

一种新 97 小波改进的 JPEG2000 算法

梁志伟 马旭东 戴先中

(东南大学自动化学院, 南京 210096)

摘要 针对有限网络带宽下视频监控的实时性要求,提出了一种改进的 JPEG2000 图像压缩传输算法。该改进算法以构造双正交小波的 Cohen-Daubechies-Feauveau 定理和消失矩条件为基础,首先依据提升结构构造了一组对称的双正交 97 小波;然后用新构造的 97 小波取代 JPEG2000 标准中的 CDF97 小波,该新 97 小波算法不仅比 CDF97 小波的计算处理速度更快,而且在保持几乎相同的压缩性能的同时,能够大大简化图像压缩中的运算量;最后,通过将改进的算法应用于网络机器人视频监控系统的实验表明,该算法是可行的。

关键词 97 小波 提升结构 JPEG2000 网络机器人 图像压缩

中图法分类号:TN919.81 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)05-0853-05

Improved JPEG2000 Algorithm Using a Novel 97 Wavelet

LIANG Zhi-wei, MA Xu-dong, DAI Xian-zhong

(Department of Automatic Control, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract An improved JPEG2000 algorithm is proposed to meet the realtime requirements of video supervisory system under the limited bandwidth. Firstly, a novel symmetric biorthogonal 97 wavelet is constructed based on the Cohen-Daubechies-Feauveau Theorem, vanishing moments condition and the lifting scheme. Then the constructed 97 wavelet is introduced to substitute CDF97 wavelet of JPEG2000 algorithm in order to improve JPEG2000 performance. Compared with traditional CDF97, the new 97 wavelet has a faster processing performance for its remarkably less computational complexity of image compression, while the compression performance is almost the same as that of CDF97 wavelet. At last, the experimental results of applying the proposed algorithm in a video surveillance system validate the predominance.

Keywords 97 wavelet, lifting scheme, JPEG2000, web robot, image compression

1 引言

在新一代图像压缩标准 JPEG2000^[1]中,有损压缩的小波滤波器是采用 Cohen 和 Daubechies 等人设计的 97 小波(CDF97)^[2-4],根据它的提升结构计算出一对小波系数需要 14 个浮点运算(6 个乘法,8 个加法),由于其系数全是无理数,其在近似计算过程中需要很大的基数,这样势必大大增加运算量,因此设计一个具有简单系数的小波滤波器是必要的。文献[5]在离散超小波^[6]的概念

下,利用极小循环矩阵和消失矩条件构造了一组带自由变元的 97 滤波器簇,并通过进一步限制其中自由变元的取值,得到了两个有意义的滤波器——W97-1 和 W97-2,其中 W97-1 滤波器虽计算简单,只需整数运算,且适合于硬件实现,但它的压缩性能比 CDF 97 小波稍差;W97-2 滤波器的压缩性能虽与 CDF97 小波接近,然而其运算量相对于 CDF97 小波并没有明显减少。

如今提升方法已取代塔式方法成为计算离散小波变换的首选方法。正是提升结构的发现,才将 CDF97 小波的运算量从 23 个浮点运算降到 14 个,

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA040202,2007AA041703)

收稿日期:2006-11-08;改回日期:2007-02-12

第一作者简介:梁志伟(1980~),男。现为东南大学控制理论与控制工程专业博士研究生。主要研究方向为网络化移动机器人、智能视频监控系统及视频压缩算法。E-mail:lzhw_ly@163.com

W97-1 和 W97-2 滤波器^[5] 由于没有利用提升结构, 因而难免存在冗余操作。本文根据一般的对称 97 滤波器的提升结构, 利用消失矩条件和 Cohen-Daubechies-Feauveau 双正交小波构造定理^[4], 得到了一组新的 97 小波滤波器, 其系数形式简单, 由于它的计算只需很少的浮点运算。经过实验验证, 新 97 小波的压缩性能与 CDF97 小波的压缩性能几乎相同。最后本文将改进的 JPEG2000 应用到网络机器人的视频监控系统中的实验结果表明, 改进的算法比标准的 JPEG2000 算法具有更低的复杂度, 更适合在网络视频监控中应用。

2 基本原理

设有限长度滤波器在分解端与重构端的低通滤波器函数分别为

$$H(\omega) = \sum_{n=-N_1}^{N_2} h_n e^{-in\omega}, G(\omega) = \sum_{n=-M_1}^{M_2} g_n e^{-in\omega} \quad (1)$$

其中, h_n, g_n 分别为分解端和重构端的低通滤波器系数。

Cohen, Daubechies 与 Feauveau 在文献[4]中通过建立 $H(\omega)$ 与 $G(\omega)$ 的关系来得到构造双正交小波滤波器的充分条件——CDF 定理, 即

$$\begin{aligned} \text{引理 1} \quad & \text{设 } H(\omega) = \sqrt{2}[(1 + e^{-i\omega})/2]^L P(\omega) \\ & G(\omega) = \sqrt{2}[(1 + e^{-i\omega})/2]^{\tilde{L}} \tilde{P}(\omega) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $P(\omega), \tilde{P}(\omega)$ 为关于 $e^{-i\omega}$ 的多项式, 若满足下述 3 个条件:

$$(1) \text{ 归一化: } H(0) = \sqrt{2}, G(0) = \sqrt{2} \quad (3)$$

$$(2) \sup_{\omega \in [0, 2\pi)} |P(\omega)| < 2^{L-1}, \quad \sup_{\omega \in [0, 2\pi)} |\tilde{P}(\omega)| < 2^{\tilde{L}-1} \quad (4)$$

$$(3) H(\omega)G^*(\omega) + H(\omega + \pi)G^*(\omega + \pi) = 2$$

(其中 $G^*(\cdot)$ 表示 $G(\cdot)$ 的共轭复数) 几乎处处成立。

则通过 $H(\omega)$ 与 $G(\omega)$ 即可构造出一对双正交小波滤波器。

另外, 文献[7]给出了式(2)中的 L 和 \tilde{L} (消失矩) 在不同取值下, $H(\omega)$ 和 $G(\omega)$ 解的形式, 其定理如下所述:

引理 2 设滤波器函数 $H(\omega)$ 与 $G(\omega)$ 均为奇数长度, 且关于 0 对称, 则有

(1) 若滤波器函数长度分别为 $2M + 1$ 与 $2M - 1$, 则当由式(2)定义的消失矩满足 $L = 2, \tilde{L} = 2M - 2$ (或 $L = 2M - 2, \tilde{L} = 2$) 时, 就可以求得唯一解 $H(\omega)$ 与 $G(\omega)$, 所得到的解即为样条小波滤波器;

(2) 当 $L = 2, \tilde{L} = 2M - 4$ 时, 就可以求得一个自由变量的解 $H(\omega)$ 与 $G(\omega)$;

(3) 当 $L = 4, \tilde{L} = 2M - 2$ 或 $L = 2M - 2, \tilde{L} = 2$ 时, 则 $H(\omega)$ 或 $G(\omega)$ 无解;

由消失矩条件可知, 当 $M = 4$ (97 小波) 时, 并且分解端和重构端滤波器的消失矩为 $L = \tilde{L} = 4$ 时, 则满足双正交对称结构的 $H(\omega)$ 与 $G(\omega)$ 有唯一的解——著名的 CDF97 小波滤波器组^[8], 而如果分解端和重构端的消失矩为 $L = 2, \tilde{L} = 4$ 时, 则可以求得含有一个自由变量的解 $H(\omega)$ 与 $G(\omega)$ 。因此为了得到一簇 97 小波滤波器, 本文取 $L = 2, \tilde{L} = 4$ 。利用对称性就可使式(1)变为

$$\begin{cases} H(\omega) = h_0 + 2 \sum_{n=1}^4 h_n \cos n\omega \\ G(\omega) = g_0 + 2 \sum_{n=1}^3 g_n \cos n\omega \end{cases} \quad (5)$$

而归一化条件(式(3)), 则变为

$$h_0 + 2 \sum_{n=1}^4 h_n = \sqrt{2}, g_0 + 2 \sum_{n=1}^3 g_n = \sqrt{2} \quad (6)$$

另一方面, 由式(2)容易推得 $H(\omega)$ 与 $G(\omega)$ 的 k 阶导数满足: $H^{(k)}(\omega)|_{\omega=\pi} = 0, k = 0, 1, 2, 3$ 。因此式(1)可以进一步简化为 $H(\pi) = 0, G(\pi) = 0, G^{(2)}(\pi) = 0$, 即

$$\begin{cases} h_0 + 2 \sum_{n=1}^4 (-1)^n h_n = 0 \\ g_0 + 2 \sum_{n=1}^3 (-1)^n g_n = 0 \\ 2 \sum_{n=1}^3 n^2 (-1)^n g_n = 0 \end{cases} \quad (7)$$

文献[7]结合引理 1 和引理 2, 详细讨论了具有奇数长度的双正交对称小波的构造方法, 由于其不是本文的重点, 故在此不作介绍, 只引用其中的结论, 即当滤波器长度以及小波消失矩的阶数较大时, 其对应的双正交小波的求法会变得比较复杂。为了解决这一问题, 本文在下一节将通过避开复杂公式的求解, 并结合滤波器的提升结构构造新的 97 小波来实现对 JPEG2000 算法的改进。

3 改进算法

为了便于叙述,在此采用文献[9]中的记法,将 97 小波的分解端提升多相矩阵表示为

$$P_{\alpha}(z) = \begin{bmatrix} 1 & \alpha(1+z^{-1}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \beta(1+z) & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & \gamma(1+z^{-1}) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \delta(1+z) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta & 0 \\ 0 & -1/\zeta \end{bmatrix} \quad (8)$$

另外 $P_{\alpha}(z)$ 又可以表示为

$$P_{\alpha}(z) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{aligned} A_{11} &= h_0 + h_2(z+z^{-1}) + h_4(z^2+z^{-2}) \\ A_{12} &= g_1(z^{-1}+1) + g_3(z+z^{-2}) \\ A_{21} &= h_1(z+1) + h_3(z^2+z^{-1}) \\ A_{22} &= -g_0 - g_2(z+z^{-1}) \end{aligned}$$

由式(8)、式(9)可得到如下方程组:

$$\begin{cases} h_0 = (1 + 2\alpha\beta + 2\alpha\delta + 2\gamma\delta + 6\alpha\beta\gamma\delta)\zeta \\ h_1 = (3\beta\gamma\delta + \beta + \delta)\zeta \\ h_2 = (\alpha\beta + \alpha\delta + \gamma\delta + 4\alpha\beta\gamma\delta)\zeta \\ h_3 = \beta\gamma\delta\zeta \\ h_4 = \alpha\beta\gamma\delta\zeta \\ g_0 = (2\beta\gamma + 1)/\zeta \\ g_1 = -(3\alpha\beta\gamma + \alpha + \gamma)/\zeta \\ g_2 = \beta\gamma/\zeta \\ g_3 = -\alpha\beta\gamma/\zeta \end{cases} \quad (10)$$

联立式(6)、式(7)和式(10)即得到如下一个含有自由变量的解:

$$\begin{cases} \alpha = (2\sqrt{2} - \zeta)/(4(\zeta - \sqrt{2})) \\ \beta = -(\zeta - \sqrt{2})^2/\zeta^2 \\ \gamma = \sqrt{2}\zeta^2/(8(\sqrt{2} - \zeta)) \\ \delta = \frac{1}{4} - (\zeta - \sqrt{2})^3/\zeta^3 + ((3\zeta - 5\sqrt{2})(\zeta - \sqrt{2}))/4\zeta^2 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中,若取 $\zeta = 1.149\ 604\ 399$,则可解得

$$\begin{cases} \alpha = -1.586\ 134\ 342\ 1 \\ \beta = -0.052\ 980\ 118\ 6 \\ \gamma = 0.882\ 811\ 075\ 5 \\ \delta = -0.443\ 506\ 852\ 0 \\ \zeta = 1.149\ 604\ 399 \end{cases}$$

这组系数就是 JPEG2000 标准中采用的著名的 CDF97 小波的提升系数^[9]。由此可以看出,其系数全是无理数,由于在进行一对系数的提升运算时需要 14 个浮点运算(6 个乘法,8 个加法),因而不利于 JPEG2000 在计算机上快速实现。从式(11)可以看出, ζ 是自由变元,为了简化计算可以对自由变元 ζ 进行一些特殊的选择。例如取 $\zeta = \frac{4\sqrt{2}}{5}$,则可以得

到以下一组简单的小波提升系数:

$$\zeta = \frac{4\sqrt{2}}{5}, \alpha = -\frac{3}{2}, \beta = -\frac{1}{16}, \gamma = \frac{4}{5}, \delta = -\frac{15}{32}$$

将此组系数代入式(10)、式(5)就可以求得 $H(\omega)$ 与 $G(\omega)$,利用式(2)可得

$$\begin{aligned} P(\omega) &= \left(1 + \frac{3}{8}\cos\omega - \frac{3}{5}\cos2\omega + \frac{9}{40}\cos3\omega\right)e^{-i\omega} \\ \tilde{P}(\omega) &= \left(\frac{5}{2} - \frac{3}{2}\cos\omega\right)e^{i2\omega} \end{aligned}$$

由于 $P(\omega)$ 和 $\tilde{P}(\omega)$ 满足 $\sup_{\omega \in [0, 2\pi]} |P(\omega)| =$

$1.62 < 2^1, \sup_{\omega \in [0, 2\pi]} |\tilde{P}(\omega)| = 4 < 2^3$,因此得到的新 97 小波滤波器是双正交小波滤波器。如果将得到的新 97 小波取代 JPEG2000 中的 CDF97 小波,便实现了对 JPEG2000 的改进,相比 CDF97 小波滤波器,该滤波器是以降低消失矩(正则性)的代价来换取执行的效率。

4 实验与应用

实验分为以下两个部分:第 1 个实验是在静态图像的压缩时,采用 256×256 大小的 Lena 真彩色图像进行了压缩实验,并对改进的 JPEG2000 与标准的 JPEG2000 之间的压缩性能进行了对比;第 2 个实验是将改进的 JPEG2000 应用于网络机器人视频监控系统中,以验证其动态压缩性能。

4.1 静态图像的压缩性能对比

用于图像压缩实验的计算机的 CPU 为 800MHz,内存为 128M,实验结果见表 1。通过表 1 可以看出,首先在相同压缩比情况下,改进的 JPEG2000 的编解码时间比标准 JPEG2000 要少,这是由于新 97 小波的 5 个提升系数中的前 4 个为有理数,并且其中 3 个的分母是 2 的幂的系数,因而其计算相对于 CDF97 小波简单。由新 97 小波计算出一对小波系数只需要 10 个整数加法、5 个

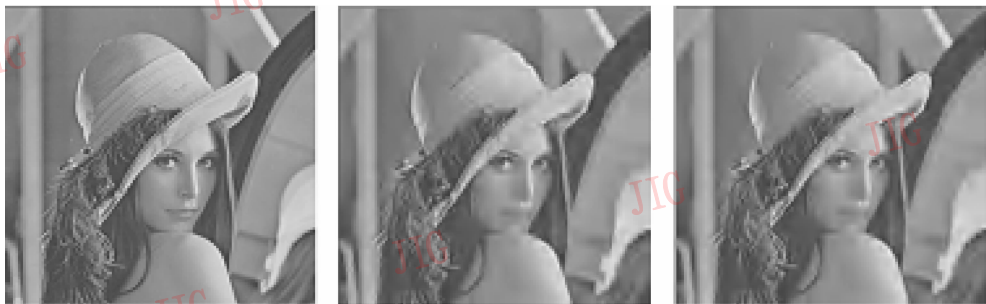
移位、1 个整数乘法和两个浮点乘法,而 CDF97 小波则需要 8 个浮点加法和 6 个浮点乘法,由此可见,新 97 小波的浮点运算量只是 CDF97 小波的 $1/7$;其次,从 R、G、B 3 个通道图像的峰值信噪比 (PSNR) 来看,二者在压缩图像质量上几乎相同。由于 PSNR 只是数学上的能量质量的评价方法,还

不能实现真正的视觉质量评定,为此本文取压缩比为 128 来对改进的 JPEG2000 和标准的 JPEG2000 进行主观效果上的比对,压缩效果如图 1 所示。从图中可以看出,改进的 JPEG2000 具有和标准的 JPEG2000 几乎一样的视觉效果,这也与其 PSNR 值几乎相同相对应。

表 1 编解码性能的比较 (A 代表改进的 JPEG2000, B 代表标准的 JPEG2000)

Tab. 1 Performance contrast of coedc

压缩比	PSNR 值 (dB)		编码时间 (s)		解码时间 (s)	
	A	B	A	B	A	B
256	22.15, 23.17, 22.68	22.16, 23.19, 22.69	0.13	0.21	0.08	0.11
128	25.86, 27.21, 25.82	25.88, 27.22, 25.84	0.12	0.19	0.06	0.09
64	28.33, 30.27, 28.21	28.34, 30.29, 28.23	0.12	0.18	0.05	0.08
32	32.75, 34.97, 32.13	32.76, 34.99, 32.14	0.11	0.16	0.05	0.07



(a) 原始图像

(b) 标准 JPEG2000 压缩结果

(c) 改进 JPEG2000 压缩结果

图 1 压缩效果对比 (压缩比为 128)

Fig. 1 Compression result

4.2 图像序列压缩性能的对比

为了验证改进的 JPEG2000 在网络视频监控中的优势,实验中使用美国 ActivMedia 公司的 Pioneer 2/DX 型移动机器人作为终端进行图像采集压缩,并先通过 11M IEEE802.11 无线局域网将压缩图像数据传送到网络控制平台,然后控制平台再通过 Internet 网转发给远程客户端进行解码显示,其系统结构如图 2 所示。

在实验中,设定压缩图片的大小为 320×240 pixels 的真彩色图片,采用 64:1 的压缩比进行实时压缩。从表 1 已经得知,改进的 JPEG2000 的编码时间比标准的 JPEG2000 要短,标准的 JPEG2000 的编码效率大约为 $5 \sim 6$ fps,而改进的 JPEG2000 的编码效率则达到 $7 \sim 8$ fps。图 3 给出了在网络客户端实测的传输速率,其中 X 轴表示时间 (单位: s), Y

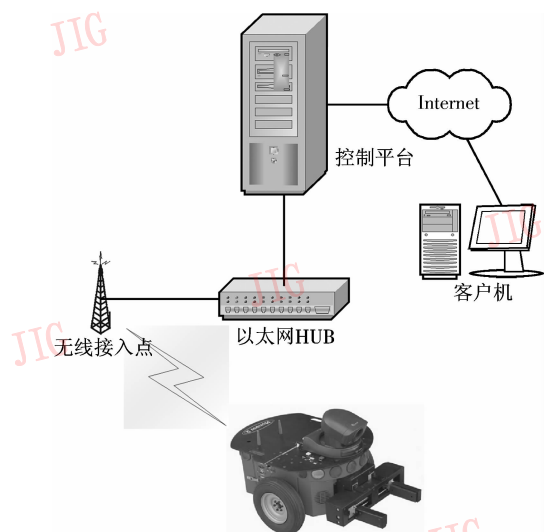


图 2 网络机器人的系统结构

Fig. 2 System structure of networked robot

轴表示测得的帧率(单位:fps),由于二者都能够大幅度压缩图片,这就减少了在网络上传输的数据量,从而保证了传输的实时性。图 4 为采用改进 JPEG2000 算法进行压缩传输的远程客户端的交互界面。

综合以上两个实验的结果可以得出以下结论:在保证几乎相同的压缩质量的同时,改进的 JPEG2000 由于比标准 JPEG2000 所耗费的编解码时间更少,因而其更适合网络视频的实时传输。

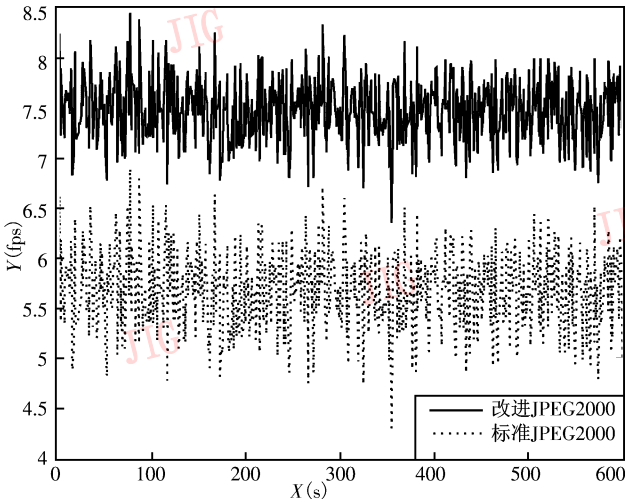


图 3 Internet 上客户端接收图像的速率

Fig. 3 Transmission rate under Internet

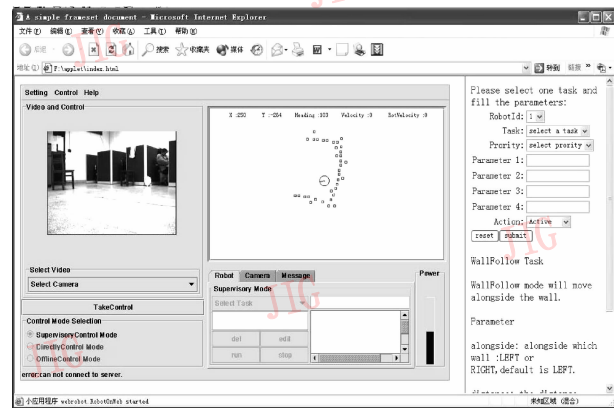


图 4 远程客户端的人机界面

Fig. 4 Human computer interface of client

5 结 论

本文利用 CDF97 小波的提升结构、CDF 定理及消失矩条件构造了一种新的 97 小波的滤波器,相比 CDF97 小波,其不仅图像的压缩质量相差不大,并且结构简单、运算量少,从而有效减少了 JPEG2000 的运算复杂性,实验也表明了其在网络视频监控中的可行性。

参考文献 (References)

- 1 ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1. Information Technology-JPEG2000 Image Coding System Part-1 [S], ISO/IEC FCD15444-1, 2000.
- 2 Christopoulos C, Ebrahimi T. The JPEG2000 still image coding system: an overview [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, **46**(4): 1103 ~ 1127.
- 3 Cruz D S, Ebrahimi T. A study of JPEG2000 still image coding versus other standards [A]. In: Proceedings of the European Signal Processing Conference [C], Tampere, Finland, 2000;673 ~ 676.
- 4 Cohen A, Daubechies I, Feauveau J. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1992, **45**(5): 485 ~ 560.
- 5 Wang Guo-qi. Generic 9-7-tap wavelets filters and their performances studies on image compression [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, **29**(1):131 ~ 133. [王国秋. 一般的 9-7 小波滤波器及其图像压缩性能研究[J]. 电子学报,2001,**29**(1):131 ~ 133.]
- 6 Wang G. Matrix methods of constructing wavelets filters and discrete hyper-wavelet transform [J]. Optical Engineering, 2000, **39**(4): 1080 ~ 1087.
- 7 Cheng Li-zhi, Guo Han-wei. Wavelet and Discrete Transform Theory and Engineering Practice [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. [成礼智,郭汉伟. 小波与离散变换理论及工程实践[M]. 清华大学出版社,2005.]
- 8 Sweldens W. The lifting scheme: A new philosophy in biorthogonal wavelet constructions [A]. In: Proceedings of SPIE Conference on Wavelet Applications in Signal and Image Processing [C], San Diego, CA, USA, 1995: 68 ~ 79.
- 9 Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transform into lifting steps [J]. Journal of Fourier Analysis and Application, 1998, **4**(3): 247 ~ 269.