

引用格式: LUO Haolong, LI Jiansheng, ZOU Danping, et al. Calibration Method for Optical Motion Capture System in Large Scene[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(11):1111003

罗豪龙, 李建胜, 邹丹平, 等. 大场景光学运动捕捉系统标定方法研究[J]. 光子学报, 2023, 52(11):1111003

大场景光学运动捕捉系统标定方法研究

罗豪龙^{1,2}, 李建胜¹, 邹丹平², 杨子迪¹, 李广云¹

(1 战略支援部队信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450001)

(2 上海交通大学 上海市北斗导航与位置服务重点实验室, 上海 200240)

摘要:为解决大场景下光学运动捕捉系统精度检测困难的问题,提出利用全站仪标定大场景下光学运动捕捉系统定位精度的方法。首先在光学运动捕捉系统的四个分区域均匀选取若干公共点,其次利用同尺寸同心靶球解决全站仪和光学运动捕捉系统测量点不一致的问题,之后通过全站仪和光学运动捕捉系统分别测量得到公共点的真实值和测量值,基于罗德里格矩阵的抗差最小二乘迭代方法计算全站仪坐标系到光学运动捕捉系统坐标系的位姿变换矩阵,最后坐标系统一并计算光学运动捕捉系统在分区域和整体区域下的定位精度。同时,基于该方法实现了度量运动捕捉系统和 Vicon 运动捕捉系统的外参标定。实验结果表明:光学运动捕捉系统在四个分区域的定位精度分别为 2.385 mm、0.877 mm、1.787 mm、2.890 mm,整体区域下光学运动捕捉系统的定位精度为 8.126 mm。说明大场景下光学运动捕捉系统的定位精度明显降低,验证了利用全站仪进行光学运动捕捉系统标定和运动捕捉系统外参标定的可行性和有效性。

关键词:光学运动捕捉系统;全站仪;公共点;罗德里格矩阵;抗差最小二乘

中图分类号:P258

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235211.1111003

0 引言

光学运动捕捉系统是一种用于跟踪和捕获目标动作,并实时获取目标 6 自由度运动信息的设备。随着室内高精度导航定位等技术领域的飞速发展,光学运动捕捉系统在医疗康复、运动检测、目标跟踪、场景动画、虚拟现实等方面发挥着越来越重要的作用^[1-4]。目前主流的光学运动捕捉系统如 Vicon 运动捕捉系统、Optitrack 运动捕捉系统等标称精度能达到毫米甚至亚毫米级,在室内导航领域为无人机、无人车导航感知提供真实的位置和姿态信息^[5-7]。然而在实际使用中,由于场地震动、运动捕捉系统的相机数量、运动捕捉系统的空间分布和噪声等因素的影响,光学运动捕捉系统的实际定位精度往往远低于厂家的标称精度。尤其是大场景下,受到实际场地和空间布局的限制,光学运动捕捉系统的覆盖范围大,往往存在相机分布分散、共视区域的相机数量少、相机与目标距离远等诸多实际问题,导致光学运动捕捉系统的定位精度严重降低。如果光学运动捕捉系统的实际定位精度与标称精度相差过大,运动捕捉系统的性能将大打折扣,难以发挥运动捕捉系统的实际作用。因此,研究如何准确标定实际场景尤其是大场景下光学运动捕捉系统的定位精度,对于保证光学运动捕捉系统高效、准确、稳定的运行,根据实际场景选择配套方案的光学运动捕捉系统和拓展光学运动捕捉系统的应用场景具有重要价值和研究意义。

国外,针对光学运动捕捉系统定位精度的研究主要集中在医学生物领域。AURAND A M 长时间多次测量同一个点,利用重复定位精度评估光学运动定位系统的重复定位精度^[8];VAN DER KRUK E 对包括运动捕捉系统、实时动态(Real-Time Kinematic, RTK)载波相位差分定位系统、射频识别(Radio Frequency

基金项目:国家自然科学基金(No. 42071454)

第一作者:罗豪龙, haolong_luo@163.com

通讯作者:李广云, guangyun_li_chxy@163.com

收稿日期:2023-05-07;录用日期:2023-06-25

<http://www.photon.ac.cn>

Identification, RFID)定位系统等17种定位系统的研究进展进行了梳理总结^[9]; WINDOLF M在180 mm×180 mm×150 mm小空间下对Vicon-460的系统精度进行了检测,缺点在于检测范围过小,难以反映实际场景中系统的定位精度^[10]。国内,杨治铎利用地面网格作为真实值对光学运动捕捉系统的定位精度开展研究,但是地面网格的精度难以保证^[11];谭菁华利用千分尺通过距离测量的方式检测光学运动捕捉系统的定位精度,存在的问题在于千分尺的测量范围太小,不能用于实际场景中光学运动捕捉系统的精度检测^[12]。此外,国内学者更多是将光学运动捕捉系统的定位结果作为真实值对其他定位系统进行标定^[13-14]。如刘智伟利用光学运动捕捉系统实现了超宽带(Ultra Wide Band, UWB)系统的精度标定,但是对光学运动捕捉系统本身的定位精度检测缺乏研究^[15]。

目前学者主要在小空间内检测光学运动捕捉系统的定位精度,且往往采用重复轨迹精度的方式评估系统的定位精度,不能真实反映实际场景尤其是大场景下光学运动捕捉系统的实际定位精度^[16]。因此,为了获取实际场景尤其是大场景下光学运动捕捉系统的实际定位精度,本文提出一种大场景下光学运动捕捉系统的标定方法。利用全站仪和光学运动捕捉系统进行公共点测量获取公共点的真实值和测量值,基于罗德里格矩阵的抗差最小二乘迭代方法进行公共点转换,实现光学运动捕捉系统的精度标定。同时,基于该方法实现了不同光学运动捕捉系统间的外参标定。

1 光学运动捕捉系统定位原理

1.1 系统构成

光学运动捕捉系统由多个发射红外光的高速摄像机组成,光线经反光标记(marker)球反射红外光并获取其二维图像,利用三维重建原理计算marker球的三维空间坐标数据。多个marker球与跟踪目标固连建立刚体,可以实时获取刚体的6自由度位置和姿态。本文所用的光学运动捕捉系统为英国Oxford Metrics Limited公司生产的Vicon光学运动捕捉系统,Vicon光学运动捕捉是目前主流的光学运动捕捉系统之一,具有低延迟、采样精度高等优点。Vicon系统包括光学摄像机、Vicon Tracker运动捕捉软件、数据采集器、信息转换盒、T型校正架、L型标定直角尺和专用连接线等。镜头间采用并联连接方式保证单个镜头独立工作,确保单镜头出现故障时不影响系统正常工作。某高校大型测试场布设的光学运动捕捉系统相机配置如表1所示。

表1 Vicon系统相机配置
Table 1 Vicon system camera configuration

Lens configuration	Indicator parameters
Lens model	Vantage 5
Pixel resolution	5 MP
Sampling frequency	420 HZ
Field of view ($H \times V$)	$63.5^\circ \times 35.1^\circ$
Camera delay	5.5 ms
Number of lenses	34
Lens weight	1.6 kg

1.2 定位原理

Vicon运动捕捉系统由多个相机组成的定位系统,系统定位原理为立体视觉的三维空间定位原理。图1所示为世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 、相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 、图像坐标系 $O_i - xy$ 和像素坐标系 $O - uv$ 的对应关系,其中 O_w 、 O_c 、 O_i 和 O 分别为三个坐标系的原点。

图2所示为双目立体视觉的三维空间定位原理。假设空间三维点 $P_w(x_w, y_w, z_w)$ 在左右目相机的像素坐标系下坐标分别为 (u_l, v_l) 和 (u_r, v_r) 。根据坐标系间的转换关系^[17],有

$$z_l \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \\ 1 \end{bmatrix} = K_l T_l \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

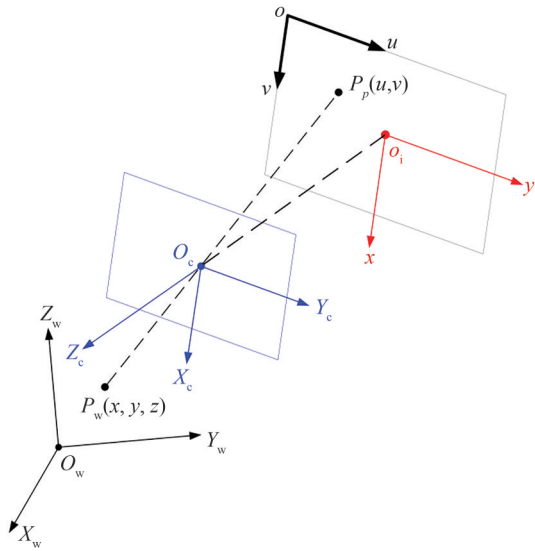


图1 坐标系对应关系

Fig.1 Coordinate system correspondence

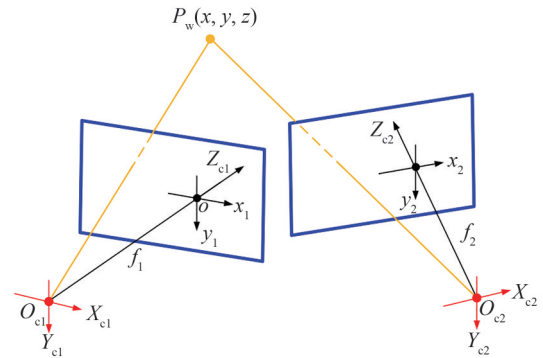


图2 双目立体视觉的三维空间定位原理

Fig.2 Three-dimensional spatial positioning principle based on binocular stereo vision

$$z_r \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ 1 \end{bmatrix} = K_r T_r \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, K_1, K_r 为左右目相机内参, T_1, T_r 为世界坐标系下左右目相机系的位姿, z_1, z_r 表示点在左右目相机坐标系下的 Z 轴方向坐标。根据式(1)、(2), 可以解算空间点 P_w 的三维位置坐标。

2 光学运动捕捉系统标定原理

本文利用全站仪进行光学运动捕捉系统的精度标定。测量原理为全站仪和光学运动捕捉系统测量若干公共点, 全站仪的测量结果作为真实值, 光学运动捕捉系统的测量结果作为测量值, 通过公共点转换的方式实现二者系统坐标系的统一, 并计算光学运动捕捉系统的实际定位精度。光学运动捕捉系统的定位精度标定原理如图3所示。

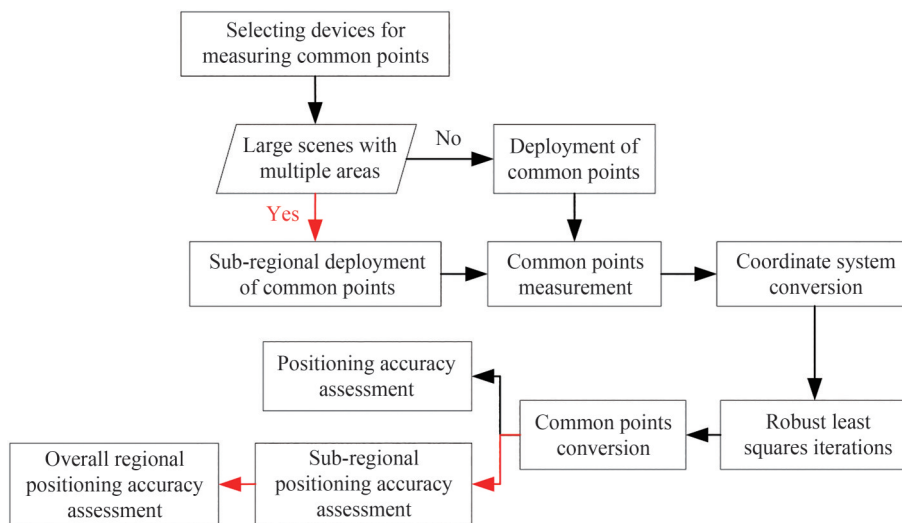


图3 光学运动捕捉系统标定原理

Fig.3 Calibration principle of optical motion capture system

2.1 全站仪测量原理

全站仪是一种由电子经纬仪、光电测距仪和数据处理系统所组成的高精度测量仪器,它将光学、机械和电子技术相结合,集成水平角、竖直角、距离和高差等多个测量功能于一身。全站仪采用光学测量原理,利用激光束对目标点进行测量,通过接收反射回来的信号,测量目标点与全站仪之间的水平角度、垂直角度和距离等信息,并借助内部软件计算出目标点的三维坐标。目前,全站仪广泛应用于地形测量、矿山勘探、变形监测等多个领域。本文所用的全站仪为Leica MS60全站仪,Leica MS60具有测量、扫描和自动照准的功能,技术参数如表2所示。

表2 全站仪技术参数

Table 2 Technical parameters of total station

Total station MS60	Indicator parameters
Goniometric accuracy	0.5"
Measuring range	1.5 m~10 000 m
Measurement accuracy	1 mm+1.5 mm
Automatic illumination	Yes
Maximum scanning speed	30 000/s
Scanning accuracy	0.6 mm@50 m
Temperature range	-20 °C~50 °C

全站仪的测量原理如图4所示。全站仪记录水平角和垂直角和测站点到目标点的距离 S ,根据测量的水平角 α 和垂直角 θ ,计算得到目标点的三维坐标为

$$\begin{cases} X = S \sin \theta \sin \alpha \\ Y = S \sin \theta \cos \alpha \\ Z = S \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

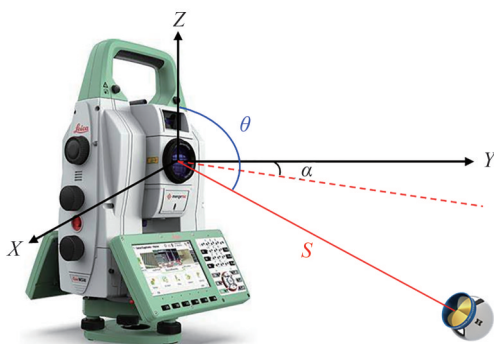


图4 全站仪测量原理

Fig.4 Measuring principle of total station

2.2 公共点测量原理

光学运动捕捉系统的测量区域均匀选取若干测量点作为公共点,全站仪和光学运动捕捉系统分别对公共点进行观测,光学运动捕捉系统测量的公共点坐标作为观测值,全站仪测量的公共点坐标作为真实值,通过坐标系统一并计算光学运动捕捉系统的实际定位精度。然而,由于光学运动捕捉系统测量的为marker球球心,全站仪测量的是棱镜几何中心,二者测量的点非共心,即非公共点。因此,如何选取合适的测量装置,实现两个系统的公共点统一是测量的难点。为解决测量点不一致的情况,利用Leica系列半径为19.05 mm的CCR1.5靶球和同尺寸半球形摄影测量反光工件分别替代全站仪的常规棱镜和光学运动捕捉系统的marker球。由于摄影测量反光工件和全站仪靶球半径相同,且摄影测量反光工件球心和全站仪靶球球心重合,因此全站仪测量的靶球球心和光学运动捕捉系统测量的摄影测量反光工件球心是相同测量点,达到了两套系统测量公共点的目的。公共点测量装置如图5所示,图5(a)为光学运动捕捉系统的常用的反光

marker球,图5(b)为全站仪棱镜,图5(c)为半球形摄影测量反光工件,图5(d)为全站仪靶球。



图5 公共点测量装置

Fig.5 Device for measuring common points

图6所示为公共点布设方案,根据光学运动捕捉系统的相机空间分布在四个分区分别均匀布设若干公共点。公共点的测量过程为:1)全站仪靶球放置在公共点A位置处,全站仪测量公共点A的位置坐标;2)基座保持不动,半球形摄影测量反光工件替代全站仪靶球,光学运动捕捉系统测量公共点A的位置坐标;3)移动靶球到公共点B处,全站仪与光学运动捕捉系统依次测量公共点B的位置坐标;4)每个公共点测量三次取平均值,循环依次测量所有公共点空间位置。公共点测量原理如图7所示。

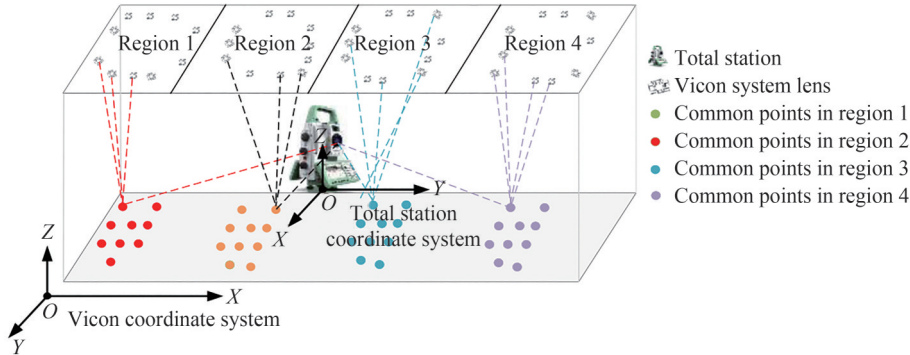


图6 公共点布设方案

Fig.6 Common point layout scheme

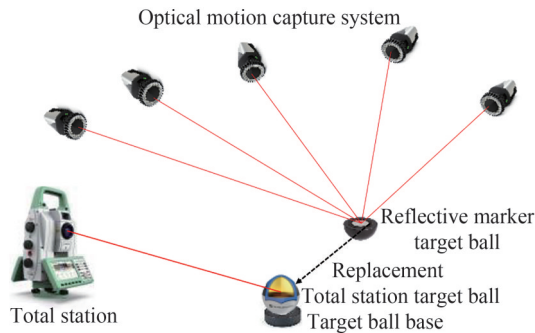


图7 公共点测量原理

Fig.7 Principle of measuring common points

2.3 坐标系转换原理

由于全站仪和光学运动捕捉系统的测量结果分别在全站仪坐标系和运动捕捉系统坐标系,二者坐标系并不统一,无法将全站仪的测量结果与运动捕捉系统的测量结果直接计算。因此,需要实现全站仪坐标系和运动捕捉系统坐标系的统一,即确定运动捕捉系统坐标系到全站仪坐标系的位姿变换矩阵。

罗德里格矩阵是由三个独立的元素组成一个矩阵,避免了象限判断的问题,利用罗德里格矩阵求解坐标系转换矩阵具有计算简单和精度高等优点^[18-19]。此外,引入抗差的方法尽可能减少测量粗差对计算结果的影响,提高坐标系转换精度^[20-21]。因此采用基于罗德里格矩阵的抗差最小二乘迭代方法求解坐标系转换

矩阵,即运动捕捉系统坐标系到全站仪坐标系的位姿变换矩阵。罗德里格矩阵的定义为

1)引入反对称矩阵 S ,其中元素 a, b, c 相互独立。

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -c & -b \\ c & 0 & -a \\ b & a & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2)定义 I 为三阶单位阵,则 $R = (I + S)(I - S)^{-1}$ 正交矩阵。将 R 展开后得到

$$R = \frac{1}{1 + a^2 + b^2 + c^2} \begin{bmatrix} 1 + a^2 - b^2 - c^2 & -2c - 2ab & -2b + 2ac \\ 2c - 2ab & 1 - a^2 + b^2 - c^2 & -2a - 2bc \\ 2b + 2ac & 2a - 2bc & 1 - a^2 - b^2 + c^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

假设某一公共点在全站仪坐标系和运动捕捉系统坐标下的坐标分别为 $(x_i, y_i, z_i)^T$ 和 $(u_i, v_i, w_i)^T$,建立二者的坐标系转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} + T \quad (6)$$

式中, R 为由罗德里格矩阵表示的旋转矩阵, T 为平移矩阵。

公共点作差得到

$$\begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} u_2 - u_1 \\ v_2 - v_1 \\ w_2 - w_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)同时左乘 $(I - S)$ 化简得到

$$(I - S) \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} = (I + S) \begin{bmatrix} u_2 - u_1 \\ v_2 - v_1 \\ w_2 - w_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

令 $k_{ij} = k_i - k_j$,式(8)化简为

$$(I - S) \begin{bmatrix} x_{21} \\ y_{21} \\ z_{21} \end{bmatrix} = (I + S) \begin{bmatrix} u_{21} \\ v_{21} \\ w_{21} \end{bmatrix} \quad (9)$$

将 I, S 代入,经整理得到

$$\begin{bmatrix} 0 & -z_{21} - w_{21} & -y_{21} - v_{21} \\ -z_{21} - w_{21} & 0 & x_{21} + u_{21} \\ y_{21} + v_{21} & x_{21} + u_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{21} - u_{21} \\ y_{21} - v_{21} \\ z_{21} - w_{21} \end{bmatrix} \quad (10)$$

对于 $Ax = B$ 的形式中,由于 A 为奇异阵,因此至少2个方程组才能解算出 a, b, c 。因此,当有 n 个公共点时,可以得到一个 $3(n - 1) \times 3$ 维的方程组

$$\begin{bmatrix} 0 & -z_{21} - w_{21} & -y_{21} - v_{21} \\ -z_{21} - w_{21} & 0 & x_{21} + u_{21} \\ y_{21} + v_{21} & x_{21} + u_{21} & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & -z_{n1} - w_{n1} & -y_{n1} - v_{n1} \\ -z_{n1} - w_{n1} & 0 & x_{n1} + u_{n1} \\ y_{n1} + v_{n1} & x_{n1} + u_{n1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{21} - u_{21} \\ y_{21} - v_{21} \\ z_{21} - w_{21} \\ \dots \\ x_{n1} - u_{n1} \\ y_{n1} - v_{n1} \\ z_{n1} - w_{n1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过最小二乘原理计算未知数初值 a_0, b_0, c_0 ,根据式(5)、(6)得到旋转矩阵的初始值 R_0 和平移矩阵的初始值 T_0 。

由式(5)、(6)得到

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + a^2 + b^2 + c^2} \begin{bmatrix} 1 + a^2 - b^2 - c^2 & -2c - 2ab & -2b + 2ac \\ 2c - 2ab & 1 - a^2 + b^2 - c^2 & -2a - 2bc \\ 2b + 2ac & 2a - 2bc & 1 - a^2 - b^2 + c^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

线性化得到

$$\begin{cases} x_i = \frac{(1+a^2-b^2-c^2)u_i + (-2c-2ab)v_i + (-2b+2ac)w_i + T_x}{1+a^2+b^2+c^2} \\ y_i = \frac{(2c-2ab)u_i + (1-a^2+b^2-c^2)v_i + (-2a-2bc)w_i + T_y}{1+a^2+b^2+c^2} \\ z_i = \frac{(2b+2ac)u_i + (2a-2bc)v_i + (1-a^2-b^2+c^2)w_i + T_z}{1+a^2+b^2+c^2} \end{cases} \quad (13)$$

由此得到误差方程为

$$V = MX - N \quad (14)$$

其中

$$X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial a} & \frac{\partial x_i}{\partial b} & \frac{\partial x_i}{\partial c} & \frac{\partial x_i}{\partial T_x} & \frac{\partial x_i}{\partial T_y} & \frac{\partial x_i}{\partial T_z} \\ \frac{\partial y_i}{\partial a} & \frac{\partial y_i}{\partial b} & \frac{\partial y_i}{\partial c} & \frac{\partial y_i}{\partial T_x} & \frac{\partial y_i}{\partial T_y} & \frac{\partial y_i}{\partial T_z} \\ \frac{\partial z_i}{\partial a} & \frac{\partial z_i}{\partial b} & \frac{\partial z_i}{\partial c} & \frac{\partial z_i}{\partial T_x} & \frac{\partial z_i}{\partial T_y} & \frac{\partial z_i}{\partial T_z} \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} \frac{(1+a^2-b^2-c^2)u_i + (-2c-2ab)v_i + (-2b+2ac)w_i}{1+a^2+b^2+c^2} + T_x - x_i \\ \frac{(2c-2ab)u_i + (1-a^2+b^2-c^2)v_i + (-2a-2bc)w_i}{1+a^2+b^2+c^2} + T_y - y_i \\ \frac{(2ac+2b)u_i + (2a-2bc)v_i + (1-a^2-b^2+c^2)w_i}{1+a^2+b^2+c^2} + T_z - z_i \end{bmatrix}$$

为避免测量粗差对参数估计的影响,引入基于IGG3的抗差估计进行最小二乘迭代计算^[22]。基于IGG3的抗差估计方法可以处理非线性、异方差等复杂情况的数据,并具有良好的鲁棒性和计算效率。该方法通过对每次观测赋予权重,并在迭代过程不断调整权重和估计参数,以减少异常值对结果的影响,达到抗差的目的。

由式(14)得到

$$X = (M^T \bar{P} M)^{-1} (M^T \bar{P} N) \quad (15)$$

式中, \bar{P} 为等价权。由于公共点的每次观测相互独立,因此 \bar{P} 为对角矩阵。 \bar{P} 中的每个对角元素满足

$$\bar{P}_i = P_i w_i \quad (16)$$

P_i 为每次观测的权因子系数,取为1。根据IGG3中的定义, w_i 的形式为

$$w_i = \begin{cases} 1 & |v| \leq k_0 \\ \frac{k_0}{|v|} \left(\frac{k_1 - |v|}{k_1 - k_0} \right)^2 & k_0 < |v| \leq k_1 \\ 0 & |v| > k_1 \end{cases}$$

式中, k_0 一般取1.0~1.5, k_1 一般取3.0~4.5, v 为残差量 v_i 与标准化残差的比值 σ_{v_i} 。其中,标准化残差的计算方程为

$$\sigma_{v_i}^2 = \sigma_0^2 q_{v_i} \quad (17)$$

式中, σ_0 为单位权中误差, q_{v_i} 为协方差矩阵对角线上的第 i 个元素。单位权方差的计算公式为

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{m - t} \quad (18)$$

式中, V 表示误差项, P 表示权重矩阵, m 表示方程组的行数 $3(n-1)$, t 表示待估计的参数个数,取为6。

利用抗差最小二乘迭代算法计算旋转矩阵参数 a, b, c 和平移矩阵参数 T_x, T_y, T_z ,解算得到光学运动捕捉系统坐标系到全站仪坐标系的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 。

2.4 光学运动捕捉系统精度检测

根据2.3中的方法得到光学运动捕捉系统坐标系到全站仪坐标系的位姿变换矩阵 R_V^L 和 T_V^L ,利用式(19)将光学运动捕捉系统的测量值 P_V 转换到全站仪坐标系下得到 P_1 ,通过式(20)与全站仪测量的真实值 P_L 作差得到光学运动捕捉系统在每个公共点 X 、 Y 、 Z 三轴方向上的测量误差,根据式(21)计算光学运动捕捉系统的点位均方根误差。

$$P_1 = R_V^L P_V + T_V^L \quad (19)$$

$$P_e = P_1 - P_L \quad (20)$$

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \|P_e\|_2}{n}} \quad (21)$$

3 动捕系统外参标定方法

Vicon运动捕捉系统和度量运动捕捉系统(NOKOV)是出自不同厂家且相互独立的光学运动捕捉系统。两个系统的空间布局如图8所示,两个系统的相机非共视。

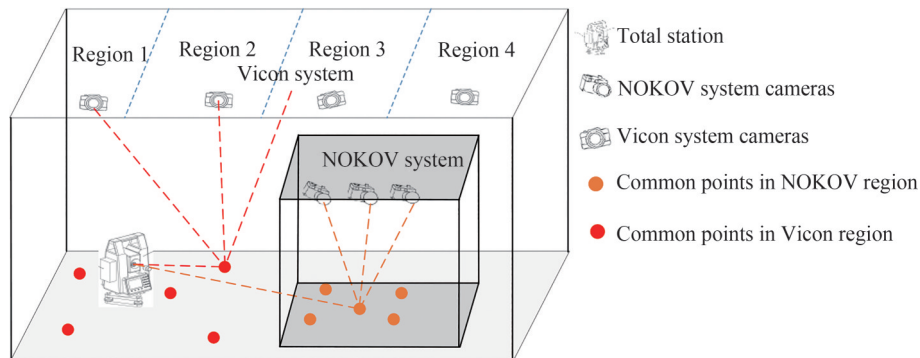


图8 Vicon/度量系统空间分布

Fig.8 Spatial distribution of Vicon system and NOKOV system

由于室内无人机导航感知的任务要求,需要获取两套系统的外参,即实现两套运动捕捉坐标系的坐标系统一。由于度量系统和Vicon系统的测量区域非共视,因此无法直接测量公共点计算两套系统的外参。采取的方式为利用全站仪建立统一坐标系的方法,即全站仪固定不动,利用全站仪分别在度量运动捕捉系统与Vicon运动捕捉系统的观测区域测量若干公共点,利用2.3中的坐标系转换方法分别计算Vicon运动捕捉系统到全站仪坐标系的位姿变换矩阵 T_V^D 和度量运动捕捉系统的位姿变换矩阵 T_D^V ,进而计算Vicon动捕系统和度量动捕系统的位姿变换矩阵 T_V^V ,实现两套系统的外参标定。

4 实验与结果分析

图9所示为某高校大型测试场,测试场的空间约为 $12\text{ m} \times 40\text{ m} \times 8\text{ m}$ 。测试场布设一套由34个相机镜头组成的Vicon光学运动捕捉系统,镜头均匀分布在测试场的四个平行区域,相邻区域间包含若干个具有共视区域的相机,整个测试场组成一套完整的Vicon运动捕捉系统。Vicon系统软件中的俯视示意图如图10所示。在室内无人机避障导航、车机协同定位、多机协同作业等实际任务中,要求Vicon光学运动捕捉系统为目标提供可靠的高精度定位坐标。一方面Vicon光学运动捕捉系统为目标提供高精度定位坐标辅助目标执行导航避障等任务;另一方面Vicon光学运动捕捉系统为目标提供高精度定位真值以验证定位导航的算法精度。然而,大场景下受Vicon光学运动捕捉系统相机分布、相机数量以及场地振动等因素的影响,Vicon系统的实际定位精度与厂家标称的定位精度往往不符。因此,需要检验大场景下Vicon运动捕捉系统的实际定位精度。为标定光学运动捕捉系统的定位精度,采用分区域标定和整体区域标定的方案,即分别计算四个分区域下光学运动捕捉系统的定位精度和整体区域下光学运动捕捉系统的定位精度。



图9 Vicon系统测试场
Fig.9 Vicon system test field

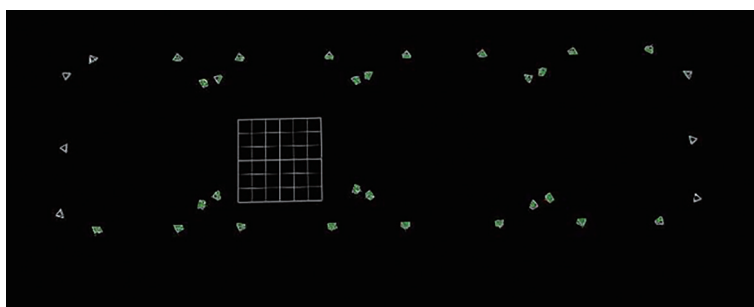


图10 Vicon系统俯视图
Fig.10 Vertical view of vicon system

根据 Vicon 光学运动捕捉系统的分布,在 Vicon 系统布设的四个区域分别均匀选取 10 个空间点,Leica MS60 和 Vicon 系统分别测量各区域 10 个公共点的真实值和测量值,利用分区域公共点计算各分区域下光学运动捕捉系统的定位精度,利用所有公共点计算得到整体区域下光学运动捕捉系统的定位精度。图 11 表示 Vicon 系统标定实验,右侧上下插图分别表示全站仪靶球实验装置和半球形摄影测量反光工件实验装置,图 12~16 表示系统定位精度结果。

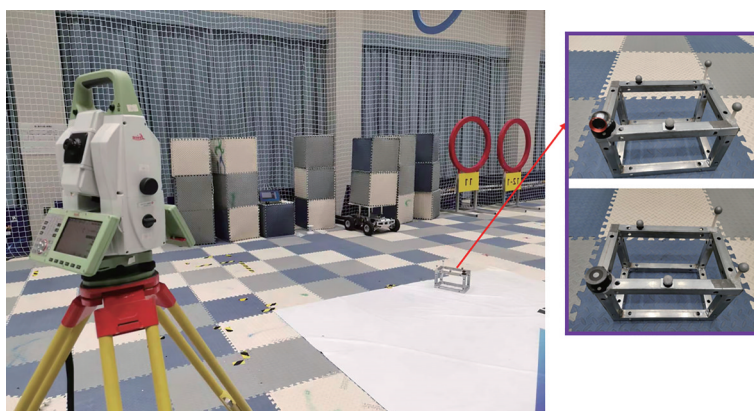


图11 Vicon系统标定试验
Fig.11 Process of TCP calibration

从图 12~16 中可以看出

1)各分区域下系统在 X、Y、Z 轴方向的定位精度多数在 2 mm 以内,表明各分区域下光学运动捕捉系统的定位精度较高。

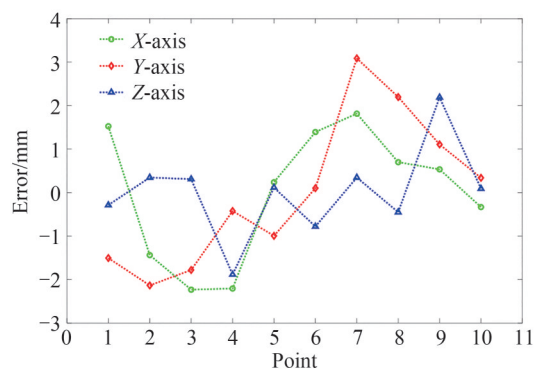


图12 区域一 VICON 系统定位精度

Fig.12 Vicon positioning accuracy in the first area

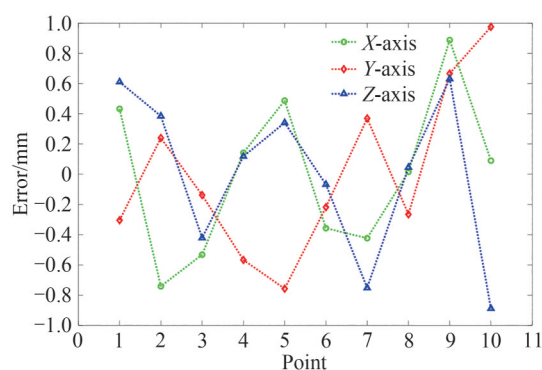


图13 区域二 Vicon 系统定位精度

Fig.13 Vicon positioning accuracy in the second area

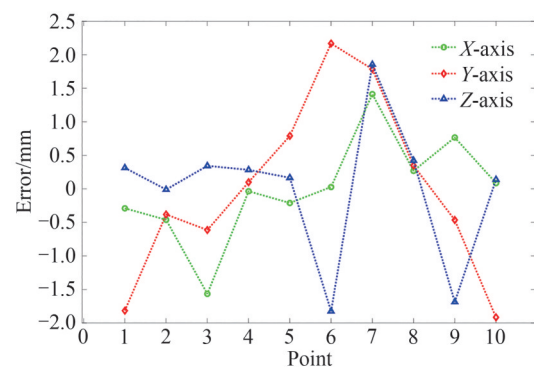


图14 区域三 Vicon 系统定位精度

Fig.14 Vicon positioning accuracy in the third area

2)整体区域下系统在X轴方向和Z轴方向的定位精度多数在5 mm以内;Y轴方向的定位精度较差,部分点在Y轴方向的误差超过10 mm。结合图6和图10分析,原因在于全站仪架站位置位于测试场中心附近,且测试场的长边与全站仪的Y轴近似平行。而整体区域是由沿Y轴方向的四个分区域组成,且靠近测试场中间区域共视相机的数量多,测试场边缘共视相机的数量少。因此,Y轴误差较大且呈现沿测试场中心向边缘逐渐增大的趋势。

3)整体区域下动捕系统的定位精度明显低于各区域下动捕系统的定位精度。原因在于整体区域由四个分区域的相机组成,区域间具有共视区域的相机数量少,相机与目标的距离远,以及场景振动等因素的影响,导致整体区域下光学运动捕捉系统的实际定位精度严重降低。

经过计算得到,四个分区域和整体区域下光学运动捕捉系统的定位均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)如表3所示。

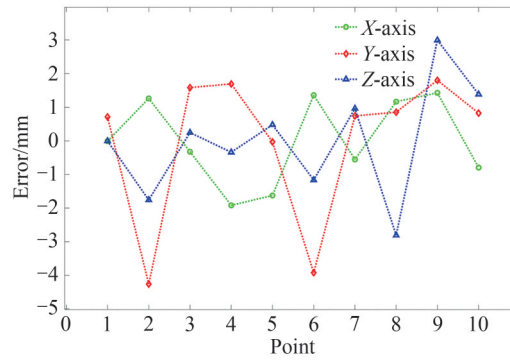


图 15 区域四 Vicon 系统定位精度

Fig.15 Vicon positioning accuracy in the fourth area

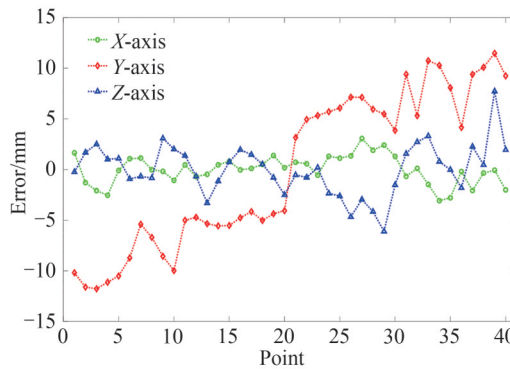


图 16 整体区域 Vicon 系统定位精度

Fig.16 Vicon positioning accuracy in the whole area

表 3 系统定位精度
Table 3 Target position

Region	RMSE			Point coordinates/mm
	X-axis/mm	Y-axis/mm	Z-axis/mm	
Region 1	1.429	1.639	0.979	2.385
Region 2	0.488	0.521	0.509	0.877
Region 3	0.739	1.279	1.007	1.787
Region 4	1.192 1	2.114	1.568	2.890
Overall region	1.393	7.606	2.496	8.126

从表 3 中可以看出:

1)区域一、区域二、区域三、区域四的点位 RMSE 分别为 2.385 mm、0.877 mm、1.787 mm 和 2.890 mm。经分析区域一和区域四位于测试场边缘,区域二和区域三靠近测试场中心,因此区域二和区域三可观测到的相机数量多于区域一和区域四,因此定位精度稍优于区域一和区域四。

2)整体区域的点位 RMSE 为 8.126 mm,相较于各分区域下的定位精度明显降低。原因在于整体区域由四个分区域组成,且相部分区域的共视相机数量较少,因此,当所有相机组成一个整体的视觉运动捕捉系统时,受相机数量和相机分布等因素的影响,整体区域下光学运动捕捉系统的定位精度明显降低。

实验二是 Vicon 光学运动捕捉系统和度量运动捕捉系统的外参标定。由于两个系统之间的相机非共视,因此如何实现系统间的外参标定是面临的难题。基于 Vicon 系统精度标定的思路,利用全站仪分别进行 Vicon 区域和度量区域下的公共点测量,分别计算 Vicon 坐标系到全站仪坐标系的坐标系矩阵和度量坐标系到全站仪坐标系的坐标转换矩阵,最后计算度量系统到 Vicon 系统的坐标系转换矩阵,实现 Vicon 系统和度量系统的外参标定。图 17 所示为度量系统的相机分布,Vicon 系统的相机分布如图 9 所示,图 18 为度量/Vicon 系统外参标定实验。



图17 度量系统相机分布

Fig.17 Camera distribution of NOKOV system



图18 Vicon/度量系统外参标定实验

Fig.18 External parameter calibration experiment between Vicon system and NOKOV system

实验过程中,利用全站仪在 Vicon 系统的测量区域采集和度量系统的测量区域分别采集 10 个公共点和 15 个公共点。经过计算,得到 Vicon 系统与全站仪坐标系的坐标变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} X_q \\ Y_q \\ Z_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.01069 & -0.99994 & -0.00175 \\ 0.99994 & -0.01069 & 0.00001 \\ -0.00003 & -0.00175 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0019 \\ 9.3102 \\ -0.0222 \end{bmatrix}$$

度量系统与全站仪坐标系的坐标变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} X_q \\ Y_q \\ Z_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01005 & -0.99993 & 0.00593 \\ 0.99995 & 0.01004 & -0.00075 \\ 0.00069 & 0.00594 & 0.99998 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1.0737 \\ 24.5173 \\ 0.0753 \end{bmatrix}$$

最终计算得到度量系统到 Vicon 系统的坐标系转换矩阵为

$$\begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.99978 & 0.02070 & -0.00088 \\ -0.02069 & 0.99972 & -0.00764 \\ 0.00069 & 0.00765 & 0.99999 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 15.2184 \\ 0.9090 \\ 0.0995 \end{bmatrix}$$

由此,度量系统与 Vicon 系统的外参标定完成。

5 结论

提出大场景下光学运动捕捉系统的定位精度标定方法。利用同尺寸同心靶球解决全站仪和运动捕捉系统测量点不一致的问题,基于罗德里格矩阵的抗差最小二乘迭代计算坐标系转换矩阵,针对大场景下

Vicon系统的相机空间分布提出分别计算分区域和整体区域下光学运动捕捉系统的定位精度方法。实验结果表明,大场景下光学运动捕捉系统的定位精度明显降低,系统在X轴、Y轴、Z轴和点位精度的RMSE分别为1.393 mm、7.606 mm、2.496 mm和8.126 mm。说明大场景下受相机分布、相机数量、场景振动等因素的影响,光学运动捕捉系统的实际定位精度可能严重降低。并利用该方法实现了Vicon系统和度量系统的外参标定。验证了提出的大场景光学运动捕捉系统精度标定方法的有效性和可行性。随着对光学运动捕捉系统的应用需求和定位精度要求不断提高,提出的方法对未来大场景、复杂场景下光学运动捕捉系统的标定工作具有一定的启发和参考意义。

参考文献

- [1] YIN J, LI A, LI T, et al. M2dgr: A multi-sensor and multi-scenario slam dataset for ground robots[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 7(2): 2266-2273.
- [2] LI Guangyun, FAN Baixing. The development of precise engineering surveying technology [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1742-1751.
李广云,范百兴.精密工程测量技术及其发展[J].*测绘学报*,2017,46(10):1742-1751.
- [3] ZHAO Zuyang, CUI Haihua, DU Kunpeng, et al. Calibration method of 3D laser projection based on homography matrix [J]. *Acta Photonica Sinica*,2022,51(11): 1112001.
赵祖阳,崔海华,杜坤鹏,等.基于单应性矩阵的三维激光投影标定方法[J].*光子学报*,2022,51(11): 1112001.
- [4] THEWLIS D, BISHOP C, DANIELL N, et al. Next-generation low-cost motion capture systems can provide comparable spatial accuracy to high-end systems[J]. *Journal of Applied Biomechanics*, 2013, 29(1): 112-117.
- [5] TOPLEY M, RICHARDS J G. A comparison of currently available optoelectronic motion capture systems[J]. *Journal of Biomechanics*, 2020, 106: 109820.
- [6] BURRI M, NIKOLIC J, GOHL P, et al. The EuRoC micro aerial vehicle datasets [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2016, 35(10): 1157-1163.
- [7] MERRIAUX P, DUPUIS Y, BOUTTEAU R, et al. A study of vicon system positioning performance [J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 1591.
- [8] AURAND A M, DUFOUR J S, MARRAS W S. Accuracy map of an optical motion capture system with 42 or 21 cameras in a large measurement volume[J]. *Journal of Biomechanics*, 2017, 58: 237-240.
- [9] VAN DER KRUK E, REIJNE M M. Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review[J]. *European Journal of Sport Science*, 2018, 18(6): 806-819.
- [10] WINDOLF M, GÖTZEN N, MORLOCK M. Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems-exemplified on the Vicon-460 system[J]. *Journal of Biomechanics*, 2008, 41(12): 2776-2780.
- [11] YANG Zhiyi, ZHAO Wei, ZHANG Yingbin, et al. Feasibility study on the application of motion capture technology in ship model testing [C]. *Proceedings of the 2021 Academic Conference of the Testing Technology Group of the Ship Mechanics Academic Committee of the China Shipbuilding Engineering Society*, 2021: 555-563.
杨治铎,赵威,张盈彬,等.运动捕捉技术在船模试验中应用的可行性研究[C].*中国造船工程学会船舶力学学术委员会测试技术学组2021年学术会议论文集*,2021: 555-563.
- [12] TAN Qinghua. Accuracy and precision analysis of optitrack 3D movement capture system [D]. Hengyang: University of South China, 2018.
谭菁华. Optitrack三维运动捕捉系统的精准度分析[D].衡阳:南华大学,2018.
- [13] WEI Yuan, ZHAO Jing. Real-time control of 7R manipulator based on motion capture [J]. *Journal of Mechanical Engineering*,2013,49(23):68-73.
卫沅,赵京.基于运动捕捉下的7R机械臂的实时控制[J].*机械工程学报*,2013,49(23): 68-73.
- [14] CAI Jiahui, WANG Hongwei, WANG Lianmeng. Research on a method of capturing rigid body motion characteristics of optical motion capturing system[J]. *Computer Measurement & Control*, 2021, 29(4): 195-200.
蔡嘉晖,王红伟,王漪梦.一种光学式运动捕捉系统下的物体运动数据捕捉方法研究[J].*计算机测量与控制*,2021,29(4): 195-200.
- [15] LIU Zhiwei, LI Jiansheng, WANG Ancheng, et al. Calibration method of UWB indoor positioning accuracy based on motion capture system[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2017, 34(2): 147-151.
刘智伟,李建胜,王安成,等.基于运动捕捉系统的UWB室内定位精度标定方法[J].*测绘科学技术学报*,2017,34(2): 147-151.
- [16] SCHMITZ A, YE M, SHAPIRO R, et al. Accuracy and repeatability of joint angles measured using a single camera markerless motion capture system[J]. *Journal of Biomechanics*, 2014, 47(2): 587-591.
- [17] ZHUANG Sufeng, JI Yong, TU Dawei, et al. Underwater RGB-D camera based on binocular stereo vision [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(4): 0404003.

- 庄苏锋, 吉勇, 屠大维, 等. 基于双目立体视觉的水下RGB-D相机[J]. 光子学报, 2022, 51(4): 0404003.
- [18] YANG Fan, LI Guangyun, WANG Li, et al. A method of least square iterative coordinate transformation based on Lodrigues matrix[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(9): 80-84.
杨凡, 李广云, 王力, 等. 一种基于罗德里格矩阵的最小二乘迭代坐标转换方法[J]. 工程勘察, 2010, 38(9): 80-84.
- [19] YAO Jili, HAN Baomin, YANG Yuanxi. Applications of Lodrigues matrix in 3D coordinate transformation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006(12): 1094-1096, 1119.
姚吉利, 韩保民, 杨元喜. 罗德里格矩阵在三维坐标转换严密解算中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006(12): 1094-1096, 1119.
- [20] YANG Yuanxi. Robust estimation and applications[M]. Beijing: Bayi Publishing House, 1993.
杨元喜. 抗差估计理论及其应用[M]. 北京: 八一出版社, 1993.
- [21] YANG Yuanxi, SONG Lijie, XU Tianhe. Robust parameter estimation for geodetic correlated observations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, (2): 95-99.
杨元喜, 宋力杰, 徐天河. 大地测量相关观测抗差估计理论[J]. 测绘学报, 2002, (2): 95-99.
- [22] LIU Tao, XU Aigong, SUI Xin, et al. An improved robust kalman filtering method based on innovation and its application in UWB indoor navigation [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(2): 233-239.
刘韬, 徐爱功, 隋心, 等. 新息向量的抗差Kalman滤波方法及其在UWB室内导航中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(2): 233-239.

Calibration Method for Optical Motion Capture System in Large Scene

LUO Haolong^{1,2}, LI Jiansheng¹, ZOU Danping², YANG Zidi¹, LI Guangyun¹

(1 School of Geospatial Information, Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

(2 Shanghai Key Laboratory of Navigation and Location-based Services, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Optical motion capture systems are devices used to track and capture target movements and obtain the position and attitude of the target in real time. In practical tasks such as UAV obstacle avoidance, vehicle-machine co-positioning and multi-machine co-operation, optical motion capture systems are required to provide reliable and high-precision positioning coordinates for targets. On the one hand, the optical motion capture system provides high-precision positioning coordinates for the target to assist in tasks such as navigation and obstacle avoidance; on the other hand, the optical motion capture system provides high-precision positioning true values for the target to verify the accuracy of the positioning and navigation algorithms. However, the actual positioning accuracy of the optical motion capture system is often much lower than the manufacturer's nominal accuracy due to factors such as the camera distribution, number of cameras in the optical motion capture system and vibrations in the field. Therefore, it is urgent and necessary to verify the actual positioning accuracy of optical motion capture systems in large scenes. Especially in large scenes, optical motion capture systems suffer from scattered camera distribution, a small number of cameras in the common viewing area, and long camera-target distances, resulting in inaccurate positioning. If the actual positioning accuracy of the optical motion capture system is significantly different from the nominal accuracy, the performance of the motion capture system will be greatly reduced and it will be difficult for the motion capture system to perform its actual function. In general, the positioning accuracy of the optical motion capture system is mainly tested in small spaces, and the positioning accuracy of the system is often assessed in terms of repeated trajectory accuracy, resulting in the actual positioning accuracy of optical motion capture systems in real scenes, especially in large scenes, being unknown or inaccurate. To solve the problem of precision detection of the optical motion capture system in large scenes, a method of calibrating the positioning accuracy of the optical motion capture system in large scenes using total station is proposed. First, select several common points evenly in the four sub-regions where the optical motion capture system is located. Second, the concentric target ball workpiece of the same size is used to solve the problem that the measuring points of the total station and the optical motion capture system are inconsistent. Third, the real value and measured value of the common

point are obtained through the measurement of the total station and optical motion capture system and the position and posture transformation matrix between the total station coordinate system and the optical motion capture system coordinate system is calculated based on robust least squares iterative algorithm for Rodrigues matrix. Finally, the positioning accuracy of the optical motion capture system in the sub-region and the whole region is calculated under the unified coordinate system. Meanwhile, the external parameter calibration of the measurement system and the Vicon system is realized based on the above method. The experimental results show that the positioning accuracy of the four sub-region optical motion capture systems is 2.385 mm, 0.877 mm, 1.787 mm, 2.890 mm respectively, and the positioning accuracy of the optical motion capture system in the whole region is 8.126 mm. It shows that the positioning accuracy of the optical motion capture system is significantly reduced in large scenes, and the feasibility and effectiveness of using the total station to calibrate the optical motion capture system and external parameters of the motion capture system are verified. With the increasing application demand and positioning accuracy requirements for optical motion capture systems, the proposed method is an inspiration and reference for future calibration of optical motion capture systems in large and complex scenes.

Key words: Optical motion capture system; Total station; Common point; Rodrigues matrix; Robust least squares

OCIS Codes: 150.0155; 040.1490; 280.3420