

基于半直接方法的序列影像直线特征跟踪匹配算法

朱世昕¹ 杨泽民²

(山西大同大学教育科学与技术学院 山西 大同 037009)¹

(山西大同大学计算机与网络工程学院 山西 大同 037009)²

摘要 针对序列影像相邻帧间相对运动较小的特点,提出了一种基于半直接方法的序列影像直线特征跟踪匹配算法。首先,选取关键帧进行点特征和直线特征的提取与匹配;然后,利用运动恢复结构算法对直线上的特征点进行重建;接着,通过反向合成图像对齐算法实现相邻帧的直线特征点的跟踪和摄像机相对位姿估计;最后,由跟踪特征点实现对直线特征的跟踪匹配。采用两组不同的序列影像数据对算法进行了验证,实验表明所提算法能够实现序列影像直线特征的准确跟踪匹配,并能同时估计得到摄像机的位姿;摄像机的位姿估计误差随着帧数的增加而累积。文中还提出了一种新的序列影像直线特征跟踪匹配算法,该算法仅利用直线上的稀疏特征点就可实现对相邻影像间的直线特征的准确跟踪匹配,并能估计得到摄像机的运动轨迹。但是,该方法存在累积误差,需要进一步改进。

关键词 序列影像,直线特征跟踪匹配,半直接方法,相对位姿估计

中图分类号 TP391 文献标识码 A

Line Tracking and Matching Algorithm Based on Semi-direct Method in Image Sequence

ZHU Shi-xin¹ YANG Ze-min²

(School of Education Science and Technology, Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)¹

(School of Computer and Network Engineering, Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)²

Abstract Considering the small motion in image sequence, this paper proposed a line tracking and matching algorithm based on semi-direct method is proposed. Firstly, extracting and matching of feature point and line should be conducted in the key frames. Secondly, feature point of the line is reconstructed by using the method of structure from motion. Then, feature point tracking and relative pose estimation are calculated through inverse compositional image alignment algorithm. Finally, line matching result is obtained based on feature point tracking result. Two group of image sequence experiments were conducted to validate the proposed algorithm. The experiments results indicate that the proposed algorithm is capable of tracking and matching the lines in the image sequence, and can estimate the camera pose simultaneously. And camera pose error accumulates with the increase of image frame. A novel line matching algorithm in image sequence was proposed. The algorithm can achieve line tracking and matching and obtain camera track at the same time through sparse feature point of the line. However, the algorithm needs to be corrected because of accumulate error.

Keywords Image sequence, Line tracking and matching, Semi-direct method, Relative pose estimation

特征匹配作为计算视觉中的重要内容和研究难点,在场景重建、目标识别、视觉 SLAM 以及视觉导航等领域有着广泛的应用。特征匹配研究的重点多集中于特征点的提取与匹配方面。相较于点特征,直线特征具有更丰富的场景几何信息和结构信息,尤其在人造目标场景中,纹理信息缺乏,但直线特征丰富^[1]。鉴于直线特征的提取可靠性和定位精度更高,近些年来,国内外研究学者对直线特征匹配也进行了越来越深入的研究。

文献[2]将直线特征匹配分为了两类。一类是利用几何变换、多视几何约束和特征描述符等方法对多视图影像进行直线匹配。Bay 等^[3]使用了直线特征邻域的颜色直方图实现了直线特征匹配;Lopez 等^[4]提出了基于局部外观和光度关系的直线匹配算法,局部外观由区域灰度值计算,光度关系则

由直线方向、长度以及端点位置来确定;Zhang 等^[5]提出了一种新的直线描述符 LBD,其中包括了局部外观信息和局部几何约束信息;张跃强等^[1]提出了一种基于直线局部邻域梯度信息和全局结构信息的直线匹配方法;文贡坚^[6]提出了一种直线编组的匹配算法,解决了“一配多”以及“多配多”的匹配问题;梁艳等^[7]利用匹配同名点构建的虚拟线段和直线的相交仿射不变性以及核线约束等多种约束实现了对不同几何变换下近景影像的直线特征匹配;胡海霞等^[8]通过线段二元关系计算待匹配线段和参考线段的局部相似度和全局相似度,对相似度进行判断,实现直线匹配。此类方法研究较为深入和广泛,能够得到较好的直线匹配结果,对图像形变、遮挡以及直线断裂等情况都有较好的适应性,应用范围广。但是此类算法数据处理量较大,复杂度较高,效率受到影响。另一类

本文受山西省教育科学“十二五”规划项目(GH-12059),国家自然科学基金(11871314),国家自然科学基金青年基金(11605107)资助。

朱世昕(1979—),女,讲师,主要研究方向为虚拟现实、计算机视觉等,E-mail:912679876@qq.com;杨泽民(1974—),教授,主要研究方向为数据挖掘。

就是对序列影像中的直线特征进行提取、跟踪和匹配,此类方法的特点就是短基线、小运动、算法要求实时性。张聪炫等^[2]针对序列影像中运动直线的跟踪问题,在点光流的基础上提出了一种点线光流预测机制的序列图像运动直线跟踪方法。相较于传统算法,该方法计算效率得到提高,也具有更高的跟踪精度和鲁棒性。但是该方法基于帧间光流计算,需要满足光流约束条件,同时光流计算效率也有待提高。

针对序列影像中直线特征匹配问题,提出了一种基于半直接方法的序列影像直线特征跟踪匹配算法。半直接方法由 Christian 等^[9]提出,并应用于视觉里程计中。半直接方法充分利用基于特征的方法和直接方法的优点,极大地提高了算法效率。基于特征的方法是对影像进行特征提取与匹配,以计算相对运动。该方法能够处理相对运动较大的影像,但是算法效率低。直接方法是指直接通过影像的灰度值估计相对运动。该方法不需要进行特征提取与匹配,算法效率高,但只能处理相对运动较小的影像。由于序列帧影像中邻帧影像相对运动较小,因此可以将半直接方法应用于序列影像直线特征跟踪匹配过程中。

1 算法流程

算法实现的基本思想是通过重建直线上的特征点,并对该特征点进行跟踪,实现序列影像中的直线特征的跟踪,同时可以得到摄像机的运动轨迹。算法实现流程如图 1 所示。算法主要包括关键帧处理和邻帧处理两个主要过程。关键帧处理主要包括特征点和特征直线提取与匹配以及直线特征点重构;邻帧处理主要包括帧间运动估计、直线特征点跟踪和直线匹配。

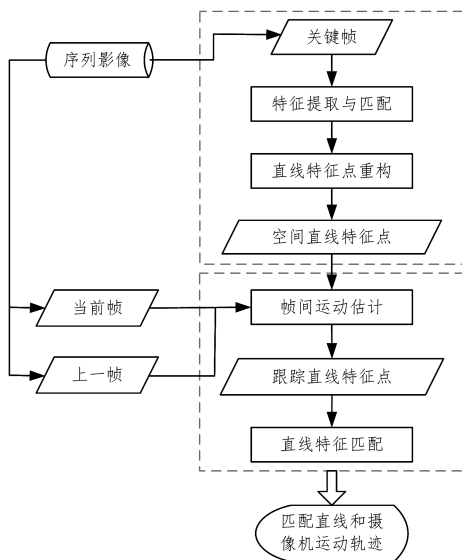


图 1 算法流程图

2 算法实现

2.1 特征提取与匹配

特征提取与匹配主要是对关键帧进行处理,包括点特征和直线特征的提取与匹配,目的是计算两帧图像对应的摄像机相对运动,对直线上的特征点进行三维重建。

目前对点特征的提取与匹配研究得较为广泛和深入。考虑到算法实时性要求较高,采用 ORB 算子进行处理。ORB 算子是 Rublee 等^[10]提出的一种快速匹配算子,采用 FAST

算子^[11]进行特征点检测,利用 BRIEF 算子^[12]计算特征描述符。ORB 算子充分利用两种算法的高效率来满足图像处理的实时性。

直线特征提取算法采用改进的 Hough 变换算法^[13],利用 Hough 一维空间变换代替标准 Hough 变换的二维空间,通过边缘编组和直线精确处理,解决了标准 Hough 变换中存在的过连接、端点难以确定等问题,提高了直线检测精度,降低了算法复杂度。直线特征匹配在点特征匹配的基础上进一步处理得到。具体过程为:首先由匹配特征点计算得到仿射变换矩阵;然后通过仿射变换矩阵将待匹配图直线投影到基准图;最后对待匹配直线组进行重合度判断,得到匹配直线。

2.2 直线特征点重建

由 2.1 节的匹配点对可以计算得到摄像机的相对运动参数,将第一帧图像作为基准帧,由已知两视图摄像机的相对运动参数 $[R\ T]$,可以得到两帧图像对应的摄像机投影矩阵, $E=K[I_3\ 0]$, $E'=K[R\ T]$, K 为摄像机的内参数矩阵, R 为旋转矩阵, T 为平移向量。空间直线特征点可由摄像机投影矩阵和图像提取的直线特征重建得到。

如图 2 所示,空间直线 L 在摄像机投影矩阵 E 和 E' 的投影为直线 l 和 l' 。图像直线 l 可用方程(1)表示:

$$x\cos\theta + y\sin\theta - \rho = 0 \quad (1)$$

其中, ρ 表示图像中心到直线 l 的垂线距离, θ 表示垂线与图像横轴的夹角, (x,y) 为直线上的点坐标。 $(\rho,\theta)^T$ 表示平面直线的坐标。

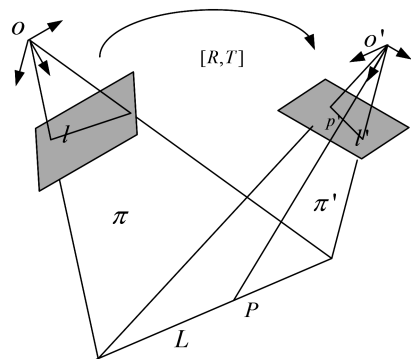


图 2 直线投影

空间直线 L 可由平面 π, π' 的相交确定。经摄像机矩阵 E 映射成一条直线 l 的空间的点集是平面 $E^T l$,因此 $\pi = E^T l$ 。空间直线 L 上的空间点 P 可由 l' 上的特征点 p' 和平面 π 的交点确定。

连接两点 O', p' 的直线可由 Plucker 矩阵 $L_{p'}$ 表示:

$$L_{p'} = O'p'^T - p'O'^T \quad (2)$$

直线 $L_{p'}$ 和平面 π 的交点是 $P = L_{p'}\pi$ 。

其中, p' 在坐标系 O' 的坐标为 $(x', y', f)^T$,在坐标系 O 的坐标为 $R'(p' - T)$,点 O' 在坐标系 O 下的坐标为 $-R'T$ 。

2.3 帧间运动估计

假设摄像机成像模型为线性模型,则空间点 P 和其在像平面的投影点 p 的关系如式(3)所示:

$$p = \Gamma(P, E) = \begin{bmatrix} f \frac{(EP)_x}{(EP)_z} & f \frac{(EP)_y}{(EP)_z} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

其中, f 是摄像机的焦距, E 为空间点所在的世界坐标系到摄像机坐标系的变换矩阵: $E = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$,也就是摄像机的位姿。

$\mathbf{R}=\mathbf{R}_z(\theta)\mathbf{R}_y(\omega)\mathbf{R}_x(\varphi)$; φ, ω, θ 分别为摄像机坐标系绕世界坐标系 3 个坐标轴旋转的欧拉角; $\mathbf{T}=[T_x, T_y, T_z]$ 为两个坐标系的平移向量。

假设当前帧的摄像机位姿为 \mathbf{E}_k , 下一帧的摄像机位姿为 \mathbf{E}_{k+1} , 且相邻帧位姿满足关系式(4):

$$\mathbf{E}_{k+1}=\mathbf{E}_k\mathbf{M} \quad (4)$$

其中, \mathbf{M} 为相邻帧间的摄像机的相对运动。

如图 3 所示, 空间点 P_i 在相邻两帧图像上的投影为 p_i 和 p_i' 。相邻两帧的摄像机运动为 \mathbf{M} 。相邻两帧的摄像机相对运动 \mathbf{M} 的求解就是寻找满足式(5)的区域最小灰度误差。

$$\mathbf{M}=\arg \min _{\mathbf{M}} \frac{1}{2} \sum_{i \in \mathfrak{R}}\|\delta \mathbf{I}(\mathbf{M}, p_i)\|^2 \quad (5)$$

其中, \mathfrak{R} 是以特征点 p_i 选取的一个 $w \times w$ 的区域, 如图 3 中的黑色方块区域, w 一般取 2; $\delta \mathbf{I}(\mathbf{M}, p_i)$ 表示 \mathbf{I}_{k+1} 和 \mathbf{I}_k 两幅图像区域的灰度差值。

$$\delta \mathbf{I}(\mathbf{M}, p_i)=\mathbf{I}_{k+1}(\Gamma(P_i, \mathbf{M}))-\mathbf{I}_k(p_i) \quad (6)$$

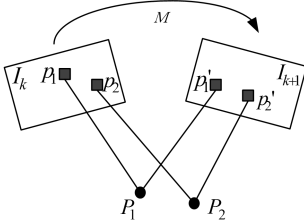


图 3 邻帧相对运动

由于式(5)是一个非线性方程, 因此采用迭代算法进行求解。通过反向合成图像对齐算法可以将式(6)改写为式(7):

$$\delta \mathbf{I}(\xi, p_i)=\mathbf{I}_{k+1}(\Gamma(P_i, \hat{\mathbf{M}}))-\mathbf{I}_k(\Gamma(P_i, \mathbf{E}(\xi))) \quad (7)$$

其中, $\hat{\mathbf{M}}$ 为邻帧的相对运动 \mathbf{M} 的初值, ξ 为更新增量。更新后的相对运动矩阵为: $\hat{\mathbf{M}}=\hat{\mathbf{M}}\mathbf{E}(\xi)^{-1}$ 。

$\mathbf{E}(\xi)$ 使用李群方法可以表示为:

$$\mathbf{E}(\xi)=\exp\left(\sum_{j=1}^6 \mu_j \mathbf{G}_j\right) \quad (8)$$

其中, $\xi=(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5, \mu_6)$ 为运动增量, 对应于摄像机帧间线速度和角速度。基矩阵 \mathbf{G}_j 的形式如下:

$$\mathbf{G}_1=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{G}_2=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_3=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{G}_4=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_5=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{G}_6=\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对式(7)进行微分得到式(9):

$$\sum_{i \in \mathfrak{R}} \nabla \delta \mathbf{I}(\xi, p_i)^T \delta \mathbf{I}(\xi, p_i)=0 \quad (9)$$

为了进行求解, 对式(7)进行线性化:

$$\delta \mathbf{I}(\xi, p_i) \approx \delta \mathbf{I}(0, p_i) + \nabla \delta \mathbf{I}(0, p_i) \xi \quad (10)$$

令 $\delta \mathbf{I}(\xi, p_i)$ 对位姿参数 ξ 的雅可比矩阵为 \mathbf{J}_i , 则有:

$$\mathbf{J}_i=\frac{\partial \delta \mathbf{I}(\xi, p_i)}{\partial \xi}=\frac{\partial \mathbf{I}_k(\mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}} \Big|_{\mathbf{a}=p_i} \frac{\partial \Gamma(\mathbf{b})}{\partial \mathbf{b}} \Big|_{\mathbf{b}=p_i} \frac{\partial \mathbf{E}(\xi)}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} \mathbf{P}_i \quad (11)$$

其中:

$$\frac{\partial \mathbf{I}_k(\mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}} \Big|_{\mathbf{a}=p_i}=\left[\frac{\partial \mathbf{I}_k(p_i)}{\partial u} \quad \frac{\partial \mathbf{I}_k(p_i)}{\partial v}\right]_{i \in \mathfrak{R}}$$

$$\frac{\partial \Gamma(\mathbf{b})}{\partial \mathbf{b}} \Big|_{\mathbf{b}=p_i}=\begin{bmatrix} -f/z & 0 & fx/z^2 \\ 0 & -f/z & fy/z^2 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}(\xi)}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} \mathbf{P}_i=\mathbf{E}(0) \sum_{j=1}^6 \frac{\mu_j \mathbf{G}_j}{\partial \mu_j} \mathbf{P}_{ii}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & z & -y \\ 0 & 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 0 & 1 & y & -x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

将式(11)代入式(10), 可得到方程:

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} \xi=-\mathbf{J}^T \delta \mathbf{I}(0) \quad (12)$$

其中, \mathbf{J} 是所有特征点的雅可比矩阵 \mathbf{J}_i 的集合。

式(12)的最小二乘解为:

$$\hat{\xi}=-\left(\mathbf{J}^T \mathbf{J}\right)^{-1} \mathbf{J}^T \delta \mathbf{I}(0) \quad (13)$$

估计得到相邻帧的运动 $\hat{\mathbf{M}}$ 后, 由式(4)可以得到 $k+1$ 时刻的位姿: $\mathbf{E}_{k+1} \approx \mathbf{E}_k \hat{\mathbf{M}}$ 。

再由式(3)可以得到直线特征点在当前帧的投影。

2.4 直线特征匹配

直线特征跟踪是利用 2.3 节估计得到的直线上的特征点在当前帧的像点位置, 然后根据像点位置和图像上提取的直线特征的几何关系进行邻帧间的直线特征匹配, 最终实现序列影像间的直线特征跟踪。具体实现流程如下:

(1) 由直线特征提取算法对图像进行直线提取, 得到直线特征 $l_j, j=1, 2, \dots, n$ 。

(2) 根据 $p_{i, k+1}=\Gamma(P_i, \mathbf{E}_{k+1})$ 得到 $k+1$ 时刻的特征点像点位置。

(3) 计算特征点 $p_{i, k+1}$ 到所有直线 l_j 的距离, 并记录下最短距离 $d_{i, m}$ 。判断 $d_{i, m}$ 是否小于阈值 t , 若小于, 则直线 l_m 为匹配直线。

(4) 判断是否对所有特征点进行处理, 若否, 则转到步骤(3)继续处理; 若是, 则结束, 标记所有匹配直线。

3 实验

为了验证算法的正确性和有效性, 采用了两组不同的序列影像对本文提出的方法进行验证。

3.1 实验一

实验数据为一组室内序列影像, 图像大小 640×480 。如图 4 所示, 图 4(a) 为序列影像中的第 1 帧影像和提取的直线特征, 直线已经进行标记; 图 4(b) 为待匹配影像和提取的直线特征, 待匹配影像选取序列影像中的第 10 帧影像; 图 4(c) 为经过本文算法处理后得到的直线上的特征点在待匹配影像上的投影点与待匹配影像提取的直线的关系; 图 4(d) 为直线特征的匹配跟踪结果。由图 4 可以看出, 本文算法可以对序列影像的直线特征进行准确的跟踪匹配。

为了验证目标位姿估计的准确性和精度, 本文设计了如下实验方案:

(1) 对两帧进行特征点提取与匹配, 利用 SFM 算法对三维点进行重建;

(2) 由三维点和当前帧的位姿得到投影点, 计算当前帧的投影点与提取的匹配点的投影几何距离;

(3) 将投影误差作为目标位姿估计精度的评价指标。

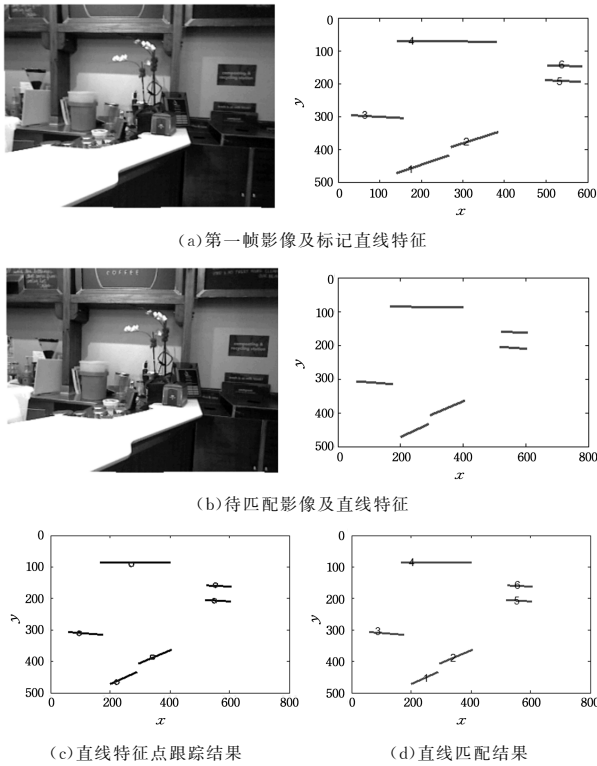


图 4 序列 1 直线特征匹配结果

如图 5 所示,图 5(a)和图 5(b)是第 1 帧和第 10 帧影像的特征点提取结果;图 5(c)为通过 SFM 算法重建的三维点;图 5(d)是由摄像机位姿估计得到的重投影点和提取的特征点的比较。计算得到的重投影误差为 13.14 pix。

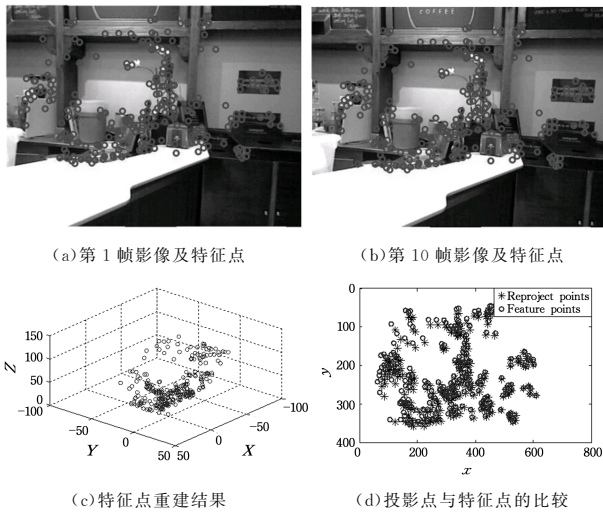


图 5 序列 1 位姿估计精度

序列影像的位姿估计存在误差累积的问题,图 6 给出了不同时刻估计的目标位姿的重投影误差。从图中可以看出:随着帧数的增加,摄像机位姿估计的误差越来越大。

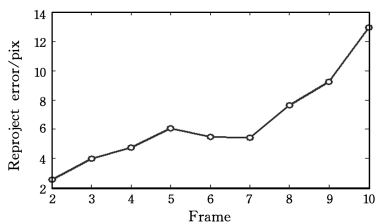


图 6 误差累积

3.2 实验二

实验数据为一组实验室序列影像,图像大小为 640×480 。图 7 为本文算法对序列影像的直线特征跟踪过程和跟踪匹配结果。从中可以看出,提出的算法实现了序列影像中直线特征的准确跟踪与匹配。

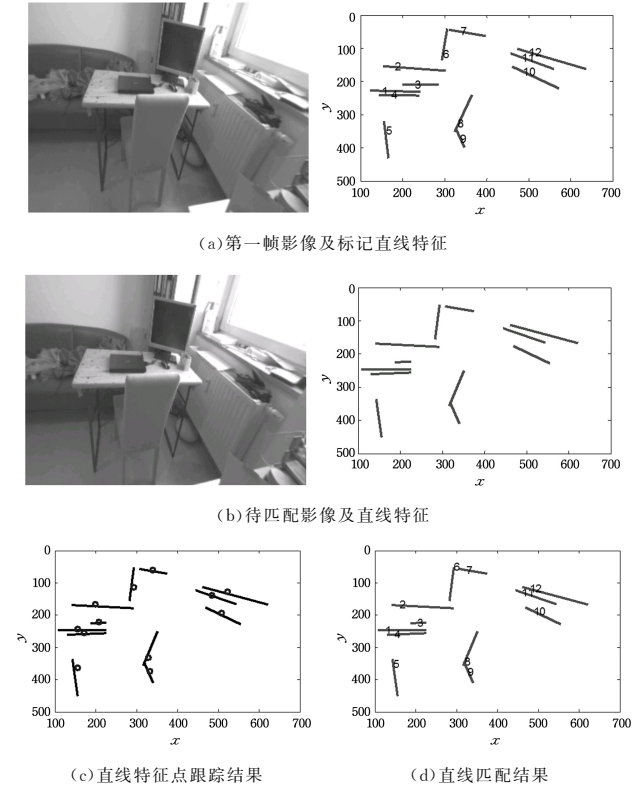


图 7 序列 2 直线特征匹配结果

图 8(a)和图 8(b)是第 1 帧和第 10 帧影像的特征点提取结果;图 8(c)为通过 SFM 算法重建的三维点;图 8(d)是由目标位姿估计得到的重投影点和提取的特征点的比较。计算得到的重投影误差为 11.32 pix。

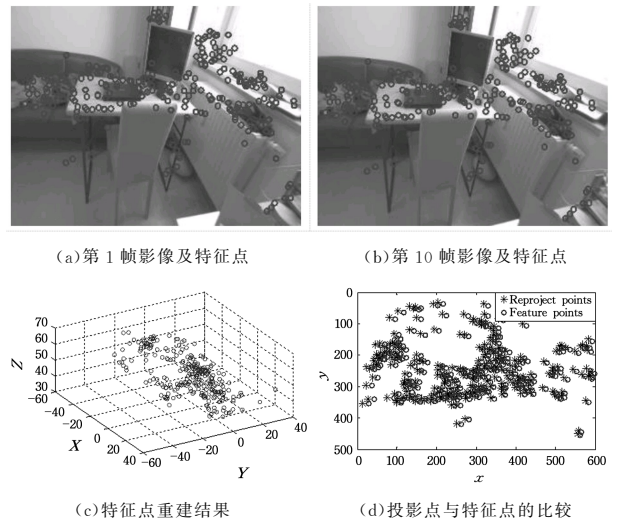


图 8 序列 2 位姿估计精度实验

结束语 本文基于半直接方法实现了序列影像的直线特征跟踪匹配。半直接方法充分利用了基于特征的方法和直接方法的优势,提高了序列影像的处理效率。首先,由关键帧特征点匹配结果估计帧间相对运动,重构得到直线上的特征点;

(下转第 290 页)