統計的手法に基づく画像解析による路面積雪判定

Detection of Snow on Road Surface Using Image Processing Based on Statistical Method

青 木 靖*¹・佐 野 弘*²
Yasushi Aoki Hiroshi Sano

SYNOPSIS

In this paper we propose a snow sensor that detects presence of snow on road surface. Automatic threshold selection is one of the statistical image processing techniques and is effective way to divide image into some regions that have common properties. Using this method, we can detect snow from images containing pavement marking such as center line under various road conditions. Furthermore, we install the sensor on actual road and control a snow melting system. It is confirmed that the sensor works appropriately and reduces operating time of the snow melting system compared with the conventional snowfall sensor.

Keywords: 積雪センサー, 画像処理, 判別分析法, 省エネルギー

1. はじめに

冬季の交通を確保する消融雪設備として地下水や河川水を利用した散水消雪, 地中熱を利用した無散水融雪, 電力による融雪などが普及しているが, 社会生活に欠かせない設備として今後も増加の傾向にある。しかし, 現在多く用いられている地下水による散水消雪は各地で地下水位低下などの問題を引き起こしており, 省エネルギーの観点からも消融雪設備の効率的な運用が必要とされている。

このようなことから, 従来の降雪センサーに代わり積雪センサーが使われるようになってきている。積雪センサーは路面の積雪の有無を直接判断することができるため, 降雪センサーに比べ消雪装置の無駄な動作を抑えることが可能であり, 地下水保全や省エネルギーに大きく貢献することが報告されている^{1), 2)}。

路面の積雪を検知する路面センサーには大きく分けて埋設タイプと非接触タイプがあり, 積雪の他,

乾燥, 湿潤, 凍結等の路面状態の判定を行うことができる。埋設タイプは導電率や誘電率を測定することにより路面状態の判定を行うものであり, 比較的低価格で塩分濃度等も計測可能であるが, 点での情報による判断に限られてしまう。また, 非接触タイプには赤外線の反射強度により判定を行うもの, 水や氷が特定の波長を吸収することを利用し赤外線カメラの画像から判定を行うもの, レーザレーダを応用したものなどが実用化されているが, 機器が高価なことから普及が進んでいない。

非接触タイプのひとつである画像処理技術を応用した積雪センサーは, 情報処理機器の高性能化・低価格化が進んだことから, 近年になって研究されるようになってきた。このセンサーは路面状態を面全体で判断することができる他, 遠隔地からの画像による路面監視も同時に行うことができるといった特徴を持っており, 一部で実用化が始まっている。

判定方法に関しては, 画像に対し各種の前処理を

※ 本研究の一部は, 第21回寒地技術シンポジウムで発表済¹⁾。

* 1 福井県雪対策建設技術研究所 主任研究員

* 2 福井県企業局・博士(工学)

[本稿受理: 2006年6月5日, 修正原稿受理: 2006年10月1日, 討論期限: 2007年12月31日]

行った上で設定された閾値以上の輝度を積雪と判定する方法³⁾、道路横断方向の輝度変化量から白色マーカおよび轍の検出を行い積雪判断する方法⁴⁾、輝度ヒストグラム分布およびエントロピー値から様々な路面状態を判断する方法⁵⁾、などが提案されている。しかし、シャーベット状の雪を確実に検出することや、路面の状態によらない安定した積雪検知が困難なこと、低価格化が進んだとはいえ依然高価なことから、消融雪装置制御のためのセンサーとしては実用化されていないのが現状である。

本研究所においても消融雪装置制御のための低価格な積雪センサーの開発を目標として、センターライン等の路面表示の輝度をもとに画像全体の輝度を補正した上で設定された閾値以上の輝度を積雪と判断する方法を研究してきた⁶⁾。しかし、閾値をあらかじめ設定する方法においては、カメラの設置場所ごとに閾値を慎重に選択する必要があり、十分注意して閾値を設定しても日向・日影、濡れ・乾きなど路面の状態により誤作動が生じる場合や、シャーベット状の雪を積雪と判断できないために消融雪設備の起動が遅れる場合があった。また、夜間の画像において照明の不均一による影響を排除するために日中と異なる処理を行う場合や異なる閾値を設定する場合は、切り替わりの前後の時間において誤作動が生じる例も見られた。

本研究では、これらの問題を解決する方法として積雪判断プログラムに統計的手法に基づく自動閾値選定法を取り入れた。自動閾値選定法を用いた路面の積雪判定方法を示すとともに、路面上の日向・日影、濡れ・乾き、照明の不均一による影響を検討する。さらに、実際の道路に本アルゴリズムを用いた画像処理型積雪センサーを設置し、その有効性を確認する。

2. 判別分析法による自動閾値選定

2.1 判別分析法

判別分析法は天津により開発された手法で、その原理は、ある閾値で輝度ヒストグラムを2つのクラスに分けたとき、クラス間分散が最大となる閾値 k^* が最適な閾値であるというものである⁸⁾。統計的に

最適な閾値を決定し画像の二値化を行うことができる他、多値化への拡張方法についても示されている。

CCD カメラで撮影された画像の各画素は R(赤), G(緑), B(青) の成分を 0 から 255 までの 256 段階で表されており、それぞれの成分ごとのレベルを r, g, b とすると輝度レベル Y は

$$Y = 0.299r + 0.587g + 0.114b$$

$$(0 \leq Y \leq 255)$$

で表される。全画素の輝度ヒストグラムを考えた場合、各輝度レベルの画素数が n_i 、全画素数を

$$N = \sum_{i=0}^{255} n_i$$

とすると、正規化されたヒストグラムは

$$P_i = n_i / N$$

全画像の平均輝度は

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{255} iP_i$$

で与えられる。これを $M-1$ 個の閾値

$$k_1, k_2, k_3, \dots, k_{M-1}$$

$(0 < k_1 < k_2 < k_3 < \dots < k_{M-1} < 255)$ により M 個のクラスに分類することを考える。閾値 k_{j-1} と k_j により分離された輝度

$$S_j = \{k_{j-1} + 1, \dots, k_j\}$$

を有するクラスに対し次の2つの累計量を定義しておく。

$$\omega_j = \sum_{i \in S_j} P_i$$

$$\mu_j = \sum_{i \in S_j} iP_i / \omega_j$$

ω_j, μ_j はそれぞれ、各クラスの生起確率、平均輝度を表している。このときクラス間分散は $M-1$ 個の閾値 $k_1, k_2, k_3, \dots, k_{M-1}$ の関数となり次の式で表される。

$$\sigma_B^2(k_1, \dots, k_{M-1}) = \sum_{j=0}^M \omega_j (\mu_j - \mu_T)^2$$

クラス間分散 $\sigma_B^2(k_1, \dots, k_{M-1})$ を最大とする $k_1^*, \dots, k_{M-1}^*$ が求める閾値である。

さらに、天津はクラス分離度の評価方法についても述べている⁸⁾。

全体の分散は次式で与えられる。

$$\sigma^2_T = \sum_{j=0}^{255} P_i(i - \mu_T)^2$$

このとき、クラス間分散の最大値を全体の分散で割った値

$$\eta = \sigma^2_B(k_1^*, \dots, k_{M-1}^*) / \sigma^2_T \quad (1)$$

は $0 < \eta < 1$ の値を持ちクラス分離度の評価基準とすることができる。クラス間分離度 η は 1 に近いほど分離度が良く、二値化の場合、分離度が 0.7 以上のとき画像には対象と背景の両方が含まれるとの判断基準も示されている⁹⁾。

2.2 判別分析法とヒストグラム

判別分析法によって求められた閾値の妥当性およびクラス間分離度の特性について検討する。図 1 は正規分布曲線から作られたヒストグラムの二値化を行った例である。閾値を太線で示しているが、各ヒ

図 1 閾値の自動選定 (二値化)

ストグラムとも適切な閾値が求められたと考えられる。この時のクラス間分離度および各分散値を表 1 に示す。ここで、クラス内分散とは

$$\sigma^2_W = \sum_{j=1}^M \omega_j \sigma_j^2$$

(σ_j^2 は各クラスの分散)

で表される値であり、全分散 σ^2_T 、クラス間分散 σ^2_B 、クラス内分散 σ^2_W の間には常に

$$\sigma^2_T = \sigma^2_B + \sigma^2_W \quad (2)$$

の関係が成り立つ。

ヒストグラム A およびヒストグラム B はクラス内分散が等しくクラス間分散が異なるように、ヒストグラム A およびヒストグラム C はクラス間分散が等しくクラス内分散が異なるように正規分布曲線を組み合わせている。これらの結果から、クラス間分散が大きいほど、またクラス内分散が小さいほどクラス間分離度は大きくなるのが分かる。この傾向は式 (1) および式 (2) から導くことができる。

図 2 は 3 つのピークを持つヒストグラムについて二値化および三値化を行った結果を示したものである。この例の場合、二値化により求めた閾値は、中央のピークの途中を示しており、ヒストグラムの特性に合った閾値とは言えない。しかし、三値化により求めた 2 つの閾値はそれぞれヒストグラムの極小値付近にあり、ほぼ適切な閾値と考えられる。な

表 1 分離度および分散

	クラス間 分離度	全分散	クラス間 分散	クラス内 分散
ヒストグラム A	0.974	3735.9	3637.2	98.7
ヒストグラム B	0.902	1008.0	909.3	98.7
ヒストグラム C	0.931	3909.0	3640.9	268.1

図 2 閾値の自動選定 (二値化および三値化)

お、二値化を行ったときのクラス間分離度は0.77であったのに対し、三値化を行ったときのクラスⅡとクラスⅢのみを考慮した分離度は0.88であった。

3. 路面積雪判定

3.1 二値化処理

判別分析法による閾値選定およびクラス間分離度の特性を考慮しながら路面積雪判定方法を検討する。

図3 一様なアスファルト面

図4 一様な場合のヒストグラム

図5 二値化処理

図3は積雪が無く白線を除く路面がほぼ一様な場合の例である。図中の黒線で示す長方形4.8m×2.5mの領域について積雪判断を行った。この部分のヒストグラムは図4に示すように白線部分と路面部分がはっきりとした鋭いピークで示されている。このヒストグラムに対し二値化処理画を行った結果が図5であり、閾値未満の輝度と判断された部分が黒で表されている。白線を除く路面上には閾値以上と判断された部分が無く、これは積雪無しと判断していることを意味している。このときのクラス間分離度は0.95であった。様々な画像について試した結果、この例のようにクラス間分離度が十分大きく、かつ白線部以外の路面上に閾値以上の領域が無いと判断された場合には、二値化のみの処理結果から積雪なしと判断して良いと考えられる。

3.2 照明処理

夜間の画像については図6のようにカメラ照明の中心部と周辺部で画像の輝度に差が出ることから、このまま二値化処理を行った場合、中心部の明るい路面を積雪と判断してしまう場合がある。また、路面部分に対応するヒストグラムの山は図7に示すように幅を持った形となり、二値化を行ったときのクラス間分離度が日中の場合と比較して小さくなる傾向がある。しかし、カメラ照明のパターンはあらかじめ決まっているので、図6の黒線で示すように照明パターンに合わせて白線を含む小領域に分割し、それぞれの領域ごとに処理を行うことで照明の影響を小さくすることができる。

図6 夜間の画像例

領域ごとに分割したヒストグラムは図8に示すように路面部分を示すヒストグラム山の幅が狭くなっている。一括して二値化を行った場合、閾値192、クラス間分離度0.69であったのに対し、3つの領域に分けて二値化を行った場合、各領域の閾値は中心部から198、189、173、またクラス間分離度は0.83、0.82、0.86であった。

この照明処理は日中において用いても問題がなく、昼夜を問わず一貫した処理方法により切り替わり時の誤作動を防ぐことができる。これ以降に示すクラス間分離度は3領域の平均値を表している。また、処理画像は、部分画像分割法¹⁰⁾の手法を用いて各領域での閾値をなだらかにつないだ閾値面によって画像の二値化または後に述べる三値化を行うことで連続的な処理画像となるようにしてある。

なお、領域の分け方は、照明と判断領域の位置関係により異なってくるので、センサー設置箇所ごとに初期設定が必要である。これに関しては、路面に積雪のない路面がほぼ様な状態における照明点灯時の画像を利用して自動的に照明処理用の領域を初期設定するようプログラムの改造が可能と思われる。

図7 夜間画像のヒストグラム

図8 領域分割後のヒストグラム

3.3 三値化処理

二値化を行った結果、クラス間分離度が小さい場合、または白線部を除く路面上に閾値以上と判断される領域がある場合には、積雪、路面上の濡れ・乾きの混在、路面上の影・日向の混在等が考えられる。このような場合、条件によって二値化のみの処理では誤動作が生じるケースや積雪の検出が遅れるといったケースが見られた。そこで、さらに三値化処理を行うこととした。

(1) 積雪時の画像例

積雪時の画像処理の例として図9に原画を、図10に原画像のうち四角で囲まれた領域のヒストグラムを示す。図10のヒストグラムは図4のヒストグラムに比べ積雪によって白線部とアスファルト路面部にはっきりとした区別がなく、一つのなだらかな山として表されている。

この画像に対し三値化を行い3つのクラスに分離した画像が図11である。路面部に近い輝度(クラスⅠ)、中間の輝度(クラスⅡ)、白線部に近い輝度(クラ

図9 積雪時の画像例

図10 積雪時のヒストグラム

図11 積雪時の三値化処理

スⅢ)の3クラスに分離できているのが確認できる。

クラスⅡと判断された部分と、クラスⅢと判断された部分が同じ積雪部かどうかを判断するには、クラスⅡ・クラスⅢ間の分離度を用いる。積雪以外の場合には白線とその他の路面部分がはっきりと区別できるためクラス間分離度が大きいのにに対し、積雪の場合には路面上の雪により両者の区別がなくなることから分離度が小さくなる。

今回用いたアスファルト路面の場合において、分離度が0.70より小さい場合はクラスⅡはクラスⅢの積雪部より僅かに輝度の小さい積雪部、0.82以上の場合は積雪の無いアスファルト路面、0.70から0.82の間の場合はシャーベット状の雪である場合が多く見られた。しかし、積雪の写り方は照明の影響による部分も大きく、分離度のみでクラスⅡの雪がシャーベット状かどうかを確実に判断することはできなかった。

消雪装置制御のセンサーとしては、クラス間分離度が0.7以下となった場合にクラスⅡはクラスⅢと同じ積雪部と判断し、クラスⅡが積雪部と判断している状態からは分離度が0.82以上になった場合に積雪部でなくなったと判断するなどのようにヒステリシスを持たせることでより正確に積雪を検知し、誤作動の少ない判断が可能である。

なお、この例の場合は積雪を検出し消雪装置運転

図12 積雪検出画像

中の状態であり、クラス間分離度が0.79であることから、クラスⅡ・クラスⅢの両方を積雪部と判断することができる。図12は積雪と判断したクラスⅡ・クラスⅢの領域を合成したものである。

二値化処理のみではシャーベット状の雪を閾値以下の領域と判断し積雪を検出できない場合が多くあったが、三値化を行うことでシャーベット状の雪を中間の輝度を持った領域として検出することが可能となった。

(2) 濡れ・乾きの混在

図13は路面上に濡れと乾きが混在している状態である。図14に示すように白線と乾き路面の部分はヒストグラム上でははっきりと区別されており、三値化を行った結果は図15に示すように濡れ路面、乾き路面、白線部に分けられている。このときクラスⅡ、

図13 濡れ・乾きの混在

図14 濡れ・乾き混在時のヒストグラム

図15 濡れ・乾き混在時の三値化処理

クラスⅢ間の分離度は0.87であることからクラスⅡは積雪部でないと判断することができる。

(3) 日影・日向の混在

図16は路面上に日影と日向が混在した状態であるが、白線上にも日影と日向が混在していることから図17のヒストグラム上で白線を示す部分がはっきりとしたピークがなく、非常になだらかな山として表されている。この場合でも三値化した結果は図18に示すように日影、日向、白線の領域に分離されており、クラスⅡⅢ間の分離度が0.88であったことからクラスⅡの領域は積雪なしと判断できる。

路面上に濡れと乾きが混在している状態や日影と日向が混在した状態の時、二値化のみの処理では日向の一部または乾き路面の一部を積雪と判断する場

図16 日影・日向の混在

図17 日影・日向混在時のヒストグラム

図18 日影・日向混在時の三値化処理

合があったが、三値化処理を行うことにより安定した判断ができるようになった。

(4) 日光の反射

図19は濡れた路面に日光が反射している例であるが、この場合は日光が反射している部分を積雪と判断してしまった。また、夜間においても同様に周囲の照明の反射を積雪と判断してしまう場合がみられた。このため、日光や照明の反射光が直接カメラに入らないようカメラを北東から北西に向けたり、積雪判断領域を選定したりするなどの対応が必要である。

図19 日光の反射

4. 実証試験

4.1 設置状況

以上の判断方法を用いて、実際の道路において消雪装置の制御を行った。図20に示すように照明・カメラ・画像処理装置を設置し、既設消雪装置の制御を行えるようにした。カメラは複数の画像を蓄積し、車両などの動体を画像から除去する機能を有したものを使用している。この道路は市街地の県道で比較的交通量が多いが、カメラから送られてきた画像は図21に示すように積雪判断に影響を及ぼさない程度にまで車両の影響が低減されている。ここでは積雪判断のための車両等の影響を取り除いた画像のみ示しているが、道路状況の監視のため必要な場合には車両等の写った画像を遠隔地に送ることも可能である。

画像処理センサーは10分間隔で画像撮影および積雪判断を行う。消雪状況の違いを考慮し、図21の白線で囲った領域A(2.5m×5.0m)および領域B(3.2m×4.8m)の2カ所を積雪判断領域とし、どちらか

図20 機器設置状況

図21 原画像および積雪判定領域

少なくとも一方の領域において積雪ありと判断した場合に消雪装置運転、両方の領域において積雪なしと判断した場合に消雪装置停止とした。また、各領域とも白線や黄線を除くアスファルト面において20%以上の積雪面積で積雪ありと判断し、10%まで低下した場合に積雪なしと判断する。カメラは北東に向けて設置してあり、路面が濡れた状態でも日光や周囲の照明の影響を受けないよう積雪判断領域の設定を行った。

4.2 判断精度

2006年3月13日から14日にかけて画像処理センサーによる消雪装置の運転を行った。目視にてセンサーと同様の基準により積雪なしと判断された画像248枚、積雪ありと判断された画像40枚に対してセンサーによる判断と比較した。図22に示すように、目視にて積雪なしと判断された画像に対してセンサーは

図22 積雪判断精度

図23 誤判断の画像例1

図24 誤判断の画像例2

100%の正答率であったが、積雪ありと判断された画像に対しては90%の正答率であった。誤判断した場合の画像例を図23、図24に示す。図23は非常に薄いシャーベット状の積雪の場合であり、このような積雪に対しては本センサーによる検知は困難であったが、車両の通行に対してほとんど障害にならない程度に消雪が進んでいる。図24もシャーベット状の積雪であるが、領域Aについてはほぼ正しい判断を行った。しかし、領域Bについては目視で約30%の面積の積雪であったのに対しセンサーは10%以下の積雪と判断した。これは、領域Aと領域Bにおいてクラス間分離度 η の設定値を同じにしたためであり、センサーの設置箇所や判断領域ごとに最適な値を設定することにより正確な判断が可能と考えられる。

4.3 運転時間

この2日間における画像処理センサーによる消雪装置の運転時間と、降雪センサーによる消雪装置の運転時間との比較を図25に示す。降雪センサーの運転状況は、近接する区間において降雪センサーにより制御されている消雪装置のデータであり、降雪終了からポンプ停止までは10分間の遅延設定となっている。この時の降雪センサーによる運転時間は10時間30分であったのに対し、画像処理センサーによる運転時間は6時間であり、約4割の運転時間の削減となった。これは、降雪センサーは路面の積雪に関係なく降雪のみで判断するため、降雪があっても積雪に至らない状況が続いた場合、無駄な運転を行う

図25 運転時間の比較

ことによるものである。画像センサーによる運転は、降雪センサーに比べて消雪装置運転時間の削減が図られ、地下水保全および省エネルギーに寄与するものと思われる。

5. おわりに

消融雪設備制御のための積雪検出と現場監視を兼ねることができる画像処理型積雪センサーの開発を目的とし、画像処理プログラムを開発した。本研究で得られた成果と今後の課題を以下に示す。

- (1) 統計的手法を用いた二値化および三値化処理を行うことにより、濡れ・乾き、日影・日向等の路面の状態によらず安定した積雪検出が可能となった。
- (2) 二値化のみではシャーベット状の雪に対して積雪と検知できない場合があったが、三値化処理により中間の輝度を持つ領域として検出することができた。
- (3) 照明パターンに合わせて領域を分割し、領域毎に処理を行うことで昼夜に関わらず安定した判断が可能となった。
- (4) 実際の道路に画像処理積雪センサーを設置した結果、消融雪装置の無駄な運転時間を削減し、効率的な運転が可能であることを確認した。
- (5) 本研究で開発されたアルゴリズムは、クラス間分離度 η の判断基準値や照明処理を行うための領域を現地の条件に合わせて設定することにより、他の箇所、地域でもそのまま適応可能と考えられる。今後、シーズンを通した動作確認、他の箇所における動作確認を行っていく。
- (6) 本システムにより積雪の有無の判断、さらには路面上の濡れ・乾きの判断が可能であるが、凍結の判断は行うことができない。冬期路面管理の立場からは凍結検知が非常に重要であり、路温センサーと組み合わせる等により凍結の判断のできるシステムを目指して行きたい。

参考文献

- 1) 宮本重信；積雪センサー制御による消雪用地下水の節水効果，第10回日本雪工学会大会論文報告集，1994，pp.61－64
- 2) 宮本重信，猪又正一，山田忠幸；積雪センサーによる消融雪の節水効果，第21回日本道路会議一般論文集(A)，1995，pp.216－217
- 3) 後藤隆一郎，濱田靖弘，窪田英樹，中村真人，長田勉；画像解析を導入した路面融雪運転制御システムに関する研究，空気調和・衛生工学会論文集，No.103，2005，pp.29－36
- 4) 上崎裕，牧野幹雄；降雪路面監視装置の開発と試験結果，日本雪工学会誌，Vol.20，No.3，2004，pp.298－301
- 5) 村田藤麿，吉田健一，上原麻子；画像情報を活用した路面判別技術に関する基礎研究，第18回ゆきみらい研究発表会報告書，2006，pp.参86
- 6) 佐野弘；画像処理による積雪センサーの開発（その2），福井県雪対策建設技術研究所年報，第17号，2004，pp.36－40
- 7) 青木靖；画像処理による積雪センサーの開発，寒地技術論文・報告集，Vol.21，2005，pp.687－691
- 8) 大津展之；判別及び最小2乗基準に基づく自動しきい値選定法，電子通信学会論文誌，Vol. J63-D，No.4，1980，pp.349－356
- 9) 天津美夫，尾上守夫，久野義徳；細胞診自動化における子宮線がん細胞集塊の特徴抽出法，医用電子と生体工学，Vol.17，No.7，1979，pp.40－47
- 10) 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，1991，pp.1523