

光学モデルに基づく部品表面検査の一手法

片渕 典史 佐野 睦夫 奥平 雅士

NTT ヒューマンインタフェース研究所
〒180 東京都武蔵野市緑町3-9-11

あらまし

本研究では、高信頼度の部品表面検査アルゴリズムの創出を目的として、異なる撮像条件下で撮影した複数枚の画像を用いて、光学モデルに基づいた処理により、欠陥のある部分とない部分の表面反射特性の差異を定量化し、それを利用して表面検査を行う一手法を提案する。本手法では、光源方向とカメラ方向は既知で検査対象は非完全拡散面との仮定から、Phong のモデルを用いて表面反射をモデル化し、最小2乗法により反射率や反射モデルのパラメータを推定する。実画像を用いた実験を行い、照明光の強度変動に対して追従可能で、安定的に欠陥検出が行えるなど、提案手法の有効性を確認した。

キーワード：光学モデル、外観検査、コンピュータビジョン

A Method of Industrial Parts Surface Inspection Based on Optics Model

Norifumi KATAFUCHI Mutsuo SANO Masashi OKUDAIRA

NTT Human Interface Laboratories
Midori-Cho 3-9-11, Musashino-shi, Tokyo 180.

abstract

For the purpose of highly reliable visual inspection, we propose in this paper a new approach of industrial parts surface inspection based on optics model using several images under different camera conditions. Assuming that light source directions and a viewing direction are known and that the object surface is not to be matte, we formulate surface reflection with Phong's model and estimate reflectance and the parameters of the reflection model by least squares method. Experimental results show that our method is available in point of withstanding changes of light intensity and detecting defects stably.

Key words : optics model, visual inspection, computer vision

1 まえがき

工業部品表面の仕上がり具合や欠陥の有無などを検査する工程は、基本的に全数検査が義務づけられ、品質管理・維持が徹底して行われている。しかしながら、プリント回路基板のパターン検査など一部を除いて最終的な検査工程は工場内でも自動化が遅れており、3次元形状を有する部品や金属製部品をはじめとして未だ人間による目視に頼っている場合が多い。また、2値化や各種空間フィルタなど従来の画像処理技術を用いた部品表面検査装置は、

- 検査物のバラツキや固有の模様、ノイズなどに起因する濃度変動に対して検出信頼度が低下する / 保証できない。
- 検査装置自体に形状依存性があり、他のアプリケーションへの転用が困難である。

という問題を抱えている。従って、画像処理検査装置に高い信頼性と環境変動やノイズに対するロバスト性を求めるニーズは根強いかかわらず、生産現場に導入され実際に稼働している検査装置は少ない。しかも、検査に用いる良質の画像を得る上で重要な光学系(画像入力系)設計にかかる開発技術者の負担や労力は一向に軽減されておらず、個々の検査対象毎に専用装置を個別開発しているのが現状である[1]。

本研究では、高信頼度の表面検査アルゴリズム創出を目的として、ゴム製部品表面の、一部はがれなどの面的な広がりを持つ欠陥検出問題を扱う。ここでは、異なる撮像条件で撮影した複数枚の画像(以下、多重画像と呼ぶ)を用いて、光学モデルに基づき検査物の反射率を推定し、その結果から欠陥判定を行うアプローチを提案する。キーとなるアイデアは、多重画像から検査環境の変動に影響を受けにくいと考えられる表面反射特性(反射率など)を推定し、その結果を用いて良否判定を行うことにより高信頼度の実現を図るということである。つまり、欠陥のない部分(以下、正常部と表現する)と欠陥のある部分(以下、欠陥部と表現する)では、反射率や反射特性に何らかの差異があることに着目し、光学モデルに基づく処理によってその違いを定量化し、それらを積極的に利用しようという考え方である。このアプローチは、照明光のあて方により観測画像の濃度値が大きく変動し、コントラストの高い良質の画像を得るのが困

難であるような検査対象、あるいは一枚の画像のみでは欠陥か否かの判定が下しにくい検査対象に対して有効と考えられる。

本稿では、今回対象として取り扱うゴム製部品の検査項目と多重画像について2節で述べ、3節で問題の定式化を行い、4節で最小2乗法による解法を説明する。5節で実験結果を示し、6節で結論と今後の課題を述べる。

2 画像の入力

2.1 検査対象と検査項目

本研究における検査対象として、電子部品の一つ導電ゴムを取り上げる。導電ゴムはテレビのリモコンや電子手帳、携帯電話などに用いられているゴム製のパッドである(図1参照)。現在、最終検査は人間による目視で行われているが、不良率が20%程度あり、自動化 / 省力化に対する期待は大きい。

導電ゴムでは図1に示すように、黒っぽい各円領域の導電性物質の接着状況を検査しなければならない。具体的な検査項目は各円領域に存在する表面欠陥であって、

- はがれ、ずれ
- つぶれ、かぶり
- 線状キズ、クラック(サイズのには幅数百 μ)

である。撮影した画像データから、周囲と比べてずれやつぶれなどの欠陥は白くうつることが経験的に分かっている。本研究では、この導電ゴムのはがれやつぶれなどの欠陥(面的な広がりを有するもので線状キズは除く)を扱うこととし、それらを検出することを目標とする。

2.2 多重画像の取得

画像入力装置の概略図を図2に示す。図2に示す入力系において、カメラと試料台の位置関係を保持しつつ、照明光源の方向、つまりサンプルの表面法線と照明方向とのなす角(入射角: i)を 0° から 40° まで 5° 刻みでふりながら、サンプルの画像を撮影した。こうして、カメラ方向一定で照明方向の異なる多重画像が得られる。また、照明光の強度変動に対する挙動を調べるために、光源の強度調整つまみ(I_S と表記する)を5, 7, 10の3通りに変えて、同様に画像を撮影した。上記の場合について、入射角が 0° の際、試料台上の法線照度を

照度計で直接計測したところ、値はそれぞれ 12900, 22600, 33000(lx) であった。

3 多重画像を用いた光学モデルに基づく表面反射特性の推定

3.1 本研究の前提条件

導電ゴムのはがれなどの面的な広がりを持つ欠陥を検出するという前節での問題設定に対して、以下のような条件や仮定のもとで定式化を行った。

- 1) 光源方向およびカメラ方向は既知である。
- 2) 用いる光源を点光源としてモデル化する。
- 3) 対象物表面の反射特性は完全拡散反射ではなく、反射率分布も一様ではない。

従って、対象物が一般的な3次元形状の場合、画像上のある観測点(エリアセンサ面上の一点)における反射光強度は表面の照明光強度や反射率などを用いて、次式で表現される。

$$L_k(\mathbf{x}) = r(\mathbf{p}(\mathbf{x})) \cdot I_k(d(\mathbf{p}(\mathbf{x}))) \cdot f(\mathbf{n}, \mathbf{l}_k, \mathbf{v}) \quad (1)$$

- \mathbf{x} : 画像上の観測点を表す2次元座標
- $L_k(\mathbf{x})$: \mathbf{x} において観測される反射光の強度
- k : 異なる光源方向を表す添字
 $k = 1, \dots, K$ (K : サンプルについて撮影する画像の枚数)
- $\mathbf{p}(\mathbf{x})$: \mathbf{x} に対応する物体表面上の点の3次元座標
- $r(\mathbf{p}(\mathbf{x}))$: $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ における反射率
- $I_k(d(\mathbf{p}(\mathbf{x})))$: $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ における照明光の強度
- $d(\mathbf{p}(\mathbf{x}))$: 光源から $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ までの距離
- $f(\mathbf{n}, \mathbf{l}_k, \mathbf{v})$: $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ における反射特性

3.2 表面反射の光学モデル

本研究では、物体表面の反射特性を表現する光学モデルとして、完全拡散反射成分と正反射成分を同時に表現可能な Phong のモデルを採用する。この場合、検査物表面上の点 $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ における反射特性 f は、この点における物体表面の法線方向ベクトル \mathbf{n} 、光源方向ベクトル \mathbf{l}_k 、センサ方向ベクトル \mathbf{v} を用いて、次のようにかける。

$$f(\mathbf{n}, \mathbf{l}_k, \mathbf{v}) = (1 - s(\mathbf{p}(\mathbf{x}))) \cos \psi(\mathbf{l}_k, \mathbf{n}) + s(\mathbf{p}(\mathbf{x})) \cos^\lambda(\mathbf{p}(\mathbf{x})) \phi(\mathbf{l}'_k, \mathbf{v}) \quad (2)$$

- $\mathbf{l}'_k(\mathbf{n}, \mathbf{l}_k, \mathbf{v})$: 表面法線 \mathbf{n} に対する \mathbf{l}_k の正反射方向ベクトル
- $\psi(\mathbf{l}_k, \mathbf{n})$: \mathbf{l}_k と \mathbf{n} のなす角
- $\phi(\mathbf{l}'_k, \mathbf{v})$: \mathbf{l}'_k と \mathbf{v} のなす角
- $s(\mathbf{p}(\mathbf{x}))$: 完全拡散反射成分と正反射成分の比 ($0 \leq s \leq 1$)
- $\lambda(\mathbf{p}(\mathbf{x}))$: 正反射成分の鋭さを示すパラメータ

式(1)、(2)より、表面の反射率分布および反射特性を求めるためには表面の照明光強度、すなわち対象表面全体の3次元位置 $\forall \mathbf{x} \mathbf{p}(\mathbf{x})$ が分かっているなければならない。また、反射特性も対象物表面の3次元位置に依存して変化するため、結局反射率分布や反射特性と同時に絶対的な3次元位置を求める問題となり、一般的に解くのは難しい。しかしながら、本報告で扱う導電ゴムの場合、その検査面形状の平面性や個々の検査領域サイズに着目すれば、問題は以下に述べるように単純化される。

グローバルに見た導電ゴムの形状は平面的で、検査面は平面とみなせる。しかも一つの検査領域(直径3~5mmの円内部)に着目すれば、その面積は比較的小さいので、表面上の位置 $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ によらず \mathbf{n} 及び \mathbf{v} は一定とみなせる。従って、 \mathbf{n} と \mathbf{l}_k 、 \mathbf{v} によって計算される \mathbf{l}'_k も k によってのみ決まり、

$$\cos \psi(\mathbf{l}_k, \mathbf{n}) = A_k, \quad \cos \phi(\mathbf{l}'_k, \mathbf{v}) = B_k \quad (\text{const.})$$

とおける。また、一つの検査領域内では表面上の位置の違いによる照明強度のバラツキも無視できて

$$I_k(d(\mathbf{p}(\mathbf{x}))) \simeq I_k \quad (\text{const.})$$

となる。以上まとめると、式(1)は

$$L_k(\mathbf{x}) = I_k \cdot r(\mathbf{p}(\mathbf{x})) \left\{ (1 - s(\mathbf{p}(\mathbf{x}))) A_k + s(\mathbf{p}(\mathbf{x})) B_k^\lambda(\mathbf{p}(\mathbf{x})) \right\} \quad (3)$$

となり、問題は与えられた(既知の) $L_k(\mathbf{x})$ 、 A_k 、 B_k からの未知パラメータ I_k 、 r 、 s 、 λ の推定に帰着される。

ところで、 \mathbf{x} において実際に観測されるのは、CCDに入射する反射光強度そのものではなく光電変換・デジタル化された256階調の濃度値である。そこで、濃度値が観測光強度の線形変換によって、次式

$$P_k(\mathbf{x}) = a L_k(\mathbf{x}) + \delta \quad (4)$$

で表されるものとする。よって、式(3)、(4)より

$$P_k(\mathbf{x}) = a I_k \cdot r(\mathbf{p}(\mathbf{x})) \left\{ (1 - s(\mathbf{p}(\mathbf{x}))) A_k \right.$$

$$+ s(\mathbf{p}(\mathbf{x}))B_k^\lambda \left. \vphantom{+ s(\mathbf{p}(\mathbf{x}))B_k^\lambda} \right\} + \delta \quad (5)$$

となる。ここで、 $P_k(\mathbf{x})$ は点 \mathbf{x} における濃度値、 α, δ は光電変換のパラメータである。これらは、多重画像取得時の入力系において反射特性既知の標準拡散板を撮影した画像データより事前に推定しておく。標準拡散板表面は完全拡散反射として問題ないので、式(2)の反射特性 f はカメラ方向 \mathbf{v} には無関係となり、式(5)は

$$P_k = \alpha I_k \cdot \cos i + \delta \quad (6)$$

となる。既知の濃度値 P_k 、入射角 i および上記画像データから上式を用いて、線形最小2乗法を適用して未知パラメータ $\alpha I_k, \delta$ を求める。

なお、式(5)の $r(\mathbf{p}(\mathbf{x}))$ 、 $s(\mathbf{p}(\mathbf{x}))$ 、 $\lambda(\mathbf{p}(\mathbf{x}))$ をそれぞれ、 $r(\mathbf{x})$ 、 $s(\mathbf{x})$ 、 $\lambda(\mathbf{x})$ とみなし、以下の処理を各観測点 \mathbf{x} において行う。また、引数の \mathbf{x} は省略して、例えば $r(\mathbf{x})$ を単に r と記す。

4 反射特性の推定による表面検査アルゴリズム

4.1 最小2乗法による反射モデルのパラメータ推定

前出の B_k (正反射方向とカメラ方向のなす角の余弦)は、光源をふる角度 i が小さい範囲内では、 $B_k \approx 1$ である。 $B_k \equiv 1 - \Delta_k$ とおくと、 $\Delta_k \ll 1$ より

$$B_k^\lambda = (1 - \Delta_k)^\lambda \approx 1 - \lambda \Delta_k + \frac{\lambda(\lambda - 1)}{2} \Delta_k^2 \quad (7)$$

が成り立つ。この近似式を用いれば、

$$B_k^\lambda - A_k = 1 - A_k - \left(\Delta_k + \frac{\Delta_k^2}{2} \right) \lambda + \frac{\Delta_k^2}{2} \lambda^2$$

であるから、式(5)を用いて結局

$$\begin{aligned} & \frac{P_k - \delta}{\alpha I_k \cdot r} \\ &= A_k + (B_k^\lambda - A_k)s \\ &= A_k + (1 - A_k)s - \left(\Delta_k + \frac{\Delta_k^2}{2} \right) \lambda s + \frac{\Delta_k^2}{2} \lambda^2 s \end{aligned}$$

となる。上式を変形して

$$\begin{aligned} & \frac{P_k - \delta}{\alpha I_k} \cdot \frac{1}{r} + \left(\Delta_k + \frac{\Delta_k^2}{2} \right) s \cdot \lambda - \frac{\Delta_k^2}{2} s \cdot \lambda^2 \\ &= A_k + (1 - A_k)s \quad (k = 1, \dots, K) \quad (8) \end{aligned}$$

となる。特に、 $B_k \approx 1$ が成り立つ場合は、近似式(7)の Δ_k の2乗項を無視できるので、

$$\frac{P_k - \delta}{\alpha I_k} \cdot \frac{1}{r} + \Delta_k s \cdot \lambda = A_k + (1 - A_k)s \quad (k = 1, \dots, K) \quad (9)$$

としてよい。この式(9)で、いま s をある値 \hat{s} に固定した場合、 $1/r$ の係数は光源方向によって決まる定数であり、 λ の係数と右辺は光源方向と \hat{s} によって決まる定数だから、次の2乗誤差関数

$$\begin{aligned} E(r, \hat{s}, \lambda) &= \sum_{k=1}^K \left\{ \text{式(9)の左辺} - \text{式(9)の右辺} \right\}^2 \quad (10) \\ &= \left\{ \frac{P_k - \delta}{\alpha I_k} \cdot \frac{1}{r} + \Delta_k \hat{s} \cdot \lambda - A_k - (1 - A_k) \hat{s} \right\}^2 \end{aligned}$$

を最小にするパラメータの組 $(\hat{r}, \hat{\lambda})$ は理論的に計算できる。よって、パラメータ s をそのとり得る値の範囲全体($0 \leq s \leq 1$)でふれば、誤差関数 E を最小にするパラメータの組 (r, s, λ) を数値計算で求めることができる。ここで推定した反射率 r が正常部と欠陥部で異なることを表面検査の良否判定に用いる。

4.2 モザイク化

これまで画像上の観測点 \mathbf{x} について論じてきたが、上述のように各画素単位で処理を行うことは、ノイズの影響を受けやすく結果がばらつき易いこと、そして計算量の観点からもあまり望ましいとは言えない。そこで、対象画像をいくつかの矩形領域に分割し、その領域では反射率などのパラメータは一定とし、その領域における観測値(濃度値)としては当該領域に属する濃度値の平均を用いる。このように画像を複数の矩形ブロックに分割し、各ブロックにおいて処理を行う(モザイク化[4])ことで速度向上を図り、安定的な解を求める。

5 実験

5.1 処理結果

3枚の導電ゴムから良のビル10箇所と不良のビル4箇所の計14箇所をサンプルとして選び出し、2.2節で述べた方法で入力画像を取得し、ビルに外接する矩形エリアの部分画像を切り出した。画像のサイズは110×105(画素)である。ビル1箇所の大きさは直径約4.5mmの円となっている。不

良サンプルの検出すべき欠陥は4箇所ともすべて、ある程度の面的な広がりを持つ欠陥(はがれ, つぶれ, かぶり)である。

おのおののサンプルについて, 照明方向を変えて撮影して得られた多重画像(9枚の画像)のうち, 入射角が $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ の場合の5枚の画像を用いて反射率 r を推定した。例として不良サンプル4箇所についての処理結果を図3, 4, 5, 6にそれぞれ示す。ただし, モザイク化のブロックサイズは 10×10 (画素)とした。これらの図において, 上段が検査対象の表面照度 $12900[\text{lx}]$, 中段が $22600[\text{lx}]$, 下段が $33000[\text{lx}]$ の場合である。左側は推定に用いた多重画像であり, 左から順に $i = 0^\circ, 10^\circ, \dots, 40^\circ$ となっており, 右側の画像は反射率 $r = 1$ を256階調の255として, 推定した反射率の分布を濃淡表示したものである。さらに, 各不良サンプルについて, 反射率の1) 正常部の平均値(α), 2) 欠陥部の最大値(β), 3) 比($\frac{\beta - \alpha}{\beta}$)の値をそれぞれ計算した結果を表1, 2にそれぞれ示す。ただし, 各対象ブロックが正常部か欠陥部かの判断は筆者が行った。

また, 図4のサンプルについて, 得られた濃度分布と反射率分布を立体的に表示した(図7, 9参照)。ただし, 各図上段に示した濃度分布は入射角が 40° の画像である。この不良サンプルは円領域の中央やや左に小さいはがれ欠陥が存在するが, このように濃度分布だけでは困難な例の場合でも, 欠陥部は正常部に比べて反射率が高くなっており, 適切なしきい値を設定して良/不良の判定が可能であるといえる。表1, 2の右端 $\frac{\beta - \alpha}{\beta}$ は正常部と欠陥部との反射率の差を欠陥部の最大値 β で正規化した数量であり, その値はしきい値の設定し易さの尺度となりうる。この欄を見れば分かるように, 図6のサンプル(かぶり)を除けば, その差異は欠陥部の信号成分の約4, 5割程度であり, しきい値設定の-marginも確保できる。かぶりの欠陥について, 両者の有意な差が得られなかった原因としては, それが他のはがれやつぶれと異なり, 黒い異物が付着したような欠陥であり, それらと性質的な差異があることが考えられる。

さらに表1, 2から, 表面照度が異なる場合でも, 正常部の反射率 α はほぼ同じ値となっている。従って, 本手法は照明光の強度変動に追従可能といえる。

表 1: 反射率の比較 (表面照度 $12900[\text{lx}]$)

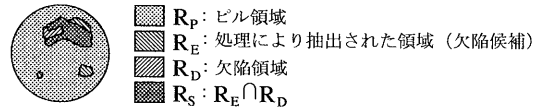
欠陥の種類	正常部の平均値 α	欠陥部の最大値 β	$(\beta - \alpha)/\beta$
はがれ大	0.26568	0.58734	0.54766
はがれ小	0.28080	0.45208	0.37886
三日月状のつぶれ	0.26949	0.56899	0.52638
かぶり	0.26568	0.30449	0.12743

表 2: 反射率の比較 (表面照度 $22600[\text{lx}]$)

欠陥の種類	正常部の平均値 α	欠陥部の最大値 β	$(\beta - \alpha)/\beta$
はがれ大	0.28116	0.66123	0.57479
はがれ小	0.29760	0.51013	0.41661
三日月状のつぶれ	0.27940	0.64128	0.56430
かぶり	0.27546	0.32348	0.14845

5.2 単純2値化手法との比較

欠陥の検出能力や安定性に関して, 従来の単純2値化手法と提案手法の性能比較・評価を行う。評価尺度として, 次に定義する見落とし確率と拾いすぎ確率を用いる[5]。ここで, 例えば, R_P はピル領域の面積(エリアに含まれる画素数)を表す。



- 見落とし確率 $P r^N = 1 - \frac{R_E}{R_D}$
- 拾いすぎ確率 $P r^P = \frac{R_E - R_S}{R_P - R_D}$

評価実験の概要

(入力画像) 入射角が $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ の各画像(強度調整つまみは7, 表面照度 $22600[\text{lx}]$)

(2値化手法) 1ブロック(5×5 画素)を単位として, その平均値を当該ブロックの濃度とするモザイク処理を行い, 濃度分布が0から255になるよう線形変換する。

(提案手法) 多重画像(上記5枚の画像)を用いて, 各ブロック毎に反射率を推定し, 反射率の分布が

0 から 255 になるよう線形変換する。

(評価) 各々得られたモザイク画像および反射率分布画像に関して、しきい値を変えて、その都度見落とし確率と拾いすぎ確率を計算する。その変化を調べて ROC 曲線を描く。例として、はがれ小サンプルの結果を図 8 に示す。この図では、拾いすぎ確率、見落とし確率共にその値の範囲が 0 から 0.3 までの部分のみを拡大表示している。ただし、欠陥の範囲は筆者が判定して与えた。

この実験結果で、提案手法の ROC 曲線に着目すると、判定しきい値を上げていくと見落とし確率が 1 から急激に減少し 0 に近づく。さらに上げていくとその後は、見落とし確率は横ばいか僅かながら減少し、逆に拾いすぎ確率が 0.1, 0.2 と次第に増加する。このように、拾いすぎ確率がほとんど増加せずに見落とし確率のみが減少する曲線は、判定しきい値の設定が比較的容易で、安定的に欠陥検出が行えるため、検査の観点からも望ましい。

また、提案手法の ROC 曲線は左上隅の原点に最も近づくカーブを描いており、このはがれ小の場合は他の 5 本の角度画像の曲線のうち 20° の曲線が追従するような形となっている。図 4 から分かるように、20° の画像は他の角度に比べてコントラストが良好で、単純な二値化手法でこのはがれ欠陥を検出できないことはない。しかしながら、一枚の画像を用いて検査する場合、どのような光学的配置で入力を行えばコントラストのとれた良質の画像を取得できるか、事前には分からずそれが問題となる。しかも、それは検査物の形状や欠陥の種類に依存するため、試行錯誤で絞り込む以外に有効な方策はない。よって、単一の画像を用いる二値化手法では、その角度選定が問題となるが、本手法ではその点を意識せずに、処理に用いる多重画像の中でも良質の画像による二値化を下回らない検出性能を容易に引き出すことが可能である。

6 むすび

以下に、本研究をまとめる。

- 異なる撮像条件下で撮影した多重画像から、ノイズや照明光の強度変動などの影響を受けにくい物体固有の反射率を推定して、その結果から良 / 不良の判定を行う検査の一手法を提案した。

2. ゴム製の電子部品に対して、Phong のモデルを用いて表面反射をモデル化し、最小 2 乗法によって反射率を推定するアルゴリズムを考案した。また、実画像を用いた実験により、照明光の強度変動に追従可能で、安定的に欠陥検出を行えるなど本手法の有効性を示す見通しを得た。

また、提案手法の問題点やそれを解決するにあたっての検討課題を以下に列挙する。

- 適用対象と光学モデルの選択
- モザイク化サイズと欠陥検出性能のトレードオフ
- 識別系の構築

謝辞

本研究を進めるにあたり、日頃よりご指導頂く酒井高志部長、ならびにグループの皆様へ感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 石井, 加藤, 他: 視覚検査に関する技術動向調査報告書, 精密工学会画像応用技術専門委員会, 1992.
- [2] T. S. Newman, "A Survey of Automated Visual Inspection," *Computer Vision and Image Understanding*, pp. 231-262, Vol. 61, No. 2, 1995.
- [3] B. Horn, "Obtaining shape from shading information", *The Psychology of Computer Vision*, P. H. Winston ed., pp. 115-155, 1975.
- [4] 和田, 浮田, 松山: イメージスキャナを用いた書籍表面の 3 次元形状復元 (II), *電子情報通信学会論文誌 D-II*, pp. 311-320, Vol. 78, No. 2, 1995.
- [5] 清水, 長谷川, 鳥脇: 胸部 X 線像の塊状陰影検出用の最小方向差分フィルタとその性質, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, pp. 241-249, Vol. 76, No. 2, 1993.

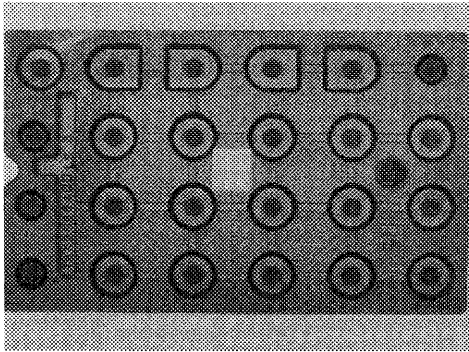


図 1: 導電ゴム

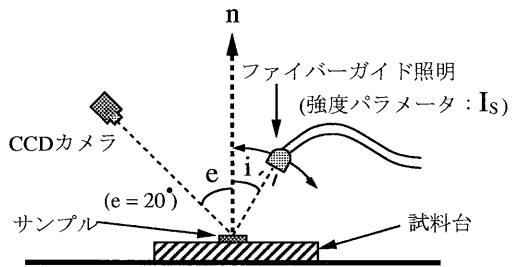


図 2: 画像入力装置の概略図

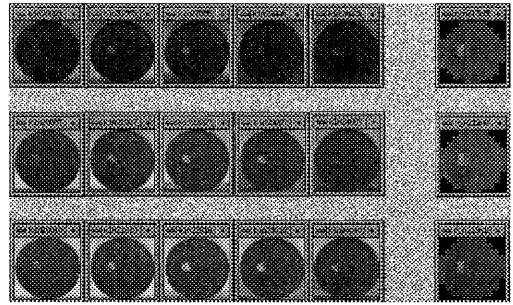


図 4: 多重画像と推定した反射率分布 (はがれ小)

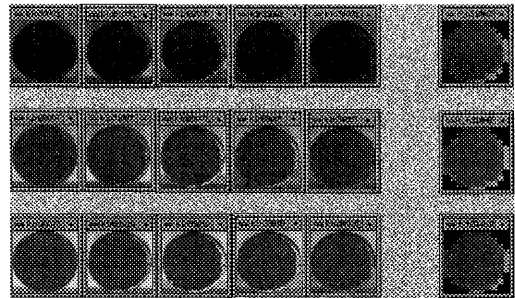


図 5: 多重画像と推定した反射率分布 (三日月状のはがれ)

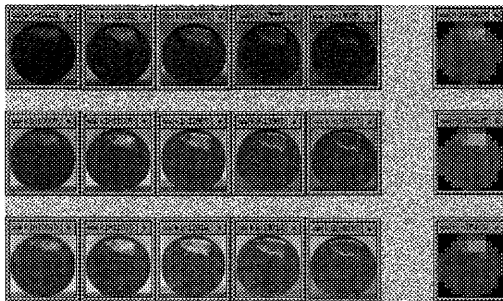


図 3: 多重画像と推定した反射率分布 (はがれ大)

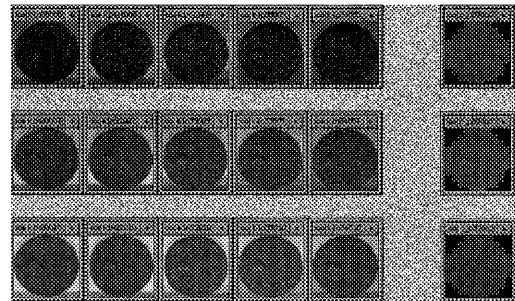


図 6: 多重画像と推定した反射率分布 (かぶり)

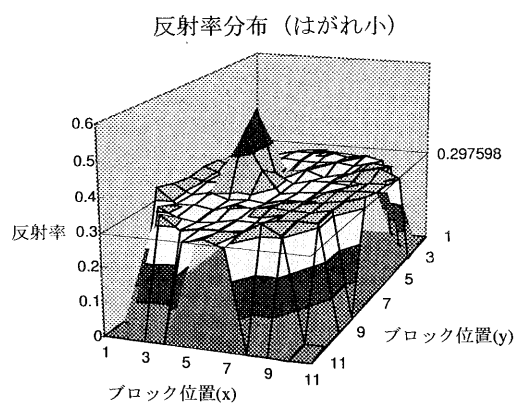
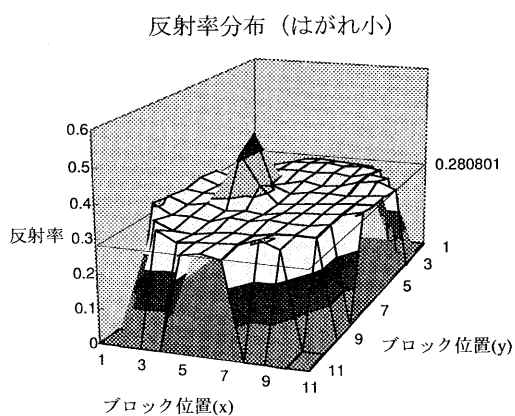
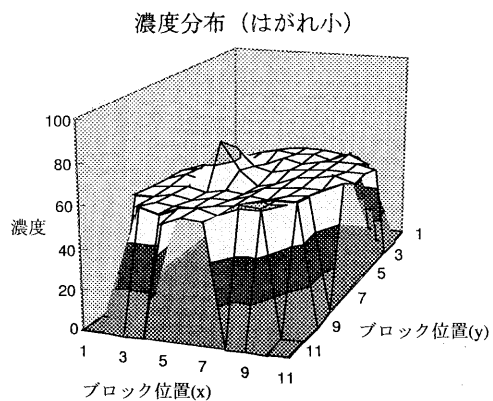
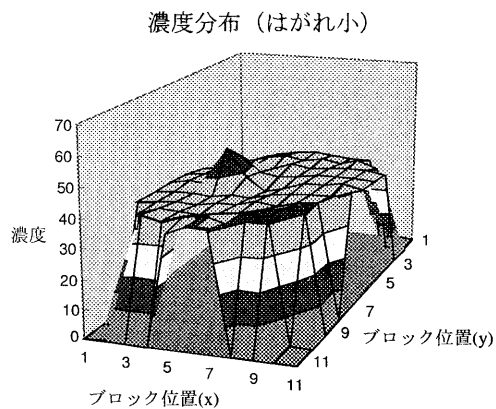


図 7: 濃度分布と反射率分布 (はがれ小, 表面照度 12900[lx])

図 9: 濃度分布と反射率分布 (はがれ小, 表面照度 22600[lx])

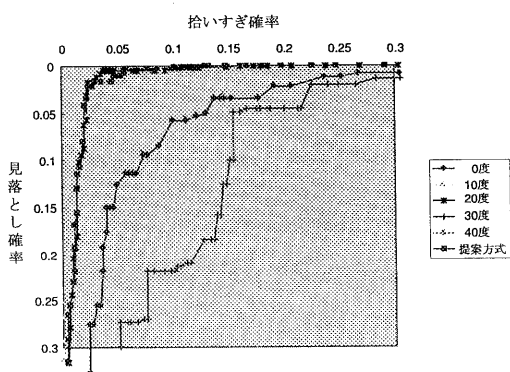


図 8: 信頼度曲線 (はがれ小, 表面照度 22600[lx])