

基于多小波的零树编码^{*})

董卫军 周明全 耿国华

(西北大学计算机科学系 西安710069)

摘要 多小波所拥有的对称性、正交性、有限支撑等重要特性弥补了单小波的不足。本文提出了一种新的图像压缩方法,该方法以多小波变换为基础。根据多小波性质的不同采用与之对应的改进编码方法。实验证明,压缩效果良好,在一定的压缩比下可达到很高的峰值信噪比(PNSR)。

关键词 多小波,零树编码,图像压缩,小波变换

The Improvement of EZW Coding Based on Multi-Wavelet Transform

DONG Wei-Jun ZHOU Ming-Quan GENG Guo-Hua

(Dept. of Computer Science, Northwest University, Xi'an 710069)

Abstract Multi-wavelet has some very important properties such as orthogonality, symmetry, and short support, which makes up for the shortcoming of scalar wavelet. Propose a new image compression method which is based on multi-wavelet transform. Select the corresponding improvement coding method with the change of multi-wavelet. The results show that the new method can obtains high peak signal-to-noise ratio(PNSR).

Keywords Multi-wavelet, EZW coding, Image compression, Wavelet transform

1 引言

小波具有的多分辨分析能力^[1~3]使得小波变换成为图像压缩的一种重要工具。近年来,基于小波的图像压缩技术取得了很大的进展。这些算法都充分利用了小波系数所具有的统计特性。通过重新进行小波系数的重组实现图像压缩^[4~6]。

相比于传统的单小波,多小波是由两个或两个以上函数作为尺度分量生成的小波,存在着很多单小波所不具备的优点^[7,8]:①对滤波器性质的限制降低。②一些多小波变换的能量紧性高于单小波的能量紧性,有利于图像的压缩。③长度较短的多滤波器可能获得比较长单滤波器更好的压缩效果。除了这些基本优点之外,多小波还具备对称性,短支撑性,二阶消失矩和正交性,所以多小波在信号处理方面比单小波更有优势^[9]。

文中提出一种新的图像压缩方法,该方法以多小波分解为基础。设计了一种新的预滤波器,通过对图像进行多小波分解和重构实现了图像的压缩存储,在进行多小波分解时,根据图像频率构成特性,选择不同的多小波,并根据不同的多小波的分解特性,采用改进的 EZW 方法进行编码。

2 多小波系统

2.1 多小波系统

不同于传统的单滤波器,多滤波器是一个多输入、多输出系统。信号在多滤波之前必须解决好两个问题:一是必须完成标量信号到向量信号的转换,以便生成向量输入流。二是要解决由于多尺度函数和多小波分量的不同,导致谱行为带来的不平衡通道问题,所以在多滤波之前需进行预滤波处理,以保证后续处理的正确性。

数据经过预滤波处理后,产生的向量数据流通过低通、高

通滤波器生成两个向量输入流,通过对生成的向量输入流进行相应处理,可以实现指定的功能。在逆多小波变换后,还需将向量数据流还原成与之对应的标量数据流,即需要进行后置滤波。

多小波分解过程如式(1),式(2)所示:

$$V_{j,k} = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} H_{m-2k} V_{j-1,m} \quad (1)$$

$$W_{j,k} = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} G_{m-2k} V_{j-1,m} \quad (2)$$

逆多小波变换过程如式(3)所示:

$$V_{j-1,k} = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \tilde{H}_{k-2m} \hat{V}_{j,m} + \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \tilde{G}_{k-2m} \hat{W}_{j,m} \quad (3)$$

其中: $\hat{V}_{j,k} = (V_{j,k}^{(0)}, V_{j,k}^{(1)})^T$, $\hat{W}_{j,k} = (W_{j,k}^{(0)}, W_{j,k}^{(1)})^T$ 。

一个完整的多小波变换系统如图1、图2所示。其中图1为预滤波和多小波变换过程,图2为逆多小波变换和后置滤波过程。P为预滤波器,Q为后置滤波器。

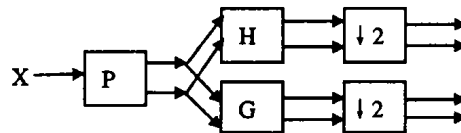


图1 预滤波和多小波变换

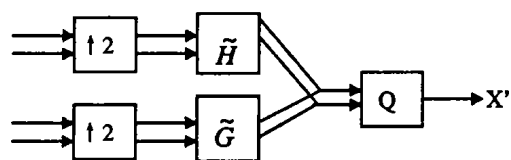


图2 逆多小波变换和后置滤波

^{*}) 本文研究得到国家自然科学基金(60372072)和国家十五“863”计划资助项目(2001AA1114212)的资助。董卫军 博士生,讲师,主要从事图形图像领域的研究。

2.2 离散多小波变换

对原始图像 X 进行二维离散多小波变换时,首先对图像的每一行、然后对每一列按式(9)进行预滤波处理,预滤波处理后的图像记作 X_0 。对于图像 X_0 依照式(1)和式(2)按先行、后列的方式进行多小波分解,分解后的图像记作 X_1 。和单小波变换最大的不同是 X_0 在被分成四个子带的同时,每个子带又被分成了四个子块。可以多次迭代次分解,直到问题得解为止。二级多小波分解过程如图3所示。

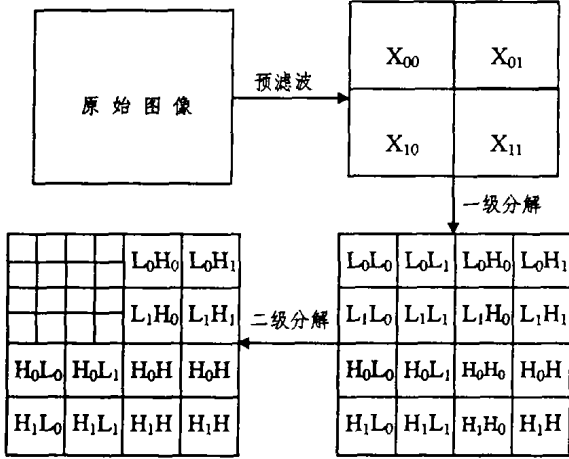


图3 二级多小波分解过程

2.3 预滤波器的设计

设计预滤波器的目的在于:生成向量输入流;解决多尺度函数和多小波分量所导致的不平衡通道问题。预滤波器设计的好坏将直接影响到多滤波器的性质。一方面,如果设计的预滤波器不正交,将会导致重构的不完全性。另一方面,性能良好的预滤波器可以弥补多滤波器的不足。因此,如何设计具有良好性能的预滤波器,是一个需要解决的重要问题。

设预滤波器 $\hat{A}_0(\omega)$ 和 $\hat{A}_1(\omega)$ 的定义如式(4):

$$\hat{A}_0(\omega) = \sum_{i=0}^N a_{0i} e^{-i\omega} \quad \hat{A}_1(\omega) = \sum_{i=0}^N a_{1i} e^{-i\omega} \quad (4)$$

低通、高通滤波器 $\hat{H}(\omega)$ 和 $\hat{G}(\omega)$ 的定义如式(5):

$$\hat{H}(\omega) = \begin{bmatrix} \hat{H}_{00}(\omega) & \hat{H}_{01}(\omega) \\ \hat{H}_{10}(\omega) & \hat{H}_{11}(\omega) \end{bmatrix} \quad \hat{G}(\omega) = \begin{bmatrix} \hat{G}_{00}(\omega) & \hat{G}_{01}(\omega) \\ \hat{G}_{10}(\omega) & \hat{G}_{11}(\omega) \end{bmatrix} \quad (5)$$

则预滤波器和多滤波器的联合响应频率为:

$$\hat{H}_i(\omega) = \hat{H}_0(\omega) \hat{A}_0(\omega) + \hat{H}_1(\omega) \hat{A}_1(\omega) \quad i=0,1 \quad (6)$$

$$\hat{G}_i(\omega) = \hat{G}_0(\omega) \hat{A}_0(\omega) + \hat{G}_1(\omega) \hat{A}_1(\omega) \quad i=0,1 \quad (7)$$

令:

$$\hat{H}_{00}(0) \hat{A}_0(0) + \hat{H}_{01}(0) \hat{A}_1(0) = 1$$

$$\hat{H}_{10}(\pi) \hat{A}_0(\pi) + \hat{H}_{11}(\pi) \hat{A}_1(\pi) = 0$$

$$\hat{G}_{00}(\pi) \hat{A}_0(\pi) + \hat{G}_{01}(\pi) \hat{A}_1(\pi) = 1$$

$$\hat{G}_{10}(0) \hat{A}_0(0) + \hat{G}_{11}(0) \hat{A}_1(0) = 0$$

则有: $\hat{A}_0(0) = 1, \hat{A}_0(\pi) = 0, \hat{A}_1(\pi) = 1, \hat{A}_1(0) = 0$ 。

为了保证系统重构的完全性,还必须满足条件(8)

$$\hat{A}_0(\omega) \hat{A}_0^*(\omega) + \hat{A}_1(\omega) \hat{A}_1^*(\omega) = 1 \quad (8)$$

其中: $\hat{A}_i^*(\omega), i=0,1$ 为后置滤波器。

则预滤波器 $\hat{A}_i(\omega)$ 的设计如式(9)所定义:

$$\hat{A}_i(\omega) = \frac{1}{2} (1 + (-1)^i e^{-i\omega}), i=0,1 \quad (9)$$

3 零树编码方法的改进

3.1 零树编码

EZW(嵌入式零树小波)编码方法^[10]是一种简单有效的图像压缩方法,在进行编码时,既不需对信源进行训练,不需事先存储码表和码书,也不需对原始图像有任何先验知识。在压缩预算给定的前提下,对信息的编码按重要性由高到低依次进行,符合人类的视觉特性。在压缩比给定的前提下,能获得最佳的图像压缩质量。

零树编码方法主要依据是:多级单小波分解后,小波系数之间存在相关性。一幅图像经过 M 级单小波变换后得到 $3M+1$ 幅多尺度子带图像,一棵完整的小波系数树构成如下:根节点是最低频子带的一个小波系数,根节点的3个子节点是同一分解级上3个方向子带图像中相应空间位置上的小波系数。而与子节点相应的同一空间位置同一方向的更精细尺度下的4个小波系数构成子节点的下级节点,依此类推,可以形成多级小波系数树。除最高频率的3个子带之外,每个方向子带中的系数都有4个子节点,而以其中任一个系数为根节点的小波系数树为相应的上级树的子树。

给定门限值 T ,如果某个小波系数 K 的绝对值小于 T ,则称 K 是相对于 T 的不充分系数;否则称 X 是相对于 T 的充分系数。如果一棵树上除根节点外所有系数都相对于 T 为不充分系数,则称该树为门限 T 下的零树。EZW 使用逐次逼近量化技术进行细数编码。在单小波变换域,采用以上方法所定义的一棵完整的小波系数树对应于原始图像中同一空间位置上的一个图像子块。正是依赖于这种对应关系,才使得图像的局部特征能够较好地通过零树和零子树来表示。小波系数的相关性及子带重要性排序如图4、图5所示。

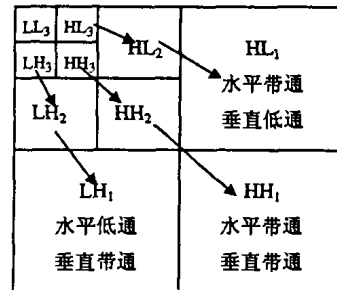


图4 图像三级小波分解示意图 (箭头所指方向为同一空间方向)

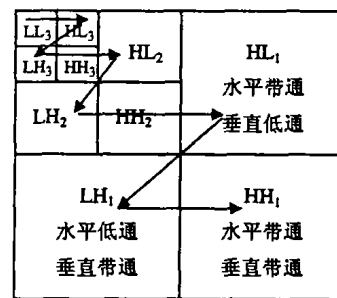


图5 子带重要性排序图示

3.2 零树编码的改进

但对于多小波变换而言,原始图像经过多小波变换后,图像被分成四个子带,同时每个子带又被分成四个子块。破坏了EZW 编码方法所假定的父子关系,必须对传统的EZW 编码方法进行改进,以适应多小波变换的要求。为此,必须先对图像的多小波系数进行重新组织,通过重组进行系数的重排,将各个子带中4个子块上相同位置的小波系数排放在一起,然后再利用传统的方法进行编码。多小波不同,其分解特性也就不

同,所以在进行编码改进时,应该根据多小波的分解特性分别进行改进。

对于平衡多小波而言,分解后每个子带的四个子块间存在大量的相关性。为了保持这种相关性,在对四个子块的系数重组时,将对应于同一空间位置的系数重新组织在一起,形成四个子带 LL、LH、HL、HH。重组前系数结构如图6所示。子带系数重组的过程如图7所示。其中系数1~4映射成子带 LL 的四个相邻系数,5~8映射成子带 HH 的四个相邻系数。

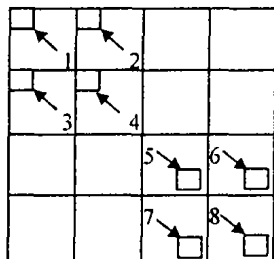


图6 多小波的系数重组前

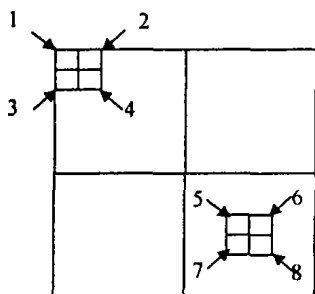


图7 基于平衡多小波的系数重组后

对于 sam 多小波而言,经过一级多小波分解后,虽然每个高频子带的四个子块间存在着大量的相关性,但由于 sam 多小波和多尺度函数的第二个分量是反对称的,其相应的多滤波器的第二通道是带通的,所以低通子带对应的四个子块间存在着不相似的谱行为。因此,对于 sam 多小波而言,只能对它的每个高频子带的四个子块的系数进行重组,生成 LH、HL、HH 子带。基于 sam 多小波的系数重组过程如图8所示。

对于 GHM 多小波和 Bighm 多小波而言,图像进行三级小波分解后,低频子块集中了图像的大部分能量,所以对低频

部分应该进行无失真编码;高频子带的每个子块间存在着相关性,各个高频子带的每个子块间的相似性较小,所有的高频系数可以构成12棵多小波分层树,而且这些分层小波树间系数的幅值差别较大,因此应该对这些子块分别进行量化。分层树的组织如图9所示。

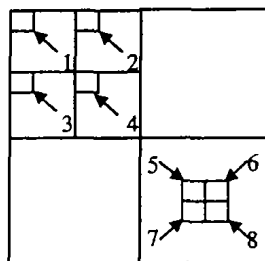


图8 基于 sam 多小波的系数重组后

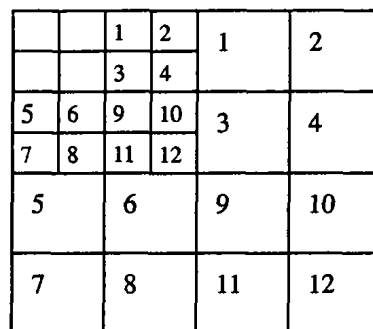


图9 多小波分层树

4 实验结果

为了衡量改进算法的性能,实验结果用峰值信噪比 (PSNR)来衡量,设原始图像 X 的大小为 $M \times N$,重构后的图像为 \hat{X} ,则峰值信噪比定义如下:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (10)$$

其中, MSE 为均方误差,定义为:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |x(i, j) - \hat{x}(i, j)|^2 \quad (11)$$

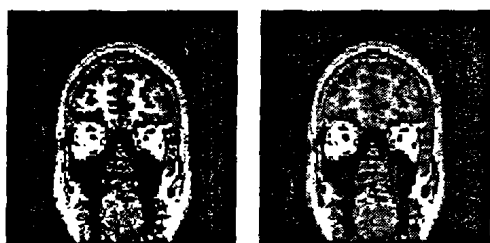
表1 256级灰度图像压缩试验

样图	Bmw1多小波压缩			Sam多小波压缩			GHM多小波压缩			Bighm多小波压缩		
	PNSR			PNSR			PNSR			PNSR		
	8:1	16:1	32:1	8:1	16:1	32:1	8:1	16:1	32:1	8:1	16:1	32:1
CT	35.63	34.77	30.27	37.67	36.32	35.63	34.77	30.27	30.77	35.63	34.77	30.27
Teapoy	34.67	33.52	32.68	36.53	34.65	34.67	33.52	32.68	32.73	34.67	33.52	32.68
Lena	37.59	32.53	28.97	38.83	34.57	31.53	37.13	32.97	29.13	38.76	33.13	28.97
Peppers	36.78	33.79	29.81	36.57	33.73	31.78	36.17	33.21	29.74	36.38	32.79	29.41
Barbara	31.97	27.51	25.43	32.74	30.52	29.97	31.97	28.13	27.72	31.97	28.51	25.43
finger	32.97	30.47	26.53	33.18	31.52	28.17	31.47	30.13	27.37	33.17	30.47	28.53
goodhill	30.07	27.95	24.67	31.25	28.39	27.07	30.45	27.67	26.19	30.47	27.95	24.67

对大小为 256×256 的256级灰度的 CT 标准图像、茶几标准图像 (teapoy)、Lena 图像、peppers 图像、barbara 图像、finger 图像、goodhill 图像进行压缩试验。其中 Lena 为自然图像,包含大量的中、低频信息且不包含交错图案;peppers 图像含有大量的低频信息;barbara 图像是一幅含有大量高频内容和交错图案的自然图像;finger 图像含有大量的纹理图案;

goodhill 图像包含局部光滑区域且包含高频纹理和突变区域。试验结果如表1所示,可以看出,Bighm 双正交小波最适宜压缩含有大量高频、纹理图案的自然图像;虽然 Sam 多小波只是一阶逼近,但由于 Sam 小波具有良好的特性,其对于大部分图像都具有良好的压缩效果。图10是对 CT 图像采用 Sam 多小波进行分解,选择对应的 EZW 编码改进方法进行

32:1压缩后的恢复效果。图11是对茶几图像采用 Bighm 多小波进行分解,选择对应的 EZW 编码改进方法进行32:1压缩后的重构结果。实验表明,选择合适的多小波进行分解可以在保证质量前提下,获得高的压缩比,而且重构后的图像质量较优。表明多小波在图像压缩方面将有更好的应用潜力,这与多小波在理论上所具有的优秀性质是一致的。



(a) CT 原图 (b) 32:1 重构结果

图10 CT 图像与还原后结果



(a) 原图 (b) 32:1 重构结果

图11 茶几图像与还原后结果

结论 传统的图像压缩方法存在着压缩比小的问题。在大压缩比情况下,重构后的图像质量较差。小波具有极强的多分辨分析能力,所以通过小波变换进行图像压缩已经成为一种重要图像压缩方法^[11]。基于单小波的图像压缩已经取得了很大的进展。相比于单小波,多小波具备对称性,短支撑性,二

阶消失矩和正交性等一系列优点,所以多小波在信号处理方面比单小波更有优势。提了一种新的基于小波变换的图像压缩算法,该方法以多小波变换为依据,通过对图像进行预滤波,离散多小波变换来实现图像的多小波分解。并根据多小波的分解特性,对不同的多小波提出不同的编码方法。实验结果表明:根据图像的频率分布特性,选择相应的多小波进行分解,并使用对应的编码方法进行编码,可以获得较为理想的压缩效果,在图像质量几乎不下降的情况下,极大地提高了压缩比。

参考文献

- 1 Mallat S. A Wavelet Tour of signal Processing[M]. Boston: Academic Press, 1998
- 2 Mallat S. A theory for multi-resolution decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 1998, 11(7): 674~693
- 3 Donoho D, Johnstone I. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81: 425~452
- 4 Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image code based on set partitioning in hierarchical trees[J]. IEEE Trans on Circuits and System for Video Tech. , 1996, 6(3): 243~249
- 5 Chai B-B, Vass J. Significance-linked connected component analysis for wavelet image coding[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1999, 8(6): 77~83
- 6 Taubman H. High performance scalable image compression with EBCOT[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9(7): 1157~1168
- 7 Goodman T N T, Lee S L. Wavelet of multiplicity[J]. Trans, Amer Math Soc, 1994, 338(2): 639~652
- 8 Geronimo J, Hardin D. fractal functions and wavelet expansions based on several functions[J]. J Approx Theory, 1994, 78: 373~401
- 9 Geronimo J, Hardin D. construction of orthogonal wavelets using fractal interpolation functions[J]. SIAM J Math Anal, 1996, 27: 1158~1192
- 10 Shapiro J M. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(12): 3445~3461
- 11 Cotronci M, Iazzaro D. Image compression through embedded multi-wavelet transform coding[J]. IEEE trans on Ip. , 2000, 9(2): 184~189

(上接第22页)

识,相应的先进方案研究刚刚开始。由于 IPv6 还未进入大规模商业部署,IPv6 为研究者提供了灵活研究空间,关于网络移动支持的研究主要集中在如何提供 IPv6 网络移动支持。双向隧道法是基于移动 IPv6 的最小扩展方法,简单安全,适用于纯 IPv4 网络或纯 IPv6 网络。随着 IPv4 向 IPv6 过渡,如何在 IPv4/IPv6 混合网络下提供网络移动支持,对双向隧道法构成新的挑战。

参考文献

- 1 Ernst T. Network Mobility Support in IPv6; [PhD thesis]. Université Joseph Fourier, October 2001. <http://www.inria.fr/rrrt/tu-0714.html>
- 2 Lach Hong-Yon, Petrescu Janneteau C, A. Network Mobility in Beyond 3G systems. Communications Magazine, IEEE, July 2003, 41(7)
- 3 Wolff M. Evaluation of Mobility Management Approaches for IPv6 based Mobile Car Networks. KiVS 2003, Leipzig, 25-28th February 2003
- 4 Ernst T, Uehara K, Mitsuyaz K. Network mobility from the InternetCAR perspective. In: Proc. of the 17 th Intl. Conf. on Advanced Information Networking and Applications, March 2003
- 5 Kim J H, Leung K, Echols K, Shel D, Denny M. Demonstration of Static Network Mobile Router for Mobile Platforms. Military Communications Conference, Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force, 2001
- 6 Ivancic W D, Stewart D H, Bell T L, Paulse P E, Shell D. Securing Mobile Networks in an Operational Setting. Computer Communications, 2003. CCW 2003. In: Proc. 2003 IEEE 18th Annual

Workshop on, Oct. 2003. 139~147

- 7 Stewart D H, Bell T L, Kachmar B A, et al. Mobile router technology development. In: Proc. of the 4th ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, July 2001
- 8 Ivancic W D, Stewart D, Bell T L, et al. Mobile-IP Priority Home Agents for Aerospace and Military Applications. IEEE Aerospace Conference 2004, Big Sky, Montana, March 2004
- 9 Stewart D H, Ivancic W H, Bell T L, et al. Application of Mobile Router to Military Communications. Military Communications Conference, 2001. MILCOM 2001. Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force. IEEE, Oct. 2001, 1: 28~31
- 10 Ernst T, Lach H-Y. Network Mobility Support Terminology. (draft-ietf-nemo-terminology-0), work in progress, Feb. 16, 2004
- 11 Ernst T. Network Mobility Support Goals and Requirements. (draft-ietf-nemo-requirements-02), work in progress, Feb. 2004
- 12 Devarapalli V, Wakikawa R, Petrescu A, Thubert P. Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol. (draft-ietf-nemo-basic-support-02), Dec. 2003
- 13 Johnson D B, Perkins C E, Arkko J. Mobility support in ipv6. (draft-ietf-mobileip-ipv6-24), June 2003
- 14 Lee K, Jeong J, Park K, Kim H. Route Optimization for Mobile Nodes in Mobile Network based on Prefix Delegation. (draft-ietf-nemo-ro-pd-02), Feb. 2004
- 15 Jeong J, Lee K, Park J, Kim H. ND-Proxy based Route and DNS Optimizations for Mobile Nodes in Mobile Network. (draft-jeong-nemo-ro-ndproxy-02), February 2004
- 16 Thubert P, Molteni M. IPV6 Reverse Routing Header and its Application to Mobile Networks. (draft-thubert-nemo-reverse-routing-header-03), Oct. 2003
- 17 Choi J K. Mobile IP Services over MPLS. draft new Recommendation Y. MIPoMPLS presented at ITU-T SG 13 meeting, 21 July-1 Aug. 2003