

機関番号：92604

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360234

研究課題名（和文）広域リアルタイム斜面モニタリングシステムの実用化研究

研究課題名（英文）Development of Real-time Monitoring System for Extensive Slope Hazards

研究代表者

黒沼 出（KURONUMA IZURU）

鹿島建設株式会社 技術研究所 ・ 先端・メカトロニクスグループ ・ 主任研究員

研究者番号：30416713

研究成果の概要（和文）：我が国に多発する土砂崩れなどの斜面災害を予防するためには、安価で取り扱いが簡便で、広範囲を迅速・リアルタイムにモニタリングすることが可能な斜面変位の検出技術が必要である。本研究では、デジタル写真測量や GPS 測位技術、車載型レーザスキャナ計測技術を用い、各要素技術の改良及びこれらを統合することにより、実用的なモニタリングシステム構築の目処を得た。

研究成果の概要（英文）：In order to prevent slope hazards, such as landslides frequently occur in Japan, simple, inexpensive and real-time monitoring method is required to detect extensive slope displacement. In this study, we improve and integrate GPS, digital photogrammetry and on-board laser scanners technologies, and obtain a prospect of building practical monitoring system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：計測工学

科研費の分科・細目：土木工学 ・ 土木計画学・交通工学

キーワード：写真測量、画像計測、GPS、モニタリング、国土保全、レーザスキャナ

## 1. 研究開始当初の背景

昨今の大規模地すべり災害の増加は、近年多発する豪雨、台風、地震といった天災の発生の影響のみならず、我が国土が地質的に崩れ易い斜面が多く、膨大な数の斜面災害の危険性の高い地域を抱えていることがその要因となっている。しかし、斜面全部に十分な対策を施すことは、限られた予算の中では不可能であるため、効率的に斜面災害を予防するための整備を推進していく防災戦略の立案が急務である。そのためには、斜面の変状

を把握し、適切な箇所および時期で対策を行う計測技術の確立を図ることが必須となる。

しかしながら、斜面災害の多くは明確な前兆現象があったとしても微小な物理変化であるために高精度での計測が要求され、それを広範囲に行おうとするとコストが高くなってしまい、また精度と共に計測技術に熟練を要するようになるなどの理由のために、十分な観測網が構築できていない状況である。

## 2. 研究の目的

本研究はこのような背景を鑑みて安全・安心な住生活の実現を提供するために、安価で取り扱いが簡便、さらに広範囲を網羅しながら、リアルタイムに高精度で斜面の動きを把握し、いつでもどこでもその状況を知ることが可能なユビキタスマonitoring技術の実現を目指す。

### 3. 研究の方法

具体的な技術的手段としては、精密デジタル写真測量と、複数箇所からの位相差式電波測距計測技術、リアルタイムGPS (Global Positioning System) 及び、これらを複合的に運用し広域のモニタリングを可能にするモバイルマッピングシステムを用いる。

(1) 遠距離からのデジタル画像計測の高精度化・解析の効率化

①アフィン投影幾何学を用いた撮影画像の形状変換により、望遠レンズ等を利用した場合の像の歪みを補正し、撮影距離に依存しない高精度の計測を行う技術を開発する。  
②カメラの撮影位置や姿勢角と言った外部標定の作業工程を簡略化し、解析の効率化を図る。

(2) GPS測位原理を利用した電波位相差式高精度変位計測システムの実用化

①電波位相差式高精度変位計測システムの送受信機配置方法と計測精度との関連調査、電波マルチパス等の精度劣化要因の把握と対策の検討  
②FKP測位システムの適用性の拡大

(3) モバイルマッピングシステムによる広域斜面変位の効率的な観測手法の検討

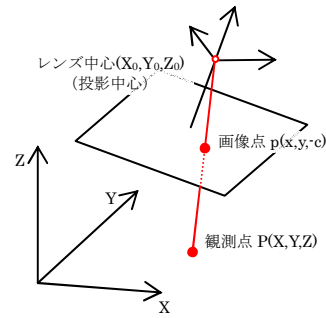
近年技術の発達が著しいモバイルマッピングシステム (GPS / IMU、レーザスキャナ、カメラを搭載した車両を走行させながら周囲物体の三次元形状を計測する技術) の活用により、広域にわたる斜面形状を迅速にモニタリングする手法を検討する。  
※申請時は、広域モニタリング手法として画像計測及びGPS測位結果をインターネットや無線放送波などを介して配信するシステムを想定していたが、上記新技術の適用により広域にわたる連続したモニタリングが可能になることから、急遽実施項目とした。

### 4. 研究成果

(1) デジタル写真測量

①遠距離撮影への対応

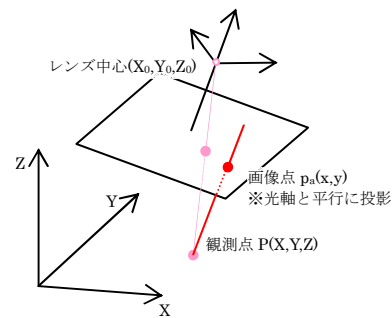
従来の中心投影に代わる投影幾何学の検討として、遠距離 (望遠) 撮影時の長焦点レンズを対象に、人工衛星画像の歪み補正技術であるアフィン投影幾何学の適用性について検証し、基本原理の確認及び適用手法の検



$$x = -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}$$

図 1 中心投影イメージ図及び共線条件式



$$x = A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4$$

$$y = A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8$$

図 2 アフィン投影イメージ図及び射影変換式

討を行った。

一般的に、精密写真測量においては焦点距離  $c$  を固定とする中心投影により共線条件式を作成・線形化し、観測点毎の共線条件式を集めた連立式からバンドル調整によるノルム最小二乗解を求めることで観測点の三次元座標や、カメラ外部標定パラメータ (カメラの設置位置  $X, Y, Z$ 、及び姿勢角  $\omega, \phi, \kappa$ ) を算出する (図 1)。 $a_{11} \sim a_{33}$  はカメラ姿勢角から導出されるパラメータである。一般に、近接写真測量というように比較的広角 ( $c$  の小さな) なレンズを使用し、数m~数十mといった近距離から対象を計測する。

一方、本研究のように遠距離からの撮影により計測精度を得るためには、焦点距離が長いいわゆる望遠レンズを用いた撮影が行われるが、撮影距離に対する計測対象表面の凸凹が相対的に小さくなるため遠近感が小さくなり、焦点距離を正確に標定することが困難になる。また、撮影画角が小さくなるためにカメラ外部標定パラメータ間に強い相関が生じ、正確な標定が困難になる。例えば、画像座標系  $x$  軸周りの回転は  $y$  軸方向の移動と重なるため分離が困難になる。

これに対し、人工衛星からの撮影画像のように極端に画角が小さな画像についての標定モデルとして、アフィン投影幾何学（平行投影）を用いる手法が提案されている（図2）。 $A_1 \sim A_8$  は独立な係数で被写体空間内に4個の基準点を与えれば一義的に決定できるが、本研究では一般逆行列の理論を用いたノルム最小二乗解を求めることで、当該基準点の精度に依存しない計測手法とした。

基本原理の確認及びシミュレーションを行い、フィールド試験を行った。従来の中心投影方式との精度比較の結果、外部標定パラメータ及び観測点三次元座標の解析精度を向上させることができた。

## ②解析作業の効率化

測定対象に設置するターゲットを二次元コード化することで、画像解析のターゲットへの番号付けの自動化、及びターゲット位置を基準とした撮影位置・角度の外部標定の自動化を可能にする手法の検討を行った。

上記①のフィールド試験において、観測域へ設置したコードターゲットにより外部標定作業の簡略化が可能なことを確認した。

## (2) GPS方式測位技術

### ①電波位相差計

発信器及び受信機の配置や電波マルチパスが計測精度に及ぼす影響について検討し、実用化の上での精度、コスト的な問題を把握した。

電波位相差距離計を利用し発信器から複数の受信器までの距離を計測し、既知の受信器座標を基に発信器の位置を算出する本システム（図3）は、GPS同様に発信器、受信器の配置関係が算出精度に大きな影響を与える。P-DOP（Position Dilution of Precision）と呼ばれる本問題は、GPS同様に、発信器を中心とした単位球と各受信器へのベクトルとの交点で構成される角錐の容量に精度が反比例することが知られている（図4）。本システムにおいてもシミュレーションによりP-DOPと精度との関連を評価し、最適な配置計画のための知見を得た。

マルチパスについては一つの受信器あたり複数のアンテナで受信し信号処理することで対応しているが、各受信器間の時刻同期を取るための手法が、特に受信器を広範囲に展開させた場合のコスト的な課題となっている。

### ②FKP測位システムの適用性の拡大

FKP方式ネットワークRTKを用いたリアルタイムモニタリングのため、ソフトウェア改造のためのシステム設計を行った。

従来FKP方式ネットワークRTKを利用するためには、(株)ジェノバが配信する補

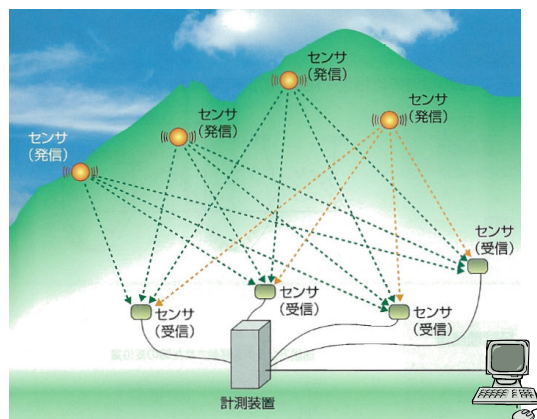


図3 電波位相差距離計を用いたGPS測位演算による発信器位置の測位技術イメージ

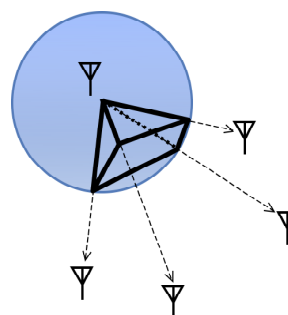


図4 P-DOP概念

正情報を基に市販のRTK計算ソフトウェアを利用する必要があるが、三次元座標の出力がソフトウェア内に閉じており、一般のGPS受信機のようにGGAフォーマットで外部に出力し他のシステムと連携して利用するといったことができなかった。

そこで、上記RTK計算ソフトウェアにおいてFKP演算結果をパソコンからリアルタイム（1Hz）に出力するように改造を施すことで、GPS演算結果（GGAフォーマット）を利用する他のシステムとの連携を可能にした。

### (3) モバイルマッピングシステム

モバイルマッピングシステムの斜面モニタリングへの適用性評価を行った。モバイルマッピングシステムとは、GPS/IMU（慣性計測装置：Inertial Measurement Unit）やレーザスキャナ、高解像度カメラを車に搭載し、GPS/IMUにより各センサの位置・姿勢を同定することで、走行しながら連続して周囲の地形や構造物などの三次元形状や座標を計測可能なシステムである。

本システムを実際に工事現場内を走行させて斜面やトンネル内空形状を計測する実験を行い、斜面やトンネル内に設置した座標既知のターゲットや、トンネル内空形状の別



(a) 車両全景



(b) 搭載センサ機器

図 5 モバイルマッピングシステム

途計測結果との比較を行った。

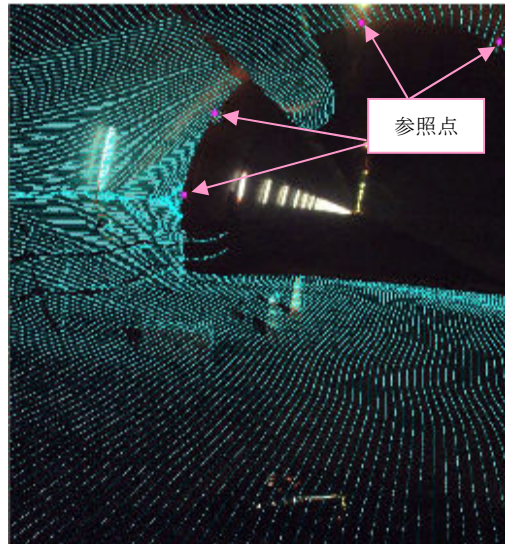
トンネル坑外でGPSをFixし座標を定めた後に入坑する。トンネル内でGPS衛星からの電波が途絶えGPS測位が使えなくなった後でもIMUによりある程度の距離の間はセンサの位置/姿勢を同定可能であるが、施工中のトンネル現場においては路面が凸凹のため、走行中の振動により舗装路に比べIMUが早期に精度劣化することが分かった。坑口から200m、430mの地点に精度評価のための基準点、形状評価のための断面を設定し実験した結果、トンネル断面形状などの相対的な比較においては数cmの誤差で計測可能であることが確認されたが、絶対座標評価においては坑口から200mの参照点において1m程度、430mの参照点で2m程度の誤差が生じる結果となった。モバイルマッピングシステムにおいては、ランドマークアップデート機能により、GPSをロストし精度が劣化した状態においても、座標既知のランドマーク(基準点)を用いて当該点の座標を修正することで周囲の計測精度を向上させることができる。本機能を用いて上記200m、430mの基準点で修正をかけたところ、10~20cmの誤差に計測精度を向上させることができた。

法面部においては、形状既知の階段状ターゲットを壁面に立てて設置し奥行き方向の段差の識別精度について確認したところ、1cm程度の段差であれば識別可能であることが分かった。

現状では、計測範囲が車両から周囲50m程度に限られるため道路から離れた箇所での計測はできないが、計測範囲内においては絶対精度10cm、相対精度1cmで連続して計測する



(a) トンネル全景



(b) トンネル内部計測結果



(c) 坑口斜面計測結果

図 6 モバイルマッピングシステム計測結果

ことが可能であり、広域にわたる道路際の斜面モニタリングに適用可能と考えられる。不動点座標を画像計測やGPS静止測量などにより高精度に計測し、その値を基にランドマークアップデートを行うことで、全体の精度向上も期待できる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 0 件）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

黒沼 出 (KURONUMA IZURU)

鹿島建設株式会社 技術研究所・先端・メ  
カトロニクスグループ・主任研究員

研究者番号：3 0 4 1 6 7 1 3

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

三浦 悟 (MIURA SATORU)

鹿島建設株式会社 技術研究所・先端・メ  
カトロニクスグループ・グループ長兼上席  
研究員

研究者番号：2 0 3 7 4 0 2 7

大西 有三 (OHNISHI YUZO)

京都大学・工学（系）研究科（研究院）・  
教授

研究者番号：3 0 0 2 6 3 4 8

西山 哲 (NISHIYAMA SATOSHI)

京都大学・工学（系）研究科（研究院）・  
準教授

研究者番号：0 0 3 2 4 6 5 8

服部 進 (HATTORI SUSUMU)

福山大学・工学部・教授

研究者番号：5 0 1 0 8 1 2 2