doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.052

非完全对称气动柔性弯曲关节力学特性实验*

邵铁锋^{1,2} 张立彬¹ 都明宇¹ 鲍官军¹ 罗鑫远¹ 杨庆华¹ (1.浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室,杭州 310018; 2.中国计量学院工程训练中心,杭州 310032)

摘要:为改进柔性机器人驱动器结构及数学模型,提出了一种非完全对称气动柔性弯曲关节及其数学模型。为了 实现其实时闭环控制系统,进一步简化了原有数学模型,并对其力学特性进行了实验研究。搭建了力学特性实验 平台,并对两种不同规格(长度分别为 40、60 mm)的关节进行了测试。采用 Matlab 曲线及曲面工具箱对测试结果 进行分析,得到了新型气动柔性弯曲关节的经验模型。该经验模型表明气动柔性弯曲关节的弯曲角度与初始长 度、关节内外气压差、输出力之间存在非线性关系。与简化的数学模型比较,该经验模型具有更高的精度,其中输 出角度模型相对误差平均值小于 6.7%,输出力模型相对误差平均值小于 2%。同时,该经验模型纠正了原有数学 模型中,认为关节初始长度与弯曲角呈正比的错误结论。

关键词:气动柔性弯曲关节 力学特性 经验模型 曲面拟合

中图分类号: TP241 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2014)11-0337-06

引言

气动人工肌肉(PAM)具有高力/质量比、柔性 好、动作平滑、噪声低、重量轻和维护方便等优 点^[1],作为一种柔顺性和适应性较好的机器人关节 驱动器,在机器人等领域引起了国内外学者的广泛 关注。

McKibben 型 PAM 作为 PAM 的典型代表,起源 于 20 世纪 50 年代^[2],其内部是弹性较好的橡胶管, 外部为一层较高强度的纤维编织网,当充以压缩空 气时,PAM 结构在轴向收缩并在径向膨胀,若其一 端固定,另一端连接负载,可以通过轴向收缩而产生 驱动力。经过多年的发展,基于 McKibben 型 PAM 研发的人工肌肉驱动器有较多报道,同时成系列的 商品化 McKibben 型 PAM 也相继由英国 Shadow^[3] 等各大公司推出。

20世纪80年代初,日本东芝公司研制的3自 由度驱动器 FMA(Flexible micro-actuator)^[4],其外 形呈管状,管内分隔成3个互呈120°的扇形柱空 腔,具有伸长、偏转、弯曲3个自由度。

21世纪初,Noritsugu 等^[5]开发了一种旋转型气动柔性驱动器,该驱动器由硅橡胶制成两个边板和 中间的可伸缩部分组成,可实现围绕其中心轴线产 生旋转运动。 近年来,多种不同材料与结构的驱动器由国内 外学者提出,例如:气动柔性驱动器^[6],气动柔性弯 曲关节^[7],气动柔性摆动关节^[8],双波纹管气动弯 曲关节^[9],聚合物人工肌肉^[10]等。

相对于 PAM 结构与材料发展的多样化,其特性 相关理论研究相对薄弱。其中,20 世纪 90 年代中 期,美国的 Chou 和 Hannaford 根据能量守恒定理建 立的 PAM 模型得到了广泛的使用^[11]。在国内,北 京航空航天大学的宗光华较早开始气动肌肉的研 究,分析了其非线性特性、橡胶管弹性及其自身摩擦 对驱动模型的影响^[12-13];上海交通大学的田杜平 等^[14]、哈尔滨工业大学的王祖温等^[15]、浙江大学的 陶国良等^[16]、北京理工大学的彭光正等^[17]、浙江工 业大学的杨庆华等^[18]均在气动人工肌肉研究上取 得了丰硕的成果。

本文为进一步改进柔性机器人驱动器结构及相应的数学模型,提出了非完全对称气动柔性弯曲关节(Flexible pneumatic bending joint with special anisotropic rigidity structure, FPBJ),并基于其力学特性模型的理论研究基础,对其进行实验研究。

1 FPBJ 结构与力学建模

1.1 FPBJ 结构设计

如图1所示,FPBJ由左右端盖、非完全对称截

作者简介: 邵铁锋,博士生,主要从事机器人技术研究, E-mail: stf@ cjlu. edu. cn

收稿日期: 2013-12-17 修回日期: 2014-02-11

^{*}国家自然科学基金资助项目(51075363)和浙江省自然科学基金资助项目(LY12E05022)

通讯作者:杨庆华,教授,博士生导师,主要从事农业机器人、机电一体化控制研究, E-mail: robot@ zjut. edu. cn



1. 左端盖
 2. 非完全对称截面橡胶管
 3. 螺旋钢丝
 4. 右端盖
 5. 紧定螺钉
 6. 薄弹簧钢片

面橡胶管、嵌套橡胶管管壁中的螺旋钢丝、薄弹簧 钢片组成。相对于传统圆柱形弯曲关节, FPBJ采 用的橡胶管设有薄壁侧与厚壁侧, 形成非弯曲对 称结构,在厚壁侧内嵌薄弹簧钢片,以增加垂直弯曲平面的刚度。压缩气体从右端盖通入橡胶管的内腔,由于螺旋钢丝的约束作用橡胶管不产生径向膨胀,同时由于薄弹簧钢片的约束作用,橡胶管伸长量从厚壁侧到薄壁侧依次增加,因此橡胶管弯曲。

1.2 力学建模

文献[19]基于关节弯曲过程中截面形状不变, 忽略内部弹簧和橡胶管耦合效应,关节弯曲过程中 弹性模量不变这3点假设,将 FPBJ 近似为欧拉-伯 努利梁,并对其进行了静态特性分析,得出

$$\theta = \frac{\pi r_0^2 L_0 \Delta p d}{E_1 I} - \frac{L_0}{E_1 I} \left\{ E t_0 r_0 \left(d - \frac{L_0}{\theta} \right) \left(2\pi - \phi \right) + 2E t_0 r_0^2 \cos \left(\frac{\pi - \phi}{2} \right) + \frac{4E t_0 r_0 \left(\frac{L_0}{\theta} \right)^2}{\sqrt{\left(d + \frac{L_0}{\theta} \right)^2 - r_0^2}} \left[\arctan \frac{d + \frac{L_0}{\theta} + r_0}{\sqrt{\left(d + \frac{L_0}{\theta} \right)^2 - r_0^2}} + \arctan \frac{\left(d + \frac{L_0}{\theta} \right) \tan \frac{\pi - \phi}{4} - r_0}{\sqrt{\left(d + \frac{L_0}{\theta} \right)^2 - r_0^2}} \right] \right\} - \frac{M L_0}{E_1 I}$$

$$(1)$$

r₀——FPBJ内腔平均半径

*L*₀——FPBJ 初始长度

- Δp——FPBJ 内外气压差
- I——薄弹簧钢片对中性轴的惯性矩
- d——弹簧钢片到中性轴的距离
- E----橡胶弹性模量
- t₀——橡胶管壁初始厚度
- *ϕ*──橡胶管结构参数
- M——外力矩

式(1)中,FPBJ 弯曲角度并非显性表达式,同时 该方程计算复杂,不利于后期实时控制,因此需对其 进一步简化。文献[19]在推导公式(1)过程中,采 用分段函数表示法定义了弯曲关节在圆周不同角度 处橡胶管的长度 L_{ψ} ,本文对该参数进一步分析修 正,根据其几何定义得出

$$L_{\psi} = \beta (d - r_0 \cos \phi + R) \quad (0 \le \phi \le \pi) \quad (2)$$

将公式(2)代入文献[19]推导可得

$$\theta = \frac{\pi r_0^2 \Delta p d - 2\pi E t_0 r_0 d - M}{E_1 I} L_0$$
(3)

修正后的 L_{ψ} 更符合实际应用,具体推导过程请 参考文献[19]。公式(3)反映了 FPBJ 的弯曲角度 与关节结构参数 $r_0 \, L_0 \, t_0 \, d$ 以及外部因素 $\Delta p \, M$ 之 间的关系。其中除初始长度 $L_0 \, P$,其他参数对关节 弯曲角度的影响均为非线性。文献[19]在外力矩 M = 0 的情况下,针对公式(1)进行了仿真分析,并 根据仿真结果及本项目需求,对 FPBJ 结构参数 t_0 、 r_0 、d进行了优化设计。为进一步优化设计以及后期 控制实现,本文在关节受到外力矩 $M \neq 0$ (即输出力 $F \neq 0$,如图 2 所示)的情况下,利用实验模型研究关 节弯曲角度 θ 、关节长度 L_0 、输出力F以及管内气压 差 Δp 之间的关系。即 FPBJ的弯曲角度模型 $\theta =$ $f(\Delta p, L_0, F)$ 与输出力模型 $F = f(\Delta p, L_0, \theta)$ 。由于阻 碍关节弯曲的作用力主要为外力F在x轴方向的分 量,如图 2 所示,上述输出力模型与弯曲角度模型可 分别简化为

$$\theta = f_1(\Delta p, L_0, F_x) \tag{4}$$

$$F_{x} = f_{2}(\Delta p, L_{0}, \theta)$$
(5)



Fig. 2 Output force analysis of FPBJ

2 实验方案设计

实验系统结构框图如图 3 所示。该实验系统可 实时控制 FPBJ 内部气压,测量其弯曲角度与输出 力,并将最终实验数据上传到上位机分析、存储。在 实验系统中,FPBJ 一端固定,另一端与推力计(HP-20)垂直接触,HP-20 最大量程 20 N,精度 0.5%, 可实现 FPBJ 输出力的实时检测,并将数据上传到 上位机。FPBJ 内部气压由嵌入式测控模块中的模 数转化模块(D/A)通过比例阀控制。而其弯曲角 度检测由数模转换模块(A/D)实时采样柔性角度 传感器(FLX03)电阻的变化来实现。本实验针对同 一半径系列的两组 FPBJ 进行测试,其中第 1 组 (FPBJ-1)内腔半径 r_0 = 4.5 mm,橡胶管初始壁厚 t_0 = 2 mm,初始长度 L_0 = 40 mm。第 2 组(FPBJ-2) 内腔半径 r_0 = 4.5 mm,橡胶管初始壁厚 t_0 = 2 mm, 初始长度 L_0 = 60 mm。实验中橡胶管内外气压差 0.02 MPa $\leq \Delta p \leq 0.32$ MPa,外部载荷 0 $\leq F_x \leq 8$ N。 实验照片如图 4 所示。



Fig. 3 Experimental setup diagram



图 4 FPBJ 弯曲实验照片 Fig. 4 Bending test photograph 1. 气管 2. FPBJ 3. 柔性传感器 4. 推力计

3 实验结果分析

3.1 等载荷分析

在外部载荷 F_x 一定的情况下,针对 FPBJ 完成 充气实验,获得等载荷特性曲线。FPBJ - 1、FPBJ - 2 的等载荷特性曲线分别如图 5、6 所示。图中共有 14 条曲线,从上到下依次表示外力 F_x 自 0 N 到 8 N,以 0.5 N 递增。

图 5、6 中,FPBJ 在外部载荷一定的情况下,其 弯曲角度随着气压差的增加而呈非线性增加。根据 Matlab 曲线拟合工具箱(cftool)分析可得,二次样条 曲线可较好地拟合这一特性。其拟合方程为

 $\theta = f_3(\Delta p) = a_1 \Delta p^2 + a_2 \Delta p + a_3$ (6) FPBJ - 1 、FPBJ - 2 拟合参数分别如表1、2 所







Fig. 6 Characteristic curve of FPBJ-2 under same load

表1 FPBJ-1等载荷拟合参数

Tab. 1 FPBJ – 1 fitting parameters

载荷/N	a_1	a_2	a_3	确定系数
0	1 015	122.7	6.441	0.9986
0.5	805.3	164.8	1.46	0.9986
1.0	661.2	179.2	- 1. 957	0.9981

表 2 FPBJ-2 等载荷拟合参数 Tab.2 FPBJ-2 fitting parameters

载荷/N	a_1	a_2	a_3	确定系数
0	821	310.5	10.15	0.9954
0.5	1 193	133.2	5.386	0. 996 6
1.0	1 353	16.79	6.882	0. 996 4

示。在不同载荷下,其拟合参数也不尽相同,因篇幅 原因,本文未全列出。

在相同载荷下, FPBJ - 1、FPBJ - 2 输出特性比 较图如图 7 所示。图中,当 Δ*p* 相对较小时, L_0 较小 的 FPBJ - 1 弯曲角度大于 L_0 较大的 FPBJ - 2 的弯 曲角度。随着 Δ*p* 逐渐增大, FPBJ - 2 弯曲角度的增 加速度明显增大, 最终 FPBJ - 2 的弯曲角度大于



FPBJ-1的弯曲角度。该特性与前文提到的理论模型有一定差异。理论模型中,在相同的载荷下, FPBJ-2的弯曲角度应始终大于 FPBJ-1 的弯曲角 度,即弯曲角度与初始长度呈线性关系。引起这一 差异的主要原因为:系统建模时,橡胶被认为是理想 橡胶,其粘性被忽略;理论模型同时忽略了空气的可 压缩性。

3.2 力学特性模型

力学特性模型主要包括输出力模型与弯曲角度 模型两部分。均由 Matlab 的曲面拟合工具箱 (sftool)针对实测数据采用多项式曲面拟合获得。 在弯曲角度模型拟合过程中,当多项式曲面拟合参 数小于3时,拟合误差较大,平均相对误差较大(大 于15%)。当拟合参数大于3时,系统拟合方程复 杂度增大,而拟合误差减小不明显。因此,针对输出 角度曲面拟合,本系统选用三次多项式曲面拟合方 程,即

$$\theta = f_1 \left(\Delta p , L_0 , F_x \right) = a_{00} + a_{10} \Delta p + a_{01} F_x + a_{20} \Delta p^2 + a_{11} \Delta p F_x + a_{02} F_x^2 + a_{30} \Delta p^3 + a_{21} \Delta p^2 F_x + a_{12} \Delta p F_x^2 + a_{03} F_x^3$$
(7)

图 8 为 FPBJ-1 弯曲角度拟合曲面,其输入变量为气压差、输出力,输出变量为弯曲角。图 9 为上

述曲面拟合的残差图。由图 8 和图 9 可得,该曲面 在 FPBJ-1 变形量较大的曲面边界附近绝对误差最 大,系统相对误差平均值小于 6.7%。曲面拟合参 数如表 3 所示。



图 8 FPBJ-1 弯曲角度拟合曲面

Fig. 8 Bending angle surface plot of FPBJ - 1



图 9 FPBJ-1 弯曲角度拟合曲面残差图

Fig. 9 Bending angle residuals plot of FPBJ-1

表 3 FPBJ-1 曲面拟合参数 Tab. 3 FPBJ-1 surface fitting parameters

拟合方程	a_{00}	a_{10}	a_{01}	a_{20}	a_{11}	a ₀₂	a ₃₀	a_{21}	a ₁₂	a ₀₃	确定系数
f_1	-2.6	335	- 1.5	- 225. 5	- 49. 1	- 0. 73	2 123	- 69. 3	2.36	0.1	0.9973
f_2	0. 52	32.4	-0.13	- 27. 65	0.15	0	0	0	0	0	0.9973

采用相同的方法,可获得输出力模型,拟合过程 中,当拟合参数小于2时,拟合误差较大,平均相对 误差大于10%。当拟合参数大于2时,系统拟合方 程复杂度增大,而拟合误差减小不明显。因此,针对 输出力曲面拟合,本系统选用二次多项式曲面拟合 方程,即

$$F_{x} = f_{2} \left(\Delta p, L_{0}, \theta \right) = a_{00} + a_{10} \Delta p + a_{01} \theta + a_{20} \Delta p^{2} + a_{11} \Delta p \theta + a_{02} \theta^{2}$$
(8)





为弯曲角、输出力,输出变量为输出力。

图 11 为上述曲面拟合的残差图。由图 10 和 图 11 可得,该曲面在 FPBJ-1 变形量较大的曲面边 界附近绝对误差相对最大,系统相对误差平均值小 于 2%。曲面拟合参数如表 3 所示。



图 11 FPBJ-1 输出力拟合曲面残差图 Fig. 11 Output force residuals plot of FPBJ-1

FPBJ-2 弯曲角度模型及输出力模型可由同样 方法获得,仅是具体参数不同,其弯曲角度拟合曲面 及残差图分别如图 12、13 所示,输出力拟合曲面及残差 图分别如图 14、15 所示。拟合参数如表 4 所示。



Fig. 14 Output force plot of FPBJ-2



图 13 FPBJ-2 弯曲角度拟合曲面残差图 Fig. 13 Bending angle Residuals plot of FPBJ-2



图 15 FPBJ-2 输出力拟合曲面残差图 Fig. 15 Output force residuals plot of FPBJ-2

表 4 FPBJ-1 曲面拟合参数 Tab.4 FPBJ-1 surface fitting parameters

拟合方程	a_{00}	a_{10}	a_{01}	a_{20}	a_{11}	a_{02}	a_{30}	a_{21}	a_{12}	a_{03}	确定系数
f_1	3.97	531.7	- 23. 1	- 1 068	- 88. 56	6.3	4 143	- 75. 24	10.74	-0.78	0. 996 6
f_2	0.63	13.06	-0.05	27.72	- 0. 06	0	0	0	0	0	0. 990 4

FPBJ-1与 FPBJ-2 的弯曲角度拟合曲面比较 如图 16 所示。图中,曲面1、曲面2代表 FPBJ-1与 FPBJ-2 的拟合曲面,粗曲线为两曲面的相交线。 由图可得,在输出力相同的情况下,两者弯曲角度之 间的关系随着内部气压的变化而变化,在内部气压 较小时,较短的关节具有较大的弯曲角度,而当内部 气压较大时,两者之间的关系正好相反。该关系的 转折点发生在相交曲线处,输出力越大,发生转折所 需的内部气压也越大。此时,输出力与内部气压之 间呈非线性关系。



图 16 FPBJ-1 与 FPBJ-2 弯曲角度拟合曲面比较图 Fig. 16 Bending angle surface FPBJ-1 vs FPBJ-2

4 结束语

新型气动柔性弯曲关节直接作为机器人末端执 行器,在某些场合,优于传统的 PAM 驱动执行器。 例如:在农业采摘、家用服务机器人等领域,FPBJ 具 有更好的柔顺性、安全性及负载能力。其精确力学 特性理论模型,已通过理论研究获得。然而该模型 相对复杂,不利于小型嵌入式系统的快速实现。且 原有理论模型存在一定的局限性。本文研究的经验 模型,为 FPBJ 的设计与使用提供了更为有效与确 切的力学特性模型。该模型专注于真实实验数据的 测量以及后期的数据处理。大量实验数据的获得以 及 Matlab 拟合工具箱的使用,保证了模型的精度与 准确性。

本文仅研究了 FPBJ 结构参数之一(初始长度 L_0)对模型的影响,仅限于本直径系列 FPBJ 的研究 与使用。更多的结构参数的影响有待进一步研究, 以支持多系列 FPBJ 的设计与使用。

参考文献

- 1 李宝仁,刘军,杨钢. 气动人工肌肉系统建模与仿真[J]. 机械工程学报,2003,39(7):23-28.
- Li Baoren, Liu Jun, Yang Gang. Modeling and simulation of pneumatic muscle system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 23 28. (in Chinese)
- 2 Caldwell D G, Medrano-Cerda G A, Goodwin M. Control of pneumatic muscle actuators [J]. Control Systems, IEEE, 1995, 15(1): 40-48.
- 3 de Volder M, Moers A J M, Reynaerts D. Fabrication and control of miniature McKibben actuators [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 166(1): 111-116.
- 4 Suzumori K, Iikura S, Tanaka H. Applying a flexible microactuator to robotic mechanisms [J]. Control Systems, IEEE, 1992, 12(1): 21-27.
- 5 Noritsugu T, Kubota M, Yoshimatsu S. Development of pneumatic rotary soft actuator [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, 2000, 66(647): 2280 - 2285.
- 6 钱少明,杨庆华,鲍官军,等.基于气动柔性驱动器的弯曲关节的基本特性研究[J].中国机械工程,2009,20(24): 2903-2907.

Qian Shaoming, Yang Qinghua, Bao Guanjun, et al. Research on basic characteristics of bending joint based on flexible pneumatic actuator[J]. China Mechanical Engineering, 2009,20(24): 2903 - 2907. (in Chinese)

7 杨庆华,张立彬,胥芳,等.气动柔性弯曲关节的特性及其神经 PID 控制算法研究[J].农业工程学报,2004,20(4): 88-91.

Yang Qinghua, Zhang Libin, Xu Fang, et al. Investigation of the characteristics of pneumatic flexible-bending joint and its neural PID controlling algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(4): 88-91. (in Chinese)

- 8 鲍官军,邵铁锋,李尚会,等. 气动柔性摆动关节静态模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 198-202. Bao Guanjun, Shao Tiefeng, Li Shanghui, et al. Static model of flexible pneumatic swaying joint[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 198-202. (in Chinese)
- 9 Shapiro Y, Wolf A, Gabor K. Bi-bellows: Pneumatic bending actuator [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 167(2): 484-494.
- 10 Mirfakhrai T, Madden J D W, Baughman R H. Polymer artificial muscles [J]. Materials Today, 2007, 10(4): 30 38.
- 11 Chou C P, Hannaford B. Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 90 - 102.
- 12 宗光华.人工肌肉夹持力的变结构控制[J].北京航空航天大学学报,1990(2):111-116. Zong Guanghua. Grasping force control of rubber muscle system using VSS theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1990(2):111-116. (in Chinese)
- 13 刘荣,宗光华.人工肌肉驱动特性研究[J].高技术通讯,1998(6):34-38.
 Liu Rong, Zong Guanghua. Study on actuating characteristics of rubbertuator[J]. Chinese High Technology Letters, 1998(6): 34-38. (in Chinese)
- 14 田杜平,林良明.人工肌肉静态特性及其测量[J]. 实用测试技术, 1998, 24(6):12-14. Tian Duping, Lin Liangming. Static characteristics and measurements of artificial muscles [J]. Practical Measurement Technology, 1998, 24(6):12-14. (in Chinese)
- 15 王祖温,隋立明,包钢. 气动肌肉驱动关节的输入整形研究[J]. 机械工程学报,2005,41(1):66-70.
 Wang Zuwen, Sui Liming, Bao Gang. Research on input shaping for the joint actuated by pneumatic muscles [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1):66-70. (in Chinese)
- 16 陶国良,谢建蔚,周洪. 气动人工肌肉的发展趋势与研究现状[J]. 机械工程学报,2009,45(10):75-83.
 Tao Guoliang, Xie Jianwei, Zhou Hong. Research achievements and development trends of pneumatic artificial muscles [J].
 Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10):75-83. (in Chinese)
- 17 彭光正,余麟,刘昊. 气动人工肌肉驱动仿人灵巧手的结构设计[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(7): 593 597.
 Peng Guangzheng, Yu Lin, Liu Hao. Structural design of a dexterous hand actuated by pneumatic artificial muscle [J].
 Transactions of Beijing Institution of Technology, 2006, 26(7): 593 597. (in Chinese)
- 18 鲍官军,王志恒,杨庆华,等. 气动柔性扭转关节动态特性研究[J]. 农业机械学报,2010,41(6):204-207.
 Bao Guanjun, Wang Zhiheng, Yang Qinghua, et al. Dynamic characteristics of flexible pneumatic torsion joint[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 204-207. (in Chinese)
 19 罗鑫远. 大柔性灵巧手指特性研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2012.
- Luo Xinyuan. Research on the characteristics of large flexible dexterous finger [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012. (in Chinese)

Inverse Dynamics of 3PUS - S(P) Parallel Metamorphic Mechanism

Chang Boyan Liu Yanru Jin Guoguang

(Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The primary goal of this paper is to analyze the kinematic and dynamics of a 3PUS - S(P) parallel spherical metamorphic mechanism. It consists of a moving platform, base platform, three PUS legs and one middle S(P) metamorphic leg. A complete description of the position and orientation of the moving platform requires six variables. Since the parallel metamorphic mechanism has three degrees of orientation freedom in 1st configuration and extra one degree of translational freedom in 2nd configuration, which implies that only three variables are independent in 1st configuration and four variables in 2nd configuration. Firstly, the constraint equations describing the six motion coordinates of moving platform are derived and kinematic equations are established based on vector algebra method. Secondly, inverse dynamics equations of this metamorphic mechanism are established based on the Newton – Euler formulation. According to geometric and physical parameters of real mechanism, required driving and constraint forces can be obtained when the motion of moving platform and working load are given by solving the inverse dynamics equations. Furthermore the simulation result illustrates that 3PUS - S(P) parallel metamorphic mechanism can avoid impact damage by activating the constrained prismatic pair in middle leg.

Key words: Metamorphic mechanism Newton – Euler formulation Inverse dynamics Driving force Constraint force

(上接第 342 页)

Experimental Study on Mechanical Properties of Flexible Pneumatic Bending Joint

Shao Tiefeng^{1,2} Zhang Libin¹ Dou Mingyu¹ Bao Guanjun¹ Luo Xinyuan¹ Yang Qinghua¹ (1. Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310018, China 2. Engineering Training Center, China Jiliang University, Hangzhou 310032, China)

Abstract: A new type of flexible pneumatic bending joint (FPBJ) and its mathematical model were proposed. To implement its real-time closed-loop control system, its mathematical model was simplified, and the mechanical characteristics were studied experimentally. An experimental platform for mechanical characteristics testing was set up, and two FPBJs with different length(40 mm and 60 mm) were tested. The experimental results were analyzed with Matlab curve and surface fitting toolbox, and the FPBJ empirical model was derived. The model showed a non-linear relationship among the bending angle, the FPBJs internal and external pressure difference, joint length and the output force of the FPBJs. Contrast to the simplified mathematical model, the empirical model was more precise, the mean relative error of output angle model was less than 6.7%, and the mean relative error of output force model was less than 2%. Meanwhile, an error, the joint length is proportional to the bending angle in the mathematical model.

Key words: Flexible pneumatic bending joint Mechanical characteristics Empirical model Surface fitting