

CCDカメラを利用した平面形状の計測システムとその応用

小櫻義隆*・鳥居邦夫**・高田孝次***

比較的広範囲の平面形状の測定では鋼巻尺等で直接寸法を計測する方法がある。これは手軽であるが、形状が複雑な場合は不向きである。また、形状を精度良く測定するには測長器を利用した接触型の測定機がある。この方式は衝撃に弱く、しかも接触型であるため、測点数が多い場合は効率が悪い。著者等はこのような問題を解決するため、CCDカメラを用いて平面形状を効率良く計測するシステムを開発した。本論文ではその測定原理とキャリブレーション方法について述べ、さらに実用例を紹介する。

Keywords: two dimensional measurement, CCD camera, steel structure

1. 序 論

比較的広範囲の平面形状を計測する場合には、スチールテープ等で直接寸法を計る方式がある。これは最も簡単な計測方法であるが、高精度の測定を期待することができない。またこの方式は平面形状が複雑な場合には不向きである等の欠点がある。

一方、平面形状を高精度で測定するには、マグネスケールまたはモアレ縞を利用した測長器などを2軸の移動方向に組み込んだ接触型の測定機を用いて計測する方法が考えられる。しかし、このタイプの測定機は、

- 1) 衝撃に弱いので、被測定物が重量物の場合は取り扱いに注意する必要がある。
- 2) 直線定規は高精度の真直度または直角度などが要求される。
- 3) プローブを被測定物に当てなければならないので、測点数が多い場合は、効率が悪い。
- 4) 測定範囲に限界がある。

などの問題がある。

上記の問題を解決する方法として、著者らはCCD (charge coupled device) カメラを用いて平面形状を効率良く計測する方法を考案した。本文では測定原理とそのキャリブレーション方法について述べる。また、本計測法は応用範囲が広いので、その実用例を紹介する。

なお、この計測方法は大型鋼構造物の立体形状を三次元測定する部材計測システム^{1)~3)}の計測装置の一部に適用している。ここでは、その装置についてまだ公表していないので、実用例の1つとして紹介する。

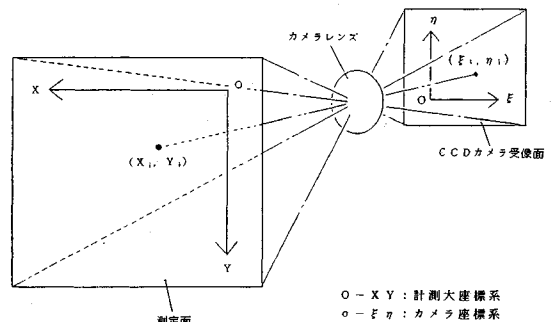


図-1 測定原理

2. 測定原理

図-1は本測定法の原理を示したものである。CCDカメラは測定面に対して傾いた状態でも良い。測定面上の計測大座標値 (0-XY座標系) と CCDカメラの受像面上のカメラ座標値 (0-ξη座標系) は、射影変換により

$$\left. \begin{aligned} X_i &= (a + A\xi_i + B\eta_i) / (1 + u\xi_i + v\eta_i) \\ Y_i &= (b + C\xi_i + D\eta_i) / (1 + u\xi_i + v\eta_i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、(i=1~n)

(X_i, Y_i): 計測大座標値

(ξ_i, η_i): カメラ座標値

(a, b, A, B, C, D, u, v): 定数

の関係が成立する。したがって、CCDカメラで捉えた画像値 (カメラ座標値) は全て計測大座標値で表すことができる。なお、式(1)において a~v の 8 個の定数は、キャリブレーションによって予め決定しておかなければならない。

なお、通常のカメラレンズは収差が 1~2% あるので、高精度の測定にはこれを補正する必要がある。ここでは、カメラレンズの収差の補正として、受像面の中心 (レン

* 正会員 工博 (株) 横河橋梁製作所大阪支店 (〒592 堺市築港新町2)

** 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 建設系

*** 正会員 工博 長岡技術科学大学教授 機械系

ズ中心の投影点に対応) から放射方向に,

$$d_i = C_1 r_i^3 + C_2 r_i^5 \dots \dots \dots (2)$$

ここで $r_i \equiv \sqrt{\xi_i^2 + \eta_i^2}$

(C_1, C_2): 補正係数

($i=1 \sim n$)

の補正量を決定し, 式(1)のカメラ座標値(ξ_i, η_i)を修正することにした. この式(2)の補正係数(C_1, C_2)もキャリブレーションで決定することにした.

3. キャリブレーション法

本キャリブレーションでは, 図-1のように測定面上に計測大座標系 $O-XY$ を有する平面パターン(基準点数 $n \geq 5$ 個)を作成し, 式(1)の左辺-右辺=0の条件式の残差を

$$\left. \begin{aligned} \phi \xi_i &= f(a, A, B, u, v, C_1, C_2) \\ \phi \eta_i &= f(b, C, D, u, v, C_1, C_2) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

($i=1 \sim n \geq 5$)

のように置き, これらの2乗和である

$$G = \sum (\phi \xi_i^2 + \phi \eta_i^2) \dots \dots \dots (4)$$

の目的関数が最小になるような定数($a, b, A, B, C, D, u, v, C_1, C_2$)を求めることにした.

ここで $a \sim C_2$ の10個の定数を決定するためには, 式(1)に示すような基準点1個($i=1$)で2つの条件式ができるので, 合計5個以上の基準点(10個以上の条件式)が必要である($n \geq 5$).

式(4)の目的関数 G の最小化は G を $a \sim C_2$ の10変数でそれぞれ偏微分した式をゼロと置くことによって得られる10元の非線形連立方程式を解く問題になる. 本キャリブレーションでは, この非線形連立方程式の解をニュートン法を適用して求めることにした.

なお, 上述のキャリブレーションの解法では逐次近似解法⁹⁾を適用しても同じ結果が得られる.

上述のように, 本計測では測定状況に応じて簡単にキャリブレーションすることができるので, CCDカメラなどの装置の据え付けが容易であるという利点がある.

4. 二次元位置センサーによる変位測定

(1) 計測装置

長大吊橋の主塔部材はブロック単位で製作され, これを垂直に積み上げていく. その際に, 各部材の上端面と下端面の平行度が悪い場合は, 主塔が傾いた状態でできあがる. このため, 主塔部材の両端面の平行度を保つために端面を切削して, 著者等はその切削した部材の形状を管理するための計測装置を開発した.

ここではその計測装置の一部である二次元位置センサーに平面形状の計測原理を応用したので紹介する.

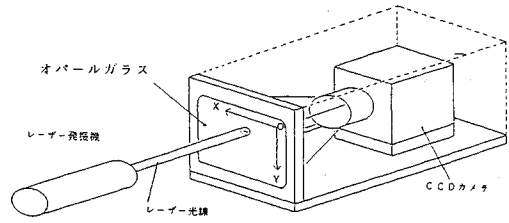


図-2 二次元位置センサーの構造

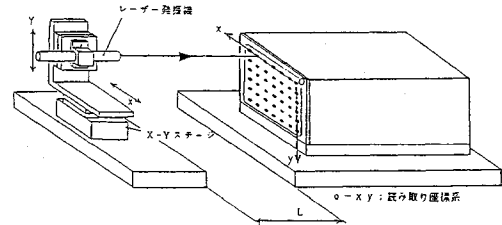


図-3 二次元位置センサーの検定装置

図-2はレーザースポットの変位を測定する二次元位置センサーである. この二次元位置センサーはレーザー光をオパールガラスに照射させ, その裏側から CCD カメラ(分解能: 512×512 ピクセル)でレーザースポットの重心を読み取る方式である. 本センサーの変位測定面はオパールガラス面である. なお, このセンサーではレーザースポットの形状を均一にして良質な画像を得るためにオパールガラスを用いた.

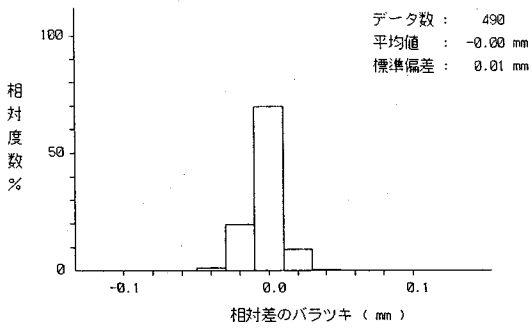
本センサーでは, オパールガラス面の読み取り座標系と CCD カメラのカメラ座標系との従属関係はキャリブレーションによって明らかにすることができるので, CCD カメラのセットを厳密に行わなくても良い. したがって, この二次元位置センサーは比較的簡単に製作することができる.

なお, 本 CCD カメラでは, 256 階調の画像データを基にレーザースポットの重心を計算している.

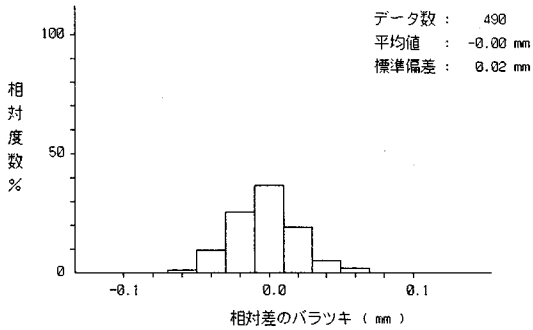
(2) 計測精度

ここでは本二次元位置センサーの測定精度を検証するため, 図-3のような検定装置を作成した. 本検定装置では, レーザー発振機を XY ステージ(位置決め精度: ± 0.01 mm, 移動有効範囲: $XY=100 \times 100$ mm)に取り付け, 二次元位置センサーの測定面にレーザースポットを照射させた. そして XY ステージを移動させた時, その移動座標値と二次元位置センサーの読み取り座標値の相対差を調べて測定精度を検証しようというものである.

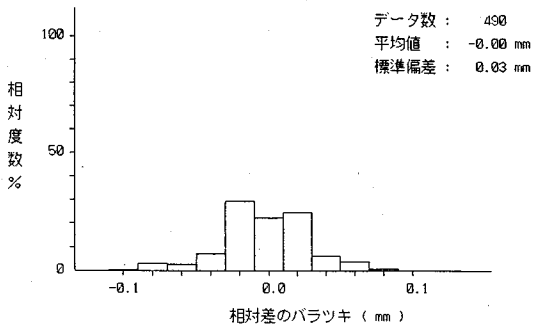
本検定では, レーザー発振機から二次元位置センサーまでの距離 L を 5 m, 10 m, 15 m の位置で行うことにした(使用範囲は最大 15 m). また, 各位置では, XY



(a) L = 5 m の場合の誤差分布



(b) L = 10 m の場合の誤差分布



(c) L = 15 m の場合の誤差分布

図-4 二次元位置センサーの計測誤差

ステージの移動範囲を 60×60 mm とし、10 mm 間隔で格子状にレーザースポットを照射させた(合計 49 箇所)。ここではこの作業(格子状にレーザースポットを照射させる)を 5 回繰り返した。

その結果、二次元位置センサーの読み取り誤差は図-4 のようなバラツキを示した。この誤差分布図では XY 座標値の相対誤差が同じような値を示していたので、それらを一括して表した。これによると、距離が 15 m 以内では同程度の誤差分布を示した。また、最大誤差は $L = 15$ m の位置で ± 0.1 mm であった。よって、この二次元位置センサーは 15 m 以内の範囲では ± 0.1 mm の

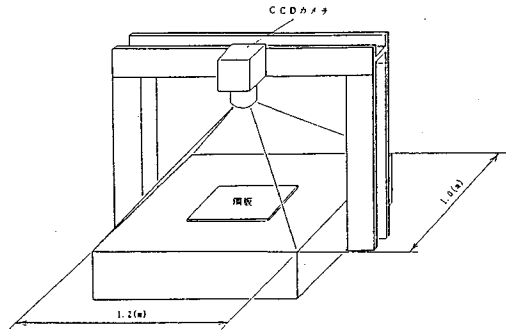


図-5 鋼板の形状計測装置

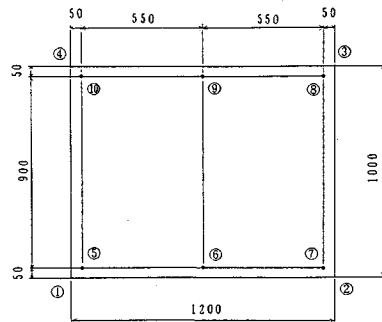


図-6 添接板

測定精度で変位を計測することができる。

以上のように、本二次元位置センサーは二次元形状の測定装置として活用することができるので、用途は非常に広いものと思われる。

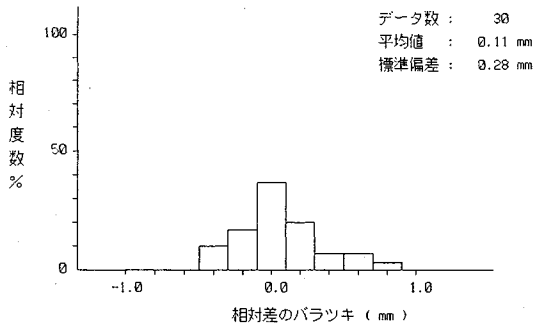
5. 鋼板の形状測定

(1) 計測装置

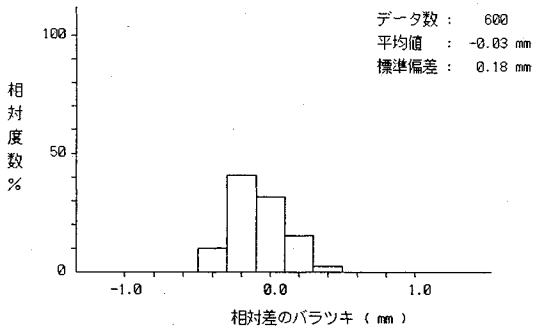
大型鋼構造物の主要部材の製作では、鋼板を切断し、それを溶接して I 型または箱型などの断面に組み立てている。この主要部材は添接板を介してボルトで連結される構造が多いため、接合部にボルト孔が明けられる。また、主要部材には二次部材を連結するためのガセットプレートなどのコネクションピースを取り付ける。このガセットにも連結用のボルト孔が明けられている。

著者等は添接板またはガセットプレートなどの形状を計測し、誤作のチェックをするシステムも開発した。本システムでは、CAD・CAM で作成した設計データと計測データを比較することによって誤作を早期発見しようというものである。

図-5 は本システムの計測装置である。この装置では 1.2×1 m までのサイズの鋼板の外形寸法とボルト孔位置を正確に計測することができる。なお、本システムでは CCD カメラ(分解能: 1280×1024 ピクセル)で取り込んだ画像データは 2 値化して処理をすることにし



(a) 外観寸法の誤差分布



(b) ボルト孔中心間距離の誤差分布

図-7 添接板の計測誤差

た。

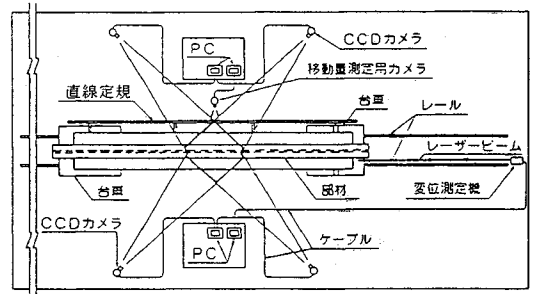
(2) 計測精度

本計測装置の検定では図-6 に示す添接板を測定することにした。測点は外観形状の4点(①~④)とボルト孔中心の6点(⑤~⑩)である。測定回数は5回繰り返すことにした。なお、画像処理では、外観形状の輪郭線を抽出し、これに近似直線を当てはめ、2つの直線の交点のカメラ座標値を外観の測点とした。また、ボルト孔中心はその重心のカメラ座標値を計算することにした。

ここでは、測定精度の検証として添接板の測点間距離(例えば①-②, ①-③などの寸法)をノギス(最小読み取り:0.02 mm)で計測した値と比較した。その結果を示したのが図-7 である。

図-7 (a) は外観形状の①~④の測点間の誤差である。この誤差の最大値は①-③で最大0.8 mmであったので、少なくとも外観形状は±1.0mm程度の計測は可能であることが判った。

一方、ボルト孔中心(⑤~⑩)の測点間の誤差は図-7 (b) のような誤差分布になった。最大誤差は±0.5 mm程度であり、図-7 (a) の外観寸法の測定誤差よりも小さい。これはボルト孔の輪郭形状の方が外観の形状よりも正確に加工されているために画像の認識率が高く、測定精度が向上したものと思われる。



注1) PC:パーソナルコンピュータ

図-8 大型鋼構造物の三次元計測装置

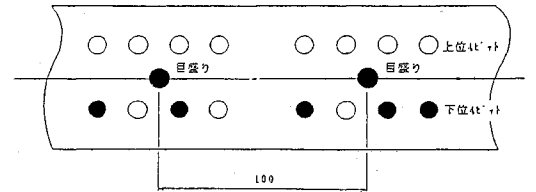


図-9 直線定規

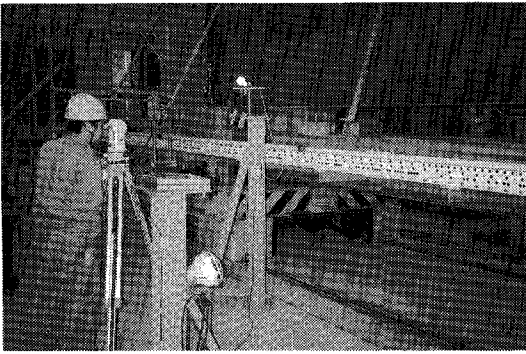
6. 直線移動量の測定

(1) 計測装置

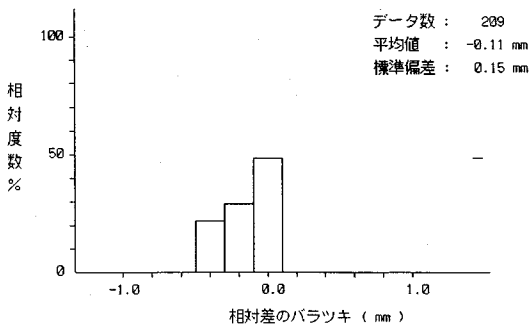
図-8 は橋梁部材等の大型鋼構造物の形状を計る三次元計測装置である。本計測では被測定物を台車上に載せ、4台の CCD カメラの測定範囲に被測定物を移動させて全体の三次元形状を計るシステムである⁶⁾。この場合、被測定物の直線移動量(最大15 m程度)を計測する必要がある。この直線移動量の計測では、被測定物が重量物なのでマグネスケールまたはパルスジェネレーター方式のような衝撃に弱い測長器は好ましくない。また、台車に載せられた被測定物は計測が完了するとそのまま次の工程に進むので、計測法は非接触型が望ましい。なお、この直線移動量は被測定物の全体の長さの精度に影響するので高精度の測定が要求される。ここでは測定精度として1/30000(15 mで±0.5 mmの誤差)を目標としている。

上記の趣旨に基づいて、本装置では図-8 のように台車に直線定規を取り付け、これを移動量測定用カメラ(小型の CCD カメラ:分解能512×512ピクセル)で読み取る方式にした。この方式は文献6)で紹介した計測装置(台車上に配置した移動量算出用基準点を部材計測用の2台の CCD カメラで三次元計測して直線移動量を求めていた)を改良したものである。

図-9 は直線定規の構造である。この定規では幅の中心に100 mmピッチで円パターンを目盛りとして刻んだ。また、目盛りの上下にはその実寸法を表す数値コード(合計8個の円パターン)を取り付けた。この数値コードは8ビットの2進表示パターンで上の四個は上位4



写真一 直線移動量の計測風景



図一〇 直線移動量の相対差の分布

ビットである。また下の円パターンは下位4ビットを示す。

本直線移動量の計測装置では、この直線定規の目盛りの刻み面を測定面としてキャリブレーションした。

また、本計測装置では、CCDカメラで直線定規の目盛りと数値コードを同時に画像データとして取り込み、目盛り中心のカメラ座標値とその数値コードが自動認識できるようにした。なお、CCDカメラの画像データは高速演算を行うため全て2値データで処理をした。

(2) 計測結果

写真一は橋梁の部材形状測定（主桁の測定）の際の直線移動量を計測している状況である。ここでは主桁の部材数が60本で構成されている橋梁を測定した。各部材長は13~17mの範囲である。本測定では各部材の全体形状を計測するため4~6ステップに分けて直線移動（最大15m）させた。

本計測では、この計測装置の信頼性を確認するため、写真一のように直線定規と平行にスチールテープを張り、それをセオドライトで読んで直線移動量を別途測定した。

図一〇は本計測装置で測定した直線移動量と、セオドライトで測定した直線移動量の両者の相対差の分布図である。これによると、平均値が-0.11mm、また $3\sigma = 0.5\text{ mm}$ (σ :標準偏差=0.15mm)という結果が得ら

れた。両者は良く対応しているのが判る。

7. 結 論

本文ではCCDカメラを用いて平面形状を効率良く、しかも正確に計測する方法について述べた。また、本文ではその実用例を3つ紹介した。

まず初めに、レーザー光をオパールガラスに照射させ、そのスポットの重心座標値を計測する二次元位置センサーを紹介した。本センサーは、測定範囲が15m（切削部材を計測する範囲）で最大 $\pm 0.1\text{ mm}$ 以内の変位（変位の測定有効範囲 $60 \times 60\text{ mm}$ ）が可能であることが判った。この二次元位置センサーは主塔部材の切断面の端面形状および平行度（ $\pm 0.1\text{ mm}$ 程度の読み取り精度が必要）の変位測定装置として開発したもので、極めて実用的であることが証明できた。

次に、加工された鋼板の形状を測定し、誤作を早期発見するシステムの計測装置を紹介した。本装置では $1.2 \times 1\text{ m}$ の大きさの鋼板の形状を輪郭形状では $\pm 1.0\text{ mm}$ 以内、またボルト孔では $\pm 0.5\text{ mm}$ 以内で計測できることが判った。

最後は橋梁部材の三次元測定システムの一部である直線移動量の測定装置について紹介した。この測定では約15mの測定範囲（橋桁部材を計測する範囲）でスチールテープの目盛りをセオドライトで読んだ値と比較すると最大 $\pm 0.4\text{ mm}$ 程度の差であり、装置の信頼性が高いことが確認できた。

以上のように、本計測法は

- 1) 非接触型であるので衝撃に強く、重量物の計測等に適している。
- 2) 比較的精度の高い測定が可能である。
- 3) 測定面とカメラの位置関係は簡単にキャリブレーションできるので、カメラの据え付けが容易である。
- 4) 計測装置は比較的安価である。
- 5) 被測定物の形状が複雑で、しかも大小様々なものでも適用できるので用途が広い。
- 6) CCDカメラはパーソナルコンピュータで簡単に制御することができる。
- 7) CCDカメラの視野に入った多数の測点を同時に計測できるので測定効率が良い。

等の特長があるので、今後は多方面にも活用したいと考えている。

参 考 文 献

- 1) Yoshitaka Kozakura, Kunio Torii and Koji Takada: A Study of the Errors of Steel Bridge Members and their Effect on the Accuracy of their Shop Assembly, Proc. of JSCE, Structural Eng./ Earthquake Eng., Vol.2, No.1, pp.245S~254S, April, 1985.
- 2) 鳥居・小椋・高田・長谷川: 鋼構造の完成検査法に関す

- る一提案, 土木学会論文集, 第 361 号／VI-3, pp. 79～85, 1985 年 9 月.
- 3) 鳥居・高田・豊山・藤野・栗田・小櫻：鋼橋の仮組立てを省略するためのシステムの開発について, 長岡技術科学大学研究報告第 8 号, pp. 77～82, 昭和 61 年 10 月.
 - 4) 小櫻・鳥居・高田：CCD カメラによる海洋構造物の形状測定, 土木学会論文集, 第 391 号／VI-8, pp. 215～219, 1988 年 3 月.
 - 5) 深谷・宮島・出嶋・片山・小櫻・白石：部材及び仮組立の検査に関する自動化システム検証実験報告, 横河橋梁技報第 16 号, pp. 46～60, 1987 年 1 月.
 - 6) 小櫻・鳥居・高田・長谷川：鋼橋の完成検査システムについて, 土木学会論文集, 第 397 号／VI-9, pp. 159～165, 1988 年 9 月.
 - 7) 小櫻・片山・藤原・深谷・佐々木：鋼橋の完成検査システムに関する検証実験報告, 横河橋梁技報第 18 号, pp. 66～72, 1989 年 1 月.
 - 8) 小櫻：鋼橋の仮組立て検査の省力化について, 鉄構技術, 第 2 巻 10 号, pp. 64～67, 1989 年 4 月.
 - 9) 渡辺・鳥居・小櫻：鋼橋仮組立てシミュレーション解析モデルの解法に関する研究, 土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集, 第 1 部, pp. 680～681, 1990 年 9 月.
(1991. 2. 1 受付)

A TWO DIMENSIONAL MEASURING SYSTEM USING A CCD CAMERA AND ITS APPLICATION

Yoshitaka KOZAKURA, Kunio TORII and Kohji TAKADA

It is the best way of measuring a body two dimensionally to measure it directly using steel tapes when the shape of it is simple enough, but this method is not applicable when the shape of the target is complicated. In this case, a measuring method of touching type which is performed using magnescale, is usually adopted. This method needs a lot of manpower and furthermore has a defect of being fragile against mechanical shocks.

The authors have developed an efficient two dimensional measurement system using a CCD camera which solved almost all of the problems the traditional methods carry with. This system has already been made practical use in the process of measuring a large size members of steel structures in a manufacturing shop. This paper presents the principle of this system and the way of calibration as well as several illustrations.