

文章编号:1007-2780(2013)04-0608-07

多约束融合算法在多摄像机测量系统中的应用

张来刚^{1,3}, 魏仲慧², 何 昕², 孙 群¹

(1. 聊城大学 机械与汽车工程学院, 山东 聊城 252059, E-mail: zhlgang@163.com;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了提高大视场三维测量精度, 克服传统束调整算法对大视场图像校正不理想(控制点集中在视场中心)的缺点, 提出了基于多约束融合算法的多摄像机三维测量方法, 其基本思想为: 将空间控制点的三维坐标与其对应像素点坐标之间的共线方程作为约束条件, 利用已知的距离、三点共线和四点共面等信息, 建立测量视场中控制点与像点坐标间的约束关系, 从而完成三维坐标测量, 同时实现了系统参数的在线标定。实验中, 通过 RMS 误差和测距相对精度对测量精度进行了定量分析, 测距相对精度达到了 1:7 000~1:15 000, 相对传统的束调整算法, 该算法测量精度提高了一个数量级, 是一种可靠的高精度视觉测量方法。

关 键 词: 计算机视觉; 束调整算法; 条件约束; 相机标定; 三维测量

中图分类号: **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20132804.0608

Multi-Camera Measurement System Based on Multi-Constraint Fusion Algorithm

ZHANG Lai-gang^{1,3}, WEO Zhong-hui², HE Xin², SUN Qun¹

(1. School of Mechanical and Automovtive Engineering, Liaocheng University,

Liaocheng 252059, China, E-mail: zhlgang@163.com;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve three-dimensional measurement accuracy in the large field and to overcome the shortcomings of the traditional bundle adjustment algorithm for image correction being not ideal for large field of view (the control points concentrated in the center of the view), this paper presented a multi-camera 3D measurement methods based on multi-constraint fusion algorithm. The basic idea is collinear equation of three-dimensional space coordinates of the control points and corresponding pixel coordinates is looked as constraints, using the known distance constraint, three-point collinear, four-point coplanar to establish the restriction between coordinates of the control points and pixel points, thus completing the three-dimensional coordinate measurement, at the same time, achieving the online calibration of the system parameters. In the experiment, the RMS error and relative accuracy of distance are used to analyses the measurement accuracy, the relative accuracy of distance reaches to 1:7 000~1:15 000, compared to the traditional bundle adjustment algorithm, the measurement accuracy of this algorithm is improved an order of magnitude, it is a reliable high-precision vision measurement method.

Key words: computer vision; bundle adjustment algorithm; constraint; camera calibration; three-dimensional measurement

收稿日期: 2013-01-25; 修订日期: 2013-06-24

基金项目: 山东省自然科学基金(No. ZR2012CO026, No. ZR2011E038)

作者简介: 张来刚(1983—), 男, 山东聊城人, 博士, 主要从视觉测量、立体成像方面的研究。

1 引 言

随着现代工业生产和科学技术的快速发展,许多领域提出了对工件几何尺寸和三维表面轮廓等参数的测量要求。例如,飞机、轮船、汽车的外形测量、大型汽轮机叶片的检测、大型焊接件的尺寸检测、重型机电设备的安装定位测量以及卫星天线在制造中的测量等,在制造过程中,测量精度的高低会影响其工作性能和寿命,大尺寸三维摄影测量技术成为了工业测量研究的重点和难点。传统的测量技术一般采用逐点测量方法,其工作效率低,难以满足大尺寸工业测量的需要。因此,开发高精度的视觉测量系统成为大尺寸三维测量技术的主要研究方向^[1-3]。

针对测量视场大,透镜畸变影响测量精度等问题,国内外学者已展开了大量深入研究,Hung 提出了基于视觉技术的全景曲面三维测量系统^[4];G. Sansoni 采用主动立体视觉和结构光快速获取物体表面三维点云数据^[5];刘建伟等提出了集成近景摄影测量与编码结构光技术的曲面三维测量方法^[6]。

近年来,基于条件约束的三维测量方法在国内陆续出现,如文献[7]将视场中的已知距离信息引入到给定的物方空间坐标系,提出了基于距离约束的三维测量方法。为了进一步提高测量系统的精度和稳定性,本系统增加了空间三点共线、空间四点共面等条件作为相对控制,将距离约束、三点共线和四点共面 3 种约束相融合,实现了高精度的视觉测量,下面分别对 3 种约束进行理论推导,并对本三维测量方法详细阐述。

2 约束算法三维测量模型

以距离约束算法为例,建立三维摄影测量模型如图 1 所示,已知控制点被随机地布置在待测场景的四周,采用标准长度(被精密测量过的)或利用距离测量仪器标定场景内的数个长度作为距离约束条件,靶点靶标为测量系统提供了一个世界坐标系。根据像素点与空间物点间约束关系的不同,视场内的物点被分为 3 类:(1)靶标点(提供世界坐标系);(2)距离控制点;(3)待测点。视场中的靶标点和控制点用于标定,而待测点没有参与标定运算。

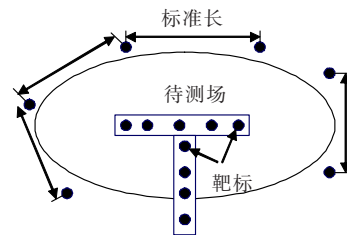


图 1 附加距离约束的三维测量模型

Fig. 1 Three-dimensional measurement model based on additional distance constraints

3 多约束融合三维测量算法

根据大尺寸视觉测量的特点,本视觉测量系统将场景中未知点间的某已知几何关系引入到给定的物方空间坐标系,提高测量系统的精度和稳定性。相对约束的引入,对提高测量精度和稳定性有明显作用,同时也使控制手段更加多样化。

3.1 世界坐标系与图像坐标系的变换关系

空间点 M 的世界坐标系坐标与其相应像点 m 在图像像素坐标系中的坐标间的变换关系^[8-9]:

$$\begin{cases} u = u_0 - f \frac{a_1(x_w - x_0) + b_1(y_w - y_0) + c_1(z_w - z_0)}{a_3(x_w - x_0) + b_3(y_w - y_0) + c_3(z_w - z_0)} \\ v = v_0 - f \frac{a_2(x_w - x_0) + b_2(y_w - y_0) + c_2(z_w - z_0)}{a_3(x_w - x_0) + b_3(y_w - y_0) + c_3(z_w - z_0)} \end{cases} \quad (1)$$

其中 (u, v) 表示图像坐标; (u_0, v_0) 为光轴与像面的交点坐标; (x_0, y_0, z_0) 表示与像面主点对应物点的世界坐标系坐标; (x_w, y_w, z_w) 表示空间点 M 的世界坐标系坐标; a_i, b_i, c_i 为摄像机的外

方位参数,是摄像机光轴方位在世界坐标系中的 3 个旋转角度 ϕ, ω, ψ 的余弦组合^[10]。

图像畸变主要是由径向畸变和切向畸变引起的^[11],畸变模型可表示为:

$$\begin{cases} \Delta u = (u - u_0)(k_1\rho^2 + k_2\rho^4 + k_3\rho^6) + p_1[\rho^2 + 2(u - u_0)^2] + 2p_2(u - u_0)(v - v_0) \\ \Delta v = (v - v_0)(k_1\rho^2 + k_2\rho^4 + k_3\rho^6) + p_2[\rho^2 + 2(v - v_0)^2] + 2p_1(u - u_0)(v - v_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $k_1, k_2, k_3 \dots$ 为径向畸变系数, $\rho = \sqrt{(u-u_0)^2 + (v-v_0)^2}$, p_1, p_2 为切向畸变系数。联立公式(1)、(2)得带有图像畸变的共线性方程^[10]为:

$$\begin{cases} u = u_0 - \Delta u - f \frac{a_1(x_w - x_0) + b_1(y_w - y_0) + c_1(z_w - z_0)}{a_3(x_w - x_0) + b_3(y_w - y_0) + c_3(z_w - z_0)} \\ v = v_0 - \Delta v - f \frac{a_2(x_w - x_0) + b_2(y_w - y_0) + c_2(z_w - z_0)}{a_3(x_w - x_0) + b_3(y_w - y_0) + c_3(z_w - z_0)} \end{cases} \quad (3)$$

3.2 条件约束方程

3.2.1 距离约束

假设空间中两约束控制点 $P_1(x_{w1}, y_{w1}, z_{w1})$ 、 $P_2(x_{w2}, y_{w2}, z_{w2})$ 的空间距离已知, 记为标准长度 L , 但空间三维坐标未知, 那么, 距离约束方程为:

$$F = (x_{w1} - x_{w2})^2 + (y_{w1} - y_{w2})^2 + (z_{w1} - z_{w2})^2 - L^2 = 0$$

将标准长度 L 作为真值, 利用泰勒展开式, 将上式线性化为:

$$F = F^0 + \frac{\partial F}{\partial x_{w1}} dx_{w1} + \frac{\partial F}{\partial y_{w1}} dy_{w1} + \frac{\partial F}{\partial z_{w1}} dz_{w1} + \frac{\partial F}{\partial x_{w2}} dx_{w2} + \frac{\partial F}{\partial y_{w2}} dy_{w2} + \frac{\partial F}{\partial z_{w2}} dz_{w2} = 0 \quad (4)$$

3.2.2 三点共线约束

假设三维空间中存在一点 $P_3(x_{w3}, y_{w3}, z_{w3})$ 与 $P_1(x_{w1}, y_{w1}, z_{w1})$ 、 $P_2(x_{w2}, y_{w2}, z_{w2})$ 共线, 则点 P_3 到直线 P_1P_2 的距离为零, 即满足如下关系式:

$$\text{Dis} = \left| \frac{\begin{vmatrix} i & j & k \\ A & B & C \\ x_{w3} - x_{w1} & y_{w3} - y_{w1} & z_{w3} - z_{w1} \end{vmatrix}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + R^2}} \right| = 0 \quad (5)$$

式中 $P = x_{w1} - x_{w2}$, $Q = y_{w1} - y_{w2}$, $R = z_{w1} - z_{w2}$; Dis 为点 $P_3(x_{w3}, y_{w3}, z_{w3})$ 到直线(如方程所示)的距离, “|”表示矢量求模, i, j, k 分别为 3 个坐标轴的单位矢量, 将关于 3 点的空间坐标非线性方程式(5)进行泰勒展开线性化为:

$$\begin{cases} F_1 = F_1^0 + \frac{\partial F_1}{\partial y_{w1}} dy_{w1} + \frac{\partial F_1}{\partial y_{w2}} dy_{w2} + \frac{\partial F_1}{\partial y_{w3}} dy_{w3} + \frac{\partial F_1}{\partial z_{w1}} dz_{w1} + \frac{\partial F_1}{\partial z_{w2}} dz_{w2} + \frac{\partial F_1}{\partial z_{w3}} dz_{w3} = 0 \\ F_2 = F_2^0 + \frac{\partial F_2}{\partial x_{w1}} dx_{w1} + \frac{\partial F_2}{\partial x_{w2}} dx_{w2} + \frac{\partial F_2}{\partial x_{w3}} dx_{w3} + \frac{\partial F_2}{\partial z_{w1}} dz_{w1} + \frac{\partial F_2}{\partial z_{w2}} dz_{w2} + \frac{\partial F_2}{\partial z_{w3}} dz_{w3} = 0 \\ F_3 = F_3^0 + \frac{\partial F_3}{\partial x_{w1}} dx_{w1} + \frac{\partial F_3}{\partial x_{w2}} dx_{w2} + \frac{\partial F_3}{\partial x_{w3}} dx_{w3} + \frac{\partial F_3}{\partial y_{w1}} dy_{w1} + \frac{\partial F_3}{\partial y_{w2}} dy_{w2} + \frac{\partial F_3}{\partial y_{w3}} dy_{w3} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

3.2.3 共面约束

假设 $P_4(x_{w4}, y_{w4}, z_{w4})$ 位于 3 点 $P_1(x_{w1}, y_{w1}, z_{w1})$ 、 $P_2(x_{w2}, y_{w2}, z_{w2})$ 、 $P_3(x_{w3}, y_{w3}, z_{w3})$ 所在的平面内, 即 4 点共面, 那么 P_4 到该平面的距离 d 为零, 其表达式为:

$$d = \frac{|Px_{w4} + Qy_{w4} + Rz_{w4} + S|}{\sqrt{P^2 + Q^2 + R^2}} = 0 \quad (7)$$

由于 P_1 、 P_2 、 P_3 三点不重合, 因此 $\sqrt{P^2 + Q^2 + R^2} \neq 0$, 则 4 点的共面条件方程可表示为:

$$F_f = Px_{w4} + Qy_{w4} + Rz_{w4} + S = 0$$

将关于 4 点的空间坐标非线性方程式(7)进行泰勒展开线性化为:

$$F_f = F_f^0 + \frac{\partial F_f}{\partial x_{w1}} dx_{w1} + \frac{\partial F_f}{\partial y_{w1}} dy_{w1} + \frac{\partial F_f}{\partial z_{w1}} dz_{w1} + \frac{\partial F_f}{\partial x_{w2}} dx_{w2} + \frac{\partial F_f}{\partial y_{w2}} dy_{w2} + \frac{\partial F_f}{\partial z_{w2}} dz_{w2} + \frac{\partial F_f}{\partial x_{w3}} dx_{w3} + \frac{\partial F_f}{\partial y_{w3}} dy_{w3} + \frac{\partial F_f}{\partial z_{w3}} dz_{w3} + \frac{\partial F_f}{\partial x_{w4}} dx_{w4} + \frac{\partial F_f}{\partial y_{w4}} dy_{w4} + \frac{\partial F_f}{\partial z_{w4}} dz_{w4} = 0 \quad (8)$$

3.3 像点残余误差方程

考虑了镜头畸变的共线性方程式描述的是物点在像面上的非线性成像模型, 即测量出的像点坐标是真值, 但是实际测量中是有随机误差出现的, u, v 代表观测值, v_u 和 v_v 为误差, 用 F_u 和 F_v 代表公式(3)等号右边的函数式, 那么像点观测值的误差方程为:

$$\begin{cases} u + v_u = F_u(\mathbf{b}) \\ v + v_v = F_v(\mathbf{b}) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\mathbf{b} = \{\phi, \theta, \psi, x_0, y_0, z_0, x_w, y_w, z_w, f, u_0, v_0, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2\}$

3.4 目标方程

根据拉格朗日系数法, 将公式(4)(6)(8)作为条件方程, 将公式(9)残余误差平方和最小作为条件极值, 可实现对空间物点三维坐标的高精度测量, 在 3 种约束条件下的目标函数可分别被表示为:

(1) 距离约束目标函数

$$S_{\text{All}}(\mathbf{b}) = \sum_{\text{靶点像点}} S_t(\mathbf{b}_t) + \sum_{\text{相对控制点像点}} S_{\text{rd}}(\mathbf{b}_{\text{rd}}) + \sum_{\text{普通待测点像点}} S_c(\mathbf{b}_c) \quad (10)$$

其中 $S_{\text{rd}}(\mathbf{b}_{\text{rd}}) = \mathbf{V}_{\text{rd}}^T \mathbf{V}_{\text{rd}} + k_\lambda \times (\mathbf{B} \times d \mathbf{X}_{\text{crd}} + L_{\text{rd}})$, $S_t(\mathbf{b}_t) = \mathbf{V}_t^T \mathbf{V}_t$, $S_c(\mathbf{b}_c) = \mathbf{V}_c^T \mathbf{V}_c$.

(2) 三点共线约束目标函数

$$J_{\text{All}}(\mathbf{b}) = \sum_{\text{靶点像点}} J_1(\mathbf{b}_1) + \sum_{\text{普通待测点像点}} J_2(\mathbf{b}_2) + \sum_{\text{三点共线约束像点}} J_3(\mathbf{b}_3) \quad (11)$$

其中, $J_d(\mathbf{b}_3) = \mathbf{V}_{\text{rt}}^T \mathbf{V}_{\text{rt}} + [k_{\lambda 1}, k_{\lambda 2}, k_{\lambda 3}] \times (C_{\text{rt}} \times d \mathbf{X}_{\text{crt}} + F_t^0)$, $F_1(\mathbf{b}_1) = \mathbf{V}_1^T \mathbf{V}_1$, $J_2(\mathbf{b}_2) = \mathbf{V}_2^T \mathbf{V}_2$.

(3) 四点共面约束目标函数

$$F_{\text{All}}(\mathbf{b}) = \sum_{\text{靶点像点}} F_1(\mathbf{b}_1) + \sum_{\text{普通待测点像点}} F_2(\mathbf{b}_2) +$$

$$\sum_{\text{四点共面约束像点}} F_3(\mathbf{b}_3) \quad (12)$$

其中, $J_d(\mathbf{b}_3) = \mathbf{V}_{\text{rf}}^T \mathbf{V}_{\text{rf}} + k_\lambda \times (C_{\text{rf}} \times d \mathbf{X}_{\text{rf}} + F_f^0)$, $J_1(\mathbf{b}_1) = \mathbf{V}_1^T \mathbf{V}_1$, $J_2(\mathbf{b}_2) = \mathbf{V}_2^T \mathbf{V}_2$.

在此, 本文取多约束融合算法的目标函数为:

$$H_{\text{All}} = \sigma_1 \cdot S_{\text{All}}(\mathbf{b}) + \sigma_2 \cdot J_{\text{All}}(\mathbf{b}) + \sigma_3 \cdot F_{\text{All}}(\mathbf{b}) \quad (13)$$

其中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为约束条件的加权系数, 根据实际情况的需求, 可以设定不同的权值。

对目标函数(13)中的变量集合 b 中各变量求偏导数, 并令其一阶偏微分方程为零, 得到目标函数的法方程。利用直接线性变换计算初始值 \mathbf{b}^0 , 经过多次迭代直到像点的残余误差平方和达到最小为止, 此时计算获得的视觉测量系统各像面内外参数即为最终的摄像机标定结果, 待测点的坐标即为最终的测量值。从数学角度上讲, 多约束融合算法可看作一种高斯迭代算法, 利用多次迭代逼近, 从而得到特定目标函数的最优解。

3.5 多摄像机视觉测量

以距离约束算法为例, 对多摄像机测量系统的原理进行分析。从多摄像机测量系统获得的图像具有不同的内、外方位参数和畸变系数, 可表示为矩阵矢量形式: $\mathbf{b}_{\text{diff}} = [t_1, X_{11}, X_{\text{adi}}, \dots, t_i, X_{1i}, X_{\text{adi}}, \dots, t_{\text{max}}, X_{1\text{max}}, X_{\text{admax}}]^T$

假设第 i 像面上的 3 类像点: 靶标点、待测点、已知距离控制点的数目分别是: $n_1, n_2, 2n_3$, 那么该像面上对应于距离约束条件方程的联系数向量可表示为: $K = [k_1, k_2, k_3, \dots, k_\lambda, \dots, k_{n_3}]$, 不同的像面上 n_1, n_2, n_3 的数值不同。根据公式(10)和矩阵矢量 \mathbf{b}_{diff} 的形式, 考虑所有像面上的像点方程, 得目标方程如下:

$$\begin{bmatrix} [(N_{11})_{\text{all}}]_1 & [(N_{13})_{\text{all}}]_1 & [(N_{14})_{\text{all}}]_1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & [(N_{15})_{\text{all}}]_1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & [(N_{15})_{\text{all}}]_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & [(N_{11})_{\text{all}}]_{\text{max}} & [(N_{13})_{\text{all}}]_{\text{max}} & [(N_{14})_{\text{all}}]_{\text{max}} & [(N_{15})_{\text{all}}]_{\text{max}} \\ [(N_{51})_{\text{all}}]_1 & [(N_{53})_{\text{all}}]_1 & [(N_{54})_{\text{all}}]_1 & \cdots & [(N_{51})_{\text{all}}]_{\text{max}} & [(N_{53})_{\text{all}}]_{\text{max}} & [(N_{54})_{\text{all}}]_{\text{max}} & [(N_{15})_{\text{all}}]_{\text{sys}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dt_1 \\ dX_{11} \\ dX_{\text{adi}} \\ \vdots \\ dt_{\text{max}} \\ dX_{1\text{max}} \\ dX_{\text{admax}} \\ K \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \left(\sum_j^{n_1} \mathbf{W}_1 + \sum_j^{n_2} (\mathbf{W}_1 - \mathbf{N}_{12} \mathbf{N}_{22}^{-1} \mathbf{W}_2) + \sum_j^{n_3} (\mathbf{W}_1 - \mathbf{N}_{12} \mathbf{N}_{22}^{-1} \mathbf{W}_2) \right)_1 \\ \left(\sum_j^{n_1} \mathbf{W}_1 + \sum_j^{n_2} (\mathbf{W}_1 - \mathbf{N}_{12} \mathbf{N}_{22}^{-1} \mathbf{W}_2) + \sum_j^{n_3} (\mathbf{W}_1 - \mathbf{N}_{12} \mathbf{N}_{22}^{-1} \mathbf{W}_2) \right)_2 \\ \vdots \\ \left(\sum_j^{n_1} \mathbf{W}_1 + \sum_j^{n_2} (\mathbf{W}_1 - \mathbf{N}_{12} \mathbf{N}_{22}^{-1} \mathbf{W}_2) + \sum_j^{n_3} (\mathbf{W}_1 - \mathbf{N}_{12} \mathbf{N}_{22}^{-1} \mathbf{W}_2) \right)_{\max} \\ \sum_j^{\max} (\mathbf{W}_5)_j \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, $N_{11} = A_r A_r^T$, $N_{13} = A_r C_r^T$, $N_{14} = A_r D_r^T$, $\mathbf{W}_1 = A_r^T L_r$, $\mathbf{W}_2 = B_r^T L_r$, $L_r = [F_u(\mathbf{b}^0) - u^0 \ F_v(\mathbf{b}^0) - v^0]^T$,

$$A_r = \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial F_u}{\partial t} \\ \frac{\partial F_v}{\partial t} \end{bmatrix} \right|_{t^0} = \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial F_u}{\partial x_0} & \frac{\partial F_u}{\partial y_0} & \frac{\partial F_u}{\partial z_0} & \frac{\partial F_u}{\partial \phi} & \frac{\partial F_u}{\partial \theta} & \frac{\partial F_u}{\partial \psi} \\ \frac{\partial F_v}{\partial x_0} & \frac{\partial F_v}{\partial y_0} & \frac{\partial F_v}{\partial z_0} & \frac{\partial F_v}{\partial \phi} & \frac{\partial F_v}{\partial \theta} & \frac{\partial F_v}{\partial \psi} \end{bmatrix} \right|_{t^0}$$

$$B_r = - \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial F_u}{\partial X_C} \\ \frac{\partial F_v}{\partial X_C} \end{bmatrix} \right|_{x_C^0} = - \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial F_u}{\partial x_w} & \frac{\partial F_u}{\partial y_w} & \frac{\partial F_u}{\partial z_w} \\ \frac{\partial F_v}{\partial x_w} & \frac{\partial F_v}{\partial y_w} & \frac{\partial F_v}{\partial z_w} \end{bmatrix} \right|_{x_C^0}$$

$$C_r = \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial F_u}{\partial X_l} \\ \frac{\partial F_v}{\partial X_l} \end{bmatrix} \right|_{x_l^0} = \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial F_u}{\partial f} & \frac{\partial F_u}{\partial u_0} & \frac{\partial F_u}{\partial z_w} \\ \frac{\partial F_v}{\partial f} & \frac{\partial F_v}{\partial u_0} & \frac{\partial F_v}{\partial z_w} \end{bmatrix} \right|_{x_l^0}$$

$$D_r = \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial F_u}{\partial X_{ab}} \\ \frac{\partial F_v}{\partial X_{ab}} \end{bmatrix} \right|_{x_{ab}^0} = \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial F_u}{\partial k_1} & \frac{\partial F_u}{\partial k_2} & \frac{\partial F_u}{\partial k_3} & \frac{\partial F_u}{\partial p_1} & \frac{\partial F_u}{\partial p_2} \\ \frac{\partial F_v}{\partial k_1} & \frac{\partial F_v}{\partial k_2} & \frac{\partial F_v}{\partial k_3} & \frac{\partial F_v}{\partial p_1} & \frac{\partial F_v}{\partial p_2} \end{bmatrix} \right|_{x_{ab}^0}$$

式中 $[(N_{11})_{\text{all}}]_i$, $[(N_{13})_{\text{all}}]_i$, $[(N_{14})_{\text{all}}]_i$ 分别代表第 i 台相机所拍图像的外方位参数微分量 dt_i , 内方位参数微分量 dX_{li} 和畸变系数微分量 dX_{ri} 的偏导数, $[(N_{15})_{\text{all}}]_i$ 表示相对约束联系数矢量 K 的偏导数。

首先利用公式(3)直接线性变换(DLT)计算得到 \mathbf{b}_{diff} 的初始值 $\mathbf{b}_{\text{diff}}^0$, 然后利用公式(15)计算偏微分矢量 $d\mathbf{b}_{\text{diff}}$ 和联系数矢量 K 的值, 计算普通待测点和相对约束点的 3D 坐标修正值 dX_C 和 $d\mathbf{X}_C$, 经过一次迭代后, 摄像机方位参数和物点空间坐标值为:

$$\begin{cases} \mathbf{b}_{\text{diff}}^{k+1} = \mathbf{b}_{\text{diff}}^k + d\mathbf{b}_{\text{diff}} \\ X_C^{k+1} = X_C^k + dX_C \\ \mathbf{X}_{\text{crd}}^{k+1} = \mathbf{X}_{\text{crd}}^k + d\mathbf{X}_{\text{crd}} \end{cases} \quad (15)$$

将 $\mathbf{b}_{\text{diff}}^{k+1}$, X_C^{k+1} , $\mathbf{X}_{\text{crd}}^{k+1}$ 代入误差方程(9)再一次

计算所有像点的误差平方和, 与上次迭代误差平方和相比较, 如果小于上次迭代的误差平方和, 那么就将本次结果作为下次迭代运算的初始值, 重新计算像面的方位参数和物点的空间坐标, 一直到像点误差平方和不再变小, 停止迭代, 得到的物点坐标即为最终的测量结果。

3.6 算法流程图

基于上述理论, 基于多约束融合算法的多摄像机测量系统的算法流程如图 2 所示。

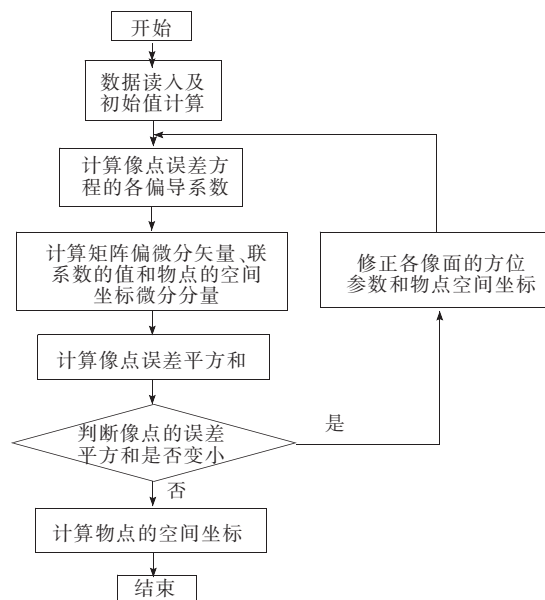


图 2 多摄像机视觉测量系统的多约束融合算法流程图

Fig. 2 Flow chart of constraint fusion algorithm in multi-camera vision measurement system

4 实验结果及分析

测量精度为衡量测量系统好坏的主要性能指标, 条件约束控制场为对比试验提供了两个标准:

特征点的空间坐标和条件约束, 其中的条件约束包括: 已知标准距离、三点共线和四点共面等信息, 测量视场内的条件约束信息和靶点坐标是通过美国 GIS 公司的 V-STARS 测量系统完成的。

为了验证本系统的测量精度和算法的有效性, 采用了两台 MC-1362 相机在两不同站位对测量视场进行拍摄, 视场中粘贴了自反射点作为被测点, 如图 3 所示, 自反射点可增加图像的信噪比, 有利于点中心的提取。相机的参数指标如表 1 所示。

将已知靶点的空间坐标以及 CCD 像面上的像点坐标代入公式(1), 得到两摄像机内外方位参数的初始值, 利用已知的约束条件分别得到相应的约束方程, 然后利用目标函数(13)经过多次迭代优化, 得到各待测点的空间坐标和相机的内外方位参数和畸变系数。经实验验证, 在本系统的测量中, 同时应用 3 种约束的测量精度要高于一种约束的测量精度^[7], 改变 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 的权值, 当 $\sigma_1=5, \sigma_2=1, \sigma_3=1$ 时, 得到了比较理想迭代优化结果。本算法的测量结果与传统束调整算法进行了对比, 得出的结论为: (1) RMS 表示测量误差的离散程度, 其值越小, 说明测量结果越精确, 从表 2 可看出, 本算法的精度要高于束调整算法的

精度; (2) 表 3 中列出了本算法和束调整算法对控制场内标准距离的测量结果, 通过测距误差与标准距离的比值, 可以看出本算法的测距相对精度为 1:7 000~1:15 000, 传统束调整算法的相对精度为 1:500~1:1 000, 测量精度相对传统束调整算法高出了一个数量级, 同时也优于文献中距离约束算法的测量精度(1:2 000)。

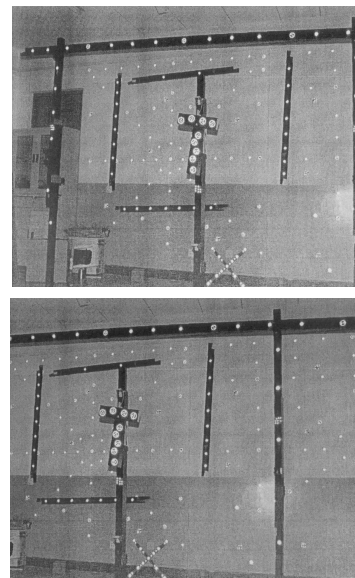


图 3 带有靶标和约束的待测场景图片

Fig. 3 Scene images with targets and constraints

表 1 MC-1362 相机参数

Table 1 Parameters of MC-1 362 camera

相机型号	像元数	像元尺寸	帧频	焦距	视场角	数据接口
MC-1362	1 280×1 024	12 μm×12 μm	≤500 fps	28.7 mm	30°×24°	CameraLink-BASE

表 2 测量物点的空间坐标比对

Table 2 Space coordinates compare of object points measured

误差分析	基于多约束融合的测量算法				传统的束调整算法			
	X/mm	Y/mm	Z/mm	点位误差/mm	X/mm	Y/mm	Z/mm	点位误差/mm
RMS 误差	0.15	0.22	0.21	0.34	0.19	0.64	1.03	1.23

表 3 实测距离与标准距离的比对

Table 3 Distance measured compare with the standard distance

像点标号	标准距离	基于多约束融合的测量算法		传统的束调整算法	
		测距误差/mm	实测距离/mm	测距误差/mm	实测距离/mm
15,20	847.508	847.392	-0.116	846.331	-1.177
19,68	2 066.031	2 066.137	0.106	2 063.514	-2.517
34,55	1 209.202	1 209.299	0.097	1 210.548	1.346
78,54	3 351.683	3 351.447	-0.236	3 354.969	3.286
94,33	3 027.903	3 027.652	-0.251	3 030.727	2.824

5 结 论

多摄像机视觉测量系统能够应用于物体形面的动态变形或震动情况的测量。本文融合了距离、三点共线和四点共面三种约束,提出了一种基于多约束的多摄像机三维测量方法,文中对该测量理论进行了详细的理论推导,通过 RMS 误差和测距相对精度对测量精度进行了定量分析,测距相对精度达到了 1:7 000~1:15 000,相对于单一

距离约束的的测量方法^[7],测量精度得到了很大地提高,与传统的束调整算法相对比,精度提高了一个数量级。

但是,该方法依然存在一些缺陷:(1)需要比较可靠的初始值估计;(2)需要经过一定的实验设定 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 的权值。将来应该对初始值的计算和自动优化 σ 权值做进一步的研究,将协同优化算法应用到最优解得求解中,以获取待测物点的高精度三维坐标值。

参 考 文 献:

- [1] Lv N G , Deng W Y , Wang Y Q . Profile measurement of microwave antenna using close range photogrammetry [C]// *Proceedings of SPIE* , Washington : SPIE-The International Society for Optical Engineering , 2005 , 5852 : 508-515 .
- [2] Frank Chen , Gordon M . Brown , Mumin Song . Over-view of three-dimensional shape measurement using optical methods [J] . *Optical Engineering* , January , 2000 , 39 (1) : 10-21 .
- [3] Clive Fraser . Automated vision metrology : A mature technology for industrial inspection and engineering surveys [C]// *6th South East Asian Surveyors Congress* , Fremantle , Western Australia , SEASC , 1999 : 1-6 .
- [4] Hung Y Y , Lin L , Park B G . Practical 3D computer vision techniques for full-field surface measurement[J] . *Optical Engineering* , 2000 , 39(1) : 143-149 .
- [5] Sangsoni G , Carocci M , Rodella A R . Calibration and performance evaluation of a 3D imaging sensor based on the projection of structured light[J] . *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* , 2000 , 49(3) : 628-636 .
- [6] 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) : 126-133 .
- [7] 王永强 , 吕天剑 , 吕乃光 . 距离约束算法在微波天线面形测量中的应用 [J] . *电子测量与仪器学报* , 2007 , 21(1) : 57-60
- [8] 陈刚 , 姚英学 . 多视点大空间三维坐标数据归一化方法[J] . *光学精密工程* , 2008 , 16(7) : 1309-1314 .
- [9] 李喆 , 丁振良 , 袁峰 . 基于共面点的多视觉测量系统的全局标定[J] . *光学精密工程* , 2008 , 16(3) : 467-471 .
- [10] 张浩 , 李大海 , 王琼华 , 等 . 自由立体显示拍摄系统中摄像机空间自由度的确定[J] . *液晶与显示* , 2010 , 25(2) : 287-291 .
- [11] 叶东 , 徐巧玉 , 车仁生 . 视觉测量系统的相机校准[J] . *光学精密工程* , 2006 , 14(5) : 883-889 .