

鉄骨工事における自動化施工技術に関する開発 揚重作業の効率化と安全性確保

鈴木 信也

筆者らは、建設現場の生産性向上を目指し、建物がさまざまな部材を現場で組み立てることで建てられること、即ち「建物は接合部のかたまりである」ことに着目して、接合作業と接合に係るさまざまな現場作業に、新たな構工法・自動化技術などを用いて生産性を向上させる取り組みを行っている。

本報では、鉄骨工事における接合作業や接合に係る部材に関する技術として、吊荷旋回制御装置、鉄骨柱の建入自動計測・建入れ制御装置の有効性について技術開発を行い、実際に現場で検証した結果を報告する。

キーワード：鉄骨工事，自動化施工，自動計測，鉄骨柱の自動建入計測・自動建入れ制御装置，吊荷旋回制御装置

1. はじめに

建設業の労働生産性は、製造業における労働生産性が年々増加していることに反して1990年以降低下傾向にあり、近年では製造業の半分以下になっている。この要因として、バブル経済崩壊後に始まった過当競争による建築受注金額の低下と、建築現場における省力化・機械化の遅れに伴い、建設業が労働集約型産業のまま停滞していることが考えられる。さらに、建設業に従事する就業者は他産業に比して高齢化が進んでおり、また、熟練工不足が建築生産の制約となっていることから、労働集約型産業からの早期脱却が望まれる。

筆者らは、建設現場の生産性向上を目指し、建物がさまざまな部材を現場で組み立てることで建てられること、即ち「建物は接合部のかたまりである」ことに着目して、接合作業と接合に係るさまざまな現場作業に、新たな構工法・自動化技術などを用いて生産性を向上させる取り組みを行っている。

本報では、鉄骨工事における接合作業や接合に係る部材に関する技術として、吊荷旋回制御装置および鉄骨柱の建入自動計測・建入れ制御装置の概要と、実際に久留米大学基礎3号館（図-1）において在来工法との比較検証を行った結果について報告する。



TS設置状況

鉄骨工事施工状況

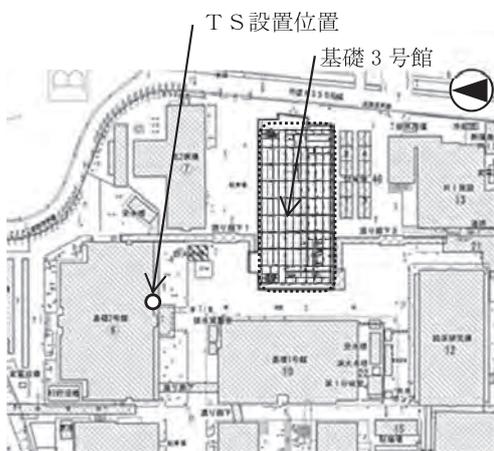


図-1 現場全体図

2. 鉄骨柱の自動計測・建入れ制御システム概要

(1) 鉄骨柱の自動計測・建入れ制御システムの機構
一般的に鉄骨の建入れ計測は、従来のトランシットを使用した2方向からの計測（以下「在来工法」）や鉄骨柱にターゲットを貼りトータルステーション（以下「TS」）を使用した計測方法が多く活用されている

が、いずれも計測機器は建方階に設置しており、吊足場や安全ネットなどからの視認性の悪さや盛替え作業が発生する。「鉄骨柱の自動計測・建入れ制御システム」は、視認性の悪さや盛替え作業の発生を回避するため、「見下げ計測」としている。

鉄骨機器に鉄骨図の3次元データを搭載した自動視準 TS により、設計データと実際に計測した建入れデータとの差分に基づき、鉄骨柱接合部に取りつけた装置を自動制御するシステム(図-2)である。また、鉄骨柱接合部に建入れ制御治具と自動建入れ制御装置(以下「本装置」)を取り付け、自動計測システムにより計測した鉄骨柱頂部の位置情報から、自動で鉄骨柱を設計位置に建起こすシステムである。

自動建入れ計測システムは、3次元計測において汎用的に使用されている TS を用い、TS は計測する鉄骨柱の頂部に設置した反射プリズムより高い位置に設置する。TS の自己位置計測指示や、鉄骨柱の建方精度計測開始や設計データと計測結果の差分から建入れ精度を $\pm 1\text{ mm}$ 以内に誘導する自動制御開始指示などの送受信はモバイル PC を用いる。モバイル PC のディスプレイを写真-1 に示す。計測結果の差分データ

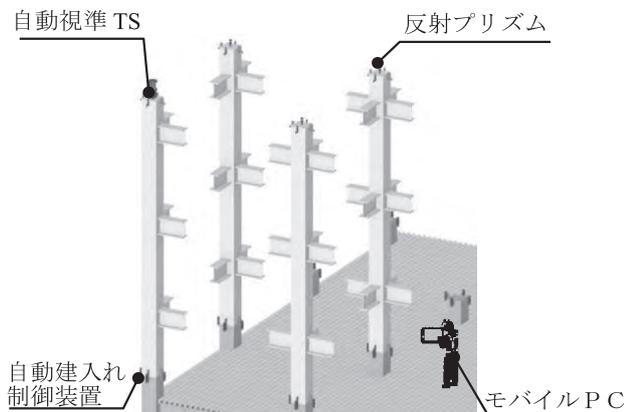


図-2 建入れ制御システム全体イメージ図



写真-1 モバイル PC ディスプレー

はモバイル PC から無線 LAN で本装置へ送られ、一連の計測作業が終わるまで計測者は一切の操作が不要となる。

本装置の機構を図-3 に示す。建入れ制御治具の上部に台座を介して本装置を設置し、倒れ制御ボルトを自動で回し 98 kN (10 t) までの鉄骨柱の建入れ制御を自動で行うものである。倒れ制御ボルトの上部にモーター、減速機、シャフトを連続配置することで、最小限の重量になるように構成されている。本装置の重量は約 10 kg である。

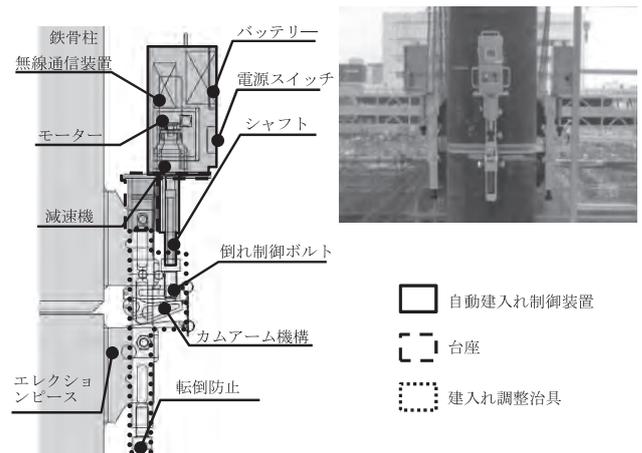


図-3 自動建入れシステムの機構

(2) TS の設置箇所の検討

計測する反射プリズムよりも高い位置に設置する TS の設置箇所は、近隣建物屋上、鉄骨柱頂部もしくは TS 専用の支柱が考えられる。鉄骨柱頂部に設置する TS は仮置きされた鉄骨柱に地上で設置するため、写真-2 に示す常時鉛直を保つ機構の治具に取り付けて揚重する。TS 専用の支柱(写真-3)への設置は支柱内を自昇降するテーブルに設置する。いずれの設置方法も高所作業が不要であり、計測作業の安全性が向上する。



写真-2 TS 鉛直保持治具



写真一3 TS専用支柱

(3) 柱頂部や専用支柱の振動

柱頂部やTS専用の支柱への設置は、鉄骨建方階の作業による振動や風速により、計測精度に悪影響を及ぼす事を避けなければならない。そこで、当該作業時の柱頂部や専用支柱頂部の振動を計測した。いずれも変位は加速度時刻歴の2重積分から求めた。

柱建方直後の最大変位は、X方向で0.4mmであり、TSの斜距離精度である±1mm以下である事が確認できた。また、デッキ仮置き時の最大変位は、Y方向で1.2mmと斜距離精度とほぼ同程度であり、柱の歪直し時の計測等に大きな影響を与えるものではないと判断できた。ただし、梁取り付け時には、衝撃によりY方向の最大変位が1mmを大きく超える瞬間があり当該作業時は、計測精度に悪影響を及ぼす可能性が示唆された。一方、TS専用支柱頂部の最大変位は1mm以下と推測され、計測結果に大きな影響を与えるものではないと判断できた。

(4) 建入れ制御量算出方法

柱の倒れの模式図を図一4に示す。柱の倒れが θ° である場合、本装置の制御量は下式で求めることができる。

$$H = X \times D \div L1 \text{ (mm)}$$

H: 建入れ制御量 (mm) X: 柱のずれ量 (mm)

L1: 柱長 (mm) D: 建入れ制御治具間距離 (mm)

自動建入れ計測システムにより計測した柱のずれ量と設計情報(柱長、柱幅)から建入れ装置の制御量を自動算出することができる。

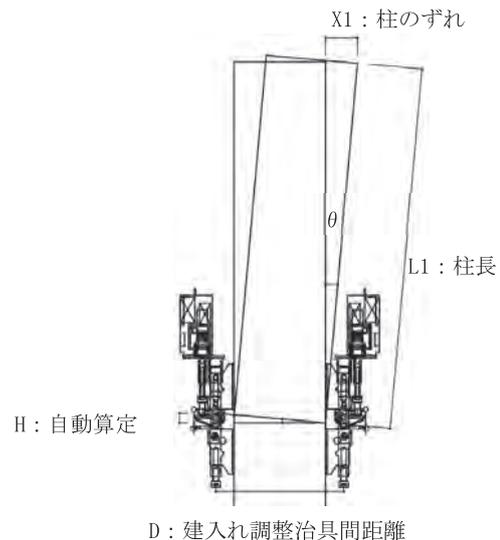
(5) 必要トルクの算出方法

倒れ制御ボルトの必要トルクTは下式により求めた。

$$T = N \times d \times K = 87.3 \text{ (Nm)}$$

N: ボルト軸力 (kN) = 29.4

d: ボルト軸径 (m) = 0.033 m



D: 建入れ調整治具間距離

図一4 柱の倒れ模式図

K: トルク係数=0.09

1/100減速機(トルクロス5%を想定)を用いたモーターの必要トルクは、約0.92Nmとなる。モーターは、ピークトルク1.07Nm、定格トルク0.48Nmのモーターを選定した。

(6) 制御の検討

自動計測システムによる柱位置の計測結果から、建入れ制御量を自動計算し、無線LANによりモバイルPCから本装置に動作信号が送信され、X方向とY方向の自動制御が始まる。汎用的に使用されている自動視準トータルステーションを用いて計測を行っているため、一回の自動視準計測に20秒程度かかる。一方向制御毎に計測を行うと制御回数分の計測時間がかかるため、一回の計測で二方向同時に制御をして、計測時間の短縮を図っている。自動建入れ制御は、柱の建入れ精度が±1mm以下になった時点で自動停止する。本装置の設置状況を写真一4に示す。

本装置は、モーターの温度、電圧、トルクを監視し



写真一4 自動建入れ制御装置

ており、許容値を超えた場合、異常信号をモバイルPCに送信し、動作が止まる安全装置が組み込まれている。

(7) 制御装置の検討

建入れ制御治具は鋳物あるいは鍛造のため、大きさにばらつきがある。そのため、台座と本装置の間で遊びを設ける必要がある。台座と本装置との間に前後方向長穴を設け、倒れ制御ボルトの位置に合わせて本装置の位置制御ができるようにして、本装置と建入れ制御治具の芯ずれに対応できるようにした(写真—5)。



写真—5 自動建入れ装置の台座

本装置と建入れ制御治具を連結するシャフトは、倒れ制御ボルトの六角凹型に合わせ、押付けバネ内蔵の六角ボルトで計画したが、倒れ制御ボルトは、カムアームに取り付いているため、シャフトが本装置から垂直になるとは限らない問題が発生した。そこで、押込みに合わせて角度が変化するように、シャフト上下端部をボールポイント形状にして、建入れ制御ボルトの角度の変化に追従可能とする事で、スムーズにモーター回転を制御治具に伝達できる機構としている。

3. 吊荷旋回制御装置の概要

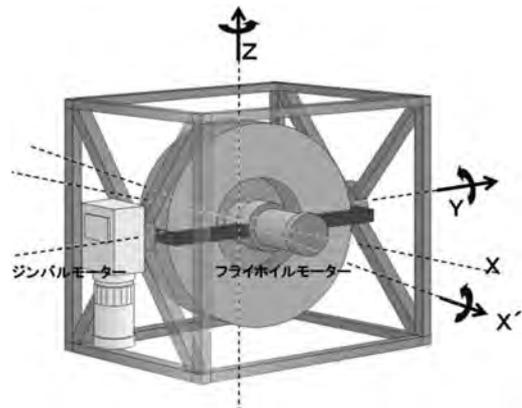
(1) 制御の検討

一般に、建設工事では鉄骨やカーテンウォールなど様々な資材をタワークレーンを用いて揚重し、取り付ける作業が行われている。しかし、風の影響やクレーンの動きに伴う慣性力によって吊荷が旋回することが多くあり、安全面や作業効率の改善が求められている。この様な課題の克服に向け、タワークレーン作業の更なる効率化と工期の短縮、及び安全性の向上を目指して様々な技術開発が行われ、ジャイロトルクにより吊荷の方向制御などを行うコントロールモーメントジャイロ技術などの高度な制御技術の導入も試みられている。

ジャイロトルクによる吊荷の方向制御の能動制御にカラートラッキング手法を用いて、吊荷を目的の位置で正確に静止させられる旋回制御装置を開発した。

(2) ジャイロ機構を用いた吊荷旋回制御装置

ジャイロ機構(図—5)を用いた旋回制御方法に、受動制御と能動制御がある。受動制御は、外力吊荷が外力によりz軸回り回転した場合、ジンバル軸(y軸)を回転し、吊荷の旋回を抑制する。それに対し、能動制御は、ジンバル軸(y軸)を回転させることで、吊荷をz軸方向に旋回させることができる。

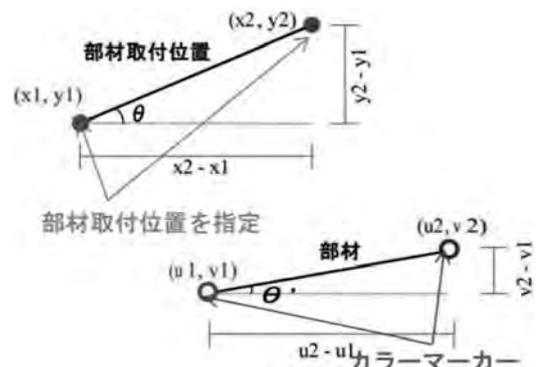


図—5 ジャイロ機構

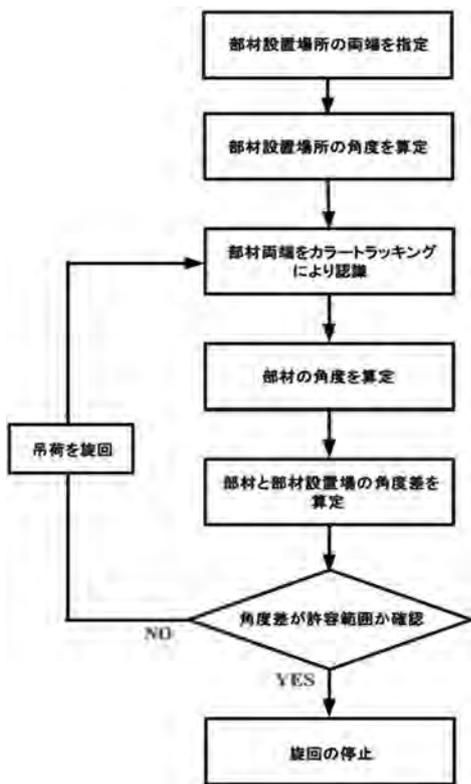
(3) カラートラッキング手法を用いた能動制御

開発にあたっては、吊荷位置と部材取付け位置の角度の把握が重要となる。そこで、部材取付け位置の角度については、タワークレーンジブトップのカメラ画像をもとにマウスなどを用いて部材取付け位置の両端をマーキングし、吊荷位置については吊荷旋回制御装置にマーカーを設置しカラートラッキング手法を用いることにより把握する。

吊荷の自己位置は、カラートラッキング手法を用いて設計座標と実測位置から吊荷旋回角を演算し、演算結果からジンバル軸を傾斜させ、吊荷を取付位置と平行に旋回制御を行う(図—6)。開発した吊荷の自動旋回制御手法は、ジャイロ機構を用いた装置とカラートラッキング技術を活用した手法であり、アルゴリズムに大きな特徴がある。



図—6 旋回制御角度



図一七 吊荷旋回アルゴリズム

(4) 吊荷旋回制御の吊荷位置把握アルゴリズム

吊荷旋回制御のアルゴリズムを図一七に示す。

(a) 部材設置場所の両端を指定

タワークレーンジブトップのカメラ画像上で、部材取付け位置の両端を指定する。

(b) 部材取付け角度を算定

部材設置場所の両端の座標を $(x1, y1)$, $(x2, y2)$ とすると、部材設置場所の角度 θ を

$$\theta = \tan^{-1}((y2 - y1) / (x2 - x1))$$

として算定する。

(c) 取付け部材両端をカラーラッキングによる認識部材の両端に異なるカラーマーカ（カラーラッキング対象物）を設置する。

(d) 取付け部材の角度を算定

部材両端の座標を $(u1, v1)$, $(u2, v2)$ とすると、部材取付け場所の角度 θ' を

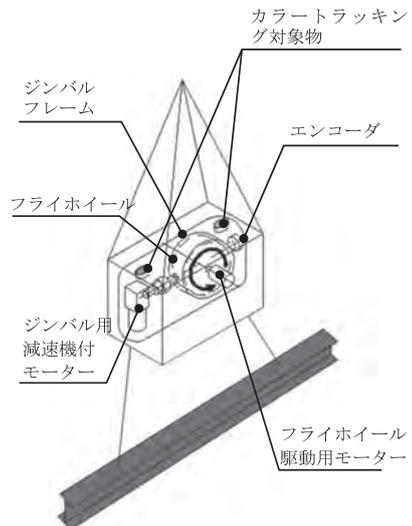
$$\theta' = \tan^{-1}((v2 - v1) / (u2 - u1))$$

として算定する。

部材取付け場所の角度 θ と取付け部材の角度 θ' の差を算定し、誤差範囲内かどうかを確認する。

(5) 吊荷旋回制御装置の機構

吊り荷旋回制御装置の構成を図一八に示す。前記のカラーラッキングの角度差によりジンバル用減速機を用い、ジンバルフレームを傾ける事により、吊荷を旋回させることができる。ジンバル回転角検出用エン



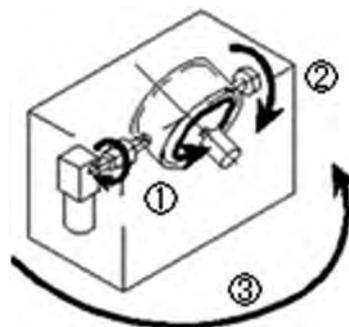
図一八 吊荷旋回制御装置概略図

コーダは、ジンバルフレームの角度を監視し、旋回制御が可能であることを確認する。

(6) 能動制御

図一九に旋回制御方向の概略図を示す。カラーラッキングで③方向に旋回させる場合、フライホイールが②方向に回転している時、ジンバル減速機を用いて、ジンバルフレームを①方向に傾けることによりフライホイール回転慣性力の反力で吊荷を③方向に旋回させることができる。

カラーラッキングによる旋回角度が一致した時点で、ジンバルフレームの傾きを止め、ジンバル用の減速機付モーターのブレーキを開放すると、ジャイロ効果によりフライホイールは①と逆の方向に傾き、吊荷の旋回③を吊荷の取付け角度で停止する。



図一九 旋回制御方向概略図

(7) 受動制御

ジンバル用の減速機付きモーターのブレーキ解放を続ければ、外力に対しての抵抗として働き、吊荷の旋回位置を保持することになる。能動制御を開始する際に吊荷の旋回が静止した状態で機械抵抗を無視する

と、ジンバルフレームを傾けて旋回を行い、ブレーキを開放すると旋回は止まり、ジンバルフレームは旋回時の角度に戻る。受動制御は、有風時の旋回制御として有用な制御となる。

(8) カメラ画像補正

カラートラッキングによる色情報は環境変化に脆弱である。しかし色情報を使った応用事例では色を効果的に利用できることが証明されている。つまり環境を限定すれば十分に利用できることを示唆している。我々は、生活環境に施された色情報を昼間や夕方と違ったものとして見ることはなく、色についても本来の色を知ることができる。光源環境によって変化する見え方を経験しているから、変化した環境においても本来の状態を推し量ることができる。このように、環境に応じた色の扱い方を使い分けることでカラートラッキングターゲット（以下、ターゲット）を認識する知覚方法をコンピュータビジョンに応用することを考える。

カメラから観測される色情報は、屋外環境の変動や物体の移動により変化する。細かく言えば屋外環境の光によるホワイトバランスによる影響も考慮に入れるべきであるが、ここでは昼間の太陽光の下での影響に特化して考察する。太陽光のもとでの物体の色情報は、炎天下と曇りでは大きな違いが出る。炎天下の場合は太陽光の強い日差しが物体に反射し、カメラのオートアイリス機能でもそのターゲット以外の情景を含めて撮影する為にはその閾値を下げ過ぎることは出来ない。曇りの場合は全体の明るさを確保する動作を行う。アイリスが変化すると照明変動がなくても出力されるRGB値に変化が生じる。そこで筆者らは、電子装置が人間の目で見たまのままの状態に近いイメージを表現することが出来る技術である Retina-Morphic Processing（網膜模倣原理）に着目した。一般的にカメラのCCDなどはディスプレイやプリンタなどよりはるかに高いダイナミックレンジを持っており、ガンマ補正などのテクニックは特に暗い領域でのディスプレイ表示において詳細情報を失うことがある。我々の目がイメージを我々の脳に送るとき、強力なダイナミックレンジ圧縮が網膜のセルによって行われる。Retina-Morphic Processingは人間の目や脳がダイナミックレンジを圧縮する方法をまねているため、イメージを加工することなしにバランスのよいコントラストを保つことが可能となる。

(9) 輝度補正空間保持モデルの確立

カラートラッキングに適した色情報の位置が決定したとしても、その色情報の位置を保持する方法を決定することが難しい。前述の通り、屋外での作業の場合、カメラの撮影の明るさを一定に保つ方式には限界がある。また、トラッキングを行う対象物が単純な反射光による色情報ではなく、LEDなどの発光体の場合はその色が薄くなる現象や色相の変化が見られるのではと考察される。

筆者らが着目した Retina-Morphic Processing（網膜模倣原理）を応用した場合の可能性について以下考察する。

考察1：カメラから得た映像に対し、網膜模倣原理にて各画素単位に異なった輝度補正を行うことで、それぞれの物体のコントラスト比が上がり、ターゲットとなる物体が認識しやすくなる。

考察2：輝度補正を行うことで明度が一定化され、色情報が変化しにくくなる。

考察3：カメラの特性に対応する為、色相・彩度をあらかじめ決定することで、トラッキングに適した色情報が保たれる。

(10) 評価実験

カメラ位置を地上より20mの高さに設置し、真下に向けて撮影した。この撮影方法は太陽光が地面とターゲットに直接反射するカメラにとって好ましくない状況と仮定し、評価実験は晴れた午後の日差しの強い日に行った。

ターゲットを目視した場合、左のターゲットは黄色、右は水色と判断する（写真-6）。実際のターゲットは左が赤のLED、右が緑のLEDである。結果として太陽光の光により赤のLEDは彩度が高いことから反射光と交わることで明度が高くなり、結果的に黄色に見え、緑のLEDも同様に水色に見えたと考えられる。

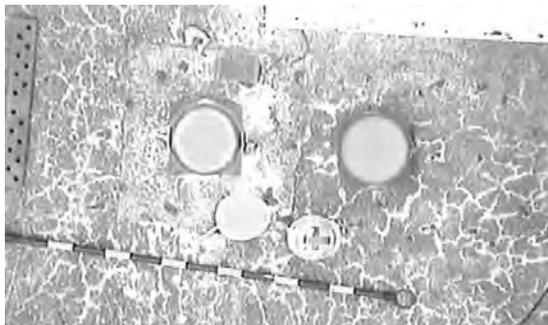
ターゲットの色相の変化を抑えるために行った実験



写真-6 標準撮影

は、画素単位輝度圧縮補正による「コントラスト強調」、色情報を保つ目的とした「彩度強調」、補正を行った場合に強調されるカメラの色ずれ補正の為の色相補正を行うことで期待している元のターゲットの色情報に近づけることが可能かどうかを実証した。

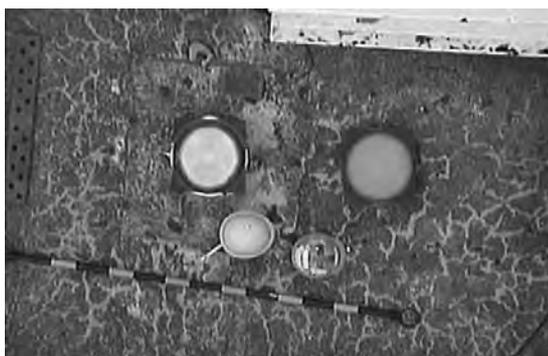
「コントラスト強調」を行った場合、ターゲットをはっきりと認識できるようになるが、カメラのカラーノイズも強調されてしまう結果となった（写真一七）。この結果に「色相補正」を行い、元の色情報に近づけてみた（写真一八）。ターゲットの色は期待した元の色を保ちつつ、まわりの物体の色も若干のカラーノイズを除けば元々の固有の色を保っていることが確認できる。また、ズームすることでカメラがとらえる明るさが変化し、暗くなった場合でも、色の明度は変化するものの色情報は保たれることを実証している（写真一九）。



写真一七 輝度補正後撮影



写真一八 輝度色相補正後撮影

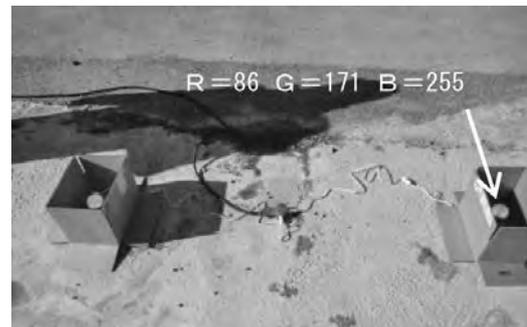


写真一九 輝度色相補正後ズーム撮影

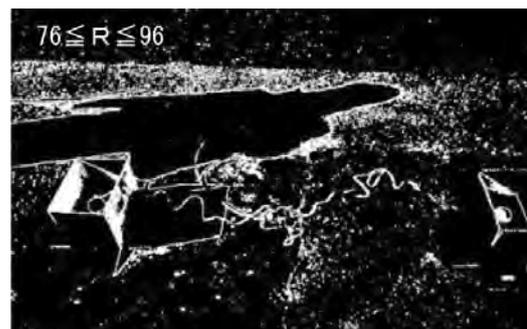
(11) トラッキング検証実験

ターゲットを撮影した画像を用いて、トラッキングの検証実験を実施した。写真一十にターゲットの撮影画像を示す。撮影画像のターゲット（青色LED）を選択し、RGB情報を取得した。R=86, G=171, B=255であり、Bの数値が高いため青色に見える。RGB値の許容範囲を ± 10 とし、最小値は0, 最大値は255と制限した。Rの許容範囲は $76 \leq R \leq 96$, Gの許容範囲は $161 \leq G \leq 181$, Bの許容範囲は $245 \leq B \leq 255$ となる。

RGBの許容範囲内の部分と許容範囲外の部分で2値化した画像を写真一十一～一十三に示す。白で表示されている部分が許容範囲内の領域を表している。写真一十四に写真一十一～一十三で抽出された領域の重なり合わせる部分を画像RGBに示す。最初に選択した青色部分が検出できていることが分かる。ターゲットの位



写真一十 ターゲットの撮影画像



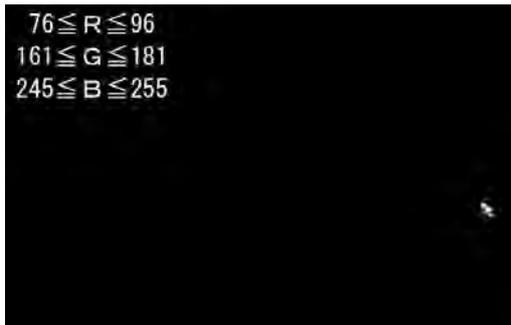
写真一十一 画像R



写真一十二 画像G



写真—13 画像B



写真—14 画像RGB

置は検出領域の重心座標を算出することにより求めることができる。屋外環境に合わせて許容範囲を設定し、一連の処理を連続的に繰り返すことにより、ターゲットの位置を連続して自動算出することが可能であることを確認した。

屋外環境でターゲット（青色LED，赤色LED）をカメラ撮影し，自動検出の可能性を検証した。赤色部分と青色部分のLEDのRGB値を取得し，RGBの許容範囲を±10とした結果，ターゲットの水平移動に追従して自動追尾できることを確認した。

4. 現場検証実験

2017年4月から久留米大学基礎3号病院北作業所において，鉄骨建入れ時の保有技術である鉄骨柱の自動計測・建入れ制御システム，吊荷旋回制御装置を用いて鉄骨建方を行った（写真—15）。一部の工区を在来工法によって鉄骨建方を行い，比較検証実験を行った。

(1) 柱の建て方について

柱1本あたりの作業時間は，自動計測・建入れ制御システムを用いた場合では14.40分/本，在来工法では25.40分/本となり，在来工法の約半分の時間で，柱の建入れ調整ができることを確認した。また，作業人員は，在来工法は4名（計測工2名，鳶工2名）であったのに対して，自動計測・建入れ調整システムを



写真—15 吊荷旋回制御装置の現場使用状況

用いた場合は，2名（計測工1名，鳶工1名）となり，作業人員も半分の人員であることを確認した。

(2) 梁の建て方について

大梁1本あたりの作業時間は，吊荷旋回制御装置を用いた場合では5.1分/本，在来工法では18.4分/本となり，吊荷旋回制御装置を用いることにより，作業時間を約1/3に削減することができた。

また，高所作業を減らす事ができ，安全性の向上につながる事が確認できた。

5. おわりに

鉄骨柱の建入れ自動計測・建入れ制御装置，吊荷旋回制御装置を用いる事により，柱の作業時間を約1/2，梁の作業時間を約1/3に削減し，生産性の向上と言う点で有効性を示す事が出来た。また，高所作業を減らすことができ，安全性の向上に寄与できる事がわかった。

今後は，更なる生産性向上と安全性の向上を目指して，鉄骨歪直し時のリアルタイム計測やタワークレーンの3次元誘導等の技術開発を進める予定である。

JICMA

《参考文献》

- 1) 井上文宏，小泉達也，小野佳之，矢田和也，椎名肖一：「ジャイロモメントを利用した高出力吊荷旋回制御装置の開発」第19回建築の自動化技術シンポジウム pp37-42，2012
- 2) 鈴木護真：「画像線メカ処理装置で用いられる超解像技術」画像電子学会誌 Vol.44 No.4 pp704-711，2015

【筆者紹介】

鈴木 信也（すずき しんや）
戸田建設㈱
技術開発センター 施工革新ユニット
地上構築チーム
主管

