

## 摘 要

das

**关键词：**无人驾驶，激光雷达，障碍物检测，深度学习，多传感器融合



## ABSTRACT

With the widespread engineering applications ranging from broadband signals and non-linear systems, time-domain integral equations (TDIE) methods for analyzing transient electromagnetic scattering problems are becoming widely used nowadays. TDIE-based marching-on-in-time (MOT) scheme and its fast algorithm are researched in this dissertation, including the numerical techniques of MOT scheme, late-time stability of MOT scheme, and two-level PWTD-enhanced MOT scheme. The contents are divided into four parts shown as follows.

.....

**Keywords:** time-domain electromagnetic scattering, time-domain integral equation (TDIE), marching-on in-time (MOT) scheme, late-time instability, plane wave time-domain (PWTD) algorithm



# 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 研究工作的背景与意义 .....	1
1.2 无人车三维障碍物检测的国内外研究历史与现状 .....	2
1.3 本文的主要贡献与创新 .....	2
1.4 本论文的结构安排 .....	2
第2章 三维感知传感器机构设计 .....	3
2.1 三维感知传感器的机械结构设计 .....	3
2.1.1 运动原理 .....	3
2.2 三维感知传感器的电路设计 .....	4
2.2.1 驱动器 .....	4
2.2.2 执行机构 .....	4
2.2.3 传感器 .....	5
2.2.3.1 角度传感器 .....	5
2.2.3.2 激光雷达 .....	5
2.2.4 主控板 .....	5
2.3 三维感知传感器的软件设计与运动控制 .....	6
2.4 本章小结 .....	6
第3章 激光雷达的多帧融合与相机配准 .....	7
3.1 基于点云的聚类算法 .....	7
3.2 基于深度学习的端到端三维物体识别方法 .....	7
3.3 本章小结 .....	7
第4章 基于视觉激光融合的三维障碍物检测方法 .....	8
4.1 相机与激光雷达标定 .....	8
4.2 基于yolo的视觉、激光结合的三维障碍物检测 .....	8
4.3 本章小结 .....	8
第5章 实验验证与结果分析 .....	9
5.1 全文总结 .....	9

5.2 后续工作展望 .....	9
参考文献 .....	10
致 谢 .....	10
外文资料原文 .....	11
外文资料译文 .....	13

## 缩略词表

---









## 第1章 绪论

### 1.1 研究工作的背景与意义

近几年来，自动驾驶技术取得了长足的进步，而其中关键的技术就是多传感器的环境感知与融合。环境感知的一个重要环节便是障碍物检测。目前，虽然基于图像的障碍物检测已经取得了卓有成效的进步，然而相较于三维障碍物检测，二维障碍物检测有以下缺陷：

- 1.基于单目相机的障碍物检测没有尺度信息，无法恢复出目标的三维坐标。
- 2.基于双目相机的障碍物检测，当基线较短时，测量距离较长（5m以上）的物体时计算出来的距离信息很不准确，而当基线较长时，近处物体的检测又容易出现在两个相机的视野盲区之中，从而导致无法三角化而得出距离信息。

基于上述原因，越来越多的目光聚焦在了基于激光雷达（LiDAR）的三维障碍物检测。LiDAR是Light Detection And Ranging的缩写，中文译作“激光探测与测量”，一般指多线数的三维激光雷达传感器。相较于相机图像，激光雷达的点云拥有以下几点优势：

- 1.测量范围广。目前的激光雷达的测量有效距离基本都在0.5-100米左右，远高于双目相机三角测距的适用范围。
- 2.测量精度高。激光雷达的测距误差可达厘米级，同样优于双目相机的测距结果。

目前最常见的旋转式激光雷达，其本质是多个激光束旋转后对每个时刻的测距结果进行保留与叠加，最后再以点云的形式发布出去。决定激光雷达的分辨率的一个参数为其激光束的个数，一般称之为激光雷达的线数。目前常用的激光雷达线数有16线、32线、64线等，其中由于低线数的激光雷达生成的点云在测量远距离物体时密度较低。举例来说，当使用16线激光雷达检测到20米处的障碍物时，其16线激光束两两之间的距离可以达到70cm，相当于检测20m处的人时，只能有两线激光束能够返回距离。因此，低线数激光雷达点云的稀疏性较大地制约了三维障碍物检测任务的准确率。

通常在自动驾驶的无人车系统中会在车的四周装上多个16线的激光雷达进行点云融合，或者直接采用线数更高的激光雷达来做障碍物检测的任务。然而目前三维激光雷达造价不菲，无人车系统中光是64线激光雷达的成本就奖金十万美金，如此高昂的成本在一定程度上限制了无人驾驶汽车的普及与推广。

鉴于上述存在在问题，本文希望能够提出一种基于多帧融合的低线数激光雷达感知机构，使其能够通过增加一个在垂直方向的往复运动，并将该机构上激光雷达的多帧点云融合发布来提高三维点云的稠密性，借而解决低线数激光雷达在障碍物检测问题上由于点云的稀疏性而造成的困难。并且，本文还希望通过融合上述机构发布的点云信息以及相机的图像信息，发挥各个传感器的优势从而提高三维障碍物检测任务的准确率与实现三维障碍物的多类别检测。

## 1.2 无人车三维障碍物检测的国内外研究历史与现状

根据本文的主要研究方向，下面将对基于激光雷达点云的三维目标分割与检测（3D object segmentation and detection）的研究现状进行调研。

针对三维障碍物的分割问题，目前主要有三类方法来实现

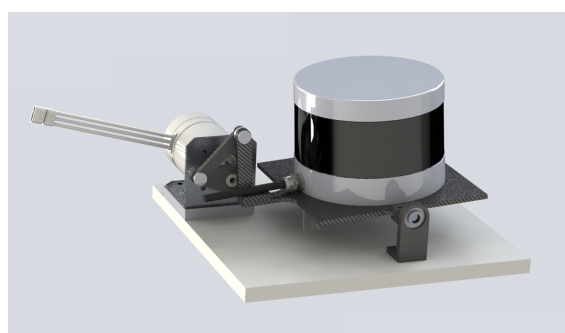
## 1.3 本文的主要贡献与创新

## 1.4 本论文的结构安排

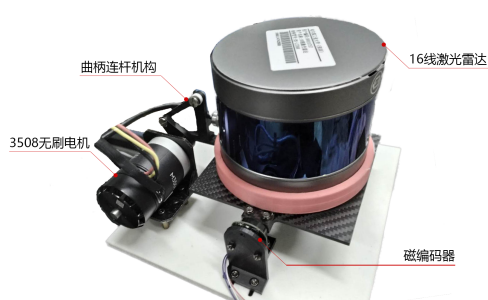
## 第2章 三维感知传感器机构设计

为了能够解决低线数激光雷达在障碍物检测问题上由于点云的稀疏性而造成的困难，本章提出了一种三维感知传感器机构，通过增加三维激光雷达在垂直方向的往复旋转，同时融合多帧激光点云，来增加激光雷达在铅垂方向上的分辨率，实现类似于高线数激光雷达的稠密点云。

### 2.1 三维感知传感器的机械结构设计



(a)



(b)

图 2-1 机构总图(a)solidworks渲染图;(b)实物图

#### 2.1.1 运动原理

本章所述的机构结构如图2-1(b)所示，其中3508电机提供驱动转矩，曲柄连杆

装置将电机的旋转运动转化为激光雷达底座在航向角(yaw)方向上的往复运动，同时绝对值磁编码器记录激光雷达在航向角上的角度变化，以供多传感器融合时使用。

## 2.2 三维感知传感器的电路设计

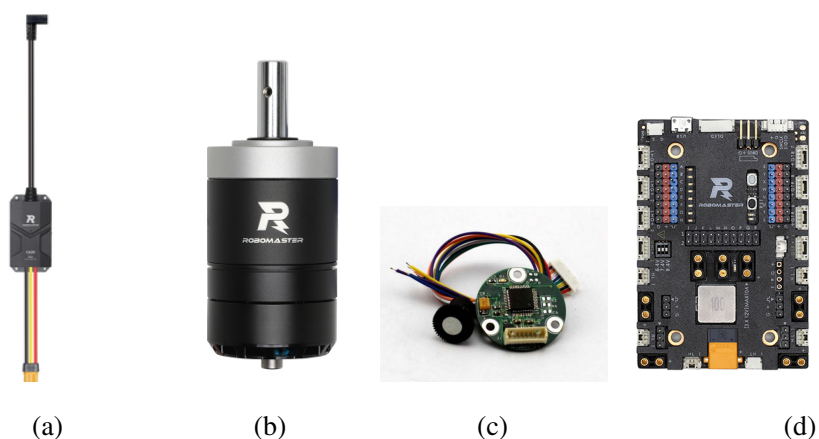


图 2-2 驱动器与传感器(a)C620 电调;(b)M3508无刷电机;(c)磁编码器;(d)RM A型开发板

### 2.2.1 电路拓扑

### 2.2.2 驱动器

该三维感知机构采用的驱动器为DJI C620电调，如图2-2(a)所示。该电调采用CAN指令或者PWM两种调节方式，最大电流可达20A。

### 2.2.3 执行机构

该三维感知机构采用的执行机构为DJI M3508无刷电机，如图2-2(b)所示。该电机持续最大转矩可达3Nm，满足曲柄机构的结构受力要求。

## 2.2.4 传感器

### 2.2.4.1 角度传感器

该三维感知机构采用的角度传感器为傲蓝13线磁编码器，如图2-2(c)所示。该编码器采用RS485方式通信，其单圈分辨率为8192cpr, 精度为 $\pm 0.1$ 度。

该编码器为绝对值式编码器，其相对于增量式编码器不同点在于，增量式编码器以上电时的位置为零点，每次使用都要机械对位；而绝对值式编码器能够记录机构的唯一位置，即单圈内编码器的每一个示值，都唯一对应了空间中机构的位置与角度。考虑到我们曲柄连杆机构的特性，显然绝对值式编码器更加符合我们的要求。

### 2.2.4.2 激光雷达



图 2-3 速腾16线激光雷达

该三维感知机构采用的激光雷达为速腾聚创的RS-LiDAR-16，如图2-3所示。该激光雷达为16线激光雷达，其测距范围为50cm-150m，精度误差为 $\pm 2$ cm。垂直视场角为30度，其角分辨率为2度；水平视场角为360度，其角分辨率为0.09-0.36度（对应的点云频率为5Hz-20Hz）。

## 2.2.5 主控板

该三维感知机构采用的主控板为DJI Robomaster A型开发板，如图2-2(d)所示。该开发板具备类型丰富的接口，包括12V、5V、3.3V电源接口、CAN接口、

UART接口、可变电压PWM接口、SWD接口等。同时该开发板拥有电源输入的防反接、过压保护、缓启动、12V电源输出过流保护、PWM端口的ESD等多重保护。

## **2.3 三维感知传感器的软件设计与运动控制**

## **2.4 本章小结**



## 第3章 激光雷达的多帧融合与相机配准

### 3.1 基于点云的聚类算法

由于时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合，因此时域混合场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征与时域电场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

### 3.2 基于深度学习的端到端三维物体识别方法

### 3.3 本章小结

## 第4章 基于视觉激光融合的三维障碍物检测方法

### 4.1 相机与激光雷达标定

本文以时域积分方程方法为研究背景，主要对求解时域积分方程的时间步进算法以及两层平面波快速算法进行了研究。

### 4.2 基于yolo的视觉、激光结合的三维障碍物检测

时域积分方程方法的研究近几年发展迅速，在本文研究工作的基础上，仍有以下方向值得进一步研究：

### 4.3 本章小结

## 第5章 实验验证与结果分析

### 5.1 全文总结

本文以时域积分方程方法为研究背景，主要对求解时域积分方程的时间步进算法以及两层平面波快速算法进行了研究。

.....

### 5.2 后续工作展望

时域积分方程方法的研究近几年发展迅速，在本文研究工作的基础上，仍有以下方向值得进一步研究：

.....

## 致 谢

在攻读博士学位期间，首先衷心感谢我的导师 XXX 教授，……  
……

## The Name of the Game

### 1.1 xxx

#### 1.1.1 xxx

##### 1.1.1.1 xxxx

### 1.2 xxx

#### 1.2.1 xxx

##### 1.2.1.1 xxxx

English words like ‘technology’ stem from a Greek root beginning with the letters  $\tau\epsilon\chi\ldots$ ; and this same Greek word means *art* as well as technology. Hence the name  $\text{\TeX}$ , which is an uppercase form of  $\tau\epsilon\chi$ . $\text{\TeX}$  (actually  $\text{\TeX}$ ), meaning of  $\tau\epsilon\chi$

Insiders pronounce the  $\chi$  of  $\text{\TeX}$  as a Greek chi, not as an ‘x’, so that  $\text{\TeX}$  rhymes with the word blecchhh. It’s the ‘ch’ sound in Scottish words like *loch* or German words like *ach*; it’s a Spanish ‘j’ and a Russian ‘kh’. When you say it correctly to your computer, the terminal may become slightly moist.

The purpose of this pronunciation exercise is to remind you that  $\text{\TeX}$  is primarily concerned with high-quality technical manuscripts: Its emphasis is on art and technology, as in the underlying Greek word. If you merely want to produce a passably good document—something acceptable and basically readable but not really beautiful—a simpler system will usually suffice. With  $\text{\TeX}$  the goal is to produce the *finest* quality; this requires more attention to detail, but you will not find it much harder to go the extra distance, and you’ll be able to take special pride in the finished product.

On the other hand, it’s important to notice another thing about  $\text{\TeX}$ ’s name: The ‘E’ is out of kilter. This logo displaced ‘E’ is a reminder that  $\text{\TeX}$  is about typesetting, and it distinguishes  $\text{\TeX}$  from other system names. In fact,  $\text{\TeX}$  (pronounced *tecks*) is the admirable *Text EXecutive* processor developed by Honeywell Information Systems.

Since these two system names are Bemer, Robert, see TEX, ASCII pronounced quite differently, they should also be spelled differently. The correct way to refer to T<sub>E</sub>X in a computer file, or when using some other medium that doesn't allow lowering of the 'E', is to type '—TeX—'. Then there will be no confusion with similar names, and people will be primed to pronounce everything properly.

## 此名有诗意

### 1.1 xxx

#### 1.1.1 xxx

##### 1.1.1.1 xxxx

### 1.2 xxx

#### 1.2.1 xxx

##### 1.2.1.1 xxxx

英语单词“technology”来源于以字母 $\tau\epsilon\chi$ ...开头的希腊词根；并且这个希腊单词除了 technology 的意思外也有 art 的意思。因此，名称 TEX 是  $\tau\epsilon\chi$  的大写格式。

在发音时， $\tau\epsilon\chi$  的  $\chi$  的发音与希腊的 chi 一样，而不是“x”，所以  $\tau\epsilon\chi$  与 blecchhh 押韵。“ch”听起来象苏格兰单词中的 loch 或者德语单词中的 ach；它在西班牙语中是“j”，在俄语中是“kh”。当你对着计算机正确读出时，终端屏幕上可能有点雾。

这个发音练习是提醒你， $\tau\epsilon\chi$  主要处理的是高质量的专业书稿：它的重点在艺术和专业方面，就象希腊单词的含义一样。如果你仅仅想得到一个过得去——可读下去但不那么漂亮——的文书，那么简单的系统一般就够用了。使用  $\tau\epsilon\chi$  的目的是得到最好的质量；这就要在细节上花功夫，但是你不会认为它难到哪里去，并且你会为所完成的作品感到特别骄傲。

另一方面重要的是要注意到与  $\tau\epsilon\chi$  名称有关的另一件事：“E”是错位的。这个偏移“E”的标识提醒人们， $\tau\epsilon\chi$  与排版有关，并且把  $\tau\epsilon\chi$  从其它系统的名称区别开来。实际上，TEX(读音为 tecks)是 Honeywell Information Systems 的极好的 Text EXecutive 处理器。因为这两个系统的名称读音差别很大，所以它们的拼写也不同。在计算机中表明  $\tau\epsilon\chi$  文件的正确方法，或者当所用的方式无法降低“E”时，就要写作“TeX”。这样，就与类似的名称不会产生混淆，并且为人们可以正确发音提供了条件。