測を実施したデータから 1 計測点当たりの平均時間を求めた。その結果を図-5 に示す。ここで、主桁は部材数 152 、全計測点数 5949 、中間横桁は 58 部材、 819 点、対傾構は 84 部材、 864 点、端対傾構は 6 部材、 96 点について整理した。同図の縦軸は平均計測時間を、横軸は計測点数を表す。

計測点数の増加に伴い、平均計測時間が若干低下する傾向が認められるが、これは、計測点が多い部材ほど、個々の計測点が近接し、計測点間の移動時間が短くなるためと考えられる。各部材の全計測点における平均値は、主桁が 42 秒、中間横桁が 47 秒、中間対傾構が 47 秒、端対傾構が 48 秒であり、従来の 3 次元計測システムによる計測時間とほぼ対応する。しかしながら、計測作業員の負担 (例えば、多数の計測点を注意深く視準しなければならない、という負担) を考えると、自動化による効果は言うまでもなく、総合的に勘案して、本システム導入により作業性の向上が期待できる。

4. まとめ

本報告で述べた橋梁部材の自動計測システムは、実用上十分な計測精度を有し、従来の部材計測システムよりも信頼性・作業性の面で優れている。それゆえ、本報告で取り扱った計測の自動化は、橋梁の部材計測の自動化に役立つものと期待される。また、本システムは、橋梁の仮組立省略を可能にする数値仮組立検査システムに容易に組み込むことができ、その信頼性の向上に大きく寄与するものと考えられる。

本報告は、橋梁の部材計測の自動化の第一歩を踏み出したものである。計測の事例が少なく、システムの信頼性・作業性を判断するには十分であるとは言いがたい。今後、多数の実橋の数値仮組立検査を通して、十分な検証を重ねたい。また、作業性、特に、計測時間については、さらにシステムを改良し、その短縮に努めたい。

【参考文献】

- 1) 林、西園、小林：仮組立シミュレーション法に関する 2、3 の検討、土木情報システム論文集、Vol. 5、pp. 53-60、1996
- 2) 林、大江、西園、井上：鋼橋の 3 次元計測に関する基礎的研究、橋梁と基礎、93-7、pp. 19~25、1993
- 3) (株) ソキア：自動計測対応型 3-Dステーション “MET 2 NV”、1995
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、pp. 390-401、1994