

文章编号:1672-058X(2012)09-0038-06

移动机器人空间姿态测量系统研究与设计*

贺 玲 玲

(重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院,重庆 400067)

摘 要:未知环境中机器人的自主导航研究一直是非常具有挑战性的前沿课题,要求机器人在定向移动之前必须先调整好自己的空间姿态;捷联惯性导航对空间姿态信息有明确的定义,具体通过倾斜角、方位角和工具面角来体现;针对目前已公开的空间姿态信息的解算数学模型存在缺陷的问题,结合空间坐标变换、空间直线方程和狗腿角的定义推导出倾斜角、磁方位角和工具面角的数学模型,并利用三轴加速度计和三轴磁强计给出具体的实现方案;测试结果表明:该方案能获得正确的空间姿态数据,倾斜角误差在 $\pm 0.1^\circ$ 以内,磁方位角和工具面角误差在 $\pm 1.5^\circ$ 以内,且成本低廉,体积小,是测量空间姿态的理想选择。

关键词:移动机器人;导航;空间姿态;加速度计;磁强计;活动转台

中图分类号:TP212.9

文献标志码:A

0 引 言

导航是移动机器人的核心和关键技术,一直是国内外研究机器人的热点^[14],常见的机器人导航方式有机器视觉导航、GPS 导航、传感器导航、电磁导航等。视觉导航主要是机器人通过 CCD 摄像头获得周围环境信息,并规划出所需路径,从而沿着该路径在没有人工干预的情况下移动到预定目标。GPS 导航是一种以空间卫星为基础的导航与定位系统,能全天候工作,适用于无线用户。传感器导航包含多种形式,如视觉传感器、超声波传感器、红外线传感器等,通常采用多种传感器融合技术,使得这种导航方式应用较为广泛。电磁导航是 20 世纪 50 年代由美国人开发的,到 20 世纪 70 年代应用于柔性制造系统中。然而所有这些导航方式都存在应用领域的局限性,试想一个机器人在空中、海洋、井底等地做定向移动时,周围环境没有任何基础设施和参照物,导航系统只能借助大地坐标系进行设计。

图 1 中的 $OXYZ$ 为大地坐标系,机器人用一个立方体表示, F 为机器人移动牵引方向, A 点为机器人初始位置, B 点为机器人目标位置。在知道 A 点和 B 点的经度、纬度和海拔高度后,直线 AB 的方向就可通过空间直线方程确定,把机器人的移动牵引

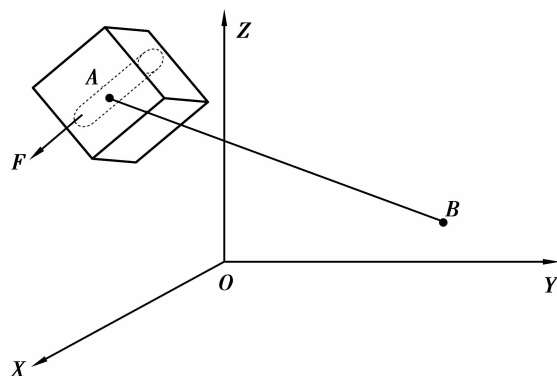


图 1 机器人移动路径分析

收稿日期:2012-03-05;修回日期:2012-03-23.

* 基金项目:重庆市科技攻关项目(CSTC2010AA2036).

作者简介:贺玲玲(1975-),女,四川内江人,讲师,从事计算机软件、嵌入式开发研究.

方向 F 调整到与直线 AB 方向重合即可实现导航。机器人的移动牵引方向由机器人的空间姿态信息确定,当机器人直立、倾斜、水平时,牵引力的方向也随之而改变。然而机器人在空间移动的随意性很大,姿态信息具有太多的不确定性,对姿态信息的成功获取成为导航系统的关键所在。

1 机器人空间姿态

1.1 空间姿态分析

目前,对空间物体的姿态信息已有明确的定义,并广泛应用于钻井测斜领域^[5-6],这些姿态信息包括方位角、倾斜角和工具面角。在机器人内沿移动牵引力方向设置一姿态测试仪,如图1的虚线圆柱体所示。方位角是姿态测试仪当前点的轴心线(即机器人牵引力 F) 在水平面的投影与大地正北方向之间的夹角,它反映了机器人在水平面内的运动方向;倾斜角是姿态测试仪当前点的轴心线与水平面法线之间的夹角,它反映了机器人移动方向相对于水平面垂线的倾斜程度;工具面角在钻井领域代表的是造斜方向与参考方向之间的夹角,通常也称作射孔方位角,在这里反映了机器人沿姿态测斜仪轴心线的自转情况,对机器人的直线移动方向意义不大,但对机器人转动方向有重要意义。在机器人移动过程中,随时调整机器人空间姿态,只要确保测试到的牵引力 F 姿态信息与图1的直线 AB 姿态信息一致即可。

1.2 空间姿态解算

建立如下的坐标体系:地理坐标系 $OXYZ$,其方向分别为东、北、天;姿态测试仪坐标系 $OX_1Y_1Z_1$,其方向分别为测试仪横截面和测试仪轴心线(牵引力 F 方向)。根据旋转变换中的欧拉定理,测试仪在空间中的姿态可以用相对于地理坐标系的有限次转动来表示。如图2所示,假设起始的地理坐标系与测试仪坐标系重合, $OXYZ$ 坐标绕 Z 轴转动 ψ 角度得到 $OX'Y'Z'$ 坐标系,再绕 X' 轴转动 θ 角度得到 $OX''Y''Z''$ 坐标系,最后绕 Y_1 轴转动 ϕ 角度得到 $OX_1Y_1Z_1$ 坐标系。每次绕坐标轴转动相当于一次坐标变换,其变换矩阵如式(1),任意空间矢量从 $OXYZ$ 坐标系旋转到 $OX_1Y_1Z_1$ 坐标系的坐标变换矩阵满足式(2)^[5-7]。

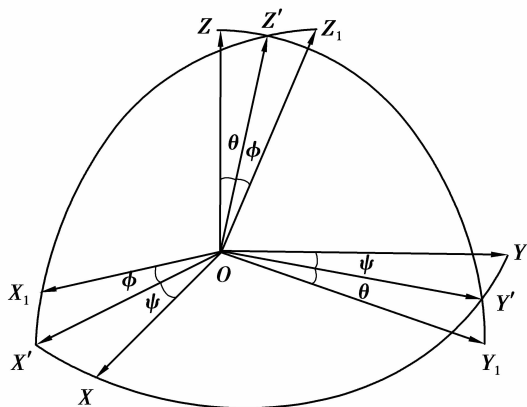


图2 欧拉旋转变换

$$R_\psi = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad R_\theta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad R_\phi = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = R_\psi R_\theta R_\phi \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

地球的磁场矢量和重力加速度矢量也满足式(2)的变换关系,可计算出绕 Z 轴的旋转角度 ψ 、绕 X' 轴的旋转角度 θ 和绕 Y_1 轴的旋转角度 ϕ 分别满足式(3)、(4)和(5)^[5-8],其中的 H_x, H_y, H_z 分别表示姿态测试仪坐标系 X_1, Y_1 和 Z_1 方向的磁场强度, G_x, G_y, G_z 分别表示姿态测试仪坐标系 X_1, Y_1 和 Z_1 方向的重力加速度。

$$\tan\psi = \frac{H_y \cos \theta + H_z \sin \theta}{H_x \cos \varphi + H_y \sin \varphi \sin \theta - H_z \sin \varphi \cos \theta} \quad (3)$$

$$\tan\theta = \frac{-G_y}{(G_x^2 + G_z^2)^{1/2}} \quad (4)$$

$$\tan\varphi = \frac{G_y}{G_z} \quad (5)$$

目前,能够查阅到的文献资料都把 ψ 、 θ 和 Φ 分别当作测试仪的方位角,倾斜角和工具面角,利用加速度计测量出 G_x 、 G_y 和 G_z ,通过式(4)和式(5)分别计算出 θ 和 Φ ,再利用磁力计测量出 H_x 、 H_y 和 H_z ,通过公式(3)计算出 ψ ,以实现姿态信息的获取。但从实际应用分析来看,测试仪的姿态信息不宜用 ψ 、 θ 和 Φ 来解。具体分析如下:

(1) 式(3)是地球的磁场矢量结合式(2)解算出来的,而地球的磁北方向与地理的正北方向存在一个夹角,叫做磁偏角^[9]。因此,式(3)计算出的是磁方位角,而不是基于正北方向的方位角,而且要求 $OXYZ$ 坐标系是地球磁场坐标系,分别指向磁东、磁北和天。尽管在石油、地质等矿井测量中也使用磁方位角表示方位,但必须指明他不是真正的方位角。

(2) 在图2的姿态坐标变换过程中,第1步绕 Z 轴旋转 ψ 角度, OX' 和 OY' 轴一定在 OXY 平面上,即 OX' 和 OY' 轴都在水平面上。第2步绕 OX' 轴旋转 θ 角度,因 OX' 轴在水平面,且 OX' 轴与 OZ 轴、 OZ' 轴、 OY' 轴、 OY_1 轴都垂直,可以确定 OZ' 和 OY_1 轴在水平面的投影都与 OY' 轴重合,此时的 θ 角即为 OY_1 轴基于水平面的倾角(即直线 OY_1 与水平面 OXY 之间的夹角), Ψ 角是 OZ' 轴的磁方位角($OXYZ$ 是基于磁东北天的坐标系, Y 轴对应磁北向)。定义 α_y 为 OY_1 轴的倾角,则式(6)成立。第3步绕 OY_1 轴旋转 Φ 角度,当 $\theta \neq 0$ 时, OY_1 不在水平面上,可以确定 OZ_1 轴在水平面的投影不与 OY' 轴重合,进而可确定 OZ_1 轴的磁方位角不是 ψ 。根据定义可知,倾斜角应该测试仪轴心线(OZ_1 轴)与水平面法线(OZ 轴)之间的夹角,而 θ 是 OZ' 轴与 OZ 之间的夹角,不能用 θ 表示倾斜角。

基于上面的分析,姿态信息的解算需要另辟蹊径。

$$\alpha_y = \theta \quad (6)$$

由式(4)和式(6)或者利用空间直线与平面的夹角公式^[10]可推导出式(7):

$$\sin \alpha_y = \frac{-G_y}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}} \quad (7)$$

同理可推导出 OX_1 轴与水平面 OXY 的夹角 α_x 满足式(8), OZ_1 轴与水平面 OXY 的夹角 α_z 满足式(9)。

$$\sin \alpha_x = \frac{-G_x}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}} \quad (8)$$

$$\sin \alpha_z = \frac{-G_z}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}} \quad (9)$$

定义姿态测试仪的倾斜角为 α ,则 $\alpha = 90^\circ - \alpha_z$,可用式(10)计算出倾斜角:

$$\alpha = \arccos \frac{-G_z}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}} \quad (10)$$

把姿态测试仪的坐标系与 $OX'Y_1Z'$ 坐标系重合时的姿态称作姿态 A ,姿态 A 的倾斜角和磁方位角分别为 α_A 和 ψ_A 。因 OX' 轴在水平面上,所以,倾斜角就是 OZ' 轴与 OZ 轴的夹角,即 $\alpha_A = \theta = \alpha_y$, ψ_A 就是坐标旋转时绕 OZ 轴旋转的 ψ ,即 $\psi_A = \psi$ 。姿态测试仪的坐标系与 $OX_1Y_1Z_1$ 坐标系重合时的姿态称作姿态 B ,姿态 B 的倾斜角和磁方位角分别为 α_B 和 ψ_B , α_B 即是式(10)计算的倾斜角 α , ψ_B 即是所要计算的任意姿态的方位角 β 。两种姿态轴心线的夹角被称作“狗腿角”,计为 φ ,狗腿角 φ 满足式(11)^[9]。

$$\cos \varphi = \cos \alpha_y * \cos \alpha + \sin \alpha_y * \sin \alpha * \cos (\psi - \beta) \quad (11)$$

从狗腿角的定义可知, φ 就是坐标变换时 OZ' 轴与 OZ_1 轴之间的夹角, 等于第3次变换时绕 OY_1 轴旋转的 Φ 角度, 即式(12)。

$$\varphi = \Phi \quad (12)$$

根据空间解析几何知识, 可以确定图2中的 OY_1 轴、 OX' 轴和 OX_1 轴在坐标系 $OXYZ$ 的直线方程分别为满足式(13)、(14)和(15)。其中, $(m, n, \sqrt{1-m^2-n^2})$ 为直线 OX_1 的单位方向向量。

$$\frac{x}{\cos \theta * \sin \psi} = \frac{y}{\cos \theta * \cos \psi} = \frac{z}{-\sin \theta} \quad (13)$$

$$\frac{x}{\cos \psi} = \frac{y}{-\sin \psi} = \frac{z}{0} \quad (14)$$

$$\frac{x}{m} = \frac{y}{n} = \frac{z}{\sqrt{1-m^2-n^2}} \quad (15)$$

OY_1 轴与 OX_1 轴垂直, 且 $\alpha_y = \theta$, 所以式(16)成立。

$$m \cos \alpha_y \sin \psi + n \cos \alpha_y \cos \psi - \sqrt{1-m^2-n^2} \sin \alpha_y = 0 \quad (16)$$

OX_1 轴与 OXY 平面的夹角即为 OX_1 轴基于水平面的倾角 α_x , 所以式(17)成立。

$$\sin \alpha_x = \sqrt{1-m^2-n^2} \quad (17)$$

OX' 轴与 OX_1 轴之间的夹角即为坐标旋转时绕 OY_1 轴旋转的 Φ 角度, 且 $\varphi = \Phi$, 所以式(18)成立。

$$\cos \varphi = m \cos \psi - n \sin \psi \quad (18)$$

综合式(16)、(17)和(18), 消除公式中的 m 和 n , 可得式(19)。

$$\sin \varphi = \sin \alpha_x / \cos \alpha_y \quad (19)$$

结合式(3)、(11)和(19), 利用3个方程求解3个变量 β 、 φ 和 Ψ , 可得出磁方位角 β 的计算公式如下:

$$\beta = \arctg\left(\frac{H_y \cos \alpha_y + H_z \sin \alpha_y}{H_x \cos \alpha_x + H_y \sin \alpha_x \sin \alpha_y - H_z \sin \alpha_x \cos \alpha_y}\right) - \arctg\left(\frac{\alpha_y}{\alpha_x}\right) \quad (20)$$

工具面角反映姿态测试仪绕自身的轴心线的旋转情况, 宜使用垂直于轴心线的方向向量来进行计算。重力加速度 G_x 、 G_y 和磁场强度 H_x 、 H_y 都是 OX_1Y_1 平面内的方向向量, 因此工具面角可以用式(21)来进行计算。

$$\gamma = \arctg\left(\frac{G_x}{G_y}\right) \quad (21)$$

当倾斜角很小时, 姿态测试仪的轴心线 OZ_1 与水平面 OXY 的法线 OZ 方向接近一致, 平面 OXY 与 OX_1Y_1 接近重合, 使得 G_x 和 G_y 的测量值非常小, 按照式(21)计算的工具面角具有较大的相对误差, 宜用磁工具面角来代替, 具体计算如式(22)。

$$\gamma = \arctg\left(\frac{H_x}{H_y}\right) \quad (22)$$

加速度的敏感方向是垂直于水平面方向, 而磁场的敏感方向是南北向, 因此式(21)和式(22)的计算结果必然不一致, 但都能够反映测试仪的自转情况。

2 姿态测试系统设计

随着现代微电子技术(MEMS)的发展, 从20世纪90年代开始出现微加速度计和磁强计, 这些传感器采用MEMS技术, 在单片上集成加速度或磁场敏感元件及相应的调理电路, 具有体积小、全固态、可靠性高、易于安装、易于批量生产、成本低等优点, 在很多场所逐渐取代体积较大、调理电路复杂的传统加速度计和磁通门产品。

基于以上的方法和 MEMS 器件,设计的机器人姿态测试系统结构如图 3 所示。系统采用沿测试仪 3 个轴(OX_1 、 OY_1 和 OZ_1) 安装的加速度计和磁强计分别测量三维空间重力加速度分量和磁场分量。三轴加速度计选用 ADXL330 芯片,其输出为模拟量,经高精度的 AD 转换后送入 CPU。三轴磁强计选用 HMC5843 芯片,其输出为数字量,并提供标准的 IIC 接口,直接与 CPU 通信。为方便调试,系统还增加了 RS232 接口,如图中虚框所示。系统中还可增加温度传感器,一方面可以实现对整个装置过热报警,另一方面可实现对传感器输出进行补偿。

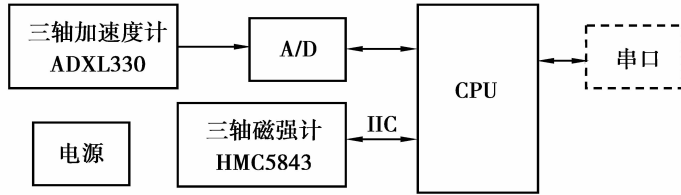


图 3 测试系统总体结构

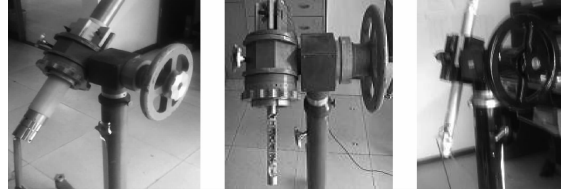


图 4 现场测试照片集

3 测试结果

利用活动转台,对所研制的姿态测试仪进行测试,测试现场如图 4 所示。活动转台要水平校准,姿态测试仪要保证与转台夹具同心。为两个传感芯片 HMC5843 和 ADXL330 单独设计 PCB 小板,垂直于测试仪轴心线安装,HMC5843 的 x 轴和 y 轴与 ADXL330 的 x 轴和 y 轴分别平行。

利用活动转台的三维调节功能将测试仪的倾斜角调整为 10° ,方位角调整为 235° ,工具面角调整为 56° ,上位机串口接收到的测试结果数据如图 5 所示。数据格式满足重庆地质仪表厂提供的标准格式(目前,该姿态测试仪已应用于地质测井系统)。每帧数据 7 个字节,用 16 进制显示十进制的测试结果数据,其中第一个字节 FF 表示帧头;第 2、3 字节表示倾斜角数据,如图中的 0100 代表倾斜角为 10.0° ;第 4、5 字节表示磁方位角数据,图中的 2344 代表 234.4° ,第 6、7 字节表示工具面角,图中的 0561 代表 56.1° 。从测试记录来看,倾斜角在 $9.9 \sim 10.1^\circ$ 范围内变化,而且结果为 10.0° 的概率最大,表明系统测试到的倾角数据非常稳定;磁方位角数据在 $233.8 \sim 236.5^\circ$ 范围内变化,工具面角数据在 $55.0 \sim 57.5^\circ$ 范围内变化,波动范围都在 $\pm 1.5^\circ$ 以内,比倾斜角精度要低,主要是因为大地磁场容易受环境干扰的影响。



图 5 实验结果

测试中还发现,如果直接使用式(3)、(4)、(5)来解算测试仪姿态信息,即使测试仪倾斜程度和方位角度不改变,让测试仪自转就造成倾斜角在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内波动,磁方位角在 $0 \sim 360^\circ$ 范围内波动。测试仪不自转,改变其倾斜程度或者改变方位角度都会造成工具面角改变,其波动范围为 $0 \sim 360^\circ$ 。

4 结束语

描述了用三轴加速度芯片和三轴磁强计芯片测量姿态测试仪的姿态信息——倾斜角、磁方位角和工具面角的方法。特别是针对目前已公开发表的姿态信息解算数学模型存在缺陷的问题,提出了利用空间解析几何与狗腿角公式推导倾斜角、磁方位角和工具面角解算的数学模型,并给出了实现过程。实验结果表明,

该方案能获得正确的姿态数据,且成本低廉,体积小,是测量机器人空间姿态的理想选择。受干扰磁场的影响,磁强计的输出结果还不够稳定,导致解算出的姿态信息存在一定的误差,这也是作者今后的主要研究方向。

参考文献:

- [1] 刘华军,杨靖宇,陆建峰. 移动机器人运动规划研究综述[J]. 中国工程科学,2006,8(1):85-94
- [2] 郑宏,王景川,陈卫东. 基于地图的移动机器人自定位与导航系统[J]. 机器人,2007,29(4):397-402
- [3] 黄志华,屠大维,赵其杰. 基于人机交互的移动服务机器人导航系统[J]. 机器人,2009,31(3):248-253
- [4] 孙立宁,张剑,杜志江. 一种骨科手术机器人的图像导航方法[J]. 自动化学报,2006 32(2):279-285
- [5] 郭爱煌;傅君眉. 基于地球重力场和磁场测量的测斜技术[J]. 仪器仪表学报 2001,22(4):400-403
- [6] 徐涛;刘翠海;黄青斌. 水平定向钻进随钻测量系统研究与设计[J]. 仪器仪表学报,2009,30(9):1976-1980
- [7] 罗武胜;徐涛;杜列波. 基于加速度计和磁强计的定向钻进姿态测量及方位校正[J]. 国防科技大学学报,2007,29(1):106-110
- [8] 谢子殿;朱秀. 基于磁通门与重力加速度传感器的钻井测斜仪[J]. 传感器技术,2004,23(7):30-33
- [9] 陈庭根;管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 山东:石油大学出版社,2001
- [10] 高红铸;王敬庚;傅若男. 空间解析几何[M]. 北京:北京师范大学出版社,2007
- [11] 刘启能. 柱形光子晶体波导中偏振光的传输模式和禁带特征[J]. 四川兵工学报,2011,32(12):1-5

Research and Design of a Spatial Attitude Measurement System for Mobile Robot

HE Ling-ling

(School of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: The research on mobile robot's autonomous navigation in the unknown environment is still a challenging advanced topic, and it requests the robot to adjust his own spatial attitude before the directional migration. The Strapdown inertial navigation has the explicit definition of the spatial attitude information which is carried out by robot's tilt angle, magnetic azimuth angle and tool face angle in detail. By considering that the spatial attitude which has been opened has flaw to resolve mathematical model, the mathematical model of tilt angle, the magnetic azimuth angle and the tool face angle is derived by combining with the definition of the space coordinates transformation, the spatial straight line equation and the dog-leg angle's definition, in addition, the specific achievable plan is given through the triple-axis accelerometer and the triple-axis magnetometer. The experimental result indicates that this plan can get the correct spatial attitude, tilt angle within the deviation of $\pm 0.1^\circ$, magnetic azimuth angle and the tool face angle within the deviation of $\pm 1.5^\circ$. So it is an ideal choice for the spatial attitude measurement system on account of the low cost and the small volume.

Key words: mobile robot; navigation; spatial attitude; accelerometer; magnetometer; activities turntable