

室内空间测量定位系统扫描激光面模型优化

林嘉睿, 徐鑫, 任永杰*, 杨凌辉, 郝继贵

天津大学精密仪器与光电子工程学院精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 针对室内空间测量定位系统(wMPS)交会测量模型将发射站扫描激光面视为理想平面的现状,研究了一种基于高精度转台的激光面面型视觉评估方法。根据评估结果引入线性折面判断机制,优化重建了 wMPS 扫描激光面数学模型,以减小交会测量模型中的系统误差。结合大空间高精度坐标场对新模型进行了评估。结果表明,所研究模型对实际光面的拟合效果较好,有助于提升 wMPS 的测量精度。

关键词 机器视觉; 工业光学测量; 大尺寸测量; 室内空间测量定位系统; 激光面模型

中图分类号 TH39; P204

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0315002

Model Optimization of Scanning Laser Surface for Workshop Measurement Positioning System

Lin Jiarui, Xu Xin, Ren Yongjie*, Yang Linghui, Zhu Jigui

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Aiming at the status that the scanning laser surface of transmitter in the model of workshop measurement positioning system (wMPS) is regarded as an ideal plane, a kind method of the visual evaluation of laser surface is proposed based on a high-precision rotary table. On basis of the evaluation results, a linear folding judgment mechanism is introduced, and the mathematical model of wMPS scanning laser surface is optimized and reconstructed to reduce the systematic errors in the intersection measurement model. The new model is evaluated by the large-scale high-precision coordinate field. The results show that the new wMPS scanning laser surface model has a better effect in the fitting of an actual laser surface, and it is helpful to improve the measuring accuracy of wMPS.

Key words machine vision; industrial optical metrology; large-scale measurement; workshop measurement positioning system; model of laser surface

OCIS codes 150.3045; 120.3940; 120.4640

1 引言

数字化柔性工装和自动化加工设备(如工业机器人)的大量使用大大提高了大型装备制造效率,同时对多点、多任务并行测量提出了新要求^[1-2]。近年来,分布式网络化测量方法发展迅速^[3-4],已经成为大型装备测量和装配的支撑技术之一,其中以室内空间测量定位系统 wMPS(workshop Measurement Positioning System)为典型代表^[5-6]。

wMPS 是一种基于精密机械扫描空-时变换的并行传感测量系统,以精密旋转结合多激光扫描,构建覆盖全周立体空间测量场。系统基站发射两束旋

转扫描激光和一束同步脉冲激光,形成传感覆盖信息。远端接收器根据基站光电脉冲间隔与转速匹配关系识别信号来源,并通过同步光-扫描光相位关系计算基站扫描旋转角度,实现单站角度变换及多角度交会定位,从而完成空间三维坐标测量^[5-7]。其中,扫描光信号特征信息来源于绕固定轴转动的光面,目前扫描角的确定及交会数学模型的建立都把扫描激光面视为理想平面。但已有研究表明,扫描激光的光源特性和器件装配误差会导致实际光面发生微小变形弯折^[8],若当作理想平面处理,则在大空间测量中对系统精度造成的影响不容忽视。

目前对激光面面型的研究主要集中在小尺度的

收稿日期: 2018-08-01; 修回日期: 2018-09-27; 录用日期: 2018-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(51775380,51835007)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51721003)、天津市自然科学基金(18JCYBJC19400)

* E-mail: yongjieren@tju.edu.cn

线结构光标定领域^[9-10], 拉丝标定法^[11]、齿形标定法^[12]等均将激光面视为理想平面, 缺少对大尺度光面变形的研究。wMPS 发射站的典型工作距离为 3~25 m, 对实际光面变形进行评估并建立更为精确的面型模型, 并优化测量模型以减小系统误差, 是提升 wMPS 系统整体性能亟待开展的工作。本文针对大尺度空间 wMPS 发射站扫描激光面变形问题, 研究了一种基于高精度转台的光面面型视觉评估方法, 以此为基础建立了改进的 wMPS 扫描激光面线性折面模型, 结合高精度坐标场进行了光面模型优化验证实验, 验证了所研究方法的有效性。

2 扫描激光面面型评估

wMPS 发射站测量原理如图 1 所示, 单台发射站发出的两个扫描激光面是多基站激光面角度交会的重要信息载体, 扫描激光面 1 与扫描激光面 2 的平面方程参数($b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, d_2$)被用来描述其在空间内的实际形状, 是直接影响系统测量性能的主要因素^[13]。

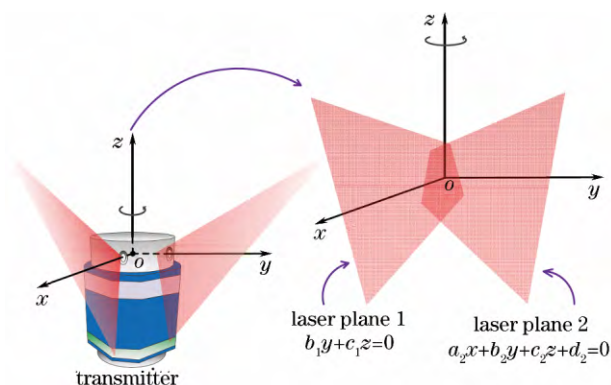


图 1 wMPS 发射站测量原理

Fig. 1 Measuring principle of wMPS transmitter

基于已有研究, 获取 wMPS 扫描激光面在大尺度空间中的微小变形信息是一项非常精密的工作。借助三轴精密转台的高精度及旋转特性^[14], 可将较大跨度激光面变形信息集中在红外相机的较小视场中^[15], 利用固定方向上的光斑变化规律来评估扫描激光面的变形程度。

利用三轴转台(角定位精度为 $\pm 1''$)调整激光器的姿态, 并使激光器发出贴合 XOY 面的扇形光面, 如图 2 所示。 L' 为相机成像平面上的一系列像素, 经相机小孔成像模型映射成为物空间一条线段 L , 点 P 为线段 L 与激光面的交点。使线段 L 所处的平面靶标与相机像面垂直于水平面, 则像平面上线段 L' 与物空间线段 L 、点 P' 与点 P 的线性对应关系

成立。将转台均匀转动 M 次, 获取像面线段 L' 上点 $P'_i (i=1, 2, \dots, M+1)$ 的坐标数据, 其中考虑到 wMPS 接收器在检测扫描激光面截面上能量中心扫过的时刻进行角度测量, 故提取相机拍摄图像中固定像素列上光条的能量中心点作为点 P'_i ^[16]; 通过小孔成像原理并依据相机工作距离、焦距与像元尺寸求得物空间线段 L 上点 $P_i (i=1, 2, \dots, M+1)$ 的对应坐标。仿真获取理想平面代替实际光面的线段 L 上点 P_i 的变化趋势, 将之与实验测得值进行对比, 以获取实际光面相较于理想平面的变形趋势。

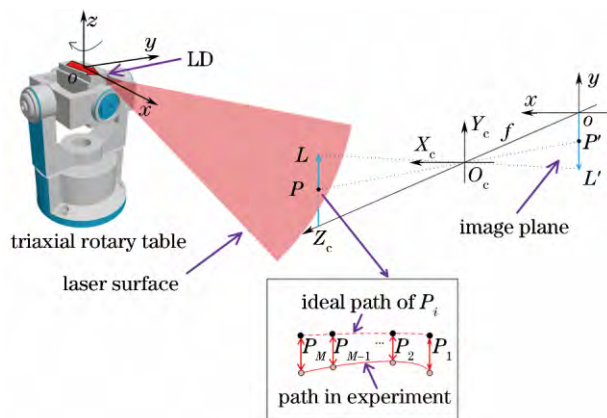


图 2 激光面变形评估示意图

Fig. 2 Schematic of evaluation of laser surface distortion

图 3 为距激光器 8 m 处的激光面面型评估结果。对同一激光器在不同工作距离(5~12 m)上进行评估, 其变形趋势具有一致性, 变形程度最大可达毫米级, 通过优化 wMPS 扫描激光面数学模型, 从传感层面减小系统误差。

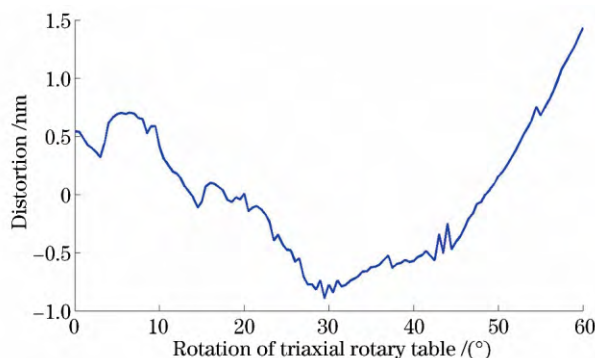


图 3 实际激光面相较于理想平面的变形趋势

Fig. 3 Distortion trend of actual laser surface with respect to ideal plane

3 wMPS 扫描激光面模型建立

图 3 中显示的变形趋势是实验的典型结果, 鉴于 wMPS 对光敏信号的获取处理以及实时坐标解算速度有极高要求, 本文研究了 wMPS 扫描激光面

线性折面模型的建立方法,在 wMPS 测量模型中将每个激光扇面分为 n 个线性平面。以 $n=3$ 为例,如图 4 所示,其中激光光面 1 的中心折面的扇角为 θ ,且关于发射站测量坐标系的 X 轴对称,两侧折面则与中心折面呈微小夹角 θ_1, θ_2 。该模型兼容原有理想平面,能够适应实际扇形光面的变化趋势,也可兼容激光面变形方向存在随机性的情况。

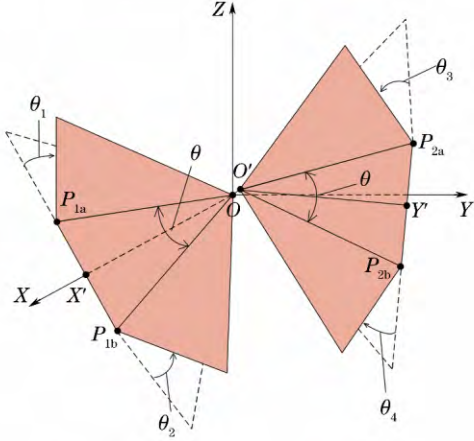


图 4 wMPS 发射站光面折面模型

Fig. 4 Model of folded laser surface of wMPS transmitter

中心折面模型的建立:wMPS 发射站在设计装配过程中,使两激光器发出的非平行扇面分别与 XOY 平面呈特定的角度并通过坐标系原点。实际建立发射站测量坐标系时,可令 X 轴处在位于初始位置的光面 1 的中心折面内,考虑到装配与加工误差,光面 2 不会精确通过原点,而是与 X 轴交于点 O' ,与 XOY 平面的交线为 $O'Y'$ 。相较于现有理想平面模型,折面模型的中心折面与现有理想平面模型相同,两个光面中心的折面方程分别为

$$b_1 y + c_1 z = 0, \quad (1)$$

$$a_2 x + b_2 y + c_2 z + d_2 = 0, \quad (2)$$

式中 b_1, c_1 与 a_2, b_2, c_2, d_2 为光面 1 与光面 2 的中心折面平面方程参数。

两侧折面模型的建立:求取光面 1 的折面上、下边界线段 OP_{1a} 与 OP_{1b} ,点 P_{1a} 与点 P_{1b} 位于中心折面上且关于 X 轴对称, P_{1a} 与 P_{1b} 连线与 X 轴相交于点 X' , $\angle P_{1a}OP_{1b} = \theta$,可令 $|OP_{1a}| = |OP_{1b}| = 1$,点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 满足

$$\begin{cases} b_1 y_p + c_1 z_p = 0 \\ \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2} = 1 \\ x_p^2 - y_p^2 - z_p^2 = \cos \theta \\ x_p > 0 \end{cases} \quad (3)$$

对(3)式求解可得两组解,可令两组解中 z_p 大于零的解为点 P_{1a} 坐标 (x_{1a}, y_{1a}, z_{1a}) , z_p 小于零的解为点 P_{1b} 坐标 (x_{1b}, y_{1b}, z_{1b}) 。由(1)式可得到中心折面的法向量,并取与 Z 轴正方向夹角为锐角的单位法向量作为中心折面的法向量 K_1 ,可表示为

$$K_1 = \begin{cases} \frac{-1}{\sqrt{b_1^2 + c_1^2}}(0, b_1, c_1), & c_1 < 0 \\ \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + c_1^2}}(0, b_1, c_1), & c_1 > 0 \end{cases} \quad (4)$$

光面 1 中过点 P_{1a} 、位于中心折面内且垂直于线段 OP_{1a} 的单位向量有两个,已知(1)式与点 O 、点 P_{1a} 坐标时可以轻易解出这两个单位向量,设其中指向点 P_{1b} 的单位向量为 L_{1a} ,则过点 O 、点 P_{1a} 的上侧折面的法向量 $K_{1a} = (k_{1ax}, k_{1ay}, k_{1az})$ 可表示为

$$K_{1a} = K_1 + \tan \theta_1 L_{1a} \quad (5)$$

当 θ_1 小于零时,上侧折面便会向图 4 所示的反方向弯折。则过点 O 、点 P_{1a} 的上侧折面的方程可以用点法式方程表示为

$$k_{1ax}x + k_{1ay}y + k_{1az}z = 0 \quad (6)$$

同理,设光面 1 中位于中心折面内且与 L_{1a} 关于 X 轴对称的单位向量为 L_{1b} ,则过点 O 、点 P_{1b} 的下侧折面的法向量 $K_{1b} = (k_{1bx}, k_{1by}, k_{1bz})$ 可表示为

$$K_{1b} = K_1 + \tan \theta_2 L_{1b} \quad (7)$$

当 θ_2 小于零时,下侧的折面便会向图 4 所示的反方向弯折。则过点 O 、点 P_{1b} 的下侧折面的方程可以用点法式方程表示为

$$k_{1bx}x + k_{1by}y + k_{1bz}z = 0 \quad (8)$$

与上文叙述原理相类似,借助光面 2 与 X 轴的交点 $O'(o_x, o_y, o_z)$, XOY 平面内长度为单位 1 的线段 $O'Y'$,光面 2 内折面上、下边界线段 $O'P_{2a}$ 、 $O'P_{2b}$ 等辅助元素(其中 P_{2a} 与 P_{2b} 连线与 XOY 平面相交于点 Y')可以显式表达出包含参数 θ_3 的上侧折面的法向量,即 $K_{2a} = (k_{2ax}, k_{2ay}, k_{2az})$,则过点 O' 、点 P_{2a} 的上侧折面的方程可以用点法式方程简单地表示为

$$k_{2ax}(x - o_x) + k_{2ay}(y - o_y) + k_{2az}(z - o_z) = 0 \quad (9)$$

同理,在显式表达出包含参数 θ_4 的下侧折面的法向量 $K_{2b} = (k_{2bx}, k_{2by}, k_{2bz})$ 后,过点 O' 、点 P_{2b} 的下侧折面的方程便可以用点法式方程简单地表示为

$$k_{2bx}(x - o_x) + k_{2by}(y - o_y) + k_{2bz}(z - o_z) = 0 \quad (10)$$

4 基于高精度坐标场的扫描激光面参数解算与评价

发射站扫描激光面能够实现水平 360° 、垂直约 $\pm 35^\circ$ 的覆盖范围,解算扫描激光面参数需获取在测量空间中足够的激光面采样信息,并且兼顾发射站系统其他内部结构参数的解算,一般借助具有空间构型层次的高精度坐标场进行^[17]。高精度坐标场的建立可采用激光跟踪仪多站干涉测长信息作为精确观测量,分布式布局构成空间图形冗余约束条件,优化跟踪仪测角误差,得到和激光干涉测长精度对应的高精度三维坐标场, $8\text{ m} \times 6\text{ m} \times 4\text{ m}$ 空间内点位精度可优于 0.02 mm ^[18-20],能够用于折面模型参数解算。基于坐标场的 wMPS 扫描激光面参数解算如图 5 所示。

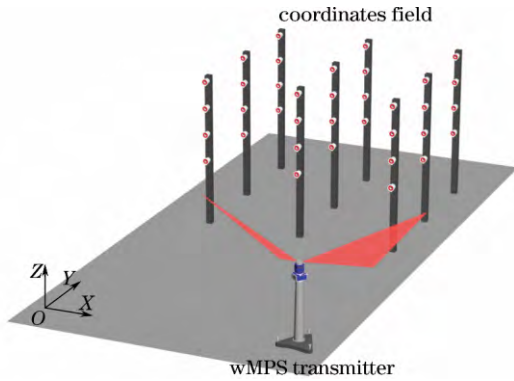


图 5 基于坐标场的 wMPS 扫描激光面参数解算

Fig. 5 Parameter calibration of wMPS scanning laser surface based on coordinate field

4.1 激光面参数解算模型建立

将坐标场的全局坐标系和单台发射站测量坐标系间的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 设为待优化求解量,将坐标场全局坐标系下 N 个坐标点中的第 j ($j=1,2,\dots,N$) 个坐标最优值 (x_{gj}, y_{gj}, z_{gj}) 变换成发射站测量坐标系下的 (x_{wj}, y_{wj}, z_{wj}) :

$$\begin{bmatrix} x_{wj} \\ y_{wj} \\ z_{wj} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_{gj} \\ y_{gj} \\ z_{gj} \end{bmatrix} + T. \quad (11)$$

在获取发射站两个扫描激光面分别扫过第 j 个坐标点时相对初始位置转过的角度 θ_{t1j} 、 θ_{t2j} 后,将坐标点绕扫描激光面旋转轴逆向旋转相同的角度,则得到位于初始位置的光面 1 与光面 2 内若干离散点坐标的采样信息,即采样点测量值 $S_{1j}(x_{w1j}, y_{w1j}, z_{w1j})$ 、 $S_{2j}(x_{w2j}, y_{w2j}, z_{w2j})$ 为

$$\begin{bmatrix} x_{w1j} \\ y_{w1j} \\ z_{w1j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{t1j} & \sin \theta_{t1j} & 0 \\ -\sin \theta_{t1j} & \cos \theta_{t1j} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{wj} \\ y_{wj} \\ z_{wj} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} x_{w2j} \\ y_{w2j} \\ z_{w2j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{t2j} & \sin \theta_{t2j} & 0 \\ -\sin \theta_{t2j} & \cos \theta_{t2j} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{wj} \\ y_{wj} \\ z_{wj} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

根据(1)式、(2)式不难求出两个光面上 S_{1j} 、 S_{2j} 分别在其上中心折面所在平面的投影点 S'_{1j} 、 S'_{2j} 。设 $\angle S'_{1j} OX' = \alpha$, $\angle S'_{2j} OY' = \beta$, $|S'_{1j} P_{1a}| = l_1$, $|S'_{1j} P_{1b}| = l_2$, $|S'_{2j} P_{2a}| = l_3$, $|S'_{2j} P_{2b}| = l_4$, 根据投影点所处的位置建立约束方程:

$$F_1(j) = \begin{cases} b_1 y_{w1j} + c_1 z_{w1j} = 0, & \alpha \leq \theta/2 \\ k_{1ax} x_{w1j} + k_{1ay} y_{w1j} + k_{1az} z_{w1j} = 0, & \alpha > \theta/2, l_1 < l_2, \\ k_{1bx} x_{w1j} + k_{1by} y_{w1j} + k_{1bz} z_{w1j} = 0, & \alpha > \theta/2, l_1 > l_2 \end{cases} \quad (14)$$

$$F_2(j) = \begin{cases} a_2 x_{w2j} + b_2 y_{w2j} + c_2 z_{w2j} + d_2 = 0, & \beta \leq \theta/2 \\ k_{2ax}(x_{w2j} - o_x) + k_{2ay}(y_{w2j} - o_y) + k_{2az}(z_{w2j} - o_z) = 0, & \beta > \theta/2, l_3 < l_4. \\ k_{2bx}(x_{w2j} - o_x) + k_{2by}(y_{w2j} - o_y) + k_{2bz}(z_{w2j} - o_z) = 0, & \beta > \theta/2, l_3 > l_4 \end{cases} \quad (15)$$

将 θ 固定为 30° , 则扫描激光面的折面模型共包含 16 个待解算参数。由(14)式、(15)式 N 个坐标点共建立 $2N$ 个约束方程,在保证坐标点于竖直方向均匀分布时,若 N 大于 8,利用最小二乘法完成参数的解算,即

$$\sum_{j=1}^N [F_1(j) + F_2(j)] = f_{\min}, \quad (16)$$

式中 f_{\min} 为左侧函数最小值。

4.2 激光面模型评价方法

获取面型模型参数后,为评价新模型效果,借助了若干用于验证的检测点。根据(11)式、(12)式、(13)式,以变换后的检测点坐标与光面距离残差作为评价标准。对于基于理想平面模型的扫描激光面,经变换的检测点到理想平面光面的距离 d_{plane} 可以表示为

$$d_{\text{plane}} = \frac{|a'x + b'y + c'z + d'|}{\sqrt{a'^2 + b'^2 + c'^2}}, \quad (17)$$

式中 a' 、 b' 、 c' 、 d' 为经变换后的检测点所属光面的平面方程参数。

基于折面模型的扫描激光面,根据检测点在光面中心折面所处平面上的投影点,依照(14)式、(15)式选择折面方程,根据(17)式进行评价。

5 实验与分析

根据 wMPS 实际工作距离与覆盖角度,在三维空间(8 m×6 m×4 m)均匀布设 36 个点(图 6),其

中超过 20 个点被用于解算扫描激光面模型参数,剩余在高度方向均匀分布的点被作为检测点来验证模型精度。利用激光跟踪仪(Leica-AT901)多站优化建立精密坐标场。

利用接收器结合信号处理单元,依次获取发射站两个扫描激光面扫过坐标点的相关时间信息,建立扫描激光面折面模型后进行解算,并将参数结果与现有理想平面模型光面参数进行对比,结果见表 1。

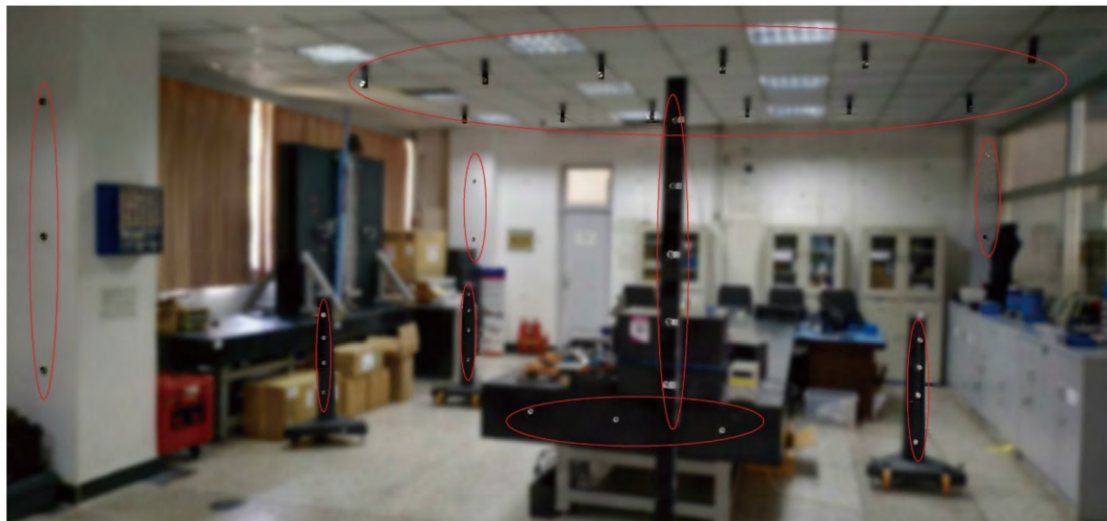


图 6 实验场景

Fig. 6 Experimental scene

表 1 扫描激光面新模型与理想平面模型的参数对比

Table 1 Parameter comparison between new model and ideal plane model of scanning laser surface

Parameter	New model	Parameter	Ideal plane model
b_1	-0.46244	b_1	-0.46231
c_1	0.88646	c_1	0.88647
a_2	-0.60258	a_2	-0.60222
b_2	-0.00750	b_2	-0.00682
c_2	0.79789	c_2	0.79815
d_2	3.82765	d_2	-0.40892
θ_1	-0.0329°		
θ_2	-0.0230°		
θ_3	0.0156°		
θ_4	0.0126°		

利用 11 个高精度检测点对新的扫描激光面模型参数解算结果进行评价,单发射站两个激光面在检测点处的拟合残差比对结果如图 7、图 8 所示,按照检测点高度依次排序。评价结果显示,基于折面模型的检测点处拟合残差较小,所研究面型模型相较于理想平面模型更贴合扫描激光面实际形状,是一种复杂度有限但精度更高的新型扫描激光面

模型。

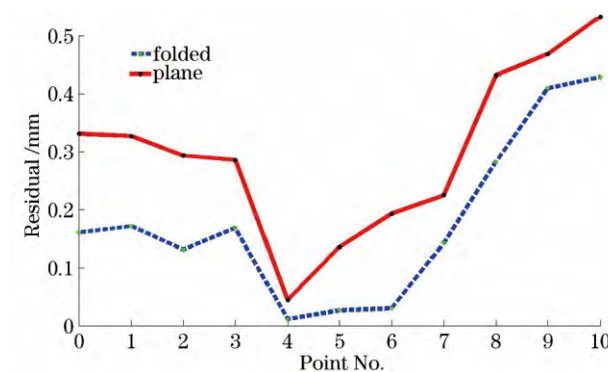


图 7 光面 1 新模型与平面模型的拟合残差比对

Fig. 7 Fitting residual comparison between new model and plane model of laser surface 1

6 结 论

研究了一种基于高精度转台的激光面面型视觉评估方法,基于实际激光面相较于理想平面的变形趋势,研究了更贴近实际的新型激光面模型建立方法,旨在减小 wMPS 测量模型中由扫描激光面变形带来的系统误差。研究了基于高精度坐标场的扫描

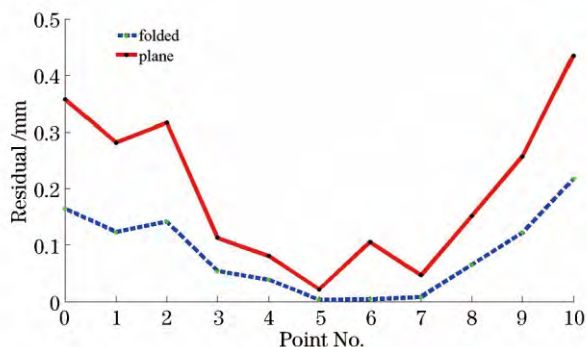


图 8 光面 2 新模型与平面模型的拟合残差比对

Fig. 8 Fitting residual comparison between new model and plane model of laser surface 2

激光面的折面模型建立与解算方法,将之与理想平面模型进行比对评价。实验结果表明,新型模型拟合结果具有更高的精度。未来扫描激光面模型优化可以通过增加折面数并采用非轴对称线性模型实现,在保证足够解算速度的条件下更精确地描述实际光面,结合 wMPS 其他主要误差源(如旋转轴系误差、接收偏心误差等)的修正补偿手段,能够有效提升 wMPS 的测量精度。

参 考 文 献

- [1] Ren Y J, Yin S B, Zhu J G. High precision control method of industrial robot for modern flexible manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(5): 16-21.
任永杰, 尹仕斌, 郝继贵. 面向现代柔性制造的工业机器人高精度控制方法[J]. 航空制造技术, 2018, 61(5): 16-21.
- [2] Norman A R, Schönberg A, Grolach I A, *et al.* Validation of iGPS as an external measurement system for cooperative robot positioning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(1/2/3/4): 427-446.
- [3] Wu J, Yu Z J, Zhuge J C, *et al.* Indoor positioning by using scanning infrared laser and ultrasonic technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 34(10): 2417-2423.
吴军, 于之靖, 诸葛晶昌, 等. 采用红外扫描激光与超声技术的室内空间定位[J]. 光学精密工程, 2016, 34(10): 2417-2423.
- [4] Maisano D A, Jamshidi J, Franceschini F, *et al.* A comparison of two distributed large-volume measurement systems: the mobile spatial co-ordinate measuring system and the indoor global positioning system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(5): 511-521.
- [5] Xue B, Zhu J G, Yang L H, *et al.* The application of the wMPS in airplane level measurement[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(8): 22-26.
薛彬, 郝继贵, 杨凌辉, 等. wMPS 系统在飞机水平测量中的应用[J]. 光电工程, 2014, 41(8): 22-26.
- [6] Zhang Y Z, Jiang Q, Zou F, *et al.* A positioning omni directional AGV method based on photoelectric scanning[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2015, 51(6): 15-19, 35.
张云志, 蒋倩, 邹方, 等. 一种基于光电扫描的室内 AGV 位姿测定方法[J]. 航空精密制造技术, 2015, 51(6): 15-19, 35.
- [7] Liu Z X, Zhu J G, Yang L H, *et al.* Real-time position and orientation measurement with occlusion handling for distributed optical large-scale metrology systems[J]. Optical Engineering, 2013, 52(11): 114101.
- [8] Li J. Study on high power semiconductor laser collimation and alignment[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013: 24-32.
李婕. 大功率半导体激光器准直与整形的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013: 24-32.
- [9] Xie Z X, Zhang A Q. Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of ultra-large-scale line structured-light sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0315001.
解则晓, 张安祺. 超大尺度线结构光传感器内外参数同时标定[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0315001.
- [10] Smith K B, Zheng Y F. Accuracy analysis of point laser triangulation probes using simulation[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1998, 120(4): 736-745.
- [11] Dewar R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system[C]. Robots and Vision'88 Conference Proceeding, 1985: 5-13.
- [12] Duan F J, Liu F M, Ye S H. A new accurate method for the calibration of line structured light sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(1): 108-110.
段发阶, 刘凤梅, 叶声华. 一种新型线结构光传感器结构参数标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(1): 108-110.
- [13] Xue B, Yang X X, Zhu J G. Architectural stability analysis of the rotary-laser scanning technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 78: 26-34.
- [14] Ding L C, Liu W, Gao P, *et al.* A micro vision-based method for multi-scale geometric parameters measurement[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(7): 9-13.

- 丁立超, 刘巍, 高鹏, 等. 应用显微视觉的跨尺度几何参数测量方法[J]. 机械设计与制造, 2017(7): 9-13.
- [15] Shi D, Zhou W H, Lao D B. Analysis and verification of precision turntable shafting design[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(1): 27-31.
- 石冬, 周维虎, 劳达宝. 精密转台轴系设计分析与验证[J]. 机电工程, 2015, 32(1): 27-31.
- [16] Jiang Y F, Jiang K Y, Lin J Y. Extrication method for sub-pixel center of linear structured light stripe [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 071502.
- 江永付, 江开勇, 林俊义. 线结构光光条中心亚像素精确提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 071502.
- [17] Zhao Z Y, Zhu J G, Lin J R, *et al.* Transmitter parameter calibration of the workspace measurement and positioning system by using precise three-dimensional coordinate control network[J]. Optical Engineering, 2014, 53(8): 084108.
- [18] Predmore C R. Bundle adjustment of multi-position measurements using the Mahalanobis distance[J]. Precision Engineering, 2010, 34(1): 113-123.
- [19] Cai J H. A new measure of positional error[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(3): 276-279.
- 蔡剑红. 一种新的点位误差度量[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 276-279.
- [20] Lin J R, Zhu J G, Guo Y, *et al.* Establishment of precise three-dimensional coordinate control network in field large-space measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 6-11.
- 林嘉睿, 郝继贵, 郭寅, 等. 现场大空间测量中精密三维坐标控制网的建立[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 6-11.