

基于点特征的单目视觉位姿测量算法

王中宇, 李亚茹, 郝仁杰, 程银宝, 江文松

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对位姿求解过程中存在的解不唯一、选解难和解的精度不高等问题, 提出一种基于点特征的单目视觉位姿测量算法。首先, 根据共面 4 个特征点之间的位置关系, 分别对平行和相交两种情况进行分析; 其次, 根据特征点的空间坐标、图像坐标和空间位置关系, 推导出世界坐标系中 3 个坐标轴上的向量变换到摄像机坐标系中的单位向量, 进而求解出物体相对于摄像机的初始位姿; 最后, 用 LM 算法对初始位姿进行优化, 得到最终位姿。实验结果表明: 文中算法的合成误差为 0.54 mm; 现有的 EPnP 算法、两点一线算法和 P3P 算法的合成误差分别为 1.28、1.52 和 4.26 mm; 文中算法的合成误差分别减小了 57.8%、64.4% 和 87.3%, 优于现有的 EPnP 算法、两点一线算法和 P3P 算法。

关键词: 单目视觉; 透视投影; 位姿测量; 共面特征点; PnP 问题

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0517002

Monocular vision pose measurement algorithm based on points feature

Wang Zhongyu, Li Yaru, Hao Renjie, Cheng Yinbao, Jiang Wensong

(School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the problems that the solutions were not unique, the correct solution was difficult to select and the accuracy was not high during processing the solution, an monocular vision pose measurement algorithm based on point features was proposed. Firstly, according to the position relationship between the four coplanar feature points, the parallel and the intersection conditions were analyzed respectively; Secondly, according to the spatial coordinates, image coordinates and spatial position relationships of the feature points, the corresponding unit vectors in the camera coordinate of the three coordinate axes in the world coordinate were derived, then the initial pose of the object to the camera was obtained; Finally, the initial pose was optimized with the LM algorithm to obtain the final pose. The experimental results show that the synthesis error of the article algorithm is 0.54 mm, the errors of the synthesis of the existing EPnP algorithm, two-point one-line algorithm and P3P algorithm are 1.28 mm, 1.52 mm and 4.26 mm, respectively. The synthesis error of the article algorithm is reduced by 57.8%,

收稿日期: 2018-12-05; 修订日期: 2019-01-03

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0203801); 国家自然科学基金(51575032); 北京市自然科学基金(3172020)

作者简介: 王中宇(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光机电一体化技术与仪器方面的研究。Email: mewan@buaa.edu.cn

通讯作者: 李亚茹(1990-), 女, 博士生, 主要从事机器视觉测量技术与应用方面的研究。Email: Liyr022518@163.com

64.4% and 87.3% respectively. All in all, the article algorithm is superior to the existing EPnP algorithm, two-point one-line algorithm and P3P algorithm.

Key words: monocular vision; perspective projection; pose measurement; coplanar feature points; PnP problem

0 引言

视觉测量技术是基于计算机视觉将三维空间中的物体通过相机投射到二维图像中,然后借助于数学模型从二维图像还原为三维信息的技术,能够实现物体的几何尺寸以及物体在空间中的位置、姿态等测量。位置和姿态简称为位姿,通常用六个自由度来表示,即两个坐标系之间的三个旋转量和三个平移量^[1]。位姿测量目前已经广泛地应用于航空航天、目标跟踪、增强现实、自动导航、视觉伺服控制和工业制造等领域^[2-4]。求解位姿时首先需要选取特征,常用的有点特征、直线特征和二次曲线特征等。基于直线和曲线特征的算法一般是由点特征算法演变过来的,因此研究点特征具有重要意义。

基于点特征的位姿估计问题又称为 PnP (Perspective-n-Point)问题。国内外学者对此进行了大量研究,主要集中于点的个数及其算法,得出的初步结论为当 $n < 3$ 时,PnP 问题有无穷多个解;当 $n = 3$ 时,PnP 问题最多有四个解,如果三个点组成的三角形为等腰三角形,并且摄像机在特定区域内时,PnP 问题有唯一解^[7-8];当 $n = 4$ 时,如果 4 点共面,则 PnP 问题有唯一解,如果 4 点不共面,则 PnP 问题最多有四个解^[9];当 $n = 5$ 时,PnP 问题最多有两个解^[10];当 $n > 5$ 时,PnP 问题有唯一解,但解的形式不封闭,因此求解的算法具有局限性。

针对单目视觉位姿测量的求解问题,国内外学者提出了一系列的算法。参考文献[9]分析了呈矩形分布的共面 4 点,用相应的几何关系求解出位姿。参考文献[10]分析了共面两点一线的情况,把位姿求解问题转化为求解一元二次方程的数学问题,不足之处是所求得解有两个,很难在实际中应用。参考文献[11]研究了共面两两平行的四条直线,以直线围成平行四边形的面积为输入值,通过相应的几何关系求解出位姿。参考文献[12]根据长宽比未知矩形中四个顶点及其对应的四个像点,通过非线

性优化算法同时估计出长宽比和位姿,不足之处是当提取的特征点精度不高时,可能出现迭代结果不收敛问题。参考文献[13]提出一种非线性迭代算法,不足之处是容易受到噪声的影响,并且可能出现迭代结果不收敛问题。

文中提出一种基于点特征的单目视觉位姿测量算法,仅需给出任意共面四个特征点的空间相对位置,其中任意三个特征点可以不共线,而且不需要给定特征点与光心连线形成的夹角、不需要给定光心到特征点的距离和限制四个特征点呈矩形或特殊形状的分布。文中基于共面四个特征点及其空间位置关系求解出物体相对于摄像机的初始位姿,再用 Levenberg-Marquardt(LM)算法^[14]对其进行优化。文中算法简单有效、易于实现和精度高,具有一定的应用价值。

1 单目视觉位姿测量模型

在单目视觉系统中,摄像机拍摄的图像通过计算机可以表示为矩阵形式,矩阵中的每一个数记为像素,像素的值为图像的灰度,像素的坐标为该矩阵中的行和列,因此需要建立像素坐标系。由于像素坐标系不能反映出像素在图像中的物理位置,因此需要建立以长度单位表示的物理坐标系,即成像平面坐标系。此外,还需要建立摄像机坐标系和世界坐标系。在单目视觉测量系统中,世界坐标系可选为目标坐标系或物体坐标系。

文中选择的物体为靶标,采用的相机模型^[14]为小孔成像模型,坐标系之间的关系如图 1 所示。图中 O_c 为相机的光心, f 为相机镜头的焦距,摄像机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 中的 X_c 轴平行于图像物理坐标系 O_I-xy 中 x 轴和像素坐标系 O_o-uv 中的 u 轴; Y_c 轴平行于图像物理坐标系 O_I-xy 中 y 轴和像素坐标系 O_o-uv 中的 v 轴; Z_c 轴为摄像机的光轴,垂直于图像平面。如果空间中的某一点在摄像机坐标系中的坐标为 $(X_c, Y_c, Z_c)^T$, 在世界坐标系中的坐标为 $(X_w, Y_w, Z_w)^T$,

则两者之间的关系为:

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} + t \quad (1)$$

式中: R 为世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵, 是一个 3×3 的单位正交矩阵; t 为世界坐标系到摄像机坐标系的平移向量, 是一个 3×1 的列向量。

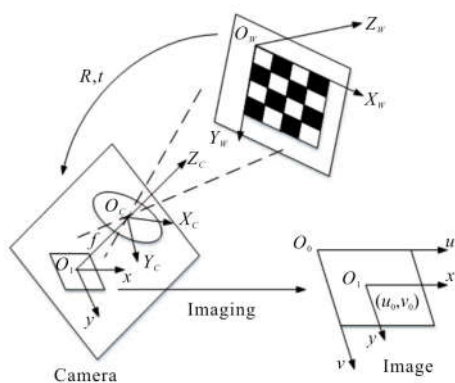


图 1 相机成像模型

Fig.1 Camera imaging model

若世界坐标系中的原点 O_w 在摄像机坐标系中的坐标为 t_0 , 则 $t_0=R[0,0,0]^T+t=t$, 即为靶标相对于摄像机的位置; 若世界坐标系中 X_w, Y_w, Z_w 轴上的单位向量变换到摄像机坐标系中的向量分别为 R_1, R_2, R_3 , 则 $R_1=R[1,0,0]^T, R_2=R[0,1,0]^T, R_3=R[0,0,1]^T$, 从而可得 $[R_1, R_2, R_3]=RE=R$, 即为靶标相对于摄像机的姿态。

当一个坐标系中的多个向量变换到另外一个坐标系时, 每个向量的模不变、各向量之间的角度不变, 则世界坐标系中 X_w, Y_w, Z_w 轴上的向量变换到摄像机坐标系中的单位向量构成的矩阵也为靶标相对于摄像机的姿态。

文中已知相机内参, 靶标中的共面四个点 $P_i (i=1, 2, 3, 4)$ 在世界坐标系中的坐标及其在像平面的投影点分别为 $q_i (i=1, 2, 3, 4)$, 并且任意三点不共线。根据距离公式可求解出任意两点之间的距离, 设 $|P_1P_2|=d_{12}, |P_2P_3|=d_{23}, |P_1P_3|=d_{13}, |P_1P_4|=d_{14}$, P_i 在摄像机坐标系中的坐标为 $P_i(x_{P_i}, y_{P_i}, z_{P_i})$ 和 q_i 在摄像机坐标系中的坐标为 $q_i(x_i, y_i, f)$ 。

下面求解物体相对于摄像机的初始位置 t 和初始姿态 R 。

2 位姿求解算法

根据任意三点不在一条直线上的共面四个特征点 $P_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的位置关系, 对 P_1, P_2 两点所在的直线 P_1P_2 与 P_3, P_4 两点所在的直线 P_3P_4 之间平行和相交两种情况分别进行讨论。

2.1 当 P_1P_2 与 P_3P_4 平行时

设点 P_1 为世界坐标系的原点, 点 O_c, q_3, q_4 确定的平面为 π_1 , 点 O_c, q_1, q_2 确定的平面为 π_2 , 光心点 O_c 到靶标特征点 $P_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的距离与到像点 $q_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的距离之比分别为 $k_i (i=1, 2, 3, 4)$, 即 $k_i = \frac{|O_cP_i|}{|O_cq_i|} (i=1, 2, 3, 4)$, 如图 2 所示。

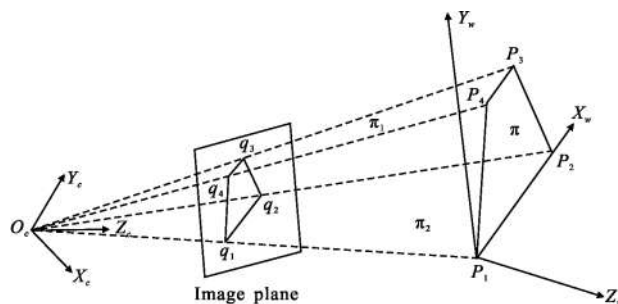


图 2 当 P_1P_2 与 P_3P_4 平行时的位姿测量示意图

Fig.2 Pose measurement when P_1P_2 and P_3P_4 are parallel

由向量 $\overline{O_cq_i} (i=3, 4)$ 和相机内参矩阵可以计算出平面 π_1 的标准法向量 $N_1=(n_{x_1}, n_{y_1}, n_{z_1})$ 。由 $P_1P_2 // P_3P_4$ 可得 $P_1P_2 \perp N_1$, 即 $\overline{P_1P_2} \cdot N_1^T = 0$ 。

由 $\overline{P_1P_2}=(\overline{O_cP_2}-\overline{O_cP_1})=(k_2\overline{O_cq_2}-k_1\overline{O_cq_1})$ 可得:

$$(k_2x_2-k_1x_1) \cdot n_{x_1} + (k_2y_2-k_1y_1) \cdot n_{y_1} + (k_2f-k_1f) \cdot n_{z_1} = 0 \quad (2)$$

由 $|P_1P_2|=d_{12}$ 可得:

$$\sqrt{(k_2x_2-k_1x_1)^2 + (k_2y_2-k_1y_1)^2 + (k_2f-k_1f)^2} = d_{12} \quad (3)$$

由参考文献[10]可知, 联立公式(2)和(3)可求解出 k_1, k_2 :

$$k_1 = \frac{d_{12}}{\sqrt{(hx_2-x_1)^2 + (hy_2-y_1)^2 + (h-1)^2f^2}}$$

$$k_2 = hk_1 \quad (4)$$

式中: $h = \frac{k_2}{k_1} = \frac{n_{x_1}x_1 + n_{y_1}y_1 + n_{z_1}f}{n_{x_1}x_2 + n_{y_1}y_2 + n_{z_1}f}$ 。

则 P_1, P_2 在摄像机坐标系中的坐标为 $(x_{P_1}, y_{P_1}, z_{P_1}) = \overline{O_cP_1} = k_1\overline{O_cq_1} = (k_1x_1, k_1y_1, k_1f)$ 和 $(x_{P_2}, y_{P_2}, z_{P_2}) = \overline{O_cP_2} = k_2\overline{O_cq_2} =$

(k_2x_2, k_2y_2, k_2f) 。

同理, 根据 $|P_3P_4|=d_{34}$ 和 $\overline{P_3P_4} \cdot N_2^T=0$ 可求解出 k_4 , 继而求解出 P_4 在摄像机坐标系下的坐标分别为 $(x_{P_4}, y_{P_4}, z_{P_4})=\overline{O_cP_4}=k_4\overline{O_cq_4}=(k_4x_4, k_4y_4, k_4f)$ 。

则

$$\overline{P_1P_2}=\overline{O_cP_2}-\overline{O_cP_1}=(k_2x_2-k_1x_1, k_2y_2-k_1y_1, k_2f-k_1f) \quad (5)$$

$$\overline{P_1P_4}=\overline{O_cP_4}-\overline{O_cP_1}=(k_4x_4-k_1x_1, k_4y_4-k_1y_1, k_4f-k_1f) \quad (6)$$

世界坐标系中 X_w 轴上的向量变换到摄像机坐标系中的单位向量 (r_{11}, r_{21}, r_{31}) 为 $\overline{P_1P_2}/|\overline{P_1P_2}|$; Z_w 轴上的向量变换到摄像机坐标系中的单位向量 (r_{13}, r_{23}, r_{33}) 为 $(\overline{P_1P_2} \times \overline{P_1P_4})/|\overline{P_1P_2} \times \overline{P_1P_4}|$; Y_w 轴上的向量变换到摄像机坐标系中的单位向量 (r_{12}, r_{22}, r_{32}) 为 $(r_{13}, r_{23}, r_{33}) \times (r_{11}, r_{21}, r_{31})$ 。

则靶标到摄像机的旋转矩阵 R 为:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (7)$$

由 P_1 为世界坐标系的原点可知, 靶标到摄像机的平移向量为 $t=(x_{P_1}, y_{P_1}, z_{P_1})^T$ 。

2.2 当 P_1P_2 与 P_3P_4 相交时

假设 P_3P_4 与 P_1P_2 相交于点 P_0 , 由靶标中四个特征点 $P_i(i=1, 2, 3, 4)$ 在世界坐标系中的坐标可以得到 P_0 在世界坐标系中的坐标, 设其为世界坐标系的原点, 在像平面的投影点为 $q_0(x_0, y_0, f)$, $|P_0P_1|=d_{01}$, $|P_0P_2|=d_{02}$, $|P_0P_3|=d_{03}$, $|P_0P_4|=d_{04}$, 如图 3 所示。

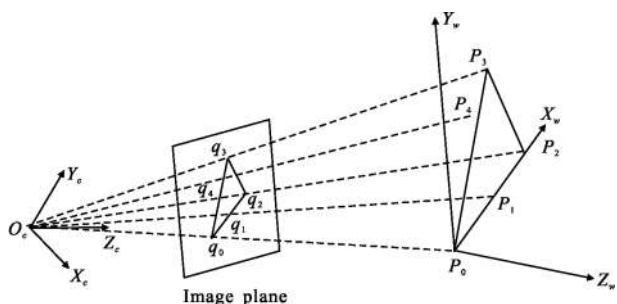


图 3 当 P_1P_2 与 P_3P_4 相交时的位姿测量示意图

Fig.3 Pose measurement when P_1P_2 and P_3P_4 intersect

由投影点 $q_i(x_i, y_i, f)(i=0, 1, 2, 3, 4)$ 可以得到 $\angle P_1O_cP_0$ 、 $\angle P_2O_cP_0$ 、 $\angle P_3O_cP_0$ 、 $\angle P_4O_cP_0$ 、 $\angle P_3O_cP_1$ 。

在 $\Delta O_cP_0P_2$ 和 $\Delta O_cP_0P_1$ 中, 由正弦定理可得:

$$\frac{|P_0P_2|}{\sin \angle P_2O_cP_0} = \frac{|O_cP_0|}{\sin \angle O_cP_2P_0} \quad (8)$$

$$\frac{|P_0P_1|}{\sin \angle P_1O_cP_0} = \frac{|O_cP_0|}{\sin \angle O_cP_1P_0} = \frac{|O_cP_0|}{\sin(\angle O_cP_2P_0 + \angle P_2O_cP_1)} \quad (9)$$

由参考文献[10]可知, 联立公式(8)和(9)可求解出 $\angle O_cP_2P_0$ 为:

$$\angle O_cP_2P_0 = \arccot \left(\frac{\frac{d_{02}}{d_{01}} \cdot \frac{\sin \angle P_1O_cP_0}{\sin \angle P_2O_cP_0} - \cos \angle P_2O_cP_1}{\sin \angle P_2O_cP_1} \right) \quad (10)$$

由公式(8)可得:

$$|O_cP_0| = \frac{|P_0P_2| \sin \angle O_cP_2P_0}{\sin \angle P_2O_cP_0} = \frac{d_{02} \sin \angle O_cP_2P_0}{\sin \angle P_2O_cP_0} \quad (11)$$

则点 P_0 在摄像机坐标系中的坐标 $P_0(x_{P_0}, y_{P_0}, z_{P_0})$ 为:

$$\overline{O_cP_0} = \frac{|O_cP_0|}{|O_cq_0|} \overline{O_cq_0} \quad (12)$$

同理, 在 $\Delta O_cP_0P_2$ 和 $\Delta O_cP_0P_3$ 中, 由正弦定理可以求解出 $\angle O_cP_0P_2$ 和 $|O_cP_2|$ 。则点 P_2 在摄像机坐标系下的坐标 $P_2(x_{P_2}, y_{P_2}, z_{P_2})$ 为:

$$\overline{O_cP_2} = \frac{|O_cP_2|}{|O_cq_2|} \overline{O_cq_2} \quad (13)$$

在 $\Delta O_cP_0P_3$ 和 $\Delta O_cP_3P_4$ 中, 由正弦定理可求解出 $\Delta O_cP_0P_3$ 和 $|O_cP_3|$, 则点 P_3 在摄像机坐标系中的坐标 $P_3(x_{P_3}, y_{P_3}, z_{P_3})$ 为:

$$\overline{O_cP_3} = \frac{|O_cP_3|}{|O_cq_3|} \overline{O_cq_3} \quad (14)$$

由公式(12)~(14)可得:

$$\overline{P_0P_2} = \overline{O_cP_2} - \overline{O_cP_0} = \frac{|O_cP_2|}{|O_cq_2|} \overline{O_cq_2} - \frac{|O_cP_0|}{|O_cq_0|} \overline{O_cq_0} \quad (15)$$

$$\overline{P_0P_3} = \overline{O_cP_3} - \overline{O_cP_0} = \frac{|O_cP_3|}{|O_cq_3|} \overline{O_cq_3} - \frac{|O_cP_0|}{|O_cq_0|} \overline{O_cq_0} \quad (16)$$

同理, 可得到世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵 R 和平移向量 t 。

这里用欧拉角表示位姿变化。假设刚体按照 $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ 轴旋转, 即刚体先绕物体坐标系的 X 轴旋转 α 角, 然后绕 Y 轴旋转 β 角, 最后绕 Z 轴旋转 γ 角。

则当 $\cos \beta \neq 0$ 时, 已知旋转矩阵 R , 如公式(7)表示的形式, 可以求解出相应的欧拉角为:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \left(\frac{r_{32}}{r_{33}} \right) \\ \beta = \arctan \left(-\frac{r_{31}}{\sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}} \right) \\ \gamma = \arctan \left(\frac{r_{21}}{r_{11}} \right) \end{cases} \quad (17)$$

从上面两种情况的讨论来看, 从不同分布的四个特

征点出发, 由距离和角度的约束以及相应的几何关系均可得到唯一解。

3 位姿解算步骤

根据上面的公式推导, 位姿求解算法的具体步骤为:

(1) 获取摄像机拍摄的图像, 用张正友标定法对摄像机进行标定, 获取摄像机内参。

(2) 在图像中选取四个特征点, 分别得到特征点在成像平面坐标系中的坐标 $\{q_i(x_i, y_i, f), i=1, 2, 3, 4\}$ 和特征点之间的距离。

(3) 当四个特征点所在的两条直线平行时, 定义特征点相关的距离因子 $\{k_i, i=1, 2, 3, 4\}$; 当四个特征

点所在的两条直线相交时, 得到交点在世界坐标系中的坐标及其在成像平面坐标系中的坐标。

(4) 由公式(5)或公式(15)求解出世界坐标系中 X_w 轴上的向量变换到摄像机坐标系中的单位向量, 结合公式(6)或公式(16)求解出世界坐标系中 Z_w 轴上的向量变换到摄像机坐标系中的单位向量, 继而求解出世界坐标系中 Y_w 轴上的向量变换到摄像机坐标系中的单位向量。

(5) 根据公式(7)和公式(17)求解出靶标相对于摄像机的初始姿态; 根据世界坐标系的原点在摄像机中的坐标求解出靶标相对于摄像机的初始位置; 最后用 LM 算法对初始位姿进行优化。求解位姿的流程如图 4 所示。

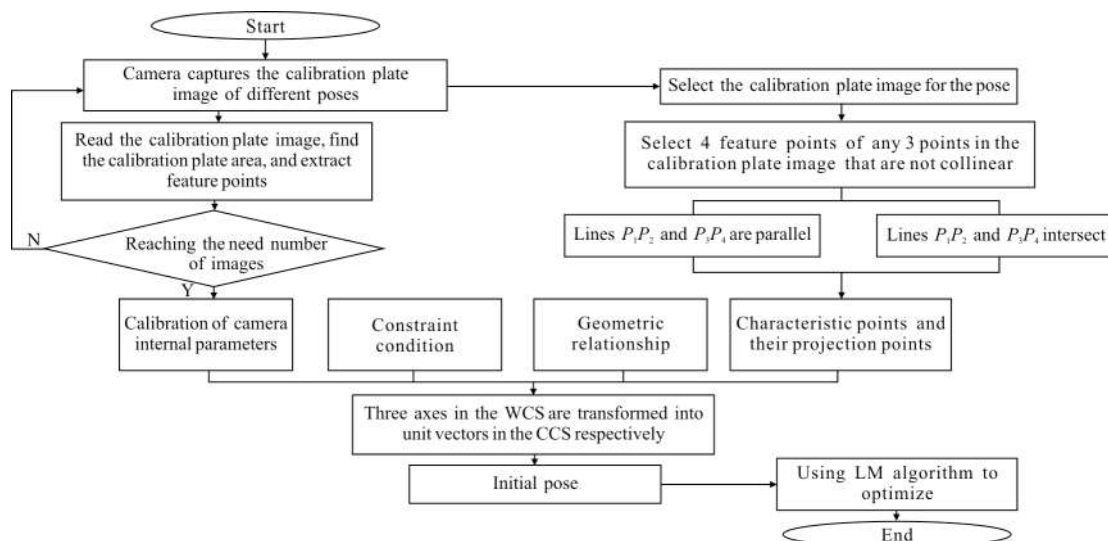


图 4 位姿求解流程图

Fig.4 Pose solution flow chart

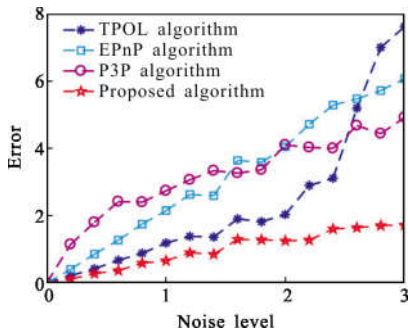
4 实验与数据分析

为了验证文中算法的位姿测量求解精度和抗噪声能力。实验中采用仿真实验和实际测量两种方式将文中算法与参考文献[10]中两点一线 (TPOL) 算法、EPnP 算法和 P3P 算法进行比较。

4.1 仿真实验

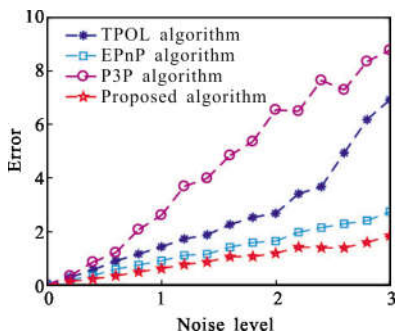
仿真实验主要验证文中算法的抗噪能力。实验

过程中, 在图像坐标中加入均匀噪声, 噪声幅度从 0~3.0 pixel, 共 16 个噪声级, 相邻两个噪声级之间间隔 0.2 pixel。对每个噪声级分别进行 200 次实验, 取其平均值作为该噪声级的结果。分别用文中算法、两点一线算法、EPnP 算法和 P3P 算法计算出加入噪声后的位姿, 将其计算结果与仿真中的真值进行比较, 得出各个算法的抗噪能力。实验中不同算法对比结果如图 5 所示。



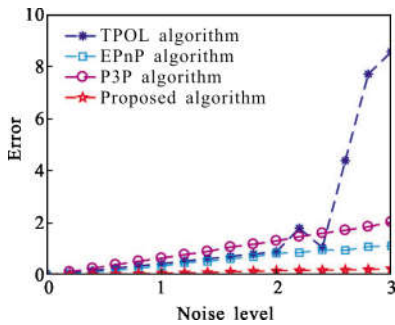
(a) x 轴旋转角误差

(a) Error for rotation angle around x-axis



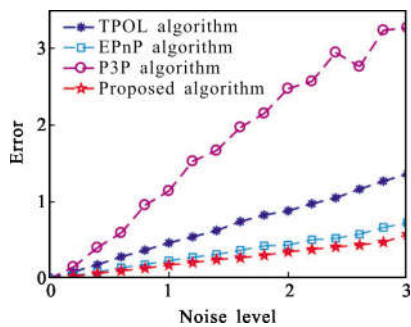
(b) y 轴旋转角误差

(b) Error for rotation angle around y-axis



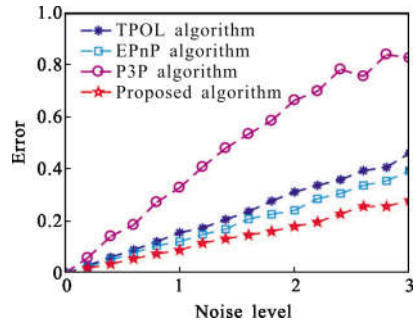
(c) z 轴旋转角误差

(c) Error for rotation angle around z-axis



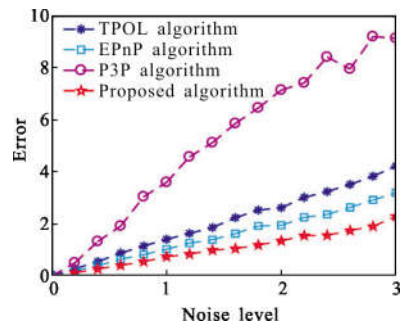
(d) x 轴平移误差

(d) Error for translation along x-axis



(e) y 轴平移误差

(e) Error for translation along y-axis



(f) z 轴平移误差

(f) Error for translation along z-axis

图 5 不同算法对比实验结果

Fig.5 Comparison experimental results of different algorithms

4.2 位姿测量实验

搭建的机器人单目视觉测量系统如图 6 所示，采用水星系列数字摄像机，型号为 MER-132-43U3M/C，分辨率为 1292×964，镜头的焦距为 $f=3.5\text{ mm}$ 。在单目视觉位姿测量实验中，以步进电机控制器 SC100 和六维精密旋转台作为测试设备，验证文中算法的有效性。将靶标固定在旋转台上，得到靶标相对于摄像机的位置和姿态参数，将其作为真值，然后拍摄图像进行测试。

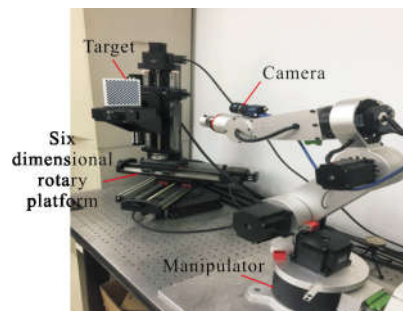


图 6 机器人单目视觉测量系统

Fig.6 Robot monocular vision measurement system

下面分别就两种情况进行实验：

(1) 当 P_1P_2 与 P_3P_4 平行时, 在世界坐标系中选取任意满足平行条件的四个特征点。这是对参考文献[9]四点呈矩形分布所做的改进, 在不约束呈矩形分布时求解世界坐标系中 x, y, z 轴上的向量变换到摄像机坐标系中的单位向量, 并且增加了 y 轴方向的判断。尽管没有要求特征点呈矩形分布, 但得到的结果却优于参考文献[9]相同; 再进一步与参考文献[10]中两点一线算法进行比较, 由于这种算法存在两个解, 只能选取该算法得到的正确解, 而文中算法所得到的位姿仅有唯一解, 与参考文献[9]的实验结果一致, 该算法解的精度优于两点一线算法。

(2) 当 P_1P_2 与 P_3P_4 相交时, 选取四个特征点在世界坐标系中的坐标分别为 $P_1=(40, 0, 0); P_2=(80, 0, 0); P_3=(80, 40, 0); P_4=(40, 20, 0)$, 得到 P_1P_2 与 P_3P_4 之间的交点为 $P_0=(0, 0, 0)$, 如图 7 所示。位姿测量结果见表 1。



图 7 实际测量靶标图

Fig.7 Actual measurement target

表 1 物体位姿测量结果

Tab.1 Measurement results of an object pose

Pose parameter	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	X_c/mm	Y_c/mm	Z_c/mm
Actual value	10.35	-14.77	32.66	50.02	20.14	799.50
Measured value (Proposed algorithm)	10.32	-14.01	32.76	49.80	20.16	798.73
Measured error	-0.03	0.76	0.10	-0.22	0.02	-0.77
Measured value (TPOL algorithm)	12.43	-13.36	32.45	49.74	19.94	798.57
Measured error	2.08	1.41	-0.21	-0.28	-0.20	-0.93
Measured value (EPnP algorithm)	10.51	-13.92	32.71	49.74	20.20	798.50
Measured error	0.16	0.85	0.15	-0.28	0.06	-1.00
Measured value (P3P algorithm)	7.02	-13.60	32.86	49.62	20.29	798.07
Measured error	-3.33	1.17	0.20	-0.40	0.15	-1.43

从表 1 可知, 文中算法优于两点一线算法、EPnP 算法和 P3P 算法, 则文中算法位姿测量精度高, 并且有唯一解, 能够很好地应用于实际测量中。上述算法是在 $1 \mu\text{m}$ 精度的标定板上进行的, 选定标定板上相对坐标为 $P_c(x_c, y_c, z_c) = (88.63, 37.89, 286.33)$ 的点作为测试点, 点 P_c 与摄像头的距离 $L=300 \text{ mm}$, 用表 1 的算法测量点 P_c 的坐标, 每种算法测量 20 次, 测试结果如图 8 所示。

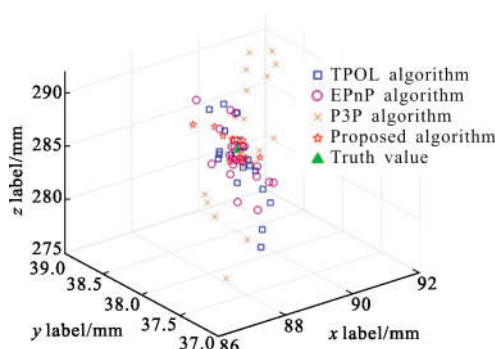


图 8 不同算法测量的世界坐标

Fig.8 World coordinates measured by different algorithms

为了定量地分析不同算法的求解精度, 定义合成误差 E 为:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (18)$$

式中: E_x 为 x 轴坐标分量的绝对误差平均值; E_y 为 y 轴坐标分量的绝对误差平均值; E_z 为 z 轴坐标分量的绝对误差平均值。

由公式(18)可求解出, 两点一线算法的合成误差为 1.52 mm ; EPnP 算法的合成误差为 1.28 mm ; P3P 算法的合成误差为 4.26 mm ; 文中算法的合成误差为 0.54 mm 。实验结果表明文中算法的精度是两点一线算法和 EPnP 算法的 2 倍, 是 P3P 算法的 7 倍。

从图 5 的仿真实验可以看出, 文中算法在不加入噪声时误差为 0, 即能得到精确的解, 表明文中算法在理论上的正确性。随着图像点的噪声增大, 精度就会随之减小, 则得到的误差就随之增大, 因此所有算法得到的 x, y, z 轴旋转角和平移误差都表现为递增的趋势。在 EPnP 算法中, 噪声对 x 轴旋转角的影响较大; 在 P3P 算法中, 噪声对 y 轴旋转角的影响较大; 在两点一线算法中, 噪声对 z 轴旋转角和平移的影响较大; 但在各个噪声水平下, 文中算法在 x, y, z 轴旋转角和平移误差均小于两点一线算法、EPnP 算法

和 P3P 算法,则由公式(18)可知,在各个噪声水平下,文中算法的旋转角和平移合成误差也均小于其他三种算法,所以文中算法的抗噪性能更强,位姿估计误差更小。

此外,对于非共面的点需要通过投影得到四个共面的点才可使用文中算法求解出位姿,当测量点存在非共面误差时,由相机模型^[14]可知,被测点在像平面的投影点存在误差,测量点存在非共面误差对测量精度的影响与在图像坐标中加入噪声的影响相同。由文中算法的抗噪声能力强可得,当测量点存在非共面误差时,文中算法的测量精度优于两点一线算法、EPnP 算法和 P3P 算法。

5 结 论

(1) 提出了一种基于未知分布的共面四个特征点位姿求解算法,详细分析了四点分布的两种情况并给出位姿求解的具体解算步骤,从理论上保证了该算法的可行性。

(2) 文中算法在 P_1P_2 与 P_3P_4 平行的情况下增加了方向向量的判断,不约束于矩形分布;同时, P_1P_2 与 P_3P_4 相交和平行的情况避免了解不唯一的现象。

(3) 文中算法在求解精度和抗噪能力上都优于两点一线算法、EPnP 算法和 P3P 算法。表明文中算法具有较高的位姿解算精度和鲁棒性,可以作为实际测量位姿的一种有效算法。

参考文献:

- [1] Hou Jia, Li Haifeng, Zheng Zhenrong, et al. Distortion correction for imaging on non-planar surface using freeform lens[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(6): 986-991.
- [2] Edward Rosten, Rohan Loveland. Camera distortion self-calibration using the plumb-line constraint and minimal hough entropy [J]. *Machine Vision and Applications*, 2011, 22(1): 77-85.
- [3] Wang Qiyue, Wang Zhongyu. Spacecraft pose measurement based on monocular vision [J]. *Applied Optics*, 2017, 38(2): 250-255. (in Chinese)
- [4] Wang Zhiqiang, Cheng Hong, Yang Guang, et al. Fast target location method of global image registration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (S1): 225-229. (in Chinese)
- [5] Zhou Xin, Zhu Feng. Some discussions on the uniqueness conditions of solutions to P3P problems[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003, 26(12): 1696-1701. (in Chinese)
- [6] Yao Zhenjian, Wang Zhongyu, Li Dan. Error analysis of pose measurement with monocular vision based on isosceles triangle model [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2014, 35(z1): 19-25. (in Chinese)
- [7] Hu Zhanyi, Lei Cheng, Wu Fuchao. A short note on P4P problem[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(6): 770-776. (in Chinese)
- [8] Wu Fuchao. A study on the P5P problem [J]. *Journal of Software*, 2001, 12(5): 768-775. (in Chinese)
- [9] Wang Tianyu, Dong Wenbo, Wang Zhenyu. Position and Orientation measurement system based on monocular vision and fixed target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0427003. (in Chinese)
- [10] Liu Chang, Zhu Feng, Xia Renbo. Monocular pose determination from coplanar two points and one line features [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(8): 3145-3147. (in Chinese)
- [11] Wang Xiaojian, Pan Shunliang, Qiu Liwei, et al. Position and pose estimation algorithms based on the features of double Parallel lines [J]. *Journal of Instrumentation*, 2008, 29(3): 600-604. (in Chinese)
- [12] Xiao Xizhen, Li Wentao, Tang Yandong, et al. Position and pose measurement of rectangle with unknown aspect ratio based on nonlinear optimization [J]. *Information and Control*, 2016, 45(1): 108-113. (in Chinese)
- [13] Liu Yinxiao, Wei Wei. Target points positioning algorithm based on rare information in uncalibrated camera's photos [J]. *Application Research of Computer*, 2015, 32(1): 272-275. (in Chinese)
- [14] Jiang Wensong, Wang Zhongyu. Calibration of visual model for space manipulator with a hybrid LM-GA algorithms[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 66 (1): 399-409. (in Chinese)