

METHODES D'ANALYSE DE L'ETAT DES CHAUSSEES

EN HIVER PAR TRAITEMENT D'IMAGES

Kiyoshi TAKEICHI¹, Yuya HIRAKOUCHI¹, Masaki KAMIURA¹, Jun UOZUMI² and Nobuyuki ITOH³

¹ Dept. of Civil Eng.,
Hokkaigakuen University
South-26, West-11, Chuo-ku,
Sapporo, Hokkaido, 064-0926, Japon
TEL : +81-11-841-1161
FAX : +81-11-551-2951
E-mail : takeichi@cvl.hokkai-s-u.ac.jp

² Dept. of Elect. & Inf. Eng.,
Hokkaigakuen University
South-26, West-11, Chuo-ku,
Sapporo, Hokkaido, 064-0926, Japon
TEL : +81-11-841-1161
FAX : +81-11-551-2951
E-mail : uozumi@eli.hokkai-s-u.ac.jp

³ Hokkaido Development
Engineering Center
#11, South-1, East-2, Chuo-ku.
Sapporo, Hokkaido, 060-0051, Japon
TEL : +81-11-271-3028
FAX : +81-11-271-5115
E-mail : n-ito@decnet.or.jp

1. Introduction

L'état de la chaussée varie beaucoup selon les conditions météorologiques et la circulation. Par exemple, une chaussée mouillée ou recouverte de neige ayant fondu le jour sous l'effet du soleil ou d'un redoux se transforme la nuit et se recouvre alors de plaques ou de minces couches de verglas. Pour assurer une bonne gestion des routes, il faut pouvoir disposer d'informations exactes sur l'état de leurs surfaces.

Le recours exclusif aux capteurs enfouis pour mesurer l'état des chaussées au niveau local laisse à désirer. La réponse serait d'élaborer une méthode qui permettrait de couvrir une zone large, tout en étant capable de mesurer avec exactitude l'état de la surface des routes.

Actuellement, c'est à l'aide d'un capacimètre, d'un conductimètre et d'un réflectomètre que l'on analyse le degré d'humidité, y compris sous forme de neige et de verglas, de la surface de roulement. On mesure la température de la surface de roulement ainsi que celle de l'atmosphère avec un capteur de surface de roulement et un thermomètre à radiation.

Dans cette étude, nous proposons d'évaluer l'efficacité du traitement d'images numériques comme méthode discriminante pour des zones étendues. Nous présentons ici les résultats de l'examen des images numériques de la surface d'une chaussée (différents états provoqués lors d'essais en laboratoire et en extérieur).

2. Epreuves d'asphalte soumises à un seul état de la surface de roulement

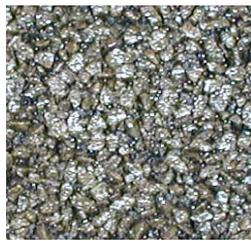
(1) Expérience en laboratoire :

Nous avons utilisé six éprouvettes de béton bitumineux poreux (30 cm. X 30 cm. X 5 cm.), matériau dont l'état de surface change énormément selon l'état de la route et les conditions météorologiques, et les avons soumises à différentes conditions provoquées en laboratoire. La photographie n° 1 montre (de a à d) les quatre états de la surface de roulement étudiés: sec, humide, couverture par une mince couche de verglas et couverture neige-et-verglas. La couverture par une mince couche de verglas remplit les vides de glace. La couverture neige-et-verglas créée remplit les vides de neige et de glace.

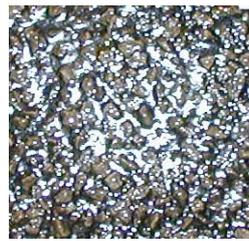
Les clichés ont été pris avec un appareil numérique (2,1 millions de pixels) dans une salle réfrigérée avec et sans flash à des hauteurs de 70, 100, 150 et 180 cm au-dessus des éprouvettes.



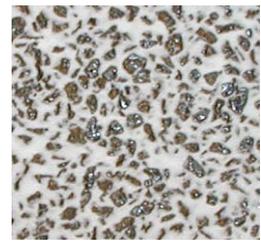
a. Sec



b. Humide



c. Mince couche de



d. Neige-et-verglas

Photographie n° 1 : Images de chaque état de la chaussée (prises à une hauteur de 100 cm.)

(2) Méthode d'analyse :

a) Intensité et nombre de pixels :

L'intensité (I) représente l'intensité de la lumière de données image stockées dans un micro-ordinateur. La gradation s'étend sur 256 valeurs. Plus l'intensité est élevée et plus la luminosité est grande (image plus blanche); plus l'intensité est faible et plus l'image est sombre (image plus noire). L'analyse a été faite après que les images des surfaces ont été découpées en sections de 256 pixels sur 256.

b) Paramètres statistiques :

Le rapport entre I/Im (l'intensité I rapportée à l'intensité moyenne Im) et la fonction densité de probabilité $P_I(I)$ dans l'équation (1) est illustré dans les figures 1 et 2, respectivement avec et sans flash. Dans les deux cas, l'état sec et l'état neige-et-verglas présentent des distributions comparables, alors que les états humide et à mince couche de verglas avec flash présentent une distribution bimodale avec une pointe à une intensité élevée, comme l'état recouvert de neige-et-verglas. Nous avons avancé comme explication à cela la réaction au flash des couches d'eau et de verglas.

Le moment centré M_k est exprimé par l'équation (2), et à partir de M_k ($k = 2, 3$ ou 4), le contraste (V), l'asymétrie (Sk) et la curtosis (Ku) sont exprimés respectivement par (3), (4) et (5).

$$P_I(I) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) dx \quad (1)$$

$$M_k = \int_{-\infty}^{\infty} (I - Im)^k P_I(I) dI \quad (2)$$

$$V = (M_2)^{1/2} / Im \quad (3)$$

$$Sk = M_3 / (M_2)^{3/2} \quad (4)$$

$$Ku = M_4 / (M_2)^2 \quad (5)$$

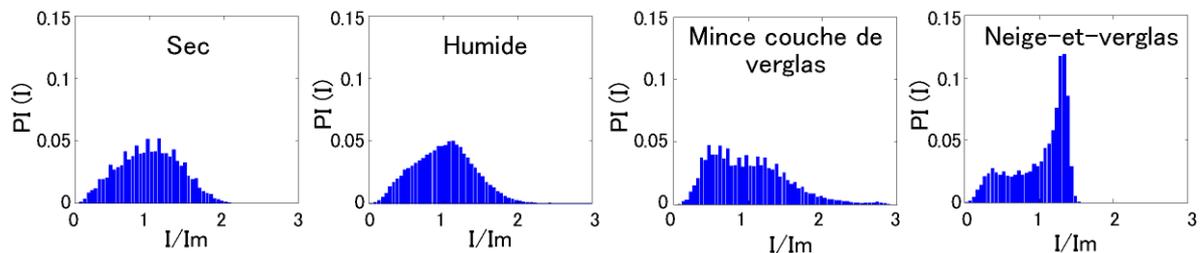


Figure 1 : Distribution de l'intensité I/Im sans flash

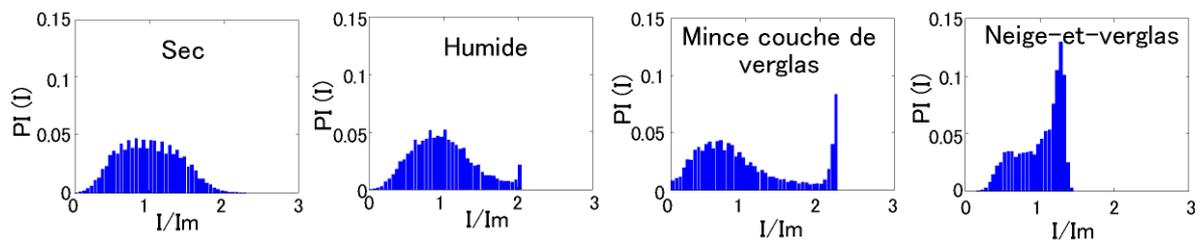


Figure 2 : Distribution de l'intensité I/Im avec flash

Le contraste (V) est le degré de dispersion de la distribution de l'intensité; plus la valeur est grande et plus la dispersion est importante. L'asymétrie mesure l'asymétrie des données d'une fonction densité de probabilité. La distribution est normale (symétrique) lorsque $Sk = 0$. Lorsque $Sk < 0$, les données sont concentrées à gauche de la moyenne, c'est-à-dire que la queue de la distribution est plus longue à gauche; lorsque $Sk > 0$, la queue est plus longue à droite. La curtosis indique la hauteur d'une fonction densité de probabilité, c'est-à-dire le degré de prédominance de la distribution de l'intensité. Lorsque la distribution est normale, $Ku = 3$; les distributions présentent moins de valeurs aberrantes que la distribution normale lorsque $Ku < 3$ et plus lorsque $Ku > 3$.

Les résultats des analyses des rapports entre le contraste V , l'asymétrie Sk et la curtosis Ku sont reportés dans les figures 3 et 4, pour une hauteur de l'appareil au-dessus de l'éprouvette de 70 et 180 cm. Des grappes correspondant à chaque état se détachent plus nettement lorsque l'on s'intéresse au rapport entre le contraste et l'asymétrie que pour les autres rapports. La limite supérieure de chaque paramètre s'élève à mesure qu'augmente la hauteur de l'appareil au-dessus de l'éprouvette (V : 0,53 \rightarrow 0,78, Sk : 0,75 \rightarrow 1,1, Ku : 2,58 \rightarrow 3,90), évolution qui indique que la dispersion de la distribution augmente.

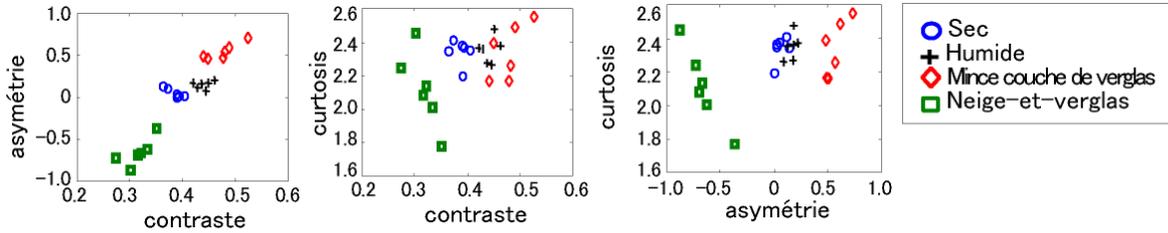


Figure 3 : Rapports entre le contraste, l'asymétrie et la curtosis ($h = 70$ cm.)

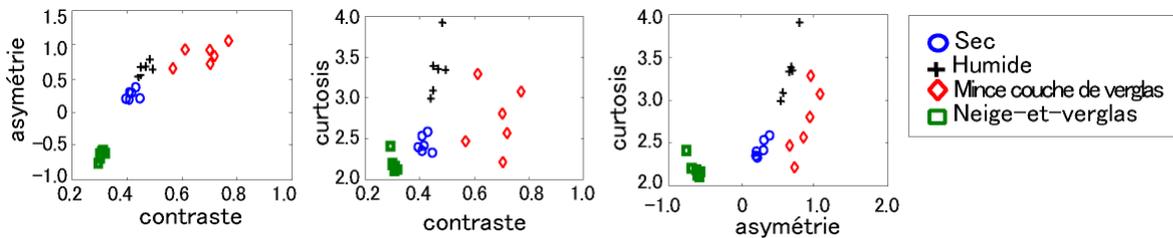


Figure 4 : Rapports entre le contraste, l'asymétrie et la curtosis ($h = 180$ cm.)

c) Fonction d'auto-corrélation, $R_I(\Delta x, \Delta y)$:

Une fonction d'auto-corrélation (équation (6)) montre le degré de corrélation des intensités de deux points distants de $(\Delta x, \Delta y)$. Les points sont des pixels de 256 gradations. Pour la représentation des coordonnées polaires $R_I(r, \theta)$, d'intensité moyenne Im , la fonction d'auto-corrélation de la moyenne angulaire $R_I(r)$ est exprimée par l'équation (7).

$$R_I(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{S} \iint_S \{I(x, y) - Im\} \{I(x + \Delta x, y + \Delta y) - Im\} dx dy \quad (6)$$

$$R_I(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R_I(r, \theta) d\theta \quad (7)$$

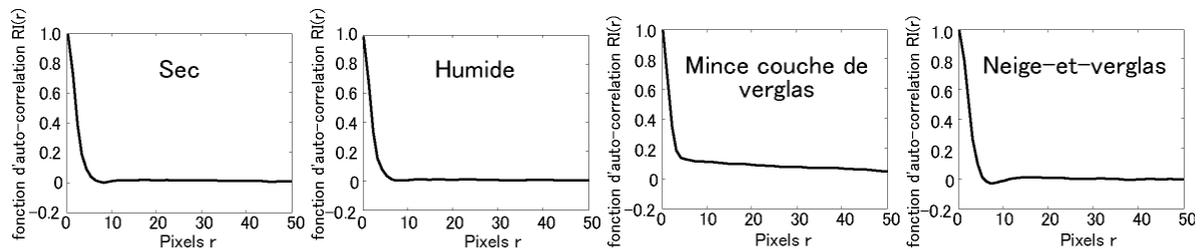


Figure 5 : Rapport entre la fonction d'auto-corrélation $R_I(r)$ et les pixels r

La figure 5 montre le rapport entre la fonction d'auto-corrélation R_I et les pixels r pour chaque état de la chaussée ($h = 150$ cm.) La fonction d'auto-corrélation tend à chuter brusquement pour chaque état avec un écart de 5 pixels ou plus. Une telle différence entre deux états de la surface de roulement n'est pas nette.

d) Puissance spectrique, $S_I(f_x, f_y)$:

La puissance spectrique, $S_I(f_x, f_y)$ montre la distribution de la puissance pour chaque composante de la fréquence, en supposant que la forme de l'onde d'une intensité variable est égale à la somme d'une série de composantes de la fréquence. Pour la représentation des coordonnées polaires $S_I(\rho, \phi)$ de $S_I(f_x, f_y)$, la puissance spectrique de la moyenne angulaire $S_I(\rho)$ se calcule par l'équation (8).

$$S_I(\rho) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} S_I(\rho, \phi) d\phi \quad (8)$$

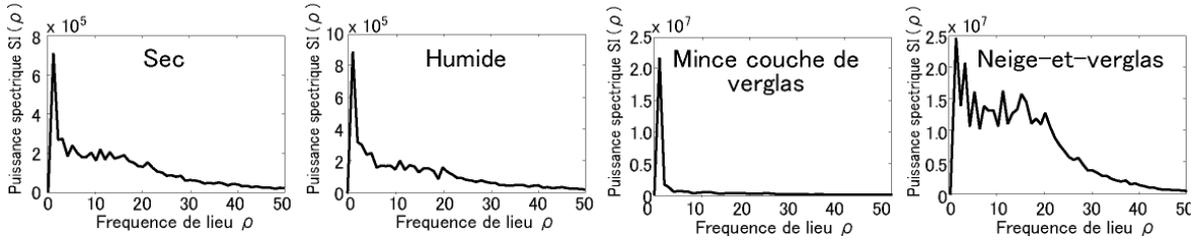


Figure 6 : Rapport entre la puissance spectrique et la fréquence de lieu

La figure 6 montre le rapport entre la fréquence de lieu ρ et la puissance spectrique $S_I(\rho)$. Pour des surfaces de roulement verglacées, ce sont les composantes de basse fréquence qui prédominent et les fluctuations de l'intensité positionnelle des surfaces sont faibles, alors que les surfaces à couverture neige-et-verglas présentent de nombreuses régions de composantes de basse fréquence parce que les surfaces de roulement sont tachetées. Les surfaces sèches et mouillées présentent une tendance qui se situe entre les deux et l'analyse de fréquence ne révèle pas de différence nette entre les surfaces sèches et mouillées.

Une valeur moyenne de $S_I(\rho)$ qui se situe dans l'intervalle de fréquence de lieu $10 \leq \rho \leq 20$ est considérée comme ayant des composantes de fréquence faibles ("low freq.") et une valeur dans l'intervalle $40 \leq \rho \leq 50$ est considérée comme ayant des composantes de fréquence élevées ("high freq.") Elles sont exprimées respectivement par les équations (9) et (10). La figure 7 montre le rapport entre les composantes de haute et de basse fréquence. L'équation (11), une transformée de Fourier (FT), décrit le rapport entre la fonction d'auto-corrélation ($R_I(\Delta x, \Delta y)$) et la puissance spectrique ($S_I(f_x, f_y)$).

$$\text{lowfreq.} = \frac{1}{11} \int_{20}^{10} S_I(\rho) d\rho \quad (9)$$

$$\text{highfreq.} = \frac{1}{11} \int_{50}^{40} S_I(\rho) d\rho \quad (10)$$

$$S_I(f_x, f_y) = FT[R_I(\Delta x, \Delta y)] \quad (11)$$

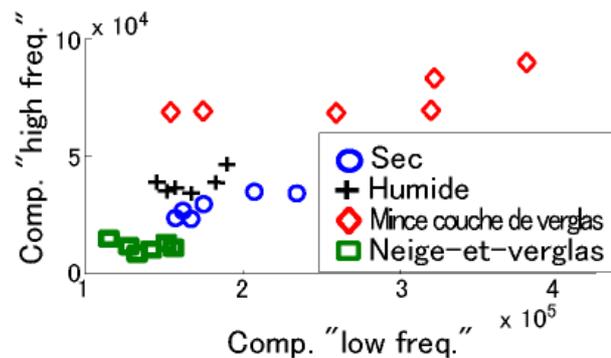


Figure 7 : Rapport entre la composante de basse fréquence ("low freq.") et la composante de haute fréquence ("high freq.")

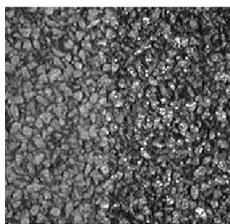
3. Eprouvettes d'asphalte soumises à un état complexe de la surface de roulement

(1) Analyse avec paramètres :

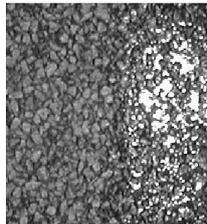
En hiver, les surfaces de roulement des routes tendent à être de type flou et complexe plutôt qu'uniforme. Nous avons étudié des états de surface complexes qui associent plusieurs des états précédemment étudiés isolément.

Comme on le voit dans la photographie n° 2, nous avons fabriqué six échantillons de surface de roulement pour chaque état mixte: sec/ humide, sec/ mince couche de verglas, sec/ neige-et-verglas, mince couche de verglas/ mouillé et neige-et-verglas/ mince couche de verglas.

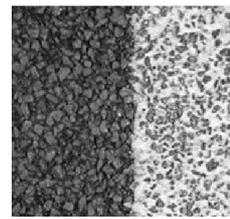
Un essai mené en laboratoire appliquait une méthode semblable pour des conditions simples. La photographie n° 2 montre des vues de surfaces complexes, prises à une hauteur de 180 cm. La figure 8 montre les rapports entre V, Sk et Ku. Une combinaison de chaque paramètre discrimine dans une certaine mesure entre chaque état de surface lorsque l'on tient compte du fait que ce sont des surfaces complexes. Cependant, lorsque les grappes sont contiguës, il n'est pas toujours aisé d'établir des distinctions en se fondant sur ces paramètres.



Sec/ humide



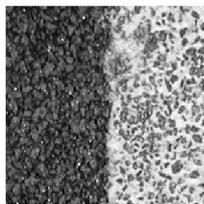
Sec/ mince couche de
verglas



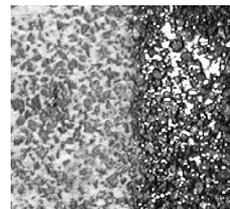
Sec/ neige-et-verglas



Humide/ mince couche de
verglas



Humide/ neige-et-verglas



Neige-et-verglas/ mince
couche de verglas

Photographie n° 2 : Images d'états de surfaces de roulement complexes

(2) L'inférence floue :

Nous avons appliquée la théorie du flou à l'examen de chaque état de la surface pour établir la "certitude de l'occurrence" (l'adéquation), afin que la discrimination soit la plus objective possible.

Dans notre programme d'analyse, les variables d'introduction dans la partie précédente sont V, Sk et Ku et l'adéquation de l'occurrence de chaque état de surface dans la partie concluante est définie comme étant le taux d'occurrence. A partir des résultats reportés dans la figure 8, il a été établi que l'intervalle de la fonction d'appartenance pour chaque surface complexe comportait sept rangs, de grande et négative (G. N.) à grande et positive (G. P.), comme on le voit dans le tableau n° 1. Le tableau n° 2 récapitule les règles de répartition entre les sept rangs. Le tableau n° 3 présente les résultats de la tentative de distinguer les surfaces les unes des autres à l'aide de la théorie du flou pour inférer six images de chaque état de la surface de roulement.

Les surfaces correctement prédites apparaissent en grisé; les surfaces incorrectement prédites du premier rang apparaissent en double encadré. Le classement des surfaces pour lesquelles les prévisions étaient fausses est indiqué par un 2), 3), dans le tableau n° 3.

78% des prévisions (ou 28/36 X 100) étaient exactes. Si l'on suppose que les premier et deuxième rangs du taux d'occurrence sont compris dans la norme de discrimination en vigueur dans le domaine de la gestion des routes, l'exactitude des prévisions atteint 86% (ou 31/36 X 100).

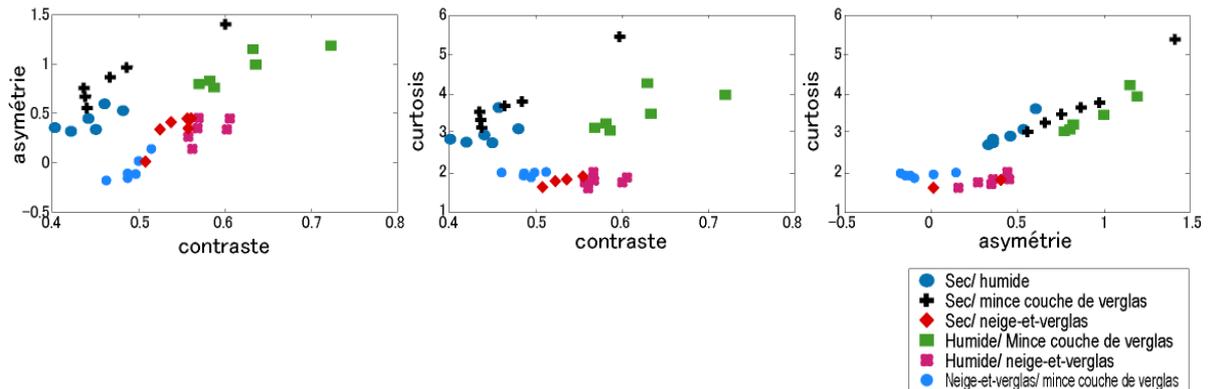


Figure 8 : Rapports entre le contraste, l'asymétrie et la curtosis

Tableau n° 1 : Intervalle de la fonction d'appartenance pour des états de surface de roulement complexes

	Partie antécédente						Partie concluante											
	Contraste		Asymétrie		Curtosis		Sec/ humide		Sec/ mince couche de verglas		Sec/ neige-et-verglas		Humide/mince couche de verglas		Humide/ neige-et-verglas		Neige-et-verglas/ mince couche de verglas	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
N.L	-∞	0.37	-∞	0.00	-∞	2.10	-0.17	0.17	-0.17	0.17	-0.17	0.17	-0.17	0.17	-0.17	0.17	-0.17	0.17
N.M	0.30	0.52	0.05	0.35	1.90	2.50	0.00	0.33	0.00	0.33	0.00	0.33	0.00	0.33	0.00	0.33	0.00	0.33
N.S	0.32	0.55	0.10	0.55	2.10	2.70	0.17	0.50	0.17	0.50	0.17	0.50	0.17	0.50	0.17	0.50	0.17	0.50
A.Z	0.37	0.61	0.20	0.50	2.50	3.15	0.33	0.67	0.33	0.67	0.33	0.67	0.33	0.67	0.33	0.67	0.33	0.67
P.S	0.40	0.63	0.25	0.85	2.75	3.40	0.50	0.82	0.50	0.82	0.50	0.82	0.50	0.82	0.50	0.82	0.50	0.82
P.M	0.45	0.68	0.35	1.00	2.90	3.50	0.67	1.00	0.67	1.00	0.67	1.00	0.67	1.00	0.67	1.00	0.67	1.00
P.L	0.59	∞	0.70	∞	3.10	3.70	0.82	1.17	0.82	1.17	0.82	1.17	0.82	1.17	0.82	1.17	0.82	1.17

Tableau n° 2 : Règles établies pour les conditions de surface de roulement complexes

Partie antécédente			Partie concluante						Poids
Contraste	Asymétrie	Curtosis	Sec/ humide	Sec/ mince couche de verglas	Sec/ neige-et-verglas	Mince couche de verglas/ humide	Humide/ neige-et-verglas	Neige-et-verglas/ mince couche de verglas	
N.M	N.M	N.S	P.S	A.Z	P.S	N.M	P.S	P.S	1.0
N.S	P.S	P.M	P.M	P.M	A.Z	P.S	N.S	A.Z	1.0
N.M	A.Z	P.S	P.L	P.S	A.Z	N.S	A.Z	A.Z	1.0
N.S	P.M	P.L	P.S	P.L	N.S	P.S	N.S	N.S	1.0
P.S	N.S	N.L	A.Z	N.S	P.L	N.S	P.M	P.M	1.0
P.M	N.S	N.L	A.Z	N.S	P.M	N.S	P.L	P.S	1.0
P.L	P.L	P.M	N.L	P.S	N.S	P.L	N.S	N.M	1.0
A.Z	N.L	N.L	A.Z	N.S	P.M	N.M	P.S	P.L	1.0

Tableau n° 3 : Résultats de l'inférence de la différenciation entre les surfaces de roulement par la théorie du flou

État réel de la chaussée	N°	État de la chaussée						
		Sec/ humide	Sec/ mince couche de verglas	Sec/ neige-et-verglas	Humide/ mince couche de verglas	Humide/ neige-et-verglas	Neige-et-verglas/ mince couche de verglas	
Taux d'occurrence de l'état de la chaussée	Sec/ humide	N° 1	0.827 ²⁾	0.832	0.494	0.663	0.335	0.494
		N° 2	0.916	0.671	0.500	0.344	0.496	0.500
		N° 3	0.668 ²⁾	0.920	0.332	0.668	0.332	0.332
		N° 4	0.865	0.654	0.518	0.317	0.516	0.518
		N° 5	0.850	0.648	0.523	0.311	0.522	0.523
		N° 6	0.896	0.693	0.500	0.397	0.474	0.500
	Sec/ mince couche de verglas	N° 1	0.670	0.920	0.330	0.670	0.330	0.330
		N° 2	0.670	0.931	0.336	0.667	0.333	0.336
		N° 3	0.626	0.861	0.331	0.689	0.330	0.313
		N° 4	0.670	0.920	0.330	0.670	0.330	0.330
		N° 5	0.743	0.865	0.409	0.667	0.333	0.409
		N° 6	0.830	0.833	0.497	0.666	0.334	0.497
	Sec/ neige-et-verglas	N° 1	0.500	0.333	0.859	0.333	0.859	0.750
		N° 2	0.500	0.333	0.851	0.333	0.851	0.750
		N° 3	0.500	0.333	0.849	0.333	0.849	0.750
		N° 4	0.500	0.333	0.872	0.333	0.851	0.764
		N° 5	0.500	0.333	0.853 ²⁾	0.333	0.870	0.740
		N° 6	0.500	0.330	0.835	0.330	0.835	0.750
	Humide/ mince couche de verglas	N° 1	0.222	0.687	0.333	0.865	0.330	0.191
		N° 2	0.080	0.670	0.330	0.920	0.330	0.170
		N° 3	0.080	0.670	0.330	0.920	0.330	0.170
		N° 4	0.750	0.835	0.415	0.670 ³⁾	0.330	0.415
		N° 5	0.750	0.835	0.415	0.670 ³⁾	0.330	0.415
		N° 6	0.750	0.835	0.415	0.670 ³⁾	0.330	0.415
Humide/ neige-et-verglas	N° 1	0.500	0.333	0.845	0.333	0.878	0.727	
	N° 2	0.500	0.333	0.834	0.333	0.905	0.687	
	N° 3	0.500	0.333	0.849	0.333	0.849	0.750	
	N° 4	0.500	0.333	0.856	0.333	0.863	0.745	
	N° 5	0.500	0.333	0.834	0.333	0.916	0.684	
	N° 6	0.500	0.333	0.838	0.333	0.838	0.750	
Neige-et-verglas/ mince couche de verglas	N° 1	0.596	0.426	0.744	0.239	0.744	0.739 ³⁾	
	N° 2	0.503	0.336	0.834	0.329	0.834	0.750 ³⁾	
	N° 3	0.500	0.333	0.833	0.172	0.667	0.947	
	N° 4	0.500	0.333	0.833	0.172	0.667	0.937	
	N° 5	0.500	0.333	0.833	0.172	0.667	0.948	
	N° 6	0.500	0.333	0.833	0.172	0.667	0.948	

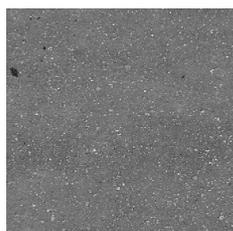
 : Quand prévision exacte

 : Quand prévision fausse

^{2), 3)} : Rang du taux d'occurrence lorsque prévision fausse

4. Distinguer entre les surfaces sur le terrain

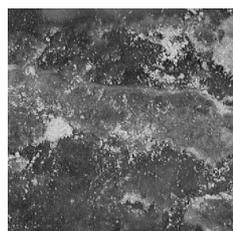
Nous avons photographié chacun des états sur les routes municipales aux alentours de l'université. Ces photographies ont été prises à la lumière naturelle à des hauteurs de 70, 100, 150 et 200 cm. La photographie n° 3 montre les différents états de la surface de roulement, dont le sec, l'humide, celui avec plaques de verglas et celui recouvert de neige tassée.



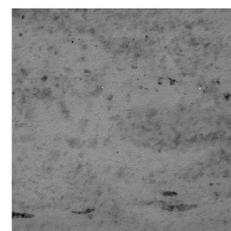
Sec



Humide



Plaques de verglas



Neige tassée

Photographie n° 3 : Image de chaque état de la chaussée sur des routes municipales

(1) Résultats de l'analyse :

La figure 9 montre le rapport entre la fonction densité de probabilité $P_I(I)$ et l'intensité (I/Im) des surfaces des routes municipales. L'intervalle de distribution en était plus étroit que celui de l'asphalte poreux reporté dans les figures 1 et 2 en raison de ce que les routes municipales sont des chaussées asphaltées à granulométrie fine et que la neige et le verglas sur les routes étaient uniformes.

Dans la figure 10, on voit les rapports entre le contraste, l'asymétrie et la curtosis des images des surfaces de roulement après l'analyse de six clichés de chaque état. Il est plus facile d'établir des distinctions ici que pour les résultats de l'essai en laboratoire car des grappes de combinaison de chaque paramètre se forment pour chacun des états.

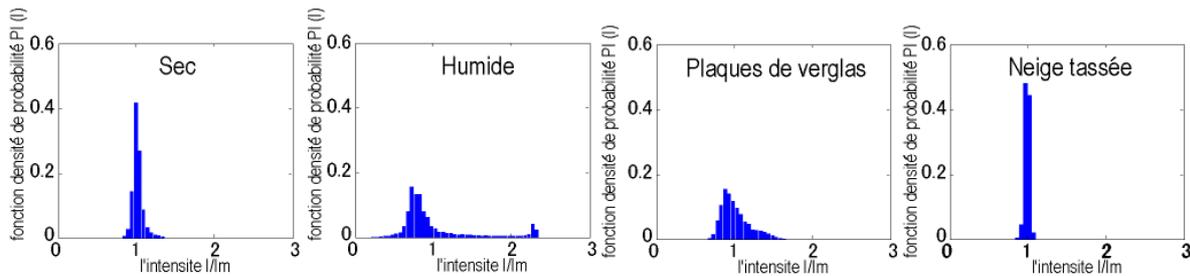


Figure 9 : Rapport entre la fonction densité de probabilité $P_I(I)$ et l'intensité I/Im

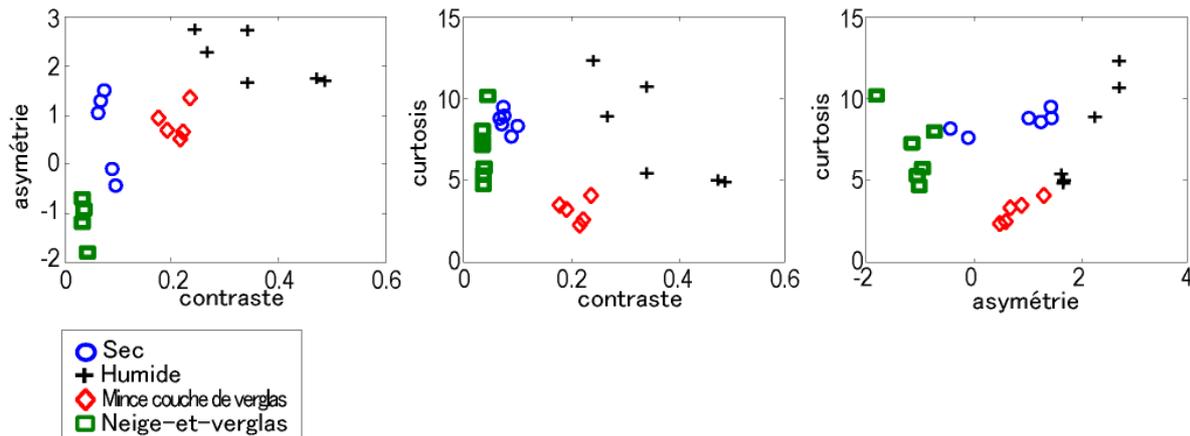


Figure 10 : Rapports entre le contraste, l'asymétrie et la curtosis des images de surface de roulement de routes municipales

(2) L'inférence floue :

Nous avons également vérifié l'exactitude de la discrimination par inférence floue, fondée sur les paramètres analysés. La même approche concernant la fonction d'appartenance et l'étalonnage des rangs a été appliquée que pour les surfaces complexes et les résultats apparaissent dans le tableau n° 4. Lorsque l'on reprend les résultats de l'inférence de chaque état en s'intéressant plus particulièrement au premier rang du taux d'occurrence, on constate que les surfaces réelles et les surfaces inférées concordent. Ceci est en partie dû au fait que ce ne sont pas des surfaces soumises à des états complexes.

Bien qu'il soit nécessaire à l'avenir de procéder à l'étude d'une variété d'états plus importante sur le terrain, il nous semble que la méthode de discrimination entre les surfaces de roulement par l'analyse d'images et par l'inférence floue donne de bons résultats.

Tableau n° 4 : Résultats de la discrimination entre états de la chaussée par l'inférence floue

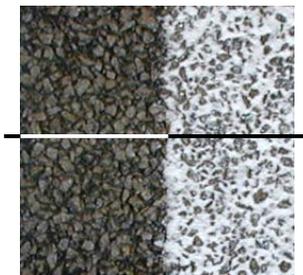
Etat de la chaussée		N°	État réel de la chaussée			
			Sec	Humide	Plaque de verglas	Neige tassée
Taux d'occurrence de l'état de la chaussée	Sec	N° 1	0.889	0.441	0.697	0.754
		N° 2	0.885	0.440	0.700	0.753
		N° 3	0.891	0.441	0.697	0.754
		N° 4	0.885	0.440	0.700	0.755
		N° 5	0.901	0.441	0.696	0.754
		N° 6	0.894	0.441	0.697	0.754
	Humide	N° 1	0.370	0.875	0.699	0.510
		N° 2	0.370	0.876	0.697	0.512
		N° 3	0.370	0.875	0.700	0.510
		N° 4	0.370	0.875	0.700	0.510
		N° 5	0.372	0.877	0.697	0.512
		N° 6	0.370	0.875	0.700	0.510
	Plaque de verglas	N° 1	0.541	0.596	0.920	0.754
		N° 2	0.542	0.596	0.933	0.754
		N° 3	0.540	0.598	0.920	0.752
		N° 4	0.540	0.595	0.920	0.755
		N° 5	0.540	0.598	0.920	0.752
		N° 6	0.540	0.595	0.920	0.755
	Neige tassée	N° 1	0.542	0.441	0.535	0.948
		N° 2	0.540	0.440	0.535	0.948
		N° 3	0.542	0.441	0.535	0.948
		N° 4	0.540	0.440	0.533	0.948
		N° 5	0.542	0.441	0.534	0.948
		N° 6	0.540	0.441	0.535	0.946

5. Analyse des ondelettes

(1) Plan :

L'analyse de la texture à l'aide de paramètres statistiques se concentre sur la distribution de l'intensité des pixels dans les images de surfaces de roulement. Le domaine du temps est transformé en domaine de fréquence par la transformée de Fourier pour obtenir la fonction d'auto-correlation et la puissance spectrique. Une onde d'intensité de forme irrégulière est considérée comme une série de composantes de fréquence.

L'opération de transformation dans le domaine de fréquence entraîne la perte des informations temporelles et spatiales. On ne peut donc rien apprendre sur l'occupation de l'espace ni sur l'existence locale d'états de la surface de roulement par cette analyse. Parmi les exemples de surfaces de roulement complexes les plus répandus, on peut citer une voie dont la surface de roulement est sèche et dont l'accotement est recouvert de plaques de verglas ou une surface de roulement recouverte de plaques de verglas parcourues par des ornières longitudinales.



Photographie n° 4 : Surface de l'éprouvette à l'état sec/ neige-et-verglas et droite d'analyse

Dans l'analyse des ondelettes, l'on peut effectuer simultanément des analyses de temps et de fréquence sur l'intensité du signal. L'on obtient non seulement des renseignements sur la fréquence mais aussi sur le temps (positionnels).

A titre d'essai, nous avons supposé l'existence d'une surface de roulement complexe comportant une moitié gauche sèche et une moitié droite recouverte d'un mélange neige-et-verglas, surface illustrée dans la photographie n° 4, et avons étudié la possibilité de distinguer les positions dans l'espace des états de la surface de roulement à l'aide de l'analyse des ondelettes.

(2) Transformée en ondelettes :

a) Transformée en ondelettes continue :

Si l'on exprime la fonction d'ondelettes par $\psi(t)$, une fonction de base $\psi_{a,b}(t)$ peut être engendrée en opérant la translation de $\psi(t)$ parallèlement à l'axe t (déplacement) et en augmentant l'échelle (dilatation). $\psi_{a,b}(t)$ est exprimée par l'équation (12).

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (12)$$

Dans cette équation, a et b sont respectivement les paramètres d'augmentation de l'échelle et de translation parallèle. Le produit scalaire de $\psi_{a,b}(t)$ et du signal $f(t)$ donne la transformée en ondelettes, et exprimée par l'équation (13). Un coefficient de développement d'ondelettes est une valeur numérique calculée qui représente le degré de similitude entre le signal $f(t)$ et l'ondelette mère $\psi(t)$.

$$(W_{\psi} f)(b,a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (13)$$

Dans cette étude, nous avons montré des résultats traités par les ondelettes de Haar et de Daubechies, les plus fondamentales des ondelettes mère. L'ondelette de Haar, l'ondelette mère la plus simple, est exprimée par l'équation (14).

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t < 1/2) \\ -1 & (1/2 \leq t < 1) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (14)$$

b) Transformée en ondelettes discrète :

La transformée en ondelettes discrète, qui rend les coordonnées discrètes, permet d'effectuer une analyse temps-fréquence efficace du signal. Pour l'ondelette discret, l'équation (12) est exprimé par l'équation (15). Dans l'équation j est un niveau et k est un degré de déplacement. Le signal $f(t)$ est approché par approximation à l'aide d'une combinaison linéaire d'une fonction d'échelle $\varphi(t)$. Une fonction approximative $f_0(t)$, combinaison linéaire de $\varphi(t)$, est exprimée par l'équation (16). Le signal $f(t)$ est exprimé par la somme des combinaisons linéaires des ondelettes et de $\varphi(t)$ du niveau 1 jusqu'à un niveau arbitraire.

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}t - k) \quad (15)$$

$$f_0(t) = \sum_k s_k \varphi(t - k) \quad (16)$$

s_k est une valeur moyenne du signal $f(t)$ dans la section $[k, k+1]$ et s'exprime par l'équation (17).

$$s_k = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\varphi(t-k)} dt = \int_k^{k+1} f(t) dt \quad (17)$$

Comme l'on considère le déplacement et la dilatation du nombre de cette fonction d'échelle comme des ondelettes, $\varphi_{j,k}$ est défini par l'équation (18). De plus, une fonction approximative $f_j(t)$ de niveau j est exprimée par l'équation (19), à l'aide de $\varphi_{j,k}$.

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \varphi(2^{-j}t - k) \quad (18)$$

$$f_j(t) = \sum_k s_k^{(j)} \varphi_{j,k}(t) \quad (19)$$

$s_k^{(j)}$ est un coefficient d'échelle que l'on obtient par le produit scalaire d'une fonction d'échelle $\varphi_{j,k}$.

$f_1(t)$ est un état dépourvu d'informations de $f_0(t)$. Cet élément manquant $g_1(t)$ est une composante de haute fréquence. De ce fait, $f_0(t)$ est restauré par l'équation (20) comme approximation de résolutions multiples (ARM).

$$f_0(t) = f_1(t) + g_1(t) \quad (20)$$

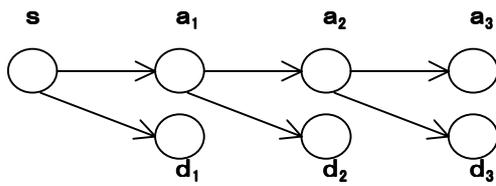


Figure 11 : Modèle du signal décomposé dans l'ARM

(3) Résultats de l'analyse :

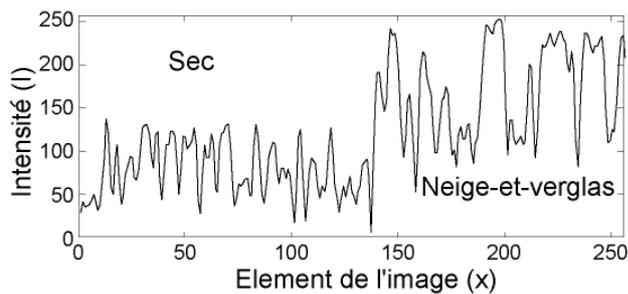


Figure 12 : Signal d'origine qui traverse de la section sèche à la section recouverte d'un mélange de neige et de verglas

a_3 est une forme d'onde de basse fréquence et d_3, d_2 et d_1 sont des composantes formes d'onde de haute fréquence lorsque le niveau $j = 3, 2$ et 1 , respectivement. Le niveau j représente une échelle de l'ondelette mère. Le niveau 2 est l'échelle de niveau 1 doublée et le niveau 3 est l'échelle de niveau 1 triplée.

Dans la figure 13, on constate que pour la composante de basse fréquence a_3 , il y a une différence remarquable de formes d'onde avant et après le pixel de vers 150 pour de Haar et Daubechies ($N = 10$), ce qui indique une différence dans les états de la surface roulante.

Cependant, comme l'analyse de fréquence du rapport entre la fréquence et un état de la surface de roulement correspondant à l'amplitude n'a pas été effectuée, l'on ne peut pas distinguer entre les états de la surface de roulement bien que l'information sur la localisation soit mise en évidence.

6. Conclusion

Nous avons tiré les conclusions suivantes des essais réalisés en laboratoire et des expériences menées sur le terrain sur les méthodes d'analyse de l'état des surfaces de roulement en hiver par le traitement d'images :

- (1) Les résultats obtenus lors d'essais en laboratoire et sur le terrain montrent que trois paramètres statistiques (le contraste, l'asymétrie et la curtosis) sont pertinents lorsqu'il s'agit de différencier entre les textures des surfaces de roulement soumises à des états de surface simples. Cependant, une fonction d'auto-correlation et une puissance spectrique engendrée par transformée de Fourier ne font pas ressortir clairement les différences entre les états des chaussées.
- (2) La différenciation entre surfaces de roulement complexes n'est pas toujours nette parce que les grappes de paramètres de chaque surface sont contiguës. Or, en appliquant la théorie du flou, on peut porter le pourcentage de prédictions exactes à environ 80%.
- (3) Bien que nous ayons effectué une analyse des ondelettes pour évaluer une méthode permettant de distinguer les états de sections locales de surfaces de roulement les uns des autres, nous n'avons réussi qu'à établir la localisation d'un état différent de la surface de roulement. A l'avenir, il faudra arriver à distinguer les différents états de la surface de roulement, en réalisant une analyse à multiples résolutions du signal d'origine plus détaillée.

La figure 11 montre un modèle décomposé du signal s utilisé dans cette étude. La composante de basse fréquence a_1 est obtenue en ôtant la composante de haute fréquence d_1 de s et a_2 est obtenu en ôtant d_2 de a_1 . Inversement, le signal est reconstruit en combinant a_3, d_1, d_2 et d_3 .

Dans le cas de la surface de roulement de la photographie n° 4 comportant une surface sèche sur la moitié gauche et une surface couverte d'un mélange de neige et de verglas sur la moitié droite, nous avons transformé la forme de l'onde de la distribution de l'intensité sur le trait qui traverse la photographie en un signal unidimensionnel et analysé sa distribution de fréquence. Le figure 12 montre un signal d'origine de la distribution de fréquence unidimensionnelle qui traverse de la section sèche à la section couverte d'un mélange de neige et de verglas. La figure 13 montre les résultats des analyses par les ondelettes de Haar et Daubechies ($N = 10$).

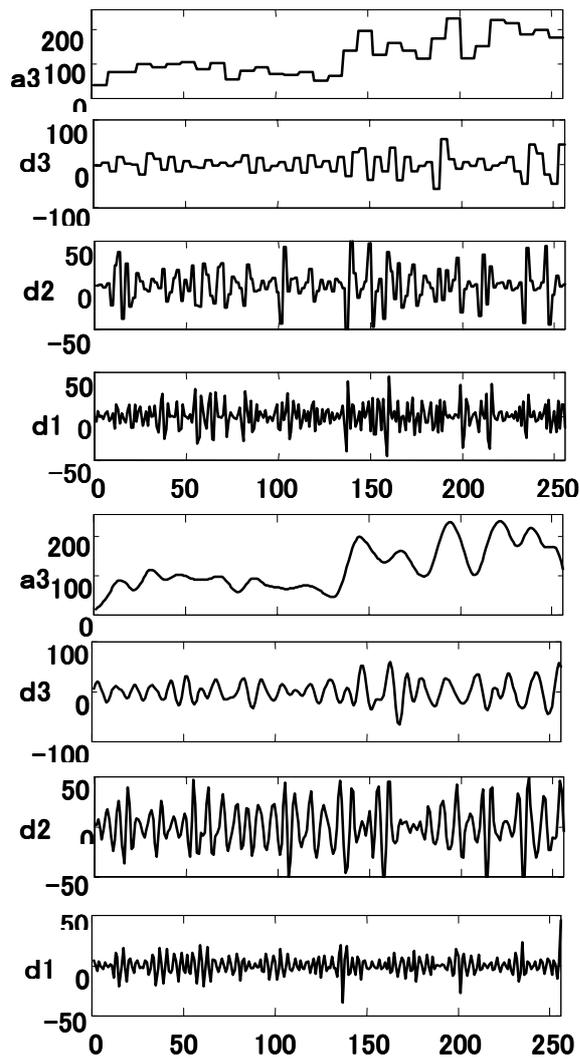


Figure 13 : Résultats des analyses des ondelettes à l'aide de l'ondelette de Haar (ci-dessus), et l'ondelette de Daubechies (N = 10) (ci-dessous)

Bibliographie :

- 1) K. Hirakouchi, K. Takeichi: Discriminant Analysis of Complex Pavement Conditions by Digital Image Processing, Proc. of Japan Society of Civil Eng. (JSCE) Hokkaido, Vol.57, pp.712-715, 2001.2
- 2) J. Simawaki: Digital Image Processing (I) for Image Comprehension, Shocodo publishing com., pp.60-94, 1991
- 3) Y. Yajima etc.: Statistics of Nature Science, Tokyo Uni. publication, pp.222-224, 1999
- 4) S. Nakamura: Digital Fourier Transform, Tokyo Denki Uni. Publication, pp.48-87, 1999
- 5) H. Charles Romburg: Cluster Analysis For Reseachers, Robert E. Klieger publishing com. Inc., 1989
- 6) Y. Nakamura: Fuzzy Modeling, Ohm publishing com., pp.35-98, 1994
- 7) A. Kawamura: Recognition Methods of Pavement Roughness by Wavelet Function, 51Th Symposium Rep. V session of JSCE, pp.64-65, 1996
- 8) S. Sakakibara: Wavelet Beginner's Guide, Tokyo Denki Uni. publication, pp.2-65, 1999
- 9) H. Nakano etc.: Signal and Image Processing by Wavelet, Kyoritsu publishing com., pp.17-63, 1999