

消除圆位姿二义性的三线构型法

张李俊 黄学祥 冯渭春 梁书立 胡天健

北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要 基于圆特征的视觉测量方法简单且精度高,因此具有广泛的机器视觉应用,但单个圆特征的单目视觉位姿估计存在二义性问题。为了有效剔除虚假解,基于三线构型的姿态估计方法,提出了一类基于角度约束的圆位姿二义性消除方法。对具有先验信息的三线构型,利用三线构型与相机系的姿态关系可以得到圆平面法向量的一个角度约束。若三线构型不具有先验信息,利用二视图三线构型的相对姿态估计可以得到一个二视图间圆法向量的角度约束,这两类角度约束都可以排除圆的虚假法向量。实验结果表明,该方法可有效消除圆位姿二义性,第一种角度约束可以达到99.2%的成功率,第二种角度约束可以达到96.7%的成功率。

关键词 机器视觉; 二义性; 三线构型; 角度约束; 位姿估计; 圆

中图分类号 TP242.6 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0515001

Solution of Duality in Circular Feature with Three Line Configuration

Zhang Lijun Huang Xuexiang Feng Weichun Liang Shuli Hu Tianjian

Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

Abstract Due to the efficiency and accuracy, the visual measurement method based on circular features is widely used in computer vision applications. However, the duality problem interferes the process of monocular vision pose estimation with a single circle feature. In order to exclude of the false solution effectively, a method utilizing angular constraint to solve the ambiguity is proposed based on the attitude estimation with the three lines configuration. For a known three lines configuration, an angular constraint about the normal vector of the single circle is deduced with the attitude between the configuration and the camera coordinate. If the three lines configuration is unknown, an angular constraint between the normal vectors of the circle in two camera views is deduced with the relative attitude estimation with a pair of matched three lines configuration. Both of the angular constraints can be applied to exclude the false normal vector of the circle. Experimental results indicate that the proposed approach can effectively solve the duality problem. The success rate is up to 99.2% for the first angular constraint, and the success rate is up to 96.7% for the second angular constraint.

Key words machine vision; duality; three line configuration; angular constraint; pose estimation; circle

OCIS codes 150.0155; 120.1880; 110.5200

1 引 言

圆是自然景物和人造物体上一种常见的特征,如公路上圆形的交通指示牌、空间飞行器上的星箭对接环等,在视觉测量领域具有广泛的应用^[1-4]。相较于点和线特征,基于圆的视觉位姿估计具有需要的特征数目少、抗遮挡能力强和特征识别匹配容易等优点。但单个圆的位姿闭式解^[5-6]具有二义性,其中一个为虚假解,从二义性位姿中找出真实位姿解对于工程应用非常重要。

为了确定圆位姿的真实解,文献[7]提出对于圆柱体目标,可以利用圆柱体的两条母线消除圆位姿的二义性,文献[5]针对存在多个法向量相同的圆特征的情形,将圆法向量相互平行作为约束来消除二义性,但这

收稿日期: 2015-11-24; **收到修改稿日期:** 2015-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(11402004)

作者简介: 张李俊(1991—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉和视觉测量方面的研究。E-mail: zljun@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 黄学祥(1970—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事空间操作方面的研究。E-mail: h_xxiang@163.com

两种方法都对目标的结构做出假设,使用范围有限;文献[8]指出,若能在像平面准确识别出圆心的投影点,则可以唯一确定圆的位姿;文献[9]利用圆外侧一个已知参考点到圆心距离的欧式距离不变性作为约束消除二义性,但这两种方法中都假设存在一个先验已知的点特征;文献[10]提出当存在与圆平行的直线对时,可基于空间运动不改变直线对夹角的约束来消除二义性,但一般情形下很难识别与圆平面平行的直线对;文献[11]通过多视图从运动恢复结构的方法对目标进行重建,再利用刚体运动不改变夹角的角度约束来消除二义性,但正如文中总结,当目标的点特征比较稀疏时该方法会失效。

针对圆位姿二义性消除问题,本文基于三线构型^[12]的姿态估计方法提出了关于圆法向量的两个角度约束,利用角度约束消除二义性。首先介绍了基于三线构型的相对姿态估计方法,若目标存在先验已知的三线构型,则根据三线构型与相机的相对姿态可以得到圆真实法向量的一个角度约束从而唯一确定位姿;若目标不存在先验已知的三线构型,则利用二视图相对位姿估计得到二视图圆法向量的一个角度约束从而同时确定二视图中圆特征的真实位姿参数。不失一般性,本文所有的讨论均假设相机已完成标定,并在成像过程中内参数保持不变。

2 基于三线构型的姿态估计方法

2.1 三线构型

在人造物体的轮廓上通常有很多相互平行或垂直的直线,比如楼房的门框,空间飞行器的轮廓等。如图1所示, L_1, L_2, L_3 表示世界系中三条直线,其中 $L_2 \parallel L_3$ 且 $L_2, L_3 \perp L_1$,满足上述约束关系的三条空间直线称为三线构型。在图1的像平面上, l_1, l_2, l_3 为 L_1, L_2, L_3 透视投影成像形成直线的3维方向向量,采用图像坐标系中的齐次坐标表示。向量 d_1 表示垂直直线 L_1 在世界系中的方向向量, d_2 表示平行直线 L_2, L_3 在世界系中的方向向量,则世界坐标系的建立方法如下:令 x 轴与 d_1 方向相同, y 轴与 d_2 方向相同,再基于右手定则确定 z 轴并使 z 轴正方向朝向相机。图中,相机成像的投影矩阵可以表示为 $P=K[R|t]$,其中, K 为相机内参数矩阵, R 为旋转矩阵, t 为平移矩阵。

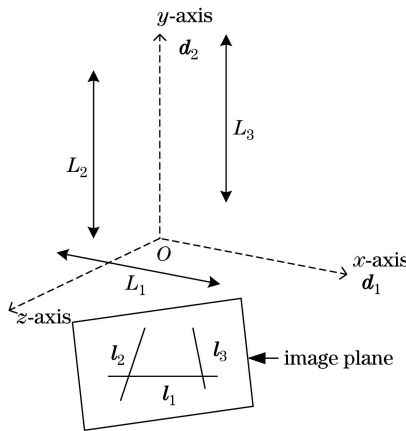


图1 三线构型示意图

Fig. 1 Illustration of three lines configuration

2.2 姿态估计

根据空间直线的成像关系^[13],平行线方向向量 d 与其在图像中的消失点的关系如下

$$v = KRd, \tag{1}$$

式中 v 为消失点的齐次图像坐标。由2.1节的定义知,三线构型中直线方向向量 d_1 与 x 轴同向而直线方向向量 d_2 与 y 轴同向,即 $d_1 = (1, 0, 0)^T, d_2 = (0, 1, 0)^T$ 。

记 v_1 与 v_2 分别为垂直线 L_1 方向向量 d_1 与平行线 L_2, L_3 方向向量 d_2 的消失点,分别代入(1)式得到以下关系

$$v_1 = KRd_1 = Kr_1, \quad v_2 = KRd_2 = Kr_2, \tag{2}$$

式中 r_i 表示旋转矩阵 R 的第 i 个列向量,由(2)式可知

$$\mathbf{R}d_i = \mathbf{r}_i, i = 1, 2, \quad (3)$$

即 \mathbf{r}_1 为 L_1 在相机系中的方向向量, \mathbf{r}_2 为直线 L_2, L_3 在相机系中的方向向量。而 \mathbf{v}_2 同时也是图像中直线 l_1, l_2 的交点, 满足

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{K}\mathbf{r}_2 = l_2 \times l_3, \quad (4)$$

另一方面, 由于 \mathbf{d}_1 垂直于 \mathbf{d}_2 , 即有 $\mathbf{d}_2 \cdot \mathbf{d}_1 = 0$ 。由(2)式替换得到

$$\mathbf{v}_2^T (\mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1}) \mathbf{v}_1 = 0, \quad (5)$$

式中 \mathbf{v}_1 为直线 L_1 的消失点, 因此 \mathbf{v}_1 位于 l_1 上, 即有关系 $l_1 \cdot \mathbf{v}_1 = 0$, 联合(5)式, 整理得到以下关系

$$\begin{cases} \mathbf{v}_2^T (\mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1}) \mathbf{v}_1 = 0 \\ l_1^T \mathbf{v}_1 = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中 \mathbf{v}_1 为三维齐次图像坐标, 仅有两个未知量, 由(6)式的两个方程可以求解, 在非退化的情况下^[12],

$$\mathbf{v}_1 = (\mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{v}_2) \times l_1. \quad (7)$$

根据以上定义和结论, 则基于三线构型可以解算单目相机的旋转矩阵 \mathbf{R} , 给定 l_1, l_2, l_3 , 则 \mathbf{R} 的计算公式总结为

$$\begin{cases} \mathbf{v}_2 = l_2 \times l_3 \\ \mathbf{v}_1 = (\mathbf{K}^{-T} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{v}_2) \times l_1 \\ \mathbf{r}_{1,2} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{v}_{1,2} \\ \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2 \end{cases}, \quad (8)$$

式中 \mathbf{R} 的三个列向量 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ 也分别为世界系 x, y, z 轴在相机系中的方向向量。

2.3 二视图相对位姿估计

通常情况下, 图像对直线并没有约束, 通过三线构型定义的世界坐标系与目标本体系的关系未知, 因此通过三线构型求解得到的旋转矩阵并没有明确的物理含义。在二视图的情形下, 基于匹配的三线构型可以解算出的旋转矩阵 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$, 则二视图的相对旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_{rel} = \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1^T, \quad (9)$$

虽然由三线构型定义的世界系与目标本体系关系并不明确, 即 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ 不具备直接的物理意义, 但由一组三线构型得到的二视图相对旋转矩阵 \mathbf{R}_{rel} 与二视图中目标本体系的相对旋转矩阵相同。在[12]中给出了一种二视图相对旋转矩阵的稳健估计方法。

值得一提的是, (8)式中 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 的计算仅与垂直直线与平行直线的消失点相关, 因此在二视图中, 只需保证两个视图中对应的垂直直线和平行直线都属于同一个平行线系, 即对应同一个消失点即可, 并不需要严格的匹配。

3 基于组合特征的位姿估计方法

3.1 基于单个空间圆投影的位姿估计方法

一般情况下, 利用单幅图像中的投影椭圆曲线可以得到单个空间圆在相机坐标系中圆心坐标和法向量的闭式解^[3-4], 但该闭式解结果存在二义性, 即存在两组位姿解, 一组为真实解而另一组为虚假解。由于每组位姿解中圆心坐标与圆心法向量相对应, 因此消除姿态二义性或者位置二义性都可以消除位姿解的二义性。

3.2 基于角度约束的位姿二义性消除方法

根据三线构型是否先验已知, 本节介绍两种基于角度约束的圆位姿二义性消除方法。

如果目标上存在一组事先已知的三线构型如图 2 所示, 目标本体系与由三线构型定义的世界系之间的旋转矩阵记为 \mathbf{R}_0^w , 由(8)式可以求解世界系与相机系之间的旋转矩阵, 记为 \mathbf{R} , 设圆平面在目标本体系中的单位法向量为 \mathbf{n}_0 , 则圆平面在相机系中真实的单位法向量 \mathbf{n} 满足下列关系

$$\mathbf{n} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}_0^w \cdot \mathbf{n}_0, \quad (10)$$

即在理想情形下有如下的角度约束(记为角度约束一)

$$\text{ang}(\mathbf{n}, \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}_0^w \cdot \mathbf{n}_0) = 0, \quad (11)$$

式中函数 $\text{ang}(\cdot)$ 计算两个向量之间的夹角大小,但实际上由于噪声的存在,两组向量夹角中角度较小的一组对应的圆法向量为真实法向量。

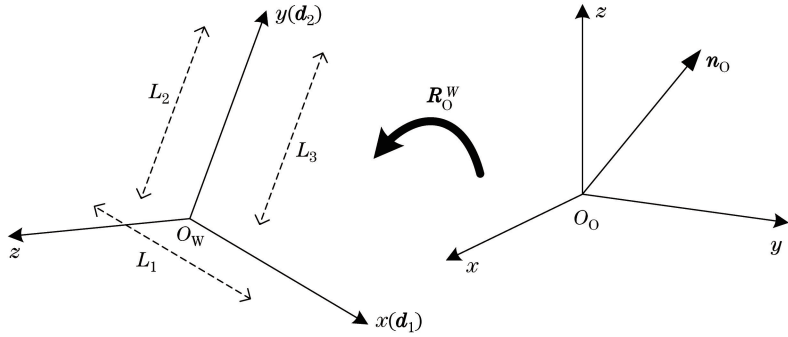


图 2 坐标系定义

Fig. 2 Definition of coordinates

当三线构型不具有先验信息时,根据 2.3 节的讨论,二视图的情形下,由匹配的三线构型可以求解出两次成像之间的真实旋转矩阵,利用该旋转矩阵可以实现二视图中圆平面法向量的相互转化,理想情况下经转化后真实的两个圆平面法向量是一致的,利用该性质可以消除二视图圆位姿的二义性;如图 3 所示的二视图位姿关系,其中 \mathbf{R}_{rel} 为两次成像之间的相对旋转矩阵,可由(9)式计算得到;设 \mathbf{n}, \mathbf{n}' 分别为视图 1, 2 中单个圆特征的真实法向量。则有下列关系成立

$$\mathbf{n}' = \mathbf{R}_{\text{rel}} \cdot \mathbf{n}, \tag{12}$$

即在理性情形下有如下的角度约束(记为角度约束二)

$$\text{ang}(\mathbf{n}', \mathbf{R}_{\text{rel}} \cdot \mathbf{n}) = 0, \tag{13}$$

实际中由于噪声的存在,在 4 组向量夹角中角度最小的一组对应的圆法向量为二视图中真实的圆法向量。

另一方面,由于三线构型中垂直直线与平行直线在两个相机系中的方向向量均可求出,即图 3 中视图 1 中的 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 和视图 2 中的 $\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2$,也可利用文献[9]中提出的基于刚体运动不改变空间夹角的角度约束,即夹角 θ_1, θ_2 在两次成像之间保持不变,来消除二视图圆位姿的二义性。但相比于(13)式对法向量的直接约束,基于刚体运动不改变空间夹角的角度约束是对二视图圆平面法向量的间接约束,因此选择(13)式所示的角度约束。

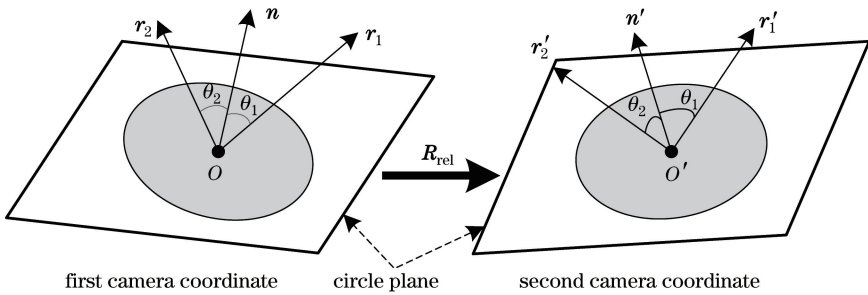


图 3 二视图情形示意图

Fig. 3 Illustration of two views case

4 实验结果

4.1 计算机仿真实验结果

由于文献[8]已经对基于单个空间圆的位姿估计精度进行了详细论述,在此重点考察本文方法在不同噪声强度和距离下的性能,建立了基于蒙特卡罗模拟的仿真实验系统,模拟不同参数和噪声强度的成像过程,对每种参数条件运行 1000 次,通过统计方法获取结果。实验所用计算机主频为 2.1 GHz,内存为 2 GB,操作系统为 Windows 7。

实验中,给定相机内参数如下:图像尺寸为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,等效焦距 $f_u = f_v = 1000$,主点坐标为

(256, 256)。对目标设定如图 4 所示:取圆半径长度作为单位长度,线段 L_1 , L_2 和 L_3 的长度都取为 2 个单位长度,中心位于坐标轴上;圆与每条直线都均匀选取 20 个采样点进行投影成像,在圆和直线采样点的像点坐标上加上均值为 0,标准差为 σ 的高斯噪声作为干扰。

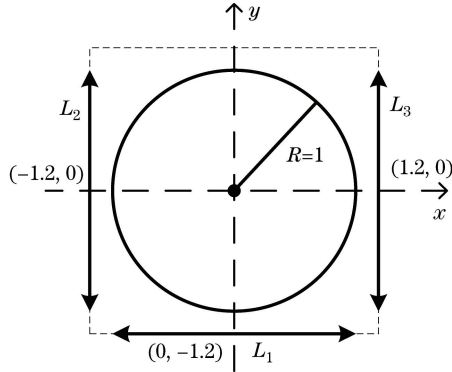


图 4 特征初始分布

Fig. 4 Primitive distribution of features

实验一:基于角度约束一的二义性消除。

不同噪声强度下二义性消除方法的稳健性实验中,目标在相机前方随机选取一个位姿进行成像模拟。实验中目标到相机的距离分别取 10, 20 和 30 个单位长度(相应为圆半径的 10, 20 和 30 倍);实验中 σ 的取值范围为 0~1 pixel。如图 5(a)所示,在三个距离下噪声强度为 0 时二义性消除成功率均为 100%,证明了本方法和计算过程的正确性;二义性消除成功率随噪声增加增强而降低,与噪声强度近似表现为线性关系;距离为 10 个单位长度时在不同噪声强度下二义性成功率均接近 100%;噪声强度为 1 时,三个距离处的成功率分别为 98.4%, 95.3% 和 91.1%。

不同距离下二义性消除方法的有效性实验中,半径的取值范围是 2~30 个单位长度(相应为圆半径的 2~30 倍), σ 分别取 0.1, 0.5 和 1 pixel, 其他参数取值方法保持不变。如图 5(b)所示,在三个噪声强度下,二义性消除成功率随距离增加而降低,与噪声强度均近似表现为线性关系;噪声强度为 0.1 时,不同距离下的二义性成功率均接近 100%;在距离为 30 个单位长度时,三个噪声强度下的成功率分别为 99.2%, 94.4% 和 91.2%。

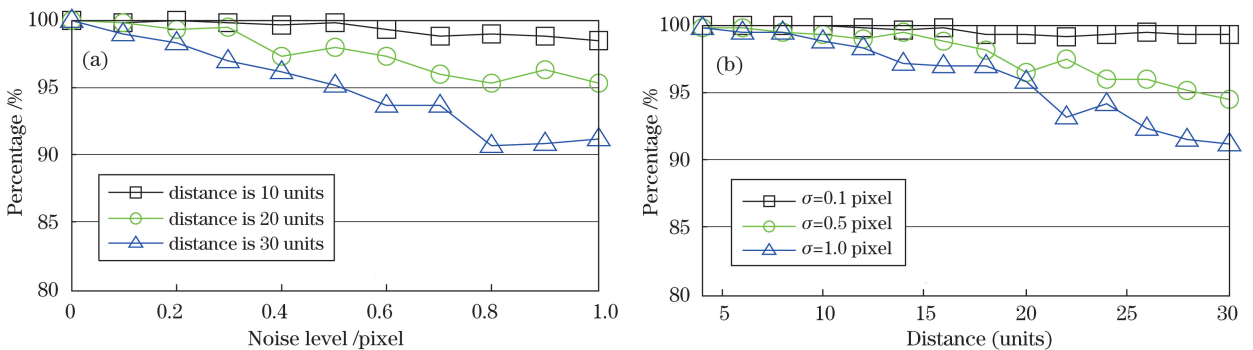


图 5 第一种角度约束。(a)成功率与噪声强度关系;(b)成功率与距离关系

Fig. 5 First type of angular constraint. (a) Success rate versus noise level; (b) success rate versus distance

实验二:基于角度约束二的二义性消除。

不同噪声强度下二义性消除方法的稳健性实验中,在相机前方随机选取两个位姿(与目标的距离相等),来进行一次二视图成像模拟。实验中目标到相机的距离分别取 10, 20 和 30 个单位长度(相应为圆半径的 10, 20 和 30 倍);实验中 σ 的取值范围为 0~1 pixel。

如图 6(a)所示,在三个距离下噪声强度为 0 时二义性消除成功率均为 100%,证明了本方法和计算过程的正确性;二义性消除成功率随噪声强度增加而降低,与噪声强度近似表现为线性关系;距离为 10 个单位长度时在不同噪声强度下二义性成功率均接近 100%;在噪声强度为 1 时,三个距离处的成功率分别为 96.7%,

85.5%和 77.7%。

不同距离下二义性消除方法的有效性实验中,半径的取值范围是 2~30 个单位长度(相应为圆半径的 2~30 倍), σ 分别取 0.1、0.5 和 1 pixel,其他参数取值方法保持不变。如图 6(b)所示,在三个噪声强度下,二义性消除成功率随距离增加而降低,与噪声强度均近似表现为线性关系;噪声强度为 0.1 时,不同距离下的二义性成功率均接近 100%;在距离为 30 个单位长度时,三个噪声强度下的成功率分别为 96.4%,85.4%和 73.2%。

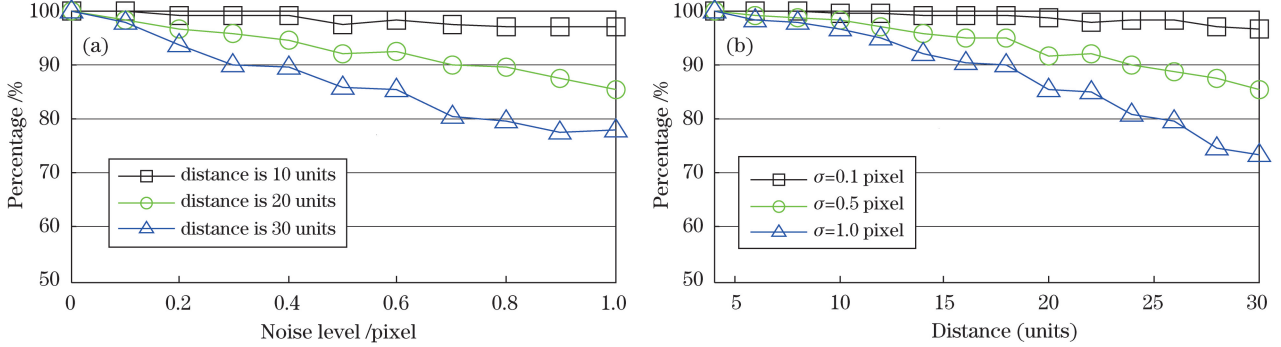


图 6 第二种角度约束。(a)成功率与噪声强度关系;(b)成功率与距离关系

Fig. 6 Second type of angular constraint. (a) Success rate versus noise level; (b) success rate versus distance

实验三:小基线情形下基于角度约束二的二义性消除。

由于工程应用中位姿测量多表现为小基线的情形^[14],对本文方法在小基线情形下的性能进行了测试。进行小基线二视图成像模拟时,第一个位姿随机选取,第二个位置为第一个位置加上一个大小为 0.5% 的随机偏差,姿态为在第一个姿态角的基础上加上大小为 $\Delta\theta_{\text{ang}}$ 的随机偏差,实验中 $\Delta\theta_{\text{ang}}$ 分别取 5° 和 10° ,其他参数取值方法保持不变,图 7 中“random”曲线为一般情形,作为小基线情形的对比。

不同噪声强度下二义性消除方法的稳健性实验中,距离设定为 20 个单位长度(相应为圆半径的 20 倍)。如图 7(a)所示, $\Delta\theta_{\text{ang}} = 10^\circ$ 时与一般情形下的二义性消除成功率基本相同,在噪声强度为 1 时成功率为 83.7%(一般情形下为 85.5%); $\Delta\theta_{\text{ang}} = 5^\circ$ 时比一般情形下的二义性消除成功率要稍微低一些,在噪声强度为 1 时成功率为 79.7%。

不同距离下二义性消除方法的有效性实验中,噪声强度取为 1 pixel。从图 7(b)中可以看到, $\Delta\theta_{\text{ang}} = 10^\circ$ 时与一般情形下的二义性消除成功率基本相同,在距离为 30 个单位长度时成功率为 85.1%(一般情形下为 85.4%); $\Delta\theta_{\text{ang}} = 5^\circ$ 时:距离为 15 个单位长度以内的二义性消除成功率与一般情形下的成功率接近,距离大于 15 个单位长度时比一般情形下成功率要稍微低一些,在距离为 30 个单位长度处的成功率为 76.3%。

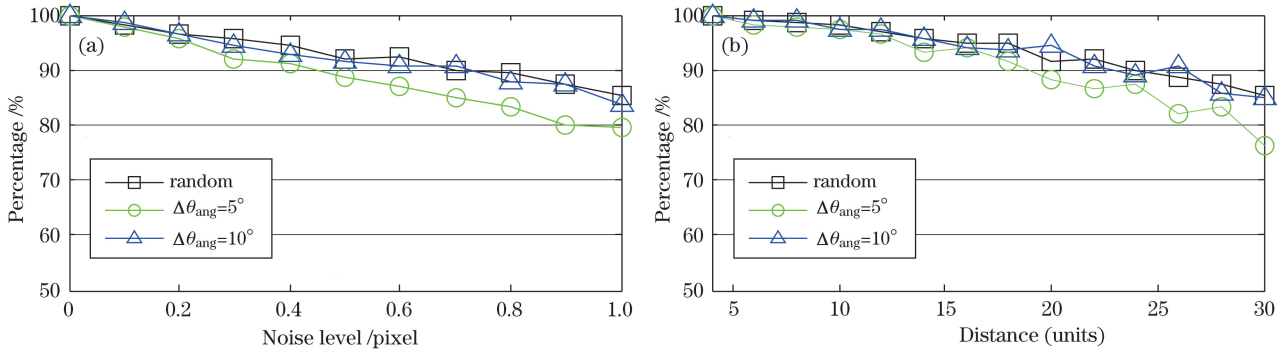


图 7 小基线情形。(a)成功率与噪声强度关系;(b)成功率与距离关系

Fig. 7 Small baseline situation. (a) Success rate versus noise level; (b) success rate versus distance

4.2 实物仿真实验结果

圆特征在航天器视觉导航领域有广泛的应用^[7,9,15],本文利用卫星模型设计了实物仿真实验,卫星模型含有提供圆特征的星箭对接环。相机内参数使用标定板标定,卫星模型星箭对接环的内环半径为 19.0 mm。

图 8(a1)、(b1)为两个不同位姿下的卫星模型图像,利用 Canny 边缘算子提取的边缘图像如图 8(a2)、(b2)所示,其中:红色曲线为边缘图像中利用椭圆检测^[16]方法提取的椭圆曲线,利用椭圆拟合方法^[17]拟合椭圆解算椭圆参数;卫星模型左侧提取的红绿蓝三条线段^[18]构成三线构型,绿色线段为垂直直线,红、蓝色线段为平行直线,其方向向量与星箭对接环的圆法向量方向平行。

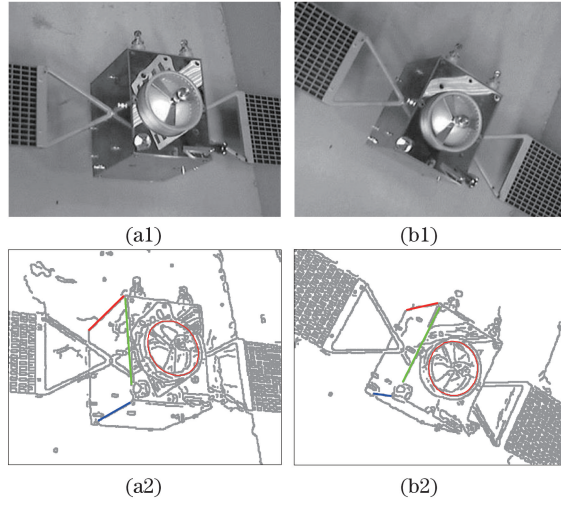


图 8 (a1)(b1)模型位姿 1,2; (a2)(b2)位姿 1,2 下的检测的椭圆与直线

Fig. 8 (a1)(b1)Model pose 1,2; (a2)(b2)ellipse and lines detected in pose 1,2

若将红绿蓝三线作为已知三线构型,由三线构型的定义可知,平行直线在相机系中的方向向量为 \mathbf{r}_2 ,与圆平面在相机系中法向量方向一致。卫星两个位姿下的测量结果如表 1 所示, $\mathbf{n}_{1,2}$ 为二义性的圆法向量, $\text{ang}(\mathbf{r}_2, \mathbf{n}_{1,2})$ 分别计算了不同位姿下 \mathbf{r}_2 与 $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ 的夹角,根据角度约束一,表 1 中 a,b 两个位姿下真实的法向量均为 \mathbf{n}_1 ,夹角分别为 8.0° 和 11.9° ,而虚假解对应的夹角分别为 79.9° 和 62.7° ,角度约束一成功消除二义性。

表 1 角度约束一测量结果

Table 1 Measurement results of angular constraint one

View	\mathbf{r}_2	$\mathbf{n}_{1,2}$	$\text{ang}(\mathbf{r}_2, \mathbf{n}_{1,2}) / (^\circ)$
a	$[0.514, -0.327, -0.793]^T$	$\mathbf{n}_1 = [0.391, -0.367, -0.844]^T$ $\mathbf{n}_2 = [-0.558, 0.379, -0.738]^T$	$\begin{pmatrix} 8.0 \\ 79.9 \end{pmatrix}$
b	$[0.575, 0.061, -0.816]^T$	$\mathbf{n}_1 = [0.414, -0.029, -0.910]^T$ $\mathbf{n}_2 = [-0.463, 0.065, -0.884]^T$	$\begin{pmatrix} 11.9 \\ 62.7 \end{pmatrix}$

若将红绿蓝三线作为未知三线构型,则视图 8(a2)、(b2)构成一组二视图,由匹配的三线构型可以求出二视图之间的相对旋转矩阵 \mathbf{R}_{rel} ;表 2 中 $\mathbf{n}_{1,2}$ 为视图(a2)中圆的二义性法向量, $\mathbf{n}_{3,4}$ 为视图 8(b2)中圆的二义性法向量;表中 $a_{i,j}$ 表示经旋转转化后的法向量 \mathbf{i}, \mathbf{j} 之间的夹角,表中夹角 $a_{1,3}$ 最小(4.6°),根据角度约束二, \mathbf{n}_1 为视图 8(a2)中圆的真实法向量, \mathbf{n}_3 为视图 8(b2)中圆的真实法向量,与角度约束一的结果一致,成功消除了二义性。

5 结 论

基于三线构型的姿态估计方法,提出了两种基于角度约束的圆位姿二义性消除方法:1)基于具有先验信息的三线构型,利用三线构型与相机系之间的姿态关系可以得到一个圆法向量的角度约束。2)对不具有先验信息的三线构型,基于二视图三线构型的相对姿态估计可以得到一个二视图圆法向量的角度约束。计算机仿真结果显示,在 10 倍圆半径距离内,或噪声强度小于 0.1 pixel 时基于两种角度约束的二义性消除方法的成功率都接近 100%,第二种角度约束在小基线二视图情形下依然具有很好的性能。实物仿真实验中两种角度约束方法均成功消除了圆位姿的二义性。在实际应用中,由单圆特征进行高精度位姿解算的距离范

表 2 角度约束二测量结果

Table 2 Measurement results of angular constraint two

View	n_1	n_2	n_3	n_4	$[a_{1,3}, a_{1,4}, a_{2,3}, a_{2,4}]$
a&b	$\begin{bmatrix} \mathbf{0.391} \\ -\mathbf{0.367} \\ -\mathbf{0.844} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.558 \\ 0.379 \\ -0.738 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \mathbf{0.414} \\ -\mathbf{0.029} \\ -\mathbf{0.910} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.463 \\ 0.065 \\ -0.884 \end{bmatrix}$	$[\mathbf{4.6}, 56.9, 70.0, 17.9]$

围内,圆特征和直线特征通常都能实现高精度、稳健性地提取,因此能保证较高的二义性消除成功率。此外实际中位姿解算通常为实验三研究的小基线场景,为实时连续的测量,相邻帧间位姿变化通常缓慢,因此通过多帧决策或多个三线特征来共同决策的方式能进一步提高二义性消除方法的可靠性。

参 考 文 献

- Wei Xinguo, Liu Tao, Liu Zhen. Three-dimensional measurement data registration based on planar circle target[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0215002.
魏新国, 刘涛, 刘震. 基于平面圆靶标的三维数据拼接[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0215002.
- Hou Junjie, Wei Xinguo, Sun Junhua. Calibration method for binocular vision based on matching synthetic images of concentric circles[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315003.
侯俊捷, 魏新国, 孙军华. 基于同心圆合成图像匹配的双目视觉标定[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315003.
- Guo Yanjie, Bai Fuzhong, Zhang Tieying, et al.. Ring object diameter measuring method based on radon transform and gray gravity algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 081501.
郭延杰, 白福忠, 张铁英, 等. 基于 Radon 变换与灰度重心法的环形目标直径测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 081501.
- Yin Jian, Li Ming. Errors measurement for rotation axis of five-axis machine tool based on laser tracker[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0408005.
殷建, 李明. 基于激光跟踪仪的五轴机床旋转轴误差测量[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408005.
- Safae-Rad R, Tchoukanov I, Smith K C, et al.. Three-dimensional location estimation of circular features for machine vision[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(5): 624-640.
- Shiu Y C, Ahmad S. 3D location of circular and spherical features by monocular model-based vision[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetic, 1989: 576-581.
- Shiu Y C, Huang C. Pose determination of circular cylinders using elliptical and side projections[C]. IEEE International Conference on Systems Engineering, 1993: 265-268.
- Wang G, Wu J, Ji Z. Single view based pose estimation from circle or parallel lines[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(7): 977-985.
- Miao Xikui, Zhu Feng, Ding Qinghai, et al.. Monocular vision pose measurement based on docking ring component[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412006.
苗锡奎, 朱枫, 丁庆海, 等. 基于星箭对接环部件的飞行器单目视觉位姿测量方法[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412006.
- Wei Zhenzhong, Zhao Zheng, Zhang Guangjun. Solution of duality in pose estimation of single circle using euclidean angular constraint[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 685-691.
魏振忠, 赵征, 张广军. 空间圆姿态识别二义性的角度约束消除[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 685-691.
- Zhang Lijun, Huang Xuexiang, Feng Weichun, et al.. Solution of duality in pose estimation of a single circle utilizing constraint angles reconstructed from motion[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0115002.
张李俊, 黄学祥, 冯渭春, 等. 运动重建约束角的圆位姿二义性消除方法[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0115002.
- Elqursh A, Elgammal A. Line-based relative pose estimation[C]. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE Conference on, 2011: 3049-3056.
- Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- Newcombe R A, Lovegrove S J, Davison A J. DTAM: Dense tracking and mapping in real-time[C]. IEEE International Conference on Computer Vision, 2011: 2320-2327.
- Liang Bin, Du Xiaodong, Li Cheng, et al.. Advances in space robot on-orbit servicing for non-cooperative spacecraft[J].

Robot, 2012, 34(2): 242-256.

梁 斌, 杜晓东, 李 成, 等. 空间机器人非合作航天器在轨服务研究进展[J]. 机器人, 2012, 34(2): 242-256.

- 16 Liu C, Hu W. Effective method for ellipse extraction and integration for spacecraft images [J]. Optical Engineering, 2013, 52(5): 057002.
- 17 Fitzgibbon A, Pilu M, Fisher R B. Direct least square fitting of ellipses [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(5): 476-480.
- 18 Von Gioi R G, Jakubowicz J, Morel J M, *et al.*. LSD: A line segment detector [J]. Image Processing on Line, 2012, 2: 35-55.