

9-23-2022

## Design of Optical Compound Eye Simulation Software for Small Aircraft Applications

Qiming Qi

*1.National University of Defense Technology, National Key Laboratory of Science and Technology on ATR, Changsha 410073, China;2.Unit 32139 of the Chinese PLA, Beijing 101200, China;; qiqiming19@163.com*

Ruigang Fu

*1.National University of Defense Technology, National Key Laboratory of Science and Technology on ATR, Changsha 410073, China;*

Ping Wang

*1.National University of Defense Technology, National Key Laboratory of Science and Technology on ATR, Changsha 410073, China;*

Min Wang

*1.National University of Defense Technology, National Key Laboratory of Science and Technology on ATR, Changsha 410073, China;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Design of Optical Compound Eye Simulation Software for Small Aircraft Applications

## Abstract

**Abstract:** Optical compound eye has the advantages of large field of view, multiple viewing angles and high resolution. With another advantage that it can conformal combine with small aircraft, optical compound eye has application value in reconnaissance and surveillance, target detection, image navigation and other aspects. *An optical compound eye simulation software for small aircraft is designed for the current situation of long development period of optical compound eye design and high cost of flight test in practical applications.* The software integrates compound eye imaging, aircraft simulation and data management, and each functional module is extensible. The simulation results show that the frame rate can reach 23.3 fps under the configuration of 9 sub-eyes, and the results are accurate. The software can be used for the optimization of optical compound eye design scheme and the test of processing algorithms, which is of great significance to the development of aircraft application.

## Keywords

optical compound eye, aircraft, simulation software, Unigine, Qt

## Authors

Qiming Qi, Ruigang Fu, Ping Wang, Min Wang, and Hongqi Fan

## Recommended Citation

Qiming Qi, Ruigang Fu, Ping Wang, Min Wang, Hongqi Fan. Design of Optical Compound Eye Simulation Software for Small Aircraft Applications[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(09): 1999-2008.

## 面向小型航空器应用的光学复眼仿真软件设计

祁启明<sup>1,2</sup>, 傅瑞罡<sup>1</sup>, 王平<sup>1</sup>, 汪敏<sup>1</sup>, 范红旗<sup>1\*</sup>

(1. 国防科技大学 自动目标识别重点实验室, 湖南 长沙 410073; 2. 中国人民解放军 32139 部队, 北京 101200)

**摘要:** 光学复眼视场大、视角多、分辨率高, 具备与小型航空器共形结合的优势, 在侦察监视、目标探测和图像导航等方面具有应用价值。针对实际应用中存在的光学复眼设计研制周期长、航空器飞行成本高的现状, 设计了一种面向小型航空器应用的光学复眼仿真软件。该软件集复眼成像、航空器模拟、数据管理于一体, 各功能接口可扩展。仿真表明, 在 9 个子眼的配置下仿真帧率可达到 23.3 fps, 结果精确。该软件可用于光学复眼设计方案优选与应用算法验证, 对面向航空器应用的复眼系统研制具有重要意义。

**关键词:** 光学复眼; 航空器; 仿真软件; Unigine; Qt

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2022) 09-1999-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0317

## Design of Optical Compound Eye Simulation Software for Small Aircraft Applications

Qi Qiming<sup>1,2</sup>, Fu Ruigang<sup>1</sup>, Wang Ping<sup>1</sup>, Wang Min<sup>1</sup>, Fan Hongqi<sup>1\*</sup>

(1. National University of Defense Technology, National Key Laboratory of Science and Technology on ATR, Changsha 410073, China;

2. Unit 32139 of the Chinese PLA, Beijing 101200, China)

**Abstract:** Optical compound eye has the advantages of large field of view, multiple viewing angles and high resolution. With another advantage that it can conformal combine with small aircraft, optical compound eye has application value in reconnaissance and surveillance, target detection, image navigation and other aspects. An optical compound eye simulation software for small aircraft is designed for the current situation of long development period of optical compound eye design and high cost of flight test in practical applications. The software integrates compound eye imaging, aircraft simulation and data management, and each functional module is extensible. The simulation results show that the frame rate can reach 23.3 fps under the configuration of 9 sub-eyes, and the results are accurate. The software can be used for the optimization of optical compound eye design scheme and the test of processing algorithms, which is of great significance to the development of aircraft application.

**Keywords:** optical compound eye; aircraft; simulation software; Unigine; Qt

## 引言

小型航空器搭载光学成像探测系统广泛应用于侦察监视、目标探测和图像导航等领域。为了提高航空器的目标环境感知能力, 光学成像系统需要更大视场和更高分辨率, 但面临小型轻量化的困难。昆虫复眼具有轻量、视角多、视场大等优点<sup>[1]</sup>,

受其启发, 近 20 年来学者提出了多种光学复眼<sup>[2]</sup>。在达到同等水平的视场和分辨率前提下, 与单孔径光学系统相比, 光学复眼视角多、立体感知能力强, 同时具备与航空器共形结合的优势, 可显著减小航空器载荷, 实现航空器光学系统小型轻量化。

由于光学复眼设计研制难度大、周期长, 且对于小型航空器应用, 其飞行测试验证过程复杂, 严

收稿日期: 2021-04-15 修回日期: 2021-05-31

第一作者: 祁启明(1994-), 男, 硕士生, 研究方向为自动目标识别。E-mail: qiqiming19@163.com

通讯作者: 范红旗(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为弱小目标检测跟踪。E-mail: fanhongqi@nudt.edu.cn

重影响复眼的普及应用及后端算法研究。因此,迫切需要一种面向小型航空器应用的光学复眼仿真设计工具,用于小型航空器数字或半实物仿真系统,以便设计方案优选,同时可为后端算法研究提供数据支持。

文献[3]借助 3ds Max 建模软件开展了复眼全景成像研究,通过在虚拟场景中对光学复眼建模和成像,可服务于复眼构型设计与算法研究。但该方法在复眼构型配置方面缺乏灵活性,同时缺乏与飞行平台的集成仿真。基于游戏引擎设计的插件 UnrealCV<sup>[4]</sup>、UnrealGT<sup>[5]</sup>面向机器视觉应用,通过在虚拟场景中采集图像生成数据集,为视觉算法研究提供数据支持;插件 AirSim<sup>[6]</sup>、Sim4CV<sup>[7]</sup>支持在虚拟场景中进行四旋翼无人机和车辆的运动模拟,为视觉算法在智能驾驶上的应用测试提供工具。然而,这些插件仅支持单孔径光学成像仿真,并且不便于功能接口扩展。从这些先例可知,借助计算机图形学工具实现光学复眼的应用仿真成为可能。目前,未找到类似的光学复眼应用仿真的公开研究。使用三维视景引擎设计仿真软件将光学复眼成像和小型航空器应用融为一体成为一种便捷可行的新思路。

本文采用 Unigine 引擎,面向小型航空器应用,

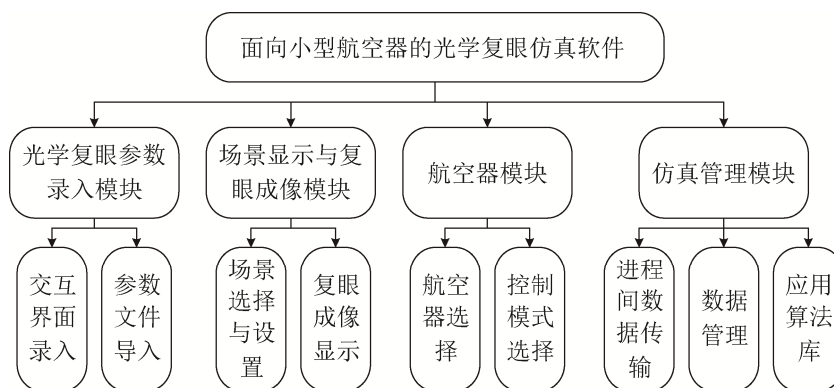


图 1 软件结构

Fig. 1 Framework of software

光学复眼参数录入模块可实现复眼构型参数的快速录入,设计了交互界面输入和 Excel 参数文件导入 2 种方式;场景显示与复眼成像模块用于显

设计了一种模块化、可扩展、易操作的光学复眼仿真软件。基于该仿真软件,用户可针对多种构型的光学复眼进行仿真,优选系统设计方案,并获取仿真数据开展后端算法研究。软件可嵌入小型航空器数字或半实物仿真系统,用于光学复眼在系统中的仿真测试与性能评估。

## 1 软件总体设计

### 1.1 软件功能

仿真软件运行环境为普通计算机,使用 Unigine 引擎和 Qt 设计。针对小型航空器应用的光学复眼仿真,功能种类包括:①灵活快捷录入光学复眼构型参数和设置安装方式;②复眼成像实时显示和导出;③支持复眼成像数据单拍和录像方式存储并同步记录航空器飞行数据;④可导入虚拟场景与天气特效;⑤航空器类型的选择与控制模式切换;⑥具备应用算法接口,可离线处理数据。

### 1.2 软件结构

按照仿真软件的功能需求,软件可分为光学复眼参数录入、场景显示与复眼成像、航空器和仿真管理等模块。软件结构如图 1 所示。

示大规模三维场景,实现光学复眼成像和数据导出、保存;航空器模块用于航空器类型和控制模式选择,实现航空器飞行仿真;仿真管理模块用于规

范进程间数据传输, 管理和处理保存的成像数据, 注入应用算法进行算法验证, 包含进程间数据传输、数据管理和应用算法库 3 个子模块。

### 1.3 软件实现

仿真软件采用 C++编程语言, 分为 Qt 进程和 Unigine 引擎进程。Qt 是一种基于 C++编程语言的图形界面应用程序开发框架, 界面效果好, 可跨平台运行, 用于设计软件的交互界面。Unigine 引擎是一款实时三维渲染引擎, 在大型地形构建、粒子渲染等方面表现突出, 且支持 64 位双精度坐标, 在军事、航海、航空航天等领域具有重要应用价值。软件的场景显示与复眼成像模块和航空器模块选用 Unigine 2.7.2 Sim 版, 采用 Visual Studio 2019 编程设计独立的显示窗口。

进程间使用 Socket 接口, 采用 TCP 数据传输协议。光学复眼系统往往具有很多子眼, 软件设计中需要解决实时成像显示、导出和实时仿真数据存储的问题。

## 2 光学复眼参数录入模块

为了实现光学复眼成像, 首先需对复眼建模, 然后根据每种构型的所需参数设计界面, 实现复眼模型参数的快速录入。

### 2.1 光学复眼模型

光学复眼的构型主要有平面型结构<sup>[8-9]</sup>和凸面型结构。凸面型结构有 3 种典型排布类型: 球面多圈排布<sup>[10-12]</sup>、球面多列排布<sup>[13-14]</sup>、柱面排布<sup>[15]</sup>。4 种排布对应 4 种坐标系, 将子眼位姿参数化表示。

对于平面型结构而言, 所有子眼的光心共平面, 光轴一般互相平行, 如图 2(a)所示。以复眼系统的几何中心为原点建立直角坐标系  $O-XYZ$ , 则每个子眼的坐标可表示为  $(\Delta X, \Delta Y)$ , 其中  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$  分别表示光心沿  $X$  轴和  $Y$  轴距几何中心的长度。

对于凸面型结构而言, 同样以复眼系统的几何中心为原点建立直角坐标系  $O-XYZ$ 。在球面多圈排

布和球面多列排布中, 所有子眼排布在半径为  $R$  的球面上, 光轴延长线交于球心, 如图 2(b)、(c)所示。球面多圈排布的子眼位姿可用球坐标  $(\theta, \phi, R)$  表示, 其中  $\theta$  表示天顶角,  $\phi$  表示方位角; 球面多列排布的子眼位姿可用极坐标  $(\phi, \theta, R)$  表示, 其中  $\phi$  表示方位角,  $\theta$  表示俯仰角。在柱面排布中, 所有子眼排布在半径为  $R$  的圆柱面上, 光轴延长线交于圆柱中轴, 如图 2(d)所示。子眼位姿可用圆柱坐标表示为  $(\phi, \Delta Y, R)$ , 其中  $\phi$  表示方位角,  $\Delta Y$  表示光心距几何中心的高度。

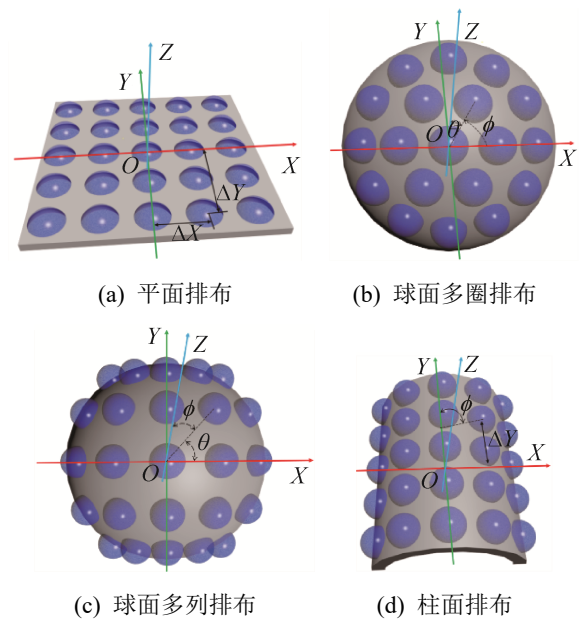


图 2 光学复眼模型

Fig. 2 Optical compound eye model

不考虑成像畸变, 每个子眼的光学参数包括焦距  $f$ 、图像传感器宽度  $d$  和分辨率  $N_u \times N_v$ 。焦距、图像传感器宽度共同确定视场角大小, 分辨率决定单个子眼成像的像素数量。不同构型的光学复眼模型参数如表 1 所示。

表 1 光学复眼模型参数

Table 1 Parameters of optical compound eye model

类型	单个子眼的参数
平面排布	$f, d, N_u, N_v, \Delta X, \Delta Y$
球面多圈排布	$f, d, N_u, N_v, \theta, \phi, R$
球面多列排布	$f, d, N_u, N_v, \phi, \theta, R$
柱面排布	$f, d, N_u, N_v, \phi, \Delta Y, R$

## 2.2 参数录入交互界面设计

软件设计了2种参数录入方式：①导入模型参数 Excel 文件，可涵盖一般构型的光学复眼系统；②交互界面输入，通过少量排布约束参数的输入完成对称结构光学复眼系统的模型参数录入，方便快捷。

参数 Excel 文件导入时，光学复眼的构型不同，格式模板不同。球面多圈排布复眼的模型参数文件如图3所示。

复眼类型	A	B	C	D	E	F	G	H
1	序号	焦距(mm)	传感器宽度(m)	分辨率宽	分辨率高	天顶角(°)	方位角(°)	半径(mm)
2	0	20	20	128	128	0	0	100
3	1	20	20	128	128	15	0	100
4	2	20	20	128	128	15	60	100
5	3	20	20	128	128	15	120	100
6	4	20	20	128	128	15	180	100
7	5	20	20	128	128	15	240	100
8	6	20	20	128	128	15	300	100
9	7	20	20	128	128	30	0	100
10	8	20	20	128	128	30	36	100
11	9	20	20	128	128	30	72	100
12	10	20	20	128	128	30	108	100
13	11	20	20	128	128	30	144	100
14	12	20	20	128	128	30	180	100
15	13	20	20	128	128	30	216	100
16	14	20	20	128	128	30	252	100
17	15	20	20	128	128	30	288	100
18	16	20	20	128	128	30	324	100

图3 参数 Excel 文件

Fig. 3 Parameters file in Excel

通过交互界面录入模型参数时，输入光学参数和子眼排布参数的界面分别如图4(a)~(e)所示。为便于参数非一致性修改，在参数列表中双击任意项可修改参数，界面如图4(f)所示。



图4 参数输入对话框

Fig. 4 Parameter input dialogs

## 3 场景显示与复眼成像模块

三维视景引擎<sup>[16]</sup>经过多年发展，在仿真训练、游戏开发、影视制作上运用广泛，其良好的光线追踪渲染性能可合成媲美真实世界的虚拟场景。该模块基于 Unigine 引擎二次开发，可显示航空器的飞行场景和实现光学复眼成像，完成数据保存和实时导出。

### 3.1 三维场景显示

基于 Unigine 引擎的二次开发，包含2个内容：①场景设计；②基于 C++接口的逻辑实现。Unigine 支持 3ds Max、Maya 等三维建模软件的模型数据导入，通过场景编辑器设计大型场景。Unigine 引擎包含丰富的 C++交互接口，通过编程让显示窗口按既定规则更新显示内容。

选择场景文件载入至 Unigine 引擎进程后，显示窗口显示该场景。面向航空器应用，三维场景包括植被、山地、道路、建筑、云层、海洋和天气特效等内容。天气特效包括昼夜时间、云量、风速、降雨、海面波浪。傍晚、多云、降雨、11 级海浪的效果分别如图5所示。

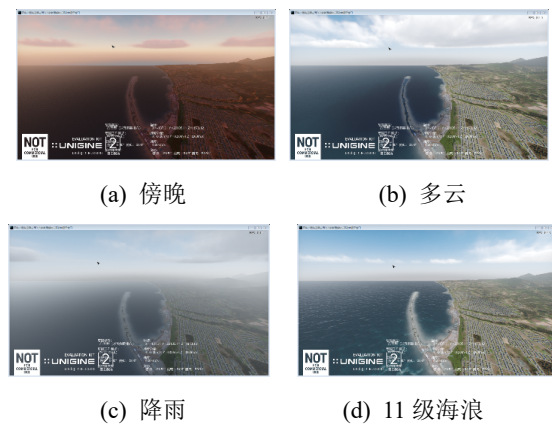


图5 天气特效

Fig. 5 Weather effects

### 3.2 光学复眼成像

光学复眼成像包含2个内容：①实时显示；②成像数据实时存储和导出。

显示窗口通过 Unigine 引擎主线程的 `update()`、

*flush()*、*render()*三个函数完成每帧的场景渲染。*update()*函数用于控制窗口显示具体的内容;*flush()*函数用于执行物理效果仿真计算和其他非渲染计算;*render()*函数用于设置场景渲染的后期处理。

在显示窗口中, 每个子眼用 Unigine 引擎的 API 接口 *WidgetSpriteViewport* 类生成独立显示区域。为确保复眼成像位姿正确, 显示窗口通过 *flush()* 函数实时更新各子眼位姿状态, 在 *update()* 函数中完成光学复眼成像渲染。光学复眼实时成像显示如图 6 所示。

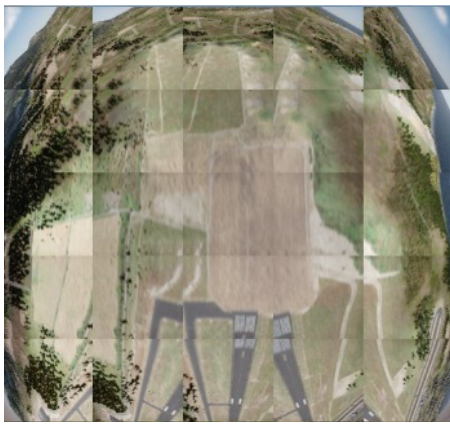
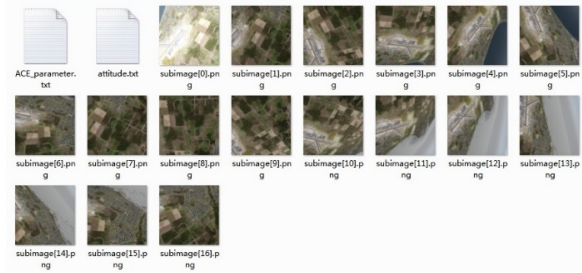


图 6 实时成像显示  
Fig. 6 Real-time imaging display

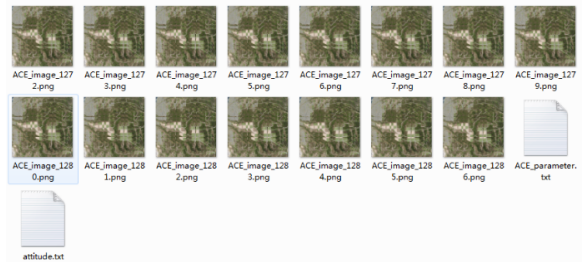
各子眼独立显示区域通过 *update()* 函数更新内容, 数据存于显卡, 未与内存进行数据传输。由于成像数据必须经过显卡至内存的数据传输后才能保存和导出, 并且该数据传输只能发生在主线程的 *update()* 和 *render()* 两个函数中, 所以显卡至内存的数据传输会阻塞主线程, 导致成像数据保存和导出时仿真帧率下降。保存仿真数据时有内存至硬盘的数据传输, 为保证内存至硬盘的数据传输不阻塞主线程, 在接受保存仿真数据指令后, 显示窗口将开启独立线程进行内存至硬盘的数据传输。

仿真数据存储有单拍和录像 2 种形式。选择单拍存储时, 每个子眼渲染得到的成像数据直接在主线程 *render()* 函数中进行显卡至内存的数据传输。而选择录像存储时, 由于显卡至内存的数据传输频率大, 为减小主线程受阻塞的程度, 显示窗口开启

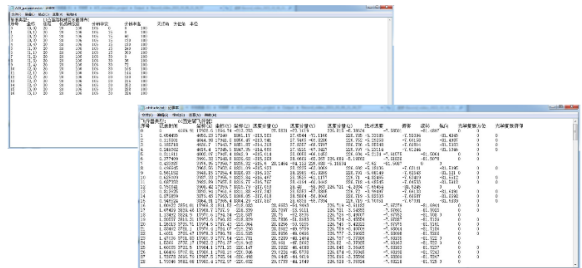
一个独立线程将光学复眼成像显示区域截屏, 所有子眼成像集成为单张图像传输至内存。单拍和录像存储的数据分别如图 7(a)、(b) 所示。为便于后端应用研究, 在内存至硬盘的数据传输线程中以 *txt* 文件形式同步记录仿真参数, 包括光学复眼模型参数、航空器飞行参数和复眼系统相对于航空器的姿态, 如图 7(c) 所示。



(a) 成像数据单拍存储



(b) 成像数据录像存储



(c) 仿真参数记录

图 7 仿真数据存储  
Fig. 7 Storage of simulation data

为便于仿真软件嵌入数字或半实物仿真系统进行航空器应用的测试评估, 软件可通过专用图像注入卡, 将仿真成像数据从内存实时导出至后端信息处理系统。

综上所述, 光学复眼成像显示、存储、导出的流程如图 8 所示。

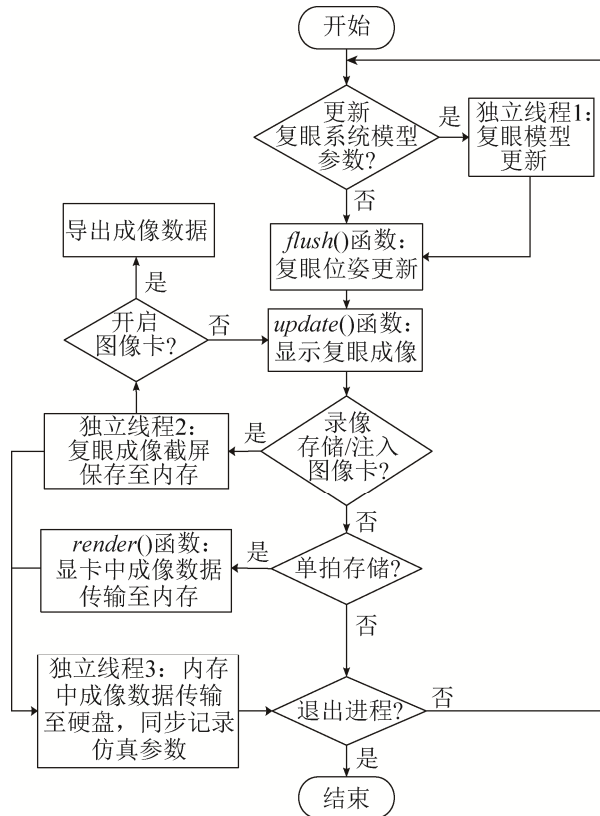


图 8 光学复眼成像示意图

Fig. 8 Schematic diagram of optical compound eye imaging

## 4 航空器模块

航空器模块用于航空器飞行仿真,通过构建航空器模型库从而提供多种航空器选择接口,并设计键盘操作、外接控制指令、预定轨迹飞行 3 种控制模式接口。

航空器模型库可扩展,已有固定翼、四旋翼两种航空器可选择。为了便于自由选择场景点采集成像数据,模块添加了自由视角模式作为复眼成像数据库的生成工具。

3 种控制模式可适应不同仿真需求下的小型航空器飞行模拟。键盘操作模式是基于航空器飞行动力学模型,通过设置键位输入控制指令,实时更新航空器位姿。不同类型航空器的操作键位如表 2 所示。外接控制指令模式是由交互界面通过 Socket 通信向显示窗口传输控制指令,为软件嵌入小型航空器数字或半实物仿真系统进行测试提供接口;预定轨迹飞行模式中,显示窗口按选择的轨迹文件更

新航空器位姿。航空器轨迹文件通过 Unigine 场景编辑器设计生成,整合为轨迹库。

表 2 键盘操作模式键位设置

Table 2 Keyboard settings for keyboard operation mode

航空器	键位
固定翼	加减速: []、俯仰: SW、滚转: AD、偏航: QE、收放着陆轮: 回车、观察视角: 方向键
四旋翼	升降: []、倾斜: ASDW、偏航: QE、观察视角: 方向键
自由视角	前后移动: WS、左右移动: AD、上下移动: EQ、加速: Shift、观察视角: 方向键/鼠标

## 5 仿真管理模块

仿真管理模块包含进程间数据传输、数据管理和应用算法库 3 个子模块,提供更多功能接口。

### 5.1 进程间数据传输

进程间数据传输子模块用于软件的交互界面和显示窗口的数据传输。软件采用 Socket 接口的 TCP 协议,将交互界面设置为客户端,显示窗口设置为服务器端。初始设置中,Socket 使用本机 IP 地址“127.0.0.1”,默认交互界面和显示窗口位于同一台主机,也可分别设置 IP 地址多机运行提升仿真性能。

Socket 采用 TCP 传输协议,每一帧数据由帧头和帧尾两部分组成。帧头大小为 10 字节,由 3 字节标识符、2 字节校验符、1 字节数据帧类型符和 4 字节信息大小符组成。数据帧类型分为光学复眼模型参数设置、场景设置、航空器设置、复眼成像设置、仿真状态、航空器控制指令等 6 种。Socket 使用参数设置、仿真状态、航空器控制指令 3 个端口,其中参数设置端口用于光学复眼模型参数设置、场景设置、航空器设置、复眼成像设置的数据传输。

软件运行时打开参数设置和仿真状态 2 个端口,交互界面开启定时器线程请求显示窗口发送仿真状态,显示窗口接受指令后发送航空器位姿信息和复眼状态信息。当参数设置改变时,交互界面发送相应参数设置数据帧让显示窗口更新设置。航空



器控制使用外接控制指令模式时, 交互界面实时向显示窗口发送航空器控制指令, 显示窗口更新显示航空器的位置姿态。进程间数据传输如图 9 所示。

### 5.2 数据管理

数据管理子模块用于查看、删除仿真数据, 并

对光学复眼成像进行重构。仿真数据存储在“Output”文件夹中, 如图 10(a)所示。在软件交互界面的“仿真数据管理”列表中, 选择其中一个数据项右击鼠标, 可选择“打开文件夹”“删除”“播放”“成像重构”, 如图 10(b)所示。

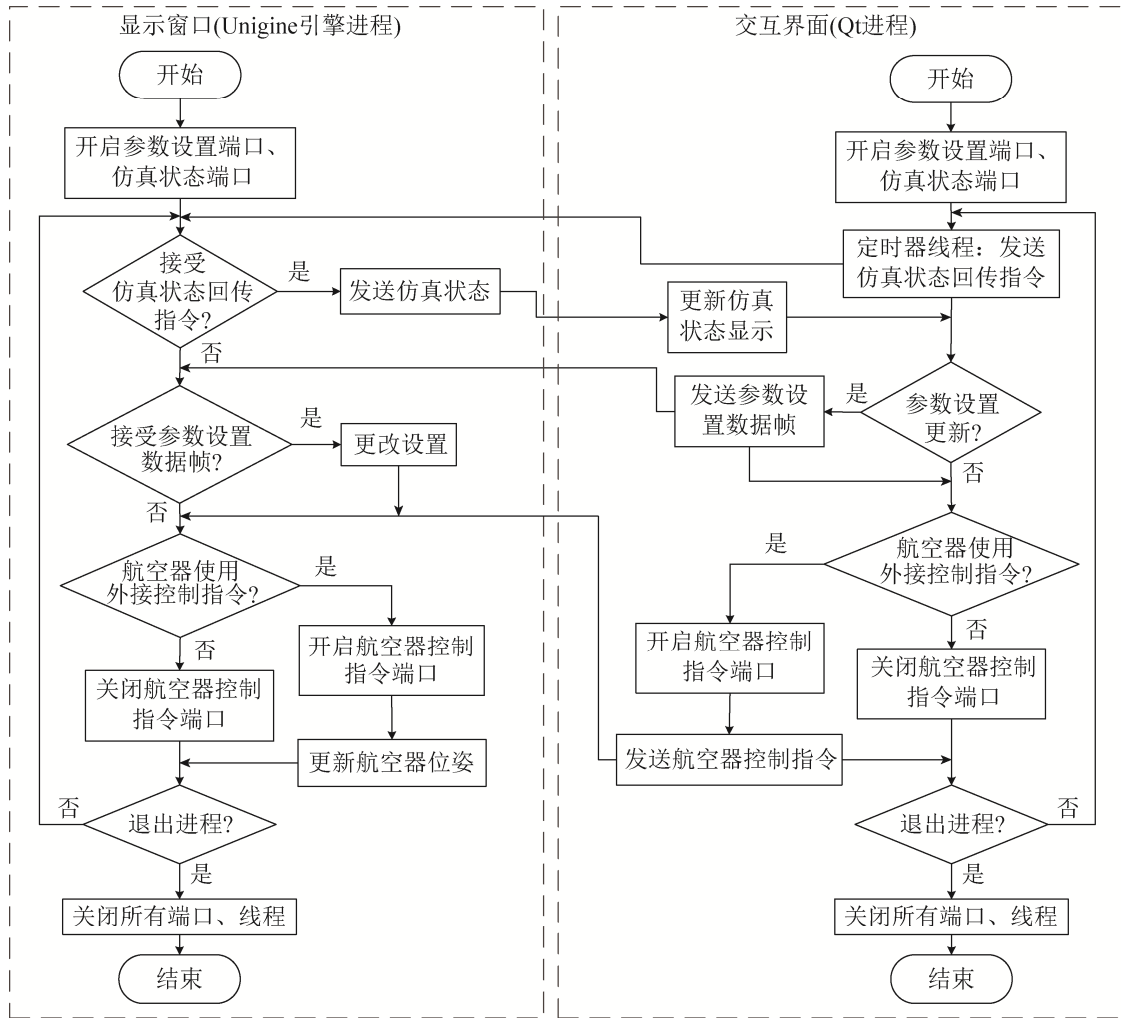


图 9 进程间数据传输示意图  
Fig. 9 Schematic diagram of interprocess data transfer



图 10 数据管理  
Fig. 10 Data management

### 5.3 应用算法库

应用算法库子模块用于后端算法的注入, 便于算法验证。针对光学复眼大视场成像的设计方案优选的需求, 软件添加了基于开源 OpenCV 库的图像拼接算法接口作为一个应用示例。若构型方案能用于大视场成像, 那么拼接后的图像视场连续, 子图像间没有像素空白。对有 35 个子眼的特定构型光

学复眼成像进行拼接后得到大视场图，如图 11 所示。拼接图像完整、视场连续，该构型光学复眼可用于大视场成像。

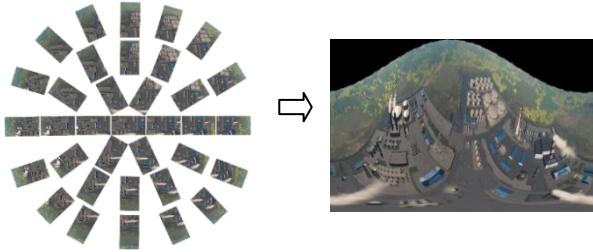


图 11 应用算法示例：图像拼接

Fig. 11 Example of applied algorithm: image stitching

## 6 仿真实例

测试该仿真软件的硬件配置如表 3 所示。以凸面型球面多列排布为例，设置光学复眼模型参数如表 4 所示，其复眼构型外观如图 12(a)所示。

仿真中，选择固定翼航空器，利用键盘操纵飞行，如图 12(b)所示。分别完成一次光学复眼成像数据单拍存储和录像存储，如图 12(c)、(d)所示。

表 3 仿真软件的硬件配置

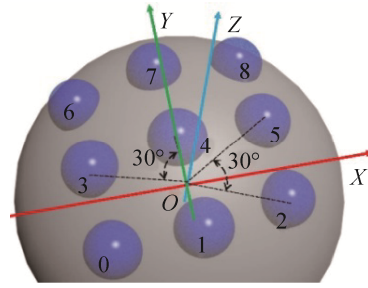
Table 3 Hardware configuration of simulation software

名称	内容
显卡	Nvidia RTX 2070 SUPER
CPU	Intel Core i7-9700K
硬盘	固态 1TB
内存	8 GB
操作系统	Windows 7

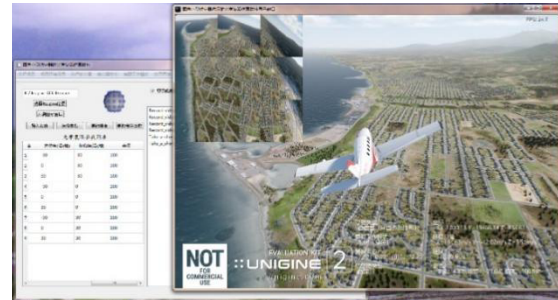
表 4 复眼模型参数

Table 4 Parameters of compound eye model

参数	数值
子眼数量(个)	水平：3、垂直：3
方位夹角/(°)	30
俯仰夹角/(°)	30
球面半径/mm	100
子眼焦距/mm	20
子眼传感器宽度/mm	20
子眼分辨率	512×512



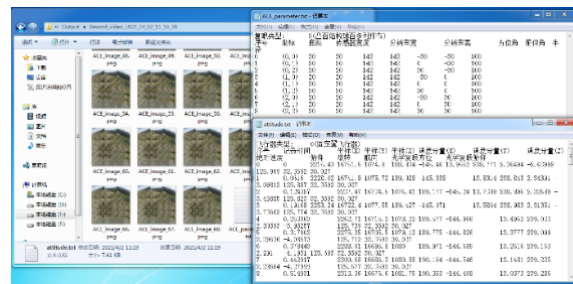
(a) 光学复眼构型



(b) 飞行测试



(c) 单拍数据



(d) 录像数据

图 12 仿真实例

Fig. 12 Simulation example

为验证仿真结果的精确性，列出图 12(c)中单拍数据存储时记录的在世界直角坐标系下光学复眼各子眼的光心坐标、光轴向量，如表 5 所示，此时记录的复眼中心坐标为(-2 547.083, 1 8281.270,

362.857)。经过计算, 各子眼的光心坐标到复眼中心坐标的欧式距离均为 100 mm, 与表 4 中设定的球面半径一致。各子眼的光心坐标与复眼中心坐标相减得到的向量与各子眼光轴向量平行。计算 0、3、6 号子眼之间光轴向量夹角为 30°, 同时计算出 3、4、5 号子眼之间光轴向量夹角为 30°, 与表 4 中设定的俯仰夹角和方位夹角比对, 结果一致。

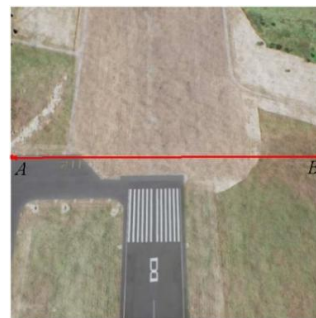
表 5 光学复眼仿真参数

Table 5 Simulation parameters of optical compound eye

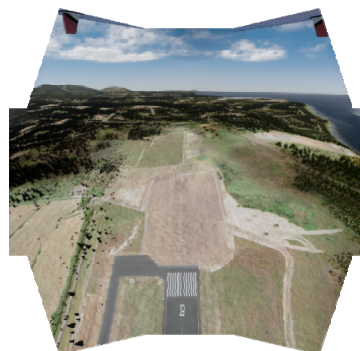
序号	光心坐标(X,Y,Z)	光轴向量(X,Y,Z)
0	-2 547.182,18 281.252,362.852	-0.983,-0.178,-0.046
1	-2 547.179,18 281.296,362.845	-0.957,0.264,-0.116
2	-2 547.159,18 281.335,362.852	-0.752,0.657,-0.047
3	-2 547.164,18 281.240,362.805	-0.803,-0.298,-0.516
4	-2 547.161,18 281.291,362.797	-0.774,0.212,-0.597
5	-2 547.137,18 281.336,362.805	-0.537,0.666,-0.518
6	-2 547.124,18 281.236,362.772	-0.408,-0.338,-0.848
7	-2 547.122,18 281.280,362.765	-0.382,0.104,-0.918
8	-2 547.101,18 281.319,362.772	-0.177,0.497,-0.850

由于设定的子眼焦距  $f$  为 20 mm, 图像传感器宽度  $d$  为 20 mm, 根据公式  $FOV = 2\arctan(d/2f)$  计算得到设定的视场角为 53°。为检验子图像的视场大小真实性, 以 7 号子图像为例, 在图 13(a)中选取两个地面点 A 和 B, 记录虚拟场景中 A 点的坐标为 (-2 700.59, 18 180.72, 102.74), B 点坐标为(-2 627.58, 18 465.44, 101.84), 两点的斜距为 293.87 m。结合 7 号子眼的光心坐标计算得到 A、B 两点与 7 号子眼构成的夹角为 53°。根据  $\eta = 1 - \Delta\theta/FOV$  计算得到相邻子眼的视场重叠率为 43.3%, 其中  $\Delta\theta$  代表俯仰或方位夹角。由于视场重叠率足够大, 理论上在该构型配置下, 光学复眼可大视场成像。用开源图像拼接算法验证, 重构 9 个复眼子图像得到大视场图, 如图 13(b)所示。从重构图像来看, 子图像之间没有像素空白, 相邻子眼间视场连续, 符合大视场成像要求。

综上可知, 该仿真软件能采集排布精确的复眼子图像, 单个子图像的视场大小符合设定参数, 同时该构型复眼的视场重叠率满足开源图像拼接算法的要求, 能进行大视场成像重构。



(a) 7 号子图像



(b) 重构的大视图

图 13 成像重构

Fig. 13 Imaging reconstruction

接下来对仿真软件的运行性能进行测试。实验中, 共设置 4 种模式: ①成像数据未导出、未录像存储; ②成像数据未导出、录像存储; ③成像数据实时导出、未录像存储; ④成像数据实时导出、录像存储。其区别在于是否通过注入专用图像卡导出和是否以录像形式保存复眼成像数据。

在该复眼构型设置下, 模式①~④的仿真帧率分别为 25.3、22.4、17.6、17.4 fps。经过多次测试, 记录仿真帧率如图 14 所示。

图 14 中, 当子眼数量小于 10 个时, 导出成像数据会显著降低仿真帧率, 最小降幅为 7 fps; 开启实时录像存储后对仿真帧率影响不大, 最大降幅为 6 fps, 平均为 2 fps。由于导出成像数据和录像存储时, 显示窗口通过独立线程将复眼成像显示区域截屏集成为单张图像传输至内存, 这样子眼数量越多, 仿真帧率下降程度越小。以该计算机配置为例, 假设导出成像数据对仿真实时性的帧率下限要求是 12 fps, 那么光学复眼的子眼数量不得超过 16 个。

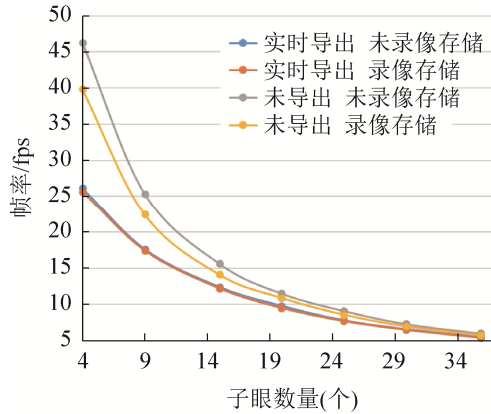


图 14 仿真帧率变化情况

Fig. 14 Trends of frame rate during the simulation

## 7 结论

本文基于 Unigine 引擎和 Qt 设计了面向小型航空器应用的光学复眼仿真软件。软件包含参数录入模块、场景显示和复眼成像模块、航空器模块和仿真管理模块。该软件满足快速光学复眼构型参数录入和小型航空器飞行测试的需求，仿真结果精确，同时力求成像数据导出、存储时具有足够仿真帧率。基于该仿真软件，用户可灵活设置光学复眼构型，通过仿真优选设计方案，推进应用算法研究，将软件嵌入小型航空器数字或半实物仿真系统进行测试评估。

## 参考文献:

- [1] 文超, 马涛, 王偲, 等. 昆虫复眼结构及视觉导航研究进展[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(1): 28-36.  
Wen Chao, Ma Tao, Wang Cai, et al. Progress in Research on the Compound Eye Structure and Visual Navigation of Insects[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2019, 56(1): 28-36.
- [2] Wu Sidong, Jiang Tao, Zhang Gexiang, et al. Artificial Compound Eye: A Survey of the State-of-the-art[J]. Artificial Intelligence Review (S0269-2821), 2017, 48(4): 573-603.
- [3] Liu Yan, Shi Lifang, Shi Ruiying, et al. An Artificial Compound Eye System for Large Field Imaging[C]// Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology II. Beijing: SPIE, 2012: 8558.
- [4] Qiu Weichao, Zhong Fangwei, Zhang Yi, et al. UnrealCV: Virtual Worlds for Computer Vision[C]// 25th ACM International Conference on Multimedia. New York: Association for Computing Machinery, 2017: 23-27.
- [5] Pollok Thomas, Junglas Lorenz, Ruf Boitumelo, et al. UnrealGT: Using Unreal Engine to Generate Ground Truth Datasets[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2019: 670-682.
- [6] Shah Shital, Dey Debadepta, Lovett Chris, et al. AirSim: High-fidelity Visual and Physical Simulation for Autonomous Vehicles[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 621-635.
- [7] Matthias Müller, Vincent Casser, Jean Lahoud, et al. Sim4cv: A Photo-realistic Simulator for Computer Vision Applications[J]. International Journal of Computer Vision (S0920-5691), 2018, 126: 902-919.
- [8] Venkataraman Kartik, Lelescu Dan, Duparré Jacques, et al. Picam: An Ultra-thin High Performance Monolithic Camera Array[J]. ACM Trans. on Graphics (S0730-0301), 2013, 32(6): 166.1-166.13.
- [9] Wilburn Bennett, Joshi Neel, Vaish Vaibhav, et al. High Performance Imaging Using Large Camera Arrays[J]. ACM Trans. Graph (S0730-0301), 2005, 24(3): 765-776.
- [10] 于晓丹, 张远杰, 王元元, 等. 小型无人机载大视场复眼相机光学系统设计[J]. 光子学报, 2019, 48(7): 17-24.  
Yu Xiaodan, Zhang Yuanjie, Wang Yuanyuan, et al. Optical Design of A Compound Eye Camera with a Large Field of View for Unmanned Aerial Vehicles[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(7): 17-24.
- [11] Afshari Hossein, Akin Abdulkadir, Popovic Vladan, et al. Real-time FPGA Implementation of Linear Blending Vision Reconstruction Algorithm Using a Spherical Light Field Camera[C]// IEEE Workshop on Signal Processing Systems. Quebec City, Canada: IEEE, 2012: 49-54.
- [12] Shi Chengyong, Wang Yuanyuan, Liu Chenyang, et al. SCECam: A Spherical Compound Eye Camera for Fast Location and Recognition of Objects at a Large Field of View[J]. Optics Express (S1094-4087), 2017, 25(26): 32333-32345.
- [13] Deng Zefang, Chen Feng, Yang Qing, et al. Dragonfly-Eye-Inspired Artificial Compound Eyes with Sophisticated Imaging[J]. Advanced Functional Materials (S1616-301X), 2016, 26(12): 1995-2001.
- [14] Song Youngmin, Xie Yizhu, Malyarchuk Viktor, et al. Digital Cameras with Designs Inspired by the Arthropod Eye[J]. Nature (S1476-4687), 2013, 497(7447): 95-99.
- [15] Leitel Robert, Brückner Andreas, Buß Wolfgang, et al. Curved Artificial Compound-eyes for Autonomous Navigation[C]// Spie Photonics Europe. Brussels, Belgium: International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [16] Zarrad Anis. Game Engine Solutions[M/OL]. London: Intech, 2018. [2021-07-02]. <https://www.intechopen.com/chapters/57425>.