

## 基于图像重投影的视图合成

刘 然<sup>1,2</sup>, 朱庆生<sup>1</sup>, 易 琳<sup>3</sup>, 许小艳<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 计算机学院, 重庆 400044; 2. 四川虹微技术有限公司, 成都 610041; 3. 重庆市肿瘤医院, 重庆 400030)  
(liuran781101@tom.com)

**摘 要:**针对摄像机绕光心旋转的情形,讨论了在这种特殊情形下单应矩阵具有的性质。然后根据这些性质结合三维图像变换技术给出了一种摄像机绕光心旋转时新视图的合成方法。该方法首先利用单应矩阵的性质生成目标图像的一部分,并采用逆向映射的方法以避免产生空洞;接着利用三维图像变换生成目标图像的剩余部分;最后对由三维图像变换生成的部分进行空洞填补。实验结果表明,该方法能够生成质量较好的新视图。

**关键词:**图像处理;视图合成;图像重投影;单应矩阵;深度图

**中图分类号:** TP391.41; TP319 **文献标志码:** A

## View synthesis based on image reprojection

LIU Ran<sup>1,2</sup>, ZHU Qing-sheng<sup>1</sup>, YI Lin<sup>3</sup>, XU Xiao-yan<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. Panovasic Technology Company Limited, Chengdu Sichuan 610041, China;  
3. Chongqing Cancer Hospital, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** What properties the homography should have when the camera rotates around its optical center was discussed. Then combining these properties with the 3D image warping technique, a new way to synthesize novel views when camera rotates around its optical center was proposed. The method first generated part of the novel view by making use of the properties of the homography, and backward mapping method was used to avoid holes; then 3D image warping method was applied to create the remaining part of the novel view; finally, holes in the remaining part which were caused by 3D image warping were filled. Experimental results show that the proposed method provides novel views with quite good image quality.

**Key words:** image processing; view synthesis; image reprojection; homography; depth image

### 0 引言

随着图像合成技术的发展,基于图像重投影的图像合成正得到日益广泛的应用。图像重投影是指通过对任意视图的参考图像进行投影来产生新的图像<sup>[1]</sup>。由于图像重投影能够改变已生成的图像的视线方向,因此它已在多视点图像的实时渲染、视图变形、图像拼接等领域得到了应用<sup>[1-2]</sup>。目前多数文献讨论一般情况下的图像重投影,处理起来比较复杂。本文重点考查当摄像机绕光心旋转时的图像的重投影,首先讨论了在这种特殊情形下图像重投影单应矩阵具有的性质,然后根据这些性质结合三维图像变换技术探讨了视图合成的方法,最后通过实验对该方法进行了验证。

### 1 单应矩阵及其性质

如图1所示(本文用同一大写粗体字母表示图像和它的图像平面,  $\theta$  为一次转动角,  $f$  为焦距),设摄像机绕其光心  $C$  做旋转运动,摄像机的初始的摄像机坐标系与世界坐标系重合,  $U$  为场景中的一点,它在世界坐标系中的规范化齐次坐标为  $[X_w Y_w Z_w 1]^T$ 。  $K$  为摄像机的内部参数矩阵,则此时摄像机的投影矩阵  $P = [K | 0]$ 。假设摄像机在初始位置和绕光心  $C$  旋转之后所拍摄的同一场景的两幅图像分别是  $I_0$  和  $I_1$ , 则  $U$

在两幅图像中的投影点  $u_0 \in I_0$  和点  $u_1 \in I_1$  有如下关系:

$$Z_w u_0 = [K | 0] U$$

$$Z_1 u_1 = [KR | 0] U$$

其中  $R$  为旋转矩阵 ( $3 \times 3$  的正交阵, 且  $\det R = 1$ ),  $u_0$  和  $u_1$  为各自的像素图像坐标系中的规范化齐次坐标(列向量)表示,  $Z_1 = (R[X_w Y_w Z_w]^T)_3$  ( $(\cdot)_3$  表示向量的第3个分量)。因此:

$$u_1 = \frac{(R[X_w Y_w Z_w]^T)_3}{Z_w} K R K^{-1} u_0 = \frac{(R[X_w Y_w Z_w]^T)_3}{Z_w} M u_0 \quad (1)$$

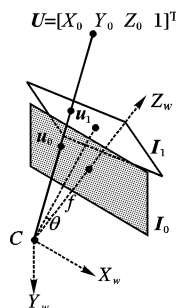


图1 摄像机绕光心旋转

其中,  $M$  被称为  $I_0$  到  $I_1$  的单应矩阵<sup>[3]</sup>。在摄像机标定时,  $M$  是将图像平面  $I_0$  重投影到图像平面  $I_1$  的投影变换矩阵<sup>[2]</sup>。因此,图像重投影能够利用已生成的图像产生新的视线方向上的图像。

在摄像机未标定时,式(1)可写成<sup>[2-3]</sup>:

$$\hat{u}_1 = K R K^{-1} u_0 \quad (2)$$

收稿日期:2009-11-09;修回日期:2009-01-07。 基金项目:国家973计划项目(2009ZX01033-001-010);国家863计划项目(2006AA10Z23);国家自然科学基金资助项目(60773082/F0205);中国博士后科学基金资助项目(20080440700)。

作者简介:刘然(1978-),男,湖南新宁人,博士,主要研究方向:计算机视觉; 朱庆生(1956-),男,安徽滁州人,教授,博士生导师,主要研究方向:虚拟现实; 易琳(1981-),女,重庆万州人,工程师,主要研究方向:医学图像处理; 许小艳(1980-),女,湖南新宁人,博士研究生,主要研究方向:计算机视觉。

其中“~”表示两个矩阵或向量在只相差一个比例因子意义下相等。其中 $u_0$ 和 $u_1$ 不一定是规范化齐次坐标。

单应矩阵 $M$ 具有许多优良性质,然而讨论摄像机绕光心旋转时 $M$ 所具有的性质的文献较少,本文给出了如下几条性质。

性质1  $M$ 与 $R$ 具有相同的特征值 $1$ 、 $e^{-i\theta}$ 和 $e^{i\theta}$ 。

由于 $R$ 是旋转矩阵,因此它有3个特征值:1、 $e^{-i\theta}$ 和 $e^{i\theta}$ 。其中 $\theta$ 为一次转动角,它对应的旋转轴(称为欧拉轴)过原点 $C$ 且一次转动向量(方向向量)与特征值1所对应的特征向量相同。从 $M = KRK^{-1}$ 可知 $M$ 与 $R$ 相似,因此 $M$ 与 $R$ 具有相同的特征值。

性质2  $\det M = \det(KRK^{-1}) = \det(KK^{-1}) = 1$ 。

性质3 设 $M$ 是 $I_0$ 到 $I_1$ 的单应矩阵,则 $M$ 将 $I_0$ 中的点映射成 $I_1$ 中的点,将 $I_0$ 中的直线映射成 $I_1$ 中的直线。

证明 首先证明 $M$ 将 $I_0$ 中的点映射成 $I_1$ 中的点。由式(1)可知, $I_0$ 中的点经过映射 $M$ 的作用之后变成了 $I_1$ 中的点。值得注意的是,对 $I_0$ 中的点实施变换 $M$ 之后得到的点的坐标必须转化为规范化齐次坐标才在 $I_1$ 的图像平面中,否则 $I_0$ 将被映射成不同于 $I_1$ 的图像,这是因为每个点的映射规则发生了变化(坐标相差一个比例因子)。

其次证明 $M$ 将 $I_0$ 中的直线映射成 $I_1$ 中的直线。设直线 $l_0 = [a_1 \ a_2 \ a_3] \subset I_0 (a_1^2 + a_2^2 \neq 0)$ ,  $p_0 = [x_0, y_0, 1]^T \in l_0$ ,  $p_1 = [x_1, y_1, 1]^T \in l_0$ ,  $p = [x, y, 1]^T$ 为 $l_0$ 上任意一点,因此:

$$\begin{vmatrix} p & p_0 & p_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x & x_0 & x_1 \\ y & y_0 & y_1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

$p_0, p_1, p$ 经 $M$ 映射到 $I_1$ 的点的规范化齐次坐标为 $t_0Mp_0$ 、 $t_1Mp_1$ 、 $tMp$ ,其中 $t_0$ 、 $t_1$ 和 $t$ 是将坐标转化为规范化齐次坐标的比例因子。则:

$$\begin{aligned} |tMp \ t_0Mp_0 \ t_1Mp_1| &= |M[tP \ t_0p_0 \ t_1p_1]| = \\ |M| |tP \ t_0p_0 \ t_1p_1| &= \\ |M| \begin{vmatrix} t & 0 & 0 \\ 0 & t_0 & 0 \\ 0 & 0 & t_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} p & p_0 & p_1 \end{vmatrix} &= 0 \end{aligned}$$

即点 $Mp_0$ 、 $Mp_1$ 、 $Mp$ 共线,由 $p$ 为 $l_0$ 上任意一点可知 $M$ 将 $l_0$ 映射成了 $I_1$ 中的直线。证毕。

## 2 视图合成

如图2所示,假设两台不同的摄像机在不同视点所拍摄的同场景的两幅图像分别是 $I_0$ 和 $I_1$ ,光心分别为 $C_0$ 和 $C_1$ , $I_0$ 的投影矩阵为 $P_0 = K_0[R_0 | -R_0C_0]$ , $I_1$ 的投影矩阵为 $P_1 = K_1[R_1 | -R_1C_1]$ 。 $I_s$ 是 $I_0$ 绕 $C_0$ 旋转所得到的图像, $I_s$ 的投影矩阵为 $P_s = K_0[R_s | -R_sC_0]$ , $u_s$ 为 $U$ 在 $I_s$ 中的投影,则根据式(2)有:

$$\hat{u}_s = Mu_0 = K_0R_sR_0^{-1}K_0^{-1}u_0 \quad (3)$$

从图2可以看出,利用式(3)可根据 $I_0$ 合成 $I_s$ 的 $a'$ 、 $b'$ 和 $c'$ 部分。如果不对 $I_s$ 进行裁剪,则 $I_0$ 的 $a$ 部分被投影到了 $a'$ 。本文对 $a'$ 做了裁剪。

$I_0$ 的 $b$ 部分被投影到了 $b'$ , $c$ 部分被投影到了 $c'$ 。为了加快合成速度,有必要确定 $I_0$ 在 $I_s$ 中的投影( $b' + c'$ )的边界。如图2所示,设 $I_0$ 右边的图像边界线为 $l_0$ ,根据性质3,它在 $I_s$ 的投影 $l_s$ 仍然是直线。 $l_s$ 构成了 $c'$ 与 $d'$ 的分界线,它由 $I_0$ 的两个端点的投影确定。其他的几条边界线也由两个端点的投影确

定。因此,区域( $b' + c'$ )由 $I_0$ 的四个顶点围成的区域和 $I_s$ 的交集确定。确定了区域( $b' + c'$ )之后,该区域的图像可采用逆向映射的方式由式(3)生成,从而避免“空洞”现象的产生。此外,由于 $b'$ 和 $c'$ 是 $I_0$ 和 $I_s$ 的公共视野部分的投影,并且 $I_0$ 和 $I_s$ 对应的摄像机共光心,因此在重投影过程中物体的可见性不变。

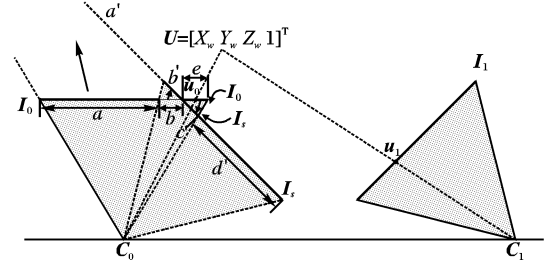


图2 摄像机绕光心旋转时基于图像重投影的视图合成

### 2.1 三维图像变换

$I_s$ 中的 $d'$ 需从 $I_1$ 中重采样得到。假设 $I_1$ 的深度图已知,利用三维图像变换方程可以将 $I_1$ 的像素映射到 $I_s$ 。<sup>[4-5]</sup>。为方便运算,这里将 $P_s$ 、 $P_1$ 改写为:

$$\begin{aligned} P_s &= \begin{bmatrix} K_0 & 0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s & -R_sC_0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \\ P_1 &= \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & -R_1C_1 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $0 = [0 \ 0 \ 0]^T$ 。

由式(4)知 $P_s$ 、 $P_1$ 均可逆。因此 $I_1$ 和 $I_s$ 的三维图像变换方程组为:

$$Z_s \begin{bmatrix} u_s \\ 1 \\ Z_s \end{bmatrix} = P_s U = \begin{bmatrix} K_0R_s & -K_0R_sC_0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} U \quad (5)$$

$$Z_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ 1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = P_1 U = \begin{bmatrix} K_1R_1 & -K_1R_1C_1 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} U \quad (6)$$

其中 $Z_s = (R_s[X_w \ Y_w \ Z_w]^T)_3$ ,  $Z_1$ 为 $u_1$ 对应的深度值。

### 2.2 可见性变化

在摄像机已标定的情况下,由式(6)可算出 $U$ 的坐标 $[X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T$ ,代入式(5)就能得到 $u_s$ ,将点 $u_1$ 对应的像素拷贝到点 $u_s$ 的位置,便能生成 $d'$ 部分的图像。但是如果简单地按上述方法处理,有可能出现 $I_1$ 中的几个点映射到 $d'$ 中的同一个点的情况,这就是由可见性变化所引起的“褶皱”现象<sup>[2, 5-6]</sup>。褶皱现象可采用油画家方法来处理<sup>[7]</sup>。

此外,可见性变化还会引起“空洞”现象。若不做处理, $d'$ 通常都带有空洞。文献[8]提出了一种空洞填充算法。在该算法中,空洞是由事先指定的一种“背景”颜色来标识的,这可能导致无法准确辨别哪些像素是真正的空洞。本文则用一个0-1矩阵 $N$ 来标识目标图像中每个像素是否是空洞,采用如下公式填补空洞:

设空洞中的点 $p$ 的邻近的左右上下四个点分别为 $p_l$ 、 $p_r$ 、 $p_u$ 、 $p_d$ ,则:

$$V(p) = (V(p_l) + V(p_r) + V(p_u) + V(p_d)) / 4 \quad (7)$$

其中 $V(\cdot)$ 表示取点的像数值。

算法描述如下:

1) 根据 $N$ 遍历图像中的空洞,填充左右上下四个点都不空的空洞点,并更新 $N$ ;

2) 根据 $N$ 遍历图像中的空洞,填充左右上下四个点中有

三个点不空的空洞点,并更新 $N$ ,若还存在邻近点有三个以上点不空的空洞点,则转1);否则转3);

3) 根据 $N$ 遍历图像中的空洞,填充左右上下四个点中有两个点不空的空洞点,并更新 $N$ ,若还存在邻近点有两个以上点不空的空洞点,则转1);否则转4);

4) 根据 $N$ 遍历图像中的空洞,填充左右上下四个点中有一个点不空的空洞点,并更新 $N$ ,若还存在邻近点有一个以上点不空的空洞点,则转1);否则停止。

这个算法可写成递归的形式,但是采用递归的形式空间复杂性变得很高。

### 3 实验

本文采用“Ballet”序列进行实验。“Ballet”序列的摄制方法参见文献[9]。图3是摄像机4捕获的第一帧(命为 $I_4$ ),其摄像机光心 $C_4$ 处在世界坐标系的原点。图4是摄像机5捕获的同步帧及其深度图。“Ballet”序列的数据还包含了每台摄像机内部参数矩阵 $K$ 和 $3 \times 4$ 的外部参数矩阵 $[R | T]^{[10]}$ 。从外部参数矩阵可以看出,摄像机4的摄像机坐标系基本上与世界坐标系(左手坐标系)重合,如图5所示,其中旋转轴是 $Y$ 轴, $\theta$ 为一次转动角, $f$ 为焦距。值得注意的是,在标定摄像机的内部参数矩阵时,“Ballet”序列的像素图像坐标系采用的是 $x'o'y'$ ,而最后得到的数字图像的像素图像坐标系采用的是 $xoy$ 。从 $xoy$ 到 $x'o'y'$ 的坐标变换矩阵为:

$$T_{oo'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 767 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中767是图像的高度768减1。

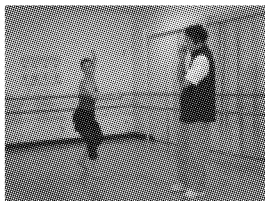
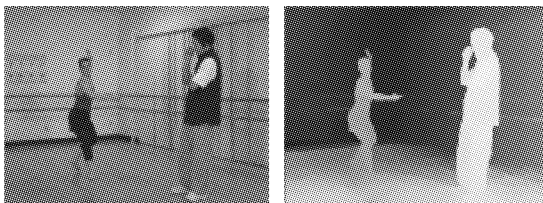


图3 “Ballet”序列测试图 $I_4$



(a) 图3的同步帧 $I_5$  (b) 深度图

图4 图3的同步帧 $I_5$ 及其深度图

此外,“Ballet”序列的深度图的深度值都已经变换到了世界坐标系中,因此对摄像机5来说,式(6)变为:

$$\begin{bmatrix} Z_5 u_5 \\ Z_5 v_5 \\ Z_5 \\ 1 \end{bmatrix} = P_5 U = \begin{bmatrix} K_5 R_5 & K_5 T_5 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中各参数的下标5表示是摄像机5的参数;点 $u = [u_5 \ v_5 \ 1]^T$ 是图3中的同步帧(图5中的 $I_5$ )中的任意一点(其坐标是 $x'o'y'$ 中的坐标); $Z_5$ 是 $U$ 在摄像机5的摄像机坐标系下的纵坐标。在本实验中,由式(8)解出 $X_w$ 和 $Y_w$ ,然后代入式(5)就可以将点 $u$ 投影到要合成的新视图。

假设摄像机4绕光心旋转的一次转动角为 $\theta$ 。为方便处

理,设旋转轴为 $Y$ 轴,此时 $I_s$ 的上下边框与 $I_4$ 相交,对应的旋转矩阵为(这里看成坐标系在转动):

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

其中 $\theta$ 的正方向是这样的:用左手握住 $Y$ 轴,大拇指指向与 $Y$ 轴的方向一致的方向,则四指旋转握住 $Y$ 轴的方向就是 $\theta$ 的正方向。

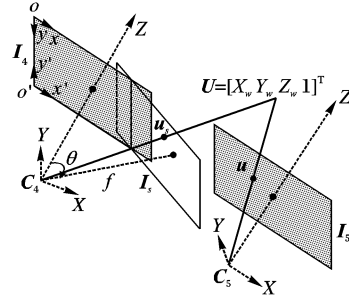


图5 摄像机4绕光心旋转

实验首先利用式(3)合成 $I_s$ 的一部分。根据式(3) $I_4$ 到 $I_s$ 的单应矩阵为 $M = K_4 R_\theta K_4^{-1}$ ,其中 $K_4$ 表示摄像机4的内部参数矩阵。但由于在标定 $K_4$ 时采用的坐标系是 $x'o'y'$ 坐标系,因此还应该将像素的坐标变换到 $xoy$ 坐标系中,所以最后的单应矩阵为:

$$M = T_{oo'}^{-1} K_4 R_\theta K_4^{-1} T_{oo'}$$

$I_4$ 在 $I_s$ 中的投影的边界可由逐次多边形裁剪算法得到。

图6(a)是 $\theta = 15^\circ$ 时生成的 $I_s$ 。



(a) 利用式(3)合成的 $I_s(\theta = 15^\circ)$  (b) 采用三维图像变换合成的 $I_s$



(c) 消除空间后的 $I_s$   
图6 合成的图像

其次,根据式(5)、(8)和画家方法合成 $I_s$ 的剩余部分,步骤如下。

1) 计算 $C_4$ 在 $I_5$ 中的投影 $e$ 。这里求得 $e = [e_x, e_y, e_z]^T = [7601.873, 79.768, 0.429]^T$ (坐标系 $xoy$ 中的坐标)。由于 $e_z > 0$ ,因此该极点为正极点,应按照朝向 $e$ 的方向处理 $I_5$ 中的像素<sup>[7]</sup>。

2) 将 $e$ 的坐标转化为规范化齐次坐标 $e' = [e_x', e_y', e_z']^T = [17721.342, 185.953, 1]^T$ 。根据 $e'$ 的坐标将 $I_5$ 划分为两个区域——Sheet1和Sheet2,如图7所示。

3) 按照图7中箭头的方向分别遍历Sheet1和Sheet2中的像素,将它们重投影到 $I_s$ 。在遍历过程中,如果投影到 $I_s$ 的像素落在图6(a)中线段围成的四边形内,则不作任何处理。判断一个点是否落在四边形内可采用“跳栅栏”算法。

图6(b)是在图6(a)的基础上采用三维图像变换合成的

$I_s$ ;图6(c)是消除空洞之后的 $I_s$ ,黑色是视野之外的部分。

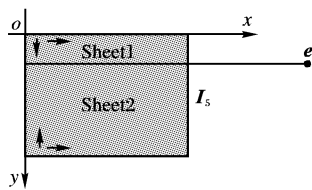


图7  $I_s$  中处理像素的顺序

#### 4 结语

由于在实际应用中很多情况下摄像机只绕光心旋转,例如视频监控设备及某些云台设备的摄像机通常只绕光心旋转,因此研究这类情况的视图合成具有重要的现实意义。本文研究了当摄像机绕光心旋转时基于图像重投影技术的视图合成。给出了一种新视图的合成方法。该方法的特点是首先利用单应矩阵的性质生成目标图像的一部分,剩余部分则采用三维图像变换技术合成。这样做的好处是能最大限度地利用单应矩阵的优良性质,以加快合成速度,提高合成质量。本文实验部分给出了由两幅参考图像生成一幅新视图的实例。从实验还可以看出,经过空洞填充后,会产生一定的伪像。下一步工作的重点是如何尽可能地减少伪像。

#### 参考文献:

- [1] KYOUNGSU O H, HYOWON K, CHULHAN L, *et al.* Real-time rendering of multi-view images from a single image with depth [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Computational Science and Applications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 505 - 509.

- [2] SEITZ S M, DYER C R. View morphing [C]// Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1996: 21 - 30.
- [3] 于洪川, 吴福朝, 阮宗才, 等. VR 环境图像生成中几项关键技术研究[J]. 计算机研究与发展, 1999, 36(11): 1349 - 1357.
- [4] FEHN C. A 3 DTV approach using depth-image-based rendering (DIBR) [C]// Proceedings of Visualization, Imaging, and Image Processing. Spain: [s. n.], 2003: 482 - 487.
- [5] LIU ZHAN-WEI, AN PING, LIU SU-XING, *et al.* Arbitrary view generation based on DIBR [C]// Proceedings of 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Xiamen: [s. n.], 2007: 233 - 236.
- [6] 郑新, 吴恩华. 从多幅参考图像合成目标图像的逆映射算法[J]. 软件学报, 2001, 12(10): 1464 - 1471.
- [7] MCMILLAN L. An image-based approach to three-dimensional computer graphic [D]. USA: University of North Carolina, 1997.
- [8] CHEN, S E, WILLIAMS L. View interpolation for image synthesis [C]// Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1993: 279 - 288.
- [9] ZITNICK C L, KANG S B, UYTENDAELE M, *et al.* High-quality video view interpolation using a layered representation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 600 - 608.
- [10] YOON S-U, LEE E-K, KIM S-Y, *et al.* A framework for multi-view video coding using layered depth images [C]// Proceedings of 6th Pacific-Rim Conference on Multimedia, LNCS 3767. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 431 - 442.

(上接第894页)

抵消一部分,实际偏差会更小。2)节点的时钟计时精度直接和频率相关,频率越高,计时精度越高。以本系统中使用的TI-CC2431使用32 MHz晶振为例,设置定时器使用128分频时计时精度高达 $0.03 \mu\text{s}$ <sup>[7]</sup>,对同步精度影响较小。如果想要进一步提高同步精度,则主要应该考虑对节点的晶振的频率误差以及初相位差进行补偿。

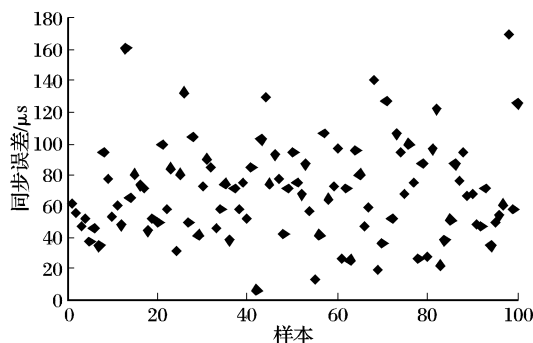


图6 节点之间的同步误差统计

#### 3 结语

与传统时间同步算法相比较,本算法的主要优点在于:1)无须建立分级网络结构,可以直接利用原有路由;2)只对需要同步的少数兴趣节点进行同步补偿,降低了通信流量,延长了网络寿命;3)本算法仅在同步事件发生或者说传送有同步需求的指令时才触发同步过程。实验结果说明本算法在节能性明显上优于TPSN,以低复杂度实现同等精度同步效果。

基于事件触发的数据同步补偿算法适用于针对部分节点

同步的工业控制与数据采集无线传感器网络,由于仅在同步事件发生时对兴趣节点进行同步,而不是周期性地全网节点频繁进行时间同步,该算法在事件发生频率较低的情况下具有良好的节能性,提供了一种无线传感器网络中数据同步的新思路。

#### 参考文献:

- [1] ELSON J, ESTRIN D. Time synchronization for wireless sensor networks[EB/OL]. [2009-07-01]. <http://www.cens.ucla.edu/Estrin/papers/timesync.pdf>.
- [2] GANERIWAL S, KUMAR R, SRIVASTAVA M B. Timing-sync protocol for sensor networks[C]// Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2003: 138 - 149.
- [3] ELSON J, GIROD L, ESTRIN D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]// OSDI'02: Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation. New York: ACM, 2002: 147 - 163.
- [4] SU PING. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks[EB/OL]. [2009-07-01]. [http://leidl.org/docs/intel/IR-TR-2003-64-081120031327\\_137.pdf](http://leidl.org/docs/intel/IR-TR-2003-64-081120031327_137.pdf).
- [5] 田贤忠, 陈登, 胡同森. 无线传感器网络按需时间同步算法研究[J]. 传感器技术学报, 2008, 21(11): 1881 - 1886.
- [6] LTD. NX3225SA DataSheet[EB/OL]. [2009-07-01]. <http://www.ndk.com>.
- [7] Texas Instruments Incorporated. CC2431 DataSheet [EB/OL]. [2009-07-01]. <http://focus.ti.com>.