

双極放射リーチ相関に基づくロバストな背景差分

Robust Background Subtraction based on Bi-polar Radial Reach Correlation

佐藤 雄隆†

坂上 勝彦†

Yutaka Satoh

Katsuhiko Sakaue

1. まえがき

本論文では、出現物体の明度分布、あるいは対象とする情景の明度変化に鈍感でありながらもロバストに出現物体を検出するために開発した新しい背景差分法について述べる。背景差分法は、画像中の背景と出現物体を分離するために多く用いられる方法で、近年そのニーズが高まっている環境監視[1]をはじめ、様々なマシンビジョンシステムにおいて重要となる基本技術である。画像時系列中から出現物体のみを精度よく検出および分離することが、その後の認識処理などの性能に大きな影響を与える。従来、単純背景差分法[2]やフレーム間差分法など画像間の明度差分に着目した手法が多く提案され、用いられている。これらの方法は実装が容易であることや演算量が少ないことから現在でも多く用いられているが、(1) 照明不良や影などの影響を受けやすい (2) 検出対象と背景の明度が近い部分が検出されない、などの問題を持つ。これらの問題を改善するため、空間微分を併用する方法[3]などが従来提案されているが、安定にエッジが得られているという条件が必要となるなどの問題点がある。また、部分画像ごとの正規化明度の変化に着目した手法[4]も提案されており、照明変動に対して高いロバスト性を持つが、ブロック分割処理によって検出パターンの形状判別などに必要となる空間分解能が低下する問題がある。カラー情報を用いた手法の提案もある[5]。画像間の差違を、明度と色度の要素に分解して判定することにより、明るさの変動や影などの影響を低減している。しかし一般的なカメラシステムにおいては、明度情報に対して色情報は不安定であることや、カラー情報自体が照明色の影響を敏感に受けやすいことが問題となる。

我々は従来、新しい統計量である放射リーチ相関法 (Radial Reach Correlation: RRC) [6] を提案し、画素単位の分解能で局所的なテクスチャを評価することでロバストな背景差分を実現した。そこにおいては、背景画像の局所的な特性に依存して適応的に定義域を調整するメカニズムを導入することによって、情景内の多様な背景や出現物体に対処することを可能としている。本稿においてはこの方法を更に拡張し、着目画素に対して正および負の明度差を同時に定義し、その保存性に着目するメカニズムにより、対象のテクスチャが微弱な場合や明度分布に偏りがある場合においても従来手法と比較してより安定に背景を分離する双極放射リーチ相関法 (Bi-polar Radial Reach Correlation, 以下 BP-RRC) を開発したので報告する。

2. 双極リーチ相関 (BP-RRC)

2.1 概要

図1に単純背景差分画像と BP-RRC 画像の例を示す。上段左の対象画像および上段中央の背景画像に対し、下段は単純背景差分画像の例で、二値化のしきい値 (th) を、20(d)、50(e) および 75(f) とした場合である。下段中央 (e) を見ると、出現した人物の胸部から顔部付近および脚部付近が、元々の背景と

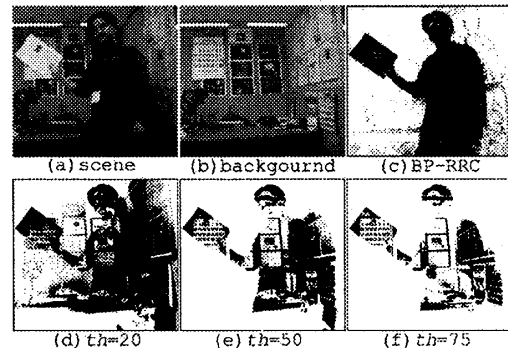


図1 単純背景差分法 (下段) と BP-RRC 画像 (上段右)

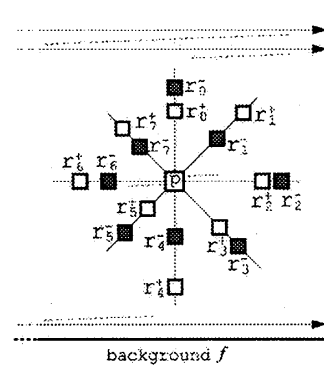


図2 リーチの生成

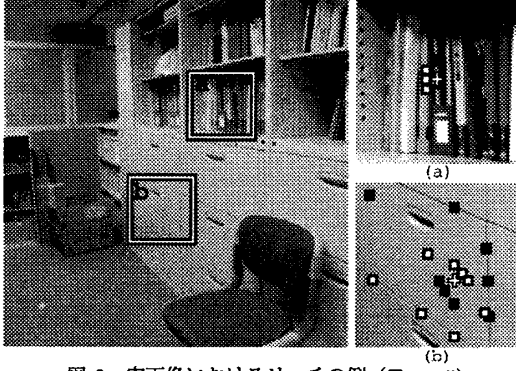
明度が近いために検出できていない (未検出) ことがわかる。一方、人物の背後には影が強く過検出されていることもわかる。これらの影響を低減するためにしきい値を (d) のように設定すると、未検出領域は縮小するが、逆に過検出領域が拡大してしまう。同様に (f) のように設定すると未検出領域が拡大する。これらのことから、しきい値の設定が極めて難しく、条件によっては最適な解が見つからない場合もあることがわかる。一方、(c) に示した BP-RRC 画像では、ややノイズが見られるが、人物のいずれの領域も良好に検出できていることがわかる。また同時に、影などの影響も少ないことがわかる。

2.2 定義

BP-RRC では着目画素と、その周辺の画素との相対的な関係を選択的に用いることで、単純に画素間の明度値を比較する方法と比較してロバストに着目画素の変化/不変化を検出する。これは、着目画素周辺の局所的なテクスチャを、適応的にスケーリングしつつ評価していることに相当する。以下、具体的な手順について述べる。

図2に BP-RRC の基本構造を示す。画像中のある着目点 p から、放射状に 8 方向についてある一定の正および負の明度差を持つ点をそれぞれ探索し、リーチ点と呼ぶ。8 方向について定義することの目的は、方向による特性の偏りを防止することと同時に、多数決処理を導入することで安定性を向上させるためである。画像中における任意の位置をベクトル $p = (x, y)$ で表す。放射状の延長腕 (リーチ) を延長する方向を表す方向

† 産業技術総合研究所, AIST


 図3 実画像におけるリーチの例 ($T_P = 5$)

ベクトル \mathbf{d}_k ($k = 0, 1, \dots, 7$) を次のように定義する。 $\mathbf{d}_0 = (1, 0)^T$, $\mathbf{d}_1 = (1, 1)^T$, $\mathbf{d}_2 = (0, 1)^T$, $\mathbf{d}_3 = (-1, 1)^T$, $\mathbf{d}_4 = (-1, 0)^T$, $\mathbf{d}_5 = (-1, -1)^T$, $\mathbf{d}_6 = (0, -1)^T$, $\mathbf{d}_7 = (1, -1)^T$ 。これらの方向に対し、正の明度差 (着目点に対しリーチ点の明度が高い) を持つリーチ $\{r_k^+\}_{k=0}^7$ および負の明度差を持つリーチ $\{r_k^-\}_{k=0}^7$ を求める。

$$r_k^+ = \min\{r \mid f(\mathbf{p} + r\mathbf{d}_k) - f(\mathbf{p}) \geq T_P\} \quad (1)$$

$$r_k^- = \min\{r \mid f(\mathbf{p}) - f(\mathbf{p} + r\mathbf{d}_k) \geq T_P\} \quad (2)$$

ここで、 f は背景画像、 T_P は明度差分のしきい値とする。しきい値の設定については 2.3 で考察する。

図3に実画像を用い $T_P = 5$ とした場合のリーチの生成例を示す。+印が着目画素を示し、その周囲の白点が正のリーチ点、黒点が負のリーチ点を表す。比較的細かなテクスチャを持つ (a) の領域ではリーチ長が小さく、テクスチャをあまり持たない (b) のような領域では大きなリーチが形成されていることがわかる。このようにリーチの配列はテクスチャのスケールを方向別に捉えていると考えることができる。すなわち、明度差分のしきい値 T_P に基づいてリーチを伸ばすことにより、テクスチャの粒度に適合して方向別にスケーリングを行っていると考えられる。本手法はテクスチャを主な手がかりとして用いているが、このメカニズムにより、テクスチャが微弱な部分についても自動的にスケーリング、すなわち大域的な情報を自動的に用いることでその機能を保つことができる。

次に、対象画像 g において、正のリーチ $\{r_k^+\}_{k=0}^7$ および負のリーチ $\{r_k^-\}_{k=0}^7$ の極性が保持されているかどうか調べる。(ここで、リーチ群 $\{r_k\}_{k=0}^7$ は背景画像 f に基づいて定義されていることに注意する。)

$$b_k(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1 & (\text{if } g(\mathbf{p} + r_k^+ \mathbf{d}_k) \geq g(\mathbf{p}) \\ & \cap g(\mathbf{p}) \geq g(\mathbf{p} + r_k^- \mathbf{d}_k)) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

$b_k(\mathbf{p})$ は、極性が保持されている場合 1 の値を、そうでない場合は 0 の値をとる。背景画像と対象画像間の任意の画素の類似度を評価するため、両者間の相関を表す B を求める。

$$B(\mathbf{p}) = \frac{1}{8} \sum_{k=0}^7 b_k(\mathbf{p}) \quad (4)$$

ここで、画像は実際には有限の大きさを持つため、(1) 式および (2) 式においてリーチが画像外まで達した場合、すなわちリーチ点が見つからなかった場合について考える。このような場合、簡易的には (i) 画像端の画素をリーチ点とする (ii) 画像端に達するまでの区間で明度差が最大になる点をリーチ点とする、などの対応が考えられるが、いずれも (1) 式および

(2) 式を満足しない、すなわち十分な明度差を持たないリーチが生成されるため、軽微なノイズによって極性が反転し誤検出となり悪影響を及ぼす可能性がある。そこでここでは、(3) 式を次のように場合分けし、画像外に達したことによって (1) 式および (2) 式を満足しないリーチに関しては、極性保持の判定から除外する。

(i) $\mathbf{p} + r_k^+ \mathbf{d}_k \in f \cap \mathbf{p} + r_k^- \mathbf{d}_k \in f$ の場合

$$b_k(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1 & (\text{if } g(\mathbf{p} + r_k^+ \mathbf{d}_k) \geq g(\mathbf{p}) \\ & \cap g(\mathbf{p}) \geq g(\mathbf{p} + r_k^- \mathbf{d}_k)) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5)$$

(ii) $\mathbf{p} + r_k^+ \mathbf{d}_k \in f \cap \mathbf{p} + r_k^- \mathbf{d}_k \notin f$ の場合

$$b_k(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1 & (\text{if } g(\mathbf{p} + r_k^+ \mathbf{d}_k) \geq g(\mathbf{p})) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (6)$$

(iii) $\mathbf{p} + r_k^+ \mathbf{d}_k \notin f \cap \mathbf{p} + r_k^- \mathbf{d}_k \in f$ の場合

$$b_k(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1 & (\text{if } g(\mathbf{p}) \geq g(\mathbf{p} + r_k^- \mathbf{d}_k)) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (7)$$

更に、両極性のリーチ点がいずれも見つからなかった場合、すなわち $\mathbf{p} + r_k^+ \mathbf{d}_k \notin f \cap \mathbf{p} + r_k^- \mathbf{d}_k \notin f$ の場合は、当該方向のリーチそのものを無効とする。方向別のリーチの有効/無効を定義するために $c_k(\mathbf{p})$ を以下のように定める。

$$c_k(\mathbf{p}) = \begin{cases} 0 & (\text{if } \mathbf{p} + r_k^+ \mathbf{d}_k \notin f \cap \mathbf{p} + r_k^- \mathbf{d}_k \notin f) \\ 1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (8)$$

以上から、背景画像と対象画像間の任意の画素の類似度を評価するため、両者間の相関を表す B' を次のように定める。

$$B'(\mathbf{p}) = \frac{1}{\sum_{k=0}^7 c_k(\mathbf{p})} \sum_{k=0}^7 c_k(\mathbf{p}) b_k(\mathbf{p}) \quad (9)$$

この $B'(\mathbf{p})$ は画素 \mathbf{p} 周辺の明度分布の類似度 (相関値) を表すものであり、本論文では双極放射リーチ相関 (BP-RRC) と呼ぶこととする。次に、BP-RRC をしきい値 T_B と比較することにより、類似あるいは非類似画素を判定する。その判定結果を示すために、2 値画像 $C(\mathbf{p})$ を次式で定義し、これを BP-RRC 画像と呼ぶ。

$$C(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1 & (B'(\mathbf{p}) \leq T_B) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (10)$$

ここでは、類似しない画素値を 1 としている。判定しきい値 T_B の設定については後に考察する。

2.3 しきい値 T_P および T_B の設定

しきい値 T_P の設定について考える。これは撮像系のノイズ特性を考慮することによって合理的な設定が可能である。(1) 式および (2) 式において、しきい値 T_P はリーチ内の明度差の最小値を定めている。 T_P の値を大きくすることで、大きな明度差を持つリーチが形成され、外乱に対する耐性が向上すると考えられる。しかしながら必要以上に大きな T_P は過大なリーチ長を生み出し、空間解像度の低下およびリーチ生成時における計算コストの増大につながる可能性がある。通常は、撮像系のノイズ分布を測定し、その 2σ 程度に T_P を設定することでノイズ成分の大部分に影響されない最小の T_P を決定することができる。図4は、図1で用いた画像に対し、実際に T_P の値を変化させ BP-RRC 画像を得たものである。 $T_P = 0$ の場合 (a) は、明度差によらず隣接画素間でペアが形成される (常に

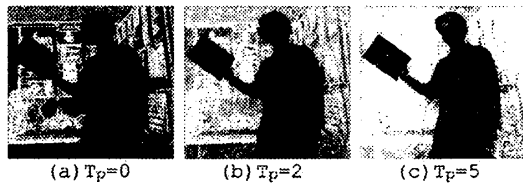
図4 異なる T_P に対する BP-RRC 画像

図5 BP-RRC の信頼度

$r_k^+ = 1$ かつ $r_k^- = 1$ になる)。このため、テクスチャをあまり持たない部分においては、明度差の小さなペアが生成され、ノイズの影響で極性の反転が起こり過検出が発生していることがわかる。一方、壁の掲示物など複雑なテクスチャを持つ部分については過検出が少ないこともわかる。これに対し、(b)、(c) と値を変化させるのに伴い、テクスチャの状況に応じて適切なリーチ長が設定されることで、頑健すなわちノイズによって極性が反転しないリーチが形成され、テクスチャの弱い面においてもノイズの影響を受けにくくなっていることがわかる。物体を出現させずに撮影したフレーム間の差を取る、という簡易的な方法で撮像系のノイズ分布の標準偏差 $\sigma = 2.54$ を得た。約 2σ となる (c) の例では、ノイズ影響をほとんど受けずに人物の領域が検出できていることがわかる。なお、本稿においては BP-RRC の基本的な性質を確認するために全ての画素に対し一定の T_P を与えたが、フリッカーノイズを持つ蛍光灯により部分的に照明されている場合など、情景中のノイズ特性が均一でない場合は、画素ごとのノイズ分布 $\sigma(p)$ を用いて、 $T_P(p) = k\sigma(p)$ と定義し、例えば $k=2$ を与えておけば、着目画素のノイズ分布に応じて自動的にしきい値を決定することができる。

しきい値 T_B は背景と出現物体の判別境界を意味しており、これにより過検出と未検出の割合をコントロールすることができる。例えばセキュリティ分野など、用途によってはこれらのバランスに意図的な偏りを持たせる場合もあるが、通常は両者の和が最小になるように設定する。

2.4 信頼度の定義

セキュリティ分野など信頼性が要求される用途においては、出力結果の信頼性を表す指標が定義されていることが望ましい。BP-RRC の信頼性は背景画像のテクスチャの粒度に依存し、画素単位で信頼度を定義することが可能である。テクスチャの粒度は、本手法におけるリーチ長 (r_k^+ および r_k^-) と相関がある。図5右は、画素ごとに8方向のリーチ長の平均を0~255に正規化し、グレースケール画像として示したものである。明るい画素ほど平均リーチ長が短く、相対的な解像度が高くなっており、本手法において信頼性の高い検出が可能であることを示す。逆に暗い画素においては、例えば影を検出しやすくなるなど部分的に性能が低下することが予想される。この信頼度を用いることで、信頼度が低い領域については他の手法を併用するなどの拡張も検討することができる。

2.5 特性に関する考察

BP-RRC の特性について考察する。まず処理対象として、

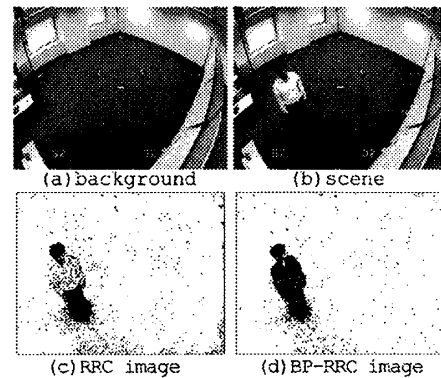


図6 RRC (従来法) との比較

画像全体の明度が0あるいは255に飽和している画像のように、テクスチャが全く存在しないものは原理的に対応できないため想定外としている。次に、背景画像のテクスチャが弱い場合、あるいは不良照明による明度飽和によって部分的にテクスチャが欠落している場合は、該当する部位において部分的に性能が低下することが予想されるが、撮像系のノイズ特性を考慮し適切な明度差分のしきい値 T_P を設定することで、性能を保持した運用が可能である。なお、これらについては2.4で定義した信頼度を用いることで、事前に評価を行うことができる。

次に、対象シーンが2.3で検討した既知のノイズのみならず、木々、葉などの動揺、水面の波、懐中電灯やサーチライトによって投影される局所的かつ不均一な明度変化、などの外乱が含まれる場合について考察する。本稿で提案している手法それ自体は、これらの外乱を除去するメカニズムを持たないため、このような外乱を検出することが予想される。従来、除去対象の時間的変化や形状特性などを評価し、対応する部分の感度の操作や背景の更新などを行う方法が提案されている[7]。本稿では扱っていないが、これらで提案されているメカニズムを導入することで、応用ニーズに合わせた運用が検討できる。

3. 実験

実画像を用いた実験例は既に図1に示し、単純背景差分法と比較して良好な検出結果が得られることを確認した。

ここでは、まず従来我々が提案したRRC[6]との比較を行う。図6に比較結果を示す。ここで用いた画像は、元々テクスチャをあまり持たない室内空間を天井に設置した魚眼レンズによって撮影したものである。加えてアナログ配線の取り回しに起因するノイズを多く含んでおり、テクスチャを手がかりとしている本手法にとっては最も厳しい条件の1つとなる。(c)にRRC(従来法)の結果を示す。RRCもロバストな手法であるが、リーチ点を正または負の、いずれかリーチ長がより短い1方しか定義しないため、このような条件下においてはその性能を維持できない。具体的には、(a)の画像の床部分はカーペット敷きになっており、本来はある程度のテクスチャを持つが、魚眼レンズの解像度と、ノイズの影響でその情報は失われており、床部分でリーチ生成を行うと、そのリーチ点は全て床と壁との境界にまで達してしまう。ここでは床と壁の境界付近に暗部が存在するため、床上の任意の点に対するRRCのリーチ点は全て負極(床上の点の明度が高い)となる。このため、出現物体が床の明度より高い場合は、検出されず(c)のような結果となる。一方、正負両極のリーチを定義するBP-RRCの結果(d)においてはこのような問題は発生しておらず、従来のRRCと比較して適用可能な範囲が拡大していることがわかる。

次に、全方向カメラLadybug[8](図7)で撮影した全方向

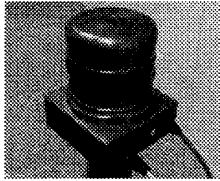


図7 全方向カメラ Ladybug

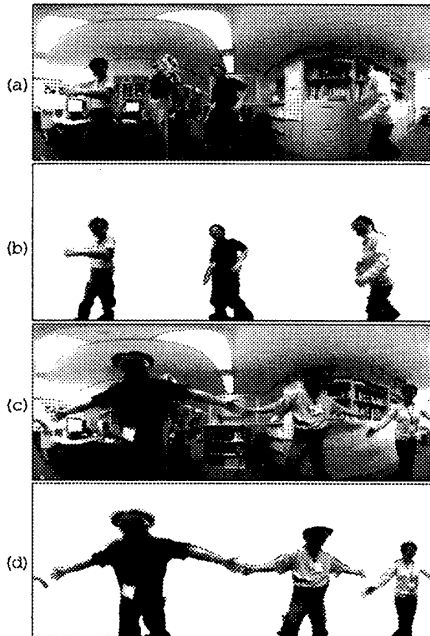


図8 パノラマ画像中からの人物領域検出

パノラマ画像中からの人物検出実験を行う。Ladybug は周方向に5台、上向きに1台の合計6台のXGAカラーカメラを搭載しており、下向きの一部を除く全天周のカラー画像を高解像度で取得することが可能である。高解像度で広範囲をカバーする能力は、様々な認識処理において有利であり好ましいが、処理コストの増大にもつながるため、本手法のように処理対象となる領域を選択的に抽出する方法の重要性が高まる。図8に人物の検出例を示す。ここではLadybug 付属のツールを用いて 1000×384 画素の8bit グレースケール画像としてパノラマ画像を生成した。(a),(c)の入力に対して、(b),(d)は、確率に応じた密度の差として得られるBP-RRC画像 ($T_P = 5, T_B = 0.375$) を、8近傍の収縮/膨張処理+面積フィルタによって領域化し、対応するテクスチャをマッピングしたものである。背景や着衣の明度分布によらず人物が良好に検出できていることがわかる。

図9は、BP-RRCの明度変動に対するロバスト性を検証するためにに行った実験である。(a)の背景画像が昼間に撮影されたものであるのに対し、(b)の対象画像は夜間に撮影されたものである。(c)の単純背景差分の結果からわかるように大きな明度変動が起きているが、(d)のBP-RRC画像 ($T_P = 5, T_B = 0.25$) では、中央右の窓付近では主に昼間時の明度飽和による過検出が見られるが、中央左の人物が良好に検出されていることがわかる。検出結果に含まれるノイズが無視できない場合、背景更新が必要となるが、実応用の場面においては更新判定や背景画像の取得が困難となる場合がある。これに対し本手法は不安定な照明条件下においても背景更新の頻度を従来手法と比較して大きく減らした運用が可能であると考えられる。

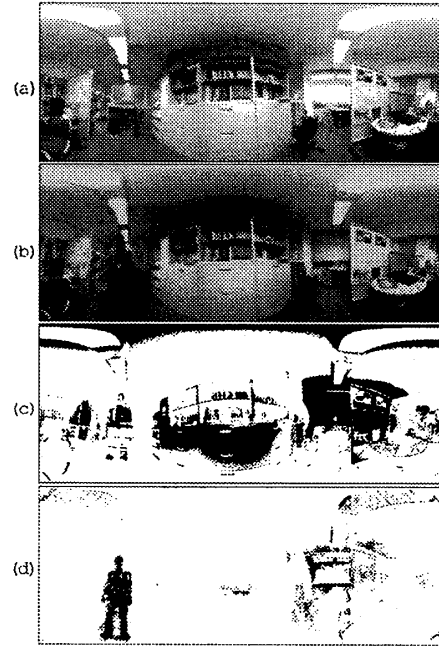


図9 照明変動下における検出

処理時間は図1の例 (320×240 画素, 8bit グレースケール) において、Pentium4 3.6GHzを搭載したPC上で、リーチの生成に80ms, BP-RRC画像の生成に10msを要した。リーチの生成にかかる時間の割合が大きいが、リーチは背景画像に対して定義されるため、背景が更新されるまでは再計算の必要はない。このため、実時間システムへの実装も十分可能であることがわかる。

4. むすび

明度変の影響を抑えながら画素単位の分解能で局所的なテクスチャを評価することで、ロバストな背景差分を実現する双極放射リーチ相関(BP-RRC)を提案した。単純背景差分および我々が従来提案したRRCとの比較検討を行い、背景画像や出現物体の明度分布、あるいは影などの対象画像の明度変化に対して高いロバスト性を持つことを示した。また、RRCと比較して対象のテクスチャが微弱な場合や明度分布に偏りがある場合においてもより安定な結果が得られることを示した。

今後の課題として2.4で定義した信頼度を用いて他手法との融合を検討する予定である。

文 献

- [1] I.Haritaoglu, D.Harwood, and L.Davis, "W4: Who? When? Where? What? A Real Time System for Detecting and Tracking People", Proc. FGR98, pp.222-227, 1998.
- [2] P.L.Rosin, "Thresholding for Change Detection", Proc. ICCV98, pp.274-279, 1998.
- [3] 嶺直道, 八木康史, 谷内田正彦, "空間微分画像と差分画像の結合による変化領域検出法", 信学論 (D-II), Vol.J77-D-II, No.3, pp.631-634, 1994.
- [4] 松山隆司, 和田俊和, 波部齊, 棚橋和也, "照明変化に頑健な背景差分", 信学論 (D-II), Vol.J84-D-II, No.10, pp.2201-2211, 2001.
- [5] T.Horpraseert, D.Harwood, and L.S.Davis, "A Statistical Approach for Real-time Robust Background Subtraction and Shadow Detection", proc. ICCV99, 1999.
- [6] 佐藤雄隆, 金子俊一, 丹羽義典, 山本和彦, "Radial Reach Filter (RRF) によるロバストな物体検出", 信学論 (D-II), Vol.J86-D-II, No.5, pp.616-624, 2003.
- [7] 関真規人, 和田俊和, 藤原秀人, 鷲見和彦, "背景の共起性に基づく背景差分手法", 情報処理学会 CVIM 研究会論文誌, Vol.44 No.SIG5(CVIM.6), pp.54-63, 2003.
- [8] <http://www.ptgrey.com/products/ladybug/>