

時空間ガボールフィルタによる土砂災害前兆現象検知

岡本 健[†] 渡辺 敏雄^{†*} 花沢 明俊[‡] 森江 隆[‡] 伴 弘司[†] 前田 裕二[†]

[†] 日本電信電話株式会社 NTT 環境エネルギー研究所

〒180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11

[‡] 九州工業大学 大学院生命体工学研究科

〒808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの 2-4

E-mail: [†] {okamoto.ken, ban.hiroshi, maeda.y}@lab.ntt.co.jp, *t.nabe@aecl.ntt.co.jp,

[‡] {hanazawa, morie}@brain.kyutech.ac.jp

あらまし 時空間ガボールフィルタを用いて時空間上の移動軌跡を抽出し、土砂災害の前兆現象となる落石や砂の崩落等を映像から検知する手法を検討した。シミュレーション映像を使って検討手法の定量的評価を行い、フレーム間差分法との比較を踏まえて検討手法の有効性を確認し、基本的な性質を明らかにした。また、霧の発生や木の揺れの外乱要因の検討手法に対する影響を評価した。

キーワード 土砂災害, 前兆現象, 時空間ガボールフィルタ

Detection of Landslide Precursor Using Spatiotemporal Gabor Filtering

Ken OKAMOTO[†], Toshio WATANABE^{†*}, Akitoshi HANAZAWA[‡], Takashi MORIE[‡],
Hiroshi BAN[†], Yuji MAEDA[†]

[†] NTT Energy and Environment Systems Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation

3-9-11 Midori-cho, Musashino-shi, Tokyo, 180-8585 Japan

[‡] Graduate School of Life Science and Systems Engineering, Kyusyu Institute of Technology

2-4 Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyusyu-shi, Fukuoka, 808-0196 Japan

E-mail: [†] {okamoto.ken, ban.hiroshi, maeda.y}@lab.ntt.co.jp, *t.nabe@aecl.ntt.co.jp,

[‡] {hanazawa, morie}@brain.kyutech.ac.jp

Abstract A method for detecting landslide precursor, such as small rock and/or soil falls which occur prior to massive landslide is proposed. The feature of our method is to recognize a trajectory of small collapse directly by using spatiotemporal Gabor filtering. The validity of our method is confirmed by simulation analysis where conditions of the simulation are quantitatively defined. The practical factors under real scene monitoring, which may disturb the recognition, are also evaluated.

Keyword Landslide precursor, Spatiotemporal Gabor filtering

1. はじめに

土砂災害の監視では、前兆・初期段階の発見による被害の軽減や、災害が発生した場合の早期の状況把握による被害拡大の防止が重要である。復旧作業の現場等においては、二次災害防止の観点から、監視員を配置して大規模崩落の前兆現象である落石や砂の崩落（以下「小崩落」と呼ぶ。）の目視監視を実施するが、広い範囲をカバーするのは困難であり、機械によるサポートが望まれている。災害監視用のセンサは様々な存在するが、筆者らは、広範囲の状況を網羅的に監視で

きる特徴を有している映像を活用し、土砂災害の前兆となる小崩落を映像によって検知する手法を検討している。

土砂災害に特化した映像監視の先行事例は少ないが、小崩落を広く物体移動とみなすと、人物や車両の監視分野では様々な移動物体検知手法の研究が行われている。通常、映像には圧縮やちらつきによるノイズが含まれていて、これらを切り分けて対象を検知することが必要である。人物や車両の監視分野では、対象の移動による輝度変化や、対象の視覚上の大きさがノイズ

とは異なるので識別は比較的容易であるが、小崩落の場合には、背景と類似しているために輝度変化が小さく、また、対象の小ささからノイズとの識別が課題となり、従来手法の適用では検知が難しいと考えられる。

本研究では、時空間特徴として小崩落の移動軌跡を時空間ガボールフィルタ[1]によって抽出することで、ノイズと識別して小崩落を検知する手法を検討した。本報告では、実際の崩落現場映像に定量的に条件を規定した崩落シーン（アニメーション）を重ね合わせたシミュレーション映像により、提案手法の基本的な性質、霧の発生や樹木の揺れなどの屋外環境下の外乱要因の影響について評価した結果を述べる。

2. 検知アルゴリズム

2.1. 概要

小崩落の移動軌跡は時空間内の微小時間において直線的な線分となるが、他方、映像解析において課題となる映像圧縮やちらつきのノイズは、孤立した点となる。本手法では、この点に着目し、時空間ガボールフィルタ処理によって算出する動きエネルギーを軌跡として抽出し、小崩落を検知する。

図1は、小崩落検知の処理の流れである。小崩落は輝度変化が小さいため、入力画像に動きを強調する処理を施す。具体的には、式(1)に示すように、時間的な差分値を元画像に加えて、変化領域を強調する。

$$I'_t = I_t + \alpha |I_t - I_{t-1}|^n \quad (1)$$

ここで、 I_t は時刻 t における入力画像の輝度値で I'_t は強調処理後の輝度値である。 α は重み係数、 n は指数である。ここでは、 $\alpha=0.3$ 、 $n=2$ とした。時空間ガボールフィルタ処理の詳細は次節で述べるが、動きエネルギーによって、ノイズと分離して軌跡を抽出する。出

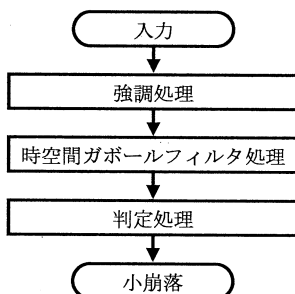


図1 小崩落検知の処理の流れ。

力結果に対して、比較的簡易な閾値処理とモルフォロジー処理によって空間的に孤立しているノイズを排除して、小崩落の発生を認識する。

2.2. 時空間ガボールフィルタ処理

入力画像 (I) に時空間ガボールフィルタ (g_φ) で畳み込み演算を施し、反応強度 (r_φ) から動きエネルギー (E) を得るのが、時空間ガボールフィルタ処理の流れである。式(3)の動きエネルギーの算出において、位相を $\pi/2$ ずらした時空間ガボールフィルタによる反応強度の2乗和を取ることで、位相（位置）依存性を解消し、検知対象の位置が目画素から僅かにずれている場合にも反応するようになっている。

$$r_\varphi = I * g_\varphi \quad (2)$$

$$E = \sqrt{r_0^2 + r_{\pi/2}^2} \quad (3)$$

時空間ガボールフィルタは、正弦波に3次元（時空間）のガウス関数を窓関数として乗じて局在化したものである。画像の左上を原点とし、右にX軸、下にY軸、時間方向にT軸を取る時空間画像において、時刻 t_0 フレームにおける画像上の位置 (x_0, y_0) を注目画素としたときの、時空間ガボールフィルタは以下の式(4)で表される。

$$g_\varphi = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(\bar{x} + v\bar{t}) + \varphi\right) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi^3} \sigma_x \sigma_y \sigma_t} \exp\left(-\left(\frac{(\bar{x} + v\bar{t})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{\bar{y}^2}{2\sigma_y^2} + \frac{\bar{t}^2}{2\sigma_t^2}\right)\right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \bar{x} &= (x - x_0) \cos(\theta) + (y - y_0) \sin(\theta) \\ \bar{y} &= -(x - x_0) \sin(\theta) + (y - y_0) \cos(\theta) \\ \bar{t} &= t - t_0 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 λ は波長（フィルタサイズ）、 σ_x σ_y 、 σ_t はX軸、Y軸、T軸方向におけるガウス関数の標準偏差、 v はガウス関数の中心位置の移動の速さ、 φ は位相の補正、 θ はX軸方向を基準とした時空間ガボールフィルタの空間的（XY平面の）方向を表す。時空間ガボールフィルタは、移動物体の移動方向と速さを導出することが可能であり、 θ が移動物体の移動方向に対応し、 v が移動物体の θ 方向に対する速さに対応する。

通常、 θ , v , λ をパラメータとして、複数の種類の時空間ガボールフィルタを用意し、フィルタセットを構成する。用意した全ての時空間ガボールフィルタで動きエネルギーを算出することで、あらゆる軌跡を生じる動きに対して応答を得ることが可能となる。

時空間ガボールフィルタの特性として、移動物体の移動方向と速さと大きさが、時空間ガボールフィルタのパラメータと適合したときに、動きエネルギーが最大になる。動きエネルギーが最大であるということは、注目画素が θ_m 方向に、速さ v_m で運動していることを意味している。 θ_m , v_m は動きエネルギーが最大のときの θ , v を表す。なお、 λ については移動物体の大きさ等に応じて強く反応する値が存在する。

移動物体の移動方向と速さに対して選択的に応答を得られることを利用して、本手法では小崩落に適したパラメータを設定することで、ノイズ等の静止状態と区別して小崩落のみを的確に抽出する。これは、予め移動物体の移動方向と速さに合わせて時空間ガボールフィルタの種類を限定することになり、計算時間の短縮にも繋がる。

図2は、注目画素の前後2フレーム分の時空間ガボールフィルタの一例である。白色領域が正の反応をし、黒色領域は負の反応をし、中間の灰色領域は反応しないフィルタ構成になっている。白色領域が時間と共にY軸の方向にずれており、微小時間で直線を示すような軌跡の場合に最も強く反応する。そのため、小崩落とノイズの動きエネルギーに明確な違いが生じ、両者の分離が可能となる。

時空間ガボールフィルタは、局所的な周波数解析を施すため、小崩落のような対象サイズが小さい場合も、それに応じたフィルタサイズを設定することで、強い反応を得ることができる。また、時空間ガボールフィルタは、注目画素における局所的なフィルタの一種であるため、周辺画素の情報を反映する。そのため、検

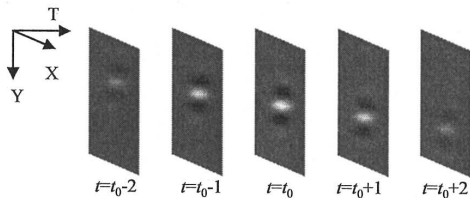


図2 時空間ガボールフィルタ。白色領域が正の反応、黒色領域が負の反応、灰色領域が無反応を表す。

知対象が小さくてもより広い範囲で反応する特徴があり、小崩落のような微小物体の検知に向いている。これらの特性より、時空間ガボールフィルタを用いることで、視覚的な特徴の小さい小崩落を捉えることが可能となる。

3. 時空間ガボールフィルタの特性検証

3.1. 検証素材と実験条件

検討手法の有効性、及び、時空間ガボールフィルタの基本的な特性の評価を行った。定量的な評価を行うために、土砂災害現場映像に擬似的な落石を重ねたシミュレーション映像(図3, 320×240, 30fps)を用いた。ベースとなる映像は、現場を固定カメラにより撮影・記録した国土交通省が公開している映像であり[2]、ちらつき等のノイズが映像監視の実情に即した形で含まれたものである。以下の検証では、落石を表1に示す条件で生成し、また、河川領域を除いた図3の白線枠内を監視領域とした。

なお、時空間ガボールフィルタのパラメータは、ここでは、 v は 1, 2, ..., 10 画素/フレームの移動速度のものを用意し、 θ は -90° (下向き) のみに、 λ は 8 に設定した。時空間ガボールフィルタを形成する空間的な(XY平面の)サイズはフィルタサイズ(λ)に応じて決まり、時間的な(T軸方向の)サイズは5フレームとした。

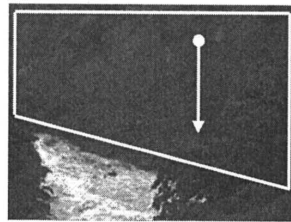


図3 シミュレーション映像。白線領域内が監視領域であり、矢印の始点から終点にかけて擬似的な落石を発生させた。

表1 落石の生成条件.

項目	条件
大きさ	4×4画素
速さ	2画素/フレーム
方向	下向き
色	落石周辺の背景領域の平均
テクスチャ	ランダム変数による色の明暗
発生回数	計300フレーム中6回

3.2. 検討手法の有効性

図4は、検証結果の一例である。図4c,dは、動きエネルギーを閾値処理で2値化した画像であり、図4a,bは同フレームのシミュレーション映像である。比較のために、基本的な動き抽出手法であるフレーム間差分法を用い、差分絶対値を同様に閾値処理した(図4e,f)。検知対象を分かり易くするために、図4a,bにおいては、落石箇所を白色で示し、また、図4c,d,e,fにおいては、閾値を越えた画素を黒色で示している。検討手法とフレーム間差分法の2値画像を比較すると、時空間ガボ

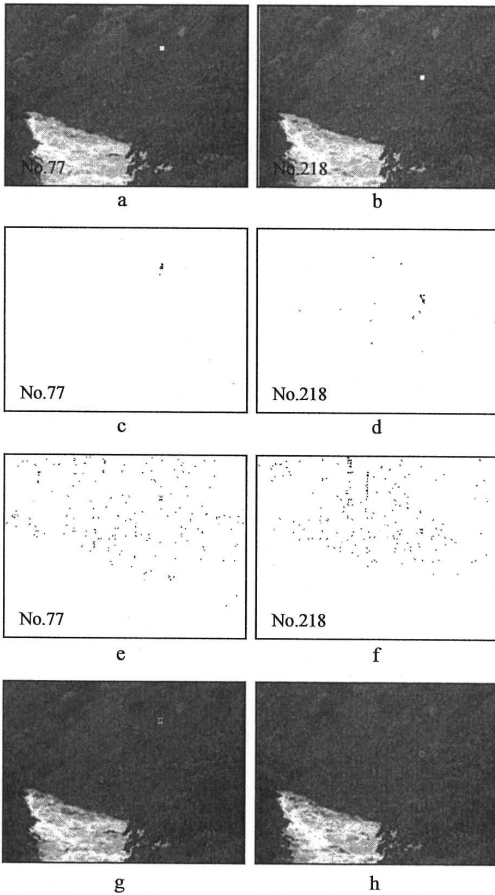


図4 検討手法とフレーム間差分法による特徴抽出結果。a,bは入力画像で、擬似落石箇所が目立つよう白枠で表示している。c,dは時空間ガボールフィルタ処理後の閾値処理(閾値=0.2)による2値画像、e,fはフレーム間差分絶対値の閾値処理(閾値=3)による2値画像である。g,hは判定処理後の結果画像で、白枠が小崩落の検知箇所である。

ールフィルタを用いると落石を的確にノイズと弁別できていることが分かるが、フレーム間差分法では、ノイズへの反応が目立ち、落石箇所と区別がつかない。

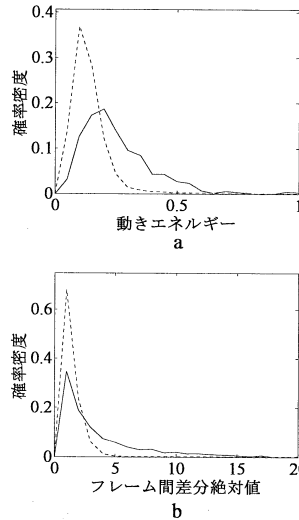


図5 検討手法(a)とフレーム間差分法(b)による落石領域(実線)と背景領域(点線)の確率密度分布。

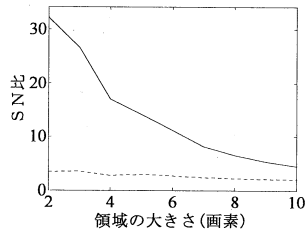


図6 検討手法(実線)とフレーム間差分法(点線)のSN比。落石領域をシグナル、落石以外の斜面をノイズにした。横軸はSN比を算出する際の正方形領域の大きさを1辺の画素数で表している。

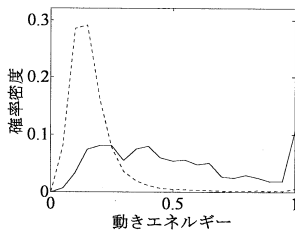


図7 差分強調処理を施した場合の落石領域(実線)と背景領域(点線)の確率密度分布。

図4g,hは検討手法で判定処理を施した結果の一例である。小崩落が発生していると判定した領域を白枠で囲んでおり、実際の落石箇所と対応していることが分かる。動きエネルギーを閾値処理した段階(図4c,d)では、僅かにノイズへの反応も見られるが、これらは反応領域の大きさの違いにより、一般的なモルフォロジー処理で容易に分離できることが示された。これらより、検討手法は、映像圧縮やちらつきのノイズのある中から落石を的確に検知することが確認できた。

落石の抽出精度を総合的に評価するために、各フレームにおける落石の出現箇所(以下「落石領域」と呼ぶ。)と落石を除く背景領域で確率密度分布を算出した。図5は、検討手法とフレーム間差分絶対値での確率密度分布であり、各領域で確率が1になるようにした。検討手法(図5a)では、落石領域の分布は、僅かではあるが、動きエネルギーが大きい領域を占めているのに対して、フレーム間差分法(図5b)では、落石領域と背景領域の分布がほぼ重なっている。落石領域と背景領域の2つの分布の平均値の差で重なりを評価した。両者の平均値の差が大きければ、落石と背景を的確に分離していると言える。検討手法の落石領域と背景領域の平均値の差は0.12であり、フレーム間差分法の平均値の差は0.0084(比較のために256階調を0~1に変換している)であるため、従来に比べて落石を的確に捉えていることが分かる。この結果から、時空間ガボールフィルタは、背景と同系色の微小な視覚的な特徴の小さい土砂災害の前兆現象検知において有効であると言える。

落石とノイズとの分離を評価するために、落石領域を取り囲む正方形領域を設定し、その正方形領域で動きエネルギーとフレーム間差分絶対値の平均値を取ってSN比を算出した。落石領域をシグナルに、落石以外の斜面の背景領域をランダムに抽出して、ノイズとしたときの結果を図6に示す。グラフの横軸は正方形領域の1辺の画素数を表し、実線が検討手法で、点線がフレーム間差分法による結果である。検討手法の方が、どの大きさをとっても、SN比が改善していることが見て取れる。特に正方形領域の大きさが落石の大きさと同じくらいのときには格段にSN比が改善していることが分かる。これは、ノイズの影響を時空間ガボールフィルタが抑えたことを裏付けている。このことから、検討手法がノイズのある中から微小な検知対象を的確に抽出していると言える。

図7は、前処理として差分強調処理を施した場合の、落石領域と背景領域の確率密度分布である。差分強調処理がない場合(図5a)と比較して、動きエネルギーがより大きな値にも分布していることが分かる。落石領域と背景領域の平均値の差は0.32であり、差分強調処理がない場合は0.12であることから、両者の分布の重なりがさらに小さく、識別しやすくなっており、差分強調処理は有効な処理であると言える。時間的な差分値が極端に大きな値を取るような、映像圧縮ノイズ等が発生している場合においては、ノイズも大きくなることが想定されるが、小崩落を安定して強く抽出する点で効果があると考えている。

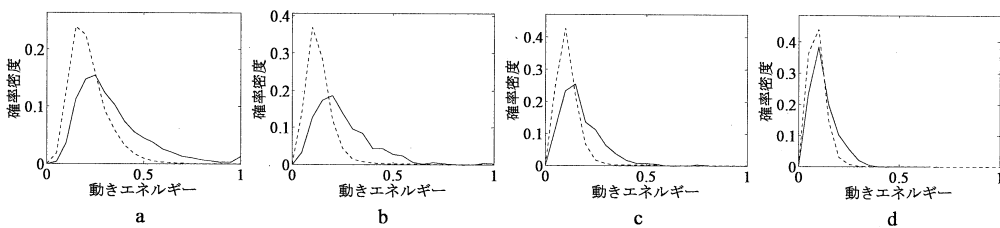


図8 落石サイズとフィルタサイズの関係。フィルタサイズを(a)4, (b)8, (c)12, (d)16にした場合の落石サイズが4×4画素の落石領域(実線)と背景領域(点線)における動きエネルギーの確率密度分布を表す。

表2 落石領域と背景領域の動きエネルギーの平均値とその差。

落石 サイズ	フィルタサイズ：4			フィルタサイズ：8			フィルタサイズ：12			フィルタサイズ：16		
	落石	背景	差	落石	背景	差	落石	背景	差	落石	背景	差
4×4	0.33	0.22	0.11	0.26	0.14	0.12	0.18	0.12	0.06	0.12	0.09	0.03
8×8	0.43	0.22	0.21	0.39	0.15	0.24	0.34	0.12	0.22	0.25	0.09	0.16

3.3. 小崩落とフィルタサイズ

図8は、時空間ガボールフィルタのフィルタサイズを変えたときの動きエネルギーの確率密度分布を表している。落石領域と背景領域の分布はフィルタサイズが8(図8b)のときに最も重なりが小さいように見える。各領域の平均値とその差を表2に示す。各領域の平均値の差から、検知目標とする落石の大きさが4×4画素のときは、フィルタサイズは8が適していることが分かった。落石の大きさが8×8画素のときも、フィルタサイズが8のときに各領域の平均値の差が最も大きくなった。今回のシミュレーション映像における最適なフィルタサイズは8であることが分かった。ただし、最適なフィルタサイズは落石サイズに応じて変化するはずである。この点については、今後さらに検証していく。

3.4. 外乱要因に対するロバスト性

本研究では、屋外環境での監視を前提としているため、最終的にはあらゆる自然条件に対応していくことが望まれる。そこで、検討手法の外乱要因に対する影響を評価した。土砂災害現場を固定カメラで撮影し、霧の発生と木の揺れのシーンを切り出した映像(320×240, 30fps, 300フレーム)を検証に用いた。本検証映像には、小崩落は発生しておらず、また、時空間ガボールフィルタのパラメータは前節の検討と同じ設定を用いた。

図9は、霧が発生しているシーンに検討手法を適用し、霧が動いている領域(25×40画素)のみの動きエネルギーを抽出した確率密度分布である。霧は比較的緩やかな輝度変化であり、動きエネルギーは小さい(平均値は0.19)。そのため、前述のシミュレーション結果より小崩落の動きエネルギーは大きく算出されることから、霧との平均値の差が大きくなることが想定され、両者の明確な分離ができると考えている。

図10は、木が揺れているシーンに検討手法を適用し、木が揺れている領域(25×40画素)のみの動きエネルギーを抽出した確率密度分布である。動きエネルギーが大きな領域に偏っていることが見て取れる(平均値は0.94)。ここでは、木の枝や葉が数十画素と小さく、これは、時空間ガボールフィルタが微小物体の動きを抽出するという本来の狙いに良く合致している。一方、実際に小崩落が発生すると思われる木が揺れていない斜面(25×40画素)の動きエネルギーの平均値は0.63であり、木が揺れている領域に対して小さいこ

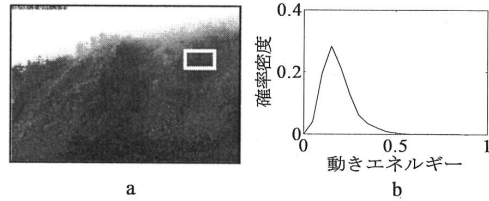


図9 霧が発生しているシーン(a)の白色枠内の動きエネルギーの確率密度分布(b)。

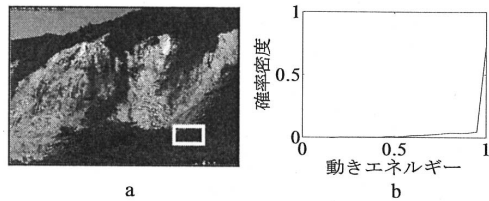


図10 木が揺れているシーン(a)の白色枠内の動きエネルギーの確率密度分布(b)。

とが分かった。木の揺れは定期的な動きであるため、時間平均(今回は10秒分)しても大きな値を取るが、斜面は動きがないことから時間平均すると動きエネルギーは小さくなる。この違いから、時間平均値から木の揺れと斜面の状態判別をして、木が揺れている領域の分離は可能と考えている。

4. まとめ

土砂災害の前兆現象である小崩落の時空間の微小時間の軌跡に着目し、時空間ガボールフィルタによって特徴量を算出し、小崩落検知において有効性を確認した。今後は、多様な外乱要因に対応する実用的な判定処理の検討を行う予定である。

謝 辞

土砂災害映像を研究素材として使用することを承諾していただきました国土交通省中部地方整備局越美山系砂防事務所に深く感謝致します。

文 献

- [1] E. H. Adelson, and J. R. Bergen, "Spatiotemporal energy models for the perception of motion," J. Opt. Soc. Am., vol.2, no.2, 1985.
- [2] 国土交通省中部地方整備局越美山系砂防事務所, <http://www.cbr.mlit.go.jp/etsumi/>