

# 四足仿生机器人足部六维力传感器设计<sup>\*</sup>

高军,冯华山,刘桢,刘超

(西北工业大学机电学院,西安 710072)

**摘要:**为获得四足仿生机器人足底所受六维力/力矩,结合机器人足部结构特点,提出了一种新型六维力传感器结构。介绍了该传感器的结构特点和测力原理,采用有限元方法对传感器弹性体进行静态和模态特性仿真,获取了该弹性体的变形图、应变云图、模态振型和固有频率,分析得出了传感器弹性体应变曲线、灵敏度和维间干扰情况。结果表明该传感器结构具有测量灵敏度高、维间干扰小,以及弹性体固有频率高等特点,满足四足仿生机器人足部测力的需求。

**关键词:**六维力传感器;有限元;弹性体;弹性梁

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A

## Design of New Six-Axis Foot Force Sensor on a Quadruped Robot

GAO Jun, FENG Hua-shan, LU An, LU Chao

(School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:**

**Key words:**

## 0 引言

在机器人所用传感器中,力传感器是最基本的一种,尤其是能够为机器人姿态控制提供全面力信息的六维力传感器<sup>[1-2]</sup>。用于动态测量机器人足部所受力/力矩信息的六维力传感器通常位于杆系运动链的末端,考虑到机器人结构特点和动力性能,要求传感器具有尺寸小、重量轻、灵敏度高、动态性能好等特点。六维力传感器设计的关键是传感器弹性体设计,弹性体是应变式测力传感器的核心部件,其优劣直接影响到传感器的各项性能指标<sup>[3-6]</sup>。国内外关于六维力传感器的研究已经很多,但能够满足四足仿生机器人足部测力要求的传感器比较少。

作者所在单位研制了一种四足仿生机器人,并开展了基于足底力与位姿信息的运动姿态控制研究。安装于机器人足部的力传感器系统包括足底六维力测量

单元和足端位姿测量单元及其计算模块等,本文着重阐述六维力测量单元的传感器弹性体部分,其他内容可参阅后续文章。本文结合四足仿生机器人足部特征,给出一种适合机器人足底测力的六维力传感器结构及其工作原理,并运用有限元分析方法对传感器弹性体进行静态、动态特性分析,探讨了该弹性体结构与尺寸的合理性。

## 1 六维力传感器结构及工作原理

四足仿生机器人的物理样机如图1所示,六维力传感器安装于机器人小腿和足之间,用来实时检测足部在工作过程中承受的运动冲击载荷,其足部力坐标系如图1中右图所示,足部承受Z向地面反力 $F_z$ 、前进方向的地面反力 $F_x$ 和侧向力 $F_y$ ,同时还承受转向力矩 $M_z$ 以及X、Y向的倾覆力矩 $M_x$ 、 $M_y$ 。结合仿生学研究和物理样机试验数据<sup>[7]</sup>,通过虚拟样机仿真分析,可

收稿日期: 2009 - 08 - 10

\*基金项目: 国防基础科研资助项目

作者简介: 高军(1978—),男,陕西白水人,西北工业大学硕士研究生,工程师,研究方向为机器人控制技术,力传感器技术,(E-mail) gau\_mail@163.com。

以得到四足仿生机器人的六维力传感器量程指标为： $F_x$ 、 $F_y$  量程为 750N， $F_z$  为 1500N； $M_x$ 、 $M_y$  量程为 75Nm， $M_z$  为 65Nm。

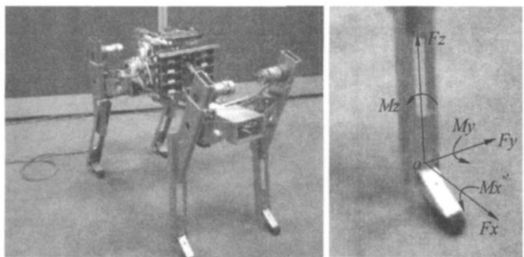


图 1 四足仿生机器人物理样机

六维力传感器在保证其机械强度和刚度的情况下，除了在结构上达到力解耦以及灵敏度高静态特性要求外，还要满足机器人实时测力对动态特性的要求，提高传感器的固有频率，有利于提高传感器的应变输出<sup>[8]</sup>。本文提出一种基于滑轴的六维力传感器结构，如图 3 所示，传感器主要由上、下基座和弹性体组成，弹性体由中心台、弹性应变梁、弹性铰链和滑轴构成，为整体式结构并一体化加工成型。传感器上、下基座与机器人小腿固连，中心台与机器人足部固连，地面反力经足部减震后传递给传感器，经传感器解耦分解为六维力。

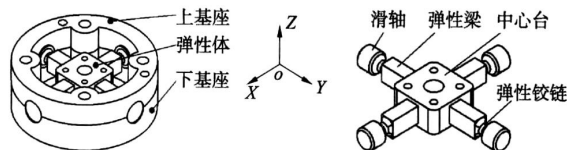


图 2 传感器及弹性体结构简图

弹性体滑轴与基座轴孔配合构成圆柱副，具有轴向移动和绕轴转动 2 个自由度，传感器测力时，以  $F_x$  为例，弹性体的相应测力弹性梁发生弹性弯曲变形，非测力弹性梁只发生轴向滑移，滑移摩擦力所产生的拉压应力远远小于测力弹性梁的弯曲应力，弹性铰链使这种对比效果更明显。弹性铰链具有更多带阻尼的自由度，这有助于减小滑轴受到的径向力，改善滑轴受力状况，另外带有弹性铰链的弹性梁类似于悬臂梁，弹性梁的弹性变形被集中到靠近中心台处，增大了弹性梁贴片部位的变形范围和应变能，所以本传感器的结构特性有利于提高其灵敏度、增强力解耦效果。

表 1 弹性体主要几何尺寸(单位:mm)

	长度	宽度/直径	高度	主要倒圆角
弹性梁	9	6.4	6	—
中心台	15	15	7	3
滑轴	5	6	—	—
弹性铰链	3	4	—	1.5

传感器弹性体材料选用硬铝合金 LY12<sup>[3]</sup>，其杨氏模量  $E$  为  $7.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ，泊松比  $\mu$  为 0.33，密度为  $2.78 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，抗拉强度  $\sigma_b = 5.2 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ，屈服极限  $\sigma_s = 3.4 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

集中力  $F_x$  沿  $X$  轴作用在弹性体中心台上， $X$  向弹性梁未发生变形， $Y$  向弹性梁发生弯曲变形，由于弹性体关于  $Z$  轴对称，故这里以正  $Y$  向弹性梁作为研究对象。将弹性体滑轴等效为移动副，弹性铰链等效为旋转副，则正  $Y$  向弹性梁的中心台端可等效为沿  $F_x$  方向的移动副，若视中心台端为固定端，弹性铰链端为自由端，则弹性梁可进一步等效为一等截面悬臂梁。对于一端固定的等截面悬臂梁，作用于自由端的集中力  $F_p$  与梁上某一位置处的应变关系为<sup>[9]</sup>：

$$\epsilon_x = \frac{6F_p(L-x)}{Ebh^2} \quad (1)$$

式中： $\epsilon_x$ ——距固定端  $x$  处的应变值；

$x$ ——悬臂梁上沿  $L$  距固定端的距离；

$L$ 、 $b$  和  $h$ ——分别为悬臂梁的长度、宽度和高度；

$F_p$ ——自由端载荷，这里  $F_p = \frac{F_x}{2}$ ；

$E$ ——材料弹性模量。

由上式可知，在悬臂梁表面上随着位置  $x$  的不同，产生的应变也不同，当  $x=0$  时，应变最大，即在弹性梁中心台处有最大应变。

一种算例：取  $L=9\text{mm}$ ， $b=6\text{mm}$ ， $h=6.4\text{mm}$ ， $x=0\text{mm}$ ，则由 (1) 式计算得传感器在  $F_x$  工况时弹性体上最大应变  $\epsilon_{\max}$  为  $1144.41\mu$ ，满足传感器电阻应变计对弹性元件的应变要求。

由式 (1) 可得出悬臂梁的应变灵敏度结构系数为：

$$= 6 \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \quad (2)$$

等截面悬臂梁的固有频率为：

$$f_0 = \frac{0.162h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

式中， $\rho$  为材料密度，上式计算出的是等效为悬臂梁的单根弹性梁的固有频率，弹性体的固有频率可借助有限元分析法得到。

弹性体关于  $Z$  轴对称，其它几维力的力学模型与  $F_x$  向模型类似，通过调整上述模型的结构参数，本传感器可以适应不同量程范围。根据机器人足部特点和传感器量程得出传感器弹性体的一种尺寸方案，如表 1，下面通过有限元分析法对传感器作进一步验证，并求出传感器的固有频率。

## 2 弹性体有限元分析

传感器基座对弹性体的约束可以在有限元分析软件里实现，为了提高分析效率、减少运算量，仅对弹性体进行分析。本文用 SolidWorks 建立传感器实体模型，将弹性体模型导入 Ansys Workbench 中进行静态分析和模态分析计算。

### 2.1 建立弹性体有限元模型

有限元模型的单元选用 Ansys Workbench 提供的

Solid187高精度实体单元,采用智能网格划分,为使计算更精确,对弹性梁和弹性铰链进行网格细化。最后得到有限元模型如图 3 所示,共有 117510 个单元,167041 个节点。以弹性体十字梁的上下对称面作为 XY 平面,以弹性体几何中心即中心台轴向孔轴线与 XY 平面的交点作为坐标原点,建立弹性体坐标系,坐标方向如图 3 所示。

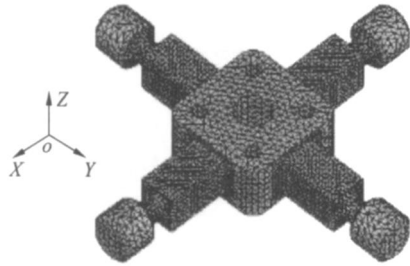


图 3 弹性体有限元模型

### 2.2 施加约束与载荷

对弹性体的 4 个滑轴圆柱面设置 Cylindrical 约束,约束属性的径向位移为 0。

机器人工作状态时足部受力如图 1 所示,考虑到传感器关于 z 轴圆周对称,可以把传感器所受载荷简化为 4 种典型工况:

- (1) 作用于弹性体中心台上表面,沿 z 轴方向通过坐标原点的集中力  $F_z = -1500\text{N}$ ;
- (2) 作用于弹性体中心台,沿 x 轴方向通过坐标原点的集中力  $F_x = -750\text{N}$ ,  $F_y$  与  $F_x$  相似;
- (3) 作用于弹性体中心台,绕 z 轴方向通过坐标原点的力矩  $M_z = 65\text{Nm}$ ;
- (4) 作用于弹性体中心台,绕 y 轴方向通过坐标原点的力矩  $M_y = -75\text{Nm}$ ,  $M_x$  与之相似。

### 2.3 静态分析

#### (1) 变形分析

图 4 为弹性体在 4 种典型工况下的受力变形情况,在图 4a 中,  $F_z$  作用下 4 根弹性梁都发生向下的弯曲变形,测量 4 根弹性梁的变形量可以得到  $F_z$ ; 在图 4b 中,  $F_x$  作用下 X 向弹性梁发生 X 向位移, Y 向弹性梁发生弯曲变形,测量 Y 轴弹性梁的变形可以得到  $F_x$ ; 在图 4c 中,  $M_z$  作用下 4 根弹性梁都发生绕 Z 轴的弯曲变形,  $M_z$  可通过测量 4 根弹性梁的变形量而得; 在图 4d 中,  $M_y$  作用下 X 向弹性梁发生上下弯曲变形, Y 向弹性梁由于 X 向弹性梁得变形而发生绕 Y 轴的转动,自身没有发生扭转变形,测量 X 向弹性梁的变形量可得  $M_y$ 。

#### (2) 应变分析

图 5 为弹性体在四种典型工况作用下的应变云图。弹性梁发生弯曲变形时,被拉伸面上的单元受到拉应力而表现为正应变,如图中红色区域;被压缩面上的单元因受压应力而表现为负应变,如图中蓝色区域,颜色越

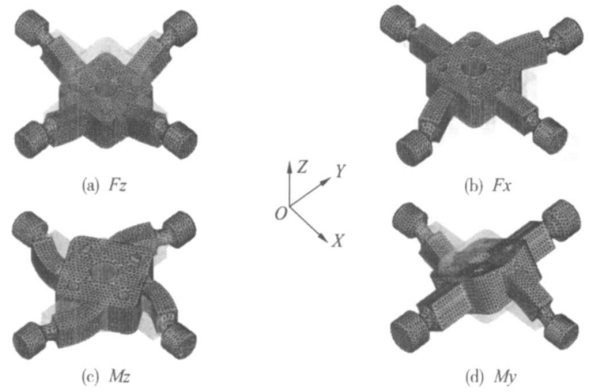


图 4 弹性体变形图

重的区域应变值越大,这些区域适合贴应变片测量。

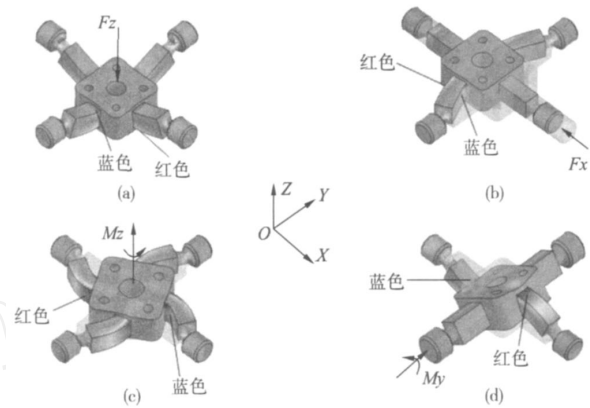


图 5 弹性体应变云图

图 5a 中,在  $F_z$  作用下弹性梁上表面受压应力,如图中所指出的靠近中心台的蓝色部分为负应变值较大区域;下表面受拉应力,红色部分为正应变值较大的区域。图 5b 中,在  $F_x$  作用下 Y 向弹性梁的负 X 向侧面受拉应力,如图中所指出的红色部分为正应变值较大区域;正 X 向侧面受压应力,蓝色部分为负应变值较大区域。图 5c 中,在  $M_z$  作用下 4 根弹性梁都发生了弯曲变形,其侧面靠近中心台的红色部分由于承受拉应力而产生较大的正应变;其相反面蓝色部分由于承受压应力而产生较大的负应变。图 5d 中,在  $M_y$  作用下 X 向弹性梁发生弯曲变形,其上、下表面的红色区域和蓝色区域因承受拉、压应力而产生较大正、负应变。

比较发现,图 5a 图与图 5d 的 X 负向弹性梁变形部位和应变颜色相似,图 5b 和图 5c 的 Y 正向弹性梁变形部位和应变颜色相似,其他部位相似而极性相反,可根据应变极性而加以区分。根据上面分析在弹性梁表面应变敏感区取 16 个测量点 S1 ~ S16,四种典型工况下其应变曲线如图 6 所示。

图 6 中  $F_x$  工况的平均应变值为  $1.10E+03\mu$ ,其中最大应变值为  $1.18E+03\mu$ ,与上文计算结果  $\max = 1144.41 = 1.14E+03\mu$  差别很小,可见上文建立的数学模型是合理的。若以单位力或力矩载荷作用所产

生的弹性梁应变来定义传感器的灵敏度,根据图 6 的测量值可以得出该传感器在四种工况下弹性梁上单个测量点的灵敏度参数,如表 2 所示,从表中可以看出,  $F_x$  维的灵敏度为 5.84,远大于  $F_z$  维的灵敏度 0.68,而  $F_x$  维和  $F_z$  维的单根弹性梁承受载荷大小均为  $1500/4 = 375\text{N}$ ,弹性梁的高、宽比仅为  $6/6.4 = 0.93$ ,说明本传感器能够有效提高传感器  $F_x$ 、 $F_y$  维的灵敏度,适合四足仿生机器人足部测力。

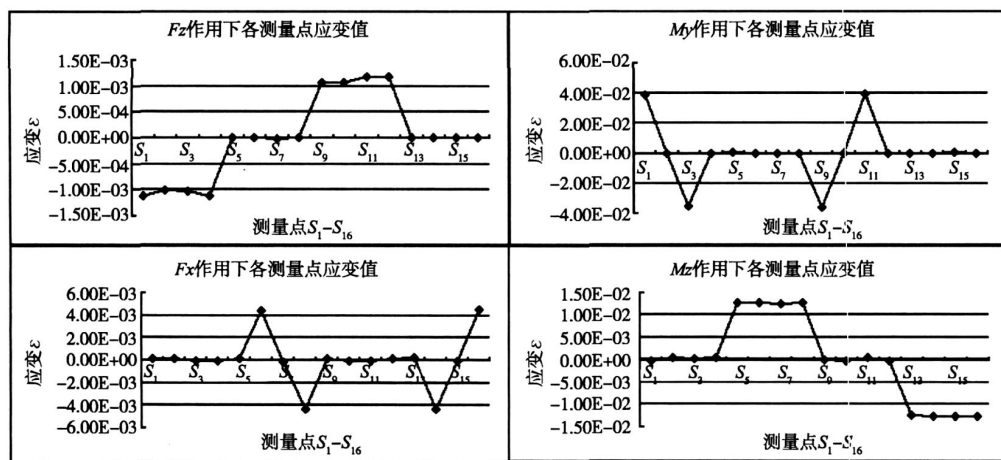


图 6 测量点应变曲线

表 2 传感器灵敏度与维间干扰

工况	$F_z$	$F_x$	$M_z$	$M_y$
灵敏度 ( $\mu\text{N}$ 或 $\mu\text{N/mm}$ )	0.68	5.84	0.55	0.16
维间干扰比 (%)	0.84	1.91	0.74	0.80

弹性体的维间干扰情况决定着六维力传感器的直接输出效果。定义维间干扰比为从各工况的测量应变值中取最大干扰应变值与最小组桥应变值的百分比,本传感器弹性体的维间干扰比如表 2 所示,从表中可以看出除  $F_x$  维的干扰比为 1.91% 外,其他维的干扰比均小于 1%,维间干扰可以忽略不计<sup>[10]</sup>,所以传感器弹性体具有很好的解耦效果。

#### 2.4 模态分析

使用与静态分析相同的约束条件对弹性体有限元模型进行模态分析,频率阶数选择 6 阶,运行分析得到弹性体固有频率与振型,其前 6 阶固有频率见表 3。

表 3 弹性体固有频率

阶数	1	2	3	4	5	6
固有频率 (Hz)	8793.5	8809.3	13220	27562	27572	33292

与弹性体固有频率相对应的振型如下:一阶振型为沿  $Y$  轴平动;二阶振型为沿  $X$  轴平动;三阶振型为沿  $Z$  向平动;四阶振型为弹性梁绕  $Y$  轴的转动;五阶振型为弹性梁绕  $X$  轴的转动;六阶振型为弹性梁绕  $Z$  轴的转动。

从表 3 可以看出传感器的一阶和二阶固有频率大小相近,振型相似,仅振型方位转了 90 度;四阶和五阶

固有频率大小相近,振型相似,仅振型方位转了 90 度。传感器具有较高的一阶固有频率,机器人六维力传感器为低通型传感器,一般可以用第一阶固有频率的  $2/3$  作为其工作带宽<sup>[11]</sup>,因此该传感器的工作带宽为  $0 \sim 5862.3\text{Hz}$ ,可以满足机器人动态测力的需求。

### 3 结束语

本文给出一种新型六维力传感器结构及其工作原理,对传感器弹性体进行了有限元分析和仿真。通过仿真计算获得弹性体的变形情况、应变云图和各模态的振型,经分析得出传感器的最佳贴片部位、传感器测量灵敏度和维间干扰情况,结果表明该传感器具有较好的力解耦效果,灵敏度和固有频率高,满足四足仿生机器人足部测力的应用需求,该传感器结构及其分析方法对力传感器设计具有一定的借鉴意义。

#### [参考文献]

- [1] 姚智慧,张付祥. 机器人六维力传感器研究概况及发展预测 [J]. 广东自动化与信息工程, 2002 (2): 7 - 10.
- [2] 干方建,刘正士,任传胜,等. 一种应变式多维力传感器的优化设计 [J]. 传感器与微系统, 2007, 26 (1): 56 - 59.
- [3] 秦岗,曹效英,宋爱国,等. 新型四维腕力传感器弹性体的有限元分析 [J]. 传感技术学报, 2003, 9 (3): 238 - 241.
- [4] 王小龙,李代生,赵川梅,等. 基于有限元分析的大量程力传感器设计改进 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (1): 139 - 140.
- [5] 樊继壮,赵杰,谷柏峰,等. 三肢体机器人足部力传感器弹性体分析 [J]. 传感技术学报, 2007, 3 (3): 519 - 522.
- [6] G -S Kim, D. -I Kang, S -H. Rhee, Design and fabrication of a 6-component force/moment sensor [J], Sens Actuators, 1999, 77: 209 - 220.
- [7] Rebecca M. Walter, David R. Carrier, Ground forces applied by galloping dogs [J], J. Exp. Biol, 2006, 210: 208 - 216.
- [8] 干方建,刘正士,任传胜,等. 一种应变式六维力传感器的动态设计 [J]. 中国机械工程, 2007, 18 (8): 967 - 970.
- [9] 张付祥. 仿人行走机器人脚部六维力传感器研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2002.
- [10] 曹效英,秦岗,宋爱国,等. ANSYS在腕力传感器结构设计中的应用 [J]. 传感技术学报, 2005, 6 (2): 414 - 417.
- [11] 刘正士,陆益民,陈晓东,等. 一种机器人多轴腕力传感器弹性体有限元分析 [J]. 机械设计, 1998, 12 (12): 12 - 14.

(编辑 赵蓉)