

近接型超高速フレーミングカメラの シャッターリング特性の改善に関する研究

学位論文内容の要旨

高速度現象の解明において画像計測は優れた計測法の一つである。多くの高速度撮影技術が研究開発されているが、数ナノ秒以下での極限状態の物理現象に対応できる超高速撮影技術として、光電変換を用いた電子シャッター方式の超高速カメラがある。その中でも、近接型(無掃引)フレーミングカメラは、軟X線～可視光領域における数ナノ秒以下での二次元画像計測において最も重要な位置を占める。近接型フレーミングカメラは、光電変換により電子密度分布に変換された画像をパルス電界により制御することで高速ゲート動作を行い、高速動作に伴う光量の減少は、二次元電子増倍素子であるMCP(Micro Channel Plate)により補う。

100ps以下の高い時間分解能を有するフレーミング方式として現在用いられている方式は、光電面-MCP入力面間をパルス駆動する方式とMCPを直接パルス駆動する方式であり、本研究では、前者を光電面ゲートカメラ、後者をMCPゲートカメラと呼称する。この両方式ともに、ゲートパルスの半値幅とゲート電極での伝搬特性に時間分解能は大きく依存するため、光電面ゲートカメラでは、低容量、低抵抗化を目的とし、光電面外部に外部透明電極を付加し伝搬特性を改善することで100ps以下の時間分解能を得ている。原理的により高い時間分解能を目指すには、より短パルスを印加すればよいが、実際は、そのような極短パルスを減衰、歪無く伝搬させることは難しく、パルス自体の発生も容易ではない。そこで、MCPを飽和領域に近い点で動作させ、入射電子をトリガーとした一種のアバランシェ動作をさせる。これにより、光電面ゲート方式で更に時間分解能の向上が期待できる。MCPゲート方式においても、MCPに直接ゲートパルスを印加することにより、MCPの印加電圧に対する増倍特性の高い非線形性が利用でき、100ps以上の半値幅のゲートパルスに対して40ps程度の高い時間分解能が得られている。

本研究の目的は、このような高い時間分解能を有する近接型フレーミングカメラを動作させた場合に、ゲートパルスの伝搬速度が有限であることから生じる従来考慮が払われていなかったシャッターリング特性上の問題を指摘すると共に、その改善手法として新たに光電面から放出される光電子の走行時間を制御する手法を提案し、その手法を用いた改善の効果を解析的に明らかにすることである。

本論文は、結論を含めて全6章から構成されている。その概略は以下の通りである。第1章は序論であり、超高速撮影技術における近接型フレーミング方式の位置と超高速二次元計測技術の現状について説明し、本論文の目的及び構成を述べている。

第2章では、本研究で対象とする近接型超高速フレーミングカメラの概要ならびにカメラの性能評価指標である時間分解能と空間分解能について述べ、本研究で用いた評価手法で

ある電磁界解析手法と MCP 解析モデルを紹介する。そして光電面ゲート方式と MCP ゲート方式両方式の動作原理、特徴について詳細に述べている。

第 3 章では、100ps 以下の高い時間分解能においてゲートパルスの伝搬時間がもたらす問題点を指摘する。本研究で新たに指摘する問題とは、シャッターリング画像内の時間情報に関する問題である。ゲート動作は、時間軸での情報を積分することであり、積分区間の幅が最小の時間分解能であるが、シャッターリング制御電極を伝搬するパルスの伝搬速度が有限であることから、画像内においてゲート動作に遅れが生じ、結果として画像各点での積分区間の開始点の相違が生じる。本研究では、これをシャッターリング画像の撮影時刻の空間均一性と表現する。これは、動作原理上明らかであるが、ゲートパルス幅に比べ十分小さい時は無視できるものと考えられていた。しかし、100ps 以下の時間分解能では、無視できない量となる。この均一性の問題は、時間分解能の向上、シャッターリング電極の拡大において、より顕在化するため、補正手法が必要である。またもう一つの問題として、光電面ゲート方式における MCP 入力面に到達する光電子の到達時刻の空間的な同時刻性も、同じ理由により保たれないことを示す。そして、この二つの問題に対する補正手法として、光電子飛行時間制御の手法を提案し、光電面ゲート方式と MCP ゲート方式のそれぞれに対しての適用法を述べる。

第 4 章では、光電面ゲート方式へ適用した場合において、第 2 章で紹介した評価手法を用いて、上記提案の評価を行なっている。画像の撮影時刻の空間均一性は、光電面ゲート方式は、光電面-MCP 入力面間でゲート動作を行うため、シャッターリングパルスの伝搬遅れに相当する光路長の相違を光学系にて与え補償する。これにより、光電面から放出される光電子は、同時刻の情報を持つ。この光電子が同時刻に MCP に入射し、MCP の各チャンネルで同時にアバランシェ動作を起こすように、光電子走行時間制御の手法を用いる。これにより、最終的に得られるシャッターリング画像の撮影時刻の空間均一性が補償される。光電子の走行時間を制御する適切な電界分布は、マイクロストリップ形状のゲート電極である外部透明電極形状を適切なテーパ形状とすることで得る。数値解析により評価を行い、適切なテーパ形状を与えることにより、10mm の電極長において、良好な補正を行うことが可能であることを示した。

第 5 章では、MCP ゲート方式へ適用した場合において、評価を行なっている。通常 MCP ゲート方式の構造と異なる光電面と MCP を分離した構造とし、MCP 上のマイクロストリップ伝送線路を伝搬するゲートパルスの伝搬遅れを打ち消すように、光電子の走行時間を制御する。これにより撮影時刻の空間均一性は保たれる。近接型カメラと異なり、光電面-MCP 入力面間は、シャッターリング部位ではないので、静電界補正方式と補正パルス印加方式が考えられ、それぞれについて検討を行った。その結果、静電界補正方式が優れており、光電面-MCP 入力面間に僅かな直線の勾配を与えるのみで高い精度で補正が可能であり、空間解像度の劣化も実用範囲内であることを明らかにした。

第 6 章は結論であり、本研究で新しく得られた結果と知見を総括している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 榎 戸 武 揚
副 査 教 授 日 野 友 明
副 査 教 授 板 垣 正 文
副 査 教 授 粥 川 尚 之

学 位 論 文 題 名

近接型超高速フレーミングカメラの シャッターリング特性の改善に関する研究

極微、極短現象の計測技術、不可視画像の可視化記録技術への要求は近年益々高まっており、より高性能な画像計測技術が求められている。本研究は、二次元超高速撮影技術に注目し、幾つかの撮影方式のなかでも、安定した性能を有し、非常に広範囲に用いられている光電変換を用いた電子シャッター方式を対象としている。その中でも近接型(無掃引型)と称される近接型光増幅素子を用いたフレーミング方式は、空間分解能にも優れ、近年では、数10psの高い時間分解能を持ち、ns以下での超高速撮影において不可欠な撮影装置である。近接型光増幅素子は、光電面、二次元電子増倍素子であるMCP(Micro Channel Plate)及び蛍光面から構成され、測定波長に対応した光電面の選択により、近赤外から軟X線領域の計測が可能である。

本論文は、近接型方式の超高速フレーミングカメラにおいて、100ps以下のシャッターリング時間においてゲーティング動作原理に起因する問題が生じることを明らかにし、その改善手法として光電子の走行時間を利用することを新たに改善手法として提案し、その有効性を解析的に明らかにしている。その主要な成果は次のように要約される。

(1) 近接型超高速フレーミングカメラは、光電変換された電子を電界で制御することでゲート動作を行う。その為に、高電圧の短パルスゲートパルスとしてゲート電極に印加する。このフレーミングカメラの動作原理から、ゲートパルスの有限な伝搬速度により画像各点においてゲート動作の開始時刻が必然的に異なる。画像各点での時間軸上での積分開始点(ゲート動作開始時刻)の不均一性を撮影時刻の同時性の欠如と呼ぶこととする。従来、同時性の欠如は無視されていたが、数100ps以下のシャッターリング時間においては、その影響が顕著に現れることを指摘した。この同時性の欠如は、シャッターリング時間の短縮化、画像サイズの拡大により必然的に顕在化する。

(2) 光電面-MCP 入力面間でゲート動作を行う方式 (光電面ゲート方式) において、より高速なシャッターリング時間を得るためには MCP の非線形動作を併用するが、この場合、撮影時刻の同時性の改善を行うことに加え、MCP 入力面に到達する電子の到達時刻の同時性も補償する必要があることを指摘した。これら二つの同時性を補償することで、高い時間分解能において同時刻の時間情報が最終のシャッターリング画像として得られる。そこで、この二つの同時性の改善手法として、前者に対し、ファイバーオプティクス等の光路長制御の手法を提案した。MCP をアバランシェ的に動作させる場合に重要となる後者では、同時性改善手法として新たに光電子の走行時間を制御する手法を提案した。即ち、シャッターリングパルスの伝搬にあわせ電界強度を適切に増加させることで MCP 入力面での到達時刻の同時性を改善するものである。光路長補正に必要な補正量と、電界を制御するために必要な電極のテーパ形状を求めるために数値解析を行った。10mm の電極サイズにおいて、光路長補正量は無補償の場合 40ps であり、これを、ゲート電極の面間距離を変化させる本手法により 5ps 以下に改善できることを数値解析により明らかにした。

(3) MCP で直接ゲート動作を行う方式 (MCP ゲート方式) において MCP は、非線形効果を利用するゲート部位である。光電面-MCP 入力面を補正部位とすることで、撮影時刻の同時性欠如を改善するために光電子走行時間制御手法が適用可能となる。そこで、パルス補正と静電界補正の二種類の補正手法を検討した。現時点では、静電界補正手法の方が、多くの利点を有し、実用的な手法であることを示した。静電界補正において、20mm の画像サイズにおいて 0.2mm から 0.8mm の僅かな勾配を光電面に与えることで、数 ps 秒内で撮影時刻の同時性を改善できることを明かにした。これは、軟 X 線計測において撮影時刻の同時性の保持が、技術的に困難な光路長補正等を用いずに、容易に行えることを示している。また、光路長補正手法と比較し幾つかの優れた点を有することを示した。

これを要するに、筆者は、近接型方式の超高速フレーミングカメラにおいて画像の同時性欠如というシャッターリングに必然的に伴う特性に新たに着目し、その改善手法として光電子の走行時間を制御する方式を提案し、その有効性を数値解析により明かにしたものであり、量子エネルギー工学分野、超高速画像計測分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。