

DOI: 10.3901/JME.2016.02.127

基于混沌理论的无人驾驶车辆行驶轨迹量化分析*

孙 扬^{1,2} 熊光明² 陈慧岩² 姜 岩² 龚建伟²

(1. 河北工程大学机电学院 邯郸 056038;

2. 北京理工大学智能车辆研究所 北京 100081)

摘要: 针对无人驾驶车辆客观量化评价困难的问题, 提出基于混沌理论的无人驾驶车辆行驶轨迹的量化分析方法。应用五次多项式方法结合优秀驾驶员驾驶车辆行驶的初始状态和目标状态设计无人驾驶车辆的理想轨迹, 计算实际行驶轨迹与理想轨迹的偏差得到偏差时间数据序列; 采用混沌理论的 C-C 方法对偏差时间数据序列重构相空间; 计算偏差时间数据序列的 Lyapunov 指数, 实现无人驾驶车辆行驶轨迹的量化表示。运用提出的方法对无人驾驶车辆避障换道的行驶轨迹偏差时间数据序列进行相空间重构, 计算其 Lyapunov 指数为正值, 表征人驾驶车辆系统的混沌性, 还表征人驾驶车辆收敛到稳态响应的快慢程度。试验表明基于混沌理论的无人驾驶车辆行驶轨迹的量化分析是可行的, 有效的。

关键词: 无人驾驶车辆; 混沌; 量化分析; Lyapunov 指数

中图分类号: TP242

Quantitative Analysis of Unmanned Ground Vehicles Trajectories Based on Chaos Theory

SUN Yang^{1,2} XIONG Guangming² CHEN Huiyan² JIANG Yan² GONG Jianwei²

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: The quantitative evaluation of unmanned ground vehicles is difficult. For this problem a quantitative analysis method based on chaos theory is proposed. The ideal trajectory of unmanned ground vehicles is designed applying the five order polynomial method, and the deviation time series are obtained by calculating the deviation of the actual trajectory and the ideal trajectory. Then the phase space of the deviation time series is reconstructed based on C-C method. The Lyapunov exponent of the deviation time series is calculated which the quantitative presentation of unmanned ground vehicles trajectory is. The quantitative presentation of unmanned ground vehicles trajectory of obstacle avoidance is achieved. The phase space of the deviation time series of obstacle avoidance is reconstructed. The Lyapunov exponent of obstacle avoidance is positive which is characterized the chaos of the unmanned ground vehicle and the speed of convergence to the steady state. Experimental results show that the quantitative analysis method based on chaos theory for unmanned ground vehicles trajectory is feasible and effective.

Key words: unmanned ground vehicles; chaos; quantitative analysis; Lyapunov exponent

0 前言

无人驾驶车辆的客观量化评价比较困难。卡内基梅隆大学的学者针对无人驾驶车辆 Boss 在 2007 DARPA 城市挑战赛低速、低密度的交通环境, 提出了一套结合成本的量化评价方法^[1]。本课题组对

无人驾驶车辆的定量评价做过一些尝试, 提出了基于成本函数的定性定量相结合的评价方法^[2]和 fuzzy-AHP 评价方法^[3]。这些方法, 在一定程度上实现了无人驾驶车辆的定量评价, 但是其中评价指标的量化受主观因素的影响较大。为了实现无人驾驶车辆客观的定量评价, 需要研究探索更为客观的定量分析方法。

在机器人领域, 很多学者开展了移动机器人行为的定量分析。ULRICH 等^[4-6]提出一种定量描述移动机器人行为的方法。应用混沌理论方法对移动机

* 国家自然科学基金重点(90920304)、国家自然科学基金培育(91120010)和河北省教育厅(QN2015129)资助项目。20150327 收到初稿, 20151008 收到修改稿

器人行为进行定量分析。SCHÖNER 等^[7-8]应用动力学系统理论定量分析机器人行为。ULRICH^[9]提出了定量测量机器人和环境的交互基于对机器人随时间推移的行驶轨迹进行分析。用指数误差生长因子 (Exponential error growth factor, EGF) 来估计机器人行驶轨迹随初始条件改变的敏感程度, 如机器人的两条行驶轨迹由于起始点的略微不同随时间偏移的程度应用于机器人与环境交互的定量描述。TOM 等^[10]对移动机器人定位质量评价提出了一般性能测量和标准的试验程序。李立等^[11]提出了消除空间刚性冗余度机器人关节运动轨迹漂移混沌现象的延迟反馈控制法。给出的一个空间刚性冗余度机器人在基于雅可比矩阵的伪逆方法使其末端重复跟踪工作空间内的一条封闭路径时的混沌控制的算例证明了所提方法的有效性。研究表明, 在适当的参数下, 系统的混沌运动可以转变为规则的周期运动。应用混沌理论解决了移动机器人的关键技术问题。石鸿雁等^[12]提出了一种基于混沌优化算法的机器人路径规划方法, 即混沌人工势场法, 该方法能够在动态环境下实时、有效地产生避碰局部最优路径, 避免了传统人工势场法容易陷入局部最优和在比较靠近的两个障碍物之间找不到通道的缺陷。KEWLANI 等^[13]提出了一种多元素广义多项式混沌 (Multi-element generalized polynomial chaos, MEGPC) 的方法, 明确考虑参数的不确定性可以对机器人动力学的进行高效准确的长期预测。GAO 等^[14]针对移动机器人在全局路径规划中存在的问题, 提出了混沌遗传算法。将混沌应用于遗传算法使得遗传算法的收敛速度得到提高, 并且有效地避免了局部优化。由混沌遗传算法进行的路径规划不仅满足路径最短, 而且还能有效避免与障碍物碰撞。姜万录等^[15]通过识别、检测复杂信号中的混沌信号, 用于汽车隔振性能的评估、部件的故障诊断。

本文借鉴移动机器人行为的定量分析方法, 采集在复杂环境下的无人驾驶车辆的行驶轨迹, 采用混沌理论的方法实现无人驾驶车辆行驶轨迹的量化分析。结果能直观地反映无人驾驶车辆智能水平的高低。

1 体系结构

无人驾驶车辆的轨迹是与其行为联系最为紧密的参数之一, 例如 x 轴、 y 轴位置随时间的变化。无人驾驶车辆行驶轨迹量化分析的流程见图 1。

(1) 应用五次多项式方法结合优秀驾驶员驾驶车辆行驶轨迹的状态参数设计出理想轨迹。

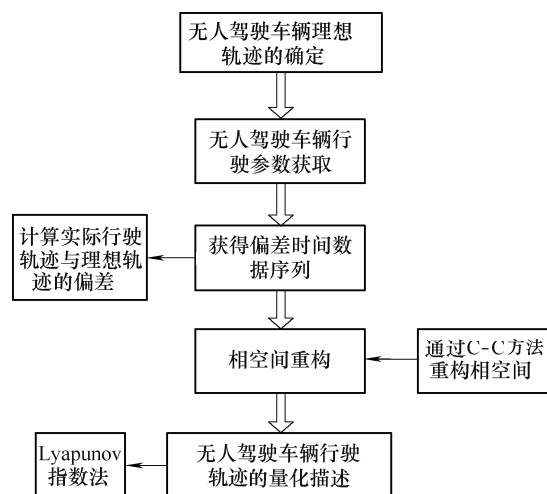


图 1 无人驾驶车辆行驶轨迹量化分析流程图

(2) 将获得的无人驾驶车辆的实际轨迹与理想轨迹进行对比, 得到它们之间偏差的时间数据序列。

(3) 通过 C-C 方法计算时间延迟和嵌入维数, 进而重构偏差时间数据序列的相空间。

(4) 通过计算 Lyapunov 指数的方法实现无人驾驶车辆行驶轨迹的定量描述。

第 3 节和第 4 节是本文的重点, 通过基于混沌理论的相空间重构和 Lyapunov 指数法实现无人驾驶车辆行驶轨迹的量化分析。

2 量化分析方法

无人驾驶车辆行驶轨迹进行量化分析包括对无人驾驶车辆行驶轨迹偏差时间数据序列进行相空间重构和计算其 Lyapunov 指数两部分。

首先, 将无人驾驶车辆的实际行驶轨迹 $f(x, y)$ 与无人驾驶车辆理想轨迹对比, 求出无人驾驶车辆实际轨迹与理想轨迹的偏差随时间变化的时间数据序列 $D(t)$; 然后, 对偏差时间数据序列 $D(t)$ 进行相空间重构; 最后计算无人驾驶车辆行驶轨迹偏差时间数据序列的 Lyapunov 指数。

2.1 采用 C-C 方法进行相空间重构

“相空间”是指一个系统所有可能状态的空间; 系统每个可能的状态都有一个相对应的相空间的点。

为了从无人驾驶车辆行驶轨迹偏差时间序列中把蕴藏的信息充分地显露出来, 以便恢复吸引子的特性, 采用 C-C 方法重构相空间^[16]。

对于时间序列 $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_i), \dots, x(t_n)$, 选取适当的时间延迟 τ 和嵌入维数 m , 构造出 m 维相空间

$$X(t_i)=[x(t_i), x(t_i + \tau), x(t_i + 2\tau), \dots,$$

$$x(t_i + (m-1)\tau)] \quad i=1, 2, \dots, n-(m-1)\tau \quad (1)$$

(1) 计算无人驾驶车辆行驶轨迹偏差时间序列标准差 σ ，选取 N 。

(2) 计算下面三个量

$$\bar{S}(t) = \frac{1}{16} \sum_{m=2}^5 \sum_{j=1}^4 S(m, r_j, t) \quad (2)$$

$$\Delta \bar{S}(t) = \frac{1}{4} \sum_{m=2}^5 \Delta S(m, t) \quad (3)$$

$$S_{cor}(t) = \Delta \bar{S}(t) + |\Delta \bar{S}(t)| \quad (4)$$

$$S(m, r_j, t) = \frac{1}{t} \sum_{s=1}^t [C_s(m, r_j, t) - C_s^m(1, r_j, t)]$$

$$m=2, 3, 4, 5 \quad (5)$$

$$\Delta S(m, t) = \max \{S(m, r_j, t)\} - \min \{S(m, r_j, t)\} \quad (6)$$

(3) 根据计算结果画图。

1) $\Delta S(m, t)$ 的第一个极小值对应的 t 为最佳时滞。

2) $\bar{S}(t)$ 的第一个零点 t 为最佳时滞。

3) $S_{cor}(t)$ 的最小值 t 对应时间窗口 τ_w 。

无人驾驶车辆实际行驶轨迹相对于理想轨迹偏差变化 $D(t)$ 越大，则相空间越模糊失真且维数越大。

2.2 Lyapunov 指数计算

根据混沌理论，最大 Lyapunov 指数为负表明系统的运动最终将收敛到一个稳定的平衡点，为零则表明系统的运动最终将收敛到一个稳定的运动形态，而正值的最大 Lyapunov 指数则表明系统的运动将表现为混沌状态。最大 Lyapunov 指数的数值大小还表征了系统收敛到稳态响应的快慢程度，其倒数则表征了系统运动状态最大可预测时间^[16]。

计算无人驾驶车辆行驶轨迹偏差时间序列的 Lyapunov 指数。

(1) 对无人驾驶车辆行驶轨迹偏差时间序列 $\{x(t_i), i=1, 2, \dots, N\}$ 进行快速傅里叶变换，计算出平均周期 P 。

(2) 用 C-C 方法同时计算出时间延迟 τ 和嵌入维数 m 。

(3) 根据时间延迟 τ 和嵌入维数 m 重构相空间 $\{Y_j, j=1, 2, \dots, M\}$ 。

(4) 找相空间中每个点 Y_j 的最近邻点 $Y_{\hat{j}}$ ，并限制短暂分离，即

$$d_j(0) = \min_j \|Y_j - Y_{\hat{j}}\| \quad |j - \hat{j}| > P \quad (7)$$

(5) 对相空间中每个点 Y_j ，计算出该邻点对的 i 个离散时间步后的距离

$$d_j(i) = \|Y_{j+i} - Y_{\hat{j}+i}\|$$

$$i=1, 2, \dots, \min(M-j, M-\hat{j}) \quad (8)$$

(6) 对每个 i ，求出所有 j 的 $\ln d_j(i)$ 平均 $y(i)$ ，

即

$$y(i) = \frac{1}{q\Delta t} \sum_{j=1}^q \ln d_j(i) \quad (9)$$

式中， q 是非零 $d_j(i)$ 的数目，并用最小二乘法做出回归直线，该直线的斜率就是无人驾驶车辆行驶轨迹偏差时间序列的最大 Lyapunov 指数 λ 。

3 理想轨迹设计

采用混沌理论的方法对无人驾驶车辆行驶轨迹进行量化分析，用以评价无人驾驶车辆智能水平。在量化分析计算时，需要获得无人驾驶车辆实际行驶轨迹和理想轨迹。

无人驾驶车辆的实际行驶轨迹通过组合定位测试技术可以获得，但是对于不同的场景和任务，无人驾驶车辆的理想轨迹是不同的。对于简单的直道保持、弯道保持可以将车道的中心线作为无人驾驶车辆的理想轨迹。对于复杂的场景和任务，例如避让静态障碍物、换道等，理想轨迹的确定需要专门设计。避让静态障碍物实质上就是一个换道的过程，本文以避让静态障碍物换道为例介绍无人驾驶车辆理想轨迹确定的方法。测试场景见图 2。

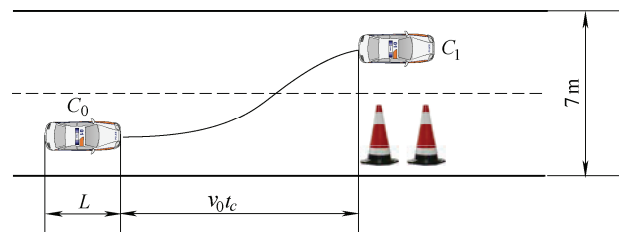


图 2 避让静态障碍物换道场景

首先采集优秀驾驶员驾驶车辆的行驶轨迹，获得车辆的行驶参数：位移，速度，时间，航向角，前轮偏角等，进而获得车辆行驶过程中的初始状态和目标状态。

根据优秀驾驶员驾驶车辆行驶的初始状态和目标状态，规划无人驾驶车辆避让静态障碍物换道

的轨迹,使车辆在指定的时间到达相邻车道。用函数 $f(x, y, t)$ 来描述换道的轨迹,由此试图在某个函数族类寻找一条轨迹,它的存在受道路几何结构的限制,它能充分描述车辆从起始位置过渡到目标位置整个过程的动态特性。为此构造换道轨迹的函数族:在 x 向、 y 向选用五次多项式

$$\begin{cases} f(x, t) = \sum_{i=0}^5 a_i \times t^i \\ f(y, t) = \sum_{i=0}^5 b_i \times t^i \end{cases} \quad (10)$$

对时间求导数为

$$\begin{cases} \dot{f}(x, t) = \frac{d(\sum_{i=0}^5 a_i \times t^i)}{dt} \\ \dot{f}(y, t) = \frac{d(\sum_{i=0}^5 b_i \times t^i)}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

二阶导数为

$$\begin{cases} \ddot{f}(x, t) = \frac{d(\sum_{i=0}^5 a_i \times t^i)}{d^2 t} \\ \ddot{f}(y, t) = \frac{d(\sum_{i=0}^5 b_i \times t^i)}{d^2 t} \end{cases} \quad (12)$$

设车辆避让静态障碍物换道的初始状态 \mathbf{S}_i 和目标状态 \mathbf{S}_f 分别为

$$\mathbf{S}_i = (x_i \quad \dot{x}_i \quad \ddot{x}_i \quad y_i \quad \dot{y}_i \quad \ddot{y}_i)$$

$$\mathbf{S}_f = (x_f \quad \dot{x}_f \quad \ddot{x}_f \quad y_f \quad \dot{y}_f \quad \ddot{y}_f)$$

式中, x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 、 y 、 \dot{y} 、 \ddot{y} 分别表示车辆的纵向位移、纵向速度、纵向加速度、横向位移、横向速度、横向加速度。初始状态的纵向位移和横向位移均为 0, 目标状态的横向位移为车道宽度, 而目标状态的纵向位移考虑到安全因素要确定行驶车辆与静态障碍物之间的安全距离。国内外的研究人员目前主要提出了 3 种安全距离模型: 一是基于典型制动过程的安全距离计算模型; 二是驾驶员预瞄安全距离模型; 三是基于车间时距的安全距离模型^[17]。基于典型制动过程的安全距离计算模型仅考虑了保证车辆行车安全的要求, 没有考虑道路交通效率方面的因素, 导致的结果是利用该模型确定的安全距离较大。驾驶员预瞄安全距离模型主要存在准确性较低, 不能适应复杂多变交通环境的需要、实用性较低及对驾驶员主观感受因素考虑不够等几方面的问题。基于车间时距的安全距离模型既考虑了车辆的速度, 还

考虑了车间距离, 此模型简单可行, 目前为大多数车距研究工作者所接受。因此本文选用基于车间时距的安全距离模型。

我国在 1995 年 3 月实施的《高速公路交通管理办法》第十五条规定: “机动车在高速公路上正常行驶时, 在同一车道的后车与前车必须保持足够的行车间距。正常情况下, 当行驶时速一百公里(30 m/s 左右)时, 行车间距为 100 m 以上; 当行驶时速七十公里(20 m/s 左右)时, 行车间距为 70 m 以上”。由此计算得出车间时距 t_c 为 3~4 s, 安全车距为

$$S_{SS} = 3v_0 + S_{MSS} \quad (13)$$

式中, S_{SS} 为安全距离; v_0 为车辆初始车速; S_{MSS} 为最小安全距离, 根据文献[18]推导的最小安全距离为前后两车的速度差与换道时间相乘。本文是避让静态障碍物换道, 所以

$$S_{MSS} = v_0 t_c \quad (14)$$

由此可得避让静态障碍物换道的安全距离 S_{SS} 为

$$S_{SS} = 3v_0 + v_0 t_c \quad (15)$$

将式(5)代入初始状态和目标状态, 整理有

$$\begin{pmatrix} f_i(x, t) \\ \dot{f}_i(x, t) \\ \ddot{f}_i(x, t) \\ f_f(x, t) \\ \dot{f}_f(x, t) \\ \ddot{f}_f(x, t) \end{pmatrix} = \mathbf{T} \mathbf{A}^T \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} f_i(y, t) \\ \dot{f}_i(y, t) \\ \ddot{f}_i(y, t) \\ f_f(y, t) \\ \dot{f}_f(y, t) \\ \ddot{f}_f(y, t) \end{pmatrix} = \mathbf{T} \mathbf{B}^T \quad (17)$$

$$\mathbf{A}^T = (a_5 \quad a_4 \quad a_3 \quad a_2 \quad a_1 \quad a_0)$$

$$\mathbf{B}^T = (b_5 \quad b_4 \quad b_3 \quad b_2 \quad b_1 \quad b_0)$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} t_i^5 & t_i^4 & t_i^3 & t_i^2 & t_i & 1 \\ 5t_i^4 & 4t_i^3 & 3t_i^2 & 2t_i & 1 & 0 \\ 20t_i^3 & 12t_i^2 & 6t_i & 2 & 0 & 0 \\ t_f^5 & t_f^4 & t_f^3 & t_f^2 & t_f & 1 \\ 5t_f^4 & 4t_f^3 & 3t_f^2 & 2t_f & 1 & 0 \\ 20t_f^3 & 12t_f^2 & 6t_f & 2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

式中, t_i 为换道初始时间; t_f 为换道目标时间。

因此此时轨迹的设计变为寻找满足边界条件的问题, 根据边界条件求出 A 、 B 。最终得到关于 x 和 y 的五次多项式。

4 试验论证

4.1 试验采集数据

BIT 号无人驾驶车辆测试平台利用全球定位系统(Global positioning system, GPS)和惯性导航系统提供车辆位置和车体姿态信息(图 3), 通过高精度组合定位测试技术, 获取无人驾驶车辆的行驶参数: 无人驾驶车辆行驶轨迹 $f(x, y)$ 。



图 3 BIT 号无人驾驶车辆测试平台

4.2 量化分析

本文以无人驾驶车辆避障换道为例介绍无人驾驶车辆行驶轨迹的量化过程。

采集优秀驾驶员驾驶车辆进行避障换道的行驶轨迹, 见图 4。

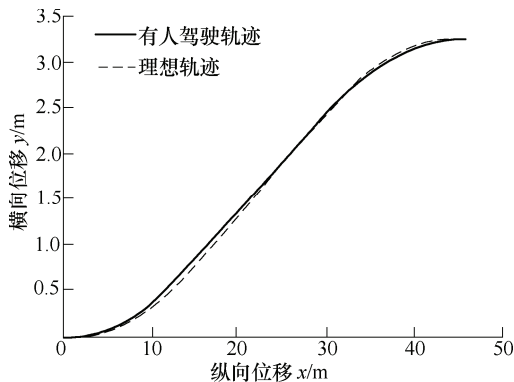


图 4 避障换道行驶轨迹

根据优秀驾驶员驾驶车辆避障换道的行驶轨迹提取其初始状态 S_i (x 方向和 y 方向的初始位移、速度、加速度) 和目标状态 S_f (x 方向和 y 方向的最终的位移、速度、加速度), 通过五次多项式方法, 运用式(16)和式(17)规划无人驾驶车辆避障换道的

理想轨迹, 如图 4 虚线所示。

$$S_i = (x_i \quad \dot{x}_i \quad \ddot{x}_i \quad y_i \quad \dot{y}_i \quad \ddot{y}_i) = (0 \quad 9 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

$$S_f = (x_f \quad \dot{x}_f \quad \ddot{x}_f \quad y_f \quad \dot{y}_f \quad \ddot{y}_f) = (45 \quad 9 \quad 0 \quad 3 \quad 0 \quad 0)$$

经计算得无人驾驶车辆避障换道的理想轨迹如图 4 所示。由图可知理想轨迹的曲率是连续变化的, 没有突变的现象, 并且在换道的起点和终点处曲率均为零。经对比可以直观地看出理想轨迹比有人驾驶的行驶轨迹曲率变化更加平顺。

采集无人驾驶车辆避障换道的实际行驶轨迹(图 5), 并计算无人驾驶车辆实际行驶轨迹与理想轨迹的偏差时间序列。

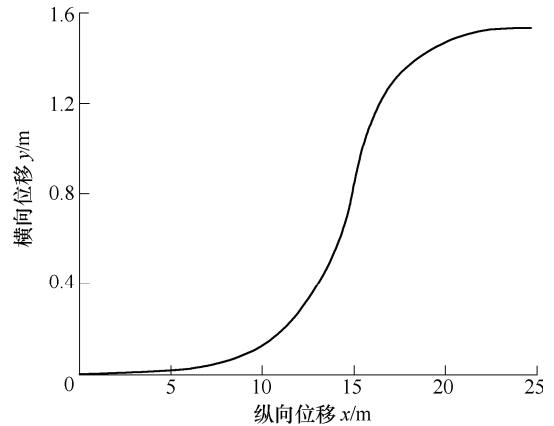


图 5 无人驾驶车辆避障换道实际行驶轨迹

采用 C-C 方法确定无人驾驶车辆实际行驶轨迹和理想轨迹偏差时间序列的时间延迟(图 6)和嵌入维数, 进而实现对偏差时间序列的相空间重构(图 7)。

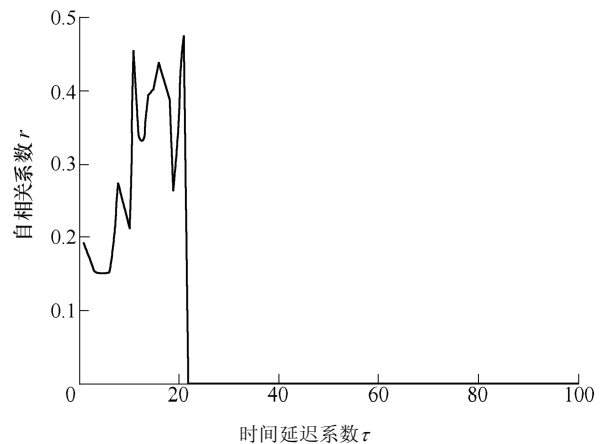


图 6 无人驾驶车辆避障换道时间延迟

最后计算出无人驾驶车辆避障换道的 Lyapunov 指数为 3.357 2。

根据计算无人驾驶车辆实际行驶轨迹和理想轨迹不同的偏差时间序列计算其 Lyapunov 指数, 计算结果如表 1 所示。

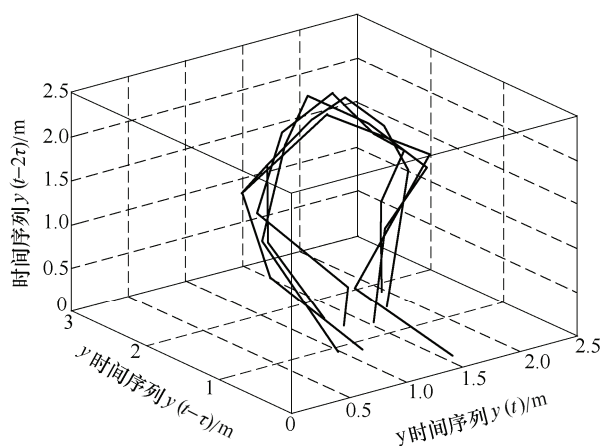


图 7 无人驾驶车辆避障换道相空间重构

表 1 无人驾驶车辆行驶轨迹的 Lyapunov 指数

试验	X 偏差	Y 偏差	均方偏差
避障换道	3.457	3.577 2	3.357 2

经计算无人驾驶车辆避障换道行驶轨迹的 Lyapunov 指数为正值,表明无人驾驶车辆避障换道过程表现为混沌状态。Lyapunov 指数的大小表征无人驾驶车辆收敛到稳态响应的快慢程度。Lyapunov 指数的倒数表征了无人驾驶车辆运动状态的最大预测时间。Lyapunov 指数越大,表征系统的混沌性越强,系统的最大预测时间越短;反之亦然。由表 1 可以看出无人驾驶壁障超车换道的最大预测时间。由此可以看出无人驾驶车辆智能行为能够通过 Lyapunov 指数直观地量化表示。

5 结论

(1) 运用混沌理论对无人驾驶车辆行驶轨迹进行研究,通过实际轨迹与理想轨迹偏差时间数据序列相空间重构,计算出最大 Lyapunov 指数,实现了无人驾驶车辆行驶轨迹的量化分析。最大 Lyapunov 指数大于 0,可判断无人驾驶车辆行驶轨迹具有混沌特征。采用混沌时间序列分析的方法能有效地判断无人驾驶车辆行驶轨迹是否为混沌运动。

(2) 理论分析和试验表明, Lyapunov 指数不仅可以表征无人驾驶车辆系统的混沌性,还表征无人驾驶车辆收敛到稳态响应的快慢程度。Lyapunov 指数是客观量化的结果。

(3) 无人驾驶车辆行驶轨迹的量化表示可以实现无人驾驶车辆的定量评价,从而为无人驾驶车辆测评体系的完善和测评标准的建立打下了良好的基础。

参 考 文 献

- [1] WEI Junqing, DOLAN J M, LITKOUHI B. A prediction- and cost function-based algorithm for robust autonomous freeway driving[C/CD]//Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010 IEEE, 2010.
- [2] SUN Yang, XIONG Guangming, CHEN Huiyan, et al. A cost function-oriented quantitative evaluation method for unmanned ground vehicles[C/CD]//AMT 2011, China, 2011: 701-706.
- [3] SUN Yang, TAO Gang, XIONG Guangming, et al. The fuzzy-AHP evaluation method for unmanned ground vehicles[J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2013, 7(2): 653-658.
- [4] ULRICH N, KEITH W. The behaviour of a mobile robot is chaotic[J]. AISB Journal, 2003, 1(4): 1-16.
- [5] ULRICH N, KEITH W. Quantitative description of robot-environment interaction using chaos theory[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 53: 177-193.
- [6] 乌尔里希·内姆佐夫, 张文增. 移动机器人学科学方法-智能体行为的量化分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- ULRICH N, ZHANG Wenzeng. Scientific methods in mobile robotics: Quantitative analysis of agent behaviour[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [7] SCHÖNER G, DOSE M. A dynamical systems approach to task-level system integration used to plan and control autonomous vehicle motion[J]. Journal of Robotics and Autonomous Systems, 1992, 10(92): 253-267.
- [8] SCHÖNER G, DOSE M, ENGELS C. Dynamics of behavior: Theory and applications for autonomous robot architectures[J]. Journal of Robotics and Autonomous Systems, 1995, 16(95): 213-245.
- [9] ULRICH N. Quantitative analysis of robot-environment interaction—towards “scientific mobile robotics”[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 44(1): 55-68.
- [10] TOM D, ULRICH N. Quantitative analysis of mobile robot localisation systems[C]//British Conference on Autonomous Mobile Robotics and “Scientific Methods in Mobile Robotics”, Manchester, 1997: 1361-1371.
- [11] 李立, 张登材. 空间刚性冗余度机器人混沌运动控制的延迟反馈控制法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 122-127.
- LI Li, ZHANG Dengcai. Delayed feedback control method for chaotic control of spatial rigid redundant robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 122-127.
- [12] 石鸿雁, 孙昌志. 一种基于混沌优化算法的机器人路径规划方法[J]. 机器人, 2005, 27(2): 152-157.
- SHI Hongyan, SUN Changzhi. Path planning method for robot based on chaotic optimization algorithm[J]. Robot,

- 2005, 41(9): 122-127.
- [13] KEWLANI G, IAGNEMMA K. A multi-element generalized polynomial chaos approach to analysis of mobile robot dynamics under uncertainty[C]//2009 IEEE-RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009: 1177-1182.
- [14] GAO Meijuan, XU Jin, TIAN Jingwen, et al. Path planning for mobile robot based on chaos genetic algorithm[C]//ICNC 2008 : Fourth International Conference on Natural Computation, 2008: 409-413.
- [15] 姜万录, 张淑清, 王益群. 混沌运动特征的数值试验分析[J]. 机械工程学报, 2000, 36(10): 13-17.
JIANG Wanlu, ZHANG Shuqing, WANG Yiqun. Numerical experimental analysis for chaotic motion characteristics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(10): 13-17.
- [16] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
LÜ Jinhu, LU Junan, CHEN Shihua. Analysis and application of chaotic time series[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.
- [17] 李克强, 王跃建. 基于 ITS 的行车安全辅助系统[J]. 江苏大学学报, 2005, 26(4): 294-297.
LI Keqiang, WANG Yuejian. Driving assistant system based on ITS[J]. Journal of Jiangsu University, 2005, 26(4): 294-297.
- [18] 游峰. 智能车辆自动换道与自动超车控制方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
YOU Feng. Study on autonomous lane changing and autonomous overtaking control method of intelligent vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
-
- 作者简介: 孙扬, 男, 1979 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为智能车辆技术, 复杂多体系统动力学, 控制与仿真。
E-mail: sungcdx@foxmail.com
熊光明(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为智能车辆技术。
E-mail: xiongguangming@bit.edu.cn
陈慧岩, 男, 1961 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为智能车辆技术, 空间情报学, 车辆信息技术, 车辆传动系统自动操纵与自适应控制理论、方法研究, 车辆动力传动一体化控制技术。
E-mail: chen_h_y@263.net