

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	視覚特性解明のための補償光学系の開発に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	山口達夫
Author(English)	Tatsuo Yamaguchi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10009号, 授与年月日:2015年9月25日, 学位の種別:課程博士, 審査員:内川 恵二,山口 雅浩,小池 康晴,金子 寛彦,吉村 奈津江
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10009号, Conferred date:2015/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	物理情報システム 専攻	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学)	Academic Degree Requested	Doctor of
学生氏名： Student's Name	山口 達夫	指導教員 (主)： Academic Advisor(main)	内川 恵二	
		指導教員 (副)： Academic Advisor(sub)		

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

人が外界を観察することを光学的な観点から考察すると、外界からの光は眼の角膜・水晶体といったレンズ群により屈折され、網膜にある錐体内の視物質にて光が電気刺激に変わり、発生した電気刺激が電気信号となって脳へと送られ情報処理され人は外界を観察している。光が角膜や水晶体を透過する際に光の波面には歪(収差)が発生する。この歪は人により多種多様であるため、錐体に結像される光形状は人により異なる。収差のうち低次収差と呼ばれる収差はレンズ等で補正可能であるが、高次収差と呼ばれるより細かい歪は、レンズでは補正できない。本研究は高次収差を補正・作成可能な補償光学技術を用いて視覚特性における眼の空間周波数特性を解明するための装置を開発することにある。眼の空間周波数特性の解明として本研究では、錐体細胞の観察と、錐体から送られた信号の脳での処理(神経系メカニズム)を解明することとした。

錐体は数ミクロンという小さい細胞であり、眼の収差の影響のため一般の光学機器では観測することが不可能である。過去の研究ではdeformable mirror(可変鏡)と呼ばれるデバイスを用いて高次収差の補償を行い、錐体を観測したという報告はあるが、本研究では、deformable mirrorではなく空間位相変調器を使用した。空間位相変調器は被検者の瞳孔の移動に対して追従が可能で、収差作成を高精細に行うことができるといった利点があり視覚特性解明に非常に有効なデバイスである。しかし、波長依存性がある、偏光依存性がある、動作が遅いといった空間位相変調器の原理的な問題がある。それらの問題に対応するため、赤色の波面測定を行う、偏光に対応する光学系の開発を行う、処理の高速化・タイミングを調整するといった開発を行い、問題に対処した。本研究の技術開発により、空間位相変調器を用いても人の眼の波面補償が可能となることを示した。また、空間位相変調器の高精細という特徴を生かして瞳孔の移動にもリアルタイムに追従可能なシステムを開発した。

開発した技術を網膜撮影システムに応用した。網膜の撮影方式としてFlood Illumination型での光学系の設計・開発を行い測定開始後3秒以内で残収差量 $0.1 \mu\text{m(RMS)}$ 以下での撮影を安定して行うことが可能となった。安定した2.5Hzの波面補償システムによって、網膜上でのオブジェクト $2 \mu\text{m}$ にあたる大きさも撮影が可能となり、人眼の錐体の観測に成功した。さらには、画像からの眼球運動の推定、撮影画像の画質向上技術も開発し、多種のアプリケーションに本研究が応用可能なことを示した。開発した技術内容は、収差の測定技術、補償技術、さらには網膜の撮影方法と挙げられ、それぞれについて有益な結果を得た。他覚的に錐体自体を撮影できることは眼の空間周波数特性の解明につながる技術である。

さらに、神経系による視覚的空間周波数特性を自覚的に解明するための技術開発を行った。開発した補償光学技術は収差の補償のみならず任意の収差を作成可能である。この特徴と新たに視覚刺激系の開発と組み込みを行い、多種の収差と眼の視覚空間周波数特性とを評価することが可能となった。本研究では、高コントラスト視標ではなく、低から高コントラストまでの空間周波数特性を評価することのできるコントラスト感度に着目し、コントラスト感度関数を測定可能な装置開発を行った。コントラスト感度の測定のために、視覚刺激系に2個の小型液晶ディスプレイを使用した。それぞれの液晶を赤色LEDで裏面から照明し、LEDの光量と液晶ディスプレイの透過率をコントロールすることで、刺激画像に1から1000までのコントラストの逆数を持つ刺激画像を呈示可能となった。装置を用いて被検者4例についてコントラスト感度関数の取得を試み、収差補正の無い状態、完全補償状態、横様コマ収差、縦様コマ収差の4種の収差形状によるコントラスト感度関数の取得を心理物理学の実験により行った。結果、すべての収差形状において低周波部分のコントラスト感度はコントラスト感度曲線のピークよりも下がっており、過去の研究と同等の傾向が得られた。収差の形状により、コントラスト感度の落ち込み方に差異が確認され、特に日常の収差と類似がある場合にはコントラスト感度の落ち込み量が少ないという結果を得た。このことから長期間に渡りぼやけた画像をみていると、視覚的な補正効果(神経系メカニズム)が働き、見えの質が向上する可能性が示唆された。

本研究は、眼の空間周波数特定に関わる他覚的な錐体評価と自覚的なコントラスト感度関数の評価を行うことが可能となるものであり、この結果は、収差の影響が示唆される角膜屈折矯正手術や、疲れにくい最適な眼内レンズやメガネレンズの提案につながるものである。技術の適用範囲は広範囲に及び、開発した補償光学刺激装置は人のQuality of Lifeに貢献するツールになり得るものである。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： 物理情報システム 専攻
Department of
学生氏名： 山口 達夫
Student's Name

申請学位(専攻分野)： 博士 (工学)
Academic Degree Requested Doctor of
指導教員(主)： 内川 恵二
Academic Advisor(main)
指導教員(副)：
Academic Advisor(sub)

要旨(英文 300 語程度)
Thesis Summary (approx.300 English Words)

To study the relationship between the aberration of the human eye and the human visual system, we developed an adaptive optics (AO) system which has a liquid crystal phase modulator (LCPM). Higher-order aberrations can be created and subject's eye movement can be followed by using the LCPM. However, it was difficult to use LCPMs in adaptive optics systems because the conventional LCPMs have two large problems which are polarization dependence and wavelength dependence. In this study, we invented the AO system to solve these problems with an optical system and a red laser diode. The aberration was measured in real time with the sampling rate of 10 Hz and the closed loop system was operated in 2.5 Hz.

An illumination system and an image capture system for the retina were added to the AO system. We used a custom model eye and human eyes to evaluate basic ability of the AO system. Consequently, the AO system reduced RMS errors from $2.03\mu\text{m}$ to $0.10\mu\text{m}$, and the retinal image of the model eye was better with the compensation than that without compensation. From the experiments of the human eye, aberrations of the normal eyes were reduced to less than $0.1\ \mu\text{m}$ (RMS) in less than three seconds. We found that the high resolution retinal images can be obtained by using the LCPM.

Adding a visual stimulus apparatus to the AO system, we developed an AO visual simulator to study the relationship between the contrast sensitivity and higher-order wavefront aberrations of human eyes. The contrast sensitivity was measured in a psychophysical experiment using visual stimulus patterns provided by a large-contrast-range imaging system, which included two liquid crystal displays illuminated by red light emitting diodes from the backside. Experiments conducted with four normal subjects revealed that their contrast sensitivity to a high-spatial-frequency vertical sinusoidal grating pattern was lower in the presence of a horizontal coma aberration than in the presence of a vertical coma or no aberrations. It was found that visual experience may cause the correction of the blurred image by aberrations.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).