

自适应DR 算法研究

周绥平 陈宗基

(北京航空航天大学305教研室, 北京, 100083)

ADAPTIVE DEAD RECKONING ALGORITHM

Zhou Suping, Chen Zongji

(Faculty 305 of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

摘要 首先介绍了DR 算法的基本思想,并分析了现有的DR 算法的不足之处,然后提出了一种自适应DR 算法,最后,将提出的这种自适应DR 算法与普通DR 算法进行了比较研究,结果表明,自适应DR 算法是十分有效的。

关键词 仿真 自适应 网络

中图分类号 V 249.1

Abstract Dead Reckoning (DR for short) algorithm is an important technique which is widely used in distributed interactive simulation. Based on the basic idea of DR algorithm, an adaptive DR algorithm is presented in this paper. The proposed algorithm is then compared with the commonly used DR algorithm, and we show that our algorithm is very effective.

Key words simulation adaptation networks

1 分布交互仿真与DR 算法

分布交互仿真(Distributed Interactive Simulation,以下简称DIS)是指用计算机网络将分布在不同地域的训练设备(如仿真器)和训练人员联结起来,使得训练人员可以在人工合成的电子战场环境中进行诸如空中格斗、空地对抗及大规模军事演习等高级训练任务的一种先进的仿真技术。

DIS 具有特点:分布性,交互性,仿真性,实时性,自治联邦性,灵活性。

在DIS 中,分布在不同地域的仿真结点之间要交换大量的信息,且对通信有实时性要求。这就一方面要求有高速大容量的通信网络支持;另一方面,应设法减少仿真结点之间的交换信息量,从而降低对通信网络的带宽和容量的要求。

DR (Dead Reckoning)算法是DIS 中普遍采用的技术^[1,2],它对于减少仿真结点之间的通讯量是十分重要的。其基本思想是:在接收结点中放入能反映发送结点中的仿真实体运动行为的一个低阶近似模型(DR 模型),在发送结点中也放入同样的关于其自身的DR 模型。这样,发送结点就不必在每个仿真帧周期中都将其状态发送给接收结点,而只是在其真实状态与DR 模型的推算状态之间的偏差超过某个预先设定的阈值时,才向接收结点发送新的状态信息。接收结点在发送结点的两次状态更新信息之间,根据接收结点的前一个报告状态,利用其DR 模型来外推发送结点中仿真实体的状态。这样就可大大减少仿真结点之间的通讯次数。在DIS 中,采用DR 算法后,可将通讯量减小90%到50%,从而大大降低对网络带

1994-09-26收到,1995-02-21收到修改稿

航空基金和国防科工委光华基金的资助课题

宽和容量的要求。

DR 算法中采用的模型一般为一阶或二阶模型。设发送结点的最近一次状态更新信息为: x_0 为位置, v_0 为速度, a_0 为加速度, 则一阶DR 算法的递推方程为

$$\hat{x}_k = x_0 + v_0kh \tag{1}$$

二阶DR 算法的递推方程为

$$\hat{x}_k = x_0 + v_0kh + \frac{1}{2}a_0(kh)^2 \tag{2}$$

以上两式中, h 为仿真的帧长; k 为从最近一次更新开始递推的步数。

从式(1), 式(2)可以看出, 目前采用的DR 算法的递推方程是固定不变的, 由于DR 算法的实质是利用一个低阶模型逼近运动对象的真实运动行为, 故当对象的真实运动轨迹变化较平缓时, DR 算法的效果是很好的, 即此时的状态更新次数很少; 而当对象的真实运动轨迹变化较剧烈时, DR 算法的效果会明显变差。本文提出的自适应DR 算法正是针对这种情况提出的, 希望当对象的机动运动水平较高时, 仍使DR 算法有较好的推算效果。

2 自适应DR 算法

设第 k 次更新和第 $(k+1)$ 次更新之间的时间间隔为 Δt_k , 则 Δt_k 愈大, 表明DR 模型的行为与对象的真实运动行为愈接近。从另外一个角度看, Δt_k 愈大(小), 表明对象的机动运动水平愈低(高)。因此, Δt_k 是一个能够反映对象机动运动水平的量。显然, Δt_k 对于远程结点是可以获得的, 故 Δt_k 即是所需的特征量。

基于一阶DR 模型的自适应DR 算法为

$$\hat{x}_t = x_k + v_k(t - t_k) + \alpha \frac{t - t_k}{\Delta t_{k-1}} e_k \tag{3}$$

式中: α 为匹配因子, 且有 $0 < \alpha < 1$ 。

设 $\Delta t_{k-1} = mh, m$ 为正整数(Δt_{k-1} 必为 h 的整数倍), $t = t_k + ih, i = 1, 2, \dots, m$; 则

$$\hat{x}_t = x_k + v_k ih + \alpha i \frac{e_k}{m} \tag{4}$$

故远程结点的基于一阶DR 模型的自适应DR 算法为

$$\begin{aligned} & i = 1; \\ & \text{if } i \leq m \\ & \text{then} \\ & \quad \{ \hat{x}_t = x_k + v_k ih + \alpha i \frac{e_k}{m} \tag{5} \\ & \quad i = i + 1; \} \\ & \text{else} \\ & \quad \hat{x}_k = x_k + v_k ih + \alpha e_k; \end{aligned}$$

对于本地结点, 其自适应DR 算法除了还需进行必要的阈值判断外, 与远程结点相同。

在以上算法中, 记 $M = \alpha i \frac{e_k}{m}$, 称 M 为自适应修正项, 显然有

$$\left. \begin{aligned} M &= \alpha i \frac{e_k}{m}, i = 1, 2, \dots, m \\ M &= \alpha e_k, i > m \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

实际上, M 的构造是基于下面三个基本假设:

假设1 相邻的更新的时间间隔 Δt_{k-1} 和 Δt_k 的大小近似相等。

假设2 连续两次更新时的推算偏差 e_k 和 e_{k+1} 的大小近似相等。

假设3 在连续两次更新之间, 推算偏差呈单调性。

需要指出的是, 以上三个基本假设并非是对对象运动轨迹所做的附加约束, 而是常规战术机动中飞行轨迹本身所具备的性质。

根据假设1和假设2, 若本次更新时的推算偏差为 e_k , 从上次更新至本次更新共推算了 m 步, 则从本次更新开始, 基于同样的DR 模型推算 m 步, 所产生的偏差也近似为 e_k 。故可对推算值反向补偿 e_k 值。这样就可以使从本次更新开始推算 m 步后的偏差仍近似为零, 这也正是本算法改善DR 算法效果的原因所在。根据假设3, 在推算的前 m 步之内, 每次补偿 e_k/m , 即将总补偿量 e_k 均匀分配在 m 步上, 这样可使每步推算的偏差最小。

对于二阶DR 算法, 其自适应修正项的形式与一阶DR 算法完全一样, 这里不再写出二阶自适应DR 算法的具体形式。

3 基本假设的说明

下面对自适应DR 算法中的三个基本假设进行说明。

注意到这样一个事实: 由于惯性的原因, 飞机等运动对象的机动运动均是由分段圆周运动组成的^[3,4]。故可选取圆周运动模式进行分析。

设飞机以固定过载进行水平盘旋运动, 仿真结点以一阶DR 算法来推算飞机的运动轨迹, 则DR 模型的运动行为如图1中的折线段所示(图中对折线段进行了放大), 即从圆周上某一点出发, 按该点处圆周的切线方向运动; 当其运动轨迹与圆周的偏差超过某一阈值时, 将其运动轨迹修正至圆周上, 然后重复以上过程。从图1可以看出, 3个基本假设是成立的。



图1 圆周运动模式下一阶DR 模型的运动行为

下面针对具体的运动方程进行说明。设飞机的水平盘旋运动方程为

$$r = R(\cos\omega t i + \sin\omega t j) \quad (7)$$

式中: R 为盘旋半径; ω 为盘旋角速度; i, j 分别为 x 方向和 y 方向的单位向量。

仅以 x 方向的运动来说明以上假设。飞机在 x 方向的运动方程为

$$x = R \cos\omega t \quad (8)$$

对上式求导有

$$\dot{x} = -R\omega \sin\omega t \quad (9)$$

故其一阶DR 模型为

$$\hat{x}_{k+1}(t) = R \cos\omega t_k - R\omega \sin(\omega t_k)(t - t_k) \quad (10)$$

式中: \hat{x}_{k+1} 表示从第 k 次更新开始计时起 t 时刻的推算值; t_k 为第 k 次更新的时刻。记 $\alpha_k = \omega t_k$, $\alpha = \omega t$, 则推算的偏差为

$$\begin{aligned} e_{k+1}(t) &= x(t) - \hat{x}_{k+1}(t) \\ &= R \cos\alpha - R \cos\alpha_k + R\omega \sin\alpha_k(t - t_k) \end{aligned} \quad (11)$$

上式对 t 求导有

$$\dot{e}_{k+1}(t) = R\omega(\sin\alpha_k - \sin\alpha) \tag{12}$$

考虑到三角函数的周期性, 仅讨论 $\alpha, \alpha \in [0, 2\pi]$ 的情况。又将区间 $[0, 2\pi]$ 划分为 $[0, \pi/2), [\pi/2, 3\pi/2), [3\pi/2, 2\pi]$ 3个子区间。在区间 $[0, \pi/2)$ 内, 由于正弦函数的单调性, 且 $\alpha_k < \alpha$, 故 $\dot{e}_{k+1} < 0$, 所以, $e_{k+1}(t)$ 单调递减。同样可以证明在区间 $[\pi/2, 3\pi/2)$ 和 $[3\pi/2, 2\pi]$ 内, e_{k+1} 亦呈单调性。这即证明了假设3成立。

由于在DR 算法中, 只要DR 模型的推算值与对象的真实轨迹值的偏差超过预先设定的阈值 δ , 便进行状态更新。所以连续两次更新时的推算偏差 e_k 和 e_{k+1} 的大小近似相等, 且均近似为 δ , 故假设2成立。

对于假设1, 仍用图示的方法加以说明。对象在 x 方向的运动轨迹为图2所示的余弦曲线。一阶DR 模型的行为如图中的折线段所示(图中对折线段进行了放大)。从图2中容易看出, 假设1成立。

需要指出的是, 当DR 算法的推算过程跨越对象真实运动轨迹的拐点时, 3条假设是不成立的(参见图2)。但这种情况在对象运动的一个周期中只发生两次, 相对一个周期内的状态更新次数来说是极少的, 可忽略不计。

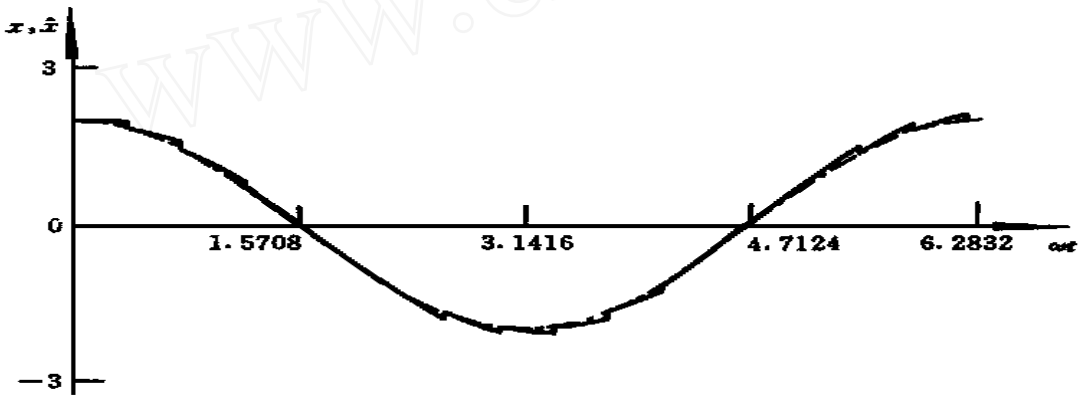


图2 对象在 x 方向运动轨迹的余弦曲线

4 仿真研究及结论

以某一飞行速度为 $0.8M a$ 的飞机进行仿真研究。仿真步长为 $0.03s$, 仿真时间为 $150s$, DR 算法中的角度偏差阈值为 3° ; 位置偏差阈值为 $2.77m$ 。取3种运动模式来验证自适应DR 算法的效果。

(1) 当飞机以 45° 的滚转角在水平面内进行盘旋时, 若不采用DR 算法, 而在每个帧周期中都发送状态信息, 则需传送 $150/0.03 = 5000$ 次状态信息。采用一阶DR 算法后, 只需传送 231次, 通讯次数降低了95%; 采用二阶DR 算法后, 只需传送62次状态信息, 通讯次数降低了98.8%。可见采用DR 算法可大大降低仿真结点之间的通讯次数。

采用基于一阶DR 模型的自适应算法后, 状态更新次数降为170次, 与采用普通的一阶DR 算法的231次相比, 通讯次数降低了26%; 采用基于二阶DR 模型的自适应算法后, 状态更新次数降为53次, 与采用普通的二阶DR 算法的62次相比, 通讯次数降低了14.5%。

(2) 当飞机以交替运动模式($a + 30^\circ$ 滚转角; $b - 30^\circ$ 滚转角, 每隔 $10s$ 切换一次)飞行时, 采用一阶DR 算法后, 状态更新次数143次; 引入自适应DR 算法后, 状态更新次数降为

121次, 通讯次数降低了13%。

(3) 当飞机以复合运动模式($a + 45$ 滚转角, 12.19m/s 爬升率; $b - 30$ 滚转角, -12.19m/s , 爬升率; 每隔 10s 切换一次) 飞行时, 采用二阶DR 算法后, 状态更新次数为365次, 引入自适应DR 算法后, 状态更新次数降为348次, 通讯次数降低了5%。

可见采用本文提出的自适应算法, 可以在原来DR 算法的基础上进一步减少仿真结点之间的通讯次数(在大多数情况下, 可减少10% - 20%), 且对象的运动轨迹越接近圆周效果越明显。这对于结点很多, 仿真时间较长的大规模分布交互仿真是很有意义的。

需要指出的是, 本文对自适应DR 算法进行的分析是基于圆周运动模式的。这对于实际应用虽然是合理的, 但从理论上讲, 基于更为一般的二次曲线(如椭圆运动模式的分析更具一般意义。这将是我們进一步的工作。

参 考 文 献

- 1 Goel S C, Morris K D. Dead-reckoning for aircraft in distributed interactive simulation. Flight Simulation Technology Conference, AIAA, 1992, 277- 284
- 2 Duncan C M. Interoperability issues for distributed interactive simulation. SCS Summer Simulation Conf, 1992, 1015- 1018
- 3 白丽洁. 飞机对地自动攻击轨迹生成及综合控制研究. 博士学位论文, 北京: 北京航空航天大学, 1994
- 4 韩亮. 空战智能仿真系统. 博士学位论文, 北京: 北京航空航天大学, 1994

国际会议信息

航空航天及相关机理研讨会 (National seminar on Aerospace and Related Mechanisms)

时 间: 1996年11月14~ 15日

地 点: 印 度

主办单位: Vikram Sarabhai 空间中心\ 海德拉巴防务研究与发展实验室

内 容: 宇宙飞船、飞机、运载火箭的发展机理和防务应用; 关于性能、可靠性、重量、尺寸等边缘交叉观点的各种设计概念和原则的研究比较; 解决航空航天机理问题的先进技术的应用。欢迎有关设计、使用、试验、模拟、可靠性、疲劳分析方面的文章。

注册费: 1000印度卢比

联系人: Mr. M. K. AbdulMajeed

Director Aerospace Mechanisms Group.

Executive chairman

Organising committee

Seminar on Aerospace and related mechanisms

VSSC, V aliamala complex

Thiruvananthapuram 695547, INDIA

Fax: 047166210