

文章编号 1004-924X(2015)04-1196-09

消隐点共线约束逐点畸变校正算法

赵振庆, 叶 东*, 吴斌, 陈刚, 杨子军

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:对逐点图像畸变校正算法进行分析和研究。分析了基于四点共线交比不变性的逐点畸变校正算法的校正精度,指出该算法由于初始使用图像点含有误差导致计算其他图像点产生了精度改变,同时给出了计算结果误差较小时的图像点位置和相对距离的选取方法。基于上述分析,提出了基于消隐点共线约束的逐点畸变校正算法。该算法利用消隐点来提高直线拟合精度,利用共线特征来约束校正图像点精度。该算法不仅可以优化基于四点共线交比不变性算法校正的图像点,同时也可以优化初始使用的图像点,从而提高所有图像点畸变校正精度。基于 MATLAB 的仿真实验显示:对于 400 万像素的镜头,校正后图像点最大误差是初始图像点噪声的 29.05 倍。针对实物图像对基于四点共线交比不变性法校正的图像点,基于消隐点共线约束法校正的图像点和未校正采集图像点的交比值进行对比,结果表明本文提出算法优于四点共线交比不变性算法的结果。

关键词:计算机视觉;图像校正;畸变校正;消隐点;交比不变性;共线约束

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152304.1196

Point wise distortion correction algorithm with vanishing point collinear constraint

ZHAO Zhen-qing, YE Dong*, WU Bin, CHEN Gang, YANG Zi-jun

(School of Electrical Engineering and Automation,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: yedong@hit.edu.cn

Abstract: Point wise correction algorithms are researched and analyzed. The correction accuracy of a point wise distortion correction algorithm based on four-point collinear cross ratio invariability is investigated. It points out that the initial used image points which contain errors will cause the accuracy change in the calculation of other image points. Then, it gives the selection method for image point locations and relative distances when the calculation error is smaller. Based on the above, this paper proposes a point wise distortion correction algorithm based on vanishing point collinear constraint. The algorithm uses vanishing points to improve the linear fit accuracy and the collinear feature to constrain the corrected distortion accuracy. It not only optimizes the image point errors of the distortion correction algorithm based on a four-point collinear cross ratio invariance, but also the initial image point errors, so that the accuracy of distortion correction of all image points is improved

收稿日期:2014-12-09;修订日期:2015-01-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075095);黑龙江省自然科学基金资助项目(No. E201045)

ultimately. The simulation based on MATLAB shows that the maximum error of corrected image points is 29.05 times that of the initial image point noise for four million pixels. In contrast to the physical image using the cross ratios from the correction algorithms based on four-point collinear invariant cross ratio and vanishing point collinear constraint as well the uncorrected image, it indicates that the performance of proposed algorithm is better than that of the algorithm based on four-point collinear cross ratio invariance.

Key words: computer vision; image correction; distortion correction; vanishing point; cross-ratio invariability; collinear constraint

1 引 言

机器视觉是根据摄像机透视投影模型,通过空间物体特征在摄像机所投影的图像特征来得到物体的信息,因而对于机器视觉来说,图像特征精度十分重要。由于实际镜头并不是理想透视成像,而是带有不同程度的畸变,所以畸变校正器在机器视觉的研究中有重要意义。

传统的镜头畸变算法是将镜头的畸变模型和摄像机其他内部参数(焦距、相面中心等)放在一起校正^[1-3],使用线性或非线形方法求解所有参数,但是多个参数一起校正,必然会出现参数耦合问题。同时当畸变模型不能简化表示时,畸变模型的非线性求解很难达到高精度。而独立校正畸变算法可以在不考虑其他内参的影响直接校正畸变,因而引起大量学者的兴趣。学者们提出基于交比不变性^[4-6],基于直线投影^[7-9]等方法来校正畸变,但是现有的这些算法都简化了畸变模型(使用一阶畸变模型),并都假定摄像机中心为已知。

当畸变模型较为复杂的情况下,有学者在独立校正畸变算法的基础上提出了不考虑畸变模型的逐点畸变校正算法^[6]。它利用四点共线交比不变性来逐点校正大量的、覆盖整个相面特征点的理想坐标值。该算法主要存在两个问题:(1)初始图像点所含噪声误差在计算新图像点坐标值时会被放大;(2)计算图像点越多,误差放大越大,这样在校正高分辨率相面畸变时,校正误差太大。针对上述问题,本文首先分析了基于四点共线的交比不变性算法的误差,给出了误差最小时,图像特征点位置和相对距离的选取方法。同时在以上算法计算结果上,提出了基于消隐点共线约束优化算法,通过提前计算出消隐点来提高直线计算精度,通过 3 个方向的直线来约束基于四点共线交

比不变性的计算结果,最终提高了所有校正图像精度。

2 透视投影的四点交比不变性

2.1 算法原理

四点交比不变性原理如图 1 所示。

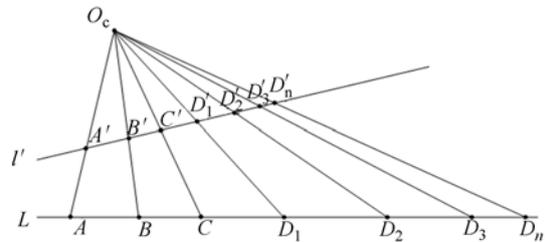


图 1 四点交比不变性

Fig. 1 Presentation of four point cross ratio invariability

将空间共线的 4 个点 A, B, C, D_n 投影到成像平面上,为 A', B', C', D'_n。根据透视投影变换性质,共线四点交比在投影前后是不变的,可以得到投影图像点的交比和空间共线四点交比存在以下关系:

$$c_r = \frac{(u_a - u_c)(u_b - u_{d_n})}{(u_b - u_c)(u_a - u_{d_n})} = \frac{(v_a - v_c)(v_b - v_{d_n})}{(v_b - v_c)(v_a - v_{d_n})} = \frac{AC/BC}{AD_n/BD_n}, \quad (1)$$

其中:(u_a, v_a), (u_b, v_b), (u_c, v_c), (u_{d_n}, v_{d_n})是图像点 A', B', C', D'_n 像素坐标值。在已知图像点 A', B', C'的坐标值时,通过空间共线四点的交比值,可以计算出图像点 D'_n的坐标值:

$$u_{d_n} = \frac{u_b u_{ac} - c_r u_a u_{bc}}{u_{ac} - c_r u_{bc}}, v_{d_n} = \frac{v_b v_{ac} - c_r v_a v_{bc}}{v_{ac} - c_r v_{bc}}, \quad (2)$$

其中:u_{ac} = u_c - u_a, u_{bc} = u_c - u_b, v_{ac} = v_c - v_a, v_{bc} = v_c - v_b。空间点坐标值已知情况下,交比 c_r 可以直接计算出。由于畸变和图像点到相面中心的距

离有关,故可以假设图像中心畸变可忽略,平面中心图像点为理想坐标值,通过公式(2)就可以计算这些图像点所在直线上其他图像点的理想坐标值。

2.2 精度分析

根据透视投影的交比不变性,已知图像直线上 3 个点的坐标值,就可以计算直线上其他图像点的理想坐标值。式(2)中两个公式在形式上是一样的,因而只分析第一个公式的精度。在公式(2)中, u_d 的精度主要由以下两部分构成:(1)交比值 c_r 精度的影响。 c_r 是通过空间点来计算的,利用一些三维(或二维)坐标仪器测量实际空间点坐标值,可以使 c_r 达到很高精度。因此 c_r 误差可忽略;(2)图像点 A', B', C' 精度影响。图像点的精度也取决于以下几个方面:a)畸变的影响。可以通过选取相面中心位置的图像点并对中心位置图像点做处理来减少畸变影响;b)图像特征提取精度。在实验室环境下,可以利用特定靶标来提高图像特征提取精度。如利用 IR-LED 靶标^[10-12],特征提取精度较高,重复定位精度最高可以达到 0.02 pixel;c)误差传递系数的影响。由于 A', B', C', D'_n 之间距离不同,在公式(2)中误差传递系数是不同的。对式(2)做一阶导数误差分析。图像点 A', B', C' 具有等价关系,这里设定图像点 A', B', C', D'_n 依次排列,如图 1 所示。 D'_n 沿着直线移动,可以得到:

$$\Delta u_d = \sqrt{\left(\frac{\partial u_d}{\partial u_a} \Delta u_a\right)^2 + \left(\frac{\partial u_d}{\partial u_b} \Delta u_b\right)^2 + \left(\frac{\partial u_d}{\partial u_c} \Delta u_c\right)^2}, \quad (3)$$

其中:

$$\frac{\partial u_d}{\partial u_a} = \frac{u_{cd} u_{bd}}{u_{ac} u_{cb}}, \frac{\partial u_d}{\partial u_b} = -\frac{u_{cd} u_{ad}}{u_{ab} u_{bc}}, \frac{\partial u_d}{\partial u_c} = \frac{u_{ad} u_{bd}}{u_{bc} u_{ac}}. \quad (4)$$

从公式(4)中分析可知,为了使误差最小,要求:

- 条件 1: u_{ac}, u_{ab}, u_{bc} 越大越好,
- 条件 2: u_{ad}, u_{bd}, u_{cd} 越小越好。

由于 u_{ad} 是两个边缘点距离,它的值最大,因而上述条件是不能完全满足的。根据 A', B', C' 图像点是否随着 D'_n 移动分为 4 种情况讨论,分别分析这 4 种情况下最终误差的大小。设定初始中心 3 个图像特征点的误差值为 $\Delta u_{cent} = 1$, 中心区域范围为 $2t$, 校正区域范围为 ωt , 其中仿真中 $\omega = 20$ 。为了简化分析,假设 D'_n 是以 t 的倍数移

动。

情况 1: A', B', C' 点一直位于图像中间区域,并且它们之间的距离相等, D'_n 以同样距离移动。当 A', B', C' 位于中间位置时,它们的图像点误差最小,得到公式:

$$\Delta u_d = \Delta u_{cent} \sqrt{\left(\frac{\partial u_d}{\partial u_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_d}{\partial u_b}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_d}{\partial u_c}\right)^2}, \quad (5)$$

这里 $u_{ab} = u_{bc} = t, u_{cd} = nt, n = 1, 2, 3, \dots$, 带入公式(5)得到:

$$\frac{\partial u_{dn}}{\partial u_c} = \frac{1}{2} n(n+1), \quad \frac{\partial u_{dn}}{\partial u_b} = -n(n+2), \quad (6)$$

$$\frac{\partial u_{dn}}{\partial u_a} = \frac{1}{2} (n+1)(n+2). \quad (7)$$

从上式可以看出,随着图像点数 n 增多, A', B', C' 点误差传递系数成 n 二次幂方式增大,结果如表 1 所示。在计算第 20 个点时达到了 539.5 倍,当图像噪声 $\Delta u_{cent} = 0.02$ pixel 时,误差达到 10.79 pixel,校正畸变误差较大。

表 1 图像点坐标值误差

Tab. 1 Coordinate errors of image points

| 图像点 | 情况 1 | 情况 3 | 情况 4 |
|-----|-------|-------------------|----------------------|
| 5 | 43.4 | 175.4 | 402.9 |
| 10 | 147.5 | 1.1×10^4 | 1.2×10^5 |
| 15 | 312.9 | 5.8×10^5 | 3.8×10^7 |
| 20 | 539.5 | 2.7×10^7 | 1.1×10^{10} |

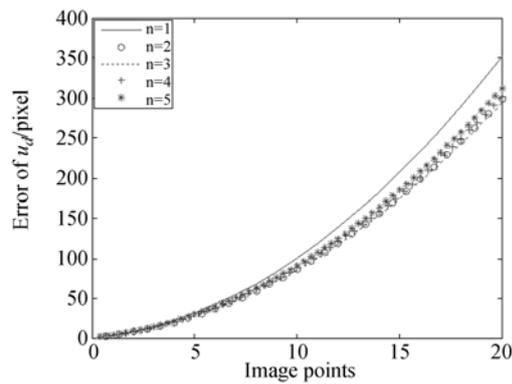


图 2 n 初始值和误差关系

Fig. 2 Relationship between initial value of n and errors

情况 2: A', B', C' 初始位于中间位置,并且它们之间的距离相等, C' 随着 D'_n 移动。这样 C' 图像的误差也逐渐增大,从而产生一个误差的叠加。最终误差公式为:

$$\Delta u_{dn} = \sqrt{\left(\frac{\partial u_{dl}}{\partial u_a} \Delta u_{cent}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_{dl}}{\partial u_b} \Delta u_{cent}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_{dl}}{\partial u_c} \Delta u_{d(n-1)}\right)^2}, \quad (8)$$

式中: $u_{db} = t, u_{bc} = nt, u_{cd} = t, n = 1, 2, 3, \dots$ 得到:

$$\frac{\partial u_{dn}}{\partial u_a} = 1, \frac{\partial u_{dn}}{\partial u_b} = -\left(1 + \frac{2}{n}\right), \frac{\partial u_{dn}}{\partial u_c} = 1 + \frac{2}{n}. \quad (9)$$

从公式(9)可知,随着 D'_n 点的移动(n 增大), A' 的误差传递系数为定值 1, B', C' 点的误差传递系数变小,最终趋向于 1,从而导致计算图像点误差小于情况 1。如图 1 中 $n=1$ 所示曲线,在计算第 20 个点时误差为 351.7 倍,虽然小于情况 1 结果,但误差传递系数值仍然很大。假设开始时 $n=2$ 或 $n=3$,这样在减小误差传递系数时,减小了计算点个数,最终误差应该变小。可是由于图像可忽略或修正畸变的中心区域和图像大小是固定的,增大 n 初始值意味中心区域增加了图像点个数,也就是减小图像点距离 t ,增加计算图像点个数。最终仿真结果如图 2 所示,当初始值 $n=2$ 时,增大初始值 n 并不能减小最终误差。

在初始中心 3 个点距离不变的情况下,只是改变 D'_n 点的移动距离来考察误差改善情况。这里设定 $u_{db} = t, u_{bc} = (n-1)mt + t, u_{cd} = mt, n = 1, 2, 3, \dots$, 得到:

$$\frac{\partial u_{dn}}{\partial u_a} = \frac{m(mn+1)}{mn-m+2}, \frac{\partial u_{dn}}{\partial u_b} = \frac{-m(mn+2)}{mn-m+1}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial u_{dn}}{\partial u_c} = \frac{(mn+1)(mn+2)}{(mn-m+1)(mn-m+2)}. \quad (11)$$

如图 3 所示,当 $m=4$ 时,边缘点误差是 465.7 倍,当 $m=0.5$ 时,边缘点误差是 302.9 倍,当 $m=0.1$ 时,边缘点误差是 247.6 倍。虽然减小 m 值会增加所计算的图像点个数,从而增加叠加误差次数,但是由于减小了误差传递系数,边缘

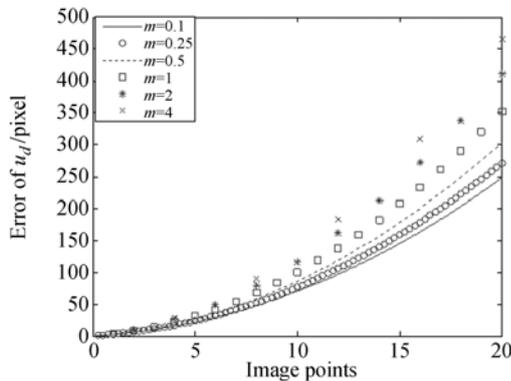


图 3 移动距离对误差的影响

Fig. 3 Influence of moving distance on error

最终误差反而减小了。另外,增加校正图像点数量,对于畸变校正来说也是好的。因此在中心区域 3 个图像点不变的情况下,减小 m 值对于畸变校正有利。

情况 3: A', B', C' 初始位于中间位置,并且它们之间的距离相等, B', C' 点随着 D'_n 等距移动。这样 B', C' 图像的误差也不断增大,从而产生两个点误差的叠加。最终误差公式为:

$$\Delta u_{dn} = \sqrt{\left(\frac{\partial u_{dl}}{\partial u_a} \Delta u_{cent}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_{dl}}{\partial u_b} \Delta u_{d(n-2)}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_{dl}}{\partial u_c} \Delta u_{d(n-1)}\right)^2}, \quad (12)$$

其中 $u_{bc} = u_{cd} = t, u_{db} = nt$, 得到:

$$\frac{\partial u_{dn}}{\partial u_a} = \frac{2}{n(n+1)}, \frac{\partial u_{dn}}{\partial u_b} = -\left(1 + \frac{2}{n}\right), \quad (13)$$

$$\frac{\partial u_{dn}}{\partial u_c} = \frac{2(n+2)}{n+1}. \quad (14)$$

从式(12)可以看出, A', B' 点的误差传递系数随着 n 的增大而变小,但是 C' 点的误差传递系数却在增大。最终仿真结果如表 1 所示, B', C' 的叠加误差导致计算误差变大,在计算第 20 个点时达到了 2.7×10^7 倍。

情况 4: A', B', C' 初始位于中间位置,并且它们之间的距离相等, A', B', C' 随着 D'_n 等距移动,这样 3 个图像点误差都会产生叠加。最终公式为:

$$\Delta u_{dn} = \sqrt{\left(\frac{\partial u_{dl}}{\partial u_a} \Delta u_{d(n-3)}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_{dl}}{\partial u_b} \Delta u_{d(n-2)}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_{dl}}{\partial u_c} \Delta u_{d(n-1)}\right)^2}, \quad (15)$$

其中 $u_{bc} = u_{cd} = u_{db} = t$, 得到:

$$\frac{\partial u_{dn}}{\partial u_a} = 1, \frac{\partial u_{dn}}{\partial u_b} = -3, \frac{\partial u_{dn}}{\partial u_c} = 3. \quad (16)$$

当 A', B', C' 点随着 D'_n 等距移动时,误差传递系数并不变化,但是从表 1 可知,3 个点误差叠加会导致计算误差变得更大,在计算第 20 个点时达到了 1.1×10^{10} 倍。在 4 种情况中误差最大。

综上所述,情况 3,情况 4 计算结果的误差较大,相对情况 1 而言,情况 2 的误差较小。同时减小 D'_n 移动距离,增加校正图像点数量,增加中心区域图像点个数也会减小计算图像点误差。

3 基于消隐点共线约束

基于交比不变性可以利用图像中心有限的几个点来计算直线上其他位置的图像点,但是从以

上分析可以得到,中间图像特征误差必然会导致新点的计算误差更大。同时,对于整个相面图像点来说,并不是所有图像点都在中间几条直线上,而是在校正出的理想图像点所在直线上,因而需要另外的约束来提高计算精度。文献[6-8]指出特征点共线约束存在的问题是中心区域图像特征点较少、相距较近,使得拟合直线的精度有限,从而很难对所计算图像点理想坐标值进行有效约束。在共线约束的基础上,本文提出了基于消隐点的共线约束。空间平行线在摄像机投影的直线会交于一点,这点叫做该平行线的消隐点。通常校正视觉靶标是采用棋盘格方式,因此在棋盘格上,可以找到4个方向的消隐点,消隐点距离相面中心较远,因而可以有效地对直线做出约束,进而对计算图像点做出约束。

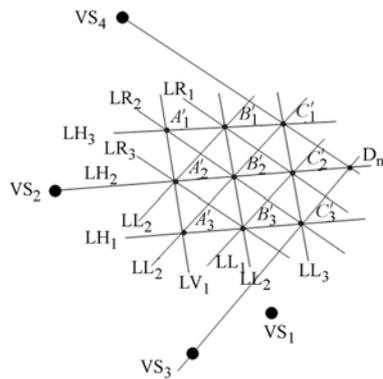


图 4 基于消隐点共线约束

Fig. 4 Collinear constrained based on vanishing points

如图 4 所示,图像中心的 9 个点可以找到 4 组共 12 条直线: $LV_i, LH_i, LR_i, LL_i, i=1, 2, 3$, 可以看出这 12 条直线是 4 组平行线投影在图像上形成的。这 4 组平行线投影图像相交于 4 个消隐点 $VS_i, i=1, 2, 3, 4$ 。对于图像上一点 D_n , 可以通过同一条直线上的 3 个点 A'_2, B'_2, C'_2 利用公式(2)计算,同时还受到 $VS_2 - C'_2, VS_3 - C'_3, VS_4 - C'_1$ 3 条直线的约束。任意一个图像点,都能找到 3 个方向由消隐点构成的直线对该点做出约束。因此建立以交比不变性估算值图像点,以消隐点共线约束作为最小化目标函数获得图像点的最优解。

该方法具体表示如下:

目标函数为:

$$\min \sum_i^n \| pu_d + qv_d + r \|^2, \quad (17)$$

约束条件: u_d, v_d 满足公式(2)

其中 p, q, r 是由消隐点拟合直线参数: $pu + qv + r = 0$, 满足 $p^2 + q^2 = 1$ 。最小化公式是一个非线性最小问题,为了获得满足该要求的图像点,本文采用 Levenberg-Marquardt 迭代算法^[14]获得此函数的最优解。目标函数(17)也可以对中心区域图像点优化,只要把约束条件改成中心区域图像点的坐标值即可。

对于大畸变镜头来说,很难找到可以忽略畸变的中心区域。例如,对于畸变为 0.5% 的镜头来说,当特征提取误差为 0.02 pixel 时,要使畸变小于特征提取精度,这意味着中心区域为 8 pixel。由于中心区域比较小,可以使用一阶线性畸变模型来校正中心区域的图像点,本文采用文献[4]所提出的算法来修正中心区域的图像点畸变。

综上所述,基于四点交比不变性和消隐点共线约束的畸变校正算法步骤如下:

1. 校正图像中心区域的畸变,修正图像中心区图像点;
2. 计算 4 个方向消隐点。大量采集中心区域图像点,通过多点来拟合 4 个方向直线,并计算 4 个方向消隐点;
3. 对中心图像点进行优化。基于消隐点共线约束,通过式(17)利用 L-M 迭代获得最优解;
4. 计算相邻外围图像点的坐标值。根据公式(2)计算新图像点;
5. 根据消隐点共线约束来优化计算图像点的坐标值;
6. 重复执行步骤 4、5 直到校正所有图像点。

4 测量实验与结果

本文采用基于 matlab 仿真精度分析,同时对于实际视觉系统作对比分析。

4.1 仿真实验

仿真实验中,靶标为由 100×100 个空间点组成的正方体单元格,其行列间隔为 30 mm,靶标坐标系相对于摄像机坐标系的关系是 $R = [40 \quad -20 \quad 20]$ (单位为 $^\circ$), $T = [-0.7 \quad -1.3 \quad 2]$ (单位为 m)。焦距为 8 mm,相面大小是 2 048

pixel×2 048 pixel。像元大小为 5.5 μm×5.5 μm。4 个方向消隐点为:

$$VS = \begin{bmatrix} 103.13 & 4\,780.52 & -6\,478.66 & 1\,660.12 \\ 2\,574.34 & 2\,389.74 & 2\,817.75 & 2\,508.91 \end{bmatrix},$$

(单位:pixel)

消隐点误差为:

$$\begin{bmatrix} 1.27 & 1.19 & 1.01 & -1.06 \\ -2.04 & -1.07 & -0.86 & -0.38 \end{bmatrix},$$

(单位:pixel)

空间点对应的图像点如图 5 所示。

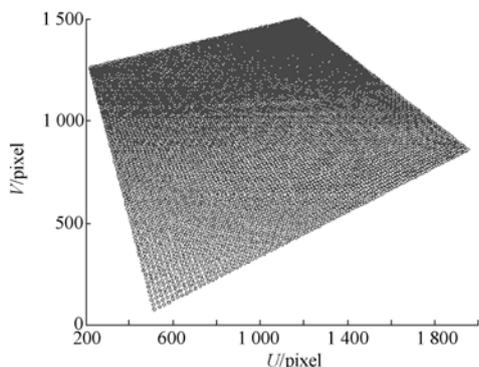


图 5 空间点对应的图像点

Fig. 5 Image points corresponding to space points

图像中心区域约为 100 pixel×100 pixel,初始步长约为 $t=50$ pixel,标定区域约为 $w=20$ 。根据四点交比的精度分析结果,选取 7×7 的图像点作为中心区域, D'_n 的移动间隔为 15 pixel。初始 A', B', C' 点为第 1、4、7 点。图像加入均值为零,三倍均方差为 0.02 pixel 的噪声和 0.6% 的畸变,根据步骤 1 和步骤 3,通过中心区域畸变校正和修正,中心区域图像点坐标值 U, V 误差如图 6 所示。

基于四点交比不变性和消隐点共线约束畸变校正结果如图 7、图 8 所示。经过 52 次计算,图像点 U 坐标值的最大误差为 0.581 pixel, V 坐标值的最大误差为 0.353 pixel,最大误差只是图像噪声的 29.05 倍。

4.2 实际系统畸变校正实验

实物实验中的镜头为 Kowa 公司 LM8JCM,焦距为 8 mm,畸变为 0.6%。相机选取的是 Point grey 公司 GZL41C6M,相面大小是 2 048×2 048,靶标特征使用的是红外发光二极管(LED),调节光亮度使得提取特征精度较好。如图 9 所示,红外 LED 固定在三坐标机上,移动坐

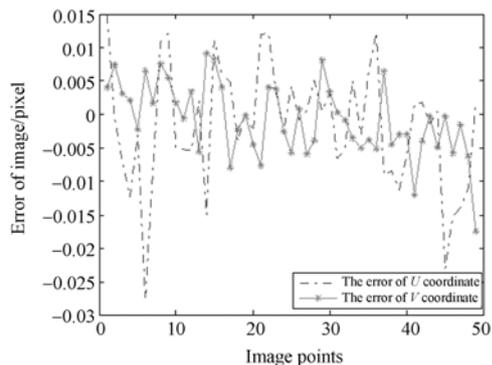


图 6 中心区域特征点校正和修正后误差

Fig. 6 Image point errors in central area after correction

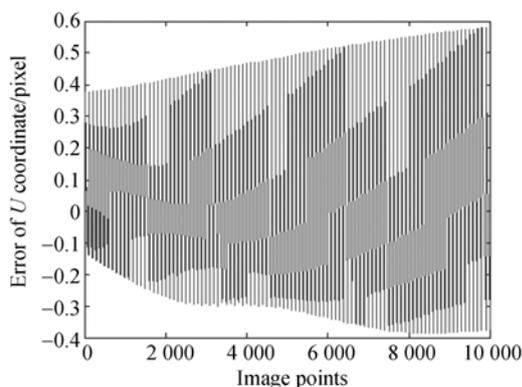


图 7 畸变校正后 U 坐标误差

Fig. 7 Errors of U coordinate after distortion correction

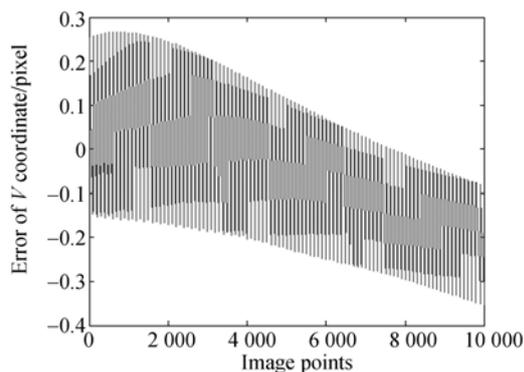


图 8 畸变校正后 V 坐标误差

Fig. 8 Errors of V coordinate after distortion correction

标机形成一个虚拟靶标。靶标大小为 800 mm×800 mm,靶标上特征点为 41×41。相机距坐标机约 1 m 远,相机坐标系和坐标机坐标系有一定角度,以满足消隐点提取精度。

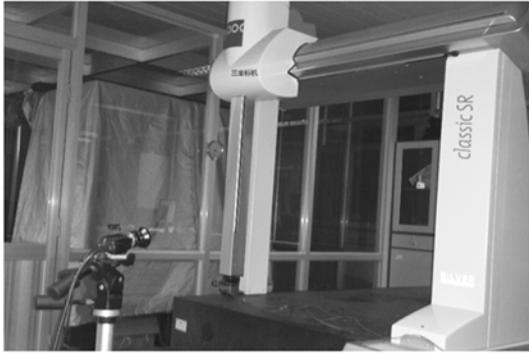


图 9 实验现场图片

Fig. 9 Experiment scene photo

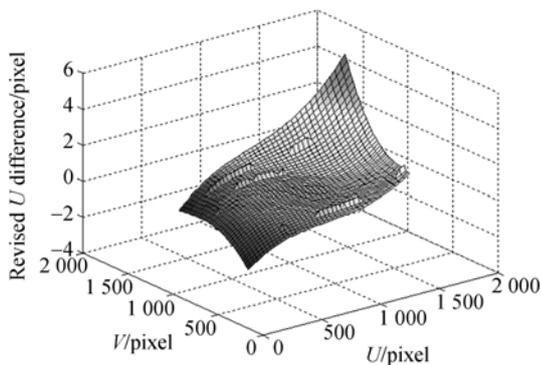


图 10 校正后 U 坐标值偏差

Fig. 10 Difference of U after distortion correction

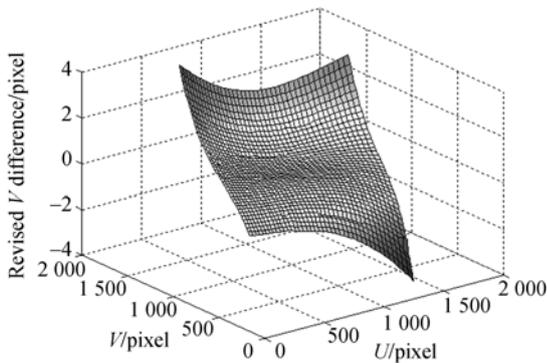


图 11 校正后 V 坐标值偏差

Fig. 11 Difference of V after distortion correction

特征提取图像点和校正后图像点的偏差值分量 U, V 如图 10 和图 11 所示。4 个边缘图像点的坐标值分别是: $(400.709, 691.459), (1432.905, 236.625), (631.17, 176.16), (1874.958, 1530.71)$ (单位: pixel), 对于校正后偏移量为: $(-2.63, 1.32), (1.95, -3.90), (-2.177, 3.89),$

$(4.88, 3.02)$ (单位: pixel)。

本文对基于消隐点共线约束校正后的图像点、基于交比不变算法校正图像点和未校正采集图像点的交比值误差进行对比, 以分析实际校正精度。取图像中心区域一点, 分别计算通过这个图像点 4 个方向直线上图像点的交比值误差。结果如表 2 所示。从表中可以看到, 基于共线交比不变性算法校正后图像点的交比值比未校正图像点的提高了一个数量级, 而基于消隐点共线约束算法的交比值比基于共线交比不变性算法校正后图像点的交比值提高了一个数量级。这说明该算法的校正结果优于基于共线交比不变算法。

表 2 校正图像交比值对比

Tab. 2 Comparison of cross-ratio values for corrected image

| 算法 | 图像点坐标值 | 直线 1 | 直线 2 | 直线 3 | 直线 4 |
|-------|--------------|------|------|------|------|
| 消隐点约束 | $U(10^{-5})$ | 4.1 | 21.8 | 2.1 | 27.5 |
| 校正算法 | $V(10^{-5})$ | 4.0 | 41.3 | 24.8 | 4.2 |
| 交比不变性 | $U(10^{-4})$ | 6.1 | 7.6 | 3.4 | 13.5 |
| 校正算法 | $V(10^{-4})$ | 9.0 | 62.2 | 15.2 | 3.1 |
| 原始采集 | $U(10^{-3})$ | 11.3 | 1.0 | 1.8 | 1.4 |
| 图像 | $V(10^{-3})$ | 7.8 | 16.1 | 3.9 | 1.8 |

5 结 论

本文分析了基于四点共线交比不变性逐点畸变校正算法的精度, 给出了四点共线中前 3 个图像的位置和间距最优设计。在上面计算结果的基础上提出了基于消隐共线约束, 根据消隐点距离直线较远的特性来优化直线计算精度。由于靶标采用棋盘格方式, 每个需要校正畸变图像点都可以找到三个方向直线约束, 最终利用直线优化校正图像结果。仿真实验表明, 对于图像含有均值为零, 三倍均方差为 0.02 pixel 的噪声, 畸变为 0.6%, 相面大小为 2048×2048 的视觉系统, 校正后最大误差 0.581 pixel。实物实验表明, 从校正后图像点所计算交比值来分析, 基于消隐点共线约束逐点畸变校正算法的校正结果优于基于四点共线交比值算法逐点校正的图像点。

参考文献:

- [1] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [2] 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 显微立体视觉小尺度测量系统的标定[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 1985-1994.
- HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Calibration of stereo microscope measurement systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 1985-1994.
- [3] 刘书桂,姜珍珠,董英华,等. 采用移动光靶标的分区域相机标定[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 259-265.
- LIU SH G, JIANG ZH ZH, DONG Y H, *et al.*. Sub-regional camera calibration based on moving light target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 259-265.
- [4] 薛俊鹏 苏昱渝. 基于两个正交一维物体的单幅图像相机标定[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0115001.
- XUE J P, SU X Y. Camera calibration with single image based on two orthogonal one-dimensional objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0115001.
- [5] 贺俊吉,张广军,杨宪铭. 基于交比不变性的镜头畸变参数标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(5): 597-599.
- HE J J, ZHANG G J, YANG X M. Approach for calibration of lens distortion based on cross ratio invariability [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(5): 597-599.
- [6] 唐巍,叶东,袁锋,等. 视觉测量系统中一种独立的畸变校正算法[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(2): 308-315.
- TANG W, YE D, YUAN F, *et al.*. Independent distortion correction algorithm in vision measurement [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(2): 308-315.
- [7] 周富强,胡坤,张广军. 基于共线特征点的摄像机镜头畸变校正[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(9): 174-177.
- ZHOU F Q, HU K, ZHANG G J. Correcting distortion of camera lens with collinear points [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(9): 174-177.
- [8] 周富强,蔡斐华. 基于非量测畸变校正的摄像机标定方法[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(8): 228-232.
- ZHOU F Q, CAI F H. Camera calibration method based on non-metric distortion correction [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(8): 228-232.
- [9] 张靖,朱大勇,张志勇. 摄像机镜头畸变的一种非量测校正方法[J]. *光学学报*, 2008, 28(8): 1552-1557.
- ZHANG J, ZHU D Y, ZHANG ZH Y. Non-metric calibration of camera lens distortion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1552-1557.
- [10] 张之江,车仁生,黄庆成,等. 测头成像视觉坐标测量系统中特征点成像中心获取[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(5): 12-18.
- ZHANG ZH J, CHEN R SH, HUANG Q CH, *et al.*. Centroid of characteristic point image obtain in probe imaging vision coordinate measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5): 12-18.
- [11] 杨博文,张丽艳,叶南,等. 装配位姿视觉检测系统中红外靶点质心定位[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(7): 965-971.
- YANG B W, ZHANG L Y, YE N, *et al.*. Centroid location algorithms of infrared target in computer-vision-based assembly pose detection system [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(7): 965-971.
- [12] 冯新星,张丽艳,叶南,等. 二维高斯分布光斑中心快速提取算法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512002.
- FENG X X, ZHANG L Y, YE N. Fast algorithms on center location of two dimensional Gaussian distribution spot [J]. *Acta Optica*

Sinica, 2012, 32(5): 0512002.

- [13] 黄凤山, 钱惠芬. 三坐标测量机驱动的摄像机标定技术[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(4): 952-957.
HUANG F SH, QIAN H F. Camera calibration technology driven by three-coordinate measuring

machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 952-957.

- [14] HARTLEY R I, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 568-582.

作者简介:



赵振庆(1983—),男,河北张家口人,2007年、2010年于燕山大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为机器视觉、图像处理。E-mail:zzq725@126.com



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得学士、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

(本栏目编辑:李自乐)

(版权所有 未经许可 不得转载)