

3 维子空间约束的遮挡点恢复方法

刘侍刚¹, 彭亚丽², 韩崇昭¹, 王英华¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 陕西师范大学计算机科学学院, 710062, 西安)

摘要: 为了有效地恢复跟踪过程中丢失的特征点, 假设相机为正投影模型, 提出了一种遮挡点恢复方法, 其主要是利用所有的图像序列构成的、由行向量生成的线性子空间之和与空间结构点构成的、由行向量生成的子空间是同一个线性子空间的特性, 构造了一种线性迭代算法. 该方法的优点是在求解遮挡点的位置时, 利用了所有的图像点信息, 而且将所有的图像及图像点平等地看待. 模拟、真实实验表明, 所提方法的重投影误差仅比原有图像的噪声约大 15%, 这说明算法具有较好的收敛性.

关键词: 图像; 遮挡点恢复; 线性子空间

中图分类号: TP391.41; P232 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)04-0010-04

An Occlusion Recovery Method Based on 3D Subspace

LIU Shigang¹, PENG Yali², HAN Chongzhao¹, Wang Yinghua¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Computer Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: To recovery the occlusions during feature track, a method for occlusion recovery is presented based on 3D subspace under orthographic projection. The method mainly relies on the fact that the rows in the matrix including all the image points span the same linear subspace as the rows in the matrix including all the space points. A linear iterative algorithm is hence proposed. The advantages of the proposed method are that the positions of the occlusions are found from all the visible points, and all the images as well as all the image points are treated in the same way. The experiments with both simulated and real data sets show that the re-projection error of the method is approximately 15% higher than the image noise, and the method has good convergence property with small errors.

Keywords: image; occlusion recovery; linear subspace

目标跟踪是计算机视觉的一个重要研究领域, 而基于特征点的跟踪又是目标跟踪的一个重要分枝^[1-3]. 在特征点的跟踪过程中, 由于存在光照的变化及遮挡等因素, 所以必然会导致部分特征点丢失. 如何恢复这些丢失的特征点, 即遮挡点, 就成为目标跟踪过程中必须考虑的问题之一^[4].

在假设相机模型为正交投影的情况下, Tomasi 利用子矩阵法^[5]求解了遮挡点的位置, 但结果受所选择的子矩阵的影响. Jacobs 利用子空间法改进了

Tomasi 方法^[6], 虽然它并不需要选择子矩阵, 但没有将所有的图像都平等地看待, 因此跟踪精度必然受到影响. 在假设相机为针孔模型下, Martinec 利用三线约束来求解遮挡点的真实位置^[7], 但在求三线约束关系的过程中, 也不能将所有的图像平等地看待, 因此跟踪误差较大. 文献[8-9]提出了基于秩约束的方法来求解遮挡点的位置, 该方法没有考虑子空间的约束, 所以精度问题依然存在.

本文利用子空间约束, 提出了一种遮挡点恢复

方法. 利用所有的图像序列构成的行向量生成的线性子空间之和与空间结构点构成的行向量生成的子空间属于同一线性子空间这一特性, 构造了一种线性迭代算法, 经多次迭代可求得遮挡点的真实图像位置.

1 子空间描述

假定摄像机模型为正投影模型, 则成像过程可表示为

$$m = PX \tag{1}$$

式中: $X = [x \ y \ z]^T$ 表示 3 维空间点坐标; $m = [u \ v]^T$ 为图像点坐标; P 为一个 2×3 的矩阵, 称为摄像机的投影矩阵.

若有 m 幅图像及 n 个 3 维空间点, 且所有的图像点都可见, 那么每幅图像上应有 n 个对应的图像点. 在实际中, 由于存在遮挡等因素, 有些图像点并不可见. 为了统一表示可见点和不可见点, 令 $\bar{m}$ 表示图像中的遮挡点, 则式(1)为

$$m_{i,j} = P_i X_j; \quad \bar{m}_{i,j} = P_i X_j \tag{2}$$

式中: $i(i=1, 2, \dots, m)$ 、 $j(j=1, 2, \dots, n)$ 分别表示第 i 幅图像和第 j 个图像点.

将所有空间点的坐标表示成一个矩阵, 即

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ y_1 & y_2 & y_3 & \cdots & y_n \\ z_1 & z_2 & z_3 & \cdots & z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} \tag{3}$$

则对于第 i 幅图像上的所有点(包括遮挡点)可表示为

$$m_i = \begin{bmatrix} u_{i,1} & \cdots & \bar{u}_{i,j} & \cdots & u_{i,n} \\ v_{i,1} & \cdots & \bar{v}_{i,j} & \cdots & v_{i,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{v}_i \end{bmatrix} \tag{4}$$

式(4)中包括不可见点.

若用投影矩阵表示图像, 则有

$$\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix} X = PX \tag{5}$$

若用 Ω_i 表示由 m_i 的行向量生成的 2 维线性子空间, 则有

$$\Omega_i = \text{span}\{\mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i\} \tag{6}$$

式中: $\mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i$ 分别表示由第 i 幅图像的所有图像点(包括遮挡点)的 u 和 v 分量组成的行向量.

同样, 用 Ω 表示由 X 的行向量生成的 3 维线性子空间, 则有

$$\Omega = \text{span}\{\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}\} \tag{7}$$

式中: $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ 分别表示由空间点 x, y, z 轴的分量组成的行向量.

由式(2)、式(5)可得线性子空间 Ω_i 和 Ω 的关系式

$$\Omega_i \subset \Omega \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^m \Omega_i \subseteq \Omega \tag{9}$$

若式(9)中取 $\subset$ 号, 表示所有的子空间 Ω_i 重合, 也就是所有的图像都一样, 这是一种特殊情况^[8]. 一般情况下应取等号, 在本文中并未考虑特殊情况, 因此本文取等号.

2 线性迭代地求取遮挡点位置

矩阵 m_i 中应包含遮挡点 $\bar{m}_{i,j}$, 但开始时并不知道遮挡点在图像中的真实位置. 假设所有的遮挡点

$$\bar{m}_{i,j} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k m_{i,j} \tag{10}$$

式中: k 表示第 i 幅图像中的可见点数. 那么, 可以利用这些假设的值来代替图像中遮挡点的真实位置, 以完成初步重建. 在完成初步重建之后, 利用式(2)进行重投影, 就可以求得接近于遮挡点真实位置的图像点, 然后利用这些新得到的图像点来代替图像中的遮挡点, 进一步求解投影重建. 如此循环, 最后就可以求得遮挡点在图像中的真实位置.

若已知 m_i , 则可将空间中一个向量投影到由矩阵 m_i 的行向量生成的线性子空间 Ω_i 的正投影矩阵 T_i ^[8] 中, 即

$$T_i = m_i^T (m_i m_i^T)^{-1} m_i \tag{11}$$

并且令

$$T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i \tag{12}$$

从式(9)可以得到, 矩阵 T 的秩满足 $\text{Rank}(T) = 3$. 将 T 矩阵进行奇异值分解(SVD), 得

$$T = DVD^T \tag{13}$$

式中: D 为正交阵; $V = \text{diag}(v_1 \ v_2 \ v_3 \ 0 \ \cdots \ 0)$.

由于求得的遮挡点位置与实际位置并不完全一致, 同时图像中含有噪声, 因此不可能保证在对矩阵 T 进行 SVD 分解后的 V 中刚好对角线上前 3 个元素为非 0, 而其他元素都为 0. 所以, 可以令对角线元素 $v_i = 0 (i \geq 4)$, 这样矩阵 D 的前 3 列就可以为投影空间中的结构点 X ^[10].

通过以上分析可知: 若遮挡点 $\bar{m}_{i,j}$ 已知, 经 SVD 分解可完成重建; 若已知空间中的结构点 X , 则由式(2)可以线性地求得投影矩阵 P_i .

初始重建成功, 则遮挡点为

$$\bar{m}_{i,j} = P_i X_j \tag{14}$$

此时求得的遮挡点图像位置更加接近于真实的位置.

从以上分析可知,通过构造一个线性迭代算法,可以线性迭代地求取重建及遮挡点的位置.

3 线性迭代算法

- 线性迭代算法步骤描述如下.
- (1)假设所有的遮挡点为图像中心点,令 ϵ 为任意小的一个正数.
 - (2)按照式(11)、式(12)构造投影矩阵 T ,对 T 进行奇异值分解,并令矩阵 D 的前 3 列为投影重建结构点 X .
 - (3)利用式(2)线性地求解投影矩阵 P_i ,同时利用式(14)求解被遮挡点 $\bar{m}_{i,j}$ 的位置.
 - (4)若 $v_i \leq \epsilon$,终止算法,否则转步骤(2).

4 模拟与真实图像实验

4.1 模拟实验

通过计算机模拟来检验本文算法的收敛性能.在单位球内随机产生 100 个空间点,产生 10 幅大小为 640×480 像素的图像.随机遮挡其中的 15% 的图像点,并在图像中分别加入像素均值为 0.0、1.0、2.0 的高斯噪声.利用这些模拟图像点进行遮挡点恢复,求得重投影误差.模拟结果如图 1 所示.

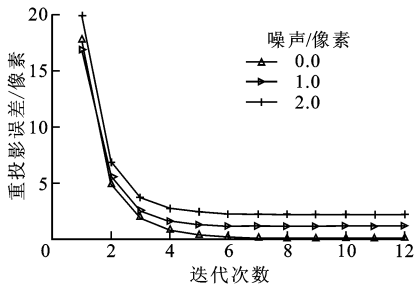


图 1 在不同噪声下重投影误差随迭代次数的变化

为了研究本文算法的收敛性与图像点遮挡率之间的关系,在图像中加入像素均值为 2.0 的高斯噪声,并分别遮挡 0%、10%、20% 及 30% 的图像点,实验结果如图 2 所示.

从图 1 及图 2 可以看出,本文算法最多迭代 9 次便能够达到收敛,因此它具有良好的收敛性.从图 2 还可以看出,图像点的遮挡率越低,算法收敛速度越快.

为了检验本文算法的收敛精度,分别利用 10 幅图像在图像点遮挡率均为 15%、对图像像素加入各

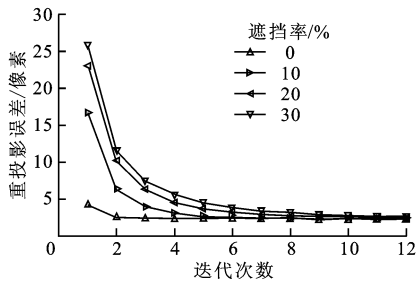


图 2 在不同的遮挡率下重投影误差随迭代次数的变化

种噪声的情况下进行了 100 次实验,并分别求取均值误差,结果如图 3 所示.

从图 3 可以看出,本文算法的误差比较小.原因主要有 2 方面:①本文算法无需计算基础矩阵,这种矩阵对图像噪声非常敏感^[11];②本文算法将所有的图像平等地看待,并没有倚重的图像,因此算法的误差比较小.

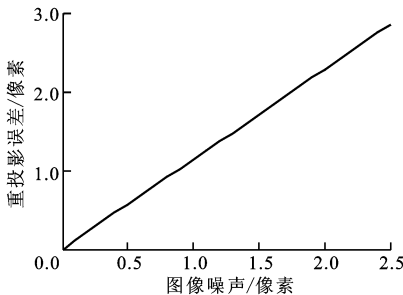


图 3 重投影误差随图像噪声的变化

4.2 真实图像实验

为了验证方法的正确性,本文先获取一个由 10 幅图像组成的车辆序列,图像的大小为 512×480 像素,最后 4 幅图像存在遮挡,第 3 幅及第 9 幅图像如图 4 所示.然后,提取并跟踪 90 个特征点,由于存在遮挡,所以有部分特征点跟踪丢失.最后,用本文方法求取遮挡点的真实位置,结果如图 4 所示.从图中可以看出,本文方法能够比较精确地恢复出遮挡点的真实位置.

5 结束语

本文提出了一种基于子空间约束的遮挡点恢复方法,其中的线性迭代算法至多需要 9 次迭代便可以达到收敛,而且误差约大于图像噪声的 15%,因此该算法具有良好的收敛性、鲁棒性以及误差小等优点.真实图像的实验结果表明,本文方法是非常有效的.



(a)第3幅图像



(b)第9幅图像

图4 本文方法求取遮挡点的真实位置示意图

参考文献:

- [1] 段学超,仇原鹰,段宝岩. 柔性支撑三维机动目标的解耦跟踪预测算法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(5):592-596.
DUAN Xuechao, QIU Yuanying, DUAN Baoyan. Decoupled tracking and prediction algorithm for flexible supporting three dimensional maneuvering object[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(5):592-596.
- [2] 吕娜,冯祖仁. 质心迭代图像跟踪算法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(12):1396-1400.
LÜ Na, FENG Zuren. Centroid iteration image tracking algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(12):1396-1400.
- [3] 董文涛,杜鹏,田玉敏. 利用 MPEG-4 视频流的运动目标检测算法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(4):454-457.
DONG Wentao, DU Peng, TIAN Yumin. Motion object detection based on MPEG-4 video [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(4):454-457.
- [4] 刘哲,卫军胡,赵军,等. 多源二维测角信息的三维动态目标跟踪定位算法[J]. 西安交通大学学报, 2008,

42(4):462-465.

- LIU Zhe, WEI Junhu, ZHAO Jun, et al. Tracking and locating algorithm of 3-dimensional moving targets using 2-dimensional angular measurements from multiple passive sensors[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(4):462-465.
- [5] TOMASI C, KANADE T. Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method [J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 9(2):137-154.
- [6] JACOBS D. Linear fitting with missing data: applications to structure from motion and to characterizing intensity images[C]// Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 1997: 206-212.
- [7] MARTINEC D, PAJDLA T. Outlier detection for factorization-based reconstruction from perspective images with occlusions[C]// Proceedings of the Photogrammetric Computer Vision. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2002: 161-164.
- [8] 彭亚丽,刘芳,焦李成,等. 基于秩4约束的遮挡点恢复方法 [J]. 机器人, 2008, 30(2):138-141.
PENG Yali, LIU Fang, JIAO Licheng, et al. A method for occlusion recovery based on rank 4 [J]. Robot, 2008, 30(2):138-141.
- [9] 刘侍刚,彭亚丽,徐秋平,等. 基于秩3约束的遮挡点恢复方法 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12):2622-2625.
LIU Shigang, PENG Yali, XU Qiuping, et al. Occlusion recovery method based on rank 3 [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(12):2622-2625.
- [10] 刘侍刚,吴成柯,李良福,等. 一种存在遮挡的射影重建算法 [J]. 模式识别与人工智能, 2007, 20(4):565-570.
LIU Shigang, WU Chengke, LI Liangfu, et al. Projective reconstruction algorithm with occlusions [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2007, 20(4): 565-570.
- [11] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.

(编辑 苗凌)