

赤外線カメラを用いた夜間および冬期間における 斜面監視システムの開発に関する研究

建設設計工学研究室 吉田 慎司
指導教官 鳥居 邦夫

1 はじめに

現在、土砂崩れや斜面崩壊といった災害による事故が相次いでおり、斜面監視体制の強化が必要になっている。そのため崩壊の前兆をとらえる手段として様々な手法が開発されてきている。その中の一つに、本研究室で行っているCCD(Charge-Coupled Device)カメラを用いた斜面監視システムがある。このシステムは標柱による移動量計測や伸縮計による地盤伸縮変動量観測などの現行の斜面監視方法と比較して安価で、遠隔地での無人自動監視を可能にする等の長所を持つ。しかし、このシステムでは夜間および冬期間での監視計測が非常に困難で、日照の影響を受けやすいといった問題点がある。そこで、本研究では、赤外線を感じて画像にすることのできる赤外線カメラを用いることにより夜間および冬期間での斜面監視を可能にした。

2 本研究の目的

本研究の目的は、現行のCCDカメラを用いた斜面監視システムでは夜間および冬期間での監視計測が困難であった。そこで、赤外線カメラを用いることにより、夜間および冬期間での監視計測を可能にすることを目的とする。

3 ブロックマッチング法について

3-1 ブロックマッチング法の原理

本研究では、赤外線カメラで撮影した対象斜面の連続静止画にブロックマッチング法を適用することで地すべりなどの比較的ゆっくりした斜面の面内変位検出を行っている。すなわちターゲットを必要としないで、画像内のあるブロック自体がどこに移動したかを検出する

ものである。以下にその検出手順を示す。

- (1) 対象斜面を水平画素 M [Pixel]、垂直画素 N [Pixel]の赤外線カメラを用いて一定時間間隔で撮影する。現在の画像と直前の画像の輝度値を、それぞれ $I_{k+1}(i, j)$ 、 $I_k(i, j)$ とする。ただし (i, j) はそれぞれ水平、垂直方向の画素を表し、 $0 \leq i \leq M$ 、 $0 \leq j \leq N$ とする。
- (2) 画像 I_k のあるブロック(大きさ： $m \times n$ [Pixel])を B_k とする。
(図-3.1 a)
- (3) 画像 I_k の中のブロック B_k 自体を目標物と見なし、画像 I_{k+1} 内で逐次これを縦横方向に1[Pixel]ずつスキャンし、ブロック B_k 自体のパターンと類似度の高いブロックを検索する。これを、ブロックマッチング法と呼ぶ。
- (4) 次の画像を撮影し、 $(k+1 \rightarrow k)$ として、(1)～(3)の手順を繰り返すことで連続計測を行う。

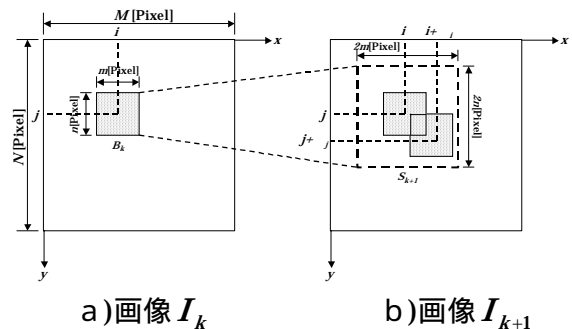


図-3.1

3-2 類似度の評価

画像 I_k のあるブロックが I_{k+1} でどこに移動したかを検索するため、画像 I_k 内のブロック B_k と画像 I_{k+1} の探索範囲内のブロック B_{k+1} との相互相関係数を1[Pixel]ずつずらしながら逐次的に計算することによって全検索

を行う。画像 I_{k+1} 内での検索範囲は任意でよいが、崩壊の前兆現象を検出する目的と画像すべての中から移動先を探していたら計算時間がかかることから、 B_{k+1} の近傍に限定する。検索範囲は、例えば図-2.1 に示すように B_{k+1} の周囲 $2m \times 2n$ の範囲とする。

$$R_k(di, dj) = \frac{\sum_{i=am}^{(a+1)m-1} \sum_{j=bn}^{(b+1)n-1} B_k(i, j) I_{k+1}(i+di, j+dj)}{\sqrt{\sum_{i=am}^{(a+1)m-1} \sum_{j=bn}^{(b+1)n-1} B_k(i, j)^2 \sum_{i=am}^{(a+1)m-1} \sum_{j=bn}^{(b+1)n-1} I_{k+1}(i+di, j+dj)^2}}$$

画像 I_k においてあるブロック B_k 自体をターゲットと見なして画像 I_k 内でそのブロックの移動先を探す。

相互相関係数 $R_k(di, dj)$ の分布の一例を図-3.2 に示す。 $R_k(di, dj)$ の値が 1 に近いほど $B_k(i, j)$ と $I_{k+1}(i+di, j+dj)$ が似ていることを意味する。もし、 $di = di^*, dj = dj^*$ において $R_k(di, dj) = 1$ であれば $B_k = I_{k+1}(i+di^*, j+dj^*)$ であり、ブロック B_k は Δt の間に (di^*, dj^*) だけ平行移動したことを示している。このようにして $R(di, dj)$ を評価関数としてブロック B_k の移動先を検出することができる。以下では、ブロック内の $R_k(di, dj)$ の最大値を $R_k^*(di, dj)$ として $R_k^*(di, dj)$ の位置を移動先の候補とする。しかし、一般に崩壊が生じている斜面ではブロック B_k が単純に平行移動することはまれであり、何らかの変形や回転移動を伴う。したがって通常は $R_k^*(di, dj) < 1$ である。しかし、地すべりなどの微小移動の検出を目的としているため、その移動中の変形や回転運動は小さいと考えられる。実用上は $R_k^*(di, dj)$ にある判定基準を設定し、 $di = di^*, dj = dj^*$ において、

$$R_k^*(di, dj) \geq \varepsilon$$

であれば、 $B_k(i, j) = I_{k+1}(i+di^*, j+dj^*)$ と見なして (di^*, dj^*) を移動先と判断することができる。この判定基準は実験的に決定される値である。

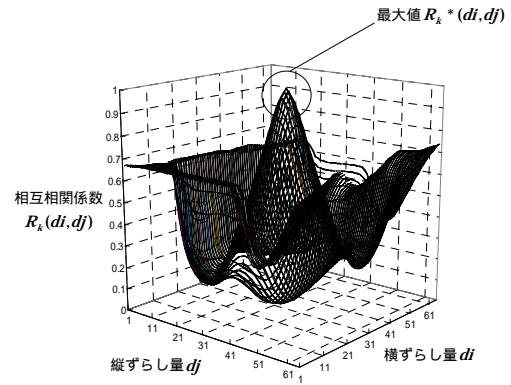


図-3.2

3-3 相互相関関数とFFT(高速フーリエ変換)の関係

相互相関法で全探索を行う際、直接計算すると探索範囲を $N \times N$ [Pixel] とすると N^2 に比例する計算量が必要となってくるため、 N が大きい場合には直接相互相関法で計算するのは実用的ではない。しかし、高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transform) を利用すると $N \log_2 N$ に比例する計算量になるため、直接計算するよりもはるかに少ない時間で相互相関関数を求めることが可能となる。

現在斜面移動の方向と大きさを認識するために我々の相互相関関数とフーリエ変換には『相関関数のフーリエ変換は各々のフーリエ変換の積である』と言うような関係がある。このことより、各々のフーリエ変換の席を逆フーリエ変換することで相互相関法と同等の結果を得ることができる。

3-4 補間処理による分解能の向上

画像情報を用いた移動計測の分解能を左右する重要な要因として解像度とカメラから斜面までの距離の2つが挙げられる。しかし、解像度を上げると画像ファイルも大きくなる、また、カメラから斜面までの距離狭めれば 1[Pixel] に対応する斜面上の長さが小さくなるため分解能を高めることができるが、対象斜面の近くではカメラ自体も斜面と一緒に移動する。または、地形的に不可能であるという問題

がある。そこで、各画素間に既存の各画素の輝度値から算出された輝度値を補間することにより、計算時のみ人工的に解像度を増やし、計測の分解能を向上させる方法を用いる。補間方法として、Bilinear補間を用いる。この補間方法は、補間対象となる画素にその画素の最近傍の 2×2 [Pixel]の画素輝度値の重み付け平均を2次元補間する方法で、各画素間をリニアに補間するものである。補間され、縦横A倍にした画像で移動量を測定し、その得られた移動量を $1/A$ 倍にすることで、 $1/A$ [Pixel]分解能での移動計測が可能となる。

4 赤外線カメラを用いた連続計測実験

赤外線カメラは、赤外線を検知して画像にすることができ、夜間や雪の降る冬期間でも斜面監視が可能であると考えられる。そこで、前節で述べた画像処理方法を用いて、あらゆる条件下で赤外線カメラを用いた連続計測実験を行った。

4-1 ハロゲンランプを用いた夜間計測実験

赤外線カメラから約16mの距離の位置にハロゲンランプを設置し、図-4.1のようなレイアウトで連続撮影し、ハロゲンランプをターゲットとして輪郭抽出処理を行い、重心座標値を求めた。



図-4.1 実験レイアウト

図-4.2に赤外線カメラからの画像を示す。さらにランプ部をターゲットとしたときの重心座標値の各軸方向における経時変化のグラフと標準偏差を図-4.3に示す。



図-4.2 赤外線カメラ画像

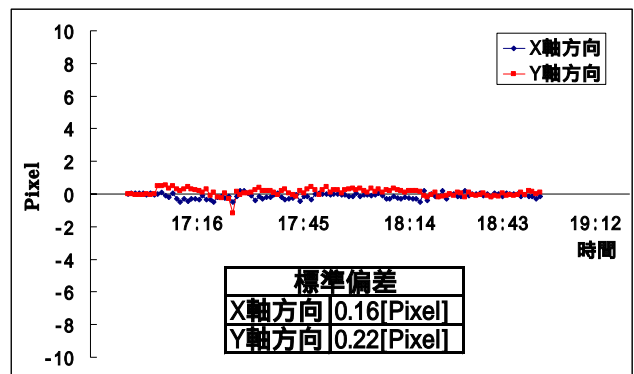


図-4.3 重心座標値の経時変化と標準偏差

以上の結果から、標準偏差がX軸方向0.16[Pixel]、Y軸方向0.22[Pixel]と、十分な精度が得られた。よって、ハロゲンランプを用いることにより夜間における監視計測が可能であるといえる。

4-2 冬期間におけるハロゲンランプを用いた計測実験

前項と同じレイアウト(図-4.4)で雪の降っている条件下で、連続計測しハロゲンランプをターゲットとした計測実験を行った。



図-4.4 実験レイアウト

図-4.5、4.6に赤外線カメラ画像、モノクロCCD

カメラ画像をそれぞれ示す。さらに、赤外線カメラでのハロゲンランプの重心座標値の各軸方向における経時変化のグラフと標準偏差を図-4.7に、モノクロCCDカメラでの降雪時におけるハロゲンランプの輪郭抽出結果を図-4.8に示す。



図-4.5 赤外線カメラ画像

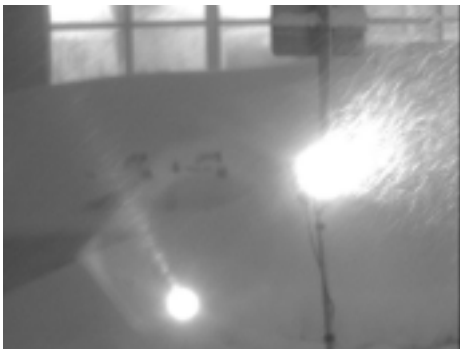


図-4.6 モノクロCCDカメラ画像

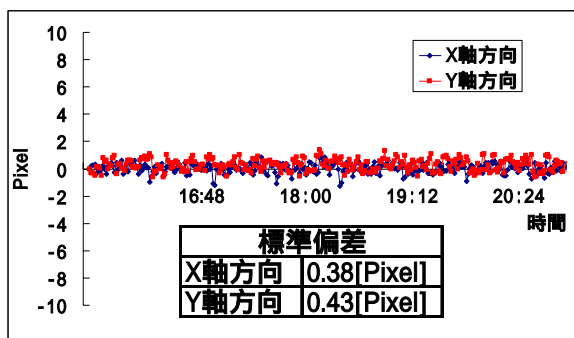


図-4.7 重心座標値の経時変化と標準偏差



図-4.8 モノクロCCDカメラでの降雪時におけるハロゲンランプの輪郭抽出結果

以上の結果から、モノクロCCDカメラでは、ハロゲンランプによる雪の影響で輪郭を抽出することが非常に困難であり、場合によっては全く輪郭を抽出できない。一方、赤外線カメラでは標準偏差がX軸方向0.38[Pixel]、Y軸方向0.43[Pixel]であり、十分な精度が得られた。よって、雪の影響を受けずに赤外線カメラでの監視計測が可能であるといえる。しかし、ハロゲンランプを用いるということは、現場設置の危険性と電源の確保という問題点があり、実用は非常に困難である。そこで、周りよりも比較的赤外線を発している樹木をターゲットにできないかと考え、次のような実験を行った。

4-3 樹木をターゲットとした夜間計測実験

樹木から約10mの位置に赤外線カメラを設置し図-4.9のようなレイアウトで連続計測実験を行った。この場合輪郭抽出処理をするのは非常に困難である。そこで、前節に述べたブロックマッチング法を用いてターゲットとなる樹木の移動量を計算した。



図-4.9 実験レイアウト

図-4.10に赤外線カメラ画像を示す。さらに、図-4.11に樹木の各軸方向における移動量の経時変化のグラフと標準偏差を示す。



図-4.10 赤外線カメラ画像

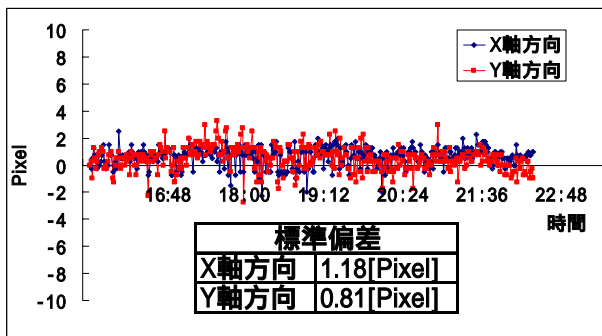


図-4.11 樹木の移動量の経時変化と標準偏差

以上の結果から、標準偏差がX軸方向1.18[Pixel]、Y軸方向0.81[Pixel]であり、十分な精度が得られた。よって、樹木をターゲットにし、ブロックマッチング法を用いることによって、夜間での監視計測は可能であるといえる。

4-4 冬期間における樹木をターゲットとした計測実験

前実験と同じレイアウト(図-4.12)で、雪の降っている条件下での連続計測実験を行った。



図-4.12 実験レイアウト

図-4.13、4.14に赤外線カメラ画像とモノクロ CCDカメラ画像をそれぞれ示す。さらに、図

-4.14にターゲットとした樹木の各軸方向における移動量の経時変化のグラフと標準偏差を示す。



図-4.13 赤外線カメラ画像



図-4.14 モノクロCCDカメラ画像

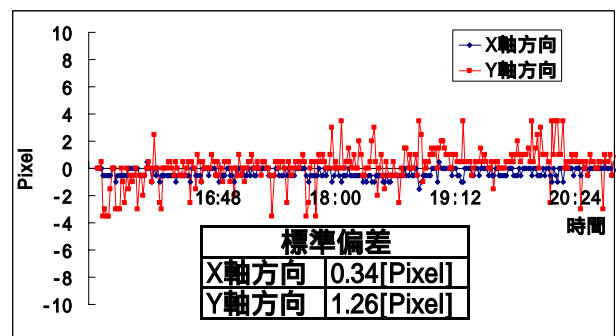


図-4.15 樹木の移動量の経時変化と標準偏差

以上の結果から、標準偏差がX軸方向0.34[Pixel]、Y軸方向1.26[Pixel]であり、十分な精度を得られた。よって、雪の降っている条件下であっても、樹木をターゲットにしての監視計測が可能であるといえる。

4-5 日照の影響について

現行のCCDカメラを用いた斜面監視システムでは日照の影響を受けやすいという問題点

があった。そこで、晴れた日において、前実験と同じレイアウトで連続計測実験を行った。

図-4.16、4.17に昼と夜の赤外線カメラ画像を示す。さらに図-4.18に樹木の各軸方向における経時変化のグラフと標準偏差を示す。



図-4.16 昼の赤外線画像



図-4.17 夜の赤外線画像

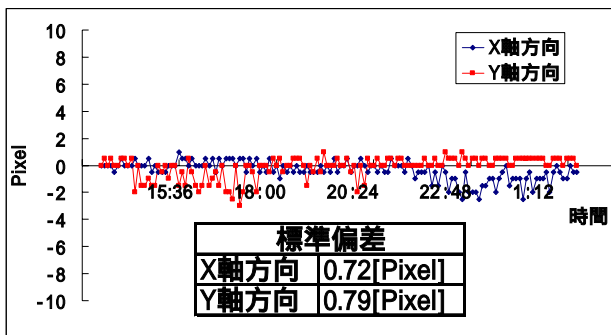


図-4.18 樹木の移動量の経時変化と標準偏差

以上の結果から、標準偏差がX軸方向0.72[Pixel]、Y軸方向0.79[Pixel]であり、十分な精度を得られた。よって、赤外線カメラを用いて、樹木をターゲットとすることにより、日照の影響を受けないといえる。

5 結論

本研究では、赤外線を検知して画像にすることのできる赤外線カメラを用いて、あらゆる条件下での連続計測実験を行った。その結果、ハロゲンランプをターゲットにすることにより、夜間および冬期間での監視計測を可能にした。しかし、ハロゲンランプを用いるということは、現場設置の危険性と電源の確保という問題点から、実用は非常に困難である。そこで、樹木をターゲットとし、ブロックマッチング法を用いることにより、することにより、夜間および冬期間での監視計測を可能にした。さらに、現行のCCDカメラを用いた斜面監視システムで問題となっていた日照の影響も改善できた。

6 今後の課題

本研究では、赤外線カメラを用いることによって、監視計測が可能であるということが分かった。今後の課題として、実際の地すべり現場での監視計測による精度検証が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 西村友宏：CCDカメラ斜面監視システムによる地すべり動態観測に関する研究、長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文、2001年
- 2) 吉田琢磨：デジタルカメラを用いた斜面崩壊遠隔監視システム、長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文、2001年
- 3) 八木伸行・井上誠喜：C言語で学ぶ実践画像処理、オーム社、1992年