

内 3-3/

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

ホログラムを用いた光デジタル
処理に関する研究

申 請 者

高 木

康 博

Yasuhiro

Takaki

物理学及応用物理学専攻

応用光学研究

平成 3 年 12 月

現在の高度情報化社会において情報処理への需要は爆発的な増大を見せている。このような状況のもとで、従来からの電子計算機はその能力の限界が明らかになってきた。そこで、電子計算機に代る次世代の計算機として様々な計算機が考案されている。その中で、光計算機は有力な候補の一つである。現状では光計算機の計算方式として様々な方式が提案されている段階であるが、計算精度・処理の柔軟性の点で光デジタル方式が最も優れている。本研究以前にも、さまざまな光デジタル計算機の実現方法が提案されていた。それらの方法の問題点は、光デジタル計算機の基本構成要素である光論理演算の実現にあたり、入力を空間的パターンあるいは偏光方向としているのに対して出力を光強度としているところにあった。つまり、入力と出力の形式が異なるため、これらを組み合わせて光論理回路を構成することが困難であった。一方、光情報処理の分野では、ホログラムが主に画像処理などの用途に用いられてきた。ホログラムの特徴は、光の振幅と位相の両方を制御できるところにある。そこで、本研究ではこのホログラムの特徴を用いて、入力・出力ともに光で行える光論理演算法を確立する。さらに、これらを組み合わせて光論理回路を構成する方法を確立し、その上に計算機回路を構築することで光デジタル計算機を実現することを目的とする。また、基礎的な実験結果をもとに、実用化に必要なデバイスについて検討を行い将来の光デジタル計算機実現のためのひとつの方針を与えるものである。このようにホログラムを用いて、光デジタル計算機の構成方法を体系的に研究した研究例はこれまでほとんどなかった。

本論文は7章から構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第1章では、光計算機に関する研究の背景、従来の研究、およびそれらの問題点についてまとめ、本研究の意義と目的について述べる。

第2章では、本研究の基本原理であるホログラムを用いた並列光論理演算の実現方法について述べる。ホログラムを用いた光論理演算の実現方法は、光の振幅と位相の両方を制御できるホログラムの特徴と、空間フィルタリング系の特徴であるspace-invariant性を組み合わせることで実現される。ここで、space-invariant性とは、入力面上の入射光の位置により出力面上の出射光の位置が決まり同一の応答関数が出力されることをいう。この応答関数は、空間フィルタリング系のフィルタリング面に配置したホログラムにより決る。論理演算の二入力に定常入力を加えた三入力を空間フィルタリング系に入射したときに、入射光が互いに重なり合うように広がった振幅と位相分布を持つ応答関数を用いる。二入力の有無によって、重なり合った部分の光強度、つまり演算出力が変化する。ここで、適当な点応答を有するホログラムを用いることで、二入力の場合に可能な16種類の論理演算がすべて実現できた。ホログラムとしては、複雑な振幅・位相情報を容易に制御できる計算機合成ホログラムが最適であると判断し、これを実験に用い正しい実験結果を得た。ただし、出射光の位相が不定で強度が入射光に比

べて減少するので、光論理演算同志を接続するためには空間光変調器が必要である。このような問題点もあるが、入力光から出力光が直接えられる、space-invariant性からひとつの空間フィルタリング系で複数の入力を並列に処理できるなどの優れた特徴がある。ひとつの空間フィルタリング系で処理できる入力数、エネルギー効率、および多段接続性について検討した。

第3章では、ホログラムを用いた光論理演算をもとに光半加算器を構成する方法について述べる。加算は、デジタル計算機の基本構成要素であり、半加算器は加算の最小構成要素である。従って、光半加算器を実現することは光デジタル計算機を実現する上で重要であると考えた。ここで問題となるのは、ホログラムを用いた光論理演算はひとつの光学系で複数の入力を同時に処理できるが、実行できる論理演算の種類は一種類であることである。半加算器は、二種類の論理演算から構成されている。そこで、この二種類の論理演算を一つの光学系で実現する方法をふたつ提案した。第一の方法は、一次元化による方法である。この方法では、シリンドリカルレンズを用いて空間フィルタリング系を一次元化した。波面の重ね合わせはシリンドリカルレンズの軸方向にのみ起るので、これと直交する方向にふたつの論理演算を行うホログラムを並べた。第二の方法は、多重化による方法である。この方法では、ホログラムを用いた光論理演算の基本に立ち戻り、空間フィルタリング系で一種類の論理演算しか行えないのは一種類の論理演算に対応した応答関数しか出力しないためで、二種類の論理演算に対応した応答関数を多重出力すればよいことを見いだした。それぞれの方法を用いて光半加算器を構成し、正しい実験結果を得た。それぞれの方法についてひとつの光学系で実現できる半加算器の数について検討した結果、多重化による方法が優れていることが判明した。

第4章では、ひとつの空間フィルタリング系で複数の種類の論理演算を並列に実行する局所可変光論理演算について述べる。論理演算を組み合わせる光論理回路を構成する場合、一般に複数の種類の論理演算が必要である。そこで、空間フィルタリング系の入力面上の位置により実行する論理演算の種類を局所化する必要がある。第3章で二種類の論理演算を同時に実行する方法をふたつ提案したが、ここでは、これをさらに発展させて局所可変光論理演算を実現する。一次元化による方法では、一次元化した空間フィルタリング系のフィルタリング面に必要な論理演算数だけホログラムを並べる。つまり、空間フィルタリング系の一方向に対してはspace-invariantで応答関数の重ね合わせが起り、これと直交方向に対してはspace-variantで異なる論理演算が行えるようにする。多重化による方法では、2ビットエンコーダという考え方を用いる。2ビットエンコーダは、二入力に対して4種類の論理演算を行う。この4出力を選択することで、二入力の場合に考えられる16種類の論理演算がすべて実現できる。4種類の論理演算に対応した応答関数を多重化し、演算出力を出力面に配置したマスクの開口で選択する。空間フィル

タリング系のspace-invariant性から、複数の入力に対して2ビットエンコーダが並列に実行されるので、出力面上の位置によりマスクの開口パターンを変えることで局所可変光論理演算が実現できる。ふたつの方法について考察を行った結果、一次元化による方法では空間フィルタリング系を一次元化したため並列度が減少し、ひとつの空間フィルタリング系で実現できる論理演算数が減少することが判明した。

第5章では、それぞれの局所可変光論理演算を組み合わせて光論理回路を構成する方法を述べる。まず、最初に一次元化による方法について説明する。この局所可変化の方法では、論理演算が一次元的に並んでいることに注目する。この出力を90度回転させて論理演算の入力側に戻し論理演算の並んでいる方向に広げることで、論理演算の出力がすべての入力に接続可能な配置になる。出力と入力の結線は、入力面に置いたマスクの開口で選択する。光論理演算間の入力と出力の任意の接続が可能になり、任意の回路構成が可能な光順次回路が実現できる。つぎに、多重化による方法について説明する。まず最初に、2ビットエンコーダの応答関数をさらにもうひとつ多重化して二組の2ビットエンコーダを構成し、各エンコーダごとに演算出力を選択するようにして、二入力二出力の光ロジックモジュールを構成する。Space-invariant性により、ひとつの光学系で同時に複数のモジュールが実現される。そこで、モジュールを二次元的に配置して、それらの間をメッシュ状に規則接続する。各モジュールの機能を適当に選ぶことで、このモジュールアレイ上に任意の論理回路が構成できる。これを、光ロジックモジュール回路と呼ぶ。以上のふたつの光論理回路の構成方法について、実験により基礎的な動作の確認を行った。それぞれの方法について考察した結果、回路構成の自由度の点では光順次回路の方が優れているが、大規模な回路構成に対しては光ロジックモジュール回路の方が優れていることが判明した。

第6章では、光ロジックモジュール回路についてさらに考察を行い、実用化のために必要なデバイスについて検討した。その結果、空間光変調器としては光双安定素子が、ホログラムとしてはROACHが適していることが判明した。さらに、中短期的な実用化方法として光電子技術を用いた光電子ロジックモジュール回路を提案した。また、光ロジックモジュール回路上に任意の計算機回路を構築する方法として、Minnickの手法が有用であることを示した。

第8章では、本研究で得られた成果を要約して述べ、今後の光計算機の開発にあたって考慮すべき点などを示唆したものである。