

44. 鉄骨建入レーザー自動計測システム

大成建設(株)：神崎 正・中野 孝一

*松本三千緒

1. はじめに

近年、高層ビルの施工では積層工法、ブロック化工法、大型設備ユニット工法、リフトアップ工法などの様々な新工法が採用されはじめている。これらは工期の短縮・省力化などを目指したものであり、今後もこの傾向は進展していくものと予想される。しかし、このような状況の中で施工中の建物や部材の位置を計測する技術には大きな進展が見られず、

依然として人手による計測(測量)に主体がおかれている。本論文で紹介する「鉄骨建て入れレーザー自動計測システム」はこのような要求に応える手段として、鉄骨建て入れ時や歪み直し時の位置計測を人手によらず自動的におこなうシステムとして開発したものであり、従来の人手による計測方法に比べ短時間かつ高精度に測定でき、また省力化・省人化に対して大きな効果を有するものである。

本システムは三菱重工

横浜ビル一期棟新築事業所で採用されたT-U P工法の一環として開発したものであり、現場での実験を通じて精度・測定時間・操作性などの検証をおこない実用化したものである。本文では、その技術概要と実験内容について報告する。

2. 既存の計測方法

従来、ビルを建造していく過程での計測(測量)作業には大きく分けて、鉛直方向への基準墨上げ作業と鉄骨



写真-1 建築中の三菱重工横浜ビル

建て方階でおこなう鉄骨位置決め作業がある。基準墨上げ作業では、専門の測量技師が下げ振り（おもり）や光学鉛直器を使用し、工事の進行に合わせて低層階に設けた基準墨を上層階に移設している。また、鉄骨の建て入れや歪み直し時の位置決め作業では、巻尺やレベルやトランシットを用い、人手による測量をおこなっている（写真-2）。しかし、鉛直方向への基準墨上げ作業では、鉛直距離が長くなるにつれて下げ振りの設備が大がかりになること、光学鉛直器では人が望遠鏡を視準する関係から計測で



写真-2 従来法による鉄骨建て入れ位置決め作業

きる階数は4～5階が限度であり、鉛直器を盛り変える必要性から誤差の累積が生じる等の欠点があった。また鉄骨の位置決め作業では測量作業に人手がかかると同時に鉄骨の上部（柱頭）に測量員が登りスケールをあてたり、測量用の棒尺を出すなどの作業が必要であり安全作業への配慮が必要とされ、かつ歪み直し中の鉄骨以外の鉄骨の動きを同時に見ることができないなどの欠点も多かった。さらに、建設中のビル自体が風などにより揺れや振動をおこすため、これらの点を配慮して測量作業をおこなう必要があった。

3. システムの概要

3-1 システムの構成

本システムは、上層階に対して鉛直方向に基準墨を上げるためのレーザー鉛直装置と建て方中の鉄骨の位置を計測する為のレーザースキャニング装置で構成される（図-1）。レーザー鉛直装置は先行コアと呼ばれる鉄骨の4隅の地上階に配置される。また、当作業所で採用されたT-UP工法では最初に最上階部を構築し、施工段階にあわせてリフトアップしていく方式であるため、最上階部（ハット梁）に仮設置された屋根の下で鉄骨建て入れ作業がおこなわれる。そこで、鉄骨の位置を計測するためのレーザースキャニング装置は、この屋根部中央に取り付けることで建て方中のコア部の鉄骨を上部より測定する方法を採用した。また、これらの装置から得られる情報はリアルタイムに施工に反映させる必要があるため、コンピュータなどの演算・

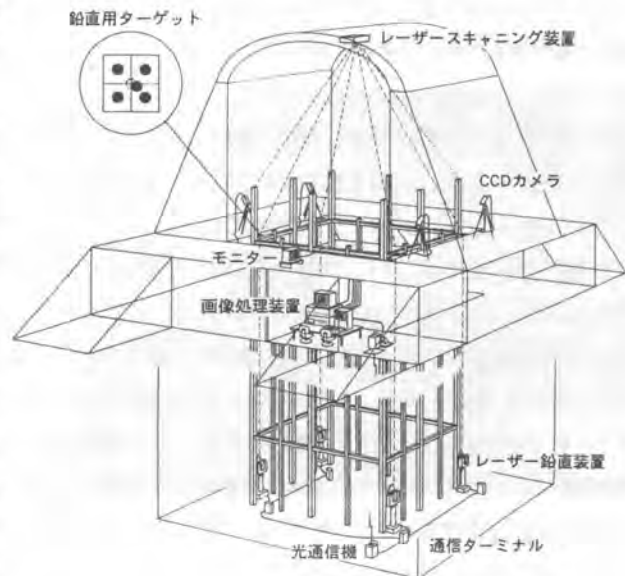


図-1 鉄骨建て入れレーザー自動計測システムの構成

表示装置はハット梁内部の計測室に配置し、さらに鉄骨の建て方をおこなう施工場所には鉄骨位置表示用のモニターテレビを設置した。地上階に設置した4台のレーザー鉛直装置と計測室内部のコンピュータ、ハット梁屋根部のレーザースキヤニング装置はネットワークを通じて連携され、相互にデータ交換をおこなっている。

3-2 システムの動作原理

本システムはレーザー鉛直装置とレーザースキヤニング装置で構成される。レーザー鉛直装置は地上階の基準墨4点を約4秒の鉛直精度で上方に向けてレーザー照射するものであり、ハット梁上4箇所に設置された半透明のターゲット板に赤色のレーザースポットとして投影される。この投影されたレーザースポット4点がレーザースキヤニング装置を動作させる時の基準点となる。レーザースキヤニング装置はこの4点のレーザースポットを利用して、まず自分自身の位置を把握した後に鉄骨柱頭位置の計測をおこなう。以下この過程を順を追って記述する。

① レーザースキヤニング装置位置の算出原理

一般に座標の分かっている点が3点あればその点を利用して座標未知点を求めることができる。図-2でA1、A2、A3が座標の分かっている3点で、A0が求める座標未知の点とすると、A0から他の3点を見たときの各線分S1、S2、S3の挟角 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 、 $\alpha 3$ がわかればA0点の座標を求める事ができる。まず、以下の3式を解く事により線分S1、S2、S3を求める。

$$S2^2 + S3^2 + 2 * S2 * S3 * \cos \alpha 1 = l1^2$$

$$S3^2 + S1^2 + 2 * S3 * S1 * \cos \alpha 2 = l2^2$$

$$S1^2 + S2^2 + 2 * S1 * S2 * \cos \alpha 3 = l3^2$$

ここで、 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 、 $\alpha 3$ 、 $l1$ 、 $l2$ 、 $l3$ は既知の量である。次に、求めたS1、S2、S3と既知点の座標を以下の3式に代入し、

$$(X1 - X0)^2 + (Y1 - Y0)^2 + (Z1 - Z0)^2 = S1^2$$

$$(X2 - X0)^2 + (Y2 - Y0)^2 + (Z2 - Z0)^2 = S2^2$$

$$(X3 - X0)^2 + (Y3 - Y0)^2 + (Z3 - Z0)^2 = S3^2$$

この連立方程式を解くことにより求める未知点A0 (X0, Y0, Z0)の座標が求められる。

レーザースキヤニング装置は内部に画像処理用CCDカメラ・光波測距儀・レーザー発振管を備えており、これらの光軸が同一線上になるようにハーフミラーを使って配置している。そして、この光軸は2つの回転ミラーによって約120度ステラジアン範囲をスキヤニングできる様に調整され、このときの回転ミラーの角度は高分解能のレーザーエンコーダにて4秒の精度で設定できるようになっている。そして、内蔵のCCDカメラと画像処理機で鉛直に上げられたレーザースポットを画像中心に誘導し、このときの2つのミラー角から挟角を算出している。実際には、レーザースポットは4点上がっているため、4点から3点を選ぶ組み合わせは4種類となり、これらの平均をとって装置位置としている。この他、光波測距儀を内蔵しているので直接S1、S2、S3を測定して装置位置を求めることもできる。

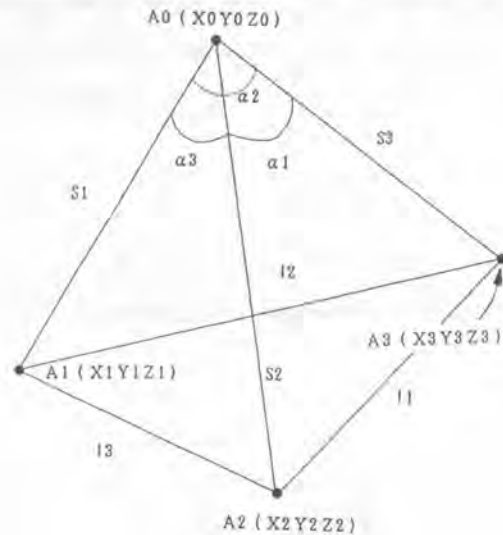


図-2 既知点3点と未知点との関係図

② 鉄骨柱頭位置の算出原理

レーザースキャニング装置より鉄骨の上部中心（柱頭）位置を算出する原理を図-3に示す。A0点の位置は前述の計算から既知である。この点A0から目的とする鉄骨の柱頭までの距離Lとその視線の水平角 α 、鉛直角 β がわかれば鉄骨柱頭の3次元位置を求める事ができる。

ここで、水平角基準方向からの角度 α や鉛直角 β は前述の回転ミラーの測角値から求められるが、スキャニング装置の設置位置は揺れや振動のため必ずしも設計上の設置位置にあるとは限らない。実際には前述の過程で求めた装置位置と既知点A1、A2、A3の関係からその瞬間の装置の設置位置の誤差（傾きやねじれ）を算出し、エンコーダでの測角値を補正して計算をおこなっている。

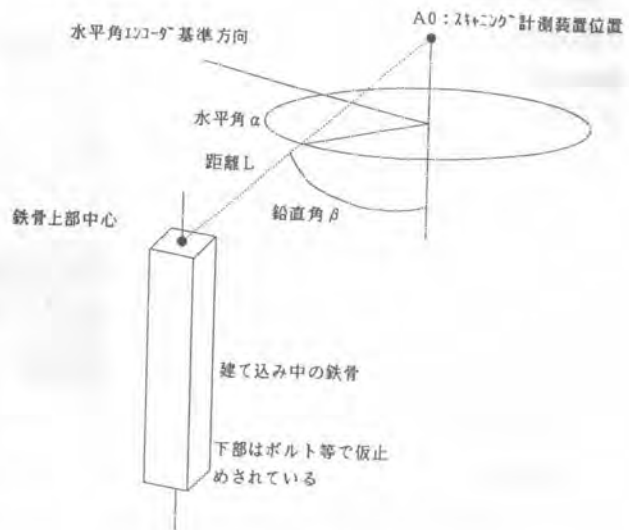


図-3 鉄骨上部中心位置の算出図

4. 実施例

三菱重工横浜ビル1期棟新築工事共同企業体（作）において実施した例を示す（写真-1）。レーザー鉛直装置は隣接する横浜ランドマークタワーにて実証済であるため、ここでは工事の初期より単独で運用を開始した。レーザースキャニング装置については設置・調整・各種試験・性能評価等をおこなった後に実証実験および試験的な運用をおこなった。写真-3はハット梁内に設けられた計測室での測定作業風景である。ここには、レーザースキャニング装置を駆動したりレーザー鉛直装置を駆動するための制御用コンピュータや解析用コンピュータ、画像処理装置、ネットワーク装置等を集中配置している。ここからの操作により、地上階に設置された4箇所のレーザー鉛直装置が遠隔操作されハット梁上に設置されたターゲット板、CCDカメラから必要なデータが収集される。また、ハット梁の屋根部中央のレーザースキャニング装置もここから遠隔操作され画像データ、測角データ等が収集される様になっている。そして、収集したデータは画像処理器、解析用コンピュータなどで演算解析され画面表示されるとともに次の動作指示がネットワークを通じてこれらの機器に伝送される。



写真-3 計測室での作業風景

写真-4は地上にてレーザー反射シートを吊上げ前の鉄骨に取り付けている様子である。この後、鉄骨は施工階に吊上げられて建て込まれる。レーザースキャニング装置からはこの鉄骨に向けてレーザーが照射され、同時に画像処理用CCDカメラにその映像が捉えられ、位置計測がおこなわれる。このビルはコア先行型の工法であるため、レーザースキャニング装置の測定対象はコア部の鉄骨2本であり、外周部の鉄骨の計測は行っていない。スキャニング装置から出されるビーム幅はある程度広げているため、建て込まれた鉄骨が設計位置になくともレーザーは反射シートに照射

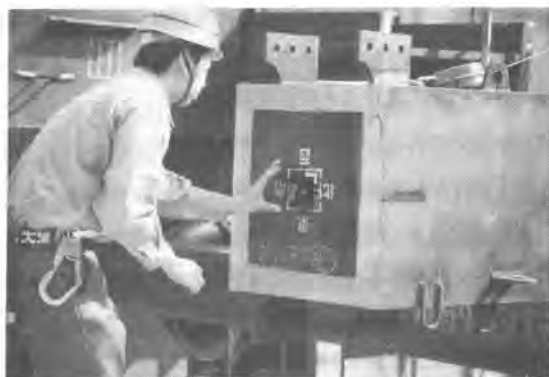


写真-4 鉄骨への反射シート取り付け

されCCDカメラには反射光が捉えられるようになっている。実際のビーム幅は鉄骨付近で約30cm程度になるように調整した。レーザーの照射された反射シートは全面が発光することになるが、画像処理装置でその重心位置を算出するため、画面中心からのずれ量は正確に求められる。

写真-5はテレビ画面に鉄骨の設計位置からのずれ量が表示されている様子を示している。この写真は最上階となる34階でのコア部鉄骨の歪み直し中のものである。建て入れ直後は数十ミリのずれがあるが、歪み直し作業が進むにつれて画面上にはほぼリアルタイムにその変位が映し出される。実際に歪み直し作業をおこなっている施工場所にもモニターテレビが設置されているため、作業員はモニターを見ながら作業を進められる。しかも、歪み直しを行なっている鉄骨以外の移動も同時に分かるため、作業の手戻しなどを極力押えることができる。

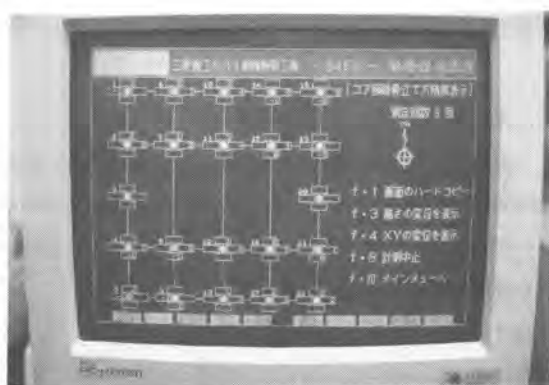


写真-5 画面に表示された鉄骨位置

5. 実験結果について

本システムは揺れなどによる測定誤差を受けないように、基準点から自分自身の位置を割り出しながら目的とする鉄骨の位置を計測する方法をとっている。したがって、短時間で広いエリアを視準する必要があるため、ミラーを回転させてレーザーやCCDカメラの光軸を移動させており、最終的な計測速度は約0.8秒となっている。その結果、揺れ量の大きさには影響されませんが、揺れの速度が早い場合には誤差を生じる恐れがあるため、計測値は移動平均をとって表示するようにした。図-4は歪み直し中の鉄骨位置の画面出力例であり、歪み直し作業はこの数値の変化を見ながら各鉄骨が目標範囲に入るように誘導される。また、本システムの相対的な精度を見るため、鉄骨上の反射シートを鋼尺を用いて100mm～500mmの範囲で段階的に移動させ、表示値と

の誤差をテストしたが、反射シート位置と表示値との差は±1mm以内におさまっていた。図-5は32階のNo13の鉄骨上で反射シートを100mm200mmの2段階で同一方向に移動させた時の本システムの測定結果である。このテストは本システムの機械的な傾向を見るためにおこなったものであり、どの鉄骨においても同様の結果が得られた。したがって、本システムの要所となる2枚の回転ミラーとCCDカメラの光軸との関係から生じる光学的な歪み誤差は、ほぼ無視出来るものと判断される。

6. 今後の課題

今回の開発と現場での試行により鉄骨の建て方作業の効率化と省力化に本シ

テムが極めて有効であることが確認された。今後は、さらに現場での運用を進め、測定データの蓄積と精度の向上をおこなっていく予定である。そこで今後、特に開発を進めなければならない課題として、タワークレーンを用いた既存の工法に適用していく為の改良があげられる。この場合、設置場所が回転などの移動を伴ったり、揺れや振動が激しい場所でも測定できるようにする必要があり、課題としては

- ・システムのスキャニング速度の向上
- ・測定範囲の広角化
- ・エンコーダ等測角機能の精度向上

などがあげられる。また現在、本システムは鉄骨柱頭位置の計測を主体としているが、これを制御装置と連携させた鉄骨の自動位置決めシステムへの発展も考えられる。今後は、このような将来の課題の検討も含めてシステムの開発を進めていく予定である。



図-4 歪み直し中の鉄骨位置の画面出力例

No13 X=-2 Y=4 Z=3 93-05-20 18:15:03	Y方向 現位置
No13 X=-2 Y=4 Z=3 93-05-20 18:15:05	
No13 X=-2 Y=4 Z=3 93-05-20 18:15:08	
No13 X=-2 Y=104 Z=3 93-05-20 18:23:49	Y方向100mm移動後
No13 X=-2 Y=103 Z=3 93-05-20 18:23:52	
No13 X=-2 Y=104 Z=3 93-05-20 18:23:55	
No13 X=-2 Y=203 Z=3 93-05-20 18:29:11	Y方向200mm移動後
No13 X=-2 Y=204 Z=3 93-05-20 18:29:14	
No13 X=-2 Y=204 Z=3 93-05-20 18:29:17	

図-5 反射シート移動時の測定データ