

SEMINAR REPORT

電子ホログラフィ専用計算機システム による立体映像技術



千葉大学大学院
工学研究科
人工システム科学専攻

教授

伊藤 智義 氏

本日は「電子ホログラフィ専用計算機システムによる立体映像技術」について紹介させていただきます。私はもともと理論天文学を志していたのですが、そこで携わった天文学専用計算機の開発を契機に、研究の主体が計算機科学に移りました。無関係に見える天文学専用計算機の知見が、究極の3次元映像技術といわれているホログラフィの高速計算に有用なことがわかり、研究を続けています。

研究略歴

高校の頃から宇宙に興味があり、大学院試験では憧れの東京大学宇宙地球科学教室に合格しました。しかし、指導教員の杉本大一郎教授(当時)からの最初の言葉は意外なものでした。「君、コンピュータを作ってみないか?」。

これが私の研究のスタートになりました。コンピュータによる「数値シミュレーション」が「理論」「実験」につぐ第3の研究スタイルとして隆盛してきた頃でした。大学院修士課程で天文学専用計算機の開発に成功し、博士課程に進学した頃は、それを応用したタンパク質シミュレーション専用計算機を作りました。その実績が評価されて、博士1年終了時の1992年に群馬大学に職を得ました。

群馬大学でホログラフィの技術を知り、無関係に思える光の計算式が天体の計算式と共通点が多いことに興味を引かれました。自分自身のテーマを求めていたこともあって、1992年からホログラフィによる3次元テレビの研究を始めました。1999年に千葉大学へ移ってからメインテーマとして研究開発を続けています。

研究のスタートと背景

まず、研究の出発点となった天文学専用コンピュータの開発についてお話ししたいと思います。

研究室では当時、銀河などの星の多体系を研究していました。杉本先生は、コンピュータを駆使して、数十万個の星からなる球状星団が膨張と収縮を繰り返している現象を解明し、「重力熱力学振動」と名付けて発表していました。ところが、この発表が大きな論争を巻き起こすことになりました。数値シミュレーションは、球状星団を一つのガスの塊に置き換えて、物理現象がうまく反映されるように工夫されていました。しかし多くの天文学者はこの結果を信用しませんでした。球状星団は星の集まりです。それをガスの塊に置き換えたのでは意味がないのではないかと。星の集まりとして計算してみなくては信用できないと。

もっともな反論でした。杉本先生も星の集まりとして計算したかったのですが、当時のコンピュータでは能力が不足していて、扱える星の数は千個くらいまでが限界でした。数十万個の星からなる球状星団を千個の星の集団に置き換えて計算しても、誤差が大きくて議論にはなりません。杉本先生はこの時期、自分の説を立証するために、高性能なコンピュータを欲していました。

「世の中のないのなら、自分たちで作ってしまえ」ということで始まったのが、天文学専用コンピュータ GRAPEの開発で、その年に進学した私の研究テーマになりました。

天文学専用計算機システム GRAPE

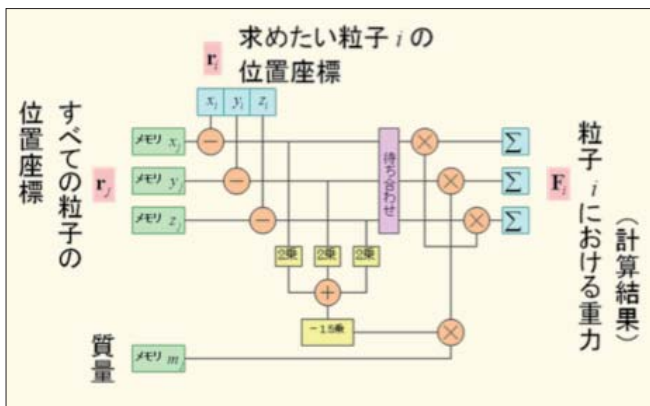
銀河などの星の集団を解析するには、周りにある星からの重力を1個ずつ万有引力の式で計算します。すべての星についてこの計算をしますから、星の数をNとすると、 $N \times (N - 1)$ で、計算量はだいたい N^2 に比例します。

重力の計算が終わると、それぞれの星の位置の更新を行います。更新の計算量は星の数Nに比例します。統計的な誤差を考慮して意味のある結果を得ようとするには、星の数は少なくとも1万個以上は必要でした。Nを1万とすると、重力の計算量と位

置更新の計算量は1万倍違うことになります。従って、99.99%は重力の計算で占めることになり、重力の計算だけをハードウェア化して速くすれば良いのではないというのが GRAPEの基本的な考え方です。

GRAPEという名称は「Gravity Pipe」から付けられました。重力計算をパイプライン方式で高速化するという意味です。パイプライン方式は、複数の演算素子を並べて同時に動作させる並列計算手法です。図1に示すように、「重力計算パイプライン」では、万有引力の式を演算の流れに沿って展開し、それぞれに演算素子を配置します。すべてのプロセッサが同時に動きますので、流れ作業的に答えが1つずつ出ます。

これが一番細かい細粒度の並列化です。このパイプラインを一枚の基板に複数実装すると中粒度の並列化になります。さらに、その基板をパソコンなどのホストコンピュータに何枚か挿して、ホストコンピュータを複数台接続すれば、粗粒度の並列化になります。



〈図1〉重力パイプライン

理論天文学の研究室ですから、当然ながらコンピュータ開発の専門家はいなくて、本当に手探りの開発になりました。ふつう、コンピュータはCADを使って設計するのですが、それすらもわからずに、手書きで設計図を引きました。それをもとに、修士1年の夏に、自分で部品を発注して、自分の手で配線して、試作1号機 GRAPE-1を作りました(図2)。

幸運にも GRAPE-1は動作し、天文学において有効に使われました。この成功体験が後の研究にも大きく役立っていると思っています。



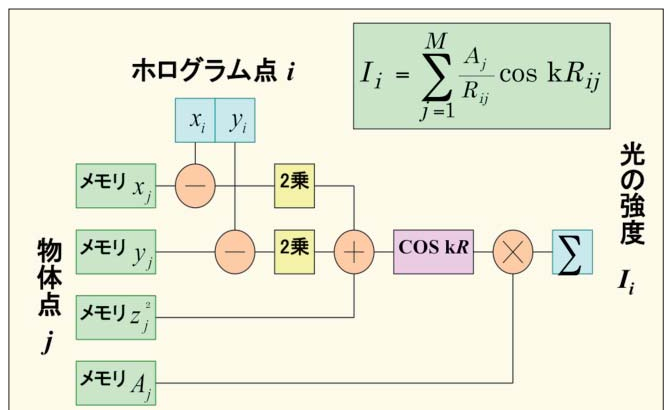
〈図2〉手作りスーパーコンピュータ GRAPE-1

私は最初の3つの試作機を作った後、プロジェクトを離れましたが、GRAPEはその後も大きく発展していきます。高速計算のオリンピックのような存在として、ゴードン・ベル賞というものがあります。その年の最高性能を示した数値シミュレーションに贈られるもので、10年あまりの間に7度、GRAPE関係のシミュレーションが受賞しています。

電子ホログラフィ

1992年に群馬大学から誘いを頂いて職に就きました。当初は GRAPEプロジェクトに継続して携わるつもりでしたが、ホログラフィという技術を知り、自分自身のテーマとして、ホログラフィ専用計算機システムの研究を始めました。

ホログラフィは3次元情報をそのまま記録・再生できる唯一知られた技術で、ホログラフィを電子化した映像システムは究極の3次元テレビになると考えられましたが、計算パワーが足りなくて、実用化が困難でした。状況が GRAPEの開発を始めたときと似ているように思いました。さらに調べてみると、計算アルゴリズムの構造が重力多体問題と似ているように感じられました。図3はもっとも簡単なホログラム計算用パイプラインですが、図1の重力パイプラインとよく似ています。かけ離れた研究分野であるにもかかわらず、方法論が共通していて、大きな興味を持ちました。



〈図3〉ホログラム計算用パイプライン

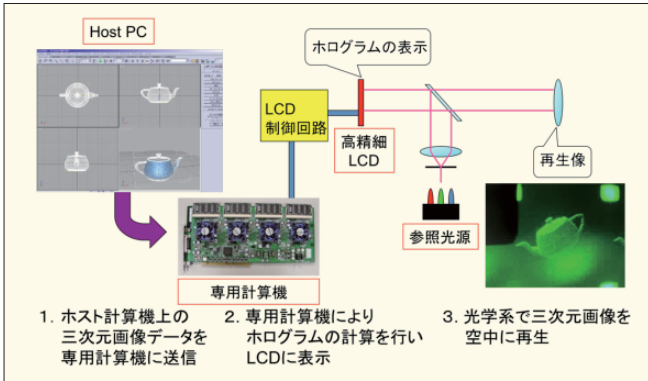
幸運だったのは、この研究を始めた時期に電子ホログラフィが盛んになったことです。1990年にMITのグループ(日本からは日大の吉川先生が参加)が初めて電子ホログラフィのデモを行い、翌1991年には日本でも、湘南工科大学の佐藤先生のグループやシチズンの橋本さんらのグループが、相次いで成功していました。その流れを受けて、通信・放送機構(TAO)が、ホログラフィテレビの実現性を調査する「高度立体動画等通信プロジェクト」を、1992年から5年間、実施することになりました。

ちょうど同じ頃、私はそういう流れを知らずに、ホログラフィ専用計算機を HORN (Holographic Reconstruction) と名付けて、研究開発を始めました。1993年には順調に試作1号機 HORN-1ができ、新聞にも掲載されました。

新聞記事を見て頂いた TAOのグループから誘いを受け、私も研究フェローとして、2年間、プロジェクトに参加することになりました。私はそのとき初めて電子ホログラフィの状況を知り、そこで得た知見は大変有意義なものとなりました。

電子ホログラフィの例として、私たちの研究グループで開発しているシステムを図4に示します。処理手順は以下の通りです。まず、コンピュータ内に3次元座標データを持った物体があったとします。例えばCTスキャナで外部から取り込んだものや、数値シミュレーションから得られたもの、あるいは3次元画像ソフトウェアで作成したもので構いません。ここでは、ポットの3次

元画像を例示しました。これを専用の計算式によってホログラムに変換します。ホログラムはふつう、光学的に作られますが、計算によっても作成することができ、計算機合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) と呼ばれます。一般にはパソコン上で計算しますが、私たちのシステムでは、高速な専用計算機を用いています。この CGH を液晶ディスプレイ (LCD) などに表示して、そこに参照光をあてると、空中に元の3次元像が再生されます。このように、すべて電子的に制御して3次元動画が可能にする技術が電子ホログラフィです。



〈図4〉電子ホログラフィシステム

電子ホログラフィの現状と問題点

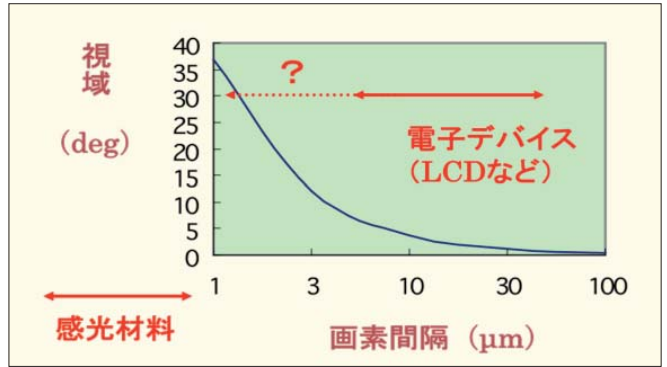
科学技術が市場に出るまでを「基礎研究」「応用研究」「企業研究」「新ビジネス」の4つに分けて議論されることがあります(C. Wessner: OECD 講演資料, 2001)。はじめに新技術が出ると、大学レベルで色々な研究が試みられて盛り上がります(基礎研究)。ところが、ある程度研究されてくると、良い所だけでなく困難な課題もわかってきて、研究が停滞します。これは「死の谷」と呼ばれます。死の谷を抜けると、次は国の研究機関レベルで大学を越えてさらに盛り上がって発展します(応用研究)。純粋に科学技術の観点からは、ここまで来れば成熟期となります。しかし、いくら良い技術でも市場で成功するかどうかは別な話です。学術研究から企業研究に移行するにはさらにもう一段の障壁があって、それは「ダーウィンの海」と呼ばれます。これらをクリアして、新技術が市場に出回ることになります。

これを電子ホログラフィに当てはめてみると、次のようになります。

1990年に未来の3次元テレビとして電子ホログラフィのデモが行われたのきっかけになって研究が隆盛しました。夢の実現に向けて、1992-1997年にTAOでプロジェクト研究が展開されました。ところが、このプロジェクト研究から、2つの大きな課題が明確にされました。ホログラムの干渉縞を表示できるほど高精細な電子デバイスが実用化されていないことと、実用的なサイズのホログラムを動画再生できるほど高速な計算機環境が実現されていないことです。この結果によって「死の谷」が訪れ、研究が停滞しました。

ホログラフィでは再生に回折光を利用しているため、視野角は回折角によって決まります。回折角は表示デバイスの画素ピッチ(間隔)によって決まり、狭ければ狭いほど大きくなります。可視

光の波長は400~700nmですので、例えば波長600nmでグラフを書くと、図5のようになります。



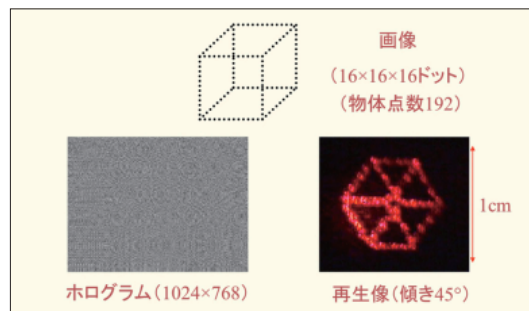
〈図5〉画素ピッチと視野角の関係

光学フィルムでは、画素ピッチに相当する解像度が0.1~1μmまであります。視野角は40°以上になり、十分な立体視が可能です。実際、静止画においては素晴らしいホログラム作品がいくつも作られており、ホログラフィ技術は現代アートの一分野にもなっています。

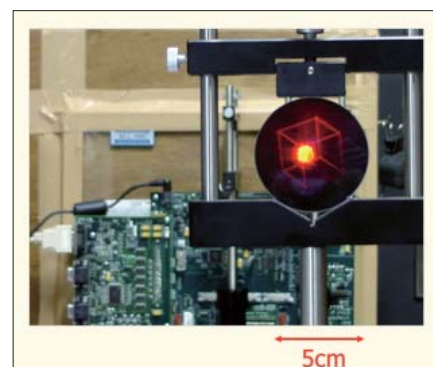
しかし、動画にするには、ホログラムを逐次更新しなければなりません。データを制御でき、かつ、これほど高精細な表示デバイスは存在していません。1990年代は、代表的な表示デバイスのLCDの画素ピッチは30μm程度でしたので、視野角は1°程度しかありませんでした。これが第一の課題です。

2000年代になると、反射型のLCDが急速に高精細化してきました。画素ピッチが10μmを切り、現在では5μm程度のもので市販されるようになってきました。実用化には1μm程度まで高精細化する必要がありますが、実験に使うには十分な状況になりました。そのため、再び研究が隆盛してきています。現在は、そういう状況にあります。

図6と図7に、2000年を境にした実験結果を示します。格段に進化した様子が見えるかと思えます。



〈図6〉画素ピッチ30μmの透過型LCDによる電子ホログラフィ(1998年)



〈図7〉画素ピッチ10μmの反射型LCDによる電子ホログラフィ(2001年)

2008年には国の重点政策の一つになり、総務省は「官民共同で2025年までに『夢の立体テレビ』を開発する」と発表しています。ただしこの発表は、研究フェーズが「死の谷」は越えなければ「ダーウィンの海」の手前であることを示唆しています。実用化までに、まだ10年以上を要するほど困難な技術であることも意味しているからです。

このままLCDの高精細化が進み、1 μ mの画素ピッチが実現する可能性は高いと思います。しかし、画素ピッチ1 μ mで1m \times 1mの表示面(50インチ程度)を作ったとしますと、総画素数は1兆になります。現在のハイビジョンでも200万画素(1,920 \times 1,080)ですから、およそ100万倍です。また、3次元の映像処理は2次元よりも複雑ですので、計算パワーはさらに必要ということになります。これが第二の課題で、実用化まで10～20年を要するという背景になっています。

ホログラフィ専用計算機システム HORN

ホログラム計算を高速化する研究は、いろいろ行われてきています。その中で、私たちの研究室の特色は、ハードウェア(専用計算機)による高速化をめざしている点です。将来、3次元テレビが実用化されるとすれば、それは現在のテレビと同様に一つの装置になると思われます。そういう意味では、計算の回路化、チップ化というのは大切な要素技術になると考えています。

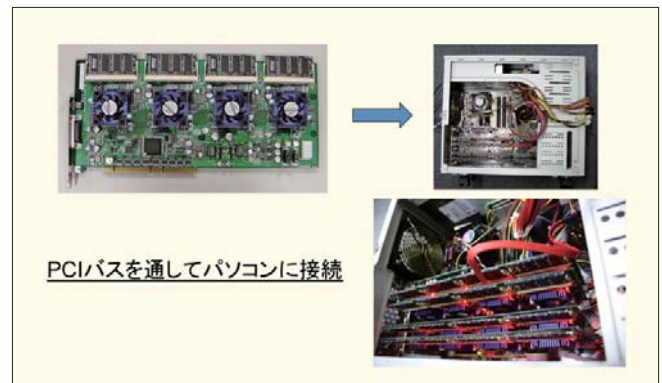
大学院生のときに、指導教員の杉本先生が世界一の研究をする秘訣を話してくれたことがありました。「方法は二つある。一つは世界一頭が良くなること。もう一つは世界中で誰もやっていないことをやること」

世界一頭が良くなるというのは無理ですが、誰もやっていないことを続けることは私にもできました。当初はほとんど見向きもされませんでした。約20年の歳月を経て、HORNも今ではそれなりの注目を浴びるようになってきています。総務省が実用化の目標に掲げた2025年頃、私は定年を迎える年齢になります。そういう、生涯を通して実現をめざせるような研究に巡り会えたことは、とても幸せなことなのかもしれません。

最初の10年は手配線で開発を行いました。基本は、図3のホログラム計算パイプラインをハードウェア化することです。試作1号機と2号機では、市販のICを用いて、基板上でパイプラインを構成しました。3号機では、読み書き可能なLSIとして急速に発展し始めていたFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて、チップ内にパイプラインを実装することに成功しました。4号機では、FPGAにパイプラインを20本実装した中粒度の並列化にも成功しました。

これ以上のことを手配線で行うことは無理になり、3000万円ほどの予算申請が通りましたので、2004年に、大規模FPGAチップを4個搭載したプリント基板によるHORN-5ボードを開発しました(図8)。ボード1枚あたりで、ホログラム

計算パイプラインを1,408本実装することに成功しました。HORN-5ボードは標準インターフェースであるPCI規格に合わせて開発したので、パソコンに差し込んで使うことができました。ボードを1枚装着するとパソコン単体の約300倍の速さでホログラムの計算を行うことができ、4枚では1000倍を超えました。



〈図8〉プリント基板による試作5号機

当時の動画ホログラフィの研究では、扱う3次元モデルは線画のような単純なものがほとんどでした。少し複雑な3次元モデルでは、1万くらいの物体点数が必要になります。しかし、当時のパソコンでは、1万点で構成される3次元物体をホログラムに変換するには、1枚あたり30秒程度はかかりました。とてもリアルタイムで動かすことはできません。それに対して、専用ボードを4枚用いたHORN-5では、毎秒30フレーム以上の滑らかなリアルタイム映像が可能になりました。

さらに、HORN-5ボードを16枚用いて、4台のパソコンで粗粒度の並列化を実現し、10万点の画像を10フレーム/秒で動画表示することに成功しました。この成果は、OSA(米国光学学会)のOptics Express誌に掲載され、2009年9月と10月の2カ月連続で、ダウンロードランキング1位を記録しました。

今後の展開

次のステップとして、ホログラム計算と映像出力を一体化した電子ホログラフィ専用チップ(HORNチップ)の開発を構想しています。実用化する際には、基板レベルではなく、チップレベルの要素技術が必要であると思っています。