HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	種々の物体表現技法に適用可能な円筒型計算機合成ホログラムの高速計算法
Author(s)	柏木, 暁史
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第16672号
Issue Date	2025-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16672
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/98282
Type	doctoral thesis
File Information	Akifumi_KASHIWAGI_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（情報科学）　　氏名　柏木　暁史

学　位　論　文　題　名

種々の物体表現技法に適用可能な円筒型計算機合成ホログラムの高速計算法
（Fast calculation method for cylindrical computer-generated holograms applicable to various object representation techniques）

映像表示デバイス性能ならびに映像表現技術は日々進化を続け, かつ多様化が進んでいる. その一つに立体表示技術がある. 立体表示技術とは, 観察者が立体を知覚するために必要な生理的要因を満たす 3 次元物体表示の仕組みを指す. ホログラフィはすべての生理的要因を満たすことができる完全な立体表示技術の一つである. ホログラフィは光の波動性と干渉性を利用し, 物体表面から観察者の眼に届く光 (物体光) を干渉縞として媒体に記録する. この干渉縞を記録した媒体をホログラムと呼ぶ. 一般的にホログラムはコヒーレントなレーザー光と感光フィルムを用いて光学的に製作されるが, これらの工程を数値シミュレーションによって実現し, 電子データとして製作されるホログラムを計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram; CGH) と言う.CGH は SLM(Spatial Light Modulator) と呼ばれる空間光変調器に表示され, 計算時に設定したパラメータに等価な光を照射されることによって, 保存した物体光を再生する.CGH を用いることで, 隔地伝送による立体表示や立体動画像再生が容易になる. しかしながら,CGH の製作には膨大な計算量が必要となる点や,CG のように高精細で多彩な物体表現技術が未成熟である点, 再生像の大きさや観察範囲の拡大には高価な高精度 SLM が必要となる点など多くの課題が残されている.

CGH の形状については, 平面が一般的だが, 角柱型や円筒型も過去に提案されている. 非平面 CGH の特徴として, 対象物体を囲む形での製作を行うことにより, 視域と呼ばれる再生像の観察範囲を拡大することができる. また, 円筒型計算機合成ホログラム (Cylindrical Computer-Generated Hologram; CCGH) においては, 円筒中心にある平面物体からの光波伝搬を高速に計算する手法が提案されており, 従来手法と比べて格段に短い時間で CCGH を計算可能となった. しかしながら, 当該計算法は物体が円筒中心にある平面を対象としており,3 次元構造をもつ物体を対象とした CCGH 計算には適用できなかった.

そこで, 第 1 の手法として,3 次元物体からの CCGH 計算に当該手法を適用するための提案を行った. 本手法は,3 次元物体を伝搬方向に垂直な面でせん断し, 各断面からの物体光を円筒中心に逆伝搬させることによって,3 次元物体の光波分布を 2 次元の光波分布に変換する. 当該アプローチにより,3 次元物体からの CCGH 計算に高速計算法を適用可能とした. 光学再生実験では奥行きのある再生像が観察されたことで本手法の有効性が確認されたとともに, 計算速度についても従来手法のおよそ 3000 倍高速であることが実験によって示された. しかしながら, 本手法には記録した物体の背面が透けて見える問題があった. また, 当時から現在に至るまで円筒型の SLM が存在しないため, 光学像再生は専用フィルムに都度印刷して行う必要があった.

そこで, 第 2 の手法として, 隠面消去をはじめとした種々の物体表現技法を CCGH 計算に組み込むための方法を提案した. 本手法は, 仮想の物体光波記録面 (Wavefront Recording Plane; WRP) を物体と CCGH の間に仮定し, 物体から WRP までの光波伝搬計算に任意の物体表現技法を利用可能

にする. 加えて, 本手法では WRP 面上の物体光波分布を円筒中心に逆伝搬させることで,WRP から CCGH までの光波伝搬に高速計算法を適用可能とした. さらに,CCGH から平面 CGH を高速に切り出す座標系変換手法を組み合わせることで,SLM を用いた光学像再生を可能にした. 光学像再生実験の結果, 組み合わせた手法に応じた物体表現がなされていることが確認された. また, 計算時間の計測比較実験により, 本手法が従来手法よりも 1000 倍〜50000 倍以上高速に計算ができることが示された. なお, 本手法によって任意形状ならびに種々の物体表現技法を用いて CCGH を高速計算できるようになった成果ならびに座標系変換による平面 CGH の高速出力との組み合わせは, 現在立体表示実現形態の一つとして期待されているホログラフィックヘッドマウントディスプレイ (Holographic-Head Mounted Display; Holo-HMD) との親和性が高い. ホロ HMD は姿勢変化に応じた平面 CGH の提示ならびに高速切替が必要となるため, 本手法を用いて CCGH を高速に製作しつつ, 任意視点に応じた平面 CGH を即座に提供できる点で本手法の有用性は高いと期待される.

なお, 本論文は以下に示す 7 つの章によって構成される.

第 1 章では, 今日の映像表現と現実感を作り出す様々なデバイス, 技法, アプローチについて紹介するとともに, 立体像表示技術の存在について示した.

第 2 章では, ヒトが立体を知覚するために必要な生理的要因について説明した. また, 生理的要因を満たす立体像表示技術の種類と発展の流れについて概要を示し, 完全な立体像表示が可能な技術であるホログラフィと電子的光学像再生を行うための電子ホログラフィを紹介した.

第 3 章では, 物体の 3 次元情報を記録する CGH の存在と記録再生の仕組みについて説明し,CGH 計算に必要な物体光伝搬計算式についてマクスウェルの方程式からの導出課程を記載した. 加えて,CGH や再生装置のスペックに依存した再生像の視野・視域と周波数制限や, 種々の CGH 計算手法についてその特徴の違いを示しながら紹介した.

第 4 章では,CCGH の一般的な平面 CGH に対する優位性と課題を示し, 先行研究とそれぞれの特徴について性能比較の図を用いて示した.

第 5 章では,3 次元物体からの CCGH 高速計算法について提案した. 加えて, 本手法によって製作された CCGH を用いての光学像再生実験ならびに従来手法との計算時間比較実験を行い, 本手法の正当性と有用性を証明した.

第 6 章では, 任意形状の物体を対象としながら, さらに隠面消去や鏡面反射, 表面材質などあらゆる物体表現技法を取り入れられる手法を確立するため, 物体と CCGH の間に WRP を組み込んだ計算法を提案した. 加えて, 本手法によって製作された CCGH を用いての光学像再生実験, 視野ならびに視域についての境界調査実験と仮説立証, 従来手法との計算時間比較実験を行い, 本手法の正当性と物体表現技法適用に対する汎用性, 本手法における視野・視域とパラメータ設計に関する因果関係, 高速計算法としての有用性を明らかにした.