

空間スクリーン方式を利用したホログラフィック投影システム Holographic Projection System utilizing the Spatial Screen

高野 邦彦¹ 須賀 凜太郎¹ 今野 哲史² 佐藤 甲癸³ 浅井 紀久夫⁴
Kunihiko TAKANO¹ Rintaro SUGA¹ Satoshi KON-NO² Koki SATO³ and Kikuo ASAI[†]

¹東京都立産業技術高等専門学校 ²群馬大学 ³元湘南工科大学 ⁴放送大学
¹Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, ²Gunma University,
³Former of Shonan Institute of Technology, ⁴Open University of Japan

Abstract In this paper, noting the effect of cavity bubble, which is also applied to the high-pressure operated washer, we have studied a spatial screen utilizing cavity bubble as a display of holographic projected images. Cavity bubble suggests a phenomenon such that the water boils and turns to the vapor by a sudden lowering of the pressure in the underwater and many small-sized bubbles are produced in the underwater. Here, to produce bubbles stably, we first dissolve the air in the water by imposing the high water-pressure, and then, pour it into the water-tank rapidly using the aspirator whose absorbing entrance is closed tightly. Like this way, by introducing a stable lowering process of the water-pressure, we may be able to produce a constant amount of bubbles continuously. In this report, we shall introduce a new process adopted a cavity bubble screen and study its effectiveness in the projecting process of holographic images. As this result, we have seen that a spatial screen utilizing cavity bubble will be expected to have a more improved quality in the brightness of the images than before in the display of the projected holographic images.

1. はじめに

全方向視差をもち、立体像を空間にそのまま表示できる動画ホログラフィは、将来の立体 TV を開発する上で究極の手法であるといわれている。ホログラフィを利用して立体像を再生する場合には、画素構造を持つ光空間変調素子（以下、SLM）を利用するため、得られる像のサイズと視域角は、SLM の持つ画素ピッチの細かさと画素数に比例する^[1,2]。したがって、現在、流通している SLM の性能をそのまま用いた場合には、得られる像の視域が狭く、かつ大きさも小さくなる等、表示像への影響は無視できないと考えられる。この課題を解決するためには、立体像を空間に投影する方法が有効であると考えられる^[3-5]。その際に本来はスクリーンがないことが望ましいが、上述の SLM の特性を補うためには、長時間にわたって安定した空間スクリーンを構成することが必要不可欠となる。この観点から、水中で生成したマイクロバブル^[6]をミストに代わる"空間スクリーン"として活用する投影法を検討した^[7,8]。しかし、これらの方法ではバブル発生機構の微調整が困難である上に、バブルそのものの生成量が不足していたため、再生像の輝度向上が課題であったと考えられる。そこで、高圧洗浄機等で活用されるキャビテーション方式によるバブル生成法^[9-11]に着目し、この方法をホログラフィック再生像を投影するための空間スクリーンとして用いるシステムの構成方法とその効果について検討した。本手法では、バブルの流動性を軽減させるため、水圧を高めて空気を溶解した水を、吸気口を密閉したアスピレータにより高速で水槽内へ流

し込む方法を採用した。このように水の減圧状態を安定して継続させることにより、一定量のバブルを連続的に生成させている。本稿では、上述のキャビテーションバブルを利用したホログラフィ再生像投影装置の構成方法について述べ、それがホログラフィック再生像に及ぼす影響について検討する。

2. 提案手法による空間像投影システム

2.1. システムの全体構成

本稿で構成した立体像表示システムの全体構成を図 1 に示す。

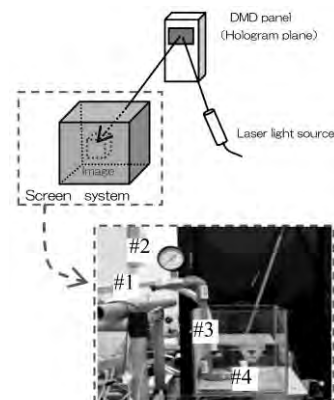


図 1 立体像再生システムの全体構成

本システムは、レーザ光源（射出口位置にレンズを内蔵または装着）、PC 制御による DMD(Digital Micro-mirror Device) パネル、次節で述べるスクリーン装置から構成される。本手法では水中に発生したキャビテーションバブルで再生光が散乱され^[12,13]、文献

[7,8]と同様に像が投影されるシステムとなっている。図中の"スクリーン生成装置"は2.2.2で述べるバブル発生機構に対応する。バブルを利用したスクリーンの考え方については次節で述べる。

2.2. 提案手法に基づくスクリーン装置

マイクロバブルを利用した空間像投影法は、ミストを利用した方法等に比べ、スクリーンの空間的および時間的な安定性が改善できる意味で有効性がある一方で、表示像の輝度の改善が未解決となっていたと考えられる。これまでの検討結果から、像輝度を向上させるためには、マイクロバブルの量を増やすことが必要となることが判明している[8]。したがって、表示像の安定化を図りながら、像輝度を向上させるための検討を行うことが重要になると考えられる。

2.2.1 キャビテーションバブルの考え方

キャビテーション効果は高圧洗浄機にも応用されており、水中での急激な圧力低下によって、水圧が飽和蒸気圧(20℃で2.33kPa)以下になり、結果的に水が沸騰して蒸気になる現象[9,10]である。これにより、水中に多数の細かい気泡(キャビテーションバブル)が発生する。本稿ではベンチュリ式によりマイクロバブルを生成した。この方法では、管路断面積の縮小と拡大をもつ流路(ベンチュリ管)に、水道蛇口から得られた「高速で気泡を含んだ水」を通過させ、急激な圧力変化によって気泡を激しく崩壊させてマイクロバブルを生成させるものとなっている。同様のことを、水槽内でスクリーンを直接回転させる手法を用いると、1気圧の場合においても、速度換算で20m/s以上の条件が要求され、スクリーンの流動性が無視できなくなると考えられる[11]。以上の理由から、本稿では水圧を高め、空気を溶解した水を、吸気口を密閉したアスピレータ(後述)へ高速で水槽内へ流し込む方法でバブルを生成した。このようにして、水の減圧状態を安定して継続させることにより、一定量のバブルを連続的に生成している。

2.2.2 バブル発生装置の考え方

キャビテーションバブルを利用したスクリーンシステムの構成例を図2に示す。従来法[7,8]との比較を行う目的で、1辺長が20cmの立方体(最大容積は7L)の水槽を使用し、次の条件でスクリーンを構成した。

- (1)給水ホース(図1,2の#1に対応)を通じて、水道口から加圧された水を取り込む。現在は、強い水圧を確保するため、水道蛇口から直接、水を取り込んでいる。
- (2)水圧計(同図の#2に対応)で水圧を確認しながら、塩ビパイプ(同図#3)を経由させ、アスピレータの入水口(同図#4)へ水を誘導する。
- (3)アスピレータ(同図#4)内を通過する際に、水が減圧され、キャビテーションバブルが生成される。

(4)アスピレータの出水口から、生成したバブルが水と共に排出される。アスピレータの吸気口を塞いでいるため、水の減圧状態は安定して継続すると考えられる。

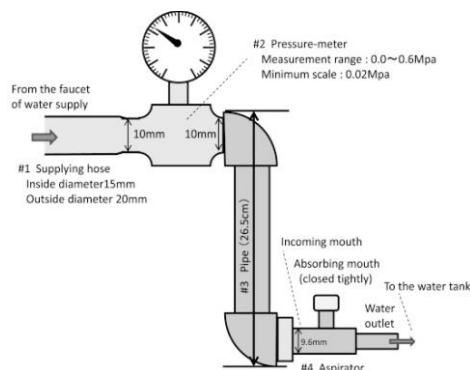


図2 スクリーン装置の構成例

なお、余った水が水槽内から溢れないよう、随時、水槽内に別途設置したポンプにより水を排水した。

3. 結果及び検討

3.1. スクリーンの光学特性

ここでは、本稿で構築したスクリーン装置の光学特性、特に、スクリーン透過後の光強度の変化について検討した結果を述べる。実験時に水道蛇口から得られた最大水圧が0.17MPaであったことを考慮して、アスピレータへの流入水圧Pを0.05MPa, 0.10MPa, 0.15MPaの3段階で設定した。

3.1.1 キャビテーションバブルの考え方

スクリーンシステムの時間的な安定性を確認するために、文献[8]と同様の測定システムを構成した上で、スクリーン内へ通過したレーザー光の強度を100ms間隔でレーザーパワーメータにより計測し、そのデータをAD変換器によりPC内へ自動取得する。なお、測定時間は5分30秒とし、測定開始後30秒を経過した時刻でスクリーン装置を起動している。得られた結果において、バブル生成量が少ないほど、透過光強度が高くなると考えられる。このようにして得られたスクリーン透過後の光強度の時間変化を図3に示す。

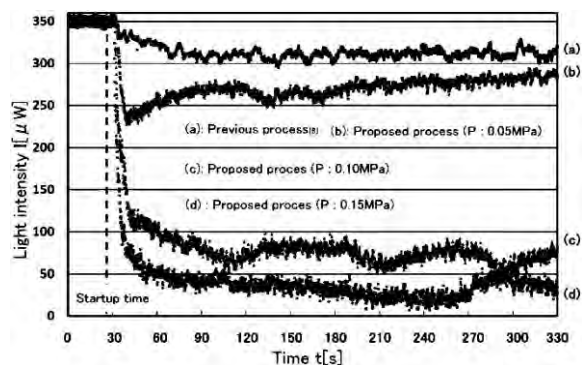


図3 スクリーン透過後の光強度の時間変化

この図において、(b)～(d)が本手法での結果であり、順に流入水圧 P が 0.05MPa, 0.10MPa, 0.15MPa の場合を示している。同図(a)は気液せん断式^[8]の場合であり、本手法での結果との比較を目的としている。これを見ると次の傾向が見て取れる。

- ・従来法である気液せん断式(a)の場合には、透過光強度が高いため、バブル生成量が少ない。
- ・本手法において、アスピレータへの流入水圧 P を 0.05MPa と低い条件に調整した場合には、従来法(a)と同様の傾向となり、バブル生成量が少ない。さらに確認実験として、アスピレータへの流入水圧 P を最大条件である 0.17MPa に設定したが、 P が 0.15MPa の場合との傾向差は確認できなかった。
- ・キャビテーション式の場合(c)～(e)では共通して、緩やかな周期で透過光強度が変動する。この変動は排水ポンプの動作タイミングとほぼ一致することから、排水時に流出したバブルが透過光強度に対して影響を与えていると考えられる。

さらに、検証の意味でバブル量を主観的に評価した。評価用図形には図 4(a)に示すテストパターンを印刷して水槽外面に取り付けた上で、水槽内にバブルを発生させた様子を観察した。この結果の一例を同図の(b)～(f)に示す。なお、(b)は従来法の気液せん断式^[8]、(c)～(f)は提案手法においてアスピレータへの流入水圧 P を変化させた場合に対応する。この結果において、水槽内の濁り具合が顕著に、すなわちテストパターンが不鮮明になる程、水槽内に多くのバブルが発生すると考えられる。

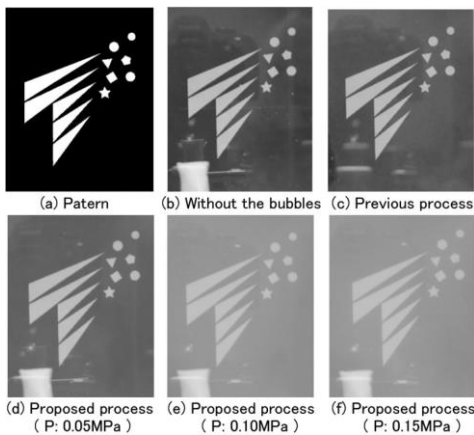


図 4 バブルの生成法と発生量の関係

これを見ると次のことが分かり、図 3 と図 4 での結果に相関性が見られた。

- ・気液せん断式の場合は、ややバブル量が少ない。
- ・本手法において、水圧 P を 0.05MPa とした場合は、濁り具合が気液せん断式の条件に近く、かつ従来法^[8]に比べてバブルが全体的に均一に広がる。

・本手法において、水圧 P を 0.10MPa に設定した場合には、濁りが顕著となりバブル発生量が多くなる。さらに、水圧 P を 0.15MPa を強めても傾向差はほとんど認められない。

3.1.1 スクリーン透過後の光の空間的安定性

スクリーン上の表示位置に対する光強度が変動すると、投影像の輝度むらの原因になる。したがって光強度の変動量が少ないことが良いスクリーンを意味すると考えられる。ここでは図 5 に示すように、スクリーンに右側から緑色レーザー光を入射させ、スクリーン内を透過するレーザー光の軌跡を撮像し、輝度断面(スクリーン上での輝度分布)^[8]を求めた。なお、計測範囲は同図に示すようにスクリーン上の中央 10cm 部分とし、不要光が入らないようにした。同図システムにおいて、スクリーンが定常状態になった時刻でスクリーン上の位置に対する輝度変化を調べた。

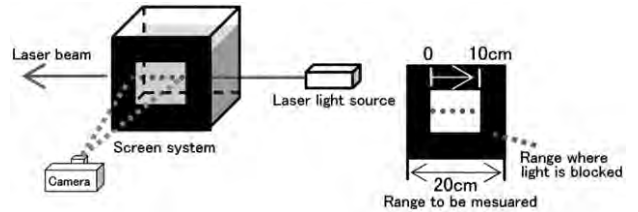


図 5 スクリーン上の輝度分布の取得方法
求めた輝度分布(最大輝度を 1 に正規化)を図 6 に示す。

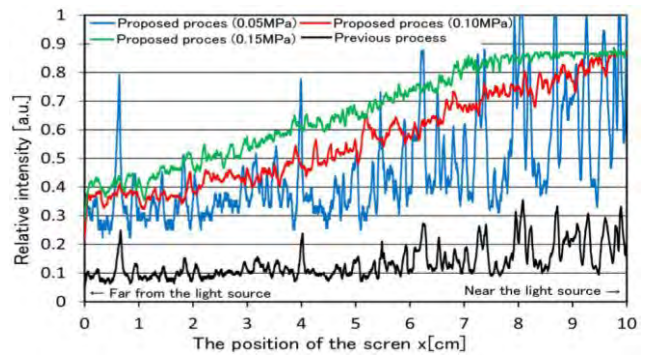


図 6 スクリーン上の位置に対する光強度の変化

同図において(a)～(c)は本手法において、アスピレータへの流入水圧 P を変化させた場合を、また、(d)は気液せん断式の場合を示している。なお、図 5 に示すようにスクリーン位置を表す座標 x の値が大きいくほど、レーザー光源に近い条件となっている。図 6 より次のことがわかる。

- ・何れの場合にも、レーザー光源からの距離が近いほどスクリーン上の輝度が高くなる。これは水中に発生したバブルによりレーザーの透過光強度が徐々に低下することが原因と考えられる。
- ・従来法の気液せん断法に比べ、本手法ではスクリー

ン上の輝度が大幅に向上する。

- ・本手法において、アスピレータへの流入水圧 P が 0.05MPa の場合には、輝度変化は従来法とやや近い傾向となるが、その変動幅が大きくなる。
- ・本手法において、アスピレータへの流入水圧 P が 0.10MPa および 0.15MPa の場合には、光源位置に近づくほどスクリーン上の輝度が緩やかに高くなるが、 0.05MPa の場合のように急激な輝度変動は発生しない。

3.2. スクリーン上での投影像特性

3.2.1 アスピレータへの流入水圧による像特性

ここでは、提案手法により得られた再生像特性の傾向について述べる。なお、評価用の再生物体には従来法(気液せん断式)^[8]との比較のため、従来法と同様の図形を用いている。スクリーン内で断層状に像が再生され、表示ボリュームが拡大される。得られた結果を赤色光($\lambda = 633\text{nm}$)、緑色光($\lambda = 532\text{nm}$)、青色光($\lambda = 473\text{nm}$)により再生した結果を図7に示す。

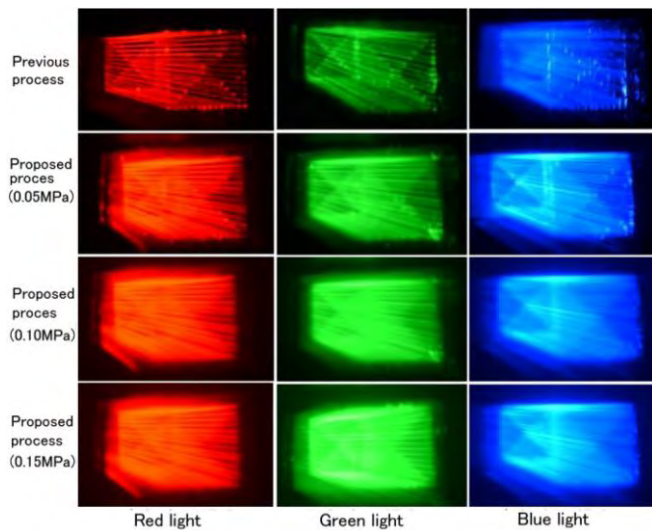


図7 本手法で得られた投影像の一例

これを見ると、アスピレータへの流入水圧 P を高めることで、投影像の輝度が高くなる上、輝度変動を軽減させる効果が確認できる。この原因はアスピレータへの流入水圧 P が高まることで、多量のバブルが水槽内に満たされたためと考えられる。この点については次節で検証する。一方でバブルが増加した影響により、像の解像力がやや低下する傾向となり、バブル生成量と像の解像力はトレードオフの関係になることがわかった。以上より、本実験の場合においてはアスピレータへの流入水圧 P を 0.10MPa した場合に良好な結果が得られた。再生波長の違いによる大きな傾向差はなかった。

3.2.2 投影像に発生する輝度変動について

前節での結果から、バブル量が増加することによりバブルの動きに起因する再生像の輝度変動が減少する

ことが確認された。ここでは、提案手法と従来法8について、投影像に発生する輝度変動を比較した。スクリーン装置起動後に無作為に3秒間隔で得られた再生像の変化について一例を図8に示す。同図のマーキング部分を見ると、従来法ではバブルの動きにより輝点が移動しているが、提案手法の場合には殆ど差異が認められないことが確認できる。これより、本手法による輝度変動の軽減効果か伺える。水圧 P の違いによる傾向差は確認できなかった。

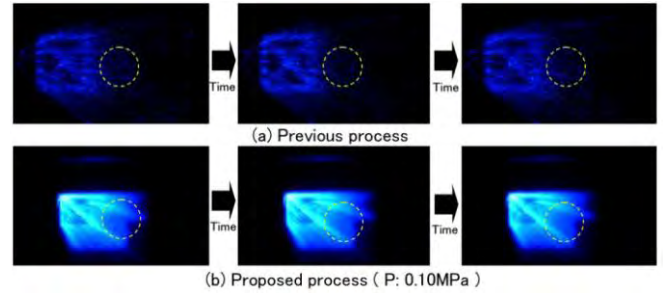


図8 時間経過に対する投影像の変化(比較実験)

4. むすび

本稿ではキャビテーションバブル利用のホログラフィック像投影用スクリーン生成装置について検討した。その結果、従来法に比べ投影像の輝度が向上し、像の輝度変動を軽減できることが明らかになった。一方で、水槽内に生成させるバブル量と投影像の解像力の間にはトレードオフの関係があることがわかった。また、現在は水道の蛇口から直接、バブルを供給するシステム構成としているため、これを循環型システムにする検討が必要であるが、これは今後の検討課題としたい。本研究は科学研究費補助金(課題番号: 17K00493)の一環として行われたものである。

文献

- [1] N.Fukaya et.al ,Opt.Eng.,35,6,1545-1549,1996.
- [2] 西川他,テレビ技報,19,8,7-11,1995.
- [3] 高野他,画電誌,39,2,134-139,2010.
- [4] 妹尾他,映情技報, 36, 12, 29-32,2012.
- [5] 川島他,FIT 講論,13,,3,179-182, 2014.
- [6] 大成他,水工学論文集,50,1345-1350,2006.
- [7] 高野他,画電誌,45,4,478-485,2016.
- [8] 高野他,画電次大講予,R3-1,2016.
- [9] 前田他,パナソニック電工技報,59,2,4-9,2011.
- [10] JSME 編,海底気液二相流技術ハンドブック,2006.
- [11] K.Sugiyama,et.al.,Proc. of the 3rd Symp. on Smart Control of Turbulence,129-138, 2001.
- [12] G.Mie, Ann. Phys. Band 25, 377-445,1908.
- [13] Von Debye P.,Ann. Phys. Band 30, 57-136,1909.