

基于 3D 曲面模型的数字水印算法^{*})

李 军 余 娅

(湖北民族学院信息工程学院 恩施 445000)

摘 要 本文给出了一种 NURBS 曲面模型的三维数字水印算法。该算法不直接将水印信息嵌入到 NURBS 曲面的参数中,而是对原始 NURBS 曲面模型进行修改,通过映射成虚拟 2D 图像,利用已有的 DCT 域图像水印嵌入算法将信息嵌入到 2D 图像中,再对 2D 图像进行提取产生新的 NURBS 曲面水印模型。该算法对于控制顶点、节点向量的改变以及模型表面的近似等操作具有鲁棒性。

关键词 水印算法, NURBS 曲面, 鲁棒

Algorithm for 3D Surface Model Digital Watermarking

LI Jun YU Ya

(College of Information Engineering, Hubei Institute for Nationalities, Enshi 445000)

Abstract In this paper, we have proposed algorithm for watermarking NURBS. The algorithms do not directly embed data into the parameters of NURBS, but into the 2D virtual images extracted from the sampled points of 3D model. As a result, the watermarking algorithm can use any of existing 2D watermarking techniques when embedding data into the virtual 2D images. From the experiment, it is found that the algorithm is robust against the operations to knots and control points.

Keywords Watermarking algorithms, NURBS surface, Robust

1 引言

近年来,由于网络和数字媒体的迅速发展,数字媒体的应用变得更加广泛。通过许多现有的工具和 Internet 网络,使得人们获取、复制、处理和发布这些媒体的内容相对更容易,这种便利性也被一些非法盗版者用来损害产品生产者的合法权益。由于数字媒体可能存在的盗版问题,使得媒体的创作者不愿意以数字媒体形式出版或发行自己的原创作品。作为对传统加密技术的一种有效补充,数字水印技术因其独有的不可见性和鲁棒性,正成为一种越来越有效的版权声明技术而受到各方面的重视^[1]。数字水印技术大体可分为空域水印和频域水印两类。空域数字水印技术^[2]利用 HVS 视觉掩盖模型直接对图像序列进行处理,算法相对简单快速,但水印对噪声和常见图像压缩的鲁棒性较差;频域数字水印技术^[2]利用适当变换域系数,结合 HVS 模型选取水印分布强度,使水印不可见性和鲁棒性提高较大,并对常见压缩处理有更好的抵抗力。近年来三维数字媒体大幅度的增加,但是有关三维数字水印的研究成果不多。文^[3]R. Ohbuchi 提出了利用重新参数化的方法在 NURBS 曲线和曲面的节点向量中嵌入水印的算法,算法首先利用有理线性函数将原始模型的节点向量(Knot Vector)重新参数化,然后将水印信息嵌入到参数化后的节点向量中,该算法精确保持了 NURBS 曲线和曲面的形状及大小,但是当嵌入的信息有原始模型时将被发现。本文给出了一种基于 Bezier 曲面模型的数字水印算法,该算法不直接将水印信息嵌入到 Bezier 曲面的参数中,而是对原始 Bezier 曲面模型进行修改,通过映射成虚拟 2D 图像,利用已有的 DCT 域图像水印嵌入算法将信息嵌入到 2D 图像中,再对 2D 图像进行提取产生新的 Bezier 曲面水印模型,产生的

水印模型有效地控制了对节点矢量的攻击。实验测试的结果表明,本算法较以前水印算法具有更好的不可见性,对于控制顶点、节点向量的改变以及模型表面的近似等操作具有鲁棒性。

2 NURBS 曲面的定义

NURBS 曲面由下式定义^[4]:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(u, v) P_{i,j} \quad (1)$$

$$\text{其中 } R_{i,j}(u, v) = \frac{N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)\omega_{i,j}}{\sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m N_{k,p}(u)N_{l,q}(v)\omega_{k,l}} \quad (2)$$

式中 $P_{i,j}$ 为控制顶点, $\omega_{i,j}$ 为权因子, $N_{k,p}(u)$ 和 $N_{l,q}(v)$ 分别为沿 u 向的 k 次和沿 v 向的 l 次 B 样条基函数。B 样条基函数由下面的递推公式定义:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (3)$$

u 向和 v 向的节点矢量分别为

$$U = \{ \underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1} \}$$

$$V = \{ \underbrace{a, \dots, a}_{q+1}, v_{q+1}, \dots, v_{s-q-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{q+1} \} \quad (4)$$

沿 u 向和 v 向的节点矢量的节点数分别为 $(r+1)$ 和 $(s+1)$ 。其中 $r = n + p + 1, s = m + q + 1$ 。

3 NURBS 曲面模型水印算法

算法的基本思想是先从三维 NURBS 模型 $W(u, v)$ 中提取二维虚拟图像点 $x(u, v), y(u, v), z(u, v)$, 其中 x, y, z 是三

^{*})湖北省科技攻关项目(项目号:2004AA210B03)。李 军 硕士,副教授,主要研究方向为:计算机图形学、图像及多媒体信息处理。

维空间的坐标点, $W(u, v)$ 是从三维原始 NURBS 模型 $S(u, v)$ 中通过一系列操作而来。再用现有二维 DCT 域图像水印嵌入算法将水印嵌入到产生的二维虚拟图像中, 使水印的每一个像素值与新的曲面相匹配。最后从水印二维虚拟图像中提取水印采样序列, 这些采样点序列便产生了一个新的水印 NURBS 模型。其产生过程如图 1 所示。

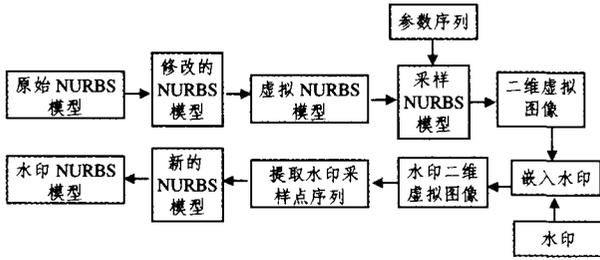


图 1 NURBS 水印模型采样过程结构图

设 NURBS 模型的权因子恒为 1, 则由(1)式得:

$$V(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) P_{i,j} \quad (5)$$

其中 $P_{i,j}$ 是原始模型的控制顶点, 其矩阵表达式为:

$$V(u, v) = [N_{e,p}(u)]^T [P_{e,f}] [N_{f,q}(v)] \quad (6)$$

其中 $0 \leq e \leq n, 0 \leq f \leq m$ 。则虚拟模型曲面 $W(u, v)$ 的矩阵表达式为:

$$[W(u_\alpha, v_\beta)] = [V(u_\alpha, v_\beta)] + \gamma [P_{e,f}] [N_{f,q}(v_\beta)] + \delta [N_{e,p}(u_\alpha)]^T [P_{e,f}] + \gamma \delta [P_{e,f}] \quad (7)$$

其中 $\{u_\alpha\}, \{v_\beta\}$ 为曲面 u, v 方向的采样参数序列, $\alpha=0, 1, \dots, n, \beta=0, 1, \dots, m, 0 \leq e \leq n, 0 \leq f \leq m, \gamma, \delta$ 为任意实数, 则采样点为 $(n+1) \times (m+1)$, 由(7)式可表示为:

$$[W(u_\alpha, v_\beta)] = [[N_{e,p}(u_\alpha)] + \gamma I_{(n+1)}]^T [P_{e,f}] [[N_{f,q}(v_\beta)] + \delta I_{(m+1)}] \quad (8)$$

沿 u 向和 v 向的节点矢量的节点数分别为 $(r+1)$ 和 $(s+1)$ 。

下面的算法得到了水印 NURBS 曲面模型的采样序列 $\{u'_\alpha\}, \{v'_\beta\}$ 。

3.1 在曲线 $C(u)$ 上计算 $k+1$ 个等距点的参数 $u'_i (i=0, 1, \dots, k)$

1) 初始化 $u'_i, d_i=0, \bar{d}=1$

$$u'_i = u_p + \left(\frac{u_{m-p} - u_p}{k} \right) i \quad (i=0, 1, \dots, k)$$

2) while $\forall i, \frac{|\bar{d}-d_i|}{\bar{d}} > \epsilon // \epsilon$ 为指定公差

a) 计算参数 u'_i 在曲线 $C(u)$ 上的平均距离 \bar{d}

$$d_i = |C(u'_i) - C(u'_{i-1})| \quad (i=0, 1, \dots, k)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^k d_i}{k}$$

b) if $\forall i, \frac{|\bar{d}-d_i|}{\bar{d}} \leq \epsilon$ break

c) 对参数 u 进行线性插值

For $(i=1; k; i++)$

$$\text{if } \bar{d} > \frac{\sum_{i=1}^i d_i}{i}$$

$$u'_i \leftarrow u'_{i-1} + \frac{u'_i - u'_{i-1}}{d_i} (\bar{d} \cdot i - \sum_{j=1}^i d_j)$$

3.2 在曲面 $S(u, v)$ 上计算 $(k+1) \times (l+1)$ 个等距点的参数 $u'_i (i=0, 1, \dots, k), v'_j (j=0, 1, \dots, l)$

1) 用参数 u 计算参数 v 的平均值 \bar{v}

a) For $(i=1, k; i++)$

$$u'_i = u_p + \left(\frac{u_{r-p} - u_p}{k} \right) i$$

b) 调用程序 1, 在曲线 $C_{u'_i}(v)$ 上计算 $(l+1)$ 个等距点的参数 $v'_j |_{u'_i}$

$$c) \bar{v}_j = \frac{\sum_{i=1}^l v'_j |_{u'_i}}{k+1}$$

2) 参照 1) 用 v 参数计算 u 参变量的平均值 \bar{u}

3) 用 u 参变量计算 $(l+1)$ 个等距点的 v 参变量 v'_j

a) For $(i=1; k; i++)$

调用程序 1, 在曲线 $C_{u'_i}(v)$ 上计算 $(l+1)$ 个等距点的 v 参变量 $v'_j |_{u'_i}$

$$b) v'_j = \frac{\sum_{i=1}^l v'_j |_{u'_i}}{k+1}$$

4) 参照 3) 用参数 v 计算 $(k+1)$ 个等距点的参数 u'_i

上面算法产生 u, v 方向的参数序列 $\{u'_\alpha\}, \{v'_\beta\}$ 。设

$\{V_{\alpha,\beta}\}$ 为水印 NURBS 模型统一采样点序列, $\{\hat{V}_{\alpha,\beta}\}$ 为二维水印技术产生的水印点序列。在指定误差范围 E 内用参数序列 $\{u'_\alpha\}, \{v'_\beta\}$ 产生一个新的 NURBS 模型 $S_{sum}(u, v)$, 通过修改曲面 $S_{sum}(u, v)$ 少量的控制顶点去逼近所有的水印点 $\{\hat{V}_{\alpha,\beta}\}$ 。

3.3 在指定误差范围 E 内用曲面 $S_{sum}(u, v)$ 去逼近点序列 $\{\hat{V}_{\alpha,\beta}\}$

1) 初始化节点矢量序列 U, V

2) 由曲面 $S'(u, v)$ 计算点序列 $\{\hat{V}_{\alpha,\beta}\}$

$$S'(u, v) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^l N_{i,p'}(u) N_{j,q'}(v) P'_{i,j}$$

有: $\hat{V}_{\alpha,\beta} = S'(u'_\alpha, v'_\beta) |_{k'+k, l'+l, p'+1, q'+1}$

3) 初始化序列 $\{e_{\alpha,\beta}\} = 0$, 定义 $e_{\alpha,\beta} \triangleq \| \hat{V}_{\alpha,\beta} - S'(u'_\alpha, v'_\beta) \|$

4) While $(p' < p \ \& \ q' < q)$

a) 移动控制顶点序列, 使得对 $\forall \alpha, \beta$ 都满足 $e_{\alpha,\beta} \leq E$

b) 重新排列节点矢量 U, V

c) $p' \leftarrow p' + 1, q' \leftarrow q$

d) 修改 $S'(u, v)$ 的控制顶点 $\{P'_{i,j}\}$, 使得 $\{P'_{i,j}\}$ 近似等于 $\{\hat{V}_{\alpha,\beta}\}$ 的最小二乘法的值^[5]

$$\text{有: } \{P'_{i,j}\} \leftarrow \arg \min_{\{P'_{i,j}\}} \left(\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^l \| \hat{V}_{i,j} - S'(u'_i, v'_j) \|^2 \right)$$

e) 修改 u'_α, v'_β

$$\text{有: } u'_\alpha, v'_\beta \leftarrow \arg \min_{u,v} \left(\| \hat{V}_{\alpha,\beta} - S'(u, v) \| \right)$$

f) 修改 $\{e_{\alpha,\beta}\}$

5) 将 $\{u'_\alpha\}$ 赋值给 $\{u_\alpha\}, \{v'_\beta\}$ 赋值给 $\{v_\beta\}$

6) 将 $S'(u, v)$ 赋值给 $S_{sum}(u, v)$

4 实验结果及结论

本文给出了一个头和南瓜模型(图 2)实验, 采样点像素为 128×128 。选择了二种对水印图像进行攻击的方式, 都没有发现水印, 模型能完整的显示出来。一种攻击方式是对控制顶点作仿射变换, 因为仿射变换模型同样会使采样点发生仿射变换, 所以这种攻击一点也不影响水印。采样点坐标作仿射变换的范围是 $[0, 256]$ 。第二种攻击方式是修改节点矢量, 如插入节点、删除节点等。即使这样, 节点矢量的改变并不能导致水印图像采样点的 u, v 参数序列发生改变。但利用第

(下转第 282 页)

制的 BSP 文件。

3.1 异常处理的 BSP 设计

S3C44B0X 芯片的主要结构: Samsung ARM7TDMI 处理器核, 带有 8kB 的指令高速缓存; 扩展存储控制器 (FP/EDO/SDRAM 控制器, 片选逻辑); LCD 控制器; 2 路 GDMA/2 路外围 DMA; 2 个独立的 UART; 2 路 IIC-BUS 控制器; 5 路 PWM 定时器 & 1 路内部定时器; 看门狗; 71 个通用 I/O 端口和 8 个外部中断; 电源控制器; 8 路 10-bit ADC; 实时钟。

S3C44B0X 不支持 remap, 启动 flash 一直位于 0 地址, 异常入口不能在运行时写入。不使用 VxWorks 的 S3C44b0X 通常编程, 硬编码将异常入口填写在启动 flash 开始处。

基本思路是在 Flash 存储器的起始地址硬编码异常入口, 在 RAM 的起始地址仿 VxWorks 建立异常向量表。异常发生时, 经 Flash 存储器入口, 跳转到自定义函数, 再跳转到 RAM 中异常入口, 再调用 VxWorks 提供的异常处理函数。中断处理流程和中断向量表如下:

```

-romInit;
  B cold
  B -romUndef
  B -romSwi
  B -romPrefetch
  B -romDataAbort
  B -romReserved
  B -romIRQ
  B -romFIQ

-ARM_FUNCTION(romIRQ)
  -romIRQ;
  sub sp, sp, #4
  stmfd sp!, {r0}

  ldr r0, L$_-promIRQ
  ldr r0, [r0]
  str r0, [sp, #4]
  ldmfd sp!, {r0, pc}

L$_-promIRQ;
.long S3C_EXC_BASE+20

/* exception base */
#define S3C_EXC_BASE 0x0c000100

void s3cExcVecSet(void)
{
  int i;
  i=(int)&-excEnterUndef;
  *((volatile int*)(S3C_EXC_BASE+0x0))=i;
  i=(int)&-excEnterSwi;
  *((volatile int*)(S3C_EXC_BASE+0x4))=i;
  i=(int)&-excEnterPrefetchAbort;
  *((volatile int*)(S3C_EXC_BASE+0x8))=i;
}
    
```

(上接第 249 页)

3.2 节的算法能找到非常靠近原始点的序列, 因为初始的 u, v 参数序列是选择等距离的采样点。实验测试的结果表明, 本算法较以前水印算法具有更好的不可见性, 能有效的抵抗节点插入、节点删除、节点细分、次数提升和仿射变换等 NURBS 模型常见攻击。

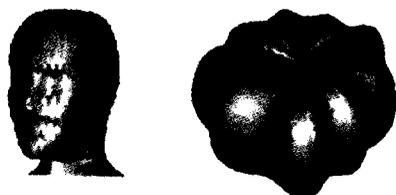


图 2 头和南瓜模型

本文给出了水印 NURBS 算法, 该算法是在二维虚拟图像上提取的 NURBS 模型, 适合于统一曲面采样水印, 几乎所

```

i=(int)&-excEnterDataAbort;
*((volatile int*)(S3C_EXC_BASE+0xc))=i;
i=(int)&-intEnt;
*((volatile int*)(S3C_EXC_BASE+0x14))=i;
return;
}
ldmfd sp!, {r0, pc}; POP the work register and pc(jump to ISR)
    
```

3.2 其它

网卡驱动: 首先在 config.h 中包含该网卡, 然后将含网卡的信息的参数放入数组 END_TBL_ENTRY endDevTbl[] 中, 系统通过函数 muxDevLoad() 调用这个数组来安装网卡驱动。

S3C44B0X 波特率与系统主时钟有如下计算公式:

$$UBRDIVn = ((int)(fMCLK/16./baud+0.5)-1)$$

时钟驱动的实现在 sngks32cTimer.c 中, 可以对相关寄存器作相应的修改。

串口驱动的实现在 sngks32cSio.c 中, 根据寄存器定义变化作相应设计。主要涉及两个初始化函数、接收和发送函数、启动发送函数。串口有 FIFO 可以使用, 能提高串口的通信效率。在初始化函数中添加启用语句:

```
SNGKS32C_SIO_REG_WRITE(pChan, S3C44B0X_UFCON, 0x97);
```

对 BSP 的设计完成测试成功后, 就可以着手进行主控程序的开发了。

结论和展望 本文创新点在于利用基于 ARM 和 VxWorks 的技术, 在 ARM 开发板上实现了对 BSP 的定制。由于在设计过程中采用接口功能丰富的 ARM 处理器和强实时和运行稳定的 VxWorks 操作系统, 大大简化了软硬件开发难度, 提到了系统可靠性、可扩充性。后续工作主要包括:

- (1) 由于数传装置对功耗的要求, 在进行电源设计时, 考虑实现利用操作系统进行电源控制的方式。
- (2) 对于主控程序的开发。

参考文献

- 1 杜春雷. ARM 体系结构与编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
- 2 陈章龙. 嵌入式系统—Intel strong ARM 结构与开发[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002
- 3 张军. 基于 Vxworks 实时操作系统的串口通信程序设计与实现. 微计算机信息, 2006

有的二维水印技术都能从二维虚拟图像中提取水印, 这对三维数字媒体的保护具有较强的实用性。

参考文献

- 1 Hernandez J R, Perez-Gonzalez F. Statistical analysis of watermarking schemes for copyright protection of images. IEEE Trans Image Processing, 2002, 11(8): 1142~1166
- 2 Pldilchuk C I, Zeng W. Image-adaptive watermarking using visual models. IEEE Trans Selected Areas in Communications, 1998, 16(4): 525~539
- 3 Ohbuchi R, Mukaiyama A, Takahashi S. A Frequency-Domain Approach to Watermarking 3D Shapes. Computer Graphics Forum, 2002, 21(3): 373~382
- 4 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术. 北京: 科学出版社, 2000
- 5 Lam E Y, Goodman J W. A mathematical analysis of the DCT coefficient distributions for images. IEEE Trans Image Processing, 2003, 13(9): 1661~1666