

文章编号 1004-924X(2017)01-0274-07

二维合作目标的单相机空间位姿测量方法

王向军*, 曹 雨, 周 凯

(天津大学 微光机电教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:针对空间交会对接的近距离位姿测量要求,提出了一种基于单目视觉的二维合作目标位姿解算算法。为方便空中移动平台的调整以满足特定的位姿关系,引入了一种新的姿态角定义方法,此方法定义的三个姿态角可以作为平台姿态调整的反馈量且不受旋转顺序的限制。平面模型相对于相机坐标系的三个姿态角和位置向量可通过平面单应矩阵直接导出。在测量实验中,算法基于 DSP 平台实现,合作目标由 4 个共面 LED 光源构成,测量值基准由高精度倾角传感器和全站仪获得。对空间位置变化范围为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$,姿态角变化范围为 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 的目标平面进行测量,结果表明,本算法可实现 0.88% 的相对位置定位误差和最大为 0.996° 的姿态角测量误差,且单帧算法的解算速度仅为 0.25 ms。

关键词:单目视觉;二维合作目标;位姿测量;空间交会对接

中图分类号: TB853.29 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0274

Methods of monocular pose measurement based on planar objects

WANG Xiang-jun*, CAO Yu, ZHOU Kai

(MOEMS Education Ministry Key Lab, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: xdocuxjw@vip.163.com

Abstract: A plane objects pose measurement algorithm based on monocular vision is proposed aiming at close-range pose measurement requirements in space rendezvous and docking. In order to facilitate the adjustment of the aerial mobile platform so as to satisfy the specific position relations, a new angle definition method is introduced, the three angles defined by which can be used as the feedback of the platform attitude adjustment and they are not restricted by the order of rotation. The three angles and position vectors of the plane model with respect to the camera coordinate system can be directly derived from the plane homography matrix. In the measurement experiment, the algorithm is implemented based on DSP platform, and the cooperative target is composed of 4 coplanar LED light sources, and the measuring datum is obtained by the high-precision inclination angle sensor and the total station instrument. Experimental results show that for the target surface measurement with spatial position change range at $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ and the angle ranging from -30 degrees to 30 degrees, this algorithm can achieve 0.88% relative positioning error and maximum 0.996° angle measurement error, and the single-frame computing time is only 0.25 ms.

Key words: monocular vision; plane objects; pose measurement; space rendezvous and docking

1 引言

单目视觉测量系统^[1-2]结构简单、测量视场大、实时性强且测量精度高,已广泛应用于空间交会对接^[3]、自动检测设备^[4]等航天航空领域。单目测量系统利用单相机成像,根据成像模型建立空间目标点与对应像点之间的映射关系,进而解算目标点相对于相机的位置和姿态信息。目前,单目视觉测量系统主要分为基于合作目标和非合作目标^[4]两种。其中,合作目标位姿测量中目标特征点之间的空间约束关系可控,这虽然在一定程度上限制了应用范围,但是降低了特征提取难度、提高了提取精度,并减小了位姿解算的复杂度。

在单目视觉位姿测量中,已知各目标点间的相对位置关系,根据目标点的图像坐标和相机成像模型解算目标相对于相机的位姿问题,是典型的 PNP 问题,最早由 Fischler^[5] 等于 1981 年提出。而本文中测量对象为二维合作目标,因此需要解决的是平面 PNP 问题。目前,平面 PNP 问题的求解分为线性算法和非线性算法两种。其中线性算法计算代价小,速度快,但精度一般不高,如 M. A. Abidi^[6] 提出采用四面体体积法用于求解平面四边形目标的位姿;Yubin Hung^[7] 提出的平面四点位姿的线性求解方法等。相对线性算法来说,非线性算法精度较高,但一般需要迭代,计算量较大,且存在稳定性问题。典型的算法有 DENIS OBERKAMPF^[8] 提出的 POSIT 算法;Gerald Schweighofer^[9] 提出的平面目标位姿估计算法(SP)等。值得注意的是,采用 POSIT 算法和 SP 算法求解平面目标的位姿一般会得到两个局部最优解。另外,通用的 PNP 求解算法也可用于解决平面 PNP 问题,如 Lepetit^[10] 提出的 EPnP 算法,Lu^[11] 提出的正交迭代算法等。

根据应用需求,本文提出了一种针对平面合作目标的简易单目位姿测量方法。本文方法中目标平面的位姿信息可根据平面单应矩阵直接得到,计算过程简单,运算代价较小。另外,本文引

入了一种新的姿态角定义,相比于旋转矩阵定义的 3 个姿态角,本文所给出的姿态角没有旋转顺序限制,作为平台位姿调整的反馈量时更加方便。

2 单相机位姿解算原理

2.1 成像模型

如图 1 中, O 为相机光心。设靶标盘的 4 个 LED 光源所确定的平面为 π_2 ,焦距归一化像平面为 π_1 , π_1 与 π_2 上的坐标系设置如图 2 所示。根据透视成像模型有, π_1 平面上的点与 π_2 平面上的点存在一一对应的关系, π_1 到 π_2 的射影变换可表示为:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}\mathbf{x}, \quad (1)$$

其中: \mathbf{x} 和 \mathbf{x}' 为三维向量,分别是 π_1 和 π_2 上的点的齐次表示。 \mathbf{H} 为透视变换矩阵。若已知 LED 在 π_2 中的 4 个坐标和在 π_1 中对应的成像坐标,则 \mathbf{H} 可由式(1)线性解出^[12]。

令:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: \mathbf{H} 参数是由 π_1 到 π_2 的旋转和平移向量组成的,可由 4 个 LED 靶标点的图像坐标及其对应靶标坐标系坐标求得。

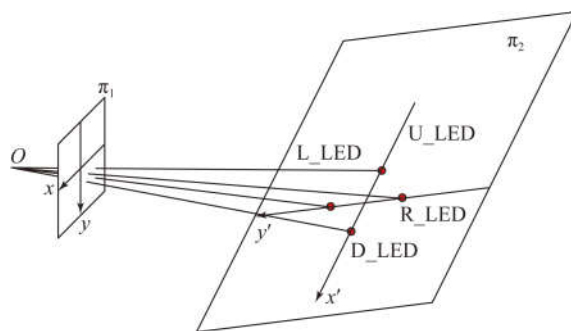


图 1 四共面点透视成像模型

Fig. 1 Perspective imaging model of four coplanar points

2.2 姿态角定义

在本文中,相机相对于靶标平面的 3 个姿态角的定义可由图 2 给出。

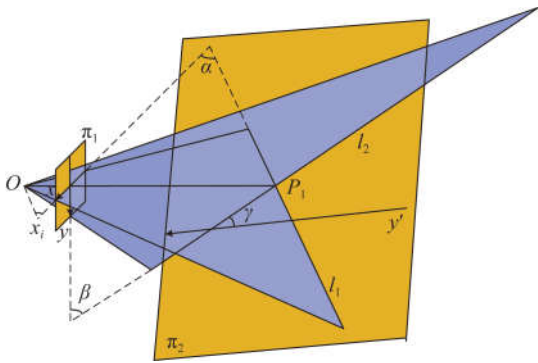


图 2 姿态角定义

Fig. 2 Attitude angle definition

根据透视成像模型可知, π_1 中的 x 轴被投影到目标平面中直线 l_1 上, π_1 中的 y 轴被投影到目标平面中的直线 l_2 上。很显然 x 轴与 l_1 共面, y 轴与 l_2 共面。定义 x 轴与 l_1 的夹角 α 为偏航角, y 轴与 l_2 的夹角 β 为俯仰角, l_2 与目标平面坐标系的 y' 轴的夹角 γ 为滚转角。上述方法定义的 3 个姿态角满足如下几个性质: (1) 3 个角度值不受相机平移的影响; (2) 3 个角没有旋转顺序的限制; (3) 3 个角度值可由透视变换矩阵直接得到 (2.3 中将给出具体方法) (4) 当 $\alpha = \beta = 0$ 时, 像平面与目标平面平行; (5) 当 $\alpha = \beta = \gamma = 0$ 时, 相机与目标平面之间仅存在平移变换; (6) α, β, γ 与由旋转矩阵定义的 3 个角度 $\text{rot}X, \text{rot}Y, \text{rot}Z$ 之间存在确定的对应关系^[12], 当 α, β, γ 已知时, 可解得 $\text{rot}X, \text{rot}Y, \text{rot}Z$, 反之亦然。限于篇幅, 本文直接给出结论: 设目标平面坐标系相对于像机坐标系的旋转顺序为: 先绕 X 轴旋转 $\text{rot}X$, 再绕 Y 轴旋转 $\text{rot}Y$, 再绕 Z 轴旋转 $\text{rot}Z$, 则有:

$$\begin{cases} \text{rot}X = \beta \\ \text{rot}Y = \arctan[-\cos(\beta)\tan(\alpha)]. \\ \text{rot}Z = \gamma \end{cases}$$

2.3 姿态角解算

设 x 轴上坐标为 $(x_i, 0, 1)^T$ (齐次坐标) 的点 X_i 被投影到直线 l_1 上的无穷远点, 则这个点和光心 O 的连线与 l_1 平行。 x_i 可由式(3)解算:

$$\begin{bmatrix} h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (3)$$

从而:

$$x_i = -\frac{h_{33}}{h_{31}}. \quad (4)$$

由于点 X_i , 光心 O 和像平面主点构成直角三角形, α 可以表示为:

$$\alpha = \arctan \frac{1}{x_i} = \arctan \left[-\frac{h_{31}}{h_{33}} \right]. \quad (5)$$

依据同样的原理, 可得到 y 轴与直线 l_2 的夹角 β 的表达式:

$$\beta = \arctan \left[-\frac{h_{32}}{h_{33}} \right]. \quad (6)$$

π_1 中的 y 轴可以表示为齐次形式:

$$\mathbf{y} = (1 \ 0 \ 0)^T. \quad (7)$$

它在 π_2 中的投影直线 l_2 可表示为:

$$l_2 = \mathbf{H}^{-T} \mathbf{y}. \quad (8)$$

令:

$$\mathbf{H}^{-T} = \begin{bmatrix} h'_{11} & h'_{12} & h'_{13} \\ h'_{21} & h'_{22} & h'_{23} \\ h'_{31} & h'_{32} & h'_{33} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

则:

$$l_2 = (h'_{11} \ h'_{21} \ h'_{31})^T. \quad (10)$$

由此可得到滚转角 γ 的表达式:

$$\gamma = \text{arccot} \left[-\frac{h'_{11}}{h'_{21}} \right]. \quad (11)$$

2.4 位置解算

下面给出目标平面 π_2 中坐标系原点 o' 在相机坐标系下的坐标求解方法。

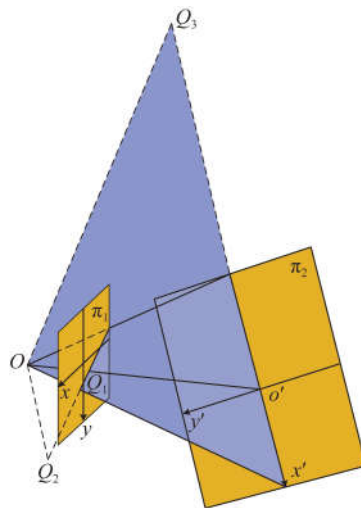


图 3 位置解算

Fig. 3 Location solver

如图 3, o' 在 π_1 中的投影点为 Q_1 , 虚线 OQ_2 平行于 x' 轴, 虚线 OQ_3 平行于 Q_1Q_2 , 且 O, o', Q_1, Q_2, Q_3 共面。易证 $\triangle OQ_1Q_2 \sim \triangle O'o'Q_3$ 。 Q_1

在 π_1 中的坐标可由下式求得:

$$Q_1 = H^{-1} o', \quad (12)$$

式中: $o' = (0, 0, 1)^T$, 其是 o' 在 π_2 中的齐次坐标。

Q_2 点与 x' 轴上的无穷远点相对应, 其坐标为:

$$Q_2 = H^{-1} [1 \ 0 \ 0]^T. \quad (13)$$

Q_3 点与直线 $Q_1 Q_2$ 上的无穷远点相对应, 设 Q_3 点的齐次坐标为 $(x'_i, 0, 1)^T$, 它可由下式求得:

$$H_{(3)}^{-1} \begin{bmatrix} x'_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (14)$$

其中 $H_{(3)}^{-1}$ 为 H^{-1} 的第 3 行。

由于 π_1 为归一化焦距的成像面, 当得到 Q_1 和 Q_2 在 π_1 中的坐标后, Q_1 距光心 O 的距离 d_{OQ_1} , 以及 Q_2 距光心 O 的距离 d_{OQ_2} , 即可由 (14) 式求得:

$$\begin{cases} d_{OQ_1} = \sqrt{1 + \|q_1\|^2} \\ d_{OQ_2} = \sqrt{1 + \|q_2\|^2} \end{cases}, \quad (15)$$

其中 q_1 和 q_2 分别是 Q_1 和 Q_2 的非齐次坐标。根据前面所述的三角形相似关系, 易得:

$$d_{O'} = |x'_i| \frac{d_{OQ_1}}{d_{OQ_2}}, \quad (16)$$

其中 $d_{O'}$ 是目标平面坐标原点到相机光心的距离。进而目标平面坐标原点在相机坐标系中的三维坐标也可求出:

$$\begin{cases} Z_c = d_{O'} / d_{OQ_1} \\ X_c = Z_c q_1(1) \\ Y_c = Z_c q_1(2) \end{cases} \quad (17)$$

3 位姿测量系统

本算法基于的测量系统示意图如图 4 所示, 图 5 为仿真验证实验中使用的二维靶标, 图 6 是系统采集靶标图像后经过图像处理获得的图像。靶标盘上固定有 4 个共面 LED 灯标志点, R_LED, L_LED, U_LED, D_LED, 定义靶标坐标系 $O_s-X_s Y_s Z_s$ 的中心 O_s 为 4 个 LED 所在正方形的对角线交点, 即本文算法的目标解算点。 X_s 、 Y_s 轴方向如图 4 所示, Z_s 轴垂直于 LED 标志点所在平面并指向远离相机的方向。本系统中, 相

机模块的视场角为 53° , 4 个 LED 目标点的共面误差及位置分布误差对算法的解算精度的影响可以忽略。

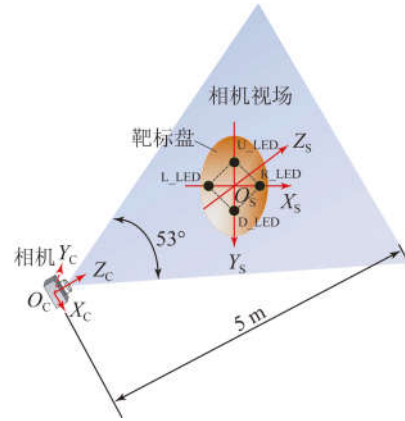


图 4 测量系统示意图

Fig. 4 Measurement system diagram

4 位姿测量实验与分析

搭建以 C64x+ 系列 DSP—DM6437 为核心的单目图像采集处理系统, 采集靶标图像并提取标志点, 利用上位机进行目标点位姿解算, 相机视频源分辨率为 960×960 。其中, 靶标盘的 4 个 LED 标志点所在正方形的对角线长度为 280 mm。测量系统的 Z 向测量范围为 $0 \sim 5$ m, 本算法的应用要求为位置测量精度达 1%, 姿态测量精度为 1° , 由于装置限制, 本文只对横滚角、俯仰角两个角度做结果验证, 并将解算结果与 Fischler^[5] 提出的 P3P 算法解算结果做对比。

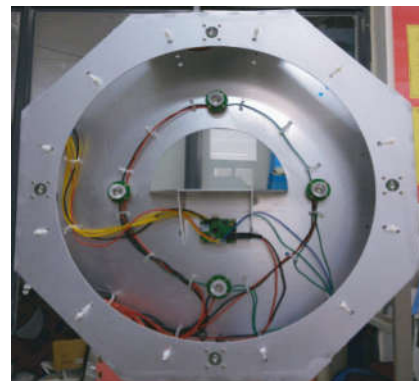


图 5 二维仿真靶标

Fig. 5 Two-dimensional emulation target



图 6 图像处理效果图

Fig. 6 Effect diagram of image processing

表 1 相机标定结果

Tab. 1 Camera calibration results

f_c /像素		c_c /像素		k_{c1}	k_{c2}
x	y	x	y		
1 642.097	1 642.059	600.570	469.648	-0.431	0.262

首先,利用 matlab 工具箱 toolbox 对 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor)测量模组进行标定,获得标定结果如表 1 所示。其中, f_c 是焦距,从 x, y 两个方向标定, c_c 是主点坐标, k_{c1} 、 k_{c2} 分别是一次、二次畸变参数。

4.1 姿态角实验

以精度为 0.01° 的 LE-30 倾角仪作为横滚角、俯仰角的角度测量标准量。固定相机位置,Z 在 1,2,3,4 m 处分别选取一个位置进行横滚角、俯仰角的实时测量实验,3 个角度的变化范围为 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 。其中,测量滚转角时,保持俯仰、偏航角在 0° 附近基本不变;测量俯仰角时,保持滚转角、偏航角在 0° 附近基本不变。

图 7,图 8 分别是本文算法以及 Fischler^[5] P3P 算法解算的横滚角和俯仰角的测量误差绝对值的分布图, x 轴是实时测量角度, y 轴是各角度测量值相对于倾角传感器输出值的误差绝对值(每个角度的测量误差值均是 4 个位置测量的对应角度值的误差平均值)。表 2 是横滚角和俯仰角的测量误差平均值。由图可知,相对于 Fischler^[5] 的 P3P 算法,本文算法的姿态角实时解算误差较小,且误差绝对值均在 1° 以下。

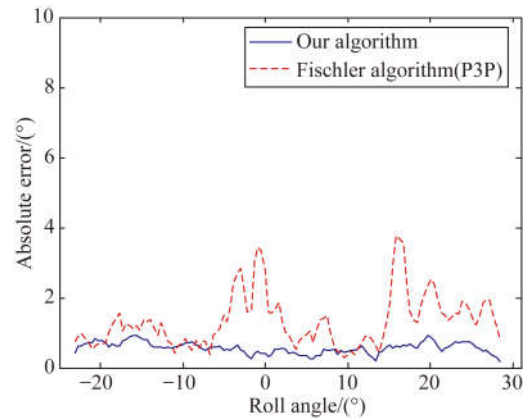


图 7 横滚角测量误差图

Fig. 7 Roll angle error

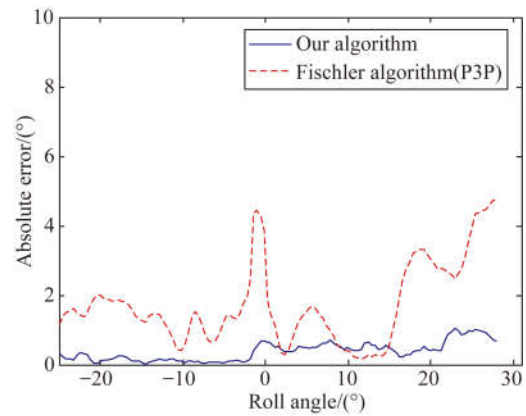


图 8 俯仰角测量误差图

Fig. 8 Pitching angle error

表 2 横滚角、俯仰角测量误差平均值

Tab. 2 Average errors of roll angle and pitch angle

	横滚角误差平均值	俯仰角误差平均值
本文算法	0.568	0.386
Fischler(P3P)	1.330	1.812

4.2 位置测量实验

本文利用相对距离的误差判定算法的位置解算精度,以精度为 $2+2$ ppm 的 NTS-360R_M 全站仪测量的距离为参考值,并与 Fischler^[5] 的 P3P 位置解算算法进行对比。固定相机位置,在测量范围内随机选取 32 个待测点,以点 $O_1(-222.1, -144.7, 3 374.5)$ (单位:mm) 作为距离测量的基准点,计算 32 个测量点与基准点的距离,与全站仪的测量距离做对比,实验测量的绝对误差分布如图 9 所示。其中,基于 Fischler^[5] 算法的位置误差绝对值的平均值为 15.6 mm,本文算法位置误差

绝对值平均值仅为 13.7 mm。结果显示本文算法的位置解算精度高于 Fischler 的 P3P 算法。

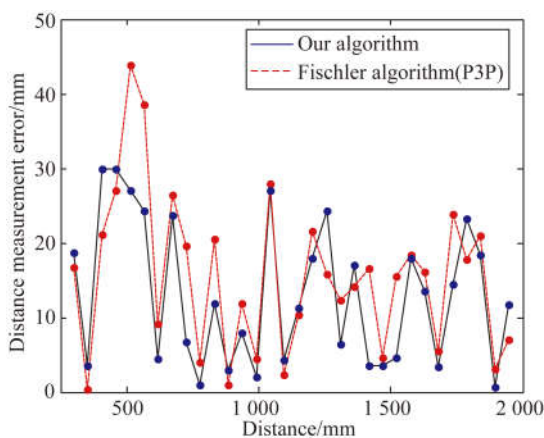


图 9 距离测量误差图

Fig. 9 Measurement error for distance

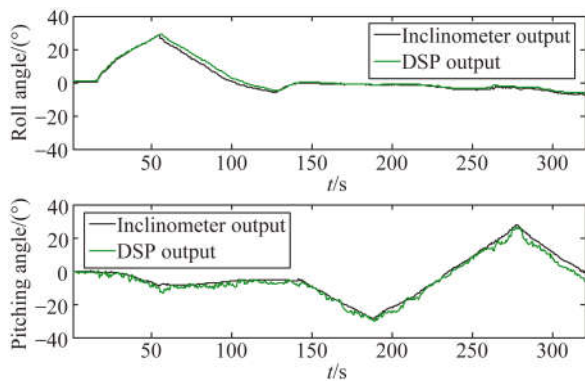


图 10 实时角度测量曲线

Fig. 10 Real-time measurement of the angle

参考文献:

- [1] 赵连军,刘恩海,张文明,等. 单目三点位置测量精度分析[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1190-1197. ZHAO L J, LIU E H, ZHANG W M, et al.. Analysis of position estimation precision by cooperative target with three feature points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1190-1197. (in Chinese)
- [2] 夏军营,徐小泉,熊九龙. 利用平行透视投影模型的位姿迭代估计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1342-1349. XIA J Y, XU X Q, XIONG J L. Iterative pose estimation using paraperspective camera model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1342-1349. (in Chinese)
- [3] 张铁毅,薛建平,孙超姣,等. 航天器空间对接位置视觉测量方法[J]. 飞行力学, 2016, 34(1): 68-71. ZHANG T Y, XUE J P, SUN CH J, et al.. A vi-

4.3 算法解算速度

本文算法计算过程简单,运算代价较小。基于 DSP 平台的 LED 标志点提取及目标点位姿解算可实现 35 帧率的逐帧实时解算,其中算法解算时间仅为 0.25 ms,图 10 是利用本测量系统对靶标在 $Z=3$ m 位置的实时测量角度的跟踪曲线。

5 结 论

针对空间交会对接的近距离测量,提出了基于二维合作目标的单相机视觉位姿解算算法。根据单目相机成像模型,人为固定 4 个靶标标志点的相对位置,并利用靶标坐标系及相机坐标系之间的映射关系解算目标点相对于相机的位置和姿态信息,基于 DSP 平台完成相机图像采集、图像预处理、位姿解算等过程。该方法计算过程简单,运算代价较小,一定程度上提高了系统的有效性。经过实验验证,本文算法的解算精度高于 Fischler^[5]的 P3P 算法,其中,姿态角解算精度为 0.996° ,位置坐标解算相对误差为 0.88%;基于 DSP 实现的算法速度较快,一帧图像的解算时间仅为 0.25 ms,满足测量系统逐帧实时的结果输出要求。

sion-based location method for spacecraft docking [J].

Flight Dynamics, 2016, 34(1): 68-71. (in Chinese)

- [4] 张劲锋,蔡伟,孙承启. 基于单目视觉的空间非合作目标相对运动参数估计[J]. 空间控制技术与应用, 2010, 36(2): 31-35.

ZHANG J F, CAI W, SUN CH Q. Monocular vision-based relative motion parameter estimation for non-cooperative objects in space [J]. *Aerospace Control and Application*, 2010, 36(2): 31-35. (in Chinese)

- [5] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395.

- [6] ABIDI M A, CHANDRA T. A new efficient and direct solution for pose estimation using quadrangular targets: algorithm and evaluation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine In-*

- telligence*, 1995, 17(5): 534-538.
- [7] HUNG Y B, YE H P SH, HARWOOD D. Passive ranging to known planar point sets [C]. *IEEE*, 1985: 80-85.
- [8] DENIS O, DANIEL F D, LARRY S D. Iterative pose estimation using coplanar feature points [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1996, 63(3):495-511.
- [9] GERALD S, AXEL P. Robust pose estimation from a planar target [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(12): 2024-2030.
- [10] VINCENT L, FRANCESC M N, PASCAL F. EPnP: an accurate $O(n)$ solution to the PnP problem [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(2): 155-166.
- [11] LU CH P, GREGORY D H, MJOLSNESS E. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(6): 610-622.
- [12] RICHARD H. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2003.

作者简介:



王向军(1955—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,主要从事精密测试技术与仪器、光电探测与传感技术、影像与视觉测量方面的研究。
E-mail: xdocuxjw@vip.163.com



曹雨(1991—),女,河北保定人,硕士,2014年于天津大学获得学士学位,主要从事图像处理及视觉测量方面的研究。E-mail: caoyu0312@tju.edu.cn

(本栏目编辑:李自乐)