## **混合导航定位系统在移动机器人中的研究与应用**

孙弋 张雪丽

（西安科技大学 通信与信息工程学院，陕西 西安 710121）

**摘要：**随着机器人应用场景的不断扩大，在未知复杂环境下建立稳健、精准的导航定位系统是实现移动机器人各种业务功能的基本前提。本文研究了惯性传感器和视觉传感器实现位姿估计的原理，并利用无迹卡尔曼滤波技术，获得机器人的位置和航向角信息。最后通过在内150m范围场景开展实验，对获得的实验数据进行算法仿真分析。实验数据表明，x轴和y轴位置误差的均方误差值为…m、…m，（导航时间…min位置估计的均方根误差(RMSE)是…m，且不随时间漂移）。在此基础上结合地图和路径规划信息，实现机器人导航。

**关键词：**移动机器人，惯性，多传感器信息融合，混合导航系统

## Research and application of hybrid navigation system in mobile robot

Yi Sun Xueli Zhang

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710121, China)

**Abstract：**

**Keywords:**

### 引言

在矿井事故和应急救援等复杂未知环境中，GPS信号不稳定，且随时可能发生二次灾难，如救护人员直接进入灾区，人身安全得不到保障。且事故发生后无法迅速准确地获得灾难现场的信息，因此，研发一系列能够替代或部分替代人工的高机动性机器人，能快速进入事故现场，迅速准确获取事故现场环境信息以及进行辅助救援自主行为，具有极其重要的现实意义，而对机器人自身位姿估计的准确性，是实现所有业务功能的前提，因此，构建精准、稳定的智能机器人的导航系统就变得越来越重要。导航是引导移动机器人从起点运动到终点的过程，其前提是告知机器人所在的位置，然后才能引导机器人从一个位置移动到另一个位置。

导航可以工作在两种不同的状态：一是根据导航输出的位置和航向角参数，操作员可以人工自由操纵并引导机器人按预定路径运动向目的地，此时导航系统可以说是一个导航定位参数（机器人位姿参数）测量装置，输出这些信息后即完成它的任；二是根据导航系统输出的导航参数，直接传递给机器人自动控制系统，通过控制系统解算，形成控制信号，直接操纵机器人自动按路径规划信息运动向目的地，这时的导航系统相当于自动控制系统(或自动驾驶仪)中的一个敏感测量环节，由于机器人控制系统实施闭环控制，操作员仅起一个监控作用，并不参与机器人运动。习惯上把导航系统的第一种工作方式称为工作指示状态，第二种工作方式称为自动导航状态。

本文主要研究导航第一种工作状态，即如何通过各传感器测量数据，输出机器人自身位姿信息，即主要研究惯导、视觉以及无迹卡尔曼滤波技术，构建惯导/视觉松耦合模型进行位姿估计，以获取更为准确的机器人位姿信息。但应用于第二种工作状态，即形成指令信号，机器人自动行为控制系统获取指令信号，控制载体姿态、航向或关闭发动机使其按预定路径运动的操作，以及二维地图生成、障碍物检测和路径规划等行为，由其他人员完成，最终共同实现机器人自主混合导航系统。

### 1移动机器人导航关键技术

通常使用的导航方式主要包括：惯性导航、视觉导航、卫星导航、GPS导航等等，在室内以及灾后等复杂环境中GPS系统已经不再可靠，而由低成本MEMS惯性测量单元(Inertial Measurement Unit，IMU)和相机组成的视觉/惯性系统是一个不错的选择。相机可以捕获丰富的场景信息，IMU可提供较高精度短期的位置信息，两者结合可为机器人自主导航提供必要的运动状态估计及足够的环境感知能力。既保持了纯惯导系统的自主性，又克服了纯惯导系统误差随时间的积累。

#### 1.1惯性导航

惯性导航系统(Inertial Navigation System,INS)INS，也称为惯性导航，是一种不依赖外部信息、也不向外部辐射能量的完全自主式导航系统，是使用最广泛的机器人导航方式，其关键是确定机器人的位置，也就是定位。

惯性导航通常由惯性测量单元(Inertial MeasurementUnit,IMU)和导航解算单元两部分组成。惯性测量单元属于硬件部分，通常是由加速度计和陀螺仪组成，可以输出三个方向的加速度和角加速度。导航解算单元属于软件部分，通过设计好的软件程序或方法，利用惯性测量单元的输出信息，进行数值积分求解运载体的姿态、速度和位置等导航参数，这三组参数的求解过程即所谓的姿态更新算法、速度更新算法和位置更新算法。

INS工作自主性强，使用条件宽，它不依赖任何其他辅助设备，使得机器人可活动范围增大，在没有信息的未知环境的室内或地下通道内都可进行任务，也不受气象条件、地面形状等影响，能满足全天、全球范围的导航的要求。但INS的突出缺点是导航精度随时间增长而降低。首先INS的核心部件陀螺存在漂移，它的误差会1:1传递给导航解算单元，而且在机器人低速运动时，陀螺测量信息误差较大。其次在导航解算时通过积分得到姿态信息，且惯性传感器测量基准是自身，没有绝对参照物，前一时刻计算误差会累计到下一时刻，计算误差会不断累计。

在文献[1]中研究了MEMS惯导导航定位的Kalman滤波算法，并提出了一新型观测量—向心加速度，从而提高定位精度。

[1]低成本车载MEMS惯导导航定位方法. 李博文，姚丹亚 2014

综上，惯性导航在短程导航中，具有较高的精度，而长时间的低速导航精度则不甚理想。目前使用最广泛的是EMES惯性传感器，其体积小、价格低，但也伴随着其精度低。因此在大多数导航系统中，会使用其他传感器与惯导组合实现导航定位。

#### 1.2视觉导航

随着移动机器人的应用场合越来越广泛，复杂环境下实现移动机器人的自主行为和决策一直是热点之一，其中机器人的定位和导航是不可或缺的关键部分。传统的机器人定位采用的是惯导和GPS结合，但GPS存在数据丢失、阻塞等情况，也面临着必须在室外场景下等条件限制，存在一定的局限性。而视觉定位则不会存在以上问题，其相对于其他传感器来说具有成本低、信息易获取、价格低廉等优点，且视觉传感器可以提供丰富的感知信息，既可以满足机器人的自定位要求，又能够同时为其他重要的任务提供信息，如目标检测、避障等。

文献[4]最早运用视觉导航的方法，利用一个可滑动相机获取视觉信息作为输入项，完成了机器人室内导航。文献[5]提出了视觉里程计的概念，基本步骤包括特征提取、特征匹配、坐标变换和运动估计，当前多数视觉里程计仍然基于此框架图。

1. MOARAVEC H.Obstacle avoidance and navigation in the real word by seeing robot rover[D].Stanfors：Univ. Of Stanford.1980
2. MATTHIES L.SHAFER S A.Error modeling in stereo navigation[J].IEEE Robotics and Automation.1987.RA-3(3)：239-250

视觉里程计(visual odometry,VO)是以单个或多个摄像机在运动过程中采集的图像为输入信息，利用图像序列来估计相机的运动，进而得到运动物体的运动轨迹，获得机器人的位置和姿态角信息。当机器人以某种间隔对时间进行采样时，就可估计运动物体在各时间间隔之内的运动。

但视觉里程计依赖于纯视觉，当机器人高速运动时，图像质量差导致估计机器人信息失败；在进行特征点匹配时存在误匹配点，导致特征点估计位置不准确。基于此，视觉里程计的研究一方面可以从算法的各个模块技术出发，以期改善整体系统性能；另一方面，可以通过融合其他传感器的方式来弥补视觉里程计的缺陷。本文使用双目stereo相机，并与惯导融合实现较为稳健的定位。

#### 1.3多传感器融合技术

在机器人中，常使用的陀螺仪和加速度计作为位姿测量器件，存在误差积累。而视觉里程计由于依赖于纯视觉图像，导致稳定性较差。因此需要进行有效的数据融合才能保证较为精确的姿态角。

多传感器数据融合技术可以分为基于滤波和基于优化的方法，目前主流的是基于滤波的方法。卡尔曼滤波算法（Kalman Filter）是最基本的传感器融合技术。

KF最初被用于惯性导航，阿波罗登月计划和c-sa飞机导航系统早期的应用实例。在文献[6]中，使用了卡尔曼滤波（Kalman Filter）算法进行数据融合，这种方法建模简单，实时性较好，但是忽略了非线性因素对滤波带来的影响。文献[8]使用扩展卡尔曼滤波（Extended Kalman Filter）方法，这是一种关于噪声均值和协方差的线性化方法，但由于其用了线性化方法，因此也引入了误差。本文使用基于四元数的无迹卡尔曼滤波（Unscented Kalman Filter）,利用无迹变换（Unscented Transform）来处理非线性系统的均值和方差的传递问题，避免了非线性系统的线性化，保留了高阶项，提高了系统高斯密度的传递函数。

[6] LEFFERTS E J, MARKLEY F L, SHUSTER M D. Kalman filtering for spacecraft attitude estimation [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2012, 5(4): 536-542.

[8] FILIPE N, KONTITSIS M, TSIOTRAS P. Extended Kalman filter for spacecraft pose estimation using dual quaternions [C]∥Proceedings of 2015 American Control Conference. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2015: 3187-3192.

### 2 视觉/惯导松组合导航系统的实现

#### 2.1系统框架

本文用于位姿估计的传感器包括kinect 2和IMU传感器。如图1所示，kinect 2被看作一个带尺度的视觉里程计，频率为10Hz；IMU传感器通过惯导解算得到三自由度的位姿信息，频率为100Hz，上述两个通道的位姿估计结果通过UKF进行信息融合，实现INS/视觉里程计松耦合组合定位系统。

第一步先对IMU和视觉里程计进行软时间戳对齐。在计算之前，需对IMU和摄像机进行软同步。通过ROS发布同一的时间戳来对齐INS和视觉里程计；

第二步进行对IMU信息进行惯导解算；

第三步判断是否有图像输入。若无图像输入，则将惯导解算的位置信息作为测量值，并转至第五步；若有图像输入，则进行特征点提取与匹配，计算出视觉里程计位姿信息，并将该信息进行坐标转换，转换到载体坐标系下；

第四步将惯导解算的位置信息和视觉里程计计算得到的位置信息进行加权平均，作为测量值；

第五步，用测量值进行UKF，将得到更新值作为系统输出。

即在本系统中，既实现了INS的高频率输出，又校正了惯导的累计误差，并克服了视觉里程计依赖于纯图像的缺点，提高定位精度和稳定性。而且在更为复杂和的环境中，对于定位功能要求更为严格的情况下，该系统可以较轻松的耦合其他传感器，实现更高，更稳定的定位。



导航系统整体框架图

#### 2.2 系统坐标系

#### 2.2视觉里程计位姿估计

视觉里程计经过多年的发展，己经形成了基本的框架。本文选用针孔相机模型，根据投影关系，在k时刻，空间中任意一点在w系下的位置表示为，则。

其中为k-1时刻的机器人在w系下的位置坐标。是k时刻b系到w系的转换矩阵，是c系到b系的转换矩阵，该矩阵是常值矩阵，由标定获得。是对k时刻和k-1时刻获得的图像进行特征点提取、匹配以及ICP算法得到，如下图所示。



图 视觉里程计位姿估计原理图

#### 2.3 IMU位姿估计

IMU位姿估计又称惯导解算，是指通过加速度计测得的载体加速度和陀螺测得的载体相对于惯性坐标系的角加速度来进行载体的位姿估计。

使用IMU进行惯导解算时必须考虑到噪声的影响，其实际测量模型如式：



其中：为加速度计和陀螺的噪声，服从正态分布；分别代表加速度计和陀螺的零漂，零漂可以看作由高斯白噪声导致的一个随机游走过程，即：。

IMU系统的状态量包括IMU的位置、姿态、速度以及加速度计和陀螺仪的零漂，因此状态量可表示为如式(11)

 （11）

根据定义的状态量可以得到IMU的运动方程如式(12)：其中表示四元数乘法

 （12）

#### 2.4 INS/视觉里程计松组合导航系统

UKF并没有脱离KF的框架，只不过对下一时刻状态的预测方法变成了sigma点集的扩充与非线性映射，可以避免了复杂非线性函数雅可比矩阵的复杂运算；并保证了非线性系统的普遍适应性。

在本文中，组合导航系统的状态向量,维数为3，p是组合导航系统的位置（x,y），UKF方法是将每一个用几个Sigma点（关键点）表示。组合导航系统的实现步骤如下：

1. 初始化：

1. 计算2L+1个sigma点，L是状态变量维数：：







1. 权值计算



m表示均值的权值，c表示协方差的权值。参数是比例缩放参数，它决定了采样点与均值X 的距离。控制了采样点的分布状态。本文取经验值0.001，的取值通常为3-L，本文取0，取值通常为2。

1. 计算2L+1个Sisma点的一步预测。首先对每个Sisma点进行非线性变化，然后对变换后的点进行加权得到相应的预测值和





其中表示在k-1时刻对k时刻状态的预测，表示k-1时刻对k时刻的预测值与真实值之间的差异，是后验估计误差协方差矩阵，用来度量预测的精度，为系统噪声的方差矩阵，是已知的非负定阵。

1. 根据非线性观测方程对Sigma点集进行非线性变换：，h是观测矩阵
2. 使用加权计算得到预测值的观测值为
3. 协方差矩阵更新：



是测量噪声协方差（视觉里程计测量时噪声）

1. 计算增益：
2. 更新
3. 后验方差矩阵更新：

### 3实验结果分析与应用

#### 3.1视觉惯导组合导航实验结果

在这个实验中，我们使用Turtlebot2机器人、kinect2和IMU传感器。如图所示。实验平台为Lenovo G50笔记本电脑()，所有实验都在Ubuntul6．04系统下实现。采集的数据包括相机采集的图像序列(20Hz)，IMU测量值(200Hz)及手动测量的位置信息。

1. 组合导航实验结果

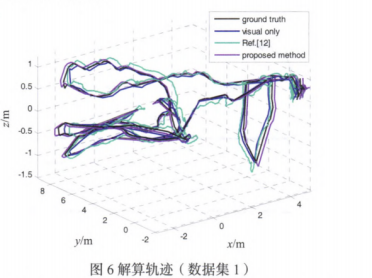
本实验中，手动测量位置被视为基本事实。通过在室内开展实验，验证方案的可行性和有效性。为了进行准确性比较，我们让机器人在不同特点的几种环境中的地面上行走两圈（长时间），并使用三种不同的方式运行姿态估计（惯导，视觉和惯导/视觉），且将我们的估算与真值进行比较（手动测量位置），最后使用轨迹图、位置的RMSE（均方根误差）表评估准确度。

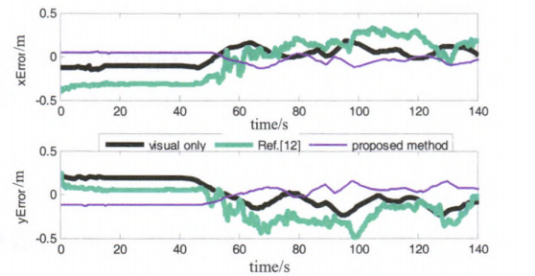
1. 特征点较多环境+缓慢运动
2. 弱纹理环境+缓慢运动
3. 特征点多+运动过激

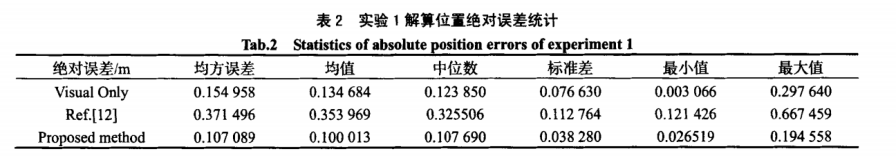
轨迹如图，位置的RMSE（均方根误差）如表。

轨迹图中应有：视觉轨迹、惯导轨迹、融合后轨迹和真实轨迹，四条线

x轴和y轴（位置）的RMSE（均方根误差）：视觉、惯导、融合后与真实的比较的均方根误差。







#### 3.2自主导航应用

结合二维栅格地图和路径规划算法，实现自主导航。