

文章编号: 1001-0920(2005)12-1360-05

## 帆船直线航行比赛最优路径动态规划方法研究

葛 艳<sup>1</sup>, 孟庆春<sup>1,2</sup>, 魏振钢<sup>1</sup>, 高 云<sup>1</sup>, 闫传军<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学 计算机科学系, 山东 青岛 266071; 2 清华大学 智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 针对帆船直线航行比赛的赛场情况, 提出一种基于模糊综合评价和动态规划理论的帆船直航训练最优路径动态规划方法. 首先以模糊逻辑为基础, 建立帆船相对于目标点的隶属函数, 并以此描述帆船的当前位置和方向信息; 然后综合考虑行驶速度和接近目标点两个因素, 建立综合评价函数, 并以航道宽度为限制条件, 利用动态规划原理分阶段进行航向决策. 最后通过仿真验证了算法的有效性.

**关键词:** 帆船; 模糊概念; 路径规划; 动态规划

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Optimum Path Planning Method for Straightaway Sailing Race Based on Dynamic Programming

GE Yan<sup>1</sup>, MENG Qing-chun<sup>1,2</sup>, WEI Zhen-gang<sup>1</sup>, GAO Yun<sup>1</sup>, YAN Chuan-jun<sup>1</sup>

(1. Computer Science Department, Ocean University of China, Qingdao 266071, China; 2 State Key Lab of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: GE Yan, E-mail: geyanta@mail.ouc.edu.cn)

**Abstract:** An optimum path planning method is proposed for straightaway sailing race using fuzzy comprehensive evaluation concept and dynamic programming theory. This method puts forward a sailing membership function of a sailboat, describing its position and heading information, which relative to the end point. Moreover, it sets up a comprehensive evaluating function concerning the sailing velocity and the sailing membership function. The optimum heading is obtained by finding the minimum of the comprehensive evaluating function with the limiting condition of sea-route width. Simulation results show the effectiveness and the applicability of the proposed method.

**Key words:** Sailboats; Fuzzy concept; Path planning; Dynamic programming

### 1 引 言

帆船运动是奥运会水上运动项目之一. 帆船与机动船只不同, 它是靠风在帆上产生动力推动船前进的. 帆船比赛是运动员驾驶帆船在规定的距离内比赛航速的一项运动. 如何依据比赛时的海洋气象信息制定最优航行轨迹是比赛取胜的重要环节.

目前, 普通船舶的气象导航系统已趋于完善, 主要是以节能省时为目标的依据气象信息的航迹跟踪系统<sup>[1-4]</sup>. 然而帆船在海上航行, 受海浪、海风及海流等环境扰动的影响力作用较大, 所以如何对给定的一段航程及限定的航道宽度, 以航行时间最短为

目标规划最优行驶路径要比普通船舶的路径规划更为困难.

20 世纪 50 年代初, 美国数学家 Bellman 等人研究多阶段决策过程的优化问题时, 提出了著名的最优性原理 (principle of decision optimality), 将多阶段过程转化为一组单阶段问题逐个求解, 并创立了解决这类过程优化问题的新方法——动态规划. 动态规划在经济管理、工程技术等领域有着重要而广泛的应用, 并已取得了显著的成果<sup>[5]</sup>.

针对帆船直线航行比赛的赛场情况, 本文在动态规划方法基础上, 提出一种基于模糊概念的帆船

收稿日期: 2004-11-17; 修回日期: 2005-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60374031); 山东省自然科学基金项目 (Y2002G18).

作者简介: 葛艳 (1975—), 女, 山东泰安人, 博士生, 从事智能控制理论与应用研究; 孟庆春 (1958—), 男, 山东招远人, 教授, 博士生导师, 从事智能信息处理与智能控制、计算智能与机器学习理论等研究.

行驶路径动态规划方法, 并用于风向、风速、海流等海况基本不变的情况下一段直线航程内规划帆船行驶最优路径。仿真实验证明, 该方法能有效地解决帆船直线航行比赛中的最优行驶路径搜索问题。

## 2 帆船航行的操纵原理

奥运会帆船比赛的船型种类很多, 这里以 OP 型帆船为例, 建立帆船运动的路径动态规划的数字仿真。船舶在海上的运动是 3 维的, 这里只考虑水平运动而忽略垂直方向上的运动。

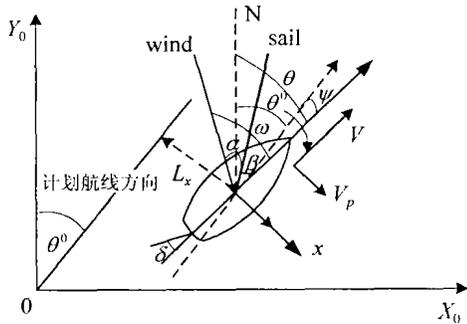


图 1 帆船航行的平面示意

图 1 为帆船航行的平面运动示意图。图中各变量的定义如下:  $\theta^0$  为预期航向;  $\theta$  为有效航向;  $\psi$  为漂移角,  $\psi = \theta - \theta^0$ , 即有效航向与预期航向之间的航向差值;  $\omega$  为相对风向角;  $\alpha$  为迎风角, 即帆与相对风之间的夹角;  $\beta$  为帆的调整角, 又称转帆角, 即帆与航向之间的夹角;  $V_B$  为帆船的速度;  $L_x$  为帆船重心偏离计划航线的距离;  $\omega = \alpha + \beta$  规定以正北方向为基准线, 顺时针风向角度为正值, 逆时针方向风向角为负值。

帆船航行时, 由于船速的影响, 船员感知的风速和风向与实际真风有很大的差别。图 2 为真风风速、相对风速和船速 3 者的速度三角形, 同时显示了它们之间的矢量关系。其中:  $V_T$  为真风风速, 表示固定目标上感知的风速和风向;  $V_B$  为船速, 方向是沿着船体的中轴线;  $V_W$  为相对风速, 方向由速度三角形确定, 是船员在航行中感觉到的风的特征量。在估计空气阻力或风的推进效果时, 考虑的应是相对风速和风向。在船速已知的情况下, 知道了真风和相对风中两者之一, 便可由三角关系式推算出另一个。

船速与真风风速的比例为

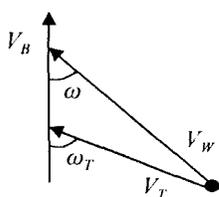


图 2 船速、真风向和相对风向 3 者的速度三角形

$$\frac{V_B}{V_T} = \frac{\sin(\omega_r - \omega)}{\sin\omega} \quad (1)$$

相对风速与真风速的比例关系为

$$\frac{V_W}{V_T} = \frac{\sin\alpha}{\sin\omega} \quad (2)$$

通过对行驶中的帆船的受力分析, 在平静海面上不考虑风、海流和波浪对船体的干扰力时, 船速和风速之间的关系式为<sup>[3]</sup>

$$V_{SB} = \sqrt{\frac{\rho S V_W^2 \sin\alpha \sin\beta}{C}} \quad (3)$$

其中:  $\rho$  为空气密度,  $S$  为帆的面积,  $V_W$  为相对风速 (m/s),  $C$  为阻力系数。

在此基础上考虑波浪、海流和风对帆船船体的作用力, 以及由此产生的航向的波动。

### 2.1 海浪对帆船航速的影响

船舶在海洋上航行会受到气象、海况等各种环境因素的影响, 而海浪是对船体作用力影响的主要方面, 因而应考虑海浪对帆船航速的影响。在确保一定精度的前提下, 给出简单的计算方法是十分必要的。航速与波浪之间的关系可由经验公式给出, 下面是美国海军研究生学院的一篇论文中所采用的公式<sup>[6]</sup>

$$V_B = V_{SB} - (ah - bh^2) + k\varphi \quad (4)$$

其中:  $V_{SB}$  为帆船在静水中的航速,  $h$  为浪高,  $a, b, k$  为实验系数;  $\varphi$  为波浪的方位角 - 航向角 ( $0^\circ \sim 180^\circ$ )。

### 2.2 海流和海风对帆船的航行轨迹推算的影响

帆船在海上航行, 船体还会受到风和海流的干扰力。其影响主要是使船产生向下风或海流方向漂移。两者共同作用产生的漂移角  $\psi$  为

$$\psi = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (5)$$

其中:  $\epsilon_1$  为风压差角,  $\epsilon_2$  为流压差角。

当  $|\epsilon_1| < 15^\circ$  时, 可按经验公式求得  $\epsilon_1$ <sup>[7]</sup>, 即

$$\epsilon_1 = K_1 (V_W / V_{SB})^2 \sin\omega \quad (6)$$

同理, 当流压差角  $|\epsilon_2| < 15^\circ$  时, 可按经验公式求得  $\epsilon_2$ <sup>[2]</sup>, 即

$$\epsilon_2 = K_2 (V_C / V_{SB})^2 \sin\gamma \quad (7)$$

将式(3)、(6)和(7)代入(5)得

$$\psi = \frac{C(K_1 V_W^2 \sin\omega + K_2 V_C \sin\gamma)}{\rho S V_W^2 \sin\alpha \sin\beta} \quad (8)$$

其中:  $\gamma$  为海流和帆船航向间的夹角;  $V_C$  为海流速 (m/s);  $K_1$  为风压差系数;  $K_2$  为流压差系数;  $C$  为帆船在静水中行驶的阻力系数;  $K_1, K_2, C$  可由实验测得。

由图 1, 帆船横向偏离计划航线的速度为

$$V_x = V_{SB} \sin\psi \quad (9)$$

帆船沿最短路线方向的行驶速度为

$$V_y = V_{ab} \cos \psi. \quad (10)$$

### 2.3 帆船的航向控制

帆船的航向控制主要由方向舵完成。由于帆船行驶过程中,帆与风向之间的夹角,帆与船之间的夹角,风向和风力的大小都不是固定不变的,尤其是风向和风力,不仅影响船的航向,而且还直接决定了船的前进速度。而船的各项参数(包括水动力系数)都与船速有关,因而对于帆船而言,要想事先得到一个数学模型,并通过此模型来计算出帆船航向的控制算法几乎是不可能的<sup>[8]</sup>。

一类可行的方法是使用自适应算法或非模型算法,如模糊控制算法,建立帆船的自适应舵。本文采用文献[9]提出的基于 Sugeno 模糊模型控制帆船的舵角以调整航向。通过模仿一个有经验的舵手的操作行为,航行经验和环境因素的变化,得到方向舵的操纵策略。

此外,根据对帆船运动的受力分析和对帆进行空气动力学分析,可以得出帆的最佳调整角  $\beta$  应该是相对风向角  $\omega$  的一半,即  $\beta = \omega/2$ , 并且当相对于真风向的角度小于  $45^\circ$  时,帆船无法航行。顶风航行的最佳航向是与真风方向大约成  $48^\circ$  角<sup>[7,10,11]</sup>。

### 3 帆船航行轨迹动态规划方法

帆船直航比赛航行轨迹规划的基本思想是利用动态规划思想,将整个航程划分为一系列单阶段问题,逐个求解。

#### 3.1 动态规划的基本模型

动态规划是目前解决多阶段决策过程问题的基本方法之一。所谓多阶段决策过程是指:由问题的特征可将过程按时间、空间等标志分为若干个互相联系又相互区别的阶段,在其每一阶段都需作出决策,从而使整个过程达到最好的效果。因此,各个阶段决策的选取不是任意的,它既依赖于当前的状态,又影响以后的发展。当各个阶段的决策确定后,就组成了一个决策序列,因而也就决定了整个过程的一条活动路线。

动态规划中有逆序递推和顺序递推两种方法,逆序递推是由终点向始点逐段递推;而顺序递推是由始点向终点逐段递推<sup>[5]</sup>。本文采用顺序递推方法。

#### 3.2 赛场环境模型的建立

本文研究直航情况下帆船航行的路径规划。航行环境如图3所示。航程长度为  $L$  m, 航道宽度为  $2W$  m。在航行区域建立二维坐标,初始点放在原点  $P_0$ , 目标点为  $y$  轴上的某一点  $P_n$ , 将帆船的出发点和目标点之间的海域均匀划分为  $n$  个航行区段,变量  $n$  的取值依据航行距离  $L$  和经验而定。

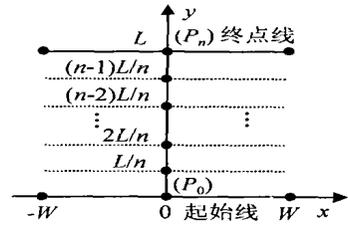


图3 帆船直线航行环境示意

在动态环境中,物体的位置随时间而变化。一般情况下物体都有自己的运动规律,因此动态环境在各时刻的情况具有很大的不确定性。于是引入模糊概念来表达这种不确定性:将物体的运动状态用模糊集的概念(即运动平面上的二维隶属函数),来表达物体的隶属函数,包含该物体当前位置、速度大小和速度方向的信息。为能反映物体相对于目标点的运动状态,在建立物体运动的隶属函数时,根据物体运动信息调整隶属函数的参数,使其包含物体的运动信息。运动物体的隶属函数形式为<sup>[12]</sup>

$$Z(x, y) = \begin{cases} 0, & \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \\ & R \times g(V, D); \\ 1 - \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{R \times g(V, D)}, \\ & \text{others} \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $(x_i, y_i)$  为目标点位置坐标;  $R$  为大于零的常数,  $R = L$ ;  $V$  为物体的运动速度矢量;  $D$  为从物体当前位置  $(x, y)$  到目标位置  $(x_i, y_i)$  的距离矢量; 函数  $g$  为方向因子,可根据具体情况采用不同的函数形式,但应符合如下规则:

1)  $g > 0$ ;

2)  $g$  是  $V$  与  $D$  夹角的递减函数,即  $V$  偏离  $D$  方向越大,  $g$  越小。

在仿真实验中,定义函数  $g$  为

$$g(V, D) = 1 + \lambda \cos \epsilon \quad (12)$$

其中:  $\lambda$  为常数,且  $0 < \lambda < 1$ ;  $\epsilon$  为  $V$  与  $D$  之间的夹角,  $0^\circ \leq \epsilon \leq 90^\circ$ 。

上述对运动物体隶属函数  $z(x, y)$  的定义包含了物体的运动信息,实际上隶属函数就是位置可能性分布函数。隶属函数在物体运动将到达下一个区段的位置距离目标点相同时,要依据  $\epsilon$  的大小来决定最佳的运动位置,即  $V$  与  $D$  夹角越小越好。只有当  $\epsilon = 0$  时,即驶向目标点时,才能到达目标点。

#### 3.3 方向决策

建立环境空间模型之后,要利用动态规划原理进行具体的搜索过程。在本系统中,动态规划基本概

念对应的各变量定义如下:

1) 阶段变量  $k$ : 将帆船的出发点和目标点之间的海域均匀划分为  $n$  个航行区段,  $k = 1, 2, \dots, n$ .

2) 状态变量: 帆船行驶过程每个阶段包括的状态很多, 主要有: 风向、风速, 海流的流向、流速, 海浪的高度、周期、方向, 帆船的航向、航速、位置等变量

3) 决策变量: 决定帆船下一阶段状态的变量是一些取值的集合, 包括: 航向、帆转角和转舵角

4) 策略又称决策序列, 是每个阶段最佳转帆角和转舵角以及航向角组成的集合

5) 指标函数是衡量每个过程策略优劣的尺度, 相当于静态规划中的目标函数 本系统中选为时间最少以及运动隶属函数值最大的综合, 定义为  $EV_{k,j}$

在帆船航行的方向决策问题中, 主要的影响因素有两个: 在某个方向上是否使其速度在最短路径上的分速度最大; 在给定方向上是否将更接近或到达目标 所以定义指标函数时应综合考虑这两个因素 对某个行驶方向而言, 其指标函数定义为: 从帆船当前区段  $k - 1$  出发, 到达下一个区段  $k$  的某个方向上, 行驶时间以及距离目标点的隶属函数值的加权累加和 同时还要满足一个限定条件: 沿此方向航行到下一区段时不能超出航道宽度 指标函数的计算公式为

$$EV_{k,j} = \tau_1 \times T_{k,j} + \tau_2 \times Z(x_{k,j}, y_{k,j}). \quad (13)$$

其中:  $EV_{k,j}$  为第  $k$  区段内  $P_{k,j}$  方向上的综合评价;  $T_{k,j} = L / (nV_{k,j})$ , 为帆船行驶完第  $k$  区段所用的时间;  $V_{k,j}$  为帆船沿  $P_{k,j}$  方向运动时, 在最短路径方向上的分速度,  $V_{k,j} = V_y = V_B \cos \psi$ ;  $(x_{k,j}, y_{k,j})$  为帆船在第  $k$  区段与  $k + 1$  区段交界点  $P_{k,j}$  的坐标;  $Z(x_{k,j}, y_{k,j})$  为帆船运动到  $(x_{k,j}, y_{k,j})$  位置的隶属函数, 代表距离目标点的大小  $\tau_1$  和  $\tau_2$  为加权系数, 由于在一个区段内航行时间越少越好, 朝向目标点方向、距离目标点越近越好, 到达目标点时物体的隶属函数值最大, 所以  $\tau_1$  取正值,  $\tau_2$  取负值

累加和  $EV_{k,j}$  的大小, 反映了综合考虑速度和接近目标两个因素之后, 按这个方向行驶对帆船到达目标的有利程度 方向决策取指标函数值最小的航向  $P_{k,j}$  作为下一步的运动方向 决策结果满足

$$f_k = \min\{EV_{k,j} + f_{k-1}\}, \quad (14)$$

其中:  $f_0 = 0, k = 1, 2, \dots, n$

### 3.4 路径规划算法

首先定义变量  $BT_k, BS_k, BH_k, BP_k$  分别保存满足指标函数时, 第  $k$  阶段帆船行驶所用的时间, 最佳转帆角, 最佳航向角信息, 以及最佳航向点 最优路径搜索步骤如图 4 所示 搜索结束后, 得到的数组

$BT_k$  中所有元素之和就是最早可能到达终点的时间 最佳航线可以从每个阶段的最佳航向点数组  $BP_k$  中得到, 从出发地  $P_0$  开始将各区段的最优节点连接起来直到目标点  $P_n$  便得到了最佳航线

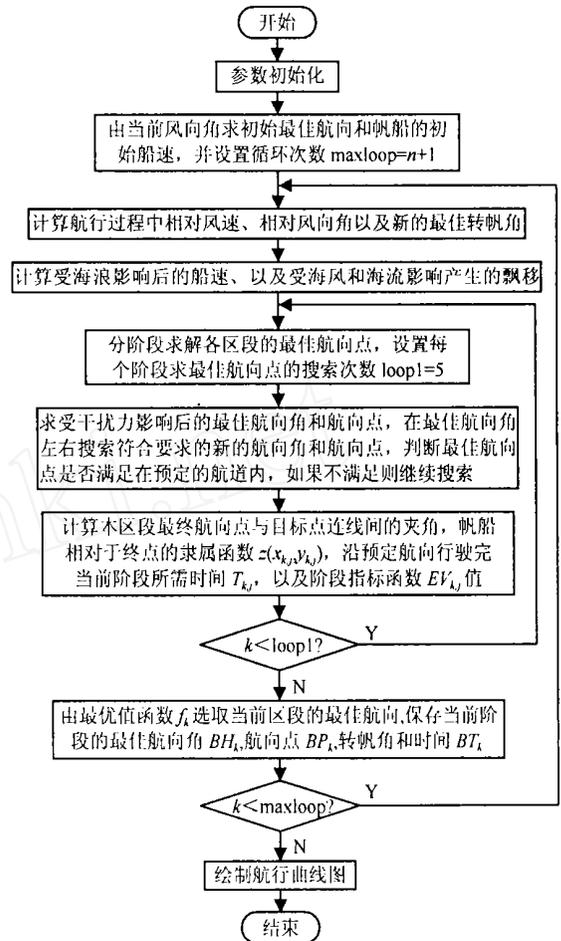


图 4 算法流程

### 3.5 算法性能分析

动态规划方法求解多阶段决策问题具有以下两个特点<sup>[5]</sup>:

1) 每个阶段的最优决策过程只与本阶段的初始状态有关, 而与以前各阶段的决策无关, 具有无后效性(即马尔科夫性).

2) 符合 Belman 提出的最优化原理, 即对最佳路径(最优决策过程)所经过的各个阶段, 其中每个阶段始点到全过程终点的路径, 必定也是该阶段始点到全过程终点一切可能路径中的最佳路径

本文采用的路径动态规划算法在考虑第  $k + 1$  阶段之前, 已考察了前  $k$  个阶段中的任意一种可能状态, 所以每个局部最优状态都是沿着最短的可能路径而找到的 因此, 算法得到的路径规划方案是全局最优的

### 4 仿真实验

本文采用 Matlab 编程仿真实现当正顶风航行

和左侧风(风向为  $-90^\circ$ )时的最优航线规划

根据专家知识, 辨识物体运动隶属函数  $Z(x, y)$  的系数  $\lambda$  为 0.7, 指标函数  $EV_{k,j}$  的系数  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别为 6 和 -1.8 其余参数设定如下: 风向  $\theta = 0^\circ$ ; 风速  $V_w = 5 \text{ m/s}$ , 海流的流向  $\mathcal{C} = 30^\circ$ ; 流速  $V_c = 0.6 \text{ m/s}$ , 海浪的方向  $\varphi = 45^\circ$ ; 浪高  $h = 0.4 \text{ m}$ , 帆面积  $6 \text{ m}^2$ , 最短行程长度  $L = 200 \text{ m}$ , 航道宽度  $W = 5 \text{ m}$ , 分段  $n = 20$

顶风航行时, 路径规划曲线及途中各节点的隶属函数值的变化分别如图 5 和图 6 所示。风向角为  $-90^\circ$  时, 路径规划曲线如图 7 所示。从图 6 可以看出, 帆船行驶过程中, 当偏离  $y$  轴距离的增大以及  $\epsilon$  角增大时隶属函数值会降低, 随着一步步靠近目标点而逐渐增大, 到达目标点时值为 1。由图 5 和图 7 可以看出, 正顶风和侧风航行时为获得最佳航速, 都不能按最短路线航行, 必须调整帆转角和航向角, 以之字形路线抢风行驶。

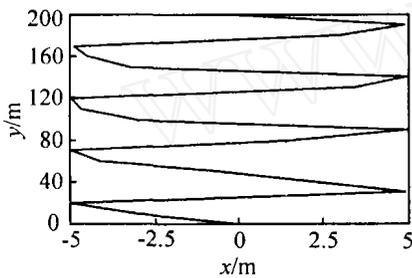


图 5 帆船顶风航行最优路径示意

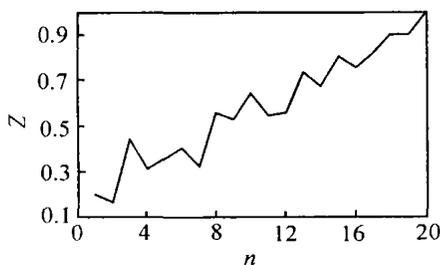


图 6 帆船顶风航行最优路径运动隶属函数值

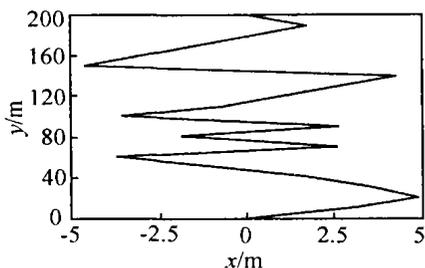


图 7 帆船左侧风航行最优路径示意

## 5 结 语

本文针对直线航行固定航道宽度的帆船比赛, 提出了一种基于模糊概念的帆船行驶最优路径动态规划方法。给出了分阶段赛场环境中, 帆船运动的二

维隶属函数模型和动态规划指标函数定义, 并对算法的性能进行了分析, 保证了路径动态规划方案是全局最优的。仿真实验表明, 该方法可有效地解决帆船行驶的最优路径搜索问题, 是指导帆船运动员进行科学训练的有效方法, 具有较高的实际应用价值。

## 参考文献 (References)

- [1] 周哲, 翁海娜, 庄良杰. 联合卡尔曼滤波及其在舰船综合导航系统中的应用[J]. 控制与决策, 2000, 15(4): 502-506  
(Zhou Z, Weng H N, Zhuang L J. Federated Kalman Filtering and Its Application to Ship Integrated Navigation System [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(4): 502-506)
- [2] 叶清, 郁振伟. 改进最短路径算法在最佳航线选择中的应用[J]. 中国航海, 2003, 55(2): 15-17.  
(Ye Q, Yu Z W. The Improved Shortcut Algorithm and Its Application in Selecting Ship's Optimum Route [J]. *Navigation of China*, 2003, 55(2): 15-17.)
- [3] Sandler M, Wahl A, Zimmernann R, et al. Autonomous Guidance of Ships on Waterways [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1996, 18(3): 327-335
- [4] Jasmin Velagic, Zoran Vukiv, Edin Omerdic. Adaptive Fuzzy Ship Autopilot for Track-keeping [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(4): 433-443
- [5] 何坚勇. 运筹学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 353-370  
(He J Y. *Foundation of Operational Research* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 353-370)
- [6] 李丽娜. 航海自动化[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 90-97.  
(Li L N. *Automatic Navigation* [M]. Beijing: China Communications Press, 2000: 90-97.)
- [7] 陆志才. 船舶操纵[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2000: 62-74  
(Lu Z C. *Steering of Ships* [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2000: 62-74)
- [8] 肖成模, 杨承恩, Paul Austin. 小型帆船自适应舵[J]. 中国造船, 2003, 44(1): 75-79.  
(Xiao C M, Yang C E, Paul Austin. A Kind of Adaptive Autopilot for Yachts [J]. *Shipbuilding of China*, 2003, 44(1): 75-79.)
- [9] 葛艳, 孟庆春, 魏振刚, 等. 基于 Sugeno 模糊模型的帆船控制方法研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(6): 659-662  
(Ge Y, Meng Q C, Wei Z G, et al. Research on Sailboat Control Method Based on Sugeno Fuzzy Model [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(6): 659-662)

(下转第 1369 页)

$\mu_i^*$ ,  $z_1, \dots, z_p, \theta, \tilde{P}, \epsilon, \tilde{\Theta}, \tilde{\lambda}, \eta, \zeta, h, L$ . 采用文[5]中定理 1 的方法即可证得定理 1.

## 6 结 语

针对含有输入未建模动态的一类 MIMO 系统, 在高频增益矩阵的顺序主子式的符号已知的前提下, 给出了多变量自适应反推控制器的设计和分析. 但仍有一些问题值得深入研究, 比如如何找出更多的矩阵分解形式, 比较各种分解对参数化系统模型和设计控制器的优缺点; 如何在更弱的条件下设计和分析多变量自适应反推控制器等.

## 参考文献(References)

- [1] Krstic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P V. *Nonlinear and Adaptive Control Design* [M]. New York: Wiley, 1995.
- [2] Ling Y, Tao G. Adaptive Backstepping Control Design for Linear Multivariable Plant [A]. *Proc of IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Kobe, 1996: 2438-2443.
- [3] Mai A K, Costa R R, Hsu L, et al. Multivariable MRAC Using High Frequency Gain Matrix Factorization [A]. *Proc of 40th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Orlando, 2001: 1193-1198.
- [4] Costa R R, Hsu L, Mai A K, et al. Adaptive Backstepping Control Design for MIMO Plants Using Factorization [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Archoage, 2002: 4601-4606.
- [5] Wu Z J, Xie X J, Zhang S Y. Robust Decentralized Adaptive Stabilization for a Class of Interconnected Systems with Unmodeled Dynamics [J]. *Int J of Systems Science*, 2004, 35(7): 389-404.
- (上接第 1359 页)
- [2] Banerjee M, Kundu M K. Content Based Image Retrieval with Fuzzy Geometrical Features [A]. *Proc of the 12th IEEE Int Conf on Fuzzy Systems* [C]. St. Louis, 2003, 2: 932-937.
- [3] Wu J K, Ang Y H, Lam P C, et al. Facial Image Retrieval, Identification, and Inference System [A]. *Proc of the 1st ACM Int Conf on Multimedia* [C]. Anaheim, 1993: 47-55.
- [4] Pass G, Zabih R. Histogram Refinement for Content-based Image Retrieval [A]. *Proc of the 3rd IEEE Workshop on Applications of Computer Vision* [C]. Sarasota, 1996: 96-102.
- [5] Colombo C, Del Bimbo A, Genovesi I. Interactive Image Retrieval by Color Distributions [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Multimedia Computing and Systems* [C]. Texas, 1998: 255-258.
- [6] Clinque L, Ciocca G, Levisaldi S, et al. Color-based Image Retrieval Using Spatial-chromatic Histograms [J]. *Image and Vision Computing*, 2001, 19(13): 879-986.
- [7] Qian R J, Van Beek P J L, Sezan M I. Image Retrieval Using Blob Histograms [A]. *IEEE Int Conf on Multimedia and Expo* [C]. New York, 2000, 1: 125-128.
- [8] Lim S, Lu G. Spatial Statistics for Content Based Image Retrieval [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Information Technology: Computers and Communications* [C]. Las Vegas, 2003: 159-155.
- [9] Chan Y K, Chen C Y. Image Retrieval System Based on Color-complexity and Color-spatial Features [J]. *J of Systems and Software*, 2004, 71(1-2): 65-70.
- [10] 曹莉华, 柳伟, 李国辉. 基于多种主色调的图像检索算法研究与实现 [J]. *计算机研究与发展*, 1999, 36(1): 96-100.
- [11] Ezer N, Anarim E, Sankur B A. Comparative Study of Moment Invariants and Fourier Descriptors in Planar Shape Recognition [A]. *Proc of the 7th Mediterranean Electro Technical Conf* [C]. Antalya, 1994: 242-245.
- (上接第 1364 页)
- [10] 缪国平. 帆船运动的力学原理 [J]. *力学与实践*, 1994, 16(1): 7-18.  
(Miu G P. Dynamics Theory for Steering a Sailboat [J]. *Lixue Yu Shijian*, 1994, 16(1): 7-18.)
- [11] Flay R G J, Vuletich I J. Development of a Wind Tunnel Test Facility for Yacht Aerodynamic Studies [J]. *J of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995, (58): 231-258.
- [12] 庄晓东, 孟庆春, 殷波, 等. 动态环境中基于模糊概念的机器人路径搜索方法 [J]. *机器人*, 2001, 23(5): 397-399.  
(Zhuang X D, Meng Q C, Yin B, et al. A Method of Robot's Path Searching in Dynamic Environment Based on Fuzzy Concept [J]. *Robot*, 2001, 23(5): 397-399.)
- [13] 田清钧. 帆板运动的力学探讨 [J]. *天津师大学报* 1996, 16(2): 26-29.  
(Tian Q J. A Mechanical Analysis of Headwind Sailing [J]. *J of Tianjin Normal University*, 1996, 16(2): 26-29.)