

基于 Bezier 和改进 PSO 算法的风环境下翼伞航迹规划

于群涛, 陈 楸, 李德荣, 吴泽锐
(西北工业大学 自动化学院 陕西 西安 710129)

摘要: 针对当前翼伞空投航迹规划中未考虑复杂风场影响, 文中提出一种利用风场优势求解最优航迹的算法。将航迹规划问题转换成 Bezier 曲线的参数寻优问题, 针对风场环境下可行轨迹特点提出优化策略, 提出改进的粒子群优化算法求取最优解。实验结果表明, 该航迹规划算法能在复杂风场环境下求出一条满足各种要求的最优航迹, 算法设计合理, 工程易实现。

关键词: 翼伞空投航迹规划; 复杂风场; Bezier 曲线航迹; 改进 PSO 算法

中图分类号: TN96

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2014)19-0028-03

Route planning of parafoil airdrop system in complex wind field

YU Qun-tao, CHEN Qiu, LI De-rong, WU Ze-rui

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: In order to make precise parafoil airdrop system with minimal drop height safely through complex wind field, the paper presents an algorithm to calculate optimal trajectory. The paper converted path planning into a Bezier curve problem with limited feature points parameter optimization problems; according to general characteristics of wind environment feasible trajectory analysis, given the optimization strategy; using improved particle swarm optimization algorithm for the optimal solution. Experimental results show that the proposed algorithm can provide a optimal track in complex wind field, satisfying all constraints. The algorithm proved a reasonable design and easy to implement the project.

Key words: parafoil airdrop path planning; complex wind field; Bezier curve; improved particle swarm algorithm

DOI: 10.14022/j.cnki.dzsjgc.2014.19.009

翼伞^[1]是一种由柔性纺织材料制成的气动减阻装置, 拥有高升阻比的气动性能、优良的滑翔能力、良好的稳定性和操纵性, 具有体积小、重量轻、便于携带搬运的特点。翼伞精确空投系统就是利用翼伞特点, 将人员、物品等远距离准确投放到指定地域。该系统在航空航天、军事、民用等领域的应用越来越广泛, 例如, 欧空局和美国宇航局合作研制的 X-38 救生飞船就采用了可控翼伞回收系统。

对翼伞空投系统而言, 风环境是影响其归航过程的关键因素之一, 在大部分归航过程中, 翼伞主要无障碍空间飞行, 在风场下规划安全有效的航迹就成为翼伞航迹规划的重要部分。然而, 目前研究者大多假设风环境为常值平均风或叠加紊流风^[2-3], 直接采用简单径向归航的方法控制翼伞接近着陆区, 虽然简化了航迹规划过程, 却导致翼伞有效投放距离小、控制频繁度高、到达着陆区时高度偏差大等缺点。若能事先对归航风场环境进行建模, 充分利用该风场的特点规划出一条合适的航迹, 将会大大提升翼伞归航性能, 不仅可减少并准确预测下降高度、扩展投放范围, 而且能减少控制操纵次数、节约能量和提升稳定性。

本文首先对翼伞归航环境中的风场进行工程化建模, 通过提出归航问题, 选择采用 Bezier 曲线表达预定航迹, 对航

迹做进一步优化处理, 并采用改进的粒子群优化算法得到符合要求的最优航迹。

1 风环境模型

综合考虑翼伞归航特点和便于工程化实现, 本文对风场做如下简化假设: 1) 风场为水平风, 无垂直气流; 2) 风速不随高度和时间变化; 3) 空间大气绕气压中心旋转, 旋转趋势近似螺旋线。基于以上假设, 利用对数螺旋线相关原理, 建立近似表现大气规律性运动的风速矢量场模型, 2D 风场效果如图 1 所示。因风速在小范围内不会发生较大变化, 本文采用栅格法保存风速数据, 在需要风速数据时, 直接查询距离最近栅格点的存储值即可。

2 航迹规划算法的实现

2.1 航迹规划问题描述与分析

某翼伞精确空投系统在完全展开后, 机载导航设备获得了当前坐标和航向, 接下来, 翼伞需穿越图 1 风场并以指定航向抵达前方导航点, 在线规划系统的任务是求出一条使翼伞系统下降高度尽可能少的轨迹, 同时保证安全、稳定飞行, 且尽量使操纵过程简单。

针对该问题, 航迹规划算法思路如下: 采用一种能

收稿日期: 2013-12-10

稿件编号: 201312073

作者简介: 于群涛(1989—), 男, 河南新野人, 硕士研究生。研究方向: 精确空投航迹规划, 地面监控系统设计。

-28-

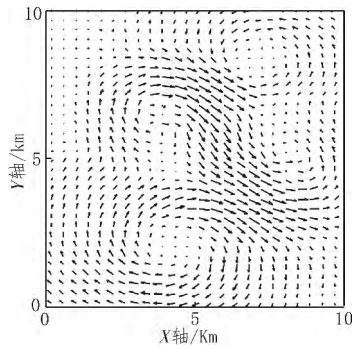


图1 风速矢量场平面区域分布效果

Fig. 1 Distribution of wind field in given area

表达空间内任意轨迹的表示方法,把轨迹光滑度、转弯曲率、轨迹可实现、高度损耗、操纵量等约束条件引入到轨迹表示法的评价机制中,将航迹规划问题转换成求最优解问题。

2.2 Bezier 曲线表达航迹

Bezier 曲线是利用特征点围成的特征多边形来定义曲线,改变特征点位置即可改变曲线的形状。若在有限空间内给定 $n+1$ 个特征点,其位置矢量为 $Q_i (i=0,1,2,\dots,n)$,则 Bezier 曲线方程表示为^[4]:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n Q_i B_{i,n}(t), t \in [0,1] \quad (1)$$

式中, $B_{i,n}(t)$ 是 n 次 Bernstein 基函数:

$$B_{i,n}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i}, \quad i=0,1,2,\dots,n \quad (2)$$

鉴于 Bezier 曲线具有未知参数少、轨迹表现力丰富等优点,本文采用多段三次 Bezier 曲线拼接的方法来表述翼伞的预定航迹。多条曲线进行拼接时,为保证连续性需满足零阶连续和一阶连续条件,如图 2 所示,两条曲线特征点分别为 $Q_i (i=0,1,2,3)$ 和 $R_i (i=0,1,2,3)$,拼接时需满足点 $Q_2, Q_3 (=R_0), R_1$ 在同一直线上。

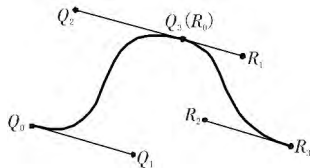


图2 两条三次 Bezier 曲线拼接效果

Fig. 2 Splicing effect of two cubic Bezier curves

2.3 航迹评价函数

采用 Bezier 曲线已经确保了轨迹的平滑性,航迹评价标准主要考虑高度损耗和操纵稳定性。本文采用离散积分法求高度损耗值,将整条 Bezier 曲线分成 n 小段,假设每一小段的操纵量不变,则预定航迹评价函数为:

$$fitness = \sum_{i=1}^N (h(i) + g(i)) \quad (3)$$

式中, N 代表预定轨迹中 Bezier 曲线条数, h 代表高度损耗, g 代表操纵代价。

高度损耗函数表达式为:

$$h = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{|\vec{P}(t_{k+1}) - \vec{P}(t_k)|}{|\vec{v}_e(t_{k,k+1})|} \cdot \vec{v}_e(t_{k,k+1}) \quad (4)$$

式(4)中, $t_k = k/n$, $\vec{P}(t_k)$ 表示 Bezier 曲线上 t_k 处的位置, \vec{v}_e, \vec{v}_z 分别代表相应状态量在 Bezier 曲线上从 t_k 到 t_{k+1} 的均值。

当翼伞沿给定轨迹飞行时,可能出现无法前行的情况,假设 P 点处的风速与切向量的夹角为 θ ,空速为 V_{a0} ,则无效轨迹的判断方法如下:

1) 若 $|\vec{V}_w| \cdot \sin\theta \geq V_{a0}$,表明空速无力抵消侧向风的影响,无法提供沿轨迹切线的前飞速度,该轨迹无效;

2) 若 $\theta \geq \pi/2$,且 $\Pr j_{\vec{V}_w} \vec{V}_w = |\vec{V}_w| \cdot \sin\theta \geq V_{a0}$,表明迎面风速太强而无法前行,该轨迹无效。

某条 Bezier 曲线第 j 小段的操纵代价表达式为:

$$g_j = \begin{cases} 0, & 0 \leq \bar{\delta}_a \leq \delta_{safe} \\ c \cdot (\bar{\delta}_a - \delta_{safe}) \cdot h_j, & \delta_{safe} \leq \bar{\delta}_a < \delta_{max} \\ d \cdot h_i, & \bar{\delta}_a > \delta_{max} \end{cases}$$

式中, $\bar{\delta}_a$ 代表平均单侧下拉量, δ_{safe} 代表风场中保证翼伞稳定的上限值, δ_{max} 为最大允许值, h_i 为高度损耗值, c, d 为常数。

2.4 规划算法的优化

相比于其他轨迹表示法,采用 Bezier 曲线技术已很大程度上优化了问题的求解,但是,若直接对预定轨迹的未知参数寻优,仍需较长的搜索时间。若能进一步对归航轨迹特点进行分析并合理优化,必能进一步提升问题求解效率。

1) 观察图 1 可知,区域内任意一条直线上各点风速存在规律:风速在直线垂线上的分量呈方向交替变化的规律分布,如图 3 中均匀排列的矢量。由此,设置预定轨迹的 Bezier 曲线条数为首尾连线 ST 上风速方向交替变化次数。以交替分布的风速分量的过零点(图中的 O_1, O_2 点)所在位置为拼接点的 x 轴坐标和 y 轴坐标边界值,以过零点为垂足、以左侧(靠近起始点一侧)风向为方向做垂线,沿垂线方向上从垂足开始依次计算各点风速在 ST 方向上的分量,当其减小到某一较小值时,取该点位置为拼接点的 y 轴坐标的另一边界值。拼接点处的切向量可设置成与风速方向相同。这样,未知参数由原来的 $(5N-3)$ 条,减少到 $(3N-1)$ 条,拼接点的 x 轴坐标变为已知值, y 轴坐标的取值范围大幅缩小。

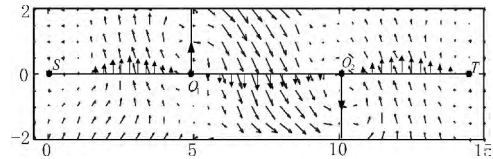


图3 某直线上风速分量的分布

Fig. 3 Distribution of wind components on a straight line

2) 由 Bezier 曲线特性知,若按固定步长移动线外特征点,曲线形状也显现出规律性变化。因此,若采用固定步长法更新曲线,则其中必有一条曲线接近最优轨迹;若设置的步长合理,可使寻优算法很快搜索到次优轨迹,再经进一步局部寻

优,即可快速找到全局最优解。

3)若寻优算法某次给出的轨迹出现不可行区段时,按不可行长度相应增大整条轨迹评价函数值,既可使寻优算法有效避开该轨迹而趋向较优轨迹,又可将之与有效轨迹作明显区分。

2.5 改进的粒子群算法

粒子群优化(Particle Swarm Optimization,PSO)算法源于对鸟类觅食行为的观察研究,由 Kennedy 和 Eberhart 提出^[5]。PSO 算法的具体原理可参考文献[6],速度和位置更新公式为:

$$V_k^{t+1} = \omega V_k^t + c_1 r_1 (pBest_k^t - X_k^t) + c_2 r_2 (gBest^t - X_k^t) \\ X_k^{t+1} = X_k^t + a V_k^{t+1} \quad (6)$$

因 PSO 算法^[7]易陷入局部最优,依照第 2.4 节中的优化思想,对 PSO 算法进行了改进,修正了算法中速度和位置更新策略,使其始终保持局部发散,保证解的多样性,同时,改进了迭代退出机制,缩短算法执行时间,执行步骤如下:

步骤 1:初始化 PSO 算法参数,初始化轨迹未知参数的取值范围和移动步长;

步骤 2:对粒子速度和位置进行更新,限制速度为步长的整数倍,当检测到位置超出取值范围,则在相应边界点和取值中心之间随机取一新值,并使之与最小值的差为步长整数倍;

步骤 3:出现最优解时,若步长为初始值,转第 4 步,若步长非初始值,转第 5 步;未出现最优解时,转第 2 步;

步骤 4:将未知参数的取值范围限定在最优解附近,并更新移动步长,转第 2 步;

步骤 5:若本次步长求得的最优值与前次步长所得最优值的误差符合精度要求,表明已求得最优轨迹,停止搜索;否则,转第 4 步。

3 实验结果

为了验证算法的有效性,利用 MATLAB 对其进行了仿真。初始条件设置如下:起始点坐标(0 km,0 km,6 km),航向 0°,目标点平面坐标(15 km,0 km),航向 0°;PSO 算法种群规模 20,轨迹精度 1 m,对优化前后的算法分别进行 20 次实验,数据如表 1 所示。

表 1 优化前后数据对比
Tab. 1 Comparison of the data before and after optimization algorithm

| | 最优评价价值 | | 迭代次数 | |
|-----|---------|---------|-------|-------|
| | 平均值 | 标准差 | 平均值 | 标准差 |
| 优化前 | 5 237.5 | 1 067.5 | 1 826 | 581.7 |
| 优化后 | 3 018.4 | 1.42 | 172 | 55.6 |

由表 1 数据可知,轨迹规划算法经优化后,避免了 PSO 算法陷入局部最优,求得的最优轨迹有明显改善,每次实验都能找到符合精度要求的最优解,而且,迭代次数减少为优化前的 9.4%,大幅度提升了算法的运算效率,证明优化策略的有效性和实用性。

图 4 为采用优化策略的某次实验中,平均、最优轨迹评

价值随 PSO 算法迭代次数变化的曲线,由图可知,在第 60 次和第 100 次迭代附近,移动步长进行了一次更新,在接近第 180 次迭代时,算法已找到最优航迹。图 5 为该次实验找到的最优航迹在风场环境下的平面投影,观察可知,该最优航迹充分利用了顺风优势,大部分路程都是沿风向方向飞行,而且曲线平滑,有多个区段近似直线,这样自然满足了操纵控制次数少的规划要求。

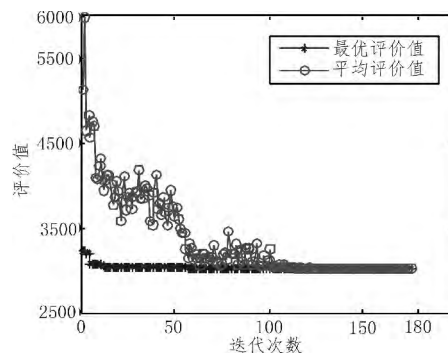


图 4 航迹评价价值随迭代次数变化的曲线

Fig. 4 Trajectory evaluation value curve with the change of iterations

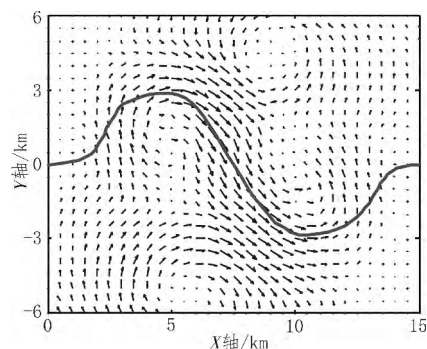


图 5 最优航迹曲线

Fig. 5 Optimal trajectory in wind field

4 结论

本文通过建立风速场模型,采用经优化的 Bezier 曲线法表达预定航迹,将约束引入到航迹评价函数中,并运用改进的 PSO 算法,最终实现了在风环境下求解翼伞空投系统的最优归航问题。实验结果表明,该算法设计合理,运算效率高,能为翼伞空投系统提供一条高度损耗少、控制操纵简单、能安全稳定到达目标点的理想轨迹。

参考文献:

- [1] 韩雅慧,杨春信,肖华军,等.翼伞精确空投系统关键技术和发展趋势[J].兵工自动化,2012,31(7):1-7.
HAN Ya-hui, YANG Chun-xin, XIAO Hua-jun, et al. Review on key technology and development of parafoil precise airdrop systems[J]. Ordnance Industry Automation, 2012, 31(7):1-7.
- [2] Sopha U, Strauch H. GNC concept for automated landing of a large parafoil[R]. AIAA-97-1464, 1997.

(下转第 34 页)

以获取身体关节的三维坐标数据。由于不同人的身高和体重不同,原始三维坐标数据存在维数高、泛化效果差等问题。关节角度特征可以较好地描述人体姿势。

离线实验中,利用 Kinect 设备捕获关节三维坐标数据,抽取 25 个与姿势有关联的关节角度,采用逻辑回归算法训练分类模型。关节角度特征数量从 5 个到 25 个逐渐增加,分析相应的准确率,得出当关节角度特征数量为 21 个时准确率最高。姿势种数从 2 种到 54 种逐渐增加,得到平均准确率为 97.88%。逻辑回归可以较好地识别多种人体姿势。

结合骨骼跟踪和逻辑回归的姿势识别方法在实时性、精确度等方面上都有良好的表现。骨骼跟踪的速率是 30 帧每秒,即每秒钟可以对姿势进行 30 次识别。当用户做出一个姿势,系统能够快速识别出来并做出反应,达到友好交互的目的。在线实验中,利用最优的关节角度特征和逻辑回归算法设计开发实时的姿势识别系统。三位新的被试从未体验过 54 种姿势,她们模仿界面左边的标准姿势做完 54 种姿势。她们做了很多模棱两可的姿势,平均准确率达到 88.89%(见表 4)。如果三位被试不断体验姿势识别系统、熟悉 54 种姿势,则她们所做的姿势可以被正确地识别。姿势的种类可以继续扩展,对于一种新的姿势,给定一定量的训练样本,就可以训练出分类模型。

5 结束语

本文利用 Kinect 的实时骨骼跟踪技术获取身体关节的三维位置信息,建立包含 54 种人体全身姿势的数据库。提取 25 个与姿势有关联的关节角度作为姿势特征,结合逻辑回归分类算法进行离线实验,得出当关节角度特征数量为 21 个时姿势识别的准确率最高。设计开发了实时的姿势识别系统并进行在线实验。实验证明,结合 Kinect 的骨骼跟踪和逻辑回归算法可以准确实时地识别人体姿势。

参考文献:

[1] Allen F R, Ambikairajah E, Lovell N H, et al. Classification of a known sequence of motions and postures from accelerometry data using adapted Gaussian mixture models[J]. *Physiological*

Measurement, 2006, 27(10):935.

- [2] Mattmann C, Clemens F, Tröster G. Sensor for measuring strain in textile[J]. *Sensors*, 2008, 8(6):3719–3732.
- [3] Weinland D, Ronfard R, Boyer E. A survey of vision-based methods for action representation, segmentation and recognition[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2011, 115(2): 224–241.
- [4] Boulay B, Brémont F, Thonnat M. Applying 3d human model in a posture recognition system [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, 27(15):1788–1796.
- [5] Cohen I, Li H. Inference of human postures by classification of 3D human body shape[C]//*Analysis and Modeling of Faces and Gestures*, 2003. AMFG 2003. IEEE International Workshop on. IEEE, 2003:74–81.
- [6] Mo H C, Leou J J, Lin C S. Human Behavior Analysis Using Multiple 2D Features and Multicategory Support Vector Machine[C]//*MVA*, 2009:46–49.
- [7] Souto H, Raupp Musse S. Automatic Detection of 2D Human Postures Based on Single Images[C]//*Graphics, Patterns and Images (Sibgrapi)*, 2011 24th SIBGRAPI Conference on. IEEE, 2011:48–55.
- [8] Le T L, Nguyen M Q, Nguyen T T M. Human posture recognition using human skeleton provided by Kinect[C]//*Computing, Management and Telecommunications (ComManTel)*, 2013 International Conference on. IEEE, 2013: 340–345.
- [9] Shotton J, Sharp T, Kipman A, et al. Real-time human pose recognition in parts from single depth images [J]. *Communications of the ACM*, 2013, 56(1):116–124.
- [10] Negin F, Özdemir F, Akgül C B, et al. A decision forest based feature selection framework for action recognition from rgb-depth cameras [C]//*Image Analysis and Recognition*. Springer Berlin Heidelberg, 2013:648–657.

(上接第 30 页)

- [3] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm—explosion, stability and convergence in a multidimensional complex space [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(1):58–73.
- [4] 徐甜, 刘凌霄. Bezier 曲线的算法描述及其程序实现[J]. *安阳师范学院学报*, 2006:49–52.
XU Tian, LIU Ling-xia. Algorithm description and program implementation of Bezier curve[J]. *Journal of Anyang Normal University*, 2006:49–52.
- [5] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm—explosion, stability and convergence in a multidimensional complex space [J].

IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58–73.

- [6] 刘波. 粒子群优化算法及其工程应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.
- [7] 焦鹏, 王新政, 谢鹏远. 基于粒子群优化 LSSVM 的模拟电路故障诊断方法[J]. *现代电子技术*, 2013(8):35–38.
JIAO Peng, WANG Xin-zheng, XIE Peng-yuan. Method of analog circuit fault diagnosis based on particle swarm optimization LSSVM[J]. *Modern Electronics Technique*, 2013 (8):35–38.