可逆线性变换的整型化及其应用*

朱桂斌[1,2], 张邦礼[1]

[1](重庆大学 自动化学院,重庆 400044);

[2](重庆通信学院 研究生管理大队,重庆 400035)

E-mail: zhuguib@cta.cq.cn

http://www.cqu.edu.cn

摘要: 对可逆的线性变换进行了改造,使之成为整数到整数的变换.首先介绍了 3 类基本的整数可逆变换,在此基础上,通过对给定线性变换的矩阵分解,给出了一个可逆线性变换整型化的充要条件及其构造方法.该整型变换是可逆的,因此非常适合于无失真的数据处理,如语音或图像的无损压缩.

关 键 词: 整数;线性变换;矩阵分解;提升;数据压缩

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

线性变换在数字信号处理领域里有着广泛的应用,如 DFT(discrete Fourier transform),DCT(discrete cosine transform),KLT(Karhumen-Loeve transform),WT(wavelet transform)等.一般来说,对数字信号进行处理时,原始数据是整型数据,而线性变换的变换系数通常是实数或复数,变换结果又要量化为整型数据.在这一过程中通常会产生两类误差:一类是计算机浮点运算的精度误差;另一类是浮点数据整型化时的舍入误差,它在数量级上要远远大于浮点精度误差.这种误差破坏了变换的可逆性,因而不能保证使数据无失真地恢复.本文针对这一问题进行了研究,实现了整数空间在实数域或复数域上的可逆变换,我们称这一过程为线性变换的整型化.必须指出的是,这种变换已经不再是线性变换了,但是为了体现它和与其对应的线性变换的紧密联系,我们仍称其为线性变换,请读者注意区分.

对某几种特殊类型的线性变换的整型化问题,已有一些国家的学者对其进行了研究,提出了相应的解决办法.在文献[1]中,Daubechies,Sweldens 采用提升的方法对小波变换进行了改造,使其成为整数到整数的小波变换.文献[2]中提到,J.Hong 在其博士论文中已经解决了 Fourier 和 Cosine 变换的可逆性问题.闫宇松、石青云在文献[3]中使用提升的方法,也完成了 FFT(fast Fourier transform)与 DCT 的可逆性构造.闫宇松、石青云在文献[2]中针对颜色空间转换的具体问题,构造了相应的整型变换方法,但是对一般的线性变换,文献[2]只给出了一个十分不易计算的充分条件,且没有给出变换的具体构造方法.

本文借鉴了文献[1]所阐述的由整数到整数的可逆变换思想,给出了任一线性变换 A 可整型化的充分必要条件,即 $|\det(A)|\geq 1$,并且给出线性变换整型化的具体构造方法,从而将上述各种线性变换的整型化方法统一到一个框架之中.其基本思想是分析线性变换的变换矩阵,将满足条件的变换矩阵进行分解,使其能用一系列基本的整型可逆变换矩阵的乘积来表示,这样就可以根据该线性变换构造一个与其性能相似且整型可逆线性变换.理论分析及实验结果表明,使用本文提出的方法所构造的整数线性变换,会使变换后数据的动态范围最小,在这一点上本文的结果优于文献[2,3]中的结果.

本文第 1 节介绍 3 类基本的可逆整数变换,并简述提升的基本原理和方法.第 2 节给出了任一线性变换可

* 收稿日期: 2000-10-16; 修改日期: 2001-01-15

基金项目: 国家教育部博士点基金资助项目(98061117)

作者简介: 朱桂斌(1972－),男,河北张家口人,博士生,讲师,主要研究领域为人工神经网络,小波理论,计算智能,图像处理;张邦礼(1941－),女,重庆人,教授,博士生导师,主要研究领域为人工神经网络,小波理论,计算智能.

整型化的充分必要条件,并通过证明给出了该整数变换的具体构造方法.第 3 节对本文提出的算法的性能进行了分析,并与文献[2,3]中提出的方法进行了比较.第 4 节给出了结论及进一步工作的建议.

1 基本的可逆整数线性变换

本节将介绍几个基本的可逆整数线性变换.由于线性变换与一个矩阵相对应,本文以下将只对此矩阵进行分析.我们首先讨论实矩阵,对于复矩阵的情况将在第 2 节中加以讨论.

(1) 置换矩阵

置换矩阵即是单位矩阵经有限次行变换(或列变换)所形成的矩阵.由于它只改变输入数据的相对位置,故显然是整数可逆的.

(2) 元素的绝对值均不小于 1 的对角阵

对于如下变换:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_2 & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & d_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \tag{1}$$

其中$(x_1\ x_2\ \ldots x_n)^T$为输入,$(y_1\ y_2\ \ldots y_n)^T$为输出,$(d_1\ d_2\ \ldots d_n)^T$为对角阵元素且满足$|d_i| \ge 1$,我们则可以构造出它所对应的整数变换为

$$y_i = \lfloor x_i \cdot d_i + 0.5 \rfloor, \tag{2}$$

其中$\lfloor x \rfloor$表示 x 的整数部分,加入 0.5 是为了减小取整误差.我们从式(2)可以看出,如果输入 x_i 为整数,那么经过计算得到的 y_i 也必定为整数.同时,我们可以得到变换式(2)的逆变换式:

$$x_i = \left\lfloor \frac{y_i}{d_i} + 0.5 \right\rfloor. \tag{3}$$

显然,式(2)和式(3)是一对可逆变换.

(3) 单位三角阵

我们首先以上三角矩阵为例来构造它的整数变换形式.对于如下变换:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ 0 & 1 & a_{2,3} & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & a_{n-1,n} \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \tag{4}$$

其中 $a_{i,j}$ 为任意实数,我们可以构造它所对应的整数变换为

$$\begin{aligned} y_n &= x_n, \\ y_{n-1} &= x_{n-1} + \lfloor a_{n-1,n} \cdot x_n + 0.5 \rfloor, \\ &\vdots \\ y_1 &= x_1 + \left\lfloor \sum_{i=2}^{n} a_{1,i} \cdot x_i + 0.5 \right\rfloor. \end{aligned} \tag{5}$$

我们从式(5)可以看出,如果输入 x_i 为整数,那么经过计算得到的 y_i 也必定为整数.因此,式(5)是一个整数到整数的变换,且它是可逆的,我们可以得到式(5)的逆变换式:

$$\begin{aligned} x_n &= y_n, \\ x_{n-1} &= y_{n-1} - \lfloor a_{n-1,n} \cdot x_n + 0.5 \rfloor, \\ &\vdots \\ x_1 &= y_1 - \left\lfloor \sum_{i=2}^{n} a_{1,i} \cdot x_i + 0.5 \right\rfloor. \end{aligned} \tag{6}$$

式(6)所表示的是,如果我们获得了一系列整数 y_i ,可以首先通过 y_n 重建 x_n ,再通过 y_{n-1} 和 x_n 重建 x_{n-1} ,这样一直计算下去,直到 x_1 被重建.容易看出,式(6)也是整数的变换,并且这种变换相对于式(5)来说是真正可逆的.类似地,单位下三角矩阵也能够找到它所对应的可逆整数变换.文献[1]将这种整型变换的构造方法叫作提升(lifting),并将这种单位三角矩阵称为提升矩阵.

显然,由上述 3 类整数线性变换级联所形成的变换亦为整数线性变换,且可以找到它的逆变换形式.这样,如果对于一个给定的线性变换矩阵 A,如果它可以分解为若干个上述 3 种类型的矩阵的乘积,则只要对其中每一个矩阵分别找到它所对应的可逆整型变换,然后按分解顺序依次变换,就可以构造出整个变换的整型变换.下面我们将给出变换矩阵可分解为上述 3 种矩阵的乘积的条件和具体的分解方法.

2 线性变换的整型化

本节主要讨论线性变换整型化的条件和实现方法.我们首先在第 2.1 节中介绍实数矩阵的整型化问题,然后在第 2.2 节中将之推广到复数矩阵,最后介绍算法的实现问题.

2.1 实数域的整型化

定理 **2.1**. 给定 n 阶可逆方阵 A,总可以找到一个置换矩阵 P、一个对角阵 Q 和若干个单位上、下三角阵 L,R,使 A 等于这些矩阵的乘积,其中 Q 的前 n–1 个对角元素为 1,记为 $A=PQL^mR^n$.

证明:由文献[4]可知,若 A 可逆,则存在一个置换矩阵 P,使 PA 的各阶顺序主子式为

$$\Delta_k = \begin{vmatrix} pa_{11} & pa_{12} & \cdots & pa_{1k} \\ pa_{21} & pa_{22} & \cdots & pa_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ pa_{k1} & pa_{k2} & \cdots & pa_{kk} \end{vmatrix} \neq 0, (k = 1,2,\dots,n). \tag{7}$$

即可对 PA 作 LDR 分解,其中 L 为单位下三角矩阵,R 为单位上三角矩阵,D 为对角矩阵.则 $A=P^{-1}L^mDR^n$,其中 P^{-1} 亦为置换矩阵.若 D 能分解为 Q 和若干个单位上、下三角阵 L,R 的乘积,即 $D=QL^mR^n$,则定理得证.

现用数学归纳法加以证明.D 的阶数为 1 时定理显然成立.现设 D 的阶数为 k–1 时定理成立,考虑 D 的阶数为 k 时的情况.记

$$D_k = \begin{pmatrix} D_{k-1} & 0 \\ 0 & d_k \end{pmatrix}, \tag{8}$$

由归纳假设知 $D_{k-1} = Q_{k-1}L_{k-1}^m R_{k-1}^n$,其中

$$Q_{k-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \vdots \\ 0 & \cdots & \prod_{i=1}^{k-1} d_i \end{pmatrix}, \tag{9}$$

则

$$D_k = \begin{pmatrix} I_{k-2} & & \\ & \prod_{i=1}^{k-1} d_i & \\ & & d_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_{k-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^m \begin{pmatrix} R_{k-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^n. \tag{10}$$

记 $q_{k}=\prod_{i=1}^{k} d_i$,对式(10)中的第 1 个矩阵可作如下分解:

$$\begin{pmatrix} I_{k-2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & q_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{k-2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{1-q_{k-1}}{q_{k-1}^{\ 2}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{k-2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & q_{k-1} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{k-2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{q_{k-1}-1}{q_{k-1}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{k-2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{11}$$

式(11)中后 4 个矩阵都为单位上、下三角矩阵,第 1 个矩阵为 Q_k,故 $D_k = Q_k L_k^m R_k^n$. □

定理 **2.2**. 给定 n 阶可逆实方阵 A,可以建立从 $R^n \to R^n$ 的可逆线性变换,则可以从 A 构造出从 $Z^n \to Z^n$ 的可逆整数变换的充分必要条件为 $|\det(A)| \ge 1$.

证明:先证充分性.由定理 2.1 可知,当 A 可逆时,$A=PQL^mR^n$,其中 P 为上节介绍的第 1 类整数可逆矩阵,L,R 为第 3 类整数可逆矩阵.由定理 2.1 的证明过程可知,Q 的最后一个元素为 $\det(A)$,故当 $|\det(A)| \ge 1$时,Q 成为第 2 类整数可逆矩阵.A 为各整数可逆矩阵的乘积,故可以从 A 构造出从 $Z^n \to Z^n$ 的可逆整数变换.充分性证毕.

再证必要性.由 $A=PQL^mR^n$ 可知,$Q=P^{-1}A(L^{-1})^m(R^{-1})^n$.因为从 A 可构造出从 $Z^n \to Z^n$ 的可逆整数变换,而 P^{-1},L^{-1},R^{-1} 仍为第 1、2 类整数可逆矩阵,故 Q 亦为整数可逆矩阵,故 Q 最后一个元素的绝对值不小于 1,即 $|\det(A)| \ge 1$. □

定理 2.2 中的 A 是实数矩阵.其实,若 A 是复数矩阵,定理仍然成立,下面简要说明.

2.2 复数域的整型化

我们首先介绍复整数的概念.任何一个复数,如果它的实部和虚部都是整数,我们就称之为复整数.对于任一个复数 $c = c_r + c_i \cdot i$,定义 $\lfloor c \rfloor = \lfloor c_r \rfloor + \lfloor c_i \rfloor \cdot i$.由定理 2.2 的证明过程可知,只要对第 2 节介绍的 3 类基本矩阵在复数域上找到复整数可逆变换,则问题得到说明.

显然对于第 1 类矩阵,即置换矩阵,可简单地推广到复数域.对第 3 类矩阵,即单位上三角矩阵(见式(10)),作如下变换:

$$y_k = x_k + \left\lfloor \sum_{j=k+1}^{n} a_{k,j} x_j + 0.5 + 0.5i \right\rfloor, \tag{12}$$

其中 x,y,a 为复数,逆变换为

$$x_k = y_k - \left\lfloor \sum_{j=k+1}^{n} a_{k,j} x_j + 0.5 + 0.5i \right\rfloor. \tag{13}$$

易见式(12)、(13)构成一对复整数型的互逆变换,对于单位下三角矩阵可得类似的结果.对于第 2 类矩阵,即元素的绝对值均不小于 1 的对角阵(见式(1)),记

$$y_k = (y_{kr} \quad y_{ki} \cdot i)^T,\quad x_k = (x_{kr} \quad x_{ki} \cdot i)^T,\quad d_k = (d_{kr} \quad d_{ki} \cdot i)^T,$$

则

$$\begin{pmatrix} y_{kr} \\ y_{ki} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{kr} & -d_{ki} \\ d_{ki} & d_{kr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{kr} \\ x_{ki} \end{pmatrix}. \tag{14}$$

由 $|d_k| \ge 1$ 知 $\begin{vmatrix} d_{kr} & -d_{ki} \\ d_{ki} & d_{kr} \end{vmatrix} \ge 1$,式(14)满足定理 2.2 的条件,可找到可逆的整型变换,所以第 2 类矩阵在复数域上亦可找到可逆的整型变换.故定理 2.2 可推广到复数域.

2.3 算法的实现

由定理 2.1、定理 2.2 可知,并不是所有的可逆矩阵 A 都可以得到整型变换,当给定的线性变换 A 不满足定理 2.2 的条件时,就必须对它进行改造;另外,为了数据的后续处理,通常应使变换后数据的动态范围尽量地小,故也需对给定的线性变换 A 进行改造.由定理 2.2 可知,要使 A 成为整数可逆的,则 $|\det(A)| \ge 1$,而为了使变换后数据

的动态范围尽量地小,要求 $|\det(A)|$ 尽量地小,所以对 A 进行改造的目标是使 $|\det(A')|=1$,这里 A' 是由 A 改造而得到的线性变换.对 A 改造的方法是用一个扩展因子 A'' 左乘或右乘 A,通常取 A'' 为对角矩阵,且满足 $\det(A'')=1/|\det(A)|$,这样做既满足可逆的条件,又使变换后数据的动态范围尽量小,而且简单易行.下面对整型变换算法的基本过程作简要介绍:

(1) 对于给定的线性变换 A,如是常见的正交变换,则进行(2),否则对其进行改造,使 $|\det(A')|=1$.

(2) 按定理 2.1 的证明过程,将 A'分解为 3 类基本矩阵.

(3) 对于每一个基本矩阵,构造其整数变换,获得整数输出.

(4) 由于每一步都有相应的逆变换,所以,整个变换的逆变换可以相应地获得.

(5) 对于多维可分离的线性变换,正变换可以逐维地计算;为了保证逆变换对多维数据的完全重建,应严格按照与正变换相反的次序进行逆变换.

3 算法的性能

本节主要对上节提出的算法的性能进行分析,并与文献[2,3]中提出的方法进行比较.

评价一个可逆变换,我们主要从两方面来进行:一是变换以后数据的动态范围要小,二是算法的复杂性要小.

3.1 数据的动态范围

与文献[2,3]所提出的方法相比,用本文提出的算法所得到的数据的动态范围是最小的.对于正交变换,影响输出数据动态范围的因素只有数据取整时的舍入误差.文献[3]利用提升的方法构造 FFT 与 DCT 相对应的整型变换,除取整时的舍入误差外,还将输出数据范围增大 $\sqrt{2}$ 倍.对于 $|\det(A)|>1$ 的线性变换,本方法可构造一个动态范围扩展因子,压缩数据的动态范围.对于 $|\det(A)|<1$ 的线性变换,本方法可构造一个最小的动态范围扩展因子.文献[2]针对 RGB 到 YC_bC_r 颜色空间转换这一具体问题,求出的动态范围扩展因子为 $\alpha_Y=1.041667$, $\alpha_{Cb}=2.173913$, $\alpha_{Cr}=2.631579$,三者的乘积为 5.9592.用本方法求出的动态范围扩展因子为 $\alpha_Y=1$, $\alpha_{Cb}=2.0572$, $\alpha_{Cr}=2.0572$,三者的乘积为 4.2323,要小于文献[2]近 30%.附录给出用本算法求出的整型化结果.

3.2 算法复杂性

用本算法来计算整数到整数的线性变换,虽然要用到大量的矩阵,但它们都是稀疏矩阵,故其复杂性可由其中的非零元素的数量来度量.在最坏情况下,其乘法次数为$(N+3)(N-1)$,加法次数为$(N+4)(N-1)$.然而在给定变换 A 的情况下,算法可作进一步的优化,即在将对角矩阵 $D=\mathrm{diag}(d_1,d_2,\ldots,d_N)$分解的时候,如先将其元素进行分组,使每一组内各元素的乘积为 1(或−1),则在这一组内分解的最后一步得到

$$\begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 1/d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -d \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1/d & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & d & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \tag{15}$$

其乘法次数减少 $3(K-1)$,加法次数减少 $4(K-1)$,其中 K 为能分组的数目.具体地,对于计算 8 点的 DCT,本算法的乘法次数为 57,文献[3]采用 FFT 计算 DCT,在将数据范围增大 $\sqrt{2}$ 的条件下,乘法次数减少到 47 次.如用常用的 DCT 浮点算法($2N$ 点 FFT),则需用 $\frac{2}{n}\log_2 n=32$ 次复数乘法,相当于 128 次实数乘法.可见当 N 数值比较小时,本算法的运算次数还是比较少的.

4 结 论

本文使用矩阵分解的方法,对可逆的线性变换进行了改造,使之成为整数到整数的可逆变换.本文给出了任一线性变换 A 可整型化的充分必要条件,即 $|\det(A)|\geq 1$,并且给出线性变换整型化的具体构造方法,从而将各种

线性变换的整型化方法统一到一个框架之中.变换本身是可逆的,因此非常适合于无失真的数据处理,如语音或图像的无损压缩等领域.由定理 2.1 的证明过程可知,对于一个给定的线性变换,构造出的整型变换有其多样性,而这些整型变换与原线性变换在性能上的差异将是我们下一步研究的内容.

致谢 重庆大学自动化学院曹长修教授对本文工作给予了细心指导,重庆通信学院乔秀琴同志对本文的完成提出了很多有益建议,在此一并表示感谢.

References:

[1] Daubchies, I., Sweldens, W. Factoring wavelet transforms into lifting steps. Technical Report, Bell Laboratories, Lucent Technologies, 1996.

[2] Yan, Yu-song, Shi, Qing-yun. Reversible color space transform. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1999,12(1):38~44 (in Chinese).

[3] Yan, Yu-song, Shi, Qing-yun. Reversible DCT mapping integers to integers and lossless image compression. Journal of Software, 2000,11(5):620~627 (in Chinese).

[4] Wang, Chao-rui, Shi, Rong-chang, Matrix Analysis. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1987.

附中文参考文献:

[2] 闫宇松,石青云.颜色空间之间的可逆变换.模式识别与人工智能,1999,12(1):38~44.

[3] 闫宇松,石青云.可逆的 DCT 整型变换与无失真图像压缩.软件学报,2000,11(5):620~627.

[4] 王朝瑞,史荣昌.矩阵分析.北京:北京理工大学出版社,1987.

附录

文献[2]所讨论的颜色空间转换的形式如下:

$$\begin{pmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2990 & 0.5870 & 0.1140 \\ -0.1687 & -0.3313 & 0.5000 \\ 0.5000 & -0.4187 & -0.0813 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \tag{A1}$$

用本文的算法将其整型化,结果如下:

(1) 引入扩展因子 diag(1,2.0572,2.0572)后,式(A1)变为

$$\begin{pmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2990 & 0.5870 & 0.1140 \\ -0.3471 & -0.6815 & 1.0286 \\ 1.0286 & -0.8613 & -0.1673 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \tag{A2}$$

(2) 对上式的矩阵进行分解,写成如下形式:$T_1T_2T_3T_4T_5T_6$,其系数见表 1.

Table 1 Result of matrix decomposition of color space transform

表 1 颜色空间转换矩阵的分解结果

T_1:	0	0	1	T_2:	1	0	0	T_3:	1	−1.0286	0
	0	1	0		−0.3375	1	0		0	1	0
	1	0	0		0.2907	−0.8613	1		0	0	1
T_4:	1	0	0	T_5:	1.0286	1	0	T_6:	1	−0.8374	−0.1626
	0.9722	−1	0		1	0	0		0	−1	1
	0	0	1		0	0	1		0	0	1

(3) 对表中每一个矩阵构造可逆的整数变换,则整个可逆变换的构造完成.

Integer Version of Reversible Linear Transform and Its Application*

ZHU Gui-bin[1,2], ZHANG Bang-li[1]

[1](*Automation College*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*);

[2](*Postgraduate Department*, *Chongqing Communication Institute*, *Chongqing* 400035, *China*)

E-mail: zhuguib@cta.cq.cn

http://www.cqu.edu.cn

Abstract: In this paper, a method to construct an integer version of the linear transform is presented so that the integers of input data can be mapped to integers. Based on the introduction of three kinds of basic integer reversible transform, by means of matrix decomposition, the sufficient and essential condition that a linear transform can be rebuilt into integer version and its construction method are proposed. The transform is reversible, so it is suitable to the lossless data processing such as the lossless digital audio or image compressions.

Key words: integer; linear transform; matrix decomposition; lifting; data compression

---

* Received October 16, 2000; accepted January 15, 2001

Supported by the National Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education of China under Grant No.98061117