

ホログラフィーって本当に三次元？

山 東 悠 介

(大阪産業技術研究所)

近年、消費者の注目を集めるため、3D（三次元）という接頭語が使用されている商品をよく見かけます。それだけ3Dという用語に関心があることの証拠でもあります。これは研究者にとっても同じ印象ではないでしょうか。実際、学会発表では三次元計測というフレーズが頻繁に使用されており、ホログラフィーの分野においても例外ではありません。ただ、三次元という用語が意味するところは必ずしも統一されておらず、使用方法や文脈によって異なっているのが現状です。ここでは、ホログラフィーが扱う情報と三次元物体との関係について、一度、整理してみたいと思います。

1. ホログラフィーと波面

ホログラフィーは三次元情報を記録し、そして再生することができる技術である、としばしば耳にします。しかし、これは必ずしも正しい表現ではありません。三次元情報という語句の意味が、文脈や捉え方によって変わるからです。一例として、物体波と平面波である参照波を干渉させ、図1に示すような干渉縞が得られた場合を考えてみます。光源は単波長レーザーで、得られた干渉縞のサイズは既知とします。干渉縞から再生像を数値的に求めるデジタルホログラフィーでは、任意の奥行き位置での像を計算で求めることができます。しかしながら、図1に示す干渉縞の情報だけでは、測定対象の像を特定することはできません。物体波は、ホログラム面上では球面波であるということはおわかりですが、測定対象が1つの点光源なのか、レンズや曲面鏡なのかはわかりません。これは、図1に示すような単純な干渉縞だけでなく、もっと複雑な干渉縞（ホロ

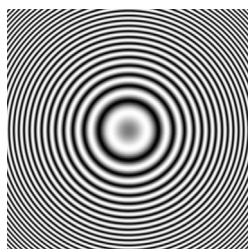


図1 物体波（球面波）と平面波の干渉縞。

グラム）でも同様です。何らかの仮定を用いることなく、物体の実在する位置を単一の干渉縞のみで特定することはできません。このことは、ホログラフィーは、本質的に波面という二次元分布を記録・再生する技術であり、ホログラムそのものに三次元物体の情報すべてが含まれているわけではないことを意味します。

ホログラフィーは二次元の情報量を扱う技術といえますが、では、その二次元情報とは具体的に何かについて、もう少し考えてみます。つまり、波面に含まれる情報と、三次元物体の関係について考えます。なお、物体情報を扱う際には、フーリエ空間で議論することが多々あります。今回も、フーリエ空間において、波面に含まれる物体情報を議論します。ただし、議論を簡略化するため、三次元物体に単色の平面波が照射され、その一次散乱光が形成する波面に着目し、その波面に含まれる物体情報を考えます。したがって、二次以降の多重散乱は無視します。これは、マクスウェル方程式から導かれるヘルムホルツ方程式において、ボルン近似を行うことに対応します。導出は割愛しますが、波面に含まれる物体情報は、解析的に明らかにすることができ、図2のAに示すように、三次元フーリエ空間において原点を通る半径 $1/\lambda$ の半球面上のスペクトルになります¹⁾。ここで、 (u, v, w) は実空間座標 (x, y, z) に対する三次元フーリエ空間の座標系を表します。また、 λ は用いた光源の波長です。三次元フーリエ空間における半球は、 w 軸が回転軸となっていますが、これは $+z$ 方向から平面波が物体に入射した場合を想定しているためです。このことから、波面、つまりホログラムに含まれる物体情報は、三次元情報のすべてではなく、二次元情報量であることがわかります。

2. ホログラフィーによる三次元計測と三次元ディスプレイ

上述のように、ホログラフィーは二次元分布である波面を扱う技術ですが、何らかの仮定をする、あるいは前提条件を加えることで、光軸方向の奥行き分布を得ることができます。例えば、デジタルホログラフィーでは、回折計

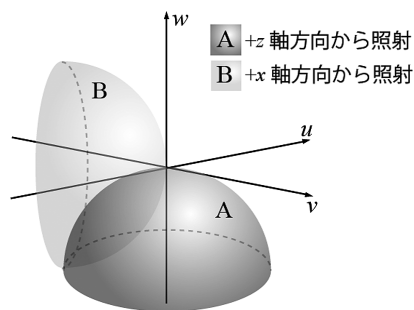


図2 三次元フーリエ空間において波面に含まれる物体情報の模式図.

算の結果、コントラストが高い奥行き位置が像位置であると仮定することで、像面までの距離がわかります。これは、カメラのオートフォーカス機能を数値的に行うことに対応します。また、ホログラフィーでは位相分布が得られるため、位相解析により、光軸方向に高分解能な表面形状計測も実現できます。このように、ホログラフィーでは三次元物体の情報すべてを記録・再生することはできませんが、条件次第では奥行きに関する情報が得られます。このことから、広い意味での三次元計測であると考えられます。また、これは三次元ディスプレイについても同様です。ホログラフィック 3D ディスプレイで再生するのは、三次元物体そのものではなく、あくまで二次元波面になります。ただ、位相分布も再生されますので、三次元空間内に像を結びますが、立体感や奥行きが感じられるのは、われわれ観測者側の生理的知覚機能によるものです。このような観点からも、三次元ディスプレイでの三次元という用語は、広義の三次元ということになります。

3. ホログラフィーによる三次元断層計測

第1節の最後で、ホログラフィーでは三次元情報が得られないと述べましたが、それは、単一のホログラムには二次元情報量しか含まれないという意味です。言い換えますと、測定条件を適切に変化させ、複数の測定を行えば、ホログラフィーでも三次元物体の三次元情報を得ることができます。例えば、図2のAやBに示すように、物体を照射する平面波の入射角を変えますと、入射角に応じて得られる半球面上のスペクトルも回転します。したがって、適切に入射角を変化させ複数回測定すると、三次元フーリエ空間をすべて覆うような三次元情報を得ることができます。最後に、三次元逆フーリエ変換を行えば、物体の三次元分布を得ることができます。回折トモグラフィー¹⁾は、このような原理によるものです。測定条件を変える他の方法として、波長掃引を行い、波長ごとに波面を計測する手法もあります。この場合、図3に示すように、部分的に三次元

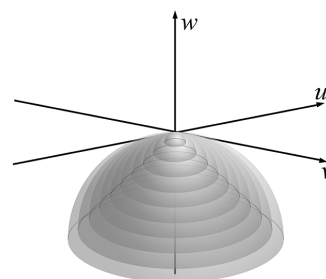


図3 波長掃引時に得られる三次元スペクトル (+z 軸方向からの照射).

元情報量が得られますが、三次元フーリエ空間内のすべての情報が得られるわけではありませんので、測定光学系に応じた数値処理を行うことで物体の三次元分布を復元します²⁾。そのほか、数値処理が前提となりますが、入射光を平面波ではなく、曲率半径が変調可能な球面波にする手法も報告されています³⁾。これらの手法は、二次元計測を複数回行うため、測定データとして三次元の情報量から物体の三次元分布を求める三次元計測になります。ここで用いた三次元という用語は、狭義の三次元となります。このように物体の三次元分布が得られる計測を、広義の三次元計測と区別して「三次元断層計測」と表現することも多いです。

また、近年、測定対象の分布にスパース性を仮定することで、限られた(不足した)情報から物体分布を再構成する、コンプレックスセンシングが注目を集めています。デジタルホログラフィーにもこの技術は応用可能であり、単一のホログラムであるにもかかわらず、三次元断層画像を取得することができます⁴⁾。測定対象にスパース性を仮定するという制約はありますが、条件次第では、少ない情報量からより多くの分布を再構成できる有効な手法であるといえます。

日常でも何気なく使用している三次元という用語ですが、使われ方によって意味合いは変わってきます。ホログラフィーが扱う物体情報は本質的には二次元情報量ですが、それが三次元物体の三次元情報に密接に関連しているという事実は三次元計測に向けた多種多様なアプローチの基礎となるものであり、今後のさらなる発展が楽しみです。

文 献

- 1) A. C. Kak and M. Slaney: *Principles of Computerized Tomographic Imaging* (IEEE Press, New York, 1988).
- 2) M. K. Kim: *Opt. Express*, **7** (2000) 305-310.
- 3) Z. Jiang, S. P. Veetil, C. Liu and J. Zhu: *Opt. Lett.*, **40** (2015) 3001-3004.
- 4) D. J. Brady, K. Choi, D. L. Marks, R. Horisaki and S. Lim: *Opt. Express*, **17** (2009) 13040-13049.