

轮胎切平面的立体视觉测量方法研究

陈旭¹ 林国余²

摘要

详细说明了获取车轮胎冠切点的不同方法,提出1种基于立体视觉和激光投影的车轮切平面测量方法,该方法依次向车轮胎冠上不同位置投射径向激光条纹,并通过条纹提取,平面拟合和坐标转换方法获取车轮胎冠切点,进而计算出车轮的切平面方程。实验结果表明该方法稳定可靠,可以高精度地获取车辆切平面的平面方程。

关键词

轮胎切平面;胎冠切点;立体视觉;激光条纹

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

0 引言

Introduction

车轮切平面参数是1个重要的车辆尺寸参数,在车辆轮距参数测量和车轮定位参数测量方面起着重要的作用^[1-2]。目前关于车轮切平面参数视觉测量的文献较少,文献[3]中提出1种采用椭圆拟合和3维搜索算法相结合的轮胎切平面求取算法,文献[4]提出1种在光平面内利用最小二乘多次曲线拟合求取车轮胎冠最高点,进而获得轮胎切平面参数。虽然上述文献中通过实验验证了这2种方法的有效性,但是还存在一定的不足。这2种方法都是基于单目视觉的测量方法,并在光平面上进行胎冠切点3维坐标测量,然而由于单目视觉的固有缺陷以及光平面特点,很难高精度地确定光平面和摄像机像平面之间的转换关系,而且标定过程复杂,因此限制了其在实际测量中的应用。

本文在文献[3-4]的方法基础上提出1种基于立体视觉和激光条纹投影的车轮切平面参数测量方法。该方法首先提取出投射在车轮胎冠上不同位置的至少3条径向激光条纹,然后通过立体视觉原理获取激光条纹上点的3维坐标,其次通过激光条纹平面拟合,平面投影,极值点计算以及3维平面拟合方法获取轮胎切平面的平面方程。实验结果表明:该方法测量稳定可靠,结构简单,车轮胎冠切点和切平面计算准确,可以较高精度地获取车轮切平面参数。

1 车轮切平面参数测量原理

Measuring principle of tire tangent plane parameters

基于上述前提条件,本论文设计了如图1所示的基于立体视觉和激光器的车轮切平面测量结构,其中激光器负责向车轮的外侧胎冠上的不同位置投射径向激光条纹,相机1和相机2构成一个立体视觉基本测量单元,负责拍摄投射在车轮外侧胎冠上的激光条纹。

假设基本测量单元中的2个相机已经分别根据张正友^[5]提出的平面模板标定算法进行单目标定以及双目标定^[1],本文设计了如下的车轮切平面参数测量步骤:

- 1) 利用激光器垂直地向轮胎胎冠上投射径向激光条纹;
- 2) 基本测量单元中的左右相机分别拍摄激光条纹图像;
- 3) 提取图像中的激光条纹目标,通过激光条纹平面拟合,平面投

收稿日期 2009-04-21

资助项目 南京信息工程大学科研基金(20080307)

作者简介

陈旭,女,博士,讲师,主要研究机器人触觉感知与机器视觉. sonia.chen@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 信息与控制学院,南京,210044

2 东南大学 仪器科学与工程学院,南京,210096

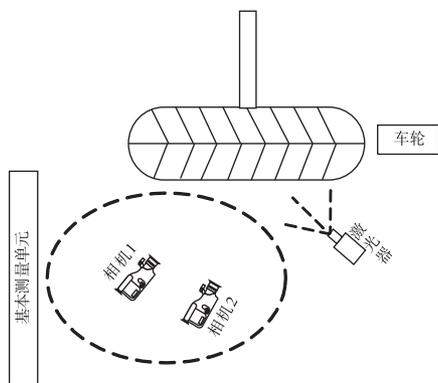


图1 车轮切平面测量结构

Fig. 1 Structural diagram of the measurement of tire tangent plane

影,极值点计算,3维坐标反求等算法获取胎冠切点3维坐标;

4) 重复步骤1)~3),直至获取车轮胎冠上不同位置的至少3个胎冠切点,记为 P_i ;

5) 根据胎冠切点集合 P_i 进行切点位置调整,并拟合3维平面,从而获得轮胎切平面参数.

2 胎冠切点测量算法

Measurement and algorithm of tire tip tangent point

胎冠切点测量是获取轮胎切平面参数的关键技术之一,为了准确、快速地获取胎冠切点,本节首先阐述胎冠切点定位的不同算法,然后详细说明本文所采用的基于坐标变换的具体测量算法.

2.1 胎冠切点定位算法的比较

如图2所示,激光器以垂直轮胎侧面的方向,向车轮胎冠上投射1条径向激光条纹,该条纹实际为胎冠径向截面的轮廓线.本文近似用胎冠侧面上的最外侧点来表示胎冠切点.

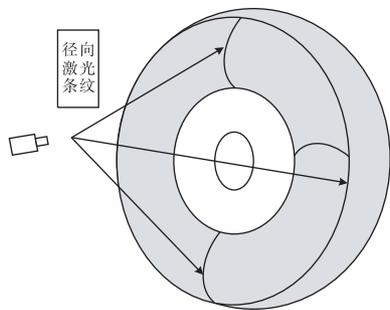


图2 投影在轮胎胎冠上的激光条纹示意

Fig. 2 Schematic diagram of the laser stripe on the tire tip

对于获取胎冠切点,目前主要有如下3种方法:

1) 对于在图像平面内拟合后的激光曲线方程,认为激光曲线的顶点即为图像平面内激光条纹曲线方程的极值点,并认为左右图像上激光条纹曲线方程的极值点构成1对匹配点,从而通过3维重建算法得到胎冠切点的3维坐标.这种方法优点是运算简单,速度快.但由于世界坐标系和图像像素坐标系之间是透视关系,因此由成像面上拟合激光条纹曲线获得的胎冠切点和实际胎冠切点并不相同,2者之间存在很大的误差.

2) 对整条激光条纹进行3维重构,从而获得激光条纹上点的3维坐标,然后在世界坐标系下对激光条纹上的空间点进行空间曲线拟合,并将空间拟合曲线中曲率最大的空间点作为胎冠切点.该方法的优点在于,由于对激光条纹上空间点进行空间曲线拟合是在世界坐标系下完成,因此空间拟合曲线能够很好地表现出激光条纹的真实形状特征,可以最大程度地减少由计算引起的胎冠切点误差.但也正是由于曲线拟合是在世界坐标系下进行的,因此在拟合过程中,必须加入3维点共面性约束,这不仅增加计算量,而且增加了拟合结果的不稳定性.

3) 对整条激光条纹进行3维重构,获得激光条纹上的空间点及其3维坐标,从世界坐标系中观察,激光条纹实际位于空间某个平面内,因此可以通过空间平面拟合和投影计算获得激光条纹在该空间平面内的平面曲线方程,然后通过计算拟合空间平面内平面曲线方程的极值点,以及坐标反变换得到胎冠切点.这种方法优点在于2个方面,首先曲线拟合是在平面内进行,因此计算量小;其次该方法可以避免方法1中由于相机透视而引起的胎冠切点和实际胎冠切点不匹配的缺陷.

根据上述的分析,从精确度和稳定性方面考虑,本文采用了方法3作为计算胎冠切点的测量方案.

2.2 基于坐标转换的胎冠切点测量算法

将左、右图像中激光条纹上点的图像坐标记为 P_{1i} 和 P_{2i} ,由于双目相机事先已经标定,通过外极线约束,序一致约束和3维重构算法可以获得激光条纹上点的3维坐标,记为 $P_{li} = [X_{li}, Y_{li}, Z_{li}]^T$,为了获取高精度的轮胎切点3维坐标,本文设计如下步骤:

1) 胎冠上的激光条纹位于某个空间平面 L_0 上,因此对 N 个3维点 P_{li} 进行空间平面拟合,根据式(1)获得归一化后的平面参数 $[A_L, B_L, C_L, 1]^T$:

$$\begin{bmatrix} X_{11} & Y_{11} & Z_{11} \\ X_{12} & Y_{12} & Z_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{1N} & Y_{1N} & Z_{1N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_L \\ B_L \\ C_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ \vdots \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

2) 将激光条纹上空间点 P_{1i} 投影到拟合平面 L_0 上,并获取投影点 3 维坐标. 假设 $P_{2i} = [X_{2i}, Y_{2i}, Z_{2i}]^T$ 是 P_{1i} 在拟合平面 L_0 上投影点的坐标,为了计算投影点 P_{2i} 的坐标,根据解析几何理论可知, P_{1i} 和 P_{2i} 2 点之间的向量与拟合平面的法向量平行,即:

$$\begin{cases} X_{2i} = X_{1i} + A_L t, \\ Y_{2i} = Y_{1i} + B_L t, \\ Z_{2i} = Z_{1i} + C_L t. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 t 表示直线标准方程中的等公比,因此式(2)表示由空间点 P_{1i} 和 P_{2i} 所构成的空间直线参数方程,此外由于 P_{2i} 位于拟合平面上,因此同时满足

$$A_L X_{2i} + B_L Y_{2i} + C_L Z_{2i} + 1 = 0. \quad (3)$$

联立(2)式和(3)式即可获得参数

$$t = -\frac{AX_{1i} + BY_{1i} + CZ_{1i} + 1}{A^2 + B^2 + C^2}, \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)即可获得投影点 P_{2i} 的 3 维坐标.

3) 由于 P_{2i} 在拟合平面 L_0 上,因此在拟合平面内根据 P_{2i} 进行曲线拟合. 由空间解析几何可知,空间平面曲线可表示为 2 个不同空间曲面的交线,很难用固定的解析公式表示,因此也就无法根据解析公式直接获取空间曲线的极值点. 本文提出 1 种间接获取空间曲线方程参数的方法,如图 3 所示. 该方法由拟合平面 L_0 构建 1 个新坐标系 $O'x'y'z'$,在新坐标系下,拟合平面 L_0 上所有点的 z 坐标为 0,即 $z' = 0$,构建新坐标系 $O'x'y'z'$ 的步骤如下:

1) 根据空间几何原理计算过拟合平面 L_0 上某点 $P_i = [x_0, y_0, z_0]^T$ 且和拟合平面 L_0 相互垂直的某个平面 L_1 的平面方程,将平面 L_1 的平面法向量记为 $[A_1, B_1, C_1, D_1]$. 由于满足上述条件的平面很多,因此本文设置 $A_1 = -A_L; B_1 = 2 B_L$. 根据空间平面相互垂直关系和空间平面的点法式方程,可得平面 L_1 的平面方程参数为

$$\begin{cases} A_1 = -A_L, \\ B_1 = 2 \times B_L, \\ C_1 = -(A_L \times A_1 + B_L \times B_1)/C_L, \\ D_1 = -(A_1 \times X_0 + B_1 \times Y_0 + C_1 \times Z_0). \end{cases} \quad (5)$$

2) 计算分别与拟合平面 L_0 以及平面 L_1 垂直,且

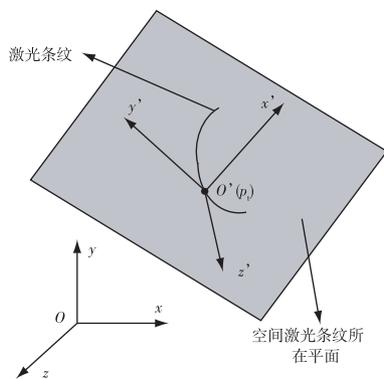


图 3 $Oxyz$ 坐标系和 $O'x'y'z'$ 坐标系之间关系
Fig. 3 Relationship between $Oxyz$ coordinate system and $O'x'y'z'$ coordinate system

过点 $P_i = [x_0, y_0, z_0]^T$ 的平面 L_2 的平面方程,将平面 L_2 的平面法向量记为 $[A_2, B_2, C_2, D_2]$,其具体计算公式为

$$\begin{cases} A_2 = B_L \times C_1 - C_L \times B_1, \\ B_2 = C_L \times A_1 - A_L \times C_1, \\ C_2 = A_L \times B_1 - B_L \times A_1, \\ D_2 = -(A_2 \times X_0 + B_2 \times Y_0 + C_2 \times Z_0). \end{cases} \quad (6)$$

3) 将拟合平面 L_0 作为 $O'x'y'$ 平面,平面 L_1 作为 $O'x'z'$ 平面,平面 L_2 作为 $O'y'z'$ 平面,这 3 个相互垂直的空间平面之间的两两交线构成了新坐标系 $O'x'y'z'$ 下的 x', y', z' 坐标轴,且 P_i 就是新坐标系原点. 通过空间解析几何理论可知,投影点 P_{2i} 到 $O'x'z'$ 平面的距离构成了新坐标系下 $O'x'y'$ 的 y 轴坐标,投影点 P_{2i} 到 $O'y'z'$ 平面的距离构成了新坐标系下 $O'x'y'$ 的 x 轴坐标,具体计算公式如式(7).

$$\begin{cases} x'_i = \frac{A_2 X_{2i} + B_2 Y_{2i} + C_2 Z_{2i} + D_2}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}}, \\ y'_i = \frac{A_1 X_{2i} + B_1 Y_{2i} + C_1 Z_{2i} + D_1}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}}. \end{cases} \quad (7)$$

这样即将空间激光条纹上点 P_{1i} 的 3 维坐标(在 $OXYZ$ 坐标系下)转化为 $O'x'y'$ 平面坐标系下的平面坐标 P_{3i} .

最后,由于 P_{3i} 是空间激光条纹上点在其所在平面上的投影点, P_{3i} 所构成的平面曲线真实表现出空间激光条纹的曲线形状特征,因此可以在 $O'x'y'$ 平面中利用 P_{3i} 进行平面曲线拟合,并计算出曲线极值点的坐标,记为 $O'_e = [x'_e, y'_e]^T$. 由于 $O'_e = [x'_e, y'_e]^T$ 是在 $O'x'y'z'$ 坐标系下的表示,因此还需要将

平面坐标重新转换为 $Oxyz$ 坐标系下的 3 维坐标表示. 由于 $O'x'y'z'$ 坐标系中的 $O'y'z'$, $O'x'z'$ 和 $O'x'y'$ 平面的法向量已知(在 $Oxyz$ 坐标系下表示), 分别为 $\mathbf{n}_1 = [A_2, B_2, C_2]^T$, $\mathbf{n}_2 = [A_1, B_1, C_1]^T$ 和 $\mathbf{n}_3 = [A_L, B_L, C_L]^T$, 因此可以获得其基本向量分别为

$$\begin{aligned}\frac{\mathbf{n}_1}{|\mathbf{n}_1|} &= [A'_2, B'_2, C'_2]^T, \\ \frac{\mathbf{n}_2}{|\mathbf{n}_2|} &= [A'_1, B'_1, C'_1]^T, \\ \frac{\mathbf{n}_3}{|\mathbf{n}_3|} &= [A'_L, B'_L, C'_L]^T.\end{aligned}\quad (8)$$

则空间激光条纹的极值点, 即胎冠切点的 3 维坐标 $\mathbf{O}_c = [X_c, Y_c, Z_c]^T$ 为

$$\begin{aligned}X_c &= A'_2x_c + A'_1y_c + X_0, \\ Y_c &= B'_2x_c + B'_1y_c + Y_0, \\ Z_c &= C'_2x_c + C'_1y_c + Z_0.\end{aligned}\quad (9)$$

3 轮胎切平面计算方法

Calculating method of tire tangent plane

所谓车轮切平面, 即是由车轮胎冠切点构成的平面. 根据不共线的 3 点确定 1 个平面的原理, 可以认为只要按照上述提出的胎冠切点提取算法获取车轮胎冠上不同位置至少 3 个胎冠切点的 3 维坐标, 即可根据空间平面拟合算法获得轮胎侧面切平面的平面方程. 然而, 考虑到在实际测量中获得的胎冠切点不可避免存在一定误差, 本文称其为伪切点, 因此通过伪切点计算获得的切平面也不可避免存在一定误差, 本文称其为伪切平面, 故还需要对伪切点进行后续的调整, 以求获取更为准确的轮胎切平面. 本文根据文献[3]中提出的切平面搜索算法获得轮胎侧面切平面参数.

4 实验和分析

Experiment and analysis

4.1 胎冠切点测量实验

由于没有直接的方法来评价胎冠切点获取的正确与否, 只能根据胎冠切点为胎冠激光轮廓线的最外侧点这一依据, 通过人工判断的方式来验证获取的胎冠切点的有效性, 当然也可以通过后续的切平面实验来间接验证切点的正确与否. 这里所采用的测量对象包括几种不同车型的车轮, 主要目的是验证本论文提出的车轮胎冠切点提取方法的有效性. 图 4 中列出了实验中提取获得的车轮胎冠切点, 其中白色点表示获得的轮胎切点位置.

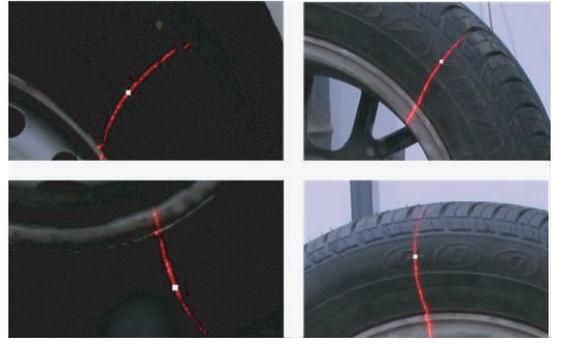


图 4 实验中获得的车轮胎冠切点
Fig. 4 The tangent point on the tire tip

目前尚未有可靠方法可以获得胎冠切点位置, 凭肉眼观察可以发现, 根据本文提出的车辆胎冠切点提取算法, 获得的胎冠切点位置和胎冠侧面激光轮廓线上的最外侧点位置十分相近, 虽然 2 者之间还存在一定的误差, 但是这种误差对车轮切平面的测量误差很小.

4.2 车轮切平面测量实验

车轮切平面由车轮胎冠切点构成, 因此可以采用测量左右车轮切平面的方法来验证胎冠切点测量方法的有效性. 在实验过程中, 本论文不采用安装在车辆上的车轮作为实验对象, 这是由于:

- 1) 实际车辆的车轮都存在一定前束角和外倾角, 获得的车轮切平面很容易受到前束角和外倾角的影响, 因此实验结果不具有代表意义;
- 2) 安装在车辆上的车轮往往由于受到车身载荷而发生一定的形变, 从而影响测量结果.

为了验证所获取的车轮切平面的正确性, 本文通过对一些单独摆放的轮胎的左右侧面进行实验以验证算法的有效性. 由于实验对象是 1 个独立摆放的轮胎, 因此如下 2 点近似成立:

- 1) 独立摆放的轮胎没有发生变形;
- 2) 轮胎两侧的切平面近似平行.

基于上述 2 个假设, 本论文设计了如下的切平面评价公式. 首先假设轮胎两侧切平面的平面方程分别为

$$A_1X + B_1Y + C_1Z + D_1 = 0, \quad (10)$$

$$A_2X + B_2Y + C_2Z + D_2 = 0, \quad (11)$$

则轮胎 2 侧切平面之间的夹角为

$$\alpha = \arccos\left(\frac{A_1A_2 + B_1B_2 + C_1C_2}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \times \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}}\right).$$

根据上述的近似条件可知如果轮胎 2 个切平面完全平行, 则满足 $|\alpha| = 0^\circ$, 因此如果测量获得的

2个切平面平行度越高,则夹角 $|\alpha|$ 越小.本文在实验中对3种不同类型的轮胎的2侧切平面夹角计算,观察其是否满足近似平行关系,表1列出了实验数据.其中 $|\alpha|$ 是对同1种轮胎两侧切平面进行多次测量后获得的平均值,可以看出 $|\alpha|$ 值并不等于 0° ,主要原因在于获取的胎冠切点和轮胎切平面都存在一定的测量误差.即使这样,依然可以从表1中看出,轮胎两侧切平面之间夹角的 $|\alpha|$ 值都较小,因此可以认为利用本论文提出的方法得到的胎冠切点以及轮胎切平面是近似正确的,进而认为本论文中提出的胎冠切点获取方法、车轮切平面的计算方法也是有效的.

表1 车辆轮胎两侧切平面测量数据

Table 1 Data measured of the tangent plane on the two sides of the automobile tires

序号	$ \alpha /(^\circ)$
轮胎1	1.54
轮胎2	2.23
轮胎3	2.07

5 结论

Conclusion

为了准确获取车轮切平面参数,本文提出1种基于立体视觉和激光投影的车轮切平面测量方法.该方法依次向车轮胎冠上的不同位置投射径向激光条纹,通过激光条纹平面拟合,平面投影,极值点计算获取胎冠切点,并根据胎冠不同位置上的至少3个胎冠切点进行3维平面拟合从而获取轮胎切平面

参数.其中,本文详细阐述了车轮胎冠切点获取的不同方法,提出了基于平面投影和曲线拟合的测量方法,并推导出具体的解析计算公式.实验结果表明该方法稳定可靠,可以高精度地获取车辆切平面的平面参数.

参考文献

References

- [1] 卞小东. 基于机器视觉的车辆几何尺寸测量系统研究[D]. 南京:东南大学仪器科学与工程学院,2005
BIAN Xiaodong. Research on vehicle dimensions measuring system based on machine vision[D]. Nanjing: School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, 2005
- [2] 苏建,翟乃斌,刘玉梅,等. 汽车整车尺寸机器视觉测量系统的研究[J]. 公路交通科技,2007,24(4):145-149
SU Jian, ZHAI Naibin, LIU Yumei, et al. Research on vehicle dimensional measurement based on machine vision[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(4): 145-149
- [3] 魏崑,孙长库,张效栋,等. 车轮定位参数的线激光非接触方法研究[J]. 光电子激光,2004,15(12):1479-1482
WEI Wei, SUN Changku, ZHANG Xiaodong, et al. Study on non-contact measurement method based on line-structured laser for vehicle wheel alignment parameters[J]. Journal of Optoelectronic Laser, 2004, 15(12): 1479-1482
- [4] 孙长库,王志雄,张效栋,等. 激光视觉车轮定位系统中胎冠3D坐标的求取[J]. 光电子激光,2002,13(9):959-961
SUN Changku, WANG Zhixiong, ZHANG Xiaodong, et al. Extraction of 3D coordinate on the tire tip in the laser vision alignment system for automobile wheels[J]. Journal of Optoelectronic Laser, 2002, 13(9): 959-961
- [5] 张正友. 相机标定柔性新技术[J]. 模式分析与机器智能,2000,22(11):1330-1334
ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334

Research on stereo vision measuring method for tire tangent plane

CHEN Xu¹ LIN Guoyu²

1 College of Information and Communications Technologies, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096

Abstract After the detailed description of the three methods of acquiring the tangent point on the tire tip, a measurement of tire tangent plane based on stereo vision and laser projection is proposed in this paper. Firstly, the radial laser stripe is projected sequentially on the various positions on the tire tip. Secondly, through the laser stripe extraction algorithm, spatial plane fitting process and coordinate transformation algorithm, the tangent point on the tire tip is acquired. And then the tire tangent plane equation is calculated. Experiments show that the method is stable and reliable, able to have the tire tangent plane equation acquired precisely.

Key words tire tangent plane; tangent point on tire tip; stereo vision; laser stripe