

文章编号:1001-2486(2011)05-0045-05

## 摄像机网络摄像测量中多目传递站位姿关系的最优标定\*

晁志超<sup>1</sup>,姜广文<sup>1</sup>,伏思华<sup>1</sup>,于起峰<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**在摄像机网络摄像测量中,经常会用到多目传递站进行相邻节点间位姿关系的传递。针对多目传递站中固连的多个摄像机之间位姿关系的标定难题,提出了一种基于冗余标定的优化标定方法。首先,对多目传递站中的独立位姿关系数目、最大可测量位姿数目、最小约束数目等进行了分析和推导;然后,对典型的四目传递站间各摄像机相对位姿关系的优化标定算法进行了阐述,对一般的多目传递站位姿参数的标定问题给出了通用的优化方法;最后,对四目传递站的优化算法进行了数值仿真,仿真结果证明了优化算法的可行性与有效性。

**关键词:**摄像机网络;摄像测量;位姿标定;测量平差

**中图分类号:**TP242;TP391 **文献标识码:**A

## Optimization Calibration of Multi-camera Relay Station in the Videometric Using Camera Network

CHAO Zhi-chao<sup>1</sup>, JIANG Guang-wen<sup>1</sup>, FU Si-hua<sup>1</sup>, YU Qi-feng<sup>2</sup>

(1. College of Opto-Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Multi-camera relay station is usually used to relay pose parameters among neighboring nodes in the videometric using camera network. An optimization method based redundancy calibration is proposed to solve the problem. Firstly, the number of independent pose parameters, the maximum number of measurable pose parameters and the minimum number of restricted condition were analyzed for a normal multi-camera relay station. Then, the optimized calibrating algorithm for a typical four-camera relay station was given, and the optimized method for general relay station calibration was suggested as well. Finally, a numerical simulation of the proposed algorithm for four-camera relay station calibration was conducted. The results show that the algorithm is feasible and effective.

**Key words:** camera network; videometric; pose calibration; survey adjustment;

摄像测量具有精度高、非接触和成本低等优点,有着广阔的应用领域。然而,传统的摄像测量技术用于三维位姿及其变形测量时,通常只能应用于可通视的物体之间或处于同一视场范围内的物体之间的位姿关系测量,对科技或工程建设领域中大量存在的不通视物体间位姿变形测量和大视场范围内物体间的位姿变形测量则无能为力。为了解决上述难题,作者提出了多摄像机接力传递位姿测量的概念与方法<sup>[1-4]</sup>,该方法能够有效解决大型结构体上不通视目标间的位姿变形测量和大视场范围内目标间的相对位姿变形测量等难题,并已成功应用于某大型船体海上航行过程中

的艏艉变形测量、甲板上下层变形测量等领域<sup>[5]</sup>。在多摄像机接力传递位姿测量的基础上,作者<sup>[6]</sup>进一步提出了摄像机网络摄像测量系统,通过最大限度地利用摄像机网络中的闭合回路一致性约束,提高系统的测量精度和健壮性。在摄像机网络摄像测量中,经常会用到由多个摄像机固连构成的多目传递站,并在测量前高精度的标定出传递站中各摄像机间的相对位姿关系。然而,由于对任意两个摄像机间的位姿关系标定时存在一定的误差,因此,当摄像机较多时会出现累积误差过大的情况。本文首先通过对多目传递站中的摄像机间的组合关系进行研究,然后,充分利

\* 收稿日期:2010-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10727202)

作者简介:晁志超(1982—),男,博士生。

用不同组合间存在的大量约束关系,对冗余的标定数据进行平差处理<sup>[7-8]</sup>,从而得到高精度的多目传递站位姿关系标定参数。由于位姿关系中平移向量与旋转矩阵的优化方法完全类似,因此本文仅对旋转矩阵进行讨论。

### 1 多目传递站姿态参数标定概述

多目传递站一般由多个摄像机固连构成,也可以由多个摄像机和合作标志块固连构成,如图1所示,左图表示由3个摄像机固连构成的三“目”传递站,右图表示由2个摄像机和1个标志块固连构成的三“目”传递站。由于在接力传递摄像测量中,主要通过“摄像机-合作标志块”组合利用单摄像机位姿测量的方法<sup>[9]</sup>来实现位姿关系的传递,因此,对于后一种情形下的多目传递站,合作标志块也可以被视作一个“目”。由摄像机和合作标志块混合组成的传递站与完全由摄像机组成的传递站在标定的方法上完全相同,因此,本文中所述的多目传递站均指完全由摄像机构成的多目传递站。

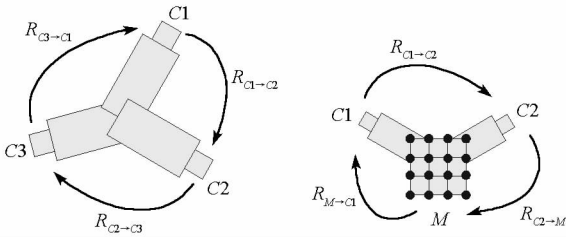


图1 三“目”传递站示意图

Fig. 1 Relay station using three cameras

摄像机坐标系一般以摄像机光心为原点,以摄像机光轴为Z轴,X、Y轴与图像坐标系的X、Y轴平行,可见,摄像机坐标系是一个“看不见摸不着”的坐标系,而且,由于进行位姿参数传递的需要,传递站中不同的摄像机必须指向各自不同的合作标志块,也即待标定的摄像机与摄像机之间不存在公共的视场,因此,要精确标定多目传递站中两个摄像机之间的相对位姿关系非常困难,一般可以通过拍摄大量不同姿态的图像,采用类似机器人手眼标定的方法进行标定<sup>[10]</sup>。由于传递站中摄像机的视场大小有限,限制了标定过程中传递站的位姿调整范围,从而影响最终位姿参数的标定精度。然而,多目传递站中不同的摄像机组合之间存在大量固有的约束关系,对于图1中所示的三目传递站来说,存在如式(1)所示的约束关系,其中 $R_{C_i \rightarrow C_j}$ 表示由摄像机坐标系 $C_i$ 变换到摄像机坐标系 $C_j$ 的旋转矩阵。

$$R_{C_3 \rightarrow C_1} \cdot R_{C_2 \rightarrow C_3} \cdot R_{C_1 \rightarrow C_2} = I \quad (1)$$

如图2所示为四目传递站示意图,对应的姿态约束关系如式(2)所示,其中4个约束中由任意3个约束可以推导出另外1个。

$$\left. \begin{aligned} R_{C_1 \rightarrow C_3} &= R_{C_2 \rightarrow C_3} \cdot R_{C_1 \rightarrow C_2} \\ R_{C_2 \rightarrow C_4} &= R_{C_3 \rightarrow C_4} \cdot R_{C_2 \rightarrow C_3} \\ R_{C_3 \rightarrow C_1} &= R_{C_4 \rightarrow C_1} \cdot R_{C_3 \rightarrow C_4} \\ R_{C_4 \rightarrow C_2} &= R_{C_1 \rightarrow C_2} \cdot R_{C_4 \rightarrow C_1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

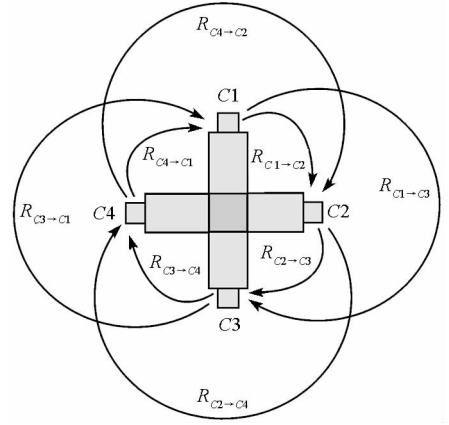


图2 四目传递站示意图

Fig. 2 Relay station using four cameras

### 2 多目传递站的组合约束关系

通过两两标定的方法可以得到多目传递站中任意2个摄像机之间的位姿参数,这些参数之间存在大量固有的约束关系,为了充分利用所有的约束关系,同时最大限度地减小计算量,需要首先探讨多目传递站中的组合约束关系。

**定理1** 对于 $n(n \geq 3)$ 目传递站的 $n$ 个摄像机,有 $n-1$ 个独立的位姿参数,有 $C_n^2$ 个可测量位姿参数,这些参数间存在 $C_n^3$ 个约束关系,但只有 $C_{n-1}^2$ 个是相互独立的。

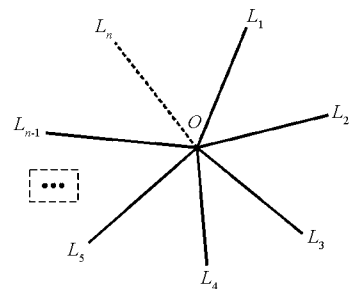


图3 n目传递站的拓扑关系图

Fig. 3 Topological relation of the relay station using three cameras

为了叙述简单,下面先介绍 $n$ 目传递站的拓扑关系图。 $n$ 目传递站中各摄像机间的空间位姿关系与平面上共射点的 $n$ 条射线的夹角之间存在相同的拓扑性质,如图3所示。例如,空间中任意两个摄像机之间的相对位姿关系可以由一个旋转

矩阵  $R$  和平移向量  $T$  唯一确定,而平面上任意两条射线之间的相对关系可以由一个它们的夹角大小唯一确定。这样传递站中的一个摄像机可以等效为图中的一条射线,传递站中 2 个摄像机间的位姿关系( $R$  和  $T$ )可以等效为图中 2 条射线间的顺时针夹角。如摄像机  $C_i$  与摄像机  $C_j$  之间的旋转矩阵  $R_{C_i \rightarrow C_j}$  对应于射线  $OL_i$  与射线  $OL_j$  之间的夹角  $\angle L_i OL_j (i \neq j)$  等。显然,  $n - 1$  个夹角即可完全确定这  $n$  条射线之间的几何关系。由于任意 2 条射线即可组成一个角,因此这  $n$  条射线所构成的总夹角数目是  $C_n^2$ ,但这些角之间存在大量的约束关系,如  $\angle L_1 OL_2 + \angle L_2 OL_3 = \angle L_1 OL_3$  等,由于任意 3 条射线所构成的 3 个夹角之间都存在一个约束关系,因此共存在  $C_n^3$  个这样的约束关系。下面用数学归纳法来证明,这些约束关系中独立的约束关系数目为  $C_{n-1}^2$ 。当  $i = 3$  时,如图 1 和式(1)所示,只存在  $1 = C_3^3$  个约束关系,因而独立的约束关系的数目也是  $1 = C_{3-1}^2$ ;当  $i = 4$  时,如图 2 和式(2)所示,存在  $4 = C_4^3$  个约束关系,其中独立的约束关系的数目是  $3 = C_{4-1}^2$ ;假设当  $i = n - 1$  时,存在  $C_i^3 = C_{n-1}^3$  个约束关系,其中独立的约束关系的数目是  $C_{i-1}^2 = C_{n-2}^2$ ,那么,当  $i = n$  时,由于在原来的  $n - 1$  条射线的基础上增加了 1 条新的射线,如图 2 所示,显然,由于这条射线的引入,将使得可测量夹角的数目增加  $n - 1$  个,独立的约束关系的个数增加  $n - 2$  个,因此总的独立约束关系的个数为  $C_{n-2}^2 + n - 2 = C_{n-1}^2$ ,证毕。

### 3 四目传递站位姿参数的优化标定算法

由定理 1 可知,四目传递站中独立的位姿关系的数目为 3,因此由  $R_{C_1 \rightarrow C_2}$ ,  $R_{C_2 \rightarrow C_3}$  和  $R_{C_3 \rightarrow C_4}$  即可完全确定四目传递站中各摄像机间的相对位姿关系;四目传递站中可以两两测量的位姿关系个数为  $C_n^2 = 6$ ,即  $R_{C_1 \rightarrow C_2}$ ,  $R_{C_1 \rightarrow C_3}$ ,  $R_{C_1 \rightarrow C_4}$ ,  $R_{C_2 \rightarrow C_3}$ ,  $R_{C_2 \rightarrow C_4}$  和  $R_{C_3 \rightarrow C_4}$ ,由于  $R_{C_i \rightarrow C_j} \cdot R_{C_j \rightarrow C_i} = I (i \neq j)$ ,因此由  $R_{C_i \rightarrow C_j}$  即可求出  $R_{C_j \rightarrow C_i}$ ;四目传递站中独立的位姿约束关系数目为 3,因此选式(2)中的任意 3 个即可组成一组独立的约束关系,不妨选前 3 个等式,并记旋转矩阵  $R_{C_i \rightarrow C_j}$  对应的欧拉角为  $Aq_{C_i \rightarrow C_j} (q = x, y, z)$ ,则存在如下形式的独立约束关系:

$$\left. \begin{aligned} R_{C_2 \rightarrow C_3}(Aq_{C_2 \rightarrow C_3}) \cdot R_{C_1 \rightarrow C_2}(Aq_{C_1 \rightarrow C_2}) \cdot R_{C_1 \rightarrow C_3}^{-1}(Aq_{C_1 \rightarrow C_3}) &= I \\ R_{C_3 \rightarrow C_4}(Aq_{C_3 \rightarrow C_4}) \cdot R_{C_2 \rightarrow C_3}(Aq_{C_2 \rightarrow C_3}) \cdot R_{C_2 \rightarrow C_4}^{-1}(Aq_{C_2 \rightarrow C_4}) &= I \\ R_{C_1 \rightarrow C_3}(Aq_{C_1 \rightarrow C_3}) \cdot R_{C_1 \rightarrow C_4}^{-1}(Aq_{C_1 \rightarrow C_4}) \cdot R_{C_3 \rightarrow C_4}(Aq_{C_3 \rightarrow C_4}) &= I \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由于两两标定过程中必然带有误差,因此,两

两标定后得到的值将不能严格满足上述约束关系,设欧拉角  $Aq_{C_i \rightarrow C_j}$  对应的改正数分别为  $\delta Aq_{C_i \rightarrow C_j} (q = x, y, z)$ ,则可将式(3)写为关于欧拉角改正数  $\delta Aq_{C_i \rightarrow C_j} (q = x, y, z)$  的全微分形式,记改正数的系数矩阵

$$C_{11}^q = R_{C_2 \rightarrow C_3} \cdot \frac{\delta R_{C_1 \rightarrow C_2}}{\delta Aq_{C_1 \rightarrow C_2}} \cdot R_{C_1 \rightarrow C_3}^{-1}, q = x, y, z \quad (4)$$

$$C_{12}^q = R_{C_2 \rightarrow C_3} \cdot R_{C_1 \rightarrow C_2} \frac{\delta R_{C_1 \rightarrow C_3}^{-1}}{\delta Aq_{C_1 \rightarrow C_3}}, q = x, y, z \quad (5)$$

$$C_{14}^q = \frac{\delta R_{C_2 \rightarrow C_3}}{\delta Aq_{C_2 \rightarrow C_3}} \cdot R_{C_1 \rightarrow C_2} \cdot R_{C_1 \rightarrow C_3}^{-1}, q = x, y, z \quad (6)$$

$$C_{24}^q = R_{C_3 \rightarrow C_4} \cdot \frac{\delta R_{C_2 \rightarrow C_3}}{\delta Ax_{C_2 \rightarrow C_3}} \cdot R_{C_2 \rightarrow C_4}^{-1}, q = x, y, z \quad (7)$$

$$C_{25}^q = R_{C_3 \rightarrow C_4} \cdot R_{C_2 \rightarrow C_3} \frac{\delta R_{C_2 \rightarrow C_4}^{-1}}{\delta Ax_{C_2 \rightarrow C_4}}, q = x, y, z \quad (8)$$

$$C_{26}^q = \frac{\delta R_{C_3 \rightarrow C_4}}{\delta Aq_{C_3 \rightarrow C_4}} \cdot R_{C_2 \rightarrow C_3} \cdot R_{C_2 \rightarrow C_4}^{-1}, q = x, y, z \quad (9)$$

$$C_{32}^q = \frac{\delta R_{C_1 \rightarrow C_3}}{\delta Aq_{C_3 \rightarrow C_4}} \cdot R_{C_1 \rightarrow C_4}^{-1} \cdot R_{C_3 \rightarrow C_4}, q = x, y, z \quad (10)$$

$$C_{33}^q = R_{C_1 \rightarrow C_3} \cdot \frac{\delta R_{C_1 \rightarrow C_4}^{-1}}{\delta Aq_{C_3 \rightarrow C_4}} \cdot R_{C_3 \rightarrow C_4}, q = x, y, z \quad (11)$$

$$C_{36}^q = R_{C_1 \rightarrow C_3} \cdot R_{C_1 \rightarrow C_4}^{-1} \cdot \frac{\delta R_{C_3 \rightarrow C_4}}{\delta Aq_{C_3 \rightarrow C_4}}, q = x, y, z \quad (12)$$

$$C_{13}^q = C_{15}^q = C_{16}^q = C_{21}^q = C_{22}^q = C_{23}^q \quad (13)$$

$$= C_{31}^q = C_{34}^q = C_{35}^q = \mathbf{0}_{3 \times 3}, q = x, y, z$$

$$B_1 = I - R_{C_2 \rightarrow C_3} \cdot R_{C_1 \rightarrow C_2} \cdot R_{C_1 \rightarrow C_3}^{-1} \quad (14)$$

$$B_2 = I - R_{C_3 \rightarrow C_4} \cdot R_{C_2 \rightarrow C_3} \cdot R_{C_2 \rightarrow C_4}^{-1} \quad (15)$$

$$B_3 = I - R_{C_1 \rightarrow C_3} \cdot R_{C_1 \rightarrow C_4}^{-1} \cdot R_{C_3 \rightarrow C_4} \quad (16)$$

则式(4) ~ (16)中左边的矩阵均为  $3 \times 3$  的方阵,记  $C_{ij}^q, B_i$  分别为将矩阵  $C_{ij}^q, B_i$  中的 9 个元素按照一定的顺序排列后得到的  $9 \times 1$  列向量,再记矩阵  $C_{ij}^q = [C_{9 \times 1}^x, C_{9 \times 1}^y, C_{9 \times 1}^z]$ ,其中  $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 6$ ,则系数矩阵如下:

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \end{pmatrix}_{27 \times 18} \quad (17)$$

记向量

$$\delta A_{3 \times 1} = [\delta Ax_{C_1 \rightarrow C_2} \quad \delta Ay_{C_1 \rightarrow C_2} \quad \delta Az_{C_1 \rightarrow C_2}]^T \quad (18)$$

$$\delta A_{C1 \rightarrow C3}^{3 \times 1} = [\delta Ax_{C1 \rightarrow C3} \quad \delta Ay_{C1 \rightarrow C3} \quad \delta Az_{C1 \rightarrow C3}]^T \quad (19)$$

$$\delta A_{C1 \rightarrow C4}^{3 \times 1} = [\delta Ax_{C1 \rightarrow C4} \quad \delta Ay_{C1 \rightarrow C4} \quad \delta Az_{C1 \rightarrow C4}]^T \quad (20)$$

$$\delta A_{C2 \rightarrow C3}^{3 \times 1} = [\delta Ax_{C2 \rightarrow C3} \quad \delta Ay_{C2 \rightarrow C3} \quad \delta Az_{C2 \rightarrow C3}]^T \quad (21)$$

$$\delta A_{C2 \rightarrow C4}^{3 \times 1} = [\delta Ax_{C2 \rightarrow C4} \quad \delta Ay_{C2 \rightarrow C4} \quad \delta Az_{C2 \rightarrow C4}]^T \quad (22)$$

$$\delta A_{C3 \rightarrow C4}^{3 \times 1} = [\delta Ax_{C3 \rightarrow C4} \quad \delta Ay_{C3 \rightarrow C4} \quad \delta Az_{C3 \rightarrow C4}]^T \quad (23)$$

待平差的欧拉角向量为

$$X = [A_{C1 \rightarrow C2}^{T 3 \times 1} \quad A_{C1 \rightarrow C3}^{T 3 \times 1} \quad A_{C1 \rightarrow C4}^{T 3 \times 1} \quad A_{C2 \rightarrow C3}^{T 3 \times 1} \quad A_{C2 \rightarrow C4}^{T 3 \times 1} \quad A_{C3 \rightarrow C4}^{T 3 \times 1}]^T \quad (24)$$

它所对应的改正数向量为

$$\delta X = [\delta A_{C1 \rightarrow C2}^{T 3 \times 1} \quad \delta A_{C1 \rightarrow C3}^{T 3 \times 1} \quad \delta A_{C1 \rightarrow C4}^{T 3 \times 1} \quad \delta A_{C2 \rightarrow C3}^{T 3 \times 1} \quad \delta A_{C2 \rightarrow C4}^{T 3 \times 1} \quad \delta A_{C3 \rightarrow C4}^{T 3 \times 1}]^T \quad (25)$$

记约束方程的误差向量  $B = [B_{27 \times 1}^T \quad B_{9 \times 1}^T \quad B_{9 \times 1}^T]^T$ , 则可得到关于改正数的微分方程

$$C \delta X = B \quad (26)$$

设系数矩阵  $C_{27 \times 18}$  的 Moore-Penrose 伪逆为  $C_{18 \times 27}^+$ , 则有<sup>[11]</sup>

$$\begin{aligned} \delta X_{18 \times 1} &= C_{18 \times 27}^+ B_{27 \times 1} \\ &= C_{18 \times 27}^T (C_{27 \times 18} C_{18 \times 27}^T)^{-1} B_{27 \times 1} \end{aligned} \quad (27)$$

得到  $\delta X_{18 \times 1}$  后即可对传递站中各摄像机间的姿态关系进行修正:

$$(X_{18 \times 1})_{i+1} = (X_{18 \times 1})_i + \delta X_{18 \times 1} \quad (28)$$

值得注意的是, 利用式(28)求解欧拉角改正数的前提是所有待平差的参数测量精度相同。然而, 对于一般的摄像机网络, 由于不同摄像机在分辨率、视场大小、测量距离等方面不尽相同, 因此对姿态的测量精度也会有所不同, 此时进行平差法解算时就需要考虑到平差参数间权阵  $P$  的影响。由于各个摄像机测量的参数之间一般都相互独立, 故权阵  $P$  一般是无量纲的方阵, 可以通过事先对各个摄像机姿态测量的方差阵  $D$  进行估计得到:

$$P^{-1} = \frac{1}{\sigma_0^2} D \quad (29)$$

其中,  $\sigma_0^2$  表示单位权所对应的测量方差, 此时, 改正数向量为<sup>[7]</sup>

$$\delta X_{18 \times 1} = P^{-1} C_{18 \times 27}^T (C_{27 \times 18} P^{-1} C_{18 \times 27}^T)^{-1} B_{27 \times 1} \quad (30)$$

如果修正后的姿态关系仍不满足约束关系, 则可进行循环迭代, 直至满足一定的条件和精度。一般仅需迭代 3~4 次即使所有欧拉角改正数的绝对值小于 1", 且基本满足约束关系。

对于一般的多目传递站, 最优标定步骤与上述四目传递站的过程类似, 如下所示:

- (1) 根据第 2 节所述, 分别得到多目传递站的一组独立位姿参数、一组可测量位姿参数和一组独立约束关系;
- (2) 按照第 3 节所述, 由步骤(1)中得到的独立约束关系, 得到待平差量的改正数方程;
- (3) 根据改正数方程, 列出平差方程组并求解改正数向量;
- (4) 由得到的改正数向量对测量值进行修正, 反复迭代, 直至满足所有的约束关系。

### 4 四目传递站姿态参数优化标定仿真

为了验证上述多目传递站的优化标定算法, 针对实际摄像机网络中经常用到的典型的四目传递站, 如图 2 所示, 设计了如下数值仿真实验:

首先, 随机生成一组四目传递站中各摄像机坐标系间位姿关系的真值。由于四目传递站中独立的位姿关系数目为 3, 故由  $R_{C1 \rightarrow C2}$ ,  $R_{C2 \rightarrow C3}$  和  $R_{C3 \rightarrow C4}$  即可完全确定四目传递站中各摄像机间的相对姿态关系。因此随机生成三组欧拉角, 由这三组欧拉角得到对应的姿态旋转矩阵  $R_{C1 \rightarrow C2}^{true}$ ,  $R_{C2 \rightarrow C3}^{true}$  和  $R_{C3 \rightarrow C4}^{true}$ , 再通过式(2)得到其他所有可测量的姿态旋转矩阵  $R_{C1 \rightarrow C3}^{true}$ ,  $R_{C1 \rightarrow C4}^{true}$  和  $R_{C2 \rightarrow C4}^{true}$ , 进而得到对应的欧拉角真值;

然后, 在所有的可测量姿态欧拉角上加入服从均值为 0、标准差为 5 角分的高斯分布随机测量误差, 得到含误差的姿态欧拉角, 并生成对应的含有测量误差的姿态旋转矩阵  $R_{C1 \rightarrow C2}^{noise}$ ,  $R_{C2 \rightarrow C3}^{noise}$ ,  $R_{C3 \rightarrow C4}^{noise}$ ,  $R_{C1 \rightarrow C3}^{noise}$ ,  $R_{C1 \rightarrow C4}^{noise}$  和  $R_{C2 \rightarrow C4}^{noise}$ ;

最后, 按第 3 节所述算法对上述含有测量误差的姿态旋转矩阵进行优化标定, 得到优化后的姿态旋转矩阵  $R_{C1 \rightarrow C2}^{sa}$ ,  $R_{C2 \rightarrow C3}^{sa}$ ,  $R_{C3 \rightarrow C4}^{sa}$ ,  $R_{C1 \rightarrow C3}^{sa}$ ,  $R_{C1 \rightarrow C4}^{sa}$  和  $R_{C2 \rightarrow C4}^{sa}$ , 进而得到对应的优化后的姿态欧拉角。将上述过程重复 1000 次, 统计优化前、优化后传递站内参数的平均绝对标定误差, 仿真结果如表 1 所示。

表1 优化前与优化后传递站内参数的平均绝对标定误差

Tab.1 Mean absolute errors of the calibration before/after optimization

Euler	C1→C2		C2→C3		C3→C4	
	Before	After	Before	After	Before	After
Ax	4.93'	2.97'	4.87'	2.82'	4.80'	2.80'
Ay	3.39'	2.30'	3.36'	2.20'	3.40'	2.23'
Az	3.39'	2.25'	3.32'	2.31'	3.38'	2.43'

由表1中数据可见,采用文中所述优化算法可以显著提高摄像机网络摄像测量中多目传递站位姿关系的标定精度。此外,由定理1可知, $n$ 目传递站中可测量的位姿关系数目是 $C_n^2$ ,独立约束关系数目是 $C_{n-1}^2$ ,因此约束关系数目与待平差元的数目比值为 $C_{n-1}^2/C_n^2 = (n-2)/n$ ,对三目传递站该比值为 $1/3$ ,对四目传递站该比值为 $1/2$ ,对五目传递站该比值为 $3/5$ ,显然该比值越大,优化的效果就会越明显,同时,运算量也会越大。对于 $n$ 目传递站,需要求解一个

$$\begin{matrix} C & \delta X & = & B \\ 9C_n^2-1 \times 3C_n^2 & 3C_n^2 \times 1 & & 9C_n^2-1 \times 1 \end{matrix}$$

的线性方程组。

## 5 结论

针对摄像机网络摄像测量中经常用到的多目传递站中各摄像机间相对位姿关系的标定难题,在分析多目传递站自身结构的基础上,提出了基于冗余标定的平差法优化标定方法。仿真结果表明,由于充分利用了多目传递站自身固有的各种约束关系,通过对原始的两两标定值进行平差法优化,可以显著提高多目传递站内各摄像机间相对位姿关系的标定精度。

## 参考文献:

[1] Yu Q F, Jiang G W, Fu S H, et al. Broken-ray Videometric

Method and System for Measuring the Three-dimensional Position and Pose of the Non-intervisible Object [C]// The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37(B5):145-148.

[2] Yu Q F, Jiang G W, Fu S H, et al. Fold-ray Videometrics Method for the Deformation Measurement of Nonintervisible Large Structures[J]. Applied Optics, 2009, 48(24):4683-4687.

[3] Yu Q F, Jiang G W, Chao Z C, et al. Deformation Monitoring System of Tunnel Rocks with Innovative Broken-ray Videometrics[C]//Proc. SPIE, Vol. 73752C, 2008.

[4] Chao Z C, Yu Q F, Jiang G W, et al. Study of a Pose-relay Videometric Method Using Parallel Camera Series [J]. Applied Optics. 2010, 49(28):5192-5198.

[5] 姜广文. 摄像机链位姿传递摄像测量方法及船体变形测量研究[D]. 长沙:国防科技大学,2010.

[6] 于起峰,晁志超,姜广文,等. 一种大型结构体姿态及位移变形的摄像机网络摄像测量方法及装置[P]. 国家发明专利:ZL200910042846.0,2010.

[7] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.

[8] 陶本藻. 自由网平差与变形分析[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,2001.

[9] Lu C P, Hager G D, Mjolsness E. Fast and Globally Convergent Pose Estimation from Video Images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(6):610-622.

[10] Park F, Martin B. Robot Sensor Calibration: Solving  $AX = XB$  on the Euclidean Group [J]. IEEE T. Robotic. Autom, 1994, 10(5): 717-721.

[11] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.