

智能车辆 SINS/DGPS/视觉/数字地图组合导航技术

李 旭, 张为公

(东南大学 仪器科学与工程学院, 南京 210096)

摘要:为适应自动驾驶车辆的高精度、高频率与高可靠性的导航要求,提出了一种机器视觉/数字地图/CP-DGPS 共同辅助 SINS 的智能车辆组合导航方法,建立了组合导航系统的滤波模型。该滤波模型的量测信息不仅包括 GPS 与 SINS 形成的位置与姿态观测信息,还包括机器视觉/数字地图/SINS 形成的横向偏差观测信息。通过对 SINS 的多重冗余辅助,使得导航系统具备容错能力。仿真结果表明,该组合导航系统能为智能车辆提供其空间位置、速度、加速度与姿态角等众多导航信息,并具有 100 Hz 的高频输出、厘米级的导航精度和容错性能,当 GPS 较长时间中断时,通过 SINS/视觉/数字地图的组合仍能为智能车辆提供可靠的导航数据。

关键词:智能车辆;自动驾驶;组合导航;信息融合

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

SINS/DGPS/Vision/Digital Map integrated navigation technique for intelligent vehicles

LI Xu, ZHANG Wei-gong

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To satisfy the navigation demands such as good accuracy, high frequency and high reliability for autonomous intelligent vehicle, a new multi-sensor integrated navigation technique was studied. According to the characteristics of Intelligent Vehicle's navigation sensors, an integrated navigation method was proposed in which SINS is aided by Vision/Digital Map/CP-DGPS. The navigation filter model was then set up. In this filter, the observation information includes two parts: one is the position and attitude information formed by SINS/GPS while the other is the lateral deviation error information formed by Vision/Digital Map/SINS. With SINS aided redundantly, the navigation system has the fault-tolerant ability. Simulation results show that the proposed navigation system can provide abundant navigation information(including the position, velocity, acceleration and attitude etc.) at 100 Hz with cm-level navigation accuracy and good fault-tolerant performance. Even when GPS is continuously interrupted for a period, The Intelligent Vehicle can still obtain reliable navigation information by SINS/Vision/Digital Map integration.

Key words: intelligent vehicle; autonomous driving; integrated navigation; information fusion

研究表明,驾驶员的主观因素是导致许多交通事故的根本原因,约 90%的交通事故源自驾驶员的错误^[1]。为提高交通安全性及运输效率,自动驾驶智能车辆的研究受到了发达国家的高度重视,并成为这些国家所开展的 ITS、AHS、AVCS 等研究的重要内容^[1~2]。

智能车辆在高等级道路上实现无人驾驶控制的前提是其导航系统能够实时、准确地提供车辆的状态信息。根据车载导航传感器所提供的状态信息形式的不同,可将车载传感器分为能提供相对信息的传感器(如视觉、引导磁钉或电缆)和能提供绝对信息的传感器(如惯性导航和 GPS),相比之下,后者提供的信息更为丰富完备(涵盖车辆的空间位置、速度、加速度、角度、角速率等)^[3]。

不同的车载导航传感器各有优缺点,加上车辆运行环境的复杂性,仅靠单一传感器无法保证在复杂工况下仍能获取

收稿日期: 2007-03-20; 修回日期: 2007-05-18

基金项目: 江苏省汽车工程重点实验室开放基金资助项目(QC200603)、江苏省交通科学研究计划项目(06C04)

作者简介: 李旭(1975—),男,博士,讲师,从事智能车辆导航与控制方面的研究。E-mail: lixu.mail@163.com

可靠的导航信息,采用多传感器并实现它们的有机融合是最有效、最可靠的手段。因而,基于多传感器组合的智能车辆导航技术成为目前国内外的研究热点和今后的发展趋势^[3-6]。根据车载传感器特点,本文提出了一种利用低成本的机器视觉和 CP-DGPS 共同辅助 SINS 的智能车辆组合导航方法,通过仿真验证了该方法的导航性能和容错能力。

1 智能车辆 SINS/DGPS/视觉/数字地图的组合导航方法

为适应复杂工况下的智能车辆导航要求,本文提出的智能车辆 SINS/CP-DGPS/视觉/数字地图的组合导航方法,如图 1 所示。在本研究中,机器视觉用于测量车辆相对于道路中心的横向偏差,根据文献[7],在近视野情况下(即摄像机主要拍摄距离车辆较近区域),其测量精度可达到厘米级。

组合系统的量测信息不仅包括 GPS 与 SINS 形成的位置、速度或姿态等观测信息,还包括机器视觉/数字地图/SINS 形成的横向偏差观测信息。所有观测信息通过卡尔曼滤波器实现融合,并通过反馈校正惯导系统的累积误差。通常,依靠多传感器的组合来辅助惯导;当发现某一部分出现故障时,依靠其它传感器来辅助与校正惯导。智能车辆采用该组合导航方案不仅具有与 SINS 一致的高频导航输出能力,而且对惯导系统的多重辅助与校正功能,使系统具有容错能力。

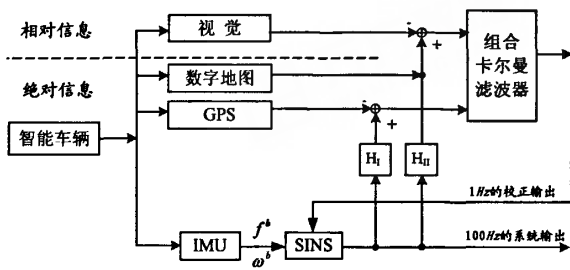


图 1 智能车辆 SINS/DGPS/机器视觉/数字地图组合导航示意图

Fig.1 Intelligent Vehicle's SINS/DGPS/Vision/Digital Map integrated navigation

2 智能车辆 SINS/DGPS/视觉/数字地图组合导航的滤波模型

2.1 系统状态方程

为便于多传感器组合导航的研究,采用当地切平面直角坐标系(简称*t*系)作为车辆导航定位的基准坐标系。车辆相对当地切平面直角坐标系的坐标值可通过其相对地心地固坐标系的坐标值经平移和旋转后获得^[8]。通过对 SINS 系统的性能及误差源的分析,组合系统的状态变量*X*共取为 15 维,包括 3 个相对切平面坐标系的位置误差 δP_e 、 δP_n 、 δh (分别对应东、北和天向), 3 个速度误差 δV_e 、 δV_n 、 δV_u , 3 个平台角误差 ψ_e 、 ψ_n 、 ψ_u , 3 个加速度计常值零偏 ∇_{α} 、 ∇_{γ} 、 ∇_{α} , 以及 3 个陀螺常值漂移 ε_{α} 、 ε_{γ} 、 ε_{α} 。组合系统状态方程可表示为^[5,8]:

$$\dot{X}(t) = F(t) \cdot X(t) + G(t) \cdot W(t) \quad (1)$$

式中,状态变量 $X = [\delta P_e \ \delta P_n \ \delta h \ \delta V_e \ \delta V_n \ \delta V_u \ \psi_e \ \psi_n \ \psi_u \ \nabla_{\alpha} \ \nabla_{\gamma} \ \nabla_{\alpha} \ \varepsilon_{\alpha} \ \varepsilon_{\gamma} \ \varepsilon_{\alpha}]^T$; 系统噪声输入矩阵 *G* 和系统状态转移阵 *F* 的取值见文献[5][8]; 系统白噪声矢量 $W = [w_{\alpha x} \ w_{\alpha y} \ w_{\alpha z} \ w_{\beta x} \ w_{\beta y} \ w_{\beta z}]^T$ 。

2.2 系统观测方程的建立

系统的观测信息包括两部分,即 SINS 与 DGPS 形成的量测信息,以及 SINS/数字地图计算得到的横向偏差与机器视觉测得的横向偏差之间的差值所构成的横向偏差量测信息。

2.2.1 位置与姿态量测信息

与舰船或飞行器等动载体相比,陆地上的车辆经常作平稳的线运动,姿态角变化不大,机动性较差,如果仅以 GPS 通常所提供的位置或速度信息作为观测量,其姿态角误差(尤其是方位角误差)等状态的可观测性较差^[9]。为保证姿态角误差的估计精度以满足正常的导航需要,在研究智能车辆 SINS/DGPS 组合时,有必要在通常的位置和速度观测信息基础上,引入姿态角观测信息。

通常,由 SINS 与 GPS 形成的量测信息是指位置量测差值和速度量测差值。由于位置和速度观测信息的相关性较大,本文只取位置量测差值。在 *t* 系下,位置量测差值为 SINS 输出的位置信息减去相应的 CP-DGPS 测量的位置信息,即三个方向的位置量测差值分别为 $\delta P_e + n_{pe}$ 、 $\delta P_n + n_{pn}$ 、 $\delta h + n_h$ (n_{pe} 、 n_{pn} 、 n_h 分别为 CP-DGPS 在东、北、天向的位置测量噪声),因此位置测量阵为单位阵。近年来,CP-DGPS 测姿技术得到了迅速发展,多天线的 DGPS 测姿系统已能够实

时精确地提供载体的姿态信息,而 SINS/DGPS 的姿态组合观测方程可在有关坐标变换理论上推导建立^[10]。设 δH_s 、 δP_s 、 δR_s 分别表示 SINS 计算输出的车辆方位角 H_s 、俯仰角 P_s 、侧倾角 R_s 相对于车辆真实的方位角 H_t 、俯仰角 P_t 、侧倾角 R_t 的误差,即 $H_s = H_t + \delta H_s$ 、 $P_s = P_t + \delta P_s$ 、 $R_s = R_t + \delta R_s$, 平台误差角 $\psi = [\psi_e \ \psi_n \ \psi_u]^T$, 则有:

$$\delta H_s = \frac{c_{11}c_{31}}{c_{11}^2 + c_{21}^2} \psi_e + \frac{c_{21}c_{31}}{c_{11}^2 + c_{21}^2} \psi_n - \psi_u, \quad \delta P_s = \frac{c_{21}}{\sqrt{1-c_{31}^2}} \psi_e - \frac{c_{11}}{\sqrt{1-c_{31}^2}} \psi_n, \quad \delta R_s = \frac{c_{23}c_{32} - c_{22}c_{33}}{c_{33}^2 + c_{32}^2} \psi_e + \frac{c_{12}c_{33} - c_{13}c_{32}}{c_{33}^2 + c_{32}^2} \psi_n \quad (2)$$

式中, c_{ij} 表示理想捷联矩阵 C_b^i 的第 i 行、 j 列处的元素。

2.2.2 横向偏差量测信息

利用视觉可以以较高精度测得距离车辆较近的前方某基准点 Q 相对于道路中心线的横向偏差^[7]。图 2 给出了 Q 与车体坐标系 $OX_bY_bZ_b$ (即载体坐标系, 简称 b 系) 以及局部切平面坐标系 $O_xY_xZ_x$ 的关系示意图。车体坐标系原点 O 位于车辆质心处, 沿车辆纵轴指向车辆前方为 OX_b , OY_b 轴沿车辆横轴指向车辆的左侧, 而 OZ_b 轴按右手规则确定。图 2 中, O 相对于 $O_xY_xZ_x$ 的坐标设为 $[x, y, z]$ 。由视觉测量横向偏差的原理^[7]可知, 基准点 Q 是一个与车体固连且位于车辆前方某处的假想点, 它相对于 $OX_bY_bZ_b$ 的坐标设为 $[a_1, b_1, c_1]$, 相对于 $O_xY_xZ_x$ 的坐标为 $[x_Q, y_Q, z_Q]$, 则根据坐标变换关系,

$$\begin{bmatrix} x_Q \\ y_Q \\ z_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + C_b^p \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于系统误差的存在, 由 SINS 解算得到的车体坐标系原点不再与车体坐标系的真正原点重合, 基准点也有类似情形。设 SINS 计算得到的车体坐标系原点和基准点分别为 \hat{O} 与 \hat{Q} , 相对于 $O_xY_xZ_x$ 的坐标分别为 $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$ 和 $[\hat{x}_Q, \hat{y}_Q, \hat{z}_Q]$ 。与式 (3) 类似, 有:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_Q \\ \hat{y}_Q \\ \hat{z}_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} + C_b^p \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式 (4) 减去式 (3), 再根据反对称矩阵与向量乘积的交换性质及 $C_b^p = [I - \psi \times] C_b^i$, 化简得:

$$\begin{bmatrix} \delta x_Q \\ \delta y_Q \\ \delta z_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} - [\psi \times] C_b^i \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} C_b^i \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} \psi_e \\ \psi_n \\ \psi_u \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $\begin{bmatrix} \delta x_Q \\ \delta y_Q \\ \delta z_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_Q - x_Q \\ \hat{y}_Q - y_Q \\ \hat{z}_Q - z_Q \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x} - x \\ \hat{y} - y \\ \hat{z} - z \end{bmatrix}.$

一方面, 基准点 Q 处的横向偏差可由 SINS 和数字地图相互配合计算得到。对于高等级路面, 由于其坡度不大, 横向偏差的计算可简化在二维平面内进行, 如图 3 所示。某时刻基准点 Q 所对应的道路中心线的两端点为 P_i 与 P_{i+1} 。它们在 $O_xY_xZ_x$ 系下的坐标分别为 (x_i, y_i) 与 (x_{i+1}, y_{i+1}) , 相应的道路中心切向与法向单位矢量分别为 \bar{k}_t 与 \bar{k}_n 。两单位矢量可由 P_i 点与 P_{i+1} 点的坐标计算得到:

$$\bar{k}_t = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(x_{i+1} - x_i)}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}} & \frac{(y_{i+1} - y_i)}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}} \end{bmatrix}^T, \quad \bar{k}_n = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(y_{i+1} - y_i)}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}} & \frac{(x_{i+1} - x_i)}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}} \end{bmatrix}^T$$

上述道路中心线是由位于其上的一系列间隔较近的点 ($\dots P_{i-1}, P_i, P_{i+1}, \dots$) 的绝对位置坐标来表示的。这些点的坐标以及道路中心切向单位矢量与法向单位矢量等都可以事先确定并存储在高精度数字地图中。当然, 应用于无人驾驶导航

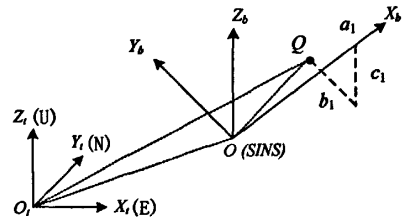


图 2 基准点与各坐标系的关系
Fig.2 Relationship between the datum mark and coordinate systems

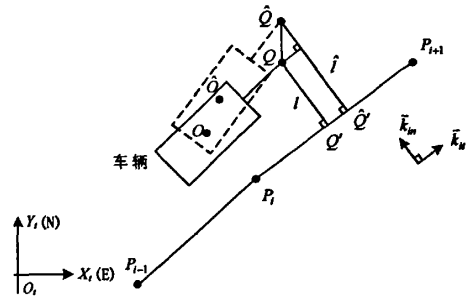


图 3 横向偏差的计算
Fig.3 Computation of lateral deviation error

的数字地图在精度和功能等方面都有特殊的要求,需事先专门制作。这样在车辆运行时,利用匹配技术^[11]并根据 SINS 的输出 $[\hat{x}_Q, \hat{y}_Q]$ 可计算横向偏差 \hat{l} :

$$\hat{l} = -\text{sgn}(s_{12}\hat{x}_Q - s_{11}\hat{y}_Q + s_{11}y_i - s_{12}x_i) \cdot |s_{12}\hat{x}_Q - s_{11}\hat{y}_Q + s_{11}y_i - s_{12}x_i| = s_{11}\hat{y}_Q - s_{12}\hat{x}_Q + s_{12}x_i - s_{11}y_i \quad (6)$$

图3中, Q' 、 \hat{Q}' 分别为真实基准点 Q' 和计算基准点 \hat{Q}' 在直线 $P_i P_{i+1}$ 上的投影。设实际的横向偏差为 l , 由图3所示关系, 不难得到:

$$\hat{l} = l + \overline{Q\hat{Q}} \cdot \bar{k}_m = l + [r_{11} \ r_{12}] [\delta x_Q \ \delta y_Q]^T \quad (7)$$

另一方面, 设视觉传感器测得的基准点 Q 处的横向偏差为 \tilde{l} , 测量噪声为 n_Q , 则有:

$$\tilde{l} = l - n_Q \quad (8)$$

将式(7)减去式(8), 并结合式(5)可推得横向偏差量测信息与状态变量关系为:

$$\delta l_Q = \hat{l} - \tilde{l} = [r_{11} \ r_{12}] [\delta x_Q \ \delta y_Q]^T + n_Q = [r_{11} \ r_{12} \ w_1 \ w_2 \ w_3] [\delta x \ \delta y \ \psi_e \ \psi_n \ \psi_u]^T + n_Q \quad (9)$$

式中, $\delta x = \delta P_e$, $\delta y = \delta P_n$; 各中间变量的取值为 $w_1 = r_{12}(a_1 c_{31} + b_1 c_{32} + c_1 c_{33})$, $w_2 = -r_{11}(a_1 c_{31} + b_1 c_{32} + c_1 c_{33})$, $w_3 = r_{11}(a_1 c_{21} + b_1 c_{22} + c_1 c_{23}) - r_{12}(a_1 c_{11} + b_1 c_{12} + c_1 c_{13})$ 。

类似上述分析, 可以得到距离车辆较近的前方另一基准点 S (相对 b 系的坐标设为 $[a_2 \ b_2 \ c_2]$) 的横向偏差量测信息与状态变量关系为:

$$\delta l_S = [r_{j1} \ r_{j2} \ u_1 \ u_2 \ u_3] [\delta P_e \ \delta P_n \ \psi_e \ \psi_n \ \psi_u]^T + n_S \quad (10)$$

式中, $[r_{j1} \ r_{j2}]^T$ 为与 S 点匹配的道路中心线段 $P_j P_{j+1}$ 的法向单位矢量, 中间变量 $u_1 = r_{j2}(a_2 c_{31} + b_2 c_{32} + c_2 c_{33})$, $u_2 = -r_{j1}(a_2 c_{31} + b_2 c_{32} + c_2 c_{33})$, $u_3 = r_{j1}(a_2 c_{21} + b_2 c_{22} + c_2 c_{23}) - r_{j2}(a_2 c_{11} + b_2 c_{12} + c_2 c_{13})$, n_S 为 S 点横向偏差视觉测量噪声。

2.2.3 组合系统的量测方程

组合系统的量测信息包括 SINS/DGPS 形成的位置与姿态量测信息, 以及基准点 Q 和 S 处的横向偏差量测信息, 即根据 2.2.1 和 2.2.2 节的讨论, 多传感器组合导航系统的量测方程可表示为:

$$Z(t) = H(t)X(t) + V(t) \quad (11)$$

式中, 量测信息 $Z(t) = [\delta P_e \ \delta P_n \ \delta h \ H_S - H_G \ P_S - P_G \ R_S - R_G \ \delta l_Q \ \delta l_S]^T$, 其中, H_G 、 P_G 、 R_G 分别表示 DGPS 测量输出的车辆方位角、俯仰角、侧倾角, 且 $H_G = H_t - n_{H_G}$, $P_G = P_t - n_{P_G}$, $R_G = R_t - n_{R_G}$; n_{H_G} 、 n_{P_G} 、 n_{R_G} 为三个姿态角的 DGPS 测量噪声。相应地 $H_S - H_G = \delta H_S + n_{H_G}$ 、 $P_S - P_G = \delta P_S + n_{P_G}$ 、 $R_S - R_G = \delta R_S + n_{R_G}$; 观测噪声向量 $V(t) = [n_{P_e} \ n_{P_n} \ n_h \ n_{H_G} \ n_{P_G} \ n_{R_G} \ n_Q \ n_S]^T$; 系统观测矩阵 $H(t)$ 为

$$H(t) = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 12} & 0 \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & \begin{bmatrix} \frac{c_{11}c_{31}}{c_{11}^2 + c_{21}^2} & \frac{c_{21}c_{31}}{c_{11}^2 + c_{21}^2} & -1 \\ \frac{c_{21}}{\sqrt{1-c_{31}^2}} & -\frac{c_{11}}{\sqrt{1-c_{31}^2}} & 0 \\ \frac{c_{23}c_{32} - c_{22}c_{33}}{c_{33}^2 + c_{32}^2} & \frac{c_{12}c_{33} - c_{13}c_{32}}{c_{33}^2 + c_{32}^2} & 0 \end{bmatrix} \\ r_{11} & r_{12} & 0 & 0_{1 \times 3} & w_1 & w_2 & w_3 & 0_{1 \times 6} \\ r_{j1} & r_{j2} & 0 & 0_{1 \times 3} & u_1 & u_2 & u_3 & 0_{1 \times 6} \end{bmatrix}$$

3 仿真结果与讨论

仿真轨迹设置成一条含有较多路况的水平环形轨迹, 如图4。该环形由 $A_1 A_2$ 、 $A_3 A_4$ 直线段和半圆弧 $A_2 A_3$ 、 $A_4 A_1$ 组成。车辆从 A_1 点开始沿方位角为 45° 的 $A_1 A_2$ 作变速直线运动: 先以 15 m/s 的初始速度和 1 m/s^2 加速度行驶 10 s , 然后以 25 m/s 的速度匀速行驶 20 s , 再以 -1 m/s^2 加速度行驶 10 s ; 之后, 车辆以 15 m/s 沿半径为 300 m 的圆弧 $A_2 A_3$ 匀速行驶; 接着, 车辆分别按照 $A_1 A_2$

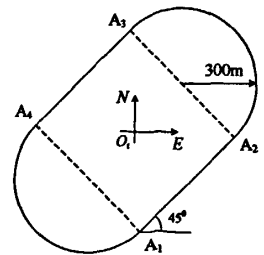


图4 仿真设定轨迹示意图
Fig.4 The simulation trajectory

段和 A_2A_3 段的行驶方式继续沿 A_3A_4 和 A_4A_1 行驶,从而完成一次完整的沿环形轨迹的运行过程;接下来,车辆按上述方式循环行驶。

仿真过程中,设 3 个陀螺、3 个加速度计的误差统计特性一致,陀螺和加速度计的随机噪声均认为是由随机常值和白噪声组成:陀螺常值漂移取为 $1(^{\circ})/h$,随机漂移取为 $6(^{\circ})/h$,加速度计的随机常值偏置取为 $0.001g$,随机偏置取为 $0.001g$;设高精度 CP-DGPS 的位置测量误差为 $0.05\text{ m}(1\sigma)$ 、姿态测量误差为 $0.4^{\circ}(1\sigma)$,设视觉的横向偏差观测噪声为标准差 0.05 m 的白噪声;基准点 Q 的坐标取值为 $a_1=2\text{ m}$ 、 $b_1=0\text{ m}$ 、 $c_1=-1\text{ m}$,基准点 S 的坐标取值为 $a_2=0.5\text{ m}$ 、 $b_2=0\text{ m}$ 、 $c_2=-1\text{ m}$ 。系统每 1 s 进行一次滤波, SINS 计算周期 10 ms ,仿真时间设为 300 s 。

为便于比较,图 5 首先给出了基于位置和姿态组合的 SINS/DGPS 组合导航仿真结果。其中,从第 145 s 开始 DGPS 因故障发生连续 15 s 的中断,在此期间组合系统仅靠 SINS 导航。由于这 15 s 内无 GPS 辅助, SINS 的累积误差不断加大,在第 160 s 输出的东、北、天向的位置误差分别达到 1.68 m 、 0.50 m 、 1.84 m 。图 5 中的导航参数误差定义为导航参数的真实值减去相应的组合导航系统输出值(表 1 和图 6 类似)。

图 6 给出了本文提出的智能车辆 SINS/DGPS/视觉/数字地图组合导航系统的仿真结果。其中, GPS 从第 145 s 开始发生故障,并一直持续 15 s (图中的两条竖直点线之间)。当各部分都正常时,依靠 GPS/视觉/数字地图来共同辅助惯导;在 GPS 发生故障期间,系统切换到由视觉/数字地图来辅助 SINS。在 GPS 长达 15 s 的故障过程中,依靠视觉/数字地图来辅助 SINS,系统只是在天向通道上存在一定的累积误差(第 160 s 时天向位置误差达到了 0.40 m),而其余导航参数性能良好,这主要是由于仅由视觉/数字地图辅助下的组合系统在天向方向上的可观

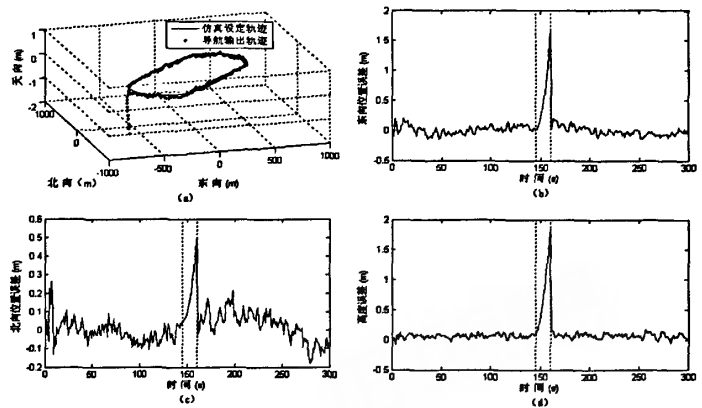


图 5 伴有 DGPS 中断的 SINS/DGPS 组合导航仿真结果
Fig.5 Simulation results of SINS/DGPS integrated navigation with GPS interrupted

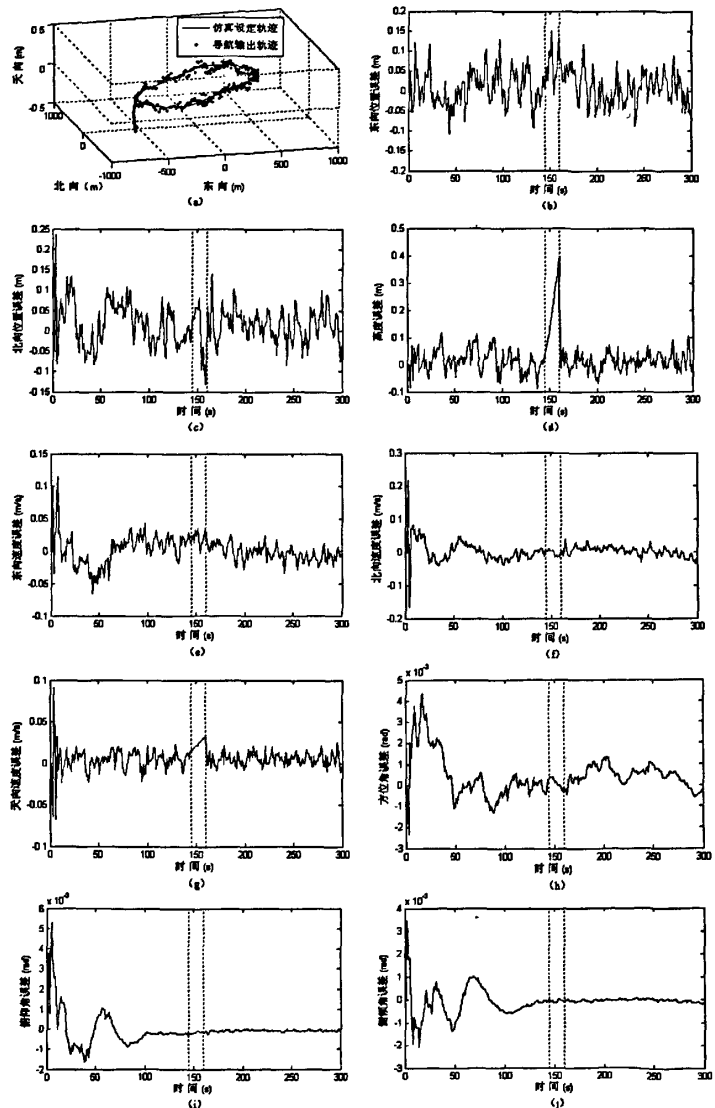


图 6 智能车辆 SINS/DGPS/视觉/数字地图组合导航仿真结果
Fig.6 Simulation results of intelligent vehicle's SINS/DGPS/Vision/Digital Map integrated navigation

测性较差。表 1 给出了 SINS/DGPS/视觉/数字地图组合系统各部分均正常工作后稳态输出参数的统计值。

表 1 智能车辆 SINS/DGPS/视觉/数字地图组合导航系统稳态输出参数统计结果
Tab.1 Statistics of Intelligent Vehicle's SINS/DGPS/Vision/Digital Map integrated navigation

导 航 误 差	东向位 置误差 (m)	北向位 置误差 (m)	天向位置 误差 (m)	东向速度 误差(m/s)	北向速度误 差 (m/s)	天向速 度误差 (m/s)	方位角误差 (rad)	俯仰角误差 (rad)	侧倾角误差 (rad)
均 值	-1.4540 $\times 10^{-4}$	0.0090	0.0129	-0.0058	-3.0427 $\times 10^{-4}$	0.0056	4.3013 $\times 10^{-4}$	-6.9792 $\times 10^{-5}$	-2.8199 $\times 10^{-5}$
标准差	0.0372	0.0364	0.0325	0.0103	0.0134	0.0076	4.5786 $\times 10^{-4}$	3.6028 $\times 10^{-5}$	5.6823 $\times 10^{-5}$

根据上述仿真结果，可以看出：

- 1) 对于 SINS/DGPS 组合系统，由于民用级 SINS 精度的限制，当 GPS 发生较短时间中断时，可能导致 SINS 累积较大的误差，无法满足智能车辆的高精度导航要求。
- 2) 对于 SINS/DGPS/视觉/数字地图组合系统，当 GPS 发生较长时间中断时，系统依靠视觉/数字地图的辅助与校正，只是在天向速度和天向通道上存在累积误差，而其余导航参数性能良好。对于运行在坡度不大的高等级路面上的智能车辆，东向、北向误差是影响横向控制精度与效果的主要因素，而天向可以忽略^[3,6]，因此，即使 GPS 出现故障发生较长时间的中断，SINS/DGPS/视觉/数字地图组合系统仍能为智能车辆提供可靠的导航输出，具有较强容错能力。

4 结束语

为适应复杂工况下的智能车辆自动驾驶导航要求，提出了一种智能车辆 SINS/CP-DGPS/视觉/数字地图的组合导航方法，通过仿真实验验证了该组合方法不仅具有高频率、高精度的导航输出能力，并且在 GPS 出现故障而发生较长时间的中断时，依靠视觉/数字地图辅助 SINS 仍能为智能车辆提供可靠的导航信息，系统具有较强的容错能力。

参考文献(Reference):

[1] Nobe S A, WANG Fei-yue. An overview of recent developments in automated lateral and longitudinal vehicle controls[C]//IEEE International Conference on SMC. Tucson, AZ, 2001. 3447-3452.

[2] J I Hernandez, Chen-Yuan Kuo. Steering control of automated vehicles using absolute positioning GPS and magnetic markers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003, 52(1): 150-161.

[3] Yang Yunchun, Jay A. Farrell. Magnetometer and differential carrier phase GPS-aided INS for advanced vehicle control[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(2): 269-281.

[4] Keith A. Redmill, Takeshi Kitajima, Umit Özgüner. DGPS/INS integrated positioning for control of automated vehicle[C]//IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings. Oakland, CA, USA, 2001. 172-178.

[5] Jay A Farrell, Tony D Givargis, Matthew J Barth. Real-time differential carrier phase GPS-aided INS[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(4): 709-720.

[6] Yang Y, Farrell J, Tan H-S. GPS-aided INS based control state calculation for AHS[C]//Proceedings of the American Control Conference. Arlington, VA, 2001. 2321-2326.

[7] 李旭, 张为公. 基于视觉的智能车辆横向偏差测量方法[J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2007, 37(1): 45-50.
LI Xu, ZHANG Wei-gong. Measurement method of intelligent vehicle's lateral deviation error based on vision[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(1): 45-50.

[8] Farrell J, Barth M. The global positioning system and inertial navigation[M]. New York: McGraw-Hill, 1998. 1-320.

[9] Ting Zhang, Bo Wang, Zhigang Han, et al. Analysis on observability of SINS/GPS[C]// Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation. China, 2004. 1584-1587.

[10] 杨艳娟, 卞鸿巍, 田蔚风, 等. 一种新的 INS/GPS 组合导航技术[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(2): 23-26, 35.
YANG Yan-juan, BIAN Hong-wei, TIAN Wei-feng, et al. A new INS/GPS integrated navigation technique[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2004, 12(2): 23-26, 35.

[11] 丁露, 陈家斌, 吕少麟, 等. 基于 Windows XP Embedded 嵌入式车辆导航系统设计与实现[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(6): 27-29.
DING Lu, CHEN Jia-bin, LV Shao-lin, et al. Design and application of vehicle navigation system based on Windows XP Embedded [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14(6): 27-29.