

# 垂直直线特征的双目视觉位姿测量方法

赵振庆 叶 东 陈 刚 郭玉波

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 针对直线特征,提出了基于两条垂直直线特征双目视觉位姿测量解析算法。该算法根据直线特征和其在摄像机图像上投影直线共面性质建立模型,利用单位四元素法简化了投影模型变量,进而在仅知被测物体上两条直线相互垂直的信息,利用两条垂线投影在两个摄像机图像上四条直线图像,求解出被测物体的位姿参数。同时分析了退化情况下位姿求解方法,即当直线向量平行于两个摄像机基线向量时,直线向量在左右摄像机投影到同一条直线上时的位姿求解方法。基于 Matlab 仿真实验表明该算法对于噪声具有一定的稳健性,即使两条直线不垂直而有一个角度误差时,仍能保证一定的精度。实物实验表明该算法可以满足一般测量精度要求。

**关键词** 机器视觉;双目视觉;位姿测量;直线特征;四元素

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1015003

## Binocular Vision Method of Measuring Pose Based on Perpendicular Lines

Zhao Zhenqing Ye Dong Chen Gang Guo Yubo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** For linear features, an algorithm which is based on perpendicular lines is proposed for binocular vision pose measurement. The algorithm is based on linear feature and its projection line on the camera image coplanar property. Unit quaternions is used to simplify model variables. Under the condition of two known perpendicular on object, an analytical solution of object pose can be determined with four lines which is projected by two perpendicular lines on two-camera image. The algorithm is also analyzed when linear vector projected onto the two cameras on the same line, namely linear vector parallel to the two camera position. Matlab simulation results show that the algorithm is robust to noise and can guarantee a certain precision even if the two straight lines have error for vertical. Physical experiments show that the algorithm can meet the general precision requirements.

**Key words** machine vision; binocular vision; pose measurement; linear features; quaternions

**OCIS codes** 150.1135; 150.4232; 330.1400

## 1 引 言

基于视觉物体相对位姿测量广泛应用于机器视觉各个部分,如:机器人视觉,视觉导航等。传统的基于特征点的单目、双目位姿测量算法方面有很多研究<sup>[1-5]</sup>。相比较于点特征,直线特征由于提取精度高、稳健性好,同时包含更多几何结构而受到关注<sup>[6-9]</sup>。由于直线特征数学模型中旋转矩阵是关于

三个角度的非线性模型,因此需要解决非线性问题。一般基于直线特征位姿求解算法主要有两种:1)非线性算法<sup>[10-13]</sup>,基于优化算法迭代求解出三个旋转角度;2)线性算法<sup>[14-17]</sup>,将旋转矩阵的非线性模型线性化,直接利用线性求解出解析解。一般地,对于实时的位姿测量,为了保证最终测量速度、测量精度以及测量稳定性,基于视觉的相对位姿测量,结合了

**收稿日期**: 2014-04-14; **收到修改稿日期**: 2014-06-04

**基金项目**: 国家自然科学基金(51075095)

**作者简介**: 赵振庆(1983—),男,博士研究生,主要从事视觉导航、图像处理方面的研究。E-mail: zzq725@126.com

**导师简介**: 叶 东(1968—),男,博士,教授,主要从事基于串/并联结构的坐标测量理论和技术、双目/单目视觉坐标测量理论和技术等方向的研究。E-mail: yedong@hit.edu.cn(通信联系人)

线性算法和非线性算法<sup>[18]</sup>；采用线性算法计算解析解，利用优化算法迭代解析解，获得较高精度结果。因而要求线性算法满足选取计算特征元素较少，算法较为简单、计算结果满足一定精度。

线性算法是通过某种方式将旋转矩阵的非线性变成线性表示，经典是将3个自由度的旋转矩阵变成8个变量<sup>[19]</sup>，利用矩阵变换可以直接获得解析解，缺点是需要较多的计算元素，同时计算结果不能保证旋转矩阵的正则性。文献[20—21]利用平行四边形直线特征和几何分析的方法，以直线的平行关系和4条直线围成的面积作为输入，获得几何意义下的相对位姿。但是计算元素需要知道平行四边形4个顶点的坐标值和两个平行关系，同时当四边形较小或测量距离较远时，两条平行线和摄像机原点所形成的平面单位法向量差值较小，导致在被测物体较小或测量距离较远时误差会很大。文献[22]利用三条相互垂直的直线，通过求解三条相互垂直直线在摄像机坐标系向量获得旋转矩阵，缺点是三条相互垂直的直线在被测物体旋转到一定角度时较难提取，应用范围受限。

针对旋转矩阵的非线性，本文基于四元素和旋转矩阵关系<sup>[23]</sup>，在仅知被测目标上两条相互垂直特征向量信息，根据双目视觉直线投影模型，求解出旋转和平移矩阵解析解。同时分析了两个摄像机投影直线向量出现共线时，旋转矩阵的求解方法。基于Matlab仿真实验分析该算法和提取特征噪声、空间直线的垂直误差影响的关系，基于实物实验分析了包含标定误差后精度。

## 2 算法原理

### 2.1 基于直线特征双目位姿解算模型

对于双目视觉测量系统，定义左摄像机坐标系为摄像机坐标系，右摄像机相对于左摄像机外参 $R_r$ 、 $T_r$ ，以及左右摄像机内参已标定。已知空间坐标系下直线 $L_1$ 投影到两个摄像机图像 $l_1$ 、 $l_2$ 。根据摄像机成像针孔模型，空间直线，投影直线以及摄像机原点位于同一个平面内。因此可以获得关于空间坐标系下直线及在左右摄像机投影平面法向量关系：

$$\begin{cases} \mathbf{N}_l^T \cdot \mathbf{R}\mathbf{V}^{scs} = 0 \\ \mathbf{N}_r^T \cdot \mathbf{R}_r\mathbf{R}\mathbf{V}^{scs} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{N}_l^T \cdot \mathbf{R}\mathbf{P}^{scs} + \mathbf{N}_l^T \cdot \mathbf{T} = 0 \\ \mathbf{N}_r^T \cdot \mathbf{R}_r\mathbf{R}\mathbf{P}^{scs} + \mathbf{N}_r^T \cdot \mathbf{R}_r\mathbf{T} + \mathbf{N}_r^T \cdot \mathbf{T}_r = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{V}^{scs}$ 和 $\mathbf{P}^{scs}$ 是直线 $L_1$ 在空间坐标系下的向量和

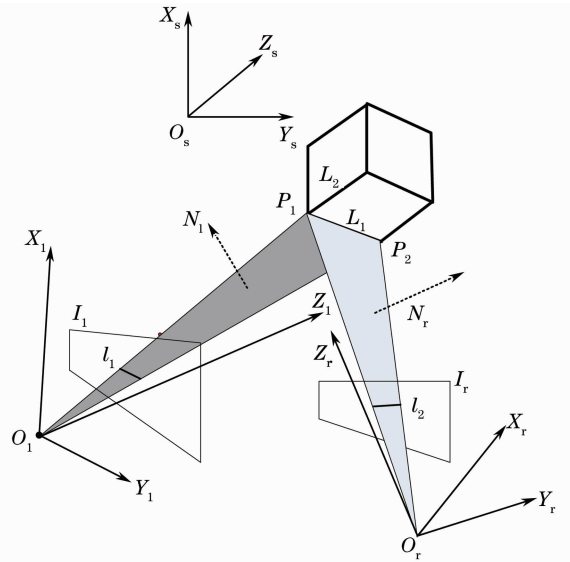


图1 目标坐标系和摄像机坐标系

Fig.1 Target and camera reference system

点， $\mathbf{N}_l$ 是直线 $L_1$ 和左摄像机投影图像 $l_1$ 形成平面的法向量， $\mathbf{N}_r$ 是直线 $L_1$ 和右摄像机投影图像 $l_2$ 所形成平面的法向量。 $\mathbf{R}$ 表示从空间坐标系到摄像机坐标系变换旋转矩阵， $\mathbf{T}$ 表示从空间坐标系到摄像机坐标系变换平移矩阵。 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{T}$ 矩阵就是所求解的位姿。

### 2.2 四元素法模型

基于四元素表示的旋转矩阵优点是可以很方便地保证旋转矩阵的正交性、参数少、节约计算量，相对于旋转角法来说没有奇异点，而且线性化程度高。文献[23]给出了通过复合乘积表示的四元素变换和旋转矩阵变换的关系。这里设四元素用复数表示为 $\mathbf{q} = q_0 + iq_1 + jq_2 + kq_3$ ，其共轭为 $\mathbf{q}^* = q_0 - iq_1 - jq_2 - kq_3$ ，空间点用复数表示为： $\dot{\mathbf{P}} = iX + jY + kZ$ ，这样对于旋转矩阵的变换 $\mathbf{P}' = \mathbf{R}(\mathbf{P})$ ，变成 $\dot{\mathbf{P}}' = \mathbf{q}\dot{\mathbf{P}}\mathbf{q}^*$ 。(1)式中两个方程可以简化为模型：

$$\mathbf{NRV} = 0, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{N}$ 是法向量在摄像机坐标系下向量值， $\mathbf{V}$ 是直线在空间坐标系下向量。用四元素法可以表示成复数形式：

$$(\mathbf{q}\dot{\mathbf{V}}\mathbf{q}^*) \cdot \dot{\mathbf{N}} = 0, \quad (4)$$

式中 $\dot{\mathbf{V}} = ia + jb + kc$ ， $\dot{\mathbf{N}} = iX + jY + kZ$ ，根据四元素正交性，(4)式可以改写为

$$(\mathbf{q}\dot{\mathbf{V}}) \cdot (\dot{\mathbf{N}}\mathbf{q}^*) = 0, \quad (5)$$

将复数积变成矩阵形式：

$$\mathbf{q}\dot{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} 0 & a & -b & -c \\ a & 0 & c & -b \\ b & -c & 0 & a \\ c & b & -a & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} = \mathbf{IR} \cdot \mathbf{q}, \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{N}}\mathbf{q}^* = \begin{bmatrix} 0 & -X & -Y & Z \\ X & 0 & Z & Y \\ Y & Z & 0 & -X \\ Z & -Y & -X & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} = \mathbf{IR}_n \mathbf{q}, \quad (7)$$

式中  $\mathbf{q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]$ ,  $\mathbf{IR}_n \mathbf{q}$  表示第 2 项  $4 \times 4$  矩阵, 这样(5)式从复数形式变成了矩阵形式:

$$(\overline{\mathbf{IR}_n \mathbf{q}}) \cdot (\mathbf{IR}_n \mathbf{q}) = 0, \quad (8)$$

或者表示为

$$\mathbf{q}^T \mathbf{IR}_V \mathbf{IR}_n \mathbf{q} = 0, \quad (9)$$

这样最终由关于  $\mathbf{R}$  的模型变成了关于四元素  $\mathbf{q}$  的模型。

### 2.3 双目视觉位姿解算解析解

由 2.2 节可知, (1)、(2) 可式以简化为四元素表示的方程组, 但是(9)式是由 4 个变量构成的 2 次方程。关于这个方程求解比较复杂, 为了简化问题的难度并不失一般性, 假设被测目标一个平面上包含了相交的两条相互垂直的直线。实际这个前提是很容易满足的, 一般机器视觉任务大部分是相对于人造物体来说的, 被测物体上很容易找到相互垂直直

线特征。

对于相交的两条相互垂直的直线, 假设这两条直线为空间坐标系的  $X, Y$  轴。两条垂线的交点为空间坐标系原点, 即:

$$\mathbf{V}_1^{\text{scs}} = [1 \ 0 \ 0], \quad \mathbf{V}_2^{\text{scs}} = [0 \ 1 \ 0], \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_1^{\text{scs}} = [0 \ 0 \ 0],$$

对应空间直线和左右摄像机所形成平面法向量为直线  $\mathbf{V}_1^{\text{scs}}$  所形成平面的法向量:

$$\mathbf{N}_1^{\text{h}} = [x_1^{\text{h}} \ y_1^{\text{h}} \ z_1^{\text{h}}], \quad \mathbf{N}_2^{\text{h}} = [x_2^{\text{h}} \ y_2^{\text{h}} \ z_2^{\text{h}}], \quad (11)$$

直线  $\mathbf{V}_2^{\text{scs}}$  所形成平面的法向量:

$$\mathbf{N}_1^{\text{v}} = [x_1^{\text{v}} \ y_1^{\text{v}} \ z_1^{\text{v}}], \quad \mathbf{N}_2^{\text{v}} = [x_2^{\text{v}} \ y_2^{\text{v}} \ z_2^{\text{v}}], \quad (12)$$

将(9)~(12)式代入到(1)、(2)式并展开得到

$$\mathbf{M}_1 [t_1 \ t_2 \ t_3 \ 1] = 0, \quad (13)$$

$$\mathbf{M}_2 [t_4 \ t_5 \ t_6 \ 1] = 0, \quad (14)$$

$$\mathbf{M}_3 \mathbf{T} = 0, \quad (15)$$

式中

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} -2x_1^{\text{h}} & -2y_1^{\text{h}} & 2z_1^{\text{h}} & x_1^{\text{h}} \\ -2x_2^{\text{h}} & -2y_2^{\text{h}} & 2z_2^{\text{h}} & x_2^{\text{h}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 2x_1^{\text{v}} & -2y_1^{\text{v}} & -2z_1^{\text{v}} & y_1^{\text{v}} \\ 2x_2^{\text{v}} & -2y_2^{\text{v}} & -2z_2^{\text{v}} & y_2^{\text{v}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_3 = [\mathbf{N}_1^{\text{h}} \ \mathbf{N}_2^{\text{h}} \ \mathbf{N}_1^{\text{v}} \ \mathbf{N}_2^{\text{v}}]^T,$$

$$t_1 = q_0^2 + q_1^2, \quad t_2 = q_0 q_3 + q_1 q_2, \quad t_3 = q_0 q_2 - q_1 q_3, \quad t_4 = q_0 q_3 - q_1 q_2, \quad t_5 = q_0^2 + q_2^2, \quad t_6 = q_0 q_1 + q_2 q_3, \quad (16)$$

计算相对位置(15)式是一个齐次线性方程组, 可以通过直接解方程方式求解出平移矩阵。针对计算相对姿态(13)、(14)式利用三角变换来求解出  $t_i$ , 进而由  $t_i$  求解出单位四元素  $q_i$ 。

1) 根据三角变换求解  $t_i$

由于  $q_i < 1, i = 0, 1, 2, 3$ 。对于(13)式, 假设  $g, \alpha, \beta$  满足:

$$q_2 = g \cos \beta, \quad q_3 = g \sin \beta, \quad q_0 = \sqrt{1 - g^2} \cos \beta, \quad q_1 = \sqrt{1 - g^2} \sin \beta. \quad (17)$$

这样  $q_i$  满足  $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$ , 同时可以获得

$$\begin{cases} t_1 = q_0^2 + q_1^2 = 1 - g^2 \\ t_2 = q_0 q_3 + q_1 q_2 = g \sqrt{1 - g^2} \sin(\alpha + \beta), \\ t_3 = q_0 q_2 - q_1 q_3 = g \sqrt{1 - g^2} \cos(\alpha + \beta) \end{cases} \quad (18)$$

(13)式变成:

$$\begin{cases} -2y_1^{\text{h}} \sin(\alpha + \beta) + 2z_1^{\text{h}} \cos(\alpha + \beta) = x_1^{\text{h}} (1 - 2g^2) / (g \sqrt{1 - g^2}) \\ -2y_2^{\text{h}} \sin(\alpha + \beta) + 2z_2^{\text{h}} \cos(\alpha + \beta) = x_2^{\text{h}} (1 - 2g^2) / (g \sqrt{1 - g^2}) \end{cases}, \quad (19)$$

进而可以求解出:

$$\tan(\alpha + \beta) = (x_1^{\text{h}} z_2^{\text{h}} - x_2^{\text{h}} z_1^{\text{h}}) / (x_1^{\text{h}} y_2^{\text{h}} - x_2^{\text{h}} y_1^{\text{h}}), \quad (20)$$

设  $m = (1 - 2g^2) / (g \sqrt{1 - g^2})$ , 即  $mg \sqrt{1 - g^2} = 1 - 2g^2$ 。 $m$  可以从(19)式求得, 设  $g = \sin \gamma$ , 代入上面公式可以得到:  $m \sin \gamma \cos \gamma = 1 - 2 \sin^2 \gamma$ , 依据三

角关系, 可以得到:  $\tan 2\gamma = \frac{1}{2m}$ , 从而可以求解出  $g$ 。

最终得到  $t_1, t_2, t_3$  值。

同样对于  $\mathbf{M}_2$ , 假设  $k, \phi, \varphi$  满足:  $q_1 = k \cos \phi, q_3 = k \sin \phi, q_0 = \sqrt{1 - k^2} \cos \varphi, q_2 = \sqrt{1 - k^2} \sin \varphi$ , 则存在:

$$\begin{cases} t_4 = q_0 q_3 - q_1 q_2 = k \sqrt{1-k^2} \sin(\phi - \varphi) \\ t_5 = q_0^2 + q_2^2 = 1 - k^2 \\ t_6 = q_0 q_1 + q_2 q_3 = k \sqrt{1-k^2} \cos(\phi - \varphi) \end{cases}, \quad (21)$$

(14)式变成

$$\begin{cases} 2x_1^v \sin(\phi - \varphi) - 2z_1^v \cos(\phi - \varphi) = y_1^v (1 - 2k^2) / (k \sqrt{1 - k^2}) \\ 2x_2^v \sin(\phi - \varphi) - 2z_2^v \cos(\phi - \varphi) = y_2^v (1 - 2k^2) / (k \sqrt{1 - k^2}) \end{cases}, \quad (22)$$

进而可以求解出

$$\tan(\phi - \varphi) = (y_1^v z_2^v - y_2^v z_1^v) / (y_1^v x_2^v - y_2^v x_1^v), \quad (23)$$

设  $n = (1 - 2k^2) / (k \sqrt{1 - k^2})$ ,  $n$  可以从(22)式求得, 设  $k = \sin \theta$ , 代入可以得到  $n \sin \theta \cos \theta = 1 - 2 \sin^2 \theta$ , 依据三角关系, 可以得到  $\tan 2\theta = 1 / (2n)$ , 从而可以求解出  $k$ . 最终得到  $t_4, t_5, t_6$  值。

2) 分解  $t_i$ , 获得  $q_i$  值

根据  $t_i$  公式可以获得以下等式:

$$\begin{aligned} q_0 q_1 &= t_1 t_6 - t_3 t_4, \\ q_0^2 - q_1^2 &= \sqrt{t_1^2 - 4(t_1 t_6 - t_3 t_4)^2}. \end{aligned} \quad (24)$$

进一步可以求出  $q_0$  值:

$$q_0^2 = \frac{1}{2} [t_1 + \sqrt{t_1^2 - 4(t_1 t_6 - t_3 t_4)^2}], \quad (25)$$

由于  $q_0$  不能取负值, 因此可以得到

$$q_0 = \sqrt{\frac{1}{2} [t_1 + \sqrt{t_1^2 - 4(t_1 t_6 - t_3 t_4)^2}]}, \quad (26)$$

最终解出其他参数:

$$\begin{aligned} q_1 &= (t_1 t_6 - t_3 t_4) / q_0, \quad q_2 = (t_2 - t_4) / (2q_1), \\ q_3 &= (t_2 + t_4) / (2q_0). \end{aligned} \quad (27)$$

## 2.4 极值分析

2.3 节中姿态解算是利用直线向量在左右摄像机的法向量差值来计算。当直线向量和基线向量位于同一个平面时, 直线特征向量在左右摄像机的法向量相同。此时无法计算  $t_i$ , 进而无法求解出四元素。

设定右摄像机相对于左摄像机旋转矩阵为  $(\alpha, \beta, \gamma)$ 。当直线向量平行于基线向量时候,  $\gamma = 0$ , 可以得到  $t_i$ :

$$\begin{cases} t_1 = q_0^2 + q_1^2 = 1/2(\cos \beta + 1) \\ t_2 = q_0 q_3 + q_1 q_2 = 0 \\ t_3 = q_0 q_2 - q_1 q_3 = 1/2 \sin \beta \end{cases}, \quad (28)$$

$$\begin{cases} t_4 = q_0 q_3 - q_1 q_2 = -1/2 \sin \alpha \sin \beta \\ t_5 = q_0^2 + q_2^2 = 1/2(\cos \alpha + 1) \\ t_6 = q_0 q_1 + q_2 q_3 = 1/2 \sin \alpha \cos \beta \end{cases}, \quad (29)$$

将结果代入到(13)、(14)式, 整理得到

$$\begin{cases} z_1^h \sin \beta - x_1^h \cos \beta = 0 \\ (x_1^v \sin \beta + z_1^v \cos \beta) \sin \alpha + y_1^v \cos \alpha = 0 \end{cases}. \quad (30)$$

从而可以求解出欧拉角  $\alpha, \beta$ :

$$\tan \beta = \frac{x_1^h}{z_1^h}, \quad \tan \alpha = -y_1^v / (x_1^v \sin \beta + z_1^v \cos \beta). \quad (31)$$

## 3 实 验

位姿测量精度取决于图像直线特征提取精度和视觉系统的参数标定精度, 本文采用仿真来验证算法对直线特征提取噪声、空间直线的不完全垂直误差的稳健性, 采用实物实验来验证实际测量精度。

### 3.1 仿真实验

噪声对直线特征提取精度影响和直线表示方法有关, 采用极坐标表示方法:  $\cos \epsilon x + \sin \epsilon y - d = 0$ 。式中  $d$  (mm) 表示从图像原点到直线的距离,  $\epsilon$  表示垂线和图像  $x$  轴的夹角。则该直线和摄像机原点所成平面的法向量为

$$n = 1 / \sqrt{f^2 + d^2} [f \cos \epsilon \quad f \sin \epsilon \quad d]. \quad (32)$$

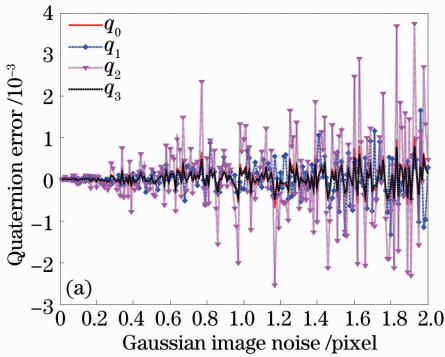
这样直线特征提取精度直接反应在模型中法向量的精度。直线特征提取算法一般是基于霍夫变换或者是直线拟合算法, 这些算法都是利用直线上特征点来计算直线方程。因此采用点提取精度来描述直线方程提取精度。做以下假设: 1) 原点和直线的垂直距离  $d$  误差是点像素级别; 2)  $\epsilon$  角度误差使得直线为 100 pixel 长度偏移是像素级别; 3) 上述两个点像素级别是相同的。随着亚像素算法研究, 考虑其他因素可能导致直线特征提取误差存在, 这里分析 2 pixel 以内偏差对算法的影响。

#### 3.1.1 特征提取噪声影响

算法仿真分析主要是分析噪声对提出位姿解算算法的影响。仿真中具体参数如下: 摄像机焦距为  $f = 12$  mm, 像素大小为  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ , 空间坐标系相对于摄像机坐标系为  $q = [0.91855 \quad 0.17677 \quad 0.30618 \quad 0.17677]$ ,  $T = [1000 \quad 1000 \quad 5000]$  (单位为 mm), 左右摄像机坐标系相对位姿为  $R_{lr} = [0 \quad 60$

0](单位为 $^{\circ}$ ),  $T_r = [-250 \ 0 \ 433.012]$ (单位为mm)。对直线特征参数  $d$  和  $\epsilon$  增加相同的高斯像素噪声, 具体数据如图 2 所示。

位姿精度和噪声影响如图 2 所示, 通过图 2(a) 可以分析到, 四元素中  $q_2$  误差最大。当特征提取精度满足亚像素精度时(噪声小于 0.1 pixel), 所求四元素精度小于  $1.03 \times 10^{-4}$ ; 当特征提取精度满足小于 1 pixel 时, 所求四元素精度小于  $2.35 \times 10^{-3}$ ; 当



特征提取精度达到 2 pixel 时, 所求四元素精度小于  $3.75 \times 10^{-3}$ 。相对位置和噪声影响如图 2(b) 所示, 由于选择 Z 向距离比 X、Y 方向大, 因而 Z 向误差也是最大的。当特征提取精度满足小于 0.1 pixel 时, Z 向误差小于 0.97 mm; 当特征提取精度满足小于 1 pixel 时, Z 向误差小于 13.5 mm; 当特征提取精度满足小于 2 pixel 时, Z 向误差小于 36.42 mm。

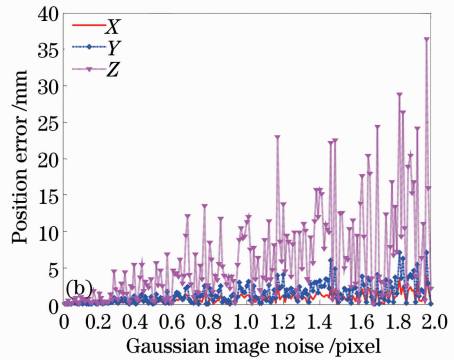


图 2 直线特征噪声和计算姿态精度关系。(a) 直线特征噪声和四元素精度关系; (b) 直线特征噪声和计算相对位置精度  
Fig. 2 Linear noise and pose accuracy. (a) Linear noise and quaternion accuracy; (b) linear noise and position accuracy

### 3.1.2 空间直线误差影响

由于实际加工、安装等影响, 空间两条直线特征并不能完全的垂直, 而是存在一定的角度误差的。这里根据仿真来分析当一条直线相对于另外一条直线的垂线有一定的夹角时候, 提出的算法是否仍然能够有效地计算出旋转矩阵。

当两条直线特征并不完全垂直时候, 仍可以将两条直线的交点定义为摄像机原点, 因而并不影响到相

对位置的计算。这里只分析对相对姿态计算结果, 仿真中对图像直线特征提取增加 0.1 pixel 的噪声。具体数据如图 3 所示, 角度误差最大增加到  $0.1^{\circ}$ , 随着角度误差增大, 四元素中  $q_2$  误差较大, 最大为  $-2.25 \times 10^{-3}$ , 对应欧拉角最大误差为  $0.289^{\circ}$ ; 当角度误差小于  $0.05^{\circ}$  时, 四元素最大误差为  $-1.25 \times 10^{-3}$ , 对应欧拉角最大误差为  $0.16^{\circ}$ 。

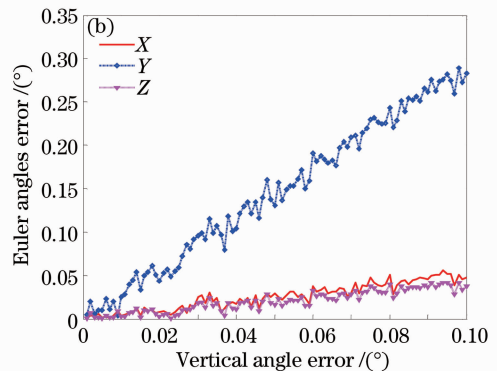
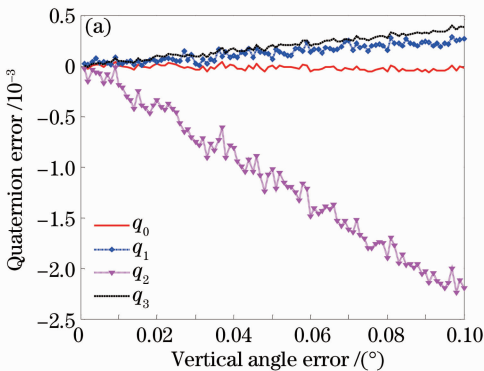


图 3 垂直角度误差和姿态精度。(a) 垂直角度误差和四元素精度; (b) 垂直角度误差和欧拉角精度

Fig. 3 Vertical angle error and pose accuracy of quaternion. (a) Vertical angle error and quaternion accuracy; (b) vertical angle error and Euler angle accuracy

### 3.2 实物位姿测量实验

使用电移台(如图 4 所示)来标定整个系统的测量精度。在检测视觉系统精度时, 使用了六自由度电移台, 移动电移台固定距离和角度, 然后比较视觉测

量的结果, 做出精度分析。靶标使用的是黑白棋盘格, 每个单元格大小为  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ , 总共  $12 \times 12$  个。直线特征选取的是边缘两条相互垂直的直线。摄像机选取的是加拿大 Dalsa 产品 HM1400, 像素

为  $1400 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ , 像元大小为  $7.4 \mu\text{m}$ 。摄像机内外参数为  $f_l = 12.109 \text{ mm}$ ,  $f_r = 12.199 \text{ mm}$ , 左摄像机相面中心为  $(684.4351, 524.5245)$ , 右摄像机相面中心为  $(739.0638, 495.8120)$ ,  $R_{lr} = [-0.944 \ 0.285 \ 0.526]$  [单位为  $(^\circ)$ ]  $T_{lr} =$

$[665.17 \ -1.12 \ -2.45]$  (单位为  $\text{mm}$ )。实验时, 靶标相对于摄像机大约  $4.6 \text{ m}$ , 每个位置通过连续测量 3 次获得均值来分析测量精度。由于实验设备限制, 三个轴向平移最大距离是  $200 \text{ mm}$ ; 三个轴向旋转最大角度是  $20^\circ$ 。具体数据结果如表 1 所示。

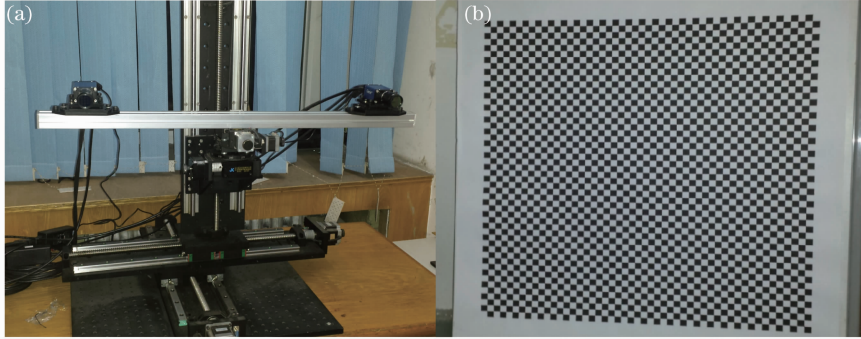


图 4 实物位姿测量实验

Fig. 4 Physical posture measurement experiment

表 1 实物位姿测量数据分析

Table 1 Physical pose measurement data analysis

	X position error /mm	Y position error /mm	Z position error /mm	Pitch angle error / $(^\circ)$	Drift angle error / $(^\circ)$	Roll angle error / $(^\circ)$
Mean	2.02	1.81	-3.10	-0.0376	-0.0446	0.026
Variance	1.48	1.55	3.68	0.0392	0.0673	0.029
Maximum error	4.60	5.90	10.50	0.1500	0.2200	0.120

由于采用的是棋盘格图像, 在光照比较好的实验情况下, 直线特征提取精度可以达到亚像素。所求解三轴旋转角度中, Y 轴旋转角度误差较大, 最大误差达到  $0.22^\circ$ , XZ 轴旋转角稍小。所求的三轴相对位置中, Z 轴偏移误差最大, 最大误差达到  $10.5 \text{ mm}$ , XY 轴平移误差较小。

## 4 结 论

根据摄像机投影中直线特征和投影直线、摄像机光心位于同一个平面建立位姿求解模型, 利用四元素法简化模型中变量, 并提出了一种基于垂直直线特征双目视觉位姿测量算法。由于特征只要求已知两条直线相互垂直关系, 因而可以用于合作、非合作目标的位姿测量。实验结果表明, 该算法对噪声具有一定稳健性, 计算结果精度也满足一般测量要求。

## 参 考 文 献

1 Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen. Mono camera and laser range finding sensor position-pose measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0312001.  
晁志超, 伏思华, 姜广文. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312001.

2 Hao Yingming, Zhu Feng, Ou Jinjun. 3D visual methods for object pose measurement [J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(12): 1247-1250.  
郝颖明, 朱 枫, 欧锦军. 目标位姿测量中的三维视觉方法[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(12): 1247-1250.  
3 Wang Peng, Sun Changku, Zhang Zimiao. Linear pose estimation with a monocular vision system [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1126-1131.  
王 鹏, 孙长库, 张子森. 单目视觉位姿测量的线性求解[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1126-1131.  
4 F Moreno Noguera, V Lepetit, P Fua. Accurate noniterative O(n) solution to the PnP problem [C]. IEEE 11th International Conference on Computer Vision, 2007. 1-8.  
5 Lü Yaowen, Wang Jianli, Cao Jingtai. Monocular measurement for point target with parabolic motion [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 33(6): 0615001.  
吕耀文, 王建立, 曹景太. 抛物线运动点目标的单目测量[J]. 光学学报, 2012, 33(6): 0615001.  
6 Sun Minglei, Wen Wen, Zong Guanghua. A method for fast measuring line-shaped image feature based on normalized cross correlation operator [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2041-2046.  
孙明磊, 文 闻, 宗光华. 基于标准互相关算子的直线图像特征快速测量方法[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2041-2046.  
7 Dong Jing, Yang Xia, Yu Qifeng. Fast line segment detection based on edge connecting [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0315003.  
董 晶, 杨 夏, 于起峰. 基于边缘连接的快速直线段检测算法 [J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0315003.  
8 J S Park. Interactive 3D reconstruction from multiple images: a primitive based approach [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(16): 2558-2571.

- 9 Wen Gongjian, Wang Runsheng. A robust approach to extracting straight lines[J]. Journal of Software, 2001, 12(11): 1660—1666.  
文贡坚, 王润生. 一种稳健的直线提取算法[J]. 软件学报, 2001, 12(11): 1660—1666.
- 10 X H Zhang, Z Zhang, Y Li, *et al.*. Robust camera pose estimation from unknown or known line correspondences [J]. Appl Opt, 2012, 51(7): 936—948.
- 11 S Christy, R Horaud. Iterative pose computation from line correspondences [J]. Computer Vision and Image Understand, 1999, 73(1): 137—144.
- 12 Y Liu, T S Huang, L D Faugeras. Determination of camera location from 2-D to 3-D line and point correspondences [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(1): 28—37.
- 13 C N Lee, R M Haralick. Statistical estimation for exterior orientation from line-to-line correspondences [J]. Image and Vision Computing, 1996, 14(6): 379—388.
- 14 H H Chen. Pose determination from line-to-plane correspondences: existence condition and closed-form solutions [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(6): 530—541.
- 15 Y Liu, T S Huang. A linear algorithm for motion estimation using straight line correspondences [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1988, 44(1): 35—57.
- 16 M Dhome, M Richetin, J Thierry Lapreste. Determination of the attitude of 3-D objects from a single perspective view [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(12): 1265—1278.
- 17 Zhou Fan, Shao Shiwei, Wu Jianhua. Method for fundamental matrix estimation combined with line feature [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1015003.  
周凡, 邵世维, 吴建华. 一种联合直线特征的基础矩阵计算方法[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1015003.
- 18 R I Hartley, A Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 110—115.
- 19 A Ansar, K Daniilidis. Linear pose estimation from points or lines [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 25(5): 578—589.
- 20 Wang Xiaojian, Pan Shunliang, Qiu Liwei, *et al.*. Analytic algorithm of pose estimation based on two pairs of parallel lines [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2008, 29(3): 600—604.  
王晓剑, 潘顺良, 邱力为, 等. 基于双平行线特征的位姿估计解析算法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(3): 600—604.
- 21 Sun Fengmei, Wang Weining. Pose determination from a single image of a single parallelogram [J]. Acta Automatic Sinica, 2006, 32(5): 746—752.  
孙凤梅, 王卫宁. 基于单个平行四边形单幅图像的物体定位[J]. 自动化学报, 2006, 32(5): 746—752.
- 22 Liu Chang, Zhu Feng, Ou Jinjun. Monocular pose determination from three perpendicular lines [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2012, 25(5): 737—744.  
刘昶, 朱枫, 欧锦军. 基于三条相互垂直直线的单目位姿估计[J]. 模式识别与人工智能, 2012, 25(5): 737—744.
- 23 B K P Horn. Closed form solution of absolute orientation using unit quaternions [J]. J Opt Soc Am A, 1987, 4(4): 629—642.

栏目编辑：何卓铭