

# 采用低速相机测量轮的相对高速转动

赵义鹏, 李铁军, 王宁, 王旭之, 刘今越, 郭士杰

河北工业大学机械工程学院, 天津 300130

**摘要** 采用机器视觉测量轮的转速具有高效、直观的特点。采用高帧速相机测量高转速会导致相机数据量激增。为了解决数据量过大的问题,提出了一种采用低速电子卷帘快门相机测量轮子转速的方法。低速电子卷帘快门相机采集相对高速转轮的图像时,卷帘快门会引起轮图像的几何畸变。利用这些畸变图像中的信息,可以求解出对应的转速,实现利用低速相机测量轮的相对高速转动的目的。为了揭示转动速度和图像畸变之间的关系,建立了旋转仿真模型,并在模型中验证了求解方法的有效性。为了解决空间中的轮被单目相机拍摄产生的二义性,提出结合轮的转速来消除二义性的方法。最后进行了验证实验,实验结果表明,采用低速电子卷帘快门相机能够测量高于相机帧速的转速,并且相对误差小于4%。

**关键词** 测量; 仪器仪表; 转速测量; 图像处理; 电子卷帘快门

**中图分类号** TH89 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.071202

## Measuring Relative High-Speed Rotation of Wheel with Low-Speed Camera

Zhao Yipeng, Li Tiejun, Wang Ning, Wang Xuzhi, Liu Jinyue, Guo Shijie

*School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China*

**Abstract** Measuring the rotating velocity of the wheel with machine vision is efficient and straightforward. Measuring the high-speed rotation with a high-speed camera can generate massive data. In order to reduce the massive data, we propose a method to measure the relative high-speed rotation of the wheel by a low-speed electronic rolling shutter camera. This method bases on that the effect of rolling shutter can induce geometric distortion in the image when the wheel is rotating fast. The information in the distortion image can be used to get the rotating velocity of the wheel, and the purpose of measuring relative high-speed rotation with low-speed camera is realized at the same time. The proposed algorithm is validated in a simulation model which reveals the relationship between the rotation and the distortion image. In order to eliminate the dualistic caused by the spatial wheel photographed by a single camera, the rotation property of the wheel is researched. Finally, the verification experiment is carried out. The result of the experiment shows that this method can detect the rotating velocity which is higher than the speed of the camera, and the relative error is less than 4%.

**Key words** measurement; instrumentation; rotating velocity measurement; image processing; electronic rolling shutter

**OCIS codes** 120.3930; 100.2960; 330.1880

## 1 引言

旋转是一种基本运动形式,广泛存在于各种复杂运动中。在工厂中,许多机械故障是由旋转部件

引起的<sup>[1]</sup>。监视这些机械部件的旋转或移动需要各式各样的传感器,如光电编码器、机械转速表、旋转指标表和集流环等。由于这些仪器通常以接触被测物体表面的方式进行测量,所以测量结果容易受到

**收稿日期:** 2017-12-19; **收到修改稿日期:** 2018-01-16

**基金项目:** 国家自然科学基金(51175145)、河北省科技支撑计划(13211910D)

**作者简介:** 赵义鹏(1990—),男,博士研究生,主要从事视听测量及其融合方面的研究。E-mail: fengyuzhe13@163.com

**导师简介:** 李铁军(1967—),男,博士,教授,主要从事视听融合、人工智能等方面的研究。

E-mail: li\_tiejun@hebut.edu.cn(通信联系人)

仪器本身的影响。例如,在测量小惯量物体的振动时,传感器自身惯量会影响测量结果。随着科技的发展,一些用来测量转速的非接触式传感设备被研制出来,并应用于现实环境。这些传感器包括频闪仪、激光测速仪<sup>[2]</sup>、光学转速表和惯性陀螺仪等。但这些传感器智能化水平低,专用性太强。近年来,一些研究人员开始运用相机测量转速。用机器视觉测量旋转将扩大机器视觉的应用范围,也给转速测量提供一种非接触测量方法。

用相机测量旋转运动有两种方法:一种是主动测量,另一种是被动测量。主动测量是在物体上附加标记,通过观察标记的移动来提取转动速度,例如在图形上粘贴标签来测量转动<sup>[3-5]</sup>。而被动测量依赖于被测物体自身独特的形状或纹理,用这些内在的特征作为转速测量的标记。例如:使用高分辨率相机测量椭圆细胞的空间旋转<sup>[6]</sup>;运用高速相机测量旋转式流化床中气泡的旋转运动<sup>[7]</sup>。Wang等<sup>[8]</sup>采用基于模糊图像的机器视觉测量角速度,这是由于这些模糊图像隐含着关于转动的重要信息。事件相机是由模拟生物视觉而设计的,它有独立的像素,能对亮度变化产生异步响应<sup>[9]</sup>。运用事件相机也可以进行自身运动估计;Lichtsteiner等<sup>[10]</sup>提出了一种并行的跟踪和定位系统,通过使用事件流和给定强度图像的粒子滤波器来估计旋转运动;Gallego等<sup>[11]</sup>提出了一种利用事件相机的独立像素信息来估计角速度的方法,该方法测量的角速度误差小于8%。

目前常用的相机有两种快门:全局快门和电子卷帘快门(ERS)。全局快门是指在同一幅图像中,所有像素的起止曝光时间相同,这样采集到的影像一致性好。而ERS相机不能同时曝光整幅图像,而是通过逐行曝光的形式完成的。因此,当物体与相机之间存在平行于像素行方向的相对运动时,所拍摄的图像将是倾斜的<sup>[12-14]</sup>。Ait-Aider等<sup>[15]</sup>利用ERS相机拍摄物体上直线的变形来计算物体的位姿和速度;He等<sup>[16]</sup>利用ERS相机观察等腰三角形的旋转运动,根据图像中三角图形的变形大小可以测量出转速和振动。但是这些方法不能测量相对高速转动。

本文采用低速ERS相机采集相对高速转轮的图像,利用图像中畸变信息求解出对应的转速,实现了利用低速相机测量相对高速转动的目的。为了方便理解,本文有两点需要注意:1)文中“低速”与“高速”是相对概念,而非与绝对阈值进行比较。“低速相机”是指与被测转速相比,速度比较低。2)本文旨在验证相机的帧速值为 $n_1$ 的情况下,如何测量转速值为 $n_2$ 的轮

的转动(其中 $n_1 < n_2$ )。文中对于两者的比较,只是对 $n_1$ 和 $n_2$ 进行比较,而非进行物理量的比较。

## 2 理论与方法

### 2.1 ERS相机工作原理

ERS相机由于其功耗低、体积小特性已经被广泛用于手机上,其工作原理如图1所示。ERS相机从顶部到底部依次分层曝光,每一层的曝光时长都相同,但是开始曝光时刻都不同。当相机拍摄一个水平快速移动的刚性杆时,所得的杆图像是倾斜的。如果被测物体的静态形状是已知的,那么根据相机得到的图像以及物体与相机之间的空间关系,就可以计算出被测物体的移动速度。一些研究者根据这一特性测量物体的运动速度和振动,实现了利用低速相机测量相对高速运动的目的<sup>[16-17]</sup>。

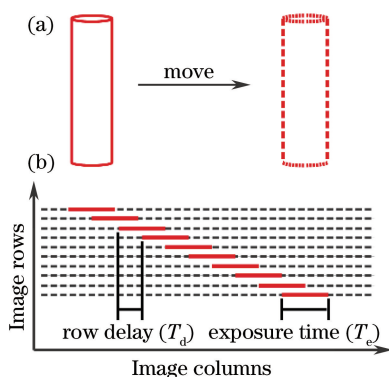


图1 ERS相机工作原理图。(a)刚性杆从左边快速移动到右边;(b)ERS相机捕捉到的杆的图像

Fig. 1 Work schematic of the ERS camera. (a) Rigid rod moves fast from left to right; (b) rod image captured by the ERS camera

### 2.2 ERS相机测量转速

ERS相机拍摄旋转物体的原理如图2所示:一个刚性杆绕点 $O(x_0, y_0)$ 作旋转运动,如图2(a)所示;ERS相机采集到的杆的图像如图2(b)所示,可以看出直杆所成的像是弯曲的。在杆的上端取一点 $A(x_1, y_1)$ ,在下端取一点 $B(x_2, y_2)$ 。 $\angle AOB$ 的真实角度用 $\theta_1$ 表示,在图2(b)中的大小用 $\theta_2$ 表示。则相机从点A到点B的过程中,杆转动的角度为

$$\varphi = \theta_2 - \theta_1, \quad (1)$$

所用时长为

$$t = T_d(y_2 - y_1), \quad (2)$$

式中: $T_d$ 为每行曝光延迟时长; $y_1$ 、 $y_2$ 分别为点A和点B所在的行数。则转速(本研究中转速单位均为 $\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$ )为

$$\omega = \varphi / (2\pi t). \quad (3)$$

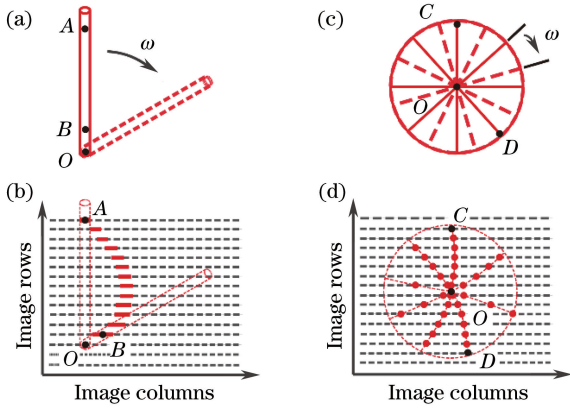


图2 ERS相机拍摄旋转物体的示意图。(a)刚性杆绕顺时针方向旋转;(b)ERS相机拍摄到的杆的旋转图像;(c)8辐条轮顺时针旋转;(d)ERS相机拍摄到的轮子的旋转图像

Fig. 2 Schematic of the rotating object captured by the ERS camera. (a) Rigid rod rotates clockwise; (b) rotating rod image captured by the ERS camera; (c) eight-spoke wheel rotates clockwise; (d) rotating wheel image captured by the ERS camera

当被测物体的形状是未知的时候,仅通过一张图像是无法测出转速的。如果被测对象是中心对称的轮式结构,则可以通过一张图像得出转速。假设轮式结构如图2(c)所示,其绕中心点顺时针转动,则用ERS相机拍摄的图像如图2(d)所示。在图2(c)中,点 $C(x_1, y_1)$ 和点 $D(x_2, y_2)$ 是从不同辐条上取的点,点 $O$ 是旋转中心,图2(c)中 $\angle COD$ 为 $\theta_1$ 。

$$\theta_1 = 2\pi(m+1)/n, \quad (4)$$

式中: $n$ 为轮的辐条数; $m$ 为点 $C$ 到点 $D$ 之间存在的辐条数目。在图2(d)中, $\angle COD$ 为 $\theta_2$ 。由(1)式可以求出轮从点 $C$ 到点 $D$ 这段时间内转动的角度,进而求出转速。

## 3 转动仿真分析

### 3.1 运动建模

仅用一张图片求轮的转速需要有一个前提,即轮子的辐条需绕转心均匀分布。图3为轮子在不同转速下形成的图像。为了方便说明,将轮子简化为一个如图3(a)所示的模型。图像的分辨率为 $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ 。轮子的中心也是该图的中心,其半径为 $450 \text{ pixel}$ 。相机曝光顺序从上到下,每行曝光时间为 $4996 \mu\text{s}$ ,每行曝光延迟时长为 $996 \mu\text{s}$ ,总曝光时间为 $1 \text{ s}$ 。

### 3.2 运动方向分析

由于轮子的初始位姿是未知的,所以轮子的转动方向是很难直接看出的。将图3(b)中的圆从上

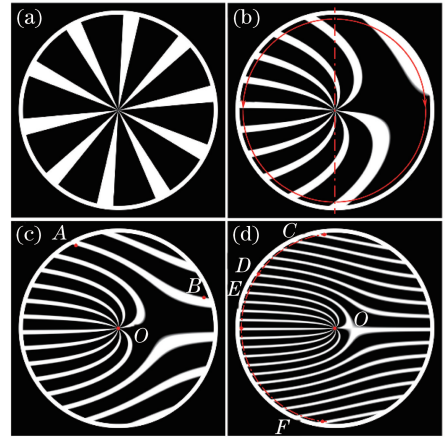


图3 不同转速下轮的仿真图像。(a)静态;(b) $0.5 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  
(c) $1 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ ;(d) $2 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 3 Simulated images of the wheel that rotates at different velocities. (a) Static; (b)  $0.5 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (c)  $1 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (d)  $2 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$

到下进行分割,分成左右两部分。选取固定半径的弧线同时对这两部分进行扫描。可以看出左侧弧线上辐条数多于右侧,则可得出轮是顺时针转动。这种方法有利于快速确定转向。在图3(c)中选出两点 $A$ 和 $B$ ,点 $A$ 和点 $B$ 在同一辐条形成的曲线上,到轮子中心的距离相同,也都在轮子的边缘上,因此 $A$ 、 $B$ 两点实际为轮子上同一个点。在图3(c)中点 $A$ 比点 $B$ 在竖直方向上高一些,由此可以推断出轮子的旋转方向是顺时针方向。但是有时候没有这种像 $AB$ 一样独立的曲线,如图3(b)所示,不能用上述方法判断转向。当轮子转速加快时,图像中的辐条形状会变得越来越弯曲,如图3(d)所示。

### 3.3 辐条边缘曝光

在实际应用中,行曝光时间 $T_e$ 远大于 $T_d$ ,导致随着轮子转速的增加,图像中轮子的边缘会变得很模糊。在图3所示的情况下,背景的亮度低于辐条。现选取轮子左半边辐条的上边缘点为研究对象,如图3(d)中的点 $C$ 所示。为了得到辐条边缘经过点 $C$ 的精确时间,现简化辐条边缘曝光模型,如图4所示。其中,辐条边缘经过该像素点的精确时刻为 $t_e$ 。辐条边缘的点的曝光过程分为两个阶段:从 $t_1$ 到 $t_e$ 为背景曝光过程,从 $t_e$ 到 $t_2$ 为辐条曝光过程。则该像素的总曝光量 $I_e$ 可以表示为

$$I_e = \int_{t_1}^{t_2} f(x) dt = \int_{y_{T_d}}^{t_e} k_1 dt + \int_{t_e}^{y_{T_d} + T_e} k_2 dt, \quad (5)$$

式中: $y$ 为该像素所在的行数; $k_1 \neq k_2$ , $k_1$ 和 $k_2$ 为不同的曝光系数。

$$\begin{cases} I_b = k_1 T_e \\ I_s = k_2 T_e \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $I_b$  为背景曝光总量, 其值等于点  $C$  周边背景的亮度, 即图 4(b) 中的点  $C_2$  处的亮度;  $I_s$  为辐条曝光总量, 其值等于点  $C$  周边辐条的亮度, 即图 4(b) 中的点  $C_1$  处的亮度。由(5)式和(6)式可求出  $t_e$ 。令辐条边缘经过点  $C$  的精确时刻为  $t_{e1}$ , 经过点  $D$  的精确时刻为  $t_{e2}$ 。则由点  $C$  到点  $D$  的时长变为

$$t = t_{e2} - t_{e1} \quad (7)$$

在辐条数目已知的情况下, 转速变为

$$\omega = \frac{\theta_2 - 2\pi(m+1)/n}{2\pi(t_{e2} - t_{e1})} \quad (8)$$

式中:  $\theta_2$  为图 3(d) 中  $\angle COD$  的值;  $n$  为总辐条数;  $m$  为点  $C$  到点  $D$  的辐条数。

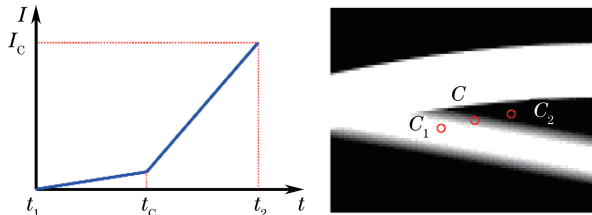


图 4 边缘曝光。(a) 点  $C$  曝光过程; (b)  $C_1$  和  $C_2$  的位置  
Fig. 4 Exposure of the spoke edge. (a) Exposure processing of point  $C$ ; (b) positions of points  $C_1$  and  $C_2$

### 3.4 运动速度分析

在测量未知辐条数的轮子时, 有时候仅通过旋转图像直接判断辐条数目是比较困难的, 如图 3(d) 所示。为了求辐条数  $n$ , 在图 3(d) 中取 4 个点: 点  $C, D, E, F$ , 其到旋转中心  $O$  的距离相等且都在辐条的边缘上。首先将点  $C$  和点  $D$  的相关参数代入(8)式, 其中有两个未知量  $n$  和  $\omega$ 。然后再将点  $C$  和点  $E$  的相关参数代入(8)式, 并联立求解可得  $n$  和  $\omega$ 。但得到的  $n$  在大多数情况下不是整数, 所以  $n$  应该取近似的整数。之后再点  $C$  和点  $F$  的参数以及  $n$  的值代入(8)式, 求得比较精确的  $\omega$  值。

然而在实际应用过程中, 仅通过上述单次计算得到的转速受噪声的影响很大, 所以可以采用加权平均的方式计算转速:

$$\omega = \frac{\sum r_i \omega_i}{\sum r_i}, 0.5r < r_i < r, \quad (9)$$

式中:  $r$  为图像中轮子的半径;  $r_i$  为选取不同的点  $C$  和点  $F$  时对应的半径;  $r_i$  对应的单次转速为  $\omega_i$ 。

通过以上方法可以计算出这个轮子有 10 根辐条, 并求得图 3(b)~(d) 中轮的转速依次为 0.4973, 0.9990, 2.0069  $r \cdot s^{-1}$ , 则计算所得转速和实际转速相比, 误差小于 0.4%。

## 4 轮的空间位姿

以上仿真是建立在图像中轮的外形是理想圆形的基础上进行的, 而实际测量中, 由于轮的轴线与相机的光轴不完全平行, 导致轮的成像不是圆形的。仅通过单目相机观测空间中的轮会产生二义性。

### 4.1 轮位姿的空间投影

图 5 为轮位姿的空间投影。  $O_2-uv$  为像平面坐标系,  $O_1-xyz$  为相机坐标系,  $O_3-ijk$  为世界坐标系。  $O_3-ij$  为轮所在的平面, 且原点为轮的中心。轮从空间投影到像平面的形状是椭圆形, 另外椭圆的中心不是轮的实际中心。

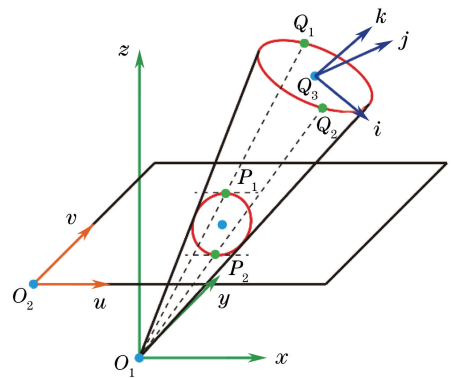


图 5 轮位姿的空间投影

Fig. 5 Projection of the wheel in the space

由文献[18-21]可得到轮中心位置和轮的空间向量:

$$\begin{cases} (x_0, y_0, z_0) = R(\pm L_1, L_2, L_3) \\ (-n_x, -n_y, -n_z) = R(\pm L_4, L_5, L_6) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $R$  为轮子的半径; 参数  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$  和  $L_6$  可以用文献[18-21]中的方法计算出来。为了降低计算复杂度,  $R$  值取 1。由于圆的空间位姿具有二义性, 则取一种姿态进行求解: 令  $x_0 = L_1$ 。在世界坐标系中,  $k$  轴向量  $\mathbf{v}_1 = (0, 0, 1)$ 。相机坐标系相对于世界坐标系的向量  $\mathbf{v}_2 = (n_x, n_y, n_z)$ ,  $\mathbf{v}_a$  为从  $\mathbf{v}_1$  到  $\mathbf{v}_2$  的单位旋转向量, 即

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{\text{temp}} = \mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2 = (-n_y, n_x, 0) \\ \mathbf{v}_a = \frac{\mathbf{v}_{\text{temp}}}{|\mathbf{v}_{\text{temp}}|} = (v_x, v_y, v_z) \end{cases} \quad (11)$$

令旋转角度为  $\theta = \arccos(n_z / |\mathbf{v}_a|)$ 。根据罗德里格斯旋转公式, 所需旋转矩阵为

$$\mathbf{M}_r = \mathbf{I} + \mathbf{M}_v \sin \theta + \mathbf{M}_v^2 (1 - \cos \theta) \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{I}$  为  $3 \times 3$  的单位矩阵;  $\mathbf{M}_v$  为反对称矩阵, 公式为



$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} 0 & -v_z & v_y \\ v_z & 0 & -v_x \\ -v_y & v_x & 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

从世界坐标系到相机坐标系的仿射变换矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_r & \mathbf{M}_t \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{M}_t$  为平移向量  $(x_0, y_0, z_0)^T$ ;  $\mathbf{0}$  为  $(0, 0, 0)$ 。因此, 通过坐标变换, 世界坐标系的点  $(i, j, k)$  经变换  $\mathbf{M}$  到相机坐标系为点  $(x, y, z)$ :

$$(x, y, z, 1)^T = \mathbf{M}(i, j, k, 1)^T. \quad (15)$$

令轮心在像平面坐标系的坐标为  $(u_0, v_0)$ , 像平面的参数矩阵为  $\mathbf{K}$ :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中:  $f_u$  和  $f_v$  分别为相机和镜头的有关参数。相机坐标系与像平面坐标系之间的投影关系可以表示为

$$z(u, v, 1)^T = \mathbf{K}(x, y, z, 1)^T. \quad (17)$$

在世界坐标下, 点  $(i', j', 0)$  是轮子上的点, 其在相机坐标系和像平面上对应的点分别为  $(x', y', z')$  和  $(u', v')$ 。在相机坐标系中, 点  $(x', y', z')$  所在的平面为

$$n_x(x - x_0) + n_y(y - y_0) + n_z(z - z_0) = 0, \quad (18)$$

则由(10)~(18)式可以确定, 点  $(i', j')$  和点  $(u', v')$  之间的相互转换关系为

$$\begin{cases} i' = g_1(u', v') \\ j' = g_2(u', v') \end{cases}, \quad (19)$$

式中:  $g_1$  和  $g_2$  为化简所得函数。通过(19)式就可以将图像中椭圆形的轮转成圆形的轮。

#### 4.2 消除轮空间位姿的二义性

消除轮空间位姿的二义性需要结合辐条的形状及分布。采用文献[22]中的方法进行椭圆的提取, 可确定椭圆的参数:

$$au^2 + bv^2 + cuv + du + ev + f = 0, \quad (20)$$

之后检测转向。而转向检测不能用图 3(b)所示的方式, 直接将椭圆分成两个部分。需采用如下方法:

点  $P_1(u_1, v_1)$  和  $P_2(u_2, v_2)$  分别为椭圆上最高点和最低点, 对应圆上的点分别为  $Q_1$  和  $Q_2$ 。将点  $Q_1$  和  $Q_2$  作为分割的起止点, 采用 3.2 节中的方法进行转向分析, 得到转向。

$$\frac{dv}{du} = -\frac{2au + cv + d}{2bv + cv + e}. \quad (21)$$

令  $dv/du = 0$ , 则可确定点  $P_1$  和  $P_2$  的坐标值, 进而结合(19)式可得到  $Q_1$  和  $Q_2$  的坐标。轮的辐条数和转速都可通过 3.4 节中的方法得到。单次扫描求得的转速仍为  $\omega_i$ , 则转速的方差为

$$D(\omega) = \sum r_i(\omega_i - \omega)^2. \quad (22)$$

根据(10)式可得到轮的两个空间位姿, 但只有一个是真实的。将这两个位姿的相关参数分别代入(22)式, 可得到两个方差:  $D_1(\omega)$  和  $D_2(\omega)$ 。真实位姿的方差较小, 通过这种方法即可消除轮空间位姿的二义性。

## 5 实验

### 5.1 实验装置

实验装置如图 6(a)所示。硬件由 ERS 相机、步进电机、补光灯以及轮组成。相机型号为 acA3800-14uc, 其图像传感器为 MT9J003。所选用相机的分辨率为  $3840 \text{ pixel} \times 2748 \text{ pixel}$ , 速度为  $14 \text{ fs}$ , 行曝光延迟时长为  $23.09 \mu\text{s}$ 。相机的镜头的型号为 C125-1218-5M, 其焦距为  $12 \text{ mm}$ 。为了获得准确的信息, 相机镜头需要在测量前进行校准, 校准方法参考文献[23]。步进电机型号为 42BYGH47-401A, 由步进电机控制器 DM422 控制。轮有 10 根辐条, 每根辐条都相同, 且均匀分布在转心周围。轮固定在步进电机轴上。在进行实验前, 电机转速已由转速表校准。

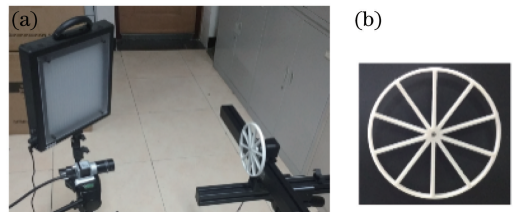


图 6 转动测量系统。(a)实验布局;(b)所用转轮

Fig. 6 Experimental system for rotation measurement.

(a) Experimental setup; (b) measured wheel

### 5.2 实验过程和结果

轮在转动过程中, 拍摄的图像品质与光照强度、曝光时间有关。曝光时间短, 辐条轮廓清晰, 但成像品质低; 曝光时间长, 成像品质高, 但辐条边缘会过于模糊。为了获得清晰的图像, 调整补光灯亮度到最大, 相机的曝光时间设定为  $350 \mu\text{s}$ 。为了减小误差, 调整相机光轴与轮转轴尽量平行。之后, 调节步进电机以不同的速度旋转。在同一转速下, 相机连续拍摄 20 张图像。图 7 显示了轮在不同转速下的图像。

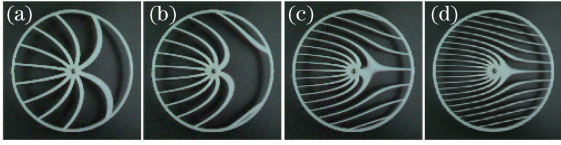


图7 轮以不同的速度旋转。(a)  $5 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ ;

(b)  $10 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $20 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d)  $30 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 7 Wheel rotates at different velocities. (a)  $5 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ ;

(b)  $10 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $20 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d)  $30 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$

最后采用本文提出的方法处理这些图像。首先检测出图像中的椭圆,然后依据(10)式求解轮中心位置的二重解以及轮空间向量的二重解。现取一种姿态进行求解:令  $x_0=L_1$ 。根据(19)式可将椭圆分别映射成一个圆,圆的半径为  $r$ 。在圆上选取点  $Q_1$  和  $Q_2$ ,分别对应椭圆上的最高点  $P_1$  和最低点  $P_2$ 。采用3.2节中的方法,从点  $Q_1$  向点  $Q_2$  顺时针分割以及逆时针扫描分割。图8给出了图7(c)中所示轮以不同半径扫描的数据,其中选定的边缘点位于峰值附近的上升沿。则可知逆时针扫描得到的辐条数量多于顺时针的数量,所以旋转方向都是顺时针。之后由3.3节中的方法,求得辐条边缘经过所选取像素点的精确时刻。按照3.4节中的方法求得辐条数和转速。测得所有图像中轮的辐条数都为10。由不同的扫描半径  $r_i$  得到不同的转速  $\omega_i$ ,并由(23)式求得方差  $D_1(\omega)$ 。再选取轮空间位姿的另一组解,求得方差  $D_2(\omega)$ 。表1为图7对应图像的  $D_1(\omega)$  和  $D_2(\omega)$ ,则可知  $D_1(\omega)$  的值都小于  $D_2(\omega)$ ,即  $D_1(\omega)$  对应的轮空间姿态是真实解。最后利用(9)式求得轮的转速,其结果如表2所示。

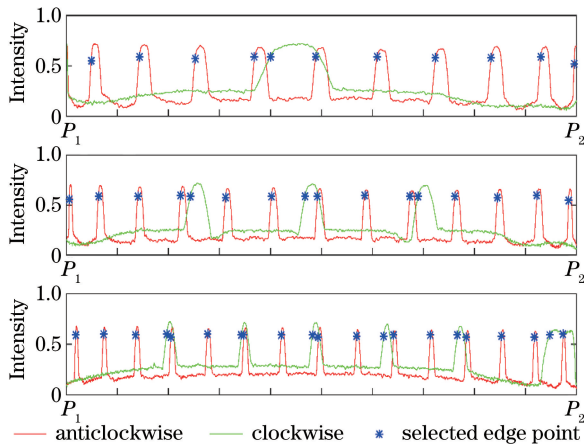


图8 不同半径对应的扫描数据。(a)  $r_i=0.4r$ ;

(b)  $r_i=0.65r$ ; (c)  $r_i=0.9r$

Fig. 8 Scanning data corresponding to different radii.

(a)  $r_i=0.4r$ ; (b)  $r_i=0.65r$ ; (c)  $r_i=0.9r$

表1 图7中的  $D_1(\omega)$  和  $D_2(\omega)$

Table 1 Values of  $D_1(\omega)$  and  $D_2(\omega)$  in Fig. 7

$D(\omega)$	$a$	$b$	$c$	$d$
$D_1(\omega)$	0.07	0.06	0.11	0.15
$D_2(\omega)$	0.42	0.48	0.55	0.64

由表2可知,采用ERS相机测量轮转速的相对误差小于4%,基本可用于轮转速的测量。由于所用ERS相机的速度为14 fs,而测量轮的最高旋转速度已达到  $30 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ ,即旋转速度是相机帧速的两倍以上,验证了低速相机可以测量轮的相对高速转动。

表2 实验结果分析

Table 2 Analysis of the experimental results

Actual velocity / $(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$	Average measured velocity / $(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$	Maximum error / %	Standard deviation / $(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$
5	4.984	2.06	0.05
10	10.029	1.52	0.07
20	19.925	2.84	0.22
30	29.657	3.30	0.48

## 6 结 论

在传统相机测量轮转速的过程中,相机的速度应该是被测速度的两倍以上。随着转速的增高,相机数据量急速上升。为了解决相机数据量过多的问题,本文提出了一种利用低速ERS相机测量轮的高转速的方法。为了揭示ERS相机拍摄轮的转动的成像规律,建立了一个仿真模型。之后在仿真模型上应用提出的算法,依次对旋转方向、边缘曝光、辐条数和转速等进行分析,并初步验证算法的有效性。为了解决轮空间位姿的二义性,利用轮在旋转过程中成像的特有规律来消除二义性,实现了转速的精确测量。最后在实验室条件下,进一步验证了所提方法的有效性,实现了低速相机测量轮的高转速的目的。另外,所提出的方法还存在不足,如所提方法不能进行实时处理,需要额外光源以提高成像质量,只用在单色背景上等。在今后的工作中还需进一步探索,解决这些问题的方法,为非接触式转速测量提供一种新的途径。

## 参 考 文 献

- [1] Tavner P J. Review of condition monitoring of rotating electrical machines[J]. IET Electric Power Applications, 2008, 2(4): 215-247.
- [2] Ying Z H, Gao C F, Wang Q, *et al.* Application of high-accuracy laser Doppler velocimeter in self-contained land navigation system[J]. Chinese Journal

- of Lasers, 2017, 44(12): 1204003.
- 应智慧, 高春峰, 王琦, 等. 高精度激光多普勒测速仪在陆用自主导航系统中的应用[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1204003.
- [3] Hou W, Jiang Y, Wu X, *et al.* Detection of kinematics parameters of index finger movement with high-speed video camera [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(2): 240-243.
- [4] Hou W S, Wu X Y, Jiang Y T, *et al.* Phased multi-joint movement of the index finger during a full flexion cycle[J]. Biomedical Engineering Applications Basis & Communications, 2008, 20(5): 303-312.
- [5] Furuno S, Kobayashi K, Okubo T, *et al.* A study on spin-rate measurement using a uniquely marked moving ball[C]//ICCAS-SICE, August 18-21, 2009, Fukuoka, Japan. IEEE, 10992034.
- [6] Schaeper M, Schmidt R, Kostbade R, *et al.* Optical high-resolution analysis of rotational movement: testing circular spatial filter velocimetry (CSFV) with rotating biological cells[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(26): 265402.
- [7] Nakamura H, Iwasakia T, Watanoa S. Experimental analysis of bubble velocity in a rotating fluidized bed [J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2009, 48(1): 178-186.
- [8] Wang S, Li Q, Guan B. A computer vision method for measuring angular velocity[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2007, 45(11): 1037-1048.
- [9] Kim H, Handa A, Benosman R, *et al.* Simultaneous mosaicing and tracking with an event camera [C]. Proceedings of the British Machine Vision Conference, 2014: 26.1-26.12.
- [10] Lichtsteiner P, Posch C, Delbruck T. A 128 × 128 120 dB 15 μm latency asynchronous temporal contrast vision sensor [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43(2): 566-576.
- [11] Gallego G, Scaramuzza D. Accurate angular velocity estimation with an event camera[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2017, 2(2): 632-639.
- [12] Liang C K, Chang L W, Chen H H. Analysis and compensation of rolling shutter effect [J]. IEEE Transactions on Image Process, 2008, 17(8): 1323-1330.
- [13] Sun Y, Liu G, Sun Y. An affine motion model for removing rolling shutter distortions[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(9): 1250-1254.
- [14] Aitaidier O, Bartoli A, Andreff N. Kinematics from lines in a single rolling shutter image[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2007, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE, 4270144.
- [15] Ait-Aider O, Andreff N, Lavest J M, *et al.* Exploiting rolling shutter distortions for simultaneous object pose and velocity computation using a single view [C] // IEEE International Conference on Computer Vision Systems, January 4-7, 2006, New York, USA. New York: IEEE, 35.
- [16] He Z, Wei P. New method for 2D velocity measurement based on electronic rolling shutter[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6625: 66251W.
- [17] Davis A, Rubinstein M, Mysore G J, *et al.* The visual microphone: passive recovery of sound from video[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 79.
- [18] Shiu Y C, Ahmad S. 3D location of circular and spherical features by monocular model-based vision [C] // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, November 14-17, 1989, Cambridge, MA, USA. New York: IEEE, 3719665.
- [19] Chen Z K, Hu L J, Wang Y, *et al.* Solution of duality in pose estimation of a single circle using rectangle constrain [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101501.
- 陈至坤, 胡连军, 王一, 等. 单圆位姿识别二义性的矩形约束消除[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101501.
- [20] Zhang L J, Huang X X, Feng W C, *et al.* Solution of duality in pose estimation of a single circle utilizing constraint angles motion reconstruction [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0115002.
- 张李俊, 黄学祥, 冯渭春, 等. 运动重建约束角的圆位姿二义性消除方法[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0115002.
- [21] Zhang L J, Huang X X, Feng W C, *et al.* Solution of duality in circular feature with three line configuration[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0515001.
- 张李俊, 黄学祥, 冯渭春, 等. 消除圆位姿二义性的三线构型法[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0515001.
- [22] Mai F, Hung Y S, Zhong H, *et al.* A hierarchical approach for fast and robust ellipse extraction [J]. Pattern Recognition, 2008, 41(8): 2512-2524.
- [23] Heikkilä J, Silvén O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [J]. Proceedings of IEEE, 1997: 1106-1112.