

文章编号 1004-924X(2013)02-0503-11

灰色关联分析法在双目视觉测量系统误差分析中的应用

唐巍*, 叶东, 袁峰, 陈刚

(哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对双目视觉测量系统存在误差因素繁多、分析困难等问题,提出了一种基于灰色关联技术的误差分析方法。考虑视觉系统的灰色属性,将灰色系统理论及其相关技术运用于视觉测量系统的误差分析。以镜头畸变、质心定位误差及双目视觉系统内、外参数等 9 项因素或参数为自变量,通过基于单项因素变化的实验,获取了误差分析的数据样本;采用灰色数据处理方法及灰色关联分析技术,从无明显规律的数据样本中明确了视觉系统各项误差因素对最终测量精度的影响。分析结果证明了灰色理论用于定量分析视觉系统误差的正确性和有效性;在灰色理论意义下,镜头径向畸变、切向畸变、摄像机夹角及特征点质心定位误差 4 项因素对测量精度的关联度均大于等于 0.859,高于其余误差因素。

关键词:视觉测量;误差分析;灰色系统理论;灰色属性;灰色关联分析

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0503

Application of grey incidence method to error analysis of binocular vision measurement system

TANG Wei*, YE Dong, YUAN Feng, CHEN Gang

(Department of Automation Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: haerbinhit@126.com

Abstract: According to the excessive error factors and difficult analysis of the binocular vision measurement systems, an error analysis method based on grey incidence technology was proposed. The grey attributes of the vision system were analyzed, and grey system theory and its correlation technologies were introduced into the error analysis of the vision measurement system. 9 factors or parameters such as lens distortion, centroid positional error, internal and external parameters in binocular vision system were all selected as independent variables, then sampled data were obtained for error analysis through experiments based on single factor variation. According to grey data processing method and grey incidence analysis technology, the influences of all error factors on final measurement accuracy were defined by irregular samples. Experimental results demonstrate the exactitude and validity that the grey theory is used for quantitatively analysis of errors for the vision system. Under grey theory significance, the incidence degrees of measurement errors with four kinds of factors, the radial distort-

收稿日期:2012-11-09;修订日期:2012-11-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075095)

tion and tangential distortion of a lens, the included angle between two cameras and centroid positional error in feature points are larger than 0.859, which is higher than those of other factors.

Key words: vision measurement; error analysis; grey system theory; grey attribute; grey incidence analysis

1 引言

双目视觉测量系统,利用摆放在测量现场的两台摄像机获取目标图像,根据同一被测目标在摄像机获取的两幅图像中对应像点之间的几何位置关系,来确定被测目标的空间三维坐标;它在工业测量领域发展迅速且应用广泛^[1-3]。但是,双目视觉系统最普遍的问题是测量精度有限且提高困难;视觉系统误差干扰因素多且某些误差对测量精度的影响难以用传统概率统计方法进行分析^[4-5]。因此,借助新型理论工具,研究视觉测量系统的误差分析方法,具有重要的现实意义。

20 世纪 80 年代,华中科技大学邓聚龙教授创立了灰色系统理论,它以“部分信息明确、部分信息未知”的“小样本”不确定性系统为研究对象;主要通过对部分明确已知信息的开发,将杂乱的原始数据整理成规律性较强的数据并探寻其内在规则,提取有价值的信息,实现对系统行为及其演化规律的正确描述和有效监控^[6-10]。目前,该理论在视觉系统中的应用,仅限于阈值选择、特征提取、剔除噪声等视觉图像处理方法,取得了较理想的效果,而在视觉系统误差分析方面尚未开拓和研究^[6,9-10]。但该理论中的灰色关联分析技术,可有效降低双目视觉测量系统误差分析问题的复杂性,无需大量样本数据、典型概率分布规律和精确的误差影响数学模型,计算过程相对简单、容易实现^[7-12]。

因此,本文提出了一种基于灰色关联技术的双目视觉测量系统误差分析方法。从测量的本质和双目视觉系统的结构特征出发,探讨了视觉系统的灰色属性;以与双目视觉系统测量过程相关的误差因素或参数为自变量,以空间点坐标/标准量块长度的测量精度为因变量,通过一定数量的实际实验,获取误差分析的数据样本;运用灰色系统理论及灰色关联技术,从有限且无规律的数据样本中,分析视觉系统各项误差因素对测量精度的影响。分析结果表明:灰色关联分析技术能够

定量地显示视觉系统中各项误差因素或参数对最终测量精度的影响程度;且镜头径向畸变、切向畸变、摄像机夹角及特征点质心定位误差 4 项因素与视觉测量精度的灰色意义下的关联度最高,均不小于 0.859。这一灰色关联分析结果,为提高系统测量精度提供了重要参考。

2 系统测量模型及误差因素

2.1 双目视觉系统的灰色属性

本质上,测量是以具有一定完善程度的测量仪器为基准、对相对不完善的被测量进行比对的过程^[12]。实践中,作为基准的测量仪器本身不可避免地存在一定的误差,兼之测量方法的局限、测量环境的影响、操作人员的干扰等因素,导致人们无法获得测量系统的全部特征,且测量结果带有一定的不确定性。因此,视觉测量系统是典型的灰色系统,其测量结果亦可看作具有一定取值范围的灰色量。

双目视觉测量系统通常由 2 台高分辨率数字摄像机、辅助测棒和主控制计算机组成,各个设备之间无机械装置加以固定,系统结构开放、易产生变动。同时,系统中各种类型的误差因素有些能够以量化的数学模型来表示,有些则不能;有些误差的分布规律及传递方式可利用误差传递公式推导出其对视觉测量精度的影响,有些则不能。因此,双目视觉系统属于一种小样本、非典型概率分布的灰色数据采集系统,灰色理论的常用技术方法,在视觉测量系统中同样起作用。

灰色系统理论将难于梳理、推导或不易建模的各项误差因素,统一视为在一定范围内变化的灰色量,依据灰色理论的相关技术或方法对其进行处理和分析,使双目视觉系统的误差分析问题得到一定程度的简化,也为从杂乱无章的测量数据中获得误差因素的相关信息提供了有效手段。

2.2 系统的测量模型及参数、误差因素

双目视觉测量的基本原理,如图 1 所示。

由图 1 可知,世界坐标系中任意一点 P ,在

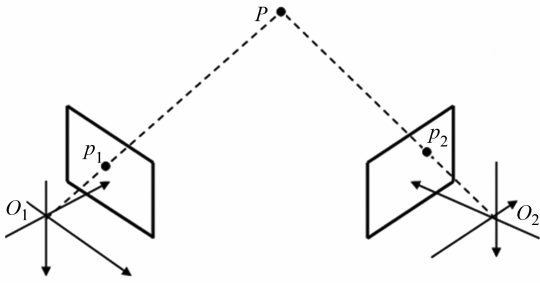


图 1 双目视觉系统的基本测量原理

Fig.1 Basic measuring principle of binocular vision system

左、右 2 台 CCD 摄像机 O_1 和 O_2 像平面上投影的图像点分别为 p_1 和 p_2 。设 2 台摄像机由世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 到像平面坐标系 $\sigma-xy$ 的投影转换矩阵分别为 M^l 和 M^r , 则根据理想针孔模

$$\begin{cases} (u_1 m_{31}^l - m_{11}^l)X + (u_1 m_{32}^l - m_{12}^l)Y + (u_1 m_{33}^l - m_{13}^l)Z = m_{14}^l - u_1 m_{34}^l \\ (v_1 m_{31}^l - m_{21}^l)X + (v_1 m_{32}^l - m_{22}^l)Y + (v_1 m_{33}^l - m_{23}^l)Z = m_{24}^l - v_1 m_{34}^l \\ (u_2 m_{31}^r - m_{11}^r)X + (u_2 m_{32}^r - m_{12}^r)Y + (u_2 m_{33}^r - m_{13}^r)Z = m_{14}^r - u_2 m_{34}^r \\ (v_2 m_{31}^r - m_{21}^r)X + (v_2 m_{32}^r - m_{22}^r)Y + (v_2 m_{33}^r - m_{23}^r)Z = m_{24}^r - v_2 m_{34}^r \end{cases} \quad (3)$$

式(3)的 4 个方程分别代表 4 个平面;前 2 个方程联立则成为射线 $O_1 p_1 P$ 的方程组,后 2 个方程联立则成为射线 $O_2 p_2 P$ 的方程组;最后 4 式联立表示射线 $O_1 p_1 P$ 与 $O_2 p_2 P$ 的交点 P 的空间三维坐标。

其中: $M^l = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & u_{01} & 0 \\ 0 & \beta_1 & v_{01} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_l & \mathbf{T}_l \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$, (4)

$K_l = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & u_{01} & 0 \\ 0 & \beta_1 & v_{01} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ 表示双目视觉系统中左侧

摄像机的内参数矩阵; \mathbf{R}_l 和 \mathbf{T}_l 则分别表示左摄像机坐标系与世界坐标系之间的旋转和平移参数。为计算方便,本文设定左摄像机坐标系与世界坐标系重合。

同理, $M^r = \begin{bmatrix} \alpha_r & 0 & u_{0r} & 0 \\ 0 & \beta_r & v_{0r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_r & \mathbf{T}_r \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$, (5)

$K_r = \begin{bmatrix} \alpha_r & 0 & u_{0r} & 0 \\ 0 & \beta_r & v_{0r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ 为系统中右侧摄像机的内

型,可得双目视觉系统的测量模型为:

$$Z_{c1} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = M^l \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^l & m_{12}^l & m_{13}^l & m_{14}^l \\ m_{21}^l & m_{22}^l & m_{23}^l & m_{24}^l \\ m_{31}^l & m_{32}^l & m_{33}^l & m_{34}^l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$Z_{c2} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} = M^r \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}^r & m_{12}^r & m_{13}^r & m_{14}^r \\ m_{21}^r & m_{22}^r & m_{23}^r & m_{24}^r \\ m_{31}^r & m_{32}^r & m_{33}^r & m_{34}^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $(u_1, v_1, 1)$ 和 $(u_2, v_2, 1)$ 分别为 p_1 和 p_2 的齐次图像坐标; $(X, Y, Z, 1)$ 是点 P 在世界坐标系下的齐次空间坐标。

将式(1)和(2)联立,得:

参数矩阵; \mathbf{R}_r 和 \mathbf{T}_r 则分别表示右摄像机坐标系与世界坐标系之间的旋转和平移参数;而当世界坐标系即为左摄像机坐标系时, \mathbf{R}_r 和 \mathbf{T}_r 则成为视觉系统唯一的一组外参数,简记为 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 。

实际上,由于各类误差因素的干扰, $(u_1, v_1, 1)$ 和 $(u_2, v_2, 1)$ 并非点 P 的投影点理想坐标,而是包含多种畸变的实际坐标,它们相应的理想图像坐标为:

$$\begin{cases} u_1' = u_1 - \delta u_1 \\ v_1' = v_1 - \delta v_1 \end{cases} \quad \begin{cases} u_2' = u_2 - \delta u_r \\ v_2' = v_2 - \delta v_r \end{cases}, \quad (6)$$

式中: δu_1 和 δv_1 表示左摄像机镜头在像平面 u 和 v 方向上的畸变量; δu_r 和 δv_r 表示右摄像机镜头在像平面 u 和 v 方向上的畸变量。

式(6)的镜头畸变包括:由大的偏轴角和透镜制造缺陷造成的径向畸变,以及由于装配镜头误差导致镜片光轴不完全共线而引起的切向畸变^[3]。

式(4)和(5)的双摄像机内参数,包括有效焦距 $(\alpha_1, \beta_1$ 和 $\alpha_r, \beta_r)$ 和光学中心 $(u_{01}, v_{01}$ 和 $u_{0r}, v_{0r})$ 。

其中,有效焦距指从透镜投影中心到 CCD 像平面的距离;光学中心指透镜光轴与 CCD 像平面的交点。二者的校准误差将直接影响系统的测量精度^[3,5,13]。

式(4)和(5)的外参数是指从左摄像机坐标系(世界坐标系)转换到右摄像机坐标系的旋转和平移参数,主要包括 3 个外参数旋转欧拉角 $\mathbf{R} = R_\omega R_\phi R_\kappa$ 和 3 个坐标系原点的平移向量 $\mathbf{T} = [t_x t_y t_z]^T$ 。旋转欧拉角是指绕左摄像机的某一坐标轴的旋转角;平移向量则是指左、右 2 个摄像机坐标系原点之间的位置关系。二者的校准误差直接决定着视觉测量模型的精度^[5,14]。

此外,测量时图像中的高斯随机噪声还会引起特征像点的质心定位误差;它是指利用二维像点信息计算出的质心坐标与理想投影质心坐标之间的位置偏差^[15]。

视觉测量精度还与摄像机的布局方式有关,布局参数包括:视觉系统左、右 2 台摄像机光轴之间的夹角(简称摄像机夹角),及物像距离(即摄像机与被测目标之间的距离,在双目视觉系统中,具体是指双摄像机基线与被测目标之间的距离)^[17-18]。

上述 9 项误差因素和参数,均与双目视觉系统的测量精度有直接关联,是本文进行误差分析的研究重点。

3 灰色误差分析方法

3.1 误差分析流程

本文进行误差分析的前提是:作为分析对象的双目视觉测量系统已经通过两步法进行了较精确的校准;系统测量模型中的各项参数均已获得了一个较准确的估计值。而基于灰色关联技术的误差分析,正是以参数估计值为基准来进行变化的。

由图 2 可知,在保持其余参数和条件不变的情况下,通过系统中单项误差因素或参数的变化,

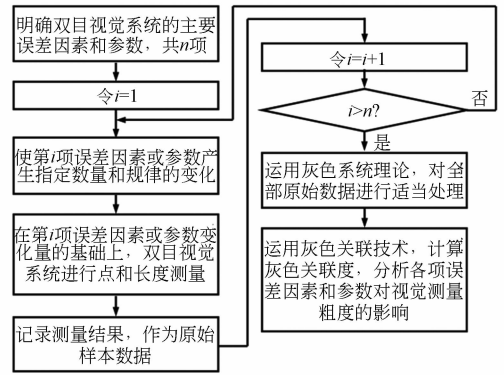


图 2 灰色误差分析的流程图

Fig. 2 Flow chart of grey error analysis

来获取误差分析的原始数据样本,是本文的基本实验方案(详见 3.2 节);在一定数量样本的基础上,运用灰色系统理论及灰色关联分析技术,计算各项误差因素与视觉测量精度之间的关联性,是误差分析的最终目的(详见 3.3 节)。

3.2 误差分析实验方案

基于单项误差因素或参数变化的实验思路,本文对测量模型中 9 项主要误差因素和参数分别制定了相应的实验方案,具体如表 1 所示。各项实验的前提是:在某一项误差因素或参数发生变化时,双目视觉系统的其余因素和参数均固定不变。

单项实验的测量数据为:双目系统分别对均布于视场范围内的 10 个空间坐标精确已知的被测目标点进行 20 次连续点坐标测量而获得的坐标测量值,在不同误差因素或参数变化下的坐标值差异变化(即位置偏差)的平均值。以及,双目系统分别对固定摆放于 10 不同空间方位上的 200 mm 一级标准量块进行 20 次连续长度测量而获得的长度测量值,在不同误差因素或参数变化下的长度测量值与公称长度之间的最大误差。根据表 1 逐项完成实验,即可获得第 i ($i=1, 2, \dots, 9$) 项误差因素或参数的变化因子序列 F_i , 以及相应的视觉测量精度序列 R_{oi} , 为灰色关联分析提供原始的样本数据。

表 1 误差分析实验方案设计

Tab. 1 Schematic design of error analysis experiments

序号	因素	变化方式	变化情况
1	径向畸变	逐步增加径向畸变的修正系数 k_1	以 0.001 的幅度增加 k_1 的值,并将变化后的 k_1 带入视觉系统测量模型,进行点/长度测量。
2	切向畸变	逐步增加切向畸变的修正系数 b_1	以 4×10^{-5} 的幅度增加 b_1 值,并将变化后的 b_1 带入视觉系统测量模型,进行点/长度测量。
3	有效焦距校准误差	人为改变焦距 f 估计值	人为设置有效焦距的估计值为 12.047~12.092 mm,每次变化幅度取 0.005 mm,再以变化后的 f 完成参数校准和视觉测量。
4	光学中心校准误差	人为改变主点 O 估计值	人为设置光学中心(主点)估计值为 5~14 pixel,变化幅度取 1 pixel,再以变化后的 O 坐标完成视觉测量。
5	旋转欧拉角校准误差	人为改变欧拉角估计值	人为设置外参欧拉角估计值为 $0.1^\circ \sim 1^\circ$,变化幅度取 0.1° ,再以变化后的欧拉角完成视觉测量。
6	平移向量校准误差	人为改变平移量估计值	人为设置外参平移量估计值为 0.010~0.100 mm,变化幅度取 0.010 mm,再以变化后的平移量完成视觉测量。
7	特征点质心定位误差	向图像添加高斯噪声	向特征图像添加均值为 0、方差为 $S \in [0.005, 0.500]$ 的高斯噪声,每次变化的噪声水平为 0.005 pixel,再以加噪图像进行视觉测量。
8	摄像机夹角	人为摆放	利用六自由度精密转台,将双摄像机光轴间的夹角由 0° 逐步增加至 90° ,每次角度变化幅度为 10° ,再进行测量。
9	物像距离	人为移动	利用六自由度精密转台,将被测目标与双摄像机基线间的距离由 3.5 m 逐步增加至 8 m,每次移动的步距为 0.5 m,再进行视觉测量。

注:摄像机夹角的调整方法。实验过程中,左侧摄像机固定于三角支架上,保持不动;而右侧摄像机则固定放置于六自由度精密转台的回转面上,利用转台的侧倾角转动副,实现右摄像机光轴的角度偏移(即 2 台摄像机之间夹角的变化)。实验开始时,人为调整 2 台摄像机光轴基本平行(即摄像机夹角为 0°),并进行相关的点/长度测量;而后,以 10° 为步距,依次调整六自由度精密转台的方位角,使右摄像机的光轴亦随之改变方向,直至两摄像机的光轴由平行逐渐变为相互垂直(即摄像机夹角为 90°)。每次调整光轴角度后均进行相关的点/长度测量、并记录各次的测量数据。

3.3 灰色关联误差分析模型的建立与求解

在一定数量的原始数据样本的基础上,本节运用灰色关联分析技术,建立了一种灰色误差影响分析模型,定量地计算视觉系统中各项误差因素与最终测量精度之间的关联程度。即:

$$\gamma_{oi} = \theta \cdot \gamma'_{oi} + (1 - \theta) \cdot \gamma''_{oi}, \quad (7)$$

式中: γ'_{oi} 表示视觉系统中第 i 项误差因素与测量精度之间相似程度的灰色绝对关联度; γ''_{oi} 表示第 i 项误差因素变化速率的灰色相对关联度;系数 $\theta \in [0, 1]$;下标“0”代表双目视觉测量的目标序列。

上述分析模型,将灰色绝对关联度和相对关联度的性能进行了综合利用,既体现了误差因素与测量精度之间的关联程度,又反映了因素变化对测量精度影响的速率^[8,11]。其具体的解算步骤如下:

① 灰色关联子空间的建立 设视觉测量精

度的目标序列为 R_{oi} , 与之相关的第 i 项误差因素(以表 1 中的“径向畸变”这一误差因素为例)所形成的因子序列为 F_i , 则构成一个灰色关联因子空间:

$$\begin{bmatrix} R_{oi} \\ F_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{oi}(1) & r_{oi}(2) & \cdots & r_{oi}(j) & \cdots & r_{oi}(m) \\ f_i(1) & f_i(2) & \cdots & f_i(j) & \cdots & f_i(m) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 表示第 i 项误差因素, n 为误差因素或参数的总数; $j=1, 2, \dots, m$ 表示第 j 个样本, m 为单项实验中样本的总数量。

② 因子空间的初始化处理 根据灰色系统理论,对灰色关联因子空间进行初始化处理:

$$\begin{bmatrix} R_{oi}^{(0)} \\ F_i^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{oi}^{(0)}(1) & \cdots & r_{oi}^{(0)}(j) & \cdots & r_{oi}^{(0)}(m) \\ f_i^{(0)}(1) & \cdots & f_i^{(0)}(j) & \cdots & f_i^{(0)}(m) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: $r_{0i}^{(0)}(j) = r_{0i}(j)/r_{0i}(1)$, $f_i^{(0)}(j) = f_i(j)/f_i(1)$ 。

③ 灰色绝对关联度的计算 基于灰色关联技术, 计算第 i 项误差因素与视觉系统测量精度之间的绝对关联度:

$$\gamma'_{0i} = \sum_{k=2}^m \gamma(k)/(m-1), \quad (10)$$

式中: $\gamma(k+1) = 1/(1 + |r_{0i}^{(1)}(k+1) - f_i^{(1)}(k+1)|)$, $k=1, 2, \dots, m-1$, $r_{0i}^{(1)}(k+1) = r_{0i}^{(0)}(k+1) - r_{0i}^{(0)}(k)$, $f_i^{(1)}(k+1) = f_i^{(0)}(k+1) - f_i^{(0)}(k)$ 。且 γ'_{0i} 越大, R_{0i} 与 F_i 的相似程度越大, 其关联性越强。反之亦然。

④ 灰色相对关联度的计算 对式(7)进行始点零化处理, 并计算出第 i 项误差因素与视觉测量精度之间的灰色相对关联度为:

$$\gamma''_{0i} = (1 + |s_{0i}| + |s_i|)/(1 + |s_{0i}| + |s_i| + |s_{0i} - s_i|), \quad (11)$$

式中, 相对和值项为 $|s_{0i}| =$

$$\left| \sum_{j=2}^{m-1} r_{0i}^{(1)}(j) + 0.5r_{0i}^{(1)}(n) \right|, \quad |s_i| = \left| \sum_{j=2}^{m-1} f_i^{(1)}(j) + 0.5f_i^{(1)}(n) \right|, \quad |s_{0i} - s_i| = \left| \sum_{j=2}^{m-1} (r_{0i}^{(1)}(j) - f_i^{(1)}(j)) + 0.5(r_{0i}^{(1)}(n) - f_i^{(1)}(n)) \right|,$$

$r_{0i}^{(1)}(j) = r_{0i}^{(0)}(j) - r_{0i}^{(0)}(1)$, $f_i^{(1)}(j) = f_i^{(0)}(j) - f_i^{(0)}(1)$; 且 $j=1, 2, \dots, m$ 。

⑤ 误差影响分析模型的计算: 根据式(10)和(11)的计算结果, 再选取适当的模型系数 θ , 即可构成第 i 项误差因素与视觉测量精度之间的关联度: $\gamma_{0i} = \theta \cdot \gamma'_{0i} + (1-\theta) \cdot \gamma''_{0i}$ 。这种灰色关联度, 从相似程度和变化速率两个方面, 分析了第 i 项误差因素与视觉测量精度的相互关系。

4 测量实验与结果分析

4.1 实验系统

图 3(a)是实验用的双目视觉测量系统, 其主要设备有: 工业控制计算机、2 台摄像机及光学测棒。

作为最核心设备的摄像机采用 Redlake MegaPlus1.4i CCD 摄像机(分辨率为 $1\,316 \text{ pixel} \times 1\,035 \text{ pixel}$ 、单个像元物理尺寸为 $6.8 \mu\text{m} \times 6.8 \mu\text{m}$ 、256 灰度级), 并装配 Tamron 工业级 C

型接口镜头。根据灰色局势决策的评价结论, 实验时按照左、右两台摄像机的夹角约为 40° 进行布局。



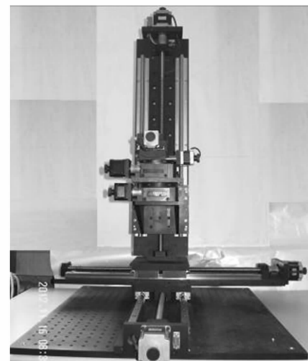
(a) 双目视觉测量系统的主要设备

(a) Key equipment of the binocular vision system



(b) 光学测棒放大图

(b) Enlarged view of optical probe



(c) 六自由度精密转台

(c) Six-freedom precision rotary table

图 3 实验系统及光学测棒

Fig. 3 Experiment system and optical probe

如图 3(b)所示, 光学测棒采用碳素纤维高分子材料, 测棒上光学特征点为 SE3470-003 型红外 LED, 测尖为英国 Renishaw 的不锈钢红宝石测

针。光学测棒上的特征点在测棒坐标系下的三维空间坐标,采用精密型 Global Image 153010 三坐标测量机和高倍显微镜对其进行精确测量。该光学测棒是整个双目立体视觉测量系统的成像目标。

如图 3(c)所示,六自由度精密转台为北京集科仪器有限公司研制的高精度电动转台,其线运动速度 ≥ 25 mm/s、角运动速度 $\geq 25(^{\circ})/s$;沿 3 条直线轴方向的最大平移幅度分别为 700、500 和 800 mm,线重复定位精度 0.005 mm;绕水平、俯仰和侧倾 3 个方向的最大旋转角度分别为 $\pm 5^{\circ}$ 、

$\pm 15^{\circ}$ 和 $\pm 180^{\circ}$,角重复定位精度 0.005 $^{\circ}$ 。

4.2 实验结果与分析

本节以双目视觉为基本测量形式,以温度、湿度、光照等条件均较理想的实验室环境为测量条件。

(1) 空间点坐标测量 根据 3.2 节表 1 所制定的实验方案,分别对 9 项误差因素和参数与测量精度之间的关系进行实验,则双目视觉系统对于 10 个坐标精确已知的空间点的测量误差如表 2 所示。

表 2 灰色误差分析实验中的点坐标测量误差

Tab. 2 Coordinate measurement errors of grey error analysis experiments

序列	变化数据
误差因子 F_1	-0.010, -0.009, -0.008, -0.007, -0.006, -0.005, -0.004, -0.003, -0.002, -0.001
测量结果 R_{01}	0.180, 0.153, 0.102, 0.092, 0.074, 0.061, 0.045, 0.044, 0.043, 0.040
误差因子 F_2	2.590×10^{-5} , 6.590×10^{-5} , 1.059×10^{-4} , 1.459×10^{-4} , 1.859×10^{-4} 2.259×10^{-4} , 2.659×10^{-4} , 3.059×10^{-4} , 3.459×10^{-4} , 3.859×10^{-4}
测量结果 R_{02}	0.012, 0.020, 0.023, 0.028, 0.031, 0.035, 0.039, 0.044, 0.050, 0.064
误差因子 F_3	12.047, 12.052, 12.057, 12.062, 12.067, 12.072, 12.077, 12.082, 12.087, 12.092
测量结果 R_{03}	0.043, 0.086, 0.129, 0.172, 0.215, 0.258, 0.301, 0.344, 0.387, 0.430
误差因子 F_4	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14
测量结果 R_{04}	0.016, 0.021, 0.027, 0.034, 0.038, 0.041, 0.049, 0.054, 0.061, 0.065
误差因子 F_5	0.100, 0.200, 0.300, 0.400, 0.500, 0.600, 0.700, 0.800, 0.900, 1.000
测量结果 R_{05}	0.017, 0.034, 0.050, 0.056, 0.063, 0.070, 0.076, 0.083, 0.092, 0.116
误差因子 F_6	0.010, 0.020, 0.030, 0.040, 0.050, 0.060, 0.070, 0.080, 0.090, 0.100
测量结果 R_{06}	0.017, 0.024, 0.035, 0.044, 0.052, 0.065, 0.073, 0.081, 0.093, 0.108
误差因子 F_7	0.005, 0.010, 0.015, 0.020, 0.030, 0.035, 0.040, 0.045, 0.050
测量结果 R_{07}	0.009, 0.012, 0.017, 0.020, 0.025, 0.026, 0.030, 0.036, 0.041, 0.047
误差因子 F_8	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
测量结果 R_{08}	0.007, 0.009, 0.012, 0.015, 0.019, 0.026, 0.029, 0.034, 0.041, 0.048
误差因子 F_9	3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0
测量结果 R_{09}	0.022, 0.024, 0.035, 0.038, 0.041, 0.045, 0.060, 0.062, 0.072, 0.083

注:表中 F_i 的单位参见表 1; R_{0i} 的单位均为 mm。

根据表 2,可计算出灰色绝对关联度的具体数值,亦可比较各项误差因素或参数与视觉测量精度之间的变化相似程度。

(2) 标准量块长度测试 根据 3.2 节制定的

实验方案,分别对 9 项误差因素和参数与测量精度之间的关系进行实验,则双目视觉系统对于 10 个空间方位下的标准量块长度测量偏差如表 3 所示。

表 3 灰色误差分析实验中的长度测量误差

Tab. 3 Length measurement errors of grey error analysis experiments

序列	变化数据
误差因子 F_1	-0.010, -0.009, -0.008, -0.007, -0.006, -0.005, -0.004, -0.003, -0.002, -0.001
测量结果 R_{01}	0.046, 0.050, 0.054, 0.055, 0.073, 0.087, 0.116, 0.134, 0.203, 0.247
误差因子 F_2	2.590×10^{-5} , 6.590×10^{-5} , 1.059×10^{-4} , 1.459×10^{-4} , 1.859×10^{-4} , 2.259×10^{-4} , 2.659×10^{-4} , 3.059×10^{-4} , 3.459×10^{-4} , 3.859×10^{-4}
测量结果 R_{02}	0.034, 0.040, 0.044, 0.048, 0.055, 0.063, 0.074, 0.089, 0.101, 0.117
误差因子 F_3	12.047, 12.052, 12.057, 12.062, 12.067, 12.072, 12.077, 12.082, 12.087, 12.092
测量结果 R_{03}	0.022, 0.045, 0.067, 0.090, 0.113, 0.135, 0.158, 0.181, 0.203, 0.226
误差因子 F_4	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14
测量结果 R_{04}	0.011, 0.012, 0.013, 0.014, 0.016, 0.019, 0.023, 0.027, 0.028, 0.035
误差因子 F_5	0.100, 0.200, 0.300, 0.400, 0.500, 0.600, 0.700, 0.800, 0.900, 1.000
测量结果 R_{05}	0.001, 0.002, 0.002, 0.023, 0.025, 0.032, 0.037, 0.042, 0.051, 0.063
误差因子 F_6	0.010, 0.020, 0.030, 0.040, 0.050, 0.060, 0.070, 0.080, 0.090, 0.100
测量结果 R_{06}	0.008, 0.011, 0.015, 0.021, 0.026, 0.032, 0.039, 0.042, 0.047, 0.050
误差因子 F_7	0.005, 0.010, 0.015, 0.020, 0.030, 0.035, 0.040, 0.045, 0.050
测量结果 R_{07}	0.009, 0.013, 0.020, 0.026, 0.032, 0.034, 0.038, 0.045, 0.048, 0.053
误差因子 F_8	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
测量结果 R_{08}	0.012, 0.037, 0.042, 0.045, 0.054, 0.067, 0.082, 0.088, 0.098, 0.105
误差因子 F_9	3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0
测量结果 R_{09}	0.041, 0.044, 0.053, 0.060, 0.070, 0.079, 0.092, 0.098, 0.108, 0.121

注:表中 F_i 的单位参见表 1; R_{0i} 的单位均为 mm。

根据表 3, 可计算出灰色相对关联度的具体数值, 亦可比较各项误差因素或参数的变化对最终测量精度的影响速率。

(3) 关联度计算结果与分析 以表 2 和 3 的实际实验数据为基础, 计算误差影响分析模型(式

表 4 误差影响分析模型中的关联度计算结果

Tab. 4 Incidence degrees in error influence analytic model

误差因素	灰色绝对 关联度	灰色相对 关联度	分析模型 关联度
径向畸变	0.953	0.888	0.927
切向畸变	0.928	0.896	0.915
摄像机夹角	0.900	0.835	0.874
特征点质心定位误差	0.847	0.877	0.859
有效焦距校准误差	0.825	0.770	0.803
光学中心校准误差	0.799	0.767	0.786
旋转欧拉角校准误差	0.790	0.768	0.781
平移向量校准误差	0.743	0.821	0.774
物像距离	0.736	0.714	0.727

(7))。此时, 因误差分析略偏重于误差因素与测量精度之间的相似性, 故分析模型系数 θ 的取值为 0.6。其关联分析结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 上述 9 项误差因素中, 镜头径向畸变、切向畸变、摄像机夹角及特征点质心定位误差这 4 项因素与最终测量精度之间的关联度大于 0.850, 是视觉测量中需着重抑制的误差源。而有效焦距、光学中心和旋转欧拉角、平移向量等双目视觉系统的内、外参数对视觉测量结果的影响程度, 较之上述 4 项因素稍弱。物像距离则是 9 项因素中对最终视觉测量结果影响最弱的一项参数。

为验证基于小样本数据的灰色关联方法的有效性, 本文将全部误差因素和参数的变化基准取为精度较低的线性估计初始值, 重复上述实验方法与计算步骤, 最终得出的灰色关联度, 如表 5 所示。

表 5 基准为线性初始值时的关联度计算结果

Tab.5 Incidence degrees when references are linear initial values

误差因素	灰色绝对	灰色相对	分析模型
	关联度	关联度	关联度
径向畸变	0.943	0.866	0.912
切向畸变	0.917	0.872	0.899
摄像机夹角	0.884	0.832	0.863
特征点质心定位误差	0.851	0.845	0.849
有效焦距校准误差	0.811	0.771	0.795
光学中心校准误差	0.773	0.736	0.758
旋转欧拉角校准误差	0.725	0.783	0.748
平移向量校准误差	0.714	0.776	0.739
物像距离	0.708	0.691	0.701

由表 4 和表 5 的对比可知,当采用灰色关联方法进行双目视觉测量系统的误差分析时,误差因素或参数的取值基准对最终的灰色关联度计算值无明显的影响,充分显示了灰色系统理论在基于小样本进行建模、分析和决策方面的优势。

(4) 系统误差抑制 通过分析各项误差因素/参数与视觉测量精度之间的关联性,并考虑误差抑制措施的可靠性、经济性和可行性,采用如下技术手段或方法,改善双目视觉系统的测量精度:

a. 独立的畸变校正方法。基于直线几何特征,对镜头的各类畸变进行逐点修正^[19],避免了因视觉成像模型参数综合优化所引起的相关性干扰及非线性迭代求解所带来的不确定性。

b. 基于灰色局势决策的摄像机布局方法。采用灰色局势决策技术,对不同摄像机夹角下的视觉测量结果进行衡量和筛选,并结合系统测量范围的具体需求,制定出最佳的摄像机布局方案。

c. 发光稳定性高的红外 LED 特征光点。通过采用发光强度稳定的高质量红外 LED 或设计恒流控制模块,从硬件方面来减少特征点质心定位误差,提高视觉系统的成像质量。

实际实验证明,上述技术手段或方法的施行,可较大程度地提高双目视觉系统的测量精度,抑制或削弱各类主要的误差因素。

5 结 论

本文基于视觉测量系统的灰色属性,将灰色系统理论及其相关技术引入到视觉系统误差分析这一新的领域,并提出了一种基于灰色关联技术的双目视觉测量系统误差分析方法。在明确双目视觉测量系统的 9 项主要误差因素和参数的基础上,通过单项因素变化的实际实验,取得误差分析的原始数据样本;鉴于原始样本无明显规律这一特性,运用灰色关联分析及特定的灰色数据处理方法,确定了双目视觉系统中各项误差因素对最终测量精度的影响。空间点三维坐标测量与标准量块长度测试的结果均证明了灰色关联分析方法应用于视觉系统误差分析的正确性和有效性。在灰色系统理论框架下,定量地计算了各项误差因素与视觉测量精度之间的关联程度,其中,镜头径向畸变、切向畸变、摄像机夹角及特征点质心定位误差这 4 项因素对测量精度的关联性均不大 0.859,高于其它系统误差因素。这一关联性分析结果可为提高双目视觉系统的测量精度提供了重要依据。

参考文献:

- [1] HOU J, LI H F, ZHENG ZH R, *et al.*. Distortion correction for imaging on non-planar surface using freeform lens [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(6): 986-991.
- [2] EDWARD R, ROHAN L. Camera distortion self-calibration using the plumb-line constraint and minimal hough entropy [J]. *Machine Vision & Applications*, 2011, 22(1): 77-85.
- [3] 薛婷,曹兆峰,金俞鑫.基于虚拟立体视觉的气液

- 两相流三维测量系统的标定 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 124-130.
- XUE T, CAO ZH F, JIN Y X. Calibration of three-dimensional measurement system for gas-liquid two phase flow based on virtual stereo vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 124-130. (in Chinese)
- [4] 李磊刚,梁晋,唐正宗,等.飞机结构件运动数据的动态视觉测量系统 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 1929-1937.
- LI L G, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Optical

- and dynamic measuring system for movement data of aircraft structural parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1929-1937. (in Chinese)
- [5] 刘博, 叶东, 陈刚, 等. 火箭喷管运动视觉测试精度的校准与实验 [J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(11): 2513-2520.
- LIU B, YE D, CHEN G, *et al.*. Calibration and experiment of vision measurement accuracy for motion of rocket nozzle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2513-2520. (in Chinese)
- [6] PING X L, ZHOU R R, LIU SH L. Three-dimensional data sequence in grey system theory [J]. *Journal of Nanjing Institute of Industry Technology*, 2004, 4(1): 1-5.
- [7] 李鸣鸣, 龚振邦, 程维明, 等. 纳米定位系统动态误差灰色模型补偿方法研究 [J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(1): 89-93.
- LI M M, GONG Z B, CHENG W M, *et al.*. Research of dynamic error compensation for nano-positioning system based on grey model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 89-93. (in Chinese)
- [8] 邓聚龙. 灰理论基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 8-17.
- DENG J L. *Grey Theoretical Principles* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002: 8-17. (in Chinese)
- [9] 周志宇, 杨卫成, 汪亚明, 等. 应用梯度矢量流 Snake 和灰预测的人脸轮廓跟踪 [J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(11): 2744-2752.
- ZHOU ZH Y, YANG W CH, WANG Y M, *et al.*. Realization of face contour tracking by GVF Snake and grey prediction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2744-2752. (in Chinese)
- [10] MA M, ZHANG Y N, SUN L, *et al.*. SAR image despeckling using grey system theory [C]. *Proceeding of IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Service, Nanjing, China: GSIS*, 2007: 458-462.
- [11] 刘卫峰, 何霞, 程少华, 等. 一类优化离散灰色模型及其等价模型 [J]. *西安大学学报*, 2011, 30(1): 79-82.
- LIU W F, HE X, CHENG SH H, *et al.*. A class of optimized discrete grey models and its equivalent models [J]. *Journal of Xihua University · Natural Science*, 2011, 30(1): 79-82. (in Chinese)
- [12] 陈松涛, 魏燕婷. 灰色系统理论在测量不确定度评定中的应用 [J]. *计测技术*, 2008, 28(4): 19-21.
- CHEN S T, WEI Y T. Application of grey system theory to evaluation of uncertainty of measurement [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2008, 28(4): 19-21. (in Chinese)
- [13] ZHANG F, ZHU Q D. On improved calibration method for the catadioptric omnidirectional vision with a single viewpoint [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2011, 25(1): 77-89.
- [14] KAPTEINA B L, SHELBURNE B K B, TORRYC M R, *et al.*. A comparison of calibration methods for stereo fluoroscopic imaging systems [J]. *Journal of Biomechanics*, 2011, 13(44): 2511-2515.
- [15] CARLOS R V, ANTONIO-JOSÉ S S. Using the camera pin-hole model restrictions to calibrate the lens distortion model [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(6): 996-1005.
- [16] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, RA-3(4): 323-344.
- [17] 孙泽林, 王昭, 李明. 火炮稳定精度图像测试系统 [J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(1): 157-164.
- SUN Z L, WANG ZH, LI M. Image test system for gun stabilization accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 157-164. (in Chinese)
- [18] LEE J H, CHANG P T. A survey and numerical comparison of factor-free penalty function constraint-handling techniques in genetic algorithms [J]. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 2012, 29(1): 61-86.
- [19] 张靖, 朱大勇, 张志勇. Nonmetric calibration of camera lens distortion [J]. *光学学报*, 2008, 28(8): 1552-1557.
- ZHANG J, ZHU D Y, ZHANG ZH Y. Dummy solid camera calibration technology using genetic algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1552-1557. (in Chinese)

作者简介:



唐 巍(1981—),女,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2006年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事机器视觉、视觉参数校准方面的研究。E-mail: haerbinhit@126.com

导师简介:



叶 东(1968—),男,湖北武汉人,博士,教授,博士生导师,1990年、1995年和1999年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士和博士学位,主要从事基于串/并联结构的坐标测量理论和技术、双目/单目视觉坐标测量理论和技术等方面的研究。E-mail: yedong@hit.edu.cn



袁 峰(1963—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授、博士生导师,1985年、1988年和1995年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士和博士学位,主要从事光电检测技术及精密几何参数测量技术等方面的研究。E-mail: yuanf@hit.edu.cn



陈 刚(1971—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,硕士生导师,主要从事光电检测技术及精密几何参数测量技术等方面的研究。E-mail: chenganghit@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)