

領域ベースステレオマッチングにおける バウンダリオーバーリーチの解析と定量化

岡根子 片山保宏 奥富正敏

東京工業大学大学院情報理工学研究科

領域ベースのステレオマッチングでは、物体境界部分において、対応付けが正確に行えず、物体の境界の位置がずれるという、バウンダリオーバーリーチと呼ばれる現象が起こることが知られている。しかしながら、このバウンダリオーバーリーチについて、一般的には、手前の物体境界が外側にふくらむといったことが知られているだけで、これまでその発生メカニズムやずれの大きさ（どのような場合に、どれだけずれるか）等に関し、明確に示されていなかった。本論文では、物体表面のテクスチャの情報をを用いた理論的な解析と実験により、それらを明らかにする。

A Study of Boundary Overreach on Area-Based Stereo Matching

Setsuko Oka Yasuhiro Katayama Masatoshi Okutomi

Graduate School of Information Science and Engineering
Tokyo Institute of Technology

In area-based stereo matching, it is known that there is a problem called "boundary overreach". That is, the estimated positions of the object boundaries tend to be mislocated and, in general, an object in front of a background tends to become larger than its actual size. However, no theoretical analysis, such that why it happens and how much the amount of the boundary overreach is expected, has been shown so far. In this paper, we make them clear by theoretically and experimentally.

1 まえがき

一般に、領域ベースステレオマッチングでは、密な奥行き情報を得ることができる。しかしながら、領域（ウィンドウ）内で視差が一定であるという仮定を設けることになり、その仮定から大きくはずれる場合、正確に対応付けを行うことができない。特に物体の境界部分では、領域内に全く異なる視差が存在し、その結果、求められる境界の位置が、実際の位置からずれる現象（バウンダリオーバーリーチ）が発生する。図1に例を示す。(a)はステレオ画像の一方の画像であり、(b)はこの画像に対して得られた視差画像を示す。(b)中の白線は真の境界位置を示す。得られた境界は、真の境界から大きくずれていることがわかる。

従来から、バウンダリオーバーリーチの現象は言及されてきた[1, 2, 3, 4]。しかしながら、その現象を具体的に解析した例はなく、概して、「テクスチャの強い領域が、弱い領域に伸びるように、境界が移動する」程度の説明がなされているにすぎない。一方図1の結果は、明らかにその説明と矛盾している。なぜなら、縦の境界と横の境界では、その両側のテクスチャは等しいにもかかわらず、一方は外側に、一方は内側に境界が移動している。

本論文では、これまであいまいにされてきたバウンダリオーバーリーチの解析を試みる。バウンダリオーバーリーチ発生メカニズムについての直観的な説明を行なうと同時に、定量的な解析をし、具体的にずれの大きさを定式化する。更に、実験により画像を実際に処理した結果を通じて、それを検証する。

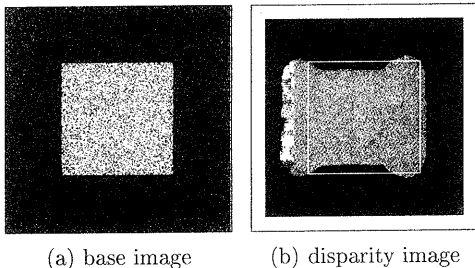


図1: バウンダリオーバーリーチ

2 境界付近での領域ベースマッチング

ここでは、物体の境界付近での領域ベースマッチングの様子について説明し、バウンダリオーバーリーチの発生理由を直観的に示す。まず、理解を容易にするために対応度空間[6]を導入し、境界付近でのマッチングの説明を行う。

2.1 対応度空間を利用した領域ベースマッチング

対応度空間は、基準画像の注目点と参照画像の対応点候補との対応の程度（対応度）を表した3次元データである。基本的なステレオカメラ構成¹の場合、対応度を画像の濃淡値の差の2乗 (SD: Squared Difference) とすると、基準画像のある注目点 (x, y) の視差 d の対応度 $SD(x, y, d)$ は、式(1)で計算される。

$$SD(x, y, d) = (I_b(x, y) - I_r(x, y - d))^2 \quad (1)$$

ここで、 $I_{b(r)}$ は基準（参照）画像を示し、 $I(x, y)$ は位置 (x, y) の濃淡値である。

通常の領域ベースマッチングでは、画像間でウィンドウ同士のSSD (Sum of SD) を計算し、その値を最小とするものを対応点とする。一方、この処理は、対応度空間に水平な2次元加算フィルタを掛けた後、注目点の d 軸上でデータ値の最小値を探索することに等しい。図2に例を示す。(a)は画像間にウィンドウを用いたマッチングを、(b)は対応度空間にフィルタを用いたマッチングの様子を表す。

2.2 境界付近でのマッチングとバウンダリオーバーリーチの発生

対応度空間内で境界がどの様になるかについて、平面の手前に四角形の平面が配置された場合（図3参照）を例に説明する。このとき、対応度空間内の物体表面は図4の様になり、物体の境界は視差の不連続な段差となって現れる。ノイズの影響がないと仮定すれば、物体表面では正確にペア間の濃淡値が一致するので $SD=0$ である。

さて、境界付近のマッチングは、図5で示す状態になる。マッチングは、SSDを最小とするフィルタを探索するのであるが、ほとんどの場合、 $SD=0$ である物体表面を含む前面と重なるフィルタか、後面

¹ 焦点距離の等しいカメラを、光軸が互いに平行で、画像面が同一平面にのるようにした配置。

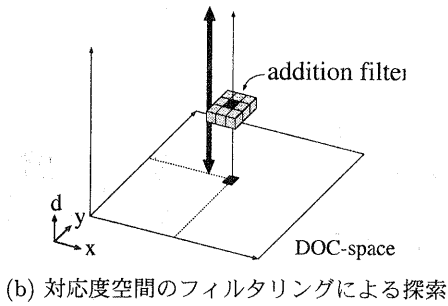
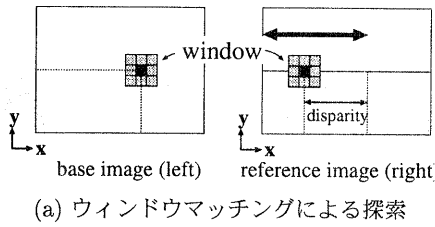


図 2: 領域ベースマッチング

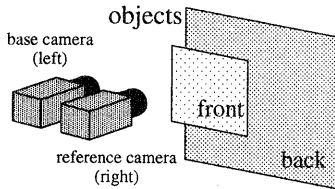


図 3: シーン的位置関係

と重なるフィルタが、SSD を最小にするフィルタとして選択される。

図 5 の場合は、後面とマッチングする方が、より多くフィルタが物体表面と重なるので、後面と重なるフィルタの SSD の方が小さいかのように思われる。しかしながら、SSD は物体表面と重ならない部分の SD も加算されるので、後面と重なるフィルタが必ずしも小さいとは限らない。SSD の大小は、物体表面と重なる部分の大きさよりも、物体表面と重ならない部分の SD 値の大きさとその面積に左右される。そして、物体表面と重なる部分が少ないフィルタが対応点として選択された場合、境界の位置がずれ、バウンダリオーバーリーチが発生することになる。

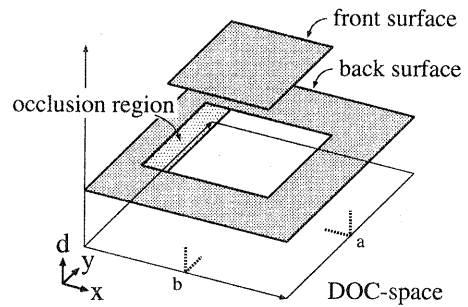


図 4: 図 3 の対応度空間

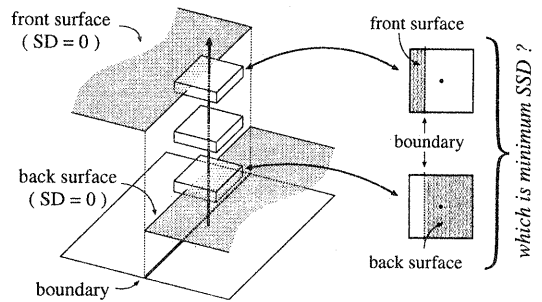


図 5: 境界付近での対応点探索

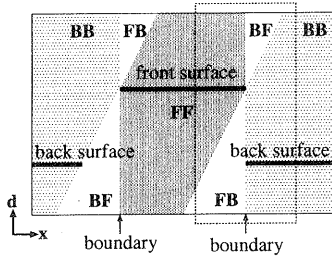
3 バウンダリオーバーリーチの解析

ここでは、理論的な解析により、物体表面のテクスチャと、バウンダリオーバーリーチの関係を明らかにする。

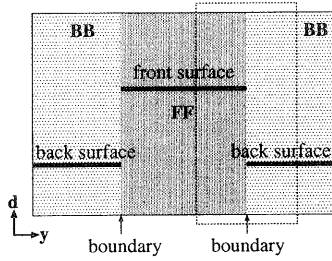
3.1 対応度空間内の領域分け

まずその準備として、対応度空間の領域分けを行う。2.2 で用いた物体の対応度空間 (図 4) は、図 6 に示す様な 4 つの領域から構成されることになる。4 つの領域は、基準画像の後面と参照画像の後面を対応させたときの領域 (BB)、基準画像の後面と参照画像の前面を対応させたときの領域 (BF)、基準画像の前面と参照画像の後面を対応させたときの領域 (FB)、基準画像の前面と参照画像の前面を対応させたときの領域 (FF) である。

図 6 から分かるように、境界付近の領域は対応度空間の $x-d$, $y-d$ 断面で異なる。以下では、エピ



(a) $y=a$ における $x-d$ 断面



(b) $x=b$ における $y-d$ 断面

図 6: 図 4 の対応度空間の断面

ポーラ線と垂直な境界 ($x-d$ 断面の境界)² と、エピソード線と平行な境界 ($y-d$ 断面の境界) に分け、各境界のパウンダリオーバーリーチの解析を行う。

3.2 エピソード線に垂直な境界

前面と重なるフィルタの SSD が最小であれば、その位置は前面、後面と重なるフィルタの SSD が最小であれば、その位置は後面となる。その結果、前面と重なるフィルタと後面と重なるフィルタの SSD が等しくなる位置まで境界はずれことになる。このときの状態を図 7 に示す。ずれの量を λ (境界が前面から後面にずれる方向を正) とすると、式 (2) が導かれる。式 (2) の左辺は前面と、右辺は後面と重なるフィルタの SSD を表す。

$$\overline{SD}_{FS}(\frac{f}{2}-\lambda)f + \overline{SD}_{BS}(\frac{f}{2}+\lambda)f$$

² エピソード線と垂直な境界は、オクルージョン側と反対側の境界に分けることができる。オクルージョン側の境界は、図 5 で示したモデルに当てはまらなく、オクルージョンやフィルタの大きさによって複雑に場合分けする必要がある。また、多眼カメラを利用すること等 [3, 5] で、オクルージョン問題の解決が図れるので、本論文では扱わない。

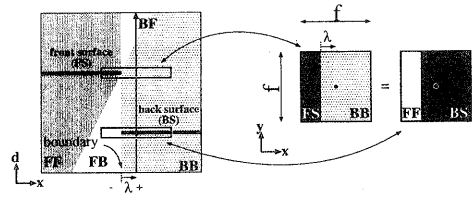


図 7: エピソード線に垂直な境界 (図 6(a) 点線部分)

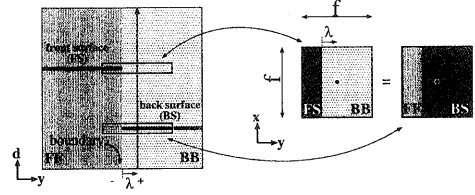


図 8: エピソード線に平行な境界 (図 6(b) 点線部分)

$$= \overline{SD}_{FB}(\frac{f}{2}-\lambda)f + \overline{SD}_{BS}(\frac{f}{2}+\lambda)f \quad (2)$$

ここで、 \overline{SD}_X は、領域 X の平均の SD を、 f はフィルタの一辺の大きさを表す。

また、前・後面各々の物体表面のテクスチャが一樣であると仮定すると、BB, BF, FB, FF 各領域の SD の平均値 (\overline{SD}) は以下の様に求まる (付録 A.1 参照)。

$$\begin{aligned} \overline{SD}_{BB} &= 2\sigma_B^2 \\ \overline{SD}_{BF} &= \overline{SD}_{FB} = \sigma_F^2 + \sigma_B^2 + (\mu_F - \mu_B)^2 \quad (3) \\ \overline{SD}_{FF} &= 2\sigma_F^2 \end{aligned}$$

ただし、前面のテクスチャの平均濃度は μ_F 、分散は σ_F^2 、後面のテクスチャの平均濃度は μ_B 、分散は σ_B^2 であるとする。また、物体表面ではテクスチャの濃淡値が一致するので SD は 0 となる (式 (4))。

$$\overline{SD}_{FS} = \overline{SD}_{BS} = 0 \quad (4)$$

式 (2) に式 (3)(4) を代入し式 (5) を得る。

$$\lambda = \frac{\sigma_F^2 - \sigma_B^2 + (\mu_F - \mu_B)^2}{\sigma_F^2 + 3\sigma_B^2 + (\mu_F - \mu_B)^2} \frac{f}{2} \quad (5)$$

λ は、前・後面のテクスチャの分散だけでなく、平均濃度にも依存することが分かる。一般的には、前

面と後面の平均濃度には差があるので、式(5)の分子は正になりやすく、 λ が正になる場合が多い。これは、バウンダリオーバーリーチは、一般に、前面が後面側に広がることが多いという経験的な観測を裏付けている。

また、 $\zeta = \sigma_B^2 / (\sigma_F^2 + (\mu_F - \mu_B)^2)$ ($\zeta \geq 0$) とすれば、式(5)は式(6)と表せる。

$$\lambda = \frac{1 - \zeta}{1 + 3\zeta} \frac{f}{2} \quad (6)$$

式(6)は ζ の単調減少関数であるので、 λ の取る範囲を以下のように求めることができる。

$$-\frac{f}{6} \leq \lambda \leq \frac{f}{2} \quad (7)$$

これより、バウンダリオーバーリーチの境界のずれの大きさは、正の方向（前面が広がる方向）では、フィルタの大きさの半分まで、負の方向（前面が縮む方向）では、フィルタの大きさの6分の1までの範囲であることがわかる。

3.3 エピポーラ線に平行な境界

3.2と同様に、エピポーラ線に平行な境界について、 λ を求める。(図8参照)。

$$\begin{aligned} \overline{SD_{FS}} \left(\frac{f}{2} - \lambda \right) f + \overline{SD_{BB}} \left(\frac{f}{2} + \lambda \right) f \\ = \overline{SD_{FF}} \left(\frac{f}{2} - \lambda \right) f + \overline{SD_{BS}} \left(\frac{f}{2} + \lambda \right) f \end{aligned} \quad (8)$$

より、

$$\lambda = \frac{\sigma_F^2 - \sigma_B^2}{\sigma_F^2 + \sigma_B^2} \frac{f}{2} \quad (9)$$

この場合、 λ は、前・後面のテクスチャの分散のみの影響を受ける。また、 λ の取る範囲は以下になる。

$$-\frac{f}{2} \leq \lambda \leq \frac{f}{2} \quad (10)$$

3.4 斜めの境界

物体境界がエピポーラ線に垂直、または平行以外の場合について考える。簡単のため、物体境界とフィルタは、図9のように互いに垂直に接するとする。このとき、図9の点線で示した部分の対応度空間の断面は図10のようになる。

今、エピポーラ線と境界線のなす角度を θ とする。 $\theta = 0$ となるのが物体境界とエピポーラ線が垂

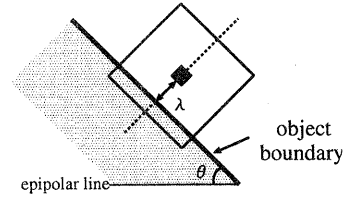


図9: 斜めの境界とフィルタの関係

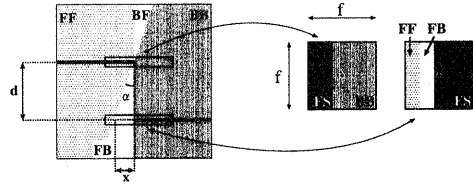


図10: 図9の点線の断面

直な場合、 $\theta = \frac{\pi}{2}$ となるのが物体境界とエピポーラ線が平行な場合である。前後平面間の視差を d としたとき、図10の断面のFB領域の作る三角形の頂角 α の大きさは、 $\alpha = \tan^{-1}(\sin \theta)$ となるので、FB領域の幅 x は、 $x = d \sin \theta$ となる。よって、FB領域の幅 x は、 θ の値に応じて $0 \leq x \leq d$ の範囲で変化することになる。

FB領域の幅が十分に広ければ、前面、後面に重なるフィルタはそれぞれ、エピポーラ線と垂直な境界の場合(図7)と同様の状態になり、 λ も同様に求められる。

しかしFB領域の幅が十分に広くない場合、前面にかかるフィルタに影響はないが、後面に重なるフィルタは図10のようにFB領域を突き抜け、FF領域にまでかかる。このとき、後面と重なるフィルタのSSDの値は、フィルタに重なるFF領域とFB領域の面積によって決定される。FB領域の幅が狭いほど、フィルタに重なるFF領域の面積が多くなり、 λ の値はエピポーラ線と平行な境界の場合に近いっていく。

4 実験結果

実際にステレオマッチングにより画像の視差を求め、バウンダリオーバーリーチを観測することにより、3で得られた結果の検証を行う。

表 1: 物体表面テクスチャ一覧

	前面テクスチャ		後面テクスチャ	
	μ_F	σ_F	μ_B	σ_B
I	100	50	100	50
II	100	100	100	50
III	100	50	100	100
IV	200	50	100	50
V	200	50	100	25
VI	200	25	100	50
i	123.74	53.89	179.58	26.34
ii	133.26	54.43	145.16	23.40

2.2 で用いた物体に対し、表 1 で示す各テクスチャを用いてステレオ画像を作成し、様々な大きさのフィルタを用いて領域ベースマッチングを行った。I~VI は各々の平均濃度と分散を持つように作られたランダムドットテクスチャ、i,ii は実際の画像から得たテクスチャを用いている。

図 11 に、各ステレオ画像の基準画像と、 25×25 のフィルタを用いたときに得られた視差画像を示す。視差画像中、白線は真の境界位置を示している。また表 2 には、各テクスチャに対して、各フィルタサイズのときに計算される λ と、実際に生じたずれの大きさ (実測値) を示す。実測値は、角を含まない各辺のずれの大きさを平均して求めている。これらの結果より、 λ と実測値が、ほぼ一致しており、式 (5),(9) によるずれの推定値が妥当であることが確認できる。

5 むすび

本論文では、バウンダリオーバーリーチの現象の理論的解析を行い、従来あいまいな形でしか説明されていなかったずれの原因について明らかにすると同時に、そのずれの大きさを、物体表面のテクスチャの平均濃度と分散から具体的に求める式を示した。更に、ステレオ画像を用いた実験を通じ、上記解析が妥当であることを確認した。

参考文献

- [1] Steven D. Cochran and Gerard Medioni "3-D Surface Description from Binocular Stereo", IEEE Trans. PAMI, vol. 14, no. 10, pp. 981-994, oct, 1992.

- [2] Radim Sara and Ruzena Bajcsy, "On Occluding Contour Artifacts in Stereo Vision" Proc. CVPR, pp.852-857, 1997.
- [3] 朴重一, 井上誠喜, "映像合成のための多眼カメラを用いた奥行き抽出" 信学技報, vol. 96, no. 133, pp. 33-40, 1997.
- [4] 吾妻 健夫, 魚森 謙也, 森村 淳, "ステレオ画像の中間視点画像生成のためのエッジ情報を用いた視差推定", 映像学誌, vol. 52, no. 3, pp.322-330, 1998.
- [5] 松浦友彦, 佐藤清秀, 中村裕一, 大田友一, "隠れ検出の可能な多眼ステレオ法" 信学論 (D-II), vol. J80-D-II, no. 6, pp.1432-1440, 1997.
- [6] 片山保宏, 奥富正敏, "ステレオ対応度空間からのオクルージョンを考慮した表面抽出の試み", 信学論 (D-II), vol. J82-D-II, no. 4, pp.780-789, 1999.

A 画像間の平均 SD

画像 I, J 間の SD の平均値 ($\overline{SD_{IJ}}$) は以下のように求められる。ただし、画像 I のテクスチャは、平均濃度 μ_I , 分散 σ_I でモデル化できる一様なテクスチャを持つと仮定する (画像 J についても同様)。

$$\begin{aligned} \overline{SD_{IJ}} &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_i - J_j)^2}{MN} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^M I_i^2}{M} - \frac{2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_i J_j}{MN} + \frac{\sum_{j=1}^N J_j^2}{N} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、各項は以下の様に展開できる。

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{i=1}^M I_i^2}{M} &= \frac{\sum_{i=1}^M ((I_i - \mu_I) + \mu_I)^2}{M} \\ &= \sigma_I^2 + \mu_I^2 \quad (12) \\ \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_i J_j}{MN} &= \frac{\sum_{i=1}^M I_i}{M} \frac{\sum_{j=1}^N J_j}{N} \\ &= \mu_I \mu_J \quad (13) \end{aligned}$$

よって、式 (11) は式 (14) となる。

$$\begin{aligned} \overline{SD_{IJ}} &= \sigma_I^2 + \mu_I^2 - 2\mu_I \mu_J + \sigma_J^2 + \mu_J^2 \\ &= \sigma_I^2 + \sigma_J^2 + (\mu_I - \mu_J)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

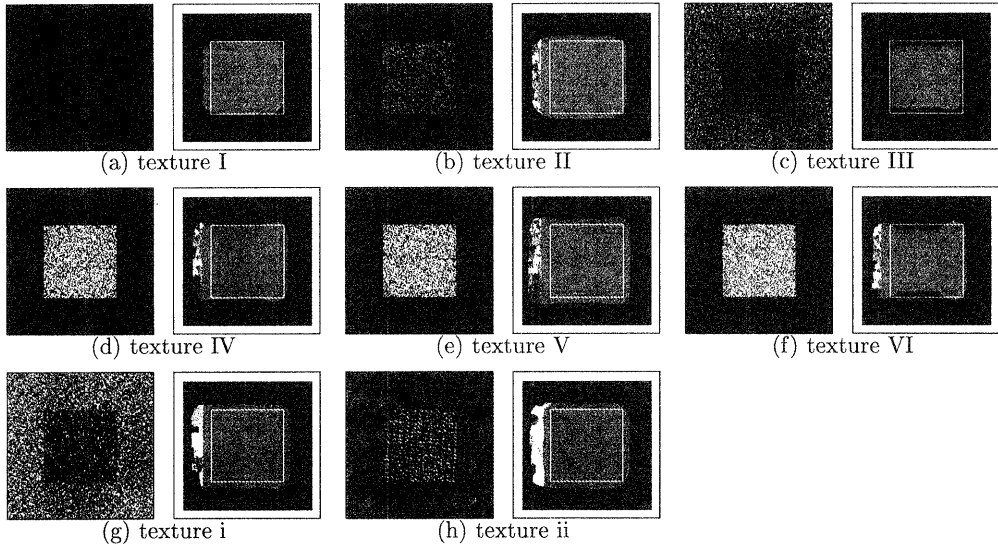


図 11: 25×25 のフィルタによる実験結果 (左:基準画像, 右:視差画像)

表 2: λ と実測値の比較

(a) texture I					(b) texture II				
f	エッジ線垂直境界		エッジ線平行境界		f	エッジ線垂直境界		エッジ線平行境界	
	λ	実測値	λ	実測値		λ	実測値	λ	実測値
7	0.00	0.03	0.00	0.05	7	1.50	1.53	2.10	2.08
11	0.00	0.08	0.00	0.13	11	2.36	2.35	3.30	3.32
17	0.00	0.09	0.00	0.13	17	3.64	3.75	5.10	5.29
25	0.00	0.12	0.00	0.42	25	5.36	5.20	7.50	7.73
35	0.00	0.40	0.00	-0.33	35	7.50	7.50	10.50	10.25

(c) texture III					(d) texture IV				
f	エッジ線垂直境界		エッジ線平行境界		f	エッジ線垂直境界		エッジ線平行境界	
	λ	実測値	λ	実測値		λ	実測値	λ	実測値
7	-0.81	-0.69	-2.10	-1.87	7	1.75	1.81	0.00	0.23
11	-1.27	-1.04	-3.30	-3.09	11	2.75	2.74	0.00	0.56
17	-1.96	-2.00	-5.10	-5.00	17	4.25	4.32	0.00	0.68
25	-2.88	-3.00	-7.50	-7.53	25	6.25	6.15	0.00	0.65
35	-4.04	-4.50	-10.50	-10.75	35	8.75	9.00	0.00	0.90

(e) texture V					(f) texture VI				
f	エッジ線垂直境界		エッジ線平行境界		f	エッジ線垂直境界		エッジ線平行境界	
	λ	実測値	λ	実測値		λ	実測値	λ	実測値
7	2.89	2.87	2.10	2.27	7	1.57	1.49	-2.10	-1.87
11	4.54	4.60	3.30	3.61	11	2.47	2.52	-3.30	-3.02
17	7.02	7.11	5.10	5.47	17	3.81	3.88	-5.10	-4.87
25	10.33	10.20	7.50	7.75	25	5.50	5.80	-7.50	-7.43
35	14.46	14.45	10.50	10.80	35	7.84	8.00	-10.50	-10.35

(g) texture i					(h) texture ii				
f	エッジ線垂直境界		エッジ線平行境界		f	エッジ線垂直境界		エッジ線平行境界	
	λ	実測値	λ	実測値		λ	実測値	λ	実測値
7	2.30	2.58	2.15	1.83	7	1.86	2.45	2.41	2.44
11	3.62	3.92	3.38	3.12	11	2.96	3.90	3.78	4.00
17	5.59	5.82	5.85	4.79	17	4.58	5.78	5.85	6.39
25	8.22	8.30	8.60	7.73	25	6.73	8.00	8.60	9.50
35	11.51	11.40	12.04	10.80	35	9.43	10.65	12.04	13.60