建築工事における写真画像と VR 画像を用いた進捗管理に関する研究

—工事写真の撮影方法及び視点位置・方向の取得—

COMPARISON OF CONSTRUCTION PHOTOGRAPH AND VR IMAGE
IN CONSTRUCTION PROGRESS

—Determination of 3D viewpoint and direction in construction photograph—

金 炯 垠*, 嘉納成男**, 蔡 成 浩***

Hyungeun KIM, Naruo KANO and Soungcho CHAE

Photo taking at an actual job site provides a very useful tool for the record of construction progress and the inspection of built-up members. The photos are also utilized as essential data to carry out the control of construction progress in virtual space. Besides, the situation of construction progress at an actual site might well encounter a conflict with the construction plan that was prepared before the beginning of construction. This invokes the importance of use of site photos in VCS(Virtual Construction Site) that enable the real time construction control by comparing themselves to the images from virtual reality.

In this study the comparison between the site photo taken at an actual job site and the virtual images corresponding to them was carried out to estimate validity of the proposed VCS. Particularly this paper demonstrates the possible troubles during development of a prototype system by acquisition of the site photos from an actual job site.

Keywords: *Virtual reality, Progress control, Construction Photograph, Image comparison*

仮想現実、進捗管理、工事写真、画像比較

1. 緒言

建設分野において 1980 年代後半から始まった VR(Virtual Reality)技術の活用は最近のパソコンにおける性能の急速な発展に伴い、実用的に工事計画や管理の実務に展開し得る状況となっている。VR 技術を用いて行う工事計画・管理とは、工事着工前において施工方法やプロセスを視覚的に表現し、工程上の問題点、作業条件を予知し、これを元に施工方法やプロセスの事前検討を行うことである。また、着工後も工事進捗状況に合わせて、工事計画の細部を再検討していくことが必要である。工事進捗段階で問題が生じ、工事計画の再検討が行われる場合もある。従って、着工後には、正確な工事の進捗情報の収集及び分析が不可欠である。

本研究では、工事の進捗状況を表す正確な情報として写真画像を利用し、写真画像と VR 空間に表示した工事進捗の VR 画像とを視覚的に比較することによって進捗管理を行う方法論の確立を目的としている。写真画像と VR 画像を比較するためには、各々の写真画像について撮影したカメラの視点位置と方向に関する情報が必要である。

本報では、工事写真の撮影方法とその写真画像におけるカメラの視点位置及び方向の取得方法を提案する。

本研究に関する既往の研究として、VR 技術の活用については、建築工事における進捗シミュレーションをはじめさまざまな研究がなされている。^{1), 2), 3)} 進捗管理においては、江口・他⁴⁾は出来高の把握と共に手配や段取りなどを含めた総合的進捗管理の概念を表した。鈴木⁵⁾は、延べ作業人数や歩掛を用いて施工済み数量を予測し、そのデータから工事進捗管理を行う方法を述べている。香月・他⁶⁾は、工事現場におけるチェックリスト化された進捗率を携帯端末を用いてデータ化した事例を表した。Jorge Abeid・他⁷⁾はユーザから工事現場の LAN にアクセスし、工事進捗の情報を得るシステムを提案して、工事進捗情報として工事写真及びアニメーションなどを提供し、進捗状況の把握が可能であることを述べている。

以上の進捗管理における研究では、視覚的な判断に基づいて施工済の確認や工事写真を用い、工事進捗の実績を視覚的に判断をしている。

* 早稲田大学理工学総合研究センター 助手・修士(工学)
** 早稲田大学理工学部建築学科 教授・工博
*** 早稲田大学理工学総合研究センター 客員講師・工博

Research Assoc., Rise, Waseda Univ., M. Eng.
Prof., Department of Architecture, Waseda Univ., Dr. Eng.
Visiting Assistant Prof., Rise, Waseda Univ., Ph. D.

本研究では、VR 計画画像と写真画像を比較することによって詳細部分に至るまで、計画と実際の進捗差における視覚的な判断を目指している。

2. 写真画像と VR 画像を用いた進捗管理

2.1 写真画像と VR 画像との比較

写真画像は現状をそのまま表現し、人間の手によって修正・加工されてない情報として、現状を把握するためによく使われる。従って、工事現場においても記録写真などとして多く使用されている。また、工事写真は、工事の進捗状況の把握や品質検査などの管理において重要な情報として取り扱われる。工事写真の収集は、その使用目的によって現場内における様々な場所から撮影され、管理されている。3次元CADによる設計情報には、各種の部材の取り付け位置が正確に情報化されている。このため、工事の進捗状況を把握する場合は、特定の日までに作業が終了している部材のVR画像を、実際の工事写真と比較することによって、必要な部材が取り付けられているか否かを照合することが出来る。また、品質検査の場合は、鉄骨建て方における取付部材や配筋など、在るべき組立て位置を表すVR画像と実際に取付けた部分の写真画像を並べて視覚的に比較することによって取付位置のずれや欠損を見つけ出すことが可能になる。さらに、工事写真とVR画像を重ね合わせて進捗管理を行うと進捗の差が視覚的に明確になり、また、画像解析により自動的にその進捗差を把握することも可能になる。本研究では、3次元CADデータをReal-Time-Walk-Thruを可能とするVRシステムに取り込み、写真画像と見え方が同じVR画像を作り出すことにした。

2.2 工事写真とVR画像の重ね合わせ

建設現場において撮影した工事写真とその同じ視点位置及び方向から作成されたVR画像は重ね合わせることが可能である。2つの画像を重ね合わせることによって、現場における部材の位置、部材の形状などに対して3次元CAD設計図との相違点が明確になる。図1には、VCS(Virtual Reality Construction Site)^{注1)}を用いて工事写真の透明度を調整しながらVR画像と重ね合わせて視覚的に比較する過程を表している。

写真画像とVR画像を重ね合わせるためには、VR画像を反映するVRシステムと写真画像を撮影するカメラの間で以下のパラメータを同じにする必要がある。

- (1) カメラの視野角
- (2) カメラの視点位置の3次元座標
- (3) カメラの撮影方向を示す3次元方向ベクトル

(4) カメラの撮影方向軸からの傾き角

本研究では、撮影に使用する各々のカメラの視野角は撮影範囲のデータから三角関数を用いて求めた。そして、撮影方向軸からの傾き角はVR画像を工事写真と比較しながら手動で調整した。

2.3 工事写真の撮影方法

工事写真の撮影時に、カメラの視点位置及び方向に関する情報を取得することが可能であれば、写真画像とVR画像を重ね合わせて視覚的に進捗管理をすることが可能になる。工事現場において、工事写真を撮影する方法として、最も容易な方法は市販のカメラを用いて手持ちで撮影する方法である。この場合、随時任意の位置から撮影するため、カメラの視点位置と方向に関する情報をそれぞれの写真画像毎に撮影時に得ることは難しい。それを克服するには、カメラの視点位置及び方向に関する情報をカメラ装置自体が取得し得るようにした、カメラ搭載ノンプリズム測量機を使用することが考えられる。

本研究では、進捗管理用のカメラとして、ノンプリズム測量機にCCDカメラを載せ、撮影した写真画像とその時の視点位置及び方向を同時にコンピュータに保存するシステムを開発して使用した。また、工事の進捗を継続的に撮影するためには定点カメラを用いた。

本報では、工事写真の撮影方法として、

- ①カメラ搭載ノンプリズム測量機による撮影方法、
- ②定点カメラによる撮影方法、
- ③手持ちカメラによる撮影方法

の3つの撮影方法を用いた。そして、上記の撮影方法による写真画像の視点位置及び方向ベクトルの取得する方法を確立し、撮影した写真画像と見え方が同じになるVR画像を作成し、それと重ね合わせて比較することによって、進捗管理を行うことを提案した。

3. 撮影時の視点位置及び方向ベクトルの取得方法

3.1 カメラ搭載ノンプリズム測量機による写真画像^{9), 10)}

3.1.1 写真画像の撮影方法

工事写真を撮影する際に写真画像と同一な位置のVR画像の情報を求めるために撮影する対象物の正確な座標を計測する必要がある。そのため、ノンプリズム測量機を利用し、正確な座標を測る。そのため、図3に示した如く測量機の上に台を作ってカメラを固定した。3次元測量機を用いて目標点として現場の特定の箇所の3次元位置を実測し、カメラ視点を求めた。測量機を利用して目標点を求めるには、測量機から目標点を向いた垂直・水平角度と斜距離によって直交座標系を利用して計算できる。その目標点を写真画像に

図1 工事写真の透明度の調整したVR画像との重ね合わせ

図2 3次元視点の推定方法において使用されるカメラ

おける方向ベクトルを求めるために使用した。

3.1.2 後方交会法による3次元座標の取得方法

後方交会法は測量機を用いて、予め位置のわかっている2点の方向角を測り、測量機の位置を求める方法である。後方交会法を用いてノンプリズム測量機の位置 (x_p, y_p, z_p) を求め、z軸の値はカメラが測量機の上に載せられているため、図4のaだけ高くしてカメラの視点位置とする。

そして、方向ベクトルはノンプリズム測量機から測定する目標点の座標を用いる。測量機の中心と写真画像の中央点とは一致する必要があるが、測量機とカメラは各々向いている方向が若干ではあるが異なっている。その理由は、図4に示した如く測量機の上にカメラを固定しているため測量機により測定したz軸の座標点より写真のz軸の座標点がaだけ高くなっている。そして、カメラを固定する際にカメラが向いている方向を測量機と正確に一致させることは難しいため、少しずれている。従って、工事写真を収集する際に、カメラと測量機の向いている方向の誤差を補正する必要がある。そして、その値を補正值として入れ、より正確な3次元座標を求める。その値を垂直角度 α と水平角度 β とする。

垂直・水平誤差角度を加え、直交座標系を用いて工事写真の目標点の3次元座標を求める補正式は式(1)に示した如くなる。この補正式から求めた写真画像の中心点である目標点と後方交会から求めた視点位置座標を用いて式(2)に示した如く方向ベクトル (x_v, y_v, z_v) を求める。

$$\begin{aligned} x_t &= r \sin(\theta - \alpha) \cos(\phi - \beta) \\ y_t &= r \sin(\theta - \alpha) \sin(\phi - \beta) \\ z_t &= r \cos(\theta - \alpha) + a \end{aligned} \quad \dots \text{式(1)}$$

$$(x_v, y_v, z_v) = \left(\frac{x_t - x_p}{\sqrt{(x_t - x_p)^2 + (y_t - y_p)^2 + (z_t - z_p)^2}}, \frac{y_t - y_p}{\sqrt{(x_t - x_p)^2 + (y_t - y_p)^2 + (z_t - z_p)^2}}, \frac{z_t - z_p}{\sqrt{(x_t - x_p)^2 + (y_t - y_p)^2 + (z_t - z_p)^2}} \right) \quad \dots \text{式(2)}$$

図4 直交座標系及びカメラの目標点の誤差

3.2 定点カメラによる写真画像

3.2.1 写真画像の撮影方法

定点カメラを用いる利点としては、同じ位置から時系列に撮影が

行い得るため、撮影した工事写真を利用することによって同一場所からの工事進捗の変化が非常に把握し易いことがあげられる。工事全体の進捗状況を把握するためには図2の(b)に示した如く現場の周辺にカメラを設置し撮影する。また、建設現場内において詳細な工事写真を収集するためには、現場の内にカメラを設置して工事写真を収集する必要がある。

図5 短期定点カメラ

ある。従って、図5に示した如く現場内で移動が可能な短期的な定点カメラを設置する場合もある。

3.2.2 直接測量法による3次元座標の取得方法

図6に示す如く、3次元測量機を用い、設置した定点カメラの位置を測定して、その3次元座標を求める。また、撮影方向は工事写真の中央点に位置する物体を目標点として定め、その目標点を3次元測量機を用いて測定し、前項で示した式(2)を用いて方向ベクトルを推定する。

一方、カメラを頻りに移動する短期定点カメラを用いる場合は、そのカメラから撮影した工事写真の視点は長期定点カメラと同じく、予め3次元測量を行い、カメラの位置を求めるが、撮影方向はカメラの回転によってその方向が頻りに変化するため、VCSを用いて3次元CADシステムデータに基づき、写真画像の中央点に位置する物体の3次元座標から方向ベクトルを推定する。

図6 測量機を用いてカメラの位置を測定

3.3 手持ちカメラによる写真画像¹¹⁾

3.3.1 写真画像の撮影方法

カメラ搭載ノンプリズム測量機による撮影方法や定点カメラによる撮影方法は、工事写真の撮影時に3次元視点及び方向を取得するため測量機が必要であるため、カメラが重くなると共に工事写真の撮影が不自由になる場合が多い。それに対して、手持ちカメラによる方法は、工事写真の収集が非常に容易になる。

手持ちカメラによる工事写真の収集は、市販のデジタルカメラを用いて工事管理者は様々な場所から簡単に工事写真の撮影が可能である。

3.3.2 写真測量法による3次元座標の取得方法

形状のわかっている3次元の対象をとらえた画像から、その対象を撮影したときのカメラの相対的な位置、撮影方向を求めることが必要になる。これを実現させるためには3次元座標がわかっている複数の点（制御点）が必要になる。位置関係のわかっている制御点の3次元座標と、それらの画像上の2次元座標、そして、カメラ自身の撮影パラメータ（焦点距離、画像の大きさなど）が与えられたとき、カメラ座標系の透視変換を求めることが出来る。カメラの位置と方向は3つの回転のパラメータと3つの平行移動のパラメータで決まり、合計6個の自由度を持つ。空間の1点の画像が与えられるごとに解消できる自由度は、各点の象のx, y座標から導かれる拘束

条件から最大2であるので、3点以上の制御点が必要である。図7に示した如く視点OからA, B, Cまでの距離a, b, cを未知数とし、△OABの辺ABなどを求める式は以下に示した如くなる。

$$\begin{aligned} L_{AB}^2 &= L_{OA}^2 + L_{OB}^2 - 2 \times L_{OA} \times L_{OB} \times \cos(\theta_{ab}) \\ L_{BC}^2 &= L_{OB}^2 + L_{OC}^2 - 2 \times L_{OB} \times L_{OC} \times \cos(\theta_{bc}) \\ L_{AC}^2 &= L_{OA}^2 + L_{OC}^2 - 2 \times L_{OA} \times L_{OC} \times \cos(\theta_{ac}) \quad (\text{式3}) \end{aligned}$$

図7 対象実物と画像の位置関係

本報では3次元座標における誤差に対して安定な解を得るため、3つの制御点を複数の組合せで3次元座標を求めることにした。そのため、5つの制御点と写真の中心点を用いて約240組の3角錐を作り、複数の組合せから得た解をクラスター分析により最も群を為している座標点のグループ上位25%の座標の平均値を求め、それをカメラの視点の3次元座標とした。

3.4 工事写真における画像の補正

3.4.1 画像の歪みの補正

VR画像と写真画像を比較するため、写真画像における画像の歪み補正を行う必要がある。本報では、カメラ搭載ノンプリズム測量機としてCCDカメラ、定点カメラとしてウェブカメラ、そして、手持ちカメラとして市販のデジタルカメラから撮影した写真画像において歪み補正を行った。本報においては、写真画像を画像の歪み補正することによって写真測量による3次元視点の推定方法の場合、推定した3次元視点の推定値の誤差は約20%位低減したことを確認した。

3.4.2 カメラの傾き角の補正

VR画像と写真画像を正確に比較するためには、固定物に定点カメラを設置時に、カメラを正確に固定する必要があるが、若干の傾きが発生する。その傾きの誤差を補正するために、図8に示す如くVCSから目標点を中心とした傾き角度に対する補正を行い、2つの画像の傾き角度を合わせた。

図8の白い円の中は、補正前の仮囲いと周辺建物などが斜めになっているものの、補正後には一致させていることを表している。

4 写真画像とVR画像の重ね合せによる進捗管理の事例への適用

4.1 3次元CADによる建物モデリング

図8 写真画像をVR画像と合わせるための傾き角度の補正

適用事例としての対象とする工事現場は早稲田大学の新築校舎の現場と岐阜県にあるロボット研究棟の新築現場である。2つの工事現場において3次元CADモデリングを行った。3次元モデリングにおいては、正確に作成する必要がある設計情報は3次元CADであるMicroStationを利用し、建物以外の仮設資材及び機械などは3DS Maxを用いて3次元モデリングを行った。特に、ロボット研究棟の新築現場においては、敷地の3次元モデルは、建築工事における計画段階の配置図に記載された建物の位置やその敷地の高低情報などを用いてモデルの正確さを高めた。また、正確な図面がない周辺建物においては、3次元測量を行い、撮影した写真を用いて周辺建物の3次元モデリングを行った。

4.2 カメラ搭載ノンプリズム測量機による進捗管理

4.2.1 適用現場の概要

進捗管理を行うため、学校施設の新築現場において工事写真を撮影し、VR画像と写真画像の比較により進捗管理を行った。対象となった現場は2002年9月から2005年5月までの地下2階、地上12階の工事である。工事の概要は表1に示した如くなる。

表1 工事概要

項目	内容
工事名	西早稲田キャンパスB棟(仮称)新築工事
用途	学校施設
敷地面積	73,659.56m ²
建築面積	2,610m ²
述べ床面積	24,150m ²
階数	地下2階、地上12階
構造	RC造、SRC造、S造
着工日	2002/9
竣工日	2005/5

4.2.2 写真画像の撮影及び視点位置と方向ベクトルの取得

カメラ搭載ノンプリズム測量機による3次元視点の推定方法を用いて、現場の4階、6階、7階において工事写真を撮影した。その各々の工事写真には測量機から測定した目標点とカメラ位置、方向ベクトルを3次元座標情報として記憶させた。カメラ搭載ノンプリズム測量機を用いて対象となる3つの階において2つの視点から計6箇所のカメラ視点から約90箇所の工事写真を撮影した。図9の(a)、

(b)には、収集した工事写真における3次元視点と方向を推定し、それと同一の視点と方向を持つVR画像を比較している。

4.2.3 写真画像とVR画像の重ね合せとその誤差

VR画像と工事写真を同じ視点と方向から比較することによって、工事進捗を視覚的に判断できる。本適用事例において工事写真を撮影する時に視点位置及び方向と同一な視点位置及び方向を持つVR画像は、ほぼ同じ範囲を表すことを確認することが出来た。

図9(c)はVR画像を輪郭線として作成、透明度を調整し、写真画像に重ね合わせている。この図に示した如くカメラ搭載ノンプリズム測量機による3次元視点の推定方法は、その推定誤差は2つの画像を重ね合わせるほど正確であった。この2つの画像を比較することから現場の部材の位置、部材の形状などを3次元CAD設計図と比較が可能であることが確認出来た。

(c) 画像の比較

図9 VR画像と写真画像の重ね合せによる画像比較

4.3 定点カメラによる進捗管理

4.3.1 適用現場の概要

工事の進捗状況を把握するため、定点カメラを用いて表2に示すロボット研究施設の新築現場において工事写真を撮影し、VR画像と写真画像の比較により進捗管理を行った。対象となる現場は2004年11月から2005年4月までの地上5階建の小規模工事である。

表2 工事概要

項 目	内 容
工事名	岐阜県ロボットプラザC棟建築工事
用 途	ロボット研究施設
敷地面積	2,245.51m ²
建築面積	150.063m ²
述べ床面積	432.0m ²
階 数	地上5階
着工日	2004/11
竣工日	2005/4

4.3.2 写真画像の撮影及び視点位置と方向ベクトルの取得

ロボット研究棟の新築現場においては、直接測量法による定点カメラの位置測定方法を用いて工事写真の収集を行った。工事写真の収集は、まず、長期定点カメラを用いて工事の着工から工事進捗状

況を毎日、自動的に撮影した。その定点カメラにはウェブカメラを用い、インターネットを通じてデータを収集した。また、外部に足場が設置された後には短期定点カメラを建物内に設置して工事写真を収集した。

測量機を用いて直接に測定した長期定点カメラの視点位置座標は x_p, y_p, z_p (55, 887, 13, 652, 14, 030) であり、目標点を用いて推定した方向ベクトルは x_v, y_v, z_v (-0.80944, -0.48157, -0.33597) であった。短期定点カメラについては頻繁に移動したため、その度に視点を測定した。

4.3.3 写真画像とVR画像の比較による進捗状況の把握

ロボット研究棟の新築現場において着工前の敷地の状況から、2005年3月中旬までの進捗状況を長期定点カメラと短期定点カメラを用いて撮影した工事写真とVR画像の比較を行った。図10には、工事進捗状況を比較した2つの画像を表している。

図10に示す如く2004年11月28日には工事着工のための準備作業として仮設事務所や仮囲いなどの設置が行われた。2004年12月13日の工事写真は、計画工程より4日間遅く基礎部が施工された状況を表している。そして、2004年12月20日は、掘削された土の山から埋め戻しが終わった状況を示しているが、VRの計画画像によると2004年12月14日において埋め戻しが終わった状況であり、実際

図10 定点カメラを用いて収集した写真画像とVR画像の比較

の工事の進捗状況は計画工程より6日の遅延が見られることが判った。しかし、2005年2月5日においては鉄骨建方工事が始まるまではピットベースコンクリートの養生であるため、工期には影響されなかった。

また、2005年2月3日以後は、外部に足場が設置されたため、現場内の様子が確認し難いため、短期定点カメラを用いて撮影した写真画像とVR画像の比較を行った。短期定点カメラであったため収集した工事写真は撮影日や場所によって様々な視点と方向を持っている。2005年2月3日はピットベースコンクリート打ちが終わった状況を現している。そして、2005年2月5日から始まった鉄骨の建て方作業は、2005年2月8日は地組みされた稼動床の小梁が施工された状況を示している。2005年2月8日まではまだ工程の遅延は見えなかった。2005年3月14日においては1階分の地中梁やスラブのコンクリート打ちが終わって、仕上工事として鉄骨部材の塗装作業が進行中であることを表している。また、パネル工事も進行中である。

測量機を用いて定点カメラの視点位置の推定方法は、カメラの位置の測定後にカメラを回転しながら撮影することによって推定した視点はカメラの回転により若干の誤差が発生するが、図11に示した如くほぼ同じ範囲を現している。従って、工事進捗のVR画像と写真画像を用いた工事の進捗状況の視覚的な比較によって、その進捗差の把握が可能であった。

4.4 手持ちカメラによる進捗管理

4.4.1 適用現場の概要

適用した現場は、4.2.1「カメラ搭載ノンプリズム測量機による進捗管理」に適用した現場と同じである。

4.4.2 写真画像の撮影及び視点位置と方向ベクトルの取得

写真測量による3次元視点の推定方法における工事写真の収集は、市販のデジタルカメラを用いて現場の7階において12箇所の視点から約200枚の工事写真を撮影した。その工事写真を用いて写真測量による推定方法により3次元視点位置と方向ベクトルの推定を行った。

4.4.3 写真画像とVR画像の重ね合せによる進捗状況の把握

図11はVR画像と写真画像の比較を表している。工事写真において写真測量法を用いて取得した視点位置及び方向に基づいて、同じ視点位置と方向からVR画像を作成したものである。この2つの画像を比較することによって現場での部材の位置、部材形状を3次元CAD設計図と照合することができる。図11では、(a)のVR画像においては、コンクリートの段差が見られるが、(b)の実際の工事写真においては、木材がその位置に置かれており、コンクリートが打たれていないことが判る。写真に撮影された部材の形状や色に基づ

(a)VR画像

(b)写真画像

図11 VR画像と写真画像の照合による状況検査

いて3次元CAD設計図の情報と照合することによって、設計図との相違点を見つけることが出来ることを示している。

写真測量法から3次元視点位置を推定する際にその分析方法によって多少の誤差は発生する。その誤差は正確に推定すべき視点から目標点の方向に対して、図12に示した如く前後、左右、高さに関する誤差が現れる。

図12 3次元視点の推定において現れた誤差の関係

写真測量による3次元視点の推定方法についてその誤差を確認するため検証を行った。推定誤差を検証する方法は、まず、工事写真として収集した約200枚の写真の中で約10%である25枚の写真をランダムに選択し、写真測量による推定方法により工事写真の3次元視点位置を推定した。そして、推定した3次元座標の誤差を確認するために測量機を用いて工事写真を撮影した12箇所のカメラの視点の座標を測量した。12箇所の視点の座標を表3に示す。各々の工事写真について写真測量法により推定した3次元視点と測量機で求めた座標との誤差を分析した結果、推定した3次元視点のそれぞれの誤差は表4に示す如くなった。

表3 測量機から実測した視点位置

単位: mm

座標名	3次元座標		
	x	y	z
P1	37,291	39,066	27,793
P2	44,098	40,688	27,771
P3	43,112	47,889	27,750
P4	35,796	48,118	27,747
P5	41,421	53,352	27,725
P6	36,600	55,953	27,720
P7	40,717	62,329	27,695
P8	34,078	60,705	27,703
P9	27,456	57,698	27,742
P10	19,755	56,402	27,710
P11	34,365	33,765	27,696
P12	40,230	31,822	27,696

その結果、表4に示した如く前後誤差は、0mm～927mmの間の誤差が発生した。そして、左右誤差は22mm～682mmの間の誤差が発生し、高さ誤差は0mmから229mmの間の誤差が発生した。誤差の絶対値の平均値は、左右誤差206mm、前後誤差389mm、高さ誤差61mmとなった。写真画像における視点の推定誤差において、前後誤差はほぼ「負」になったが、前後誤差はカメラの視野角度の設定誤差の影

響を受けていると考えられる。

表 4 工事写真における 3 次元視点位置の推定値とその誤差

単位: mm

写真No.	推定した3次元座標			誤差			座標名
	x	y	z	左右	前後	高さ	
007	37,403	39,570	27,618	114	-503	29	P1
012	43,508	40,771	27,613	-130	-581	21	P2
023	43,758	40,649	27,482	190	-285	106	P2
028	43,713	40,929	27,792	78	-448	0	P2
034	43,115	48,775	27,403	682	-565	66	P3
036	42,825	47,996	27,906	184	-245	37	P3
038	42,762	48,223	27,548	363	-319	41	P3
045	43,270	47,179	27,632	126	-716	10	P3
047	42,631	47,095	27,742	-55	-927	0	P3
049	36,395	47,792	27,425	-328	-598	72	P4
060	35,445	48,201	27,656	-355	65	11	P4
061	36,085	48,218	27,716	159	-261	2	P4
075	41,211	53,337	27,818	171	-122	20	P5
079	41,136	53,499	27,639	-42	-318	11	P5
080	40,805	53,613	27,418	-263	-615	67	P5
081	41,185	53,691	27,234	-53	-409	229	P5
085	41,854	53,604	27,560	340	-367	26	P5
092	36,537	55,895	27,597	61	-60	65	P6
094	36,774	55,494	27,353	41	-489	122	P6
096	36,991	55,268	27,311	78	-785	100	P6
097	36,667	55,918	27,487	22	-72	169	P6
120	40,448	62,480	27,455	309	0	82	P7
123	40,198	62,477	27,290	240	-483	135	P7
143	40,279	61,923	27,404	362	-476	67	P7
155	34,491	60,686	27,876	-412	-33	35	P8
絶対値の平均				206	389	61	

5. 結言

工事現場では、視覚的な判断は重要な手段であることに着目して、本研究では、実際の工事の進捗状況を把握する情報として工事写真を利用し、その工事写真と VR 技術を用いた新たな進捗管理手法を提案した。そして、VR 画像と写真画像の比較を行うための工事写真の撮影方法と写真画像における 3 次元視点位置及び方向を取得する方法論を検討した。

3 次元視点位置及び方向ベクトルの推定誤差が少ないカメラ搭載ノンプリズム測量機による 3 次元視点位置の推定方法は、正確に 2 つの画像の重ね合わせるほどその精度は高い。このため、2 つの画像を重ね合わせて画像解析の技術を応用することによって、2 つの画像の相違を自動的に識別することも可能であると考えられる。

また、定点カメラの位置測定による 3 次元視点位置の推定方法においては、工事写真の収集も非常に簡単である。また、固定された同一の視点から撮影された工事写真は時系列な比較によって工事における進捗状況を容易に把握し得ることが判った。

写真測量による 3 次元視点位置の推定はその誤差は多少あるものの、手持ちカメラによる工事写真の収集が容易であり、2 つの画像の比較は視覚的に可能であった。また、写真測量によって求めた 3 次元座標は画像の歪み補正とクラスター分析による推定座標の選別によってより精度の高い結果を得ることが判った。

以上の 3 つの工事写真の撮影方法や 3 次元視点位置及び方向ベクトルの取得方法に基づいて工事写真を収集し、写真画像と VR 画像の比較することによって工事の進捗を視覚的に判断し得ることを確認した。

注 1 VCS(Virtual Construction Site、仮想建設現場)：建築物の建設プロセスにおける進捗状況を、バーチャル空間において再現・検討するシステムである(詳細は参考文献 1)、2)を参照)

<謝辞>

本論文は、岐阜県からの委託である WABOT-HOUSE プロジェクトにより行われた。なお、本論文の作成に当って現場の関係者に御協力を頂いた。ここに謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 嘉納成男・他：バーチャル建設現場システムの開発－プロトタイプシステムの開発とその開発問題－、日本建築学会第 18 回建築生産シンポジウム論文集、pp67～72、2002. 07
- 2) 嘉納成男・他：バーチャル建設現場システムの開発－建築工事の可視化シミュレーション－、日本建築学会第 19 回建築生産シンポジウム論文集、pp95～102、2003. 07
- 3) D. Curtis et al.: Several Devils in the Details-Making an AR Application Work in the Airplane Factory-, Proc. Int'l Workshop Augmented Reality, pp47～60、1998
- 4) 江口禎・他：作業所プロジェクトにおける総合的進捗管理の機能と仕組み－その仮説的概念と一作業所の実態、日本建築学会第 15 回建築生産シンポジウム論文集、pp449～450、1999. 07
- 5) 鈴木光彦：イントラネットを活用した進捗管理システムについて、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp 295～302、1999. 09
- 6) 香月泰樹・他：携帯端末による作業所進捗管理システムの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp 479～480、2000. 09
- 7) Jorge Abeid and David Arditi: Linking Time-Lapse Digital Photography and Dynamic Scheduling of Construction Operations J.Comp.in Civ. Engrg., pp 269～279、2002. 10
- 8) 金炯根・他：建築生産における VR 技術の活用化、日本建築学会第 26 回情報システム利用技術シンポジウム論文集、pp161～164、2003. 12
- 9) 金炯根・他：建築生産における現場写真と VR 画像との比較、日本建築学会第 20 回建築生産シンポジウム論文集、pp313～318、2004. 07
- 10) Hyungeun Kim et al.: A Study on the Application of VR Technique to Building Construction, ISARC, Vol.21, pp431～436、2004. 09
- 11) 金炯根・他：VR 技術を用いた現場写真の活用化、日本建築学会第 27 回情報システム利用技術シンポジウム論文集、pp31～36、2004. 12

(2005年7月10日原稿受理、2005年9月27日採用決定)