

◆ 特集：走行支援道路システム ◆

AHS 路面センサの開発

川田則幸 * 久野 晃 ** 大内浩之 ***

1. はじめに

近年注目されている ITS が実現すべきサービスの一つとして、ドライバへの路面情報提供による交通事故の抑制を狙いとした AHS 安全運転支援サービスがある。また、除雪業務における効率的な作業のスケジューリングと出動、凍結防止剤散布業務における的確な薬剤散布の実現と散布量の適正化、更には道路凍結予測システムの予測精度向上など、道路管理業務の高度化、効率化においても路面状況をデータに裏付けされた形で迅速かつ的確に把握することが望まれており、そのための路面センサの機能及び精度向上は重要な課題となっている。今回、研究開発中の AHS 可視画像式路面センサを安全運転支援サービス並びに道路管理業務に応用すべく、東北地方整備局三陸国道事務所の協力のもと、センサの路面状態検出性能並びに必要な付加機能に関する検証を行ったので、その結果を報告する。

2. 路面状況検出方法

2.1 検出原理

開発した AHS 路面センサには 4 種類（可視画像式、レーザレーダ式、光ファイバ式、電波放射

式）ある。そのうち可視画像式センサは CCTV カメラで取得した画像から輝度や色の分布情報、模様などの特徴量を画像処理により分析して路面状態を判定する。図-1 に示すように、路側に設置された可視カメラの画像から、路面状態による光の反射特性の相違によって生じる輝度や色、テクスチャ（模様）などの特徴量の差を画像解析により評価し、路面状態を判定する。

2.2 多変量解析による路面状況判別

路面状況判別は、図-2 に示すように可視カメラ画像から得られる複数の画像特徴量でつくる空間内で、路面状況毎に画像基準として予めクラス分けされたデータと検査データとの近さを解析することで行う。近さは、基準データのばらつきを考慮して (1) 式に示すマハラノビス距離によって表現し、それが最小となるクラスに含まれると判定する。

$$D_{M\omega}^2 = \sum \frac{(d_i' - m_{\omega i}')^2}{\lambda_{i\omega}}$$

ここで $D_{M\omega}$ は基準路面状態 ω と検査画像とのマハラノビス距離 d_i' は検査画像の i 番目の特徴量の要素、 m_i, ω' は基準路面状態 ω の i 番目の特徴量

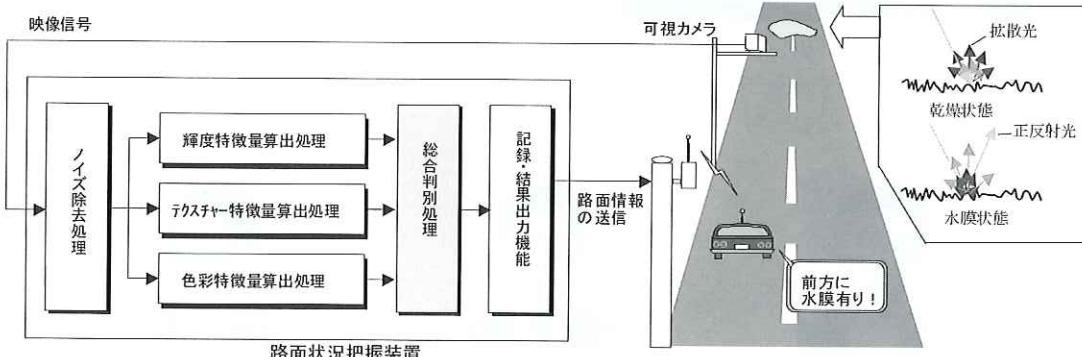


図-1 可視画像式路面センサの検出原理

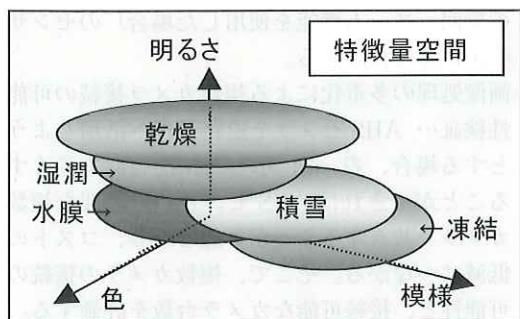


図-2 特微量空間の概念図
(3次元の場合を示すが実際は多次元)

の要素、 λ_i, ω は基準路面状態 ω の*i*番目の特微量の要素の標準偏差である。標準偏差を用いるため、例えば図-3において検査データのユークリッド距離は基準路面1に近いが、マハラノビス距離ではデータの広がりを考慮するので、基準路面2との距離の方が小さくなり、基準路面2と判定される。

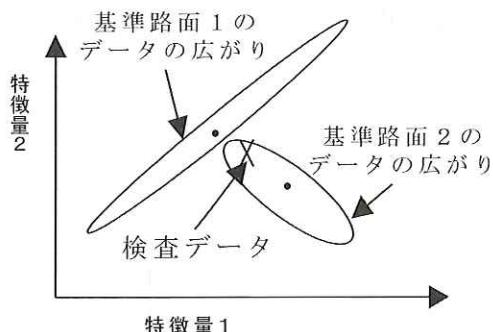


図-3 マハラノビス距離の概念図

2.3 路面状況検出に用いる特微量

基準となる路面状況画像の中から、路面状況検出に用いる特微量として以下のものを抽出した。

- ・判定しようとする範囲の複数の色成分、すなわち、色相 (Hue : H)、彩度 (Saturation : S)、同相色差 (In-phase : I)、直交色差 (Quadrature : Q) の平均の値
- ・赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の輝度値、H, S, 明度 (Luminance : V)、I, Q の標準偏差
- ・カメラから遠近方向の輝度の値を近似した直線の傾き (輝度勾配) とその直線からの角輝度の誤差 (輝度誤差)
- ・画像の水平方向と垂直方向におけるテクスチャを特徴づける 6 種類の値

(角度2次モーメント (ASM), 相関度 (CO), 総エントロピー (SE), 差分エントロピー (DE), 2つの相関情報量 (IMC))

なお、特微量の定義、意味に関しては文献を参照されたい。

2.4 検出アルゴリズム

上記の検出方法を基本に、路面状況を総合的に判定するためのアルゴリズムを策定した。図-4 にその概略を示す。

(1) 路面温度を用いた凍結判定の信頼性向上

湿潤、水膜と凍結の判別は画像だけでは難しい場合が多い。そのため路面温度を評価指標の一つとして用いることで判定精度の向上を図った。寒冷地では冬期に路面に融雪剤を散布するため、必ずしも 0 度近傍で凍結するとは限らないが、設置場所毎にその特性を把握することで有効な指標として利用できると考えられる。

(2) 時系列判断による判定精度向上

路面状態が変化する場合、物理的に変化し得ない状態がある。例えば、積雪状態からいきなり乾燥には変化せず、水膜または湿潤を経由して変化していく。照明などの急激な外乱により発生する可能性のある路面の時間変化のうち、あり得ない出力について内部でチェックし除外する。

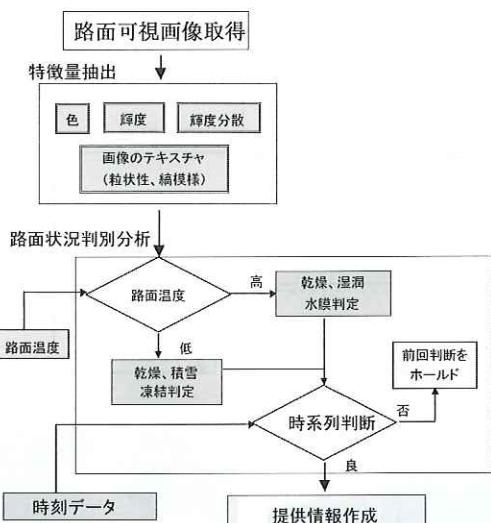


図-4 路面状況判定アルゴリズム

3. 装置性能

AHS可視画像式路面センサの性能の概要を表-1 に示す。なお、状態分解能において、湿潤とは路

表-1 AHS 可視画像式路面センサの性能

状態分解能	5 状態 (乾燥、湿潤、水膜、積雪、凍結)
最小分解能	道路横断方向 0.5 m × 道路縦断方向 0.5 m
検出範囲	最大で道路縦断方向 100 m、横断方向 10.5 m (3 車線)
検出時間	1 分以内
検出周期	1 分

面の表面が湿っている状態、水膜は路面の表面に水の層が形成されている状態を示す。

4. 実験項目

今回実験を行った一般国道 45 号宮古トンネル群 (279kp) は、約 2km の間に中小 4 つのトンネルが連続している山間部の道路で、種々の路面状態が発生し、トンネル出口特有の路面状態の変化が予想される場所である。道路管理で活用することを考慮して以下の実験を行った。実験装置の機器構成を図-5 に示す。

- 1) 路面状態検出性能検証…実交通環境下での路面センサの検出性能を検証する。
- 2) カメラの旋回・ズーム機能対応検証…既設の CCTV カメラを使用した場合 (CCTV カメラ

の旋回・ズーム機能を使用した場合) のセンサ検出性能を検証する。

- 3) 画像処理の多重化による複数カメラ接続の可能性検証… AHS センサを道路管理へ活用しようとする場合、表-1 に示した検出周期を長くすることができれば AHS センサの処理部を複数カメラで共有することが可能となり、コストの低減につながる。そこで、複数カメラの接続の可能性と、接続可能なカメラ台数を評価する。

なお、実験は平成 15 年 1 月 27 日～平成 15 年 3 月 1 日の冬季に昼夜連続で行った。

5. 実験結果

(1) 路面検出性能検証結果

表-2 に検出結果を示す。なお、真の路面状態は実際の路面を目視観測することで判定した(図-6)。

- 1) 個別正解率^{注1)}、的中率^{注2)}は、乾燥、湿潤、水膜、積雪でほぼ 90% であった。ただし、凍結状態については現象が発生せず、引き続きデータ取得を行う予定である。参考に平成 14 年度に北海道中山峠で取得した凍結の検出結果を表-3 に示す。

注 1) 正解率：真の路面状態（目視観測）に対する正しいセンサ出力の割合

注 2) 的中率：センサが真の路面状態を出力する割合

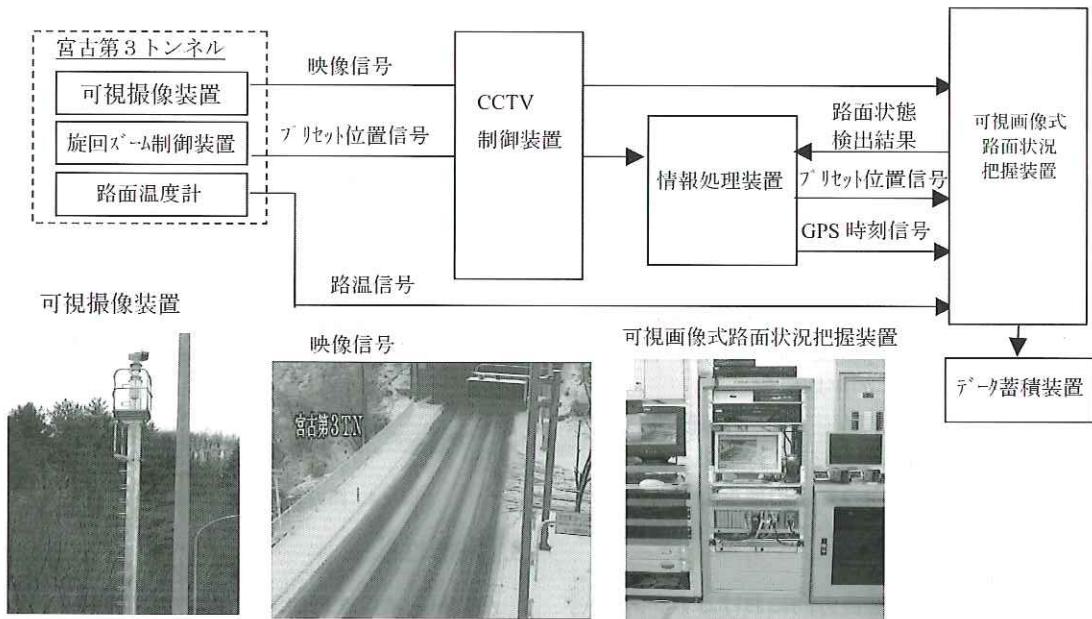


図-5 路面センサ試験システムと装置概観

表-2 AHS 可視画像式路面センサの検出性能

		データ数	個別正解率 (%)					安全度 (%)	サービス稼働率	システム稼働率
			乾燥	湿潤	水膜	積雪	凍結			
観測路面 状態	乾燥	27,030	96.0%	2.3%	0.2%	1.4%	0.0%	95.5%	97.2%	100.0%
	湿潤	10,179	4.9%	92.5%	2.3%	0.3%	0.0%			
	水膜	3,191	0.1%	4.1%	88.3%	7.5%	0.0%			
	積雪	4,031	0.1%	2.8%	1.6%	95.4%	0.0%			
	凍結	0	-	-	-	-	-			
合計		44,431								
的中率			94.9%	90.9%	95.5%	91.2%	-			



図-6 路面状態の例

表-3 複数カメラ接続時の路面センサの検出性能

		データ数	正解率 (%)				
			乾燥	湿潤	水膜	積雪	凍結
観測路面 状態	乾燥	8,926	96.8/95.9	3.2/4.1	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
	湿潤	5,909	4.5/4.4	92.0/91.8	3.0/3.3	0.5/0.5	0.0/0.0
	水膜	2,028	0.2/0.2	6.5/6.1	88.4/89.7	4.9/4.0	0.0/0.0
	積雪	3,401	0.1/0.2	3.7/4.2	1.1/1.9	95.0/93.8	0.0/0.0
	凍結	0	-	-	-	-	-
的中率 (%)			95.3/95.2	87.3/86.5	95.6/64.5	94.6/95.4	-

表中の正解率: 1台カメラ接続時(検出間隔1分) / 5台カメラ接続時(検出間隔5分)

2) 安全度^{注3)}については、目標値である96%とはほぼ同程度であった。

3) 稼働率^{注4)}については実験期間が短いため、あくまで参考値であるが、システム稼働率100%、サービス稼働率97.2%であった。

なお、誤検出の主な原因是湿潤から水膜、あるいは水膜から湿潤へと路面状態が移り変わる時、また両者が混在する状態において生じている。特に実験箇所が山間部のトンネル出口付近であることから日照条件の関係で混在状態の出現割合が多い。混在状態では混在の状況によって種々の路面

状態が生じるため、画一的な判定のセンサ出力基準では誤検出が生じることになる。この改善には測定箇所における混在状態でのセンサ出力基準の一層の精緻化が必要である(図-7)。

(2) 旋回ズーム／プリセット機能検証結果

一般的な旋回ズーム付撮像装置の復帰精度は旋

注3) 安全度: センサ出力が危険側(水膜を湿潤など実際の路面状態よりも摩擦係数が高いと誤検出した場合。表-2の対角線の下半分)に間違わない確率)

注4) 稼働率: システム稼働率は機器が正常に作動している割合、サービス稼働率はシステム稼働率からさらに濃霧や逆光でセンサが情報を出せない時間を引いた割合

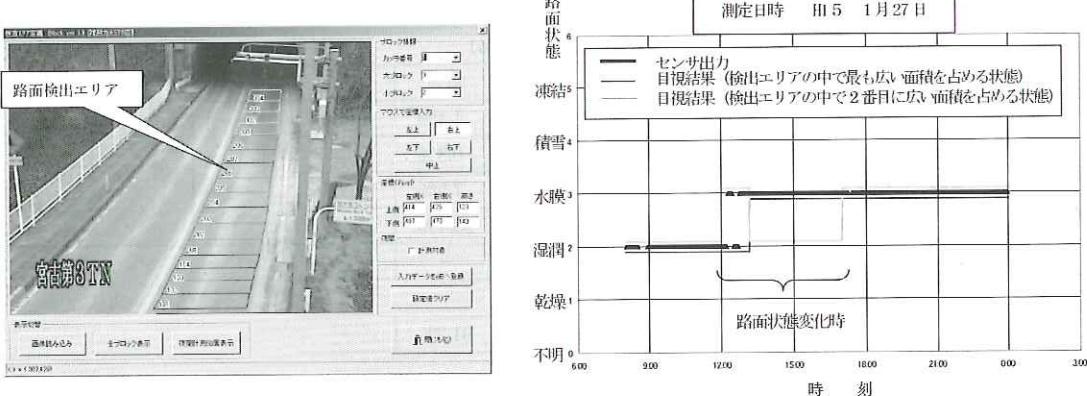


図-7 検出エリア分割画面と検出路面状態のセンサ出力トレンド例

回角度 ± 0.5 度以内、ズーム焦点距離； $\pm 10\%$ 以内といわれている。0.5度は50m先では約44cmの距離となるため、旋回ズーム作動前後のプリセット位置を画素単位で一致させることは不可能である。そのため、図-8に示すように可視路面状況把握装置には基準画像との画像位置のずれをソフト的に検出し、補正する機能を持たせた。

実験では、この機能を確認した。

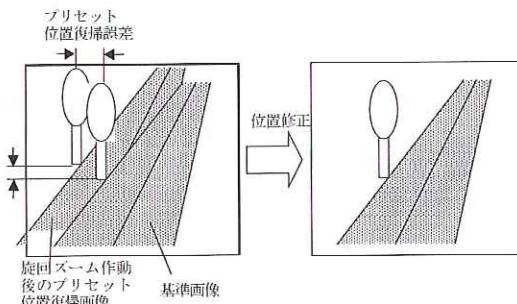


図-8 プリセット画面位置ずれの補正

- 1) 図-9に示すように、監視操作後の復帰画面の位置ずれ量は補正処理後1画素以内に収まり、路面検出処理上問題ないことが確認できた。

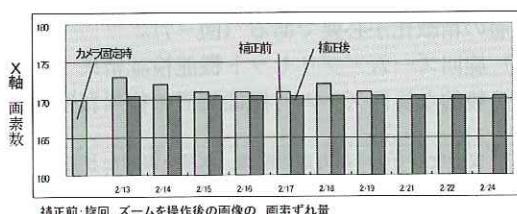


図-9 プリセット画面位置ずれの画像補整効果

- 2) 旋回ズーム操作の有無による検出精度に有意な差は見られず、プリセット機能対応が可能であることを確認した。

(3)複数カメラ接続の可能性検証結果

検査画像は、天候などの周囲環境の変化や車などの外乱を除去するため、1秒間隔の画像を1分間平均して作成される。複数カメラを接続する場合、各カメラでの画像間隔がなるべく短くなるよう図-10に示すように1秒毎にカメラを切り替えて画像を取得し、検査画像を作成する必要がある。この画像取得間隔と検出率低下の関係を調べた。図-11に試験の方法を示す。

- 1) 接続カメラ台数ごとの相対正解率を図-12に示す。ここで相対正解率とは1台接続時の正解率を基準にした複数台接続時の正解率を表すものである。

図-12は路面状態毎の個別正解率を示したもので、状態毎の信頼水準99%の区間推定値はそれぞれ、乾燥：1.014～0.985、湿潤：1.012～0.986、水膜：1.067～0.932、積雪：1.030～0.965となっており、この値の範囲に入る接続台数は5台であった。なお、複数カメラ接続時の路面判定出力間隔は1分×接続台数となる。

- 2) 5台接続時の個別正解率、的中率を表-3に示す。1台接続時と統計的に有意な差はないことを確認した。

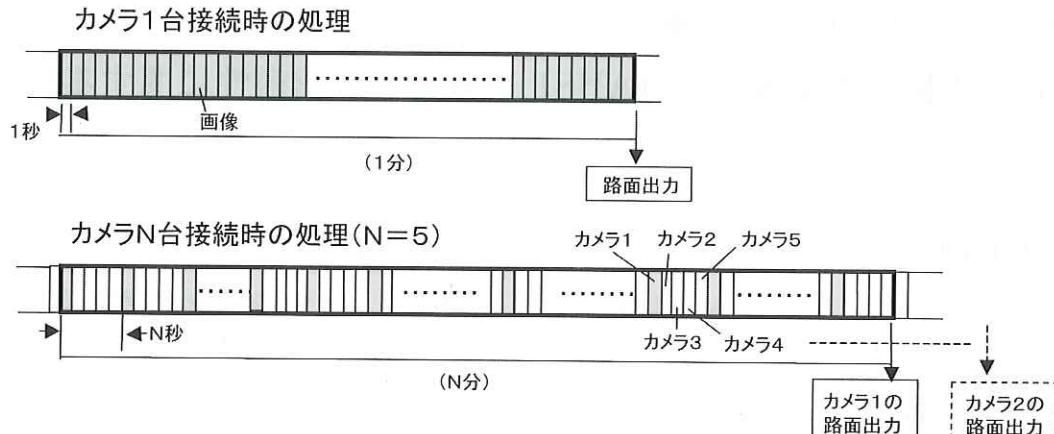


図-10 複数カメラ接続時の画像取得の様子

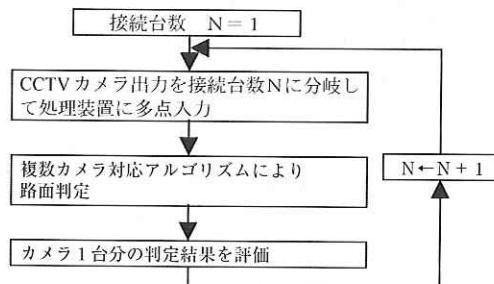


図-11 複数カメラ接続試験フロー

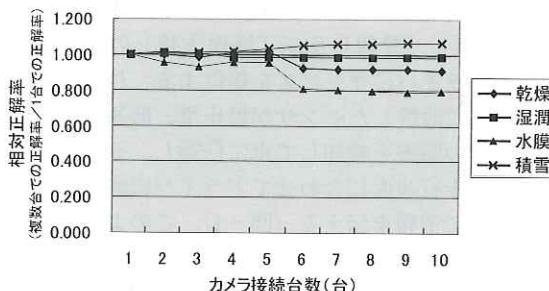


図-12 複数カメラ接続時の路面センサの検出性能

6. おわりに

実道実験により AHS 可視画像式路面センサを AHS 安全運転支援サービス並びに道路管理へ活用する場合のセンサ性能を検証した結果、個別正解率、的中率、安全度の性能指標が目標値に近いことを確認した。また、道路管理への活用を考えた場合に必要となる旋回ズーム／プリセット機能への対応が可能であること、複数カメラ対応機能

として 5 台までのカメラの接続が可能であることを検証できた。

本実験にあたり、ご協力頂いた三陸国道事務所に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Takagi M and Shimoda H (1991) Handbook of Image Analysis (Tokyo University Press)
- 2) Ishii K (1998) Pattern Recognition (Ohmsha)

川田則幸*



技術研究組合走行支援道路システム開発機構
Noriyuki KAWADA

久野 晃**



技術研究組合走行支援道路システム開発機構
Akira KUNO

大内浩之***



国土交通省国土技術政策総合研究所高度情報化研究センター高度道路交通システム研究室主任研究官
Hiroyuki UCHI