

DOI: 10.7652/xjtub201304014

基于空间球的三维激光扫描仪标定算法

汪霖, 曹建福, 韩崇昭

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对三维激光扫描仪测量模型参数的估计问题,提出一种基于空间球的模型参数标定算法。该算法根据球状标定物上各激光扫描点与标定球球心的距离约束条件,建立三维激光扫描仪模型参数和标定球参数的非线性目标函数;综合采用入侵性杂草优化算法和 Levenberg-Marquardt 算法优化该目标函数,以实现激光扫描仪模型参数标定;通过增加标定球上的扫描点数,能够减弱激光扫描仪测量噪声对标定精度的影响,从而提高文中算法的模型参数标定精度。实验结果表明,该算法的标定精度高,模型参数估计的一致性良好,且能有效抑制测量噪声对标定结果的影响。

关键词: 三维激光扫描仪;标定;非线性目标函数;入侵性杂草优化;Levenberg-Marquardt 算法
中图分类号: TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)04-0079-07

A Calibration Algorithm for 3D Laser Scanner Based on Spatial Sphere

WANG Lin, CAO Jianfu, HAN Chongzhao

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A model parameter calibration algorithm based on spatial sphere is proposed to estimate the measurement model parameters of a 3D laser scanner. The distance constraint between each laser scanning point on a spherical calibration object and the center of the calibration sphere is used to establish a nonlinear objective function to determine the model parameters of the 3D laser scanner and the calibration sphere parameters. The model parameter calibration of the laser scanner is realized by optimizing the objective function implemented by a proposed hybrid algorithm which integrates the invasive weed optimization (IWO) and the Levenberg-Marquardt algorithm. By adding the number of scanning points on the calibration sphere, the influence of measuring noise of laser scanner on calibration accuracy can be weakened, thereby the model parameter calibration accuracy of the proposed algorithm is improved. Experimental results show that the proposed algorithm can yield accurate calibration results with a good consistency of model parameters, and effectively suppress the measurement noise.

Keywords: 3D laser scanner; calibration; nonlinear objective function; invasive weed optimization; Levenberg-Marquardt algorithm

与传统的视觉传感器相比,距离传感器具有测量精度高、稳定性好、不易受光照影响等优点。随着距离成像技术的日趋成熟,三维激光扫描仪在目标分割^[1]、目标识别与定位^[2-3]、三维重建^[4]、场景理

解^[5]等机器人领域的应用日益增加。三维激光扫描仪标定的目的是对其测量模型参数进行估计,从而获得大量三维坐标点所组成的扫描场景的点云数据,它是实现三维激光扫描仪高精度测量的基础。

收稿日期: 2012-05-12。 作者简介: 汪霖(1983—),男,博士生;曹建福(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家“863 计划”资助项目(2006AA01Z126)。

网络出版时间: 2013-01-06

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130106.1059.001.html>

目前,常见的三维激光扫描仪主要有 3 种类型^[6]:车载激光扫描仪、俯仰运动激光扫描仪和偏转运动激光扫描仪。车载激光扫描仪^[7]将二维激光扫描仪固定于车辆上,通过车辆运动获得周围环境的三维点云数据,但该类三维激光扫描仪仅能对路过的环境进行测量。俯仰运动激光扫描仪^[8]和偏转运动激光扫描仪^[9]分别将二维激光扫描仪安装于俯仰装置和偏转装置上,通过装置的相应运动实现对扫描空间的数据测量,其中俯仰运动激光扫描仪的测量角度视场范围较小。Antone 等人提出了一种基于多足标定物的车载激光扫描仪标定算法,用于标定二维激光扫描仪与参考坐标系间的三维位姿参数^[10]。项志宇采用细杆作为标定物,提出了一种基于最小二乘法的俯仰运动激光扫描仪标定算法^[11],该方法需要测量激光扫描仪旋转中心到细杆的距离,由于该距离通常难以精确测量,从而降低了该方法的标定精度。Stoyanov 等人利用偏转运动激光扫描仪扫描房间墙面获得的测量数据,提出了一种基于平行平面间距离约束的标定算法^[12],但由于该方法假设激光扫描仪距离测量零点与偏转轴在垂直于激光扫描平面方向上的偏置量为 0,因而限制了其应用范围。

本文针对偏转运动激光扫描仪测量模型的参数估计问题,提出了一种基于空间球的三维激光扫描仪标定算法。在分析球状标定物作为激光扫描仪模型参数标定可行性的基础上,根据标定球上各激光扫描点到球心距离均为标定球半径的约束条件,建立了模型参数以及标定球球心坐标和半径的非线性目标函数。为了有效解决 Levenberg-Marquardt (LM)算法优化非线性目标函数中的初值选取问题,避免 LM 算法陷入局部极小值,采用入侵性杂草优化(Invasive Weed Optimization, IWO)算法对目标函数进行优化,将获得的最优解作为 LM 算法的初值。实验结果表明,本文算法的模型参数标定精度高,能有效抑制测量噪声的影响。

1 三维激光扫描仪测量模型

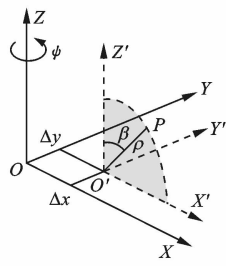
本文研究的三维激光扫描仪由二维激光扫描仪和云台所组成,如图 1a 所示,二维激光扫描仪具有垂直扫描平面,通过云台的偏转运动(绕垂直旋转轴旋转),实现对扫描空间的三维数据测量。三维激光扫描仪坐标系 $OXYZ$ 定义如下:以云台的垂直旋转轴为 Z 轴,将激光扫描仪距离测量零点 O' 在 Z 轴上的投影点 O 作为坐标系原点,将云台偏转角 ψ 为 0°

时垂直于激光扫描平面的方向作为 Y 轴方向,如图 1b 所示。由图 1b 可知,当云台偏转角为 ψ 时,对于激光测量距离和测量角度分别为 ρ 和 β 的扫描点 P ,其在三维激光扫描仪坐标系下的三维坐标为

$$(x, y, z)^T = \mathbf{p}(\psi, \beta, \rho, \Delta x, \Delta y) = \begin{bmatrix} \sin\beta\cos\psi & \Delta x\cos\psi - \Delta y\sin\psi \\ \sin\beta\sin\psi & \Delta x\sin\psi + \Delta y\cos\psi \\ \cos\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: (ψ, β, ρ) 为三维激光扫描仪对于某扫描点 P 的测量值;模型参数 Δx 和 Δy 分别为 $\psi=0^\circ$ 时距离测量零点 O' 在 X 轴与 Y 轴方向上的坐标偏移量; $\psi \in [-180^\circ, 180^\circ]$; $\beta \in [0^\circ, 180^\circ]$ 。因此,式(1)即为图 1 所示的三维激光扫描仪测量模型。

三维激光扫描仪标定的目标是估计其测量模型中的 Δx 和 Δy ,模型参数标定的通常方法是将其转化为非线性优化问题进行求解。利用三维激光扫描仪对标定物进行扫描,获得标定物上各扫描点的云台偏转角、激光测量角度、激光测量距离等测量数据,建立标定物上扫描点的几何约束关系,得到模型参数的非线性目标函数。传统的非线性优化算法(如 LM 算法)具有收敛速度快、稳定性好等优点,但对初值的依赖性强,为了避免 LM 算法陷入局部极小值,本文将采用 IWO 算法优化目标函数获得的解作为 LM 算法的初值。



(a) 激光扫描仪实物图 (b) 激光扫描仪坐标系

图 1 三维激光扫描仪测量模型

2 激光扫描仪模型参数标定算法

2.1 球状标定物

将半径为 R (未给定) 的标定球放置于三维激光扫描仪前方某一位置,标定球球心 O_s 的坐标记为 $\mathbf{p}_s = (x_s, y_s, z_s)^T$ 。假设云台偏转角为 ψ_i 时,三维激光扫描仪对于标定球上某两个扫描点 P_{i,i_1} 和 P_{i,i_2} 的测量值分别为 $(\psi_i, \beta_{i,i_1}, \rho_{i,i_1})$ 和 $(\psi_i, \beta_{i,i_2}, \rho_{i,i_2})$,则根

据条件 $|P_{i,i_1}O_s| = |P_{i,i_2}O_s|$ 以及式(1),得到关于模型参数 Δx 和球心坐标 $(x_s, y_s, z_s)^T$ 的线性方程为

$$a_{i,1}\Delta x + a_{i,2}x_s + a_{i,3}y_s + a_{i,4}z_s = b_i \quad (2)$$

式中系数 $a_{i,1}$ 、 $a_{i,2}$ 、 $a_{i,3}$ 、 $a_{i,4}$ 和 b_i 为

$$\begin{aligned} a_{i,1} &= \rho_{i,i_1} \sin \beta_{i,i_1} - \rho_{i,i_2} \sin \beta_{i,i_2} \\ a_{i,2} &= -\cos \phi_i (\rho_{i,i_1} \sin \beta_{i,i_1} - \rho_{i,i_2} \sin \beta_{i,i_2}) \\ a_{i,3} &= -\sin \phi_i (\rho_{i,i_1} \sin \beta_{i,i_1} - \rho_{i,i_2} \sin \beta_{i,i_2}) \\ a_{i,4} &= \rho_{i,i_2} \cos \beta_{i,i_2} - \rho_{i,i_1} \cos \beta_{i,i_1} \\ b_i &= \frac{1}{2}(\rho_{i,i_2}^2 - \rho_{i,i_1}^2) \end{aligned}$$

对于不同的 ϕ_i ($i = i_1, i_2, i_3, i_4$), 分别选取标定球上的两个扫描点, 根据式(2)可以得到以下线性方程组

$$\mathbf{A}(\Delta x, x_s, y_s, z_s)^T = \mathbf{B} \quad (3)$$

式中系数矩阵 $\mathbf{A}$ 和向量 $\mathbf{B}$ 为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{i_1,1} & a_{i_1,2} & a_{i_1,3} & a_{i_1,4} \\ a_{i_2,1} & a_{i_2,2} & a_{i_2,3} & a_{i_2,4} \\ a_{i_3,1} & a_{i_3,2} & a_{i_3,3} & a_{i_3,4} \\ a_{i_4,1} & a_{i_4,2} & a_{i_4,3} & a_{i_4,4} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{i_1} \\ b_{i_2} \\ b_{i_3} \\ b_{i_4} \end{bmatrix}$$

当所选扫描点满足系数矩阵 $\mathbf{A}$ 的秩为 4 时, 矩阵 $\mathbf{A}$ 存在逆矩阵 $\mathbf{A}^{-1}$, 则方程组(3)存在唯一解 $(\Delta x, x_s, y_s, z_s)^T = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$ 。

对于不同 ϕ_i 和 ϕ_j 下标定球上的两个扫描点 P_{i,i_1} 和 P_{j,j_1} , 其测量值分别为 $(\phi_i, \beta_{i,i_1}, \rho_{i,i_1})$ 和 $(\phi_j, \beta_{j,j_1}, \rho_{j,j_1})$, 根据 $|P_{i,i_1}O_s| = |P_{j,j_1}O_s| = R$ 以及式(1), Δy 满足

$$2(g_i - g_j)\Delta y = h_{j,j_1} - h_{i,i_1} \quad (4)$$

式中: $g_i = x_s \sin \phi_i - y_s \cos \phi_i$; $g_j = x_s \sin \phi_j - y_s \cos \phi_j$; h_{i,i_1} 和 h_{j,j_1} 的计算公式为

$$\begin{aligned} h_{i,j} &= \rho_{i,j}^2 + 2\rho_{i,j}(\Delta x \sin \beta_{i,j} - z_s \cos \beta_{i,j}) - \\ &2(x_s \cos \phi_i + y_s \sin \phi_i)(\rho_{i,j} \sin \beta_{i,j} + \Delta x) \end{aligned}$$

由于 $g_i - g_j = (x_s^2 + y_s^2)^{1/2}[\sin(\phi_i - \alpha) - \sin(\phi_j - \alpha)]$, 其中 $\alpha = \arctan 2(y_s, x_s)$, 而 $-180^\circ \leq \phi_i, \phi_j \leq 180^\circ$, 当所选的云台偏转角满足 $\phi_i + \phi_j \neq \pm 180^\circ$ 时, $g_i \neq g_j$, 此时 Δy 的解为 $0.5(h_{j,j_1} - h_{i,i_1})/(g_i - g_j)$ 。由此, 得到了 Δx 和 Δy 的解析解, 从而表明球状标定物可用于三维激光扫描仪的模型参数标定。

2.2 非线性目标函数的建立

由于激光扫描仪存在测量噪声, 因此由 2.1 节给出的模型参数解析解与其真实值之间通常存在较大误差。为此, 根据三维激光扫描仪对固定位置标定球进行扫描获得的测量数据, 建立模型参数的非线性目标函数, 从而通过优化该目标函数, 实现激光

扫描仪模型参数的标定。

将标定球放置于激光扫描仪前方, 其球心 O_s 的坐标记为 $\mathbf{p}_s = (x_s, y_s, z_s)^T$, 半径记为 R (未给定), 通过云台的偏转运动, 对该标定球进行扫描。假设该标定球上扫描点 $P_{i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N_i$) 的激光扫描仪测量值为 $(\phi_i, \beta_{i,j}, \rho_{i,j})$, 其中 ϕ_i 表示云台偏转角, $\beta_{i,j}$ 为激光测量角度, $\rho_{i,j}$ 为激光测量距离。根据式(1), $P_{i,j}$ 在激光扫描仪坐标系下的坐标为 $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})^T = \mathbf{p}(\phi_i, \beta_{i,j}, \rho_{i,j}, \Delta x, \Delta y)$ 。

由于扫描点 $P_{i,j}$ 位于球心为 O_s 、半径为 R 的标定球上, 因此满足 $|P_{i,j}O_s| = R$, 即

$$\|\mathbf{p}(\phi_i, \beta_{i,j}, \rho_{i,j}, \Delta x, \Delta y) - \mathbf{p}_s\| = R \quad (5)$$

根据式(5), 建立 Δx 和 Δy 的非线性目标函数如下

$$f(\Delta x, \Delta y, \mathbf{p}_s, R) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} (\|\mathbf{p}(\phi_i, \beta_{i,j}, \rho_{i,j}, \Delta x, \Delta y) - \mathbf{p}_s\| - R)^2 \quad (6)$$

式中: N 为标定球上激光扫描位置数; N_i 为第 i 次扫描时标定球上的激光扫描点数。由此, Δx 和 Δy 的标定问题转化为式(6)的最小优化问题。

2.3 激光扫描仪模型参数优化

本节采用 IWO 算法和 LM 算法相结合的全局优化算法, 对式(6)中的模型参数进行优化。IWO 算法^[13] 首先由 Mehrabian 和 Lucas 于 2006 年提出, 是一种模拟杂草的生长与繁殖过程的仿生随机搜索优化算法。IWO 算法简单易于实现, 其全局寻优能力优于遗传算法、粒子群算法和人工蜂群算法等智能优化算法^[13-14]。本文将 IWO 算法用于优化目标函数, 将获得的优化解作为 LM 算法的初值。

IWO 算法首先对种群进行初始化, 即随机生成原始种群中的 m_0 个杂草, 其中每个杂草均为最小优化问题的一个候选解, 并将杂草位置对应的目标函数值定义为该杂草的适应度。其次, 种群中各杂草根据其相对适应度进行繁殖, 以产生若干个种子, 其中第 $k+1$ 次迭代中杂草 a 所产生的种子数为

$$\begin{aligned} w_a^{k+1} &= \left\lfloor \frac{(f_{\max}^k - f(q_a^k))(s_{\max} - s_{\min})}{(f_{\max}^k - f_{\min}^k)} \right\rfloor + s_{\min} \\ \forall a &= 1, 2, \dots, m_k \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{q}_a^k = (q_{a,1}^k, q_{a,2}^k, \dots, q_{a,D}^k)^T$ 为第 k 次迭代后杂草 a 的位置; $f(q_a^k)$ 为杂草 $\mathbf{q}_a^k$ 的适应度; $f_{\min}^k$ 和 $f_{\max}^k$ 分别为第 k 次迭代后种群中所有杂草的最小和最大适应度; $s_{\min}$ 和 $s_{\max}$ 分别为单个杂草所能产生的最小

和最大种子数; $\lfloor \cdot \rfloor$ 为下取整函数; m_k 为第 k 次迭代后的种群数。然后, 将所产生的各个种子按零均值、变标准差的正态分布规律, 在其父代杂草个体附近的解空间中进行随机扩散。第 $k+1$ 次迭代中 D 维解空间的第 i 个分量的正态分布标准差为

$$\sigma_i^{k+1} = \frac{(k_{\max} - k - 1)^p (\sigma_{\max,i} - \sigma_{\min,i})}{k_{\max}^p} + \sigma_{\min,i} \quad \forall i = 1, 2, \dots, D \quad (8)$$

式中: $k_{\max}$ 为最大迭代次数; 上标 p 为非线性调制指数; $\sigma_{\min,i}$ 和 $\sigma_{\max,i}$ 分别为解空间的第 i 维分量的最小和最大标准差。根据可行解的取值范围, 对空间扩散后的种子进行箝位操作, 以保证产生的杂草后代均为可行解。最后, 根据最大种群数 $m_{\max}$ 及淘汰机制来控制种群数。若种群中各杂草及其后代总数大于 $m_{\max}$ 时, 按照其适应度大小进行排序, 选取适应度最小的前 $m_{\max}$ 个个体组成下一次迭代的种群, 而其余个体均被淘汰。

根据以上的杂草繁殖、种子空间扩散、杂草及其后代的竞争排斥等过程, 对种群中杂草数目及位置进行更新。当 IWO 算法的迭代次数等于最大迭代次数 $k_{\max}$ 时, IWO 算法终止迭代。将第 $k_{\max}$ 次迭代后的种群中具有最小适应度的杂草位置 $\mathbf{q}_a^{k_{\max}}$ 作为 LM 算法的初值, 利用 LM 算法对式(6)进行优化, 以获得 Δx 和 Δy 的标定值。

采用 IWO 算法和 LM 算法相结合的三维激光扫描仪模型参数标定步骤如下。

步骤1 IWO 算法初始化。给定解空间维数 $D=6$ 、初始种群数 m_0 和最大种群数 $m_{\max}$ 、单个杂草产生的最小种子数 $s_{\min}$ 和最大种子数 $s_{\max}$ 、最大迭代次数 $k_{\max}$ 、非线性调制指数 p 、种子正态扩散的各维最小标准差 $\sigma_{\min,i} (i=1, 2, \dots, D)$ 以及式(6)可行解的取值范围 $[q_{\min}, q_{\max}]$; 计算种子正态随机扩散的各维最大标准差^[15] $\sigma_{\max,i} = \left(\frac{1}{2} (|q_{\min,i}| + |q_{\max,i}|) \right)^{1/2}$, 其中 $i=1, 2, \dots, D$; 令迭代次数 k 为 0, 当前种群数 m_k 为 m_0 , 将式(6)作为杂草的适应度函数, 随机初始化由 m_0 个杂草组成的原始种群 $\Omega^k = \{\mathbf{q}_1^k, \mathbf{q}_2^k, \dots, \mathbf{q}_{m_0}^k\}$ 。

步骤2 根据式(7)计算种群 Ω^k 中各个杂草 $a=1, 2, \dots, m_k$ 产生的种子数 w_a^{k+1} 。

步骤3 根据式(8)计算种子正态随机扩散的各维标准差 $\sigma_i^{k+1} (i=1, 2, \dots, D)$, 并对各种子在其父代杂草个体附近进行正态随机扩散。按照可行解的取值范围, 对空间扩散后的各个种子进行箝位操作。

步骤4 计算第 $k+1$ 次迭代中生成的种子总数

$W^{k+1} = \sum_{a=1}^{m_k} w_a^{k+1}$ 。若 $W^{k+1} + m_k \leq m_{\max}$, 则由种群 Ω^k 中所有杂草及其后代组成第 $k+1$ 次迭代后的种群 Ω^{k+1} , 并且令 $m_{k+1} = W^{k+1} + m_k$; 否则, 将种群 Ω^k 中各个杂草及其后代按照适应度大小排序, 将适应度最小的前 $m_{\max}$ 个个体组成种群 Ω^{k+1} , 并且令 $m_{k+1} = m_{\max}$ 。

步骤5 迭代次数 k 增加 1, 若 $k < k_{\max}$ 成立, 则转到步骤 2; 否则, IWO 算法终止迭代, 转到步骤 6。

步骤6 将 IWO 算法第 $k_{\max}$ 次迭代后的种群 $\Omega^{k_{\max}}$ 中具有最小适应度的杂草位置 $\mathbf{q}_a^{k_{\max}}$ 作为 LM 算法的初值, 利用 LM 算法对式(6)进行优化, 所求得的 Δx 和 Δy 的最优解即为三维激光扫描仪模型参数的标定值。

3 实验结果与分析

本节通过仿真和实际实验, 对所提出的三维激光扫描仪模型参数标定算法的有效性进行验证。实验中三维激光扫描仪由 SICK LMS400 激光扫描仪和 PT10302 双自由度数字云台组成。利用三维激光扫描仪对标定球进行模拟和实际扫描测量, 其中 LMS400 激光扫描仪的测量角度分辨率设为 0.1° , 仿真和实际实验的数字云台偏转运动角度分辨率分别设为 0.1° 和 0.1032° 。由于 LMS400 激光扫描仪的角度测量误差较小, 且 PT10302 数字云台的偏转角定位精度较高, 因此仿真实验中主要考虑 LMS400 激光扫描仪的距离测量误差对标定结果的影响。与文献[16]相同, 仿真实验中激光测量距离 ρ 均加上 $\pm \Delta \rho$ 的均匀噪声, 其中 $\Delta \rho$ 为激光扫描仪距离测量误差。

除非另有说明, 实验中本文算法的参数设置如下: 初始种群数 m_0 和最大种群数 $m_{\max}$ 分别设为 20 和 40, 单个杂草产生的最小种子数 $s_{\min}$ 和最大种子数 $s_{\max}$ 分别设为 1 和 3, 非线性调制指数 p 设为 2, 种子作正态空间扩散的各最小标准差 $\sigma_{\min,i} (i=1, 2, \dots, 6)$ 均设为 0.000 1, 最大迭代次数 $k_{\max}$ 设为 300; 激光扫描仪模型参数 Δx 和 Δy 、标定球球心坐标 $\mathbf{p}_s = (x_s, y_s, z_s)^T$ 以及半径 R 的变化范围分别为 $\Delta x, \Delta y \in [-200, 200]$ mm, $x_s \in [0, 2\ 000]$ mm, $y_s, z_s \in [-500, 500]$ mm 和 $R \in [0, 200]$ mm。

3.1 仿真实验

仿真实验中, 标定球球心坐标设为 $\mathbf{p}_s = (850, 50, -10)^T$ mm, 激光扫描仪模型参数的标定误差定义为其标定值与真实值之间的绝对误差。

首先,对本文算法和 Stoyanov 算法^[12]的模型参数标定精度进行比较。考虑到 Stoyanov 算法需要假设 Δy 为 0,因此实验中 Δx 和 Δy 的真实值分别设为 -25 mm 和 0 。如文献^[12]所述,Stoyanov 算法利用三维激光扫描仪对房间四周墙壁的扫描测量数据来估计 Δx ,实验中房间的长宽尺寸分别设为 $D_x=3\,400\text{ mm}$ 和 $D_y=1\,620\text{ mm}$ 。激光扫描仪的距离测量误差 $\Delta\rho$ 设为 3 mm ,采用本文算法和 Stoyanov 算法分别进行 100 次相互独立的模型参数标定实验,其中采用本文算法的各次标定实验中,通过对 R 为 100 mm 的标定球进行模拟扫描,仿真生成标定球上的激光扫描仪测量数据,再采用本文算法对 Δx 和 Δy 进行估计。本文算法和 Stoyanov 算法的模型参数标定精度比较如表 1 所示。由表 1 可知,本文算法的 Δx 的标定误差的均值和标准差均小于 Stoyanov 算法的相应值,即本文算法对于 Δx 的标定精度和一致性均优于 Stoyanov 算法。此外,由于 Stoyanov 算法假设 Δy 均为 0,故该算法无法实现 Δy 的精确估计, Δy 的真实值和零值偏离的越远,其标定误差越大。由此可见,本文算法的模型参数标定精度高于 Stoyanov 算法。

表 1 本文算法和 Stoyanov 算法^[12]的模型参数标定精度比较

算法	Δx 标定误差		Δy 标定误差	
	均值	标准差	均值	标准差
本文	0.503	0.290	0.524	0.431
Stoyanov	1.842	0.647		

其次,对本文算法和 IWO 算法的标定精度及一致性进行比较。 Δx 和 Δy 的真实值均设为 20 mm , $\Delta\rho$ 设为 3 mm ,通过对 R 为 80 mm 的标定球进行模拟扫描,仿真生成一组标定球上的激光扫描仪测量数据。采用本文算法和 IWO 算法分别进行 100 次相互独立的模型参数标定实验,两种算法的模型参数标定误差的均值和标准差如表 2 所示。由表 2 可知,对于同一组标定球上的激光测量数据,本文算法的 Δx 和 Δy 标定误差的标准差均为 0,即 100 次独立标定实验中模型参数标定值均相同,其原因是本文算法将 IWO 算法的最优解作为 LM 算法的初值,而 IWO 算法具有良好的全局寻优能力,由其获得的 LM 算法初值与式(6)的实际最优解均较为接近,再采用局部搜索能力强的 LM 算法优化式(6),即可获得一致的模型参数标定值。此外,仅

采用 IWO 算法对模型参数进行标定时, Δx 和 Δy 标定误差的均值及标准差均明显大于本文算法。这是由于 IWO 算法对式(6)进行优化时获得的最优解具有一定的随机性,并且 IWO 算法中种群数、单个杂草产生的最大和最小种子数、非线性调制指数等参数选择也会较大地影响算法性能,而本文算法将 IWO 算法和 LM 算法相结合来优化式(6),提高了模型参数标定精度和一致性。由此可见,本文算法的激光扫描仪模型参数的标定精度和一致性均优于 IWO 算法。

表 2 本文算法和 IWO 算法的模型参数标定误差比较

算法	Δx 标定误差		Δy 标定误差	
	均值	标准差	均值	标准差
本文	1.203	0	0.416	0
IWO	5.860	4.875	6.294	4.098

下面对本文算法的抗噪声干扰能力进行实验。假设 Δx 和 Δy 的真实值均为 20 mm ,在不同的 $\Delta\rho$ (分别取 $0,1,\cdots,10\text{ mm}$)下对 R 为 80 mm 的标定球分别进行 100 次相互独立的模拟扫描,仿真生成 100 组标定球上的激光扫描仪测量数据,采用本文算法分别对各组测量数据进行模型参数标定实验。不同噪声水平下本文算法的模型参数标定误差均值如图 2 所示。由图 2 可知, Δx 和 Δy 的标定误差均值随着 $\Delta\rho$ 的增大而有所增加,但当 $\Delta\rho$ 不大于 5 mm 时, Δx 和 Δy 的标定误差均值均小于 2.5 mm 。因此,本文算法能有效地抑制测量噪声的影响。

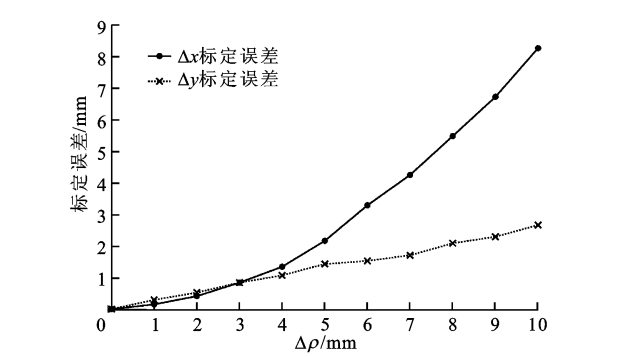


图 2 不同噪声水平下本文算法的模型参数标定误差

最后,对本文算法标定误差与标定球上激光扫描点数的关系进行实验。 Δx 和 Δy 的真实值均设为 20 mm , $\Delta\rho$ 设为 3 mm ,通过对不同 R (分别取 $30,35,\cdots,125\text{ mm}$)的标定球分别进行 100 次相互独立的模拟扫描,仿真生成 100 组标定球上的激光

扫描仪测量数据。采用本文算法分别对各组测量数据进行模型参数标定实验,不同激光扫描点数下本文算法的模型参数标定误差均值如图 3 所示。由图 3 可知, Δx 和 Δy 的标定误差均值随着标定球上激光扫描点数的增加而呈减小趋势,当标定球上激光扫描点数不小于 3 649 时, Δx 和 Δy 的标定误差均值均小于 2 mm。由此可见,通过增加标定球上的扫描点数,能够减弱激光扫描仪测量噪声对标定精度的影响,从而提高本文算法的模型参数标定精度。

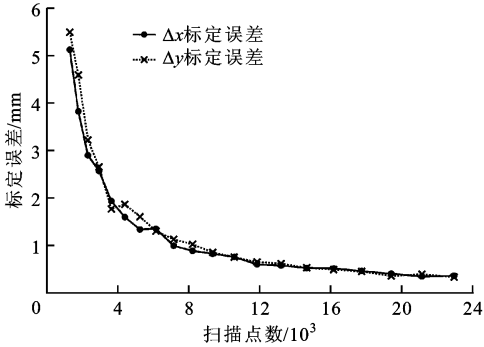


图 3 标定球上扫描点数与模型参数标定误差的关系

3.2 实际实验

根据图 4 所示的实验环境对三维激光扫描仪模型参数进行标定实验,实验中将足球作为标定球。利用三维激光扫描仪对处于同一位置的标定球进行 100 次相互独立的扫描,获得 100 组标定球上的激光扫描仪测量数据,其中每组数据的扫描点数约为 13 600。采用本文算法对各组测量数据进行模型参数标定实验,结果如表 3 所示。由表 3 可知, Δx 和 Δy 的标定值标准差分别为 0.447 mm 和 1.237 mm,可见本文算法的一致性好。

根据表 3 所示的模型参数标定结果, Δx 和 Δy 分别取为 -0.751 mm 和 7.710 mm,利用三维激光扫描仪对图 5a 所示的实际场景进行扫描测量。实验中,激光扫描仪的测量距离范围设为 700~1 500 mm,测量角度范围设为 70°~118°,云台偏转角范围设为 -13.416°~27.864°。三维激光扫描仪扫描获得的实际场景点云如图 5b 所示,其三维点数为 52 108。

表 3 三维激光扫描仪模型参数标定实验结果

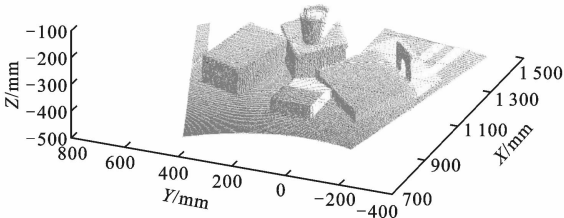
标定值	Δx	Δy	x_s	y_s	z_s	R
均值	-0.751	7.710	821.993	8.999	57.910	102.363
标准差	0.447	1.237	0.471	1.309	0.034	0.085



图 4 三维激光扫描仪标定实验环境



(a) 实验场景



(b) 扫描点云

图 5 室内场景的三维数据测量实验

4 结 论

针对三维激光扫描仪测量模型参数的估计问题,本文提出了一种基于半径未知的球状标定物的模型参数标定算法。考虑到三维激光扫描仪对固定位置标定球的扫描测量数据存在测量误差,根据标定球上各扫描点与球心间的距离约束条件,建立了模型参数的非线性目标函数,从而将模型参数的标定转化为该目标函数的最小优化问题。为了避免 LM 算法陷入局部极小值,将 IWO 算法优化目标函数获得的解作为 LM 算法的初值,从而有效解决了 LM 算法的初值选取问题。采用 LM 算法最小化该目标函数,以实现三维激光扫描仪模型参数的标定。仿真和实际实验结果表明,本文算法的标定精度高,

模型参数的估计一致性好,并且能有效抑制测量噪声对标定结果的影响。

参考文献:

- [1] KATSOULAS D, BASTIDAS C C, KOSMOPOULOS D. Superquadric segmentation in range images via fusion of region and boundary information [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(5): 781-795.
- [2] NUCHTER A, LINGEMANN K, HERTZBERG J, et al. Accurate object localization in 3D laser range scans [C]//Proceedings of 12th International Conference on Advanced Robotics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 665-672.
- [3] BREITENREICHER D, SCHNOERR C. Model-based multiple rigid object detection and registration in unstructured range data [J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 92(1): 32-52.
- [4] FENTANES J A P, ALONSO R F, ZALAMA E, et al. A new method for efficient three-dimensional reconstruction of outdoor environments using mobile robots [J]. Journal of Field Robotics, 2011, 28(6): 832-853.
- [5] 庄严, 卢希彬, 李云辉, 等. 移动机器人基于三维激光测距的室内场景认知 [J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1232-1240.
ZHUANG Yan, LU Xibin, LI Yunhui, et al. Mobile robot indoor scene cognition using 3D laser scanning [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(10): 1232-1240.
- [6] SHEEHAN M, HARRISON A, NEWMAN P. Self-calibration for a 3D laser [J]. The International Journal of Robotics Research, 2012, 31(5): 675-687.
- [7] KAUSHIK R, XIAO J, MORRIS W, et al. 3D laser scan registration of dual-robot system using vision [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 4148-4153.
- [8] VALENCIA R, TENIENTE E, TRULLS E, et al. 3D mapping for urban service robots [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 3076-3081.
- [9] BOSSE M, ZLOT R. Continuous 3D scan-matching with a spinning 2D laser [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 4312-4319.
- [10] ANTONE M, FRIEDMAN Y. Fully automated laser range calibration [C]//Proceedings of the British Machine Vision Conference. Bristol, UK: ILES Central Press, 2007: paper-29.
- [11] 项志宇. 快速三维扫描激光雷达的设计及其系统标定 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(12): 2130-2133.
XIANG Zhiyu. Design and calibration of fast 3D laser range finder [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(12): 2130-2133.
- [12] STOYANOV T, LILIENTHAL A J. Maximum likelihood point cloud acquisition from a mobile platform [C]//Proceedings of International Conference on Advanced Robotics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1-6.
- [13] MEHRABIAN A R, LUCAS C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization [J]. Ecological Informatics, 2006, 1(4): 355-366.
- [14] KRISHNANAND K R, NAYAK S K, PANIGRAHI B K, et al. Comparative study of five bio-inspired evolutionary optimization techniques [C]//Proceedings of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1231-1236.
- [15] ROY G G, CHAKROBORTY P, ZHAO S Z, et al. Artificial foraging weeds for global numerical optimization over continuous spaces [C]//Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-8.
- [16] ZHANG Q L, PLESS R. Extrinsic calibration of a camera and laser range finder: improves camera calibration [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 2301-2306.

(编辑 荆树蓉 武红江)