2次元ロックインアンプによる微小変化の可視化技術*

前野 恭**

Imaging Technique of Very Small Change Using Two-dimensional Lock-in Amplifier Systems / Takashi MAENO

Key words: lock-in amplifier, microscopical imaging, charge distribution, nondestructive test, thermal image, stress measurement

1. はじめに

極微弱光の2次元検出装置の開発は近年大きな成功を収めているが、光強度の交流分に相当する微小な変化量の計測方法については検討例が少ない。ここでは、一般の理科学計測によく用いられるロックインアンプを2次元に拡張し、光量変化の分布が測定できるようにした装置について解説する。ロックインアンプとは、位相鋭敏検波器 (Phase Sensitive Detector, 以下 PSD と記す) により同期検波をする装置であり、100 dB にも及ぶ極めて高い雑音除去能力を持つ。光を検出するためには、モータにより駆動する回転式チョッパなどと組み合わせるのが一般的で、一つのセンサで一点の光強度を測るのに用いられる。従って、画像のような2次元の情報を得るには、センサとロックインアンプを2次元に並べなければならず、非常に大掛かりなものとなり非現実的である。ここで紹介する装置は、センサとして2次元の光検出器 (CCD, 撮像管など) を用い、画像のままで同期検波処理ができるようにしたもので、映像信号を A/D 変換したのちコンピュータを PSD として動作させ、同期検波するものである。

2. ロックインアンプによる雑音の除去

2.1 2次元ロックインアンプの構成¹⁾

ロックインアンプの原理は同期検波そのものであり、二

つの正弦波をかけあわせたのち平均化すると、その周期が一致する場合にはそれぞれの大きさに比例した直流成分が生まれるが、片方が雑音のようにランダムなものは平均値がゼロに収束することを利用した検出法である。掛け算をする部分を PSD と呼び、通常は半導体スイッチなどを用いてアナログ信号のまま掛け算を行うが、これを計算器内部での数値演算で行うのが2次元ロックインアンプである。本装置を用いた測定では、測定対象はビデオカメラのフレーム周期と同期して光位相変調などの変調を受ける。1枚の画像はビデオカメラにより1本の映像信号に変換され、A/D 変換器によりディジタルデータ列となり記憶される。次の画像も同様にして記憶され、先の画像から各画素ごとに引き算される。この処理は、フレーム周期と同期して ± 1 の矩形波をかけあわせることと等価であり、PSD の動作そのものである。図1に2次元ロックインアンプの基本的な構成を示す。これは、明るい照明をあてたスクリーンの背後に LED を置き、極微弱な強度で点滅させそのパターンを検出する装置である。LED の光強度は暗中でやっと見える程度で、照明をつけると全く見えなくなる。LED のパターンを検出するには、LED 点灯中の画像から消灯中の画像を差し引けばよく、バックグラウンドのオフセットを取り除くためによく行われる減算処理をすればよい。しかしながら、画像の S/N が十分でない場合には何枚かの画像を加算平均しなければならない。この時、点灯中の画像をまとめてとり、次に消灯中の画像を同数だけとってから差し引くのが通常の減算処理であり、これを交互に繰り返して差画像を蓄積するのがロックインアンプの同期検波処理である。

2.2 $1/f$ 雑音の低減

先に述べたように、減算処理と同期検波処理は差画像を検出していることに関しては全く同じ処理のように見え

* 原稿受付 平成8年1月31日
** 郵政省通信総合研究所 (小金井市貫井北町4-2-1)
1989年武蔵工業大学大学院電気工学専攻博士課程修了、工学博士。誘電体中の電界および電荷分布の測定、レーザ応用計測の研究に従事。郵政省通信総合研究所地球環境計測部光計測研究室勤務

図1 2次元ロックインアンプの構成

る。しかし、減算処理の場合には差をとる画像間の時刻のずれが大きく、時間的相関の低い独立した2枚の画像の差であるために、周波数の低い大きな揺らぎ雑音の影響を受ける。一方、同期検波処理では、1フレーム分のずれしかないためこのような影響は受けない。この関係を図2に示す。通常どこにでも見られる雑音として $1/f$ 雑音があるが、その原因はともかくとして周波数が低いほど雑音電力は増加する。フレーム周期に相当する周波数をAとすると、多数の画像を用いて減算処理をする場合にはそれらの時刻のずれが大きくなり、信号周波数が低いほうへ移動する。よく知られているように、雑音が白色雑音とみなせる場合には、平均化に用いた画像の枚数の平方に比例して雑音は除去され、A-B間では差画像の S/N は向上する。ところが、更に枚数を増やし、B-C間のように $1/f$ 雑音の領域に入ると、時刻のずれの増加とともにより低い周波数成分の雑音も測定値に影響してくるため S/N の向上はなくなる。一方、同期検波処理では信号の周波数はフレーム周期に固定されており、枚数を増やした場合、信号帯域幅が狭まることによって雑音が減少するため、処理枚数の平方に比例して S/N は改善し続ける。

図3に減算処理と同期検波処理の比較を示す。冷却型のCCDカメラのように、特に微弱な光を検出するように設計されたものでは、 $1/f$ 雑音は通常問題とはならないが、本例のような明るい環境下で測定するカメラでは十分な配慮が必要となる。ここで用いたカメラはロックインアンプ用に撮像管を用いて製作したもので、画素数は 100×100 で、25枚/秒のフレーム周期を持つ。残像による影響を避けるためにLEDの点滅周期は6.25 Hzとした。映像信号は、ロングメモリーのデジタルオシロスコープ(Le-Croy社製、#7200 A)によりA/D変換と平均化が行われたのち、コンピュータに転送され差画像が得られる。オシロスコープの一走引内に点灯画像と消灯画像をセットで記録し、加算平均化後のデータから点灯画像と消灯画像部分を切り出して減算することにより、同期検波処理が可能である。一方、比較のために点灯画像のみを平均化したのち、同様に消灯画像をとり減算処理を行った。ここで、処理枚数1枚とは2枚の画像から得た1枚の差画像のことである。図から明らかなように、減算処理では10枚以上で

図2 雑音のスペクトルと変調周波数の関係

図3 2次元ロックインアンプによる雑音除去

は S/N の向上はなくなっているが、同期検波処理では3000枚でも S/N が改善し続け、 $1/f$ 雑音による制限がないことがわかる。

3. 2次元ロックインアンプの応用

3.1 表面電荷分布の測定²⁾

ここでは2次元ロックインアンプの応用例をいくつか紹介する。図4に高分子フィルム上の電荷分布を測定する装置を示す。フィルムは電気光学効果を持つ結晶(BSO)の上に置かれ、BSOの裏面は透明電極をコーティングし接地してある。このような試料に針電極を近づけ放電させると、フィルム上に電荷が蓄積する。この電荷を可視化する試みは古くから行われ、コピー機などに利用されているように、粉を振りかけ付着させる方法などが知られているが、電荷パターンは見えても電荷量を知ることは出来な

図4 表面電荷分布測定法

(a) 無変調の測定結果、雑音が多い

(b) ロックインアンブによる測定

図5 縁面放電によりフィルム上に蓄積した電荷の分布²⁾
(カラーページ参照)

かった。ここで紹介する方法は、電荷パターンと電荷密度分布を同時に知ることが出来るものである。比較的变化の早い現象をとらえるために、CCDによる高速デジタルカメラ（フォトロン社製、HVC、186枚/秒）を用い、画像は半導体メモリーに記録されたのちコンピュータで処理される。蓄積電荷はBSO結晶内部に電界を生じさせ、電気光学効果による複屈折（屈折率に異方性が生じる現象）が透過する直線偏光を楕円偏光に変換する。偏光子と検光子を直交させておくと、検光子を透過する光量は、楕円偏光の割合に比例する。従って、透過光量分布を測れば蓄積電荷分布が測定できる。このようにして測定したのが図5(a)である。放射状に放電した痕跡が見られるが非常にS/Nが悪い。これは、楕円偏光により生ずる透過光量

が小さく、レーザーの干渉じま、ごみなどによるパターンノイズが邪魔をするためである。次に、入射光を光位相変調器によって変調し、透過光の変化量分布をロックインアンブで測定する。この場合、透過光の交流分はBSOにより生じる位相差に比例し、時間的な変化のない直流的なパターンノイズなどの影響無しに電荷分布を求めることができる。図5(b)に示すように、非常に良いS/Nで放電により蓄積した電荷分布が検出できる。

3.2 応力分布の測定³⁾

アクリル樹脂などの透明材料に力を加えると、光弾性効果により複屈折が生じ、これを利用して試料内部の応力測定が行われている。直交した偏光子の間に試料を置くと、応力分布に対応したしま模様が得られるが、応力が小さい時にはしま模様は見えず、透過光の強度分布を解析しなければならない。例えば、光ディスクの素材の評価などには極めて小さな応力の分布を知ることが必要で、高感度な測定装置が要求される。この測定法は複屈折分布を求めるものであるため、図4の装置がそのまま応用でき、BSOとフィルムの代わりに透明試料を置けばよい。応力は、方向を持つベクトルであるため、方向の決定には工夫が必要であるが、詳しくは参考文献を参照されたい。図6に、円形の光学ガラスの外周をヒータにより加熱した時生ずる熱応力の分布を測定した例を示す。ガラス右上の枠で囲った部分を測定した。図に示すように、加熱するに従い円周方向に応力が生じており、内部のひずみが増加していることが分かる。

3.3 赤外カメラによるボイドの検出

機械部品内部の傷を検査するために、超音波探傷装置やX線撮影が用いられるが、ここでは赤外カメラを用いたロックインアンブにより非破壊検査する方法について述べる。この装置は、プラスチック製品内部のボイド（空洞、気泡）や、塗装の浮きを発見することを目的としたものである。高分子の場合、熱伝導率が低いいため製品の表面を加熱した時、内部にボイドがあるとその部分だけ温度の上昇

図6 円形光学ガラスの熱応力分布³⁾ (カラーページ参照)

図7 プラスチック板のボイドの検出

が早くなる。従って、温度の上昇率分布を測定すればボイドが発見できる⁴⁾。赤外カメラ（サーモレーサ）を用いて常温での画像を取っておき、加熱後の画像と比較すればよいが、赤外光の放射率の不均一さなどの影響によりわずかな変化は発見しにくい。そこで、図7に示すように、2次元ロックインアンブを用いて周期的な加熱と自然冷却を繰り返し、温度の変化率分布を求めれば容易にボイドのみの画像を得ることが出来る。図7に示した試料は、厚さ5mmの亚克力板に直径2, 3, 4, 5mmの穴を開け、表面に0.8mmの塩化ビニルフィルムを接着し、塗装したものである。加熱直後の原画像では、試料のわずかな温度不均一によるパターンなどによりS/Nが悪いが、ロックインアンブを通した画像では、フィルム裏面の穴が確認できる。

3.4 顕微鏡画像の解像度向上¹⁾

現在の光学顕微鏡は、回折限界に近い極めてよい解像度を持つが、画像の面内の解像度に比べ深さ方向の解像度は数倍劣ることが知られている。従って、通常の顕微鏡画像は常に奥のものと手前のものを含めた広い範囲の像を重ねて見ていることになる。これらを分離するために、深さ方向の解像度向上を図る方法について述べる。図8に示すように、測定試料をスライドガラスに固定し、これを光軸方向に移動させ焦点面付近の2枚の画像を得る。これらの差画像をロックインアンブで求めると、画像の深さ方向の微分が得られる。焦点を手前から奥に順次移動し、画像の変化を観察すると、焦点と試料が一致する付近で最も大きな変化があることがわかる。従って、深さ方向の微分画像はこの変化を強調したものであり、原画像に比べ解像度の高い画像となる。図8の画像は、直径3 μ mのラテックスビーズをゼラチンで固定したもので、原画像には3個の

図8 顕微鏡画像と深さ方向の微分画像

ビーズが写っている。このうち画面中央のものが焦点面近くにあり、他のものは5 μ mほど離れているが同じようなコントラストで見える。これに対し、ロックインアンブを通した画像では焦点面にあるもののみが他のものと分離してはっきりと見えるようになる。

4. おわりに

近年のA/D変換技術やコンピュータの進歩に伴い、画像のように非常にデータ量の多いものまでデジタル処理が可能となり、ここに示したような2次元のロックインアンブが実現できた。これらの装置は通常では目に見えないような情報を可視化するに十分な性能を持っており、より多くの分野での活用が期待される。

謝 辞

実験協力および貴重なデータを提供していただいた武蔵工業大学電子計測研究室の学生諸君に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 前野 恭ほか：2次元ロックインアンブによる顕微鏡画像の深さ方向分解能の改善，電気学会論文誌C，112-C，8（1992）474.
- 2) 例えば，川崎俊之ほか：ポッケルス効果による電荷潜像の可視化と定量化技術，電気学会論文誌C，113-C，12（1993）1114.
- 3) 高山 学：正負パルス変調法を用いた高感度2次元複屈折測定装置の開発，武蔵工業大学大学院機械工学科修士論文，（1994）.
- 4) 例えば，阪上隆英ほか：サーモグラフィックNDTによる複合材料の欠陥損傷計測，日本機械学会論文集A，59，565（1993）2155.