## 論文

# 走查型共焦点方式三次元計測

日名子 達也 Tatsuya Hinago

## 1 はじめに

昨今,スマートフォンやタブレットPCなどに代表され るような小型・高性能なモバイル端末を所有することは 一般的となり,メガネや腕時計など身に付けて持ち歩く ウェアラブルコンピュータなども大きな話題となっている。 これら製品を含む多機能電子機器には必ず半導体部品 が組み込まれており,需要も年々増加している。

東光高岳では、半導体製造における検査工程向けの装置として、特にインラインに対応可能な高速性を有した三 次元計測装置の開発・販売をしており、半導体業界検査 工程の自動検査(例えばバンプ性の高さ検査)を実現してき た。三次元計測の代表的な手法として格子パターン投影 法、光切断法、三角測量法、光の干渉の性質を利用した 光干渉法、光の伝搬時間を利用したタイムオブフライト法 など様々な提案がなされているが、東光高岳の三次元計 測装置の計測原理には共焦点法を採用している。これは 他の計測手法と比較して、精度面や速度面、環境の違い に対する頑強性などが、半導体検査工程のニーズに適し ていると考えたためである。

共焦点による三次元計測技術の中でも,東光高岳独自 技術として非走査型共焦点方式三次元計測が大きな特 長として挙げられる<sup>(1)(2)</sup>。本稿では,東光高岳独自技術の "非走査型共焦点方式三次元計測"について説明し,それ をベースとして開発した"走査型共焦点方式三次元計測" の原理,及び三次元センサについて述べる。





共焦点光学系では、ピンホールから照射された照明光 が、対象物上で結像した場合にのみ高い強度の光が検出 器まで届くようになっており、検出された輝度値から深さ 方向の情報を取得することができる。

図2は、東光高岳の独自技術である非走査型共焦点方 式三次元計測の光学系(以下,非走査型共焦点撮像系) の構造である。共焦点光学系は原理としてピンホールによ る点の情報を取得することから、二次元情報を得るため には光軸に直交する方向への走査機構が必要となる。一 般にこの走査機構はレーザXY走査やNipkowディスク の回転による走査によって実現されている。一方で、非走 査型共焦点撮像系は、ピンホールを二次元的に配列した 光学素子(以下,ピンホールアレイ)を用い、かつ、検出器 として二次元エリアカメラを採用することで走査機構を設 けることなく高解像度の共焦点画像を取得できる構成と なっている。



図2 非走查型共焦点撮像系

図3は、1セントコインを非走査型共焦点撮像系にて撮像した共焦点画像の例である。それぞれの画像は焦点位置を変えて撮像している。各画像では、共焦点光学系の Optical Sectioning特性により、合焦位置のみが強い輝度値として記録され、等高線のように表われている。



図3 1セントコイン画像

この時,物体または光学系の光軸方向へのステージ移動により焦点位置を変化させ,最大輝度値となった時のステージ位置を画素毎に記録すれば物体表面の形状を求めることができる。しかし,計測分解能ピッチでステージを移動させるとすると,必要な共焦点画像は膨大な数になり,計測時間が著しく長大になってしまう。そこで,ステージの移動ピッチを計測分解能より大きい間隔にすることで必要な共焦点画像の枚数を減らし,補間法を用いることにより計測分解能を向上させる手法としている。このようにすることで画像入力と演算時間を大きく削減することができ,大幅な高速化が達成できる。補間法としては,例えば,定ピッチ $\Delta$ zでサンプリングされた値の大きい三点(I<sub>k-1</sub>, I<sub>k</sub>, I<sub>k+1</sub>)を対象としたガウス関数へのフィッティングによりピーク位置Z<sub>focus</sub>を高精度に推定する手法(式1)などが考えられる。

$$Z_{focus} = Z_k + \frac{(lnl_{k+1} - lnl_{k-1})}{(2lnl_k - lnl_{k+1} - lnl_{k-1})} \Delta z \qquad \cdot \cdot \cdot \exists 1$$

ガウス関数へのフィッティングの他にも,N次曲線への フィッティングや,サンプリング間隔が標本化定理を満たし ていると仮定した畳み込みによる復元法なども考えられ る。またステージ移動自体の高速化として,撮像毎に光路 中へ厚みの異なる平行平面ガラスを挿入することで光学 的に移動させることも考えられる。

## 3 非走査型共焦点方式三次元計測の限界

非走査型共焦点方式三次元計測によって,高解像度の 共焦点画像を取得できることを前章にて説明したが,その ためには二次元エリアカメラの画素配列に対して,ピン ホール配列が十分に高い空間周波数で配置されているこ とが前提条件となっている。図4の右側にはその前提条 件が崩れた状況(つまり,二次元エリアカメラの画素配 列がピンホール配列以上に高い場合)を示した。この状 況下では,図に示す通り,ピンホールスポットが当たらず に情報を有さない受光素子が生じていることが分かる。 つまり, 画素配列が非常に高い空間周波数で配置されて いたとしても, ピンホール配列を超えるような高い周波数 成分の情報は取得できないということである。



この問題を解決するためには、ピンホールを高い空間周 波数で配置し、より多くのピンホールスポットを確保すれ ば良いが、共焦点の効果を確保するためにはピンホール同 士の間隔を一定以上必要とするため、ピンホール配列の 空間周波数を高くすることが容易ではない。ここに非走査 型共焦点方式三次元計測の限界がある。それでも、非走 査型共焦点方式三次元計測を採用した三次元計測装置 が実現できたのは、これまで市場に流通してきた半導体 パッケージの集積度合に対して、非走査型共焦点方式三 次元計測で取得できる共焦点画像が十分に高解像であっ たためである。

しかし,半導体の集積度合はムーアの法則に従って年々 と高密度化・微細化が進んでおり,非走査型共焦点方式 三次元計測の限界を超える解像度を求められるように なってきた。また,同様に受光素子の多画素化・高速化も 発展してきたことで,高分解能な二次元エリアカメラを選 択することが可能になっている。そこで,解像度のボトル ネックになっているピンホールアレイによる解像度劣化の ブレイクスルーを求めて,東光高岳独自の走査型共焦点 方式三次元計測を開発することとした。

#### 4 走查型共焦点方式三次元計測

走査型共焦点方式三次元計測の光学系(以後,走査型 共焦点撮像系と称する)の基本構造を図5に示す。図2の 非走査型共焦点撮像系と対比すると,基本構成はほぼ同 じであるがピンホールアレイ部に一軸ステージが追加され ていることが分かる。元々XY走査を不要とするためにピ ンホールを平面に配列していたが,前章で述べたとおり更 に解像度を上げる必要があるため,一軸方向へピンホー ルアレイを走査する機構を用意した。



図5 走查型共焦点撮像系

図6にピンホールアレイと一軸ステージ機構のイメージ を示す。ピンホールは、XY平面上へ周期的に配列され、 特にステージの移動軸方向ヘピンホール配列が一定距離 の間隔で再現性を持たせるように配列されている。この一 定距離を二次元エリアカメラの一露光時間中に走査する ことで、非走査型共焦点方式三次元計測では取得できな かったピンホール間領域の情報も含めた共焦点画像を取 得することが可能となった。



図6 ピンホルアレイユニットイメージ

ピンホールを走査する手法としては、2章にて説明した Nipkowディスクの回転による走査も同様の技術ではあ るが、東光高岳の走査型共焦点方式と大きく違う点は、 走査ベクトルである。図7は両手法の、視野内の異なる座 標において一定時間に走査した距離を示したものである。 図から分かる通り、Nipkowディスクによる走査では回 転軸を用いるために、回転中心からの距離に応じた走 査ムラが生じてしまう。走査ムラを軽減させるため, ピン ホールの大きさや配列に特長を持たせた提案はこれまで にも多くされてきたが, 視野内全てを同じ条件で走査す ることは原理的に不可能である。視野の座標によって計 測条件が異なっていることは計測装置として好ましくな い。東光高岳の走査型共焦点方式では, 回転による走 査ではなく一軸ステージによる走査であるため, 視野内 全ての座標で同条件の走査が可能であり, 計測装置とし てより優れている。



ピンホール走査イメージ(左:Nipkowディスク,右:一軸ステージ)

図7 ピンホール走査イメージ(走査ムラの違い)

一方, デメリットも存在する。一軸ステージの場合は, 回転軸とは異なり無限の走査ができない, また, 静止状 態から設計速度になるまでの加速時間が必要となってし まう。この二つがデメリットといえる。しかし, 無限走査に 関しては, 計測において必ずしも必要ではない。顕微鏡の ような観察を目的とした場合とは異なり, 計測では一回毎 の区切りが必ず存在するからである。また, 加速時間につ いても, 応答性の高いステージを選定することで, 数十ms 程度の待ち時間で済むことが確認できている。この待ち 時間についても, 計測時に必要となる他の時間(他軸移 動の振動待ち時間など)に包括することができ, 実質与え られる影響は殆どないことも分かっている。つまり, 計測 専用の走査方法と考えれば, デメリットはほぼなくなり, よ り良い走査方法といえる。

次に,IC表面パターンの一部を非走査型・走査型共 焦点撮像系の双方により取得した画像を図8に示す。



図8 | C表面パターン画像の比較

3章で述べたとおり,非走査型共焦点撮像系で取得した画像では高い周波数成分の情報を十分に取得すること

ができないために、刻印されている文字や細かな配線パ ターンなどの微細な情報が欠落しているのが分かる。 また、画像中に検出素子配列とピンホールアレイ配列の 干渉によって生じる折り返しノイズも確認できる。この影 響で、二次元計測(対象物の大きさ、位置などの計測) への影響は大きく、また三次元計測においても、特に 微小な対象物を安定して計測できない原因となってし まっている。一方、走査型共焦点撮像系で取得した画像 には、非走査型共焦点方式三次元計測では起きていた ピンホールアレイによる情報欠落がないため、高解像度の 画像を取得できており、文字や配線のパターンをはっき りと確認することができる。この高解像の共焦点画像を 取得する方式を手に入れたことで、高い精度での二次元 計測が可能となり、今までは不可能であったレベルの微 小な対象物の三次元計測もできるようになった。

## 5 三次元計測センサ仕様

最後に、これまでに非走査型・走査型共焦点方式三 次元計測を原理として開発した三次元計測センサの仕様 を表1に示す。また、視野サイズと計測対象サイズを軸と したグラフと非走査型共焦点方式三次元計測における 計測限界を破線で表現した図9を示す。今後、より微細 化が進む半導体業界の検査工程においては、破線を超 える計測能力が必要であり、走査型共焦点方式がそのブ レイクスルーの役目を果たした。今後は新規の三次元計 測センサの開発と並行して、既存の非走査型共焦点方 式三次元計測センサを走査型共焦点方式に対応させる ことで計測能力向上を図っていく。

		363C (7 7	21111
センサ	視野 サイズ	計測対象 サイズ	高さ計測 繰返精度
空九	(mm)	(um)	(um)
NCS-5000 ser.	6.0 × 6.0	> 60	< 0.12 (C2)
NCS-5200 ser.	9.0 × 9.0	> 90	< 0.25 (C3)
NCS-6000 ser.	18.0 × 18.0	> 60	< 0.12 (C2)
NCS-7000 ser.	13.3 × 13.3	> 60	< 0.12 (C2)
NCS-8000 ser.	13.3 × 13.3	> 90	< 0.25 (C3)
SCS-5000 ser.	6.0 × 6.0	> 30	< 0.12 (C2)
SCS-5200 ser.	9.0 × 9.0	> 45	< 0.25 (C3)
SCS-6000 ser.	18.0 × 18.0	> 30	< 0.12 (C2)
SCS-8000 ser.	13.3 × 13.3	> 45	< 0.25 (C3)
SCS-8500 ser.	6.0 × 6.0	> 20	< 0.06 (C1)
SCS-9000 ser.	6.0 × 6.0	> 20	< 0.06 (C1)

#### 表1 三次元計測センサ仕様 一覧表 (シリーズ別)



## 6 おわりに

本稿では走査型共焦点方式三次元計測の原理と三次 元計測センサについて説明した。走査型共焦点方式三次 元計測技術による東光高岳の三次元計測センサは高速・ 高精度・汎用的な三次元計測・二次元計測が可能であ り、半導体業界のみならず、各種産業に今後幅広く利用で きると考えている。

#### ■参考文献

(1)日名子:「非走査型共焦点方式表面形状計測装置」,光アライアンス,2012.11,pp.39-45 (2012)

(2) M.Ishihara : "A Confocal Surface Measurement System Having Improved Measurement Accuracy for Rough Surfaces and Measurement Speed", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.15 No.3, pp-331-440 (2003)

#### ■語句説明

注1) バンプ:ICチップ表面部に搭載された数十µm程 度の微小突起電極。高さが不均一であると,接触不良に よる不具合が起きてしまうため,高さ検査が必要。



**日名子 達也** 光応用検査機器事業本部 技術開発部開発グループ 所属 三次元計測センサの開発に従事