·自动驾驶技术专题·

激光雷达与摄像头时空同步技术的设计与实现

朱健

（中汽创智科技有限公司，南京 211100）

【欢迎引用】朱健. 激光雷达与摄像头时空同步技术的设计与实现[J]. 汽车文摘，2026(2): 37-41.

【Cite this paper】ZHU J. Design and Implementation of Spatiotemporal Synchronization Technology Between LiDAR and Camera[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(2): 37-41.

【摘要】为了提升自动驾驶领域多模态数据融合精度，提出了一种激光雷达与摄像头时空同步技术方案，采用预估偏移量、调整偏移量的方法，通过计算摄像头曝光触发的时间，调整摄像头曝光触发时刻的偏移，从而控制激光雷达与摄像头对同一目标在同一时刻进行扫描和曝光采集，实现激光雷达与摄像头的时空同步。试验结果表明，该方案显著提升了点云数据与图像数据融合的精度，验证了技术方案的可行性与效果。

关键词：激光雷达；摄像头；时空同步；扫描；曝光

中图分类号：U469.79　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240225

Design and Implementation of Spatiotemporal Synchronization Technology Between LiDAR and Camera

Zhu Jian

（China Automotive Innovation Corporation, Nanjing 211100）

【Abstract】To improve the fusion accuracy of multi-modal data in the field of autonomous driving this paper proposes a spatiotemporal synchronization technology techinal scheme for Light Detection and Ranging (LiDAR) and camera. By adopt a method of estimating and adjusting the offset, it calulates the time of the trigger for the camera exposure, and adjusts the offset time of the trigger for the camera exposure thereby controlling LiDAR and camera to scan and the same target at the same time. The results show that the proposed scheme significantly improves the fusion accuraly of poirt cloud data and images, verifying the feasibility and effectiveness of the technical scheme.

Key words: Light Detection and Ranging (LiDAR), Camera, Spatiotemporal synchronization, Scan, Exposure

0　引言

近年来，自动驾驶及车路协同技术发展迅速。激光雷达、摄像头等传感器作为自动驾驶系统的感知单元，承担采集车辆周围数据、感知车辆周边环境的关键任务。在自动驾驶系统中，需要先采集激光雷达的点云数据和摄像头的图像数据，再将这些数据输入至感知融合算法进行处理。在此过程中，传感器时间同步技术为数据融合提供了必要的技术支撑，也是保障融合效果的重要前提。

目前，行业普遍采用的时间同步方案是通过自动驾驶域控制器发送时间同步报文进行授时，并以摄像头曝光触发信号的产生时刻作为图像数据的时间戳。该方案虽能确保激光雷达点云数据与摄像头图像的时间戳与自动驾驶域控制器系统时钟保持同步，但未充分考虑激光雷达和摄像头采集数据频率的差异。由于数据采集并非严格同一时刻进行，在对同一目标进行点云与图像融合时，常因时序偏差导致融合精度不足。

本文提出了激光雷达与摄像头的时空同步技术方案，在保持激光雷达和摄像头原有帧率的基础下，激光雷达和摄像头实现同步扫描和曝光，从而显著提升多模态数据融合的精度。

1　激光雷达点云数据采集

本研究采用禾赛Pandar128E3X型机械式激光雷达，其依靠内部电机旋转驱动激光发射模块和接收模

块，实现360°激光束扫描，从而获取周边环境的点云数据[1]。激光雷达的信息处理模块根据接收模块输出的数据矩阵，将其封装为点云数据包，并通过以太网以用户数据报协议（User Datagram Protocol, UDP）或传输控制协议/网际协议（Transmission Control Protocol/Internet Protocol, TCP/IP）报文形式发送至自动驾驶域控制器。报文数据主体包含目标物三维坐标（X，Y，Z）、激光反射强度、时间戳及激光雷达状态等信息。

1.1 点云数据采集

自动驾驶域控制器通过以太网接口与激光雷达连接，实时接收其输出的原始点云数据。域控制器内置高性能处理器及专用点云处理算法，对接收到的点云数据进行处理和分析。自动驾驶域控制器通过以太网获取激光雷达的UDP或TCP/IP报文，将目标物三维坐标、激光反射强度、时间戳等信息从报文中解析出来，获得点云数据信息。该时间戳由激光雷达信息处理模块根据其本地时钟生成。

1.2 激光雷达时间同步

激光雷达时间同步旨在使其时钟与域控制器及其他传感器保持一致，从而提升自动驾驶感知系统在时序层面的处理精度。通过自动驾驶算法对传感器数据进行处理，提高自动驾驶感知系统的准确性。同步过程以域控制器为时钟源，遵循精确时间协议（Precision Time Protocol, PTP）或广义精确时间协议（generalized Precision Time Protocol, gPTP），向激光雷达周期性发送时间同步报文[2-3]。激光雷达作为从时钟设备，接收并解析同步报文，据此校准其本地时钟[4]。本研究将Pandar128E3X激光雷达的时间同步模式配置为PTP，该雷达主要参数如表1所示。

表1 Pandar128E3X机械式激光雷达主要参数

扫描原理	扫描频率/Hz	水平视场角/(°)	时间来源	传输方式
机械旋转	10/20	360	PTP/gPTP	以太网

2 摄像头图像数据采集

本研究采用Leopard公司生产的LI-VENUS-ISX021-GMSL2型摄像头，其主要参数如表2所示。

表2 LI-VENUS-ISX021-GMSL2摄像头主要参数

传感器	分辨率/像素	帧率/帧·s^{-1}	输出格式	传输方式
ISX021	1 920×1 280	30/60	YUV 8	GMSL2

2.1 图像数据采集

自动驾驶域控制器通过千兆多媒体串行链路(Gigabit Multimedia Serial Link 2, GMSL2)与摄像头连接。GMSL2链路可以单向传输摄像头的图像数据，也可以双向传输控制信号。域控制器由内部的解串芯片[5]，通过GMSL2链路向摄像头发送曝光触发信号。摄像头模组接收到曝光触发信号后，图像传感器开始曝光，获取实时的图像数据。摄像头的图像数据通过GMSL2链路发送给域控制器。域控制器内部配置高性能处理器和专门的视觉算法模块，对接收到的图像数据进行处理和分析。摄像头的图像帧数据经过摄像头模组内的串行芯片进行串化处理，再通过GMSL2链路传输到域控制器。域控制器内的解串芯片对串行的图像帧数据进行解串处理，再通过移动产业处理器接口（Mobile Industry Processor Interface, MIPI）将数据传送至系统级芯片（System on Chip, SoC）处理单元[6]。SoC处理单元对采集到的MIPI数据进行解析，最终获得可供处理的图像数据。

2.2 摄像头图像数据时间戳

由于摄像头模组本身不具备独立的时钟管理系统，其输出的图像数据不包含时间戳信息。为实现摄像头图像数据与激光雷达点云数据的精确融合，需为每帧图像分配合适的时间戳。对于域控制器而言，以域控制器向摄像头模组发送曝光触发信号的时刻为基准，加上摄像头模组的图像传感器的曝光延时参数[7]，得到的时间戳即作为摄像头图像帧的时间戳。

3 激光雷达与摄像头时空同步设计

机械式激光雷达按照预设定的固有频率（10 Hz），周期性地旋转扫描，每扫描一周耗时100 ms，旋转运动过程中无法改变或停止其机械动作。摄像头帧率设计为30帧/s。为了实现激光雷达与摄像头在同一时刻对同一空间目标进行数据采集，需要对摄像头的触发曝光时刻进行偏移调整，使其与激光雷达在同一目标角度的扫描时刻对齐。

本文提出的同步系统由3个模块组成：激光雷达中心点位置时间戳获取模块、摄像头曝光触发偏移修正计算模块和摄像头曝光触发模块，具体流程如图1所示。

激光雷达中心点位置时间戳获取模块通过数据通信接口实时获取激光雷达扫描至中心点位置时的时间戳。摄像头曝光触发偏移修正计算模块主要负责计算摄像头曝光触发所需添加的偏移量。摄像头曝光触发模块主要负责根据计算得到的偏移量，调整摄像头曝光触发信号的输出。

3.1 激光雷达与摄像头夹角的确定

激光雷达与摄像头夹角的精确标定是激光雷达

与摄像头时空同步技术的前提条件。该夹角定位激光雷达中心点位置(水平方向角0°)与摄像头视场中心点(光轴方向)之间的角度,标定方法如下[8]。

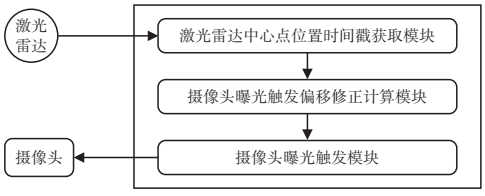


图1　激光雷达与摄像头时空同步设计构成

如图2所示,在激光雷达与摄像头共同覆盖的视野内,放置一个外观规整的靶标(如标准球体),并尽量使其远离传感器以获得较小的视角误差。

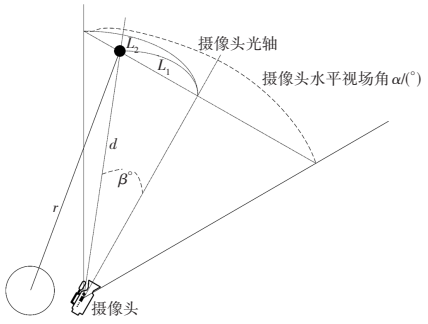


图2　靶标部署位置示意

第一步,获取靶标的点云数据。通过激光雷达扫描靶标,获取其点云数据。使用网络抓包工具(如wireshark),捕获以太网传输的点云原始数据包(pcap格式)[9]。

第二步,获取靶标的图像数据。通过摄像头对靶标进行拍摄,获取一帧清晰的靶标图像数据。保存摄像头拍摄到靶标的图像。

第三步,解析点云数据并计算水平视场角。将点云pcap文件导转换为pcd格式,借助点云处理工具(如激光雷达厂商提供的软件)读取靶标在笛卡尔坐标系下的坐标(x,y,z)。计算靶标在点云上的水平方向的角度,需要将靶标的坐标从笛卡尔坐标系转换成球坐标系(r,θ,φ)。笛卡尔坐标系与球坐标系转换关系[10]如图3所示。

球坐标系(r,θ,φ)与笛卡尔坐标系(x,y,z)的转换关系如下:

$$x=r\times\sin\theta\times\cos\varphi \tag{1}$$

$$y=r\times\sin\theta\times\sin\varphi \tag{2}$$

$$z=r\times\cos\theta \tag{3}$$

式中:r为目标点到原点的距离,即靶标相对激光雷达的直线距离,θ是目标点的位矢与z轴的夹角,即靶标在点云上的俯仰方向的角度,φ是目标点的位矢在xy平面上的投影与x轴的夹角,即靶标在点云上的水平方向的角度,x、y、z为笛卡尔坐标系三元素。根据已知的笛卡尔坐标(x,y,z),求得:$\varphi=\arctan(\frac{y}{x})$。

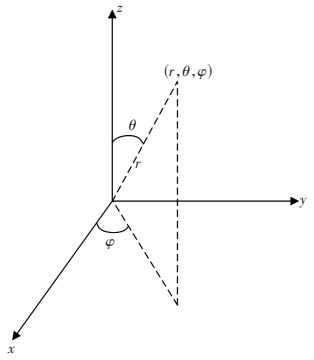


图3　笛卡尔坐标系与球坐标系的转换

第四步,解析图像数据并计算像素偏移。将摄像头拍摄到的靶标图像导出,使用图像编辑工具打开图像,对图像进行像素点解析。用鼠标在图像上选中靶标,获取靶标的像素坐标(X_0,Y_0),以及图像的总像素尺寸(X,Y)。

通过计算得到图像中靶标距图像中轴线的长度X_1,和图像中轴线距离Y方向的边的长度X_2,如图4所示。

$$X_2=\frac{X}{2} \tag{4}$$

$$X_1=X_2-X_0 \tag{5}$$

式中:X为图像总像素尺寸的横坐标值,X_0为靶标的像素坐标的横坐标值。

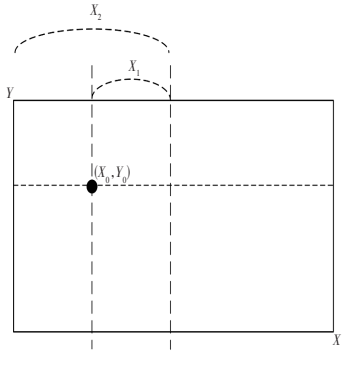


图4　靶标的图像素解析

第五步,计算激光雷达与摄像头的夹角。

根据图2所示,几何关系有:

$$\frac{L_1}{L_2}=\frac{X_1}{X_2} \tag{6}$$

$$L_1=d\cdot\sin\beta \tag{7}$$

$$L_2=d\cdot\cos\beta\cdot\tan(\frac{\alpha}{2}) \tag{8}$$

$$\frac{L_1}{L_2}=\tan\beta/\tan(\frac{\alpha}{2})=\frac{X_1}{X_2} \tag{9}$$

整理得:

$$\beta=\arctan(\frac{X_1}{X_2}\cdot\tan\frac{\alpha}{2}) \tag{10}$$

最终得到激光雷达与摄像头的夹角为：

$$\theta_{LC}=\varphi+\beta \tag{11}$$

式中：L_1为在过靶标并垂直与摄像头光轴的平面中，靶标距平面竖直中心线的距离，L_2为在过靶标并垂直与摄像头光轴的平面中，摄像头视场平面横向长度的一半数值，X_1为图像中靶标距图像中轴线的长度，X_2为图像中轴线距离Y方向的边的长度，d为靶标距摄像头的距离，β为靶标与摄像头视场中心点（光轴）之间的夹角，α为摄像头水平方向的视场角。

3.2 激光雷达中心点位置时间戳获取

激光雷达旋转扫描到中心点位置，即0°角位置时，其信息处理器会记录当前时间戳，这些点云数据和时间戳会按照固定的数据帧格式打包，发送给部署在自动驾驶域控制器的激光雷达上位机驱动进行解析。在激光雷达上位机驱动和摄像头上位机驱动中分别创建本地socket通信线程，激光雷达上位机驱动侧作为socket客户端，摄像头上位机驱动侧作为socket服务端，服务端获取客户端消息。当激光雷达上位机驱动解析获取到中心点位置的点云和时间戳时，将这个中心点位置的时间戳通过socket通信发送给摄像头上位机驱动程序。

此处发送的中心点位置时间戳用于计算摄像头曝光触发时间的偏移修正。摄像头曝光触发时间偏移修正计算的频率，设定为每5 s执行一次。机械式激光雷达扫描一周耗时100 ms，即1 s能产生10个中心点时刻的点云时间戳，设计中设定每5 s发出一次，即每获得50个激光雷达中心点位置时间戳就取最新的一个，发送给摄像头上位机驱动程序。

3.3 摄像头曝光触发偏移修正计算模块

摄像头曝光的频率是30 Hz，上文已经计算得到激光雷达中心点角度与摄像头视场中心点的夹角为$(\varphi+\beta)^\circ$，假设夹角定为90°。当激光雷达扫描到中心点位置时，获取到激光雷达中心点位置时间戳，并发送给摄像头上位机驱动程序，摄像头曝光触发偏移修正计算模块开始执行[11]。执行步骤如下所示。

第一步，摄像头曝光触发偏移修正模块获取到最新的激光雷达中心点位置时间戳。假设时间戳为1 734 511 000.1 s，取该时间戳的秒以下部分，记为T_{lidar1}，T_{lidar1}=100 000 μs。同时取最近一次获取到的摄像头图像数据的时间戳，假设时间戳为1 734 511 000.09 s，也取秒以下部分，记为T_{cam1}，T_{cam1}=90 000 μs。

第二步，计算激光雷达从中心点位置扫描到摄像头视场中心点角度位置的时间戳，即激光雷达从中心点位置再旋转扫描90°角度时预计的时间戳，取该时间戳的秒以下部分，记为T_{lidar2}。首先计算出激光雷达的扫描速度，即每扫描1°所需时长，用激光雷达扫描一周的时间除以一周的角度，再乘以旋转角度，得到扫描90°角度所需要的时长T_{spin}。用起始时间加旋转所需时长，得到激光雷达扫描到摄像头视场中心点角度位置的预计时间戳T_{lidar2}，如图5所示。

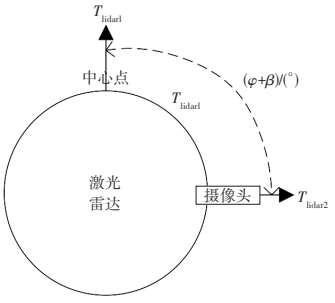


图5 激光雷达旋转扫描到摄像头视场中心点示意

第三步，计算摄像头下一次曝光触发的时间偏移T_{trig_offset}。理论上，如果激光雷达与摄像头能够时空同步，能保持同步扫描和曝光，那么摄像头下一次曝光出图的时刻应该是在激光雷达扫描到摄像头视场中心点角度位置的时刻，即T_{lidar2}时刻。如图6所示，在时间轴上，左边粗线箭头表示激光雷达当前扫描中心点位置的时刻标识T_{lidar1}；右边粗线箭头表示激光雷达扫描到摄像头视场中心点角度时的预计时刻标识T_{lidar2}；左边细线箭头是当前摄像头曝光的时刻标识T_{cam1}；右边2个虚线细箭头是在不调整摄像头曝光触发偏移的理论情况下，后续发生的摄像头曝光触发时刻标识。计算出摄像头曝光触发偏移修正值，是为了调整最接近T_{lidar2}时刻的摄像头曝光触发时刻，即最右边的虚线细箭头，使之正好与右边粗线箭头T_{lidar2}时刻重合。

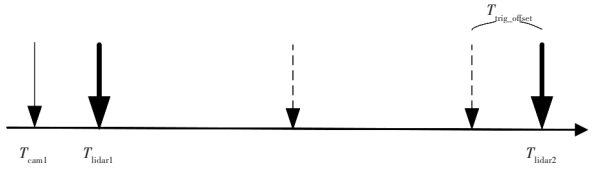


图6 摄像头曝光触发信号的偏移修正示意

考虑到T_{lidar2}时刻可能发生在摄像头1次或2次曝光之后，需要对摄像头曝光时间间隔进行求余操作，即调整最接近T_{lidar2}时刻的摄像头触发曝光时刻即可。摄像头1 s曝光30次，相邻2帧曝光的时间间隔为T_{cam_hz}。用T_{lidar2}减去T_{cam1}的差值对摄像头曝光时间间隔T_{cam_hz}求余，得到摄像头的曝光触发信号的偏移量T_{trig_offset}=1 667 μs。

3.4 摄像头曝光触发修正模块

摄像头的曝光触发方式是通过GMSL2链路直接

向摄像头模组的串行器发送曝光触发信号，串行器向摄像头图像传感器发出曝光触发电平。

根据摄像头的曝光频率，在摄像头曝光触发修正模块中设定一个相同频率的定时器，在定时器触发时，发送摄像头曝光触发信号。在发送触发指令之前，进行延时等待处理，延时时长为通过摄像头曝光触发偏移修正计算模块计算得到的摄像头的曝光触发信号的偏移修正值 T_{trig_offset}。

摄像头的曝光触发时刻在偏移了 T_{trig_offset} 时间后，开始触发曝光，获取图像。这时激光雷达也正好扫描到摄像头视场中心点角度位置，实现了激光雷达和摄像头对同一目标在同一时刻进行扫描和曝光，实现了激光雷达与摄像头的时空同步。

4 激光雷达与摄像头时空同步技术实现效果

通过软件编程，实现激光雷达与摄像头的时空同步技术。根据采集到的点云数据的时间戳，在时间戳偏差范围10 ms以内，选取时间戳最为接近的图像数据，进行融合投影。效果对比如图7、图8所示。



图7 未添加时空同步技术时的融合投影效果

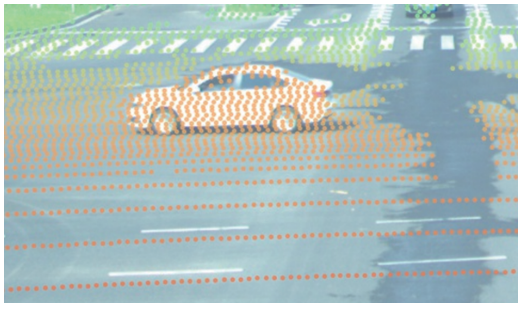


图8 添加时空同步技术时的融合投影效果

图7是未添加激光雷达与摄像头时空同步技术，点云与图像融合的效果图。通过边缘拟合对比法，从车头位置可以看出融合后得到车身的点云与图像出现了半个车头长度的偏移。图8是添加了激光雷达与摄像头时空同步技术，点云与图像融合的效果图，从车后备箱位置可以看出，车身点云在车身图像上的拟合相对较为精确，偏差在半个车灯以内。结果表明，激光雷达与摄像头时空同步技术可以显著提高点云与图像融合的精度。

5 结束语

本文针对当前普遍采用的同步方案中因传感器采集频率差异而引起的时序偏差问题，设计并实现了一种激光雷达与摄像头的时空同步技术方案。该方案在保持传感器原有帧率的前提下，通过精准控制摄像头的曝光触发时刻，使其与激光雷达扫描至摄像头视场中心点角度位置的时间严格对齐，从而实现多模态数据采集的时空一致性。结果表明，应用本文所提同步方法后，点云与图像融合的偏差从原来的半个车头长度减小至半个车灯长度以内，显著提升了多传感器融合投影的精度，验证了本方法的可行性与有效性。

参 考 文 献

[1] 高建双. 激光成像雷达扫描技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.

[2] 全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员. 网络测量和控制系统的精确时钟同步协议: GB/T 25931—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

[3] IEEE Standards Association. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks: IEEE Std 802.1AS-2020[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2020.

[4] 张显宏. 自动驾驶系统时间同步技术研究[J]. 上海汽车, 2023(7): 16-20.

[5] 张宝龙, 许孝晨, 梅志远, 李丹. 基于GMSL的车载摄像系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021(5): 189-195.

[6] 蒋智超. 基于MIPI CSI-2协议的接收端接口设计与验证[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2023.

[7] 戈志伟, 姚素英, 徐江涛, 等. 一种应用于CMOS图像传感器的快速自动曝光控制方法[J]. 天津大学学报, 2010(10): 10-15.

[8] 朱健, 张振林, 林文韬. 一种激光雷达与相机同步曝光控制方法及装置: CN117310649A[P]. 2023-12-29.

[9] 奚少华. 激光点云系列之一：详解激光雷达点云数据的处理过程[EB/OL]. (2023-12-21)[2026-01-26]. https://baijiahao. baidu. com/s? id=1758405523318367478&wfr=spider&for=pc.

[10] 毛虎华, 刘广武. 基于Cordic的笛卡尔坐标和极坐标转换的FPGA实现[C]// 第五届信号和智能信息处理与应用学术会议, 2011.

[11] 朱健, 张振林, 林文韬. 同步曝光方法、装置、计算机设备和存储介质: CN117119122A[P]. 2023-11-24.

（责任编辑 **明慧**）