

大视距视觉位姿测量系统的设计与建模

周凯*, 王向军, 王仲, 万子敬

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 提出一种分段式位姿测量方法和系统的实现方案。利用柱面镜线阵相机的成像方程为远段图像测量子系统构建线性三维坐标测量模型, 并利用最小化物方空间误差方法标定各线阵相机的外部参数。针对近段图像测量子系统的单目位姿测量问题, 提出一种基于线性初始解的迭代位姿优化方法。实验结果表明, 在 5~35 m 的视距变化范围内, 系统可实现小于 0.5% 的相对位置测量精度和低于 40 mm 的方均根误差; 在 5 m 以内的视距范围内, 可实现小于 1° 的姿态测量误差, 能够满足大视距位姿测量的任务需求。

关键词 机器视觉; 位姿测量; 单目视觉; 合作靶标

中图分类号 TP391; TP274.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.111504

Design and Modeling of Visual Pose Measuring System with Large Vision Range

Zhou Kai*, Wang Xiangjun, Wang Zhong, Wan Zijing

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract In this study, we presented the scheme of a segmented pose measuring system as well as its implementation. Further, we presented a linear three-dimensional coordinate measurement model for a far-segmented measuring subsystem by applying an imaging equation of the line cameras equipped with cylindrical lenses and calibrated the extrinsic parameters of each line camera by minimizing the object space errors. We proposed an iterative pose optimization method based on a linear initial solution to solve the problems related to monocular pose determination for a near-segmented measuring subsystem. The experimental results demonstrate that the proposed system can achieve a relative position measurement accuracy of less than 0.5% and a root mean square error of less than 40 mm in the vision range of 5-35 m. Moreover, the system can realize an attitude tracking accuracy of less than 1° in the vision range within 5 m, satisfying the large vision range requirement of pose measurement.

Key words machine vision; pose measurement; monocular vision; cooperative target

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.6910

1 引言

运动目标的实时位姿测量技术是航空航天测控领域中的一项关键技术, 在空间交会对接^[1-2]、无人机自主着陆/舰^[3]以及无人机自动加油对接^[4-5]等复杂技术的实现过程中发挥重要作用。无论是航天器空间交会对接中的引导追踪, 还是无人机自动加油对接中的自主导航, 控制系统都需要在较大的空间

范围内实时获取目标平台相对于追踪平台的位置和姿态, 从而为导航提供依据。基于光学成像的视觉位姿测量方法是实现这一过程的有效手段。

视觉测量系统应用于相对自主导航时, 首先需要解决追踪平台由远及近接近目标平台的过程中, 如何精确估计目标平台相对于追踪平台的位置和姿态。从导航任务开始到结束, 两个移动平台之间的距离一般要由几十米变化到零, 该阶段要求测量系

收稿日期: 2018-11-30; 修回日期: 2018-12-27; 录用日期: 2019-01-07

基金项目: 天津大学自主创新基金项目(C02014021)

* E-mail: d_zhou@tju.edu.cn

统在较大的视距范围内保持位姿跟踪能力。基于面阵相机的双目立体视觉测量系统在大空间远距离定位应用中具有较好的表现^[6-8],但是远距离测量需要较高的分辨率,而面阵图像处理和匹配算法需要消耗大量时间,这限制了系统的测量速度和实时性,同时,受两个相机公共视场角的限制,在目标距离很近时容易进入测量盲区;不同于双目视觉测量系统,单目视觉测量系统在近距离的位姿测量中具有较大优势^[9-11],其测量模型需要目标形状或尺寸等额外信息作为附加条件,但限于图像分辨率和目标尺寸,单目视觉系统有效作用距离较短^[12-13],当距离目标较远时,很难实现精确定位测量。

为了满足实际测量中对距离范围和测量精度的要求,本文提出一种分段式组合位姿测量方法及系统实现方案。当测量距离较远时,对传感器的分辨率要求较高,鉴于高分辨率的面阵图像传感器数据量较大,图像处理速度受到很大的限制,而线阵图像传感器只在一维方向上成像,能够在保证高分辨率的同时实现很高的图像传输和处理速度,因此本文采用线阵相机代替面阵相机实现远段目标定位,对应的远段图像测量子系统由两组正交成像的线阵相机构成;当测量距离较近时,目标超出了远段子系统各相机的重叠视场,进入“近段”测量范围,该范围内要求位姿测量精度较高,此时借助基于面阵相机的单目视觉方法的优势,使用单个面阵相机实时测量目标的位置和姿态。实验结果表明,所设计的分段式位姿测量系统能够满足大视距位姿测量的任务需求。

2 分段式位姿测量方法与系统组成

分段式位姿测量方法主要针对大视距位姿测量的应用需求而设计,具体的系统实现方案如图1所示。该系统包含远段图像测量子系统和近段图像测量子系统两大部分。其中远段子系统由4个线阵相机构成,分为左右两组(左、右目相机组),对称地分布于测量系统的左右两端,用于实现视距变化范围为5~35 m时的高分辨率位置跟踪;近段子系统由一个置于测量系统中央的面阵相机组成,用于实现视距小于5 m时的精确位姿测量。

目标平台上的合作光源包含8个近红外发光二极管(LED),分为内外两环,当两个移动平台距离大于5 m时,外环的4个大功率LED处于工作状态,为远段测量提供合作标志;当距离小于5 m时,外环LED熄灭,内环的4个中等功率LED点亮,为近段测量提供合作标志。

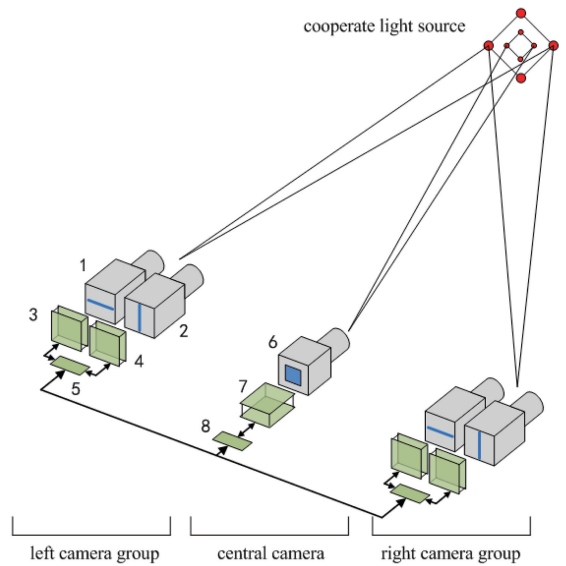


图1 系统结构

Fig. 1 Structure of system

图1中1和2为两个正交放置的线阵相机,分别包含柱面镜头和分辨率为2048 pixel×1 pixel的线阵电荷耦合器件(LCCD)传感器芯片,用于在远段测量中获取LED光源的高分辨率图像;3和4分别对应1和2的图像处理电路,基于数字信号处理器(DSP)和现场可编程门阵列(FPGA)架构,用于实现线阵图像的实时处理和LED图像坐标检测;5为通信和同步控制电路,用于同步图像采集和传输LED的图像坐标;6为一个包含球面镜头和分辨率为720 pixel的互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器芯片的面阵相机,用于近段测量中获取LED光源图像;7为对应面阵相机的图像处理电路,基于德州仪器(TI)高性能DSP芯片设计,用于实时处理面阵图像并检测LED图像坐标,同时负责运行近段和远段的位姿解算程序;6和7共同构成近段单目图像测量子系统;8为整个系统通信链路的主控制器,负责各单元之间传输图像坐标数据,并定时向各模块发送图像采集同步信号。

图1中1~5共同构成了远段图像测量子系统的左目相机组,右目相机组的组成和结构与左目相机组完全相同。每个相机组中两个线阵相机镜头朝向相互平行,成像方向相互垂直,其结构与文献[14]和[15]中的正交柱面成像系统有相似之处,但后者两个线阵CCD通过分光棱镜共享同一光路,而远段子系统基于大范围目标跟踪的应用需求,每个相机组中两个线阵CCD相机在机械结构上相互关联,但成像光路相互独立,相比于共光路的结构,每个线阵

CCD 获取的光能量更多,对远距离目标的探测能力更强。系统为每个线阵 CCD 单独配置图像处理电路,在远段测量过程中能够实现多 DSP 并行图像处理,可以增强系统的实时性。

现要求位姿测量系统的观测视场为 50° ,测量距离范围不小于 35 m。整个系统的视场分布如图 2 所示,远段的 4 个线阵相机和近段的面阵相机的镜头都具有 50° 的水平和竖直视场角。所有相机并排放置,镜头朝向相互平行。图 2 中黄色扇形区域和蓝色三角形区域分别为远段子系统和近段子系统的测量视场范围,两个区域有一定重叠,可保证整个测量过程的连续性。系统核心模块实物如图 3 和图 4 所示。

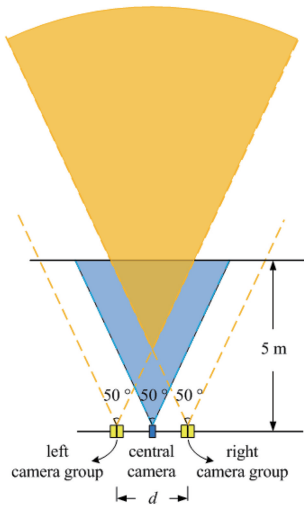


图 2 视场分布

Fig. 2 Distribution of field of view

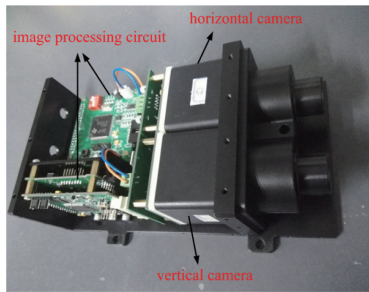


图 3 远段测量左目相机组

Fig. 3 Left camera group for far-segmented measurement

3 远段图像测量子系统的测量模型

3.1 定位测量模型

远段图像测量子系统利用 4 个线阵 CCD 相机实现目标定位。所有相机均采用柱面镜头,镜头在几何模型上可等效为一个柱面透镜,如图 5 所示。线阵

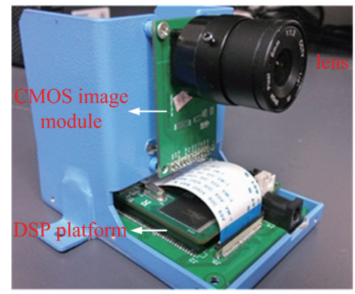


图 4 近段测量面阵相机

Fig. 4 Plane camera for near-segmented measurement

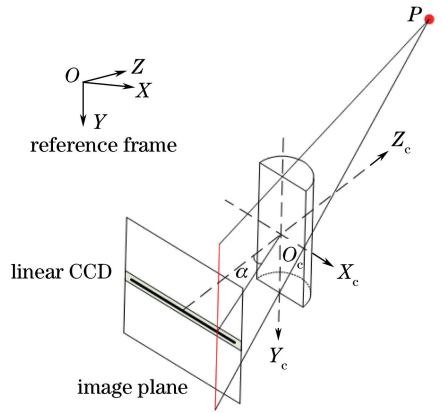


图 5 线阵相机的等效成像模型

Fig. 5 Equivalent imaging model of line camera

CCD 传感器位于透镜后方,其所在直线的方向与柱面透镜的轴线垂直。目标光源 P 发出的光经过柱面透镜会聚得到一条直线光斑,该光斑与线阵 CCD 垂直相交,交点即为目标在线阵 CCD 上的成像位置。

在图 5 中, $OXYZ$ 、 $O_cX_cY_cZ_c$ 分别为世界坐标系和线阵相机坐标系, α 为目标光源 P 和 Y_c 轴确定的视平面与 Z_c 轴的夹角。设 P 在世界坐标系中的坐标为 $(X, Y, Z)^T$,在线阵相机上投影的归一化坐标为 $x_n = \tan \alpha$,则成像方程可表示为

$$\rho \begin{bmatrix} x_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 分别为世界坐标系到线阵相机坐标系的旋转矩阵和平移向量。远段子系统线阵相机的内参数和畸变利用文献[16]中的方法进行校准,为已知量,因此 P 的归一化图像坐标 x_n 可由其线阵 CCD 上的像素坐标转化得到。展开(1)式可得

$$(x_n r_{31} - r_{11}) X + (x_n r_{32} - r_{12}) Y + (x_n r_{33} - r_{13}) Z + x_n t_3 - t_1 = 0, \quad (2)$$

式中: $r_{11} \sim r_{33}$ 为旋转矩阵 \mathbf{R} 的对应元素; t_1 和 t_3 为

平移向量 t 的第 1 个和第 3 个元素。(2)式为一个平面方程,当 R 和 t 已知时,其提供了一个对 P 点位置的线性约束。将远段左目相机组的两个线阵相

机分别命名为 1L 和 1R,右目相机组的两个线阵相机分别命名为 2L 和 2R,每个线阵相机可提供一个平面方程,联立后可得

$$\begin{bmatrix} x_n^{1L} r_{31}^{1L} - r_{11}^{1L} & x_n^{1L} r_{32}^{1L} - r_{12}^{1L} & x_n^{1L} r_{33}^{1L} - r_{13}^{1L} \\ x_n^{1R} r_{31}^{1R} - r_{11}^{1R} & x_n^{1R} r_{32}^{1R} - r_{12}^{1R} & x_n^{1R} r_{33}^{1R} - r_{13}^{1R} \\ x_n^{2L} r_{31}^{2L} - r_{11}^{2L} & x_n^{2L} r_{32}^{2L} - r_{12}^{2L} & x_n^{2L} r_{33}^{2L} - r_{13}^{2L} \\ x_n^{2R} r_{31}^{2R} - r_{11}^{2R} & x_n^{2R} r_{32}^{2R} - r_{12}^{2R} & x_n^{2R} r_{33}^{2R} - r_{13}^{2R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1^{1L} - x_n^{1L} t_3^{1L} \\ t_1^{1R} - x_n^{1R} t_3^{1R} \\ t_1^{2L} - x_n^{2L} t_3^{2L} \\ t_1^{2R} - x_n^{2R} t_3^{2R} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

(3)式为一个超限定方程组,可简化为

$$Ax = b, \quad (4)$$

式中: $x = (X, Y, Z)^T$ 。在理想情况下 A 的秩为 3,方程组具有唯一解,且利用方程组中任意 3 个方程均能得到唯一正确解。但在实际测量过程中,成像模型偏差、系统安装误差、标定误差以及目标点图像坐标的提取误差等都会将噪声引入测量模型,导致 $\det(A) > 3$,从而使(4)式无解。此时可通过最小化 $\|Ax - b\|$ 求取方程组的近似解。基于线性最小二乘法,满足 $\min \|Ax - b\|$ 的 x 的解可以表示为

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b. \quad (5)$$

远段图像测量子系统的定位模型如图 6 所示。相比于传统的三线阵相机定位系统^[17-18],远段子系统包含 4 个线阵相机,其定位方程比前者多一个冗余约束,在成像过程中噪声水平一致的条件下,具有冗余约束的方程组有助于减少测量误差^[19]。

上述测量模型针对单目标点定位而设计,而与远段测量过程配合的是合作目标外环上的 4 个 LED。为了区分不同的 LED,在远段子系统工作时,由合作目标上的控制电路控制 4 个 LED 以不同的相位频闪,并保证在每次图像采集时只有一个 LED 处于点亮状态,该方法依托于线阵 CCD 的高帧率特点,能够解决多目标点匹配问题,且在部分

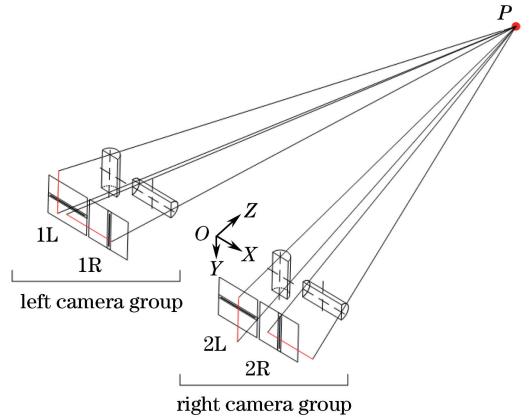


图 6 四线阵相机定位模型

Fig. 6 Positioning model of 4-line-camera

LED 被遮挡的特殊情况下,剩余 LED 仍能获得准确的位置测量结果。

3.2 外参数标定方法

组装完成后远段子系统中各相机的外参数未知,因此在测量前需要对 4 个相机的外参数 (R^{1L}, t^{1L}) 、 (R^{1R}, t^{1R}) 、 (R^{2L}, t^{2L}) 和 (R^{2R}, t^{2R}) 进行标定。标定可视为测量的逆过程,对于单个线阵相机,已知 N 个空间点的三维坐标及其在线阵相机中投影的归一化坐标,求解世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵 R 和平移向量 t 。对于每个空间点都可建立如(2)式所示的平面方程,联立方程组,可得

$$\begin{bmatrix} X^{(1)} & Y^{(1)} & Z^{(1)} & -x_n^{(1)} X^{(1)} & -x_n^{(1)} Y^{(1)} & -x_n^{(1)} Z^{(1)} & 1 & -x_n^{(1)} \\ X^{(2)} & Y^{(2)} & Z^{(2)} & -x_n^{(2)} X^{(2)} & -x_n^{(2)} Y^{(2)} & -x_n^{(2)} Z^{(2)} & 1 & -x_n^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X^{(N)} & Y^{(N)} & Z^{(N)} & -x_n^{(N)} X^{(N)} & -x_n^{(N)} Y^{(N)} & -x_n^{(N)} Z^{(N)} & 1 & -x_n^{(N)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \\ t_1 \\ t_3 \end{bmatrix} = 0. \quad (6)$$

(6)式为包含8个未知数的齐次线性方程组,当 $N=7$ 且所有空间点不共面时,其解为等号左边系数矩阵的1维零空间基向量;当 $N>7$ 时,将系数矩阵进行奇异值分解,其最小奇异值对应的奇异向量即为最小二乘解^[19]。然而,上述任意一种情况利用(6)式仅能在相差一个非零尺度因子的意义下确定外参数,由于噪声的存在,其解未必严格满足旋转矩阵的正交性约束。将(6)式的解记为 $\mathbf{K}=(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8)$,为了从 \mathbf{K} 中恢复相机的外参数,取其前6个元素组成 2×3 的矩阵 \mathbf{M} ,即

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \\ k_4 & k_5 & k_6 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

另设旋转矩阵 \mathbf{R} 的第1行和第3行构成矩阵 $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1^T \\ \mathbf{r}_3^T \end{bmatrix}$,则 \mathbf{C} 可通过求解带约束的最优化问题获得,即

$$\min_{\mu, \mathbf{C}} \|\mathbf{M} - \mu \mathbf{C}\|_{\text{F}}^2, \text{ s.t. } \mathbf{C} \mathbf{C}^T = \mathbf{I}_{2 \times 2}. \quad (8)$$

在求解(8)式时,本文采用与文献[10]、文献[20]类似的方法,首先,对 \mathbf{M}^T 进行奇异值分解,得到 $\mathbf{M}^T = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T$, \mathbf{U} 为 3×3 阶酉矩阵, \mathbf{S} 为 3×2 阶对

角矩阵, \mathbf{V} 为 2×2 阶酉矩阵;然后,求解 \mathbf{C} 和尺度因子 μ , \mathbf{C} 和 μ 表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1^T \\ \mathbf{r}_3^T \end{bmatrix} = [\mathbf{V} \mid \mathbf{0}_{2 \times 1}] \mathbf{U}^T \\ \mu = \frac{s_1 + s_2}{2} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: s_1 和 s_2 为 \mathbf{S} 的2个非零对角元素;最后,由 \mathbf{r}_3 和 \mathbf{r}_1 的叉积得到旋转矩阵 \mathbf{R} 的第2行 \mathbf{r}_2 , t_1 和 t_3 的值可分别表示为 k_7/μ 和 k_8/μ 。至此,完成了线阵相机所有外参数的求解(t 的第2个元素 t_2 无法通过标定获得,但其在成像模型和测量模型中并不参与计算,因此不必关心具体值)。

当标定点数量较多且图像噪声较小时,通过计算(6)式和(8)式可以快速得到各线阵相机较精确的外参数,但这些外参数并非最优估计。为了提高标定精度,在线性解的基础之上,对外参数进行非线性优化。在理想情况下,对于单个线阵相机,空间点 P 应该位于由(2)式确定的视平面上,点 P 到视平面的距离为0,故可以将所有标定点到其对视平面的距离平方和作为目标函数,即

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{\{[x_n^{(i)} r_{31} - r_{11}] X^{(i)} + [x_n^{(i)} r_{32} - r_{12}] Y^{(i)} + [x_n^{(i)} r_{33} - r_{13}] Z^{(i)} + x_n^{(i)} t_3 - t_1\}^2}{[x_n^{(i)} r_{31} - r_{11}]^2 + [x_n^{(i)} r_{32} - r_{12}]^2 + [x_n^{(i)} r_{33} - r_{13}]^2}, \quad (10)$$

式中: $[X^{(i)}, Y^{(i)}, Z^{(i)}]$ 和 $x_n^{(i)}$ 均为已知量。该目标函数在物方空间中具有清晰的几何意义。在优化过程中为了保持旋转矩阵的正交性,利用欧拉角将 $r_{11} \sim r_{33}$ 进行参数化,设世界坐标系到相机坐标系的姿态旋转顺序为先绕 X 轴旋转 α ,再绕 Y 轴旋转 β ,最后绕 Z 轴旋转 γ ,则 $r_{11} \sim r_{33}$ 与欧拉角 (α, β, γ) 的转换关系为

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\beta c_\gamma & c_\alpha s_\gamma + s_\alpha s_\beta c_\gamma & s_\alpha s_\gamma - c_\alpha s_\beta c_\gamma \\ -c_\beta s_\gamma & c_\alpha c_\gamma - s_\alpha s_\beta s_\gamma & s_\alpha c_\gamma + c_\alpha s_\beta s_\gamma \\ s_\beta & -s_\alpha c_\beta & c_\alpha c_\beta \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中: c_x 和 s_x 分别表示三角函数 $\cos x$ 和 $\sin x$ 。将(11)式代入(10)式中可得参数向量 $\mathbf{T}=(\alpha, \beta, \gamma, t_1, t_3)$ 表示的目标函数 E ,即

$$E = f(\mathbf{T}). \quad (12)$$

最小化 E 的问题是一个非线性最优化问题,由于 E 对所有参数局部可微,因此可构建偏导数方程组

$$\mathbf{g}(\mathbf{T}) = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{T}} = \mathbf{0}, \quad (13)$$

(13)式为一个非线性方程组,利用牛顿迭代法^[21]对其求解,将线性方法获得的解作为迭代初始值,将求解结果作为 \mathbf{T} 的最优估计。

所提标定方法是在线性解的基础上进行非线性优化,在理论上标定结果具有较高的精度和稳定性。

4 近段图像测量子系统的测量模型

近段图像测量子系统利用单个面阵相机配合合作目标内环的4个LED光源实现相对位姿测量。面阵相机的内参数经过了预先标定,因此测量模型在本质上是一个P4P(Perspective-4-points)求解问题。针对PnP问题的求解方法较多,现有方法一般可分为非迭代方法^[22-23]和迭代方法^[24-25]两大类。非迭代方法一般具有较快的运算速度,但对噪声较敏感,容易损失运算精度;而迭代方法精度和稳健性较高,但运算速度较慢,且性能受迭代初始值的影响较大。本文基于4个特征点的共面结构,综合考虑运算速度与精度,提出一种基于线性初始解的迭代

位姿估计方法。

近段测量中面阵相机的成像模型如图 7 所示。4 个内环 LED 共面且对称分布,在成像模型中取内环平面作为世界坐标系的 $Z=0$ 平面,内环中心作为世界坐标系原点。位姿估计问题可以描述为:给定世界坐标系 $Z=0$ 平面上的 n 个共面空间点 p_i 的坐标 $p_i=(X_i Y_i 0)^T$,及其在相机归一化图像平面上的对应投影坐标 $q_i=(u_i v_i 1)^T$,其中 $i=1, 2, \dots, n$,求解世界坐标系与相机坐标系之间的位姿变换关系 (\mathbf{R}, \mathbf{t}) 。

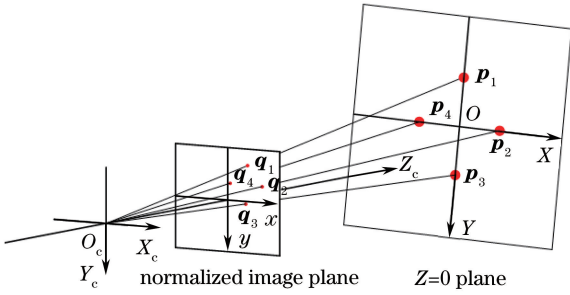


图 7 近段测量中面阵相机的成像模型

Fig. 7 Imaging model of plane camera for near-segmented measurement

4.1 线性初始解的计算

面阵相机的透视成像方程可表示为

$$\lambda_i q_i = \mathbf{R} p_i + \mathbf{t}, i=1, 2, \dots, n, \quad (14)$$

式中: λ_i 为第 i 个空间点在相机坐标系中的深度; \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 分别为世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵和平移向量,为待估计量。考虑到 p_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的第 3 个元素恒为零, (14) 式可进一步变换为

$$\lambda_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{n}_1 \quad \mathbf{n}_2 \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix}, i=1, 2, \dots, n, \quad (15)$$

式中: \mathbf{n}_1 和 \mathbf{n}_2 为旋转矩阵 \mathbf{R} 的前两列。由 (15) 式可以看出, $(X_i Y_i 1)^T$ 和 $(u_i v_i 1)^T$ 之间的映射为一个平面单应。单应性矩阵满足前两个列向量正交且具有相同的范数,可以表示为

$$\mathbf{H} = \tau [\mathbf{n}_1 \quad \mathbf{n}_2 \quad \mathbf{t}], \quad (16)$$

式中: τ 为尺度因子。根据摄影几何理论,在给定不小于 4 组的 $(X_i Y_i 1)^T$ 和 $(u_i v_i 1)^T$ 之间的点对应的条件下,利用直接线性变换法, \mathbf{H} 可通过求解一个齐次线性方程组获得。由于实际测量中噪声的存在, \mathbf{H} 难以满足前两列的正交性约束,且由于 \mathbf{H} 的齐次性质,尺度因子 τ 仍为未知量。为了从 \mathbf{H} 中恢

复 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} , 采用与 3.2 节中相似的方法,将 \mathbf{H} 的前两列组成的 3×2 的矩阵奇异值分解表示为 $[\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2] = \mathbf{U}' \mathbf{S}' \mathbf{V}'^T$, \mathbf{U}' 为 3×3 阶酉矩阵, \mathbf{S}' 为 3×2 阶对角矩阵, \mathbf{V}' 为 2×2 阶酉矩阵,则可得 $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ 和尺度因子 τ 的最小二乘估计,即

$$\begin{cases} [\mathbf{n}_1 \quad \mathbf{n}_2] = \mathbf{U}' [\mathbf{V}' \mid \mathbf{0}_{2 \times 1}]^T \\ \tau = \frac{s'_1 + s'_2}{2} \end{cases}, \quad (17)$$

式中: s'_1 和 s'_2 为 \mathbf{S}' 的 2 个非零对角元素。由 (17) 式的结果可进一步得到

$$\begin{cases} \mathbf{R} = [\mathbf{n}_1 \quad \mathbf{n}_2 \quad \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2] \\ \mathbf{t} = \frac{\mathbf{h}_3}{\tau} \end{cases}, \quad (18)$$

式中: \mathbf{h}_3 为 \mathbf{H} 的第三列。上述求解 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 的方法包含了两步计算:求解齐次线性方程组以获得 \mathbf{H} 以及对 \mathbf{H} 的前两列进行奇异值分解。两步计算均为线性过程,因此该方法具有较快的运算速度。由于第一步运算没有考虑 \mathbf{H} 的内在约束,因此在理论上该方法的计算结果存在一定的精度损失。

4.2 迭代位姿优化

为了进一步提高位姿估计的精度,在线性计算结果的基础上进行迭代优化。迭代方法选用摄影测量中经典的 Levenberg-Marquardt 方法^[19]。展开 (15) 式,并利用欧拉角对旋转矩阵的前两列进行参数化,可得

$$\lambda_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\beta c_\gamma & c_\alpha s_\gamma + s_\alpha s_\beta c_\gamma & t_1 \\ -c_\beta s_\gamma & c_\alpha c_\gamma - s_\alpha s_\beta s_\gamma & t_2 \\ s_\beta & -s_\alpha c_\beta & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i=1, \dots, n, \quad (19)$$

利用非齐次形式表示 (19) 式,可得

$$\begin{cases} u_i = \frac{X_i c_\beta c_\gamma + Y_i c_\alpha s_\gamma + Y_i s_\alpha s_\beta c_\gamma + t_1}{X_i s_\beta - Y_i s_\alpha c_\beta + t_3} \\ v_i = \frac{-X_i c_\beta s_\gamma + Y_i c_\alpha c_\gamma - Y_i s_\alpha s_\beta s_\gamma + t_2}{X_i s_\beta - Y_i s_\alpha c_\beta + t_3} \end{cases}, \quad i=1, \dots, n, \quad (20)$$

待优化的参数向量为

$$\mathbf{P} = (\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad t_1 \quad t_2 \quad t_3)^T, \quad (21)$$

将 $(u_i, v_i)^T, i=1, \dots, n$ 视为归一化图像坐标的估计值,其为参数向量 \mathbf{P} 的函数。设归一化图像坐标的观测值为 $(\bar{u}_i, \bar{v}_i)^T, i=1, \dots, n$, 则可利用图像坐标的偏差构建残差向量

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [u_1(\mathbf{P}) - \bar{u}_1 \cdots u_n(\mathbf{P}) - \bar{u}_n \quad v_1(\mathbf{P}) - \bar{v}_1 \cdots v_n(\mathbf{P}) - \bar{v}_n]^T, \quad (22)$$

另设 $\mathbf{J} = \partial \boldsymbol{\varepsilon} / \partial \mathbf{P}$ 为 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 对 \mathbf{P} 的雅可比矩阵。

Levenberg-Marquardt 方法迭代过程中每一步的增量为

$$(\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k + \lambda \mathbf{I}) \Delta_k = -\mathbf{J}_k^T \epsilon_k, \quad (23)$$

向量 \mathbf{P} 的解由线性方法得到的初始估计 \mathbf{P}_0 逐次迭代计算得到, 即

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_k + \Delta_k, \quad (24)$$

式中: Δ_k 为线性方程组(23)式的解。

基于线性初始解的迭代优化方法, 迭代优化使用重投影误差作为目标函数, 可保证测量结果的理论精度; 线性初始解的引入可提高算法的稳定性和收敛速度; 算法对于特征点的数目 n 没有限制, 理论上适用于任意共面 $n (n \geq 4)$ 点的单目位姿估计问题。

5 测量实验

实验中采用的合作靶标如图 8 所示, 靶标分为内外两环, 内环和外环分别对称安装 4 个功率型近红外 LED, 内环直径为 280 mm, 外环直径为 440 mm。所有 LED 波长范围固定, 中心波长为 740 nm, 光谱半峰全宽为 20 nm, 具有良好的单色性。合作靶标的中心安装双轴倾角传感器, 为近段姿态测量结果提供参考基准。倾角传感器角度测量精度为 $\pm 0.01^\circ$, 量程为 $\pm 30^\circ$ 。

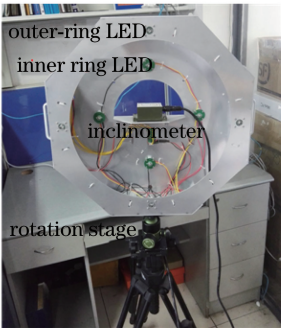


图 8 测量实验中所用的合作靶标

Fig. 8 Cooperative target used in measurement experiment

图 9 给出了分段式位姿测量系统的实验现场照片, 系统两端的两组正交线阵相机构成远段图像测量子系统的左、右目, 中央的面阵相机及嵌入式运算单元构成近段图像测量子系统。所有相机的镜头前端均安装与 LED 光源波长完全匹配的窄带滤光片, 以滤除杂光, 提高目标背景对比度。所有相机内部参数均经过校准。视距约为 35 m 时, 远段子系统中 4 个线阵相机对靶标外环单个 LED 的成像效果如图 10 所示; 视距约为 5 m 时, 近段图像测量子系统对靶标内环 4 个 LED 的成像效果如图 11 所示。

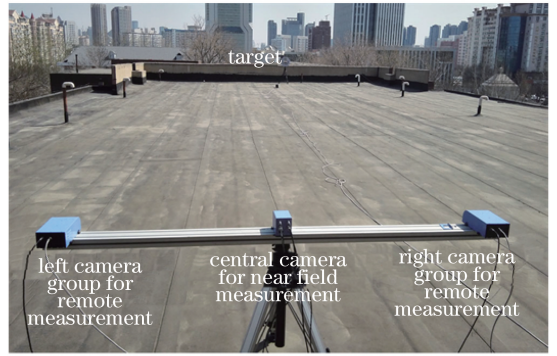


图 9 分段式位姿测量系统

Fig. 9 Segmented pose measurement system

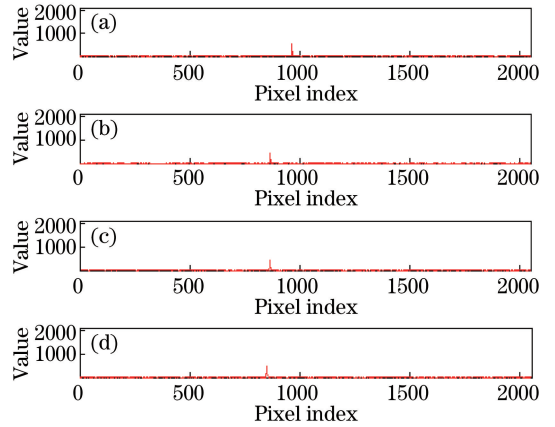


图 10 视距为 35 m 时外环 LED 在 4 个线阵 CCD 上成像的脉冲信号。(a) 1L 相机; (b) 1R 相机; (c) 2L 相机; (d) 2R 相机

Fig. 10 Image peaks of one outer ring LED on the four line array CCDs with vision range of 35 m. (a) Camera 1L; (b) camera 1R; (c) camera 2L; (d) camera 2R

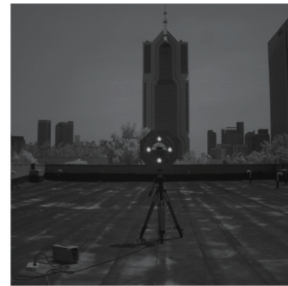


图 11 视距为 5 m 时面阵相机对内环 LED 的成像效果

Fig. 11 Image of inner ring LEDs on plane array camera with vision range of 5 m

从图 10 和图 11 可以看出, 系统在远段和近段均能获得高信噪比的目标图像。针对远段线阵图像和近段面阵图像的特点, 分别采用灰度尖峰值法和质心法提取 LED 成像区域中心的像素坐标。

5.1 远段测量实验

在远段标定和测量实验中,所选择的标定点和反测验证点的分布如图 12 所示,图中红色线段表示测量系统的支架,其长度代表远段子系统的基线距离。根据现场实验条件选择 109 个点用于标定 4 个线阵相机的外参数,如图 12 中蓝点所示;随机选择 3 个不同位置的点对标定结果进行反测验证,如图中的红点所示。所有点的真实位置由精度为 $2 + 2 \times 10^{-6}$ 的全站仪记录。

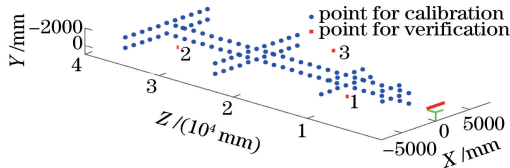


图 12 远段测量实验中标定点和反测验证点的分布

Fig. 12 Distributions of calibration points and verification points in far-segmented measurement experiment

利用 3.2 节中的标定方法,并借助 109 个标定点的已知位置及图像坐标,对 4 个线阵相机的外参数 $(R^{1L}, t_1^{1L}, t_3^{1L})$ 、 $(R^{1R}, t_1^{1R}, t_3^{1R})$ 、 $(R^{2L}, t_1^{2L}, t_3^{2L})$ 和 $(R^{2R}, t_1^{2R}, t_3^{2R})$ 分别进行标定。将标定结果代入 3.1 节的定位测量模型,利用图像坐标对标定点和反测验证点的位置进行重构,重构结果在 X、Y、Z 三个方向上的误差分布如图 13 所示。

为了全面评价测量精度,定义相对测量误差为

$$\delta = \frac{\sqrt{(X - \bar{X})^2 + (Y - \bar{Y})^2 + (Z - \bar{Z})^2}}{\sqrt{\bar{X}^2 + \bar{Y}^2 + \bar{Z}^2}} \times 100\%, \quad (25)$$

表 2 随机验证点三维坐标的测量结果

Table 2 Measurement results of three-dimensional coordinates of random verification points

Point number	True position /mm			Constructed position /mm			Absolute error /mm			Relative error /%
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	-2420	-110	9680	-2423.4	-107.3	9673.7	-3.4	2.7	-6.3	0.08
2	-4840	-1320	30250	-4834.2	-1323.7	30296.5	5.8	-3.7	46.5	0.15
3	5060	-1100	18150	5069.0	-1098.6	18116.1	9.0	1.4	-33.9	0.19

5.2 近段测量实验

在近段测量实验中,利用安装于靶标中心的倾角传感器获取的姿态角真值对近段测量模型的精度和稳健性进行评价。由于倾角传感器可连续输出姿态参考值,因此可进行动态测量结果的实验比较。实验中位姿测量算法在近段图像测量子系统的 DSP 平台上实时运行,运算结果通过 RS-232 发送至上位机。为了方便与参考基准比较,将运算结果中的 R 通过(11)式分解为 3 个旋转角 α 、 β 、 γ ,分别

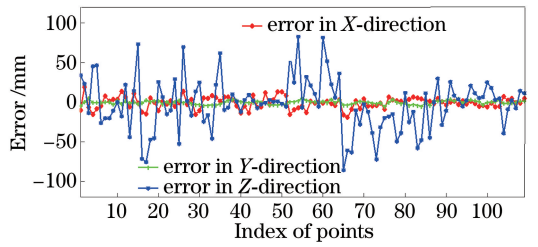


图 13 标定点在 X、Y、Z 方向上的坐标重构误差
Fig. 13 Coordinate reconstruction errors of calibration points in X, Y, and Z directions

式中: \bar{X} 、 \bar{Y} 、 \bar{Z} 为空间点三维坐标的真值; X 、 Y 、 Z 为重构得到的三维坐标。统计所有标定结果相对误差的最大值、平均值以及方均根误差 (RMSE),结果如表 1 所示。

表 1 标定点的方均根误差和相对误差

Table 1 Root mean square error and relative error of calibration points

	RMSE /mm			Relative error /%	
	X	Y	Z	Maximum	Average
	7.48	2.35	33.42	0.37	0.13

表 1 结果表明,对于视距变化分布范围为 5~35 m 的标定,坐标重构的方均根误差在 X 和 Y 方向上为毫米级,在 Z 方向上为厘米级,最大相对误差小于 0.5%,说明标定方法具有较好的稳健性。

利用标定结果对图 12 中的随机验证点的坐标进行重构,结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,所有随机验证点测量结果的绝对误差和相对误差均保持在较低水平,验证了远段测量模型和标定方法的有效性。

代表合作靶标相对于相机的俯仰角、偏航角和横滚角。

在测量程序开始运行后:1) 调整靶标与近段相机的相对姿态,使双轴倾角传感器的输出和 DSP 解算结果的俯仰角、偏航角和横滚角的输出均接近于零;2) 固定近段图像测量模块,手动调节靶标下方的三自由度转台,连续改变靶标的俯仰角和横滚角,同时记录倾角传感器的输出和 DSP 的位姿解算结果,并绘制角度随时间的变化曲线;3) 分别将靶标

置于相机前方约 1 m 和 3 m 的位置,重复上述实验,实验结果如图 14 和图 15 所示。3 个子图分别对应横滚角、俯仰角和偏航角的变化曲线。点线和虚线分别代表本文线性初始解和迭代位姿优化后的结果。子图中的小框内给出了曲线部分细节的放大图。

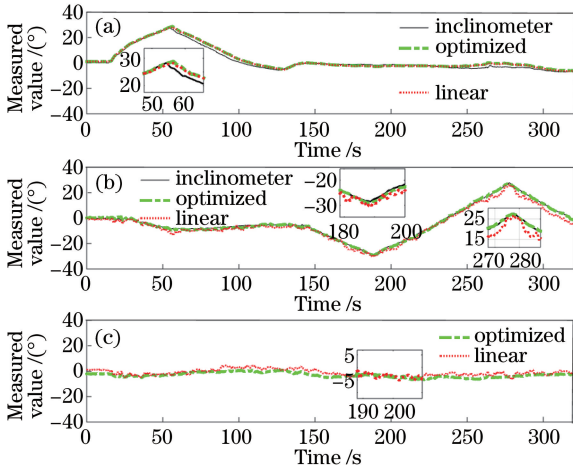


图 14 靶标与相机相距 1 m 时姿态角测量结果随时间的变化曲线。(a)横滚角;(b)俯仰角;(c)偏航角

Fig. 14 Variation of attitude angle measurement result with time when target is 1 m away from camera. (a) Rolling angle; (b) pitching angle; (c) yaw angle

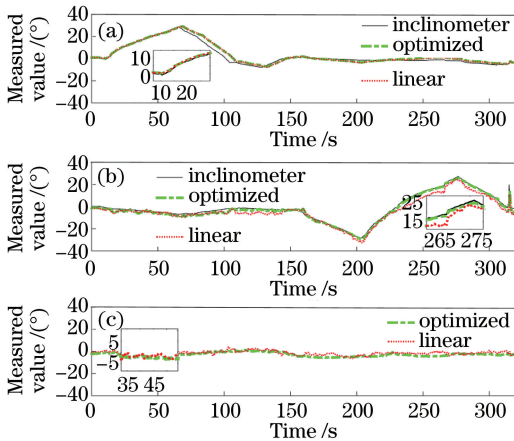


图 15 靶标与相机相距 3 m 时姿态角测量结果随时间的变化曲线。(a)横滚角;(b)俯仰角;(c)偏航角

Fig. 15 Variation of attitude angle measurement result with time when target is 3 m away from camera. (a) Rolling angle; (b) pitching angle; (c) yaw angle

从图 14 和图 15 可以,对于横滚角和俯仰角,线性初始解的测量结果整体变化趋势与倾角传感器相同,但曲线中毛刺较多,存在较大的随机测量误差,

而迭代优化后的结果与倾角传感器的输出拟合度较高,且曲线更平滑,测量精度更高;对于偏航角,由于缺少参考基准,仅绘出了两种算法的输出结果,基于线性初始解的迭代优化方法对应的角度变化曲线相比于线性解直接得到的结果具有更好的平滑度;此外,排除因零位对准偏差产生的测量结果整体偏移部分(如图 14 中横滚角变化曲线的细节放大图所示),所提算法对横滚角和俯仰角测量结果的最大偏差不超过 $\pm 1^\circ$ 。

6 结 论

针对视觉导航应用对大视距相对位姿测量的需求,提出了一种分段式视觉位姿测量方法,并基于该方法构建了完整的测量系统。系统分为远段图像测量子系统和近段图像测量子子系统,其中远段子系统由两组正交成像的线阵相机构成,可完成目标的远距离位置测量;近段子系统由一个面阵相机构成,可实现目标的近距离位姿跟踪。根据线阵相机和面阵相机的成像特点,基于线性计算结合迭代最优化的思想,分别为远段和近段测量子子系统提出了相应的测量模型,并为远段子系统的线阵相机设计了精确的外参数标定方法。通过实测实验对系统及测量模型的精度进行了验证,结果表明,经过外参数标定的远段子系统能够在 5~35 m 的视距变化范围内实现小于 0.5% 的位置测量精度和低于 40 mm 的方均根误差;近段子系统在小于 5 m 的视距范围内可实现高精度姿态跟踪,验证了分段式视觉测量系统和模型应用于大视距测量的可行性。

目前对系统的测试环境仍在持续优化完善中,下一步的研究将围绕目标运动状态下远段和近段的动态位置测量能力展开,并研究目标光源被部分(或全部)遮挡等特殊情况下系统的响应。

参 考 文 献

- [1] Philip N K, Ananthasayanam M R. Relative position and attitude estimation and control schemes for the final phase of an autonomous docking mission of spacecraft[J]. Acta Astronautica, 2003, 52(7): 511-522.
- [2] Gasbarri P, Sabatini M, Palmerini G B. Ground tests for vision based determination and control of formation flying spacecraft trajectories [J]. Acta Astronautica, 2014, 102: 378-391.
- [3] Sharp C S, Shakernia O, Sastry S S. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle [C] //

- Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. no. 01CH37164), May 21-26, 2001, Seoul, Korea. New York: IEEE, 2001: 1720-1727.
- [4] Wang X F, Dong X M, Kong X W, *et al.* Vision based measurement of refueling drogue for autonomous aerial refueling[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 590: 618-622.
- [5] Martínez C, Richardson T, Thomas P, *et al.* A vision-based strategy for autonomous aerial refueling tasks[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(8): 876-895.
- [6] Wang J, Wang X J, Liu F, *et al.* Modeling of binocular stereo vision for remote coordinate measurement and fast calibration[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 54: 269-274.
- [7] Li W M, Shan S Y, Liu H. High-precision method of binocular camera calibration with a distortion model[J]. Applied Optics, 2017, 56(8): 2368-2377.
- [8] Jiang T, Cheng X S, Cui H H, *et al.* Calibration method of binocular vision system with zoom lens based on homography matrix[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0315005.
姜涛, 程筱胜, 崔海华, 等. 基于单应性矩阵的变焦双目视觉标定方法[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0315005.
- [9] Ding M, Wei L, Wang B F. Vision-based estimation of relative pose in autonomous aerial refueling[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(6): 807-815.
- [10] Zhou K, Wang X J, Wang Z, *et al.* Complete initial solutions for iterative pose estimation from planar objects[J]. IEEE Access, 2018, 6: 22257-22266.
- [11] Lü Y Y, Gu Y Y, Gao Z Y, *et al.* Design and experiment of the monocular vision measurement system based on spatial cooperation pose[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 121505.
吕耀宇, 顾营迎, 高瞻宇, 等. 空间协同位姿单目视觉测量系统设计与实验[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 121505.
- [12] Wang X J, Cao Y, Zhou K. Methods of monocular pose measurement based on planar objects[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1): 274-280.
王向军, 曹雨, 周凯. 二维合作目标的单相机空间位姿测量方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 274-280.
- [13] Su J D, Qi X H, Duan X S. Plane pose measurement method based on monocular vision and checkerboard target[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0815002.
苏建东, 齐晓慧, 段修生. 基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0815002.
- [14] Liu H Q, Yang L H, Ren Y J, *et al.* Large-scale 3D coordinate measurement based on orthogonal cylindrical imaging cameras[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 1117002.
刘海庆, 杨凌辉, 任永杰, 等. 基于正交柱面成像相机的大尺寸三维坐标测量[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1117002.
- [15] Guan R F, Yang L H, Wang L J, *et al.* Position and attitude precision measurement of spatial objects based on orthogonal cylindrical imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1112003.
关瑞芬, 杨凌辉, 王丽君, 等. 基于正交柱面成像的空间物体位姿精密测量[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1112003.
- [16] Zhou K, Wang X J, Wei H, *et al.* Modeling and calibration of a precise optical positioning system based on four linear cameras[J]. Applied Optics, 2018, 57(19): 5538-5548.
- [17] Ai L, Yuan F, Ding Z. Study of the spatial object's exterior attitude measurement based on multi-linear CCD[C] // 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, June 3-5, 2008, Singapore. New York: IEEE, 2008:1945-1948.
- [18] Wang Y, Yuan F, Jiang H, *et al.* High precision pose calculation of space target based on three linear array CCD[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0515004.
王艳, 袁峰, 姜宏, 等. 基于三线阵 CCD 空间目标的高精度位姿解算[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0515004.
- [19] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision: estimation- 2D projective transformations [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 87-131.
- [20] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [21] Sauer T. Numerical analysis[M]. Pei Y R, Ma G Y, Transl. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2012.
Timothy Sauer. 数值分析[M]. 裴玉茹, 马废宇, 译. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [22] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. EPnP: an

- accurate $O(n)$ solution to the PnP problem [J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.
- [23] Zheng Y Q, Kuang Y B, Sugimoto S, *et al.* Revisiting the PnP problem: a fast, general and optimal solution [C] // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE, 2013: 2344-2351.
- [24] Lu C P, Hager G D, 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.
- [25] Chen P, Wang C X. IEP nP : an iterative camera pose estimation algorithm based on EP nP [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0411001.
陈鹏, 王晨骁. IEP nP : 一种基于 EP nP 的相机位姿迭代估计算法 [J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0411001.