

Thermal-Inertial Odometry

总结汇报

汇报人：芮文惠

目录/Contents

01 | Thermal-Inertial
Odometry是什么?

03 | Thermal-Inertial
Odometry如何实现

02 | TIO在夜间环境的应用

04 | 优势与挑战
Next Work Planning

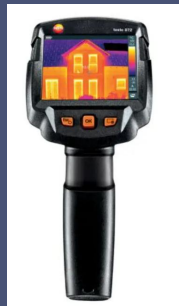
Thermal-Inertial Odometry是什么?

第一单元

Thermal-Inertial Odometry是什么？

热惯性里程计（Thermal-Inertial Odometry, TIO）是一种通过融合热成像传感器和惯性测量单元（IMU）实现位姿估计的技术，专为复杂环境（如低光、无光或烟雾环境）设计

热像仪工作原理



(a)



(b)

Fig. 8. Vehicle and cameras used in the experiments. (a) Robotic vehicle. (b) Setup of the visible and thermal cameras.



菲力尔红外热成像仪



热像仪由一片镜头、一个热传感器、处理电子器件和一个机械外壳组成。镜头将红外能量聚集到传感器上。传感器有各种像素配置。热成像仪的像素指的是其传感器上检测到热辐射的最小单元，通常也称为热像素。每个像素代表一个检测区域的温度信息这就是热像仪的分辨率。红外辐射（一种不可见光，波长范围为 $0.75\ \mu\text{m}$ 至 $14\ \mu\text{m}$ ）赫歇尔是最早发现红外线存在的人。他可以将温度计放在光谱的红光末端之外，并且检测到了未知的不可见光谱，而且它们比任何可见光的温度都要高。今天，我们将这一不可见光谱称为“红外”辐射，它位于电磁波频谱的可见光和微波频率之间。

FLIR 相机利用热量而非可见光来拍照。热量（也称为红外线或热能）和光都是电磁波谱的一部分，但能够探测可见光的相机看不到热能，反之亦然…。不过，热像仪不仅能探测热量，还能探测到微小的热量差异（小至 0.01°C ），并将其显示为灰色阴影或不同颜色。所有温度高于绝对零度（ -273.15°C ）的物体都会发出红外辐射。

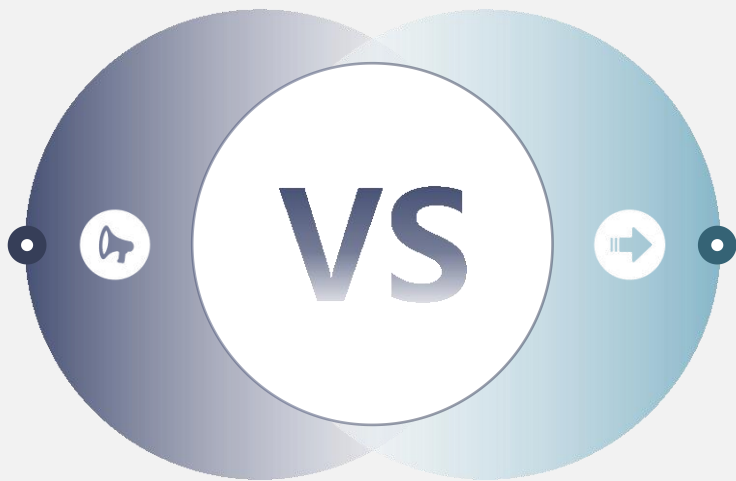
什么是红外线？

● 红外线存在于自然界的任何一个角落，一切温度高于绝对零度的物体时时刻刻都在不停地辐射红外线。物质的运动是产生红外线的根源。物质由原子分子组成，由于热的存在，它们按一定的规律不停地运动着，其运动状态也不断地变化，因而不断地发射或吸收辐射能量。这种辐射的本质是热辐射。红外线是一种电磁波，位于可见光和微波之间的频谱区域，波长大约在 700 纳米到 1 毫米 之间。

● 热辐射是由任何温度高于绝对零度的物体发出的电磁辐射，产生的辐射波长范围广泛，从红外线到更短的可见光甚至紫外线、X射线。红外线本身就是一种热辐射。

热成像仪VS夜视仪

热成像仪看不到可见光，但可以看见温度或者热能，日常事物都有热量释放，因此无论在白天或是黑夜都能检测出热量并生成图像



夜视仪工作原理与人眼相似，可以检测到少量可见光并且放大，但完全黑暗环境夜视仪会失效

红外成像仪特点



特点概述

- (1) 它属于非接触测量技术，适合检测快速运动目标、带电目标和微小目标的温度。
- (2) 测温面积大，测温效率高，能直观显示物体表面温度场。热像仪可同时测量物体表面各点温度的高低，并以图像形式显示出来。民用热像仪的热图可以显示 640×640 个单元的温度分布，空间分辨率很高。
- (3) 温度分辨率高。由于热像仪可以同时显示两点的温度值，可准确区分很小的温差，温度分辨率可达 0.01°C 甚至更高。
- (4) 可采用多种显示方式。热像仪输出的视频信号可以用伪彩色或灰度的形式显示热图像。通过模数转换处理，还可用数字显示物体各点温度。
- (5) 可进行数据存储和计算机处理。

热成像仪是否可以穿透物体？

P

墙壁

热像仪无法透过墙壁。当墙壁通常足够厚，并且隔热性能足够好，可以阻挡来自另一侧的任何红外辐射。如果将热像仪对准墙壁，它会检测到来自墙壁的热量，而不是墙壁后面的热量。但是，如果墙壁内部的某些东西造成足够的温差，热像仪将能够在墙壁表面感应到它。

S

烟雾

可以穿过



在可见光谱中，门口的人被烟雾所掩盖，但可以通过热成像轻松探测到。

物体种类



墙内的立柱（垂直线）比绝缘层温度低，导致墙面产生温差。

热成像仪是否可以穿透物体？

P

水雾

水滴会散射辐射，雾和雨可能会严重限制热像仪的探测范围。然而，在许多情况下，热像仪比可见光相机或人眼更能穿透雾气。



S

玻璃

将热像仪对准窗户，你将看不到玻璃另一侧的任何东西，但你会在热成像中看到自己的清晰倒影。

在某些情况下，热成像可以比可见光探测器更清晰地透过雾探测物体。



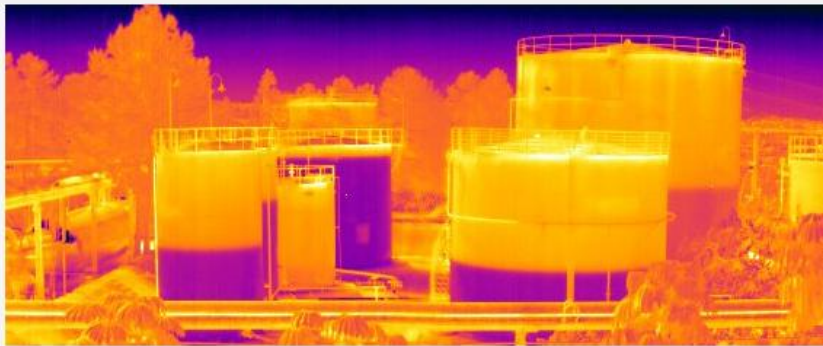
数码相机可以透过玻璃看到外面的树木，而热像仪则可以看到摄影师反射的热量。

热成像仪是否可以穿透物体？

P

金属

金属是一种棘手材料。闪亮的金属（任何光滑或抛光的金属物体）都会反射红外辐射，就像玻璃一样充当红外镜。氧化金属或涂有哑光材料的金属更容易准确测量。在所有情况下，热像仪都无法“透过”金属物体看东西，但导电金属可能会显示热点、冷点或金属容器内物质的水平。

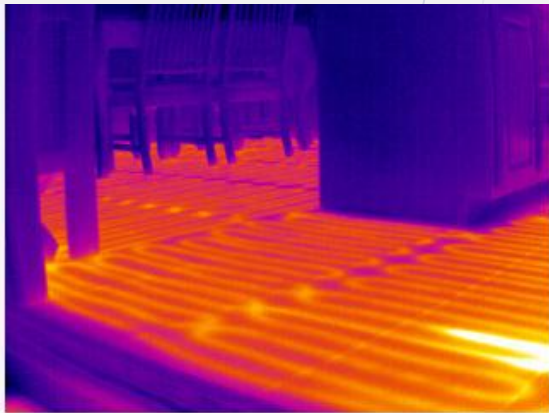


由于内部液体引起金属表面的温差，在红外线下很容易看出这些油箱的满度。

S

混凝土

与墙壁基本相同，但热像仪可能能够检测到混凝土内部的某些东西，例如管道或辐射加热。



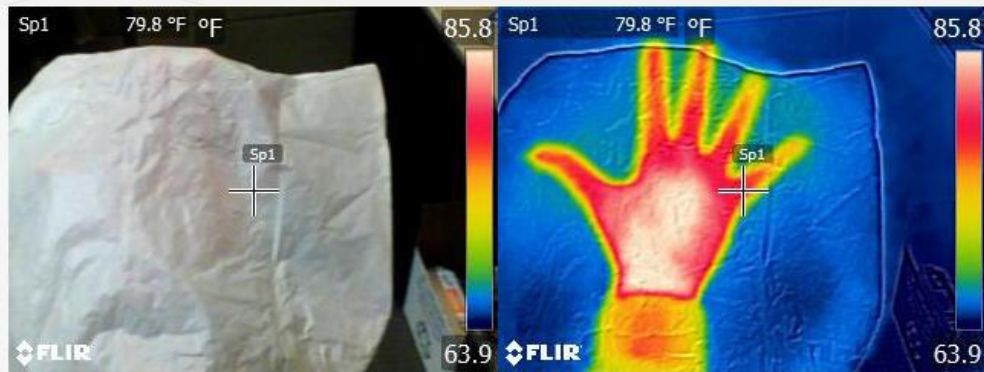
在混凝土地板下可以清晰看到辐射地板采暖。

热成像仪是否可以穿透物体？

P

塑料

红外线会穿过塑料，让热像仪能够检测到塑料后面的东西，而可见光则会被阻挡。然而，这个技巧只适用于非常薄的塑料——较厚的塑料会阻挡红外线。



可见光大部分被塑料袋阻挡，但红外线辐射可以透过。

S

树木

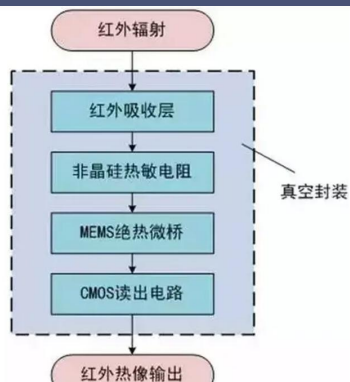
无法透过树干探测物体，但热成像可以帮助在森林地区发现人或动物。搜救队在搜索大片荒野时经常使用热成像来发现热信号。



TIO在夜间环境的应用

第二单元

TIO在夜间环境的应用



什么是平场校正？

平场校正(FFC)是一种用于校正的方法：

- 照机像素传感器之间感光度的差异
- 视野中照明强度的差异
- 光通过透镜传输的差异（例如：虚光）

目标是校正捕获的（Raw）图像的像素，以便当系统（相机和镜头）捕获统一的背景时，生成的输出图像是统一的。

工作概述

在低亮度或完全黑暗的环境中进行远距离监测，由于物体在白天和黑夜以不同的速度冷却，因此图像对比度也不同。在温度均匀的场中，非冷却热像仪图像的均匀性随着时间的推移而降低。

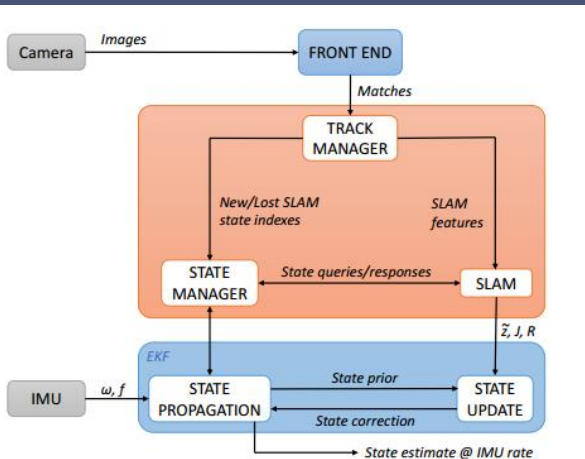


Fig. 1: Thermal view of a fully-autonomous quadrotor flight at night using the proposed thermal-inertial odometry, state machine and controls framework.

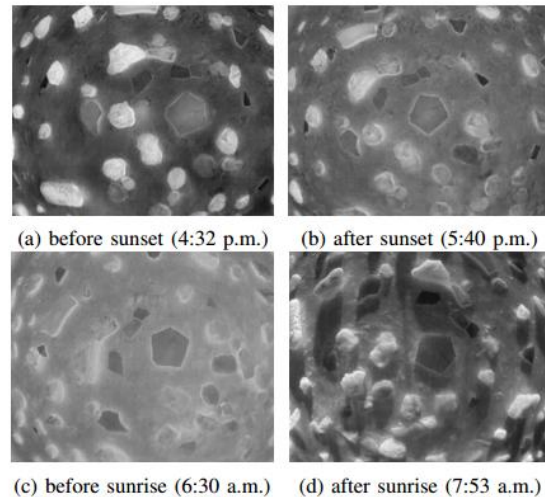


Fig. 5: Variation of thermal image appearance throughout the night. Sunset and sunrise provide the most sudden changes.

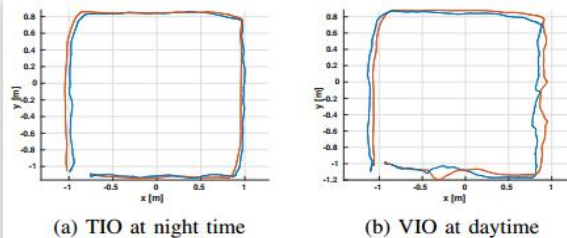
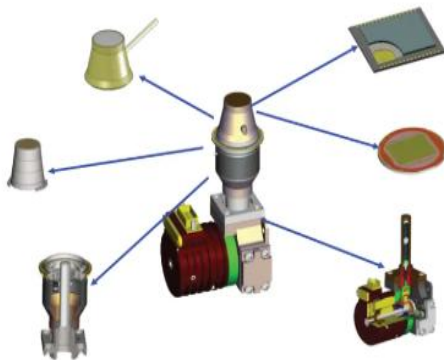


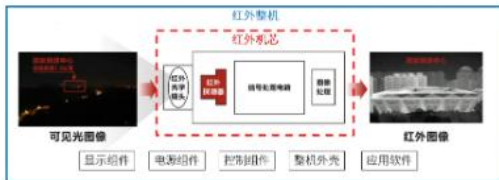
Fig. 6: Top view of the trajectory estimate (blue) and ground truth (red) at night (6:30 a.m.) with thermal camera (left), and during the day (8:41 a.m.) with the visible camera (right).

制冷型红外探测器和非制冷型

制冷型**红外探测器**一般指的是利用半导体材料之间的光子效应制成的红外探测器，光电效应需要半导体冷却到较低温度（通常为77K）才能够实现探测功能，所以红外系统需要搭配制冷机制冷后才能使用。目前国内制冷红外探测的材料主要包含碲镉汞、II类超晶格等。



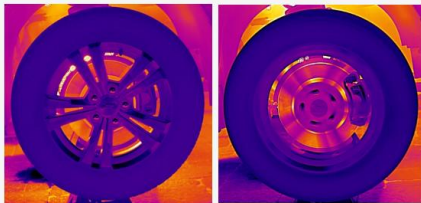
非制冷型红外探测器利用红外辐射的热效应，通过红外吸收材料将红外辐射能转换成热能，引起敏感元件温度上升。敏感元件的某个物理参数随之发生变化，再通过所设计的某种转换机制转换为电信号，以实现对物体的探测。



Review Of Work Content

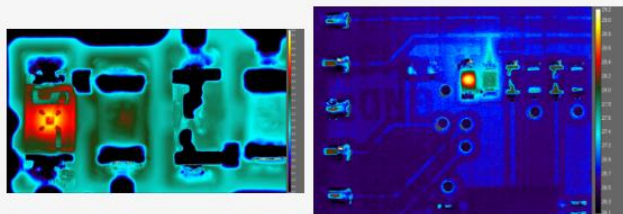
如果想掌握细微的温差，需要高质量的图像质量，或应用于快捷/高速的场合，想看清极小目标的热特征或测量其温度，想对电磁波谱中一个非常具体部分的热现象进行可视化，想将热像仪和其它测量设备同步使用等，可以考虑制冷型红外成像。

高速



这些红外图像对比了以20 mph速度旋转的轮胎的拍摄效果。左边这张是用制冷型红外热像仪拍摄的，您可能会觉得轮胎并未在转动，但这是制冷型红外热像仪在极其高速条件下的拍摄结果，它会“定格”轮胎的转动。非制冷型红外热像仪的拍摄速度太慢，无法捕捉到轮胎旋转时使得轮辐显得透明的瞬间。

空间分辨率



上述热图像对比了采用制冷型和非制冷型热像仪系统可实现的特写放大效果。左:

TIO如何实现建图

挑战性分析

热红外相机直接用于VIO框架的挑战性

图像信息不同

热红外相机捕捉的是物体的热辐射，提供温度分布信息，而非颜色或纹理信息。热图像通常是灰度图，且不同于可见光图像，可能缺乏足够的结构化特征（如显著的边缘或角点），因此对特征提取和匹配带来挑战。热

图像分辨率和对比度较低

动态场景处理

热红外图像不仅受到物体的热辐射影响，还容易受到环境因素（如阳光、风、机械设备运行等）的影响，热成像相机通常比可见光相机更为敏感，尤其是在快速运动和剧烈振动的情况下，热图像容易产生模糊和噪声。

TLO实现建图

目前的热惯性里程计（TIO）解决方案主要是在普通VIO的基础上进行改进的。基于特征的热里程计被开发出来，它需要对红外图像进行特殊的对比度增强以提取特征

Thermal-Inertial Odometry for Autonomous Flight Throughout the Night

Delaune, Robert Hewitt, Laura Lytle, Cristina Sorice, Rohan Thakker and Larry Matthies

IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 15, NO. 11, NOVEMBER 2015

Thermal Stereo Odometry for UAVs

Tarek Mouats, Nabil Aouf, *Member, IEEE*, Lounis Chermak, and Mark A. Richardson



Edge-based Monocular Thermal-Inertial Odometry in Visually Degraded Environments

Yu Wang, Haoyao Chen*, *Member, IEEE*, Yufeng Liu, Shiwu Zhang, *Member, IEEE*



状态估计器可以将惯性数据与夜间的热图像或白天的视觉图像紧密耦合。它集成在运动规划和控制的自主框架中，在标准嵌入式计算机上实时运行。我们从日落到日出广泛分析热惯性里程计的性能，用于各种热不均匀性水平，并将其与白天的视觉惯性里程计进行比较



开发了基于特征的热测法，该方法需要对红外图像进行特殊的对比度增强以提取特征。



利用边缘提取后的二值化图像代替原始图像进行姿态估计，以克服热红外图像质量差的问题。该研究提出了一种基于边缘的单目热惯性里程计，称为ETIO，以突出边缘信息，用于视觉退化环境中的鲁棒状态估计。为了克服稀疏边缘图像数据关联的困难，提出了距离场辅助特征跟踪和自适应切换策略

结果展示

IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 15, NO. 11, NOVEMBER 2015

Thermal Stereo Odometry for UAVs

Tarek Mouats, Nabil Aouf, *Member, IEEE*, Lounis Chermak, and Mark A. Richardson



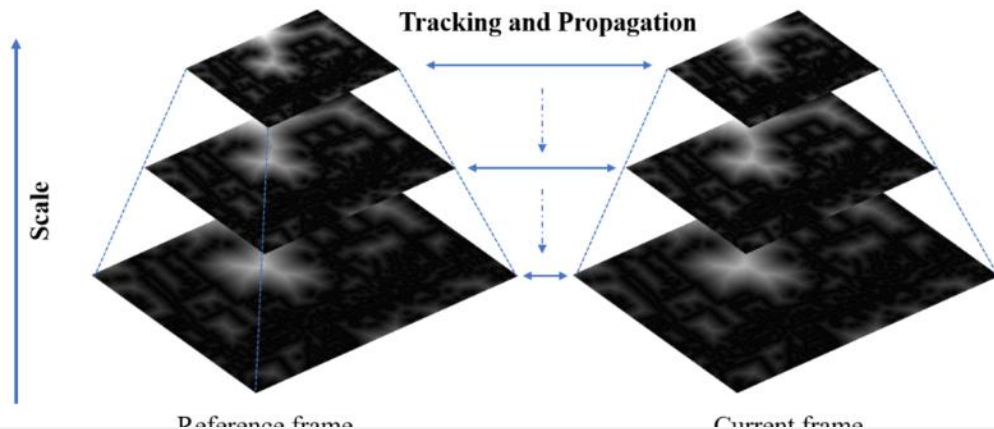
使用Fast-Hessian特征和FREAK描述符的立体匹配说明

相比国际最新的方案，在黑暗、烟雾的视觉退化环境的实验中，该系统的精度提升了58.8%；在全天时户外环境实验中，该系统的平均精度提升了31.6%。实验结果证明，项目组提出的方案能够实现机器人全天时高精度定位，达到了世界领先水平。

Edge-based Monocular Thermal-Inertial Odometry in Visually Degraded Environments

Yu Wang, Haoyao Chen*, *Member, IEEE*, Yufeng Liu, Shiwu Zhang, *Member, IEEE*

受热辐射在物体边缘变化显著的现象启发，该系统利用边缘提取的二值化图像代替原始红外图像进行数据关联，克服了热红外图像高噪声、低对比度的问题。然后，基于有限的边缘信息及其距离场，项目组提出了一种自适应特征跟踪策略ADT-KLT tracker，在边缘图像中实现了稳定的数据关联。最后，该系统利用基于滑动窗的位姿图优化方法，最小化IMU预积分误差和边缘特征观测的重投影误差，实现实时状态估计。



Next work planning

优势与挑战

优势与挑战

Next Work Planning

特性

适应低光环境

适应烟雾、雾霾等环境

环境光变化的鲁棒性

分辨率

特征提取与匹配

噪声问题

动态场景处理

计算复杂度

TIO（热惯性里程计）

优势，能够在完全黑暗或低光环境下工作

优势，能穿透烟雾、雾霾等视觉障碍物

优势，不受光照变化影响（如白天与黑夜转换）

劣势，热图像分辨率通常较低，细节不如可见光图像丰富

劣势，热图像特征稀疏，难以进行高效匹配

劣势，热成像受温度波动、电磁干扰等影响，容易产生噪声

劣势，动态物体的热量变化捕捉难度较大，容易受到温度变化影响

较高，热图像处理和数据融合需要额外的优化

VIO（视觉惯性里程计）

劣势，低光环境下图像质量差，难以提取有效特征

劣势，烟雾、雾霾等环境下可见光相机性能大幅下降

劣势，光照变化会显著影响图像质量

优势，可见光图像分辨率通常较高，细节丰富

优势，丰富的纹理和边缘特征，匹配精度较高

优势，可见光相机图像噪声较少，稳定性较高

优势，能较处理好动态场景，提取运动物体的视觉特征

相对较低，视觉与惯性数据的融合已经有成熟的算法和框架

BLUE ANALYST

感谢大家观看

汇报人：芮文惠