

(論文内容の要旨)

我が国では、法面の崩壊や地すべりといった災害によって道路の機能が失われることによる経済的な損失が大きいにもかかわらず、限られた予算の中で道路の維持管理を行わなければならないという矛盾を抱えており、いかに効率的に道路防災を実施するのが問題となっている。特に定期的なモニタリングは、危険予知の手段として必要不可欠であるが、これまでの測量機器による計測では、作業効率およびコストの関係から計測点数を多数設定するのは難しく、斜面全体の変位を時系列でとらえることが出来なかった。本論文は写真測量技術を用いて、斜面変位のモニタリングを、専門技能者以外の作業者が簡便に実施できる手法として提案するもので、一定周期で斜面全体の変位を計測し、その傾向から対策施工の場所や時期あるいは方法を検討する資料の提供を可能にするものである。具体的には、標点の自動認識を可能にする技術を構築することで、写真測量に要する作業効率の大幅な改善や人為的なミスを防止すると同時に、どの地点から何枚撮影するのが最適な計測になるのかをあらかじめ作業者が把握することができるシミュレーション技術を開発することによって、写真測量撮影に要したノウハウの修得が不要となり、その結果より簡便で迅速なモニタリング技術が実現されるというもので、実際の法面における道路防災の効率的な実践例を示している。研究の内容は、以下のとおりである。

本論文の構成は、序章および結論を含め、以下の9章から成っている。

第1章は序論である。斜面モニタリングのための計測技術には、高精度でのリアルタイム計測、広範囲に機器を設置しながらもハード技術に要するコストは低く抑えられることなどが要求され、従来の手法ではこれらの特性をすべて満たすことが困難であったことを解説し、デジタルカメラで撮影した画像から対象物の3次元形状を復元する技術を応用した写真測量技術は、これまでの計測手法の欠点を克服する技術となる可能性があることを示している。

第2章において、前章で検討した写真測量技術を斜面・法面の変状を捉える手法に応用するために開発すべき項目を整理している。写真測量など画像を使った計測手法は、従来から各種工業計測に応用されてきたが、斜面・法面を対象にした場合、撮影位置と対象物が遠距離であること、限られた位置からしか撮影ができないことなど、これまでの写真測量の応用例には無い困難さが伴うために精度が保障されない点を指摘し、本論文はこの課題に取り組むことを明確にしている。これより、斜面・法面の変状をモニタリングする計測手法として、遠隔から撮影しても高精度に対象物の3次元の変位を計測できる写真測量技術を完成させ、さらに当技術を実用化させるための開発要素として、撮影から変位算出までの処理を自動的に行うアルゴリズムを考案し、習熟した技術を必要とすることなく、本計測の実施を可能にすることに取り組むことを示している。

第3章では、写真測量によって対象物の3次元の変位を求めることができる理論を紹介し、デジタルカメラによって斜面・法面を撮影するだけで当対象物の変状を把握できる計測手法の原理を解説する。これまでの画像を利用した計測法は、航空写真から3次元の立体像を再現する従来から用いられてきた理論に基づくものであるが、この理論を高精度の3次元計測に応用する際には、撮影する写真枚数が一定の数以上のものが必要になること、また限られた撮影位置からでは撮影ネットワークと称される精度に影響するパラメータの改善を図ることができず、必然的により多数の撮影位置から画像を撮影する必要があること、さらに解析には撮影位置や撮影角度あるいは標点の位置といった解析時に未知数として扱うパラメータの初期近似値が必要なことを理論的に説明し、その結果として従来の写真測量の手法は斜面・法面監視には不適格な計測手法になってしまうことを議論している。これより本章では、画像計測の活用において、撮影した画像の解析および自動処理アルゴリズムと撮影ネットワークの定量化を図ることによる高精度化のための撮影技術の構築が必要であることを説明している。

第4章では、前章で説明した写真測量のもつ利点と課題を実験的に実証している。標点となるターゲットを設置した対象物を遠方からデジタルカメラで撮影し、撮影位置及び撮影枚数と計測精度の関係を定量的に議論することで、前章で考察した理論的な課題を実験的に証明しており、本実験結果に基づいて精度に及ぼすパラメータを再度定量的に考察している。

第5章は、写真測量技術を実際の現場において変状監視のモニタリングとして実施した例を示し、前章で指摘した写真測量の利点の部分を現場実験にて実証している。具体的には、撮影位置の選択が比較的容易なトンネル工事に伴う地表面の沈下量を計測した例をあげ、地表面の変位分布を写真測量という簡便な計測方法だけで面的に捉えることが可能であることを示し、従来の測量機器を用いた計測による結果と比較して、解析および未知数の初期近似値の取得の自動化が改善されれば、斜面・法面モニタリング技術として有用な手法となることを考察している。

第6章では、色彩の異なる標点を法面上に設置し、色空間上であいまいさを定量的に表現する画像処理技術を開発することによって、法面上の標点を自動的に抽出し、撮影された各画像の標点に対応させる自動認識技術の開発と、当技術を利用して、撮影したカメラの位置と角度および標点の位置の精密な初期近似値を算出する技術を同時に開発している。これによって、撮影から標点の3次元座標の解析までの一連の作業を自動化すると共に、人為的なミスの発生を防ぐことができ、写真測量に要する作業効率を大幅に改善できることを明らかにした。

第7章では、写真測量の解析過程で計算される連立方程式の構造から、計測精度を解析的に求める考察を行い、あらかじめ作業者が最適な撮影地点と撮影枚数を把握することが可能なシミュレーション技術を開発している。これにより、これまでどの地点から何枚撮影するのかといった要素技術は、現場ごとに試行しながら決定していたが、写真測量技術に要する知識が無い技術者でも本計測を実施することができ、前述の解析の自動化技術と共に本計測の実用化を図るための要素技術がほぼ完成したことを示した。また、撮影ネットワークという精度に起因するパラメータと撮影位置との関係をシミュレーションによって明らかにし、限られた位置からの撮影しかできない現場において、ほんの少し位置を変えた撮影でも精度を向上させることが可能であることを示し、撮影枚数や撮影距離といった精度に影響を与える他のパラメータを含めた斜面・法面モニタリングにおいて、計測精度に起因するパラメータの重みを定量化し、実際の現場において枚数を増やすことと撮影位置を変えることのどちらが計測精度の向上に有効なのかを検討することが可能になったことも検証して示している。

第8章において、本研究で開発したシミュレーション技術および自動処理技術を備えた写真測量による計測を、実際の法面現場でのモニタリングに適用し、本研究成果の有用性を明らかにしている。計測対象は数多くの領域に分割して撮影しなければならない長大法面であり、従来の写真測量技術では多数の試行による撮影計画の立案と解析に多大な時間を要していたが、本研究によって当試行が不要になり、さらに自動解析によって撮影対象の面積に関わらず撮影から解析までを短時間で処理できることを実証した。また計測精度の向上を図るために、現場の限られた撮影可能な位置において、どの位置からの撮影が最も有効になるのかを、開発したシミュレーションによって考察し、結果として撮影枚数の合計を増やすことなく約180m遠方からの撮影で、伸縮計を法面表面に面的に設置した際と同等の効果をもつ監視技術の構築を可能にした。

第9章はまとめとして結論を述べている。本研究の成果によって計測手段が写真撮影という簡便な手法でありながらも、ハード機器に要するコストを低く抑えられる斜面・法面モニタリング技術の実用化が可能になったことを、実際の法面の現場に適用した例を示しながら明らかにし、さらに本計測手法を活用した場合において、従来の管理基準値と本計測結果との関係を考察し、計測システムの運用に関する考察の議論と共に結論を述べている。

(論文審査の結果の要旨)

我が国において、頻繁に発生する斜面・法面の崩壊や地すべりといった災害によって道路の機能が失われ、それに伴う経済的な損失が大きいにもかかわらず、限られた予算の中で道路の維持管理を行わなければならないという矛盾を抱えており、いかに効率的に道路防災を実施するのが問題となっている。特に定期的なモニタリングは、危険予知の手段として必要不可欠であるが、これまでの測量機器による計測では、作業効率およびコストの関係から計測点数を多数設定するのは難しく、斜面全体の変位を時系列でとらえることが出来なかった。本論文は斜面変位のモニタリングを、写真測量技術を用いて専門技能者以外の作業者が簡便に実施できる手法として提案するもので、一定周期で斜面全体の変位を計測し、その傾向から対策の場所や時期あるいは方法を検討する資料の提供を可能にするものである。具体的には、標点の自動認識を可能にする技術を構築することで、写真測量に要する作業効率の大幅な改善や人為的なミスを防止すると同時に、最適な計測のためのシミュレーション技術を開発することによって、写真測量に関するノウハウの修得が不要となり、その結果としてより簡便で迅速なモニタリング技術が実現されるというもので、実際の法面における道路防災の効率的な実践例を示している。研究の主な内容は、以下のとおりである。

(1) 斜面上の標点の自動認識技術の構築

色彩の異なる標点を法面上に設置し、色空間上であいまいさを定量的に表現する画像処理技術を開発することによって、法面上の標点を自動的に抽出し、撮影された各画像の標点を対応させる自動認識技術を実現させた。さらに当技術を利用して、撮影したカメラの位置と角度の精密な初期近似値を算出する技術も同時に開発し、撮影から標点の3次元座標の解析までの一連の作業を自動化すると共に、人為的なミスの発生を防ぐことができ、精密写真測量に要する作業効率を大幅に改善した。

(2) 写真計測計画を立案するシミュレーション技術の開発

これまでどの地点から何枚撮影するのかといった要素技術は、現場ごとに試行しながら決定していた。本研究では、写真測量の解析過程で計算される連立方程式の構造から、計測精度を解析的に求める考察を行い、あらかじめ作業者が最適な撮影地点と撮影枚数を把握することが出来るシミュレーション技術を開発した。これにより、写真測量に関する撮影に要するノウハウが無くても本計測を実施することができ、前述の解析の自動化技術と共に本計測の実用化を大きく前進させた。

(3) 実際の斜面における新技術の有用性の実証

本研究で開発された技術を用いた写真測量システムを用いて、実際に施工中の道路法面を対象に計測作業を実施した。計測対象は数多くの領域に分割して撮影しなければならない長大法面であり、従来の写真測量では多数の試行による撮影計画の立案と解析に多大な時間を要していたが、本研究によって当試行が不要になり、かつ自動解析によって撮影対象の面積に関わらず撮影から解析までが短時間で処理できる効果が実証された。

以上のように本論文は、斜面・法面のモニタリング技術として工学上有用な画像計測を実現するための理論の構築と実用化を推進させたもので、道路防災の分野の発展に関し、学術上、実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20年10月10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。