

氏 名	張 春
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 1917 号
学位授与の日付	平 成 12 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 土 木 シ ス テ ム 工 学 専 攻
学位論文題目	Rock Displacement Measurement by Precise Close Range Photogrammetric System (精密近接写真測量による岩盤変位計測に関する研究)

論文調査委員 (主 査) 教 授 大 西 有 三 教 授 小 野 紘 一 教 授 青 木 謙 治

論 文 内 要 の 要 旨

我が国のような複雑な地質条件下での土木施工は、事前に十分な調査を行って設計をした場合でも、実際の工事にて地山が予測したものと異なる挙動を示すことが多い。そのため、例えばトンネル施工における NATM 工法では、内空変位や天端沈下測定といった変位計測の結果を的確かつ迅速に施工に反映させることが、合理的で経済的かつ安全な施工を確保するために必要な作業となっている。また、他の土木施工においても、地山や各部材の変位を計測し、その結果をもって設計および施工法の妥当性を検討および修正することは極めて重要な工程である。これまで機器や測定法の改良によって変位計測技術は進歩しているが、複雑な地質条件や地圧現象をより完全に把握するために計測点を増やしたり計測精度の向上を図ると、その計測に要する時間的および経済的負担が増大してしまう傾向がある。

本研究はこの問題点を解決するため、写真を用いて被写体の物理量を測定する手法すなわち写真測量の手法を土木工事(主に岩盤構造物)の変位計測に適用することを試みる。写真測量は計測点が多数存在する場合でも、写真撮影という簡便な手法でその3次元座標を高精度で計測する利点を有している。近年デジタルカメラの発達により、現位置で画像をパソコンに取り込んで解析をすることが可能になり、この写真測量の技術を用いた変位計測法が土木施工に適用できれば、さらに大きな工学的意義をもつに違いない。本論文はそのための研究の成果をまとめたものであり、次に述べるように8章から構成されている。

第1章は写真測量による変位計測の利点を他の変位計測技術と比較しながら記述している。中でも精密近接写真測量と呼ばれる手法は、被写体を3枚以上の写真に撮影して高精度の解析を可能にするものであり、岩盤構造物の変位計測へ当手法を適用することの意義について述べている。さらに従来のこの精密近接写真測量技術は、高価な工業計測用カメラを使用しなければならず、また解析の際には未知数に精密な初期値を入力する必要があるという課題を示すとともに、本研究はその課題の解決を目的とするものであり、その解決のための手法を記述する本論文の全体の構成を概観している。

第2章では写真測量の一般的な原理を、計測の手順を紹介しながら説明している。写真測量は中心投影像である写真画像の平面座標を測定し、さらに被写体、レンズおよび画像が同一直線上に在るという共線条件式を利用して、被写体の空間座標を求めるものであり、変位はその時間的変化から算出される。ここでは既知の7個の座標値を用いて空間座標軸を決定し、2次元の平面画像から3次元の座標を算出する原理を示している。また2次元平面座標の読み取りに伴う偶然誤差が、3次元座標の解析精度にどのように影響するのかを本研究で開発したシミュレーターを使って考察し、対象物にターゲットを設置して平面座標の読み取り精度を向上させることで、mm以下の高精度で変位計測が可能になることを示している。

第3章では、計測点数に応じた写真の撮影枚数および撮影位置(ネットワークデザインと称す)の最適設計について記述している。このネットワークデザインは、計測精度に影響するだけでなく、計測に要する時間的・経済的負担をも左右する。本研究は前記シミュレーターを改良し、最も高い精度で計測できる最小の撮影枚数と最適な撮影位置およびカメラ角度を算

出する撮影シミュレーターの開発を行う。これは平面画像の誤差と3次元座標の誤差を関係付けるパラメーターがネットワークデザインの最適化に関与していることを利用したもので、計測点数やカメラ位置と角度および撮影枚数を入力すれば解析される3次元座標の推定誤差が示される。この開発により最適なネットワークデザインの設計が可能となり、写真撮影と解析工程の時間的および経済的負担が軽減される効果が示されている。

第4章は、共線条件式から3次元座標を算出する手法について詳述している。写真測量では、平面座標の読み取りに伴う偶然誤差を調整し3次元座標の解析誤差を最小にするため最小二乗法が用いられてきた。この際カメラの位置・角度も未知数として扱い、それを計測点の3次元座標と同時に決定するバンドル調整法が高精度な結果を与える解析法として一般的に使用されている。しかし、この手法はカメラの内部構造に起因する系統誤差が既知である高価な工業計測用カメラを使用することを前提としており、市販のデジタルカメラを使って計測する場合、系統誤差を知るための校正作業が必要となる。この校正作業は時間的・経済的負担が大きく、高精度な解析法であるバンドル調整法の導入を妨げる要因となってきた。本研究はカメラの系統誤差を表現する最適な誤差モデルを考案し、それを共線条件式に付加して他の未知量と同時に決定する手法（以下セルフキャリブレーション付きバンドル調整法と称する）の構築と解法の研究に取り組み実現させている。これにより、より高精度な解析法が、カメラの校正作業をすることなく、すなわち非工業計測用のデジタルカメラを使用しても可能であることを示している。

第5章では、セルフキャリブレーション付きバンドル調整法における初期値を取得するための手法が検討されている。この手法による各未知数の算出には正確な初期値が必要とされる。すなわち、カメラの位置・角度をシミュレーションでの値に厳密に一致させて撮影し、さらに計測点の3次元座標も精密に計測して入力する必要がある。土木施工での計測を考慮した際、これら未知数の精密な初期値を得ることは困難である。本研究は、計測点の3次元座標の初期値を不要とし、さらにカメラの位置・角度も厳密化することなく撮影できる初期値計算プログラムの開発を行っている。まず撮影された画像から対象物と相似な立体像（モデル）を一旦形成し、次に複数のモデルを結合して一つのモデルにし、最後に出来上がったモデルを対象物が定義されている座標系へ変換することで対象物と同一のモデルを形成する。このモデルから計測点の3次元座標の近似値を取得し、各画像が撮影時の状態に復元されることによりカメラの撮影位置と角度の近似値が取得できるので、これらを初期値として使用するものである。これにより、従来の写真測量技術が抱えていた初期値計測という問題点を解決し、土木構造物の変位計測に応用するという本研究の目的が達せられることが説明されている。

第6章は開発した手法の計測精度の検証について記述している。この検証は、標的を設置したマイクロメーターを多数配置した室内模型を用いた実験によるもので、撮影シミュレーターによるネットワークデザインに基づいて撮影が行われ、マイクロメーターによって与えられる変位量と本研究によって計測された変位量とが比較されている。実験結果は、本研究による撮影シミュレーターの有効性と初期値取得を含む解析プログラムの優れた計測精度を明らかにしており、土木施工へ応用することが可能であることを示すものである。

第7章では、施工中のトンネルの内空変位計測と崩落する斜面の変状計測に本研究の手法を適用した結果を示す。トンネルの内空変位計測ではマンモスの計測結果との比較検討がなされ、多数の計測点を簡便にしかも高精度で計測できるという写真測量の利点が、現場を使った実験によって発揮されたこと、また斜面の計測では、従来の計測法では困難であった変状の面的な3次元計測が、本手法により簡便に行えることを示し、施工後の斜面の安全管理という立場からも本研究が有効であることを実証している。また、撮影シミュレーターに基づいて行われた計測は、目標通りの計測精度を与えており、本研究の成果を実際の現場の計測結果にて示すとともに、工学的見地からの効果についてまとめている。

第8章は結論であり、写真測量による変位計測を土木構造物へ応用することを可能にした本研究の工学的意義とその成果を総括し、また今後の課題について言及している。

論文審査の結果の要旨

従来の写真測量による計測では、安価な非工業計測用のデジタルカメラを使用する場合、時間的・経済的負担の大きなカメラ校正作業が必要とされ、また計測精度を向上するには求めるべき未知数の初期値として精密な値を入力する必要がある。このような制約から、写真測量は変位計測点が多数の場合でも、撮影という簡便な手法での計測という利点を有するにもかかわらず、土木工事に応用した過去の例では、高価な工業計測用カメラを使用するために経済的負担が大きなものに

なったり、入力する初期値を計測するための時間的負担が過大なものになっていたため、実際の現場に普及するには至らなかった。本研究はこれらの問題を解決するために、写真撮影によって高精度に対象物の変位を計測する精密近接写真測量手法を開発し、岩盤などに構築される土木構造物の変位計測に適用するための方法を検討したもので、得られた主な成果は次の通りである。

1. 高精度な解析結果が得られる精密写真測量の解析手法としては、被写体を3枚以上の写真に撮影して多数の共線条件式を構築し、平面座標の読み取りに伴う偶然誤差を最小二乗法を使って調整するバンドル調整法が一般的に用いられる。本研究では、さらにレンズ歪みなどカメラの構造に起因する系統誤差を表す誤差モデルを構築し、それを共線条件式に付加した解析手法（セルフキャリブレーション付きバンドル調整法）を開発した。これにより、より高精度な解析が可能になり、非工業計測用の安価なデジタルカメラを校正作業することなく使用できるようにした。

2. 写真測量では、撮影された画像の2枚をペアにし、被写体と相似な立体像（モデル）を形成することが出来る。このモデルを各2枚画像ごとに形成し、その後結合して一つのモデルにし、さらにこれを被写体の座標系へ変換すれば被写体と同一のモデルが形成される。このモデルから計測点の3次元座標の近似値を取得し、さらに各画像を撮影時の状態に復元することによりカメラの撮影位置と角度の近似値を取得することが出来る。本研究はこの近似値取得の手法を開発し、その値を初期値として解析に使用することで、従来の写真測量の問題点であった初期値計測に伴う作業を不要にし、写真撮影も任意の位置と角度で行うことを可能にした。

3. 計測精度は、写真の撮影枚数や撮影位置と角度にも依存する。本研究は、それらを最適化する撮影シミュレーターの開発を行い、最も少ない労力で最も高精度な計測を可能にする計測作業の設計を提案し、現場の撮影作業と解析作業の効率化を可能にした。

4. 本研究による変位計測手法を、トンネルの内空変位計測と斜面の変状監視に適用し、撮影シミュレーターの有効性と開発された初期値取得を含むセルフキャリブレーション付きバンドル調整法の計測精度を検証した。その結果、撮影シミュレーターは計測目標通りの精度を与えることを実証し、多数の計測点の変位の3次元成分を高精度に計測することが可能であることを明らかにした。

以上要するに本論文は、これまでの写真測量が抱えていた課題を解決する研究に取り組み、高精度に対象物の変位を計測する精密近接写真測量手法を開発し、岩盤などの土木構造物の計測に応用した成果をまとめたものであり、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12年2月16日、論文内容とそれに関連した試問を行った結果、合格と認めた。