

基于 SVM 数据滤波的非同轴两轮机器人 转弯自动平衡控制方法

丁心安, 王艳娥

(西安思源学院 理工学院, 西安 710038)

摘要: 非同轴两轮机器人由于其轮子的轴线为不共线、不平行构造, 使其在转弯时容易出现不稳定的情况; 为了提高该机器人在复杂环境下的控制性能, 研究基于 SVM 数据滤波的非同轴两轮机器人转弯自动平衡控制方法; 切换机器人传感器节点状态, 并定义传感器锚点, 以实现机器人转弯运动数据的转化与分解; 选取 SVM 滤波参数, 通过分析该条件下机器人运动行为奇偶模型特性的方式, 实施对传感器数据的耦合重构, 完成对机器人传感器数据的 SVM 耦合滤波处理; 分析两轮机器人足端步态规律, 按照转弯足端步态的非同轴规划原则, 解算转弯轨迹, 并推导具体的控制函数表达式, 完成传感器数据 SVM 耦合滤波下非同轴两轮机器人转弯自动平衡控制方法的设计; 实验结果表明, 基于上述方法可将俯仰角、横滚角、偏航角同时控制在合理的数值范围之内, 有效保障了机器人转弯过程中的运动平衡性。

关键词: 传感器数据; SVM 耦合滤波; 两轮机器人; 转弯平衡控制; 非同轴

Automatic Turning Balance Control Method for Non Coaxial Two Wheeled Robots Based on SVM Data Filtering

DING Xin'an, WANG Yan'e

(School of Institute of Technology, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Non coaxial two-wheeled robots are prone to instability during turning due to the non collinear and non parallel construction of their wheel axes. In order to improve the control performance of robots in complex environments, an automatic balance control method for non coaxial two wheeled robot turning based on support vector machine (SVM) data filtering is studied. Switch the status of robot sensor nodes and define sensor anchors to achieve the transformation and decomposition of robot turning motion data. By selecting the SVM filtering parameters and analyzing the odd even model of robot motion behavior under these conditions, the coupling reconstruction of sensor data is implemented, and the SVM coupling filtering processing of robot sensor data is completed. Analyze the gait pattern of the two wheeled robot's foot end, calculate the turning trajectory by the non coaxial planning principle of the turning foot end gait, derive the specific control function expression, and complete the design of the automatic balance control method for non coaxial two wheeled robot turning under the coupling filtering of the sensor data SVM. Experimental results show that based on the above method, the pitch angle, roll angle, and yaw angle can be controlled within a reasonable numerical range, effectively ensuring the motion balance of the robot during turning.

Keywords: sensor data; SVM coupled filtering; two wheeled robot; turning balance control; non coaxial

0 引言

非同轴两轮机器人, 也被称为差速驱动机器人或双轮差速机器人, 是一种通过两个独立驱动的轮子来实现移动和转向的机器人。这种机器人的两个轮子位于同一水平面上, 但不在同一条直线上, 因此被称为“非同轴”。非同轴两轮机器人的运动基于差速原理。通过独立控制两个轮子的转速, 机器人可以实现前进、后退、转向和原地旋转等动作。当两个轮子以相同的速度旋转时, 机器人直线前进

或后退; 当两个轮子以不同的速度旋转时, 机器人将沿速度较慢的轮子一侧转弯^[1]。由于两个轮子可以独立控制, 所以机器人可以在各种复杂环境中灵活移动。在高速移动或复杂环境中, 机器人可能会面临碰撞和倾倒的风险, 故需要加强安全保护措施。又因为独立控制两个轮子需要复杂的控制算法和硬件设备, 所以机器人在运动稳定性与平衡性方面存在一定的问题。为此, 需要研究一种非同轴两轮机器人的平衡控制方法。

针对非同轴两轮机器人运动平衡性的研究, 文献 [2]

收稿日期: 2024-05-15; 修回日期: 2024-07-01。

基金项目: 陕西省教育科学“十四五”规划课题(SGH21Z06); 西安思源学院校级重点科研项目(XASYZD-B2205)。

作者简介: 丁心安(1970-), 男, 硕士, 高级工程师。

王艳娥(1979-), 女, 硕士, 副教授。

引用格式: 丁心安, 王艳娥. 基于 SVM 数据滤波的非同轴两轮机器人转弯自动平衡控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 124-130.

提出了基于 Udwadia-Kalaba 理论的平衡控制方法, 该方法根据机器人静止时刻的侧向平衡条件, 构造运动学约束方程, 并将理论化平衡状态视为控制目标, 实现对机器人转弯方向角的控制。基于 Udwadia-Kalaba 理论所建立的控制模型虽然能够在机器人转弯过程中保障其侧向平衡状态, 但由于主机元件针对各类平衡态势所设置控制条件之间的相关性不突出, 所以即便在理想运动状态下, 依然有可能出现方向角不受控的情况。文献 [3] 提出了基于区间 II 型 T-S 模糊模型的平衡控制方法, 在机器人转弯过程中, 以转向中心所在位置为支点进行自平衡建模, 又借助状态反馈控制器中的运动数据, 定义模糊约束规则, 从而对模型表达式进行化简。由于非同轴两轮机器人的转弯运动具有明显的非线性行为特征, 所以单纯按照模糊约束规则化简自平衡条件容易造成数据样本缺乏的问题, 从而使主机元件对方向角的控制出现偏差。文献 [4] 建立机器人的姿态平衡模型, 分析坐姿动作的动力学特性, 明确控制器的平衡性指标, 利用混合零密度优化算法和加权变量函数, 对控制器进行补偿控制。通过对控制器参数的优化和调整, 使机器人的平衡控制过程更稳定, 提高控制响应速度。但该方法在调节控制器参数的过程中, 需要大量的训练数据和迭代次数, 计算过程较繁琐。文献 [5] 利用人工肌肉激活模型调整阻抗参数, 设计脚踝可变阻抗模型, 获取抗干扰扭矩, 将脚踝动态扭矩和抗干扰扭矩相结合, 估计出机器人在当前环境中需要的脚踝扭矩, 用以维持平衡状态。

为更好地解决上述问题, 在保障机器人转弯运动平衡性的同时, 实现对多类型方向角的有效控制, 针对传感器数据 SVM 耦合滤波下的非同轴两轮机器人转弯自动平衡控制方法展开研究。SVM 数据滤波是一种结合了支持向量机 (SVM) 算法和滤波技术的数据处理方法, 这种方法主要用于处理传感器采集的数据, 以提高数据的准确性和可靠性。基于此, 提出了针对非同轴两轮机器人的转弯自动平衡控制方法, 解决了由于轮子不共线、不平行导致的转弯不稳定问题; 使用了 SVM 耦合滤波技术处理传感器数据, 提高了数据处理的准确性和效率; 推导了具体的控制函数表达式, 为实现机器人的自动平衡控制提供了理论基础。经实验测试, 本文的方法实现了将俯仰角、横滚角、偏航角同时控制在合理的数值范围之内, 有效保障了机器人转弯过程中的运动平衡性。这证明了所提出的方法在非同轴两轮机器人转弯自动平衡控制方面的有效性。

1 非同轴两轮机器人传感器数据转化与分解

非同轴两轮机器人控制原理如图 1 所示。

由图 1 可知, 输入信号是控制过程的起始点, 其信号来源包含外部指令、传感器及其他控制设备。由于各种环境因素和传感器本身的限制, 输入的信号往往包含噪声, 为了消除或减小噪声的影响, 采用了 SVM 滤波技术, 根据设定的参数和算法, 对含噪信号进行耦合重构和滤波处理, 提取出更加准确和可靠的数据。经过 SVM 滤波处理后的数据被转化为控制量, 代表了机器人需要执行的具体动作或

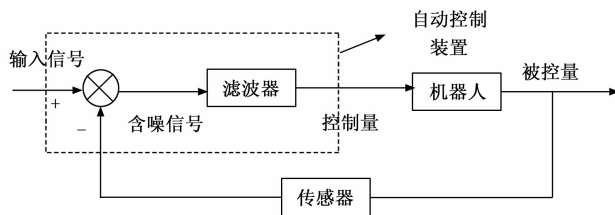


图 1 非同轴两轮机器人控制原理图

调整的参数。机器人根据接收到的控制量, 通过其内部的执行机构实现相应的动作, 使机器人能够按照期望的轨迹运动。被控量是机器人实际运动状态的反馈, 用于实时监测机器人的运动状态。传感器将测量到的被控量转化为电信号, 并传递给控制系统。控制系统根据这些反馈信息, 与期望的输入信号进行比较, 计算出误差信号。误差信号作为新的输入信号, 再次进入控制系统, 形成一个闭环反馈控制过程。控制系统根据误差信号的大小和方向, 调整控制量的大小和方向, 使机器人的实际运动状态逐渐逼近期望的轨迹。

为了将原始的机器人转弯运动数据转化为更容易处理的形式, 在完成传感器节点状态切换后, 定义具体的锚点对象, 再借助这些节点对象, 实施对转弯运动数据的转化与分解, 将原始数据分解为不同的分量, 提取其中的关键信息, 以更好地理解机器人的运动方式和行为。

1.1 机器人传感器节点状态切换

机器人传感器节点的状态切换是指根据机器人的运动环境和转弯需求, 动态地调整传感器节点的状态。这涉及传感器节点的激活、休眠、关闭等操作, 以及节点之间的切换和协调。状态切换是为了优化机器人的运动效率和性能, 同时控制转弯过程中的机器人平衡状态。在机器人运动的不同阶段和环境中, 可能需要不同的传感器节点来感知和获取环境信息。因此, 通过状态切换, 可以根据实际需求动态地调整传感器节点的运行状态, 以满足机器人的感知需求。对于非同轴两轮机器人而言, 传感器节点可能需要根据机器人的移动速度和位置, 动态地调整转弯运动行为与转向中心所在位置, 以获得更清晰的运动图像信息^[6]。完整的机器人传感器节点状态切换原则如图 2 所示。

规定 l_1, l_2, \dots, l_n 为 n 个不同传感器节点中所激活的环境信息数据, χ 为数据信息在传感器节点中的过渡参量, \bar{h} 为激活状态下传感器节点向外输出的运动数据向量, δ 为节点对象的响应状态切换值, 联立上述物理量, 可将机器人传感器节点的状态切换表达式为:

$$K = \chi(l_1 + l_2 + \dots + l_n)^2 + \delta \bar{h} \quad (1)$$

传感器节点状态切换的过程中, 要保证数据传输的连续性和稳定性, 以避免因节点响应不及时而出现数据丢失或突变情况。激活所有传感器节点后, 机器人传感器会继续执行切换操作, 直至确保转弯运动过程中, 所有采集到的数据样本都能得到稳定传输。

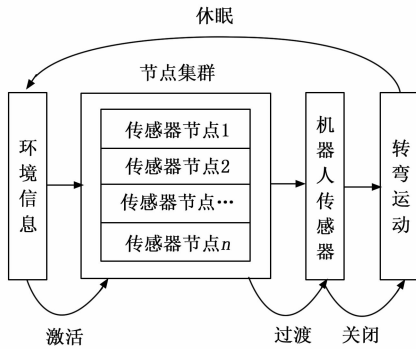


图 2 机器人传感器节点状态切换原则

1.2 传感器锚点定义

传感器锚点的个数对机器人运动数据的采集至关重要，直接影响了非同轴移动接收器的访问路径与传感器子网络的覆盖范围。如果锚点的个数过多，会将传感器子网络划分成若干个小范围的次级网络体系，这样不但会增加非同轴移动接收器的访问的代价，也会使传感器节点承担不必要的信息消耗。如果锚点的个数过少，虽然能够降低非同轴移动接收器的访问行程长度，从而减少传感器延迟，但由于每个锚点所负责的传感器子网络区域过大，极易使机器人运动数据出现传输丢包、拥塞等情况，从而影响传感器数据的质量^[7]。因此，为在非同轴两轮机器人转弯运动过程中，实现对传感器数据的高质量采集，就必须在精准切换传感器节点状态的基础上，严格限定锚点数量。

从功能性角度来看，传感器锚点负责接收子网络区域内所有的机器人运动数据，并需要等待移动接收器完全消化信息访问请求后，才可以继续对传感器采集到的数据样本进行上传处理，故锚点数量应以大于子网络分区数量但小于传感器节点数量为宜^[8]。设 h_1 为子网络分区数量， h_2 为传感器节点数量， α 为锚点对象标记系数， β 为传感器数据的访问请求参数，联立公式 (1)，可将传感器锚点定义式表示为：

$$L = \frac{(\alpha^2 - 1)K}{\beta(h_1 + h_2)} \quad (2)$$

非同轴两轮机器人转弯运动过程中，传感器锚点只能在子网络中获得转弯节点的位置坐标，所以除了节点个数外，其所在位置也会对运动数据的采集效果造成影响。

1.3 转弯运动数据转化与分解

通过上述机器人传感器节点状态切换与传感器锚点定义，可以帮助确定在机器人转弯运动过程中所需的传感器状态和数量，满足机器人在不同转弯环境和需求下的感知需求，使分解后数据可以在空间上分布均匀。非同轴两轮机器人，在转弯运动时的数据转化与分解主要涉及对机器人转弯平衡模式的建立和计算。这类机器人通常通过调整两个轮子（一个在左侧，一个在右侧）的转速来实现转弯。当两个轮子以不同的速度旋转时，机器人将沿一个曲线路径移动，从而实现转弯，而针对不同转速的采集就是转弯

运动数据转化与分解的主要目的^[9-10]。规定左侧转轮为 1 号轮、右侧转轮为 2 号轮，1 号轮的转速标量为 G_1 、2 号轮的转速标量为 G_2 ，其定义式如下：

$$\begin{cases} G_1 = \varepsilon_1 \vec{g}_1 \times \frac{j_1}{|\Delta H|} \\ G_2 = \varepsilon_2 \vec{g}_2 \times \frac{j_2}{|\Delta H|} \end{cases} \quad (3)$$

式中， ε_1 、 ε_2 分别为 1 号轮、2 号轮的平衡模态量， \vec{g}_1 、 \vec{g}_2 分别为 1 号轮、2 号轮的曲线路径移动向量， ΔH 为传感器数据的单位采集量， j_1 、 j_2 分别为 1 号轮、2 号轮中的实时转速值。利用公式 (3)，可将转速差表示为：

$$G' = \sqrt{||G_1|^2 - |G_2|^2|} \quad (4)$$

联立公式 (2) (4)，可将转弯运动数据的转化与分解运算式表示为：

$$F = \sum_{\gamma=1}^{\gamma} \left(f \frac{\varphi G'}{L} \right)^2 - \frac{(\varphi \hat{J})^{-1}}{s+1} \quad (5)$$

式中， γ 为转弯运动数据的模量分解系数， f 为机器人转弯运动的线速度分量， φ 为角速度分量， φ 为非同轴两轮机器人的转弯运动半径， \hat{J} 为 1 号轮、2 号轮之间的距离， s 表示转弯运动数据的转化参数。经过转化与分解处理后，转弯运动数据中满足自平衡控制条件的信息参量被筛选出来，对于传感器元件而言，利用这些目标信息，可以实现对非同轴两轮机器人转弯运动数据的转化与分解。

2 机器人传感器数据的 SVM 耦合滤波处理

在复杂环境中，传感器容易受到各种不同特性和频率的噪声。为了有效去除传感器数据中的噪声信息，避免噪声对机器人运动平衡性产生干扰和误判现象，采用 SVM 耦合滤波处理机器人传感器数据。传统的滤波方法无法有效处理复杂环境中传感器数据中的噪声，而采用 SVM 进行耦合滤波处理，不仅考虑了数据的全局特性，还通过 SVM 的强化能力对局部特性进行了优化，这在处理传感器数据噪声方面是一个创新点。而通过引入权重因子、学习因子和速度最大值，使 SVM 滤波参数可以根据机器人运动的具体情况精细调整，能够更准确地反映机器人运动行为的特点，提高滤波效果。

2.1 SVM 滤波参数选取

选取机器人传感器数据的 SVM 滤波参数涉及权重因子、学习因子与速度最大值。

2.1.1 权重因子

α 表示惯性权重因子。其主要作用是调整 SVM 滤波参数解的搜索范围，以平衡传感器子网络对机器人转弯运动数据的局部及全局搜索能力，同时还控制着机器人当前运动速度受之前速度的影响程度^[11]。如果不考虑权重因子，那么自平衡节点的位置会十分接近，致使传感器子网络难以区分。

2.1.2 学习因子

\approx 表示学习因子。相较于权重因子，如果的数值为 0，

则代表 SVM 滤波参数对于机器人传感器数据的认知不具有普遍性, 在分析运动行为奇偶模的过程中, 只能得到局部最优解。

2.1.3 速度最大值

v_{\max} 表示速度最大值, 其取值通常是根据非同轴两轮机器人转弯运动所处维度空间而定。如果 v_{\max} 较大, 则导致 SVM 滤波参数容易错过最优解, 因为此时传感器子网络对运动数据的探索能力得到大幅度提升; 如果 v_{\max} 较小, 传感器子网络会侧重于探索 SVM 滤波参数的局部最优解, 因为此时数据样本的耦合能力得到大幅度提升^[12]。在上述物理量的支持下, 联立公式 (5), 可将 SVM 滤波参数选取标准定义为:

$$A = \frac{z}{a} v_{\max} - \left(\frac{1}{\bar{\mathbf{X}}}\right)^{-1} \sqrt{\lambda F} \quad (6)$$

式中, $\bar{\mathbf{X}}$ 为机器人运动数据的滤波协同向量, λ 为基于支持向量机 (SVM) 的运动数据认证系数, z 为运动数据分类参数。SVM 滤波参数的选择可能因机器人传感器数据集和转弯运动平衡状态而异, 因此在滤波处理的过程中需要根据具体情况进行调整。

2.2 滤波参数下的机器人运动行为奇偶模分析

在机器人运动控制中, SVM 滤波参数的选择会直接影响机器人的运动行为。滤波参数的设置通常是为了平衡机器人的转弯运动轨迹, 减少噪声和抖动, 从而提高运动的平衡性^[13]。奇偶模分析是一种常用的方法, 用于分析机器人传感器数据在不同频率下的响应特性。奇偶模分析可以帮助传感器子网络理解滤波参数对机器人运动行为的影响。具体来说, 奇偶模分析可以将机器人的转弯运动轨迹分解为奇数次和偶数次谐波分量, 从而分析不同频率下的运动特性。规定 \tilde{V}_1 为转弯运动轨迹的奇数次谐波分量, \tilde{V}_2 为偶数次谐波分量 (通常情况下, 奇数次谐波分量、偶数次谐波分量的取值同属于 $[1, +\infty)$ 的数值区间, 一方面表示二者不具备明显的数值差异, 另一方面也意味着奇、偶模分量对机器人运动平衡性的影响能力相同), m 为模向量标记参数, η 为机器人传感器数据在 SVM 滤波参数下的响应效率, κ 为滤波参数的标准设定值, 联立公式 (6), 推导 SVM 滤波参数下的机器人运动行为奇偶模分析表达式如下:

$$C = (\kappa - 1) \frac{\eta A}{\sum_{m \rightarrow \infty} \tilde{V}_1 \times \tilde{V}_2} \quad (7)$$

此外, 奇偶模分析还可以帮助传感器子网络理解机器人运动行为中的共振现象。在某些情况下, 机器人的转弯运动轨迹可能会出现共振, 导致运动不稳定或精度下降^[14]。通过奇偶模分析, 可以确定共振的频率和幅度, 从而采取相应的措施来避免或减小共振对机器人运动平衡性的影响。

2.3 传感器数据的耦合重构

合理选取 SVM 滤波参数能够提高传感器数据的质量, 通过适当选择权重因子、学习因子和速度最大值等参数, 调整 SVM 滤波模型的搜索范围和灵敏度, 提高传感器数据

的可靠性和准确性。通过滤波参数下的机器人运动行为奇偶模分析, 可以更好地理解滤波参数对机器人运动行为的影响, 分析滤波参数在不同频率下的响应特性, 提高机器人在转弯中的平衡性, 为传感器数据的耦合重构提供准确的数据信息。传感器数据的耦合重构是一个复杂的过程, 它涉及从多个传感器获取的数据中提取有用的信息, 并将这些数据融合以形成更完整、更准确的表达形式。在传感器数据耦合重构的过程中, SVM 滤波发挥着关键的作用。该算法可以更好去除传感器数据中的噪声信息, 以平滑数据, 从而提取出有用的信号。SVM 滤波是一种常用的滤波算法, 它通过模拟非同轴两轮机器人的转弯运动轨迹来对机器人运动行为进行统计分析, 并通过概率分布来描述轨迹内的节点平衡性特征^[15]。对于机器人传感器数据的耦合重构, 首先需要为每个传感器建立一个 SVM 滤波模型, 该模型可以根据传感器的特性进行定制。然后, 将这些模型融合在一起, 形成一个全局的滤波模型, 以处理多个传感器之间的数据耦合^[16]关系。

设 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 为 n 个非相关的 SVM 滤波模型, 其所对应的传感器不相同且保持完全独立状态, \vec{b} 为传感器数据耦合向量, 且 $\vec{b} \neq 0$ 的不等式取值条件恒成立, 联立公式 (7), 可将传感器数据的耦合重构表达式定义为:

$$B = \frac{C \times \sqrt{\vec{b}}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \dots \cdot \mu_n} \cdot \frac{\bar{M}}{\sqrt{o^2 + 1}} \quad (8)$$

\bar{M} 为转弯轨迹数据的均值统计量, o 为传感器数据的重构项。

3 非同轴两轮机器人转弯自动平衡控制方法设计

利用 SVM 耦合滤波条件, 处理非同轴两轮机器人传感器数据, 通过不断地更新和调整滤波重构参数, 可以逐渐提高转弯轨迹内数据的准确性和可靠性, 从而使机器人运动行为的平衡性得到有效保障。在此基础之上, 分析两轮机器人足端步态规律, 按照非同轴规划原则, 解算自动平衡标准下的转弯轨迹, 从而推导具体的控制函数, 完成机器人转弯自动平衡控制方法的设计。

3.1 两轮机器人足端步态规律分析

非同轴两轮机器人的足端步态规律主要通过已知几何参数及各类方向角变量, 求解机器人转弯足端相对于指定坐标系的姿态及位置, 以及足端相对于机器人的位置与姿态, 求解方向角变量^[17]。在求解过程中, 使用惯性坐标系描述机器人的全局位置和方向, 使用机器人本体坐标系来描述机器人的内部状态, 如质心位置和角速度。在后续解算过程中, 机器人运动方向角可以继续细化为俯仰角、横滚角与偏航角, 但对于传感器子网络而言, 其只需标定转弯轨迹的大致范围就可以确定足端步态在轨迹内的分布形式, 所以即便不细分方向角, 也可以完成两轮机器人足端步态规律分析^[18], 参考公式 (9):

$$Q = \int \frac{1}{B} \times |\overline{\omega}^2(\tilde{\omega})| d\tilde{\omega} \quad (9)$$

式中, \bar{w} 为机器人质心位置定义项, \tilde{w} 为转弯运动过程中的机器人运动角速度描述项。由于转弯运动过程中, 机器人轮子与地面之间没有明显的滑动摩擦作用, 因此轮子速度与机器人运动速度之间存在直接联系, 这也是构建转弯自动平衡控制算法必须针对足端步态进行分析的主要原因。

3.2 机器人转弯足端步态的非同轴规划

通过足端步态规律分析, 可以了解机器人转弯过程中足端的运动规律和特点, 便于其在足端落地等状态中, 获取相应的非同轴规划策略, 优化机器人的转弯姿态, 提高机器人的灵活性。非同轴规划是指机器人在转弯时, 其足端轨迹不与两轮机器人的轴线重合, 这样可以增加机器人在转弯过程中的稳定性和灵活性, 实现对其运动平衡性的控制。其中, 其中, 足端抬起与落地轨迹的定义参考摆动相足端步态, 能够决定机器人单腿的步幅与步高水平; 腿部相位变化直接驱动机器人在转弯过程中的平衡转向能力, 由于支撑相足端直接支撑在地面之上, 所以在滤波处理传感器数据时, 非同轴规划机器人转弯^[19-20]足端步态时应遵循如下要求:

- 1) 传感器采集到数据所能描述出的转弯足端步态轨迹必然是圆滑的闭合曲线, 整个转弯过程中轨迹内不会出现断点;
- 2) 足端落地时, 步态速度与加速度必须为零, 以使地面与足端的冲击作用尽可能小, 实现对转弯运动的自动平衡控制;
- 3) 非同轴规划过程中, 机器人足端关节速度与加速度的变化无明显奇点。

设 e_0 为支撑相足端步态, e' 为摆动相足端步态, ρ 为足端步态信息在传感器数据中的占比密度, r 为两轮机器人的非同轴平衡转向系数, ϑ 为足端步态的非同轴标记向量, θ 为转弯足端的自动平衡项参数。在上述物理量的支持下, 联立公式 (9), 可将机器人转弯足端步态的非同轴规划标准表示为:

$$E = \prod_{\theta=1}^{+\infty} \frac{\vartheta^2}{2} \cdot \sqrt{\frac{\rho(e' - e_0)^2}{(r-1) \times Q}} \quad (10)$$

在转弯过程中, 机器人需要承受较大的离心力和侧向力, 因此实施对足端步态的非同轴规划时, 还要根据传感器数据的 SVM 耦合滤波处理结果, 对其动力学平衡特性进行控制。

3.3 自动平衡标准下的转弯轨迹解算

在自动平衡标准下解算两轮机器人转弯轨迹, 需要综合考虑机器人的动力学特性、稳定性要求以及转弯时的约束条件。其中, 动力学特性决定了机器人的转弯参数, 稳定性要求的定义则关系到机器人的转弯半径, 约束条件确保了机器人在转弯过程中不会倾倒, 即传感器子网络必然能够根据 SVM 耦合滤波数据测得方向角数值^[21-22]。设 u 为转弯半径内的轨迹线路曲率, \tilde{y} 为足端步态在转弯轨迹内的数值解算向量, σ 为基于自动平衡标准所选择的转弯约束参

数, \dot{U} 为 SVM 耦合滤波下机器人转弯轨迹内的步态向量非同轴协调系数, 联立上述物理量, 可将自动平衡标准下的两轮机器人转弯轨迹解算表达式定义为:

$$D = \sqrt{\frac{E}{u^2 - 1}} \cdot \tilde{y} \left(\frac{\dot{U}}{\sigma} \right)^2 \quad (11)$$

经过解算处理后, 转弯轨迹中不合理的步态节点被排除在外, 这对于机器人转弯运动的自动平衡控制可以起到一定的促进性影响作用。

3.4 控制函数推导

控制函数的设计是基于对系统行为的理解和控制目标的设定。在本次研究中, 使用 SVM 耦合滤波算法识别机器人的转弯运动状态, 并据此计算控制指令, 可以实现更精确和自适应的自动平衡控制。实现传感器数据 SVM 耦合滤波下非同轴两轮机器人转弯自动平衡控制功能, 需利用解算后的转弯轨迹, 定义等式函数条件, 而该函数就是平衡控制函数。传感器子网络使用 SVM 耦合滤波算法对预处理后的传感器数据进行分类, 以识别机器人当前所表现出的转弯运动状态^[23-24]。从功能性角度来看, 控制函数根据转弯轨迹参数、SVM 分类结果以及机器人的实时状态, 计算并输出控制指令, 以调整机器人的轮子速度和姿态, 实现自动平衡。设 t, i 为两个不重合的转弯轨迹标记点, I_t 为标记点 t 中的传感器数据分类项, I_i 为标记点 i 中的传感器数据分类项, ΔT 为非同轴两轮机器人的转弯周期, ζ 为传感器数据 SVM 耦合滤波下的转弯轨迹控制项, 联立公式 (11), 可将控制函数定义式表示为:

$$P = \sigma \left[\frac{(I_t^2 + I_i^2)}{D} \times |\Delta T| \right]^{-1} \quad (12)$$

根据机器人的运动学模型和期望的转弯轨迹 (如转弯半径、速度等) 解算出转弯轨迹。使用 SVM 耦合滤波算法对预处理后的传感器数据进行分类, 以识别机器人当前所表现出的转弯运动状态。综合考虑转弯轨迹参数、SVM 分类结果以及机器人的实时状态设计控制函数。为满足 SVM 耦合滤波算法对机器人转弯运动行为的平衡控制需求, 传感器子网络在采集转弯轨迹节点时, 对数据样本的连续性提出了明确要求, 这就表示控制函数对于机器人转弯运动的平衡性规划具有连续性特征。

4 实验分析与研究

针对非同轴两轮机器人在转弯运动过程中平衡性的实验, 就是根据方向角数值判断机器人的实时运动状态。受到角速度、线速度等物理量的影响, 方向角的理想数值基本维持在既定数值区域之中, 且只有保证实验结果完全保持在该数值范围之内, 才表示机器人在转弯运动过程中的平衡性能够得到保障, 即所应用方法的控制作用能力较强。

4.1 实验准备

首先, 搭建一个非同轴两轮机器人实验平台, 主要包括机器人的机械结构、电子控制系统和传感器系统等。进行转弯实验前, 需要对机器人进行初始化和校准, 确保各

个系统工作正常。在实验过程中, 使用各种传感器来监测机器人的运动状态和环境信息, 如陀螺仪、加速度计、超声波传感器等。这些传感器数据可以实时反馈给机器人的控制系统, 用于调整机器人的运动轨迹, 并计算方向角的具体数值。本次实验所应用测量仪器如表 1 所示。

表 1 实验设备

类别	名称
机器人	CMR ROBOT 非同轴两轮机器人
电子控制系统	JY931 控制平台
传感器系统	NJK-5002C-M12 计算机平台
陀螺仪	WT901BLE
加速度计	MPU6050
超声波传感器	MIK-MP 一体式传感器

在机器人两轮前后安装传感器, 并连接到电子控制板上, 将购置的机器人系统的电源与自行设计的电源系统集成, 确保整个系统能够稳定供电。根据购置的机器人系统的传感器数据格式, 修改数据采集和预处理代码以适配新系统。修改控制软件的架构, 将 SVM 滤波算法集成到购置的机器人系统的控制软件中, 以替换原有的控制算法或与其并行运行。一个完整的转弯运动至少包含两个不同的运动形态, 以左侧转弯为例, 对机器人转弯运动进行分解, 如图 3 所示。

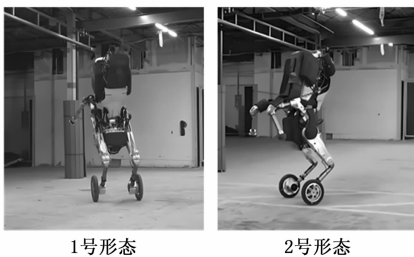


图 3 非同轴两轮机器人的转弯运动分解

1 号形态表示两轮机器人处于转弯初期, 其中左轮的实时速度小于右轮, 向心加速度指向左侧; 2 号形态表示两轮机器人已经完成转弯, 左轮、右轮的实时速度均为零。

4.2 实验部分

4.2.1 数据滤波效果分析

为了降低控制误差, 首先进行数据滤波处理, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 经过所提方法滤波后, 可清晰地看到机器人控制过程中, 频率变化情况, 提高机器人的平衡控制能力。

4.2.2 机器人整体控制效果分析

非同轴两轮机器人在转弯运动过程中的方向角由俯仰角、横滚角、偏航角 3 部分组成。其中, 俯仰角表示机器人相对于水平面的倾斜角度。具体来说, 俯仰角是机器人纵轴与水平面之间的夹角, 当机器人向前倾斜时, 俯仰角为正; 当机器人向后倾斜时, 俯仰角为负。横滚角表示机

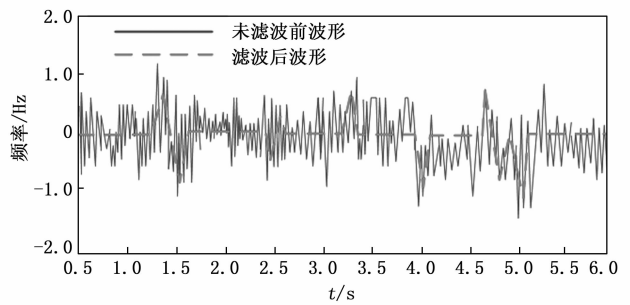


图 4 滤波处理结果分析

器人相对于其自身垂直轴的旋转角度。当机器人向左转弯时, 横滚角为正; 当机器人向右滚动时, 横滚角为负。偏航角表示机器人相对于其初始面向方向的偏转程度。当机器人向右转时, 偏航角增大; 当机器人向左转时, 偏航角减小。

选择传感器数据 SVM 耦合滤波下的非同轴两轮机器人转弯自动平衡控制方法、基于 Udwadia-Kalaba 理论的平衡控制方法、基于区间 II 型 T-S 模糊模型的平衡控制方法进行实验, 记录不同方法作用下, 俯仰角、横滚角、偏航角 3 类方向角的实验数值, 所得结果分别为 a 组、b 组、c 组变量。具体实验情况如图 5 所示。

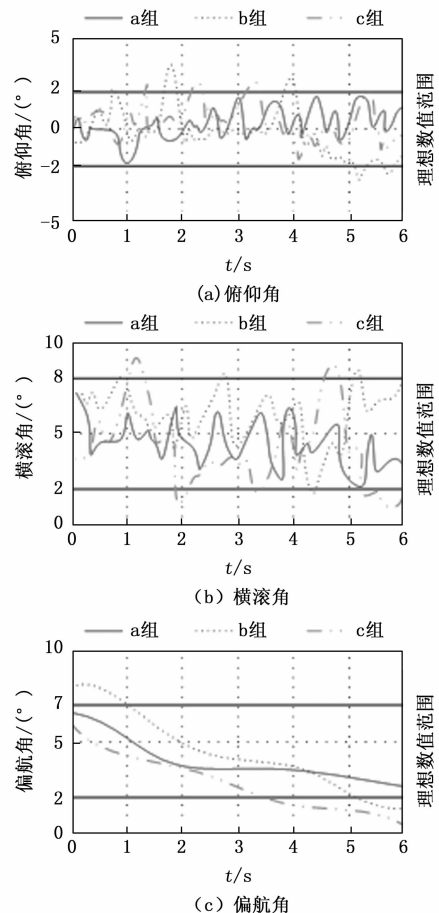


图 5 不同角变化对比图

分析图 5 可知, 俯仰角、横滚角、偏航角的理想数值范围分别为 $-2 \sim 2^\circ$ 、 $2 \sim 8^\circ$ 、 $2 \sim 7^\circ$, 结合曲线走向来看, 只有 a 组方向角的实验结果始终保持在上述数值范围之内。就 b 组实验结果来看, 其俯仰角最小值低于 -2° , 最大值高于 2° ; 横滚角最小值低于 2° , 而最大值高于 8° ; 偏航角最小值低于 2° , 最大值高于 7° 。就 c 组实验结果来看, 其俯仰角最大值高于 2° ; 横滚角最小值低于 2° , 最大值高于 8° ; 偏航角最小值低于 2° 。

实验结论: 基于 Udwardia-Kalaba 理论的平衡控制方法、基于区间 II 型 T-S 模糊模型的平衡控制方法的应用, 并不足以实现对 3 类方向角的有效控制, 这就表示这两种方法并不能在机器人转弯过程中有效保持其运动平衡性; 传感器数据 SVM 耦合滤波下的非同轴两轮机器人转弯自动平衡控制方法的应用, 则实现了对 3 类方向角的有效控制, 可使其实验值保持在理想数值范围之内, 符合在机器人转弯过程中有效保持其运动平衡性的实际应用需求。

5 结束语

通过结合支持向量机 (SVM) 的强大分类能力和滤波技术的信号处理优势, 成功地两轮机器人设计了一种高效的转弯自动平衡控制策略。通过 SVM 耦合滤波, 不仅能够有效地去除传感器数据中的噪声和干扰, 提高数据的可靠性和准确性, 还能够利用 SVM 的分类特性, 对机器人的运动状态进行精准识别和预测。这为机器人在转弯过程中的自动平衡控制提供了坚实的基础。非同轴规划的应用进一步增强了机器人在转弯时的稳定性和灵活性。通过精心规划足端步态, 确保了机器人在转弯过程中能够保持平稳、流畅地运动, 有效避免了倾倒等不稳定情况的发生。

参考文献:

[1] 高靖松, 金弘哲, 朱延河, 等. 基于非线性弹簧模型的轮腿自平衡机器人跳跃算法研究 [J]. 机械工程学报, 2023, 59 (9): 51-62.

[2] 张佳乐, 赵睿英, 冯艳丽, 等. 基于 Udwardia-Kalaba 理论的自行车机器人平衡控制方法 [J]. 工程科学学报, 2023, 45 (2): 318-325.

[3] 李磊, 章政, 黄卫华, 等. 基于区间 II 型 T-S 模糊模型的立方体机器人自平衡控制 [J]. 高技术通讯, 2022, 32 (8): 866-874.

[4] 熊长智, 周慧, 贾杰. 基于深度图像的轮足机器人坐姿平衡控制仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (10): 435-439.

[5] YIN K, XUE Y, YU Y, et al. Variable impedance control for bipedal robot standing balance based on artificial muscle activation model [J]. Journal of Robotics, 2021 (5): 1-9.

[6] 国强, 崔玉强, 王勇. 无线传感器网络中基于动态簇的节点调度算法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2022, 52 (6): 1466-1476.

[7] 崔焕庆, 赵君宜, 罗汉江. 基于双移动锚节点的无线传感器网络定位算法 [J]. 计算机工程与设计, 2023, 44 (8): 2248

-2255.

[8] 陈雪雁, 章志明, 杨伟, 等. 轻量级的无线传感器网络选择性转发攻击检测 [J]. 计算机科学与探索, 2022, 16 (4): 865-876.

[9] 肖贤贵, 李开成, 贺才郡, 等. 基于稀疏分解和复合熵编码的电能质量扰动数据高效压缩算法 [J]. 电工技术学报, 2023, 38 (23): 6318-6331.

[10] 戚连刚, 申振恒, 王亚妮, 等. 基于周期截断数据矩阵奇异值分解的干扰抑制技术 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (6): 2143-2150.

[11] 石延辉, 杨洋, 廖毅, 等. 基于改进粒子群算法优化 SVM 的变压器故障诊断 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2023, 56 (10): 1238-1244.

[12] 柯晔, 吕志伟, 周玟龙, 等. LS-SVM 和抗差估计的 GNSS/INS 紧组合欺骗检测算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50 (1): 299-307.

[13] 周世华, 王云贺, 陈雨, 等. 非线性振动下卸载系统动力学及运动学特性分析 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2022, 43 (12): 1724-1731.

[14] 刘兰香, 杨文英, 柴玉阳, 等. 微小型继电器的刚柔耦合碰撞动力学建模方法与弹跳行为分析 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (2): 808-818.

[15] 刘超, 林寿英, 王彩霞, 等. 基于 Gabor 滤波器和 SVM 结合的中华蜂图像识别方法 [J]. 农业工程, 2021, 11 (8): 49-52.

[16] 高升, 马广富, 郭延宁. 基于自适应未知输入观测器的多故障快速重构 [J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44 (7): 2364-2373.

[17] 杨太玮, 郑旭东, 徐文福, 等. 考虑迟滞及变形影响的主被动混合驱动绳驱空间机械臂运动学建模及求解 [J]. 机器人, 2022, 44 (1): 45-54.

[18] 任娇, 冀晓翔, 李江红, 等. 一种基于改进 Denavit-Hartenberg 方法的三轴“动中通”天线运动学建模方案 [J]. 西北工业大学学报, 2023, 41 (3): 518-528.

[19] 王春臻, 李瑞琴, 柴超, 等. 混联双平台错动式六足机器人步态分析及轨迹规划 [J]. 机械传动, 2023, 47 (4): 90-97.

[20] 朱力, 李团结, 宁宇铭, 等. 腿臂融合型在轨装配机器人运动建模与步态规划 [J]. 中国空间科学技术, 2023, 43 (1): 100-108.

[21] 司全, 王忠宾, 王浩, 等. 基于惯性传感组件和 BP 神经网络的防冲钻孔机器人钻具姿态解算 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (4): 213-223.

[22] 姜丽辉, 郑循江, 杨逸峰, 等. 基于 TOF 相机的超近程空间非合作目标的位姿估计 [J]. 空间控制技术与应用, 2022, 48 (3): 63-71.

[23] 袁敞, 戴猛猛, 邱俊卿. 应用新型能量函数的 PWM 整流器无源性控制方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34 (3): 45-50.

[24] 郭海聪, 容源, 王召朋, 等. 基于多容惯性标准传递函数的 PID 控制参数整定方法在 Boost 变换器中的应用 [J]. 中国测试, 2022, 48 (3): 84-89.