

AOTFを用いた3次元形状計測システムの開発

電子部 仮屋一昭，永吉弘己，久保 敦*，佐藤公則**，荒木政親***

Development of the Range Finder Using AOTF

Kazuaki KARIYA, Hiromi NAGAYOSHI, Atsushi KUBO, Kiminori SATO and Masachika ARAKI

3次元形状計測と併せて計測対象物の表面情報を得ることのできる計測方法として，スペクトルパターンとAOTFを用いた3次元形状計測システムを検討し試作した。本計測方法は，スペクトルパターンを計測対象物に投射し，計測対象物からの反射光をAOTFで設定した波長ごとにフィルタリングし，CCDカメラで撮像した画像から計測対象物の3次元形状を計測する。また，白色光を計測対象物に投射し，計測対象物からの反射光をAOTFで設定した波長ごとにフィルタリングし，CCDカメラで撮像した画像から計測対象物の表面情報を得る計測方法である。実験の結果，3次元形状計測と併せて表面情報の取得が可能であった。

Keyword : AOTF, 分光画像, 3次元計測, レンジファインダ

1. 緒 言

高精度の機械加工部品において，加工時の精度は当然のことながら，加工終了後の製品検査も重要であり，欠かすことのできない工程の一つである。近年は製品の小型化が進み，組み込む加工部品等も小型化されているため，バリや表面空隙等の不良部が微細化し，目視検査では十分な検査結果が得られなくなりつつある。これに対応するためにセンサメーカー等では高精度な多種の検査・計測用センサを開発して市場に提供しており，生産現場等ではこれらのセンサを活用して生産管理を行っているところである。最近ではさらに製品の販売サイクルが短くなり，部品等の生産期間も短くなっている。このため，検査工程では，製造する製品の種類ごとに検査用センサの調整を行う必要が生じている。また，様々な製品検査に対応するため製造工程からセンサ等による自動的な検査を取り除き，あえて手で検査を行っている場合もある。

製造工程を流れる製品の種類の認識や形状の計測ができれば高精度の検査・計測用センサの計測位置の自動調整，センサ等の再配置を行うことが可能となる。また，形状計測と併せて表面情報による検査も行うことができれば，複雑な検査工程を簡素化できる。

画像計測による3次元形状計測方法は，種々の計測方法^{1)~8)}が提案されており，計測対象物に対応した計測方法を選択することで計測が行える状況にある。ところが，3次元形状と併せて計測対象物の表面情報(例えば表面の色，傷，付着物等)を得たい場合は，すでに提案された多くの計測方法が，3次元形状計測に限定した計測方法であるため，別途に表面情報測定装置を用意する必要がある。この

ため，3次元形状と併せて計測対象物の表面情報を得ることのできる計測方法として，スペクトルパターンとAOTF(Acousto Optic Tunable Filter :Brimrose社製)を用いた3次元形状計測システムを検討し試作した。

2. 従来の画像処理技術を用いた3次元形状計測方法
画像処理技術を用いた3次元形状計測方法は，図1のよ

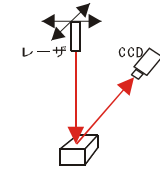
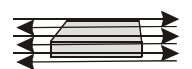
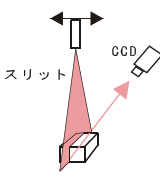



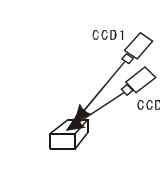
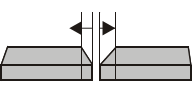
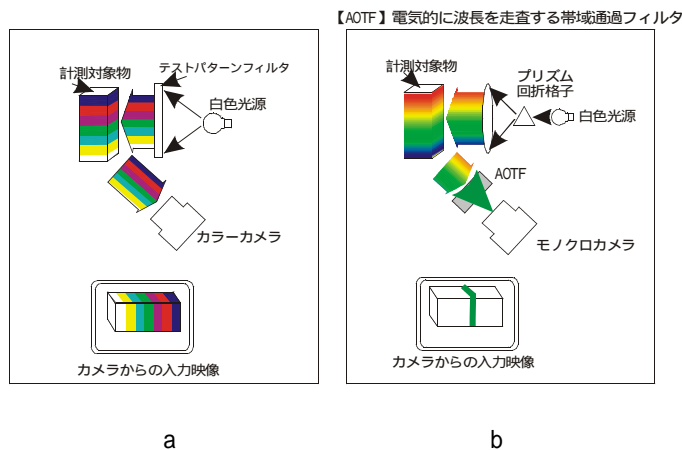
計測方法	検出系の基本構成	画像・処理方法
レーザー		
スリット		
色相		
ステレオ		

図1 従来からの計測方法

*工業振興課，**鹿児島大学工学部，*** (株) 測上マイクロ

うにレーザを用いた計測方法、スリットを用いた計測方法、色相を用いた計測方法、及びステレオ計測の4つに大別できる。この中で、スリット、色相の各計測方法は、レーザを用いた計測方法を発展させた計測方法である。また、ステレオ計測には、人間の目と同じように2個のカメラで撮像した画像から距離を計測する方法や、画像からピントの合った部位を検出して計測する方法等がある。一般に、計測時間は図1の上位から下位に行くほど速く、計測精度は上位ほど高い。レーザを用いた計測方法は、早くから計測に利用されており、現在では、変位センサとして最も普及している計測方法である。新しく開発した3次元形状計測方法は、スリットを用いた計測方法と色相を用いた計測方法の特徴を併せ持った計測方法である。

図2はAOTFを用いた計測方法と類似した計測方法との比較である。図2aの色相を用いた計測方法は、計測対象物にテストパターンのような断続した色を投射し、テストパターンと異なる角度からカラーCCDカメラで撮像する。計測対象物の形状によりカラーパターンが変化するため、パターンの変化を計測することで形状計測を行う。特徴は、計測範囲を広くでき、計測速度が速いことである。計測は一般的に色の変化するラインで行う。カラーパターンの各色は幅を持つため、色の変化するライン上に計測したいポイントが無い場合は、機械的にパターンを移動させる必要がある。また、パターンの色幅を狭くするとカラーCCDカメラで色の変化に対応できず計測精度が悪くなる。図2bのAOTFを用いた計測方法は、回折格子などで分光した連続波長の光(スペクトルパターン)を投射し、AOTFを用い特定の波長のみを透過し、モノクロCCDカメラで計測する。撮像した画像は特定波長の画像(分光画像)のみとなり、色差を考慮しなくともラインの計測が可能であることと、連続した波長から任意の波長を計測できることが特徴である。



a: 色相を用いた計測方法, b: AOTFを用いた計測方法
図2 計測方法の比較

3. AOTFを用いた3次元形状計測システムの概要
システム概要を示した図3中央付近の回折格子に400nm~800nmの波長を含んだスリット光を投射し、回折格子によりスペクトルパターンを計測対象物に投射する。この状態をAOTFを通してCCDカメラで撮像し、計測対象物の3次元形状を計測する。AOTFは音響(振動)波がある結晶からなり、ラジオ周波数を与えると白色光あるいは多色光から単一波長のみを透過することのできる素子である。AOTFを任意の透過波長に設定することによりスペクトルパターンはCCDカメラでスリット状となり、三角測量法の原理を用いて算出し、計測対象物の3次元形状を得ることができる。

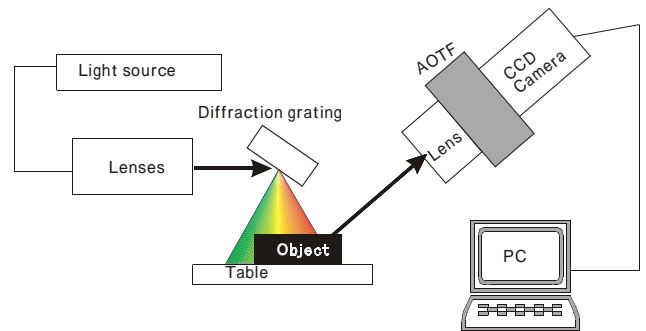


図3 システムの概要

AOTFを用いた3次元形状計測システムで使用したAOTFの透過特性を図4に示す。AOTFは、任意の波長を設定することにより、バンドパスフィルタとして使用できる。このことから、計測対象物に、スペクトルパターンの代わりに白色光を投射し、AOTFでフィルタリングすることで計測対象物の分光画像が得られ、同じシステムで3次元形状と併せて表面情報も得ることできる。

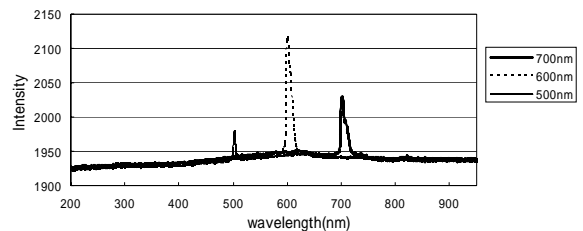


図4 波長500nm, 600nm, 700nmでのAOTFの透過特性

4. AOTFを用いた3次元形状計測システムの原理
図5に示される計測原理(模式図)において、白色光源からレンズを通り平行にされた白色光線が、回折格子により赤から青紫のスペクトル光に分光され、波長の分光された光は回折格子に対しての角度が与えられ空間に投射される。このとき、各波長は計測対象物体面P1, P2..に投影され、AOTFを透過しカメラに結像される。AOTFを任意の

透過波長に設定することにより、カメラで撮像される画像は、1本のラインとなり、見かけ上光切断法と同等になる。回折格子とレンズの間の距離をD、計測対象物体面上の点P1と撮像系間の距離をL、計測対象物体面上の点P1と回折格子との距離をMとすると(1)式と(2)式が得られる。

$$L \sin \theta = M \sin \alpha \quad (1)$$

$$L \cos \theta + M \cos \alpha = D \quad (2)$$

(1)式、(2)式からMを消去すると

$$L = \frac{\sin \alpha}{\sin(\theta + \alpha)} D \quad (3)$$

(3)式となり計測対象物体面までの距離Lが求められる。

また、計測対象物全体を計測するために、AOTFの透過波長とカメラの撮像タイミングの同期をとりながら、AOTFの透過する波長帯を連続的に変化させ、CCDカメラで撮像する。

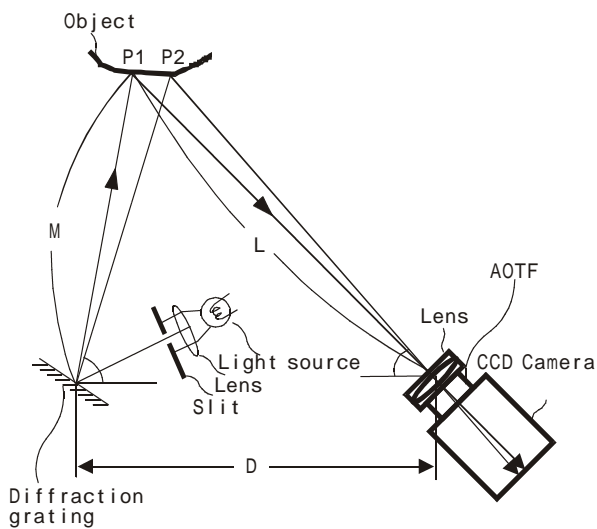


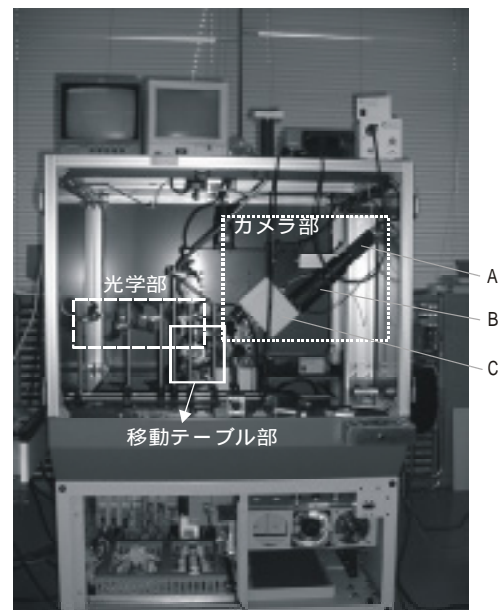
図5 計測原理(模式図)

5. 試作機と実験方法

図6にAOTFを用いた3次元形状計測システムの外観を示す。試作機は、光学部、カメラ部、移動テーブル部から構成されている。光学部では、光源から発せられる白色光を回折格子で分光し、移動テーブル部の計測対象物を乗せるテーブルに投射する。このときのテーブルは、スペクトルパターンが投射された状態である。カメラ部は、AOTF、光電子増倍管、CCDカメラで構成されている。

テーブルから反射されたスペクトルパターンをAOTFで特定の波長のみ(単一波長光)を透過する。透過された単一波長光は微弱光のため光電子増倍管で増幅し、CCDカメラで撮像する。得られた画像は、スリット状になっており、この画像を画像処理することによりテーブルに置いた計測対象物の3次元形状を得ることができる。移動テーブルは光学部、カメラ部の中間にあり、カメラ部で鮮明な画像が得られるように傾斜・回転機構を有している。

図7にカメラ部のブロック図を示す。AOTFを用いた計測方法は、AOTFを透過する波長ごとにCCDカメラで撮像する必要がある。このため、AOTFを透過する光の波長とCCDカメラで撮像した画像とを関連づけるために、AOTF制御装置とCCDカメラの制御装置とを同期させる回路を設置した。また、3次元形状計測と表面情報計測時では、光源が異なるためこの回路で光源の切り替えも行えるようになっている。



正面から撮影、A: CCDカメラ、B: 光電子増倍管、C: AOTF
図6 AOTFを用いた3次元形状計測システムの外観図

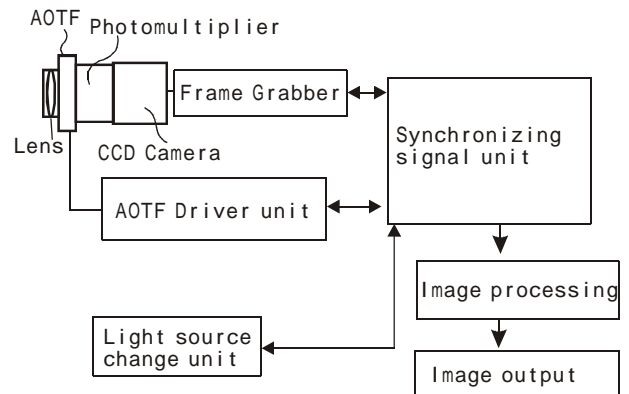


図7 カメラ部ブロック図

実験では、光源にハロゲン光を用い、光ファイバで光学部のレンズ群に導き、回折格子から投射されるスペクトルパターンを平行光にするためのレンズを介してテーブルに投射した。スペクトルパターンの波長は400nmから800nmを含む波長領域である。使用したAOTFの波長領域は400nmから750nmであるが、400nmから500nmの範囲では、光の透過率が低く、光電子増倍管を通して撮像した画像に多くのノイズ成分があり、鮮明な画像が得られなかった。このため500nmから700nmの波長領域を使用した。実験で使用した計

測対象物は、小型のアルミニウム製機械加工部品である。計測対象物全体を計測するために500nmから 3 nm間隔で順次AOTFの透過波長を変化させながら撮像した。

6. 試作機での計測結果

6.1 3次元計測結果

図8に計測対象物のない状態のスリット光、図9に計測対象物の計測時のスリット光の画像を示す。レーザスリット光を用いた光切断法などの計測方法では、レーザから投射されるスリット幅を十分狭くすることで、撮像されたスリットの幅を狭くすることが可能であり、このような計測法では、撮像した画像をある値で2値化し、抽出したライン中央の座標値を求め、計測ラインとすることが多い。一方、本計測方法ではAOTFを用いてスペクトルパターンをフィルタリングしてスリット化している。AOTFを含め多くのバンドパスフィルタは、図4のAOTFの透過特性に示すように、設定した透過波長に対して透過帯域幅があり、レーザスリット光のように、スリット幅を狭くするには、投射されたスペクトルパターンをレンズにより狭くする必要がある。

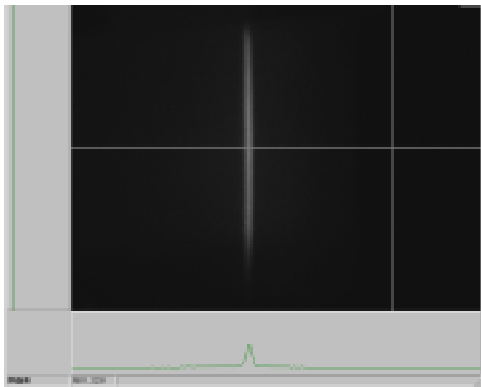


図8 撮像されたスリット光 (計測対象物のない状態)

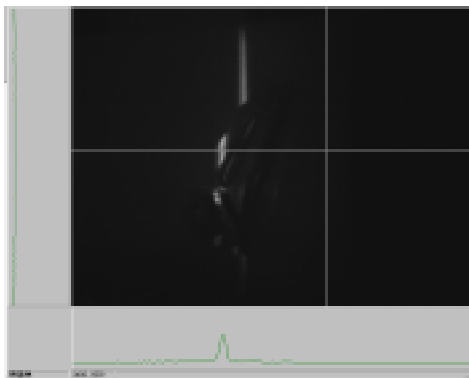


図9 撮像されたスリット光 (計測対象物のある状態)

しかし、この方法では計測できる範囲が狭くなる欠点がある。また、AOTFの透過率が波長により異なることから、撮像されたスリットの濃度値が波長によって異なり、2値化

のためのしきい値の設定が容易でない。このため、計測する波長と隣接する2波長との画像演算から計測ラインを求めることにより、前述の問題を改善した。計測するスリットを含む画像をimg1、隣接するスリットをimg0,img2とする。図10aは撮像されたスリット、図10bは図10aの隣接するスリットの画像を

$$f1(x,y)=(img0(x,y)-img2(x,y))+(img2(x,y)-img0(x,y))$$

濃度値は0以上 (4)

で求めた画像で、図10cは、

$$f(x,y)=img1(x,y)-f1(x,y)$$

濃度値は0以上 (5)

図10aから図10bを引いた画像である。

図10aでは、光電子増倍管でのノイズと被計測物での反射条件等の影響で、濃度最大値がスリット中央付近に無い場合があり、安定した計測結果が得られなかった。図10cでは、スリット幅が狭まることにより、濃度最大値の存在する範囲が狭まり、安定した計測結果が得られた。



a b c

a:撮像されたスリット,b:隣接する波長の2画像から求めた画像,c:画像演算結果

図10 スリット光

前述の方法により求めた各波長のスリットの座標値をもとに、AOTFを用いた3次元形状計測システムの原理で述べた(1)式、(2)式、(3)式を用いて3次元形状を求めることが可能である。しかし、計測システム内に実測して求めるいくつかのパラメータがあり、光学部、テーブル、カメラ部の位置を変更するたびに実測するのは、誤差要因の一つになり好ましくない。このため、試作機では、図11の方法により3次元計測を行った。

回折格子からテーブルに投射されるスペクトルパターンの特定の波長とテーブルとのなす角度を、カメラから

xp1を見たときの見かけ上の位置 X_1 でのカメラとテーブルとのなす角度を θ_1 とする。このときxp1の高さ Z_1 は、(6)

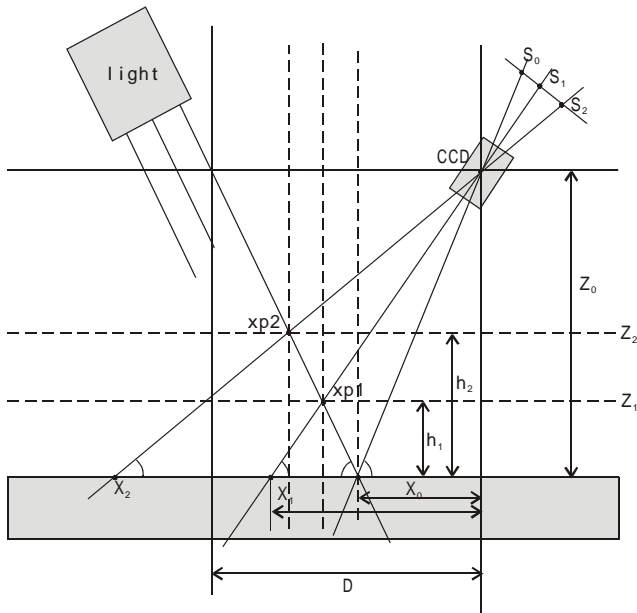


図11 試作機での計測方法

式で求められる。

$$Z_1 = \frac{\tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2 \cdot (X_1 - X_0)}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \quad (6)$$

高さが既知の基準物を複数用意し、計測することで、(7)式及び(8)式により角度 θ_1 及び角度 θ_2 を求めることができる。また、(9)式から角度 θ_1 は、波長により異なるものの、波長が決まれば一定である。

$$\tan \theta_1 = \frac{Z_0}{X_1} \quad (7)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{h_1 \cdot \tan \theta_1}{\tan \theta_1 \cdot (X_1 - X_0) - h_1} \quad (8)$$

カメラからテーブルまでの距離 Z_0 とカメラでの計測ポイント S_0 及び h_1 , h_2 , S_1 , S_2 の関係は、

$$Z_0 : S_0 = (Z_0 - h_2) : S_2 = (Z_0 - h_1) : S_1 \quad (9)$$

となり、カメラからテーブルまでの距離 Z_0 及び被計測物のない状態のカメラからの距離 X_0 は、(10)式及び(11)式で求まる。

$$Z_0 = \frac{h_1 \cdot S_2 - h_2 \cdot S_1}{S_2 - S_1} \quad (10)$$

$$X_0 = \frac{h_2 \cdot S_1 - h_1 \cdot S_2}{h_2 - h_1} \quad (11)$$

図12は、機械加工部品を試作機で計測したものである。計測に使用した波長は、500nmから700nmの可視光領域を用いた。機械加工部品全体の3次元形状を得るために、3nm間隔で計測し、前述した(6)式から(11)式を用いて算出した。計測時の計測精度は約140 μ mである。また、計測時間は約5秒であった。

図13は、電子部品の8ピンコネクタを計測したものである。計測時の設定等は図12と同じである。

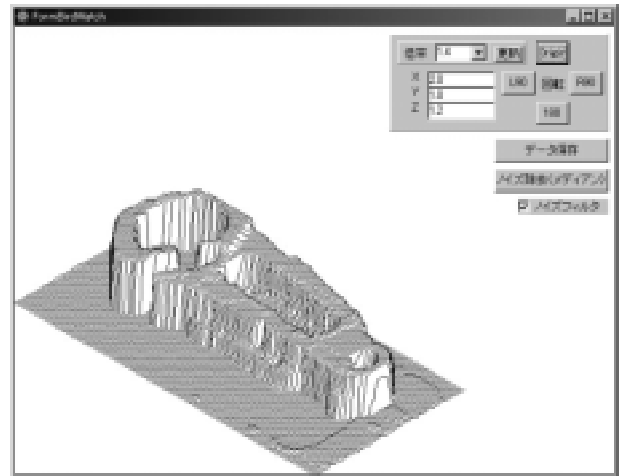


図12 計測結果(機械加工部品)

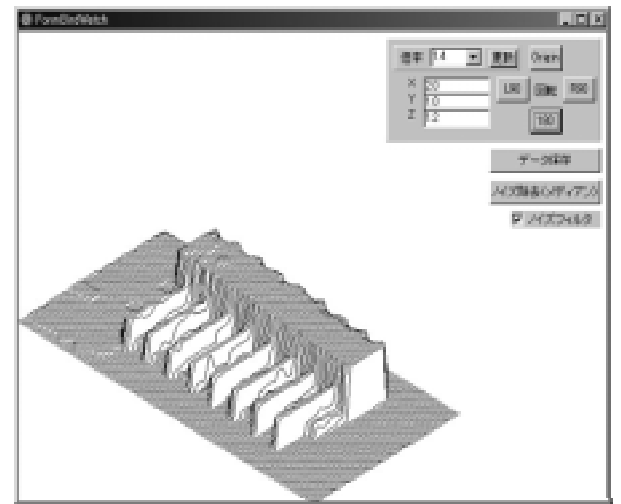


図13 計測結果(コネクタ)

6.2 表面情報の計測

AOTFは、白色光又は多色光から単一波長光のみを透過するバンドパスフィルタの一種である。試作機では図7に示すように、スペクトルパターンと白色光を切り替えるための装置が備わっており、スペクトルパターンの代わりに白色光を投射し、AOTFでフィルタリングすることで任意波長の分光画像を得ることが可能である。このことを利用して、被計測物の表面情報を得ることが可能である。また、表面色に影響されない計測も可能である。

図14は、赤色でデザインされた標識のある乾電池である。この乾電池に人為的に傷を付け、傷の確認が容易に行えるか実験した。

カラーCCDカメラ等で撮像した場合は、図14のように撮像され、この中から傷の検出を行うには様々な画像処理技術を駆使する必要がある。図15は、AOTFの透過波長を

700nmに設定し撮像したものである。電池の赤色の標識等は消え、乾電池中央部にある傷が容易に確認できた。その他、表面情報の表面の付着物、標識等の確認・検査等への利用も可能である。



図14 赤色の乾電池



図15 分光画像による傷の検出（波長700nm）

7. 結 言

AOTFを用いた3次元形状計測システムの検討及び試作過程において、光電子増倍管から発生するノイズが計測結果に悪影響を与える場合があったため、蓄積型の高感度CCDカメラを用いた方法の検討も行った。蓄積型のCCDカメラでは、光電子増倍管を用いて撮像した画像より鮮明な画像が得られ、計測精度が向上した。しかし、光電子増倍管を用いた場合より計測時間が長くなる（1回の計測に数分）ために試作機では光電子増倍管を使用することにした。

AOTFを用いた3次元形状計測システムの特徴をまとめると、

- (1) スペクトルパターンを投射しAOTFを介して分光画像を取得し、3次元形状を得る計測方法である。
- (2) 3次元形状の計測系の中に機械的な駆動部がなく、これに起因する誤差が生じない。
- (3) スペクトルパターンの代わりに白色光を投射することで表面情報も得ることができる。
- (4) 赤外領域の透過波長特性を持つAOTFに交換することで、赤外領域においての3次元形状計測、表面情報の取

得が可能であり多目的に利用可能である。

などである。また、問題点としては、

- (1) 波長ごとに撮像し画像処理を行うため、計測波長数に比例して計測時間が長くなる。
- (2) AOTFの透過波長帯域が狭いため、カメラの種類によっては撮像できない。

などがある。

AOTFを用いた計測方法は、まだまだ開発途上であるために、製造工程中で計測用センサ、検査用センサ等の位置決めに活用するためには、目的に対応したアプリケーションの開発が必要である。しかし、AOTFを用いた計測方法で計測した3次元形状計測結果から対象物の認識、様々なセンサの位置決めが行え、併せて表面情報を用いた外観検査にも活用できるものと考えられる。また、必要とされる計測精度によっては、計測用センサ、検査用センサ等で再計測を行わなくてもAOTFを用いた計測方法での計測結果から良品・不良品等の判断ができる可能性も十分あるものと考えられる。

本稿で述べた技術に、新たなアプリケーションやニーズを提示いただき、気軽に活用いただければ幸いである。

謝 辞

最後に、共同研究者の皆様、ご指導いただいた産業技術総合研究所 坂上勝彦氏、小見山耕司氏に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 尾上守夫：”画像処理ハンドブック”，昭晃堂(1987)
- 2) 江尻正員：”画像処理産業応用総覧【上下巻】”，フジテックノシステム(1994)
- 3) 上杉満昭：”イメージエンコーダを用いた三次元局面形状計測”，センサ技術，11，No9，(1991)
- 4) 田島穰二ら：”Rainbow Range Finderによる距離画像取得”，信学論(D-II)，J73-D-II，374(1990)
- 5) 渡部則生：”光学方式によるBGA，CSPパンプ高さ検査装置”，画像ラボ，9，78(1998)
- 6) 堤博貴ら：”2台のCCDカメラを用いた物体の3次元空間位置測定”精密工学会誌，64，1752(1998)
- 7) 山村久恵ら：”光学的3次元形状検出によるはんだ付自動外観検査技術”電気学会研究会資料，83(1996)
- 8) 石原満宏：”微小物体の高速立体形状計測”，第2回画像センシングシンポジウム講演論文集，155(1996)