

球形机器人驱动系统设计与路径跟踪控制^{*}

安 凯

(山东航天电子技术研究所, 烟台 264670)

摘要: 设计了一种球形机器人驱动系统,通过在竖直平面内调整滚动轴的水平倾角控制转向,由一个变量,即滚动轴的水平倾角就可以表征滚动轴,因此控制模型中仅有水平倾角和驱动电动机转速两个变量,不需要复杂的运算就可以确定控制策略。引入相对曲率半径的概念,作为转向控制指标,借助微分几何中平面曲线论的唯一存在定理,通过改变滚动轴的水平倾角使轨迹与路径的相对曲率半径在对应点达到一致,以实现路径的跟踪。所给出的球形机器人驱动系统及其控制策略不需要测量传感器确定运动状态,而是通过运行时间计算轨迹弧长实施控制。针对相对曲率半径的几个特殊值验证了控制策略的正确性,仿真结果也证明了算法的可行性。

关键词: 球形机器人 驱动系统 相对曲率半径 路径跟踪 弧长

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2014) 02-0302-06

引言

球形机器人的研究包括驱动装置和控制策略两个方面。在驱动装置方面目前有单轮驱动^[1]、小车驱动^[2]、万向轮驱动^[3]、电动机定子反转驱动^[4]和配重物驱动^[5-6]。这些球形机器人的驱动方式各有特色,都可以实现球体的滚动,但控制模型大多比较复杂,控制策略的制定面临很大困难^[2,5,7-10]。由于控制策略依赖于控制模型,而控制模型又与驱动装置密切相关,因此,导致控制模型复杂化的主要原因是驱动装置。

导致控制模型复杂化的另一个原因是球形机器人滚动轴的确定占用变量太多。目前滚动轴的确定大多采用欧拉角或广义欧拉角的方法^[5,11-14],至少需要3个独立变量,而具体到滚动轴方向的表示,还涉及3个独立变量的三角函数。

本文设计一种容易获得控制模型的球形机器人驱动系统,并将路径纳入控制策略中,以一个变量表征滚动轴,给出一种简捷的球形机器人路径跟踪控制策略。

1 驱动系统及其工作原理

如图1所示,球形机器人驱动系统由滚动轴、驱动电动机、配重载荷、支架、转向电动机、驱动球等部件组成。滚动轴上装有限位挡圈。位于球壳同一直径上的两根滚动轴一端固定在球壳上,另一端与一

个法兰连接。其中一个法兰上安装驱动电动机,驱动电动机轴的一端开槽,槽内安装销钉,销钉的中心线经过球心。另一个法兰上安装配重载荷,配重载荷内可以装电池等必要的载荷,其质量要求是上述部件安装在球壳上后可以使转轴保持平衡。

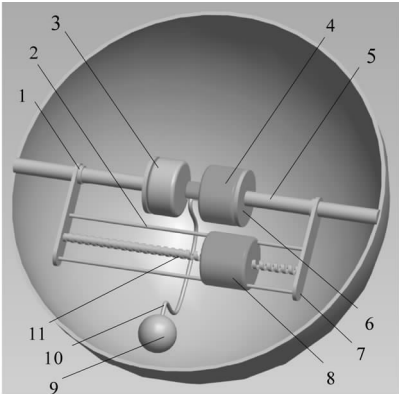


图1 驱动系统的结构

Fig. 1 Configuration of diving system

1. 挡圈 2. 滑动杆 3. 配重载荷 4. 驱动电动机 5. 滚动轴
6. 法兰 7. 支架 8. 转向电动机 9. 驱动球 10. 弓形连杆
11. 螺杆

支架上带有螺杆和2根滑动杆,转向电动机套在螺杆和滑动杆上,并以螺帽与螺杆配合。随电动机的转动,自身可沿滑动杆来回移动。支架套在滚动轴2个限位挡圈的外侧,由于挡圈的限位作用,支架可以绕滚动轴转动,但不能沿滚动轴滑动。

驱动球通过固连其上的弓形连杆与驱动电动机

转轴槽内的销钉铰合, 保证在滚动轴倾斜的情况下驱动球仍不会偏离竖直方向。因此球形机器人的质心就是转向电动机的质心, 它始终位于球心与球面和地面接触点的连线上, 通过改变转向电动机质心的位置就可以改变滚动轴的倾斜角度。

转向电动机转动, 则电动机在螺杆上的位置发生改变, 也就是转向电动机的质心发生改变。转向电动机转动角度越大, 质心的改变量越大, 滚动轴倾斜角改变量也越大。因此通过转向电动机转动可以控制滚动轴的倾斜角度。

启动驱动电动机后, 驱动球被提起, 同时在重力的作用下球体下落, 并带动球形机器人绕滚动轴转动。可见球心的运动速度始终与滚动轴垂直, 同时由于地面的约束, 球心运动速度是地面的平行平面内与滚动轴垂直的向量。以地面为水平面为例, 当转向电动机固定在螺杆的中点时, 滚动轴保持在水平面内, 球心的运动速度始终是水平面内与滚动轴垂直的向量, 因此球形机器人的轨迹为一条直线; 当转向电动机固定在螺杆上偏离中点的位置时, 滚动轴与水平面保持固定的角度, 虽然球心的运动速度仍是水平面内与滚动轴垂直的向量, 但由于转向电动机质心始终位于球心与球面和地面接触点的连线上, 球体滚动的同时滚动轴的方向也在不断变化, 因此球形机器人的轨迹不再是一条直线, 其形状将在下面讨论。

2 相对曲率半径及其性质

按照微分学的理论, 任何光滑曲线, 即存在连续二阶导数的曲线, 都可以看作圆心或半径各不相同的许多微小圆弧的连接线, 也就是说光滑曲线实际上是圆心和半径连续变化所形成的弧, 该半径就是曲线的曲率半径, 该圆心就是曲率圆的圆心。因此任何光滑路径都可以看作圆弧的组合^[15], 路径上任何点处的切线必然与该点的曲率半径垂直。

假定球形机器人的光滑路径为 $(x(s), y(s))$, 其中 $s \in [0, L]$ 为弧长, L 为路径长度。本文中若无特别说明, 所指的路径均为光滑路径。对路径上每一点 $(x(s), y(s))$, 利用微分几何方法可以求出该点处的曲率半径为

$$r = \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} / \left| \frac{d^2y}{dx^2} \right| \quad (1)$$

曲率半径可以描述曲线在一点的弯曲程度, 但由于式(1)的分母带有绝对值, 因此曲率半径不能反映曲线在各点弯曲的方向, 为此需要引进微分几何中相对曲率半径的概念。

相对曲率半径可以表示为

$$R_r(s) = \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} / \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2)$$

它与曲率的区别在于可以取负值。在 $R_r > 0$ 的点曲线向左转; 在 $R_r < 0$ 的点曲线向右转^[16]。相对曲率半径的一个重要性质就是平面曲线论的唯一存在定理。

定理 给定一个闭区间 $[s_0, s_1]$ 内的连续函数 $R_r(s)$, 平面上一点 (x_0, y_0) 和一个单位矢量

$$\alpha_0 = (\cos\varphi_0, \sin\varphi_0)$$

有且只有一条平面曲线

$$r(s) = (x(s), y(s)) \quad (s_0 \leq s \leq s_1)$$

且 $r(s_0) = (x_0, y_0) \quad \dot{r}(s_0) = \alpha(s_0) = \alpha_0$

尽管定理中的曲线是以弧长为参数的, 但其结论对其他参数仍然正确。

3 路径跟踪控制策略

如图2所示, 设球形机器人的球壳半径为 R , 球心为 O , 与地面接触点为 D , 螺杆的倾斜角度为 α , 滚动轴延长线与地面的交点为 G , 滚动轴所在的直线为 OG 。球形机器人的轨迹就是它与地面接触点 D 的轨迹。若球体绕 OG 转过的角度为 $d\beta$, 在无滑动转动时轨迹曲线长度为

$$ds = R \cos\alpha d\beta \quad (3)$$

的圆弧。由于轨迹曲线上任何点的临近线段都可以看作圆弧, 因此滚动轴在地面上的投影 DG 始终与轨迹曲线的切线垂直。这样, 轨迹曲线就是一条以 G 为曲率中心、 $r = R/\tan\alpha$ 为曲率半径的曲线, 即 $R_r = R/\tan\alpha$ 。

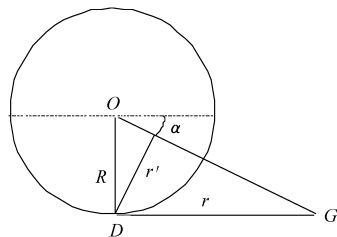


图2 曲率半径的表示

Fig. 2 Expression of curvature radius

按照平面曲线论的唯一存在定理, 若将球形机器人放在路径起点处, 即球壳与地面的接触点为 (x_0, y_0) , 并使滚动轴在地面上投影与路径曲线在起点处的切线垂直, 只要在轨迹曲线上的每一点 $(X(s), Y(s))$ 处相对曲率半径与路径上 $(x(s), y(s))$ 点处的相对曲率半径相等, 则轨迹曲线 $(X(s), Y(s))$ 与路径 $(x(s), y(s))$ 就是同一条曲线, 换句话说, 球形机器人可以沿规划的路径从起点走到终点。

对于给定的路径 $(x(s), y(s))$, $s \in [0, L]$, 可以求出每一点的相对曲率半径 $R_r(s)$ 。控制策略旨在

通过对转向电动机重心位置和驱动电动机转速的控制,使轨迹上任何点的相对曲率半径也是 $R_r(s)$ 。

3.1 转向电动机重心位置控制

先考虑轨迹上一点的相对曲率半径。如图 3 所示, L_1 、 L_2 分别表示滚动轴和螺杆所在的直线, l 表示二者之间的距离。滚动轴处于水平状态时螺杆与过球心的铅垂线的交点 O' , 以 O' 为原点在螺杆上建立坐标轴, 定义左边为坐标轴的正方向。

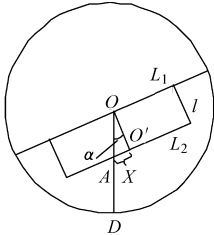


图 3 相对曲率半径的表示
Fig. 3 Expression of relative curvature radius

假定转向电动机的质心 A 的坐标为 X , 则 A 在过球心的铅垂线上。记射线 OO' 逆时针方向偏离该铅垂线的角度为 α , 则 $X = l \tan \alpha$, 因此当 $X > 0$ 时滚动轴左端下倾角度为 α , 且 $0 < \alpha \leq \pi/2$, 球形机器人“向左转”, 轨迹的相对曲率半径为

$$R_r = R / \tan \alpha = lR / X$$

而当 $X < 0$ 时 $3\pi/2 \leq \alpha < 2\pi$, 螺杆右端的下倾角度为 $2\pi - \alpha$, 球形机器人“向右转”, 轨迹的相对曲率半径为

$$R_r = R / \tan \alpha = -R / \tan (2\pi - \alpha) = lR / X$$

因此无论 X 为何值, 总有

$$R_r = R / \tan \alpha = lR / X \tag{4}$$

因此, 转向电动机控制策略为 $X(s) = lR / R_r(s)$, 即当轨迹曲线弧长为 s 时, 其重心位置为 $lR / R_r(s)$ 。

3.2 驱动电动机转速控制

由于转向电动机重心位置控制需要借助当前轨迹曲线的弧长, 因此驱动电动机转速的选择应当便于当前轨迹曲线弧长的确定。由 $X(s) = lR / R_r(s)$ 以及式(3)和式(4)有

$$ds = R \frac{l}{\sqrt{l^2 + X^2}} d\beta = R \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{R_r(s)}\right)^2}} d\beta \tag{5}$$

令球体绕滚动轴的转速

$$\frac{d\beta}{dt} = \omega \sqrt{1 + \left(\frac{R}{R_r(s)}\right)^2} \tag{6}$$

其中, $\omega > 0$ 是用于限制球体绕滚动轴的转速的常数, 则 $ds = \omega R dt$, 因此在时刻 t 轨迹曲线弧长为 $s = \omega R t$ 。于是轨迹曲线的弧长可通过滚动时间计算。

3.3 路径跟踪控制程序

在滚动轴转速 $\frac{d\beta}{dt} = \omega \sqrt{1 + \left(\frac{R}{R_r(s)}\right)^2}$ 情况下,

由于轨迹弧长 $s = \omega R t$, 因此两个控制变量都可以表示为时间 t 的函数, 即

$$X(\omega R t) = lR / R_r(\omega R t) \tag{7}$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \omega \sqrt{1 + \left(\frac{R}{R_r(\omega R t)}\right)^2} \tag{8}$$

因此, 球形机器人的控制程序是: ①将球形机器人放在路径的起点处, 即球壳与地面的接触点为 (x_0, y_0) 。②滚动轴在地面上的投影与路径曲线在起点处的切线垂直。③在时刻 t 按照式(7)调整转向电动机重心位置和按照式(6)驱动电动机转速。④若 $t > \frac{L}{\omega R}$, 停止。

按照上述程序驱动球形机器人, 其轨迹符合平面曲线论的唯一存在定理的所有条件, 因此就是给定的路径 $(x(s), y(s))$, $s \in [0, L]$ 。

3.4 特例

当 $R_r(\omega R t) = \infty$ 时, 路径 $(x(s), y(s))$, $s \in [0, L]$ 为直线, 不妨设 $(x(s), y(s)) = (0, s)$, 此时 $X(\omega R t) = 0$, $\frac{d\beta}{dt} = \omega$ 或 $\beta = \omega t$ 。按照上述控制策略, 球形机器人的起点在原点 $(0, 0)$, 滚动轴始终与地面平行, 滚动时间为 $\frac{L}{\omega R}$, 滚动角度为 $\frac{L}{R}$, 滚动弧长为 L , 因此轨迹与规划路径重合。

当 $R_r(\omega R t) = c$ (正常数) 时, 路径 $(x(s), y(s))$, $s \in [0, c\pi]$ 是半径为 c 的圆, 不妨设 $(x(s), y(s)) = (c - c \cos(s/c), -c \sin(s/c))$ ($s \in [0, c\pi]$)

此时, $X(\omega R t) = lR / c$, $d\beta = \omega \sqrt{1 + \left(\frac{R}{c}\right)^2} dt$ 。以 φ 表示轨迹切线倾角, 则

$$d\varphi = \frac{R}{c} \cos \alpha d\beta = \frac{R}{c} \frac{1}{\sqrt{1 + (R/c)^2}} d\beta = \omega \frac{R}{c} dt$$

因此, $\varphi = \omega \frac{R}{c} t$ 。按照上述控制策略球形机器人的起点在原点 $(0, 0)$, 转向电动机重心位置始终为 lR / c , 滚动时间为 $\frac{c\pi}{\omega R}$, 转过角度为

$$\varphi = \omega \frac{R}{c} \frac{c\pi}{\omega R} = \pi$$

轨迹弧长为 $c\pi$, 因此轨迹与规划路径重合。

4 仿真

对于给定的路径 (t, t^2) , $t \in [0, 1]$, 可以求出相对曲率半径 $R_r(t) = \frac{(1 + 4t^2)^{\frac{3}{2}}}{2}$, 设 $\omega = R = 1$, $l = 0.1$, 则

$$X = 0.2 / (1 + 4t^2)^{\frac{3}{2}}$$

而由 $R_r d\varphi = R \cos\alpha d\beta$, $\varphi = \arctan \frac{dy}{dx}$ 得

$$d\varphi = \frac{2}{1 + 4t^2} dt$$

$$d\beta = \frac{R_r d\varphi}{R \cos\alpha} = R_r \sqrt{1 + \left(\frac{1}{R_r}\right)^2} d\varphi =$$

$$R_r \sqrt{1 + \left(\frac{1}{R_r}\right)^2} \frac{2}{1 + 4t^2} dt = \sqrt{1 + 4t^2 + \frac{4}{(1 + 4t^2)^2}} dt$$
 取采样周期为 $\Delta t = 0.01$, 将 $[0, 1]$ 划分成长度为 0.01 的 100 个子区间, 记 $t_i = i\Delta t$, 则

$$X(t_i) = 0.2 / (1 + 4t_i^2)^{\frac{3}{2}}$$

$$d\beta(t_i) = \Delta t \sqrt{1 + 4t_i^2 + \frac{4}{(1 + 4t_i^2)^2}}$$

$$d\varphi(t_i) = \frac{2\Delta t}{1 + 4t_i^2}$$

$$ds(t_i) = \frac{2\Delta t}{1 + 4t_i^2} \frac{(1 + 4t_i^2)^{\frac{3}{2}}}{2} = \sqrt{1 + 4t_i^2} \Delta t$$

在每个时间区间 $[t_i - 1, t_i]$ 内, 轨迹都是以 $R_r(t_i)$ 为半径、长度为 $ds(t_i)$ 的圆弧, 所有这些圆弧构成了轨迹曲线, 如图 4 所示。如缩短采样周期, 取 $\Delta t = 0.001$, 则图中的两条曲线重合。在实际控制中也一样, 如果缩短采样周期, 球形机器人将更准确地沿着路径曲线行走。

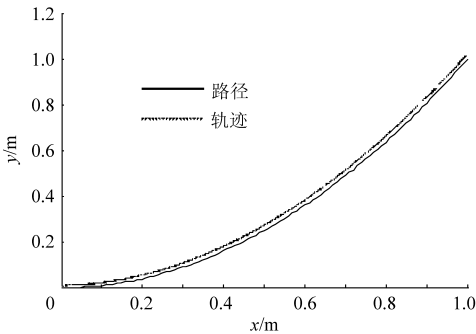


图 4 轨迹与路径曲线的对比

Fig. 4 Comparison of track and path

5 实验

采用上述驱动机构的球形机器人, 其路径决定于滚动轴与滚动平面的夹角。为检验控制方法的效果, 采用如图 5 所示的装置: 一个半径 $R = 29.57\text{ mm}$ 的球代表球形机器人, 由球心延伸并穿过球面, 长度为 $a = 50.57\text{ mm}$ 的刚性圆柱体代表机器人的滚动轴, 滚动轴的末端固定一个半径为 $r_0 = 12.5\text{ mm}$ 偏心轮, 轴心到偏心轮中心的距离为 $e = 2.5\text{ mm}$, 偏心轮的平面与转轴垂直。

在偏心轮的平面上建立极坐标系, 如图 6 所示。极点为偏心轮轴心, B 是滚动平面、偏心轮平面和过轴心的滚动平面的垂直平面 3 个平面的交点, $r_1(\beta)$

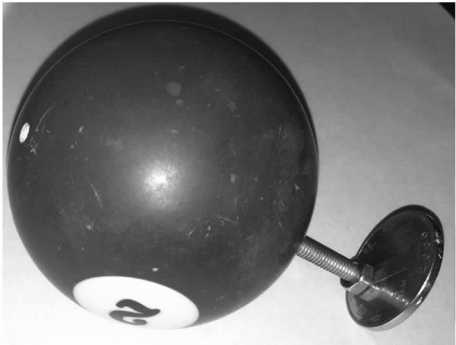


图 5 实验装备

Fig. 5 Experimental equipment

和 β 分别表示极点与点 B 连线的长度及其与极轴的夹角, 则

$$r_1(\beta) = r_0 - e \cos\beta$$

当该装置在平面上无滑滚动时, 随偏心轮的转动, 滚动轴的倾角不断变化, 球与平面接触点的轨迹就是一条曲率不断变化的曲线。将该曲线与理论曲线比较即可了解控制效果。

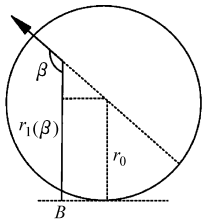


图 6 偏心轮上的极坐标系

Fig. 6 Polar coordinate system on eccentric wheel

为获得球体的运动轨迹, 在其表面涂上一层颜料, 然后放在一张平坦的白纸上滚动, 滚动角 β 的变化范围为 $0 \sim 2\pi$ 。获得的球体运动轨迹如图 7 所示。

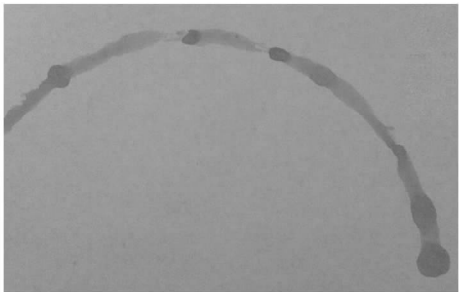


图 7 球体轨迹

Fig. 7 Trajectory of sphere experimental equipment

另一方面, 由图 8 知, 当偏心轮的角位移为 β 时, 轨迹的相对曲率 $R_r(\beta)$ 满足

$$\frac{R}{R_r(\beta)} = \frac{r_1(\beta)}{\sqrt{R_r^2(\beta) + R^2 - a}}$$

$$\text{即} \quad (R^2 - r_1^2(\beta)) R_r^2(\beta) - 2aRr_1(\beta) R_r(\beta) - R^2(a^2 - R^2) = 0$$

解之得

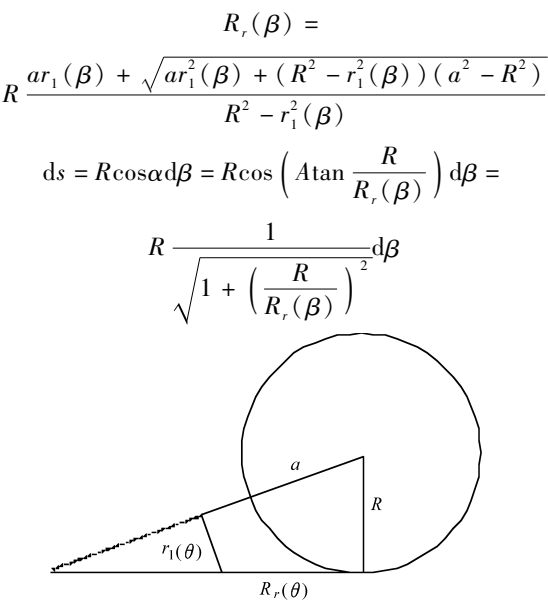


图 8 曲率半径的计算

Fig. 8 Calculation of curvature radius

当偏心轮角位移 β 在 $[0, \pi]$ 内变化时,以机器人滚动轴的角位移 β 为参数,将 $[0, \pi]$ 划分成长度均为 $d\beta = 0.001\pi$ 的 1 000 个子区间,在第 i 个子区间中令 β_i 表示其左端点的值,则

$$R_r(\beta_i) = R \frac{ar_1(\beta_i) + \sqrt{ar_1^2(\beta_i) + a^2 - R^2}}{R^2 - r_1^2(\beta_i)}$$
$$ds_i = \frac{R}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{R_r(\beta_i)}\right)^2}} d\beta$$
$$d\varphi_i = ds_i / R_r(\beta_i)$$

式中 ds_i —— β 经过第 i 个区间后路径的增加的长度
 $d\varphi_i$ ——在此过程中路径转过的角度

由此可以得到路径曲线,如图 9 中的实线所示。

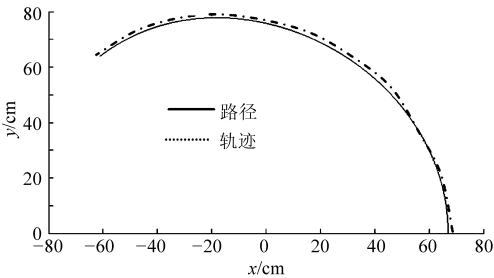


图 9 实验轨迹和仿真曲线的对照

Fig. 9 Comparison of experimental trajectory and simulation curve

图 9 中的虚线是由图 7 中的轨迹线提取的中心线。由图 9 可以看出,本文中提出的利用相对曲率对球形机器人路径的跟踪控制方法具有理想的控制效果。

6 结论

- (1) 给出的球形机器人驱动系统具有简单的控制模型,滚动轴仅有其水平倾角一个变量表征,控制变量只有滚动轴水平倾角和驱动电动机转速两个变量。
- (2) 引入相对曲率半径的概念,并作为控制指标。借助微分几何中平面曲线论的唯一存在定理,证明按照文中提出的控制策略,可实现球形机器人轨迹曲线与设计路径的一致。
- (3) 不需要任何传感器测量运动参数,只需要通过从起点到当前位置的运行时间计算轨迹弧长即可对系统实施控制。

参 考 文 献

1 Halme A, Schonberg T, Wang Y. Motion control of a spherical mobile robot [C] // 1996 4th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'96), 1996, 1: 259 - 264.

2 Bissch A, Balluchi A, Praticchizzo D, et al. Introducing the spherical: an experimental testbed for research and teaching in nonholonomy [C] // 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1997, 3: 2 620 - 2 625.

3 Ferriere L, Raucent B. RollMOBS, a new universal wheel concept [C] // 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, 3: 1 877 - 1 882.

4 Bhattacharya S, Agrawal S K. Design, experiments and motion planning of a spherical rolling robot [C] // 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000, 4: 1 207 - 1 212.

5 Javadi A, Mojabi P. Introducing august: a novel strategy for an omnidirectional spherical rolling robot [C] // 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002, 4: 3 527 - 3 533.

6 肖爱平,孙汉旭,谭月胜.一种球形机器人运动轨迹规划与控制[J]. 机器人, 2004, 26(5): 444 - 447.
Xiao Aiping, Sun Hanxu, Tan Yuesheng. Movement trajectory planning and control for a spherical robot [J]. Robot, 2004, 26(5): 444 - 447. (in Chinese)

7 李团结,张学锋,陈永琴.一种全向滚动球形机器人的运动分析与轨迹规划[J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(1): 29 - 33.
Li Tuanjie, Zhang Xuefeng, Chen Yongqin. Motion analysis and trajectory planning of a spherical omnidirectional rolling robot [J]. Journal of Xidian University, 2007, 34(1): 29 - 33. (in Chinese)

8 Xiao A, Sun H, Liao Q Z, et al. The design and analysis of a spherical mobile robot [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2004, 17(1): 14 - 16.

9 Wang L, Sun H, Jia Q. Research on the climbing and jumping of a spherical rolling robot[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommun, 2007, 30(2): 11 – 14.

10 Ranjan M, Mark A M, Jay T P. Motion planning for a spherical mobile robot; revisiting the classical ball-plate problem[J]. Transactions of the ASME, 2007, 124: 502 – 511.

11 Bhattacharya S, Agrawal S K. Spherical rolling robot: a design and motion planning studies[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(6): 835 – 839.

12 Das T, Mukherjee R. Reconfiguration of a rolling sphere: a problem in evolute-involute geometry[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 2006, 73(4): 590 – 597.

13 刘大亮,孙汉旭,贾庆轩. 一种球形机器人的非线性滑模运动控制[J]. 机器人, 2008, 30(6): 498 – 502.
Liu Daliang, Sun Hanxu, Jia Qingxuan. Nonlinear sliding-mode motion control of a spherical robot [J]. Robot, 2008, 30(6): 498 – 502. (in Chinese)

14 安凯,李向阳. 轮式移动机器人的最优变道路径规划[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 179 – 184.
An Kai, Li Xiangyang. Optimal path planning for lane changing of wheeled mobile robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 179 – 184. (in Chinese)

15 吴大任. 微分几何讲义[M]. 北京:人民教育出版社,1982.

16 Jürgen Jost. Riemannian geometry and geometric analysis[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.

Drive System and Path Tracking Control of Spherical Robot

An Kai

(Shandong Aerospace Electro-technology Institute, Yantai 264670, China)

Abstract: A drive system of spherical robot was designed by which the horizontal obliquity of roll axe could be adjusted vertically to control turning and used to identify the roll axe as unique variable. Since only two control variables, the horizontal obliquity of roll axe and the rotate speed of drive motor, were used in the control model, the control strategy could be given without any complex operation. In order to deal with the problem of path tracking, the concept of relative curvature radius was introduced as a turning control index. Based on the existence and uniqueness theorem about plane curve theory in differential geometry, path tracking was actualized by adjusting horizontal obliquity of roll axe so as to make the track and path had the same relative curvature radius in the corresponding points with same arc length from respective original point. The arc length of the track from original point to the present position, needed to choose relative curvature radius in control process, could be obtained from the moving time, and no sensor was needed for measuring. The control strategy was proved to be correct for several especial values of relative curvature radius, and the feasibility of the control strategy was also validated by a simulation result.

Key words: Spherical robot Drive system Relative curvature radius Path tracking Arc length