

多特征点拓扑确定位姿测量算法研究

王 鹏^{1,2}, 周权通¹, 孙长库^{1,2}

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 为解决单目视觉位姿测量时, 由目标特征点较多导致图像点与目标点拓扑关系未知的问题, 提出了一种多特征点拓扑确定位姿测量算法。较多特征点可在目标进行大角度运动时保证足够的特征点进行位姿解算, 与较少特征点相比提高测量精度。该算法将拓扑确定的过程和位姿求解的迭代过程进行嵌套, 同时进行拓扑确定和位姿计算。位姿计算的迭代过程基于平行透视投影模型, 不需要目标重心投影点坐标作为迭代初始值。拓扑确定的过程转化为分配问题的求解过程。每次位姿迭代的过程中进行一次拓扑确定, 拓扑确定的结果可以计算更优的位姿估计。通过多位姿测量实验和精度对比实验结果证明: 该算法适合大范围、高精度的位姿测量, 在 $-120^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 范围内, 位姿测量均方根误差为 0.272° 。

关键词: 位姿测量; 拓扑确定; 单目视觉; 特征点; 嵌套迭代

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0517001

Study of pose estimation based on multiple feature points topological determination

Wang Peng^{1,2}, Zhou Quantong¹, Sun Changku^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Science and Technology Electro-optic Control Laboratory, Luoyang 471009, China)

Abstract: In monocular vision pose estimation, the topological relationship between objective feature points and image feature points where there are multiple feature points is difficult to determine. An algorithm based on multiple feature points topological determination was proposed to solve this problem where the correspondences are unknown. By mounting multiple feature points on the object, enough proper feature points for pose computing were guaranteed when the object is large-scale moving, which can improve the precision of pose estimation. The algorithm nested the iteration process of topological determination and the iteration process of pose computing into one iteration loop, solving them simultaneously. The pose estimation iteration process was based on para-perspective projection model, where the coordination of the projection of the object gravity center used as the initial parameter of iteration is not needed. The iteration process of topological determination was transformed into a solution of assignment problem. Each topological determination can obtain a better pose estimation in every pose estimation iteration loop. The results of multiple poses experiment and precision comparison experiment

收稿日期: 2016-09-05; 修订日期: 2016-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(51375339); 航空科学基金(20145148009)

作者简介: 王鹏(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光及光电检测方面的研究。Email: wang_peng@tju.edu.cn

通讯作者: 周权通(1991-), 男, 硕士, 主要从事激光及光电检测技术方面的研究。Email: tjuzqt@163.com

prove that the algorithm is qualified for the high precision pose estimation of 3D object with large scale motion, with the root mean square error 0.272° in the range of $-120^\circ-120^\circ$.

Key words: pose estimation; topological determination; monocular vision; feature point; nested iteration

0 引言

单目视觉位姿测量过程使用一个摄像机, 测量范围大, 结构简单, 受干扰小, 已广泛应用于工业位姿测量领域^[1-4]。利用已标定摄像机图像中的 n 个特征点二维坐标, 结合这些特征点的空间相对位置计算其三维空间坐标的问题, 统称为 PnP 问题。

现有的 PnP 问题求解方法主要分为直接线性求解和非线性迭代求解。直接线性求解方面, 吴福朝, 段福庆^[5-6]等人证明了 4 点可以实现位姿测量的线性求解, 王鹏^[7]等人利用代数方法将非线性测量模型转化为线性非齐次方程组求解。但是当特征点提取结果精度不高时, 直接线性求解的结果精度受较大影响。非线性求解方面, 张子森^[8]等人提出基于非共面特征点的最小二乘法求取物体位姿的算法。刘昶^[9]等人提出基于共面的两点一线特征迭代求取位姿的算法。DeMenthon^[10]等人提出的 POSIT 算法收敛快, 稳定性高。Horaud^[11]等人研究了弱透视投影、平行透视投影和透视投影的几何模型, 对 POSIT 算法进行改进, 提出 PI (Pose from para-perspective with Iteration) 算法。夏军营^[12]等人基于 PI 算法提出 MPI 算法将图像参考点的坐标作为未知变量与目标的位姿参数一同迭代求解。周婧^[13]等人提出自适应总体最小二乘方法求解 P5P 问题。非线性迭代计算方法在位姿测量领域占据主要地位。

已知图像特征点与目标特征点之间的拓扑关系是前面所述方法应用的基础。在被测目标运动范围较小的情况下, 位姿测量仅需少量特征点, 拓扑关系的确定相对容易。当目标运动范围较大时, 较少特征点会因为偏离视场甚至被目标自身遮挡等原因无法满足位姿测量的需要, 因此需要在被测目标上增加特征点的数量和分布范围, 这时图像与目标特征点拓扑确定变得复杂。为求解目标位姿, 需要解决拓扑确定的问题。David^[14]等人结合 POSIT 算法和 SoftAssign 迭代算法提出了 SoftPOSIT 算法, 实现小范围的同时位

姿估计与拓扑确定。SoftPOSIT 算法从空间内随机的初始位姿出发开始寻找, 采用误差较大的弱透视投影模型, 在初始位姿相差较大的情况下匹配较难成功, 更适用于目标运动范围较小或已知目标近似位姿的情况^[15-17]。

基于以上讨论, 为解决单目视觉位姿测量中图像与被测目标特征点拓扑关系未知的情况, 提出一种基于平行透视投影模型的多特征点拓扑确定位姿测量算法。该算法在被测目标上放置多个特征点, 保证目标运动时在正对的视场区域内有足够的特征点可进行位姿解算。建立合适的初始位姿集合, 算法开始时从集合中选取假设初始位姿, 并在连续运行时将前次位姿解算结果作为优先假设位姿, 实现全局搜索。将求解拓扑确定的迭代过程与基于平行透视投影模型的位姿解算迭代过程进行嵌套, 对两个方面综合优化, 同时求解。在迭代过程中, 设置随迭代次数增加而逐渐收紧的阈值, 错误初始位姿的迭代过程会较快终止。在拓扑确定迭代过程中, 放宽了对权值系数矩阵进行优化操作的终止条件。最后搭建相应的实验系统, 验证该算法具有较高的成功率和测量精度。

1 理论与基本思路

1.1 基本理论

文中研究内容为图像特征点到目标特征点的拓扑确定与位姿估计, 为方便描述, 约定目标特征点的世界坐标系坐标 P_i 均为已知, 记为 $(X_i, Y_i, Z_i)^T$ 。摄像机成像模型为小孔模型且内参数已知, o 是摄像机坐标系的原点。 P_0 是目标特征点坐标系的原点, 且是所有目标特征点的重心。 $p_0(x_0, y_0)$ 是 P_0 的投影, 且 $x_0=t_x/t_z, y_0=t_y/t_z$ 。在摄像机内参矩阵已知的情况下, 可以快速将图像特征点在实际像平面和归一化像平面之间转换。为方便表述, 认为图像点均在归一化像平面上, 即 $z=1$ 。那么两个坐标系之间的转换需要通过一个旋转矩阵 R 和平移矩阵 t , 那么对于目标坐标系

内任意的点 P_i 在归一化像平面的坐标记为 (x_i, y_i) , 有:

$$\begin{cases} x_i = \frac{i^T \cdot P_i + t_x}{k^T \cdot P_i + t_z} \\ y_i = \frac{j^T \cdot P_i + t_y}{k^T \cdot P_i + t_z} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $R=(i^T, j^T, k^T)^T, t=(t_x, t_y, t_z)^T$. 记

$$\begin{cases} I=i^T/t_z \\ J=j^T/t_z \\ \varepsilon_i=k^T \cdot P_i/t_z \end{cases} \quad (2)$$

则公式(1)可以改写为:

$$\begin{cases} x_i(1+\varepsilon_i)-x_0=I \cdot P_i \\ y_i(1+\varepsilon_i)-y_0=J \cdot P_i \end{cases} \quad (3)$$

在目标距离摄像机有一定距离时, ε_i 的值比较接近于 0. 这种情况下, 透视投影有两种近似, 弱透视和平行透视. 平行透视投影的近似误差要小于弱透视投影^[11], 故文中算法采用平行透视投影.

记位于待测目标坐标系的目标特征点为 P_i , 对应的投影像点为 p_i , 对应的平行透视投影像点为 $p_i^p(x_i^p, y_i^p)$, 平行透视投影对应的投影方程^[11]:

$$\begin{cases} x_i^p - x_0 = \frac{i^T - x_0 k^T}{t_z} \cdot P_i \\ y_i^p - y_0 = \frac{j^T - y_0 k^T}{t_z} \cdot P_i \end{cases} \quad (4)$$

将公式(2)代入公式(4)可以得到:

$$\begin{cases} x_i^p + x_0(\varepsilon_i - 1) = I \cdot P_i \\ y_i^p + y_0(\varepsilon_i - 1) = J \cdot P_i \end{cases} \quad (5)$$

通过公式(3)与公式(5), 可得平行透视投影像点坐标为:

$$\begin{cases} x_i^p = x_i(1+\varepsilon_i) - x_0\varepsilon_i \\ y_i^p = y_i(1+\varepsilon_i) - y_0\varepsilon_i \end{cases} \quad (6)$$

1.2 位姿求解思路

如图 1 所示, 取任一特征点 P 、特征点坐标系原点 P_0 与摄像机中心的所在平面来描述. p' 点为特征点 P 的平行透视投影归一化像点, p' 点坐标 (x', y') 可以由公式(4)得到. 讨论拓扑确定已知情况, 认为 P_L 点为移动之后的 P 点, p'' 点是 P_L 点的平行透视投影归一化像点, p'' 点坐标 (x'', y'') 可由公式(6)得到. 显而易见, 当且仅当 p' 与 p'' 重合时, P 才会出现在 p 点确定的投影直线上. 寻找位姿的过程就是寻找 p' 与 p'' 重合的过程.

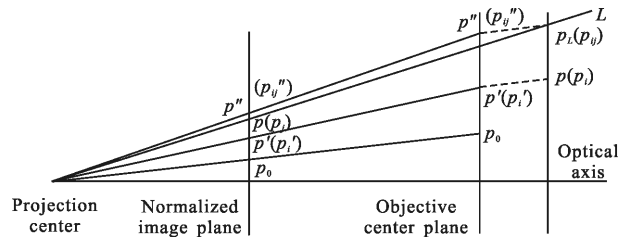


图 1 位姿求解的思路

Fig.1 Interpretation of pose solving

1.3 位姿估计与迭代求解

对于 M 个目标特征点 $P_i(i=1, 2, \dots, M)$, 采集的单幅图像有 N 个图像特征点 $P_j(j=1, 2, \dots, N)$. 每个图像特征点 p_i 可能与任何一个目标特征点 P_i 所对应, 需要找出唯一的拓扑确定.

如图 1 所示, p_i' 为 P_i 的像点, p_{ij}'' 是位姿改变之后的 P_{ij} 的像点. p_i' 与 p_{ij}'' 的重合表示像点 p_j 与特征点 P_i 匹配. 用 d_{ij} 来表示 p_i' 和 p_{ij}'' 之间的距离. 为方便计算, 记:

$$\begin{cases} I_p = \frac{i^T - x_0 k^T}{t_z} \\ J_p = \frac{j^T - y_0 k^T}{t_z} \end{cases} \quad (7)$$

引入齐次坐标:

$$\begin{cases} Q_1 = (I_p, x_0) \\ Q_2 = (J_p, y_0) \\ M_i = (P_i, 1) \end{cases} \quad (8)$$

于是公式(4)、(6)、(7)、(8)联立, 可以写出:

$$d_{ij}^2 = (Q_1 \cdot M_i - [x_j(1+\varepsilon_i) - x_0\varepsilon_i])^2 + (Q_2 \cdot M_i - [y_j(1+\varepsilon_i) - y_0\varepsilon_i])^2 \quad (9)$$

位姿估计与拓扑确定问题就转化为求解式(10)这个全局函数的最小值.

$$E = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N m_{ij} (d_{ij}^2 - \alpha) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N m_{ij} [(Q_1 \cdot M_i - [x_j(1+\varepsilon_i) - x_0\varepsilon_i])^2 + (Q_2 \cdot M_i - [y_j(1+\varepsilon_i) - y_0\varepsilon_i])^2 - \alpha] \quad (10)$$

式中: m_{ij} 用来描述 p_j 和 P_i 的匹配情况, 当所有的对应关系都已经确定时, m_{ij} 的取值只可能是 0 (不匹配) 或 1 (匹配). 并且, 每个图像特征点至多只能和一个目标特征点匹配, 反之每个目标特征点同样至多只能和一个图像特征点匹配. 由此可以构建一个由权值系数 m_{ij} 组成的 $M \times N$ 的矩阵 $M = \{m_{ij}\}$. 第 i 行对应第 i 个目标特征点, 第 j 列对应第 j 个图像特征点, 因此当 (i, j) 的元素为 1 时, 表示图像特征点 p_j 和目

标特征点 P_i 相匹配。

公式(10)中, α 用来初步区分 p_j 和 P_i 是否匹配, 满足 $d_{ij}^2 < \alpha$ 的 p_j 和 P_i 认为其可能匹配, 但是 $d_{ij}^2 > \alpha$ 的则认为不匹配, 在后续的迭代中增加可能匹配点对的权值, 减小不匹配点对的权值, 避免所有权值均为 0 的平凡解成为全局最优解。 α 的取值的依据为 p_j 和 P_i 对应的 d_{ij}^2 的最大容许值, 对于 LED 特征点, α 可以取 1。

现假设已得到正确拓扑关系的权值系数矩阵, 即目标点与图像点的对应关系已知。令公式(10)关于 Q_1 和 Q_2 的偏导等于 0, 可以解得其最小二乘解:

$$\begin{cases} Q_1 = (\sum_{i=1}^M m_i' P_i P_i^T)^{-1} (\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N m_{ij} (x_j(1+\varepsilon_i) - \varepsilon_i x_0) P_i) \\ Q_2 = (\sum_{i=1}^M m_i' P_i P_i^T)^{-1} (\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N m_{ij} (y_j(1+\varepsilon_i) - \varepsilon_i y_0) P_i) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $m_i' = \sum_{j=1}^N m_{ij}$ 。利用 Q_1 和 Q_2 可以解算出相应的目标位姿参数。

迭代开始时, 将 ε_i 均置为 0, 则含有图像点重心坐标的项为 0, 可以应用于目标位姿未知的情况。由公式(11)可以得到 Q_1 和 Q_2 的初始估计值; 由公式(8)可以得到 I_p, J_p, x_0, y_0 的估计; 由于每次估计都是目标函数最小化的解, 新的位姿下, p_i' 和 p_{ij}'' 距离更接近, 在此位姿下, 可以对 x_0 和 y_0 进行重新估计, 更新 ε_i , 得到对 Q_1 和 Q_2 更好的估计。位姿估计形成一个迭代过程。

位姿求解过程是反复迭代的过程, 需要通过位姿参数与权值系数矩阵 M (表示图像点与目标点拓扑关系) 交替优化来求解正确的位姿。具体的迭代过程见后文详细表述。

如果令最终的位姿向量 $Q_1 = (q_1^1, q_1^2, q_1^3, q_1^4)$, $Q_2 = (q_2^1, q_2^2, q_2^3, q_2^4)$, $s = (\| (q_1^1, q_1^2, q_1^3) \| \| (q_2^1, q_2^2, q_2^3) \|)^{1/2}$, 则可以得到:

$$\begin{cases} i = (q_1^1, q_1^2, q_1^3)^T / s \\ j = (q_2^1, q_2^2, q_2^3)^T / s \\ k = i \times j \\ t_x = q_1^4 / s, t_y = q_2^4 / s, t_z = f / s \end{cases} \quad (12)$$

2 拓扑确定位姿求解

2.1 拓扑确定

以上位姿求解建立在拓扑关系已经确定的情况

下。对于拓扑关系未知的目标点集和图像点集, 求出正确的拓扑关系则成为解决位姿求解问题的关键。

对于被遮挡的目标特征点, 没有图像特征点与之对应。为了处理这种情况, 将矩阵 $M = \{m_{ij}\}$ 扩展至 $(M+1) \times (N+1)$, 在矩阵外围各添加一个松弛行和一个松弛列, 用以放置并未找到匹配关系的“1”。如果矩阵 M 的松弛列的第 i 个元素为 1, 说明第 i 个目标特征点 P_i 并没有与之对应的图像特征点, 同理适用于松弛行。

对于一个初始的权值系数矩阵 $M^0 = \{m_{ij}^0\}$, 将目标函数公式(10)进行泰勒展开, 有:

$$\begin{aligned} E = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N m_{ij} (d_{ij}^2 - \alpha) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N m_{ij}^0 (d_{ij}^2 - \alpha) - \\ \left(- \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\partial E}{\partial m_{ij}^0} \right) (m_{ij} - m_{ij}^0) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N m_{ij}^0 (d_{ij}^2 - \alpha) - \\ \left(- \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (d_{ij}^2 - \alpha) \right) (m_{ij} - m_{ij}^0) \end{aligned} \quad (13)$$

求解目标函数的最小值等价于求解:

$$E_0 = \left(- \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{\partial E}{\partial m_{ij}^0} \right) m_{ij} \quad (14)$$

的最大值。 E_0 最大值求解问题在数学中被称作分配问题, 是组合优化的一种经典问题^[18]。 E_0 中每个元素受到两个方向的约束:

$$\forall i, \sum_{j=1}^{N+1} m_{ij} = 1, \forall j, \sum_{i=1}^{M+1} m_{ij} = 1 \quad (15)$$

参考文献[18]证明了元素均为正数的任意矩阵都可通过对行和列的交替归一化的迭代过程收敛于双随机矩阵。(双随机矩阵指矩阵的所有元素均为正数, 且每一行或列的元素和均为 1)。

首先需要对 M 进行初始化, 取 $M^0 = \{m_{ij}^0\}$ 。对于松弛行和松弛列, 为方便接下来的反复归一化, 将初始值取为较小的常数 $\gamma = 1/(M+1)$ 。其余的权值则参考 E_0 的格式取为:

$$m_{ij}^0 = \gamma \exp(\beta(-\partial E / \partial m_{ij}^0)) = \gamma \exp(-\beta(d_{ij}^2 - \alpha)) \quad (16)$$

指数函数可以保证初始权值全部为正值。其中 β 的初值设为较小的数, 可以在迭代开始时将所有可能的匹配关系都考虑在内。

然后对权值系数矩阵 M 进行行和列的交替归一化, 将其转化成每一个每行每列和为 1 的矩阵。每次完成归一化迭代, 更新 β , 乘以一个略大于 1 的系数。接着更新权值系数矩阵 M , 其中所在行和列都是

最小的 d_{ij}^2 对应的 m_{ij} 将逐渐收敛于 1, 其余各项则收敛于 0。行、列归一化的公式为:

$$m_{ij}^{k+1} = m_{ij}^k / \sum_{i=1}^{M+1} m_{ij}^k, 1 \leq i \leq M+1, 1 \leq j \leq N$$

$$m_{ij}^{k+1} = m_{ij}^{k+1} / \sum_{j=1}^{N+1} m_{ij}^{k+1}, 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N+1 \quad (17)$$

在每次完成行、列归一化得到当前迭代系数下的权值系数矩阵, 对其进行计算, 假设当前迭代次数为 λ , 得到拓扑点数系数 $\eta(\lambda)$ =当前拓扑匹配点个数/图像特征点个数。设置根据迭代次数变化的跳出阈值 $\text{kick.thres}(\lambda) = \lambda^2 / (\log_{\beta_0}(\beta_{\text{end}}/\beta_0))^2$: 如果匹配点数小于跳出阈值, 即 $\eta(\lambda) < \text{kick.thres}(\lambda)$ 则跳出迭代循环, 返回选取下一初始位姿开始迭代。如果大于跳出阈值, 则更新迭代系数 β , 继续进行当前对权值系数矩阵的行列归一化过程, 直到全局函数达到足够小

或者迭代系数溢出。

文中算法将行、列归一化的过程嵌入位姿迭代过程。嵌套的迭代过程表述为: 通过假设位姿计算出当前目标函数 E 和权值矩阵 M ; 通过行、列归一化更新权值矩阵 M 为双随机矩阵, 获得当前目标函数在当前位姿下最优的拓扑关系; 利用获得的拓扑关系更新位姿向量 Q_1 和 Q_2 , 解算出优于当前位姿参数的位姿, 进而更新目标函数 E 和权值矩阵 M 。这样就形成了一个嵌套的迭代过程, 每一次迭代都可以得到更好的位姿估计和权值矩阵, 重复上述过程直到迭代终止或目标函数公式(10)达到足够小。

2.2 算法流程

文中算法的详细流程图如图 2 所示, 虚线框表示行、列归一化迭代过程和位姿求解迭代过程的嵌套。

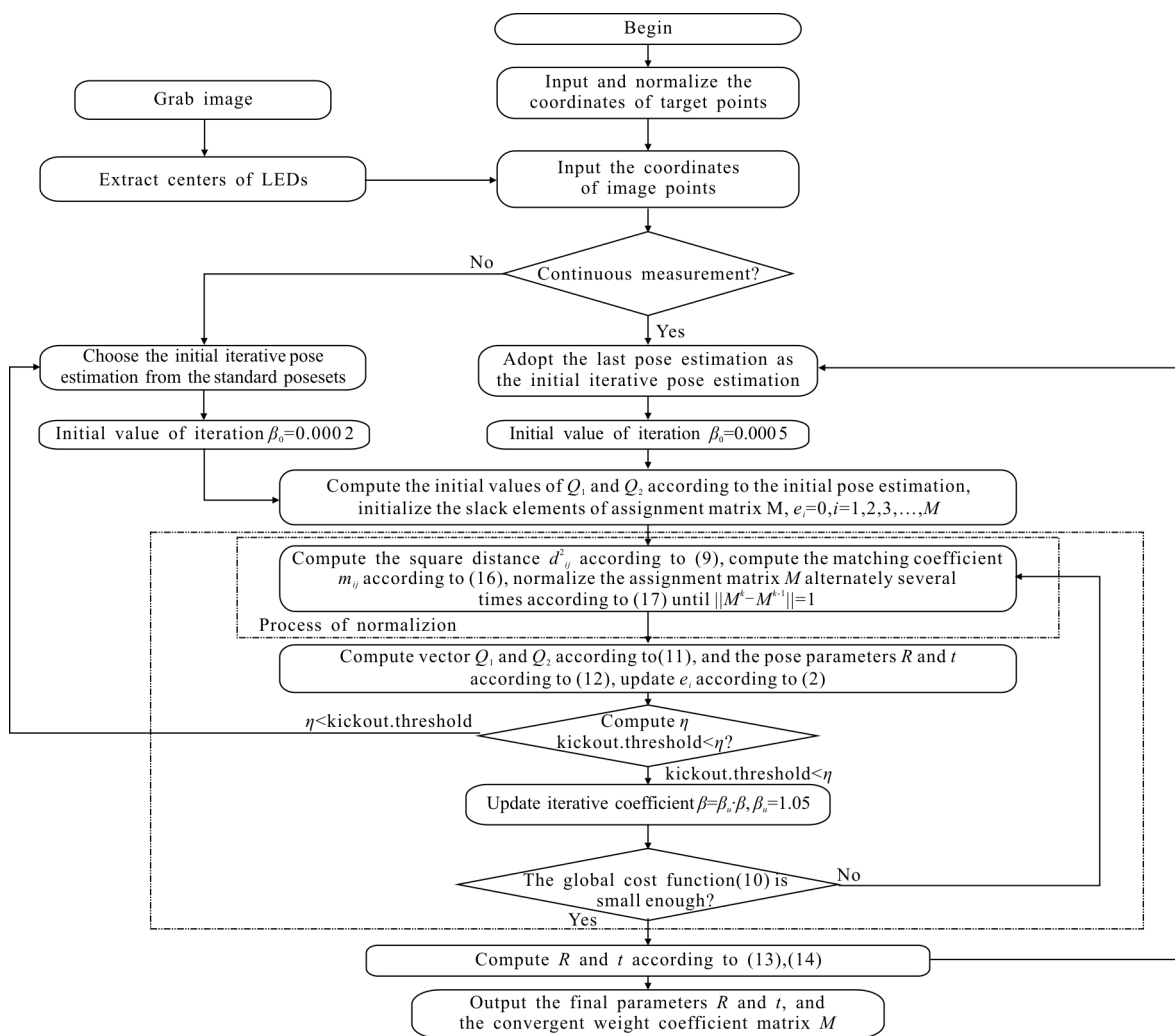


图 2 算法流程图

Fig.2 Flow chart of the proposed algorithm

3 实验与分析

为验证文中算法的有效性和精度,搭建相应的实验系统。如图 3 所示,实验系统包括一台丹麦 JAI 公司的 CV-M4+CL 面阵摄像机,有效像素区域为 $1\,392 \times 1\,040$ pixels,像元尺寸为 $6.45\ \mu\text{m} \times 6.45\ \mu\text{m}$,采集频率为 24 Hz,镜头为 penta $\times 1.25$ mm,卓立汉光 RZK200 高精度电控旋转台,分布有 29 个贴片式 LED 特征点的待测立体目标和测量用计算机。

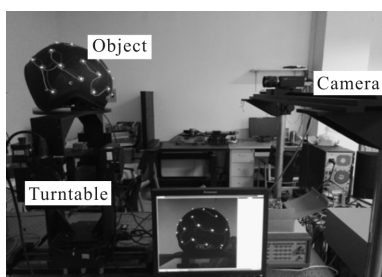


图 3 实验系统
Fig.3 Experiment system

采用 Zhang 的方法对实验用单目摄像机进行标定^[19],获得摄像机内参数如表 1 所示。 f 为焦距(单位 mm), c 为主点坐标(单位 pixel), k 为径向畸变系数, p 为切向畸变系数。

表 1 摄像机参数

Tab.1 Camera parameters

f_x/mm	f_y/mm	c_x/pixel	c_y/pixel
12.727 5	12.729 3	661.391 87	510.137 80
k_1	k_2	p_1	p_2
-0.074 37	-0.090 84	-0.000 68	-0.001 27

特征点三维坐标绘于图 4 中,坐标轴的单位为 mm,

前后左右表示从该方向进行拍摄。约定 direction-(x, y, z)表示从基准方向进行俯仰,横滚,方位三自由度旋转。

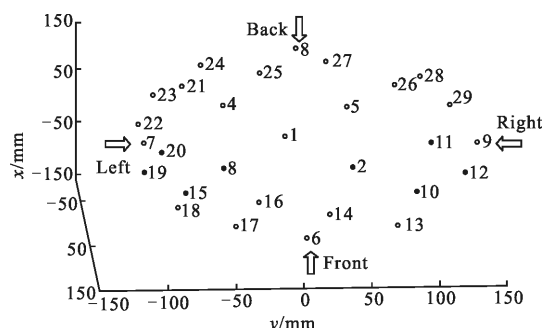


图 4 目标特征点空间示意图

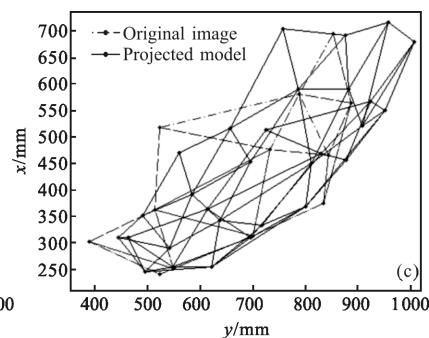
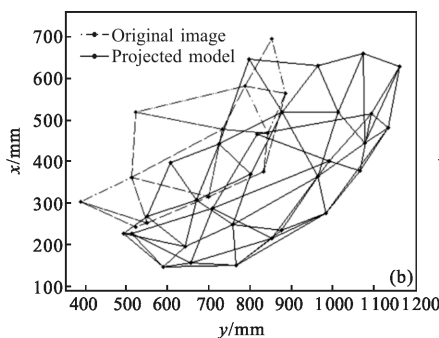
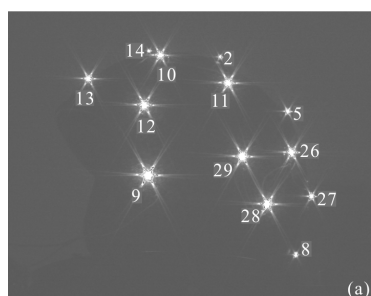
Fig.4 Schematic diagram of objective feature points

3.1 拓扑确定位姿算法有效性验证

对算法的有效性进行验证。文中算法具有全局搜索能力,对单幅图像提取图像特征点中心,与目标特征点进行拓扑确定和位姿测量。被测目标在精密转台上旋转时,通过对采集的图片进行特征点中心提取,与目标特征点集进行位姿估计和特征点拓扑确定,以匹配成功与否来判定算法全局搜索的有效性。

为表明算法具有全局搜索性,对被测目标多个不同位姿进行实验。选取被测目标前后左右为四个基准位姿,在精密转台上对每个基准位姿进行以下位置的采集: $(x, y, z) = (0, 0, 0), (\pm 15, 0, 0), (0, 0, \pm 15), (\pm 15, 0, \pm 15), (\pm 20, 0, 0), (0, 0, \pm 20), (\pm 20, 0, \pm 20)$,共计 68 组数据进行处理。图 5 给出一组数据的处理示例,表 2 与其他算法进行比较。

如图 5 所示,Left- $(-20, 0, 0)$ 的处理过程,其中图(a)是被测目标在转台 Left- $(-20, 0, 0)$ 时拍摄的图像,图(b)~(h)分别是位姿迭代的起始以及第 5, 10, 20, 30, 40, 57 次迭代的结果,实线连接的是目标特征点,虚线连接的是图像特征点,其中横纵坐



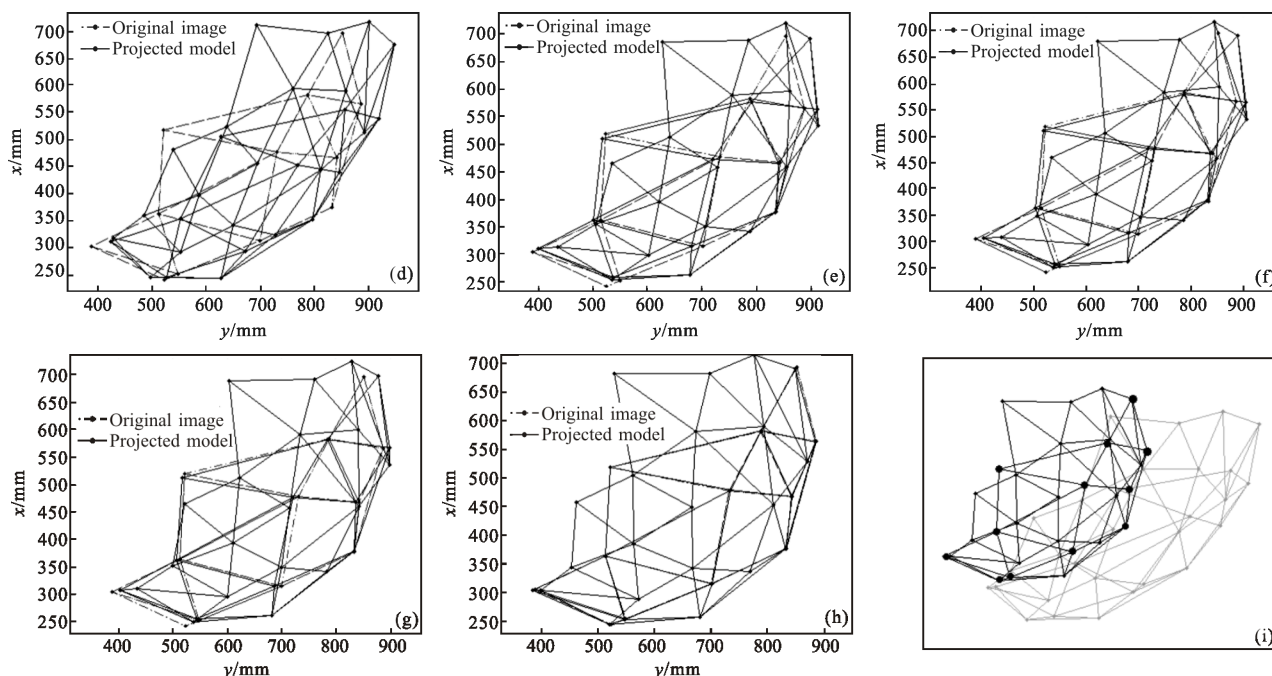


图 5 Left-(-20, 0, 0) 的处理示意图

Fig.5 Schematic diagram of the process of left-(-20, 0, 0)

标轴表示像平面坐标。目标特征点的位置根据当前迭代解算的位姿变化。可以看出开始时位姿相差较大,经过多次迭代,逐渐向正确的位姿靠拢,图(i)是经过 57 次迭代最终拓扑成功的结果,找到正确拓扑关系的点在图中用较大实心点表示。此位姿所有图像特征点均找到了拓扑的目标特征点,匹配成功。

如表 2 所示,给出了前后左右各 17 组位姿的文中算法和 SoftPOSIT 算法的匹配结果对比,表中数据是对应的匹配成功次数,可以看到,SoftPOSIT 算法基于广泛假设初始位姿的全局搜索能力较差,仅有少部分位姿匹配成功,而文中算法基于初始位姿集合,并在连续运行时,采用前次运算结果,有效地利用了先验信息获得了较高的成功率。

表 2 算法成功率

Tab.2 Success rate of the algorithms

	Front	Back	Left	Right
Proposed	17/17	17/17	17/17	16/17
SoftPOSIT	6/17	2/17	1/17	1/17

3.2 拓扑确定位姿算法精度验证

文中通过和 POSIT 算法进行比较来进行测量精度验证。文中算法得益于目标特征点较多,在目标进

行大角度旋转时,摄像机视场内特征点个数较多,并且采用平行透视投影模型,可以实现精度较高的位姿测量。而 POSIT 等算法由于特征点较少,在目标大角度旋转时会出现特征点偏离视场的情况,导致位姿测量误差较大。为了对比文中算法与 POSIT 算法的测量精度,对 POSIT 算法进行两种应用,其一为用 POSIT 算法对目标上固定四点组进行位姿测量,这是当前 P4P 测量位姿的经典应用,记为 POSIT for 4 points;其二为用 POSIT 算法对文中算法处理的图像特征点进行处理,以比较同样数目特征点情况下,文中算法与 POSIT 算法的位姿测量精度,记为 POSIT for n points。

将被测目标按照前方拍摄的位姿置于精密转台上,绕 z 轴(方位角)向左、向右旋转至 120° ,每隔 5° 采一幅图像。利用文中算法对采集的图像进行同时位姿估计与拓扑确定;基于文中算法得到的拓扑确定,利用 POSIT for n points 对采集的图像进行位姿估计;用 POSIT for 4 points 处理数据时,为了保证在头盔大角度旋转时仍可以在图像中找到被测点,如图 4 所示,左旋时选取四点组(3, 15, 19, 20),右旋时选取四点组(2, 10, 11, 12)进行位姿计算。如图 6 所示,当目标物体转动角度较大,尤其旋转至 90° 时,POSIT 算法误差急剧变大直至失效,因此在计算误

差时只考虑 POSIT 算法处理 $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内图像得到的结果。图 6 给出 $-120^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 旋转范围内,各个算法的计算误差。

如图 6 所示,横轴为固定在精密转台上的立体目标的旋转位姿,纵轴表示在当前位姿下的绝对误差。图中正方形点和三角形点分别表示 POSIT for n points 和 POSIT for 4 points 的位姿测量精度,可以看出,POSIT 算法在旋转角 90° 附近,近乎失效,但是在旋转角较小时,POSIT 算法还是保持了其较高的精度。图中圆点表示文中算法的精度,文中算法具备全局搜索位姿的能力,找出正确的对应关系,确定最终位姿,不受旋转角度的局限,在较大旋转角的情况下依旧表现很好。对于 $-120^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 旋转范围的 49 组数据进行统计,得到文中算法的均方根误差为 $0.272\ 601^{\circ}$, $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围内文中算法的均方根误差为 $0.276\ 157^{\circ}$ 。对于 $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 旋转范围的 25 组数据进行统计,得到 POSIT for 4 points 算法的均方根误差为 $0.421\ 714^{\circ}$,POSIT for n points 算法的均方根误差为 $0.301\ 035^{\circ}$ 。从实验结果可以看出文中所提出的同时位姿估计与拓扑确定算法能够满足大范围位姿测量的要求,并保证位姿测量的精度。

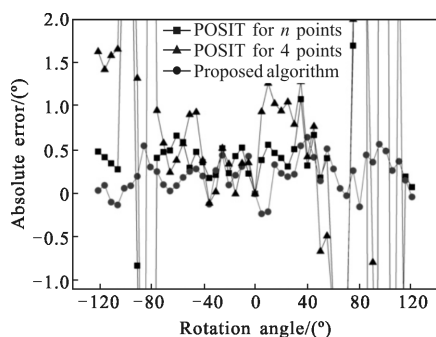


图 6 文中算法与 POSIT 算法的精度比较

Fig.6 Precision comparison between POSIT algorithm and the proposed algorithm

4 结 论

文中针对单目视觉多特征点目标位姿测量的问题,提出一种有效且精度较高的多特征点拓扑确定算法。该算法利用目标点先验信息和前次测量结果作为迭代初始参数,将拓扑确定的迭代过程和基于平行透视投影的位姿迭代过程进行嵌套,同时进行拓扑确定和位姿计算,实现较大运动范围被测目标

位姿测量。通过对被测目标较多位姿的拓扑确定和位姿估计,证明了文中算法具有较高的匹配成功率。通过在大范围旋转情况下的文中算法和 POSIT 算法的位姿测量精度比较,文中算法可以在 $-120^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 单轴测量精度达到均方差 $0.272\ 6^{\circ}$,能满足较高测量精度的大范围位姿测量。

参 考 文 献 :

- [1] Sun C, Sun P, Wang P. An improvement of pose measurement method using global control points calibration [J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0133905.
- [2] Chen Haixin, Gu Guohua, Qian Weixian, et al. A Fast method for moving target detection on a moving camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(3): 133-138. (in Chinese) 陈海欣, 顾国华, 钱惟贤, 等. 一种快速的单目移动相机下运动目标检测方法[J]. *光子学报*, 2014, 43(3): 133-138.
- [3] Neumayr R, Zsombor-Murray P, O'Leary P, et al. Precise pose measurement with single camera calibration for planar parallel manipulators [J]. *Transactions-Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2011, 35(35): 201-213.
- [4] Zeng Zhankui, Gu Qiangwei, Cao Xibin, et al. Relative pose monocular vision determination of spacecraft using orthogonal Procrustes analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S1): 113-118. (in Chinese) 曾占魁, 谷蔷薇, 曹喜滨, 等. 基于正交 Procrustes 分析的航天器单目视觉相对位姿确定方法 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(S1): 113-118.
- [5] Wu Fuchao, Hu Zhanyi. A linear method for the PnP problem[J]. *Journal of Software*, 2003, 14(3): 682-688. (in Chinese) 吴福朝, 胡占义. PnP 问题的线性求解算法 [J]. *软件学报*, 2003, 14(3): 682-688.
- [6] Duan Fuqing, Wu Fuchao, Hu Zhanyi. Camera calibration and 3D reconstruction using parallelism constraint [J]. *Journal of Software*, 2007, 18(6):1350-1360. (in Chinese) 段福庆, 吴福朝, 胡占义. 基于平行性约束的摄像机标定与 3D 重构[J]. *软件学报*, 2007, 18(6):1350-1360.
- [7] Wang Peng, Sun Changku, Zhang Zimiao. Linear pose estimation with a monocular vision system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(5): 1126-1131. (in Chinese) 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.
- [8] Zhang Zimiao, Wang Peng, Sun Changku. Position and

- orientation measurement method with monocular vision and digital simulation [J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, 44(5): 440–444. (in Chinese)
- 张子森, 王鹏, 孙长库. 单目视觉位姿测量方法及数字仿真[J]. 天津大学学报, 2011, 44(5): 440–444.
- [9] 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)
- 刘昶, 朱枫, 夏仁波. 基于共面二点一线特征的单目视觉定位[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(8): 3145–3147.
- [10] Dementhon D F, Davis L S. Model-based object pose in 25 lines of code[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1995, 15(1–2): 123–141.
- [11] Horaud R, Dornaika F, Lamiroy B. Object pose: the link between weak perspective, paraperspective, and full perspective [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 22(2): 173–189.
- [12] Xia Junjian, Xu Xiaoquan, Xiong Jiulong. Iterative pose estimation using paraperspective camera model [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20 (6): 1342–1349. (in Chinese)
- 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.
- [13] Zhou Jing, Gao Yinhan, Liu Changying, et al. Attitude caculation of single camera visual system based on an adaptive algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(17): 2796–2803. (in Chinese)
- 周婧, 高印寒, 刘长英, 等. 基于自适应算法的单目视觉系统的姿态解算 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(17): 2796–2803.
- [14] David P, Dementhon D, Duraiswami R, et al. SoftPOSIT: simultaneous pose and correspondence determination [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 59 (3): 424–431.
- [15] Ugurdag H F, Gören S, Canbay F. Gravitational pose estimation[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2010, 36 (6): 1165–1180.
- [16] Kriener, Charles R. A comparison and evaluation of three different pose estimation algorithms in detecting low texture manufactured objects [J]. *Dissertations & Theses-Gradworks*, 2011(3): 108–111.
- [17] Gold S, Rangarajan A, Lu C P, et al. New algorithms for 2D and 3D point matching: pose estimation and correspondence[J]. *Pattern Recognition*, 1999, 31(8): 1019–1031.
- [18] Knight P A. The sinkhorn-knopp algorithm: convergence and applications [J]. *Siam Journal on Matrix Analysis & Applications*, 2007, 30(1): 261–275.
- [19] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330–1334.