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 —

PHOTO-MEASUREMENT WITH A DIGITAL CAMERA

— Measuring the size of building elements by computer vision —

加戸啓太 — * 1 中林拓馬 — * 2
平沢岳人 — * 3

キーワード:
コンピュータビジョン, イメージプロセッシング, トラッキング技術,
光学タグ, 写真測量

Keywords:
Computer vision, Image processing, Tracking technology, Optical tag,
Photo-measurement

Keita KADO — * 1 Takuma NAKABAYASHI — * 2
Gakuhito HIRASAWA — * 3

Computer vision is concerned with the theory and technology for robot's eyes that obtain information from images. Tracking is one of the indispensable requirements for computer vision system and is responsible for registering the virtual world in the real world. The authors select a marker-based tracking method, which computes the location such as position and orientation of a square marker in physical space out of an image captured by a camera. In this paper, the authors would like to propose a photo-measurement tool with a digital camera.

1. はじめに

コンピュータビジョンとは、「ロボットの目」を作る研究分野と呼ばれ、簡単には二次元の画像から元の世界の三次元情報を得ることを目的とする技術である。さまざまな実装パターンで研究が行われており、対象物の形状や動き・変化に関する情報や、色や素材感などについても幅広く研究されている。¹⁾

本研究の目的はコンピュータビジョン技術を応用し、建築分野、特に建築施工あるいは建築文化財の調査等で利用できる新たなツールを提案することである。可能な限り普及が進んでいる機材を用いた実装とし、低コストで運用可能とすることを原則とする。本稿ではコンピュータビジョン技術を応用し、単一の汎用デジタルカメラによってステレオカメラ測量を行い建築部位等の採寸を行う手法について報告する。

2. ビジュアルタグと強化／複合現実感

近年、ARToolKit^{注1}が周知されるようになり、強化／複合現実感技術 (Augmented Reality/Mixed Reality、以降 AR/MR) も身近なものになりつつある。AR/MR とは簡単に言えば、現実の映像に仮想のCGを重畳する技術である。マーカーと呼ばれる光学タグを画像内に含ませ、これをトラッキングすることで違和感なく実空間の画像にコンピュータグラフィックス (仮想物、以下 CG) を重畳している²⁾。本稿では、CGの重畳に利用するタグとカメラと相対的な位置関

係とタグ設置面の傾きをもとに、実空間中の建築部位の採寸を行う手法を報告する。なお、光学タグにおいてはQRコード³⁾が広く知られており、二次元バーコードなどと呼ばれることが多いが、本研究ではRFIDとの機能的な対比を際立たせるために、光学タグをビジュアルタグと呼ぶことにしたい。

3. 既往の研究との位置づけ

コンピュータビジョン技術を利用し、建築部位等を採寸する手法についてはステレオカメラが代表的である。ステレオカメラは三角測距法によって対象物 (の特徴点) の位置を算出するため、基長線が短いと十分な精度を得ることができない。よって可搬性と計測精度が相反してしまう。また、単純には左右のカメラで撮影した一対の画像に共通して含まれるものしか測量出来ないため、ある程度の範囲を測量する場合複数回に分けた測量結果をマージする必要がある。単一のカメラによる測量については、秋本ら³⁾によるデジタル画像計測法があげられる。この計測法では多数の画像内の特徴点群から補正を行い、測量の分解能を高めることで実用上十分な精度での測量が可能であるとしている。ただ、画像内の特徴点のみを手がかりにカメラの位置を算出するため、反射ターゲットとよばれる特徴点を対象物に数十枚貼る必要があるようで多少手間がかかる。また、測量対象は反射ターゲットを貼ることのできるものに限られる。

¹⁾ 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻 博士後期課程 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33 工学研究科建築・都市科学専攻 平沢研究室)
²⁾ 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻 博士前期課程
³⁾ 千葉大学大学院工学研究科 准教授

¹⁾ Graduate Student, Graduate School of Engineering, Chiba Univ.

²⁾ Graduate Student, Graduate School of Engineering, Chiba Univ.
³⁾ Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Chiba Univ.

他方、三次元スキャナ、トータルステーション等も測量、測距等に使われるが、測量作業そのものを現場で行う必要がある点でコンピュータビジョン技術を利用した測量技術とは相違がある。コンピュータビジョン技術による測量では、採寸結果とあわせて対象物の画像が得られる点は品質管理においては注目すべきである。

4. 画像から取得するデータの精度について

現在までの研究で画像から取得するデータの精度には、画像の歪曲収差の補正、解像度およびタグのトラッキングのための二値化の閾値が関係していることがわかっている⁴⁾。それぞれ追加の検証について簡単に報告する。

4. 1. 歪曲収差の補正

カメラで撮影した画像にはレンズに起因する歪曲収差が生じている。特にこれは広角で撮影した時に顕著で、直線の多い建築物等を撮影すると樽型の歪みを見ることができる。前稿ではこの歪曲収差が画像から取得するデータの精度に影響することを確認し、歪曲収差を補正することでタグ間の距離の測定精度が向上することを確認した。補正のアルゴリズムを新たなものに更新し、同様の測定を行った結果が表1である^{注2)}。

測定結果を比較すると、画像によっては旧歪み補正による測定値の方が実長に近い場合もある。しかし、旧歪み補正で大きく誤差が出ていた画像に対しても新歪み補正ではかなり実長に近い測定結果を得ることができている。

なお、取得データに関する検証には前稿と同じく、図1に示すような検査用タグ配置シートを用いた。前稿までデータとの比較のために、写真の撮影の仕方やタグの映り込み方などできるだけ同様になるよう留意している。

4. 2. 画像の解像度と精度

6048×4032pixel (2400万画素) の画像を用いてタグ間の距離を測定する実験を行った^{注3)}。実験の結果をまとめたものが図2である。閾値を調整しないケースでは、ID0、ID1のタグ間隔(実長250mm)で-0.3%~+0.6%程度の幅があるが、既知の寸法から閾値を調整したケースでは、全体としてやや+側に寄るものの誤差0%~+0.4%程度の精度が得られている。タグ間距離の測定においては、二値化の閾値を上げる(黒と判断される画素が増える)と測定値が小さくなることから、タグ間の距離が+側に寄るのはタグが小さめに認識されていると考えることができる。

以上が追加の検証である。歪曲収差の補正アルゴリズムの更新と画像の高解像度化によってタグ間距離の測定精度は向上したといえる。今後もデータ精度について検討を重ねていく予定である。

5. 単一のカメラによるステレオカメラ測量について

一般にステレオカメラによる測量では、既知の間隔、輻輳角で配置された二台のカメラを用いて三角測量を行っている。ステレオカメラによる測量では、まずそれぞれのカメラに映る対象点の画像内(クリップ座標系)での位置から、注視点(カメラの目標点)との角度差を求める。この角度差と既知であるカメラの間隔、輻輳角をもとに三角測量を行い、対象点の(いずれかのカメラの眼点座標系での)三次元座標を得る。こうして得られた対象点の三次元座標と他の対象点との距離等を算出していくのが一般的なステレオカメラ

表1 歪曲収差の補正

画像番号	旧・歪み補正		新・歪み補正	
	測定値(mm)	誤差(%)	測定値(mm)	誤差(%)
1	251.22	0.49	250.58	0.23
2	257.48	2.99	251.54	0.62
3	258.10	3.24	251.35	0.54
4	258.92	3.57	251.34	0.54
5	257.32	2.93	251.04	0.42
6	255.70	2.28	250.46	0.18
7	250.20	0.08	249.57	-0.17
8	249.90	-0.04	249.28	-0.29
9	249.95	-0.02	249.36	-0.26
10	250.81	0.32	250.06	0.02

実長：250mm 閾値：125

図1 検査用タグ配置シート (単位：mm)

実長：250mm 閾値調整なしデータの閾値：140

図2 2400万画素での測定誤差の分布

による測量であると整理できる。カメラを既知の間隔、輻輳角で配置する必要があることから、三脚に二台のカメラがマウントされたものが用いられることが多い。

コンピュータビジョン技術によれば、画像内のタグをトラッキングすることで、タグを基準とした世界座標系でのカメラの位置を算出できる。画像の組み合わせ毎にカメラ間の位置関係を求めることで、単一のカメラにてステレオカメラ測量と同様の三角測量を行うことができる。タグを原点とした世界座標系で三台以上のカメラ位置を扱うことも可能であることから、本節で扱う測量システムを以降、仮想マルチカメラ測量とする。仮想マルチカメラ測量による測量の原理を以下に示す。

- ①タグと対象点が映るように、二枚以上の画像を撮影する。タグはカメラ位置計算のための世界座標系の原点となるので動かさない。
- ②タグから得られたカメラとの相対位置、タグ設置面の傾きから、カメラ位置を算出する。
- ③それぞれの画像内で対象点が映る箇所をマウスクリック等で指定し、眼点座標系でカメラ位置（原点）から対象点へ方向ベクトルを得る（図3）。
- ④方向ベクトルとタグ設置面との交点を算出し、交点座標を世界座標系へと変換する。
- ⑤変換した交点座標と②で求めたカメラ位置からレイをつくる。他の画像からも同じように同一の対象点へと向かうレイをつくり、これらの交点（最近点）を求める。この点の座標がタグを原点とした世界座標系における対象点の三次元座標である（図4）。

5. 1. 従来の寸法測定との違いについて

前稿の最後に示したタグを利用した寸法測定と本稿で示す仮想マルチカメラ測定の違いについてここで整理する。従来の寸法測定は、④で得た交点座標を利用したものである。この交点算出は、方向ベクトルとタグ設置面の平面方程式との交点を求めることにより行う。平面方程式は平面の法線とオフセットによって定義できるため、測定した交点をもとに新たな平面を定義することでタグ設置面以外も測定できる。ただし、面や辺が直角に交わる構成が多い対象物でないとうまく測定を行うことができないこと、平面の新たな定義によって誤差が蓄積されていくことが欠点であった。

仮想マルチカメラ測定では画像内の対象点を三角測量によって測定していくので、対象点が特徴的な形状であればどのような形状でも測定することができる。図5左のように斜面の多い形状を測定するのは定規等を用いても難しいが、仮想マルチカメラ測定では測量が可能であり図5右のように三次元モデル化することができる^{注4}。

また、従来の測量では画像1枚から測量が可能であるが、仮想マルチカメラ測定では最低限2枚の画像が必要である。ただ、これらの測量手法に排他的な関係はなく、組み合わせて利用することも可能である。

5. 2. 仮想マルチカメラ測定の精度検証

図6左上に示すような試験体を仮想マルチカメラ測定によって測量し、三次元形状を取得する実験を行った。なお、試験体は、CADでモデリングしたものを数値制御加工機^{注5}で切削したものである。測量の手順とあわせて実験の様子を以下に示す。

- ①タグ^{注6}を設置し、試験体の周囲から写真撮影を行った。本実験で使用した写真は5枚である。
- ②測量プログラムに写真を読み込ませ、測量を開始する。適宜写真を拡大しながら対象点をクリックし、レイを登録していく。
- ③写真を切り替え、他写真（視点）からのレイとの対応をとりながらレイを登録する。一つの対象点の三次元座標を得るためには少なくとも二つの写真からのレイが必要である。ある対象点に対し三つ以上のレイを作成した場合、その内から最適と判断できる一組のレイが計算に用いられる^{注7}。
- ③対象点群を求めたら、次に対象点を選択し面を張っていく。
- ④対象点の三次元座標はタグの中心を原点とする座標系で表されている。最後にローカル原点となる頂点とX軸方向を指定する。

図6右は仮想マルチカメラ測定で得た試験体の各頂点座標を示し

図3 画像内対象点のクリックによる方向ベクトル

図4 二視点からのレイの交差

図5 斜面の多い形状の測量

（左：測定対象、右：測定結果のもとに作成したCG）

図6 実験に用いた試験体（左上）、測定結果（右）

測定結果から求めた寸法（左下）

図7 再切削したコピー（左）と試験体（右）

たものである。概ね正しい寸法が得られていることがわかる。各頂点座標から、試験体の主要な寸法を求めると図6左下のようにになる。実長と比較し、 -0.5mm 程度の誤差が見られる。図7左は、測定の結果できた試験体の三次元モデルを再度数値制御加工機で切削したものである。ほぼ試験体（図7右）の形状が複製出来ていることがわかる。両者を手にとって比較してみても、大きな形状の差異を感じることはなかった。

5. 3. 石段を対象とした屋外実験

法華経寺（千葉県市川市）の大仏下の石段を対象に仮想マルチカメラ測量による測量実験を行った。一辺が240mmのタグを石段手前に配置し、撮影を行ったものを測量した。測量には、図8、図9に代表されるような写真5枚を利用した。測量の様子を図8と図9に示す。図8が石段の特徴点をマウスで選択し、レイを作成しているところ、図9が、測量の結果得た石段の特徴点に面を張っているところである。また、測量の結果を三次元モデル化したものが図10である。特徴点として、石段各段の頂点を採寸したので、形状としては滑らかさがなく粗さが目立つが、図8、9の画像からもわかるように、計測した石段の頂点が写真を跨いで正しく写真に重量できている。

以上、コンピュータビジョン技術の建築分野への応用として、仮想マルチカメラ測量について述べた。近傍にタグを置き、周囲から数枚の写真を撮影するのみで建築部位等の採寸および三次元モデル化が行えるといった手軽さは、仮想マルチカメラ測量の大きな特徴であるといえる。他方、4節での精度検証も含めて、取得データの正確さについては向上の余地があると考えられる。また、マウスでの対象点クリックに代わり画像内の特徴点を自動的に認識するアルゴリズムの組み込みなど、実用性や便利さを高めるインターフェイスについても検討していきたい。

6. まとめ

ビジュアルタグからカメラの位置情報を算出し、カメラの間隔、輻輳角等を得ることで単一のカメラによるステレオカメラ測量を行う、仮想マルチカメラ測量について記した。ビジュアルタグと一台のデジタルカメラで多様な形状の採寸が可能であり、手軽で可搬性の高い実用的な応用例を提案できた。

本研究では、伝統木造建築を対象にデジタルアーカイブ化に関する研究を行っている。伝統木造建築、特に屋根部では未製材の部材も多く、コンベックス等での採寸の難しい箇所も多い。運用試験を重ね、完成度を追求したい。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(C)21560629)の助成を受けている。

参考文献

- ¹⁾ David A. Forsyth, 他: コンピュータビジョン (原題 Computer Vision: A Modern Approach)、2007、共立出版
- ²⁾ 山田祐輝、他2名、複合現実感を用いたインテリアシミュレーターの開発、日本建築学会大会(広島)学術講演会、学術講演梗概集 pp.505-506、2008.9
- ³⁾ 秋本圭一、他2名、ディジタル画像計測法を用いた精密工業計測、電子情報通信学会論文誌、D-II、情報・システム、II・パターン処理、pp.1299-1309、2001.10
- ⁴⁾ 平沢岳人、他2名: コンピュータビジョンによる建築の施工品質管理の可能性に関する研究、第23回建築生産シンポジウム、pp.127-132、2007.7
- ⁵⁾ 平沢岳人、加戸啓太、コンピュータビジョンによる建築の施工品質情報管理の可能性に関する研究 その2、第24回建築生産シンポジウム、pp.149-154、2008.7
- ⁶⁾ 加戸啓太、平沢岳人、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、日本建築学会、第14巻 第27号、pp.307-310、2008.6

図8 石段を対象とした検討

図9 三角形のメッシュとして面を張る

図10 測定結果から得た石段表面の三次元モデル

- ⁷⁾ Intel®: Open Source Computer Vision Library, Reference Manual, 2001
- ⁸⁾ Wagner Daniel, et al.: ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices, Proceedings of 12th Computer Vision Winter Workshop (CVWW'07), February 2007

注

- ^{注1} ARToolKit (<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>)は、AR/MRを実現するためのC言語ライブラリである。本研究では参考文献8)に示すARToolKitPlusを使用している。
- ^{注2} カメラはFUJIFILM製FinePixF100fdを用いた。解像度は1200万画素。ISO 100のみ設定し、あとはオートで撮影した。
- ^{注3} これ以降の実験は、SONY製SONYα900 DSLR-A900を利用した。レンズはSIGMA製MACRO 70mm F2.8 EX DGである。フルサイズをイメージセンサのため、被写界深度が浅くなりすぎないように、f16程度に絞り、三脚を使用して撮影を行った。ISO 100で撮影。
- ^{注4} 測量結果を、GDLのコードとして出力することで三次元モデル化を行っている。GDLとはArchiCAD (GraphiSoft製のCADソフトウェア)のライブラリオブジェクト作成に用いられる言語である。
- ^{注5} Roland製MDX40を利用した。
- ^{注6} この実験では一辺40mmのタグを利用した。カメラは注3に記した通りである。
- ^{注7} 三本以上のレイが作成された場合、レイとレイの角度が30度以上あり、かつ最も近傍となるレイの組み合わせを計算している。

[2010年2月19日原稿受理 2010年7月13日採用決定]