

氏 名	三 浦 悟
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2487 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 都 市 環 境 工 学 専 攻
学位論文題目	土木計測分野におけるデジタル写真測量の高度化に関する研究

論文調査委員	(主 査) 教 授 大 西 有 三	教 授 青 木 謙 治	教 授 田 村 正 行
--------	----------------------	-------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

土木分野における情報化施工及び構造物維持・管理のための変位・変形計測へのデジタル写真測量の導入が始まっている。画像を用いた三次元座標計測技術は航空写真測量技術として古くから開発されていたが、1990年代以降のデジタルカメラとコンピュータの高性能化によって地形測量技術の範囲を超え、船舶や航空機、ロケットなど大型の工業製品の形状計測に利用されるようになってきた。解析手法においても、セルフキャリブレーション付きバンドル調整法が確立されたことで、非計測用カメラが利用可能となり、普及が促進されつつある。

一方、トンネル工事の NATM 工法に代表される土木情報化施工では、観察及び計測の結果を迅速に評価し、設計・施工に遅滞なく反映させるために、計測技術には精度の確保とともに、作業効率の面での計測時間の縮減及び計測データの評価が迅速に実施できることが要求されている。また、法面や斜面の崩壊やすべり監視のための変状計測への需要も多く、最近では建設施工中のみならず、土木構造物維持・管理のために健全性を診断する際にも、変位・変形計測は重要な技術要素となっている。

これらのことから、土木分野における高精度・高効率の変位・変形計測法として、デジタル写真測量技術の適用が増加しつつある。しかしながら、デジタル写真測量を土木分野に適用する際、これまで適用されてきた工業製品の形状計測とは大きく異なる計測環境のため、様々な工夫が必要とされる。

本研究は、実際の土木施工現場で試行的にデジタル写真測量を用いることで、土木分野への適用性を把握するとともに、広く土木分野へ導入するための課題を抽出し、土木計測への適用性向上のために必要なデジタル写真測量技術の高度化を図ることを目的としている。具体的には、トンネル内空変位計測や斜面の動態観測などの現場計測結果を通じて、2つの研究課題を掲げた。すなわち、工業計測における計測対象と異なり、非常に大きな対象物を限られた場所から撮影し、かつ精度良く計測しなければならないのでその解決策を探るという課題と、変位の原点となる基準点、不動点の設置が困難な状況下で変位検出を遂行するための方策の開発という課題である。よって、本論文の構成は、序章および結論を含め6章から成っている。

第1章は序論であり、本論文の研究の背景と目的について論じるもので、デジタル写真測量技術の現状と適用先である土木分野におけるニーズについて概観する。情報化施工や土木構造物の変状監視、健全性調査などにおいては、計測が重要な位置を占めており、簡便で精度のよい優れた計測法が要求されている。一方、比較的容易に対象物の三次元位置を計測できるデジタル写真測量が普及し始めているため、この技術を土木計測に応用することを提示する。

第2章は情報化施工をはじめ土木計測分野へのデジタル写真測量の適用の意義を考えるため、土木分野における変位・変状計測技術の現状を述べている。NATM 工法における計測事項や土工事における情報化施工計測、構造物診断における変位・変形計測の現状について報告するとともに、使用されている現状の計測技術について示す。

第3章はデジタル写真測量の基本原則を説明するとともに、計測システムの概要を述べる。デジタル写真測量は1台のデ

デジタルカメラを用い、計測点にレトロターゲットを貼り付けた対象物を様々な方向から収束撮影し、撮影した画像上の計測点位置情報から立てられる共線条件式を最小二乗法で解くことによって、計測点の空間座標とカメラの内部標定と外部標定要素を同時計算する手法である。これを実現するための計測システムについて、計測作業の一連の処理の実用的な考え方や設計方法を整理した。計測にあたっては、カメラ、レンズの選定、ターゲットの設計、撮影形態や撮影枚数など実用面におけるさまざまな項目について計画が必要である。また、画像取得後にはターゲットの画像座標の計算、写真の接続、調整計算を行う。それら実際上の処理項目についての理論、方法について説明している。

第4章はデジタル写真測量の土木計測分野への適用性の評価、適用に際しての問題点、課題の抽出を目的としている、実現場での実験や試行導入として、山岳トンネルの内空変位計測、TBMトンネルにおける鋼製セグメントの動態観測、鉄道軌道沈下計測、鉄道橋梁の載荷時沈下計測、コンクリート構造物劣化調査（表面ひびわれ計測）および斜面動態観測をデジタル写真測量により実施した。これらの結果、土木分野の変位・変形計測へのデジタル写真測量の適用性は十分有ると評価できるが、撮影、解析上の制約を主要因とする問題点も存在することを指摘している。

第5章は第4章で抽出された問題点に対し2つの方策を提案した。まず、計測環境に制約がある場合の適用性向上策として開発した、カメラの事前キャリブレーション法を説明している。多くの現場では、計測対象物の大きさに比べて撮影可能範囲が狭く収束撮影が困難、すなわち観測ネットワークが弱い。また、コスト的、時間的に計測対象へのターゲット設置密度を大きくできない、現場での撮影枚数が多くできない、等の理由で計測精度の低下が懸念される。この問題点を解決する方法として、内部標定要素を事前にキャリブレーションすることに注目し、簡易的に高精度のキャリブレーションが可能な方法を提案した。具体的には、1.2m×2.0mの鋼板上に50mm間隔で960個の小形ターゲットを貼った平面ターゲット場に対して、全景撮影と近接撮影の2種類の撮影方法を採用し、最も補正しにくいCCD撮像面周辺部を含む内部標定要素を求める方法を提案した。実証実験結果として、計測環境に制約がある場合でも2～3倍の精度向上が認められている。

変位・変形計測は時期を隔てた時点間の座標値の差から変化の有無を判断することになるため、同一座標系での基準点、あるいは不動点が必要となるが、土木現場などでは絶対的な不動点の設置が困難であり、土木計測分野への適用性の向上には、これらを考慮した変位・変形計測法の構築が必要となる。この課題に対して、計測ターゲットの中で変位の生じていないターゲットと、変位が発生しているものを定量的に判断するために構築した、統計的仮説検定の手法による変位検出法を提案した。この方法を実証するために実施した現場実験として、幅40m、高さ20mの実斜面において99個の固定ターゲットおよび10個の可動ターゲットを設置し、人為的に可動ターゲットに2～20mm変位を与えた。この場合の検出能力の試験において、5mm以上の変位を確実に検出できることを示している。また、変位の有無の検出力の概念を用いた計測の設計法として、目標検出能力に対する必要計測精度を論じ、これまで経験的に決めていた計測手順、撮影形態の計画に対する合理的な設計指針を提案した。

第6章は本論文の結論と今後の課題、展望をまとめたものである。今後の課題としては、第5章で提案したデジタル写真測量の高度化への具体的方策を用いた事例の増強による各手法の確立と信頼性の向上および解析処理の自動化が挙げられる。今後の展望としては、電子機器の発展によるデジタル写真測量の進化、ターゲットレスの写真測量法による斜面や岩盤の変位監視、逆解析の入力データとしての利用などを挙げている。

論文審査の結果の要旨

情報化施工における変状計測をはじめ、岩盤崩落事故等の予防保全や土木構造物の健全性評価のための変位・変形計測にはこれまでほぼ唯一の方法として光学測量機が使用されてきた。近年、GPSや光ファイバを利用した計測技術も出現してきたが、コスト、計測の簡便性などの面で汎用的に適用できる状況には至っていない。これに対してデジタル写真測量技術は、現地では市販のデジタルカメラを用いて任意の位置・姿勢から対象物の写真を撮影するのみであり、光学測量機による方法に比べてはるかに短時間で済む。また、ターゲット数が多い場合でも撮影作業時間は増加しない、工業計測における計測精度は撮影距離の1/30,000～1/10,000と比べて高い、撮影した画像データをPC等で解析し高精度の三次元位置を得ることができる、など簡単に高精度の計測が実施できる可能性がある。また、計測のための配線や電源等、特殊設備が不要であるなど、コスト的にも優位性を持つ有望な技術である。しかし、工業計測分野で発展してきたデジタル写真測量技術を

土木分野に適用するにあたっては、計測作業面の制約、耐久性や耐環境性などの計測システムの課題が予想される。本研究では、実現場での計測にデジタル写真を試行導入して土木計測分野への適用性を評価するとともに、課題を抽出し、新たな対策手法を提案している。本論文の主な内容は以下のとおりである。

- 1) 実際の土木現場での実験や試行導入により、デジタル写真測量の土木計測分野への適用性の評価を行った。その結果、全対象で、光学測量機と同等以上の精度で短時間に計測することができ、適用性は認められた。しかし、土木現場における計測環境の制約に起因した計測精度の低下も認められ、また、絶対的な計測基準点や不動点の設置が困難な土木現場における変位・変形の有無の定量的評価の必要性が課題として抽出された。
- 2) 計測環境の制約—収束撮影が困難で弱い観測ネットワーク、対象物が大きいために小さいターゲット設置密度と不十分な撮影枚数—がある場合の精度向上策として、カメラの事前キャリブレーションの有効性に注目し、簡易的に高精度のキャリブレーションが可能な方法を提案した。これによって、最も補正しにくい CCD 撮像面の周縁部を含むキャリブレーションが行え、実証実験の結果、計測環境に制約がある場合でも、2～3 倍の精度向上が認められた。
- 3) 変位・変形計測においては、同一座標系での基準点、あるいは不動点が必要となるが、土木現場などでは絶対的な不動点の設置が困難であり、これまでは基準点座標基準を別途定める、あるいは動いていないと「仮定」した他のターゲットで座標系を決め、データの差を議論していた。すなわち、見た目に変位の検出可能性を判断していた。本来バラツキのある計測データ間の差を判定する場合には、計測ノイズを考慮し定量的に論じなければならない。本論文では、変位検知に統計的仮説検定の手法を適用することを試み、よい結果を得ている。
- 4) 変位の有無の検出力の概念を用いた計測の設計について論じ、これまでともすれば経験的に計測手順を決めていたこの分野において、変位計測の設計指針を示した。

以上、要するに本論文は、デジタル写真測量の土木計測分野への適用性の向上を目的とした計測システムの高度化手法を提案したものであり、簡易なオフラインキャリブレーション法、基準点のない計測場での計測データの評価、変位検出のための計測設計法の提案など土木計測へ応用する場合に不可欠な手法を提案したもので、学術上、実際に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年2月1日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。