线驱动拟人臂机器人机构与前向运动学分析

陈泉柱 陈伟海 张建斌

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 为了克服手臂上的安装电机由于自重对拟人臂机器人承载能力和运动灵活性造成的影响,基于最新人臂仿生和并联机器人研究的成果,提出了一种用线驱动的并联机构替代手臂的肩、腕关节的串并联结构,并将驱动电机安放在基座上. 讨论了从各个关节到基座的驱动绳索的走线方式及关节之间的耦合情况,在此基础上对前向运动学进行了分析,给出了末端相对于基础坐标系的位姿态正解. 由给出的两组数值解实例,在 ADAMS 环境下进行了仿真,验证了算法的正确性.

关 键 词: 线驱动; 并联机器人; 运动学

中图分类号: TP 242

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)08-0988-04

Mechanism and forward kinematic analysis for cable-driven humanoid-arm manipulator

Chen Quanzhu Chen Weihai Zhang Jianbin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to overcome the influence of bad load-bearing capacity and the movement flexibility by the actuators installed on the humanoid-arm, a series-parallel mechanism based on the latest theories of humanoid-arm bionics and research results of the parallel robots was proposed. The shoulder and wrist joints with a cable-driven parallel mechanism were replaced, and the motors were installed on the base. The cable-distribution from the base to the corresponding joint and the coupling instances among 3 joints were discussed. Furthermore, the forward kinematics to deduce the pose and position of the end effector respective to the base coordinate were analyzed. A simulation by means of ADAMS was carried out for two group numerical solutions to verify the effectiveness of proposed algorithm.

Key words: cable-driven; parallel manipulator; kinematics

拟人臂机器人的研究始于 20 世纪 80 年代,这种具有冗余自由度的机器人是智能化机器人发展的一个重要方面[1]. 北航从 1986 年开始进行冗余度机器人的研究,并已研制成功一台 7 自由度(7-DOF)机器人样机. 它利用冗余控制,具有较好的灵活性[2-3]. 但这种传统的拟人臂机器人的电机均安装于臂上,增加了机器人的惯量和重量,减小了机器人的承载能力,同时也对高速运动和快速响应极为不利. 为了克服手臂上电机的自重对手臂承载和运动灵活性造成的影响,近年来线驱动技术逐渐受到重视. 一些学者提出了不同机构形式的绳索驱动并联机器人,如起重型机器人 ROBOCRANE,线驱动并联机构等[4-6].

本文根据人体结构的形体特点,提出用线驱动的球面 3 自由度并联机构代替 7 自由度冗余手臂的肩关节和腕关节,并将驱动电机都安装在基座上. 这种结构设计有效地减轻了手臂的自重,并提高了快速响应能力. 同时,由于并联机构的引入,使机器人具有了并联机构高刚度、高精度、高负载能力的优点.

收稿日期: 2005-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375008,60575052)

作者简介: 陈泉柱(1980-),男,湖北天门人,硕士生, cqz1980@163.com.

1　线驱动拟人臂机器人机构设计

线驱动拟人臂机器人机构如图 1 所示, 类似于人臂,由肩、肘、腕 3 个关节与大臂、小臂组成. 机构的肩、腕关节都采用 4 根绳索驱动的并联结构,由运动平台、固定平台、球形轴承组成. 4 根绳索一端固定在运动平台上,一端经过固定平台上的滑动轮. 肘关节由两根绳索驱动一个转动轮来实现肘关节的单自由度旋转. 为了消除肘关节运动对腕关节的影响,将导向滑轮安装在肘关节的回转中心上,使腕关节的驱动绳索经过转动轮的轴心线. 因此,当转动轮绕轴心线旋转时,驱动绳索只发生弯曲变化,而长度不会受到影响. 最后将驱动这 10 根绳索的电机均安装在基座上.

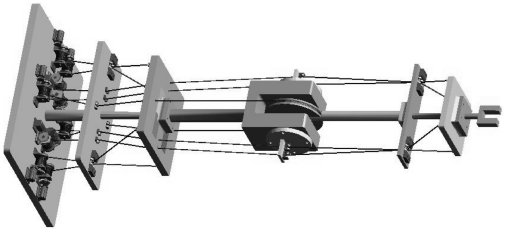


图 1　线驱动拟人臂机器人实体仿真模型

2　前向运动学分析

线驱动拟人臂机器人前向运动学是给定电机上绳索长度的变化来求机器人末端位姿的问题.

假定基座、肩、肘、腕和末端的坐标系分别为 *Bxyz*, *Sxyz*, *Exyz*, *Wxyz*, *Txyz*, 如图 2 所示. 在初始位姿时,这些坐标系所指方向相同,且坐标系 *Sxyz* 和 *Bxyz* 重合. 则基坐标系 *Bxyz* 到末端操作器坐标系 *Txyz* 的前向运动学可表示为

$$\boldsymbol{T}_T^B = \boldsymbol{T}_S^B \cdot \boldsymbol{T}_E^S \cdot \boldsymbol{T}_W^E \cdot \boldsymbol{T}_T^W \tag{1}$$

其中, $\boldsymbol{T}_T^B$ 是操作器末端在基坐标系中的位姿矩阵; $\boldsymbol{T}_S^B$, $\boldsymbol{T}_E^S$, $\boldsymbol{T}_W^E$ 和 $\boldsymbol{T}_T^W$ 依次是从肩坐标系开始到末端坐标系为止的各坐标系相对于它的前一坐标系的位姿矩阵.

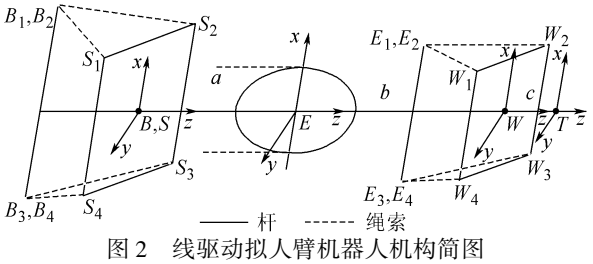


图 2　线驱动拟人臂机器人机构简图

2.1　肩关节的位姿分析

肩关节的驱动关系如图 3 所示,其主要组成结构有边长为 $2l_s$ 的方形运动平台 $S_1S_2S_3S_4$, 长度为 l_h 的中间支撑杆及长度为 $2l_b$ 的底面基杆.

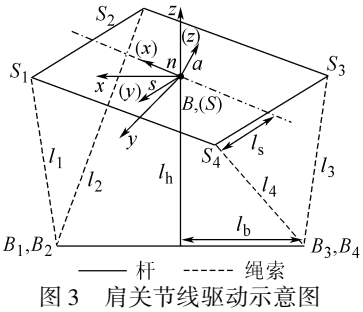


图 3　肩关节线驱动示意图

假定转动前肩关节的 4 根绳索长度分别为 $l_{1,0}, l_{2,0}, l_{3,0}, l_{4,0}$, 转动后的长度为 l_1, l_2, l_3, l_4, 而转动后平台的位姿 $\boldsymbol{T}_S^B$ 表示为 $\begin{bmatrix} \boldsymbol{n}_x & \boldsymbol{s}_x & \boldsymbol{a}_x & 0 \\ \boldsymbol{n}_y & \boldsymbol{s}_y & \boldsymbol{a}_y & 0 \\ \boldsymbol{n}_z & \boldsymbol{s}_z & \boldsymbol{a}_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, 其中 $\boldsymbol{n}, \boldsymbol{s}, \boldsymbol{a}$ 是旋转后的坐标系 *Sxyz* 的 x, y, z 轴上的单位方向矢量.

底面杆的顶点 B_1, B_2, B_3, B_4 在基坐标系 *Bxyz* 中的坐标分别可表示为: $\boldsymbol{B}_1 = \boldsymbol{B}_2 = [l_b, 0, -l_h]^T$, $\boldsymbol{B}_3 = \boldsymbol{B}_4 = [-l_b, 0, -l_h]^T$.

假设转动后四边形的顶点在坐标系 *Bxyz* 中的坐标分别表示为 $\boldsymbol{S}_i = [x_i, y_i, z_i]^T (i = 1 \sim 4)$. 因运动平台为正方形,则由对称性可得:

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= -x_3 \\ y_1 &= -y_3 \\ z_1 &= -z_3 \\ x_2 &= -x_4 \\ y_2 &= -y_4 \\ z_2 &= -z_4 \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

由 $|SS_1|^2 = |SS_2|^2 = |SS_3|^2 = |SS_4|^2 = 2l_s^2$ 可得:

$$2l_s^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 \qquad i = 1 \sim 4 \tag{3}$$

以 $\boldsymbol{L}_i$ 表示各绳长方向的矢量,则由矢量关系有 $\boldsymbol{L}_i = \boldsymbol{S}_i - \boldsymbol{B}_i (i = 1 \sim 4)$, 于是

$$l_1^2 = (x_1 - l_b)^2 + y_1^2 + (z_1 + l_h)^2 \tag{4}$$

$$l_2^2 = (x_2 - l_b)^2 + y_2^2 + (z_2 + l_h)^2 \tag{5}$$

$$l_3^2 = (x_3 + l_b)^2 + y_3^2 + (z_3 + l_h)^2 \tag{6}$$

$$l_4^2 = (x_4 + l_b)^2 + y_4^2 + (z_4 + l_h)^2 \tag{7}$$

根据式(2) ~式(7)易解出各点的坐标 $\boldsymbol{S}_i$.

由图 3 可得: $\boldsymbol{s} = \dfrac{\boldsymbol{S}_1 - \boldsymbol{S}_2}{2l_s}$, 则

$$s_x = \frac{x_1 - x_2}{2l_s} = \frac{-l_1^2 + l_2^2 - l_3^2 + l_4^2}{8l_b l_s}$$

$$s_z = \frac{z_1 - z_2}{2l_s} = \frac{l_1^2 - l_2^2 - l_3^2 + l_4^2}{8l_h l_s}$$

由于 $s_x^2+s_y^2+s_z^2=1$,则 $s_y=\pm\sqrt{1-s_x^2-s_z^2}$.

考虑到肩关节结构上的限制,为避免绳索的缠绕,转动后与坐标系 $Sxyz$ 中 y 轴的夹角应当在 ±90°内[7]. 那么 s 与坐标系 $Sxyz$ 中 y 轴的夹角余弦值 s_y 应取正值. 由矢量 $\boldsymbol{n}=\dfrac{\boldsymbol{S}_1-\boldsymbol{S}_4}{2l_s}$,可以求出:

$$n_x=\frac{8l_s^2+4l_b^2+4l_h^2-(l_1^2+l_2^2+l_3^2+l_4^2)}{8l_bl_s}$$

$$\begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} c(\beta)c(\gamma) & & \\ s(\alpha)s(\beta)c(\gamma)+c(\alpha)s(\gamma) & & \\ -c(\alpha)s(\beta)c(\gamma)+s(\alpha)s(\gamma) & & \end{bmatrix}$$

其中,$c(i)=\cos(i)$;$s(i)=\sin(i)$,i 依次取 α,β,γ. 转动后的角度如下:

$$\alpha=\arctan 2(-a_y/a_z)$$

$$\beta=\arctan 2\left(a_x/\sqrt{1-a_x^2}\right)$$

$$\gamma=\arctan 2(-s_x/n_x)$$

2.2 肘关节的位姿分析

肘关节为单自由度的旋转关节,其驱动示意图如图4所示.

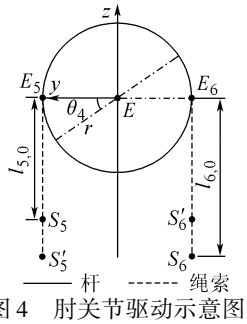


图4 肘关节驱动示意图

该转动轮的半径为 r,$l_{5,0}$ 和 $l_{6,0}$ 分别是初始状态下从点 S_5 到 E_5 和从 S_6 到 E_6 的绳索的长度. l_5 和 l_6 是绕坐标系 $Exyz$ 中 x 轴转动 θ_4 后的长度.

由图4有 $l_5-l_{5,0}=r\cdot\theta_4$,因此得出

$$\theta_4=\frac{l_5-l_{5,0}}{r}$$

则相对于前一位姿的位姿矩阵为

$$\boldsymbol{T}_E^S=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{x,\theta_4} & \boldsymbol{p}_a\\ 0 & 1\end{bmatrix}$$

其中,$\boldsymbol{R}_{x,\theta_4}$ 为绕坐标系 $Exyz$ 中 x 轴的旋转矩阵;$\boldsymbol{p}_a=[0\quad 0\quad a]^{\mathrm{T}}$;$a$ 为大臂长.

由于腕关节的结构形式与肩关节类似,因此采用同肩关节相同的方法来求 $\boldsymbol{T}_W^E$:

$$\boldsymbol{T}_W^E=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_W^E & \boldsymbol{p}_b\\ 0 & 1\end{bmatrix}$$

其中,$\boldsymbol{R}_W^E$ 为以所给欧拉角表示的腕关节对于肘关节的旋转矩阵;$\boldsymbol{p}_b=[0\quad 0\quad b]$;$b$ 为小臂长.

$$n_z=\frac{l_1^2+l_2^2-l_3^2-l_4^2}{8l_hl_s}$$

则 $\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{s}=0$,即有 $n_xs_x+n_ys_y+n_zs_z=0$. 于是,

$$n_y=-(n_xs_x+n_zs_z)/s_y$$

求出 $\boldsymbol{n}$,$\boldsymbol{s}$ 后,由矢量关系 $\boldsymbol{a}=\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{s}$ 可求出矢量 $\boldsymbol{a}$.

若欧拉角用绕 x 轴旋转 α 角,再绕新的 y 轴旋转 β 角,最后绕新的 z 轴旋转 γ 角来描述转动后平台的姿态,则平台的姿态可表示为

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

在求出各个关节的位姿矩阵之后,代入式(1)就可得出末端运动后的位姿.

3 肩关节运动对腕、肘关节的影响

由于各个关节的驱动电机都装在基座上,因此当肩关节运动时,经过肩关节的驱动绳索长度也会相应发生变化. 控制肩关节运动时要考虑其对腕和肘关节的耦合影响.

如图5所示,从肘和腕关节牵引过来的绳索通过肩关节的运动平面. S_i 为这6条绳索与肩关节的运动平台联接点,B_i 是依次与固定平台的联接点,这些点对称布置. 点 S_i 在 $Sxyz$ 中的坐标值为 $\boldsymbol{S}_i^S$,点 B_i 在 $Bxyz$ 中的坐标值为 $\boldsymbol{B}_i^B(i=5\sim10)$.

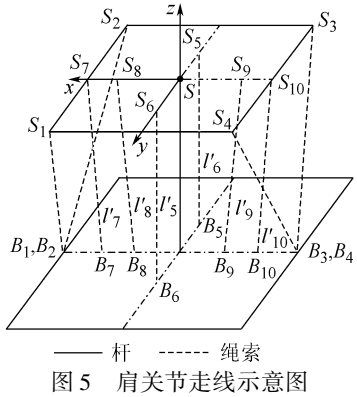


图5 肩关节走线示意图

由第2节的运动学分析可知,当给定驱动肩关节运动的4根绳索的长度时,可得出肩关节的旋转矩阵. 由此可求出其他6根绳索在肩关节的长度,其解法与一般的并联机器人求逆解方法类似.

假设坐标系 $Sxyz$ 相对于 $Bxyz$ 的方向矩阵为 $\boldsymbol{R}_S^B$,则肩关节运动后点 S_i 在 $Bxyz$ 中的坐标为

$$\boldsymbol{S}_i^B=\boldsymbol{R}_S^B\cdot\boldsymbol{S}_i^S\qquad i=5\sim10$$

因此这6根绳索在肩关节的绳长变化为

$$\Delta l'_i=\|\boldsymbol{B}_i^B-\boldsymbol{R}_S^B\cdot\boldsymbol{S}_i^S\|-l'_i\qquad i=5\sim10$$

其中,l'_i 为初始状态时这6根绳索在肩关节的绳

长. 假设绳索总的长度变化为 Δl_i,运动前腕关节处驱动绳索长度为 $l_{i,0}$,则运动后腕关节驱动绳索的长度 $l_i = l_{i,0} + (\Delta l_i - \Delta l'_i)$, $i = 7 \sim 10$; 肘关节驱动绳索长度 $l_i = l_{i,0} - (\Delta l_i - \Delta l'_i)$, $i = 5, 6$.

4　实验算例与仿真

机构的设计参数如下(单位:mm):

大臂长为 200.5,小臂长为 222.5,末端操作器长为 50;肩关节结构参数为:$l_b = 75$, $l_h = 75$, $l_s = 50$;相应腕关节结构参数为:$l'_b = 52.5$, $l'_h = 52.5$, $l'_s = 35$;肘关节结构参数为:$r = 40$.

当电机旋转的时候,使卷扬机上的绳索缠绕或松开,从而改变驱动绳索长度的变化. 如表 1 所示,给定 3 组基座处绳索的长度变化,负值表示绳索缠绕在卷扬机上,正值表示松开绳索.

根据表 1 所给的绳长的变化,得出肩关节对肘、腕关节驱动绳索的长度变化影响如表 2 所示.

表 1　机器人基座驱动绳索长度变化　mm

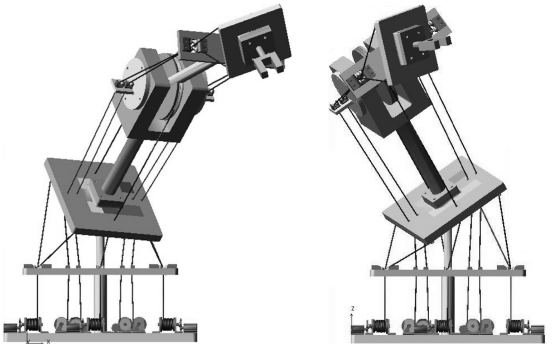
绳长	第 1 组	第 2 组	绳长	第 1 组	第 2 组
Δl_1	35.77	46.66	Δl_6	48.17	53.29
Δl_2	-52.88	3.17	Δl_7	36.23	13.51
Δl_3	-9.05	-8.93	Δl_8	-23.48	12.65
Δl_4	22.15	-23.55	Δl_9	-9.25	-18.72
Δl_5	-49.12	-51.25	Δl_{10}	4.38	1.49

表 2　肩关节处驱动肘、腕关节的绳长变化　mm

绳长	第 1 组	第 2 组	绳长	第 1 组	第 2 组
$\Delta l'_5$	-28.18	-9.36	$\Delta l'_8$	-1.48	20.60
$\Delta l'_6$	27.23	11.40	$\Delta l'_9$	4.34	-21.43
$\Delta l'_7$	-0.97	27.78	$\Delta l'_{10}$	6.66	-28.06

下面通过 ADAMS 仿真的方法来研究仿人手臂的运动学问题. 在 ADAMS 环境下建好机构模型,并对刚体加入相应的约束和运动.

由给定的 2 组绳长,进行仿真即可得出如图 6 所示的 2 种位姿. 仿真结束后测出末端的位姿 $p(x,y,z,\alpha,\beta,\gamma)$. x,y,z 为末端坐标,单位为 mm; α,β,γ 为末端姿态的欧拉角描述,单位为°. 其仿真结果与前部分的计算结果的对照如表 3 所示.



a　第 1 组参数下的位姿　　b　第 2 组参数下的位姿

图 6　2 组参数情况下的运动仿真

表 3　2 种结果对照

末端位姿	实例计算结果 $p(x,y,z,\alpha,\beta,\gamma)$	仿真测量结果 $p(x,y,z,\alpha,\beta,\gamma)$
第 1 组	(199.2,-342.78,170.76,128.74,19.84,9.081)	(199.2,-342.8,170.8,128.7,19.84,9.086)
第 2 组	(-19.93,-343.56,194.43,85.48,43.88,17.56)	(-19.88,-343.6,194.4,85.5,43.89,17.55)

5　结 束 语

基于人臂仿生学原理,本文采用线驱动的并联机构,提出了一种线驱动仿人臂机器人的设计方案,并对机构进行了运动学分析. 在考虑肩关节对肘和腕关节耦合影响的情况下,由给定的 10 根绳索长度的变化求出了机构唯一的位姿. 在 ADAMS 环境下进行了仿真研究,验证了本文前向运动学分析结果的正确性.

参考文献 (References)

[1] Chen W H, Chen I M, Lim W K, et al. Cartesian coordinate control for redundant modular robots[J]. IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics, 2000(5): 3253-3258

[2] 钱锡康. BUAA-RR 七自由度机器人机械结构设计[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(3): 354-357
Qian Xikang. Structure design for 7-DOF BUAA-RR manipulator [J]. Journal of Beijing University of Aeronautic and Astronautics, 1998, 24(3): 354-357(in Chinese)

[3] 李鲁亚. 冗余自由度机器人控制研究[D]. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 1994
Li Luya. On the control of redundant robots [D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautic and Astronautics, 1994(in Chinese)

[4] Yamamoto M, Yanai N, Mohri A. Inverse dynamics and control of crane-type manipulator[J]. Journal of Robotics Society of Japan, 1999(17): 123-129

[5] Yang G L, Lin W, Mustafa S K. Kinematic design of a 7-DOF cable-driven humanoid arm: a solution-in-nature approach [J]. Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechanistic, 2005: 444-449

[6] Pham C B, Yeo S H, Yang G L. Workspace analysis and optimal design of cable-driven planar parallel manipulator[J]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2004: 243-247

[7] Kurtz R, Hayward V. Multiple-goal kinematic optimization of a parallel spherical mechanism with actuator redundancy [J]. IEEE Transaction on Robotics & Automation, 1992: 644-651

(责任编辑:彭　徽)