
摘要

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

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 机械结构运动原理	4
2.1.2 曲柄连杆机构的设计	5
2.2 三维感知传感器的电路设计	7
2.2.1 驱动器	7
2.2.2 执行机构	7
2.2.3 传感器	8
2.2.3.1 角度传感器	8
2.2.3.2 激光雷达	8
2.2.4 主控板	8
2.2.5 电路拓扑	9
2.3 三维感知传感器的软件设计与运动控制	10
2.4 本章小结	10
第3章 激光雷达的多帧融合与相机配准	12
3.1 基于点云的聚类算法	12
3.2 基于深度学习的端到端三维物体识别方法	12
3.3 本章小结	12
第4章 基于视觉激光融合的三维障碍物检测方法	13
4.1 相机与激光雷达标定	13
4.2 基于yolo的视觉、激光结合的三维障碍物检测	13
4.3 本章小结	13

目录

第5章 实验验证与结果分析	14
5.1 全文总结	14
5.2 后续工作展望	14
参考文献	15
致 谢	15
外文资料原文	16
外文资料译文	18

缩略词表

主要符号表

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，只能够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

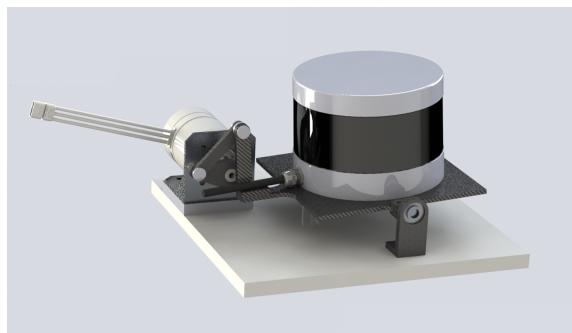
1.3 本文的主要贡献与创新

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 三维感知传感器机构的机械结构设计



(a)



(b)

图 2-1 机构总图(a)solidworks渲染图;(b)实物图

2.1.1 机械结构运动原理

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。

在著名的激光SLAM算法LOAM^[?]中，由于当时的条件限制，其文章作者没有三维激光雷达来进行SLAM，而是用一个舵机给一个二维激光雷达进行竖直方向的往复旋转来增加线数，如图2-2所示。

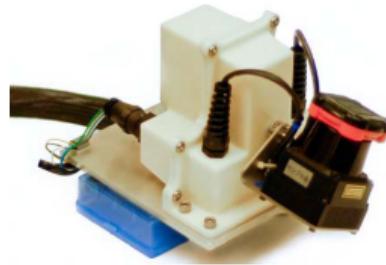


图 2-2 LOAM中的机构设计

该机构最大的优点就是结构简单，这也是本文初次采用的机构设计。然而该机构有以下几个缺点：

- 1.在往复运动中，当运动方向发生改变时，由于舵机控制精度的问题，很难做到平滑换向，并且经常伴随有较大的震动，给之后的传感器融合算法带来了困难。
- 2.LOAM中采用的是二位激光雷达，重量较轻，而本文需要带动三维激光雷达进行往复运动，重量较重（近1kg），长时间使用舵机带动会使舵机产生较为明显的回程间隙，影响角度的测量与后续的传感器融合的效果。

因为上述原因，我们没有采用这种结构设计，而是采用了之前提到的曲柄连杆机构来针对三维激光雷达进行往复运动，相较于上述机构，曲柄连杆结构有以下几个优点：

- 1.换向平滑。执行电机只需要一直向同一方向旋转，曲柄连杆机构就能够自动换向，并且输出的角度曲线近似正弦曲线。
- 2.对执行机构负担小。仅需要较小并且较为恒定的转矩就能够驱动较大的负载做往复运动。

3.对执行机构的控制要求低。在该机构中，无刷电机只需要输出恒定的转矩就能够完成三维激光雷达在偏航角方向上的往复运动，并且经过验证，其角度输出近似正弦曲线，而若采用上述的舵机机构，要想得到相近的角度曲线，则对舵机的软件控制提出了较高的要求。

综上，本文选择曲柄连杆机构作为该机构的驱动机构。

2.1.2 曲柄连杆机构的设计

该三维感知机构的一个难点在于如何设计与电机相连的曲柄连杆机构。这里参照《机械设计基础》^[2]一书中的相应章节对曲柄四连杆机构的连杆长度进行求解。

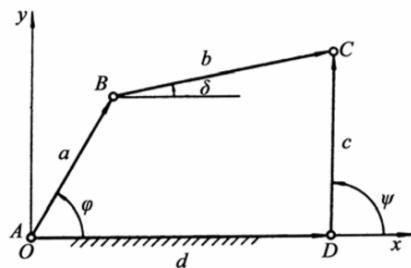


图 2-3 四杆机构的数学模型

如图2-3所示，假设已知该铰链四杆机构两连架杆AB和CD所形成的角度 ψ_1 和 ϕ_1 在三个不同位置下的角度，要求连杆a、b、c、d的尺寸。则根据向量向x、y轴投影，有

$$a \cos \phi + b \cos \delta = d + \cos \phi$$

$$a \sin \phi + b \sin \delta = c \sin \phi$$

将上两式先进行移项，然后作平方和相加，从中消去 δ 后整理有

$$b^2 = a^2 + c^2 + d^2 + 2cd \cos \psi - 2ad \cos \phi - 2acc \cos(\phi - \psi)$$

我们设

$$\begin{cases} R_1 = (a^2 + d^2 + c^2 - b^2) \\ R_2 = d/c \\ R_3 = d/a \end{cases}$$

代入，则上一个式子可以化简为

$$R_1 - R_2 \cos \phi + R_3 \cos \psi = \cos(\phi - \psi)$$

这个式子即为铰链四连杆机构的角位置方程，该方程有三个待定参数 R_1 、 R_2 、 R_3 。故应有三组对应的 ψ_1 和 ϕ_1 角才能得出这个方程的解。将三组 ψ_1 和 ϕ_1 角代入求解该方程后，可以得到四个构件之间的长度关系为

$$\begin{cases} a = d/R_3 \\ c = d/R_2 \\ b = \sqrt{a^2 + c^2 + d^2 - 2acR_1} \end{cases}$$

则根据机构的具体设置情况，知道 a, b, c, d 中的任何一条边的长度后，便可知剩下四条边的长度。

在实际设计中，我们已知 ψ_1 和 ϕ_1 的三组对应角度为

$$\begin{cases} \psi_1 = 30^\circ \quad \phi_1 = 36.3^\circ \\ \psi_1 = 60^\circ \quad \phi_1 = 43.87^\circ \\ \psi_1 = 120^\circ \quad \phi_1 = 35.75^\circ \end{cases}$$

并且根据我们的机构设置，构件 d 的长度为 105.72mm。将这些已知量代入公式中可得

$$\begin{cases} a = 31.6\text{mm} \\ b = 49.18\text{mm} \\ c = 108.37\text{mm} \end{cases}$$

由此，便得到了曲柄机构的连杆构件设计参数。

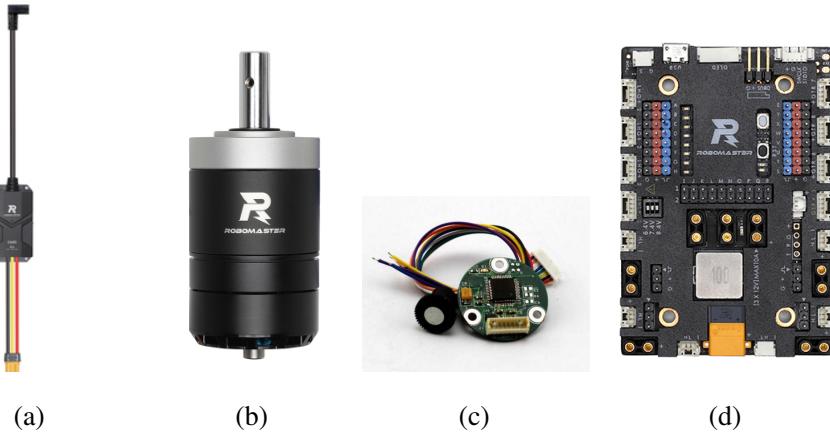


图 2-4 驱动器与传感器(a)C620 电调;(b)M3508无刷电机;(c)磁编码器;(d)RM A型开发板

2.2 三维感知传感器机构的电路设计

2.2.1 驱动器

该三维感知机构采用的驱动器为DJI C620电调，如图2-4(a)所示。该电调支持50-500Hz的PWM（脉宽调制）信号控制以及CAN总线指令控制，最高支持20A的持续电流，支持对CAN总线上的电调快速设置ID，支持通过CAN总线获取电机温度、转子位置和转子速度等信息，切换电机时可无需进行位置传感器的参数校准。

2.2.2 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2-4(b)所示。该电机可搭配上文所述C620电调实现正弦驱动，相比传统方波驱动具有更高的效率、机动性和稳定性。其最高可持续输出力矩为2.8Nm，满足驱动曲柄四连杆机构的需求。

2.2.3 传感器

2.2.3.1 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2-4(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 ± 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。

2.2.3.2 激光雷达



图 2-5 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2-5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 $\pm 2cm$ 。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）。

2.2.4 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2-4(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。

2.2.5 电路拓扑

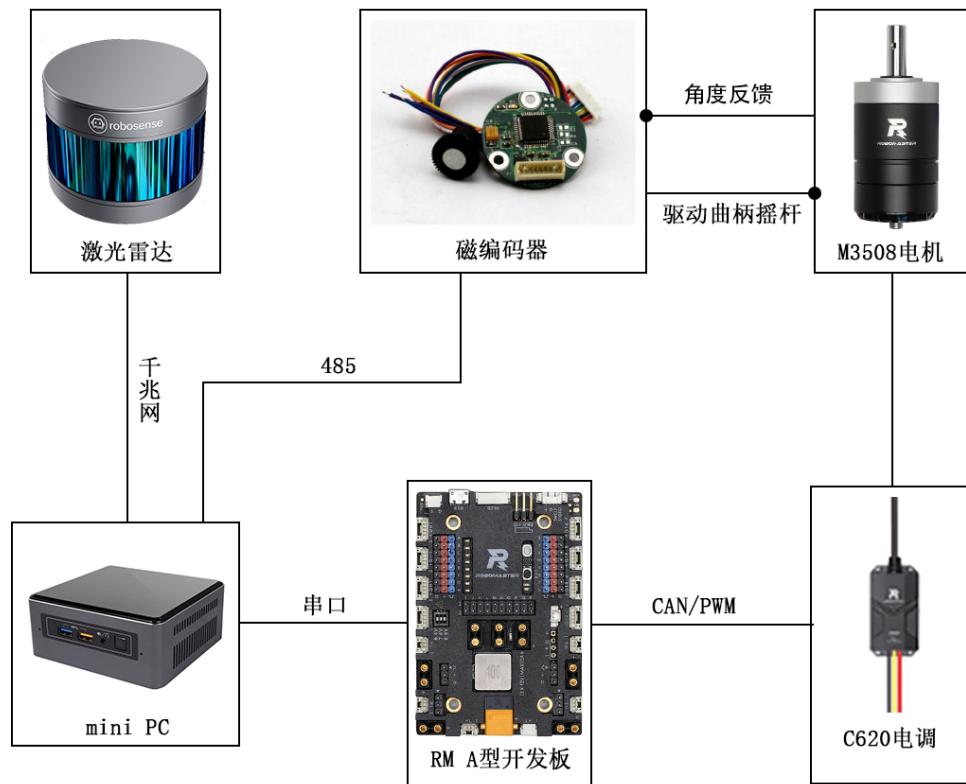


图 2-6 电路拓扑

该三维感知机构的电路拓扑如图2-6所示。激光雷达通过千兆网接口将点云传输到mini PC上，磁编码器通过485转USB与mini PC通信，同时主控通过PWM控制电调输出，调节M3508电机的转速，M3508电机提供曲柄四连杆机构的驱动力矩，而磁编码器又将曲柄机构作用在激光雷达底座上的旋转通过485通信输出到mini PC。

2.3 三维感知传感器机构的软件设计与运动控制

根据上文所述的机械设计以及电路设计，该三维感知机构的软件设计主要实现了以下几个任务：

1. 实现了各个传感器、主控到Mini PC的通信，同时将数据以ROS（Robot Operating System）话题的方式发布出去，以供第二章节提到的多帧融合算法使用。
2. 实现了电机的多档调速功能。为了应对不同的场景，在主控中实现了多档调速功能，以调节曲柄机构的往复运动频率。
3. 实时检测电调的温度信息，提供了基于温度检测的堵转保护（温度过高自动切断控制）。

此外，本文还记录了在电机输出恒定转速情况下的曲柄连杆机构的输出的角度信息，如图2-7所示。该图纵坐标为角度制的输出角度。从图中可以看出，本章所设计的三维感知机构其输出角度近似正弦曲线，并且没有较大的换向震动，相比起上文所提到的舵机的结构拥有稳定可靠的优势。

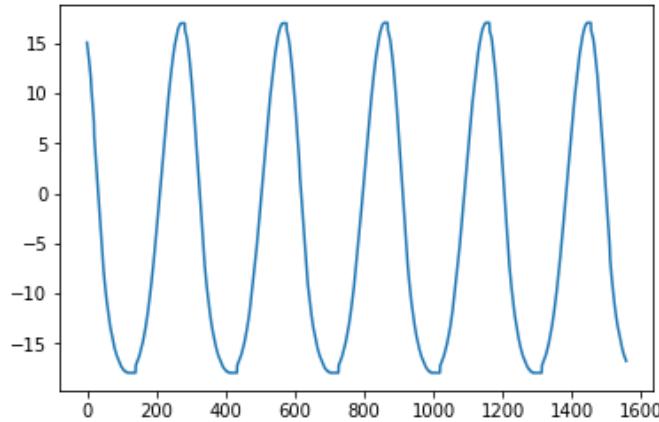


图 2-7 曲柄连杆机构输出角度

2.4 本章小结

本章提出了一种新的三维感知机构，并从该机构的机械设计、电路设计以及软件设计和运动控制三个方面介绍了该机构。在机械方面，本文提出使用无刷电机+曲柄摇杆机构来代替简单的舵机给三维激光雷达提供一个竖直航向角方向上

的往复运动，这种结构的优势在于机构换向流畅、控制简单以及对机构负载小，能够为本文后续章节提到的激光雷达的多帧融合提供结构上的稳定与可靠性。在电路方面，本章利用绝对值式磁编码器对曲柄机构运动的角度进行了记录与输出，相较于增量式编码器，磁编码器不需要保证每次上电时机构都在同一个位置，为机械结构的设计提供了便利。在软件方面，本章实现了各个传感器与主控以及mini PC的通信，主控对无刷电机的多档控制以及对电机的堵转保护，并且绘制了输出角度，验证了机构的可行性。本文的后续章节将利用该机构输出的点云信息以及角度信息来进行点云的多帧融合稠密化，并且在融合的点云上进行三维障碍物的检测与分类。

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 $\tau\epsilon\chi\dots$; and this same Greek word means *art* as well as technology. Hence the name $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$, which is an uppercase form of $\tau\epsilon\chi.\text{TeX}$ (actually $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$), meaning of $\tau\epsilon\chi$

Insiders pronounce the χ of $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ as a Greek chi, not as an ‘x’, so that $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ rhymes with the word bleechhh. 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 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 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 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 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 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ ’s name: The ‘E’ is out of kilter. This logo displaced ‘E’ is a reminder that $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ is about typesetting, and it distinguishes $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ from other system names. In fact, 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_EX 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 $\tau\epsilon\chi\dots$ 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 **T_EX** 是 $\tau\epsilon\chi$ 的大写格式。

在发音时，T_EX 的 χ 的发音与希腊的 chi 一样，而不是 “x”，所以 T_EX 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，T_EX 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 T_EX 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 T_EX 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，T_EX 与排版有关，并且把 T_EX 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 T_EX 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。