

旋翼无人机协同任务指派问题研究与算法改进

沈 奥^{1,2}, 周树道¹, 王 敏¹, 彭舒龄^{1,3}, 刘展华¹

(1. 国防科技大学 气象海洋学院, 南京 211100; 2. 中国人民解放军 94303 部队, 山东 潍坊 261000

3. 中国人民解放军 61206 部队, 北京 100043)

摘要: 在应用旋翼无人机群时, 每架无人机自主快速选择目标空域点, 对于提升无人机群整体性能有很大作用; 对于到达目标空域点即可降落的情况, 可视作二分图最佳匹配问题, 利用匈牙利算法进行求解; 对于到达空域点后, 需要等待其他无人机全部就位后一同工作的情况, 需要同时优化平均移动距离和最大移动距离两个耦合参数; 经多次实验和测试, 将匈牙利算法中代价矩阵各元素值替换为各自值的平方, 可以在平均移动距离与最优解十分接近的情况下, 使最大移动距离减小, 从而减小无人机悬停等待的消耗, 缩短过程完成的时间; 针对此问题设计了只变异不交叉、父辈子辈一同评价的遗传算法进行求解与改进算法对比, 验证了改进后匈牙利算法在此问题中具有更好的效果; 由于算法计算速度快, 适用于无人机上嵌入式系统实时计算。

关键词: 旋翼无人机; 匹配; 匈牙利算法; 遗传算法; 算法改进

Study and Algorithm Improvement on Collaborative Task Assignment of Rotor UAVs

Shen Ao^{1,2}, Zhou Shudao¹, Wang Min¹, Peng Shuling^{1,3}, Liu Zhanhua¹

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211100, China;

2. Unit 94303 of PLA, Weifang 261000, China; 3. Unit 61206 of PLA, Beijing 100043, China)

Abstract: In the application of the rotor unmanned aerial vehicle (UAV) cluster, the quick selection of a predetermined point of each UAV plays a great role for improving the overall performance. In the case of reaching the target airspace point and then landing, it can be regarded as the best matching problem of the bipartite graph, which can be solved by the Hungarian algorithm. In the case of reaching the airspace point then waiting for the other UAVs to work together after they are fully in place, it is necessary to optimize both of the coupling parameters: the mean moving distance and the maximum moving distance at the same time. The value of elemental in the cost matrix of the Hungarian algorithm is replaced after experiments and tests, so that the maximum moving distance can be reduced when the average moving distance is very close to the optimal solution, and the time to complete the process can be shortened. Genetic algorithm for this problem was designed to compared with the improved algorithm. It is verified that the improved Hungarian algorithm performs better in this problem. Due to the fast calculation of this algorithm, it is suitable for real-time calculation of embedded system in UAV.

Keywords: rotor unmanned aerial vehicle; matching; hungarian algorithm; genetic algorithm; algorithm improvement

0 引言

旋翼无人机具有结构简单、操作灵活、起降要求低、可悬停等特点, 在拍照录像、气象监测、物资投递等领域具有难以替代的作用。而多架旋翼无人机可以通过协同配合、编队飞行等方式完成单架无人机难以完成的任务。在多架旋翼无人机协同执行任务时, 无人机会根据需求飞至不同目的地执行任务。这种情况一般采用多架相同的无人机, 每一架无人机都有相同的属性和功能^[1-3]。根据无人

机实际应用情况, 可以大致分为两种情况:

情况 1, 每架无人机分别分配一个目标点, 到达目标空域点即可降落, 比如利用无人机进行物资运送;

情况 2, 每架无人机到达各自目标空域点后需要悬停, 等待所有无人机就位后再开始执行任务, 比如多无人机定点拍照、监控或测量。

在这类问题中, 计算复杂度随无人机数量上升, 呈指数上涨, 属于多项式问题 (Polynomial Problem, P 问题), 所以无人机自主快速智能地根据任务性质和目标点位置进行匹配, 可以免除人工调度, 增加无人机协同工作的自动化程度, 对提升无人机集群飞行的性能有重要意义^[4-5]。由于在此类应用实际中, 空间内无人机密度相对稀疏, 无人机避碰相对容易实现。同时, 各无人机目标空域点相距较远, 且高度往往不同, 使用时碰撞的几率较小。所以在本文中暂不将无人机避碰作为研究的重点。

本文主要是针对旋翼无人机, 设计了适用于无人机嵌

收稿日期: 2020-02-08; 修回日期: 2020-03-12。

基金项目: 国家自然科学基金资助 (41775039, 41775165, 91544230)。

作者简介: 沈 奥 (1990-), 男, 江苏启东人, 助理工程师, 硕士, 主要从事群体智能方向的研究。

周树道 (1964-), 男, 浙江宁波人, 教授, 硕士, 主要从事气象装备方向的研究。

入式系统的轻量级算法, 完成不同情况下多无人机的目标空域点匹配。第一部分介绍了旋翼无人机目标空域点匹配的数学模型; 第二部分针对第一种情况采用匈牙利算法进行求解; 第三部分针对第二种情况, 在匈牙利算法的结构上, 针对实际问题进行了改进, 确定了改进后的参数, 并设计了遗传算法进行对比; 第四部分为结论。

1 旋翼无人机多目标空域点匹配问题数学模型

多无人机与多目标点的匹配可以看作图论中二分图的匹配问题^[6-7], 可以简述为:

有 n 架无人机 A_1, A_2, \dots, A_n ; n 个目标点 B_1, B_2, \dots, B_n , 将无人机设置为矩阵的行, 目标点设置为矩阵的列, 则可得到匹配矩阵为 $\mathbf{X} = (x_{ij})$, 其中, x_{ij} 表示匹配情况, 取值为 1 表示无人机 A_i 与目标点 B_j 匹配, 取值 0 表示无人机 A_i 与目标点 B_j 不匹配。同时, 一架无人机必须且仅能与一个目标点匹配, 优化函数可以通过实际情况进行设置。因此, 问题可以看作 n^2 个变量 $2n$ 个约束条件的最优规划问题:

$$\text{minimize } z = f(\mathbf{X}) \quad (1)$$

服从于:

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, ij = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1, ij = 1, 2, \dots, n$$

其中:

$$x_{ij} = 0 \text{ or } 1, i, j = 1, 2, \dots, n$$

根据实际需要, 设置合适的目标函数 $f(\mathbf{X})$, 在服从约束条件的情况下, 优化匹配矩阵 \mathbf{X} , 即可获得问题的优化解。

2 针对情况 1 的匈牙利算法使用

2.1 匈牙利算法

对于二分图的最佳匹配问题, 如果采用遍历的方法, 将所有匹配情况进行比较和选取, 则在问题规模较大时, 会发生组合爆炸的情况。而此问题中限制条件特殊且具有明显的数学特征, 难以采用遗传算法和模拟退火算法等随机算法, 且随机算法在求解此问题中, 丢失了问题的数学本质, 具有较大盲目性。

而匈牙利算法是基于 Hall 定理中充分性证明的思想, 通过不断寻找增广路径的方法大幅度降低时间复杂度, 是解决二分图匹配问题的主要算法^[8-9]。算法步骤如下。

将优化目标定义为:

$$\text{minimize } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

通过利用代价矩阵的相关定理, 对矩阵进行等价变换, 算法可按图 1 步骤执行。

通过图 1 中步骤计算, 可得到 x_{ij} 的具体取值, 即得到匹配矩阵 \mathbf{X} , 将匹配矩阵中取值为 1 元素的行号对应的无人机与列号对应的目标点进行匹配, 即为该问题的最优匹配结果。

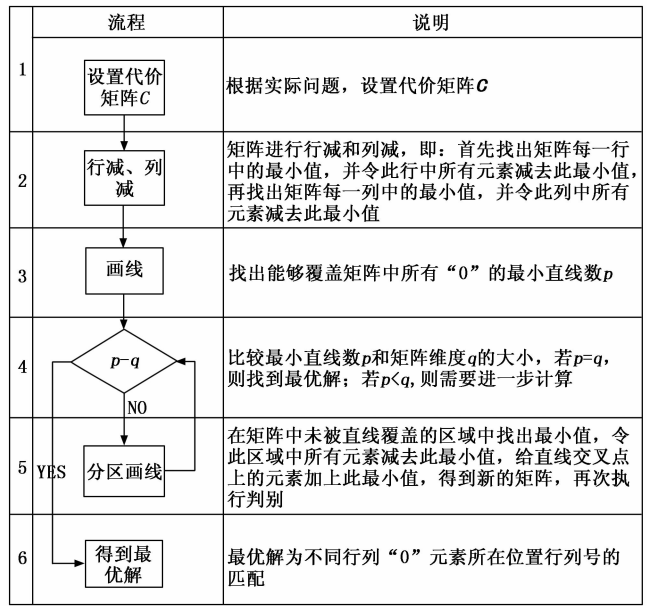


图 1 匈牙利算法流程图

2.2 匈牙利算法使用

在情况 1 中, 由于无人机到达空域点后即可降落, 不需要等待其他无人机, 所以可以将距离设置为问题中的代价值, 即可求解令无人机群飞行总距离最短的匹配方式。通过卫星定位获取可获取每一架无人机的当前坐标和空域点的坐标值, 计算各无人机对应各空域点的距离, 并将其作为代价矩阵 C_1 中的元素, 即:

$$C_1 = (c_{ij}) \quad (3)$$

其中: $c_{i,j} = \text{distance}(A_i, B_j)$

对矩阵 C_1 进行 2~6 步骤运算, 即可得到匹配矩阵 \mathbf{X}_1 , 将匹配矩阵中值为“1”的元素所在行列号进行匹配, 即为最佳匹配结果。

图 2 以 13 架随机初始位置的无人机对应 13 个空域点为例, 展示了匹配的几组结果, 图中“*”代表无人机所在位置, “o”代表目标点位置, 连线表示无人机和目标点的匹配结果。匹配结果中, 无人机群总体移动距离之和最小, 而从图 2 中可以看出, 使用匈牙利算法进行目标匹配, 无人机径直飞向目标点时, 飞行线路不会存在交叉的情况, 即可不必考虑无人机避碰的问题, 在安全性和节能性上都有较好的效果。

3 针对情况 2 的匈牙利算法的改进和对比

3.1 在情况 2 中存在的问题

对于情况 2 中时应用背景, 当旋翼无人机到达自己空域点后, 需要悬停飞行, 等待其他无人机到达各自空域点, 在等待的过程中, 悬停飞行同样会产生能量的消耗^[10]。可以计算整个过程的总消耗为:

$$Z = a_1 \sum_{i=1}^n d_i / v + a_2 \sum_{i=1}^n (d_{\max} - d_i) / v \quad (4)$$

可以化简为:

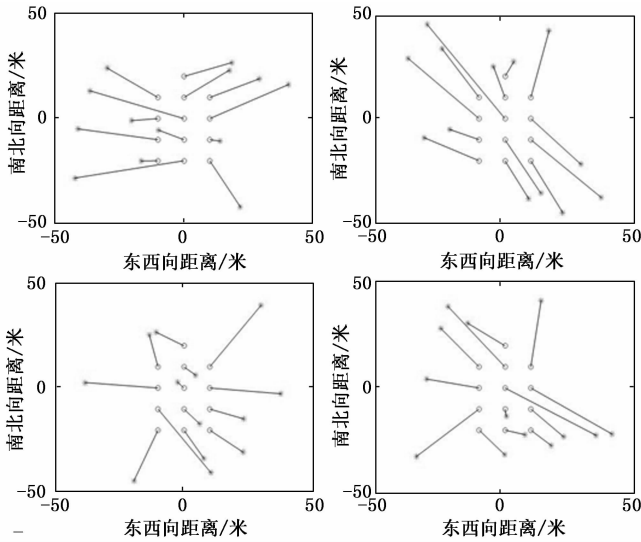


图 2 情况 1 中的匹配结果

$$Z = \frac{(a_1 - a_2)}{v} \sum_{i=1}^n d_i + \frac{a_2 \cdot n \cdot d_{\max}}{v} \quad (5)$$

其中： $d_{\max} = \max_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}} \{c_{ij} \cdot x_{ij}\}$

式中， a_1 、 a_2 分别为飞行和悬停时，单位时间内的能量消耗， v 为旋翼无人机飞行速度， d_i 为无人机 A_i 距离匹配到目标点的距离， d_{\max} 为无人机到目标点的距离的最大值。

与此同时，响应速度快是无人机的优势，长时间悬停等待会影响旋翼无人机群整体执行任务的效率^[11]，所以整个过程所用的时间应当考虑在内，计算整个过程完成的时间为：

$$T = d_{\max} / v \quad (6)$$

可以看出，影响旋翼无人机群总能量消耗和完成时间取决于无人机需要移动的总距离（平均每架无人机需要移动的距离）和各无人机到各自空域点距离中的最大值，所以，要对无人机空域点进行优化匹配，应当同时优化减小每架无人机移动的平均距离和无人机需移动距离的最大值。此外，无人机飞行的路线应尽量减少交叉，减少相互间的避让过程。

而匈牙利算法主要是针对单一变量进行优化，当存在多个独立变量时，需要按照变量影响程度加权计算出代价矩阵。但在此问题中，优化目标为无人机平均移动距离和无人机的最大移动距离是一对相互耦合的变量，只有当一种匹配完成后，才能进行二次匹配，得到这种匹配下的最大移动距离^[12]。

针对于此，许多二次分配问题线性化方法已被提出，如：Kaufman 和 Broeckx 线性化模型^[13]，Lawler 线性化模型^[14]等，此外 Peter Hahn 还提出一种基于匈牙利算法的对偶上升求解方法^[15]，但这些方法需要大量的矩阵运算，占用大量计算资源和时间，不适用于无人机嵌入式系统实时计算^[16]。

3.2 算法改进

使用标准的匈牙利算法，得到结果可以使平均移动距

离最小，但却无法优化无人机中的最大移动距离，经过多次实例计算发现，当两架以上无人机全部位于空域点一侧时，如图 3 所示，由于线段 AB 与线段 CD 的和小于线段 AD 与 BC 的和，所以无人机 B 与目标 A 匹配，无人机 D 与目标 C 匹配，但实际中， A 与 D 匹配， B 与 C 匹配更符合应用要求，在平均距离相差不大的情况下，均衡无人机的最大移动距离，同时，避免了前方无人机到达目标后阻挡了后方无人机路线的情况。同样的情况还存在于无人机 F 、 H 与目标点 G 、 H 。

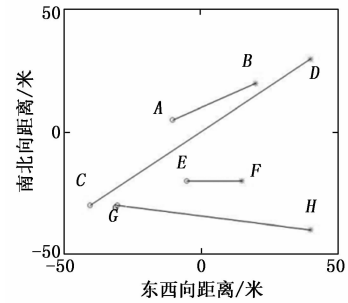


图 3 匹配结果分析

针对这一问题，为了避免较大距离的移动，在不增加额外矩阵计算的情况下，可以将代价矩阵中的元素由距离的一次函数改为距离的 m 次函数，增大远距离匹配的代价，具体改进如下：

$$C_2 = (c_{2,ij}) \quad (7)$$

其中： $c_{2,ij} = [distance(A_i, B_j)]^m, m \in Z^+, m \geq 2$

对矩阵 C_1 进行 2~6 步骤运算，即可得到匹配矩阵 X_2 ，匹配矩阵中所有值为“1”的元素所在行号无人机与所在列号目标进行匹配，可视为此情况下的优化匹配。

经过改进，由于指数函数的单调性，每一架无人机匹配各自目标点的代价值大小排序仍与无人机与目标点距离远近的排序一致。但此时与距离较大的目标进行匹配的代价值将会明显增大，限制了匹配中对较远距离目标点的匹配，在匈牙利算法的框架中，在不增加变量的情况下，通过无人机-目标点匹配的特点均衡优化了平均移动距离和最大移动距离两个参数。同时，优化后的匹配结果不具有随机性，对同一矩阵多次的匹配结果相同，可以在分布式系统中使用^[17]。

3.3 遗传算法对此问题的求解

为了更好的验证算法性能，针对此问题设计了遗传算法进行求解：

- 1) 产生 r 条父辈染色体，染色体为 $1 \times n$ 维矩阵，每个基因取值范围为 $[1, n]$ ，其中 n 为无人机数量，父辈中染色体为随机生成的 n 的排列，第 i 个基因取值为 N_i 代表无人机 i 与目标 N_i 匹配；
- 2) 由于匹配模型限制较多，采用只变异不交叉的方式，从父辈染色体中随机选择两个基因变异，为了保证目标的逐一匹配，变异方式为此两段基因进行交换；
- 3) 将父辈中 r 条染色体与产生的子代染色体进行评

价, 淘汰评价低的 r 条, 保留评价高的 r 条染色体;

4) 将保留的染色体作为父辈重复迭代。

5) 经过迭代, 选择最终染色体中评价最高的作为匹配结果。

在此例中, 将 r 设置为 100, 迭代次数设置为 1 000, 对问题进行解算。

3.4 实例对比

以 13 架随机位置的无人机对应 13 个已知空域点进行计算, 表 1 和图 4 展示了 m 不同取值时匹配结果的对比, 并与遗传算法结果进行比较。可以看出, 匈牙利算法在解决此问题时, 计算时间相差不大, 将代价矩阵由距离的函数改为 m 次函数会使平均移动距离增大, 但差别几乎可以忽略, 而最大移动距离会得到很大的改善, 减小无人机群整体的等待时间。而遗传算法由于在选择上具有随机性, 计算效果和效率明显欠缺, 并且每次计算结果会不同, 不利于无人机自主分布式计算。

表 1 算法参数对比(无人机在空域点四周)

	平均移动距离 /米	最大移动距离 /米	平均计算时间 /秒
$m=1$	8.497 5	19.085 5	0.007 56
$m=2$	8.546 4	15.384 4	0.008 58
$m=3$	8.591 6	14.691 6	0.008 1
$m=4$	8.770 3	14.911 4	0.008 57
遗传算法	10.218	18.007 1	2.237 94

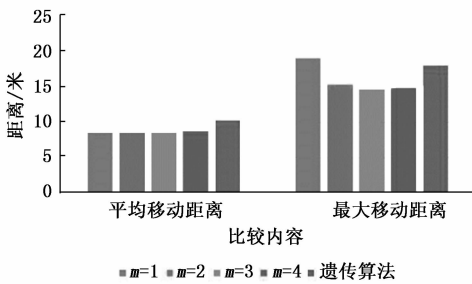


图 4 算法性能对比柱形图(无人机在空域点四周)

改变无人机群与空域点的相对位置, 使无人机群位于空域点的不同方向, 表 2、图 5 展示了无人机群位于空域点一侧时的匹配结果对比。可以看出, 当无人机群位于目标点一侧时, 当 m 值变大时, 结果变化趋势与之前相似, 而遗传算法的效果有了很大提升, 但计算时间仍然远远超过匈牙利算法。经过多次实验, 改变无人机和目标点的相对位置, 也会得到类似的结果。

表 2 算法参数对比(无人机在空域点一侧)

	平均移动距离 /米	最大移动距离 /米	平均计算时间 /秒
$m=1$	23.707 9	45.230 6	0.014 40
$m=2$	24.227 2	32.663 1	0.017 37
$m=3$	24.469 4	32.326 5	0.019 26
$m=4$	24.998 7	32.228 0	0.017 26
遗传算法	24.911 6	32.580 1	2.449 96

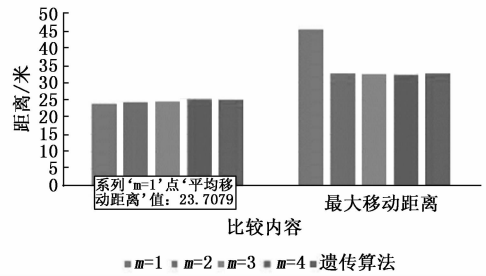


图 5 算法性能对比柱形图(无人机在空域点一侧)

此外, 图 6~9 和图 10~13 展示了几组 m 不同取值下, 无人机与目标点的匹配结果图。通过多次试验可以看出, 当 $m=1$ 时, 由于匹配结果为总距离最短的最优匹配, 不存在路线的交叉, 各无人机与其匹配的目标点之间路线相离度较大; 而 $m=2$ 时, 匹配结果会为了减小最大移动距离而做出一定修改, 有时会发生路线交叉的情况; $m=3$ 或 4 时, 由于代价矩阵元素变化较大, 匹配时会发生过度避免较远目标的情况, 导致匹配结果中交叉较多, 实际应用中, 不仅提升很小, 并且会带来飞行安全隐患。所以, 将算法中 m 的值设置为 2, 可以兼顾优化参数和实际中对路线的要求。

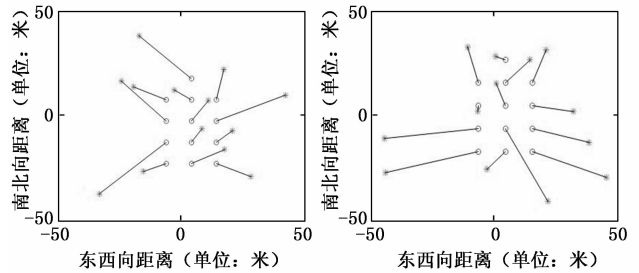


图 6 当 $m=1$ 时匹配结果(无人机在空域点四周)

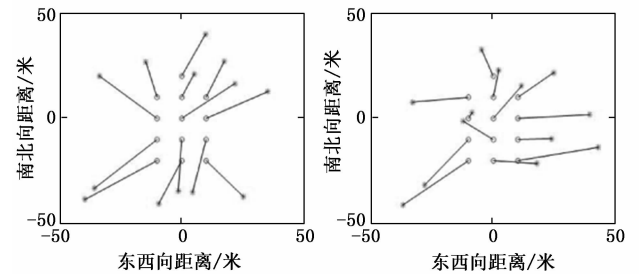


图 7 当 $m=2$ 时匹配结果(无人机在空域点四周)

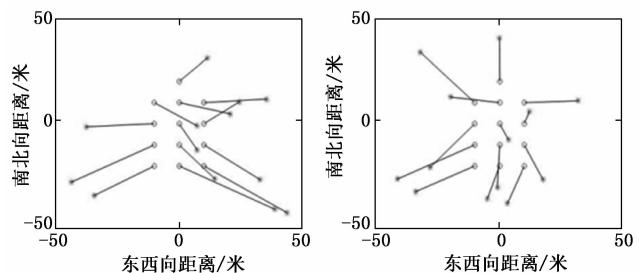


图 8 当 $m=3$ 时匹配结果(无人机在空域点四周)

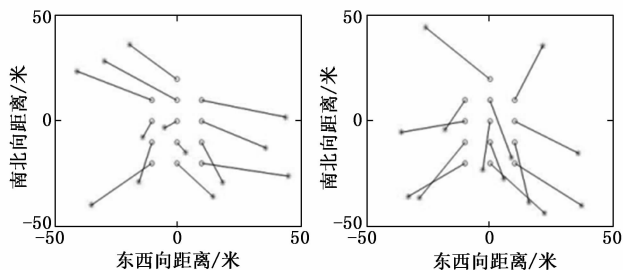


图 9 当 $m=4$ 时匹配结果 (无人机在空域点四周)

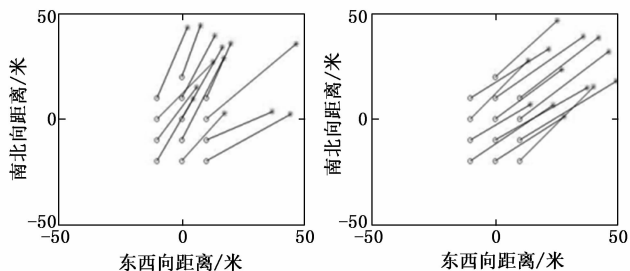


图 10 当 $m=1$ 时匹配结果 (无人机在空域点一侧)

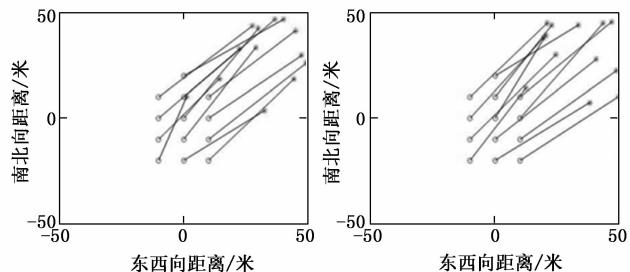


图 11 当 $m=2$ 时匹配结果 (无人机在空域点一侧)

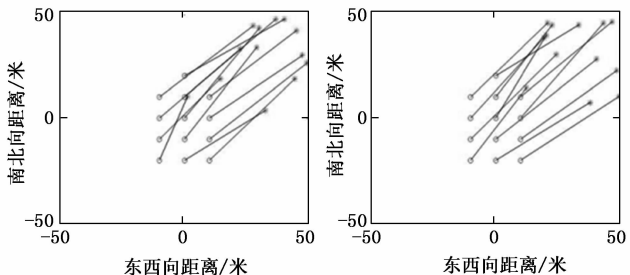


图 12 当 $m=3$ 时匹配结果 (无人机在空域点一侧)

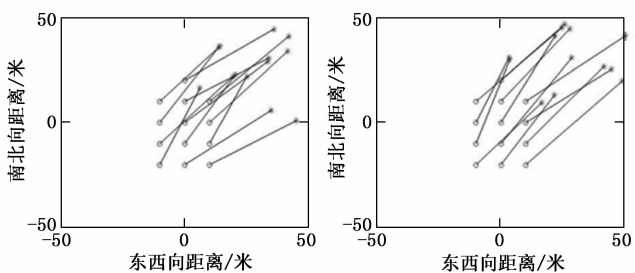


图 13 当 $m=4$ 时匹配结果 (无人机在空域点一侧)

4 结束语

通过实例可以发现,匈牙利算法对于解决无人机群的空域点匹配有很好的效果。对于到达空域点即可降落的情况,使用标准匈牙利算法可以得到最优解;而对于到达空域点后需要等待的情况,可以修改匈牙利算法中的代价矩阵,将其中元素改为各自值的平方,可以在平均移动距离和计算时间变化不大的情况下,将无人机中最大移动距离减小,通过与遗传算法的比较和多次结果的对比,验证了算法在此问题中的优越性。

参考文献:

- [1] 张晋武. 无人机编队飞行技术研究 [J]. 船舶电子工程, 2015, 35 (8): 9-12.
- [2] 嵇亮亮. 无人机的导引及协同编队飞行控制技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [3] 龙涛, 沈林成, 朱华勇, 牛轶峰. 面向协同任务的多UCAV分布式任务分配与协调技术 [J]. 自动化学报, 2007, 33 (7): 731-737.
- [4] 徐小林. 基于匈牙利算法的多车型车辆调度问题 [J]. 火力与指挥控制, 2009, 34 (2): 137-139.
- [5] 淳于江民, 张珩. 无人机的发展现状与展望 [J]. 飞航导弹, 2005, 5 (2): 23-27.
- [6] 戴一奇, 胡冠章, 陈卫. 图论与代数结构 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [7] 黄力伟, 许品刚, 王勤. 基于匈牙利算法求解的火力分配问题 [J]. 火力与指挥控制, 2007, 32 (6): 25-28.
- [8] Kuhn H W. The Hungarian method for the assignment problem [J]. Naval Research Logistics, 2005, 52: 7-21.
- [9] Kuhn H W. Variants of the hungarian method for assignment problems [J]. Naval Research Logistics, 1956, 3: 253-258.
- [10] 岳基隆, 张庆杰, 朱华勇. 微小型四旋翼无人机研究进展及关键技术浅析 [J]. 光电与控制, 2010, 17 (10): 46-52.
- [11] 刘莉, 于成龙, 王祝, 等. 小型无人机快速三维航迹规划方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35 (12): 2521-2526.
- [12] Eliane Maria Loiola, Nair Maria Maia de Abreu, Paulo Oswaldo Boaventura-Netto, Peter Hahn, Tania Querido. A survey for the quadratic assignment problem [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 176 (2): 657-690.
- [13] Xia Y. Improved Gilmore-lawler bound for quadratic assignment problems [J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2007, 24 (3): 401-413.
- [14] Lawler, Eugene L. The Quadratic Assignment Problem [J]. Management Science, 1963, 9 (4): 586-599.
- [15] Hahn, Peter and Grant, Thomas. Lower Bounds for the Quadratic Assignment Problem Based upon a Dual Formulation [J]. Operations Research, 1998, 46 (6): 912-922.
- [16] 张惠珍, 马良. 几种基于匈牙利算法求解二次分配问题的方法及其分析比较 [J]. 运筹与管理, 2010, 19 (1): 92-99.
- [17] 朱杰斌, 秦世引. 无人机编队飞行的分布式控制策略与控制器的设计 [J]. 智能系统学报, 2010, 5 (5): 392-399.