

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月18日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560629

研究課題名（和文）

高精度画像処理による建築部位等の精密な3次元計測に関する研究開発

研究課題名（英文）

Precise three-dimensional measurement of the building element with high precision image processing

研究代表者

平沢岳人（HIRASAWA GAKUHITO）

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30268578

研究成果の概要（和文）：

写真測量は、仮設機材や仮置資材などで雑然とした建築現場においても手軽に実施できる技術である。トータルステーション等の大型機材では取り回しが困難な現場においても実施でき、他の測量手法と比較して可搬性の面で特に優れている。本研究では、写真測量を建築でより高度に活用するために、測量精度を向上させ、誤差の傾向を示し、運用時の信頼性を高めた。さらに、設計図書等の建築情報と工事写真との相互参照を可能にした。

研究成果の概要（英文）：

Photogrammetry is easily available even in the construction sites where various materials and temporary equipment are scattered, because a digital camera is much more portable than the other measuring devices such as a total station or a 3D scanner.

In order to utilize photogrammetry more highly in the A/E/C fields I improved measuring accuracy, illustrated error tendency, and concretely explained employment reliability. Furthermore I developed the system which cross-refers with construction information (ex. BIM models) and construction photographs.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：

科研費の分科・細目：建築学・都市計画・建築計画

キーワード：写真測量、測量精度、工事写真管理、コンピュータビジョン、画像処理、施工現場

1. 研究開始当初の背景

近年、偽装問題を契機として、建築物の品質管理の改善に期待が寄せられるようにな

っている。建築物の品質を確認する上で、建築部位に使用される素材の適切な選択、および納まりの正確さが重要である。納まりの確

認においては正確な測量技術が求められる。

測量技術に関してはトータルステーションのような精度の高い装置や、3次元スキャナのような新しい機器が使用されるようになってきている。しかし、これらのデバイスは大きかりで取り回しに不便であり、特に建築現場のように狭い空間に資材が詰め込まれているような場所では気楽に使えるものではない。そこで、これらに代わるものとして、軽装備で精度も高い計測技術の開発を目指した。

2. 研究の目的

軽装備でありながら高精度な測量技術を開発する。測量には写真を用い、既存の装置と比較して同等あるいはそれを上回る精度を実現する。また、写真と設計情報を紐付け、測量用途のみでなく出来形管理にも活用できるようにする。

3. 研究の方法

(1) 精度に関する検証

写真で測量する場合、以下の項目が測量精度に大きく影響する。

- デジタルカメラの画素数
- 画像の歪み
- 画像処理のアルゴリズム

本研究では、a)およびb)に関して重点的に検討した。またc)については関連する要素技術が多岐にわたるが、一部について検証した。

(2) 実現場での試用

この技術の実用性を評価するため、施工現場で測量実験を行った。

(3) BIM 建築モデルを前提とした工事写真と建築モデルの相互参照システムの構築

測量用途の写真撮影は、通常管理業務で撮影する工事写真と区別なく行える。写真の管理を測量用途のみに限定せず一般の工事写真にまで展開し、その効果を検証した。

(4) 複数の写真による3次元形状の構築

1枚の写真からでも精度の高い写真測量が可能であるが、測量対象に対して撮影位置を変えた複数枚の写真を用いればステレオ測量が可能となり、対象の3次元形状の構築が可能となる。3Dスキャナの代替となりうるか検証した。

4. 研究成果

(1) 精度に関する検証

本研究では、ビジュアルタグと称する測量の手がかりとなるものを写真枠内に写るように撮影する方式をとる。この方式では、ビジュアルタグの既知の寸法を用いることにより、写真内の任意の2点間距離を計測することができる。本方式による測量精度を検証するために画像の歪みに関するカメラのキャリブレーションを丁寧に実施した後、画素

数の異なる複数のカメラによる測量精度の傾向を比較した。画像の歪み補正にはOpenCVを用いた。

① 使用したカメラ

比較に使用したカメラは以下である。

- Sony α900: 解像度 6048×4032、SIGMA 24-70mm F2.8 EX DG MACRO
- Nikon D7000: 解像度 4928×3264、AF-S NIKKOR 18-105mm f/3.5-5.6G ED VR
- FinePix F100fd: 解像度 4000×3000

② 計測実験

これらのカメラを用いて規定の間隔に配置されたビジュアルタグ間の距離を計測した。図1に計測用に用いたビジュアルタグの配置を示す。また図2は計測写真の例である。

•SINGLE 120, MULTI 1x120



•MULTI 4x40

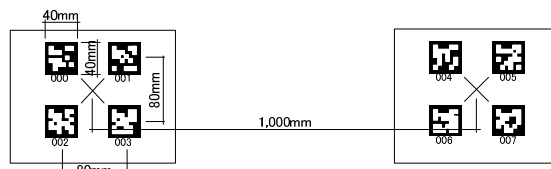


図1 計測用のビジュアルタグの配置



図2 計測用写真の例 (F100fdによる)

図1において SINGLE120、MULTI1x120といったキャプションが見られるが、これは画像中のビジュアルタグの認識のさせ方による分類である。紙面の都合上これらに関する詳細は省くが、3種類の認識パターンに関して精度検証をおこなうこととした。カメラ3種類×認識パターン3種類の計9通りの実験を行った。

計測する距離はいずれも1000mmである。1000を真値として、計測値と真値との差を誤差であるとして、それぞれの誤差に関して平均および標準偏差を求めた。表1~3に結果をまとめる。

計測値平均に着目すると、各トラッカーに共通して a900 の計測値平均が最も真値に近く、D7000、F100fd と続く（ただし、MULTI 1x120 に関しては F100fd、D7000 で逆転する）。カメラ毎の計測値平均の差はそれほど大きなものではないが、解像度が高い順に計測値平均が真値に近づいている。誤差の標準偏差に着目すると、SINGLE 120、MULTI 1x120 では、a900、D7000、F100fd の順に、MULTI 4x40 では、F100fd、a900、D7000 の順にばらつきが小さいことがわかる。

最も良好な結果である MULTI4x40 に関して誤差に関するヒストグラムを図 3 に示す。

表 1 a900

	計測値の平均(mm)	認識率 (%)
	誤差の平均 (%)	誤差の標準偏差
SINGLE	1003.1128	88.0952
120	0.3113	0.2174
MULTI	1001.2579	100.0000
4x40	0.1258	0.1175
MULTI	1000.5967	98.4127
1x120	0.0597	0.1668

表 2 D7000

	計測値の平均(mm)	認識率 (%)
	誤差の平均 (%)	誤差の標準偏差
SINGLE	1001.2579	100.0000
120	0.1258	0.1175
MULTI	1001.6080	100.0000
4x40	0.1608	0.2111
MULTI	1001.9980	96.3158
1x120	0.1998	0.1165

表 3 F100fd

	計測値の平均(mm)	認識率 (%)
	誤差の平均 (%)	誤差の標準偏差
SINGLE	1000.5967	98.4127
120	0.0597	0.1668
MULTI	1002.2124	100.0000
4x40	0.2212	0.1874
MULTI	1001.6619	91.0526
1x120	0.1662	0.2254

図 3 によれば、誤差は 0.2 を中心に±0.2 以内にほぼ収まっていることがわかる。測量誤差は大きめに見積もっても±0.3%未満を期待できることがわかった。この程度まで誤差の取り得る範囲が狭ければ要求される精度は十分に満たしているといえる。また +0.2%がピークとなる件も、実寸にして 2mm 程度であるので、この測量法が長めに計測してしまう傾向があるとは断定できず、検査用タグの製作精度や配置時の誤差が発現しているとも考えられる。いずれにせよ建築の実務に耐える精度は達成された。

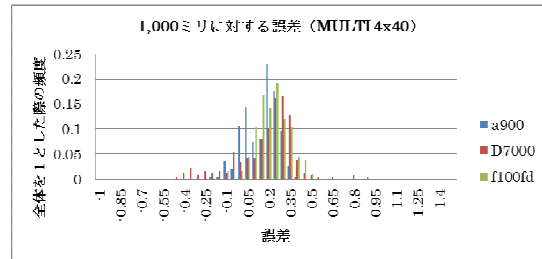


図 3 計測値の誤差分布

③ カメラ内蔵歪み補正機能を用いた計測精度

計測の精度に与える歪みの影響は大きい。事前の入念なキャリブレーションにより、上述の高い精度が得られるが、キャリブレーション無しで実用上の精度が得られないか試験した。表 4 および図 4 に D7000 内蔵の歪み補正機能を使用した計測実験結果を示す。

表 4 歪み補正の有無、方式の比較

	計測値の平均(mm)	認識率 (%)
	誤差の平均 (%)	誤差の標準偏差
なし	1007.2061	-
	0.7206	7.2962
OpenCV	1005.7153	-
	0.5715	4.4962
内蔵	1005.7887	-
	0.5789	4.4677

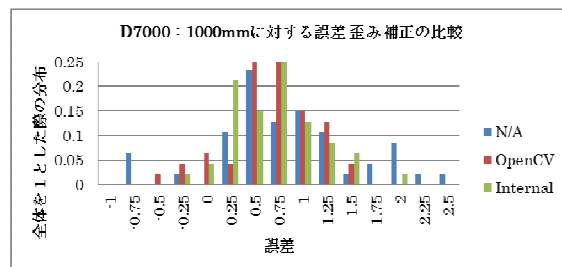


図 4 歪み補正の有無、方式の比較

カメラ内蔵の歪み補正機能を用いた場合でも、OpenCVによる事前のキャリブレーション

ョンを施したものに比べやや劣る程度にとどまっている。使用局面にもよるが十分に実用水準であることがわかった。

(2) 実現現場での試用

本件に関しては後節にて触れることとし、紙面の都合上省略する。

(3) BIM 建築モデルを前提とした工事写真と建築モデルの相互参照システムの構築

ビジュアルタグを含めた工事写真では撮影したカメラを原点とする3次元座標系におけるタグの位置と傾きを得て、このデータを用いて計測値としている。これをタグを原点とする座標系に変換することにより、カメラの位置および視線方向が得られる。つまり、設計図書上に撮影位置とカメラ方向をプロットすることが出来る。

① 実現現場での撮影実験

図5は実験時に撮影した写真の例である。図6はこの写真から撮影位置およびカメラ方向を得る方法を示す。

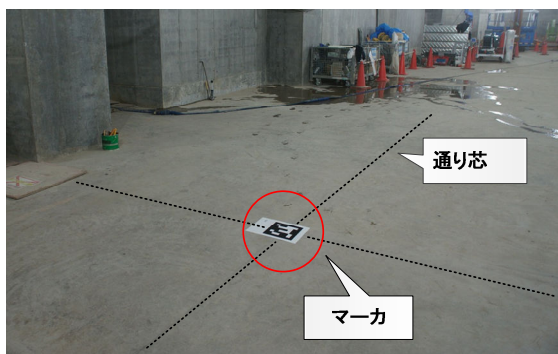


図5 タグを含めた撮影例

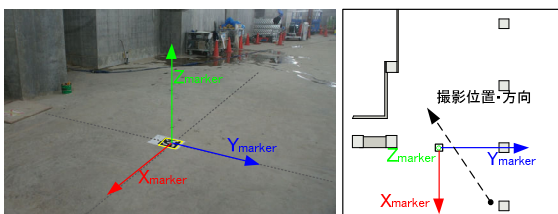


図6 撮影位置・方向を計算する

② 図面上への撮影情報のプロット

上のようにして撮影した写真それぞれについて撮影位置・方向を計算することで、図面あるいは建築モデル上に撮影情報をプロットすることが出来る。図7は、CADでフロアデータを開き、そのフロアで撮影された写真情報をプロットした結果である。三角錐は錐の頂点が撮影位置、底辺の長方形が画角を表している。

③ 写真 DB と建築モデルの相互参照システム

撮影情報をデータベースに格納し、このデータベースをCADから呼び出せるシステムを構築した。図8では工事写真から建築モデルを呼び出す事例を示す。写真DBとCAD

の連携によって建築モデル(部位)の写る写真の検索も可能である。

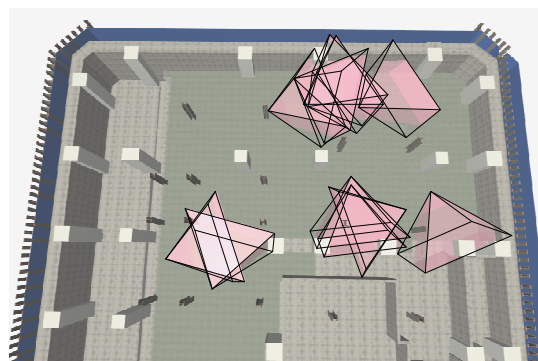


図7 撮影情報の図面上でのプロット



図8 工事写真からCAD内の建築モデルの呼び出し(上:工事写真、下:撮影情報と一致する形での建築モデルの呼び出し)

④ 高精度GPSおよび三軸角度センサによる撮影位置・方向の取得

工事写真の撮影位置・方向に関しては、上述のビジュアルタグによらないで、高精度なGPSと三軸角度センサを用いることも可能である。撮影のためにタグを配置できない状況においては、この手段によっても高度な工事写真管理をおこなうことが出来る。難点としては、GPSの電波が届かない状況では使用できないことである。図9にこの方式での撮影で使用する機材と撮影者の装備を示す。また図10に図7と同等の、図11に図8と同等な事例を示す。

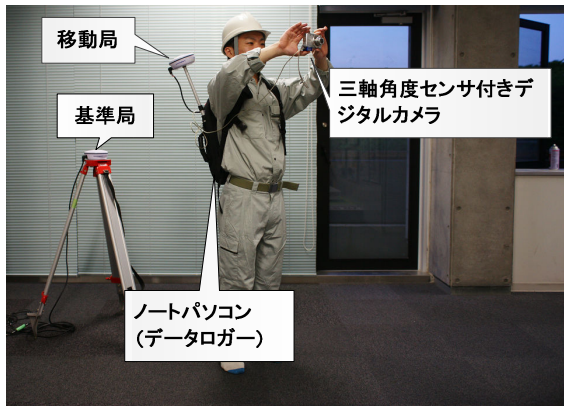


図9 機材と撮影者の装備

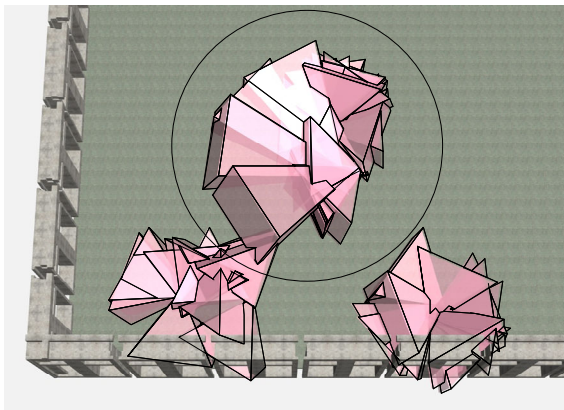


図10 工事写真の図面上プロット

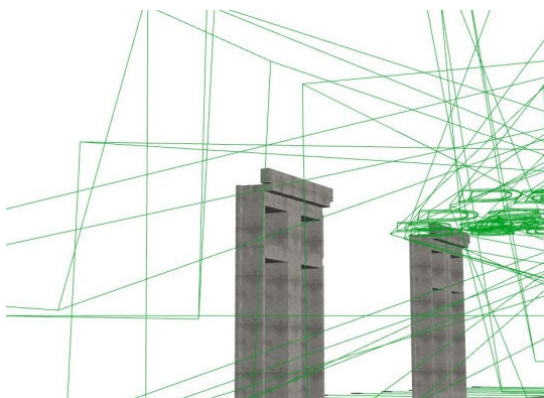


図11 工事写真と建築モデルの対応
(上：工事写真、下：撮影位置・方向を再現した建築モデルの呼び出し)

工事写真は品質管理のためには欠かせないツールであるが、本システムのように、撮影情報と設計情報（建築モデル）が相互に紐づけられれば、従来の工事写真の役割に加えて出来形管理の実施も可能となる。また、ビジュアルタグを写し込んだ工事写真では採寸することも可能である。

(4) 複数の写真による3次元形状の構築

1枚の写真からでも精度の高い写真測量が可能であるが、測量対象に対して撮影位置を変えた複数枚の写真を用いればステレオ測量が可能となり、対象の3次元形状の構築が可能となる。ここでは、施工現場等で(3)で示した手法で撮影された工事写真のセットを素材とし、対象の3次元形状が構築できるか試みた。工事写真のみで3Dスキャナと同等の結果が得られれば、取り扱いが煩雑な3Dスキャナをデジタルカメラで代替することが可能である。

① 対応点の検出の自動化手法

ステレオ測量の原理では、2枚以上の画像で同一の幾何学的要素（点や面）が撮影されていれば測量が可能である。つまり、ステレオ測量をおこなうには、同一の点に関して複数の画像内でのそれぞれの座標値を対応づける必要がある。この処理を対応点の設定というが、これを可能な限り自動的におこない、手動による対応は最終段階の微調整程度に減らせれば作業性が高まる。

本研究では SIFT による特徴点の抽出を工事写真に対しておこない、特徴ベクトルの比較により対応点の設定の自動化を試みた。

出来形確認に不可欠な検査対象物の幾何学的形状の復元には頂点（や稜線）を直接的に抽出できることが望ましいが、SIFT 特徴点の出やすい場所は対象物の頂点等と一致しないことが多い。そのため、建築技術的に望ましい位置で SIFT 特徴点が生ずるように、SIFT 計算の前処理として写真画像に対して稜線抽出などの画像処理をおこなうことでこれに対応した。また、自動的に生成した対応点リストには、いわゆる誤対応が含まれる。RANSAC によるフィルタリング処理で特徴点リストから誤対応を除く処理を自動化した。これらの処理の後、なお不足する対応点の追加や誤対応の削除を手動にておこなう。

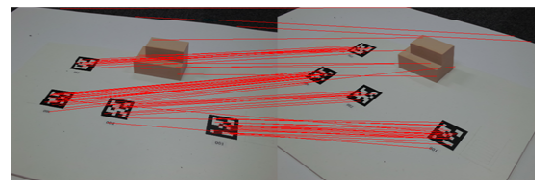


図12 対応点の設定の様子

② ステレオ写真測量から実寸を得る

対応点が適切にリスト化されれば、単純な計算により各点の座標値が求まる。この段階

で得られる座標値は単位無しの相対的な数値であり、すなわち、対象物の相似形状が得られている。この相似形状を適切にスケールリングすれば実寸の3次元形状となる。適当な2点を実際に計測してこれをおこなってもよいが、ビジュアルタグが画像中に含まれていればこの処理も自動化される。

③ 工事写真から3次元形状の構築

図13に示すような工事写真のセットから3次元形状を復元した事例を示す。

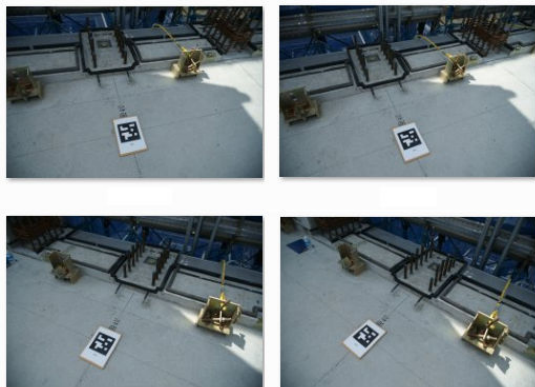


図13 復元に用いる写真セット (一部)

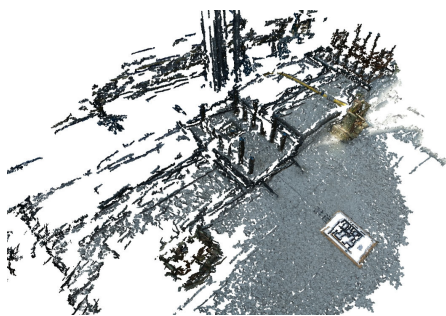


図14 復元例

図14では鉄筋位置なども正しく構築されているのがわかる。また、図15に示すように、このようにして構築された3次元形状は実寸値で構成されている。写り込んだタグの幅は163mmであるが、構築した3次元モデルのタグ幅を手動で選択した2点間の距離で計ると163.104を示しており、ほぼ原寸通りに構築できているのがわかる。

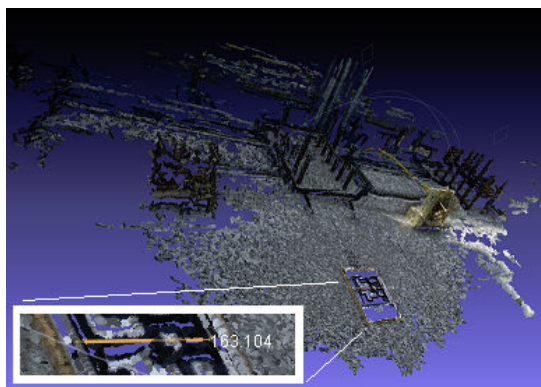


図15 実寸値で構築された3次元形状

3Dスキャナは点群を生成するのみであり、点群から幾何的な構成要素(主として面)の構築はポストプロセスのソフトウェアの役割である。本システムにおいて、3Dスキャナの機能に相当するのは複数の工事写真から3Dスキャナと同様の点群を生成する機能である。その後の処理で構築された3次元形状の品質から判断して点群の生成に関しては3Dスキャナと同等以上の機能を保有しているといつてよい。3Dスキャナをデジタルカメラで置き換えられる。

以上、高精度画像処理による建築部位等の精密な3次元計測に関する研究開発において得られた成果の概略を説明した。紙面の制約で言及しなかったが、特に測量精度の向上においては歪み補正に関する細やかな調整や、サブピクセルレベルでの画像処理などを実施しよい結果が得られている。これらについては別途論文として発表する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

①加戸啓太、平沢岳人、三次元 CAD とコンピュータビジョンによる写真管理に関する研究、日本建築学会技術報告集、査読有、18巻、2012、781-784

②加戸啓太、中林拓馬、平沢岳人、軽装備での写真測量に関する研究—コンピュータビジョンによる建築部位等の採寸に関する研究—、日本建築学会技術報告集、査読有、17巻、2011、393-396

〔学会発表〕(計3件)

①平沢岳人、工事写真の撮影位置・方向情報の取得と三次元 CAD による写真管理に関する研究、日本建築学会(招待講演)、2012.3、日本建築学会(港区)

②加戸啓太、岩田健吾、中林拓馬、平沢岳人、BIM とコンピュータビジョンによる写真管理に関する研究 その1、日本建築学会、2011.8、A-2分冊、511-512、早稲田大学(新宿区)

③加戸啓太、岩田健吾、中林拓馬、平沢岳人、BIM とコンピュータビジョンによる写真管理に関する研究 その2、日本建築学会、2011.8、A-2分冊、513-514、早稲田大学(新宿区)

〔その他〕

ホームページ等

<http://hlab.ta.chiba-u.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平沢 岳人 (HIRASAWA GAKUHITO)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30268578