

文章编号 1004-924X(2004)02-0139-05

GPS/ INS 组合导航系统的研究

高宪军, 翟林培

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 讨论了飞机惯性导航系统 (INS) 与全球卫星导航系统 (GPS) 的利与弊以及卡尔曼滤波方法在组合定位中的应用情况, 进一步提出了基于神经网络数据融合方法的 GPS/ INS 组合导航系统。系统神经网络结构采用单隐层的三层神经网络, 输入输出神经元数目是 4 个, 基于 256 个训练样本由经验公式求得隐层神经元数目为 8 个, 同时还建立了惯导系统的数学模型和数据融合的数学模型。给出了利用 MATLAB 编制的神经网络训练程序并对这一神经网络进行了训练和仿真。实验表明, 组合导航系统经度误差可达 9 m, 纬度误差可达 8 m, 与单独 GPS 定位和 INS 定位相比精度得到了提高。

关键词: 惯性导航系统; 全球卫星导航; 神经网络; 数据融合

中图分类号: V249.322 文献标识码: A

GPS/ INS integrated navigation system

GAO Xian-jun, ZHAI Lin-pei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics & Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Through the discussions on the advantages and disadvantages of inertial navigation system (INS) and global positioning system (GPS) for aircraft, and the application of Kalman filtering method in the integrated positioning system, GPS/ INS integrated navigation system, a data fusion method based on neural network is proposed. The neural network framework of the integrated navigation system is a single hidden layer three-layered neural network with 4 input/output neurons, and the number of hidden layer neurons based on 256 training samples and obtained using empiric formula is 8, and mathematical models have been established for inertial navigation system and data fusion. Training and simulation were made with this neural network using the neural network training program compiled with MATLAB, and experimental results indicate that the integrated navigation system has a longitude error of 9 m, and a latitude error of 8 m, and in comparison with separate GPS and INS, the accuracy of integrated GPS/ INS has been improved.

Key words: inertial navigation system; global positioning system; neural network; data fusion

1 引言

惯性导航系统 (INS) 是一种完全自主的导航

系统, 具有不依赖外界信息、隐蔽性好、抗辐射性强、全天候等优点, 是机载设备中能提供多种导航参数的重要导航设备。但它的定位误差随时间而积累, 长时间工作后会产生大的误差, 使

得惯性导航系统不宜作远距离导航。而全球定位系统(GPS)具有较高的导航精度,但是该系统不能提供如载体姿态等导航参数,而且在飞行载体上使用,由于载体的机动运动,常使接收机不易捕获和跟踪卫星的载波信号,甚至对已跟踪的信号失锁。为克服这些缺点,多根据 INS 和 GPS 的导航功能互补的特点,以适当的方法将两者组合来提高系统的整体导航精度及导航性能以及空中对准和再对准的能力。GPS 接收机在惯导位置和速度信息的辅助下,也将改善捕获、跟踪和再捕获的能力,并在卫星分布条件差或可见星少的情况下导航精度不致下降过大^[1]。由于优点显著,GPS/INS 组合系统被一致认为是飞行载体最理想的组合导航系统,GPS 和 INS 数据融合算法中最常用的工具是卡尔曼滤波器^[2],但是在使用卡尔曼滤波器时,尚有许多问题有待解决,如处理速度

估计的准确度、耐用性、与其他传感器的组合等等。与此同时,近几年来人工神经网络(ANN)得到了飞速的发展,已广泛应用于人工智能、自动控制、统计学等领域。特别是 BP 网络以其良好的非线性功能、自学习功能等许多优良特性而在很多领域获得成功,已渐渐成为数据融合算法的一项重要工具。本文尝试应用 BP 网络建立数据融合模型来提高 GPS/INS 组合导航系统的导航精度。

2 GPS/INS 组合导航系统的组成

GPS/INS 组合导航系统由全球卫星导航系统(GPS)、惯性导航系统(INS)和信息处理系统三部分构成,系统原理框图如图 1 所示。

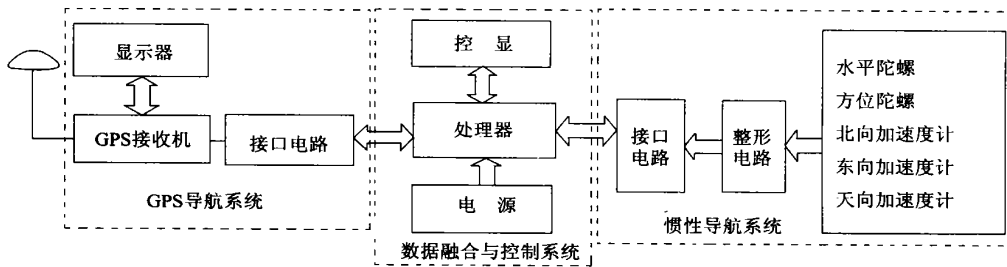


图 1 GPS/INS 组合导航系统框图

Fig. 1 GPS/INS integrated navigation system diagram

GPS 导航系统采用美国天宝 2101GPS 导航系统,工作高度可在 $-304.8 \sim +15\,240\text{ m}$,最大工作速度可达 $1\,480\text{ km/h}$ 。它具有体积小、质量轻、功耗低、高抗振、高灵敏度、高精度和高动态性能。接收载波信号频率为 $L_1 = 157\,5.42\text{ MHz}$,C/A 码标准定位服务,9 通道接收,数据更新时间为 4 s ,跟踪时间为 $1.5 \sim 3.5\text{ min}$,动态定位精度可达几十 m。工作电源采用飞机供电标准 28 V 直流,最大电流 0.5 A 。

GPS 系统的定位过程可描述为:已知卫星(利用卫星广播电文描述卫星运动的星历参数 EPH 和历书参数 ALM 实现)的位置,测量得到卫星和用户之间的相对位置(利用导航方程),用导航算法(利用最小二乘法或卡尔曼滤波法)解算得到用户的最可信赖位置。

由于飞机上的 GPS 系统工作在三维状态,需要 4 个测量值来修正误差。这就是说如果在水平

位置上看不到 4 颗卫星,它就不能精确定位。此时需人工输入高度值,在降低精度条件下继续导航。

加速度计主要由挠性杆、摆锤、力矩器、信号器、放大器和采样电路组成。当飞机有加速度时,摆锤由于惯性将会偏离零位,信号器敏感零位偏离的信号经放大器放大后,输出电流给力矩器线圈,产生力矩,将摆锤拉回到零位。输出电流流过采样电阻 R,采样电阻 R 两端电压的大小就是载体加速度大小的量度。为测量载体的加速度必须设法保持加速度计水平,这就需要有一个重要的惯性器件—陀螺。

挠性陀螺由挠性杆(很细、很软)在电机的驱动下,转子以 $12\,000\text{ r/min}$ 的转速旋转,当基座转动一个角度时,由于转子的稳定性,加之挠性杆很柔软,则转子相对惯性空间保持不动,这样陀

螺就可“感知”基座转动的角度。

陀螺上还装有 2 个信号器和 2 个力矩器,2 个信号器“感知”基座绕 X, Y 两个方向轴的旋转,给出相应的信号。而 2 个力矩器可以给陀螺施矩,使之分别沿 X, Y 两个轴进动。

惯性平台是一个由 2 个二自由度陀螺稳定的四环全姿态平台。平台能隔离飞机的三轴角运动,亦可根据飞机运动和地球自转,准确地跟踪当地水平面和保持方位不变(或指向真北),使平台稳定在地理坐标系内。

平台上装有北向、东向和垂直方向 3 个加速度计,用以敏感飞机的加速度。

平台从外到里依次为:外滚环,俯仰环,内滚环和方位环(台体)。平台各环的一端或两端分别装有旋转变压器和力矩电机。在导航时,旋转变压器可输出飞机的姿态角和航向角信号。

3 惯性导航系统数学模型的建立

惯性导航系统是依靠测量载体的加速度推算出载体的瞬时速度和位置,以及测量载体的姿态。因此,可让惯导平台模拟地理坐标系,从而得到比例方程^[1]:

$$\bar{V} = \bar{f} - (2 \bar{i}_e + \bar{e}_p) \times \bar{V}_{ep} + \bar{g}, \quad (1)$$

因在系统中测量得到的是 3 个比例分量,因此上式可写为:

$$V_e = f_e + (2 i_e \sin L + (V_e / R_e) \times \tan L) \times V_n - (2 i_e \cos L + V_e / R_e) \times V_d, \quad (2)$$

$$V_n = f_n - (2 i_e \sin L + (V_e / R_e) \times \tan L) \times V_e - (V_n / R_n) \times V_d, \quad (3)$$

$$V_d = f_d + (2 i_e \cos L + (V_e / R_e) \times V_e - (V_e / R_e) \times V_d - g, \quad (4)$$

如果载体垂直方向的速度比较小,则可略去 V_d , 有下式:

$$V_e = f_e + (2 i_e \sin L) \times V_n - V_e (V_n / R_n) \times \tan L, \quad (5)$$

$$V_n = f_n - (i_e \sin L) V_e - (V_e^2 / R_e) \times \tan L, \quad (6)$$

由于已知 V_e, V_n , 则纬度、经度的计算为下式:

$$L = V_n / R_n dt + L_0, \quad (7)$$

$$= V_e / R_e \times \text{secl } dt + 0. \quad (8)$$

4 GPS/INS 组合系统数据融合算法结构

神经网络是由大量简单的称为神经元的处理单元以某种拓朴结构广泛地相互连接而成的非线性动力学系统,它是在对以人脑为代表的生物神经系统的组成结构和行为特征进行研究的基础上提出的^[3]。理论上已经证明,3 层神经网络可以实现任意复杂的非线性映射问题^[4]。因此,本文采用单隐层的 3 层神经网络作为信息融合模型。输入层应该有 4 个节点:GPS 测量值 (X_{GPS}, Y_{GPS}) 和惯导推算值 (X_{INS}, Y_{INS})。隐层神经元的数目通过经验公式^[5]获得: $N_2 = \log_2 T$, 在这里 N_2 是隐层神经元个数, T 是训练样本。本文通过仿真模拟训练样本期望值 500 对,从中取好点 256 对作为训练样本,200 对作为检验样本,所以隐层神经元数目为: $N_2 = \log_2 256 = 8$ (如图 2)。神经

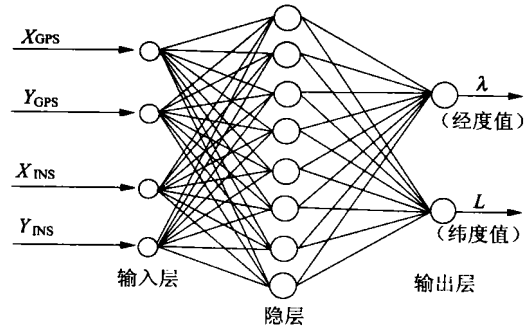


图 2 组合导航系统数据融合模型神经网络结构

Fig. 2 Neural network frame of the data fusion model of the integrated navigation system

网络的训练采用的是 BP 算法,决策函数选取非线性 Sigmoid 函数^[6]:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (9)$$

4.1 神经网络的正向计算过程

正向计算过程就是从输入到输出逐层计算出每一层神经元的输入输出状态,从而得到网络的实际输出。计算公式如下^[6]:

第 j 隐层神经元的输出为

$$O_j = \left(\sum_{k=1}^4 W_{jk} X_k - \theta_j \right), \quad (10)$$

第 i 个输出层神经元输出为

$$O_i = \left(\sum_{j=1}^8 W_{ij} X_j - \theta_i \right), \quad (11)$$

式中, W_{jk} 是从输入层到隐层的权值; W_{ij} 是从隐层到输出层的权值; X_k 是输入层的输入值; X_j 是隐层神经元的输出值; θ_j 和 θ_i 分别是隐层和输出层的阈值。

4.2 神经网络的训练过程

本文利用 MATLAB 的神经网络工具箱提供的函数对动态虚拟基准站的神经网络进行训练。按照 MATLAB 神经网络的规则,隐层神经网络的决策函数采用 sigmoid 型变换函数 tansig,输出层采用线性函数 purelin,那么整个网络的输出就可以取任意值^[7]。

在对神经网络进行初始化时,按照规则输入值中应包括输入值的最大值和最小值,这样才能保证得到最佳的初始值。

4.3 训练误差目标的制定

本文提出的 GPS/INS 组合导航系统制定的指标定位误差应为 5 m。换算成地球坐标约为 5/31 (按航海作业 1 n mile = 1852.189 m,即 1 约为 31 m) = 0.161°,也即为 $(0.448 \times 10^{-4})^\circ$ 。

4.4 神经网络训练的 MATLAB 程序^[7]

```

%初始化神经网络
clc
S1 = 8;
[w1 , b1 , w2 , b2 ] = initff ( P , S1 , 'tansig ' , T , '
purelin ' );
echo off
k = pickic ;
echo on
%定义训练参数
df = 50;
me = 5000;
eg = 0.0000000201;
tp = [ df me eg ];
%网络训练
[w1 , b1 , w2 , b2 , ep , tr ] = trainlm ( w1 , b1 , 'tan-
sig ' , w2 , b2 , 'purelin ' , P , T , tp );
%绘最终误差曲线
h1 = figure ;

```

plottr (tr , eg) ;

5 实验与结论

采用上述神经网络模型进行仿真实验,当输入值为:GPS 测量值纬度是 43.904 415 277 7(°),经度是 125.317 487 500 0(°),期望值纬度是 43.904 464 555 7(°),经度是 125.318 125 693 2(°),这时数据融合后的坐标为:

$$= 43.904 517 949 1, L = 125.31 760 053 7$$

根据期望值计算出经度与纬度的误差为:

$$X = 0.000 052 267 1, Y = 0.000 055 303 7$$

从整个实验来看,纬度误差平均值为:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \times 1852.189 \times 60 = 9.145 974 287 9 \text{ m}$$

经度误差平均值为:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Y_i \times 1852.189 \times 60 = 8.808 512 865 4 \text{ m}$$

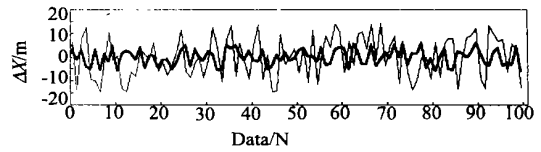


图 3 经度误差曲线

Fig. 3 Longitude error curve

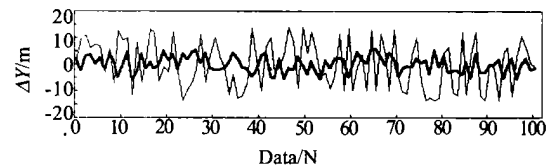


图 4 纬度误差曲线

Fig. 4 Latitude error curve

经度误差曲线见图 3,纬度误差曲线见图 4 (细线为 GPS 单独定位,粗线为数据融合后曲线)。可见,采用基于神经网络的数据融合模型的 GPS/INS 组合导航方法能大大提高飞机的动态导航精度,系统也会有迅速的跟踪能力。

参考文献:

- [1] 黄伟. 采用卡尔曼滤波器的 GPS/INS 组合系统模拟仿真[J]. 导航, 1994, 4(2): 57-69.
HUANG W. Simulation of GPS/INS integrated navigation with Kalman filter[J]. *Navigation*, 1994, 4(2): 57-69. (in Chinese)
- [2] 吴秋平. GPS/惯性组合导航系统研究进展[J]. 导航, 1998, 8(4): 1-10.
WU Q P. Survey of GPS/INS integrated navigation systems[J]. *Navigation*, 1998, 8(4): 1-10. (in Chinese)
- [3] 朱坚民. 基于神经网络的测量模型的建立及检验[J]. 光学精密工程, 2000, 8(4): 389-393.
ZHU J M. Foundation and test of measurement mode based on neural network[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(4): 389-393. (in Chinese)
- [4] 焦季成. 神经网络计算[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1996. 35-71.
JIAO L CH. *Calculation of neural network* [M], Xi'an: Publishing House of Xi'an University of Electronics Science and Technology, 1990. 35-71. (in Chinese)
- [5] 卢秋红. 基于神经网络算法的故障检测技术[J]. 光学精密工程, 2002, 10(1): 25-30.
LU Q H. Fault detecting technology based on neural network algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(1): 25-30. (in Chinese)
- [6] RUMELHART D E. Learning representation by back-propagating errors[J]. *Nature*, 1986: 533-536.
- [7] 楼顺天. 基于 MATLAB 的系统分析与设计-神经网络[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1998.
LOU SH T. *System analysis and design based on MATLAB-neural network* [M]. Xi'an: Publishing House of Xi'an University of Electronics Science and Technology, 1998. (in Chinese)

作者简介:高宪军(1965-),男,吉林白城人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在站博士后,主要研究方向为 GPS 导航系统和航空数据通信系统等。E-mail:gxj1994@TOM.com