

结构光传感器在柔性视觉测量系统中的应用研究^{*}吴斌¹, 孙长钦¹, 杨兵¹, 薛婷^{2**}, 叶声华¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 针对柔性视觉测量系统的应用需求, 根据介绍了基于线结构光视觉传感器实现棱线测量的相关技术, 创新性地研究了采用线结构光视觉传感器实现空间圆孔测量的原理、方法, 并对空间圆孔中心坐标的测量数学模型进行了详细地推导。基于线结构光视觉传感器实现棱线和空间圆孔测量的相关技术已经在江淮汽车厂C926汽车生产线上得到应用, 采用双机器人形式对84个测量点进行了在线测量, 取得了很好的测量应用效果。

关键词: 线结构光传感器; 柔性视觉测量系统; 棱线特征; 圆孔参数

中图分类号: TN386.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2008)10-1309-03

Application technology of line-structured light sensor in flexible vision measurement system

WU Bin¹, SUN Chang-qin¹, YANG Bing¹, XUE Ting^{2**}, YE Sheng-hua¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. College of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To meet the applied demands of flexible vision measurement system, the technology of ridge feature measurement with Line-structured light sensor is presented summarily. Moreover, innovative measurement principle and implementation method for spatial hole parameters are investigated using line-structured light vision sensor in the paper. Through the detailed research procedure, the math model for center coordinates resolution of spatial hole is deduced. The discussed technologies have been proved and applied successfully in the C926 car-body product line of JAC factory. The flexible vision measurement system for C926 car-body product line of JAC factory adopts two industrial robots for implementation of 84 points measurement on-field.

Key words: line-structured light sensor; flexible vision measurement system; ridge feature; hole parameters

1 引言

工业视觉测量系统的组建形式主要有两种: 多传感器固定式^[1]和机器人移动式^[2]。前者相当于一台多测头的三坐标测量机, 测量速度快、效率高, 适合批量大、测量对象变化小的应用场合, 但系统造价高、柔性差。后者以工业机器人作为运动载体, 配合视觉传感器实现特征的顺序测量, 对于批量小、测量对象变化大的应用最为适合, 系统柔性好、适应性强, 若测量点较多、测量节拍要求短的应用则可以采用多个测量机器人组合的测量方式实现。目前, 由于工业生产灵活、产品变化较快, 这种可编程、适应性强的机器人柔性视觉测量系统已成为研究的热点。

对于柔性视觉测量系统, 视觉传感器的应用技术研究是其核心内容。目前, 视觉传感器主要有两种结构形式: 立体视觉传感器^[3,4]和线结构光视觉传感器^[5,6]。传统立体视觉传感器由两台摄像机组成, 成本高、体积大、分量重, 不适合移动式测

量应用。线结构光视觉传感器由一台摄像机和一个线结构光投射器组成, 体积小、重量轻、成本低且精度适中, 在工业现场三维视觉测量中获得了广泛的应用^[7]。尤其是体积小、重量轻的特点更适合应用于柔性视觉测量系统。

在柔性视觉测量系统中, 为了灵活移动, 每个机器人仅安装一个视觉传感器, 却要满足不同对象的测量需要, 比如车身上的棱线和定位孔, 是车身测量中最基本, 也是最主要的测量对象。许多学者开展了线结构光视觉传感器进行棱线测量的相关研究, 但基于线结构光视觉传感器实现空间圆孔测量的研究还很少。因此, 本文简单概括了基于线结构光视觉传感器实现棱线测量的相关技术, 着重研究了采用线结构光视觉传感器实现空间圆孔测量的原理和方法, 并推导了空间坐标计算数学模型。

2 线结构光传感器的数学模型

图1所示为线结构光传感器的数学模型。如图中所示, 假

收稿日期: 2007-12-24 修订日期: 2008-04-03

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50705065); 天津市自然科学基金资助项目(08JCYBJC10000)^{**} E-mail: xueting@tju.edu.cn

设三维世界坐标系为 $O_w-x_wy_wz_w$, 摄像机坐标系为 $O_c-x_cy_cz_c$, 图像平面 π_n 坐标系为 $O_n-X_nY_n$ 。将摄像机坐标系作为传感器测量坐标系, 则线结构光视觉传感器的数学模型可以用摄像机坐标系下光平面的方程来表示。设在 $O_c-x_cy_cz_c$ 坐标系下, 光平面 π_s 的方程系数为 $V=[a \ b \ c \ d]$, 光平面上任意一点 P 的坐标 $P_c=[x_c \ y_c \ z_c]^T$, 对应齐次坐标 $P_c=[x_c \ y_c \ z_c \ 1]^T$, 则光平面方程可以表示为:

$$V \cdot P_c = 0 \quad (1)$$

若已知 P 点的理想投影归一化图像坐标 $P_n=[X_n \ Y_n \ 1]^T$, 则过摄像机光心和此像点的直线方程可以表示为:

$$P_c - O_c = k \cdot (P_n - O_n) \quad (2)$$

则(1)、(2)式的联立即为线结构光视觉传感器的数学模型。

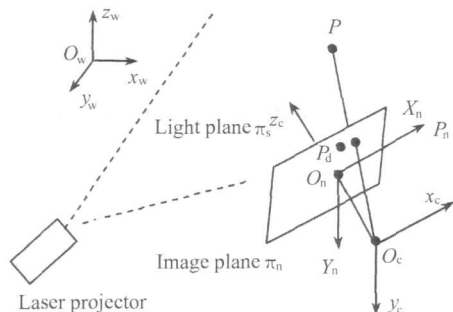


图1 线结构光传感器数学模型

Fig 1 Mathematic model of line structured light sensor

3 柔性视觉测量中线结构光传感器的应用

3.1 基于线结构光传感器的棱线测量技术

棱线的测量是通过线结构光视觉传感器对棱线上多个位置的测量来实现的。光平面与棱线被检测点位置处的切线垂直投射, 经棱线两侧曲面形貌的调制, 在摄像机像面上形成两条亮折线, 如图2所示, 图像中两条亮折线的拐点所对应的空间点即为棱线上的待测特征点, 相应的空间坐标即为所求棱线特征点坐标。

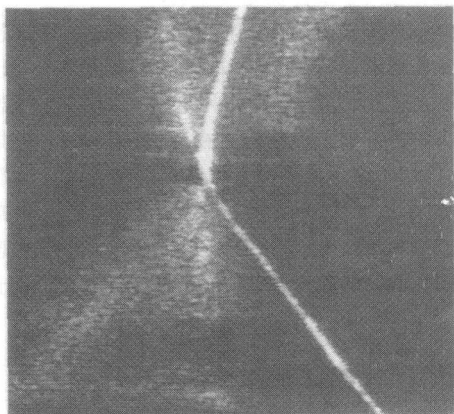


图2 测量光条图像

Fig 2 Measured image of light strip

对于已标定的线结构光视觉传感器来说, 在摄像机坐标系 $O_c-x_cy_cz_c$ 下的光平面方程是已知的, 根据上述线结构光视觉传

感器的数学模型, 为得到图像中拐点所对应的棱线特征点在 $O_c-x_cy_cz_c$ 坐标系下的空间坐标, 需要精确确定图像中拐点的图像坐标。

拐点图像坐标的提取可以通过相交直线求交点的方法计算得到^[1], 首先对图像中的两条亮折线进行光条提取, 根据提取的数据通过线性拟合的方法得到表示两条折线的直线方程, 然后联立两直线方程, 求得交点坐标, 即为拐点坐标。通常实际的两条亮折线并不是理想的直线, 而且在拐点处由于光的漫反射会形成不规则的光斑、毛刺等, 使采用直线相交求取拐点的精度不高, 而且也容易受到环境光照变化的影响。

根据相关实验数据和现场应用情况, 鲁棒性最好的拐点图像坐标的提取方法则是基于模板匹配的方法, 设 $I(x, y)$ 为待匹配图像, 尺寸为 $W \times H$, $T(x, y)$ 为匹配模板, 尺寸为 $w \times h$, $R(x, y)$ 为匹配结果数组, 尺寸为 $(W-w+1) \times (H-h+1)$, 则其归一化互相关计算式为

$$R(x, y) = \frac{\sum_{y'=0}^{h-1} \sum_{x'=0}^{w-1} T(x', y') I(x+x', y+y')}{\sqrt{\sum_{y'=0}^{h-1} \sum_{x'=0}^{w-1} T(x', y')^2} \sqrt{\sum_{y'=0}^{h-1} \sum_{x'=0}^{w-1} I(x+x', y+y')^2}} \quad (3)$$

根据(3)式和预设匹配模板对待匹配图像搜索后, 得到匹配结果数组 $R(x, y)$, 匹配结果数组 $R(x, y)$ 中最大元素值即为最优模板匹配结果。模板中应预设拐点位置信息, 根据最优模板匹配结果和预设拐点位置信息可以得到最终的拐点的图像坐标。

3.2 基于线结构光传感器的空间圆孔测量技术

线结构光视觉传感器测量空间圆孔中心位置的原理示意图如图3所示。图中的线结构光视觉传感器由正直摆放的摄像机和斜向摆放的激光投射器组成, O_c 和 O_l 分别为摄像机光心和激光光源中心, 摄像机坐标系 $O_c-x_cy_cz_c$ 定义为传感器测量坐标系。 O_h 为被测空间圆孔中心, 在 $O_c-x_cy_cz_c$ 坐标系下的坐标定义为 $O_h(x_h, y_h, z_h)$ 。直线 O_hO_c 与光平面 π_s 交于 P 点, 在 $O_c-x_cy_cz_c$ 坐标系下的坐标定义为 $P_c(x_p, y_p, z_p)$ 。 AB 表示光平面 π_s 与空间圆的相交弦, Q 表示弦 AB 的中点, 且 Q 在 $O_c-x_cy_cz_c$ 坐标系下的坐标定义为 $Q_c(x_q, y_q, z_q)$ 。

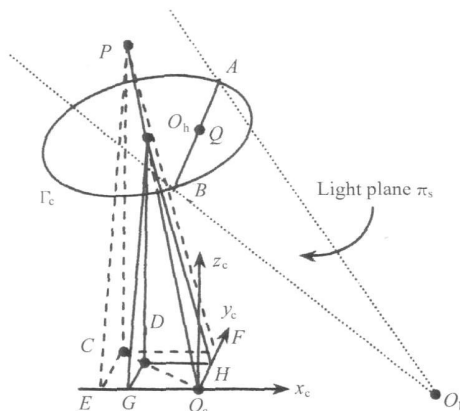


图3 线结构光传感器空间圆孔测量原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spatial hole measurement with line structured light sensor

根据空间椭圆透视投影变换模型^[4,8,9], 被测空间圆面与测量摄像机像面应尽量平行, 不平行时, 两个平面所成角度越大, 空间圆孔中心在像面上的实际投影畸变误差越大。另外, 测量时要求光平面与空间圆孔相交, 存在弦 AB 。为简化分析, 假定 π_s 与 $O_c x_c y_c z_c$ 坐标系的 y_c 轴平行, 且规定角度逆时针旋转为正, 顺时针为负。

则测量基本原理为: 根据线结构光视觉传感器测量模型, 得到 Q , 其中 z_Q 作为 O_h 的近似 z 向坐标, 即 $z_h \approx z_Q$; 根据已求得 z_h 以及 O_h 相对 O_c 的方位, 确定 x_h 和 y_h 。

3.2.1 z_h 的求取

设在图 1 所示图像平面坐标系下, 被测圆孔图像的椭圆方程为

$$\frac{(x-x_n)^2}{a^2} + \frac{(y-y_n)^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$

其中, (x_n, y_n) 为椭圆中心, a, b 为椭圆两半主轴。

光条图像直线方程为

$$y = k \cdot x + l \quad (5)$$

其中, k 为直线斜率, l 为 y 轴截距。

根据图像特征定位算法, 联立式 (4) 及式 (5) 可以解算得到弦 AB 两端点 A, B 的图像坐标 A_n 和 B_n , 代入式 (1) 及式 (2) 计算求得 A, B 两点在 $O_c x_c y_c z_c$ 坐标系下的空间坐标 $A_c(x_A, y_A, z_A)$ 和 $B_c(x_B, y_B, z_B)$, 由于 Q 点为弦 AB 的中点, 有

$$Q_c = \frac{1}{2}(A_c + B_c)$$

则 z_Q 为被测圆心 O_h 的近似 z 向坐标, 即 $z_h = z_Q$ 。

3.2.2 x_h, y_h 的求取

因 P 点为直线 $O_h O_c$ 与光平面 π_s 的交点, 根据线结构光视觉传感器数学模型, 可以计算得到 $P(x_P, y_P, z_P)$ 。

如图 3 所示, 过 P 点作 $x_c O_c y_c$ 平面垂线, 垂足记为 C ; 在 $x_c O_c y_c$ 平面内, 过 C 点分别作 x_c 轴与 y_c 轴的垂线, 垂足记为 E 和 F , 令 $\angle FPC = \theta$, $\angle EPC = \varphi$, 则 P 点相对 O_c 的方位可由 θ 和 φ 表示 (θ 和 φ 为锐角)。根据图 4 中几何关系, 有

$$\tan \theta = \frac{|CF|}{|PC|} = \frac{|x_P|}{z_P}, \tan \varphi = \frac{|CE|}{|PC|} = \frac{|y_P|}{z_P} \quad (6)$$

同理, 过 O_h 作 $x_c O_c y_c$ 平面垂线, 垂足记为 D , 在 $x_c O_c y_c$ 平面内, 过 D 点分别作 x_c 轴与 y_c 轴的垂线, 垂足记为 G 和 H 。由图 4 可以看出, $\angle HO_h D = \angle FPC = \theta$, $\angle GO_h D = \angle EPC = \varphi$, 因此 O_h 相对于 O_c 的方位也可由 θ 和 φ 表示, 有

$$\tan \theta = \frac{|DH|}{|O_h D|} = \frac{|x_h|}{z_h}, \tan \varphi = \frac{|DG|}{|O_h D|} = \frac{|y_h|}{z_h} \quad (7)$$

联立式 (6) 和式 (7), 又因 x_h 与 x_P 同号, y_h 与 y_P 同号, 且 $z_h = z_Q$, 有

$$x_h = \frac{x_P}{z_P} \cdot z_h = \frac{x_P}{z_P} \cdot z_Q, y_h = \frac{y_P}{z_P} \cdot z_h = \frac{y_P}{z_P} \cdot z_Q$$

4 应用结论

目前, 基于线结构光视觉传感器, 采用上述测量技术, 已经成功应用于江淮汽车制造厂 C926 轿车主焊线上轿车车身棱线和定位孔的在线测量, 并取得了很好的测量效果, 现场测量系统如图 4 所示, 机器人末端抓持的即为线结构光视觉传感器, 左右两台机器人协同工作, 实现了空间圆孔和棱线特征共计

84 个点的在线测量。



图 4 工业机器人柔性视觉测量系统

Fig. 4 Flexible vision measurement system based on industrial robot

参考文献

- [1] ZHU Ji-gui. Study on the technologies of 3D measurement system for IVECO car-body inspection [R]. Postdoctoral Report, Tianjin: Nankai University, 2001. (in Chinese)
- [2] LIU Chang-jie, YANG Xue-you, ZHU Ji-gui, et al. Flexible coordinate measurement system based on industrial robot for car body-in-white [J]. Journal of Optoelectronics • Laser (光电子 • 激光), 2006, 17(2): 207-210. (in Chinese)
- [3] WU Bin, XUE Ting, ZHU Ji-gui, et al. Calibrating stereo visual sensor with free-position planar pattern [J]. Journal of Optoelectronics • Laser (光电子 • 激光), 2006, 17(11): 1293-1296. (in Chinese)
- [4] ZHOU Fu-qiang. Study on the key technologies of stereo vision inspection [R]. Postdoctoral report, Beijing: Beijing University, 2002. (in Chinese)
- [5] ZHOU Fu-qiang, CHEN You-zheng, ZHANG Guang-jun. Calibrating double sensors laser vision measurement system [J]. Journal of Optoelectronics • Laser (光电子 • 激光), 2007, 18(7): 828-831. (in Chinese)
- [6] LIU ke, ZHOU Fu-qiang, ZHANG Guang-jun. Estimation of uncertainty in calibrating line structured light sensor [J]. Opto-Electronic Engineering (光电工程), 2006, 33(8): 79-84. (in Chinese)
- [7] XUE Ting. Study on the key technologies of instrumentation of 3D visual inspection [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- [8] ZHOU Fu-qiang, ZHANG Guang-jun, JIANG Jie. High accurate non-contact method for measuring geometric parameters of spatial circle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument (仪器仪表学报), 1992, 25(5): 604-607.
- [9] Heikkila J, Silven O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [C]. International Conference on CVPR'97, 1997: 1106-1112.

作者简介:

吴 斌 (1975—) 男, 河南通许人, 副教授, 主要从事工业视觉检测、大尺寸数字化测量及图像处理技术等方面的研究。