

地震による被害箇所を背景差分法で抽出する際のノイズ除去に最適な画像枚数の検証

今野 新¹・関谷 浩孝²・蘆屋 秀幸³

¹ 正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 社会資本マネジメント研究センター
社会資本情報基盤研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

E-mail: konno-a85aa@mlit.go.jp

² 正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 社会資本マネジメント研究センター
社会資本情報基盤研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

E-mail: sekiya-h92tb@mlit.go.jp

³ 正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 社会資本マネジメント研究センター
(〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

E-mail: ashiya-h82ac@mlit.go.jp

行政機関は地震による被害状況を迅速に把握する必要がある。国土技術政策総合研究所では、国土交通省が管理するインフラに設置した CCTV カメラに映し出された地震発生後の画像を平常時の画像と比較し、画像中の被害箇所を差分として抽出することで初動対応を支援する研究を行っている。

差分のみを抽出するには移動体等はノイズとなり、これを地震発生直後に得られる少数の画像から除去する必要がある。差分画像を生成する際に二種類のアルゴリズムを用い代表的な場面の画像列へ想定される被害を書き加えた疑似画像で最適な枚数を評価した。穏やかな晴れ、風のある日、みぞれ、夜間の四場面に対しては、差分画像の画素値の閾値を自動決定する方法では 5 枚より多くの画像が必要であり、二次元画素値ヒストグラムを用いる方法では 5 枚で十分という知見を得た。

Key Words: support of the early stage after earthquake, camera image, CCTV, background subtraction, image change detection

1. はじめに

地震発生時に行政機関は被害状況を迅速に把握する必要がある。国土交通省では管理する河川や道路等に CCTV (Closed Circuit Television) カメラを設置し、地震発生時には CCTV カメラで撮影する画像から被害状況の把握を行っている。しかし、地震の規模が大きく被害の可能性のある地域の CCTV カメラの台数が多くなるほど、映し出している画像を確認する時間は長くなる。

そこで国土技術政策総合研究所 (以下、国総研という) では、設定震度以上の市区町村内に位置する CCTV カメラが映し出している画像を平常時の画像と比較し、画像に映し出された被害箇所を差分 (変化) として抽出することで初動対応を支援する研究を行っている。一般に差分を抽出する手法は二つに分類される。一つは、地震発生直後の画像と地震発生直前の画像の

画素値の差を計算し、閾値を超えた差分値を「変化」とするフレーム間差分法である。この手法は時間変化の影響を最小化可能であるが、一般に「変化」した領域全体を抽出できない課題が指摘されており¹⁾、個別の CCTV カメラに対して最適なパラメータを設定する必要があることも課題となる。

もう一つの差分を抽出する手法は「変化」がない状態の「背景画像」を地震発生後と平常時に生成し、二枚の「背景画像」から求めた「差分画像」の画素値に対して閾値処理を行い「変化」した領域を抽出する背景差分法である。背景差分法は複数の CCTV カメラに共通して利用可能となるが、一般的に車体や人物等の移動体等 (以下、ノイズという) を除去し「背景画像」を予め生成しておく必要がある。背景差分法に関するアルゴリズムは後述の通り数多く提案されているが、100%の精度を有するアルゴリズムはない。地震発生直

後の初動対応を支援するためには、限られた時間で得られる少数の画像からノイズを除去する手法を検討する必要がある。

ノイズを除去（背景画像を生成）するアルゴリズムは、ある特定の CCTV カメラの特定の撮影方向で切出したある時刻における「背景画像」を、同一方向で切出した直近の複数枚の画像（以下、画像列という）から生成することが基本となる。Piccardi²⁾ は背景画像を生成するアルゴリズムを七種類に分類している。七種類に含まれる代表的なアルゴリズムの精度比較を Toyama³⁾ が行った際、用いた画像列は 200 枚以上であった。固有空間法を用いる場合は、数千枚の画像列からノイズを除去する必要がある^{4), 5)}。他のアルゴリズムとして、松山⁶⁾ は背景画像の照明変化の影響を受けない特徴量から背景差分を計算する手法を提案し 13 枚の画像列から有効性を示している。後藤⁷⁾ は予め登録したテンプレートとの類似度を示す評価指標に基づく手法（パターンマッチング）が照明変化に頑健である仮定し、20 枚の画像列から背景画像を生成し移動する人物の画像を検出できることを確認している。小塚⁸⁾ は、八枚以上の画像を元に画像をブロックに分割し移動体を除去する手法を提案している。

背景差分法の実用的な研究として、須崎⁹⁾ は日照変化に対応した交通流動画から四輪車を自動抽出するため、平常時には 31 枚の画像列から、検出時には 11 枚の画像列から中央値法で背景画像を作成する手法を提案している。リュウ¹⁰⁾ は、衛星画像からノイズとなる日影を除去するため、5 枚の衛星画像に含まれる形状や色の情報を元に、画素単位からオブジェクト単位に分割するアルゴリズムを採用している。以上の既往研究は固定した撮影方向から得られる画像列に基づいているが、カメラの旋回機能等も利用した背景差分法も提案されている^{11), 12), 13)}。

このように多くの画像列から「背景画像」を生成する手法は数多く提案されているが、少数の画像列からノイズを除去する研究については数少ないと考えられる。そこで本稿では、少数の画像列からノイズを除去する背景差分法を構成し、ノイズ除去に最適な画像枚数について検証した結果を報告する。

2. 少数の画像列に基づく背景差分法の構成

本稿で用いる背景差分法を二つのアルゴリズムから構成する。一つは画像列からノイズを除去（背景画像を生成）するアルゴリズムであり、もう一つは地震発生直後の背景画像を平常時の背景画像と比較（差分画像を生成）するアルゴリズムである。これらを組み合わせる方法として直列させる方法と並列させる方法が

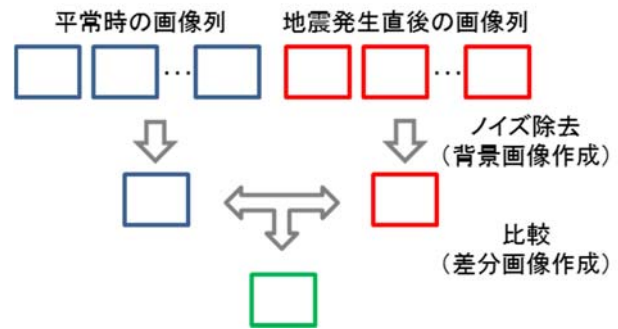


図-1 少数の画像列に基づく背景差分法の構成

考えられるが、最適化するパラメータを抑えられること等から実用化されている事例が多い¹⁴⁾ 直列させる方法（図-1）を採用した。

(1) 背景画像を生成するアルゴリズム

ある特定の CCTV カメラの特定の撮影方向で切出した時刻 t における「背景画像」 B_t は、同一方向で切出した直近の n 枚の画像列 $I_{t+n-1}, I_{t+n-2}, \dots, I_t$ から生成する。Piccardi²⁾ が分類した七種類のアルゴリズムのうち、下記四種類は応用例が多いと考えられる。一つ目は画素単位で n 枚の平均及び分散を求める移動ガウシアン平均^{15), 16)}、二つ目は画素単位で n 枚のヒストグラムの中央値を求める時間中央値フィルタ^{17), 18)}、三つ目は n 枚の画像から画素単位で複数の平均及び分散を線形結合した混合正規分布法¹⁹⁾、四つ目は n 枚の主成分を求めて画像に頻出する特徴量を抽出する固有背景法²⁰⁾ である。

混合正規分布法に基づく実用化事例が多いと指摘²¹⁾ されているが数百枚の画像列が必要²⁾ とされている。固有背景法についても、前章で述べたとおり数千枚の画像列が必要である。時間中央値フィルタは、一般的にスパイク状ノイズの除去に効果的であり²²⁾、移動ガウシアン平均よりも高い精度を有することが多くの研究から報告されている²⁾ ことから本稿で採用する。具体的には、画素を $i=1,2,\dots,H$, $j=1,2,\dots,W$ で表現し、median を入力ベクトルの中央値を返す関数と定義して、次のように計算する。

$$B_{ij}^{(t)} = \text{median}(I_{ij}^{(t-n+1)}, I_{ij}^{(t-n+2)}, \dots, I_{ij}^{(t)}) \quad (1)$$

なお、時間中央値フィルタを通す前にはガウシアンフィルタ G_β を用い、通した後は非局所平均法を用いて画素値 I_{ij} を平滑化する。

$$G_\beta(x, y) = \frac{\beta}{2\pi} e^{-\frac{\beta}{2}(x^2+y^2)} \quad (2)$$

$$I_{ij} = \sum_{(i', j') \in K_{ij}} I_{i', j'} G_\beta(i', j') \quad (3)$$

ただし、カーネル K_{ij} は、注目画素 (i, j) を中心とした近傍集合とする。非局所平均法は、指定したカーネルサイズで注目画素 (i, j) の近傍をテンプレート画像

として切り出し、注目画素を中心とするウィンドウサイズでテンプレートマッチングを行う。マッチングの度合いをウィンドウの重みとし、ガウシアンフィルタ G_β で重み付きフィルタリングを行う²³⁾。

(2) 差分画像を生成するアルゴリズム

地震発生直後と平常時の二枚の「背景画像」を比較し「差分画像」を生成するアルゴリズムについては、Radke²⁴⁾ が画素単位で差を求めるアルゴリズムと、日照変化を考慮しヒストグラムの差を求めるアルゴリズムに分類している。本稿では、比較のため両方のアルゴリズムで検証する。

前者のアルゴリズムとしては、差分画像のヒストグラムを「変化部分」と「変化でない部分」に分離する際、画素値の閾値を自動的に決定する大津の二値化²⁵⁾を採用する。

後者のアルゴリズムとしては、二枚の「背景画像」に対する二次元画素値ヒストグラム（二枚の画像の画素値を二軸とする、二枚の同じ座標における画素値のペア）を用いる手法²⁶⁾（以下、二次元画素値ヒストグラムの方法という）を採用する。具体的には、地震発生後の背景画像 $I^{(0)}_j$ と平常時の背景画像 $I^{(2)}_j$ の平均画像として

$$\overline{I^{(k)}} = \frac{1}{HW} \sum_{i,j} I_{ij}^{(k)} \quad (4)$$

を計算する ($k=1, 2$)。二枚の画素値のペア ($I^{(0)}_j, I^{(2)}_j$) の分布の中心を通る直線 $g(x)$ を次のように求める。

$$g(x) = \frac{\overline{I^{(2)}}}{\overline{I^{(1)}}} x \quad (5)$$

以上から $D_j = I^{(2)}_j - g(I^{(0)}_j)$ を定義する。平常時の背景画像と地震発生後の背景画像が全く同一であれば、 D_j は原点のみに値を持つ一点分布となる。逆に、日照変化のみの影響で二枚の背景画像が異なる場合、 D_j は原点を中心とした対称分布となる。この分布を平均値 0、標準偏差 s の値を持つガウス分布と仮定し、ガウス分布から外れる D_j を調整するパラメータ σ を導入して下記条件を満たす画素値を「変化」とみなす。

$$\frac{D_{ij}}{s} > \sigma \quad (6)$$

ガウス分布の性質から、全ての画素値の $0.1 \times \sigma$ [%] の割合が「変化」がないとみなされる。つまり、 σ を大きくすると除去する日照変化の影響範囲は拡大できるが、微小な「変化」も除去されることとなる。

差分画像を生成する二種類のアルゴリズムを適用した後に、微小な変化を除去するため、ラベリング処理を行う。具体的には、オープニング処理²⁷⁾、メディアンフィルタの順に処理を行った後に Th_{area} 以下の小さな面積を除去する。

3. 必要な画像枚数の検証と結果

前章で構成した背景差分法を用いて、ノイズ除去に最適な画像枚数を検証する。地震による実際の被害を CCTV カメラから撮影することが少ないことや、運用している CCTV カメラから地震による被害を同一撮影方向で複数枚を画像列として保存することは稀である。そこで本稿では、画像列に想定される被害を書き加えた疑似画像を作成し、書き加えた被害を「変化」と定義して精度を検証する。

(1) 使用データ

学術的に用いられる CDnet2014 の画像²⁸⁾ から実際に運用している CCTV カメラの撮影方向と類似している画像列として図-2（上段）から図-5（上段）のような四種類の場面の画像列を用いた。地震による被害（変化）に対する精度を検証するため、それぞれの場面に対して図-2（下段）から図-5（下段）のように疑似的な被害を書き加えた。図-2 の「穏やかな晴れ」の画像列に対しては亀裂として二本の線、図-3 の「風のある日」の画像列に対しては占有物や道路附属物の破片としてとして画像の下方に三角及び四角の黒塗り領域、及び細い線を書き加えた。図-4 の「みぞれ」の画像列に対してはスタック車両として自動車程度の大きさの黒塗り領域、交通障害物として一車線分を塞ぐ一本の線、建物に積もった積雪として二本の線を書き加えた。図-5 の「夜間」の画像列に対しては、落石や亀裂として右側に長方形と線を書き加えた。

(2) アルゴリズムに用いたパラメータ設定

背景画像を生成した後の非局所平均フィルタ、差分画像を生成した後のオープニング処理等に用いるパラメータについては表-1 のとおりとした。

(3) 検証方法

疑似的な被害を書き加えた箇所を正解箇所とし、差

表-1 本稿で用いたパラメータ値

ガウシアンフィルタ	カーネルサイズ 5×5 , $\beta=1$
非局所平均法	カーネルサイズ 5×5 , ウィンドウサイズ 21×21 , $\beta=1/15$
二次元画素値ヒストグラムの方法	$\sigma = 4$
オープニング処理	カーネルサイズ 3×3 , 繰り返し数 1
メディアンフィルタ	カーネルサイズ 3×3
小領域除去	$Th_{area} = 120$

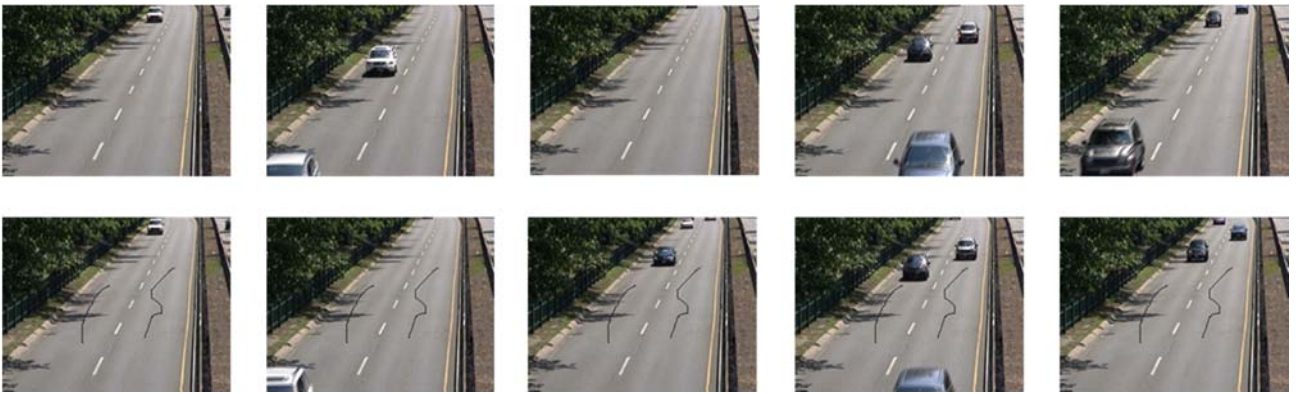


図-2 穏やかな晴れの画像列〔上段〕と別の時点に対して被害を書き加えた画像列〔下段〕



図-3 風のある日の画像列〔上段〕と別の時点に対して被害を書き加えた画像列〔下段〕



図-4 みぞれの画像列〔上段〕と別の時点に対して被害を書き加えた画像列〔下段〕

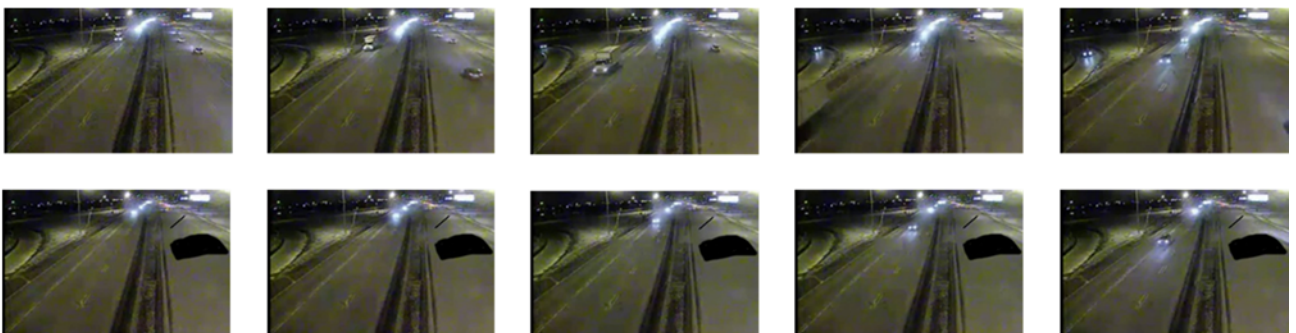


図-5 夜間の画像列〔上段〕と別の時点に対して被害を書き加えた画像列〔下段〕

分画像に一部でも正解箇所が含まれる箇所数を正検出数 T_p とする。差分画像に正解箇所でない箇所を抽出した箇所数を誤検出数 F_p 、正解箇所を抽出しない箇所数を未検出数 F_n とする。誤検出を表す評価指標として $precision$ 、未検出を表す評価指標として $recall$ を用いる¹⁾。

$$precision = \frac{T_p}{T_p + F_p} \quad (7)$$

$$recall = \frac{T_p}{T_p + F_n} \quad (8)$$

F_p と F_n が 0 であると精度が良いことから、いずれも 1

に近い値であるほど精度が高いことを示す。

(4) 結果と考察

四種類の場面に対し、画像枚数を 1 枚から 5 枚まで 1 枚ずつ増やした場合に出力された「差分画像」について、「二次元画素値ヒストグラムの方法」を用いた場合の結果を図-6 に、「大津の二値化」を用いた場合の結果を図-7 に示す。図-6 の差分画像から画像枚数別にカウントした正検出数 T_P 、誤検出数 F_P 、未検出数 F_N 及び *precision*、*recall* を表-2 に示す。同様に、図-7 の差分画像からカウントした正検出数 T_P 等を表-3 に示す。また、*precision* と *recall* の四種類の場面に対する平均値を画像枚数別に計算した結果を図-8 に示す。

図-8 より、「二次元画素値ヒストグラムの方法」及び「大津の二値化」とともに画像枚数が増えるにつれ精度が上がることを確認できる。2 枚までの画像列では「背景画像」を生成する際の統計処理のサンプル数として不十分であることから「変化」を全く抽出できていないと考えられる。以下 3 枚以上の画像列を用いた場合について述べる。

「二次元画素値ヒストグラムの方法」は、どの画像枚数でも *precision* の値の方が *recall* よりも高いことから誤検出を防いでいる。画像枚数が 5 枚の場合に *precision* = 1 となったことから、誤検出を 100% 防いでいる。このアルゴリズムは日照変化の影響等の微小な変化を考慮していることから、「風のある日」の画像列に含まれる木々の揺れや「みぞれ」の画像列に含まれる水滴をノイズとして除去することに成功していると考えられる。画像枚数を増やすことはノイズを除去するため中央値を計算する際に有効であるが、微小な「変化」の検出には効果が小さく、*recall* は改善されないと考えられる。このことは、画像枚数を 5 枚から 6 枚へ増やして検証する必要がある。

逆に「大津の二値化」については、どの画像枚数でも *recall* の値の方が *precision* よりも高いことから、未検出を防いでいる。画像枚数を 4 枚から 5 枚へ増やしても *recall* = 0.875 という値に変化が無いことから、未検出を最大限に防ぐには 4 枚で十分であると言える。ただし、画像枚数を 5 枚から 6 枚へ増やした場合に *precision* の値が高まる、つまり誤検出を減らしノイズを除去する精度が高まるかは今後の検証が必要となる。

4. おわりに

本稿では、地震発生直後の限られた時間内に得られる少数の画像列に映し出された被害箇所を抽出する背景差分法を構成した。必要な画像枚数を検証する際に

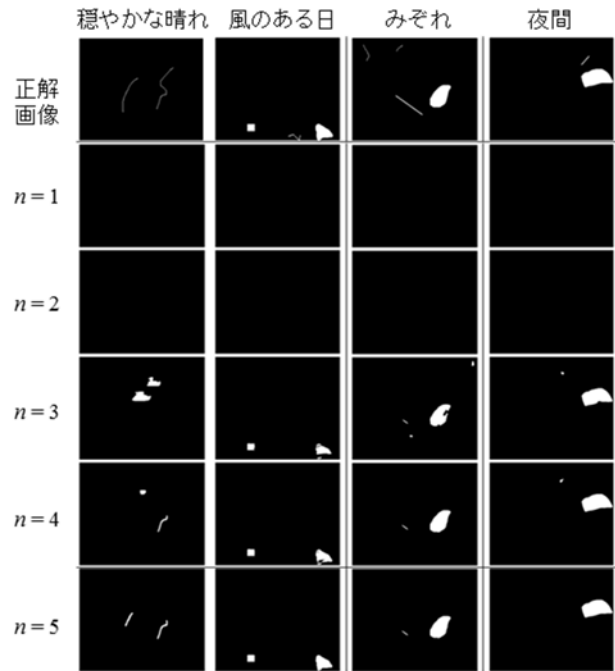


図-6 出力された差分画像(二次元画素値ヒストグラムの方法)

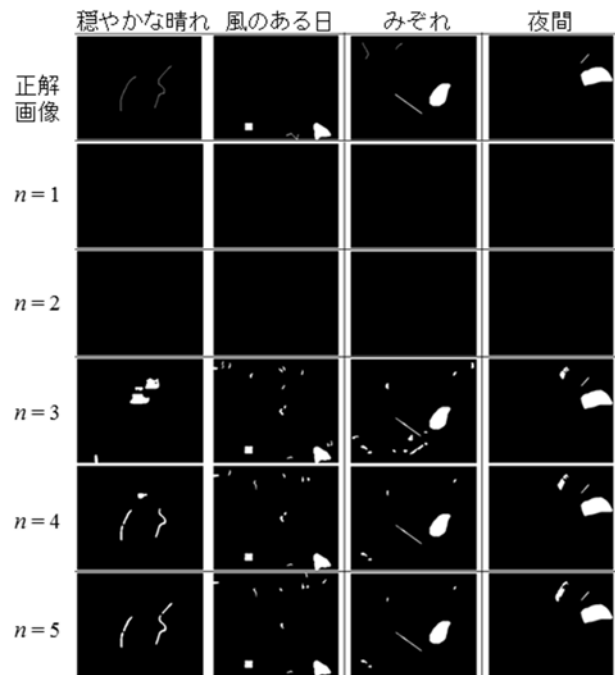


図-7 出力された差分画像(大津の二値化)

は、地震による被害を撮影した実際の画像列の代わりに、想定される被害を書き加えた疑似画像を用いた。「穏やかな晴れ」、「風のある日」、「みぞれ」、「夜間」の四種類の場面を用いた場合、「二次元画素値ヒストグラムの方法」を用いてヒストグラムから差分画像を生成する場合については、5 枚の画像列で誤検出を 100% 防ぐ結果を得たが、5 枚より多くの画像で未検出が増えないことを今後検証する必要がある。「大津の二値化」を用いて画素単位の差分画像を生成する

表-2 差分画像の検証結果(二次元画素値ヒストグラムの方法)

場面	n	TP	FP	FN	precision	recall
穏やかな晴れ	1	0	0	2	0.00	0.00
	2	0	0	2	0.00	0.00
	3	0	2	2	0.00	0.00
	4	1	1	1	0.50	0.50
	5	2	0	0	1.00	1.00
風のある日	1	0	0	3	0.00	0.00
	2	0	0	3	0.00	0.00
	3	2	0	1	1.00	0.67
	4	2	0	1	1.00	0.67
	5	2	0	1	1.00	0.67
みぞれ	1	0	0	4	0.00	0.00
	2	0	0	4	0.00	0.00
	3	2	2	2	0.50	0.50
	4	2	0	2	1.00	0.50
	5	2	0	2	1.00	0.50
夜間	1	0	0	2	0.00	0.00
	2	0	0	2	0.00	0.00
	3	1	1	1	0.50	0.50
	4	1	1	1	0.50	0.50
	5	1	0	1	1.00	0.50

表-3 差分画像の検証結果(大津の二値化)

場面	n	TP	FP	FN	precision	recall
穏やかな晴れ	1	0	0	2	0.00	0.00
	2	0	0	2	0.00	0.00
	3	0	3	2	0.00	0.00
	4	2	1	0	0.67	1.00
	5	2	0	0	1.00	1.00
風のある日	1	0	0	3	0.00	0.00
	2	0	0	3	0.00	0.00
	3	3	11	0	0.21	1.00
	4	3	8	0	0.27	1.00
	5	3	8	0	0.27	1.00
みぞれ	1	0	0	4	0.00	0.00
	2	0	0	4	0.00	0.00
	3	2	12	2	0.14	0.50
	4	2	4	2	0.33	0.50
	5	2	4	2	0.33	0.50
夜間	1	0	0	2	0.00	0.00
	2	0	0	2	0.00	0.00
	3	2	1	0	0.67	1.00
	4	2	1	0	0.67	1.00
	5	2	1	0	0.67	1.00

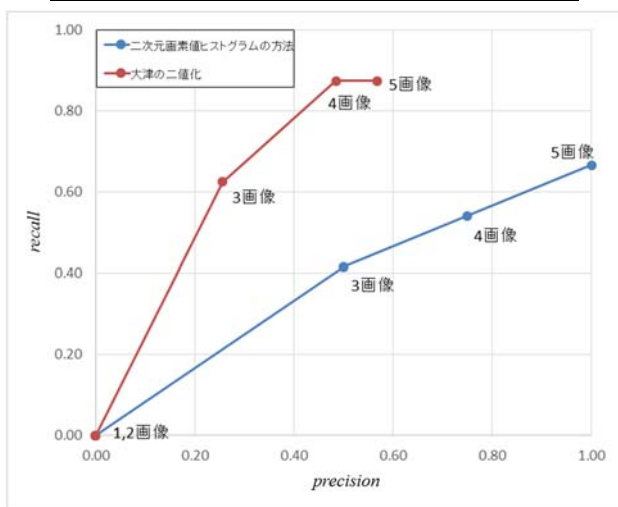


図-8 画像枚数別の precision と recall
(右上にプロットされるほど検出精度は高い)

場合については、未検出を最大限に防ぐには4枚で十分という結果となったが、5枚より多くの画像列で誤検出が減らせるかは今後の検証が必要となる。

今後の検証においては、実際に運用している CCTV カメラから得られる画像を用いる予定である。また、地震による「変化」を抽出する運用上の精度を向上させたい。例えば、二次元画素値ヒストグラムの方法に含まれるパラメータ σ の時間帯別に最適な値を求めていきたい。

謝辞：本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「レジリエントな防災・減災機能の強化」 (管理法 人: JST) によって実施されました。

参考文献

- 1) 藤吉 弘亘, 小村 剛史, 矢入 (江口) 郁子, 香山 健太郎, 吉水 宏: 歩行者 ITS のためのフレーム間差分による移動体検出法とその評価, コンピュータビジョンとイメージメディア研究会研究報告, 情報処理学会, Vol. 2004, pp.11-20, 2004.
- 2) M. Piccardi: Background subtraction techniques: a review, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp.3099-3104, 2004.
- 3) K. Toyama, J. Krumm, B. Brumitt, B. Meyers: Wallflower: Principles and Practice of Background Maintenance, *International Conference on Computer Vision*, pp.255-261,1999.
- 4) 長谷川修, 金出武雄: 一般道路映像中の移動物体の識別・色の推定と特定対象の検出, 情報処理学会論文誌, 情報処理学会, Vol. 44, No. 7, pp.1795-1807, 2003.
- 5) 川西康友, 椋木雅之, 美濃導彦: 背景の時間変化に着目した固有空間中での時系列フィルタに基づく背景画像推定, 電子情報通信学会技術研究報告, 電子情報通信学会, Vol. 111, No. 379, pp. 173-178, 2012.
- 6) 松山隆司, 和田俊和, 波部斉, 棚橋和也: 照明変化に頑健な背景差分, 電子情報通信学会論文誌, 電子情報通信学会, Vol. J84-D-II, No. 10, pp.2201-2211, 2001.
- 7) 後藤邦博, 齊藤文彦, 山本和彦, 加藤邦人: 局所領域照合を用いた背景差分による移動物体検出, 画像電子学会誌, 画像電子学会, Vol. 37, No. 3, pp.346-354, 2008.
- 8) 小塚亨, 出口大輔, 井手一郎, 村瀬洋: 背景の適応的選択に基づく複数画像系列の統合による移動物体除去に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 電子情報通信学会, Vol. 114, No. 521, pp. 165-170, 2015.
- 9) 須崎純一: 日照条件に頑健な交通流動画像からの四輪車の自動抽出手法の開発, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 土木学会, Vol. 70, No. 4, pp.211-226, 2014.
- 10) リュウウエン, 山崎文雄: 高解像度衛星画像における日陰の抽出と補正法の提案, 土木学会論文集 D3

- (土木計画学), 土木学会, Vol. 67, No. 3, pp.359-366, 2011.
- 11) 松山隆司, 和田俊和, 物部祐亮: 視点固定型パン・チルト・ズームカメラを用いた実時間対象検出・追跡, 情報処理学会論文誌, 情報処理学会, Vol. 40, No. 8, pp.3169-3178, 1999.
 - 12) 譲田 賢治, 坪内 貴之, 菅谷 保之, 金谷健一: 移動ビデオカメラ画像からの運動物体の抽出, コンピュータビジョンとイメージメディア研究会研究報告, 情報処理学会, Vol. 2004, pp.41-48, 2004.
 - 13) 高田和豊, 佐藤智, 登一生: PTZ カメラを用いた物体検出のための画像の線形化による予測背景画像生成, コンピュータビジョンとイメージメディア研究会研究報告, 情報処理学会, Vol. 2005, pp.221-226, 2005.
 - 14) 鷺見和彦, 関真規人, 波部斉: 物体検出-背景と検出対象のモデリング-, コンピュータビジョンとイメージメディア研究会研究報告, 情報処理学会, Vol. 2005, pp.79-98, 2005.
 - 15) C. Wren, A. Azarbayejani, T. Darrell and A. Pentland : Pfilter : Real-time Tracking of the Human Body, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 19, No. 7, pp.780-785, 1997.
 - 16) D. Koller, J. Weber, T. Huang, J. Malik, G. Ogawsawa, B. Rao and S. Russell : Toward Robust Automatic Traffic Scene Analysis in Real-time, *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, pp.126-131, 1994.
 - 17) B. Lo and S. Velastion : Automatic congestion detection system for underground platforms, *Proceedings of the International Symposium on Intelligent Multimedia, Video and Speech Processing*, pp.158-161, 2001.
 - 18) R.Cucchiara, C. Grana, M. Piccardi and A. Prati : Detecting Moving Objects, Ghosts, and Shadows in Video Streams, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 25, No. 10, pp.1337-1442, 1997.
 - 19) C. Stauffer and W. E. Grimson : Adaptive background mixture models for real-time tracking, *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, pp.246-252, 1999.
 - 20) N. Oliver, B. Rasorio and A. Pentland : A Bayesian Vision System for Modeling Human Interactions, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 8, pp.831-843, 2000.
 - 21) 羽下哲司: 映像監視における背景モデリング・物体検出技術の進展, 映像情報メディア学会誌, 映像情報メディア学会, Vol. 63, No. 10, pp.1378-1384, 2009.
 - 22) CG-ARTS 協会: デジタル画像処理, CG-ARTS 協会, p.122, 2008.
 - 23) A. Buades, B. Coll, J. Morel : A non-local algorithm for image denoising, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp.60-65, 2005.
 - 24) R. J. Radke, S. Andra, O. Al-Kofahi and B. Roysam : Image Change Detection Algorithms : A systematic Survey, *IEEE transactions on image processing*, Vol. 14, No. 3, 2005.
 - 25) 高木幹雄, 下田陽久: 新編画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp.1520-1521, 2004.
 - 26) 喜多泰代: 二次元濃度ヒストグラムを用いた画像間変化抽出, 電子情報通信学会論文誌, 電子情報通信学会, Vol.J84-D-II, No.10, pp.2201-2211, 2001.
 - 27) 高木幹雄, 下田陽久: 新編画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp.1528-1529, 2004.
 - 28) Yi Wang et al. : ChangeDetection.NET (CDnet), <<http://www.changedetection.net/>>, (入手 2018.7.22)