



光学运动捕捉实验中参考相机的 选择方法研究

杜海¹, 孟娟^{2*}, 熊伟³, 崔丽飞⁴

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024; 2. 大连海洋大学 信息工程学院, 大连 116023;
3. 凌云光技术股份有限公司, 北京 100094; 4. 石家庄科技信息职业学院 电子与通信学院, 石家庄 050500)

摘要: 针对运动捕捉实验过程中多视觉系统的标定优化问题, 通过对摄像机参数估计过程的误差分析, 探索了参考相机的选择对于光束平差迭代计算的影响, 并在此基础上提出了一种 Q 值评测方法, 该方法运用有权无向图获得相机节点之间的最短连通路径, 利用反投影误差和均方差的加权平均值来评估参考相机选择的合理性。在实验中, 使用了多台摄像机组成多视觉系统对所提出的参考相机选择方法进行了验证。实验结果表明, 所提出的 Q 值评测方法是有效的, 可进一步提高系统标定的精度, 对运动测试实验精度控制具有重要的参考价值。

关键词: 运动捕捉; 多目视觉系统; 无向图; 摄像机标定; 光束平差

中图分类号: O353.5

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20230469](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20230469)

Study on the Method of Reference Camera Selection in the Optical Motion Capture Experiment

DU Hai¹, MENG Juan^{2*}, XIONG Wei³, CUI Lifei⁴

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Information Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

3. LUSTER LightTech Co., Ltd., Beijing 100094, China;

4. College of Electronics and Communications, Shijiazhuang Vocational College of Technology & Information, Shijiazhuang 050500, China)

Abstract: Aiming at the calibration optimization problem of the multi-vision system in the process of motion capture experiment, this paper explores the influence of the selection of reference camera on the iterative calculation of bundle adjustment through the error analysis of camera parameter estimation process, and proposes a Q parameter evaluation method based on it, which uses the entitled undirected graph to obtain the shortest connected path between camera nodes. The back projection error and the weighted mean of mean square error are used to evaluate the rationality of the reference camera selection. In the experiment, multiple cameras have been used to form a multi-view stereo vision system to verify the reference camera selection method proposed in this paper. The experimental results show that the selection of reference camera is necessary and the Q parameter evaluation method designed is effective, which can further improve the accuracy of the system calibration and has important reference value for the application of optical motion measurement.

Key words: motion capture; multi-view stereo vision; undirected graph; camera calibration; bundle adjustment

基于光学运动捕捉技术构建的运动测量系统可以将摄像机视野范围内的运动目标“冻结”在像面上, 然后经过三维重建过程可计算目标物体的空间坐标, 以及对运动进行 6 个自由度的分解准确获取目标物体的运动信息。该技术由于具有无干

扰、高精度、大场景等方面的优势, 在海洋工程模型实验中发挥了巨大的作用^[1-5]。

在进行运动捕捉实验时, 为了获得较大的测量范围, 往往需要使用多台摄像机组成环形观测结构, 并且需要根据环形结构中心处目标运动范

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2024-05-24

基金项目: 大连理工大学基本科研业务项目 (DUT21LAB117)。

作者简介: 杜海(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事大型实验系统研制和非接触式测量技术方面的研究。

* 通信作者: 孟娟(1981-), 女, 博士, 副教授, 主要从事图像测量方面的研究。E-mail: mengjuan@dlou.edu.cn

围调节各个摄像机的位置。与此同时,受到摄像机之间位置关系的影响,每次布放后,均需要重新进行系统标定。标定的好坏将直接影响运动测量数据的准确性。目前,关于摄像机的布放与摄像机标定精度之间关系的研究较少,运动捕捉应用人员在摄像机布放后缺少进一步提高标定精度的技术方案,因此成为运动测量实验过程中迫切需要解决的一个重要问题。

目前,国内外专家学者对摄像机标定过程中的各个环节进行了深入探讨,其中包括标定板的选择对标定精度的影响^[6],通过离焦二次标定的方式降低现场操作的难度^[7],采用较易鉴别的距离固定和尺寸不同的两个球体作为标准物体进行标定^[8],以及采用 Q-Learning 强化学习来优化位置和姿态^[9]等。尽管当前对摄像机标定过程有了较多的研究成果,但在初始参数计算过程中缺少更为深入和细致的探讨。由于优化过程对初始值的敏感性,一旦初始参数计算误差较大,则会严重影响后续优化的进程。

指定参考相机进行全局坐标的统一是多摄像机系统标定过程中的一项重要内容,也是各个摄像机初始参数计算的最后一步。因此当获得两两相机之间的局部参数后,对全局坐标统一时的误差控制是非常重要的。为了提高多目视觉系统标定过程中初始值的质量,本文深入剖析了运动测量过程中多台摄像机标定过程中误差的来源,并通过对比分析研究了参考相机选择对初始值的影响,提出了一种用于确定最佳参考相机的 Q 值评测方法。该方法通过反投影误差作为权值构建多相机节点无向图,并通过无向图来选择摄像机坐标统一的路径,最后根据不同相机作为参考相机时各个路径的 Q 值来判定参考相机选择的合理性。本文所提方法通过合理地选择参考相机大幅度提高了标定过程的稳定性和标定的准确性,为进一步提高海洋工程物理模型实验测试精度提供参考。

1 摄像机标定原理简述

运用光学运动捕捉系统获得目标上标识点(又称为 Marker 点) P 的运动参数时,首先需要获得空间点 P 所在的世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 与其像点 p 所在的图像像素坐标 (u, v) 之间的对应关系,而确定这一对应关系将涉及摄像机的内参数(摄像机自身参数)与外参数(摄像机在世界坐标中的位置和姿态)

的获取,即摄像机的标定,如图 1 所示。当不考虑非线性畸变影响时,根据针孔成像模型(线性相机模型)^[10],可以得到:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & \gamma & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: s 为一比例因子;摄像机的内参数矩阵

$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} a_x & \gamma & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, 其中 a_x 和 a_y 为像面两个轴向的有效焦距, γ 是两个轴向的不垂直因子, (u_0, v_0) 为主点的图像像素坐标(图 1 中各个摄像机光心 O 在像面上的投影位置),这 5 个参数被称为摄像机的内参数;外参数矩阵为 $\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$ 。内参数矩阵 $\mathbf{K}$ 与外参数矩阵 $[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$ 构成了投影矩阵 $\mathbf{M}$ 。

在摄像机标定过程中将依据式(1),通过已知对应关系的像点和空间点计算得到投影矩阵 $\mathbf{M}$,进而分解得到摄像机的内参数和外参数^[11]。

当考虑镜头的畸变影响时,除了式(1)中 5 个摄像机内参数外,还需增加畸变参数,如常用的径向畸变参数 k_1 、 k_2 、 k_3 和切向畸变参数 p_1 、 p_2 。此时的相机模型也称为非线性相机模型^[12],表达式为:

$$\begin{cases} \tilde{x} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ \tilde{y} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $r^2 = x^2 + y^2$, $(\tilde{x}, \tilde{y})$ 与 (x, y) 分别为有畸变与无畸变的图像物理坐标。在摄像机定标过程中,往往将线性相机模型得到的相机参数作为初始值,代入由非线性相机模型构建的反投影误差评价函数中进行迭代计算,从而优化摄像机的所有内、外参数。

式(1)与式(2)描述了空间点 (X_w, Y_w, Z_w) 与成像点 (u, v) 坐标之间的转换关系^[13],其在物理意义上为一条通过物点和光心的空间成像光线,所以无法仅从一台固定位置的摄像机来获得空间点的准确位置。因此,在运动捕捉应用时,往往采用多台摄像机组成多目视觉系统,进而在一个时刻可以保证至少有两台摄像机可以捕获目标。之后,便可通过汇聚在目标同一位置上的两条及以上数目的成像光线来重建目标的空间位置信息^[14],并进一步计算出物体的姿态变化^[15]。

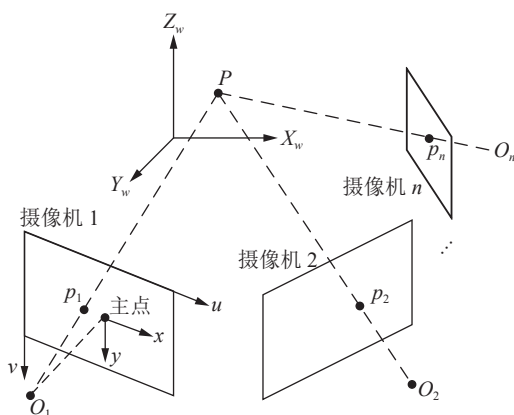


图1 摄像机成像结构图

2 运动捕捉应用时多摄像机系统标定过程

基于光学动捕技术的运动测量实验中,系统标定过程可分为两个步骤:

- 1) 移动标志物(如三维标定块、二维标定板或一维标定杆等)进行摄像机内外参数的计算;
- 2) 使用方向校正器,将参考相机坐标系(标定完成后的基准坐标系)转换为运动测量用的坐标系(测量坐标系)。

在处理过程中,首先利用两两相机之间的投影矩阵进行相机参数的解算^[11];然后将各个摄像机的外参数统一到参考相机坐标系中^[16]:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1 = \mathbf{I}, \mathbf{t}_1 = \mathbf{0} \\ \mathbf{R}_{j+1} = \mathbf{R}_j \mathbf{R}_{j,j+1}, \mathbf{t}_{j+1} = \mathbf{R}_j \mathbf{t}_{j,j+1} + \mathbf{t}_j \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}_1$ 为旋转矩阵令, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, 平移向量 $\mathbf{t}_1$ 为 $\mathbf{0}$ 向量, 此时参考相机的坐标系暂定为基准坐标系, 而其他相机 j 的外参数则根据式(3)进行转换。对所有摄像机的参数进行光束平差^[16], 最后再将参考相机的坐标系转化为测量坐标系, 有:

$$E = \min \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_p} \left\| \mathbf{x}_i^j - \tilde{\mathbf{x}}_i^j(\mathbf{a}_j, \mathbf{d}_j, \mathbf{q}_j, \mathbf{t}_j, \mathbf{X}_i) \right\| \quad (4)$$

式中: i 与 j 分别表示标志物位置样本序号和摄像机的编号, N_c 为所拍摄标志物的位置样本数, N_p 为视觉系统中摄像机的个数, $\mathbf{a} = [a_x, a_y, u_0, v_0, \gamma]$ 包含了摄像机 5 个内参数, $\mathbf{d} = [k_1, k_2, k_3, p_1, p_2]$ 包含了 5 个畸变参数, $\mathbf{q} = [q_0, q_1, q_2, q_3]$ 为 4 元素的旋转量参数, $\mathbf{t} = [t_1, t_2, t_3]$ 包含 3 个平移量参数, $\tilde{\mathbf{x}}_i^j$ 为空间位置 $\mathbf{X}_i$ 在第 j 台摄像机中的反投影图像坐标。

在求解式(4)时, 通常采用莱文贝格-马夸特

(Levenberg-Marquardt, LM) 算法进行迭代计算^[17]。计算时由于光束平差过程对于初始值是非常敏感的, 偏差较大的初始值会严重影响式(4)的收敛性, 从而导致标定结果误差过大, 所以在平差计算前进行初始参数优化是十分重要的。

3 参考相机优化选择策略探索

当测量现场布置好摄像机后, 摄像机之间存在着复杂的共视关系, 此时若将每台摄像机作为节点可以构建出一个无向图, 如图2所示。两个节点之间连通, 则表示这两台摄像机之间存在着共视关系。当获得摄像机参数后, 有连通关系的两台摄像机之间可以用反投影误差来构建连接权值 $W_{i,j}$, 这样便形成有权无向图(这里的 i 与 j 表示摄像机的编号)。根据测量需求来布置摄像机, 每两台摄像机之间不一定存在共视区, 因此对多台摄像机进行外参数统一时, 需要在有权无向图中寻找与参考摄像机有连通关系的路径(该路径不唯一)。由于摄像机参数恢复时, 各组计算误差并不相同。同时, 外参数统一过程中, 连通路径上各个摄像机的误差是累积的。因此, 不同摄像机作为参考相机时, 各个路径上的误差是不同的, 存在着最优决策问题。

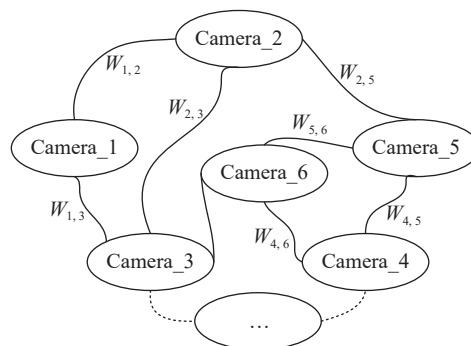


图2 摄像机节点无向图

为了在初始参数估计时降低误差, 本文提出 Q 值检测方法, 并通过 Q 值的大小来选择参考相机:

$$Q_j = (\omega_1 \bar{\varepsilon}_j + \omega_2 \bar{\delta}_j) / (\omega_1 + \omega_2), \quad j = 1, 2, \dots, N_p \quad (5)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_j$ 表示第 j 台摄像机作为参考相机时, 各个路径上(图2中到各个节点的最短路径)权值的均值, $\bar{\delta}_j$ 表示各条路径权值的均方差, ω_1 和 ω_2 为两个权重(依据经验取值 ω_1 为 $1 \sim 1.5\omega_2$), N_p 为摄像机的台数。

根据式(5)设计参考相机选择如下 7 个步骤:

1) 两两相机进行参数恢复, 并基于反投影误差构建有权无向图;

2) 选择任一台摄像机作为参考相机, 该摄像机节点作为主节点;

3) 在无向图中寻找其他摄像机节点到主节点的最短路径;

4) 计算每一条路径上权值的均值 $\bar{\varepsilon}_j$ 和所有路径的均方差 δ_j ;

5) 根据式(5)计算该台摄像机作为参考相机的 Q_j 值;

6) 反复执行步骤 2~步骤 5, 直到每台摄像机的 Q_j 值计算完毕;

7) 比较各个摄像机的 Q_j 值, 选择拥有最小 Q_j 值的摄像机作为参考相机。

由上述步骤可以看出, 根据 Q 值确定参考相机, 不仅控制了总体误差, 而且还考虑了各个摄像机误差分布的均衡性, 可为平差优化提供更好的初始值。与此同时, 也可以从图 2 所示的有权无向图中看出, 当使用光学运动捕捉系统进行测量时, 随着摄像机数量的增多, 相机之间的共视关系也会变得复杂, 这将导致图 2 中摄像机节点之间的连接路径增多, 因此会增加 Q 值计算量, 延长摄像机标定过程的执行时间。然而, 运动捕捉应用时, 摄像机系统标定阶段并不采用在线分析的方式, 而是一种精度优先的处理模式, 因此本文所提的 Q 值评测法主要为摄像机标定精度提高提供技术参考。

4 实验与讨论

4.1 获取实验数据

为了验证本文所提参考相机选择方法的效果和对摄像机布置的适应性, 在测试场地的上方环形摆放(非等间距布置)了 14 台运动捕捉摄像机, 构成一个多目视觉系统。同时因摄像机是随机选择, 所以数码 ID 编号显示较为随机, 这也使得摄像机 ID 与空间位置不存在相关性, 如图 3 所示。在这 14 台摄像机中, 第 3、7、8、9 号 4 台摄像机像素分辨率为 1664×1088, 配备 6 mm F#1.8 镜头; 而其他摄像机的像素分辨率均为 2048×2048, 配备 12 mm F#1.8 镜头。与此同时, 为了测试参考相机的选择对系统标定误差的影响, 采用了已知尺寸的一维标定杆, 如图 4 所示, 杆上

有 3 个共线球形标识物(又称为 Marker 点), 反光球的直径为 15.9 mm, 其中 AB 两点距离为 325 mm, BC 两点距离为 175 mm。

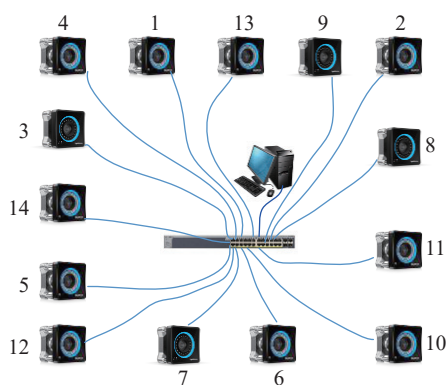


图 3 摄像机布置位置关系图



图 4 一维标定杆

在摄像机阵列下方区域挥动标定杆(挥动范围大致为 5 m×5 m)获取杆上 3 个 Marker 点的图像。在本文选取了 935 个标准杆位置进行计算分析, 每台摄像机的数据个数和共视关系如图 5 所示, X、Y 轴均为摄像机的编号, Z 轴用不同颜色表示数据样本在不同摄像机公共视区中出现的数量, 如图 5(b)所示。

4.2 结果分析

基于数据样本对摄像机参数进行计算, 并采用第 3 节的方法构建摄像机节点有权无向图, 如图 6 所示。摄像机参数恢复后的误差分布是不同的, 依次以每一台摄像机作为参考相机, 进行最短路径分析, 其分析结果如表 1 和表 2 所示, 其中 $\bar{\varepsilon}_j$ 和 δ_j 分别为式(5)中第 j 台摄像机作为参考相机时各条路径反投影误差的均值和均方根误差。

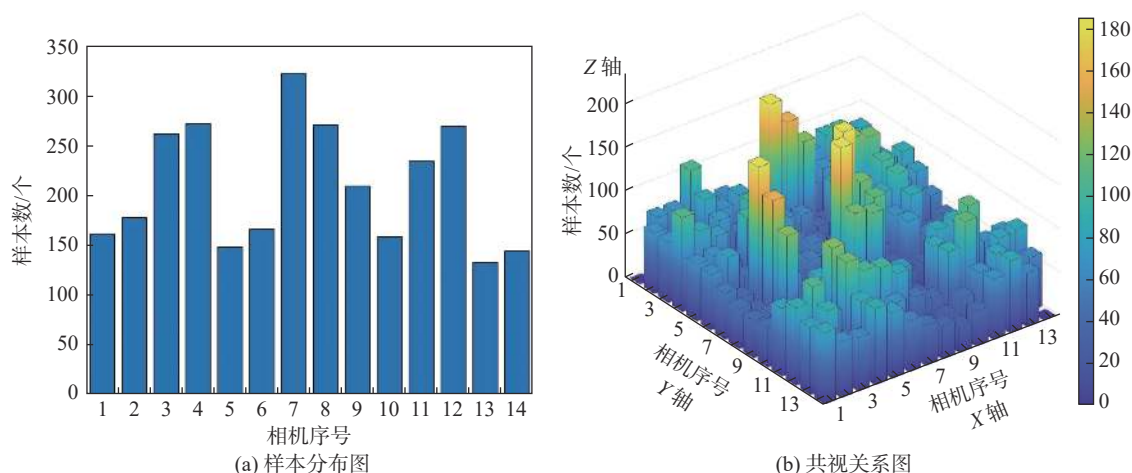


图5 用于测试的样本数据

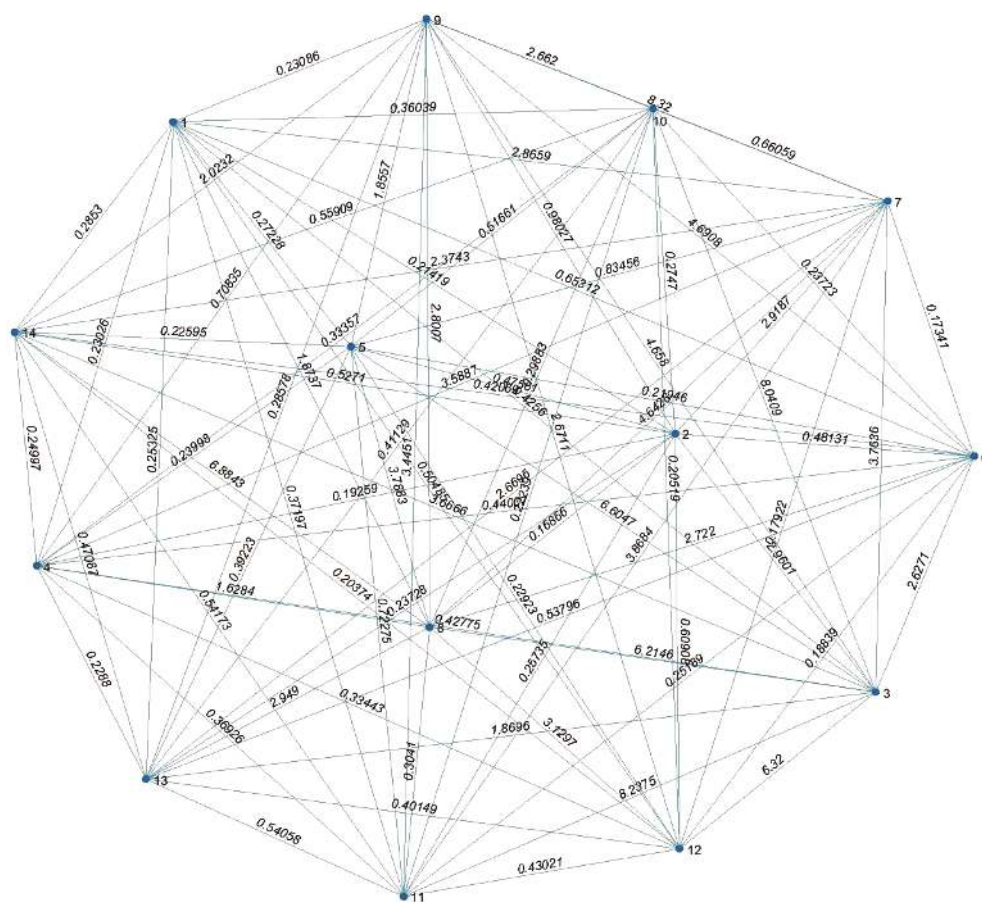


图6 摄像机各个节点的有权无向图

根据式(5)进行参考相机的估计,这里取权值 $\omega_1=0.6$, $\omega_2=0.4$ 。经过计算 10 号摄像机的 $Q=0.338$,该值在所有数据中最小,因此推测 10 号摄像机作为参考摄像机时,误差控制较为理想。

为了进一步验证所选参考相机的正确性,本文将 1~14 号摄像机依次作为参考相机进行标定

测试。首先通过式(3)将各台摄像机外参数统一到参考相机坐标系中,之后将摄像机的内外参数以及标定杆 Marker 点的空间坐标代入式(4)中,并基于 LM 法对所有参数进行迭代优化。实验中设置光束平差过程迭代分析的停机准则为: $|\bar{\varepsilon}_{pre} - \bar{\varepsilon}_{cur}| \leq 0.001$,即当前各台摄像机反投影误差

的均值 $\bar{\varepsilon}_{\text{cur}}$ 与前一次值 $\bar{\varepsilon}_{\text{pre}}$ 相比不超过 0.001 时停止迭代(为了避免错误停机,连续 3 次检测误差变化,若均满足停机准则便执行停机),分析结果如表 3 和表 4 所示,其中 $\bar{\varepsilon}_{\text{cur}}^j$ 和 $\bar{\delta}_{\text{cur}}^j$ 分别为第 j 台摄像机作为参考相机时光束平差后的各台摄像机反投影误差的均值和均方根误差。由于选择的参考相机不同,迭代计算后平差结果的误差也不同,因此采用多台摄像机构建运动捕捉系统时合理选择参考相机是非常必要的。与此同时,也可以从 $\bar{\varepsilon}_{\text{cur}}^j$ 和 $\bar{\delta}_{\text{cur}}^j$ 数值变化中看出,通过 Q 值选择的第 10 号摄像机作为参考相机时,其结果无论是各台摄像机反投影误差的大小,还是各台摄像机误差之间的差异,均比其他摄像机作为参考相机时更加合理。当 10 号摄像机选作参考相机后,在平差迭代计算过程中各台摄像机反投影误差变化曲线(横轴为迭代次数,纵轴为反投影误差)可以得到快速地收敛,如图 7 所示。这些实验结果验证了采用本文所提 Q 值评测方法进行参考相机的选择对优化动捕系统标定流程是非常有效的。

表 1 摄像机节点无向图路径分析(相机编号 1~7)

参数	j						
	1	2	3	4	5	6	7
$\bar{\varepsilon}_j$	0.482	0.607	0.409	0.426	0.429	0.555	0.943
$\bar{\delta}_j$	0.250	0.291	0.242	0.241	0.227	0.267	0.320

表 2 摄像机节点无向图路径分析(相机编号 8~14)

参数	j						
	8	9	10	11	12	13	14
$\bar{\varepsilon}_j$	0.676	0.559	0.425	0.470	0.774	0.505	0.506
$\bar{\delta}_j$	0.281	0.290	0.207	0.232	0.324	0.252	0.274

表 3 不同参考相机下光束平差结果(相机编号 1~7)

参数	j						
	1	2	3	4	5	6	7
$\bar{\varepsilon}_{\text{cur}}^j$	0.417	0.629	0.331	0.365	0.379	0.533	1.043
$\bar{\delta}_{\text{cur}}^j$	0.087	0.161	0.060	0.091	0.086	0.132	0.279

表 4 不同参考相机下光束平差结果(相机编号 8~14)

参数	j						
	8	9	10	11	12	13	14
$\bar{\varepsilon}_{\text{cur}}^j$	0.667	0.569	0.326	0.388	0.775	0.450	0.474
$\bar{\delta}_{\text{cur}}^j$	0.219	0.134	0.053	0.078	0.246	0.108	0.110

为了检测 Q 值评测方法在不同场景布置时的稳定性和有效性,每组实验中采用不同数量摄像

机组成动捕系统,并将每台摄像机逐一作为参考相机进行标定计算。在实验中,为了使每次实验评测标准统一,在平差优化中迭代计算次数限制为 80。实验结果如图 8 所示。横轴为实验中采用的摄像机台数,纵轴为反投影误差。验证测试时共有 8 组实验,所采用的摄像机的数目从 3 台到 10 台不等。“◇”标识为不同摄像机作为参考相机时得到的计算结果,线段连接的节点为采用 Q 值评测算法选择出参考相机的结果。经本文方法选择出的摄像机作为参考相机时得到的反投影误差是最小的,这一结果表明即使相机位置和数量不同,采用 Q 值评测算法也能选择出最为合适的参考相机进一步优化标定精度。同时也再次证明通过 Q 值选择参考相机对于后续迭代优化过程中误差的控制是非常有效的。

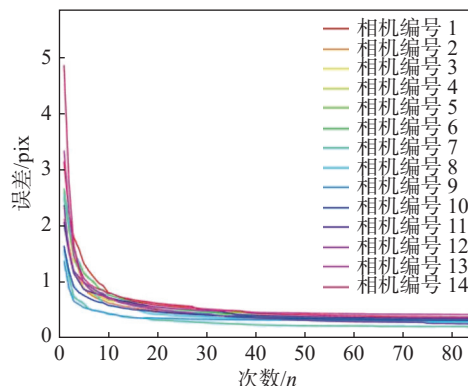
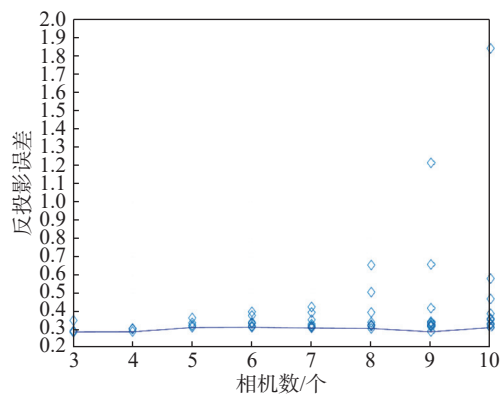


图 7 反投影误差变化曲线

图 8 Q 值评测法稳定性测试

5 结束语

光学运动捕捉是海洋工程物理模型试验中一种重要的运动测量技术,而摄像机标定是光学运动捕捉实验中非常重要的一个环节,其精度直接影响运动测量结果的质量,其中光束平差作为标

定过程的最后一个环节,具有很强的初始值敏感性,因此如何在摄像机初始参数估计过程中控制好误差,成为运动捕捉系统提高数据质量的一个关键。针对标定初始参数估计过程中误差控制问题,本文聚焦在多目视觉系统坐标统一过程中参考相机的选择方面,深入探讨了参考相机选择对于平差结果的影响,并在初始值优化策略研究基础上,以反投影误差和均方差的加权平均构建了 Q 值评测算法。该方法以摄像机为节点、以反投影误差为权值构建有权无向图,并依据无向图进行坐标统一路径的误差控制和参考相机选择的评测。在实验中,本文通过多台摄像机组成的多目视觉系统,并利用一维标定杆来验证所提出的参考相机评测方法。实验结果不仅证实了参考相机的选择对平差过程的重要影响,而且还将各个摄像机作为参考相机时的平差结果与 Q 值大小进行比对,并验证了本文所提 Q 值评测方法的有效性。本文提供了海洋工程模型运动测量的技术参考,尤其在多目视觉系统的标定方面,为优化标定流程提供了一种行之有效的策略。

参考文献

- [1] 许天羽,夏闻达,赵岭. 海洋漂浮物运动的非接触测量方法研究[J]. 中国水运(下半月), 2009, 9(11): 113-114.
- [2] 杨建民,肖龙飞,彭涛,等. 浅水不规则波浪中油轮运动研究[J]. 海洋工程, 2000, 18(3): 25-29.
- [3] 李海博. 船模六自由度的实时测量方法与系统实现研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [4] 沈海滨,杜海,李木国,等. 非接触式海洋模拟平台测量技术研究[J]. 海洋通报, 2008, 27(6): 68-75.
- [5] 高峰,郑宝友,谷汉斌. 船模运动六分量的非接触式测试系统[J]. 水道港口, 2004, 25(1): 48-50.
- [6] 翟溢章,宿洁华,张士恒,等. 相机标定的精度影响实验分析[J]. 电子设计工程, 2022, 30(7): 82-86.
- [7] HUO J Z, ZHANG H D, MENG Z C, et al. A flexible calibration method based on small planar target for defocused cameras[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 157: 107125.
- [8] PEREZ A J, PEREZ-CORTES J C, GUARDIOLA J L. Simple and precise multi-view camera calibration for 3D reconstruction[J]. Computers in Industry, 2020, 123: 103256.
- [9] OU Q F, XIE Q Q, CHEN F H, et al. Reinforcement learning-based calibration method for cameras with large FOV[J]. Measurement, 2022, 202: 111732.
- [10] 张广军. 视觉测量[M]. 1版. 北京: 科学出版社, 2008.
- [11] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [12] 刘建伟,梁晋,梁新合,等. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 126-134.
- [13] FROHLICH R, TAMAS L, KATO Z. Absolute pose estimation of central cameras using planar regions[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(2): 377-391.
- [14] 李同彬,董帅. 多相机全局三维测量中相机分布形式研究[J]. 光电技术应用, 2019, 34(2): 11-16.
- [15] 薛俊鹏,胡艳飞,王译萱. 影响区域网光束法平差测量精度的初值因素分析[J]. 光学技术, 2019, 45(2): 181-187.
- [16] 朱子健,张贵阳,杨明,等. 基于法化矩阵降维的多相机快速光束法平差算法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(2): 255-263.
- [17] 张贵阳,霍炬,杨明,等. 多相机网络联合约束优化的高精度三维变形全场测量[J]. 光学精密工程, 2021, 29(7): 1653-1666.

编辑 葛晋