

審査の結果の要旨

氏名 菅原明彦

本論文は、白内障治療において良好な術後視力を得るため重要な眼内レンズ (intraocular lens, 以下 IOL) 度数予測に関し、解剖学的計測に忠実な眼光学系モデルと skew ray tracing による新しい IOL 度数シミュレーション法を開発し、従来の予測式 (SRK-II, SRK/T) と比較評価し臨床的有用性を示すとともに、誤差解析手法により誤差の原因を定量的に示したものである。

近年、白内障の治療として白濁水晶体を摘出し IOL を埋め込む手術が行われている。最適な IOL 度数を術前に正確に予測することが重要である。しかし現在の予測法は必ずしも正確でなく、強度の眼鏡の装用や左右眼の度数ずれによる眼精疲労、再手術などが報告されている。誤差の原因としては、眼光学系モデルが省略されている点、近軸・薄肉近似計算によっている点、経験補正を行っている点が指摘されている。そこで本論文では、解剖学的計測に忠実な眼光学系モデルと、近似を排した厳密光学計算 skew ray tracing による新しい IOL 度数予測法の開発を目的としている。

本論文ではまず、解剖学的計測に忠実な眼光学系モデルについて述べている。これは眼内の光学的屈折面を薄肉近似なく記述するコンピュータモデルで、従来式が眼軸長と角膜屈折力の 2 パラメータであるのに対し本モデルは 8 パラメータ、屈折面数は従来式 2 面に対し本モデル 4 面、屈折率の独立設定数は従来式で 2、本モデルでは 5 である。各パラメータは術前計測で個々人の眼に fit させる。光学計算には、従来の近軸近似では精度に限界があると指摘し、skew ray tracing を導入し眼内光線計算を 3 次元ベクトル演算によって定式化する手法を述べている。以上 2 つの技術の融合により、新しい IOL 度数予測法が実現される。そのアルゴリズムは光線計算方向により、像点開始型、物点開始型の 2 通りを提案している。前者のアルゴリズムは、(1) 網膜中心窩での光線開始方向の決定、(2) 眼内光線追跡、(3) 物点上終点での眼鏡度数の計算からなり、後者ではこの逆となる。

開発された手法の基礎評価として、単純球面屈折モデルと Gullstrand/LeGrand 模型眼での評価を行い、また処理時間を実測した。結果、単純球面屈折誤差は $-5.22 \times 10^{-9} \pm 2.40 \times 10^{-7}$ mm、平均誤差絶対値 1.78×10^{-7} mm、模型眼での正視化眼鏡度数予測誤差は物点開始型で許容誤差 0.5D の 0.8%、像点開始型で 0.66%、仮想 1000 眼処理時間は物点開始型 444 ± 2.26 s、像点開始型 5.63 ± 0.07 s (10 試行) であった。以上より、開発された手法の計算途中発生誤差は小さく、

丸め誤差が大部分であり、角膜・前房水・水晶体・硝子体からなる眼光学系モデルで十分な精度でシミュレーション可能であり、また処理時間は十分小さく、特に像点開始型が高効率であるとしている。

さらに生体眼による retrospective な臨床評価を行った。IOL 移植眼 N=10 において従来法 (SRK-II、SRK/T) と予測誤差を比較し、本法の平均絶対値誤差 $0.292 \pm 0.245D$ 、SRK-II $0.917 \pm 0.405D$ (paired t-test $p < 0.005$)、SRK/T $0.479 \pm 0.339D$ ($p = 0.128$) を得た。 $\pm 0.5D$ 以下の誤差は、本法 8/10、SRK-II 2/10、SRK/T 6/10 に見られた。N=725 眼による評価でも本法が有意に誤差小となった (SRK-II $p < 0.001$ 、SRK/T $p < 0.05$) であった。以上によって、本法は従来法より誤差小さく IOL 度数予測が可能であると示された。

また開発された手法を応用し誤差解析を行い、IOL 度数予測の工学的・医学的な誤差原因を定量した。各パラメータの誤差値と拡大係数を生体眼データから推算し、その結果、誤差構成比率は眼軸長が全誤差の 58%、前房深度 17%、角膜前面曲率 9%、房水屈折率、角膜径、角膜後面曲率で計 9%と見積もられた。同様の手法で予測誤差 0.5D 以内に収める条件を算出し、眼軸長誤差 0.17mm 以内、角膜前面曲率 0.08mm 以内、前房深度 0.3mm 以内と算定した。また本法は、長眼軸長、薄角膜厚、強度乱視の症例で特に従来法より誤差小となることを 200 眼以上の臨床例から示した。また主観的眼鏡度数誤差を全誤差の約 5%、角膜経時変化誤差を約 4%と定量した。

考察において、近年の他研究では本法を臨床成績で上回るものは見られないとしている。また本法をアルゴリズムの点から論じ、物点開始型より像点開始型が処理速度約 80 倍かつ高分解能で予測可能としている。本法によって前房深度予測と光学計算を分離可能であり、従来困難だった屈折率、角膜厚、角膜径、角膜後面の影響をも解析できるとしている。また将来の応用として、角膜屈折矯正術後の IOL 度数予測を挙げている。矯正後の角膜形状や厚の実測値を用いて予測精度向上が可能である。また本法と SRK/T 式を並列に計算するスクリーニング法を提案し、これによって本法の臨床的有用性が向上するとしている。

以上から本論文では、白内障治療のための skew ray tracing と正確な眼光学系モデルによる IOL 度数予測理論を確立し、これによって模型眼のみならず生体眼においても従来法より予測誤差を低減でき、詳細な誤差解析が可能となり、誤差原因の究明、更なる性能向上など臨床上有用な新しい知見を得られることを示した。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。