時空間分割方式電子ホログラフィの研究

代表研究者 高田直樹 高知大学教育研究部 自然科学系 理工学部門教授

1 はじめに

現在,実用化されている三次元映像技術は,2枚の二次元映像を用いて右目と左目で見える像の位置の違い(両眼視差)から立体感を知覚する方法が用いられている.しかし,再生される立体像は様々な方向から 眺めることはできない.また,視覚疲労などの健康被害が懸念される.一方,ホログラフィと呼ばれる三次 元物体を忠実に記録・再生できる技術がある.ホログラフィによって再生される三次元像は,実物を眺めて いるのと同じ現象を忠実に再現することができる.ホログラフィによる立体像は様々な角度から眺めること ができ,視覚疲労もなく長時間利用可能である.

ホログラフィを電子化(電子ホログラフィ)すれば、「究極の三次元テレビ」になると考えられている.電 子ホログラフィでは、コンピュータで作成したホログラム(CGH: Computer-generated hologram)を用いる. CGH は、電子表示デバイスである空間光変調器(SLM: Spatial light modulator)に表示される.SLM は、再 生する CGH を書き換えて表示できるため、CGH の動画再生が可能となる.CGH の動画に再生光を入射すると 空中に三次元動画を再生することができる.電子ホログラフィによる三次元テレビを実現するためには、CGH を秒間 30 枚以上表示する必要があり、CGH 計算のために高い演算能力を必要とする[1].この課題が実用化 を妨げる大きな原因の1つとなっている.また、三次元物体を構成する物体点数が膨大になると CGH が劣化 し、鮮明な三次元映像を再生することができない.本研究では、これらの課題を解決することを目的とする.

近年, GPU (Graphics Processing Unit)の浮動小数点演算性能とコストパフォーマンスは著しく向上している. CGH 計算は使用するデータ量に比べ演算量が多く並列化に向いている. 2006 年に CUDA (Compute Unified Device Architecture)と呼ばれる GPU プログラミングの統合開発環境がリリースされ, GPU を用いたシステム開発は容易になり[2], GPU を用いた CGH 計算に関する研究が報告された[3].カラー電子ホログラフィの計算高速化の研究もなされている[4,5,6].さらに,複数の GPU を搭載したマルチ GPU 環境 PC を複数台使用したマルチ GPU クラスタシステムによる CGH 計算の高速化についての研究が報告されている[7,8,9].

複数の SLM とマルチ GPU クラスタによる CGH 計算の高速化についても報告されている[7]. 膨大な画素数 からなる CGH において,分割された CGH 毎に GPU が割り当てられ計算される.計算された CGH はそれぞれの GPU に接続された SLM に直接出力されるため,スケーラビリティが高くなる.しかし SLM を複数用いるため, 非常に高価で大規模なシステムとなる.また,光学系の位置調整も容易ではない.

これに対して,Full HD の解像度を持つ SLM を1つ用いたマルチ GPU クラスタによる電子ホログラフィは, コストパフォーマンスもよく,光学系も小規模で実用的である.しかし,Full HD の解像度を持つ CGH を複 数の GPU で計算高速化を実現することは,PC 間の転送時間がボトルネックとなり容易ではない.転送時間の ボトルネックを打開するため,InfiniBand を用いたマルチ GPU クラスタシステムによるリアルタイム電子ホ ログラフィが提案されている[8,9].しかし,InfiniBand は高価であり,汎用性の高い Gigabit Ethernet を 用いて実現することが望ましい.

本研究では、まず、PC 間で転送するデータ量を低減することで CGH 計算高速化を実現する汎用性の高いギ ガビット・イーサネットを搭載したマルチ GPU クラスタシステムを構築する.そして、高速かつ高精細な再 生像を得るために、研究代表らが考案した時空間分割法をマルチ GPU クラスタシステムに適用する.最終的 に、100 万点からなる三次元物体の高精細なリアルタイム動画再生を目指す.

2 マルチ GPU クラスタ電子ホログラフィシステム

2-1 システム構成

本研究で使用したマルチ GPU クラスタ電子ホログラフィシステムを図1に示す.本システムは、マルチ GPU クラスタと光学系装置からなる.マルチ GPU クラスタは、高速計算により CGH を作成する.そして、 光学系装置は、作成された CGH から三次元映像を再生する.



図1 マルチ GPU クラスタ電子ホログラフィシステム

(1) マルチ GPU クラスタの構成

本研究で使用するマルチ GPU クラスタを図2(a)に示す. これは, CGH 表示ノード(PC 0)と M 台の CGH 計算ノード(PC 1-PC M) から構成される. 各 CGH 計算ノードは,3 枚の GPU を搭載したマルチ GPU 環 境 PC である. なお, CGH 計算ノードにおいて,1つのノードに多くの GPU を搭載した方がノード数を 減らすことができるため,コストパフォーマンスに優れる.しかし,本研究では,使用したマザーボ ードの制約上,各ノードに3 枚の GPU を搭載している.このため,搭載する GPU の合計枚数 N は,PC の台数 M を 3 倍した数となる(N = 3M).

マルチ GPU クラスタによる三次元動画再生を図2(b)に示す.図2(b)に示すように、三次元動画の 各フレームは、CGH 計算ノードの各 GPU に割り当てられる.CGH 計算ノードの各 GPU は、割り当てられ た CGH を計算する.計算された CGH は、CGH 表示ノード (PC 0) へ転送される.CGH 表示ノードは、1 枚 の GPU ボード(GPU 0)のみ搭載する.この GPU は SLM に接続される.CGH 計算ノードから受け取った CGH は、三次元動画のフレーム順に、CGH 表示ノードの GPU ボードによって SLM に表示される.三次元 動画の最初のフレームが、CGH 計算なされて CGH 表示ノードの GPU 0 によって SLM に表示された後は、 一定時間間隔 T で表示される.CGH 計算時間が、N×T 以内であれば図2(b)のように再生することが可 能となる.

(2)光学装置

光学系装置は、レーザ、対物レンズ、コリメータレンズ、SLMからなる.光源となるレーザ光から







の光を対物レンズにより点光源にし、コリメータレンズによって平行光を作る.この平行光を SLM 上 に投影されたバイナリ CGH 画像に入射する.SLM を覗き込むと三次元映像が空中に再生される.

2-2 本システムによるリアルタイム三次元動画再生

(1) マルチ GPU クラスタにおけるノード間通信

図 3 に CGH 計算の座標系を示す.三次元物体を構成する点数を N_p とする.そのとき,ホログラム面上の点($x_{\alpha}, y_{\alpha}, 0$)における光強度 I は次式となる.

$$I(x_{\alpha}, y_{\alpha}, 0) = \sum_{j=1}^{N_p} \cos\left[\frac{\pi}{\lambda z_j} \{(x_{\alpha} - x_j)^2 + (y_{\alpha} - y_j)^2\}\right]$$
(1)

ここで、変数 α はホログラム点を表す.物体点の座標を (x_i, y_i, z_i) とした. λ は再生光の波長である.

CGH 上の1 画素の光強度 I を求めるには、式(1)をj = 1から N_p まで繰り返し計算する必要がある. よって、1 枚の CGH を作成するには、ホログラムの解像度を $W \times H$ とすると、その計算量は $(W \times H) \times N_p$ に比例する.

(2) マルチ GPU クラスタにおけるノード間通信

CGH によるリアルタイム三次元動画再生を実現するには、1 秒間に 30 枚の CGH を表示しなければな らない. つまり、CGH 表示時間間隔が約 33ms 以内でなければならない. ネットワークに Gigabit Ethernet を使用した場合、1 枚の CGH データ転送時間は次のようになる.

$$\frac{32[bit] \times 1,920[pixel] \times 1,024[pixel]}{1 \times 10^9[bps]} \approx 63[ms]$$
⁽²⁾

ここで, CGH の解像度を 1,920×1,024, 1 画素あたりのデータを 32 bit とした.式(2) からわかるように, Gigabit Ethernet では GPU 間での通信がボトルネックとなる.

高速なネットワークとして InfiniBand を搭載したシステムが提案された[8]. InfiniBand は高い信 頼性,可用性,保守性を持つ.また,メモリバンド幅が広域帯で,低レイテンシ,高スループットとい った特徴がある.転送レート QDR (Quad data rate)の HCA およびスイッチングハブが使用された. InfiniBand QDR の実効転送レートは 32Gbps であり,実効速度は約 25Gbps であった.このとき,1枚 の CGH 転送時間は次のようになる.

$$\frac{32[bit] \times 1,920[pixel] \times 1,024[pixel]}{25 \times 10^{9}[bps]} \approx 3[ms]$$
(3)

これにより通信のボトルネックが解消され、リアルタイム三次元動画再生が可能となる.しかし、 InfiniBand は高価であり、汎用性の点からも Gigabit Ethernet を用いて実現することが望ましい.

(3) パッキング処理によるノード間通信の低減

本研究では、CGH の計算結果を2値化したバイナリ CGH を用いる.バイナリ CGH は、最初に、式(1) から CGH 上の各画素の光強度 I を求める. CGH 上の各画素の光強度 I は、単精度浮動小数点の数値データ (32 bit) で表される.バイナリ CGH では、光強度 I の値が0 より小さいところを黒、それ以外を白とし、黒と白の2 色のバイナリ CGH 画像を作成する.よって、バイナリ CGH の各画素におけるデータは、2 値(1 bit) で表すことが可能である.これにより、1 画素あたりのデータ量は1 ビットとなる.このとき、1 枚の CGH データの転送時間は次のようになる.

$$\frac{1[bit] \times 1,920[pixel] \times 1,024[pixel]}{1 \times 10^{9}[bps]} \approx 2[ms]$$
(4)

これにより, Gigabit Ethernet でも通信速度のボトルネックが解消される.

しかし、1 画素あたり1ビットのデータを転送するには、バイナリ CGH のパッキング処理が必要に なる.パッキング処理により、32 ビットのデータ型の配列の1つの要素に32 画素分の2 値データを 格納する(図42).パッキング処理により表示ノードへ転送するデータ量が1/32 に低減される.表示 ノードでは、パッキングされた転送データを受信後、アンパッキング処理によりバイナリ CGH を復元 し、SLM へ表示する.パッキング処理とアンパッキング処理を用いた場合、マルチ GPU クラスタによる 三次元動画再生は図4のように行われる.

(4) 性能評価

12 台の CGH 計算ノードと 1 台の CGH 表示ノードの合計 13 ノードからなるマルチ GPU クラスタ (SYSTEM A(表 1))において,ネットワークに InfiniBand QDR を用いた場合(図 2)と Gigabit Ethernet にパッキング・アンパッキング処理を適用した場合(図 4,5)について性能評価を行った.その結果を 図 6(a)に示す.ここで,CGH の解像度を 1,920×1,024 とした.図 6(a)には,ネットワークに Gigabit Ethernet を用いた場合において,パッキング・アンパッキング処理を CPU(Intel Core i7 4770)で行 ったときと GPU(NVIDIA GeForce GTX TITAN X)で行ったときの 2 つの結果を示している.GPU でパッキ ング・アンパッキング処理を行ったときの結果は,InfiniBand をネットワークに用いた場合の結果と 差はなかった.一方,パッキング・アンパッキング処理を CPU で行った場合は、2 つの結果と比べ遅



図4 パッキング処理を用いたノード間通信



図5 パッキング処理を行ったリアルタイム三次元動画再生

くなった.この原因として,パッキング・アンパッキング処理時間の影響が考えられる.CPU によるパ ッキング・アンパッキング処理時間は,それぞれ,7.22 ms と 6.61 ms であった.これに対し,GPU に よるパッキング・アンパッキング処理時間は,0.27 ms と 0.20ms であった.GPU によってパッキング・ アンパッキング処理を高速化することで,InfiniBand をネットワークに使用した場合と同等の性能を 達成することができていることがわかる.

次に、GPU に NVIDIA GeForce GTX TITAN X を用いた SYSTEM A と、GPU に NVIDIA GeForce 1080 Ti を用いた SYSTEM B の 2 つのマルチ GPU クラスタ電子ホログラフィシステムについて性能評価を行っ た.SYSTEM B も、SYSTEM A と同じく、4 台の CGH 計算ノードと1 台の CGH 表示ノードの合計 5 ノー ドからなるマルチ GPU クラスタである.SYSTEM B のスペックを表1に示す.三次元物体を構成する物 体点数に対するそれぞれのシステムによる CGH 表示時間間隔を図 6(b)に示す.どちらの結果も、三次 元物体を構成する物体点数に対して CGH 表示時間間隔は比例している.そして、SYSTEM B は、SYSTEM A の約 2 倍の算高速化を実現し、約 20 万点からなる三次元物体のリアルタイム再生が可能であること

表1 2種類のマルチGPUクラスタのスペック				
	SYSTEM A	SYSTEM B		
CPU	Intel Core i7 4770 (Clock speed: 3.4 GHz)	Intel Core i7 7800X (Clock speed: 3.5 GHz)		
Main memory	DDR3-1600 4 GB	DDR4-2666 16 GB		
OS	Linux (CentOS 7.3 x86_64)	Linux (CentOS 7.6 x86_64)		
Software	NVIDIA CUDA 8.0 SDK, OpenGL, MPICH 3.2	NVIDIA CUDA 10.1 SDK, OpenGL, MPICH 3.2		
GPU	NVIDIA GeForce GTX TITAN X	NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti		





が確認された.また,SYSTEM Bのマルチ GPU クラスタは,文献[7]の最適化した CGH 計算アルゴリズ ムを用いて,CGH 計算ノードの持つ理論性能の約 75%の性能を発揮している.

3 膨大な物体点からなる三次元物体の高精細な動画再生

3-1 再生像の画質劣化

CGH は、図7(a)のように物体点の干渉縞が重なりあって構成される.本研究では、振幅ホログラムを用いるため、明るい再生像を得るために白と黒の2色で描かれるバイナリCGH を用いた.三次元物体を構成する物体点数が膨大になると、干渉縞は図7(b)のように広範囲にわたって縞が塗りつぶされる.干渉縞が重なったことで白もしくは黒で塗りつぶされてしまった部分を赤丸で示す.

物体点数が 1,064,462 点で構成された三次元物体(図 8(a))の再生像を図 8(b)に示す.再生像が劣化しているのがわかる.



図 7 CGH の劣化



(a) 三次元物体モデル(b) 再生像図8 膨大な物体点で構成された三次元物体再生像(物体点数:1,064,462点)

3-2 再生像の高精細化を目的とした時空間分割方式電子ホログラフィ

膨大な物体点からなる三次元物体の再生像の劣化は、干渉縞が重なり合うことにより CGH が劣化する ことによる.これを改善するべく、研究代表者らは、再生像の高精細化を目的とした時空間分割法[10]を 考案している.

三次元物体の物体点位置座標データ(物体点データ)を複数に分割し、分割された物体点データに対し て CGH 計算を行う.計算した CGH を次々に表示することで、残像効果により、物体点の補完された元の三 次元物体に等しい再生像を表示することができる.図 9(a) は三次元物体を分割しないとき、図 9(b) は三 次元物体を 6 分割したときの CGH を示す.各図において赤丸で囲んだ箇所を比較すると、図 9(a) は白ま たは黒で塗りつぶされた箇所が多い.図 9(b) は塗りつぶされていた箇所が減り、より多く干渉縞が再現 されていることがわかる.このように、CGH 1 枚あたりの物体点数が 1/6 に減少するため、高精細な再生 像を得ることができる.

図 10 に分割数が3の場合における再生像の高精細化を目的とした時空間分割法を示す[10]. 次の手順

で行われる.

- 1. 各フレームの物体点データを3分割する.
- 2. 各フレームにおいて3分割された物体点データ毎に CGH 計算を行う.
- 3. 作成した3つのCGHを次々に表示する.

元の三次元物体の動画のFrame 1が3フレームFrame 1', Frame 2', Frame 3'となる. これらの3フレームを高速に再生することによって,残像効果により補完されて元のFrame 1の全ての物体点が表示されることになり,高精細な三次元物体の再生が可能となる.



図 11 分割数に対する再生像の高精細化

図8(a)に示した三次元物体モデル(物体点数:1,064,462点)において,分割数に対する再生像の高精細 化を調べた.分割なしの物体点データと,2,4,6分割した物体点データを用意し,時空間分割法(図10) を用いた.その結果を図11に示す.図11において,分割なしと2分割の再生像は明らかに画質が劣化し ていることが分かる.また,4分割と6分割の再生像は,分割なしと2分割に比べ画質が改善している. しかし,赤枠で囲まれた拡大箇所を比較すると,4分割では不十分である.6分割の場合は,十分高精細 な再生像が得られていることがわかる.

本手法は再生像の高精細化を目的とする時空間分割法であり,すべての分割された三次元物体に対して CGH を計算し,すべての CGH を再生する.よって,本手法を用いる場合,再生される動画のフレーム数は, 元の三次元物体の動画のフレーム数の分割数倍となる.そのため,元の三次元動画再生と同じ速度で再生 するためには,分割数倍だけ高速に再生しなければならない.しかし,CGH 計算時間は物体点数に比例す ることから,本手法によってリアルタイム再生を実現することは極めて困難である.



4 リアルタイム時空間分割方式電子ホログラフィによる高精細な三次元動画再生

4-1 CGH 計算高速化を目的とした時空間分割電子ホログラフィ

研究代表者らは、CGH 計算の高速化を目的とした時空間分割法[11] も考案している.図12 に、分割数 が3の場合のCGH 計算の高速化を目的とした時空間分割法[11] を示す.本手法においては、3分割した 三次元物体のうち、1つのフレームのみを選択する.また、図12 に示すように、Frame 1においてDiv 1-1を選択した場合、Frame 2ではDiv2-2、Frame 3 ではDiv3-3、・・・のように、一つずつずらして選 択を行う.ずらして選択することにより、常に同じ物体点が表示されず間引かれてしまうことを防ぐ.選 択したフレームについてそれぞれ CGH 計算を行い、次々に表示する.残像効果により直前のフレームの 物体点が補完され、物体点が多く見える.Frame 1'、2'、3'、・・・のそれぞれの物体点数は 1/3 に減 ったため、それぞれの CGH 計算時間は 1/3 となる.したがって、1 GPU あたり数万点くらいの物体点数の 多い三次元物体をリアルタイムに再生することが可能となる.しかし、各フレームの CGH 計算時間が長く なると、残像効果が得られず、補完された再生像を得ることができない.そのため、再生像が劣化する 100 万点以上の膨大な物体点数からなる三次元物体に本手法は適用されていなかった.

4-2 マルチ GPU クラスタ電子ホログラフィシステムを用いた高速高精細な時空間分割電子ホログラフィ

本研究で構築した表1に示す SYSTEM B のマルチ GPU クラスタシステムは、20 万点からなる三次元物体 のリアルタイム再生を実現できることが確認された.また、本研究で用いる三次元物体モデルは約100万 点であり、6分割することで高精細な三次元物体の再生像を得ることができた.よって、表1に示す SYSTEM B のマルチ GPU クラスタシステムに、CGH 計算の高速化を目的とした時空間分割法[11]を適用すれば、120 万点までの膨大な物体点数からなる三次元物体の高精細かつリアルタイム再生を実現することができる ことになる.そこで、図8(a)に示した三次元物体モデルを用いて、本研究で提案する100万点からなる 三次元物体の高精細なリアルタイム再生を試みた. 表1に示す SYSTEM B のマルチ GPU クラスタに、6 分割の CGH 計算の高速化を目的とした時空間分割法 を適用したとき、その CGH 表示時間間隔を図 13 に示す.ここで、再生される CGH の解像度は 1,920×1,024 とした.図 13 より約 120 万点近くまでリアルタイム再生が可能であることが確認された.しかし、これ は計算性能を評価したものであり、三次元物体の位置座標データはキャッシュに保存されているデータを 読み込んだものである.100 万点からなる三次元物体のリアルタイム動画再生を実現するには、三次元物 体の位置座標データの読み込み時間も無視することはできない.そこで、三次元物体の位置座標データを SSD (Intel Optane 900P (280 GB)) に保存し、さらに、図 14 に示すように三次元物体の位置座標データ の読み込みを GPU による CGH 計算と並列化した.図 8(a)に示した三次元物体モデル(物体点数:1,064,462 点)を用いて、空間に対して6分割で動画再生を行ったところ、CGH 表示時間間隔は 32.7 ms であった. 再生されたリアルタイム三次元動画のスナップショットを図 15 に示す.本研究により、100 万点からな る三次元物体の高精細なリアルタイム動画再生に成功した.



図 13 高速高精細な時空間分割法による CGH 表示時間間隔(6分割)



図14 三次元物体の位置座標データの読み込み



0.00 second

6.03 seconds

12.16 seconds



【参考文献】

- T. Sugie, T. Akamatsu, T. Nishitsuji, R. Hirayama, N. Masuda, H. Nakayama, Y. Ichihashi, A. Shiraki, M. Oikawa, N. Takada, Y. Endo, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "High-performance parallel computing for next-generation holographic imaging", Nature Electronics 1, pp.254–259 (2018).
- [2] NVIDIA, NVIDIA CUDA Tool Kit download, https://developer.nvidia.com/cuda-downloads
- [3] N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka, A. Shiraki, and T. Sugie, "Computer generated holography using a graphics processing unit," Opt. Express 14, pp.603- 608 (2006).
- [4] A. Shiraki, N. Takada, M. Niwa, Y. Ichihashi, T. Shimobaba, N. Masuda, T. Ito, "Simplified electroholographic color reconstruction system using graphics processing unit and liquid crystal display projector," Optics Express 17, 16038-16045 (2009).
- [5] H. Araki, N. Takada, H. Niwase, S. Ikawa, M. Fujiwara, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Real-time timedivision color electroholography using a single GPU and a USB module for synchronizing reference light," Applied Optics 54, 10029-10034 (2015).
- [6] H. Nakayama, N. Takada, Y. Ichihashi, S. Awazu, T. Shimobaba, N. Masuda, T. Ito, "Real-time color electroholography using multiple graphics processing units and multi high-definition liquid-crystal display panels," Applied Optics 49, 5993-5996 (2010).
- [7] N. Takada, T. Shimobaba, H. Nakayama, A. Shiraki, N. Okada, M. Oikawa, N. Masuda, T. Ito, "Fast high-resolution computer-generated hologram computation using multiple graphics processing unit cluster system," Applied Optics 51, pp. 7303-7307 (2012).
- [8] H. Niwase, N. Takada, H. Araki, Y. Maeda, M. Fujiwara, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Real-time electroholography using a multiple-graphics processing unit cluster system with a single spatial light modulator and the InfiniBand network," Optical Engineering 55, 093108 (2016).
- [9] H. Araki, N. Takada, S. Ikawa, H. Niwase, Y. Maeda, M. Fujiwara, H. Nakayama, M. Oikawa, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Fast time-division color electroholography using a multiple-graphics processing unit cluster system with a single spatial light modulator", Chinese Optics Letters 15, 120902-(2017).
- [10] N. Takada, M. Fujiwara, C. W. Ooi, Y. Maeda, H. Nakayama, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "High-speed 3-D electroholographic movie playback using a digital micromirror device", IEICE Trans. Electron. E100-C, 978-983 (2017).
- [11] H. Niwase, N. Takada, H. Araki, H. Nakayama, A. Sugiyama, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Real-time spatiotemporal division multiplexing electroholography with a single graphics processing unit utilizing movie features," Optics Express 22, 28052-28057 (2014).

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
コストパフォーマンスに優れたマルチ GPU 環境電子ホログラフィシステムの提案	第19回 情報科学技術フォーラム	2020年9月(予定)
ホログラフィックプロジェクタを用いた遠 隔三次元描画システムの検討	第19回 情報科学技術フォーラム	2020年9月(予定)
グルーピングによって計算効率化した階調 表現可能なリアルタイム電子ホログラフィ	3 次元画像コンファレンス 2020	2020年7月(予定)
指先の軌跡を描写する位相変調型ホログラ フィックプロジェクションシステム	3 次元画像コンファレンス 2020	2020年7月(予定)

〈発 表 資 料〉

ポータブルホログラフィックプロジェクタ を用いた3次元物体全周投影	3 次元画像コンファレンス 2020	2020年7月(予定)
Real-time spatiotemporal division multiplexing electroholography for 1,200,000 object points using multiple- graphics processing unit cluster	Chinese Optics Letters	2020 年 7 月
Real-time electroholography using a single spatial light modulator and a cluster of graphics-processing units connected by a gigabit Ethernet network	Chinese Optics Letters	2020 年 2 月
Real-time color holographic video reconstruction using multiple-graphics processing unit cluster acceleration and three spatial light modulators	Chinese Optics Letters	2020 年 1 月
Holographic Projection System for Drawing Fingertip Trajectory Obtained from Depth Camera	Proc. of the International Display Workshops 2019	2019年11月
Real-Time Spatiotemporal Division Multiplexing Electroholography of Point-Cloud 3D Model Comprising 920,000 Points Using Multiple GPU Cluster System	Proc. of the International Display Workshops 2019	2019 年 11 月
Cost-Effective Portable Holographic Projector Using a Single Board Computer	Proc. of the International Display Workshops 2019	2019年11月
Efficient Computation of Binary- Weighted Computer-Generated Hologram for Gradation Representable Electroholography	Proc. of the International Display Workshops 2019	2019 年 11 月
ギガビット・イーサネットを搭載したマル チ GPU クラスタシステムによる計算機合成 ホログラムの計算高速化	第 18 回 情報科学技術フォーラム	2019 年 9 月
階調表現可能な時分割電子ホログラフィに おける重み付きバイナリ計算機合成ホログ ラムの効率的な計算手法の検討	第 18 回 情報科学技術フォーラム	2019年9月
ホログラフィックプロジェクタによる空中 投影	第18回 情報科学技術フォーラム	2019 年 9 月
マルチ GPU クラスタを用いた計算機合成ホ ログラム高速計算システムのクラウド化へ の検討	第 18 回 情報科学技術フォーラム	2019 年 9 月
ホログラフィックプロジェクションを用い た3次元投影の検討	3 次元画像コンファレンス 2019	2019年7月
Pascal アーキテクチャを搭載した GPU で構 成した汎用型マルチ GPU クラスタシステム によるリアルタイム電子ホログラフィ	3 次元画像コンファレンス 2019	2019 年 7 月
マルチ GPU クラスタシステムのクラウド 化によるフリンジプリンタへの応用	3 次元画像コンファレンス 2019	2019年7月
重み付きバイナリ計算機合成ホログラムに よる階調表現可能な時分割表示方式電子ホ ログラフィの計算効率化 -重複計算除去 -	3 次元画像コンファレンス 2019	2019 年 7 月
Real-Time Holographic Projection of 3D- Gradation Movie Using Binary-Weighted Computer-Generated Hologram and Multiple GPU Cluster	Proc. of the International Display Workshops 2018	2018年12月
Real-Time Spatiotemporal Division Multiplexing Electroholography Using Multiple GPU Cluster System with Gigabit Ethernet Network	Proc. of the International Display Workshops 2018	2018 年 12 月

High-speed 3-D Spatiotemporal Division Multiplexing Holographic Movie Playback with High Image Quality by SSD and DMD	Proc. of the International Display Workshops 2018	2018 年 12 月
圧縮・復号処理を高速化した汎用型 GPU ク ラスタシステムによるリアルタイム電子ホ ログラフィ	3 次元画像コンファレンス 2018	2018 年 7 月
DMD を用いた電子ホログラフィによる高速・ 高精細な三次元動画再生	3 次元画像コンファレンス 2018	2018 年 7 月
重み付きバイナリ計算機合成ホログラムを 用いたリアルタイム電子ホログラフィ	3 次元画像コンファレンス 2018	2018 年 7 月