

氏 名	にし やま さとし 西 山 哲
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3712 号
学位授与の日付	平 成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	デジタル画像データを用いた逆解析手法の地盤挙動評価法への適用に関する研究

論文調査委員	(主 査) 教 授 大 西 有 三	教 授 関 口 秀 雄	教 授 青 木 謙 治
--------	----------------------	-------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文はデジタル画像を入力とし、地盤・岩盤挙動を推定するための物理量である変位や歪みを出力とする計測システムを用いて、斜面災害による被害から都市機能を守るための防災モニタリングシステム、あるいは都市生活を高度化するための地下空間を築く際の情報化施工およびその維持管理を行うためのモニタリングシステムに関する研究をまとめたものであり、全体で7章から構成されている。

第1章は序論であり、本論文における研究の背景と目的を述べている。研究の背景では、地盤・岩盤挙動の評価として適用されてきた画像計測の利点と、これまでの画像計測の研究の過程で指摘されてきた問題点を考察し、本研究が取り組む課題を明らかにした。具体的には、計測対象が空間的に広範囲に及び、さらに遠方にある対象物の3次元的な挙動を限られた計測位置からリアルタイムに計測する必要が有るという地盤挙動の評価特有の問題点に対して、これまでの計測手法がその要求にできていないことを鑑み、本研究は構造物上の計測点の3次元座標を高精度に計測するための理論と、それを地盤挙動の評価へ適用するための課題を解決し、前記要求を満たすリアルタイムでのモニタリングシステムを構築することが本研究の目的であると記述している。

第2章では、逆解析の基礎理論における地盤の変形および変状を表すモデルパラメータを明らかにし、解析対象となるモデルの構築を行う。このモデルは計測点とその像の幾何学的な関係から容易に導かれるものであるが、モデルパラメータから見て非線形なものであるため、解析においては線形な方程式へと変換する必要が生じる。本研究では、その過程において、カメラのもつ系統誤差の取り扱いの不便さや、未知数の近似値取得の困難さによって、これまでの画像計測法が地盤・岩盤挙動の計測に適用できないことを指摘し、本研究では逆解析のモデルにおけるカメラの内部構造に関する要素を解析的に求める手法を構築すると同時に5撮影された画像から未知数の近似値を高精度に取得することを可能にする理論を考察する。これにより計測機器のコストおよび作業に要する時間的なコストを低減でき、その技術の導入が容易な計測システムを完成させることができるとしている。

第3章では、これまでの逆解析の一般的な解法を概説し、ノルム最小条件に基づいて議論されてきた拘束条件付最小二乗解をベクトル空間の概念を用いて整理し、未知数に関する幾何学的な条件によって当該条件を導くことを試みている。これにより、同じく幾何学的な条件から導いた解析モデルと数値解法が直観的に結び付けられ、最小二乗条件に付加される条件の物理的意味が考察できるようになることから、計測対象に応じた未知数の重み付けあるいは拘束条件を任意に設定することが可能になり、本研究の理論のプログラミング化が容易に実現できることを示している。また、これが擬似逆行列を用いた解法と同値であることを数学的に証明することで、本研究の理論的な側面の妥当性を検証している。

第4章では、未知数からなる図形を幾何学的に考察し、その重心位置を判断することで任意に設定することができる最小二乗解の拘束条件を理論的に導き出すことを試みる。これにより、遠方にある物体でも高精度に計測でき、また限られた撮影条件の下でも精度を劣化させない計測手法を確立させることが可能になる。さらに、写真枚数や計測点の設定方法などの計測に関する要素技術と精度の関係を理論的に構築し、撮影時のカメラ位置や姿勢に応じた計測手法を確立させている。本

章では、本計測手法の有用性を室内実験にて検証しており、20 m の距離にある被写体に設置された計測点の3次元座標を0.5 mm 以下の標準偏差をもって計測できることを実証している。

第5章では、斜面の変位計測に本研究の手法を適用した新しい斜面防災モニタリングシステムを提案し、その有用性を現場実験にて検証している。まず斜面災害に対して、ハザードを評価するための危険箇所抽出技術として、少ない写真枚数で広範囲の変位分布を計測する技術を構築し、トータルステーションと同等の精度で日常監視的に斜面挙動の変位分布を計測するシステムが確立できたことを現場実験で実証している。次に、災害の影響を軽減するための管理技術および災害を予知する監視技術として、個々の計測値を同一の座標軸上で解析することで、斜面の3次元変位を高精度で求めるための理論を構築する。この結果、斜面の崩壊形態を把握することができ、さらに本研究による計測システムの高性能性を実証している。

第6章では、地下空洞建設に関して、その施工中および維持管理のモニタリングに本研究を適用するための技術の確立を試みる。具体的には、施工段階において掘削直後の初期変位量の把握を目的とした変位計測法について考察し、掘削直後のトンネルの内空変位計測による現場実証実験を通して、高精度を得るための画像枚数や擬似的な標点の設定法などと組み合わせた本解析法の有用性を示している。また、構造物の維持管理手法として、撮影形態に関する考察結果をさらに発展させ、3次元球形ターゲットと画像処理技術の応用によって、移動する車両から撮影された画像を用いてトンネル壁面の挙動を把握することが可能となり、供用中のトンネルの運用を妨げずにその状態をモニタリングする技術が構築できることを現場実験の結果を通して示している。

第7章は結論であって、本研究ではデジタル画像を用いるリアルタイム計測の利点に、撮影状態および撮影距離に関わらず高精度で面的に変状をとらえ、さらに重点的に監視する場合には3次元的な挙動を解析するという地盤・岩盤挙動の評価法としての要求項目に応えるために研究された各章の成果を要約する。また、現場実験を含めた本研究の実用性をあらためて考察すると同時に、危険な場所に対して遠隔から計測するための自動計測技術の可能性について論じている。また、不連続性体解析手法などとの組み合わせによる地盤・岩盤挙動解析技術の展望について論じ、本研究をさらに高度化し普及させるための展望について総括している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、地盤・岩盤挙動を推定するための物理量である変位や歪みを、デジタル画像データから逆解析により算出する計測手法によって、斜面災害による被害から都市機能を守るための防災モニタリングシステム、あるいは都市生活を高度化するための地下空間を築く際の情報化施工およびその維持管理を行うためのモニタリングシステムを構築するための研究をまとめたものであり、その主な成果は次のとおりである。

- (1) 地盤・岩盤構造物を撮影したデジタル画像から、当該構造物上に設定される計測点の3次元座標を算出するための逆解析手法を理論的に考察した。本研究の逆解析理論の特徴は、数学的には擬似逆行列を用いた解法と同値であることを証明しながら、拘束条件付き最小二乗条件解をモデルパラメータに関する幾何学的な考察と関連させて導くことである。これにより、プログラミング化と未知数の重み付けを容易にし、その結果、計測時の基準点の有無あるいは撮影距離の遠近に応じて高精度での計測を可能にする解法を考案することができ、限定された撮影条件下で、さらに遠方にある物体でも高精度に計測するという地盤・岩盤挙動の評価特有の困難さを克服できる計測技術の構築を可能にした。
- (2) 前記手法において、計測点のデジタル画像上での2次元座標の計測から3次元座標を求めるまでの解析過程を詳細に考察することで、計測誤差が解析結果に伝播する過程を明確にし、その誤差を評価する手法を構築した。これにより、逆解析過程で生じる非適切さを回避する計測手法を確立し、さらにレンズ歪といった系統誤差や撮影時のカメラ位置等などに依存することなく計測精度を保持する現場計測システムの実現を可能にした。その結果、市販の数百万画素のデジタルカメラで、20 m の距離にある被写体に設置された計測点の3次元座標を0.5 mm 以下の標準偏差をもって計測できることを室内実験により実証し、本研究による理論の有用性を明らかにした。
- (3) 計測のための要素技術と計測誤差の関係を理論的に考察することで、日常監視的な変位の面的分布を求める手法および重点監視区域の変位を3次元的に捉える手法などを確立し、斜面モニタリングに適用可能な高精度の防災システム

の構築を実現した。またトンネルにおいても、走向車両から撮影されたデジタル画像を使ったリアルタイム計測を可能にするなど、本計測手法を発展させた実用化のためのシステムを完成させ、また現場検証実験によって本研究によるシステムの有用性を実証した。

以上、本論文はデジタル画像を用いた地盤・岩盤評価システムを構築したものであり、土木構造物の変位および変状を評価するための理論的考察と、各種現場実験を通して本理論の有用性を実証したものであり、学術上、實際上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15年1月7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。