

光計測と周辺技術雑感

東京工業大学 名誉教授
初澤 毅 HATSUZAWA, Takeshi

本年 3 月で定年退職となったが、学生時代から計量研（現産総研）を経て大学研究所に至るまで、光計測関連の研究につかず離れず取り組んできた。実験の制御系や画像処理に当時用いた PC 技術などを交え、いくつかを振り返ってみたい。

1982 年に佐藤拓宋教授の研究室で取り組んだ修論テーマは「位相共役波を用いた高精度光計測系」というもので、「縮退 4 波混合によるダイナミックインターフェロメトリー」という難解な原理に基づいていた。ひらたく言ってしまえば一種のリアルタイムホログラフィーで、当時市場に出回り始めた電気光学結晶 BSO（ビスマスシリコン酸化物）を写真乾板代わりに、Ar 緑色レーザー光 4 本とシャッター制御によりホログラムの読み書きするシステムである。媒質を透過させた物体光の時間的差分を検出できるというのがメリットであった。

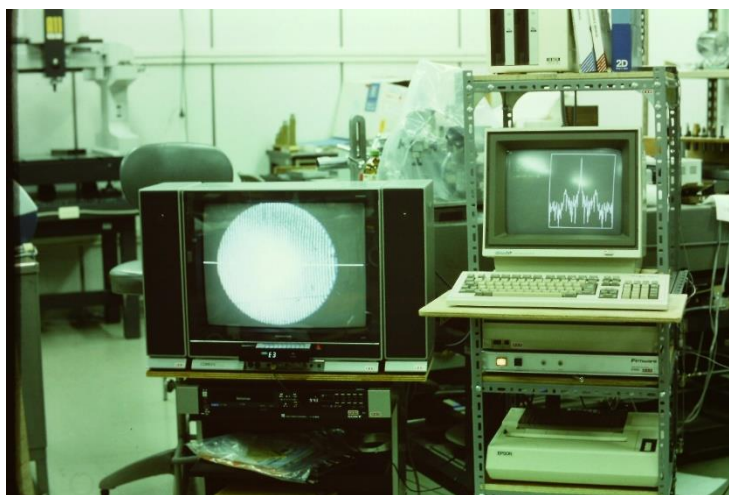
はじめに 4 つのシャッターを所定のタイミングで開閉するシーケンス制御系を構築したが、当時はワンボードマイコンや 8 ビット PC の黎明期で、研究でまともに使えそうなモノは ¥35 万と高価な Apple II のみであった。もとより大学の研究室で簡単に購入できるものではなく、秋葉原で売られていたコンパチ基板と部品一式を ¥10 万で入手し、手間暇をかけてハンダ付けしたニセ Apple が活躍した。CCD カメラなどは未だ高価だったので、撮像管 ITV により干涉縞画像を撮影し 256×256 画素のフレームメモリに取りこんだ。その後 PC による FFT 位相解析を行ったが、何せ RAM が 48KB しかないので 64 点/走査線のサンプリングがやっとであった。FFT で求めたパワースペクトルから等厚干涉縞のキャリア成分を除去し、逆 FFT して波面変動を求めるのに 14 時間ほどかかり、前日夕に仕掛けたデータが翌日朝に出てくるという具合で、動作原理の「ダイナミック」とは程遠い計測系となった。とはいえノズルの空気噴流変化を観察する事が出来たので、修論としては合格を頂いた。



光学定盤上に組んだダイナミックインターフェロメトリー系¹⁾

1983年、つくばの計量研に就職すると機械計測研究室に配属となり、初仕事として実験室で遊休化していた平面度測定用フィゾー干渉計の画像処理に取り組んだ。この干渉計は参照面としてシリコンオイル液面を用い、オイルバス中に沈めたオプティカルフラットの平面度を測定するものであった。直径 30cm までの円形フラットが測定可能であったが、基準となる参照液面の平面度を地球の半径から計算すると中央が 14nm ほど凸となる。これは光源の He-Ne レーザー波長の約 1/45 に相当し、高精度光学面とされる $\lambda/20$ より良い平面であるが、検証のすべがない理論的観念値である。またオイルが水アメ様の流動性を持つため、干渉縞を出し所定の縞間隔に落ち着くのに 1 週間程度かかり、設定するのが非常に難儀な測定機であった。現在の産総研では 3 面擦り合わせで製作したガラス製オプティカルフラットを基準面としているが、実用上はこれ以上のモノは難しいであろう。

干渉縞の解析手法は修論の手法をほぼそのまま流用できたが、PC は一世を風靡した 16 ビットマシンの NEC-PC9801 が研究室レベルで使えるようになっていたので、解像度などは 2 倍ほど上げることができた。また情報処理センターの大型計算機も使い放題だったので、フレームメモリのデータをフロッピディスクで持参し、等高線チャートを出すバッチ処理プログラムなどを作成した。

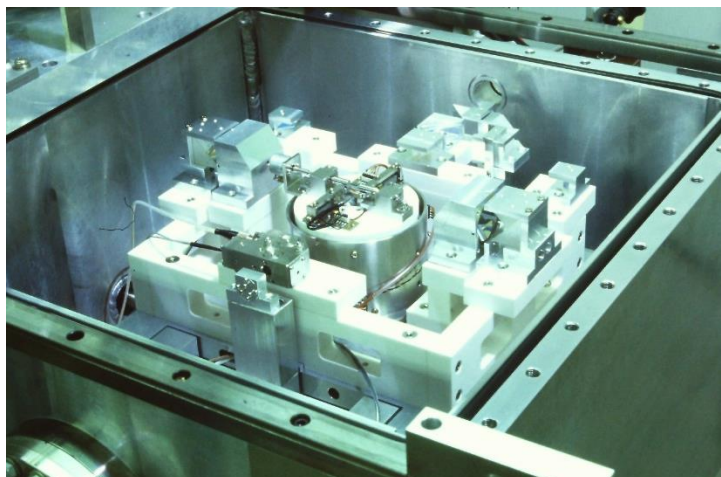


PC9801 による干渉縞解析の様子²⁾

次に取り組んだ「サブ μm 長さ標準設定用の測長 SEM」は半導体マスク・線幅校正試料などを測定対象とし、測定値が波長トレーサブルの必要があったので、通常の電磁的電子ビーム走査に代わり機械走査式の SEM をグループで開発した。メカニカルスキャナを大型真空チェンバーに据え付け、ピエゾ素子で試料を微動させながら、レーザー干渉計の位置データと 2 次電子強度を同時サンプリングするシステムである。当時の DRAM の線幅はサブ μm であったので、測定分解能は 1/1000 のサブ nm が目標であった。このため直角プリズムとコーナーキューブを組み合わせ、レーザーを多重往復して光路長を稼ぐ「光路長増倍型差動干渉計」が採用されたが、ビームの角度ズレも光路長に応じて拡大されてしまうのでアライメントがことのほか難しく、ミラー類の調整にかなり苦しんだ。レーザーで干渉信号が得られたときは、最大のヤマを乗り越えたという思いで本当にホッとした。これより He-Ne レーザー波長の 1/800、0.8nm の分解能を持つ測長系が完成し、ピエゾスキャナや超音波モーターなどの機械走査・アライメント制御系と組み合わせたシステムを PC9801 で構築・完成した。この成果は自分の Dr 論文ともなり、感慨深い仕事となっている。

当時は現在のように便利なインターフェースボード類は少なく、それぞれの計測・制御アンプなどにあわせて A/D、D/A コンバータやパラレル I/O のプラグインボードを組合せ、高速動作が必要な要所のプログラムはアセンブラによって記述した。PC の ROM 内ルーチンもおおよそ公開されていたので、割り込みや V-RAM へのアクセスプログラムも N88-BASIC で制作することができた (N88-BASIC は OS を兼ねていた!)。現在のように WiFi・USB デバイスを差し、付属ソフトやライブラリで解析

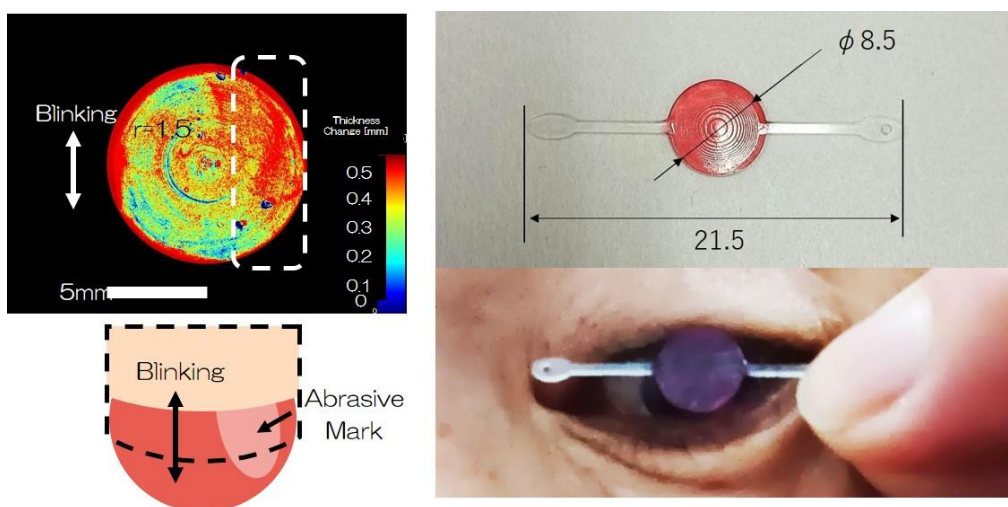
可能な環境は当時からすると夢のようであるが、OSの介在でプログラマ的にはかえって遅くなり、内部処理の詳細が不明なのが弱点であろう。



大型真空チェンバーに設置されたメカニカルスキャナと光路長増倍型差動干渉計³⁾

1995年、大学に戻ると光学デバイスを含めて様々なMEMS系デバイスの研究を進めたが、定年時のテーマは「眼瞼圧分布測定用コンタクトレンズ」にかかわるもので、図らずも画像処理系の研究に戻るようになった。これは眼科医から角膜障害の診断ツールとして要望があったもので、これまでの眼圧測定用MEMSコンタクトレンズや差込み式MEMS圧力センサに代わり、着色したアメ薄膜（砂糖のスクロース膜）をコンタクトレンズ上にコートするというものである。レンズを装着すると瞼の動きや圧力に応じてアメの膜が溶けるため、使用前後のレンズ画像輝度を比較すると、瞼のアタリすなわち圧力分布が測定可能というものである。

画像解析に関しては昔と異なり、ズームレンズ付小型CCDカメラや画像処理の膨大なライブラリがあったのでこれらを活用して、かなりの速さでシステムを完成することができた。一つ困ったのは、コンタクトレンズのような凸面形状をサブ μm レベルで大面積で測定可能な装置が存在せず、非接触式光学測定器による数か所のスポット測定に留まったことだ。最近は光学測定器もコモディティ化のトレンド上にあり、可視分光計などはスマホカメラにプリズムを被せたものでもかなりの波長分解能が得られているが、分野や測定対象によってはまだまだ開発の余地があるようである。



画像処理による擦過痕・眼瞼圧分布測定例と検査用コンタクトレンズ⁴⁾

さて研究環境の変化ということで顧みると、最近は光学デバイスや測定機の小型高性能・ネット化が進むとともに、制御や解析をスマホで済ませてしまうことが多くなってきた。利便性が向上した分、基礎となる部分のブラックボックス化や上書きソフト化が進んで、研究・開発の場においてもユーザー・お手軽的な立場が増えてしまったことが将来的に危惧される。また本誌の読者方々には信じられないことかもしれないが、最近の学生にとって写真はスマホで撮るものであり、カメラの扱いを知らない・触ったことが無い学生がほとんどである。研究用の実験系を組めと指示しても結局できずに、こちらでターンキーシステムを構築して与えないと進まないことも多々であった。

自分自身の研究生活を振り返ると、ソフトウェア/ハードウェアによらず、やはり技術は苦勞しないと身につかないようである。最先端技術への過度の集中を避けつつ、これを支える基礎部分の充実も図られることを期待している。

参考文献

- 1) Stabilization of the BSO phase conjugator using a feedback technique; T.Sato, T.Hatsuzawa, O.Ikeda, Applied Optics, 22(13), pp.1996-1998(1983)
- 2) Optimization of fringe spacing in a digital flatness test; T.Hatsuzawa, Applied Optics, 24(15), pp.2456-2459(1985)
- 3) マイクロパターンの絶対測長装置の開発；初澤，豊田，谷村，計測自動制御学会論文集，26(9)，pp.983-988(1990)
- 4) コンタクトレンズへの薄膜コーティングを用いた眼瞼圧分布の測定法，一第3報 動物実験による安全性評価と擦過痕形成－，初澤 毅，森 優太，精密工学会誌，89(8)，pp.661-664，<https://doi.org/10.2493/jjspe.89.661>，(2023)