

橋梁部材の形状・寸法の計測技術に関する研究

トピー工業株式会社 第一技研 林 健治

トピー工業株式会社 第一技研 ○大江 浩一

1. はじめに

最近、橋梁業界では、鋼橋の生産システムの自動化と信頼性・健全性の向上を図るために、製造業におけるコンピュータ統合生産システム（C I M）に基づく自動化システムを導入・開発し、設計、製作、架設の統合化を図っている。多品種小量生産のため、従来からその自動化が困難とされてきた鋼橋の製作においても原寸から孔明けまでの前加工段階では、C A D、C A Mの一貫システムの開発により、また、溶接についてもロボットの導入により自動化、合理化がかなり進んでいる。

しかし、構造物や部材の品質管理および仮組立検査に対する自動化は、上述の自動化に比べて十分であるとは言い難く、非常に立ち遅れているのが実状である^{1), 2)}。また、架設時において仮組立検査と同様に構造物の形状が設計で想定された値の通りとなっているかを検査する形状管理に対する自動化も現状では十分であるとは言い難い。それゆえ、品質管理、仮組立検査および架設形状管理システムを開発することは生産システムの自動化・統合化を押し進める上で不可欠であり、業界にとって重要な課題である。

本研究では、以上の観点から、鋼橋の主桁連結部における添接板の製品精度の保証とボルト孔の品質管理を行うために、C C Dカメラを用いた小物部材計測システムを開発した。また、工場内での組立時の部材検査、仮組立時の検査や架設現場における形状管理など、一貫した寸法・形状の検査法を確立すべく、精密型トータルステーションを用いた長尺部材計測システムを開発した。前者のシステムの特徴は、C C Dカメラにより得られた添接板の2次元画像をパソコン画像解析システムを介して、板の隅角部の座標位置、ボルト孔の座標位置、幅および面積等をリアルタイムに測定できることである。また、後者のシステムの特徴は、部材の3次元座標位置を高精度（1 0 0 mで±1. 2 m m）で測定でき、ターゲットに小型の反射テープを用いているため前作業が容易であり、計測データを電子野帳を介してパソコンに転送することができるので、データの処理を迅速に実施できることである。

本研究では、まず、これらの計測システムの性能評価試験を行い、本システムの妥当性・信頼性について検証し、つぎに、工場内での部材の組立時における寸法検査、仮組立時における寸法計測およびキャンバー計測、さらには、架設現場における斜張橋の形状管理への本システムの適用実験を行い、システムの使用性・実用性について検討した。以下にその概要を述べる。

2. 小物部材計測システム

橋梁に多用されている鈑桁や箱桁の全体形状は主桁単体の製品精度に依存する。主桁は、各ブロックが連結板を介してボルト接合されるので、ボルトの孔明け精度が主桁の製作精度に大きな影響を及ぼし、引いては橋梁全体の完成形状に多大な影響を与える。主桁連結部の孔情報としては孔の寸法だけではなく、孔の中心位置などの面情報が必要となる。このような2次元情報を迅速に処理できる道具として、C C Dカメラを用いた計測システムが開発され、種々の分野で使用されている^{3), 4)}。そこで、本研究でも、C C Dカメラを用いた画像処理装置より構成される小物部材計測システムを構築した。

2-1 測定手順とシステムの構成

C C D（Charge Coupled Device）カメラを用いた測定法の手順を次のように要約することができる。

- 1) C C Dカメラでターゲットを撮り、各素子の明るさの程度を判別する。
- 2) 素子の明るさの違いにより、あるしきい値を境にして2値化する。
- 3) ターゲット部と判定された画素を確定し、確定された画素の隔たりから長さや変位を求める。

C C D素子は、一般の撮像管と比較して画像の歪が小さく、寸法計測に適している。なお、その測定誤差は2画素以内であるが、相対誤差はしきい値のレベルに関係することが明らかにされている⁵⁾。

つぎに、計測システムの概要を図-1に示す。CCDカメラのカメラヘッドに適当なアタッチメントを取り付けることにより、一般に使用されているカメラレンズを用いてターゲットの2次元画像情報を解析することができる。カメラの画像データはフレームメモリ（あるいはパーセプタスコープ）により処理され、解析されたデータがGPIBを介してパソコンに転送される。計測システムの性能は、CCDカメラおよびフレームメモリの単体の性能に大きく依存する。CCDカメラの性能は、基本的にはその解像度（画素）により決定されるので、画素数の多いカメラが要求される。また、フレームメモリは、大容量の画像データを高速に処理し、種々の画像解析が実施できるものが便利である。最近では、画像処理を自動化した計測ユニットとして、パーセプタスコープが市販されており、計測システムを比較的容易に構成することができる環境になりつつある。このような状況を考慮して、同図の計測システムを開発した。

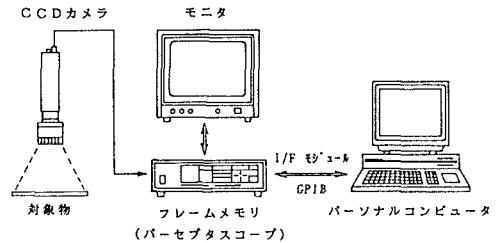


図-1 CCDカメラを用いた計測システム

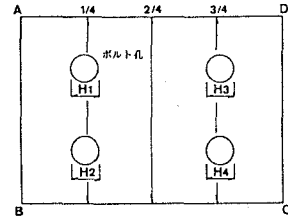


図-2 ボルト孔モデルの計測実験

2-2 計測システムの測定精度

主桁連結部の孔情報の測定に本計測システムを適用した場合の問題点を明かにするために、図-2に示す4つのボルト孔を有する幅約175mm、長さ約250mmの板を用いたシステムの性能評価試験を実施した。実験結果を表-1に示す。ここで、解析は水平方向および鉛直方向ともに分解能（画素の逆数）を1/512として行っている。実測視野長が250mmであることから、約±0.5mmの誤差が見込まれる。また、同表には計測結果の誤差を明かにするために、1/100mmの精度のノギスにより所定の寸法等を実測した結果を併記している。なお、しきい値には領域全体の階調の中間値を用いた。

表-1 計測システムを用いた実測結果

測定位置	板 幅 (mm)			測定位置	孔の水平最大径 (mm)		
	CCD	ノギス	誤差		CCD	ノギス	誤差
AB	175.3	174.8	0.5	H1	24.3	24.8	-0.5
1/4	174.8	174.7	0.1	H2	24.5	24.9	-0.4
2/4	174.8	174.7	0.1	H3	24.5	24.9	-0.4
3/4	175.3	174.8	0.5	H4	24.5	24.8	-0.3
DC	175.3	174.8	0.5				

表-1の結果から明かなように、CCDカメラを用いた本計測システムの測定精度は±0.5mmであり、測定誤差はほぼ画素数に対応する結果となっている。それゆえ、所定の精度を確保するためには、CCDカメラの視野長を画素に応じて決定する必要がある（逆に、測定可能な範囲が画素数から決定される）。固体撮像素子ではその出力信号をいくつかの階調（0～256）に分けて測定すると、その数だけ見かけ上、素子数が増加したことに相当し、それだけ測定誤差は小さくなる⁵⁾。この点を考慮して設定しきい値に対して±5%、±10%増減させた階調を新たなしきい値として測定し、これら5点の平均値としてデータを整理した。その結果、上述のボルト孔モデルでは誤差が±0.3mmと減少し、若干精度が改善されたが、しきい値の取り方で誤差が変動する。それゆえ、最適なしきい値の設定に関して十分な検討が必要である。

なお、本システムによる計測時間は、1個のボルト孔の中心位置、横幅、縦幅および面積の測定では約3秒、全体の測定では約20秒であり、多数のボルト孔を有する部材の計測に本システムを適用することは十分可能であると考えられる。

3. 長尺部材計測システム

3-1 3次元座標測定装置とその構成

部材の3次元座標位置を測定する方法として、現状では、CCDカメラを用いた方法²⁾と光波測距経緯儀（トータルステーション）を用いた方法が考えられる。1台のCCDカメラで測定できる範囲は、部材の要求精度とカメラの画素数により決定されるので、橋梁の長尺部材の測定に、前者の方法を採用する場

合、複数個のカメラを併用するか、何らかの方法でカメラを移動させることにより、計測データの接続を行わなければならない。それゆえ、システムそのものが大規模となる可能性があり、また、大量の画像情報を処理しなければならないため、使用性・効率性の点でも問題がある。一方、後者の方法では1台の装置により部材の3次元座標を直接測定することができ、また、一貫した計測システムを構築することができるので、長尺部材の寸法計測に適していると思われる。

ところで、道路橋示方書⁶⁾では部材精度としてフランジ幅やトラスの部材長を±2mmと規定しており、計測システムとしては少なくとも±2mmの測距精度を有する装置の使用が前提となる。一般に用いられている光波測距経緯儀の測定精度は、測角が最高水準の1級経緯儀で2秒、測距が2級中距離型光波測距儀で±(5mm+2ppm・D)〔D：測定距離〕であり、上記の条件を満足しない（このことが、橋梁の部材計測に同装置があまり使用されていない所以と考えられる）。このような状況の中で、測距精度±(1mm+2ppm・D)の精密測距型トータルステーションNET2が開発された。

当社では、仮組立検査や架設形状管理への適用を想定して、NET2を用いた長尺部材計測システムを開発した。同システムは、電子野帳を用いて計測データを簡単に現場で処理することができ、また、パソコンを介してデータを加工・処理（オフライン処理）することができる。さらに、ターゲットには反射テープを用いており、従来の反射プリズムと比較して使用性に優れ、省力化を期待することができる。

3-2 計測システムの性能評価

NET2の公称の精度は、測距が±(1mm+2ppm・D)、測角が2秒であり、橋梁の部材寸法の測定に数値的には適合しているものと考えられるが、実用的にはどうかを検証する必要がある。そこで、NET2の性能を把握すべく、以下のような簡便な試験を実施した。

まず、精度が±0.1mmの基線（2～20m）を用いて距離による測定精度の変化を調べた。ここで、測定は5回行った。また、ターゲットには70mm角の反射テープを用いた。基線値が2mの場合を除いて、基線値と測定値との差は±0.5mm以下、また、標準偏差も0.2mm以下であり、実用上十分な測距精度を有する。つぎに、同じ基線を用いてターゲットの傾きによる測定精度の変化を調べた。ここで、ターゲットには70mm角の反射テープを使用して10回測定を行った。その結果、傾きが50°を超えると、精度が急激に悪化し、場合によっては測定できないことも認められたが、ターゲットの傾きが30°以内であれば、実用的には問題がないことが確認された。

3-3 仮組立検査への適用

本計測システムの仮組立検査への適用性および使用性を検討するために、図-3に示す箱桁の仮組立時における部材長とキャンバーの計測を行った。その結果を表-2、3に示す。部材長については、基準テープと本システムによる測定値には±1mm程度の差が見られるが、測定精度の面からは問題ないものと推察される。同様に、キャンバーの測定結果についても、レベルと本システムの測定結果は良好に一致（測定値間の最大誤差は高々2mmである）し、共に許容値（-5～+15mm）内に入っている。

本橋の測定時間は、本システムの場合、約45分と比較的短時間である。テープとレベルを使用した場合、1時間以上も要するので、本システムの方が効率的である。また、作業人員についても、本システムでは一人でも測定を行うことができるので、そ

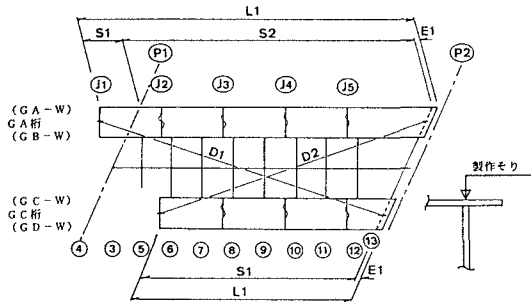


図-3 計測の対象と測定位置

表-2 部材長の測定結果（単位mm）

測定項目	位置	記号	規定値	基準テープ		本システム		許容値
				測定値	誤差	測定値	誤差	
全 長	GA	S2	48600	48603	+3	48603	+3	±14
	GD	S1	40486	40486	±0	40485	-1	±12
平 面 対角長		D1	52696	52698	+2	52694	-2	± 8
		D2	45453	45460	+7	45461	+8	± 7

＊）テープでは、障害物を乗り越えて測定したため、参考値とした。

の有効性は明かである。

表-3 キャンバーの測定結果(単位mm)

3-4 架設形状管理への適用

本計測システムの架設形状管理への適用性等を検討するために、2面ケープルの単径間鋼斜張橋(橋長27.2m)の形状管理に本システムを使用した。各架設ステップにおける本システムとレベルによるキャンバーの測定結果を図-4に示す(ここで、測定は夜間ではなく、日中に行った)。各ステップ共に、設計値に対する計測値の差(キャンバー誤差)は非常に小さく、また、本システムによる測定結果とレベルによる測定結果は比較的良好に一致している。

以上の結果から、本システムによる測定結果は妥当な結果を与え、本システムを架設形状管理システムの構成要素として実際に使用しても実用上問題ないことが確認された。

4. まとめ

本研究では、橋梁部材の形状・寸法の計測技術を確立することを目指して、CCDカメラを用いた計測システムとトータルステーションを用いた計測システムを開発し、種々の計測・検査への適用性について実験的な検討を行った。それらの結果を要約すると、次のとおりである。

(1) 本実験の範囲内では、CCDカメラを用いた計測システムの精度はカメラの分解能に依存し、測定誤差はほぼ1画素に対応する。

(2) 上記の結果から、所定の精度を確保するためには、CCDカメラの視野長を画素に応じて決定する必要がある(逆に、測定可能な範囲が画素数から決定される)。

(3) トータルステーションを用いた計測システムの測距誤差は、基線値が2~20mの範囲内では $\pm 0.5\text{mm}$ 以下である。また、70mm角の反射テープを使用した場合、ターゲットの傾きを 3.0° 以内とすることにより、実用上十分な精度で3次元座標位置の測定を行えることが確認された。

(4) 本システムは、従来の基準テープ、レベルやトランシットによる測定法と同様に、仮組立時の寸法計測やキャンバー計測に、また、斜張橋の架設形状管理におけるキャンバーや塔の倒れの計測に使用できることが判明した。

最後に、本システムの開発に際して有益なご示唆を頂戴しました当社鉄構事業部 品質保証部長 菅澤保則氏に、また、NET2に関して有益なご助言を頂きました(株)測機舎 計測営業部課長代理 鈴木晶夫氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)山本、戎：計測と制御、Vol.17、No.2、1978
- 2)小櫻、片山、藤原、深谷、佐々木：横河橋梁技報、No.18、1989
- 3)(株)本四連絡橋エンジニアリング、三菱重工(株)：日本機械学会誌、No.833、1988
- 4)岩月、福田、白井、天神林、野崎：自動車技術会学術講演会前刷891、1989
- 5)沢田孚夫：塑性と加工、Vol.29、No.330、1988
- 6)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、丸善(株)、1980

記号	位置	5.J2	6	7	8	9	10	11	12	13
GA-W	規定値	992	872	769	671	566	440	296	135	0
	レベル誤差	991 -1	870 -2	766 -3	667 -4	564 -2	438 -2	296 ± 0	136 +1	
	本システム誤差	991 -1	871 -1	767 -2	667 -4	563 -3	437 -3		136 +1	
GD-W	規定値	964	883	782	679	567	436	283	111	78
	レベル誤差	963 -1	884 +1	781 -1	681 +2	568 +1	440 +4	286 +3	115 +4	82 +4
	本システム誤差	965 +1	885 +2	782 ± 0	682 +3		440 +4	286 +3		83 +5

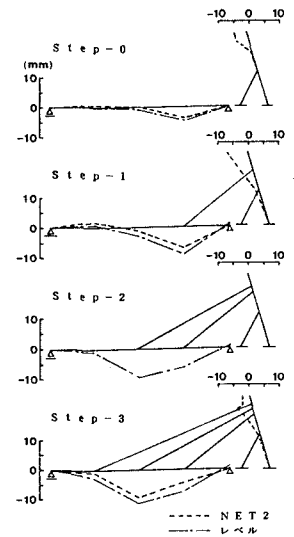


図-4 キャンバー誤差