

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905831

冗余正交式六维力感知机构性能分析与实验研究*

姚建涛^{1,2}, 阮豪奇¹, 蔡大军¹, 单俊云¹, 赵永生^{1,2}

(1. 燕山大学 河北省并联机器人与机电系统实验室 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室 秦皇岛 066004)

摘要:基于冗余容错和测量重构的思想,提出了一种具有可重构测量模型的冗余正交式并联六维力感知机构,并进行了相关理论分析及实验研究。利用柔度矩阵理论建立了机构的刚度模型,通过仿真验证了建模方法的正确性。最后,对设计的力感知机构进行了样机研制,搭建了标定实验平台,对样机进行了重构实验。针对不同维度力选择不同测量分支组合的测量模型进行测量,实验结果表明,在五维力和三维力的测量模型重构后,测量精度分别提高了1.29%和3.19%。实现了测量模型重构的多维力感知机构面向不同测量任务的多维力测量,为冗余六维力感知机构的研究提供了理论依据及实验基础。

关键词:冗余正交;六维力感知;柔性并联机构;刚度建模;重构实验

中图分类号: TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Performance analysis and experiment study of redundant orthogonal six-dimensional force sensing mechanism

Yao Jiantao^{1,2}, Ruan Haoqi¹, Cai Dajun¹, Shan Junyun¹, Zhao Yongsheng^{1,2}

(1. Parallel Robot and Mechatronic System Laboratory of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science, Ministry of Education of China, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Based on the idea of redundant fault tolerance and measurement reconstruction, this paper proposes a redundant orthogonal parallel six-dimensional force sensing mechanism with reconfigurable measurement model, and carries out related theoretical analysis and experiment research. The flexibility matrix theory is used to establish the stiffness model of the mechanism, and the correctness of the modeling method is verified through simulation. The prototype of the designed force sensing mechanism was developed, the calibration test bench was built, and the reconfiguration experiments on the measurement model were conducted, in which different measurement branch combination was selected according to different dimensional forces. The experiment results show that after the reconfiguration of the measurement model of five-dimensional force and three-dimensional force, the measurement accuracy increases by 1.29% and 3.19%, respectively. The multi-dimensional force sensing mechanism with reconfigurable measurement model realizes the multi-dimensional force measurement facing to different measurement tasks, which provides theoretical and experiment bases for the study of redundant six-dimensional force sensing mechanism.

Keywords: redundant orthogonality; six-dimensional force sensing; flexible parallel mechanism; stiffness modeling; reconfiguration experiment.

0 引言

息的特点,被广泛应用在航空航天^[1]、汽车性能测试^[2]、工业智能机器人^[3-5]、机器人动力学控制^[6]、柔性力感知技术^[7]以及风洞试验^[8]等领域。其中测量系统的精度、稳定性和自适应性是重中之重。近年来,能够满足多任

六维力传感器以其能够精确测量空间力与力矩的信

收稿日期: 2019-11-20 Received Date: 2019-11-20

* 基金项目: 国家自然科学基金(51675459)、河北省科技计划国际科技合作基地建设专项(19391825D)、河北省自然科学基金京津冀合作专项(E2017203387)、河北省高校百名优秀创新人才支持计划(SLRC2019039)资助

务或同一任务不同阶段的个性要求、实现高精度六分力或多分力测量的多维力感知技术,在上述领域的力测控应用中起着十分关键的作用。在这些应用中,希望力测量系统能根据具体任务要求满足不同的个性指标,包括不同任务阶段的精度指标和测量维数等,这就需要测量系统能根据任务特点实现测量模型重构,提供可满足工作过程中不同任务个性指标需求的测量能力。

通过调研分析、研究发现,经典一体式力感知机构常见于六维力传感器商业产品中,其解算算法复杂,且解算模式通过贴片方式唯一确定^[9-11],其设计也未从重构测量角度考虑,所设计产品测量模型单一,并不具备面向不同测量任务需求的自适应性。而基于并联式力感知机构依靠机构力学映射关系解耦,结构紧凑,解算简单,越来越多地应用于研究及实践中^[12-13]。但由并联机构受力特性可知,目前所采用的力感知机构多为静定结构,为单一模型的最简测量结构,无法针对测量任务进行自适应重构模型测量,针对超静定结构^[14]的测量模型的研究较少。

本文基于容错和可重构测量思想,设计了一种8分支4-4冗余正交构型的六维力感知机构,并对该构型进行刚度建模与仿真分析。研制了传感器样机,搭建了标定实验平台并对其进行了重构实验。增加冗余分支可提高承载能力,并使得测量信息量更趋丰富,可实现容错与重构测量功能。针对测量任务不同的维数,冗余并联力感知机构可通过选取不同组合检测分支的受力与被测外载间的映射关系,得到多个具有不同受力映射特性的测量模型,进而满足不同任务阶段的不同维数和精度的测量要求。

1 冗余正交式六维力感知机构测量原理

以 n -SS 并联结构为研究对象,施加在受力平台上的六维外力与测量分支所受力之间具有确定的映射关系。

$$\mathbf{F} = \mathbf{G}\mathbf{f} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{G}$ 为力映射矩阵,由螺旋理论可得:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{S}_2 & \mathbf{S}_3 & \cdots & \mathbf{S}_{n-1} & \mathbf{S}_n \\ \mathbf{S}_{01} & \mathbf{S}_{02} & \mathbf{S}_{03} & \cdots & \mathbf{S}_{0(n-1)} & \mathbf{S}_{0n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{S}_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 个分支轴向上的单位方向矢量, $\mathbf{S}_{0i} (i=1, 2, \dots, n)$ 表示矢量 $\mathbf{S}_i$ 对原点的线距。

本文设计的冗余正交式六维力感知机构可以分为刚度解耦部分与测量部分,8分支SS弹性连杆组成正交4-4构型为刚度解耦部分,弹性连杆两端均为柔性球铰。弹性连杆的结构直接影响其刚度解耦性能,并起到二力杆的作用,因其仅传递轴向力,从而保证悬臂梁只受到所测量力分量的作用,以达到刚度解耦的目的。连接各弹性连杆的检测分支为测量部分,检测分支为悬臂梁结构。如图1和2所示,检测分支分别为竖向布置的测力梁a

和横向布置的测力梁b,测力梁一端连接定平台,另一端连接弹性连杆。弹性连杆连接受力平台,1~4号弹性连杆水平分布在 xoy 平面上,5~8号弹性连杆竖直分布。

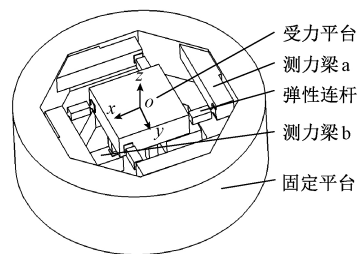


图1 冗余正交式六维力感知机构构型

Fig.1 The redundant orthogonal six-dimensional force sensing mechanism configuration

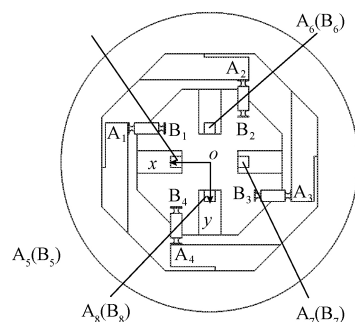


图2 冗余正交式六维力感知机构俯视图

Fig.2 Top view of the redundant orthogonal six-dimensional force sensing mechanism

2 刚度性能分析与仿真验证

采用结构矩阵分析法对冗余正交式六维力感知机构的8分支弹性连杆并联部分(不包含测力梁)进行刚度建模。

2.1 弹性连杆刚度建模

如图3所示,弹性分支由两个柔性球铰和中间的方梁组成,三者均为基本柔性单元。弹性分支左端固定,当弹性分支受到六维外力 $\mathbf{F}$ 作用时,串联在弹性分支中的各个基本柔性单元均会受到对应的载荷 $\mathbf{F}_j = [f_{x_j}, f_{y_j}, f_{z_j}, m_{x_j}, m_{y_j}, m_{z_j}]^T (j=1, 2, 3)$,在该载荷作用下,各基本柔性单元会产生对应空间变形 $\mathbf{X}_j = [\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j, \Delta \alpha_j, \Delta \beta_j, \Delta \gamma_j]^T (j=1, 2, 3)$,由第 j 个基本柔性单元变形引起的弹性分支末端的变形用 $\Delta \mathbf{X}_j$ 表示。根据虚功原理可得:

$$\Delta \mathbf{X}_j = \mathbf{J}_j \mathbf{X}_j \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_j = \mathbf{J}_j^T \mathbf{F} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{J}_j$ 为由第 j 个基本柔性单元末端的局部坐标系

$\{O_j\}$ 到弹性分支末端参考坐标系 $\{O_p\}$ 的位姿变换矩阵,其可由下式表示。

$$J_j = \begin{bmatrix} {}^0_{O_j}\mathbf{R} & \mathbf{S}(\mathbf{r}_j) {}^0_{O_j}\mathbf{R} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}^0_{O_j}\mathbf{R} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: ${}^0_{O_j}\mathbf{R}$ 为第 j 个基本柔性单元末端局部坐标系 $\{O_j\}$ 在弹性分支末端参考坐标系 $\{O_p\}$ 下的方位描述矩阵; $\mathbf{r}_j$ 为第 j 个基本柔性单元末端局部坐标系 $\{O_j\}$ 原点在参考坐标系 $\{O_p\}$ 下的位置描述矢量; $\mathbf{S}(\ast)$ 为反对称算子矩阵,其表达式为:

$$\mathbf{S}(\mathbf{r}_j) = \begin{bmatrix} 0 & -r_{yj} & r_{xj} \\ r_{yj} & 0 & -r_{xj} \\ -r_{xj} & r_{xj} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

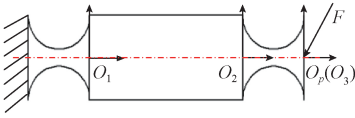


图3 弹性连杆

Fig.3 Simplified diagram of elastic linking rod

根据变形叠加原理,综合式(3)可知,弹性分支末端总变形 $\mathbf{X}$ 可由分支中各基本柔性单元变形 $\mathbf{X}_j$ 叠加得到。

$$\mathbf{X} = \sum_{j=1}^3 \Delta \mathbf{X}_j = \sum_{j=1}^3 J_j \mathbf{X}_j \quad (7)$$

用柔度矩阵的形式来表示弹性分支末端变形与外力的关系。

$$\mathbf{X} = \mathbf{C}_i \mathbf{F} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{C}_i$ 为第 i 个弹性分支在其末端参考坐标系 $\{O_p\}$ 下的柔度矩阵。

联立式(7)和(8),再将式(4)代入可整理可得:

$$\mathbf{X} = \mathbf{C}_i \mathbf{F} = \sum_{j=1}^3 J_j \mathbf{X}_j = \sum_{j=1}^3 J_j \mathbf{C}_j \mathbf{F}_j = \sum_{j=1}^3 J_j \mathbf{C}_j J_j^T \mathbf{F} \quad (9)$$

其中, $\mathbf{C}_j$ 为弹性分支中第 j 个基本柔性单元的柔度矩阵。 $\mathbf{C}_1$ 和 $\mathbf{C}_3$ 均为柔性球铰的柔度矩阵^[15]; $\mathbf{C}_2$ 为方梁的柔度矩阵,由于柔性梁单元为短粗梁,故采用铁木辛柯梁模型^[16]进行建模。

则由式(9)可得弹性分支在其末端参考坐标系下的柔度矩阵表达式为:

$$\mathbf{C}_i = \sum_{j=1}^3 J_j \mathbf{C}_j J_j^T = \mathbf{J} \mathbf{C}^* \mathbf{J}^T \quad (10)$$

式中: $\mathbf{C}^*$ 为各基本柔性单元柔度矩阵组成的对角阵 $\mathbf{C}^* = \text{diag}[\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_3]_{18 \times 18}$; $\mathbf{J}$ 由各基本柔性单元的位姿变换矩阵组成 $\mathbf{J} = [\mathbf{J}_1 \mathbf{J}_2 \mathbf{J}_3]_{6 \times 18}$ 。

2.2 整体刚度建模

图4所示为冗余正交式六维力感知机构建模部分坐标系,由动平台与8个弹性分支组成,将弹性分支与测力梁连接面设为固定端。在动平台中心建立参考坐标系

$\{O\}$,在各分支末端建立局部坐标系 $\{O_i\}$ ($i=1,2,\dots,8$),这里的 $\{O_i\}$ 即为上节中的 $\{O_p\}$,用 $\mathbf{K}_i = \mathbf{C}_i^{-1} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ ($i=1,2,\dots,8$)表示各分支的刚度矩阵,机构整体的刚度矩阵用 $\mathbf{K}$ 表示,这里假设动平台为刚体,在受力时不产生变形,六维外力 $\mathbf{F}$ 施加在动平台中心,即参考坐标系 $\{O\}$ 的原点,设 $\mathbf{X}$ 为动平台在外力作用下产生的六维空间位移,则有:

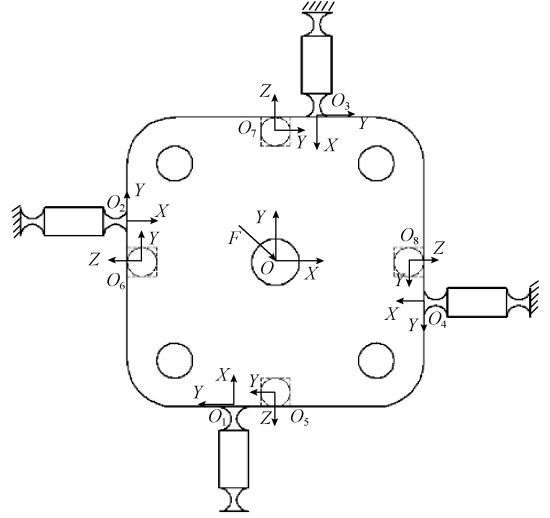


图4 建模坐标系

Fig.4 The modeling coordinate system

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{X} \quad (11)$$

此时,动平台在外力作用下产生的六维空间位移 $\mathbf{X}$ 是由所有分支的末端变形共同决定的。根据动平台和各分支间存在着并联关系的几何相容条件,可得动平台空间位移 $\mathbf{X}$ 和各弹性分支末端变形 $\mathbf{X}_i$ 之间的关系:

$$\mathbf{X} = J_i \mathbf{X}_i = J_1 \mathbf{X}_1 = J_2 \mathbf{X}_2 = \dots = J_8 \mathbf{X}_8 \quad (i=1,2,\dots,8) \quad (12)$$

式中: J_i 为第 i 个弹性分支末端局部坐标系 $\{O_i\}$ 到动平台参考坐标系 $\{O\}$ 的位姿变换矩阵。

$$J_i = \begin{bmatrix} {}^0_{O_i}\mathbf{R} & \mathbf{S}(\mathbf{r}_i) {}^0_{O_i}\mathbf{R} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & {}^0_{O_i}\mathbf{R} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{r}_i = [r_{xi}, r_{yi}, r_{zi}]^T$ ($i=1,2,\dots,8$)为各分支末端局部坐标系 $\{O_i\}$ 原点在动平台参考坐标系 $\{O\}$ 下的位置描述矢量。

又根据静力平衡条件,在六维外力 $\mathbf{F}$ 作用下,各分支受力与外力相平衡,设第 i 个分支末端受力为 $\mathbf{F}_i$,则其关系可由下式表示:

$$\mathbf{F} = \sum_{i=1}^8 J_{F_i} \mathbf{F}_i = \sum_{i=1}^8 J_{F_i} \mathbf{K}_i \mathbf{X}_i \quad (14)$$

其中, J_{F_i} 为局部坐标系 $\{O_i\}$ 下分支末端受力 $\mathbf{F}_i$ 到参考坐标系 $\{O\}$ 下外力 $\mathbf{F}$ 的关系矩阵,其表示为:

$$J_{F_i} = \begin{bmatrix} {}^0R & O_{3 \times 3} \\ S(r_i) {}^0R & {}^0R \end{bmatrix} = J_i^{-T} \quad (15)$$

将式(12)、(14)代入式(11),可得:

$$F = KX = \sum_{i=1}^8 J_{F_i} F_i = \sum_{i=1}^8 J_{F_i} K_i X_i = \sum_{i=1}^8 J_{F_i} K_i J_i^{-1} X \quad (16)$$

由式(16)可提取得到机构整体刚度矩阵为:

$$K = \sum_{i=1}^8 J_{F_i} K_i J_i^{-1} = \sum_{i=1}^8 J_{F_i} K_i J_{F_i}^T = J_F^* K^* J_F^{*T} \quad (17)$$

其中: $J_F^* = [J_1^{-T} J_2^{-T} \cdots J_8^{-T}]_{6 \times 48}$, $K^* =$

$\text{diag}[K_1, K_2, \cdots, K_8]_{48 \times 48}$

2.3 仿真验证

刚度模型仿真验证如图5所示。在仿真过程中,依

次施加外力 $F_x = 100 \text{ N}$, $F_z = 100 \text{ N}$, $M_x = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_z = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$ (由于机构对称, y 方向与 x 方向结果一致), 测量动平台的位移量。

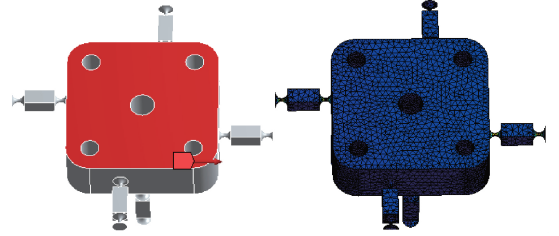


图5 刚度模型仿真验证

Fig.5 Simulation verification of stiffness model

由式(17)计算得到机构刚度矩阵 K 为:

$$K = \begin{bmatrix} 7.5898 \times 10^7 & 0 & 0 & 0 & -4.9170 \times 10^3 & 0 \\ 0 & 7.5898 \times 10^7 & 0 & 4.9170 \times 10^3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.5120 \times 10^8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.9170 \times 10^3 & 0 & 3.8485 \times 10^4 & 0 & 0 \\ -4.9170 \times 10^3 & 0 & 0 & 0 & 3.8485 \times 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7.9134 \times 10^3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

由式(11)可得:

$$X = CF \quad (19)$$

其中, $C = K^{-1}$ 为整体柔度矩阵。

依次给定外力 $F_x = 100 \text{ N}$, $F_z = 100 \text{ N}$, $M_x = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_z = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 代入式(19)可计算的动平台对应的位移量。

将仿真值与计算值进行对比, 二者对比结果如表1所示。 D_x 与 D_z 分别表示沿 x 轴与 z 轴方向的位移量, R_x 与 R_z 分别表示绕 x 轴和绕 z 轴转过的角度。

表1 建模计算与仿真结果对比

Table 1 Comparison of modeling calculation and simulation result

外力	变形方向	理论值	仿真值	误差值/%
F_x	D_x/mm	1.3188×10^{-6}	1.4225×10^{-6}	7.29
F_z	D_z/mm	6.6138×10^{-7}	7.2578×10^{-7}	8.87
M_x	R_x/rad	1.2992×10^{-4}	1.4232×10^{-4}	8.71
M_z	R_z/rad	6.3184×10^{-4}	6.8142×10^{-4}	7.28

由表1可知整体建模误差在9%以内, 证明该建模方法具有较高的建模精度。

3 样机标定实验

3.1 冗余正交式力感知机构标定实验

传感器样机与标定实验平台如图6所示。六维外力与各分支输出电压值得映射关系为:

$$[F_w]_{6 \times 6m} = [G]_{6 \times n} [U]_{n \times 6m} \quad (20)$$

式中: m 为六方向单维力分别加载的次数; $[F_w]_{6 \times 6m}$ 为受力平台上的加载力; $[G]_{6 \times n}$ 为标定矩阵; $[U]_{n \times 6m}$ 为分支输出电压值。

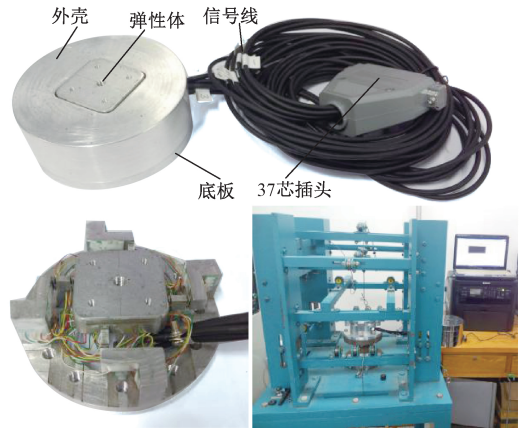


图6 冗余正交式力感知机构样机与标定实验平台
Fig.6 The prototype and calibration experiment platform of the redundant orthogonal six-dimensional force sensing mechanism

则标定矩阵为:

$$[G]_{6 \times n} = [F_w]_{6 \times 6m} ([U]_{n \times 6m}^T [U]_{n \times 6m})^{-1} [U]_{n \times 6m}^T \quad (21)$$

由式(21)计算得标定矩阵:

$$\boldsymbol{G}_{d6} = \begin{bmatrix} 5.473\ 9 & -4.014\ 8 & 3.335\ 9 & -3.410\ 0 & -3.997\ 0 & -8.157\ 3 & 1.025\ 1 & -0.040\ 3 \\ 2.811\ 4 & -1.396\ 6 & 0.543\ 4 & -0.635\ 8 & 0.466\ 3 & -3.654\ 7 & 0.996\ 7 & 1.981\ 6 \\ -2.075\ 5 & 9.387\ 5 & -10.163\ 8 & 6.183\ 5 & -17.285\ 6 & 5.491\ 0 & -11.234\ 7 & 15.285\ 8 \\ -0.094\ 8 & -0.068\ 5 & 0.123\ 9 & -0.039\ 2 & 0.094\ 0 & -0.072\ 9 & 0.060\ 4 & -0.039\ 5 \\ 0.132\ 8 & -0.127\ 9 & 0.020\ 2 & 0.023\ 6 & -0.064\ 9 & -0.106\ 6 & -0.025\ 5 & 0.015\ 0 \\ -0.024\ 5 & 0.038\ 6 & -0.011\ 2 & 0.004\ 7 & 0.073\ 2 & 0.017\ 5 & -0.052\ 8 & -0.034\ 5 \end{bmatrix}$$

(22)

将计算得到的标定矩阵 $\boldsymbol{G}$ 重新代入式(20)得到力感知机构模型对六维外力的测量值。

$$[\boldsymbol{F}_c]_{6 \times 6m} = [\boldsymbol{G}_c]_{6 \times n} [\boldsymbol{U}]_{n \times 6m}$$

(23)

将式(20)与式(23)相减得到加载力与测量值之间的差值的绝对值为:

$$\Delta \boldsymbol{F} = |\boldsymbol{F}_w - \boldsymbol{F}_c| =$$

$$[\Delta \boldsymbol{F}_x \ \Delta \boldsymbol{F}_y \ \Delta \boldsymbol{F}_z \ \Delta \boldsymbol{M}_x \ \Delta \boldsymbol{M}_y \ \Delta \boldsymbol{M}_z]$$

(24)

式中各分量力/力矩的差值的最大值与该方向满量程值的比值力感知机构的线性度,所以力 $\boldsymbol{F}_x$ 的线性误差为:

$$\xi_{d6} = \begin{bmatrix} -0.016\ 9 & 0.021\ 3 & 0.030\ 5 & -0.007\ 8 & 0.014\ 2 & 0.018\ 7 \\ -0.011\ 2 & 0.006\ 0 & 0.018\ 6 & 0.002\ 8 & 0.008\ 6 & -0.003\ 2 \\ -0.020\ 1 & -0.043\ 9 & 0.057\ 5 & 0.043\ 0 & -0.015\ 2 & 0.010\ 1 \\ 0.013\ 3 & 0.030\ 1 & -0.022\ 2 & 0.017\ 9 & -0.020\ 1 & -0.015\ 9 \\ -0.025\ 4 & 0.023\ 8 & 0.051\ 7 & 0.014\ 7 & -0.014\ 4 & 0.007\ 8 \\ 0.023\ 1 & 0.006\ 9 & -0.021\ 8 & -0.017\ 2 & -0.010\ 8 & -0.014\ 9 \end{bmatrix}$$

(27)

从式(27)中可看出,该冗余正交式六维力感知机构样机在测量空间六维力时,最大线性误差为 5.75%,最大耦合误差为 5.17%。

3.2 冗余正交式力感知机构重构测量实验

根据不同的任务,为了满足不同的测量需求,提出可重构测量系统。针对不同测量任务选择最佳重构模型可有效的提高测量精度。力和力矩存在不同阶的测量模型,即可以选用不同数量的测量分支实现对同一维度的力与力矩的重构,又可通过选用相同数量的不同测量分支对同一维度的力与力矩的重构。

传统 Stewart 平台的重构方案如表 2 所示,重构方案多而繁杂。本文的冗余正交式力感知机构在实现解耦的基础上,8 分支上对应 8 个测量元件测量对应维度的力与力矩,如图 7 所示。由此得到如表 3 所示的冗余正交式力感知机构的重构方案,更为简单快速。在面向具体任务的传感器实际测量过程中,通过选取相应的力的输出通道电压信号,利用相应的力映射关系模型对其进行计算,快速实现模型重组。

这里以三维力 ($\boldsymbol{F}_x, \boldsymbol{F}_y, \boldsymbol{F}_z$)、五维力 ($\boldsymbol{F}_x, \boldsymbol{F}_y, \boldsymbol{F}_z, \boldsymbol{M}_x, \boldsymbol{M}_y$) 为例,进行重构测量实验。

由式(21)和(26)分别计算得三维力和五维力的标定矩阵($\boldsymbol{G}_{d3}$ 与 $\boldsymbol{G}_{d5}$)和误差矩阵(ξ_{d3} 与 ξ_{d5})。

$$\xi_{F_x} = \left[\frac{\max(\Delta F_{x1})}{F_{x\max}} \quad \frac{\max(\Delta F_{x2})}{F_{x\max}} \quad \frac{\max(\Delta F_{x3})}{F_{x\max}} \right.$$

$$\left. \frac{\max(\Delta F_{x4})}{F_{x\max}} \quad \frac{\max(\Delta F_{x5})}{F_{x\max}} \quad \frac{\max(\Delta F_{x6})}{F_{x\max}} \right]$$

(25)

式中: $\max(\Delta F_{xi})$ ($i = 1, 2 \cdots, 6$) 为矩阵 $\Delta \boldsymbol{F}_x$ 的第 i 行的最大值; $F_{x\max}$ 表示加载 $\boldsymbol{F}_x$ 方向外力的满量程值。由此可得力感知机构六分量的误差矩阵为:

$$\xi = [\xi_{F_x} \ \xi_{F_y} \ \xi_{F_z} \ \xi_{M_x} \ \xi_{M_y} \ \xi_{M_z}]$$

(26)

计算得误差矩阵为:

表 2 传统 Stewart 平台的重构方案

Table 2 The reconstruction scheme of traditional Stewart platform

测量模型阶数	测力分支举例	测力维度	力模型个数	阶数模型个数
2	(1,2)	2	$C_6^2 = 15$	57
3	(1,2,3)	3,2	$C_6^3 = 20$	42
4	(2,3,4,5)	4,3,2	$C_6^4 = 15$	22
5	(2,3,4,5,6)	5,4,3,2	$C_6^5 = 6$	7

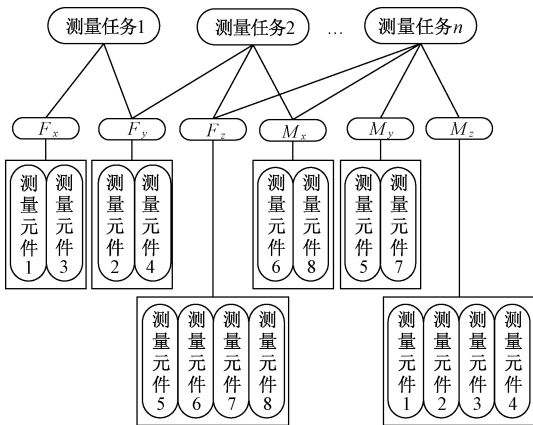


图 7 冗余正交式力感知机构可重构测量原理
Fig.7 The reconfigurable measurement principle of the redundant orthogonal force sensing mechanism

$$\boldsymbol{G}_{d3} = \begin{bmatrix} 3.296\ 9 & 1.101\ 5 & 0.606\ 8 & -3.055\ 0 & -3.015\ 3 & -3.998\ 9 & 0.116\ 7 & -0.242\ 3 \\ 0.793\ 9 & 1.309\ 3 & 0.062\ 3 & -1.092\ 3 & 2.833\ 9 & -1.454\ 5 & 0.204\ 6 & 1.094\ 9 \\ -28.307\ 2 & 10.711\ 7 & 11.923\ 96 & -2.027\ 9 & 16.539\ 2 & 1.850\ 6 & -7.279\ 4 & 0.714\ 4 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\boldsymbol{\xi}_{d3} = \begin{bmatrix} 0.008\ 8 & -0.007\ 4 & 0.005\ 8 \\ 0.005\ 4 & -0.004\ 7 & 0.002\ 9 \\ -0.016\ 6 & -0.019\ 1 & 0.025\ 6 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\boldsymbol{G}_{d5} = \begin{bmatrix} 5.120\ 9 & -1.806\ 2 & 3.134\ 0 & -2.952\ 8 & -0.032\ 5 & -7.129\ 3 & -1.921\ 5 & -2.086\ 4 \\ 2.340\ 4 & 0.116\ 6 & 0.280\ 8 & -0.502\ 4 & 3.277\ 7 & -2.850\ 9 & -1.105\ 5 & 0.607\ 2 \\ -4.365\ 1 & 18.803\ 5 & -11.550\ 0 & 7.047\ 8 & 0.080\ 7 & 10.590\ 0 & -24.300\ 5 & 6.712\ 0 \\ -0.103\ 8 & -0.067\ 2 & 0.120\ 1 & -0.040\ 7 & 0.098\ 4 & -0.072\ 4 & 0.057\ 9 & -0.040\ 1 \\ 0.112\ 9 & -0.059\ 8 & 0.009\ 1 & 0.030\ 7 & 0.061\ 0 & -0.070\ 9 & -0.119\ 6 & -0.047\ 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\boldsymbol{\xi}_{d5} = \begin{bmatrix} -0.010\ 4 & 0.025\ 4 & 0.019\ 1 & -0.015\ 7 & -0.008\ 2 \\ -0.006\ 7 & 0.008\ 6 & 0.011\ 5 & -0.006\ 7 & 0.003\ 7 \\ -0.021\ 5 & -0.036\ 0 & 0.044\ 6 & 0.021\ 5 & -0.030\ 3 \\ 0.012\ 7 & 0.029\ 8 & -0.021\ 6 & 0.017\ 7 & -0.019\ 8 \\ -0.016\ 2 & 0.030\ 7 & 0.032\ 1 & 0.012\ 0 & -0.012\ 2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

表 3 冗余正交式力感知机构不同维度测量模型
Table 3 Different dimension measurement model of the
redundant orthogonal force sensing mechanism

测力维度	力模型个数	测量模型阶数
1	$C_6^1 = 6$	2,4
2	$C_6^2 = 15$	4,6,8
3	$C_6^3 = 20$	4,6,8
4	$C_6^4 = 15$	6,8
5	$C_6^5 = 6$	8
6	1	8

观察式(27)、(29)和(31),每个矩阵的对角线元素为对应主方向最大非线性误差,分别如表 4 所示。每个矩阵的非对角线元素为耦合误差,每个矩阵各自取耦合误差最大项列于表 4 最后 1 列。

表 4 重构测量模型误差分析结果
Table 4 The error analysis result of the reconstruction
measurement model (%)

力	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z	最大耦合 误差
六维力	1.69	0.6	5.75	1.79	1.44	1.49	5.17
五维力	1.04	0.86	4.46	1.77	1.22	-	3.60
三维力	0.88	0.47	2.56	-	-	-	1.91

由表 4 分析可知,重构前测量模型最大非线性误差

为 5.75%,针对五维力和三维力分别重构后,最大非线性误差分别为 4.46% 和 2.56%,误差分别降低了 1.29%和 3.19%。对冗余正交式六维力感知机构进行测量模型重构后,其最大耦合误差减小,且随着测力维数减小,六维力、五维力及三维力 3 种情况下对应的力 F_x 、 F_y 、 F_z 的线性误差基本程递减的趋势,而五维力与六维力相比,力矩 M_x 、 M_y 线性误差相对减小,说明该冗余正交式六维力感知机构进行测量模型重构后的误差具有不大于六维力测量情况下的误差。在保证测量精度的同时,该冗余正交式六维力感知机构实现了针对具体任务的重构测量。

4 结 论

本文基于容错和重构思想设计了一种冗余正交式的六维力感知机构。利用柔度矩阵理论对机构进行了刚度建模,最后完成了样机研制,并对样机进行了重构的标定实验研究,计算得到了标定矩阵和误差矩阵,测量六维力时,非线性误差不大于 5.75%,耦合误差不大于 5.17%;使用重构模型测量五维力时,非线性误差不大于 4.46%,耦合误差不大于 3.60%;使用重构模型测量三维力时,非线性误差不大于 2.56%,耦合误差不大于 1.91%,实现了测量模型重构的冗余并联多维力感知机构作为测量结构本体面向自适应测量任务的六维或多维力检测。

参考文献

- [1] 高理富,宋宁,葛运建,等. 航天机器人用六维腕力传感器动态特性研究[J]. 机器人, 2002, 24(4): 319-323.
GAO L F, SONG N, GE Y J, et al. Research on dynamic characteristics of six-axis force sensor for aeronautic robot[J]. Robot, 2002, 24(4):319-323.
- [2] 冯李航,王东,徐扬,等. 运动-力解耦的多维轮力传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5):1240-1248.
FENG L H, WANG D, XU Y, et al. Motion-force decoupling wheel force transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5):1240-1248.
- [3] 刘运毅,黎相成,黄约,等. 基于极大似然估计的工业机器人腕部 6 维力传感器在线标定[J]. 机器人, 2019, 41(2):216-221.
LIU Y Y, LI X CH, HUANG Y, et al. Online calibration for the 6-axis force sensor in the wrist of industrial robot based on maximum likelihood estimation[J]. Robot, 2019, 41(2):216-221.
- [4] FRIEDRICH C, KAUSCHINGER B, IHLENFELDT S. Decentralized structure-integrated spatial force measurement in machine tools[J]. Mechatronics, 2016, 40: 17-27.
- [5] ZHANG ZH J, CHEN Y P, ZHANG D L, et al. A six-dimensional traction force sensor used for human-robot collaboration[J]. Mechatronics, 2019, 57: 164-172.
- [6] ABDUL-WAHED A M, MAHMOUD M A E. Vibratory ring six-axis motion sensor [J]. Microsystem Technologies-Micro-and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems, 2015, 21(10): 2133-2144.
- [7] 姚建涛,陈俊涛,陈新博,等. 可嵌入式多维柔性力/位传感[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10):184-192.
YAO J T, CHEN J T, CHEN X B, et al. Embedded flexible multi-dimensional displacement and force sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10):184-192.
- [8] TAVAKOLPOUR-SALEH A R, SETOOODEH A R, GHOLAMZADEH M. A novel multi-component strain-gauge external balance for wind tunnel tests: Simulation and experiment[J]. Sensors and Actuators: A. Physical, 2016, 247:172-186.
- [9] AKBARI H, KAZEROONI A. Improving the coupling errors of a Maltese cross-beams type six-axis force/moment sensor using numerical shape-optimization technique[J]. Measurement, 2018, 126: 342-355.
- [10] 陈望隆,杨述焱,胡权,等. 面向运动学测量的无线六维力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 129-136.
CHEN W L, YANG SH Y, HU Q, et al. Wireless six-dimensional force sensor for motion mechanics measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4):129-136.
- [11] 宋国民,张为公,翟羽健. 基于对角优势化补偿的传感器动态解耦研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(4): 165-167.
SONG G M, ZHANG W G, ZHAI Y J. Study of dynamic decoupling of sensor based on diagonal predominance compensation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(4):165-167.
- [12] 赵延治,焦雷浩,牛智,等. 机械解耦自标定并联六维力传感器设计及仿真[J]. 中国机械工程, 2017, 28(7):771-778.
ZHAO Y ZH, JIAO L H, NIU ZH, et al. Design and simulation of mechanical decoupling self-calibration parallel six dimensional force sensors [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(7):771-778.
- [13] 金振林,高峰,刘辛军. 新型力解耦和各向同性机器人六维力传感器[J]. 传感器技术, 2000, 19(4):26-28.
JIN ZH L, GAO F, LIU X J. Novel decoupled and isotropic 6 -axis force/ torque robot sensor[J]. Journal of Transducer Technology, 2000, 19(4):26-28.
- [14] YAO J T, WANG D L, CAI D J, et al. Fault-tolerant strategy and experimental study on compliance assembly of a redundant parallel six-component force sensor[J]. Sensor and Actuators A: Physical, 2018, 272:114-124.
- [15] 姚建涛,李立建,杨维,等. 直圆柔性球铰柔度矩阵的解析计算[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1857-1863.
YAO J T, LI L J, YANG W, et al. Analytical calculation of compliance matrix for right-circular flexure spherical hinge[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(7):1857-1863.
- [16] 杜柏松,项海帆,葛耀君,等. 剪切效应梁单元刚度和质量矩阵的推导及应用[J]. 重庆交通大学学报, 2008, 27(4):502-507.
DU B S, XIANG H F, GE Y J, et al. Derivation and application of 3D-beam's element stiffness and mass

matrix with shear effect [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2008, 27(4):502-507.

作者简介



姚建涛, 分别在 2004 年和 2009 年于燕山大学获得学士学位和博士学位, 现为燕山大学教授、博士生导师, 主要研究方向为并联机器人及柔性力感知技术及应用。

E-mail: jtyao@ysu.edu.cn

Yao Jiantao received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Yanshan University in 2004 and 2009, respectively. He is currently a professor and Ph. D. supervisor at Yanshan University. His main research interests include parallel robot, and flexible force sensing technology and application.



赵永生, 分别在 1983 年和 1987 年于东北重型机械学院获得学士和硕士学位, 1999 年于燕山大学获得博士学位, 现为燕山大学教授、博士生导师, 主要研究方向为并联机构理论及应用、数控技术等。

E-mail: yszhao@ysu.edu.cn

Zhao Yongsheng received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Northeast Heavy Machinery Institute in 1983 and 1987, respectively, received Ph. D. degree from Yanshan University in 1999. He is currently a professor and Ph. D. supervisor at Yanshan University. His main research interests include parallel mechanism theory and its application, numerical control technique and etc.