一种光栅式双目立体视觉传感器光条匹配方法

谢光辉 魏振忠 刘 震 张广军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 光栅式双目立体视觉传感器的难点之一在于光条的准确匹配. 基于编码方式的光条匹配方法往往需投射多幅图像,或限制最少可见光条数,更严重的是在被测对象深度变化较大时,常出现误匹配. 为此,将光栅式双目立体视觉传感器看作两个已经过标定统一的光栅结构光视觉传感器,由这两个光栅结构光视觉传感器测得各光条中心点的三维坐标,并搜索光条中心点集之间距离最小且模型编号相同的光条即为匹配光条. 实验表明该方法有效实现了光栅光条的准确匹配.

关 键 词: 光条匹配; 立体视觉; 三维; 光栅

中图分类号: TN 215

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)01-0113-04

Light-stripes matching method for raster binocular stereo vision sensor

Xie Guanghui Wei Zhenzhong Liu Zhen Zhang Guangjun

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Light-stripe matching is one of the difficulties of raster binocular vision sensor. Usually, matching methods based light-stripe coding require projecting multi-images or viewing minimum stripes in one image. Additionally, when the depth of the measured object has a relatively large range of variety, mismatching will frequently occur. To solve this problem, a new method was presented as follows: The raster binocular stereo vision sensor was regarded as two raster structured-light vision sensors which had been calibrated under the same measurement coordinate system. The 3D coordinates of the light-stripe center points was measured by the two rater structured-light vision sensors respectively. The distances between the light-stripe center point sets were calculated and the ones which had the minimum distance and the same model number were the matching light-stripes. The experiment results indicate the validity of the presented method for light-stripes matching.

Key words: light-stripes matching; binocular vision; three dimensional; rating

光栅式双目立体视觉传感器广泛应用于物体三维形貌数据的获取[1]. 测量中存在的一个关键技术难点是光条在左右两摄像机图像中的匹配问题. 目前,基于编码的光条匹配方法研究最为广泛,如时间多元编码[2]、空间邻域编码[3]、直接编码[4]等. 上述方法往往需要投射多幅图像,或投射一幅图像但限制最少可见光条数,且通常还需依赖光条点的灰度、颜色或相位信息,这使得投射系统的复杂性增加,或使得匹配易受噪声干扰,降低匹配率. 更为严重的是,在被测对象深度变化较大时,编码方法往往不能实现正确匹配. 针对上述问题,将光栅式双目立体视觉传感器看作两个光栅结构光视觉传感器,并标定出它们在同一坐标系下的测量模型. 由这两个光栅结构光视觉传感器分别测量各光条中心点的三维坐标,搜索不同光条中心点集之间距离最小且模型编号相同的光条即为匹配光条.

1 光条匹配原理

光栅式双目立体视觉传感器的基本原理结构

收稿日期: 2008-03-05

基金项目: 2007年度教育部新世纪优秀人才培养计划资助项目(NCET-07-0043); 国家自然科学基金资助项目(50875014)

作者简介: 谢光辉(1958-),男,河南洛阳人,博士生, xiegh612@126.com.

见图 1. 该传感器结构也可以看作两个光栅结构光视觉传感器:一个由左摄像机和光栅投射装置构成,另一个由右摄像机和光栅投射装置构成. 若对两个光栅结构光视觉传感器进行标定,并统一到同一坐标系下,同样可完成对物体三维形貌数据的测量. 显然,同一光条上光点在上述两个光栅结构光视觉传感器中的三坐标测量结果应相同或很接近,而不同光条的测量结果则会相差较大. 因此,根据两光栅结构光视觉传感器对不同光条测量结果之间的距离即可判断两光条是否匹配.

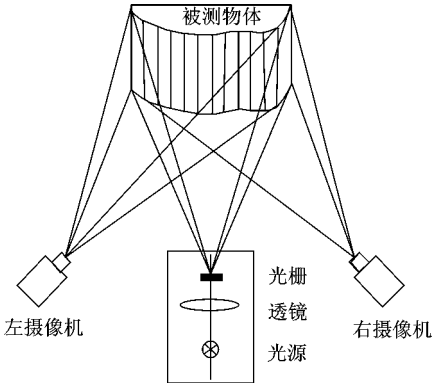


图 1 光栅式双目立体视觉传感器

2 光栅结构光视觉传感器标定

光栅结构光视觉传感器标定的难点在于:①光条数多,标定过程繁杂;②难以获得光条上足够的标定点. 为此,本文基于平面靶标自由移动方式和面面映射原理方法对光栅结构光视觉传感器进行标定.

2.1 传感器测量模型

如图 2示,设测量坐标系为 $O_w x_w y_w z_w$,并把测量坐标系建立在摄像机坐标系上,则光栅结构光视觉传感器的测量模型可表示如下:

$$\left.\begin{aligned} &\rho\tilde{X} = A\tilde{x}_c \\ &\tilde{L}_1 \cdot \dot{x}_c = 0 \\ &\cdots \\ &\tilde{L}_n \cdot \dot{x}_c = 0 \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

其中,ρ为任意不为零常数;$\tilde{X}$为点的齐次图像坐标;$\dot{x}_c$为点的齐次摄像机坐标;A为摄像机透视投影矩阵;$\tilde{L}_i$, $i = 1, 2, \cdots, n$分别为第 i个光平面在摄像机坐标系下的齐次法向矢量.

2.2 传感器标定

由式 (1),A可利用文献 [5]或文献 [6]的摄像机标定方法获得. 而参数 $\tilde{L}_i$, $i = 1, 2, \cdots, n$的标定则采用下述基于平面靶标自由移动和面面映射原理的标定方法获得.

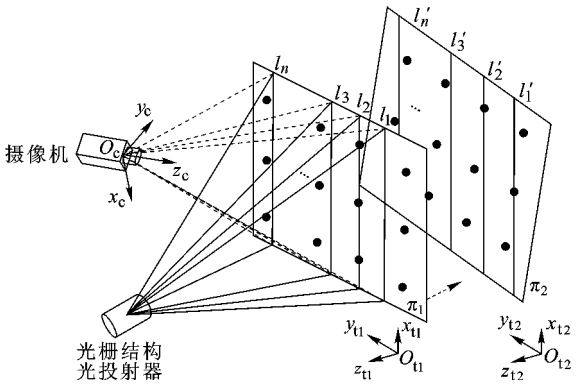


图 2 光栅结构光视觉传感器测量模型及标定

如图 2所示,平面靶标上至少设置 m ($m \geq 4$)个物坐标已知的非共线特征点 (黑色圆点). 将平面靶标随意放置在某一位置,记为 π_1,并设靶标坐标系为 $O_{t1} x_{t1} y_{t1} z_{t1}$,$O_{t1} x_{t1} y_{t1}$面为靶标平面. 光栅投射器投射的光平面与靶标平面相交的光条为 l_i, $i = 1, 2, \cdots, n$

摄像机拍摄靶标图像,利用靶标上物坐标已知特征点,采用文献 [5]提出的摄像机标定方法,可求得 $O_{t1} x_{t1} y_{t1} z_{t1}$到摄像机坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 的变换矩阵 T_1. 靶标平面与摄像机像平面之间的映射关系可描述为

$$\tilde{x}_{t1} = H\tilde{X} \quad (2)$$

其中,H为 3 ×3映射矩阵;$\tilde{x}_{t1}$为靶标上的点在 $O_{t1} x_{t1} y_{t1}$坐标系下的齐次物坐标;$\tilde{X}$为对应的齐次图像坐标. 由至少 4个非共线特征点,可获得式 (2)中的映射矩阵 H. 在此基础上,通过图像处理方法提取各光条中心点图像坐标,利用式 (1)可求得各光条中心点在 $O_{t1} x_{t1} y_{t1} z_{t1}$下的坐标,进一步通过 T_1可将各光条中心点坐标变换到 $O_c x_c y_c z_c$ 下.

将平面靶标放置到另外一个位置,记为 π_2,如图 2所示. 设靶标坐标系为 $O_{t2} x_{t2} y_{t2} z_{t2}$,$O_{t2} x_{t2} y_{t2}$面为靶标平面. 光栅投射器投射的光平面与靶标平面相交的光条为 l_i', $i = 1, 2, \cdots, n$. 依据上述方法,可获得各光条中心点在 $O_c x_c y_c z_c$ 下的坐标.

于是,利用在不同位置 (至少两个)获得的各光平面上的特征点,可拟合得到各光平面在 $O_c x_c y_c z_c$ 下的平面方程,即可获得参数 $\tilde{L}_i$, $i = 1, 2, \cdots, n$,从而完成光栅结构光视觉传感器的标定.

3 光条匹配算法

3.1 集合定义

设投射的光栅光平面数为 n,左摄像机可视光条数为 m_1 ($m_1 \leq n$),右摄像机可视光条数为 m_2

$(m_2 \leq n)$. 采用文献[7]提出的方法完成光条图像中心点的提取. 定义如下集合.

左光栅结构光视觉传感器中各线结构光传感器测量模型集合记为 Φ_{LM},右光栅结构光视觉传感器中各线结构光传感器测量模型集合记为 Φ_{RM},由式(1)可得

$$\Phi_{LM} = \left\{ M_{Li} \mid M_{Li} = \begin{cases} \rho_L \tilde{X}_L = A_L \tilde{x}_c \\ \tilde{L}_{Li} \cdot \tilde{x}_c = 0 \end{cases}, i = 1, 2, \cdots, n \right\} \tag{3}$$

$$\Phi_{RM} = \left\{ M_{Ri} \mid M_{Ri} = \begin{cases} \rho_R \tilde{X}_R = A_R \tilde{x}_c \\ \tilde{L}_{Ri} \cdot \tilde{x}_c = 0 \end{cases}, i = 1, 2, \cdots, n \right\} \tag{4}$$

左光栅结构光视觉传感器各光条图像中心点构成的集合记为 $\Phi_{LPi},\ i=1, 2, \cdots, m_1$,右光栅结构光视觉传感器各光条图像中心点构成的集合记为 $\Phi_{RPi},\ i=1, 2, \cdots, m_2$,则有

$$\Phi_{LPi} = \{ \tilde{X}_{Lk} \mid \tilde{X}_{Lk} = (X_{Lk}, Y_{Lk}, 1)^T, k = 1, 2, \cdots, n_i \} \tag{5}$$

$$\Phi_{RPi} = \{ \tilde{X}_{Rk} \mid \tilde{X}_{Rk} = (X_{Rk}, Y_{Rk}, 1)^T, k = 1, 2, \cdots, s_i \} \tag{6}$$

其中, n_i 和 s_i 分别为左右两光栅结构光视觉传感器中第 i根光条上提取的光条图像中心点个数.

3.2 光条匹配

将式(5)、式(6)的光条图像中心点集 Φ_{LPi} 和 Φ_{RPi} 分别代入式(3)和式(4)所表示的光栅结构光视觉传感器测量模型集合中,可得到光条三维中心点集合. 计算左右两光栅结构光传感器中,由同序号线结构光传感器测量模型得到的光条三维中心点集合之间的距离. 其中,距离最小且小于设定阈值的光条为匹配光条.

1) 光条三维中心点集合间距离的计算

设两个光条三维中心点集合分别为 Φ_{LT} 和 Φ_{RT},即

$$\Phi_{LT} = \{ \tilde{x}_{cLk} \mid \tilde{x}_{cLk} = (x_{cLk}, y_{cLk}, z_{cLk}, 1)^T, k = 1, 2, \cdots, p \} \tag{7}$$

$$\Phi_{RT} = \{ \tilde{x}_{cRk} \mid \tilde{x}_{cRk} = (x_{cRk}, y_{cLk}, z_{cRk}, 1)^T, k = 1, 2, \cdots, q \} \tag{8}$$

其中, p 和 q 分别为光条三维中心点个数. Φ_{LT} 和 Φ_{RT} 之间的距离定义为两集合中三维点之间最小欧氏距离之和,具体计算方法如下.

①正向计算. 取 Φ_{LT} 集合中一点,计算它与 Φ_{RT} 集合中所有点之间的欧氏距离. 记录其中的最小距离值 d 及两集合中对应的两三维点.

②反向计算. 计算 Φ_{RT} 中对应最小距离 d 的三维点与 Φ_{LT} 集合中所有点之间的距离. 记录其中的最小距离 d' 及两集合中对应的两三维点.

上述正向计算和反向计算中,若 $d = d'$,且两集合中对应的两三维点相同,则该最小距离参与两集合中三维点之间最小欧氏距离和的计算. 对 Φ_{LT} 和 Φ_{RT} 中所有三维点按上述方法计算最小欧氏距离,最终得到两集合中三维点之间最小欧氏距离和.

2) 光条匹配过程

①依次将右光栅结构光传感器中所有光条图像中心点集合 $\Phi_{RPi},\ i=1, 2, \cdots, m_2$,代入右光栅结构光视觉传感器测量模型集合 Φ_{RM}. 由其中每一个线结构光视觉传感器测量模型可获得对应所有光条图像中心点集合的 m_2 个光条三维中心点集合,可获得 $n \times m_2$ 个光条三维中心点集合.

②取左光栅结构光视觉传感器中某一光条图像中心点集合 Φ_{LRi},将其带入左光栅结构光视觉传感器测量模型集合 Φ_{LM},得到 n 个光条三维中心点集合.

③分别计算步骤②与步骤①中,由同序号线结构光传感器测量模型得到的光条三维中心点集合之间的距离. 对应每一个线结构光传感器可得 m_2 个距离,记录其中最小者,最终可得到 n 个最小距离.

④搜索 n 个最小距离中的最小者 d_{min},若 d_{min} 小于给定的阈值 d_{th},即 $d_{min} < d_{th}$,则对应的光条匹配,记录之,并将当前的匹配光条从搜索中剔除,即 $m_2 = m_2 - 1,\ n = n - 1$.

⑤若所有光条搜索匹配完毕,则结束匹配过程,匹配完成,否则,返回步骤②.

需要指出的是,经过大量实验测试,步骤④中的 d_{th} 取光栅结构光视觉传感器标定误差的 1.5～2倍可以取得较好的匹配效果.

4 实　验

采用两台分辨率为 1 280 ×1 024的 DH1310摄像机,35mm镜头,可投射 3个光平面的光栅激光投射器构建了光栅式双目立体视觉传感器. 光条匹配实验结果如下.

1) 两摄像机内外参数标定结果

左摄像机内部参数: $\alpha_{Lx} = 5\,885.872\,2$, $\alpha_{Ly} = 5\,884.787\,0$, $r_L = -0.185\,3$, $u_{L0} = 658.267\,6$, $v_{L0} = 469.616\,7$, $k_{1L} = 0.262\,6$, $k_{2L} = 3.228\,2$

右摄像机内部参数：α_{Rx} = 5 915.792 0, α_{Ry} = 5 917.257 4, r_R = -0.244 0, u_{R0} = 688.136 0, v_{R0} = 481.387 8, k_{1R} = 0.223 6, k_{2R} = 1.800 4.

左、右摄像机坐标系之间的旋转矩阵和平移矢量：

$$R = \begin{bmatrix} 0.628\,5 & -0.055\,2 & 0.775\,8 \\ 0.093\,6 & 0.995\,5 & -0.004\,9 \\ -0.772\,1 & 0.075\,7 & 0.630\,9 \end{bmatrix}$$

$$T = [-365.433\,3 \quad 2.566\,9 \quad 176.715\,4]^{T}$$

2) 光平面方程标定结果

左光栅结构光视觉传感器 1～3光平面方程：

$x - 0.085\,2y + 0.457\,1z - 65.738\,0 = 0$

$x - 0.091\,8y + 0.464\,6z - 198.364\,7 = 0$

$x - 0.111\,9y + 0.483\,2z - 243.440\,4 = 0$

右光栅结构光视觉传感器 1～3光平面方程：

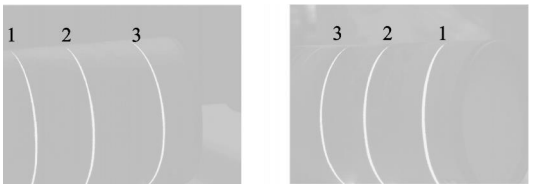
$x - 0.003\,6y - 0.502\,7z + 288.823\,3 = 0$

$x - 0.001\,2y - 0.490\,3z + 253.429\,9 = 0$

$x - 0.023\,2y - 0.477\,0z + 210.862\,9 = 0$

3) 光条匹配

图 3为光栅式双目立体视觉传感器拍摄的两幅实测图像，各光条分别编号如图中所示. 光条的正确匹配关系为：图 3a中的 1对应图 3b中的 3，图 3a中的 2对应图 3b中的 2，图 3a中的 3对应图 3b中的 1. 下面利用提出的匹配算法对光条进行匹配.



a 左光栅　　*b* 右光栅

图 3 实测光栅光条图像

提取每根光条图像中心点像坐标，并计算其对应的光条三维中心点集合. 左右光栅结构光视觉传感器各可得 9个光条三维中心点集合，分别记为 Φ_{LT}^{ij}和 Φ_{RT}^{ij}，i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3. 其中，i为光条编号，j为光栅结构光视觉传感器中各线结构光视觉传感器模型编号. 在此基础上，按照前面提出的匹配算法进行最小距离计算和搜索. 表 1给出了对左光栅结构光视觉传感器中标号为 2的光条的最小距离匹配搜索结果数据.

从表 1中的数据可以清楚看出，Φ_{LT}^{22}与 Φ_{RT}^{22}间的距离最小，且满足模型编号相同的条件，因此是匹配光条，这与光条的正确匹配关系是一致的.

表 1 最小距离匹配搜索结果数据　　mm

左点集	右点集								
	Φ_{RT}^{11}	Φ_{RT}^{21}	Φ_{RT}^{31}	Φ_{RT}^{12}	Φ_{RT}^{22}	Φ_{RT}^{32}	Φ_{RT}^{13}	Φ_{RT}^{23}	Φ_{RT}^{33}
Φ_{LT}^{21}	64.442	107.466	177.883	34.221	65.804	127.304	66.208	60.035	81.050
Φ_{LT}^{22}	26.968	51.905	117.346	33.021	0.426	61.539	94.478	62.854	32.908
Φ_{LT}^{23}	84.889	62.377	70.267	110.170	72.845	33.373	163.426	127.588	71.024

5 结 论

将光栅式双目立体视觉传感器看作两个光栅结构光视觉传感器，并采用平面靶标自由移动和面面映射原理实现其标定统一. 两个光栅结构光视觉传感器分别测量得到的各光条中心点三维坐标，搜索不同光条中心点集之间距离最小且模型编号相同的光条，实现了光条的准确快速匹配. 上述方法是在三维空间的匹配方法，因此，比光条编码方式的二维匹配具有更好的鲁棒性. 当投射光条数较多时，所提出的方法需要一定的标定工作量，且标定精度会影响匹配的准确性. 但由于标定工作只需在应用前进行一次即可，且标定环境可由人为控制，因此该方法仍具有较好的应用前景.

参考文献 (References)

[1] 孙军华，魏振忠，张广军. 一种高密度光栅结构光编码方法[J]. 光电工程，2006，33(7)：78 - 82
Sun Junhua, Wei Zhenzhong, Zhang Guangjun. A coding method for high-density grating structured light[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(7): 78 - 82 (in Chinese)

[2] Chen S Y, Li Y F, Zhang J Z. Vision processing for realtime 3-D data acquisition based on coded structured light[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(2): 167 - 176

[3] Koninckx T P, Van Gool L. Real-time range acquisition by adaptive structured light[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(3): 432 - 445

[4] Pages J, Collewet C, Chaumette F, et al. Optimizing plane-to-plane positioning tasks by image-based visual serving and structured light[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(5): 1000 - 1010

[5] 张广军. 机器视觉[M]. 北京：科学出版社，2005: 79 - 84
Zhang Guangjun. Machine vision[M]. Beijing: Science Press, 2005: 79 - 84 (in Chinese)

[6] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[R]. NSR-TR-98-71, 1998

[7] CarstenSteger. Unbiased extraction of curvilinear structure from 2D and 3D images[D]. Germany: Technology University Munich, 1999

(责任编辑：刘登敏)