

同轴双偏心球形机器人的系统设计与研究

黎铭威, 于大泳, 程雨奇

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月30日; 录用日期: 2025年4月23日; 发布日期: 2025年4月30日

摘要

本文探讨了同轴双偏心球形机器人的系统设计, 旨在提高其运动的灵活性和精度。它首先对机器人的设计原理、结构特点和作用机构进行了详细分析。重点放在机器人在各种作业条件下的性能上, 重点关注运动精度、响应速度和稳定性等关键指标。拉格朗日动力学方程是针对同轴双偏心质量驱动球形机器人推导的, 包括线性、转向和爬升运动以及初级耗散函数。仿真和实验结果表明, 该机器人具有出色的动态特性, 尤其是在准确性和稳定性方面。此外, 还引入了基于S曲线的启动策略来优化启动性能。这种方法通过逐渐加速和减速机器人, 减少快速加速产生的振动和冲击, 确保在启动过程中实现平稳过渡。改进的启动平稳性和动态响应增强了机器人的整体稳定性和可靠性。本研究为球形机器人的运行提供了理论和实践见解, 为该领域未来的研究和应用提供了坚实的基础。

关键词

同轴双偏心球形机器人, S曲线启动策略, 动态特性, 系统设计, 模拟和实验, 驱动机构

System Design and Research of Coaxial Double Eccentric Spherical Robot

Mingwei Li, Dayong Yu, Yuqi Cheng

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 30th, 2025; accepted: Apr. 23rd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

This paper discusses the system design of coaxial double eccentric spherical robot, aiming to improve their flexibility and accuracy of motion. Firstly, the design principle, structural characteristics and

operating mechanism of the robot are analyzed in detail. The focus is on the performance of the robot under various operating conditions, focusing on key indicators such as motion accuracy, response speed and stability. Lagrange dynamic equation is derived for spherical robot driven by coaxial double eccentric mass, including linear, steering and climbing motion and primary dissipation function. Simulation and experimental results show that the robot has excellent dynamic characteristics, especially in accuracy and stability. In addition, the startup strategy based on S-curve is introduced to optimize the startup performance. By gradually accelerating and decelerating the robot, this method can reduce the vibration and impact caused by rapid acceleration and ensure a smooth transition in the starting process. The improved starting stability and dynamic response enhance the overall stability and reliability of the robot. This research provides theoretical and practical insights for the operation of spherical robots, and provides a solid foundation for future research and application in this field.

Keywords

Coaxial Double Eccentric Spherical Robot, S-Curve Starting Strategy, Dynamic Characteristics, System Design, Simulation and Experiment, Drive Mechanism

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,球形机器人因其独特的运动能力和在复杂环境中导航的多功能性而在机器人领域引起了广泛关注[1]。例如,这些机器人用于火星探测或发现任意未知环境[2][3];其他人开发了具有多矢量喷水推进的球形水下机器人[4],还有一些用于环境温度和相对湿度监测的球形移动机器人[5],还有一些用于帮助解决儿童发育障碍[6]。这些球形机器人中的每一个都有其优点和缺点。他们的内部驱动方式也存在差异,根据驱动方式大致分为三类:直接驱动方式、重力驱动方式和角动量驱动方式。2011年,战强推出了以玻尔兹曼-哈梅尔方程命名的 BHQ-III 机器人[7][8]。该机器人的特点是驱动电机直接连接到驱动轮,驱动轮连接到机器人的内壳上。第二个电机控制 IDU, IDU 控制机器人的旋转。这种设计使球式机器人能够以接近零的转弯半径和高完整性进行机动。它的主要优点是平台和机器人外壳之间的四个接触点,一个来自驱动轮,三个来自海绵轮,这增加了摩擦力并允许它在不平坦的地形上运行。另一种类型的直驱球形机器人是将推车放置在球形外壳内,提供驱动力以驱动外壳运动。这种驱动机构的优点是能够以受控方式停止在倾斜面上并从倾斜面上滚落。一些研究团队基于这一原理设计了球形机器人,例如文献[9]-[12]。就运动学特性而言,当内部机器人是一个受控球时,运动学特性也会发生变化[13]。因此,球式机器人可以立即改变方向并具有完整的特性。R. Mukherjee 等人为球形机器人设计了一种新的驱动机构概念,称为 Spherobot [14],后来,参考文献[15][16]通过为 s_r 分配质量和轴来改进这种设计。可以结合其设计来持续加速、减速和保持恒定速度。基于摆原理的机构在今天非常流行,参考文献中出现了几种结合该原理的球形机器人[17]-[22]。其原理是将轴直接连接到滚珠机器人的内壳上,在轴的中间连接一个摆锤,该摆锤围绕轴旋转。通过改变摆锤的位置,CoM 移动,滚珠机器人开始滚动。S. Bhattacharya *et al.* 设计了第一个利用角动量移动的球形机器人[23],这种机构的优点是球形机器人可以作为一个整体移动。参考文献[24]-[26]基于类似的原则提出和设计。各种驱动方式各有优缺点,其中,同轴双偏心质量驱动球形机器人由于其创新的推进机构和增强的可作性,是一种很有前途的设计。其中一种类似的机制

使用两个钟摆。赵勃提出了这个想法，因此设计了一种带有椭圆壳的球形机器人[27][28]。本研究的重点是此类机器人的开发和优化，特别强调其动态行为和性能特征。类似的原理也被用于设计其他球形机器人[29]-[31]，说明同轴双偏心球形机器人具有非常好的高灵活性和可作性、稳定性和控制性以及高效的能量利用。

球形机器人的发展取得了长足的进步，在移动性和多功能性方面具有独特的优势。同轴双偏心球形机器人的球形结构具有双偏心，为提高运动控制和效率提出了新的挑战 and 机遇。本研究旨在通过解决与此类机器人相关的特定设计和控制挑战来建立现有研究，这在当前文献中不太常见。

同轴双偏心球形机器人代表了机器人设计的重大进步，通过其创新的结构配置提供了增强的运动能力和精度。通过在球形框架内集成双偏心质量，该机器人实现了灵活性和稳定性的独特组合。同轴设计允许对复杂动作进行卓越控制，包括线性运动、转向和爬升。该机器人的高级动态建模由拉格朗日力学提供支持，可以详细了解其在各种条件下的性能。实施基于 S 曲线的启动策略通过最大限度地减少振动和提高响应能力来进一步改进其作业能力。这些进步不仅增强了机器人的整体功能，还为机器人系统和应用的未来发展铺平了道路。

2. 同轴双偏心系统结构设计

根据图 1，该机器人设计有同轴双偏心质量驱动，相当复杂和强大。其结构由几个部件组成，包括球形外壳、支撑机构、姿态传感器模块、偏心驱动单元、系统控制器和机载电源。每个组件都起着关键作用，并相互协同工作以实现机器人的各种功能。

首先，球形外壳是整个机器人的外壳，直径为 300 毫米。它采用精致的设计，带有内部凸耳机构，不仅美观，还有助于牢固地固定支撑机构。支撑机构是连接球壳与其他元件的关键部件，它们承担着承载和支撑的功能。姿态传感器模块负责感应机器人的姿态和运动状态以进行精确控制。

偏心驱动装置是该机器人的驱动核心[27][28]。它通过法兰连接到支撑机构，以确保两个驱动电机轴线在同一条直线上。这种设计的微妙之处在于它采用了同轴双偏心质量驱动方案，这意味着通过控制两个偏心驱动单元的运动，机器人能够实现各种运动，例如前进、后退和转向。

系统控制器和车载电源是机器人的智能中枢。作业人员通过无线通信控制机器人的控制器，向机器人发送命令。另一方面，系统控制器利用姿态传感器模块提供的信息实时计算机器人的运动状态，并根据作业员的命令将其转换为驱动电机的控制命令。这种实时反馈和控制机制使机器人能够灵活地响应各种情况并执行复杂的任务。

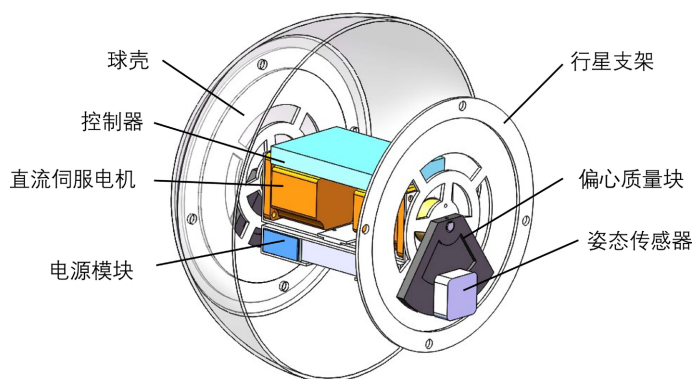


Figure 1. Structure diagram of spherical robot

图 1. 球体机器人结构图

同轴双偏心质量驱动装置的结构如下图 2 所示。驱动单元由电机支撑机构、法兰、直流伺服电机、深沟球轴承、垫片、偏心质量和螺钉组成。驱动单元有两个电机，相对于球心对称放置在主轴上，每个电机分别驱动一个偏心质量，该偏心质量只能绕电机轴线旋转。直流伺服电机通过螺钉连接到电机支撑机构。

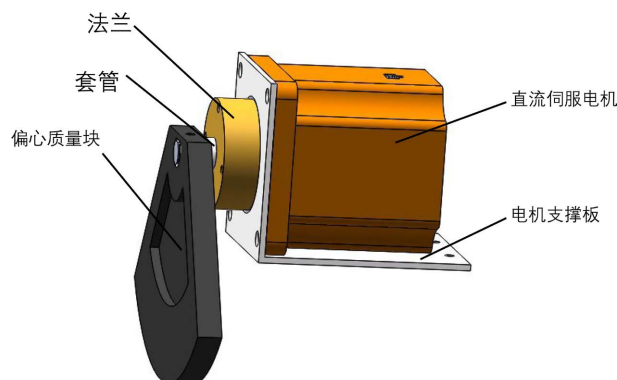


Figure 2. Structural design drawing of driving unit
图 2. 驱动单元结构设计图

3. 球形机器人的线性行走动力学方程

球形移动机器人的工作原理是以破坏平衡状态产生扭矩来驱动运动，并通过控制内部重心改变机构来调节运动方向和速度。我们将双摆式全向运动球形移动机器人简化为由两个刚体组成的滚动系统：一个是球体的外壳部分，包括轴和附件的连接部分等，视为刚体；另一种是由内部驱动装置驱动的单摆锤，它与质量转子的末端相连，包括齿轮、电机、轴、配重等，它们连接在一起形成另一个刚体，它们在电机的驱动下一起运动。这个简化的模型有助于我们的动力学分析和控制算法设计。通过这样的分析和设计，我们可以更好地了解和优化球形移动机器人的运动特性和控制机制。

如图 3 所示，同轴双偏心球形机器人[32]沿直线行走，两个偏心转子在同一方向上以相同角度偏转，驱动机器人沿直线行走，因此在线性运动分析中可以将球形机器人简化为球壳和等效摆，并且通过改变等效摆的位置来偏移球形机器人的重心，并带动球形机器人向前滚动。设球壳的半径为 R ，等效摆的长度为 r 。球壳和地面是纯粹的滚动约束。球形机器人的初始位置 O 是球壳与平面的接触点，一段时间后，球形机器人移动到 Q 点。球形机器人通过“ φ ”角滚动，等效摆锤的偏转角为“ θ ”。

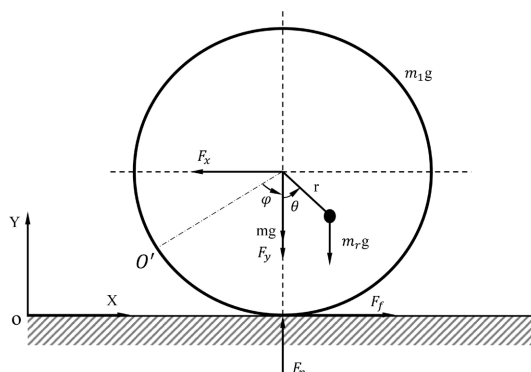


Figure 3. Schematic diagram of robot running in a straight line
图 3. 机器人直线行驶示意图

设球壳在惯性坐标系 XOY 中的中心为 (x_1, y_1) ，因为球是纯粹沿着地面滚动的，所以，球壳坐标 x_1 的中心与“ φ ”的关系如下。

$$x_1 = R\varphi \quad (1)$$

设等效摆的中心坐标为 (x_2, y_2) ，则等效摆的位移方程可以表示为

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + r \sin \theta = R\varphi + r \sin \theta \\ y_2 = -r \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

取关于时间的一阶导数，得到等效摆的速度方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = r \cos \theta \dot{\theta} + R\dot{\varphi} \\ \dot{y}_2 = r \sin \theta \dot{\theta} \end{cases} \quad (3)$$

因此，等效摆锤的速度方程可以得到为

$$v_2^2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 = r^2 \dot{\theta}^2 + 2Rr \cos \theta \dot{\theta} \dot{\varphi} + R^2 \dot{\varphi}^2 \quad (4)$$

取关于时间的一阶导数得到等效摆锤的加速度方程为

$$\begin{cases} \ddot{x}_2 = r \cos \theta \ddot{\theta} - r \sin \theta \dot{\theta}^2 + R\ddot{\varphi} \\ \ddot{y}_2 = r \sin \theta \ddot{\theta} + r \cos \theta \dot{\theta}^2 \end{cases} \quad (5)$$

通过动力学方程可以看出，通过控制等效摆的速度进来控制球形机器人的运动是困难的，因此需要通过其他方法来控制球形机器人的运动。

设球形机器人球壳的质量为 m ，球壳沿水平方向移动的速度为 v_1 ，球壳的转动惯量为 J_m ，等效摆的质量为 m_r ，角速度为 w_2 ，转动惯量为 J_2 。取穿过球形球中心并与地面平行的平面为零势能表面，则系统的移动动能、旋转动能和势能表示为

$$\begin{cases} E_k = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_r v_2^2 = \frac{1}{2} (m_1 + m_r) R^2 \dot{\varphi}^2 + m_r r^2 \dot{\theta}^2 + m_1 R r \dot{\varphi} \dot{\theta} \cos \theta \\ E_t = \frac{1}{2} J_m w_1^2 + \frac{1}{2} J_2 w_2^2 = \frac{1}{2} J_m \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}^2 \\ E_p = -m_1 g r \cos \theta \end{cases} \quad (6)$$

根据分析，该系统在二维平面上是 2 个自由度，所以以球体滚动经过的 φ 角和配重相对于球壳摆动经过的角度 θ 为广义坐标，选择球心作为引力势能 0 的点，并通过运动学分析建立拉格朗日函数：

$$\begin{aligned} L &= E_k + E_t - E_p \\ &= \frac{1}{2} (m_1 R^2 + m_r R^2 + J_m) \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} (m_r r^2 + J_2) \dot{\theta}^2 + m_r (R \dot{\varphi} \dot{\theta} + g) \cos \theta \end{aligned} \quad (7)$$

在实际应用中，电机输出轴与轴承之间存在粘性阻尼，输出轴与轴承之间的相对速度不大，因此引入初速度的瑞利耗散函数 ψ ，定义为：

$$\psi = \frac{1}{2} \mu (\dot{\theta} + \dot{\varphi})^2 \quad (8)$$

其中 μ 表示粘性摩擦系数，具有耗散函数的球形机器人线性滚动的拉格朗日方程由下式给出

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = Q_i - \frac{\partial \psi}{\partial \dot{q}_i} \quad (9)$$

当球体在地面上进行纯滚动时,地面的摩擦力 F_f 和作用在球体中心的偏心质量块的水平力是一对反作用力和反作用力,设左右电机 1 和 2 的输出转矩分别为 τ_1 和 τ_2 。

左右电机 1 和 2 的输出转矩分别为 τ_1 和 τ_2 , 两个广义力 Q_φ 和 Q_θ 的表达式可求如下。

$$\begin{cases} Q_\varphi = \tau_1 + \tau_2 - F_f R = 2\tau - F_f R \\ Q_\theta = \tau_1 + \tau_2 - m_r r g \sin \theta = 2\tau - m_r r g \sin \theta \end{cases} \quad (10)$$

将联合(7) (8) (9) (10)方程引入拉格朗日方程,以获得 φ 和 θ 的二进制二阶微分方程组。

$$\begin{cases} 2\tau - F_f R = (m_1 R^2 + m_r R^2 + J_m) \ddot{\varphi} + m_r R r \cos \theta \ddot{\theta} - m_r R r \sin \theta \dot{\theta}^2 + \mu (\dot{\varphi} + \dot{\theta}) \\ 2\tau = (m_r r^2 + J_2) \ddot{\theta} + m_r R r \cos \theta \ddot{\varphi} + 2m_r r g \sin \theta + \mu (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) \end{cases} \quad (11)$$

为了验证简化模型的准确性,我们使用 ADAMS 软件构建了简化的单偏心驱动球形机器人模型和双偏心驱动球形机器人模型,用于仿真分析。简化模型包括球壳、长轴和配重,如下图 4 所示。通过比较简化模型的仿真结果和实际的复杂模型,我们可以评估简化模型在预测机器人运动性能方面的有效性和可靠性。结果表明,简化模型能够更好地反映机器人的基本动力学特性,同时在运动精度和响应时间方面与复杂模型保持一致。这验证了简化模型在早期设计阶段分析和优化机器人性能的可行性和有用性。

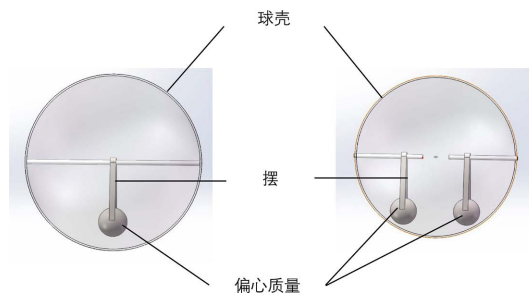


Figure 4. Simplified model structure diagram

图 4. 简化的模型结构图

在简化模型上设置相同的条件进行仿真和分析,球形机器人线性行走的速度图如图 5 所示,位移图如图 6 所示

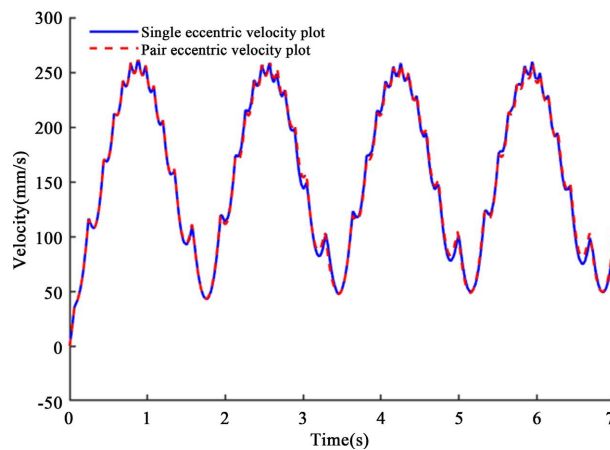


Figure 5. Linear travel speed curve

图 5. 线性行驶速度曲线

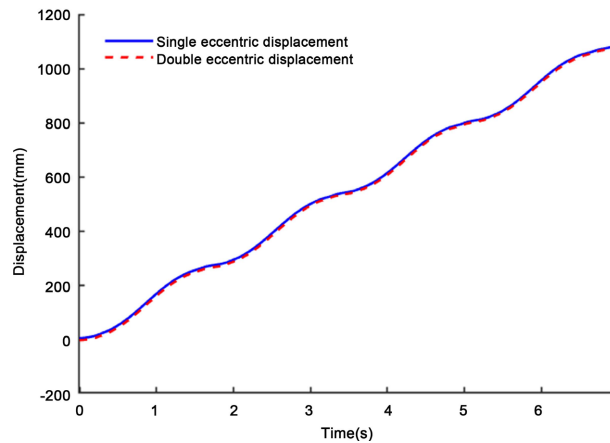


Figure 6. Linear stroke displacement curve
图 6. 线性行程位移曲线

结果表明,单偏心驱动球形机器人模型和双偏心驱动球形机器人模型在直线行走时的速度分布和位移分布基本相同。这表明将同轴双偏心驱动系统简化为单偏心系统是可靠的,建立的动力学方程可以准确描述机器人的运动行为。具体来说,两个模型在线性运动中的加速、减速和位移趋势是一致的,验证了简化模型在预测机器人运动性能方面的有效性。这不仅保证了简化模型能够有效反映实际的运动特性,而且表明简化模型可以在设计和优化过程中进行快速分析,节省计算资源和时间。这些结果为后续的设计迭代和实际应用提供了坚实的理论支持。

4. 双偏心机器人的运动优势

单偏心结构:振动方向由偏心块的旋转方向决定,只能产生固定方向的振动(如图形或线性振动)。双偏心结构:通过调整两个偏心块的相位差 ϕ ,可以合成任意方向的振动轨迹,见图 7。振动轨迹方程:

$$\begin{cases} x(t) = A\cos(\omega t) + A\cos(\omega t + \phi) \\ y(t) = A\sin(\omega t) + A\sin(\omega t + \phi) \end{cases} \quad (12)$$

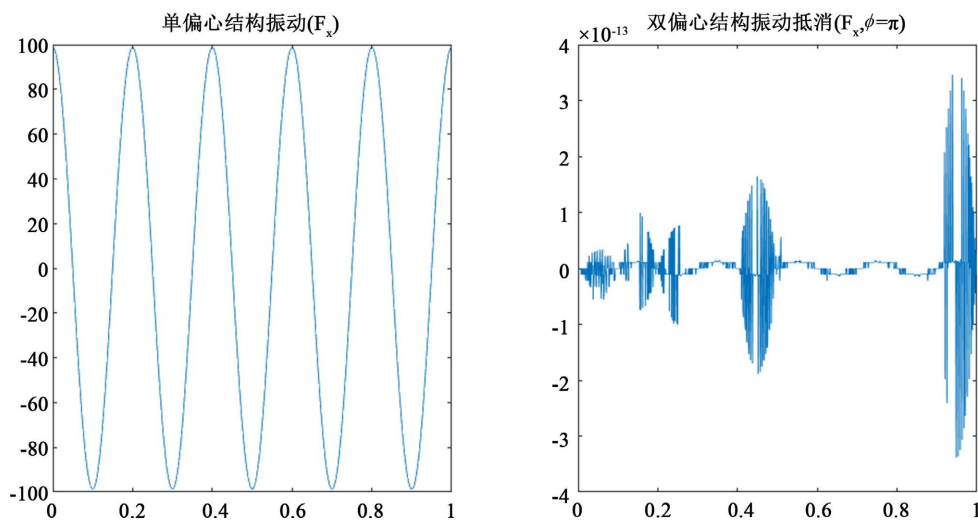


Figure 7. Linear travel vibration curve
图 7. 线性行程振动曲线

当相位角 $\phi=0$ 时, 系统表现为线性振动, 即振动沿一个固定方向进行, 不涉及任何偏移或旋转; 当 $\phi=\pi/2$ 时, 系统的振动转变为椭圆振动, 这意味着振动的轨迹呈椭圆形, 方向和幅度会随时间不断变化, 通常是由于两个正交方向上的振动叠加导致的; 而当 $\phi=\pi$ 时, 振动完全抵消, 此时两个振动的幅度相等且方向相反, 导致它们相互抵消, 系统处于静止状态。因此, 相位角的变化直接影响振动的形式, 从线性振动到椭圆振动, 再到完全抵消的状态。

5. 基于 S 曲线的球形机器人启动控制策略

球形机器人在启动过程中的精确控制是一项挑战, 尤其是启动阶段出现的速度曲线断裂问题会影响机器人的稳定性和性能。为了解决这个问题, 有人提出了一种基于 S 曲线的启动策略[33]。该策略通过使用 S 曲线控制算法优化机器人启动过程中的加减速特性, S 曲线是一种常用的加减速控制策略, 其目标是平滑启动、加速、减速和停止过程中的速度变化, 从而提高系统的稳定性和控制精度。S 曲线的形状类似于字母“S”, 在时间轴上形成渐进加速、平稳运行和精确控制。S 型曲线在加速和减速阶段利用了加速和减速之间的平滑过渡。这种过渡有助于减少启动过程中的冲击和振动, 从而提高启动过程的稳定性。与传统的线性加减速相比, S 曲线能有效减少系统的过冲现象, 即速度超过目标值后的回落问题。其函数表达式如下

$$f(x) = A + \frac{B}{(1 + e^{-ax+b})} \quad (13)$$

在这个表达式中, A 代表纵轴方向的平移, 但对于小球机器人的启动过程来说, 起点为 0; B 代表纵轴方向的拉伸, 在小球机器人的整个速度规划过程中, B 的值由小球机器人的平稳速度决定。因此, S 曲线中影响小球机器人起动的参数只有 a 和 b , 其参数对 S 曲线的影响如下图 8 所示。

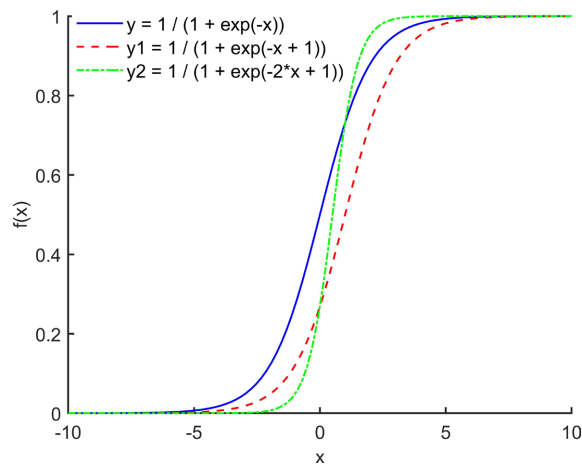


Figure 8. S-Curve influence factor chart
图 8. S 曲线影响因子图

为了进一步验证这一理论, 本文采用单因素控制变量法模拟分析了偏心质量摆角 θ 对球形机器人速度的影响。为了简化验证过程, 我们使用 ADAMS 软件建立了双偏心驱动球形机器人的简化模型。该模型包含一个球形外壳、一根长轴和一个配重, 如图 4 所示。通过该简化模型, 我们可以有效模拟球形机器人在不同控制条件下的运动行为, 从而验证简化模型的准确性。

在实验中, 我们假设球形机器人的质量为 1.35 千克, 偏心块与球形外壳及附属结构的质量比为 0.5。

为了研究同轴双偏心质量球形机器人的运动规律，我们需要控制偏心质量的偏转角度和运动模式。具体来说，我们分别采用 180 度/秒、240 度/秒、360 度/秒和 420 度/秒的电机驱动偏心质量的不同运动模式，观察它们对球形机器人运动模式的影响。通过这些仿真实验，我们可以进一步分析球形机器人在不同偏心质量速度下的运动行为和稳定性，进而为实际应用提供数据支持。

实验结果如图 9 所示，显示了球形机器人在不同运动速度下的运动模式。通过这些结果，我们可以直观地看到偏心质量的运动规律是如何影响机器人运动的稳定性和速度变化的，这为今后优化球形机器人的控制策略提供了理论依据。

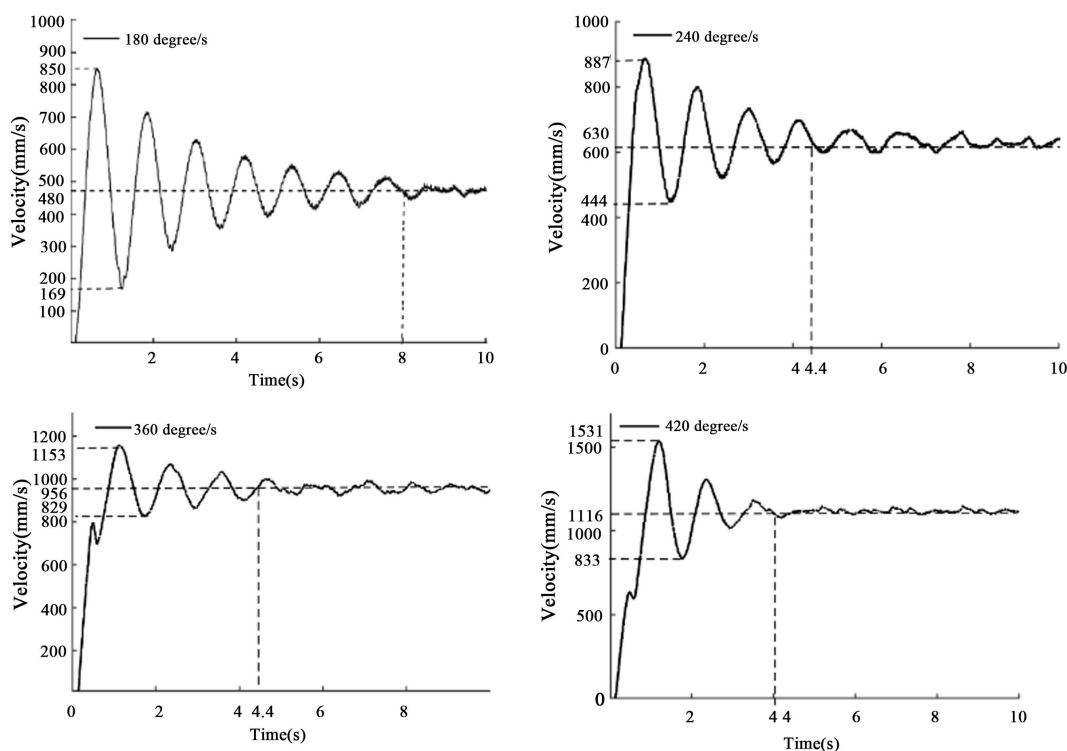


Figure 9. Diagram of the motion velocity of a spherical robot

图 9. 球形机器人的运动速度图

从实验数据可以看出，当偏心质量以不同的运动速度运行时，球形机器人的稳定速度、稳定时间和速度振幅差都存在一定的规律。具体来说，当偏心质量的运动速度为 180 度/秒时，球形机器人的稳定速度为 480 毫米/秒，稳定时间为 8 秒，在此过程中，最大速度幅差为 581 毫米/秒；当偏心质量的运动速度增加到 240 度/秒时，稳定速度增加到 630 毫米/秒，稳定时间缩短到 4.4 秒，最大速度幅差减小到 443 毫米/秒。当偏心质量的运动速度达到 360 度/秒时，球形机器人的稳定速度进一步提高到 956 毫米/秒，稳定时间保持在 4.4 秒，最大速度振幅差更小，为 324 毫米/秒。当运动速度进一步增加到 420 度/秒时，球形机器人的稳定速度达到 1116 毫米/秒，稳定时间减少到 4 秒，但最大速度振幅差增加到 698 毫米/秒。

从这些数据可以清楚地看出，随着偏心质量速度的增加，球形机器人的稳定速度逐渐增加，达到稳定状态的时间明显缩短。但值得注意的是，当偏心质量运动速度分别为 180 度/秒和 420 度/秒时，期间的速度振幅差较大，分别为 581 毫米/秒和 698 毫米/秒，可能会影响球形机器人的精确控制，造成一定的性能波动。

进一步分析表明，在 240 度/秒和 360 度/秒的实验中，速度振幅差较小，分别为 443 毫米/秒和 324 毫

米/秒, 这表明球形机器人在这些速度范围内可以较稳定地达到所需的运动状态。根据这些观察结果, 可以提出一个猜想: 当偏心质量的速度介于每秒 180 度和每秒 420 度之间时, 球形机器人与稳定速度状态之间的振幅差呈现先减小后增大的趋势。这一假设的依据是, 较低和较高的速度可能会导致较大的振幅差, 而中等速度会使控制更加平稳。

为了验证这一猜想, 研究人员进一步设计了实验, 并为偏心质量选择了 210 度/秒、270 度/秒、330 度/秒和 390 度/秒的条件。通过这些实验结果, 可以进一步验证速度间隔对球形机器人控制精度的影响, 以及上述振幅差是否存在变化趋势。

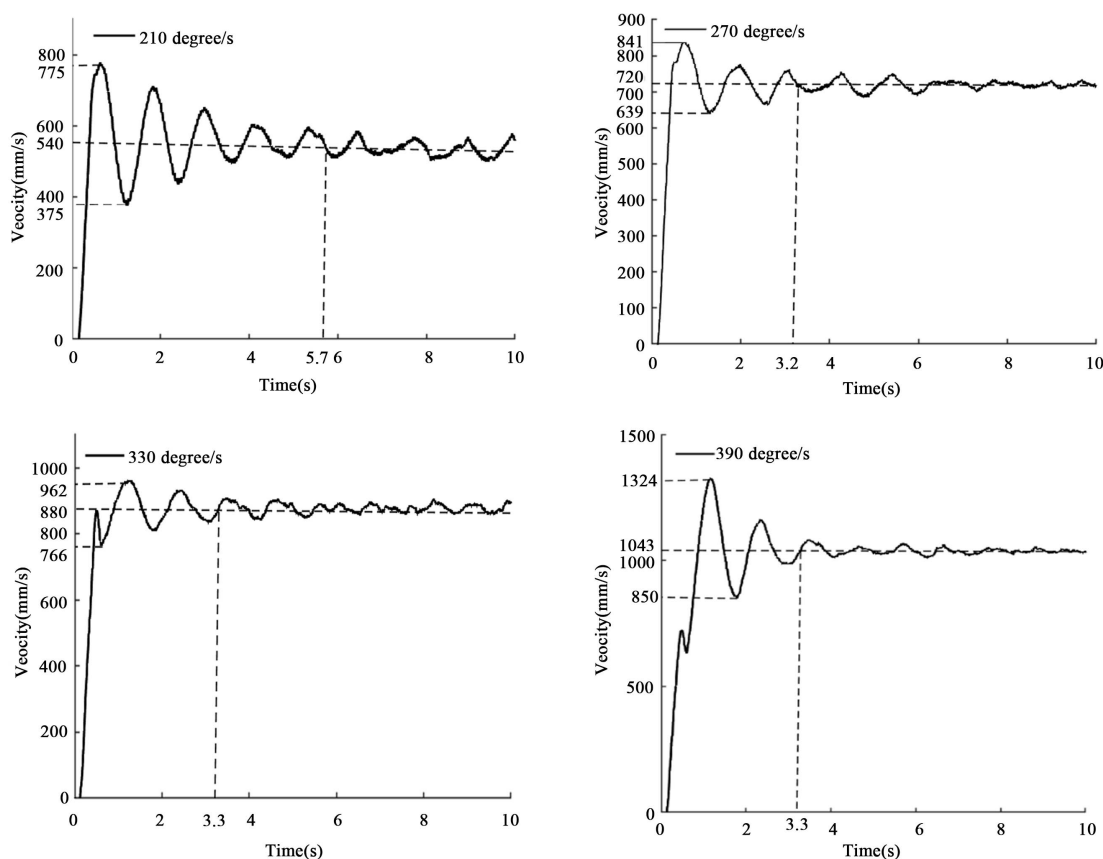


Figure 10. Diagram of the motion velocity of a spherical robot

图 10. 球形机器人的运动速度图

如上图 10 所示, 随着球形机器人速度的增加, 球形机器人达到稳定状态的时间缩短, 最快达到稳定状态的时间为 3.2 秒, 且在 270 度/秒和 330 度/秒的实验中, 速度幅值差较小, 分别为 202 毫米/秒和 196 毫米/秒, 结合图 5 和图 6 的分析, 可以得出球形机器人在 270 度/秒和 330 度/秒的速度范围内, 达到稳定状态的时间最小, 达到稳定状态的时间最短。结合图 5 和图 6 分析, 可以得出球形机器人在 270 度/秒和 330 度/秒速度范围内的速度幅值差最小, 速度区间内达到稳定状态的时间也最小。但是, 球形机器人早期的速度波动问题对球形机器人的控制有很大影响。为了解决上述问题, 本文提出了球形机器人的 S 曲线启动控制策略。

为了验证 S 型曲线的有效性, 本研究在偏心质量块的速度分别为 240 度/秒、270 度/秒、360 度/秒和 390 度/秒的条件下进行了实验。实验结果如下图 11 所示。

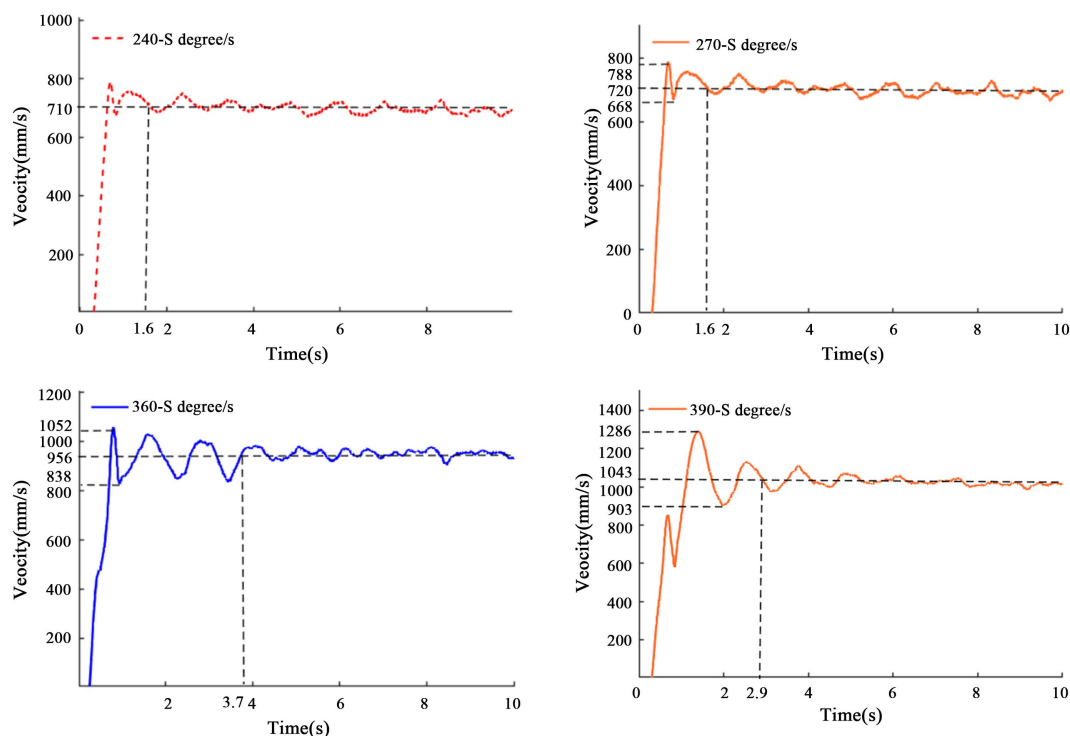


Figure 11. Movement velocity curve of spherical robot S control strategy

图 11. 球形机器人 S 控制策略的运动速度曲线

实验结果表明,采用 S 型启动控制策略的球形机器人达到稳定状态的时间缩短了,最快实现稳定的时间为 1.6 秒,稳定时间的效率最多提高了 63.6%,各组实验之间的幅度差也较之前的实验有所减小,其中在 240 度/秒和 270 度/秒两组实验中,球形机器人运行所需的速度梯形曲线与最大值差 120 毫米/秒基本吻合、根据实验结果可知,球形机器人的 S 曲线启动控制有利于球形机器人快速达到稳定状态,有利于减小球形机器人启动时的速度波动。

总之,事实证明, S 型启动控制策略在提高球形机器人的动态性能和运行效率方面非常有效。实验结果清楚地表明,实施这种控制方法后,机器人达到稳定状态所需的时间大大缩短,最快的稳定时间仅为 1.6 秒。在稳定时间缩短的同时,效率提高了 63.6%,这凸显了 S 型控制策略优化机器人性能的潜力,尤其是在快速稳定至关重要的情况下。

此外, S 型启动控制策略通过减少不同实验组之间的振幅差异,有助于增强运动一致性。尤其是在 240 度/秒和 270 度/秒时,机器人的速度轨迹与所需的速度梯形曲线非常接近,速度的最大偏差被限制在 120 毫米/秒。这表明,在启动和过渡阶段,机器人运动的平稳性和可预测性有了明显改善。

速度波动的减少对于需要精确和稳定运动控制的应用尤为重要,因为它可以最大限度地降低机器人在加速和减速阶段出现过冲或不稳定的风险。这些结果表明, S 型启动控制策略不仅加快了机器人向稳定状态的过渡,而且在提高机器人性能的整体精度和可靠性方面发挥了至关重要的作用。

此外, S 型控制策略能够提供更平滑、更可预测的运动曲线,这使其成为一种非常有价值的工具,适用于各种应用,包括涉及精细或时间敏感操作的应用。总之,本研究的结果表明, S 型启动控制策略在速度、稳定性和一致性方面具有显著优势,是实际应用案例中球形机器人动态控制的重要改进。未来的工作可以探索进一步优化该策略,并将其与其他控制技术进行潜在整合,以进一步提高机器人在复杂环境中的性能。

6. 结论

本研究通过系统设计和性能验证,显著提高了同轴双偏心球形机器人的运动灵活性和精度。建立了线性运动、转向运动和爬山运动具有初级耗散函数的同轴双偏心质量驱动球形机器人的拉格朗日动力学方程。详细的仿真和实验结果表明,该机器人在各种工作条件下表现出优异的动态特性,尤其是在精度和稳定性方面。基于 S 曲线的启动策略,有效减少启动过程中的振动和冲击,提高启动的平稳性和响应速度。研究结果不仅验证了设计原理的有效性,也为未来的机器人研究和实际应用提供了强有力的理论支持和实践经验。这些结果为进一步优化球形机器人系统的设计和性能奠定了坚实的基础,对推动该领域的技术进步具有重要意义。

参考文献

- [1] Bujňák, M., Pírník, R., Rástočný, K., Janota, A., Nemec, D., Kuchár, P., *et al.* (2022) Spherical Robots for Special Purposes: A Review on Current Possibilities. *Sensors*, **22**, Article 1413. <https://doi.org/10.3390/s22041413>
- [2] Hogan, F.R. and Forbes, J.R. (2014) Modeling of Spherical Robots Rolling on Generic Surfaces. *Multibody System Dynamics*, **35**, 91-109. <https://doi.org/10.1007/s11044-014-9438-3>
- [3] Ocampo-Jiménez, J., Muñoz-Meléndez, A. and Rodríguez-Gómez, G. (2014) Extending a Spherical Robot for Dealing with Irregular Surfaces: A Sea Urchin-Like Robot. *Advanced Robotics*, **28**, 1475-1485. <https://doi.org/10.1080/01691864.2014.968615>
- [4] Lin, X. and Guo, S. (2012) Development of a Spherical Underwater Robot Equipped with Multiple Vectored Water-Jet-Based Thrusters. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, **67**, 307-321. <https://doi.org/10.1007/s10846-012-9651-3>
- [5] Abad, A.C., Sarmiento, A.P.M., Danseco, J.A.P., Leon, J.S.D., Otani, J.P. and Aguilar, P.S.B. (2017) Spherical Mobile Robots as Wireless Sensor Nodes for Ambient Temperature and Relative Humidity Monitoring. 2017 *International Conference on Advanced Computing and Applications (ACOMP)*, Ho Chi Minh City, 29 November-1 December 2017, 88-92. <https://doi.org/10.1109/acomp.2017.28>
- [6] Mizumura, Y., Ishibashi, K., Yamada, S., Takanishi, A. and Ishii, H. (2017) Mechanical Design of a Jumping and Rolling Spherical Robot for Children with Developmental Disorders. 2017 *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Macau, 5-8 December 2017, 1062-1067. <https://doi.org/10.1109/robio.2017.8324558>
- [7] Halme, A., Schonberg, T. and Wang, Y. (1996) Motion Control of a Spherical Mobile Robot. *Proceedings of 4th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Mie, 18-21 March 1996, 259-264. <https://doi.org/10.1109/amc.1996.509415>
- [8] Zhan, Q., Cai, Y. and Yan, C.X. (2011) Design, Analysis and Experiments of an Omni-Directional Spherical Robot. 2011 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, 9-13 May 2011, 4921-4926. <https://doi.org/10.1109/icra.2011.5980491>
- [9] Ghariblu, H. and Mohammadi, H. (2012) Structure and Dynamic Modelling of a Spherical Robot. 2012 *8th International Symposium on Mechatronics and Its Applications*, Sharjah, 10-12 April 2012, 1-5. <https://doi.org/10.1109/isma.2012.6215159>
- [10] Alves, J. and Dias, J. (2003) Design and Control of a Spherical Mobile Robot. *Proceedings of the I MECH E Part I Journal of Systems & Control Engineering*, **217**, 457-467. <https://doi.org/10.1243/095965103322747061>
- [11] Chen, W., Chen, C., Tsai, J., Yang, J. and Lin, P. (2013) Design and Implementation of a Ball-Driven Omnidirectional Spherical Robot. *Mechanism and Machine Theory*, **68**, 35-48. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.04.012>
- [12] Ivanov, A.P. (2015) On the Control of a Robot Ball Using Two Omni Wheels. *Regular and Chaotic Dynamics*, **20**, 441-448. <https://doi.org/10.1134/s1560354715040036>
- [13] Chen, W., Chen, C., Yu, W., Lin, C. and Lin, P. (2012) Design and Implementation of an Omnidirectional Spherical Robot Omnicron. 2012 *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Kaohsiung, 11-14 July 2012, 719-724. <https://doi.org/10.1109/aim.2012.6266036>
- [14] Mukherjee, R., Minor, M.A. and Pukrushpan, J.T. (1999) Simple Motion Planning Strategies for Spherobot: A Spherical Mobile Robot. *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.99CH36304)*, Phoenix, 7-10 December 1999, 2132-2137. <https://doi.org/10.1109/cdc.1999.831235>
- [15] Amir Homayoun Javadi A, and Mojabi, P. (2002) Introducing August: A Novel Strategy for an Omnidirectional Spherical Rolling Robot. *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*, Washington, 11-15 May 2002, 3527-3533. <https://doi.org/10.1109/robot.2002.1014256>

- [16] Javadi A., A.H. and Mojabi, P. (2004) Introducing Glory: A Novel Strategy for an Omnidirectional Spherical Rolling Robot. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, **126**, 678-683. <https://doi.org/10.1115/1.1789542>
- [17] Zheng, Y.L., Sun, H.X., Jia, Q.X., et al. (2008) An Omni-Directional Rolling Spherical Robot with Telescopic Manipulator. 2008 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, Shenzhen, 10-12 December 2008, 1-6. <https://doi.org/10.1109/isscaa.2008.4776155>
- [18] Zadeh, F.K., Moallem, P., Asiri, S. and Zadeh, M.M. (2014) LQR Motion Control and Analysis of a Prototype Spherical Robot. 2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), Tehran, 15-17 October 2014, 890-895. <https://doi.org/10.1109/icrom.2014.6991017>
- [19] Muraleedharan, N., Cohen, D.S. and Isenberg, D.R. (2016) Omnidirectional Locomotion Control of a Pendulum Driven Spherical Robot. Southeast Conference 2016, Norfolk, 30 March-3 April 2016, 1-6. <https://doi.org/10.1109/secon.2016.7506648>
- [20] Li, W. and Zhan, Q. (2019) Kinematics-Based Four-State Trajectory Tracking Control of a Spherical Mobile Robot Driven by a 2-DOF Pendulum. *Chinese Journal of Aeronautics*, **32**, 1530-1540. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.09.002>
- [21] Gajbhiye, S. and Banavar, R.N. (2015) Geometric Modeling and Local Controllability of a Spherical Mobile Robot Actuated by an Internal Pendulum. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, **26**, 2436-2454. <https://doi.org/10.1002/rnc.3457>
- [22] Landa, K. and Pilat, A.K. (2015) Design and Start-Up of Spherical Robot with Internal Pendulum. 2015 10th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo), Poznan, 6-8 July 2015, 27-32. <https://doi.org/10.1109/romoco.2015.7219709>
- [23] Bhattacharya, S. and Agrawal, S.K. (2000) Spherical Rolling Robot: A Design and Motion Planning Studies. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **16**, 835-839. <https://doi.org/10.1109/70.897794>
- [24] Tao, Y., Hanxu, S. and Qingxuan, J. (2012) Variable Structure Control of Pendulum-driven Spherical Mobile Robots. *Proceedings of the 2010 3rd International Conference on Computer and Electrical Engineering (ICCEE 2010)*, Chengdu, 16-18 November 2010, 1-9.
- [25] Joshi, V.A. and Banavar, R.N. (2009) Motion Analysis of a Spherical Mobile Robot. *Robotica*, **27**, 343-353. <https://doi.org/10.1017/s0263574708004748>
- [26] Joshi, V., Banavar, R. and Hippalgaonkar, R. (2007) Design, Modeling and Controllability of a Spherical Mobile Robot. *Proceedings of the 13th National Conference on Mechanisms and Machines (NaCoMM07)*, Bangalore, 12-13 December 2007, 135-140.
- [27] Zhao, B., Wang, P., Hu, H., Li, M. and Sun, L. (2009) Study on Turning in Place of a Spherical Robot Based on Stick-Slip Principle. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Guilin, 19-23 December 2009, 771-775. <https://doi.org/10.1109/robio.2009.5420575>
- [28] Zhao, B., Li, M.T., Yu, H.T., et al. (2010) Dynamics and Motion Control of a Two Pendulums Driven Spherical Robot. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei City, 18-22 October 2010, 147-153. <https://doi.org/10.1109/iros.2010.5651154>
- [29] Yoon, J., Ahn, S. and Lee, Y. (2011) Spherical Robot with New Type of Two-Pendulum Driving Mechanism. 2011 15th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, Poprad, 23-25 June 2011, 275-279. <https://doi.org/10.1109/ines.2011.5954758>
- [30] Chen, M., Sun, W., Gao, Y., Zhan, S., Zhang, G. and Li, W.J. (2016) Development of a Holonomic Mobile Spherical Robot with 3D Center of Gravity Shifting Actuators. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Qingdao, 3-7 December 2016, 438-442. <https://doi.org/10.1109/robio.2016.7866361>
- [31] Asiri, S., Khademianzadeh, F., Monadjemi, A. and Moallem, P. (2019) The Design and Development of a Dynamic Model of a Low-Power Consumption, Two-Pendulum Spherical Robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **24**, 2406-2415. <https://doi.org/10.1109/tmech.2019.2934180>
- [32] Ahn, S. and Lee, Y. (2014) Novel Spherical Robot with Hybrid Pendulum Driving Mechanism. *Advances in Mechanical Engineering*, **6**, Article 456727. <https://doi.org/10.1155/2014/456727>
- [33] Zhaojiang, L., Changkai, W., Junsong, L., Xu, L., Feipeng, H. and Chaoqun, L. (2023) A New S-Curve Acceleration/Deceleration Control Considering Displacement Conditions. 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Zhuhai, 5-8 November 2023, 4065-4068. <https://doi.org/10.1109/icems59686.2023.10345321>
- [34] DeJong, B.P., Karadogan, E., Yelamarthi, K. and Hasbany, J. (2016) Design and Analysis of a Four-Pendulum Omnidirectional Spherical Robot. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, **86**, 3-15. <https://doi.org/10.1007/s10846-016-0414-4>