

doi: 10.3788/gzxb20124102.0179

一种用于计算三维视觉测量中线结构光平面的 新型算法

刘宁, 卢荣胜, 夏瑞雪, 李琪

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

摘 要:介绍了一种基于线结构光的机器视觉测量系统的光平面计算方法. 该方法采用图像减影来获取光条图像, 利用 Steger 算法提取图像中的亚像素光条中心点, 再用正交直线拟合法计算图像坐标系下的光条直线方程. 通过靶标特征点的世界坐标和交比不变性, 计算线结构光在靶标平面上的世界坐标点, 并将这些坐标点用正交平面拟合法计算得到光平面方程. 为了提高整体准确度, 本文对算法进行了细节优化, 给出了标定系统的设计方案和实验过程. 实验结果表明, 该方法具有较好的鲁棒性和较高的准确度.

关键词:线结构光; 光平面; 机器视觉; 图像处理; 交比

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)02-0179-6

0 引言

结构光三维视觉测量方法属于主动机器视觉范畴, 相对于被动机器视觉(例如双目立体视觉), 具有大量程、大视场、高准确度、光条图像易于提取、实时性强及主动受控等优点. 其中用线激光作结构光的模式目前应用得最为广泛^[1]. 采用这种方法进行测量需要预先完成两个步骤, 一个是相机的内外参量及畸变的标定, 另一个是光平面方程的计算. 整个系统要获得更高的测量准确度, 从算法层面上来说, 一是需要标定出更准确的相机内外参量与畸变系数; 二是要获得更高准确度的光平面方程. 本文着重研究第二个问题, 即光平面计算方法的优化. 本文的方法在传统光平面投影系统上作了一些调整, 并在算法上作了一些改进, 例如线结构光在靶标平面上投影的光条的提取、光平面拟合点在世界坐标系下的计算等. 另外还增加了一些提高准确度的校正步骤, 以提高线结构光光平面的计算准确度, 进而提高测量系统的性能.

1 光条图像的提取

计算光平面的第一步是要提取图像中线结构光在靶标平面上投影的光条. 本方法采用的测试系统设计方案为: 将平面靶标安置于直线导轨上, 靶标平

面与导轨运动轴线垂直, 用步进电机控制靶标在导轨上运动, 实物如图 1 所示, 其中用于产生光条的激光器为 StockerYale 公司的 Lasiris T-MFL125.

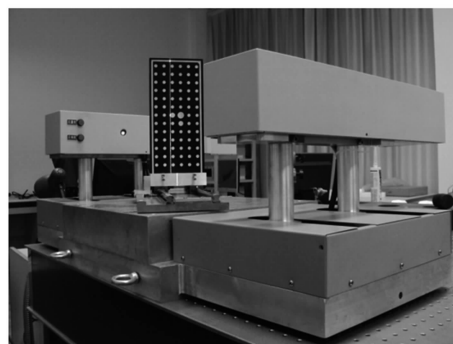


图 1 测试系统

Fig. 1 Measurement system

通过磁栅式传感器检测靶标的当前位置, 用计算机控制线激光器打开或关闭. 靶标近似正对相机作直线位移, 在 3 个不同位置停留, 停留时线激光器先打开再关闭, 在每个位置摄取含有光条和不含光条的图像各一幅. 共得到 3 组不同位置的靶标图像(共 6 幅)进行相机标定. 标定的方法采用 Tsai 的 RAC 两步法^[2].

在每一个位置, 不含光条的图像 I_1 (如图 2(a)) 与含有光条的图像 I_2 (如图 2(b)) 只相差一个光条, 故直接用图像 I_2 减去图像 I_1 , 可以排除背景干

基金项目:国家自然科学基金(No. 50875074)和国家高技术研究发展计划(No. 2009AA04Z114)资助

第一作者:刘宁(1982—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为精密测量中的数字图像处理技术. Email: longredhair@163.com

导师(通讯作者):卢荣胜(1963—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为机器视觉及应用、自动光学检测、微纳显微三维成像、变形应变散斑测量技术. Email: lusrh@hotmail.com

收稿日期: 2011-09-01; **修回日期:** 2011-10-31

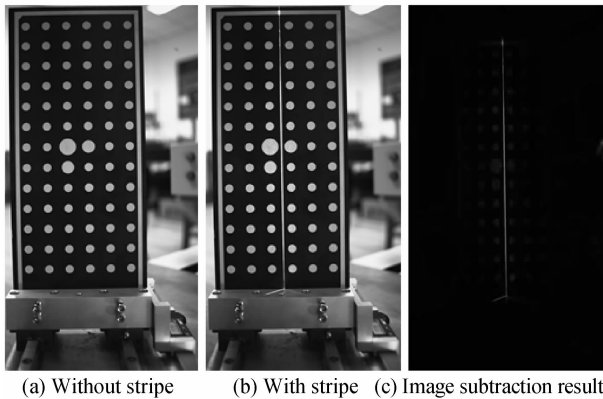


图2 图像减影获取光条图像

Fig.2 Gain stripe using image subtraction method

扰,得到基本只有光条的图像 I_0 ,称为图像减影,如图2(c).

图像 I_0 使得光条提取变得较为容易,常用的提取光条的算法有 Hough 变换^[3]、边缘检测^[4]等. Hough 变换速度较慢且不够稳定,而现有的各类一阶、二阶边缘检测算子基本上都是检测阶跃边缘,而非线条中心,并且大部分是像素级准确度的. CCD 的分辨率为 $3\ 048 \times 4\ 660$,Lasiris T-MFL125 投射的光条在 CCD 上的成像较好地服从高斯分布,具有极佳的对称性. T-MFL125 工作在“宽线模式”,高斯曲线的 $\sigma \leq 10$ 像素,一个光条横断面的滤波后灰度曲线如图3所示,其一阶导数用虚线表示,二阶导数用点线表示.横坐标为像素,纵坐标为灰度值.二阶导数的过零点对应光条中心(如图中竖直虚线所示).德国 Steger 博士^[5]利用 Hessian 矩阵确定图像中线条边缘的法线方向,然后通过求解法线方向上

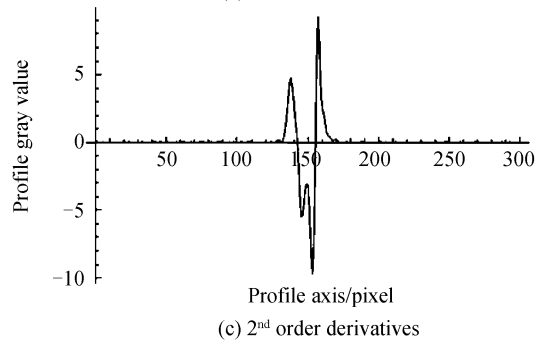
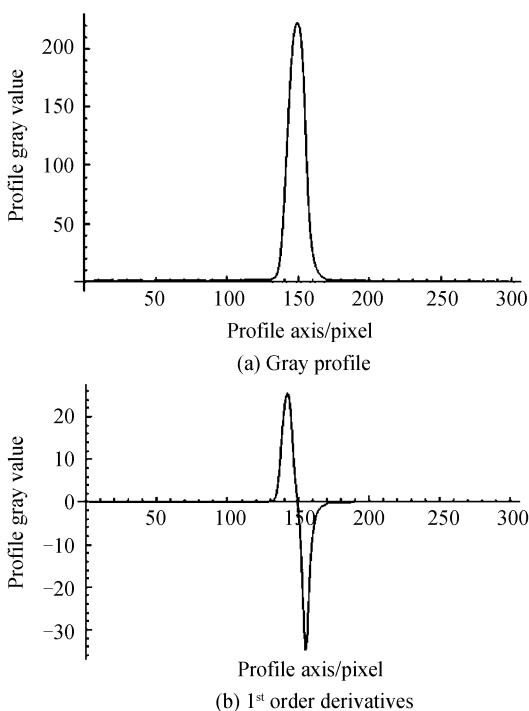


图3 光条横断面的灰度曲线及其一阶二阶导数

Fig.3 Gray profile of stripe cross section and its 1st and 2nd order derivatives

的极值点得到线条边缘的亚像素级位置,该方法具有准确度高、鲁棒性好等优点.本文采用该算法来提取光条的中心轮廓.

二维 Steger 算法属于亚像素内插算法,设图像与下列高斯函数核卷积后得到偏导数 $g_x, g_y, g_{xx}, g_{xy}, g_{yy}$,分别为

$$\begin{cases} g_{x,\sigma}(x,y) = g'_\sigma(x)g_\sigma(y) \\ g_{y,\sigma}(x,y) = g_\sigma(x)g'_\sigma(y) \\ g_{xx,\sigma}(x,y) = g''_\sigma(x)g_\sigma(y) \\ g_{xy,\sigma}(x,y) = g'_\sigma(x)g'_\sigma(y) \\ g_{yy,\sigma}(x,y) = g_\sigma(x)g''_\sigma(y) \end{cases} \quad (1)$$

则图像的二次泰勒展开形式为

$$\begin{aligned} f(x,y) = & g(x_0,y_0) + (x-x_0\ y-y_0) \begin{bmatrix} g_x(x_0,y_0) \\ g_y(x_0,y_0) \end{bmatrix} + \\ & \frac{1}{2}(x-x_0\ y-y_0) \begin{bmatrix} g_{xx}(x_0,y_0) & g_{xy}(x_0,y_0) \\ g_{xy}(x_0,y_0) & g_{yy}(x_0,y_0) \end{bmatrix} \cdot \\ & \begin{pmatrix} x-x_0 \\ y-y_0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

对于图像上任意一点,它的 Hessian 矩阵可以表示为

$$H(x,y) = \begin{pmatrix} g_{xx} & g_{xy} \\ g_{xy} & g_{yy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

对于二维图像 $f(x,y)$,线条边缘中心点处的一阶导数为零,即认为边缘方向 ν 上的一阶方向导数为零,且二阶方向导数取局部极值的点就是线条边缘中心点.可证明,Hessian 矩阵的两个特征值分别为图像灰度的二阶导数的极大值和极小值,其对应的两个特征向量表示了两个极值所取的方向,且相互正交.

设光条法线方向 $\nu = (\nu_x, \nu_y)^T$ 且满足 $\|\nu\| = 1$. 则光条的亚像素坐标 $(p_x, p_y) = (t\nu_x + x_0, t\nu_y + y_0)$,其中的

$$t = -\frac{\nu_x g_x + \nu_y g_y}{\nu_x^2 g_{xx} + 2\nu_x \nu_y g_{xy} + \nu_y^2 g_{yy}} \quad (4)$$

如果 $(t\nu_x\ t\nu_y) \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] \times \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$,即一阶

导数为零的点位于当前像素内,且 (v_x, v_y) 方向的二阶方向导数大于指定阈值,则点 (p_x, p_y) 为线条边缘中心点. 光条法线方向 $\mathbf{v} = (v_x, v_y)^T$ 对应于 Hessian 矩阵的最大绝对特征值的特征向量,而图像灰度函数在 \mathbf{v} 方向的二阶导数对应于 Hessian 矩阵的最大绝对特征值.

经过 Steger 算法初步计算得到的只是每一点的方向向量和二阶方向导数,如要得到光条的路径,需要使用双阈值连通算法将图像中的边缘进行二值化,并将线条连接起来. 在该算法中用户需要指定一个高阈值 high 和一个低阈值 low.

如果某个像素在线条垂直方向上的二阶方向导数取得局部极大值,则它被标记为待考察的线点. 为了将线点连接成轮廓线,需进行下面的判断:如果某一点的二阶导数大于 high 则它被立即接受;如果一个线点的二阶导数小于 low 则该点被立即拒绝;如果它的值介于二者之间,则判断它是否通过连通路程与已接受点相连,如果相连则接受.

由于 Steger 算法在提取线条时可能存在光条外的点,这会对光条直线的拟合造成严重误差,因此在拟合前需要进行第一次筛选. 将每个亚像素线点取到最邻近的像素级位置,得一幅二值图,先用连通域标记算法^[6]将线点分割成多个独立的连通域,将每个连通域进行正交距离直线拟合(拟合方法见下),分别得到过直线的一点 $\mathbf{p}_0 = (x_0, y_0)^T$ 和直线的方向向量 $\mathbf{v}_0 = (\alpha_0, \beta_0)^T$. 逐一将各连通域与最大连通域的直线参量进行比较,若 \mathbf{v}_0 的角度差异大于指定阈值,则该连通域的所有点均被排除在拟合点之外. 余下的连通域直线参量转化为一般式,转化方式为将点向量式 $\{\mathbf{p}_0 = (x_0, y_0)^T, \mathbf{v}_0 = (\alpha_0, \beta_0)^T\}$ 中参量对应于一般式 $ax + by + c = 0$ 中的参量,分别为 $a = \beta, b = -\alpha, c = \alpha y_0 - \beta x_0$,其中 $\|\mathbf{v}\| \neq 0$. 再将各连通域与最大连通域直线的 c 参量进行比较,大于指定阈值的也被排除在外.

为了获得更高准确度,直线拟合应基于点到直线的正交距离. 对于平面上 m 个点的集合 $\{\mathbf{p}_i = (x_i, y_i)^T, i = 1, 2, \dots, m\}$,根据正交距离最小二乘法拟合得到的直线必过均值点 $\bar{\mathbf{p}} = (\bar{x}, \bar{y})^T$ ^[7],只需再求得直线方向向量 $\mathbf{v}_0 = (\alpha_0, \beta_0)^T$ 即可确定该直线,为此先建立散射矩阵

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} D_x & C_{xy} \\ C_{xy} & D_y \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中 $D_x = \sum (x_i - \bar{x})^2$, $D_y = \sum (y_i - \bar{y})^2$, $C_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$. \mathbf{S} 有两个特征值,其中最大特征值对应的特征向量即为直线的方向向量,最大特征值为

$$\lambda = (D_x + D_y + \sqrt{(D_x - D_y)^2 + 4C_{xy}^2})/2 \quad (6)$$

若 $D_x \geq D_y$,最大特征值对应的特征向量为

$$\mathbf{v}_0 = (\alpha_0, \beta_0)^T = (D_x - D_y + \sqrt{(D_x - D_y)^2 + 4C_{xy}^2}, 2C_{xy})^T \quad (7)$$

否则为

$$\mathbf{v}_0 = (\alpha_0, \beta_0)^T = (2C_{xy}, -(D_x - D_y) + \sqrt{(D_x - D_y)^2 + 4C_{xy}^2})^T \quad (8)$$

光条直线在平面坐标系下可表示为 $\{x, y | x = x + t\alpha_0, y = y + t\beta_0\}$,如果拟合结果仍受到非光条像素的影响,则用莱以特准则 (3σ) 进行第二次筛选,计算 $\sigma = \{\sum [\alpha_0(x_i - x_0) + \beta_0(y_i - y_0)]^2 / (n-1)\}^{1/2}$,将 $d_i = \sqrt{[\alpha_0(x_i - x_0) + \beta_0(y_i - y_0)]^2} > 3\sigma$ 的拟合点视为粗大误差剔除,再用余下的点进行第二次拟合.

2 光条空间坐标的计算

根据图 2 中不含光条的靶标图像,提取出其中圆点中心,作为特征点在图像坐标系下的坐标.

要得到圆点中心,需要先提取圆点的外边缘:先用大津法分割前景和背景^[8],再用连通域标记算法找到前景中靶标的白线外框,只保留外框内部区域的靶标图像. 用连通域法找到每个圆点的大致位置,对每个圆点进行亚像素边缘检测以获得拟合点. 边缘检测的方法可以先用 Canny 算法初定位,然后用矩估计^[9]或曲线拟合方法^[10]提高到亚像素准确度.

根据得到的圆点的边缘点序列,再用直接最小二乘椭圆拟合法得到椭圆的中心^[11],再由 Heikkila 提出的空间圆中心在摄像机像平面上的畸变误差模型^[12],对椭圆中心进行校正,以得到中心真实投影点,作为特征点在图像坐标系下的位置. 校正模型如图 4 所示,空间椭圆 $O_1 - A_1 B_1 C_1 D_1$ 的中心 O_1 在像平面 π 上的投影像点的坐标可以利用直线 OO_1 与 π 的交点来求取. 透视投影变换中椭圆中心畸变误差数学模型为

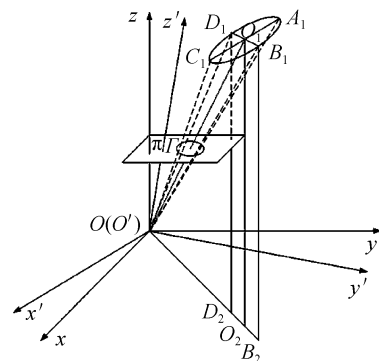


图 4 空间椭圆透视投影变换

Fig. 4 Perspective projection transformation of spatial ellipse

$$d = \sqrt{(a-a')^2 + (b-b')^2} \quad (9)$$

式(9)中 (a', b') 为 O_1 点的投影像点坐标,即为 $a' = (q_1 l_1 - m_1 p_1) / (k_1 p_1 - n_1 l_1)$, $b' = (m_1 n_1 - k_1 q_1) / (k_1 p_1 - n_1 l_1)$,其中几个参量由相机标定中的内外参量计算而来,分别为 $k_1 = r_1 \cos \gamma - r_7 \cos \alpha$, $l_1 = r_2 \cos \gamma - r_8 \cos \alpha$, $m_1 = (r_3 \cos \gamma - r_9 \cos \alpha) f$, $n_1 = r_4 \cos \gamma - r_7 \cos \beta$, $p_1 = r_5 \cos \gamma - r_8 \cos \beta$, $q_1 = (r_6 \cos \gamma - r_9 \cos \beta) f$.

经过校正后的特征点图像坐标具有较高准确度,根据半径最大圆和半径次大圆的空间分布,将图像坐标系下的特征点与世界坐标系下的空间坐标建立一一对应的关系.每个特征点的世界坐标是已知的,其图像坐标现在也已知.在图像坐标系下,对于同一行的靶标特征点,用上述的正交直线拟合法,拟合得每一行的特征点直线.

虽然根据投影空间同素性,经过投影后的同一行靶标特征点应在一条直线上,但由于测量误差的存在,不可能绝对共线.为了在用交比不变性求光平面点时获得较高准确度,需要在图像坐标系中进行校正,先将直线点向量式转化为一般式,设某条靶标横向特征点连线为 $a_k x + b_k y + c_k = 0$,该横向上的特征点序列为 $\{(x_i, y_i)^T, k=1, 2 \dots 6\}$,过每一特征点向连线作垂线,其交点为

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{b_k^2 x_i - a_k b_k y_i - a_k c_k}{a_k^2 + b_k^2} \\ y_i &= \frac{-a_k b_k x_i + a_k^2 y_i - b_k c_k}{a_k^2 + b_k^2} \end{aligned} \quad (10)$$

将其作为校正后求光平面的新特征点图像坐标.对于光条直线 $a_0 x + b_0 y + c_0 = 0$ 和靶标横向特征点连线 $\{a_k x + b_k y + c_k = 0, k=1, 2 \dots 13\}$,其交点分别为

$$\begin{aligned} x_k &= \frac{b_0 c_k - b_k c_0}{a_0 b_k - a_k b_0} \\ y_k &= \frac{a_k c_0 - a_0 c_k}{a_0 b_k - a_k b_0} \end{aligned} \quad (11)$$

现在利用交比不变性求光条与横向特征点直线的交点的世界坐标.交比不变性如图5所示,若有4

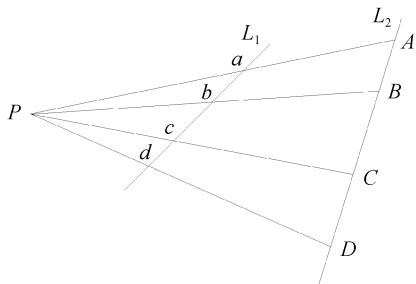


图5 交比不变性
Fig. 5 Cross ratio invariance

个点 a, b, c, d 共线于直线 L_1 ,它们经投影中心投射到直线 L_2 上,对应的像点分别是 A, B, C, D ,其中共线四点 a, b, c, d 的交比可以表示为 $(a, b; c, d) = (ac/ad)/(bc/bd)$,根据投影空间的交比不变性^[13], $(a, b; c, d) = (A, B; C, D)$,即

$$\frac{ac/ad}{bc/bd} = \frac{AC/AD}{BC/BD} \quad (12)$$

在投影变换中交比保持不变.

本文实验采用的靶标一行有6个特征点,任取3个与光条交点组成4点进行交比不变运算,共计有 $C_6^3 = 20$ 种组合.利用交比不变性算出每种组合下光条线与水平直线的交点的世界坐标,将20个的世界坐标相加求平均值,即可知在该行的光平面拟合点的世界坐标.靶标有13行,每张图像可得13个在该靶标平面上的光平面点,共采集3次,得39个光平面点.

3 光平面的拟合

根据上面的步骤,将三次采集得到的几组世界坐标系下的光平面空间点合并在一起,得到一组空间点序列 $\{x_i\}, \{y_i\}, \{z_i\}$,用正交距离最小二乘法拟合光平面.在空间中,拟合点 $p_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ 到光平面 $Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0$ 的垂距平方为

$$d_i^2 = \frac{(Ax_i + By_i + Cz_i + D)^2}{A^2 + B^2 + C^2} \quad (13)$$

光平面还可用平面上一点 $p_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ 和平面法向量 $v_0 = (v_x, v_y, v_z)^T$ 来表示.对于光平面上任意一点 p ,需满足约束条件 $\langle p - p_0, v_0 \rangle = 0$,即平面上的点 p 与平面上另一点 p_0 所成的向量与平面的法向量 v_0 垂直,这与方程形式 $Ax + By + Cz + D = 0$ 相一致.则点到光平面的垂距的平方为

$$d_i^2 = \frac{\langle p_i - p_0, v_0 \rangle^2}{\langle v_0, v_0 \rangle} \quad (14)$$

式中 $\langle v_0, v_0 \rangle = 1$,对于拟合点集 $\{p_i = (x_i, y_i, z_i)^T, i=1 \dots m\}$,若其到光平面 $\{p | \langle p - p_0, v_0 \rangle = 0\}$ 的正交距离服从正态分布,且具有一致标准差 σ ,则平面拟合的优值函数为^[14]

$$f(p_0, v_0) = \sum \langle p_i - p_0, v_0 \rangle^2 \rightarrow \min \quad (15)$$

式中 $\{p_i\}$ 是已知的, p_0 和 v_0 是待求的.可以证明,根据上式拟合得到的光平面必过 $\{p_i\}$ 的均值点 \bar{p} ,故解得第一个未知向量 $p_0 = \bar{p}$,再构造设计矩阵

$$D = \begin{bmatrix} p_1 - \bar{p} \\ \vdots \\ p_m - \bar{p} \end{bmatrix} \quad (16)$$

令散射矩阵 $S = D^T D$,显然 S 为实对称矩阵, S 具有3个特征值和对应的3组特征向量,其中最小特征

值所对应的单位特征向量即为光平面待求参量 $\mathbf{v}_0 = (v_x, v_y, v_z)^T$, 解得第二个未知向量 $\bar{\mathbf{p}}$ 和 \mathbf{v}_0 即为光平面拟合结果. 光平面的另一种表达形式为

$$0 = Ax + By + Cz + D = v_x \bar{x} + v_y \bar{y} + v_z \bar{z} - (v_x \bar{x} + v_y \bar{y} + v_z \bar{z}) \quad (17)$$

式中 $A = v_x, B = v_y, C = v_z, D = -(v_x \bar{x} + v_y \bar{y} + v_z \bar{z})$.

4 实验

采用本文设计的设备, 进行基于 Tsai 标定的机

器视觉激光三角法测量的标定实验. 靶标在三个位置停留, 采集 3 组数据, 包括不含光条的 (图 6(a)、(c)、(e)) 和含有光条的 (图 6(b)、(d)、(f)). 用本文的方法进行提取和计算, 其中 Steger 算子提取线条时取 $\sigma = 1.5$, 卷积模板宽度为 $2 \times 3\sigma = 9$ 像素, 最终得到光平面模型如图 6(g). 将数据应用于实际测量中发现, 采用 3048×4660 的高分辨率相机, 加上本文的高准确度算法, 该机器视觉测量系统准确度可达微米级. 在计算完成后, 将光平面与标定板每行特

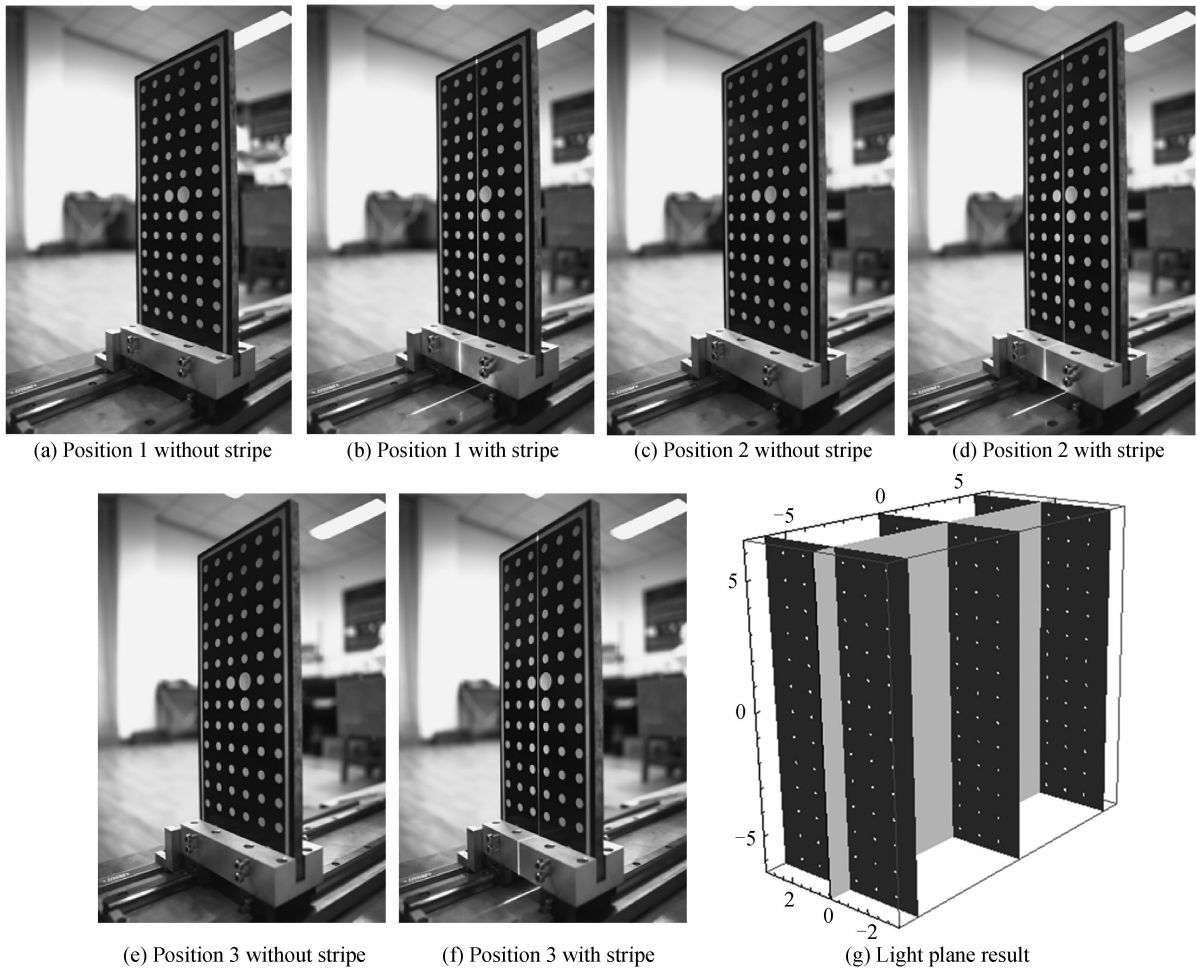


图 6 实验图像与光平面结果

Fig. 6 Experimental images and the result of light plane

表 1 光平面提取方法比较

Table 1 Comparison of different light plane extraction methods

Method	Traditional	Current	This paper
Stripe extraction	Hough transform	Canny operator and Algebraic line fitting	Steger algorithm and Orthogonal line fitting
Calibration points extraction	Centroid	Center of fitted ellipse	Calibrated center using Heikkila model
Light plane fitting	Algebraic plane fitting	Algebraic plane fitting	Orthogonal plane fitting
Error(σ)	100%	70%~85%	40%~60%

* Error (σ) is the general range of error decline from multi-group experiments

征点连线的交点作为计算结果反算到世界坐标系. 由于系统误差和算法模型误差的存在, 标定点的反算结果与输入参量不可能绝对吻合. 该系统在相同情况下采集到的同一组标定点数据, 采用传统的算法、目前常用方法, 以及本文方法进行计算, 将反算位置与理想位置作距离平方和运算, 计算标准差 σ (σ 越大则准确度越差, 可以用来评估准确度), 各种方法的效果如表 1 所示. 由于是同一组数据, 含有相同的系统误差, 因此其效果的比较可以说明本文方法可以降低算法带来的误差.

5 结论

针对机器视觉测量系统中光平面的获取,本文介绍了一整套包括图像提取和数据处理在内的方法.在传统方法的基础上,进行了一些实验手段的改进和算法配置的优化(例如图像采集、靶标特征点提取等),有效地提高了光平面的计算准确度.实验结果显示该方法具有较好的鲁棒性和较高的准确度.

参考文献

- [1] LI Bing, LUO Yi-ping, WANG Zhao, *et al.* Study on the rapid measuring method of multi light-knife for 3D profile[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 738-741.
李兵,罗意平,王昭,等.多光刀三维轮廓快速测量方法研究[J].光子学报,2003,**32**(6): 738-741.
- [2] QU Xue-jun, ZHANG Lu, MENG Biao, *et al.* A new camera calibration method based on two stages distortion model[C]. Information Science and Management Engineering (ISME), 2010 International Conference, 2010, 2: 125-129.
- [3] FERNANDES L A F, OLIVEIRA M M. Real-time line detection through an improved hough transform votings cherne [J]. *Pattern Recognition*, 2008, **41**(1): 299-314.
- [4] ZHAO Hui-li, QIN Guo-feng, WANG Xing-jian. Improvement of canny algorithm based on pavement edge detection[C]. Image and Signal Processing (CISP), 2010 3rd International Congress, 2, 964-967.
- [5] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures [R]. Forschungsgruppe Bildverstehen (FG BV), Informatik IX, Technische Universitaet Muenchen, July 1996.
- [6] HARALICK R M, SHAPIRO L G. Computer and robot vision [M]. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc, 1992:28-48.
- [7] BEVINGTON P R. Data reduction and error analysis for the physical sciences[M]. New York: McGraw-Hill,1969.
- [8] PAN M, ZHANG F, LING H. An image binarization method based on HVS [C]. Multimedia and Expo, 2007 IEEE International Conference on Digital Object Identifier, 2007: 1283-1286.
- [9] LYVERS E P, MITCHELL O R, AKEY M L, *et al.* Subpixel measurements using a moment-based edge operator [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**(12): 1293-1308.
- [10] HE Zhong-hai, WANG Bao-guang, LIAO Yi-bai, *et al.* Subpixel algorithm using a curve fitting method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003,**24**(2): 195-197.
贺忠海,王宝光,廖怡白,等.利用曲线拟合方法的亚像素提取算法[J].仪器仪表学报,2003,**24**(2): 195-197.
- [11] FITZGIBBON A, PILU M, FISHER R B. Direct least square fitting of ellipses[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, **21**(5): 476-480.
- [12] HEIKKILA J, SILVEN O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]. Proc of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Jun 1997, 1106-1112.
- [13] SEMPLE J G, KNEEBONE G T. Algebraic projective geometry[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [14] Von MISES R. Mathematical theory of probability and statistics[M]. New York: Academic Press, 1964.

A Novel Algorithm for Computing the Plane of Line Structured Light in 3D Vision Measurement

LIU Ning, LU Rong-sheng, XIA Rui-xue, LI Qi

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A novel algorithm is presented to compute the plane equation of line structured light, which used in a machine vision measurement system. Image subtraction is introduced to obtain stripe image, Steger algorithm is applied to extract sub-pixel level centric points of stripe in the image, and orthogonal line fitting is performed to gain line equation of stripe in image coordinate system. The approach of calculating world coordinates of points on the plane of line structured light from feature points in calibration board is introduced, which are based on the principle of cross-ratio invariance. Finally, orthogonal least-squares plane is proposed fitting to get light plane equation. Some specific optimizations in algorithm are put forward to improve total accuracy, and the scheme design of calibration system and detailed experimental procedure are given. Experimental results demonstrate that the method is of robustness and has high accuracy.

Key words: Linear structured light; Light plane; Machine vision; Image process; Cross ratio