

特征光斑单目视觉空间定位方法

霍 炬¹, 仲小清², 杨 明²

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程与自动化学院, 150001 哈尔滨, torch@hit.edu.cn;

2. 哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 150080 哈尔滨)

摘 要: 为了满足地面试验中运动目标位姿参数视觉测量系统的研制需求, 基于单目视觉原理设计了大视场条件下实际平面上特征光斑的精确空间定位方法. 建立了特征光斑的成像模型, 给出了实际平面对特征光斑空间位置的约束, 进而提出了特征光斑的单目视觉空间定位方法, 并依据实际平面的特点设计了高阶曲面型、分块平面型和分块曲面型等三种类型实际平面上特征光斑空间定位的具体实现方法. 所提方法可以满足 $8\,000\text{ mm} \times 8\,000\text{ mm}$ 视场范围内特征光斑的空间定位需求, 相对定位误差小于 $1/10\,000$.

关键词: 机器视觉; 空间定位; 单目视觉; 大视场; 特征光斑

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)09-0047-04

3D reconstruction of feature point on object surface from a single image

HUO Ju¹, ZHONG Xiao-qing², YANG Ming²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, torch@hit.edu.cn; 2. Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China)

Abstract: For the design and development of a vision sensor for the ground test, a method of 3D reconstruction of feature point on large scale object surface from a single image is proposed. By establishing the math model of the 3D coordinate of feature point on the object surface and using the spatial ray through feature point, the 3D coordinate of the feature point can be determined using single image. According to the characteristics, the object surface can be classified into three types: high order surface type, block plane type and block surface type, while the corresponding location methods are introduced. The accuracy of three different 3D reconstruction methods is compared by simulation experiments. By the measurement precision of $1/10\,000$ in the range of $8\,000\text{ mm} \times 8\,000\text{ mm}$, it is proved that the proposed method is suitable for 3D reconstruction of feature point on large scale object surface.

Key words: machine vision; 3D reconstruction; mono-vision; large field of view; feature point

外部位姿测量系统是哈尔滨工业大学研制的一套视觉测量系统, 用于实现对地面试验中运动目标六自由度运动参数的非接触测量. 实际平面上特征光斑的精确空间定位是系统研制需要突破的关键技术之一, 其研究难点主要体现为: 1) 单目视觉, 特征光斑的空间定位仅可以使用单幅图像; 2) 视场大, 单台摄像机所拍摄实际平面的尺寸达

$8\,000\text{ mm} \times 8\,000\text{ mm}$; 3) 定位精度高, 相对定位精度需求为 $1/10\,000$. 具有上述特点的视觉测量是当前机器视觉领域的 1 个研究热点^[1-5]. 双目视觉法、结构光法以及几何相似测量法等是这些研究中常用的 3 种空间定位方法^[6], 但双目视觉法无法利用单幅图像进行空间定位^[7]; 结构光法需要已知形成光斑的光束与摄像机间的方向和位置, 这在外部位姿测量系统无法实现^[8]; 而几何相似测量法则假设特征光斑均位于 3D 空间中 1 个位置已知的理想平面内^[6], 应用中实际平面不可视为理想平面. 为此, 本文将首先建立特征光斑的成像模型, 然后给出一种基于单目视觉的特征光斑空间定位方法, 最

收稿日期: 2010-04-20.

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划资助项目 (HITQJNS2007021); 黑龙江省杰出青年科学基金资助项目 (JC200606).

作者简介: 霍 炬(1977—), 男, 副教授;
杨 明(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

后通过仿真实验和实际数据试验比较分析所提方法的正确性和有效性。

1 特征光斑的成像模型

为描述方便,对如下术语进行定义.理想平面:具有几何学意义的平面;实际平面:物体上实际存在的平面;平面度误差:实际平面对位置符合最小条件的理想平面(下文简称之为理想平面)的变动量^[9],实际平面的平面度误差不为0。

空间光束投射到实际平面上形成特征光斑,该光斑经过透镜成像在摄像机的成像平面上,该过程可用图1表示.图中, L 表示空间光束,它与理想平面的交点为 A ,其方向向量为 V_l .假设光束 L 能投射到理想平面上,那么它将在成像平面上形成像点 a .但实际“可见”的光斑为 A^* ,对应的像点为 a^* ,它由光束 L 投射到实际平面上形成, a^* 与 a 一般不重合,如果从摄像机“看”过来,该像点“仿佛”是由理想平面上的光斑 A' 形成的,摄像机的“视线”所在的直线称为 I ,其方向向量记为 V_c .

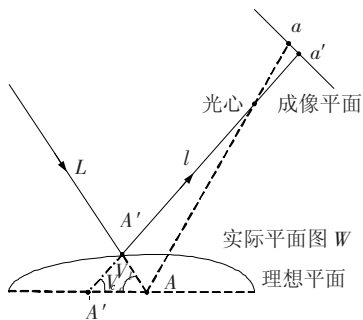


图1 实际平面上特征光斑及其成像过程

假设形成光束 L 的方向和位置均已知,图1所示的实际平面上特征光斑的成像过程可以描述为:

1) 空间光束 L 投射到实际平面 W 上形成特征光斑 A^* ,其世界坐标系 $O_w x_w y_w z_w$ (世界坐标系为描述特征光斑空间位置的参考坐标系)中的3D坐标 $X_w^* \equiv [x_w^*, y_w^*, z_w^*]^T$ 可依据光束 L 的方向向量 V_l 及其与理想平面的交点 A 的坐标 $X_{w0} \equiv [x_{w0}, y_{w0}, z_{w0}]^T$ 计算得到,如下所示:

$$X_w^* = L(W_p, V_l, X_{w0}). \quad (1)$$

式中,方程 L 及其系数 W_p 的具体形式和定义如下文式(7)所示。

2) 特征光斑 A^* 在成像平面上形成像点 a^* ,其在计算机图像坐标系中的坐标 $U^* \equiv [u^*, v^*]^T$ 可按下式计算:

$$U^* = C(C_p, X_w^*). \quad (2)$$

式中 C 和 C_p 分别表示摄像机模型和模型参数,具体形式参考文献[10]。

联合式(1)和(2),可以得到如式(3)所示的实际平面上特征光斑的成像模型:

$$U^* = U(W_p, C_p, V_l, X_{w0}). \quad (3)$$

它表示了由空间光束 L 计算其投射到实际平面上形成的特征光斑的像的图像坐标过程。

2 基于单目视觉的特征光斑空间定位方法

2.1 实际平面对特征光斑空间位置的约束

当指定世界坐标系的 $O_w x_w y_w$ 平面与理想平面重合,则实际平面上每个点在世界坐标系中的3D坐标的 z 向分量与该点相对于理想平面的变动量 d^{ls} 相等,即

$$z_w = d^{ls}. \quad (4)$$

进一步,如果把每个点3D坐标中的 z 向分量写成关于 x 和 y 向分量的形式,那么实际平面上所有点的空间位置可用如下函数表示:

$$z_w = f_w(W_p, XY_w). \quad (5)$$

式中 $XY_w \equiv [x_w, y_w]^T$, W_p 为函数 f_w 的系数.因为特征光斑可视为实际平面上的点,所以方程(5)表示了实际平面对特征光斑空间位置的约束。

2.2 基于单目视觉的特征光斑空间定位原理

基于单目视觉的特征光斑空间定位方法的基本原理可描述为:首先由图像确定通过该特征光斑的空间光束的方程,然后利用约束方程(5)求取该空间光束与实际平面的交点,交点坐标即为特征光斑的3D坐标.依据该原理,实际平面上特征光斑的定位由2个步骤组成:

1) 由像点 a^* 的2D图像坐标 U^* 确定由特征光斑发出的通过摄像机光心的光束 I 的方向和位置:

$$(X'_w, V'_c) = C'(C_p, U^*). \quad (6)$$

式中,方程 C' 为与摄像机模型 C 对应的逆模型^[10]; $X'_w \equiv [x'_w, y'_w, z'_w]^T$ 和 $V'_c \equiv [v'_{cx}, v'_{cy}, v'_{cz}]^T$ 分别为 I 与理想平面交点的3D坐标及其方向向量。

2) 求取光束 I 与实际平面的交点位置,即特征光斑在世界坐标系中的3D坐标 X_w^* 为

$$\begin{cases} z_w^* = f_w(W_p, XY_w^*), \\ \frac{x_w^* - x'_w}{v'_{cx}} = \frac{y_w^* - y'_w}{v'_{cy}} = \frac{z_w^* - z'_w}{v'_{cz}}. \end{cases} \quad (7)$$

2.3 三种类型实际平面上特征光斑的空间定位方法

应用中,可把实际平面分为高阶曲面型、分块平面型和分块高阶曲面型等3种,前2者的示意图如图2所示(图中只表示了偏离量在某1个方

向上的变化),而第3种可视为前2种的组合.本节将详细介绍三种类型实际平面上特征光斑单目视觉空间定位方法的具体实现过程.

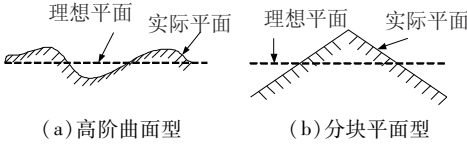


图2 两类实际平面

1) 高阶曲面型实际平面. 对于如图2(a)所示的高阶曲面型实际平面,可使用1个阶次为 n 的高阶多项式对其上点间的位置关系进行描述,此时式(5)中方程 f_w 的具体形式为

$$z_w = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} w_{pij} x_w^i y_w^j. \quad (8)$$

为求取参数 $W_p \equiv \{w_{pij} | i, j = 1, 2, \dots, n\}$,可在视觉测量前首先使用诸如激光跟踪仪等设备测量实际平面上 N 个点的3D坐标 $[x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}]$ ($i = 1, 2, \dots, N$). 利用这些点的3D坐标,按下式可以进行参数 W_p 的计算:

$$W_p = (A^T A)^{-1} (A^T Z). \quad (9)$$

式中,

$$A = \begin{bmatrix} x_1^0 y_1^0 & x_1^0 y_1^1 & \cdots & x_1^n y_1^n \\ x_2^0 y_2^0 & x_2^0 y_2^1 & \cdots & x_2^n y_2^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_N^0 y_N^0 & x_N^0 y_N^1 & \cdots & x_N^n y_N^n \end{bmatrix}_{N \times (n+1)^2}, \quad (10)$$

$$Z = [z_1 \ z_2 \ \cdots \ z_N]^T. \quad (11)$$

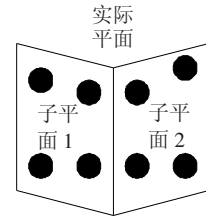
确定了方程 f_w 及参数 W_p ,依据2.2节给出的定位原理就可以实现高阶曲面型实际平面上特征光斑的空间定位.

2) 分块平面型实际平面. 以图2(b)所示的由两块子平面组成的实际平面为例,此时实际平面、特征光斑(图中用黑点表示)以及摄像机的关系如图3(a)所示. 按照分块型实际平面的定义,虽然从整体上看实际平面的平面度误差不为零,但是对于每块子平面其平面度误差为零;换言之,如果只考虑某个子平面与摄像机,并把二者视为1个定位组合,如下图3(b)所示,那么该定位组合中,特征光斑的定位可以使用几何相似测量法实现.

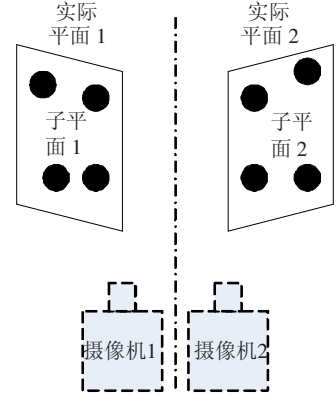
基于以上分析,对于分块平面型实际平面的第 i 个子平面上特征光斑的定位,可按照如下2个步骤进行:

1) 由特征光斑的2D图像坐标,使用几何相似测量法求取其在子平面坐标系中的3D坐标 $X_h^i \equiv [x_h^i, y_h^i, 0]^T$. 此处子平面坐标系是建立在第 i 个子平面上的坐标系,其 xy 平面与对应的子

平面重合.



(a) 分块平面型实际平面及摄像机



(b) 等效的分块平面型实际平面及摄像机

图3 分块平面型实际平面及摄像机

2) 由特征光斑在子平面坐标系中的坐标 X_h^i 计算其在世界坐标系中的坐标 X_w^* 如下:

$$X_w^* = R_i X_h^i + T_i. \quad (12)$$

式中 R_i 和 T_i 分别为第 i 个子平面坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵和位置向量.

3) 分块曲面型实际平面. 分块曲面型实际平面上特征光斑的定位可视为上述高阶曲面型和分块平面型的组合,此处仅给出相应定位算法的流程图,如图4所示.

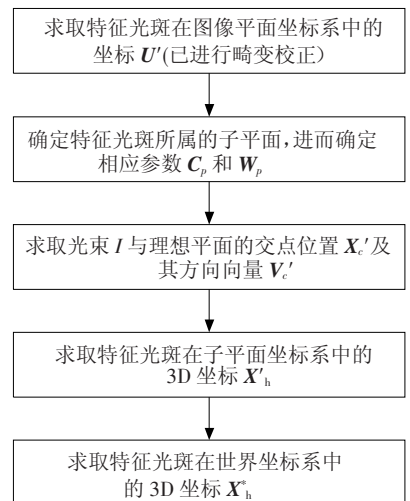


图4 分块曲面型实际平面点定位算法流程

3 实验及结果分析

3.1 仿真实验

仿真实验以高阶曲面型实际平面为例对所提特征光斑单目视觉空间定位方法、双目视觉法和几何相似测量法等 3 种方法进行了比较分析. 实验中,图像分辨率为 $1\,280\times1\,024$,主距为 30 mm,摄像机相对于世界坐标系的 3 个姿态角分别为 10° 、 30° 、 10° , 3 个位置分量分别为 2 m、13 m、2 m. 双目视觉法中使用的两摄像机间光心的距离为 13 m. 实际平面尺寸为 $8\text{ m}\times8\text{ m}$,其上每个点在世界坐标系中 z 方向的分量与在 x 、 y 方向分量间的关系满足二元正弦函数. 该函数在 x 和 y 方向的空域周期均为 4 m,幅值为 2 mm(相应的实际平面的平面度误差为 4 mm).

为了定量地对定位精度进行比较,分别使用 3 种方法求取相同条件下的一定数量位置已知的测试光斑的 3D 坐标,并计算所有测试光斑的最大定位误差. 实验中,产生测试光斑的空间光束在世界坐标系中的方向向量 $\mathbf{V}_i$ 均为 $(1, 1, 1)^T$,测试光斑数量为 9,其在实际平面上均匀分布于整视场 80% 的区域. 仿真实验比较了光斑定位噪声由 0.1 pixel 逐渐增加到 1 pixel 时不同方法的最大定位误差. 实验采用 Monte Carlo 仿真分析方法, Monte Carlo 仿真的试验次数为 50,实验结果如图 5 所示.

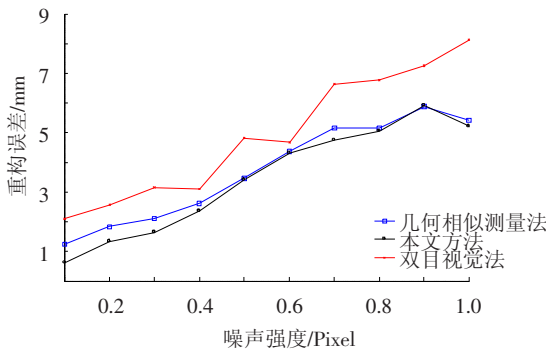


图 5 实际平面点定位误差随噪声变化

从图 5 实验曲线可以看出,在图像坐标检测噪声小于 0.4 pixel 时,本文所提出的实际平面上光斑定位方法精度最高,几何相似测量法其次,而双目法精度最差. 结合图 1 所示的特征光斑成像过程可知,几何相似测量法精度较本文方法精度差的原因,是该方法忽略了实际平面的平面度误差对其上光斑定位误差的影响. 图 5 的实验结果也表明,当噪声大于 0.4 pixel 时,几何相似测量法定位精度与本文所提方法近似相当,这是因为此时实际平面的平面度误差相对于图像坐标检测噪声可以忽略.

3.2 实际数据试验

本文所提方法已成功应用于外部位姿测量系统中,系统中图像的分辨率为 $1\,280\times1\,024$,黑白图像,像元深度为 8 B,镜头焦距约为 30 mm. 实际平面为测量现场厂房的幕墙,其平面度误差约为 3 mm,墙面长度和高度均约为 8 m. 摄像机与幕墙间的距离约为 13.5 m,在测量过程中摄像机与幕墙间的位置相对固定. 光斑在图像上占 5~7 个像素. 光斑图像坐标的提取采用重心法;摄像机的标定采用文献[10]所介绍的方法.

把实际平面视为高阶曲面型,方程 f_w 的阶次取为 2. 使用所提方法求取的预先设置的 9 个测试光斑的位置如表 1 所示. 这些测试光斑的“真实”位置通过激光跟踪仪获得.

测量坐标在 x 、 y 、 z 3 个方向上的误差最大值分别是 0.76 mm、0.78 mm、0 mm. 由此及表 1 所示实际数据表明,当实际平面尺寸达 $8\text{ m}\times8\text{ m}$ 时,使用本文所提出特征光斑单目视觉空间定位方法的定位精度可达 $1/10\,000$,满足应用需求.

4 结 论

本文给出了一种大视场条件下实际平面上特征光斑的单目视觉空间定位方法,该方法定位精度优于当前常用的双目视觉法和几何相似测量法,可满足 $8\text{ m}\times8\text{ m}$ 视场范围内特征光斑的空间定位需求,相对定位误差小于 $1/10\,000$.

表 1 测试光斑定位数据 mm

测试光斑	“真实”坐标			测量坐标		
	x	y	z	x	y	z
1	6 000. 19	-999. 94	-1. 27	5 999. 49	-1 000. 71	-1. 27
2	5 999. 79	-3 000. 04	1. 29	5 999. 66	-2 999. 94	1. 29
3	1 499. 89	2 999. 89	1. 23	1 500. 65	3 000. 35	1. 23
4	1 500. 49	1 000. 03	-0. 11	1 500. 03	999. 82	-0. 11
5	1 500. 38	-999. 98	-1. 08	1 500. 52	-1 000. 36	-1. 08
6	1 499. 86	-3 000. 04	1. 31	1 500. 25	-2 999. 83	1. 30
7	-2 000. 11	2 999. 84	1. 37	-1 999. 78	3 000. 62	1. 37
8	-1 999. 98	1 000. 02	-0. 07	-1 999. 86	999. 12	-0. 07
9	-1 999. 95	-999. 96	-1. 15	-1 999. 22	-999. 76	-1. 15