

基于未标定彩色图像三维重建的立体匹配算法

呼 艳¹ 耿国华¹ 周明全^{1,2} 王小凤¹

(西北大学信息科学与技术学院 西安 710127)¹ (北京师范大学信息科学与技术学院 北京 100875)²

摘 要 提出了一种用于三维重建的未标定彩色图像立体匹配算法。针对 Harris 角点的聚簇现象,引入了限制因子来消除,通过采用精度较高的邻域彩色相关法进行匹配。针对相机平移旋转较小的情况,提出了利用斜率一致性剔除明显的误匹配,然后运用随机抽样算法估计基础矩阵,同时进一步剔除误匹配点对,最后用基础矩阵引导未匹配特征点进行匹配。实验表明,该算法用于三维重建,能够较好地恢复物体的结构,是一种有效的匹配算法。

关键词 立体匹配,未标定彩色图像,三维重建,限制因子,斜率一致

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A

Stereo Matching Algorithm Based on Uncalibrated Color Images for 3D Reconstruction

HU Yan¹ GENG Guo-hua¹ ZHOU Ming-quan^{1,2} WANG Xiao-feng¹

(Dept. of Computer, School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)¹

(Dept. of Computer, School of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)²

Abstract This paper proposed an stereo matching algorithm for 3D Reconstruction based on uncalibrated color images. First, this algorithm referred a limiting factor to eliminate the clustering phenomenon of Harris corners, and correlative matching method based on color was used for match. Then, removed the obvious outlier points according to the principle of slope consistency, and used RANSAC algorithm to estimate Fundamental matrix, at the same time, excluded outlier points. Finally, found unmatching points by using Fundamental matrix. The experimental results show that object structure can be well reconstructed by using this algorithm, and it is an effective stereo matching algorithm for 3D Reconstruction.

Keywords Stereo matching, Uncalibrated color images, 3D reconstruction, Limiting factor, Slope consistency

立体匹配是计算机视觉领域的一个重要研究方向,也是计算机视觉研究领域中最为困难的问题。准确的立体匹配对利用立体视觉技术进行物体的三维重建、目标识别和目标跟踪等具有重要的意义。为了保证重建出的物体表面能正确表达物体的几何结构,基于图像的三维重建要求提取到的特征点不仅能够反映物体结构,而且匹配算法要达到较高的匹配精度。大多数立体匹配都是针对已标定图像的,可以通过极线约束^[1]来提高匹配精度。但是在一些未标定图像要利用极线约束时,需要根据已匹配的点对来估计基础矩阵,基础矩阵估计的准确性直接影响三维重建的效果,这对立体匹配的精度提出了更高的要求。本文的立体匹配算法是针对未标定彩色图像的。

C. Schmid 等^[2]对现有的一些经典角点提取算法进行对比,指出 Harris^[3]角点检测算法是目前效果相对较好的一种角点检测算法。在实验中,我们发现 Harris 角点能够反映物体的外貌结构特征,但是有时候局部会出现角点聚簇的现象,导致在后期的匹配中容易出现误匹配,同时降低匹配效率。

另外, Harris 角点的定位是像素级的,会影响匹配的精度。在图像匹配中比较经典的算法是灰度相关法^[4],该算法需要先把彩色图像转化为灰度图像,但这会丢失许多颜色信息。研究显示,匹配中使用图像的彩色信息比使用图像的灰度信息精确度会有所提高^[5]。另外,由于匹配过程中不可避免会有误匹配点的存在,因此会影响基础矩阵的估计,并进一步影响三维重建的效果。如何剔除误匹配点,是估计未标定彩色图像的基础矩阵中面临的一个问题。

通过分析上述算法的优点和不足,本文提出了一种适用于未标定彩色图像三维重建的立体匹配算法。首先针对 Harris 角点聚簇和角点定位精度不高的问题,本文引入了一个限制因子,使角点分布均匀,然后采用现有的基于抛物线的插值算法使角点达到亚像素级。由于彩色图像能够提供更丰富的信息,因此运用彩色邻域相关系数匹配算法进行匹配。针对误匹配点会影响基础矩阵的估计,本文提出用斜率相似性原理粗略地剔除匹配误差较大的匹配点对;然后采用鲁棒性较好的随机抽样算法 RANSAC^[6]估计基本矩阵,同时进一

到稿日期:2010-08-04 返修日期:2010-12-23 本文受国家自然科学基金项目(60873094),863 国家重点基金(2008AA01Z301),西北大学研究生自主创新基金项目(09YZZ65),虚拟现实应用教育部工程研究中心开放基金项目(ME0BNUEVRA200903)资助。

呼 艳(1984—),女,硕士生,主要研究方向为图形图像处理、可视化技术,E-mail:huyan1519@163.com;耿国华(1955—),教授,博士生导师,主要研究方向为图形图像处理、可视化技术、人工智能;周明全(1953—),教授,博士生导师,主要研究方向为计算机可视化技术、生物特征识别、中文信息处理;王小凤(1979—),讲师,主要研究方向为信息系统与人工智能、三维检索。

步剔除误匹配点对;最后在估计的基础矩阵的引导下寻找可能反映物体外貌的未匹配点对。把本文算法用于未标定的彩色图像的三维重建中,能够较好地恢复物体的结构。

1 算法描述

1.1 Harris 角点提取及改进

Harris^[3]特征提取算法的思想是:在图像中设计一个局部检测窗口,当该窗口沿各个方向做微小移动时,考察窗口的平均能量变化。当该能量变化值超过设定的阈值时,就将窗口的中心像素点提取为角点。图像亮度的自相关矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $A = \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 \otimes w$, $B = \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 \otimes w$, $C = \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y}\right) \otimes w$, \otimes 表示卷积运算。 $\frac{\partial I}{\partial x}$, $\frac{\partial I}{\partial y}$ 分别为图像在 x 和 y 方向上的导数。

$(2k+1)(2l+1)$ 的高斯卷积核函数 w 为

$$w_{i,j} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(i-k-1)^2 + (j-l-1)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Harris 算法的角点响应函数为

$$R = \det(M) - k(\text{trace}(M))^2 > T \quad (3)$$

式中, $\det(M) = \lambda_1 \lambda_2 = AB - C^2$, $\text{trace}(M) = \lambda_1 + \lambda_2 = A + B$, k 为经验值,取 0.04。角点对应于函数 R 的局部极大值点。当图像上某点像素的 R 值大于给定的阈值 T 时,就把该点作为特征点。

Harris 算法检测到的角点在局部区域可能会出现聚簇的现象,即在一个角点很邻近的周围还存在着很多其它的角点。一般情况下,临近角点的特征值(如颜色值)很相近,导致在后期的特征点匹配中误匹配率增加,同时匹配效率降低。由于角点很临近,因此代表性角点足以反映三维物体的外貌结构特征。本文通过引入一个限制因子 r 来确保找到的角点之间有足够的距离,从而减弱或消除这种现象,使角点分布均匀。具体实现描述见算法 1。

算法 1 DotUniform

输入:原始角点序列 Corner

输出:均匀分布的角点序列 UniformSeq

Step1 设置计数器值 $i = N$, N 为 Corner 中角点的个数。在 Corner 中找到最强的角点 m_0 , 作为第一个保留点保存到角点序列 UniformSeq 中, $i--$ 。

Step2 计算 Corner 中新角点 m_i 与 UniformSeq 中各角点之间的欧式距离 d_j 。若所有的 $d_j > r$, 则把角点 m_i 保存到 UniformSeq 序列中(r 为给定的限制因子), 否则舍弃 m_i , $i--$ 。

Step3 若 $i > 0$, 即 Corner 中还有角点存在, 转向 Step2, 否则算法结束。

$$C_i(m, m') = \frac{\sum_{y=-k}^k \sum_{x=-l}^l [I_1(u+x, v+y) - \overline{I_1(u, v)}] \cdot [I_2(u'+x, v'+y) - \overline{I_2(u', v')}]}{\sqrt{\sum_{y=-k}^k \sum_{x=-l}^l [I_1(u+x, v+y) - \overline{I_1(u, v)}]^2} \cdot \sqrt{\sum_{y=-k}^k \sum_{x=-l}^l [I_2(u'+x, v'+y) - \overline{I_2(u', v')}]^2}} \quad (4)$$

式中, $i \in (R, G, B)$ 。

Step2 计算点 m 的每一通道的权重系数。我们定义每个通道的权重系数如下

$$W_R = \frac{I_R}{I_R + I_G + I_B} \quad (5)$$

$$W_G = \frac{I_G}{I_R + I_G + I_B} \quad (6)$$

图 1 是取限制因子为 0 到 10, 对图 5 中的图像用经典的灰度相关法进行匹配的匹配准确率曲线图。

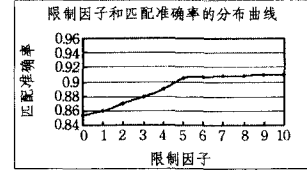


图 1 限制因子与匹配准确率曲线

从图 1 可以看出, 当限制因子小于 5 时, 匹配准确率曲线上升明显; 当限制因子大于 5 时, 匹配准确率曲线上升平缓, 变化不大。限制因子大于 5 时, 尽管匹配精度在很缓慢地提升, 但由于限制因子过大, 一些反映物体外貌的点可能会丢失, 因此本文选限制因子为 5。我们对多组图像进行实验, 发现对于大部分的图像, 限制因子为 5 是一个比较好的临界点。

提取到的角点的定位精度越高, 匹配精度就会越高。但 Harris 角点的定位是像素级的, 会影响匹配的精度。由于抛物面插值法具有计算速度较快、精度较高并且误差波动较小的特点^[7], 因此本文采用文献[8]中的基于抛物线拟合原理进行角点亚像素的定位。此方法利用抛物线拟合的原理来描述刻画某一方向被沿顶点纵切开的相关峰轮廓线, 进而获得此方向上的拟合曲线最高顶点。在不同的方向依次纵切, 就会得到不同的顶点。然后根据所获得的点, 进一步求取到各点距离之和的最小值点, 其对应位置即为所求。

1.2 邻域彩色相关匹配法

传统比较经典的匹配算法是灰度相关匹配法。它首先把彩色图像转化为灰度图像, 然后用邻域灰度相关法进行匹配。但是把彩色图像转化为灰度图像, 就会丢失图像的颜色信息, 影响匹配的精度。因此本文运用基于彩色信息的邻域彩色相关匹配法, 提高匹配的精度。

彩色图像中的每一个像素, 都由 R, G, B 3 个通道组成, 对图 5 左图像提取到的每个角点和右图像指定区域的所有角点在三通道上分别计算角点邻域颜色相关系数, 然后和每个通道的权重系数进行多通道系数融合来计算角点邻域彩色相关系数并进行匹配。具体实现步骤见算法 2。

算法 2 Match

输入: 左右图像及对应角点集合 CornerL, CornerR

输出: 匹配点对集合 MatchList

Step1 对于左图像(图 5(a))上的 CornerL 中的任一点 m , 使中心位于该点且高为 $(2k+1)$ 、宽为 $(2l+1)$ 的区域作为其邻域窗口(其中 k, l 为邻域窗口的高和宽, 本文均取 7)。在右图像(图 5(b))中以 m 坐标为中心, 选定一个高为 $(2H+1)$ 、宽为 $(2W+1)$ 的矩形窗口作为匹配点的搜索区域(其中 H, W 为搜索窗口的高和宽, 本文中分别取图像高和宽的 $1/4$), 利用归一化相关系数式(4)分别算出角点 m 和搜索窗口的 CornerR 中的点 m' 的每一个通道的相关系数 C_R, C_G, C_B 。

$$W_B = \frac{I_B}{I_R + I_G + I_B} \quad (7)$$

Step3 根据已求出的每个通道邻域相关系数和通道的权重系数, 用式(8)计算点 m 和点 m' 的最终相关系数 $C(m, m')$ 。

$$C(m, m') = W_R C_R(m, m') + W_G C_G(m, m') + W_B C_B(m, m') \quad (8)$$

Step4 若 $C(m, m') > Th$, 认为点 m' 是点 m 的候选匹配点, 把点 m, m' 保存到 MatchList 中。其中, Th 为相关系数阈值。经实验发现,

Th 取值为 0.55~0.6 比较合适,本文 Th 取 0.6。

Step5 对左图像(图 5(a))的 CornerL 中的所有角点循环执行 Step1 到 Step4,直到所有的角点循环执行一遍,算法结束。

1.3 误匹配点的剔除及 F 引导匹配

计算角点邻域彩色相关系数得到的匹配点对中不可避免地含有一些错误匹配点对,比如出现一一对应多点的现象,它们会影响基础矩阵的估计和重建的效果。为了剔除这些误匹配点对,我们首先使用斜率一致法粗略地剔除匹配误差比较大的匹配点对,然后使用鲁棒性比较好的随机一致抽样算法(RANSAC 算法)来估计基础矩阵 F ,同时进一步剔除误匹配点对。在匹配的过程中有可能使一些反映物体外貌结构的匹配点对丢失,本文在已估计的基础矩阵的引导下对未匹配的特征点进行重新匹配。

(1) 斜率一致约束法剔除误匹配

我们使用一个相机来采集数据,要求相机相对位移和旋转角度均不是很大,因此场景中的同一点在两幅图像上的投影点位置相差不大,这样两幅图像的匹配点对连线的斜率具有相同或者近似的特性。如图 2 所示,匹配的点对中正确匹配的点对斜率比较一致,从视觉上就可以得出斜率明显不一致的都是错误匹配点对。因此,对于邻域彩色相关匹配产生的候选匹配点对,本文根据斜率一致性约束法来剔除误差较大的匹配点对。我们以任一斜率为中心,以 ϵ 为邻域,找出邻域中包含匹配点对最多的斜率 S_i ,把斜率在 $[S_i - \epsilon, S_i + \epsilon]$ 范围内的匹配点对认为是正确的匹配点对。

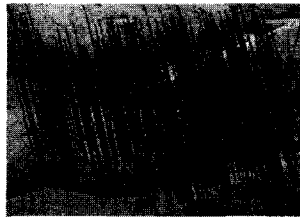


图 2 部分点匹配效果

(2) 随机一致抽样算法 RANSAC

斜率一致约束法能够剔除一部分匹配误差比较大的匹配点对,但不可避免地仍会有一些误匹配点对存在。本文在使用鲁棒性比较好的随机一致抽样 RANSAC 算法估计基础矩阵的同时进一步剔除误匹配点对。RANSAC 算法中用到了极线约束,极线约束原理如图 3 所示。

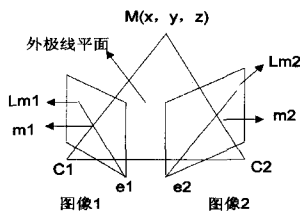


图 3 极线约束示意图

图像 1 上的点 m_1 ,如果在图像 2 上找到其对应点,则该点必然位于 m_1 在图像 2 的极线 L_{m_2} 上。同理,若图像 2 上的点 m_2 在图像 1 上找到对应点,则该点也位于 m_2 在图像 1 的极线 L_{m_1} 上。如果 m_1, m_2 是两幅图像上的一对匹配点,那么 m_1 和 m_2 对应的齐次坐标存在如下的关系

$$m_2^T F m_1 = 0 \quad (9)$$

RANSAC 算法估计基础矩阵 F 时,通过重复地随机取样

特征点数据集来获得基本子集,然后利用基本子集估算基础矩阵。

(3) 基础矩阵引导匹配

针对前期匹配过程中可能使有些正确匹配点对丢失,从而影响到三维重建的结构,本文用估计出来的基础矩阵引导那些未匹配的特征点进行匹配。左图像(图 5(a))中未匹配角点中任一角点 m 利用估计的基础矩阵计算出它在右图像(图 5(b))中的对应极线,并且计算在对应的极线两侧的区域(图 4 中虚线包含的区域)中的未匹配点和 m 的邻域彩色相关系数 $C(m, m')$ 值最大的角点 m' ,且 $C(m, m') > Th$ 时认为 m, m' 为一对正确匹配点对。这样,通过基础矩阵引导匹配可以找到能够反映物体结构的更多正确匹配点对,使得后期的三维重建结构完整。

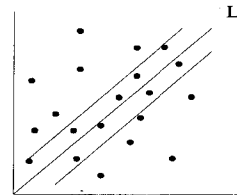


图 4 基础矩阵引导匹配图

2 实验结果及其分析

在 VC6.0 环境下用 C++ 语言实现本文提出的立体匹配算法,并对多组立体图像进行实验。实验表明,本文的立体匹配算法精度较高,可用于未标定彩色图像的三维重建,大多数情况下能够较好地恢复物体的结构。下面是其中一组实验的数据和效果图。图 5 是用一个相机拍摄的大小为 400×300 的西汉张安世主墓楼梯的一角。

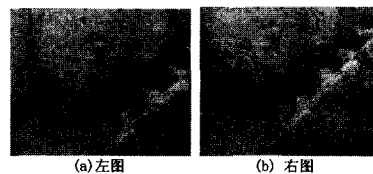


图 5 原图像

图 6 是 Harris 检测算法提取到的角点和引入限制因子的 Harris 检测算法提取到的角点(限制因子为 5)的对比效果图。

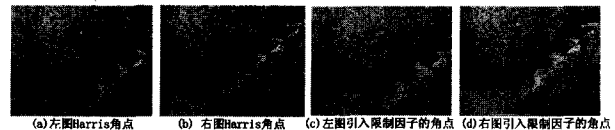


图 6 Harris 角点和引入限制因子的 Harris 角点效果

从图 6 和表 1 的统计结果可以看出, Harris 检测算法提取到的角点明显存在聚簇现象,有好多个角点连到一起,使得角点颜色看上去被加黑了。引入限制因子改进后,使得特征点能够均匀分布,角点数量降了一半多,而且反映物体外貌结构特征的点也几乎都存在。

表 1 图 6 中的特征点数量统计结果

	左图提取的角点数	右图提取的角点数
Harris 角点	3571	3416
引入限制因子后角点	1581	1536

(下转第 293 页)

simulation based on physical imaging model [J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2006, 14(3): 177-189

- [2] 孙丰荣, 刘泽, 李艳玲, 等. 基于模型的 CT 三维医学图像重建仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 781-784
- [3] 闫浩, 牟轩沁, 罗涛, 等. 锥束 X 射线 CT 投影的蒙特卡罗仿真[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 414-417
- [4] 秦中元, 牟轩沁, 王平, 等. 一种通用的 X 射线锥形束投影生成算法[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(2): 160-164
- [5] 黄魁东, 张定华, 毛海鹏, 等. 理想材料零件的锥束 CT 投影仿真

[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(2): 157-162

- [6] Siddon R L. Fast calculation of the exact radiological path for three-dimensional CT array [J]. Med Phys, 1985, 12: 252-255
- [7] Shepp L A, Logan B F. The Fourier reconstruction of a head section [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1974, NS-21: 21-43
- [8] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992
- [9] 张顺利, 张定华, 李明君, 等. 基于最小圆柱区域的锥束 CT 快速图像重建[J]. 计算机科学, 2010, 37(5): 257-260

(上接第 279 页)

表 2 是引入限制因子的 Harris 角点和 Harris 角点的邻域彩色相关匹配结果比较。

表 2 Harris 角点和引入限制因子后角点的邻域彩色匹配

	Harris 角点匹配	引入限制因子后角点匹配
匹配点对	1695	762
正确匹配点对	1448	709
匹配正确率	85.43%	93.04%

从表 2 的结果看, 引入限制因子后, 特征点匹配的精度明显提高, 由于角点的数量明显减少, 因此能够有效地提高立体匹配效率。

使用斜率一致法剔除误匹配点对的效果如图 7 所示。对比图 7(a)和(b)可以看出一些错误明显的匹配点对被剔除, 这样后期 RANSAC 算法的迭代次数可能减少, 也为 RANSAC 算法估计正确的基础矩阵提供了一定的保证。



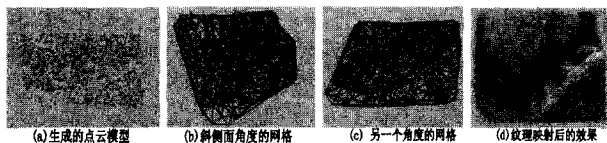
(a)斜率一致法剔除前 (b)斜率一致法剔除后

图 7 斜率一致法剔除误匹配点的效果图

运用 RANSAC 算法估计的基础矩阵 F 如下

$$F = \begin{pmatrix} 0.000005 & 0.000010 & -0.026527 \\ -0.000010 & 0.000000 & 0.006872 \\ 0.024594 & -0.007761 & 1.000000 \end{pmatrix}$$

在估计基础矩阵的同时进一步剔除误匹配点对, 并利用估计的基础矩阵引导未匹配点进行匹配, 得到最终的匹配点对。为了验证提出的匹配算法在三维重建中的有效性, 我们把本文算法得到的匹配点对利用 SFM 重建算法^[9,10]进行重建, 重建的效果如图 8 所示。



(a)生成的点云模型 (b)斜侧面角度的网格 (c)另一个角度的网格 (d)纹理映射后的效果

图 8 三维重建效果图

其中, 图 8(a)是重建后生成的点云效果图, 图 8(b)是重建后的斜侧面角度的网格效果, 图 8(c)是另一个角度的网格效果, 图 8(d)是纹理映射后的效果图。可以看出, 本文提出的立体匹配算法能够很好地恢复物体的结构, 从而证明了它的有效性。

结束语 本文针对未标定彩色图像三维重建的立体匹配不仅要求匹配精度较高, 而且要求提取到的特征点能够反映物体的外貌特征。首先引入限制因子消除 Harris 角点聚集的现象, 同时利用基于抛物线插值算法使角点达到亚像素级来提高匹配精度, 并运用精度较高的邻域彩色相关匹配法对其进行匹配。为了对基础矩阵估计精度提供保证, 针对我们的相机平移旋转较小的情况, 提出了斜率一致法以剔除误差比较大的误匹配点对; 并且采用 RANSAC 算法估计基本矩阵, 同时进一步剔除误匹配点对。最后, 为了让未匹配的可能反映物体外貌结构的点得以匹配, 我们使用基础矩阵引导匹配。实验证明, 本文的算法能够很好地恢复物体的结构。另外本文算法中虽然邻域彩色相关匹配法使匹配效率有所降低, 但是前期消除 Harris 角点聚集现象的同时能有效地提高匹配效率。针对单相机采集的未标定图像, 如何使算法适用于相机的旋转和平移较大的情况, 是今后进一步研究的内容。

参考文献

- [1] 马颂得, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 78-80
- [2] Schmid C, Mohr R, Bauckhage C. Evaluation of interest point detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 37(2): 151-172
- [3] Harris C, Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector [C] // Fourth Alvey Vision Conference, 1988: 147-151
- [4] Karna D K, Agarwal S, Nikam S. Normalized Cross-correlation Based Fingerprint Matching[C] // Proceedings of the 2008 Fifth International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualisation, 2008: 229-232
- [5] Mthlman K, et al. Calculating Dense Disparity Maps from Color Stereo Images: an Efficient Implementation [J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1): 79-88
- [6] 周围. 基于单目视觉的运动估计与结构重建[M]. 杭州: 浙江大学, 2007
- [7] 郭荣鑫, 杨邦成, 等. 亚像素位移插值计算方法的比较分析[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2005, 30(2): 55-59
- [8] 雷鸣, 张广军. 基于互相关的图像匹配亚像素定位[J]. 光电工程, 2008, 35(5): 108-113
- [9] Marques M, Costeira J. Estimating 3D shape from degenerate sequences with missing data [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2009, 113(3): 261-272
- [10] Dell'acqua P, Sarti P, Tubaro S. 3D Motion from structures of points, lines and planes [J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(4): 529-549