

文章编号 1004-924X(2012)09-2095-07

最小化预测残差的图像序列压缩感知

石文轩*, 李 婕

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:提出了一种最小化预测残差的图像序列压缩感知算法以实现高速相机输出图像的实时压缩。首先,在编码端仅使用映射矩阵对原始输出图像进行压缩,将压缩得到的观测向量通过信道传输到解码端。接着,在解码端对相邻帧进行运动估计和运动补偿,得到一幅待重建图像的预测图像,利用压缩感知算法对原始图像和预测图像之间存在的预测残差图像进行重建。最后,用迭代的方法优化预测残差图像的重建结果,直到连续两次的重建结果之差小于设定阈值,从而获得重建的原始图像。采用 DALSA 公司的 CR-GEN0-H6400 相机进行的实验表明,该算法可以实现 1 000 frame/s 图像的实时压缩,并且图像重建质量比独立地重建每张图像至少提高了 2~6 dB,有效地实现了对高速相机输出图像的实时压缩与高质量重建。

关键词:压缩感知;实时压缩;图像重建;预测残差

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122009.2095

Image sequence compressed sensing by minimizing prediction errors

SHI Wen-xuan*, LI Jie

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

* Corresponding author, E-mail: shiwx@163.com

Abstract: An image sequence compressed sensing algorithm by minimizing prediction errors was proposed for high speed camera image compression in real-time. First, an original image was compressed only by a projection matrix on the encoder side. The observed vector obtained by compressing was transferred to the decoder through a channel. Then, motion estimation and motion compensation were performed on correlated images on the decoder side, and a prediction image was generated in this way. Furthermore, the prediction error image which is the difference between original image and prediction image was reconstructed by compressed sensing. Finally, the reconstruction of prediction error image was improved by an iterative procedure, until the difference between two consecutive reconstruction results was smaller than a predetermined threshold. Therefore, the original image was reconstructed by the prediction error image. Experiments by CR-GEN0-H6400 camera from DALSA indicate that the proposed algorithm can compress 1 000 frame/s images in real-time, and image reconstruction result is improved by 2–6 dB at least as compared with that of independent reconstruction. The proposed algorithm can compress high speed camera images in real-time, and can reconstruct the images in high quality.

Key words: compressed sensing; compress in real-time; image reconstruction; prediction error

收稿日期:2012-05-04;修订日期:2012-07-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61072135)

1 引言

近年来,随着采集速率达到每秒千帧级别的高速相机的问世,如何对这种高速相机所采集的图像序列进行实时有效的压缩成为一个亟待解决的问题。对于中低速相机,人们设计了各种各样的压缩算法来对图像序列进行压缩。比如, MPEG^[1]和 H. 264^[2-3]采用预测编码和变换编码对帧间和帧内的冗余图像数据进行压缩。在进行帧间预测编码时,利用图像序列时间上的冗余,采用宏块运动估计方法,使压缩率大幅提升。然而,压缩率提升的代价是宏块运动估计引起的编码计算复杂度增加。据测算,对于 H. 264 算法,帧间预测编码的计算复杂度是帧内编码(无运动估计)的 5~10 倍^[4-5]。编码的高复杂度会影响编码的实时性,导致编码设备能耗高,并且不利于编码器的硬件实现。Motion JPEG 和 Motion JPEG2000^[6]方法仅利用帧内数据的冗余性进行图像编码,编码的复杂度与上述方法相比有所下降,但是编码过程依然要经历离散余弦变换(DCT)或小波变换,量化,Z 字形编码,游程编码和熵编码等步骤。因此,现有的实时编码设备仅能处理每秒百帧以下的图像压缩,对于每秒千帧级别的高速相机所输出的图像压缩无能为力。

本文的思想来源于分布式视频编码^[4,7]。分布式视频编码理论是由 2 个信源编码理论 Slepian-Wolf^[8]和 Wyner-Ziv^[9]建立起来的。它的主要作用是在编码端对每一幅图像进行独立的简单编码,在解码端利用图像之间的冗余性进行解码。将编码端的复杂度转移给解码端,可以有效地降低编码端的负荷,使高速相机图像压缩这种对编码端的实时性和功耗要求严格的图像压缩系统实现图像序列的实时压缩。因此,设计一种编码端计算复杂度低的图像编码方法是实现高速相机图像实时压缩的关键。

压缩感知(Compressed Sensing, CS)是近些年来受到极大关注的一种信号压缩理论^[10-13],利用 CS 进行图像压缩可以大幅降低编码端的复杂性。它的基本思想是:如果一个信号是稀疏信号

(信号中大部分元素为 0 或者接近 0),或者经过某种线性变换成为稀疏信号,那么该信号可以以远低于奈奎斯特采样定理的采样数进行重构,从而实现了图像的压缩。现有的基于 CS 的视频图像编码方法要么依然需要在编码端进行运动估计^[14-15],未能充分利用 CS 理论的优势;要么独立地对每帧图像进行压缩和重建^[16],未能利用图像序列的帧间冗余性。本文提出的基于最小化预测残差的图像序列 CS 方法将编码端的复杂性转移到解码端,并且在解码端利用相邻帧之间的冗余性进行图像重建。实验结果证实了该方法的有效性,和单张图像进行独立地 CS 重建相比,图像质量至少提高了 2~6 dB。

2 压缩感知概述

压缩感知解决了以下问题:假设 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^N$ 是一个长度为 N 的稀疏向量, \mathbf{x} 的稀疏程度由 \mathbf{x} 中的非零元素个数或者 \mathbf{x} 中的大系数元素的个数决定,如果 \mathbf{x} 中有 K 个非零元素(或大系数),那么该稀疏向量 \mathbf{x} 能够以很大的概率通过 $M \geq O(K \log(N/K))$ 次观测来恢复。

假设 \mathbf{P} 为一个 $M \times N$ 大小的映射矩阵($M \ll N$),那么向量 \mathbf{x} 可通过 $\mathbf{b} = \mathbf{P}\mathbf{x}$ 得到压缩后的长度为 M 观测向量 \mathbf{b} 。如果 \mathbf{P} 满足压缩等距条件(RIP)^[17],那么 \mathbf{x} 可以由 \mathbf{b} 通过求解下面的优化问题来估计:

$$\min_{\hat{\mathbf{x}}} \|\hat{\mathbf{x}}\|_1 \text{ subject to } \mathbf{P}\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{b}, \quad (1)$$

其中: $\hat{\mathbf{x}}$ 是对原始向量 \mathbf{x} 的估计, $\|\cdot\|_1$ 表示 l_1 -范数。本文选取映射矩阵为一个行正交的高斯随机矩阵,因为该矩阵能以很高的概率满足 RIP 条件^[18-19]。

如果向量 \mathbf{x} 本身并不稀疏,但是通过某种线性变换 $\Phi \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 能使之变得稀疏,那么 \mathbf{x} 可以通过求解下面的优化问题来估计:

$$\min_{\hat{\mathbf{x}}} \|\Phi\hat{\mathbf{x}}\|_1 \text{ subject to } \mathbf{P}\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{b}. \quad (2)$$

线性变换 Φ 可以是傅里叶变换, DCT 变换,小波变换等,因为这些变换能使图像的能量集中在很少的一部分元素上,致使这些元素很大,而其

他元素接近于零,从而形成稀疏向量。

全变分变换(TV)是一种特殊的复数线性变换,它的实部和虚部分别是图像在水平和垂直方向的差分。这时, $\|\Phi x\|_1$ 是对表征成 1 维向量的原图像 x 进行全变分计算(表示为 $TV(x)$)。由此最优化问题变为:

$$\min_{\hat{x}} TV(\hat{x}) \text{ subject to } P\hat{x} = b. \quad (3)$$

如果观测向量 b 在传输过程中混入了噪声,在解码端接收到的观测向量变为 $b = Px + w$ 。若 w 是一个零均值、方差为 σ^2/M 的高斯白噪声,那么最优化问题变为:

$$\min_{\hat{x}} \|\Phi \hat{x}\|_1 \text{ subject to } \|P\hat{x} - b\|_2 \leq \sigma, \quad (4)$$

其中: $\|\cdot\|_2$ 表示 l_2 -范数。对于观测向量有噪声的全变分恢复问题,最优化问题变为:

$$\min_{\hat{x}} TV(\hat{x}) \text{ subject to } \|P\hat{x} - b\|_2 \leq \sigma. \quad (5)$$

公式(1)~(5)所示的最小化问题都是凸优化问题,凸优化问题可以通过 log-barrier 或者 prime-dual^[20]算法进行有效求解。另外,匹配追踪算法、梯度投影法等算法也可以求解这类问题。

3 基于预测的图像序列压缩感知方法

高速相机所拍摄连续图像序列中的相邻图像帧有着很强的相关性。如图 1 所示,图像帧之间最直观的联系就是物体的运动。一方面,为了能更有效地重建当前帧 x ,需要得到当前帧与相邻帧(前一帧或后一帧)的运动补偿。另一方面,需要通过当前帧和相邻帧来计算运动补偿向量,但是当前帧在解码重建之前是无法获得的。解决这个问题可以通过假设前一帧和当前帧的运动补偿向量与当前帧和下一帧的运动补偿向量很接近来实现,从而可以用前一个运动补偿向量来代替后一个。这种假设对于高速相机来说在一段比较短的时间段之内是完全成立的。因此,通过运动补偿得到的预测图像与原始图像非常相关,它们之间的预测残差会形成一个稀疏向量。

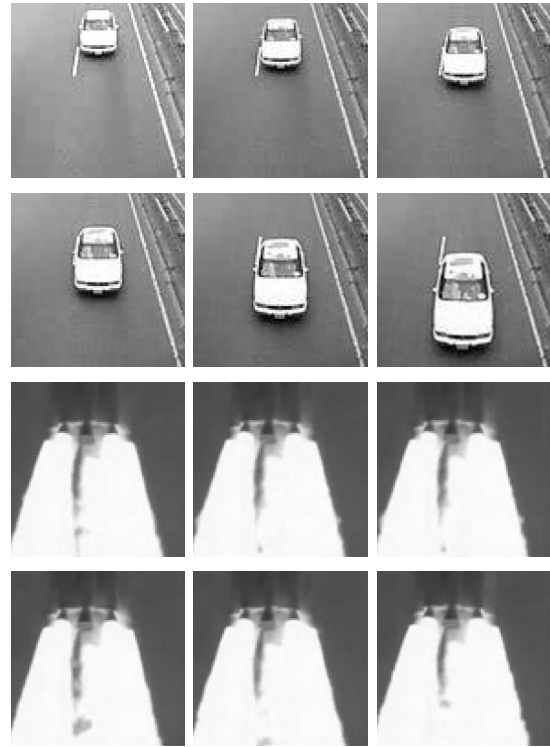


图 1 图像序列
Fig. 1 Image sequence

3.1 最小化预测残差的优点

图 2 为图 1 中的第一组第三帧图像在 TV 域的系数以及通过前两帧图像的运动估计和运动补偿得到的第三帧预测图像与原始第三帧图像的预测残差在 TV 域的系数(绝对值由大到小排列)比较结果。从图 2 中可以看到,预测残差在 TV 域的系数比原始图像在 TV 域的系数下降得更快,

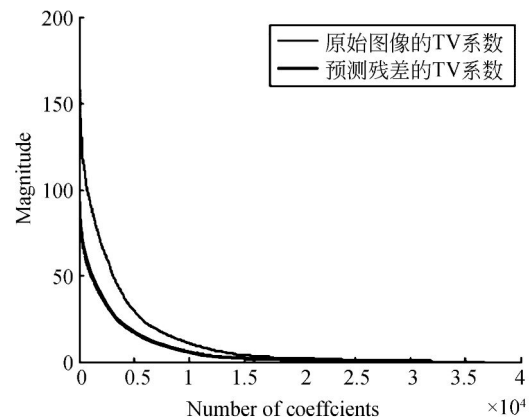


图 2 原始图像与预测残差图像在 TV 域的系数经过降序排列后的幅度

Fig. 2 Magnitude of TV coefficients in decreasing order for original and prediction error images

表明预测残差比原始图像在 TV 域的系数更稀疏。因此这里可以通过运动补偿预测出一幅预测图像 y , 利用预测图像与原始图像的差向量更稀疏的特点, 通过压缩感知最小化该差向量, 重构预测残差, 最后重构原始图像 x 。

3.2 最小化预测残差的 CS 重建方法

将原始图像和预测图像分别按列首尾连接, 形成两个由 N 个元素组成的 1 维向量 $x, y \in \mathbf{R}^N$ 。构造一个 $(N+M) \times N$ 大小的矩阵 D , 使得:

$$D = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中: \mathbf{I} 是一个 $N \times N$ 大小的单位矩阵, \mathbf{P} 依然是第 2 节引入的大小为 $M \times N$ 的映射矩阵。如果 $b = \mathbf{P}x$ 是编码端的压缩观测结果, 那么图像的压缩率定义为向量 b 的长度与向量 x 的长度之比, 即映射矩阵 \mathbf{P} 的高度与宽度之比: 压缩率 = M/N 。 \hat{b} 是经过信道传输后解码端接收到的压缩信号, 那么在解码端可将预测图像 y 和压缩信号 \hat{b} 组成一个新的向量:

$$r = \begin{bmatrix} y \\ \hat{b} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

鉴于 y 和 \hat{b} 已知, 可知 r 也是已知向量。又由于预测残差向量 $x - y$ 是一个稀疏向量, 故可在理想信道或者噪声稀疏信道的情况下, 通过优化下式重建原始图像 x :

$$(P_0) \min_x \| r - Dx \|_1. \quad (8)$$

公式(8)的优化问题可以转化为求解带约束条件的 l_1 -范数最小化问题:

$$(P_1) \min_E \| E \|_1 \quad \text{subject to} \quad FE = Fr, \quad (9)$$

其中, E 由两部分组成: (1) 预测残差向量 $e_1 = x - y$; (2) 信道噪声向量 e_2 :

$$E = r - Dx = \begin{bmatrix} y \\ \hat{b} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

公式(9)中的矩阵 F 定义为:

$$F = -[\mathbf{P} \quad \mathbf{I}]. \quad (11)$$

引入矩阵 F 的作用是用来消除矩阵 D , 因为 $FD = \mathbf{0}$ 。如果 (P_0) 和 (P_1) 是等价问题, 那么当且仅当 E 是 (P_1) 的唯一解时, x 才是 (P_0) 的唯一解。

命题一: 优化问题 (P_0) 与 (P_1) 等价

证明:

$$\begin{aligned} (P_1) &\Leftrightarrow \min_E \| E \|_1 \quad \text{subject to} \quad FE = Fr \\ &\Leftrightarrow \min_E \| E \|_1 \quad \text{subject to} \quad (FD)x + FE = Fr \\ &\Leftrightarrow \min_E \| E \|_1 \quad \text{subject to} \quad E = r - Dx (\exists x) \\ &\Leftrightarrow \min_E \| r - Dx \|_1 \Leftrightarrow (P_0). \end{aligned} \quad (12)$$

理想信道和有噪信道是求解 (P_1) 的两种不同的情形。在理想信道条件下, (P_1) 转化为:

$$(P_{1a}) \min_{e_1} \| e_1 \|_1 \quad \text{subject to} \quad -Pe_1 = Fr. \quad (13)$$

当信道中存在零均值、方差为 σ^2/M 的高斯白噪声时, (P_1) 转化为:

$$(P_{1b}) \min_{e_1} \| e_1 \|_1 \quad \text{subject to} \quad \| Pe_1 + Fr \|_2 \leq \sigma. \quad (14)$$

命题二: 在理想信道条件下优化问题 (P_1) 与 (P_{1a}) 等价, 在有噪信道条件下优化问题 (P_1) 与 (P_{1b}) 等价。

证明:

$$(P_1) FE = Fr \Leftrightarrow \begin{bmatrix} -\mathbf{P} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} y \\ \hat{b} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

在理想信道中 $e_2 = \mathbf{0}$, 压缩信号在编码端的输出值与解码端的观测值相等: $b = \hat{b}$ 。则:

$$\begin{aligned} (P_1) FE = Fr &\Leftrightarrow \begin{bmatrix} -\mathbf{P} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} y \\ \hat{b} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \\ &-\mathbf{P}e_1 = F \begin{bmatrix} y \\ \hat{b} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \\ &-\mathbf{P}e_1 = Fr \Leftrightarrow (P_{1a}). \end{aligned} \quad (16)$$

在有噪信道中, 如果 e_2 是一个零均值、方差为 σ^2/M 的高斯白噪声。则:

$$\begin{aligned} (P_1) FE = Fr &\Leftrightarrow \begin{bmatrix} -\mathbf{P} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} y \\ \hat{b} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \\ &-\mathbf{P}e_1 + \mathbf{I}e_2 = F \begin{bmatrix} y \\ \hat{b} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \\ &e_2 = \mathbf{P}e_1 + Fr \Leftrightarrow \\ &\| e_2 \|_2 = \| \mathbf{P}e_1 + Fr \|_2 \leq \sigma \Leftrightarrow \\ &(P_{1b}). \end{aligned} \quad (17)$$

当预测残差向量 e_1 由公式(16)或(17)重建后, 重建的原始图像 x 可由公式(10)得到: $x = y$

— e_1 。为了得到更好的重建结果,可将重建的原始图像(这里用 $\hat{x}^{(0)}$ 表示)作为新的相关帧,并与之前待重建帧相邻的相关帧进行运动估计和运动补偿得到新的预测图像 $y^{(1)}$,这时新的预测残差向量 $x - y^{(1)}$ 会比原预测残差向量更稀疏。重建该预测残差向量可获得更好的重建结果。反复进行迭代重建,直到连续两次迭代结果之差小于设定的阈值,可获得最佳的重建图像。

3.3 压缩与重建流程

图 3 展示了基于预测的图像压缩感知的系

统。从系统的角度来看,这种基于预测的压缩感知算法只是将编码段的复杂度转移到了解码端,重建图像的质量更大程度上取决于解码端,而非提高了整个系统的编解码效率。本文提出的基于预测的图像序列压缩感知采用映射矩阵与原图像相乘作为编码器,降低了编码端的复杂度;在解码端利用预测残差图像比原始图像在 TV 域更稀疏的特点,以及压缩感知算法对稀疏信号重建的优势,用压缩感知算法对预测残差进行迭代重建,实现了对图像序列的高质量重建。处理步骤如下:

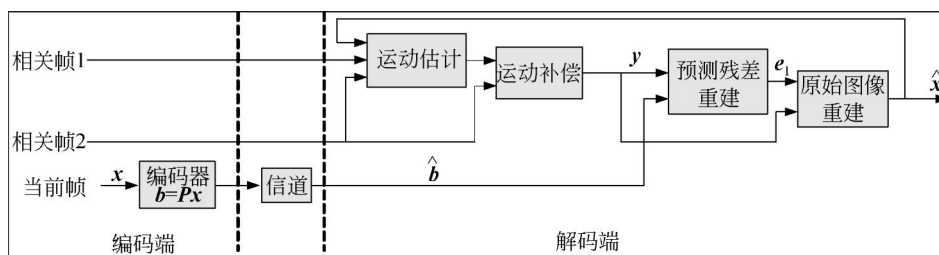


图 3 基于预测的图像压缩感知系统

Fig. 3 Prediction based image compressed sensing system

步骤 1: 将图像序列等分为若干组;仿造 MPEG 标准,将每组中的图像分为 I 帧和 P 帧。对于 I 帧图像,采用帧内编码(例如:JPEG)的方式进行编码并传输到解码端;对于 P 帧图像,采用 CS 进行压缩并传输。每组图像中的 I 帧和 P 帧按照 P...PIIP...P 的方式排列。

步骤 2:在解码端,对每组图像中的连续 2 个 I 帧解码,并对解码后的 I 帧进行运动估计和运动补偿得到待重建 P 帧的预测图像 $y^{(0)}$ 。令 $t=0$ 。

步骤 3:待重建 P 帧的压缩向量 \hat{b} ,联合 $y^{(t)}$,利用公式(9)进行预测残差的 CS 重建得到 $e_1^{(t)}$,从而得到该 P 帧的第 t 次重建结果: $\hat{x}^{(t)} = y^{(t)} - e_1^{(t)}$ 。

步骤 4: $t=t+1$ 。将第 $t-1$ 次的原图像重建结果 $\hat{x}^{(t-1)}$ 作为新的相关帧,与该 P 帧相邻的 I 帧进行运动估计,并对该 I 帧进行运动补偿,得到新的预测图像 $y^{(t)}$ 。

步骤 5:重复步骤 3 和步骤 4,直到 $\|\hat{x}^{(t)} - \hat{x}^{(t-1)}\|_2 \leq \delta$,则最终的重建图像表示为 $\hat{x} = \hat{x}^{(t)}$ 。将重建后的图像 \hat{x} 的标记由 P 帧改为 I 帧。

步骤 6:重复步骤 2 到步骤 5,重建出图像序

列中所有的 P 帧。

4 实验结果与分析

本节选用 DALSA 公司的 CR-GEN0-H6400 相机进行实验,输出图像分辨率设定为 200×200 ,帧率设定为 1 000 frame/s。在编码端,采用 ALTRA 公司的 EP2S60F1020C5 型 FPGA 芯片对相机输出图像进行压缩,采用 H. 264, Motion JPEG,以及本文提出的压缩方法进行实验和比较。在压缩率为 0.3 的情况下(对于映射矩阵 P ,使 $M/N=0.3$),H. 264 平均每帧的压缩时间为 21.56 ms, Motion JPEG 为 2.37 ms,而本文提出的方法为 0.85 ms。因此本文提出的方法可在该相机该参数设定条件下实现对输出图像的实时压缩。

在解码端,将图 1 中每组图像的第 3,4 帧设为 I 帧,其余设为 P 帧。将本文算法和最小化 DCT 线性变换的独立压缩感知(DCT-CS),以及最小化 TV 的独立压缩感知(TV-CS)对 P 帧进行压缩与重建的效果进行比较。这里选取每组图像的第 2,6 帧作为重建对象,第 2 帧的预测图像

利用第 3,4 帧进行后向运动估计和运动补偿得到,而第 6 帧的预测图像则先由第 3,4 帧重建第 5 帧,然后第 4 帧和重建的 5 帧进行前向运动估计和运动补偿得到。迭代终止阈值 δ 设为 2.5。在压缩率为 0.2 ($M/N=0.2$) 的条件下,比较结果如图 4、图 5 所示。实验结果表明,在同等的压缩率下,通过 DCT-CS 重建的第一组第 2,6 帧图像

中有明显的噪声,TV-CS 重建图像中有明显的块状效应,而本文所提出的方法从主观视觉上要优于前两种方法;通过 DCT-CS 重建的第二组第 2,6 帧图像依然噪声明显,TV-CS 方法重建图像效果与本文所提出的方法从主观视觉上看重建质量相当,但从峰值信噪比的客观比较上依然有所提高。

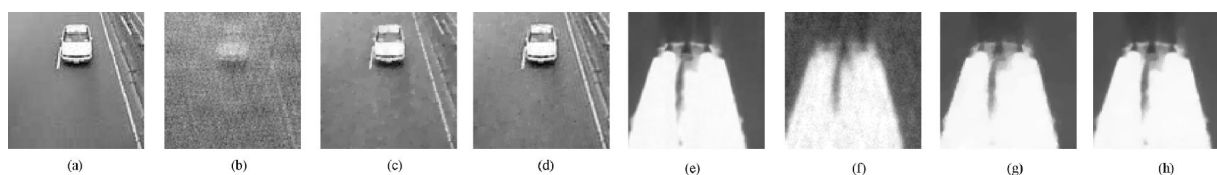


图 4 几种算法对每组第 2 帧图像重建的结果比较 (a) 第一组第 2 帧原图像, (b) DCT-CS (PSNR=20.12 dB), (c) TV-CS (PSNR=28.20 dB), (d) 本文算法 (PSNR=30.26 dB), (e) 第二组第 2 帧原图像, (f) DCT-CS (PSNR=26.12 dB), (g) TV-CS (PSNR=34.17 dB), (h) 本文算法 (PSNR=36.64 dB)。

Fig. 4 Reconstruction result comparison for Frame 2 by several algorithms (a) Original image in Group 1, (b) DCT-CS (PSNR=20.12dB), (c) TV-CS (PSNR=28.20dB), (d) Proposed algorithm (PSNR=30.26 dB), (e) Original image in Group 2, (f) DCT-CS (PSNR=26.12 dB), (g) TV-CS (PSNR=34.17 dB), (h) Proposed algorithm (PSNR=36.64 dB)

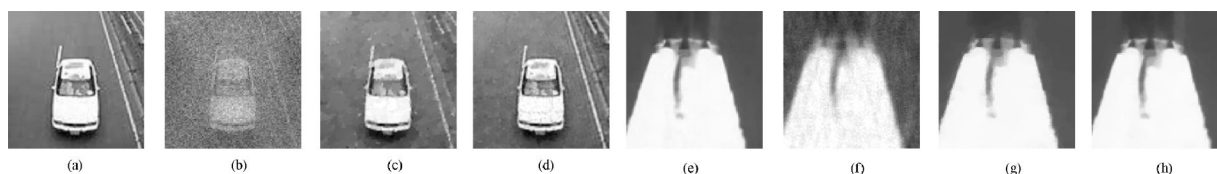


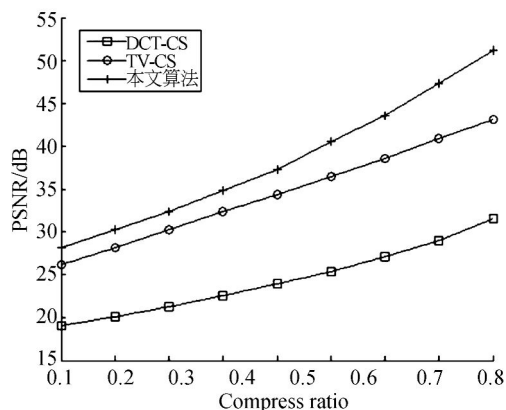
图 5 几种算法对每组第 6 帧图像重建的结果比较 (a) 第一组第 6 帧原图像, (b) DCT-CS (PSNR=17.03 dB), (c) TV-CS (PSNR=25.39 dB), (d) 本文算法 (PSNR=27.48 dB), (e) 第二组第 6 帧原图像, (f) DCT-CS (PSNR=26.47 dB), (g) TV-CS (PSNR=34.86 dB), (h) 本文算法 (PSNR=36.89 dB)

Fig. 5 Reconstruction result comparison for Frame 6 by several algorithms (a) Original image in Group 1, (b) DCT-CS (PSNR=17.03 dB), (c) TV-CS (PSNR=25.39 dB), (d) Proposed algorithm (PSNR=27.48 dB), (e) Original image in Group 2, (f) DCT-CS (PSNR=26.47 dB), (g) TV-CS (PSNR=34.86 dB), (h) Proposed algorithm (PSNR=36.89 dB)

图 6 展示了不同压缩率下,3 种压缩感知图像重建方法的图像重建质量对比(采用峰值信噪比: PSNR 进行衡量)。通过调节映射矩阵 \mathbf{P} 的行数,可以改变压缩率,从而在不同的压缩率下进行实验比较。结果表明,本文算法与单张图像独立进行压缩感知重建相比,在不同的压缩率下,图

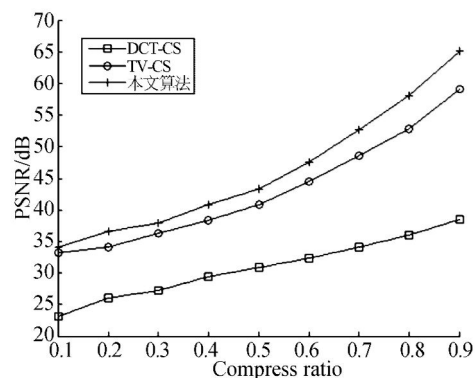
像重建质量至少提高了 2~6 dB。

对不同的图像序列组进行的实验结果表明,本文提出的方法对不同的图像序列中的图像帧都能高质量地重建,重建质量优于传统的压缩感知重建算法(DCT-CS 和 TV-CS)。因此,本文提出的方法有较好的实用范围。



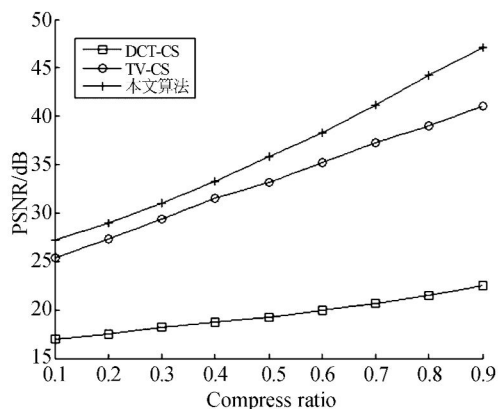
(a)第一组第2帧图像重建质量比较

(a)Reconstruction quality comparison for Frame 2 in Group 1



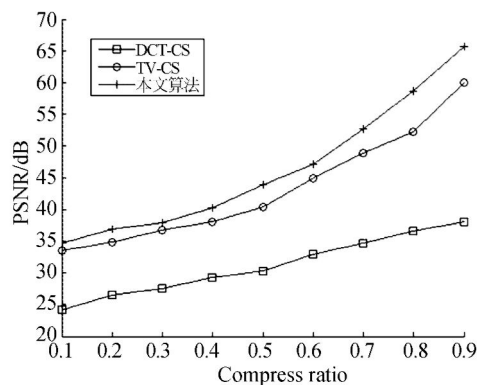
(b)第二组第2帧图像重建质量比较

(b)Reconstruction quality comparison for Frame 2 in Group 2



(c)第一组第6帧图像重建质量比较

(c)Reconstruction quality comparison for Frame 6 in Group 1



(d)第二组第6帧图像重建质量比较

(d)Reconstruction quality comparison for Frame 6 in Group 2

图6 不同压缩率下,3种压缩感知图像重建方法的PSNR对比

Fig. 6 PSNR vs. compress ratio by three compressed sensing algorithms

5 结 论

本文提出了最小化预测残差的图像序列压缩感知算法。该算法在编码端仅采用映射矩阵实现对原始图像的压缩,能对高速相机输出的图像序列进行实时压缩。采用比原始图像全变分更稀疏的预测残差图像进行压缩感知,能在解码端对图像序列进行高质量重建。图像重建的质量高于对单张图像进行独立压缩感知重建的结果。与

DCT-CS 和 TV-CS 方法相比,本文提出的方法可用较少的压缩数据获得同样的重建效果,或者在相同的压缩率下获得较高的图像重建质量。实验结果表明,该算法能实现 1 000 frame/s 的实时图像压缩,并且在相同的压缩率下,图像重建结果比单张图像进行独立压缩感知重建的结果提高了至少 2~6 dB。后续研究将着重研究提高解码效率的方法,以及寻找使图像更稀疏的表达方式,从而继续提高图像的重建质量。

参考文献:

- [1] WATKINSON J. The MPEG Handbook: MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4 [M]. Boston, MA: Focal Press, 2004.
- [2] WIEGAND T, SULLIVAN G J, BJONTEGAARD

G, et al. Overview of the H. 264/AVC video coding standard [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(7): 560-576.

- [3] 李桂菊, 刘刚, 梁静秋. H. 264 快速运动估计算法的改进[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11): 2489-2496.
- LI G J, LIU G, LIANG J Q. Improvement of fast

- motion estimation algorithm used in H. 264 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2489-2496. (in Chinese)
- [4] GIROD B, AARON A M, RANE S, *et al.*. Distributed video coding [J]. *IEEE-Special Issue Advances video coding and Delivery*, 2005, 93(1):71-83.
- [5] LIU L, LI Z, DELP E J. Efficient and low-complexity surveillance video compression using backward-channel aware Wyner-Ziv video coding [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19(4):453-465.
- [6] MARPE D, GEORGE V, CYCON H L, *et al.*. Performance evaluation of Motion-JPEG2000 in comparison with H. 264/AVC operated in pure intra coding mode [J]. *Wavelet Applications in Industrial Processing*, 2003, 5266:127-137.
- [7] 卿鄰波, 何小海, 张志亮. 分布式视频编码中虚拟信道模型的动态估计[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(4): 923-929.
- QING L B, HE X H, ZHANG Z L. Dynamic estimation of virtual channel model for distributed video coding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 923-929. (in Chinese)
- [8] SLEPIAN D, WOLF J. Noiseless coding of correlated information source [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1973, 19(4): 471-480.
- [9] WYNER A, ZIV J. The rate-distortion function for source coding with side information at decoder [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1976, 22(1): 1-10.
- [10] CANDES E J, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [11] DONOHO D. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [12] 焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 压缩感知回顾与展望[J]. *电子学报*, 2011, 39(7): 1651-1662.
- JIAO L C, YANG S Y, LIU F, *et al.*. Development and prospect of compressive sensing [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(7): 1651-1662. (in Chinese)
- [13] 刘欣悦, 董磊, 王建立. 稀疏采样傅里叶望远镜成像[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(3): 521-527.
- LIU X Y, DONG L, WANG J L. Fourier telescope imaging via sparse sampling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 521-527. (in Chinese)
- [14] 邵树斌. 基于压缩感知理论的视频帧间信号编码研究[D]. 天津:天津大学, 2010.
- SHAO S B. *Research on compressed sensing-based inter-frame coding for digital videos* [D]. Tianjing:Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [15] 潘榕, 段继忠, 刘昱. 压缩感知及其在图像和视频编码中的应用[J]. *电视技术*, 2012, 36(1): 10-14.
- PAN R, DUAN J Z, LIU Y. Compressed sensing and application in image and video coding [J]. *Video Engineering*, 2012, 36(1): 10-14. (in Chinese)
- [16] 翟冲. 基于压缩感知的视频编码技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.
- ZHAI C. *The research of video coding based on compressive sensing* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [17] CANDES E J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing [J]. *Comptes Rendus Mathematique*, 2008, 346(9): 589-592.
- [18] CANDES E J, TAO T. Decoding by linear programming [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(12): 4203-4215.
- [19] CANDES E J, ROMBERG J, TAO T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements [J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 2006, 59(8): 1207-1223.
- [20] BOYD S, VANDENBERGHE L. *Convex Optimization* [M]. Cambridge University Press, 2004.

作者简介:



石文轩(1983-),男,湖北武汉人,博士后,助理研究员,2005年、2010年于武汉大学分别获得学士、博士学位,主要从事图像处理、信号处理、嵌入式系统方面的研究。E-mail: shiwx@163.com



李婕(1984-),女,湖北宜昌人,博士研究生,2007年于湖北工业大学获得学士学位,2009年于武汉大学获得硕士学位,主要从事图像处理算法方面的研究。E-mail: jielonline@gmail.com