
サブナノ領域の位相回復を実現する光子計数顕微映像法

(10450029)

平成 10 年度～平成 13 年度科学研究費補助金 基盤研究(B)(2) 研究成果報告書

平成 14 年 3 月

研究代表者 小松 進一

(早稲田大学・理工学部・教授)

はしがき

光波の位相分布は透過物体の屈折率分布、あるいは反射物体の表面形状やその変形などの情報が反映されるために、その可視化と高精度測定は工学的に重要である。一般に光検出器は光強度に応答し、直接には光位相の測定ができないため、通常は、干渉計やホログラフィ干渉技術を利用する。これらの干渉技術では、被測定光波に別の参照光波を重ね合わせているために、システムの複雑化、振動などによる不安定性を招くことはもとより、本質的に相対測定であり、位相測定の精度が参照波面の精度で制約を受ける。参照波をつくる鏡面の精度は通常波長の数十分の1程度であり、精度が波長の百分の1を超える位相測定を行うのは困難である。

本研究では、干渉法によらず、被測定波面のフーリエ回折像強度データから位相回復によって被測定波面の位相分布を推定する位相回復法を実用的な光位相分布計測法として確立し、さらにその精度を飛躍的に向上し、波面推定精度がサブナノメートル（千分の1波長）を超える光波位相分布測定を実現することをめざした。

通常の干渉測定と異なり、参照基準面を必要としないため、基準面の精度に依存しない高精度の波面計測が行える。同時に、光学系が簡単なため、外部振動などに強い安定なシステムを構成できる。光子計数イメージングを用いることにより、回折像の低照度部分の撮像限界が大幅に改善されるため、波面推定誤差を飛躍的に低減できる。波面精度が千分の一を超える顕微波面計測技術はこれまでになく、実現されれば表面計測に強力な手段を与える。

また、波面精度向上とは別な方向の応用として、無染色の生物試料の定量的可視化がある。この方面では、生きたままでのダイナミクスの研究が今後ますます重要となると考えられる。利用可能な光子数が限られるこのような状況において本方法はとくに有効な手段となることが期待できる。

位相回復法の精度向上のためには、フーリエ回折像強度データのダイナミックレンジが本質的に重要である。本研究では、フォトンカウンティング（光子計数）法に基づくイメージングシステムを用いることにより、回折像の撮像のダイナミックレンジを飛躍的に向上させる。ただし、光子計数により回折像全体を撮像すると撮像時間が長くなるため実用的には問題であるから、回折像の高照度部分（中心部）から低照度部分（周辺部）にわたって効率よく広いダイナミックレンジで撮像する必要があり、そのための方法を検討した。

また、位相回復法の精度に影響を与えるノイズとしては、撮像素子のダイナミックレンジを制約する暗電流ノイズのほかに、宇宙線によるパルスノイズ、画素ごとの感度の不均一性、電荷漏れによるにじみ、増幅器等の電気ノイズなど様々なものがあり、現実問題としては、これらの処理が重要である。本研究では、主としてデータの前処理を検討した。

ところで、興味ある生体組織の多くは透明に近く、その構造は生物試料からの透過光の強度分布よりも位相分布により多く反映されている。したがって本研究で確立をめざしている位相回復に基づく光波面測定技術を生物試料に適用することが、生物研究に新たな有効な手段を与えるものとして期待される。しかし、生物試料の場合には、組織に及ぼす影響を防ぐための照射光強度に対する制限、運動による撮像時間に対する制限があり、1フレームの回折像を形成する光エネルギーが低くなる。このため、従来のアナログ撮像素子では画像記録ができず、光子計数による撮像が必要になる。このような2次元的な光子計数により得られる回折像は、これまでのアナログ画像とは異なって、光子の集合である。このようなフォトン画像から出発して位相回復を行うアルゴリズムとして最尤推定法の摘要を検討した。

フーリエ反復法に基づく位相回復アルゴリズムは Gerchberg と Saxton によって提案されてから主としてX線回折の分野で発展してきたが、これまで光の分野では実験研究が行われた例は少なく、とくに光波の位相変化が微小な場合には、位相回復法は適していないと信じられてきた。本研究の光子計数法の導入によって百分の一波長程度の波面精度が現時点において達成されたと推定されるが、今後さらに回折像データの大規模化と高精度化を図り、サブナノメートル（千分の一波長）以上の波面推定精度を達成に向かって研究を継続していきたい。

本研究を遂行するにあたり、文部科学省科学研究費補助金の援助を受けた。御支援と御協力をいただいた関係各位に感謝の意を表する。

研究組織

研究代表者: 小松進一 (早稲田大学理工学部教授)

研究分担者: 服部雅之 (早稲田大学理工学部助手;

平成 11 年度～平成 12 年度に分担)

(研究協力者: 嘉村洋平、中島悠輔、大野慎也)

交付決定額 (配分額)

(金額単位 : 千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 10 年度	9,600	0	9,600
平成 11 年度	3,000	0	3,000
平成 12 年度	600	0	600
平成 13 年度	800	0	800
総計	1,4000	0	1,4000

研究発表

(1) 学会誌等

1. Y. Kamura and S. Komatsu: Phase Retrieval Microscope for Quantitative Imaging of a Weak Phase Object, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, No.11, 6018-6019 (1998), 1998 年 11 月
2. S. Ohno and S. Komatsu: Image Restoration and Object Distance Evaluation from a Defocused Photon Image, Proc. SPIE, Vol. 4416, 412-415 (2001), 2001 年 6 月
3. Y. Nakashima, M. Hattori and S. Komatsu: Phase Retrieval Microscope Using Photon Imaging Detector, Technical Digest, Jpn. J. Appl. Phys. (投稿中)

(2) 口頭発表

1. 大野慎也、小松進一：フォトンカウンティング撮像した焦点はずれ劣化像の回復と物体距離推定、Optics Japan 2000 (日本光学会年次学術講演会)予稿集、41 - 42 (2000), 日本光学会(応用物理学会), 2000 年 10 月, (7aC6)
2. 中島悠輔、服部雅之、小松進一：高感度光子計數位相回復顕微鏡、Optics Japan 2000 (日本光学会年次学術講演会)予稿集、85 - 86 (2000), 2000 年 10 月, (7pB7)
3. Y. Nakashima, M. Hattori and S. Komatsu: Phase Retrieval Microscope Using Photon Imaging Detector, Tech. Dig. , MOC'01, Osaka, Japan, 270-273 (2001), 2001 年 10 月

研究代表者および研究分担者によるその他の研究発表

研究代表者: 小松 進一

学会誌等

1. 竹田 元、小松進一: ウェーブレット解析によるブラインド・デコンボリューションの一手法 – 低周波サブバンド画像の寄与 –, 光学、Vol. 27, No.11, 661-667 (1998), 1998 年 11 月
2. Y. Shizu and S. Komatsu: Crosstalk of Optical Switching Device Using Photorefractive Crystal and Interconnection Mask, Proc. SPIE, Vol. 3554, 140-143 (1998), 1998 年 9 月
3. 宮坂 聡、小松進一: 点像分布関数の推定に基づく三次元顕微鏡画像の回復、光学、Vol. 27, No.9, 539-543 (1998), 日本光学会 (応用物理学会), 1998 年 9 月
4. H. Ohba and S. Komatsu: Wavefront Sensor Using a 2-Dimensional Diffraction Grating, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.37, No.6B, 3749-3753 (1998), 1998 年 6 月
5. 宮崎良高、服部雅之、小松進一: 境界要素法によるニアフィールド顕微鏡の解析 – 多体問題解を用いた解析 –, 光学、Vol. 28, No.5, 278-281 (1999) 1999 年 5 月
6. M. Hattori and S. Komatsu: The endoscopic application of the deconvolution filter set method, Optics and Lasers in Biomedicine and Culture (Proc. Optics Within Life Sciences V) (Springer-Verlag, July 2000), 33-36 (2000), 2000 年 7 月
7. H. Ohba and S. Komatsu: Optical wavefront sensing using a 2-dimensional diffraction grating: Application to biological microscopy, Optics and Lasers in Biomedicine and Culture (Proc. Optics Within Life Sciences V) (Springer-Verlag, July 2000), 340-343, 2000 年 7 月
8. 服部雅之、西村雅文、小松進一: ツイストネマティック液晶光変調器と 2 次元回折格子による波面形状センサーを用いた実時間補償光学系、光学、Vol. 30, No.4, 262-269 (2001), 2001 年 4 月
9. F. Akasaki, M. Sakakura and S. Komatsu: Experimental Study on the Characteristics of the Double-Path Liquid Crystal Spatial Phase Modulator for Adaptive Optics, Proc. SPIE, Vol. 4416, 368-371 (2001), 2001 年 6 月
10. Itaru Numata and Shinichi Komatsu : Improved Blind Deconvolution Algorithm Using a Sub-Band Filter Bank, Technical Report, No.2001 - 4 (2001), pp 1-11, Adv. Res.

Inst. Sci. & Eng., Waseda Univ. , 2001 年 6 月

11. Hiroyuki Tanaka and Shinichi Komatsu : Blind Deconvolution Algorithm by Use of Quasi Binary Hopfield Neural Network, Technical Report, No.2001 - 5 (2001), pp 1-11, Adv. Res. Inst. Sci. & Eng., Waseda Univ. , 2001 年 6 月
12. Ken Yoshida and Shinichi Komatsu : Wavelength Shift Measurement Using a Dual-Photodiode for the Reflected Light from a Strained Fiber Bragg Grating Technical Report, No.2001 - 9 (2001), pp 1-9, Adv. Res. Inst. Sci. & Eng., Waseda Univ., 2001 年 9 月
13. Masahiro Sakakura and Shinichi Komatsu : Phase Distribution Measurement of Light Wave by Adaptive Control of Pupil Function with Local Algorithm, Opt. Rev., Vol.9, No.2, (2002), IPAP, 2002 年 3 月 (印刷中)

口頭発表

1. 伊勢雅英、小松進一：トランケートされたボケ画像からの焦点はずれ量の推定, 第 46 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 1064 (1999), 1999 年 3 月, (29a-A-2)
2. M. Hattori, Y. Miyazaki and S. Komatsu: Self-Consistent Numerical Analysis of the Photon STM Optical Information Images: Edge Contrast of a Dielectric Sample Embedded in a Plane Surface, Technical Digest (the 5th International Conference on Near Field Optics and Related Techniques, 1998), pp. 345-346, 1998 年 12 月
3. H. Ohba and S. Komatsu: Optical wavefront sensing using a 2-dimensional diffraction grating: Application to biological microscopy, Scientific Program Abstracts (Fifth International Conference on Optics Within Life Sciences (OWLS V), 1998), P40, 1998 年 10 月
4. M. Hattori and S. Komatsu: The endoscopic application of the deconvolution filter set method, Scientific Program Abstracts (Fifth International Conference on Optics Within Life Sciences (OWLS V), 1998), TuOpO4, 1998 年 10 月
5. 大場洋士、小松進一: 2 次元回折格子を用いた高解像度波面センサー, Optics Japan '98 (日本光学会学術講演会) 予稿集, 117 - 118 (1998), 1998 年 9 月, (18a-D-07)
6. 大場洋士、小松進一: 2 次元回折格子を用いた波面センサーの高解像度化, 第 59 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No.3, 880 (1998), 1998 年 9 月, (6a-2C-3)
7. M. Hattori and S. Komatsu: Near Field Image of Sub-micron Sample with Internal Refractive Structures, Abstracts (Sixth International Conference on Optics Within Life Sciences (OWLS VI), 2000), We2.1, 2000 年 2 月

8. 沼田 至、小松進一：負値を含む画像のシミュレーテッドアニーリングによるブラインドデコンボリューション, 第 47 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 1013 (2000), 2000 年 3 月, (28a-B-1)
9. 坂倉正洋、小松進一：ローカルアルゴリズムによる光波位相分布測定法, 第 47 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 1004 (2000), 2000 年 3 月, (28p-W-15)
10. 吉田 健、小松進一：二重フォトダイオードを用いたブラッグ波長シフト測定法, 第 47 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 1005 (2000), 2000 年 3 月, (29a-YN-3)
11. 石田 知、小松進一：マイクロレンズアレイと自己励起型位相共役鏡を用いた反射型ダブルパス共焦点顕微鏡, 第 47 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 1009 (2000), 2000 年 3 月, (29p-YN-7)
12. 左部校之、小松進一：散乱型ニアフィールド走査型光学顕微鏡の結像特性, 第 47 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 1035 (2000), 2000 年 3 月, (30a-ZA-3)
13. 蔵田陽一、小松進一：近接場記録におけるデータ形状の影響, 第 47 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 1046 (2000), 2000 年 3 月, (31a-ZA-7)
14. カラントル・カ ril、服部雅之、松本伸吾、滝沢一也、尾西智久、小松進一、庄野裕夫：液晶表示素子の省エネルギー向上用偏光導光板の成形による生産 — 高輝度導光板および偏光性高機能導光板の量産化 —、NEDO 平成 11 年度新規産業創造型提案公募事業成果報告会予稿集, 330-334 (2000), 2000 年 3 月, (98Y17-010)
15. M. Hattori and S. Komatsu: True-time adaptive optics using liquid crystal panel and wave-front distribution sensor with 2-dimensional grating mask, Abstracts of International Symposium: Adaptive Optics: From Telescopes to the Human Eye (Murcia, Spain, November 13-14, 2000), Part 2, 5 (2000), (P9)
16. M. Hattori and S. Komatsu: Near Field Image of Refractive Objects; Numerical Analysis of the Border Contrasts, Technical Digest of Focus on Microscopy 2000 (Shirahama, Japan, 2000), 79 (2000), 2000 年 4 月
17. 山田悠人、小松進一：FBG を用いた透過型バンドパスフィルタ, 第 48 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 1193 (2001), 2001 年 3 月, (28a-ZS-10)
18. 石原信人、小松進一：遺伝アルゴリズムを用いたプランインドデコンボリューション, 第 61 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No.3, 880 (2000), 2000 年 9 月, (4a-D-7)
19. 赤崎史英、小松進一：ダブルパス TN 液晶空間光位相変調器を用いる補償光学系,

- 第 61 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, No.3, 868 (2000), 2000 年 9 月, (5a-C-4)
20. 服部雅之、小松進一: 2 次元回折格子を利用した光波面センサーの高速化と補償光学への応用, 第 61 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, No.3, 868 (2000), 2000 年 9 月, (5a-C-5)
 21. 服部雅之、西村雅文、小松進一: 2 次元回折格子と TN 液晶パネルを用いた補償光学系, 第 61 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, No.3, 869 (2000), 2000 年 9 月, (5a-C-6)
 22. 森田 力、服部雅之、小松進一: 液晶バックライトの積層型偏光導光板の偏光特性, 第 61 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, No.3, 867 (2000), 2000 年 9 月, (5a-W-22)
 23. 高波顕二郎、小松進一: 分散特性を利用した 2 波長バイナリーレンズ、Optics Japan 2001 (日本光学会年次学術講演会)予稿集、255 - 256 (2001), 2001 年 11 月, (7aB13)
 24. 海老澤賢史、小松進一: 半導体レーザーを用いた光カオスによるデジタル通信、Optics Japan 2001 (日本光学会年次学術講演会)予稿集、311 - 312 (2001), 2001 年 11 月, (7aB41)

出版物

1. 小松進一: 「速解 光サイエンス辞典」(オプトロニクス社, 1998 年 11 月 15 日発行)
(分担執筆: 「スペックル」 p.163, 「フーリエ光学」 p.245)
2. (翻訳) 小松進一: 色知覚の不思議、パリティブックス「色とにのいの科学」(大槻義彦責任編集)、47 -68 (2001), 丸善, 2001 年 11 月
3. (翻訳) 小松進一: 光学で専門職をねらえ、パリティ、Vol. 16, No. 7, 29-35 (2001), 丸善, 2001 年 6 月

研究分担者: 服部 雅 之

学会誌等

1. 服部雅之、西村雅文、小松進一: ツイストネマティック液晶光変調器と 2 次元回折格子による波面形状センサーを用いた実時間補償光学系、光学、Vol. 30, No.4, 262-269 (2001), 2001 年 4 月

口頭発表

1. M. Hattori, Y. Miyazaki and S. Komatsu: Self-Consistent Numerical Analysis of the Photon STM Optical Information Images: Edge Contrast of a Dielectric Sample Embedded in a Plane Surface, Technical Digest (the 5th International Conference on Near Field Optics and Related Techniques, 1998), pp. 345-346, 1998年12月
2. M. Hattori and S. Komatsu: The endoscopic application of the deconvolution filter set method, Scientific Program Abstracts (Fifth International Conference on Optics Within Life Sciences (OWLS V), 1998), TuOp04, 1998年10月
3. M. Hattori and S. Komatsu: Near Field Image of Sub-micron Sample with Internal Refractive Structures, Abstracts (Sixth International Conference on Optics Within Life Sciences (OWLS VI), 2000), We2.1, 2000年2月
4. カラントル・カリラ、服部雅之、松本伸吾、滝沢一也、尾西智久、小松進一、庄野裕夫: 液晶表示素子の省エネルギー向上用偏光導光板の成形による生産 — 高輝度導光板および偏光性高機能導光板の量産化 —、NEDO 平成11年度新規産業創造型提案公募事業成果報告会予稿集, 330-334 (2000), 2000年3月, (98Y17-010)
5. M. Hattori and S. Komatsu: True-time adaptive optics using liquid crystal panel and wave-front distribution sensor with 2-dimensional grating mask, Abstracts of International Symposium: Adaptive Optics: From Telescopes to the Human Eye (Murcia, Spain, November 13-14, 2000), Part 2, 5 (2000), (P9)
6. M. Hattori and S. Komatsu: Near Field Image of Refractive Objects; Numerical Analysis of the Border Contrasts, Technical Digest of Focus on Microscopy 2000 (Shirahama, Japan, 2000), 79 (2000), 2000年4月
7. 服部雅之、小松進一: 2次元回折格子を利用した光波面センサーの高速化と補償光学への応用, 第61回応用物理学会学術講演会講演予稿集, No.3, 868 (2000), 2000年9月, (5a-C-5)
8. 服部雅之、西村雅文、小松進一: 2次元回折格子とTN液晶パネルを用いた補償光学系, 第61回応用物理学会学術講演会講演予稿集, No.3, 869 (2000), 2000年9月, (5a-C-6)
9. 森田 力、服部雅之、小松進一: 液晶バックライトの積層型偏光導光板の偏光特性, 第61回応用物理学会学術講演会講演予稿集, No.3, 867 (2000), 2000年9月, (5a-W-22)

研究成果

はじめに、研究成果の概要を各年度ごとにまとめる。

平成 10 年度

1. 光子計数イメージングシステムによる回折像の取込

光子計数イメージングシステム（平成 10 年度申請設備備品）を用いて光波のフラウンホーファー回折像を撮像し、ワークステーション（現有設備）に取り込んだ。 SiO_2 透明薄膜を基板上に形成した極微弱位相格子の高次回折像部分を光子計数イメージングシステムで撮像した。この結果に ND フィルターで強度を減少させて別に撮像したゼロ次光部分を合成して回折像データとした。この方法で、80,000 以上のダイナミックレンジが得られることを確認した。ワークステーションへのデータ取込は、フロッピーディスクによるデータ移動によっている。

2. 光子計数データに基づく位相回復

光子計数イメージングシステムで撮像した回折像データに対して位相回復アルゴリズムを適用し、アルゴリズムの収束性を調べた。位相回復アルゴリズムとして、HIO (Hybrid Input Output) 法と ER (Error Reduction) 法の組合せを用いた。現在のところ収束に至っていない。高次回折像部分とゼロ次光部分を合成する際の位置ずれがその原因の一つとして考えられる。

3. 位相回復データの前処理

回折像に含まれる種々のノイズを低減する前処理が有効であることを冷却 CCD で撮像したアナログデータに対して確認した。アナログデータに対して現在行っている、フレーム加算とウィーナー最適フィルターを光子計数イメージに適用してその有効性を調べるとともに、光子計数イメージに最適な処理について考察するのが今後の課題である。

平成 11 年度

1. 光子計数イメージングシステムによる回折像の分割取込

昨年度に引き続き、光子計数イメージングシステム（平成 10 年度設備備品）を用いて光波のフラウンホーファー回折像を広いダイナミックレンジで撮像する方法について検討した。 SiO_2 透明薄膜を基板上に形成した極微弱位相格子の高次回折像部分を光子計数イメージングシステムで撮像し、この結果に ND フィルターで強

度を減少させて別に撮像したゼロ次光部分を合成して回折像データとした。この方法によって回折像撮像のダイナミックレンジを、1,000,000 程度にまで向上でき、その結果、従来は 3 次までであった回折光の取り込みが、7 次まで可能になった。

2. 光子計数データ取り込みのオンライン化

データ収集・解析の効率を向上させるため、フロッピーディスクを媒体とするオフライン処理で行っていたワークステーションへの回折像データ取り込みを、まず研究室 LAN を介するデータ転送に改め、さらにオンラインのデータ取込が行えるようにした。

3. 光子計数データに基づく位相回復

光子計数イメージングシステムの分割取り込みによって撮像した回折像データに対して位相回復アルゴリズムを適用した結果、HIO (Hybrid Input Output) 法と ER (Error Reduction) 法の組合せを用いた反復型位相回復アルゴリズムが反復回数 300 程度で十分な収束がみられ、周期状の物体表面形状を再生することができた。再生像になお若干のノイズが残っている原因について、さらに検討している。

平成 12 年度

1. 光子計数イメージングシステムによる位相回復法の確立

光子計数イメージングシステム（平成 10 年度設備備品）を用いて光波のフラウンホーファー回折像を 1,000,000 程度の広いダイナミックレンジで撮像し、このデータから位相物体の周期状位相分布を再生することは、昨年度に成功していたが、再生像にはなお若干のノイズが残っていた。今年度は、この問題の検討を行い、ND フィルターで全体の強度を減少させて撮像した回折像と、ゼロ次回折成分をマスクで遮って撮像した回折像を合成する際の二つの画像の位置合わせ誤差と、回折像の飽和による像の歪みが主な原因であることを確認した。撮像条件の適正化と位置あわせの改善によって、回折像の強度分布をより正確に測定することができた。その結果、この回折像データから位相回復を行うアルゴリズムの収束性が向上し、位相差 $\lambda/30$ の物体の矩形の位相分布形状を、従来よりも正確に回復することに成功した。

2. 光子計数データ取り込みの完全オンライン化

実験室で撮像した回折像データは、研究室 LAN のデータ転送を利用してワークステーションに取り込んでいたが、今年度は、さらにデータ収集・解析の効率を向上させるため、ワークステーション側からの制御による完全オンラインでのデー

夕取込を可能にした。

3. 離散光子計数データへの適用

光子数が少ない回折像を対象に、離散的な光子計数データを推定回折像に変換する最適な方法として最尤推定法の利用を検討した。

平成 13 年度

1. 光子計数イメージングシステムによる位相回復法の改善

SiO₂ 透明薄膜を基板上に形成したモデル位相物体を使用してシステムの改善を図った。とくに弱位相物体の位相回復を行う際に問題となる、回折像の中心部データと周辺部データの合成法の改善を図った。回折像に含まれる高強度の低次回折スポットから低強度の高次回折スポットまで広い範囲にわたって取り込むために、光子計数イメージングカメラの視野を横ずらししながら、隣接する回折スポットのグループごとに撮像していき、最後にそれらを合成することにより、弱位相物体の回折像を広いダイナミックレンジで高次スポットまで取り込むことを試みた。その結果、これまでは 3 次までであった回折像の取り込み次数を 7 次まで拡大し、実効的なダイナミックレンジを 11,000,000 :1 に高めることができた。画素サイズが大きいいため、位相回復に利用するには至っていないが、引き続き計算環境を整備して実行する予定である。

2. 微弱位相物体の位相回復の解析的手法

微弱位相の条件のもとで回折像が満たすべき数学的関係を利用して、解析的に物体位相を求める手法について考察した。この手法で求めた解を位相回復の初期推定に利用することでアルゴリズムの収束性を大幅に改善することが期待できる。

3. 離散光子計数データへの適用

回折像を形成する光子数が少ない場合に、得られた離散的な光子計数データに対して最尤推定法を適用した。今後生体材料等に応用する場合には、このような光子数の制限された状況が多いものと想定される。これまでに検討した最尤推定法との比較を行いながら、引き続き有効なアルゴリズムを探る。

本課題研究の研究費補助金交付最終年度終了時点における、主要な成果は以上の通りである。今後も引き続き経常費等によって研究を継続し、無染色の生物・生体試料のようなマイクロな位相物体へ本方法を実際に適用することによって、本方法の有効性を検証していきたい。

以下に、研究成果の詳しい内容を述べる。

第 1 部

回折像データの前処理による位相回復顕微鏡像の改善

フレーム加算とウィーナー最適フィルタによる前処理が回折像に含まれる種々のノイズを低減する有効であることを、冷却 CCD で撮像したアナログデータに対して確認した。

第1章 序論

光の位相分布には、その波の通過してきた媒質の屈折率分布あるいは反射してきた物体の表面形状などの情報が含まれており、位相分布を定量的に測定することはオプトエレクトロニクスや生物学をはじめ多くの分野で重要な意味を持ち、その応用範囲は広い。

光波の位相分布を可視化する方法としては、干渉計を用いる方法などが従来から実用されている。しかし、この方法には光学系が複雑になってしまう、測定精度が参照波面の精度に影響されてしまうなどといった問題点があった。一方、これらの問題点を克服するばかりでなく、位相分布の定量的測定までも可能にする手段としてフーリエ反復アルゴリズム (Iterative Fourier transform algorithm : 本論文では以下 IFTA とする) が有名である¹⁾。この方法によれば、我々は光波の位相分布をそのフラウンホーファー回折像、すなわちフーリエ変換像の強度分布 (フーリエ強度分布) から求めることが可能となる。

しかしこの方法の問題点としては、回復された位相分布の精度がフラウンホーファー回折像の測定精度に制限されてしまうということが挙げられる。したがって、いかに正確にフラウンホーファー回折像を測定するかが回復精度を決定する鍵となる

本研究では、フーリエ反復アルゴリズムを用いた位相回復実験において、微弱位相物体 (用いる試料物体は、位相差 $\lambda/32$ 程度の二値位相格子、 λ : 波長) の高精度な定量的測定を目指す。

1.1 フーリエ反復アルゴリズム

フーリエ反復アルゴリズム (IFTA) は物体光のフーリエ強度分布から元の物体をあらわす関数 (の位相分布) を求める方法である。想定される光学系の例を図 1.1 に示す。

求めたい物体関数を $f(\mathbf{x}) = |f(\mathbf{x})| \exp[i\theta(\mathbf{x})]$ とすると、測定されるデータはそのフーリエ強度分布 $I(\mathbf{u})$ である。

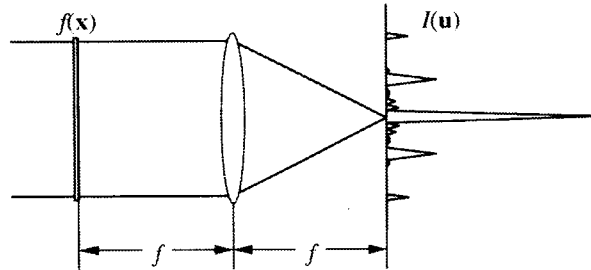


図 1.1: フーリエ変換光学系。 f : レンズの焦点距離、 $f(\mathbf{x})$: 物体関数、 $I(\mathbf{u})$: フーリエ強度分布

この方法では実験により得られた $I(\mathbf{u})$ よりフーリエ振幅分布 $|F(\mathbf{u})|$ を求め、このデータをもとにしてコンピュータ上で物体関数 $f(\mathbf{x})$ を求めてゆく。まず $f(\mathbf{x})$ の推定関数 $g_0(\mathbf{x})$ (初期予想) をフーリエ変換したものを $G_0(\mathbf{u})$ とする。次に、 $G_0(\mathbf{u})$ に対してフーリエ領域の拘束条件を適用し $G'_0(\mathbf{u})$ を得る。具体的には、 $G_0(\mathbf{u})$ の振幅部分 $|G_0(\mathbf{u})|$ をフーリエ振幅分布 $|F(\mathbf{u})|$ と入れ換えたものが $G'_0(\mathbf{u})$ である。そして、 $G'_0(\mathbf{u})$ を逆フーリエ変換したものを $g'_0(\mathbf{x})$ とする。最後に $g'_0(\mathbf{x})$ に対して物体領域での拘束条件としてサポート条件と振幅の非負条件とを適用し、この拘束条件を満たす場合、満たさない場合それぞれについて新たな推定関数 $g_1(\mathbf{x})$ を得る。同様にして順次 $g_2(\mathbf{x})$ 、 $g_3(\mathbf{x})$... $g_k(\mathbf{x})$ と求め、評価関数が収束するまでこれを繰り返す (図 1.2 の矢印方向にループを描く)。

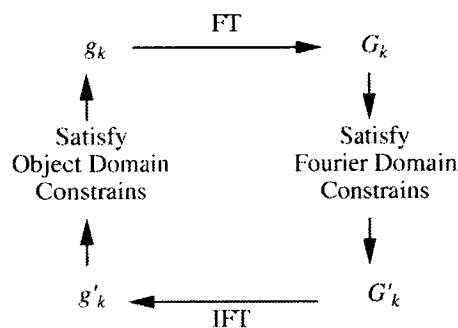


図 1.2: ループの k 回目におけるフーリエ反復アルゴリズムの模式図。 FT : フーリエ変換、 IFT : 逆フーリエ変換。

IFTA と呼ばれる方法は、 $g'_k(\mathbf{x})$ から $g_{k+1}(\mathbf{x})$ を求める段階での $g_{k+1}(\mathbf{x})$ の定義の仕方

の違いにより複数種類があり²⁾³⁾、エラーリダクションアルゴリズム (Error Reduction algorithm: 以下 ER) やハイブリッドインプットアウトプットアルゴリズム (Hybrid Input Output algorithm: 以下 HIO) 等がその例である。

ER について以上の流れを数式で示すと、ループの k 回目においては以下ようになる。

$$\text{STEP1. } G_k(\mathbf{u}) = |G_k(\mathbf{u})| \exp[i\phi_k(\mathbf{u})] = \mathcal{F}[g_k(\mathbf{x})]. \quad (1.1)$$

$$\text{STEP2. } G'_k(\mathbf{u}) = \frac{|F(\mathbf{u})|}{|G_k(\mathbf{u})|} G_k(\mathbf{u}) = |F(\mathbf{u})| \exp[i\phi_k(\mathbf{u})]. \quad (1.2)$$

$$\text{STEP3. } g'_k(\mathbf{x}) = |g'_k(\mathbf{x})| \exp[i\theta_k(\mathbf{x})] = \mathcal{F}^{-1}[G'_k(\mathbf{u})]. \quad (1.3)$$

$$\text{STEP4. } g_{k+1}(\mathbf{x}) = \begin{cases} g'_k(\mathbf{x}) & , \quad \mathbf{x} \notin \gamma. \\ 0 & , \quad \mathbf{x} \in \gamma. \end{cases} \quad (1.4a)$$

ここで γ は物体領域の拘束条件を満たさない領域である。また HIO についても数式で示すと、STEP1. から STEP3. までは ER の場合と全く同様であり、STEP4. のみが以下に示す STEP4'. のようになる。

$$\text{STEP4'. } g_{k+1}(\mathbf{x}) = \begin{cases} g'_k(\mathbf{x}) & , \quad \mathbf{x} \notin \gamma. \\ g_k(\mathbf{x}) - \beta g'_k(\mathbf{x}) & , \quad \mathbf{x} \in \gamma. \end{cases} \quad (1.4b)$$

β は任意の定数である。

反復の k 回目における回復具合をはかる評価関数としては、 $g'_k(\mathbf{x})$ 全体のうち、拘束条件を満たさないものの割合として Object error (E_{ok}) が、またコンピュータシミュレーション等の場合はさらに、理論値 (正解値) からのずれの波長に対する割合の画素平均として RMS error (RMS_k) が、それぞれ次のように定義されている。

$$E_{ok} = \sqrt{\frac{\sum_{\mathbf{x} \in \gamma} |g'_k(\mathbf{x})|^2}{\sum_{\mathbf{x}} |g'_k(\mathbf{x})|^2}}. \quad (1.5)$$

$$RMS_k = \frac{\sqrt{\sum_{\mathbf{x}} |\theta_k(\mathbf{x}) - \theta(\mathbf{x})|^2 / N}}{2\pi}. \quad (1.6)$$

ここで N は画素数である。

本研究においては、停滞 (次節参照) を避けるために ER と HIO とを組み合わせたアルゴリズムにより位相回復を行う。

1.2 フーリエ反復アルゴリズムの停滞問題とその克服法

IFTA は評価関数 (通常は Object error: E_{ok}) が収束するまで反復を繰り返す。ER は反復を繰り返すごとに E_{ok} が単調に減少してゆくということが数学的に証明されており²⁾、これが Error Reduction の名の由来にもなっているとも言われる。しかし、仮に ER を無

眼回数を繰り返したとしても ($k \rightarrow \infty$)、収束した関数 $g_\infty(\mathbf{x})$ は必ずしも正解の物体関数 $f(\mathbf{x})$ に一致するとは限らない。この理由は、 E_{ok} が最小値 (理想的には 0) ではなく極小値に収束してしまうことにある。このような現象を停滞問題という。

このような停滞問題を克服するために、これまでも数多くのアルゴリズムが報告されているが、HIO もまたそういったアルゴリズムのうちの一つである^{4) 5)}。HIO は ER と異なり、必ずしも反復ごとに E_{ok} が単調減少するわけではない。しかし、そのことが逆に E_{ok} が極小値に落ち込んでしまうのを防ぐことになり停滞を克服することが出来るのである。

1.3 微弱位相物体の測定における問題点

試料物体として二値位相格子 (図 1.3) を用いた場合、そのフラウンホーファー回折像をコンピューターによって計算すると図 1.4 のようになる。図 1.3(a) において、格子模様が円で囲まれているのは円形開口をあらわしている。また、図 1.3(b) のようにこの位相格子を透過した光は山の部分 (P) を透過したのか谷の部分 (Q) を透過したのかによって、 $h(n-1)/\lambda$ の位相差を生じる (ただし、 h は位相格子の深さ = PQ 間の段差、 n は屈折率、 λ は透過光の波長である)。この位相差が $\lambda/4$ (図 1.4 中では破線で示してある)、 $\lambda/32$ (同じく実線) となるよう 2 パターン想定した。格子定数はどちらも等しく d とした。像は双方とも最大値 (0 次回折光) が 1 となるように規格化してある。

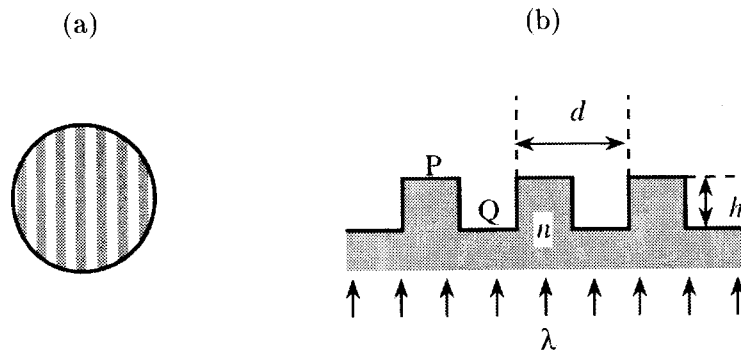


図 1.3: 試料物体として想定した二値位相格子。(a) 平面図、(b) 断面図。

図 1.4 よりわかるように、どちらの格子も格子定数が等しいので、フーリエ面 (すなわち周波数空間) 上のほぼ同じ点にピークが現れている。しかし、そのピークの値は大きく異なっており、微弱位相物体 (実線) の方がはるかにデータの強度が弱い。したがってこの回折像の撮影に際し、ダイナミックレンジの小さな撮像機器を用いた場合、このような強度の弱いデータが失われてしまう可能性があることがわかる。図 1.4 のデータによる位相回復の場合、量子化レベル (撮像機器のダイナミックレンジ) とエラー (位相回復の精度) の関係はコンピューターシミュレーションによれば表 1.1、図 1.5 のようになり、この結果から撮像機器のダイナミックレンジが小さいほど位相回復の精度は落ちることがわかる⁶⁾。なお、コンピューターシミュレーションにおける位相回復のアルゴリズムは、HIO を 200

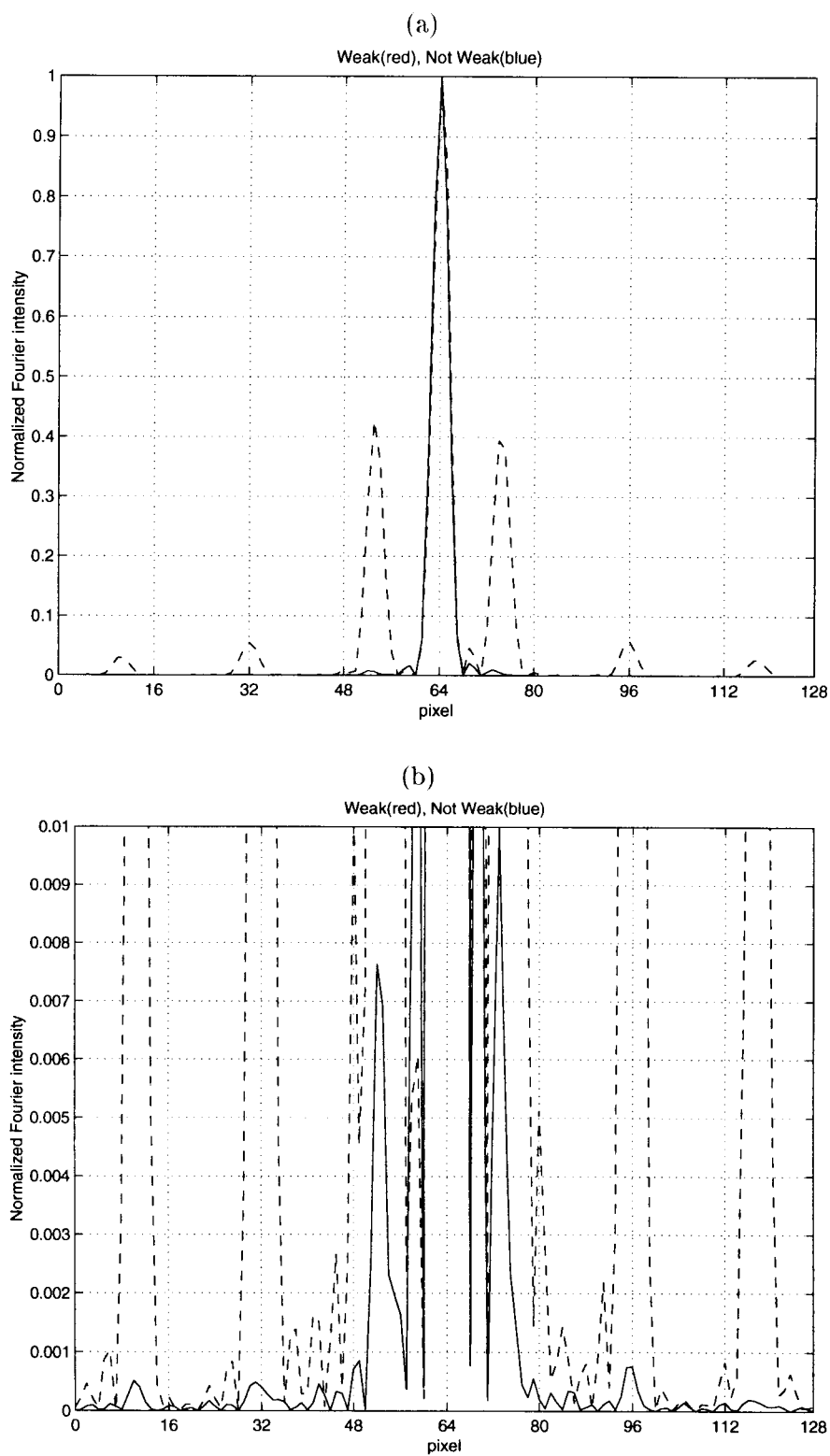


図 1.4: フーリエ強度分布 (断面図)。物体は二値位相格子。実線: 位相差 $\lambda/32$ 、破線: 位相差 $\lambda/4$ 。(b) は (a) の低強度部分の拡大図。

量子化 レベル (bit)	位相差 $\lambda/32$	位相差 $\lambda/4$
4	0.399068	0.412911
5	0.295830	0.362321
6	0.288875	0.304337
7	0.250484	0.258893
8	0.211305	0.223345
9	0.191027	0.189127
10	0.170416	0.160796
11	0.153045	0.135283
12	0.132922	0.115437
13	0.115398	0.096466
14	0.095707	0.079222
15	0.073896	0.057497
16	0.048964	0.030127
17	0.031943	0.018497
18	0.020325	0.009509
19	0.012687	0.005003
20	0.007493	0.002531
21	0.004523	0.001408
22	0.002937	0.000761
23	0.002142	0.000405
24	0.001883	0.000204

表 1.1: 量子化レベル vs エラー (その 1)。

回繰り返した後に ER を 100 回繰り返してある。HIO の β の値は 0.5 である。

このコンピューターシミュレーションでは、データは理想的なものであるとしてノイズゼロと仮定してある。しかし、実際の実験を考える場合、測定データには必ずノイズ成分が乗ってしまうのでこれを考慮しなくてはならない。仮に、測定データに白色雑音が乗っているとすると、データに与える影響は強度の強い部分よりも弱い部分の方が大きい。つまりフーリエ領域では、高周波データの方が低周波データよりも影響を受け易いことになる。

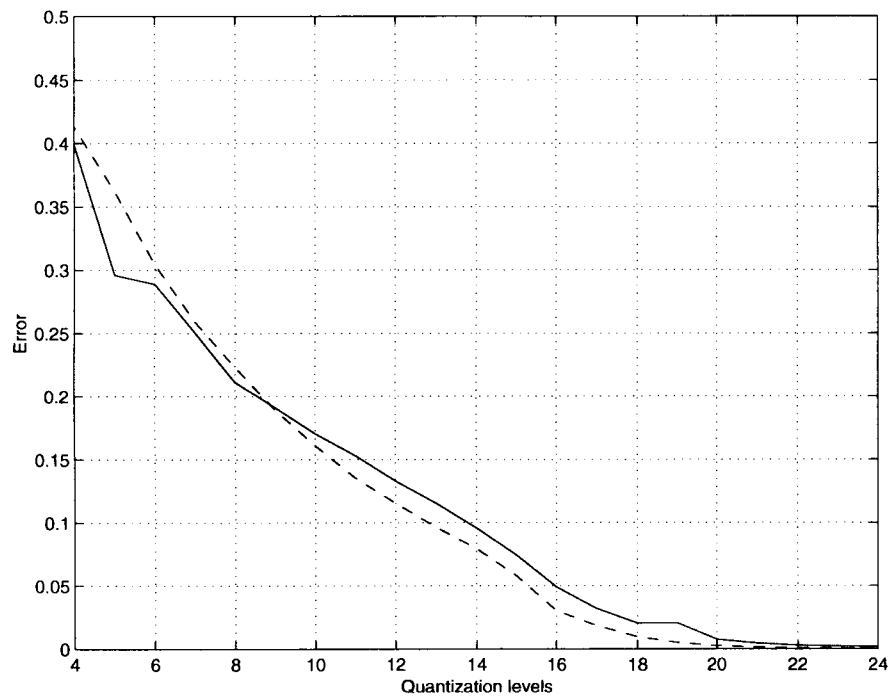


図 1.5: 量子化レベル vs エラー (その1)。実線 : 位相差 $\lambda/32$ 、破線 : 位相差 $\lambda/4$ 。

第2章 データの前処理

前章で述べたように、実際に実験より測定されたデータ $I(\mathbf{u})$ (フラウンホーファー回折像) は必ずノイズ成分を含んでいる。実験系自体の工夫、改善、改良により、ある程度ノイズレベルは抑えることは出来るが、それでもノイズ0の理想的な状態を作り上げるのは不可能である。したがって、 $I(\mathbf{u})$ から $|F(\mathbf{u})|$ を求める際はこのことを考慮に入れなくてはならない。そこで、測定データをコンピュータ上で処理することによってノイズの影響を軽減あるいは除去させ、これによって位相回復の精度を向上させることを目指す^{7,8)}。処理の内容とは、(1) 複数枚画像の加算、(2) 撮像機器 (CCD カメラ) の画素ごとの感度の補正、(3) Wiener optimal filter⁹⁾ の適用である。

2.1 複数枚画像の加算

画像（フーリエ強度分布 $I(\mathbf{u})$ ）を複数枚加算することにより、ノイズの成分は軽減される。全 J 枚の画像のうち、 j 番目 ($j = 1, 2, \dots, J$) の画像を $I_j(\mathbf{u})$ とし、 $I_j(\mathbf{u})$ のノイズ成分を $N_j(\mathbf{u})$ とすると、 J 枚の画像を加算した場合、加算後の画像 $I_{\text{sum}}(\mathbf{u})$ は、

$$\begin{aligned} I_{\text{sum}}(\mathbf{u}) &= \sum_{j=1}^J I_j(\mathbf{u}) = \sum_{j=1}^J [I_o(\mathbf{u}) + N_j(\mathbf{u})] \\ &= JI_o(\mathbf{u}) + \sum_{j=1}^J N_j(\mathbf{u}). \end{aligned} \quad (2.1)$$

となる。ただし、 $I_o(\mathbf{u})$ はノイズを含まない真の（理想の）強度分布である。信号成分は加算枚数 J に比例して大きくなるのに対し、ノイズ成分はそのランダム性のために正成分と負成分が互いに打ち消し合い、 J の平方根に比例して大きくなる¹⁰⁾。したがって、 $I_{\text{sum}}(\mathbf{u})$ の S/N 比と、 $I_j(\mathbf{u})$ ($j = 1, 2, \dots, J$) の S/N 比の平均とを比較すると、前者の方が後者よりも大きい (2.2 式)。

$$\frac{J \int I_o(\mathbf{u}) \, d\mathbf{u}}{\left| \sum_{j=1}^J \int N_j(\mathbf{u}) \, d\mathbf{u} \right|} \gg \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{\int I_o(\mathbf{u}) \, d\mathbf{u}}{\left| \int N_j(\mathbf{u}) \, d\mathbf{u} \right|}. \quad (2.2)$$

図 2.1 のように、撮像機器（ここでは冷却 CCD カメラ）はコンピューター（エンジニアリングワークステーション）に直接接続されており、撮影された画像は順次コンピューター上で加算される。このために多数枚の加算が可能になる。

2.2 画素ごとの感度の補正

冷却 CCD カメラの画素ごとの感度の違いを考慮してこれを補正する。画素ごとの感度の違いは、強度均一と見なせる光を測定したときの値から逆算して求めることができる。

2.3 Wiener optimal filter

Wiener optimal filter とはローパスフィルターの一種であり、パラメータの値を変えることによりフィルターの形状を任意に調節できる。このフィルターを用いることにより、高周波領域でより大きく効いてくるノイズの影響を軽減させることができるのである。

IFTA ではフーリエ面において、 $G_k(\mathbf{u})$ の振幅 $|G_k(\mathbf{u})|$ は $I(\mathbf{u})$ より求められた $|F(\mathbf{u})|$ と置き換えられる (5 ページ参照)。このとき通常 $|F(\mathbf{u})|$ は

$$|F(\mathbf{u})| = [I(\mathbf{u})]^{1/2} \quad (2.3)$$

として計算されるが、Wiener optimal filter では以下のように求められる。

$$|F(u, v)| = \frac{[I(u, v)]^{\nu+1/2}}{[I(u, v) + \alpha_1 u^{2m_1} + \alpha_2 v^{2m_2}]^\nu} \quad (2.4)$$

ただし、 $(u, v) = \mathbf{u}$ であり、また ν 、 α_1 、 α_2 、 m_1 、 m_2 はパラメータである。

2.4 実験結果

図 2.1 に示す実験系により測定されたデータに、以上に挙げた 3 つの処理を施した後に位相回復をした結果を図 2.2 に示す。試料物体は図 1.3 のような二値位相格子である。図 1.3 中で言う高さ h 、格子の屈折率 n はそれぞれ 40nm、1.46 であり、またヘリウムネオンレーザーの波長は 633nm である。したがって、光がこの格子を透過したときに生ずる位相差はおよそ $\lambda/32$ である。位相回復のアルゴリズムは、HIO を 200 回繰り返した後に ER を 100 回繰り返した。HIO の β の値は 0.5 である。また、画像の加算枚数は 500 枚、Wiener optimal filter のパラメーターの値はそれぞれ、 $\nu = 0.5$ 、 $\alpha_1 = 0.02$ 、 $\alpha_2 = 0.1$ 、 $m_1 = 1.0$ 、 $m_2 = 1.0$ である。比較のために、ここに挙げた前処理のうち、複数枚画像の加算のみを施した場合の位相回復像を図 2.2(a) に、全ての前処理を施した場合の位相回復像を図 2.2(b) に示す。また、図 2.2(c) は、両者を格子の並ぶ方向に沿って中央部を切断した場合の断面図である。図 2.2 より、前処理のうち特に最後の処理が有効に効いていることがわかる。

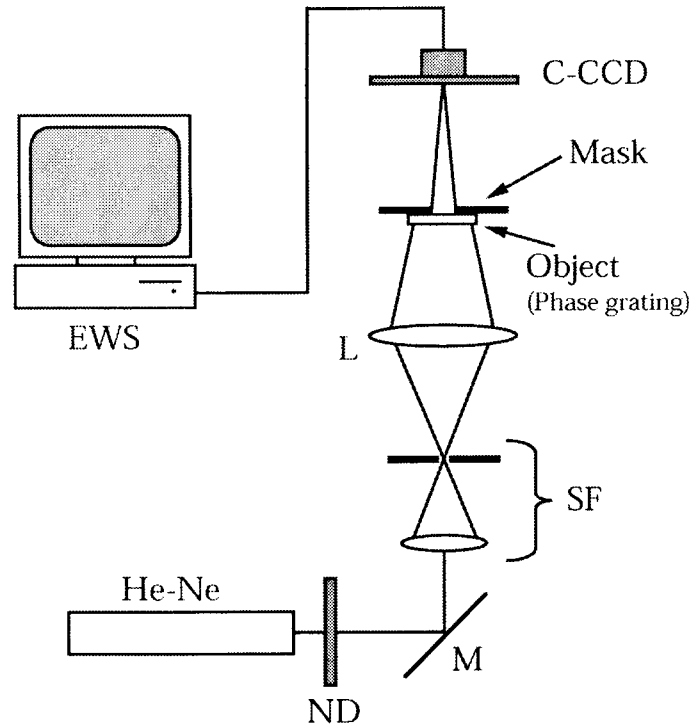


図 2.1: 実験系。He-Ne : ヘリウムネオンレーザー、ND : Neutral Density フィルター、M : ミラー、SF : 空間フィルター、L : レンズ、Object : 二値位相格子、Mask : ピンホール (直径 $400\mu m$)、C-CCD : 冷却 CCD カメラ、EWS : エンジニアリングワークステーション。

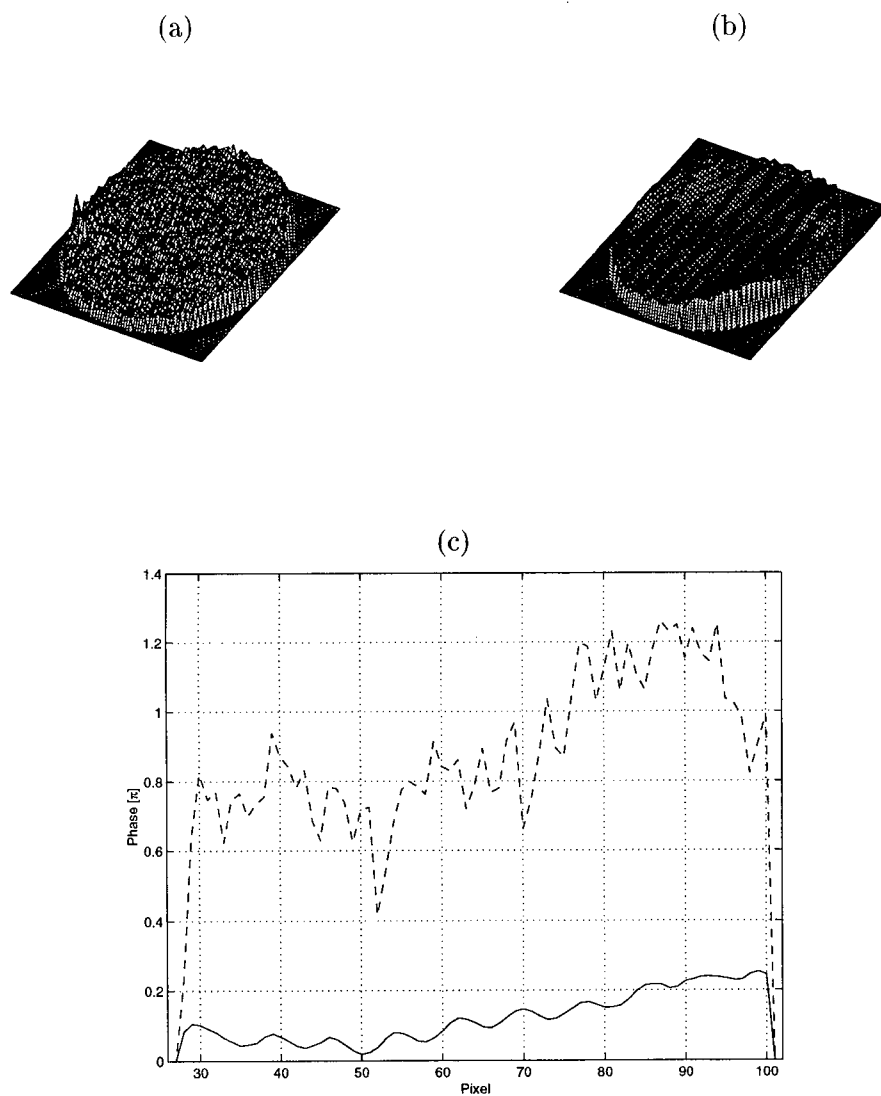


図 2.2: 前処理を施した後の位相回復結果。試料物体は二値位相格子 (位相差およそ $\lambda/32$)。 (a) 前処理のうち、複数枚画像の加算のみを施した場合。 (b) 全ての前処理を施した場合。 (c) 両者の断面図、実線: (b) の断面図、破線: (a) の断面図。

第3章 フーリエ強度の分割式測定

本章では強度微弱のデータを測定するための新たな方法として、強度の強い部分と弱い部分に分けて測定する方法を提案する。

3.1 分割式測定

通常、一つの撮像機器で測定可能な強度の最小値は同じ画像中の最大値によって決定される。例えば、量子化レベル 8bit の CCD カメラで測定することが出来る最小強度の値は、同じ画像中の最大強度の値の $1/256$ ($\cong 3.91 \times 10^{-3}$) である。ところで、一般に円形開口等のフラウンホーファー回折像は強度の強い部分が画像の中心に集中している。そこで、この特徴を考慮し、フラウンホーファー回折像の強度微弱のデータを測定するための新たな方法を提案する。すなわち、強度の強い部分と弱い部分を分けて、つまり中心部分と外側部分を分けて測定するという方法である。ここで単純な円形開口による平面波のフラウンホーファー回折像の場合を例にとると、1 次回折光の強度は 0 次回折光の 0.0175 倍、2 次回折光、3 次回折光はそれぞれ同じく 0.0042 倍、0.0016 倍... であり¹¹⁾、8bit の CCD カメラでは通常は 3 次回折光を正確に測定することは原理的に無理である。しかし、今回提案する分割式の測定では、仮に中心のエアリーディスク部分 (0 次回折光) とそれ以外の部分を理想的に分けて測定することが可能であるとすると、測定できる光の強度の最小値は 1 次回折光の $1/256$ 、すなわち 0 次回折光の 6.84×10^{-5} 倍となり、これは量子化レベル 14bit とほぼ同等である。分割式測定の結果として、撮像機器のダイナミックレンジを実質的に向上させることになるのである。

3.2 分割式測定の効果

分割式測定の効果を数値的に検証するために、フーリエ強度データの量子化レベルと位相回復の精度 (エラー) の関係について、コンピューターシミュレーションにより調べた。このコンピューターシミュレーションにおける位相回復のアルゴリズムも第 1 章 1.3 (7 ページ) と同じく、HIO を 200 回繰り返した後に ER を 100 回繰り返してある。HIO の β の値は 0.5 である。結果 (エラー値) を表 3.1、図 3.1 に示す。試料物体としては、図 1.3 (7 ページ) に示す二値位相格子 (位相差 $\lambda/32$ 、 $\lambda/4$ の 2 通り) を仮定した。

コンピューターシミュレーションの結果から、今回提案する分割式の測定からの位相回復の方が、従来式の測定からの場合に比べて良好な位相回復結果を得られることがわかる。位相差 $\lambda/32$ の場合について、エラーの値で比較すると、例えば量子化レベル 8bit で分割式測定した結果は量子化レベル 24bit で従来式測定をした結果とほぼ等しい。このときの回復結果の画像を図 3.2 に示す。

また、分割式測定をすることによるエラーの減少率を 3.1 式のように考え、試料物体の位相差が $\lambda/32$ の場合と、 $\lambda/4$ の場合とを比較すると、前者は 87.2%、後者は 54.5% と、分割式測定の効果は前者の方がより大きく表れている。したがって、この分割式測定の効果は、特に微弱位相物体を対象とした場合により顕著に現れると考えられる。

$$\text{減少率 [\%]} = \frac{\text{従来式測定のエラー平均} - \text{分割式測定のエラー平均}}{\text{従来式測定のエラー平均}} \times 100 \quad (3.1)$$

量子化 レベル (bit)	Object Error			
	位相差 $\lambda/32$		位相差 $\lambda/4$	
	従来式測定	分割式測定	従来式測定	分割式測定
4	0.399068	0.095458	0.412911	0.221063
5	0.295830	0.073633	0.362321	0.185427
6	0.288875	0.048800	0.304337	0.164049
7	0.250484	0.031803	0.258893	0.134656
8	0.211305	0.020230	0.223345	0.114690
9	0.191027	0.012644	0.189127	0.097906
10	0.170416	0.007428	0.160796	0.086535
11	0.153045	0.004423	0.135283	0.049340
12	0.132922	0.002924	0.115437	0.028538
13	0.115398	0.002370	0.096466	0.017911
14	0.095707	0.002058	0.079222	0.010403
15	0.073896	0.001891	0.057497	0.004731
16	0.048964	0.001754	0.030127	0.002410
17	0.031943	0.002210	0.018497	0.001377
18	0.020325	0.001792	0.009509	0.000736
19	0.012687	0.001810	0.005003	0.000370
20	0.007493	0.001990	0.002531	0.000273
21	0.004523	0.001887	0.001408	0.000126
22	0.002937	0.001732	0.000761	0.000111
23	0.002142	0.001725	0.000405	0.000051
24	0.001883	0.001832	0.000204	0.000039

表 3.1: 量子化レベル vs エラー (その 2)。

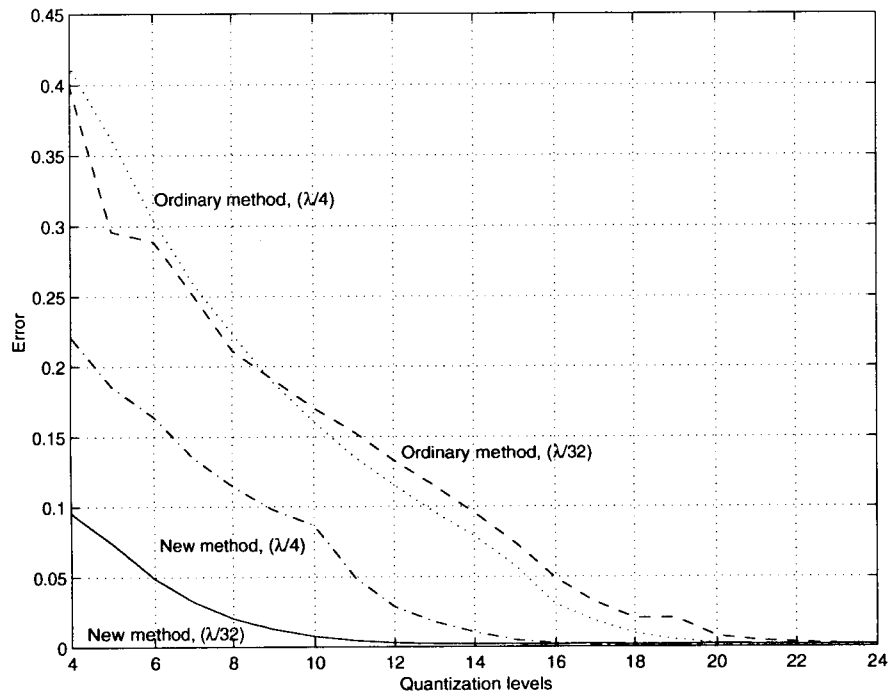


図 3.1: 量子化レベル vs エラー (その 2)。従来式の測定を Ordinary method、分割式の測定を New method とする。実線 : 位相差 $\lambda/32$ で New method、破線 : 位相差 $\lambda/32$ で Ordinary method、鎖線 : 位相差 $\lambda/4$ で New method、点線 : 位相差 $\lambda/4$ で Ordinary method。

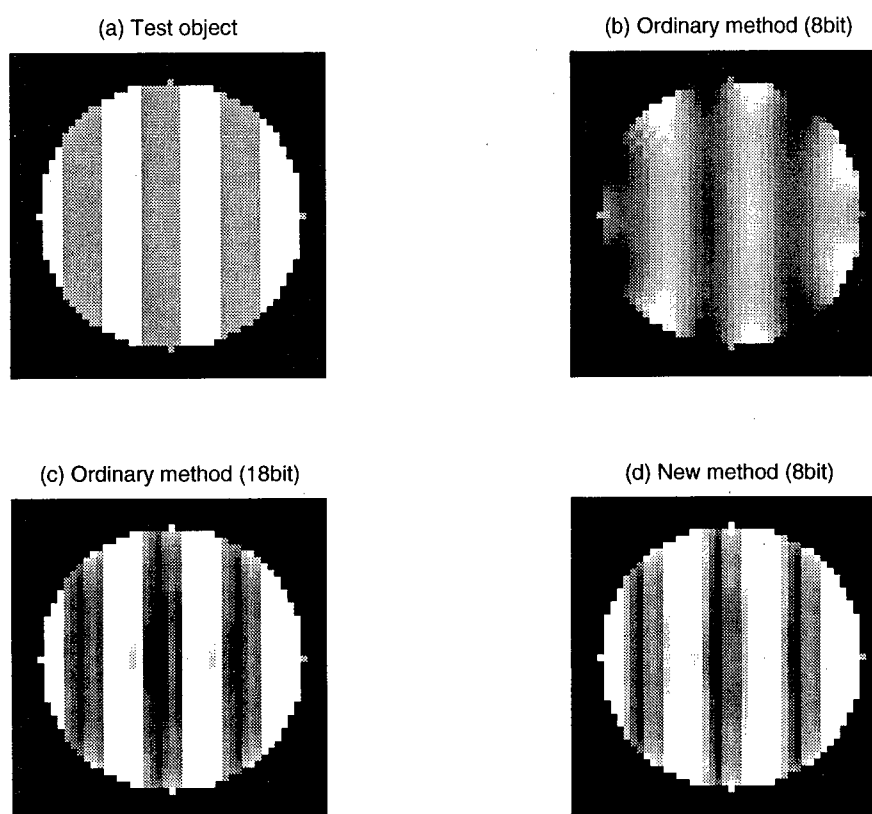


図 3.2: 位相差 $\lambda/32$ の試料物体の場合の位相回復結果 (コンピュータシミュレーション)。(a) 試料物体、(b) 従来式測定 (量子化レベル 8bit)、(c) 従来式測定 (量子化レベル 18bit)、(d) 分割式測定 (量子化レベル 8bit)。

3.3 実験結果

コンピュータシミュレーションでは有効性の示されたフーリエ強度の分割式測定であるが、これを実現するための実験系を図 3.3(a) に示す。この実験系の特徴は、第一の焦点面に図 3.3(b) 及び (c) に示すような 2 種類のフィルターを挿入することにより、強度の強い部分と弱い部分を分けて撮影できることである。図 3.3(b) のフィルターは、中央部分（黒い部分）が透過率 0%、それ以外の部分（白い部分）が透過率 100% のフィルターであり、一方図 3.3(c) のフィルターは (b) のフィルターとは逆に、中央部分（白い部分）が透過率 100%、それ以外の部分（黒い部分）が透過率 0% となっている。系に (b) のフィルターを挿入し、強度が最大である中央部分の光をカットすることにより、周囲の、強度微弱光の撮影が可能となるのである。(b) のフィルターの黒い部分と (c) のフィルターの白い部分の形状及び面積は等しく、また (b) のフィルターの白い部分と (c) のフィルターの黒い部分の形状及び面積も等しい。したがって、この二つのフィルターを系に挿入して撮影された二つの回折像を単純に足しあわせたものは、この系にフィルターを全く挿入しなかった場合の回折像と等しい（バビネの原理）¹²⁾。ただし、ビーム径はフィルターよりも十分に小さい。

フーリエ強度の測定には浜松ホトニクス社製フォトンカウンター（フォトンカウンティング ICCD カメラ）を用いている。フォトンカウンターとは文字通り、光の強度を光子（フォトン）単位で計測することが出来る測定機器である。植物の発光現象等の、非常に弱い光を計る実験や研究に使用されることが多い。今回の実験においても、強度微弱の高次回折光を測定するためにフォトンカウンターを用いる。また、試料物体は第 2 章 2.4 節での実験と同じ二値位相格子を使用した。

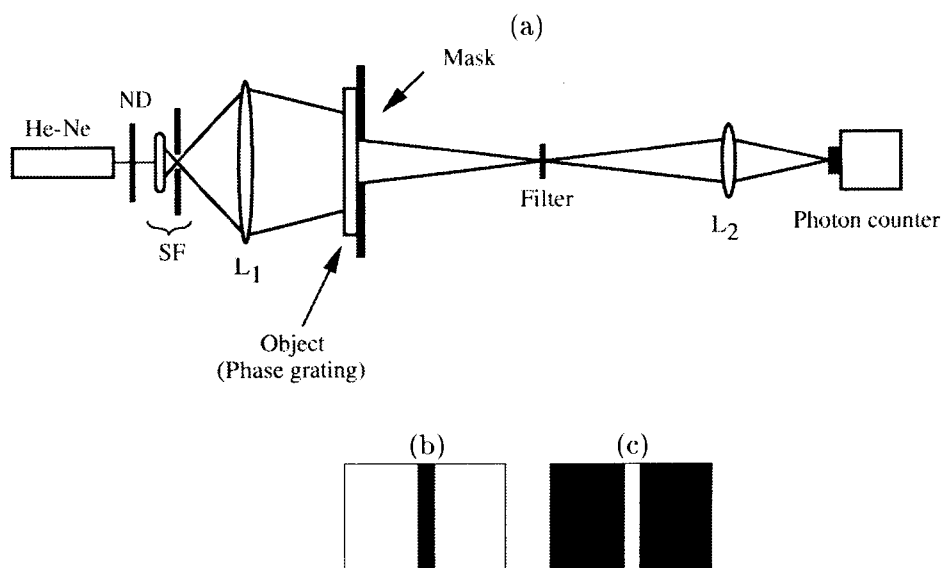


図 3.3: フーリエ強度の分割式測定のための実験系。(a) 実験系。He-Ne: ヘリウムネオンレーザー、ND: Neutral Density フィルター、SF: 空間フィルター、 L_1 : レンズ 1、 L_2 : レンズ 2、Object: 二値位相格子、Mask: ピンホール (直径 $200\mu\text{m}$)、Photon counter: フォトンカウンター、Filter は (b)、(c) に示す。(b) 低次回折光カット (ハイパス) フィルター。(c) 高次回折光カット (ローパス) フィルター。

図 3.3 の実験系により、実際にフーリエ強度の測定を行った。フォトンカウンターの受光可能な光の強度は $10^{-2} \sim 10^{-9}$ Lux 程度¹³⁾ と弱いため、これら二つの回折像撮影の際は、ND フィルター（富士写真フィルム社製のゼラチン光学フィルター）を用いて強度の調節を行った。ND フィルターの号数と露光調整倍数との関係は表 3.2 に示す通りである¹⁴⁾。また、フーリエ強度の測定結果を図 3.4 に示す。図 3.4(a) は、系に図 3.3(b) の低次回折光カットフィルターを挿入した場合の、図 3.4(b) は図 3.3(c) の高次回折光カットフィルターを挿入した場合の回折像である。なお、図 3.4(a)、(b) の画像は 18000 フレーム（1 秒あたり 30 フレームで 10 分間）の積算画像であり、ともに規格化等を行っていない。また、図 3.4(a) の撮影の際と図 3.4(b) の撮影の際に使用した ND フィルターの号数を表 3.3 に示す。

号数	露光調整倍数	号数	露光調整倍数
0.1	1.25	0.9	8.0
0.2	1.5	1.0	10.0
0.3	2.0	1.2	16.0
0.4	2.5	1.5	32.0
0.5	3.0	1.8	64.0
0.6	4.0	2.0	100
0.7	5.0	3.0	1000
0.8	6.0	4.0	10000

表 3.2: 富士写真フィルム社製 ND フィルターの号数と露光調整倍数の関係。

号数	使用枚数	
	図 3.4(a)	図 3.4(b)
0.2	1	0
0.8	1	0
1.2	1	0
1.5	1	1
3.0	1	1
4.0	0	1

表 3.3: 実験に使用した ND フィルター。

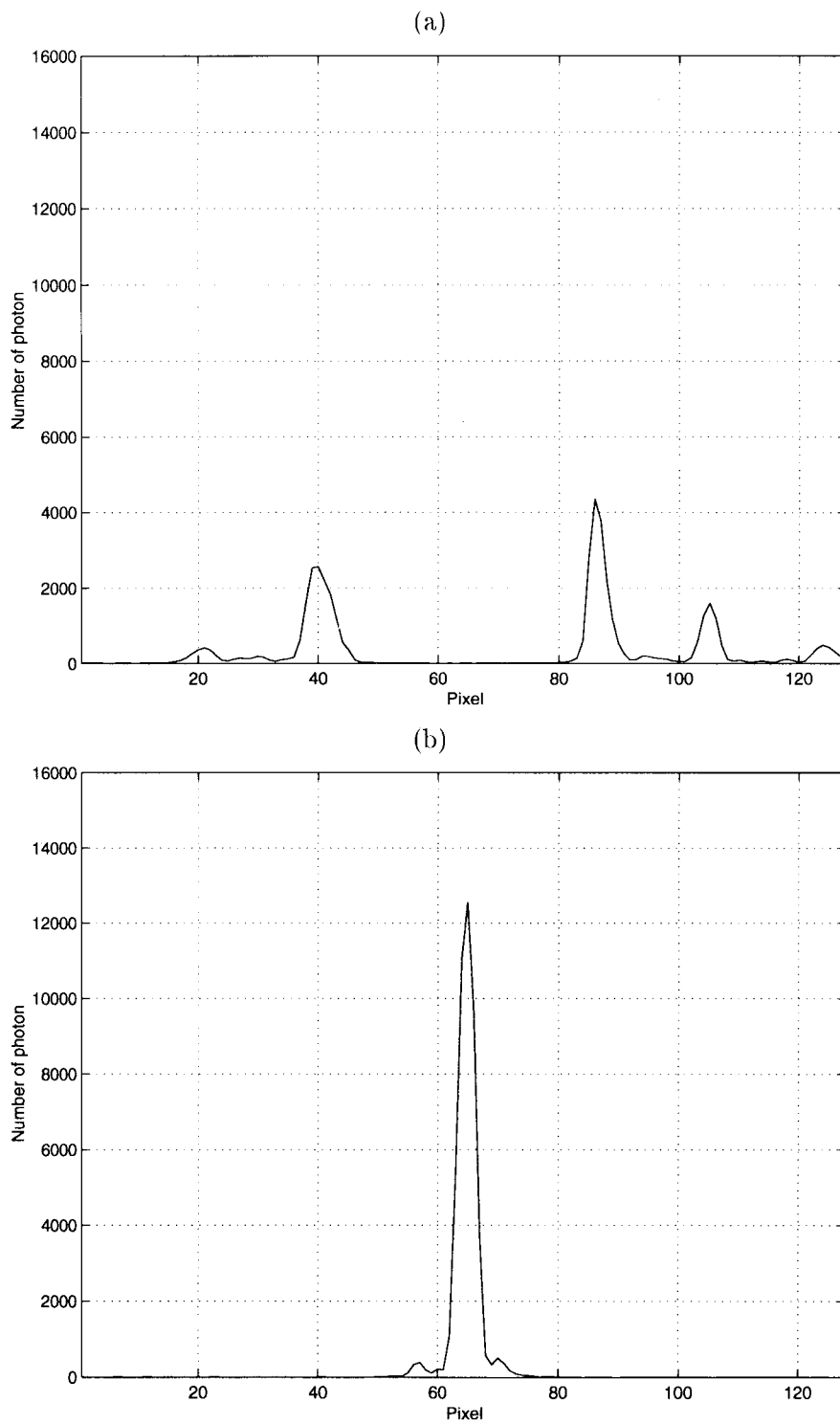


図 3.4: フーリエ強度の測定結果。18000 フレーム積算後。(a) 低次回折光をカットした場合、(b) 高次回折光をカットした場合。

図 3.4 の縦軸はカウントされたフォトンの個数であり、これは強度に比例する。また、図 3.4(a)、(b) とも同じスケールで表示してあるが、実際は測定に使用した ND フィルターの号数とその枚数から透過率を求め、スケールを換算する必要がある。例えば露光調整倍数が 10000 であるなら透過率は $1/10000$ である。表 3.2 及び表 3.3 をもとに計算すると、図 3.4(b) の画像（高次回折光をカットした場合）の縦軸のスケールは図 3.4(a) の画像（低次回折光をカットした場合）の 69.4 倍である。

透過率を考慮して図 3.4(a)、(b) を合成して得られた結果を図 3.5 に示す（実線）。比較のために、従来式に測定されたフーリエ強度も同時に示す（破線）。なお、双方とも規格化してある。

3.4 考察

図 3.5 に見られるように、今回提案する分割式測定の方が従来式測定よりも、明らかに強度微弱の高次回折光のデータを確実、正確に測定することが出来ている。これはまさにコンピュータシミュレーションの結果を裏付ける実験結果である。

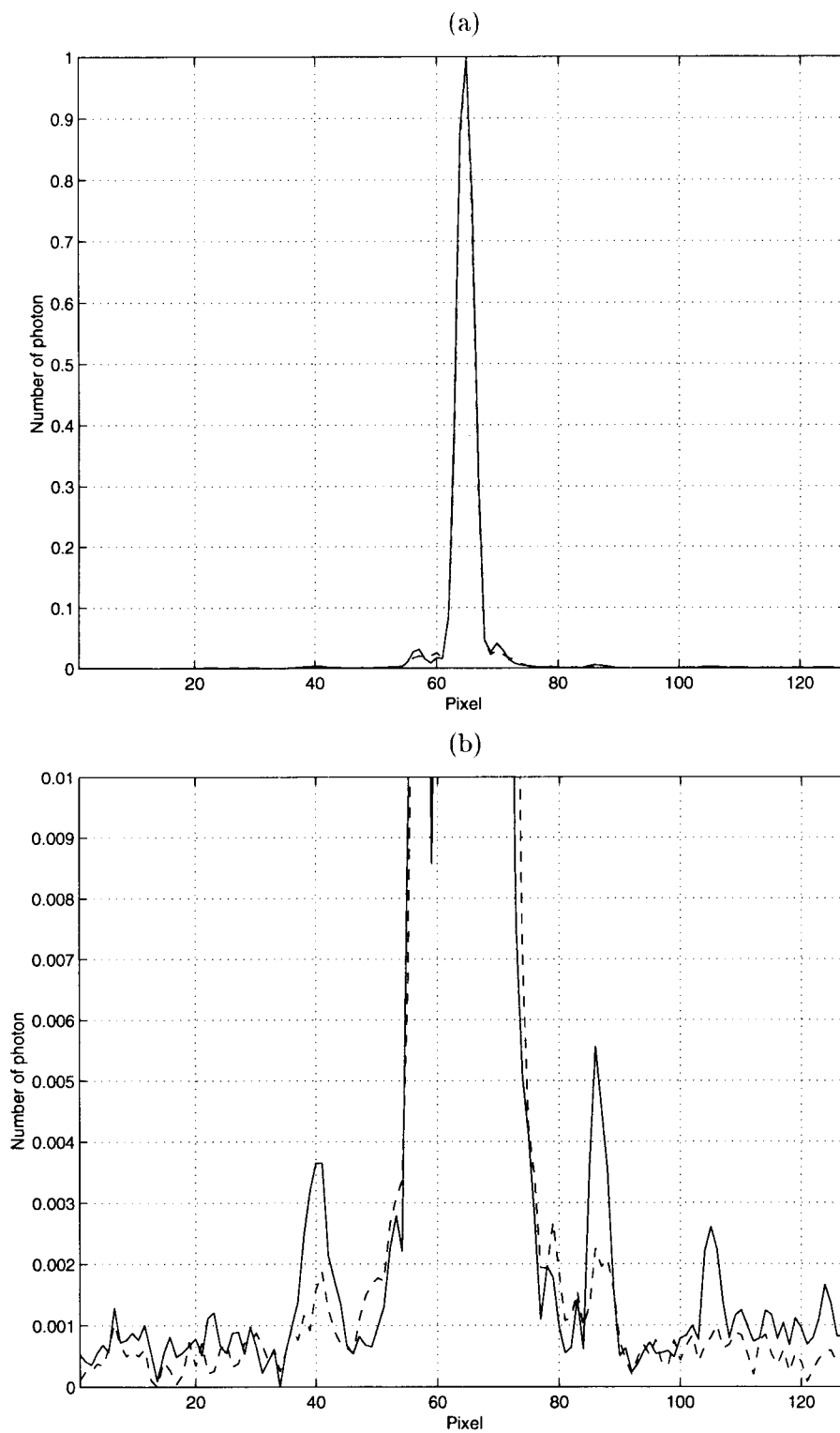


図 3.5: 測定されたフーリエ強度 (規格化後)。実線: 分割式に測定された後、合成されたフーリエ強度、破線: 従来式に測定されたフーリエ強度。(b) は (a) の低強度部分の拡大図。

第4章 結論

本研究では、第1章にあるように微弱位相物体の高精度の定量的測定（位相回復）を目標とし、そのためにフーリエ強度の強度微弱であるデータをいかに正確に測定するかということテーマとしてきた。

第2章では、ノイズの影響を軽減させることで微弱強度データをより正確に測定するという観点から、データの前処理という概念を導入した。結果としてデータの前処理により位相回復の精度は向上した。

第3章では、原理的に微弱強度データの測定を可能にするために、フーリエ強度の分割式測定という測定方法を導入した。結果として微弱強度データである高次回折光を測定することに成功した。最終的には、この測定データからの位相回復までには至らなかったが、第3.2節のコンピューターシミュレーション（表3.1、図3.1、図3.2）から予測されるように、位相回復の精度の向上の可能性は十分に示された。

参考文献

- [1] W. O. Saxton, “*Computer Technique for Imaging Processing Electron Microscopy*” Academic Press, New York, (1978).
- [2] J. R. Fienup, “Phase retrieval algorithms: a comparison”, *Appl. Opt.*, **21**, 2758-2769 (1988).
- [3] Guowen Lu, Zheng Zhang, Francis T. S. Yu and Aris Tanone, “Pendulum iterative algorithms for phase retrieval from modulus data”, *Opt. Eng.*, **33**, 548-555 (1994).
- [4] 高橋 徹, 高城 洋明, “繰り返し型位相回復アルゴリズムにおける停滞問題の克服”, *光学*, **21**, 485-488 (1992).
- [5] 高城 洋明, 高橋 徹, “位相回復におけるハイブリッドインプットアウトプット・アルゴリズムの能力について”, *光学*, **22**, 419-427 (1993).
- [6] 小柳 晴揮, 日隈 薫 小松 進一, “フーリエ反復アルゴリズムを用いた二次元位相回復顕微鏡”, *光学*, **25**, 416-420 (1996).
- [7] 嘉村 洋平, 小松 進一, “位相回復実験におけるデータの前処理”, 第58回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, 962 (1997).
- [8] Y. Kamura and S. Komatsu, “Phase Retrieval Microscope for Quantitative Imaging of a Weak Phase Object”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 6018-6019 (1998).
- [9] V. V. Kotlyar, P. G. Seraphimovich and V. A. Soifer, “Regularized iterative algorithm for the phase retrieval”, *Optik*, **94**, 96-99 (1993).
- [10] Ya. G. シナイ (森 真 訳), “シナイ確率入門コース”, シュプリンガー・フェアラーク東京, (1995).
- [11] 小瀬 輝次, 斎藤 弘義, 田中 俊一, 辻内 順平, 波岡 武 編, “光工学ハンドブック”, 朝倉書店, (1986).
- [12] 飯塚 啓吾, “光工学 (新訂増補版) ”, 共立出版, (1983).
- [13] “フォトンカウンティング ICCC カメラ C2400-30 シリーズ 取扱説明書”, 浜松ホトニクス, (1998).
- [14] “光学フィルター FUJIFILM FILTER”, 富士写真フィルム, (1996).

付録

以下を付録とする。

- 第3章の実験で使用したフォトンカウンターの仕様¹³⁾。
- 参考文献[8]の別刷り(添付)。

2次元光子計数管	PI-430C
感度波長域	360 ~ 650[nm] (バイアルカリ)
仕様撮像素子	CCD
撮像領域	$10^{-2} \sim 10^9$ [Lux]
有効光電面寸法	12.7(H)×9.5(V) [mm]
解像度	350TV本以上
図形歪み	2%以下
映像出力信号	同期混合 1.0V _{p-p} /75Ω
入力電源	AC 100/117/220/240 ±10% (50/60Hz)
消費電力	30VA以下
動作周囲温度	摂氏0 ~ +30度
保存周囲温度	摂氏-10 ~ +50度
湿度	80%以下(結露しないこと)
外形寸法	
カメラヘッド	100 × 120 × 305(±5)
I.I. コントロールユニット	232 × 74 × 308 (W × H × D)

表: フォトンカウンティング ICCD カメラの仕様。

第 2 部

光子計数イメージングシステムを利用する

高感度位相回復顕微鏡の構築

光子計数イメージングシステムを用いて光波のフラウンホーファー回折像を広いダイナミックレンジで撮像する方法について検討した。SiO₂ 透明薄膜を基板上に形成した極微弱位相格子の高次回折像部分を光子計数イメージングシステムで撮像し、この結果に ND フィルターで強度を減少させて別に撮像したゼロ次光部分を合成して回折像データとした。この方法によって回折像撮像のダイナミックレンジを、1,000,000 程度にまで向上でき、その結果、従来は 3 次までであった回折光の取り込みが、7 次まで可能になった。

光子計数イメージングシステムの分割取り込みによって撮像した回折像データに対して位相回復アルゴリズムを適用した結果、HIO (Hybrid Input Output) 法と ER (Error Reduction) 法の組合せを用いた反復型位相回復アルゴリズムが反復回数 300 程度で十分な収束がみられ、周期状の物体表面形状を再生することができた。

第1章 序論

本論文は、フォトン・イメージング・ディテクター(Photon imaging detector: 以下PIDと略記)を用いて計測した回折像強度分布を主な情報源として、光波の位相分布を回復することを目的とする。本論文は5章からなる。第1章において、背景と目的について述べる。第2章において、物体面マスク条件とPIDにより計測されるフーリエ面強度分布から光波の位相分布をフーリエ反復法(Iterative Fourier transform algorithm: 以下IFTAと略記)によって回復する方法を述べる。第3章において、32分の1波長の位相差をもつ位相分布を回復した結果を述べる。第4章において、PIDを用いた強度計測からの位相回復法の可能性を考察する。第5章において、結論を述べる。

1.1 背景

光波の位相分布を計測する方法としてフーリエ反復法を利用した位相回復法の有効性が認められてきている。フーリエ反復法を利用した位相回復について理論面と実験面の両面から研究されてきた。本研究では実験面における可能性を探るべく、研究目的を定める。

1.1.1 光波の位相分布計測

光波の位相分布には透過物体の屈折率分布や反射物体の3次元表面形状などの多くの情報が反映されるため(図1)、その可視化と高精度測定は特にオプトエレクトロニクスや生物学などにおいて重要な役割を果たす[文献1]。物体光の位相を直接測定するためには光波の強度測定が必要である。物体光の位相分布を測定するために従来から用いられている方法である光波干渉計やホログラフィなどにおいては、参照光を干渉させる必要があるため光学系が複雑になり、外乱に対する安定性などの問題から測定精度が制限される。参照光を干渉させずにより構成要素の少ない光学系で位相を測定する方法が、以下に説明するフーリエ面強度分布計測から位相分布を回復する方法である。

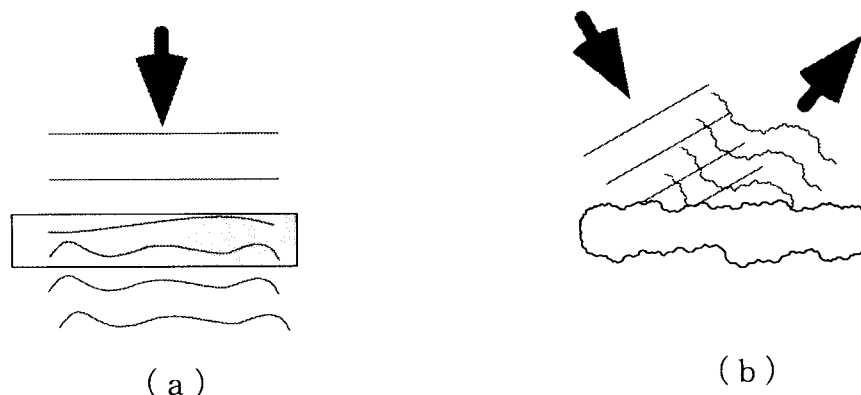


図1 光波面位相。

物体への入射光と(a)透過光、(b)反射光

1.1.2 フーリエ反復法による位相回復

物体のフーリエ振幅などの拘束条件から物体位相を求める方法として IFTA を用いた位相回復法が知られている[文献2]。今までその特性や停滞問題など種々の研究がなされており、シミュレーションに加え実験面での検証もされてきている。本 1.1.2 項においては主に理論面を述べる。まずフーリエ面強度分布について、次にフーリエ変換に関する離散計算について、最後に IFTA について述べる。実験面については第 1.1.3 項においてフーリエ面強度分布計測を中心に述べる。

フーリエ面強度分布

フーリエ面強度分布を計測する光学系の例を図 2 に示す。求めたい位相物体の振幅分布関数を $f(x) = |f(x)| \exp[i\phi(x)]$ とすると、レンズの焦点面において測定される強度分布 $I(u)$ は $f(x)$ のフラウンホーファ回折像となる。この $I(u)$ は関数 $f(x)$ をフーリエ変換した関数の二乗、つまりフーリエ面強度分布関数である。[3,4]

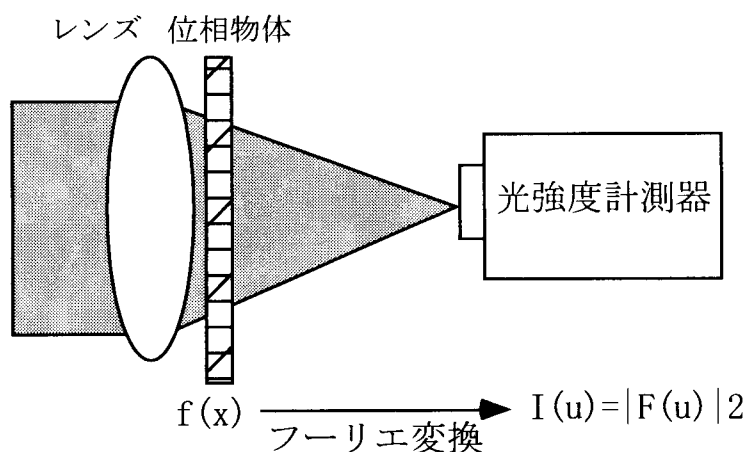


図 2 フーリエ変換光学系
 f : 物体面位相分布、 I : 焦点面強度分布、
 F : f のフーリエ変換

離散計算

計測器による強度計測と IFTA の計算機処理の双方において、関数は整数 $M \times$ 整数 N の格子で表される。関数 $f(x, y)$ の離散フーリエ積分を $F(u, v)$ とすると

$$\begin{aligned}
 F(u, v) &= |F(u, v)| \exp[i\phi(u, v)] \\
 &= \sum_{x=-M/2+1}^{M/2} \sum_{y=-N/2+1}^{N/2} f(x, y) \exp\left[-i2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)\right], \quad \dots 1
 \end{aligned}$$

またその逆は

$$f(x, y) = (MN)^{-1} \sum_{u=-M/2+1}^{M/2} \sum_{v=-N/2+1}^{N/2} F(u, v) \exp\left[i2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)\right], \quad \dots 2$$

である。離散フーリエ変換の際、 M と N を 2 の累乗値として高速フーリエ変換にすることで、フーリエ変換、逆フーリエ変換の計算機処理における高速化をはかる。

フーリエ反復法

本研究において物体関数 $f(\mathbf{x})$ を求めるために IFTA を用いる。IFTA は、物体領域とフーリエ領域においてそれぞれの拘束条件を適用しながらフーリエ変換と逆変換を繰り返し行い、物体位相分布の解に収束させる方法である。本研究において負荷する拘束条件とは、物体面におけるサポート条件やフーリエ面におけるフーリエ面強度分布 $f(u)$ などである。

IFTA を、図 3 に示すフーリエ反復法ループ k 回目の模式図に沿い、STEP 1 から 4 の順に説明する。STEP 1 において、ループ k 回目の初期振幅分布 $f_k(\mathbf{x})$ (ここで、ループ 1 回目において与える $f_1(\mathbf{x})$ は任意である) をフーリエ変換したものを $F_k(\mathbf{u})$ とする。次に STEP 2 において、 $F_k(\mathbf{u})$ に対してフーリエ領域の拘束条件を適用し $F'_k(\mathbf{u})$ を得る。フーリエ領域の拘束条件とは、 $F_k(\mathbf{u})$ の振幅を計測から得られる振幅と置換する。STEP 3 において、 $F'_k(\mathbf{u})$ を逆フーリエ変換したものを $f'_k(\mathbf{x})$ とする。STEP 4 において、 $f'_k(\mathbf{x})$ に対して物体領域での拘束条件としてサポート条件などを適用し、この拘束条件を満たす場合、満たされない場合それぞれについて新たな推定関数 $f_{k+1}(\mathbf{x})$ を得る。 $f_{k+1}(\mathbf{x})$ が $k+1$ 回目のループの初期値となり、同様にして順次 $f_{k+2}(\mathbf{x})$, $f_{k+3}(\mathbf{x})$... と求め、解に収束することを目標とする(図 3 の矢印方向にループを描く)。解に収束しているかを判定するために、評価関数を導入する。

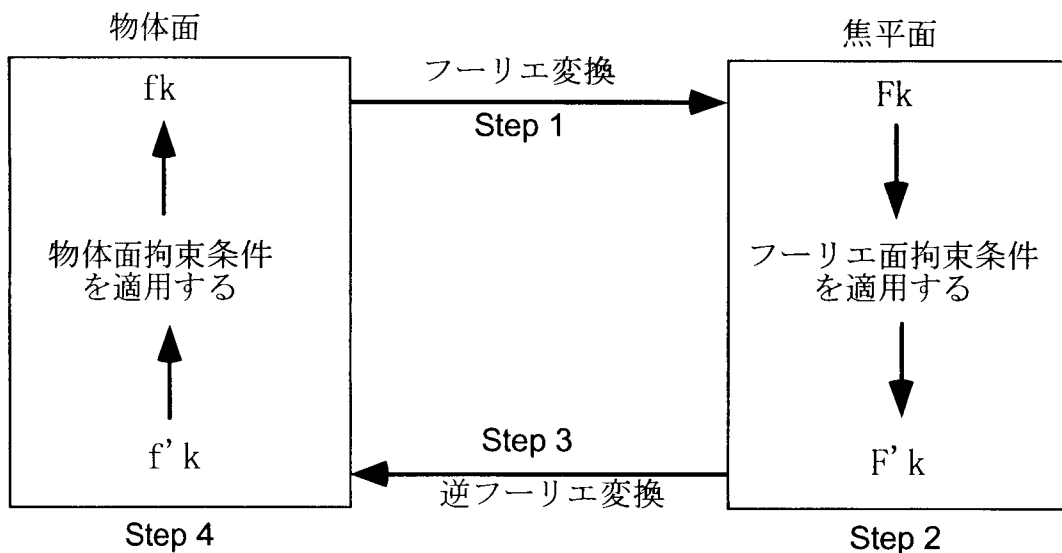


図 3 フーリエ反復法ループ k 回目の模式図

f : 物体面振幅分布、 F : フーリエ面振幅分布

IFTA には、STEP 4 において $f'_k(\mathbf{x})$ から $f_{k+1}(\mathbf{x})$ を求める段階での $f_{k+1}(\mathbf{x})$ の定義の仕方の違いにより複数種類があり[文献 2]、エラーリダクションアルゴリズム(Error Reduction algorithm : 以下 ER と略記)やハイブリッドインプットアウトプットアルゴリズム(Hybrid Input Output algorithm : 以下 HIO と略記) 等が強力なものとして知られている。

ER と HIO の双方が図 3 において説明した 4 つの STEP を繰り返す流れを式 3-7 に示す。まず、ER ではループ k 回目において以下の式 3-6 のように表される。

$$\text{STEP1. } F_k(\mathbf{u}) = |F_k(\mathbf{u})| \exp[i\phi_k(\mathbf{u})] = F[f_k(\mathbf{x})] \quad \dots 3$$

$$\text{STEP2. } F'_k(\mathbf{u}) = \frac{|F(\mathbf{u})|}{|F_k(\mathbf{u})|} G_k(\mathbf{u}) = |F(\mathbf{u})| \exp[i\phi_k(\mathbf{u})] \quad \dots 4$$

$$\text{STEP3. } f'_k(\mathbf{x}) = |f'_k(\mathbf{x})| \exp[i\theta_k(\mathbf{x})] = F^{-1}[F'_k(\mathbf{u})] \quad \dots 5$$

$$\text{STEP4. } f_{k+1}(\mathbf{x}) = \begin{cases} f'_k(\mathbf{x}) & , \mathbf{x} \notin \gamma \\ 0 & , \mathbf{x} \in \gamma \end{cases} \quad (\text{ER}) \quad \dots 6$$

$$\text{STEP4'. } f_{k+1}(\mathbf{x}) = \begin{cases} f'_k(\mathbf{x}) & , \mathbf{x} \notin \gamma \\ f_k(\mathbf{x}) - \beta f'_k(\mathbf{x}) & , \mathbf{x} \in \gamma \end{cases} \quad (\text{HIO}) \quad \dots 7$$

ここで γ は物体領域の拘束条件を満たさない領域である。また HIO についても数式で示すと、STEP1 から STEP3 までは ER の場合と全く同様であり、STEP4 のみが STEP4' に示すように拘束条件外の振幅をパラメータ β により指定する割合で保持する。ここで β は 0 から 1 の任意の定数である。

反復 k 回目における回復具合をはかる評価関数としては、物体関数 $f'_k(\mathbf{x})$ の強度和のうち拘束条件を満たさないものが占める強度和の割合として Object error (E_{ok}) をもちいた。

$$E_{ok} = \sqrt{\frac{\sum_{\mathbf{x} \in \gamma} |f'_k(\mathbf{x})|^2}{\sum_{\mathbf{x}} |f'_k(\mathbf{x})|^2}} \quad \dots 8$$

フーリエ反復法の収束性

HIO と ER を組み合わせた位相回復法が、計測におけるノイズや誤差を考慮した場合、効果的であるとされる。HIO ループを繰り返すことで解近傍に近づけた後、ER ループを繰り返すことで解への収束を図る方法が、計算機シミュレーションにおいて効果を実証されている[文献5]。フーリエ面強度分布の強度ダイナミックレンジと回復精度について検証がなされ[文献6]、より高いダイナミックレンジで得られたフーリエ面強度分布からの位相回復がより回復精度が高いことが示された。

1.1.3 フーリエ面強度分布計測

数値実験においてフーリエ強度のダイナミックレンジの大きさが回復される位相分布の精度に影響を与えることを踏まえ、計測においてより高いダイナミックレンジでフーリエ面強度分布を測定し、測定したフーリエ面強度分布から IFTA による位相分布をより高精度で回復することを目指してきた。フーリエ面強度分布の測定機器として、CCD ディテクタを用いた研究[文献5,7]や、CCD ディテクタに比べより高精度な測定が可能な冷却 CCD ディテクタを用いた研究[文献8]がなされた。

問題は、測定ダイナミックレンジが機器の測定精度に依存している部分が多く、CCD ディテクタや冷却 CCD ディテクタを用いた研究ではフーリエ面強度分布測定データが 0 次光ピークと 1 次光ピークのみを含んだものに限られていたことである。また、計算機の性能の限界から回復計算に用いる強度分布のピクセル数が 128×128 に限られていた。

1.2 目的

以上の背景を踏まえ、本研究ではフーリエ面強度分布を光子計数により高精度に計測し、計測されたデータを元に物体位相を回復することで、光子計数からの位相回復の方法と効果を検証することを目的とする。光子単位でフーリエ面強度分布を計測することで1次より高次の回折ピークを含んだ回折光強度分布を測定する。測定した強度分布から 128×128 以上のピクセル数の強度分布をとりだし、そのデータをもとに物体面位相分布を回復することを目指す。

第2章 方法

フーリエ面強度分布を光子計数により高精度に計測する。フーリエ面強度分布をPIDにより計測する光学系を構成する。被測定物体として位相格子を物体面に設置する。フーリエ面強度分布を2種類の方法で撮像する。撮像したフーリエ面強度分布 512×128 ピクセルのデータをもとにIFTAを施し、被測定物体の位相分布を回復する。

2.1 物体面位相分布

被測定物体として単調な物体をもちいることで、今回の手法が有効か否かを検証する。計測される位相物体として位相差 $1/32$ 波長の位相格子 (図 4(a)) をもちい、物体面マスク条件として振幅分布を制限するために直径 $200 \mu\text{m}$ のピンホール (図 4(b)) をもちいる。位相格子とピンホールを前後に並べた振幅分布 (図 4(c)) が物体面における振幅分布となる。

位相格子は図 4(a)に示す構造をしている。位相格子は材質が SiO_2 であり、屈折率 $n = 1.46$ で製作されている。位相格子の一面には間隔 $d = 40 \mu\text{m}$ で高さ $h = 40\text{nm}$ の格子が一樣に列をなしている。格子の凸部分と凹部分の高度差 h により、He-Ne レーザー光波長 632nm が入射したとすると、格子を垂直に通過する波面に $1/32$ 波長の位相差が生じる。

ピンホール(図 4(b))は直径 $200 \mu\text{m}$ の円形の部分のみ光が通過する。このピンホールに強度分布が一様な平面波が入射した場合、ピンホールを通過する光波の振幅分布は 2 つの部分に分けられる；円形で一様な振幅を持った部分と、その円形にくりぬかれた部分以外の振幅 0 の部分である。振幅の異なる 2 つの部分をも物体面におけるサポート条件として用いることができる。

物体面に構成する位相分布は図 4(c)に示される。位相分布は直径 $200 \mu\text{m}$ の円形の中に凹部との位相差 $1/32$ 波長の凸部が $40 \mu\text{m}$ 間隔で縦に並ぶ。縦方向の位相変化を少なくし縦と垂直な横方向の位相変化を構成した理由は、回折像の回折ピークを一直線上に形成し撮像を簡易にするためである。

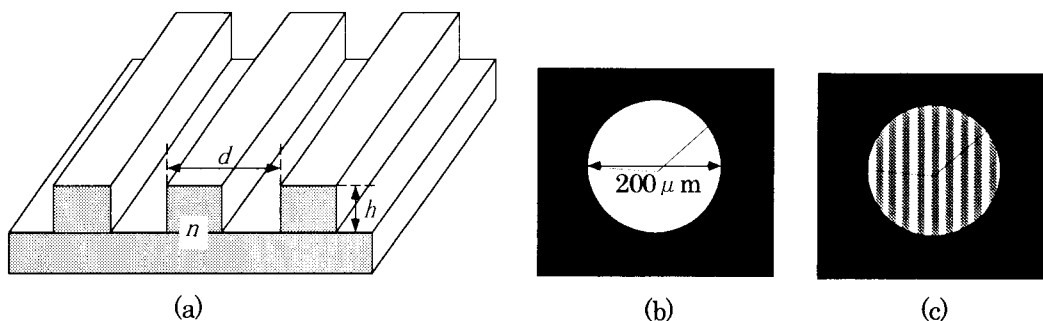


図 4 物体面位相分布

(a)位相格子、(b)直径 $200 \mu\text{m}$ ピンホール、(c)物体面位相分布。

$d = 40 \mu\text{m}$, $h = 40\text{nm}$, $n = 1.46$ 。

2.2 光子計数フーリエ面強度分布計測

物体面におかれた位相分布のフラウンホーファ回折像（フーリエ面強度分布）を光子数単位で強度計測するために2種類の撮像方法を採用した。フーリエ面強度分布の光子計数撮像について説明した後、2種類の撮像方法、分割式撮像法とディテクタ位置シフト撮像法について述べる。

2.2.1 光子計数撮像

フーリエ面強度分布を光子単位で計測する。計測システムの構成と、システムに付属するソフトウェアにより光子計数計測する方法を概説する。より効率よく正確に光子計数するために、計測システムの感度調整と入射光強度調整をする。また計測系の外から内への光をさえぎる遮光の工夫もする。

光子計数撮像

光強度を光子計数撮像する手段として、浜松フォトニクス社製 Intensified Charge Coupled Device (以下 I-CCD ディテクタと記す)システムを用いる。I-CCD ディテクタシステムでは Image Intensifier (以下 I.I. と略記) 部分で微弱光強度を増幅し、強度増幅した光を CCD ディテクタで計測し、計測したデータを計算機に伝送し、計算機上でソフトウェアにより強度データを光子単位で計数する。

I-CCD ディテクタシステムの受光部分について図 5 に模式図を示す。I-CCD ディテクタシステムの受光部分では、測定する光強度分布を I-CCD ディテクタの前方部分にある I.I. の受光面に入射させる。I.I. によって光強度が増幅され、I.I. 後方から増幅された光が放出される。I.I. による光強度の増幅が微弱光の強度計測を可能とすることに役立っている。I.I. から放出された光の強度分布を、浜松フォトニクス社製 CCD ディテクタ C2400 により毎秒 30 回計測する。計測された強度分布の情報がシステム付属の計算機に伝送される。計算機にはデータ処理ソフトウェア ARGUS-50 がインストールされており、伝送された強度分布情報を ARGUS-50 により処理することで、光強度の光子計数が実現する[文献9]。

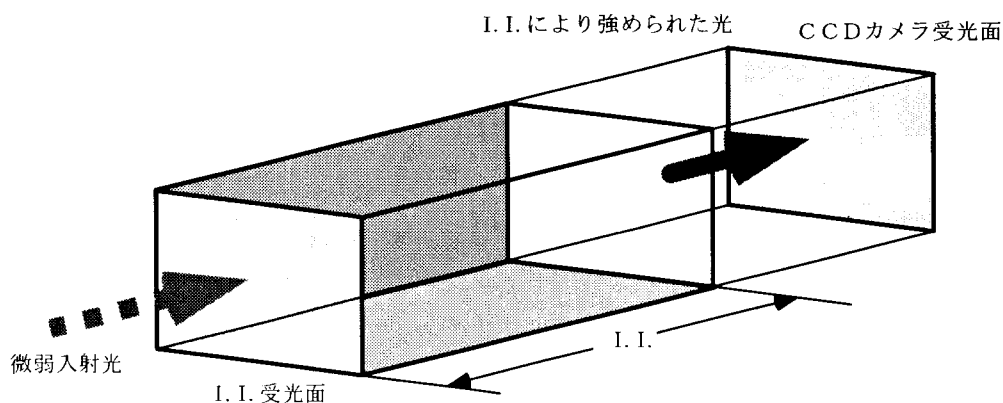


図 5 I-CCD ディテクタ受光部分の模式図
I.I.: image intensifier

計算機において光子係数を実現するために、ARGUS-50 に数種類用意されている撮像モードオプションの中から **photon counting mode** を選択する。このモードはフレーム (1/30 秒) ごとに CCD デテクタに光が入射したか、していないかをそれぞれ 1、0 個の光子が入射したと計数する(図 6)。入射し閾値調整(後述 11 頁に記載)された後のフォトン数が複数個であっても、1 個と計数される。例えば図 6(a)と(b)の 1 行 2 列のピクセルは、複数個入射した場合の光子数と計数される光子数の関係の例である。光子数の計数は、PID の各ピクセルにおける光子数が 0 か 1 であるかを 1/30 秒ごとのフレームで記録し、足し合わせていく。

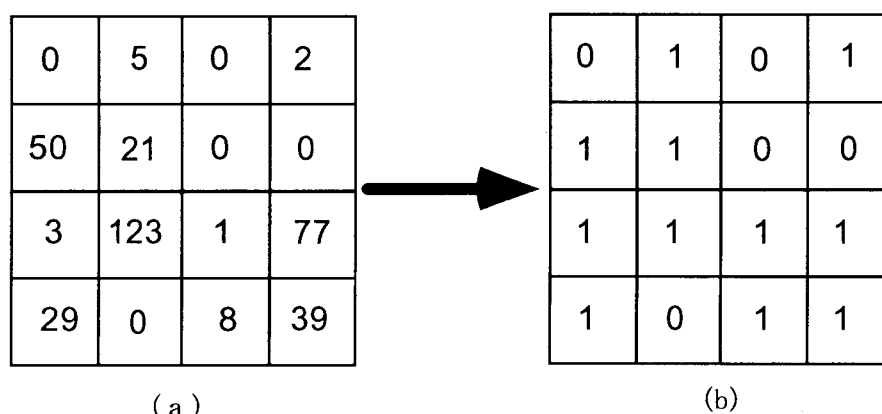


図 6 30 分の 1 秒毎に計測される光子数の例
(a)入射光子数 (b) 計数される光子数

計数のたびに、ARGUS-50 が光子数を浮動小数点精度 **float** の整数表記で保存している。そのために、光子数が 32768 を超えそうなときは、光子数が 32768 に達する前に計測を一度止めて計測データを保存して、再び計測をはじめ、再計測する計測データを別ファイルに保存する必要がある。参考に、入射光子数の例を上げると、あるピクセルに 3 フレームつきに平均 1 フォトンの割合で入射する場合、1 秒間に 10 フォトン、1 分間に 600 フォトン、1 時間に 36000 フォトン入射する。よって計測の正確を期せば 30 分ごとに計測を一度中断し計測データを保存していく必要がある。

感度調整

微弱光を計測することができる PID を最大感度で撮像に用いるため、PID の画像強度制御機 (Image Intensifier Controller) の感度調整 (sensitivity) のつまみである HV の設定を最大値である 10 にする。感度調整を最大にすると、PID の CCD 部分の特性や高電圧が理由で光をまったく入射させない状態でも PID で光が計測されている状態になる。このため、PID 受光面に光をまったく入射させない状態で光が計測されず、光が入射すると計測される、ぎりぎりの閾値を設定する。閾値を設定する方法として、argus50 において 2 値化を行う識別値 (discrimination level) を 10 または 11 に設定する。

入射光強度調整

PID が受光可能な光強度は $10^{-2} \sim 10^{-9}$ Lux 程度と弱い [文献10]。回折像撮影の際、入射光強度が PID の受光許容強度内におさまるようにするため、入射光強度を調整する。今回の実験では、1 フレームにつき 1 ピクセルに 1 光子を超えない光子数が入射するように入射光強度を弱める。今回は、入射する光子数が一番多いピクセルにおいても、入射光子数が 1 フレームにつき 1 ピクセルに 1/2 フォトン以下の割合であるように ND フィルタにより入射レーザー光強度を調整した。

遮光

計測したい光以外の光が PID 受光面に入射しない状態で使用するため、僅かなノイズ光も除去する必要がある。測定光学系の内と外から PID 受光面への光入射を極力減らす遮光をする。PID 受光面と物体面マスクであるピンホール間に遮光用に黒色の厚紙製の筒を設置する (図 7)。また、光学系外からの光を遮ることを徹底するため、計測系全体の周囲を厚さ 1cm 程度の厚紙で覆い、さらに計測系を設置する部屋自体も遮光を徹底した。

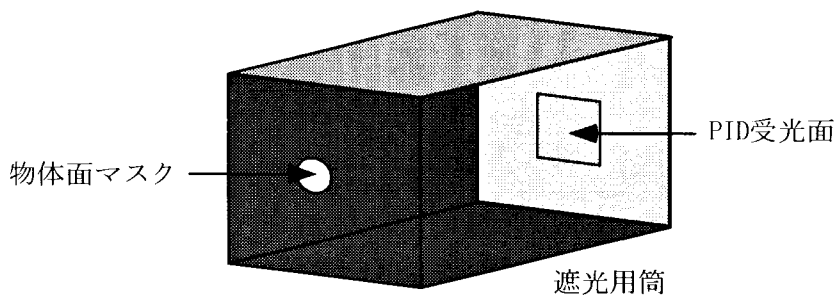


図 7 受光面と物体面マスク間の遮光

2.2.2 分割式撮像法

分割式撮像法を、被測定強度分布に強度の大きい部分と小さい分布があるとき、大きい部分の光を遮った像と遮らない像を別々に撮ったのち、二つの像の関係を考慮に入れて合成する撮像法とする。三段落に分けて詳述する。まず、分割式撮像法により 2.1 節にしめした物体を撮像するために構築する光学系を示す。次に、撮像した回折像強度分布を示す。三番めに、撮像した回折像強度分布を計算機処理により合成し、 10^7 乗近くの強度ダイナミックレンジの像を得かつ 3 次回折光以上の高次回折光ピークの像を得られた過程を示す。

回折像強度分布計測光学系

物体面位相分布のフラウンホーファ回折像強度分布を計測する光学系を構成する(図 8)。図 8 を説明する。He-Ne レーザーから波長 632.8nm の光が射出されると、光は ND フィルタにより強度を弱められた後、spatial filter により波面が広げられる。広がった波面がレンズにより PID の受光面に焦点を結ぶ位置に、レンズと PID を位置させる。レンズと PID の間レンズのすぐ後方に、物体面マスクとしてのピンホールと、物体としての位相格子の三つの構成要素を互いに近接させて設置する。PID 受光面の直前には filter が置かれることがあり、filter により計測しない光強度を弱める。PID により計測された光強度分布情報はフレームごとにコンピュータに伝送され光子計数処理などがなされる。

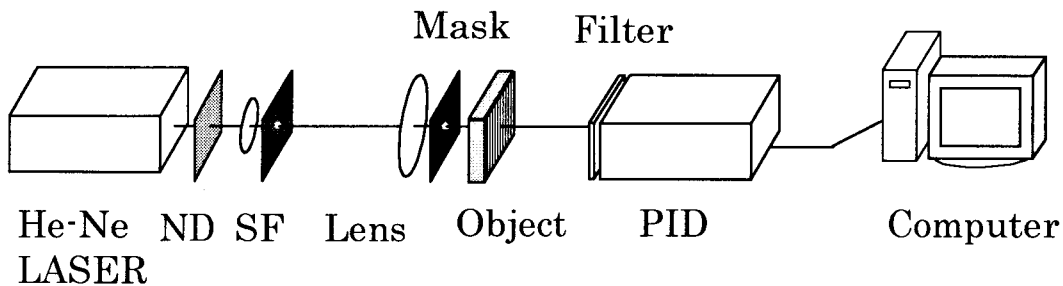


図 8 分割式測定光学系

SF: spatial filter, PID: photon-imaging detector

分割式撮像法の骨子は、ND フィルタによる光強度調整と filter による高強度部分削除である(図 9)。レーザー発信器直後に設置された ND フィルタ(図 8)により、全体の光強度が PID によって効率よく計測できる強度に調整される。全体の光強度が、図 9(a)においては 0 次回折光ピークに適した大きさに、図 9(b)においては 1 次回折光ピークに適した大きさに設定されている。図 9(b)のように 1 次回折光ピークに適した大きさに光強度が設定されていると、0 次回折光ピークが PID の測定限界を超える恐れがある。PID の測定限界を超える恐れがある部分の強度を、PID 計測面直前に置く filter により、PID の測定限界内に収まるよう弱めるなどして調整する。今回の計測における filter は、0 次回折光を遮断し 1 次回折光を遮断しない大きさに ND フィルタ (No. 2) を切り取りとることで作り、0 次回折光を遮断できる位置に設置した。

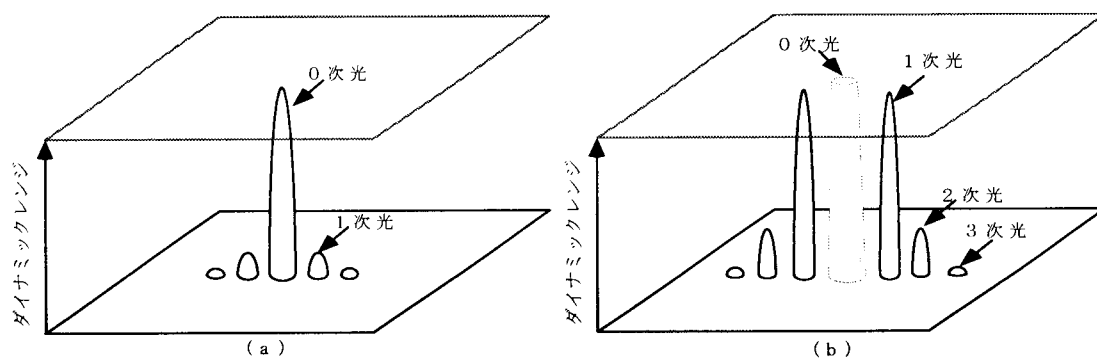


図 9 分割式撮像法による検出ピーク
(a) 0 次光をカットしない場合、(b) 0 次光をカットする場合。

計測結果

0 次回折光をカットしていない回折像強度分布と全体の光強度を大きくしかつ 0 次回折光をカットしている回折像強度分布の 2 つの分布を撮像した。撮像した強度分布を底が 10 の対数表示でそれぞれ、図 10(a)と図 10(b)にしめす。回折光ピークが並んだ断面の断面図をそれぞれ、図 11(a)と図 11(b)にしめす。0 次から 3 次回折光ピークの光子数の詳細を表 1 に示す

0 次回折光をカットしていない回折像強度分布の回折光ピーク光子数は、0 次回折光は 103336、1 次回折光 2 つはそれぞれ 1200 と 937、2 次回折光 2 つはそれぞれ 78 と 81 である。3 次回折光ピークは有為には計測できなかった。

0 次回折光をカットしている回折像強度分布の回折光ピーク光子数は、0 次回折光が ND フィルタ (No.2) により弱められ 29824、1 次回折光 2 つはそれぞれ 120422 と 115528、2 次回折光 2 つはそれぞれ 5220 と 2599、3 次回折光ピークは 1503 と 2013 である。

表 1 分割式測定回折像ピーク光子数

	0 次回折をカットなし		0 次回折光カット	
	左	右	左	右
0 次回折光	103336		29824	
1 次回折光	1200	937	120422	115528
2 次回折光	78	81	5220	2599
3 次回折光	40	60	1503	2013

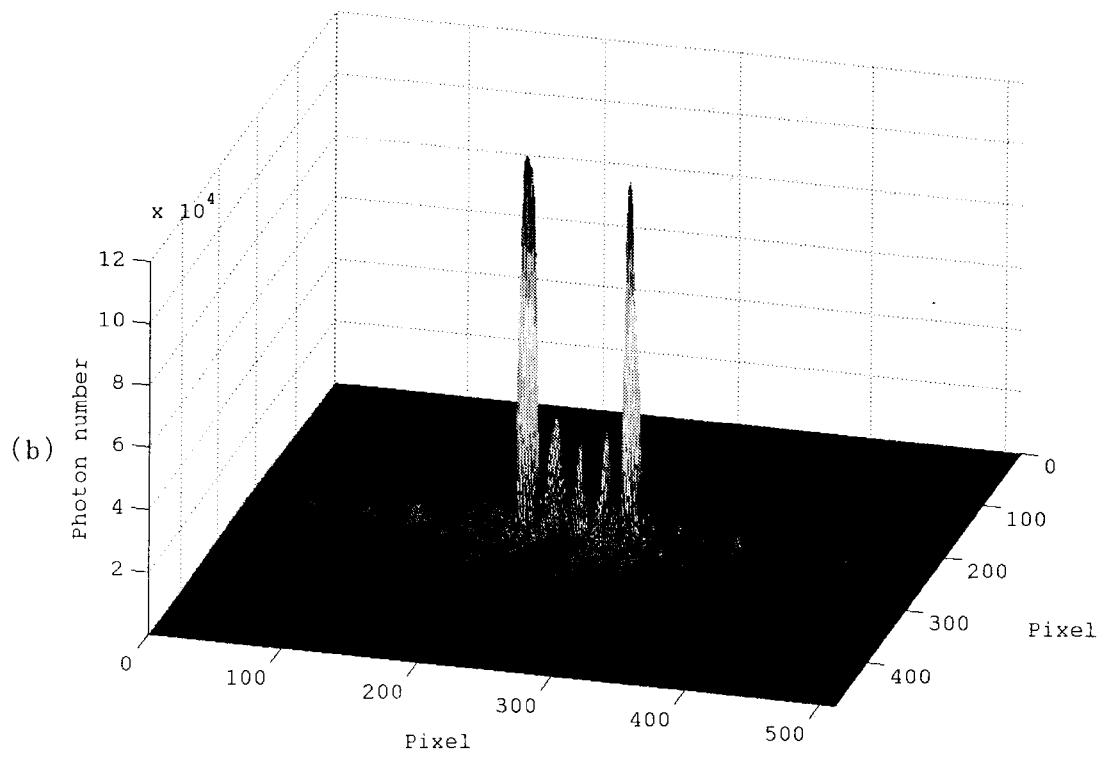
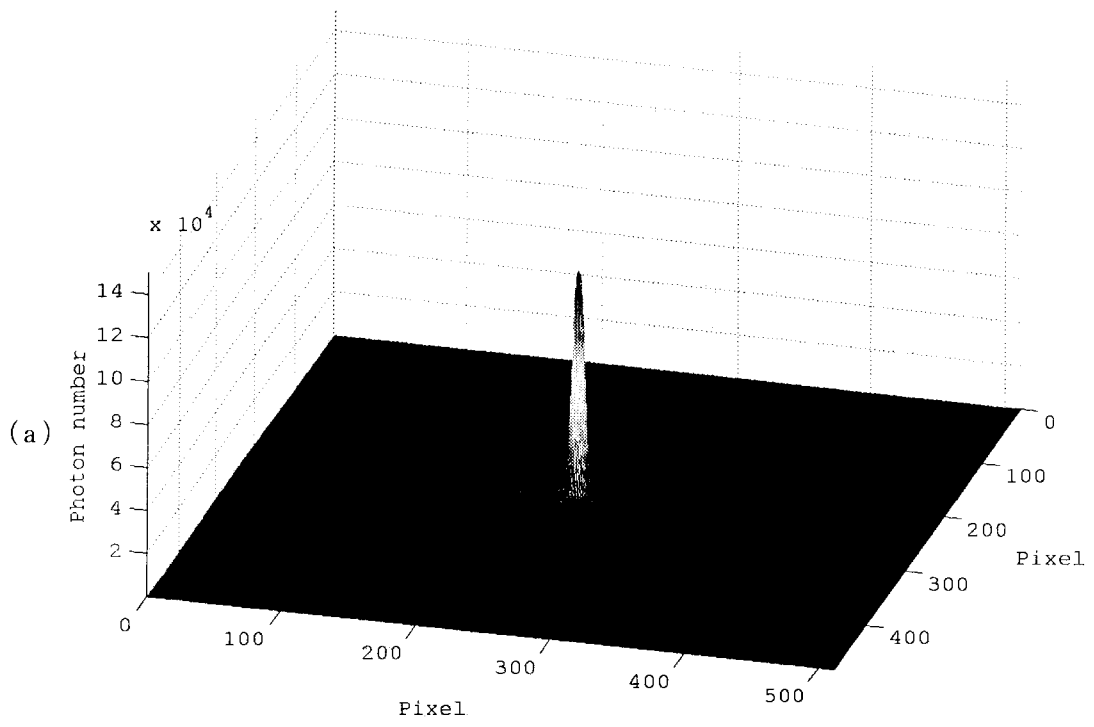
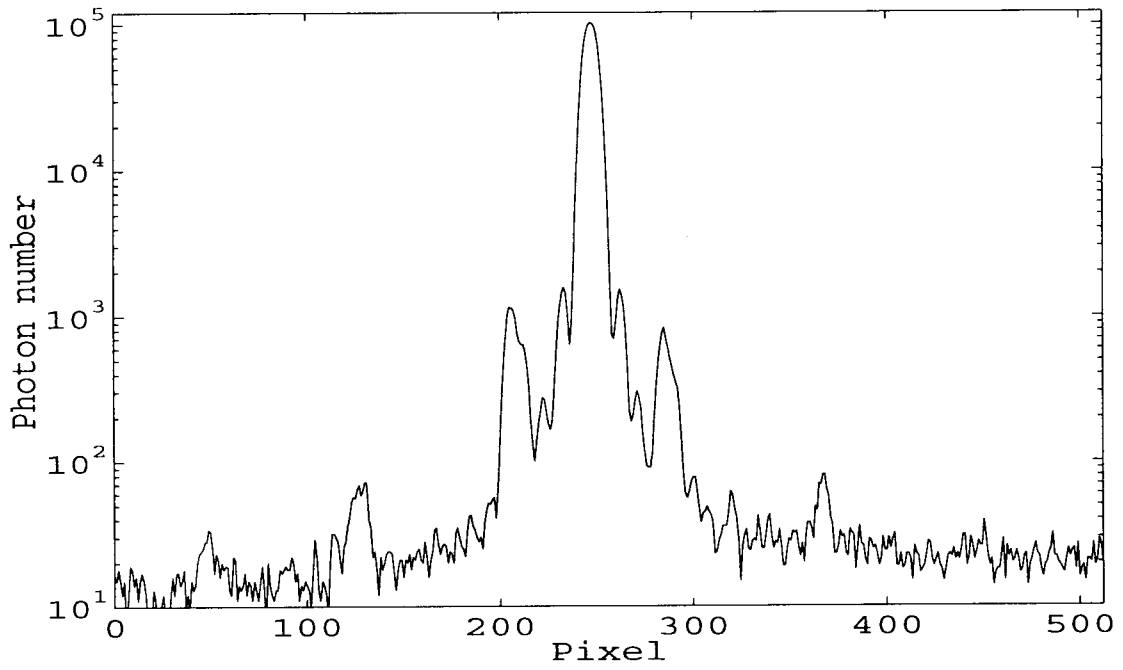
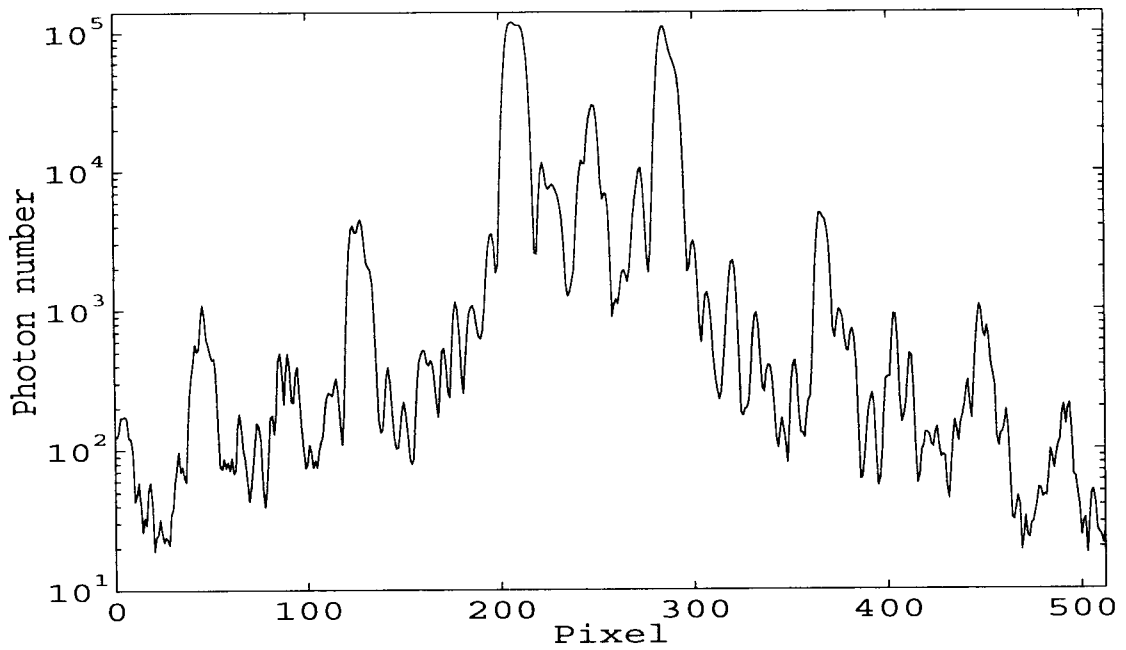


図 10 フラウンホーファ回折像強度分布
(a)0次光あり、(b)0次光カット



(a)



(b)

図 11 フラウンホーファ回折像強度分布断面図 対数表示
 (a)0次光カットなし、(b)0次光カットあり

画像合成

2つの像、低次回折光をカットしている像とカットしていない像、を互いのピーク強度を比較して得た情報をもとに1つの像にする。1つの像にすることで、1回の測定のみで得られる像より高いダイナミックレンジを得ることが見込まれる。低次回折光をカットしている像とカットしていない像2つの像を1つの像にする方法は、まず、低次回折光をカットしていない像とカットした像、両方の像に含まれる1次以上の高次回折光の強度比を得る。ピーク間の強度比により、2つの像の強度比を推定し、2つの像を1つの像に合成する。低次回折光をカットされた像のカットされた部分を、低次回折光をカットされていない像における対応する部分にその比例定数を乗じ置換する。

分割式撮像した2つの強度分布、低次回折光をカットしている像(図 10(b))とカットしていない像(図 10(a))、を互いのピーク強度を比較して得た情報をもとに1つの像にした(図 12)。10 の7乗近くのダイナミックレンジを得かつ3次回折光以上の高次回折光ピークの像を得た。

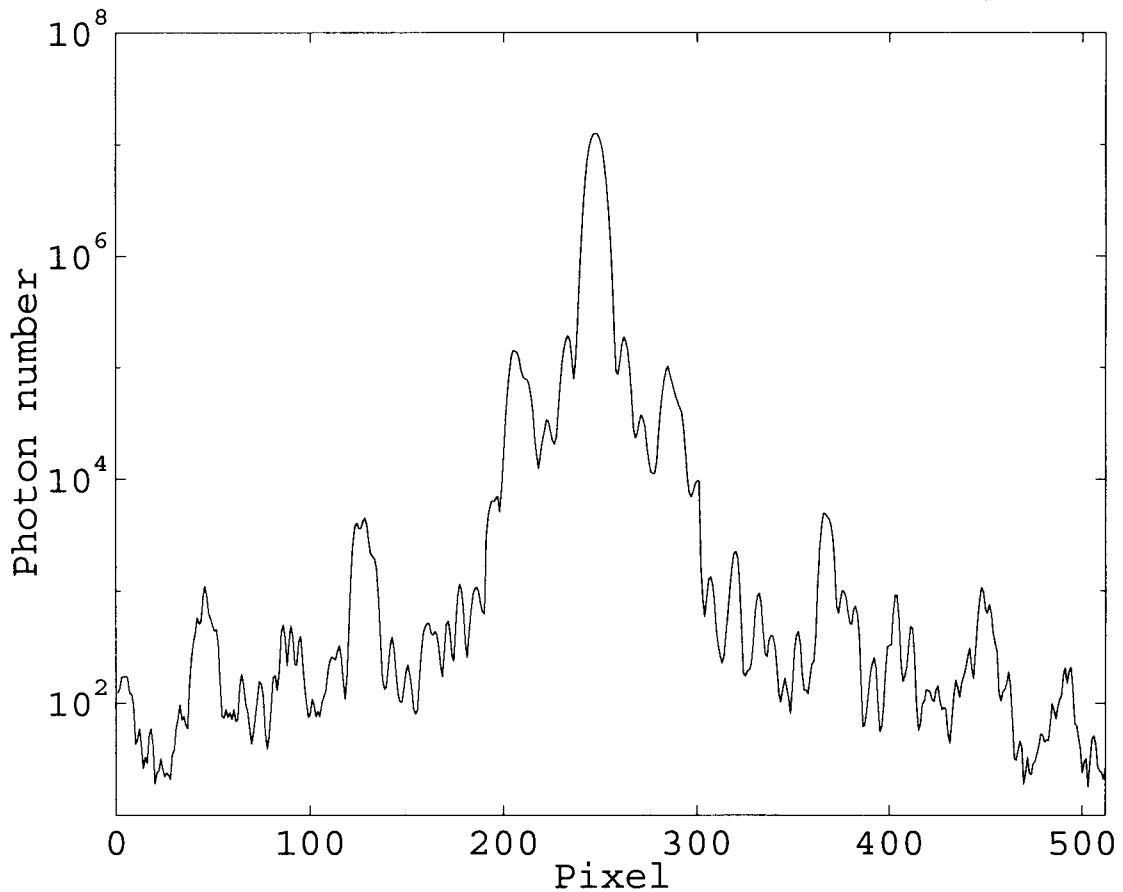


図 12 回折像画像処理後強度分布断面図 対数表示

2.2.3 ディテクタ位置シフト撮像法

分割式撮像法においても3次回折光までを撮像することができたが、位相分布をより正確に回復するには、より高次の回折光ピークを含んだ像を撮像することが望まれる。高次の回折光ピークは測定器の受光面の領域には納まらない広さに位置していることが多い。高次回折光ピークを含んだ像を撮像する手法として、ディテクタ位置シフト撮像法を採用した。

ディテクタ位置シフト撮像法を、ディテクタの位置を移動させ、その各位置で撮像し、別々に撮像した像の関係を考慮に入れて別々に撮像した像を一つの像に合成する撮像法とする。二段階に分けて詳述する。まず、ディテクタ位置シフト撮像法により2.1節に示した物体を撮像するために構築する光学系を示す。次に、撮像した回折像強度分布を示し、撮像した回折像強度分布を計算機処理により合成し、10の9乗近くのダイナミックレンジを得かつ8次回折光以上の高次回折光ピークの像を得られた過程を示す。

回折像強度分布計測光学系

物体のフラウンホーファ回折像を撮像するために構築する基本的な光学系(図13)は、ほぼ図8と同様である。図13に示す光学系が図8と異なる点は、PIDの受光面直前にfilterを設置しないことと、PIDの位置を光軸に垂直な平面でシフトさせ複数の像を撮像することである。

図4に示した物体位相分布の回折像ピークがPIDの受光面の幅を超えて広がっている時、PIDをシフトさせる方法を図14に示す模式図を用いてより詳しく述べる。図14において、まず、PIDにより、0次と1次回折光を含んだ強度分布を撮像する。つぎに、+1次と+2次回折光を含んだ像、+2次と+3次回折光を含んだ像というように、一つ次数の低い回折光ピークを含んだ回折像を撮像していく。-1次と-2次回折光を含んだ像、-2次と-3次回折光を含んだ像のように、0次光を挿んで反対側の回折像を撮像する際も同様である。ここで、光強度の設定は2.2.2節で述べたように、その像の中で一番強度の大きいピークにおいて正確な強度計測ができるように設定されている。

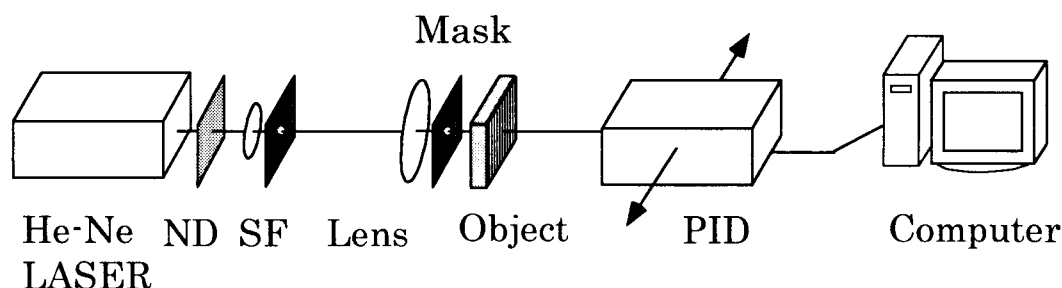


図13 ディテクタ位置シフト撮像法実験系

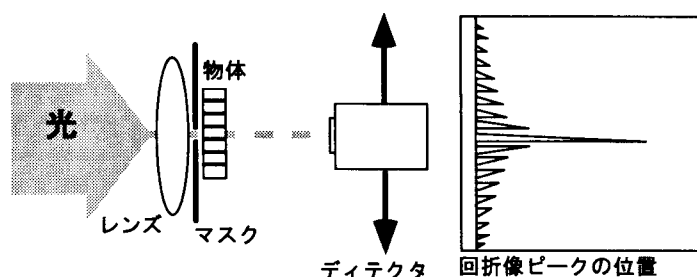


図14 ディテクタ位置シフト撮像法の模式図

計測結果

ディテクタ位置シフト撮像方により、複数の回折像ピークを含んだ像を6枚撮像した(図 15(a))。物体とPID間の距離を80mmにして撮像した。全体の光強度を最大強度の光子数が 10^4 乗程度になるように設定し、各々の像を撮像した。対応する回折像ピークをもとに横位置ピクセルをそろえて、一つのグラフに複数の回折像を示した(図 15(a))。複数の像を回折ピークの強度比を参考につなぎ合わせた。つなぎ合わせた結果を図 15(b)に示す。高次回折光になるほどピーク間の強度比が小さくなった。 10^9 乗近くのダイナミックレンジを得た。8次回折光以上の高次回折光ピークを確認できる。

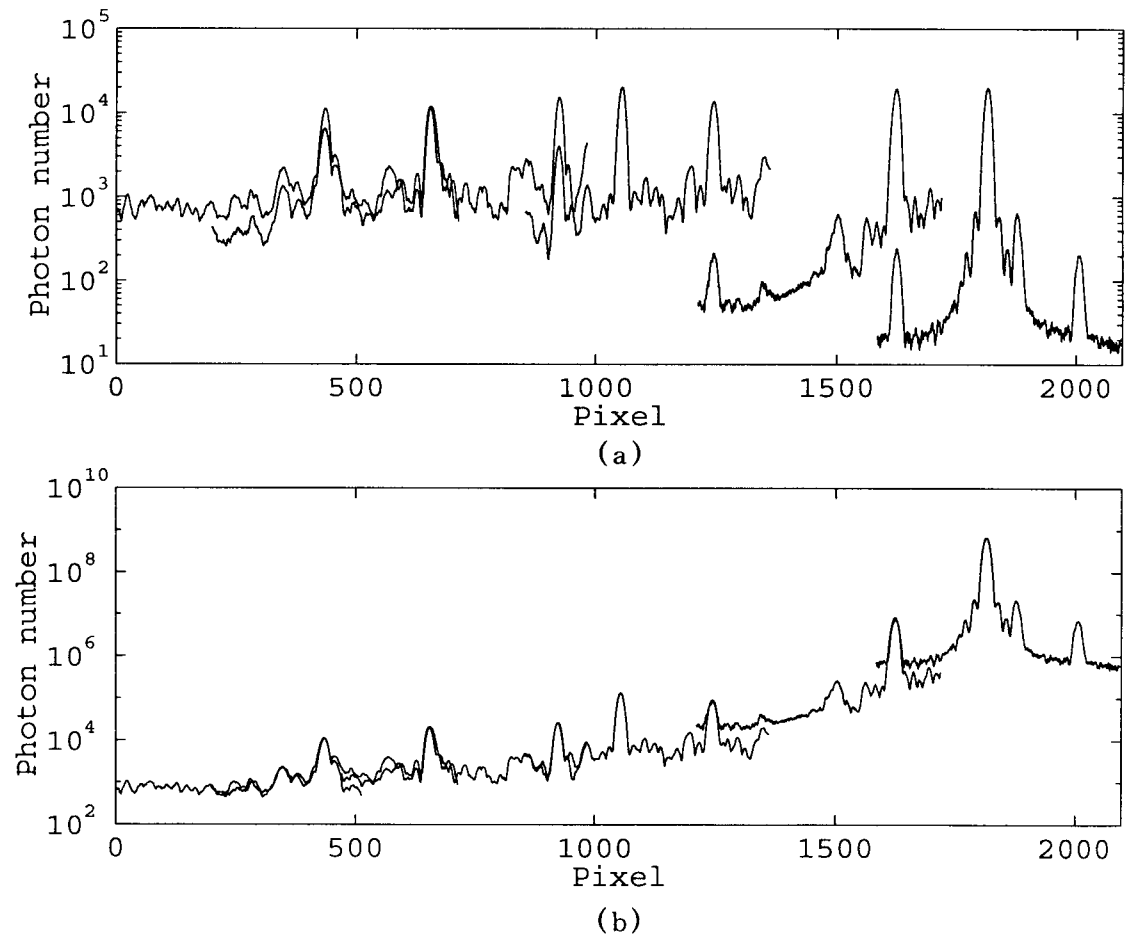


図 15 フラウンホーファ回折像強度分布断面図 対数表示
(a)計測強度、(b)処理後強度分布

2.3 位相回復

撮像したフーリエ面強度分布をもとに IFTA により物体面位相分布を回復する。拘束条件として、フーリエ面における拘束条件は 2.2.2 項で述べた分割式撮像法により計測した回折像強度分布を、物体面における拘束条件はマスク条件を採用する。

2.3.1 計測強度分布前処理

回折像強度分布の情報を位相回復に適した情報に計算機処理により変換する。回折像強度分布の生情報はデジタル情報として得られる。デジタル情報であることから計算機処理を容易に行うことができる。IFTA においては FFT を高速に繰り返し適用するため、フーリエ面におけるピクセル数を縦横とも 2 の累乗にする。縦は 128 ピクセル、横は 512 ピクセルにした。また、0 次回折光のピーク位置を強度分布行列の中心に置くことにより、回復位相分布の傾きを防ぐ。強度分布の正の二乗根をとることにより、フーリエ面の拘束条件としてフーリエ面振幅分布を得る(図 16)。

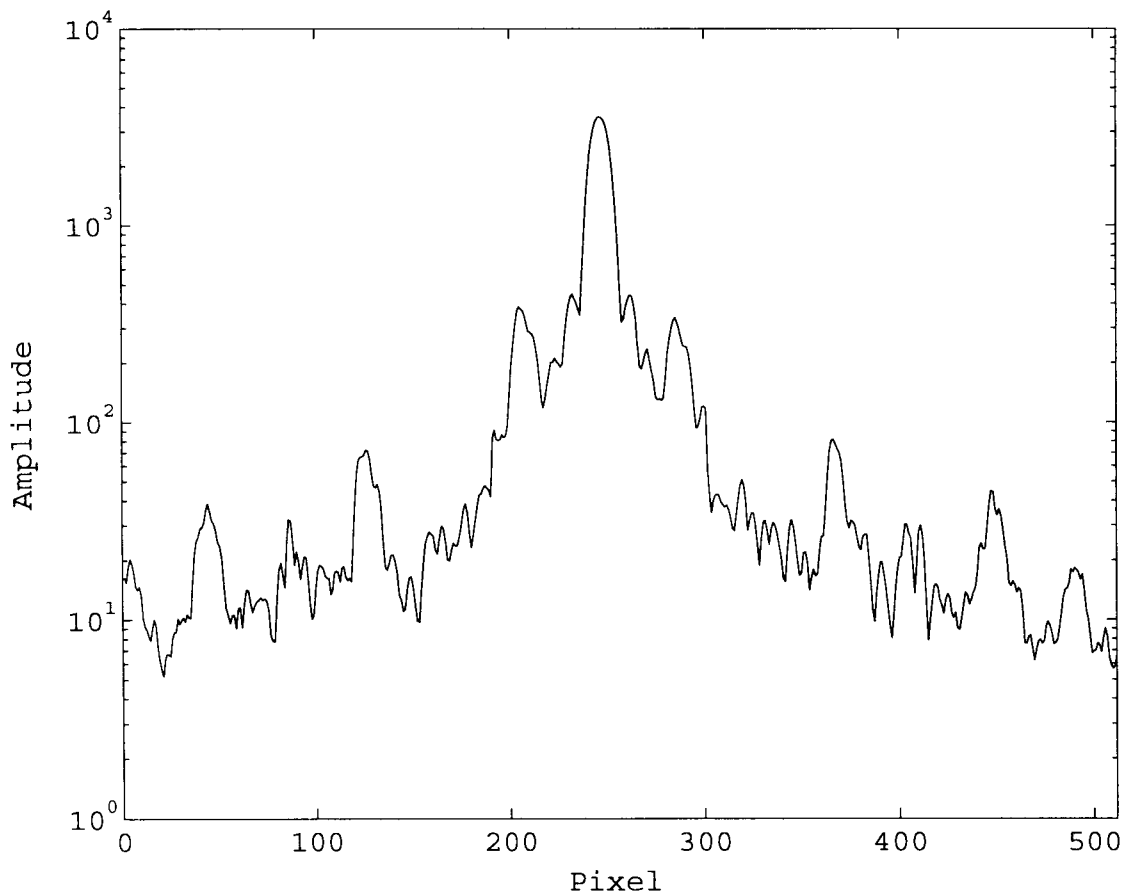


図 16 フーリエ面拘束条件としての振幅分布

2.3.2 物体面マスク条件

物体面における拘束条件として物体面マスク条件を設定する方法を示す。物体面とフーリエ面の間の標本定理より、物体面のマスクを決定する。フーリエ面における標本間隔はPIDのピクセル間距離として縦 $19.67 \mu\text{m}$ 、横 $24.80 \mu\text{m}$ 、光の波長 632.8nm 、焦点距離を 50mm とすると、物体面での標本間隔は縦 $3.49 \mu\text{m}$ 、横 $8.80 \mu\text{m}$ となっている。物体面にマスクとして設置した円形ピンホールの直径が $200 \mu\text{m}$ であるので、物体面マスクは直径を横軸 80 ピクセル、縦軸 31 ピクセルの楕円と推測される。

2.3.3 反復計算

物体面とフーリエ面における拘束条件をもとに IFTA による反復計算から物体の位相分布を回復する。今回は IFTA として 200 回のループを繰り返した。200 回のループを具体的に示すと、HIO をパラメータ $\beta=0.5$ として 150 回反復した後、ER を 50 回反復した。反復計算は UNIX OS 上で行列計算ソフト MATLAB (MathWorks) により計算した。反復計算に用いた MATLAB 用計算プログラムを“付録：計算機プログラム”の中の“iterHEy.m”に示す。MATLAB により 200 回のループを一度実施し終了するまでに要する時間は、平均して 8 分前後であった。

MATLAB 計算機プログラム“iterHEy.m”によりなされる計算は、IFTA の 200 回ループを、物体面マスク条件を変数にして、何度も繰り返す計算である。物体面マスク条件を直径横軸 74 ピクセル、縦軸 34 ピクセルの楕円としたとき、IFTA による反復計算におけるエラー (式 8) の変化を図 17 に示す。横軸がループの回数であり、縦軸がエラーの値である。エラーの値が 1 付近から 0.1 付近にまで単調に減少していくのが見て取れ、収束していることがわかる。

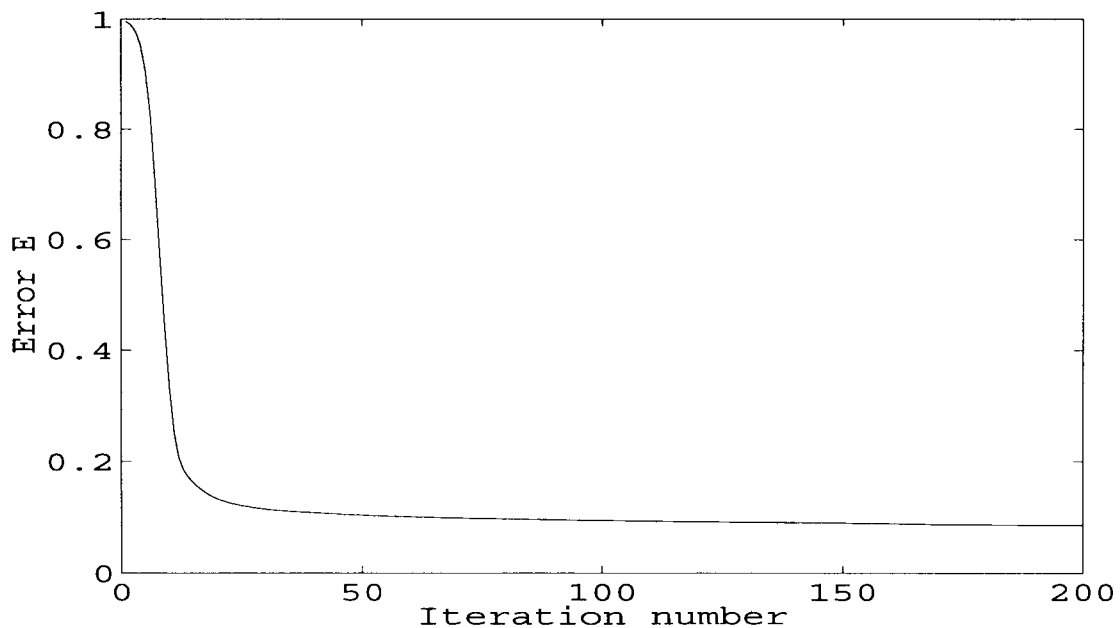


図 17 エラー：HIO150回、ER50回

第3章 結果

3.1 回折像強度分布計測結果

2種類の方法、分割式撮像法とディテクタ位置シフト撮像法により弱位相物体のフラウンホーファ回折像を計測した。計測できたダイナミックレンジは、分割式撮像法により3次回折光ピークを含む 10^7 のダイナミックレンジで、ディテクタ位置シフト撮像法により8次回折光ピークを含む 10^9 のダイナミックレンジである。

3.2 位相回復結果

3次回折光ピークを含む回折光強度分布をもとにIFTAにより、物体の位相分布を回復した。回復した位相分布に $2\pi/32$ 程度の位相差の段差があり、この位相差は物体面に設置した位相格子の位相差と同等である。回復した位相分布の段差の間隔が10ピクセル程度であり、この段差の間隔は物体面に設置した位相格子の格子間隔と同等である。よって、回折光強度分布をもとにIFTAにより、物体の位相分布を回復したと考えられる。

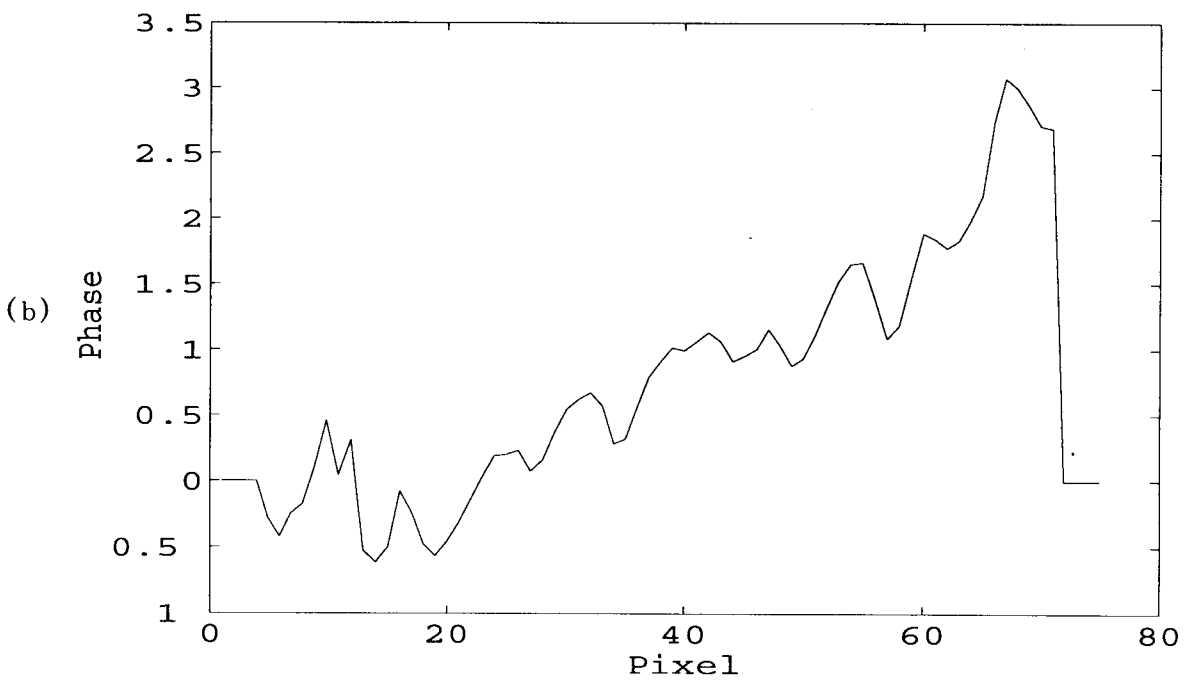
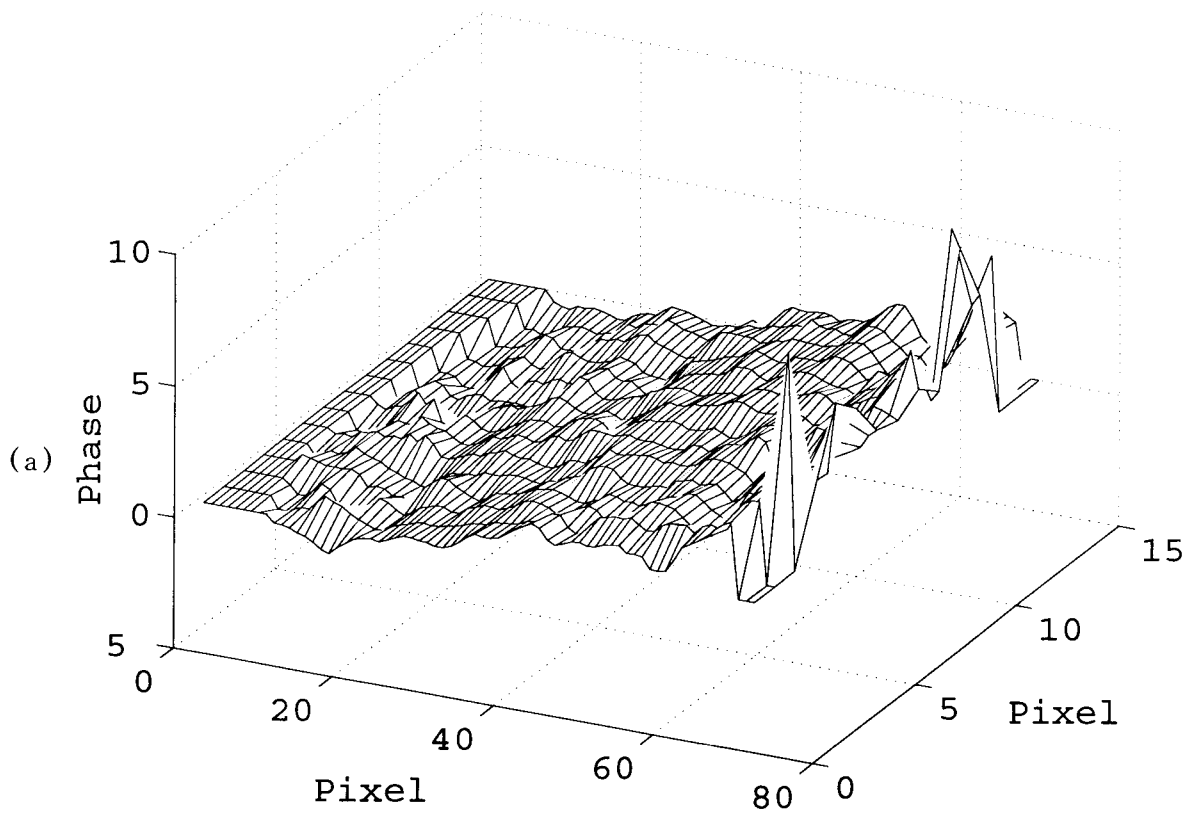


図 18 回復位相分布
 (a)物体面マスク内、(b)断面図

第4章 考察

計測した方法、計測したデータに IFTA 前に行った処理方法、前処理したデータに行った位相回復方法について考察する。

4.1 計測方法

物体回折像強度分布を PID により計測する方法で、9 次回折光に及ぶ高次回折光を測定できることを確認できた。問題点は、回折像のダイナミックレンジが大きい場合や回折像ピーク間の距離が大きい場合、一度の撮像では必要な情報が得られないことにある。回折像のダイナミックレンジが光強度測定器のダイナミックレンジを超える場合は、回折像の一部を遮ることや光強度を変えることを適宜行いながら数度にわたり計測する必要がある。回折像ピーク間の距離が大きい場合は、高次のピークを含む像を撮像するには計測機器の受光面の大きさが足りず、より広い計測面を得るために計測器を動かすなどの作業を適宜行いながら数度にわたり計測する必要がある。より高次のピークを含む回折光を高いダイナミックレンジでより簡単な計測方法により計測することが望まれる。

4.2 前処理方法

計測情報を、位相回復を行うに適した情報に変換する処理にも工夫が必要である。最大ピークを像行列の中心に置く処理を今回行った。それ以外にも、回折像計測の際の諸条件を鑑みて前処理を行う必要があると考えられる。

4.3 位相回復方法

今回採用した位相回復方法は HIO の後に ER を行う方法であった。位相回復方法に HIO の後に ER を行う方法を採用した理由は、過去の計算機実験の結果と冷却 CCD ディテクタによる計測実験の結果からこの方法の有効性を見出したからである。HIO の後に ER を行う方法が、PID により今回の方法で計測された情報に一番適していたかどうかを今後検討する余地があると考えられる。

今回採用した位相回復の初期値はランダム位相であった。初期値としてランダム位相を採用した理由は、初期値により回復される位相が異なってくることを考慮して初期値に任意性を持たせるためである。初期値を解に近い分布にすると解に収束しやすくなることを考慮すると、初期値として入力する位相をどのような分布にすると解に収束しやすいかを今後検証する必要があると考えられる。

第5章 結論

本研究ではフーリエ面強度分布を光子計数により高精度に計測し、計測されたデータを元に物体位相を回復し、光子計数からの IFTA による位相回復方法と効果を検証した。光子単位でフーリエ面強度分布を計測することで8次の回折ピークを含んだ回折光強度分布を測定した。測定した3次回折ピークを含む強度分布からピクセル数 512×128 の強度分布をとりだし、そのデータをもとに物体面位相分布を回復した。

参考文献

- 1 中村 収、河田 聡：“日本分光学会測定法シリーズ 38 超解像の光学”、株式会社 学会出版センター (1999).
- 2 J. R. Fienup：“Phase retrieval algorithms：a comparison,” *Appl. Opt.*, 21 (1982) 1758-1769.
- 3 大頭仁、高木康博：“テレビジョン学会教科書シリーズ 2 基礎光学—光の古典論から量子論まで”、株式会社 コロナ社(2000).
- 4 谷田貝豊彦：“現代人の物理 5 光とフーリエ変換”、株式会社 朝倉書店(1992).
- 5 小松進一、他：“フーリエ反復法に基づく超感度位相回復顕微鏡”科学研究費補助金一般研究 (B) (04452107)研究成果報告書(1995)
- 6 S. Komatsu and J. C. Dainty：“Estimation of a 2D phase distribution using a Fourier iteration method: Effect of the number of quantization levels and minimum detectable level,” *Appl. Opt. Dig.* (1990) 293-294.
- 7 小柳 晴樹、日隈 薫、小松 進一：“フーリエ反復アルゴリズムを用いた二次元位相回復顕微鏡”、*光学*、25 (1996)、416-420
- 8 Yohei kamura, Shinichi Komatsu：“Phase retrieval Microscope for quantitative Imaging of a weak phase object,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37 (1998), 6018-19.
- 9 “ARGUS-50 基本ソフトウェア取扱説明書 Virsion 3.5,” 浜松フォトニクス.
- 10 “フォトンカウンティング ICCD カメラ C2400-30 シリーズ取扱説明書,” 浜松フォトニクス (1998).

背景：位相回復研究の流れ

●理論面

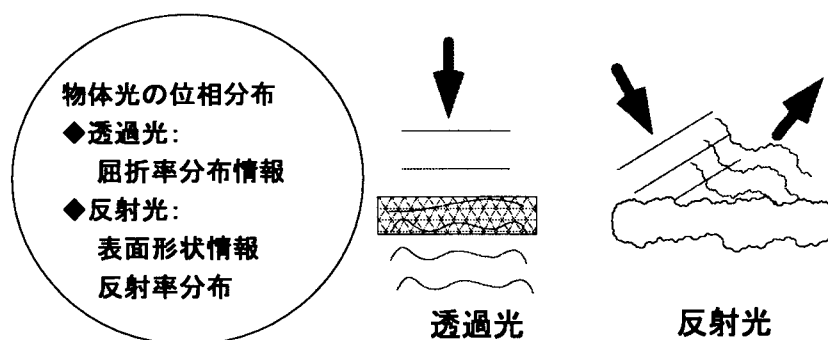
- ・フーリエ反復法が位相回復に効果的。
- ・高いダイナミックレンジが回復精度を高める。

●実験面

1. 高いダイナミックレンジで計測してきた。
(CCDカメラ、冷却CCDカメラ)
2. より高い精度での位相回復を目指してきた。
(1次回折光、 128×128 ピクセル)

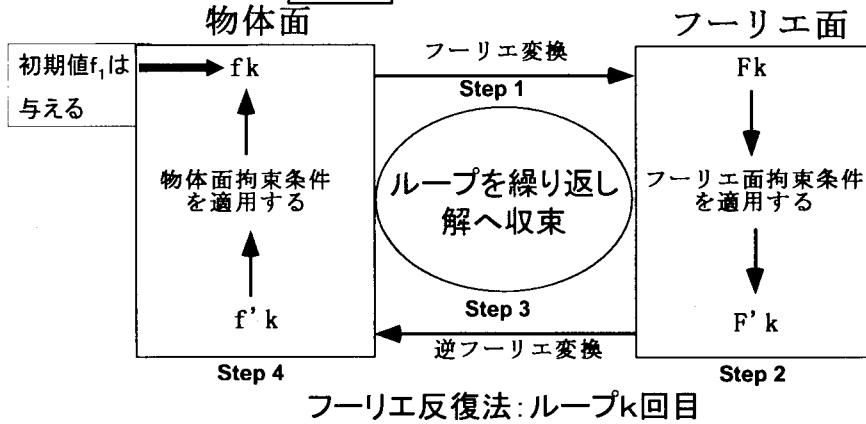
背景：位相回復問題

拘束条件(フーリエ面回折像振幅分布、物体面マスク条件など)から、物体面における位相分布を求める問題。



背景: フーリエ反復法

拘束条件(フーリエ面回折像振幅分布、物体面マスク条件など)から、物体面における位相分布を**求める**問題。



背景: フーリエ反復法

拘束条件(フーリエ面回折像振幅分布、物体面マスク条件など)から、物体面における位相分布を**求める**問題。

Error Reduction algorithm (ER)
Hybrid Input Output algorithm (HIO)

拘束条件

フーリエ面: 振幅分布 $|F(u)|$

$$\text{STEP1. } F^1(u) = |F^1(u)| \exp[i\varphi^1(u)] = F[f^1(x)]$$

$$\text{STEP2. } F^2(u) = \frac{|F^2(u)|}{|F^1(u)|} F^1(u) = |F(u)| \exp[i\varphi^1(u)]$$

$$\text{STEP3. } f^2(x) = |f^2(x)| \exp[i\theta^2(x)] = F^{-1}[F^2(u)]$$

$$\text{STEP4. } f^2(x) = \begin{cases} f^2(x) & , x \notin \gamma \\ 0 & , x \in \gamma \end{cases} \quad (\text{ER})$$

$$\text{STEP4'. } f^2(x) = \begin{cases} f^2(x) & , x \in \gamma \\ f^1(x) & , x \notin \gamma \end{cases} \quad (\text{HIO})$$

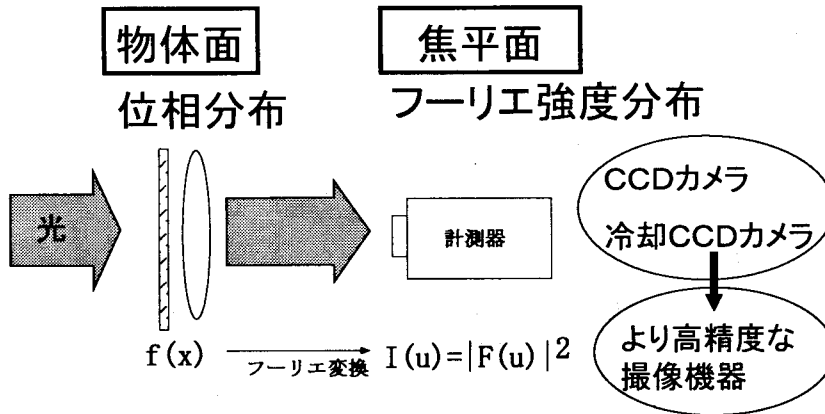
エラー関数

$$E_{ok} = \sqrt{\frac{\sum_{x \in \gamma} |f'_k(x)|^2}{\sum_x |f'_k(x)|^2}}$$

γ : サポート外領域
 x, u : 平面位置座標

背景：フーリエ強度分布計測

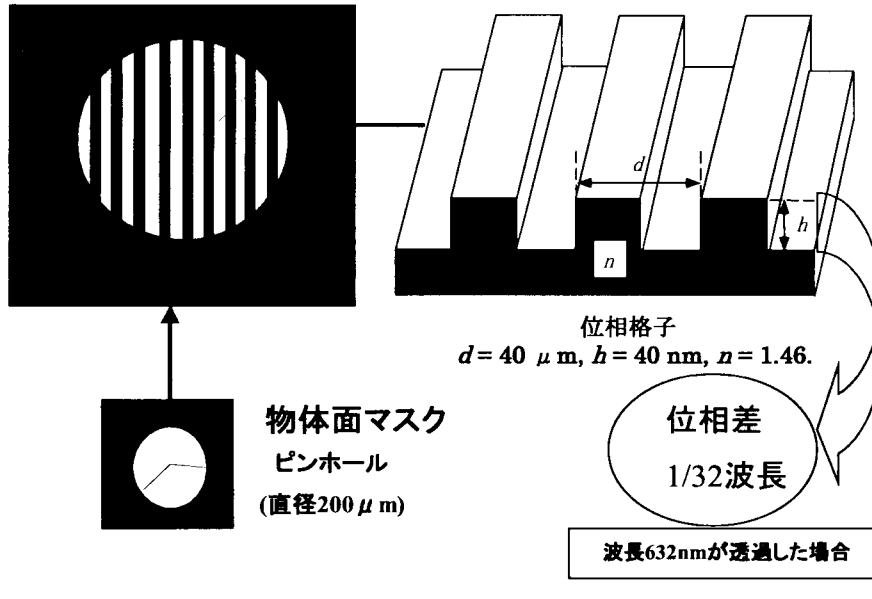
拘束条件 (フーリエ面回折像振幅分布、物体面マスク条件など) から、物体面における位相分布を求める問題。



方法

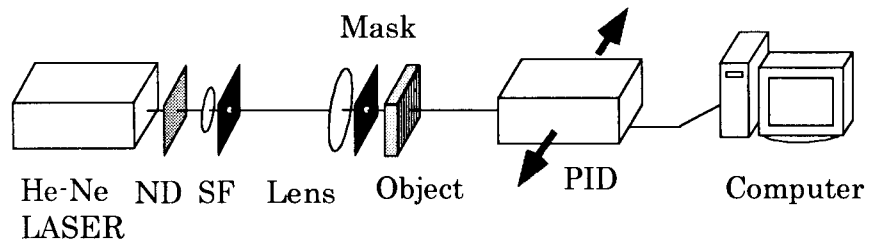
1. 弱位相格子を物体面に設置し、弱位相物体の回折光強度分布を光子単位で測定する。
 - ・ 2つの計測方法を試みる。
 - { デテクタ位置シフト測定方法
 - { 分割式測定方法
 - ・ 2次回折光より高次を計測する。
2. 128 × 128ピクセル以上のデータより物体の位相分布をフーリエ反復法によって回復する。

計測：物体面位相分布



計測：回折像強度分布計測光学系

ディテクタ位置シフト測定方法

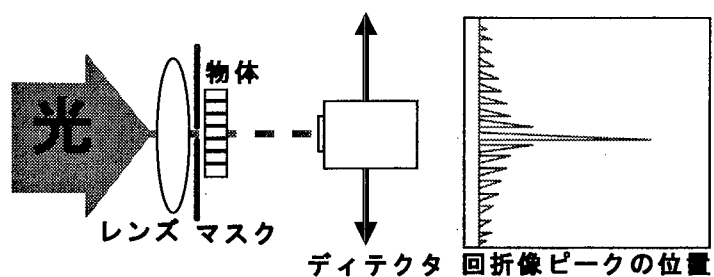


He-Ne: ヘリウムネオンレーザー ND: NDフィルタ

SF: 空間フィルタ Mask: ピンホール(直径 $200\ \mu\text{m}$)

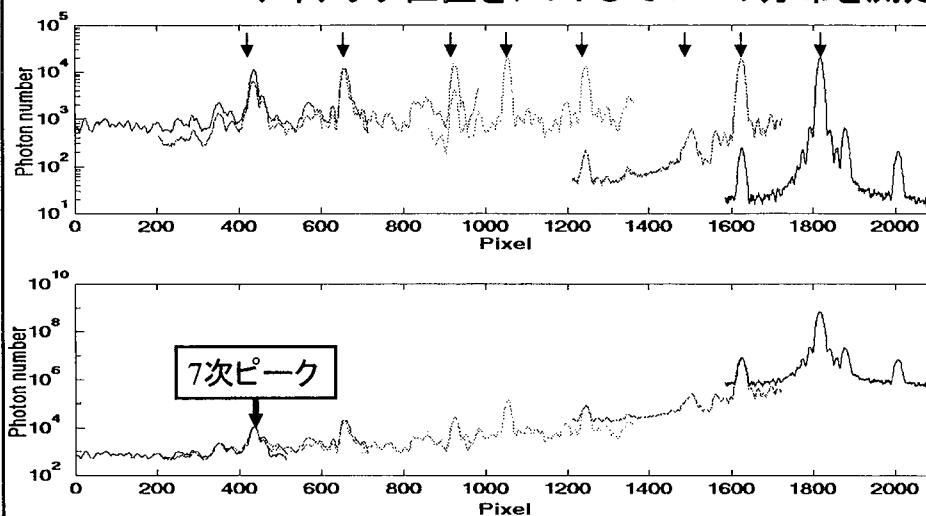
Object: 弱位相板 PID: Photon imaging detector ,ICCDカメラ

計測1: ディテクタ位置シフト



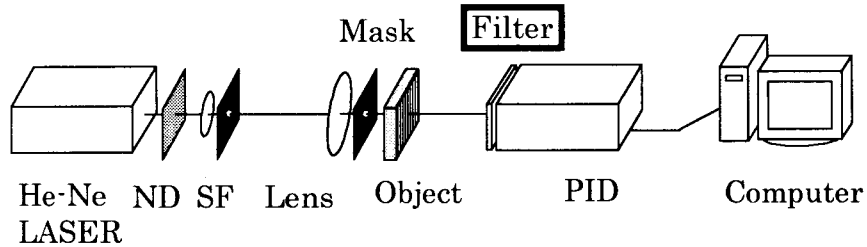
計測1: 計測したフーリエ強度分布

ディテクタ位置をシフトして6つの分布を測定



計測：回折像強度分布計測光学系

分割式測定方法



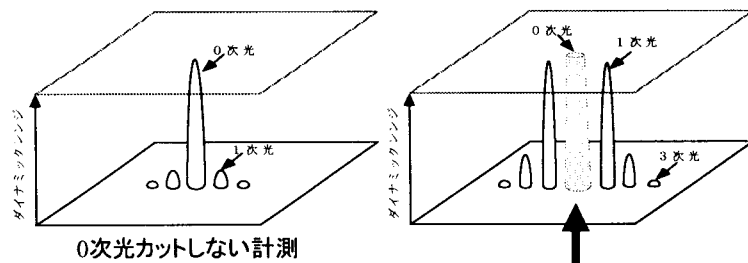
He-Ne: ヘリウムネオンレーザー ND: NDフィルタ

SF: 空間フィルタ Mask: ピンホール(直径200 μ m)

Object: 弱位相板 PID: Photon imaging detector ,ICCDカメラ

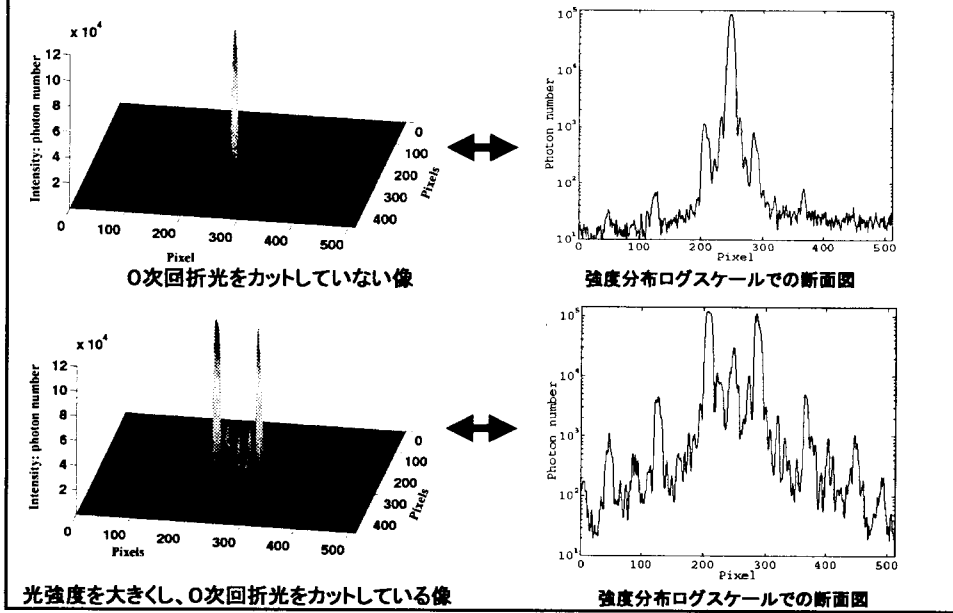
計測2：低次回折光カット

分割式測定方法

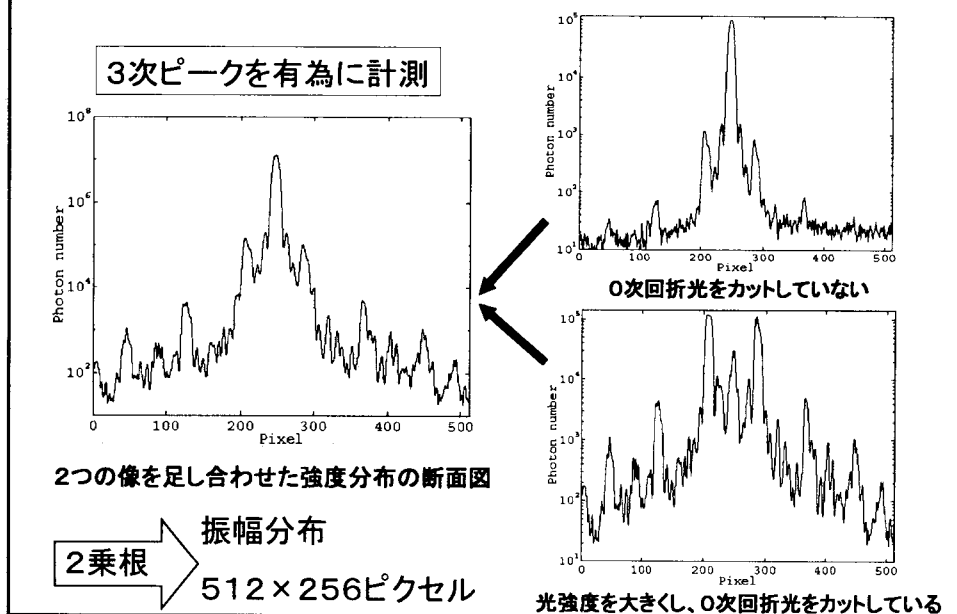


フィルタにより0次光をカットした状態で、
全体の強度を大きくする

計測2: 低次回折光カットによる計測



計測2: 回折光強度分布の足し合わせ

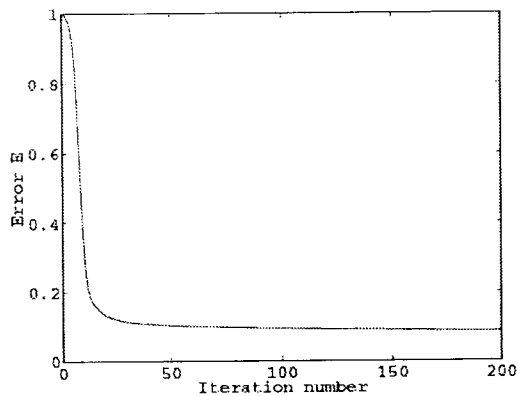


回復: フーリエ反復法エラーの変化

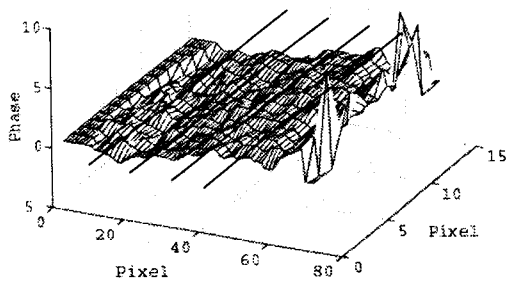
HIO 150回 ($\beta = 0.5$)
ER 50回

エラー関数

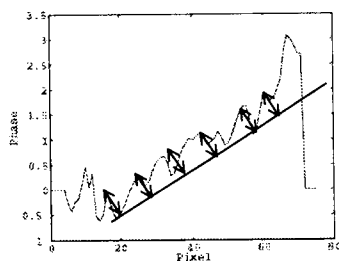
$$E_{ok} = \sqrt{\frac{\sum_{x \in \gamma} |f'_k(x)|^2}{\sum_x |f'_k(x)|^2}}$$



結果: 回復物体位相分布



回復物体位相分布物体マスク内



回復物体位相分布の断面図

結論

- 弱位相物体のフーリエ強度分布を光子単位で測定する方法により、7次ピークまでを有為に計測できた。
- 3次ピークを含むフーリエ強度分布からフーリエ反復法により、物体の位相分布を回復した。

今後、より高周波数成分を含んだフーリエ面強度分布から位相回復することが望まれる。

第3部

資料集

本研究課題の成果のうち、現在までに出版物に発表されたものを添付する。

資料 1:

Y. Kamura and S. Komatsu: Phase Retrieval Microscope for Quantitative Imaging of a Weak Phase Object, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, No.11, 6018-6019 (1998), 1998年 11月

資料 2:

S. Ohno and S. Komatsu: Image Restoration and Object Distance Evaluation from a Defocused Photon Image, Proc. SPIE, Vol. 4416, 412-415 (2001), 2001年 6月

資料 3:

Y. Nakashima, M. Hattori and S. Komatsu: Phase Retrieval Microscope Using Photon Imaging Detector, Tech. Dig. , MOC'01, Osaka, Japan, 270-273 (2001), 2001年 10月

資料 4:

大野慎也、小松進一：フォトンカウンティング撮像した焦点はずれ劣化像の回復と物体距離推定、Optics Japan 2000 (日本光学会年次学術講演会)予稿集、41 - 42 (2000), 日本光学会(応用物理学会), 2000年 10月, (7aC6)

資料 5:

中島悠輔、服部雅之、小松進一：高感度光子計數位相回復顕微鏡、Optics Japan 2000 (日本光学会年次学術講演会)予稿集、85 - 86 (2000), 2000年 10月, (7pB7)

資料 1:

Y. Kamura and S. Komatsu: Phase Retrieval Microscope for Quantitative Imaging of a Weak Phase Object, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, No.11, 6018-6019 (1998), 1998 年 11 月

Reprinted from

Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 37 (1998) pp. 6018–6019

Part 1, No. 11, November 1998

©1998 Publication Board, Japanese Journal of Applied Physics

Phase Retrieval Microscope for Quantitative Imaging of a Weak Phase Object

Yohei KAMURA¹ and Shinichi KOMATSU^{1,2}

¹*Department of Applied Physics, Waseda University, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan*

²*Materials Research Laboratory for Bioscience and Photonics, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan*

Phase Retrieval Microscope for Quantitative Imaging of a Weak Phase Object

Yohei KAMURA^{1,*} and Shinichi KOMATSU^{1,2}

¹Department of Applied Physics, Waseda University, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

²Materials Research Laboratory for Bioscience and Photonics, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

(Received July 8, 1998; accepted for publication September 9, 1998)

Optical phase retrieval using the iterative Fourier transform algorithm has long been believed inadequate for the quantitative imaging of weak phase objects, but in this letter it is shown to be greatly improved by introducing the preprocess of Fourier intensity data as well as by adopting a cooled charge coupled device (C-CCD) camera to record the data. The preprocess consists of the addition of multiple data, the sensitivity correction of the C-CCD camera, and the modification of the Fourier intensity data with a Wiener optimal filter. The phase distribution of a very weak phase object (maximum path difference of $\lambda/32$) is experimentally retrieved fairly well.

KEYWORDS: phase retrieval, laser microscope, optical measurements, information optics, image science

The iterative Fourier transform algorithm is a useful phase retrieval method. With this method, the phase distribution of a transparent object is retrieved from the measured intensity of its Fraunhofer diffraction pattern $|F(\mathbf{u})|^2$, where $F(\mathbf{u})$ is the Fourier transform of the amplitude transmittance $f(\mathbf{x})$ of the object. In each loop of this algorithm, an estimated amplitude transmittance of the object is Fourier transformed and is imposed as the Fourier domain constraint, the obtained function is then inverse Fourier transformed and is imposed as the object domain constraint, and these procedures are iterated until the algorithm converges.¹⁾

In contrast with interferometric or holographic methods, the phase retrieval method requires no reference wave, therefore the experimental setup can be considerably simplified, and the accuracy of the measurement is not limited by the imperfectness (error) of the reference mirror. Furthermore, since quantitative phase distributions can be obtained, this method is also suitable for precise profile measurement.

However the phase retrieval method has long been believed inadequate especially for the measurement of small phase distributions.¹⁾ It has been shown that the accuracy of the retrieved phase distribution greatly depends on the dynamic range of the measured Fourier intensity $|F(\mathbf{u})|^2$, and that a dynamic range of 8192 (13 bit) is needed to obtain an accuracy of $\lambda/100$ while ordinary 8 bit digitizing (256 levels) gives a rather poor accuracy of $\lambda/5$.²⁾

Adopting a cooled charge coupled device (C-CCD) camera, we actually obtained Fourier intensity data with such dynamic range. We succeeded in imaging a weak phase object with a maximum path difference of $\lambda/32$, but the retrieved image was somewhat noisy.³⁾

In this letter, we explain some additional processes introduced to measure the phase distribution more accurately and to obtain a quantitative image of the weak phase object.

The first process involves the summing up J frames of Fourier intensity data. Assuming that the j -th measured Fourier intensity data $I_j(\mathbf{u})$ consists of true Fourier intensity $I_o(\mathbf{u})$ and additive noise $N_j(\mathbf{u})$, the summed up Fourier intensity data $I_s(\mathbf{u})$ is denoted as

$$I_s(\mathbf{u}) = \sum_{j=1}^J I_j(\mathbf{u}) = \sum_{j=1}^J [I_o(\mathbf{u}) + N_j(\mathbf{u})]$$

$$= JI_o(\mathbf{u}) + \sum_{j=1}^J N_j(\mathbf{u}). \quad (1)$$

The signal-to-noise ratio of $I_s(\mathbf{u})$ is larger than that of $I_j(\mathbf{u})$ (for $j = 1, 2, \dots, J$) because of the randomness of $N_j(\mathbf{u})$.

$$\frac{J \int I_o(\mathbf{u}) d\mathbf{u}}{\left| \sum_{j=1}^J \int N_j(\mathbf{u}) d\mathbf{u} \right|} > \frac{\int I_o(\mathbf{u}) d\mathbf{u}}{\left| \int N_j(\mathbf{u}) d\mathbf{u} \right|}, \quad (2)$$

for $j = 1, 2, \dots, J$.

The second process involves the correction of sensitivity of the C-CCD. Unevenness of the sensitivity coefficient is corrected at each pixel.

The third process involves the adopting the Wiener optimal filter (WOF).⁴⁾ Although the Fourier amplitude $|F(\mathbf{u})|$ used as the Fourier domain constraint is usually related to the Fourier intensity as

$$|F(\mathbf{u})| = [I(\mathbf{u})]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

in this letter we use the filtered form,

$$|F(u, v)| = \frac{[I(u, v)]^{v+\frac{1}{2}}}{[I(u, v) + \alpha_1 u^{2m_1} + \alpha_2 v^{2m_2}]^v}. \quad (4)$$

where (u, v) denotes \mathbf{u} , and $\alpha_1, \alpha_2, m_1, m_2$ and v are adjustable parameters.

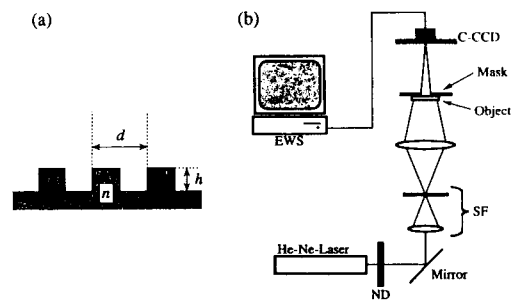


Fig. 1. (a) Phase grating used as an object. $d = 40 \mu\text{m}$, $n = 1.46$ and $h = 40 \text{ nm}$. (b) Experimental setup of a phase retrieval microscope; EWS: engineering workstation, C-CCD: cooled CCD camera, SF: spatial filter, ND: ND filter. Recorded multiple Fourier intensity data is directly saved in EWS.

*E-mail address: kamura@opt.phys.waseda.ac.jp

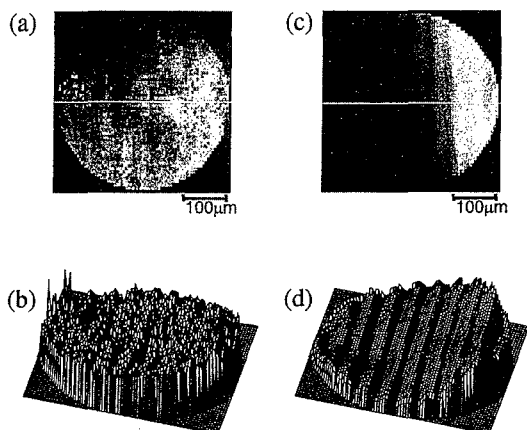


Fig. 2. The images of the retrieved phase from type A amplitude are shown in (a) and (b). The images of the retrieved phase from type B amplitude are shown in (c) and (d). (a) and (c) are plane images, (b) and (d) are bird's eye view images.

Figure 1(a) shows a profile of a part of the phase grating used as an object, whose pitch d , refractive index n , and thickness h are $40 \mu\text{m}$, 1.46, and about 40 nm respectively. Accordingly, when a light wave (wavelength: λ) passes through this grating, a path difference of about $\lambda/32$ (phase difference 0.06π) is generated. Figure 1(b) shows an experimental setup of the present phase retrieval microscope. A pinhole, of diameter $400 \mu\text{m}$, is used as a mask to limit the extent of the object field. The Fraunhofer diffraction pattern of the object is recorded with the C-CCD, and the recorded data digitized in 12 bits are transferred to and saved in the engineering workstation (EWS).

The Fourier amplitude $|F(u)|$ obtained by the three above-mentioned processes is used as the Fourier constraint for the combined phase retrieval algorithm of the hybrid input output (HIO) and the error reduction (ER), which is known to be very effective.⁵⁾ In this study, we adopt a combination of 350 iterations of HIO and 150 iterations of ER.

With this experimental setup, we measured 500 Fourier intensity data values, from which we obtained two types of pre-processed Fourier amplitudes, i.e., the amplitude obtained by the first above-mentioned process only (we call this type A amplitude) and the amplitude obtained by all the three above-mentioned processes (type B amplitude).

Typical experimental results are shown in Figs. 2 and 3. Figures 2(a) and 2(b) are the plane and bird's eye view images, respectively, of the phase distribution retrieved from the type A amplitude. In Fig. 2(a), vertical lines of the grating can be obscurely recognized. Figures 2(c) and 2(d) are the exper-

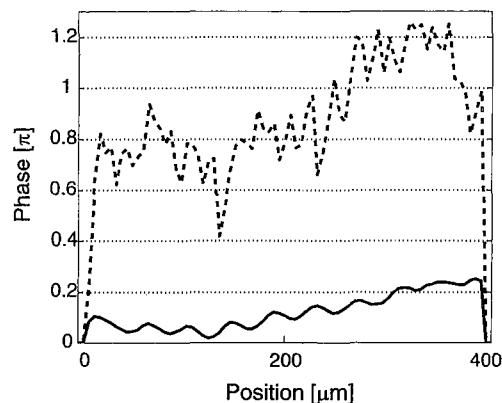


Fig. 3. Profile images of retrieved phases. Broken line: from type A, solid line: from type B.

imental results obtained from the type B amplitude with the adjustable parameters of WOF, $m_1 = m_2 = 1.0$, $\alpha_1 = 0.02$, $\alpha_2 = 0.1$ and $\nu = 0.5$. In Figs. 2(c) and 2(d), ten periods of the grating structure are clearly seen in the object field in accordance with the fact that the pitch of the grating is $40 \mu\text{m}$ and the diameter of the field-limiting pinhole is $400 \mu\text{m}$. The improvement is due to the adopting of the WOF and the sensitivity correction of C-CCD. For a quantitative comparison, the profile of the retrieved phase distributions are shown in Fig. 3, where the broken line and the solid line are the profiles along the horizontal lines in Figs. 2(a) and 2(c), respectively. Apparently the solid line obtained from the type B amplitude sufficiently recovers the phase difference due to the thickness variation of the phase grating, although there exists some inclination and the rectangular profile is rounded off. We consider that the roundness is caused by the finite extent of the C-CCD which is not sufficient to record high-frequency components of the Fraunhofer diffraction pattern.

The authors thank M. Hattori for the help with the experiment. This study was partly supported by a High-Tech Research Center Project as well as by a Grant-in-Aid for Scientific Research (10450029) from the Ministry of Education, Science, Sports, and Culture.

- 1) W. O. Saxton: *Computer Technique for Image Processing Electron Microscopy* (Academic Press, New York, 1978).
- 2) S. Komatsu and J. C. Dainty: *Appl. Opt. Dig.* (1990) 293.
- 3) H. Koyanagi, K. Higuma and S. Komatsu: *Kogaku* 25 (1996) 416 [in Japanese]
- 4) V. V. Kotlyar, P. G. Seraphimovich and V. A. Soifer: *Optik* 94 (1993) 96.
- 5) J. R. Fienup: *Appl. Opt.* 21 (1982) 96.

資料 2:

S. Ohno and S. Komatsu: Image Restoration and Object Distance Evaluation from a Defocused Photon Image, Proc. SPIE, Vol. 4416, 412-415 (2001), 2001 年 6 月

Image Restoration and Object Distance Evaluation from a Defocused Photon Image

Shinya Ono^a and Shinichi Komatsu^{a,b}

^aDepartment of Applied Physics, School of Science and Engineering
Waseda University, 3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555, Japan

^bMaterial Research Laboratory for Bioscience and Photonics
Waseda University, 3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555, Japan
phone number : +81-3-5286-3224 e-mail : ohno@opt.phys.waseda.ac.jp

ABSTRACT

Previously we developed the filter bank method that enables to extract from a defocused image the information on the amount of defocus. In this paper, we apply this method to a defocused image with extremely low intensity detectable only with a photon counting camera. Experimental results show that the information of the defocus amount can be extracted from such a blurred photon image and simultaneously the original object is successfully restored.

Keywords: Image restoration, Range-finding, Photon image, Semi-blind deconvolution

1. INTRODUCTION

The field of image processing has been expanded along with the development of computer technologies. Various researches have been carried out so far on the image restoration from a blurred image. There are various causes for image blurring, however in the case of defocusing, the blurred image can be usually represented as the convolution of the original object and the point spread function (PSF) of the blur. Therefore, if the PSF of the blur is known, the original object can be restored by deconvolution procedure.

Previously we proposed the filter bank method for image restoration in which a given blurred image is deconvolved with a set of deconvolution filters, each element filter of which corresponds to a different amount of defocus. The amount of defocus was determined by finding the extreme of the cost function, e.g., the sum of negative pixel values contained in each deconvolved image. We confirmed the feasibility of the

The array size of the defocused image was 256×256 pixels, and the maximum number of photon in a pixel was 479, and 481, while the total number of photon in the image 7.5×10^6 and 1.4×10^6 , for the object I and II, respectively.

It is seen from Fig.3 that E_n is minimal at $D = 1\text{m}$, i.e., the correct object distance can be determined for both objects (a solid line : object I, a broken line : object II). The restored images obtained by applying the Wiener filter for $D=1\text{m}$ is shown in Fig.2(c).

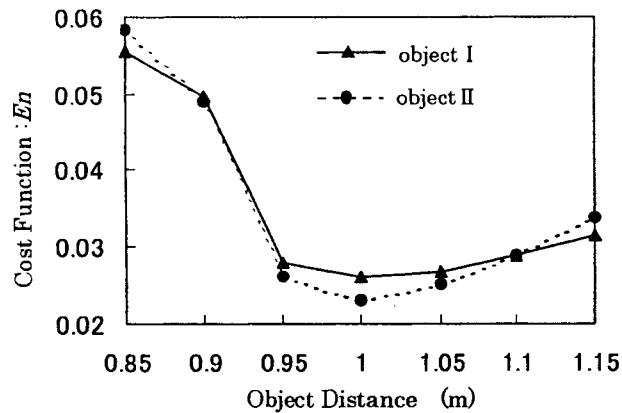


Fig. 3. The cost function E_n vs. D

4. SUMMARY

The filter bank method for image restoration was applied to a defocused image with extremely low-intensity light level. In the experiments conducted using a photon counting camera, the information on the amount of defocus was extracted and the original object was successfully restored.

5. REFERENCES

- [1] H. Yamamoto et al.: Preprint of JSAP (Spring 1993), 870.
- [2] N. Sakima and S. Komatsu: Japan Optics '94 Extended Abstracts, 242.
- [3] M. Hattori and S. Komatsu: Jpn.J.Opt.(Kogaku), 27 (1998), 150-156.

2.2 Cost Function

If the blurred image is deconvolved with inappropriate filters that do not correspond to the correct PSF used for the recording, negative values generally arise in the deconvolved images that never happen in case of the correct PSF. Therefore by examining the negative values contained in the deconvolved image, we can expect to find an appropriate PSF to restore the object. Therefore the cost function E_n is defined as follows

$$E_n = \sqrt{\frac{\sum m_{ni}^2}{\sum M_{ni}^2}} \quad (2)$$

where M_{ni} is a pixel value in the n th deconvolved image, and m_{ni} a negative value appearing in the same image. The summation in the numerator is taken over negative pixels while it is taken for all pixels in the denominator. Considering the fact mentioned above, it is expected that smaller values of E_n will be accompanied with better restoration.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

Being translated along the optical axis, a yellow LED with a pinhole used as the point light source was taken pictures with a photon counting camera in order to prepare a filter bank. The distance of the LED was varied between 0.85m and 1.15m at the interval of 0.05m, while the TV lens ($f = 12 \text{ mm}/F2.8$) was always kept focused at infinity. The light emitted from the LED was attenuated with a diffuser directly in front of the LED, and the exposure time for each frame was 20 seconds. A black pattern printed on a sheet of white paper was used as the object. The sheet was illuminated with the LED and the reflected light was imaged with the photon counting camera. Typical objects I and II are shown in Fig.2(a), and their defocused images in Fig.2(b). The object was placed at the distance of 1 m in front of the camera.

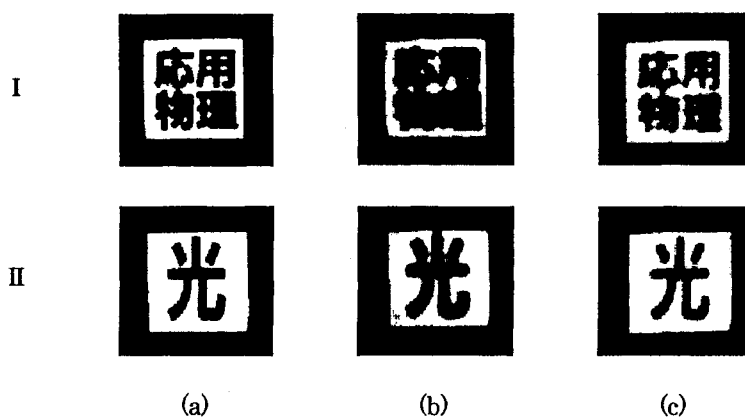


Fig.2. (a)Object (b)Defocused image (c)Restored image

proposed method by computer simulation^[1] as well as by experiments using a cooled CCD camera^[2].

In the present study, we apply this method to the processing of a defocused image of extremely low-intensity light level that can be recorded only with a photon counting camera. The restoration of such a photon image will be experimentally carried out as well as the simultaneously achieved range-finding of the object.

2. THE PRINCIPLE OF THE FILTER BANK METHOD

Prior to the recording of the object with a defocused lens, the PSFs of the lens were measured experimentally for various amounts of defocus in order to prepare a filter bank, i.e., a set of deconvolution filter each of which is calculated with the corresponding measured PSF. Then a defocused image is recorded with the lens and is fed into this filter bank. The cost function E_n , which is defined here to be proportional to the root mean square of the negative pixel values appearing in the n th deconvolved image, is calculated for all the element deconvolution filters. Ideally, E_n falls to zero if the blurred image is deconvolved with the appropriate filter which corresponds to the true PSF. Therefore by searching the minimal value of E_n , the appropriate element filter can be found. Accordingly appropriately restored object can be obtained along with the information on the object distance.

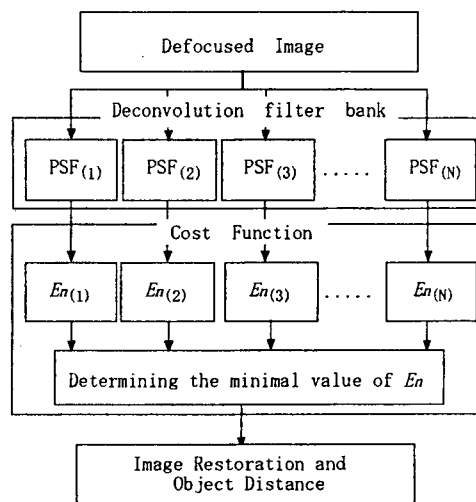


Fig.1 Filter Bank Method for Defocus Amount Evaluation

2.1 Deconvolution Filter

In the present study, the Wiener filter $W_n(v_x, v_y)$ is adopted as the deconvolution filter

$$W_n(v_x, v_y) = \frac{H_n^*(v_x, v_y)}{|H_n(v_x, v_y)|^2 + \Gamma(v_x, v_y)} \quad (1)$$

where $H_n(v_x, v_y)$ is the Optical Transfer Function(OTF) corresponding to the n th PSF, and a constant is used for Γ appearing in the denominator that is defined by taking account of the ratio between the spectral power of the noise and that of the original object.

資料 3:

Y. Nakashima, M. Hattori and S. Komatsu: Phase Retrieval Microscope Using Photon Imaging Detector, Tech. Dig. , MOC'01, Osaka, Japan, 270-273 (2001), 2001 年 10 月

PHASE RETRIEVAL MICROSCOPE USING PHOTON IMAGING DETECTOR

Yusuke Nakashima*, Masayuki Hattori**, and Shinichi Komatsu*.,**.,***

*Department of Applied Physics, School of Science and Engineering, Waseda University
3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

Phone: +81-3-5286-3224 Fax: +81-3-3200-2567 Email: yusuke@opt.phys.waseda.ac.jp

** Advanced Research Center for Science and Engineering, Waseda University

3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

*** Material Research Laboratory for Bioscience and Photonics, Waseda University

3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

Phase retrieval was achieved with higher accuracy than ever from the Fraunhofer diffraction pattern that was measured with a photon imaging detector up to higher diffraction orders.

1. Introduction

Iterative algorithms for phase retrieval have been studied numerically and experimentally for more than two decades.[1] The phase distribution $\phi(u)$ of a transparent object can be recovered from the Fraunhofer diffraction pattern $|F(u)|^2$, where $F(u)$ is the Fourier transform of the amplitude transmittance of the object $f(u)$. Each loop of the Fourier iterative algorithm mainly consists of four steps as described in Fig.1: 1) $f(u)$ is Fourier transformed, 2) the Fourier domain constraint including $|F(u)|^2$ is imposed on, 3) $F(u)$ is inverse Fourier transformed, 4) the object domain constraint is imposed on, and these procedures are iterated until the algorithm converges. It has been numerically demonstrated that the accuracy of the retrieved distribution is affected by the dynamic range of $|F(u)|^2$. [2] The retrieved phase distribution may be unstable in the presence of small noise perturbations in measurement. The diffraction pattern measured experimentally by a cooled charge coupled device to as high order as the first order of $|F(u)|^2$ [3] and that measured by a photon imaging detector (PID) to the third order were combined together, and the resultant data was processed with the combination of two algorithms [4]: 250 times Hybrid Input Output algorithm (HIO) before 50 times Error Reduction algorithm (ER). For the

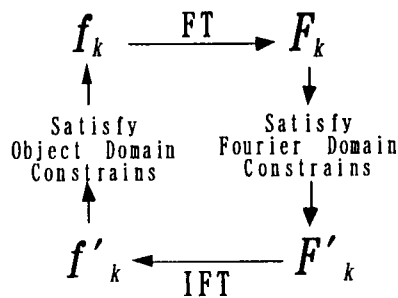


Fig.1 The k th loop of the Fourier Iterative algorithm.

FT: Fourier transform
IFT: inverse Fourier transform

purpose of monitoring the degree of convergence, the object-domain errors E is introduced.; NS presents the domain out of the support domain.

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{x \in NS} |f'_k(x)|^2}{\sum_x |f'_k(x)|^2}}$$

In this paper, more accurate retrieval is aimed for. To accomplish this aim, $|F(u)|^2$ is measured accurately with a PID, and the HIO are applied more effectively to the data

2. Experiment

Fig.2 describes an experimental setup of a phase retrieval microscope. The diffracted light wave (wavelength: 633nm) which is measured with the PID travels through a spatial filter, lens, phase object, pinhole. The ND filter included in the spatial filter reduces the intensity of the wave so that no more than one photon is measured by one pixel of PID per 1/30 seconds. The lens is placed at the position where the light wave forms the Fraunhofer diffraction pattern of the object at the PID. The pinhole, of diameter 200 μm , is used as a mask to limit the extent of object field.

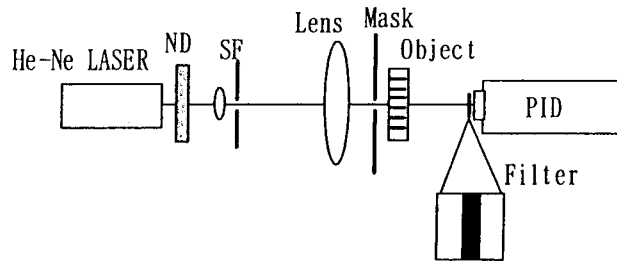


Fig.2 Experimental setup. The filter was placed in front of the PID to attenuate the lower order diffraction spots. ND: ND filter, SF: spatial filter, Mask: pinhole (diameter: 200 μm) PID: Photon Imaging Detector

Fig.3 describes a profile of a part of the phase grating used as an object, whose pitch d , refractive index n , and thickness h are 40 μm , 1.46, and 40 nm, respectively. The optical path difference of about $\lambda/32$ (phase difference 0.06π) is generated by the grating.

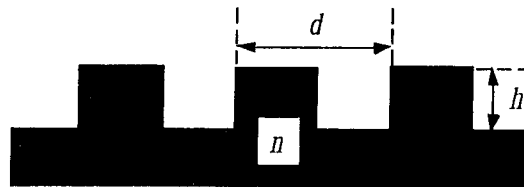


Fig. 3. Phase grating used as an object.

$$d = 40 \mu\text{m}, h = 40 \text{nm}, \text{ and } n = 1.46.$$

For precise measurement, two types of diffraction pattern were measured. A pattern including the zero order diffraction spot contains about 100,000 photons forming the zero order diffraction spot, and about 1,000 photons for the first order diffraction spot (Fig.4 (a)). The other pattern whose lower order diffraction pattern is attenuated by a filter, and whose higher order diffraction pattern is intensified contains about 5,000 photons for the second order diffraction spot, and 1,000 photons for third order diffraction spot (Fig.4 (b)).

On workstation, the two measured intensity distributions are combined to produce a very wide dynamic range diffraction pattern data that effectively contains about 11,000,000 photons (Fig.4 (c)). Around the central point at which the diffracted intensity is the highest in the combined pattern, the square region containing 384×384 pixels is extracted. The array size of the extracted data was then reduced to 128×128 elements by designating the sum of 3×3 pixels to each element

After normalizing intensities of the pattern, the phase retrieval algorithm was applied to the prepared data.

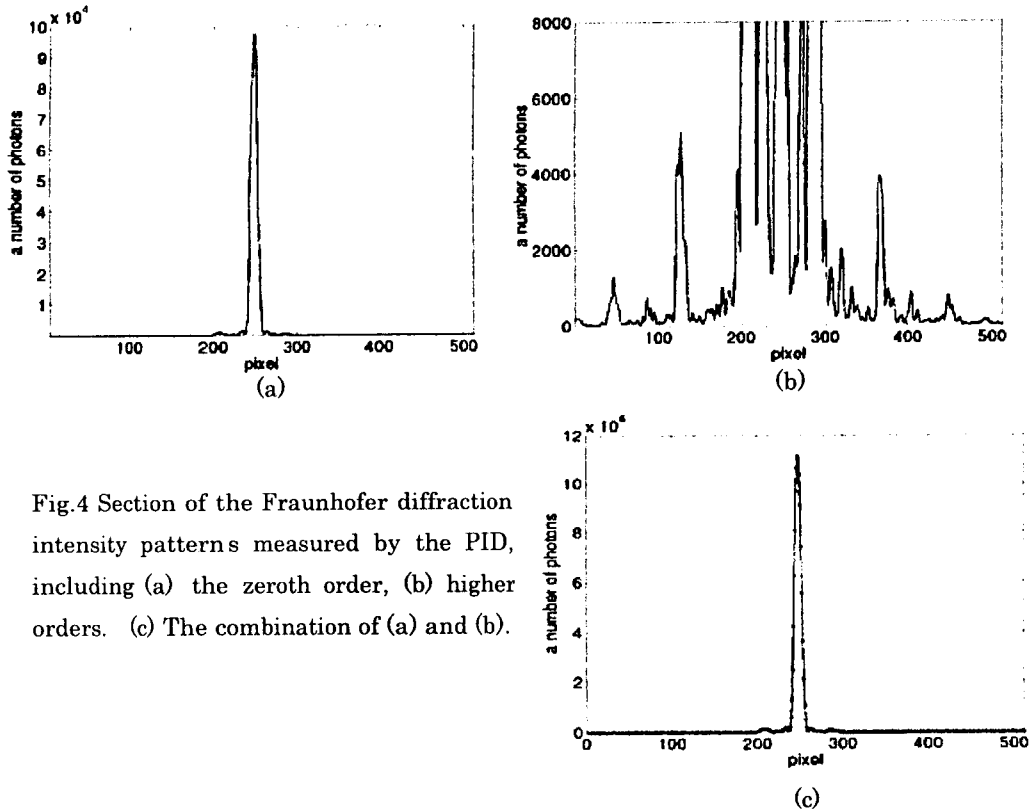


Fig.4 Section of the Fraunhofer diffraction intensity patterns measured by the PID, including (a) the zeroth order, (b) higher orders. (c) The combination of (a) and (b).

3. Phase Retrieval

The phase retrieval algorithm, i.e., 2500 times HIO (feedback parameter: 0.50) before 500 times ER, was applied to the normalized data. As the algorithm proceeds, the error E decreases to less than 0.01 (Fig.5), and the object phase distribution was retrieved fairly well as shown in Fig. 6.

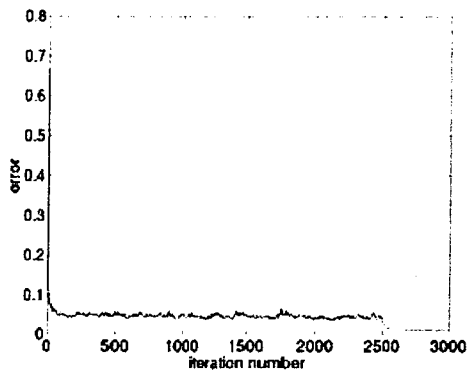


Fig.5 Transition of the error E .

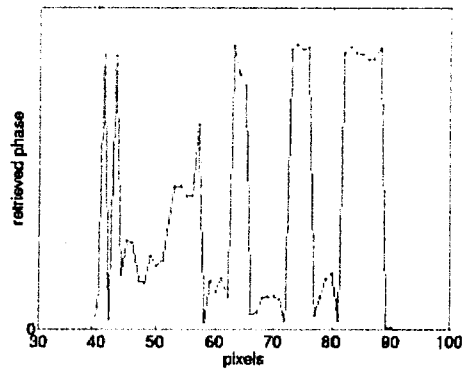


Fig.6 Retrieved phase.
Section of line 100.

4. Conclusion

Measuring a Fraunhofer diffraction pattern including higher order diffraction spots by photon imaging detector, we retrieve the phase of the weak phase object more faithfully than ever.

This study has been partly supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research (10450029) from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

References

- [1] J. R. Fienup: Appl. Opt., **21** (1982) 1758-1769.
- [2] S. Komatsu and J. C. Dainty: Appl. Opt. Dig. (1990) 293-294.
- [3] Y. Kamura and S. Komatsu : Jpn. J. Appl. Phys., **37**(1998) 6018-6019.
- [4] Y. Nakashima, M. Hattori and S. Komatsu: Extended Abstracts (Optics Japan 2000) The Optical Society of Japan, 85-86.

資料 4:

大野慎也、小松進一：フォトンカウンティング撮像した焦点はずれ劣化像の回復と物体距離推定、Optics Japan 2000 (日本光学会年次学術講演会)予稿集、41 - 42 (2000), 日本光学会(応用物理学会), 2000 年 10 月, (7aC6)

○大野慎也*、小松進一*、**

○Shinya OHNO* and Shinichi KOMATSU*、**

早稲田大学理工学部 応用物理学科*

早稲田大学パイオ・フォトンクス新素材研究施設**

Department of Applied Physics, Waseda Univ.*

Material Research Laboratory for Bioscience and Photonics, Waseda Univ.**

In our laboratory the filter bank method has been developed, which enables to extract the defocus amount from a defocused image. In this paper, we apply this method to the extremely low intensity defocused image which can be imaged only with a photon counting camera. Experimental results show the information of the defocus amount is extracted and the original object is successfully restored.

1. はじめに

我々の研究室では、デコンボリューションフィルターを用いた、新しいオートフォーカスの原理となるフィルターバンク法を提案し、計算機シミュレーション[1]、及び冷却 CCD を用いた実験[2]により評価してきた。本研究では、通常の撮像方式では画像化できない、極微弱光領域での撮像を対象とする。そしてそのような状況のもとで、フォトンカウンティングカメラで撮像された1枚の焦点はずれ劣化像に、この手法を適用することで、物体を復元し、さらに物体距離情報を抽出するものである。

2. 原理

線形性と空間不変性(シフトインバリエント)を満たした光学系において、焦点はずれ劣化像 $g(x, y)$ は、レンズの点像分布関数 (PSF : Point Spread Function) $h(x, y)$ と物体 $f(x, y)$ との2次元畳み込み積分 (コンボリューション:*) で表される。

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) \quad (1)$$

式(1)において、既知の劣化像 $g(x, y)$ と点像分布関数 $h(x, y)$ から、物体 $f(x, y)$ を求める操作をデコンボリューションと呼ばれている。

本手法では、まず、劣化像撮影時に使用したレンズを用いて、各焦点はずれ量に対応した点像分布関数を測定し、それに基づいて、デコンボリューションフィルター群を作成する。そして、そのフィルターバンクに劣化像を入力し、それぞれの回復画像に含まれる負値総和を評価量として、これが最小となるデコンボリューションフィルターを決定することによって、物体距離推定及び、最良の劣化像回復を行う。

今回の実験において、式(1)のデコンボリューションフィルターは、ノイズも考慮に入れた式(2)のウィナーフィルターを用いて像回復を行った。また評価関数には、式(3)を用いた。

$$W(v_x, v_y) = \frac{H^*(v_x, v_y)}{|H(v_x, v_y)|^2 + \Gamma(v_x, v_y)} \quad (2)$$

H : レンズの光学的伝達関数(OTF:Optical Transfer Function) Γ : 信号雑音比

$$E_n = \sqrt{\frac{\sum m_i^2}{\sum M_i^2}} \quad (3)$$

$M_i(x, y)$: 出力の強度成分
 $m_i(x, y)$: 出力に含まれる負値成分

3. 実験装置

本実験において、12mm/F1.2のレンズをフォトンカウンティングカメラ撮像用VIMカメラヘッドの付いたCCDカメラに取り付けて撮像を行った。

撮像画像は、水平512×垂直483画素の16ビットで構成されており、そのうち中心部の256×256画素の正方領域を切り取って計算機アルゴリズムに用いた。光源は黄色LEDを使い、これに直径100μmのピンホールを取り付け、点光源としてフォトンカウンティングカメラで撮影した。

4. 実験と結果

点光源を距離0.85~1.15mの間で、0.05m刻みで移動させ、フォトンカウンティングカメラで点像分布関数を20秒間撮影し、これをもとにフィルターバンクを作成した。結果の一例として、物体距離1mで撮影した物体(14cm×14cm)の焦点はずれ劣化像(Fig.1.(a)): 1画素における最大フォトン数=479個、画像中の全フォトン数=7.5×10⁶個)に対して、良好な回復像(Fig.1.(b))が得られた。Fig.2は、物体距離推定値と評価関数値(E_n)のグラフで、実際の物体距離1mのところで、評価関数値(E_n)は最小になっていることが分かる。

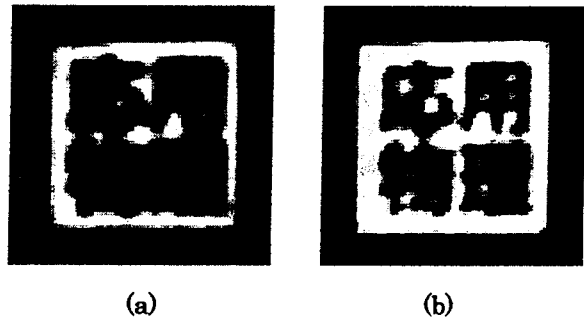


Fig.1. (a)Defocused image (b)Restored image

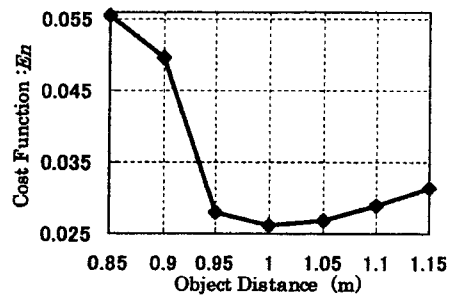


Fig.2. Behavior of cost function E_n

5. まとめ

フィルターバンク法を実際の光学系に適用し、フォトンカウンティングカメラで撮像した、1枚の焦点はずれ劣化像から物体距離推定の原理実験に成功し、同時に出力画像として良好な回復象も得られた。これによって、このフィルターバンク法が、より広範囲な撮像方式にも適応できるということが証明され、実用化への可能性が一層膨らんだといえる。

6. 参考文献

- [1]山本栄治他、第40回応用物理学会春予稿集 No.3 (1993), p870.
- [2]服部雅之、小松進一、光学 27 卷 3 号 (1998) pp150-156.

資料 5:

中島悠輔、服部雅之、小松進一: 高感度光子計數位相回復顕微鏡、Optics Japan 2000 (日本光学会年次学術講演会)予稿集、 85 - 86 (2000), 2000 年 10 月, (7pB7)

Phase Retrieval Microscope Using Photon Imaging Detector

○中島 悠輔*, 服部 雅之*, 小松 進一*,**

Yusuke Nakashima, Masayuki Hattori, and Shinichi Komatsu

早稲田大学理工学部応用物理学科*

早稲田大学バイオ・フォトンクス研究施設**

Dep. of Applied Physics, Waseda Univ. *

Material Research Laboratory for Bioscience and Photonics, Waseda Univ. **

Phase distribution of transparent object can be recovered from a measured Fraunhofer diffraction pattern by using the Fourier iterative algorithms. In order to achieve phase restoration accurately, we applied a photon imaging detector which enables to detect the Fraunhofer diffraction pattern to higher orders.

7p

1. はじめに

物体の位相分布をそのフーリエ強度分布から求める方法として位相回復法が提案されており、フーリエ反復アルゴリズム (IFTA) も研究されている。その中でハイブリッド・インプット・アウトプット・アルゴリズム (HIO) とエラー・リダクション・アルゴリズム (ER) は有効であるとされている。計算機による研究は数多いのに比べ、未だ実用的な利用はなされていない。計測のダイナミックレンジを上げると回復像の精度が上がるということが報告されている[1]。冷却 CCD カメラによる計測で IFTA の研究がなされている[2]が、この研究では1次の回折像までを計測している。

本研究では、高精度の計測のために光子単位での強度計測をするフォトン・イメージング・ディテクタ (PID) によって物体のフラウンホーファ回折像を3次の回折像まで計測した。計測の方法として強度差の大きい低次回折像と高次回折像を分割して別々に測定した。計算機上で2つの像をあわせ、そのフーリエ強度分布から IFTA によって物体の表面形状を回復した。

2. フーリエ反復アルゴリズムの原理

IFTA によりフーリエ強度分布から物体の位相分布を回復する。Fig. 1 に示す step 1 から step 4 のように、フーリエ変換 (FT) とフーリエ逆変換 (IFT) のループを繰り返す。計測したフーリエ強度分布 $|G'|^2$ を step 2 において負荷する、物体面におけるサポート条件を step 4 において負荷する、という2つの拘束条件を負荷しながらループを繰り返すことで物体の位相分布を回復する。

ER と HIO の違いは step 4 の物体面における拘束条件のかけ方にある。その式をそれぞれ Eq.(1), (2) に示す。

$$\text{STEP4.} \quad g_{k+1}(\mathbf{x}) = \begin{cases} g'_k(\mathbf{x}) & , \mathbf{x} \in S \\ 0 & , \mathbf{x} \notin S \end{cases}, \quad (\text{ER}) \quad (1)$$

$$\text{STEP4'.} \quad g_{k+1}(\mathbf{x}) = \begin{cases} g'_k(\mathbf{x}) & , \mathbf{x} \in S \\ g_k(\mathbf{x}) - \beta g'_k(\mathbf{x}) & , \mathbf{x} \notin S \end{cases}, \quad (\text{HIO}) \quad (2)$$

ただし β は 0 以上 1 以下のフィードバック・パラメタ、 S はサポート領域である。

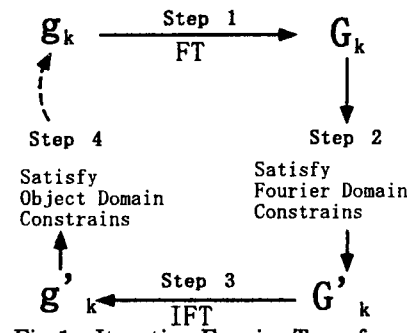


Fig.1 Iterative Fourier Transform Algorithm

反復 k 回目における回復度を測る評価関数としては、物体関数 $g_k(x)$ の全体のうち拘束条件を満たさないものの割合を測る E_{ok} がある。

$$E_{ok} = \sqrt{\frac{\sum_{x \notin S} |g'_k(x)|^2}{\sum_x |g'_k(x)|^2}} \quad (3)$$

3. 計測・・・ダイナミックレンジの向上

本研究では、Fig.2 に示す実験系を採用した。He-Ne レーザー ($\lambda = 633\text{nm}$) の微弱光を位相差 $\lambda/30$ の位相格子に照射し、そのフラウンホーファ回折像を PID によって光子単位で計測した。さらにダイナミックレンジを上げるために、0 次回折光を弱めるフィルタを用いて、1 次回折光以上の高次回折光の強度分布 (Fig.3(a)参照) と、0 次回折光を含む回折光の強度分布を分けて測定した。

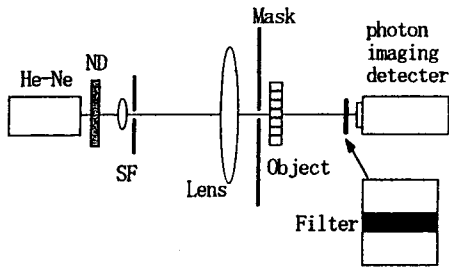
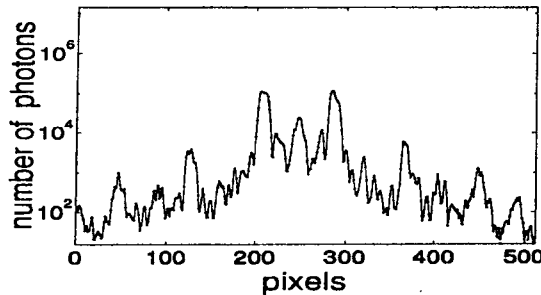
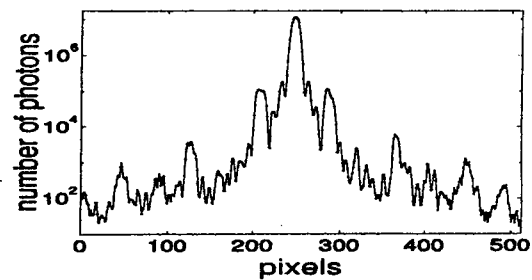


Fig.2 Experimental setup

その分割して計測した 2 つのフーリエ強度分布をワークステーション上で 1 つに合成した (Fig.3(b)参照)。この方法によって 3 次回折光も有為に測定することができた。



(a) excluding zero diffraction pattern



(b) including zero diffraction pattern

Fig.3 section of Diffraction intensities

4. 位相回復

計測したフーリエ強度分布を用いて、初めに HIO を 250 回、続けて ER を 50 回おこなった。Eq.2 の HIO におけるフィードバック・パラメタ β は 0.5 である。IFTA の過程におけるエラーの変化を Fig.4 に示す。また、この IFTA の結果得られた物体の位相分布の断面図を Fig.5 に示す。

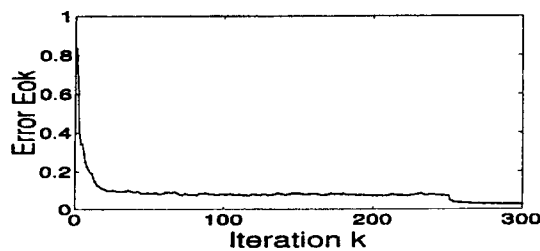


Fig.4 Error (E_{ok})

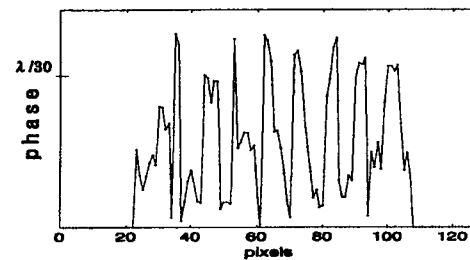


Fig.5 Retrieved phase

5. まとめ

本研究では PID を使い光子単位で強度分布を 3 次回折光まで測定した。そのフーリエ強度分布から位相差 $\lambda/30$ の物体の表面形状を正確に回復した。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金 (10450029) の援助により行われた。

文献

- [1] S. Komatsu and J. C. Dainty : Appl. Opt. Digest, (1990) pp293-294
- [2] Y. Kamura and S. Komatsu : Jpn. J. Appl. Phys., 37 (1998) pp 6018-6019