

文章编号 1004-924X(2016)04-0714-12

基于双平行平面相机模型的钢板尺寸视觉测量

刘 昶*, 韦飞云, 孙维广

(沈阳理工大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要:提出基于双平行平面相机模型的视觉测量方法,用于测量生产线上运动钢板的尺寸。该方法采用数据驱动的方式计算像点在标定平面上投影点的世界坐标;采用 k 近邻(k -NN)方法生成目标在标定平面上的无畸变投影图像,并建立投影图像与世界坐标系的直接关联。提出了双平行平面模型下相机光心位置标定算法,利用线结构光进行板材厚度测量;在无畸变的投影图像上利用钢板边缘间的平行和垂直性进行钢板边缘特征提取,通过边缘直线的世界坐标方程求取长宽尺寸。最后,给出了针对大尺寸钢板测量的多相机测量系统框架。提出的方法为单目视觉测量方法,相比于其他方法具有现场安装简单和标定工作量小的特点。通过图像分辨率为 640×480 的相机对尺寸为 $80 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的标准铝块进行了测量,结果显示:厚度测量误差为 0.1 mm ,长度和宽度的误差在 0.2 mm 以内。实际应用中测量精度远高于加工精度,能够满足产品计量的要求。

关键词:单目视觉;双平面相机模型;钢板;尺寸测量;视觉测量;标定

中图分类号: TB92; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0714

Visual metrology for steel plate sizes based on two-parallel-plane camera model

LIU Chang*, WEI Fei-yun, SUN Wei-guang

(School of Information Science and Engineering,
Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

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

Abstract: A visual metrological method based on a two-parallel-plane camera model is proposed for the measurement of the sizes of moving steel plates on production lines. This method uses a data driven mode to calculate the world coordinates of any image point's corresponding projective point on the calibration plane. A k Near Neighbour(k -NN) algorithm is presented to generate the distortion free projective image on the calibration plane from the original image and to build a direct connection between the image and the world coordinate system. An optical center localization algorithm is also proposed. The metrological method uses line structured light to realize the thickness measurement. Then, it extracts plate's edge lines from the distortion free projective image by using their parallel or perpendicular properties and calculates the size of the plate from the edge lines' equations in the world coordinate system. Finally, a framework of large scale steel plate size measurement system is given. The above

收稿日期:2015-10-16;修订日期:2015-12-09.

基金项目:国家留学基金资助项目(No. 201308210280);沈阳理工大学计算机应用重点学科开放基金资助项目(No. 4771004kkfx10)

method is a monocular visual metrology. As comparing to other methods, the method is characterized by simple mounting and smaller calibration process. Experiments results show that if a camera with an image resolution of 640×480 is used to measure a standard $80 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ aluminum cuboid via the method, the thickness error is 0.1 mm , and the length and width errors are both less than 0.2 mm . When the method is applied to real steel plate measurement, the measurement accuracy is higher than manufacture accuracy, which shows that it satisfies the demands of product measurement.

Key words: monocular vision; two-plane camera model; steel plate ; size metrology ; visual metrology ; calibration

1 引 言

钢板等板材在造船、桥梁、锅炉制造等行业有大量需求。为满足客户需求及降低生产成本,生产企业对此类产品尺寸核验的精度要求越来越高。传统的手工测量长度和宽度的方法劳动强度高,人为因素对测量精度影响大。激光跟踪仪或光笔^[1]等光电测量方法虽然精度高,但不适合测量运动钢板。涡流法^[2]、漏磁场法^[3]、超声波^[4]或射线法^[5]等钢板厚度测量方法需要与被测目标接触,所以容易受板材表面光滑度和温度等因素的影响,并且存在环境污染等问题。

近年来,以计算机视觉技术为代表的非接触测量方法成为这一领域的研究热点。针对钢板长度和宽度的测量,文献[6]采用针孔模型,但在视觉解算过程中没有考虑到镜头畸变,误差较大,虽然利用了多台相机,但本质上还是单目视觉技术;文献[7]采用双目视觉的方法,但要求两台相机的光心连线与辊轴平行,现场安装难度大;文献[8]采用双目视觉技术测量宽度,两条边缘分别由两台相机进行测量,使用的设备比较多。针对板材厚度的测量,一般采用相机配合结构光的方法,如文献[9]采用点结构光;文献[10]采用线结构光,利用光条的像高和位移计算厚度。针对大尺寸板材的测量,文献[11]利用多台三维扫描仪和投影仪,采用图像拼接的方法恢复目标的三维图像,可测量平面或曲面板材;文献[12]采用双目结构光技术测量大型工件尺寸;文献[13]提出多相机多视场协同测量方法,有利于获得目标的细节特征,以提高测量精度。

综上所述,钢板尺寸测量的计算机视觉方法目前可分为单目视觉和双目视觉两类。相比于单目方法,双目视觉方法设备多、标定过程相对复杂,存在特征匹配的环节,因此总体上不如单目视觉方法简便。但单目视觉在一般情况下无法完成三维测量,需要借助结构光等其他设备才能完成测量任务。另一方面,高精度视觉测量方法中一般都采用相机的针孔模型和镜头畸变模型,需要标定相机参数和畸变参数,而现有的成熟标定算法,如基于共面特征点的标定方法^[14],往往需要拍摄多幅标定板图像才能达到满意的标定精度。而在工业现场条件比较苛刻的情况下,特别是大测量场、需要现场调节相机的焦距和光圈的情况下,现场标定过程是十分复杂的。

双平面相机模型^[15-16]采用物点在已统一坐标系的一个平面上的投影点连线确定物点与像点的透视投影关系。由于标定过程仅需要两个标定平面的图像,其标定工作量比较低。该模型虽然在三维重建等领域有所应用^[17-18],但由于模型参数较多,存在过参数化倾向,加之精度不是特别高,所以未得到广泛采用。

本文对双平面相机模型进行了改进,提出了基于双平行平面相机模型的钢板尺寸测量方法。该方法继承了双平面相机模型标定工作量小的优点,通过两个平行于钢板测量平面的标定平面,完成相机的标定,通过图像坐标变换提高了像点在标定平面上投影点世界坐标的恢复精度。然后通过生成标定平面上的投影图像得到钢板的无畸变图像,同时消除了镜头畸变和几何畸变,建立了图像坐标与世界坐标的联系。最后通过线结构光、钢板边缘提取和视觉解算实现了钢板的三维尺寸测量。

2 双平行平面相机模型与标定

2.1 标定平面上物点世界坐标恢复

按照相机的针孔模型,物理平面上一点与其对应的图像点之间存在中心射影变换关系,但由于镜头存在畸变,真实像点与理想像点不重合,因此在标定平面上建立平面世界坐标系,记某点的世界坐标为 (x, y) ,畸变图像中对应点的图像坐标为 (u, v) 。当镜头畸变仅考虑一阶径向畸变、切向畸变和薄棱镜畸变时,它们的关系如下:

$$\begin{cases} \sum_{0 \leq i+j \leq 3} c_{i,j} u^i v^j + \sum_{0 < i+j \leq 3} e_{i,j} x u^i v^j = x \\ \sum_{0 \leq i+j \leq 3} d_{i,j} u^i v^j + \sum_{0 < i+j \leq 3} e_{i,j} y u^i v^j = y \end{cases}, \quad (1)$$

其中:参数 $c_{i,j}, d_{i,j} (0 \leq i+j \leq 3)$ 和 $e_{i,j} (0 < i+j \leq 3)$ 共 29 个,它们隐式包含了相机的内外参数和镜头畸变参数。由于式(1)是关于这些参数的线性表达式,通过平面点特征标定板图像可以获得一组对应点的采样数据,并利用最小二乘法 (Least Squares Method, LSM) 估计这 29 个参数的值。将式(1)写成:

$$\begin{cases} x = \frac{\sum_{0 \leq i+j \leq 3} c_{i,j} u^i v^j}{1 - \sum_{0 < i+j \leq 3} e_{i,j} u^i v^j} \\ y = \frac{\sum_{0 \leq i+j \leq 3} d_{i,j} u^i v^j}{1 - \sum_{0 < i+j \leq 3} e_{i,j} u^i v^j} \end{cases}. \quad (2)$$

即可由图像点的图像坐标恢复它在标定平面上对应点的世界坐标。该方法最早由 Wei 等提出^[16],但此模型中存在 29 个参数,参数估计误差很容易导致物点世界坐标恢复的不准确。文献[19]采用图像坐标分块平移的方法来提高物点坐标恢复的准确性,取得了一定效果,但没有说明应该分几块才能达到满意效果。

考虑到式(1)的正确性与图像坐标系的定义无关,在对图像点 (u, v) 进行世界坐标恢复时,可以将图像坐标原点平移到 (u, v) ,此时原始采样中的对应点的图像坐标也随之平移。 (u, v) 在新坐标系下的坐标为 $(0, 0)$,仍然利用这些采样点进行 LSM 估计 29 个参数后,由式(2)可得物点坐标为 $x = c_{0,0}, y = d_{0,0}$,仅与 29 个参数中的 2 个有关。但考虑到此时这 2 个参数均依赖于 (u, v) ,所

以有:

$$\begin{cases} x = c_{0,0}(u, v) \\ y = d_{0,0}(u, v) \end{cases}. \quad (3)$$

以上方法将模型中的 29 个参数减少到 2 个,有效避免了参数估计误差对计算精度的影响,但每次计算均需要利用原始采样点,进行坐标平移后通过 LSM 进行参数估计,计算量比较大。一般地,模型参数一旦确定下来,模型也就随之确定下来,可以直接用于计算,是一种统一参数的形式。本文方法只有以式(1)表达的绝对不变的模型形式,而没有绝对不变的参数,每次计算均需重新估计参数,是一种数据驱动的形式。

2.2 标定平面投影图像生成

相机拍摄的原始图像是目标在像平面上的投影,受相机位姿和镜头的影响,目标图像一般同时存在几何畸变和镜头畸变。假设在标定平面上存在一个目标的投影图像,它与真实目标满足透视关系,透视中心为相机的光心,则也可以将原始图像理解为是该投影图像在像平面上的成像。相比于原始图像,该投影图像的优点是不存在镜头畸变。考虑钢板测量的问题,若标定平面与钢板测量平面平行,则钢板在此标定平面上的投影图像既不存在几何畸变,也不存在镜头畸变,这便于钢板尺寸测量。

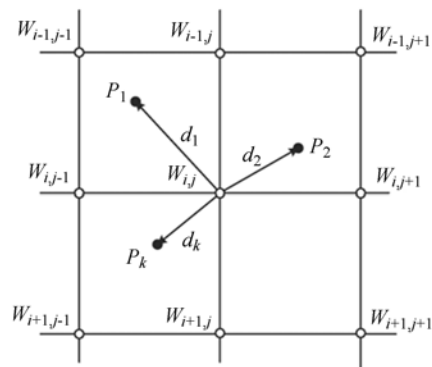


图 1 标定平面投影图像生成方法示意图

Fig. 1 Schematic illustration of generation of projective image on a calibration plane

假设在标定平面上人为地划分一些等间距的网格,网格的位置、间距可人为设定,如图 1 所示。若能恢复出网格交点处目标投影点的亮度,则所有的网格点将构成一幅图像,即为标定平面上的

投影图像。由 2.1 节的方法,可以将原始图像中每个像素点对应的标定平面上点的世界坐标恢复出来,但由于存在畸变,这些恢复点一般散落在网格内或网格外。这里采用 k 近邻(k -NN)的方法进行网格交点的亮度恢复。以图 1 中的 $W_{i,j}$ 点为例,在所有的恢复点中寻找距离 $W_{i,j}$ 最近的 k 个点,记为 P_1, P_2, \dots, P_k ,它们到 $W_{i,j}$ 的距离分别为 d_1, d_2, \dots, d_k ,对应的原始图像点的亮度分别为 I_1, I_2, \dots, I_k ,以距离的倒数对亮度加权,归一化后 $W_{i,j}$ 点的亮度 $I_{i,j}$ 估计为:

$$I_{i,j} = \frac{\sum_{l=1}^k \frac{I_l}{d_l}}{\sum_{l=1}^k \frac{1}{d_l}}. \quad (4)$$

由于投影图像将在测量系统中反复生成,为了减少计算量,可以构造一个查找表(Look Up Table, LUT),其中保存每个投影图像像素点对应的 k 个原始图像点的图像坐标值和归一化后的权值。当相机的位姿保持不变时,该 LUT 的内容也保持不变。将 LUT 保存到计算机内存,则投影图像中的每个像素点可根据原始图像中 k 个点的亮度进行乘加运算获得,从而满足实时性的要求。

由标定平面投影图像的生成过程可知,投影图像中的每个像素点都对应一个世界坐标,像素距即为图 1 所示的网格间距,因此只要在投影图像上确定某个特征的像素位置,该特征在标定平面上的投影的世界坐标位置也就随之确定。

2.3 光心位置标定

相机模型的本质是确定物点与像点间的关系,双平行平面相机模型是双平面相机模型的一个特例,即两个标定平面相互平行的情况。如图 2 所示,两个标定平面 π_1 和 π_2 已统一坐标系并且相互平行。按透视原理,物点 P 、无畸变像点 p 、光心 O_c 和两个平面上的投影点 p_1, p_2 共线;按针孔模型,它们的关系是“物点必位于光心与像点的连线上”;按双平面模型则是“物点必位于两个标定平面的投影点的连线上”,可利用前一种方法分别恢复出像点在两个标定平面上投影点的世界坐标来确定这条投影线。事实上,它们之间的关系也可以理解为“物点必位于光心与某一个标定平面上的投影点的连线上”,按此理解,只要事先确定了光心在世界坐标系中的位置,只需计算

像点在任意一个标定平面上的投影点坐标即可确定投影射线,而不是传统双平面相机模型中的两个投影点。

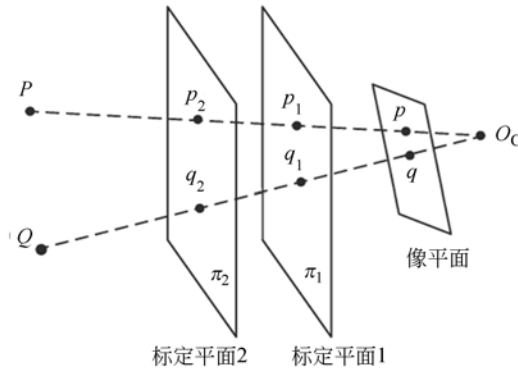


图 2 双平行平面模型原理示意图

Fig. 2 Principle of two-parallel-plane camera model

基于双平面相机模型的光心位置标定在文献[16]中已有所提及。该方法利用任意物理点在两个标定平面上的投影点连线过光心的原理(如图 2 所示),考虑到误差因素,首先选择若干样本点,计算它们在两个标定平面上的投影点的世界坐标并连线,构成直线集,再利用 LSM 计算到直线集中所有直线距离最小的点作为光心位置的估计。该方法在理论上是正确的,但在实际应用中由于光心可能距离标定平面较远,而两个标定平面的距离较近,微小的误差都可能导致直线的方向产生较大的偏差,因此上述方法对光心位置的估计并不准确。

针对双平行平面相机模型,这里采用一种基于棋盘格标定板的光心标定算法,该方法利用标定板在两个已统一坐标系的平行平面上的图像进行标定,原理如图 3 所示。棋盘格标定板上的角点呈方格状均匀分布,且距离已知,这里记标定平面 π_2 上的角点网格为 $A_2 B_2 C_2 D_2$,标定板上每行和每列的角点个数分别为 N 和 M ,网格间距为 r_2 (已知),两个标定平面间的距离为 h (已知),世界坐标系的定义如图 3 所示。

标定过程中,首先利用 2.1 和 2.2 节的方法生成 π_2 平面上标定板图像在 π_1 上的投影图像,然后对投影图像进行角点提取,获得角点的图像坐标,并计算相应的世界坐标。记 $A_2 B_2 C_2 D_2$ 在 π_1 上的投影点网格为 $A_1 B_1 C_1 D_1$,网格中角点的世界坐标分别为 $(x_{i,j}, y_{i,j}, h)$, $i=0, 1, \dots, N-1$, $j=0, 1, \dots, M-1$,则前面获得的角点世界坐标可

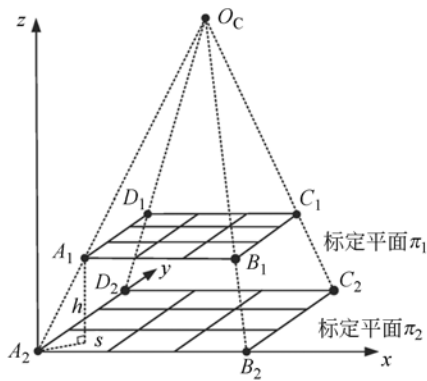


图 3 光心位置标定原理示意图

Fig. 3 Principle of optical center localization

作为 $(x_{i,j}, y_{i,j}, h)$ 的采样点。由于两个标定平面平行, 易知 $A_1 B_1 C_1 D_1$ 与 $A_2 B_2 C_2 D_2$ 亦平行, 则这些角点的坐标满足:

$$\begin{cases} x_{i,j} = x_{0,0} + r_1 \cdot i \\ y_{i,j} = y_{0,0} + r_1 \cdot j \end{cases} \quad (5)$$

其中: $i=0, 1, \dots, N-1; j=0, 1, \dots, M-1$, r_1 表示 $A_1 B_1 C_1 D_1$ 的网格间距。式(5)构成了关于参数 $x_{0,0}$, $y_{0,0}$ 和 r_1 的线性约束, 利用采样点和 LSM 可估计出它们的值, 则光心的世界坐标 (x_c, y_c, z_c) 可估计为:

$$\begin{cases} x_c = \frac{r_2}{r_2 - r_1} x_{0,0} \\ y_c = \frac{r_2}{r_2 - r_1} y_{0,0} \\ z_c = \frac{r_2}{r_2 - r_1} h \end{cases} \quad (6)$$

该方法只利用了已知尺寸的棋盘格标定板在两个已统一坐标系的平行平面上的图像实现光心标定, 通过优化投影网格的位置和尺寸计算光心, 比文献[16]中提及的方法更加合理。针对钢板尺寸测量的问题, 由于钢板位于生产线的辊轴上, 钢板的下表面与辊轴平面重合, 采用厚度均匀的标定板很容易实现两个标定平面与测量平面(钢板上表面)平行, 并保持两个标定平面世界坐标系的统一, 进而完成光心位置的标定。

3 钢板尺寸的三维测量

3.1 基于线结构光的钢板厚度测量

结构光是视觉测量的重要手段之一, 并已获得广泛应用^[9,10,12,20]。本文采用基于双平行平面

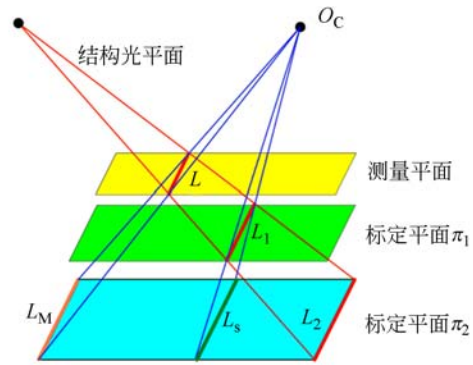


图 4 线结构光测厚法原理

Fig. 4 Schematic diagram of thickness measurement using line structured light

相机模型和线结构光的钢板厚度测量方法, 其原理如图 4 所示。将线结构光倾斜照向钢板, 使光条清晰地成像在钢板上表面, 然后固定结构光与相机的相对位置, 则它与两个标定平面的相对位置也固定下来。设结构光平面在标定平面 π_1 上形成的光条为 L_1 , 在 π_2 上形成的光条为 L_2 , L_1 在 π_2 上的投影为 L_S 。当测量钢板厚度时, 结构光平面将在测量平面(即钢板的上表面)形成光条 L , L 在 π_2 上的透视投影为 L_M 。由于测量平面与两个标定平面平行, 可知 L_M, L_S, L_2, L_1 和 L 必然平行。当被测钢板的厚度发生变化时, 则钢板表面上的光条 L 的位置在结构光平面上的位置也发生变化, 其在 π_2 上的投影直线 L_M 的位置也随之发生变化, 利用 L_M 位置相对于 L_S 和 L_2 的变化量可推出钢板的厚度。

在结构光标定阶段, 分别拍摄结构光在两个标定平面上的图像, 利用 2.2 节的方法分别生成两幅图像在各自平面上的投影图像。由于投影图像无几何畸变和镜头畸变, 图像中的光条将保持其固有的直线特征。图像滤波后利用阈值分割方法提取可能的光条点, 记 L_1 的光条点集为 U_1 , L_2 的光条点集为 U_2 , 记 L_2 在 π_1 平面的直线方程为:

$$y = k_s x + b_1, \quad (7)$$

则 L_2 在 π_2 平面的直线方程可表示为:

$$y = k_s x + b_2. \quad (8)$$

式(7)和式(8)构成了关于 k_s, b_1, b_2 的线性约束, 分别将 U_1 与 U_2 内的点代入式(7)和式(8), 利用 LSM 可估算出这 3 个参数的值, 从而获得 L_1 和 L_2 的直线方程, 再由光心坐标可计算出 L_S

的直线方程。在实际应用中,通过调整光条的角度可以使光条与世界坐标系 y 轴不平行,从而保证直线方程(7)和(8)的有效性。

在测量阶段,首先生成钢板图像在 π_2 上的投影图像,在对图像进行滤波和阈值分割后提取可能的光条点构成点集 $U = \{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, K\}$,这里 K 为点集中样本点的个数。由于 $L_M // L_2$,可将 L_M 的直线方程表达为:

$$y = k_s x + b_s, \quad (9)$$

其中 k_s 在标定阶段已完成估值,利用 U 中的样本点可得 b_s 的近似值为:

$$b_s = \frac{\sum_{i=1}^K (y_i - k_s x_i)}{K}. \quad (10)$$

由此确定了 L_M 的直线方程。

图 5 是 4 个平面的侧视图,记光心 O_C 到测量平面的垂线分别交测量平面于 T_M ,交两个标定平面于 T_1 和 T_2 ,交结构光平面于 S_T ;在测量平面上 T_M 到 L 的垂线交 L 于 S_M ;在 π_1 上 T_1 到 L_1 的垂线交 L_1 于 S_1 ;在 π_2 上 T_2 到 L_2 的垂线交 L_2 于 S_2 ,交 L_S 于 P_2 ,交 L_M 于 P_S 。根据交比不变性及比例关系,有:

$$c = \frac{T_2 P_2 : T_2 P_S}{S_2 P_2 : S_2 P_S} = \frac{S_T S_1 : S_T S_M}{S_2 S_1 : S_2 S_M} = \frac{S_T T_1 : S_T T_M}{T_2 T_1 : T_2 T_M} = \frac{S_T T_1 : (S_T T_2 + T_2 T_M)}{T_2 T_1 : T_2 T_M}, \quad (11)$$

可得:

$$T_2 T_M = \frac{c \cdot T_2 T_1 \cdot S_T T_2}{S_T T_1 - c \cdot T_2 T_1}. \quad (12)$$

式(11)和式(12)中的距离均为有向距离。由于光心垂线方向和 π_2 平面上各点间的有向距离均可计算,则标定平面 π_2 到测量平面的有向距离

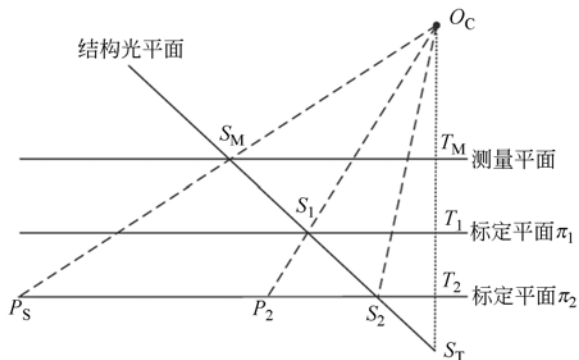


图 5 钢板厚度解算原理示意图

Fig. 5 Illustration of steel plate thickness calculation

$T_2 T_M$ 可由式(12)得出,再由标定平面 π_2 到生产线辊轴平面(亦为钢板的下表面)的距离可得钢板的厚度。

上述方法中光条直线特征的提取都是在相应的标定平面投影图像上完成,由于投影图像不存在几何畸变与镜头畸变,可以有效地利用光条间相互平行的特性进行特征提取,从而提高提取精度和计算精度。与从存在畸变的原始图像上直接提取光条特征的方式相比,这种方法具有很大的优越性。

3.2 单视场内钢板边缘的世界坐标检测

在钢板长度和宽度的测量中,可以选择两个标定平面中的任意一个作为投影平面。由于标定平面与钢板表面平行,因此标定平面上的投影图像完全保持了钢板的表面特征,如对于矩形钢板,其边缘间的平行和垂直关系得以保持,这在投影图像上进行准确的边缘提取提供了依据。

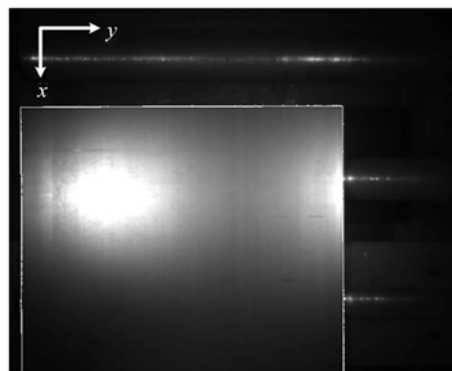


图 6 钢板头部在标定平面上的投影图像

Fig. 6 Projective image of front part of a steel plate on a calibration plane

图 6 显示了某机位下一幅钢板头部图像在某个标定平面上的投影图像。在提取钢板边缘直线时,首先对图像进行 Canny 边缘提取,然后进行随机 Hough 变换提取图像中的直线段,这样提取出的候选边缘线段中包括了若干伪边缘,如辊轴、生产线侧面或地面的边缘直线。考虑到此机位下钢板的 3 条边缘呈门形,且钢板自身纹理比较简单,选取距离图像垂直方向中心线最近(两侧各一条)、线段足够长、走向基本保持垂直方向的两条线段作为钢板两侧边缘的基准线,同时选取距离图像下方距离最近、线段足够长、走向基本保持水平的一条线段作为钢板上边缘的基准线。延长 3

条线段到它们的交点和图像底端,则此 3 条基准线构成了一个门形,再分别以 3 条线段为中心向两侧进行适当扩宽,可得到 3 个“门框”区域。选择“门框”区域内的 Canny 边缘点作为钢板边缘的候选点,计算这些点的世界坐标并构成对应左、右、上的 3 个边缘点集,分别记为 U_L , U_R 和 U_T 。假设钢板为矩形,当世界坐标系如图 6 中描述时,3 条直线的方程可表示为:

$$\begin{cases} \text{左: } y = k_L x + b_L \\ \text{右: } y = k_R x + b_R \\ \text{上: } x = -k_T y + b_T \end{cases} \quad (13)$$

将 U_L , U_R 和 U_T 中的点作为样本点分别代入以上 3 条直线方程,利用 LSM 可以估计出参数 k_L , b_L , k_R 和 b_T 的值,进而可得到 3 条直线的世界坐标直线方程。图 6 显示了按以上方法提取出的 3 条门形线段的位置,可见提取比较准确。

注意到这 3 条直线是钢板边缘在标定平面的投影直线方程,由于钢板厚度的测量结果和光心位置均已知,则测量平面上对应的 3 条直线方程也很容易计算出来。在图 6 所示的情况下,钢板的宽度可直接由测量平面上两条长边的直线方程计算,一旦用类似的方法确定钢板尾部的直线方程,钢板的长度也就随之计算出来。

3.3 多相机测量系统

钢厂生产的钢板多数尺寸较大,因此要求测量场较大,单相机的视场一般不足以覆盖整个测量场,此时可以利用基于多相机的视场拼接方法进行测量。

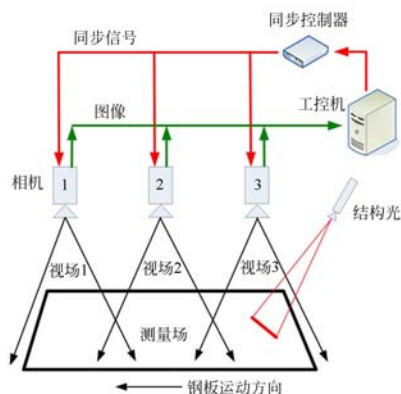


图 7 多相机测量系统结构图

Fig.7 Framework of multi-camera measurement system

图 7 显示了一个由 3 台相机构成的多相机测量系统,每台相机均连接工控机和同步控制器。其中 1 号和 2 号相机用于拍摄钢板的头部区域图像,3 号相机负责拍摄钢板尾部区域的图像,结构光条照射在视场 3 的区域内。系统工作时,工控机控制 3 台相机同时拍照,收到 3 幅图像后,利用 3 号相机的图像判断钢板尾部是否已经进入视场 3。一旦判断进入,利用 3 号相机的含结构光条的图像计算此块钢板的厚度和宽度,以及钢板尾部直线的世界坐标方程。此时,钢板的头部可能位于其他相机视场内,工控机在相应图像内利用直线检测算法提取头部直线的世界坐标方程,结合尾部的方程完成钢板长度的计算。由于测量场大,很难制造如此大尺寸的标定板,为此可利用小尺寸标定板拼接的方法进行标定。

由于钢板长度和宽度是通过钢板的上表面(测量平面)边缘在标定平面的投影直线的世界坐标方程获得,因此本质上本文方法仍属单目视觉测量方法。当测量系统由多个相机共同构成时,每个相机都独立地进行相应视场内的边缘直线提取,独立计算直线的世界坐标方程,因此不会因为存在多个相机而产生测量误差累积。相机间除要求有一定的视场重叠,保证覆盖整个测量场外,对相机的位姿没有更多要求,因此现场安装调试的工作量比较小。标定时,每个相机对应的两个标定平面要与生产线上的辊轴平面平行且统一坐标系,标定过程比较容易实现。

3.4 测量系统误差分析

在本文描述的视觉测量系统中,相机分辨率、图像清晰度、特征提取精度等都会对最终的测量结果产生影响。由于在直线边缘提取过程中假设钢板为长方形,受剪切加工误差的影响,钢板本身的规整度对结果影响较大,而实际的钢板较标准矩形存在一定偏差,有时偏差达到厘米级别,还可能出现边缘不直、板面不平等情况,这不仅给测量增加了难度,也给测量结果评价带来了困难。由于系统是对生产线上运动中的钢板进行测量,因此图像的清晰程度还受钢板的运动速度和相机曝光时间的影响。在条件允许的情况下,增加现场照明并减少曝光时间有利于提高运动目标图像的清晰度;但由于工业现场条件有限,视觉测量系统的照明难以做到非常理想,反射光斑或阴影对特征提取也将产生一定的影响,因此需要仔细设计

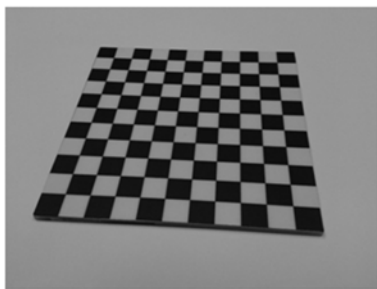
系统照明。另外,由于计算钢板长度和宽度时需要进行从标定平面到测量平面的投影运算,因此钢板厚度测量误差将以一定比例传递到长度和宽度的计算结果中,该系数受钢板边缘在视场中的位置影响。

以图 6 所示的宽度测量结果为例,相机分辨率为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$,视场近似为 $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,与多点手工测量结果相比,视觉测量误差在 3 mm 以内,总体上远小于钢板的加工误差水平。

4 实验及结果分析

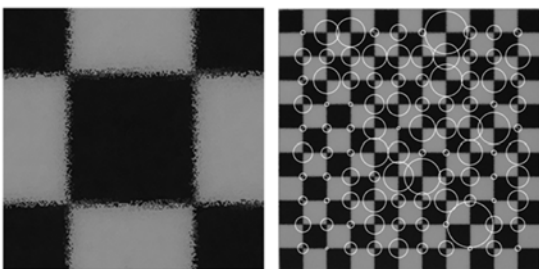
4.1 投影图像生成实验

为检验 2.2 节中标定平面投影图像生成方法的有效性,首先选取了一幅普通手机拍摄的标定板图像,如图 8(a)所示。该图像的分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,棋盘格标定板上共有 10 行、10 列角点,通过 OpenCV 中的角点提取算法提取角点,构成图像点与世界坐标点对的采样点集,分别选取 $k=1,2,3,4$ 四种情况生成标定平面投影图像。由于此时目标平面与标定平面重合,所生成的图像即是对标定板表面的真实反映。世界坐标在标定板上沿角点方向定义,生成的投影图像分辨率为 $1\ 100 \text{ pixel} \times 1\ 100 \text{ pixel}$,像素距为 0.1 mm ,图像范围刚好覆盖标定板的有效区域。

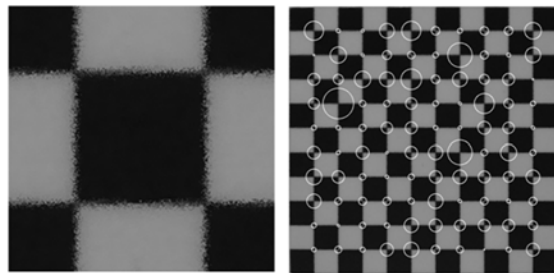


(a) 原始图像

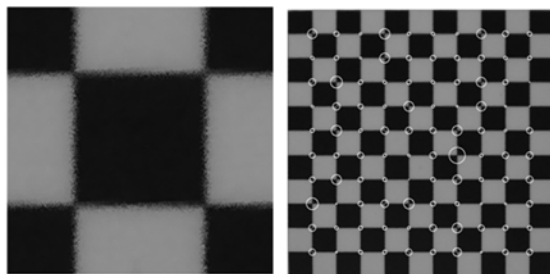
(a) Original image



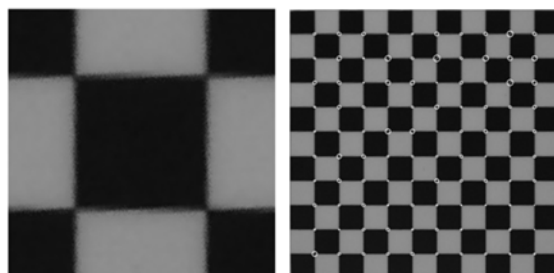
(b) $k=1$



(c) $k=2$



(d) $k=3$



(e) $k=4$

图 8 标定板表面图像的生成结果

Fig. 8 Generated images of calibration plane

为便于比较,再次利用角点提取算法在这 4 幅生成图像上进行角点提取,并计算出对应角点的世界坐标,与真实坐标进行对比。图 8(b)到图 8(e)左侧是生成图像的局部放大图,可见 k 取值越大,生成图像的边缘越光滑;右侧图像描述了角点误差的分布情况,图中每个角点周围的圆表示该角点提取后与真实值的误差(为了显示清楚进行了等倍数放大),圆直径越大,表示误差越大。从误差分布来看, k 值越大误差越小,而且图像中各角点误差的分布基本均匀,位于上半部分的角点误差略大于下半部分,这是因为在原始图像中受透视的影响,标定板下半部分比上半部分的分辨率更高。表 1 列举了 4 幅生成图像中最大误差和平均误差的统计结果,从结果上看, $k=4$ 时能够得到很好的角点提取结果。

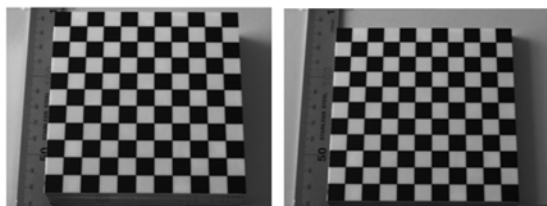
表 1 标定板角点提取误差结果

Tab. 1 Errors of corner extraction for calibration pattern (mm)

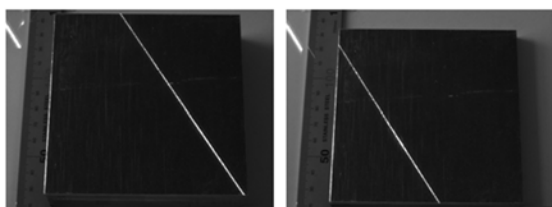
k	最大误差	平均误差
1	0.483	0.164
2	0.317	0.101
3	0.165	0.057
4	0.069	0.029

4.2 真实铝块尺寸测量实验

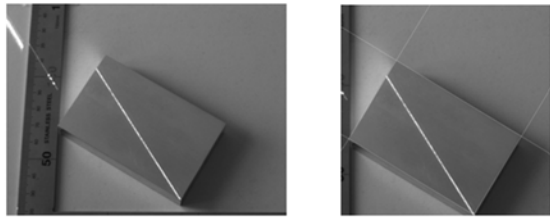
在进行实际目标测量时,首先在桌面上固定一个直角钢尺,取两块同样规格、厚度不同的棋盘格标定板分别与钢尺对齐并拍照,以此统一两块标定板的坐标系。实验相机采用 Basler piA640-210gm,分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。图 9(a)和 9(b)分别是两块标定板的图像;图 9(c)和 9(d)分别是对应平面上的结构光图像;再将一块标准长方体铝块放置到视场中拍照,图 9(e)为目标图像。将目标图像投影到高标定平面生成投影图像,实验中选取投影图像的像素距为 0.1 mm ,在此图像上利用铝块上表面 4 条边缘直线为长方形的特性进行特征提取,图 9(f)为生成的投影图像及边缘直线提取结果。计算得到的铝块三维尺寸



(a) 高标定板 (b) 低标定板
(a) High calibration plane (b) Low calibration plane



(c) 高标定平面结构光 (d) 低标定平面结构光
(c) Structured lights on high calibration plane (d) Structured lights on low calibration plane



(e) 目标图像 (f) 高标定平面上的投影
(e) Image of target (f) Projection of target on high calibration plane

图 9 真实测量实验图像

Fig. 9 Images in real measurement experiment

如图 2 所示,从结果看,精度比较理想,其中长度的测量误差最大,相当于投影图像中 2 个像素的误差。

表 2 铝块尺寸的测量结果

Tab. 2 Results of dimensional measurement for aluminum cuboid (mm)

项目	精确值	测量值	误差
厚度	15.00	14.90	0.10
长度	80.00	79.81	0.19
宽度	50.00	49.96	0.04

4.3 实际应用

将本文方法应用于某钢厂生产线上运动钢板的测量,采用图 7 所示的系统结构,利用 3 台 Basler acA1600-20gm 相机构建测量系统,3 台相机分别配 4,4,8.5 mm 的镜头。利用两块尺寸均为 $800 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 、厚度不同的标定板进行标定,每个标定板上有 8 行 6 列特征点。标定时首先在生产线上布置一块大尺寸钢板作为工作平台,然后在其上表面建立世界坐标系。在测量场范围内人工画出若干平行于坐标轴且与标定板尺寸相同的矩形网格,将标定板与格线对齐,则可得到标定板上每个特征点对应的世界坐标,由相机拍照后获取标定数据。在生成投影图像时,1、2 号相机图像的像素距设为 5 mm ;3 号相机图像的像素距为 2 mm ,3 幅投影图像构成的复合视场范围为 $13.4 \text{ m} \times 2.64 \text{ m}$ 。图 10(a),10(b),10(c)为

表3 钢板在线测量结果

Tab. 3 Results of on-line steel plate measurement (mm)

序号	长度	长度 误差	宽度	宽度 误差	厚度	厚度 误差
1	8 061.2	7.8	2 000.5	2.5	19.5	0.5
2	8 067.9	1.1	1 999.2	1.2	20.0	0.0
3	8 067.8	1.2	1 998.9	0.9	20.0	0.0
4	8 067.5	1.5	1 999.5	1.5	19.4	0.6
5	8 063.8	5.2	2 000.4	2.4	18.7	1.3
6	8 071.7	2.7	1 994.2	3.8	19.0	1.0
7	8 069.6	0.6	1 994.3	3.7	19.6	0.4
8	8 066.8	2.2	1 994.9	3.1	19.0	1.0
9	8 073.6	4.6	1 993.5	4.5	19.3	0.7
10	8 066.1	2.9	1 995.0	3.0	19.4	0.6
11	8 064.5	4.5	1 995.7	2.3	19.2	0.8
12	8 065.8	3.2	1 996.9	1.1	19.3	0.7
13	8 067.6	1.4	1 997.4	0.6	19.9	0.1
14	8 068.8	0.2	1 995.9	2.1	18.9	1.1
15	8 069.2	0.2	1 996.7	1.3	19.1	0.9
16	8 069.3	0.3	1 997.9	0.1	19.0	1.0
17	8 073.5	4.5	1 996.4	1.6	19.1	0.9
18	8 072.8	3.8	1 995.9	2.1	19.4	0.6
19	8 071.6	2.6	1 995.1	2.9	18.7	1.3
20	8 070.8	1.8	1 994.4	3.6	19.4	0.6
平均误差		2.62		2.22		0.71
最大误差		7.8		4.5		1.3

3幅原始图像,图10(d)为3幅标定平面投影图像的拼接结果(图中去掉了视场重叠的部分)。

为了检验本文方法的测量精度,在车间随机选择一块钢板作为被测对象,该钢板的厚度为20 mm,订单要求宽度为1 950 mm,长度为8 050 mm。利用卷尺对钢板的长宽进行了多点测量,该钢板的实际平均宽度为1 998 mm,平均长度为8 069 mm,以此结果作为钢板尺寸的准确值。该值与订单尺寸间存在较大差距的原因如下:一是钢板受加工精度的影响并非是完全规则的矩形;二是企业为避免负误差,剪切钢板时故意增加了一定余量。反复在生产线上移动该钢板共进行20次拍照测量,表3是测量和统计的结果。由表3可知,基于双平行平面相机模型的视觉测量方法完全能够满足企业对钢板进行在线计量核验的精度要求。

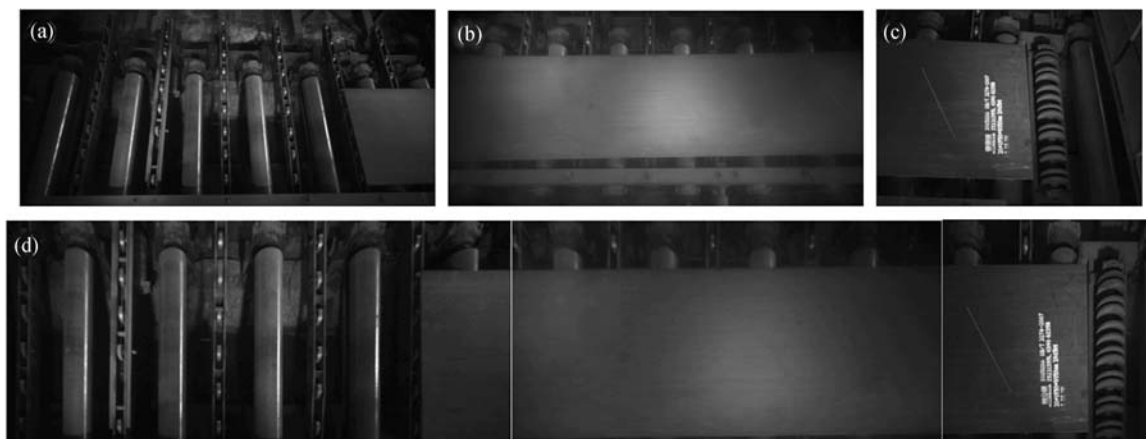


图10 钢板原始图像及由三幅投影图像构成的钢板拼接图像

Fig. 10 Original images of a steel plate and its integrated image from three projective images

5 结 论

本文提出了基于双平行平面相机模型的钢板尺寸测量方法。该方法不要求像平面与测量平面平行,只要保证多个相机间视场有所重叠即可,因此相机的现场安装工作量比较小。测量系统相机标定的内容包括标定平面投影图像生成过程中所

需要的LUT的构造、光心位置标定、结构光线条在两个标定平面上的位置提取。标定过程仅需要标定板在两个已统一坐标系的平行平面的图像和结构光光条在这两个标定平面的图像,现场图像采集的工作量小。不过,LUT的构造需要较多时间,但考虑到这一过程是在实时系统运行前就可以完成的,因此并不影响测量系统的实时性。利用标定平面上的投影图像进行视觉测量,相比于

利用原始图像具有明显的优势。由于选择的标定平面与测量平面平行,标定平面上的投影图像不存在几何畸变和镜头畸变,很好地保持了钢板边缘间固有的几何关系,如平行、垂直等,这为钢板边缘的特征提取提供了依据。标定平面投影图像的图像坐标与世界坐标具有对应关系,一旦确定了特征在图像中的坐标位置,其在世界坐标系中的位置也能随之确定下来,这为视觉解算提供了便利。由于本文方法是通过计算钢板边缘在世界坐标系中的直线方程进行长度、宽度计算,因此属于单目视觉技术,在需要多相机进行视场拼接的场合,只要在标定过程中统一世界坐标系,并不会

因为使用多个相机而产生累积误差。实验结果显示,通过图像分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 的相机对 $80 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的标准铝块进行测量,厚度测量误差为 0.1 mm ,长度和宽度的误差均在 0.2 mm 以内。本文为生产线上运动钢板的三维尺寸测量提供了一种新方法,其测量精度能够满足实际应用中产品计量核验的要求。

本文方法在标定过程中要求两个标定平面统一世界坐标系,但在实际应用中确定标定板位置时会存在标定板定位和定向上的偏差,而由此产生的误差对标定和最终测量结果的影响程度,是未来需要进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] 解则晓,韩振华,高翔. 光笔式单目视觉测量系统的关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(5):780-787.
XIE Z X, HAN ZH H, GAO X. Key technologies of monocular vision measurement system with light pen [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5):780-787. (in Chinese)
- [2] 周亦武,王国锋. 冷轧钢板厚度的电涡流动态测量方法[J]. 自动化仪表, 1998, 19(2):6-8.
ZHOU Y W, WANG G F. The electro-eddy dynamic measuring method for thickness of steel from cold rolling process [J]. *Process Automation Instrumentation*, 1998, 19(2):6-8. (in Chinese)
- [3] 左建勇,颜国正,周维杭. 漏磁场法测量钢板厚度的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2003(6):4-6.
ZUO J Y, YAN G ZH, ZHOU W H. Magnetic flux leakage (MFL) method for detecting the thickness of steel plate [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2003(6):4-6. (in Chinese)
- [4] 康宜华,涂君,杨芸,等. 一种简便的电磁超声测厚实现方法探究[J]. 自动化仪表, 2012, 33(10):83-86.
KANG Y H, TU J, YANG Y, *et al.*. Research on the implementation method of a simple thickness measurement method by using EMRT [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2012, 33(10):83-86. (in Chinese)
- [5] 彭帅军,王凯,邬海峰,等. 射线检测技术在钢铁尺寸测量中的应用[J]. 无损检测, 2007, 29(11):679-681.
PENG SH J, WANG K, WU H F, *et al.*. Application of radiographic testing technology in size measurement of steels [J]. *Nondestructive Testing*, 2007, 29(11):679-681. (in Chinese)
- [6] 贺赛先,何对燕,仲思东,等. 面阵 CCD 钢板长宽尺寸在线实时测量系统[J]. 仪器仪表学报, 1997, 18(6):640-642.
HE S X, HE D Y, ZHONG S D, *et al.*. Real time steel plate size measurement system using CCD [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1997, 18(6):640-642. (in Chinese)
- [7] 崔庆胜,尹海潮,周婷婷,等. 红外测宽技术及其在热轧带钢宽度检测中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2009(1):43-44.
CUI Q SH, YIN H CH, ZHOU T T, *et al.*. Application and technology of infrared width gauge [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2009(1):43-44. (in Chinese)
- [8] 查成东,王长松,崔巍. 基于双目视觉原理的智能测宽仪[J]. 微计算机信息, 2008, 24(4-1):156-157.
ZHA CH D, WANG CH S, CUI W. Intellectualized width fauge based on binocular vision principle [J]. *Microcomputer Information*, 2008, 24(4-1):156-157. (in Chinese)
- [9] 刘瑾,杨海马,张菁. 基于 CCD 的在线厚度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6):1217-1218.
LIU J, YANG H M, ZHANG J. Study on method of on-line thickness detection based on CCD [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(6):1217-1218. (in Chinese)
- [10] 王丹,赵斌. 激光倾斜照明法测量钢板厚度[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10):2033-2036.
WANG D, ZHAO B. Laser oblique illumination

- method for measuring steel plate thickness [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2033-2036. (in Chinese)
- [11] 史金龙, 钱强, 庞林斌, 等. 大尺度钢板的三维测量和拼接[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5):1165-1170.
SHI J L, QIAN Q, PANG L B, *et al.*. Three-dimensional measurement and registration for large scale plates [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5):1165-1170. (in Chinese)
- [12] 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):126-134.
LIU J W, LIANG J, LIANG X H, *et al.*. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):126-134. (in Chinese)
- [13] 何博侠, 何勇, 卜雄洙, 等. 机器视觉多视场协同测量方法[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 2821-2829.
HE B X, HE Y, BU X ZH, *et al.*. Cooperative measurement method of multi-FOV for machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2821-2829. (in Chinese)
- [14] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [15] MARTINS H A, BIRK J R, KELLEY R B. Camera models based on data from two calibration planes [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, 17(2): 173-180.
- [16] WEI G, MA S. Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1994, 16(5):469-480.
- [17] IAAGUIRRE A, PU P, SUMMERS J. A new development in camera calibration: calibrating a pair of mobile cameras [J]. *International Journal of Robotics Research*, 1987, 6(3):104-116.
- [18] 刘鹏, 刘伟军. 基于计算机视觉的自由曲面三维测量技术研究[J]. *计算机工程*, 2005, 31(4):58-61.
LIU P, LIU W J. Research on 3D measurement of free form surface based on computer vision technique [J]. *Computer Engineering*, 2005, 31(4): 58-61. (in Chinese)
- [19] 刘昶. 二维目标视觉测量的双平行平面标定[J]. *光学学报*, 2013, 33(11):115004.
LIU CH. Two parallel planes calibration for two-dimensional object vision measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11):115004. (in Chinese)
- [20] 冯萍, 刘震. 舵面角度测量中结构光光条图像自动定位方法[J]. *中国光学*, 2014, 7(6):911-916.
FENG P, LIU ZH. Automatic localization method of the multi-planar strip in rudder angle measurement [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6):911-916. (in Chinese)

作者简介:



刘昶(1971—),男,辽宁盘锦人,博士,副教授,1992年、1995年于南开大学分别获得学士、硕士学位,2012年于中国科学院沈阳自动化所获得博士学位,主要从事计算机视觉方面的研究。E-mail: syliuch@126.com



韦飞云(1990—),女,河北沧州人,硕士研究生,2013年于河北师范大学获得学士学位,主要从事图像处理、视觉测量方面的研究。E-mail: sylgweifeiyun@163.com