

单图三维重构方法

吴 敖, 方向忠, 董皓远

(上海交通大学图像通信与信息处理研究所, 上海 200240)

摘 要: 在场景深度信息未知的情况下, 由多视点成像产生的焦散失真无法消除。针对该问题, 利用多视点成像中光束斜交的特性, 提取失真图像中结构化图形中包含的场景深度信息, 实现对单幅多视点图像的三维几何结构重建。重构适用范围包括所有已知函数形式的曲线, 尤其为直线、圆等特殊几何图形的三维重构提供了专门的数学方法。

关键词: 多视点图像; 失真; 深度信息; 三维重构

3D Reconstruction Method for Single Image

WU Ao, FANG Xiang-zhong, DONG Hao-yuan

(Institute of Image Communication & Information Processing, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

【Abstract】 Without knowing scene structure, caustic distortions due to multi-viewpoint imaging can not be removed. Based on the skewed light rays in multi-viewpoint imaging, this paper extracts depth information from structured features in distorted images, and performs 3D Euclidean reconstruction from a single multi-viewpoint image. The reconstructing principle includes all curves of known functional form, and provides specially designed mathematical approaches for features such as space lines and circles.

【Key words】 multi-viewpoint image; distortion; depth information; 3D reconstruction

1 概述

图像本质上是一种三维场景的二维投射, 其中空间点到平面像素的映射关系是由成像系统的几何特性决定的。最常见的成像系统是基于透视投射的传统相机, 在这样的系统中, 所有的入射光线汇聚于一点(焦点), 然后投射到成像平面上。由于人眼习惯于透视场景^[1], 透视成像系统所获得的图像通常被认为是未失真的, 任何非透视的图像都被看作是失真的(或扭曲的)。透视成像系统虽然不会引入失真, 但由于物理焦距的限制, 其视野范围相当有限。

2 多视点图像及图像失真

为了增大视角, 相机不再局限于透视投射模型, 却仍保持单个的有效视点。典型的单视点成像系统包括基于透镜的折射式相机, 如广角相机、鱼眼相机^[2]。由于仍是单个视点, 因此, 这类相机所产生的图像失真可以简单地通过图像变形^[3]消除。然而, 这类单视点成像系统对器件及其装配的精确性有极高的要求, 否则, 系统将偏离单个的视点。

事实上, 单视点并非是成像系统的必要条件, 放宽这种限制可使相机的设计变得更加灵活, 此时入射光线可以不再汇聚于同一点。在成像系统中, 一个视点可看作处于视线上的任意位置, 但通常情况下视点被归于某一曲面上, 称为光线面。光线面的选择可以是任意的。然而, 很多成像系统中存在一个特殊的光线面, 它由入射光线的几何特性所唯一决定。在这样的曲面上, 视线的方向是所对应视点位置的函数。这种特殊的光线面被定义为焦散面^[4]。对于多视点成像系统, 焦散面描述了其视点的轨迹。基于透镜和反射镜的折反射式相机是一类典型的多视点成像系统。另外, 通过相机移动或相机聚集实现的拼接成像也是多视点的。由这样的多视点成像系统所构成的图像称为多视点图像。由于图像中的每一个像素都具有独立的视点和方向, 即使成像系统的几何特性完

全已知, 图像也不可能脱离深度信息而转化成透视视角, 即显现出失真, 这样的失真称为焦散失真^[4]。

如上所述, 在深度信息未知的情况下, 单幅多视点图像的焦散失真是无法消除的。这种失真的程度恰恰是由物体所在位置的深度决定的。本文通过提取多视点单图所包含的场景深度信息, 实现对已知函数形式的一般空间曲线的三维几何结构重建, 如直线、圆、二次曲线。

3 三维重构

非单视点产生的焦散失真与成像系统的几何特性及场景的深度信息有密切的联系。虽然多视点图像中任意像素的深度是不可知的, 但大多数生活场景包含了直线、圆等结构化的形状, 从而提供了附加的约束条件用于对场景深度信息进行估计。用户只需指出图像中待重构曲线的轮廓及其对应的函数形式, 即可实现对该空间曲线的三维重构。为方便论述, 本文仅说明一般平面曲线的重构原理。

3.1 平面曲线的三维重构

假定成像系统的几何特性可以通过校准获知^[3-4], 则对于多视点图像中的任意像素 q_i , 可以计算出它处于焦散面上的视点位置 $S_c(q_i) = [S_{cx}, S_{cy}, S_{cz}]$ 及其视线方向 $V_i(q_i) = [V_{ix}, V_{iy}, V_{iz}]$ ^[4], 于是该像素所对应的场景点可表示为:

$$Q_i = S_c(q_i) + \lambda \cdot V_i(q_i) = [S_{cx} + \lambda V_{ix}, S_{cy} + \lambda V_{iy}, S_{cz} + \lambda V_{iz}] \quad (\lambda > 0) \quad (1)$$

其中, λ 为视点 $S_c(q_i)$ 与场景点 Q_i 之间的距离, 即深度。

基金项目: 上海市科委基金资助项目“无线高清数字电视基础研发”(08dz1500803)

作者简介: 吴 敖(1985-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 图像处理; 方向忠, 教授、博士生导师; 董皓远, 硕士研究生

收稿日期: 2010-03-27 **E-mail:** beibei8056@hotmail.com

空间曲线 C 通过任意成像系统映射至图像平面中的曲线 c 。曲线 C 可以被定义为视线束 V_i 与场景平面 Π 的交线，而其他任意平面 Π' 交视线束 V_i 于非曲线 C 的函数形式。如图 1 所示，场景中的平面曲线 C 可以被定义为视线束 V_i 与场景平面 Π 的交线，而由于光束是斜交的，因此它与其他任意平面的交线是一条与 C 不同函数形式的曲线。也就是说，确定曲线 C 等价于确定 C 所在的平面：

$$\Pi: Ax + By + Cz + D = 0 \quad (2)$$

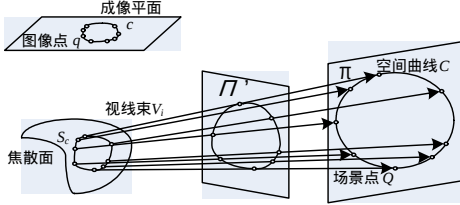


图 1 空间曲线

如果是光束共面，则交任意平面于一条直线，因此，是不能重构的。由式(1)、式(2)，可以将深度 λ 或点列 Q 表示为平面参数 $\{A, B, C, D\}$ 的函数。现在将点列 Q 旋转至 XOY 平面(这样的旋转并不改变 Q 的约束条件，如作为直线、圆)，得到相应的二维坐标 $Q^{2D}(A, B, C, D)$ 。由于曲线 C 在 XOY 平面上的函数形式：

$$F(Q^{2D}) = 0 \quad (3)$$

是已知的，因此可通过非线性搜索平面参数 $\{A, B, C, D\}$ 使表达式：

$$\arg \min_{\Pi: \{A, B, C, D\}} \sum_{i=1}^N |F(Q_i^{2D})| \quad (4)$$

的值最小，其中， N 为视线束与场景平面的交点个数。注意此重构方法并不要求已知曲线在场景平面中的方向。

3.2 圆锥曲线的三维重构

圆锥曲线是生活中常见的一类平面曲线，可以采用统一的二维方程形式描述包括椭圆、抛物线和双曲线在内的所有圆锥曲线：

$$F(Q^{2D}): ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (5)$$

这种二维模型并不需要已知曲线在平面中的方向，而事实上也包含了直线和圆。

3.3 圆的三维重构

圆是一类特殊的圆锥曲线。在对圆所在平面的 4 个参数 $\{A, B, C, D\}$ 进行非线性搜索之前，本文介绍一种数学方法估计出其中的 3 个参数 $\{A, B, C\}$ ，即平面的方向(或法向量)，这使重构更加快速、准确。此处利用透视成像系统的一个性质，它可以近似地应用于多视点系统中。在透视系统中，空间圆的视线束交场景平面及与其平行的平面于圆，而与其他平面均交于椭圆。相反，若已知空间圆的椭圆图像，可计算出该圆所在平面的法向量。而在多视点系统中，视线束交场景平面的平行平面于一个失真的圆，而交其他平面于失真的椭圆。

因此，此处可以忽略视点的轨迹而近似为单个视点，利用视线束与某个平面的交点列拟合一个椭圆，并由此椭圆计算得出空间圆所在场景平面的法向量，由对称性可知将得到 2 个可能的结果。分别以这 2 个法向量作为起始点按式(4)对平面参数 $\{A, B, C, D\}$ 进行全局最小值的非线性搜索，从而重构出空间圆的三维位置。这种方法比直接搜索更快速准确。

3.4 直线的三维重构

直线是生活中最常见的图形，除了 3.1 节中介绍的一般

平面曲线的重构方法，本节推导一种线性方案直接由单幅多视点图像计算出其中直线的空间三维位置。简单起见，假定成像是中心对称的。在这样的系统中，视点可以被认为处于系统的对称轴上，称为视线轴，如图 2 所示。空间直线 L 由一中心对称系统成像，可以将视线束看作是从视线轴出发的，这为直线的线性三维重构提供了简便的数学论证方法。

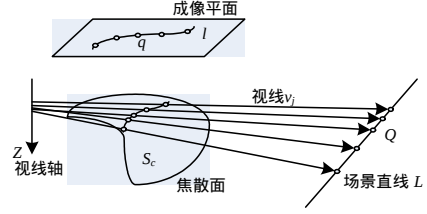


图 2 视线轴

定理 空间中给定 4 条不同的直线，存在 0 条、1 条、2 条或无穷多条直线与之相交^[5]。

在本文的例子中，存在 2 条直线与视线束(远多于 4 条)相交，其中一条是视线轴，另一条是待重构的场景直线。因此，采用下述空间直线的表示方法，排除了视线轴，从而使场景直线成为唯一满足条件的结果。

方便起见，将视线轴定为 Z 轴，则任意空间直线可以被定义为以下 2 个平面的交线：

$$\Pi_0: A_0x + B_0y + z = 0$$

$$\Pi_z: A_zx + B_zy + 1 = 0 \quad (6)$$

其中， Π_0 表示经过原点而不平行于 Z 轴的平面； Π_z 表示平行于 Z 轴而不过原点的平面。注意既经过原点又平行于 Z 轴，即经过 Z 轴的平面，对应于 3.1 节提到的共面情形，这种情况下任何平面曲线都不能重构。

在已知几何特性的成像系统中，对于图像中失真曲线 l 上给定的像素 q_i ，可以得到它所对应的视线轴上的视点 $S_c(q_i) = [0 \ 0 \ S_{cz}]$ 及其视线方向 $V_i(q_i) = [V_{ix}, V_{iy}, V_{iz}]$ 。于是，场景点应位于视线上，可以表示为：

$$Q_i = S_c(q_i) + \lambda \cdot V_i(q_i) = [\lambda \cdot V_{ix} \ \lambda \cdot V_{iy} \ S_{cz} + \lambda \cdot V_{iz}] \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)中并消去 λ ，得到场景直线上的点须满足的限制条件：

$$A_0V_{ix} + B_0V_{iy} - A_zS_{cz}V_{ix} - B_zS_{cz}V_{iy} = -V_{iz} \quad (8)$$

对于直线上的点列，可以写成如下矩阵形式：

$$[V_{ix} \ V_{iy} \ -S_{cz}V_{ix} \ -S_{cz}V_{iy}] \cdot [A_0 \ B_0 \ A_z \ B_z]' = -V_{iz} \quad (9)$$

其中， S_{cz} 、 V_{ix} 、 V_{iy} 、 V_{iz} 是对应于直线上点列(远多于 4 个)的列向量。由这个矩阵方程可以计算出 A_0 、 B_0 、 A_z 、 B_z ，即场景直线的空间三维位置。

4 渲染场景的实验仿真

上一节论述了单幅多视点图像中平面曲线的三维重构原理，本节用渲染的场景进行仿真实验，进一步描述整个三维重构中的交互过程。采用渲染场景便于对比重构结果与原始场景位置。

4.1 曲线识别

首先用 PovRay 渲染一个大约 $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 的室内场景，使用一个仿真的相机以 1 m 为半径绕房间的中心轴水平旋转一周，将每一帧图像的中间列像素拼接得到图 3 所示的全景图像。由于像素的视点都不同，因此得到的图像显然是多视点的。用户通过标注采样点指定待重构曲线，通过线性

(下转第 231 页)