

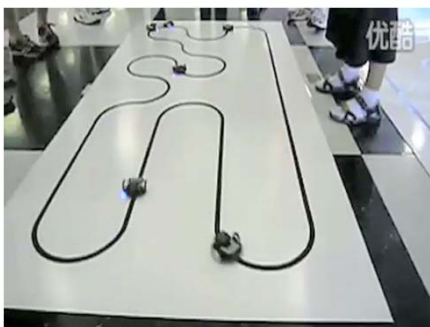
中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 基于载流导线的小范围方向定位技术

薛岳川

巡线机器人定位技术

中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China



原有方法的技术限制

中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

如上面视频所示，现在巡线机器人是一种技术较为成熟的实现方案，它通过二极管和光敏电阻搭建的灰度传感器扫描地面上已经画出的线条来确定位置。但是在实际应用中，它要求

- 线条清晰
- 线条与外界对比度高
- 严格控制外界光照

启发

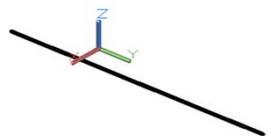
中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

- 将地面线条替换为载流导线，考虑在通有稳恒电流与交变电流两种情况下机器人沿线运动的可行性。

研究条件

中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

- 在实际应用中，导线的安置可能会有S型，直角型等等，但是相对于传感器的大小，都可以近似认为在传感器下的导线是一条直导线，故只讨论直导线的情况。
- 约定坐标系，如下图：



基于稳恒直流的静磁场定位

中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 基于稳恒直流的静磁场定位

### 幻灯片 3

---

1 岳川 薛, 2013/6/22

### 基于稳恒直流的静磁场定位

中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

由比奥—萨伐尔定律可知，真空中电流元  $Idl$  在空间所产生的磁感应强度为

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Idl \times a_r}{R^2 \sqrt{a^2 + b^2}}$$

对于通有稳恒电流  $I$ ，长度为  $L$  的直导线，周围会产生磁场，距离导线为  $r$  处的  $P$  点磁感应强度为

$$B = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \sin\theta d\theta \quad (\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N} \cdot \text{A}^{-2})$$

对于无限长的直导线来说，上式中  $\theta_1 = 0$ ， $\theta_2 = \pi$ ，对上式积分，则有

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos 0 - \cos \pi) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

### 基于稳恒直流的静磁场定位

中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

磁感线是垂直于导线平面内且以导线为圆心的一簇同心圆，越靠近导线的地方，磁感应强度就越大，如图所示。

### 基于稳恒直流的静磁场定位

中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

**磁场类型：静磁场**  
**传感器：线性霍尔元件**

如果在机器人底盘上固定一个探测面轴线垂直于导线并且和地面平行的线性霍尔元件，那么在机器人行进偏离导线方向时霍尔元件的磁通量会发生改变，进而对机器人返回参数进行修正方向修改。

### 基于稳恒直流的静磁场定位

中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

在导线正上方  $h$  处霍尔元件所测得的磁感应强度为

$$B_x(h) = \frac{\mu_0 I}{2\pi h}$$

仍在高度为  $h$ ，水平偏离导线  $x$  时，霍尔元件测得的磁感应强度为

$$B'_x(h) = \frac{\mu_0 I}{2\pi \sqrt{h^2 + x^2}} \cdot \cos\theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi \sqrt{h^2 + x^2}} \cdot \frac{h}{\sqrt{h^2 + x^2}} = \frac{\mu_0 h I}{2\pi (h^2 + x^2)}$$

不妨假定导线电流  $I=1\text{A}$ ，霍尔元件距地平面高度  $h=10\text{cm}$ ，传感器偏移  $x=2\text{cm}$  前后所在水平方向磁感应强度为

$$B_x = 2.000 \times 10^{-6} \text{T} \quad B'_x = 1.963 \times 10^{-6} \text{T}$$

由此可见，偏移前后磁感应强度变化为

$$\Delta B_x = B_x - B'_x = 0.037 \times 10^{-6} \text{T}$$

### 基于稳恒直流的静磁场定位

中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

现有的某种线性霍尔元件部分参数如下表

型号	工作电压 VDD(V)	磁场强度范围(GS)	输出电压 VOT(V)	灵敏度 S(mV/G)	工作温度 TA(°C)	封装形式
HAL95A	4.5-10.5	+/-670	0.5-4.5	3.125	-40~150	T0-92S
HAL49E	3.0-6.5	+/-100	0.8-4.25	1.4	-40~100	T0-92S

表1 部分线性霍尔元件性能参数  
其他常见线性霍尔元件的灵敏度也在相同数量级。

**缺陷：**

- 市面上霍尔元件相对于该磁场灵敏度过低
- 地面处地磁场磁感应强度约为  $4 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4} \text{T}$ ，相对于导线磁场过大，有干扰
- 机器人本身的电子线路激发磁场也会对霍尔元件产生干扰

### 基于交变电流电磁场定位

中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

### 基于交变电流电磁场定位

中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

- 导线电流：正弦交变电流
- 磁场类型：交变电磁场
- 传感器：**两个X方向线圈**或**两个Z方向线圈**

线圈磁通量变化  
↓  
感生电动势变化

Y方向线圈基本没有磁通量，故没有安放价值

### 基于交变电流电磁场定位

中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

直导线附近的磁场可以近似为无限长直导线的磁场分布，其中磁感应强度的两个分量为

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \times \frac{h}{x^2 + h^2} \quad B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \times \frac{-x}{x^2 + h^2}$$

根据法拉第电磁感应定律，感应电动势的大小和通过线圈的磁通量变化率成正比，即

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

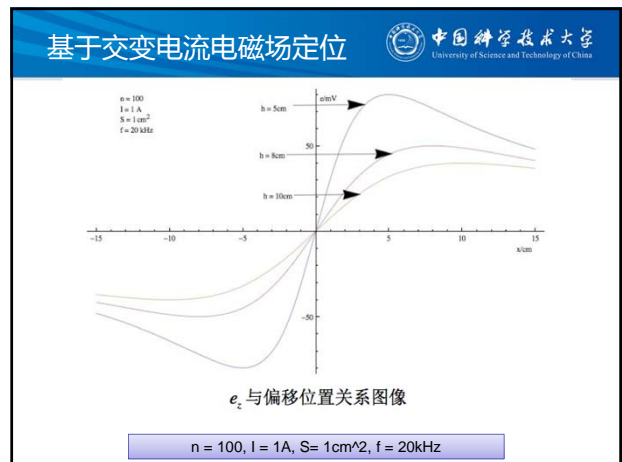
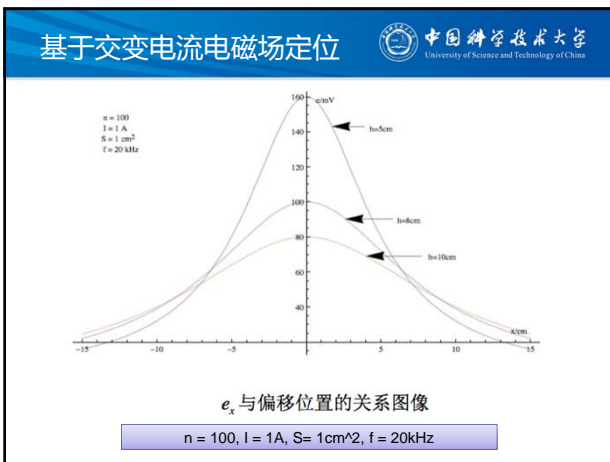
导线中通有交变电流，由于线圈面积相对于大范围的磁场可以忽略，近似地认为线圈内的磁场是均匀分布的，可近似计算出在线圈上产生的感应电动势如下

$$e_x = -\frac{d\phi_x}{dt} = -\frac{dB_x nS}{dt} \quad e_z = -\frac{d\phi_z}{dt} = -\frac{dB_z nS}{dt}$$

式中， $S$ 为线圈围住面积， $n$ 为线圈匝数。带入 $B_x$ 和 $B_z$ 的表达式可得

$$e_x = \frac{n\mu_0 S h}{2\pi(x^2 + h^2)^2} \frac{dI}{dt} \quad e_z = \frac{n\mu_0 S x}{2\pi(x^2 + h^2)^2} \frac{dI}{dt}$$

由此可知，线圈中感应电动势的大小正比于电流的变化率和线圈匝数，电流频率一定的情况下 $e_x$ 与 $e_z$ 的图像如下图



### 基于交变电流电磁场定位

中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

**确定是否发生偏移**

由上两图可见，若X方向两线圈在竖直高度5cm，沿水平方向**距离导线3cm对称安置**时

- 当机器人水平偏移达到**1cm**时，X方向两线圈由感生电动势相等变化为**40mV**左右
- 水平偏移达到**2cm**时，X方向两线圈由感应电动势相等变化为相差**120mV**左右

配合以放大电路足以判断出电动势大小关系

### 基于交变电流电磁场定位

中国科学技术大学 University of Science and Technology of China

**判断偏移方向**

**比较两线圈感生电动势大小**即可判断出偏移方向

感生电动势大的线圈一端更靠近导线，此时让机器人向这一方向偏转即可

基于交变电流电磁场定位

**Z线圈 or X线圈**

为了判断方向，使用Z线圈也应采用两个关于导线对称的摆放方式  
从图像可以看出，在相同位置安放，偏移相同距离时

- 两个Z线圈电势差小于两个X线圈
- Z线圈的电动势关于偏移值并不是单调函数关系，故线圈要安置在单调范围内，否则会发生误判

因此采用对称安置的X线圈较好

基于交变电流电磁场定位

**改进**

- 在机器人中成对增加线圈，可以通过更多数据更为精准的判断机器人**偏移方向**甚至**偏移量**
- 增加Y方向线圈可以**判断分叉线路**
- 导线竖直上方安放线圈可以判断**距离导线高度变化**
- .....

结论

**优势**

- 相较于GPS，**定位精度高**
- 相较于超声波、红外定位，**对于外界物品安放无限制**
- 相较于码盘等相对定位技术，**没有累积误差**

**缺点**

- **只能沿预定轨道行驶**
- **外界磁场可能会对其产生干扰**

结论

由于成本低，易于实现，在未来工厂化车间等一些只需要固定路线移动的机器人上有很大的应用价值

结论

**谢谢!**