

## S 背景:

在轨航天器实时姿态估计是各种空间应用中的核心任务。现有的方法大多是基于高分辨率传感器的长期观测，如星载相机和地面雷达。然而，在观测周期有限的情况下，这些方法很难获得目标的瞬时姿态信息。所以从单幅相机图像中实现瞬时姿态估计尤为重要。

## T 任务

提出了一种基于关键点检测网络的目标瞬时姿态估计方法，将目标在轨姿态参数与单幅图像中的关键点特征相连接，实现从单幅相机图像中实现瞬时姿态估计。

## A 行动

**Action 1:** 从相机图像中估计目标姿态，将二维摄像机图像中的关键点分布看作是三维目标结构的隐式映射。航天器上一个关键点的成像可以表示为

$$(X_p, 1)^T = K(R, t)(X_u, 1)^T$$

$X_p$ 表示关键点投影在成像平面 P 上的 2D 位置， $X_u$ 表示 3D；

K 为摄像机已知的固有参数矩阵，R 为目标姿态的旋转矩阵，t 为平移向量

**Action 2** 设计基于 UNet 框架关键点提取网络 ULNet，过程如下式

$$Y = \text{Est}(\Psi(I); \theta) \quad \theta \text{为网络 } \Psi(\cdot) \text{的参数}$$

ULNet 由编码器和解码部分组成，这两部分由一系列相邻的密度卷积块连接，编码器部分的目的是从图像中提取目标结构特征，而解码器部分的目的是对这些特征进行压缩。

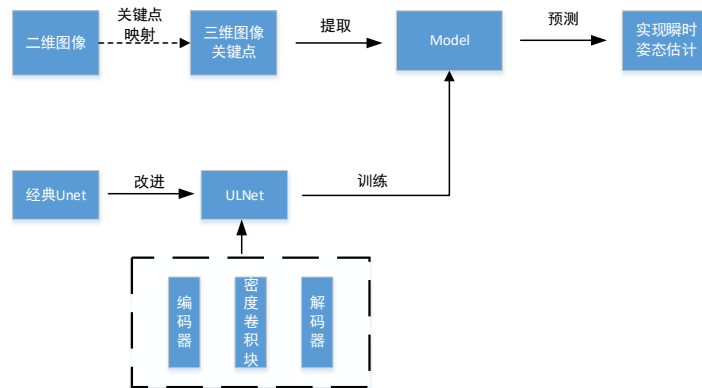
在下采样部分和上采样部分之间插入密度卷积块，采用短链路策略来避免语义差异丢失，使用热图回归方法提取关键点，设计一个函数 $S_i(h, g)$ 来估计关键点位置。

$$S_i(h, g) = e^{-\frac{(h+h_i)^2 + (g+g_i)^2}{2\delta^2}}$$

其中  $(h_i, g_i)$ 为滑动窗口在热图中的中心位置， $\delta$ 为滑动窗口的大小，一般与热图大小成正比， $-(\delta/2) < h < (\delta/2)$ ， $-(\delta/2) < g < (\delta/2)$

并采用均方误差(MSE)函数作为损失函数来描述地面真实值与回归结果之间的差异

$$\text{Loss} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \|S_i^{gt}(h, g) - S_i(h, g)\|^2 \quad \text{其中 } S_i^{gt} \text{ 表示第 } i \text{ 个关键点的热图的基本真值。}$$



### Action 3 实验

实验准备，两种典型航天器 TG-1 和 Rosetta 的仿真图像数据集，1200 幅光学图像，水平和垂直分辨率均设置为 0.05m，图片大小为  $512 \times 512$ ，训练集为 400 幅无遮挡图片，测试集 50 幅。

实验设计，自上向下与 ULNet；自下向上与 UNet；自下向上 ULNet；三种提取方法对比实验。（自上向下策略是指在目标特征描述之前提取目标组件。而自下向上的策略则是根据每个样本的热图直接检测目标关键点）；batch size 设置为 4，学习速率为 0.01，训练梯度阈值为 0.0002。

分辨率分别设置为为原始分辨率 0.05m; 0.06; 0.07m 三种分辨率对比实验。

### R 结果

设计了 ULNet 进行特征自动提取。通过对两种典型航天器在不同观测条件下的仿真实验，验证了该方法的可行性和鲁棒性。在实际应用中，它具有利用星载相机实现实时姿态估计的潜力。