

多目立体视觉测量网络节点的位姿优化方法

乔玉晶*, 高胜彪, 皮彦超

哈尔滨理工大学机器人技术及工程应用研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 提出了一种测量网络节点位姿的优化方法。建立了网络节点参数的数学模型, 分析了位姿参数对测量精度的影响机理, 仿真获得了位姿参数最优取值范围和优化初解。对标定板上标志点间距离进行三维视觉测量, 结果表明, 优化处理后测量相对误差约降低了 0.6%。

关键词 机器视觉; 多目立体视觉; 测量网络; 测量精度; 节点位姿; 优化

中图分类号 TP242

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.051501

Optimization Method of Node Pose for Measurement Network Based on Multi-View Stereo Vision

Qiao Yujing*, Gao Shengbiao, Pi Yanchao

Robotics & Its Engineering Research Center, Harbin University of Science and Technology,
Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract An optimization method for measuring network node pose is proposed. The mathematical model of network node parameters is established, the influence mechanism of pose parameters on the measurement accuracy is analyzed, and the optimal range and optimal initial solution of pose parameters are obtained by simulation. Distance between the mark points on calibration plate is measured by three-dimensional vision. Experimental results show that the relative error of measurement after the optimization is reduced by 0.6%.

Key words machine vision; multi-view stereo; measurement network; measurement accuracy; node pose; optimization

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.3040

1 引言

随着大尺寸装备视觉测量问题的提出, 基于多视觉组网测量方法开始应用于大型结构的三维测量。多目立体视觉组网测量技术通过在不同位置和方位放置视觉传感器, 对待测物体实施拍摄, 并通过标定、特征匹配及三维重建等技术实现测量目标的三维测量。多目视觉测量网络由多个单目视觉传感器组成, 其测量原理基于双目立体视觉视差原理, 因此多视觉测量网络模型可以拆解成多组双目视觉测量单元, 每个单元为网络中的一组节点^[1-2]。

在不同方位对待测物体实施三维测量时, 应用智能算法自动规划测量环境与测量物体, 可以实现

测量网络中视觉传感器的节点布局和最佳位姿信息获取^[3]。针对视觉传感器的组网规划方法, 国内外学者进行了广泛研究。Olague 等^[4]利用模糊控制理论分析了摄影测量网络布局中的约束条件, 并在知识库中建立了相应的约束模型, 该方法复杂且不完善; 乌萌等^[5]提出了一种基于遗传算法和网格划分的传感器网络布局优化方法, 该方法过于复杂, 数据交换繁琐; Shi 等^[6-7]针对视觉传感器规划问题提出了一种实时反馈系统, 解决了测量对象表面曲率和材质不均匀时, 需要在数学建模过程中考虑反光和阴影等因素的问题, 该方法需结合被测物的 CAD 模型实现; 陈佳毅等^[8]根据大型槽式聚光器的高测量精度要求, 提出了一种基于遗传算法的摄影测量

收稿日期: 2018-07-09; 修回日期: 2018-08-07; 录用日期: 2018-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(51675142)

* E-mail: qiaoyujing@sina.com

网络规划方法,该方法的被测物单一,没有推广到更多的应用场景中;乔玉晶等^[9]提出的兼顾测量覆盖率和三维不确定度的智能组网规划方法实现了多视觉精确组网,该方法应用单个相机进行多个站点实验,没有验证多个相机的情况。

上述方法均以实现多视觉自动组网规划为目的,用来实现大型结构精确地三维测量,但在组网规划过程中,多视觉组网测量系统的精度由目标点的三维不确定度决定,其为随机误差,而规划过程忽略了节点位姿参数所导致的系统误差,对于精密测量,该误差会导致测量结果达不到所需精度要求。为解决该问题,本文通过建立网络节点参数的数学模型,系统分析测量网络节点位姿参数对测量精度的影响机理及分布情况,并通过实验验证理论的准确性,为

大型结构的精密测量提供技术依据。

2 测量网络节点位姿参数分析

随机提取测量组网中的一组节点,该节点为基于视差原理的双目视觉测量单元,计算成像平面上特征点坐标,求取特征点对应的空间三维坐标。节点位姿参数包括视觉传感器的投影角、光轴与基线夹角及镜头焦距等,在一定程度上对测量精度起制约作用,为保证视觉测量网络系统的高精度,必须分析网络节点的位姿参数。

2.1 数学模型

为定性分析测量网络节点位姿参数对测量精度的影响,首先建立双目视觉位姿参数的数学模型,如图1所示。

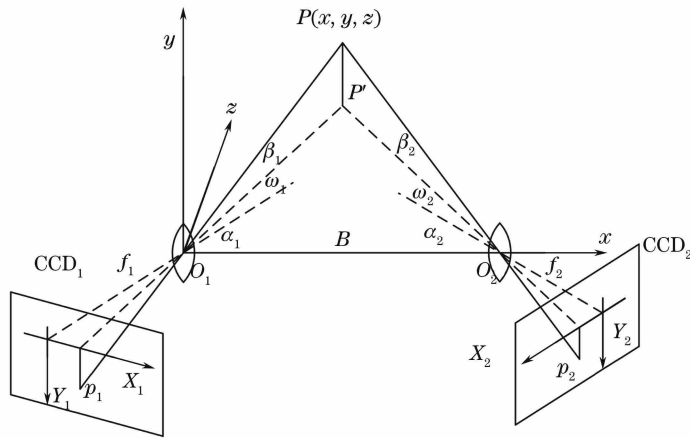


图1 双目视觉系统测量原理示意图

Fig. 1 Measurement principle of binocular stereo vision system

图1中 CCD₁ 和 CCD₂ 为两台视觉传感器, O₁ 和 O₂ 分别为两视觉传感器光心,以 CCD₁ 的光心 O₁ 为原点建立坐标系 O₁-xyz,定义沿 O₁ 与 O₂ 的连线方向为系统 x 轴方向,两视觉传感器水平摆放,以 CCD₁ 的坐标系为标准,则点 P 坐标为

$$\begin{cases} x = \frac{B \cdot \cot(\omega_1 + \alpha_1)}{\cot(\omega_1 + \alpha_1) + (\omega_2 + \alpha_2)} \\ y = \frac{z \cdot Y_1}{f_1} \cdot \frac{\cos \omega_1}{\sin(\omega_1 + \alpha_1)} = \frac{z \cdot Y_2}{f_2} \cdot \frac{\cos \omega_2}{\sin(\omega_2 + \alpha_2)} \\ z = \frac{B}{\cot(\omega_1 + \alpha_1) + \cot(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: B 为 CCD₁ 和 CCD₂ 之间的基线距;点 P(x, y, z) 为待测目标点; P' 为 P 点在 xO₁z 平面上的投影; (X₁, Y₁) 和 (X₂, Y₂) 分别为 P 在两视觉传感器图像平面上的投影点坐标; ω₁ 和 ω₂ 分别为两视觉

传感器的水平投影角; β₁ 和 β₂ 分别为两视觉传感器的俯仰角; α₁ 和 α₂ 分别为两视觉传感器光轴与基线间夹角; f₁ 和 f₂ 分别为两视觉传感器的有效焦距; tan β₁ = Y₁/f₁ · cos ω₁, tan β₂ = Y₂/f₂ · cos ω₂, tan ω₁ = X₁/f₁, tan ω₂ = X₂/f₂。

由(1)式可知,测量网络节点位姿参数主要由传感器光轴与基线间夹角、物距、投影角和基线距等构成,这些参数之间存在相互制约关系,所以有必要从测量网络的节点位姿参数入手,对测量精度指标进行分析。

2.2 双目视觉系统测量误差

测量网络的节点位姿参数直接影响系统最终精度,为进一步分析,可将(1)式表示为

$$P(x, y, z) = F(B, \alpha_1, \alpha_2, f_1, f_2, X_1, X_2, Y_1, Y_2), \quad (2)$$

式中 P(x, y, z) 为测量目标点坐标, F(·) 为系统结构参数的函数。

由(1)式可得空间目标点 P 在 x 轴方向上的误差传递系数,其表达式为

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial X_1} = -\frac{Z^2}{B \cdot f_1} \cdot \frac{\cot(\omega_2 + \alpha_2)}{\sin^2(\omega_1 + \alpha_1)} \cdot \cos^2 \omega_1 \\ \frac{\partial x}{\partial X_2} = -\frac{Z^2}{B \cdot f_2} \cdot \frac{\cot(\omega_1 + \alpha_1)}{\sin^2(\omega_2 + \alpha_2)} \cdot \cos^2 \omega_2 \end{cases} \quad (3)$$

P 在 y 轴方向上的误差传递系数为

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial X_1} = \frac{yz}{B \cdot f_1} \cdot \frac{\cos^2 \omega_1}{\sin^2(\omega_1 + \alpha_1)} \\ \frac{\partial y}{\partial X_2} = \frac{yz}{B \cdot f_2} \cdot \frac{\cos^2 \omega_2}{\sin^2(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial Y_1} = \frac{z}{f_1} \cdot \frac{\sin \omega_1}{\sin(\omega_1 + \alpha_1)} \\ \frac{\partial y}{\partial Y_2} = \frac{z}{f_2} \cdot \frac{\sin \omega_2}{\sin(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (5)$$

P 在 z 轴方向上的误差传递系数为

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial X_1} = \frac{z^2}{B \cdot f_1} \cdot \frac{\cos^2 \omega_1}{\sin^2(\omega_1 + \alpha_1)} \\ \frac{\partial z}{\partial X_2} = \frac{z^2}{B \cdot f_2} \cdot \frac{\cos^2 \omega_2}{\sin^2(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (6)$$

根据(2)~(6)式可得, P 点在 x 轴方向上的合成误差为

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial X_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial X_2}\right)^2} \quad (7)$$

P 在 y 轴方向上的合成误差为

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial X_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial X_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Y_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Y_2}\right)^2} \quad (8)$$

P 在 z 轴方向上的合成误差为

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial X_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial X_2}\right)^2} \quad (9)$$

根据误差理论的合成与分配原理,可以将 x 、 y 、 z 三个方向上的测量误差合成综合误差 Δ ,即

$$\Delta = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} = \sqrt{\sum_j \sum_i \left(\frac{\partial F}{\partial \delta_i} \cdot \delta_i\right)^2}, \quad (10)$$

式中: i 表示各个位姿参数; j 表示 x 、 y 、 z 三个方向; δ_i 为各种误差的系数。为了研究方便,暂不考虑其他误差因素的影响。

3 位姿参数对测量精度的影响分析

在综合误差模型中,分别对每一个有效的位姿参数分离变量进行系统仿真分析,进一步得出每个

位姿参数对测量系统精度的影响程度,并根据分析结果确定节点位姿参数的最优选取范围。

3.1 投影角对测量精度影响机理分析

投影角为主要的测量网络节点位姿参数,包括水平投影角及仰俯投影角,其直接限制测量目标点 P 的空间位置,由(1)~(9)式可知,随着仰俯投影角 β_1 和 β_2 的增大,综合测量误差单调增大,则当两视觉传感器的仰俯投影角取最大值时,其引起的综合测量误差最大。当仰俯投影角固定时,水平投影角的变化可以确定空间有效视场中 P 的位置,进而定性分析不同位置下投影角引起的综合测量误差分布情况。

由于综合测量误差随仰俯投影角的增大而单调增大,为证明该结论,分别选取 $\beta_1 = \beta_2 = 10^\circ$, $\beta_1 = \beta_2 = 20^\circ$, $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$, $\beta_1 = \beta_2 = 40^\circ$, $\beta_1 = \beta_2 = 50^\circ$, $\beta_1 = \beta_2 = 60^\circ$,并置光轴与基线间夹角保持不变,根据(1)~(9)式可以得出,两视觉传感器的水平投影角 ω_1 和 ω_2 对综合测量误差的影响,结果如图 2 所示。

由图 2 可知,当水平投影角为 $[20^\circ, 70^\circ]$ 与 $[70^\circ, 90^\circ]$ 时,综合测量误差变化较大,而水平投影角为 $[20^\circ, 70^\circ]$ 时,综合测量误差变化相对较小;当水平投影角 $\omega_1 = \omega_2$ 时,可显示一定规律性,即系统综合误差分布沿两视觉传感器的水平投影角相等的方向呈先减小后增大的趋势。为了使水平投影角引起的系统综合误差分布相对较小,应选取两视觉传感器的水平投影角为 $[20^\circ, 70^\circ]$ 。

3.2 光轴与基线夹角对测量精度的影响机理分析

双目视觉测量过程中,可以通过光轴与基线间的夹角 α_1 和 α_2 改变两视觉传感器的姿态。为了满足视觉传感器的安装与调试要求,其光轴与基线间的夹角不一定相等,即 $\alpha_1 \neq \alpha_2$,这是一种普遍情况,因此有必要系统分析该情况下光轴与基线间夹角对测量精度的影响。

为了简化计算过程,在 $\alpha_1 \neq \alpha_2$ 的情况下,令 $\beta_1 = \beta_2 = 10^\circ$, $\beta_1 = \beta_2 = 20^\circ$, $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$, $\beta_1 = \beta_2 = 40^\circ$, $\beta_1 = \beta_2 = 50^\circ$, $\beta_1 = \beta_2 = 60^\circ$,根据(1)~(9)式可得两视觉传感器的光轴与基线间夹角对综合测量误差的影响,结果如图 3 所示。

根据图 3 可知,当两视觉传感器的水平投影角分布在 $[20^\circ, 70^\circ]$ 时,系统综合测量误差相对较小,结合(3)~(10)式,计算该范围的水平投影角,规划光轴与基线间夹角的取值范围,得到综合测量误差随光轴与基线间夹角的分布曲线,结果如图 4 所示。

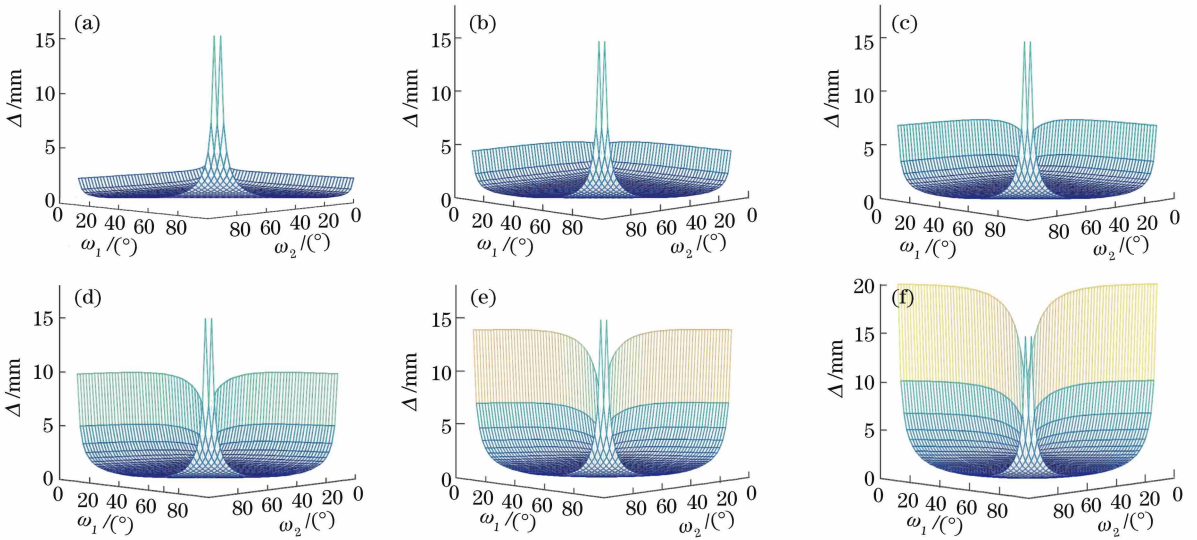


图2 水平投影角对系统精度的影响。(a) $\beta_1 = \beta_2 = 10^\circ$; (b) $\beta_1 = \beta_2 = 20^\circ$; (c) $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$;
(d) $\beta_1 = \beta_2 = 40^\circ$; (e) $\beta_1 = \beta_2 = 50^\circ$; (f) $\beta_1 = \beta_2 = 60^\circ$

Fig. 2 Influence of horizontal projection angle on system accuracy. (a) $\beta_1 = \beta_2 = 10^\circ$; (b) $\beta_1 = \beta_2 = 20^\circ$;
(c) $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$; (d) $\beta_1 = \beta_2 = 40^\circ$; (e) $\beta_1 = \beta_2 = 50^\circ$; (f) $\beta_1 = \beta_2 = 60^\circ$

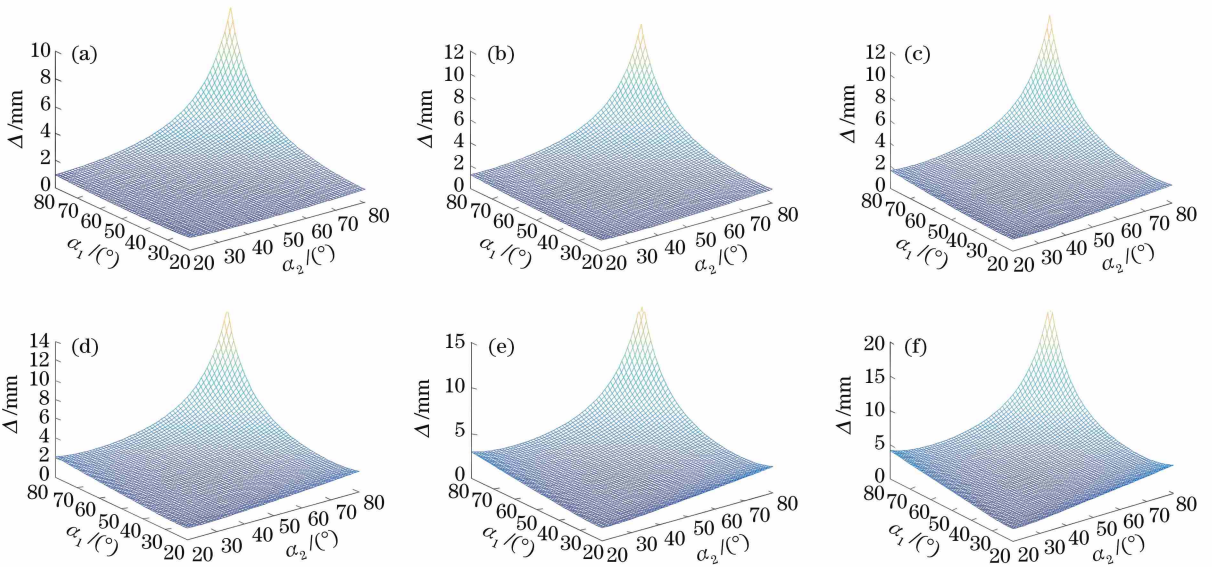


图3 光轴与基线间夹角对系统精度的影响。(a) $\beta_1 = \beta_2 = 10^\circ$; (b) $\beta_1 = \beta_2 = 20^\circ$; (c) $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$;
(d) $\beta_1 = \beta_2 = 40^\circ$; (e) $\beta_1 = \beta_2 = 50^\circ$; (f) $\beta_1 = \beta_2 = 60^\circ$

Fig. 3 Influence of angle between optical axis and baseline on system accuracy. (a) $\beta_1 = \beta_2 = 10^\circ$; (b) $\beta_1 = \beta_2 = 20^\circ$;
(c) $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$; (d) $\beta_1 = \beta_2 = 40^\circ$; (e) $\beta_1 = \beta_2 = 50^\circ$; (f) $\beta_1 = \beta_2 = 60^\circ$

由图4可知,当摄像机光轴与基线间夹角为 $[0, 70^\circ]$ 时,综合测量误差不断变化,为了使综合测量误差在整个测量视场范围中均匀分布,可以控制光轴与基线间夹角为 $[20^\circ, 55^\circ]$,此时综合测量误差相对较小。

3.3 基线距对测量精度影响机理分析

基线距 B 为限制测量网络中各视觉传感器间位置关系的重要参数,其直接决定系统测量精度。在视觉测量过程中,测量精度受基线距 B 的影响比

较复杂,当 B 增大时,参数 $\alpha + \omega$ 呈减小趋势,所以 B 对测量精度的影响是非线性的。为了简化分析,设定 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha, \beta_1 = \beta_2 = 0, \omega_1 = \omega_2 = 0$,可得 P 点的三维坐标传递系数为

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial X_1} = -\frac{z^2}{B \cdot f} \cdot \frac{\cot \alpha}{\sin^2 \alpha} \\ \frac{\partial x}{\partial X_2} = -\frac{z^2}{B \cdot f} \cdot \frac{\cot \alpha}{\sin^2 \alpha} \end{cases}, \quad (11)$$

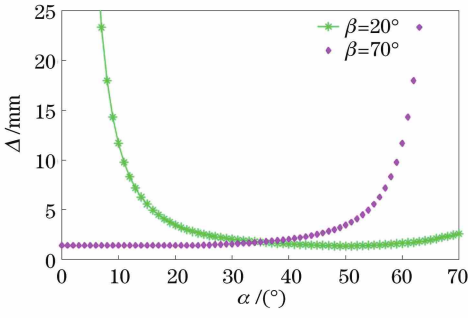


图4 系统精度随光轴与基线间夹角的变化曲线
Fig. 4 Curves of system accuracy varies with angle between optical axis and baseline

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial X_1} = \frac{z^2}{B \cdot f} \cdot \frac{1}{\sin^2 \alpha} \\ \frac{\partial z}{\partial X_2} = \frac{z^2}{B \cdot f} \cdot \frac{1}{\sin^2 \alpha} \end{cases}, \quad (12)$$

令 $k=B/z$, (11)式与(12)式可以转换为

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial X_1} = \frac{\partial x}{\partial X_2} = -\frac{z}{k \cdot f} \cdot \frac{\cot \alpha}{\sin^2 \alpha} \\ \frac{\partial z}{\partial X_1} = \frac{\partial z}{\partial X_2} = \frac{z}{k \cdot f} \cdot \frac{1}{\sin^2 \alpha} \end{cases}. \quad (13)$$

$$\text{令 } e_1 = \frac{1}{k} \cdot \frac{\cot \alpha}{\sin^2 \alpha}, e_2 = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\sin^2 \alpha}, e_3 =$$

$\sqrt{(e_1)^2 + (e_2)^2}$, 经过泰勒公式展开后, $e_1 = \frac{1}{k} \cdot$

$\frac{\cot \alpha}{\sin^2 \alpha} = \frac{1}{2} + \frac{k^2}{8}, e_2 = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\sin^2 \alpha} = \frac{1}{k} + \frac{k}{4}, \alpha$ 为两视觉传感器光轴与基线间夹角, 因此有

$$\frac{\partial x}{\partial X_1} = \frac{\partial x}{\partial X_2} = -\frac{z}{k \cdot f} \cdot \frac{\cot \alpha}{\sin^2 \alpha} = -\frac{z}{f} e_1, \quad (14)$$

$$\frac{\partial z}{\partial X_1} = \frac{\partial z}{\partial X_2} = \frac{z}{k \cdot f} \cdot \frac{1}{\sin^2 \alpha} = \frac{z}{f} e_2, \quad (15)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial X_1} = \frac{\partial x}{\partial X_2} = -\frac{z}{k \cdot f} \cdot \frac{\cot \alpha}{\sin^2 \alpha} \\ \frac{\partial z}{\partial X_1} = \frac{\partial z}{\partial X_2} = \frac{z}{k \cdot f} \cdot \frac{1}{\sin^2 \alpha} \end{cases}. \quad (16)$$

由上述公式可知, 目标点 P 在 x 方向上的测量误差为

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial X_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial X_2}\right)^2} = \frac{\sqrt{2} \cdot z}{f} \cdot e_1, \quad (17)$$

在 z 方向上的测量误差为

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial X_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial X_2}\right)^2} = \frac{\sqrt{2} \cdot z}{f} \cdot e_2, \quad (18)$$

则目标点 P 的综合测量误差为

$$\Delta = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{\partial x}{\partial X_1}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial X_2}\right)^2} = \frac{\sqrt{2} \cdot z}{f} \cdot e_3. \quad (19)$$

由此可知, 对于稳定有效的双目视觉测量系统, 参数 z 和 f 保持不变, e_1 与 Δx 成正比, e_2 与 Δz 成正比, e_3 反映综合测量误差的分布情况, 图5为基线距 B 对双目视觉系统测量精度的影响分布曲线。由图5可以看出, 若 P' 位置保持不变, 即 z 为固定值, 当 $0.7 < k < 2.5$ 时, 系统精度受基线距的影响相对较小; 当 $k < 0.5$ 和 $k > 2.5$ 时, 系统精度受基线距的影响较大, 通过 Matlab 仿真得出 $k=1.4$ 时, 系统综合测量误差取得最小值, 表明此时测量网络节点位姿参数选取最合适。但在实际测量环境中, 基线距的选取直接受到测量空间及成本等因素制约。

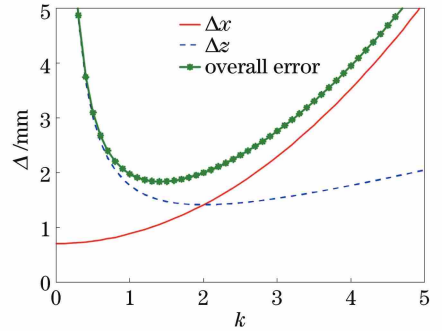


图5 测量精度随基线距的变化曲线
Fig. 5 System accuracy varies with baseline distance

3.4 焦距对测量精度影响的机理分析

镜头焦距主要用来确定视觉传感器的视场角大小和工作距离, 不同的镜头焦距可以为测量要求提供不同的视场角和测量距离, 所以焦距不同直接影响双目视觉测量系统的测量精度^[10]。为了定性分析镜头焦距对双目视觉测量系统精度的影响, 根据(1)式可进一步推导两视觉传感器的镜头焦距 f_1 和 f_2 的误差传递函数, 即

$$\psi_{f_1} = \frac{B \sin(\alpha_2 + \omega_2)}{f_1 \cdot \lambda^2} \cdot \sqrt{\cos^2 \omega_1 + \left[\rho_1 - \lambda \tau_1 \frac{\sin(\alpha_1 + \omega_1)}{\sin \omega_1} \right]^2 \sin^2(\alpha_1 + \omega_1)}, \quad (20)$$

$$\psi_{f_2} = \frac{B \sin(\alpha_1 + \omega_1)}{f_2 \cdot \lambda^2} \cdot \sqrt{\cos^2 \omega_2 + \left[\rho_2 - \lambda \tau_2 \frac{\sin(\alpha_2 + \omega_2)}{\sin \omega_2} \right]^2 \sin^2(\alpha_2 + \omega_2)}, \quad (21)$$

式中： τ_1, τ_2 和 λ 为焦距误差系数； $\rho_1 = \tau_1 [\lambda \cos \alpha_1 - \cos \omega_1 \cdot \sin(\alpha_2 + \omega_2)]$ ； $\rho_2 = \tau_2 [\lambda \cos \alpha_2 - \cos \omega_2 \cdot \sin(\alpha_1 + \omega_1)]$ 。

对(20)式和(21)式进一步分析得出不同镜头焦距的误差分布,结果如图6所示。其中 $\omega_1 = \omega_2 = 5^\circ, \beta_1 = \beta_2 = 30^\circ, \alpha_1 = \alpha_2 \in [20^\circ, 70^\circ]$ 。

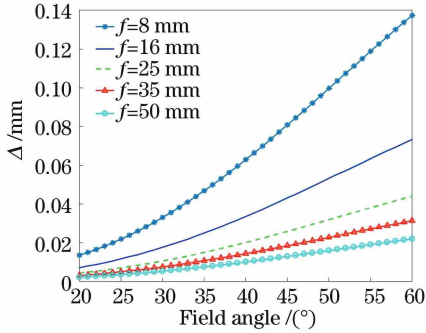


图6 镜头焦距和视场角对系统精度的影响

Fig. 6 Effect of lens focal length and angle of field on system accuracy

由图6可以看出,随镜头焦距的增大,综合测量误差呈增大趋势;镜头焦距直接影响视觉传感器的观测范围,在同一镜头焦距下,综合测量误差随视场角的增大而增大,因此,根据实际测量环境适当增大镜头焦距,可以有效提高测量精度。

4 测量实验与数据分析

4.1 测量实验系统构成

实验装置由测量单元、数据处理单元与测量对象组成,如图7所示,测量单元包括:两个视觉传感器组成的双目视觉测量系统,分辨率为1280 pixel×1536 pixel,像素尺寸为5.2 μm×5.2 μm,焦距为6~12 mm的手动变焦式镜头以及安装机架(用于搭载测量云台);数据处理系统选取 Win7 操作系统的笔记本电脑;测量对象为高精度黑白测量标定板。

为了直观验证测量网络节点位姿参数对测量精度的影响,在实验前,先将测量标定板调整到视觉传感器的景深范围内,然后在仿真分析结果最优范围内取定节点位姿参数,固定左、右两视觉传感器的位置与姿态,通过计算机控制视觉传感器并实施拍摄,将拍摄的图像传输到计算机中处理。图8所示为测量对象,为10×8的方格标定板,上面标有A、B、C三个标记点,通过精密测量仪器预先测得标记点间的距离, $L_{AB} = 152.36$ mm, $L_{AC} = 200.28$ mm, $L_{BC} = 198.64$ mm。保持两视觉传感器的光轴与基线夹角及其他影响条件不变,分别设置不同的基线距离,摄

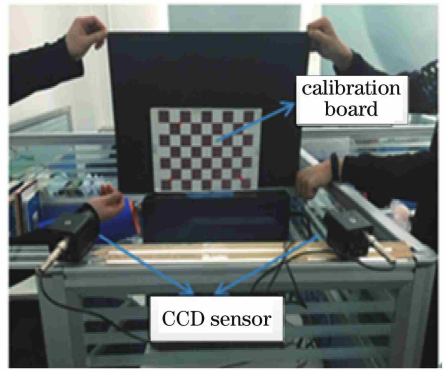


图7 实验平台

Fig. 7 Experiment platform

取不同基线距的双目相片,通过数据处理,计算得出实验标定板上测量点间的测量距离,与预先已知的实际距离相比较,分析对测量误差的影响,验证仿真结果的准确性。

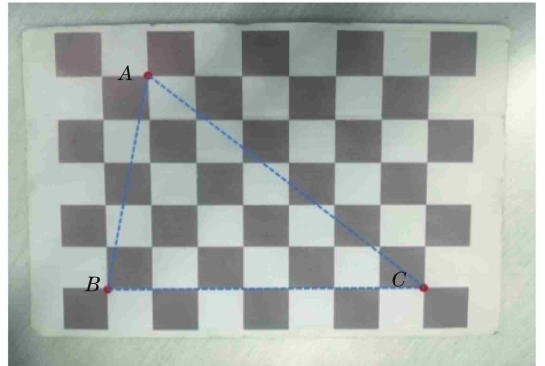


图8 实验标定板

Fig. 8 Experimental calibration plate

实验过程中,选定测量标定板的左下角角点作为世界坐标系原点,沿标定板底边向右和左边向上分别定义为X轴和Y轴正方向,Z轴正方向垂直于标定板向上。假设两个视觉传感器的内参数均为理想情况,即两视觉传感器的光心投影位置均在成像平面中心。

4.2 实验数据分析

根据实验方案,结合理论推导,验证测量网络节点位姿参数对测量精度的影响。理论分析结果已知,当 ω 为 $[20^\circ, 70^\circ]$, α 为 $[20^\circ, 50^\circ]$ 时,系统综合误差相对较小,并且误差分布较平缓。为了进一步简化实验,取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ, \omega_1 = \omega_2 = 30^\circ$ 摄像机焦距 $f = 8$ mm。对称式放置两视觉传感器,选取测量标定板上三个标志点组成三组线段距离,根据两视觉传感器的内外参数求得三个标志点的三维坐标,计算三组线段的距离并与真实距离相比较,得出相对误差平均值,至此,实现了改变系统结构参数分析测

量精度的变化情况。

由(1)~(10)式可知,节点位姿参数的变化与物距 z 直接相关,而 z 主要由 α 、 ω 和 B 构成,所以在实验过程中,取 $B=350$ mm 和 $B=300$ mm 进行实

表 1 基线距 $B=300$ mm 时的结果

Table 1 Experimental results with baseline distance $B=300$ mm

Real length /mm	Baseline length /mm	Random choice		Behind optimal choice	
		Measure length /mm	Relative error /%	Measure length /mm	Relative error /%
$L_{AB}=152.36$	300	149.86	1.6682	151.27	0.7206
$L_{AC}=200.28$	300	197.85	1.2282	199.34	0.4716
$L_{BC}=198.64$	300	196.45	1.1148	197.56	0.5467

表 2 基线距 $B=350$ mm 时的结果

Table 2 Experimental results with baseline distance $B=350$ mm

Real length /mm	Baseline length /mm	Random choice		Behind optimal choice	
		Measure length /mm	Relative error /%	Measure length /mm	Relative error /%
$L_{AB}=152.36$	350	150.96	0.9189	151.78	0.3807
$L_{AC}=200.28$	350	198.24	1.0186	199.34	0.4693
$L_{BC}=198.64$	350	196.31	1.1730	197.66	0.4934

由表 1 和表 2 结果可知,在测量网络节点位姿参数的优化分析中,主要参数在优化取值范围内取值,得到的测量精度明显高于随机选取位姿参数时所得到的精度指标,进而证明了本文优化方案的可行性。

5 结 论

多目视觉测量网络每个节点可拆分为一组双目立体视觉测量系统,从而建立测量网络节点的位姿参数数学模型。通过分析投影角、光轴与基线夹角、焦距、基线距等位姿参数对测量精度的影响,得到了多视觉组网测量的测量网络节点位姿参数的最优取值范围。仿真分析和实验结果证明了所提方法的正确性,利用优化后位姿参数的视觉测量系统精度明显提高,其相对误差降低了 0.6%。

参 考 文 献

- [1] Zhang X L, Yin S B, Ren Y J, *et al.* High-precision flexible visual measurement system based on global space control [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2805-2812.
张晓龙, 尹仕斌, 任永杰, 等. 基于全局空间控制的高精度柔性视觉测量系统研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2805-2812.
- [2] Wang Y, Liu C J, Yang X Y, *et al.* Online calibration of visual measurement system based on industrial robot [J]. *Robot*, 2011, 33(3): 299-302, 331.

验,分别在优化前、后的取值范围内选择结构参数,得出相应的测量长度并与真实值相比较,计算相对误差百分比,并作为实验验证的评判标准。具体测量结果如表 1 和表 2 所示。

- 王一, 刘常杰, 杨学友, 等. 工业机器人视觉测量系统的在线校准技术 [J]. *机器人*, 2011, 33(3): 299-302, 331.
- [3] Yan X X, Sun R, Lü G Q. Visual sensor networks and its key techniques [J]. *China New Telecommunications*, 2008, 10(7): 19-22.
闫晓星, 孙锐, 吕国强. 视觉传感器网络及其关键技术 [J]. *中国新通信*, 2008, 10(7): 19-22.
- [4] Olague G, Mohr R. Optimal camera placement for accurate reconstruction [J]. *Pattern Recognition*, 2002, 35(4): 927-944.
- [5] Wu M, Zhang X D, Duan W C. Wide image mosaic and measure algorithm of MMS [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2016, 33(4): 415-420.
乌萌, 张晓东, 段渭超. 移动测量系统宽幅影像的几何拼接与量测 [J]. *测绘科学技术学报*, 2016, 33(4): 415-420.
- [6] Shi Q, Xi N, Spagnuolo C. A feedback design to a CAD-guided area sensor planning system for automated 3D shape inspection [J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2007, 4(1/2/3/4): 209-218.
- [7] Shi Q, Xi N, Zhang C. Develop a robot-aided area sensing system for 3D shape inspection [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132(1): 014502.
- [8] Chen J Y, Dong M L, Wang J, *et al.* Photogrammetric network design for large-scale trough concentrator surface measurement [J].

- Renewable Energy Resources, 2016, 34(3): 353-359.
- 陈佳毅, 董明利, 王君, 等. 大型槽式聚光器面形摄影测量网络规划方法研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(3): 353-359.
- [9] Qiao Y J, Tan S Z, Jiang J G. Planning strategy for multi-visual measurement networking [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0515005.
- 乔玉晶, 谭世征, 姜金刚. 一种多视觉测量组网规划策略[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0515005.
- [10] Xiao Z T, Zhang W Y, Geng L, *et al.* Accuracy analysis of binocular vision system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(2): 6-11.
- 肖志涛, 张文寅, 耿磊, 等. 双目视觉系统测量精度分析[J]. 光电工程, 2014, 41(2): 6-11.