

電気接点表面の三次元画像計測に関する基礎検討

A Fundamental Study on Three Dimensional Measurement of Contacts

○江原康生[†], 曾根秀昭[†], 根元義章[†], 高木相[‡]

○Yasuo EBARA[†], Hideaki SONE[†], Yoshiaki NEMOTO[†], Tasuku TAKAGI[‡]

[†] 東北大学大学院情報科学研究科, [‡] 日本大学工学部情報工学科

[†] Graduate School of Information Science Tohoku University,

[‡] College of Engineering Nihon University.

キーワード : 電気接点 (Electric Contact), 表面形状 (Surface Profile), 光切断像 (Light Section Image),
スリット光 (Slit Lay), 三次元表示 (Three Dimensional Visualization),

連絡先 : 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学 大学院情報科学研究科 根元研究室
江原康生, Tel.: (022)217-7140, Fax.: (022)263-9306, E-mail: eba@nemoto.ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

電気接点(コンタクト)表面は、開閉時に起こるアーク放電現象による発熱、軟化、溶融、蒸発などの現象の結果として、溶解痕や電極材料の消耗あるいは転移などにより変形が生じる。またこの変化は接触抵抗の増加を引き起こし、電気接点の性能劣化に大きな影響を与える¹⁾。

このことから、電気接点表面の形状変化を自動的に計測でき、かつ得られたデータから表面形状の変化(劣化など)の解析技術が要求される。また、電気接点表面の変化の定量的な解析を行うために、非接触、実時間で約10 μm の分解能で計測する技術が必要となる。

このような要求に対して、近年の三次元計測技術の進歩や光学機器、撮像素子、精密移動機構など機器類の開発が著しくなったことから、光学的手法による計測が盛んに検討されるようになり、

実現の可能性を与えてきた。

本稿では、光学的形状計測方法の代表例である光切断法を応用した計測装置を構成し、設計を行った。また、デジタル画像処理技術を適用して、計測装置で得たデータから電気接点表面形状の微小な変化の可視化する試みを行った。これらの概要と結果について報告する。

2. 電気接点表面の三次元画像計測方法

2.1 計測に求められる条件

電気接点表面の変化の計測には以下の条件が重要とされる。

- (1) 動作中の接点とその表面に影響を与えないように、外部から非接触で計測ができること
- (2) 10 μm オーダーで電気接点の三次元形状を定量的に計測できること

- (3) 電気接点の開閉動作に影響を与えないように、数秒以内で計測できること

これらの条件を満たすように、光切断法を応用した非接触かつ実時間で三次元形状を計測する装置が開発された²⁾。これにより、従来から実現できなかった動作毎の電気接点表面の形状変化を把握できるようになった。しかし、(2)の条件については、2.2で述べるような問題点がある。

2.2 光切断法による三次元画像計測

2.2.1 計測装置の構成

光切断法は試料(電気接点)に斜め方向からスリット光を照射する。この光が投影された線が光切断像であり、これを反対方向から観測して基準点との変位量を計測して、断面形状を得る方法である。投影するスリット光を表面全体にわたって走査しながら光切断像を記録することにより、表面形状を計測できる。

スリット光を $10\ \mu\text{m}$ 以下の幅に絞って対象表面に投影するために、ビームエキスパンダーでレーザー光の光束直径を拡大してからシリンドリカルレンズで一軸方向へ集光する。また接眼レンズ(10倍)と対物レンズ(2.5倍)で構成する顕微鏡を用いてビデオカメラで表面全体を撮影する。計測装置の概略を図1に示す。

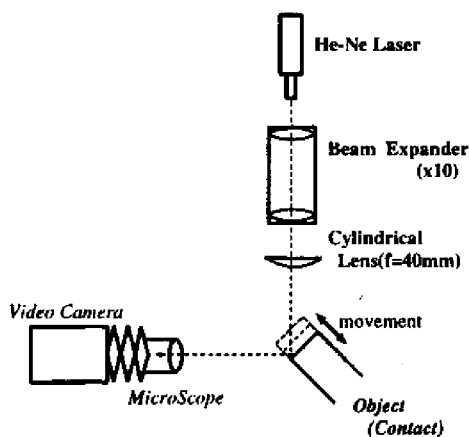


Fig. 1 計測装置の概略

2.2.2 計測上の課題

光切断法を応用する場合、計測時の光の広がりや乱反射による誤信号が光切断像に入り、表面形状の算出に誤差が生じる。ここでスリット光の細線化について検討する。まず、レンズ系の法則からスリット光の幅を導出する³⁾。光は必ず拡がり角 $\Delta\theta$ をもつ。光束直径 D 、波長を λ とすると回折理論から $\Delta\theta$ は式(1)で表される。

$$\Delta\theta = 2.44 \cdot \lambda / D \quad (1)$$

また、光束直径 D の光束を焦点距離 F のレンズで集光した時の、集束面における集束スポット直径(スリット光幅) R は式(2)で表される。

$$R = F \cdot \Delta\theta \quad (2)$$

式(1)、(2)より、スリット光幅 R は式(3)で表される。

$$R = 2.44 \cdot \lambda \cdot F / D \quad (3)$$

これらの式より、スリット光幅 R を小さくするためには、焦点距離 F の小さいレンズに光束直径 D の大きい光を入射させれば良いことがわかる。

しかし、図1に示すようにスリット光走査の際に対象面(電極)を移動させると、スリット光を投影するレンズと対象面の距離が変化して焦点ずれが生じ、スリット光幅が増加する。例えば、電極表面の中心に焦点に合わせると、表面の両端を走査する際に線幅が大きくなる。焦点ずれの影響をなるべく減らすためには、図2に示すように、光束直径 D を小さくして、焦点距離 F を大きくしなければならない。

以上のことから、焦点ずれの影響を抑えることとスリット光の細線化は相反する要求となる。スリット光(現在約 $10\ \mu\text{m}$)をこれ以上細くすることが困難である。

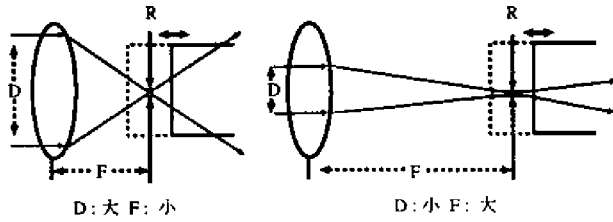


Fig. 2 スリット幅に対する焦点ずれの影響

この対策として、本装置では計測対象とレンズ間の焦点距離を一定に保つように、計測対象と投光部を同時に微小移動させる機構を設計した。構成については2.2.3項の移動機構系で述べる。これにより、表面全体の走査における焦点ずれの影響の改善を試みた。

一方、形状変化が顕著な場合は変化の度合いが明らかで評価しやすいが、通常の表面形状変化は微小であるため、光切断像の変化がスリット光の広がりにより埋もれ、溝や畝などの特徴を判別しにくい。これは、光の広がりによって像の位置の計測誤差が真実の変化に混入して、特徴の識別を非常に困難にしている。光の乱反射によるノイズを含めて、注目すべき変化部分におけるノイズも除去して、明確に可視化する方法の考案が要求される。そこで、現在様々な分野で応用されているデジタル画像処理手法を適用して、これら問題点の改善を行う。詳細は2.3で述べる。

2.2.3 移動機構系

移動機構系の概略を図3に示す。光切断像を取得するためにスリット光を試料表面上で自動的に微小移動させて走査させる。機構は直径1mmの電気接点を40 μ m間隔で25回移動させる。この走査のために、ステッピングモータを用いて微小移動を可能とした精密リニアステージを利用し、これを用いて、計測対象(電気接点)と投光部(シリンドリカルレンズ)を微小移動させる。この方式により、接点とレンズ間の焦点距離が毎回の走査において、一定に保つことができ、従来からの課題であった焦点ぼけの問題が生じない。

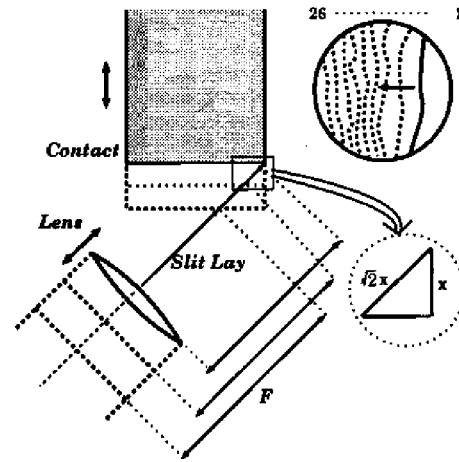


Fig. 3 移動機構系

2.3 三次元処理方法

2.3.1 光切断像の取得

一般的な画像処理では、時系列であるビデオ信号を画素ごとに標本化して数値に変換し、フレームメモリに蓄えた後で、それをコンピュータで数値計算処理する方法を採用していることが多い。しかしその方法では、処理回路も計算処理も複雑となる。本方式では、時系列アナログ信号のままビデオ信号を直接処理する方法を採用している。図4に示すように、画面上で光切断像が縦になるように撮影すると、切断像は各走査線と一回ずつ交差する。従って、この交差位置を全走査線について求めることにより、一本の切断像が得られる⁴⁾。この場合の交差位置とは走査線上の輝度ピークの水平位置である。この方法では、ビデオ信号を直接に処理するので画像処理して像を抽出するソフトウェアなどを必要とせず、回路とコンピュータを連携させることにより簡単に構成できる。

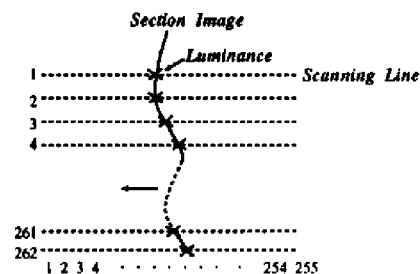


Fig. 4 光切断像取得原理

2.3.2 データ変換

一般の画像処理手法を適用するのに用いられる画像データは、等間隔で離散的な直交座標上における輝度値の二次元配列の構造を持つ。光切断法によって得られるデータには図4の×印で示すように、水平方向で等間隔に位置しないので、これらの手法を適用させるために、データを等間隔に変換する必要がある。輝度ピーク値の水平位置の値を a_{ij} (i, j は整数) とすると、図5のような位置関係を持つ。これにより、式(4)で表される i, j における位置 g_{ij} における表面の変位 h_{ij} が式(5)より求められる。さらに等間隔の $i\Delta x$ に対するコンタクトの変位 z_{ij} が、式(6)より求められる。これにより表面形状データは、 $i \times j$ の二次元配列に変換される。

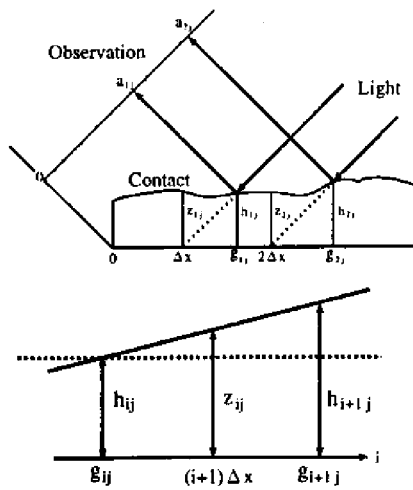


Fig. 5 データ変換

$$g_{ij} = \frac{\sqrt{2}a_{ij} + i\Delta x}{2} \quad (4)$$

$$h_{ij} = \frac{\sqrt{2}a_{ij} - i\Delta x}{2} \quad (5)$$

$$z_{ij} = h_{i+1,j} + \frac{(i\Delta x - g_{i+1,j})(h_{i+1,j} - h_{ij})}{g_{i+1,j} - g_{ij}} \quad (6)$$

2.3.3 処理方法

1. 非線形フィルタ

まず乱反射によって遠く離れた位置に光切断像が検出される誤信号を除去するために、注目点 s_{xy} に対して、

$$|s_{xy} - (\text{近隣8画素の平均値})| > (\text{閾値}) \quad (7)$$

を満たす場合は近隣より突出しているので、 s_{xy} を誤りとして8画素の平均値に置き換え、逆の場合は s_{xy} が滑らかな部分としてそのままにするという非線形フィルタをかける⁵⁾。このフィルタによって、誤った計測データを除去でき、なおかつ辺縁部は打ち消されない。

2. 動的に変化するフィルタ

図6に示すように注目点の前後2つの値および、上下2つの値について注目する。そこで隣り合う値で差分をとり、その値の正負を判別する。そして、その4つの正負の符号のパターンによって、変化が大きくなるころでは変化を保存し、変化が小さいところでは平滑化するというように、注目点にかけるフィルタを変化させる。符号のパターンとフィルタ係数の対応については図6に示す。これを縦、横で同様に行うので、合計9種類のフィルタを用いることになり、変化を残すべき点と誤差として除くべき点の区別がつくものと考えられるが、その効果については検討中である。

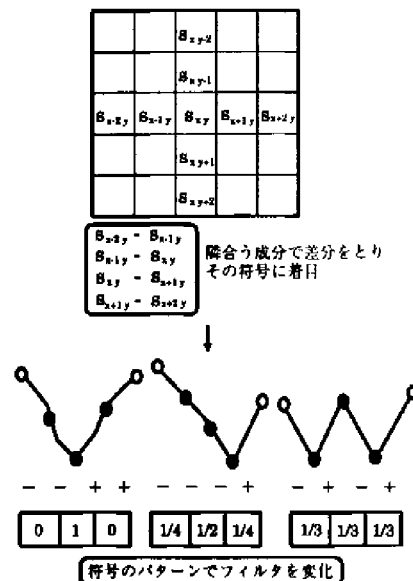
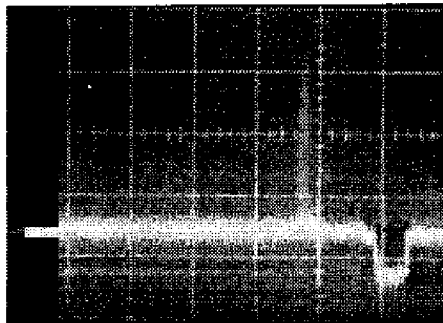


Fig. 6 フィルタの判別

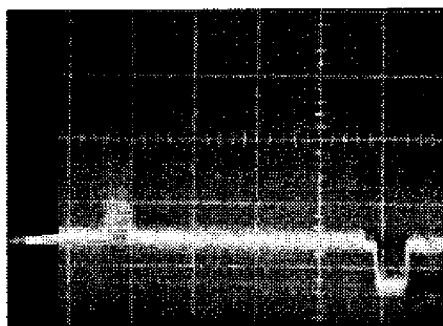
3. 評価および検討

3.1 スリット光の焦点

2.2.3で述べた計測対象とレンズ間の焦点距離を一定にする機構の効果について検討する。計測装置を動作させ、その際のビデオ信号出力をオシロスコープを用いて観測を行った。その結果を、図7に計測対象のみ移動させる従来の機構によるものを、図8が本機構によるものを示す。これより、対象表面の右端(時間波形で右端)で(a)の走査開始時はともに、波形は鋭くピークの位置が明確である。走査が進み、次第に図7(b)の方が波形に広がりが生じているのがわかる。これは、焦点が合わなくなりスリット光が太くなっていることを示している。この状態ではピークの位置を明確に検出できない。一方図8(b)では、変化が小さく全体的にピークが明確であることがわかる。これより、問題であった焦点ぼけが改善されたことがいえる。

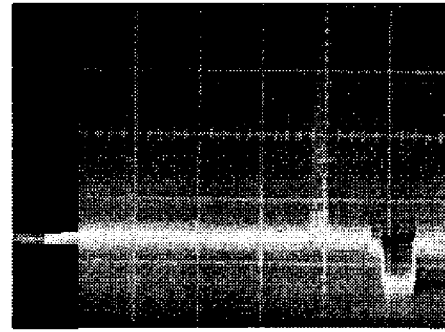


(a) 走査開始時

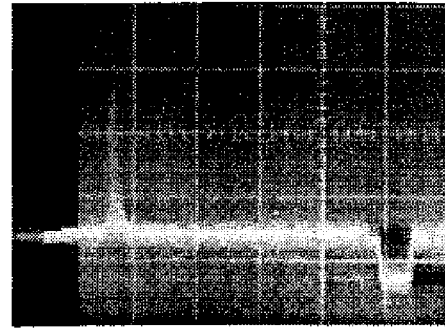


(b) 走査終了時

Fig. 7 ビデオ信号出力(従来機構)



(a) 走査開始時



(b) 走査終了時

Fig. 8 ビデオ信号出力(本機構)

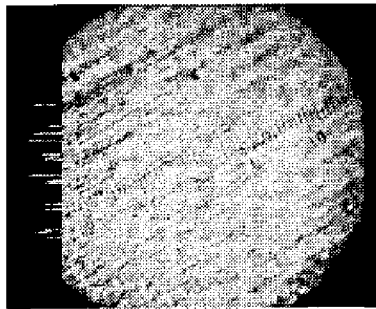
3.2 表面形状の三次元計測結果

本計測装置を用いて、電気接点表面の形状変化を計測し、そのデータを三次元表示を行った。電極材料はAgを用い、形状は直径1mmの軸対象型とする。表面の前処理として、2000番のエメリー紙で研磨を行い、アルコールおよび蒸留水で洗浄し自然乾燥させた。そして、接点の開閉動作試験(DC48V,5A,1000回)を行い、試験前後の接点表面形状を計測した。

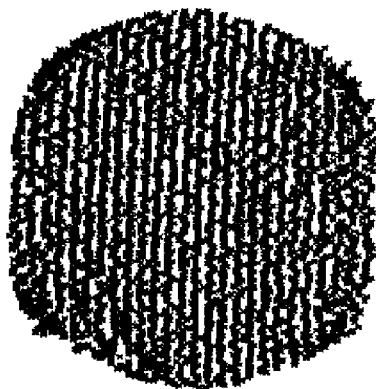
接点表面の顕微鏡写真、光切断像データおよび三次元表示した結果を動作試験前を図9(陽極)、図10(陰極)に、動作試験後を図11(陽極)、図12(陰極)にそれぞれ示す。

結果より、動作試験前の表面はエメリー紙による微小な粗さが存在するが、全体的に平坦である。そのため光切断像はゆらぎが小さく直線状になっている。三次元表示でも全体的に平坦であることが表れている。一方試験後では、陽極は表面に付

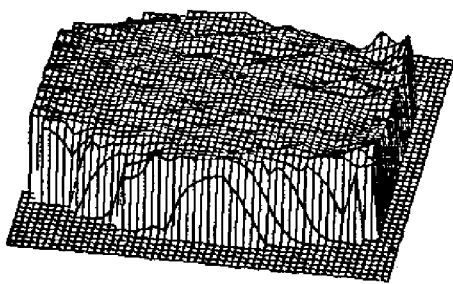
着した物質による変色が見られ、右下部では突起が生じているのがわかる。一方、陰極では下部で激しく消耗しているのが見られる。光切断像でもその部分で変動化が明確である。三次元表示では、陽極では写真にあったように右下部に突起が見られる。陰極も下部で消耗しているのが顕著に表れている。



(a) 接点表面の顕微鏡写真

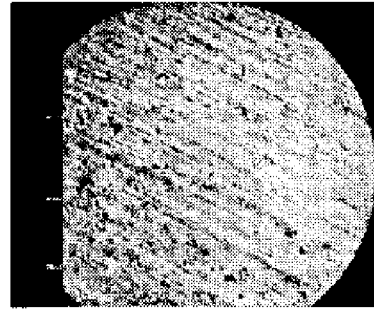


(b) 光切断像

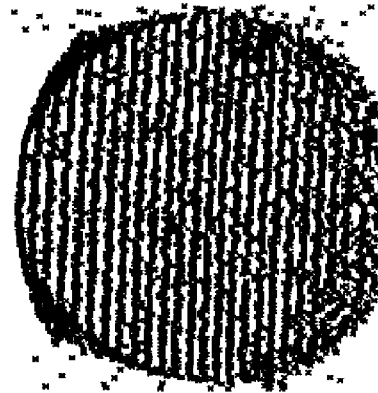


(c) 三次元表示

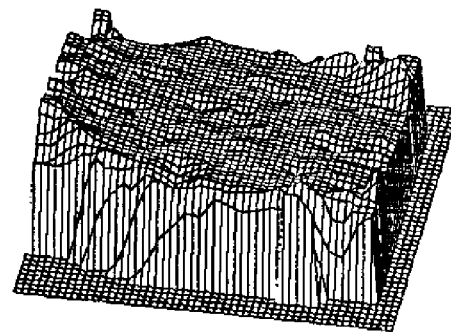
Fig. 9 陽極(動作試験前)



(a) 接点表面の顕微鏡写真

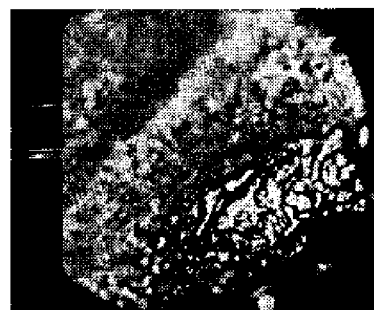


(b) 光切断像

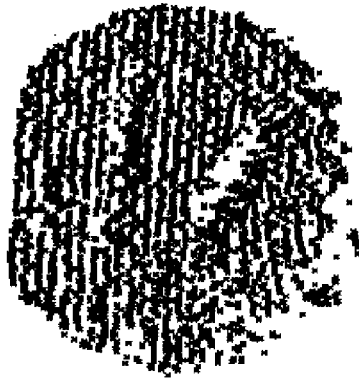


(c) 三次元表示

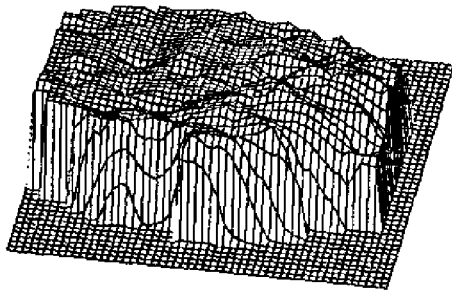
Fig. 10 陰極(動作試験前)



(a) 接点表面の顕微鏡写真

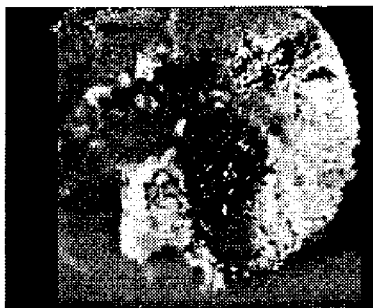


(b) 光切断像



(c) 三次元表示

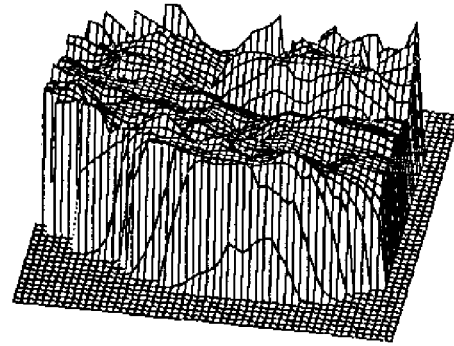
Fig. 11 陽極 (動作試験後)



(a) 接点表面の顕微鏡写真



(b) 光切断像



(c) 三次元表示

Fig. 12 陰極 (動作試験後)

3.3 検討

本装置により、開閉試験による電気接点表面の形状変化が明確に計測できることが確認できた。今後さらに定量的な評価を行うため、三次元形状が既知のテストパターンを用いて計測し、装置の計測精度について検討を行う必要がある。

4. おわりに

本稿では、光切断法を応用した計測装置を構成し、設計を行った。また、デジタル画像処理技術を適用して、計測装置で得たデータから電気接点表面形状の微小な変化の可視化を行った。その結果、以下のことが実現可能となった。

- 1) スリット光の走査の際に問題となる焦点ぼけについて、計測対象とレンズを同時に微小移動させて、焦点距離を一定にする構成を設計した。その結果、表面全体でスリット光幅が一定になることが確認された。
- 2) デジタル画像処理手法を適用して検討を行い、表面形状変化の可視化を行った。それにより、注目すべき形状変化を保ったまま計測のゆらぎを除去することができ、特徴の可視化が実現した。

今後は、本装置でテストパターンを用いた計測を行い、計測装置の精度について検討を行っていく。

今後は、本装置でテストパターンを用いた計測を行い、計測装置の精度について検討を行っていく。それによって、電気接点表面形状変化の定量的な解析の実現が期待される。

参考文献

- 1) 高木相 他:“電気接点のアーカ放電現象”, コロナ社 (1995.2).
- 2) 曾根秀昭:“コンタクトのアーカ放電現象実時間デジタル計測に関する研究”, 東北大学博士学位論文 (1992).
- 3) 末田哲夫:“光学部品の使い方と留意点” オプトロニクス社,(1987).
- 4) H.Sone,T.Takagi:“Recent development of testing system for arcing contacts”,IEICE Trans.,E-77-C,10 ,pp1545-1552(1994).
- 5) 長谷川伸:“画像工学”, 電子情報通信学会編、コロナ社 (1983).