

視界不良画像に対する
画像鮮明化と降雪状況判定に関する研究

瓦吹 大

平成 29 年 2 月 23 日

目次

第 I 部 序論	11
1 研究の背景	11
1.1 監視カメラと人々の生活の密接な関係	11
1.1.1 カメラの普及と多様な活用	11
1.1.2 人々の安全と監視カメラ	12
1.1.3 認識や判断と画質向上の密接な関係	13
1.1.4 監視カメラに期待される能力	14
1.1.5 悪天候と画像不鮮明化	15
1.1.6 雨粒検出と雪粒検出の現状	16
1.1.7 画像鮮明化と偽色	17
1.1.8 降雪状況判定の重要性	18
2 従来手法	19
2.1 コントラスト改善	21
2.1.1 補正 (トーンカーブの概念)	22
2.1.2 ヒストグラム拡張	23
2.1.3 ヒストグラム平坦化	24
2.1.4 局所制限ヒストグラム平坦化 (CLAHE)	25
2.1.5 Retinex 理論	26
2.1.6 Koschmieder の法則	27
2.1.7 ダークチャンネル	27
2.1.8 霞除去で夜間画像の鮮明化	29
2.2 降雪検出	31
2.2.1 雪粒画素の特徴付け	31
2.2.2 その他の動体への対応	32
2.2.3 動体情報を利用しない手法	33
2.3 降雪程度判定	34
2.3.1 降雪状況判定は未発達分野	34
2.3.2 降雪程度判定の問題点	35
3 研究の目的	36
3.1 3つの課題	36
3.1.1 鮮明化の仕組み	37
3.1.2 降雪検出の仕組み	38
3.1.3 降雪状況判定の仕組み	39
4 本論文の構成	40
第 II 部 コントラスト改善における提案手法	41

1	コントラスト改善	41
1.1	明度整合と偽色	42
2	従来手法	43
2.1	ダークチャンネル	43
2.1.1	Koschmieder の大気散乱法則	43
2.1.2	ダークチャンネル、大気光、透過係数	44
2.1.3	ダークチャンネルの結果	46
2.1.4	偽色の原因	47
2.2	CLAHE	48
2.2.1	局所制限ヒストグラム平坦化 (CLAHE)	48
2.2.2	ヒストグラム平坦化	48
2.2.3	クリップ処理	49
2.2.4	画素の線形補間	50
2.2.5	トーンカーブの線形補間	51
2.2.6	CLAHE の結果	52
2.2.7	偽色の原因	53
2.3	Retinex 理論	54
2.3.1	Retinex	54
2.3.2	マルチスケール Retinex	56
2.3.3	マルチスケール Retinex の結果	56
2.3.4	不鮮明画像の原因	56
3	ブライトチャンネル	57
3.1	霞除去の課題	57
3.1.1	白い対象物の扱い	57
3.2	手法の説明	59
3.2.1	ブライトチャンネルの算出	59
3.2.2	透過係数の算出	61
3.2.3	大気光の算出	63
3.2.4	トーンカーブの違い	68
3.2.5	重み係数の効果	69
3.2.6	重み係数の自動決定	70
3.2.7	トーンカーブ視点からの霞除去効果の違い	72
3.3	結果	73
4	領域分割と霞除去の組み合わせ	75
4.1	霞除去の課題	75
4.2	本論文で使用する基本アルゴリズムの説明	77
4.3	手法の説明	78
4.3.1	領域分割	79
4.3.2	領域成長法	79
4.3.3	領域統合	80
4.3.4	大気光推定	81

4.3.5	重み係数の調節	82
4.3.6	彩度の重み係数を抑える	85
4.3.7	透過係数の算出	86
4.4	結果	89
5	ヒストグラム拡張とクラスタリングの組み合わせ	91
5.1	夜間画像の課題	91
5.2	手法の説明	92
5.2.1	不鮮明画像と鮮明画像の明度と彩度の特徴	92
5.2.2	2つのクラスタリング	95
5.2.3	L^* のクラスタリング	96
5.2.4	$L^*a^*b^*$ のクラスタリング	97
5.2.5	ヒストグラム拡張倍率の算出	98
5.2.6	L^* クラスタの拡張倍率の推定	98
5.2.7	L^* クラスタの再配置	99
5.2.8	L^* クラスタ再配置の効果	101
5.2.9	L^* クラスタ拡張の効果	103
5.2.10	a^*b^* クラスタ拡張の効果	104
5.2.11	クラスタのヒストグラム拡張	106
5.2.12	L^* クラスタのヒストグラム拡張	106
5.2.13	a^*b^* クラスタのヒストグラム拡張	106
5.3	結果	107
6	従来手法と提案手法の比較	110
6.1	定性評価	111
6.2	定量評価	131
6.2.1	コントラスト	131
6.2.2	色差	133
6.3	処理時間	137
第 III 部	降雪検出における提案手法	138
1	降雪画素検出の課題	138
1.1	降雪画素の特徴付け	138
2	従来手法	139
2.1	色クラスタリングと背景差分の組み合わせによる雪粒検出	139
2.1.1	手法の説明	139
2.1.2	色クラスタリングの結果	140
2.2	Histogram of Orientation of Streaks(HOS)	141
2.2.1	手法の説明	141
2.2.2	HOSの結果	143

3	提案手法	144
3.1	手法の説明	144
3.1.1	3D メディアンフィルタ	144
3.2	結果	145
第 IV 部 降雪状況判定における提案手法		149
1	降雪状況判定の課題	149
2	従来手法	150
2.1	検出画素数による降雨(雪)程度推定	150
2.1.1	手法の説明	150
2.1.2	結果	150
3	提案手法	151
3.1	手法の説明	152
3.1.1	降雪画素検出結果の合成	152
3.1.2	降雪画素検出位置の分布特性	154
3.1.3	降雪程度の判定	155
3.2	結果	156
第 V 部 結論		158

目 次

1	画像処理利用例	11
2	監視カメラのアプリケーション例	12
3	天気と画質の例	15
4	鮮明化と降雪検出	15
5	様々な雪粒	16
6	コントラスト向上の例	18
7	補正の例	22
8	ヒストグラム拡張の例	23
9	ヒストグラム平坦化の例	24
10	CLAHE の例	25
11	マルチスケール Retinex の例	26
12	霞除去の対象外画像例	27
13	明度補正の効果	28
14	霞除去による夜間画像の鮮明化例 1	29
15	霞除去による夜間画像の鮮明化例 2	30
16	雪粒と動体の位置	32
17	移動体の分布	32
18	雨粒雪粒の角度ヒストグラム	34
19	降雪検出の例	35
20	本手法の概要	36
21	鮮明化	37
22	動体検出	38
23	降雪と動体	39
24	様々なコントラスト	41
25	コントラスト改善の問題点	42
26	Koschmieder の法則	43
27	ダークチャンネルマップと透過係数マップ	45
28	明度補正の効果	46
29	ダークチャンネルのトーンカーブ	47
30	累積ヒストグラム	48
31	クリップ処理の例	49
32	線形補間の例	51
33	CLAHE の例	52
34	CLAHE の偽色	53
35	昼間の画像の Retinex の例	55
36	夜間の画像の Retinex の例	55
37	マルチスケール Retinex の例	56
38	極端に変わる明るさの例	58
39	提案手法 1 の流れ	59
40	ダークチャンネルとブライトチャンネル	60
41	透過係数の違い	62

42	大気光の影響	63
43	大気光の違いによるトーンカーブの変化	64
44	霞成分の分布例	65
45	大気光の推定	66
46	従来と本研究のトーンカーブの違い	68
47	重み係数の効果	69
48	透過係数ヒストグラムの違い	71
49	重み係数の効果	72
50	ブライツチャンネルの導入結果 1	73
51	ブライツチャンネルの導入結果 2	74
52	各領域で霞除去を行った例	75
53	高ダイナミックレンジ画像の霞除去	76
54	$L^*a^*b^*$ の彩度と色差	77
55	提案手法 2 の流れ	78
56	カラーエッジ抽出例	79
57	領域分割の流れ	80
58	画像の彩度	81
59	領域の彩度と情報エントロピー	82
60	重み係数算出のグラフ	84
61	彩度の鮮明化効果	85
62	色差による透過係数	87
63	従来の透過係数	88
64	霞除去の結果 1	89
65	霞除去の結果 2	90
66	不鮮明画像のヒストグラム	91
67	明度と彩度のヒストグラム	92
68	ヒストグラム拡張例	93
69	提案手法 3 の流れ	94
70	L^* のヒストグラム拡張の例	96
71	NN 法によるクラスタリング結果の例	97
72	L^* ヒストグラムの再配置の例	100
73	過分割の例	102
74	過分割の例 2	103
75	クラスタリングによる a^*b^* ヒストグラム拡張の例	104
76	図 87 の拡大図	105
77	本手法の結果	108
78	鮮明化比較結果 1	113
79	鮮明化比較結果 2	113
80	鮮明化比較結果 3	114
81	鮮明化比較結果 4	114
82	鮮明化比較結果 5	115
83	鮮明化比較結果 6	115
84	鮮明化比較結果 7	116

85	鮮明化比較結果 8	116
86	鮮明化比較結果 9	117
87	鮮明化比較結果 10	117
88	鮮明化比較結果 11	118
89	鮮明化比較結果 12	118
90	鮮明化比較結果 13	119
91	鮮明化比較結果 14	119
92	鮮明化比較結果 15	120
93	鮮明化比較結果 16	120
94	鮮明化比較結果 17	121
95	鮮明化比較結果 18	121
96	鮮明化比較結果 19	122
97	鮮明化比較結果 20	122
98	鮮明化比較結果 21	123
99	鮮明化比較結果 22	123
100	鮮明化比較結果 23	124
101	鮮明化比較結果 24	124
102	鮮明化比較結果 25	125
103	鮮明化比較結果 26	125
104	鮮明化比較結果 27	126
105	鮮明化比較結果 28	126
106	鮮明化比較結果 29	127
107	鮮明化比較結果 30	127
108	鮮明化比較結果 31	128
109	鮮明化比較結果 32	128
110	鮮明化比較結果 33	129
111	鮮明化比較結果 34	129
112	鮮明化比較結果 35	130
113	鮮明化比較結果 36	130
114	Michelson コントラストの比較グラフ	132
115	RMS コントラストの比較グラフ	132
116	$L^*a^*b^*$ 色差の比較グラフ	136
117	L^* 色差の比較グラフ	136
118	a^*b^* 色差の比較グラフ	137
119	背景クラスタと雪粒クラスタ	140
120	雨(雪)粒の角度ヒストグラム	143
121	3D メディアンフィルタの例	144
122	雪粒検出結果の例(雪粒が見えない画像)	145
123	雪粒検出結果の例(雪粒が見える画像)	146
124	雪粒検出結果の例(晴天画像)	147
125	雪粒検出の結果	148
126	雨粒画素と降雨量の関係	150
127	動体検出の違い	151

128	動体検出結果の合成	153
129	動体検出結果の分布	154
130	降雪程度の判定	156

表 目 次

1	天候と撮影画像の特徴	14
2	研究目的と問題点	19
3	鮮明化	21
4	雪粒の特徴	31
5	領域数の変化	80
6	コントラスト改善の定量評価	109
7	鮮明化アルゴリズムの特性	110
8	提案手法 1 のパラメータ設定値	111
9	提案手法 2 のパラメータ設定値	112
10	提案手法 3 のパラメータ設定値	112
11	コントラスト	131
12	色の許容差	133
13	原画像と鮮明化画像の平均色差	135
14	原画像と鮮明化画像の色差	135
15	処理時間	137
16	提案する雪粒検出手法のパラメータ設定値	147
17	雪粒検出の Precision Recall	148
18	降雪程度判定の特徴	155
19	提案する降雪程度判定手法のパラメータ設定値	157

第I部 序論

1 研究の背景

1.1 監視カメラと人々の生活の密接な関係

1.1.1 カメラの普及と多様な活用

画像処理は従来、人物を認識する公共の防犯カメラ、地形データを集積するリモートセンシング、映画やテレビに利用されるCG映像作成、超音波診断装置やMRA等から病原を診断する医療応用、月面や遠くの衛星を映した写真の解析等、様々な高度科学技術に利用されていた。近年では、4Kや8Kテレビ等の高画質画像生成、訪問者やペットの様子を確認する家庭内監視システム、カーナビの渋滞情報に利用される交通監視、webの検索エンジンや人工知能の開発に利用される画像検索、カメラを搭載して自動走行するインテリジェントカー、笑顔で自動的に写真を撮るデジタルカメラ、目を大きくしたり肌の色を白くしたりするプリクラ、カメラに映った2人の目や鼻や口等の顔のパーツを取り換えるスマートフォンアプリケーション等、人々の生活で実感出来る内容にも画像処理技術の応用範囲が広がっている。これらを実現するために画像処理では、様々な対象物や特徴を検出したり認識したりしている。防犯カメラでは人物、車載カメラでは周辺の状態、画像検索では画像の特異的な特徴、医療画像ではガン細胞等を検出する事で、各アプリケーションを実現している。図1に、画像処理アプリケーションの利用例を示す。図1左図は顔認識による人物検出と年齢推定、図1右図はがん細胞検出例であり、それぞれ図1はwebページ([1]、[2])に掲載されている画像である。しかし、これらを実現するためには、鮮明な高画質画像が必要となる。劣化した低画質の画像では、各対象物を正確に認識したり各特徴を抽出したりする事が出来ないため、各アプリケーションの実現は難しい。画像処理の各アプリケーションでは、低画質画像の問題を解決する事が重要となっている。

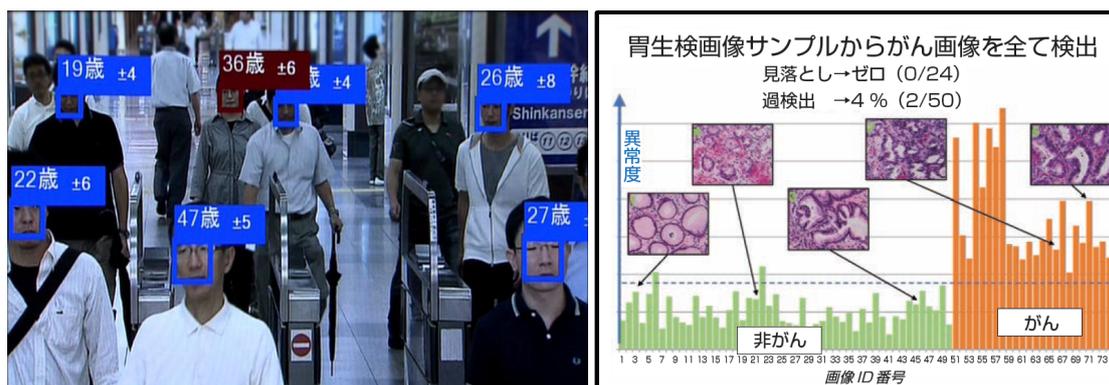


図 1: 画像処理利用例

1.1.2 人々の安全と監視カメラ

現在では様々な分野でカメラを利用したアプリケーションが役立っているが、特に防犯カメラの機能の開発が進んでいる。防犯カメラは空港や駅等の公共施設だけではなく、コンビニやオフィスビルにも設置され、特定人物を自動認識して所在を確認したり、特定の顔を認識してゲートを自動開閉する事にも利用されている。また、街中に防犯カメラは設置され、犯罪捜査にも利用されている事は、ニュースでもよく目にする。一般家庭用では、防犯カメラを玄関に設置して訪問者を確認したり、自分の顔でドアの鍵を開けるオートロック機能に利用したり、部屋の中にカメラを設置してスマートフォンから外出時の部屋への侵入者の検知やペットの様子を確認したりする事に利用されている。図2左図は、webページ ([3]) に掲載されている画像で、家庭内の監視カメラで玄関や部屋の様子を携帯端末から確認出来る「ドアホン」の仕組みを表した図である。この「ドアホン」は防犯だけでなく、スマートフォンで来客者に対応する事も可能で、一般家庭内にカメラが普及するきっかけになっている。

自動車に搭載したカメラの機能も盛んに開発されている。カメラで自動車の周辺を録画する事で、事故が起きた時の原因解析に利用されている。また、カメラ以外のセンサと連携した、自動ブレーキの機能も実用化されている。さらに現在では、車線、歩行者、道路標識等を認識してハンドル操作がいらぬ自動運転機能も研究されている。図2中図は、webページ ([4]) に掲載されている画像で、車載カメラによる道路標識と走行車線の検出結果例である。

災害対策を目的としたカメラシステムは、状況を認識する段階には至っておらず、現在は設置段階である。図2右図は、豪雨による土砂崩れに対応するため、監視カメラの増設を国土交通省が指示した記事を紹介するwebページ ([5]) に掲載された画像である。危険発生が予想される場所に監視カメラの設置を進める施策は、今後も広まっていく事が期待されている。監視カメラの設置により、火山の噴火や津波・高波の様子等が遠隔地より確認でき、将来的には、監視カメラの映像を各人のスマートフォンで確認出来るようになる事が期待される。また、自動で状況を判断する機能が追加されると、危険な場所のみを提示出来るようになる。現在では、地震予報が携帯電話で自動配信される機能が実現されているが、将来は災害場所の画像の確認がスマートフォンで出来るようになると思われる。

監視カメラは、主に防犯や安全対策等、人命を守るために研究開発されているが、災害対策は十分とは言えない。現在は、予め周辺情報を調査してハザードマップを作成したり、避難場所や避難経路を決めたり、避難訓練を行ったりする対策を施しているが、災害が予測外の状況に発展した場合、この事前調査が裏目に出る場合もある。東日本大震災でも、周囲の状況が分からずに危険な箇所を通過してしまい事故に遭って多数の人々が亡くなっている。自然災害の被害や犠牲を少なくするためには、各個人で身近な現状を把握する仕組みが重要となる。



図 2: 監視カメラのアプリケーション例

1.1.3 認識や判断と画質向上の密接な関係

監視カメラの大きな役割の1つは、人間の代わりに務める事である。まずはカメラを各地に設置して、人間と同じ様に特定の対象物を検知/認識したり、状況を判断したりする。これにより、遠隔地からの状況確認が可能となり、さらに人間が見なくても適切な判断を自動で行う事が出来る様になる。現状の監視カメラによる災害対策は、カメラの設置段階である。予め危険な場所や様子を確認したい場所にカメラを設置しておけば、災害時に危険を冒す事無く、災害状況の確認が可能となる。今後は、監視カメラの画像から各災害状況を適切に判断する機能の開発が期待されている。

しかし、防犯であれば犯人の顔や服装や歩容、事故や災害対策であれば被害状況、車の自動運転であれば障害物等を正確に検出するため、画像認識アプリケーションにとって画質は重要である。画質が悪いと、事態を正しく認識したり判断したりする事が難しくなり、監視装置は正しく機能しなくなる。しかし、自然災害時は画質が悪くなる事が多い。例えば、よく雪が降る北国では、降雪時に自動車事故や電車の事故が多いため、画質が悪い時こそ監視カメラの機能が正しく動作する必要がある。視界の悪さと危険な状況は密接な関係にあり、危険な状況こそ安全対策が必要である。

しかし、画像処理の認識/検出アプリケーションの多くは、災害が起きていない鮮明な画像のみを対象としており、監視カメラで天候状況を把握し、自然災害に対応するための研究は、実用段階に至っているとは言えない。図1や図2中図からも分かる様に、現在の各画像処理アプリケーションは、鮮明な画像のみを扱っている。例えば、道路交通監視カメラ、自動車運転支援システム、不審者侵入検知システム等において、不鮮明な画像では、認識/検出率が低下し、性能に一部制限がかかったり性能が低下したりする。

監視カメラで撮影した画像が低画質になる原因は様々であるが、屋外を撮影する場合は天候の影響が一番大きい。晴天の場面と曇天の場面では、同じ昼間でも明るさが異なる。さらに悪天候時、特に豪雨時や豪雪時では明るさの変動だけでなく、雨粒や雪粒も混ざる。また、夜は曇天よりも暗く、画像に何が映っているか視認出来ない。晴天時よりも悪天候時や夜間の方がより危険なため、より多くの対策が必要であるが、現在の画像処理アプリケーションは、コントラストが低い低画質画像に対して十分に動作しない。よって、屋外画像処理による認識や判断において、画質向上のための画像鮮明化が必要不可欠である。状況を自動で判断しない場合でも、人間の判断の助けになる鮮明な画像を監視カメラが提供する効果は非常に大きい。

現状の各認識アプリケーションは通常、画像が不鮮明にならない状況で動作する。しかし、豪雨や豪雪や火山灰等の自然災害が発生すると視界が不明瞭になるため、屋外を撮影する自然災害対策の監視カメラアプリケーションは、視界が不明瞭な悪天候時に動作しなければならず、画像の鮮明化によりコントラストを改善した画像を安定して得る事が重要である。しかし、画像鮮明化は従来から研究され様々な手法があるにも関わらず、様々な画像のコントラストを効果的に改善する手法は無く、画像鮮明化は難しい課題である。

1.1.4 監視カメラに期待される能力

視界が酷く悪い時ほど、事故が起きる確率は高く、危険な状況になり易いため、安全確保を目的とした監視カメラアプリケーションにおいて、危険な状況の時こそ効果を発揮する事が重要である。屋外監視カメラアプリケーションでは、悪天候への対策が必要不可欠と言える。

表1に、天候が画像に与える影響を纏める。晴天の場合は、画像中の各対象物は様々な色彩を持ち視認も容易であるが、雨天や降雪等悪天候になる程、画像から色彩は失われ、対象物の存在すらも視認出来なくなる。晴天画像と降雪画像では、画像特徴が大きく異なるため、晴天画像で動作するアプリケーションをそのまま降雪画像に適用する事は出来ない。

現在、屋外画像処理認識アプリケーションは、視界が明瞭な晴天時に動作する段階まで開発され実用化されているが、残念ながら視界不明瞭な状況で動作する段階には至っていない。しかし、屋外画像を撮影する監視カメラアプリケーションにとって、悪天候の状況は避けられない。自然災害の対策に取り組むためには、現在解決出来ていない、視界不明瞭な状況でも動作するアプリケーションが必要である。視界不明瞭な天候で1番酷い状況は、豪雪や吹雪である。吹雪の時に外に出ると、人間でも顔を上げられない程雪が降り、前を見ても一面灰色に見えて、向こうに何かがあるか分からない。しかし、その視界不明瞭の 때가1番危険な状況であり、この時に危険を認識する事が、今後の監視カメラに期待される能力である。よって本研究では、降雪画像を扱い、画像の危険状況を判定する研究を行う。本研究では、雪粒を検出し、雪粒の多さで降雪の酷さを表す。

表 1: 天候と撮影画像の特徴

天候	見た目の特徴	画像処理から見た特徴
晴天	空は青く明るくて各対象物が鮮明に見える 影がある	明度ヒストグラムの幅が広い エッジが強い 彩度が高い
曇天	空は暗く灰色で各対象物が鮮明に見える	明度ヒストグラムの幅が狭い エッジが弱い 彩度が低い
雨天	空は暗く灰色で雨粒によって各対象物が見え辛い	明度ヒストグラムの幅が狭い エッジが弱い 彩度が低い
降雪	空は暗く灰色で雪粒によって各対象物が見え辛い 雪粒で対象物の色が薄くなる	明度は灰色に集中する エッジが弱い 彩度が無い
吹雪	画像全体が灰色で何も見えない	明度は灰色に集中する エッジが無い 彩度が無い

1.1.5 悪天候と画像不鮮明化

天候を把握する分野の研究はまだ少ないが、その中に降雨量を判定する研究がある。この研究は、画像から降雨画素を検出し、検出数に応じて降雨量を計測するアルゴリズムである。

しかし、悪天候下で撮影された画像は、雨粒や雪粒、霧等により不鮮明になる傾向にある。図3の3つの画像は、様々な天候の下で同じ位置を撮影した画像である。図3(a)は晴天、図3(b)は曇天、図3(c)は降雪の時に撮影した画像である。天候が悪くなると、画像中の遠くの建物は見えなくなり、画像全体の色彩が失われていく。雪粒は図3(c)にしか存在しないが、この画像から雪粒を視認する事は難しい。図3(a)は視認性は高いが、晴天画像のため雪粒がある事は珍しい。雪粒を検出するという事は当然、図3(c)の様な不鮮明画像を扱う事になる。



図 3: 天気と画質の例

屋外画像処理において、画像の鮮明化は重要な研究テーマであるが、現状の画像鮮明化の技術は、要求される性能を満たしていない。このため本研究では、降雪の影響を受けた不鮮明画像から降雪状況を判定する手法を検討する。図4に例を示す。図4(a)は降雪による不鮮明画像、図4(b)は図4(a)に鮮明化処理を行った画像、図4(c)は雪粒検出結果画像である。本論文では、画像の鮮明度を調べて、画像が不鮮明であれば図4(b)の様に画像を鮮明にする手法を提案する。その後、鮮明にした画像から降雪画素を高速動体として図4(c)の様に検出し、検出分布を解析する事で降雪の状況を判定する手法を提案する。本研究では、図4(c)の様に降雪画像から検出した雪粒領域を「雪粒画素」と呼ぶ。



図 4: 鮮明化と降雪検出

1.1.6 雨粒検出と雪粒検出の現状

雨粒検出の分野では、降雨量を判定するためだけでなく、雨粒画素の除去を目的とした研究が多い。これらの研究では、雨粒の特徴を仮定し、監視カメラ画像から該当する特徴を持つ領域を抽出する事で雨粒画素を検出する。しかし、殆どのアルゴリズムは雨粒が鮮明に目視出来る画像を扱っており、豪雨により不鮮明な画像を扱うものは少ない。また、雪粒と雨粒の特徴は同一または類似すると仮定する手法が多く、雪粒画素に特化したアルゴリズムも少ない。

雨粒は上空から地面に向かって真っ直ぐに落ちるが、雪粒は直線運動するとは限らない。しかし、雪粒は直線的に移動すると特徴付けられる事が多い。雨粒画素と雪粒画素の特徴は本来異なり、雨粒画素の検出手法で雪粒画素を安定に検出する事は困難である。雨粒の形は、風の影響を受けても全ての雨粒が落ちる方向は同じになるため、検出された時の雨粒の形は全て同じ方向に傾く。しかし、雪粒は風の影響を強く受けて各雪粒は様々な方向へ動くため、雨粒検出で仮定した特徴をそのまま雪粒検出へ応用する事は出来ない。

図5に、雪粒検出の例を示す。図5(a)は原画像、図5(b)は鮮明化画像、図5(c)は雪粒検出結果である。図5上段は原画像の雪粒が見え易い画像、図5下段は原画像の雪粒が見え難い画像である。図5(c)を見ると、直線的な雪粒もあるが、丸い雪粒や2つの雪粒が重なって瓢箪型になっていたり、形は様々である。直線的な雪粒の形の傾きは、水平や垂直、右斜めや左斜め等様々な方向に傾き、形の方向が一定にはなっていない。そのため、雨粒と雪粒を類似する特徴とする事は不適切である。

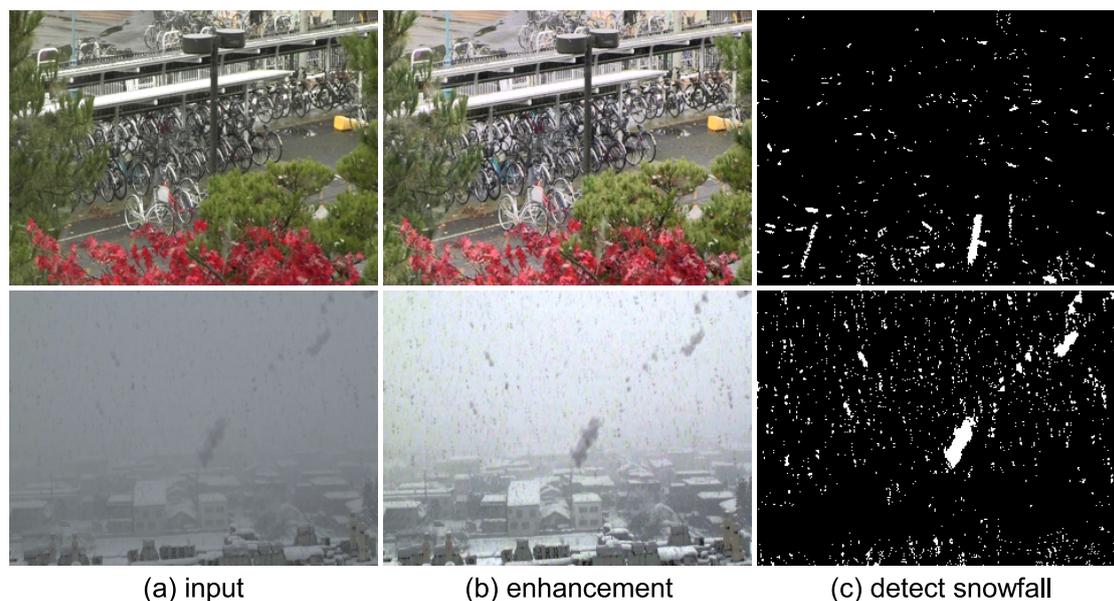


図5: 様々な雪粒

1.1.7 画像鮮明化と偽色

人間にとって見易い画像とは、明るい色と暗い色の対比バランスが良い画像である。各色が程良く対比される事で、お互いに識別し易くなり、人間は対象物を認識する事が出来る。この対比バランスが悪く各色が同じ様な色ばかりになると、各色がぼやけて見えて、人間は対象物を認識する事が出来なくなる。また、逆光によって人の顔が暗く映ったり、照明が強すぎてライト付近が真っ白に映ったりすると、見辛い画像になってしまう。この様に色のバランスが悪くなった画像を見易い画像に補正する処理が、コントラスト改善等に代表される画質補正処理である。

画質補正処理の中でも近年、悪天候画像の鮮明化に関する研究が盛んに行われている。その処理は「霞除去」と呼ばれ、近年盛んに行われている研究であり、悪天候により発生した「霞」の成分を不鮮明な画像から除去して画像を鮮明にする処理である。また、コントラストを向上し、画質を改善する画像処理アルゴリズムが、古くから研究されている。この処理は、逆光や光の鏡面反射等により、撮影した写真が暗くなりすぎたり明るくなりすぎたりする場合に、撮影画像の明るさや色合いのバランスを補正して、画像を見易くするアルゴリズムである。

しかし、画像鮮明化アルゴリズムには、コントラストを向上した結果、原画像全体の明るさのバランスを大きく崩してしまう明度整合 (brightness preserving) の問題があり、コントラストが高まるが本来の明るさからかけ離れた画像に補正される場合がある。これは明るさだけでなく色合いにも同じ事が言え、本来の色とは違う画像に補正される事を本論文では「偽色の発生」と呼ぶ。画像を鮮明にする時には、コントラストを上げるだけでなく、明るさや色の補正結果にも注意を払わなければならない。

図 6 に、様々な鮮明化アルゴリズムの結果画像例を示す。図 6(a) は原画像、図 6(b) は霞除去による結果画像、図 6(c) はヒストグラム拡張による結果画像、図 6(d) はヒストグラム平坦化による結果画像である。図 6(b) は、遠くの建物が見える様になり、3 種類の結果画像の中で 1 番対象物を鮮明にしている。しかし、色彩が強すぎて特に空は赤や緑や水色等、本来空には無い色が多数発生している。これが「偽色」である。図 6(c) は、図 6(a) と殆ど変わらない結果で、3 種類の中で 1 番鮮明化効果が低い。偽色は発生していない。図 6(d) は、図 6(b) ほどではないが、空に偽色を発生させ、さらに画像下部の建物が暗くなりすぎている。この様に、補正した明るさが本来の明るさとは異なってしまう問題が、明度整合の問題である。しかし、図 6(c) よりも鮮明化効果は高い。鮮明化アルゴリズムにおいて、鮮明化性能と偽色抑制性能はトレードオフであり、どれも一長一短である。

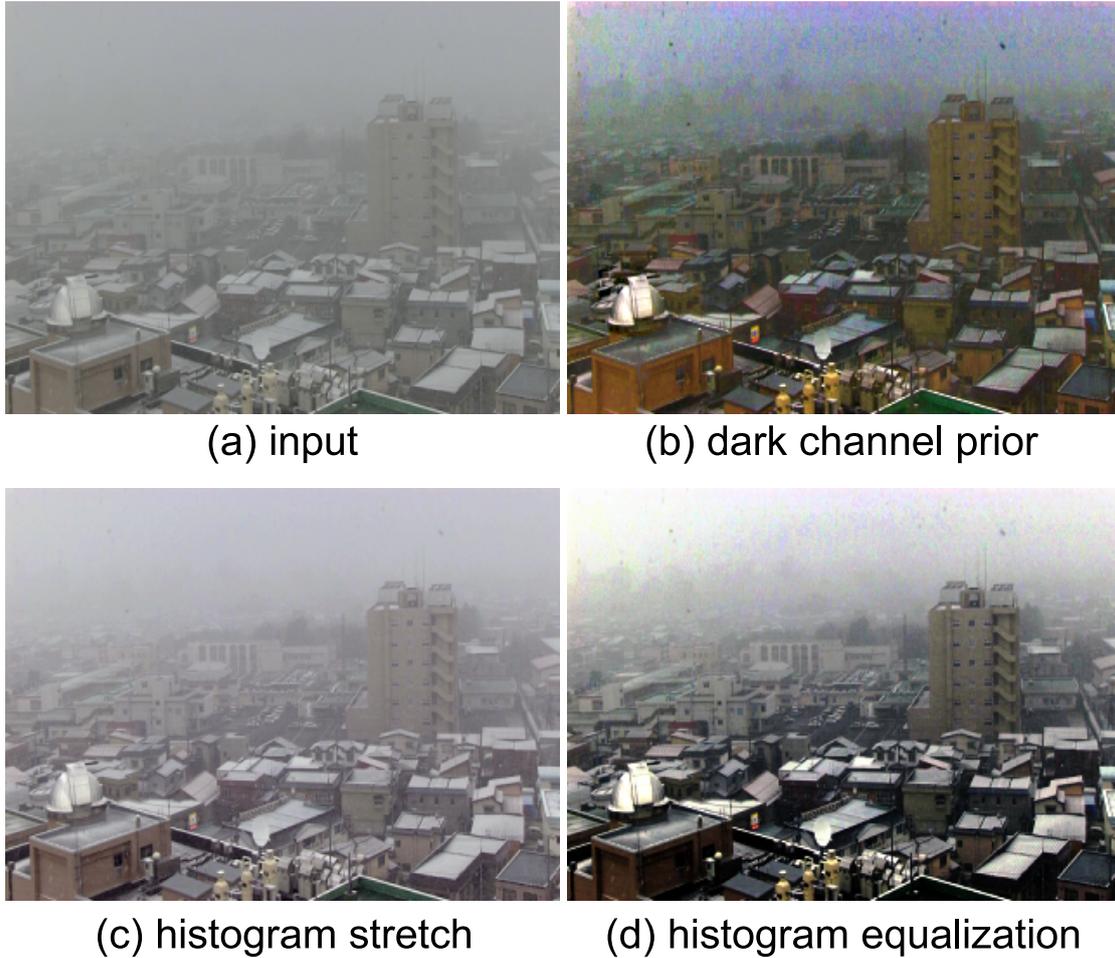


図 6: コントラスト向上の例

1.1.8 降雪状況判定の重要性

豪雪地帯に住む人々にとって、雪への対策は重要課題である。そこで本論文では降雪に注目して、吹雪で視界不明瞭な状況でも天候状況を把握する手法を提案する。画像を鮮明にしてから雪粒画素を検出し、雪粒検出結果の分布から画像の降雪状況を把握する。このため、本論文では「画像の鮮明化」「雪粒画素の検出」「降雪状況の判定」の3つの処理に対する新しい手法を提案する。降雪の状況が判定出来れば、降雪災害の現状を安全な場所から把握出来る様になると考える。これにより、屋外監視カメラによる天候判定機能や、既に開発されている認識/検出アプリケーションの性能向上の一助になる事を目指す。

2 従来手法

本研究で取り組む3つの課題「画像の鮮明化」「雪粒画素の検出」「降雪状況の判定」は、どれも難しい問題である。「画像の鮮明化」においては、今までに多数の手法が提案されているが、「雪粒画素の検出」に応用出来る有用な手法は無い。本論文では、「降雪状況の判定」に利用出来る「画像の鮮明化」と「雪粒画素の検出」の手法を提案する。

本論文で提案する手法を説明する前に、各課題における従来手法の概要を説明する。表2に、3つの課題における従来手法の問題点を示す。

画像の鮮明化では、明度整合の問題と偽色の発生等の2つの重要な課題がある。原画像の不鮮明さを全く考慮しないで鮮明化処理を行うと、原画像にとって鮮明化効果が強い場合に原画像の色合いを大きく崩してしまうため、空や道路や壁等の単色で表される大きな対象物に、不自然な明るさと色が現れる。その他の課題としては、霞で覆われた不鮮明画像は明るくなると仮定する手法では、明るい色程暗くする事で鮮明にする手法のため、後処理で明度補正が必要となる。この明度補正処理は、結果画像に大きな影響を与えるため、各画像に適した処理を利用する必要がある。また、画像をブロック分割して、各ブロックでヒストグラム平坦化による鮮明化を行う手法では、ブロックノイズを除去するための線形補間によって、対象物の境界線にハロー効果が発生する問題もある。この様に、従来の鮮明化手法には多数の問題がある。

表 2: 研究目的と問題点

目的	問題点
画像の鮮明化	白い対象物に偽色が発生 空の様な広い領域に偽色が発生 後処理に明度補正処理が必要 明度整合の問題 ハロー効果の出現
雪粒画素の検出	雪粒と雨粒は類似特徴 雪粒が見える鮮明画像が必要 雪粒を小さいと仮定 雪粒の移動軌跡は直線的と仮定
降雪状況の判定	雨(雪)粒以外の動体が無い事が必要 鮮明画像が必要

雪粒画素の検出の課題は、雨粒と雪粒の特徴を類似させている事と、雪粒が鮮明に白く見えている画像が対象である事の2点である。雨粒検出手法の副次的な効果という位置づけで扱う論文も多く、雪粒検出はまだ未発達分野である。雨粒はほぼ球体で移動速度も速く直線的な移動軌跡となるが、雪粒は球体とは限らず移動速度も雨粒より遅い。雨粒は風の影響を受けると画像中の全ての雨粒の落下方向が同じになる傾向にあるが、雪粒は雨粒より風の影響を受けやすく、各雪粒によってその影響の受け方は異なり、落下方向は統一されず、移動軌跡も直線的になるとは限らない。よって、この様な雨粒の特徴を雪粒にも適用する事は出来ない。

降雨(雪)状況は、雨(雪)粒を動体として検出して、その検出画素数の多さで判定される。しかしこの方法は、雨(雪)粒の誤検出が無い事が前提で、さらに画像が鮮明で雨(雪)粒が容易に視認出来る必要がある。雨(雪)粒の検出画素数で状況を判定する手法は自然な方法であるが、これでは雨(雪)粒が見えなくなる程酷い豪雨や豪雪の状況に適用出来ない。そのため、まずは雨(雪)粒を視認出来る様に、不鮮明な画像のコントラストを上げる必要がある。さらに、雨(雪)粒以外の動体に対応する事も必要である。単純に動体検出の画素数で状況を判定してしまうと、雨(雪)粒が無くてもその他の動体を検出した時に降雨(雪)があると判定してしまう事になる。本論文では、その他の動体を検出しても、降雪状況の判定に影響を与えない手法を提案する。

2.1 コントラスト改善

霞除去の様に不鮮明な画像のコントラストを改善するアルゴリズムは、古くからある画像処理アルゴリズムの基本的な研究分野である。画像のヒストグラムを操作する手法、光の散乱モデルを利用する手法、人間の視覚特性を利用する手法等、多数ある。中でもヒストグラム平坦化を基本とする手法 ([6-11]) が多数提案されている。しかし、ヒストグラム平坦化は強力にコントラストを改善する一方で、画像の色のバランスを不自然にする問題もある。

人間は周辺の色との違いから注目する中心の色を認識するという、人間の視覚特性を利用した理論に基づく手法 ([12, 13]) も提案されている。この手法は、周囲が均一な色特徴の背景で、対象とする物体がある程度小さい場合に、画像を効果的に鮮明化する。しかし、計算時間が膨大である。

また、近年ではダークチャンネルを使用した手法の研究も盛んに行われている ([14-31])。これらの手法は、大気中における光の散乱が与える各対象物への影響をモデル化した [32] に基づいた手法であり、簡単な計算で色味の強さを計算して鮮明にする度合いを調節出来るが、白い対象物へ対応出来ない問題がある。

コントラスト改善には各種手法があるが、それぞれ問題点もあり難しい分野である。表 3 に、主なコントラスト改善手法の問題点について纏める。

表 3: 鮮明化

手法	利点	問題点
補正	簡単な関数で定義可能	部分的に明るくまたは暗くする事は出来ない
ヒストグラム拡張	画像の色バランスを保つ	高ダイナミックレンジ画像では効果が無い
ヒストグラム平坦化	任意の画像で鮮鋭化効果が高い	画像の色バランスを崩す
Retinex	高ダイナミックレンジ画像に適用出来る	結果画像の画質は平滑化フィルタの強度に依存する ハロー効果を出す
マルチスケール Retinex	平滑化フィルタを複数用意して任意の画像に対応出来る	鮮明な画像を不鮮明にする
CLAHE	任意の画像で鮮鋭化効果が高い	画像の色バランスを崩す
ダークチャンネル	計算が単純	白い対象物に偽色を出す 計算時間が長い

2.1.1 補正 (トーンカーブの概念)

コントラスト改善の代表的な手法に、人間の視覚特性に基づく補正がある。補正とは本来、イメージセンサが受け取った光の量を電気信号に変換した色と、人間が認識する色との関係のずれを補正する処理である。人間は、暗い色の差には敏感に反応し、明るい色の差には鈍感であり、この特性は指数関数で表現出来る。一方カメラ等では、イメージセンサの光電変換によって光エネルギーを電気エネルギーに変換し、エネルギー量によって画面の色を決める。この、人間の感覚とイメージセンサやモニタ等の機器の特性の違いを補正する処理が補正である。補正量は、各機器で独自に行われ、各機器の画質を表す指標にもなっている。しかし現在では、人間と機器の特性の違いを補正する事だけではなく、デジタル画像処理のコントラスト改善アルゴリズムとしても利用されている。

補正は、式 (1) で表される。 I は原画像、 O は結果画像、 x は画素位置、 γ は補正係数である。 γ を 1 未満にすると画像は暗くなり、1 より大きくすると明るくなる。 γ が 1 の時は変化しない。

しかし、補正は画像全体が暗すぎるまたは明るすぎる場合にしか適用出来ないアルゴリズムである。画像中に明るすぎる箇所と暗すぎる箇所の両方がある場合、どちらか片方のコントラストしか改善出来ない。

図 7 に、補正の結果画像とトーンカーブを示す。図 7(a) は原画像、図 7(b) は γ が「0.5」の場合の結果、図 7(c) は γ が「3」の場合の結果画像、図 7(d) は様々な γ 値による式 (1) のトーンカーブのグラフを表す。図 7(d) では、 γ を 0.5 から 3 まで変化させたトーンカーブを示す。図 7 から、(b) は画像全体が暗く、(c) は画像全体が明い事が分かる。

トーンカーブとは、入力画素値と出力画素値の関係をグラフ化した曲線の事であり、入力と出力の関係が分かり易いため、画像の画質を制御する時によく使われる。トーンカーブを表す式を設計してコントラスト改善を行う手法は、コントラスト改善の最も基本の手法である。トーンカーブは、比例直線よりも左上に曲線があると暗い箇所のコントラストを改善し、比例直線よりも右下に曲線があると明るい箇所のコントラストを改善する事を示す。

$$O(x) = 255 \left(\frac{I(x)}{255} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (1)$$



図 7: 補正の例

2.1.2 ヒストグラム拡張

画像のコントラストを改善する手法に、ヒストグラムを操作する方法がある。その1つは、ヒストグラム拡張である。この手法は、画像の色のヒストグラムの幅を広げて、コントラストを改善する。コントラストが低い画像は、全画素がある色に集中する。このような画像のヒストグラムの幅は狭い。一方、コントラストが高い画像には、暗い色から明るい色までであるため、ヒストグラムの幅は広い。よって、ヒストグラムの幅を広げると、コントラストが改善する。

図8に、ヒストグラム拡張の結果画像とヒストグラムを示す。図8(a)は原画像、図8(b)は結果画像、図8(c)は(a)と(b)のヒストグラムである。図8(c)の青線は(a)のヒストグラム、赤線は(b)のヒストグラムである。図8上段は昼間の画像、図8下段は夜間の画像である。図8上段では、降雪で不鮮明な画像のコントラストが改善して見易くなっている。しかし、図8下段ではほとんど変わらず、暗くて不鮮明な画像のままである。なぜなら、ヒストグラム拡張は、明るい画素と暗い画素両方が存在する画像に、効果が無いからである。ヒストグラムの変化を見てみると、ヒストグラム拡張により、図8(c)上段はヒストグラムの幅が広がっているが、図8(c)下段はヒストグラムが殆ど変わっていない事が分かる。これは、図8(c)下段の青丸の位置に、照明に該当する画素が存在し、これ以上明るい方向へは拡張出来ないからである。青丸とヒストグラムの山の間には画像に存在しない箇所があり、この箇所が全く利用されないため、コントラストが改善しない。この様にヒストグラム拡張には、ヒストグラムの内側が凹んでいて、画像中に明るい画素と暗い画素はあるが中間の明るさの画素がない場合に、不鮮明な画像のコントラストを改善出来ない弱点がある。

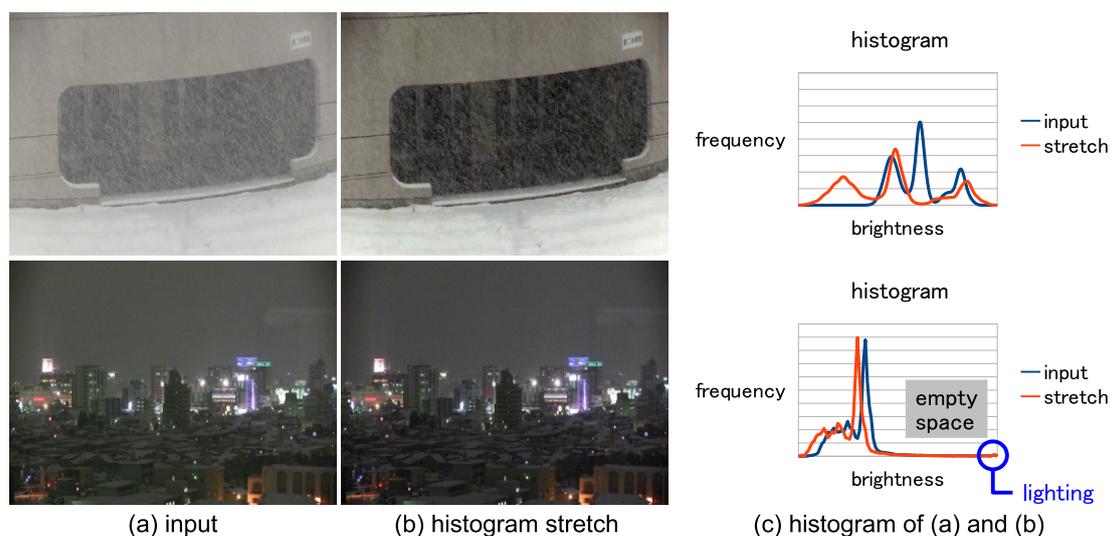


図8: ヒストグラム拡張の例

2.1.3 ヒストグラム平坦化

コントラストが低い画像のヒストグラムは、ある色に集中して形が偏りピークを持つ。コントラストが高い画像には、様々な色の画素があり、ヒストグラムの形はピークを持たずに平らになる。ヒストグラム拡張はヒストグラムの幅を広げたが、ヒストグラム平坦化はヒストグラムの形を平坦にしてピークを作らない様にする手法である。ヒストグラム平坦化は、ヒストグラムの各ビンの頻度を同じにする事でコントラストを向上させる。

ヒストグラム平坦化は、全色のヒストグラム値が同じ場合に、コントラストが理想的であると考えられる手法であるが、実際にはヒストグラムの各ビンの頻度を同じにする事は出来ないので、累積ヒストグラムの形が直線になる事を利用して、ヒストグラムを変形させる。つまり、ヒストグラム平坦化は、累積ヒストグラムを直線に沿う様な形に変形する処理である。

図9に、ヒストグラム平坦化の例を示す。図9(a)は原画像、図9(b)は結果画像、図9(c)は(a)と(b)のヒストグラムである。図9(c)の青線は(a)のヒストグラム、赤線は(b)のヒストグラムである。図9上段は昼間画像、図9下段は夜間画像である。ヒストグラム拡張とは異なり、どちらの画像も鮮明になっている事が分かる。しかし、鮮明化の効果が強すぎて、上段では壁の部分に灰色に分離した不自然な箇所があり、下段では照明が真っ白になったり夜空にノイズの様な色ずれが生じていたりしている。ヒストグラム平坦化は、色が不自然になる明度整合の問題はあるが、コントラスト改善の効果は強力なので、現在では改良版が多数あり最も利用されているアルゴリズムである。ヒストグラムの変化を見ると、図9(a)も(b)も、ヒストグラムのピークが無くなり、各ビンでヒストグラム値が大体同じくらいに平坦化された事が分かる。これは、暗い色から明るい色まで様々な色を結果画像に使っている事で、コントラストが上昇した事を示している。しかし、この事は逆に原画像には無かった色を無理矢理使っている事でもある。原画像の構成上、必要無い色を使う事は、明度整合の問題の原因になる。ヒストグラム平坦化に基づく手法 ([6, 8-11]) は、この点の改良に重点を置いている。

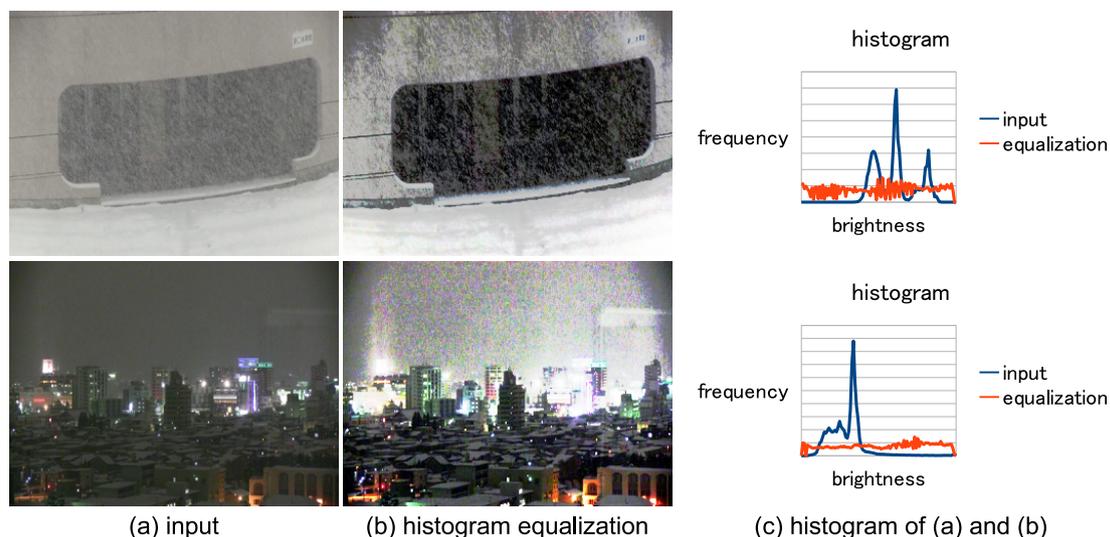


図9: ヒストグラム平坦化の例

2.1.4 局所制限ヒストグラム平坦化 (CLAHE)

ヒストグラム平坦化の改良版として代表的な手法は、局所制限ヒストグラム平坦化 (CLAHE) ([6, 7]) である。ヒストグラム平坦化における明度整合の問題の一因は、空や壁や道路等、同じ様な色が広く分布する箇所のコントラストを無理矢理高める事にある。CLAHE では、原画像をブロック分割して、コントラストを上げる必要が無いブロックのヒストグラム平坦化の効果を弱める事で、明度整合の問題を回避する。累積ヒストグラムを計算する前に、予めヒストグラムのピークを切り取り、ヒストグラム全体に再分配する事で、平坦化の効果を調節する。ピークを沢山切り取って各ヒストグラムビンへの再分配量を多くすれば平坦化の効果は弱まり、ピークを少しだけ切り取って再分配量を少なくすれば平坦化の効果は高まる。

しかし、画像全体が霞んでおり、空や道路など似た色が広がっている箇所がある場合には対応出来ない。手法 [6] は、鮮明化が必要ない画像において、空や道路等に明度整合の問題を起こさないだけである。不鮮明画像に対して平坦化の効果を強めると、偽色が発生する。また、線形補間によるブロック間の色漏れも問題である。ブロックノイズを除去するためにブロック間で各ヒストグラムを線形補間しているが、これによりブロック境界でハロー効果の様に色漏れが発生する。この色漏れは、隣接ブロックのヒストグラムと大きく異なるブロック境界で起きる。

図 10 に CLAHE の例を示す。図 10(a) は原画像、図 10(b) はブロック分割してヒストグラム平坦化をした結果画像、図 10(c) は線形補間後の結果画像である。図 10(b) ではブロックノイズがあるが、ヒストグラムの線形補間によって図 10(c) では除去されている。図 10(c) 上段から、画像全体に薄く偽色が発生している事が分かる。これは、図 10(b) で偽色が発生して、線形補間により偽色が平滑化されたためである。また、小さく映っている人物周辺等で色漏れが発生し、周辺と異なる明るさになっている。図 10 下段では、画像下部の赤い葉と緑の葉の間で、色の漏れが発生している。これは、ヒストグラムの線形補間により、各ブロックが隣接ブロックのヒストグラムの影響を受けているためである。

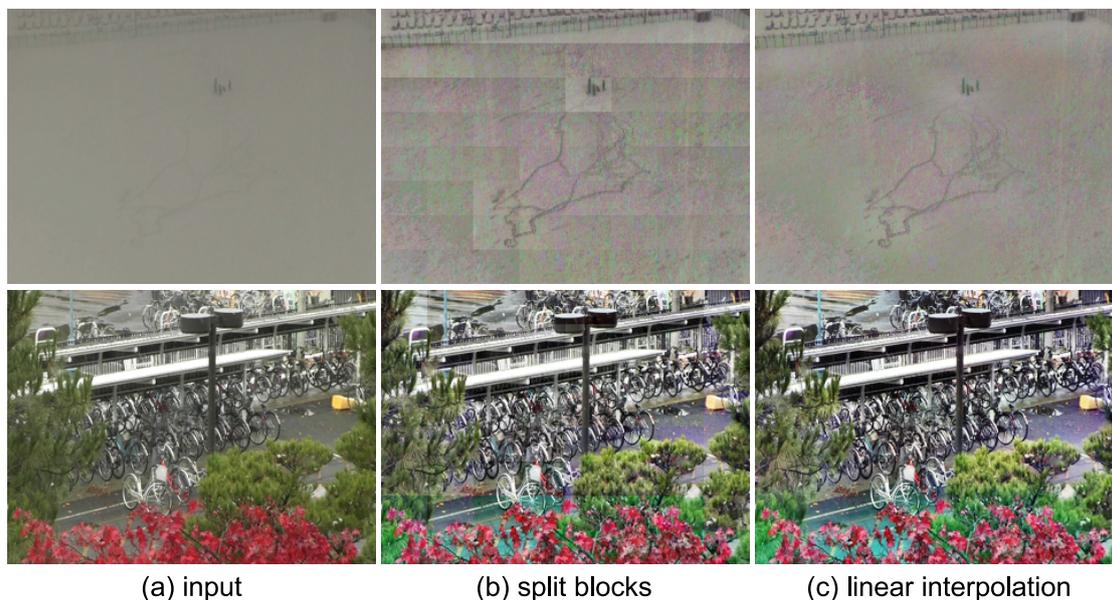


図 10: CLAHE の例

2.1.5 Retinex 理論

人間が色を認識する時、周辺の色に影響されるという視覚特性を利用した Retinex 理論に基づく手法 [12, 13] もある。注目する中心画素は周辺画素の影響を受けて人間に認識される事から、中心画素と周辺画素との色の比率を強調する事で画像を鮮明にする手法である。

図 11 に、マルチスケール Retinex の結果例を示す。図 11 上段は原画像、図 11 下段は結果画像である。図 11 の 1 番左の画像を見ると、マルチスケール Retinex は画像全体が不鮮明で対象物が小さい画像を鮮明にする事が分かる。しかし、元々鮮明な画像を不鮮明にしてしまう場合もあり、照明がない夜間画像を鮮明にする事も出来ない。



図 11: マルチスケール Retinex の例

2.1.6 Koschmieder の法則

「Koschmieder の法則」 ([32]) とは、カメラと対象物の距離が長いほど光の散乱が起きる体積が広くなるため色味が無くなり白く見える、という法則である。これは、地平線や水平線の近く等遠くの対象物は白く霞み色味も無くなりぼんやりと見え、近くの対象物は鮮明に見える事からも実感出来る。カメラで撮影する場合には、カメラと対象物の間の光エネルギーが多くなり、対象物は明るく撮影されると考えられる。

Koschmieder の法則に基づいた手法は、[14] を始めとして、多数の手法 [15-31] が提案されている。初期の手法では、画像以外の情報を事前に取得しておく必要があったが、現在では1枚の画像のみで霞除去を行える手法が提案されている。霞除去の問題点は、手法の多くは白い対象物や広く似た色が分布する空等に適用出来ない事である。

この手法を基にすると、白い対象物は常に霞んでいると判定されるため、白い対象物には適用出来ない。そのため、白い対象物を避けたり、小さな白い対象物のみを扱って巨大空間フィルタリングにより白色の影響を無視する様な対応をしている。図 12 の様に、大気光よりも白い対象物がある画像や、大気光が白以外の画像は対象外とされる。

2.1.7 ダークチャンネル

近年、「Koschmieder の法則」に基づいて、簡単な計算で抽出する特徴量から「大気光」と「透過係数」を推定する手法 [14] が提案され、類似したその他の手法も多数 ([24-31]) 提案されている。手法 [14] は、単純に画素値の明るさを霞の程度とするのではなく、各画素の RGB 色チャンネルの最小値を霞の程度としている。この特徴量 (RGB 色チャンネルの中の最小値) を「ダークチャンネル」と呼ぶ。これは、霞んでいない対象物の RGB 色チャンネルは、少なくとも何れか1つの色チャンネルは小さい値となるが、対象物に霞がかかると、RGB 色チャンネルの全色成分が高くなるという現象に基づく。これにより、従来は黒色のみで霞成分が低いと推定していたが、手法 [14] は単純に明るい程霞成分が多いと仮定せずに、鮮やかな色彩の対象物の霞成分を低く推定する事で過強調を防ぐ。しかし、依然として RGB 色成分の全てが高い「白色」には適用出来ず、大きな白い対象物を処理対象外としている。小さな白い対象物に対しては、巨大空間フィルタリングを用いる事で、辛うじて対応している。この手法もやはり、図 12 に示す様な画像には適用できない。

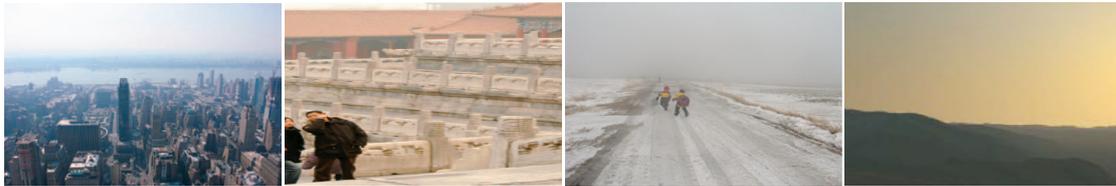


図 12: 霞除去の対象外画像例

手法 [14] を基本とする霞除去は、明るい色を霞と仮定して暗い色を鮮明な対象物と仮定するため、不鮮明な明るい霞の色を鮮明な暗い色にする処理とも言える。よって、結果画像は全体的に暗くなる。また、各対象物の彩度を高くする傾向にあるため、白い対象物に偽色が発生する。そのため、後処理として明度補正を必要とし、各結果画像に適切な明度補正処理を選択する必要がある。明度補正の手法も多数あり ([33-36])、各結果画像に適した手法を選択する事は難しい。専用の明度補正処理を指定している手法 [28, 29] もある。

図 13 に、手法 [14] の結果と、後処理に明度補正をした結果例を示す。ここでは、明度補正は [33] の手法を使用した。図 13(a) は原画像、図 13(b) は手法 [14] の結果、図 13(c) は明度補正をした結果である。図 13(c) は同じパラメータ値で明度補正した結果である。図 13(b) から、手法 [14] の結果画像は暗くなる事が分かる。図 13(c) から、上段と下段は見易い明るさになっているが、中段は暗く明度補正の効果が低い事が分かる。各画像で適した明度補正の手法を選択する事は、非常に難しい問題である。

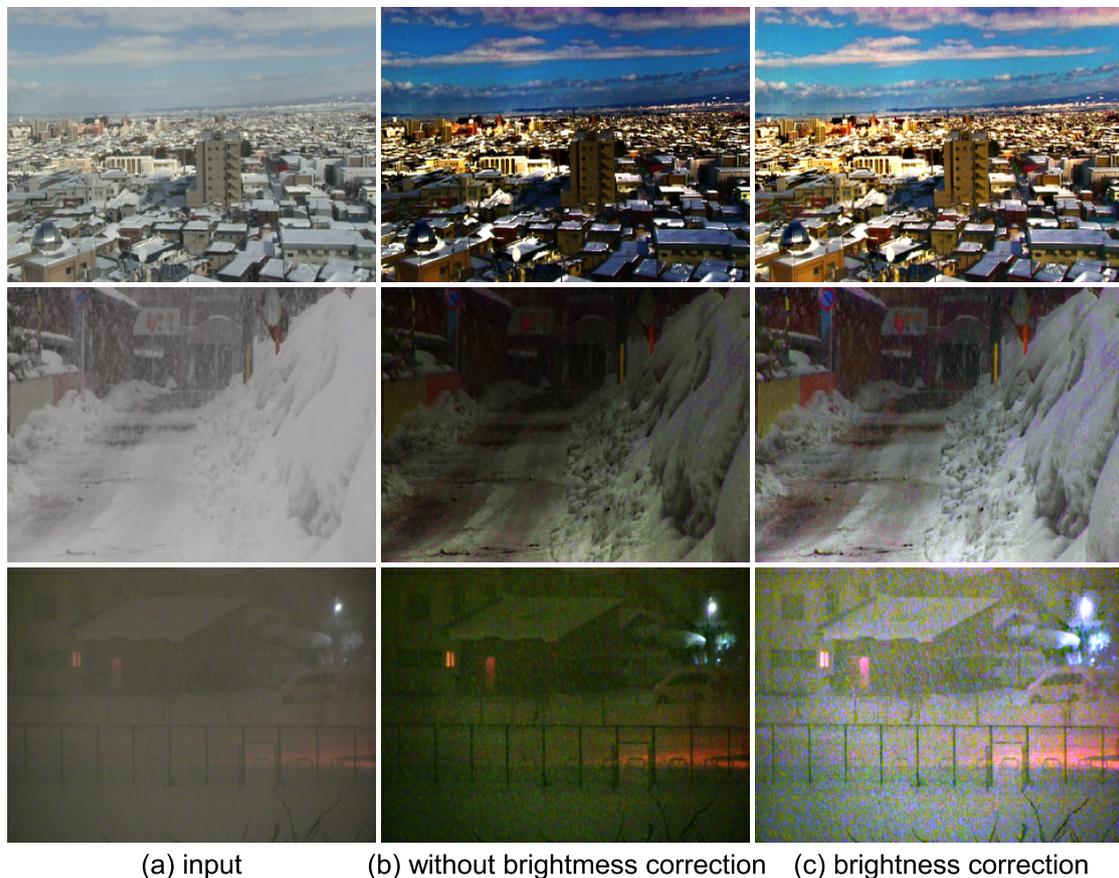


図 13: 明度補正の効果

2.1.8 霞除去で夜間画像の鮮明化

屋外監視カメラは、天候の変化に加えて、時間変化の影響も受ける。昼間は強い太陽光があるが、夜間に太陽光はなく画像の明るさが全く異なる。夜間では天候に関係無く、画像中に何が映っているか分からない。夜間画像を鮮明にする事は、屋外画像処理において重要な課題である。

霞除去を使用した夜間画像の鮮明化の手法 [30] が提案されている。この手法は、明度を反転した画像に、手法 [14] のアルゴリズムを適用する。夜間画像は全体的に暗いため明るさを反転すると、全体的に白い画像となる。この白い画像は、霞画像と見なせる。つまり、手法 [30] は夜間画像の明るさを反転して霞画像にしてから霞除去を行い画像を鮮明にする。その後、霞除去後の画像の明るさを反転し、夜間画像の鮮明化画像を生成する。

図 14 に、手法 [30] の結果を示す。図 14 は、手法 [30] に掲載されている画像である。図 14(a) は原画像、図 14(b) は (a) の反転画像、図 14(c) は結果画像である。図 14(a) に比べて図 14(c) は建物が見える様になっているが、画像全体は暗く、画像下部の車等の画像中の暗い箇所では十分に鮮明になっていない。



図 14: 霞除去による夜間画像の鮮明化例 1

図 15 に、手法 [30] のその他の結果画像を示す。図 15(a) は原画像、図 15(b) は結果画像である。図 15(b) から、白い車や建物等の見えなかった対象物が見えるようになったが、道路や建物の奥側の暗い箇所では十分に鮮明化されていない。手法 [30] は、全体的に暗い画像を生成するため、暗さが酷い箇所の鮮明化は出来ていない。

夜間画像を対象とした鮮明化手法は、夜間画像に特化していて、昼間画像には適用できない手法である。しかし、本研究では、夜間画像も霞画像も画像全体の明るさは異なるが、不鮮明という点では同じであると考える。本論文では、昼間と夜間どちらの画像も区別なく鮮明にする手法も提案する。

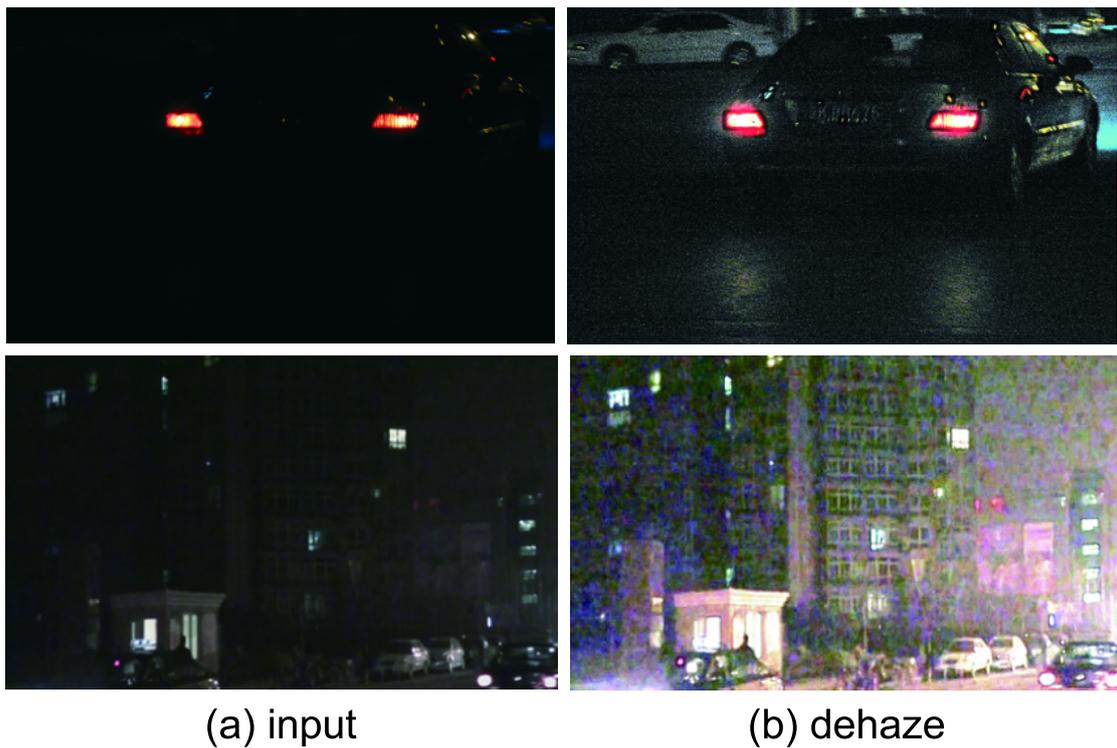


図 15: 霞除去による夜間画像の鮮明化例 2

2.2 降雪検出

2.2.1 雪粒画素の特徴付け

雨(雪)粒画素を抽出する手法は、手法 [6,37-41] 等多数提案されている。雪粒は、手法 ([37-41]) において、雨粒と同じ特徴を持つと仮定され、「白い」「小さい」「直線的に映る」「高速に移動する物体」等と仮定されている。「雪粒は白い」と仮定した手法では、色や明度でクラスタリングして、白い画素を雪粒画素としている。「雪粒は小さい」と仮定した手法では、大きさが小さな検出領域を雪粒画素としている。「雪粒は直線的に映る」と仮定した手法では、空間周波数や、検出領域の形の角度を計算して、特定の角度に傾いている領域を雪粒画素としている。「雪粒は高速移動体」と仮定した手法では、背景差分等による動き特徴を雪粒画素としている。しかし、雨粒と雪粒の特徴が同一であると仮定する事には無理がある。

表 4 に、上記各特徴を雪粒に適用する時の問題点を示す。まず、明るさについては、照明条件により雪粒は白いとは限らない。雨粒は透明なので、光の透過により明るく映る場合が殆どであるが、雪粒は透明ではない。大きさと形については、雨粒の大きさは全粒でほぼ同じくらいだが、雪粒の大きさは落下中に他の雪粒と結合したり分離したり崩れたりするため、一定ではない。風の影響については、雪粒は軽くて風の影響を受けやすいため、各雪粒で移動方向が様々になり、雪粒の移動軌跡も雨粒の様に直線的とは限らない。移動速度については、雪粒は雨粒より遅いが、その他の一般的な動体に比べると非常に高速である。直線的な形を抽出する事を目的としていなければ、この特徴は雪粒検出に有効である。

本論文では、「高速動体」の特徴は雪粒を表す特徴であると考え、図 16 の左上から右下にかけて、降雪画像の連続 6 フレームの画像を順に示す。図 16 の赤枠は注目雪粒、図 16 の緑枠は注目歩行者を示す。6 フレームだけでは歩行者の位置はほぼ変わらないが、雪粒はたった 6 フレームで大きく動いている。雪粒は雨粒程速くはないが、その他の動体より明らかに高速である。

また、前述した様に悪天候の画像は視界が不明瞭になる。降雪時は画像全体が暗くなる場合が多い。よって本研究では、鮮明化した画像から動体検出手法により雪粒を検出する。従来の鮮明化手法ではフレーム間で発生箇所が異なる偽色が多数発生するため、偽色が動体として検出される。しかし、本論文で提案する鮮明化手法は偽色を抑制するため、動体検出により雪粒のみが検出される。

表 4: 雪粒の特徴

特徴	雨粒	雪粒
明るさ	明るい	様々
大きさ	小さくて一定	様々
撮影される形	落下方向に沿って直線的	様々
風の影響	全雨粒で等しく受ける	各雪粒で様々
移動速度	高速	高速

2.2.2 その他の動体への対応

雪粒を「高速動体」と特徴付ける場合、雪粒以外の動体への対応が必要となる。図 17 に、動体が存在する晴天時の背景差分の例を示す。図 17(a) は原画像、図 17(b) は背景画像、図 17(c) は背景差分による動体検出の結果である。図 17 は晴天画像なので雪粒は存在しないが、車や人が検出されている。しかし、降雪時の動体検出結果と異なり、動体が検出されている箇所は、画像の道路の箇所だけである。この時、検出した動体の形から雨粒を検出する手法は注意が必要である。例えば、道路上では主に車が検出されるため、動体検出領域の形は、殆どが車の形となる。そのため、動体の形の傾きは、車の形の傾きに集中する。よって、雨粒が無くても車しか検出されないため、雨粒が検出される時と同じ様に、形の角度ヒストグラムはある特定の方向にピークを作る傾向にある。雨粒が無くても、車の様に同じ形の動体が多く検出されると、手法 [6] では対応出来ない。

本研究では、動体検出の検出位置の分布に注目する。図 17 の様に、雪粒以外の動体は、画像中のある特定の位置にしかない。しかし、雪粒は図 4 や図 5 の様に、画像全体で検出される。本研究では、この検出位置の違いを使って、雪粒以外の動体に対応する。

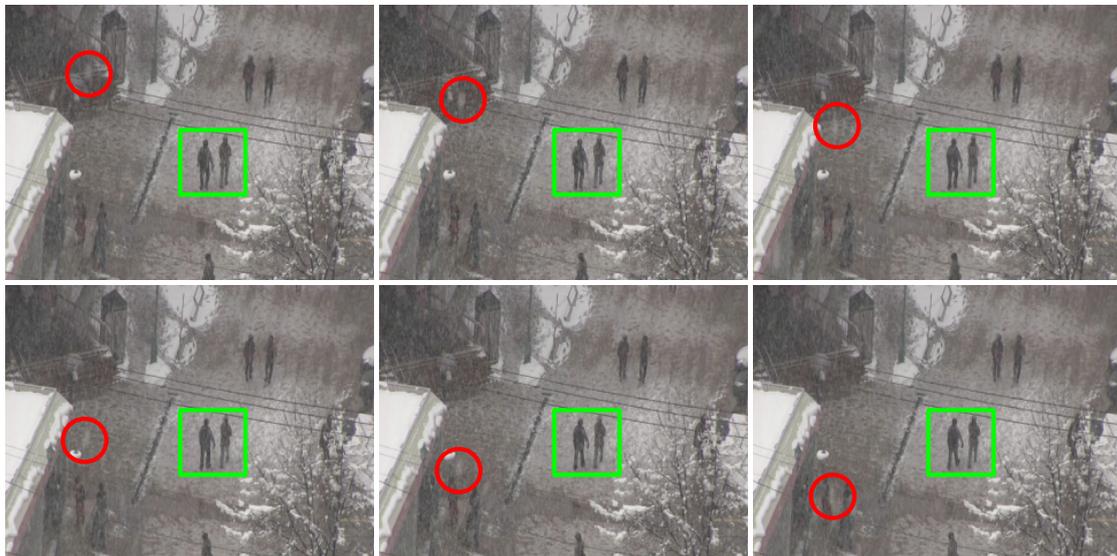


図 16: 雪粒と動体の位置



図 17: 移動体の分布

2.2.3 動体情報を利用しない手法

不鮮明画像から降雪画素を除去し、鮮明化により雪粒の無い見易い画像を生成する手法 [6] は、雪粒を検出するために、動体情報を使用していない。この手法は、降雪画素検出と画像鮮明化の2段階で構成され、降雪画素の特徴を「白く」て「小さい」領域と仮定して雪粒を検出する。

しかし、この手法は「降雪画素の色は白い」と仮定するため白い対象物も除去してしまい、「雪粒は小さい」と仮定するため様々な大きさの雪粒を検出する事も出来ない。また、降雪除去の後に鮮明化を行うため、不鮮明だった雪粒画素が除去されない。そのため、霞んで見えない箇所では鮮明化の効果を弱めて、見えない雪粒を鮮明にする事を防いでいる。これは同時に、過強調を防ぐための対策にもなっている。

しかしこれでは、不鮮明な箇所は鮮明化されない。不鮮明な箇所に雪粒以外の対象物があっても、その対象物は見える様にならない。結局手法 [6] では、ある程度見える不鮮明な箇所しか鮮明化はしていない。よって本論文では、動体特徴を利用しないで雪粒を検出する事は難しいと考える。

2.3 降雪程度判定

2.3.1 降雪状況判定は未発達分野

現在、降雪量や降雪の程度をテーマとした本格的な研究はない。雨粒と雪粒は類似する特徴と仮定して雨(雪)粒を検出し、検出量から降雨(雪)量を推定する手法 [41] は提案されている。

手法 [41] の降雨(雪)量判定方法を以下に記述する。手法 [41] は、まず雨(雪)粒画素の特徴を「直線的に動き、ある程度小さな動体」と仮定して、直線的な動体を検出する。この検出した直線的な動体は、もし雨(雪)粒ならば全て同じ角度に傾く。そして、雨(雪)粒は画像全体で検出されるので数が多く、動体の形の傾きのヒストグラムを作ると、ある1つの角度にピークを持つヒストグラムになる。動体の傾きのヒストグラムを使用して、1つのピークを持つヒストグラムが作成されたら、画像全体から検出された動体は雨(雪)粒であると判定する。雨(雪)粒以外の動体は明らかに大きいため、大きさの閾値で大きな動体は除外する。降雨(雪)量は、残った小さく同じ方向に傾いた動体の検出数で推定される。

図 18 に、雪粒の形の角度分布の例を示す。図 18 は、[41] に掲載されている画像である。図 18(a) は原画像、図 18(b) は雨粒雪粒検出結果画像、図 18(c) は検出粒の形の傾き角度のヒストグラムである。図 18(c) から、検出粒の形の傾き角度のヒストグラムピークが1つになっている事から、検出粒の傾き角度はある1つの角度に集中している事が分かる。図 18(b) の緑色は、ヒストグラムピークに含まれている角度の検出粒を表し、赤色はヒストグラムピークに含まれていない角度の検出粒を表す。この事から、画像中の検出粒の殆どは雨(雪)粒と判定出来ている事が分かる。

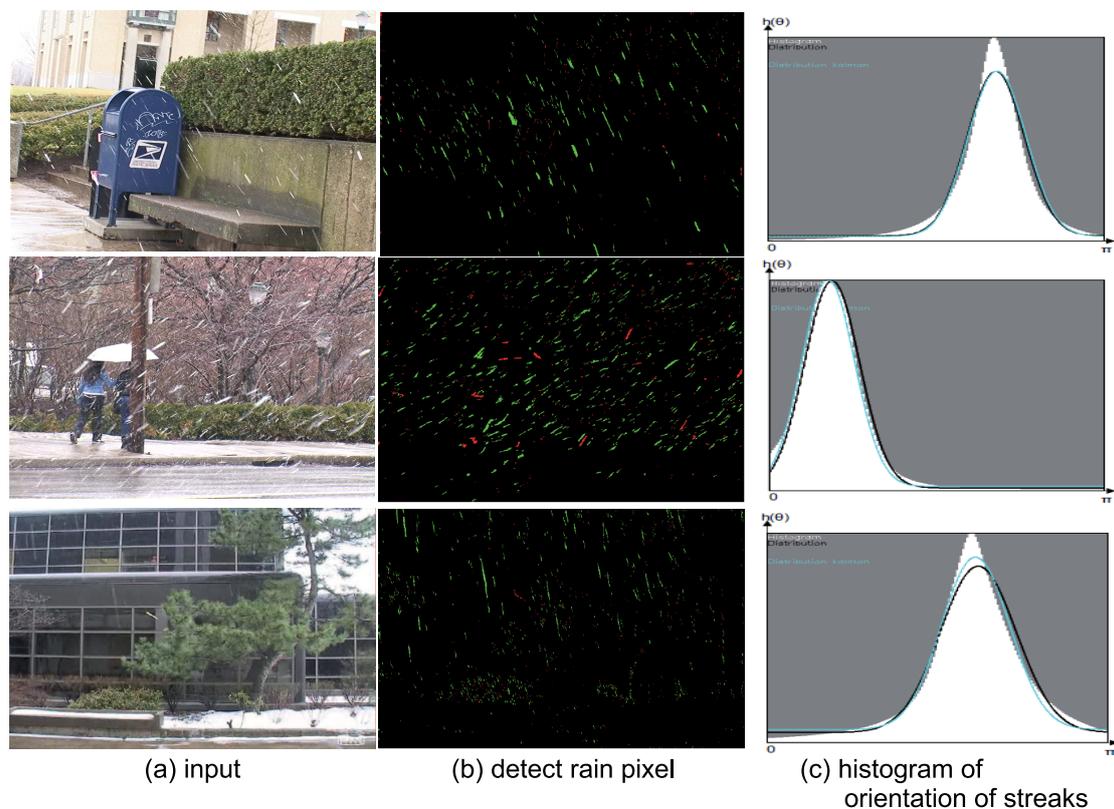


図 18: 雨粒雪粒の角度ヒストグラム

2.3.2 降雪程度判定の問題点

確かに雨粒を監視カメラで撮影すると直線的に映る。しかし、雪粒は直線的な形で映るとは限らない。雪粒は雨粒よりも風の影響を大きく受けるため、必ずしもある一定方向に降る訳ではない。雨粒よりも降る速度は遅く、強風が吹けば各雪粒の移動方向はバラバラになり、特に上空では上に舞い上がる雪粒もある。さらに、監視カメラで撮影する範囲が広い場合、遠くの粒も近くの粒も監視カメラに映り、雨(雪)粒の大きさは一定にならない(図5)。

図18(a)は、何れも地面付近の画像である。なるべく風の影響が無い様に撮影された画像と判断出来る。また、対象物にかなり近い狭い画角で撮影されている。雪粒が同じ大きさにしか映らない様に撮影されている。しかしこれでは、状況を把握するという目的は達成されない。もう少し広範囲で撮影された画像を対象とする必要がある。

さらに、雪粒画素が見えなければ、降雪画像から雪粒を検出する事は難しい。図3や図4等にした様に、降雪時の画像は不鮮明である場合が多い。このため、雪粒検出は不鮮明な画像を扱う必要がある。図19に、様々な鮮明度の降雪画像から雪粒画素を検出した例を示す。図19(a)は雪粒が鮮明に見える画像、図19(b)は酷い降雪の画像、図19(c)は吹雪で肉眼では何も見えない画像である。図19上段は原画像、図19下段は背景差分による雪粒検出結果である。当然、雪粒が見える図19(a)のみ、雪粒が検出される。降雪程度を判定するためには、あらゆる形の雪粒画素を検出する事と、不鮮明な画像を鮮明にする事が必要である。

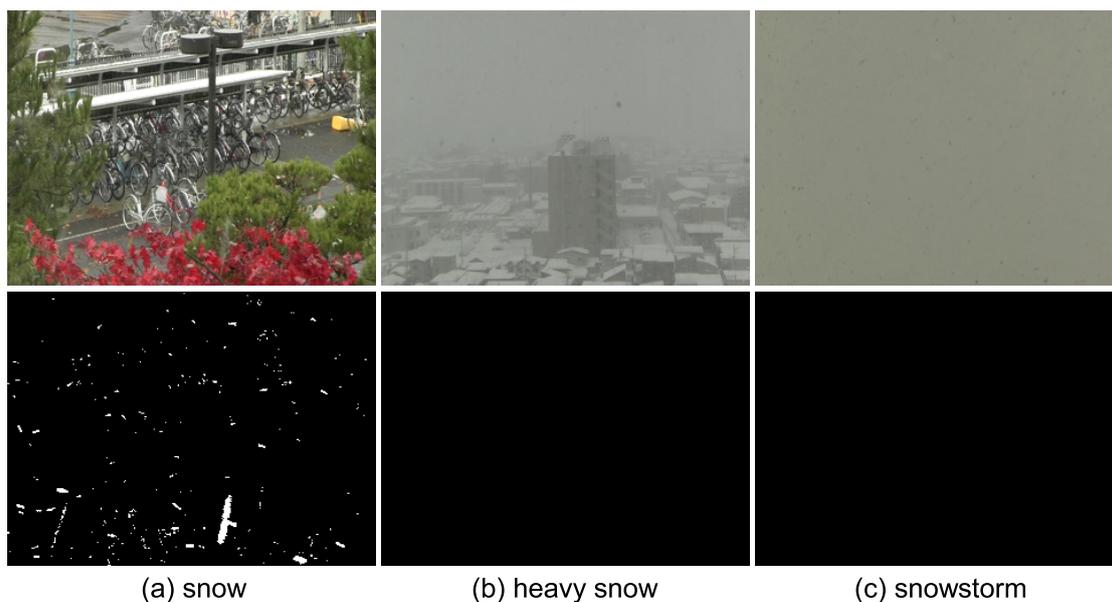


図 19: 降雪検出の例

3 研究の目的

3.1 3つの課題

本論文では、様々な天候で24時間作動する屋外監視カメラアプリケーションを目的とし、画像鮮明化と動体検出を組み合わせる降雪状況を判断する手法を提案する。従来手法が持つ天候に関する制限を取り払い、視界が不明瞭な状況でも動作するアルゴリズムを提案する。

画像鮮明化では、原画像の鮮明度に応じて鮮明化の効果を調節する3つの手法を提案する。降雪検出では、動体検出により雪粒画素を検出する手法を提案する。降雪状況判定では、雪粒の検出位置の分布を解析して降雪状況を判断する手法を提案する。

図20に、概念図を示す。図20(a)は原画像、図20(b)は鮮明化画像、図20(c)は雪粒検出画像、図20(d)は雪粒検出位置分布調査図である。まず原画像を鮮明化して、雪粒画素を検出しやすくする。この時、高速動体である雪粒を見える様にするため、複数フレームを使用せずフレーム単位で画像を鮮明化する。次に、鮮明化画像から動体検出によって雪粒を検出する。最後に、雪粒検出位置の分布から、検出した動体が雪粒かその他の動体かを判断し、降雪の程度を判定する。雪粒は画像全体で検出され、その他の動体は画像の一部でのみ検出される。この違いを利用して、ブロック分割した画像から、動体検出されたブロック数の多さを調べ、雪粒かその他の動体かを判断する。動体が検出されたブロック数が少なければ、画像中で検出された対象物は雪粒以外の動体である。一方、動体検出されたブロック数が多ければ、画像中で検出された対象物は雪粒である。

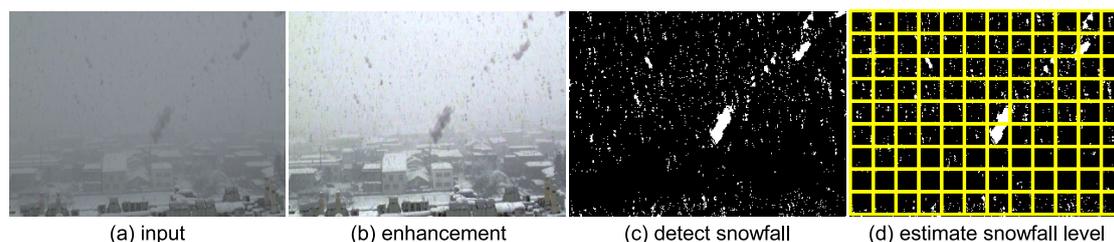


図 20: 本手法の概要

3.1.1 鮮明化の仕組み

画像鮮明化には、画像全体の明るさを補正する手法、ヒストグラムを操作する手法、Koschmiederの法則に基づく手法等多数の手法があるが、明度整合の問題と偽色の発生が課題である。この課題を解決する事を中心に本研究では、3種類の鮮明化アルゴリズムを提案する。1つ目は、白い対象物に偽色を発生させないために、Koschmiederの法則に基づく手法 [14] を改良した手法である。手法 [14] では、白い対象物に偽色が発生する事が問題であった。本研究では、新たに特徴量「ブライトチャンネル」を導入する事で、この問題を解決する。2つ目は、画像の各箇所適切な鮮明化を行うために、Koschmiederの法則に基づく手法と領域分割を組み合わせた手法である。手法 [14] では、高ダイナミックレンジ画像の様に暗く霞む箇所と明るく霞む箇所が同一画像中に存在する場合に画像鮮明化が不十分になる。本研究では、暗い箇所と明るい箇所に領域を分割し、各領域に適した鮮明化を行う事で、この問題を解決する。3つ目は、霞画像も夜間画像も鮮明化するために、明度整合と偽色抑制の効果が高いヒストグラム拡張を基礎とする鮮明化手法である。24時間動作する監視カメラアプリケーションは昼間も夜間も動作する事が必要だが、霞画像の鮮明化手法は夜間画像を鮮明にする事が出来ない。本研究では、コントラスト改善効果が限定的であるヒストグラム拡張の弱点を改善し、昼間と夜間の両方で不明瞭な画像の鮮明化をする。

図 21 に例を示す。図 21(a) は原画像、図 21(b) は従来の霞除去による結果画像、図 21(c) は3つ目の提案手法による結果画像である。図 21 上段は晴天画像、図 21 中段は降雪画像、図 21 下段は夜間の降雪画像である。図 21(b) では偽色が目立つ結果であるが、図 21(c) では偽色はない。

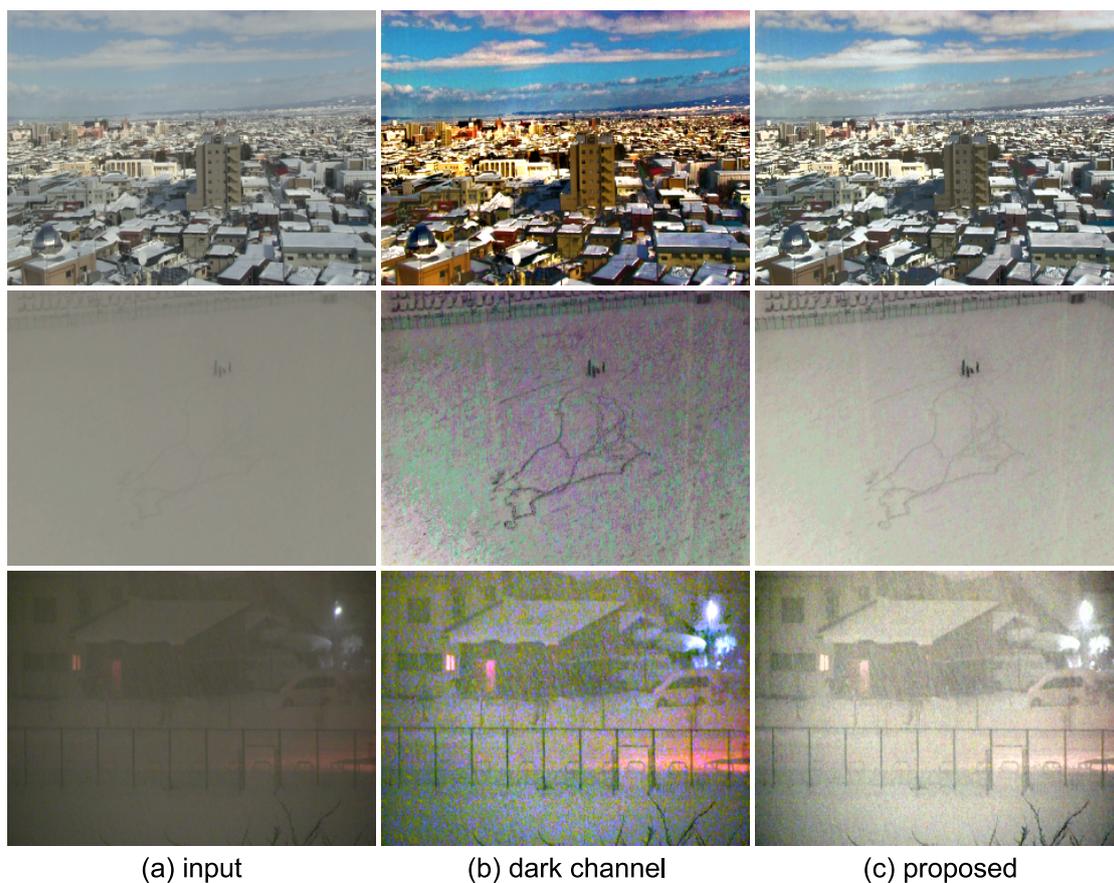


図 21: 鮮明化

3.1.2 降雪検出の仕組み

従来、雪粒画素は、雨粒画素の特徴と類似させて「白い」「小さい」と特徴付けされた。しかし、雪粒画素の見え方は、監視カメラ設置位置と撮影場所の照明条件に大きく依存する。降雪場面には積雪が当然あり、照明条件によっては雪粒画素より積雪画素の方が「白い」場合がある。雪粒の大きさを「小さい」と仮定したり、明るさを「白い」と仮定したりして、雪粒の大きさと色を限定して特徴付けてしまう事は、降雪画像から雪粒画素を抽出する事には適さない。

従来手法で仮定された特徴の中に有用な特徴もある。それは、雪粒は雨粒よりも遅いがその他の動体に比べて高速に移動する事から、雪粒が空から地面へ高速に落下するという特徴であり、雪粒を良く表した特徴である。また、降雪場面では雪粒は画像全体に映る様に、天候は広範囲に影響を与えるため、監視カメラで撮影する画像の一部にしか雪が降らない様な状況は稀である。そこで本研究では、雪粒の特徴を「画像全体に分布する高速動体」と仮定して、時間変化によって動体を検出する方法を用いて雪粒画素を検出する。

図 22 に、晴天時と降雪時の雪粒検出結果の違いを示す。図 22(a) は原画像、図 22(b) は背景差分による動体検出に使用した背景画像、図 22(c) は差分結果画像である。図 22 上段は晴天画像、図 22 下段は降雪画像である。図 22 から、晴天時には画像全体に検出結果は無く、降雪時には画像全体に検出結果がある事が分かる。

本研究では、降雪画像から雪粒を除いた背景画像を構築して、背景差分により雪粒画素を抽出する。

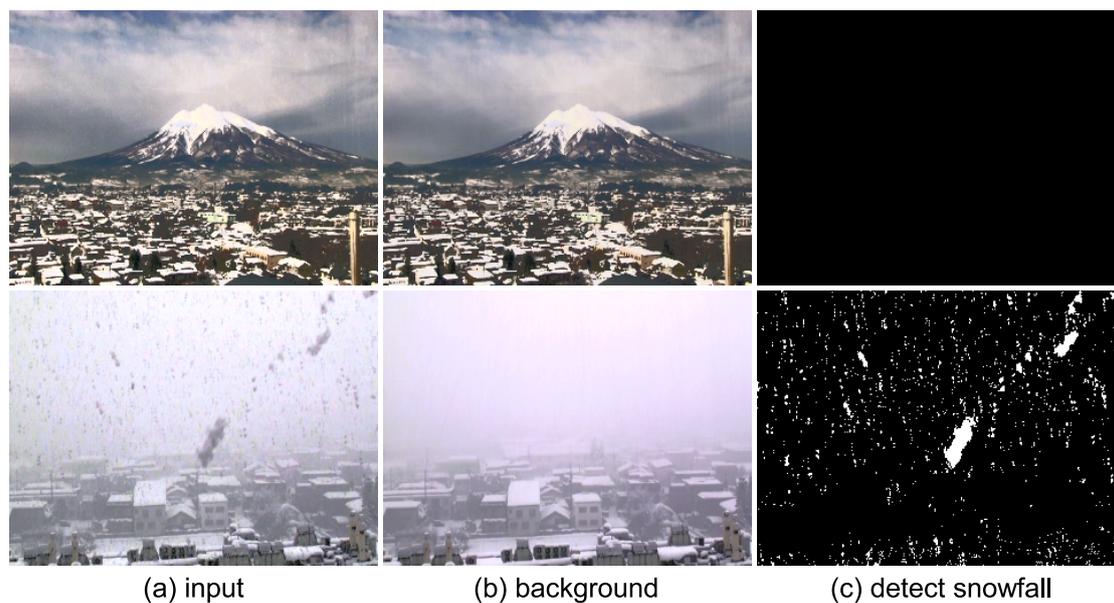


図 22: 動体検出

3.1.3 降雪状況判定の仕組み

降雨量を推定する手法は提案されているが、降雪状況を判断する手法は、現在では殆ど提案されていない。さらに、従来手法は雨粒画素が鮮明に映っている事が前提である。そこで本研究は、前処理に画像の鮮明化を施し、動体検出による降雪画素の検出量と検出位置の分布から降雪状況を判定する。

降雪は空中を漂う動体であり、風向きによって移動方向や速度が急変するため、動き方を特徴として雪粒を抽出する事は難しい。また、天候の影響は監視カメラで撮影した画像全体に及び、一般的な動体は画像全体で検出される事はあまりない。そこで本研究は、動体が検出された位置の分布の広がりを特徴量として、降雪状況を判定する。画像をブロック分割して雪粒検出の分布を解析して、撮影画像の降雪状況を判定する。

図 23 に、晴天時の動体検出結果と降雪時の雪粒検出結果の違いを示す。図 23(a) は原画像、図 23(b) は鮮明化画像、図 23(c) は背景差分による動体検出結果画像である。図 23 上段は動体が存在する晴天画像、図 23 下段は降雪画像である。図 23 から、晴天時には画像の一部分にしか動体検出結果は無く、降雪時には画像全体に動体検出結果がある事が分かる。

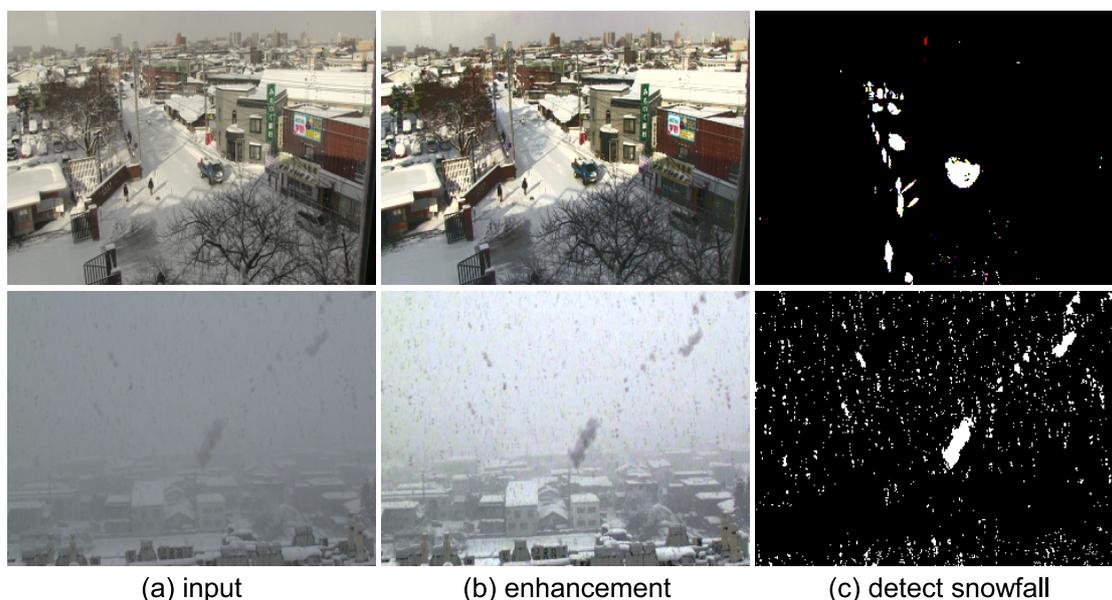


図 23: 降雪と動体

4 本論文の構成

2章では、画像鮮明化における提案手法について述べる。この章では、手法 [14] のダークチャンネル特徴量に加えて白い対象物に対応するための特徴量「ブライツチャンネル」を導入して手法 [14] を改良した手法、領域分割と「ブライツチャンネル」を組み合わせた手法、クラスタリングとヒストグラム拡張を組み合わせた手法の、3つの提案手法について説明する。ブライツチャンネルとは霞の程度を表す特徴量の1つであり、1つ目の提案手法は白い対象物の偽色を抑制する効果がある事を示す。領域分割は異なる明るさで霞む箇所が複数ある画像の鮮明化を行うために導入し、2つ目の提案手法は高ダイナミックレンジ画像を鮮明化する事を示す。クラスタリングとヒストグラム拡張を組み合わせる事で、3つ目の提案手法は霞画像と夜間画像の両方の鮮明化が可能である事を示す。

3章では、降雪検出における提案手法について述べる。本研究では、降雪画素は「高速に移動する対象物」と「画像全体に分布する対象物」の2つの特徴を持つと仮定する。この章では、「高速に移動する対象物」の特徴から、背景差分を使用する事で降雪画素を検出する方法について説明する。

4章では、降雪程度判定における提案手法について述べる。この章では、動体検出結果から降雪程度を判定する方法について説明する。「画像全体に分布する動体」という特徴から、降雪画素の検出位置が画像全体でどの様に分布しているかを調査する事で降雪程度を判定する。

5章では、提案手法の結論を述べる。提案手法は、従来では避けられていた白い対象物にも対応した鮮明化を行い、夜間画像も鮮明化し、ノイズ除去と動体検出によって効果的に雪粒検出を行い、検出位置の分布を調査する事で、動体の外乱に強い降雪程度を行う事を示した。最後に各手法の実験結果から、本論文で提案した各手法は、24時間動作する屋外監視カメラにおいて有用なアプリケーションである事を示す。

第II部

コントラスト改善における提案手法

1 コントラスト改善

一般的にコントラストとは物事の対比であり、比較するものが違う特徴を持つ場合は「コントラストが高い」、似た特徴ばかりの場合は「コントラストが低い」と表現される。画像処理において、コントラストは特に「色」に対して表現されるのが一般的である。コントラストが高い画像とは、明るい色から暗い色まで様々な色で構成されて色彩がはっきりし、コントラストが低い画像とは、全体的に似た様な色しかなく色彩がはっきりしせずぼんやりとする。コントラスト改善は、色彩がはっきりしない不鮮明な画像をはっきりした鮮明な画像にするためのアルゴリズムであり、画像処理の基本分野である。

図 24 に、色のコントラストが大きく異なる画像例を示す。図 24(a) から順に、コントラストが低い画像からコントラストが高い画像を並べる。図 24(a) や (b) では画像に何が映っているか分からずぼやけているが、図 24(c) や (d) は各対象物がはっきり見えている画像である。図 24(a) の様に画像が不鮮明の場合、画像から何かを解析する事は難しい。本研究では、不鮮明な画像を図 24(d) の様な高コントラスト画像にする事で、降雪検出と降雪程度の判定を行える様にする。

しかし、コントラスト改善アルゴリズムには、コントラストを上げると同時に画質が悪くなるトレードオフがある。コントラストを上げすぎではっきりしすぎる明るさになったり（「明度整合の問題」）、ノイズの様な不自然な色（「偽色」）が出たりする。コントラストを上げる手法は多いが、この問題を解決する手法は少なく、特に偽色発生の問題は解決すべき重要な課題である。本研究では、偽色の発生を抑制する事を中心に、3 種類の手法を提案する。



図 24: 様々なコントラスト

1.1 明度整合と偽色

コントラスト改善には、明度整合の問題と偽色発生との2つの問題がある。明度整合とは、コントラストを上げる代わりに、原画像とは異なる明るさや色合いになってしまう事であり、偽色とは、無彩色、特に白く明るい箇所を赤や緑等有彩色になってしまう事である。

図 25 に、明度整合と偽色の例を示す。図 25(a) は原画像、図 25(b) はコントラストを過剰に上げた場合の結果例である。図 25 上段では、画像下部の建物が黒く潰れ、画像中央部の地平線付近に赤茶色の偽色が発生している。図 25 下段では、画像上部は黒く潰れ、画像下部の雪原は白く飽和し、画像全体の雪原には赤や緑の偽色が発生している。

明度整合の問題の原因は、原画像の明るさの分布を考慮しないでコントラストを上げてしまう事であり、暗い場所をより暗く、明るい場所をより明るくすると、原画像の明るさの分布が崩れる。原画像全体の明るさのバランスを保つ事は、この問題を解決するために重要である。

偽色発生の原因は、彩度のコントラストが上がりすぎる事である。コントラストを上げる事は画像の色特徴を強調する事でもあるため、無彩色や低彩度の色味を過強調すると有彩色になり、これが偽色として現れる。また、RGB 色特徴でそれぞれ異なる計算をしてしまう事も原因である。原画像の色バランスを保ちながら彩度を強調する事は、偽色を抑制するために重要である。

本研究では、コントラストを改善した後、降雪検出と降雪状況判定を行うため、コントラスト改善の段階で偽色が発生する事は非常に問題がある。本論文では、明度整合の問題と偽色の発生を解決する手法を提案する。

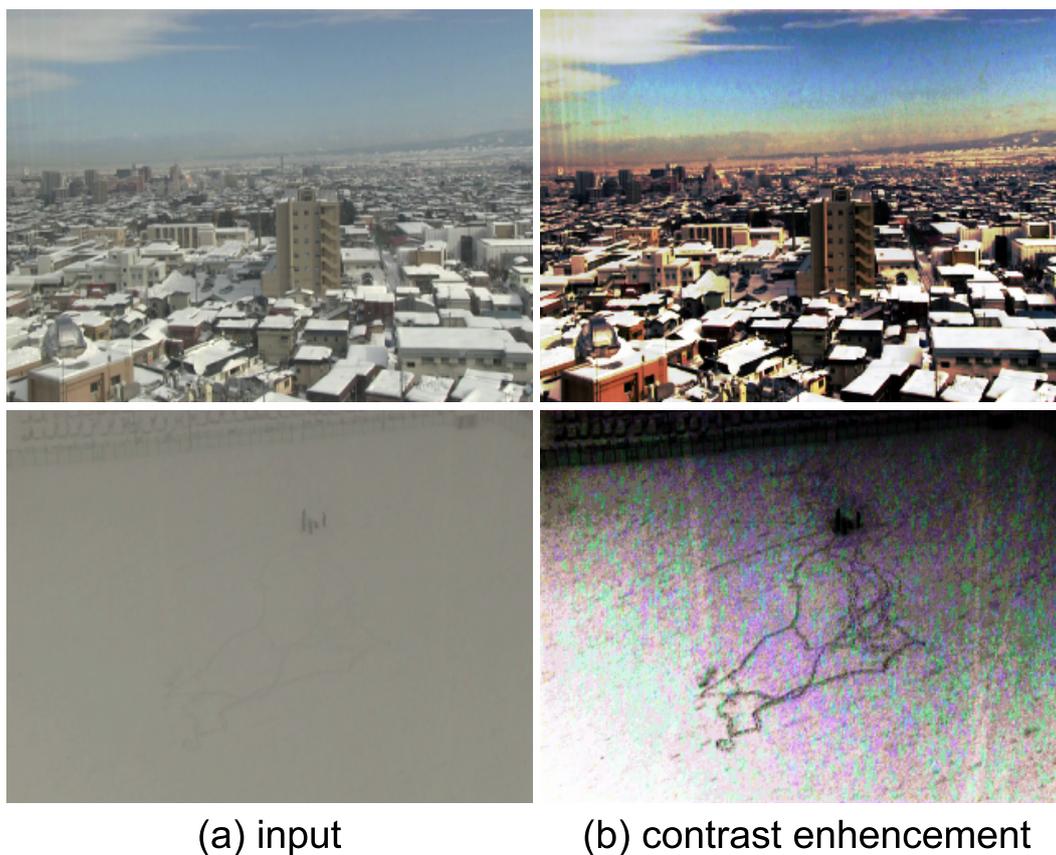


図 25: コントラスト改善の問題点

2 従来手法

2.1 ダークチャンネル

2.1.1 Koschmieder の大気散乱法則

Koschmieder の法則とは、各対象物の明るさはカメラと各対象物までの距離で表されると仮定した法則であり、式 (2) で表される。ここで、 I は撮影画像、 J は物体色、 A は大気散乱光、 x は画素位置、 t は透過係数、 d はカメラと対象物の距離、 β は大気の散乱係数である。大気散乱光 (A) とは、対象物が無い無限遠の箇所の明るさを表す。透過係数 (t) とは、物体からの反射光が大気中を透過した割合を表し、撮影した原画像に含まれる物体色の割合である。この式は、カメラで撮影された画像 I は、大気光 A と物体本来の色 J が混合した色であることを表す。つまり、距離 (d) が近い程物体色 (J) が原画像 (I) に含まれる割合が大きくなり、 d が遠い程大気光 (A) が I に含まれる割合が大きくなることを表す。この式に則ると霞除去とは、 A を霞と見立てて、入力画像 (I) から J を推定する手法であり、 J を求めるためには、 I の他に d と A を推定する必要がある。ただし、 β は固定値と考え、 d に含める場合が多い。また、従来は A と d を別途計測していたが、現在では直接 t を推定する手法が一般的である。距離センサで t を計測したり、ステレオカメラで t を推定したりする手法もあるが、カメラ設置の度に正確な計測が必要となり、さらに無限遠への対応が難しい。Koschmieder の法則の概念図を図 26 に示す。

$$\begin{aligned} I(x) &= J(x)t(x) + A(1 - t(x)) \\ t(x) &= e^{-\beta d(x)} \end{aligned} \quad (2)$$

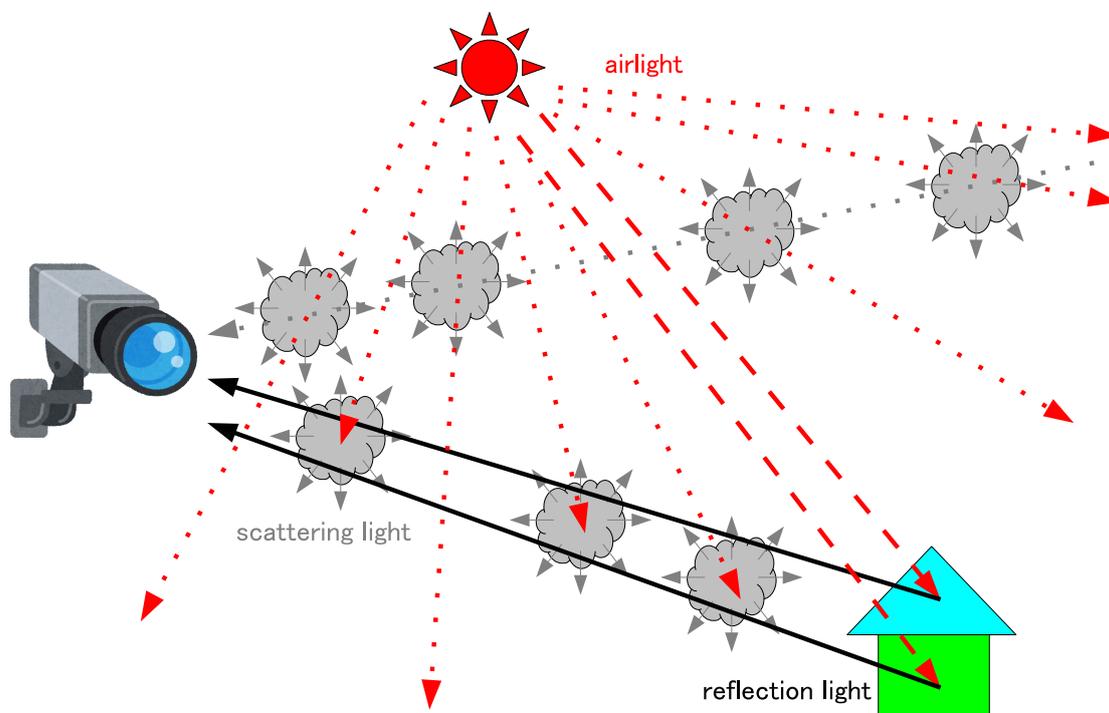


図 26: Koschmieder の法則

2.1.2 ダークチャンネル、大気光、透過係数

Koschmieder の法則において、大気光は対象物が存在せずに大気中で散乱した光のみが撮影された時の色と仮定する。手法 [14] は、その大気光を最も霞んだ色と仮定し、最も霞んだ色を表すために、各画素の霞成分を推定する。各画素の霞成分を推定するために手法 [14] は、「最も霞んだ色とは RGB 色要素の全てが高い値であり、対象物の RGB 色チャンネルは何れか 1 つは低い値となる」という仮定を立て、RGB 色チャンネルの最小値が霞成分を表すと仮定した。手法 [14] では、RGB 色チャンネルの最小値で表す霞成分を「ダークチャンネル」と呼ぶ。ダークチャンネルは、値が低いと霞成分が少なく、値が高いと霞成分が多い事を表す。透過係数は、大気光と各画素のダークチャンネルの比率で算出する。

ダークチャンネルは、式 (3) で算出する。ここで、 D はダークチャンネル、 x は注目画素位置、 Ω はフィルタ、 y は x を中心としたフィルタ内画素位置、 \min は最小値、 c は色チャンネル、 I は原画像である。 A は、画像中で D が最大値となる画素の画素値とする。これにより、単に白い画素が A となる訳ではない。また、ダークチャンネルは、RGB 色チャンネルの最小値が低い程霞成分が無いと仮定するため、鮮明画像中の白い対象物を鮮明であると説明出来ない。この場合、手法 [14] では、巨大な白い対象物が存在する事は稀で各対象物の近くには必ず別の色の対象物が存在すると仮定し、ダークチャンネルの算出時に周辺にある白色以外の別の色の対象物のダークチャンネルを利用する事で、鮮明画像中の白い対象物に高いダークチャンネルが算出される事を回避している。よって、小さい白い対象物の D は、空間フィルタ Ω を大きくする事で、大きな値になる事を防ぐ事が出来る。しかし、事前に白い対象物の大きさを知らないと適したフィルタサイズを決める事は出来ず、根本的に白い画素程大気光と推定される傾向にある事に変わりはない。

大気光は、式 (4) で算出する。ここで、 A は大気光、 D はダークチャンネル、 I は原画像、 x は注目画素位置である。手法 [14] は、最大の D を持つ画素値を画像中で 1 番霞む色 (A) とする。

透過係数は、 A と D の比率から式 (5) で算出する。ここで、 t は透過係数、 x は注目画素位置、 Ω はフィルタ、 y は x を中心としたフィルタ内画素位置、 \min は最小値、 c は色チャンネル、 I は原画像、 A は大気光、 ω は重み係数である。 D が小さいと霞が無いため t は高くなり、 D が大きいと霞が多いため t は低くなる。この手法では、 t はカメラと各対象物の距離から算出するのではなく、霞成分を表す D から推定するので、距離の計測が不要であり、撮影場面に依存していた様々な制約から解放された。しかし、計算は単純だが巨大な空間フィルタリング (Ω) が必要なため、計算時間は膨大である。

$$D(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in R, G, B} I(y)^c \right) \quad (3)$$

$$A = I(x) \quad \text{if } x = \operatorname{argmax}_{x \in I} D(x) \quad (4)$$

$$t(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in R, G, B} \frac{I(y)^c}{A^c} \right) \quad (5)$$

図 27 に、ダークチャンネルと透過係数の算出例を示す。図 27(a) は原画像、図 27(b) はダークチャンネル、図 27(c) は透過係数である。図 27(b) は黒い程鮮明な画素、白い程霞んだ画素を表す。図 27(c) は黒い程不鮮明な画素、白い程鮮明な画素を表す。図 27 上段では、画像の特徴を良く表している。しかし、その他の画像では、近くの積雪箇所で特徴量が逆転している箇所が多々ある。ダークチャンネルを使用する手法では、降雪画像に適用する事に問題があり、白い対象物への対策が必要である。

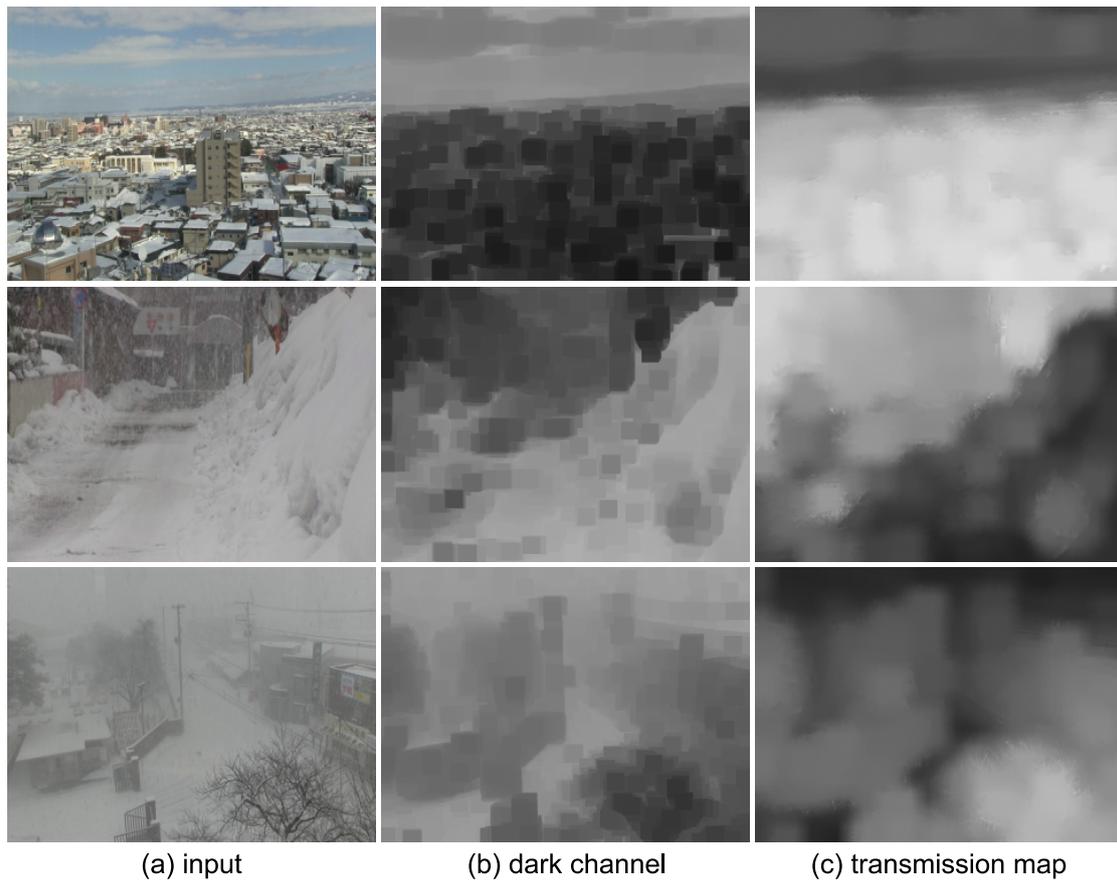


図 27: ダークチャンネルマップと透過係数マップ

2.1.3 ダークチャンネルの結果

式 (3)(4)(5) で算出した各特徴量を用いて、式 (6) で霞除去結果を算出する。ここで、 I は原画像、 J は結果画像、 A は大気光、 t は透過係数、 x は注目画素位置、 \max は最大値、 t_0 は 0 除算を防ぐための係数である。手法 [14] では、 t_0 を「0.1」とする。

図 28 に、手法 [14] の結果と、後処理に明度補正をした結果例を示す。霞除去結果は全体的に暗いため、後処理として [33] のトーンカーブマッピングを使用した。図 28(a) は原画像、図 28(b) は手法 [14] の結果、図 28(c) は明度補正をした結果である。図 28(c) 上段では、雲に偽色があり画像全体も赤みを帯びている。図 28(c) 中段では、画像が暗い。各画像で適した明度補正の手法を選択する事は、非常に難しい。図 28(c) 下段では、画像全体に赤や緑の偽色がある。手法 [14] は白い対象物だけでなく、無彩色の箇所にも偽色を多数発生させる。

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (6)$$

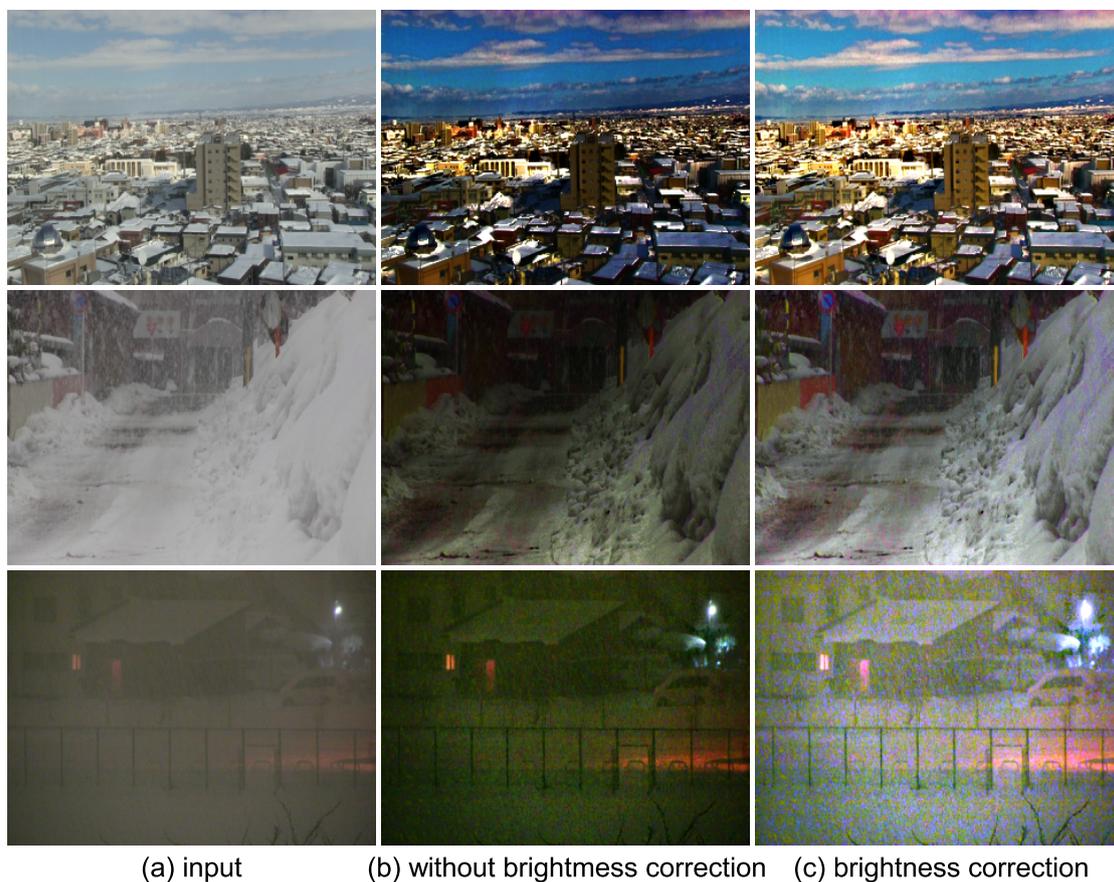


図 28: 明度補正の効果

2.1.4 偽色の原因

手法 [14] は、大気光より明るい画素値以外を全部暗くするため画像全体が暗くなる。手法 [14] の処理を表すトーンカーブを図 29 に示す。赤丸は大気光の明るさである。図 29 を見ると、トーンカーブが大気光付近で急激に右上がりになるカーブである事が分かる。補正の値を異常に小さくした場合と似たトーンカーブとなっており、画像を暗くするトーンカーブである。つまり、手法 [14] による画像の鮮明化とは、画像を暗くする事であると言える。霞画像は画像全体が明るく霞むため暗くする処理は適しているが、図 29 のトーンカーブは極端に暗くする曲線であり、霞除去の効果が強すぎると言える。

また、手法 [14] は鮮明化効果が強いいため、白色画素の各 RGB 色チャンネルの値に大きな差が生じ、白色画素が有彩色画素に変化して偽色が発生する。偽色発生の原因は、トーンカーブの傾きが急激である事と、トーンカーブが RGB 色チャンネルで統一されない事にあり、偽色は白色によく発生する。図 29 から、高強度ではトーンカーブの傾きが急激であるため、白色程鮮明化によって各 RGB 色チャンネルの値の変化が大きく、白色の各色チャンネルの値の僅かな差が広がりやすい事が分かる。さらに、大気光の各 RGB 色チャンネルが同値でない場合、各 RGB 色チャンネルでトーンカーブが異なり、入力画素の各 RGB 色チャンネルが同値であっても、結果画素の各 RGB 色チャンネルの値に差が生じる。よって、白い対象物において偽色が発生しやすい理由は、上記の 2 つの原因が組み合わさる事である。黒い画素で偽色が発生しにくいのは、図 29 のトーンカーブにおいて、入力が「0」付近の左下部分の傾きがほぼ水平であり、結果画素の各 RGB 色チャンネルの値の差はほぼ広がらないためである。

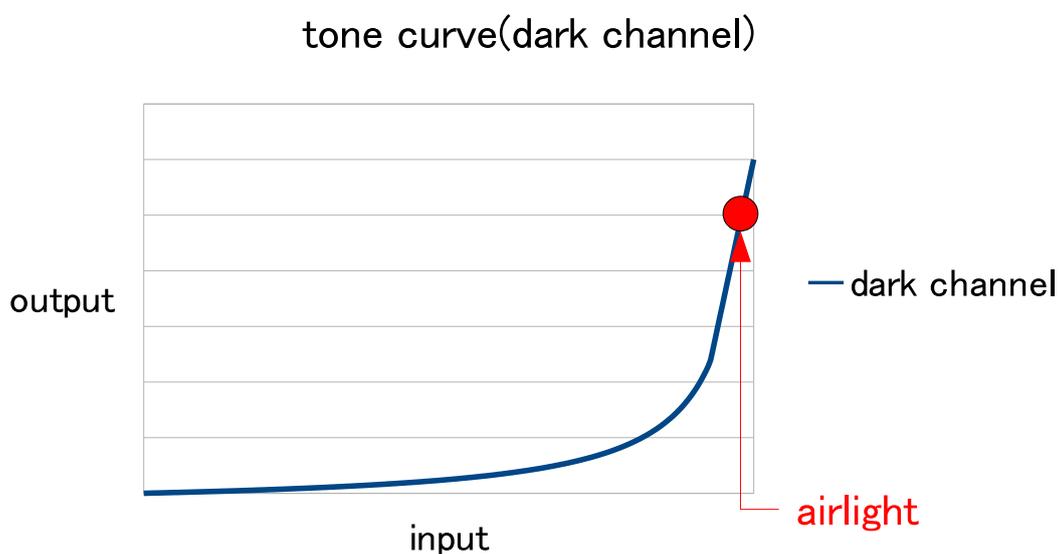


図 29: ダークチャンネルのトーンカーブ

2.2 CLAHE

2.2.1 局所制限ヒストグラム平坦化 (CLAHE)

CLAHE は、画像をブロック分割し、各ブロックでヒストグラム平坦化を行い、ブロックノイズを除去するためにブロック間で線形補間を行う事で、鮮明化効果を各ブロックで適する様に調節して画像を鮮明にする手法である。分割した各ブロックにおいて、ヒストグラムのクリップ処理によって、ヒストグラム平坦化の効果を調節する。クリップ処理とは、累積ヒストグラムの計算前に予めヒストグラムピークを削って各ビンに再分配しておく処理の事であり、この処理によって空や道路等の様な 1 色の大きな対象物を含むブロックで明度整合の問題を回避する。以下、CLAHE の具体的な処理方法を説明する。

2.2.2 ヒストグラム平坦化

ヒストグラム平坦化は、画像の色ヒストグラムを平坦な形にする事で、コントラストを改善する手法であり、全色 (ヒストグラムビン) の画素数 (出現頻度) を同じするという事である。しかし、実際には画像中で全色の各画素数を同じにする事は出来ない。そこで、各ヒストグラムビンの値が同じであれば累積ヒストグラムは線形なグラフとなる性質を利用して、累積ヒストグラムが線形になる様に、各ビンの位置を変える事で画像のコントラストを上げる。

ヒストグラム平坦化は、式 (7) で表される。ここで、 I は原画像、 O は結果画像、 h はヒストグラム値、 l はヒストグラムビン、 i は 0 から l までの累積を表す変数、 $size$ は全画素数である。この式は、入力画像の累積ヒストグラム値を階調値で線形変換する式である。

図 30 に、ヒストグラム平坦化による累積ヒストグラムの変化例を示す。図 30(a) は原画像、図 30(b) はヒストグラム平坦化の結果、図 30(c) は (a) と (b) の累積ヒストグラムのグラフである。青線は全ヒストグラムビンのヒストグラム値が同じ場合の累積ヒストグラム、赤線は (a)、黄線は (b) の累積ヒストグラムである。青線は、ヒストグラム平坦化で理想とする累積ヒストグラムである。図 30(a) の累積ヒストグラムは比例直線から大きくかけ離れているが、図 30(b) の累積ヒストグラムは、比例直線に近づいている事が分かる。

$$O_i = \sum_{i=0}^{I_i} h_i \times \frac{255}{size} \quad (7)$$



図 30: 累積ヒストグラム

2.2.3 クリップ処理

CLAHEでは、各ブロックのヒストグラムをクリップ処理する事で、各ブロックのヒストグラム平坦化の効果を調節する。図31にクリップ処理の様子を示す。図31は、[6]に掲載されている図である。図31(a)は原画像、図31(b)は(a)のヒストグラム、図31(c)は、クリップ処理の閾値を変えた場合の効果を示す図である。図31には道路が映っており、コントラストをあまり上げない事が望まれる場合の例である。図31(b)には、緑点線の「cliplimit」が2つあり、これがクリップ処理の閾値である。クリップ処理とは、ヒストグラム平坦化をする前に、この閾値より上のヒストグラムを取り除き、その取り除いた分を全ビン(階調値)に分配する事である。図31(c)上段に、2つの閾値のクリップ処理例を示す。「cliplimit1」では、切り取った量が少いためヒストグラムの形は図31(b)とあまり変わらないが、「cliplimit2」では、切り取った量が多いためヒストグラム全体が高くなる。図31(c)中段は、クリップ処理後に(b)のヒストグラムを平坦化した結果のヒストグラムである。ここで、累積値は(c)上段のヒストグラムで算出するが、平坦化するヒストグラムは(c)上段ではなく(b)である事に注意する。「cliplimit1」では、ヒストグラムが平坦化され大きく形を変えているが、「cliplimit2」では(b)とあまり変わらない。これは、「cliplimit2」において(c)上段で切り取った多くの量を全階調値に再分配し、累積値を計算する(c)上段のヒストグラムを平坦にしたためである。結果画像は図31(c)下段である。図31(c)左図はヒストグラムが平坦化され、道路に不自然な白や黒が現れ明度整合の問題が発生しているが、図31(c)右図はヒストグラムが平坦化されないため、明度整合の問題を回避出来ている。[6]では、この「cliplimit」を各ブロックで調節する事で、ヒストグラム平坦化を必要なブロックにのみ行う。クリップ処理の閾値は、各ブロックの分散値と画像全体の分散値で調節する。画像全体の分散値は画像全体の不鮮明さを表し、各ブロックの分散値は各位置の不鮮明さを表す。

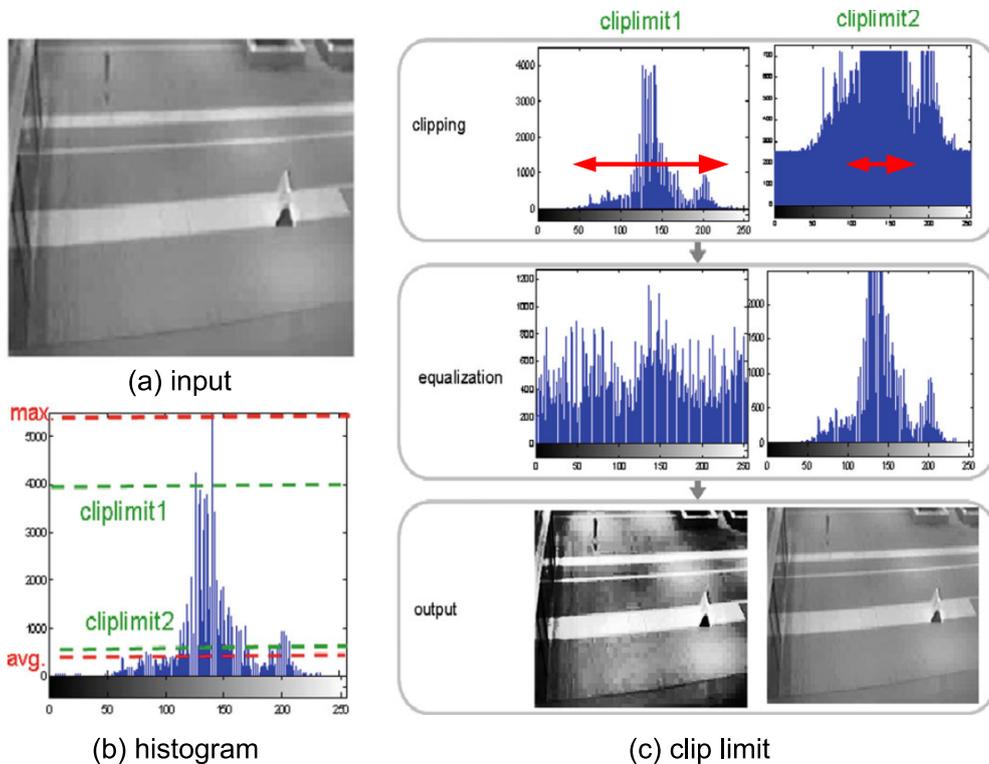


図 31: クリップ処理の例

2.2.4 画素の線形補間

画像の線形補間は、画素値のノイズ除去や不正データ除去等に使用されるアルゴリズムで、周辺の信頼出来る画素値から、ノイズの様な信頼出来ない注目画素値を補正する手法である。

図 32(a) に線形補間の例を示す。赤枠は注目画素、青枠は基準画素である。図 32(a) では、信頼出来ない注目画素を 4 つの基準画素で線形補間する場合の例である。線形補間において、補間される赤枠画素は、位置に近い基準画素の影響を大きく受ける様に補間される。

線形補間は式 (8) で表される。ここで、 I は基準画素、 O は結果画素、 x は注目画素の水平位置、 y は注目画素の垂直位置、 l は図 33(a) の左側の基準画素の水平位置、 r は図 33(a) の右側の基準画素の水平位置、 u は図 33(a) の上側の基準画素の垂直位置、 d は図 33(a) の下側の基準画素の垂直位置、 w_h は水平距離の重み、 w_v は垂直距離の重みである。 w_h と w_v は、注目画素と基準画素の距離から算出される。

$$\begin{aligned} O(x, y) &= (w_h) \times (w_v) \times I(l, u) \\ &+ (1 - w_h) \times (w_v) \times I(r, u) \\ &+ (w_h) \times (1 - w_v) \times I(l, d) \\ &+ (1 - w_h) \times (1 - w_v) \times I(r, d) \\ w_h &= 1 - \frac{x - l}{r - l} \\ w_v &= 1 - \frac{y - u}{d - u} \end{aligned} \tag{8}$$

2.2.5 トーンカーブの線形補間

CLAHE ではブロックノイズを除去するために、信頼出来るデータを各ブロックのヒストグラム平坦化によるトーンカーブとして線形補間を行う。各画素は、属するブロックのヒストグラム平坦化の結果と、画素が隣接ブロックに属していると仮定した場合の隣接ブロックのトーンカーブの結果から、線形補間される。図 32(b) にヒストグラム平坦化の結果の線形補間の例を示す。

トーンカーブの線形補間は、式 (9) で表される。ここで、 I は原画像、 O は結果画像、 $HE(a, b, c)$ はブロック番号 (a, b) における入力画素 c のヒストグラム平坦化の結果画像、 Bl は図 33(b) の左側ブロックの水平ブロック番号、 Br は図 33(b) の右側ブロックの水平ブロック番号、 Bu は図 33(b) の上側ブロックの垂直ブロック番号、 Bd は図 33(b) の下側ブロックの垂直ブロック番号、 x は注目画素の水平位置、 y は注目画素の垂直位置、 l は図 33(b) の左側の基準画素の水平位置、 r は図 33(b) の右側の基準画素の水平位置、 u は図 33(b) の上側の基準画素の垂直位置、 d は図 33(b) の下側の基準画素の垂直位置、 w_h は水平距離の重み、 w_v は垂直距離の重みである。各基準位置は、各ブロックの中心位置とする。このトーンカーブの線形補間により、ブロックノイズを除去する。

$$\begin{aligned}
 O(x, y) &= (w_h) \times (w_v) \times HE(Bl, Bu, I(x, y)) \\
 &+ (1 - w_h) \times (w_v) \times HE(Br, Bu, I(x, y)) \\
 &+ (w_h) \times (1 - w_v) \times HE(Bl, Bd, I(x, y)) \\
 &+ (1 - w_h) \times (1 - w_v) \times HE(Br, Bd, I(x, y)) \\
 w_h &= 1 - \frac{x - l}{r - l} \\
 w_v &= 1 - \frac{y - u}{d - u}
 \end{aligned} \tag{9}$$

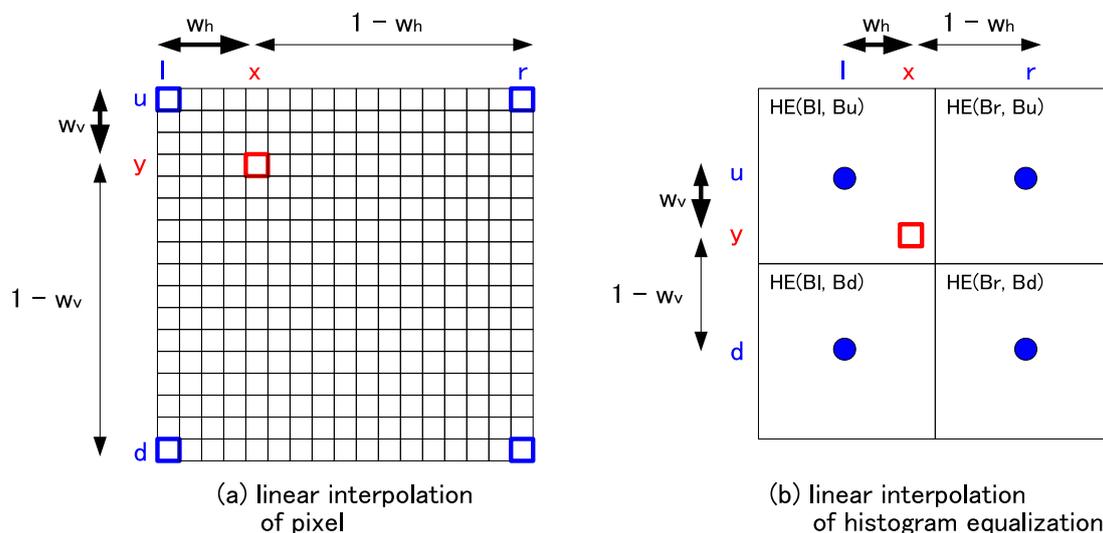


図 32: 線形補間の例

2.2.6 CLAHE の結果

図 33 に CLAHE の例を示す。図 33(a) は原画像、図 33(b) はブロック分割してヒストグラム平坦化をした結果画像、図 33(c) は線形補間後の結果画像である。図 33(b) ではブロックノイズがあるが、ヒストグラムの線形補間によって図 33(c) では除去されている。しかし、図 33 上段の様に、1面に広がる雪原に偽色が発生している。これは、根本的にヒストグラム平坦化の問題点である偽色の発生を CLAHE でも解決しきれないためである。CLAHE は、明度整合の問題や偽色の発生に対して、ブロック分割とクリップ処理で対策しているが、この対策は鮮明に見えている大きな 1 色の対象物への対策である。図 33 上段は不鮮明な雪原であり、雪原の偽色を抑制するためには平坦化の効果を弱めなければならず、これは本研究の目的から大きく外れる。また、図 33 の 3 段目では、ブロック間で色が大きく異なる画像下部の赤い葉と緑の葉の間で、ハロー効果の様に色の漏れが発生している。これは、ヒストグラムの線形補間により、隣接ブロックのヒストグラムの影響を受けているためである。



図 33: CLAHE の例

2.2.7 偽色の原因

ヒストグラム平坦化と比べて CLAHE は、ブロック分割した事によって画像全体の明るさが崩れる明度補正の問題は解消されている。しかし、各ブロックで特有のトーンカーブを生成するため、対象物のエッジ周辺にハロー効果の様な色漏れが発生する。これは、隣接ブロック間でブロック内に占める対象物の割合が大幅に異なる時に起きる。また、各ブロックで平坦化の効果が違いすぎると、色漏れが起きやすい。鮮明な画像でも局所的に色分布が偏ったブロックでは平坦化が強く行われるため、1部で色漏れが発生する。よって、ブロックノイズを除去するために、各ブロックで独自に生成した全く異なるヒストグラムを線形補間する事には問題がある。

偽色については、Koschmieder の法則に基づく手法よりも CLAHE は偽色の発生を抑えている。しかしこれは、線形補間によって偽色が薄まっているだけである。CLAHE では、霧状にモヤモヤした赤や緑や水色の偽色が発生する。

図 34 に、CLAHE の線形補間前後の結果を示す。図 34(a) は原画像、図 34(b) は各ブロックでヒストグラム平坦化を行った結果、図 34(c) は線形補間後の結果である。図 34(b) を見ると、各ブロックで偽色は多数発生している。図 34(c) で偽色が目立たないのは、線形補間による効果である。偽色は目立たないだけであって、広範囲に薄く発生している。

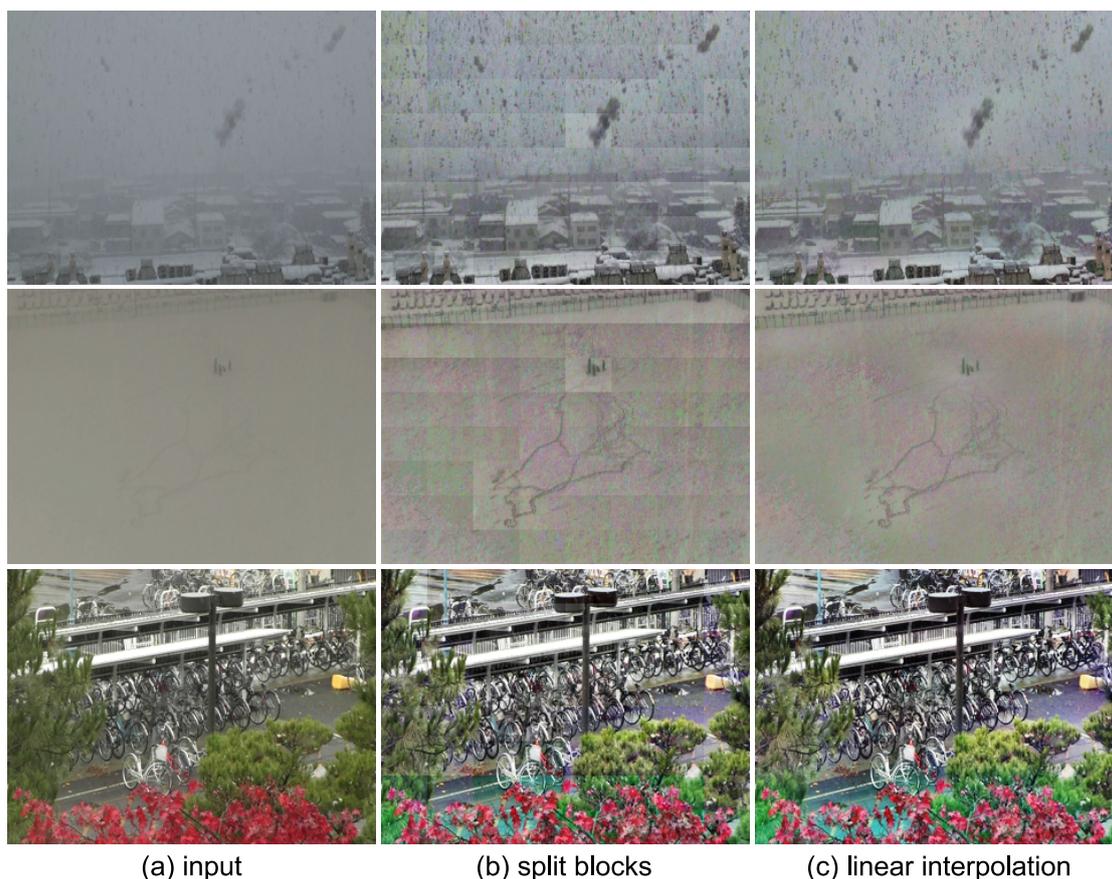


図 34: CLAHE の偽色

2.3 Retinex 理論

2.3.1 Retinex

Retinex 理論は、周囲を照らす照明光と各対象物の光の反射成分の比率から、人はその場面に適した色を認識するという理論である。この理論に基づく手法は、照明光は対象物に依存せず周囲に存在する明るさ、反射光は各対象物で特有の明るさと仮定し、その対数比率から各対象物を強調して画像を鮮明化する。原画像の照明光は未知であるため、Retinex 理論では照明光を空間フィルタリングによる平滑化の結果と仮定する。しかし、画像の各位置で適切な平滑化が必要であり、照明光の推定に失敗すると返って不鮮明な画像が生成される。これを回避するために、平滑フィルタを複数使用する手法 [13] があるが、根本的に適切な平滑フィルタの設定は困難であり、さらに計算時間も膨大となる。

Retinex 理論は、式 (10) で表される。ここで、 I は原画像、 R は対象物の反射率、 L は照明光、 x は画素位置である。Retinex 理論では、各対象物の色を推定する事は、各対象物が照明光をどれだけ反射しているのか推定する事と考える。照明光は未知であるが広範囲に拡散し、画像全体に分布しており、もし対象物が無い場合、入力画像とガウシアンフィルタの結果は等しくなる。対象物がある場合、その周辺と色成分は異なり、入力画像とガウシアンフィルタの結果の間に差が生じ、この差が対象物の色特性を表す。そのため、照明光の推定に広範囲なガウシアンフィルタが適用される。しかし、人間は暗い色の变化ほど敏感に反応する特性から、照明光と反射光の比率は対数を使用して式 (11) が使用される事が多い。ここで、 G はガウスカーネル、 $*$ は I と G の畳み込み積分 (ガウシアンフィルタ) である。

図 35 と図 36 に、空間平滑フィルタの大きさを変えた場合の例を示す。図 35 は昼間画像、図 36 は夜間画像である。(a) は原画像、(b) はフィルタサイズ 3×3 のガウシアンフィルタを使用した Retinex の結果画像、(c) は 10×10 、(d) は 100×100 の結果画像である。小さなガウシアンフィルタでは境界線の情報しか現れず、フィルタが大きくなるにつれて様々な対象物の色が現れてくるが、境界線はぼやける。図 35 と図 36 の上段では大きな対象物が無く、殆ど雪しか映っていないため、小さな人影が鮮明化されているが、その他の画像では色が薄く鮮明化されていない。適切なフィルタサイズは画像の構成によって異なり、対象物より大きなフィルタサイズにしなければならないため、計算時間はその他のアルゴリズムより膨大になる。

$$I(x) = R(x)L(x) \quad (10)$$

$$R(x) = \log \frac{I(x)}{I(x) * G(x)} \quad (11)$$

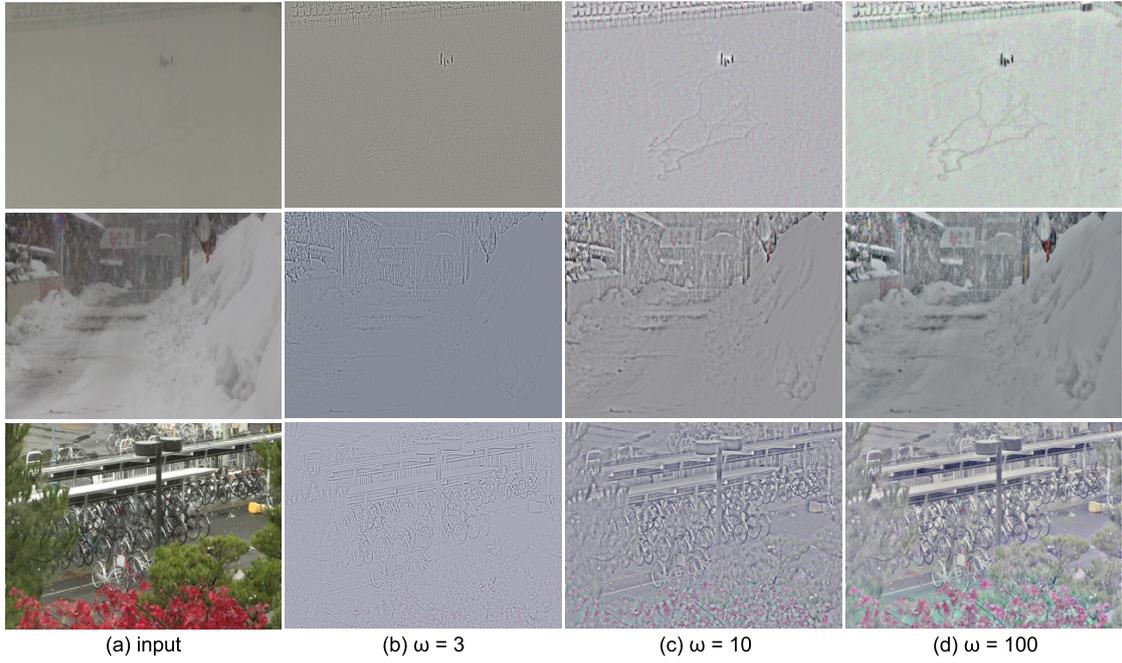


図 35: 昼間の画像の Retinex の例

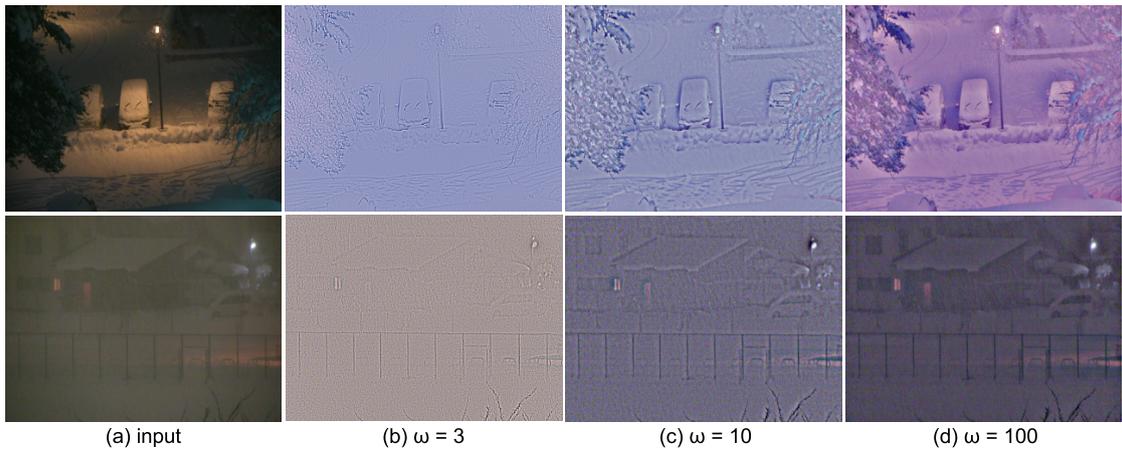


図 36: 夜間の画像の Retinex の例

2.3.2 マルチスケール Retinex

Retinex で使用するガウシアンフィルタが小さい場合はエッジ情報を良く表し、大きくなるにつれて対象物内部の色を良く表す。よって、小さいフィルタの Retinex 結果と大きなフィルタの Retinex 結果を合成する手法 [13] が提案されている。これをマルチスケール Retinex と呼び、複数の Retinex の結果を平均化する事で、エッジも対象物の色も良く表す手法として研究されている。

2.3.3 マルチスケール Retinex の結果

図 37 に、マルチスケール Retinex の結果例を示す。図 37 上段は原画像、図 37 下段は結果画像である。ガウシアンフィルタは、標準偏差を「15」「80」「250」として、「 60×60 」「 320×320 」「 1000×1000 」の3種類とした。図 37 を見ると、マルチスケール Retinex は画像全体が不鮮明で対象物が小さい画像を鮮明にするが、元々鮮明な画像を不鮮明にしてしまう場合もあり、夜間画像も鮮明にする事は出来ない。

2.3.4 不鮮明画像の原因

マルチスケール Retinex は、大きな対象物が存在する画像を不鮮明にしてしまう。これは、巨大なガウシアンフィルタと原画像との対比を結果画像とするため、フィルタより大きな対象物はガウシアンフィルタと原画像の結果の差が小さくなり、対象物を環境光としてしまうからである。また、複数の Retinex の結果の合成方法も問題である。不鮮明画像では小さなフィルタによるエッジ情報と大きなフィルタによる色情報を平均的に組み合わせれば画像が鮮明化されるが、鮮明画像では Retinex の結果を平均化すると色情報が減ってしまうため、返って不鮮明な画像にしてしまう。Retinex 理論は、悪天候の屋外画像において図 37 の左側の画像の様に雪に覆われて不鮮明な対象物が小さい場合には効果的な手法であるが、鮮明にしたい対象物の大きさが不定の場合や鮮明画像に対しては適用が難しい。



図 37: マルチスケール Retinex の例

3 ブライトチャンネル

3.1 霞除去の課題

3.1.1 白い対象物の扱い

Koschmieder の法則に従う手法 [14] は、ダークチャンネルが低い値となる暗い色を鮮明な色と仮定しているため、鮮明化によって全体が暗い画像を生成する。よって、後処理の明度補正を行う必要があるが、各画像に適切な明度補正処理を行う事は困難である。また、Koschmieder の法則に則る手法は、高明度は最も霞む色 (大気光) であるという仮定から、白い対象物を最も霞んだ対象物として扱い過強調するため、偽色の発生や色飽和などを引き起こす。図 29 のトーンカーブからも、入力が高明度ほど出力が急激に高くなる事が分かる。手法 [14] では、各対象物は小さいため、ある程度大きな空間フィルタリングを使用してダークチャンネルを算出する事で、白い対象物に発生する偽色の問題は解決できると仮定しているが、降雪画像において雪原や積雪は小さな対象物ではないため、手法 [14] の仮定は本研究の目的に適さない。

図 38 に例を示す。図 38(a) は原画像、図 38(b) は手法 [14] の明度補正前の結果、図 38(c) は手法 [14] の明度補正後の結果である。明度補正は手法 [33] を使用し、全画像に同じパラメータ値を設定した。図 38 の上段と中段は同じ場面で照明条件が少し異なる画像である。図 38(b) の画像から、暗い箇所と明るい箇所が極端な明るさになっている事が分かる。また、図 38(b) の下段では雪原に多数の緑色の偽色が発生している。さらに、図 38 中段の (b) と (c) では、雲に偽色が発生している。これは、図 38 の上段に合わせた明度補正処理を図 38 の中段と下段にも適用しているため、画像に適した明度補正のパラメータ設定に失敗したためである。結果画像の偽色を抑制するためには、画像に合わせた明度補正を選択する事も必要である。

本研究では、降雪画像の鮮明化を行うために大きな白い対象物を避ける事は出来ないため、明るい色を鮮明であると仮定する特徴量を新たに導入する事で、この問題を解決する。そこで、ダークチャンネルとは別に、「明るい程鮮明である」と仮定した特徴量「ブライトチャンネル」を導入する。ダークチャンネルとブライトチャンネルの両方の特徴量を使い分ける事によって、従来手法では明るい画素に発生していた偽色を抑制する。また、ブライトチャンネルを導入する事によりトーンカーブが S 字曲線となるため、明度補正が不要となる。



(a) input

(b) without brightness correction

(c) brightness correction

図 38: 極端に変わる明るさの例

3.2 手法の説明

本手法の流れを説明する。まず、従来手法のダークチャンネルに加えて、白い対象物の霞成分を表す特徴量「ブライツチャンネル」を算出する。次に、大気光、透過係数、重み係数の3特徴を推定する。ブライツチャンネルは、大気光と透過係数の推定に用いる。図39に提案手法1の流れ図を示す。

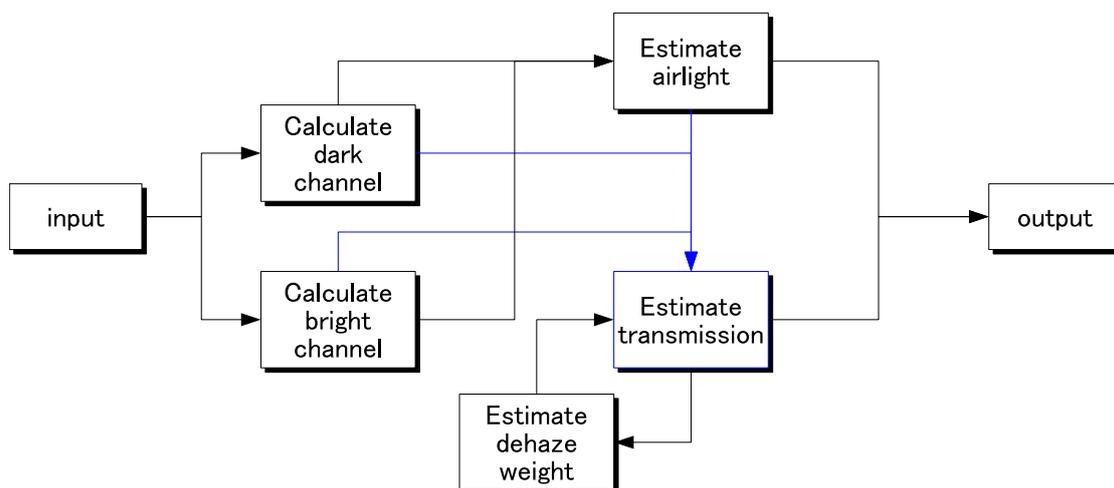


図 39: 提案手法 1 の流れ

3.2.1 ブライツチャンネルの算出

本研究では白い対象物に対応するために、暗い程鮮明である事を表す「ダークチャンネル」に加え、明るい程鮮明である事の特徴量を導入する。この特徴量を「ブライツチャンネル」と呼ぶ。ブライツチャンネルは、式(12)で算出される。ここで、 B はブライツチャンネル、 x は注目画素位置、 Ω はフィルタ、 y は x を中心としたフィルタ内画素位置、 \max は最大値、 c は色チャンネル、 I は原画像である。ダークチャンネルは各色要素の最小値で算出されていたが、ブライツチャンネルは各色要素の最大値を用いて算出される。式(12)により、明るい画素程ブライツチャンネルの値は小さく、明るい画素の霞成分が低い事を表す。このブライツチャンネルは、白い対象物の霞の程度を表すために使用される。

各画素の霞成分は、ダークチャンネルとブライツチャンネルのどちらかを選択して算出される。通常の対象物にはダークチャンネルが使用され、白い対象物にはブライツチャンネルが使用される。

$$B(x) = 255 - \max_{y \in \Omega(x)} \left(\max_{c \in R, G, B} I(y)^c \right) \quad (12)$$

図 40 に、ダークチャンネルとブライトチャンネルの算出結果を示す。黒い程霞成分が少なく、白い程霞成分が多い事を表す。図 40(a) は原画像、図 40(b) はダークチャンネルの結果、図 40(c) はブライトチャンネルの結果を示す。図 40(b) では、白い対象物が鮮明に見えている箇所でも霞成分が多く算出されている。例えば、図 40 上段の山頂に積もった雪や、図 40 中段の画像中央等にある道路の積雪や信号機の積雪などは、他の霞んだ箇所よりも鮮明に見えるが、ダークチャンネルはそれらの画素の霞成分が多いと推定する。しかし、ブライトチャンネルを導入する事によって、図 40(c) では上記の様な白い対象物の霞成分が低く推定されている。ブライトチャンネルを使用する事で、従来では対応出来なかった問題を解決出来る事が分かる。さらに、図 40 の下段は、画像全体が霞んだ雪原の画像で、白い鮮明な対象物が無い画像である。図 40 下段の (b) と (c) は、小さな黒い人影以外に霞成分の算出結果に差は無く、白い対象物が存在しない画像でも、ブライトチャンネルは悪影響を与えない事が分かる。

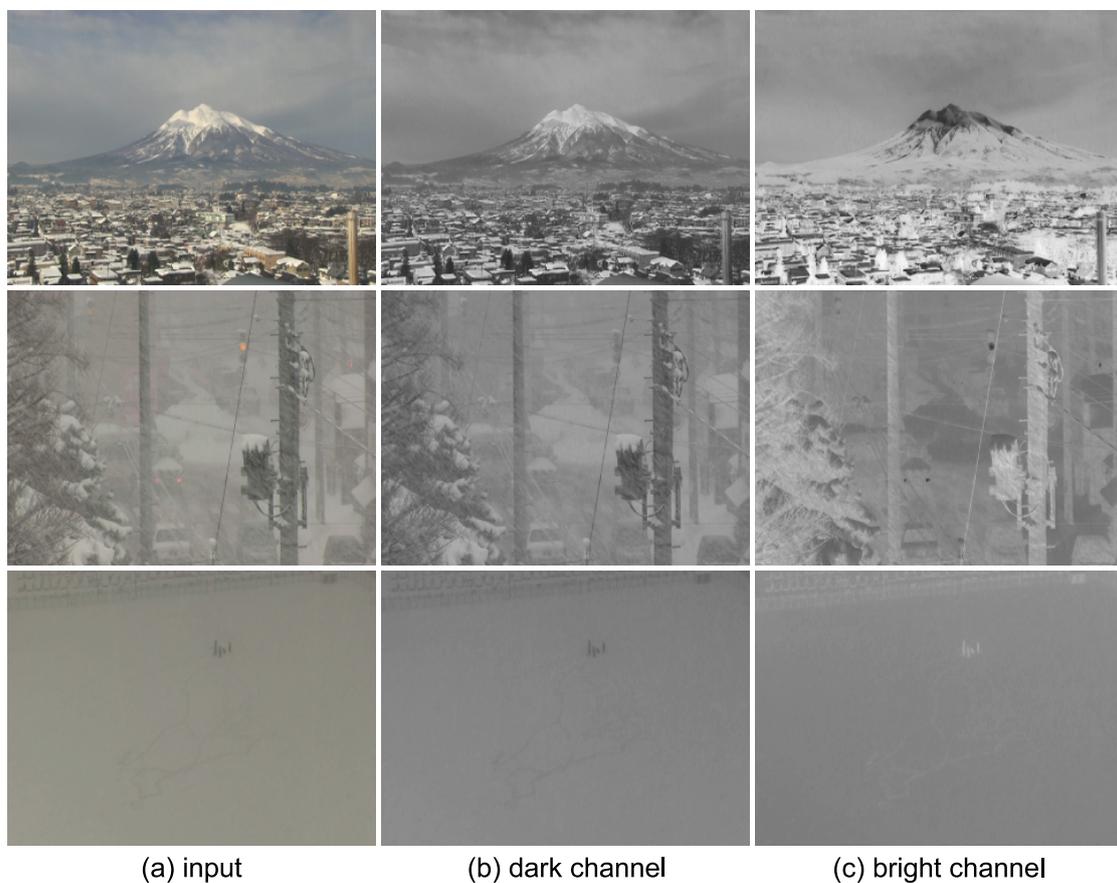


図 40: ダークチャンネルとブライトチャンネル

3.2.2 透過係数の算出

透過係数は、式 (13) で算出される。ここで、 M はダークチャンネルとブライトチャンネルによる霞成分、 D はダークチャンネル、 B はブライトチャンネル、 t は透過係数、 x は注目画素位置、 \min は最小値、 c は色チャンネル、 I は原画像、 A は大気光、 ω は重み係数である。霞成分は、ダークチャンネルとブライトチャンネルの小さい方で算出される。

従来では明るい画素程霞むという仮定だったが、本研究では暗いまたは明るい画素程鮮明であり、中くらいの灰色の画素程不鮮明であると仮定する。これは、図 40 下段の様に、酷い吹雪の画像は白くなく薄暗い画像である事からも、自然な仮定である。

$$\begin{aligned} M(x) &= \min(D(x), B(x)) \\ t(x) &= 1 - \omega \frac{M(x)}{A^c} \end{aligned} \tag{13}$$

図 41 に、ダークチャンネルのみを使用して算出した透過係数と、ダークチャンネルとブライトチャンネルを使用して算出した透過係数の違いを示す。黒い程透過係数が低くて霞成分が多く、白い程透過係数が高くて霞成分が少ない事を表す。図 41(a) は原画像、図 41(b) はダークチャンネルから算出した透過係数、図 41(c) はダークチャンネルとブライトチャンネルを使用して算出した透過係数を示す。図 40 と同様に、図 41(b) では白い画素の透過係数が低く算出されているため、入力画像の白い対象物には、物体色よりも大気光の割合が多く含まれている事を表す。そのため、図 41(a) では比較的鮮明に見えるこれらの白い画素が過強調され、偽色発生や色飽和が起きる。一方、図 41(c) では、これらの白画素に高い透過係数が割り当てられている。よって、画像中の不鮮明な箇所よりも鮮明化効果を抑えるため、偽色発生や色飽和が抑えられる。また、図 41 下段の (b) と (c) は、どちらも小さな黒い人影に高い透過係数を割り当てているため、ブライトチャンネルは悪影響を与えない事が分かる。

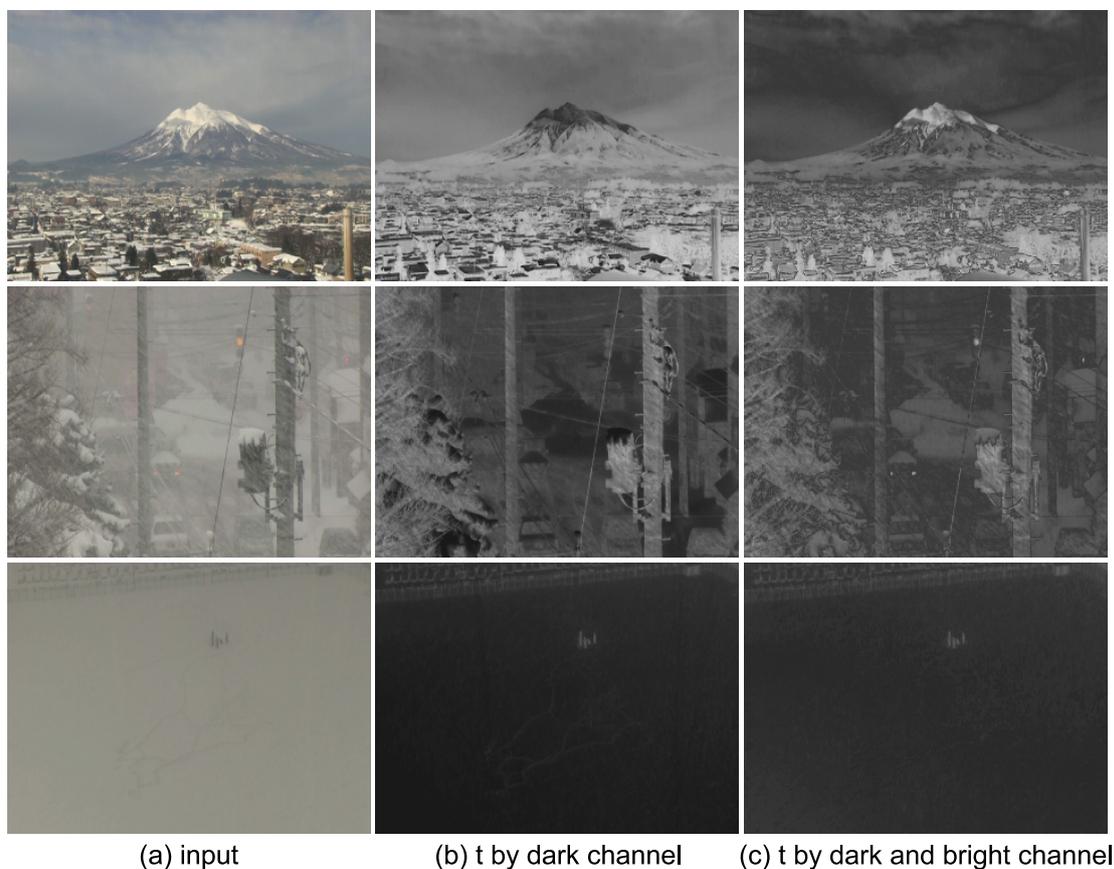


図 41: 透過係数の違い

3.2.3 大気光の算出

従来では、大気光は1番明るい色と仮定された。しかし本研究では、ブライトチャンネルを導入するため、画像中に大気光より明るい対象物が存在すると事を前提とする。

大気光の値は、鮮明化の結果に大きな影響を与える。図42に、大気光の値を変えた場合の鮮明化結果を示す。ここでは、従来手法 [14] の結果を示す。図42(a)は原画像、図42(b)から(f)は大気光の値を様々な値に変えた結果を示す。図42(b)から(f)のトーンカーブを図43に示す。図42(b)から(f)を見ると、大気光を明るい色にすると画像全体は暗くなり、大気光を暗い色にすると画像全体が明るくなる事が分かる。これは、手法 [14] の式 (6) は、大気光より僅かに暗い色程暗くする効果が大きく、大気光より明るい色程明るくする効果が大きいためであり、この事は図43に示すトーンカーブからも分かる。さらに、大気光より明るい色は明るい程、急激にさらに明るくなるため、図42(b)や(c)では色飽和が起きやすくなる。

図42(b)から(f)の中で、1番鮮明化画像として良い結果を示しているのは、図42(d)である。他の図に比べて、1番不鮮明な空や山の麓が明らかに鮮明になっている。従来手法では、この後に明度補正を行うためこの段階で評価する事は出来ないが、図42(e)や(f)では、既にこの段階で山頂の雪に橙色の偽色が発生している。図42(d)は、青い空も白い雲も見えていて、白い対象物に偽色が発生せずに、明らかにコントラストが改善されていて、後処理の明度補正も不要である。

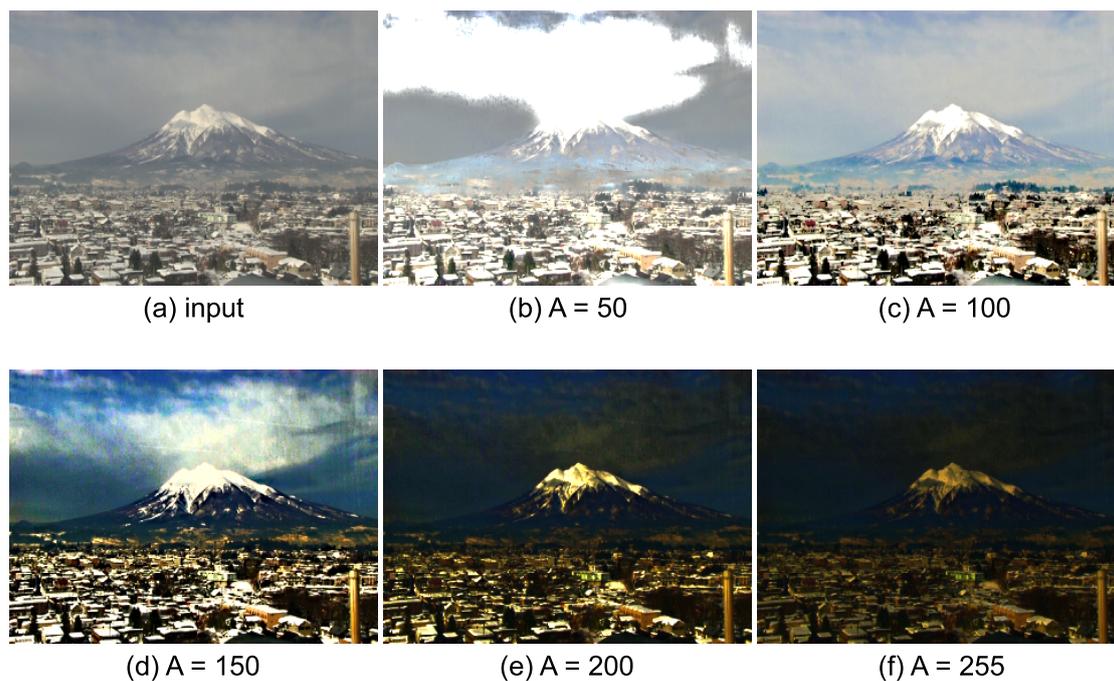


図 42: 大気光の影響

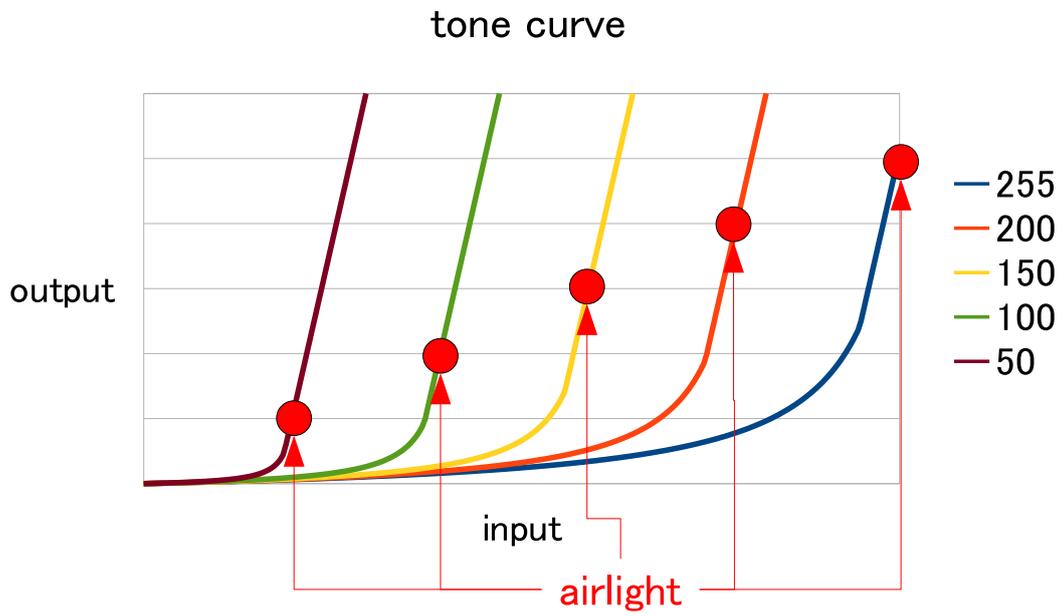


図 43: 大気光の違いによるトーンカーブの変化

大気光の推定は、鮮明化において重要な処理である。最も明るい色を大気光に設定すると白い対象物に偽色が発生し、大気光を暗くしすぎると色飽和が発生する。従来では霞むと画像が明るくなると仮定していたが、本研究では霞成分を利用して大気光を推定する。

霞が無い鮮明な画像は、各対象物の色が鮮明に見えて霞成分は低くなる。一方、霞画像では各対象物の色は不鮮明になり、画像全体は霞の色で覆われ霞成分は、特定の値に集中する。そこで本研究では、霞成分が集中する色が大気光であると仮定し、霞成分のヒストグラムのピークを検出してその色を大気光とする。

図 44 に、不鮮明画像と鮮明画像において、式 (13) で算出した霞成分 (M) の分布の違いを示す。図 44(a) は原画像、図 44(b) は霞成分画像、図 44(c) は (b) のヒストグラムである。図 44(b) は白い程霞成分が高い事を表す。図 44 の上段は酷く霞んだ画像、図 44 の中段と下段は鮮明な画像である。図 44 の上段では画像全体で霞成分が高いが、図 44 の中段と下段では霞成分が低い箇所も多い。この違いは、図 44(c) から分かる。図 44 の上段の霞成分は特定の値に集中し、ヒストグラムの幅が狭くピークが鋭い。一方、図 44 の下段の霞成分は様々な値となり、ヒストグラムの幅は広くピークは緩やかである。この様に、霞画像の霞成分ヒストグラムがピークを持つ事から、本研究では大気光を霞成分ヒストグラムのピークの色とする。

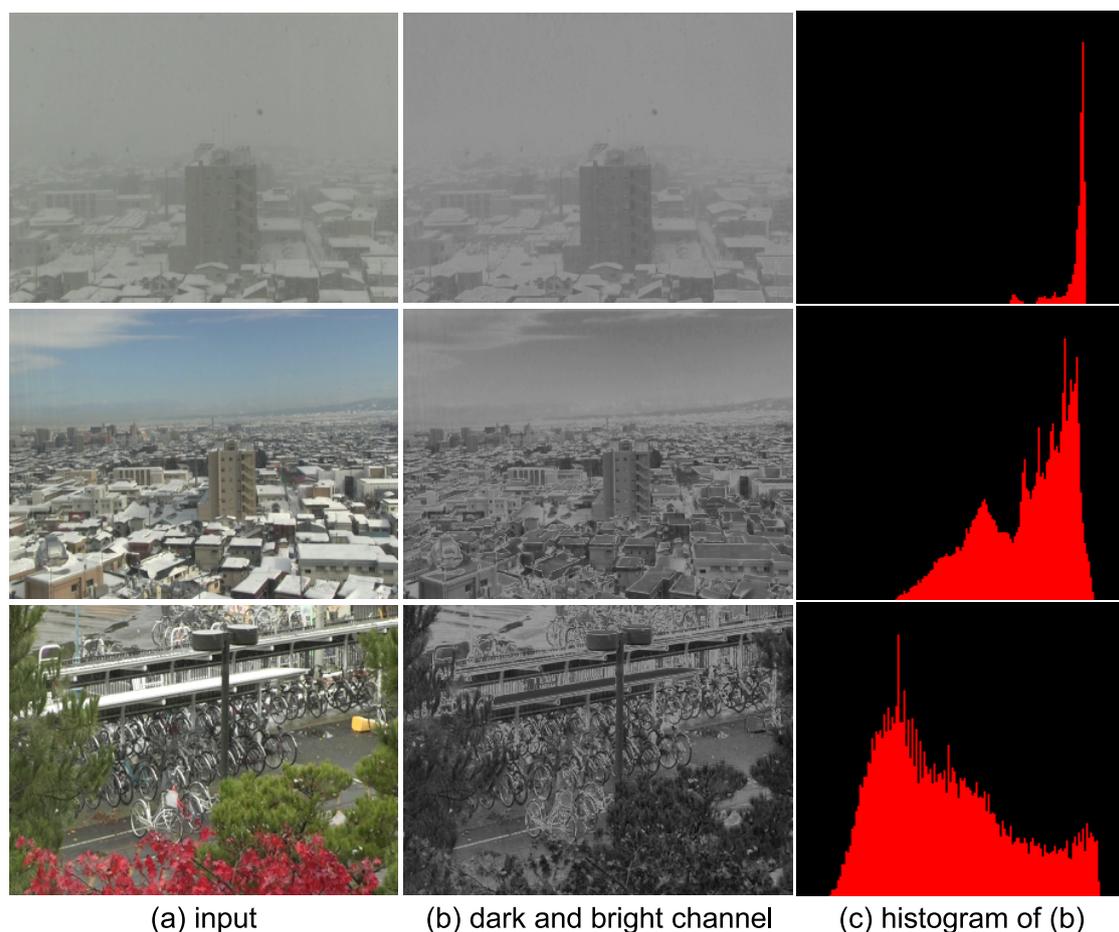


図 44: 霞成分の分布例

図 45 に、大気光を推定する様子の概念図を示す。図 45 は、霞成分のヒストグラムに、透過係数算出のグラフを重ね合わせた図である。横軸は明度を表し、縦軸はヒストグラムに対しては頻度、透過係数算出のグラフに対しては透過係数値を表す。灰色のグラフはダークチャンネルから透過係数を算出する式のグラフ、水色のグラフはブライトチャンネルから透過係数を算出する式のグラフ、黄色線は大気光を推定する探索範囲、緑線は大気光推定の計算範囲である。ここで、本来は透過係数は大気光 A が決定されないと算出出来ないが、大気光 A を画像中の最大値 L_{max} として暫定的に透過係数を算出するグラフを示す。

まず、大気光を低く推定して色飽和が起きる事を防ぐために、大気光推定値の範囲を図 45 の黄色線で示した範囲に限定する。大気光の最小値は、透過係数を推定する時に、ダークチャンネルから推定した値とブライトチャンネルから推定した値が同値になる値とする。これは、ブライトチャンネルを暗い色の霞成分の算出に使用しないためである。大気光の最大値は、画像の最も明るい色とする。これは、画像中に白い対象物が存在しない場合に、ブライトチャンネルを使用しないで従来手法 [14] と同様の結果にするためである。

大気光は、黄色線の探索範囲内で明るい値から順に、ヒストグラムピークを探索し、最初にピークと判定した値とする。ピークの判定は、図 45 の太緑線 L を探索値として、 L を中心に幅 $2w$ の細緑線内のヒストグラム値の合計が閾値を超えた場合に、 L の値を大気光とする。もし、黄色線の探索範囲内で、閾値を超える値が無かった場合は、探索範囲のヒストグラム値の平均値を大気光とする。

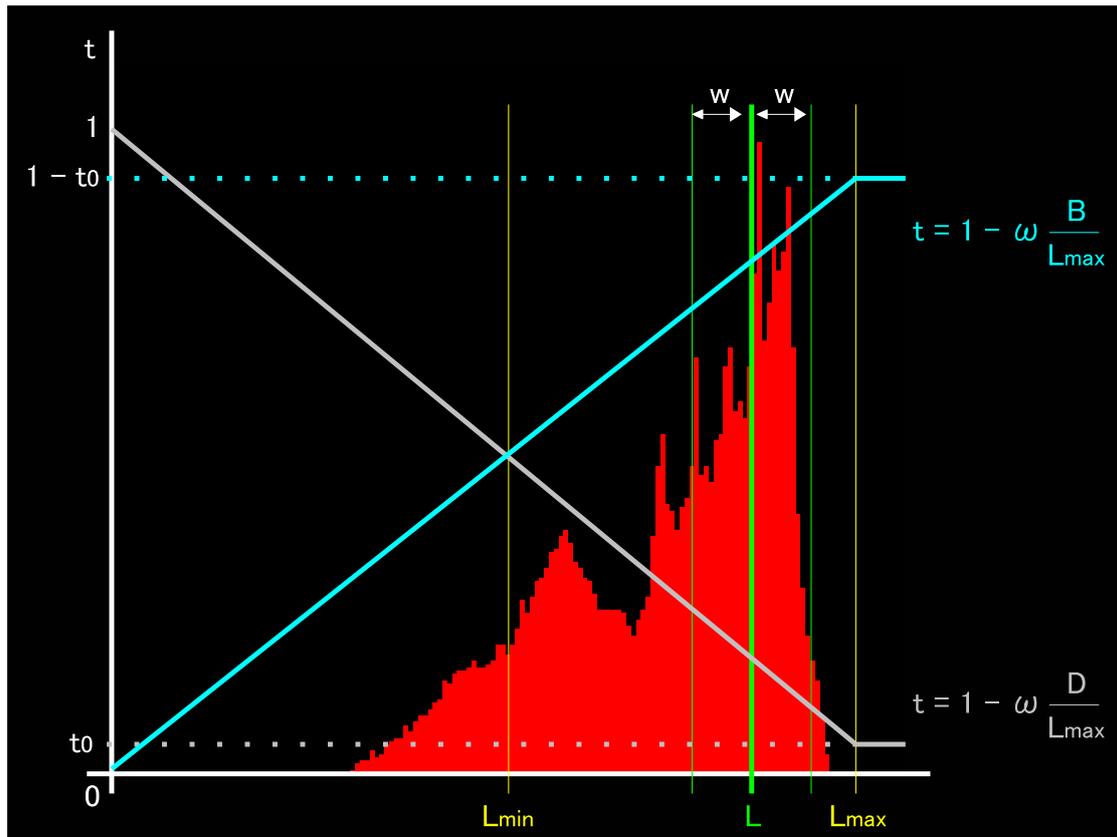


図 45: 大気光の推定

大気光を推定する探索範囲は、式 (14) で表される。大気光の適合条件は、式 (15) で表される。探索範囲内で適合条件を満たす値が無い場合は、式 (16) によって探索範囲内の平均値を大気光とする。ここで、 L は大気光探索値、 H はヒストグラム、 M は霞成分、 i は大気光推定の計算範囲、 w は大気光推定の計算幅、 th_A は判定閾値、 A は大気光、 I は原画像、 \max は最大値、 L_{min} はダークチャンネルと透過係数の関係を表すグラフとブライトチャンネルと透過係数の関係を表すグラフの交点、 c は色チャンネルである。大気光の探索範囲を式 (14) で制限し、その中で式 (15) を満たす霞成分のヒストグラムピークを計算する。

$$\begin{aligned} L_{min} &< L - w \\ L + w &< \max_{c \in R, G, B} I(x)^c \end{aligned} \quad (14)$$

$$th_A < \frac{\sum_{i=L-w}^{i=L+w} H(i)^M}{size} \quad (15)$$

$$A = \frac{\sum_{i=L_{min}}^{i=L_{max}} H(i)^M}{\sum_{i=L_{min}}^{i=L_{max}} H(i)} \quad (16)$$

3.2.4 トーンカーブの違い

ここで、本研究で導入したブライトチャンネルと大気光を低くした効果について説明する。図 46 に、従来手法のトーンカーブと本研究のトーンカーブの違いを示す。図 46 では、大気光の値を従来手法と本研究で同値にした場合のグラフである。大気光を低くした場合の効果は従来でも同じく、画像を明るくする効果を持つ。また、従来ではグラフが高明度で急激な傾きとなり、最大画素値を超える値で色飽和を起こす事に対して、本研究ではブライトチャンネルを導入した事によりグラフが S 字曲線となり、色飽和を防ぐ事が分かる。大気光より暗い箇所では暗くする効果は従来と同じく、大気光より明るい箇所では色飽和させずに S 字曲線に沿って明るくする効果を持たせる事で、明度補正を不要にしている。

また、本研究のトーンカーブは、大気光が変曲点となり、大気光を中心にトーンカーブの傾きが急激になり、大気光から離れる程トーンカーブの傾きが緩まる形となっている。これは、大気光は霞成分が集中する色と仮定した事により、その集中した色付近で効果的に鮮明化し、大気光とは異なる色では過強調しない事を表す。

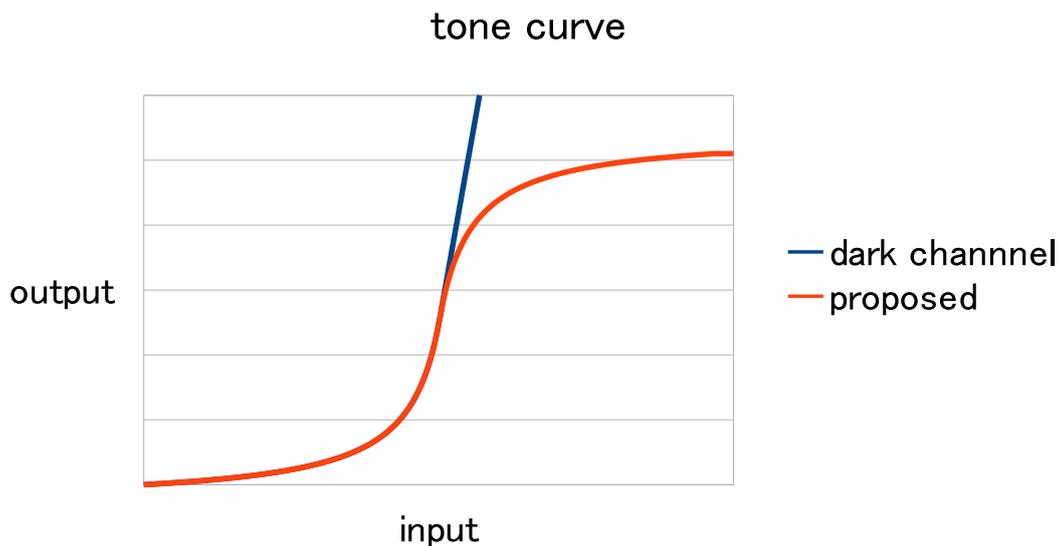


図 46: 従来と本研究のトーンカーブの違い

3.2.5 重み係数の効果

透過係数を算出する式 (13) に使用されている重み係数 ω は、霞除去の効果を調節するパラメータである。従来では、固定値「0.95」が使用されているが、理由は「完全に霞を除去すると不自然な画像になるから」である。しかし、従来手法は鮮明画像は対象としていないためであり、本来は画像の霞具合が異なればダークチャンネルから推定した霞成分の重みが同じであるはずが無い。

そこで本研究では、画像の霞具合を推定して、霞具合によって霞除去の効果を変化させるために、画像によって重み係数を変える。図 47 に、重み係数を変更した場合の結果例を示す。図 47(a) は原画像、図 47(b) は重み係数を「0.5」にした場合、図 47(c) は重み係数を「0.9」にした場合の結果である。図 47(b) と (c) を比較すると、(b) より (c) の方が鮮明化された画像である事が分かる。図 47 上段では、(c) の結果が良い画像に見えるが、図 47 下段の様に元々鮮明な画像では、(b) や (c) よりも霞除去をしない (a) の方が良い画像に見える。霞除去による鮮明化は、霞を除去するという意味だけではなく、画像の色合いを強めるコントラスト強調という意味もある。そこで本研究では、画像の霞具合によって、コントラストを強調する効果を調節するために、画像によって重み係数を変更する。

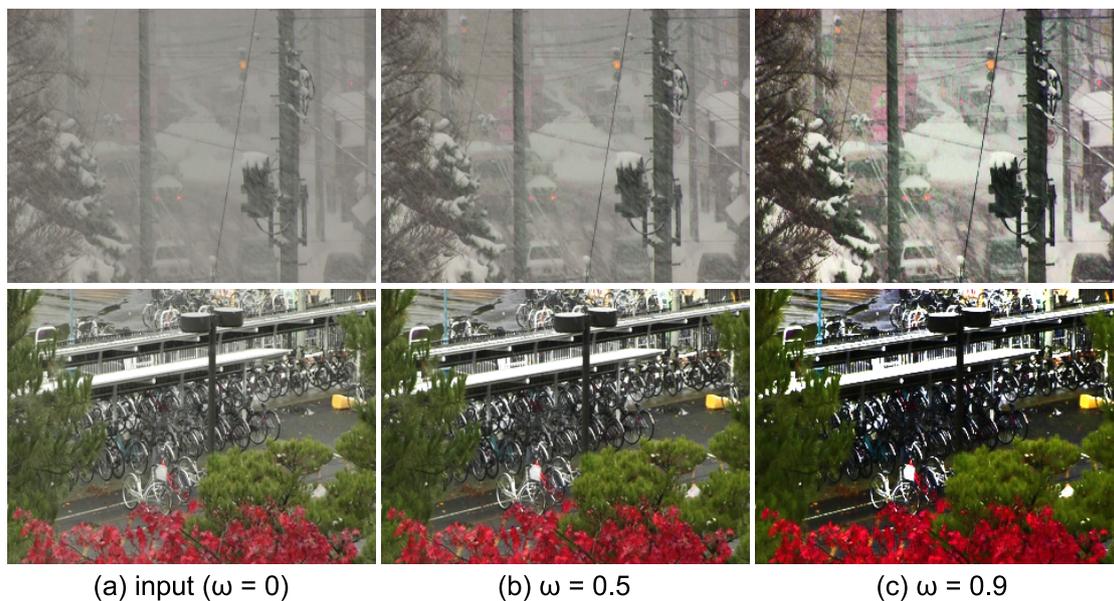


図 47: 重み係数の効果

3.2.6 重み係数の自動決定

重み係数は、画像全体の霞除去の効果を大きく変える要素であり、本来、霞の程度によって調節されるべき要素である。本研究では、透過係数のヒストグラムから、画像全体の霞の程度を推定し、重み係数の値を調節する事で、鮮明な画像の過強調を防ぐ。透過係数のヒストグラムにおいて、透過係数が低い値に集中する度合いで重み係数を算出する。

重み係数の調節の条件を式 (17) に示す。ここで、 r_t は図 48 の緑枠内の透過係数ヒストグラムのヒストグラム値の合計値である。

また、動画像の場合は、重み係数の急激な変化を避けるために、リカーシブフィルタを取り入れ、変化を緩やかにする。重み係数は、式 (18) で平滑化される。ここで、 ω は重み係数、 α は学習係数、 t はフレーム番号である。

$$\omega = \begin{cases} 0.1 & \text{if } 0 < r_t < 0.2 \\ 0.5 & \text{if } 0.2 < r_t < 0.5 \\ 0.8 & \text{if } 0.5 < r_t < 0.9 \\ 0.9 & \text{if } 0.9 < r_t < 1.0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\omega_t = \alpha \times \omega_t + (1 - \alpha) \times \omega_{t-1} \quad (18)$$

図 48 に、各画像の透過係数ヒストグラムの違いを示す。図 48(a) は原画像、図 48(b) は透過係数を画像化した画像、図 48(c) は (b) のヒストグラムである。図 48(b) は、黒い程霞成分が高く、白い程霞成分が低い事を表す。図 48 から、鮮明な画像の透過係数は高い値が多く、不鮮明な画像の透過係数は画像全体で低い値が多い事が分かり、図 48(c) の透過係数ヒストグラムにも表されている。この違いから、透過係数の分布を調べる事で各画像に適した重み係数を算出する。図 48(c) の緑枠に示した、透過係数ヒストグラムの透過係数が低い値に注目し、緑枠内のヒストグラム値の合計値から重み係数を決定する。図 48 上図の様に透過係数ヒストグラムが緑枠内に多く含まれていれば重み係数を高くし、図 48 上図の様に透過係数ヒストグラムが緑枠内に殆ど含まれていなければ重み係数を低くする。本研究では緑枠の範囲は、透過係数が「0~0.4」の範囲とする。

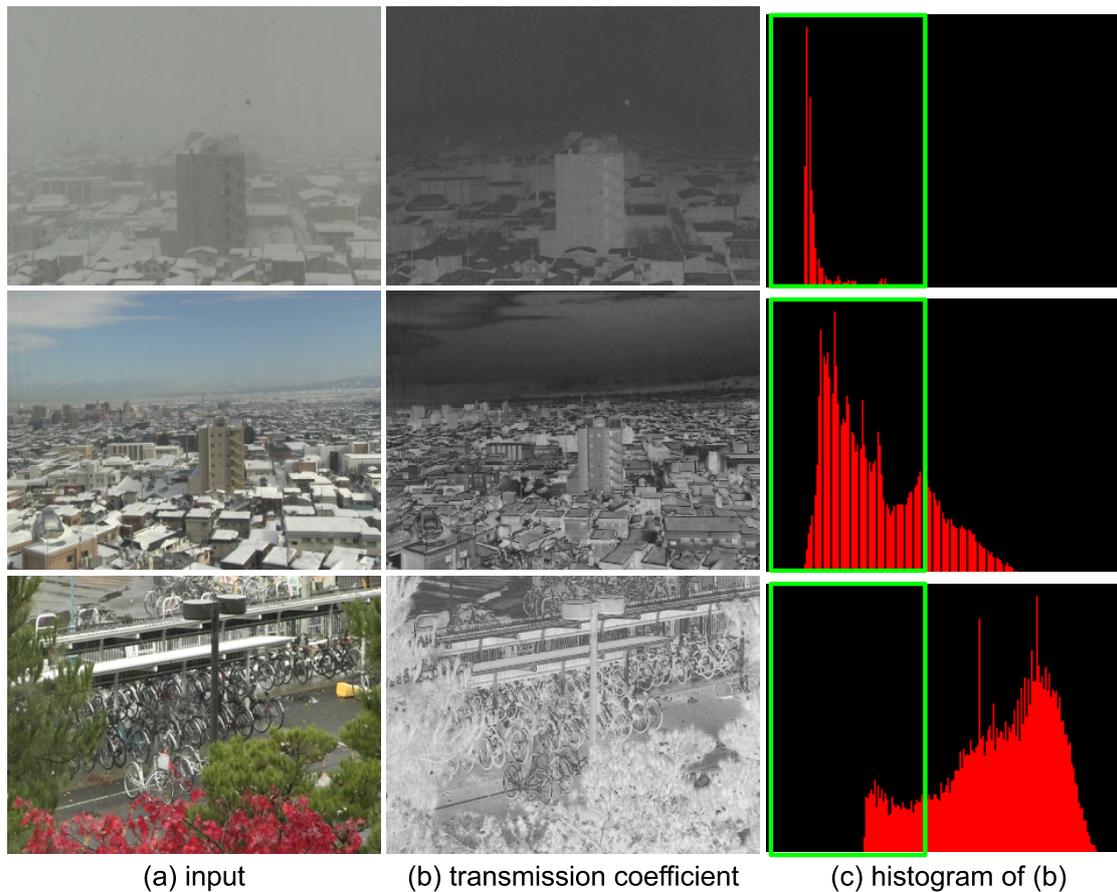


図 48: 透過係数ヒストグラムの違い

3.2.7 トーンカーブ視点からの霞除去効果の違い

重み係数を変える事によるコントラスト強調の効果は、トーンカーブでも説明出来る。図 49 に、様々な重み係数のトーンカーブを示す。図 49 の青線は重み係数が「0.9」の場合、赤線は重み係数が「0.8」の場合、黄色線は重み係数が「0.5」の場合、緑線は重み係数が「0.1」の場合のトーンカーブである。重み係数が高いトーンカーブの角度は急ではっきりとした S 字曲線になり、重み係数が低いトーンカーブの角度は緩やかになり比例直線に近づく。よって、重み係数を低くすればトーンカーブは比例直線に近づき、鮮明な画像のコントラストを変えない効果がある事が分かる。本研究では、トーンカーブの S 字の傾きを調節する事で、明度補正を必要とせずに、様々な鮮明度合いの画像に適切な霞除去を行う。

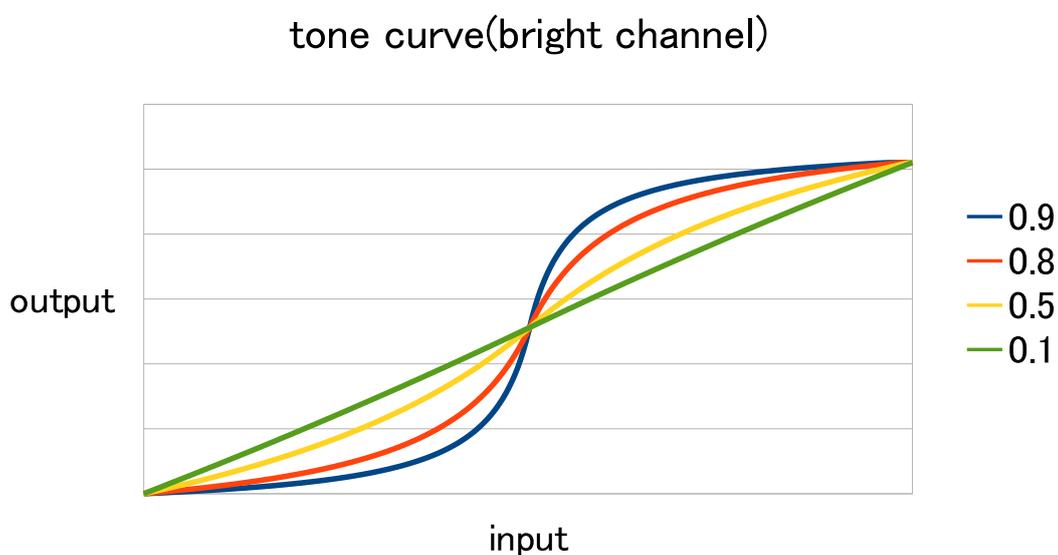


図 49: 重み係数の効果

3.3 結果

ブライツチャンネルを導入した本手法の霞除去結果画像は、従来手法と同じく式 (19) で生成される。ここで、 I は原画像、 J は結果画像、 A は大気光、 t は透過係数、 x は注目画素位置、 \max は最大値、 t_0 は 0 除算を防ぐための係数であり、 t_0 を「0.1」とした。

降雪画像に適用した結果を図 50 に示す。図 50(a) は原画像、図 50(b) は手法 [14] の結果、図 50(c) は本手法の結果画像である。但し、図 50(b) の手法 [14] の結果は、マッティング処理の代わりに手法 [42] を行った。霞除去により、(a) に比べて (b) も (c) も吹雪で見えなかった対象物が見える様になっている。(b) は (c) よりも鮮明化効果は高いが、雪原や空等大きな白い対象物に赤や緑等無数の偽色が発生している。一方、(c) は鮮明化をしていると同時に、白画素に対する偽色の発生も少ない。これは、ブライツチャンネルを導入した事により、画像中の高明度の画素で過強調を防いだ結果である。

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (19)$$

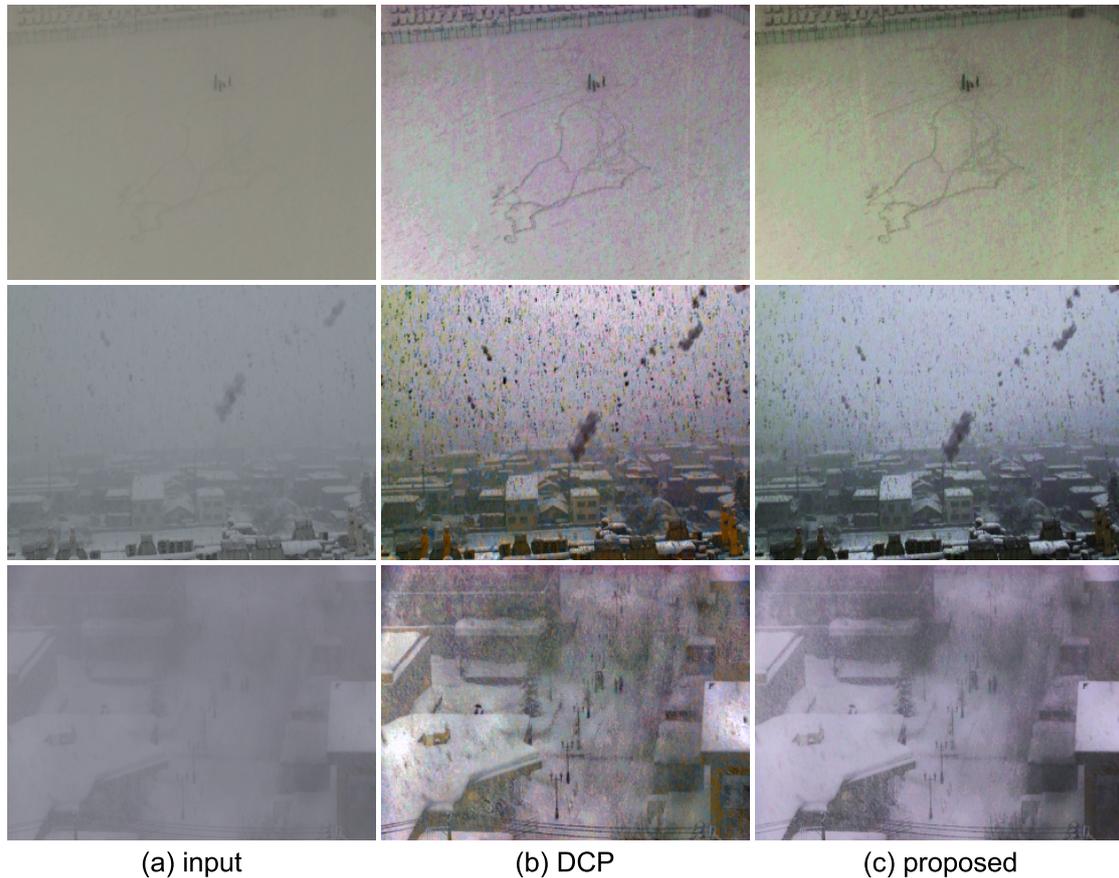


図 50: ブライツチャンネルの導入結果 1

降雪の無い画像に適用した結果を図 51 に示す。図 51(a) は原画像、図 51(b) は手法 [14] の結果、図 51(c) は本手法の結果画像である。(b) は鮮明画像に対しても鮮明化をしてしまうため、色の過強調をしてしまう。一方、(c) は画像の不鮮明さを判定して霞除去の効果を調節する事が出来るため、鮮明な画像に過剰な霞除去は行わない。(b) では、雲や積雪の様な白い箇所では赤や水色の偽色がある。しかし、(c) には偽色は無く、雲は白く山頂や屋根の上の積雪も鮮明な白にしている。また、(b) に比べて(c) は、霞除去の効果を調節しているため、空や壁の色等の白色以外の色の過剰な発色も抑えている。

本研究で提案した 1 つ目の鮮明化手法は、ブライトチャンネルを導入する事によって、従来手法で問題となっていた白い対象物に発生する偽色を抑制した。また、霞除去の効果を調節する事で過強調を防ぐ事も出来る。さらに、大気光の推定を改良する事によって、後処理に必要な明度補正も不要とした。



図 51: ブライトチャンネルの導入結果 2

4 領域分割と霞除去の組み合わせ

4.1 霞除去の課題

従来の霞除去は、大気光を最も霞む色と仮定し、画像から1つの「大気光」を推定していた。しかし、照明条件により暗く映る箇所や明るく映る箇所など、高ダイナミックレンジ画像の様に数種類の明るさが霞画像中に存在する場合、従来手法は最も霞む色を1つしか推定しないため、画像を十分に鮮明化出来ない。

図 52 に、数種類の明るさで構成される画像を鮮明化した例を示す。図 52(a) は原画像、図 52(b) は手法 [14] の結果、図 52(c) はここで提案する領域毎に鮮明化する手法の結果である。図 52(b) に比べて図 52(c) では、明るい箇所と暗い箇所ので効果的に鮮明化されている事が分かる。特に、図 52 下段 (a) の画像中央部の暗い箇所に注目すると、図 52(b) では雪粒も暗くなって不鮮明であるが、図 52(c) では雪粒が白く鮮明になっている。これは、従来手法は大気光を1つしか推定しないため、画像中の1つの特定の明るさの領域しか鮮明化出来ないためである。画像の各場所で明るさが異なる場合、その場所に適した鮮明化をする必要がある。

本研究では、高ダイナミックレンジ画像の鮮明化を行うために、画像を領域分割をして各領域で霞除去を行い、コントラスト改善効果をより高める。

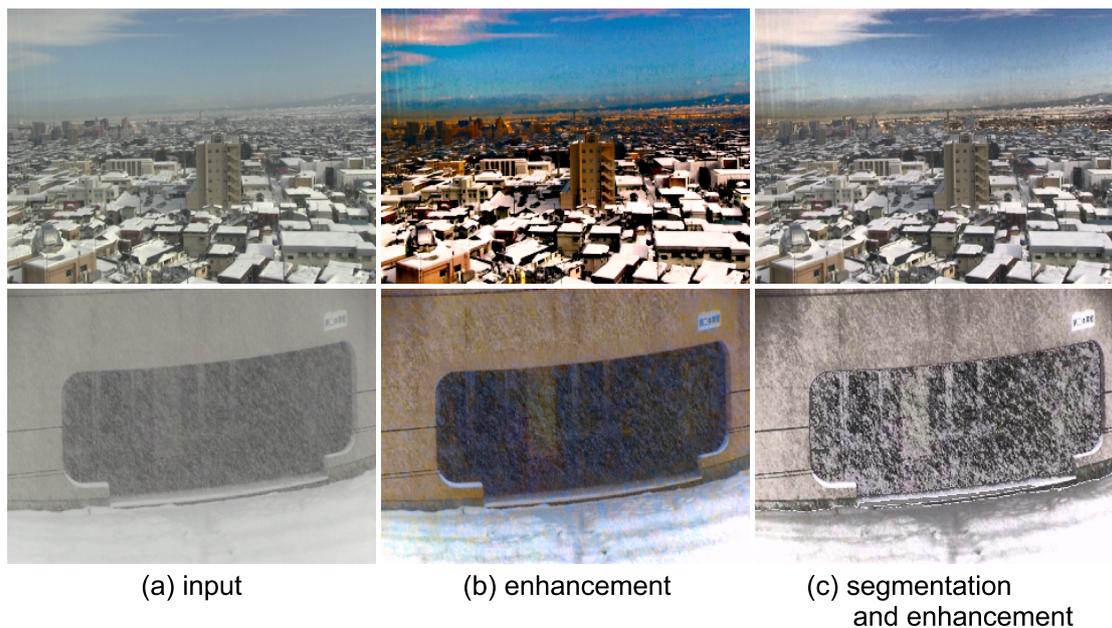


図 52: 各領域で霞除去を行った例

従来の霞除去は、一様に霞む画像を前提にしている。しかし実際には、撮影場所の対象物や照明条件により、一部は鮮明に見えていたり、霞んでも霞む色が異なって撮影される場合もある。様々な明るさで構成される、高ダイナミックレンジの画像に対して、従来の霞除去は画像全体を十分鮮明化する事は出来ない。それは、霞と仮定した色(大気光)は1つと仮定しているからである。

図 53 に、高ダイナミックレンジ画像の霞除去例を示す。図 53(a) は原画像、図 53(b) は手法 [14] による画像、図 53(c) は本論文で上述したブライトチャンネルを導入した手法による霞除去画像、図 53(d) は本節で説明する提案手法による霞除去画像である。図 53(b) や (c) では、暗く不鮮明になる箇所や明るく不鮮明になる箇所があり、画像全体を十分に鮮明化していない。これは、推定した大気光の明るさ以外の明るさのコントラストを改善出来ないからである。しかし図 53(d) では、様々な明るさのコントラストを同時に改善している。これは、画像を領域分割し、各領域で大気光を推定して霞除去を行ったためである。

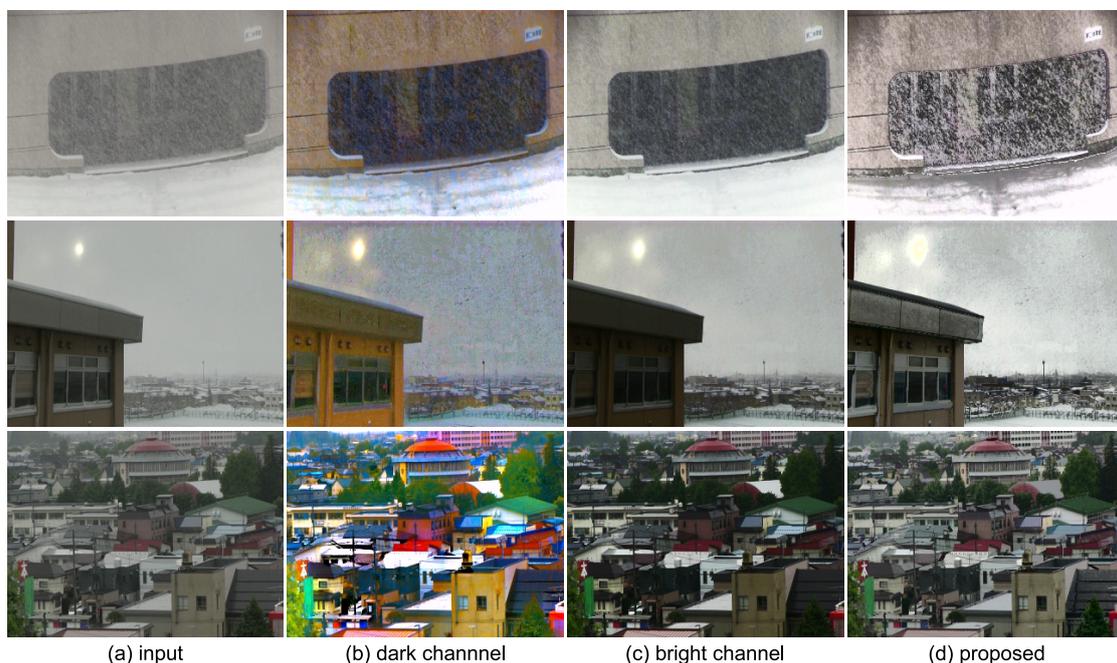


図 53: 高ダイナミックレンジ画像の霞除去

4.2 本論文で使用する基本アルゴリズムの説明

次に提案する手法の、基本となる要素について説明する。

本研究の提案手法は、均等色空間である $L^*a^*b^*$ 色空間を用いて、画素値の「明度」と「彩度」と「色差」を特徴量として使用する。 $L^*a^*b^*$ 色空間において、明度は L^* チャンネルで表される。彩度は、式 (20) で計算する。ここで、 I は画像、 S は彩度、 a は画素値の a^* チャンネル、 b は画素値の b^* チャンネルである。彩度は、 L^* 軸からの各画素値の距離で表される。

2つの画素値の色差は、式 (21) により、2画素のユークリッド距離で計算される。ここで、 I は画像、 D は色差、 x と y は任意の画素位置、 L は画素値の L^* チャンネル、 a は画素値の a^* チャンネル、 b は画素値の b^* チャンネルである。

図 54 に、 $L^*a^*b^*$ 色空間の彩度と色差の概念図を示す。赤丸と緑丸は任意の画素値、黄色矢印が画素 x の彩度、白矢印が画素 x と y の色差である。

$$I^S = \sqrt{I^{a^2} + I^{b^2}} \quad (20)$$

$$D(x, y) = \sqrt{(I^L(x) - I^L(y))^2 + (I^a(x) - I^a(y))^2 + (I^b(x) - I^b(y))^2} \quad (21)$$

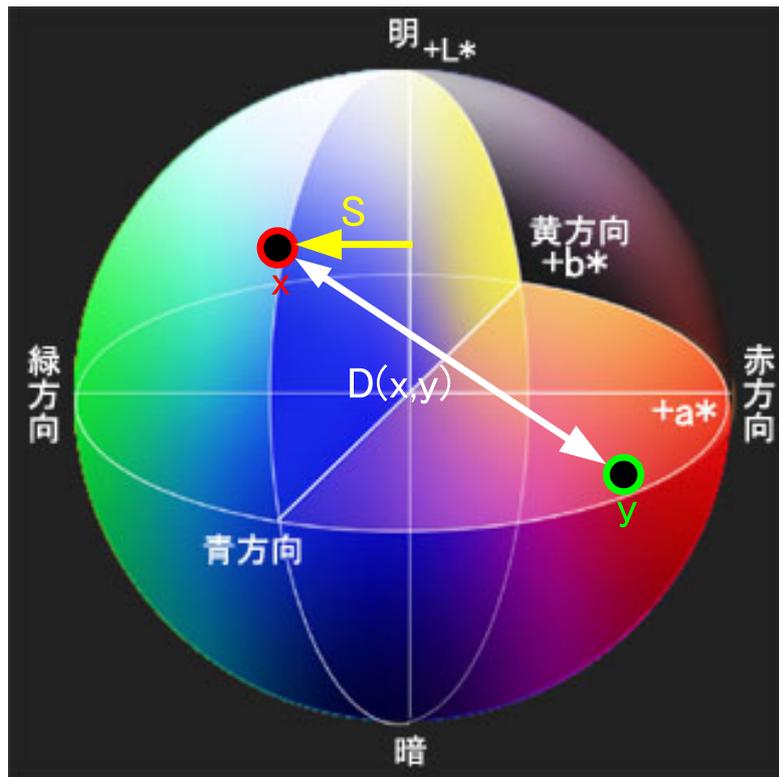


図 54: $L^*a^*b^*$ の彩度と色差

4.3 手法の説明

本研究では、高ダイナミックレンジ画像に霞除去を適用するために領域分割を行い、各領域に適した霞除去を行う。各領域で大気光の推定と霞除去効果の調節を行い、従来の霞除去アルゴリズムを高ダイナミックレンジ画像に適用出来る様に改良する。また、偽色発生の原因が彩度の過強調であるため画像の色成分を明度と彩度に分け、明度と彩度でそれぞれ霞除去の効果を変える。本手法は $L^*a^*b^*$ カラー空間で行われ、「領域分割」「霞除去」の2段階に分かれる。

図 55 に、提案手法の流れ図を示す。まず入力画像を $L^*a^*b^*$ 色空間に変換する。次に、カラーエッジを抽出し、カラーエッジを用いて、領域成長法、領域統合、小領域統合の3段階で画像の領域分割を行う。領域分割後は、鮮明化処理を行う。鮮明化は、明度と彩度それぞれで行い、各領域で、大気光、透過係数、重み係数を推定する。透過係数の推定に用いる霞成分は、大気光と各画素の色差から推定する。

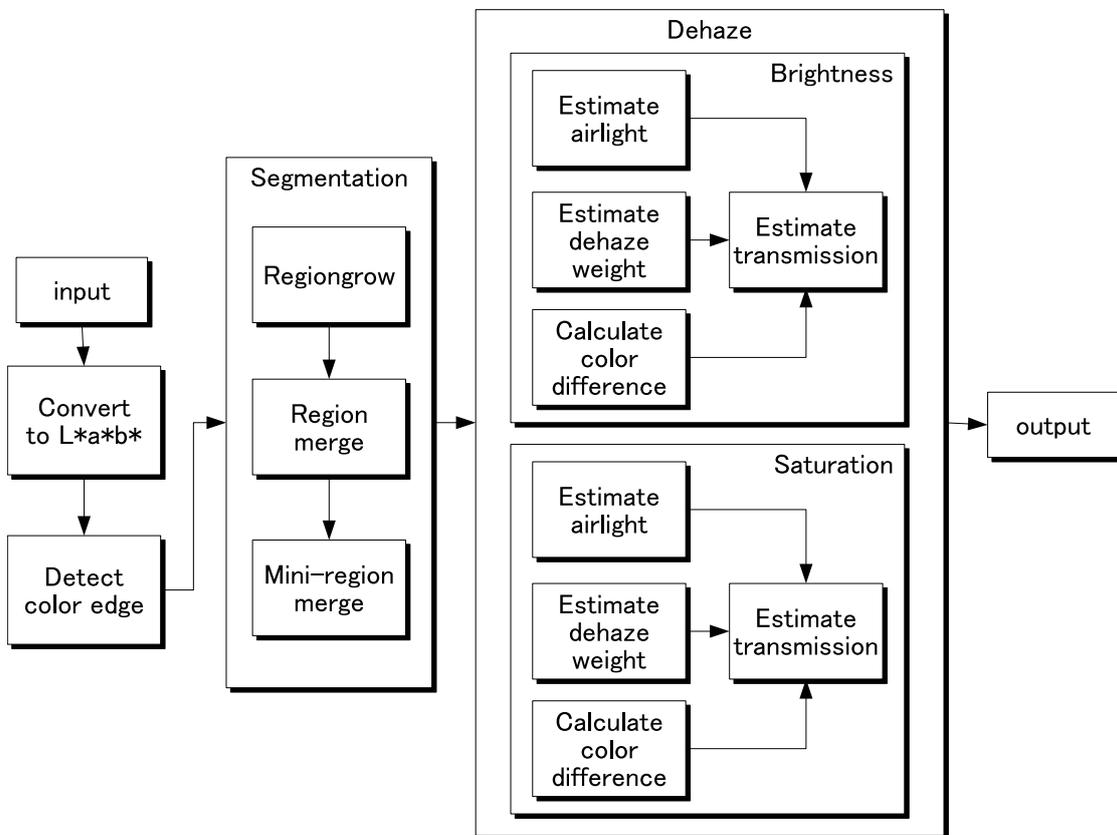


図 55: 提案手法 2 の流れ

4.3.1 領域分割

本研究では、明るさの異なる不鮮明な領域と鮮明な領域を大まかに分割するために、「領域成長法」「領域統合処理」「小領域統合」の3段階で領域分割を行う。領域分割で用いる特徴量は、各色成分のエッジ強度を3次元ベクトルとして、その合力で表されるカラーエッジ強度である。領域成長法では、エッジに沿って過統合しない程度に画像を分割する。領域統合処理では、領域間でエッジが弱い箇所を統合する。この2つの処理により、画像中の不鮮明な領域を大まかに分割する。小領域統合では、特徴が類似しない小領域群を強制的に統合する。この処理により、鮮明な領域を大まかに分割にする。

4.3.2 領域成長法

本研究では、霞画像の霞の色の分布を大まかに分割するために、計算が単純な領域成長法を用いて領域分割する。領域分割において、領域は1度統合されてしまうと分離する事は非常に難しいため、過統合は避けるべき問題である。領域成長法は過分割も過統合もしやすいため、グラデーションの箇所領域が過統合しない様、カラーエッジを特徴量とした閾値 th_{RG} を用いて領域成長法を行う。複数の明るさで構成された画像は、明るさが変わる箇所をエッジとして抽出可能であるため、カラーエッジは本研究の目的に合った特徴量である。

図 56 に、カラーエッジ抽出例を示す。図 56(a) は原画像、図 56(b) はカラーエッジ画像である。図 56(b) は白い程エッジが強い事を表す。図 56(b) から、グラデーション領域の弱いエッジに比べて、明るさが大きく異なる領域間では強いエッジがある事が分かる。カラーエッジを用いて領域分割を行う事により、明るさの違う箇所が分割出来る事が分かる。

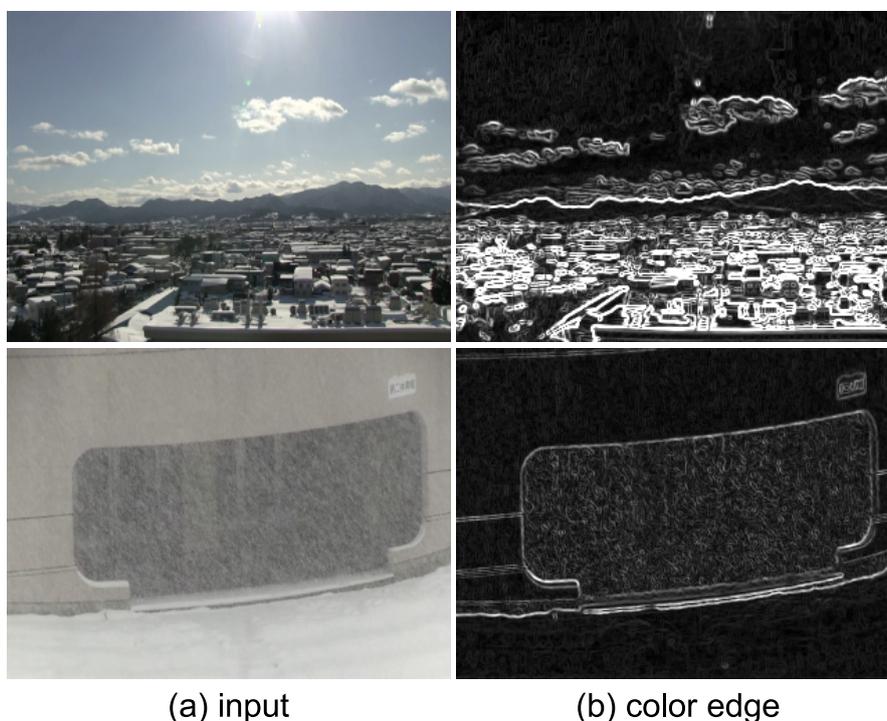


図 56: カラーエッジ抽出例

4.3.3 領域統合

過分割される様に領域成長法を行った後に、領域統合処理によって過分割された領域を統合し、グラデーション箇所も1つの領域に統合する。また、領域統合処理の後に小領域統合を行い、テクスチャの様な細かな小領域を統合して鮮明な領域を大まかに生成する。

領域統合処理では、隣接領域に接する画素のカラーエッジの平均値を特徴量として、閾値 (th_{RM}) 未満の場合に統合する。小領域統合では、小領域の画素数を特徴量として、画素数が閾値 (th_{MRM}) 未満の領域を隣接する1番大きな領域に統合する。

図 57 に、領域分割の結果を示す。図 57(a) は原画像、図 57(b) は領域成長法の結果、図 57(c) は領域統合処理の結果、図 57(d) は小領域統合の結果である。図 57(b)(c) で白色は各領域を表し、黒色は各領域の境界を表す。図 57(d) では、各色の違いで各領域を表す。最終的に図 57(d) では、霞具合によって領域が大まかに分割され、鮮明な領域も大まかに分割されている。各領域数は表 5 の様になる。

表 5: 領域数の変化

	領域成長 (b)	領域統合処理 (c)	小領域統合 (d)
上段	2509	2465	11
下段	1845	1386	3

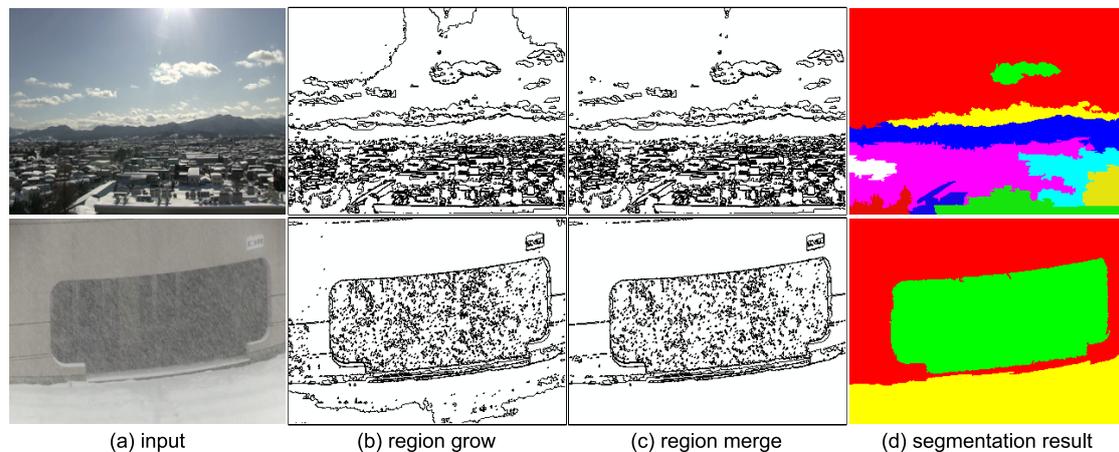


図 57: 領域分割の流れ

4.3.4 大気光推定

大気光は、理想的には対象物が存在しない無限遠の色である。遠くの山や酷く霞む部分の色特徴を調べると、彩度が低く「灰色」に近い事が分かる。

図 58 に彩度の算出結果を示す。図 58 上段は原画像、図 58 下段は彩度画像である。図 58 下段は、黒い程彩度が低く、白い程彩度が高い事を表す。図 58 上段の真ん中の鮮明画像を見ると、遠くの地平線付近の彩度が低い事が分かる。また、図 58 上段の左図の豪雪画像では、建物等の対象物の彩度が無くなり、灰色一色になる。図 58 から、霞は低彩度を招く事が分かる。

そこで、本手法では大気光を低彩度特徴と仮定する。各領域において、低彩度画素の平均値を大気光とする。各領域の大気光は、式 (22) で算出される。ここで、 A は大気光、 I は原画像、 S は彩度、 N は画素数、 Ω は領域範囲、 x は画素位置、 reg は領域番号、 th_{low_sat} は低彩度閾値、 c は色チャンネルである。また、彩度は式 (23) で算出される。ここで、 I は原画像、 a^* は画素の a^* 色チャンネル、 b^* は画素の b^* 色チャンネル、 x は画素位置である。

$$A_{reg}^c = \frac{1}{N_{reg}} \sum_{x \in \Omega_{reg}} \begin{cases} I(x)^c & (I(x)^S < th_{low_sat}) \\ 0 & (else) \end{cases} \quad (22)$$

$$I(x)^S = \sqrt{I(x)^{a^2} + I(x)^{b^2}} \quad (23)$$



図 58: 画像の彩度

4.3.5 重み係数の調節

本研究では、各領域の霞具合によって重み係数を変えて、各領域で霞除去の効果を調節する。図 58 からも分かる様に、霞むと対象物の彩度が減少して色味が無くなるため、彩度の高低は霞の有無を表す。また、画像が鮮明ならば対象物のテクスチャが見えるため、色情報エントロピーを計算する事によって各領域の鮮明度を表せる。これらの事から、各領域の「彩度」と「色情報エントロピー」を用いて、重み係数を調節する。

図 59 に、各領域の彩度と情報エントロピーの算出結果を示す。図 59(a) は原画像、図 59(b) は各領域の平均彩度、図 59(c) は各領域の色の情報エントロピーである。図 59(b) と (c) はどちらも、黒い程低い値を表し、白い程高い値を示す。図 59 から、鮮明な領域では彩度も情報エントロピーも高く、霞んだ領域ではどちらも低い事が分かる。この 2 つの特徴から霞具合を推定して、重み係数を算出する。

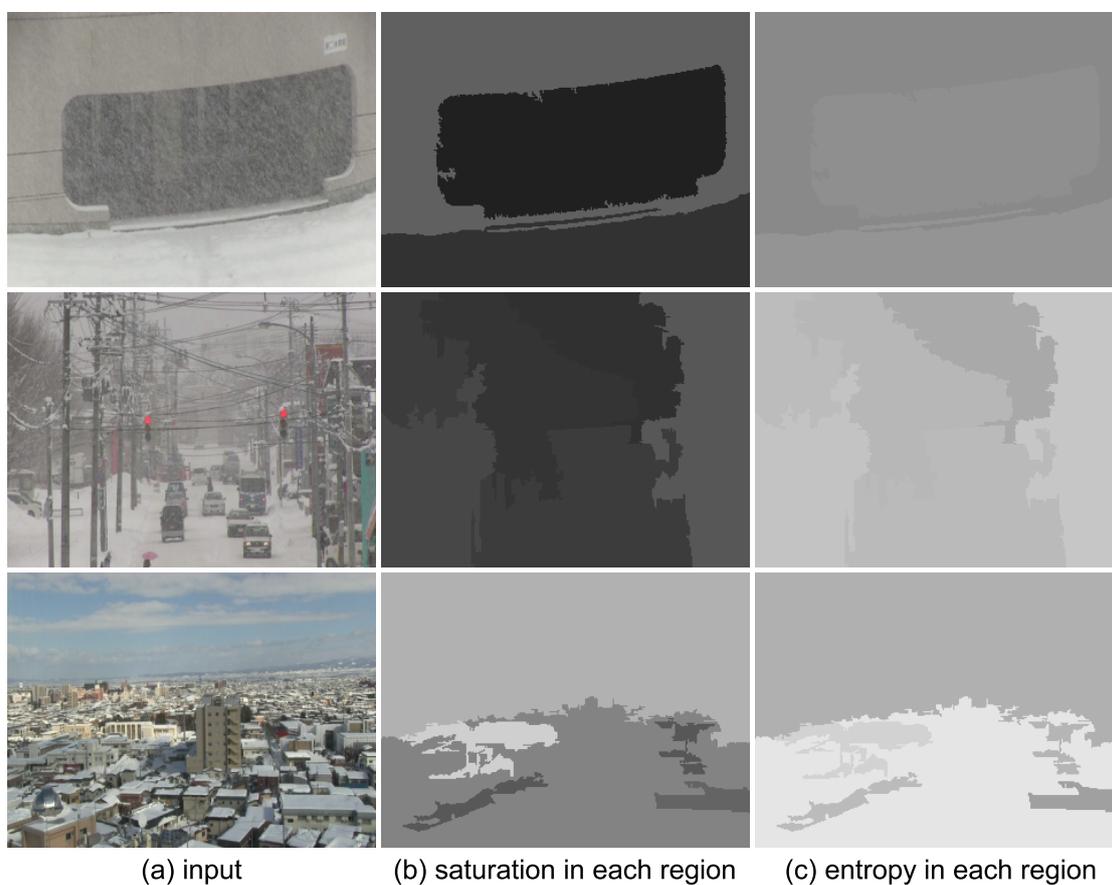


図 59: 領域の彩度と情報エントロピー

「彩度」と「情報エントロピー」の2つの特徴量は、各領域の平均値で算出する。平均彩度は式(24)で算出される。ここで、 S_{reg} は領域番号 reg の平均彩度、 I は原画像、 S は彩度、 Ω は領域、 x は画素位置、 N は画素数である。色情報エントロピーは式(25)で算出される。ここで、 AIE_{reg} は領域番号 reg の情報エントロピー、 I は原画像、 Ω は領域、 x は画素位置、 P は領域内の色($I(x)$)の出現確率、 N は画素数である。「彩度」と「情報エントロピー」それぞれで重み係数を推定し、低い方の重み係数を採用する。

重みを判定する条件は式(26)(27)(28)を用いる。彩度から推定する重み係数は式(26)、情報エントロピーから推定する重み係数は式(27)を用いる。ここで、 ω_s は彩度から推定する重み係数、 ω_e は情報エントロピーから推定する重み係数、 S_{reg} は領域番号 reg の平均彩度、 AIE_{reg} は領域番号 reg の情報エントロピー、 w_{max} は重み係数の最大値、 w_{min} は重み係数の最小値、 w_{max} は重み係数のとりうる最大値、 w_{min} は重み係数のとりうる最小値、 $th_{s,max}$ は ω_s を w_{max} とする条件の閾値、 $th_{s,min}$ は ω_s を w_{min} とする条件の閾値、 $th_{e,max}$ は ω_e を w_{max} とする条件の閾値、 $th_{e,min}$ は ω_e を w_{min} とする条件の閾値である。 ω_s と ω_e はどちらも、とりうる値の最大値と最小値を設定し、その間を線形補間する事によって推定される。最後に、式(28)で、2つの重み係数の内で低い値を最終的な重み係数とする。

$$S_{reg} = \frac{1}{N_{reg}} \sum_{x \in \Omega_{reg}} I(x)^S \quad (24)$$

$$AIE_{reg} = - \sum_{x \in \Omega_{reg}} P_{reg}(I(x)) \log P_{reg}(I(x)) \quad (25)$$

$$\omega_{s,reg} = \begin{cases} w_{max} & (S_{reg} < th_{s,max}) \\ w_{min} & (th_{s,min} < S_{reg}) \\ \frac{w_{min}(S_{reg}-th_{s,max})+w_{max}(th_{s,min}-S_{reg})}{th_{s,min}-th_{s,max}} & (otherwise) \end{cases} \quad (26)$$

$$\omega_{e,reg} = \begin{cases} w_{max} & (AIE_{reg} < th_{e,max}) \\ w_{min} & (th_{e,min} < AIE_{reg}) \\ \frac{w_{min}(AIE_{reg}-th_{e,max})+w_{max}(th_{e,min}-AIE_{reg})}{th_{e,min}-th_{e,max}} & (otherwise) \end{cases} \quad (27)$$

$$\omega_{reg} = \min\{\omega_{s,reg}, \omega_{e,reg}\} \quad (28)$$

式 (26)(27) の線形補間による重み係数推定の様子を図 60 に示す。ここで、本研究では各閾値に、 w_{max} には「0.9」、 w_{min} には「0.1」、 $th_{s_{max}}$ には「5」、 $th_{s_{min}}$ には「20」、 $th_{e_{max}}$ には「4」、 $th_{e_{min}}$ には「5.5」を設定した。

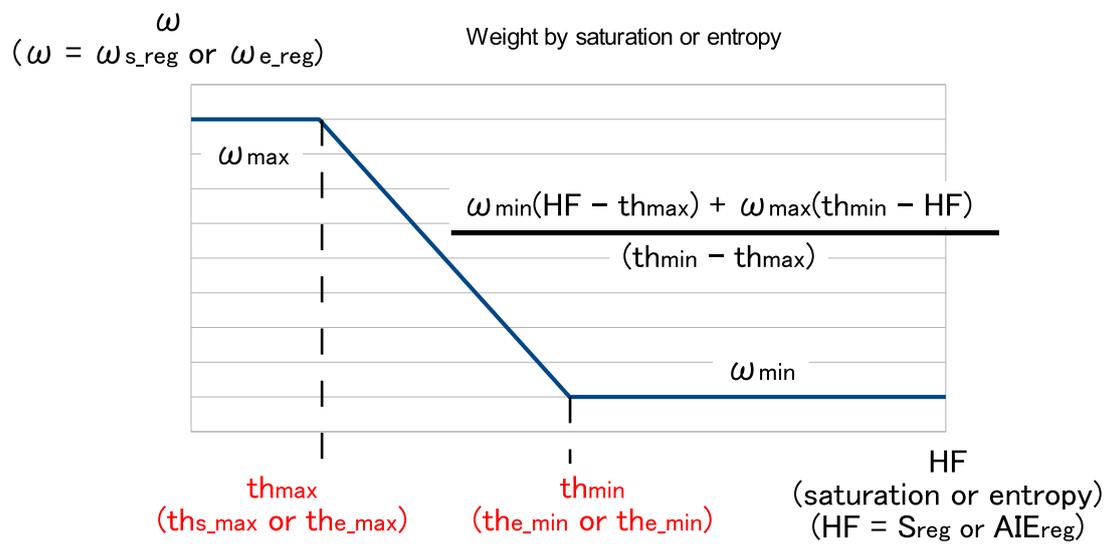


図 60: 重み係数算出のグラフ

4.3.6 彩度の重み係数を抑える

偽色の発生は、彩度の過強調にある。従来手法では、明度を改善する事を中心としていたため、彩度の過強調を防ぐ事に重点が置かれていなかった。図 61 に、彩度の過強調の様子を示す。図 61(a) は重み係数を変えた場合の霞除去の結果例、図 61(b) は重み係数を変えた場合の霞除去画像と原画像の差分値の変化を表すグラフである。図 61(a)() は無彩色の霞画像、図 61(a)() は僅かに黄色の霞画像、図 61(a)(A) は原画像、図 61(a)(B) は重み係数を「1.0」にして霞除去を行った結果画像、図 61(a)(C) は重み係数を「0.7」にして霞除去を行った結果画像である。図 61(a)(B) と (a)(C) を比べると、図 61(a)() (B) はカラーバーの色が原画像と同じ色相で見易く霞除去されているが、図 61(a)() (B) は霞の黄色味が過強調され、カラーバーの色相が原画像とは異なってしまっている。これは、霞が完全な無彩色であれば偽色は発生しないが、霞に僅かでも彩度がある場合は、重み係数が高すぎると、霞の彩度が画像全体に影響を与える事を表す。

また、重み係数の値を変えた場合の鮮明化効果を調べるために、霞除去画像と原画像との差分を計算した。その差分値の変化のグラフを図 61(b) に示す。このグラフから、重み係数が「0.6」までは殆ど鮮明化効果は変わらないが、「0.7」以降では急激に変化が現れる。図 61(a)() (C) を見ると、画像全体に僅かに黄色味を帯びた変化が見られるが、カラーバーの色相は (a)() (A) と変わらない。よって、本研究では彩度の重み係数の限界は「0.6~0.7」として、明度の霞除去に使用する重み係数と彩度の霞除去に使用する重み係数を変える事で、偽色の発生を抑制する。彩度の重み係数は、明度の重み係数の 0.7 倍とする。式 (29) に、明度の重み係数と彩度の重み係数の算出式を示す。ここで、 $\omega_{bri.reg}$ は領域番号 reg の明度の重み係数、 $\omega_{sat.reg}$ は領域番号 reg の彩度の重み係数、 ω_{reg} は式 (28) で算出した領域番号 reg の重み係数である。

$$\begin{aligned}\omega_{bri.reg} &= \omega_{reg} \\ \omega_{sat.reg} &= \omega_{reg} \times 0.7\end{aligned}\tag{29}$$

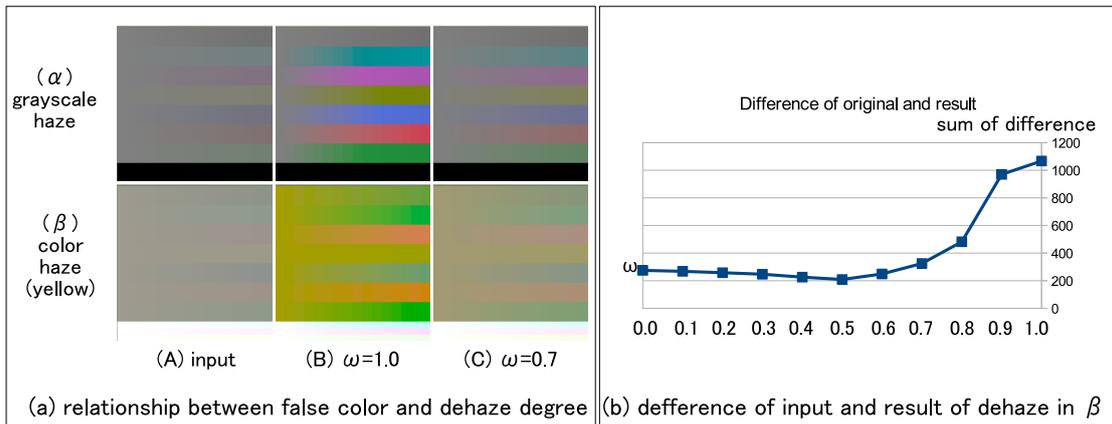


図 61: 彩度の鮮明化効果

4.3.7 透過係数の算出

透過係数は、原画像に含まれる対象物の色の割合を表す。従来では、ダークチャンネルの様な霞成分を推定する事で対象物の色の割合を推定していた。本研究では、霞む事は各画素が霞の色に近づく事と考える。霞が酷い画素は霞の色に似た色で撮影され、霞が無いと画素は対象物の色で撮影される。霞の程度によって、画素は霞の色と対象物の色の中間の色で撮影されると仮定する。この仮定は、Koschmieder の法則でも同じ事が言える。本研究ではこの仮定から、画素の色と大気光の色の差が、霞の程度を表すと考え、画素値と大気光との色差が霞成分を表すと仮定する。

本研究では、過剰な鮮明化の原因は彩度の過強調であるから、明度と彩度で透過係数を別々に算出する。彩度だけ霞除去の効果を抑える事で、彩度の過強調を避ける。色差の計算についても、明度の差と彩度の差の2種類の色差を算出する。各色差は式(30)で算出する。ここで、 dif は色差、 bri は明度、 sat は彩度、 I は原画像、 A は大気光、 L は $L^*a^*b^*$ の L チャンネル、 S は彩度、 x は画素位置である。

大気光と重み係数と色差から、式(31)で透過係数を算出する。ここで、 t は透過係数、 bri は明度、 sat は彩度、 ω_{bri_reg} は式(29)の明度の重み係数、 ω_{sat_reg} は式(29)の彩度の重み係数、 A は大気光、 dif は色差、 L は $L^*a^*b^*$ の L チャンネル、 S は彩度、 x は画素位置である。

$$\begin{aligned} dif_{bri}(x) &= |A^L(x) - I^L(x)| \\ dif_{sat}(x) &= |A^S(x) - I^S(x)| \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} t_{bri}(x) &= 1 - \omega_{bri_reg} \frac{dif_{bri}(x)}{A^L} \\ t_{sat}(x) &= 1 - \omega_{sat_reg} \frac{dif_{sat}(x)}{A^S} \end{aligned} \quad (31)$$

図 62 に、透過係数の算出例を示す。図 62(a) は原画像、図 62(b) は明度の透過係数、図 62(c) は彩度の透過係数である。図 62 上段の様、異なる明るさの領域に対しても、不鮮明であれば低い透過係数を割り当てられる事が分かる。本研究の手法は、高ダイナミックレンジ画像に適用出来る霞除去アルゴリズムである事が分かる。また、図 62 中段では、画像中央部の不鮮明な道路と空領域に低い透過係数を割り当てている。さらに、図 62 下段の様、画像下部の建物が密集している鮮明な箇所を領域として纏める事で、画像下部領域一帯に高い透過係数を割り当てている事が分かる。よって、鮮明箇所の過強調を防ぐ事が出来る。領域分割を取り入れた事により、1つの画像の中でも各明るさに関わらず、不鮮明な箇所に低い透過係数を割り当てる事が出来る。

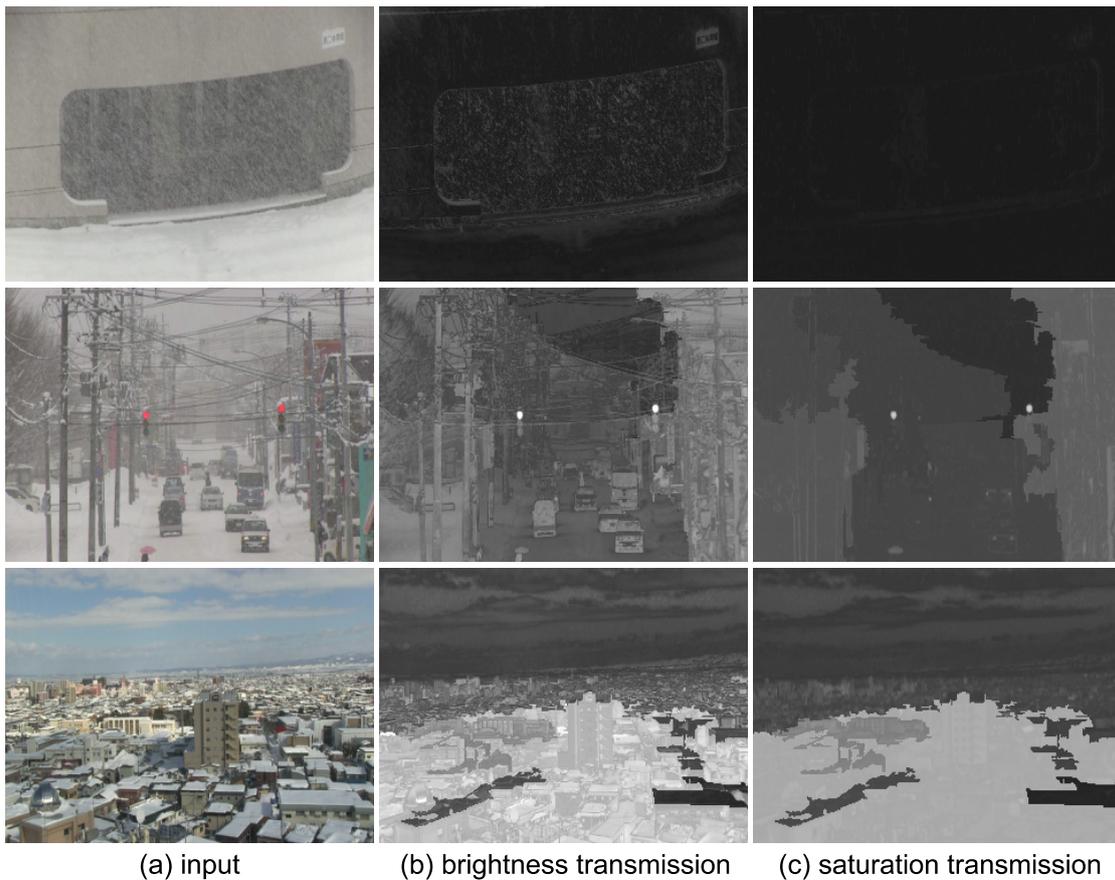


図 62: 色差による透過係数

図 63 に、従来の霞除去アルゴリズムの透過係数を示す。図 63(a) は原画像、図 63(b) は文献 [14] のダークチャンネルを使用して算出した透過係数、図 63(c) はブライトチャンネルを使用して算出した透過係数である。従来では大気光を 1 つとしていたため、図 63 上段の様な高ダイナミックレンジ画像で 1 つの明るさの領域にのみ、低い透過係数を割り当てている。その他の明るさの領域では、推定された大気光と大きく色が異なるため、不鮮明であるにも関わらず、高い透過係数を割り当ててしまう。図 63 中段では、道路領域には低い透過係数を割り当てているが、道路の 1 番奥の箇所や空領域に低い透過係数を割り当てる事が出来ていない。図 63 下段では、画像下部の建物が密集している箇所に高い透過係数を割り当てる事が出来ていない。これは、影になっていて屋根の積雪も少し暗く撮影され、ブライトチャンネルを使用しても透過係数が低く算出されているためである。日照条件によっては、鮮明に見えていても影になって少し暗くなった箇所で、従来手法は過強調を引き起こす可能性がある。

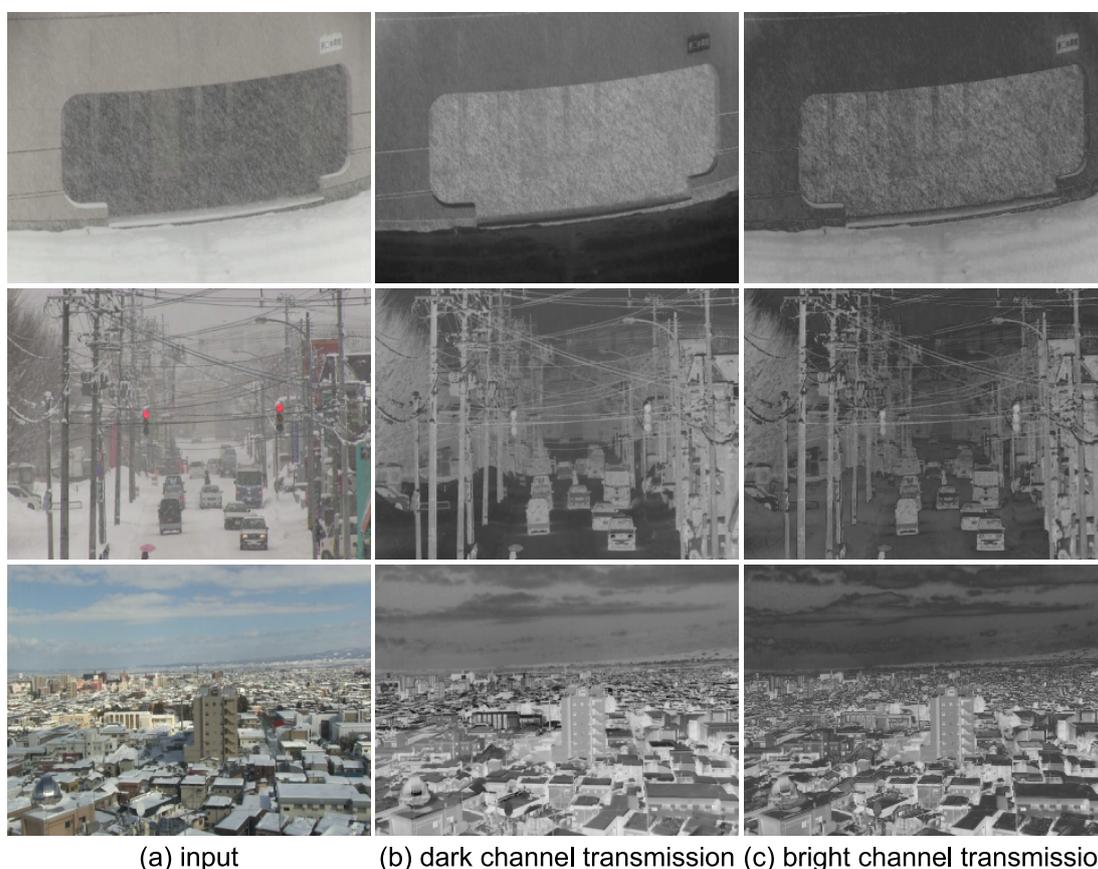


図 63: 従来の透過係数

4.4 結果

式 (6) を変形した式 (32) で霞除去の計算を行う。ここで、 J は霞除去結果、 I は原画像、 A は大気光、 L は $L^*a^*b^*$ の L^* チャンネル、 a は $L^*a^*b^*$ の a^* チャンネル、 b は $L^*a^*b^*$ の b^* チャンネル、 t は透過係数、 bri は明度、 sat は彩度、 x は画素位置、 t_{min} は 0 除算を防ぐパラメータである。 t_{min} は「0.1」とした。尚、透過係数算出の時点で重み係数を 1 にしない限り、0 除算は起こらない。

図 64 と図 65 に、提案手法の結果を示す。(a) は原画像、(b) はダークチャンネルの手法の結果、(c) は提案手法の結果である。図 64 を見ると、特に図 64 中段 (b) では、暗い箇所では雪粒画素も暗くなり、明るい箇所では積雪も雪粒画素も明るくなり、雪粒が区別し難い。

$$\begin{aligned}
 J(x)^L &= \frac{I(x)^L - A^L(1 - t_{bri}(x))}{\min\{t_{bri}(x), t_{min}\}} \\
 J(x)^a &= \frac{I(x)^a - A^a(1 - t_{sat}(x))}{\min\{t_{sat}(x), t_{min}\}} \\
 J(x)^b &= \frac{I(x)^b - A^b(1 - t_{sat}(x))}{\min\{t_{sat}(x), t_{min}\}}
 \end{aligned} \tag{32}$$

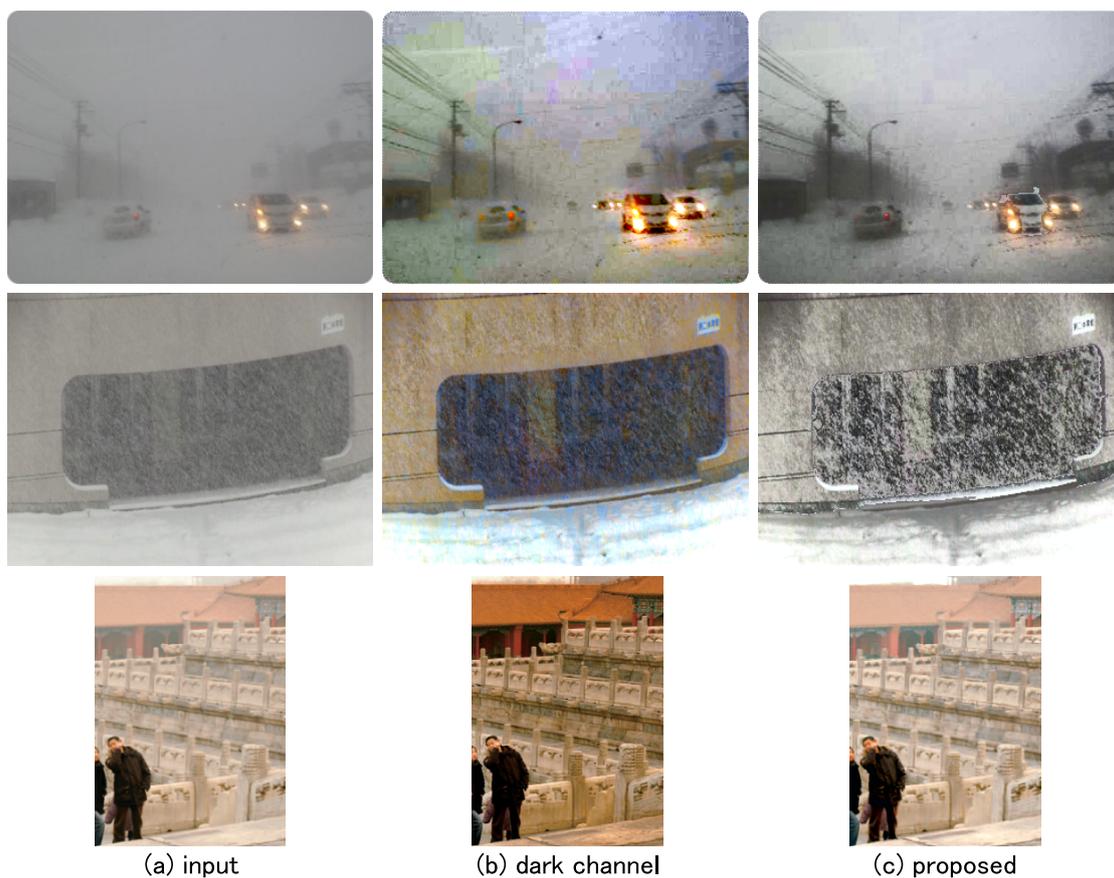


図 64: 霞除去の結果 1

また、図 65 上段 (b) では、1 番不鮮明な画像中央部の道路の 1 番奥の箇所、霧を除去しきれていない。さらに、全画像で (b) には偽色が多数発生している。しかし提案手法では、領域分割をする事により、各領域で適切に霧除去がされている。また、偽色も無く、図 65 の 3 段目の様に、鮮明な画像を過強調しない。これは、彩度を過剰に強調せずに、霧除去の効果を調節するためである。

本節では、画像の各領域に適した鮮明化を行う手法を提案した。霧の色が画像の各箇所異なる画像においても、提案手法は各箇所適切に鮮明化をする事が出来た。また、画像全体が霧に覆われた画像に限らず、晴天画像でも遠くてぼやけて映っている箇所のみを鮮明にする事も可能である。

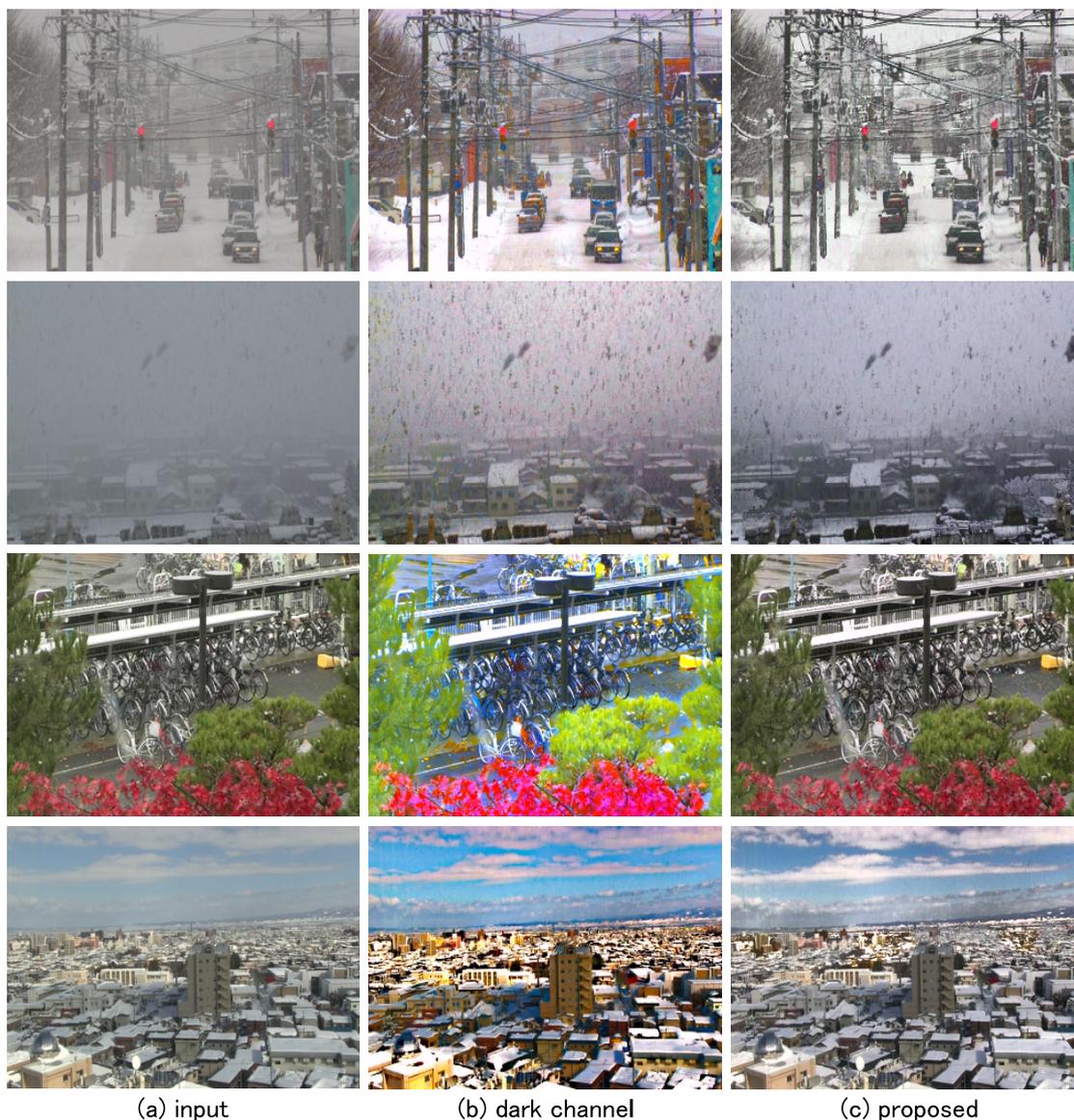


図 65: 霧除去の結果 2

5 ヒストグラム拡張とクラスタリングの組み合わせ

5.1 夜間画像の課題

24時間動作する監視カメラアプリケーションにとって、昼間の画像だけでなく夜間の画像のコントラストも改善する必要がある。悪天候に関係無く、夜間は晴天時でも一面が暗く不鮮明で、画像に何が映っているか認識しづらい。夜間画像のコントラストを改善する手法は幾つか提案されているが ([11,30])、ある程度各対象物が見えている画像を扱っており、暗闇画像に対しては辛うじて見え様になる程度にしかコントラストを改善せず、暗闇画像のコントラストを十分改善する結果とはなっていない。時に、悪天候時の夜間画像を扱った手法はない。

本研究では、昼間の霞画像も夜間の画像も、同じ不鮮明な画像と捉える。昼間の霞画像は画像全体が霞の色になるため不鮮明で、夜間の画像は画像全体が暗い色になるため不鮮明である。昼間の霞画像と夜間の画像の違いは不鮮明になる色だけであり、その不鮮明になる色を鮮明にする手法があれば、どちらの画像も鮮明に出来ると考える。

図 66 に、霞画像と夜間画像のヒストグラムを示す。図 66(a) は霞画像、図 66(b) は夜間画像、図 66(c) は (a) と (b) のヒストグラムである。図 66(c) を見ると、(a) は霞の色にピークがあり、(b) は夜の暗い色にピークがある。(a) も (b) も、ヒストグラムのピークの位置が違っただけで、両ヒストグラムはピークの幅が狭く、ピーク以外はヒストグラム値が少ないという似た特徴を持つ。そこで本研究では、ヒストグラムピークの幅を広げる手法である、ヒストグラム拡張を基に、新たな鮮明化アルゴリズムを提案する。

コントラスト改善アルゴリズムは幾つもあるが、それらの中でもヒストグラム拡張は、原画像の色分布を崩さないため、明度整合と偽色抑制の効果が 1 番高い。しかし、ヒストグラム拡張は、極端に暗い画素と明るい画素で構成された高ダイナミックレンジ画像に対応出来ない。これは、ヒストグラム拡張はヒストグラム全体の幅を広げる事でコントラストを改善する手法であるため、原画像のヒストグラム全体が広い場合には、不鮮明な画像であっても十分鮮明化が出来ない。よって本研究では、ヒストグラムを分解して、各部分ヒストグラムを拡張する事によって、効果的に夜間画像も鮮明化するアルゴリズムを提案する。これにより、原画像のヒストグラムのピーク位置に関係無く、コントラストを改善する。

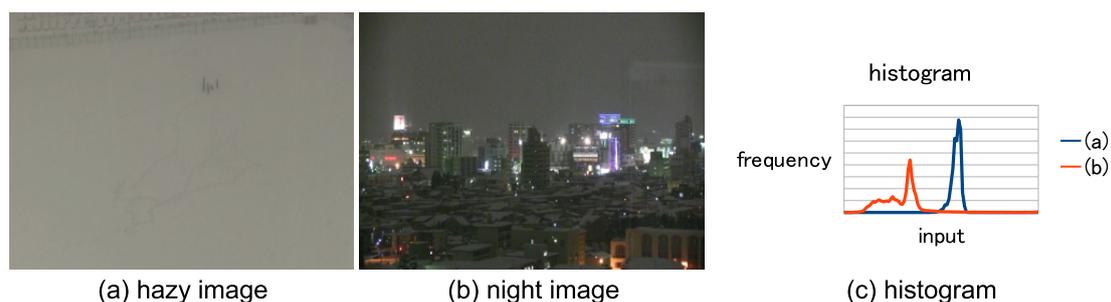


図 66: 不鮮明画像のヒストグラム

5.2 手法の説明

5.2.1 不鮮明画像と鮮明画像の明度と彩度の特徴

不鮮明な画像とは、画像の明度が特定の明るさに集中する画像の事である。豪雨や吹雪では、空が雲で覆われ暗くなり、雨粒や雪粒が大量に降ると影になっていた箇所も粒の色に近づく。色彩を持った対象物も、雨粒や雪粒の色にかき消され、彩度が失われる。夜間画像では、画像全体が暗くなり、対象物の存在すら見えない。このような不鮮明画像のコントラストを改善するために、提案手法は明度のコントラストを大幅に改善し、かき消された彩度を復元する。

図 67 に明度ヒストグラムと彩度ヒストグラムの例を示す。図 67(a) は晴天画像、図 67(b) は降雪画像、図 67(c) は夜間画像、図 67(d) 左図は (a) と (b) と (c) の明度ヒストグラム、図 67(d) 右図は (a) と (b) と (c) の彩度ヒストグラムである。図 67(a) と (b) は、同じ場所を撮影した画像である。図 67(d) 左図から、(a) の明度ヒストグラムは広範囲に分布するが、(b) は中間明度に、(c) は低明度に集中してピークを作る。不鮮明画像の明度ヒストグラムの幅は狭いが、降雪画像と夜間画像でその範囲は異なる。また、図 67(d) 右図から、(b) の彩度は低下しているが、(a) と (c) の彩度はあまり変わらない。これは、豪雨や降雪により対象物が見え辛くなると彩度が低下するが、夜間は照明光の影響を受けやすいため照明光の彩度に影響されるためである。天候による不鮮明な画像の彩度は、明度とは異なる変化をするため、明度と彩度で適切な処理を行う必要がある。

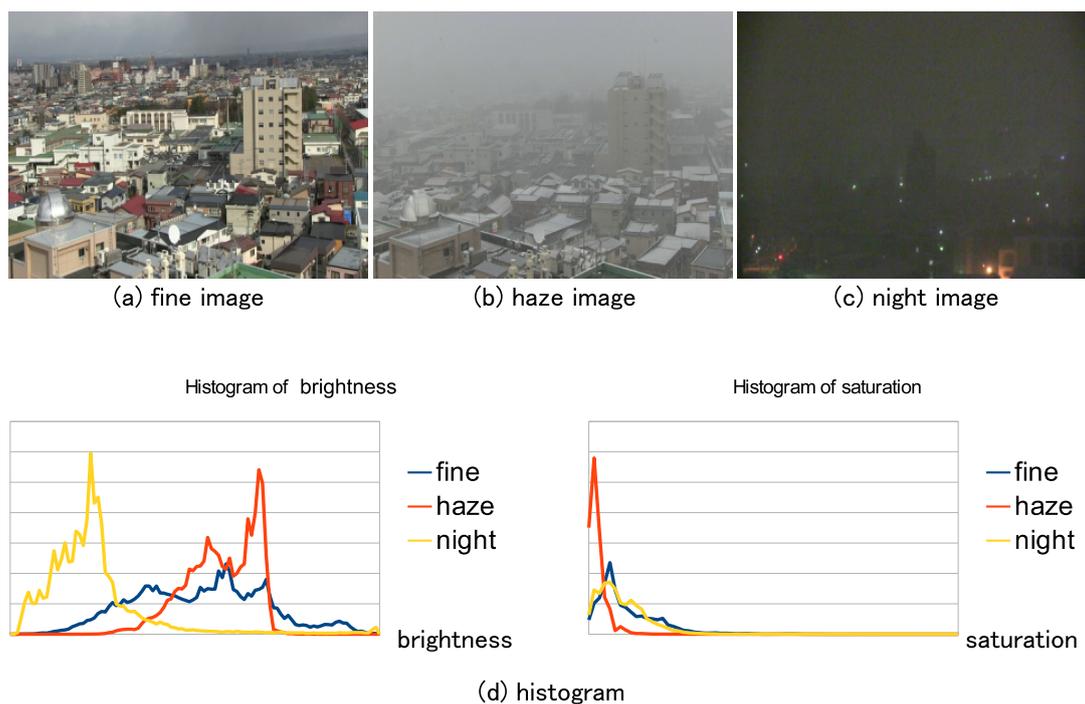


図 67: 明度と彩度のヒストグラム

そこで本手法では、ヒストグラム拡張を基本として、明度と彩度それぞれに適したコントラスト改善を行う。図 68 に提案手法のコントラスト改善の概念を示す。拡張倍率は色空間全体で一律ではなく、各色の密集度合いから各色に適した拡張倍率を推定する。本手法では、明度と彩度でヒストグラム拡張処理を別々に行う事と、各色をクラスタリングによってクラスタ分類し、各クラスタでヒストグラム拡張処理を行う事で、偽色を抑制する。コントラスト改善処理において、偽色が発生する原因は彩度の過強調にある。そこで、コントラスト改善処理を明度と彩度に分ける事で、明度のコントラスト改善効果を高めたまま彩度のコントラスト改善効果を過度にしない様に調節する。また、低彩度の画素はさまざまな色相を持っているが、これらの画素は低彩度なので、画像上では似た灰色に見えて色相の違いは視認しづらい。高彩度の画素は強調が不要である。よって、一律に彩度を強調してしまうと、大きな低彩度領域中に、周辺と色相が異なる画素が目立ち、高彩度領域は過度な色となる。特に低彩度領域の中で周辺と色相が異なる画素の過強調は、偽色発生の原因の1つである。画像中には白色や黒色等の無彩色対象物も存在するため、低彩度画素だからといって必ずしも彩度を強調すれば良いという訳ではない。そこでクラスタリングによって、原画像の各画素を強調するクラスタと抑制するクラスタに分ける。ヒストグラム拡張を各クラスタで独立に行い、各クラスタに適した拡張倍率を設定して偽色を抑制する。

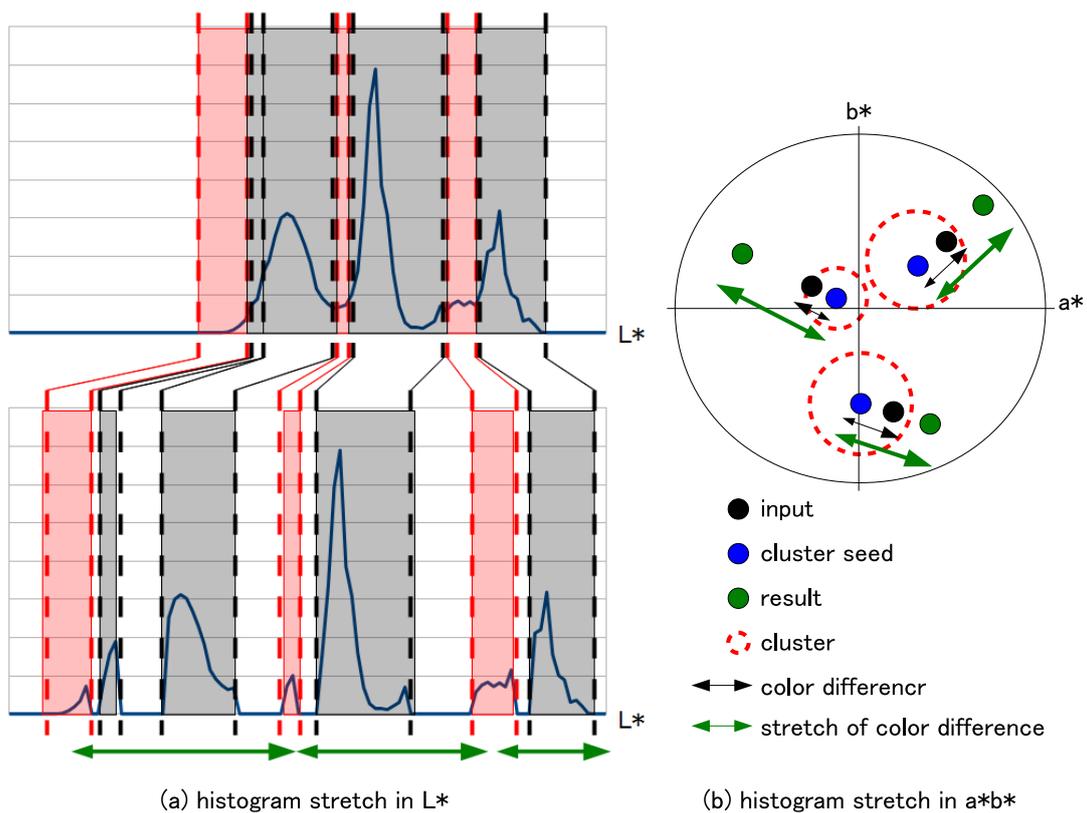


図 68: ヒストグラム拡張例

本手法の流れを説明する。まず画像を明度と彩度に分解する。 $L^*a^*b^*$ 色空間を用いて画像を L^* と a^*b^* 平面に分ける。次に、2種類のクラスタリングを行う。1つは、 L^* ヒストグラムの形の複雑さでクラスタリングする(図 68(a) 上段)。図 68(a) の点線は L^* クラスタの分割点で、黒点線は拡大する L^* クラスタ、赤点線は縮小する L^* クラスタを表す。黒点線で囲んだ拡大する L^* クラスタは黒矩形で、赤点線で囲んだ縮小する L^* クラスタは赤矩形で示す。黒矩形のクラスタはピークを持つため不鮮明な色のクラスタ、赤矩形のクラスタは平坦なヒストグラムのため鮮明な色のクラスタと言える。全ての画素は、拡大する L^* クラスタか縮小する L^* クラスタに割り当てられる。 L^* 軸の範囲を超えてヒストグラム拡張はできないため、鮮明な L^* クラスタを縮小する事で、不鮮明な L^* クラスタのコントラスト改善効果を高める。もう1つは、 $L^*a^*b^*$ 色空間の画素値でクラスタリングする。最後に、ヒストグラム拡張によりコントラストを改善する。 L^* のコントラストを大幅に改善するために、各 L^* クラスタを拡張しても互いに重ならない位置へ再配置する(図 68(a) 下段)。不鮮明な画像のヒストグラムは、画素が特定の色に集中し、特徴空間中でクラスタが作成されない範囲が広がる。例えば、図 68(a) 上段では、ヒストグラムの両端にはデータが存在せず、その箇所はクラスタがない空きスペースとなる。本手法ではこの空きスペースをヒストグラム拡張において有効に利用する。図 68(a) 下段の様に L^* クラスタを再配置する事によって、 L^* のヒストグラム全体に空きスペースを分散させて各黒点線の L^* クラスタの拡大率を高める。 a^*b^* のコントラストは、 $L^*a^*b^*$ のクラスタリングで作成した各クラスタの代表点と各画素の色差を広げる事で改善する(図 68(b))。図 69 に提案手法の流れ図を示す。

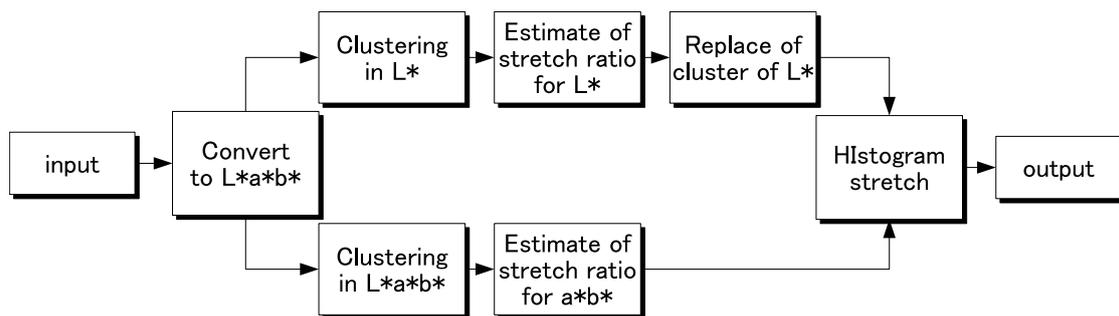


図 69: 提案手法 3 の流れ

5.2.2 2つのクラスタリング

色分布の偏りに沿って、各色で最適なヒストグラム拡張の倍率を推定するために、 L^* と $L^*a^*b^*$ の2種類のクラスタリングを行う。

L^* のクラスタリングでは、ヒストグラム形状の複雑な箇所と平坦な箇所を分離するために、累積ヒストグラムを等分割し、密集した L^* クラスタを統合する。累積値で等分割すると、ヒストグラムの形が山となる箇所では L^* クラスタが密集し、平坦な箇所では L^* クラスタが散らばる。等分割によって平坦な L^* クラスタを作成し、山となる箇所では密集した L^* クラスタを統合して複雑な L^* クラスタを作成する。

$L^*a^*b^*$ のクラスタリングでは、一般的な NearestNeighbor(NN) 法を行う。NN 法とは、分類カテゴリを予め用意して、各入力データと最も類似するデータを含むカテゴリに各入力データを分類する手法である。用意する分類カテゴリを構成するデータを初期シードと呼ぶ。初期シードは、原画像から「50」画素をランダムにサンプリングし、その中から色が類似するサンプリング画素を棄却し、残った画素で構成した。ここで、色の類似は $L^*a^*b^*$ 色空間のユークリッド距離で色差「30」未満とした。入力データと最も類似する分類カテゴリのデータの距離が閾値を超えている場合は、入力データを初期シードとして新たに分類クラスタを作成する。閾値より小さい場合は、該当する分類クラスタに入力データを分類して、その入力データを分類カテゴリのシードに追加する。閾値が小さいとクラスタが過分割されて処理時間はかかるが偽色の原因にはならない。閾値が大きいと他の色特徴のクラスタと過統合されて後のヒストグラム拡張の際に偽色発生の原因となる。本手法で使用した閾値 (th_{NN}) は実験的に「20」とした。

NN 法において、クラスタが類似する色の画素を吸収すると、その吸収した色差の分だけクラスタを大きくする。 L^* については色特徴だけでなくヒストグラム形状で分割したいが、NN 法ではピーク箇所と平坦箇所にある画素の色が類似していると分離できず過統合される。そのため本手法では L^* のクラスタリングに NN 法を使用しない。

5.2.3 L*のクラスタリング

図 70 に L* のクラスタリング例を示す。図 70(a) は累積ヒストグラムを累積値で等分割した例、図 70(b) は累積値の分割線を L* 軸上で表した分割線の例、図 70(c) は分割した L* クラスタを統合した例を示す。

まず累積ヒストグラムを累積値で等分割する (図 70(a))。赤線は累積ヒストグラムの等分割線を表す。緑の矢印と青の矢印は、それぞれ等分割した累積ヒストグラムの L* の幅を表す。緑の矢印は累積ヒストグラムの勾配が急な箇所、青の矢印は累積ヒストグラムの勾配が緩い箇所の幅を表す。緑の矢印では L* の幅は狭く、青の矢印では L* の幅は広い。累積ヒストグラムの勾配は、ヒストグラムの頻度が高いピーク箇所では急激になり、頻度が低い平坦箇所では緩やかになる事から、累積ヒストグラムを累積値で等分割すれば、緑の矢印の様な L* 幅の狭い分割結果がピーク箇所に密集して生成され、青矢印の様な L* 幅の広い分割結果は平坦箇所では生成される。

図 70(a) の様な累積ヒストグラムを累積値で分割した分割線を L* 軸で表現した例を図 70(b) に示す。赤線は図 70(a) の分割線を L* 軸上で表した分割線、青線はヒストグラム、黄色線は累積ヒストグラム、緑円は密集した L* クラスタを表し、後に統合されるクラスタの範囲である。L* の観点でも図 68(a) と同様に、等分割線の密集具合から、ヒストグラムのピーク箇所と平坦箇所を抽出できる事が分かる。

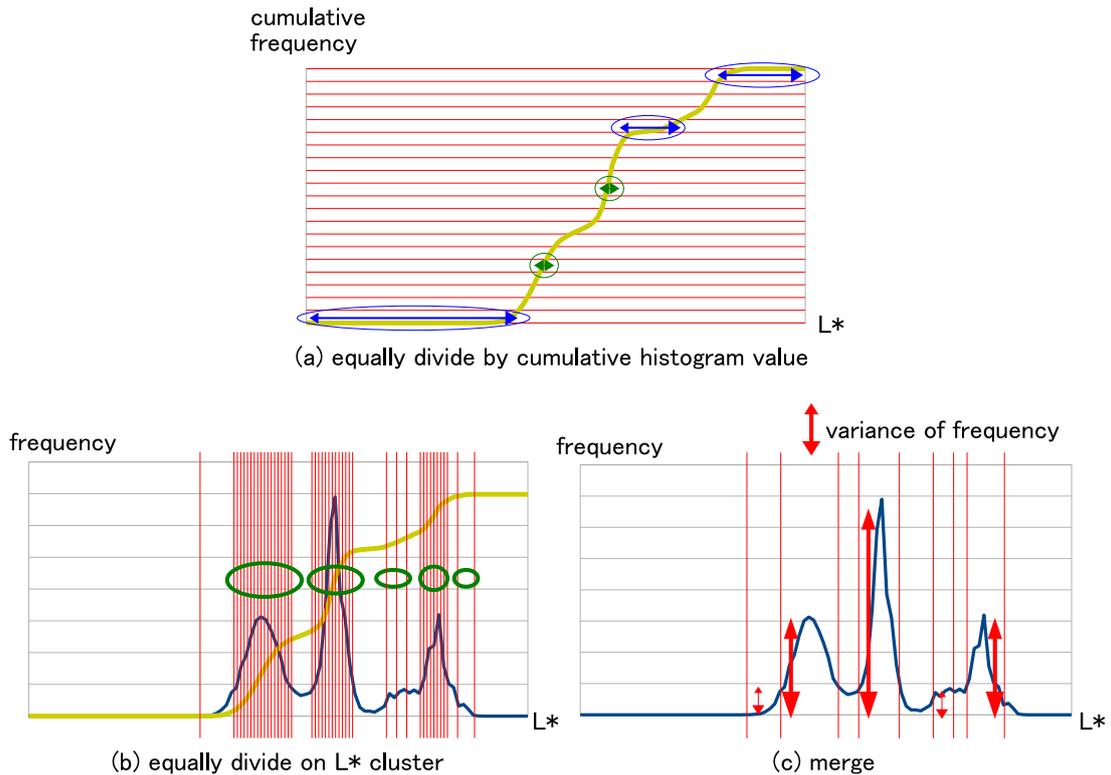


図 70: L* のヒストグラム拡張の例

次に、階層的クラスタリングの最近隣法によって2つのクラスタ間距離が最も近いL*クラスタを統合する。式(33)を満たす2つのクラスタが無くなるまで統合を繰り返す(図70(c))。ここで、PとQは比較する2つのL*クラスタ番号、clsはL*クラスタ、pはcls^P内の各画素値、qはcls^Q内の各画素値、L*はL*a*b*色空間のL*チャンネル、NはL*クラスタ数、th_{mer}は閾値である。

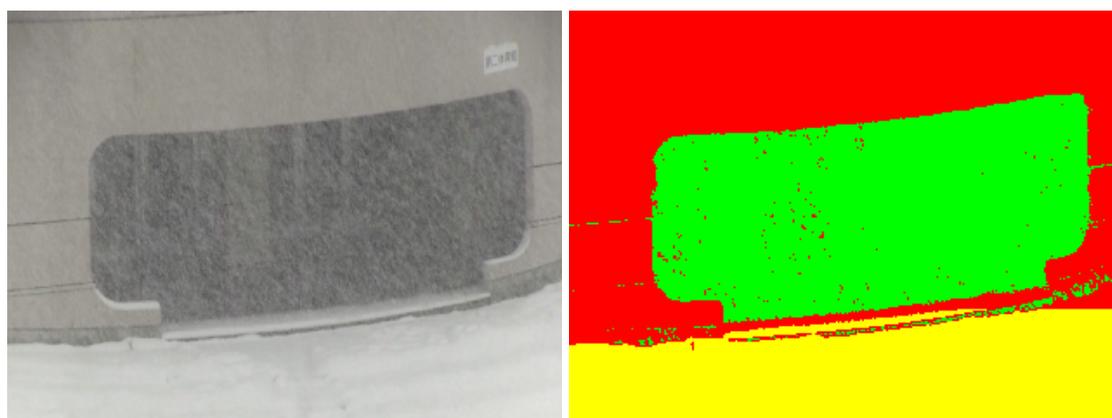
この段階で等分割数が少ないとピーク箇所と平坦箇所が同一クラスタとなり、鮮明化の効果が弱まるため、等分割数を多く設定する必要がある。等分割数を多くして過分割しても、最近隣法によって統合されるので問題無い。本論文では、各種画像において過統合しない事を実験から確認して分割数(div)を「64」と固定し、全実験画像に適用した。

L*クラスタの統合処理により、ピーク箇所と平坦箇所のL*クラスタが作成される。ピークを含むL*クラスタは色が集中する不鮮明なL*クラスタ、平坦なL*クラスタは色が散らばる鮮明なL*クラスタである。各L*クラスタの代表点(cs_{L*})は各クラスタに属する画素のL*の平均値で算出する。

$$\min_{p \in cls^P, q \in cls^Q} |p_{L^*} - q_{L^*}| < th_{mer} \quad (P \neq Q = 1 \dots N) \quad (33)$$

5.2.4 L*a*b*のクラスタリング

図71にNN法の結果を示す。NN法によるクラスタリング結果から、各クラスタに属する画素のa*の平均値とb*の平均値をそれぞれ代表点(cs_{a*}, cs_{b*})とする。L*a*b*のクラスタリング結果はa*とb*のヒストグラム拡張に使用するため、以降ではL*a*b*のクラスタリング結果をa*b*のクラスタと呼ぶ。



(a) input

(b) clustering(NN)

図 71: NN 法によるクラスタリング結果の例

5.2.5 ヒストグラム拡張倍率の算出

L*のクラスタと a*b*のクラスタそれぞれにおいて、各クラスタの特徴から拡張倍率を推定する。L*のクラスタはヒストグラム値の標準偏差、a*b*のクラスタは画素値の標準偏差から拡張倍率を推定する。

5.2.6 L*クラスタの拡張倍率の推定

図 70(c) の赤矢印に示す様に、ピークを含む L*クラスタは山なりの形であるため、各ピンの頻度値は低い値から高い値までである。一方、平坦箇所クラスタは全ピンの頻度値はほぼ同じ値となる。よって、各ピンの頻度値の標準偏差を算出する事によって、ピーク箇所と平坦箇所を区別出来る。ピーク箇所は似た色の画素が画像に多数存在する事を表すため、不鮮明な色であるから拡張倍率を高くする。平坦箇所は各色は平均的に画像に存在する事を表すため、鮮明にする必要はないため拡張倍率を低くする。よって、式 (34) で各 L*クラスタの拡張倍率を推定する。ここで、 $\hat{r}_{L^*}^{nL}$ は暫定的な L*の拡張倍率、 var_H はヒストグラム値の標準偏差、 α_{HV} は拡張倍率を調節するパラメータ、 L^* は L*a*b*色空間の L*チャンネル、 nL は L*クラスタの番号である。但し過剰な鮮明化を防ぐために、 $\hat{r}_{L^*}^{nL}$ は「0.1」から「4.0」の範囲に限定する。

$$\hat{r}_{L^*}^{nL} = \frac{var_H^{nL}}{\alpha_{HV}} \quad (34)$$

5.2.7 L*クラスタの再配置

図 72 に L*クラスタの再配置の概念を示す。図 72(a) は原画像、図 72(b) は本手法による鮮明化後の結果画像である。図 72(c) は (a) のヒストグラム、図 72(d) は式 (35) で算出した暫定拡張倍率 \hat{r}_{L^*} で各 L*クラスタが重ならない様に拡張した後の各 L*クラスタの位置、図 72(e) は L*クラスタの再配置後の各 L*クラスタの位置を示すグラフである。まず、 \hat{r}_{L^*} で拡張しても全 L*クラスタが重ならない様に、各 L*クラスタを L*軸上に並べる (図 72(d))。 \hat{r}_{L^*} は L*軸の範囲とは無関係に推定しているため、拡張後の L*クラスタ全体は L*a*b*色空間の L*軸の幅 ($width_{max}$) からはみ出す。よって、 \hat{r}_{L^*} で拡張後の全 L*クラスタの幅の合計値 ($width_{all}$) を算出し、全 L*クラスタの \hat{r} を正規化する (図 72(e))。各 L*クラスタの代表点は、 cs_{L^*} の低いクラスタから順に式 (35) で正規化する。ここで、 \check{cs}_{L^*} は正規化後の再配置した L*クラスタの代表点、 r_{L^*} は正規化後の拡張倍率、 L^* は L*a*b*色空間の L*チャンネル、 nL は L*クラスタの番号、 cs_{L^*} は再配置前の L*クラスタの代表点、 \hat{r}_{L^*} は式 (34) で算出した暫定的な拡張倍率、 $width_{max}$ は L*a*b*色空間の L*軸の幅 (図 72(d) を参照)、 $width_{all}$ は \hat{r}_{L^*} で拡張後の全 L*クラスタの幅の合計値 (図 72(d) を参照)、 min は最小値、 $width_{pre}$ は n 番クラスタよりも cs_{L^*} が低い全 L*クラスタ (p 番で表す) の拡張後の幅合計値 (図 72(e) 赤矢印) である。

また、豪雨や吹雪等で酷く霞んだ画像の場合は、L*のクラスタ数が少なく作成され「 $width_{all} < width_{max}$ 」となる。その場合は、 $width_{all}$ の中心を $width_{max}$ の中心に合わせる。図 72(c) から (e) への変化が各代表点の移動量 (s) となる。

また、図 72(d) において 1 番左のピーク箇所のクラスタが複数に分裂している。これは、累積ヒストグラムの累積値で等分割する際に過分割する事で起きる現象である。しかし、ピーク箇所の端の 1 部分のみが分割されているだけで問題は無い。図 73 で理由を説明する。

$$\begin{aligned} \check{cs}_{L^*}^{nL} &= width_{pre}^{nL} - min_{L^*}^{nL} + (cs_{L^*}^{nL} - min_{L^*}^{nL}) \times r_{L^*}^{nL} \\ r_{L^*}^{nL} &= \hat{r}_{L^*}^{nL} \times \frac{width_{max}}{width_{all}} \end{aligned} \quad (35)$$



(a) input



(b) result of proposed

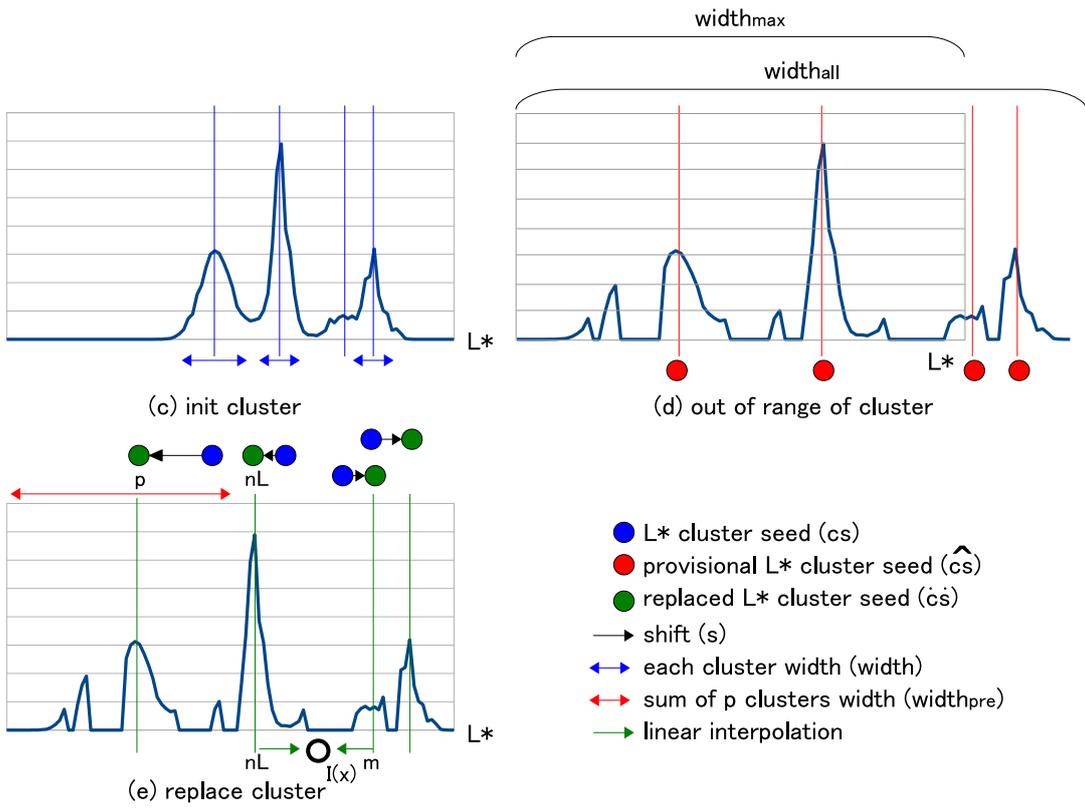


図 72: L*ヒストグラムの再配置の例

5.2.8 L*クラスタ再配置の効果

図 73(a) は図 72(e) と同じヒストグラムで、ピーク箇所が過分割された状態のヒストグラムである。(c) は (a) の緑枠で囲んだ 1 番左のピーク箇所のみを例として切り出したヒストグラムに L*クラスタリングを行った結果のヒストグラムである。(b) は式 (33) の th_{mer} を大きくして (a) の左枠のピーク箇所を 1 つのクラスタとして L*クラスタリングを行った結果のヒストグラムである。(b) と (c) の青線は L*クラスタ再配置後、赤線は後述するヒストグラム拡張後のヒストグラムをそれぞれ表す。(b) と (c) を比べるとピーク位置は少し異なっているが、どちらも赤線が 1 つのピークを構成している点で同じである。後述のヒストグラム拡張において、拡張結果を隣接クラスタと線形補間するため、ピーク箇所の端で過分割があっても結果画像に大きな影響は無い。

図 73(d) は (b) の様に式 (33) の th_{mer} を大きくしてピーク箇所を纏めた場合の鮮明化画像、図 73(e) は図 73(c) の様にピーク箇所の端に過分割がある場合の鮮明化画像である。図 73(d) と (e) を比べると (e) の方が鮮明化効果が高い。これは、図 73(e) のヒストグラムが (d) のヒストグラムより平坦化されているためである。図 73(f) に (d) と (e) のヒストグラムを示す。図 73(f) の青線は (d) のヒストグラム、赤線は (e) のヒストグラムである。図 73(f) の青線は、平坦箇所とピーク箇所を過統合してしまい、図 72(c) のヒストグラム全体を拡張した形となっていて、単なるヒストグラム拡張とほぼ変わらない。一方図 73(f) の赤線は平坦箇所を縮小する事で、ピーク箇所の拡張効果を大きくできたため、青線よりもヒストグラムが平坦化されている事が分かる。

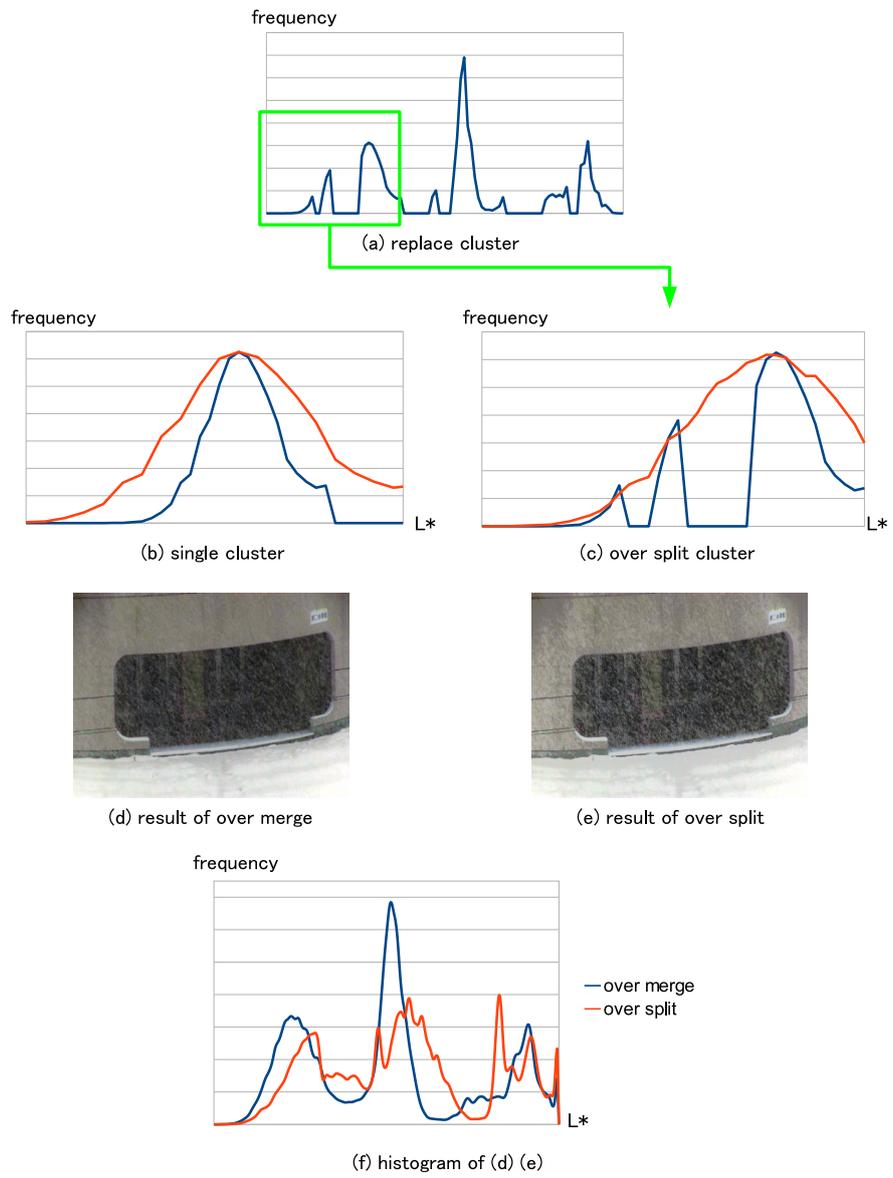
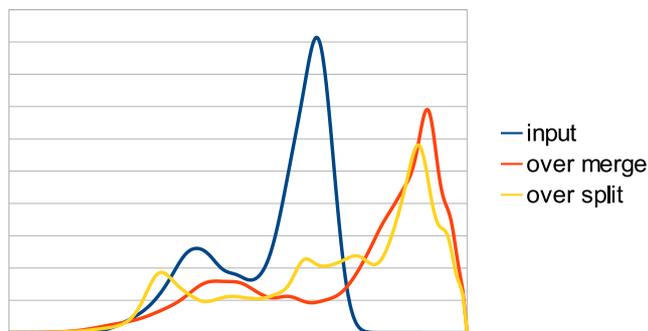


図 73: 過分割の例

5.2.9 L*クラスタ拡張の効果

図 74 に別の画像の例を示す。図 74(a) は原画像、図 74(b) は th_{mer} を大きくして L*クラスタを過統合して鮮明化した例、図 74(c) は L*クラスタを過分割して鮮明化した例である。図 74(a) のヒストグラムは幅が狭く比較的単純な形をしており、単なるヒストグラム拡張でも十分な鮮明化が期待される画像である。図 74(d) は (a) と (b) と (c) のヒストグラムである。図 74(b) は、L*クラスタ数を 1 にして、単なるヒストグラム拡張と同様の結果にしてある。図 74(c) の L*クラスタ数は 8 に過分割した。図 74(b) と (c) を比較すると、鮮明化効果に大きな差は無く、(d) のヒストグラムを見ても (b) と (c) のヒストグラムにも大きな差は無い。ピーク箇所を過分割して L*クラスタ数を多くしても、ヒストグラム拡張の結果とほぼ変わらない鮮明化効果がある事が分かる。この事からも、過分割しても拡張処理において拡張結果を線形補間する事で、単なるヒストグラム拡張と同様の効果も持ち、過分割が鮮明化効果に大きな悪影響を与えない事が分かる。



(d) histogram of (a) (b) (c)

図 74: 過分割の例 2

5.2.10 a*b*クラスタ拡張の効果

鮮明な色のクラスタは大きく、画素値の標準偏差が高い。不鮮明な色のクラスタは小さく、画素値の標準偏差が低い。よって、標準偏差から推定する各クラスタの拡張倍率は、式(36)で算出する。ここで、 r_{a*b*} は $a*b*$ に対する拡張倍率、 var_{a*} は各クラスタに属する画素の $a*$ の標準偏差、 var_{b*} は各クラスタに属する画素の $b*$ の標準偏差、 β_V は拡張倍率を調節するパラメータ、 n はクラスタの番号である。但し過剰な鮮明化を防ぐために、 r_{a*b*} は「1.0」から「4.0」の範囲に限定する。

図75に、 $a*b*$ クラスタの効果の例を示す。図75(a)は原画像、図75(b)は全画素の $a*$ と $b*$ を一律の拡張倍率でヒストグラム拡張した結果画像、図75(c)は各 $a*b*$ クラスタの拡張倍率を変えてヒストグラム拡張した本手法の結果画像である。図75(b)の拡張倍率は、画像全体で偽色が発生しない程度に手動で設定した。 $a*b*$ クラスタ数は図75(c)の上段が「5」、下段が「10」である。図75(b)と(c)を比較すると、(c)の方が全体的に有彩色対象物の彩度が高い事が分かる。これは、 $a*b*$ クラスタを複数作成して、各 $a*b*$ クラスタの拡張倍率を個別に設定したためである。

本手法では、上記で説明した $a*b*$ クラスタの代表点 (cs_{a*}, cs_{b*}) を複数持つ事で、偽色の抑制と彩度の鮮明化を同時に行う事ができる。各代表点と各画素の色差を倍率で広げてヒストグラム拡張するため、代表点からの色差が大きい画素程、鮮明化効果が高くなる。クラスタが1つしかない場合、代表点から色差が大きくなる程、低彩度では偽色の発生、高彩度では彩度の過強調が起きる。低彩度でも代表点との色差が大きい画素とは、代表点と異なる色相を持つ低彩度画素の事である。代表点と色相が異なる画素は、低彩度であっても代表点との色差は少し大きくなる。

$$r_{a*b*}^n = \frac{\beta_V}{\frac{var_{a*}^n + var_{b*}^n}{2}} \quad (36)$$

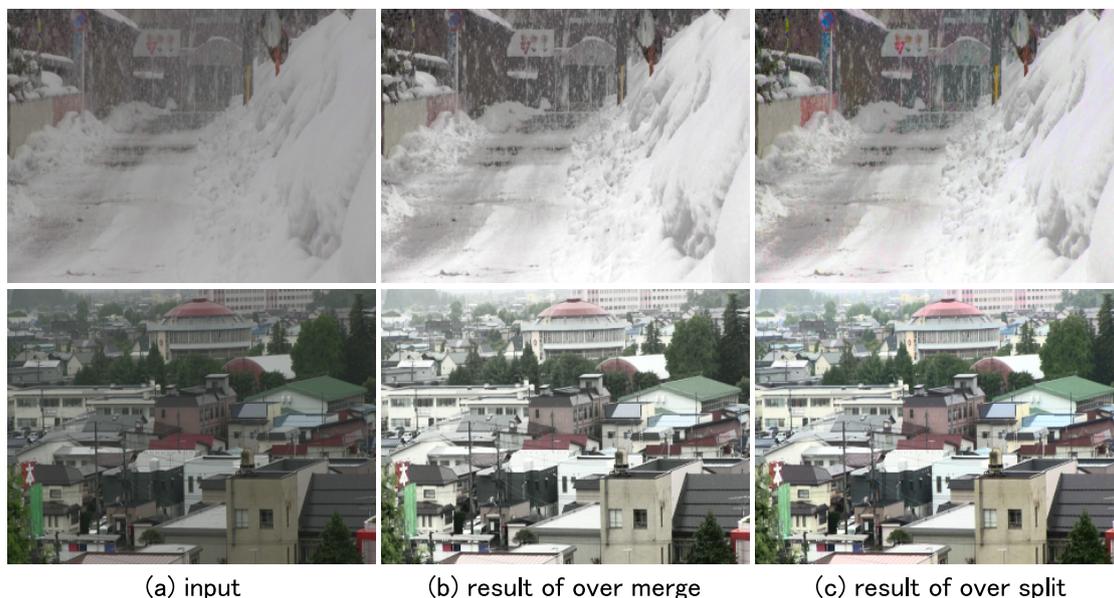
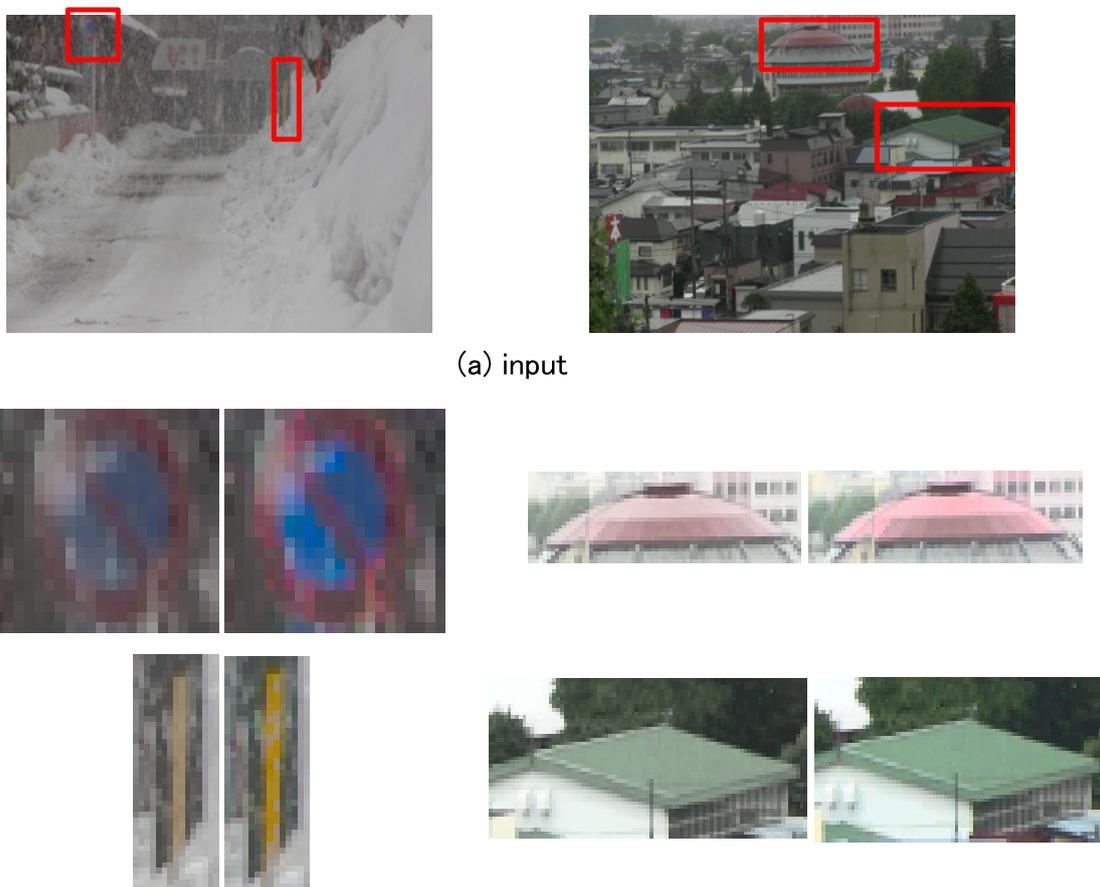


図75: クラスタリングによる $a*b*$ ヒストグラム拡張の例

偽色が発生しやすい画素は、低彩度領域で周辺と異なる色相を持つため、鮮明化すると周辺とは異なる色相が目立ち偽色として認識されやすい。これは、曇り空や雪原や暗闇等で偽色が目立つ原因の1つである。図75(b)において、彩度の過強調を防ぐ事は、彩度の鮮明化効果を弱くする事でもある。そこで本手法では、 $L^*a^*b^*$ でクラスタリングをして各 a^*b^* クラスタを大きくせず、ヒストグラム拡張をするための代表点を複数設定する。従来手法は全要素で同じ様にコントラストを改善するアルゴリズムであるため、コントラスト改善効果が高い箇所偽色を発生させる。

図76に有彩色対象物を拡大した図を示す。図76(a)は図75(a)と同じ原画像、図76(b)は図75(b)と図75(c)から図76(a)の赤枠と同じ位置をそれぞれ切り出した画像を拡大して並べた画像である。図76(b)の左側が図75(b)の一部を拡大した画像、右側が図75(c)の一部を拡大した画像である。図76(b)からも、図75(c)の方が彩度のコントラストを改善できている事が分かる。図75(b)の彩度のコントラストを上げると偽色が発生する。本手法では、 $L^*a^*b^*$ のクラスタリングによって a^*b^* クラスタを作成する事で、各 a^*b^* クラスタの拡張倍率を調節し、 a^*b^* のコントラストを上げると同時に、偽色発生を抑制を実現できる。



(a) input

(b) over merge & over split
left : over merge
right : over split

図76: 図75の拡大図

5.2.11 クラスタのヒストグラム拡張

正規化した拡張倍率 r_{L^*} と $r_{a^*b^*}$ でヒストグラム拡張を行う。各クラスタの代表点を中心に、各代表点と各画素の色差を拡張する。

5.2.12 L*クラスタのヒストグラム拡張

各 L*クラスタを拡張するが、図 72(e) 下部に示す様に、隣の L*クラスタの代表点からの拡張結果との線形補間を行い、拡張後のヒストグラムの形を平滑化する。式 (37) で結果画像 (O) を作成する。ここで、 O は結果画像、 I は原画像、 x は画素位置、 L^* は L*a*b*色空間の L*チャンネル、 nL は L*クラスタの番号、 $\check{c}s_{L^*}^{nL}$ は式 (35) で算出した正規化後の再配置した L*クラスタの代表点、 r_{L^*} は式 (35) で算出した正規化後の拡張倍率、 cs_{L^*} は再配置前の L*クラスタの代表点、 s は各代表点の移動量 (図 72(e) を参照)、 m は隣接する L*クラスタ番号である。

$$\begin{aligned}
 O(x)_{L^*} &= (\check{c}s_{L^*}^{nL} + (I(x)_{L^*} - cs_{L^*}^{nL}) \times r_{L^*}^{nL}) \\
 &\times \left(1 - \frac{|I(x)_{L^*} - cs_{L^*}^{nL}|}{|cs_{L^*}^{nL} - cs_{L^*}^m|}\right) \\
 &+ (\check{c}s_{L^*}^m + (I(x)_{L^*} - cs_{L^*}^m) \times r_{L^*}^m) \\
 &\times \left(1 - \frac{|I(x)_{L^*} - cs_{L^*}^m|}{|cs_{L^*}^{nL} - cs_{L^*}^m|}\right) \\
 &\cdots if(cs_{L^*}^{nL} \leq I(x)_{L^*} < cs_{L^*}^m)
 \end{aligned} \tag{37}$$

5.2.13 a*b*クラスタのヒストグラム拡張

各クラスタの代表点と各画素の色差の拡張結果は、式 (38) で算出する。ここで、 O は結果画像、 I は原画像、 x は画素位置、 n はクラスタの番号、 a^* は L*a*b*色空間の a*チャンネル、 b^* は L*a*b*色空間の b*チャンネル、 cs_{a^*} は各クラスタの代表点の a*チャンネル、 cs_{b^*} は各クラスタの代表点の b*チャンネル、 $r_{a^*b^*}$ は式 (36) で算出した拡張倍率、 cls は各クラスタである。

$$\begin{aligned}
 O(x)_{a^*} &= cs_{a^*}^n + (I(x)_{a^*} - cs_{a^*}^n) \times r_{a^*b^*}^n \\
 O(x)_{b^*} &= cs_{b^*}^n + (I(x)_{b^*} - cs_{b^*}^n) \times r_{a^*b^*}^n \\
 &\cdots if(x \in cls^n)
 \end{aligned} \tag{38}$$

5.3 結果

文献 [14](DCP) と文献 [6](CLAHE) と比較した実験結果を図 77 と表 6 に示す。図 77(a) は原画像、図 77(b) は DCP の結果、図 77(c) は CLAHE の結果、図 77(d) は提案手法の結果である。但し、文献 [14] のマッピング処理は文献 [42] に改良し、明度補正は文献 [33] を使用し、ダークチャンネル算出のフィルタサイズは「 30×30 」とし、図 77(b) の最下段の画像は文献 [14] の結果画像をそのまま掲載した。文献 [6] のブロック分割は「 8×8 」ブロックとした。定量評価に使用した動画の種類は 36 種類で、各動画 1800 フレームを使用した。提案手法の各パラメータは全て実験により決定した同一値で固定し、 α_{HV} は「10」、 β_V は「1」、累積ヒストグラムの等分割数 (*div*) は「64」分割、 th_{mer} は「1」とした。

DCP の手法では、降雪画像と夜間画像と鮮明画像の全てに偽色を多数出している。また、上から 3 段目と 4 段目の夜間画像では特に画質が悪い。さらに、下から 2 段目の鮮明画像では彩度を過強調する。

CLAHE の手法では、空や雪原等の同じ色が分布する箇所やエッジ付近で偽色を出している。最上段の画像では、曇り空に緑色と赤紫の帯状の偽色があり、画像下部の建物にもまばらに霧状の偽色があり、ビルと空の境界にハロー効果の様な不自然に明るい箇所がある。2 段目の画像では、曇り空 1 面に緑色の偽色があり、雪粒の境界付近が不自然に明るい。3 段目の画像は全体的に暗く、4 段目の画像も暗く画像中央部に紫色の偽色がある。5 段目の鮮明画像では画像下部の赤い木と緑の木の境界に緑色や水色の偽色がある。最下段の画像では、全体的に水色の偽色が多数ある。静止画処理では偽色の無い画像を選んで利用できるが、動画処理には利用できない。

しかし本手法では、夜間画像でも降雪画像でも鮮明画像でも、偽色を発生させずにコントラストを改善している。

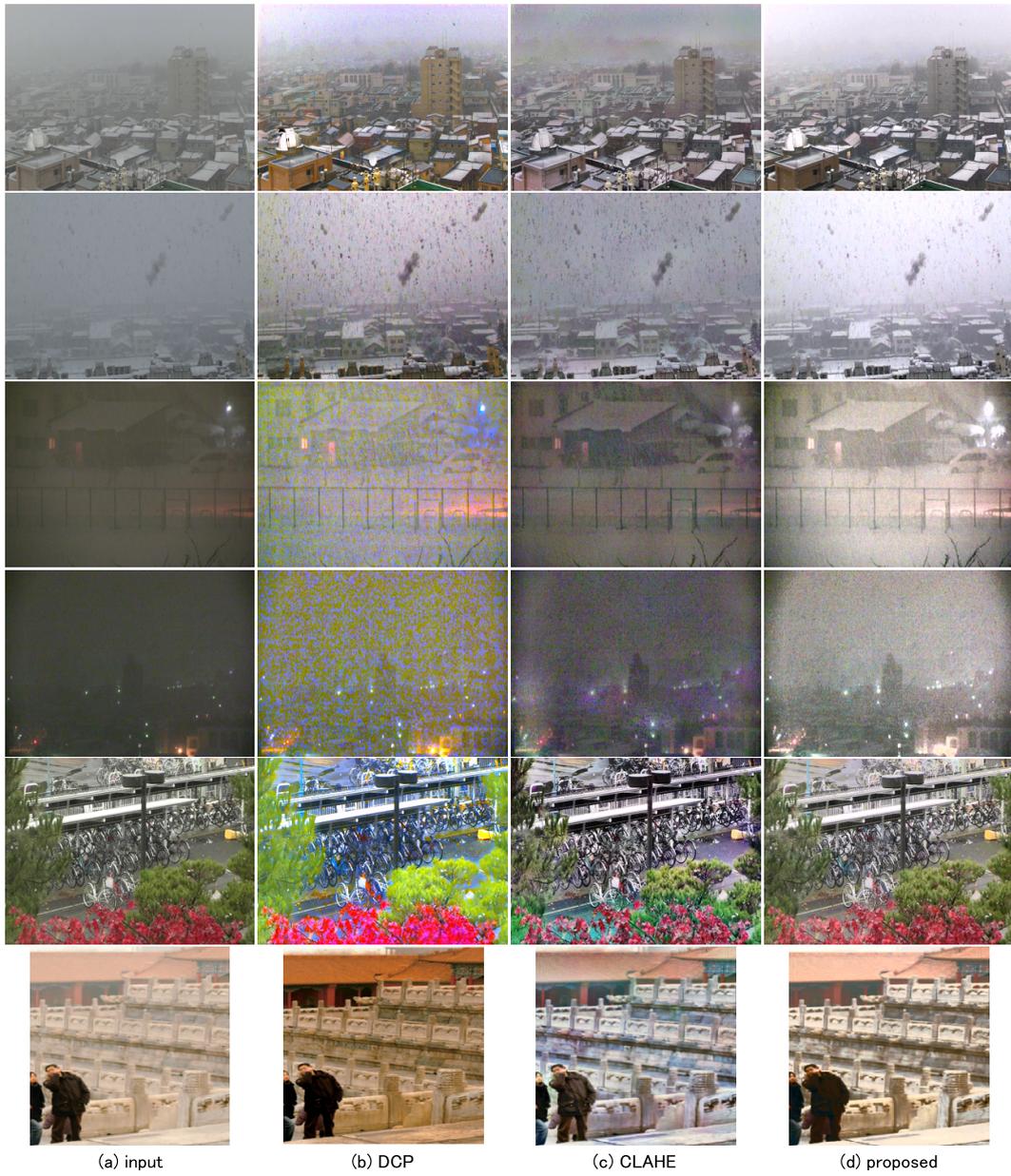


図 77: 本手法の結果

Michelson のコントラストと最小二乗誤差 (RMS) コントラスト (式 (39)) で評価を行った結果を表 6 に示す。これらの評価値は、値が大きい程、画像のコントラストが高く、画像が鮮明である事を表す。36 種類の動画画像を晴天画像、降雪画像、夜間画像の 3 つに分類し、各平均値で評価した。ここで、 $cont$ はコントラスト、 $rmsc$ は RMS コントラスト、 max は最大値、 N は全画素数、 \bar{I} は全画素平均値である。

表 6 から、晴天画像、降雪画像、夜間画像の全てにおいて、本手法のコントラスト改善効果は高い。DCP のコントラスト値は高いが、これは偽色によるもので、図 77 から分かる様に、視認性の点から良い画像とは言えない。CLAHE の手法は、偽色もあり、夜間画像においてコントラスト改善の効果が低い。しかし、本手法は降雪画像でも夜間画像でも晴天画像でも偽色を発生させずに、コントラスト改善効果が高い事が分かる。

$$cont_{c \in R, G, B} = \frac{max_c - min_c}{max_c + min_c}$$

$$rmsc_{c \in R, G, B} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_x (\bar{I}_c - I(x)_c)^2} \quad (39)$$

表 6: コントラスト改善の定量評価

	fine		hazy		night	
	Michelson	RMS	Michelson	RMS	Michelson	RMS
Original	0.83	39.99	0.46	20.22	0.86	19.95
DCP	0.99	62.67	0.89	46.91	0.93	45.49
CLAHE	0.95	53.47	0.70	32.99	0.90	26.46
Proposed	0.98	60.37	0.85	45.60	0.95	46.87

6 従来手法と提案手法の比較

本論文では、鮮明化アルゴリズムを3つ提案した。ここでは、各提案手法と従来手法との比較を行う。比較手法は、DCP、CLAHE、マルチスケール Retinex(MSR) である。評価は定性評価と定量評価にて行う。定量評価の尺度は、コントラスト、処理前後の色差、及び処理時間である。

各手法の特性を表7に纏める。ここで、[14]の手法はDCP(Dark Channel Prior)、[6]の手法はCLAHE(Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization)、[13]の手法はMSR(Multi Scale Retinex)、本論文の提案手法 [1] はDBCP(Dark/Bright Channel Prior)、本論文の提案手法 [2] はRBD(Region Based Dehaze)、本論文の提案手法 [3] はMHS(Multi Histogram Stretch) と表記する。

表 7: 鮮明化アルゴリズムの特性

	鮮明化効果	偽色抑制	明度整合	色漏れ抑制	鮮明画像	夜間画像	処理時間
DCP		×	×		×		×
CLAHE				×	×	×	
MSR			×		×		×
DBCP						×	
RBD						×	
MHS							

6.1 定性評価

実験は、 320×240 画素の画像を用いた。晴天、霞、夜間の3種類のシーンに対し、合計36本の動画像で行った。従来手法と本論文で提案した各手法の結果画像を図78から図113に示す。各図の(a)は原画像、(b)はDCPの結果、(c)はCLAHEの結果、(d)はMSRの結果、(e)はDBCPの結果、(f)はRBDの結果、(g)はMHSの結果である。

従来手法で使用したパラメータ値について述べる。DCPにおいては、ダークチャンネルの算出に使用する空間フィルタサイズを「 30×30 画素」とし、マッティング処理は文献[42]の手法、後処理の明度補正は文献[33]を使用した。CLAHEにおいては、分割ブロック数を「 8×8 ブロック」とした。MSRにおいては、環境光の推定に使用するガウシアンフィルタのサイズを標準偏差が「15」「80」「250」となる「 60×60 」「 320×320 」「 1000×1000 」の3種類とし、それぞれの結果画像の平均値をMSRの結果とした。

各提案手法で使用したパラメータの設定値は、表8から表10に示す。

表 8: 提案手法 1 のパラメータ設定値

パラメータ	記号	設定値
フィルタサイズ	Ω	1×1
大気光推定のピーク探索幅	w	10
大気光判定閾値	th_A	0.15
透過係数ヒストグラム探索範囲	r_t の範囲	0 ~ 0.4
リカーシブフィルタの学習係数	α	0.9
透過係数最小値	t_0	0.1

表 9: 提案手法 2 のパラメータ設定値

パラメータ	記号	設定値
領域成長法の閾値	th_{RG}	15
領域統合の閾値	th_{RM}	30
小領域統合の閾値	th_{MRM}	0.05
重み係数最大値	w_{max}	0.9
重み係数最小値	w_{min}	0.1
最大重み係数の彩度閾値	th_{s_max}	5
最小重み係数の彩度閾値	th_{s_min}	20
最大重み係数のエントロピー閾値	th_{e_max}	4
最小重み係数のエントロピー閾値	th_{e_min}	5.5
透過係数最小値	t_{min}	0.1

表 10: 提案手法 3 のパラメータ設定値

パラメータ	記号	設定値
最近隣法の初期分割数	div	64
最近隣法の閾値	th_{mer}	1
NN 法の閾値	th_{NN}	20
明度の拡張倍率調節値	α_{HV}	10
彩度の拡張倍率調節値	β_V	1

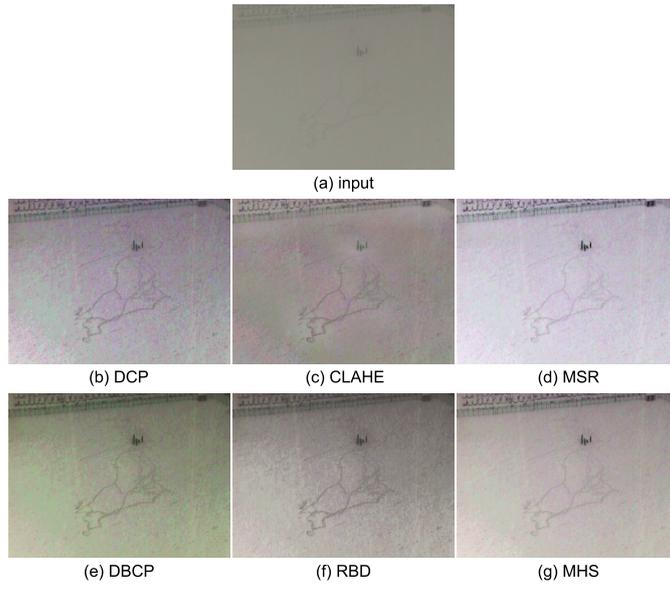


圖 78: 鮮明化比較結果 1

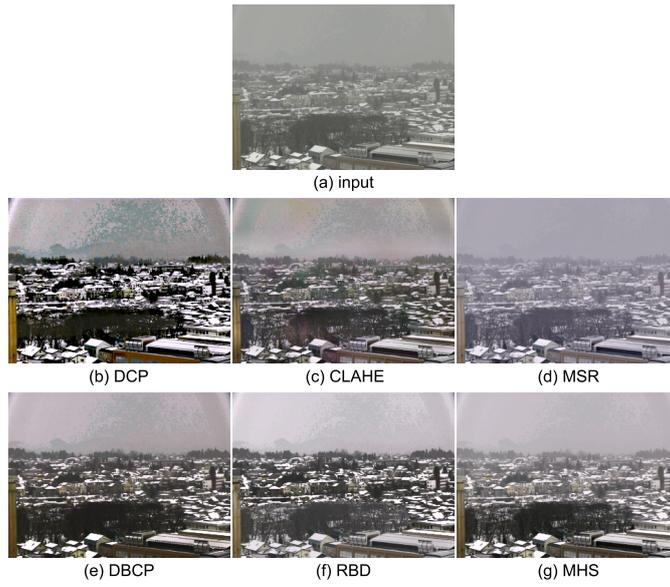


圖 79: 鮮明化比較結果 2

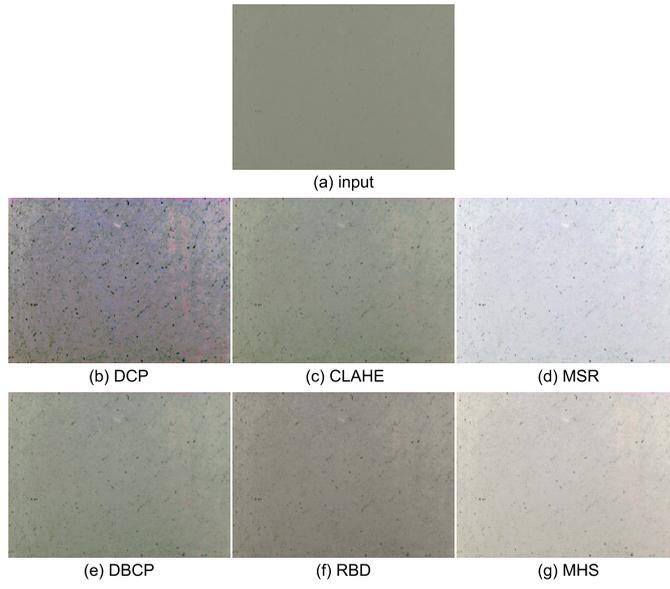


圖 80: 鮮明化比較結果 3

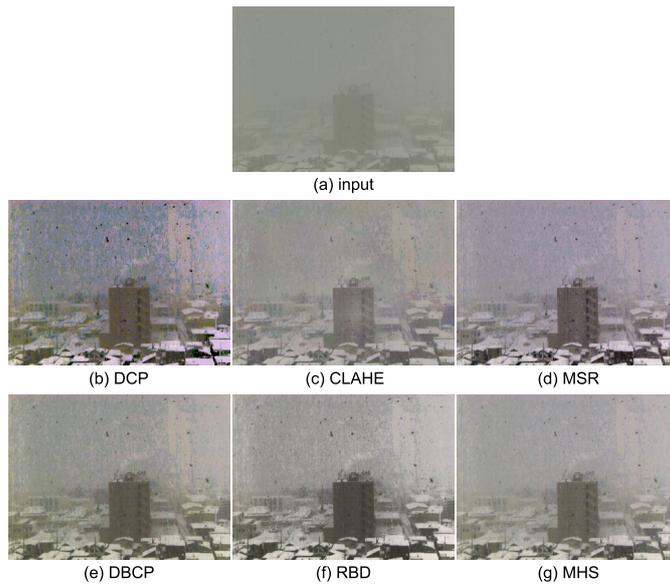


圖 81: 鮮明化比較結果 4

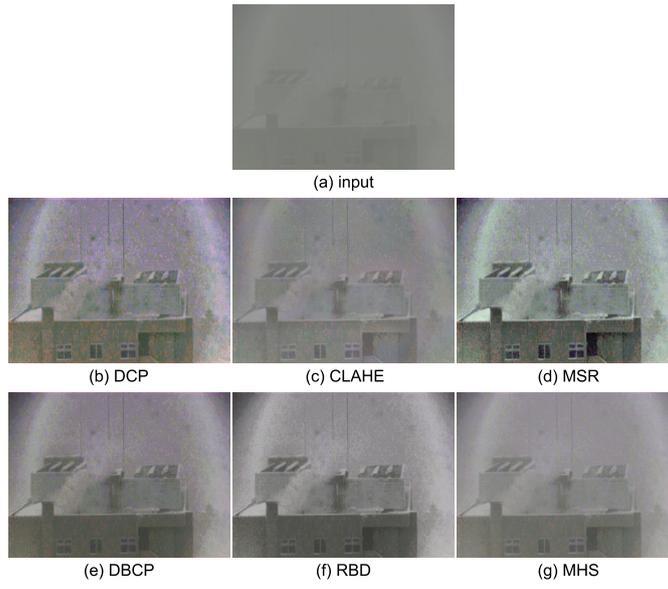


圖 82: 鮮明化比較結果 5

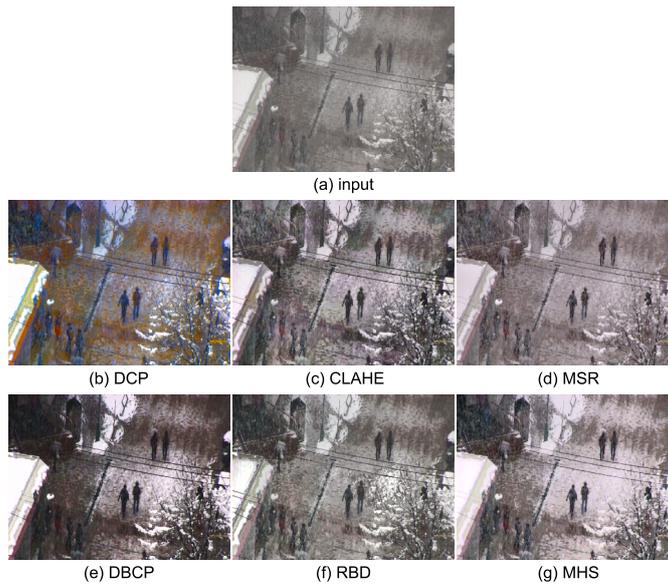


圖 83: 鮮明化比較結果 6

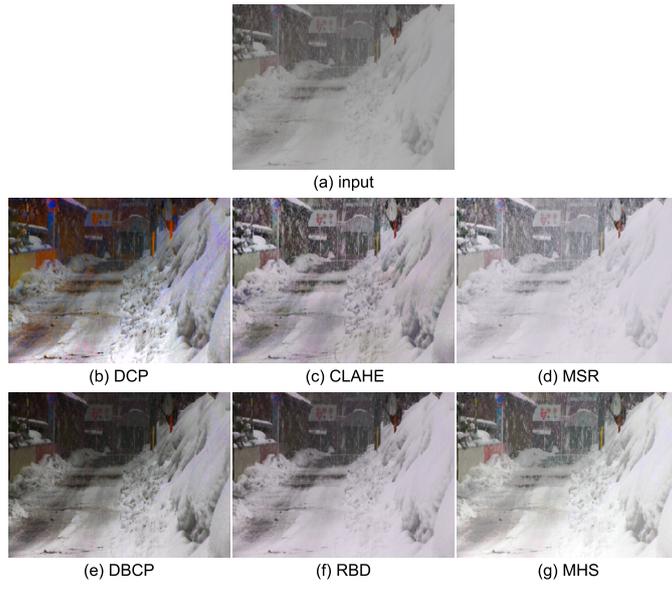


圖 84: 鮮明化比較結果 7

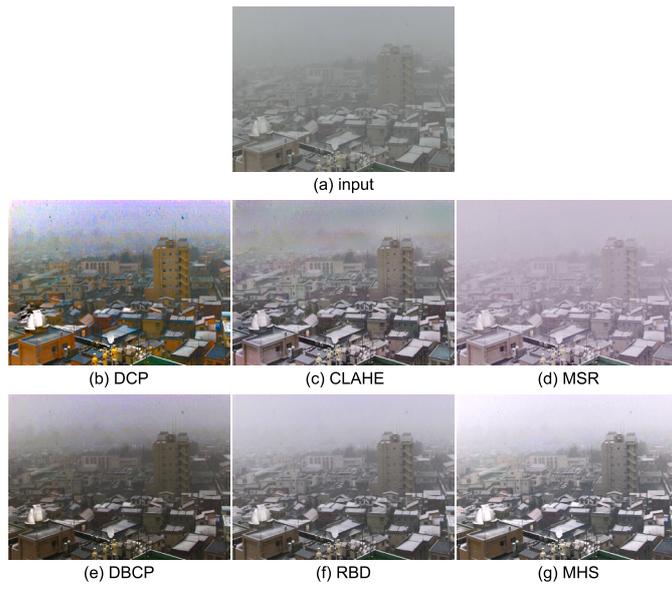


圖 85: 鮮明化比較結果 8

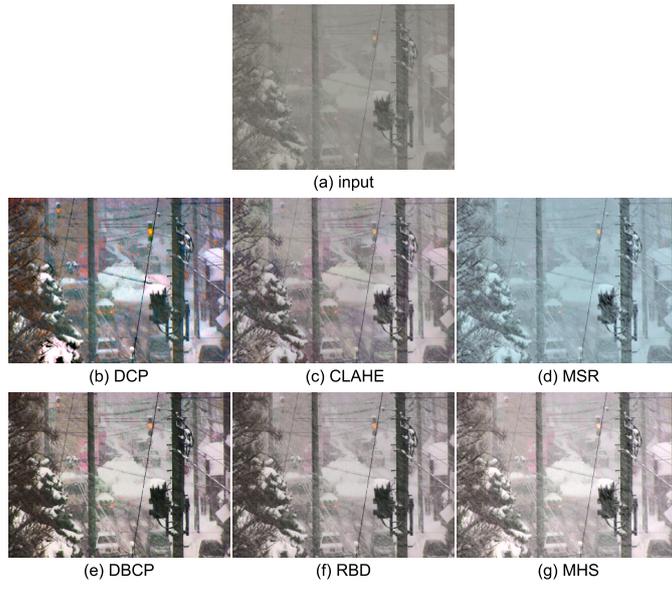


图 86: 鮮明化比較結果 9

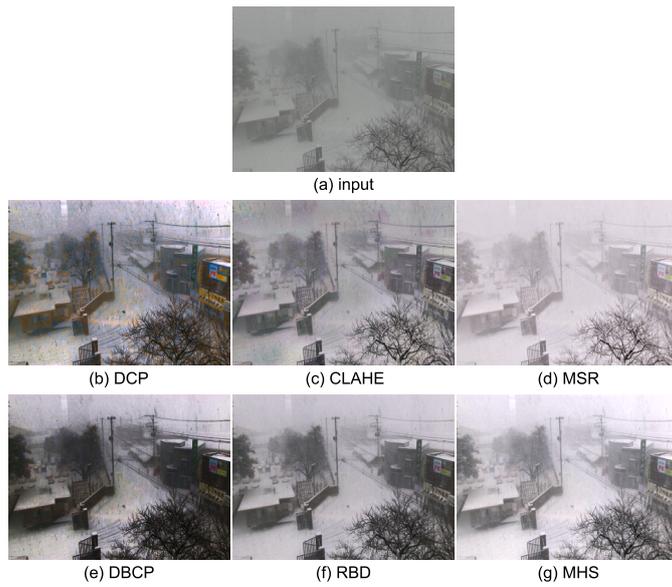


图 87: 鮮明化比較結果 10



图 88: 鮮明化比較結果 11

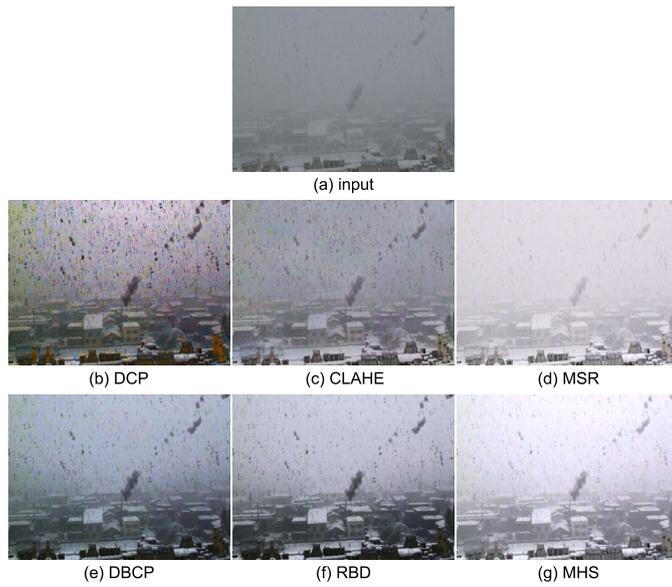


图 89: 鮮明化比較結果 12

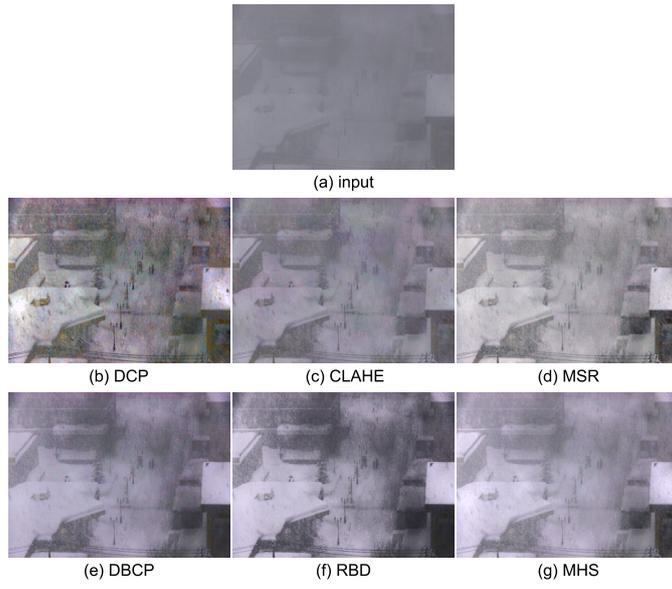


图 90: 鮮明化比較結果 13

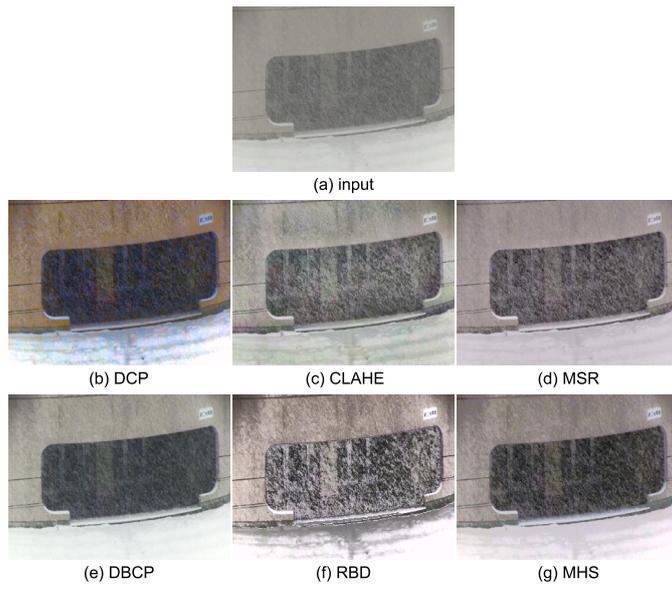


图 91: 鮮明化比較結果 14

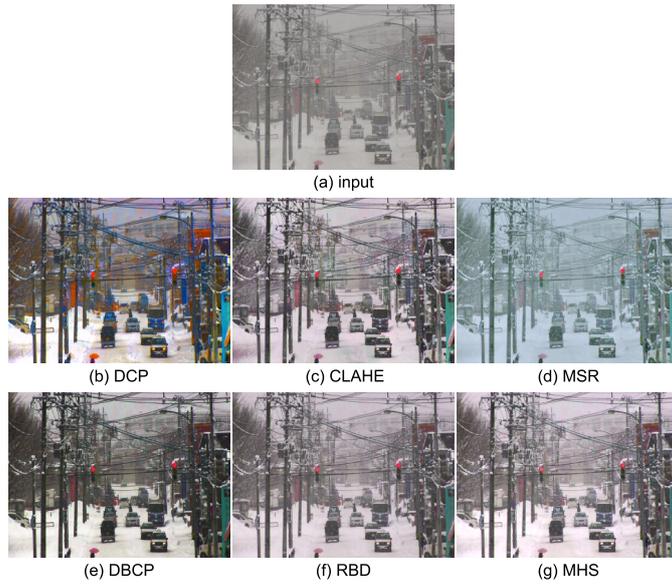


图 92: 鮮明化比較結果 15

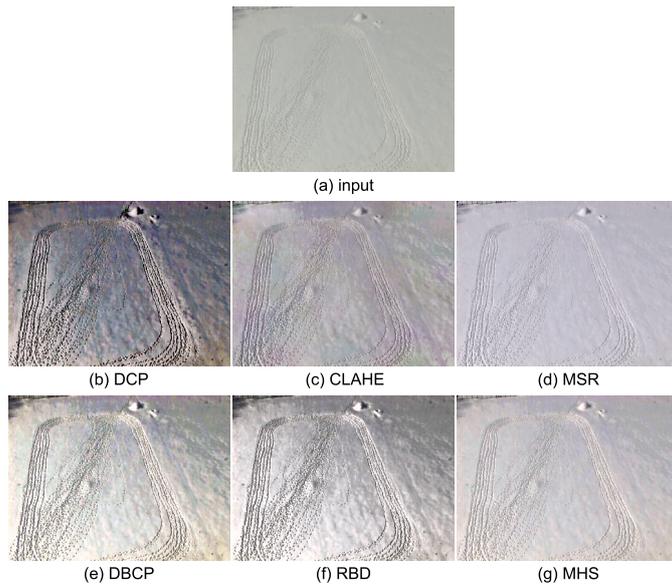


图 93: 鮮明化比較結果 16

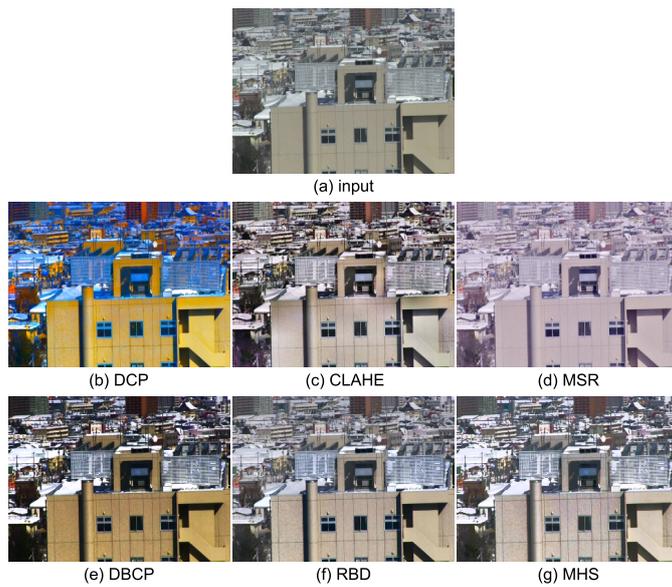


图 94: 鮮明化比較結果 17

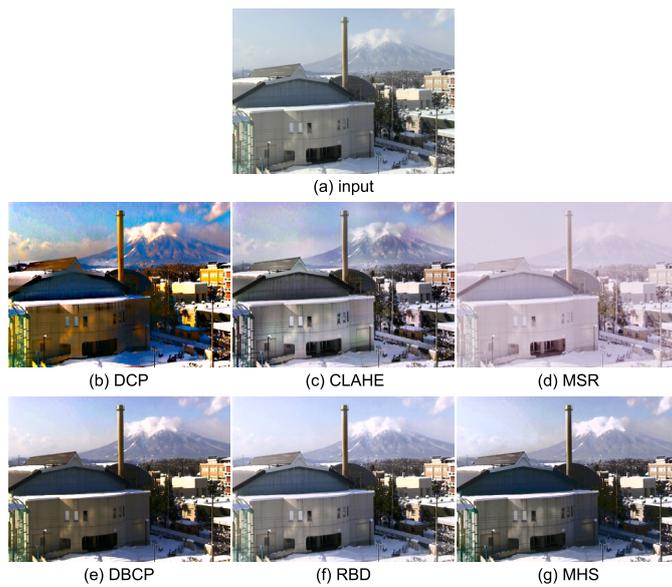


图 95: 鮮明化比較結果 18

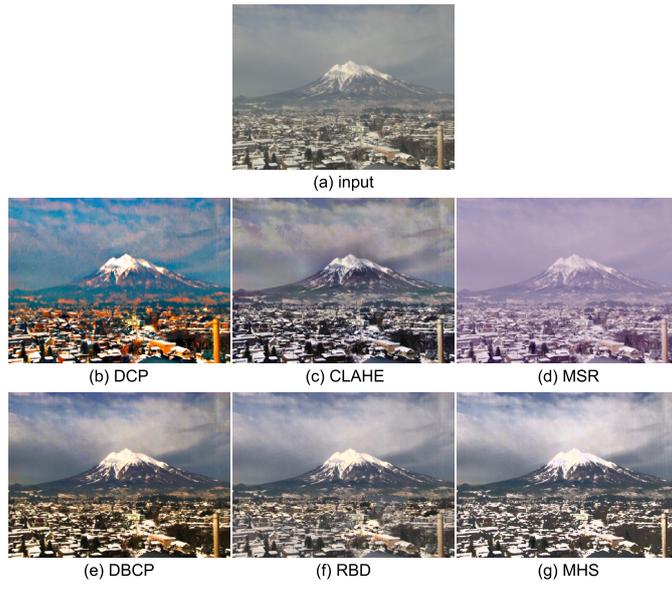


图 96: 鮮明化比較結果 19

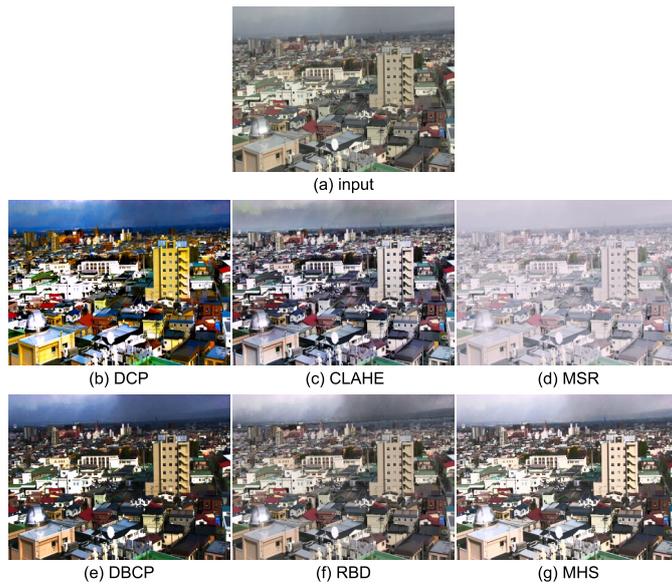


图 97: 鮮明化比較結果 20

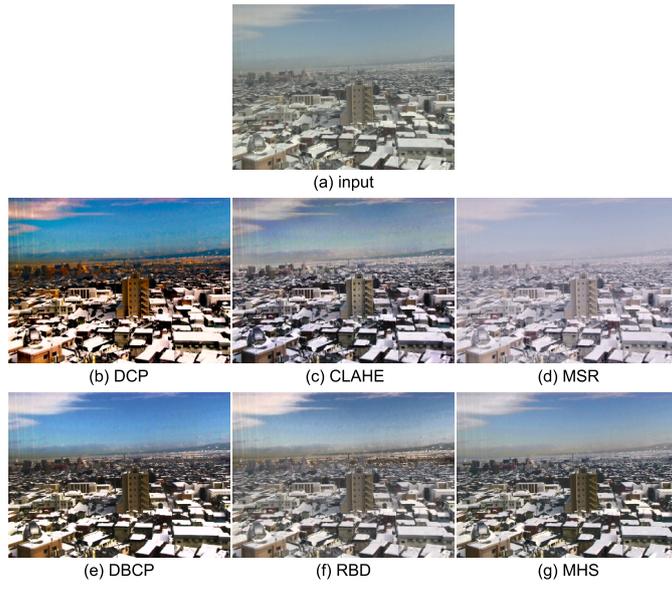


图 98: 鮮明化比較結果 21

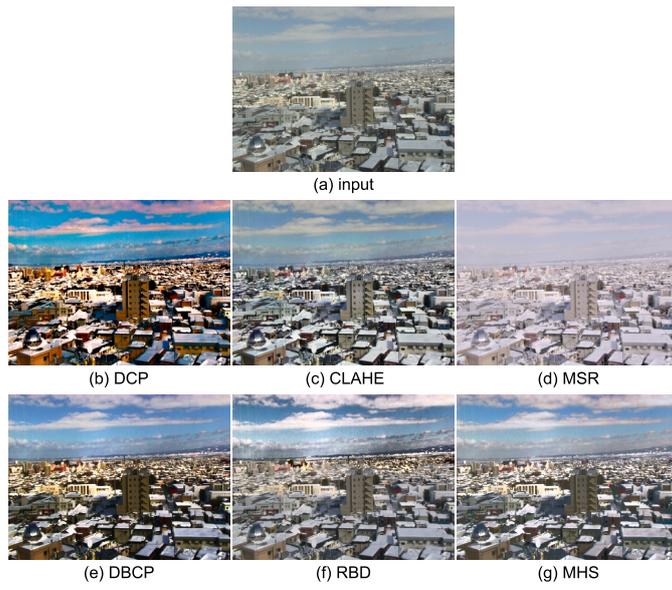


图 99: 鮮明化比較結果 22

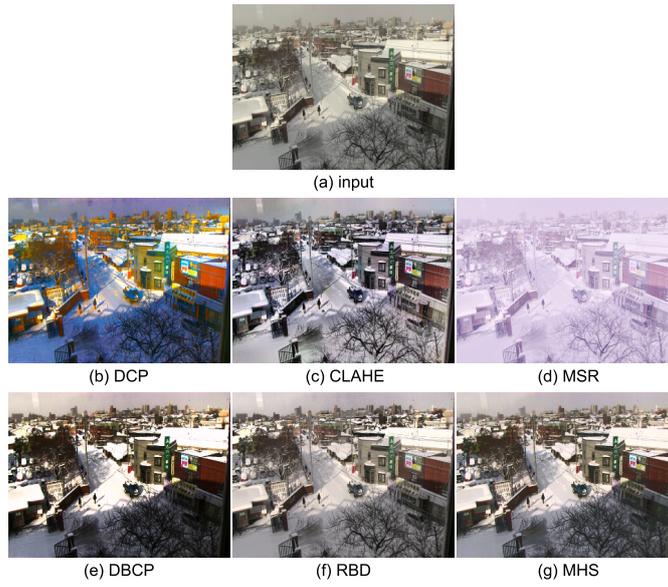


圖 100: 鮮明化比較結果 23

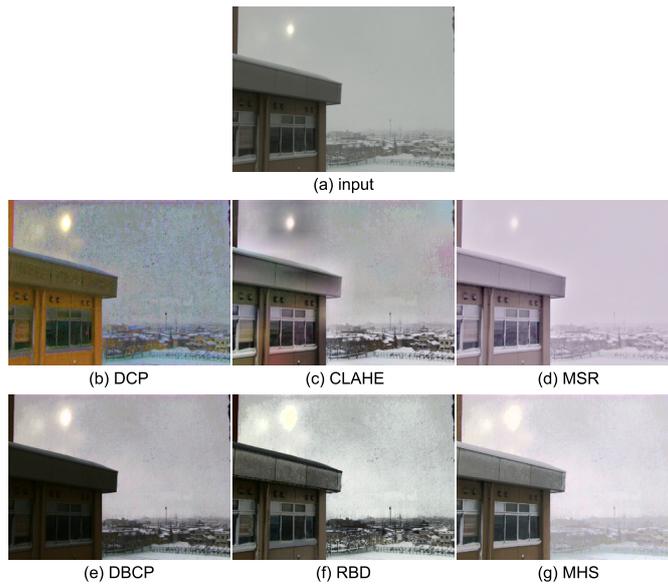


圖 101: 鮮明化比較結果 24

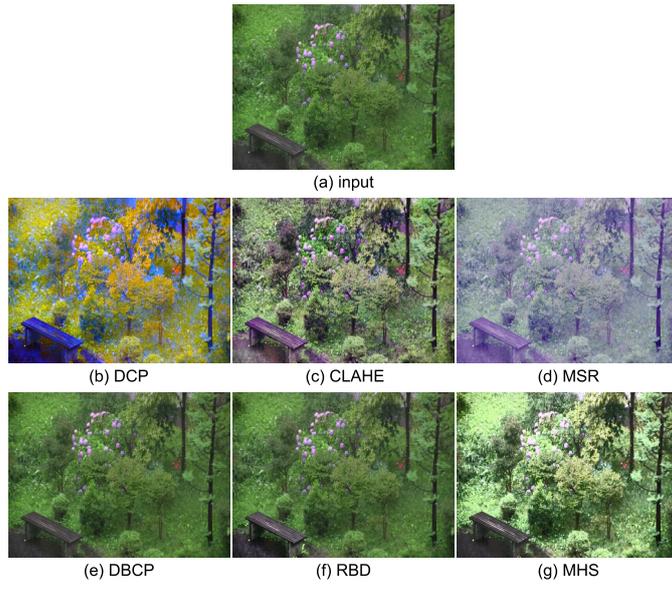


圖 102: 鮮明化比較結果 25

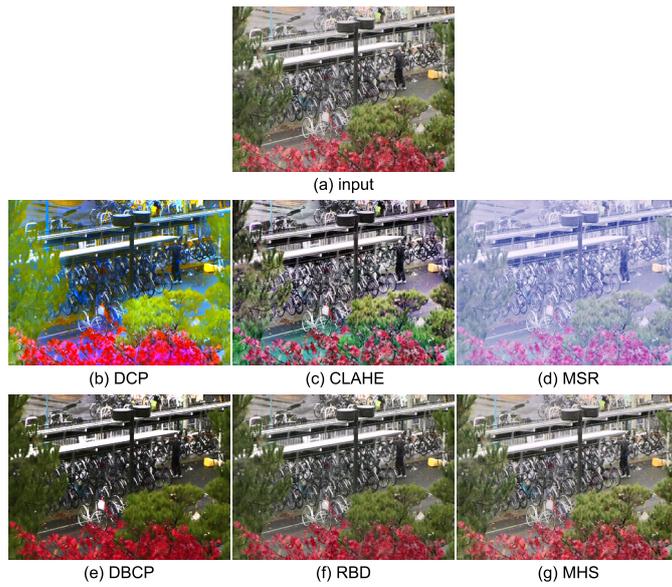


圖 103: 鮮明化比較結果 26

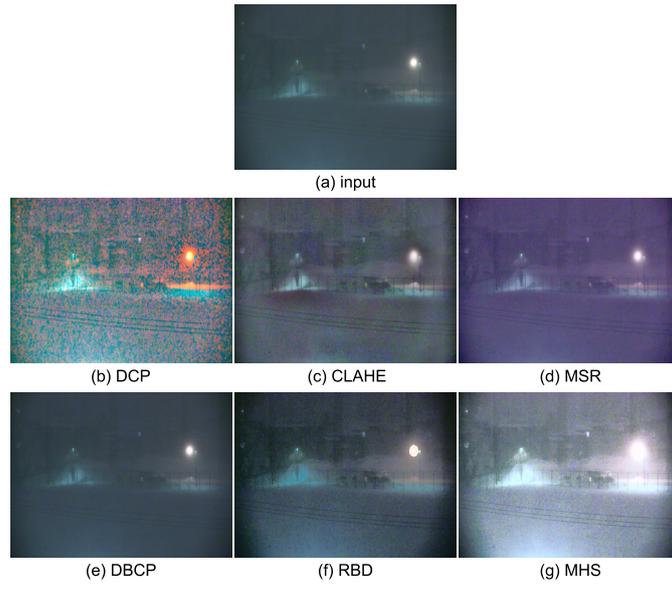


图 104: 鮮明化比較結果 27

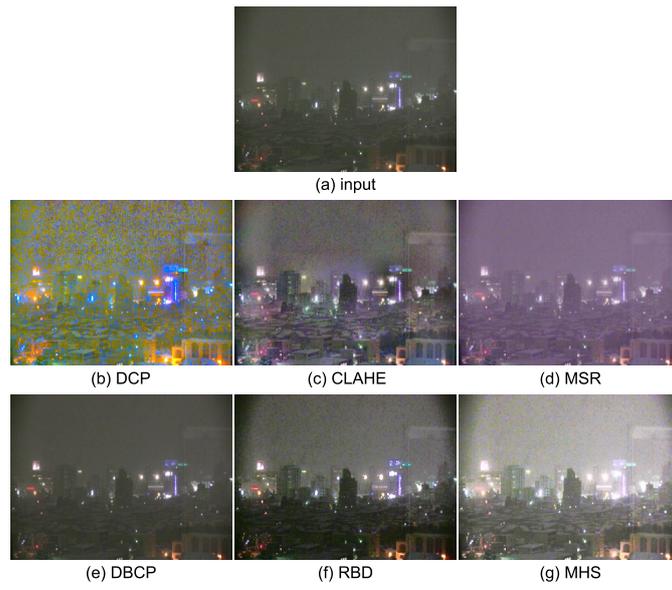


图 105: 鮮明化比較結果 28

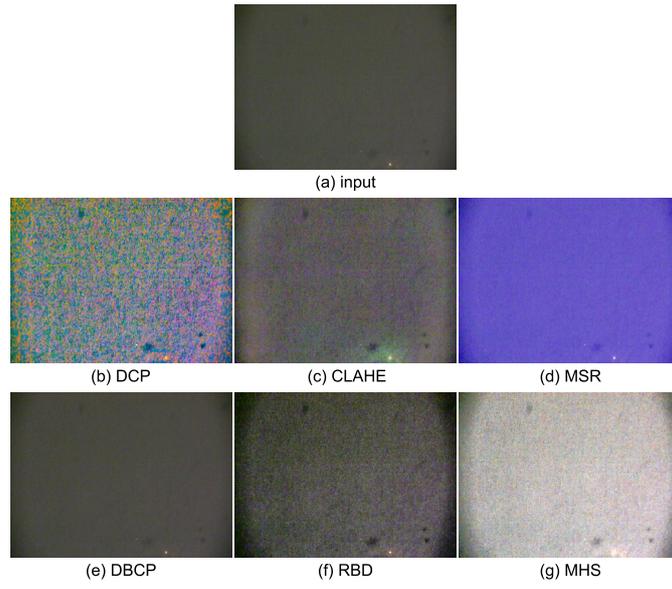


圖 106: 鮮明化比較結果 29

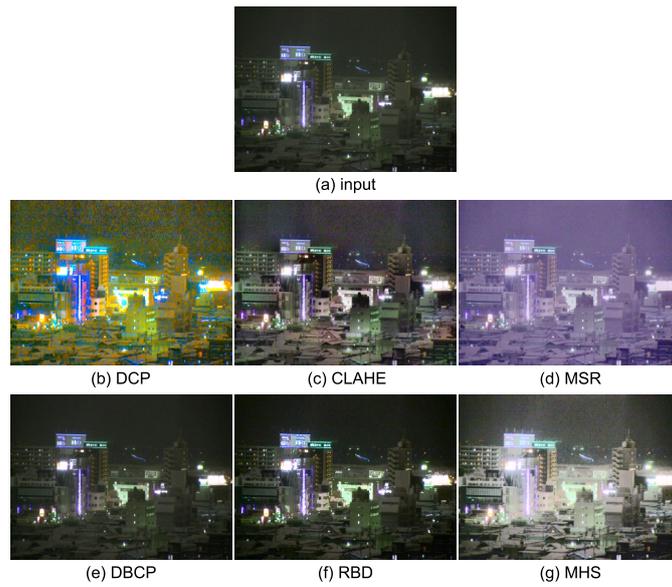


圖 107: 鮮明化比較結果 30

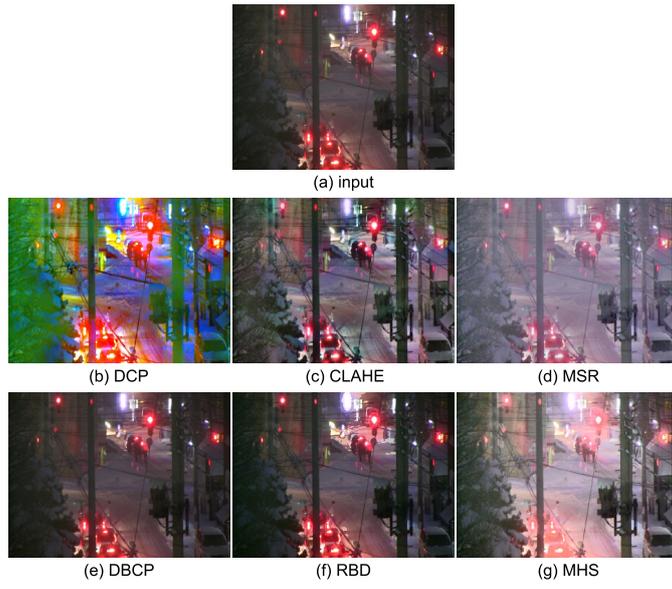


圖 108: 鮮明化比較結果 31

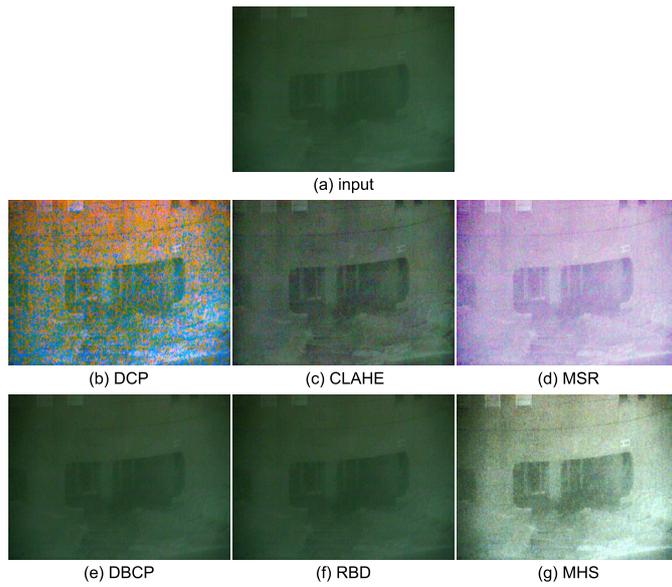


圖 109: 鮮明化比較結果 32

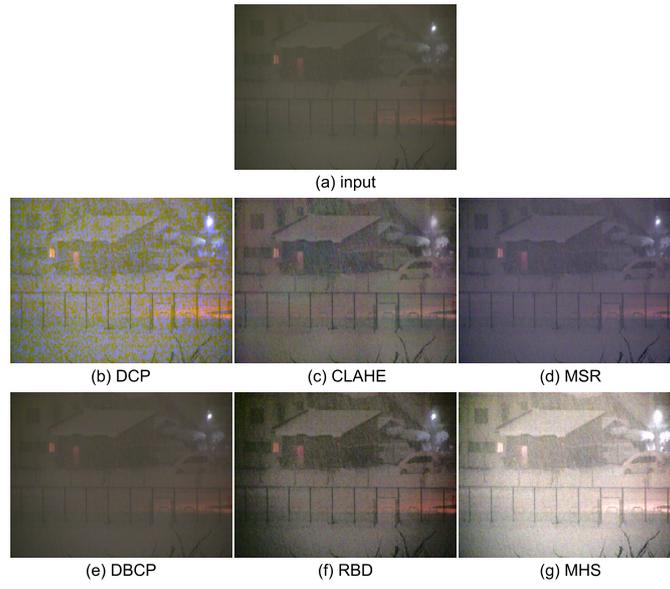


圖 110: 鮮明化比較結果 33

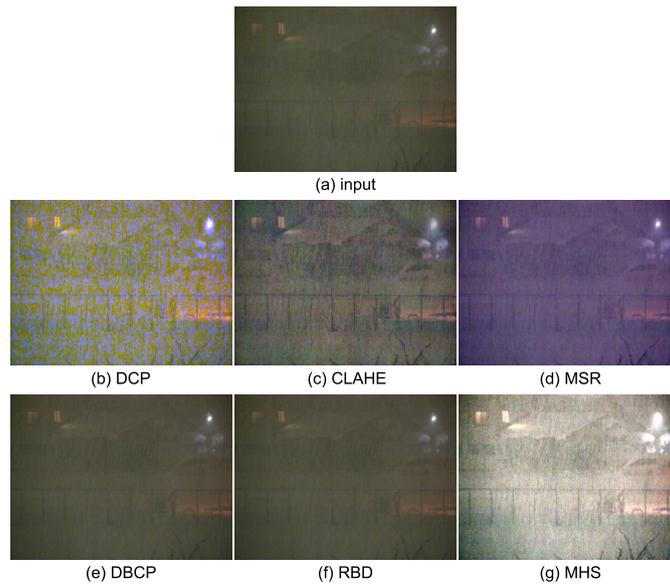


圖 111: 鮮明化比較結果 34



図 112: 鮮明化比較結果 35



図 113: 鮮明化比較結果 36

DCP は鮮明化の効果は高いが、偽色を多数発生させたり、過強調をしたりするため、良い結果とは言えない。CLAHE は、過強調はしないが、偽色が広範囲に薄く発生する。また、エッジが強い箇所の周辺に色漏れが生じる。MSR は、原画像より画像を不鮮明にする場合がある。これは、環境光の推定に用いる空間フィルタの大きさが、画像中の対象物と比べて十分に大きくない場合に起きる。一方、DBCP と RBD は、鮮明な画像を過強調する事無く、霧画像を効果的に鮮明化しているが、夜間画像に対しては鮮明化効果が低い。しかし、MHS は霧画像も夜間画像も鮮明化している事が分かる。

6.2 定量評価

6.2.1 コントラスト

コントラストの評価は、Michelson のコントラストと最小二乗誤差 (RMS) コントラスト (式 (40)) を用いて行った。数値結果を表 11 に、比較のグラフを図 114 と図 115 に示す。図 114 は Michelson コントラスト、図 115 は RMS コントラストの比較グラフである。各 1800 フレームからなる 36 本の動画を晴天画像、降雪画像、夜間画像の 3 つに分類し、それぞれの平均値で性能を評価した。ここで、 $cont$ はコントラスト、 $rmsc$ は RMS コントラスト、 c は RGB 色空間の R チャンネルと G チャンネルと B チャンネル、 max は最大値、 min は最小値、 I は原画像、 x は画素位置、 N は全画素数、 \bar{I} は全画素平均値である。

表 11 と図 114 と図 115 から、晴天/降雪/夜間画像全てにおいて、本手法のコントラスト改善効果は高い事が分かる。DCP のコントラスト値は高いが、それは偽色によるもので、図 78 ~ 図 113 においても分かる様に、視認性の良い画像とは言えない。CLAHE の手法は、偽色もあり、夜間画像においてコントラスト改善の効果が低い。しかし、本手法は全てのシーンにおいて偽色を発生させず、従来手法と同様にコントラスト改善効果が高い。

以上の様に、提案手法は鮮明化効果を弱める事無く、明度整合と偽色抑制の問題を解決している。

$$cont_{c \in R, G, B} = \frac{max_c - min_c}{max_c + min_c}$$

$$rmsc_{c \in R, G, B} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_x (\bar{I}_c - I(x)_c)^2} \quad (40)$$

表 11: コントラスト

	fine		hazy		night		average	
	Michelson	RMS	Michelson	RMS	Michelson	RMS	Michelson	RMS
Original	0.83	39.99	0.46	20.22	0.86	19.95	0.69	25.63
DCP	0.99	62.67	0.89	46.91	0.93	45.49	0.93	50.85
CLAHE	0.95	53.47	0.70	32.99	0.90	26.46	0.83	36.68
MSR	0.95	30.91	0.96	32.84	0.90	22.00	0.94	28.99
DBCP	0.96	63.54	0.82	49.54	0.89	20.45	0.88	44.54
RBD	0.94	56.40	0.79	46.10	0.99	33.48	0.89	45.11
MHS	0.98	60.37	0.85	45.60	0.95	46.87	0.92	50.09

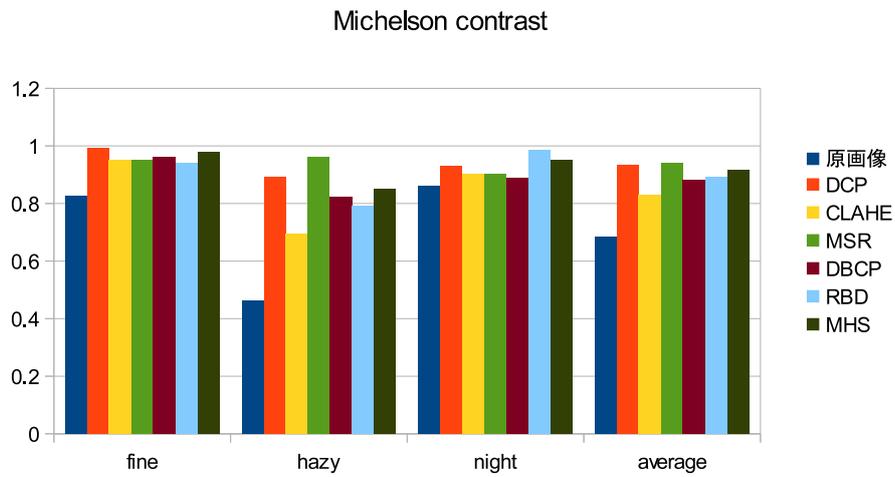


図 114: Michelson コントラストの比較グラフ

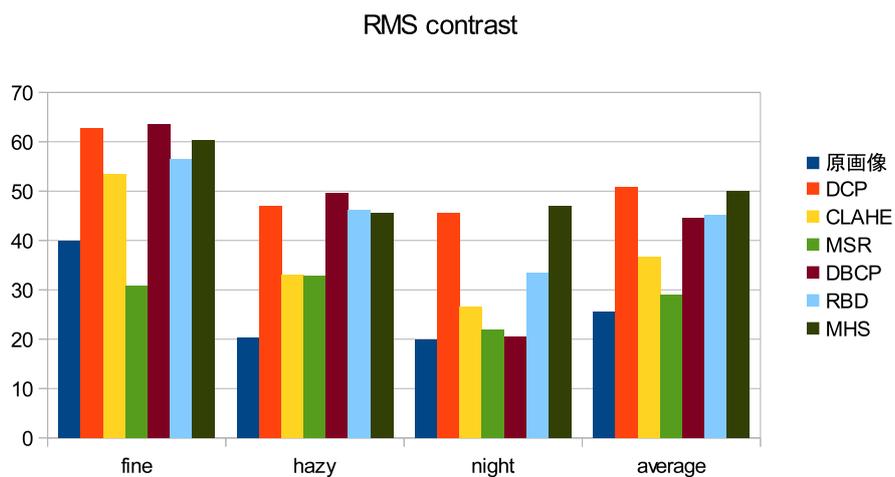


図 115: RMS コントラストの比較グラフ

6.2.2 色差

原画像と鮮明化画像との色差で評価を行う。コントラスト評価と同じく、各 1800 フレームからなる 36 本の動画像を晴天画像、降雪画像、夜間画像の 3 つに分類し、それぞれの平均値で評価した。色差は、各画像中の輝度が平坦な箇所の画素値の差分平均値で計測する。L*a*b*色空間の色差から、画像の過強調を評価する。鮮明化によりコントラストを改善するため、原画像と鮮明化画像には色差が生じるが、過強調した画像では色差が過度に大きな値となる。色差が大きすぎる値の定義には、JIS 規格の色の許容差 ([43]) を用いる。表 12 に、JIS 規格の色の許容差を示す。

色差の評価では、「L*a*b*色差」「L*色差」「a*b*色差」の 3 種類を用いた。「L*a*b*色差」は L*a:b*色空間の色差、「L*色差」は明度の色差、「a*b*色差」は彩度の色差である。偽色の原因は、彩度の過強調であるため「a*b*色差」を用いて評価する。霞画像や夜間画像では、明度が霞の色や暗闇に集中するため、「L*色差」を用いて明度の改善効果を評価する。表 13 に各色差の評価結果を示す。

ここで表 12 から、過強調によって生じた、原画像と結果画像の色差の指標を定義する。全ての画像において、原画像と鮮明化画像の色彩を同じ色と判定するために、a*b*色差が「B 級許容差」を超える場合を過強調の状態と評価する。鮮明画像においては、コントラストを強調する必要は無いため、L*a*b*色差と L*色差が「C 級許容差」を超える場合を明度整合を崩す過強調と評価する。霞画像においては、明度整合を保持した鮮明化は「D 級許容差」を限界とし、L*a*b*色差と L*色差が「D 級許容差」を超える場合に明度整合の崩壊と評価する。夜間画像においては、特に明度のコントラストが改善されなければならないため、L*色差が高い値程、コントラスト改善性能が高いと評価する。

表 12: 色の許容差

呼び名	色差の範囲	知覚される色差の範囲
評価不能領域	0 ~ 0.2	特別に調整された測色器械でも誤差の範囲にあり、人が識別不能。
識別境界	0.2 ~ 0.4	十分に調整された測色器械の再現精度の範囲で、訓練を積んだ人が再現性をもって識別できる限界。
AAA 級許容差	0.4 ~ 0.8	目視判定の再現性からみて、厳格な許容色差の規格を設定できる限界。
AA 級許容差	0.8 ~ 1.6	色の隣接比較で、わずかに色差が感じられるレベル。一般の測色器械間の器差を含む許容色差の範囲。
A 級許容差	1.6 ~ 3.2	色の離間比較では、ほとんど気付かれない色差のレベル。一般的には同じ色だと思われているレベル。
B 級許容差	3.2 ~ 6.5	印象レベルでは同じ色として扱える範囲。塗料業界やプラスチック業界では色違いでクレームになることがある。
C 級許容差	6.5 ~ 13.0	JIS 標準色票、マンセル色票などの 1 歩度に相当する色差。
D 級許容差	13.0 ~ 25.0	細分化された系統色名で区別ができる程度の色の差で、この程度を超えると別の色名のイメージになる。

表 13 に各手法における全シーンの平均色差の数値結果、表 14 に各シーンにおける色差の数値結果、図 116 ~ 図 118 に比較のグラフを示す。図 116 は $L^*a^*b^*$ 色差、図 117 は L^* 色差、図 118 は a^*b^* 色差の比較グラフである。

鮮明画像に対して、従来手法の DCP と MSR は、全ての色差が大きい。これは、鮮明画像はコントラストを強調する必要が無いため、明らかに DCP は過強調をしている事を表す。MSR は定性評価の各図からも分かる様に、コントラストを改善したためではなく、不鮮明な画像にしたためである。一方、CLAHE、DBCP、RBD、MHS は、全ての色差が低いため、鮮明画像を過強調しない事が分かる。

霞画像に対して、各手法で $L^*a^*b^*$ 色差に大きな差は無いが、 L^* 色差と a^*b^* 色差には大きな差がある。これは、各鮮明化手法の強調性能が異なる事を表す。DCP は L^* 色差より a^*b^* 色差の値が大きい。つまり、DCP は明度よりも彩度を強調する性質があり、このため偽色を発生させやすい。その他の手法は、 L^* 色差の方が高く、特に提案手法の 3 つの手法は、 a^*b^* 色差が概ね「B 級許容差」以内であるため、偽色を抑制してコントラストを改善する事を表す。提案手法と比べて CLAHE の各色差は小さいため、CLAHE は鮮明化効果が少し弱い。

夜間画像に対しては、ほとんどの手法で L^* 色差よりも a^*b^* 色差の値が高くなり、特に DCP と MSR は、 L^* 色差よりも明らかに高くなりすぎている。しかし、夜間画像は画像全体が暗いため、明度のコントラストが大幅に改善されなければならない。よって図 117 と図 118 の比較は、DCP と MSR が偽色を多数発生させる事を表している。また、CLAHE、DBCP、RBD は、 L^* 色差の値が低く、夜間画像の明るさを改善していないため、夜間画像を鮮明にする効果は低い。しかし MHS は、他手法と比べて L^* 色差が最も高く、夜間画像の明度のコントラストを大幅に改善している事が分かる。MHS の a^*b^* 色差は「B 級許容差」の範囲であり、偽色が目立つレベルではないため、MHS は偽色を抑制して夜間画像を鮮明化する。

従来手法の中で、CLAHE は鮮明画像と霞画像で鮮明化効果を調節しているが、夜間画像には対応できない。DCP と MSR は、霞画像において a^*b^* 色差が「D 級許容差」まで高くなるため、偽色を抑制する事はできない。また、DCP と MSR は、霞画像における各色差よりも鮮明画像における各色差の方が大きいため、鮮明画像の明度整合を保持する能力が低い。一方提案手法では、霞画像に対しても夜間画像に対しても、 a^*b^* 色差は概ね「B 級許容差」に収まるため、偽色抑制の効果は高い。さらに、 L^* 色差の値が各シーンに適した値となっている事から、提案手法は各シーンに応じて明度整合を保持した鮮明化を行う。特に MHS では、鮮明画像、霞画像、夜間画像の順に L^* 色差を高くするため、明度整合を保持した鮮明化効果は、比較手法の中で MHS が最も高い事を表す。

表 13 から、全シーンにおいて従来手法の a^*b^* 色差は非常に高い。これは、従来手法が彩度を過剰に強調して偽色を発生させている事を表す。しかし、各提案手法の a^*b^* 色差は従来手法よりも低く、提案手法は偽色を抑制できる事が分かる。 L^* 色差と a^*b^* 色差の結果から、提案手法は明度整合の保持と偽色の抑制を同時に満たしている事が分かる。

表 13: 原画像と鮮明化画像の平均色差

	average		
	L*a*b*	L*	a*b*
DCP	26.06	15.03	18.85
CLAHE	11.37	7.35	7.32
MSR	24.60	15.07	17.05
DBCP	11.77	9.21	5.29
RBD	9.56	7.48	4.64
MHS	18.67	17.14	5.51

表 14: 原画像と鮮明化画像の色差

	fine			hazy			night		
	L*a*b*	L*	a*b*	L*a*b*	L*	a*b*	L*a*b*	L*	a*b*
DCP	27.31	13.09	21.37	17.71	10.97	11.48	36.32	22.34	26.59
CLAHE	13.46	8.52	8.91	8.54	5.95	4.96	13.33	8.19	9.09
MSR	23.93	15.40	16.61	17.20	13.77	8.44	35.31	16.54	29.19
DBCP	15.24	11.72	7.24	14.65	12.86	4.95	4.70	1.95	3.99
RBD	8.69	6.68	4.46	11.12	9.74	4.16	8.21	5.13	5.47
MHS	11.96	9.96	5.23	15.55	14.10	5.12	29.04	27.81	6.30

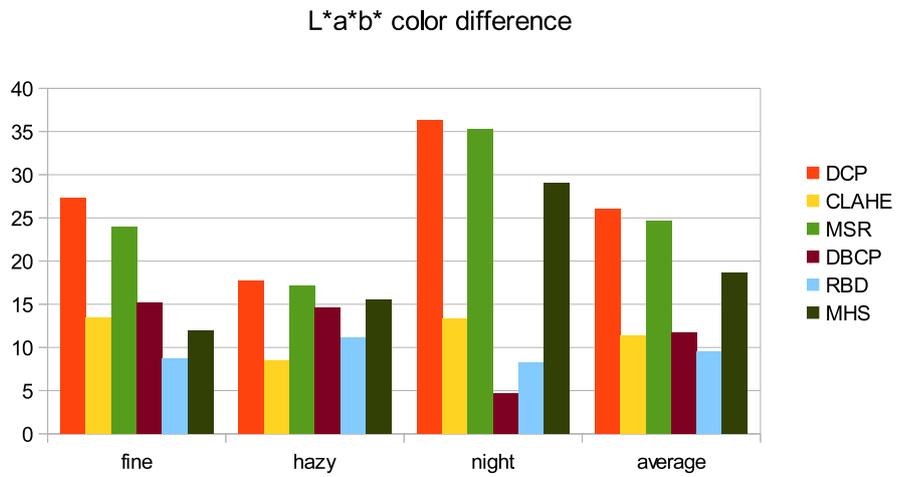


図 116: L*a*b*色差の比較グラフ

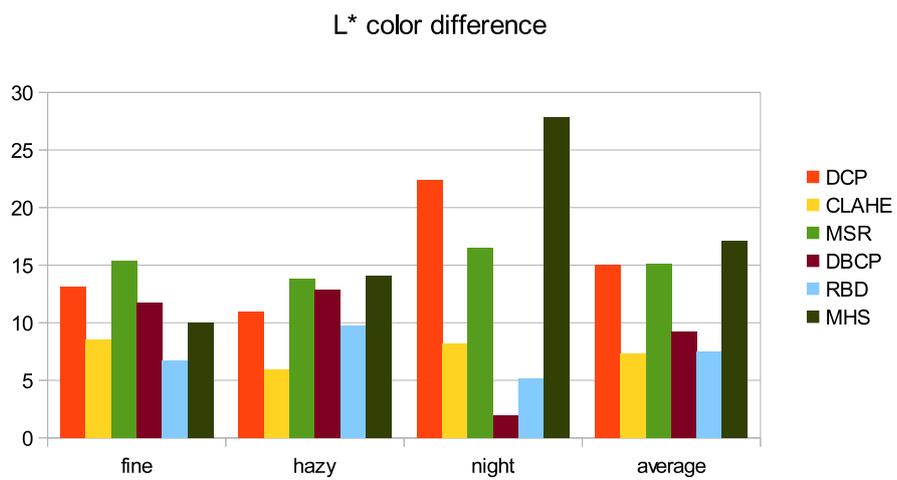


図 117: L*色差の比較グラフ

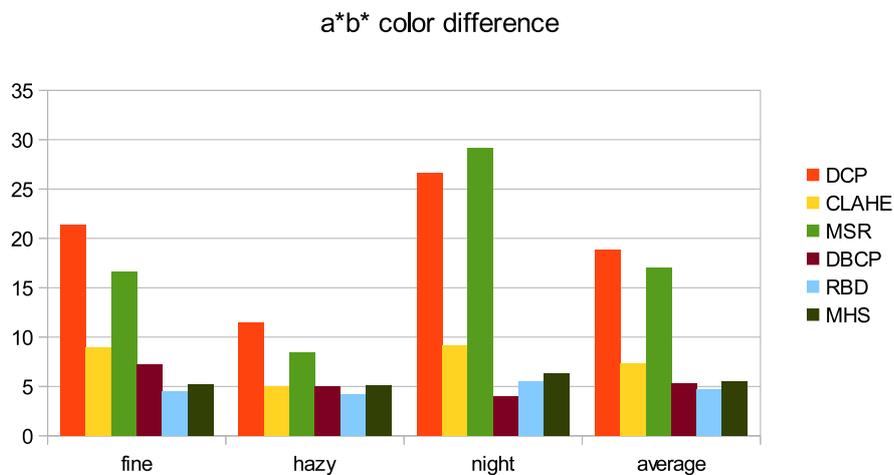


図 118: a*b*色差の比較グラフ

6.3 処理時間

各 1800 フレームからなる 237 シーンの動画像を用い、処理時間の平均値を算出した結果を表 15 に示す。画像サイズは 320 × 240 画素である。使用した CPU は、AMD Opteron 2.6GHz である。

DBCP と CLAHE は非常に高速に動作するが、DCP と MSR は非常に低速である。これは、DCP と MSR はどちらも巨大な空間フィルタリング処理を行っているためである。また、RBD と MHS もやや低速である。これは、領域分割やクラスタリング処理を行っているためである。

CLAHE はトーンカーブの線形補間に変わる手法で、偽色を抑制する必要があるが、処理時間が高速である点は優れている。DBCP は、白い対象物に対応するための空間フィルタリングが必要ないため、比較手法中で処理時間が最も高速となった。その他の提案手法も、DCP や MSR よりも非常に高速である。

表 15: 処理時間

	time(frame / second)
DCP	13.3219
CLAHE	0.3241
MSR	9.4013
DBCP	0.0728
RBD	2.3365
MHS	1.8692

第 III 部

降雪検出における提案手法

1 降雪画素検出の課題

降雪画素検出手法の問題点は、雨粒の特徴をそのまま雪粒にも適用して雪粒を検出する事である。雨粒画素は、明るく小さな画素としてクラスタリング等で抽出されたり、直線的な形として抽出されたりする。しかし、降雪画像は降雨画像よりも暗く不鮮明な画像であり、雨粒と同様の特徴を持つとは限らない。検出するためには、まず画像を鮮明にする事が必要である。

また、雪粒を動体として検出しても、雪粒は雨粒の様に直線的な形になるとは限らない。空間周波数を解析して直線構造を抽出して雨(雪)粒を検出する手法 ([38-40]) もあるが、建物のエッジ等も検出してしまい、これらの手法は誤検出が多い。また、2次モーメントから形の歪みを計算してある角度に傾いている直線構造の領域を雨(雪)粒画素として抽出する手法 [37,41] もあるが、雪粒は雨粒よりも移動軌跡が直線的にはならず、形も雨粒の様な球体ではないため、形や移動方向の角度から雪粒を検出する事は難しい。

実際の降雪場面は悪天候により画像が不鮮明になるが、従来手法では雪粒が鮮明に見える画像を対象としている。そのため、前処理で画像を鮮明にする必要があるが、この前処理の画像鮮明化に失敗すると、降雪検出に利用出来ない。文献 [14] の様な従来の画像鮮明化手法では、フレーム毎に偽色が発生する位置が変わるため、単純な動体検出や直線構造の抽出等を満足に行う事は出来ない。そのため、従来では雪粒の未検出が多い。

本研究では、前述した画像鮮明化手法によって、明度整合が保持され偽色が無い鮮明化画像を生成し、動体検出による手法で雪粒画素を検出する手法を提案する。従来では不鮮明な画像から雪粒を検出する事は出来ず、また検出条件が難しいため多数の雪粒候補が除外されてしまう。本研究で提案する手法は、安定した画質を生成する鮮明化手法と動体検出手法を組み合わせる事で、単純な計算で雪粒を検出する事によって未検出を防ぐ。

1.1 降雪画素の特徴付け

雪粒は雨粒よりも遅いが、一般の動体に比べて高速である。一般の動体はフレーム間差分によって境界線しか検出されないが、雪粒はフレーム間差分でも雪粒全体が検出される程速い。よって本研究では、雪粒を「高速移動体」と特徴付けて、動体検出アルゴリズムで雪粒を検出する。雪粒は時間的なノイズと仮定し、3D メディアンフィルタによって雪粒を取り除いた背景画像を作成し、背景差分によって雪粒を検出する。

2 従来手法

2.1 色クラスタリングと背景差分の組み合わせによる雪粒検出

手法 [6] は、降雪画像の鮮明化手法を提案し、雪粒画素を除去してから画像を鮮明化している。雪粒は白く小さいと仮定し、色と大きさのクラスタリングによって背景画像を構築し、雪粒は背景差分によって検出される。以下に、手法 [6] の雪粒検出について述べる。

2.1.1 手法の説明

手法 [6] は、背景画像を作成するために、クラスタリング手法は特定していないが、各画素の過去数フレーム分のデータを使ってクラスタリングを行い、「背景」「雪粒」「前景」の3クラスに分類している。「背景」クラスは動体の無い特徴で作成され、各画素において過去数フレームで出現頻度が高い色特徴から生成される。「雪粒」クラスは白い特徴で作成され、雪粒と仮定する白い画素から生成される。「前景」クラスは動体特徴で作成され、背景クラスでも雪粒クラスでもないデータから生成される。その後、背景差分で動体検出を行い、検出領域の大きさでさらにクラスタリングを行い、小さいと雪粒クラス、大きいと前景クラスと判別する。

2.1.2 色クラスタリングの結果

図 119 に背景クラスタと雪粒クラスタの例を示す。図 119 は [6] に掲載されている画像である。図 119 は、入力画像を複数フレーム保存しておき、時間方向にクラスタリングをして高強度の画素を特定する事で、背景クラスタと雪粒クラスタを更新していく例である。図 119 右図を見ると、背景画像には雪粒は映っていない事が分かる。しかし、降雪画像において白い特徴は雪粒だけでなく、積雪やその他一般の白い動体にも当てはまる。図 119 は悪天候によって全体的に暗い画像であるが、雪が止んだ後の積雪が残っている明るい晴天画像や、白い雲が映っている晴天画像などに対して、この手法は適用出来ない。

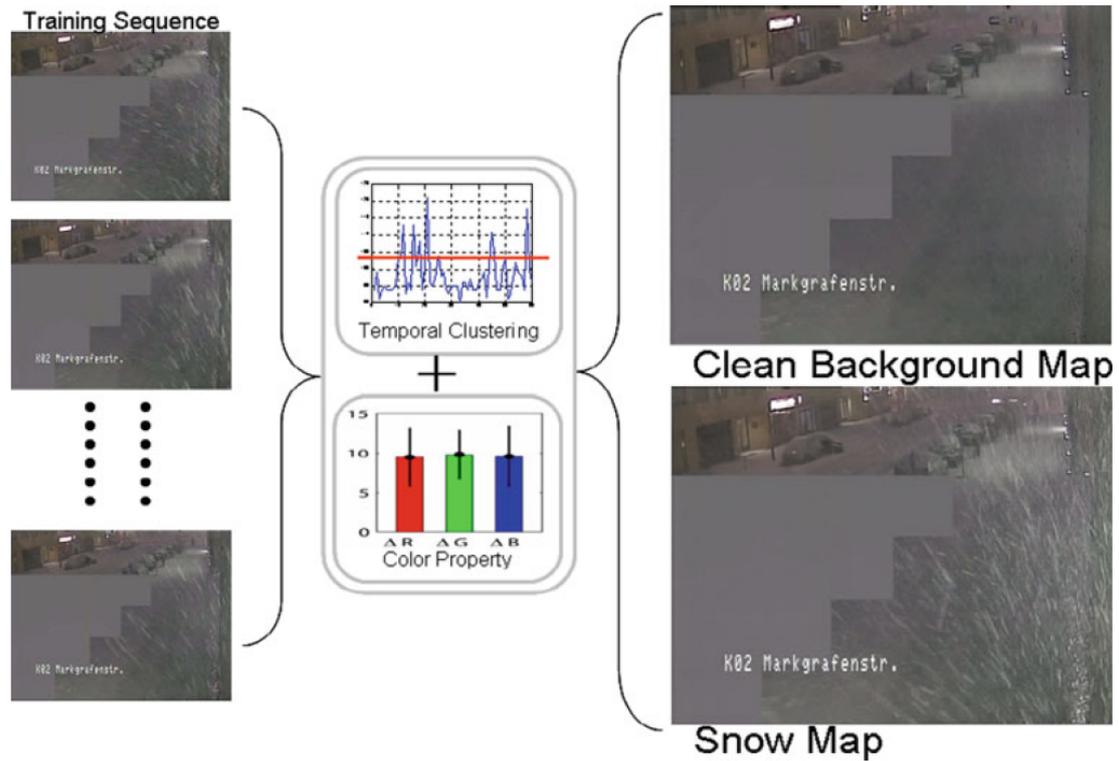


図 119: 背景クラスタと雪粒クラスタ

2.2 Histogram of Orientation of Streaks(HOS)

手法 [37] は、雨 (雪) 粒画素の特徴を「同じ方向に動く、小さな動体」と仮定し、動体検出で検出された小さな動体の形の角度から雨 (雪) 粒を検出する。確かに雨粒を監視カメラで撮影すると、かなり直線的に映る。手法 [37] は、天候は画像全体に影響を与えて、風の影響により画像中の全雨粒雪粒は同じ方向に傾いた形で映ると仮定する。よって、検出した全動体の形の角度を調べ、最も頻度が高い角度を持つ動体を全て雨 (雪) 粒と判定する。

2.2.1 手法の説明

角度の計算は、以下の式 (41) から (46) で計算される。

式 (41) は 2 次モーメントを算出する式で、 m_i^{20} は動体領域の形の水平方向の偏り (分散)、 m_i^{11} は動体領域の形の斜め方向の偏り (共分散)、 m_i^{02} は動体領域の形の垂直方向の偏り (分散)、 m_i^{00} は動体領域の画素数、 B は動体領域、 x_0 は重心の水平位置、 y_0 は重心の垂直位置、 i は動体領域番号である。

式 (43) は動体の長径と短径を算出する式で、 λ^1 は式 (42) の第 1 固有値、 λ^2 は式 (42) の第 2 固有値、 a は長径、 a は短径、 i は動体領域番号である。

式 (44) は形の傾きを算出する式で、 θ_i は動体領域の形の傾きである。

式 (45) は基準となる傾きを算出する式で、 $d\theta_i$ は短径長径の歪みが同じと仮定した場合の B_i の角度、 dm は実験的に設定されるパラメータである。 $d\theta$ は、各領域で 1 番歪みが少ない場合の角度を表し、長径が長い程、角度ヒストグラムへの寄与率を高めるためのパラメータである。

角度ヒストグラムは式 (46) で計算される。ここで、 h はヒストグラム、 θ は角度、 P は領域数、 a は長径である。各領域 B_i は、各領域の基準とする角度からどれだけ離れていて、長径がどれだけ長いことによって、各角度ヒストグラムへの寄与重みが変わる。

式 (44) ではなく式 (46) を使用するのは、角度ヒストグラムのピークをより明確にするためである。単純な楕円で検出されている場合には、基準の角度 $d\theta$ と検出角度 θ の差はある角度に集中するが、雨粒以外の複雑な形の動体は、 $d\theta$ と θ の差は一定にならない。各検出動体の形が歪む確率を積算する事で、想定した形から大きく外れて検出された動体の傾きの影響を無視出来る様になっている。

$$\begin{aligned} m_i^{20} &= \frac{1}{m_i^{00}} \sum_{(x,y) \in B_i} (x - x_0)^2 \\ m_i^{11} &= \frac{1}{m_i^{00}} \sum_{(x,y) \in B_i} (x - x_0)(y - y_0) \\ m_i^{02} &= \frac{1}{m_i^{00}} \sum_{(x,y) \in B_i} (y - y_0)^2 \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{pmatrix} m_i^{20} & m_i^{11} \\ m_i^{11} & m_i^{02} \end{pmatrix} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} a_i &= 2\sqrt{\lambda_i^1} \\ b_i &= 2\sqrt{\lambda_i^2} \end{aligned} \quad (43)$$

$$\theta_i = \frac{1}{2} \arctan \frac{2m_i^{11}}{m_i^{02} - m_i^{20}} \quad (44)$$

$$d\theta_i = \frac{\sqrt{(m_i^{02} - m_i^{20})^2 + 2(m_i^{11})^2}}{(m_i^{02} - m_i^{20})^2 + 4(m_i^{11})^2} dm \quad (45)$$

$$h(\theta) = \sum_{i=1}^P \frac{a_i}{d\theta_i \sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta - \theta_i}{d\theta_i} \right)^2} \quad (46)$$

2.2.2 HOS の結果

図 120 に、雪粒の形の角度分布の例を示す。図 120 は、[37] に掲載されている画像である。図 120(a) は原画像、図 120(b) は雨(雪)粒検出結果画像、図 120(c) は検出粒の形の傾き角度のヒストグラムである。図 120(c) から、検出粒の形の傾き角度のヒストグラムピークが 1 つになっている事から、検出粒の傾き角度はある 1 つの角度に集中している事が分かる。図 120(b) の緑色の検出粒は、ヒストグラムピークに含まれている角度の検出粒を表す事から、画像中の検出粒の殆どは雨(雪)粒と判定出来ている事が分かる。

しかし、雨粒は風の影響によって全ておなじ方向に移動するが、雪粒は雨粒よりも複雑に風の影響を受けるため、各雪粒で移動方向は異なり、粒の移動方向に着目して雪粒を検出する事は難しい。本研究では、雪粒を時間的なノイズと仮定する事で、ノイズ除去と背景差分を組み合わせる事で雪粒を検出する。

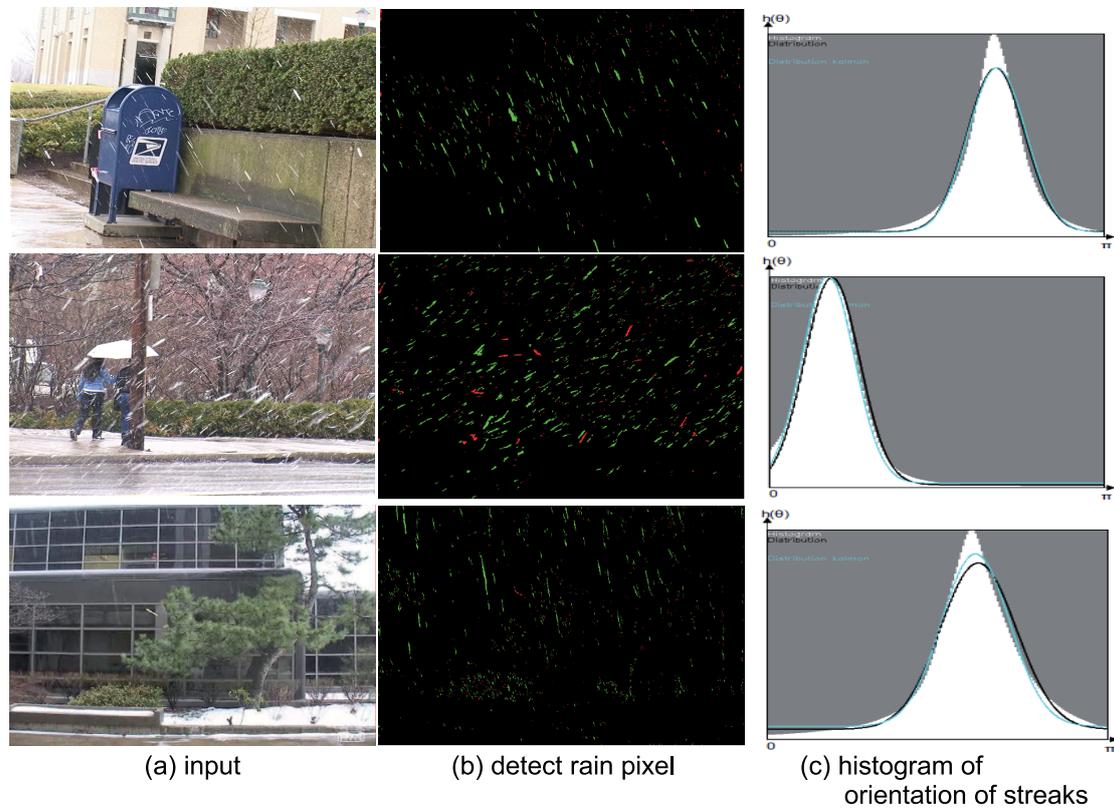


図 120: 雨(雪)粒の角度ヒストグラム

3 提案手法

3.1 手法の説明

背景構築において、降雪は周期的に発生する外乱 (ノイズ) と考えられる。ガウス混合分布は一般的に、外乱を背景に取り込んで誤検出しない様にする手法であるため、ガウス混合分布を使用して降雪画像から背景画像を作成すると、雪粒特徴は背景に含まれる傾向にある。よって、雪粒検出にガウス混合分布を適用する事は難しい。本研究では、雪粒を高速動体と考え、ノイズ除去アルゴリズムの3D メディアンフィルタを用いて背景画像を作成し、背景差分によって雪粒を検出する。

3.1.1 3D メディアンフィルタ

メディアンフィルタとは、非線形ノイズ除去の基本アルゴリズムであり、画像処理においては空間フィルタリングの1つである。フィルタ対象の全データを特徴値で昇順または降順に並べ、その中央値をフィルタリング結果とする事で、平滑化フィルタでは除去出来ないパルスノイズを効果的に除去出来る。メディアンフィルタは、極端なノイズに強いが、ノイズが全データの半数以上の場合には除去出来ない。

時間方向にメディアンフィルタを応用した手法 [44] は、3D メディアンフィルタと呼ばれる。3D メディアンフィルタは通常、画質向上のためのノイズ除去に利用されるアルゴリズムであるが、本研究では背景差分の背景構築に利用する。雪粒の動き情報を時間方向のノイズと考え、複数フレームの時間方向の中央値を算出する事で、雪粒の無い背景画像を作成する。3D メディアンフィルタに必要なフレーム数は、動体の速度によって異なり、動体が計算フレーム数の半分以上にならない様に多く設定する事が重要である。しかし、雪粒は高速動体であるため、降雪検出には多くのフレーム数を必要としない。本研究では30フレームで3D メディアンフィルタを行う。

式 47 に、3D メディアンフィルタの計算式を示す。ここで、 I は原画像、 B は背景画像、 x は画素位置、 med は中央値演算、 t はフレーム番号、 T は過去フレーム番号、 ΔT は3D メディアンフィルタに使用するフレーム数である。

図 121 に、3D メディアンフィルタの結果例を示す。図 121(a) と図 121(b) は異なるフレームの入力画像、図 121(c) は結果画像である。ここで使用したフレーム数は30である。図 121(a) と図 121(b) では異なる位置にある雪粒画素が、図 121(c) では消えている。雪粒の除去に3D メディアンフィルタは有効である事が分かる。

$$B(x) = med\{I^{t-T}(x)\} \quad T = 0, \dots, \Delta T \quad (47)$$



図 121: 3D メディアンフィルタの例

3.2 結果

図 122 から図 124 に、背景差分による雪粒検出の結果を示す。各図において、(a) は原画像、(b) は文献 [14] による従来手法の鮮明化画像、(c) は提案手法による鮮明化画像、(d) は原画像から雪粒を検出した結果、(e) は従来手法の鮮明化画像から雪粒を検出した結果、(f) は提案手法の鮮明化画像から雪粒を検出した結果である。提案手法の鮮明化は、本論文で提案した 3 つ目の鮮明化手法を使用した。(d)(e)(f) において、検出した雪粒を白領域で示す。実験では、背景差分の閾値 (th_{bs}) は「30」とした。

図 122 に、悪天候により不鮮明な画像に対する実験結果を示す。図 122(d) から、不鮮明な画像から雪粒を検出する事は出来ない事が分かる。また、雪粒が黒く映っているため、白い特徴を雪粒の特徴とする事は適さない。雪粒の移動方向は全体的に下向きが多いが、カメラの近くにある大きめの雪粒は左下方向へ移動しているため、方向の特徴を雪粒検出に適用する事も難しい。さらに、図 122(e) では図 122(f) より検出数が多くなっているが、これは図 122(b) に多数の偽色が発生しているためである。従来の鮮明化手法は偽色を抑制出来ず、各フレームで偽色が発生する位置も異なるため、背景差分は雪粒だけでなく偽色も検出してしまふ。よって、従来の鮮明化手法は、動体検出の前処理として利用出来ない。一方、図 122(c) は明度整合を保持し、偽色が発生していないため、図 122(f) では雪粒のみが検出されている。

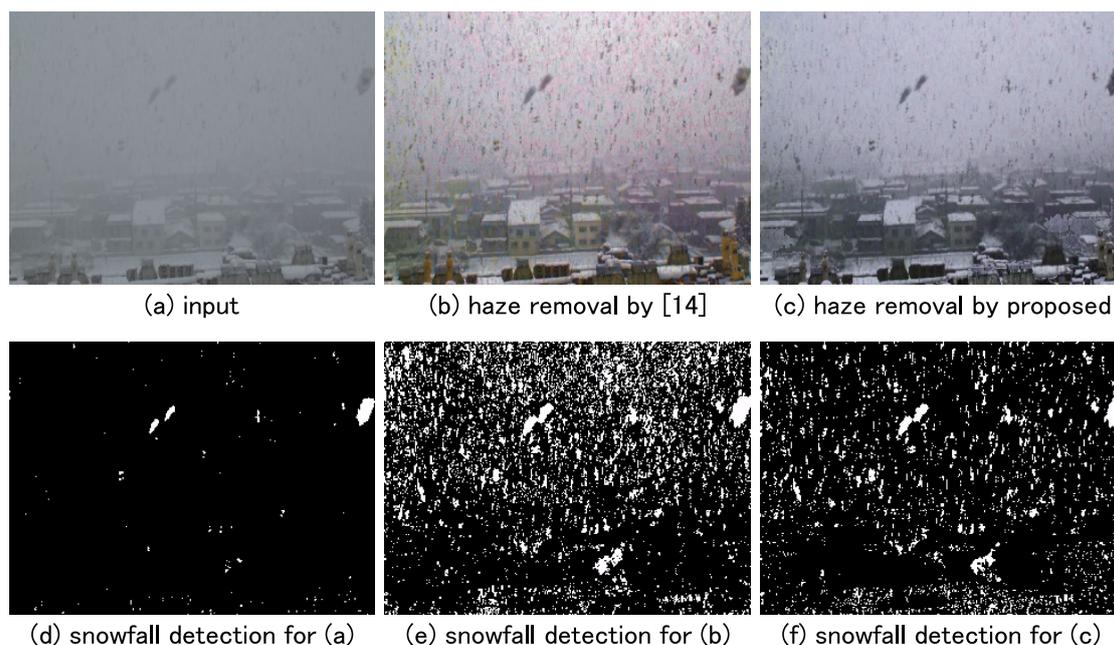


図 122: 雪粒検出結果の例 (雪粒が見えない画像)

図 123 に、雪粒が鮮明に見える画像に対する実験結果を示す。図 123(d) から、動体検出により鮮明な画像からは簡単に雪粒を検出出来る事が分かる。提案手法では鮮明な画像に対して鮮明化効果を弱めるため、図 123(a) と図 123(c) はほぼ変わらず、図 123(d) と図 123(f) の雪粒検出結果もほぼ同じである。しかし、従来手法による鮮明化画像の図 123(b) は過強調が起きており、図 123(e) にはノイズも多数検出されている。

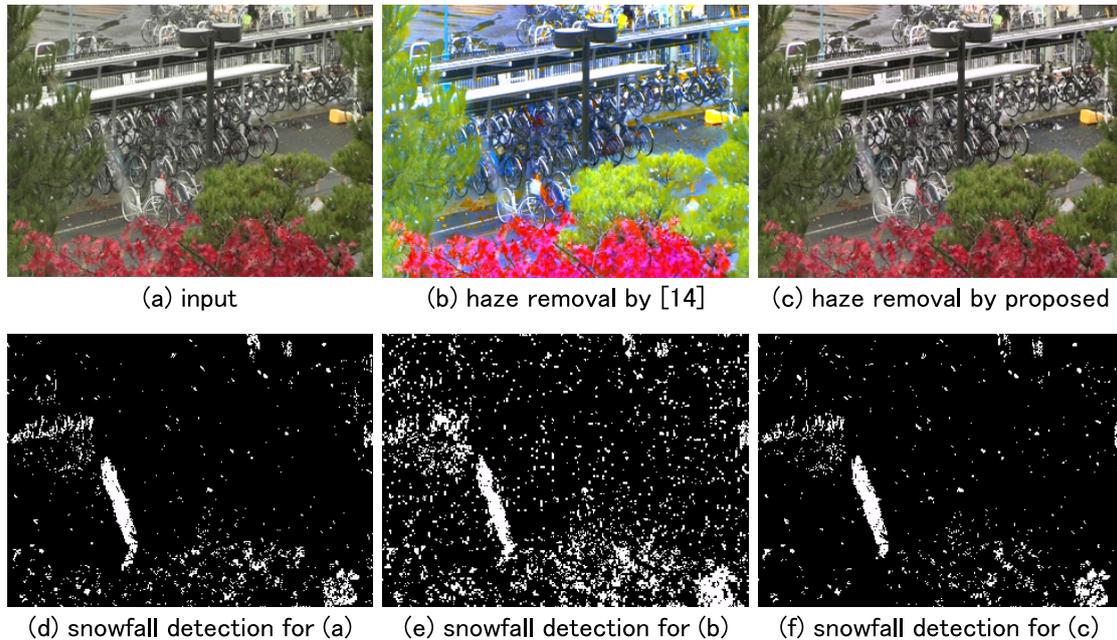


図 123: 雪粒検出結果の例 (雪粒が見える画像)

図 124 に、鮮明な晴天画像に対する実験結果を示す。図 124 は雪が降っていない画像であるが、図 124(e) には偽色による動体検出結果がある。これは、偽色によるものであり、特に白領域で誤検出が多数発生する。しかし、提案手法では図 124(c) の様に偽色を抑制し過強調もしないため、鮮明画像に対して動体検出を行っても誤検出がない。

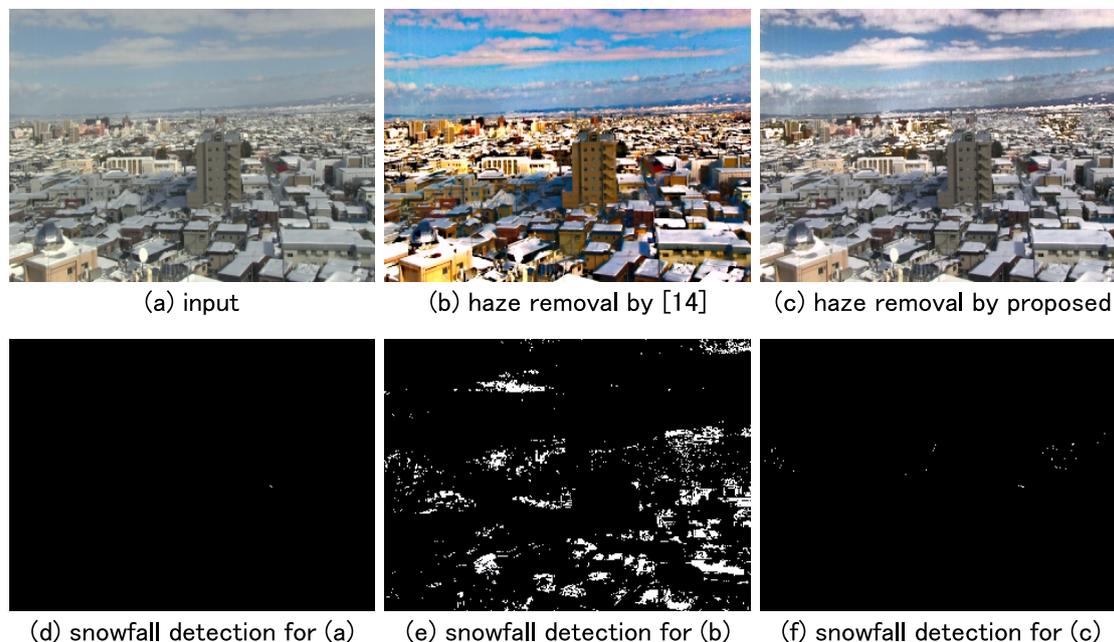


図 124: 雪粒検出結果の例 (晴天画像)

以上の結果から、鮮明化アルゴリズムと動体検出アルゴリズムを組み合わせる事で、降雪で不鮮明になった画像から雪粒を検出できる事が分かる。しかし、図 122 から図 124 において、DCP の結果である同図 (b) は偽色を多数含むため、同図 (e) の様に動体検出結果に誤検出が多数発生する。よって、従来の鮮明化手法を動体検出と組み合わせる事は難しい。これは、偽色の発生位置が、各フレームで異なるためである。一方、提案した鮮明化アルゴリズムは、明度整合を保持し偽色を抑制するため、動体検出と組み合わせる事が出来る。提案手法は、図 122(a) の様な不鮮明画像から同図 (f) の様に雪粒を検出でき、さらに図 124(a) の様な晴天画像からは同図 (f) の様に誤検出を発生させない。また、雪粒は高速動体のため、3D メディアンフィルタと背景差分を組み合わせた手法により、雪粒を検出できる事が分かる。

表 16 に、実験に使用した各パラメータの設定値を示す。

表 16: 提案する雪粒検出手法のパラメータ設定値

パラメータ	記号	設定値
3D メディアンフィルタフレーム数	ΔT	30
背景差分の閾値	th_{bs}	30

降雪画像を模した CG 動画を作成して雪粒検出率を算出する事で定量評価を行った。図 125 に、作成した不鮮明な CG 動画から雪粒検出する様子を示す。図 125(a) は原画像、図 125(b) は手法 [14] の鮮明化画像、図 125(c) は本論文で提案した 2 つ目の鮮明化手法による鮮明化画像、図 125(d) は雪粒検出の正解を表す Ground Truth 画像、図 125(e) は (b) から本手法による雪粒検出結果画像、図 125(f) は (c) から本手法による雪粒検出結果画像、図 125(g) は検出率の Precision-Recall を示した表である。作成した CG 動画は、視界不良の状況を再現するために、全体が灰色の画像にガウシアンノイズを付加した背景に、背景の灰色より僅かに白または黒の円で表した仮想的な雪粒を画像の上部から下部へ様々な方向へ高速に移動させて、擬似的に吹雪を再現した動画である。動画は 1800 フレームで、検出単位は画素単位で Ground Truth と比較した。図 125(g) から、提案した鮮明化手法と雪粒検出手法を組み合わせる事で、従来の鮮明化手法より雪粒検出率が高くなる事が分かる。

CG 動画から雪粒検出性能を手法 [37] と比較した結果を表 17 に示す。手法 [37] ではノイズには強いので Precision は高いが、未検出が多数あるため Recall が低く、降雪検出性能は良くない。本手法では、不鮮明な画像に対しても未検出は文献 [37] より少なく降雪検出性能が良い。未検出の原因は、背景画像を作成する際に降雪が激しい箇所を降雪を背景としてしまう事、雪粒の輪郭がノイズの影響でかすれてしまう事である。メディアンフィルタは出現確率が全体の半分未満の現象をノイズとして除去するため、ある画素における一定時間内の雪粒の出現確率が半分を超えた場合には、雪粒を背景としてしまう。しかし、本手法は鮮明化と背景差分を組み合わせる事によって、原画像では視認できない雪粒が抽出出来る。

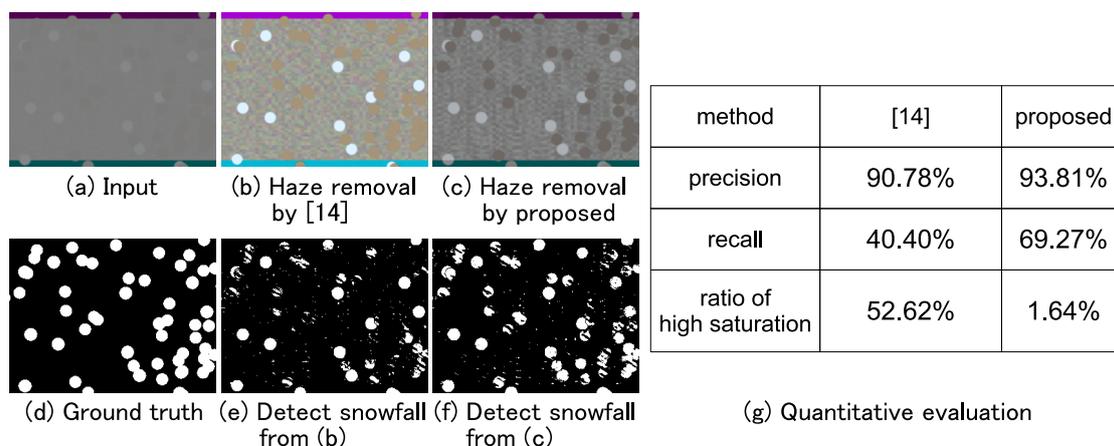


図 125: 雪粒検出の結果

表 17: 雪粒検出の Precision Recall

method	[37]	proposed
precision	0.9721	0.9902
recall	0.2995	0.6450

第IV部

降雪状況判定における提案手法

1 降雪状況判定の課題

現在、降雪状況の判定を目的とした手法は、手法 [41] の様に降雨量を推定する手法を転用して行われている。また、雨粒画素の検出数を降雨量としているが、誤検出が無い事が前提である。雨粒以外の誤検出により、晴天画像でも降雨量があると判定する場合がある。

本研究では、動体検出によって雪粒を検出し、検出された動体の位置分布に注目する。雨や雪等の天候は、広範囲に影響を与えるため、雨や雪が降っている状況を撮影した場合、撮影した屋外画像の1部分にしか雨(雪)粒が映っていないという状況はない。雪は広範囲に降るため雪粒は画像全体に存在するが、その他の一般の動体は画像の1部分にしか存在しない。この違いを利用して、雪粒を画像全体に存在する特徴と仮定し、雪粒画素の検出量と検出位置の分布を用いて、降雪程度を判定する。これにより、雪粒以外の動体は降雪程度の判定に影響を与えない。本研究では、上述した鮮明化と雪粒検出と組み合わせる事で、不鮮明な画像から降雪程度を判定する。

2 従来手法

2.1 検出画素数による降雨(雪)程度推定

2.1.1 手法の説明

手法 [41] は、手法 [37] の雨粒検出の手法を基にしている。雨粒を検出したら、検出画素数を数えて、画像から降雨量を推定する。

2.1.2 結果

結果を図 126 に示す。図 126 は [41] に掲載されている図である。図 126 上段は原画像、図 126 の 2 段目は雨粒検出結果、図 126 の 3 段目は HOS のヒストグラム、図 126 下段は実際の降雨量のグラフを表す。図 126 の 3 段目の各グラフは、白はヒストグラム、その他の線グラフは EM アルゴリズム等によるヒストグラムのフィッティング処理を表し、ピーク探索の結果である。図 126 下段の降雨量のグラフは、横軸が時間、縦軸が降雨量を表し、図 126 上段の画像は図 126 下段の赤点の時刻の画像と対応する。図 126 の 2 段目と図 126 下段から、雨粒検出数と実際の降雨量には相関がある事が分かる。しかし、図 126 の 3 段目の右から 2 番目のグラフでは、HOS ヒストグラムのピークが 2 つになっている。この場合、水色のグラフの様に、ピーク探索に失敗する可能性があり、ヒストグラムの形によっては、雨粒の形の角度を正しく推定出来ない。雨粒以外の雑多な動体が存在する画像では、この手法は適用出来ない。

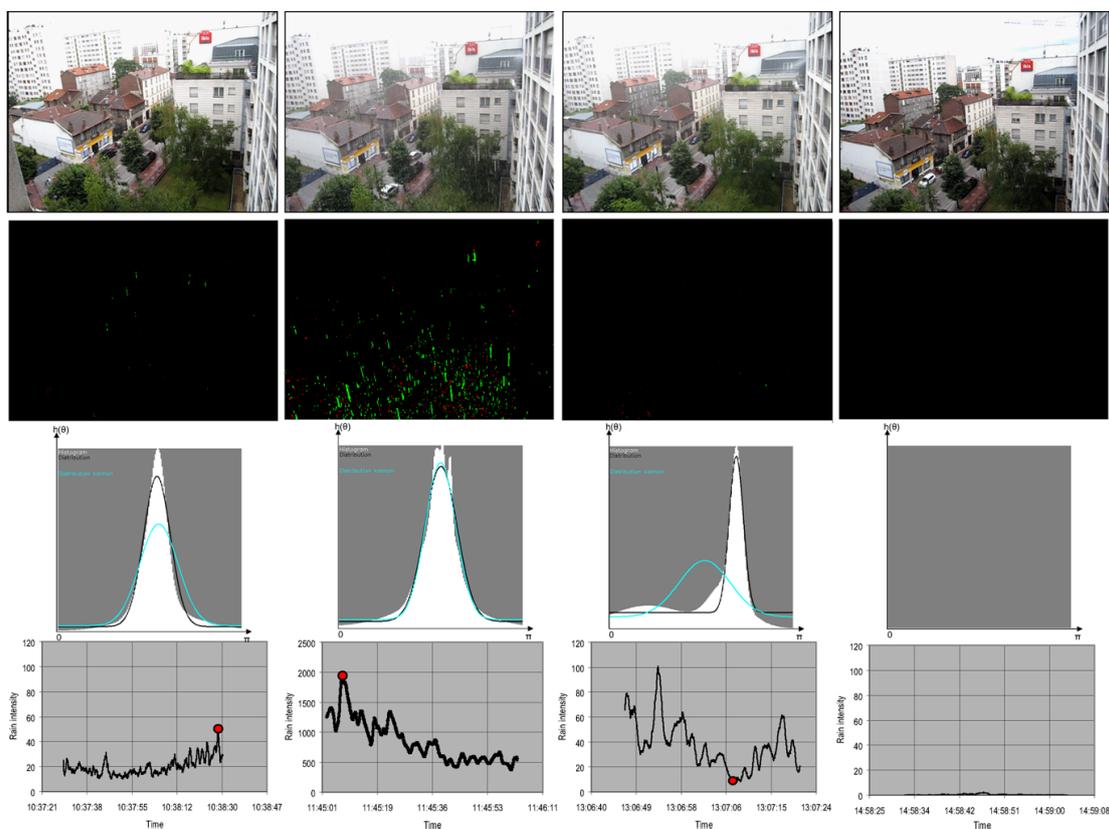


図 126: 雨粒画素と降雨量の関係

3 提案手法

動体検出アルゴリズムを使用して雪粒を検出する場合、雪粒以外の動体を取り除く事は出来ない。本研究では、雪粒は画像全体で検出されるが、その他の動体は画像の1部にしか検出されない事を利用してこの問題に対処する。数フレームの動体検出結果を合成してから、動体検出位置の分布を調査する事で、雪粒以外の動体が検出される画像からでも降雪状況を判定する。

図 127 に、雪粒と一般の動体の検出位置の違いを示す。図 127(a) は原画像、図 127(b) は動体検出画像である。図 127 上段は降雪画像、図 127 下段は晴天画像である。図 127 上段では、画像全体に雪粒が検出されている。しかし、図 127 下段では、道路上にしか車や人が検出されない。この違いから、降雪が原因で検出された動体を判別する。

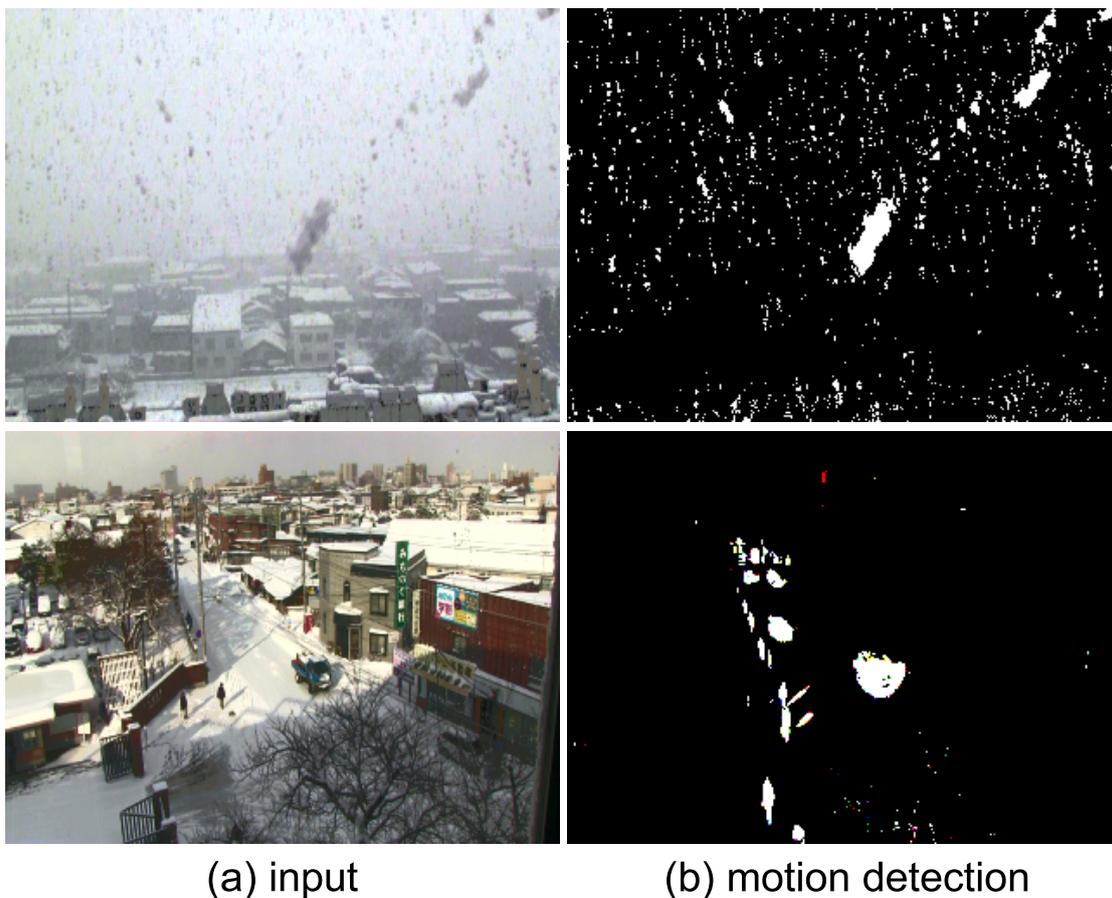


図 127: 動体検出の違い

3.1 手法の説明

3.1.1 降雪画素検出結果の合成

雪粒は画像全体で検出されるが、1 フレームだけでは画像全体に検出されるとは限らない。本研究では、確実に雪粒を画像全体に存在させるために、数フレームの動体検出結果を合成する。

図 128 に、動体検出結果の合成例を示す。図 128(a) は原画像、図 128(b) は 1 フレームの動体検出結果、図 128(c) は 30 フレームの動体検出結果を合成した画像である。図 128 の上段と中段は降雪画像、図 128 下段は晴天画像である。降雪が酷いと画像全体で雪粒が検出されるが、風が強かったり雪粒が小さく映っていたり、雪が降り始めた状況等では、雪粒はまばらに検出される。降雪が酷い画像であっても、1 フレームの雪粒検出数が少ない場合もある。しかし、雪粒は高速動体であるため、フレームが異なれば検出位置も変わるが、その他の動体は遅く直近のフレームで検出位置が大きく変わる事は無い。そこで本研究では、数フレームの検出結果を合成する事で、検出結果で画像全体が埋まる様にする。図 128(c) からも、検出結果を合成する事で、1 フレームではまばらだった検出結果が画像全体を埋めている事が分かる。一方、一般の動体検出結果を合成しても、検出結果は画像全体に広がらない。よって、動体検出結果を数フレーム合成する事で、雪粒とその他の動体を区別する事が出来る。

式 (48) に、動体検出合成式を示す。ここで、 M^{merge} は動体検出合成画像、 M は動体検出結果画像、 x は画素位置、 t はフレーム番号、 ΔT は過去フレーム数である。動体検出結果全フレームの論理和を動体検出合成画像とする。

$$M^{merge}(x) = M^t(x) \vee M^{t-1}(x) \vee \dots \vee M^{t-\Delta T}(x) \quad (48)$$

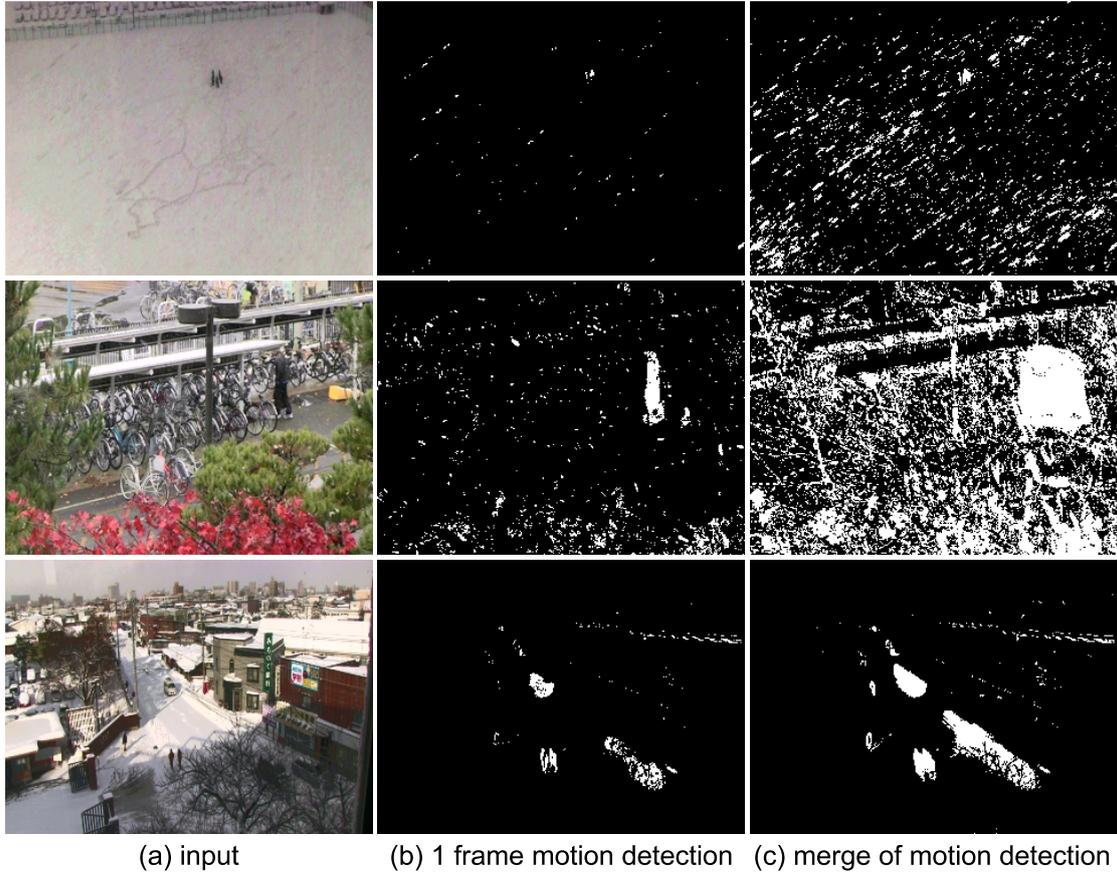


図 128: 動体検出結果の合成

3.1.2 降雪画素検出位置の分布特性

本研究では、動体検出合成画像をブロック分割し、動体検出結果が存在するブロック数を調査し、検出画素が存在するブロックが多い場合に降雪と判定する。降雪の程度は、動体検出結果の画素数と領域数とブロック数の3特徴から推定する。よって、各フレームの検出画素数や検出領域数が多くても、検出分布が狭い場合は、各フレームの動体検出は降雪ではなく、その他の動体の影響であると判断する。

図 129 に、降雪画像と晴天画像で、動体検出の合成画像における検出位置の分布の違いを示す。図 129(a) と図 129(b) は降雪画像の動体検出合成画像、図 129(c) は晴天画像の動体検出合成画像である。赤枠は分割ブロックを表す。図 129(a) と (b) は、殆どのブロックで動体検出結果が存在するが、図 129(c) では特定のブロックにしか動体検出結果は存在しない。動体が存在するブロック数で、降雪画像か晴天画像かの判定が出来る事が分かる。

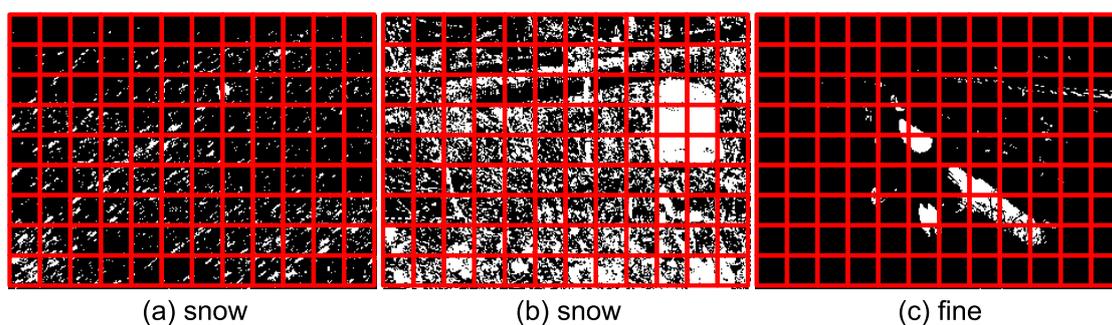


図 129: 動体検出結果の分布

3.1.3 降雪程度の判定

降雪量が酷いと降る雪の量も多いため、雪粒検出された画素数が多い程、降雪の程度は酷いと言える。また、画像中の一般の動体の数に比べて、雪粒の数は多い。動体検出した検出画素数と検出領域数は、どちらも多いと降雪の程度が酷いと言える。但し、検出結果の合成画像では、各動体領域がくっついて統合されてしまうため、検出領域数は各フレームで計算して全フレームの合計値とする。

本研究では、「動体画素数」「動体領域数」「動体検出ブロック率」の3特徴から、降雪程度の判定を行う。降雪程度の判定方法は、以下の通りである。まず、動体検出合成画像から動体検出画素が存在するブロック数を数える。このブロック数が多い場合は降雪と判断して程度の推定に移る。検出ブロック数が少ない場合は、降雪は無いと判定する。また、合成に使用した全フレームの検出領域数が少ない場合も、降雪は無いと判定する。降雪の程度は、動体検出合成画像の検出画素数と動体検出ブロック率から推定する。表 18 に、降雪程度の判定に使用する特徴量を示す。

各特徴量は、式 (49) から式 (51) で算出される。ここで、 D_{pix} は動体画素数、 D_{reg} は動体領域数、 D_{rat} は動体検出ブロック率、 M^{merge} は動体検出合成結果、 M_{reg} は動体検出領域数、 M_{rat} は各ブロックの動体検出判定、 t はフレーム番号、 T は過去フレーム数、 (X, Y) はブロック番号、 Ω はブロックの範囲、 (x, y) は画素位置、 Ω_{size} はブロックの画素数、 th_{bl} はブロック降雪判定閾値である。各ブロックで閾値以上の動体画素数がある場合に、そのブロックを動体検出ブロックとする。

判定条件を式 (52) で表す。ここで、 th_{pix} は動体画素数の閾値、 th_{reg} は動体領域数の閾値、 th_{rat} は動体検出ブロック率の閾値、 th_{high} は重度の降雪を表す閾値、 th_{mid} は中度の降雪を表す閾値、 th_{lig} は軽度の降雪を表す閾値である。 D_{rat} が少ない場合と、 D_{pix} と D_{rat} の積が低い場合には、降雪は無いと判定する。降雪の程度は、 D_{pix} と D_{rat} の積で判定する。

表 18: 降雪程度判定の特徴

特徴量	抽出方法
動体画素数	動体検出合成結果の検出画素数
動体領域数	各動体検出合成結果の全検出領域数
動体検出ブロック率	動体検出合成結果の検出ブロック率

$$D_{pix} = \sum_x M^{merge}(x) \quad (49)$$

$$D_{reg} = \sum_T M_{reg}^t \quad (50)$$

$$D_{rat} = \frac{1}{X \times Y} \sum_{X,Y} M_{rat}(X, Y)$$

$$M_{rat}(X, Y) = \begin{cases} 1 & \frac{\sum_{x,y \in \Omega(X,Y)} M^{merge}(x,y)}{\Omega_{size}} > th_{bl} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} nosnowfall & \quad if \quad D_{pix} < th_{pix} \wedge D_{reg} < th_{reg} \wedge D_{rat} < th_{rat} \\ heavysnowfall & \quad elseif \quad D_{pix} \times D_{rat} > th_{high} \\ mediumsnowfall & \quad elseif \quad D_{pix} \times D_{rat} > th_{med} \\ lightsnowfall & \quad elseif \quad D_{pix} \times D_{rat} > th_{lig} \\ nosnowfall & \quad else \end{aligned} \quad (52)$$

3.2 結果

実験は画像を「10 × 10」にブロック分割して行った。図 130 に判定結果例を示す。図 130(a) は吹雪の画像、図 130(b) は晴天画像、図 130(c) は夜間の降雪画像である。図 130 の上段は原画像、図 130 の中段は (a) の本論文で提案した 3 つ目の手法を用いた鮮明化画像、図 130 の下段は動体検出合成画像である。動体検出合成画像において、降雪が酷い画像では画像全体に動体が検出されるが、晴天画像では動体は画像の 1 部にのみ検出されている事が分かる。夜間画像においても、原画像は不鮮明で降雪が見えないが、鮮明化アルゴリズムと組み合わせる事で、雪粒を検出して降雪の程度が判定出来る。検出位置分布を利用しているため、画像に雪粒以外の動体があっても、降雪の判定結果に影響しない事が示されている。

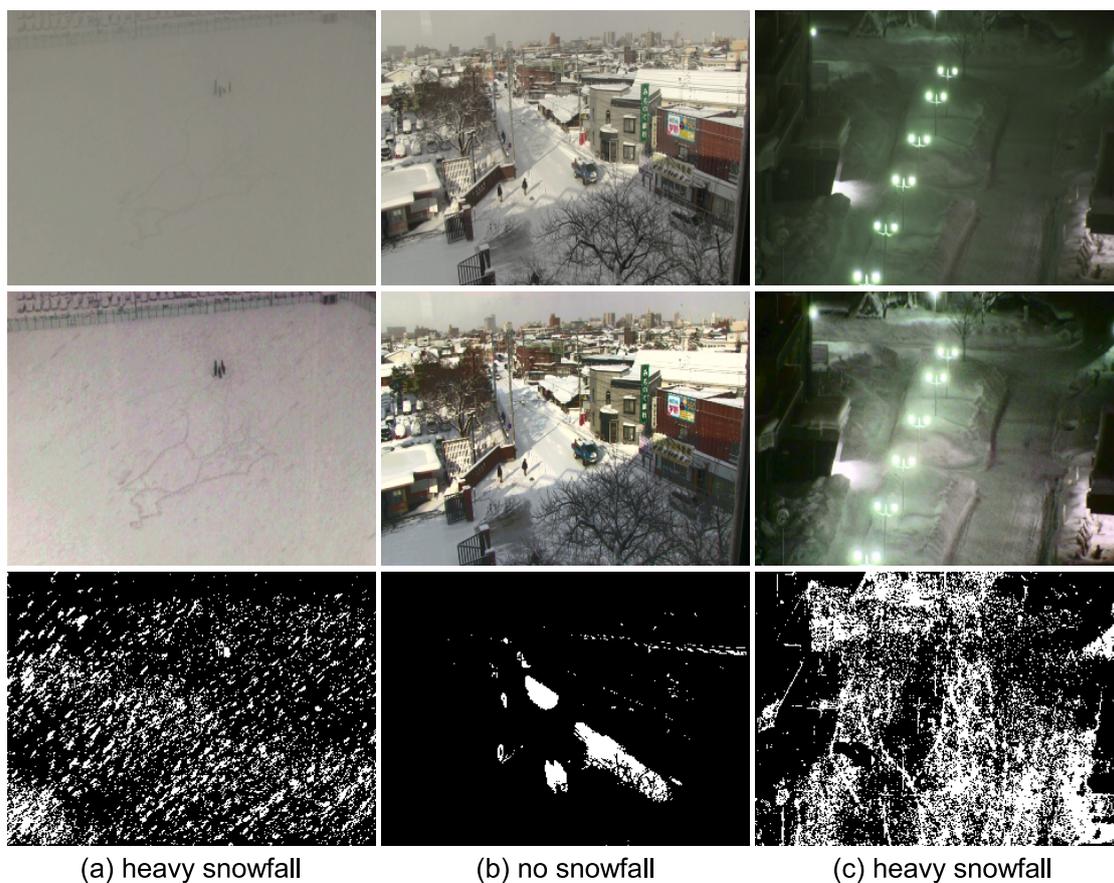


図 130: 降雪程度の判定

表 19 に、実験に使用した各パラメータの設定値を示す。

表 19: 提案する降雪程度判定手法のパラメータ設定値

パラメータ	記号	設定値
検出結果合成フレーム数	ΔT	30
動体検出ブロック判定閾値	th_{bl}	0.3
動体画素数の閾値	th_{pix}	5000
動体領域数の閾値	th_{reg}	200
動体検出ブロック比率の閾値	th_{rat}	0.3
重度の降雪程度の判定閾値	th_{high}	0.3
中度の降雪程度の判定閾値	th_{mid}	0.2
軽度の降雪程度の判定閾値	th_{lig}	0.1

第V部

結論

本論文では、自然災害の中でも特に危険である豪雪に対応するために、悪天候で危険な状況になりやすい不明瞭な場面においても稼働する屋外監視カメラアプリケーションを想定して、降雪の程度を判定する手法を提案した。雪粒を検出して降雪の程度を推定するために、雪粒検出の新たな手法を同時に提案した。また、降雪の程度を判定する時は悪天候である事が予想されるため、画像の鮮明化の新たな手法も同時に提案した。

画像の鮮明化においては、明度整合と偽色発生との2つの重大な問題に取り組み、効果的に解決する3つの手法を提案した。

1つ目の提案手法では、従来の仮定とは正反対の特徴量「ブライツチャンネル」を導入する事で、従来の「霞は高明度である」という仮定では解決出来なかった、白い対象物に発生する偽色の問題を解決した。従来手法では、後処理の明度補正次第で画質が大きく変わるため、鮮明化手法とセットで明度補正手法も提案される事もあったが、この提案手法では偽色の抑制だけでなく、明度補正を不要とする大きな成果もある。

2つ目の提案手法では、領域分割を取り入れる事により、場面に合わせた霞成分を表す事ができ、従来より効果の高いコントラスト改善を実現した。霞成分は明るさではなく、画像の色分布から推定出来る事を示した。また、 $L^*a^*b^*$ 色空間を採用する事により、人間の感覚に即した処理を簡潔に行う手法を考案した。同時に、偽色の発生の原因が無彩色の有彩色化にある事を突き止め、これを解決した。この手法では、全体的に画像の彩度が低下してしまうが、この着眼点は3つ目に提案する手法のアルゴリズム考案に大きな影響を与えた。

3つ目の提案手法では、ヒストグラムを分割する事によりヒストグラム拡張の弱点を克服する事で、「鮮明化効果」と「明度整合の保持・偽色抑制」のトレードオフを解決し、霞画像だけでなく夜間画像の鮮明化も実現した。この手法は降雪の夜間画像の鮮明化も可能であるため、従来よりも利用範囲が広く効果が高い鮮明化アルゴリズムである。また、霞画像の鮮明化にヒストグラム操作アルゴリズムが利用可能であることを示し、Koschmiederの法則に基づく手法以外の手法でも霞除去が可能であることを示した。さらに、画像平面を分割する領域分割ではなく、特徴空間を分割するクラスタリングを行っても、各クラスに適した鮮明化効果を割り当てる事で、霞画像のコントラストを改善出来る事も示した。本論文で提案した3つの鮮明化手法は、何れも従来手法では本格的に対策がなされていない問題点を解決する手法である。さらなる発展としては、画像平面を分割する領域分割と特徴空間を分割するクラスタリングを組み合わせ、さらに画像の各箇所適切な鮮明化を行うための改良などが考えられる。

雪粒検出においては、従来では雪粒検出は雨粒検出と同類として扱われていたが、本論文では効果的な雪粒検出専用の手法を提案した。ノイズ除去アルゴリズムと組み合わせる事で、簡潔な処理で効果的に雪粒が検出出来た。雪粒の検出に色や大きさの特徴量を使用しないため、照明条件に関係無く、その他の対象物にも白以外などの制限や前提条件が必要なく、雪粒を検出できる。本論文で提案した雪粒検出手法は、明らかに雨粒とは異なる特徴である雪粒を簡潔に検出する事に特化した手法である。さらなる発展としては、フレーム間差分の要素も取り入れるなどを行い、移動速度の違いから雪粒と雪粒以外の動体を区別し、動体の誤検出を抑える改良などが考えられる。

降雪程度の判定においては、雪粒以外の動体の動き特徴の出現パターンと比較する事で、撮影条件に依存せず、降雪状況を判定出来る手法を提案した。認識や検出のアルゴリズムではカメラの設置位置や事前の設定条件などが複雑な場合があり、降雪程度の判定でも従来では雨粒や雪粒以外の

動体が無く、粒が小さく映り、粒が鮮明に見える明るい場面である事が必要であった。本論文で提案した手法は、事前の撮影条件を必要とせず、雪が降ると画像全体に雪粒が存在する事と、雪粒は高速に動く事を利用し、雪粒以外の動体の影響を受けずに降雪程度を判定する手法である。

本論文で提案した各手法は、降雪状況において従来手法よりも効果が高い事を実験により示した。各提案手法を組み合わせる事で、如何なる天候においても安定して降雪の程度を判定する事が出来る。

災害時に避難経路の選択に失敗し、危険な場所を巡って命を落とす事故は多く、適切な避難誘導をしなかった事を巡って裁判で争う事も少なくない。自然災害、特に地震が多い日本において、人々の命と安全を確保するためにも、本論文の研究結果が、今後の自然災害への対策の発展に繋がり、災害に巻き込まれる人が少しでも少なくなる事を願う。

参考文献

- [1] Hiroshi Kawarabuki and Kazunori Onoguchi: "Snowfall Detection in a Foggy Scene", 22nd International Conference on Pattern Recognition, August 2014.
- [2] Hiroshi Kawarabuki and Kazunori Onoguchi: "Snowfall detection under bad visibility scene", 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, October 2014.
- [3] 瓦吹大・小野口一則: 「ヒストグラム拡張とクラスタリングによる視界不良画像の鮮明化に関する研究」, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) Vol.136, No.10, 2016.

参考文献

- [1] 監視カメラ映像というビッグデータ、人混みから顔認証で「あなたの顔」を見つけ出す
「<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20130319/464501/?rt=nocnt>」
- [2] がん診断を支援する病理組織画像認識システム
「http://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/aistinfo/aist_today/vol12_08/vol12_08_p15.pdf」
- [3] ドアホン 「<http://panasonic.jp/door/swd701ks/>」
- [4] Ficha Object Detection 「<http://ficha.jp/>」
- [5] ぼうはんかめらまん 「<http://eyeya.s203.xrea.com/wpseet/archives/301>」
- [6] Z. Jia, H. Wang, R. E. Caballero, Z. Xiong, J Zhao and A. Finn: "A two-step approach to see-through bad weather for surveillance video quality enhancement", Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on, May 2011.
- [7] Zuiderveld, K.: "Contrast limited adaptive histogram equalization", In:Academic Press-Graphics Gems Series: Graphics Gems, vol. IV, pp. 474.485 (1994).
- [8] Q. Tian and J. Duan: "Local Histogram Modification Based Contrast Enhancement", Audio, Language and Image Processing (ICALIP), 2012 International Conference on, July 2012.
- [9] S. Nimkar, S. Shrivastava and S. Varghese:
"CONTRAST ENHANCEMENT AND BRIGHTNESS PRESERVATION USING MULTI-DECOMPOSITION HISTOGRAM EQUALIZATION", Signal & Image Processing : An International Journal (SIPIJ) Vol.4, No.3, June 2013.
- [10] A. S. Krishna, G. S. Rao and M. Sravya: "CONTRAST ENHANCEMENT TECHNIQUES USING HISTOGRAM EQUALIZATION METHODS ON COLOR IMAGES WITH POOR LIGHTNING", International Journal of Computer Science, Engineering and Applications (IJCSEA) Vol.3, No.4, August 2013.
- [11] Henrik Malm, Magnus Oskarsson and Eric Warrant: "Adaptive enhancement and noise reduction in very low light-level video", In Journal of Information & Computational Science, October 2010.
- [12] D. J. Jobson, Z. Rahman, and G. A. Woodell, " Properties and performance of a center/surround retinex, " IEEE Trans. Image Process., vol. 6, no. 3, pp. 451.462, Mar. 1997
- [13] Z. Rahman, D. J. Jobson, and G. A. Woodell, " Retinex processing for automatic image enhancement, " J. Electronic Imaging, vol. 13, no. 1, pp. 100.110, Jan. 2004.

- [14] Kaiming He, Jian Sun, and Xiaoou Tang: "Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior ", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 33, No.12, pp.2341-2353 (December 2011).
- [15] S. G. Narasimhan and S. K. Nayar: "Interactive (De)Weathering of an Image using Physical Models", ICCV Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision (CPMCV), October, 2003.
- [16] H. Hautiere, J. P. Tarel and D. Aubert, "Towards fog-free in-vehicle vision systems through contrast restoration ", Proceedings of CVPR, pp.1-8, 2007.
- [17] S. G. Narasimhan and S. K. Nayar, "Vision and the Atmosphere ", International Journal of Computer Vision, Vol.48, No.3, pp.233-254., 2002.
- [18] NICOLAS HAUTIERE, JEAN-PHILIPPE TAREL, DIDIER AUBERT and ERIC DUMONT, "BLIND CONTRAST ENHANCEMENT ASSESSMENT BY GRADIENT RATIOING AT VISIBLE EDGES ", Image Analysis and Stereology 27(2), June 2008.
- [19] Fabio Cozman and Eric Krotkov, "Depth from Scattering " Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1997.
- [20] Y. Y. Schechner, S. G. Narasimhan and S. K. Nayar, "Instant Dehazing of Images Using Polarization ", Proceedings of CVPR, pp.325-332, 2001.
- [21] R. Tan, "Visibility in Bad Weather from a Single Image, " Proceedings of CVPR, 2003.
- [22] S. G. Narasimhan and S. K. Nayar, "Contrast Restoration of Weather Degraded Images ", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.5, No.6, pp.713-724, 2003.
- [23] Laurent Caraffa and Jean-Philippe Tarel: "Markov Random Field Model for Single Image Defogging", in IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'13), June 2013.
- [24] Peter Carr and Richard Hartley: "Improved Single Image Dehazing using Geometry", DICTA09, 2009.
- [25] Zhihao Ding, Qi Yu, RongRong and Zhenyue Zhang: "Dark Pixel Detection: A Novel Single Image Dehaze Approach", In Proceedings of the 26th International Conference Image and Vision Computing New Zealand, November 2011.
- [26] Chia-Hung Yeh, Li-Wei Kang and Cheng-Yang Lin: "Image haze removal via haze density analysis based on pixel-based dark channel prior", in Proceedings of Computer Vision & Graphic Image Processing (CVGIP2012), 2012.
- [27] Nai-Cyun Ke and Ju-Chin Chen: "REAL-TIME VISIBILITY RESTORATION FROM A SINGLE IMAGE", In IEEE International Conference on Image Processing, September 2013.
- [28] J. P. Tarel and H. Hautiere, "Fast Visibility Restoration from a Single Color or Gray level Image, " Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV '09), pp.2201-2208, 2009.

- [29] Jing Yu and Qingmin Liao, "FAST SINGLE IMAGE FOG REMOVAL USING EDGE-PRESERVING SMOOTHING," ICASSP, 2011.
- [30] Xuan Dong and Shiqiang Yang: "A Fast Efficient Algorithm for Enhancement of Low Lighting Video", In Journal of Information & Computational Science, October 2010.
- [31] Erik Matlin and Peyman Milanfar, "Removal of Haze and Noise from a Single Image," in Proceedings of SPIE, February 2012.
- [32] H. Koschmieder, "Theorie der Horizontalen Sichtweite," Beitr. Phys. Freien Atm., vol. 12, pp. 171-181, 1924.
- [33] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda: "Photographic tone reproduction for digital images", In Proceedings of SIGGRAPH '02, Vol. 21, pp. 267-276, 2002.
- [34] K. Garg and S. K. Nayar: "Gradient domain high dynamic range compression", ACM Transactions on Graphics (Proc. ACM SIGGRAPH 2002), July 2002.
- [35] Eugene Hsu, Tom Mertens, Sylvain Paris, Shai Avidan and Fredo Durand: "Light Mixture Estimation for Spatially Varying White Balance", ACM Transactions on Graphics, 27(3), (Proc.Siggraph), August 2008.
- [36] 北浦真樹・大倉史生・神原誠之・横矢直和: 「明度分布と空間的分布が二分される HDR 画像のためのトーンマッピング」, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU) 講演論文集, August. 2012.
- [37] Peter Barnum, Takeo Kanade, and Srinivasa G. Narasimhan: "Spatio-Temporal Frequency Analysis for Removing Rain and Snow from Videos", Workshop on Photometric Analysis For Computer Vision (PACV), in conjunction with ICCV, October 2007.
- [38] P. C. Barnum, S. G. Narasimhan, and T. Kanade: "Analysis of Rain and Snow in Frequency Space", International Journal of Computer Vision (IJCV), December 2008.
- [39] Chen Zhen, and Shen Jihong: "A New Algorithm of Rain (Snow) Removal in Video", JOURNAL OF MULTIMEDIA, VOL. 8, NO. 2, APRIL 2013.
- [40] K. Garg and S. K. Nayar, "Vision and Rain," International Journal of Computer vision, Vol.75, No.1, pp.3-27, 2007.
- [41] J. Bossu, N. Hautiere and J. P. Tarel: "Rain or Snow Detection in Image Sequences through use of a Histogram of Orientation of Streaks", International Journal of Computer Vision, July 2011.
- [42] Kaiming He, Jian Sun and Xiaoou Tang: "Guided image filtering", Comput. Vis. ECCV 2010, Lect. Notes Comput. Sci., 2010, 6311, pp. 1.14.
- [43] 色の許容差 「<http://kato-glaze.up.seesaa.net/image/kyoyousikisa.pdf>」
- [44] Cutler R, Davis L. "View-based detection and analysis of periodic motion" in: Int Conf Patt Recog Brisbane, Australia (Aug.) 1998; 1: 495-500.

謝辞

最後になりましたが、本研究に携わって頂いた同研究室の皆様へ感謝の言葉を申し上げます。

本研究を進めるにあたって、色々な助言、指導等を賜りました小野口一則教授に深く感謝致します。本研究が何処に向かって行けば良いのか適切に助言、指導して頂き、言葉にもなりません。2年も留年して、良い学生ではなかったと思いますが、忍耐強く5年間ご指導して頂き、お礼申し上げます。

研究環境の構築に尽力して頂いた、安田竜規君、三関拓也君に、深く感謝致します。研究室内の環境が壊れた時でも、諦めずに復旧と再構築、新環境整備に奮闘して頂き、ありがとうございます。現在の環境が無かったら、この博士論文を作成する事は出来ませんでした。

研究の息抜きに、高校生向けのデモアプリケーションの検討、作成に参加して頂いた、柄目卓磨君、佐藤崇人君に深く感謝致します。ものづくりの楽しさを再認識する事が出来、楽しかったです。

また、研究室内で定期的に色々な店と一緒に食事をして頂いた方々に、特に、安田竜規君、柄目卓磨君、佐藤崇人君に感謝致します。研究生活の息抜きに、面白く、考えさせられる、独特の発想を沢山聞く事が出来ました。勉強になりました。弘前に来る前は、周りからは「今の若い大学生は大した事ない」と言われました。しかし、実際に触れあってみると、多難な人生を送って来たせいか、しっかりとした考えを持ち、行動力のある学生も居て、逆にこちらが勉強になりました。人の成長は年齢ではなく経験だと、改めて思いました。

その他、既に卒業や修了された方々も含めて、研究室で出会った方々の今後の活躍を期待します。

弘前で出会った方々にも、感謝致します。一緒に遊んでくれた方から、研究の新たなアイデアを頂いた事もあります。何気ない会話から、既成概念や固定観念に囚われない、面白い発想のきっかけを沢山頂きました。

最後に、大学院生活を支えてくれた家族に感謝致します。急に大学院へ行く事を決めて、驚いたと思います。大学院在学中は質素な生活を心がけ、それを実践出来たのは、家族の存在があったからだと思います。母の病気、祖母の百寿等、在学中に家庭内で嫌な事や嬉しい事がありましたが、こうして無事に博士論文を修める事が出来ました。今まで支えられっぱなしだったので、これからは博士課程の経験を踏まえて、今度は家族に恩返し出来る様にしたいと思います。ただし、そうなるまで、いましばらく、お待ち下さい。

博士論文を修める事が、こんなにも不安になり大変な事だとは思いませんでした。当初は、博士課程は3年で出来ると思っていたのですが、実際には5年かかりました。留年中の2年間は、このまま続けていても、博士号が取得できるのか、何年留年する事になるのか、生活していけるのか、不安で仕方ありませんでした。博士号を取得せずに卒業だけする人もいる理由を実感しました。でも、そのおかげで、普通の生活では体験出来ない事も経験出来ました。自動車隊列走行の試乗、海外で英語の学会発表、自分で執筆した論文の雑誌掲載等、辛くて大変な事もありました。しかし、全て出来るだけの事をして、手を尽くした結果なので、今では良い思い出として、良い経験が出来たと思っています。この論文執筆中の現在は就職活動中ですが、運良く内定を頂く事が出来ていますので一安心しているところです。まだ就職先を決めた訳ではありませんが、今後何処に行っても、悔いのない様に死力を尽くす事を大事にしようと思います。弘前大学大学院での生活は、とても有意義であったと思います。研究生活だけでなく、普段の生活も非常に充実したと思っています。5年前、仕事を辞めてまで大学院へ行く事に大きな迷いがありましたが、大学院へ行く事を決意して良かったです。

皆様、本当にありがとうございます。