

文章编号 1004-924X(2014)09-2518-10

## 多视频超分辨率的时间重建倍数

陈为龙<sup>1</sup>, 郭黎<sup>2</sup>, 雷刚<sup>1</sup>, 吴炜<sup>3</sup>, 杨晓敏<sup>3\*</sup>

(1. 四川师范大学 数字媒体学院, 四川 成都 610068;

2. 湖北民族学院 信息工程学院, 湖北 恩施 445000;

3. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**多视频超分辨率时间重建技术可以消除视频中的运动模糊和运动混叠现象。进行多视频时间重建时,重建倍数过小不能有效地减小运动模糊和运动混叠现象;而重建倍数过大会产生严重的时间振铃现象和运动物体位置的跳变。本文对如何在重建过程中确定最优的时间重建倍数进行了研究。通常情况下,在决定多视频时间重建倍数时只考虑输入视频的个数;但在实际重建过程中,除了输入视频个数的因素,时间重建倍数还与各个输入视频在时间上能提供的冗余信息量有关。文中从多个低分辨率输入视频配准后的位置关系入手,通过对曝光区间的分析,提出了确定多视频时间重建倍数的计算方法。最后对提出的方法进行了理论分析与实验,证明了所提方法的有效性。

**关键词:**多视频超分辨率;时间重建倍数;时间配准;时间分辨率;冗余信息

**中图分类号:**TN911.73;TP391.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142209.2518

## Temporal reconstruction times of video-to-video super-resolution

CHEN Wei-long<sup>1</sup>, GUO Li<sup>2</sup>, LEI Gang<sup>1</sup>, WU Wei<sup>3</sup>, YANG Xiao-min<sup>3\*</sup>

(1. Digital Media College, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China;

2. College of Information Engineering,

Hubei University for Nationalities, Enshi 445000, China;

3. College of Electronics and Information Engineering,

Sichuan University, Chengdu 610068, China)

\* Corresponding author, E-mail: csszmt@hotmail.com

**Abstract:** Video-to-video temporal super-resolution technology eliminates motion blur and motion aliasing existing in a captured video sequence. However, smaller temporal reconstruction times can not effectively remove motion blur and motion aliasing, while larger times will lead to serious temporal-ringing and the wrong location of a moving object in process of temporal reconstruction. This paper explores how to select an appropriate temporal construction times in the temporal reconstruction. In general, only the number of input video sequences is considered in deciding

**收稿日期:**2013-12-10;**修订日期:**2014-02-02.

**基金项目:**四川省教育厅科学研究项目(No. 11ZB073);可视化计算与虚拟现实四川省重点实验室资助项目(No. PJ201113);湖北省自然科学基金资助项目(No. 2012FFC02601);湖北省教育厅青年科学研究基金资助项目(No. Q20111907);国家自然科学基金资助项目(No. 61271330);武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室资助项目(No. 12R03);教育部博士点基金资助项目(No. 20130181120005)

temporal reconstruction times of video-to-video super-resolution reconstruction. In fact, temporal reconstruction times are also associated with redundant temporal information provided by each input low-temporal resolution video sequence. So, a novel method to select an appropriate temporal reconstruction times is proposed by analyzing the exposure-time and location relation of aligned low resolution input video sequences. From theoretical discussion and experimental results, the proposed method is validated to be effective and efficient.

**Key words:** video-to-video super-resolution; temporal reconstruction times; temporal alignment; temporal-resolution; redundant information

## 1 引言

当被拍摄物体存在高速运动时,假如摄像机的曝光时间不够短,就会产生运动模糊现象。同样,当摄像机采样帧率不足时,也不能拍摄到物体的正确运动轨迹,此时会产生运动混叠。运动模糊和运动混叠现象都是由于视频的时间分辨率不足引起的。提高视频的时间分辨率,多采用多视频超分辨率时间重建技术。该技术可概述如下:假设在相同的时间段内对同一场景拍摄,得到了多个视频,则通过对这些视频进行信息融合处理,可以重建出一个具有更高时间分辨率的视频。通过多视频超分辨率时间重建得到的高分辨率视频具有高帧率和短曝光时间,可以有效地解决运动模糊和运动混叠现象。

现阶段已有一些科研人员对多视频超分辨率时间重建技术展开了研究。Mudenagudagudi<sup>[1]</sup>等人提出了一种多视频重建算法,该算法可以在输入视频个数受限的情况下,提高视频的重建倍数。Amit Agrawal<sup>[2]</sup>等人提出了一种结合编码思想的多视频重建方法,得到了较好的时间重建效果。彭晓明<sup>[3]</sup>等人提出了一种多视频时空配准算法,该算法配准精度较高,但对拍摄的视频有一定限制和要求。Shechtman、Caspri 和 Irani 共同提出了几种针对多视频的时空超分辨率重建和配准算法<sup>[4-7]</sup>,其中,文献[5]提出了基于特征的多视频时空配准算法,该算法将时空信息作为一个整体同时计算,实验结果证明了算法的有效性。四川大学何小海<sup>[8]</sup>等人对超分辨率重建技术进行了深入研究,并提出了高精度的配准算法。文献[9-13]也对超分辨率技术进行了研究,这些方法均有

效地提高了视频帧的配准精度,提升了视频重建效果。但大多数方法主要针对单个视频空间进行重建,对于多个视频的时间重建的研究较少。少部分对于多视频时间重建的研究也没有充分考虑输入视频和重建倍数的关系。本文通过分析多个视频时间配准后的位置关系,提出了一种确定时间重建倍数的方法,该方法可以根据输入视频的信息自动计算得到合适的时间重建倍数。

## 2 输入视频个数与时间重建倍数的关系

理想情况下,多视频时间重建倍数的最大值可以等于输入视频的个数<sup>[4]</sup>。但在实际重建中,考虑到配准误差、噪声以及多个视频在时间上的信息互补程度等因素,时间重建倍数不可能达到理想最大值。若重建倍数过小,则不能有效减小运动模糊和运动混叠现象;若重建倍数过大,又会造成严重的时间振铃现象,同时还可能引起视频帧亮度变化以及运动物体位置的跳跃。因此,针对输入视频,如何确定合理的时间重建倍数就显得至关重要。

在诸多影响时间重建倍数的因素中,最重要的是“多个视频时间上的信息互补程度”。因此,在本文对多视频时间重建倍数的讨论中,也将主要考虑该因素。在以下的章节中,为了分析方便,假设各个视频都已进行高精度的配准。

### 2.1 多视频重建中的时间互补信息

多视频超分辨率时间重建可以看成是一个大型线性方程组的求解问题,在求解方程组的过程中,只有当矩阵的秩等于方程组未知量的个数的时候,方程组有唯一解。在工程应用中,当秩大于

方程组未知量个数的时候,可以用数值计算的方法拟合出最优解;但当秩小于方程组未知量个数的时候,此时得到的解受到的扰动较大,往往也是不可接受的。所以,通常情况下,在多视频超分辨率时间重建中,矩阵的秩大于等于方程未知数个数是得到较精确解的必要条件。

为了深入讨论输入视频的个数与重建倍数以及重建效果三者的关系,先看如下示意图。为了方便讨论,本文做了如下限定:(1)每个视频为均匀采样;(2)各视频的采样帧率相同。

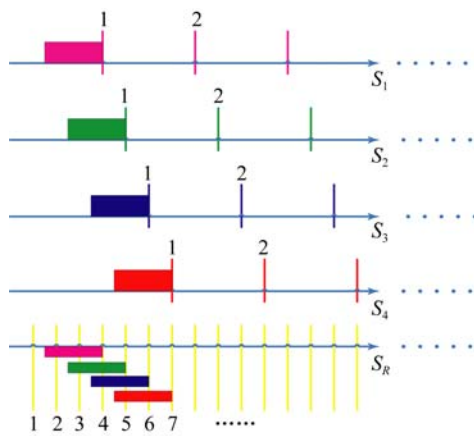


图 1 理想情况

Fig. 1 Ideal situation of temporal shift

在图 1 中(彩图见期刊电子版),  $S_1 \cdots S_4$  代表 4 个输入视频,  $S_R$  是重建得到的高分辨率视频,假设这些视频序列都已进行了时空配准。粉红色的竖线代表  $S_1$  中的帧,绿色、蓝色、红色和黄色竖线分别代表  $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  和  $S_R$  中的帧,竖线上方或下方的编号代表是第几帧。 $S_1$  中的粉红色矩形、 $S_2$  中的绿色矩形、 $S_3$  中的蓝色矩形和  $S_4$  中的红色矩形分别代表  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  和  $S_4$  的曝光时间。 $S_R$  中的粉红色矩形、绿色矩形、蓝色矩形和红色矩形分别代表各个低分辨率视频的第 1 帧在高分辨率视频中的曝光积分区域。

假设视频  $S_n$  中的某帧用  $S_n - x$  表示,例如视频  $S_1$  的第 1 帧表示为  $S_1 - 1$ ;视频  $S_2$  的第 3 帧表示为  $S_2 - 3$ ;视频  $S_R$  的第 6 帧表示为  $S_R - 6$ 。从图 1 的各个曝光区间可以看出,  $S_1 - 1$  可以表示为  $S_R - 2$ 、 $S_R - 3$ 、 $S_R - 4$  加权求和得到,  $S_2 - 1$  可

以表示为  $S_R - 3$ 、 $S_R - 4$ 、 $S_R - 5$  加权求和得到,  $S_3 - 1$  可以表示为  $S_R - 4$ 、 $S_R - 5$ 、 $S_R - 6$  加权求和得到,  $S_4 - 1$  可以表示为  $S_R - 5$ 、 $S_R - 6$ 、 $S_R - 7$  加权求和得到……

写成方程组的形式如下:

$$\begin{aligned}
 S_1 - 1 &= (\lambda_{11} \times S_R - 2) + (\lambda_{12} \times S_R - 3) + (\lambda_{13} \times S_R - 4) \\
 S_2 - 1 &= (\lambda_{21} \times S_R - 3) + (\lambda_{22} \times S_R - 4) + (\lambda_{23} \times S_R - 5) \\
 S_3 - 1 &= (\lambda_{31} \times S_R - 4) + (\lambda_{32} \times S_R - 5) + (\lambda_{33} \times S_R - 6) \\
 S_4 - 1 &= (\lambda_{41} \times S_R - 5) + (\lambda_{42} \times S_R - 6) + (\lambda_{43} \times S_R - 7), \\
 S_1 - 2 &= (\lambda_{11} \times S_R - 6) + (\lambda_{12} \times S_R - 7) + (\lambda_{13} \times S_R - 8) \\
 S_2 - 2 &= (\lambda_{21} \times S_R - 7) + (\lambda_{22} \times S_R - 8) + (\lambda_{23} \times S_R - 9) \\
 &\dots\dots
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

在以上方程组中,  $\lambda$  代表每个像素点的求和权值(求  $\lambda$  的方法见文献[4])。从该方程组可以看出,方程个数等于未知数个数,并且低分辨率视频的时间错位很均匀,这样就能提供足够的时间信息。因此,以上的 4 个输入视频能通过进行 4 倍重建,得到一个 4 倍重建的高时间分辨率视频。

虽然在上面的例子中,4 个输入视频就能在时间上重建出一个 4 倍的高时间分辨率视频,但这并不足以证明输入多少个低分辨率视频,就能在时间上得到相同倍数的重建,如图 2 所示。

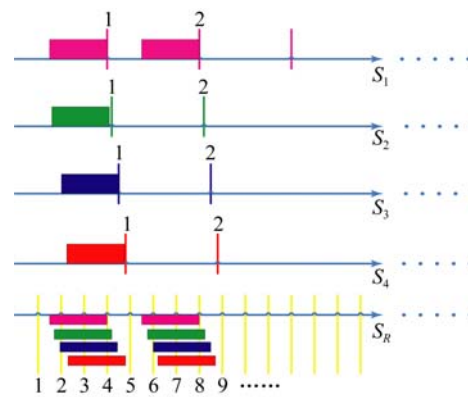


图 2 不理想情况

Fig. 2 Non-ideal situation of temporal shift

在图 2 中(彩图见期刊电子版),所有的字符以及其它图形的意义和图 1 相同。同样地,  $S_R$  的求解写成方程组的形式,如下:

$$\begin{aligned}
 S_1-1 &= (\lambda_{q1} \times S_R - 2) + (\lambda_{q2} \times S_R - 3) + (\lambda_{q3} \times S_R - 4) \\
 S_2-1 &= (\lambda_{e1} \times S_R - 3) + (\lambda_{e2} \times S_R - 4) \\
 S_3-1 &= (\lambda_{s1} \times S_R - 3) + (\lambda_{s2} \times S_R - 4) \\
 S_4-1 &= (\lambda_{q1} \times S_R - 3) + (\lambda_{q2} \times S_R - 4) + (\lambda_{q3} \times S_R - 5) \\
 S_1-2 &= (\lambda_{q1} \times S_R - 6) + (\lambda_{q2} \times S_R - 7) + (\lambda_{q3} \times S_R - 8), \\
 S_2-2 &= (\lambda_{e1} \times S_R - 7) + (\lambda_{e2} \times S_R - 8) \\
 S_3-2 &= (\lambda_{s1} \times S_R - 7) + (\lambda_{s2} \times S_R - 8) \\
 S_4-2 &= (\lambda_{q1} \times S_R - 7) + (\lambda_{q2} \times S_R - 8) + (\lambda_{q3} \times S_R - 9) \\
 &\dots\dots
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

该方程组的方程个数等于未知数个数,该方程组在理论上存在唯一解。但在实际的超分辨率重建中,如果进行 4 倍的时间重建,该方程组得不到理想结果。原因如下:图 2 中的 4 个低分辨率视频序列,虽然时间上存在错位,但这 4 个视频的错位时间不是很明显,低分辨率对应帧都集中在一个很短的时间段内,因此时间上的互补信息有限。此种情况下,运动物体在某些高分辨率帧中的位置信息不能精确重建,也无法很好地消除运动混叠现象,甚至还会出现时间振铃现象。

### 2.2 多视频时间重建倍数的分析

通常情况下,能获得的输入视频是不受控制的。因此,如何能快速确定多个输入视频的最优时间重建倍数是需要深入研究的问题。合理的时间重建倍数能最大限度地减少重建后高分辨率视频的运动混叠和运动模糊现象,并能保持好的观赏效果。

在具体讨论如何设定时间重建倍数之前,先分析如下例子。

假设某个低分辨率视频中的某一帧  $P$ ,通过时空配准后,在高分辨率视频中的投影点为  $P'$ ,如图 3 所示(彩图见期刊电子版)。图中有 4 个输入的低分辨率视频  $S_1, S_2, S_3, S_4$ ;  $S_R$  是重建后的高时间分辨率视频序列。  $P_{S_1-1}, P_{S_2-1}, P_{S_3-1}$  和  $P_{S_4-1}$  分别是视频  $S_1 \dots S_4$  的第一帧在时间轴上的坐标。  $S_R$  中的粉红色、绿色、蓝色、红色矩形分别代表各个低分辨率视频第 1 帧在  $S_R$  中的积分区间。  $P'_{S_1-1}, P'_{S_2-1}, P'_{S_3-1}$  和  $P'_{S_4-1}$  分别是  $P_{S_1-1}, P_{S_2-1}, P_{S_3-1}$  和  $P_{S_4-1}$  在  $S_R$  中的投影。

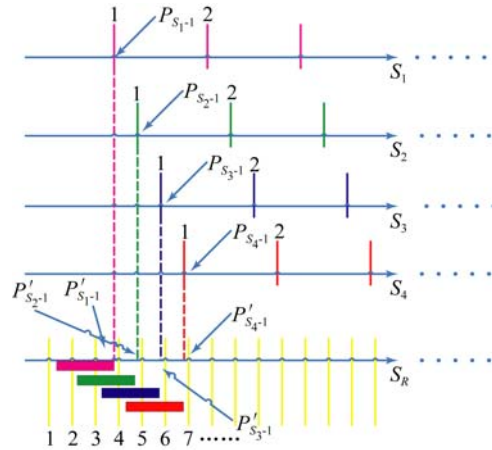


图 3 满足条件的情况  
Fig. 3 Satisfied condition

此时的重建方程组如式(1)所示。

在这种情况下,通常能得到较好的重建效果。原因如下:

(1) 从导出的方程组可以看出,方程个数等于未知数个数,因此该方程组在数学上存在唯一解。

(2) 图 3 中的 4 个低分辨率视频序列,在时间上的错位比较均匀,低分辨率帧在高分辨率时间轴上分布比较广,在时间上能提供较充足的互补信息。

### 3 多视频时间重建倍数的判定方法

基于以上分析,本文提出了一种多视频时间重建倍数的判定算法,步骤如下:

- (1)对多个低分辨率输入视频进行时空配准;
- (2)初始化时间重建倍数  $N=1$ ;
- (3)找出各个低分辨率帧在高分辨率视频中的投影;
- (4)通过各个低分辨率帧的投影位置,判断是否满足基本的重建条件,如果满足,即  $N=N+1$ ,转步骤(3);如果不满足,即  $N=N-1$ ,此时的  $N$  为合理的时间重建倍数,算法结束。

在步骤(4)中,需要判断是否满足基本的重建条件,判断准则是:在重建方程组中,每个高分辨率帧在方程的最右端至少出现一次(如式(1)就满足重建条件,式(2)就不满足)。判断准则的提出基于如下考虑:只有高分辨率重建帧在方程组的右端出现,才能从低分辨率输入视频中得到运动物体的准确位置信息。反之,就难获得准确的重建结果(如

式(2)中的  $S_R-6$ , 即图 2 高分辨率视频第 6 帧)。

其中, 假设某低分辨率帧是由几帧高分辨率帧加权求和得到, 那么在  $S_R$  空间中, 离该低分辨率帧投影点最近的高分辨率帧写在方程的最右端, 最远的高分辨率帧就写在方程的最左端。

当输入视频满足所提出的算法时, 不论输入视频的曝光时间如何, 也不管时间错位如何, 都能保证提供的时间冗余信息足够。当重建倍数大于它时, 由于输入视频的时间信息量不足, 不能有效地减小运动混叠现象, 还可能由此产生时间振铃现象; 同时, 还可能因为拟合不精确, 使运动物体产生亮度突变。当时间重建倍数小于所判定的倍数时, 则不能最大限度地消除运动模糊和运动混叠。

## 4 实 验

### 4.1 重建倍数实验 1

输入 3 个视频  $S_1, S_2, S_3$ , 假设它们的帧率

FR 都相等, 帧间间隔  $\Delta t=1/FR$ , 则它们的时间关系如图 4 所示。以  $S_1$  为参考视频,  $S_2$  和  $S_3$  相对于  $S_1$  依次延迟  $\Delta t/4$  和  $\Delta t/2$ , 视频的曝光时间都为  $0.6 \times \Delta t$ 。

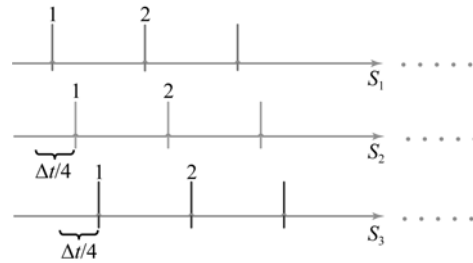


图 4 输入视频的时序关系图

Fig. 4 Temporal relation of input video sequences

使用本文算法计算得到的重建倍数为 2。下面分别对 3 个输入视频进行 2、3 倍重建, 以比较重建效果。



(a1)第 4 帧  
(a1)The 4th frame



(a2)第 6 帧  
(a2)The 6th frame

(a) 某个低分辨率输入视频的两帧

(a) Two frames in a low temporal resolution video sequence



(b1)第 8 帧  
(b1)The 8th frame



(b2)第 12 帧  
(b2)The 12th frame

(b) 2 倍重建视频的部分帧

(b) Some frames in temporal reconstructed video sequence (2 times)

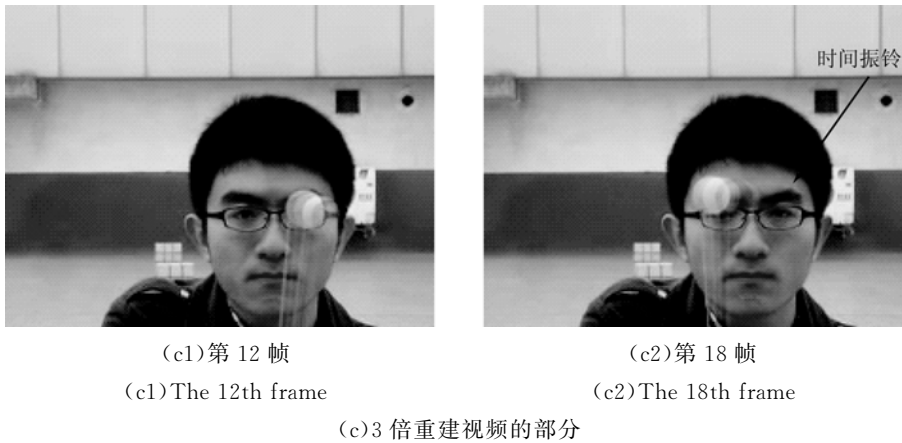


图 4 不同倍数的重建结果

Fig. 4 Temporal reconstructed results by various reconstruction times

图 4(a)代表某个低分辨率输入视频的第 4、6 帧;图 4(b)是 2 倍重建视频的第 8、12 帧;图 4(c)是 3 倍重建视频的第 12、18 帧。从图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)的对比可以看出,图 4(b)和图 4(c)中球的运动更慢,球在图 4(a)中两帧的运动距离等于在图 4(b)中 4 帧的运动距离,也等于在图 4(c)中 6 帧的运动距离,这和它们各自的时间重建倍数相符合,同时可以看出,图 4(a)中的小球存在运动模糊现象;图 4(b)中运动模糊有所减轻(图 4(b2)与图 4(a2)对比最为明显);图 4(c)中的小球存在时间振铃现象(箭头所指为影子),其重建效果还不如图 4(b)(通过图 4(c2)与图 4(b2)的对比可以看出)。

所以,通过实验对比可知,重建倍数为 2 时能获得最好的重建效果,与本文算法的判断结果相同。

### 4.2 重建倍数实验 2

输入 4 个视频  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , 假设它们的帧率  $FR$  都相等, 帧间间隔  $\Delta t=1/FR$ 。以  $S_1$  为参考视频,  $S_2, S_3$  和  $S_4$  相对于  $S_1$  依次延迟  $\Delta t/6$ 、 $\Delta t \times \frac{3}{6}$  和  $\Delta t \times \frac{5}{6}$ , 视频的曝光时间都为  $0.9 \times \Delta t$ 。

该情况下,使用本文算法计算得到的重建倍数为 3。下面分别对 4 个输入视频进行 2、3、4 倍重建,以对比重建效果。

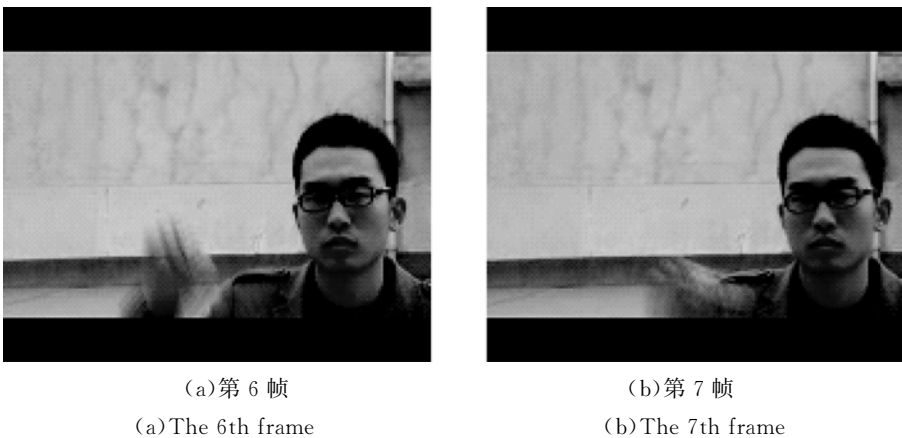


图 5 某低分辨率输入视频中的两帧

Fig. 5 Two frames in a low temporal resolution video sequence



(a)第 9 帧  
(a)The 9th frame



(b)第 10 帧  
(b)The 10th frame



(c)第 13 帧  
(c)The 13th frame



(d)第 14 帧  
(d)The 14th frame

图 6 2 倍重建视频的部分帧

Fig. 6 Some frames in temporal reconstructed video sequence (2 times)



(a)第 13 帧  
(a)The 13th frame



(b)第 15 帧  
(b)The 15th frame



(c)第 18 帧  
(c)The 18th frame



(d)第 20 帧  
(d)The 20th frame

图 7 3 倍重建视频的部分帧

Fig. 7 Some frames in temporal reconstructed video sequence (3 times)



图8 4倍重建视频的部分帧

Fig. 8 Some frames in temporal reconstructed video sequence (4 times)

图5是某个低分辨率视频的第6帧和第7帧,从图5可以看出,乒乓球存在严重的运动模糊和运动混叠现象。图6是2倍重建后的4帧视频,4帧视频从时间上大致与图5中的2帧对应。图6中,运动模糊现象得到了部分减轻,同时运动混叠现象也得到了改善(球的运动轨迹比图5更完整)。图7是3倍重建后的4帧视频,同样,该4帧视频时间上大致与图5中的2帧对应。可以明显看到,图7中球的运动模糊得到了较好地消除,轮廓已经比较清晰,球的运动轨迹也比图5

完整。图8是4倍重建后的6帧视频,该6帧视频从时间上大致与图5中的2帧对应。在图8可以看出,出现了时间振铃现象(图中小球和手周围的影子,箭头所示),第18~19帧,小球的位置在来回摆动。第26~28帧小球出现了来回摆动和移动停顿的现象。视频各帧的亮度也有所变化(对比第18、第19帧可以看出)。这些现象都是由于输入视频时间信息量不足造成的。

从以上实验可以看出,重建倍数为3时能得到最好的重建效果,与本文算法判断结果相同,进一步证明了本文算法的正确性。

## 5 结 论

进行多视频时间重建时,太低的重建倍数不能有效消除运动模糊和运动混叠现象,而由于输入视频时间冗余信息的限制,太高的重建倍数又会导致重建视频中出现时间振铃、运动物体位置跳变等现象。通常情况下,在确定多视频时间重建倍数时,都只是考虑了输入视频个数的限制,由此得出重建倍数不大于输入视频的个数的结论。但在实际重建过程中,除了输入视频个数,时间重建倍数还与各个输入视频在时间上能提供的冗余信息有关。本文从多个低分辨率输入视频配准后的位置关系入手,通过分析曝光区间,提出了多视

频时间重建倍数的计算方法。通过理论分析与实验比较,证明了本文所提方法的有效性。

考虑到每次重建的输入视频个数、输入视频时间冗余信息、输入视频自身的成像情况以及曝光时间等都不同,使得本文重建过程复杂,也使得重建效果差异很大。需要注意的是,基于以上诸多原因,本文提出的多视频时间重建倍数的判定方法并不一定能确保每次都取得最优的视觉重建效果(因为视频效果与视频本身以及观察者主观视觉有很大关系)。但本文的方法可以保证在大多数情况下,不论曝光时间的长短,也不管各个视频的时间关系,重建后的视频都能获得理想的效果。

## 参考文献:

- Scientific Council of the Weizman Institute of Science Rehovot, Israel, 2002.
- [1] MUDENAGUDI U, BANERJEE S, KALRA P K. Space-time super-resolution using graph-cut optimization [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(5): 995-1008.
- [2] AGRAWAL A, GUPTA M, VEERARAGHAVAN A. Optimal coded sampling for temporal super resolution [J]. *In Proc. IEEE CVPR*, 2010:599-606.
- [3] 彭晓明,丁明跃,周成平,等. 一种序列图像配准的计算框架[J]. *中国图象图形学报*, 2005, 10(4): 441-449.
- PENG X M, DING M Y, ZHOU CH P, *et al.*. A computational framework for the temporal-spatial alignment of multi-sensor image sequences [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(4): 441-449. (in Chinese)
- [4] SHECHTMAN E, CASPI Y, IRANI M. Space-time super-resolution [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(4):531-544.
- [5] CASPI Y, IRANI M. Spatio-temporal alignment of sequences [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(11): 1409-1419.
- [6] CASPI Y, IRANI M. Aligning non-overlapping sequences [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 48(1):39-51.
- [7] CASPI Y. *Sequence-to-sequence alignment* [D].
- [8] 覃凤清,何小海,陈为龙,等. 一种图像配准的超分辨率重建[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 409-416.
- QIN F Q, HE X H, CHEN W L, *et al.*. Super-resolution reconstruction method of image registration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 409-416. (in Chinese)
- [9] 张进,王仲,李雅洁,等. 高精度影像测量系统中图像的超分辨率重建[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1):168-174.
- ZHANG J, WANG ZH, LI Y J, *et al.*. Super-resolution reconstruction of image in high accuracy image measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1):168-174. (in Chinese)
- [10] 李家德,张叶,贾平. 采用非局部均值的超分辨率重构[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1576-1585.
- LI J D, ZHANG Y, JIA P. Super-resolution reconstruction using nonlocal means [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1576-1585. (in Chinese)
- [11] 张地,何家忠. 基于特征空间的人脸超分辨率重构[J]. *自动化学报*, 2012, 38(7):1145-1152.
- ZHANG D, HE J ZH. Feature space based face super-resolution reconstruction [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(7):1145-1152. (in Chinese)
- [12] CHEN W L, HE X H, SONG H Y. An improved sequence-to-sequence alignment method combined

with feature-based image registration algorithm [J]. *Journal of Information Science and Engineering*, 2012, 28(3):617-630.

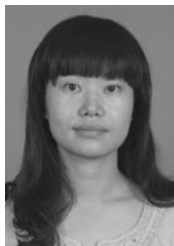
- [13] 张元,钟兴,金光,等. 基于 CCD 阵列错排的图像差分超分辨重建方法[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(6):841-846.

ZHANG Y, ZHONG X, JING G, *et al.*. Super resolution reconstruction of image difference based on CCD staggered arrays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(6):841-846. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈为龙(1981—),男,四川内江人,博士,讲师,主要研究方向:数字图像处理、超分辨率重建。



郭黎(1978—),女,湖北黄冈人,博士,讲师,主要研究方向:数字信号处理、超分辨率重建。

(版权所有 未经许可 不得转载)