

一种基于网格控制的3维军标符号动态建模与优化方法

汤晓安¹⁾ 陈敏²⁾

¹⁾(国防科技大学电子科学与工程学院,长沙 410073) ²⁾(国防科技大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

摘要 3维军标符号的动态建模是虚拟战场的重要内容,其对提高战场态势的直观性,增强辅助决策能力具有重要意义。提出了一种基于网格控制的3维军标符号动态建模与优化方法,首先对军标符号在2维平面上进行剖分,形成逼近线段;通过贝塞尔网格和DEM网格的约束,使逼近线段在3维空间中发生变形,控制其空间形态;依据空间线段剖分点与相邻点连线的角度,对剖分与变形后的空间点集进行优化;最后进行Delaunay三角网重构,从而得到3维空间中优化的动态模型。实验结果表明,该方法能够很好地控制3维军标符号的平面与空间形态,并能有效实现DEM地形跟随。

关键词 3维军标符号 建模 Bezier网格 DEM网格

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)09-1919-06

An Approach of 3D Military Symbols Dynamic Modeling and Optimizing Based on Control Grid

TANG Xiao-an¹⁾, CHEN Min²⁾

¹⁾(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense of Technology, Changsha 410073)

²⁾(College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense of Technology, Changsha 410073)

Abstract It is one of the most important parts of the research on virtual battlefield for 3D military symbol modeling. A dynamic modeling method based on the control grid was declared, Bezier grid and DEM grid are used to control the military symbol model's 3D shape. The military symbol is divided into several line segments according to its slope. Then, a Bezier grid is drawn around the symbol, when the Bezier grid is warped. The symbol will be projected into the grid, as well as the line segments are transformed into 3D space and are optimized by the angle of two line segments. With surface reconstruction from Delaunay triangulation, a 3D military symbol will be created. The DEM grid is used to control the 3D military symbol model's shape also; the 3D military symbol can be limited into the DEM grid and follow the DEM grid's surface.

Keywords 3D military symbol, modeling, Bezier grid, DEM grid

1 引言

随着虚拟现实技术的发展,战场环境与态势的表达正由2维进入3维领域,虚拟战场环境已成为战场信息系统的重要集成、处理与应用界面。与之

相适应,军事标图的内涵也进一步扩展到3维领域,除了需要对军标符号的平面形态进行有效控制外,还需要进一步处理其空间形态。目前,美军已较为广泛地应用了3维军标符号的标绘方法,为战场指挥员提供更加形象、直观的综合态势,如美国空军的内利斯空战训练系统、海军“龙”战场信息系统,以

及以天战为背景的空间对抗模拟训练系统等。我军对这一领域也展开了一定的研究,但目前仍处于实体模型研究的起步阶段,其基本方法是将建好的固定 3 维模型输入战场环境,然后在欧氏空间中进行平移、旋转、缩放等操作,这一方法对静态符号是可行的,但却不能满足动态符号的随机标绘要求,这是因为动态符号随作战意图的不同,其平面形态、空间形态、空间厚度均需实时改变。因此,为满足新时期的作战需求,对 3 维军标符号的动态建模技术进行深入研究是十分必要的。

对 3 维军标符号的建模方法研究,国内外已有了一些成果,徐志勇等研究了 3 维符号的视觉参量问题^[1],给出了若干参量定义;Thomas 和杨强提出将军标符号映射到一个公告版上,然后将公告版放置于场景中^[2-3];Hagens 采用包围盒给出作战范围,然后结合公告版进行标绘^[4];Thomas 等人研究了 3 维军标符号的碰撞检测问题^[5];Feibush 讨论了 2 维,3 维的匹配问题^[6];Mossman 针对特殊用户设计了一个 3 维军标符号结构^[7];Youngseok Kim 采用序列层次图像将 2 维军标图像映射到一个立方体上,并结合实体模型进行联合标绘^[8],从而对 Thomas 的方法进行了扩展。以上方法有效解决了静态符号向 3 维空间的映射问题,但对动态符号的 3 维映射仍有一定的局限性,不能实时控制 3 维军标符号的空间形态。

本文提出了一种基于网格控制的 3 维军标符号动态建模与优化方法,首先对军标符号在 2 维平面上进行剖分,形成逼近线段,记录线段端点;然后建立 2 维军标符号的包围网格,以网格交线为曲面控制点,生成军标符号的空间控制曲面,则该空间控制曲面可以有效控制军标符号的空间形态;计算线段端点在空间控制曲面上的投影,得到变形后的军标符号逼近线段的端点;依据空间线段剖分点与相邻点的角度,对剖分与变形后的空间点集进行优化;最后进行 Delaunay 三角网重构,从而得到 3 维空间中的动态军标标绘结果。实验结果表明,该方法能够很好地控制 3 维军标的平面形态、空间形态与空间厚度,可以满足实际作战需求。

2 3 维军标符号的生成与控制流程

以 2 维军标符号为基础,通过在 3 维约束曲面投影的方法达到 3 维军标符号的生成及动态标绘目

的,其流程如图 1 所示:

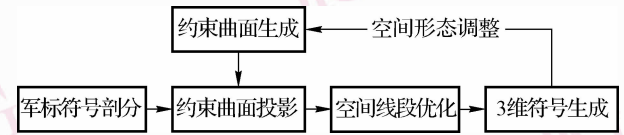


图 1 3 维军标符号的生成与控制流程

Fig. 1 Generation and control of 3D military symbol

各步骤功能描述如下:

(1) 军标符号剖分 军标符号剖分的目的是将 2 维矢量军标符号转化为一组线段串,满足投影到约束曲面以及构建 3 维模型的需要。2 维军标的控制点并不能直接引入 3 维空间,这是因为 2 维军标中曲线阶数可能无法满足 3 维空间弯曲的需求,并且 2 维中的直线在 3 维标绘中,由于空间形态的改变,亦可能变成曲线。

(2) 约束曲面生成 约束曲面是空间 3 维曲面,可分为两种情况:一种是自由曲面,即人工编辑生成的控制曲面;另一种是匹配于某参照物表面的曲面,例如匹配于地形表面。

(3) 约束曲面投影 采用双线性插值方法将所得线段串沿垂直方向按顶点投影到约束曲面上,这样就得到了一个依附于约束曲面的 3 维符号线段。

(4) 空间线段优化 依据空间曲线的变化曲率,对剖分的空间线段进行筛选,若变化曲率大于某个门限,则保留剖分的线段端点,否则删除该端点。对以链表形式构成的有序的线段串端点集合,删除某一端点后,其他端点继续构成新的链表,即形成优化后的空间线段。

(5) 3 维符号生成 为依附于约束曲面的 3 维符号线段增加厚度,并进行 Delaunay 三角网重构,生成 3 维符号模型。

3 军标符号的空间剖分

考察主要的 2 维军标符号(随机队标),如图 2 所示。

由图 2 可以看出,2 维军标符号主要由线段、圆(圆弧)、曲线(Bezier 曲线)等基本图元及其组合构成,其中,Bezier 曲线是矢量军标图元的重要组成部分,也是其难点之一。现以 Bezier 曲线为对象,讨论军标符号的空间线段剖分。

给定空间 $n + 1$ 个点的位置矢量 $P_i (i = 0, 1,$

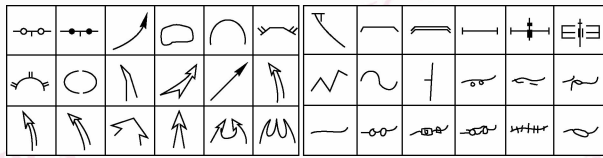


图2 部分军标符号
Fig.2 The military symbology

2, …, n), 则 Bezier 参数曲线上各点坐标表示如下:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n P_i B_{i,n}(t) \quad t \in [0,1] \quad (1)$$

式中, P_i 构成该 Bezier 曲线的特征多边形, $B_{i,n}(t)$ 是 n 次 Bernstein 基函数:

$$B_{i,n}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i \cdot (1-t)^{n-i} \quad (2)$$

式中, $i=0,1,2,\dots,n$, 并规定 0 的 0 次方和 0 的阶乘分别为 $0^0=1, 0!=1$ 。

欲将曲线分为 k 段, 则取参数 t 的步长为 $1/k$ 。也可以利用 Castl jau 算法进行快速递推分割。另外, 2 维军标符号中的直线段和圆(圆弧)等图元也需要按照一定步长转化为线段串, 这样可以满足 Z 方向的空间变形。

4 3 维符号的生成与控制

4.1 约束曲面生成

建立约束曲面是为了控制军标符号的空间形态, 使 2 维平面上的军标符号可以跟随约束曲面的空间变形而改变形状, 其基本方法是首先构建 $M \times N$ 的控制网格, 如图 3 所示。当控制网格进行空间变形时, 实时计算 2 维军标符号在该控制网格上的投影, 则军标符号由平面约束变换至欧氏空间约束。由于军标符号始终跟随控制网格, 因此可以达到对军标符号进行空间变形的目的。

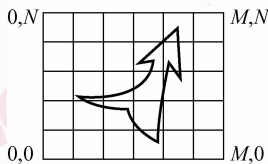


图3 军标符号控制网格
Fig.3 The control grid of military symbol

约束曲面包括自由曲面与匹配曲面两类, 前者可以在欧氏空间中对军标符号进行任意控制, 适用于空战与天战标绘; 后者则利用已有的曲面模型, 如 DEM 地形/水深网格, 使标绘结果跟随地形/水深的起伏, 能够更加直观地体现作战意图, 适用于陆战与海战标绘。

(1) 自由曲面的生成

自由曲面的生成有两种方法, 一种是基于网格顶点编辑的生成方法, 该方法自由度高, 但很难取得较为平滑的曲面, 且工作量较大; 另一种是基于曲面控制点编辑的生成方法, 利用工程曲面插值得到相应的控制网格。

设 $P_{ij}(i=0,1,\dots,n; j=0,1,\dots,m)$ 为 $(n+1) \times (m+1)$ 个空间点列, 则 Bezier 曲面表示为

$$P(u,v) = [B_{0,n}(u), \dots, B_{m,n}(u)] \begin{bmatrix} P_{00} & P_{00} & P_{0m} \\ P_{10} & P_{11} & P_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n0} & P_{n1} & P_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{0,m}(v) \\ B_{1,m}(v) \\ \vdots \\ B_{n,m}(v) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $B_{i,m}(u) = C_m^i u^i (1-u)^{m-i}, B_{j,n}(v) = C_n^j v^j (1-v)^{n-j}$ 。

依次连接点列 $P(u,v)$, 可形成相应的控制网格。控制网格越密, 则军标符号在 3 维空间中的模型构建越精细, 优化计算的复杂度越高, 一般地, 取 256×256 的网格是比较适中的选择。

(2) 匹配曲面的生成

匹配曲面是自由曲面的一种极限情况, 控制曲面将直接使用地形/水深网格。若对控制网格的平滑性有更高要求, 则首先以地形/水深网格为基础, 通过插值获得更高密度的网格面, 再进行网格平滑滤波, 获得最匹配于地形/水深的平滑曲面网格, 并以此作为军标符号的控制网格。

4.2 约束曲面投影

由空间线段的剖分, 可获得 2 维军标符号的线段串各顶点的 x 和 y 两个分量, 通过沿竖直方向在约束曲面投影可得到各顶点的 z 分量。设 Ω 为 x, y 方向间隔为 d 的控制网格, 某顶点 (x_s, y_s, z_s) 在 Ω 中的投影位于网格顶点 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3), (x_4, y_4, z_4)$ 构成的四边形内, 如图 4 所示。

则 (x_s, y_s, z_s) 的投影点的 z 坐标为

$$z = f(x_s, y_s) = [(x_s - x_1)g(x_2, y_s) + (x_2 - x_s)g(x_1, y_s)]/d \quad (4)$$

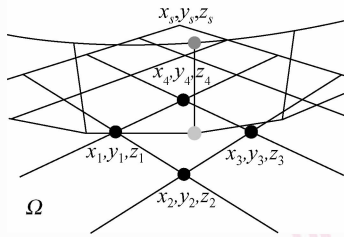


图 4 线段串顶点在控制网格上的投影

Fig. 4 The projecting vertex of line segments in the control grid

其中,

$$g(x_1, y_s) = [(y_s - y_1)z_4 + (y_4 - y_s)z_1] / d \quad (5)$$

$$g(x_2, y_s) = [(y_s - y_2)z_3 + (y_3 - y_s)z_2] / d \quad (6)$$

通过线段串顶点的投影,军标符号由 2 维平面映射至 3 维欧氏空间,此时,3 维军标符号的空间点集已经形成。

5 空间线段优化

空间线段优化的处理对象是剖分后的空间点集,其任务包括两个方面:一是去除冗余,二是进行简化。由于空间变形的任意性,为了保证 3 维军标符号足够平滑,在进行初始剖分时,剖分点应尽可能多,但是平滑性与计算量是一对矛盾体,当剖分点增多时,尽管可以增加平滑度,但由此带来的计算量也显著增加,因此,必须对平滑性与计算量折中考虑。另外,等间距、高密度的空间剖分也将导致较大的数据冗余,如对空间中的一个线段,只要记录其两个端点即可,而不必进一步剖分。图 5 是一个 Bezier 曲线的 2 维平面剖分及其空间变形结果:

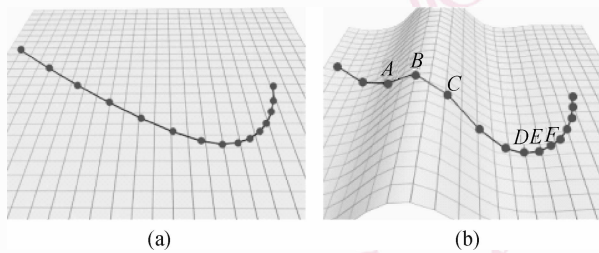


图 5 Bezier 曲线的 2 维平面剖分及其空间变形

Fig. 5 Spatial Bezier curve warping

图 5(a) 是 Bezier 曲线在 2 维平面上剖分的结果,图 5(b) 发生了空间变形。由图中可以看出,点 A, B, C 处(由空间变形导致曲率增加)以及 D, E, F

处(在 2 维平面上有较大的曲率)应保留较高的剖分密度,而其他部分则可以适当降低。

考察空间曲线 Φ , 设 Φ 被剖分为 \overline{AB} , \overline{BC} , \overline{CD} 线段, 则 Φ 的空间点集具有 A, B, C, D 4 个剖分点, 显然, 剖分点越多, 则剖分后的线段越逼近 Φ , 如图 6 所示:

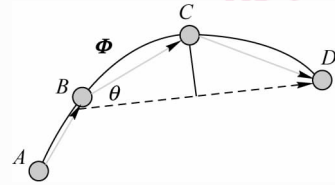


图 6 空间曲线剖分

Fig. 6 Subdivision of spatial curve

图 6 中, θ 是 \overline{BC} 与 \overline{BD} 的夹角。 θ 越小, 表明点 C 越接近 \overline{BD} , 当 $\theta = 0$ 时, 点 C 位于 \overline{BD} 上。因此, 当 θ 足够小时, 可以使用 \overline{BD} 逼近 \overline{BC} 与 \overline{CD} , 即删除点 C。

设 θ_0 为给定的简化精度, 现计算 θ 。考虑矢量点乘公式:

$$\overline{BC} \cdot \overline{BD} = \|\overline{BC}\| \times \|\overline{BD}\| \times \cos \theta \quad (7)$$

则:

$$\theta = \arccos \{ (\overline{BC} \cdot \overline{BD}) / (\|\overline{BC}\| \times \|\overline{BD}\|) \} \quad (8)$$

若 $\theta < \theta_0$, 则删除点 C。

显然, θ_0 的选取可以控制 3 维军标符号的平滑度, θ_0 越小, 表明精度越高, 重建后的军标符号越平滑。当 $\theta_0 = 0$ 时, 将不对空间点集进行优化, 保留其原始数据。

考虑到 θ_0 直接决定了军标符号的平滑度, 因此可以作为 LOD (levels of detail) 的判决依据, 则 θ_0 的选取将与作战场景中军标符号与视点的距离或在屏幕上的投影面积相关。一个简单的方法是: θ_0 定义为视点距离的线性递增函数或屏幕投影面积的线性递减函数。

空间线段优化是一个迭代过程, 某一剖分点是否删除取决于自身以及与之连通的前后两点, 在图 6 中, 点 B 取决于点 A 和点 C, 点 C 取决于点 B 和点 D。若在第 1 轮扫描中, 点 C 被删除而点 B 保留, 在剖分点集的链表中, 其连通关系由 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ 自动修正为 $A \rightarrow B \rightarrow D$, 则在第 2 轮迭代过程中, 点 B 是否删除将取决于点 A 和点 D。通常, 这种迭代经过 2 ~ 3 次已可完全满足条件。

显然, 通过空间线段优化, 可得到一个满足给定精度的、具有最少数据量的 3 维军标符号的空间点

集,再通过控制网格下方的空间偏移,可以为军标符号增加空间厚度。对该点集进行 Delaunay 三角网重建,可以实现军标符号的3维建模。由于 Delaunay 三角网重建是一个经典问题,此处不再赘述。

6 实验结果及其分析

系统立足于自主研发,采用 P4 2.4 GHZ 微机平台,Windows XP 操作系统,VC++ 6.0 编程环境进行实验。建模与标绘系统集成于自主研制的虚拟作战平台“海量空间地理信息快速绘制系统”之中。实验结果如下:

(1) 基于自由曲面约束的符号建模

图7是基于自由曲面约束的3维进攻类符号的建模过程及结果:

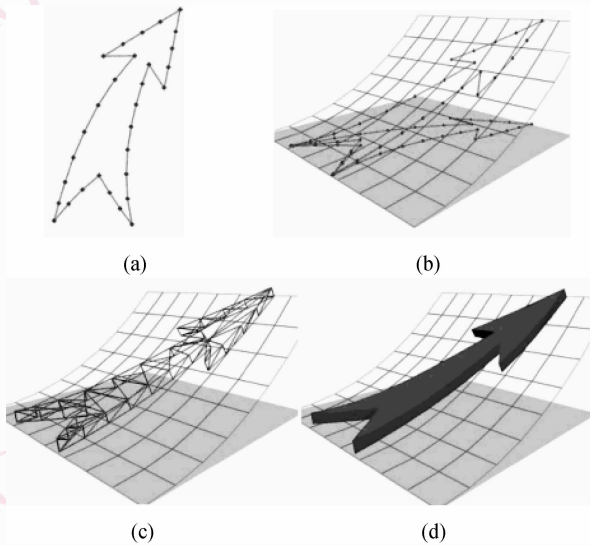


图7 基于自由曲面约束的3维进攻类符号建模

Fig. 7 3D military symbol modeling based on Bezier grid

其中,图7(a)是经过空间剖分后形成的军标符号线段串;图7(b)中的弯曲网格为约束曲面(Bezier曲面)的线架形式,军标符号经过投影,实现了约束曲面跟随;图7(c)是增加空间厚度以后的线架模型;图7(d)是加入光照后的实体模型。

(2) 基于匹配曲面约束的符号建模

图8是基于DEM网格匹配的3维符号建模结果:

其中,图8(a)和图8(b)分别是堑壕类和钳击类符号的建模结果,其匹配网格为DEM地形数据。

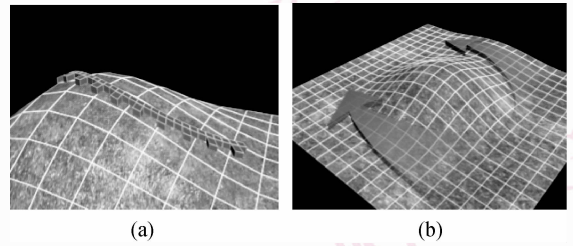


图8 基于DEM网格匹配的3维符号建模

Fig. 8 3D military symbol modeling based on DEM grid

(3) 3维军标符号的优化结果

以钳击符号为例,得到的优化曲线如图9所示。

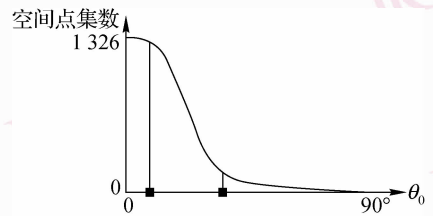


图9 钳击符号的优化结果

Fig. 9 The result of military symbol optimizing

图9中,将 θ_0 约束于第1象限。由图9可以看出,随着 θ_0 的增加,剖分的空间点集数将有较明显的下降,但也存在两个临界点,分别是 5.2° 和 31.3° ,在这两个临界点之间,空间点集的数量下降较快,这表明原始剖分点与相邻点连线的角度大部分位于 5.2° 与 31.3° 之间。应该说,这一剖分是合理的,当第1临界点减小时,表明原始剖分密度过大;第2剖分点增大时,表明原始剖分密度过小。

(4) 典型作战样式的动态标绘结果。

图10是典型空间作战以及坦克集群作战的动态标绘结果。



图10 典型作战样式动态标绘

Fig. 10 Typical military scenario with situation protracting

图10是99式坦克集群(20辆坦克)作战与综合电磁态势标绘结果,地形模型选用的是北京密云地区 $2\ 048 \times 4\ 096$ 的DEM数据,采样间距15 m。

在以上系统中,符号建模的运算速度大于 30 f/s,动态标绘由于受系统其他资源的影响(主要是战场环境需要占用大量的系统资源),速度约为 24 f/s,基本达到实时标绘的目的。

以上实验结果(基于自由曲面约束的符号建模、基于匹配曲面约束的符号建模、模型优化、典型作战样式的动态标绘)表明,本文方法在曲面约束、地形跟随等方面具有灵活性,除了继承 2 维方法对平面形态进行控制外,能够在 3 维欧氏空间对军标符号的空间形态进行有效控制。

7 结 论

提出了一种基于网格控制的 3 维军标符号动态建模与优化方法,通过平面剖分及空间变形,形成了 3 维空间中优化的动态模型。实验结果表明,该方法能够很好地控制 3 维军标符号的空间形态,且能有效地实现 DEM 地形跟随。

进一步的工作是对 3 维军标符号建库,形成独立运行的、不依赖于平台的 3 维军标符号数据库,从而灵活、方便地绑定于作战指挥系统中。

参考文献 (References)

1 Xu Zhi-yong, Ai Ting-hua, Wei Yong-jun, *et al.* On visual variables of 3D map symbol[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan

University,2006,**31**(6):557-560. [徐志勇,艾廷华,危拥军等. 三维地图符号视觉参量研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版. 2006,**31**(6):557-560.]

- 2 Thomas L C. Visual displays and cognitive tunneling: frames of reference effects on spatial judgments and change detection[A]. In: Proceedings of the 45th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society[C], Santa Monica, CA, USA,2001: 6-12.
- 3 Yang Qiang. Research on Technique of 3D Unit Symbol Building and Situation Protracting [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense of Technology,2007, 2. [杨强. 三维军标生成与态势标绘技术研究[D]. 长沙:国防科技大学研究生院. 2007.]
- 4 Dan Hagens, Jeremiah Montgomery, Christopher Moor. Developing custom 3D visualization applications for defense using ARCGIS[A]. In: Proceedings of the 2005 Developer Summit[C], San Diego,CA, USA, 2005: 814-835.
- 5 Thomas L C, Wickens C D. Effects of display frames of reference on spatial judgments and change detection[R]. ARL-00-14/ARMY-FED-LAB-00-4, Savoy, IL, USA: Aviation Research Lab,2000: 432-443.
- 6 Jeliot Feibush, Nikhil Gagvani, Daniel Williams. Visualization for situation awareness[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2000,**20**(5):38-45.
- 7 Jim Mossman. Data Deja View: special symbols for special needs [J]. ArcUser: ESRI Software Users, 2003,(7):32-35.
- 8 Youngseok Kim, Thenkurussi Kesavadas. Dynamic symbology for visualization of high level fusion[R]. NY14260, Buffalo, NY, USA: State University of New York. 2004:1196-1208.