

Application Note

采用霍尔效应传感器的游戏手柄和控制杆设计



Patrick Simmons, Scott Bryson

Position Sensing

摘要

游戏手柄和控制杆功能通常用作各种应用（包括游戏控制器、重型机械、汽车电子换挡器和转向柱控制柄）的输入控制。在每种情况下，都允许游戏手柄或控制杆具有一个或两个旋转轴。通过在这些系统中巧妙地放置磁体和霍尔效应传感器，可以实现一种有用的设计来消除随着时间推移而磨损的接触式部件。

本文档演示了如何实现视频游戏控制器拇指拨动游戏手柄以及转向柱控制模块中的量产汽车转向灯控制柄改造。在这两种配置中，都使用 3D 线性霍尔效应传感器来捕获磁场数据。本文档详细介绍了设置和测试方法以及对可能影响测量质量的机械误差源的分析。

内容

1 简介.....	2
2 游戏手柄设计.....	3
2.1 确定外形尺寸.....	3
2.2 磁体传感器放置.....	5
2.3 设计计算.....	8
2.4 后期处理.....	11
2.5 原型设计和基准测试.....	13
2.6 误差源.....	15
3 控制杆设计.....	19
3.1 确定外形尺寸.....	19
3.2 磁体传感器放置.....	21
3.3 设计计算.....	22
3.4 原型设计和基准测试.....	24
3.5 误差源.....	26
4 总结.....	27
5 参考资料.....	27
6 修订历史记录.....	27

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

本文档提供了游戏手柄和控制杆的简要视图，同时展示了如何使用霍尔效应传感器构建此类控制装置。结合简要讨论来展示设计示例。图 1-1 总结了所提供的示例的设计流程。

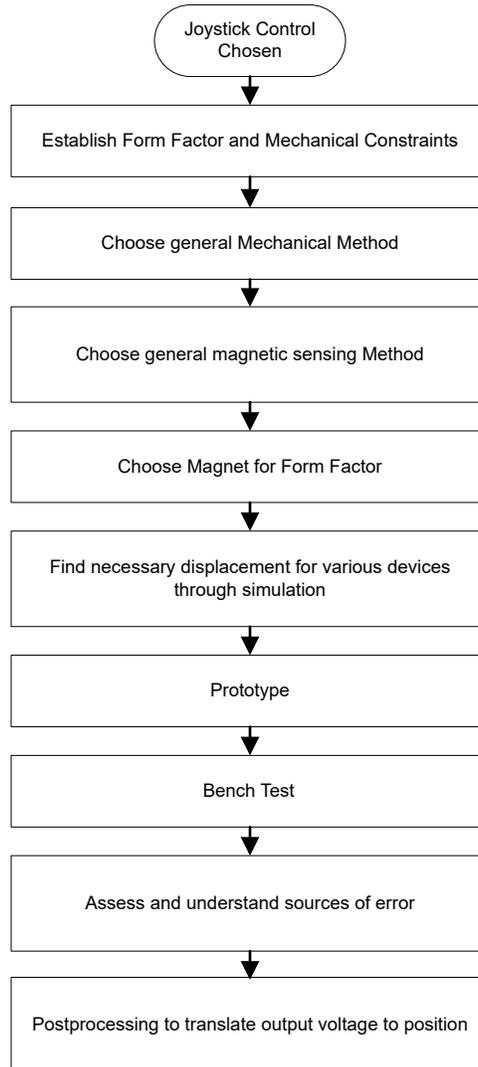


图 1-1. 开发流程

2 游戏手柄设计

2.1 确定外形尺寸

机械外形尺寸为系统实现提供了界限，并决定了在构建游戏手柄或控制杆时需要考虑的磁体尺寸或磁体等级。通常，霍尔效应传感器测量永磁体产生的磁场。除非霍尔效应传感器与类似于滑环的部件相连接或通过本地无线模块进行控制，否则它很可能位于游戏手柄的固定部分，而磁体位于某个具有一定运动范围的移动体中。磁体的尺寸比该移动体小。因此，对于游戏控制器中通常称为拇指操纵杆的一部分游戏手柄，设计仅限于小磁体。通常，只有钕磁体采用如此小的外形尺寸，这些磁体磁场更强，温度漂移更大，成本更高。

2.1.1 选择机械实现

根据设备用途、分辨率、功能、成本、制造难易程度和所需的用户体验，可能会探讨不同的机械方法。以下只是可能考虑的几个选项。方法 1 和 2 是球窝接头的变体，展示了球可以位于接头的固定体或移动体中，具体取决于哪个看起来更适合设计。方法 3 展示了一个具有 2 个轴的游戏手柄示例，允许通过 1 个固定体和两个移动体进行 2 度运动。

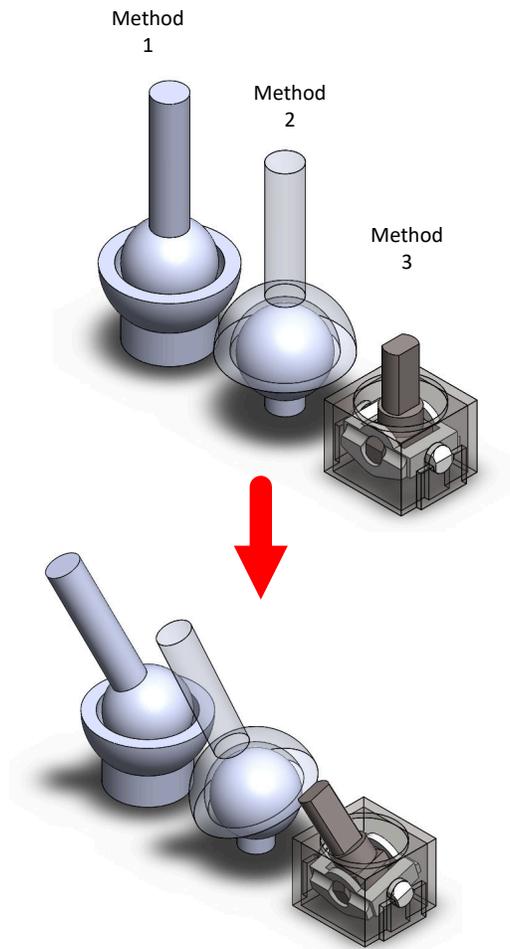


图 2-1. 机械实现

2.1.2 选择磁性实现

磁性实现与磁体类型、运动路径以及磁体和传感器的相对方向相对应。图 2-2 展示了图 2-1 中采用的每种机械方法的几种可能磁性实现。从左侧开始，有两个机械方法 1 选项，这些选项采用球形或圆柱形磁体。然后，中间是两个机械方法 2 选项，这些选项采用轴向环形磁体或径向环形磁体。最后，右侧是两个机械方法 3 选项，其中一个在游戏手柄轴上有一个中心轴向环形磁体，而另一个有两个随着轴旋转的条形磁体。这些实现中的每一种都面临独特的设计挑战，并且可能具有独特的传感器配对。

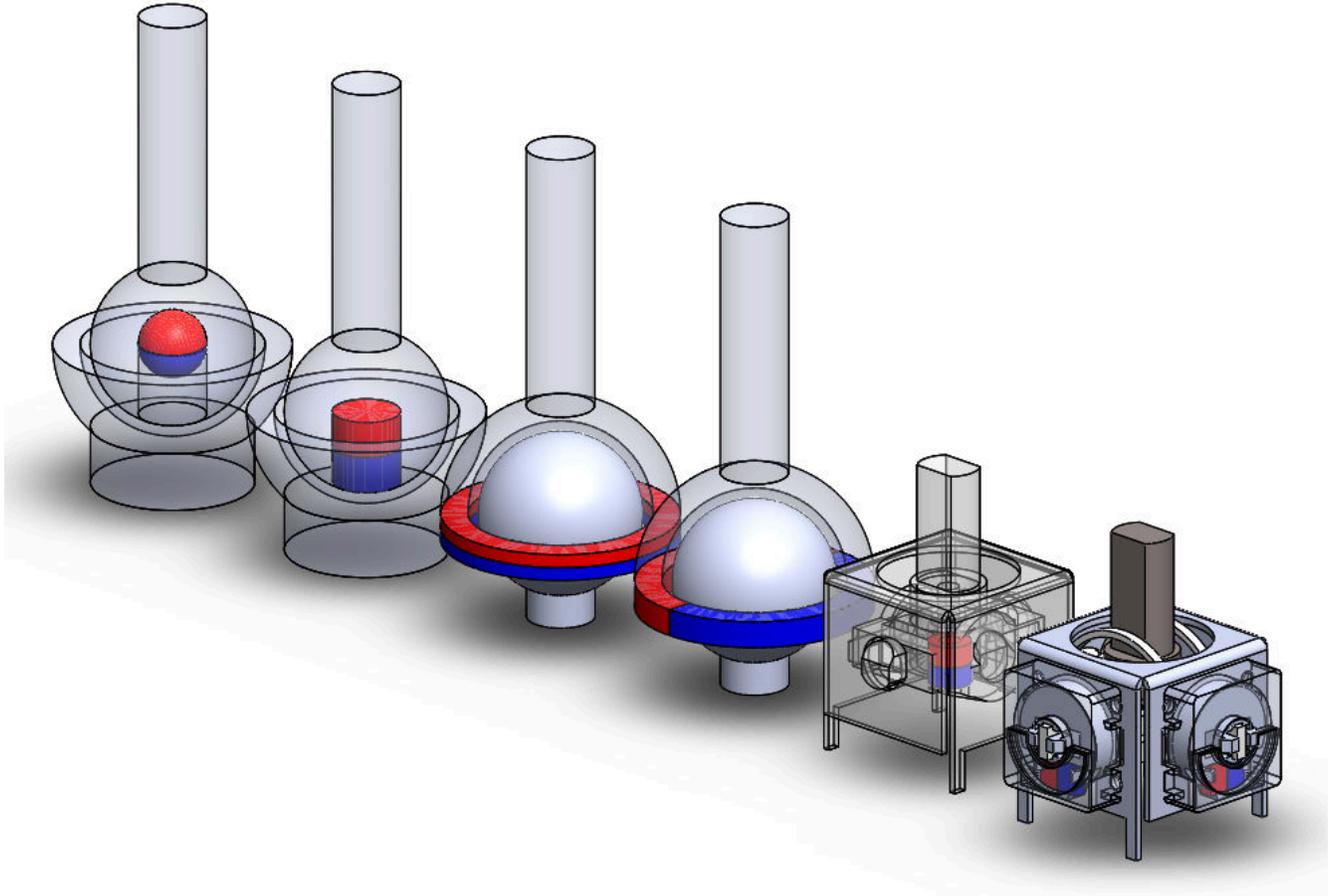


图 2-2. 磁性实现

2.2 磁体传感器放置

最终目标是将器件输出映射到不同的机械位置。由于包含在移动体中的磁体不局限于单一的直线路径，而是在一个或多个平面内旋转、横摆、倾斜或俯仰，因此至少需要 2 个霍尔元件才能避免空间混叠，如图 2-3 所示。图 2-4 说明了利用来自垂直检测元件的数据，可以从 2 个本身无法分辨游戏手柄位置的传感器中提取独特的游戏手柄俯仰值和独特的旋转值。

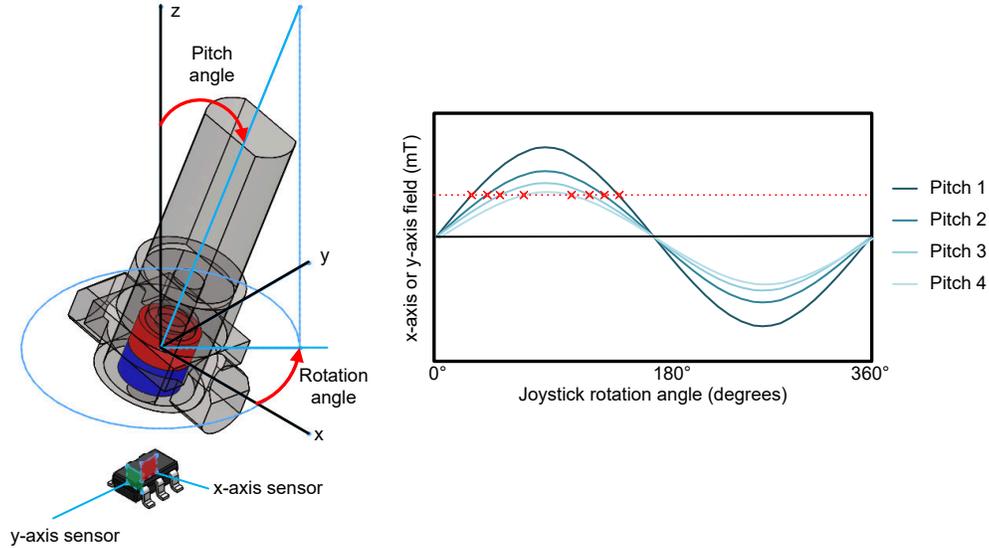


图 2-3. 混叠

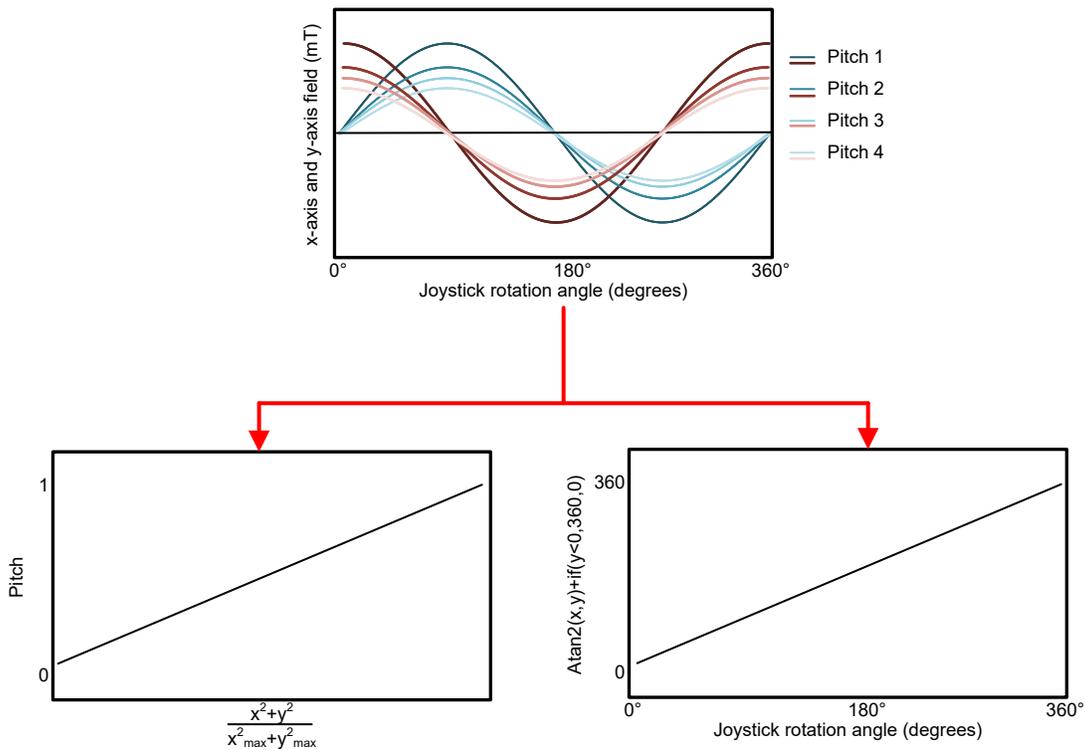


图 2-4. 2 传感器俯仰和旋转提取

图 2-5 展示了利用 3D 传感器 (如 TMAG5273, 或适合空间受限的应用的 TMAG3001) 的单器件设计, 该传感器具有沿 x 轴和 y 轴进行检测的霍尔元件。对于该设计, 请尽量适当地放置器件, 以便获得类似于图 2-6 的输出。在给定俯仰度的圆形路径中移动游戏手柄轴时, x 轴和 y 轴磁场会表现出相对于传感器的正弦行为。

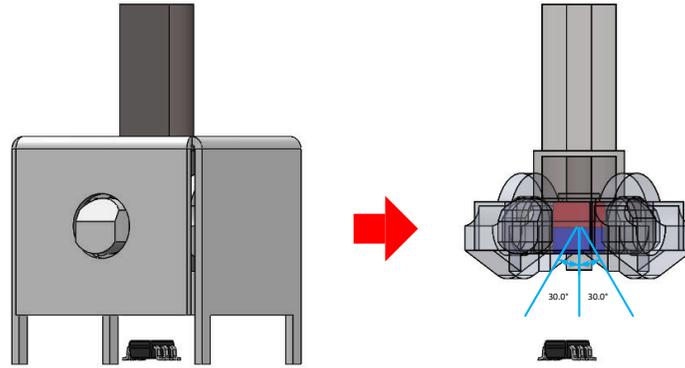


图 2-5.1 器件设计

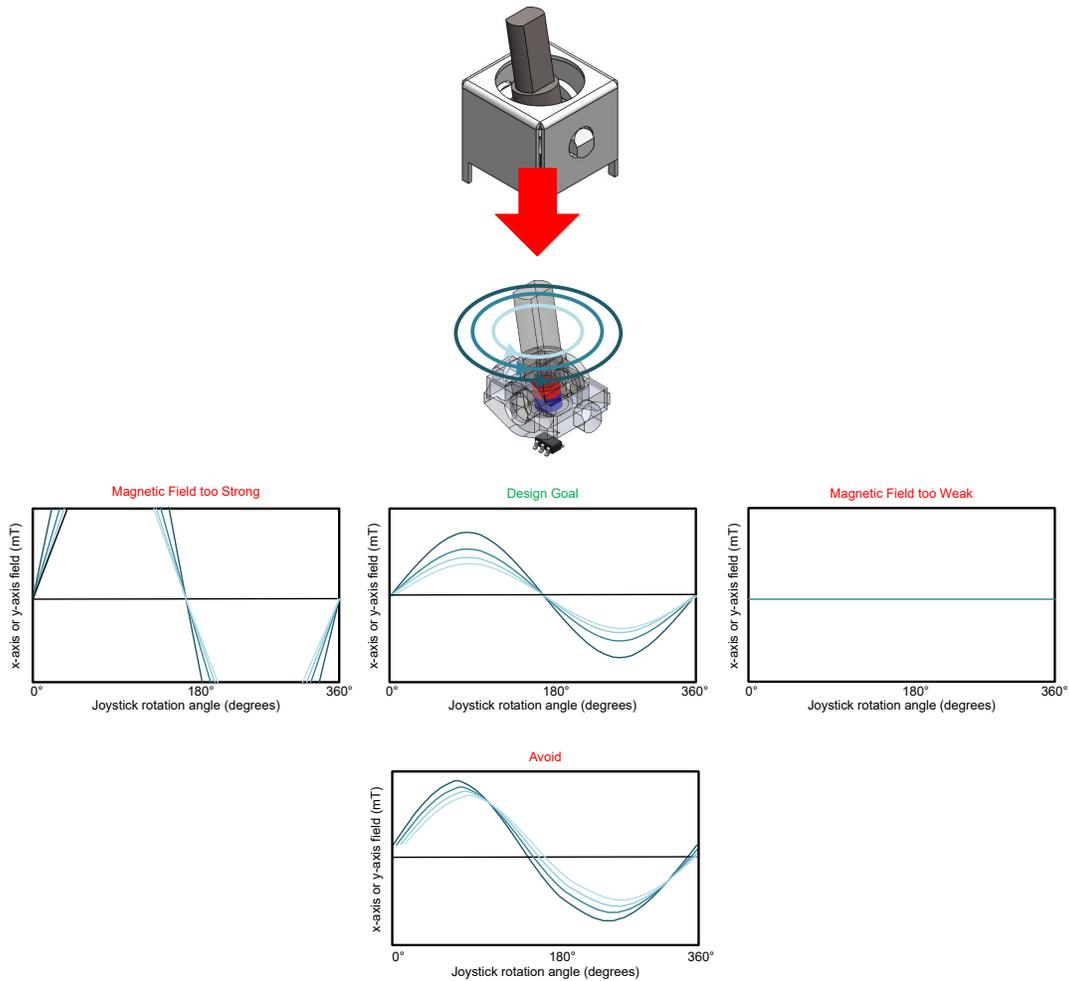


图 2-6.1 器件示例图

图 2-7 展示了一个双器件设计，该设计利用 2 个霍尔元件沿 z 轴进行检测，输出行为如图 2-8 所示。对于双器件设计，可以使用 TMAG5253 等模拟输出器件，或者如果没有可用的 ADC，则可以使用 TMAG5273 或 TMAG3001 等数字设计。

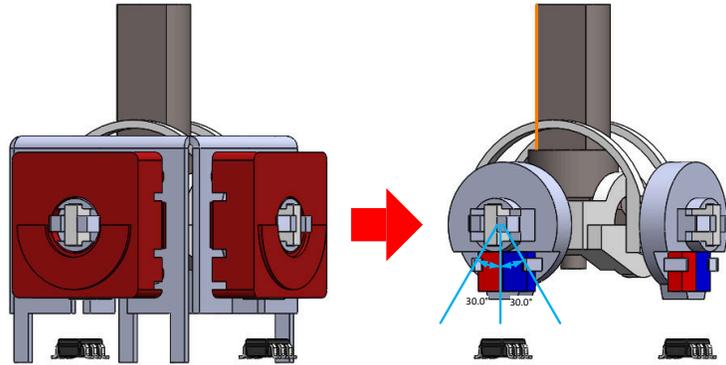


图 2-7. 2 器件设计

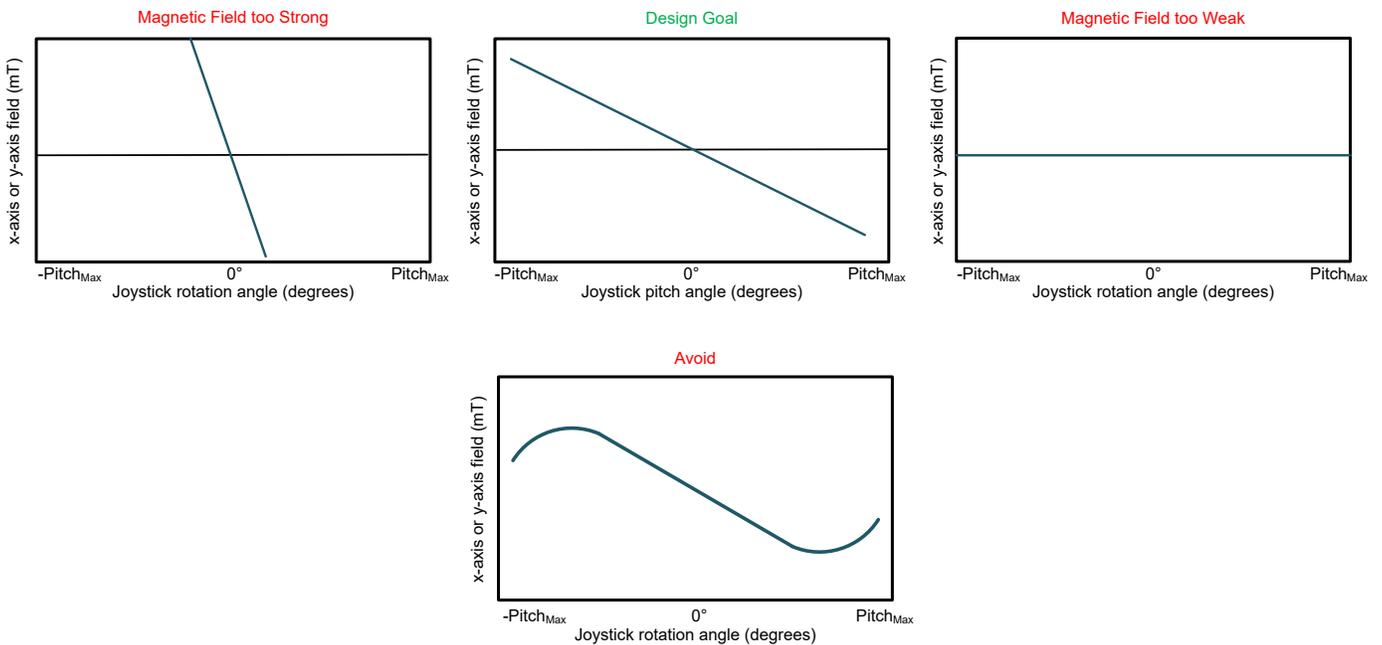
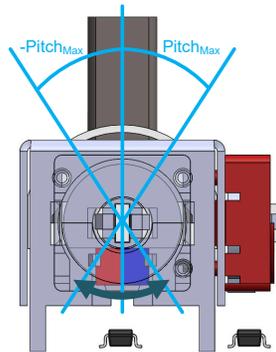


图 2-8. 2 传感器设计目标

2.3 设计计算

确定了设计所需输出的一般预期后，现在可以执行确定确切放置区域的迭代过程。TI 提供了**磁感应模拟器**来简化此过程。该工具具有一个主菜单，用户可以在其中指定磁体运动类型。然后，会根据用户选择显示相应的子菜单，其中包含用于指定磁体放置、传感器放置、运动范围和所需器件的条目。图 2-9 展示了顶部菜单和“Rotation”移动子菜单。

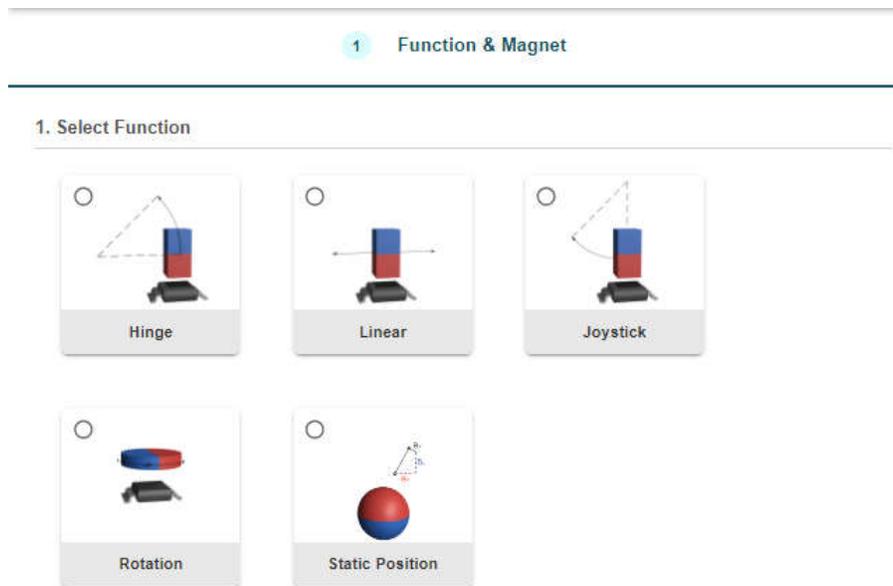


图 2-9. 工具菜单

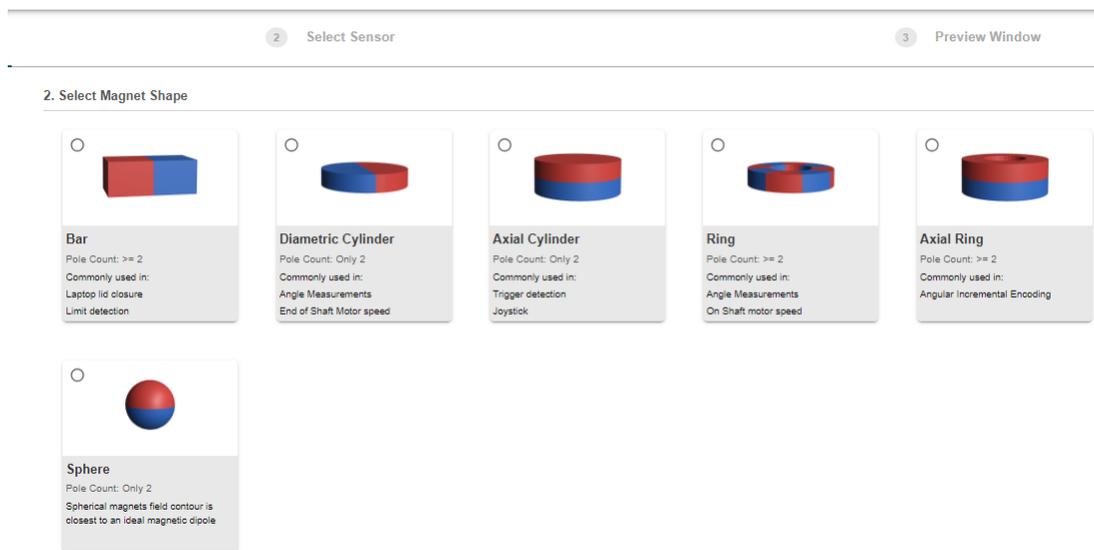


图 2-10. 工具菜单

对于双传感器拇指操纵杆，预期行为所需的输入如图 2-11 所示。

Magnet
Sensor
Sim Settings

▼ Magnet Specifications ⓘ

Magnet Shape: Bar

Poles: 2

Magnet Material: Sintered Neodymium I...

Material Grade: N42

Select Remanence Value: Average Remanence ...

Remanence (Br)	Temperature
1310 mT at 20°C	20 °C
Temperature Coefficient	Coercivity
-0.12 %/°C	11.5 KOe

▼ Magnet Geometry ⓘ

Magnet Length - X dim: 2.46 mm

Magnet Width - Y dim: 0.95 mm

Magnet Height - Z dim: 3.45 mm

▼ Magnet Motion ⓘ

Origin Position

Position		
X Axis	Y Axis	Z Axis
2.13	-1.23	0
	mm	mm

Angle

X Axis	Y Axis	Z Axis
90	0	-30
	Deg	Deg

Final Position

Position		
Arc Length		
60		
	Deg	

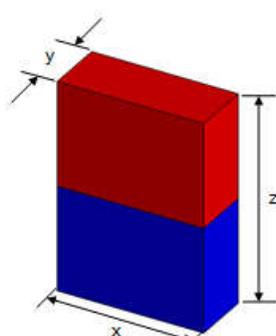
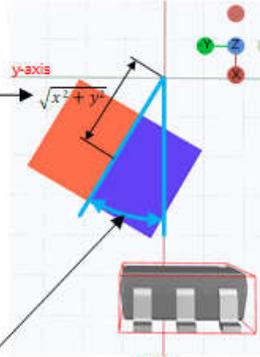
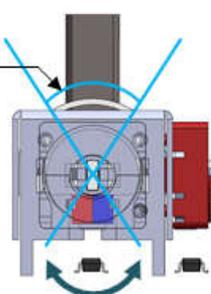




图 2-11. 2 磁体和传感器拇指操纵杆输入

Magnet
Sensor
Sim Settings

▼ Sensor Details
⊙

Edit Sensor Selection

Sensor Select
Sensor 1 : TMAG5273 ▼

▼ Sensor Specifications
⊙

Sensor Family		Multi-axis linear & angle po	
Device		TMAG5273	
Part Number		TMAG5273A1QDBVR ▼	
Package	SOT-23	Pin Count	6
Max Vcc	Min Vcc	Applied Vcc	
3.6	V 1.7	V 3.3	V
Max Input	40	mT	Min Input -40 mT
Input Referred Noise	X: 125 Y: 125 Z: 68 μ RMS		
Sensitivity	51.2 LSB/mT		
Sensitivity DirY-X-Z	Quiescent O/P	0	code
Temperature Compensation	0		%C
Averaging	1		Samples

▼ Sensor Position
⊙

Position Properties
⊙

Position

X Axis	Y Axis	Z Axis
<input type="text" value="6.01"/> mm	<input type="text" value="0.4"/> mm	<input type="text" value="0.12"/> mm

Angle

X Axis	Y Axis	Z Axis
<input type="text" value="0"/> Deg	<input type="text" value="-90"/> Deg	<input type="text" value="0"/> Deg

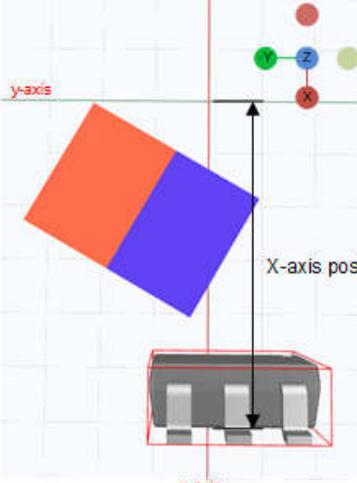
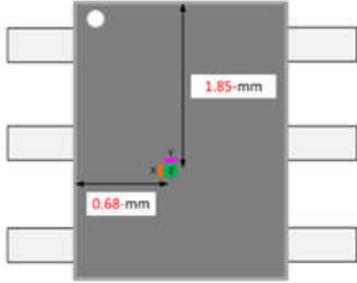



图 2-12. 2 磁体和传感器拇指操纵杆输入

Plots

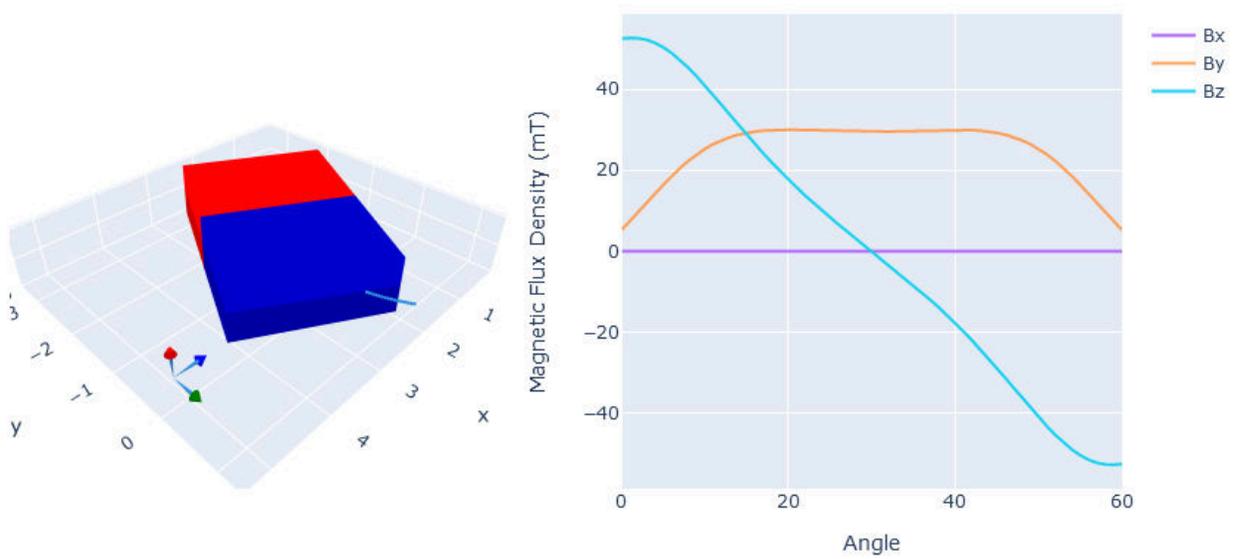


图 2-13.2 传感器拇指操纵杆输入的工具输出

2.4 后期处理

无论游戏手柄是使用 1 个磁体和 1 个检测器件还是 2 个磁体和 2 个检测器件实现的，都需要进行一些后处理以将测得的数据转换为对最终用户有意义的位置数据。后处理采用与游戏手柄沿 x 轴和沿 y 轴的俯仰度相对应的测量值来推断旋转角度和俯仰角度。

对于 2 磁体 2 器件设计，校准涉及找到在两个传感器上观察到的 z 轴磁场的全局最大值和最小值。一个器件的 z 场值与 x 方向上的游戏手柄移动相关，而另一个器件的 z 场值与 y 方向上的游戏手柄移动相关。限制的测量值可作为参考，用于比较未来的测量值。要找到这些限制值，用户需要如图 2-14 所示在运动区域周边移动游戏手柄，并且器件采样率明显快于用户在运动区域周边移动游戏手柄的速率。这会提高校准阶段的空间分辨率，并确保传感器检测到理想全局最大值和最小值的概率更高。这些值预计会在 0°、90°、180° 和 270° 处找到，如果用户只是尝试通过仅移动到这些视觉感知角度来进行校准，则用户很容易错过几度。

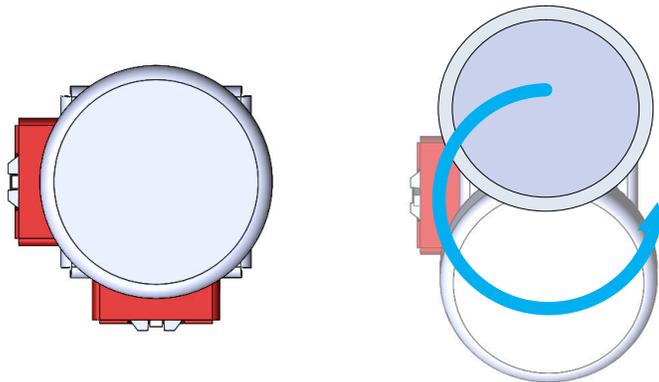


图 2-14. 用于确定全局最大值和最小值的圆周运动

由于旋转平面中器件和传感器之间的意外偏移预计会影响测量的线性度，因此可以确定默认的静止位置和游戏手柄限制测量值。这可以在拇指操纵杆处于静止位置时进行测量。或者，如果预计静止位置具有一定的容差，则可以使用通过先前确定的全局最大值和最小值计算平均位置。

通过计算 x 和 y 限制值以及中间静止位置，可以计算旋转值。[方程式 1](#) 说明了利用的基本概念。但是，在这种情况下，所有测得的 x 和 y 值都相对于校准期间找到的全局最大值和最小值进行了归一化，如[方程式 2](#) 所示。

$$\text{角度} = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (1)$$

$$\text{角度} = \arctan\left(\frac{y_{\text{component}}}{x_{\text{component}}}\right) = \arctan\left(\frac{\frac{Y_{\text{measured}} - Y_{\text{Center}}}{Y_{\text{Bound}} - Y_{\text{Center}}}}{\frac{X_{\text{measured}} - X_{\text{Center}}}{X_{\text{Bound}} - X_{\text{Center}}}}\right) \quad (2)$$

由于归一化使所有 x 分量和 y 分量值介于 0 和 1 之间，因此仅计算 0 和 90° 之间的角度。因此，需要为 $x_{\text{component}}$ 和 $y_{\text{component}}$ 分配符号。符号的分配方式取决于磁体极性，如果组装不一致，磁体极性可能会有所不同。[图 2-15](#) 展示了可以针对 2 磁体 2 传感器方向安装磁体的四种不同方式。因此，可以使用与以下伪代码类似的函数。

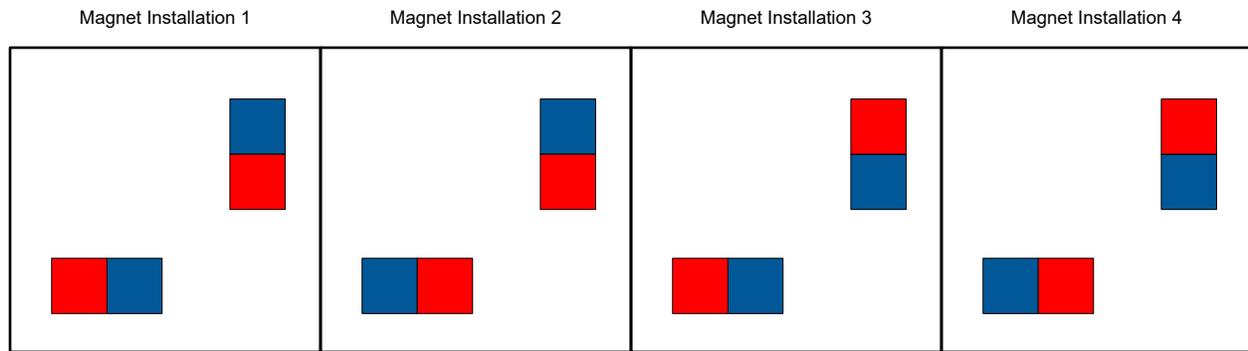


图 2-15. 磁体安装

```
float AngleComponent(const float measured, const float Left_Down_Bound, const float Right_Up_Bound,
const float Center)
{
    float angleComponent;
    if(measured > Center)
    {
        if(Left_Down_Bound > Center)
        {
            angleComponent = -(measured-Center)/(Left_Down_Bound-Center);
        }
        else if(Right_Up_Bound > Center)
        {
            angleComponent = (measured-Center)/(Right_Up_Bound-Center);
        }
    }
    else if(measured < Center)
    {
        if(Left_Down_Bound < Center)
        {
            angleComponent = -(measured-Center)/(Left_Down_Bound-Center);
        }
        else if(Right_Up_Bound < Center)
        {
            angleComponent = (measured-Center)/(Right_Up_Bound-Center);
        }
    }
    return angleComponent;
}
```

反正切函数 (通常缩写为 $\text{atan}()$) 的一个缺陷是它计算的值介于 -90° 和 90° 之间。要获得圆周中的整个角度范围, 必须使用 $\text{atan2}()$ 。但是, 该函数计算的值介于 -180° 和 180° 之间。因此, 如果严格要求角度为正值, 则可以在计算中包含一个三元运算符, 如 [方程式 3](#) 所示。

$$\text{角度} = \text{atan2}\left(\frac{y_{\text{component}}}{x_{\text{component}}}\right) + (y_{\text{component}} < 0 ? 360 : 0) \quad (3)$$

只要运动区域边界俯仰角已知, 就可以使用 [方程式 4](#) 通过测量数据推断游戏手柄俯仰度。

$$\text{角度} = \text{间距}_{\text{max}} \times \left(\frac{x^2 + y^2}{x^2_{\text{最大值}} + y^2_{\text{max}}} \right) \quad (4)$$

2.5 原型设计和基准测试

虽然仿真有助于初步设计和可行性评估, 但验证实际性能需要原型设计和基准测试。仿真有时候不会考虑所有参数, 因此无法完全匹配实际的测试用例。基准测试可以揭示设计仿真的一些可能差异, 从而揭示初步设计阶段中被忽略的细微影响以及制造和组装过程中可能发生的偏移。

为了评估硬件设计, 通过下图所示的设置同时捕获 [TMAG5273](#) 测量值和游戏手柄移动。在该设置中, 手机摄像头捕获触发器移动的视频, 同时计算机屏幕在 [TMAG5273EVM GUI](#) 中捕获测量输出。然后, 两个视频文件通过可闻脉冲同步。在手机捕获的视频中, 一个指针连接到游戏手柄轴, 与以铰链原点为中心的量角器相比, 有助于直观地显示游戏手柄角度。为了简化评估, 运动受到 3D 打印槽的限制, 一次只允许一个游戏手柄铰链旋转。



图 2-16. 拇指操纵杆硬件测试

通过 [图 2-16](#) 设置收集了 [图 2-17](#) 中的测量值。

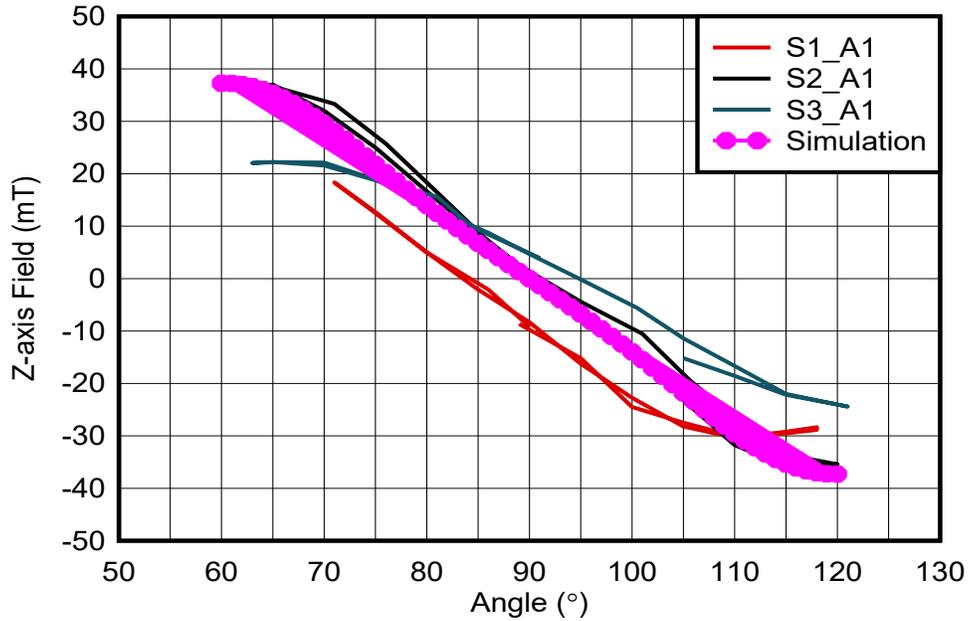


图 2-17. 最终硬件测试数据

为了评估软件处理算法，使用了一个单独的测试设置。如图 2-18 所示，一台 3D 打印机配备了一个特殊附件来控制游戏手柄的移动，并生成自定义 g 代码来指示 3D 打印机如何移动。通过该测试设置收集了图 2-19 中的数据。

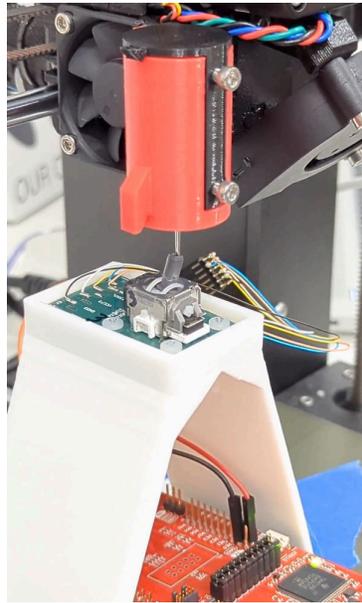


图 2-18. 软件测试设置

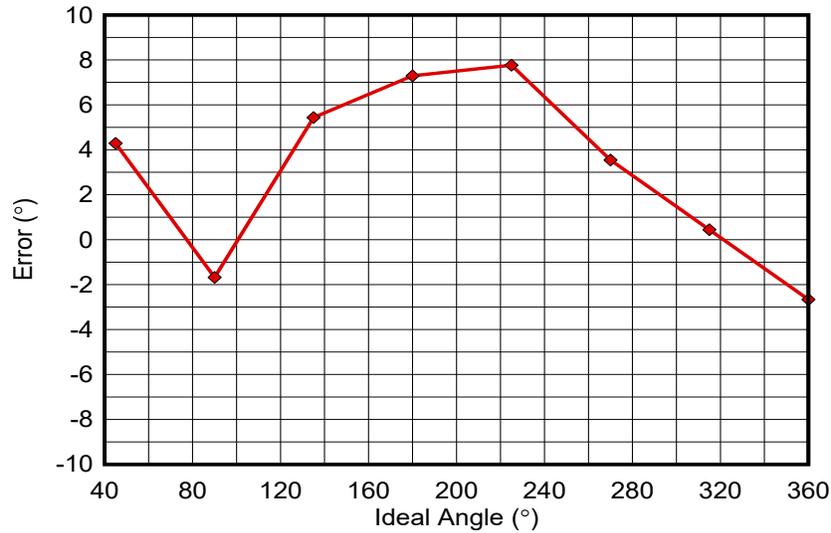


图 2-19. 最终软件数据

本节中提供的数据对应于在调试测试设置并针对某些组装缺陷进行调整的各种迭代之后获取的最终设置。先前收集的数据揭示了初步设计计算中未充分考虑的潜在问题。

2.6 误差源

有多种可能的误差源，其中许多误差源与制造和组装相对应。在基准评估的过程中，此类误差源易于识别，因此在投入大规模生产之前，基准测试是一种良好的必要做法。以下列表显示了针对此具体设计确定的所有可能的误差源，包括在初步设计中需要考虑的误差源：

- 制造限制和机械容差
- 在线性区域之外运行
- 器件偏移量
- 翻滚、偏转和俯仰
- 磁体差异
- 器件差异和温度漂移
- 外部磁场
- 附近材料的影响
- 基准设置误差
- 电源容差
- 测量精度

本应用手册中进行原型设计的 2 磁体 2 传感器拇指操纵杆的最显著误差导致数据曲线表现出迟滞现象。一个重要的误差源是材料选择和制造容差引起的机械迟滞，而另一个重要的误差源是附近材料的磁性。这些误差在未加考虑时非常重要，会影响后处理校准和计算结果。在解决机械迟滞之前，图 2-20 中的硬件数据表现出明显的迟滞并导致图 2-21 中显示的较大误差。其他显著误差包括偏移和支点滑移。

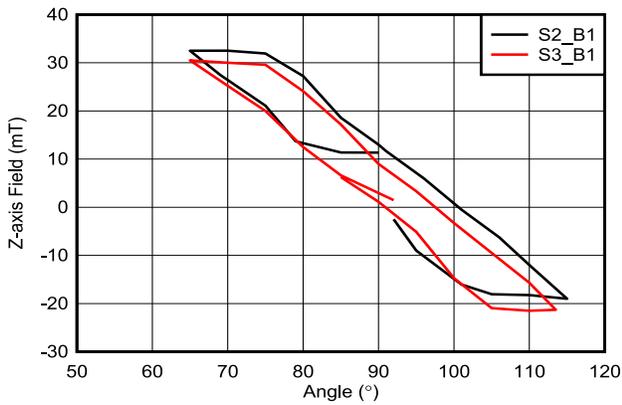


图 2-20. 调试和调整前的初始硬件测试误差

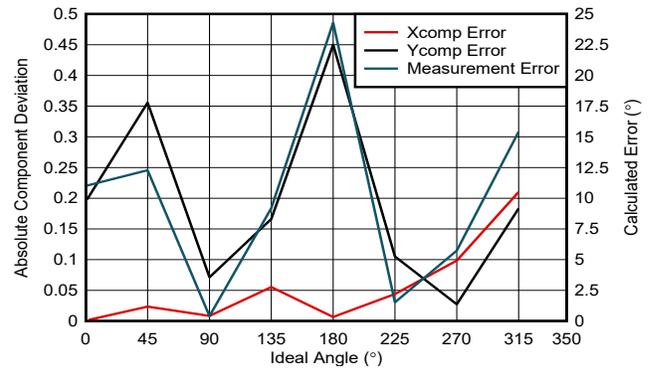


图 2-21. 调试和调整前的初始软件测试误差

2.6.1 机械迟滞

我们发现摩擦和弹性模量使本应用手册中测试的 2 传感器 2 磁体拇指操纵杆产生机械迟滞。因此，操纵杆部件看起来在移动，而磁体没有移动，从而产生类似于图 2-22 所示的移动，其中左侧拇指操纵杆处于默认静止位置，磁体按预期居中，而对于右侧拇指操纵杆，操纵杆向左倾斜，但磁体没有移动任何可分辨的距离。器件容差和具有低摩擦系数的材料对于最大程度地减小该误差非常重要。

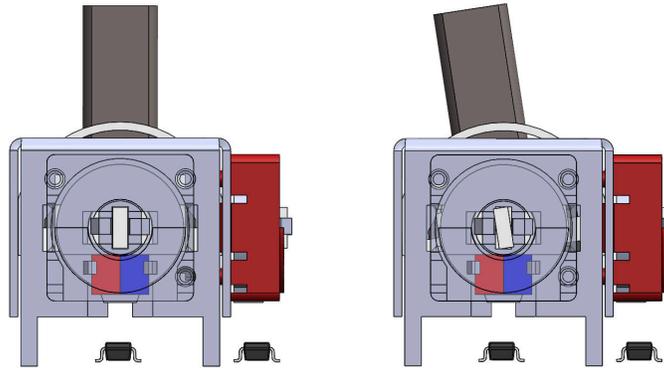


图 2-22. 机械迟滞

2.6.2 附近材料的影响

如误差列表中所述，附近的材料可能会影响测量结果。铁、钴、镍和钢等高磁导率材料不仅可以重定向磁场，使其通过磁阻最小的路径，还可以抵御与磁体运动相关的退磁。在 ANSYS 瞬态仿真中，我们可以观察到如果将磁体和传感器放置在由镍等导磁材料制成的结构体附近，则当运动方向反转时，可以观察到迟滞现象，如图 2-23 所示。

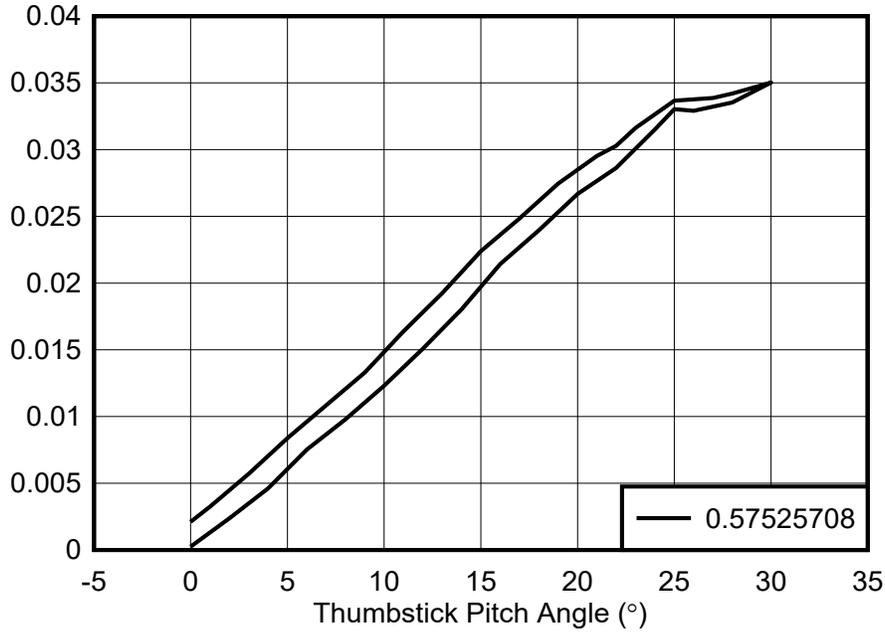


图 2-23. 磁滞

2.6.3 支点滑移

在设计部分模拟的出色选择方案中，支点是固定不动的。但是，根据游戏手柄组件的容差，支点可能会有一些滑移空间。这可能会改变磁体的路径，如图 2-24 所示。

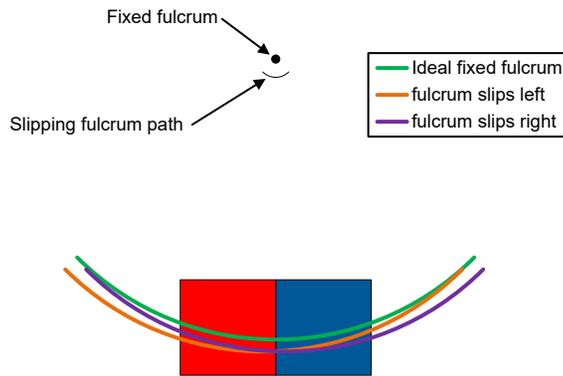


图 2-24. 支点滑移

2.6.4 偏移

偏移对应于磁体未在器件检测元件上正确居中，如图 2-25 中的蓝色框所示。图 2-25 中定义的沿 y 轴的偏移没有沿 x 轴或 z 轴的偏移那么糟糕。增加沿 z 轴的偏移量会减小器件测量的磁场强度。而沿 x 轴的偏移会改变磁场特性并减小可用的线性范围。

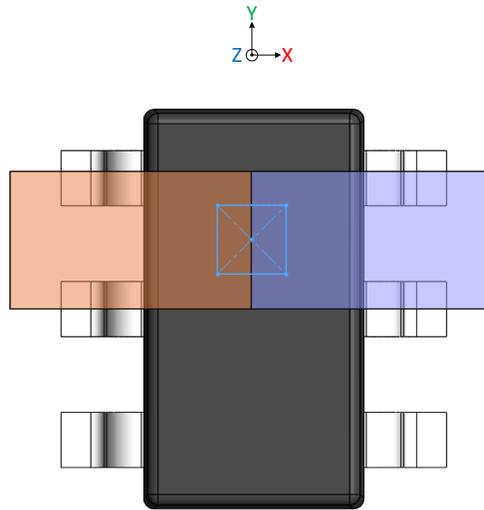


图 2-25. 在器件 zx 平面中旋转的磁体

3 控制杆设计

控制杆在功能上与前面讨论的游戏手柄相似，但通常一次只能沿单个旋转轴运动。

3.1 确定外形尺寸

对于该应用，从功能上讲，传感器或磁体都可以位于控制杆的枢轴部分上，但同样，在传感器位置保持固定的情况下移动磁体要方便得多。

3.1.1 选择机械实现

有两种典型的对齐方式可以直接实现。传感器 PCB 位于与旋转磁体的旋转平面共面的位置，或者安装 PCB 时传感器平行于旋转平面。[常见的控制杆对齐方式](#)展示了两种对齐方式。虽然在使用 3D 霍尔效应传感器时可以自由调整 PCB 的方向，但为简单起见，将使用该约定。

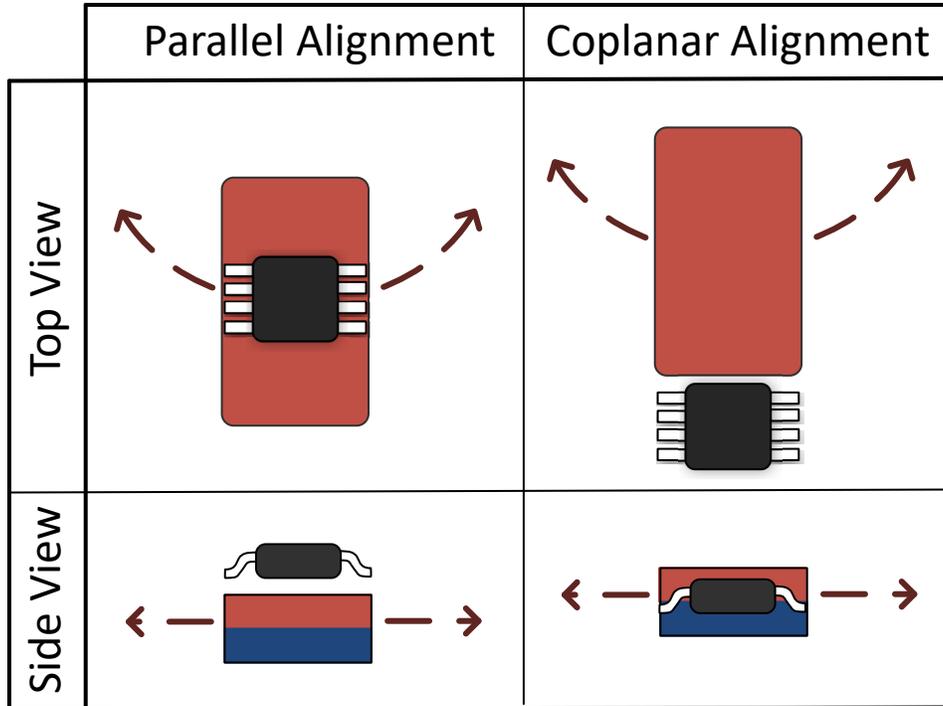


图 3-1. 常见的控制杆对齐方式

在许多情况下，共面安装需要更大的系统占用空间。因此，将在以下示例中探讨平行安装，以在转向灯控制柄中保持最小的设计尺寸。

另一个需要考虑的因素是控制杆的行程范围。[控制杆运动类型](#)展示了常见的汽车应用。与使用传统控制杆实现[电子换挡器设计](#)时可能遇到的情况类似，全向控制杆只能围绕单个轴旋转。[转向柱控制杆](#)（例如转向灯或挡风玻璃雨刮器控制杆）通常能够沿两个方向倾斜，支持两个旋转轴。

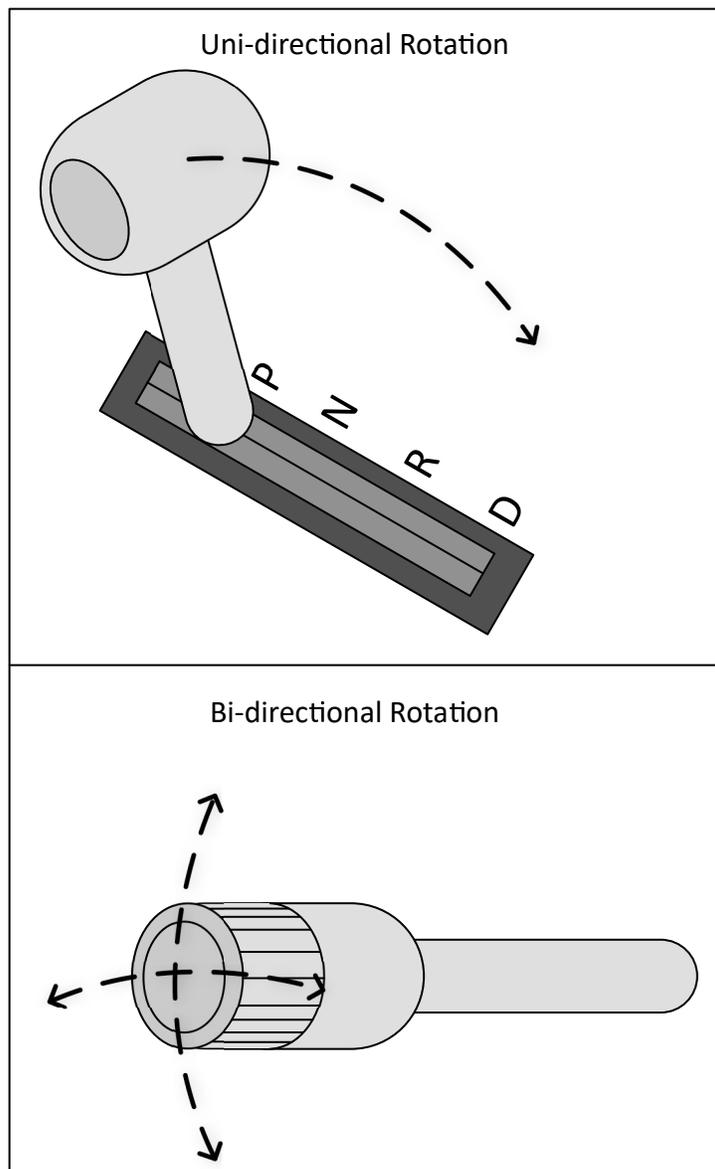


图 3-2. 控制杆运动类型

在未使用时，转向灯控制杆位于中间位置，但在任何时候都可以将控制杆拉向驾驶员，以切换超车闪光灯功能。该超车闪光灯功能会暂时启用远光前照灯，直到驾驶员松开控制杆。该示例将演示如何使用[转向灯控制柄](#)中所示的单个霍尔效应传感器对量产转向灯模块进行改造。

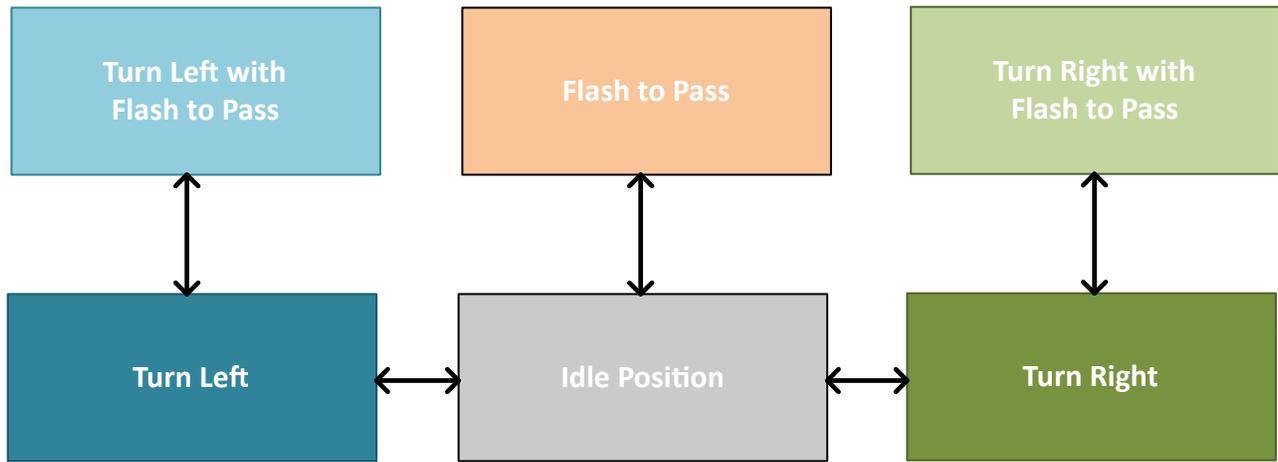


图 3-3. 转向灯功能状态



图 3-4. 转向灯控制柄

3.2 磁体传感器放置

如节 2 中所述，务必采用适当的方式放置磁体，以充分利用传感器的线性输入范围，而不会使输入饱和。扫描 3D 霍尔效应传感器附近的磁体位置将产生类似于[控制杆输入磁场示例](#)中所示的行为。通常，磁场矢量的一个分量呈三角形或 S 形，而其他两个分量呈钟形。每个矢量分量的幅度将取决于对齐情况。

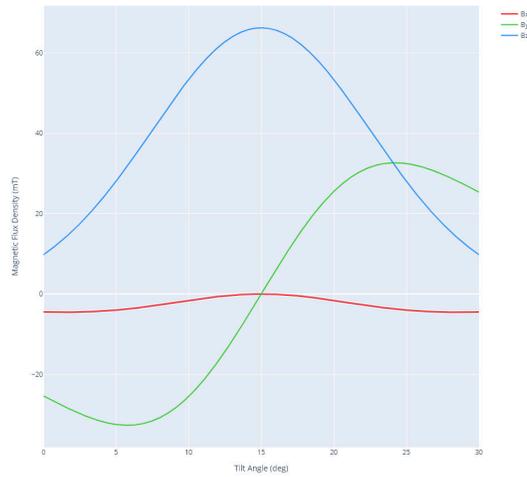


图 3-5. 控制杆输入磁场示例

为了最大限度地增大转向灯控制柄等控制装置的输入范围，磁体的中点位置必须位于磁体上方的中心。在本例中，磁体没有位于控制装置的旋转支点上，因此有必要使用类似于节 2 中介绍的单个多轴检测器件，同时使用图 3-1 中所示的配置之一。

可以在控制杆输入磁场示例中观察到该要求的第一个原因。当控制杆相对于空闲位置旋转至 +15 或 -15 度时，如果观察 B_z ，我们可以看到混叠可能带来的挑战。即使使用 B_y 分量，也有距离中心 +/- 10 度以上的位置，此时输入磁场可以映射到第二个位置。

此外，如果仅观察一个轴，可以看到用于启用超车闪光灯的控制杆拉动会增加磁体和传感器之间的距离。如果仅使用单个检测轴，则该运动也可能变得模糊，可能与左转或右转设置相混淆。

3.3 设计计算

要将传感器正确放置在现有的转向柱控制模块中，必须了解控制杆运动可能产生的预期磁场

在该测试用例中，磁体的理想安装位置是靠近控制柄轴的末端，控制杆的外露部分在此处外露。开口约为 12mm × 6mm，具有该尺寸的磁体易于安装，如转向灯磁体位置 所示。选择了 TMAG5170-Q1 作为安装到设计中的传感器，同时使用连接到 TI 传感器控制板的 TMAG5170UEVM。

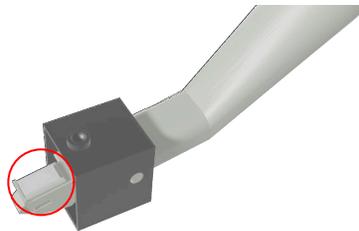


图 3-6. 转向灯磁体位置

对磁体和 TMAG5170-Q1 传感器的可用安装位置进行了测量，并使用测量结果来模拟 3D 霍尔效应传感器的预期输入（使用 TI 磁感应模拟器）。

首先，当转向灯控制杆经过标准转向位置时，模拟输入磁场分量如模拟转向灯输入磁场 所示，检测元件和磁体行程之间的对齐如转向灯磁体运动 所示。

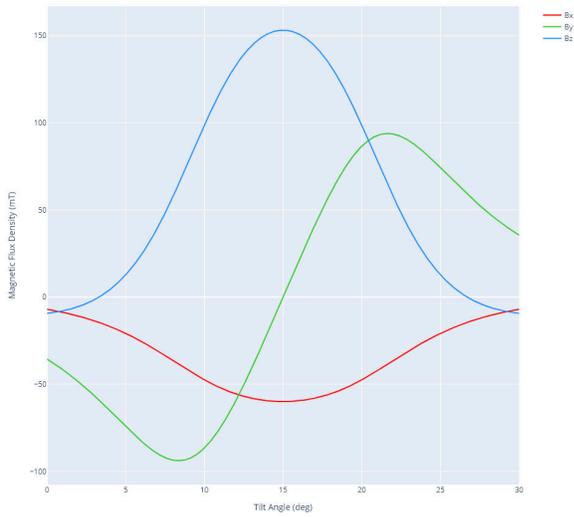


图 3-7. 模拟转向灯输入磁场

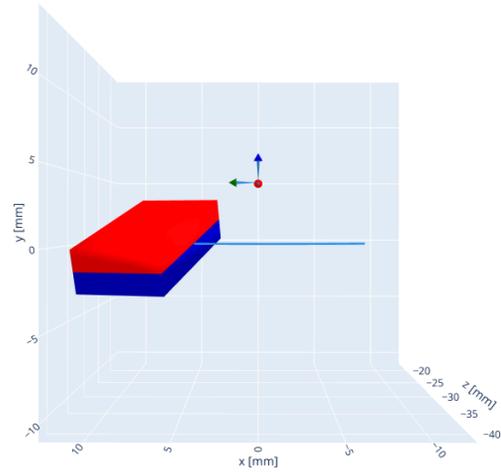


图 3-8. 转向灯磁体运动

围绕 Z 轴 (蓝色) 的磁体旋转模拟表明, 4.3mm 的间距可以提供超过 150mT 的 B_z 分量, 需要将 **TMAG5170A2-Q1** 的输入磁场范围设置为 $\pm 300\text{mT}$ 。设置该范围后, 对超车闪光灯控制杆拉动进行了二次模拟, 以观察用户增加传感器范围时的最小预期输入磁场。

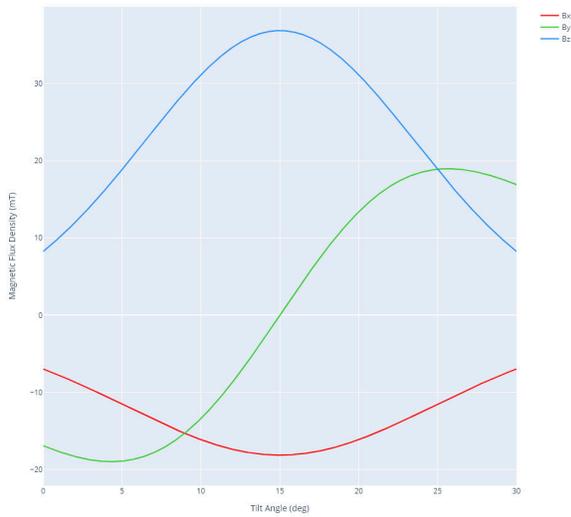


图 3-9. 模拟超车闪光灯输入磁场

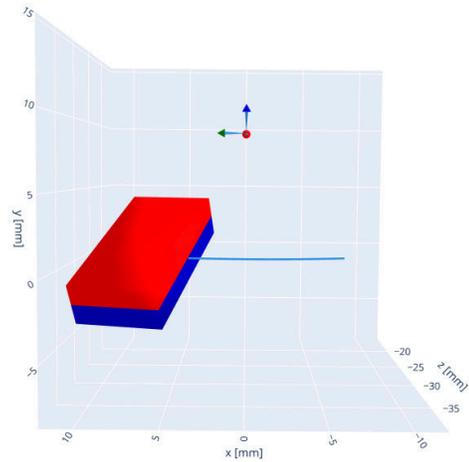


图 3-10. 超车闪光灯磁体运动

由于在使用超车闪光灯期间增加了倾斜度, 因此全部三个磁场矢量分量的幅度都明显减小, 但仍然存在足够大的输入信号, SNR 不会成为一个问题。

3.4 原型设计和基准测试

凭借对输出格式的高度信心，控制杆设计被组装并安装到现有的汽车转向柱控制模块中。

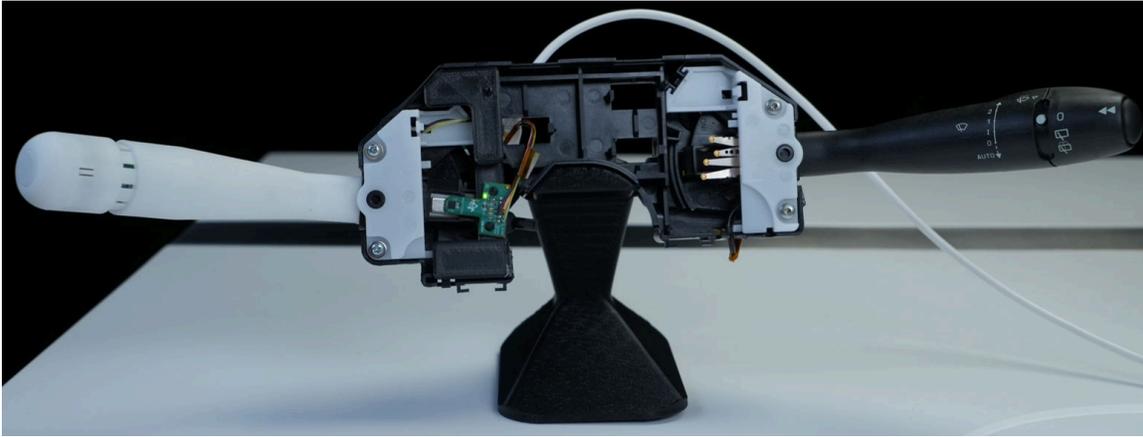


图 3-11. 汽车转向灯演示

然后，在转向灯控制柄通过所有操作位置时，会持续传输全部三个轴的传感器数据。在绘制 XYZ B 场数据中所显示的收集到的 X、Y 和 Z 分量数据时，会显示三个截然不同的行程弧线。

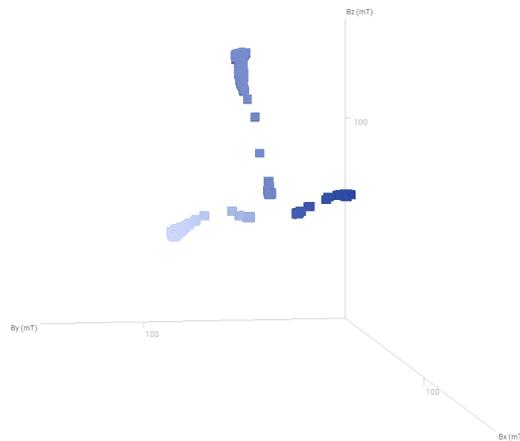


图 3-12. XYZ B 场数据

可以充分利用原始的 X、Y 和 Z 分量数据来创建可用于定义六个操作位置中的每一个的查找表。然而，根据这些结果执行矢量角度计算可提供更清晰的决策树。这些矢量角度计算可以提供更接近于球形的基准，这在提供多轴数据的游戏手柄和控制杆应用中非常有用。这些矢量角度计算称为 α 和 β ，在与总矢量幅度结合时可描述总磁场矢量。

$$\alpha = \operatorname{atan}\left(\frac{\sqrt{B_z^2 + B_x^2}}{B_y}\right) \quad (5)$$

$$\beta = \operatorname{atan}\left(\frac{\sqrt{B_z^2 + B_y^2}}{B_x}\right) \quad (6)$$

$$\text{magnitude} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (7)$$

为了更好地理解方程式 5 至方程式 7，请考虑 α 和 β 角矢量图中的矢量图，这些矢量图使用相同的源矢量来演示每个角。

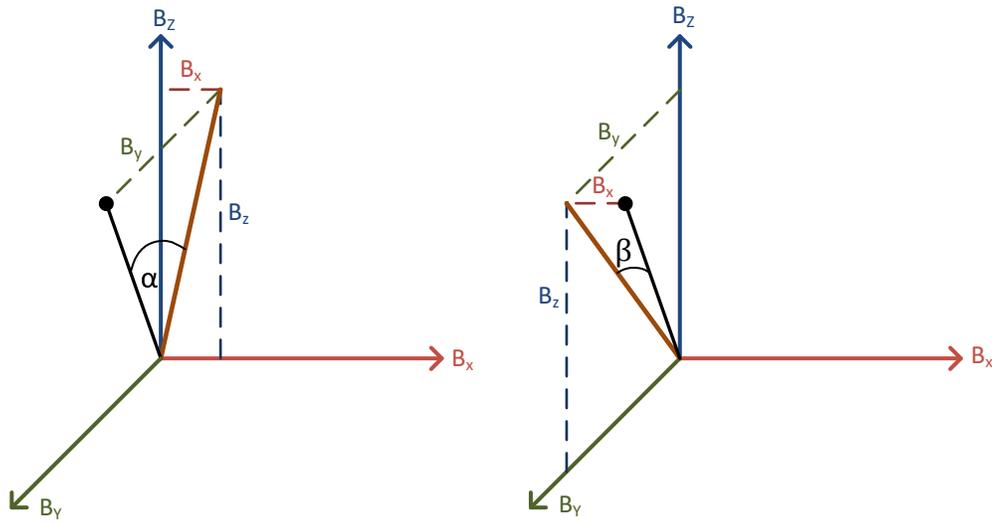


图 3-13. α 和 β 角矢量图

通过将方程式 5 至方程式 7 应用于 XYZ B 场数据中的捕获数据，可以轻松识别角度的线性变化。

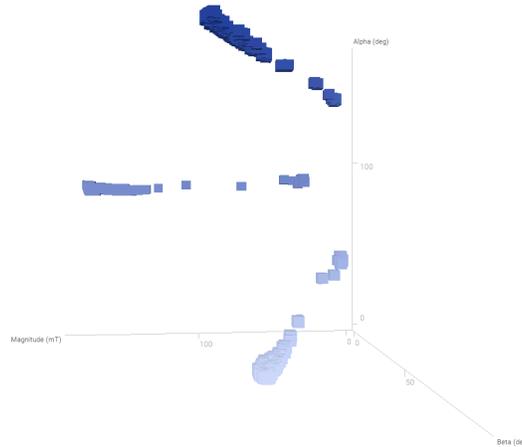


图 3-14. 计算得出的 α - β 数据

在绘制 α 角和 β 角与矢量幅度的关系图后，可以清楚地看到，方程式 5 的 α 角结果为每个转向灯位置定义了三个独立的区域。方程式 7 中的矢量幅度可用于轻松定义控制杆拉动。此外，现在对控制杆拉动操作有线性响应，该响应可用于指示控制杆被拉动的距离。如果需要，还可以使用 α 和 β 一起为转向灯控制柄定义更多的倾斜角。

[TMAG5170-CODE-EXAMPLE](#) 和 [TMAG5x73-CODE-EXMAPLE](#) 中的示例代码都提供了有关如何实现这些计算的参考。

3.5 误差源

检查图 3-12 或图 3-14 中的数据图确实可以发现绝对位置的一些分散和不确定性。这种变化是由于组装的机械容差不严格而导致的。传感器足够灵敏，可以捕捉到磁位置的微小变化，并且有意摆动控制装置，使其达到每个位置的机械容差，以明确定义运行状态的限制。

除此之外，以输入为基准的噪声和灵敏度误差是确定测量误差时需要考虑的关键因素。以输入为基准的噪声会在输出信号上产生随机变化，这会影响最终的角度计算。对连续测量结果取平均值可以减小该误差源的影响。实际上，RMS 噪声值与样本数平方根成反比。

灵敏度误差是器件信号链增益变化的结果，可能会导致轴之间和器件之间的振幅变化。该误差对角度测量的重要性往往会根据各个轴之间的不匹配程度而变化。

此外，必须考虑传感器的温度和寿命漂移。这种漂移可能会导致偏移量和灵敏度发生微小变化。任何漂移的显著性都会影响 α 和 β 角度计算，并且会导致控制杆的定义位置发生一些微小的变化。在传感器内部应用温度补偿会极大地降低温度变化导致的任何影响。

作为参考，请考虑以下 3D 霍尔效应传感器及其数据表电气表以获得完整的性能摘要。

表 3-1. 3D 霍尔效应传感器

器件	说明
TMAG5170	具有 SPI 接口和集成 CORDIC、分辨率为 1/4 度的商用级 3D 线性霍尔效应传感器
TMAG5170-Q1	具有 SPI 接口和集成 CORDIC、分辨率为 1/4 度的汽车级 3D 线性霍尔效应传感器
TMAG5170D-Q1	具有 SPI 接口和集成 CORDIC、分辨率为 1/4 度的双芯片汽车级 3D 线性霍尔效应传感器
TMAG5173-Q1	具有 I2C 接口和集成 CORDIC、分辨率为 1/16 度的汽车级 3D 线性霍尔效应传感器
TMAG5273	具有 I2C 接口和集成 CORDIC、分辨率为 1/4 度的商用级 3D 线性霍尔效应传感器
TMAG3001	具有 I2C 集成 CORDIC、唤醒检测功能、分辨率为 1/16 度的商用级 3D 线性霍尔效应传感器

4 总结

本应用手册演示了霍尔效应传感器可用于游戏手柄和控制杆。每个示例的设计流程都从确定一般机械外形和可能的磁性实现开始。随后，通过 TI 开发的 [TI 磁感应模拟器](#) 执行设计计算。该工具初步考查为游戏手柄或控制杆选择的磁性位置检测实现的大致可行性。在解决了硬件设计问题后，提供了有关如何将霍尔效应传感器测量值转换为与最终用户在感知上更相关的角度值的软件算法。

在后处理算法之后，提供了关于原型设计和基准测试的讨论。基准测试旨在证实霍尔效应传感器可用于游戏手柄和控制杆（而不仅仅是仅由仿真支持的假设推测）的想法。不过，这些基准测试确实表明可能相对于仿真结果存在偏差，有助于发现在设计的早期阶段未考虑到的误差。因此，本应用手册中提供了设计的显著误差。借助本文中提供的设计流程，读者可以获取相关的详细信息以快速模仿、迭代并可能改进所提供的。

5 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [TMAG5273 具有 I2C 接口的低功耗线性 3D 霍尔效应传感器](#) 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [增强测距工具](#)。
3. 德州仪器 (TI), [TMAG5170-CODE-EXAMPLE](#)。
4. 德州仪器 (TI), [TMAG5x73-CODE-EXMAPLE](#)。
5. 德州仪器 (TI), [电子换挡器设计](#)。
6. 德州仪器 (TI), [转向柱控制杆](#)。
7. 德州仪器 (TI), [TMAG5170UEVM](#)。
8. 德州仪器 (TI), [TI 传感器控制板](#)。
9. 德州仪器 (TI), [TI 磁感应模拟器](#)。
10. 德州仪器 (TI), [TMAG5170A2-Q1](#)。

6 修订历史记录

Changes from Revision * (June 2023) to Revision A (December 2023)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 通篇添加了 <i>TMAG3001</i>	1

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司