

文章编号 1004-924X(2015)增-0472-07

圆投影及消失点约束下的卡车厢体体积测量

赵春宇¹, 孙 伟^{1*}, 李大健², 贾 伟², 刘宏娟²

(1. 西安电子科技大学 空间科学与技术学院, 陕西 西安 710118;

2. 西北工业大学第 365 研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了降低卡车厢体体积测量的成本, 对相机内参求解、卡车位姿解算及车厢顶点坐标计算等进行研究, 提出了基于正交消失点及圆投影先验的单幅图像卡车体积解算方法。首先, 检测出卡车图像中三正交方向消失点, 根据消失点求解相机内部参数; 然后, 将世界坐标系建立在车轮圆心处, 利用相机内参数与车轮的单圆投影先验解算出卡车相对于相机的位姿信息, 并求出车厢平面方程。最后, 联立车厢平面方程与相机成像运算的矩阵方程计算车厢顶点坐标, 进而求出卡车车厢体积。实验结果表明: 车厢的长度测量误差小于 0.3 m, 卡车厢体体积测量值和真实值的误差在 5% 以内。提出的方法有效解决了传统测量方法实施复杂, 成本较高等问题, 适用于卡车体积的实时测量。

关键词: 单幅图像; 消失点; 圆投影; 位姿解算; 体积测量

中图分类号: TP752.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0472

Truck box volume measurement under constraint of circle projection and vanishing points

ZHAO Chun-yu¹, SUN Wei^{1*}, LI Da-jian², JIA Wei², LIU Hong-juan²

(1. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710118, China;

2. The 365 Institute, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710065, China)

* Corresponding author, E-mail: wsun@xidian.edu.cn

Abstract: To reduce the cost of truck's box volume measuring system, some calculation methods were discussed in detail, such as the solution of intrinsic parameters of a camera, the estimation of truck's position and orientation and the calculation of vertex coordinates on the truck's box. A method focusing on single image measuring was proposed under the constraint of orthogonal vanishing points and circle projection priori from the single image. Firstly, three orthogonal vanishing points were detected from the image and the intrinsic parameters of the camera were figured out according to the vanishing points. Then, the world coordinate system was established at the center of the wheel, then, the position and orientation of the truck relative to the camera were calculated with the intrinsic parameters of the camera and the prior of single circular projection of the wheel and the external facade equation of the truck's box was solved. Finally, the vertex coordinates of the truck's box were calculated with the external facade equation and matrix equation of imaging algorithm, and the volume of truck's box was

收稿日期: 2015-04-03; 修订日期: 2015-05-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61201290); 教育部直属高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. JB141307)

figured out. Experiment results show that the measuring error of the truck's box length is less than 0.3 m and the error of the truck's box volume is within 5%. The proposed approach is more effective and lower cost as compared with other state of art methods, and is suitable for real-time measurement of truck's box volume.

Key words: single image; vanishing point; circle projection; posture calculation; volume measurement

1 引言

传统的卡车体积测量大都采用光电体积测量系统^[1-2],随着计算机技术的发展,利用基于图像建模和绘制技术进行物体体积测量得到了越来越多的研究。传统的图像的三维重建是基于图像的明暗、纹理^[3]、焦距^[4]等先验知识的基础上完成,其对场景的光源、纹理规则、反射属性有严格的要求,通用性较差。Quan 等人^[5]通过搭建双目立体视觉^[6]的三维测量系统,计算工件各特征点的三维坐标值并完成工件尺寸的测量,但系统的实施结构复杂。Eisert P 等人^[7]利用基于运动的建模方法实现物体的三维重建^[8],这种方法对图像中特征点匹配的精度敏感,在图像中包含特征点较少时,其建模精度低,体积测量误差大。Henry P 等人^[9]利用深度图像可以较精确的建立物体三维模型,包括采用结构光源^[10]、激光传播时间计量等手段,但成本较高,操作不便,应用范围受到了限制。Kholgade^[11]与 Xu^[12]等利用虚拟现实技术通过对已有同类物体 3D 模型的变换,实现模型与单幅未标定图片的 3D 匹配,可以从单幅图像中恢复物体的三维模型及纹理。此方法存在尺度上的模糊,只能用于 3D 场景的漫游,不适用于物体体积的测量。

针对现有方法需要复杂特征点匹配或深度信息计算的缺点,本文根据卡车图像几何特征提出了一种基于单幅图像的卡车车厢体积测量方法。该方法以车轮半径为先验信息,仅利用卡车图像中存在的消失点与车轮提供的单圆特征计算出各车厢顶点的唯一空间三维坐标,进而求出卡车车厢的体积,不存在尺度上的模糊,且具有较高的精度。利用卡车的几何特点,即可完成相关参数解算,无需特征点匹配与深度信息计算过程,适用于实时的体积测量。通过单幅卡车图像计算出卡车车厢的体积,克服了传统的光电体积测量系统只能应用于位置固定的检测通道且需要多个激光

器、摄像机和传感器的缺点。

2 单圆特征及消失点约束下的体积测量方法

2.1 相机内参数求解

采用针孔成像模型,定义 4 个坐标系,分别是世界坐标系 (O_w, X_w, Y_w, Z_w); 相机坐标系 (O_c, X_c, Y_c, Z_c); 图像的物理坐标系 (O, x, y) 以及像素坐标系 (u, v), 像素坐标系与世界坐标系的关系为:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{X}}_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: \mathbf{K} 为相机的内参矩阵, \mathbf{R} 为 3×3 为旋转矩阵, \mathbf{t} 为三维平移向量, \mathbf{R}, \mathbf{t} 表征世界坐标系与摄像机坐标系之间的旋转及平移关系, (u_0, v_0) 表示物理坐标系原点在像素坐标系中的坐标, $\overline{\mathbf{X}}_w$ 表示世界坐标系下一点的三维坐标。

2.1.1 消失点坐标计算

卡车在经过透视投影变换以后,车厢中 3 正交方向上相互平行的直线分别相交与消失点 V_x, V_y, V_z , 如图 1 所示:

卡车图像中同一方向上 n 条投影线段的端点为 (x_{i1}, y_{i1}) 和 (x_{i2}, y_{i2}) , 利用各投影线段的端点求出图像平面中各投影线段所在的直线方程为:

$$a_i x_i + b_i y_i + c_i = 0, \quad (2)$$

其中: a_i, b_i, c_i 可表示为: $a_i = y_{i2} - y_{i1}$, $b_i = x_{i1} - x_{i2}$, $c_i = y_{i1} x_{i2} - y_{i2} x_{i1}$, 令 $\mathbf{A}_i = (a_i, b_i, c_i)$, 利用 \mathbf{A}_i 构造矩阵:

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^n \beta_i \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i, \quad (3)$$

其中 $\beta_i = \frac{1}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2 + c_i^2}}$ 。

对矩阵 \mathbf{A} 进行特征值和特征向量分解,其最

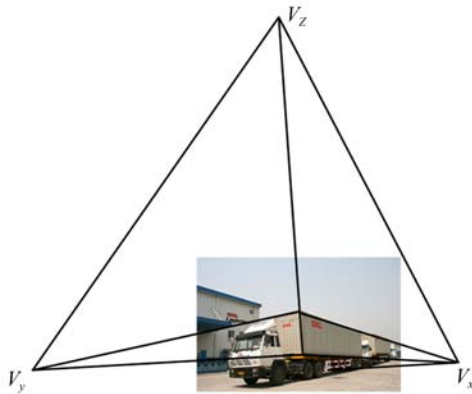


图 1 车厢三正交方向消失点示意图

Fig. 1 Sketch map of three orthogonal vanishing points

小特征值对应的特征向量 $(x, y, t)^T$ 即为所求消失点 V 的齐次坐标, 消失点 V 的非齐次坐标为:

$$V(u, v) = (x/t, y/t)^T. \quad (4)$$

根据消失点 V 的求解方法, 检测出卡车图像中 3 正交方向消失点的坐标 $V_x(u_x, v_x), V_y(u_y, v_y), V_z(u_z, v_z)$ 。

2.1.2 计算相机内参数

两条正交直线的消失点 V_1, V_2 , 他们与绝对二次曲线像 ω 的关系为:

$$V_1^T \omega V_2 = 0, \quad (5)$$

其中 $\omega = K^{-T} K^{-1} = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & \omega_2 \\ 0 & \omega_1 & \omega_3 \\ \omega_2 & \omega_3 & 1 \end{bmatrix}$, 因此, 两个互

相正交的消失点能提供一组对绝对二次曲线的约束^[13], 将卡车图像中 3 个正交方向的消失点 $V_x(u_x, v_x), V_y(u_y, v_y), V_z(u_z, v_z)$ 代入式 (5) 可以解出二次曲线矩阵 ω , 对矩阵 ω 进行 Cholesky 分解, 求出对应的相机内参矩阵:

$$K = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{\omega_1 - \omega_2^2 - \omega_3^2}{\omega_1^2}} & 0 & -\frac{\omega_2}{\omega_1} \\ 0 & \sqrt{\frac{\omega_1 - \omega_2^2 - \omega_3^2}{\omega_1^2}} & -\frac{\omega_3}{\omega_1} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

2.2 卡车位姿解算

2.2.1 计算平移向量 t

以车轮的圆心为原点、以空间中生成消失点 V_x, V_y, V_z 的直线方向为 X_w, Y_w, Z_w 的轴建立世

界坐标系, 如图 2 所示, 即车轮圆心在世界坐标系下的三维坐标为: $d_w = (0, 0, 0)^T$ 。



图 2 世界坐标系示意图

Fig. 2 Sketch map of world coordinate system

车轮的外轮廓为三维空间中的一个圆, 三维空间中任何一个不与相机光心轴垂直的圆经过透视投影后在成像平面中的像为一个椭圆, 如图 3 所示:

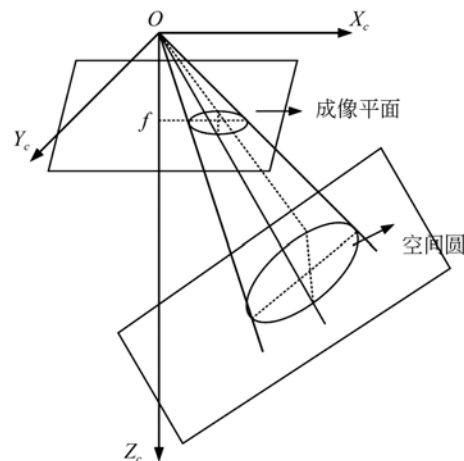


图 3 相机坐标系下空间圆成像几何表示

Fig. 3 Geometric representation of circle imaging in camera coordinate system

设相机投影平面的椭圆方程为:

$$a' x_i^2 + b' y_i^2 + c' x_i y_i + d' x_i + e' y_i + h' = 0 \quad h' \neq 0, \quad (7)$$

其中: x_i, y_i 表示椭圆方程在像平面中的坐标, a', b', c', d', e' 为椭圆方程的参数, 手动选取像平面上椭圆边缘上 5 个以上的点, 利用最小二乘法解算出椭圆方程的各个参数的最优解^[14]。

根据小孔成像原理, 求出相机坐标系下相机光心点和成像椭圆所组成的椭圆锥面方程:

$$\begin{bmatrix} x_c & y_c & z_c \end{bmatrix} \mathbf{Q} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = 0, \quad (8)$$

其中 $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} a'f^2 & c'f^2/2 & d'f/2 \\ c'f^2/2 & b'f^2 & e'f/2 \\ d'f/2 & e'f/2 & h' \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}$ 表示

相机坐标系下一点的三维坐标;

将 \mathbf{Q} 进行相似对角化: $P^{-1}QP = \text{diag}(\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3)$, 并调整 \mathbf{P} 矩阵的列向量使 $\lambda_1 > \lambda_2, \lambda_3$ 为负值, 令 $\begin{bmatrix} x_c & y_c & z_c \end{bmatrix}^T = \mathbf{P} \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T$, 代入到式(8), 将相机坐标系下的椭圆锥面方程转换到标准坐标系下, 标准坐标系下的锥面方程为:

$$\lambda_1 x^2 + \lambda_2 y^2 + \lambda_3 z^2 = 0. \quad (9)$$

在标准坐标系 (x, y, z) 所确定的空间中存在一个平面, 使得该平面与标准坐标系下的椭圆锥面方程式(9)的交线为一个半径为 φ 的圆^[15], 可得其圆心坐标为 O_s :

$$\begin{aligned} (x, y, z) = \\ \left[\varphi \sqrt{\frac{\lambda_2 \lambda_3 - \lambda_1 \lambda_3}{\lambda_1^2 - \lambda_1 \lambda_3}}, 0, \pm \varphi \sqrt{\frac{\lambda_1 \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_3}{\lambda_3^2 - \lambda_1 \lambda_3}} \right], \end{aligned} \quad (10)$$

其中: φ 为车轮的半径。

利用式(10)中圆心坐标 O_s 求出相机坐标系下车轮圆心坐标 d_c 为:

$$\mathbf{d}_c = \begin{bmatrix} x_{dc} \\ y_{dc} \\ z_{dc} \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (11)$$

世界坐标系到相机坐标系之间的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} \overline{\mathbf{X}}_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{X}}_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

将相机坐标系下车轮圆心坐标 d_c 与世界坐标系下车轮圆心坐标 d_w 代入式(12)中, 得到平移向量 \mathbf{t} :

$$\mathbf{t} = \mathbf{d}_c = \begin{bmatrix} x_{dc} \\ y_{dc} \\ z_{dc} \end{bmatrix}$$

2.2.2 计算旋转矩阵 \mathbf{R}

旋转矩阵 \mathbf{R} 可用旋转角 $\alpha - \beta - \gamma$ 表示, 利用

图像中 3 正交方向消失点 $V_x(u_x, v_x), V_y(u_y, v_y), V_z(u_z, v_z)$, 可将旋转角 $\alpha - \beta - \gamma$ 表示如下:

$$\alpha = \arctan \frac{\sin \gamma (u_x - u_0) - \cos \gamma (v_y - v_0)}{f}$$

$$\beta = \arctan \left(\cos \alpha \frac{\cos \gamma (u_z - u_0) + \sin \gamma (v_z - v_0)}{f} \right)$$

$$\gamma = \arctan \left(-\frac{u_y - u_0}{v_y - v_0} \right)$$

旋转矩阵 \mathbf{R} 与旋转角 $\alpha - \beta - \gamma$ 的关系为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (13)$$

2.3 车厢立面求解及体积计算

将空间中与卡车车轮在同一面的车厢平面标记为车厢平面 I, 将正交与卡车车轮平面的车厢平面标记为车厢平面 II, 如图 4(a) 所示; 空间中卡车车厢平面的成像过程的几何示意如图 4(b) 所示, 其中 e 为像平面车厢顶点的像素坐标, E 表示空间中车厢顶点的三维坐标。

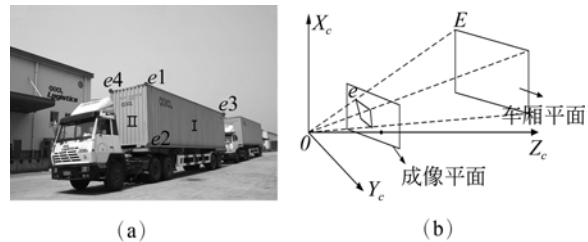


图 4 车厢成像的几何示意图

Fig. 4 Geometric representation of truck image

车厢平面 I 在相机坐标系下的法向量 $\tilde{\mathbf{N}}$ 可通过与车轮平面垂直的车厢平面 II 所形成的消失点 $V_p(u_p, v_p)$ 表示:

$$\tilde{\mathbf{N}} = \begin{bmatrix} u_p - u_0 \\ v_p - v_0 \\ f \end{bmatrix}. \quad (14)$$

利用法向量 $\tilde{\mathbf{N}}$ 与式(11)中车轮圆心坐标 d_c , 求出相机坐标系下车厢平面 I 的平面方程为:

$$\tilde{\mathbf{N}} \cdot (\overline{\mathbf{X}}_c - \mathbf{d}_c) = 0. \quad (15)$$

根据式(12),将相机坐标系下车厢平面 I 方程转换成世界坐标系下的车厢平面方程为:

$$\tilde{\mathbf{N}} \cdot \mathbf{R} \cdot \overline{\mathbf{X}}_w = 0. \quad (16)$$

令投影矩阵 $\mathbf{M} = [\mathbf{K} \ 0] \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$, 并化成

矩阵形式代入式(1)可得:

$$\begin{cases} (um_{31} - m_{11})x_w + (um_{32} - m_{12})y_w + \\ (um_{33} - m_{13})z_w = m_{14} - um_{34} \\ (vm_{31} - m_{21})x_w + (vm_{32} - m_{22})y_w + \\ (vm_{33} - m_{23})z_w = m_{24} - vm_{34} \end{cases}. \quad (17)$$

m_{ij} 为投影矩阵 \mathbf{M} 的第 i 行第 j 列的元素, $1 \leq i \leq 3, 1 \leq j \leq 4$ 。

联立式(16)与式(17),通过像素坐标 $e_1(u_1, v_1), e_2(u_2, v_2), e_3(u_3, v_3)$ 求出车厢平面 I 上车厢顶点的空间坐标 E_1, E_2, E_3 。

利用车厢平面 I 上车厢顶点的空间坐标 E_1, E_3 求出世界坐标系下车厢平面 II 的平面方程为:

$$(E_3 - E_1)^T \cdot (\overline{\mathbf{X}}_w - E_1) = 0. \quad (18)$$

联立式(17)与式(18),利用卡车图像中车厢顶点坐标 $e_4(u_4, v_4)$ 求出车厢平面 II 上车厢顶点世界坐标 E_4 。

根据车厢顶点的空间坐标 E_1, E_2, E_3, E_4 , 计算出卡车车厢的长宽高,得到卡车车厢的体积,其中车厢长宽高的长度单位与卡车车轮半径的长度单位相同。

3 实验结果

为了验证本方法的有效性和可行性,在 Matlab 平台上对实际采集的卡车图像进行实验验证。图 5(a),5(d)为实际采集轻型卡车和重型卡车图像,图 5(b),5(e)为 3 正交方向消失点检测结果,图 5(c),5(f)为进行手动选定的车厢顶点像素坐标值。

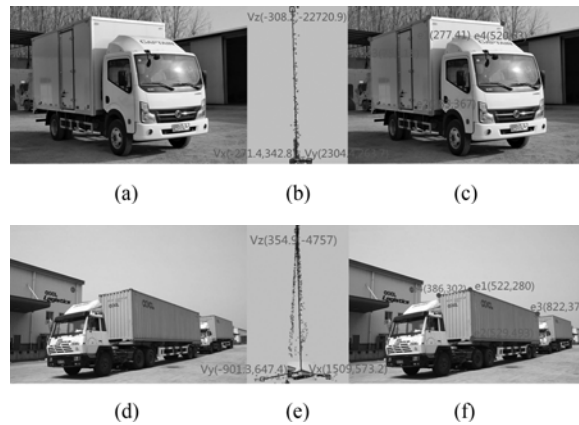


图 5 轻型及重型卡车图像检测结果

Fig. 5 Detection results of truck images

根据图 5 中的消失点的检测结果与车轮在像平面中的椭圆方程,计算出相机的参数和车轮的位姿信息如表 1 所示:

表 1 相机参数和卡车位姿信息

Tab. 1 Camera parameters and truck

	轻型卡车 ($\varphi = 38 \text{ cm}$)	重型卡车 ($\varphi = 60 \text{ cm}$)
相机内参 \mathbf{K}	$\begin{bmatrix} 1130.9 & 0 & 400 \\ 0 & 1130.9 & 266.5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1142.6 & 0 & 512 \\ 0 & 1142.6 & 341.5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
车厢平面 I 法向量	$(0.8655 \quad -0.0377 \quad 0.4996)$	$(-0.8217 \quad 0.1683 \quad 0.5445)$
车轮圆心	$(-19.27 \quad 95.23 \quad 588.9)$	$(157.7 \quad 367.1 \quad 1821.0)$
相机外参	$\begin{bmatrix} 0.86 & -0.5094 & -0.0298 & -19.27 \\ -0.0002 & 0.0579 & -0.9983 & 95.23 \\ 0.5102 & 0.8586 & 0.0496 & 588.9 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.6347 & -0.7724 & -0.0237 & 157.7 \\ 0.1573 & 0.1591 & -0.9746 & 367.1 \\ 0.7566 & 0.6149 & 0.2225 & 1821.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

利用表 1 中所求的信息, 计算出图像中车厢的顶点的世界坐标, 求出车厢各顶点坐标后可根据车厢的长宽高计算出体积, 测量值与真实值的对比如表 2 所示。

表 2 卡车体积测量值与真实值对比

Tab. 2 Contrast of measurement value and the true volume value

重卡(轻卡)	测量值	真实值	相对误差/%
长度/m	10.65(4.59)	11(4.3)	3.1(6.7)
宽度/m	2.57(1.97)	2.5(2.05)	2.8(3.9)
高度/m	2.73(2.13)	2.8(2.1)	2.5(1.42)
体积/m ³	74.72(19.26)	77(18.51)	2.96(4.10)

进行了多组实验, 图 6 选取了不同品牌的轻重型卡车图像, 图 7 给出了利用本文所述方法对图 6 中不同卡车进行车厢体积测量, 车厢长、宽、高与体积的测量值与真实值的误差。实验结果表明, 本方法的测量精度与传统的光电体积测量系统^[2]及基于单目视觉的体积测量系统^[14]的测量精度近似相同, 能够满足实际生活中对测量精度



图 6 实验所用不同卡车图像

Fig. 6 Different images in our experiment

参考文献:

[1] SCOTT W R, ROTH G. View planning for automated three-dimensional object reconstruction and inspection [J]. *ACM Computing Surveys*, 2003, 35(1): 64-96.

[2] 邢冀川, 罗小红. 利用激光三角法测量货车车厢体积[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(11): 3083-3087.

XING J CH, LUO X H. Measurement of truck carriage volume with laser triangulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3083-3087. (in Chinese)

[3] LOBAY A M, FORAYTH D A. Shape from texture without boundaries [J]. *International Journal*

的要求。

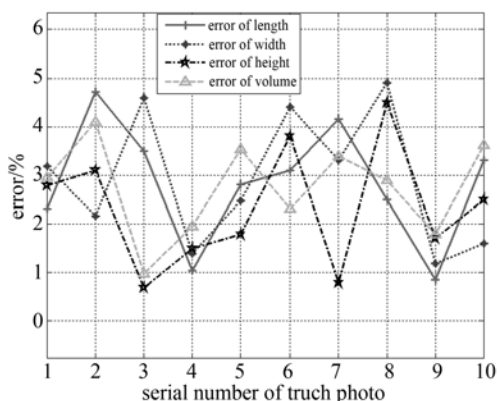


图 7 测量值与真实值的相对误差

Fig. 7 Relative error of measurement value and true value

4 结 论

本文在空间圆特征定位和基于消失点的相机标定基础上, 提出了单幅图像的卡车厢体体积测量方法。只需以车轮半径为先验, 便可计算出单幅卡车图像中车厢体积, 通过验证, 车厢的长度测量误差小于 0.3 m, 卡车厢体体积测量结果与实际结果的误差在 5% 之内。体积测量的精度和相机的标定精度有很大关系, 所以消失点和车轮圆心的求取是关键的一环, 提高消失点的求解精度和实现车厢体积的自动检测有待进一步研究。

on *Computer Vision*, 2006, 67(1): 71-91.

[4] MUHAMMAD M S, CHOI T. Sampling for shape from focus in optical microscopy [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2012, 34(3): 564-573.

[5] 全燕鸣, 黎淑梅, 麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 1054-1061.

QUAN Y M, LI SH M, MAI Q Q. On-machine 3D measurement of workpiece dimensions based on binocular vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 1054-1061. (in Chinese)

[6] SUN W, CHEN L, HU B, et al.. Binocular vision-based position determination algorithm and

- system [J]. *Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM)*, 2012;170-173.
- [7] EISERT P, STEINBACH E, GIROD B. Automatic reconstruction of stationary 3-D objects from multiple uncalibrated camera views [J]. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, 2000, 10(2):261-277.
- [8] IRVING J, ENRIQUE L, MURRIETA R. View planning for 3D object reconstruction with a mobile manipulator robot [C]. *Intelligent Robots and Systems, IEEE International Conference on. IEEE*, 2014;14-18.
- [9] HENRY P, KRAININ M, HERBST E, *et al.*. Using Kinect-style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2012, 31(5): 647-663.
- [10] ROCCHINI C, CIGNONI P, MONTANI C, *et al.*. A low cost 3D scanner based on structured light [J]. *Computer Graphics Forum*, 2001, 20(3):299-308.
- [11] KHOLGADE, NATASHA. 3D object manipulation in a single photograph using stock 3D models [J]. *ACM Transaction on Graphics (TOG)*, 2014,33(4):127-135.
- [12] XU K, ZHENG H, ZHANG H, *et al.*. Photo-inspired model-driven 3D object modeling [J]. *ACM Trans. on Graphics (Proc. SIGGRAPH, 2011)*, 30(4):4-13.
- [13] 李雅倩,林洪彬. 回转体形貌测量中的相机自标定 [J]. *光学精密工程*, 2011,19(8): 1957-1963.
LI Y Q, LIN H B. Camera calibration in morphology measurement of axisymmetric body[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8):1957-1963. (in Chinese)
- [14] JIA W, YUE Y, FERNSTROM J D, *et al.*. Imaged based estimation of food volume using circular referents in dietary assessment [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012,109(1): 76-86.
- [15] ZHENG Y Q, MA W J, LIU Y C. Another way of looking at monocular circle pose estimation [C]. *Proceedings of International Conference on Image Processing*, 2008: 86-92.

作者简介:



赵春宇(1992—),男,安徽阜阳人,主要从事计算机视觉及图像处理方面的研究。E-mail: zhao_chunyu2014@163.com



孙伟(1980—),男,安徽砀山人,博士,副教授,硕士生导师。主要研究方向为高性能视觉信息计算及嵌入式系统设计。E-mail: wsun@xidian.edu.cn