ライトフィールドカメラおよび圧縮センシング を用いたホログラフィに関する研究

2017年1月

千葉大学大学院工学研究科

人工システム科学専攻 電気電子系コース

遠藤 優

(千葉大学学位申請論文)

ライトフィールドカメラおよび圧縮センシング を用いたホログラフィに関する研究

2017年1月

千葉大学大学院工学研究科

人工システム科学専攻 電気電子系コース

遠藤 優

概要

ホログラフィは光の波面を記録・再生する技術であり,3次元ディスプレイやセンシングに応用 されている.近年,このホログラフィにライトフィールドイメージングや圧縮センシングなどの新 しいイメージング技術が応用されている.本研究では,ホログラフィにおけるライトフィールドイ メージングの利用と,圧縮センシングを用いたホログラフィであるコンプレッシブホログラフィに おける課題に取り組んだ.具体的には,(1)ライトフィールドカメラを用いた実シーンのホログラ ム作成,(2)コンプレッシブホログラフィにおける計算の高速化に取り組んだ.

ライトフィールドカメラを用いた実シーンのホログラム作成では、市販のライトフィールドカメ ラである Lytro を用いたホログラム計算手法に取り組んだ. Lytro は従来のインテグラルイメージ ングに基づく撮影系より小型かつポータブルという利点がある.ホログラムの作成は、光線サンプ リング面に基づくホログラム計算手法を応用した.本手法の妥当性を検証するため、数値・光学再 生を行い、奥行きを持った再生像が得られることを確認した.

コンプレッシブホログラフィにおける計算の高速化では,GPU (Graphics Processing Unit) に よる計算の高速化に取り組んだ.コンプレッシブホログラフィは信号再構成に要する計算コストが 大きいが,GPU による並列計算によって高速化が期待できる.コンプレッシブホログラフィの2 つの基本的な問題に対して GPU 高速化を行い,一般的なプロセッサと比較して 20–30 倍の高速化 を達成した.

A study on holography using light field camera and compressed sensing

Yutaka Endo

Abstract: Holography is a technique to record and reconstruct wavefronts and used to three-dimensional display and sensing. In recent years, many advanced imaging techniques have been developed and applied in holography, such as light field imaging and compressed sensing. This study is related to applications of those imaging techniques in holography. Specifically, this study shows (1) hologram generation of real scenes using a light field camera and (2) fast computation for compressed sensing in holography called compressive holography.

As for (1), I developed a method to calculate holograms of real scenes using a commercial portable light field camera, Lytro. Since Lytro is compact and easy-to-use, we can easily construct a portable capture system to obtain light fields for hologram generation. The proposed method uses the hologram calculation based on ray-sampling planes where we convert light fields captured with Lytro into wavefronts and generate holograms from those wavefronts. I tested both numerical and optical reconstructions of the holograms and showed that the hologram calculation from captured data with Lytro was successful.

As for (2), I developed fast signal reconstruction in compressive holography using a graphics processing unit (GPU). Although signal reconstruction in compressive holography requires high computational cost due to large data sizes, GPU-based parallel computing efficiently accelerates it. I developed GPU-accelerated signal reconstruction for two applications in compressive holography and achieved 20–30 times speed-up over a normal processor.

Key words : holography, light field imaging, compressed sensing, computer-generated hologram, compressive holography, GPU computing

目次

第1章	はじめに	1
第2章 2.1 2.2 2.3	ホログラフィ ホログラフィによる波面記録と再生	3 3 4 6
第 3 章 3.1 3.2 3.3 3.4	ポータブルライトフィールドカメラを用いた実シーンのホログラム作成 はじめに	8 8 10 15 22
第4章 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	コンプレッシブホログラフィの GPU 高速化 はじめに	24 24 25 29 35 37 42
第5章	結論	44
付録 A	光線-波面変換	45
謝辞		47
参考文献		48
業績リス	\mathbf{k}	60

第1章

はじめに

ホログラフィは光の波面 (振幅と位相) を記録・再生できる技術であり,1948年に D. Gabor に より顕微鏡技術として発明された [1]. 一般的な結像に基づく写真技術はレンズによって記録対象 の像を形成し,その光強度を記録するため,光の位相情報を記録できない.ホログラフィでは参照 波と呼ばれる記録用の照明を用いることで,位相情報を含めた波面を記録することができる.参照 波は記録対象の波面と干渉し,干渉縞が形成される.この干渉縞の光強度は振幅・位相情報を含 み,写真乾板やイメージセンサによる記録が可能となる.このようにして記録された縞パターンは ホログラムと呼ばれる.ホログラムに記録された波面の再生は,参照波と同様の光をホログラムに 照射して行われる.ホログラム自体は縞パターンであるため,結像に基づく写真技術とは異なり, そこに記録対象の像は写っていない.しかし,再生照明を利用した波面再生によって記録対象の像 を3次元的に形成することができる.そのため3次元的な像の記録・再生が可能であり,計測技術 や3次元映像表示などに応用されている.

現在,情報処理技術の発展によりホログラフィの活用の幅が大きく広がっている.情報処理技術 の発展は目覚ましく,C.Shannonによって情報理論 [2]が発表されてから様々な分野に影響を与 え,現代社会を支える重要な基盤となっている.また 1946年に発表された黎明期のコンピュータ である ENIAC (Electric Numerical Integrator And Computer)[3]が発明されてから計算性能は 飛躍的に向上しており,データの高速な処理が可能となっている.これらに加え,1960-70年代に は固体撮像素子 [4]や液晶ディスプレイ [5]が開発され,光強度をデジタルデータとして記録・再生 することが可能となり,ホログラフィを含めた光学全般で情報処理活用の機運が高まっていった. ホログラフィでは,従来光学的に行われていた波面の記録・再生を情報処理で行うアプローチが盛 んに研究されている.波面の記録を情報処理によって行う手法では,計算処理によって作成したホ ログラムをディスプレイ装置に表示し,光学的に像再生を行う.これは電子ホログラフィ (図 2.2 を参照)と呼ばれるホログラフィック3次元ディスプレイ技術などに応用されている.逆に,波面 の再生を計算処理によって行う場合,光学的に生成したホログラムをイメージセンサで取得し,計 算処理によって像再生を行う.これはデジタルホログラフィ (図 2.3を参照)と呼ばれ,顕微鏡な どの計測技術に応用されている.電子ホログラフィ,デジタルホログラフィは光学的な波面記録・ 再生に比べて柔軟性や拡張性に優れており,現在活発に研究が行われている.

イメージングやディスプレイ分野においても情報処理は積極的に活用されている.特に情報処理 を行うことを前提として光学系を設計するイメージング法およびディスプレイ技術は,コンピュ テーショナルイメージング,コンピュテーショナルフォトグラフィ,コンピュテーショナルディス プレイなどと呼ばれる [6,7].代表的な例として,符号化開口イメージング [8],ライトフィールド カメラ [9]・ディスプレイ [10], 圧縮センシング [11] などが挙げられる.また電子ホログラフィお よびデジタルホログラフィは,計算処理による波面の記録・再生を前提にシステムが設計されてお り,コンピュテーショナルイメージングおよびコンピュテーショナルディスプレイの手法の一つと みなせる.

近年のコンピュテーショナルな手法をホログラフィに応用することで,ホログラフィにおける課 題の解決や,新しい成果が得られ始めている。例えばホログラフィにおける圧縮センシングの応用 は,3次元物体分布推定 [12] をはじめとして多数の研究成果が報告されており,その一方で新たな 課題も生んでいる。特に大容量データの取得・伝送・保存が可能となったことや,計算処理の高度 化・複雑化によって,従来よりも高性能・高効率な計算システムや計算アルゴリズムが必要となっ てきている。

本研究ではコンピュテーショナルイメージングの技術をホログラフィに活用するとともに,それ によって生まれた課題の解決を目指す.具体的には次の二つの研究に取り組んだ.

一つ目は、ライトフィールドカメラを利用して電子ホログラフィにおけるコンテンツ生成の課題 を解決することを目的とした研究である.電子ホログラフィでは計算処理によってホログラムを作 成するが、そのためには表示したいコンテンツの情報が必要である.特に表示したいコンテンツが 実シーンである場合、その3次元情報を取得してホログラムに変換する必要がある.この3次元 情報の取得は、カメラアレイを用いた複数視点画像の取得や、レンジセンサを用いた奥行き情報の 取得などが行われている.本研究では市販のライトフィールドカメラである Lytro を用いる手法 に取り組んだ.ライトフィールドカメラはライトフィールドと呼ばれる複数視点画像をシングル ショットで取得できる.さらにカメラアレイなどの大規模な撮影系よりもコンパクトであり、ポー タブルな撮影が可能である.本研究では、Lytro をホログラム生成に用いる手法を提案し、その妥 当性を数値・光学再生により確認した.

二つ目は、圧縮センシングをホログラフィに応用した手法における計算コストの削減を目的とし た研究である. 圧縮センシングをホログラフィに応用した手法はコンプレッシブホログラフィと 呼ばれ、様々な手法が提案されており、有用性が示されている. その一方で計算コストが大きい といった問題があり、実用化への課題となっていた. 本研究ではこの問題を解決するために GPU (Graphics Processing Unit)を用いた計算の高速化に取り組んだ. GPU は多数のシンプルなプロ セッサコアからなるアーキテクチャを持ち、様々な分野で並列計算機として活用されている. この GPU による並列計算をコンプレッシブホログラフィの二つの基本的な問題に対して適用し、一般 的なプロセッサと比較して 20-30 倍の高速化を達成した.

本論文は以下のように構成される.第2章では,ホログラフィの原理とその応用である電子ホロ グラフィと3次元イメージングについて述べる.第3章では,ポータブルなライトフィールドカメ ラである Lytro を用いた実シーンのホログラム作成手法について述べる.第4章では,圧縮センシ ングを用いたホログラフィであるコンプレッシブホログラフィの計算処理を GPU によって高速化 する手法について述べる.第5章では,本研究のまとめと今後の展望について述べる.

 $\mathbf{2}$

第2章

ホログラフィ

2.1 ホログラフィによる波面記録と再生

ホログラフィ (holography) は, 1948 年に Dennis Gabor によって提案された, 波動の干渉・回折 を利用した波面の記録・再生技術であり [1], 波面が記録された縞パターンをホログラム (hologram) と呼ぶ.通常の光イメージング技術では光の強度だけしか記録できないが,ホログラフィでは波面 の振幅と位相を強度情報として記録することができる.この性質からホログラフィは様々な分野に 活用されており,例えば,3次元ディスプレイ [13–16],顕微鏡・干渉計測技術 [17–19],データス トレージ [20, 21],暗号化技術 [22–25],回折光学素子 [26, 27] などに応用されている.本節では, Goodman の「フーリエ光学」[27] を基に,ホログラフィの原理について簡単に述べる.

ホログラフィによる波面の記録および再生の過程を示す. 図 2.1 にホログラフィによる波面の 記録・再生の概略図を示す.まずコヒーレント光で照明された物体からやってくる波面 (物体波 object wave)の記録を考える (図 2.1(a)).物体波を記録するには、物体波と互いにコヒーレント な記録用の波面 (参照波 reference wave)を導入し、干渉縞を記録する干渉法 (interferometry)を 利用する.物体波 $a(\mathbf{r})$ 、参照波 $A(\mathbf{r})$ をそれぞれ

 $a(\mathbf{r}) = |a(\mathbf{r})| \exp \left[\phi(\mathbf{r})\right]$ $A(\mathbf{r}) = |A(\mathbf{r})| \exp \left[\psi(\mathbf{r})\right]$

とおくと、干渉により生じる強度分布 I(r) は、

$$I(\mathbf{r}) = |A(\mathbf{r}) + a(\mathbf{r})|^{2}$$

= $|A(\mathbf{r})|^{2} + |a(\mathbf{r})|^{2} + A^{*}(\mathbf{r}) a(\mathbf{r}) + A(\mathbf{r}) a^{*}(\mathbf{r})$
= $|A(\mathbf{r})|^{2} + |a(\mathbf{r})|^{2} + 2|A(\mathbf{r})| |a(\mathbf{r})| \cos [\psi(\mathbf{r}) - \phi(\mathbf{r})]$

となる.ここで, A* は A の複素共役を表す.このように,物体波の振幅と位相が干渉縞の強度分 布として現れるため,この強度分布を記録することで,物体波の複素振幅を記録することができる.

干渉縞を写真材料を利用して光学的に記録することを考える. 写真フィルムの振幅透過率分布 t_A が露光量に対して線形に変化すると仮定し,写真乾板に対して一様な参照波強度 $|A|^2$ で記録を 行うとすると,

$$t_A = t_b + \beta' \left(|a|^2 + A^* a + A a^* \right)$$



図 2.1: ホログラフィ: (a) 波面記録. (b) 波面再生.

となる.ここで、 t_b は写真材料と一様な参照波照明強度 $|A|^2$ に依存する一様なバイアス透過率、 β' は写真材料および露光量に依存するパラメータを表す.

ホログラムに記録した波面の再生は、コヒーレントな再生波 (reconstruction wave) をホログラ ムに照明することで行われる (図 2.1(b)).再生波を B とおくと、

$$Bt_A = t_b B + \beta' B \left| a \right|^2 + \beta' B A^* a + \beta' B A a^*$$

となる.このとき、再生波として参照波と同じものを利用する場合 (B = A),

$$Bt_{A} = t_{b}A + \beta' A |a|^{2} + \beta' |A|^{2} a + \beta' A^{2} a^{*}$$
(2.1)

となる.第3項は、参照波強度が一定であることから、物体波 a に比例した成分となる.したがって、この成分を取り出すことで、元の波面を再生することができる.また、再生波として参照波の共役波を利用する場合 ($B = A^*$)、

$$Bt_A = t_b A^* + \beta' A^* |a|^2 + \beta' (A^*)^2 a + \beta' |A|^2 a^*$$
(2.2)

となる. 第4項は,参照波強度が一定であることから,物体波の共役波面 a* に比例した成分となる. したがって,この成分を取り出すことで,元の波面 (の共役波面) を再生することができる. しかし,再生波面は式 (2.1), (2.2) で表されるように,所望の波面の他に3つの余分な成分が重畳 している. そのため,物体波の完全な再生には,これらの余分な成分を分離する必要がある. その ような手法として,例えば,物体波に対して斜めの角度を持つ参照波を利用してホログラムを生成 するオフアクシスホログラフィがある. これは Leith と Upatnieks が提案した手法 [28] であり, Leith-Upatnieks ホログラムとしても知られている.

2.2 電子ホログラフィ

ホログラフィの応用の一つに3次元ディスプレイがある.3次元ディスプレイは様々な方式があ るが([29], [30] の Figure 8 参照),その中でもホログラフィック3次元ディスプレイは,メガネな どを身につける必要なく,人間の視覚システムにおける奥行き知覚要件を全て満たす3次元映像を



図 2.2: 電子ホログラフィ: 3D モデルから計算した CGH を SLM に表示することで,3次元像を 再生する.

表示できる特性から,究極の3次元ディスプレイとして知られている.他にもホログラフィック 3D ディスプレイには,光の利用効率が高い,ディスプレイの欠損に強いなどの利点がある.この ように,ホログラフィック 3D ディスプレイは現行の 3D ディスプレイ技術を原理的に超える性能 を持ち,実用化に向けて研究が行われている [13–16].

電子ホログラフィ (electro-holography) とは、ホログラフィック 3D ディスプレイの形式の一つ であり、制御信号に応じて光の振幅・位相変調量を変化させることができる空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) を利用してホログラムを作成するシステムを指す (図 2.2). 写真乾板な どの媒体にホログラムを光学的に記録する手法は、通常一度ホログラムを記録したあとに、それを 書き換えることはできない. 一方、電子ホログラフィでは、SLM を利用して動的にホログラムを 書き換えることができるため、3 次元動画像表示が可能になる. SLM として主に用いられているデ バイスは、液晶ディスプレイ (LCD: Liquid Crystal Display), LCoS (Liquid Crystal on Silicon), 音響光学変調素子 (AOM: Acousto-Optic Modulator), DMD (Digital Micromirror Device) など である. SLM に表示するホログラムパターンは計算処理によって作成されることが多く、このよ うに作成されたホログラムを計算機合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram) と 呼ぶ. 典型的な CGH 作成方法は、表示したいシーンのデータを用いて物体波成分を計算し、参照 波との干渉像を計算により求めることで行われる.

ホログラフィック 3D ディスプレイの実用化に向けた大きな課題の一つに,SLM 性能の向上が 挙げられる.ホログラフィック 3D ディスプレイは,現行のディスプレイデバイスと比べて,高精 細かつピクセル数が非常に多いデバイスが必要とされる.これは,視域がピクセルピッチに依存 し,像の大きさはディスプレイサイズに依存するためである.例えば文献 [13] では,十分な性能 (像サイズ 0.5 m,視域 60°) を実現するには,10¹² ものピクセル数 (100 万×100 万ピクセル) が必 要だという議論がある.現在市販されている SLM でそのような性能を達成しているものはなく, SLM 性能の向上に向けた研究が行われている.例えば,複数の SLM を利用して,表示面積および 視域の拡大を行うアプローチが行われている [31, 32]. 近年では,フォトリフラクティブポリマー (photorefractive polymer)を利用した4インチ (約 10 cm) 角の大型ホログラフィックディスプレ イ [33, 34] や,メタサーフェス (metasurface)を用いたホログラム [35, 36] も開発されている.

ホログラフィック 3D ディスプレイの実用化に向けたもう一つの課題は, CGH 計算性能の向上 である.前述の SLM 性能の議論から,ホログラフィック 3D ディスプレイでは必要とされるピク セル数が非常に多いことがわかる.したがって,非常にピクセル数が多い CGH を作成しなければ ならず,必要な計算時間は非常に大きくなる.またホログラフィによる 3 次元動画像表示は,一般 的なディスプレイのリフレッシュレートと同等の 30 フレーム/秒や 60 フレーム/秒で CGH の切り 替えが求められ,計算時間の制約が大きい.そのため CGH 計算の高速化に向けた研究が広く行わ れている.例えば,アルゴリズムの改善 [37, 38] や, GPU[39, 40] や FPGA (Field Programmable Gate Array)[41, 42] などの並列計算機を利用するアプローチなどが行われている.

2.3 デジタルホログラフィ

デジタルホログラフィ (DH: Digital Holography) とは,光学的に生成されたホログラムを CCD (Charge-Coupled Device) などのイメージセンサでデジタル記録し,像再生処理は記録したホロ グラムデータを用いた計算処理により行う手法を指す (図 2.3)[17, 18, 43]. センサによるホログ ラムのデジタル記録および計算処理による像再生は, 1967 年に Goodman によって初めて行われ [44], CCD カメラによる記録は 1994 年に Schnars と Jueptner によって行われた [45]. DH にお ける像再生処理は,ホログラム (に記録された物体波) を用いて,任意奥行きへの波面伝搬計算を 行う. これにより任意奥行きにフォーカスが合った像を取得できる. これは物理的なフォーカシン グを行う通常の顕微鏡システムと異なり,数値的なフォーカシングであるため,単一の撮像で 3 次 元情報を取得できる. また位相情報を取得することが可能であることから,定量位相イメージング に利用されている [46]. また計算処理による像再生は画像処理手法と組み合わせて利用することが できるため,物理的に行うことが難しい処理も計算によって実現することが可能になるという特 徴も持つ. 図 2.3 では, Mach-Zhender 干渉計を用いて透過物体のインラインホログラム (inline hologram) を取得しているが,他にもオフアクシスホログラフィ (off-axis holography) など様々 な光学系が活用されている.

波面伝搬計算による数値再生手法として、フレネル回折と角スペクトル法について述べる.距離 z = 0にある平面上の複素場 U(x, y; 0)が、波面伝搬により距離 zに作る複素場を U(x, y; z) とする. フレネル近似を用いると、U(x, y; z) は以下のように記述できる.

$$U(x,y;z) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} U(\xi,\eta;0) \exp\left\{j\frac{k}{2z} \left[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2\right]\right\} d\xi d\eta$$
(2.3)

ここで,波長を λ ,波数を $k = 2\pi/\lambda$ とした.このフレネル回折積分を計算するには,フーリエ変換によって計算する方法とコンボリューションによって計算する方法がある.

角スペクトル法に基づく波面伝搬の場合,複素場 U(x, y; z) は以下のように記述できる.

$$U(x,y;z) = \iint_{-\infty}^{\infty} A(f_x, f_y; 0) H(f_x, f_y) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y$$

ただし,

$$A(f_x, f_y; 0) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(x, y; 0) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dxdy$$



図 2.3: デジタルホログラフィ: センサを用いてホログラムをデジタル記録し, コンピュータ上で数 値再生を行う (BS: Beam Splitter, BE: Beam Expander).

$$H\left(f_x, f_y\right) = \begin{cases} \exp\left(jkz\sqrt{1 - \left(\lambda f_x\right)^2 - \left(\lambda f_y\right)^2}\right) & \sqrt{f_x^2 + f_y^2} < 1/\lambda \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

である.角スペクトル法の場合,関数 $H(f_x, f_y)$ は線形並進不変 (LTI: Linear Translation-Invariant) システムにおける伝達関数とみなすことができ,入力である複素場 U(x, y; 0) をフーリ エ変換し,伝達関数 $H(f_x, f_y)$ との積を計算した後に,逆フーリエ変換することで計算できる.

ホログラフィによる計測の分解能はセンサの大きさと、計測対象との距離によって決まる.大き さが w のセンサを用いて、距離 z にある対象を計測する場合、面内方向の分解能 δ_x は以下のよう に決まる [17].

$$\delta_x = \frac{\lambda z}{w}$$

第3章

ポータブルライトフィールドカメラを 用いた実シーンのホログラム作成

3.1 はじめに

電子ホログラフィに基づく 3D ディスプレイは、メガネなどを身につけることなく裸眼で、人間の視覚システムにおける奥行き知覚の要素を全て満たす 3 次元映像を表示できることから、自然な 3 次元映像表示技術として研究が行われている [13–16]. 電子ホログラフィによる 3 次元映像表示は、(1)表示したいシーンのデータから計算機合成ホログラム (CGH: Computer-Generated Hologram)を計算し、(2)それを微細な液晶ディスプレイなどの空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator)に表示して光学的に再生される. このとき、(1)の CGH 計算は、表示したいシーンの 3D モデルデータを用いて行われる. 自然光下の実シーンを表示したい場合は、シーンの 3D モデルデータが予め用意されていないため、その実シーンの 3 次元情報を取得し、CGH を計算する必要がある. 自然光下の実シーンの 3 次元情報取得は、複数視点画像を取得する手法や [47, 48]、レンジセンサを用いて奥行き情報を取得する手法 [49] などが行われている.

自然光下における 3 次元情報取得する手法の一つにインテグラルイメージング (integral imaging) [50–52] がある.これは撮影シーンの複数視点画像をレンズアレイを用いて単一のセンサ で取得する手法である.また,記録時と同様のレンズアレイ系を用いて 3 次元映像表示も可能であ る.複数視点画像は CGH 計算にも用いることができ,様々な手法が提案されている [53–62].ま た実際に,3D ライブシーンをインテグラルイメージングで取得し,そのデータから CGH を計算 して,ホログラフィ再生するシステムが開発されている [59].インテグラルイメージングによる 3D ディスプレイでは深い奥行きにある像の解像度が著しく劣化するが,一方でホログラフィは奥 行きの深いシーンを再生するのに適している [57,63].そのため,インテグラルイメージングによ るデータ取得とホログラフィによるデータ表示を組み合わせることで,従来のインテグラルイメー ジングによる 3D ディスプレイの解像度を超える手法も提案されている [58,61].このようにイン テグラルイメージングは自然光下の実シーン情報の取得に有効な手段である.しかし,典型的なイ ンテグラルイメージングの撮影系は,大きなレンズアレイやフィールドレンズなどが必要があり, またレンズアレイ,フィールドレンズ,イメージセンサ間を適切にアライメントする必要があるた め,ポータブルな撮影が困難であった.

本研究では、市販のポータブルライトフィールドカメラを用いた自然光下実シーンの CGH 計



図 3.1: ライトフィールドカメラ: ライトフィールドカメラは主レンズ,マイクロレンズアレイ,イ メージセンサから構成され,マイクロレンズアレイによってライトフィールドを取得する.



図 3.2: 4D ライトフィールド: 二つの平面の交点で表されたライトフィールド L(u, v, s, t).

算手法を提案する. ライトフィールドカメラはプレノプティックカメラ (plenoptic camera) とも 呼ばれ, 主レンズ (main lens), マイクロレンズアレイ (microlens array), イメージセンサから構 成され (図 3.1), インテグラルイメージングと同様の原理で複数視点画像を撮影することができる [64-66]. 取得した複数視点画像は, 図 3.2 のような 4D ライトフィールド *L*(*u*, *v*, *s*, *t*) であり [9, 67], 光線が主レンズのどの位置 (*u*, *v*) を通り, どのマイクロレンズ (*s*, *t*) に達したかでパラメタ ライズされている. ライトフィールドカメラは主レンズによる縮小像をマイクロレンズアレイ上 に形成するため, 典型的なインテグラルイメージングの撮影系よりも小さく, 持ち運びが容易であ る. また近年, Lytro 社の Lytro カメラや Raytrix の R シリーズなど市販のライトフィールドカ メラが販売されており, 安価に手に入れることができる. 市販品は小型かつポータブルで, 光学系 のキャリブレーションを行う必要がない. そのため, これらのライトフィールドカメラを利用する ことで, 実シーンの CGH のためのポータブル撮影系を簡単に構築することができる. 本研究で は, Lytro を用いて CGH 計算を行い, 作成した CGH を数値シミュレーションおよび光学的に再 生し, 本手法の有効性を検証した. 最後に、本研究と同様にライトフィールドカメラを利用して CGH 作成を行った Lee らの研 究 [60] について述べる. Lee らの研究では、取得したライトフィールドからサブ開口画像 (subaperture image) を構成し、サブ開口画像のフーリエホログラムパッチを作成する. このパッチを 並べてホログラフィックステレオグラムを作成し、ホログラフィによる像再生を行う. 本研究との 違いは使用したライトフィールドカメラである. Lee らの研究ではデジタルー眼レフカメラとマイ クロレンズアレイを用いてライトフィールドカメラを自作したが、本研究では市販品である Lytro を利用した. Lytro を利用することで、ユーザーがライトフィールドカメラを自作し、細かな調整 を行う必要がなくなる. その一方で、使用したライトフィールドカメラのマイクロレンズアレイの 形状やサイズの違いにより、Lee らの手法をそのまま適用できず、Lytro のための CGH 計算手法 を開発する必要がある. したがって、本研究は Lee らの研究を Lytro に拡張し、実シーンの CGH を作成したい多くのユーザーに簡便な手法を提案するものと言える. またホログラム作成手法も Lee らの研究と異なり、物体近傍に光線サンプリング面を配置する手法 [57, 58] を基にしているこ とに留意したい. ただし、これらの手法は光線情報からホログラムを作成する手法として本質的に 同等であり、違いは再生像の位置や倍率にのみ影響する.

3.2 ライトフィールドカメラを用いた CGH 計算

本節では市販のライトフィールドカメラである Lytro を用いた CGH 計算手法について述べる. まずライトフィールドから CGH 計算を行う手法について説明する.次に Lytro により取得した ライトフィールドを CGH 計算に適用するための画像の前処理について述べる.

3.2.1 ライトフィールドからの CGH 計算

図 3.3 にライトフィールドカメラを用いた CGH 計算の模式図を示す. ライトフィールドカメラ では、主レンズにより撮影対象をマイクロレンズアレイ上に結像し、その中間像の光線をマイク ロレンズアレイによって空間的・角度的にサンプリングしてライトフィールドを取得する. その 後、取得したライトフィールドを波面に変換し、CGH 面における干渉パターンを計算することで CGH を作成する.

本研究では、ライトフィールドの取得を Lytro により行い、ライトフィールドからの CGH 計算 に光線サンプリング (RS: Ray-Sampling) 面に基づく手法 [57, 58] を適用する. RS 面とは光線情 報のサンプリングの際に導入される仮想的な面であり、その面上の点を中心に光線情報が角度的に サンプリングされる. ライトフィールドの観点から考えると、RS 面は図 3.2 の uv 面に相当し, uv 面上の点を中心に光線を角度的にサンプリングするとみなせる. このように考えて、ライトフィー ルドカメラにより取得したライトフィールドを RS 面で取得された光線情報とみなし、CGH 計算 を適用する.

本研究における RS 面 (uv 面) の配置について説明する.通常,ライトフィールドカメラでは主 レンズ面を uv 面,マイクロレンズアレイ面を st 面として考える.しかし本研究ではマイクロレン ズアレイ面を uv 面,センサ面を st 面として考える.これはライトフィールドカメラによるライト フィールド取得のプロセスを,主レンズによって縮小結像した中間像をマイクロレンズアレイに よって空間的・角度的にサンプリングすると考えるためである.つまり,主レンズによって縮小さ れたシーンのライトフィールドを「直接」サンプリングし,このときのマイクロレンズアレイ面を uv 面,センサ面を st 面とみなす.このとき中間像はマイクロレンズアレイ上に縮小結像されるた



図 3.3: ライトフィールドカメラを用いた CGH 計算: ライトフィールドカメラでは, 主レンズに より形成された中間像の光線情報 (ライトフィールド) をマイクロレンズアレイによって取得し, 取得されたライトフィールドを波面に変換し, CGH 計算を行う.

め, RS 面はその中間像の近傍に配置されるとみなせる (図 3.3). 一般的に光線情報に基づく CGH 計算では, RS 面と被写体の位置関係が解像度に影響し,特に RS 面から被写体が離れるほど再生 時の解像度が低下するという問題がある [57, 58, 63]. このライトフィールド取得プロセスの場合, RS 面は物体の中間像上に配置されており,密な光線情報を取得することができるため,再生像の 解像度の劣化を防ぐことができる. ただし,このように取得されたライトフィールドから CGH を 計算・再生した場合,その再生像は主レンズによって縮小されたシーンとなるため,再生像の縦横 の倍率は実際のシーンと異なることに注意したい.

上記のように配置された RS 面で取得されたライトフィールドからの CGH 計算は次の二つのス テップからなる.

- 1. 光線-波面変換: ライトフィールドを RS 面上の波面 (複素振幅分布) に変換する.
- 2. CGH 計算:変換した波面を物体波として利用して CGH を計算する.

ステップ1の光線-波面変換の模式図を図 3.4 に示す^{*1}. まずライトフィールドの (u,v) を定数 としたときの画像であるサブ画像 (sub-image) をフーリエ変換して (u,v) 近傍の局所波面を計算す る. 位置 (u,v) のマイクロレンズによって取得されたサブ画像を $L_{u,v}(s-u,t-v) = L_{u,v}(s',t')$ とすると、サブ画像からの局所波面は、

$$U_{u,v}(x',y') = U_{u,v}(x-u,y-v) = \mathcal{F}^2\left\{\sqrt{L_{u,v}(s',t')}\exp\left[j\theta_{u,v}(s',t')\right]\right\}$$

で求めることができる.ここで, \mathcal{F}^2 {·} は 2 次元フーリエ変換を表し, exp [$\theta_{u,v}(s',t')$] は局所波 面の位相を表す.ライトフィールドは強度のみの情報を持ち,位相情報は欠落している.そのた

^{*1} 光線-波面変換の詳しい説明は付録 A を参照.





図 3.4: 光線-波面変換: サブ画像 $L_{p,q}$ にランダム位相をかけ,フーリエ変換することで,局所波面 $U_{p,q}$ を求める.これを全てのサブ画像に適用し,局所波面を足し合わせることで波面を計算する. ただし,ここでは表記を簡潔にするため, $L_{p,q} = L_{u_p,v_p}, U_{p,q} = U_{u_p,v_p}$ としている.

め位相情報の復元にデプスマップを用いる手法 [68] などが提案されているが、ここでは単純に $\theta_{u,v}(s',t')$ が $[0,2\pi)$ の一様分布に従うランダム位相を利用した. このようにして局所波面を全て のサブ画像に対して求め、それらを足し合わせることで RS 面上の波面を計算する. これは、uv面上でのサンプリングピッチ (マイクロレンズ間の距離)を $\Delta u, \Delta v,$ サンプル数 (マイクロレンズ の個数)を N_u, N_v とすると、

$$U(x,y) = \sum_{p=0}^{N_u-1} \sum_{q=0}^{N_v-1} U_{p\Delta u,q\Delta v}(x',y') = \sum_{p=0}^{N_u-1} \sum_{q=0}^{N_v-1} U_{u_p,v_q}(x',y')$$

と表すことができる.

次のステップ2では、上記のようにして計算した RS 面上の波面を、図 3.3 のように CGH 面ま で波動伝搬させることで、CGH 面上の波面を計算する.今回、この波動伝搬計算は式 (2.3) で表 されるフレネル回折により計算した. RS 面から CGH 面までの光伝搬の計算を波動的に行うこと で、RS 面と CGH 面の距離が離れている場合でも解像度の低下を抑えることができる [57].最後 に、CGH 面上の波面と参照波を干渉させることで、CGH となる干渉縞を計算する.

3.2.2 Lytro を用いたライトフィールドの取得

本研究では、ライトフィールドカメラとして First Generation Lytro Camera を用いた. 表 3.1 に Lytro の仕様を示す. Lytro は、解像度が 3,280×3,280、ピクセルピッチが 1.4 µm の CMOS

表 3.1: Lytro カメラの仕様.

Product name	First Generation Lytro Camera		
Size	$41\mathrm{mm}\times41\mathrm{mm}\times112\mathrm{mm}$		
Weight	$214\mathrm{g}$		
Resolution	$3,280 \times 3,280$		
Pixel pitch	$1.4\mu{ m m}$		
Microlens array	Hexiagonal shape, 10-pixel diameter $(14\mu\mathrm{m})$		
Data format	Light Field Picture (.lfp)		



図 3.5: Lytro で撮影した RAW 画像: 右の二つの図は左図中の白い四角領域を拡大したもの. 右 画像内にマイクロレンズアレイの構造を確認できる.

イメージセンサを持ち,各ピクセルは 12 bit の値を持つ.マイクロレンズは六角形の形状をして おり,その直径は約 10 ピクセル分 (14 µm) に相当する.イメージセンサは約 330 × 380 個のマイ クロレンズからなるマイクロレンズアレイによってカバーされている.Lytro では,撮影データ が LFP (Light Field Picture) または LFR (Lytro RAW) というファイルフォーマットで保存さ れており,このファイルには撮影された RAW 画像と JSON (JavaScript Object Notation) 形式 のメタデータが含まれている.LFP ファイルの中身は解析されており,ツールを用いて読み込む ことができる [69].本研究では,lfptools[70] というツールを利用して LFP ファイルを読み込み, RAW 画像を取得した.図 3.5 に取得した RAW 画像 (後述の色補正後) を示す.

Lytro で撮影した RAW 画像を CGH 計算の入力データとして利用するための前処理として,(1) 色補正,(2) サブ画像への分割,(3) サンプリングパターンの変換を行った.以下にそれぞれについ て説明する.



図 3.6: 色補正: (a) RAW 画像 (左上はベイヤーパターン), (b) デモザイク, (c) ガンマ補正, (d) ホ ワイトバランス補正.

色補正

Lytro はベイヤーフィルタによるカラー画像記録が行われている. そのためカラー画像の取得に はデモザイク処理が必要となる. Lytro のベイヤーパターンは JSON メタデータに記録されてお り,図 3.6 (a) 内の左上のような配列となっている. このデモザイク処理は,補間するピクセルの 4 隣接を用いて線形補間を行う OpenCV[71] の cvtColor 関数にて行った.

デモザイク後の画像に,ガンマ補正,ホワイトバランス補正を行い,色調整を行った.ガンマ補 正,ホワイトバランス補正に関するデータは JSON メタデータに記録されており,それを参考に 補正を行った.図 3.6 に,RAW 画像と,デモザイク処理,ガンマ補正,ホワイトバランス補正を 行った後の画像をそれぞれ示す.

サブ画像への分割

Lytro により撮影された RAW 画像は図 3.5 のように六角形のサブ画像から構成される. RAW 画像を複数のサブ画像に分割することで,ライトフィールドとして使用することができる. この分割は,Lytro のカメラキャリブレーションも含めた手法が提案されている [69, 72–74] が,今回,マイクロレンズの中心座標を JSON 形式のメタデータを基にマニュアルで推定し,その中心座標を用いてサブ画像へ分割した. 図 3.7 に白背景を撮影したときの中心座標のマニュアル推定結果の一部を示す.分割の結果,10×10 ピクセルのサブ画像を 330×380 枚取得できる. 各サブ画像の端のピクセルは,マイクロレンズの口径食によって暗くなっているため,本研究では,各サブ画像の中央8×8 ピクセルを取り出して使用した.

サンプリングパターンの変換

Lytro のマイクロレンズは六角形の形状をしているため, Lytro で取得したライトフィールドの 空間的・角度的サンプリングパターンは図 3.8 のようになる. このライトフィールドを, 前述の CGH 計算に適用しやすくするために, サンプリングパターンを正方形へと変換した (図 3.8). こ の変換は, ライトフィールドによって得られた光線を線形補間によってリサンプリングして行った



図 3.7: マイクロレンズの中心推定結果:赤い点が推定されたマイクロレンズの中心座標を表す.



図 3.8: サンプリングパターンの変換:線形補間を利用して六角形のサンプリングパターンから正 方形のサンプリングパターンに変換.

[67]. 光線のリサンプリングによって,六角形のサンプリングパターンを持つ 330 × 380 枚のサブ 画像から,正方形のサンプリングパターンを持つ 240 × 240 枚のサブ画像を生成して,CGH 計算 に用いた.

今回,簡単のためサンプリングパターンの変換を行ったが,六角形のレンズアレイを用いて取得 したライトフィールドからホログラムを生成した場合,その再生像の解像度は長方形のレンズアレ イを利用した場合よりも良いことが知られている [75].またライトフィールドのリサンプリング手 法も様々な手法が提案されている [76, 77].六角形のサンプリングパターンとライトフィールドの リサンプリング手法の適切な利用は今後の課題の一つとして挙げられる.

3.3 CGH 再生結果

これまでに述べた CGH 計算手法の妥当性を検証するために,Lytro を用いて取得したデータから CGH を計算し,その CGH の数値シミュレーションおよび光学系による再生をそれぞれ行った.



(b)

図 3.9: Lytro による撮影 (単色): (a) 撮影シーン.シーンは二つの異なる奥行きに配置された平 面物体 Object 1, Object 2 からなり, Lytro からそれぞれ 100 mm, 500 mm だけ離れている. (b) Lytro によって撮影された RAW 画像. Object 1 にフォーカスを合わせて撮影.

3.3.1 単色再生

図 3.9 に Lytro で撮影した環境を示す.撮影シーンは異なる奥行きに配置された2つの平面物体 Object 1, Object 2 からなる. Object 1 と Object 2 は Lytro からそれぞれ 100 mm, 500 mm 離 れた位置に配置した. Lytro による撮影の際には, Lytro に備わっているオートフォーカス機能を 用いて, Object 1 にフォーカスを合わせて撮影を行った.

RS 面を用いた手法では,撮影シーンが複数の異なる奥行きの物体から構成される場合,それぞれの物体にフォーカスを合わせてライトフィールドを取得し,その複数のライトフィールドを1つの CGH へと記録する必要がある [58]. しかし,今回は Object 1 にフォーカスを合わせて撮影したライトフィールドのみを利用した. これは,第3.2 節で述べたように,ライトフィールドカメラの主レンズによって,縦倍率 (axial magnification) が横倍率 (lateral magnification) の二乗にな

表 3.2: CGH 計算設定 (単色): RS 面と CGH 面は同じサンプリングピッチとサンプル数とした.

Wavelength	$513.8\mathrm{nm}$	
Sampling pitch	$8.0\mu{ m m}$	
Number of pixels	$1,920 \times 1,920$	
Distance between RS and CGH planes	$500\mathrm{mm}$	
Hologram type	Kinoform, 8-bit depth	

るように撮影シーンの奥行きが縮小され,Object 1 と Object 2 の距離が小さくなるためである. このようにして撮影したライトフィールドから,第 3.2 節で説明した手法を用いて CGH を計算 した.表 3.2 に CGH 計算に利用したパラメータを示す.CGH 計算では,RS 面,CGH 面のサ ンプリングピッチを共に 8.0 µm とし,光の波長を 513.8 nm とした.RS 面と CGH 面との距離は 500 mm に設定し,波動伝搬は角スペクトル法 [27] を用いた.参照光は CGH 面に垂直に入射する 平行光を用い,位相変調のみ行うホログラムであるキノフォーム [78] として CGH を記録した.

数值再生

図 3.10 にシミュレーションによって数値的に計算した再生像を示す. 図 3.10 (a), (b) はそれぞれ CGH から 500 mm, 505 mm だけ離れた位置における光の強度分布である. ここで,図 3.9 で示される撮影シーンと,CGH によって再生されたシーンのスケールが異なることに注意したい. これは,主レンズによって撮影シーンが縮小されているからである. 図 3.10 (a) では,Object 1 にピントが合った再生像が得られ,Object 2 はぼけている. 一方,図 3.10 (b) では,Object 1 がぼけており,Object 2 にピントが合った再生像となっている. このことから,奥行きを持った再生像が得られているといえる.

光学再生

図 3.11 に光学再生に使用した実験系を示す. CGH を表示するデバイスとして, Holoeye 社製の 位相変調 SLM である PLUTO を利用した. PLUTO は 1,920×1,080 の解像度を持ち, そのピク セルピッチは 8.0 µm である. 作成した CGH は 1,920×1,920 ピクセルであるため, 1,920×1,080 ピクセル部分のみを切り取って SLM に表示した. 参照光は, 波長 513.8 nm のレーザー光をコリ メートしたものを使用した. 光学再生実験では, Object 1 と Object 2 の奥行きの違いをはっき りと見るために, CGH 計算の際に拡大作用のあるレンズの位相項をかけ, 数値的に Object 1 と Object 2 の間の距離を拡張し, また凸レンズを用いた光学的な再生像の拡大も行った.

図 3.12 に光学再生によって得られた再生像を示す. 図 3.12 (a) は Object 1 にピントを合わせ て写真を撮影し,図 3.12 (b) では Object 2 にピントを合わせて撮影した. 再生像内の中央の強い 光は直接光である. 数値再生結果と同様に,図 3.12 (a) では Object 1 の像がシャープなエッジを 持つのに対し,Object 2 はぼけた像となっている. また図 3.12 (b) では,Object 2 の像がシャー プなエッジを持つのに対し,Object 1 がぼけた像となっている. このことから,光学再生実験に おいても,奥行きを持った再生像が得られたことを確認した.



図 3.10: 数値再生像 (単色): (a) CGH から 500 mm だけ離れた位置の強度分布. (b) CGH から 505 mm だけ離れた位置の強度分布.



3.3.2 カラー再生

図 3.13 に CGH のカラー再生の模式図を示す.取得したライトフィールドは RGB カラーチャンネルに分離され,それぞれの色成分に対応した CGH が作成される.各 CGH をそれぞれの色成分に対応した光で照明し,再生された RGB 像を重ねることで,カラー再生像が得られる.

図 3.14 に Lytro で撮影した環境, 撮影された RAW 画像, およびデモザイキング後のカラー画像 を示す. 撮影シーンは, 単色再生と同様に, 異なる奥行きに配置された 2 つの平面物体 Object 1,



(a)

(b)

図 3.12: 光学再生像 (単色): (a) Object 1 にピントを合わせて撮影. (b) Object 2 にピントを合わせて撮影. 中央の四角い強い光は直接光.





Object 2 からなる. Object 1 と Object 2 は Lytro からそれぞれ 50 mm, 600 mm 離れた位置に 配置した. Lytro による撮影の際には, Lytro に備わっているオートフォーカス機能を用いて, Object 1 にフォーカスを合わせて撮影を行った.

撮影したライトフィールドからの CGH 計算は,第2.2節で説明した手法を用いて CGH を計算 した.表3.3 に CGH 計算に利用したパラメータを示す. CGH 計算では,RS 面,CGH 面のサン プリングピッチを共に8.0 µm とし,光の波長をR,G,B それぞれ 638.9 nm,513.8 nm,487.3 nm とした.RS 面と CGH 面との距離は200 mm に設定し,波動伝搬は角スペクトル法 [27] を用い た.参照光は CGH 面に垂直に入射する平行光を用い,位相変調のみ行うホログラムであるキノ フォーム [78] として CGH を記録した.

数值再生

図 3.15 に数値シミュレーションによるカラー再生像を示す.図 3.15 (a), (b) はそれぞれ CGH から 199 mm, 209 mm だけ離れた位置における光の強度分布である.ここで前述の通り,主レン ズによる縮小作用で,図 3.14 で示される撮影シーンと,再生シーンのスケールが異なることに注





(b)



(c)

図 3.14: Lytro による撮影 (カラー): (a) 撮影シーン.シーンは二つの異なる奥行きに配置され た平面物体 Object 1, Object 2 からなり, Lytro からそれぞれ 50 mm, 600 mm だけ離れている. (b) Lytro によって撮影された RAW 画像. Object 1 にフォーカスを合わせて撮影. (c) 色補正に より得られたカラー画像. 表 3.3: CGH 計算設定 (カラー): RS 面と CGH 面は同じサンプリングピッチとサンプル数とした.

Wavelength	R: 638.9 nm, G: 513.8 nm, B: 487.3 nm
Sampling pitch	$8.0\mu{ m m}$
Number of pixels	$1,920 \times 1,920$
Distance between RS and CGH planes	$200\mathrm{mm}$
Hologram type	Kinoform, 8-bit depth



(a)

(b)

図 3.15: 数値再生像 (カラー): (a) CGH から 199 mm だけ離れた位置の強度分布. (b) CGH から 209 mm だけ離れた位置の強度分布.

意したい. 図 3.15 (a) では, Object 1 にピントが合った再生像が得られ, Object 2 はぼけている. 一方, 図 3.15 (b) では, Object 1 がぼけており, Object 2 にピントが合った再生像となっている. このことから, 奥行きを持った再生像が得られているといえる.

光学再生

図 3.16 の光学系で RGB それぞれの照明で光学再生した 3 つの像をコンピュータ上で重ね,カ ラー光学再生実験を行った.SLM は単色再生のときと同じ Holoeye PLUTO (位相変調 SLM, 1,920×1,080 ピクセル,8.0 µm ピクセルピッチ)を用いた.作成した CGH は 1,920×1,920 ピク セルであるため,1,920×1,080 ピクセル部分のみを切り取って SLM に表示した.参照光源はそれ ぞれ R(638.9 nm), G(513.8 nm), B(487.3 nm)の波長をもつレーザーダイオードを用いた.また 4f 光学系と 0 次光除去のための空間フィルタを利用して直接光の除去を行った.

図 3.17 に光学再生の結果を示す.図 3.17 (a) は Object 1 にピントを合わせて写真を撮影し,



図 3.16: 再生光学系 (カラー).



(a)



図 3.17: 光学再生像 (カラー): 光学再生した RGB の再生像をコンピュータ上で重ねた結果. (a) Object 1 にピントを合わせて撮影. (b) Object 2 にピントを合わせて撮影.

図 3.17 (b) では Object 2 にピントを合わせて撮影した.数値再生結果と同様に,図 3.17 (a) で は Object 1 の像がシャープなエッジを持つのに対し,Object 2 はぼけた像となっている.また図 3.17 (b) では,Object 2 の像がシャープなエッジを持つのに対し,Object 1 がぼけた像となって いる.このことから,カラー光学再生実験においても,奥行きを持った再生像が得られたことを確 認した.

3.4 まとめ

本研究では、自然光下における実シーンを CGH として記録するための手法として、市販のライ トフィールドカメラである Lytro を利用する手法について述べた.ライトフィールドカメラで取 得したライトフィールドから、RS 面に基づく CGH 計算手法により CGH を作成した.本手法の 妥当性を検証するために、Lytro で取得したデータから CGH を作成し、数値シミュレーションに よる再生,光学系を用いた再生の両方を行った.その結果,奥行きを持った再生像が得られたこと を確認した.市販のライトフィールドカメラは小型かつポータブルで取り扱いやすいため,自然光 下における実シーンの CGH 作成における有用な撮影ツールになることが期待される.

今回の CGH 計算の設定では、物体間の奥行きの差が実際のスケールよりも小さくなっているため、リアルスケールでの再生が今後の課題の一つに挙げられる.

第4章

コンプレッシブホログラフィの GPU 高 速化

4.1 はじめに

圧縮センシング (compressed sensing, compressive sensing, compressive sampling) とはスパー ス信号を取得・再構成するサンプリングの枠組みである [11, 79–83]. スパース信号とはその要素の ほとんどが 0 であるような性質 (スパース性)を持つ信号であり,そのような信号では含まれる「情 報量」がその帯域幅よりもはるかに小さい. この性質を活用することで,従来の Nyquist-Shannon のサンプリング理論に比べて,遥かに効率的なサンプリングが可能となる. 自然界に存在する多く の信号 (例:音声,画像など) はスパース性を満たすことが経験的に知られており,したがって圧縮 センシングの理論は多くの自然信号に対して適用可能である. そのため,様々な分野において圧縮 センシングを利用した研究が非常に活発に行われている.

イメージング分野では圧縮センシングを活用した研究が多数行われており,そのようなイメー ジング法はコンプレッシブイメージング (compressive imaging) と呼ばれている [84–87]. コンプ レッシブイメージングのアプリケーションの中でも有名なものとしてシングルピクセルイメージン グ [88, 89] が挙げられる. これは,計測対象からの光を DMD (Digital Micromirror Device) に よってランダムに変調し,変調した光をレンズを用いて集光し,単一のフォトディテクタで検出す る手法である. 圧縮センシングの枠組みを利用することで,検出回数よりも多くの画素数の画像を 得ることができる. シングルピクセルイメージングのコンセプトは他の様々な分野に応用され,特 にセンサの製造コストが高い可視光外の領域,例えばテラヘルツ領域 [90] や赤外領域 [85, 91],光 量が必要なバイオイメージング [92] などにおいて活用が進んでいる. もう一つ有名なアプリケー ションは MRI (Magnetic Resonance Imaging)[93, 94] である. MRI による撮像は時間がかかる ことが問題であったが, 圧縮センシングを利用することで撮像の高速化を行うことができる. それ 以外にも分光イメージング [95, 96] や合成開口レーダー [97] など多くの分野でコンプレッシブイ メージングの研究がなされている.

ホログラフィ分野でも圧縮センシングの枠組みを利用した研究は多数行われており,それらはコ ンプレッシブホログラフィ (compressive holography) として知られている [98, 99]. コンプレッシ ブホログラフィの初期の研究は, Brady らのガボールホログラフィを用いた 3 次元物体分布の推定 (ホログラフィックトモグラフィ)[12, 98, 100, 101] である. この手法では,ホログラフィによって 3 次元信号が 2 次元信号 (ホログラム) にエンコードされるとみなし,ホログラムから 3 次元物体分 布の推定を行う.同様の考え方を用いて,インラインホログラムからの 3 次元分布推定にスパース 性を用いる手法 [102],ミリ波領域に応用した研究 [103], single exposure in-line (SEOL) ホログ ラフィに適用する手法 [104],複数角度から撮影したガボールホログラムを用いて 3 次元分布推定 を行う手法 [105] などが提案されている. Rivenson らは圧縮センシングをフレネルホログラフィ に応用した (コンプレッシブフレネルホログラフィ)[106, 107]. この手法を基礎として,遮蔽物に よって遮られた物体の復元 [108],多次元イメージング [109–111],位相イメージング [112–114], 特定視点画像の生成 [115] などの手法が提案されている.これ以外にも,オフアクシスホログラ フィへの応用 [116, 117], optical scanning holography に置けるスキャン時間の低減 [118],シン グルピクセルイメージング [119, 120],スペックルノイズが強い拡散物体への応用 [98, 121],波面 再生におけるノイズ除去 [122–125],計算機合成ホログラムを用いたコンプレッシブイメージング [126] などが提案されている.

コンプレッシブホログラフィは従来のホログラフィ技術を超える可能性を持つ技術だが,その 一方で計算コストが大きいといった問題がある. 圧縮センシングでは計算処理によって観測デー タから信号再構成を行う. これは L1 ノルム最小化を代表とする最適化問題に帰着し,信号再構成 のためには最適化問題を解く必要がある. コンプレッシブホログラフィで再構成する信号は 3 次 元空間における信号である場合が多く,データ数が多くなりがちである. 例えば, 3 次元空間が 1,000×1,000×10 で離散化されていた場合,決定すべき変数は 1,000 万個にも上る. このように コンプレッシブホログラフィでは,概して決定すべき変数が多い大規模な最適化問題を解く必要 がある. そのため,コンプレッシブホログラフィの実用化への課題の一つに計算処理の高速化が あった.

本研究では、コンプレッシブホログラフィにおける信号再構成計算を、GPU (Graphics Processing Unit) により高速化した結果について述べる. GPU とはグラフィックス処理専用の演 算装置であり、多数のシンプルなプロセッサコアが搭載されている. GPU はその高い並列演算 処理性能から、グラフィックス処理以外の数値計算に利用されることが多くなっており、このこ とを GPGPU (General-Purpose Computing on GPUs) と呼ぶ [127–129]. GPU のアーキテク チャは複数のデータに単一の命令を実行するようなデータ並列計算に向いており、SIMD (Single Instruction Multiple Data)型並列計算機としての性質を持つ. コンプレッシブホログラフィの信 号再構成計算の多くはベクトル演算で構成されているため、GPU による高速化は多くの分野 (例: MRI [130, 131], Optical Coherence Tomography[132], 分光イメージング [133, 134]) で行われて いるが、ホログラフィ分野であるコンプレッシブホログラフィで行われている例はほとんどない. そのため、本研究はコンプレッシブホログラフィにおいて、計算の高速化に GPU コンピューティ ングが有効な手段であることを示す初めての例である.

4.2 コンプレッシブホログラフィ

本研究で GPU 高速化に取り組んだコンプレッシブホログラフィのアプリケーションである,(1) コンプレッシブフレネルホログラフィと,(2) ホログラフィックトモグラフィについて述べる.こ の二つのアプリケーションは,コンプレッシブホログラフィの中でも代表的かつ基本的なアプリ ケーションであるため,本研究での高速化対象とした.



図 4.1: フレネル回折場のサブサンプリング: 複素場 *x* がある距離に作るフレネル回折場をマスク *R* によりサブサンプリングする.

4.2.1 コンプレッシブフレネルホログラフィ

コンプレッシブフレネルホログラフィ (compressive Fresnel holography)[106] とは, 圧縮セン シングの枠組みをフレネルホログラフィに応用したものであり, ある複素場が作るフレネル回折場 の少数の観測値から元の複素場を再構成する手法である. 図 4.1 のようなフレネル回折場をサブサ ンプリングする系を考える. N 個のサンプルからなる複素場を $x \in \mathbb{C}^N$ とし, そのフレネル回折 場を M(M < N) サンプルだけ取得するマスク $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ によりサブサンプリングすると, 観 測データ $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^M$ は,

$$y = RHx = RF^*P_zFx \tag{4.1}$$

となる. ここで, 行列 $H \in \mathbb{C}^{N \times N}$ はフレネル変換を表すテプリッツ行列 (Toeplitz matrix) で あり, 2次元フーリエ変換 F, 距離 z に対応する伝達関数 P_z , 2次元逆フーリエ変換 F^* からな る. 観測データ y から複素場 x を求めることは, M < N のため不良設定逆問題となる. しかし, 複素場 x がスパースである場合, 圧縮センシングの枠組みを利用して, スパースな解を復元する ことができる. 観測データ y は複素場であるため, ホログラフィなどでデータ取得が行われる. Rivenson らは位相シフト DH[135] を利用して取得した観測データ y に対して, 圧縮センシングの 枠組みが利用できることを示している [106].

コンプレッシブフレネルホログラフィを利用すれば、少数のデータから複素場を復元できることから、センサのコストの低減や、空間分割多重記録による多次元イメージング (例: 波長、偏光)[109] が実現できる.マスクパターン **R** を遮蔽物体によるデータ欠損とみなすと、複素場のインペインティングに利用できる [108].また上記の例の場合、イメージセンサとマスクによるデータ取得を仮定していたが、スキャンによるデータ取得の場合、スキャン時間の削減につながる.

少数のフレネル回折場からの信号再構成は、MRI や CT 分野における部分的なフーリエ観測

データから元の分布を復元する問題 [93, 94] とほぼ同じ枠組みであり、この問題における観測デー タをフーリエ変換データからフレネル変換データに置き換えたものと見なせる.またフレネル変換 は伝搬距離 z がある程度遠ければフーリエ変換とみなすことができる.1次元信号の場合、フレネ ル変換をフーリエ変換と同等だとみなすためには、距離 z が以下の式を満たす必要がある [107].

$$z \ge z_0 = \frac{N\Delta x_0^2}{\lambda}$$

ここで、 Δx_0 は回折元のサンプリングピッチ、 λ は光の波長を表す. 伝搬距離 zは圧縮センシングの信号再構成精度に影響し、文献 [107] にて行列のコヒーレンスに基づく再構成精度の議論が述べられている.

サブサンプリングをどのようなパターンで行うかは,信号再構成精度の向上と物理実装に影響を 与えるため,重要な問題である. 圧縮センシングの文脈では,サブサンプリングとして一様なラン ダムサンプリングを利用することで,どのようなデータに対しても良好な結果が得られることが知 られている. コンプレッシブフレネルホログラフィの場合,一様分布の代わりに,中心付近を多く サンプリングするのが良好な結果を与えるという例が示されている [107].

4.2.2 ホログラフィックトモグラフィ

ホログラフィックトモグラフィ (holographic tomography)[12, 100] とは, compressive holography^{*1}とも呼ばれ,単一のガボールホログラムから3次元空間の散乱密度分布を圧縮センシング の考え方を利用して復元する手法である.通常のホログラフィによる3次元計測では,ある奥行き の断層画像は逆伝搬計算をすることで得られる.このようにして得られた断層画像には,直接光, 物体光の2乗項,フォーカス外像,二重像 (twin image, または共役像 conjugate image) が重畳 する.ホログラフィックトモグラフィはそのような不要像を取り除くことができ,3次元物体分布 を推定することができる.インラインホログラフィからの3次元物体分布推定にスパース性を利用 するアプローチは,同時期に Denis らによっても提案されている [102].推定の精度については, 文献 [101, 136] を参照されたい.

図 4.2 のようなガボールホログラフィの系において 3 次元再構成を行うことを考える.3 次 元空間において散乱密度分布が定義されており、それに対して平面波を照射することで散乱 波と透過波の干渉縞であるガボールホログラムを記録する.ここでは簡単のため、物体空間が $N_x \times N_y \times N_z = N_{xyz}$ に離散化されており、センサのピクセル数が $N_x \times N_y = N_{xy}$ である場合 を考える.ある奥行き z にある 2 次元散乱密度分布を $x_z \in \mathbb{C}^{N_{xy}}$ として表すと、それが z = 0 に あるセンサ面上に形成する散乱波 $u_z \in \mathbb{C}^{N_{xy}}$ は次のように表される.

$$oldsymbol{u}_z = oldsymbol{H}_{oldsymbol{z}} oldsymbol{x}_{oldsymbol{z}} = F^*P_zFx_z$$

ここで,行列 H_z は距離 z の自由空間伝搬,行列 $P_z \in \mathbb{C}^{N_{xy} \times N_{xy}}$ はそれに対応する伝達関数を表す.また行列 $F \in \mathbb{C}^{N_{xy} \times N_{xy}}$ は 2 次元フーリエ変換行列を表す.図 4.2 のような系の場合,センサ面上での散乱波はすべての奥行きの散乱の和となる.奥行き 1,..., N_z における 2 次元散乱密度

^{*&}lt;sup>1</sup>本論文では,コンプレッシブホログラフィ (compressive holography) という語句を「ホログラフィにおける圧縮 センシング応用の総称」という意味で用いる.



図 4.2: ガボールホログラフィ系: 3 次元物体分布に対して平面波を照射してガボールホログラムを 取得する.

分布をそれぞれ x_1, \ldots, x_{Nz} とし、3 次元散乱密度分布 $x \in \mathbb{C}^{N_{xyz}}$ を

$$oldsymbol{x} = egin{bmatrix} oldsymbol{x}_1 \ oldsymbol{x}_2 \ dots \ oldsymbol{x}_2 \ dots \ oldsymbol{x}_{N_z} \end{pmatrix}$$

と表すと、3次元散乱密度分布がセンサ面にて形成する散乱波 $u \in \mathbb{C}^{N_{xy}}$ は次のように表される.

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H}_1 & \boldsymbol{H}_2 & \cdots & \boldsymbol{H}_z \end{bmatrix} \boldsymbol{x} = \boldsymbol{F}^* \boldsymbol{P} \boldsymbol{F}_B \boldsymbol{x}$$
(4.2)

ここで、行列 $P \in \mathbf{C}^{N_{xy} imes N_{xyz}}$ は、

$$oldsymbol{P} = egin{bmatrix} oldsymbol{P}_1 & oldsymbol{P}_2 & \cdots & oldsymbol{P}_{N_z} \end{bmatrix}$$

行列 $F_B \in \mathbb{C}^{N_{xyz} \times N_{xyz}}$ は次のような 2 次元フーリエ変換行列のブロック対角行列を表す.

$$oldsymbol{F}_B = ext{bdiag}\left(\{oldsymbol{F}, oldsymbol{F}, \dots, oldsymbol{F}\}
ight) = \left[egin{array}{ccc} oldsymbol{F} & & & \ & oldsymbol{F} & & \ & & \ & & oldsymbol{F} & & \ & & \ & & oldsymbol{F} & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ & & \ &$$

ここで、bdiag ($\{A_1, A_2, ..., A_N\}$) は対角要素が行列の集合 $\{A_1, A_2, ..., A_N\}$ の各要素からな るブロック対角行列を表す、ガボールホログラム $g \in \mathbb{R}^{N_{xy}}$ は、散乱波 u と参照波 r の和の強度 となるため次のように書ける.

$$m{g} = |m{r} + m{u}|^2 = 2 \operatorname{Re}{(m{r} \odot m{u})} + |m{r}|^2 + |m{u}|^2$$

ここで, Re (·) は実部をとるオペレータ, ① は要素毎の積, $|u|^2$ は要素毎の絶対値の二乗を表す. 参照波は平面波であるため, 振幅はセンサ面で一定値となる. ここで簡単のため, 参照波振幅を1 とする. 一様な直接光成分 $|r|^2$ は, フーリエ変換後の DC 成分除去するフーリエフィルタリング により取り除くことができる [137]. 直接光成分を除去したガボールホログラム $y \in \mathbf{R}^{N_{xy}}$ は次の ように記述できる.

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{g} - \boldsymbol{1} = 2\operatorname{Re}\left(\boldsymbol{u}\right) + \left|\boldsymbol{u}\right|^{2} \tag{4.3}$$

この観測モデルを線形モデルとみなすために,非線形である二乗成分 $|u|^2$ をモデル誤差 (model error) e とおく.するとガボールホログラフィによる観測過程は次のような線形システムとして表すことができる.

$$\boldsymbol{y} = 2\operatorname{Re}\left(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}\right) + \boldsymbol{e} \tag{4.4}$$

ここで, Re 演算子は有界な線形作用素であるため,式 (4.4) は線形であることに注意したい.

通常,ガボールホログラム y から 3 次元散乱密度 x を求めることは,等式制約よりも変数の数 が多いため ($N_{xy} < N_{xyz}$),不良設定逆問題となり解くことができない.しかし,3次元散乱密度 分布 x がスパースである場合,圧縮センシングの枠組みを利用して不良設定逆問題を解くことがで きる.

ここで、物体波の二乗成分 $|u|^2$ をモデル誤差 eとして扱う妥当性に関して簡単に述べる (より詳 しい議論は文献 [12] を参照). 二乗成分 $|u|^2$ は物体空間の各 x-y 平面に対して相関が低い成分であ る. つまり、物体空間のある x-y 平面への逆伝搬 $H_z^* |u^2|$ を計算したとき、どの平面に対しても 強いピークが立つことはほとんどない. そのため、再構成処理において二乗成分が引き起こす誤差 の影響はセンサ面 (z = 0) に集中しやすい. したがって、センサ面の散乱密度分布 x_0 を再構成し たい変数 x に含める ($x = [x_0^T, x_1^T, \dots, x_{N_z}^T]^T$) ことで、二乗成分の再構成誤差の大部分を x_0 内 に隔離でき、他の平面 x_1, \dots, x_{N_z} に関して誤差の影響を与えない. そのため、二乗成分 $|u|^2$ は 誤差 eとして取り扱うことができる. 逆に言えば、二乗成分 $|u|^2$ を誤差として取り扱うには、距 離 z = 0のセンサ面の変数 x_0 を含んだ変数 x を再構成する必要がある.

4.3 信号再構成アルゴリズム

本節では、コンプレッシブホログラフィの信号再構成のアルゴリズムについて述べる.本研究では、以下の制約なし最適化問題を解くことで信号再構成を行う.

$$\underset{\boldsymbol{x}}{\text{minimize}} \quad \frac{1}{2} \|\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} - \boldsymbol{y}\|_{2}^{2} + \tau \mathcal{R}(\boldsymbol{x})$$
(4.5)

ここで、変数を $x \in \mathbb{C}^N$ 、コンプレッシブホログラフィの観測過程を $A \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 、観測データ を $y \in \mathbb{C}^M$ とした.またスパースな解を誘導する正則化項を \mathcal{R} 、正則化パラメータを τ とした. 正則化項 \mathcal{R} として L1 ノルムと全変動 (TV: Total Variation)を用いる [138]. TV とは信号の 勾配の絶対値和をとる汎関数であり、画像のノイズ除去などに利用される [139].2次元信号 (行 列) $X \in \mathbb{R}^{N_x \times N_y}$ のベクトル表記が $x \in \mathbb{R}^{N_x N_y}$ とすると、離散的かつ等方的な (isotropic)TV は 以下のように定義される.

TV
$$(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sqrt{(X_{i,j} - X_{i+1,j})^2 + (X_{i,j} - X_{i,j+1})^2}$$

ここで $X_{i,j}$ は行列 **X** の (i,j) 要素を表す.ただし、TV は実数に対して定義されているため、複素数ベクトル x に対して次のように拡張した.

$$TV(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sqrt{|X_{i,j} - X_{i+1,j}|^2 + |X_{i,j} - X_{i,j+1}|^2}$$

TV は区分的連続な信号をスパースに表すため,画像などを対象にした圧縮センシングで広く用いられている.

4.3.1 加速付き近接勾配法

問題 (4.5) を解くために,加速付き近接勾配法 (accelerated proximal gradient method)[140, 141] を利用した.これは近接勾配法 (proximal gradient method) に Nesterov の加速法を適用し て,収束率を改善した手法である.L1 正則化に対する近接勾配法は ISTA (iterative shrinkagethresholding algorithm) として知られている.また ISTA を加速付き近接勾配法と同様に高速化 したアルゴリズムは FISTA (fast ISTA) と呼ばれている.

最初に,近接勾配法について説明する.近接勾配法が対象とする問題は,以下のようなコスト関数が微分可能な項と微分不可能な項に分離できるような問題である.

minimize
$$f(\boldsymbol{x}) + g(\boldsymbol{x})$$

ここで変数を $x \in \mathbb{C}^N$, 関数 f(x), g(x) をそれぞれ微分可能な項, 微分不可能な項^{*2}とした. こ の形式は不良設定逆問題を解く際によく見られ, その場合, 関数 f(x) が二乗誤差などの滑らかな 損失項を表し, 関数 g(x) が L1 ノルムなどの滑らかではない解の事前分布 (正則化項) を表す.

この問題では目的関数全体が微分できないため、最急降下法 (gradient descent) をそのまま適用することができない.そのため、コスト関数が $f \ge g$ に分離できるという構造を利用して、微分可能な項fに対しては最急降下法、微分不可能な項gに対しては近接写像 (proximal mapping, proximal operator) による最小化を実行する.関数gに対応する近接写像は以下のように定義される.

$$\operatorname{prox}_{g}(\boldsymbol{v}) \coloneqq \operatorname{argmin}_{\boldsymbol{x}} \left(g\left(\boldsymbol{x}\right) + \frac{1}{2} \|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{v}\|_{2}^{2} \right)$$

これは,変数 v の近傍で関数 g を最小化するような変数 x を求めるという操作である.この近接 写像を用いて,近接勾配法は以下の反復計算により解の推定値を更新する.

$$\boldsymbol{x}^{(k+1)} = \operatorname{prox}_{tg} \left(\boldsymbol{x}^{(k)} - t \nabla f \left(\boldsymbol{x}^{(k)} \right) \right)$$

ここで、 $x^{(k)}$ はk反復目の推定値、t > 0はステップサイズを表し、 prox_{tg} はスケールされた関数 tg(x)に対する以下のような近接写像を表す.

$$\operatorname{prox}_{tg}(\boldsymbol{v}) = \operatorname{argmin}_{\boldsymbol{x}} \left(g\left(\boldsymbol{x}\right) + \frac{1}{2t} \left\|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{v}\right\|_{2}^{2} \right)$$

^{*2} g は真閉凸関数 (proper closed convex function) とする.

近接勾配法は,微分不可能な項gの近接写像が閉形式 (closed-form) で書ける場合,微分不可能な 項gを効率よく最小化できる.L1ノルムの近接写像は閉形式で書けるため,L1正則化は近接勾配 法で効率よく解くことができる.

加速付き近接勾配法は、近接勾配法の各ステップに一つ前の解を用いた加速項をつける.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}^{(k+1)} &= \operatorname{prox}_{tg} \left(\boldsymbol{z}^{(k)} - t \nabla f \left(\boldsymbol{z}^{(k)} \right) \right) \\ s^{(k+1)} &= \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \left(s^{(k)} \right)^2}}{2} \\ \boldsymbol{z}^{(k+1)} &= \boldsymbol{x}^{(k+1)} + \left(\frac{s^{(k)} - 1}{s^{(k+1)}} \right) \left(\boldsymbol{x}^{(k+1)} - \boldsymbol{x}^{(k)} \right) \end{aligned}$$

ただし, $s^{(0)} = 1$ とする.近接勾配法の収束率はO(1/k)だが、この加速により収束率が $O(1/k^2)$ まで改善される.

(加速付き) 近接勾配法は、ステップサイズが $t \leq 1/L(f)$ のとき収束が保証されている. ここ で、L(f) は勾配 ∇f のリプシッツ定数 (Lipschitz constant) を表す. これは、任意のベクトル u、v に対して、

$$\left\|\nabla f\left(\boldsymbol{u}\right) - \nabla f\left(\boldsymbol{v}\right)\right\| \leq L\left(f\right) \left\|\boldsymbol{u} - \boldsymbol{v}\right\|$$

を満たすような定数である.

問題 (4.5) では, 滑らかな項は $f(\mathbf{x}) = (1/2) \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2^2$ であり, その勾配は $\nabla f(\mathbf{x}) = \mathbf{A}^* (\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y})$ であるから,

$$\left\|\nabla f\left(\boldsymbol{u}\right) - \nabla f\left(\boldsymbol{v}\right)\right\| = \left\|\boldsymbol{A}^{*}\boldsymbol{A}\left(\boldsymbol{u} - \boldsymbol{v}\right)\right\|$$

となる. $A^*A = U\Lambda U^*$ のように,ユニタリ行列 U と固有値行列 Λ で表される固有値分解を行うと,ユークリッドノルムはユニタリ変換 U に対して不変 (||Ux|| = ||x||) であるから,

$$\|\nabla f(\boldsymbol{u}) - \nabla f(\boldsymbol{v})\| = \|\boldsymbol{U} \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{U}^*(\boldsymbol{u} - \boldsymbol{v})\| = \|\boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{U}^*(\boldsymbol{u} - \boldsymbol{v})\|$$

となる.これより、 λ_{\max} を Λ の最大対角要素とすると、

$$\left\|\nabla f\left(\boldsymbol{u}\right) - \nabla f\left(\boldsymbol{v}\right)\right\| \leq \lambda_{\max} \left\|\boldsymbol{U}^{*}\left(\boldsymbol{u} - \boldsymbol{v}\right)\right\| = \lambda_{\max} \left\|\boldsymbol{u} - \boldsymbol{v}\right\|$$

となる.よって、勾配 ∇f のリプシッツ定数は $L(f) = \lambda_{\max}$ となる.以上より、問題 (4.5) にお いて滑らかな項が $f(\mathbf{x}) = (1/2) \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2^2$ である場合、 $\lambda_{\max}(\mathbf{A}^*\mathbf{A})$ を行列 $\mathbf{A}^*\mathbf{A}$ の最大固有値 とすると、近接勾配法のステップサイズは $t \leq 1/\lambda_{\max}(\mathbf{A}^*\mathbf{A})$ とすれば良い.

4.3.2 L1 正則化に対する適用

加速付き近接勾配法を L1 正則化に適用する場合,正則化項 $g(\mathbf{x}) = \tau \|\mathbf{x}\|_1$ に対応する近接写像 は次のように閉形式で書ける.

$$\operatorname{prox}_{q}\left(\boldsymbol{x}\right) = \mathcal{S}_{\tau}\left(\boldsymbol{x}\right)$$

ここで S_{τ} は以下のようなソフトしきい値 (soft-thresholding) 関数をベクトルの各要素に対して適用したものである.

$$\mathcal{S}_{\tau}(x) \coloneqq (|x| - \tau) \operatorname{sgn}(x)$$

また sgn は以下のような (複素数に拡張された) 符号関数である.

$$\operatorname{sgn}(x) \coloneqq \begin{cases} x/|x| & |x| \neq 0\\ 0 & |x| = 0 \end{cases}$$

これより、L1 正則化に対する加速付き近接勾配法は以下のように書ける.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}^{(k+1)} &= \mathcal{S}_{\tau t} \left(\boldsymbol{z}^{(k)} - t \nabla f \left(\boldsymbol{z}^{(k)} \right) \right) \\ s^{(k+1)} &= \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \left(s^{(k)} \right)^2}}{2} \\ \boldsymbol{z}^{(k+1)} &= \boldsymbol{x}^{(k+1)} + \left(\frac{s^{(k)} - 1}{s^{(k+1)}} \right) \left(\boldsymbol{x}^{(k+1)} - \boldsymbol{x}^{(k)} \right) \end{aligned}$$

4.3.3 TV 正則化に対する適用

加速付き近接勾配法を TV 正則化に適用する場合,正則化項 $g(\mathbf{x}) = \tau \operatorname{TV}(\mathbf{x})$ に対応する近接 写像は次のように書ける.

$$\operatorname{prox}_{g}(\boldsymbol{v}) = \operatorname{argmin}_{\boldsymbol{x}} \left(\tau \operatorname{TV}(\boldsymbol{x}) + \frac{1}{2} \|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{v}\|_{2}^{2} \right)$$
(4.6)

この近接写像は閉形式で記述できないため、近接写像の最小化問題を数値的に解く必要がある.こ こでは、数値的に計算する手法として Beck と Teboulle のアルゴリズム [142] を利用する^{*3}.この アルゴリズムは、TV 正則化の双対問題を射影付き勾配法 (gradient projection method) によって 反復的に解く手法である.

Beck-Teboulle のアルゴリズムについて説明する.ここでは、実数信号に対するアルゴリズムを 述べ、最後に複素数信号に拡張する.また 2 次元信号に対する TV を利用することを想定する.2 次元信号 $X \in \mathbf{R}^{N_x \times N_y}, Y \in \mathbf{R}^{N_x \times N_y}$ のベクトル表記をそれぞれ x, y とする.まず線形作用素 $\mathcal{L}: \mathbf{R}^{N_x \times N_y} \times \mathbf{R}^{N_x \times N_y} \rightarrow \mathbf{R}^{N_x \times N_y}$ を以下のように定義する.

$$\mathcal{L}\left(\boldsymbol{p},\boldsymbol{q}\right)_{i,j} = p_{i,j} + q_{i,j} - p_{i-1,j} - q_{i,j-1}$$

ただし, $p_{0,j} = q_{i,0} = 0$ とする.また作用素 \mathcal{L} の随伴作用素 $\mathcal{L}^{\mathrm{T}} : \mathbf{R}^{N_x \times N_y} \to \mathbf{R}^{N_x \times N_y} \times \mathbf{R}^{N_x \times N_y}$ を次のように定義する.

$$\mathcal{L}^{\mathrm{T}}\left(oldsymbol{X}
ight)=\left(oldsymbol{p},oldsymbol{q}
ight)$$

ここで,

$$p_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j} - x_{i+1,j} & (i < N_x) \\ 0 & (i = N_x) \end{cases}$$
$$q_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j} - x_{i,j+1} & (j < N_y) \\ 0 & (j = N_y) \end{cases}$$

^{*&}lt;sup>3</sup> Beck-Teboulle のアルゴリズムは広く利用されている Chambolle のアルゴリズム [143] と実質的に等価だが,形式 が微妙に異なる.

である.問題(4.6)は以下の反復計算によって解くことができる.

$$\boldsymbol{X}^{(k)} = \boldsymbol{Y} - \tau \mathcal{L}\left(\boldsymbol{p}^{(k)}, \boldsymbol{q}^{(k)}\right)$$
(4.7)

$$\left(\boldsymbol{p}^{(k+1)}, \boldsymbol{q}^{(k+1)}\right) = P_{\mathcal{P}}\left[\left(\boldsymbol{p}^{(k)}, \boldsymbol{q}^{(k)}\right) + \frac{1}{8\tau}\mathcal{L}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{X}^{(k)}\right)\right]$$
(4.8)

ここで,集合 \mathcal{P} に対する射影を $P_{\mathcal{P}}$ とした.集合 \mathcal{P} は行列ペア (p,q) に対する制約であり,その 写像 $P_{\mathcal{P}}(p,q) = (r,s)$ は以下のように定義される.

$$r_{i,j} = \frac{p_{i,j}}{\max\left\{1, \sqrt{p_{i,j}^2 + q_{i,j}^2}\right\}}$$
$$s_{i,j} = \frac{q_{i,j}}{\max\left\{1, \sqrt{p_{i,j}^2 + q_{i,j}^2}\right\}}$$

式 (4.8) は双対問題に対する射影付き勾配法である. Beck-Teboulle のアルゴリズムではこの射影 付き勾配法を Nesterov の加速法を利用して高速化する手法を提案しているが、本研究では上記 に示した通り、加速法を使用しないバージョンを利用した.また、複素数信号に対しては、写像 $P_{\mathcal{P}}(\boldsymbol{p}, \boldsymbol{q}) = (\boldsymbol{r}, \boldsymbol{s})$ を以下のように定義することで拡張を行った.

$$r_{i,j} = \frac{p_{i,j}}{\max\left\{1, \sqrt{|p_{i,j}|^2 + |q_{i,j}|^2}\right\}}$$
$$s_{i,j} = \frac{q_{i,j}}{\max\left\{1, \sqrt{|p_{i,j}|^2 + |q_{i,j}|^2}\right\}}$$

ベクトル x に対して,式 (4.7), (4.8) の反復を N_{TV} 回行う処理を $\mathcal{D}_{\tau}(x, N_{\text{TV}})$ とすると,TV 正則化に対する加速付き近接勾配法は以下のように書ける.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}^{(k+1)} &= \mathcal{D}_{\tau t} \left(\boldsymbol{z}^{(k)} - t \nabla f \left(\boldsymbol{z}^{(k)} \right), N_{\text{TV}} \right) \\ s^{(k+1)} &= \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \left(s^{(k)} \right)^2}}{2} \\ \boldsymbol{z}^{(k+1)} &= \boldsymbol{x}^{(k+1)} + \left(\frac{s^{(k)} - 1}{s^{(k+1)}} \right) \left(\boldsymbol{x}^{(k+1)} - \boldsymbol{x}^{(k)} \right) \end{aligned}$$

4.3.4 GPU 実装の方針

加速付き近接勾配法を GPU に実装する際の方針について述べる.本研究では NVIDIA が提供 している GPU 向けの並列計算プラットフォーム・プログラミングモデルである CUDA (Compute Unified Device Architecture) を利用した (詳しい実装環境は第4.4,4.5 節に記載). CUDA プロ グラミングモデルでは,GPU が搭載されているマシンであるホスト (host) と一つまたは複数の GPU であるデバイス (device) からシステムが構成される.デバイス上で実行される関数をカーネ ル (kernel) と呼び,これを CUDA プログラミング言語で記述し,ホストから複数のスレッドを作 成しカーネルを呼び出すことで,スレッド並列計算を行う.このプログラミングモデルは、多くの



図 4.3: **GPU** による加速付き近接勾配法: (1) 観測データとセンシング行列をホストからデバイス ヘデータ転送する. (2) 加速付き近接勾配法のカーネルを必要な反復回数 N_{APG} 分呼び出す. (3) 最終結果をデバイスからホストヘデータ転送する.

データに単一の命令を行う SIMD 型のデータ並列計算と相性が良い.加速付き近接勾配法はデー タ並列性の高いベクトル演算から構成されているため,GPU を用いた並列計算により効率的に計 算できる.

GPU を利用した加速付き近接勾配法の模式図を図 4.3 に示す.まず,観測データ y とセンシン グ行列 A をホストからデバイスへ送る. その後,加速付き近接勾配法のカーネル関数を必要な反 復回数だけ呼び出し、デバイス上で並列計算する.最後に、得られた解をデバイスからホストへ送 り、最終的な結果を得る.ホスト-デバイス間のデータ転送は多くの時間がかかり、そのようなデー タ転送は少ない方が良い、今回の実装では、最初と最後にデータ転送を一回ずつ行い、それ以外の 処理はデバイス内でほぼ完結するため、ホスト-デバイス間のデータ転送量は少なく抑えられる. 加速付き近接勾配法は,大きく分けて3つのカーネルからなる(勾配計算,近接写像,変数の更 新).勾配計算では,滑らかな項の勾配である $abla f(m{x}) = m{A}^* \left(m{A}m{x} - m{y}
ight)$ を計算する.センシング行 列 A がテプリッツ行列などのように構造化されている場合,勾配計算は構造を利用して高速に行 うことができる.センシング行列は個々の問題によって異なるため,勾配計算は第 4.4, 4.5 節で述 べる.近接写像では,前述の通り,L1 正則化はソフトしきい値計算,TV 正則化は Beck-Teboulle のアルゴリズムを行う. Beck-Teboulle のアルゴリズムでは,式 (4.7), (4.8) で表される主変数と 双対変数の更新を行うカーネルをそれぞれ記述し、必要な回数だけ反復する.これらもベクトル演 算で構成されるため簡単に並列化できる.変数の更新では,加速項である s, z を更新する.これ らの一連のカーネルを収束判定条件を満たす必要な回数だけ反復することで、加速付き近接勾配法 を行う.

表 4.1: 実装環境 (コンプレッシブフレネルホログラフィ): GPU-CH2 では CPU-CH2 をホスト環 境とした.

	GPU-CH2	CPU-CH2	
Dresser	NVIDIA GTX TITAN X	Intel Core i7-5930K	
Frocessor	$1~\mathrm{GHz},3{,}072~\mathrm{Cores}$	$3.5~\mathrm{GHz}, 6$ Cores, $12~\mathrm{Threads}$	
Managemen	GDDR5 RAM	DDR4-2133	
Memory	$12~\mathrm{GB},336.5~\mathrm{GB/sec}$	32 GB, 17 GB/sec	
Compiler	NVCC 7.5.17 (CUDA Toolkit 7.5)	gcc 4.8.4 (-O3)	
Precision	Single (float)	Single (float)	
FFT library	cuFFT (CUDA Toolkit 7.5)	FFTW 3.3.4	
Multi-threading	-	OpenMP	

4.4 コンプレッシブフレネルホログラフィの GPU 高速化

4.4.1 GPU 実装

コンプレッシブフレネルホログラフィ (第 4.2.1 節) の信号再構成を GPU を用いて高速化した. 信号再構成は以下の TV 正則化によって行った.

$$\underset{\boldsymbol{x}}{\text{minimize}} \quad \frac{1}{2} \|\boldsymbol{R}\boldsymbol{H}\boldsymbol{x} - \boldsymbol{y}\|_{2}^{2} + \tau \operatorname{TV}(\boldsymbol{x})$$
(4.9)

問題 (4.9) を加速付き近接勾配法 (第 4.3 節) によって解く. このとき, 勾配 ∇f はコンプレッシ ブフレネルホログラフィの観測モデル (4.1) から次のように計算できる.

$$abla f(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{A}^* \left(\boldsymbol{A} \boldsymbol{x} - \boldsymbol{y} \right) = \boldsymbol{H}^* \boldsymbol{R}^{\mathrm{T}} \left(\boldsymbol{R} \boldsymbol{H} \boldsymbol{x} - \boldsymbol{y} \right)$$

行列 H は式 (4.1) で表されるように、2 次元フーリエ変換 F, 伝達関数の乗算 P_z , 2 次元逆フーリ エ変換 F^* からなる. この構造を利用して行列 H(およびその随伴行列 H^*) の乗算は効率的に行 うことができる. また対角行列 R の乗算は、単純に該当ピクセルをサブサンプリングすれば良い. フーリエ変換 (FFT) は $O(N \log N)$, 伝達関数の乗算は O(N), サブサンプリング R は O(N) で 計算できるため、勾配計算は全体で $O(N \log N)$ で計算できる.

GPU による信号再構成計算 (GPU-CH2) を表 4.1 に示される環境で実装した.また CPU と比較して性能向上を評価するため、同様のアルゴリズムを CPU にも実装した (CPU-CH2). GPU-CH2 は NVIDIA GTX TITAN X をターゲットデバイスとして実装した.FFT の実装は NVIDIA 純正の FFT ライブラリである cuFFT を利用した.CPU-CH2 は C++ により実装し, FFT の実装は FFTW を利用し, OpenMP を利用した簡単な並列化 (12 スレッド) を施した.ま た両者とも単精度浮動小数点数 (float) で実装した.GPU-CH2 の実行は CPU-CH2 に記載され ているホストから行った.

表 4.2: 計算時間 (コンプレッシブフレネルホログラフィ): TV 正則化による信号再構成 (N_{APG} = 400, N_{TV} = 10). 10 回の試行の平均値を記載. GPU-CH2 におけるカッコ内の数値は CPU-CH2 に対する高速化比.

Pixel count	GPU-CH2 $[sec]$	CPU-CH2 $[sec]$
128×128	$0.090~(8.03 \times)$	0.721
256×256	$0.141~(25.7\times)$	3.636
512×512	$0.463~(23.8\times)$	11.03
$1{,}024 \times 1{,}024$	$1.851~(22.3\times)$	41.36
$2{,}048 \times 2{,}048$	$7.178~(30.4 \times)$	218.0

4.4.2 性能評価

GPUによる信号再構成計算の性能評価を行った (表 4.2, 図 4.4). 計算時間は, GPU-CH2, CPU-CH2 ともに 10 回実行した平均値をとった.また加速付き近接勾配法の反復回数 N_{APG} は 400 回 に設定し ($N_{APG} = 400$), TV 正則化における Beck-Teboulle のアルゴリズムの反復回数 N_{TV} は 10 回に設定した ($N_{TV} = 10$). これらの反復回数は,複数回の信号再構成の結果に基づき,良好な結果が得られる回数を選んだ.ただし,計算時間は反復回数 N_{APG} にほぼ線形に比例することに注意したい.再構成を行う信号のデータサイズは, $N = 128 \times 128, 256 \times 256, 512 \times 512, 1,024 \times 1,024$ とした.表 4.2 より,入力データが十分大きい ($N \ge 256 \times 256$)とき,GPU-CH2 は CPU-CH2 と比較して 20–30 倍の高速化となった.また入力データが小さいとき ($N \le 128 \times 128$)は, CPU-GPU 間の通信と GPU 内のメモリアクセスのレイテンシがボトルネックとなるため,高速化は 8 倍程度となった.

図 4.4 に計算時間とデータサイズの関係を示す. 図 4.4 より, GPU-CH2 の計算時間はデータサ イズにほぼ線形に比例しており,並列計算が効率よく働いていることがわかる. また, CPU-CH2 の計算時間もデータサイズにほぼ線形に比例しているが, $N_{xy} = 2048 \times 2048$ のときに計算時間が 長くなっている. これは CPU-CH2 の実装がまだ十分に最適化されていないことが原因だと考え られる.

GPU-CH2 による再構成シミュレーションの結果を図 4.5 に示す. 図 4.5 (a) に 5 つの異なる振幅パターン (位相は 0) と波長を持つ伝搬元複素場 x を表す. これらのパターンは、512 × 512 ピクセル、8.0 µm のピッチを持つ. 観測データ y の取得は、距離 z = 100 mm の位置のフレネル回折場を 20% ランダムサンプリングすることで行った. 図 4.5 (b) に TV 正則化による信号再構成結果を示す. また比較のために、サブサンプルされたデータ y を線形補間した後に逆伝搬計算を行った結果を図 4.5 (c) に示す. 図 4.5 (a) に表される元の複素場と図 4.5 (b), (c) の PSNR (Peak Signal-To-Noise-Ratio) をとったところ、いずれの物体の場合も図 4.5 (b) の方が PSNR の改善が見られた. TV は区分的に連続なパターンをスパースにするため、Pepper (4 列目) のようなパターンでは良い再構成結果となる. 一方で、Baboon (2 列目) のようなパターンでは再構成結果がそれほど向上しない.



図 4.4: 計算時間 (コンプレッシブフレネルホログラフィ): TV 正則化による信号再構成 (N_{APG} = 400, N_{TV} = 10).

4.5 ホログラフィックトモグラフィの GPU 高速化

4.5.1 GPU 実装

ホログラフィックトモグラフィ (第 4.2.2 節) の信号再構成を GPU を用いて高速化した. 信号再 構成は以下の L1 および TV 正則化によって行った.

$$\underset{\boldsymbol{x}}{\text{minimize}} \quad \frac{1}{2} \left\| 2 \operatorname{Re}\left(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}\right) - \boldsymbol{y} \right\|_{2}^{2} + \tau \left\|\boldsymbol{x}\right\|_{1}$$
(4.10)

$$\underset{\boldsymbol{x}}{\operatorname{minimize}} \quad \frac{1}{2} \left\| 2\operatorname{Re}\left(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}\right) - \boldsymbol{y} \right\|_{2}^{2} + \tau \sum_{i=1}^{N_{z}} \operatorname{TV}\left(\boldsymbol{x}_{i}\right)$$

$$(4.11)$$

L1 正則化では,物体そのものがスパースに分布している場合を仮定している.また TV 正則化では,2次元断面に対する TV の和を利用した.

問題 (4.10) および (4.11) を加速付き近接勾配法 (第 4.3 節) によって解く. このとき, 勾配 ∇f はホログラフィックトモグラフィの観測モデル (4.4) から次のように計算できる.

$$\nabla f(\boldsymbol{x}) = 2\boldsymbol{H}^* \left(2\operatorname{Re}\left(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}\right) - \boldsymbol{y} \right)$$

行列 H は式 (4.2) で表されるように、ブロック 2 次元フーリエ変換 F_B 、伝達関数の乗算と和 P、 2 次元逆フーリエ変換 F^* からなる.この構造を利用して行列 H(およびその随伴行列 H^*)の乗 算は効率的に行うことができる (図 4.6).また図 4.6 に示す通り、行列 F_B と Pの乗算は異なる奥



28.5 dB

21.3 dB

24.2 dB

27.8 dB

22.0 dB

図 4.5: 信号再構成シミュレーション (コンプレッシブフレネルホログラフィ): (a) 伝搬元複素場 x (位相 0, 512×512 ピクセル, 8.0 µm ピクセルピッチ, 波長は各画像の下部に記載). (b) TV 正則 化による信号再構成結果. (c) 線形補間された複素場からの逆伝搬結果. (b), (c) のいずれも, 距 離 z = 100 mm の位置のフレネル回折場を 20% のランダムサンプリングしたデータ **u** を利用. 各 再構成画像の下部に PSNR を記載.

(c)

行き断面 xz に対して並列に計算できる性質 (ブロック分割性)を持つ.本実装ではこの性質を利用 していないが、この性質はマルチ GPU システムなどで実装する上で有利に働く性質である.

GPU による信号再構成計算 (GPU-CH3) を表 4.3 に示される環境で実装した. また GPU と比 較して性能向上を評価するため,同様のアルゴリズムを CPU にも実装した (CPU-CH3). GPU-CH3 は NVIDIA GTX 980 をターゲットデバイスとして実装した. FFT の実装は NVIDIA 純正 の FFT ライブラリである cuFFT を利用した. CPU-CH3 は C++ により実装し, FFT の実装は FFTW を利用し、OpenMP を利用した簡単な並列化 (8 スレッド) を施した.また今回使用した GPU のパフォーマンスの都合上,両者とも単精度浮動小数点数 (float) で実装した. GPU-CH3 の実行は CPU-CH3 に記載されているホストから行った.



3D object

図 4.6: センシング行列 H の乗算: 行列 H は, ブロック 2 次元フーリエ変換 F_B, 伝達関数の乗 算と和 P, 2 次元逆フーリエ変換 F* からなり, 効率的に乗算を計算できる.

表 4.3: 実装環境 (ホログラフィックトモグラフィ): GPU-CH3 では CPU-CH3 をホスト環境とした.

	GPU-CH3	CPU-CH3	
Dreesson	NVIDIA GTX 980	Intel Core i7-4790K	
Processor	$1,\!126$ MHz, 2048 Cores	4 GHz, 4 Cores, 8 Threads	
Momony	GDDR5 RAM	DDR3-1600	
Memory	4 GB, 224 GB/sec	32 GB, 12.8 GB/sec	
Compiler	NVCC 7.5.17 (CUDA Toolkit 7.5)	gcc $4.8.3$ (-O3)	
Precision	Single (float)	Single (float)	
FFT library	cuFFT (CUDA Toolkit 7.5)	FFTW 3.3.4	
Multi-threading	-	OpenMP	

4.5.2 性能評価

GPUによる信号再構成計算の性能評価を行った (表 4.4, 図 4.7).計算時間は,GPU-CH3 では 20回実行した平均値をとり,CPU-CH3 では 10回実行した平均値をとった.また加速付き近接勾 配法の反復回数 N_{APG} は 600回に設定し ($N_{APG} = 600$),TV 正則化における Beck-Teboulle の アルゴリズムの反復回数 N_{TV} は 10回に設定した ($N_{TV} = 10$).これらの反復回数は,複数回の 信号再構成の結果に基づき,良好な結果が得られる回数を選んだ.ただし,計算時間は反復回数 N_{APG} にほぼ線形に比例することに注意したい.再構成を行う信号のデータサイズは以下のように 設定した

表 4.4: **計算時間 (ホログラフィックトモグラフィ)**: L1 正則化と TV 正則化による信号再構成 (N_{APG} = 600, N_{TV} = 10). GPU-CH3 は 20 回の試行の平均値, CPU-CH3 は 10 回の試行の平 均値を記載. GPU-CH3 におけるカッコ内の数値は CPU-CH3 に対する高速化比.

Data size	L1 regularization		TV regularization	
$N_x \times N_y \times N_z$	GPU-CH3	CPU-CH3	GPU-CH3	CPU-CH3
$128\times128\times10$	$0.119~(12.2\times)$	1.449	$0.548~(18.8\times)$	10.28
$256\times 256\times 10$	$0.433~(22.7\times)$	9.818	$2.139~(21.5\times)$	46.03
$512\times512\times10$	$1.930~(22.2\times)$	42.87	$8.636~(21.1\times)$	182.5
$1,\!024\times1,\!024\times10$	$7.641~(24.5 \times)$	187.5	$34.45~(21.6\times)$	743.3
$512 \times 512 \times 5$	$1.074~(20.1\times)$	21.58	$4.443~(20.9\times)$	92.92
$512\times512\times20$	$3.655~(20.0 \times)$	73.01	$17.04~(20.4\times)$	348.0
$512\times512\times30$	$5.383~(19.6\times)$	105.3	$25.44~(20.3\times)$	516.4
$512 \times 512 \times 40$	$7.108~(16.2\times)$	114.9	$33.80~(17.7\times)$	597.3

- 1. 奥行き分割数を一定値 ($N_z = 10$) とし、ホログラムサイズを変化させた ($N_{xy} = 128 \times 128, 256 \times 256, 512 \times 512, 1024 \times 1024$).
- 2. ホログラムサイズを一定値 ($N_{xy} = 512 \times 512$) とし、奥行き分割数を変化させた ($N_z = 5, 10, 20, 30, 40$).

表 4.4 より, L1 正則化, TV 正則化の両者とも, GPU-CH3 は CPU-CH3 に比べて約 20 倍の高 速化を達成した. 図 4.7 に計算時間とデータサイズの関係を示す. 図 4.7 (a) より, GPU-CH3 の計算時間はデータサイズにほぼ線形に比例しており,並列計算が効率よく働いていることが わかる. 図 4.7 (b) より, CPU-CH3 の計算時間もデータサイズにほぼ線形に比例しているが, $N_{xyz} = 512 \times 512 \times 40$ のときに計算時間が短くなっている. したがって, $N_{xyz} = 512 \times 512 \times 40$ における GPU-CH3 の CPU 対性能比 (L1: 16.2 倍, TV: 17.7 倍) の低下は, CPU-CH3 の性能の 向上によるものである.

GPU-CH3 の加速付き近接勾配法の 1 ループにおける各計算ステップの評価を行った (図 4.8). ここでは,信号のデータサイズを $N_x \times N_y \times N_z = 1024 \times 1024 \times 10$ とした.図 4.8 にて,デバ イスへのデータ転送,ホストへのデータ転送,伝達関数の計算は 1 回だけ行われるが,勾配計算, 近接写像,変数の更新はそれぞれ N_{APG} 回ずつ行われるため,計算時間がそれぞれ N_{APG} 倍とな ることに注意したい.さらに,TV の近接写像は加速付き近接勾配法の 1 ループにつき N_{TV} 回の 反復計算を必要とするため,その計算時間は $N_{APG} \times N_{TV}$ 倍となることに注意したい.例えば, 表 4.4 と同様の設定 ($N_{APG} = 600, N_{TV} = 10$)とした場合,勾配計算は 5.53 sec, L1 の近接写像 は 0.884 sec, TV の近接写像は 27.7 sec,変数の更新は 1.20 sec となる.この場合,データ通信時間 14.7 ms は無視できるほど小さく,L1 正則化では勾配計算が最も計算時間を要し,TV 正則化では 近接写像が最も計算時間を要する.

最も計算時間を要する計算ステップ (L1 正則化: 勾配計算, TV 正則化: 近接写像) のプロファ イリングを行い, ボトルネックを特定を行った. 勾配計算では, GPU の計算リソース使用率



図 4.7: 計算時間 (ホログラフィックトモグラフィ): (a) GPU-CH3 の計算時間. (b) CPU-CH3 の計算時間. N_{APG} = 600, N_{TV} = 10.



図 4.8: プロファイル結果 (GPU-CH3): データサイズ 1,024×1,024×10 のときの加速付き近接 勾配法の 1 ループにおける各計算ステップの計算時間. デバイスへのデータ転送,ホストへのデー タ転送,伝達関数の計算は 1 回だけ行われる.勾配計算,近接写像,変数の更新はそれぞれ N_{APG} 回行われるため,計算時間がそれぞれ N_{APG} 倍となる. TV の近接写像は 1 ループにつき N_{TV} 回 の反復計算を必要とするため,計算時間が $N_{APG} \times N_{TV}$ 倍となる.

(compute resource utilization) が約 20%, メモリ帯域幅使用率 (memory bandwidth utilization) が約 75% となった.一方, TV 正則化における近接写像では, 計算リソース使用率が約 26%, メ モリ帯域幅使用率が約 76% となった.このように計算リソース使用率が低く,メモリ帯域幅使 用率が高い場合,カーネルはメモリバウンドであり,デバイス上のマルチプロセッサとグロー バルメモリ間の通信がボトルネックとなる.表 4.3 より, CPU のメモリ帯域幅は 12.8 GB/sec (DDR3-1600), GPU のメモリ帯域幅は 224 GB/sec (GDDR5) である.メモリアクセスがボト ルネックとなる場合,このメモリ帯域幅によって性能が決まる.仮に,本実装がこれらの帯域幅 をフルに使用できていた場合,224/12.8 = 17.5 倍の高速化が可能となる.したがって,本実装 で得られた約 20 倍の高速化は穏当な結果だと評価できる.またデータサイズが十分大きくない 場合,メモリアクセスの帯域幅の代わりにレイテンシ (latency) がボトルネックとなる. 例えば, $N_{xyz} = 64 \times 64 \times 5$ のような小さなデータの場合,メモリ帯域使用率は 25% まで低下する. こ のメモリ帯域幅に関する議論は,効率的なメモリアクセスが性能向上に大きく寄与することを示 している.本実装のメモリアクセスは完全に最適化されておらず,改善の余地が残されている. 例えば,TV の近接写像におけるメモリアクセスの一部は完全にコアレスアクセスになっておら ず,それによってメモリ帯域幅を完全に利用できていない.これはテクスチャキャッシュ (texture cache) を利用することで改善でき,今後の課題の一つとして挙げられる.

GPU-CH3 による再構成シミュレーションの結果を図 4.9 に示す. 図 4.9 (a) に 3 次元空間に分 布する物体を示す.物体空間は $N_x \times N_y \times N_z = 1,024 \times 1,024 \times 5$ サンプルに離散化され,面 内方向のピッチは 9.0 µm,軸方向のピッチは 2.0 mm とした.物体分布は,ランダムに分布した 点状物体 (10 × 10 ピクセル領域,90 µm × 90 µm) と,異なる 4 つの奥行きにそれぞれ分布した Shepp-Logan phantom (256 × 256 ピクセル領域, 2.3 mm × 2.3 mm) から構成される. この物体 分布に平面波照明 (波長 633 nm) を使い,ガボールホログラムを取得する. センサは 1,024×1,024 ピクセルからなり,ピッチは 9.0 µm とした. また物体とセンサは z = 100 mm だけ離れた位置 に配置した.取得したガボールホログラムから,式 (4.3) にしたがって DC 項を除去した.図 4.9 (b) と (c) に逆伝搬計算とホログラフィックトモグラフィによる再構成結果をそれぞれ示す. 通常の逆伝搬計算 (図 4.9 (b)) では,各奥行き断面に置いて,フォーカス外像,共役像,物体光 の二乗項が重畳されている.一方,ホログラフィックトモグラフィ (図 4.9 (c)) では,そのよう な不要像が抑制され,図 4.9 (a) の物体分布と近い分布が得られている.この結果は,TV 正則化 ($\tau = 0.01, N_{AGP} = 1,000, N_{TV} = 10$) によって得られた.このとき,計算時間は GPU-CH3 で 29 sec, CPU-CH3 で 597 sec となり, 20 倍程度の高速化となる.

4.6 まとめ

コンプレッシブホログラフィにおける信号再構成計算を GPU により高速化した.高速化の対象 としたアプリケーションは、コンプレッシブホログラフィの代表的な手法であるコンプレッシブ フレネルホログラフィとホログラフィックトモグラフィである.信号再構成は、L1 および TV 正 則化を加速付き近接勾配法により解くことで行った.加速付き近接勾配法における勾配計算にお いて、センシング行列の構造を利用した高速化を行った.その結果、両者のアプリケーションで CPU と比較して 20 倍程度の高速化を達成した.また、ホログラフィックトモグラフィの GPU 高 速化では、ボトルネックの特定のためのプロファイリングを行い、メモリ帯域幅使用率がボトル ネックとなっていることを確認した.そのため、メモリアクセスの効率化が今後の課題として挙げ られる.



図 4.9: 信号再構成シミュレーション (ホログラフィックトモグラフィ): (a) 3 次元物体分布 ($N_x \times N_y \times N_z = 1,024 \times 1,024 \times 5$, 面内方向のピッチ 9.0 µm, 軸方向のピッチ 2.0 mm). (b) 逆伝搬計算による結果. (c) ホログラフィックトモグラフィによる信号再構成結果 (TV 正則化, $\tau = 0.01, N_{AGP} = 1,000, N_{TV} = 10$).

第5章

結論

本研究では、ホログラフィにおけるライトフィールドイメージングの利用と、圧縮センシングを 用いたホログラフィであるコンプレッシブホログラフィにおける課題に取り組んだ.具体的には、 (1) ライトフィールドカメラを用いた実シーンのホログラム作成 (第3章), (2) コンプレッシブホ ログラフィにおける計算の高速化 (第4章) に取り組んだ.

ライトフィールドカメラを用いた実シーンのホログラム作成では、市販のポータブルなライト フィールドカメラである Lytro を用いる手法に取り組んだ. Lytro によって実シーンの3次元情報 であるライトフィールドを取得し、そのライトフィールドを波面に変換することで、ホログラムを 作成した.また Lytro で撮影した RAW 画像をホログラム計算に利用するための前処理 (色補正、 サブ画像への分割、サンプリングパターンの変換)について述べた.本手法の妥当性を確認するた めに、Lytro を用いて作成したホログラムの再生シミュレーションおよび光学再生実験を行った. その結果、奥行きを持った再生像が得られることを確認した.Lytro のようなポータブルなライト フィールドカメラは、従来のインテグラルイメージングに基づく撮影系より小型かつポータブルで 取り扱いやすいため、自然光下における実シーンのホログラム作成のための有用なツールになるこ とが期待される.

コンプレッシブホログラフィにおける計算の高速化では,代表的なアプリケーションであるコン プレッシブフレネルホログラフィとホログラフィックトモグラフィの信号再構成計算の GPU によ る高速化に取り組んだ.信号再構成は L1 および TV 正則化により行われ,それらの問題を解く最 適化アルゴリズムである加速付き近接勾配法を GPU 実装した.また加速付き近接勾配法における 勾配計算において,センシング行列の構造を利用した高速化を行った.その結果,コンプレッシブ フレネルホログラフィでは一般的なプロセッサと比較して 20-30 倍の高速化を達成し,ホログラ フィックトモグラフィでは 20 倍程度の高速化を達成した.またホログラフィックトモグラフィの GPU 実装ではプロファイリングを行うことで,メモリ帯域幅使用率がボトルネックとなっている ことを確認した.

付録 A

光線-波面変換

光線情報からそれに対応する波面を求めることを光線-波面変換 (ray-wavefront conversion) と 呼ぶ.光線-波面変換では光線情報をフーリエ変換することで波面に変換する.このことは角スペ クトルの理論 [27] から説明することができるが、本節ではマイクロレンズによる光線取得を波動光 学により記述することで、光線-波面変換を説明する.

図 A.1 に示すように, xy 平面上の位置 (u,v) にあるマイクロレンズに波面 U(x,y) が入射した ときに,後側焦平面 (s,t) 上に形成される波面 $U_{u,v}$ を考える.記述を簡潔にするため,マイクロレ ンズ位置を中心とした座標系 (x',y') = (x - u, y - v), (s',t') = (s - u, t - v) を定義すると,波 面 $U_{u,v}(s',t')$ は次のように表される.

$$U_{u,v}(s',t') = C(s',t') \iint_{-\infty}^{\infty} U(x,y) P(x',y') e^{-j\frac{2\pi}{\lambda f}(xs'+yt')} dxdy$$
$$= C(s',t') \mathcal{F}^2 \left\{ U(x,y) P(x',y') \right\} \left(\frac{s'}{\lambda f},\frac{t'}{\lambda f}\right)$$

ここで、 λ は波長、f はマイクロレンズの焦点距離、C(s',t') は |C(s',t')| = 1 となる 2 次位相因 子、P(x',y') は (u,v) を中心とした瞳関数を表す. センサ上の波面 $U_{u,v}(s',t')$ は瞳関数によって 広がりを制限された局所的な入力波面 U(x,y)P(x',y') のフーリエ変換によって表される. した がって、 $U_{u,v}(s',t')$ を逆フーリエ変換することでこの局所入力波面を求めることができる. これ は、 $U_{u,v} = |U_{u,v}| \exp(j\theta_{u,v})$ と表した場合、以下のように記述できる.

$$U(x,y)P(x',y') = \mathcal{F}^{-2} \left\{ C^{-1}(s',t') | U_{u,v}(s',t')| \exp\left[j\theta_{u,v}(s',t')\right] \right\} (\lambda f x, \lambda f y)$$
(A.1)

複数のマイクロレンズによって取得された局所入力波面群によって入力波面全体が近似できる 場合,

$$U(x,y) = \sum_{n_u=0}^{N_u-1} \sum_{n_v=0}^{N_v-1} U(x,y) P(x - n_u \Delta u, y - n_v \Delta v)$$

となる.ここで、 $\Delta u \times \Delta v$ はマイクロレンズ間の距離、 $N_u \times N_v$ はマイクロレンズの個数 を表す.マイクロレンズアレイの後側焦平面に置かれたセンサによって記録されたライトフィールド L(u,v,s,t)は、上記の強度分布 $|U_{u,v}(s',t')|^2$ とみなすことができる^{*1}.したがって、

*1 ここではライトフィールドをコヒーレント光とみなしている.



図 A.1: マイクロレンズによるフーリエ変換: 座標 (u, v) にあるマイクロレンズによって局所波面 のフーリエ変換が記録される.

 $|U_{u,v}(s',t')| = \sqrt{L(u,v,s,t)}$ として式 (A.1) に代入して局所入力波面を近似的に求め、それを足 し合わせることで入力波面全体を求める。ただしライトフィールドは位相分布の情報が欠落してい るため、厳密な波面の復元はできない。多くの応用ではこの欠落した位相情報の代替にランダム位 相を使い、局所入力波面のスペクトルを平均化することが行われている。

式 (A.1) にしたがって,取得したライトフィールドに対してフーリエ変換による光線-波面変換 を数値的に行う場合,座標系がスケールすることに注意したい.特に,式(A.1)のフーリエ変換を 高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transform) で行う場合,以下の条件を満たす必要がある.

$$\frac{\Delta x \Delta s}{\lambda f} = \frac{1}{N_s}, \quad \frac{\Delta y \Delta t}{\lambda f} = \frac{1}{N_t} \tag{A.2}$$

ここで, $\Delta x \times \Delta y$, $N_x \times N_y$ は xy 面 (入力波面) のピッチとサンプル数, $\Delta s \times \Delta t$, $N_s \times N_t$ は st 面 (後側焦平面・センサ面) のピッチとサンプル数をそれぞれ表す.式 (A.2) は, マイクロレンズ の焦点距離 f の代わりに画角 $2\theta_{\alpha} \times 2\theta_{\beta}$ を用いると,以下のように書き換えることができる.

$$\tan \theta_{\alpha} = \frac{\lambda}{2\Delta x}, \quad \tan \theta_{\beta} = \frac{\lambda}{2\Delta y} \tag{A.3}$$

また実際の焦点距離 f を考慮せず, $\Delta x = \Delta s$, $\Delta y = \Delta t$ として FFT による光線-波面変換を行う ことは, 画角が式 (A.3) を満たすようにシーンの倍率が変わることを意味する.

謝辞

本研究を行うにあたり,素晴らしい研究環境と丁寧な指導および貴重な助言を頂きました,指導 教員である千葉大学大学院工学研究科伊藤智義教授に心より感謝申し上げます.また研究を進める にあたり多くのご指導と助言を承りました,千葉大学大学院工学研究科下馬場朋禄准教授に深く感 謝申し上げます.また普段の研究生活から様々な面でお世話になりました,千葉大学大学院工学研 究科角江崇助教に心から感謝申し上げます.また技術的な面で助言を頂いた,千葉大学大学院工学 研究科老川稔特任准教授に心から感謝申し上げます.また学部生の頃から様々な面でお世話にな りました,東京理科大学基礎工学部電子応用工学科増田信之准教授に心から感謝申し上げます.最 後に,研究を進めるにあたり多くの場面でお世話になりました同研究室の皆様に深く感謝いたし ます.

参考文献

- ¹D. Gabor, "A New Microscopic Principle", Nature **161**, 777–778 (1948) DOI: **10.1038**/ **161777a0**.
- ²C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication", Bell System Technical Journal **27**, 623–656 (1948) DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x.
- ³H. H. Goldstine and A. Goldstine, "The electronic numerical integrator and computer (ENIAC)", Mathematics of Computation **2**, 97–110 (1946) DOI: 10.1090/S0025-5718-1946-0018977-0.
- ⁴W. S. Boyle and G. E. Smith, "Charge Coupled Semiconductor Devices", Bell System Technical Journal **49**, 587–593 (1970) DOI: 10.1002/j.1538-7305.1970.tb01790.x.
- ⁵H. Kawamoto, "The history of liquid-crystal displays", Proceedings of the IEEE **90**, 460– 500 (2002) DOI: 10.1109/JPRDC.2002.1002521.
- ⁶C. Zhou and S. K. Nayar, "Computational Cameras: Convergence of Optics and Processing", IEEE Transactions on Image Processing **20**, 3322–3340 (2011) DOI: 10.1109/TIP. 2011.2171700.
- ⁷B. Masia, G. Wetzstein, P. Didyk, and D. Gutierrez, "A survey on computational displays: Pushing the boundaries of optics, computation, and perception", Computers & Graphics 37, 1012–1038 (2013) DOI: 10.1016/j.cag.2013.10.003.
- ⁸E. E. Fenimore and T. M. Cannon, "Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays", Applied Optics **17**, 337–347 (1978) DOI: **10.1364/AO.17.000337**.
- ⁹M. Levoy, "Light Fields and Computational Imaging", Computer **39**, 46–55 (2006) DOI: 10.1109/MC.2006.270.
- ¹⁰G. Wetzstein, D. Lanman, M. Hirsch, and R. Raskar, "Tensor displays", ACM Transactions on Graphics **31**, 1–11 (2012) DOI: 10.1145/2185520.2185576.
- ¹¹D. Donoho, "Compressed sensing", IEEE Transactions on Information Theory 52, 1289– 1306 (2006) DOI: 10.1109/TIT.2006.871582.
- ¹²D. J. Brady, K. Choi, D. L. Marks, R. Horisaki, and S. Lim, "Compressive Holography", Optics Express **17**, 13040–13049 (2009) DOI: 10.1364/0E.17.013040.

- ¹³C. Slinger, C. Cameron, and M. Stanley, "Computer-generated holography as a generic display technology", Computer **38**, 46–53 (2005) DOI: 10.1109/MC.2005.260.
- ¹⁴F. Yaras, H. Kang, and L. Onural, "State of the Art in Holographic Displays: A Survey", Journal of Display Technology 6, 443–454 (2010) DOI: 10.1109/JDT.2010.2045734.
- ¹⁵L. Onural, A. Gotchev, H. M. Ozaktas, and E. Stoykova, "A Survey of Signal Processing Problems and Tools in Holographic Three-Dimensional Television", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology 17, 1631–1646 (2007) DOI: 10.1109/TCSVT. 2007.909973.
- ¹⁶L. Onural, F. Yaraş, and H. Kang, "Digital Holographic Three-Dimensional Video Displays", Proceedings of the IEEE **99**, 576–589 (2011) DOI: 10.1109/JPROC.2010.2098430.
- ¹⁷U. Schnars and W. Jueptner, *Digital Holography* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005), DOI: 10.1007/b138284.
- ¹⁸M. K. Kim, "Principles and techniques of digital holographic microscopy", Journal of Photonics for Energy 1, 018005–018005–50 (2010) DOI: 10.1117/6.0000006.
- ¹⁹W. Osten, A. Faridian, P. Gao, K. Körner, D. Naik, G. Pedrini, A. K. Singh, M. Takeda, and M. Wilke, "Recent advances in digital holography [Invited]", Applied Optics 53, G44 (2014) DOI: 10.1364/A0.53.000G44.
- ²⁰H. J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox, eds., *Holographic Data Storage*, Vol. 76, Springer Series in Optical Sciences (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2000), DOI: 10.1007/978-3-540-47864-5.
- ²¹L. Hesselink, S. Orlov, and M. Bashaw, "Holographic data storage systems", Proceedings of the IEEE **92**, 1231–1280 (2004) DOI: 10.1109/JPROC.2004.831212.
- ²²B. Javidi and T. Nomura, "Securing information by use of digital holography", Optics Letters 25, 28–30 (2000) DOI: 10.1364/0L.25.000028.
- ²³E. Tajahuerce and B. Javidi, "Encrypting three-dimensional information with digital holography", Applied Optics **39**, 6595–6601 (2000) DOI: 10.1364/A0.39.006595.
- ²⁴A. Alfalou and C. Brosseau, "Optical image compression and encryption methods", Advances in Optics and Photonics 1, 589–636 (2009) DOI: 10.1364/AOP.1.000589.
- ²⁵S. Liu, C. Guo, and J. T. Sheridan, "A review of optical image encryption techniques", Optics & Laser Technology 57, 327–342 (2014) DOI: 10.1016/j.optlastec.2013.05.023.
- ²⁶P.-A. Blanche, "Volume phase holographic gratings: large size and high diffraction efficiency", Optical Engineering 43, 2603 (2004) DOI: 10.1117/1.1803557.
- ²⁷J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 3rd ed. (Roberts & Company Publishers, Englewood, Colorado, 2005).
- ²⁸E. N. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront Reconstruction with Continuous-Tone Objects", Journal of the Optical Society of America 53, 1377–1381 (1963) DOI: 10.1364/JOSA.53. 001377.

- ²⁹N. S. Holliman, N. A. Dodgson, G. E. Favalora, and L. Pockett, "Three-Dimensional Displays: A Review and Applications Analysis", IEEE Transactions on Broadcasting 57, 362– 371 (2011) DOI: 10.1109/TBC.2011.2130930.
- ³⁰J. Geng, "Three-dimensional display technologies", Advances in Optics and Photonics 5, 456–535 (2013) DOI: 10.1364/AOP.5.000456.
- ³¹J. Hahn, H. Kim, Y. Lim, G. Park, and B. Lee, "Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators", Optics Express 16, 12372– 12386 (2008) DOI: 10.1364/0E.16.012372.
- ³²H. Sasaki, K. Yamamoto, K. Wakunami, Y. Ichihashi, R. Oi, and T. Senoh, "Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators", Scientific Reports 4, 6177 (2014) DOI: 10.1038/srep06177.
- ³³S. Tay, P.-A. Blanche, R. Voorakaranam, A. V. Tunç, W. Lin, S. Rokutanda, T. Gu, D. Flores, P. Wang, G. Li, P. St Hilaire, J. Thomas, R. A. Norwood, M. Yamamoto, and N. Peyghambarian, "An updatable holographic three-dimensional display", Nature 451, 694–698 (2008) DOI: 10.1038/nature06596.
- ³⁴P.-A. Blanche, A. Bablumian, R. Voorakaranam, C. Christenson, W. Lin, T. Gu, D. Flores, P. Wang, W.-Y. Hsieh, M. Kathaperumal, B. Rachwal, O. Siddiqui, J. Thomas, R. A. Norwood, M. Yamamoto, and N. Peyghambarian, "Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer", Nature 468, 80–83 (2010) DOI: 10.1038/nature09521.
- ³⁵X. Ni, A. V. Kildishev, and V. M. Shalaev, "Metasurface holograms for visible light", Nature Communications 4, 777–778 (2013) DOI: 10.1038/ncomms3807.
- ³⁶L. Huang, X. Chen, H. Mühlenbernd, H. Zhang, S. Chen, B. Bai, Q. Tan, G. Jin, K.-W. Cheah, C.-W. Qiu, J. Li, T. Zentgraf, and S. Zhang, "Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface", Nature Communications 4, 77–79 (2013) DOI: 10.1038/ncomms3808.
- ³⁷T. Shimobaba, N. Masuda, and T. Ito, "Simple and fast calculation algorithm for computergenerated hologram with wavefront recording plane", Optics Letters **34**, 3133–3135 (2009) DOI: 10.1364/0L.34.003133.
- ³⁸J. Weng, T. Shimobaba, N. Okada, H. Nakayama, M. Oikawa, N. Masuda, and T. Ito, "Generation of real-time large computer generated hologram using wavefront recording method", Optics Express **20**, 4018–4023 (2012) DOI: 10.1364/0E.20.004018.
- ³⁹N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka, A. Shiraki, and T. Sugie, "Computer generated holography using a graphics processing unit", Optics Express 14, 603–608 (2006) DOI: 10.1364/OPEX. 14.000603.

- ⁴⁰T. Shimobaba, T. Ito, N. Masuda, Y. Ichihashi, and N. Takada, "Fast calculation of computer-generated-hologram on AMD HD5000 series GPU and OpenCL", Optics Express 18, 9955–9960 (2010) DOI: 10.1364/0E.18.009955.
- ⁴¹T. Ito, N. Masuda, K. Yoshimura, A. Shiraki, T. Shimobaba, and T. Sugie, "Special-purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography", Optics Express 13, 1923–1932 (2005) DOI: 10.1364/OPEX.13.001923.
- ⁴²Y. Ichihashi, H. Nakayama, T. Ito, N. Masuda, T. Shimobaba, A. Shiraki, and T. Sugie, "HORN-6 special-purpose clustered computing system for electroholography", Optics Express 17, 13895–13903 (2009) DOI: 10.1364/0E.17.013895.
- ⁴³U. Schnars and W. P. O. Jüptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms", Measurement Science and Technology **13**, R85–R101 (2002) DOI: **10.1088/0957–** 0233/13/9/201.
- ⁴⁴J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "DIGITAL IMAGE FORMATION FROM ELEC-TRONICALLY DETECTED HOLOGRAMS", Applied Physics Letters **11**, 77–79 (1967) DOI: 10.1063/1.1755043.
- ⁴⁵U. Schnars and W. Jüptner, "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction", Applied Optics **33**, 179–181 (1994) DOI: 10.1364/A0.33.000179.
- ⁴⁶E. Cuche, F. Bevilacqua, and C. Depeursinge, "Digital holography for quantitative phasecontrast imaging", Optics Letters 24, 291–293 (1999) DOI: 10.1364/0L.24.000291.
- ⁴⁷Y. Ohsawa, K. Yamaguchi, T. Ichikawa, and Y. Sakamoto, "Computer-generated holograms using multiview images captured by a small number of sparsely arranged cameras", Applied Optics 52, A167–A176 (2013) DOI: 10.1364/A0.52.00A167.
- ⁴⁸T. Senoh, Y. Ichihashi, R. Oi, H. Sasaki, and K. Yamamoto, "Study of a holographic TV system based on multi-view images and depth maps", Proc. SPIE, Vol. 8644 (Mar. 2013), 86440A, DOI: 10.1117/12.2000570.
- ⁴⁹J. Barabas, S. Jolly, D. E. Smalley, and V. M. Bove, Jr., "Diffraction specific coherent panoramagrams of real scenes", Proc. SPIE, Vol. 7957 (Feb. 2011), pp. 795702–795702–7, DOI: 10.1117/12.873865.
- ⁵⁰A. Stern and B. Javidi, "Three-Dimensional Image Sensing, Visualization, and Processing Using Integral Imaging", Proceedings of the IEEE **94**, 591–607 (2006) DOI: 10.1109/ JPROC.2006.870696.
- ⁵¹J.-H. Park, K. Hong, and B. Lee, "Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging", Applied Optics 48, H77–H94 (2009) DOI: 10.1364/AO. 48.000H77.
- ⁵²X. Xiao, B. Javidi, M. Martinez-Corral, and A. Stern, "Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications [Invited]", Applied Optics **52**, 546–560 (2013) DOI: 10.1364/A0.52.000546.

- ⁵³Y. Sando, M. Itoh, and T. Yatagai, "Holographic three-dimensional display synthesized from three-dimensional Fourier spectra of real existing objects", Optics Letters 28, 2518– 2520 (2003) DOI: 10.1364/0L.28.002518.
- ⁵⁴T. Mishina, M. Okui, and F. Okano, "Calculation of holograms from elemental images captured by integral photography", Applied Optics 45, 4026–4036 (2006) DOI: 10.1364/ A0.45.004026.
- ⁵⁵J.-H. Park, M.-S. Kim, G. Baasantseren, and N. Kim, "Fresnel and Fourier hologram generation using orthographic projection images", Optics Express 17, 6320–6334 (2009) DOI: 10.1364/0E.17.006320.
- ⁵⁶N. T. Shaked, B. Katz, and J. Rosen, "Review of three-dimensional holographic imaging by multiple-viewpoint-projection based methods", Applied Optics 48, H120–H136 (2009) DOI: 10.1364/A0.48.00H120.
- ⁵⁷K. Wakunami and M. Yamaguchi, "Calculation for computer generated hologram using ray-sampling plane", Optics Express **19**, 9086–9101 (2011) DOI: **10.1364/0E.19.009086**.
- ⁵⁸K. Wakunami, M. Yamaguchi, and B. Javidi, "High-resolution three-dimensional holographic display using dense ray sampling from integral imaging", Optics Letters **37**, 5103– 5105 (2012) DOI: 10.1364/0L.37.005103.
- ⁵⁹Y. Ichihashi, R. Oi, T. Senoh, K. Yamamoto, and T. Kurita, "Real-time capture and reconstruction system with multiple GPUs for a 3D live scene by a generation from 4K IP images to 8K holograms", Optics Express 20, 21645–21655 (2012) DOI: 10.1364/0E.20.021645.
- ⁶⁰S.-K. Lee, S.-I. Hong, Y.-S. Kim, H.-G. Lim, N.-Y. Jo, and J.-H. Park, "Hologram synthesis of three-dimensional real objects using portable integral imaging camera", Optics Express **21**, 23662–23670 (2013) DOI: 10.1364/OE.21.023662.
- ⁶¹X. Xiao, K. Wakunami, X. Chen, X. Shen, B. Javidi, J. Kim, and J. Nam, "Three-Dimensional Holographic Display Using Dense Ray Sampling and Integral Imaging Capture", Journal of Display Technology 10, 688–694 (2014) DOI: 10.1109/JDT.2014.2315506.
- ⁶²Y. Takaki and K. Ikeda, "Simplified calculation method for computer-generated holographic stereograms from multi-view images", Optics Express **21**, 9652–9663 (2013) DOI: 10.1364/ 0E.21.009652.
- ⁶³M. Yamaguchi, "Light-field and holographic three-dimensional displays [Invited]", Journal of the Optical Society of America A 33, 2348–2364 (2016) DOI: 10.1364/JOSAA.33.002348.
- ⁶⁴E. Adelson and J. Wang, "Single lens stereo with a plenoptic camera", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14, 99–106 (1992) DOI: 10.1109/34.121783.
- ⁶⁵R. Ng, "Fourier slice photography", ACM SIGGRAPH 2005 Papers on SIGGRAPH '05,
 Vol. 24, 3 (July 2005), pp. 735–744, DOI: 10.1145/1186822.1073256.

- ⁶⁶R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, "Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera", Stanford University Computer Science Tech Report CSTR 2005-02 2, 1–11 (2005).
- ⁶⁷M. Levoy and P. Hanrahan, "Light field rendering", Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '96 (Aug. 1996), pp. 31–42, DOI: 10.1145/237170.237199.
- ⁶⁸R. Ziegler, S. Bucheli, L. Ahrenberg, M. Magnor, and M. Gross, "A Bidirectional Light Field - Hologram Transform", Computer Graphics Forum **26**, 435–446 (2007) DOI: **10**. **1111/j.1467-8659.2007.01066.x**.
- ⁶⁹T. Georgiev, Z. Yu, A. Lumsdaine, and S. Goma, "Lytro camera technology: theory, algorithms, performance analysis", IS&T/SPIE Electronic Imaging, Vol. 8667 (Mar. 2013), 86671J-86671J-10, DOI: 10.1117/12.2013581.
- ⁷⁰N. Patel, *nrpatel/lfptools: Tools for working with Lytro files*, https://github.com/ nrpatel/lfptools (visited on 01/10/2017).
- ⁷¹Itseez, OpenCV, http://opencv.org (visited on 01/10/2017).
- ⁷²D. G. Dansereau, O. Pizarro, and S. B. Williams, "Decoding, Calibration and Rectification for Lenselet-Based Plenoptic Cameras", 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (June 2013), pp. 1027–1034, DOI: 10.1109/CVPR.2013.137.
- ⁷³D. Dansereau, "Plenoptic Signal Processing for Robust Vision in Field Robotics", PhD thesis (The University of Sydney, 2014).
- ⁷⁴D. Cho, M. Lee, S. Kim, and Y.-W. Tai, "Modeling the Calibration Pipeline of the Lytro Camera for High Quality Light-Field Image Reconstruction", 2013 IEEE International Conference on Computer Vision (Dec. 2013), pp. 3280–3287, DOI: 10.1109/ICCV.2013.407.
- ⁷⁵N. Chen, J. Yeom, J.-H. Jung, J.-H. Park, and B. Lee, "Resolution comparison between integral-imaging-based hologram synthesis methods using rectangular and hexagonal lens arrays", Optics Express 19, 26917–26927 (2011) DOI: 10.1364/0E.19.026917.
- ⁷⁶J.-X. Chai, S.-C. Chan, H.-Y. Shum, and X. Tong, "Plenoptic sampling", Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '00 (2000), pp. 307–318, DOI: 10.1145/344779.344932.
- ⁷⁷A. Isaksen, L. McMillan, and S. J. Gortler, "Dynamically reparameterized light fields", Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques
 SIGGRAPH '00 (July 2000), pp. 297–306, DOI: 10.1145/344779.344929.
- ⁷⁸L. B. Lesem, P. M. Hirsch, and J. A. Jordan, "The Kinoform: A New Wavefront Reconstruction Device", IBM Journal of Research and Development **13**, 150–155 (1969) DOI: 10.1147/rd.132.0150.

- ⁷⁹E. Candes, J. Romberg, and T. Tao, "Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information", IEEE Transactions on Information Theory **52**, 489–509 (2006) DOI: 10.1109/TIT.2005.862083.
- ⁸⁰E. J. Candes and T. Tao, "Near-Optimal Signal Recovery From Random Projections: Universal Encoding Strategies?", IEEE Transactions on Information Theory **52**, 5406–5425 (2006) DOI: 10.1109/TIT.2006.885507.
- ⁸¹E. J. Candès and M. B. Wakin, "An Introduction To Compressive Sampling", IEEE Signal Processing Magazine 25, 21–30 (2008) DOI: 10.1109/MSP.2007.914731.
- ⁸²Y. C. Eldar and G. Kutyniok, eds., Compressed Sensing: Theory and Applications (Cambridge University Press, Cambridge, 2012).
- ⁸³S. Foucart and H. Rauhut, A Mathematical Introduction to Compressive Sensing, Applied and Numerical Harmonic Analysis (Springer New York, New York, 2013), DOI: 10.1007/ 978-0-8176-4948-7.
- ⁸⁴J. Romberg, "Imaging via Compressive Sampling", IEEE Signal Processing Magazine 25, 14–20 (2008) DOI: 10.1109/MSP.2007.914729.
- ⁸⁵R. F. Marcia, "Compressed sensing for practical optical imaging systems: a tutorial", Optical Engineering 50, 072601–072601–13 (2011) DOI: 10.1117/1.3596602.
- ⁸⁶M. A. Neifeld and J. Ke, "Optical architectures for compressive imaging", Applied Optics 46, 5293–5303 (2007) DOI: 10.1364/A0.46.005293.
- ⁸⁷M. E. Gehm and D. J. Brady, "Compressive sensing in the EO/IR", Applied Optics 54, C14–C22 (2015) DOI: 10.1364/A0.54.000C14.
- ⁸⁸M. Duarte, M. Davenport, D. Takhar, J. Laska, Ting Sun, K. Kelly, and R. Baraniuk, "Single-Pixel Imaging via Compressive Sampling", IEEE Signal Processing Magazine 25, 83–91 (2008) DOI: 10.1109/MSP.2007.914730.
- ⁸⁹D. Takhar, J. N. Laska, M. B. Wakin, M. F. Duarte, D. Baron, S. Sarvotham, K. F. Kelly, and R. G. Baraniuk, "A new compressive imaging camera architecture using optical-domain compression", Electronic Imaging 2006 (Feb. 2006), pp. 606509–606509–10, DOI: 10.1117/12.659602.
- ⁹⁰W. L. Chan, K. Charan, D. Takhar, K. F. Kelly, R. G. Baraniuk, and D. M. Mittleman, "A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing", Applied Physics Letters **93**, 121105 (2008) DOI: 10.1063/1.2989126.
- ⁹¹N. Radwell, K. J. Mitchell, G. M. Gibson, M. P. Edgar, R. Bowman, and M. J. Padgett, "Single-pixel infrared and visible microscope", Optica 1, 285–289 (2014) DOI: 10.1364/ OPTICA.1.000285.
- ⁹²V. Studer, J. Bobin, M. Chahid, H. S. Mousavi, E. Candes, and M. Dahan, "Compressive fluorescence microscopy for biological and hyperspectral imaging", Proceedings of the National Academy of Sciences 109, E1679–E1687 (2012) DOI: 10.1073/pnas.1119511109.

- ⁹³M. Lustig, D. Donoho, and J. M. Pauly, "Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging", Magnetic Resonance in Medicine 58, 1182–1195 (2007) DOI: 10.1002/mrm.21391.
- ⁹⁴M. Lustig, D. Donoho, J. Santos, and J. Pauly, "Compressed Sensing MRI", IEEE Signal Processing Magazine 25, 72–82 (2008) DOI: 10.1109/MSP.2007.914728.
- ⁹⁵G. R. Arce, D. J. Brady, L. Carin, H. Arguello, and D. S. Kittle, "Compressive coded aperture spectral imaging: An introduction", IEEE Signal Processing Magazine **31**, 105– 115 (2014) DOI: 10.1109/MSP.2013.2278763.
- ⁹⁶M. P. Edgar, G. M. Gibson, R. W. Bowman, B. Sun, N. Radwell, K. J. Mitchell, S. S. Welsh, and M. J. Padgett, "Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors", Scientific Reports 5, 10669 (2015) DOI: 10.1038/srep10669.
- ⁹⁷M. Cetin, I. Stojanovic, O. Onhon, K. Varshney, S. Samadi, W. Karl, and A. Willsky, "Sparsity-Driven Synthetic Aperture Radar Imaging: Reconstruction, autofocusing, moving targets, and compressed sensing", IEEE Signal Processing Magazine **31**, 27–40 (2014) DOI: 10.1109/MSP.2014.2312834.
- ⁹⁸S. Lim, D. L. Marks, and D. J. Brady, "Sampling and processing for compressive holography [Invited]", Applied Optics **50**, H75–H86 (2011) DOI: **10.1364/A0.50.000H75**.
- ⁹⁹Y. Rivenson, A. Stern, and B. Javidi, "Overview of compressive sensing techniques applied in holography [Invited]", Applied Optics 52, A423–A432 (2013) DOI: 10.1364/A0.52. 00A423.
- ¹⁰⁰J. Hahn, S. Lim, K. Choi, R. Horisaki, and D. J. Brady, "Video-rate compressive holographic microscopic tomography", Optics Express **19**, 7289–7298 (2011) DOI: 10.1364/OE.19. 007289.
- ¹⁰¹Y. Rivenson, A. Stern, and J. Rosen, "Reconstruction guarantees for compressive tomographic holography", Optics Letters **38**, 2509–2511 (2013) DOI: **10.1364/0L.38.002509**.
- ¹⁰²L. Denis, D. Lorenz, E. Thiébaut, C. Fournier, and D. Trede, "Inline hologram reconstruction with sparsity constraints", Optics Letters **34**, 3475–3477 (2009) DOI: 10.1364/0L.34. 003475.
- ¹⁰³C. F. Cull, D. A. Wikner, J. N. Mait, M. Mattheiss, and D. J. Brady, "Millimeter-wave compressive holography", Applied Optics 49, E67–E82 (2010) DOI: 10.1364/AO.49.000E67.
- ¹⁰⁴Y. Rivenson, A. Stern, and B. Javidi, "Improved depth resolution by single-exposure inline compressive holography", Applied Optics 52, A223–A231 (2013) DOI: 10.1364/AO. 52.00A223.
- ¹⁰⁵L. Williams, G. Nehmetallah, and P. P. Banerjee, "Digital tomographic compressive holographic reconstruction of three-dimensional objects in transmissive and reflective geometries", Applied Optics 52, 1702–1710 (2013) DOI: 10.1364/A0.52.001702.

- ¹⁰⁶Y. Rivenson, A. Stern, and B. Javidi, "Compressive Fresnel Holography", Journal of Display Technology 6, 506–509 (2010) DOI: 10.1109/JDT.2010.2042276.
- ¹⁰⁷Y. Rivenson and A. Stern, "Conditions for practicing compressive Fresnel holography", Optics Letters **36**, 3365–3367 (2011) DOI: 10.1364/0L.36.003365.
- ¹⁰⁸Y. Rivenson, A. Rot, S. Balber, A. Stern, and J. Rosen, "Recovery of partially occluded objects by applying compressive Fresnel holography", Optics Letters **37**, 1757–1759 (2012) DOI: 10.1364/0L.37.001757.
- ¹⁰⁹R. Horisaki, J. Tanida, A. Stern, and B. Javidi, "Multidimensional imaging using compressive Fresnel holography", Optics Letters **37**, 2013–2015 (2012) DOI: 10.1364/0L.37. 002013.
- ¹¹⁰R. Horisaki, X. Xiao, J. Tanida, and B. Javidi, "Feasibility study for compressive multidimensional integral imaging", Optics Express **21**, 4263–4279 (2013) DOI: 10.1364/0E.21. 004263.
- ¹¹¹R. Horisaki and J. Tanida, "Multidimensional object acquisition by single-shot phase imaging with a coded aperture", Optics Express 23, 9696–9704 (2015) DOI: 10.1364/OE.23. 009696.
- ¹¹²R. Horisaki, Y. Ogura, M. Aino, and J. Tanida, "Single-shot phase imaging with a coded aperture", Optics Letters **39**, 6466–6469 (2014) DOI: 10.1364/0L.39.006466.
- ¹¹³R. Horisaki, R. Egami, and J. Tanida, "Experimental demonstration of single-shot phase imaging with a coded aperture", Optics Express 23, 28691 (2015) DOI: 10.1364/OE.23. 028691.
- ¹¹⁴R. Horisaki, R. Egami, and J. Tanida, "Single-shot phase imaging with randomized light (SPIRaL)", Optics Express **24**, 3765–3773 (2016) DOI: **10.1364/OE.24.003765**.
- ¹¹⁵Y. Rivenson, M. A. Shalev, and Z. Zalevsky, "Compressive Fresnel holography approach for high-resolution viewpoint inference", Optics Letters 40, 5606–5609 (2015) DOI: 10.1364/ 0L.40.005606.
- ¹¹⁶M. M. Marim, M. Atlan, E. D. Angelini, and J.-C. Olivo-Marin, "Compressed sensing for digital holographic microscopy", 2010 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro (2010), pp. 684–687, DOI: 10.1109/ISBI.2010.5490084.
- ¹¹⁷M. M. Marim, M. Atlan, E. Angelini, and J.-C. Olivo-Marin, "Compressed sensing with off-axis frequency-shifting holography", Optics Letters **35**, 871–873 (2010) DOI: 10.1364/ 0L.35.000871.
- ¹¹⁸A. C. S. Chan, K. K. Tsia, and E. Y. Lam, "Subsampled scanning holographic imaging (SuSHI) for fast, non-adaptive recording of three-dimensional objects", Optica 3, 911–917 (2016) DOI: 10.1364/OPTICA.3.000911.

- ¹¹⁹P. Clemente, V. Durán, E. Tajahuerce, V. Torres-Company, and J. Lancis, "Single-pixel digital ghost holography", Physical Review A 86, 041803 (2012) DOI: 10.1103/PhysRevA. 86.041803.
- ¹²⁰P. Clemente, V. Durán, E. Tajahuerce, P. Andrés, V. Climent, and J. Lancis, "Compressive holography with a single-pixel detector", Optics Letters **38**, 2524–2527 (2013) DOI: **10**. **1364/0L.38.002524**.
- ¹²¹K. Choi, R. Horisaki, J. Hahn, S. Lim, D. L. Marks, T. J. Schulz, and D. J. Brady, "Compressive holography of diffuse objects", Applied Optics 49, H1–H10 (2010) DOI: 10.1364/ A0.49.0000H1.
- ¹²²V. Katkovnik and J. Astola, "High-accuracy wave field reconstruction: decoupled inverse imaging with sparse modeling of phase and amplitude", Journal of the Optical Society of America A 29, 44–54 (2012) DOI: 10.1364/JOSAA.29.000044.
- ¹²³V. Katkovnik and J. Bioucas-Dias, "Wavefront reconstruction in phase-shifting interferometry via sparse coding of amplitude and absolute phase", Journal of the Optical Society of America A **31**, 1801–1810 (2014) DOI: 10.1364/JOSAA.31.001801.
- ¹²⁴V. Katkovnik, I. A. Shevkunov, N. V. Petrov, and K. Egiazarian, "Wavefront reconstruction in digital off-axis holography via sparse coding of amplitude and absolute phase", Optics Letters 40, 2417–2420 (2015) DOI: 10.1364/0L.40.002417.
- ¹²⁵V. Katkovnik, I. A. Shevkunov, N. V. Petrov, and K. Egiazarian, "Sparse approximations of phase and amplitude for wave field reconstruction from noisy data", Proc. SPIE, Vol. 9508 (May 2015), pp. 950802–950802–13, DOI: 10.1117/12.2177657.
- ¹²⁶A. J. Macfaden, S. J. Kindness, and T. D. Wilkinson, "Architecture for one-shot compressive imaging using computer-generated holograms", Applied Optics 55, 7399–7405 (2016) DOI: 10.1364/A0.55.007399.
- ¹²⁷J. Nickolls, I. Buck, M. Garland, and K. Skadron, "Scalable parallel programming with CUDA", Queue 6, 40–53 (2008) DOI: 10.1145/1365490.1365500.
- ¹²⁸J. Nickolls and W. J. Dally, "The GPU Computing Era", IEEE Micro **30**, 56–69 (2010) DOI: 10.1109/MM.2010.41.
- ¹²⁹J. Owens, M. Houston, D. Luebke, S. Green, J. Stone, and J. Phillips, "GPU Computing", Proceedings of the IEEE **96**, 879–899 (2008) DOI: 10.1109/JPROC.2008.917757.
- ¹³⁰D. S. Smith, J. C. Gore, T. E. Yankeelov, and E. B. Welch, "Real-Time Compressive Sensing MRI Reconstruction Using GPU Computing and Split Bregman Methods", International Journal of Biomedical Imaging **2012**, 1–6 (2012) DOI: 10.1155/2012/864827.
- ¹³¹Ç. Bilen, Y. Wang, and I. W. Selesnick, "High-Speed Compressed Sensing Reconstruction in Dynamic Parallel MRI Using Augmented Lagrangian and Parallel Processing", IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems 2, 370–379 (2012) DOI: 10.1109/JETCAS.2012.2217032.

- ¹³²D. Xu, Y. Huang, and J. U. Kang, "GPU-accelerated non-uniform fast Fourier transformbased compressive sensing spectral domain optical coherence tomography", Optics Express 22, 14871–14884 (2014) DOI: 10.1364/0E.22.014871.
- ¹³³S. Bernabe, G. Martin, J. M. P. Nascimento, J. M. Bioucas-Dias, A. Plaza, and V. Silva, "GPU implementation of a hyperspectral coded aperture algorithm for compressive sensing", 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (July 2015), pp. 521–524, DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7325815.
- ¹³⁴S. Bernabe, G. Martin, J. M. P. Nascimento, J. M. Bioucas-Dias, A. Plaza, G. Botella, and M. Prieto-Matias, "A fast parallel hyperspectral coded aperture algorithm for compressive sensing using OpenCL", IEEE EUROCON 2015 - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON) (Sept. 2015), pp. 1–6, DOI: 10.1109/EUROCON.2015.7313756.
- ¹³⁵I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography", Optics Letters **22**, 1268– 1270 (1997) DOI: 10.1364/0L.22.001268.
- ¹³⁶Y. Rivenson, A. Stern, and J. Rosen, "On the tomographic reconstruction resolution from compressive holography", Imaging and Applied Optics, Vol. 2, 1 (June 2013), CW1C.4, DOI: 10.1364/COSI.2013.CW1C.4.
- ¹³⁷E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, "Spatial filtering for zero-order and twinimage elimination in digital off-axis holography", Applied Optics **39**, 4070–4075 (2000) DOI: 10.1364/A0.39.004070.
- ¹³⁸L. I. Rudin, S. Osher, and E. Fatemi, "Nonlinear total variation based noise removal algorithms", Physica D: Nonlinear Phenomena **60**, 259–268 (1992) DOI: 10.1016/0167– 2789(92)90242-F.
- ¹³⁹A. Chambolle, V. Caselles, M. Novaga, D. Cremers, and T. Pock, "An Introduction to Total Variation for Image Analysis", *Theoretical Foundations and Numerical Methods for Sparse Recovery*, edited by M. Fornasier (De Gruyter, Berlin, 2009), pp. 263–340, DOI: 10.1515/9783110226157.263.
- ¹⁴⁰A. Beck and M. Teboulle, "A Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm for Linear Inverse Problems", SIAM Journal on Imaging Sciences 2, 183–202 (2009) DOI: 10.1137/ 080716542.
- ¹⁴¹A. Beck and M. Teboulle, "Gradient-Based Algorithms with Applications to Signal Recovery Problems", Convex Optimization in Signal Processing and Communications, 3–51 (2010).
- ¹⁴²A. Beck and M. Teboulle, "Fast Gradient-Based Algorithms for Constrained Total Variation Image Denoising and Deblurring Problems", IEEE Transactions on Image Processing 18, 2419–2434 (2009) DOI: 10.1109/TIP.2009.2028250.

¹⁴³A. Chambolle, "An Algorithm for Total Variation Minimization and Applications", Journal of Mathematical Imaging and Vision 20, 89–97 (2004) DOI: 10.1023/B:JMIV.0000011325. 36760.1e.

業績リスト

査読付論文(筆頭)

- Y. Endo, T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito, "GPU-accelerated compressive holography," Optics Express 24(8), 8437–8445 (2016).
- Y. Endo, K. Wakunami, T. Shimobaba, T. Kakue, D. Arai, Y. Ichihashi, K. Yamamoto, and T. Ito, "Computer-generated hologram calculation for real scenes using a commercial portable plenoptic camera," Optics Communications **356**, 468–471 (2015).

査読付論文(共著)

- T. Shimobaba, M. Makowski, Y. Nagahama, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, M. Sano, T. Kakue, M. Oikawa, T. Sugie, N. Takada, and T. Ito, "Color computer-generated hologram generation using the random phase-free method and color space conversion", Applied Optics 55(15), 4159–4165 (2016).
- T. Sanpei, T. Shimobaba, T. Kakue, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, Y. Nagahama, M. Sano, M. Oikawa, T. Sugie, and T. Ito, "Optical encryption for large-sized images," Optics Communications 361, 138–142 (2016).
- T. Shimobaba, T. Kakue, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, Y. Nagahama, M. Sano, M. Oikawa, T. Sugie, and T. Ito, "Improvement of the image quality of random phase-free holography using an iterative method," Optics Communications 355, 596–601 (2015).
- T. Shimobaba, T. Kakue, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, Y. Nagahama, M. Sano, M. Oikawa, T. Sugie, and T. Ito, "Random phase-free kinoform for large objects," Optics Express 23(13), 17269–17274 (2015).
- D. Arai, T. Shimobaba, K. Murano, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, T. Kakue, and T. Ito, "Acceleration of computer-generated holograms using tilted wavefront recording plane method," Optics Express 23(2), 1740–1747 (2015).
- T. Shimobaba, M. Makowski, T. Kakue, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, S. Hasegawa, Y. Nagahama, and T. Ito, "Numerical investigation of lensless zoomable holographic multiple projections to tilted planes," Optics Communications 333, 274– 280 (2014).
- 7. T. Shimobaba, T. Kakue, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, and T. Ito,

"Ptychography by changing the area of probe light and scaled ptychography," Optics Communications **331**, 189–193 (2014).

- T. Shimobaba, Y. Nagahama, T. Kakue, N. Takada, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, D. Hiyama, and T. Ito, "Calculation reduction method for color digital holography and computer-generated hologram using color space conversion," Optical Engineering 53(2), 024108 (2014).
- T. Shimobaba, T. Kakue, M. Oikawa, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, and T. Ito, "Nonuniform sampled scalar diffraction calculation using nonuniform fast Fourier transform," Optics Letters 38(23), 5130–5133 (2013).
- T. Shimobaba, M. Makowski, T. Kakue, M. Oikawa, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, and T. Ito, "Lensless zoomable holographic projection using scaled Fresnel diffraction," Optics Express 21(21), 25285–25290 (2013).
- T. Shimobaba, H. Yamanashi, T. Kakue, M. Oikawa, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, N. Masuda, and T. Ito, "In-line digital holographic microscopy using a consumer scanner," Scientific Reports 3, 2664 (2013).
- 12. 根尾敦, 角江崇, 遠藤優, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "MATLAB における計算機合成ホログラム 生成の高速化,"レーザー研究 44(7), 458–463 (2016).
- 13. 佐野麻理恵, 糸井淳一, 下馬場朋禄, 阿比留慎, 遠藤優, 白木厚司, 角江崇, 伊藤智義, "低コストなポータブルディジタルホログラフィック顕微鏡,"レーザー研究 **44**(7), 454–457 (2016).

国際会議 (筆頭)

- Y. Endo, T. Shimobaba, T. Kakue, T. Ito, "GPU-Acceleration of Compressive Fresnel Holography," Imaging and Applied Optics 2016, DW5I.7 (July 2016).
- Y. Endo, J. Itoi, T. Shimobaba, M. Sano, T. Kakue, T. Ito, "Portable and Low-Cost Digital Holographic Microscope using RGB LED Illumination," Digital Holography & 3-D Imaging Meetings, DW2A.10 (May 2015).
- 3. Y. Endo, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Color reconstruction of computer-generated hologram for real scenes using a light field camera," Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2015, 949514 (April 2015).
- 4. Y. Endo, Takehiko Kii, N. Masuda, N. Okada, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Special-Purpose Computer for Phase Modulation Type Electro-Holography with DVI Output," Three Dimensional Systems and Applications 2013, S4-2 (June 2013).
- [電子情報通信学会 SIS 賞受賞] Y. Endo, Y. Matsudo, K. Takahashi, "Design of Impulse Noise Canceler Utilizing Sparsity of Audio Signals," The 16th LSI Design Contest, pp.23-26 (March 2013).

国際会議(共著)

1. M. Oikawa, D. Hiyama, R. Hirayama, S. Hasegawa, Y. Endo, N. Tsumura, M. Kuroshima, M. Maki, C. Lei, Y. Ozeki, K. Goda, T. Shimobaba, "A Computational

Approach to Real-Time Image Processing for Serial Time-Encoded Amplified Microscopy," SPIE Photonics West BIOS 2016 High-Speed Biomedical Imaging and Spectroscopy: Toward Big Data Instrumentation and Management, 97200E (February 2016).

- K. Uchigata, T. Kakue, Y. Endo, T. Shimobaba, T. Ito, "Aerial projection of images reconstructed by integral photography on fog display," Three Dimensional Systems and Applications 2015, S4-4 (August 2015).
- T. Kakue, Y. Endo, T. Shimobaba, T. Ito, "Estimation of vibration frequency of loudspeaker diaphragm by parallel phase-shifting digital holography," SPIE/COS Photonics Asia 2014: Real-time Photonic Measurements, Data Management, and Processing, 92790V (Octobar 2014).
- 4. H. Yamanashi, T. Shimobaba, T. Kakue, M. Oikawa, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, N. Takada, T. Ito, "Speckle-Reduced Zoomable Holographic Projection," The 20th International Display Workshops 2013, PRJ4-3 (December 2013).
- [Invited] T. Kakue, N. Masuda, Y. Endo, R. Hirayama, N. Okada, T. Shimobaba, T. Ito, "Special-Purpose computer for real-time reconstruction of holographic motion picture," 2013 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments, 90420B (December 2013).

国内会議(筆頭)

- 1. 遠藤優, 下馬場朋禄, 角江崇, 伊藤智義, "コンプレッシブフレネルホログラフィの GPU による高速化,"第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 22a-P3-16 (2016.3).
- 2. 遠藤優, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "コンプレッシブフレネルホログラフィにおける再構成計算の GPU による高速化,"第8回計算オプティクス研究会 (2016.1).
- 3. 遠藤優, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "Compressive holography の GPU による高速計 算," Optics and Photonics Japan 2015, 29pE4 (2015.10).
- 4. 遠藤優, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "Compressive Fresnel holography の GPU による 高速化," 第 16 回情報フォトニクス研究グループ研究会 (2015.9).
- 5. 遠藤優, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "Compressive holography の GPU による高速化," 第7回計算オプティクス研究会 (2015.7).
- 6. 遠藤優, 涌波光喜, 下馬場朋禄, 角江崇, 市橋保之, 山本健詞, 伊藤智義, "ライトフィールドカ メラを用いた計算機合成ホログラムの光学再生,"立体映像技術研究会 (3DIT) (2015.3).
- 7. 遠藤優, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "ライトフィールドカメラを利用した実シーンの計 算機合成ホログラムの作成,"第15回情報フォトニクス研究グループ研究会 (2014.9).
- 8. 遠藤優, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "ライトフィールドカメラを用いた計算機合成ホログ ラムの作成,"第5回計算オプティクス研究会 (2014.07).
- 9. 遠藤優, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "深度情報を利用したホログラフィックステレオグ ラム,"第4回計算オプティクス研究会 (2013.12).
- 10. 遠藤優, 紀井建彦, 増田信之, 岡田直久, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "DVI 出力を持つ位 相変調型ホログラム専用計算機の開発,"3次元画像コンファレンス 2013, 1–3 (2013.7).

- 11. 遠藤優, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "多視点画像からの計算機合成ホログラムの作成," 第3回計算オプティクス研究会 (2013.6).
- 12. 遠藤優, 増田信之, 下馬場朋禄, 角江崇, 伊藤智義, "DVI 出力を持つ電子ホログラフィ専用計 算機," Optics and Photonics Japan 2012, 24pP4 (2012.10).

国内会議(共著)

- 1. 鈴木慎一郎, 下馬場朋禄, 遠藤優, 角江崇, 伊藤智義, "最適化計算を用いたディジタルホログ ラフィック顕微鏡による複素振幅場の再生,"第8回計算オプティクス研究会 (2016.1).
- 2. [FIT 奨励賞受賞] 佐野麻理恵, 糸井淳一, 遠藤優, 下馬場朋禄, 角江崇, 伊藤智義, "実用化を 指向した低コスト高性能なポータブルディジタルホログラフィック顕微鏡の開発," 第14回 情報科学技術フォーラム (FIT2015) (2015.9).
- 3. 松下卓也, 遠藤優, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "多視点画像を用いた計算機合成ホログラムの作成,"第7回計算オプティクス研究会 (2015.7).
- 4. 内潟圭介, 角江崇, 遠藤優, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "インテグラルフォトグラフィに基づく霧 ディスプレイへの三次元映像の空中投影," 3 次元画像コンファレンス 2015 (2015.7).
- 5. 松下卓也, 遠藤優, 金出武雄, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "複数視点画像を用いたホログ ラム生成,"立体映像技術研究会 (3DIT) (2014.10).
- 6. 下馬場朋禄, 檜山大輔, 岡田直久, 遠藤優, 平山竜士, 角江崇, 伊藤智義, "2 次元断層画像群か らのカラー計算機合成ホログラムの高速生成,"3次元画像コンファレンス 2014 (2014.7).
- 7. 角江崇, 遠藤優, 檜山大輔, 平山竜士, 下馬場朋禄, 伊藤智義, "並列位相シフトディジタル ホログラフィによる高速振動体の振動変位観察,"ホログラフィックディスプレイ研究会 (HODIC) (2014.5).
- [FIT 奨励賞受賞] 増田信之, 遠藤優, 角江崇, 下馬場朋禄, 伊藤智義, 市橋保之, "DVI 出力 をもつ位相ホログラフィ専用計算機の開発," 第 12 回情報科学技術フォーラム (FIT2013) (2013.9).