

激光与光电子学进展

融合尺度因子的组合式光学扫描中转位姿标定方法

姜涛^{1,2*}, 崔海华², 程筱胜², 田威²¹宿迁学院机电工程学院, 江苏 宿迁 223800;²南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

摘要 针对组合式光学扫描系统中转位姿存在的尺度差异问题,提出了一种融合尺度因子的中转位姿标定方法。建立了组合式光学扫描系统数学模型,基于数值模拟探究了全局测量精度相对尺度差异的线性规律。建立了融合尺度因子的中转位姿标定模型,基于张量积展开给出了中转位姿的理论解,并对系统参数和尺度因子进行优化。利用仿真和实验验证了标定方法的有效性和标定精度。结果表明:组合定位精度优于 0.1 mm;融合尺度因子的中转位姿提升了组合式光学扫描系统的整体扫描精度。

关键词 光学测量; 中转位姿; 标定; 尺度因子; Kronecker 积

中图分类号 TH741;O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2312005

Combined Optical Scanning Transposition Pose Calibration Method Integrating Scale Factor

Jiang Tao^{1,2*}, Cui Haihua², Cheng Xiaosheng², Tian Wei²¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Suqian University, Suqian 223800, Jiangsu, China;²College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China

Abstract A transposition pose calibration method integrating scale factor is proposed for the problem of scale difference in the combined optical scanning system. The mathematical model of the combined optical scanning system is established. Then, the changing trend of global measurement accuracy relative to scale difference is explored based on the numerical simulation. The calibration model of transposition pose considering the scale factor is established. With the Kronecker product expansion, the theoretical solution of the transposition pose is given. The system parameters and scale factors are optimized. The effectiveness and accuracy of the calibration method are verified by simulation and experiment. The results show that the combined positioning accuracy is better than 0.1 mm; the transposition pose considering the scale factor significantly improves the overall scanning accuracy of the combined optical scanning system.

Key words optical measurement; transposition pose; calibration; scale factor; Kronecker product

1 引言

大尺度部件尺寸跨度大、结构复杂、特征丰富、相对测量精度和表面完整性要求高。使用单一扫描设备进行多站位测量拼接,或多测量设备组合测量是大尺度部件整体三维重建的主要思路^[1-2]。根据扫描数据拼接原理可分为基于机械精密运动的^[3]、基于标志点的^[4]、基于形状的^[5]和基于跟踪的^[6]测量方法。其中基于跟踪的测量方法无需预先粘贴标志点,累计误差低,

测量完整性更高,研究较为广泛。该方法是一种全局大视场双目视觉定位系统和终端光学扫描仪的组合式跟踪测量方法,两级测量设备通过中转靶标进行数据传递和整体拼接,其中中转位姿是全局数据拼接必要的定值转换矩阵,需要精确标定。

在组合式视觉跟踪测量系统中,现有的中转位姿标定方法多是基于公共标定板的三维刚体变换方法^[7-9]。Shi 等^[10-11]概括了组合光学跟踪测量系统的研究框架,其中中转位姿的标定是基于空间封闭坐标变

收稿日期: 2022-02-28; 修回日期: 2022-03-20; 录用日期: 2022-06-13

基金项目: 江苏省高校自然科学基金计划(22KJB460007)、宿迁市科技计划、宿迁学院高层次人才启动项目(校 2022XRC012)

通信作者: *TaoJiang@squ.edu.cn

换实现的。坐标变换的方法是最直接的方法,标定算法简单,一次测量即可完成,实施便捷,被广泛采用。Wang 等^[12]利用具有编码特征的标志点构建大型标定板,保证终端扫描设备和全局定位设备均能有效测量,然后基于坐标变换实现标定。为提升标定的精度,Zhou 等^[13]研制了一种具有两种距离约束的精密公共靶标,并提出加权矩阵精确计算出中转位姿。但是,基于精密标定板的方法仍然受限于加工精度及使用过程中的累计误差,采用多视角测量有助于标定靶标的平差优化^[14],标定算法仍有提升空间。Jiang 等^[15-16]在分析了基于刚体变换的中转位姿误差分布的基础上,提出了一种更加符合组合式跟踪测量数据传递过程的中转位姿标定方法,提升了标定精度。该方法获得了较高的组合测量精度,但是本质上仍是将中转位姿作为两级设备的刚体变换,而忽略了测量精度等级差异造成的数据尺度差异问题。石世锋等^[17]为解决全局目标定位和局域精密测量问题,研究了一种具有远近视距的双目视觉系统,提出了一种基于点阵编码元和多视图几何的系统标定方法,该方法是解决全局与局域同步测量的有效方法,多站位标定建模方法有助于参数平差和优化。综上所述,在组合测量中,为提升中转位姿标定精度和全局测量精度,必须充分考虑数据传递规律及存在数据尺度差异问题。

考虑目前组合测量系统中两级中转位姿标定存在的精度等级差异问题,本文提出了融合尺度因子的中转位姿标定方法。分析了尺度差异对全局定位精度的影响规律,建立了融合尺度因子的标定模型,并给出了求解方法,通过仿真和实验对方法进行了验证。本文方法考虑了组合测量两级精度差异问题,提升了中转位姿标定精度和全局定位精度。

2 融合尺度因子的中转位姿标定模型与求解

2.1 组合式光学跟踪扫描模型

组合式光学跟踪扫描几何测量模型如图 1 所示。全局视觉系统(GVS)固定放置,可实现较大范围的定位跟踪;局部视觉系统(LVS)是基于视觉测量原理的终端测量系统,实现局部测量;中转定位器(TPT)固定安装在 LVS 上,在 LVS 移动过程中,TPT 与 LVS 测量坐标系相对位姿保持不变。

图 1 中, $\{G\}$ 表示 GVS 测量坐标系, $\{L_i\}$ 表示 LVS 测量坐标系 $\{T\}$ 在第 $i(i=0, 1, 2, \dots)$ 个测量视角时的局部测量坐标系, $\{T_i\}$ 表示中转靶标坐标系 $\{T\}$ 在第 i 个测量视角时相应的靶标坐标系。 P_{L_i} 表示第 i 个测量视角的局部测量数据,其是在 $\{L_i\}$ 坐标系下的。从 $\{L\}$ 到 $\{T\}$ 的变换矩阵表示为 T_T^L ,其是一个固定矩阵,即中转变换矩阵。从 $\{T_i\}$ 到 $\{G\}$ 坐标系的变换矩阵为 $T_G^{T_i}$,由于中转靶标在运动,每个测量测量视角下的 $T_G^{T_i}$ 不同,需要利用动态测量结果进行计算。测量数据 P_{L_i} 可

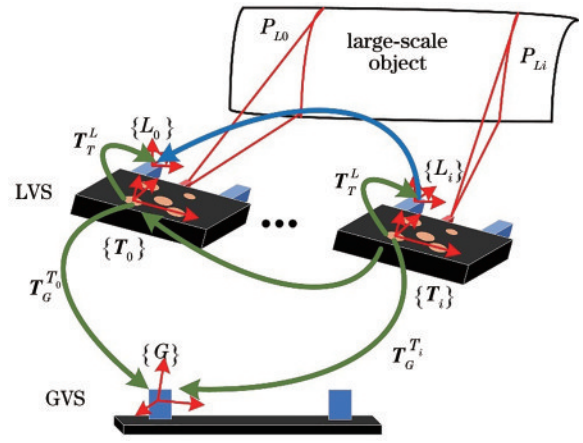


图 1 组合式光学跟踪扫描几何模型

Fig. 1 Geometrical model of combined optical tracking and scanning

通过坐标变换实现整体测量数据的拼接和融合,即将 $P_{L_i}(i=0, 1, 2, \dots)$ 统一到 $\{G\}$ 。若 i 个测量视角下局部测量点在 $\{G\}$ 坐标系下的坐标为 P_{G_i} ,根据坐标变换^[16]

$$P_{G_i} = T_G^{T_i} T_T^{L_i} P_{L_i}, \quad (1)$$

每个视角测量数据均变换到 $\{G\}$ 坐标系下,测量结果直接融合。将所有位姿矩阵展开表示,式(1)可表示为

$$P_{G_i} = R_G^{T_i} (R_T^{L_i} P_{L_i} + t_T^{L_i}) + T_G^{T_i}, \quad (2)$$

式中: $T_G^{T_i} = \begin{bmatrix} R_G^{T_i} & t_G^{T_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; $T_T^{L_i} = \begin{bmatrix} R_T^{L_i} & t_T^{L_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,其中 $R_G^{T_i}$ 和 $t_G^{T_i}$ 分别表示 $T_G^{T_i}$ 的旋转矩阵和平移向量, $R_T^{L_i}$ 和 $t_T^{L_i}$ 分别表示 $T_T^{L_i}$ 的旋转矩阵和平移向量。

2.2 尺度因子的线性规律

假设视觉系统及两级中转位姿精确标定,则全局定位误差中尺度因子占主导作用,本节探究尺度因子对于全局定位点 P_G 误差和跟踪位姿 T_G^T 误差的影响规律。本文以标准差作为测量误差的描述指标。设定 LVS 测量误差 $\Delta P_{LVS} \sim N(0, 0.01)$,即 LVS 的误差项满足均值为 0、方差为 0.01 mm,这是依据 LVS 测量不确定度实验设定的。设定 GVS 测量误差 $\Delta P_{GVS} \sim N(0, \sigma^2)$,并控制 $\sigma^2 \in [0.01, 1]$ 变化,即 GVS 误差值相对于 LVS 误差在 1~100 倍变化。根据全局点方程式(2),若全局理想点为 P_G ,增加误差项后的理想点为 P'_G 。由于全局点 P_G 的绝对误差受到 P_L 点坐标数值大小的影响,这里采用相对误差作为误差评价标准,即

$$e(P_G) = \frac{\|P'_G - P_G\|}{P_G} \times 100\%。 \quad (3)$$

同样,计算跟踪位姿的误差值,位姿误差计算不受具体数值大小的影响,故采用绝对距离进行误差评估,具体为

$$e(R_G^T) = \|(R_G^T)' - R_G^T\|, \quad (4)$$

$$e(t_G^T) = \|(t_G^T)' - t_G^T\|。 \quad (5)$$

利用式(3)计算全局定位点误差,利用式(4)和式(5)计算跟踪位姿误差。不断增加标准差 σ 数值,计算相应的误差值,绘制 T_G^T 、 P_G 误差相对于GVS与LVS精度

等级比例的曲线图如图2所示,其中图2(a)中 a 、 b 、 c 分别表示旋转参数的三个角度;图2(b)中 t_x 、 t_y 、 t_z 分别表示平移向量的三个分量。

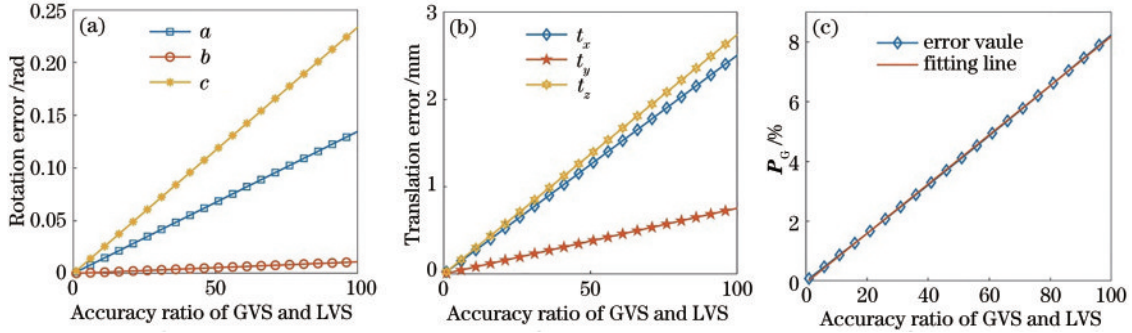


图2 T_G^T 、 P_G 误差相对于GVS与LVS精度等级比例的变化曲线。(a) T_G^T 旋转分量;(b) T_G^T 平移分量;(c) P_G 相对误差

Fig. 2 Variation curves of T_G^T and P_G errors corresponding to accuracy ratio of GVS and LVS. (a) Rotation matrix of T_G^T ; (b) translation vector of T_G^T ; (c) relative error of P_G

由图2可以看出,随着GVS与LVS精度比值逐渐增加,靶标位姿 T_G^T 各参数、全局测量点 P_G 相对误差均成线性增加趋势。图2(a)、2(b)表示旋转参数和平移向量受到测量误差比值的影响情况,可以看出测量误差比值增加,位姿各参数增加,即当GVS和LVS存在精度等级差别时,精度等级差别越大,全局点的测量相对误差越大。计算可得,当测量误差比值增加至100,此时对应的GVS误差 $\sigma=1$ mm时,综合平移误差为3.8271 mm,综合旋转误差为0.27 rad。此时,全局点相对误差为7.8%。所以对于组合测量系统,GVS和LVS测量设备应尽量保持相同的精度等级,否则将产生精度等级差异误差。由于这种误差具有线性变化的规律,可认为是系统误差,所以当存在精度等级差异时,可以通过消除法进行抵消。如图2(c)所示,对得到的误差值进行直线拟合,得到全局点误差值相对于精度差异的线性变化规律,表明在测量时,通过标定两个测量系统的精度等级,可实现该部分误差的消除。

2.3 融合尺度因子的中转位姿标定模型

根据2.2节数值计算可知,尺度因子可用来描述两级测量系统数据的差异。设定尺度因子为 λ 。遵循多视角平差原则,本文提出中转位姿标定的步骤如下:

1) 固定放置标定板,标定板摆放位置任意;固定放置GVS,事先标定好GVS。

2) 事先标定好LVS。移动LVS,从不同的视角拍摄标定板图像,并基于双目原理重建标定板坐标系的原点坐标,记为 P_{Li}^C , i 表示测量视角的索引。

3) 在每个位置处,同时控制GVS拍摄TPT,重建TPT,并计算TPT到GVS的相对位姿 T_G^{Ti} 。

根据 P_{Li}^C 和 T_G^{Ti} 建立数学模型,并优化求解。

由于GVS和LVS全部参与测量,且与测量模型的数据变换过程相符,所以标定过程更加适应测量过程,获得的测量精度更高。

由于标定板与GVS固定放置, $\{G\}$ 与 $\{C\}$ 相对关系保持不变,记标定板原点在 $\{G\}$ 下的三维坐标为 P_0 , P_0 是一个固定值。第 i 个拍摄位置,标定板原点在 $\{L_i\}$ 坐标系下的三维点坐标为 P_{Li}^C , $\{L_i\}$ 和 $\{T_i\}$ 同步变化, $\{T_i\}$ 在 $\{G\}$ 的相对位姿利用重建的靶标特征点和刚体注册算法计算。根据组合系统的测量模型式(2),可建立如下方程组:

$$\begin{cases} \lambda R_G^{T_i} (R_T^L P_{Li}^C + t_T^L) + t_G^{T_i} = P_0 \\ \lambda R_G^{T_2} (R_T^L P_{L2}^C + t_T^L) + t_G^{T_2} = P_0 \\ \vdots \\ \lambda R_G^{T_n} (R_T^L P_{Ln}^C + t_T^L) + t_G^{T_n} = P_0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: n 表示LVS拍摄的次数;旋转矩阵 $R_G^{T_1}, \dots, R_G^{T_n}$ 均为 3×3 的可逆矩阵; $t_T^L, \dots, t_G^{T_1}, \dots, t_G^{T_n}$ 均为 3×1 的列向量; $P_0, R_T^L, t_T^L, \lambda$ 为待求解的未知数; λ 是控制中转位姿缩放的尺度因子,根据“七参数”法,尺度因子可以通过作用在坐标的旋转平移变换来实现对应匹配点的尺度扩展。

展开式(6)中的第 i 个公式可得

$$\lambda R_G^{T_i} R_T^L P_{Li}^C + \lambda R_G^{T_i} t_T^L - P_0 = -t_G^{T_i} (i=1, \dots, n). \quad (7)$$

设定尺度参数 $\lambda=1$,后续进行优化确定。利用张量积将方程两端展开,由于 $R_G^{T_i} t_T^L, P_0, t_G^{T_i}$ 均为列向量,所以展开后形式不变,式(7)展开可得

$$\begin{aligned} [(P_{Li}^C)^T \otimes R_G^{T_i}] \text{vec}(R_T^L) + R_G^{T_i} t_T^L - P_0 = -t_G^{T_i} \\ (i=1, \dots, n), \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $(P_{Li}^C)^T \otimes R_G^{T_i} \in \mathcal{R}^{3 \times 9}$ 为 $(P_{Li}^C)^T$ 和 $R_G^{T_i}$ 的张量积。为方便表达,记 $R_T^L = [r_1^{(0)}, r_2^{(0)}, r_3^{(0)}]$, $r_i^{(0)} \in \mathcal{R}^3 (i=1, 2, 3)$, $r_0 = \text{vec}(R_T^L) = [r_1^{(0)}, r_2^{(0)}, r_3^{(0)}]^T$ 。则式(6)可以类比式(8)进行展开并化简,可得

$$\underbrace{\begin{bmatrix} (P_{L1}^C)^T \otimes R_G^{T_1} & R_G^{T_1} & -I_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (P_{Ln}^C)^T \otimes R_G^{T_n} & R_G^{T_n} & -I_3 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} r_0 \\ t_T^L \\ P_0 \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} t_G^{T_1} \\ \vdots \\ t_G^{T_n} \end{bmatrix}}_b, \quad (9)$$

式中： I_3 为单位矩阵； A 为 $3n \times 15$ 的系数矩阵。所以，求解式(6)即求

$$Ax = b. \quad (10)$$

解的讨论如下：

1) 如果 $n = 5$, A 非奇异, 则式(13)有唯一解, 且解为 $x = A^{-1}b$ 。

2) 如果 $n > 5$, 式(13)有解的充分必要条件是 $AA^+b = b$, 并且其极小最小二乘解为 $x = A^+b$, 其中 A^+ 是矩阵 A 的 Moore-Penrose 广义逆。

从上述讨论中可知, 要求系数矩阵的逆矩阵或者广义逆矩阵存在, 为满足这一条件则要求旋转矩阵 R_G^T 非奇异, 物理上说明 TPT 坐标系 $\{T_i\}$ 与 GVS 坐标系 $\{G\}$ 非共线, 所以在实施标定时, 尽可能大角度地转动 TPT 以获得稳定的旋转矩阵。

2.4 尺度因子与标定参数优化

式(10)中, 通过设置尺度因子 $\lambda = 1$ 得到了标定方程的理论解, 其中转位姿并不包含尺度缩放信息, 故进一步通过多视角的平差优化来确定优化的尺度因子和中转位姿, 建立目标函数如下:

$$F(c) = \min \sum_i \sum_k \left(\left\| \lambda R_G^{T_i} (R_T^L P_{L_i,k}^C + t_T^L) + t_G^{T_i} - P_{0,k} \right\|^2 \right), \quad (11)$$

式中： $P_{0,k}$ 表示标定板上第 k 个点在 GVS 下的坐标；

$P_{L_i,k}^C$ 表示标定板上第 k 个点在 LVS 下的坐标； $C = (\lambda, R_T^L, t_T^L, P_{0,k}, R_G, t_G, K_{GL}, K_{GR})$, 其中 λ 即为尺度因子, K_{GL}, K_{GR} 表示 GVS 的双目内参数, R_G, t_G 表示 GVS 的双目结构参数。优化的过程为: 在每个视角下, 利用 GVS 测量得到 TPT 点在 $\{G\}$ 下的坐标, 利用刚体变换得到 R_G^T 和 t_G^T , 结合小视场测得的坐标 $P_{L_i,k}^C$ 代入式(11)求解偏差, 并对参数 C 进行调整。这里认为小视场测量系统具有较小的测量误差, 精度等级达到了 GVS 定位精度等级以下, 即 LVS 的参数调整变化不大, 所以不进行参数优化, 只对 GVS 进行参数优化。值得说明的是, 本文尺度因子描述了测量系统测量精度等级的差异, 在两级测量系统标定完成后, 精度等级则已经确定, 故精度等级差异固定, 尺度因子也即为固定值, 受标定板摆放位置影响小, 所以式(11)优化过程保证了固定尺度因子优化的有效性。

3 标定实验与结果分析

3.1 仿真实验

为验证中转位姿标定算法的有效性, 构建了组合标定的仿真平台。为简化计算过程, 并控制其他参数的影响, 只验证尺度因子和中转位姿的计算精度, 仿真平台中 GVS 和 LVS 测量原理设定为单目。仿真可视化平台及对应的数据传递路线如图 3 所示。

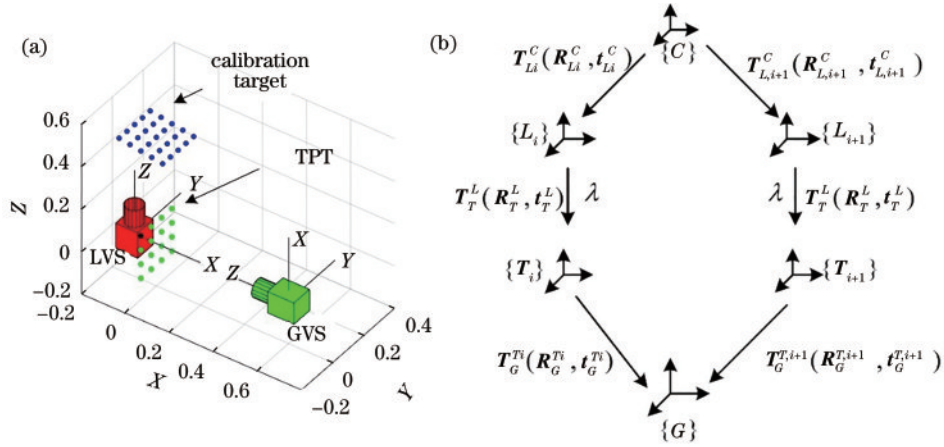


图 3 中转位姿标定仿真。(a) 可视化平台; (b) 数据传递路线

Fig. 3 Simulation of transposition pose calibration. (a) Visualization platform; (b) data transmission route

图 3(a) 为利用 Matlab 构建的仿真平台, 其中 GVS 和 LVS 分别用单目相机表示, 中转靶标和标定板分别用平面靶标表示。图 3(b) 为数据传递过程, 是依据式(2)绘制的。首先, 对标定方法的有效性进行仿真验证。此处标定板和跟踪靶标的尺度相同, 根据标定策略, LVS 及 TPT 的位姿随机给定, 表示其在 GVS 测量空间的位置。在图 3(a) 中, 设定被测标定板和跟踪靶标的测量精度等级不同, 设定局部测量点的测量精度等级从 1 至 2 递增, 利用仿真方法, 随机生成标定板坐标和对应的 LVS 位姿, 然后运行标定程序, 比较旋转矩阵和平移向量偏差, 误差结果如表 1 所示。

表 1 中尺度因子是根据 LVS 测量精度等级设定的, 标定值是利用本文标定方法计算得到的。从表 1 可以看出, 增加尺度因子, 标定得到的尺度因子偏差平均值为 0.034, 表明标定得到的尺度因子具有较高的精度。经过优化调整后的旋转矩阵和平移向量偏差均小于 1%, 说明标定得到的中转位姿可信度高。随着尺度因子增加, 标定得到的偏差波动不明显, 但有轻微增加的趋势, 结合 2.2 节精度等级分析, 说明两级测量系统尺度差异越大, 通过尺度缩放不能完全去除尺度差异数据, 需要通过跨尺度的尺度变换实现尺度分解和数据融合^[18]。

表 1 尺度变化下的标定结果偏差
Table 1 Calibration result error with scale change

Scale factor setting value	Scale factor calibration value	Scale factor error	Rotation matrix error / %	Translation vector error / %
1.0	1.00	0	0.34	0.076
1.1	1.12	0.02	0.36	0.081
1.2	1.23	0.03	0.38	0.098
1.3	1.28	0.02	0.45	0.110
1.4	1.44	0.04	0.48	0.120
1.5	1.47	0.03	0.52	0.160
1.6	1.64	0.04	0.55	0.130
1.7	1.67	0.03	0.60	0.150
1.8	1.85	0.05	0.64	0.160
1.9	1.95	0.05	0.68	0.180
2.0	2.06	0.06	0.75	0.230

3.2 中转定位精度实验验证

进一步开展实验对标定方法进行有效性和精度的验证。实验设备包括:GVS 系统采用 2 个 DMK33G26 4 工业相机,分辨率为 2448 pixel×2048 pixel,8 mm 焦

距镜头。测量范围深度定为 2~3 m,测量的宽度为 2~3 m。终端扫描仪配置的 DMK33G445 工业相机,单次局部测量宽度为 0.3 m,最大帧率为 30 frame/s。实验平台如图 4 所示。

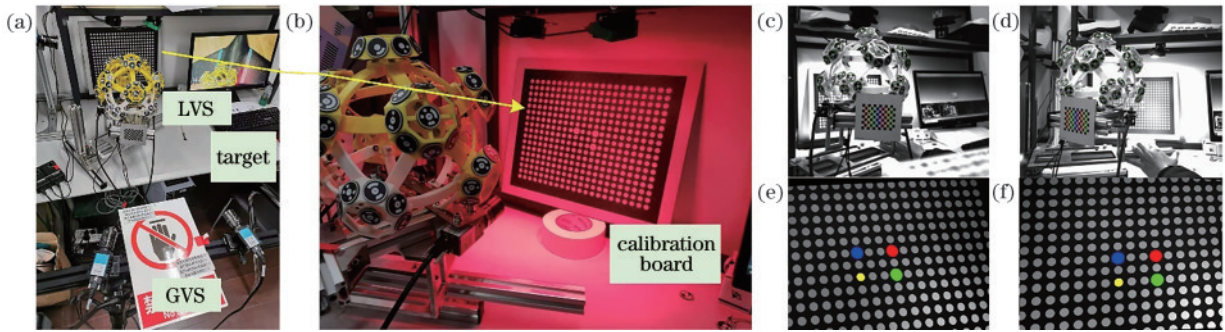


图 4 中转位姿标定实验。(a)实验装置;(b)标定板;(c)、(d) GVS 视角下的靶标检测结果;(e)、(f) LVS 视角下的靶标检测结果
Fig. 4 Experiment of transposition pose calibration. (a) Experimental setup; (b) calibration board; (c), (d) target detection results of GVS view; (e), (f) target detection results of LVS view

利用 2.3 节标定步骤进行中转位姿标定,在实验中,大视场双目利用文献[19]方法标定,可实现重复定位精度为 0.05 mm,光学扫描设备平面扫描精度为 0.03 mm。组合定位精度主要验证从终端测量结果传递到全局的重复精度,主要基于 GVS 测量坐标系 {G} 和空间固定点 P_0 相对关系不变原理,结合图 4,具体精度验证过程如下:

- 1)控制圆形标定板不动,GVS 双目固定放置。
- 2)移动 LVS,从 N 个角度拍摄圆形标定板,并重建出 4 个定位圆。每个视角下,4 个定位圆坐标分别为 $P_{Lij}, i=1, \dots, N, j=1, 2, 3, 4$ 。同时,GVS 求解 LVS 靶标位姿,记为 T_r^{Li} 。
- 3)利用式(2)计算圆形定位点 P_{Lij} 经过中转位姿和靶标位姿 T_r^{Li} 变换到全局测量坐标系下,记为 P_{Gij} 。
- 4)对于每个特征点,分别计算 N 次测量标准差作为组合定位的误差,记为 \bar{P}_{Gj} 。并计算 4 个定位圆的误

差标准差的平均值作为最终的定位误差。
根据步骤 1)~4),任意移动 5 个位置测量标定板,计算最终组合测量误差如表 2 所示。

表 2 组合定位误差
Table 2 Combined calibration error

Calibration circle \bar{P}_{Gj}	1	2	3	4	Average standard error
Standard error /mm	0.08	0.11	0.12	0.09	0.10

从表 2 中可以看出,本文所使用的标定板 4 个定位圆在 5 次测量得到全局点的标准差分别为 0.08、0.11、0.12、0.09 mm,该数值表示多次测量数据波动大小,表明了重复测量误差。4 个定位圆多次测量定位误差的平均值为 0.10 m,判为系统组合定位精度。

为验证组合测量的最终精度,以标准圆形平面标定板作为比较对象,两视角扫描结果如图 5 所示。

使用商用设备 Creamform MetraSCAN 进行叶片

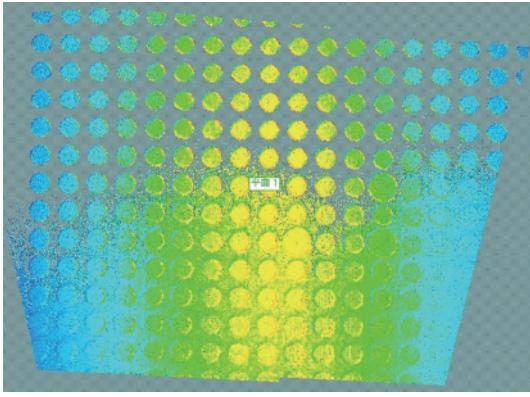


图 5 利用标准平面进行扫描精度评估

Fig. 5 Evaluation of scanning accuracy using standard plane

零件扫描,并与本文系统扫描结果进行比较,分析结果

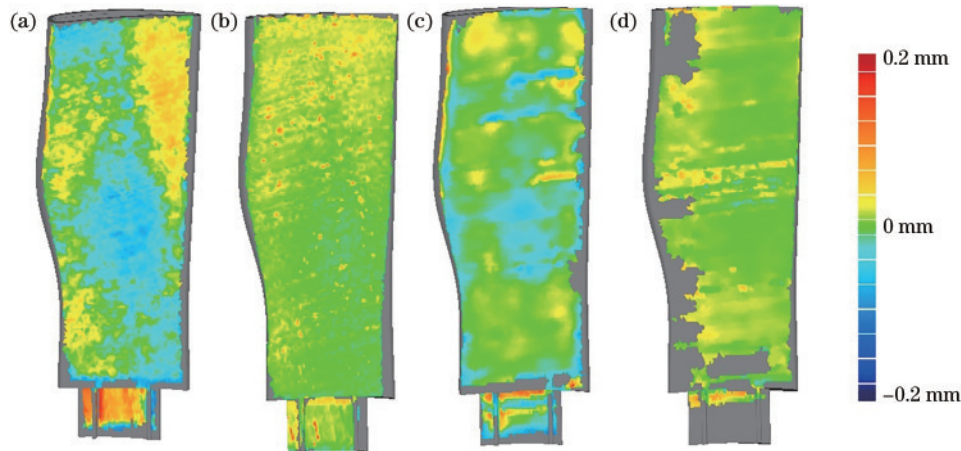


图 6 利用商用扫描设备进行提出方法的扫描精度对比。(a)叶片 1 无尺度因子;(b)叶片 1 有尺度因子;(c)叶片 2 无尺度因子;(d)叶片 2 有尺度因子

Fig. 6 Scanning accuracy comparison of proposed method with commercial device. (a) Blade 1 without scale factor; (b) blade 1 with scale factor; (c) blade 2 without scale factor; (d) blade 2 with scale factor

随着测量尺寸的增加,GVS具有的空间定位精度逐渐下降,其与局部扫描系统的尺度差异逐渐增加,尺度因子作用越加明显。但是结合 3.1 节仿真结果可知,尺度跨度不能无限增加,也说明了本文算法的适用场合。

4 结 论

针对组合式光学扫描中转位姿标定问题,提出一种融合尺度因子的标定方法。仿真验证结果表明,在两级数据存在尺度差异的情况下,本文方法得到的中转位姿仍然具有较高的精度。实验验证可得,在考虑尺度因子的情况下,组合定位精度优于 0.1 mm,最终的扫描精度相对于没有尺度因子的情况有显著提升。表明本文融合尺度因子的标定方法对于组合测量系统中两级测量数据存在一定尺度差异情况下的中转位姿标定精度具有提升作用。但是当尺度跨度进一步增加,仅通过尺度扩展则不能实现全局数据融合,仍需进一步研究。

如 6 所示。

图 6 中展示了 2 个叶片的扫描结果,其中图 6(b)、6(d)考虑了尺度因子,而图 6(a)、6(c)没有考虑尺度因子优化。扫描结果均使用自动对齐方式进行配准,然后对比对应匹配点的配准偏差标准差,并将其作为精度评估的指标。标准偏差分别为 0.16、0.08、0.12、0.06 mm。无尺度因子的标准差平均值为 0.14 mm,而有尺度因子的标准差平均值为 0.07 mm,整体精度提升了 50%,这表明考虑尺度因子对于组合式光学扫描系统的整体精度提升具有显著作用,验证了本文方法的有效性和高精度。值得说明的是,本部分验证尺度因子对精度提升的影响,对比的数据均来自商业系统的测量结果,并将其作为真实值,即有、无尺度因子对比的是相同的测量数据。

参 考 文 献

- [1] 汪俊,李红卫.飞机大尺寸自动化柔性测量技术研究进展[J].南京航空航天大学学报,2020,52(3):353-362.
Wang J, Li H W. Aircraft large-scale automation flexible measurement technology[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 353-362.
- [2] 谭舸,花向红,陶武勇,等.基于激光跟踪仪的多测站地面激光扫描点云配准方法[J].中国激光,2021,48(17):1710002.
Tan G, Hua X H, Tao W Y, et al. Multiview terrestrial laser scanning point cloud registration method based on laser tracker[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1710002.
- [3] Bi C, Fang J G, Li K, et al. Extrinsic calibration of a laser displacement sensor in a non-contact coordinate measuring machine[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(4): 1528-1537.
- [4] Liu W, Lan Z G, Zhang Y, et al. Global data registration technology based on dynamic coded points[J].

- IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(2): 394-405.
- [5] Chang W C, Wu C H. Candidate-based matching of 3-D point clouds with axially switching pose estimation[J]. The Visual Computer, 2020, 36(3): 593-607.
- [6] Jiang T, Cheng X, Cui H, et al. Combined shape measurement based on locating and tracking of an optical scanner[J]. Journal of Instrumentation, 2019, 14(1): P01006.
- [7] Zhao F D, Tamaki T, Kurita T, et al. Marker-based non-overlapping camera calibration methods with additional support camera views[J]. Image and Vision Computing, 2018, 70: 46-54.
- [8] Barone S, Paoli A, Rationale A V. Multiple alignments of range maps by active stereo imaging and global marker framing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(2): 116-127.
- [9] Barone S, Paoli A, Rationale A V. 3D reconstruction and restoration monitoring of sculptural artworks by a multi-sensor framework[J]. Sensors, 2012, 12(12): 16785-16801.
- [10] Shi J L, Sun Z X, Bai S Q. Large-scale three-dimensional measurement via combining 3D scanner and laser rangefinder[J]. Applied Optics, 2015, 54(10): 2814-2823.
- [11] Shi J L, Sun Z X, Bai S Q. 3D reconstruction framework via combining one 3D scanner and multiple stereo trackers [J]. The Visual Computer, 2018, 34(3): 377-389.
- [12] Wang J S, Tao B, Gong Z Y, et al. A mobile robotic measurement system for large-scale complex components based on optical scanning and visual tracking[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67: 102010.
- [13] Zhou Z L, Liu W, Wang Y X, et al. A combined calibration method of a mobile robotic measurement system for large-sized components[J]. Measurement, 2022, 189: 110543.
- [14] Sun P F, Zhou F Q, Sun J H, et al. High-accuracy three-dimensional measurement based on multi-directional cooperative target with weighted SfM algorithm[J]. Measurement, 2021, 172: 108955.
- [15] Jiang T, Cui H H, Cheng X S, et al. Calibration and uncertainty analysis of a combined tracking-based vision measurement system using Monte Carlo simulation[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(9): 095007.
- [16] Jiang T, Cui H H, Cheng X S. Accurate calibration for large-scale tracking-based visual measurement system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 5003011.
- [17] 石世锋, 叶南, 张丽艳. 具有远近视距的两目视觉系统标定技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2415001.
Shi S F, Ye N, Zhang L Y. Calibration of two-camera vision system with far and near sight distance[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2415001.
- [18] 莫程威, 崔海华, 程筱胜, 等. 基于分形维数表征的跨尺度拼接方法[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1215001.
Mo C W, Cui H H, Cheng X S, et al. Cross-scale registration method based on fractal dimension characterization[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1215001.
- [19] Jiang T, Cui H H, Cheng X S. A calibration strategy for vision-guided robot assembly system of large cabin[J]. Measurement, 2020, 163: 107991.