

基于自适应鲁棒性光流的差错掩盖

周智恒 谢胜利

(华南理工大学电子与信息学院 广州 510640)

摘要 编码数字视频序列经过受噪声影响的信道传输时, 通常会出现图像信息丢失。该文提出一种基于自适应鲁棒性光流的差错掩盖方法, 作为解码端的工具解决这样的问题。该文利用光流技术能有效获取物体运动估计的特性, 对丢失块进行逐像素点的恢复, 既避免了图像模糊, 又消除了块效应。在光流的估计中, 自适应地调整了目标泛函中的数据保持项与空间连贯项之间的关系, 并引入 Lorentz 函数来构造目标泛函, 提高了光流的鲁棒性。仿真结果表明, 该文提出的方法无论在主观视觉评价, 还是在客观的数值标准下, 都能比现有的误差掩盖方法恢复出质量更好的图像。

关键词 图像处理, 差错掩盖, 运动矢量, 光流, 鲁棒性估计

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-1888-04

Error Concealment Based on Adaptive Robust Optical Flow

Zhou Zhi-heng Xie Sheng-li

(College of Electronic & Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract During transmitting encoded digital video sequences over noisy communication channels, the information of the images will be lost. An error concealment method based on robust optical flow is proposed, as a post-processing tool at the decoder side to solve this problem. The property of optical flow technique on efficiently obtaining motion estimation is used to recover the lost block in pixel-wise manner. This processing not only avoids the image blurring, but also reduces the blocking effect. In the estimation of optical flow, the relation between data conservation term and spatial coherence term of the objective function is adaptively adjusted. In order to increase the robustness, Lorentzian function is used to construct the energy function. Simulation results show that the proposed method can recover the higher quality image on both subjective visual evaluation and objective numerical metrics, comparing to the existing error concealment methods.

Key words Image processing, Error concealment, Motion vector, Optical flow, Robust estimation

1 引言

近年来, 实时传输视频的需求日益增长, 这不但是计算机和通信网络频宽的允许, 还是高效的图像视频压缩技术发展的结果。许多视频压缩标准, 如 MPEG-2 和 H.263 等, 都使用基于块的 DCT 变换, 可变长熵编码, 以及运动补偿来消除空间和时间冗余。变长熵编码的码流对信道的干扰很敏感, 特别是易于出错的无线信道环境。单个比特出错就可以使帧内的若干块被破坏, 而运动补偿技术会把误差传播到后续帧中, 影响整个视频序列的质量。在解码器端的后处理差错掩盖(error concealment)是一种有效对抗信道干扰的方法^[1], 它利用视频序列中的空间和时间冗余来估计丢失或出错的块。因而差错掩盖技术有分为空间域和时间域两种。

空间域差错掩盖是基于图像空间上邻接像素都是平滑变化这一事实的。1993年Wang等^[2]提出了基于一阶导数的最大平滑恢复的准则, 丢失的图像内容可以通过邻接的像素插

值得到。直接插值法虽然速度快, 但效果往往不好, 人们于是求助于迭代算法。1995年Sun和Kwok^[3]提出了凸集投影(POCS)法, 反复迭代对空间域和频率域等使用平滑准则, 凸集投影法的实现相当困难。近年来又出现了一种基于统计模型的差错掩盖的方法, 称为MRF-MAP法^[4]。然而迭代算法都有相近的缺点, 会使图像变模糊。

时间域差错掩盖是利用当前帧和前一帧的时间关联, 对丢失的块进行运动补偿^[1]。这种处理要求丢失块的运动矢量完好, 然而实际上运动矢量也同样会丢失, 所以需要先对运动矢量进行估计。常用的方法有邻域运动矢量平均值法AVMV^[5]和边界匹配法BMA^[6]等。这些算法计算简单, 但是常常因为运动矢量估计不准确, 造成恢复图像的块效应。

光流^[7]是一种2D图像运动的度量(如图1所示), 它广泛应用于计算机视觉、视频编码和计算机图形学等领域。光流能有效地获取图像中物体运动的准确估计。因而, 本文利用这种技术避免差错掩盖问题中由于运动矢量估计不准造成的块效应现象。现时许多光流技术都是基于数据保持性和空间连贯性两个假设的^[7]。这两者是一对矛盾, 因为过多的数据保持容易受噪声影响, 而过多的空间连贯会对运动的变化

2005-02-07 收到, 2005-09-13 改回
国家杰出青年科学基金(60325310), 教育部跨世纪优秀人才基金, 国家自然科学基金(60274006), 广东省重点自然科学基金(020826)和广东省自然科学基金团队研究项目(04205783)资助课题

估计不足。光流的获取可以归结为一个目标泛函优化的过程。本文在目标泛函中引入一个自适应变化的权值, 调整这两者的关系。为了提高优化过程对于特殊运动的鲁棒性, 本文还以Lorentz函数来构造目标泛函。由于对运动估计的准确性提高, 而且是逐像素点地进行恢复, 提出的方法有效地减少了恢复图像的块效应。

本文的第 2 节是给出了自适应的鲁棒性光流获取技术, 第 3 节提出一种基于光流的差错掩盖方法, 第 4、5 节分别是仿真和结论。

2 自适应的鲁棒性光流

2.1 光流的基本假设

光流是描绘图像中物体运动的 2D 速度场。光流的最基本假设是它具有数据保持性, 即在运动的过程中, 图像中一个很小区域的度量(如灰度)保持不变。用公式可以表示为

$$\frac{dI(x, y, t)}{dt} = \frac{\partial I}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial I}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

其中 $I(x, y, t)$ 是运动图像序列中第 t 帧图像在像素点 (x, y) 的灰度值。用 $(u, v) = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}\right)$ 表示光流向量, 则可得到光流约束方程^[8]:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (2)$$

其中 I_x , I_y 和 I_t 是灰度值关于 x , y 和 t 的偏导数。

但是, 单靠数据保持性是不能准确获得光流的, 因为光流约束方程容易受噪声的影响。为了解决这个问题, 需要用到空间连贯性假设, 即空间邻近的像素点具有相同的光流向量。这一假设看上去像是非适定问题的正则化处理。

再假设 (u_i, v_i) 是像素点 (x, y) 的 8 邻域 N^8 中第 i 个点的光流向量, 可构造能量泛函

$$E(u, v) = E_D(u, v) + \lambda E_S(u, v) \quad (3)$$

其中 λ 是调整参数, E_D 和 E_S 分别是数据保持项和空间连贯项^[9]:

$$E_D(u, v) = \rho(I_x u + I_y v + I_t, \sigma_D) \quad (4)$$

$$E_S(u, v) = \frac{1}{8} \sum_{i \in N^8} \rho\left(\sqrt{(u - u_i)^2 + (v - v_i)^2}, \sigma_S\right) \quad (5)$$

$\rho(x)$ 是能量函数, σ_D 和 σ_S 是尺度变化参数。

2.2 调节参数的自适应选取

式(3)能量泛函最小值对应的向量 (u, v) 即为最终所求的光流向量。可以发现, 当 $\lambda < 1$ 时, 能量泛函更多地受数据保持项影响, 但此时光流向量对噪声较为敏感。而当 $\lambda \geq 1$ 时, 能量泛函更多地受空间连贯项影响, 但此时光流向量对特殊运动的估计不足。

如图 1 所示, 我们假设图像中物体与背景、物体与物体之间的运动速度是不一样的。而能划分物体与背景、物体与物体的是图像中的边缘。因而, 当像素点 (x, y) 为边缘点时, 光流向量在它与其邻接像素间极有可能是不连贯的。相反, 当

像素点 (x, y) 为非边缘点时, 光流向量在空间中极有可能是连贯的。于是, 定义

$$\lambda = \frac{\sigma_\lambda}{I_{xx} + I_{yy}} \quad (6)$$

其中 I_{xx} 和 I_{yy} 是灰度值关于 x 和 y 的二阶偏导数, σ_λ 是尺度变化参数。注意到 $I_{xx} + I_{yy}$ 是检测边缘的拉普拉斯算子。

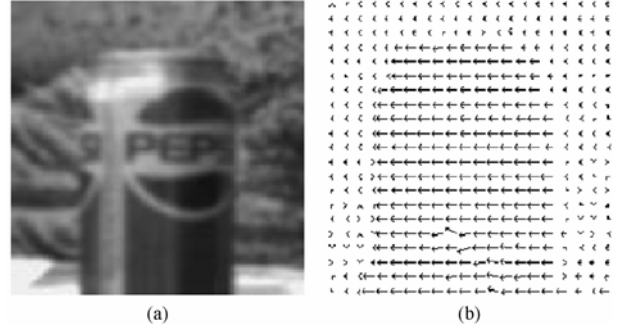


图 1 “Pepsi can”运动图像序列

(a)灰度图像

(b)光流场(箭头方向表示运动方向, 长度表示运动量的大小)

Fig.1 “Pepsi can” motion image sequence

(a) Gray-scale image

(b) Optical flow field (Direction of arrows represents motion direction and length measures the motion)

2.3 光流的鲁棒性

回到式(3)的优化问题上。有时候, 运动的不连续会造成光流与数据保持和空间连贯两个假设的模型都不成立。鲁棒性统计(robust statistics)是一个专门解决这类模型偏离问题的领域。它通过能量函数 $\rho(x)$ 和它的称为影响函数(influence function)的导函数 $\psi(x)$, 来控制模型偏离点对整个能量泛函的影响。当该点严重偏离模型时, 我们需要把它保留下来, 因此能量泛函应该趋于 0。

当 $\rho(x) = x^2$ 时, 优化过程对应着由Horn和Schunck^[7]提出标准的最小均方差估计法, 不会陷入局部最小点, 保证了解的唯一性。但是, 此时 $\psi(x) = 2x$, 模型偏离点对能量泛函的影响线性递增而且没有上界, 能量泛函也不会趋向于 0。为了提高鲁棒性, 我们引入Lorentz函数:

$$\rho_L(x) = \log\left(1 + \frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2\right), \quad \psi_L(x) = \frac{2x}{2\sigma^2 + x^2} \quad (7)$$

Lorentz 函数连续可微, 它的导函数形式简单。如图 2 所示, 在 $x > 0$ 时随着 x 变大, $\psi_L(x)$ 先上升然后趋向于 0, 这既能抑止噪声影响又能保留模型偏离点。

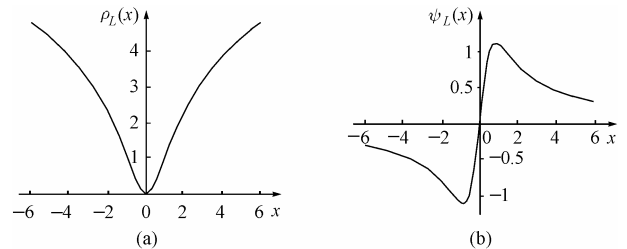


图 2 具鲁棒性的能量函数

(a)Lorentz 函数 $\rho_L(x)$ (b) 影响函数 $\psi_L(x)$

Fig.2 Robust energy function

(a) Lorentz function $\rho_L(x)$ (b) Influence function $\psi_L(x)$

结合式(3)一式(7), 可利用梯度下降法寻求能量泛函最优值对应的光流向量 (u, v) 。给定一个初始值 (u_0, v_0) , 在第 k 步迭代时有

$$u^k = u^{k-1} - \tau \frac{\partial E}{\partial u}, \quad v^k = v^{k-1} - \tau \frac{\partial E}{\partial v} \quad (8)$$

其中 τ 是迭代步长, 且

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial u} &= \frac{2(I_x u + I_y v + I_t) \cdot I_x}{2\sigma_D^2 + (I_x u + I_y v + I_t)^2} \\ &\quad + \lambda \cdot \frac{1}{8} \sum_{i \in N^8} \frac{2(u - u_i)}{2\sigma_S^2 + (u - u_i)^2 + (v - v_i)^2} \\ \frac{\partial E}{\partial v} &= \frac{2(I_x u + I_y v + I_t) \cdot I_y}{2\sigma_D^2 + (I_x u + I_y v + I_t)^2} \\ &\quad + \lambda \cdot \frac{1}{8} \sum_{i \in N^8} \frac{2(v - v_i)}{2\sigma_S^2 + (u - u_i)^2 + (v - v_i)^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

3 基于光流的差错掩盖

传统的差错掩盖方法, 如AVMV^[5]和BMA^[6]等都是努力地恢复丢失块的运动矢量。但是这些方法估计出的运动矢量往往不准确, 造成了恢复图像中出现块效应。本文使用光流技术实现差错掩盖。一方面光流能够准确地估计出物体的运动; 另一方面, 这是逐像素点而不是原来整个块的恢复。因而能有效地防止块效应的产生。

对于运动图像序列的第 t 帧中的一个丢失块, 我们根据以下的步骤对它进行恢复:

(1) 假设在丢失块边界外两个像素宽的环上, 总共有 K 个正确接收或者已经恢复的像素, 用 $I(m(k), n(k), t)$ 表示, $k = 1, 2, \dots, K$;

(2) 以环上的像素 $I(m(k), n(k), t)$ 所在的图像块的运动矢量作为初始值 $(u_{m(k), n(k), t}^0, v_{m(k), n(k), t}^0)$, 用式(3)一式(9)获取像素 $I(m(k), n(k), t)$ 对应的光流向量 $(u_{m(k), n(k), t}, v_{m(k), n(k), t})$, 其中 I_x, I_y, I_{xx} 和 I_{yy} 用水平或垂直方向上像素值的同时前向或同时后向差分代替;

(3) 由于空间上邻近像素的光流向量也大致相同, 故给定丢失块内的像素 $I(x, y, t)$, 环上各点对此像素的权值 $w_{x, y, t \rightarrow m(k), n(k), t}$ 应与它们之间的距离成反比, 即

$$w_{x, y, t \rightarrow m(k), n(k), t} = 1 / \sqrt{(x - m(k))^2 + (y - n(k))^2} \quad (10)$$

而且总的权值 $w_{x, y, t}$ 为

$$w_{x, y, t} = \sum_{k=1}^K w_{x, y, t \rightarrow m(k), n(k), t} \quad (11)$$

(4) 计算丢失像素 $I(x, y, t)$ 的光流向量

$$u_{x, y, t} = (1/w_{x, y, t}) \sum_{k=1}^K w_{x, y, t \rightarrow m(k), n(k), t} u_{m(k), n(k), t} \quad (12)$$

$$v_{x, y, t} = (1/w_{x, y, t}) \sum_{k=1}^K w_{x, y, t \rightarrow m(k), n(k), t} v_{m(k), n(k), t}$$

(5) 恢复丢失像素 $I(x, y, t)$

$$I(x, y, t) = I(x - u_{x, y, t}, y - v_{x, y, t}, t - 1) \quad (13)$$

(6) 恢复丢失块内所有的像素, 以 (u_M, v_M) 作为此块的运动矢量, 并有

$$u_M = \text{median}(u_{x, y, t}), \quad v_M = \text{median}(v_{x, y, t}) \quad (14)$$

图 3 是本文提出的差错掩盖算法的示意图。经过(1)–(5)步之后, 我们可以恢复整个丢失块。在(1)步中, 我们之所以使用丢失块边界外两个像素宽的像素环, 是因为在式(4)和式(6)中计算 I_x, I_y, I_{xx} 和 I_{yy} 时不能够使用到丢失的像素。最后做第(6)步, 是因为可能是邻接的两个或多个块同时丢失的, 我们需要当前丢失块的运动矢量去恢复邻接丢失块。

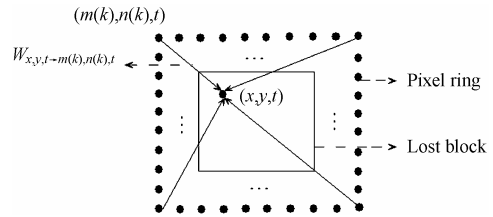


图 3 差错掩盖算法示意图

Fig.3 Illustration of error concealment algorithm

4 仿真与结果分析

本文使用大小为 144×176 的灰度视频图像序列进行仿真, 帧内分块大小是 8×8 。图 4 是“Foreman”序列中的第 91

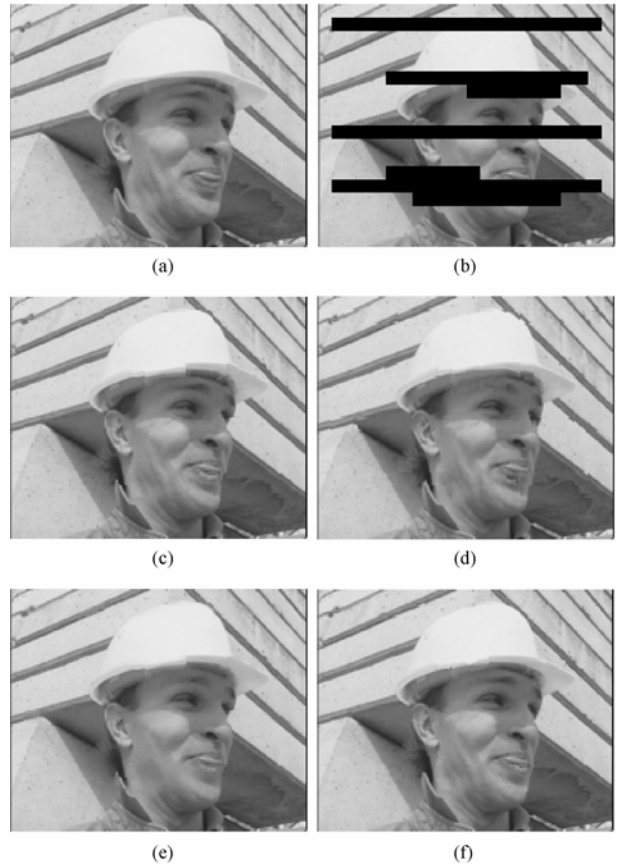


图 4 块丢失率 25.3% 下不同误差掩盖方法的视觉质量比较

(a) 原图 (b) 受损图像 (c) AVMV (d) BMA (e) MRF-MAP 方法 (f) 本文方法

Fig.4 Visual quality comparison with different error concealment methods with block lost rate 25.3% (a) Original image (b) Damaged image (c) AVMV (d) BMA (e) MRF-MAP method (f) Proposed method

帧使用各种差错掩盖算法恢复的结果。图 4(a)是未受损的原始图像, 图 4(b)是模拟经过信道传输后块丢失率为 25.3% 的受损图像, 而图 4(c)~图 4(f)分别是使用AVMV^[5], BMA^[6], MRF-MAP方法^[4]和本文提出的算法进行差错掩盖后的结果。在仿真中, 选取尺度变化参数 $\sigma_D = 10$, $\sigma_S = 5$, $\sigma_\lambda = 5$ 。由于迭代计算时, 光流分量 u 或 v 增加或减少了 1, 图像上就可能出现明显的变化。所以, 选取小于 1 迭代的步长 $\tau = 0.5$ 。仿真中发现迭代至第 5 次时已基本收敛, 所以为了节省计算量, 可以在迭代 5 次之后停止迭代。

从图 4 中可以看出, 使用AVMV^[5]和BMA^[6]算法得到的恢复图像存在大量的块效应, 而使用MRF-MAP方法得到的恢复图像出现模糊, 使用本文方法的结果在视觉上都要比以上 3 种方法要好。

表 1 是“Foreman”序列中的第 91 帧在不同的块丢失率下, 使用各种差错掩盖算法恢复得到峰值信噪比(PSNR)的结果。而表 2 是在块丢失率 20.2% 下, 对不同的视频序列 20 帧, 使用各种差错掩盖算法恢复得到的PSNR结果。可以看出, 本文提出的方法在几种情况的对比下, 都要比AVMV^[5], BMA^[6]和基于MRF-MAP^[4]的方法要好。

表 1 单帧不同块丢失率下各种掩盖方法的 PSNR(dB)比较

Tab.1 Single frame PSNR (dB) comparison by different concealment methods with different block lost rates

块丢失率	AVMV	BMA	MRF-MAP	本文方法
20.2%	29.58	26.9	29.69	29.8
25.3%	27.21	26.44	27.4	28.83
35.4%	27.1	26.26	27.32	27.43

表 2 多帧不同视频序列各种掩盖方法的 PSNR (dB)比较(块丢失率 20.2%)

Tab.2 Multi-frame PSNR (dB) comparison for different video sequences by different methods with block lost rate 20.2%

运动图像序列	AVMV	BMA	MRF-MAP	本文方法
Foreman	28.73	27.17	28.8	29.29
Coastguard	28.87	21.69	27.6	27.78
Claire	35.58	30.86	35.6	36.01
Carphone	28.49	27.02	28.9	30.1
Missam	38.98	32.81	37.7	39.0

5 结束语

针对编码数字视频序列经过受噪声影响的信道传输后出现的图像信息丢失的情况, 本文提出一种基于自适应鲁棒

性光流的差错掩盖方法。以往的差错掩盖方法通常会因为迭代造成模糊, 因为运动矢量估计不准确而造成块效应。本文利用了光流技术能有效获取物体运动估计的特性, 对丢失块进行逐像素点的恢复, 既避免了图像模糊, 又消除了块效应。在光流的估计中, 本文自适应地调整了目标泛函中的数据保持项与空间连贯项之间的关系, 并引入 Lorentz 函数提高了光流的鲁棒性。

仿真结果表明, 本文提出的方法对不同的块丢失率, 不同类型的视频序列, 都能比原来的AVMV^[5], BMA^[6], 基于MRF-MAP^[4]的方法恢复出更高质量的图像。

参考文献

- [1] Wang Y, Zhu Q F. Error control and concealment for video communication: A review. *Proc. IEEE*, 1998, 86(5): 974-997.
- [2] Wang Y, Zhu Q F, Shaw L. Maximally smooth image recovery in transform coding. *IEEE Trans. on Communications*, 1993, 41(10): 1544-1551.
- [3] Sun H, Kwok W. Concealment of damaged block transform coded images using projections onto convex sets. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1995, 4(4): 470-477.
- [4] Salama P, Shroff N B, Delp E J. Error concealment in MPEG video streams over ATM networks. *IEEE J. on Selected Areas Communications*, 2000, 18(6): 1129-1144.
- [5] Sun H, Challapali K, Zdepski J. Error concealment in digital simulcast AD-HDTV decoder. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 1992, 38(3): 108-116.
- [6] Lam W M, Reilbman A R, Liu B. Recovery of lost or erroneously received motion vectors. *ICASSP*, Apr. 1993, 5: V417-V420.
- [7] Horn B K P, Schunck B G. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 1981, 17: 185-203.
- [8] Barron J, Beauchemin S, Fleet D. Performance of optical flow techniques. *Int'l J. Computer Vision*, 1994, 12(1): 43-77.
- [9] Ye M, Haralick R M, Shapiro L G. Estimating piecewise-smooth optical flow with global matching and graduated optimization. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(12): 1625-1630.

周智恒: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为图像无线传输。

谢胜利: 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 曾获国家杰出青年科学基金和教育部跨世纪优秀人才基金。在国内外学术刊物上发表 70 多篇论文。目前感兴趣的领域为非线性系统学习控制理论、自适应信号处理、盲信号分离和图像处理等。