
光学设计软件的架构升级：树状数据结构优化镜头设计与仿真

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36438.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

光学设计软件的架构升级：树状数据结构优化镜头设计与仿真。 导读

近年来，随着光学系统设计复杂度的不断提升，尤其是离轴自由曲面、多路径光学系统及高精度公差分析等需求的增加，传统基于表面列表的光学设计软件逐渐显露出其局限性。列表式数据结构虽适用于经典轴对称镜头设计，但在处理多通道、多序列或复杂机械依赖关系时，往往需要通过繁琐的变通方案来实现，导致模型构建复杂、维护困难且易出错。

近日，德国Quadoa光学系统有限公司研究团队在Light: Advanced Manufacturing上发表了题为A tree-like data structure for sequential and multi-sequential ray tracing的突破性研究成果，提出了一种全新的树状数据结构，用于光学设计软件中的镜头数据管理与光线追迹计算。该架构通过将光路序列信息与镜头几何与光学参数分离，实现了多序列光线追迹、模块化表面定义以及灵活的坐标系管理，显著提升了光学设计的效率与灵活性。相比传统列表式数据结构，树状架构具有多重优势：支持在单一模型中定义任意数量的序列光线追迹路径，而非仅限于单一路径；模块化表面方法为镜头几何和光学属性定义提供了前所未有的自由度；同时引入了在局部或全局坐标系中放置镜头、组装件或表面的多种选项，以及在明确定义的镜头坐标系内定义折射率不均匀性或双折射的能力。

小百科1：什么是STOP分析？

结构-热-光学性能（Structural-Thermal-Optical-Performance，STOP）分析，是一种多物理场耦合仿真方法，用于综合评估光学系统在温度变化、机械应力等实际工况下的性能，它揭示了重力、振动、温度变化如何导致镜头形变、折射率改变，从而影响成像质量或激光光束。传统方法需在多个软件间手动传递数据，繁琐易错。而树状数据结构天然支持STOP分析，能够将有限元分析得到的面形变形、温度场数据，自动映射回光学模型中的对应表面或透镜材料。通过修改局部坐标系或添加表面偏差模块，即可快速模拟机械位移、热效应，实现全自动化分析。该技术是设计航天器、光刻机、高功率激光器等高端装备的关键，确保其在复杂环境下依然性能卓越。

小百科2：为什么需要多序列光线追迹？

在多通道光学系统（如干涉仪、鬼像分析系统）中，光线可能沿多条路径传播。传统列表结构只能定义单一序列，而树状结构允许用户在同一个模型中定义任意数量的光路序列，每条路径可独立配置透射、反射、衍射等交互类型，极大简化了多路径系统的建模与分析流程。

一、光路与镜头数据的分离

传统列表中，表面顺序隐式定义了光线路径。新方法将光路序列作为独立数据结构，仅引用镜头模型中的表面，从而支持同一表面在不同路径中被多次使用，极大简化了双通或多通系统的建模。相比非序列光线追迹，这种多序列方法保持了序列追迹的速度优势，因为光路信息预先确定，无需在追迹过程中搜索下一个击中的表面。

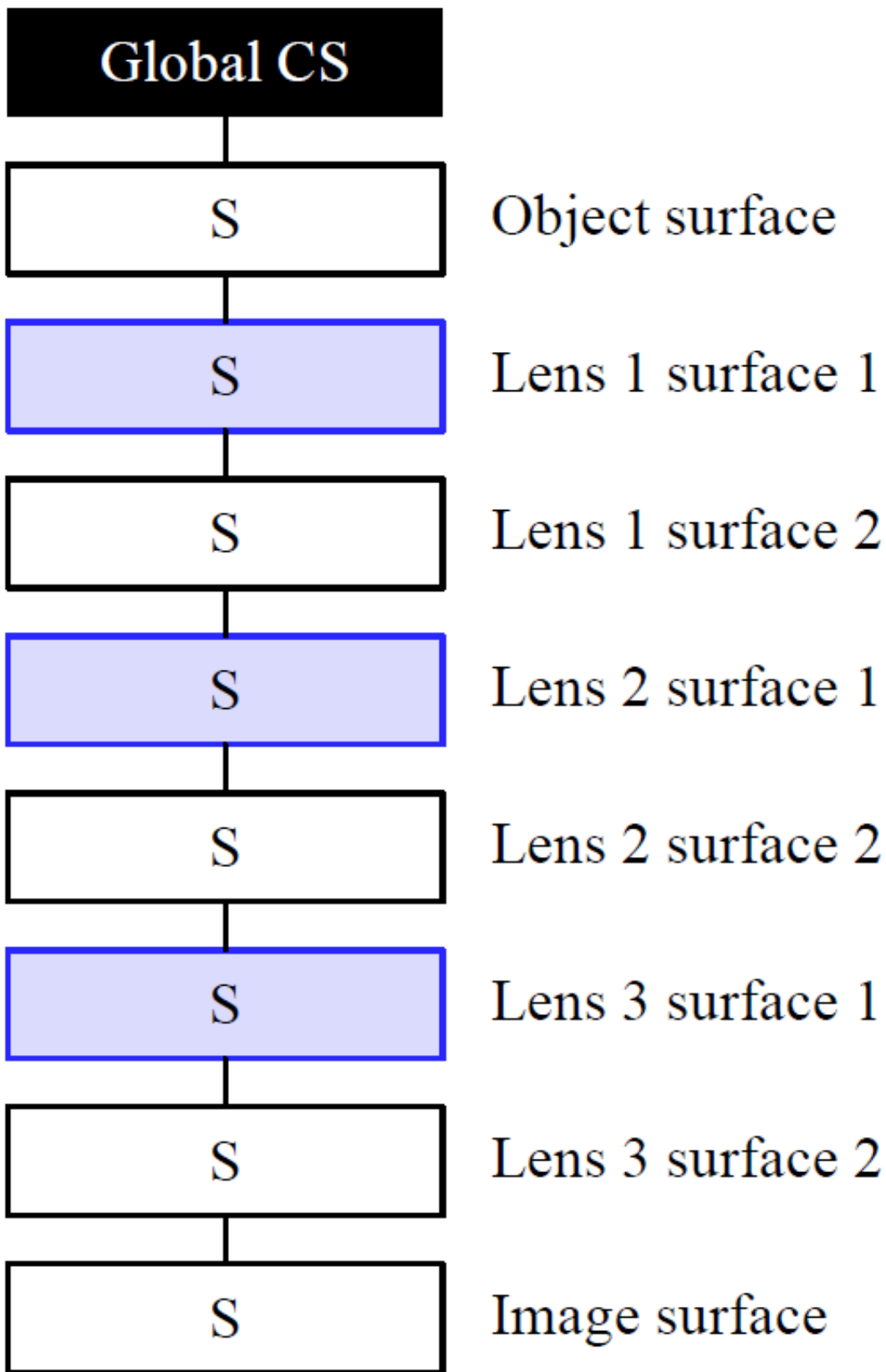


图1：基于列表的表面数据结构

二、模块化表面定义

不再依赖固定表面类型。用户可在基础球面上叠加任意数量的属性模块（如非球面项、泽尼克偏差、网格 sag 插值、局部高斯偏差等），甚至可以导入实测面形数据，通过模块化叠加的方式，能够定义几乎无限种类的表面类型，解决了传统方法需要为每种应用场景预设特定表面类型的局限性。

三、嵌套坐标系系统

每个镜头或组装件可定义局部坐标系，支持相对或绝对定位，并可自由设置旋转中心。这一特性尤其适用于公差分析、STOP分析等场景，无需引入虚拟面即可实现复杂的坐标变换。新架构支持将有限元分析结果（表面变形、元件位移、折射率变化等）直接导入各层级坐标系，实现从机械设计到光学性能评估的无缝集成。

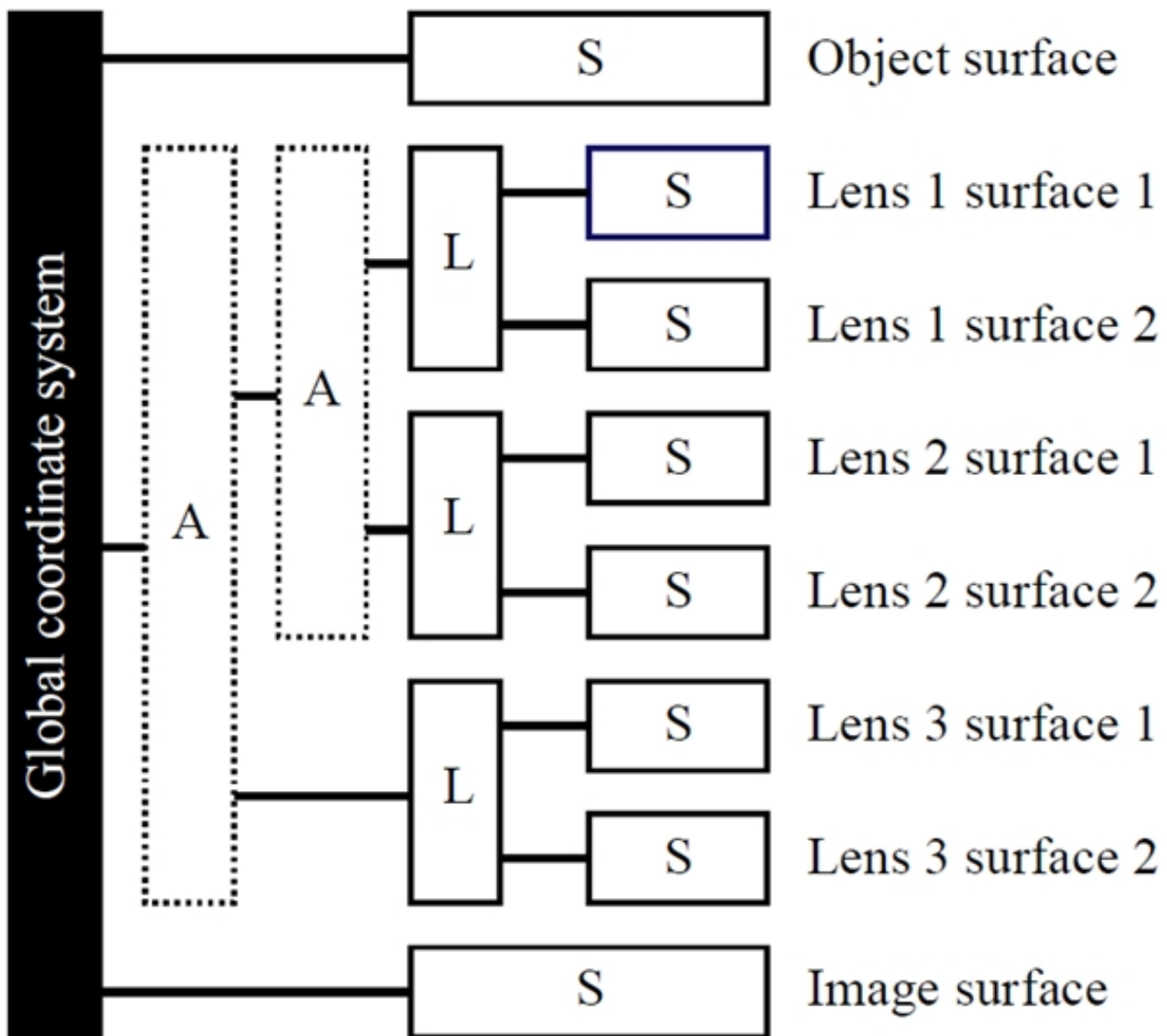


图2：树状结构中的嵌套坐标系系统

四、体积光学属性支持

双折射材料、梯度折射率（gradient index profile, GRIN）透镜等体积光学效应可在镜头坐标系中独立定义，避免因表面倾斜或位移导致材料属性坐标系错位的问题。

五、应用案例

猫眼逆反射器：双通系统中同一镜头表面被两次引用，无需重复建模。

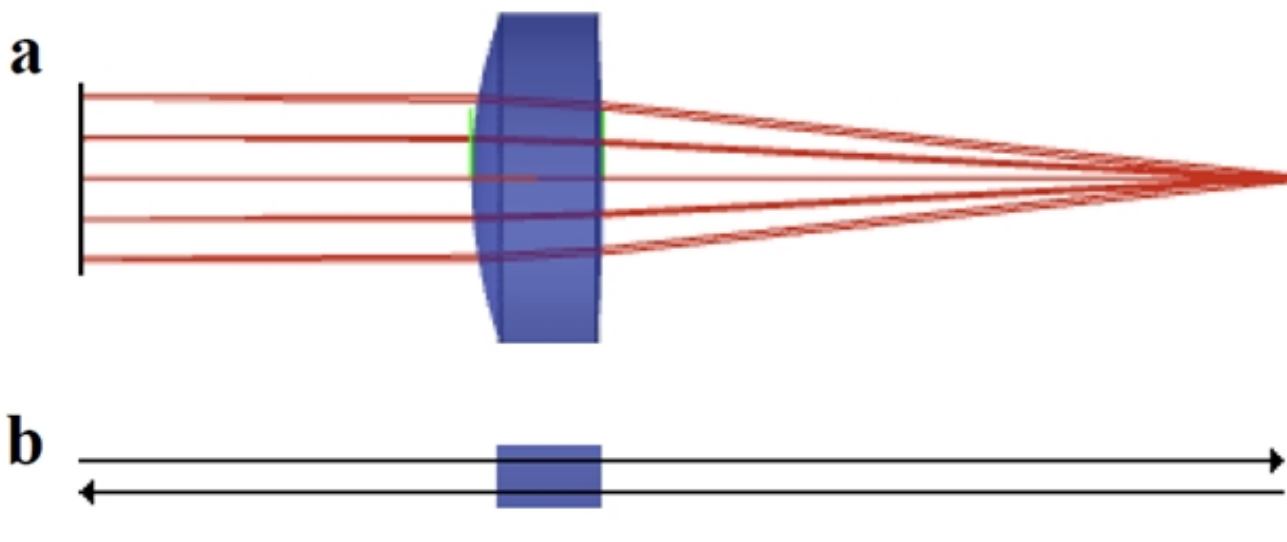


图3：猫眼逆反射器

相机镜头鬼像分析：在同一模型中自动生成多条鬼像路径，避免转换为非序列模式带来的信息丢失与计算开销。

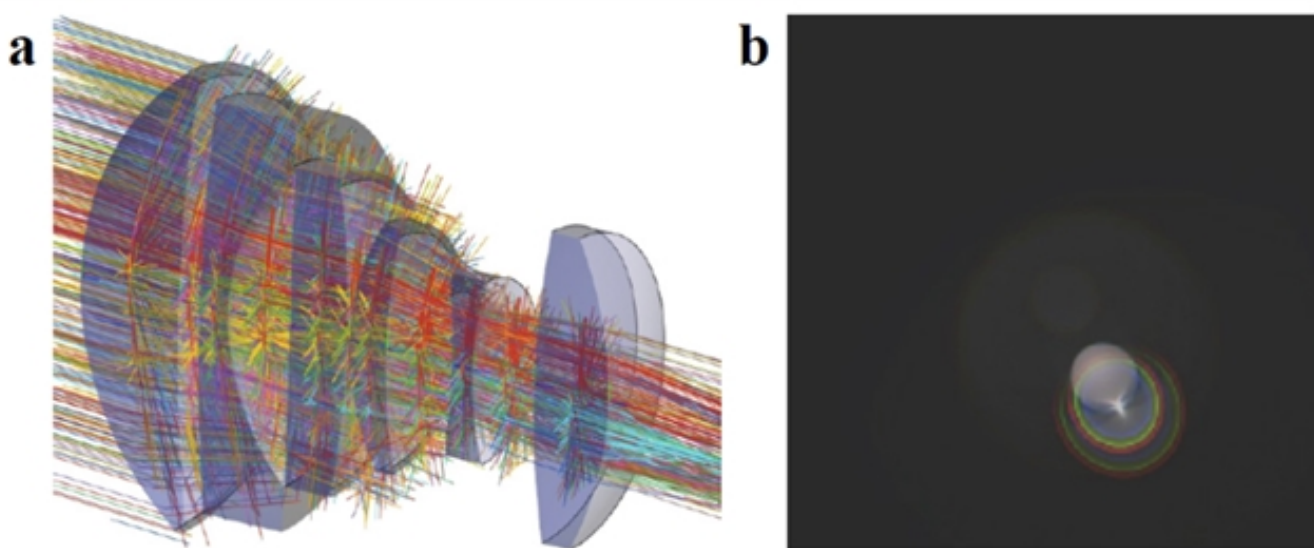


图4：相机镜头鬼像分析

Twyman-Green干涉仪：仅用5个光学面即可建模分束立方体，通过局部坐标系旋转实现公差分析，无需额外虚拟面。

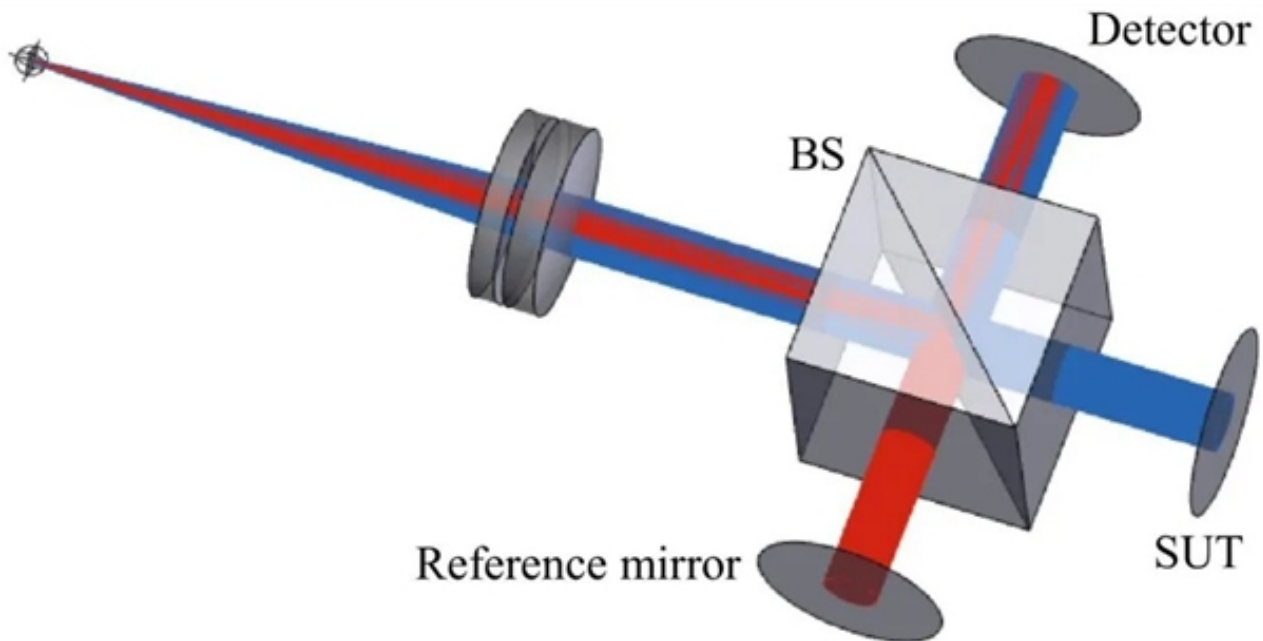


图5：Twyman-Green干涉仪装置图

六、总结展望

该架构已集成于Quadoo公司的光学设计软件中，并显示出在复杂光学系统设计与分析中的巨大潜力。未来，团队计划进一步优化其与CAD/FEM工具的集成，推动STOP分析流程的自动化，并为柔性光学与微结构光学提供更强支持。

这项研究不仅为光学设计软件提供了新一代数据架构，也彰显了数据结构创新在现代工程软件中的核心作用。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2025.043>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：Jens Siepmann 来源：《光：先进制造》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发