

Scott Bryson

Position Sensing

引言

TMAG5170、TMAG5173 或 TMAG5273 等多轴线性霍尔效应传感器能够跟踪旋转磁体的磁场方向。鉴于磁场矢量分量彼此相差 90 度，可以快速确定磁体的绝对位置。

虽然上述器件能够使用 CORDIC 算法生成角度结果，但有时需要应用运行平均值，获得扩展的浮点精度，或对 3D 空间中的完整矢量执行计算。可以使用 CORDIC 执行向量计算，确定平面、球形或圆柱形的角度和大小。这些测量需要在微控制器内执行计算。当磁体快速旋转时，可以更大限度地减小此计算中任何不必要的延迟，从而实现最低的系统延迟。

CORDIC

坐标旋转数字计算器 (CORDIC) 算法是通过一系列二进制搜索近似值来计算二维平面内的角度的过程。此过程首先执行坐标空间旋转，目标为以一维向量作为结束。从理论上讲，这是使用二进制搜索的最高效方法，其中，矢量从 45 度开始旋转。对于每一步，可确定矢量所在的象限，然后顺时针或逆时针旋转上一次旋转的一半程度。此过程可进行固定次数的迭代，算法的输出会生成原始矢量的角度和大小。

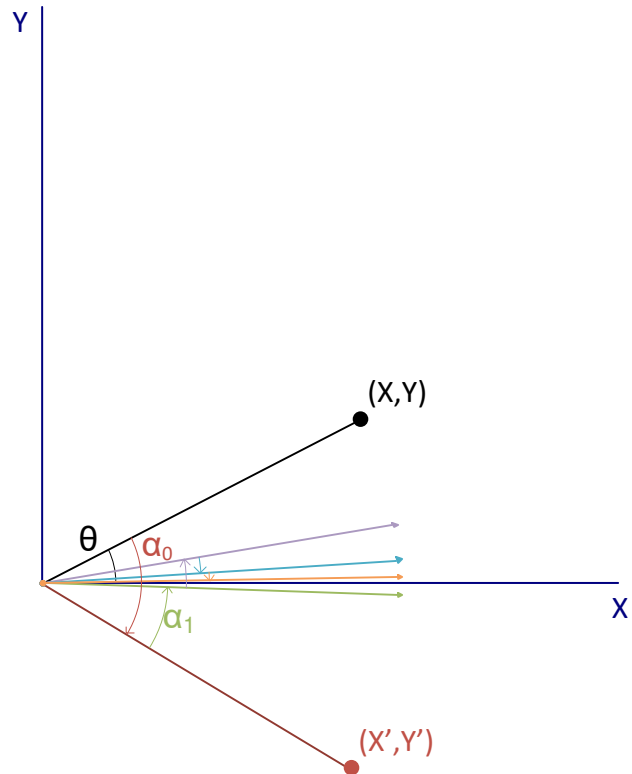


图 1. 五步矢量旋转

在应用中，最好建立旋转模式，并使用数字逻辑应用该模式。要生成坐标空间旋转，需要乘以旋转角度的正切值。使用真正的二进制搜索时，前五次迭代需要在查找表中存储每一步的浮点数。表 1 展示了此示例。

表 1. 旋转角度的反正切结果

α_n - 旋转角度，单位为度	$\tan(\alpha_n)$
45	1
22.5	0.414
11.25	0.199
5.625	0.98
2.8125	0.049

只要使用的旋转角度大于或等于以上每一步对应的值，就有可能收敛到最终结果。因此，乘以 $\tan(\alpha_n)$ 的替代

方法是简单地除以 2，即向右移一个位。表 2 中的实际旋转角度是 2^{-n} 反正切的计算值。

表 2. 向右移位的旋转角度

2^{-n}	实际旋转角度，单位为度
1	45
0.5	26.565
0.25	14.036
0.125	7.125
0.0625	3.576

对于每一步，向右移位的结果都会略大于真正的二进制值。因此搜索可能需要增加一次或两次迭代，但这样可以节省对查找表进行解析和加载结果的时间。移位操作可在更短的时间内完成。

有关应用此算法前的公式推导的更多分步详细信息，请参阅 [使用多轴霍尔效应传感器进行角度测量](#) 应用报告。TMAG5170-CODE-EXAMPLE 中提供了使用 TMAG5170 实现 CORDIC，以及转换为其他坐标空间的代码示例。

在 TI-SCB 中实现的 CORDIC 以 120MHz 的内部时钟运行，单个 10 次迭代循环的计算时间可低至 $3.4 \mu s$ 。

平面角度计算

一种快速计算角度的方法可以将二维角度和大小的计算扩展到完整的三维空间。使用平面角度可以同时描述 3D 空间中向量的角度和大小。这种方法需要在两个单独的平面（如 ZY 和 XZ）中计算矢量的大小，并计算与相垂直分量大小相关的角度。

公式 1 和 公式 2 展示了如何计算这些角度：

$$\theta_{ZY} = \text{atan}\left(\frac{\sqrt{Z^2 + Y^2}}{X}\right) \quad (1)$$

$$\theta_{ZX} = \text{atan}\left(\frac{\sqrt{Z^2 + X^2}}{Y}\right) \quad (2)$$

例如，假设一个 B 场矢量的分量为 $B_X = 3mT$ 、 $B_Y = 6mT$ 、 $B_Z = 8mT$ 。与 ZY 平面的大小相结合，公式 1 生成的第一个角度结果描述了与 ZY 平行，并相隔此角度的圆周上的任意点。



图 2. YZ 平面角度

类似地，公式 2 描述了与 ZX 平面平行的垂直圆周。

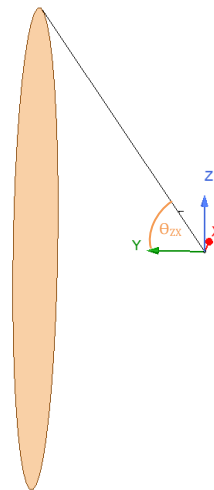


图 3. ZX 平面角度

笛卡尔坐标中的原始矢量位于这两个圆周的交叉处。会产生两个交叉点，因此这些结果仅限于 Z 分量始终为正或始终为负的情况（例如在游戏手柄控制装置中观察到的情况）。

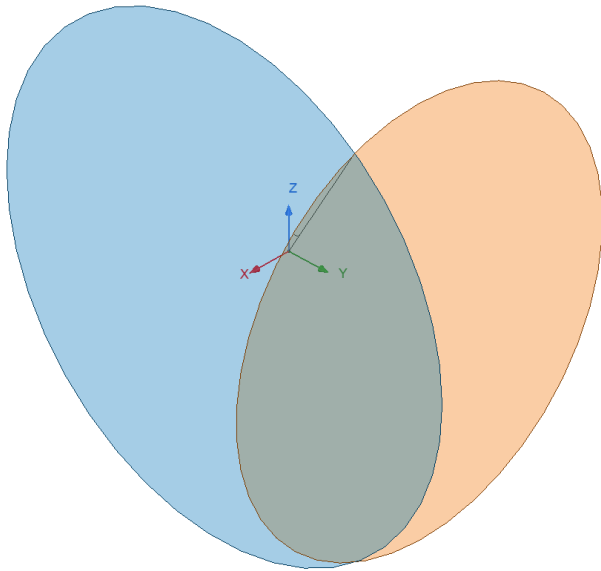


图 4. 合并后的平面角度结果

由于此格式高度依赖角度和大小，因此可以使用 CORDIC 快速计算此结果。在 CORDIC 部分提到的相同条件下执行时，使用 10 次迭代 CORDIC 计算，可以在 $16.2 \mu\text{s}$ 内全部完成平面角度计算。

球形坐标角度

从笛卡尔 XYZ 坐标到球面坐标的转换非常有用，尤其是当磁体与传感器的距离固定并沿径向运行时。[使用绝对位置传感器测量 3D 运动](#) 应用简报介绍了相关转换。

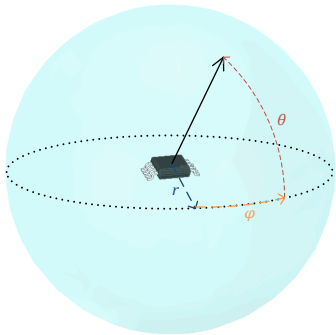


图 5. 球面坐标

使用 X 和 Y 分量找到角度 ϕ 可实现此过程。角度 θ 使用 Z 分量和 XY 大小计算。使用 CORDIC 进行两次这种角度计算，最终大小即半径。

球面计算需要两次 CORDIC 计算才能完成，因此从笛卡尔坐标空间转换的总计算时间约为 $7 \mu\text{s}$ 。

圆柱坐标角度

对于圆柱坐标转换，在 X 和 Y 上使用 CORDIC 进行单次计算， $3.4 \mu\text{s}$ 即可产生半径和角度。更改为此坐标空间时，不必转换 Z。

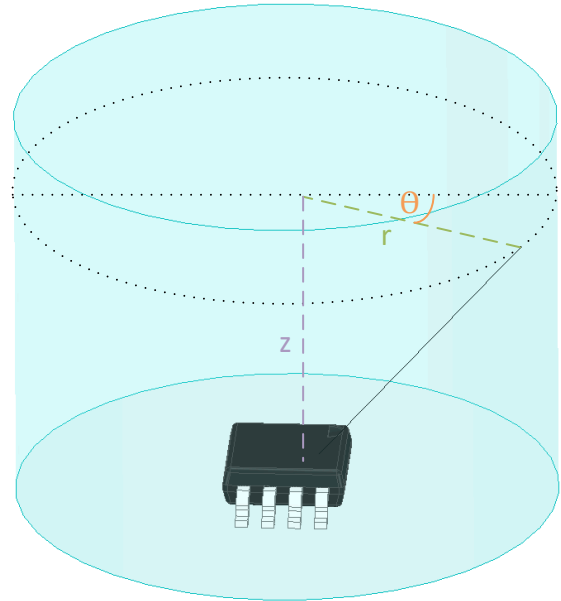


图 6. 圆柱坐标

结论

3D 磁传感器可显著增加现有 B 场的测量范围。根据观察到的运动类型，可以使用几种方法应用每个轴的数据，并将结果映射到有用的坐标系中。游戏手柄和操纵杆应用（例如转向柱控制装置或视频游戏控制器中的转向指示灯）尤其受益于此功能。

有关使用线性霍尔效应传感器及一维或 3D 位置传感器来测量绝对位置的更多详细信息和指南，请参阅表 3 和表 4。

表 3. 备选器件建议

器件	特性	设计注意事项
TMAG5170(TMAG5170-Q1)	具有 SPI 接口、采用 8 引脚 DGK 封装的商用 (汽车) 级线性 3D 霍尔效应位置传感器	高磁矢量灵敏度。该器件能够跟踪各种磁体位置,但仍需要仔细规划,确保所有输入条件都映射到特定位置。
TMAG5170D-Q1	具有 SPI 接口、采用 16 引脚 TSSOP 封装的双芯片汽车类高精度 3D 线性霍尔效应传感器	与 TMAG5170 相同,但传感器芯片堆叠,便于集成冗余。专为功能安全应用而开发,并提供资源来支持高达 ASIL D 级别的设计。
TMAG5273	具有 I2C 接口、采用 6 引脚 SOT-23 封装的商用级线性 3D 霍尔效应位置传感器	与 TMAG5170 类似,但可在 I2C 上运行,具有更宽的灵敏度容差规格。
TMAG5173-Q1	具有 I2C 接口、采用 6 引脚 SOT-23 封装的汽车级线性 3D 霍尔效应位置传感器	在 I2C 上运行,性能与 TMAG5170 相当。

表 4. 相关技术资源

名称	说明
实现超高系统角度感应精度	指导如何设计可用于跟踪长路径运动的传感器阵列
使用绝对位置传感器测量 3D 运动	论述线性输出和开关输出霍尔效应传感器之间的差异。
利用霍尔效应传感器测量旋转运动的绝对角度	介绍霍尔效应以及霍尔效应如何用于制造磁传感器
使用多轴霍尔效应传感器进行角度测量	使用 3D 霍尔效应传感器监控绝对角度位置的指南
TMAG5170EVM	GUI 和附加装置采用精确的三维线性霍尔效应传感器进行角度测量
TMAG5170DEV	GUI 和附加装置使用集成到一个器件中的两个精确的三维线性霍尔效应传感器进行角度测量。
TMAG5273EVM	GUI 和附加装置采用精确的三维线性霍尔效应传感器进行角度测量
TMAG5173EVM	GUI 和附加装置采用三维线性霍尔效应传感器进行游戏手柄测量
TI 高精度实验室 - 磁传感器	一个实用的视频系列,介绍霍尔效应以及如何在各种应用中利用霍尔效应,还包含一个介绍 CORDIC 计算的视频。

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司