

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2021 年 4 月 8 日 (08.04.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/063136 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01C 21/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/111697
- (22) 国际申请日: 2020 年 8 月 27 日 (27.08.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910943387.7 2019年9月30日 (30.09.2019) CN
- (71) 申请人: 江苏大学 (JIANGSU UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。
- (72) 发明人: 崔冰波 (CUI, Bingbo); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 龚

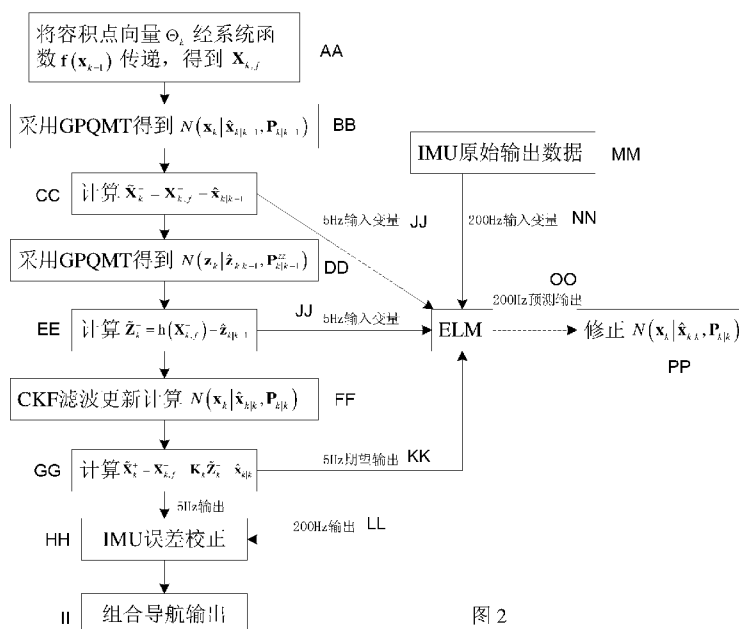
辰 (GONG, Chen); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 魏新华 (WEI, Xinhua); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 卢泽民 (LU, Zemin); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 李晋阳 (LI, Jinyang); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

(74) 代理人: 南京智造力知识产权代理有限公司 (NANJING IPZHI INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.); 中国江苏省南京市江宁区芝兰路 18 号 4 幢 1202 室, Jiangsu 211100 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT,

(54) Title: DATA-DRIVEN HIGH-PRECISION INTEGRATED NAVIGATION DATA FUSION METHOD

(54) 发明名称: 一种数据驱动的高精度组合导航数据融合方法



AA TRANSMIT VOLUME POINT VECTOR
[EXPRESSION 1] USING SYSTEM
FUNCTION F(XK-1) TO OBTAIN
[EXPRESSION 2]
BB USE GPQMT TO OBTAIN [EXPRESSION 3]
CC CALCULATE [EXPRESSION 4]
DD USE GPQMT TO OBTAIN [EXPRESSION 5]
EE CALCULATE [EXPRESSION 6]
FF PERFORM CKF FILTER UPDATING TO
CALCULATE [EXPRESSION 7]
GG CALCULATE [EXPRESSION 8]
HH PERFORM IMU ERROR CORRECTION
II INTEGRATED NAVIGATION OUTPUT
JJ 5HZ INPUT VARIABLE
KK 5HZ DESIRED OUTPUT
LL 200HZ OUTPUT
MM IMU ORIGINAL OUTPUT DATA
NN 200HZ INPUT VARIABLE
OO 200HZ PREDICTED OUTPUT
PP CORRECT [EXPRESSION 7]

图 2

(57) Abstract: A data-driven high-precision integrated navigation data fusion method. The Gaussian process is used to achieve a precise estimation of posterior distribution of the navigation parameters of an integrated navigation system and the data-driven transformation of an error matrix of sampling points. Specifically, after the integrated navigation system is powered on, fitting of an error propagation model of the sampling points is performed when time $t_k < t_n$; and when time $t_k > t_n$, approximation of a model error is performed on the basis of IMU original data and prediction of the error matrix of the sampling points is performed. On the basis of the

JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

predicted error matrix of the sampling points, the output angle increment of an upward gyroscope and the specific force of a carrier in the traveling direction in the integrated navigation system are used as input variables of the error propagation model of the sampling points to achieve updating of the sampling points, and the approximation of a matrix matching error of the system model is directly performed on the basis of sensor data. Therefore, the precise estimation of the navigation parameters of the integrated system is realized, and the robustness of a parameterized model of the integrated navigation system is improved.

(57) 摘要: 一种数据驱动的高精度组合导航数据融合方法, 采用高斯过程实现组合导航系统导航参数后验分布的精确估计, 并实现采样点误差阵的数据驱动变换, 具体为: 组合导航系统上电后, 在时刻 $t_k < t_n$ 时进行采样点误差传播模型的拟合; 当时刻 $t_k > t_n$ 时, 基于IMU原始数据进行模型误差的逼近, 进行采样点误差矩阵的预测。基于采样点预测误差阵, 将组合导航系统中的天向陀螺输出角增量、载体行进方向比力作为采样点误差传播模型的输入变量, 实现了采样点更新, 直接基于传感器数据进行系统模型矩匹配误差的逼近。由此实现了组合系统导航参数的精确估计, 改善了组合导航系统参数化模型的鲁棒性。

一种数据驱动的高精度组合导航数据融合方法

技术领域

本发明属于组合导航及多源数据融合领域，具体涉及一种数据驱动的高精度组合导航数据方法。

背景技术

导航定位在国防、工业及农业领域上都有广泛应用，如卫星导航、惯性导航、视觉导航以及 LiDAR 等，由于单一的导航系统往往无法处理复杂环境下的导航问题，应用中需要建立基于多源传感器的组合导航系统。尤其是以无人驾驶为代表的新型导航定位应用，其对导航系统的鲁棒性和智能化要求极为苛刻，多源组合导航成为优选方案。以扩展卡尔曼滤波(EKF)为代表的非线性滤波技术在组合导航领域应用广泛，通过在模型预测点处将模型函数线性化能够满足非线性滤波模型的组合滤波。然而受系统和量测不确定性影响，EKF 在矩匹配的精度、量测更新的效率以及鲁棒性等方面均无法满足实际组合导航系统的需求。以无迹卡尔曼滤波(UKF)为代表的确定性采样点逼近策略可以较EKF获得更好的矩匹配精度和收敛速度。对于状态维数较高的组合导航滤波问题，容积卡尔曼滤波(CKF)较 UKF 有更好的稳定性。

由于采用有限的确定性采样点，无法匹配状态模型的整体概率分布函数，CKF 的估计常常过于乐观即其方差值偏小。现有技术均没有考虑量测模型非线性对滤波更新的影响，且均假设高斯逼近过程中随机变量的二阶矩可以精确匹配，忽略了系统不确定性对状态估计模型的影响。

发明内容

为了克服现有技术的不足，本发明提出了一种数据驱动的高精度组合导航数据融合方法，基于 IMU（惯性测量单元）原始数据进行模型误差的逼近，实现组合系统导航参数的精确估计，改善了 CKF 组合滤波算法的鲁棒性。

为实现上述目的，本发明采用的技术方案为：

一种数据驱动的高精度组合导航数据融合方法，组合导航系统正常工作时，基于多源异构传感器数据进行导航参数和采样点递推更新；当组合导航系统受到干扰时，采样点误差传播模型给组合导航系统提供连续的辅助量测更新，所述采样点误差传播模型采用极限学习机结合惯性测量单元的原始数据进行采样点更新。

进一步，所述极限学习机的输入为状态模型的先验预测分布信息、天向陀螺输出角增量和行进方向比力，输出为后验采样点误差阵。

更进一步, 所述先验预测分布信息包括采样点预测误差阵 $\tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma)$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma)$ 。

更进一步, 所述 $\tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma) = \mathbf{X}_{k,f}^-(\gamma) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$, 其中 $\mathbf{X}_{k,f}^-(\gamma)$ 为系统函数的采样点预测矩阵, $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 为状态先验分布的均值。

更进一步, 所述 $\tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma) = \mathbf{Z}_{k,h}^-(\gamma) - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$, 其中 $\mathbf{Z}_{k,h}^-(\gamma)$ 为量测函数的采样点预测矩阵, $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$ 为似然函数的均值。

更进一步, 所述状态先验分布和似然函数采用高斯过程积分矩匹配 GPQMT 计算得到。

进一步, 所述极限学习机的输入参数频率是异步数据, 输出参数频率可选为输入参数频率的任意一种。

进一步, 所述采样点误差传播模型的训练过程为: 设 $\Xi = (\omega_k^z, a_k^y, \tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma), \tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma))^T$ 为输入变量, $\gamma = 1, \dots, 2n$, $\Xi \in \mathbb{R}^{4n+2}$ 、 $\Pi \in \mathbb{R}^{2n}$ 为输出变量; 其中 ω_k^z 为 k 时刻天向陀螺输出角增量, a_k^y 为 k 时刻载体行进方向比力输出, $\tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma)$ 、 $\tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma)$ 均为采样点预测误差阵, n 为组合导航系统状态维数;

采样点误差传播模型采用如下形式: $\sum_{i=1}^M \rho_i \pi(\phi_i \Xi_j + b_i) = \Pi_j$, $1 \leq j \leq N$, 其中 ρ_i 为网络输出权值, $N=2n$ 为 CKF 采样点个数, ϕ_i 为连接输入变量和隐层节点的输入权值, b_i 为偏置, M 为隐层节点的个数; 上式写成矩阵形式有 $\mathbf{H}\mathbf{p} = \mathbf{\Pi}$, 其中 $\mathbf{p} = (\rho_1, \dots, \rho_M)$ 为连接隐层节点与网络输出的权值, $\mathbf{\Pi} = (\Pi_1 \dots \Pi_N)$ 为样本输出变量:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \pi(\rho_1 \Xi_1 + b_1) & \cdots & \pi(\rho_M \Xi_1 + b_M) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi(\rho_1 \Xi_N + b_1) & \cdots & \pi(\rho_M \Xi_N + b_M) \end{bmatrix}$$

极限学习机训练过程保持随机产生的初始输入权值和偏置不变, 未知的网络输出权值 $\mathbf{p}$ 通过求解最小均方误差下的解 $\mathbf{p} = \mathbf{H}^+ \mathbf{\Pi}$ 得到, 其中 $\mathbf{H}^+$ 为矩阵 $\mathbf{H}$ 的广义逆。

本发明提出了一种数据驱动的高精度组合导航数据融合方法, 相比现有技术, 具有以下有益效果:

(1) 本发明为克服高斯滤波模型方差估计精度不高的缺陷, 提出一种基于高斯过程积分矩匹配 (GPQMT) 的采样点预测误差生成方法, 提高了采样点误差传播模型训练过程采样点生成的质量, 进而改善了状态先验分布和似然函数方差估计精度。

(2) 本发明为改善组合导航系统滤波的输出连续性和稳定性, 提出采样点误差阵的数据驱动变换进行采样点的更新, 改善了非线性量测更新的效率并提高了状态后验分布更新频率。

(3) 本发明得到采样点预测误差阵 $\tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma)$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma)$, 将组合导航系统中天向陀螺输出角增

量、载体行进方向比力作为采样点误差传播模型的输入变量，实现了采样点更新与不可观测状态量的直接耦合，直接基于传感器数据进行系统模型矩匹配误差的逼近，改善了组合导航系统参数化模型的鲁棒性。

附图说明

图 1 为本发明数据驱动的采样点更新流程图；

图 2 为本发明基于 ELM 的采样点误差变换流程图。

具体实施方式

下面结合附图对本发明作更进一步的说明。

一种数据驱动的高精度组合导航数据融合方法，组合导航系统正常工作时，基于多源异构传感器数据进行导航参数和采样点递推更新；当组合导航系统受到干扰时，采用高斯过程实现组合导航系统导航参数后验分布的精确估计，并实现采样点误差阵的数据驱动变换，采样点误差阵的数据驱动变换的过程包括：组合导航系统上电后，在时刻 $t_k < t_n$ 时进行采样点误差传播模型的拟合；当时刻 $t_k > t_n$ 时，基于 IMU 原始数据进行模型误差的逼近，进行采样点误差矩阵的预测。

具体过程如下：

步骤（1），采样点预测误差阵计算

如图 1 所示，在 $t_k < t_n$ 时，首先，采用 CKF 的采样点生成方法初始化容积点向量 Θ_k ，对组合导航系统函数 $f(\mathbf{x}_{k-1})$ 和量测函数 $h(\mathbf{x}_k)$ 的函数值进行计算，分别得到采样点预测矩阵 $\mathbf{X}_{k,f}^-(\gamma)$ 和 $\mathbf{Z}_{k,h}^-(\gamma)$ ；然后，基于 GPQMT 得到状态先验分布 $p(\mathbf{x}_k|\mathbf{Z}_{k-1}) \approx N(\mathbf{x}_k|\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{P}_{k|k-1})$ 和似然函数 $p(\mathbf{z}_k|\mathbf{Z}_{k-1}) \approx N(\mathbf{z}_k|\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}, \mathbf{P}_{k|k-1}^{zz})$ ， $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 、 $\mathbf{P}_{k|k-1}$ 表示状态先验分布的均值与方差， $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$ 、 $\mathbf{P}_{k|k-1}^{zz}$ 表示似然函数的均值与方差，其中 $\mathbf{Z}_{k-1} = \mathbf{z}_{1:k-1}$ 为组合系统直至 $k-1$ 时刻的量测序列；最后，计算得到采样点预测误差阵 $\tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma) = \mathbf{X}_{k,f}^-(\gamma) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma) = \mathbf{Z}_{k,h}^-(\gamma) - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$ ， $\gamma = 1, \dots, 2n$ 。

所述 GPQMT 的实现过程如下：设组合导航系统的系统模型包括系统函数 $\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{w}_k$ 和量测函数 $\mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k$ ， $\mathbf{w}_k$ 、 $\mathbf{v}_k$ 分别为系统噪声和量测噪声，将上述方程定义为统一的形式 $\mathbf{y}_i = g(\mathbf{x}_i) + \varepsilon_i$ ，GPQMT 基于已知数据集 $D = \{\mathbf{X} := [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N]^T, \mathbf{Y} := [\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_N]\}$ 推理出函数 g 的后验分布，其中 $g: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ 表示由 n 维实数空间到 1 维实数空间的映射，且 $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ ， σ_ε 为模型噪声标准差；设 $\mathbf{x}_* \in \mathcal{R}^n$ 为统计特性已知的高斯随机变量，然后基于函数 g 的后验分布进行

$g(\mathbf{x}_s)$ 函数值的预测; $\mathbf{X} := [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N]^T$ 为采样点集合, $\mathbf{y} := [\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_N]$ 为对应的函数 g 实例化值集合, $N=2n$ 为 CKF 采样点个数。下面以系统函数 $f(\mathbf{x}_{k-1})$ 的逼近为例详述函数后验分布的估计过程, 设训练维数索引为 a , $a=1, \dots, N$, 则有对第 a 维变量有均值:

$$(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})_a = (\beta_a^x)^T \mathbf{q}_a^x \quad (1)$$

$$(\mathbf{q}_a^x)_i = \alpha_{f_a}^2 \left[\mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{\Lambda}_a^{-1} + \mathbf{I} \right]^{-\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{1}{2} (\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1})^T (\mathbf{P}_{k-1|k-1} + \mathbf{\Lambda}_a)^{-1} (\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}) \right) \quad (2)$$

其中 $\beta_a^x = (\mathbf{K}_{f_a} + \sigma_{\omega_a}^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{y}_a \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{K}_{f_a}(i, j) = \mathbf{k}_{f_a}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$, i 和 j 表示组合导航系统训练数据集的点索引, $i \neq j$, $i, j = 1, \dots, N$, $\mathbf{I}$ 为 n 维单位阵, $\mathbf{y}_a$ 是高斯过程训练的第 a 维变量期望目标, $\sigma_{\omega_a}^2$ 是拟合系统方程产生的噪声方差, $\mathbf{k}_{f_a}$ 经 $f(\mathbf{x}_{k-1})$ 传播的第 a 维状态变量的核函数; $\alpha_{f_a}^2$ 是核函数的超参数, 表示第 a 维状态变量的信号方差, $\mathbf{\Lambda}_a = \text{diag}([\ell_{f,1}^2, \dots, \ell_{f,N}^2])$, 其中 $\ell_{f,i}$ 为长度缩放因子, $i = 1, \dots, N$ 。针对 $f(\mathbf{x}_{k-1})$ 不同的状态维数选择相同的核函数参数, 即 $\mathbf{k}_{f_a} = \mathbf{k}_{f_b}$ 。类似的, 第 a 维状态变量方差有:

$$(\mathbf{P}_{k|k-1}^p)_{aa} = (\beta_a^x)^T \mathbf{Q} \beta_a^x - (\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})_a^2 + \alpha_{f_a}^2 - \text{tr} \left((\mathbf{K}_{f_a} + \sigma_{\omega_a}^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{Q} \right) + \sigma_{\omega_a}^2 \quad (3)$$

$$\mathcal{Q}_{i,j} = \exp \left(2 \log(\alpha_{f_a}^2) - \frac{1}{2} (\varsigma_i \mathbf{\Lambda}_a^{-1} \varsigma_i^T + \varsigma_j \mathbf{\Lambda}_a^{-1} \varsigma_j^T - \mathbf{z}_{i,j}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{z}_{i,j}) \right) / \sqrt{|\mathbf{R}|} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{z}_{i,j} = \mathbf{\Lambda}_a^{-1} (\varsigma_i + \varsigma_j)$, $\mathbf{R} = 2\mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{\Lambda}_a^{-1} + \mathbf{I}$, $\varsigma_i = \mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$;

当计算第 a 维状态变量与第 b 维状态变量的方差时, 即计算后验方差的非对角线元素有在:

$$(\mathbf{P}_{k|k-1}^p)_{ab} = (\beta_a^x)^T \mathbf{Q} \beta_b^x - (\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})_a (\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})_b \quad (5)$$

设系统噪声 $\mathbf{w}_k$ 的方差为 $\mathbf{Q}_k$, 则有 $(\mathbf{P}_{k|k-1})_{aa} = (\mathbf{P}_{k|k-1}^p)_{aa} + (\mathbf{Q}_k)_{aa}$, 即产生后验方差对角线元素, 综合式 (5) 可得基于 GPQMT 生成的后验方差。

类似的, 构造 $h(\mathbf{x}_k)$ 的第 a 维状态变量的核函数 $\mathbf{k}_{h_a}$, $\alpha_{h_a}^2$ 是核函数的超参数, 表示第 a 维状态变量的信号方差, 基于式 (1)、(3) 和 (5) 可得经 $h(\mathbf{x}_k)$ 预测的后验矩估计值, 再考虑量测噪声的方差 R_k 可得 $N(\mathbf{z}_k | \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}, \mathbf{P}_{k|k-1}^{zz})$ 。针对 $h(\mathbf{x}_k)$ 不同的状态维数选择相同的核函数参数, 即 $\mathbf{k}_{h_a} = \mathbf{k}_{h_b}$, 而在预测 $f(\mathbf{x}_{k-1})$ 和 $h(\mathbf{x}_k)$ 后验分布时, 选择不同的超参数集合 $\theta_f := \{\mathbf{k}_f, \alpha_f, \ell_{f,i}\}$ 、 $\theta_h := \{\mathbf{k}_h, \alpha_h, \ell_{h,i}\}$ 。

步骤 (2)，采样点误差传播模型的训练与预测

首先，基于CKF滤波框架、容积点向量 Θ_k 计算导航参数联合概率分布的预测协方差阵 $\mathbf{P}_{k|k-1}^{xz}$ ，状态后验分布的均值和方差为 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ 、 $\mathbf{P}_{k|k}$ ，并计算后验采样点误差阵 $\tilde{\mathbf{X}}_{k,s1}^+(\gamma)$ 如下：

$$\tilde{\mathbf{X}}_{k,s1}^+(\gamma) = \mathbf{X}_{k,f}^-(\gamma) - \mathbf{K}_k \tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}, \quad \gamma = 1, \dots, 2n \quad (6)$$

以惯性测量单元 (IMU) 天向陀螺输出角增量 ω_k^z 、载体行进方向比力输出 a_k^y 、 $\tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma)$ 、 $\tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma)$ 为输入变量，以 $\tilde{\mathbf{X}}_{k,s1}^+(\gamma)$ 为期望输出进行采样点误差阵传递函数 $T(\Xi)$ 的拟合，其中下标 s1 表示当前误差阵为训练阶段后验信息。其次，当时刻 $t_k > t_N$ 时，进行采样点误差矩阵的预测，其步骤如图 2 虚线所示：1) 以 ω_k^z 、 a_k^y 、 $\tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma)$ 、 $\tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma)$ 为预测模型的输入变量，预测得到 t_k 时刻采样点后验传播误差阵 $\tilde{\mathbf{X}}_{k,s2}^+(\gamma)$ ，其中下标 s2 表示当前误差阵为预测阶段后验信息；2) 采用CKF 计算得到状态变量后验分布的均值和方差为 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ 、 $\mathbf{P}_{k|k}$ ，以 IMU 输出频率 200Hz 进行后验采样点误差阵 $\tilde{\mathbf{X}}_{k,s2}^+(\gamma)$ 的预测，并对 5Hz 输出的后验分布 $N(\mathbf{x}_k | \hat{\mathbf{x}}_{k|k}, \mathbf{P}_{k|k})$ 进行校正；3) 将 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ 与 $\tilde{\mathbf{X}}_{k,s2}^+(\gamma)$ 相加得到 t_{k+1} 时刻的采样点 $\mathbf{x}_k^+(\gamma)$ ，进而完成下一滤波周期采样点的初始化与预测采样点误差阵的计算。

采样点误差传播模型（即传递函数 $T(\Xi)$ ）的训练和预测过程均采用极限学习机 (ELM) 实现，其内容为：设 $\Xi = (\omega_k^z, a_k^y, \tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma), \tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma))^T$ 为输入变量， $\gamma = 1, \dots, 2n$ ， $\Xi \in \mathbb{R}^{4n+2}$ ， $\Pi \in \mathbb{R}^{2n}$ 为输出变量即后验采样点误差阵。设学习样本的个数为 $N=2n$ ，即CKF 采样点的个数，则有 M 个隐层节点的单隐藏层前馈神经网络（极限学习机）可表示为：

$$\sum_{i=1}^M \rho_i f(\phi_i \Xi_j + b_i) = \Pi_j, \quad 1 \leq j \leq 2n \quad (7)$$

其中 ρ_i 为网络输出权值， ϕ_i 为连接输入变量和隐层节点的输入权值， b_i 为偏置；上式写成紧凑的矩阵形式有 $\mathbf{H}\boldsymbol{\rho} = \boldsymbol{\Pi}$ ，其中 $\boldsymbol{\rho} = (\rho_1, \dots, \rho_M)$ 为连接隐层节点与网络输出的权值，

$\boldsymbol{\Pi} = (\Pi_1, \dots, \Pi_N)$ 为样本输出变量：

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \pi(\rho_1 \Xi_1 + b_1) & \cdots & \pi(\rho_M \Xi_1 + b_M) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi(\rho_1 \Xi_N + b_1) & \cdots & \pi(\rho_M \Xi_N + b_M) \end{bmatrix} \quad (8)$$

ELM 训练过程保持随机产生的初始输入权值和偏置不变，未知的网络输出权值 $\boldsymbol{\rho}$ 可通过求解最小均方误差下的解 $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{H}^+ \boldsymbol{\Pi}$ 得到，其中 $\mathbf{H}^+$ 为矩阵 $\mathbf{H}$ 的广义逆。训练过程完成网络输出

权值的计算后,在模型工作在预测模式时,输入变量 Ξ 可得到预测的采样点误差阵输出 $\tilde{\mathbf{X}}_{k,s2}^+(\gamma)$,
 $\gamma = 1, \dots, 2n$ 。

基于 $\tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma)$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma)$,将组合导航系统中的天向陀螺输出角增量、载体行进方向比力作为采样点误差传播模型的输入变量,实现了采样点更新与不可观测状态量的直接耦合,直接基于传感器数据进行系统模型(系统函数 $f(\mathbf{x}_{k-1})$ 和量测函数 $h(\mathbf{x}_k)$)矩匹配误差的逼近,改善了组合导航系统参数化模型的鲁棒性。

以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出:对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

权 利 要 求 书

1.一种数据驱动的高精度组合导航数据融合方法，其特征在于：组合导航系统正常工作时，基于多源异构传感器数据进行导航参数和采样点递推更新；当组合导航系统受到干扰时，采样点误差传播模型给组合导航系统提供连续的辅助量测更新，所述采样点误差传播模型采用极限学习机结合惯性测量单元的原始数据进行采样点更新。

2.根据权利要求1所述的数据驱动的高精度组合导航数据融合方法，其特征在于：所述极限学习机的输入为状态模型的先验预测分布信息、天向陀螺输出角增量和行进方向比力，输出为后验采样点误差阵。

3.根据权利要求2所述的数据驱动的高精度组合导航数据融合方法，其特征在于：所述先验预测分布信息包括采样点预测误差阵 $\tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma)$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma)$ 。

4.根据权利要求3所述的数据驱动的高精度组合导航数据融合方法，其特征在于：所述 $\tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma) = \mathbf{X}_{k,f}^-(\gamma) - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ ，其中 $\mathbf{X}_{k,f}^-(\gamma)$ 为系统函数的采样点预测矩阵， $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 为状态先验分布的均值。

5.根据权利要求3所述的数据驱动的高精度组合导航数据融合方法，其特征在于：所述 $\tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma) = \mathbf{Z}_{k,h}^-(\gamma) - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$ ，其中 $\mathbf{Z}_{k,h}^-(\gamma)$ 为量测函数的采样点预测矩阵， $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$ 为似然函数的均值。

6.根据权利要求4或5所述的数据驱动的高精度组合导航数据融合方法，其特征在于：所述状态先验分布和似然函数采用高斯过程积分矩匹配 GPQMT 计算得到。

7.根据权利要求2所述的数据驱动的高精度组合导航数据融合方法，其特征在于：所述极限学习机的输入参数频率是异步数据，输出参数频率可选为输入参数频率的任意一种。

8.根据权利要求1所述的数据驱动的高精度组合导航数据融合方法，其特征在于：所述采样点误差传播模型的训练过程为：设 $\Xi = (\omega_k^z, a_k^y, \tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma), \tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma))^T$ 为输入变量， $\gamma = 1, \dots, 2n$ ，

$\Xi \in \mathbb{R}^{4n+2}$ 、 $\Pi \in \mathbb{R}^{2n}$ 为输出变量；其中 ω_k^z 为 k 时刻天向陀螺输出角增量， a_k^y 为 k 时刻载体行进方向比力输出， $\tilde{\mathbf{X}}_k^-(\gamma)$ 、 $\tilde{\mathbf{Z}}_k^-(\gamma)$ 均为采样点预测误差阵， n 为组合导航系统状态维数；

采样点误差传播模型采用如下形式： $\sum_{i=1}^M \rho_i \pi(\phi_i \Xi_j + b_i) = \Pi_j$ ， $1 \leq j \leq N$ ，其中 ρ_i 为网络输出权值， $N=2n$ 为 CKF 采样点个数， ϕ_i 为连接输入变量和隐层节点的输入权值， b_i 为偏置， M 为隐层节点的个数；上式写成矩阵形式有 $\mathbf{H}\mathbf{p} = \mathbf{\Pi}$ ，其中 $\mathbf{p} = (\rho_1, \dots, \rho_M)$ 为连接隐层节点与网络输出的权值， $\mathbf{\Pi} = (\Pi_1 \ \dots \ \Pi_N)$ 为样本输出变量：

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \pi(\rho_1 \Xi_1 + b_1) & \cdots & \pi(\rho_M \Xi_1 + b_M) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \pi(\rho_1 \Xi_N + b_1) & \cdots & \pi(\rho_M \Xi_N + b_M) \end{bmatrix}$$

极限学习机训练过程保持随机产生的初始输入权值和偏置不变，未知的网络输出权值 $\boldsymbol{\rho}$ 通过求解最小均方误差下的解 $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{H}^+ \boldsymbol{\Pi}$ 得到，其中 $\mathbf{H}^+$ 为矩阵 $\mathbf{H}$ 的广义逆。

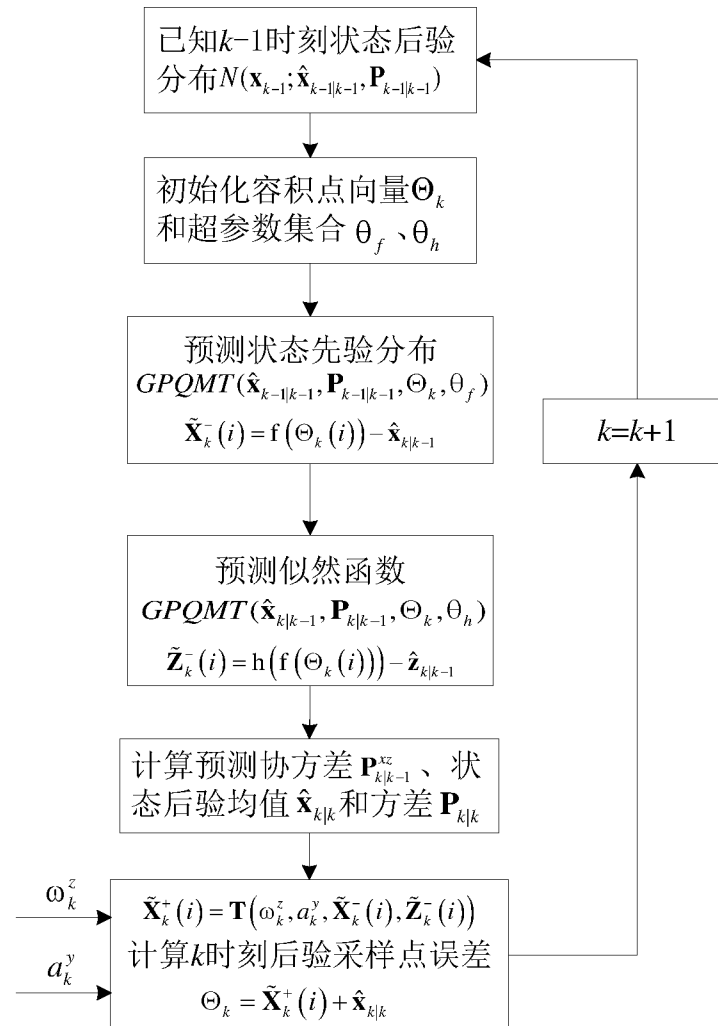


图 1

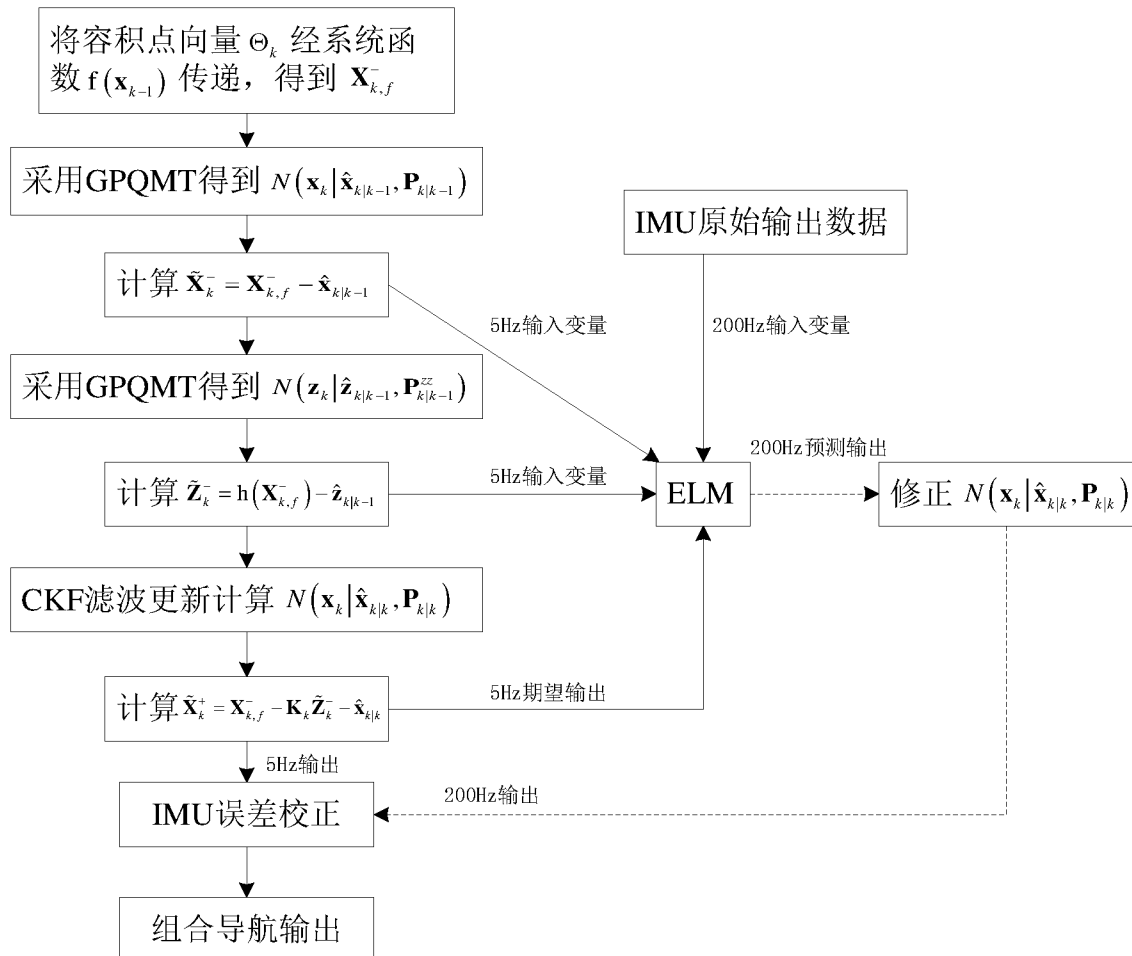


图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/111697

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01C 21/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01C21

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNKI, CNPAT, WPI, EPODOC, IEEE, ISI: 建模, 神经网络, 前馈, 组合, 极限学习机, 误差, 模型, 导航, 融合, 惯导, 惯组; INS, IMU, model+, feed+, neural, network, SLFN+, ELM, extreme, learning, machine?, fus+, navigat+, integrat+, SINS, SIMU, GPS, GNSS

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 110702095 A (JIANGSU UNIVERSITY) 17 January 2020 (2020-01-17) claims 1-8	1-8
PX	DENGAO LI, et al. "A Novel Hybrid Fusion Algorithm for Low-Cost GPS/INS Integrated Navigation System During GPS Outages." <i>IEEE Access.</i> , Vol. 8, 26 March 2020 (2020-03-26), ISSN: 2169-3536, pp. 53985-53986	1,
X	CN 105180935 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 23 December 2015 (2015-12-23) description, paragraphs [0004]-[0046]	1,
X	温雅丽 (WEN, Yali). "面向小型旋翼无人机的低成本组合导航算法研究 (The Low-Cost Integrated Navigation System for Small Rotor UAV)" <i>中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技II辑 (Chinese Master's Theses Full-text Database, Engineering Science II)</i> , No. 08, 15 August 2016 (2016-08-15), ISSN: 1674-0246, pp. 52-56	1,



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

29 October 2020

Date of mailing of the international search report

01 December 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/111697

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	E. S. Abdolkarimi, et al. "A wavelet-extreme learning machine for low-cost INS/GPS navigation system in high-speed applications." <i>GPS Solutions.</i> , Vol. 22, No. 15, 15 November 2017 (2017-11-15), ISSN: 1080-5370, pp. 2-7	1,
A	CN 107390246 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 24 November 2017 (2017-11-24) entire document	1-8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/111697

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	110702095	A	17 January 2020	None			
CN	105180935	A	23 December 2015	CN	105180935	B	06 February 2018
CN	107390246	A	24 November 2017	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/111697

A. 主题的分类 G01C 21/00 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																	
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G01C21 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNKI, CNPAT, WPI, EPDOC, IEEE, ISI: 建模, 神经网络, 前馈, 组合, 极限学习机, 误差, 模型, 导航, 融合, 惯导, 惯组; INS, IMU, model+, feed+, neural, network, SLFN+, ELM, extreme, learning, machine?, fus+, navigat+, integrat+, SINS, SIMU, GPS, GNSS																	
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 110702095 A (江苏大学) 2020年 1月 17日 (2020 - 01 - 17) 权利要求1-8</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>DENGAO LI, et al. "A Novel Hybrid Fusion Algorithm for Low-Cost GPS/INS Integrated Navigation System During GPS Outages." IEEE Access., 第8卷, 2020年 3月 26日 (2020 - 03 - 26), ISSN: 2169-3536, 第53985-53986页</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>CN 105180935 A (东南大学) 2015年 12月 23日 (2015 - 12 - 23) 说明书第[0004]-[0046]段</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>温雅丽. "面向小型旋翼无人机的低成本组合导航算法研究." 中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技 II 辑., 第08期, 2016年 8月 15日 (2016 - 08 - 15), ISSN: 1674-0246, 第52-56页</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 110702095 A (江苏大学) 2020年 1月 17日 (2020 - 01 - 17) 权利要求1-8	1-8	PX	DENGAO LI, et al. "A Novel Hybrid Fusion Algorithm for Low-Cost GPS/INS Integrated Navigation System During GPS Outages." IEEE Access., 第8卷, 2020年 3月 26日 (2020 - 03 - 26), ISSN: 2169-3536, 第53985-53986页	1	X	CN 105180935 A (东南大学) 2015年 12月 23日 (2015 - 12 - 23) 说明书第[0004]-[0046]段	1	X	温雅丽. "面向小型旋翼无人机的低成本组合导航算法研究." 中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技 II 辑., 第08期, 2016年 8月 15日 (2016 - 08 - 15), ISSN: 1674-0246, 第52-56页	1
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
PX	CN 110702095 A (江苏大学) 2020年 1月 17日 (2020 - 01 - 17) 权利要求1-8	1-8															
PX	DENGAO LI, et al. "A Novel Hybrid Fusion Algorithm for Low-Cost GPS/INS Integrated Navigation System During GPS Outages." IEEE Access., 第8卷, 2020年 3月 26日 (2020 - 03 - 26), ISSN: 2169-3536, 第53985-53986页	1															
X	CN 105180935 A (东南大学) 2015年 12月 23日 (2015 - 12 - 23) 说明书第[0004]-[0046]段	1															
X	温雅丽. "面向小型旋翼无人机的低成本组合导航算法研究." 中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技 II 辑., 第08期, 2016年 8月 15日 (2016 - 08 - 15), ISSN: 1674-0246, 第52-56页	1															
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																	
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> "T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件													
* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件																
国际检索实际完成的日期 2020年 10月 29日		国际检索报告邮寄日期 2020年 12月 1日															
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		授权官员 徐建营 电话号码 86-(10)53962421															

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
X	E. S. Abdolkarimi, et al. "A wavelet-extreme learning machine for low-cost INS/GPS navigation system in high-speed applications." GPS Solutions., 第22卷, 第15期, 2017年 11月 15日 (2017 - 11 - 15), ISSN: 1080-5370, 第2-7页	1
A	CN 107390246 A (电子科技大学) 2017年 11月 24日 (2017 - 11 - 24) 全文	1-8

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/111697

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	110702095	A	2020年 1月 17日	无	
CN	105180935	A	2015年 12月 23日	CN 105180935	B 2018年 2月 6日
CN	107390246	A	2017年 11月 24日	无	