

基于 Zemax 的钢轨轮廓测量系统仿真模型研究

王乐^{1,2}, 方玥¹, 王胜春¹, 王昊^{1*}, 黎国清¹, 任盛伟¹, 戴鹏¹, 谭峭峰³¹中国铁道科学研究院集团有限公司基础设施测量研究所, 北京 100081;²中国铁道科学研究院研究生部, 北京 100081;³清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 近年来,线结构光轮廓测量技术已成为钢轨廓形检测的重要手段。为了满足钢轨轮廓高精度的测量要求,提出了基于 Zemax 软件的线结构光钢轨轮廓测量系统仿真模型。将线结构光钢轨轮廓测量系统分解为图像采集模块、系统标定模块和轮廓测量模块,在 Zemax 非序列模式下依次对三个模块进行建模,得到钢轨轮廓测量系统仿真模型。对比实验表明,系统仿真模型与实际系统的测量结果较为接近,模拟测量结果符合实际情况,仿真模型能够实现对接钢轨轮廓测量过程的准确模拟。该仿真模型为线结构光钢轨轮廓测量相关问题研究提供了一种新的分析方法,对光学系统设计、光学元件选型和测量精度提升具有指导意义。

关键词 测量; 线结构光; Zemax; 钢轨轮廓; 仿真模型

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1604004

1 引言

基于三角测量原理的线结构光钢轨轮廓测量技术可以实时获取钢轨的轮廓数据,得到钢轨的垂直磨耗量和侧面磨耗量等参数,这些参数不仅可以用来掌握钢轨的服役状态,也可以指导钢轨打磨作业,是铁路运营维护的重要手段^[1]。仿真分析作为一种重要的研究手段,在缩短产品研发周期、节省经费投入和提高产品质量等方面发挥着重要的作用。在铁路工务方面,仿真分析已经应用到钢轨打磨机理研究和轨道结构动力学研究等方面,为该领域内相关问题的研究提供了直观高效的分析手段,帮助解决了很多现场问题^[2-3]。在光学检测研究领域内,也有很多学者利用光学仿真设计软件开展了光学系统设计、检测系统仿真建模和误差分析等方面的工作,并取得了大量的研究成果^[4-5]。线结构光钢轨轮廓测量技术属于光学检测领域,目前,还未见关于线结构光钢轨轮廓测量系统仿真研究的相关报道。

针对上述问题,本文提出了基于 Zemax 软件的线结构光钢轨轮廓测量系统仿真模型。首先,基于

Zemax 软件建立了线激光器、镜头、相机和钢轨等主要部件的光学模型,并根据光路结构参数搭建了系统仿真模型,使模型具备图像采集功能。然后,建立平面靶标光学模型,采用经典的平面靶标标定方法,采集不同姿态下的平面靶标图像,完成系统标定模块建模。最后,模拟实际钢轨轮廓测量时的运动情况,等间距获取钢轨激光断面图像,结合光条中心提取结果和系统标定参数完成钢轨轮廓测量。通过对比实验验证了钢轨轮廓测量系统仿真模型的准确性和有效性。在此基础上,指出了系统仿真模型的用途和下一步的研究方向。

2 基本原理

2.1 线结构光钢轨轮廓测量原理

图 1 是线结构光轮廓测量技术的透视投影几何模型,由线激光器、镜头和相机组成一套线结构光轮廓测量组件,线结构光入射到被测物表面,被调制后反映被测物轮廓信息的光条,并由相机拍摄该光条得到被测物的激光断面图像。然后提取该图像的光条中心像素坐标,结合光条中心像素坐标和系统标

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2020-12-23; 录用日期: 2020-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(61702551)、中国铁道科学研究院集团有限公司基金重点项目(2018YJ147)

通信作者: *wanghao1984@rails.cn

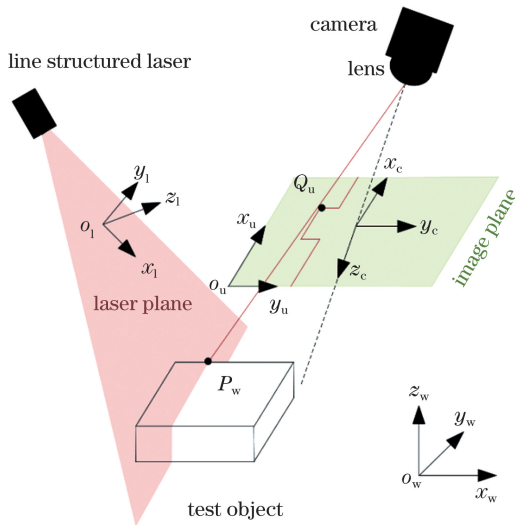


图 1 线结构光透视投影几何模型

Fig. 1 Geometric model of line structured light perspective projection

定参数,便可计算出被测物实际轮廓。图 2 是线结构光钢轨轮廓测量系统原理图,在钢轨两侧各有一套线结构光轮廓测量组件,两套组件的激光平面共面安装,分别用于获取钢轨左右半断面轮廓数据,由标定参数将半断面轮廓进行拼接,从而得到钢轨全断面轮廓。将测量轮廓与标准轮廓进行匹配,计算相关特征点的变化量,便可以评估被测钢轨的垂直磨损量和侧面磨损量。配合扫描运动,即可实现对整个钢轨的轮廓测量。

2.2 系统标定原理

进行钢轨轮廓测量之前,需要对测量系统进行标定,获取两侧相机内部参数和两侧激光平面参数^[6]。在图 1 中, $o_w x_w y_w z_w$ 是世界坐标系, $o_c x_c y_c z_c$ 是相机坐标系, $o_l x_l y_l z_l$ 是激光平面坐标系, $o_u x_u y_u$ 是像素坐标系。对于激光平面内的一点 P_l , 其 在 世 界 坐 标 系 下 的 坐 标 为 $P_w = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$, 该 点 对 应 的 像

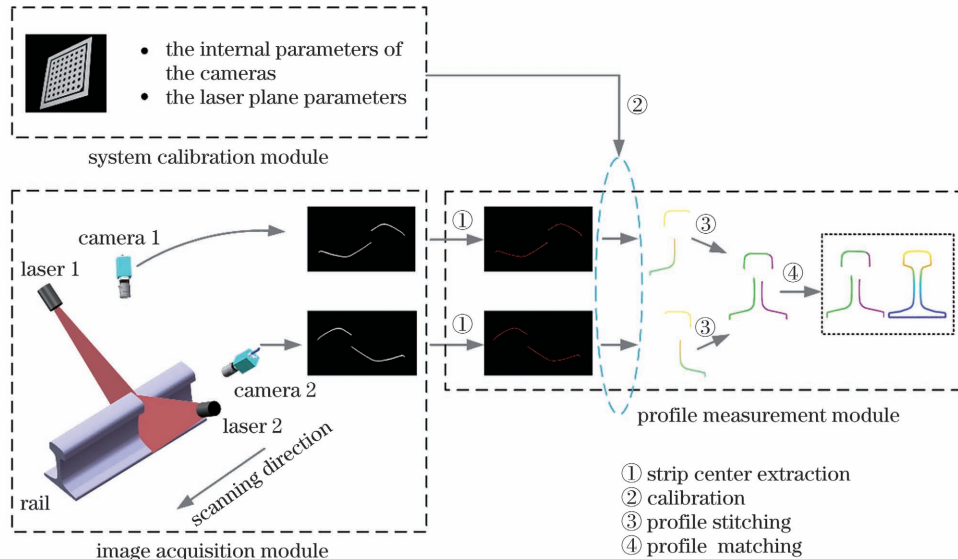


图 2 线结构光钢轨轮廓测量系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of rail profile measurement system with line structured light

点为 $Q_u = (x_u, y_u, 1)^T$ 。根据针孔成像模型有

$$sQ_u = A [R, t] P_w, \quad (1)$$

式中: s 为尺度因子;矩阵 A 是相机内参矩阵; $[R, t]$ 是相机外参矩阵,分别是世界坐标系到相机坐标系旋转矩阵和平移向量。此外, P_w 在激光平面内,满足激光平面方程,

$$ax_w + by_w + cz_w + d = 0, \quad (2)$$

式中: a, b, c, d 是激光平面参数。联立(1)式和(2)式即可得到线结构光轮廓测量的数学模型,

$$\begin{cases} sQ_u = A [R, t] P_w \\ ax_w + by_w + cz_w + d = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

利用文献[7]中的方法计算相机内参矩阵、外参矩阵和激光平面参数,即可由(3)式计算出 P_w 。

3 钢轨轮廓测量系统仿真模型创建

Zemax 是美国 Radiant Zemax 公司开发的光学仿真设计软件,可用于成像系统和照明系统相关问题分析^[8],本文利用 Zemax 模拟钢轨轮廓测量过程。为了方便建模,将钢轨轮廓测量系统分解为图像采集模块、系统标定模块和轮廓测量模块,如图 2 所示。图像采集模块用于获取钢轨激光断面图像,主要包括线激光器、镜头和相机等主要元器件。系统标定模块用于获取标定参数,即像素坐标系下的

图像平面和世界坐标系下的测量平面之间的变换关系。轮廓测量模块对图像采集模块得到的钢轨激光断面图像进行光条中心提取得到光条中心像素坐标,然后利用标定数据将光条中心像素坐标变换到世界坐标系下,从而得到钢轨的真实轮廓。

根据系统功能模块的划分,系统建模流程分为 3 步,如图 3 所示。第 1 步,图像采集模块建模,首先建立主要元器件的光学模型,然后结合元器件光学模型和光路结构参数搭建系统仿真模型,使系统

仿真模型具备图像采集功能。第 2 步,系统标定模块建模,基于平面靶标标定方法对系统标定模块进行建模,利用图像采集模块采集不同姿态下的标定板图像,并计算系统标定参数。第 3 步,轮廓测量模块建模,模拟现场钢轨轮廓测量过程,由图像采集模块沿钢轨走向(延伸方向)以一定的采样间隔扫描钢轨,等间距获取钢轨激光断面图像,由钢轨激光断面图像计算得到钢轨真实轮廓,由此赋予系统仿真模型轮廓测量功能。

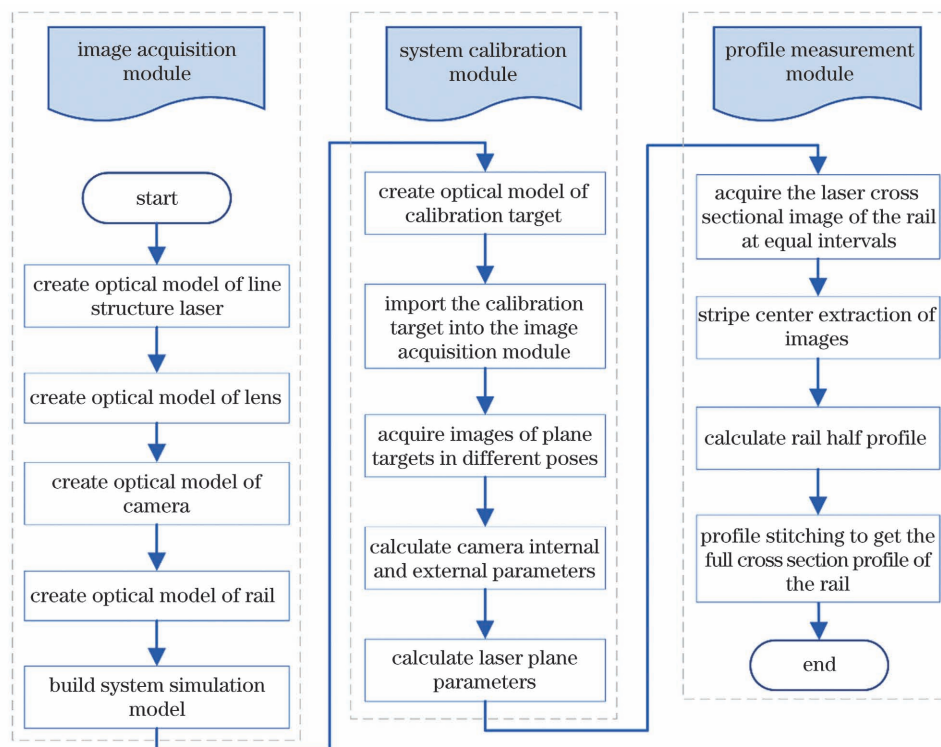


图 3 钢轨轮廓测量系统建模流程图

Fig. 3 Modeling flow chart of rail profile measurement system

3.1 图像采集模块建模

图像采集模块主要包括线激光器、镜头、相机和钢轨等主要元器件,在实际的钢轨轮廓测量系统中,线激光器采用加拿大 Osela 公司生产的波长为 650 nm 的半导体激光器,镜头采用美国 Edmund 公司生产的型号为 58001 的 12 mm 定焦镜头,相机采用德国 SICK 公司生产的型号为 Ranger3 的工业相机,被测物选择 60 kg/m 型号的钢轨。因此,参考上述实物的基本参数对图像采集模块进行建模。

3.1.1 线激光器光学模型

在 Zemax 中只有点光源、矩形光源、二极管光源等一些常规光源,并没有线激光器的模型。实际上,线激光器是由激光二极管、聚焦透镜和整形透镜

组合得到,因此,利用 Zemax 中的二极管光源作为模拟光源,如图 4 所示,二极管光源发出的光线经非球面透镜聚焦后,由鲍威尔棱镜整形形成线激光。线激光器的参数主要有波长、功率、激光线宽、发散角和扇形角,其中,激光线宽、发散角和扇形角这 3 个参数对线结构光钢轨轮廓测量系统的测量精度至关重要。因此,为了建立准确的线激光器光学模型,可以借助光束分析仪等设备获取精确的参数,表 1 列出了本文线激光器的相关参数。在 Zemax 中设置二极管光源的波长为 650 nm,功率为 498 mW,并通过调整二极管光源、非球面透镜和鲍威尔棱镜之间的距离使激光线宽、发散角和扇形角满足实际情况,从而建立线激光器的光学模型。

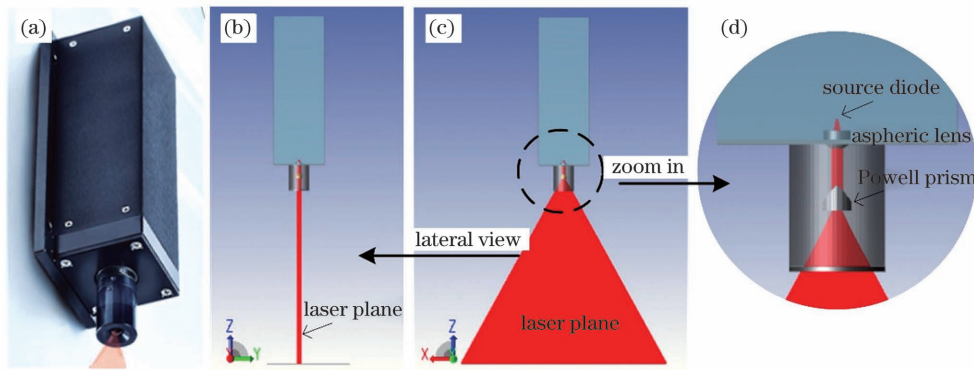


图 4 线激光器。(a)实物图;(b)~(d)仿真模型

Fig. 4 Line laser. (a) Physical picture; (b)~(d) simulation model

表 1 线激光器的主要参数

Table 1 Main parameters of line laser

Wavelength /nm	Power /mW	Line width /@350 mm	Divergence angle /(^{\circ})	Fan angle /(^{\circ})
650	498	0.15	0.19	68

3.1.2 镜头和相机光学模型

镜头和相机用于获取钢轨激光断面图像,图 5 为 58001 镜头在 Zemax 序列模式下的模型。在实际应用中,对镜头的操作主要有调整聚焦位置和调整光圈大小两种情况,因此,镜头建模除了考虑每个透镜元件的基础参数外,还应当模拟调整镜头聚焦位置和调整光圈大小的过程,使光学模型更符合实际的成像条件。对于镜头调焦过程,其实质就是调整镜头和成像平面的距离,从而将镜头对特定距离的物体清晰成像,该成像平面对应相机的靶面。因此,在 Zemax 序列模式下,将物面厚度参数设置为镜头的基准工作距离,设置镜头最后一个参考面的厚度为变量,在评价函数编辑器中设置优化函数类型为均方根半径,以质心为参考执行全局优化,更新后的厚度值就是最佳成像平面的位置,从而完成对实际应用中镜头调焦过程的准确模拟。在 Zemax 序列模式下设置系统孔径类型为像方空间 F 数,并根据实际应用中的光圈大小设置孔径值,即可实现

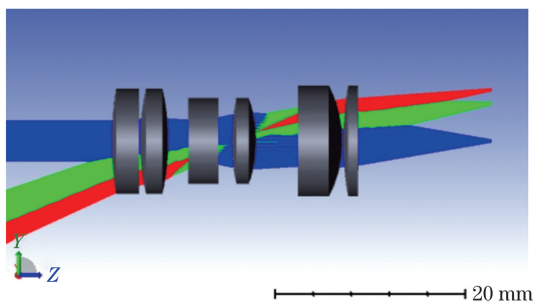


图 5 序列模式下的镜头原始模型

Fig. 5 Original lens model in sequence model

对镜头调整光圈过程的模拟。在镜头调焦和调整光圈后,将全部镜头数据转换到非序列模式,最终得到的镜头模型如图 6(b)所示。

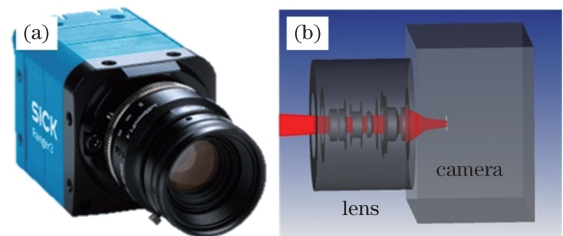


图 6 镜头与相机。(a)实物图;(b)光学模型

Fig. 6 Lens and camera. (a) Physical picture; (b) optical model

实际相机的像元大小是 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$,分辨率是 2560×832 。在 Zemax 中以矩形探测器对相机进行建模,矩形探测器的位置由上一步的镜头调焦过程确定,矩形探测器的参数由相机的像元大小和靶面尺寸决定,其主要参数如表 2 所示。

表 2 相机的主要参数

Table 2 Main parameters of camera

Surface type	X half width /mm	Y width /mm	X/ pixel	Y/ pixel
Detector rectangle	7.680	2.496	2560	832

3.1.3 钢轨光学模型

钢轨光学模型的主要参数有外形尺寸和表面散射函数等。以每米长的钢轨质量进行分类,我国铁路常用的钢轨主要有 43 kg/m 、 50 kg/m 、 60 kg/m 和 75 kg/m 等型号,图 7(a)是 60 kg/m 钢轨的横断

面参数图。以标准轨的横断面尺寸为基础参数,通过机械建模软件可以准确建立钢轨的基础模型,如图 7(b)所示。表面散射函数影响钢轨激光断面图像的光条截面能量分布,对钢轨轮廓测量结果产生较大影响,是钢轨光学模型的重要参数。表面散射函数与被测物的表面特性相关,一般采用高斯散射函数描述光滑表面,采用朗伯体散射函数描述漫散射表面。在应用中被测表面通常较为粗糙,为了简化问题,且不失一般性,可假设被测表面为理想的漫散射表面^[9]。因此在钢轨表面添加朗伯体散射函数模拟钢轨表面的散射效果。

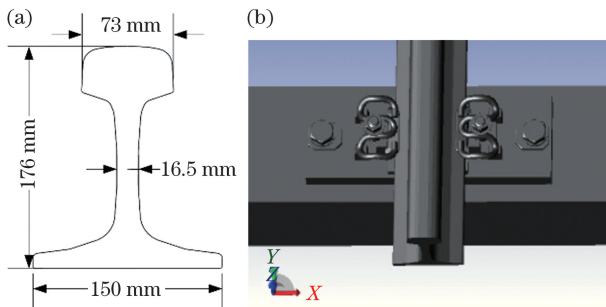


图 7 标准 60 kg/m 钢轨。(a)横断面主要参数;(b)光学模型

Fig. 7 Standard 60 kg/m rail. (a) Main parameters of cross section; (b) optical model

3.1.4 搭建系统仿真模型

钢轨轮廓测量系统主要由 2 套线结构光轮廓测量组件构成,因此,系统仿真模型的搭建过程分为两步:1)建立线结构光轮廓测量组件的仿真模型。在实际应用中,一般由分辨率、工作距离、安装角度和测量视野等条件确定线结构光轮廓测量组件的光路结构参数。图 8(a)是目前线结构光轮廓测量组件光路结构图,将以上主要部件的光学模型按照该光路结构参数进行搭建,得到线结构光轮廓测量组件的仿真模型,如图 8(b)所示。2)参考组件的安装参数,在钢轨模型左右两侧各放置一套组件模型,由此得到钢轨轮廓测量系统的仿真模型,如图 9 所示。设置线激光器的分析光线数量为 3 亿条,然后进行非序列模式光线追迹,追迹从线激光器发出的光线,然后经过钢轨表面反射,穿过镜头最后到达相机,得到钢轨激光断面图像,从而使仿真模型具备图像采集功能。

3.2 系统标定模块建模

系统标定主要包括相机内部参数标定和激光平面参数标定两部分,本文采用 Halcon 机器视觉软件中线结构光标定方法^[10],该方法基于二维平面靶

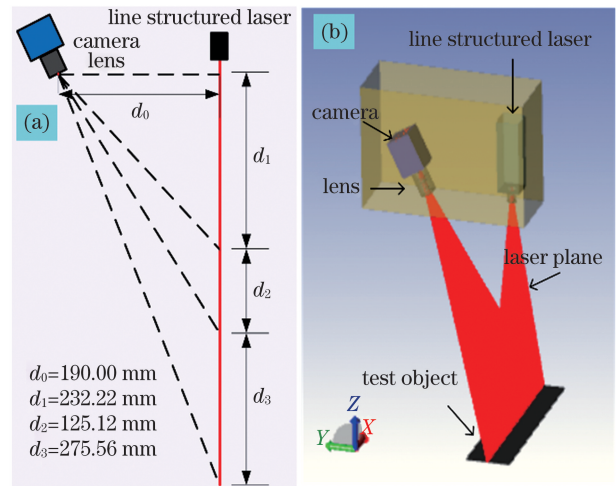


图 8 线结构光轮廓测量组件。(a)主要光路结构参数;(b)组件光学仿真模型

Fig. 8 Line structured light profile measurement component. (a) Main optical structure parameters; (b) optical simulation model of component

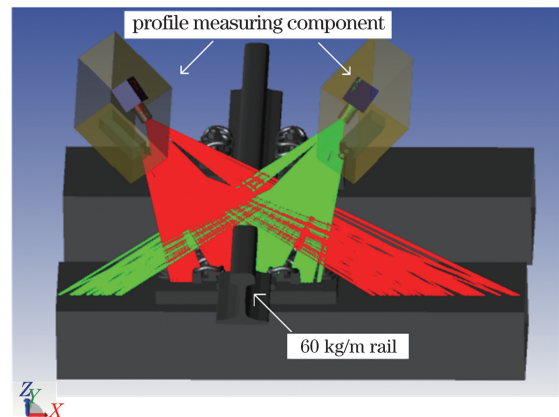


图 9 钢轨轮廓测量系统仿真模型

Fig. 9 Simulation model of rail profile measurement system

标进行标定,其采用的标定板如图 10(a)所示。标定模块的建模主要分为两步:1)标定相机内部参数,如图 10(b)所示,用创建钢轨光学模型的方法建立标定板光学模型,将标定板光学模型导入到系统仿真模型中,并添加矩形光源作为标定板的照明光源。追迹从矩形光源发出的光线,被标定板反射后最终到达左右侧相机感光平面,得到标定板图像。改变标定板位姿,利用同样的方法采集标定板不同位姿下的图像。参考文献[10]中的方法,利用不同位姿下的标定板图像计算相机内部参数。2)标定激光平面参数,其标定原理如图 11 所示,利用两个不同高度的标定板与激光平面相交,采集两个交线的光条图像,由交线上的点拟合激光平面。在仿真模型中,

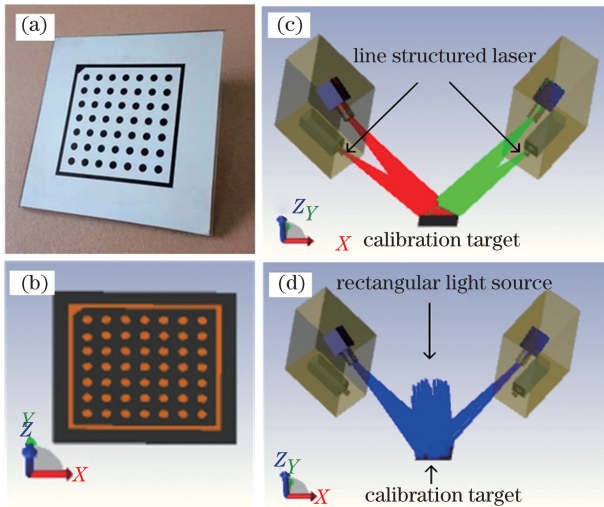


图 10 系统标定模块建模。(a) 标定板实物; (b) 标定板光学模型; (c) 相机内部参数标定; (d) 激光平面标定

Fig. 10 System calibration module modeling. (a) Calibration target; (b) optical model of calibration target; (c) calibration of camera internal parameters; (d) calibration of laser plane

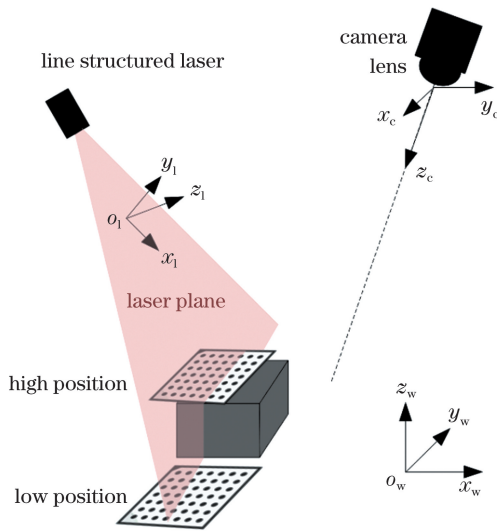


图 11 激光平面标定示意图

Fig. 11 Schematic diagram of laser plane calibration

首先采用矩形光源照明标定板,分别采集标定板在较高位置和较低位置时的图像,然后关闭矩形光源并打开线激光器,采集标定板在上述两个位置时的光条图像。同样参考文献[10]中的方法,利用高低位置的标定板图像和光条图像计算激光平面的参数。

3.3 轮廓测量模块建模

轮廓测量模块主要作用是模拟实际钢轨轮廓扫描测量过程,并利用图像采集模块和标定模块的数据得到钢轨轮廓测量结果,其建模过程分为三步: 1)模拟实际钢轨轮廓测量时的运动情况,等间距采

集钢轨激光断面图像。2)提取图像光条中心得到光条中心像素坐标。3)利用(3)式将光条中心像素坐标变换到世界坐标系下,得到钢轨左右侧半断面轮廓,通过文献[1]中的方法完成轮廓拼接任务,最终得到钢轨轮廓测量结果。

在以上三步中,最后二步的光条中心提取和坐标变换可以参考现有的研究成果^[11-12],这里不做过多陈述。对于第一步,其功能的实现主要依靠 Zemax 的宏语言。在钢轨轮廓测量现场,钢轨轮廓测量装置沿钢轨走向运动,测量装置的位姿可以表示为

$$P_i = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma), \quad (4)$$

式中: P_i 表示进行第 i 个轮廓采样时测量装置的位姿,其中, x, y, z 分别是测量装置在世界坐标系中的位置参数; α, β, γ 分别是测量装置当前的姿态参数。假设测量装置在直线段沿 Y 轴运动,则可以将 P_i 近似表示为

$$P_i = (0, y, 0, 0, 0, 0), y = i \cdot s + y_0, \quad (5)$$

式中: s 和 y_0 分别表示轮廓采样间隔和初始坐标 y 。因此,在确定采集系统相对钢轨的实际运动轨迹后,利用 Zemax 宏语言编写采集系统的控制程序,即可模拟数据采集模块的运动过程。图 12 是控制程序工作流程图,包括修改图像采集模块的位姿、非序列光线追迹、保存探测器数据和清空探测器数据等操作。通过控制程序模拟实际测量时的运动情况,使其按照预设路径和采样间隔获取钢轨激光断面图像。

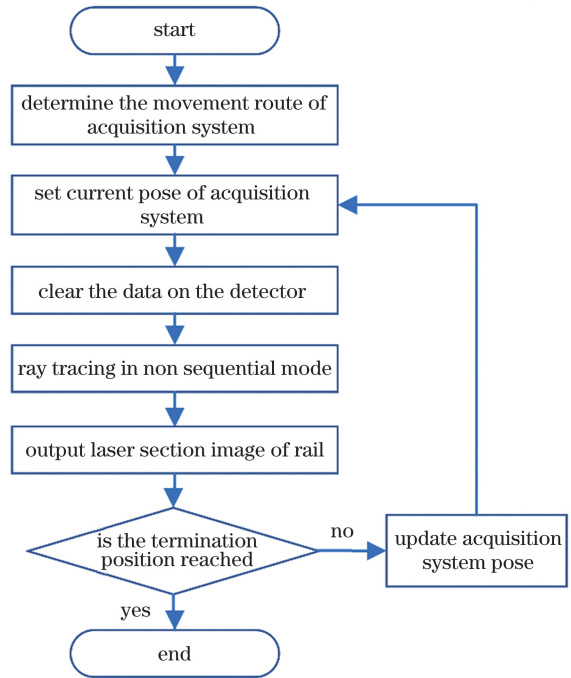


图 12 轮廓测量模块控制程序的工作流程图

Fig. 12 Flow chart of control program of profile measurement module

4 分析与讨论

4.1 仿真模型标定

利用 3.2 节中的方法标定仿真模型,图 13 是系统仿真模型采集的用于相机内部参数标定的部分标定板图像,图 14 是用于激光平面标定的图像,表 3 是标定结果,其中 f 表示镜头焦距, k_1 、 k_2 、 k_3 、 p_1 和 p_2 表示镜头畸变系数, s_x 和 s_y 表示像元大小, c_x 和 c_y 表示径向畸变中心, Width 和 Height 分别表示

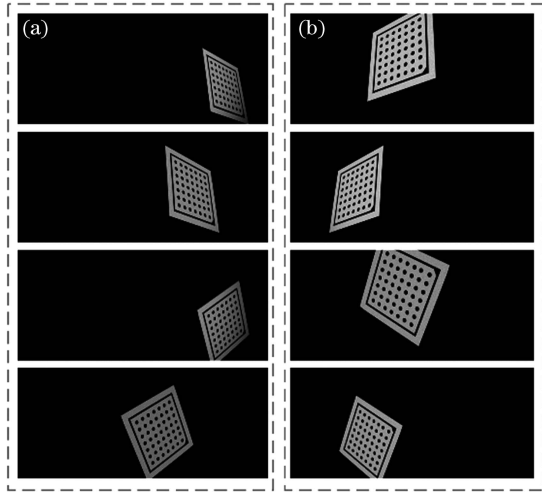


图 13 仿真模型采集的用于相机内部参数标定的部分图像。(a)左侧相机;(b)右侧相机

Fig. 13 Partial images collected by the simulation model for camera internal parameter calibration.

(a) Left camera; (b) right camera

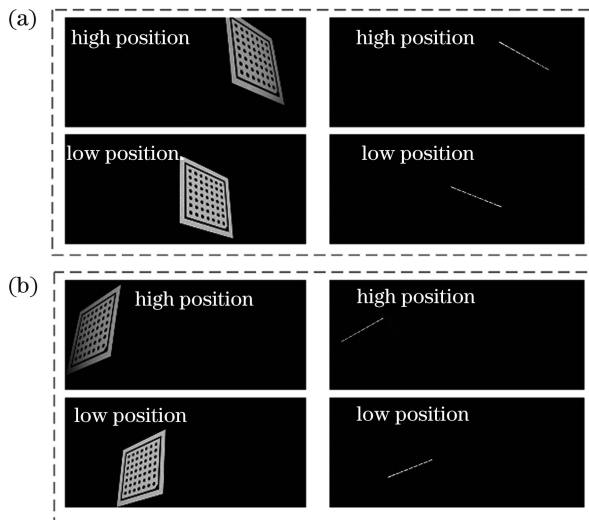


图 14 仿真模型采集的用于激光平面标定的图像。

(a)左侧相机;(b)右侧相机

Fig. 14 Images collected by the simulation model for laser plane calibration. (a) Left camera;

(b) right camera

图像宽度和高度。左右侧相机内部参数标定误差分别为 0.09 pixel 和 0.10 pixel,左右侧激光平面标定误差分别为 0.029 mm 和 0.044 mm,标定误差均满足实际测量系统的标定要求。需要指出的是,即使仿真模型采用的是镜头设计时的参数来模拟实际的镜头,所建立的镜头光学模型也是存在畸变的,这是由几何光学的基础理论决定的。此外,标定过程中所采用的标定模型(针孔成像模型)本身就是对成像过程的一种近似,标定模型中对镜头畸变的建模更是一种近似,因此,无论采用哪一种标定模型,标定结果肯定会产生一定的误差,相应地,测量结果也会产生一定的误差。

表 3 系统仿真模型标定结果

Table 3 Calibration results of system simulation model

Parameter name	Left component	Right component
f / mm	12.12	12.09
k_1 / m^{-2}	1351.76	1223.18
k_2 / m^{-4}	-4.67×10^6	9.00×10^5
k_3 / m^{-6}	-3.76×10^{11}	-4.75×10^{11}
p_1 / m^{-1}	-0.09	0.23
p_2 / m^{-1}	0.120	0.003
Inter camera parameter	s_x / m	6.01×10^{-6}
	s_y / m	6.00×10^{-6}
c_x	1293.64	1258.34
c_y	420.41	407.69
Width	2560	2560
Height	832	832
Laser plane parameter	t_x / mm	2.99
	t_y / mm	1.46
	t_z / mm	0.03
	$r_x / (^\circ)$	270.14
	$r_y / (^\circ)$	0
$r_z / (^\circ)$	0.10	0.13

4.2 仿真模型测量精度

钢轨轮廓测量系统主要由两套线结构光轮廓测量组件构成,因此,组件仿真模型的建模质量直接影响系统仿真模型的测量精度。为了全面评估系统仿真模型的测量精度,本文设计了组件精度验证实验、钢轨模拟测量实验和钢轨实际测量实验,分别如图 15~17 所示。其中,组件精度验证实验用于分析图 8(b)中的组件仿真模型深度方向的测量精度。钢轨模拟测量实验利用图 9 中的系统仿真模型测量

钢轨磨耗。钢轨实际测量实验采用的实验装置和结构参数与仿真模型一致,用于验证系统仿真模型的准确性和有效性。

如图 15 所示,采用钢轨建模的方法创建两个高度分别为 20.00 mm 和 10.00 mm 的标准量块模型,将两个量块先后放置在组件测量范围的近端、中点和远端,依次采集不同位置的量块激光断面图像,以两个量块上表面高度差的测量结果评估组件仿真模型深度方向的测量精度,结果如表 4 所示。采用同样的方法创建一段垂直磨耗量为 11.00 mm 的钢轨,如图 16 所示,采集磨耗钢轨的激光断面图像,由轮廓测量模块得到钢轨轮廓测量结果,在仿真模型中随机移动钢轨,重复测量钢轨轮廓,得到 20 次钢轨轮廓的模拟测量结果。参考图 16(a)中的磨耗钢轨模型,在实验室搭建钢轨轮廓测量装置,如图 17 所示,对该钢轨进行实际测量,在每次测量后随机移动钢轨,重复测量钢轨轮廓,得到 20 次钢轨轮廓的实际测量结果。采用文献[13]中的方法分别计算钢轨模拟测量轮廓和实际测量轮廓的垂直磨耗量,如图 18 所示。表 5 给出了钢轨垂直磨耗的平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)的统计结果。

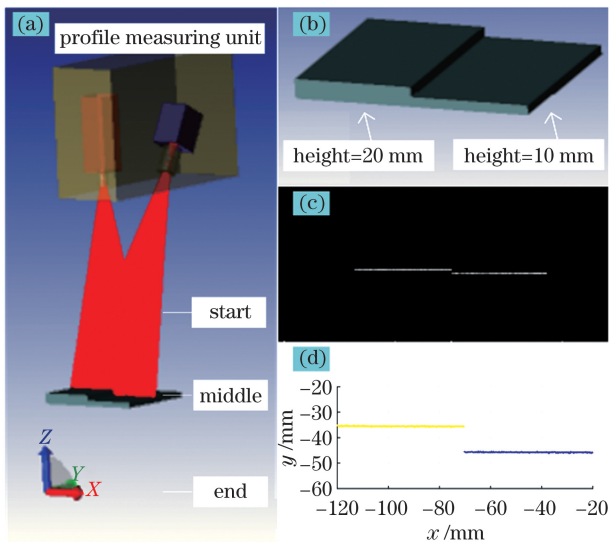


图 15 组件精度验证实验。(a)量块模型;(b)模拟测量装置;(c)量块激光断面图像;(d)量块测量结果

Fig. 15 Component accuracy verification experiment. (a) Gauge block model; (b) measuring device of simulation; (c) laser cross section image of gauge block; (d) measurement result of gauge block

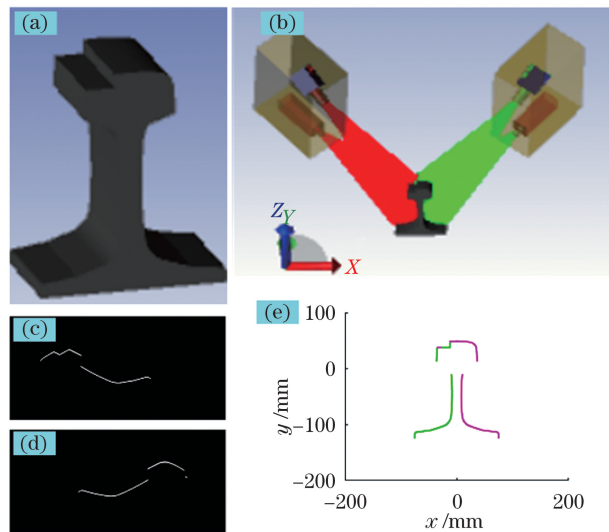


图 16 钢轨轮廓模拟测量实验。(a)磨耗钢轨模型;(b)模拟测量装置;(c)(d)钢轨左右侧激光断面图像;(e)轮廓测量结果

Fig. 16 Simulation measurement experiment of rail profile. (a) Model of worn rail; (b) simulation measuring device; (c)(d) image of laser cross section on left and right side of rail; (e) profile measurement result

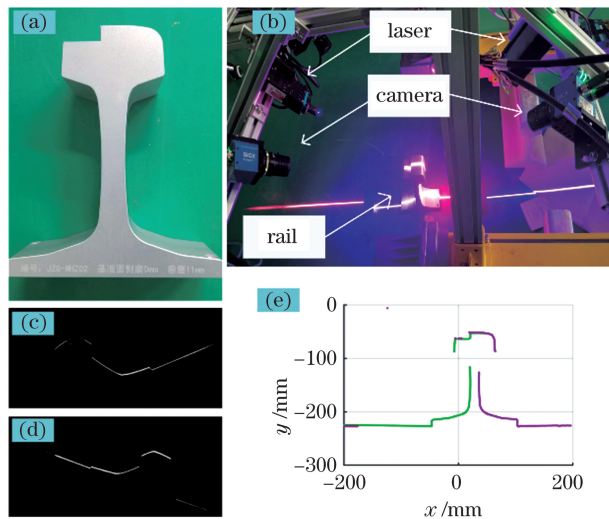


图 17 钢轨轮廓实际测量实验。(a)磨耗钢轨实物;(b)实验装置;(c)(d)钢轨左右侧激光断面图像;(e)轮廓测量结果

Fig. 17 Practical measurement experiment of rail profile. (a) Worn rail; (b) experimental device; (c)(d) image of laser cross section on left and right side of rail; (e) profile measurement result

表 4 线结构光轮廓测量组件仿真模型深度测量误差

Table 4 Depth measurement error of simulation model of line structured light profile measurement component

Position	Start	Middle	End
Error /mm	0.01	0.02	0.04

由表 4 可以看出,组件仿真模型测量误差在 0.04 mm 以下,具有较高的测量精度,与市场上线结构光轮廓测量产品的精度一致^[14],说明了组件仿真模型具有较高的准确度。此外,随着量块远离相机,测量误差逐渐增大,这种误差变化趋势也符合激光三角测量技术的特点^[14]。由表 5 可以看出,在

表 5 钢轨磨耗测量统计结果

Table 5 Statistical results of rail wear measurement

unit: mm

Nominal value of rail wear	Actual measurement system		System simulation model	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE
11.00	0.084	0.066	0.049	0.049

20 次钢轨垂直磨耗重复测量数据中,系统仿真模型得到的均方根误差(0.049 mm)与实际测量装置得到的均方根误差(0.066 mm)较为接近,系统仿真模型具有较高的准确度,模拟测量结果符合实际情况,说明仿真模型能够较好地模拟钢轨轮廓测量系统。

仿真测量误差比实际测量误差小,对于这种差异,从光源、被测物、镜头和相机的角度分析,原因主要有 4 点:1)线激光模型的截面能量符合高斯分布,较为理想化,而实际线激光的截面能量并非完美符合高斯分布,存在毛刺多峰的现象,如图 19 所示,

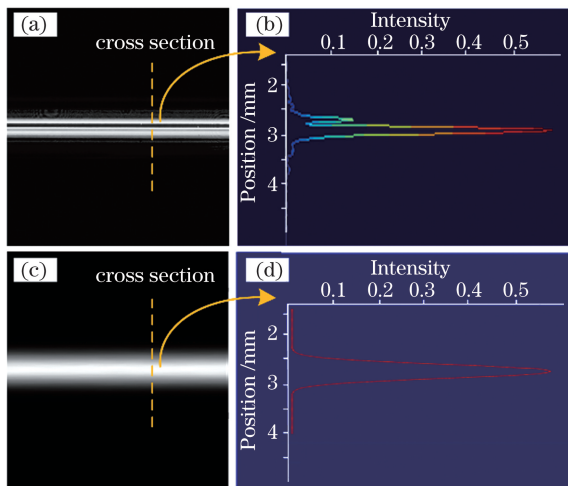


图 19 线结构光截面能量分布。(a)(b)实际情况;

(c)(d)仿真模型

Fig. 19 Cross section energy distribution of line structured light. (a)(b) Actual situation;

(c)(d) simulation model

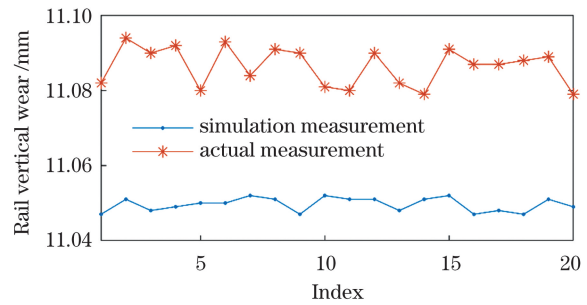


图 18 实际测量系统和仿真模型的钢轨垂直磨耗测量结果

Fig. 18 Measurement results of rail vertical wear based on actual measurement system and simulation model

这种毛刺多峰的问题会给测量系统带来误差^[14]; 2)本文的钢轨模型表面属于理想的光滑表面,且采用朗伯体散射函数近似模拟量块表面的散射效果,成像质量较高,但实际被测物表面存在一定的粗糙度,不同的粗糙度会影响光条的截面能量分布,进而影响光条中心提取结果,给测量系统带来误差;3)镜头模型采用的是镜头设计时的结构参数,但由于镜头加工和组装过程的影响,实际镜头的成像效果不如设计预期;4)相机模型中每个像素的响应是一致的、线性的,但实际相机由于暗电流、噪声、非均匀性和非线性度等因素的影响,会给激光断面图像带来噪声,影响光条截面能量分布,最终降低测量精度。

在以上 4 种因素中,被测物的表面粗糙度对仿真模型的测量精度影响较大。实际钢轨轮廓测量时会遇到不同表面状态的钢轨,如光带和表面生锈,如果仍采用理想的光滑表面和朗伯体散射函数建立钢轨光学模型,则不能准确模拟这种工况。因此,对于光滑表面,如钢轨表面的光带区域,可采用高斯散射函数;对于表面粗糙度较大的区域,可以在创建钢轨基本模型的时候赋予表面一定的粗糙度,如图 20 所示,通过调整钢轨表面形貌参数和散射函数,使系统仿真模型达到更好的效果。

在钢轨实际测量中,钢轨表面存在粗糙度的变化、颜色的变化、表面油污和表面杂物等情况,这些情况使钢轨表面的反射特性发生变化,严重影响了相机获取的钢轨激光断面图像的成像质量,进而影

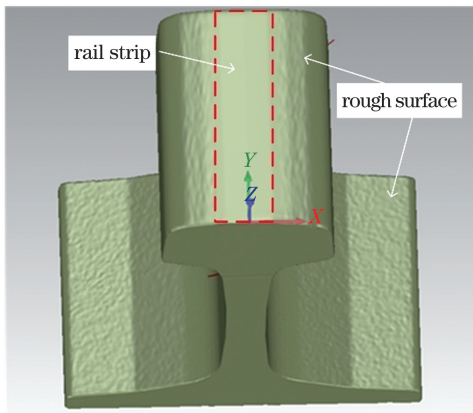


图 20 钢轨光带和粗糙表面 ($R_a = 100 \mu\text{m}$)

Fig. 20 Rail strip and rough surface ($R_a = 100 \mu\text{m}$)

响光条中心定位的准确度,最终导致钢轨轮廓测量出现较大误差^[15]。而在目前的仿真模型中,简化了钢轨的光学模型,仅采用了高斯散射函数或朗伯体散射函数来描述钢轨表面的反射特性,只能用于近似模拟较为简单的钢轨表面状态,还无法模拟钢轨表面颜色和表面油污等因素导致的钢轨表面的反射特性的变化。此外,目前钢轨表面只能分区域赋予其表面反射特性,而实际钢轨表面的反射特性变化较大,如果区域划分较大(或者说钢轨表面划分的区域的数量较少),则只能粗略模拟钢轨表面的反射特性。针对这种情况,当仿真精度要求较高时,可以考虑通过测量实际钢轨表面的双向散射分布函数(BSDF),然后用双向散射分布函数代替高斯散射函数或朗伯体散射函数,来模拟实际钢轨表面的反射特性。这种方法提高了仿真的准确度,但是相应的成本会大幅增加。

4.3 系统仿真模型用途

根据元器件实际的参数,修改仿真模型中相应元件的参数,模拟采用该元器件后的测量结果,通过建立相应的评价指标(如激光断面图像中的光条宽度、成像对比度、视场、景深大小和测量误差等),评估仿真模型采用不同元器件后测量结果的差异,即可指导和验证元器件的选型工作。也可根据实际的光路结构参数修改仿真模型的结构参数,通过模拟测量验证实际光路结构参数的优势与不足,或者在仿真模型中修改光路结构参数,通过模拟测量获取光路结构参数变化后的测量误差,得到光路结构参数与测量误差的变化关系,根据该变化关系指导结构参数设计工作。在仿真模型中,修改测量组件和钢轨的相对位置关系,通过模拟测量得到测量组件位置变化后的测量结果,根据测量结果也可指导和

验证钢轨轮廓测量系统的测量组件的安装参数设计工作。

系统仿真模型可以精确控制系统标定过程和钢轨轮廓测量过程中的相关参数,如标定板姿态参数、激光平面姿态参数、测量系统姿态参数和轨道几何形位参数等情况,因此,系统仿真模型不仅可用于研究系统标定的相关问题,也可用于研究轨廓测量的相关问题。例如,实际测量时车辆的振动会造成激光平面的点头和摇头运动,导致激光平面与钢轨延伸方向不再垂直,引起轮廓测量误差,许多学者对该问题开展了相应的研究工作^[13,16]。在系统仿真模型中通过修改测量系统的点头角和摇头角,采集相应的钢轨激光断面图像,即可模拟该工况,在仿真分析的基础上,可以开展相应的误差修正研究工作。

根据目前的研究情况,对钢轨轮廓测量系统仿真模型的用途概括为以下方面:首先,系统仿真模型可以用于相关问题分析,如分析系统标定时钢轨两侧激光不共面对测量结果造成的影响,也可利用系统仿真模型生成钢轨表面缺陷样本,解决深度学习中负样本缺少的问题^[17]。其次,系统仿真模型可以用于实验验证,实验室或现场实验可以和系统仿真实验同步开展,仿真数据既可以对实验结果进行验证,又可以用来指导实验设计。最后,系统仿真模型可以用于结果预测,有些并不适合现场开展的实验或者参数不能很好控制的实验,可以通过仿真模型进行,比如车体姿态补偿实验^[18]。

5 结 论

提出了基于 Zemax 的线结构光钢轨轮廓测量系统仿真模型,该仿真模型具备图像采集功能、系统标定功能和轮廓测量功能。对比实验表明,系统仿真模型与实际测量系统的测量结果一致,仿真模型能够模拟线结构光钢轨轮廓测量过程。分别从不同的角度指出了系统仿真模型与实际系统的差异,为进一步完善仿真模型提供了参考方向。该系统仿真模型可以用于钢轨轮廓测量的相关问题分析、实验验证和结果预测,为钢轨轮廓测量系统的精度提升和可靠性评估提供了理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Wang H, Wang S C, Wang W D, et al. Automatic registration method of rail profile in train-running environment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(11): 2273-

2282.
王昊, 王胜春, 王卫东, 等. 行车环境下钢轨轮廓自动配准方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(11): 2273-2282.
- [2] Shang W, Zhang S Y, Guo J, et al. Simulation study on material removal of rail grinding based on virtual grinding wheel modeling [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(4): 30-36.
商维, 张沐玥, 郭俊, 等. 基于虚拟砂轮建模的钢轨打磨材料去除仿真研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 30-36.
- [3] Wu Q, Sun Y, Spiryagin M, et al. Parallel co-simulation method for railway vehicle-track dynamics [J]. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2018, 13(4): 041004.
- [4] Chen H F, Tang L, Sun Y Q, et al. Zemax simulation based energy analysis of optical system for laser tracking measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0704009.
陈洪芳, 汤亮, 孙衍强, 等. 基于 Zemax 仿真的激光追踪测量光学系统能量分析[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0704009.
- [5] Shi J L, Ren G. Integrated analysis and simulation of opto-mechanical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2866-2870.
史建亮, 任戈. 光机系统集成分析仿真研究[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2866-2870.
- [6] Wang H, Hui B W, Wang S C, et al. Study on calibration method of planar target for rail profile measurement system [J]. *Railway Engineering*, 2018, 58(9): 114-117.
王昊, 回丙伟, 王胜春, 等. 钢轨廓形测量系统平面靶标定方法研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(9): 114-117.
- [7] Li W T, Wang P J, Chen Y D, et al. Calibration of binocular vision measurement system by line structured light for rail full profile[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3): 203-211.
李文涛, 王培俊, 陈亚东, 等. 钢轨全轮廓线结构光双目视觉测量系统标定[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 203-211.
- [8] Zan Q B, Hao X J, Zhou H C, et al. Design of laser light path of optical fiber coupling lens based on Zemax[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 102201.
咎清波, 郝晓剑, 周汉昌, 等. 基于 Zemax 光纤耦合透镜激光光路设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 102201.
- [9] Zhuang B H, Wang S Q, Jiang C Z, et al. Dependence of the received light power of a laser triangulation displacement sensor on the testing surface inclination and the inclination angle measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1995, 22(8): 595-600.
庄葆华, 王少清, 蒋诚志, 等. 激光三角位移计接收光功率与被测表面倾斜的关系及倾斜角测量[J]. 中国激光, 1995, 22(8): 595-600.
- [10] Xie Y L. Calibration methods and experiments evaluation for a line structured light vision measurement system [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2014.
谢宇浪. 线结构光视觉测量的标定方法与实验评价 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2014.
- [11] Li W M, Peng G, Gao X Y, et al. Fast extraction algorithm for line laser strip centers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 304002.
李伟明, 彭国, 高兴宇, 等. 线激光光条中心快速提取算法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 304002.
- [12] Zhou Y, Meng X Q, Jiang D B, et al. Centerline extraction of structured light stripe under complex interference [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1204004.
周渊, 孟祥群, 江登表, 等. 复杂干扰情况下的结构光条纹中心提取方法[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204004.
- [13] Sun J H, Liu Z, Zhao Y T, et al. Motion deviation rectifying method of dynamically measuring rail wear based on multi-line structured-light vision [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 50: 25-32.
- [14] Wang X S, Shao S Y, Su X D, et al. Measurement of rail bearing platform based on binocular line-structured light [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 211202.
王雪嵩, 邵双运, 苏晓东, 等. 基于双目线结构光的承轨台测量[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 211202.
- [15] Wang S C, Wang H, Zhou Y L, et al. Automatic laser profile recognition and fast tracking for structured light measurement using deep learning and template matching [J]. *Measurement*, 2020, 169: 108362.
- [16] Wang C, Li Y F, Ma Z J, et al. Distortion rectifying for dynamically measuring rail profile based on self-calibration of multiline structured light [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(3): 678-689.
- [17] Wang S C, Han Q, Wang H, et al. Laser stripe center extraction method of rail profile in train-running environment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 212004.
王胜春, 韩强, 王昊, 等. 行车环境下钢轨轮廓激光条纹中心的提取方法[J]. 光学学报, 2019, 39(2):

- 212004.
- [18] Li Y F, Liu H L, Ma Z J, et al. A distortion calibration method of rail profile based on dynamic reference[J]. Journal of the China Railway Society,

2018, 40(10): 119-126.

李艳福, 刘宏立, 马子骥, 等. 基于动态参考的钢轨轮廓失真校准方法[J]. 铁道学报, 2018, 40(10): 119-126.

Research on the Simulation Model of Rail Profile Measurement System Based on Zemax

Wang Le^{1,2}, Fang Yue¹, Wang Shengchun¹, Wang Hao^{1*}, Li Guoqing¹, Ren Shengwei¹, Dai Peng¹, Tan Qiaofeng³

¹Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing, 100081, China;

²Graduate Department of China Academy of Railway Sciences, Beijing, 100081, China;

³State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

Abstract

Objective Line structured light profile measurement is an important technique for rail profile detection. Currently, simulation analysis is instrumental in the research of rail grinding mechanism and track structure dynamics. Optical simulation design software has also been subjected to considerable research in optical system design, simulation modeling, and error analysis. However, few reports have focused on the simulation modeling of the line laser rail profile measurement system. In view of this situation, a simulation model of the rail profile measurement system based on Zemax software is proposed. The proposed simulation model is of guiding significance for designing optical systems, selecting optical elements, and improving measurement accuracy. It can provide theoretical support for the accuracy improvement and reliability evaluation of the rail profile measurement system.

Methods The rail profile measurement system is divided into image acquisition, system calibration, and profile measurement modules. The image acquisition module obtains the rail laser cross section image and mainly includes the line laser, lens, and camera. The system calibration module obtains the calibration parameters, i. e., the transformation relationship between the image plane in the pixel coordinate system and the measurement plane in the world coordinate system. The profile measurement module extracts the center pixel coordinates of the light stripe from the rail laser cross section image obtained using the image acquisition module. Then, it transforms the central pixel coordinates of the light stripe into the world coordinate system using the calibration data to determine the real rail profile. Based on the division of the system function modules, the system modeling process is divided into three steps (Fig. 3). In the first step, the image acquisition module is modeled (Fig. 8). First, the optical model of the main components is established in the Zemax non-sequential mode. Then, the system simulation model is established by combining the optical model of the components and optical structure parameters to ensure that the system simulation model has the image acquisition function. In the second step, the system calibration module is modeled based on the plane target calibration method (Fig. 10). The image acquisition module collects the calibration board images under different poses, and the system calibration parameters are calculated. In the third step, the profile measurement module simulates the rail profile measurement process (Fig. 12). The image acquisition module scans the rail at a certain sampling interval along the rail direction (extension direction) and obtains the rail laser cross-section image at equal intervals. The real rail profile is calculated using the rail laser cross section image; hence, the system simulation model has the profile measurement function (Fig. 9).

Results and Discussions To comprehensively evaluate the measurement accuracy of the system simulation model, component accuracy verification, rail simulation measurement, and actual rail measurement experiments are performed (Figs. 15–17). Experimental results show that the root mean square error (0.049 mm) obtained using the system simulation model is close to the root mean square error (0.066 mm) obtained using the actual

measurement device based on the 20 repeated measurement data of rail vertical wear (Table 5). The system simulation model achieves high accuracy, and the simulation measurement results are consistent with the actual situation, thus demonstrating that the simulation model can better simulate the rail profile measurement system.

Conclusions A simulation model of the rail profile measurement system based on Zemax is proposed. The simulation model has image acquisition, system calibration, and profile measurement functions. The results show that the simulation model is consistent with the measurement results of the actual measurement system, and the simulation model can be used to simulate the rail profile measurement process using line structured light. The differences between the simulation model and the actual system are highlighted from different aspects, thus providing a reference for further improving the simulation model. The system simulation model can be used for analyzing related problems in the field of rail profile measurement, e. g. , evaluating the impact of lasers on both sides of the rail that are not coplanar and generating rail surface defect samples using the system simulation model to solve the problem of a lack of negative samples in deep learning. Moreover, the system simulation model can be used for experimental verification and laboratory or field experiments can be performed simultaneously with system simulation experiments. The simulation data can not only verify the experimental results but also provide guidance for the experimental design. Finally, the system simulation model can be used to predict the results. Some tests unsuitable for field tests or parameters and cannot be well controlled can be performed using the simulation model, such as the vehicle body pose compensation test. The simulation model provides a new analysis method for studying rail profile measurements using line structured light and offers guiding significance for optical system design, optical element selection, and measurement accuracy improvement.

Key words measurement; line structured light; Zemax; rail profile; simulation model

OCIS codes 110.2970; 100.2000; 290.5855