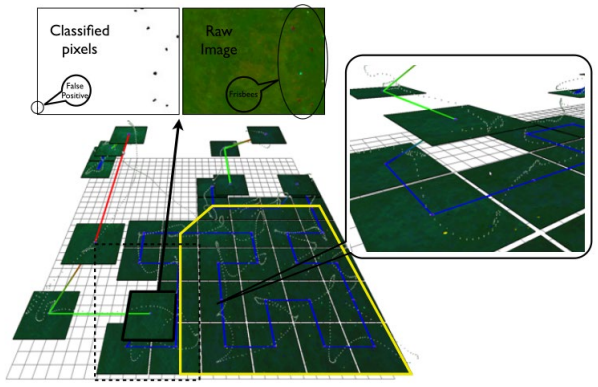
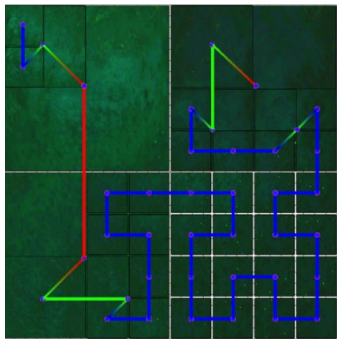
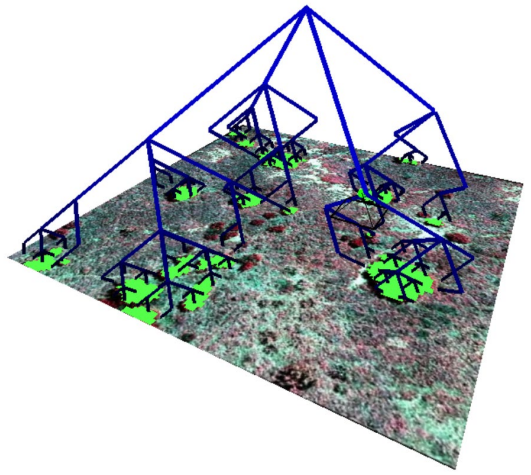
北京航空航天大學
BEIHANG UNIVERSITY

Fractal Trajectories for Online Non-Uniform Aerial Coverage

Seyed Abbas Sadat, Jens Wawerla and Richard V aughan
Autonomy Lab, Simon Fraser University
{sas21, jwawerla, vaughan}@sfu.ca







2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)

Fractal Trajectories for Online Non-Uniform Aerial Coverage

在线非均匀空中覆盖的分形轨迹

北京航空航天大學
BEIHANG UNIVERSITY

目 录

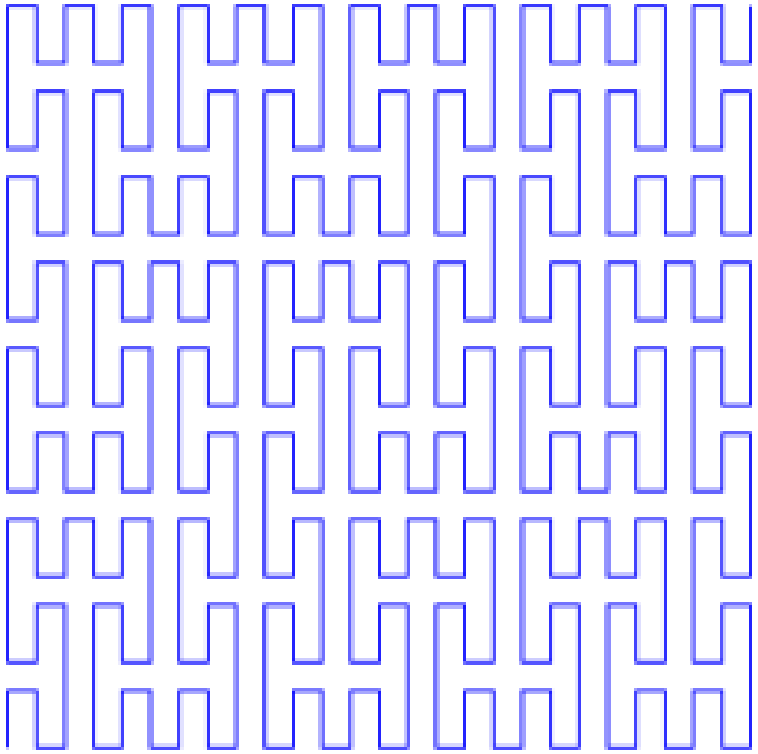
Contents

背景知识介绍

青年问禅师：“我的心被忧愁和烦恼塞满了怎么办？”

禅师若有所思地说：“你随手画一条曲线。用放大镜放大了看。它的周围难道不是十分明朗开阔吗？”

那个青年画了一条皮亚诺曲线。

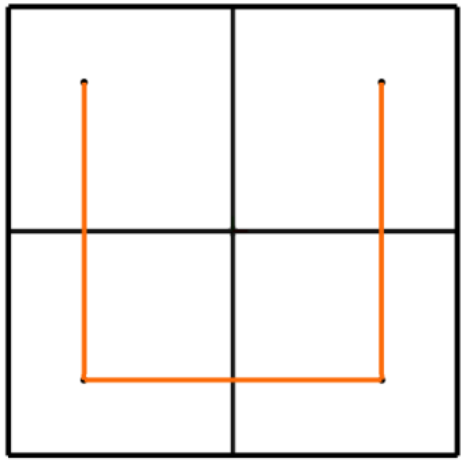


背景知识介绍

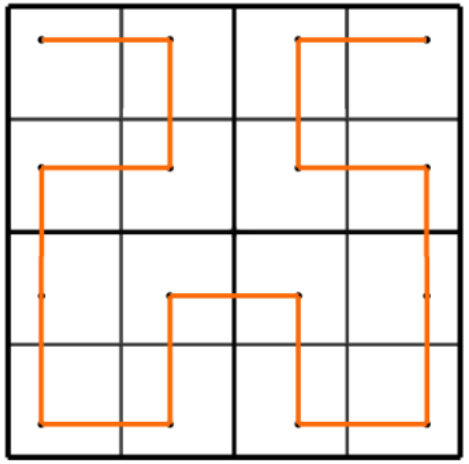
希尔伯特曲线:

The Hilbert curve (also known as the Hilbert space-filling curve) is a continuous fractal space-filling curve first described by the German mathematician David Hilbert in 1891, as a variant of the space-filling Peano curves discovered by Giuseppe Peano in 1890. ——Wikipedia

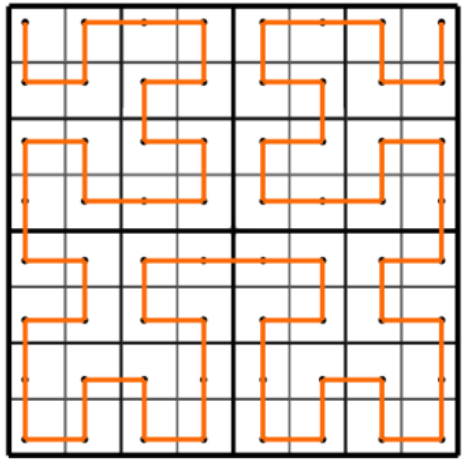
希尔伯特曲线（也称为希尔伯特空间填充曲线）是一种连续分形空间填充曲线，由德国数学家大卫·希尔伯特在1891年首次描述，是朱塞佩·皮亚诺在1890年发现的空间填充皮亚诺曲线的变体。——维基百科



1阶希尔伯特曲线

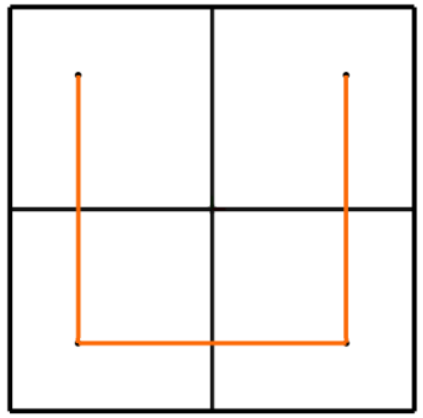


2阶希尔伯特曲线

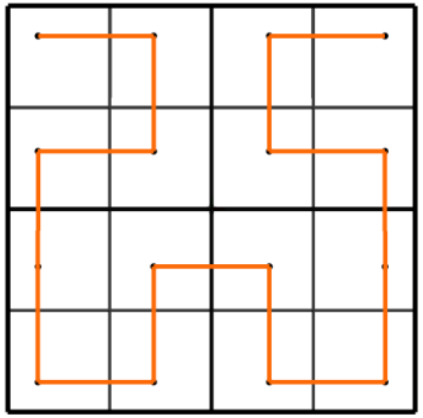


3阶希尔伯特曲线

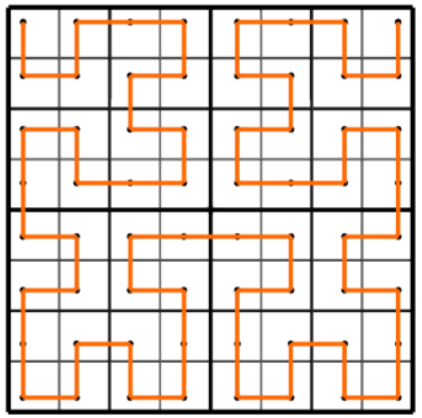
背景知识介绍



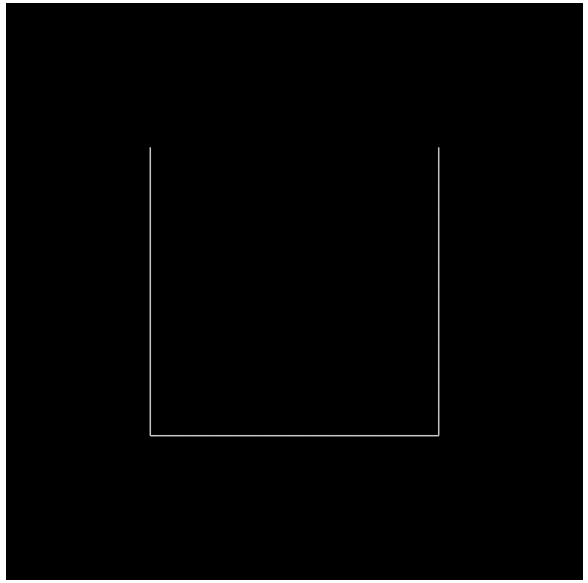
1阶希尔伯特曲线



2阶希尔伯特曲线

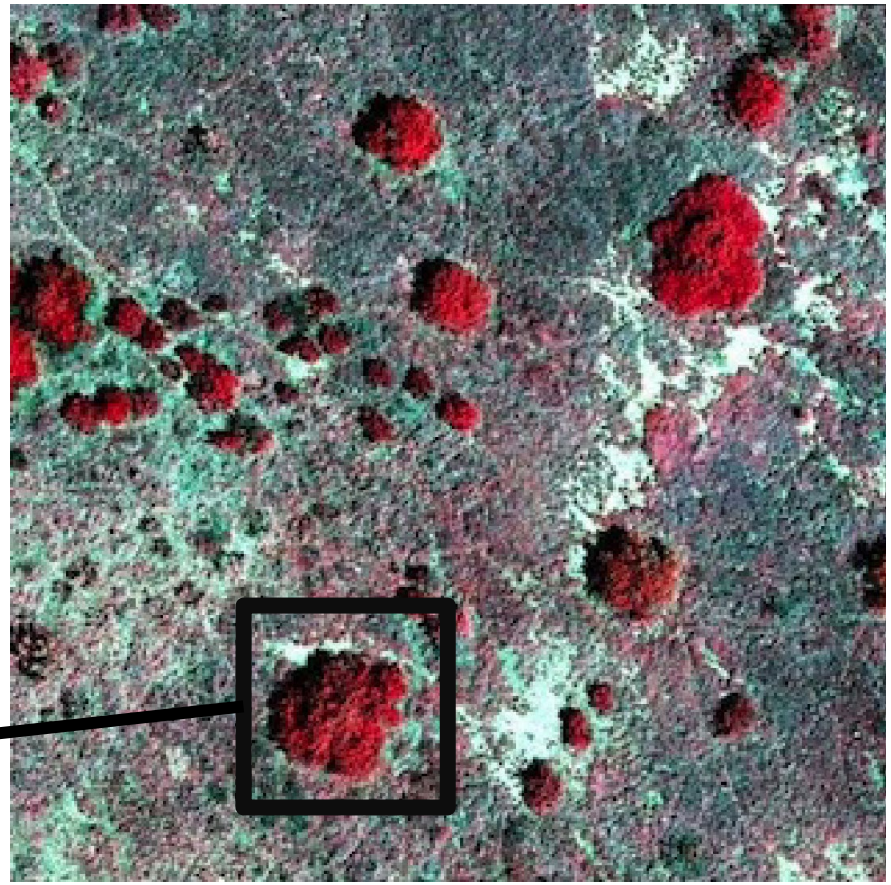


3阶希尔伯特曲线



问题提出

- 在许多应用中，环境并不均匀，我们对目标区域的某一部分可能比其他部分更感兴趣。
- 无人机的所在的高度会影响所拍照片的分辨率。



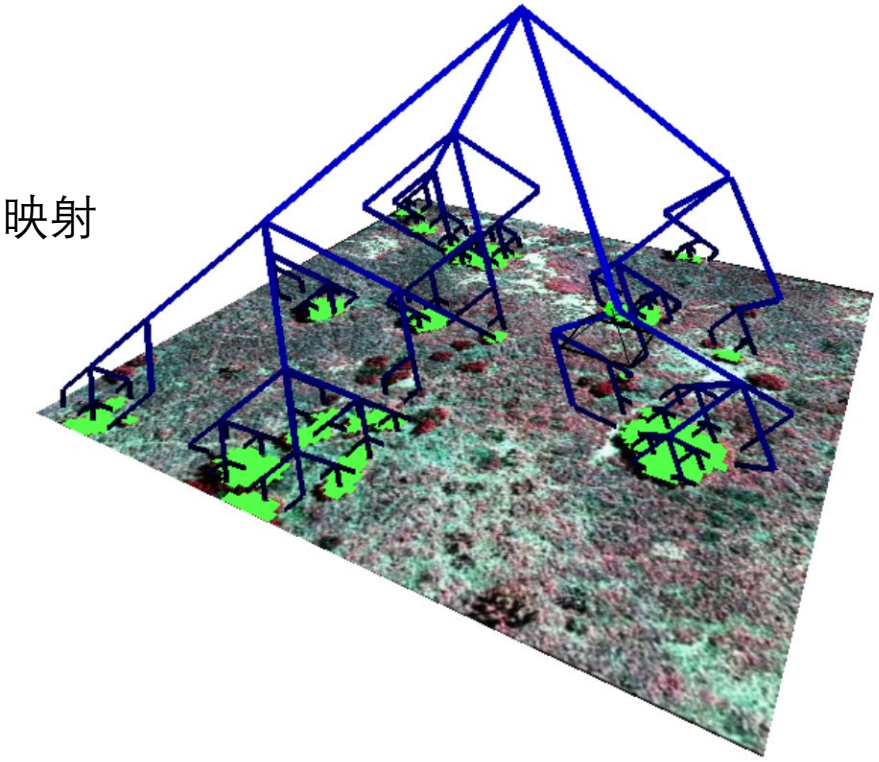
某些我们更感兴趣的地方

Sadat, Seyed & Wawerla, Jens & Vaughan, Richard. (2014). Recursive non-uniform coverage of unknown terrains for UAVs. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. 1742-1747. 10.1109/IROS.2014.6942790.

算法思路

模型简化（覆盖树模型）：

- 我们所需要覆盖的地方是一个正方形A(大小m*m)
- 存在一些区域是我们更感兴趣的
- 函数l定义为传感器所在高度到此传感器所覆盖区域的边长的映射
- 根R在A的正中间，高度hr=l^(-1)(m)
- hn为节点n的高度
- An为节点n上传感器所能覆盖的面积
- 存在临界值ht，传感器高度不能低于这个值
- An被分成2*2的小格（cell）
- 每一个小格都可以有一个节点
- 访问父节点的时候，传感器总能知道那一部分是感兴趣的



算法思路

广度优先策略

- 遍历最高的节点
- 每到一个节点，就对其子节点加上标签（我们是否感兴趣）
- 结束上一层的遍历工作就进行下一层的遍历（不感兴趣的节点就不去了）

深度优先策略

- 每到一个节点，就把它底下所有感兴趣的节点走完，再去下一个节点

捷径启发策略 Shortcut Heuristic

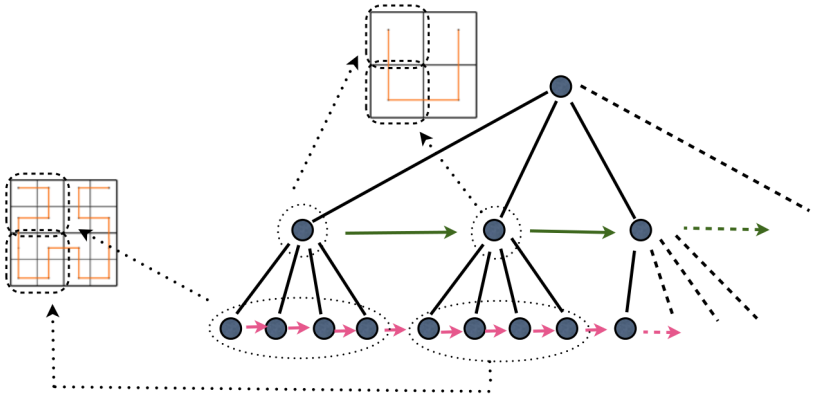
算法思路

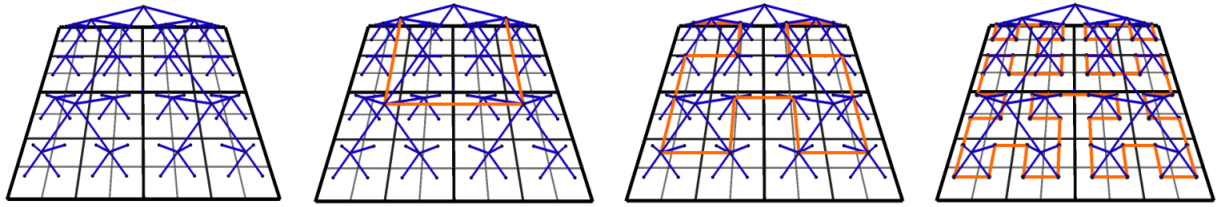
捷径启发策略
Shortcut Heuristic

- 总体和深度优先一样
- 假设无人机从一个节点到下一个节点（n→n(next)）且n(next)的高度大于n
- 无人机拜访n(next)的子节点n(nearest)
- 如果n(nearest)是有趣的，拜访n(next)的所有子节点
- 如果无趣，无人机拜访n(nearest)

算法思路

基于希尔伯特曲线的覆盖路径规划:





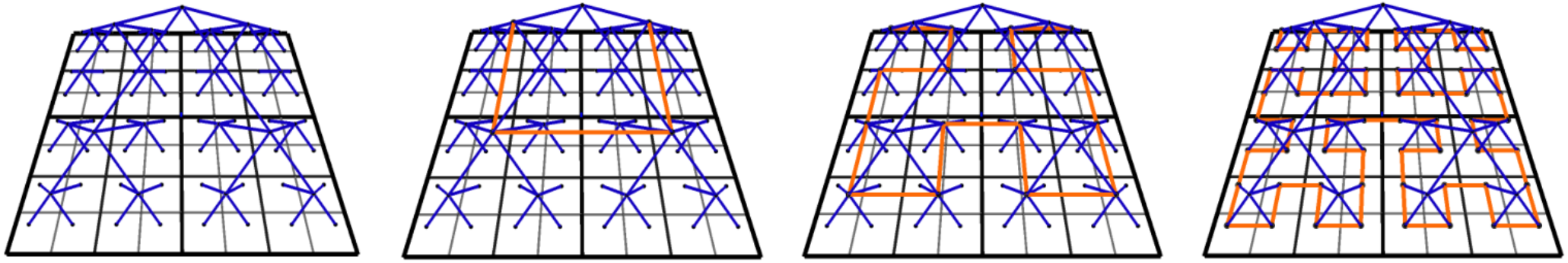
(a) Coverage tree (b) H_1 (c) H_2 (d) H_3

Algorithm 1 Hilbert-based coverage path planning

Input: Last visited node n ($null$ if none), coverage tree T with the implicit order of the nodes.
Output: Next node that should be visited or $null$ if the traversal is finished.
if $n = null$ **then**
    return the first leaf of T
end if
if $Interesting(n)$ AND $NeedVisit(Children(n))$ **then**
    $n \leftarrow$ first child of n
else if !$Interesting(n)$ AND $Depth(n) > 1$ **then**
    $n \leftarrow Parent(n)$
end if
if $NeedVisit(n)$ **then**
    return n
else if n is the last child of $Parent(n)$ **then**
    $n \leftarrow Parent(n)$
    Go to 5
else
    if $Next(n) <> null$ **then**
        $n \leftarrow Next(n)$
        Go to 10
    else
        return $null$
    end if
end if

算法思路

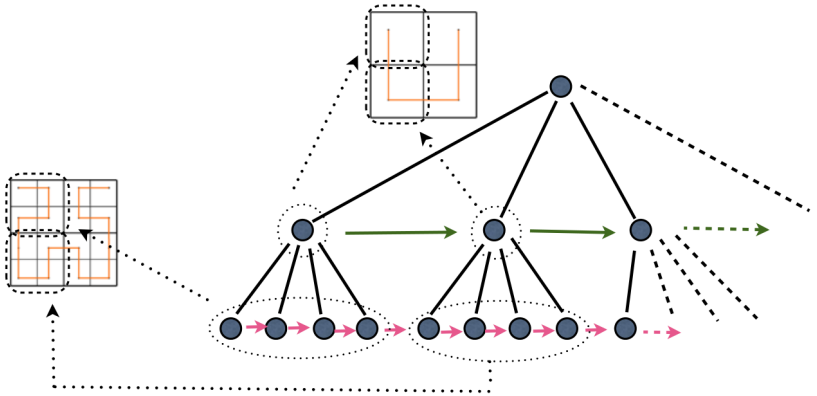
基于希尔伯特曲线的覆盖路径规划:

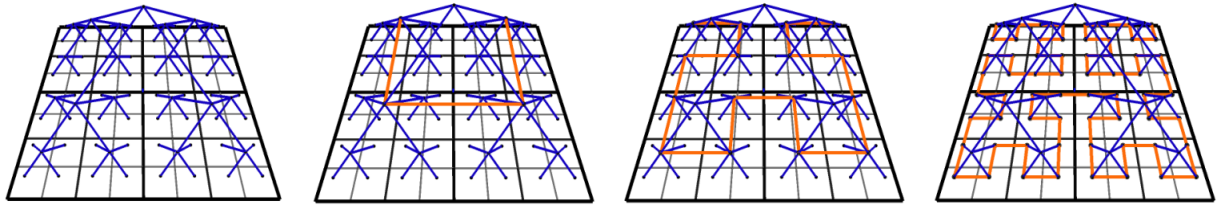


(a) Coverage tree (b) H_1 (c) H_2 (d) H_3

算法思路

基于希尔伯特曲线的覆盖路径规划:





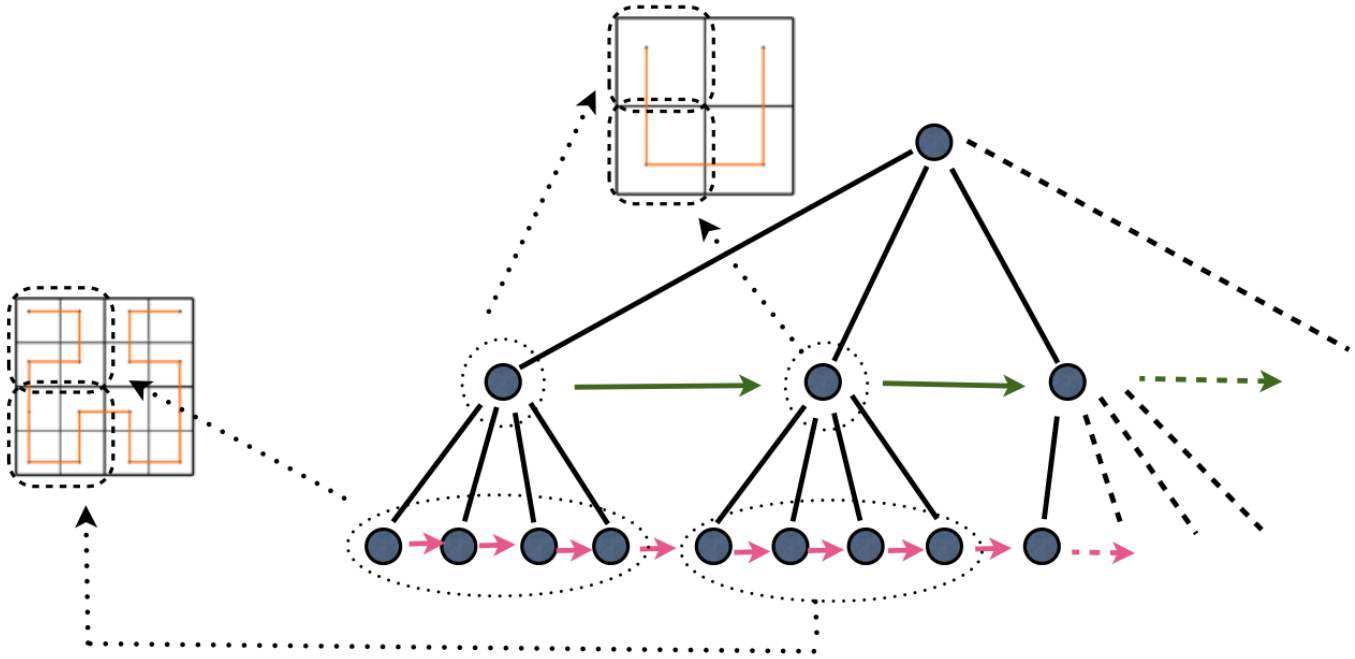
(a) Coverage tree (b) H_1 (c) H_2 (d) H_3

Algorithm 1 Hilbert-based coverage path planning

Input: Last visited node n ($null$ if none), coverage tree T with the implicit order of the nodes.
Output: Next node that should be visited or $null$ if the traversal is finished.
if $n = null$ **then**
    return the first leaf of T
end if
if $Interesting(n)$ AND $NeedVisit(Children(n))$ **then**
    $n \leftarrow$ first child of n
else if !$Interesting(n)$ AND $Depth(n) > 1$ **then**
    $n \leftarrow Parent(n)$
end if
if $NeedVisit(n)$ **then**
    return n
else if n is the last child of $Parent(n)$ **then**
    $n \leftarrow Parent(n)$
    Go to 5
else
    if $Next(n) <> null$ **then**
        $n \leftarrow Next(n)$
        Go to 10
    else
        return $null$
    end if
end if

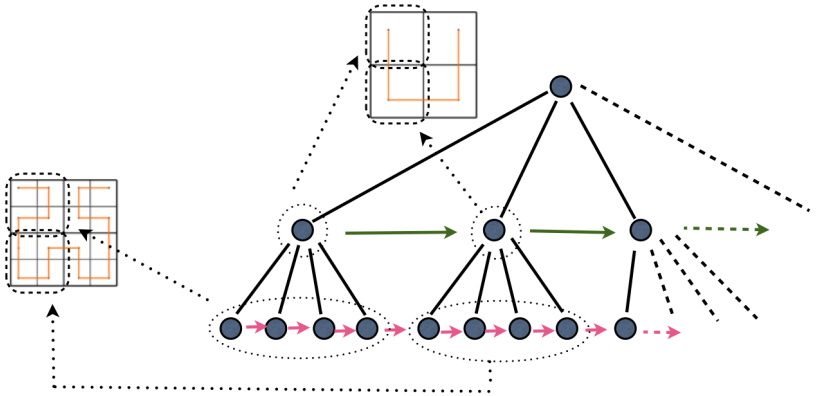
算法思路

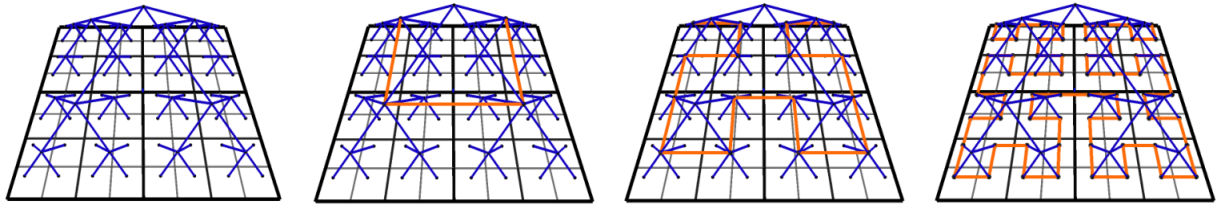
基于希尔伯特曲线的覆盖路径规划:



算法思路

基于希尔伯特曲线的覆盖路径规划:





(a) Coverage tree (b) H_1 (c) H_2 (d) H_3

Algorithm 1 Hilbert-based coverage path planning

Input: Last visited node n ($null$ if none), coverage tree T with the implicit order of the nodes.
Output: Next node that should be visited or $null$ if the traversal is finished.
if $n = null$ **then**
    return the first leaf of T
end if
if $Interesting(n)$ AND $NeedVisit(Children(n))$ **then**
    $n \leftarrow$ first child of n
else if !$Interesting(n)$ AND $Depth(n) > 1$ **then**
    $n \leftarrow Parent(n)$
end if
if $NeedVisit(n)$ **then**
    return n
else if n is the last child of $Parent(n)$ **then**
    $n \leftarrow Parent(n)$
    Go to 5
else
    if $Next(n) <> null$ **then**
        $n \leftarrow Next(n)$
        Go to 10
    else
        return $null$
    end if
end if

算法思路

Algorithm 1 Hilbert-based coverage path planning

1: **Input**: Last visited node n ($null$ if none), coverage tree T with the implicit order of the nodes.
2: **Output**: Next node that should be visited or $null$ if the traversal is finished.
3: **if** $n = null$ **then**
    return the first leaf of T
4: **end if**

算法思路

```
5: if Interesting(n) AND NeedVisit(Children(n)) then
6:     n ← first child of n
7: else if !Interesting(n) AND Depth(n) > 1 then
8:     n ← Parent(n)
9: end if
10: if NeedVisit(n) then
        return n
11: else if n is the last child of Parent(n) then
12:     n ← Parent(n)
13:     Go to 5
14: else
15:     if Next(n) <> null then
16:         n ← Next(n)
17:         Go to 10
18:     else
        return null
19:     end if
20: end if
```

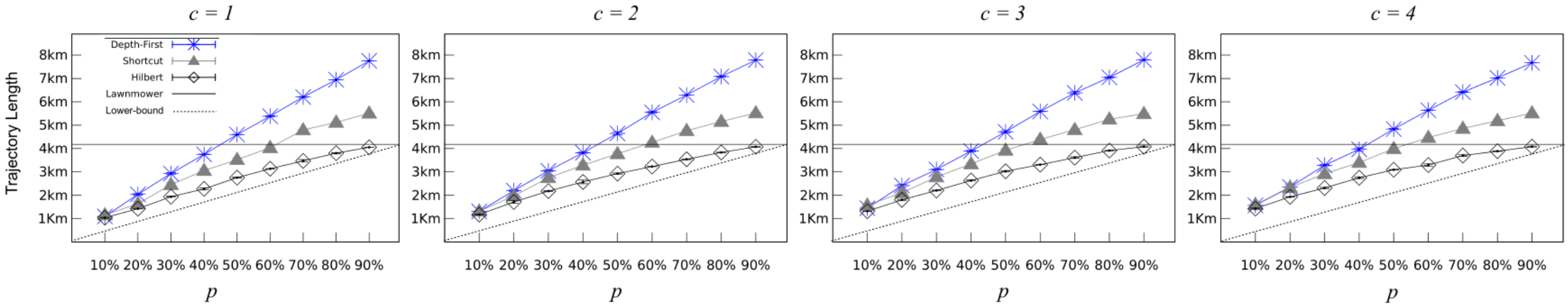
在该算法中
Children(n)返回节点n的子节点
Parent(n)返回节点n的父节点
Depth(n)返回节点n所在树的深度
NeedVisit(n)返回true，如果访问n是必要的

仿真结果

我们引入两个参数来表示有趣区域的分布:

P：表示整个有趣区域的百分比

C：表示有趣区域的数量



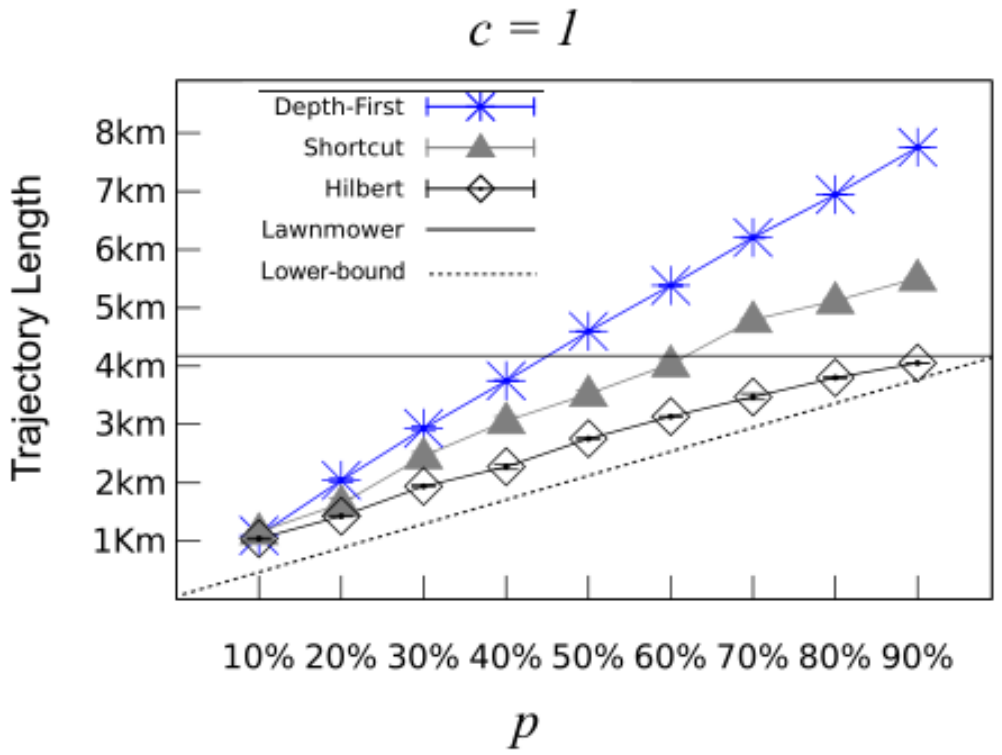
不同环境配置下的模拟实验结果

条件为：

总面积：128m*128m

传感器高度和覆盖边长的映射：l(h)=h

仿真和实验结果


c = 1
Depth-First
Shortcut
Hilbert
Lawnmower
Lower-bound
8km
7km
6km
5km
4km
3km
2km
1Km
Trajectory Length
10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90%
p

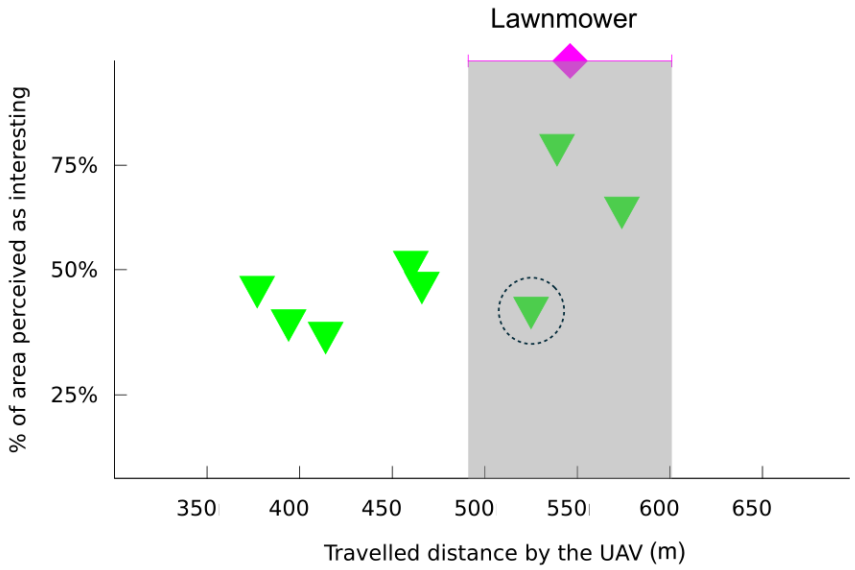
仿真和实验结果

为什么效果会更好呢?

实验结果

作者使用升腾科技公司的鹅鹏四旋翼机在户外环境下进行了实验：

- 利用GPS估计机器人的位置，使用PID方法进行控制
- 任务是覆盖30×30 m2的区域
- 大量的飞盘分散在该区域，占目标环境的31%
- 彩色相机的I(h)=h
- 查询区域与飞盘交集的图像被归类为有趣的
- 由于光线变化和其他噪声源，在飞盘检测中会出现误报
- 使用割草机的方法实验重复6次
- 使用作者提出的方法重复8次



局限

和割草机策略相比：

本文的方法需要更多地停顿，在速度上有劣势

关于z轴的移动成本，并不一定和平飞的成本相同