

足式机器人在非结构地形中的姿态求解算法

常青¹, 乔志霞¹, 罗庆生²

(1. 天津商业大学 机械工程学院, 天津 100081; 2. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

摘要: 为了改进传统足式机器人姿态求解算法的不足, 提出了一种新型的适用于非结构地形的姿态求解方法; 该算法将动力学分析得到机体运动加速度信息与惯性测量单元(IMU)的信息相融合, 通过卡尔曼滤波器计算机器人机体的姿态信息; 所提的算法也适用于机器人机体存在冲击力的情况; 为了验证算法的有效性, 对两款典型的足式机器人在非结构地形中的运动进行了仿真, 结果表明提出的算法能够准确的求解出机器人的姿态信息, 具有良好的有效性和通用性。

关键词: 足式机器人; 非结地形; 姿态求解; 卡尔曼滤波器

Attitude Calculation Algorithm for Legged Robots in Unstructured Terrain

Chang Qing¹, Qiao Zhixia¹, Luo Qingsheng²

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China;

2. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: For the sake of improving on traditional attitude calculation algorithm of legged robots, a novel attitude calculation algorithm for legged robots in unstructured terrain is proposed. The body locomotion acceleration obtained by dynamic analysis is fused with the information of inertial measurement unit (IMU), then Kalman filter is used to calculate the attitude of the robot body. The proposed algorithm is applicable for the situation that the robot body is subjected to the external impact. Simulations of two typical legged robots were conducted to verify the effectiveness of the proposed algorithms. The result proves the accuracy, effectiveness and versatility of the proposed algorithm.

Keywords: legged robot; unstructured terrain; attitude calculation; Kalman filter

0 引言

仿生机器人一直是机器人领域的研究热点, 足式机器人是其中的重要组成部分^[1]。随着“Big Dog”和“Wild cat”等液压驱动机器人的出现, 在野外环境应用的足式机器人逐渐增多, 因而对适应非结构地形的姿态求解算法进行研究具有重要意义。机器人的姿态求解是指对机体相对于重力方向的俯仰角和横滚角进行求解。陀螺仪、加速度计等惯性测量单元(IMU)广泛地应用于飞行器的姿态求解中^[2-3], 近年来也开始在足式机器人中使用。P. C. Lin等^[4]在研究RHex六足机器人时, 最早提出将机器人运动学与IMU相结合用于足式机器人的姿态解算。这种方法只适用于在平地上运动的机器人, 并且要求机器人在任意时刻至少有三条腿与地面接触, 具有较大的局限性。为了对四足机器人在地面上的姿态进行求解, S. P. N. Singh等^[5]通过在机器人机体上设置三个距离传感器, 获得机体与地面之间的相对位姿关系, 并将其与IMU进行融合以获得最终的位姿。M. Reinstein等^[6]提出了一种基于经验的姿态求解算法, 利用关节编码器、压力传感器的信息得到实时步长,

并将其作为量测向量对IMU的求解结果进行补偿, 实现了机器人的姿态和速度的估计。由于足端与地面之间的相对滑动会大大降低算法的精度, 因而要通过试验以确定补偿滑动的参数。以上方法仅解决了足式机器人在平地运动中的姿态求解问题, 不能在非结构地形中使用。为此本文提出了一种新型的姿态求解算法, 采用卡尔曼滤波器将机器人动力学与IMU相融合, 实现了足式机器人在非结构地形中的姿态求解。

1 机器人的动力学分析

如图1所示, 在机器人的运动空间建立惯性坐标系I, 并在机体质心处建立机体坐标系B。机体受到的合力包括重力, 腿部对机体作用力以及机体受到的外界冲击力。以坐标系B作为参考坐标系, 机体所受合力可以用下式表示:

$${}^B F_s = {}^B F_l + {}^B F_e + {}^B G \quad (1)$$

式中, 左上标B表示向量以坐标系{B}为参考坐标系, ${}^B F_s$ 为所受合力, ${}^B F_l$ 为腿部对机体作用力, ${}^B F_e$ 为机体受到的外界冲击力, ${}^B G$ 为机体所受重力。 ${}^B F_l$ 可以用下式表示:

$${}^B F_l = \sum_{i=1}^m {}^B f_i \quad (2)$$

式中, m 为机器人腿的数量, ${}^B f_i$ 为腿*i*对机体的作用力。机体运动加速度 ${}^B a_c$ 如下:

$${}^B a_c = \frac{{}^B F_l}{M} + \frac{{}^B F_e}{M} + {}^B g \quad (3)$$

式中, M 为机体的质量, ${}^B g$ 为重力加速度在系{B}中对应

收稿日期: 2018-06-29; 修回日期: 2018-07-18。

基金项目: 国家部委预研基金资助项目(40401060305); 天津市企业科技特派员项目(18JCTPJC64400)。

作者简介: 常青(1987-), 男, 讲师, 主要从事仿生机器人控制、传感器信息融合方向的研究。

的向量。

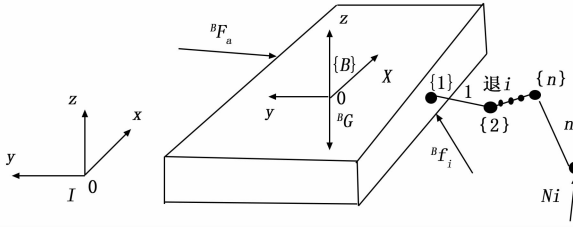


图 1 足式机器人模型

将机体视为杆件 0 并在腿部各杆件上建立坐标系。机器人腿 i 上杆件由机体到足端依次编号为杆件 1, 2... n 。将杆件 j 的上关节编号为关节 j , 并将杆件 j 的坐标系 $\{j\}$ 固定在关节 j 处。其中坐标系 $\{1\}$ 各坐标轴与机体坐标系 $\{B\}$ 各坐标轴平行。由图 1 可知, 由于腿部通过关节 1 与机体相连, 因而 ${}^B f_i$ 即为关节 1 受到的腿部作用力。腿足式机器人的每条腿都可以看作是以机体为浮动基座的串联机器人^[7]。将牛顿-欧拉方程进行变形^[8], 得到腿 i 的关节 1 受力 ${}^B f_i$ 的计算公式如下所示:

$${}^B f_i = \sum_{j=1}^n {}^B R_i F_{i,j} + {}^B R_i^n N_i \quad (4)$$

式中, $F_{i,j}$ 为腿 i 中杆件 j 所具有的惯性力, ${}^B R_i$ 为腿 i 中系 $\{j\}$ 到系 $\{B\}$ 的旋转变换矩阵, ${}^n N_i$ 表示足端(杆件 n)与地面的冲击力, 当腿部处于摆动相对该值为 0。

对于腿 i 来说 $F_{i,j}$ 可以用下式所示:

$$F_{i,j} = m_{i,j} {}^j \dot{v}_{c_{i,j}} + m_{i,j} {}^j g_{i,j} \quad (6)$$

式中, $j=0, 1 \dots n$, ${}^j \dot{v}_{c_{i,j}}$ 和 ${}^j g_{i,j}$ 分别为杆件 j 质心运动加速度和重力加速度在系 $\{j\}$ 中所对应的向量。将式 (4) ~ (6) 带入式 (2), 可得 ${}^B F_i$ 的计算公式如下所示:

$${}^B F_i = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n {}^B R_i (m_{i,j} {}^j \dot{v}_{c_{i,j}} + m_{i,j} {}^j g_{i,j}) + \sum_{i=1}^m {}^B R_i^n N_i \quad (7)$$

2 姿态求解算法

2.1 机器人机体姿态的描述

机器人机体的横滚角 (roll)、俯仰角 (pitch) 和偏航角 (yaw), 分别为机体相对惯性坐标系 x 、 y 、 z 三个轴的旋转角度, 其中横滚角和俯仰角称为机器人的姿态角。机体坐标系 B 与惯性坐标系 I 之间的变换关系可以采用方向余弦矩阵 C 表示:

$$C = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, c 代表 \cos , s 代表 \sin , α 、 β 和 γ 分别表示机器人机体的偏航角、俯仰角和横滚角。将 C 改写成如下形式:

$$C = [X \ Y \ Z]^T \quad (9)$$

注意到 Z 只包括 β 、 γ 两个变量, 且形式较为简单, 仅使用 Z 中的元素就能计算出横滚角和俯仰角, 如下式所示:

$$\begin{cases} \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{Z_2}{Z_3} \right) \\ \beta = \tan^{-1} \left(\frac{-Z_1}{Z_2/\sin\gamma} \right) \end{cases} \quad (10)$$

在式中, Z_1 、 Z_2 和 Z_3 分别为 Z 中的行向量, 即 $Z = [Z_1 \ Z_2 \ Z_3]^T$ 。在已知 Z 的情况下就可以求解所需的姿态角, 因而卡尔曼滤波器的主要目的就是对于 Z 进行估计。

2.2 卡尔曼滤波器设计

本文采用三轴陀螺仪和加速度计, 建立传感器输出信号模型, 如下所示:

$$\begin{cases} y_G = {}^B \omega + n_G \\ y_A = {}^B g + {}^B a_c + n_A \end{cases} \quad (11)$$

y_G 和 y_A 分别为陀螺仪和加速度计的输出信号, ${}^B \omega$ 为机体的角速度。 n_G 和 n_A 分别表示陀螺仪和加速度计的测量误差, 均为零均值的高斯白噪声。

卡尔曼滤波器包括状态方程和量测方程^[9], 如下所示:

$$\begin{cases} x_t = \Phi_t x_{t-1} + w_t \\ z_t = H_t x_t + v_t \end{cases} \quad (12)$$

其中: x_t 和 z_t 分别为状态向量和量测向量, Φ_t 为 $t-1$ 时刻到 t 时刻的一步转移矩阵, H_t 为量测矩阵, w_t 和 v_t 分别为系统激励噪声和量测噪声。将状态向量 x_t 定义为 Z 。下面分别确定状态方程和量测方程。

2.2.1 状态方程

卡尔曼滤波器的状态方程基于捷联式惯导算法^[10], 如下所示:

$$C_t = C_{t-1} (I + \Delta t [\omega_{t-1}]) \quad (13)$$

式中, C_t 为 t 时刻的方向余弦矩阵, Δt 为时间间隔。 $[\omega_{t-1}]$ 为 ω_{t-1} 的斜对称矩阵。根据式 (9) 可以将式 (13) 整理成如下形式:

$$Z_t = (I + \Delta t [\omega_{t-1}])^T Z_{t-1} \quad (14)$$

由式 (10) 可知 $[\omega_{t-1}] = [y_G, t-1] - [n_G, t]$, 且 $[\omega_{t-1}] = -[\omega_{t-1}]^T$, 代入式 (14) 可得:

$$Z_t = (I - \Delta t [y_G, t-1]) Z_{t-1} - \Delta t [Z_{t-1}] n_G, t-1 \quad (15)$$

将式 (15) 和的状态方程中各部分相对应, 可知 $\Phi_{t,t-1}$ 和 w_t 可以用下式表示:

$$\begin{cases} \Phi_{t,t-1} = I - \Delta t [y_G, t-1] \\ w_t = -\Delta t [Z_{t-1}] n_G \end{cases} \quad (16)$$

状态方程的噪声协方差可以定义为 $Q_{t-1} = E (w_{t-1} w_{t-1}^T)$, 式中 E 表示对变量求期望, 将式 (15) 中的 w_{t-1} 代入可得 Q_{t-1} 的表达式:

$$Q_{t-1} = \Delta t^2 [Z_{t-1}] \sum_G [Z_{t-1}] \quad (17)$$

式中, \sum_G 是陀螺仪测量噪声的协方差矩阵, 可以用 $E (n_G n_G^T)$ 表示。

2.2.2 量测方程

由于使用陀螺仪进行姿态求解时需要将角速度进行积分, 陀螺仪的测量误差也会经过积分放大, 影响姿态求解的精度。而加速度计信息在计算姿态时不存在积分误差, 可以作为量测方程。在惯性坐标系中重力加速度可以用 ${}^I g = [0 \ 0 \ g]^T$ 来表示, 其中 g 为重力加速度值取 9.8 m/s^2 。那么在机体坐标系中重力加速度为:

$${}^B g = g \times Z \quad (18)$$

将式 (2)、(7) 及 (18) 代入式 (11) 中的加速度计输出信号模型, 并进行整理得:

$$y_{A,t} - \frac{{}^B F_{L,t}}{M} = 2gZ_t + \frac{{}^B F_{e,t}}{M} + n_A \quad (19)$$

其中: 下标 t 表示各向量在 t 时刻的值。将式 (19) 与量测方程相对应, 可知 z_t 、 H_t 和 v_t 的表达式分别如下所示:

$$\begin{cases} z_t = y_{A,t} - \frac{{}^B F_{L,t}}{M} \\ H_t = 2gI \\ v_t = \frac{{}^B F_{e,t}}{M} + n_A \end{cases} \quad (20)$$

与状态方程类似, 量测方程噪声协方差矩阵 M_t 由 $M_t = E(v_t v_t^T)$ 定义。当 ${}^B F_{e,t}$ 不存在时, M_t 为 n_A 的噪声协方差 $E(n_A n_A^T)$ 。当 ${}^B F_{e,t}$ 存在时, 量测方程会产生很大的量测误差, 不能用于姿态求解, 可以通过将噪声协方差 M_t 设为无穷大来实现, 如下式表示:

$$M_t = \begin{cases} \sum_A \left\| \left\| y_A - \frac{{}^B F_L}{M} \right\| - g \right\| \leq \epsilon A \\ \infty \left\| \left\| y_A - \frac{{}^B F_L}{M} \right\| - g \right\| > \epsilon A \end{cases} \quad (21)$$

式中, ϵA 为机体冲击力判断阈值, $\left\| \left\| y_A - \frac{{}^B F_L}{M} \right\| - g \right\|$ 小于该值时, 表明 ${}^B F_{e,t}$ 不存在或值较小, 使用加速度计信息求解姿态时仍能保证一定的精度。当 $\left\| \left\| y_A - \frac{{}^B F_L}{M} \right\| - g \right\|$ 大于该值时, 表明 ${}^B F_{e,t}$ 较大, 加速度信息不能用于姿态求解, 主要依靠陀螺仪的信息求解姿态。

2.2.3 卡尔曼滤波器的参数确定

卡尔曼滤波器的递推方程如式 (22) 所示, 其中 $t \geq 0$ 。再使用该式进行计算时, 首先要确定式中的各参数。式中 $\Phi_{t,t-1}$ 、 Q_{t-1} 的值可由固定在机体质心处的陀螺仪的输出信号确定。 z_t 的值由固定在机体质心处的加速度计的输出信号 $y_{A,t}$ 和腿部冲击力 ${}^B F_{L,t}$ 共同确定。由式 (7) 可知 ${}^B F_{L,t}$ 中包括足端冲击力 ${}^n N_{i,t}$ 和腿部惯性力 ${}^j F_{i,j,t}$ 两项, 其中 ${}^n N_{i,t}$ 可由足端三维力传感器获得, 各杆件坐标系之间的旋转变换矩阵 R 可以根据关节角或关节位移传感器通过 DH 法计算得到。 ${}^j F_{i,j,t}$ 使用式 (6) 计算, 注意到式 (6) 可以改写成 $F_{i,j+1} = m_{i,j+1} ({}^i \dot{v}_{c_{i,j+1}} + {}^j g_{i,j+1})$, 考察式 (11) 中加速度计模型可知, 如果在杆件 j 质心处固定加速度计, 并保证加速度计各方向轴与系 $\{j\}$ 对应的坐标轴相平行, 那么加速度计的输出信号即为 ${}^i \dot{v}_{c_{i,j+1}} + {}^j g_{i,j+1}$ 。 M_t 的值可以根据式 (21) 进行计算, 文献 [11] 在对基于惯性传感器的姿态求解进行研究时, 将阈值 ϵA 设为 $0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ 时, 得到了较小的求解误差, 本文中也令 $\epsilon A = 0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ 。为保证滤波器的正常计算, 状态向量 x 和估计均方误差阵 P 的初值分别设为 $x_0 = [0 \ 0 \ 1]$, $P_0 = 0.1$ 。由此可知, 在获得各传感器的相关信息后和机器人各杆件的质量之后就可以采用下式对 Z 值进行计算了。

$$\begin{cases} x_{t,t-1} = \Phi_{t,t-1} x_{t-1} \\ P_{t,t-1} = \Phi_{t,t-1} P_{t-1} \Phi_{t,t-1}^T + Q_{t-1} \\ K_t = P_{t,t-1} H_t^T (H_t P_{t,t-1} H_t^T + M_t)^{-1} \\ x_t = x_{t,t-1} + K_t (z_t - H_t x_{t,t-1}) \\ P_t = (I - K_t H_t) P_{t,t-1} \end{cases} \quad (22)$$

通过卡尔曼滤波器的递归运算就能获得 Z 的估计值, 再通过 (10) 式的计算就得到横滚角 β 和俯仰角 γ 。整个姿态求解算法的流程如图 2 所示。

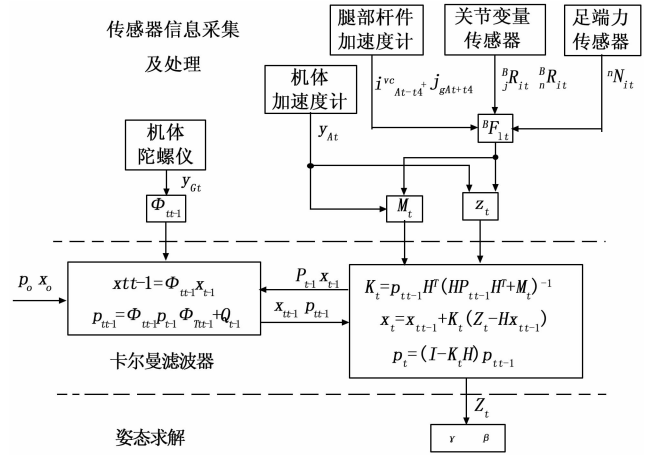


图 2 姿态求解算法的流程图

3 仿真和算法验证

3.1 仿真条件设置

ADAMS 是一款出色的虚拟样机仿真软件, 在对机构进行仿真的过程中, ADAMS 能够获得各构件任意点的速度、角速度、方位角等运动学参数和力、力矩等动力学参数, 并且可以将这些参数在不同的坐标系下进行表示, 因而在本文中使用 ADAMS 进行仿真实验以对提出算法进行验证。在本文中选取了两款典型的足式机器人的简化模型进行仿真 (如图 3 所示), 其中四足机器人具有与哺乳类动物类似的腿部结构, 六足机器人具有与昆虫类似的腿部结构, 两款机器人腿部都由三个杆件组成, 杆件之间采用旋转关节进行连接, 但关节采用不同的布置方式。机器人机体采用钢制材料, 腿部采用铝制材料, 各杆件的质量和尺寸参数如表 1 所示。

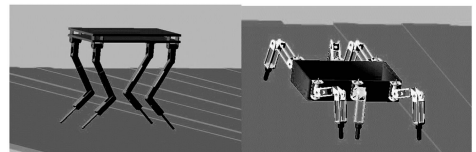


图 3 仿真中使用的足式机器人

如图 3 所示, 在仿真中使用不规则的阶梯地面作为非结构地形, 其中每个阶梯的长度范围为 $160 \sim 300 \text{ mm}$, 高度范围为 $10 \sim 40 \text{ mm}$, 相邻阶梯随机凸起或凹陷。在仿真中四足机器人采用对角步态 (对角两腿同时抬起或着地), 六足机器人采用三角步态 (不相邻的三腿同时抬起或着地)

沿直线运动。仿真共进行三组，具体的条件设置如表 2 所示。

表 1 机器人的结构和尺寸参数

验证机器人	杆件编号	杆件质量/ kg	杆件长度/ mm	杆件质心与对应 关节距离/mm
四足机器人	0(机体)	42.13	无	无
	1	2.72	140	37.11
	2	6.57	400	200.75
	3	3.56	400	142.25
六足机器人	0(机体)	27.02	无	无
	1	1.17	37	6.23
	2	0.65	190	102.37
	3	0.70	240	126.45

表 2 仿真实验的条件设置

组号	仿真机器人	步态 频率/ Hz	平均运 动速度 /m/s	仿真 时长 /s	仿真 步长 /s	仿真地形	机体有 无外界 冲击力
1	四足机器人	2	0.8	10	0.01	阶梯地面	无
2	六足机器人	2	0.35	10	0.01	阶梯地面	无
3	四足机器人	2	0.8	10	0.01	平地	有

在前两组仿真中，两款机器人分别在阶梯地面上运动。机器人开始运动时阶梯地面较为平缓，随着运动的进行，阶梯高度的变化越来越剧烈。由于在阶梯地面运动时，机器人很容易倾倒，因而前两组仿真中没有给机器人机体施加外界冲击力。为了检验机器人机体受到外界冲击时算法的效果，在第 3 组仿真中四足机器人在平地上运动，在保证机器人不倾倒的情况下，对机体 Y 轴正方向施加了如图 4 所示的冲击力。

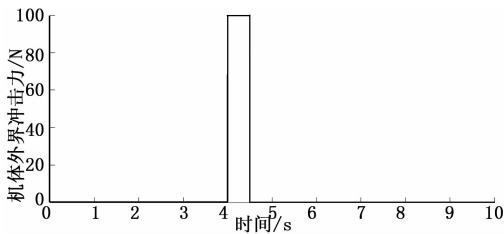


图 4 机器人机体外界冲击力

3.2 数据处理分析

根据上节所示设置的条件进行仿真后，进行数据采集，数据的采样频率为 100 Hz。这些数据包括机体的真实俯仰角和横滚角（用于与计算值对比）、角速度、加速度、方向余弦矩阵，各杆件质心的加速度和方向余弦矩阵，关节角度及足端冲击力等。根据关节角度采用 D-H 法可以得到各杆件坐标系到机体坐标系的旋转变化矩阵。采用文献 [12] 的方法，根据关系传感器信号的特点，在真实值的基础上加上高斯白噪声来模拟惯性传感器输出信号。算法中使用的陀螺仪的输出为在角速度基础上加上协方差 $\sum_G = 0.0561$ 的零均值高斯白噪声，各加速度计的输出信息则是

在运动和重力加速度之和的基础上加上协方差 $\sum_A = 0.031$ 的零均值高斯白噪声。各杆件坐标系下的重力加速度用向量 $[0 \ 0 \ g]^T$ 与杆件的方向余弦矩阵的乘积获得。

在对采集的信息进行处理后，使用本文提出的算法对姿态角进行计算，结果如图 5、图 6 所示。从图中可以看出，在前两组仿真开始时，由于地面较为平缓，两款机器人姿态角比较稳定。随着运动的进行，阶梯变化越来越剧烈，姿态角的变化也越来越大。但整个仿真过程中姿态角计算值始终能够准确反应真实值的变化。由于这两款具有不同的结构，并采用不同的步态运动，说明算法具有较好的通用性。在第 3 组仿真中，当机体冲击力存在时，只能依靠陀螺仪进行姿态求解，由于用陀螺仪的角速度求解姿态时需要积分，噪声在积分后产生了较大的计算偏差。当冲击力消失后，加速度的信息又能用于姿态求解，从而使计算偏差迅速减小。从图 6 中可以看出，即使在冲击力存在的情况下，计算值的偏差仍能控制在较小水平，能够满足机器人平衡控制的需要。

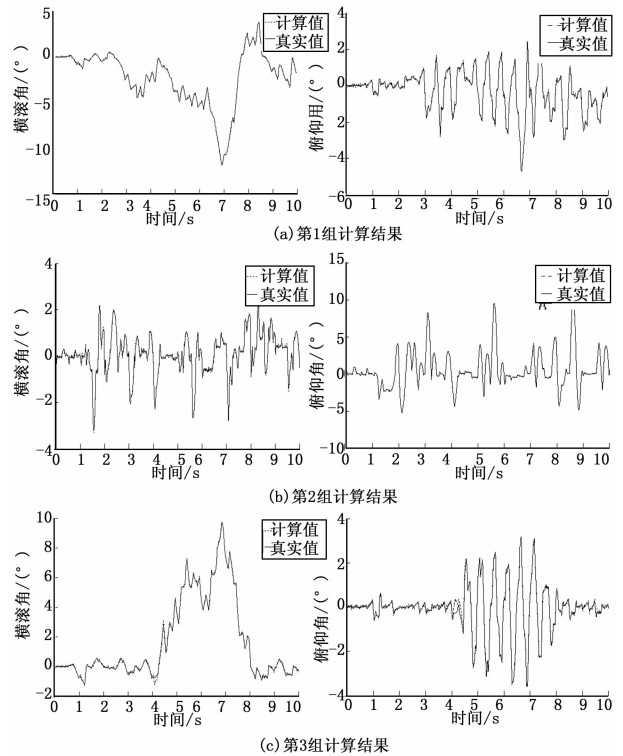


图 5 姿态角计算结果

4 结论

针对以往机器人姿态求解方法存在的不足，提出了一种适用于非结构地形的姿态求解方法，该算法通过动力学分析得到机器人机体运动加速度，并将其引入到卡尔曼滤波器的量测方程中，通过与惯性测量单元 (IMU) 的信息相融合来获得准确的姿态信息。通过两款典型的足式机器人在非结构地形中的仿真分析，验证了所提算法的有效性和通用性。与之前研究相比，本文提出的方法具有以下

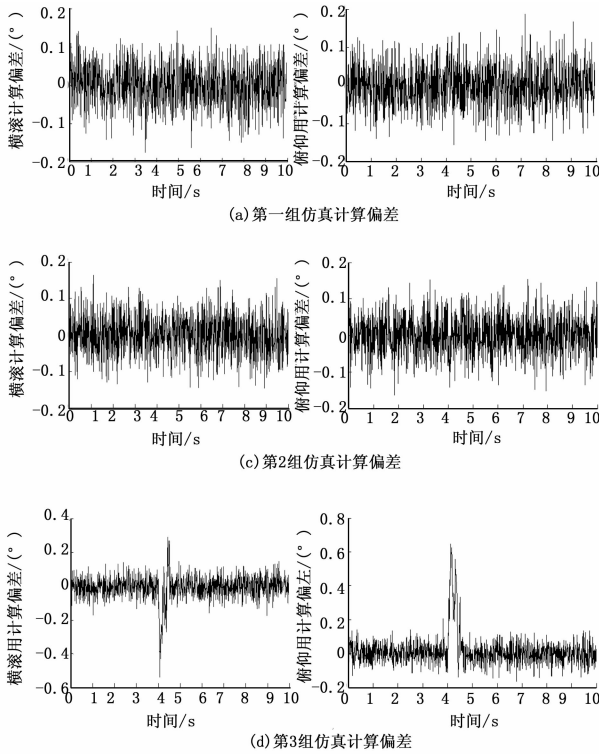


图6 姿态角计算偏差

特点:

1) 提出的算法采用动力学与IMU相结合的方法, 将惯性传感器、力传感器和角度传感器等多传感器的信息相融合, 实现了足式机器人在非结构地形中的姿态求解。

2) 当机体存在外界冲击力作用时, 算法的计算值偏差将会增大, 但仍能保证平衡控制的需要, 当冲击力消失后, 计算值的偏差又将迅速变小。

参考文献:

[1] 丁良宏. BigDog 四足机器人关键技术分析 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (7): 1-23.

(上接第150页)

[6] Feng D, Wenkang S, Liangzhou C, et al. Infrared image segmentation with 2-D maximum entropy method based on particle swarm optimization (PSO) [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26 (5): 597-603.

[7] Pham T X, Siarry P, Oulhadj H. Image Clustering Using Improved Particle Swarm Optimization [A]. International Conference on Industrial Networks and Intelligent Systems. Springer [C]. Ho Chi Minh City, Vietnam, Springer, 2017: 359-373.

[8] Bana S, Kaur D D. Fingerprint recognition using image segmentation [J]. International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, 2011, 5 (1): 12-23.

[9] Audebert N, Le Saux B, Lefèvre S. Segment-before-detect: Vehicle detection and classification through semantic segmentation of aerial images [J]. Remote Sensing, 2017, 9 (4): 368-

[2] Hua M D, Ducard G, Hamel T, et al. Implementation of a non-linear attitude estimator for aerial robotic vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22 (1): 201-213.

[3] 杨智博, 杨春山, 邓自立. 面向跟踪系统的多传感器信息融合鲁棒性能协方差交叉 Kalman 估计方法 [J]. 电子学报, 2017, 45 (7): 1627-1636.

[4] Lin P C, Komsuoglu H, Koditschek D E. Sensor data fusion for body state estimation in a hexapod robot with dynamical gaits [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22 (5): 932-943.

[5] Singh S P N, Waldron K J. A hybrid motion model for aiding state estimation in dynamic quadrupedal locomotion [A]. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. IEEE, 2007: 4337-4342.

[6] Reinstein M, Hoffmann M. Dead reckoning in a dynamic quadruped robot based on multimodal proprioceptive sensory information [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29 (2): 563-571.

[7] Righetti L, Buchli J, Mistry M, et al. Optimal distribution of contact forces with inverse-dynamics control [J]. The International Journal of Robotics Research, 2013, 32 (3): 280-298.

[8] Shabana A A. Dynamics of multibody systems [M]. Cambridge university press, 2013. 133-151.

[9] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理 [M]. 第2版. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.

[10] 邓正隆. 惯性技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.

[11] Sabatini A M. Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53 (7): 1346-1356.

[12] Suh Y S. Orientation estimation using a quaternion-based indirect Kalman filter with adaptive estimation of external acceleration [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59 (12): 3296-3305.

1-18.

[10] 董小舒, 陈岗, 卞志国. 一种改进的基于混合高斯模型的运动目标检测方法 [J]. 应用光学, 2012, 33 (5): 877-883.

[11] 王敏, 郑嘉豪, 王金宝. 基于DSP车辆视频检测背景更新算法 [J]. 电子科技, 2012, 25 (5): 129-132.

[12] Cheon M, Lee W, Yoon C, et al. Vision Based Vehicle Detection System with Consideration of the Detecting Location [J]. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13 (3): 1243-1252.

[13] 王丹, 刘怀. 基于改进混合高斯模型的背景提取与更新 [J]. 南京师范大学学报 (工程技术版), 2015, 15 (2): 60-64.

[14] Wu W, Yang J, Xu Z. The detection algorithm of irregular dynamic objects [J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76 (13): 14599-14615.