

基于 CB 样条曲线的空间物体三维重建

赵颜利 郭成昊 王 湛 刘凤玉

(南京理工大学计算机系 南京 210094)

摘 要 本文提出一种基于 CB 样条曲线重建空间不规则物体的方法。在仿射相机模型的假设下,利用 CB 样条曲线仿射不变性,以 CB 样条曲线为基元来重建空间物体。试验结果证明,与传统方法比较,该方法重建精度更高,算法复杂度也有较大改进。

关键词 CB 样条曲线, 三维重建, 仿射不变性

3D Reconstruction of Free-form Objects Based on CB-spline Curve

ZHAO Yan-Li GUO Cheng-Hao WANG Zhan LIU Feng-Yu

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract A algorithm based on CB-spline curves is presented for 3D reconstruction of 3D objects. CB-spline Curves which have the property of the affine invariance can be used as primitives to reconstruct 3D objects under the assumption of the affine camera model. Experiments demonstrate that this algorithm presented is more accurate and robust than other approaches.

Keywords CB-spline curve, 3D Reconstruction, Affine invariance

1 引言

利用二维图像重建三维物体是计算机视觉和计算机辅助设计领域的一个很重要的研究课题,到目前为止国内外已经做了许多富有成效的工作^[1~5]。然而,现有的重建方法仍存在很多局限性,其中一直令人关注的一个问题就是重建对象的范围,即重建的覆盖域问题。现实的三维场景中经常包含许多形状不规则的物体,对于这些不规则物体,如何准确、快速地重建是三维场景能否被真实反映的关键。现有的立体视觉方法主要采用点、直线段、二次曲线作为立体匹配和三维重建的基元,对物体进行重建。由于这些基元不能够有效地表示空间不规则曲线,所以在应用于空间不规则物体的三维重建时很难取得良好的效果。

近年来,一些学者提出了基于曲线的三维重建,他们直接用曲线作为基元进行匹配,减少了误匹配发生的概率,提高了算法的健壮性。如在文[6]中提出了基于 B 样条的空间自由曲线三维重建,使用一定数量的控制点代替整个边缘点集,匹配难度降低,重建精度优于基于点对点的方法和基于分隔的方法。但这个方法有个问题,B 样条曲线不能精确表示二次规则曲线^[7]。从文[7]可以看出 CB 样条在近似拟合中优于标准 B 样条,本文由此提出了一种基于 CB 样条曲线的空间自由曲线三维重建。在仿射相机模型的假设下,利用 CB 样条曲线的仿射不变性来重建三维物体。

2 CB 样条曲线的概述

CB 样条曲线是三次样条曲线的推广,由一组新的基 $\sin(t)$, $\cos(t)$, t 和 1 组成的。它们依赖于参数 $a > 0$, 而且对于 $a \rightarrow 0$ 时,它们的极限是三次样条曲线,这种方法不仅能处理一

般的三次曲线的需要,而且能精确地表示二次曲线。

定义 设 b_0, b_1, b_2, b_3 是给出的 4 个控制点,对一个任意选择的实数值 $\alpha, 0 < \alpha \leq \pi$, 下列的曲线段被命名为具有参数 α 的 CB 样条曲线段。

$$P(t) = \sum_{i=0}^3 b_i B_i(t) \quad (1)$$

对点列 $P_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$, 可生成 n 段曲线连接而成的一条曲线,其中第 i 段曲线段定义为:

$$P_i(t) = \sum_{j=0}^3 b_{i,j} B_{i,j}(t) \quad (2)$$

其中, $0 < \alpha \leq \pi, 0 \leq t \leq \alpha, C = \cos(\alpha), S = \sin(\alpha), B_{i,j}(t)$ 是 CB 样条曲线的基函数。

$$B_{i,j}(t) = \frac{1}{2a(1-C)} (\sin(t)\cos(t)tl)$$

$$* \begin{bmatrix} C & -(1+2C) & 2+C & -1 \\ -S & 2S & -S & 0 \\ -1 & 1+2C & -(1+2C) & 1 \\ \alpha & -2aC & \alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

CB 样条曲线函数的性质:

$$\bullet \sum_{j=0}^3 B_{i,j}(t) = 1 \quad (4)$$

$$\bullet B_{i,j}(t) \geq 0 (j=0, 1, 2, 3) \quad (5)$$

3 CB 样条曲线的仿射不变性

投影不变性是三维重建基元的必要条件,如直线的投影还是直线,二次曲线的投影还是二次曲线。在一些应用场合中,相机投影过程可简化为仿射投影,称为仿射相机模型。由于 CB 样条曲线在仿射投影下是不变的,因此在仿射相机模型下,CB 样条曲线可以作为三维重建的基元,下面给予证明:

赵颜利 博士研究生,主要研究方向:计算机视觉,图形与图像。郭成昊 博士研究生,主要研究方向:软件性能保持。王 湛 博士研究生,主要研究方向:软件性能保持。刘凤玉 教授、博导,主要研究领域:人工智能与信息安全。

1. 仿射相机矩阵的投影矩阵形式为:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

M 所代表的仿射投影变换在欧氏坐标下的表达形式为 $x = M_A X + t_A$ (7)

$$\text{其中 } M_A = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{bmatrix}, t_A = \begin{bmatrix} m_{14} \\ m_{24} \end{bmatrix}, x = (x, y)^T$$

为图像坐标点, $X = (X, Y, Z)^T$ 为空间坐标点。

在以上对仿射相机模型和 CB 样条曲线分析的基础上, 我们得出以下定理。

2. 定理 CB 样条曲线具有仿射不变性, 即 CB 样条曲线经过仿射投影变换后, 其结果仍为 CB 样条曲线。

证明: 一条 CB 样条曲线, 它的仿射投影可写为

$$M_A P(t) + t_A = \sum_{i=0}^3 (M_A b_i) B_i(t) + t_A \quad (8)$$

根据式(4) $\sum_{j=0}^3 B_{i,j}(t) = 1$, 故式(8)进一步化为:

$$\sum_{i=0}^3 (M_A b_i) B_i(t) + t_A = \sum_{i=0}^3 (M_A b_i) B_i(t) + \sum_{i=0}^3 t_A B_i(t) = \sum_{i=0}^3 (M_A b_i + t_A) B_i(t) \quad (9)$$

由(8)式和(9)式得

$$M_A P(t) + t_A = \sum_{i=0}^3 (M_A b_i + t_A) B_i(t) \quad (10)$$

即定理成立。

由上面的分析可得出, CB 样条曲线在仿射相机模型下, 其投影仍为一条 CB 样条曲线, 且控制点为原 CB 样条曲线的控制点的投影。

4 CB 样条曲线的三维重建

在仿射相机模型下, 空间 CB 样条曲线的投影等于其控制点的投影作为控制点生成的曲线, 这样我们可以从立体图像对中提取图像 CB 样条曲线, 然后利用两个图像 CB 样条曲线的控制点来重建空间 CB 样条曲线的控制点, 从而得到空间物体的 CB 样条曲线表示。重建算法的具体步骤如下:

a. 进行图像预处理, 提取图像边缘, 并对边缘进行跟踪和标记。

b. 对图像边缘进行参数化, 然后用最小二乘法进行 CB 样条曲线拟合, 得到图像的 CB 样条曲线的控制点。

c. 利用两个图像的对应控制点重建空间控制点。

假设两个视图的投影矩阵分别 M_1, M_2 。则一个空间 CB 样条曲线的控制点 $(X, Y, Z)^T$ 左右两视图的控制点 $(x_1, y_1)^T, (x_2, y_2)^T$ 之间的对应关系如下:

$$\begin{cases} (x_1 M_{31} - M_{11})X + (x_1 M_{32} - M_{12})Y \\ + (x_1 M_{33} - M_{13})Z = M_{14} - x_1 M_{34} \\ (y_1 M_{31} - M_{21})X + (y_1 M_{32} - M_{22})Y \\ + (y_1 M_{33} - M_{23})Z = M_{24} - y_1 M_{34} \\ (x_2 M_{31} - M_{11})X + (x_2 M_{32} - M_{12})Y \\ + (x_2 M_{33} - M_{13})Z = M_{14} - x_2 M_{34} \\ (y_2 M_{31} - M_{21})X + (y_2 M_{32} - M_{22})Y \\ + (y_2 M_{33} - M_{23})Z = M_{24} - y_2 M_{34} \end{cases} \quad (11)$$

从上式得出, 若知道 $(x_1, y_1)^T, (x_2, y_2)^T$ 。可以求得最小二乘解, 计算出空间控制点的坐标 $(X, Y, Z)^T$ 。

d. 空间曲线生成。在计算出空间控制点以后, 可以按照(1)式求得空间曲线。

5 实验结果

我们用一个较复杂的花的图像作为试验数据。在实验中, 花的骨架轮廓是由较为复杂的空间曲线构成的, 我们选用 CB 样条曲线作为重建基元。图 1 为同一个相机在两个不同的视点拍摄的花的图像。图 2 显示了使用本文算法重建图 1 的结果。



图 1 两个不同视点的一束花的原始图像



图 2 两个不同视点的一束花重建图像

我们通过计算重建后的图像同原始图像轮廓曲线的平均最近点距离, 来验证重建的精度。

一个点 x 到一个点集 $E_i = \{e_i : i = 1, 2, \dots, n\}$ 的最近点距离定义如下:

$$d(x, E) = \min_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} d(x, e_i) \quad (12)$$

其中 $d(x, e_i)$ 表示两点的欧氏距离。我们对重建图像的花瓣的四条轮廓曲线(从左到右依次为曲线 1, 2, 3, 4)采样 100 个点, 并利用式(12)计算这些点到原始图像轮廓曲线的最近点距离, 最后求出它们的平均最近点的距离, 结果如表 1。

表 1 重建图像到原始图像的平均最近距离(单位: 像素)

	左视点	右视点
曲线 1	0.4237	0.5646
曲线 2	0.6732	0.4033
曲线 3	0.5742	0.5831
曲线 4	0.8643	0.9421

从表 1 的结果看来, 本文的算法精度是相当高的。其中误差主要来自透视投影的仿射近似和曲线的 CB 样条曲线的拟合。

作者同时验证了同其他重建方法的比较, 图 3 是文[6]提出的基于 B 样条的重建算法的实验结果。对比图 2 和图 3, 可以看出, 我们提出的曲线拟合方法能精确地表示二次曲线, 形状表示直观, 其重建效果优于文[6]重建算法。

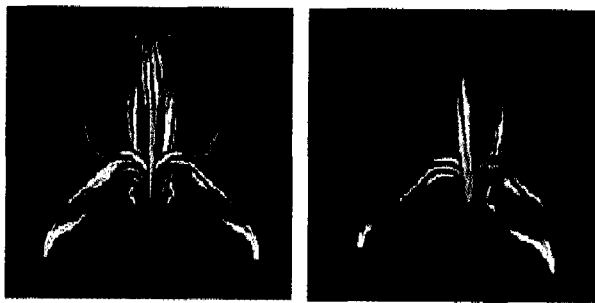


图3 基于B样条曲线的重建结果

结论 CB样条曲线是三次样条曲线的推广,这种曲线不仅能够处理不规则曲线和曲面,并且提供了圆和圆柱精确的重新产生,在工程表示和处理曲线、曲面上有很好的应用。本文利用CB曲线的仿射不变性,将其作为三维重建的一种基元,用来重建空间的自由曲线。与传统方法相比较,本文方法在重建精度和算法复杂度上都有较大的改善,并能直接从灰度图中计算出空间自由曲线的模型,在应用时更加方便。首先,在边缘提取时,使CB样条曲线表示不规则物体可以尽可能

地减少近似误差的影响。其次,使用CB样条曲线可以避免点对点的对应,使用一定数量的点代替整个边缘集,不仅加速了匹配过程而且减少了错误匹配的发生。

参考文献

- 1 Tang Li, Wu Chengke, Tsui H T, Shi gang Liu. Algorithm for 3D reconstruction with both visible and missing data. Electronics Letters, 2003, 39(23): 1640~1642
- 2 Grossmann E, Santos-Victor J. Least-squares 3D reconstruction from one or more views and geometric clues. Computer Vision and Image Understanding, 2005, 99(2): 151~174
- 3 Gu Kaining, Tang Zesheng, Sun Jianguang. Reconstruction of 3D solid objects from orthographic projections. Computer Graphics Froum, 1986, 5(4): 317~324
- 4 Lequette R. Automatic construction of curvilinear wire frame Views. Computer-Aided Design, 1988, 20(4): 171~179
- 5 kuo M H. Reconstruction of quadric surface solids from three-View engineer-ing drawings. Computer-Aide Design, 1998, 30(7): 517~527
- 6 Xiao Y, Ding M, Peng J. B-spline-based Stereo for 3D Reconstruction of Line-like Objects Using Affine Camera Model. Int. J. Pattern Recognition Artifact Intelligence, 2001, 15(2): 347~358
- 7 张纪文, 罗国明. 三次样条曲线的推广——C曲线. 计算机辅助工程, 1996

(上接第230页)

总的匹配程度的评估值,当其充分匹配时,这个特定态势模板就用来解释当前的战场态势,如推断敌方的目标,推理一些未被发现的参与者、过去未发现的事件、将要发生的事件,以及对敌方活动的特征数值进行判断等。由于特定态势模板结构中槽的约束关系表示了可被填入该槽的典型、允许数值,将观测到的敌方活动的特征数值与之相比较则可以得到敌方活动的特征数值。

4 基于CLIPS的模板匹配实现

CLIPS是用C语言设计的一种多范例编程语言,它支持基于规则的、面向对象的和面向过程的编程,在人工智能领域中得到了广泛的应用^[5]。下面以一个简单的例子来说明事件和计划在CLIPS中的表示及CLIPS的模板匹配过程:一个平台被对方雷达锁定、受到攻击的威胁时通常要实施规避的作战计划。该计划有一个计划实施者,一个目标。计划实施者的相关事件有施放干扰和快速机动等;目标也有一个相关事件:火控雷达开机。为便于讨论,设检测到计划实施者的事件为快速机动。其中约束关系有:

- (1)计划实施者属于蓝方,目标属于红方。
- (2)红方火控雷达开机锁定蓝方。
- (3)雷达开机事件领先于快速机动时间的典型值为3~4秒,允许值为0~6秒。

为了验证态势估计中基于CLIPS的模板匹配方法的可行性,由仿真程序生成一个场景,并模拟产生各类传感器的数据,然后由信息融合系统对这些数据进行处理。态势估计系统接受一级融合的输出,仿真程序提供的各平台在当前时刻由侦察设备获取的参数数据(如位置、速度、平台携带的辐射源等)经过目标跟踪和识别后进入态势估计系统。设红方战斗机起飞以后,根据来犯敌机的大致方位进入迎击航向。当搜索到目标并确认是敌机后,双方都可能实施机动进入有利的攻击阵位,并在对方处于导弹射程之内时发射导弹进行攻击。同时,受攻击的一方则在发现对方火控雷达锁定自己后立刻实施急速拐弯,规避导弹的攻击。这样,战斗机可能实施两种计划:攻击或规避。实施攻击计划的相关事件一般有起飞、搜索、快速爬高、锁定目标、干扰、俯冲攻击、拐弯等,这里只考虑较简单的情形,认为攻击计划由搜索目标、锁定目标和发射导弹组成,如图2所示。且设火控雷达开机(锁定目标)事件领先于搜索雷达关机(搜索到目标)事件的时间典型值为5~7秒,允许值为1~12秒,发射导弹事件领先于火控雷达

开机事件的时间典型值为4~6秒,允许值为2~8秒。

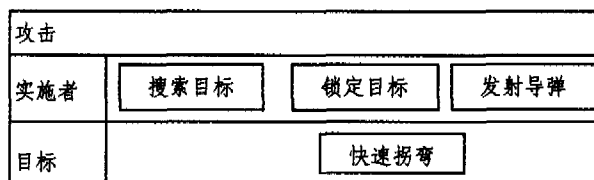


图2 平台攻击计划

设通过场景检测到蓝方战斗机的一系列事件:

- 0分0秒,发现目标;
- 0分0秒,radar-AN/APS-115开机;
- 1分12秒,radar-AN/APS-115关机;
- 1分20秒,radar-AN/APG-63开机……

可以看出,蓝方搜索雷达在1分12秒关机,火控雷达在1分20秒开机,计算这两个事件与攻击模板中相应槽的匹配度分别为1和0.8。设这两个事件对攻击模板的影响度分别为0.3和0.4,在有这两个事件发生时,可以得到发生事件对模板的总的支持度为 $MB=0.31+0.4\times0.8=0.62$,认为与该模板相匹配,即识别到蓝方战斗机的攻击计划,该计划的执行时间被认为是相关事件的发生时间。

结束语 本文讨论了基于模式的态势知识库的建立,给出了一种基于模板匹配的态势估计知识推理算法,并运用专家系统工具CLIPS实现了事件/活动、军事计划的模板表示及推理,表明了使用模板匹配的方法实现态势估计是有效可行的。使用模板匹配的优点在于能直接表示和聚类大量数据,并且模板的范围和复杂性可以选择。缺点是结构相对固定,且来自多传感器系统的一个观测可能与多个可能的事件或活动相联系,使模板设置控制涉及到复杂的数据管理问题。

参考文献

- 1 姚春燕. 战术态势估计中时空推理理论与技术研究:[国防科技大学博士论文], 1999
- 2 Kirillov V P. Constructive Stochastic Temporal Reasoning in Situation Assessment. IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics, 1994, 21(7): 1099~1113
- 3 Noble D F. Schema-Based Knowledge Elicitation for planning and Situation Assessment Aids. IEEE Trans. on SMC, 1989, 19(3): 473~482
- 4 Azarewicz J, Fala G, Heitchecher C. Template-Based Multi-Agent Plan Recognition for Tactical Situation Assessment. In: Proc. of 5th Conf. on Artificial Intelligence Applications, March 1989. 247~254
- 5 Giarratano J, Riley G 著. 印鉴,等译. 专家系统原理及编程. 机械工业出版社, 2001