

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210268

基于IMU的机械臂末端执行器姿态优化*

汪坤^{1,2} 张国良^{1,2} 张自杰^{1,2} 王艺成^{1,2}

(1.四川轻化工大学自动化与信息工程学院 自贡 643000; 2.人工智能四川省重点实验室 自贡 643000)

摘要: 为了补偿机器人关节扭转不足和末端执行器连接等造成的末端执行器姿态误差,提出一种基于惯性测量单元在线获取末端姿态的方法。首先将整个机械臂系统的运动过程分为静态和动态过程。静态时,由于外部加速度噪声较小,提出使用加速度计根据当地重力估计末端执行器姿态角的方法。动态时,针对系统外部加速度噪声和陀螺仪零漂、比例因子误差等影响测量精度的问题,提出一种基于噪声统计方法的自适应扩展卡尔曼滤波算法。根据加速度计的测量值,更新观测噪声方差阵的权重,从而调节卡尔曼增益,降低加速度噪声对测量精度的影响。实验结果表明:静态时,通过静态算法估算的姿态角误差平均值为 0.07° 、 0.05° 、 0.2° ;动态时,本文算法可以很好补偿外部加速度的对姿态的影响,能有效提高姿态测量精度,相比于EKF算法,姿态角平均误差分别降低了 2.69° 、 1.01° 、 0.5° 。

关键词: 机械臂;姿态估计;卡尔曼滤波;自适应

中图分类号: TP241.2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

IMU-based attitude optimization of the robotic arm end effector

Wang Kun^{1,2} Zhang Guoliang^{1,2} Zhang Zijie^{1,2} Wang Yicheng^{1,2}

(1. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

2. Artificial Intelligence Key Laboratory of Sichuan Province, Zigong 643000, China)

Abstract: In order to compensate for the end effector attitude error caused by insufficient torsion of the robot joint and the end effector connection, a method based on inertial measurement unit to obtain the end attitude online is proposed. First of all, the motion process of the entire robotic arm system is divided into static and dynamic processes. At static, due to the small external acceleration noise, a method for estimating the attitude angle of the end effector based on local gravity using an accelerometer is proposed. In dynamic time, an adaptive extended Kalman filtering algorithm based on noise statistics is proposed for the problems of external acceleration noise, gyroscope zero drift, and scale factor error that affect the measurement accuracy. Based on the measurements of the accelerometer, the weights of the observed noise variance array are updated to adjust the Kalman gain and reduce the effect of acceleration noise on the measurement accuracy. Experimental results show that the average attitude angle error estimated by the static algorithm is 0.07° , 0.05° , 0.2° ; In dynamic time, the proposed algorithm can compensate well for the influence of external acceleration on attitude, and can effectively improve the attitude measurement accuracy, compared with the EKF algorithm, the average error of attitude angle is reduced by 2.69° , 1.01° , 0.5° .

Keywords: robotic arm; attitude estimation; Kalman filtering; adaptive

0 引言

机械臂运动学模型往往是在理想情况下构建的,与实际运动学模型参数存在误差。运动学参数误差包含几何误差和非几何误差^[1];几何参数误差主要是机器人的运动学模型和实际运动学模型之间差异导致的;非几何误差的引入是多方面的,包含末端负载、场景温度等原因。机械臂在

操作过程中的位姿误差是多种因素的结果,存在难以实时估计出末端执行器准确位姿的问题。

描述机器人末端执行器位姿包含位置和姿态两方面。可以通过D-H参数法计算机械臂执行器姿态,但存在结构性误差。当机械臂末端添加重物后引入的非线性误差可以通过系统辨识的方法辨识出误差系数。刘志等^[2]通过使用基于Gauss过程回归预测和测量平差模型修正位姿误差。

收稿日期:2022-06-09

* 基金项目:四川省应用基础研究项目(2019YJ00413)资助

唐越等^[3]通过 MD-H 参数误差补偿机械臂末端定位精度。此外,也可以通过添加外部传感器获取机械臂末端姿态,如 IMU、视觉传感器等。Digo 等^[4]提出一种基于惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)的仿人机器人上肢典型姿态实时估计方法。李旭妍等^[5]基于扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)算法设计出一套用于姿态测量的航姿参考系统。由于陀螺仪存在误差累计的缺点,因此 IMU 常与不存在误差累计的传感器联用,如 GPS、超宽带无线通信技术(ultra wideband, UWB)、里程计、相机等传感器。张文等^[6]提出一种基于深度相机和 IMU 组合的自主定位方法。江朝军等^[7]提出了一种基于 IMU 与 UWB 结合的弹跳机器人位姿检测方案。IMU 的误差主要是系统结构引起的误差、陀螺仪的零漂、温度、震动等。通过对误差补偿,从而提高测量精度。Balek 等^[8]利用多项式近似进行温度补偿,以获得接近实验室条件的现场测量精度。Saeed 等^[9]通过找出误差系数对温度的依赖关系对温度漂移进行补偿。Uzair 等^[10]对传感器误差模型参数进行估算,并用于对加速度计生成的数据进行实时校正。程为彬等^[11]根据均衡校正点设计校正矩阵,校正 IMU 各种系统误差。另外,也可通过优化系统融合算法提高精度。班朝等^[12]提出一种基于四元素的自适应扩展卡尔曼滤波算法优化机器人末端姿态。魏韡等^[13]提出一种改进自适应互补滤波算法优化三级流水线算法提高姿态解算速度和精度。马星河等^[14]提出一种改进自适应鲁棒卡尔曼滤波算法改善随机误差累计的问题。Parag 等^[15]提出了一种采用非线性和线性版本的互补滤波器,分别校正陀螺仪偏置和估计系统姿态角。Simone 等^[16]提出一种基于四元数法的两级扩展卡尔曼滤波器估计载体的姿态。以上算法在对姿态估计精度上都有一定的提高,但对系统中的有害加速度的处理较少。

由于末端执行器的引入、机械臂关节的扭转不准确、环境温度等原因造成末端执行器姿态误差。针对这一问题,本文通过在机械臂末端执行器安装 MEMS-IMU 在线估计末端执行器姿态。依据噪声统计的思想,设计了一种基于欧拉角的自适应扩展卡尔曼滤波器估计末端执行器姿态。根据机械臂不同的运动加速度,在线调节卡尔曼滤波增益,消除机械臂系统加速度对姿态估计精度的影响,提高测量精度。

1 IMU 姿态表示与解算

在定位系统中,为了准确表示载体的位姿、运动速度等,在 IMU 的安装中心建立坐标系 b 。为了便于描述和解算 IMU 数据,选取地理坐标系“东北天”为参考坐标系 n 。规定旋转方式为“XYZ”,如图 1 所示。坐标系分别绕 x , y , z 轴旋转 r , θ , φ 角度得新的坐标系。

那么空间中,载体坐标系 b 与参考坐标系 n 之间的坐标变换关系可以表示为:

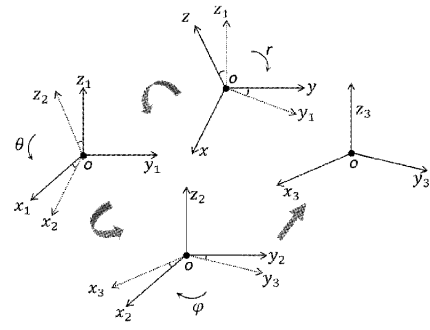


图 1 坐标系之间的转换方式

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = C_n^b \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

由加速度计测量原理可知,加速度计测量值和外部加速度之间的关系可以表示为:

$$f^b = C_n^b (g + a) + v \quad (2)$$

其中,外部运动加速度为 a ,重力加速度矢量为 g ,加速度噪声为 v 。

当系统静止时,外部加速度 $a = 0$,由于加速度计静态稳定性高,动态稳定性低。因此,静态时,噪声较小,可以忽略不计。将重力加速度 g 映射到载体坐标系中,得:

$$\begin{bmatrix} f_x^b \\ f_y^b \\ f_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin r \sin \varphi + \sin \theta \cos r \cos \varphi \\ -\sin \varphi \cos r + \sin \theta \sin r \cos \varphi \\ \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix} g \quad (3)$$

如式(3)所示,可得到静态时,机械臂末端姿态角。

当系统处于运动时,为了便于计算,姿态计算采取“ZXY”的旋转方式。

$$\omega_{nb}^b = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_Y \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_Y C_X \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\omega_{nb}^b: [\omega_{nbx}^b \ \omega_{nby}^b \ \omega_{nbz}^b]^T$ 为陀螺仪输出, C_Y, C_X 为绕 Y, X 轴的旋转矩阵。

如式(4)所示,可推导出欧拉角微分方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \Gamma \omega_{nb}^b \quad (5)$$

$$\text{其中, } \Gamma = \begin{bmatrix} \cos r & 0 & \sin r \\ \sin r \tan \theta & 1 & -\cos r / \tan \theta \\ -\sin r / \cos \theta & 0 & \cos r / \cos \theta \end{bmatrix}$$

由于陀螺仪存在偏置、比例因子误差、交轴耦合等误差存在,陀螺仪的测量误差模型可描述为:

$$\tilde{\omega} = \omega + b_g + S\omega + N\omega + \varepsilon_g \quad (6)$$

其中, $\tilde{\omega}$ 为陀螺仪测量值; ω 为角速度真值; b_g 为陀螺仪偏置; S 为比例因子误差矩阵; N 为三轴陀螺仪交轴耦合形成的非正交矩阵; ε_g 为随机噪声。

如式(5)、(6)所示,可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{r} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \mathbf{F} \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_{nbx}^b - b_{gx} - S_x \tilde{\omega}_{nbx}^b \\ \tilde{\omega}_{nby}^b - b_{gy} - S_y \tilde{\omega}_{nby}^b \\ \tilde{\omega}_{nbz}^b - b_{gz} - S_z \tilde{\omega}_{nbz}^b \end{bmatrix} - \mathbf{N} \tilde{\omega}_{nb}^b \right\} \quad (7)$$

MEMS 器件的偏置、比例因子误差受环境影响较大。交轴耦合受环境影响较小,滤波过程可忽略交轴耦合的影响。因此,搭建由欧拉角、偏置、比例因子误差为状态向量的状态方程:

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}) + \mathbf{G}\mathbf{w} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{X} = [\Psi \ b_g \ \mathbf{S}]^T$, 由欧拉角向量 $\Psi: [\theta \ r \ \varphi]^T$, 偏置向量 $b_g: [b_{gx} \ b_{gy} \ b_{gz}]$, 比例因子误差系数 $\mathbf{S}: [S_x \ S_y \ S_z]^T$; \mathbf{G} 为噪声驱动矩阵; \mathbf{w} 为过程激励噪声。

因此,系统状态方程可描述为:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_{nb}^b - b_g - \mathbf{S} \tilde{\omega}_{nb}^b \\ b_g \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} + \mathbf{G}\mathbf{w} \quad (9)$$

其中, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$; $\mathbf{G} = \mathbf{A}; \tilde{\omega}_{nb}^b$ 为陀螺仪的测量值。

当系统处于静态时,加速度计测量值与重力矢量之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} f_x^b \\ f_y^b \\ f_z^b \end{bmatrix} = \mathbf{C}_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin r \cos \theta \\ \sin \theta \\ \cos r \cos \theta \end{bmatrix} \mathbf{g} \quad (10)$$

计算得到:

$$\begin{bmatrix} \theta \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arcsin(f_y^b / \mathbf{g}) \\ \arctan(f_x^b / f_z^b) \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过加速度计计算的 θ 和 r 可得坐标系 n 到坐标系 b 的方向余弦矩阵 \mathbf{C}_b^n :

$$\mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} \cos r & 0 & \sin r \\ \sin r \sin \theta & \cos \theta & -\sin \theta \cos r \\ -\sin r \cos \theta & \sin \theta & \cos r \cos \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

经过倾斜补偿,磁力计通过地磁场得到的 \mathbf{H}^b 映射到坐标系 n 中得到 \mathbf{H}^n ,

$$\mathbf{H}^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{H}^b \quad (13)$$

求得磁力计计算得到的偏航角:

$$\varphi = \arctan(H_x^n / H_y^n) \quad (14)$$

由上述式子可知,当机械臂运动时,加速度计测量的加速度包含重力和末端的运动加速度。系统中增加了外部运动加速度,引入了加速度计的观测噪声。构建的观测模型为:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{v} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X} + \mathbf{v} \quad (15)$$

其中,测量值 $\mathbf{Z}: [\theta \ r \ \varphi]^T$, 其中 θ 和 r 为加速度计的计算值, φ 为磁力计的计算值; \mathbf{H} 为观测矩阵; \mathbf{v} 为观测噪声。

2 自适应扩展卡尔曼滤波算法设计

2.1 扩展卡尔曼滤波算法模型

在工程上,大部分系统并非理想的线性系统。对于非线性系统,通常的解决办法近似线性化后,再使用一般卡尔曼滤波算法。根据欧拉角的一阶离散更新方程和系统状态方程,构建卡尔曼滤波的状态方程为:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1} + f(\mathbf{X}_{k-1}) + \mathbf{w}_k \quad (16)$$

基于 EKF 模型,通过对状态函数的非线性部分在上一个状态进行泰勒级数展开,并保留一阶项,忽略高阶项来近似线性化状态模型方程。线性近似化 $f(\mathbf{X}_{k-1})$ 可得 $\Phi_k |_{k-1}$ 。因此系统状态方程可描述为:

$$\mathbf{X}_k = \Phi_k |_{k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{w}_k \quad (17)$$

假设过程激励噪声 $\mathbf{w}_k \sim N(0, \mathbf{Q})$, 观测噪声 $\mathbf{v} \sim N(0, \mathbf{R})$ 。根据观测方程和线性化状态方程构建卡尔曼滤波模型。经过初始化后,带入一般卡尔曼滤波模型。经过卡尔曼滤波的预测和更新后,获取最优估计姿态。卡尔曼滤波算法如图 2 所示。

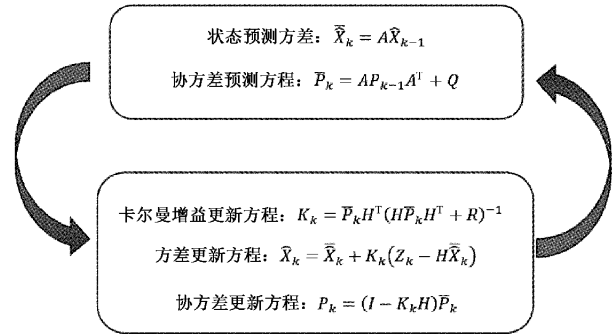


图 2 卡尔曼滤波算法基本步骤

2.2 自适应算法设计

使用加速度计进行姿态估计的假设是没有外部加速度(即 MEMS 器件载体保持静止)或测量噪声可以体现在低加速度中。在这种情况下,比力矢量近似等于重力矢量。然而,在动态的情况下,外部加速度会导致姿态测量存在误差。在这种情况下,如果测量更新的不确定度与低动态情况下的权重相同,则会引入副作用并导致性能下降。因此,需要自适应地调整测量噪声方差矩阵 \mathbf{R} , 以最优地混合陀螺仪、加速度计和磁强计数据,从而获得准确的姿态结果。考虑到系统处于动态时,加速度计的测量值为重力矢量和外部加速度的和,导致对静态欧拉角的估算偏差较大,使观测测量失去了较好的校准能力。因此,基于噪声统计的思想,设计了一种自适应算法。由于机械臂在整个运动过程中,包含的动态加速度主要影响观测过程,因此采取基于加速度大小改进矩阵 \mathbf{R} 的方式自适应调节卡尔曼增益 K_k 来消

除外部加速度对姿态估算的误差。外部加速度 a 的大小可以表示为:

$$a = |f^b - g| \quad (18)$$

当机械臂系统静止时,即 $a = 0$ 时,系统外部加速度为 0,系统的欧拉角可以通过加速度计测量值计算得到。

通过加速度计判断外部加速度处于 $a \leq \sqrt{\sigma_{bx}^2 + \sigma_{by}^2 + \sigma_{bz}^2}$ 时,即外部加速度大小小于于静止时加速度计测量的噪声标准差。此时滤波器可将 R 设为:

$$R^* = \begin{bmatrix} \sigma_{fx}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{fy}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, $\sigma_{fx}^2, \sigma_{fy}^2$ 表示加速度计校准测量值的方差, σ_h^2 表示磁力计校准测量值的航向角方差。

当 $a < \sqrt{\sigma_{bx}^2 + \sigma_{by}^2 + \sigma_{bz}^2} \leq a_{th}$ 时,此时外部加速度较小,可将动态加速度设为测量噪声的一部分,测量噪声协方差矩阵 R 应根据 a 在线调整, k 为调整系数; a_{th} 为系统设定值。

$$R^* = R + \begin{bmatrix} ka^2 & 0 & 0 \\ 0 & ka^2 & 0 \\ 0 & 0 & k(a/g)^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

由于加速度计计算出的姿态角的精度与加速度之间的关系约为 1 mrad/mg ,因此磁航向测量噪声的附加函数噪声形成 $k(a/g)^2$ 。

当 $a > a_{th}$ 时,加速度计的测量值大于重力值,由加速度计和电子罗盘计算出的加速度残差和偏航角误差较大。为了避免这种测量值对滤波器的影响,将高动态期间将卡尔曼增益设置为 0,惯性系统将成为一个独立的信号,此时可将 R 更新为 R^* , σ_{se}^2 为实验设定值:

$$R^* = \begin{bmatrix} \sigma_{se}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{se}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{se}^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

通过使用加速度测量值更新观测噪声方差矩阵,带入卡尔曼滤波算法更新过程中,在线调整卡尔曼滤波增益 K_K ,动态调整静态欧拉角在卡尔曼滤波中的权重,从而获得准确的姿态估算结果。

3 实验结果和分析

3.1 实验平台搭建

本文使用九轴 MSME-IMU、采样频率为 100 Hz 。将 IMU 固接在末端执行器(二指夹爪)中心位置,并将机械臂基坐标系和导航坐标系 n 对齐,便于通过 D-H 参数法获取机械臂末端姿态和 IMU 解算姿态对比。通过上位机控制机械臂进行各种运动,并通过数据线实时接收姿态数据。首先经过通过机械臂判断是否处于静态,分别通过动态和静态算法估计机械臂末端执行器的姿态。姿态估计系统初始姿态和相关坐标系如图 3 所示。

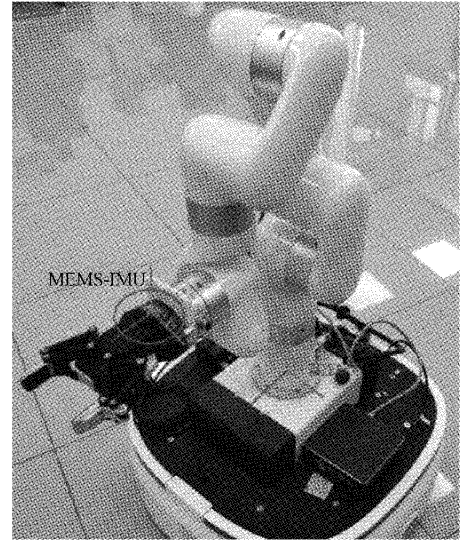


图 3 机械臂系统

3.2 实验结果分析

首先对机械臂初始姿态进行静态初始粗对准实验,确定机械臂末端姿态。将机械臂运动到初始状态,此时末端执行器的欧拉角为 $0, 0, 0$,然后下电去除部分噪声。以 60 Hz 的频率采集 2 min IMU 数据做平均处理后计算初始姿态角。对比 D-H 参数法得到的末端执行器姿态,RPY 角误差分别为 $-0.01^\circ, -0.03^\circ, 0.61^\circ$ 。可知初始姿态和计算姿态误差主要是安装末端执行器引入的误差。结果如图 4 所示。

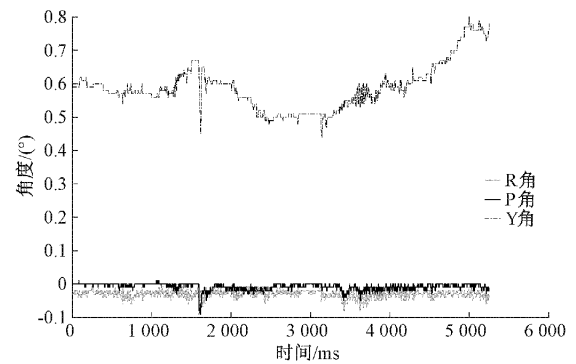


图 4 静态粗对准姿态解算误差

通过机械臂示教系统控制机械臂依次运行到 5 个目标点,并在目标点停留 2 s 。使用静态算法估算末端执行器姿态结果如图 5 所示。

与实际末端执行器姿态对比,结果如表 1 所示。从姿态误差可以看出,静态时 IMU 估算的末端执行器姿态误差主要来源是安装误差。

通过 ROS 系统编写控制节点,指定各关节的旋转角度为 $(-57.9^\circ, -47.2^\circ, -47.8^\circ, -103^\circ, -42.1^\circ, 73.6^\circ)$,控制机械臂匀速运动。通过本文算法估计末端执行器姿态,并与 EKF 算法计算结果对比,如图 6 所示。为了便于对

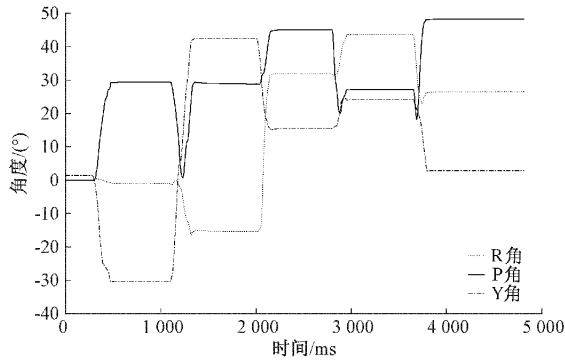


图 5 静态姿态估算

表 1 姿态估算结果及误差

路径点		1	2	3	4	5
估算姿态	Roll	-1.06	-15.38	31.84	43.69	26.49
	Pitch	29.36	28.89	45.12	27.16	48.26
	Yaw	-30.68	41.54	15.33	23.80	2.28
实际姿态	Roll	1.01	-15.48	31.87	43.57	26.43
	Pitch	29.40	28.86	45.14	27.22	48.21
	Yaw	-30.91	41.39	15.04	23.68	2.09
误差	Roll	0.05	0.09	-0.02	0.12	0.06
	Pitch	-0.04	0.03	0.04	-0.06	0.05
	Yaw	0.23	0.15	0.29	0.12	0.19

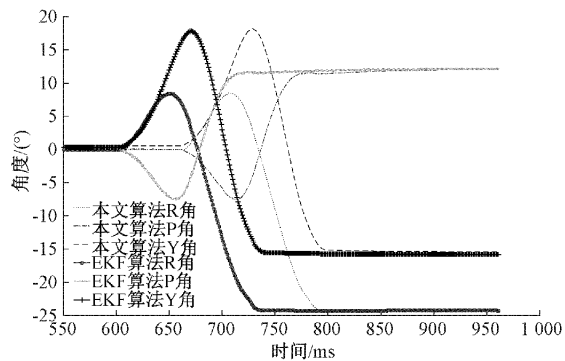


图 6 匀速运动姿态估计结果

比,增加 2 s 相位作图。

姿态误差如表 2 所示。因为不存在系统外部加速度的干扰,因此两种算法的误差都较小,本文算法误差略小,主要是系统结构误差导致的末端执行器姿态误差。

表 2 匀速运动姿态估算结果及误差

欧拉角	本文算法	EKF	实际姿态
Roll	-24.343	-24.273	-24
Pitch	11.857	12.039	11.5
Yaw	-15.347 9	-15.779	15

通过 ROS 系统控制机械臂做变加速运动,通过本文算

法计算 IMU 数据对比 EKF 算法计算结果,欧拉角对比结果如图 7~9 所示。

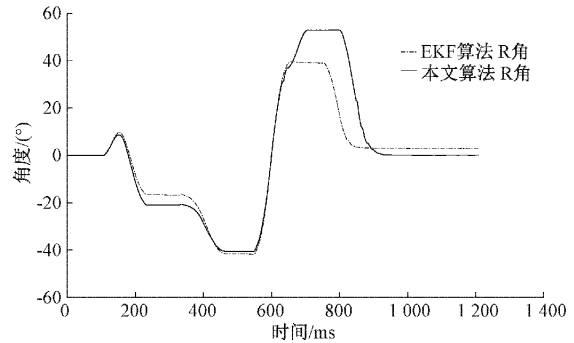


图 7 Roll 角估计结果对比图

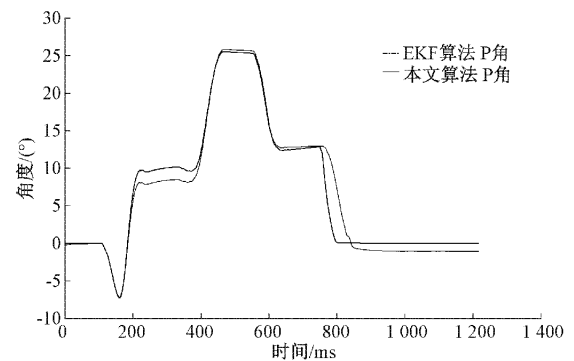


图 8 Pitch 角估计结果对比

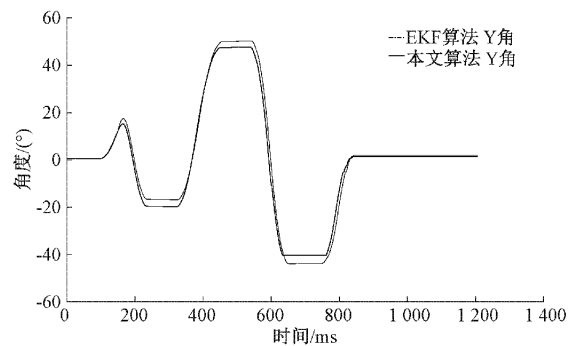


图 9 Yaw 角估计结果对比

由图 7~9 可以看出,本文算法可以有效消除外部加速度带来的重定位误差。其中前两段系统加速度较小,两种算法姿态误差相对较小;后两段加速度较大,由于外部加速度的影响,导致通过 EKF 算法不能有效估算姿态。从最终的重定位误差可以看出,EKF 算法估计的姿态在外部加速度的影响下误差较大,RPY 角稳态误差为 2.71°、-1.05°、1.36°;本文误差较小,RPY 角稳态误差分别为 0.02°、0.04°、0.86°。本文算法在系统存在外部加速度且加速度较大时,测量精度有很大的提高。

4 结 论

本文搭建了搭载 MEMS-IMU 的机械臂末端执行器姿

态估计系统。针对由末端执行器的引入、机械臂关节的扭转不准确、环境温度等原因造成末端执行器姿态误差,提出一种基于欧拉角的自适应扩展卡尔曼滤波算法。该算法以卡尔曼滤波模型为基本框架,首先对系统观测方程线性化近似处理,然后基于机械臂三种运动状态,自适应调节卡尔曼增益,融合陀螺仪和加速度计数据以消除机械臂加速度的对测量精度的影响。最后,通过实验将本文算法与姿态估计性能良好的 EKF 算法进行对比。结果表明,静态时,通过加速度计测量的姿态角误差较小,主要误差来源于安装误差;动态时,对比 EKF 算法,本文算法对机械臂末端执行器姿态的测量具有较高的精度,可以有效估计机械臂末端执行器的姿态。

参考文献

- [1] 付鹏强,姜晓灿,苗宇航,等. 工业机器人绝对定位误差补偿技术研究进展[J]. 科技导报,2021,39(13):93-107.
- [2] 刘志,陈恳,徐静. 基于模型和数据驱动的机器人 6D 位姿估计方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(3):391-399.
- [3] 唐越,郑金辉,王庆杰. 六自由度工业机器人末端定位误差参数辨识与实验研究[J]. 现代制造工程,2021(2):21-26.
- [4] DIGO E, GASTALDI L, ANTONELLI M, et al. Real-time estimation of upper limbs kinematics with IMUs during typical industrial gestures[J]. Procedia Computer Science,2022,200:1041-1047.
- [5] 李旭妍,刘长明,陈燕,等. 基于 EKF 算法的微型 AHRS 模块设计[J]. 国外电子测量技术,2022,41(4):93-98.
- [6] 张文,丁雨林,陈咏华,等. 基于外部视觉与机载 IMU 组合的爬壁机器人自主定位方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(9):1524-1531.
- [7] 江朝军,倪江生,张军,等. 基于 IMU 及 UWB 的微型弹跳机器人传感器节点位姿检测研究[J]. 传感技术学报,2021,34(8):1123-1130.
- [8] BALEK J, PETR K. Development of low-cost inclination sensor based on MEMS accelerometers [J]. Earth and Environmental Science,2021,906(1):012057.
- [9] SAEED K, SAEED R, SAEED E. Simplification of calibration of low-cost MEMS accelerometer and its temperature compensation without accurate laboratory equipment[J]. Measurement Science and Technology, 2021,32(4):045102.
- [10] UZAIR M, KHAN A F, KHURSHID K, et al. Modified sensor error model for static calibration of a low-cost tri-axial MEMS accelerometer [J]. International Journal of Robotics and Automation, 2018,33(3):233-238.
- [11] 程为彬,陈焯姣,张夷非,等. IMU 姿态误差均衡校正模型与验证[J]. 仪器仪表学报,2021,42(9):202-213.
- [12] 班朝,任国营,王斌锐,等. 基于 IMU 的机器人姿态自适应 EKF 测量算法研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(2):33-39.
- [13] 魏犇,宋晓东,王刚. 改进型自适应互补滤波 MEMS-IMU 姿态解算实现[J]. 电子测量技术,2020,43(24):81-86.
- [14] 马星河,毕文龙,朱行,等. 改进 SHAKF 算法消除 IMU 随机误差的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(12):59-67.
- [15] PARAG N, SHASHI P, RAHEE W, et al. Cascaded complementary filter architecture for sensor fusion in attitude estimation[J]. Sensors,2021,21(6):1937.
- [16] SIMONE S, MARCO G, LUCA F, et al. A double-stage Kalman filter for orientation tracking with an integrated processor in 9-D IMU [J]. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 2013, 62 (3): 590-598.

作者简介

汪坤,硕士,主要研究方向为机器人技术。

E-mail:wangk668@sina.com

张国良,教授,主要研究方向为先进控制理论,机器人技术,组合导航。

E-mail:zhgl@sohu.com

张自杰,硕士,主要研究方向为智能机器人。

E-mail:1270060287@qq.com

王艺成,硕士,主要研究方向为移动机器人导航技术。

E-mail:2397096061@qq.com