

文章编号: 1001-2486 (2001) 05-0022-05

双机格斗行为建模方法研究*

薄涛, 尹娟, 王正志, 黄柯棣

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 行为模型的真实性是决定 CGF 真实性的关键因素之一。针对双机格斗空战, 提出了一种基于模糊规则的三层行为模型, 并运用遗传算法对底层飞行状态模糊控制器进行了优化。文中给出了仿真实验结果。结果表明这种用模糊规则建立的行为模型产生了逼真的空战格斗行为。

关键词: 模糊系统; 人工智能; 遗传算法; 行为建模; 空战仿真

中图分类号: E926.3; TP391.9 **文献标识码:** A

The Study of Human Behavior Modeling for Air Combat of Two Fighters

BO Tao, YIN Juan, WANG Zheng-zhi, HUANG Ke-di

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The reality of human behavior model is critical for the CGF. A three-layer human behavior model based on the fuzzy rule is first proposed for one vs. one fighter dogfight and the fuzzy-flight-state controller on the bottom layer was optimized using genetic algorithms. The simulation result suggest that this model can generate human-like air combat behavior.

Key words: fuzzy system; artificial intelligence; Genetic Algorithms; human behavior modeling; fighter combat simulation

分布交互仿真技术在军事训练与作战仿真领域已经得到了广泛的应用。在作战训练仿真中, 除了要有真人和各种仿真器参与外, 还有大量的由计算机生成和控制的兵力单元。这些兵力单元被称为计算机生成兵力 (Computer Generated Force, CGF)。CGF 的真实性主要取决于两个方面: 一是物理模型是否真实; 二是行为模型是否反映了它所代表的兵力单元的实际战场行为。

双机格斗是歼击机飞行员作战训练的一个最基本的训练项目。飞行员在双机格斗训练中可以熟练地掌握战机在各种状态下的飞行性能, 掌握空战的作战思想和基本战斗动作的操作, 学习各种战术的运用。要将 CGF 技术运用到双机格斗训练这一领域, 除了需要高真实度的战机物理模型和机载设备、武器模型外, 还需要高真实度的战机行为模型。我们以某型战斗机近距离空战为背景, 综合运用了模糊控制技术和遗传算法建立了一个双机格斗行为模型, 并实现了一个空战 CGF 原型系统。

1 系统结构

我们所完成的空战 CGF 系统由两台运行 Window NT 4.0 的 PentumII400 PC 机和一台 SGI Octane 工作站组成, 系统框架如图 1 所示。

两台 PC 机上各自运行一个战机 CGF 系统, Octane 工作站用于显示两架战机的格斗场景。三台计算机通过 10Mb 以太网互联, 并通过 DMSO 所开发的 RTI1.3NGv2 进行交互。

2 战机行为模型框架

战机行为模型分为传感器和作战逻辑两部分, 其框架如图 2 所示。

传感器子系统对本机状态和通过 RTI 所接收的敌机状态进行综合, 并计算相对运动信息, 包括距离、相对速度、相对高度、视角、进入角、态势角、视线俯仰角、视线偏航角等。作战逻辑子系统利用这些相对信息和本机状态进行决策, 并将控制指令发送到战机仿真模型。控制指令包括操纵杆横

* 收稿日期: 2001-05-17
作者简介: 薄涛 (1974-), 男, 博士生。

向位移（控制横滚）、操纵杆纵向位移（控制俯仰）、油门杆位置、舵踏板位移、雷达控制指令（开机、关机、锁定、解锁、工作模式、扫描方式）、导弹控制指令（接通、关闭、发射）、机炮控制指令。作战逻辑子系统在结构上分为战略决策层、战术决策层、动作规划层。其功能定义如下：

(1) 战略决策层。根据当前战场形势做出战略决策，如进攻、防守、追击、脱离等。

(2) 战术决策层。根据战略决策层的输出和当前敌我双方的态势，规划出适当的基本战术动作序列，如高速遥遥、低速遥遥、水平转弯、战斗转弯、半滚倒转、半筋斗转弯等等；同时，在本层还完成对雷达和武器系统的控制。

(3) 动作规划层。将所需完成的动作转化为战机飞行控制系统输出量，包括操纵杆横向位移（控制横滚）、操纵杆纵向位移（控制俯仰）、油门杆位置、舵踏板位移，并将这些飞行控制指令与战术决策层中生成的雷达和武器系统控制指令一起输出给战机仿真模型。

3 战机行为模型的建立

空战过程是一个高度非线性的复杂动态过程，高真实度空战行为模型的建立是一个非常困难的问题。一般的控制和优化方法都难于直接用于空战行为建模。虽然空战行为极其复杂，但仍然有一定的规律，其行为可以看作是由一系列基本空战机动动作（Basic Fighter Maneuver, BFM）组成。所以，我们可以将空战过程看作是一个动态决策过程，其决策依据是飞行员的作战经验。那么，我们就可以利用飞行员的作战经验来建立战机的行为模型。

在真实世界中，人们的经验都是具有模糊性的，而模糊数学^[1]就是为了表达真实世界中的模糊性而诞生的一门学科。模糊数学从创立至今已经在自动控制、人工智能等领域得到了广泛的应用。我们在建立战机行为模型时，就采用了模糊技术来将飞行员的经验转化为模糊规则。

3.1 战略决策层

在战略决策层中，我们直接利用飞行员的经验来完成战略决策过程。在这一层中，决策要素包括敌我距离、我机剩余弹药、我机机载武器状态（机炮、红外近距弹、雷达中距弹等）、敌机雷达状态（已发现、已跟踪、已锁定）、敌我能量对比、我机进入角、我机态势角、敌机进入角、敌机态势角等。其中一些要素，包括距离、角度等，需要进行模糊化。进行模糊化时隶属度函数一律取指数型。本层所需完成的任务是根据这些决策要素来判定我机是否具有优势，是否处于被攻击状态，是否可以立即投入进攻。这一层的决策任务相对来说比较简单。

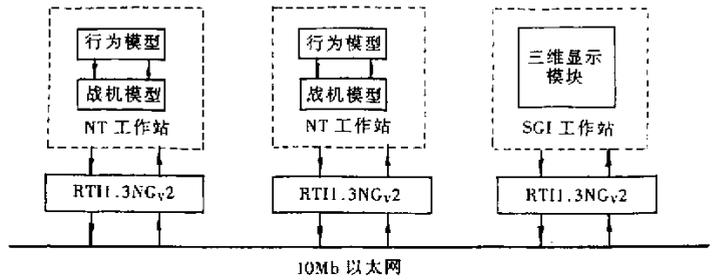


图 1 系统结构框架

Fig.1 Framework of system structure

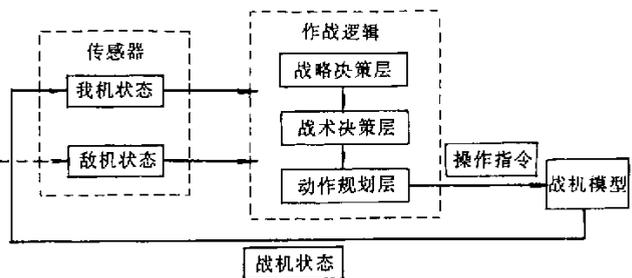


图 2 战机行为模型框架

Fig.2 Framework of fighter behavior model

3.2 战术决策层

在战术决策层中，我们也直接利用飞行员的经验来完成战术决策过程。在这一层中，决策要素包括战略决策层的输出、敌我距离、接近速度、敌我高差、我机进入角、敌机进入角、我机态势角、敌机态势角、我机雷达和机载武器状态、敌机雷达状态等。与战略决策层相似，一些决策要素需要模糊化，在进行模糊化时，隶属度函数采用指数函数。本层的决策任务是根据所需要达到的战略目的，选择一组适当的BFM。这一层的决策任务相对来说比较复杂，所涉及的模糊规则比较多，因此，我们采用决策树的方法来完成决策过程。图3是决策树的示意图。

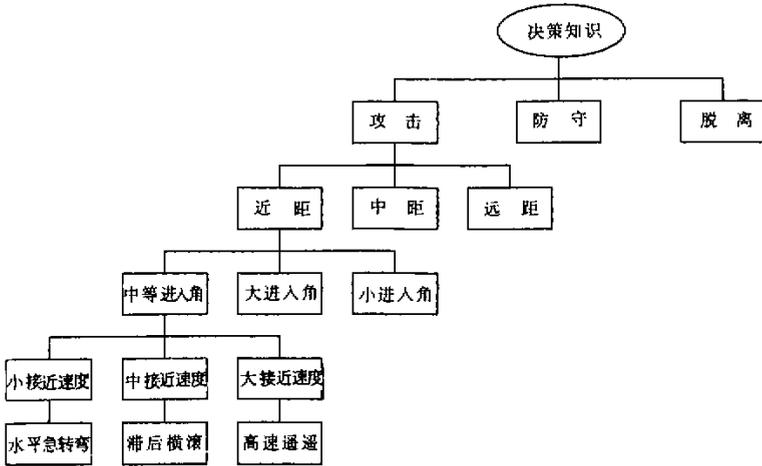


图3 战术决策层决策树示意图

Fig.3 Decision tree of tactic decision layer

3.3 动作规划层

动作规划层的任务是根据所需完成的BFM生成控制指令，并将控制指令传输到飞机仿真模型中。在这一层中直接使用飞行员的作战经验是比较困难的。因为这一层的输出量是各种控制指令，有些控制指令（如飞行控制指令）是模拟量，将飞行员的作战经验直接转化为模拟控制量是比较困难的，很容易造成飞机的飞行出现大的振荡。为了解决这个问题，我们将这决策过程分为两步：首先根据飞行员的经验决策出期望的飞行状态控制量，如速度、俯仰角、横滚角、过载等，然后再利用模糊控制器来对飞机进行控制，以获得期望的飞行状态。

期望飞行状态控制量可以由飞行员的经验直接决策得到，但由飞行员的经验直接生成模糊控制器则比较困难。为了解决这一问题，我们首先根据飞行员的经验构造一个基本模糊控制器，然后利用遗传算法来对这个模糊控制器进行优化。下面，我们将介绍这些模糊控制器的构造和优化。

通过对飞行员驾驶经验进行分析，我们发现模糊控制器可以采用如下形式：

$$\Delta u = k_P e + k_{PE} \dot{e}$$

对上式进行积分得：

$$u = u_0 + k_I \int e + k_{PE} e$$

可见，此模糊控制器实质上是一个变系数比例积分控制器。

模糊控制器采用中心平均模糊消除器、单值模糊产生器和乘积推理规则，语言变量采用高斯隶属度函数。这一类模糊控制器具有任意的非线性逼近能力^[2]。以横滚角度模糊控制器为例，我们对误差、误差导数和输出都使用了八个语言变量，分别为：NB、NM、NS、NZERO、PZERO、PS、PM、PB。模糊控制器共有64条模糊规则，其输入输出可以表示为：

$$\Delta u = \frac{\sum_{l=1}^{64} \bar{y}^l \left[\prod_{i=1}^8 \exp\left(-\left(\frac{e - \bar{e}_i}{\sigma_i}\right)^2\right) \cdot \exp\left(-\left(\frac{\dot{e} - \bar{\dot{e}}_i}{\sigma'_i}\right)^2\right) \right]}{\sum_{l=1}^{64} \left[\prod_{i=1}^8 \exp\left(-\left(\frac{e - \bar{e}_i}{\sigma_i}\right)^2\right) \cdot \exp\left(-\left(\frac{\dot{e} - \bar{\dot{e}}_i}{\sigma'_i}\right)^2\right) \right]}$$

其中, $\bar{y}^l \in \{y_i | i = \text{NB}, \text{NM}, \dots, \text{PM}, \text{PB}\}$ 代表第 l 条规则的输出语言变量在其隶属度函数取最大值时所对应的值, \bar{e}_i 、 $\bar{\dot{e}}_i$ 、 σ_i 、 σ'_i 分别为对应误差和误差导数语言变量隶属度函数的参数。根据经验, 采用对称隶属度函数形式, 则语言变量可以减少为四个, 即 B、S、M、ZERO。各参数应满足约束条件:

$$0 < \bar{e}_{\text{ZERO}} < \bar{e}_S < \bar{e}_M < \bar{e}_B < \pi, 0 < \bar{\dot{e}}_{\text{ZERO}} < \bar{\dot{e}}_S < \bar{\dot{e}}_M < \bar{\dot{e}}_B < 2\pi, 0 < y_{\text{ZERO}} < y_S < y_M < y_B < 0.1$$

通过调节 y_i 、 \bar{e}_i 、 $\bar{\dot{e}}_i$ 、 σ_i 、 σ'_i 的取值, 就可以得到不同的控制性能。

用手工方式来对这些参数进行调节是一件非常困难和费时的的工作, 在此我们使用遗传算法来完成对参数的寻优工作。遗传算法^[314]是一种随机搜索算法, 它模拟自然界的生物进化过程, 通过选择、交叉、变异等操作来对候选解进行重组, 逐渐提高候选解的性能。遗传算法已在优化领域得到了广泛的应用, 它尤其适合于求解一些高度非线性或一些无法获知其内部结构, 但其性能可以从外部测量的问题。

以横滚角度模糊控制器为例, 在应用遗传算法来对控制器参数进行优化时采用浮点编码方案, 将所需调节的参数用一个浮点数组来表示。适宜函数为战机在平飞状态时执行 90 度横滚过程中误差的积分, 其离散形式为:

$$\text{fitness} = \sum_k |e_k|$$

由于标准遗传算法所使用的单点一致交叉算子和一致变异算子有可能破坏约束条件, 产生非法个体, 所以必须采用新的算子。在此我们使用了两种新的算子:

(1) 算术交叉算子

假定父代个体为 $p_1 = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $p_2 = \{a'_1, a'_2, \dots, a'_n\}$, 则交叉后生成的两个新个体为:

$$p'_1 = \{ka_1 + (1-k)a'_1, ka_2 + (1-k)a'_2, \dots, ka_n + (1-k)a'_n\}$$

$$p'_2 = \{ka'_1 + (1-k)a_1, ka'_2 + (1-k)a_2, \dots, ka'_n + (1-k)a_n\}$$

其中, $k \in (0, 1)$, 称为算术交叉因子。 k 可以控制两个后代个体之间的距离。

(2) 区间变异算子

被选中产生变异的基因 a 按照下式改变:

$$a' = a + \Delta$$

其中 Δ 为一随机变量, 且:

$\Delta \in [a_{\min} - a_1, a_{\max} - a_1]$, a_{\max} 和 a_{\min} 分别代表在不破坏约束条件时 a 所取值的上确界和下确界。

显然, 此处定义的算术交叉算子和区间变异算子不会破坏约束条件。

计算时取种群规模为 2000, 最大世代数为 1000, 交叉概率为 0.2, 变异概率为 0.001。在一台运行 Windows NT 的 PII533 PC 机上经过 10 小时左右的运算得到了一组最优参数, 它所对应的模糊控制器表现出了良好的控制性能。用类似的方法对其它的模糊控制器进行优化, 都得到了令人满意的结果。

4 实验结果

在仿真实验中此 CGF 系统表现出了比较真实的空战行为。图 4 和图 5 给出了部分实验结果。

在图 4 中, 两架战机在仿真开始时 (A 点) 处于并排飞行状态, 在格斗过程中两架战机都采用大过载桶滚机动和下滑转弯机动来企图占据对方尾后的有利位置, 两机从高度 6000m 一直缠斗到高度

约 1500m 后由于高度过低而相互交错脱离 (B 点)。

在图 5 中,一架战机在初始时刻 (A 点) 具有位置优势,在此称为攻击机,其轨迹由细实线表示;另一架战机在初始时刻具有速度优势,其轨迹由粗实线表示,在此称为目标机。仿真开始后,目标机发现形势不利,利用自己的速度优势采用过载为 4.5G 的水平急转弯进行防御,攻击机则立即采用低速遥遥战术进行对抗。最后,攻击机成功地占据了目标机的尾后位置,并将机头指向敌方,获取了一次后半球红外近距离导弹攻击机会 (B 点)。

5 结束语

空战 CGF 技术在空战仿真训练、战术研究领域都有着广泛的应用前景。本文对双机空战格斗 CGF 的行为建模技术进行了一些探讨,并取得了较好的结果,但本文并未涉及多机协同作战方面的研究。目前,随着多智能体技术的发展,多机协同空战行为建模方法已成为今后的研究目标,相信这将进一步扩展空战 CGF 的应用领域。

参考文献:

- [1] 扎德 L.A. 模糊集合、语言变量及模糊逻辑 [M]. 陈国权译. 北京:科学出版社,1982.
- [2] 王立新. 自适应模糊系统与控制——设计与稳定性分析 [M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [3] Holland J.H. . Adaptation in Natural and Artificial Systems [M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.
- [4] 王正志, 薄涛. 进化计算 [M]. 长沙:国防科学技术大学出版社,2000.
- [5] Tambe M, Johnson W L, Jones R M. , Koss F, Laird J E, Rosenbloom P S and Schwamb K B. Intelligent Agents for Interactive Simulation Environments [J]. AI Magazine, 1995, 16 (1): 15 - 39.
- [6] Shaw R L. Fighter Combat Tactics And Maneuvering [M]. Maryland: Naval Institute Press, 1985.

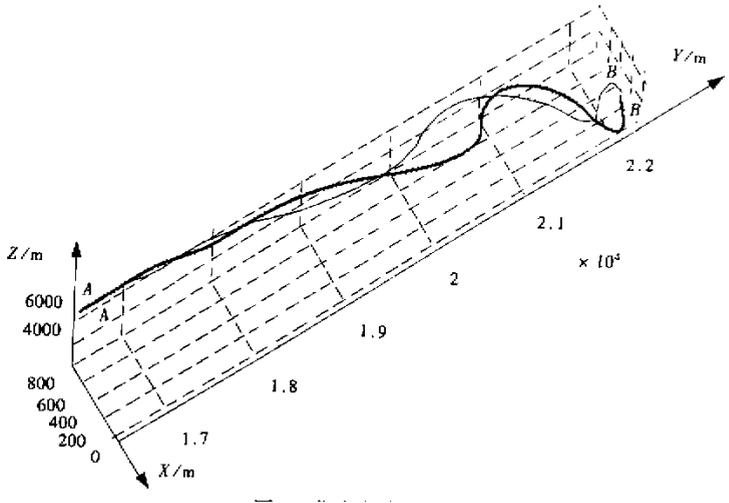


图 4 仿真实验结果 1
Fig.4 Simulation result 1

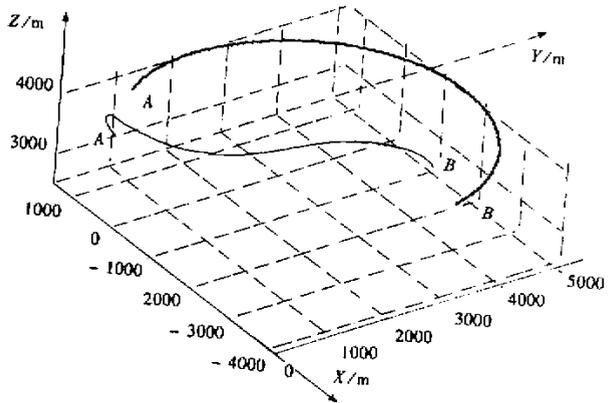


图 5 仿真实验结果 2
Fig.5 Simulation result 2

