



文章编号: 1003-8728(2006)03-0268-05

## 六自由度绳索悬挂式并联机器人工作空间和鲁棒性研究

庄 鹏<sup>1,2</sup>, 姚正秋<sup>1</sup>

庄 鹏

(<sup>1</sup>中国科学院 国家天文台 南京天文光学技术研究所, 南京 210042;

<sup>2</sup>中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘 要:**六自由度绳索悬挂式并联机器人在机械加工、物料搬运和抢险救灾等方面具有广阔的应用前景。工作空间和抗外力扰动鲁棒性是这类欠约束绳索机器人的两项重要性能指标。在绳索长度、动平台尺寸和雅可比矩阵条件数等约束下, 本文研究了工作空间的体积和基于运动旋量斜率的鲁棒性与动、定平台几何构型、半径比及动平台姿态之间的关系, 首次得出了工作空间的形状及其变化规律。研究结论对这类机器人的设计和使用都具有较高的参考价值。

**关 键 词:**绳索悬挂式并联机器人; 工作空间; 鲁棒性; 运动旋量; 力旋量

中图分类号: TP24

文献标识码: A

### Workspace and Robustness Study of Six Degree-of-freedom Cable-suspended Parallel Robots

Zhuang Peng<sup>1,2</sup>, Yao Zhengqiu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology,

Chinese National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042;

<sup>2</sup>Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** Cable-suspended parallel robots with six degrees of freedom have wide applications in areas such as machining, material handling, rescue and cleanup of disaster sites. Workspace and disturbance robustness are two important performance indexes for the underconstrained cable robots. Under the constraints of cable length, dimension of moving platform and condition numbers of Jacobian matrix, the variations of workspace volume and twist-based slope robustness versus geometric configurations, ratios and orientations of platforms were studied in this paper. The shape of workspace and its variation rules were also developed for the first time. The research conclusions will be of great value in the design and operation of robots.

**Key words:** cable-suspended parallel robot; workspace; robustness; twist; wrench

80年代末期美国国家标准技术研究所首次研制成功第一台由绳索驱动的并联机器人<sup>[1]</sup>, 由于这类机器人具有工作空间大、惯性小、结构简单、拆装容易及有效载荷与自重比高等优点, 在近年来备受关注。目前的研究工作主要集中在运动学和动力学的分析以及控制系统的设计等, 并且已试制样机成功地应用于焊接、切削、磨削、装配、喷漆、桥梁建筑、核废料处理、货物装卸及海底打捞等, 尽管许多工作仍然处于实验阶段, 但是可以预见绳索机器人具有广阔的应用前景。

由于绳索只能受拉而不能受压, 根据力封闭原理, 如果工作空间维数为  $n$ , 那么需要  $n+1$  条绳索才能完全控制动平台的位姿<sup>[2]</sup>, 称这类型的绳索机器人为完全约束型。

收稿日期: 2005-03-25

基金项目: 大天区面积多目标光谱望远镜 (LAMOST) 国家大科学工程项目资助

作者简介: 庄 鹏 (1968-), 男 (汉), 福建, 工程师, 博士研究生

Email: pzhuang@mail.niaot.ac.cn

这类机器人由于采用较多的绳索, 绳索之间或者绳索与周围环境之间产生干涉的可能性较大, 在实际应用中受到限制, 因此目前的许多应用场合多采用欠约束绳索机器人<sup>[3]</sup>, 即工作空间的维数和驱动绳索的数目均为  $n$ , 机器人在  $n$  维工作空间中的位姿必须依靠动平台的重力和  $n$  根驱动绳索才能完全确定。这类机器人由于使用较少数量的绳索, 因而产生干涉的可能性较小、适用范围广、结构简单、控制方便, 但抵抗外力扰动的能力 (以下称鲁棒性) 较差, 适用于低速运动的机械, 尽管如此, 欠约束绳索机器人在实际应用中仍然具有更大的优越性。

目前我国对欠约束绳索机器人的研究主要是针对“大射电望远镜 fast 的悬索式馈源支撑系统<sup>[4]</sup>”进行的, 研究工作主要集中在运动学、控制<sup>[5]</sup>、奇异性<sup>[6]</sup>以及解空间的存在条件<sup>[7]</sup>等方面。

由 6 根绳索驱动、具有 6 个可控自由度的空间绳索机器人 (以下简称 6-6 机器人) 具有广阔的应用前景<sup>[8,9]</sup>, 由于工作空间和鲁棒性是这类机器人最重要的性能指标, 而

目前对这两方面特别是后者的研究极少,因此本文将深入研究 6-6 机器人的尺寸、结构和位姿对工作空间和鲁棒性的影响,从而为优化设计奠定基础。

Jason Pusey 等人<sup>[10]</sup>研究了 6-6 机器人的工作空间体积和灵巧度与平台的构型和尺寸之间的关系,但未考虑机器人奇异形位、绳索长度以及动平台尺寸的约束,与实际情况不相符合,而且未进行工作空间形状的研究。本文将更加完整地考虑实际因素对工作空间的影响,深入研究工作空间形状的变化规律,此外还利用刚体运动学原理简洁地推导出雅可比矩阵。

Paul Bosscher<sup>[11]</sup>首先提出了一种基于斜度的欠约束绳索机器人的鲁棒性度量方法,并将此法应用于平面绳索机器人的鲁棒性计算,但将鲁棒性定义为约束表面的斜率有所不妥,而且未能阐明修正雅可比矩阵的物理意义。本文将鲁棒性定义为运动旋量的斜率,并把这种新颖的方法推广应用于 6-6 机器人的鲁棒性分析。

1 运动学模型

6-6 机器人的构型如图 1 所示。动平台通过 6 根绳索悬挂于定平台之下,在定平台和动平台的中心分别建立坐标系 {B} 和 {P}, 定平台与绳索的连接点  $b_i (i = 1, 2, \dots, 6)$  相对于坐标系 {B} 原点的位置矢量为  ${}^B b_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ ; 动平台与绳索的连接点  $p_i (i = 1, 2, \dots, 6)$  相对于坐标系 {P} 原点的位置矢量为  ${}^P p_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 。 ${}^B T_P$  为坐标系 {P} 的原点相对于坐标系 {B} 的原点的位置矢量,  ${}^B R_P$  为动平台相对于定平台的旋转矩阵。本文采用 RPY 旋转顺序,即先绕 Z 轴转动  $\alpha$  角,再绕新的 Y 轴(Y 轴)转动  $\beta$  角,最后绕新的 X 轴(X 轴)转动  $\gamma$  角,以此表示动平台的所有姿态。如图 2 所示,  $p_i$  点相对于  $b_i$  点的位置矢量在坐标系 {B} 中表示为

$$L_i = {}^B T_P + {}^B R_P {}^P p_i - {}^B b_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \tag{1}$$

绳索的长度为

$$L_i = |L_i| = \sqrt{({}^B T_P + {}^B R_P {}^P p_i - {}^B b_i)^T ({}^B T_P + {}^B R_P {}^P p_i - {}^B b_i)} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \tag{2}$$

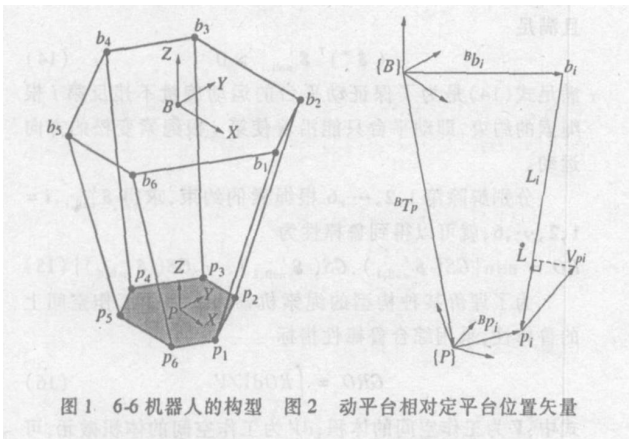


图 1 6-6 机器人的构型 图 2 动平台相对定平台位置矢量

这就是 6-6 绳索机器人位姿反解的显式表达式。因

此,给定动平台的位姿 ( ${}^B T_P, {}^B R_P$ ) 就可以分别求得 6 根绳索的长度。

对矢量表达式 (1) 全微分或者利用虚功原理<sup>[12]</sup>, 可以求得绳索牵引速度  $\dot{L}$  与动平台运动旋量  $t$  之间的关系,从而求得绳索机器人的雅可比矩阵。但这两种方法计算都比较繁琐,事实上利用刚体运动学原理可以简洁地推导出雅可比矩阵。

设  $u_i$  是第  $i$  根绳索的单位矢量,即  $u_i = L_i / |L_i|$ 。若已知动平台的运动旋量  $t = (v, \omega)^T$ , 其中  $v$  为动平台的平动线速度,  $\omega$  为动平台的转动角速度,则动平台上  $p_i$  点的速度为

$$v_{pi} = v + \omega \times p_i \tag{3}$$

其中

$${}^B p_i = {}^B R_P \cdot {}^P p_i$$

绳索  $i$  的牵引速度的大小为

$$\dot{L}_i = u_i \cdot v_{pi} = u_i \cdot v + u_i \cdot (\omega \times p_i) \tag{4}$$

由矢量的混合积公式可知

$$u_i (\omega \times p_i) = ({}^B p_i \times u_i) \cdot \omega$$

代入式 (4) 可得

$$\dot{L}_i = u_i \cdot v + ({}^B p_i \times u_i) \cdot \omega \tag{5}$$

把第 1, 2, ..., 6 根绳索的牵引速度写成矩阵的形式

$$\dot{L} = J t \tag{6}$$

式中:  $\dot{L}$  为 6 根绳索的牵引速度矩阵,  $\dot{L} = (\dot{L}_1, \dot{L}_2, \dots, \dot{L}_6)^T$ ;  $J$  为绳索机器人的雅可比矩阵,  $J = ({}^s_1, \dots, {}^s_6, \dots, {}^s_6)^T$ ;  ${}^s_i = (u_i, {}^B p_i \times u_i)$ ,  ${}^s_i$  为沿着第  $i$  根绳索的力旋量。

2 工作空间的分析

如果动平台所受的外力旋量为  $W = (F, M)^T$ , 各条绳索张力的大小为  $s_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ , 则动平台的静力平衡方程为

$$\begin{cases} s_i \cdot u_i + F = 0 \\ {}^B p_i \times (s_i \cdot u_i) + M = 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \tag{7}$$

写成矩阵的形式

$$\begin{bmatrix} u_1 & u_2 & \dots & u_6 \\ {}^B p_1 \times u_1 & {}^B p_2 \times u_2 & \dots & {}^B p_6 \times u_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F \\ M \end{bmatrix} = 0$$

即

$$J^T \cdot S + W = 0$$

由此可得

$$S = - (J^T)^{-1} \cdot W \tag{8}$$

如果考虑动平台仅受重力的情形, 则

$$W = (0, 0, -mg, 0, 0, 0)^T$$

Jason Pusey<sup>[10]</sup>将工作空间定义为: 当各条驱动绳索的

张力均大于 0 时,动平台的质心所能达到的点集。因此可以利用式 (8) 求出绳索机器人对应于某一位姿时各条绳索的拉力,以此判断该位姿是否处于工作空间之内。但仅考虑这一约束条件是不够的,在进行工作空间的分析时,还应考虑如下 3 个约束条件:

(1) 绳索的最大长度。实际应用中,绳索的长度不能超过其最大长度极限。

(2) 动平台的尺寸。由于动平台必须完全位于定平台之下,如果动平台的尺寸及姿态倾角较大,将在工作空间上部与定平台发生干涉,使工作空间变小。

(3) 雅可比矩阵的条件数。雅可比矩阵条件数定量地描述了机器人运动的灵巧性。当条件数为 1 时,机构的灵巧度最高。因此在分析工作空间时,应该剔除条件数过大的位姿。

3 鲁棒性分析

由于欠约束绳索机器人的绳索不能对动平台的位姿产生完全的约束,在外力扰动下动平台就有可能偏离原来的平衡位姿。因此鲁棒性定义为:未知外力扰动使动平台偏离平衡位姿的可能性。显然具有较高鲁棒性的绳索机器人就具有较强的抵抗外力扰动的能力,鲁棒性与机器人的尺寸、结构和位姿有关。

3.1 质点平面绳索机器人的鲁棒性分析

考虑图 3 所示的动平台为质点的绳索机器人,假设绳索不可伸长且无悬链效应,那么对动平台 P 产生的约束为两虚线圆弧。

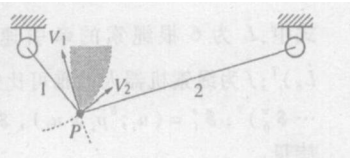


图 3 质点平面绳索机器人

$V_1$ 、 $V_2$  分别为动平台在绳索 1、2 约束下,处于平衡位置时所能产生的运动速度,它们在 P 点分别相切于两圆弧。动平台在任意外力扰动下,只能有 3 种运动情况:

(1) 沿着  $V_1$  方向运动。此时绳索 1 保持张紧状态,绳索 2 变松。

(3) 沿着  $V_2$  方向运动。此时绳索 2 保持张紧状态,绳索 1 变松。

(3) 动平台 P 运动到两虚线圆弧所包围的阴影区域。此时两条绳索均变松弛。

显然由于  $V_1$  的斜率最小,在未知外力扰动下,动平台沿  $V_1$  方向运动的可能性最大,因此其鲁棒性决定于  $V_1$  的斜率。

3.2 运动旋量广义斜率的定义

用斜率作为鲁棒性的度量具有明确的物理意义,但是为了将基于斜率的鲁棒性概念推广到动平台为一般刚体的空间绳索机器人(6-6 绳索机器人即属于这一类型),就必须在量纲不一致的工作空间中定义“运动旋量的斜率”。Paul Bosscher<sup>[11]</sup>首先提出了“过渡空间”的概念。

建立坐标系使原点与动平台质心重合,坐标轴方向与动平台的惯性主轴一致,这样量纲不一致的运动旋量  $\$ =$

$(v, \dot{\theta})^T$  就可以映射为过渡空间中量纲一致的广义速度,即

$$\tilde{V} = A \$ \tag{9}$$

式中:  $A = \text{diag}(\dot{r}^3, r_x, r_y, r_z)$ ,  $I$  为  $3 \times 3$  维单位矩阵,  $r_x$ 、 $r_y$ 、 $r_z$  分别为动平台关于惯性主轴的旋转半径。

量纲不一致的力旋量  $\$^v = (F, M)^T$  也可以映射为过渡空间中量纲一致的广义力,即

$$\tilde{F} = B \$^v \tag{10}$$

式中:  $B = A^{-1} = \text{diag}(\dot{r}^3, 1/r_x, 1/r_y, 1/r_z)$ 。

利用式 (9)、(10) 将运动旋量和重力旋量映射为过渡空间中的广义速度  $\tilde{V}$  和广义重力  $\tilde{F}_g$ , 将  $\tilde{V}$  投影到  $\tilde{F}_g$ , 如图 4 所示,从而求出

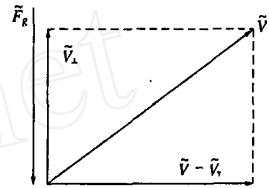


图 4 过渡空间中广义速度的分解

广义速度的垂直分量

$$\tilde{V}_\perp = \frac{\tilde{F}_g}{\|\tilde{F}_g\|^2} \cdot \tilde{F}_g \cdot \tilde{V} \tag{11}$$

这样运动旋量的广义斜率 GS 就可以定义为相应的广义速度在过渡空间中的斜率

$$GS(\$) = \frac{\tilde{V}}{\tilde{V} - \tilde{V}_\perp} \tag{12}$$

3.3 6-6 绳索机器人的鲁棒性分析

在研究 6-6 绳索机器人的工作空间时,已将奇异点和近奇异点剔除,因此雅可比矩阵 J 不存在非平凡的零空间。当动平台在外力扰动下产生偏移时,必有某根绳索的张力首先变为 0,而其余 5 根绳索仍保持张紧状态。与质点平面绳索机器人类似,假设第 i 根绳索首先变松(相当于失去第 i 根绳索的约束),此时动平台在其余 5 根绳索的约束下所允许的运动旋量为  $J_{\text{new},i}$  的零空间  $\$_{\text{null},i}^v$ , 其中

$$J_{\text{new},i} = (\$, \dots, \$_{i-1}^v, \$_{i+1}^v, \dots, \$_6^v) \tag{13}$$

且满足

$$(\$, \dots, \$_{i-1}^v, \$_{i+1}^v, \dots, \$_6^v) \$_{\text{null},i}^v > 0 \tag{14}$$

满足式 (14) 是为了保证动平台的运动旋量不违反第 i 根绳索的约束,即动平台只能沿着使第 i 根绳索变松的方向运动。

分别解除第 1, 2, ..., 6 根绳索的约束,求得  $\$_{\text{null},i}^v$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ , 就可以得到鲁棒性为

$$RO = \min\{GS(\$_{\text{null},1}^v), GS(\$_{\text{null},2}^v), \dots, GS(\$_{\text{null},6}^v)\} \tag{15}$$

为了评价某种构型的绳索机器人在整个工作空间上的鲁棒性,采用综合鲁棒性指标

$$GRO = \frac{RO dV}{V} \tag{16}$$

式中:  $V$  为工作空间的体积;  $dV$  为工作空间的体积微元,可以认为鲁棒性 RO 在  $dV$  中为常值。

4 具体构型的分析与设计

对具体构型进行分析和设计的目的是为了使绳索机器人具有最大的工作空间和最高的抗干扰鲁棒性。本文采用的分析模型如图 1 所示。动、定平台均采用对称半六边形,六边形短边对应的夹角为  $\gamma$  (对于定平台为  $b_1 B b_2$ 、 $b_3 B b_4$ 、 $b_5 B b_6$ , 对于动平台为  $p_1 P p_6$ 、 $p_2 P p_3$ 、 $p_4 P p_5$ ), 且动、定平台各自的短边和长边分别相等。动、定平台的半径 (质心到六边形顶点的距离) 分别为  $R_p$  和  $R_b$ 。当动平台处于初始位姿时, 坐标系  $\{P\}$  位于坐标系  $\{B\}$  的正下方, 两坐标系相应的坐标轴互相平行且方向一致, 动平台的短边 (长边) 平行于定平台的长边 (短边)。已知设计参数为: 定平台半径 6 m, 绳索最大长度 18 m, 雅可比矩阵的条件数小于 50。以下就绳索机器人的构型、尺寸以及位姿对工作空间和鲁棒性的影响做详细的讨论。

4.1 构型和尺寸的影响

考虑到 6-6 机器人工作时的主要姿态是动平台的平动和绕  $x$  轴和  $y$  轴的转动, 为了更加全面地反应不同姿态时平台构型和尺寸对工作空间和鲁棒性的影响程度, 在仿真计算时采用了求取平均值的方法, 即对应于某一确定的角和  $R_p/R_b$  值 (以下简称半径比), 固定动平台绕  $z$  轴的转角为 0, 使绕  $x$  轴和  $y$  轴的转角分别从  $-30^\circ$  变化到  $30^\circ$ , 求出对应于动平台的每一姿态时的工作空间体积和鲁棒性, 然后计算出平均值。图 5、图 6 所示为平均工作空间和平均鲁棒性随  $\gamma$  角和半径比的变化情况,  $\gamma$  角取值为  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ; 半径比取值为  $0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1$ 。

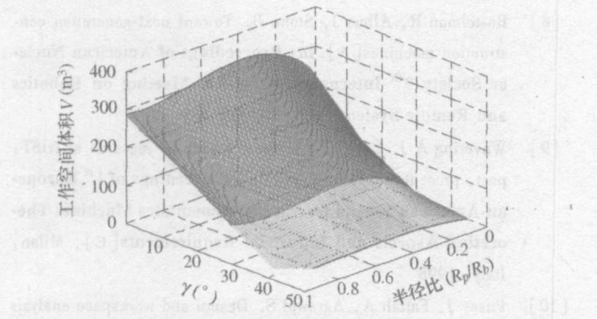


图 5 工作空间体积随  $\gamma$  和  $R_p/R_b$  值的变化

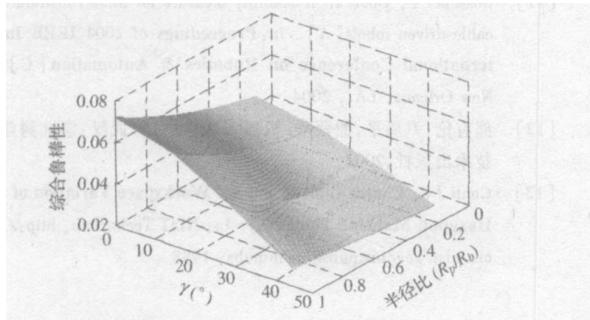


图 6 鲁棒性随  $\gamma$  和  $R_p/R_b$  值的变化

由图 5 可见, 当  $\gamma = 0^\circ$  时工作空间的体积最大 (参见图 1, 此时六边形短边的长度变为 0, 动、定平台的构型均变为等边三角形), 随着  $\gamma$  角的增大, 体积急剧变小; 当半径比为 0.01 时工作空间的体积最小, 随着半径比的增大体积逐渐增大, 当半径比为 0.5 时体积达到最大值, 此后随着半径比的增大体积又逐渐减小, 这种情况是由于动平台处于倾斜姿态时, 在工作空间的上部与定平台发生干涉所造成的。由图 6 可见, 鲁棒性在  $\gamma = 0^\circ$  且半径比为 1 时最大, 随着  $\gamma$  角的增大和半径比的减小, 鲁棒性呈下降的趋势。

4.2 姿态的影响

由以上分析可知, 平台构型为等边三角形时具有最大的工作空间和最高的鲁棒性。尽管半径比为 1 的构型鲁棒性最高, 但由于此时动平台尺寸太大, 易与周围环境发生干涉而造成使用不便, 考虑到半径比为 0.5 时工作空间最大, 因此以下只研究平台为等边三角形、半径比为 0.5 的构型的工作空间和鲁棒性随动平台位姿的变化情况。

固定动平台绕  $z$  轴的转角为 0, 使绕  $x$  轴和  $y$  轴的转角分别从  $-30^\circ$  变化到  $30^\circ$ ; 由图 7、图 8 可见, 当动平台处于水平姿态时, 工作空间最大、鲁棒性最高, 随着偏离水平姿态角度的增大, 工作空间和鲁棒性均变小。由于平台的几何形状对称于  $y$  轴而不对称于  $x$  轴, 因此体积变化图和鲁棒性变化图对称于平面  $\theta = 0$ , 而不对称于平面  $\varphi = 0$  (由于体积数据较大, 从图中较难看出这一规律, 但从仿真数据可以明显地看出)。

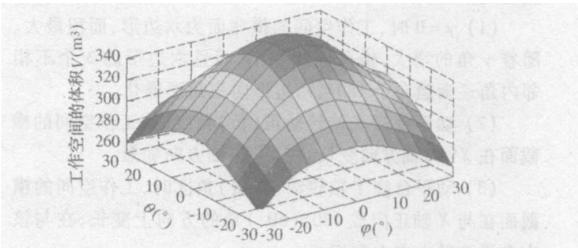


图 7 工作空间体积随  $\theta$  和  $\varphi$  的变化情况

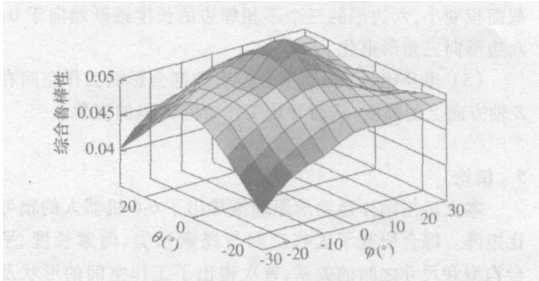


图 8 鲁棒性随  $\theta$  和  $\varphi$  的变化情况

如果固定动平台绕  $x$ 、 $y$  轴的转角为 0, 使绕  $z$  轴的转角从  $-60^\circ$  变化到  $60^\circ$ ; 由图 9 可见, 工作空间的体积随角绝对值的增大而减小, 当达到  $60^\circ$  时体积减小为 0, 此时动平台的短边 (长边) 与定平台的短边 (长边) 平行; 由图 10 可见, 随着  $\gamma$  角绝对值的增大, 开始时鲁棒性略有下降,

随后又有较大幅度的上升,由于  $\psi$  角的绝对值达到 60 时工作空间的体积为 0,因此鲁棒性变化曲线在  $\psi$  角绝对值达到 50 时就终止了。

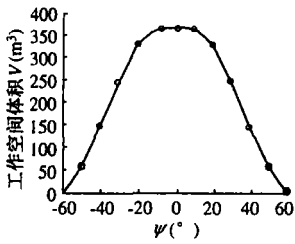


图 9 工作空间体积随  $\psi$  的变化

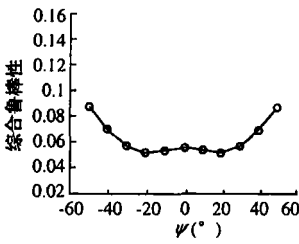


图 10 鲁棒性随  $\psi$  的变化

4.3 工作空间的形状

本文采用二分法<sup>[13]</sup>

搜索工作空间的边界,对 6-6 机器人工作空间的形状进行了详细的分析。如图 11 所示,半径比为 0.5,动平台绕 X、Y、Z 轴的转角均为 0 的 6-6 机器人的工作空间的形状为六棱柱体。由于篇幅有限,不能将各种工作空间的形状一一列出,仅把其主要变化规律列出如下:

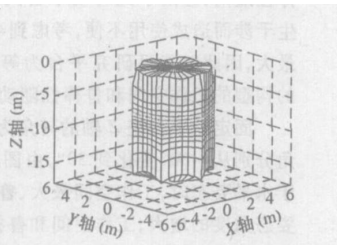


图 11 工作空间的形状

(1)  $\psi = 0$  时,工作空间的横截面为六边形,面积最大。随着  $\psi$  角的增大,横截面积变小,而且六边形的 3 个不相邻内角逐渐趋向于 180°,六边形向三角形退化。

(2) 动平台绕 X 轴转动正(负)角度时,工作空间的横截面在 X(Y)轴方向变长,在 Y(X)轴方向变短。

(3) 动平台绕 Y 轴转动正(负)角度时,工作空间的横截面在与 X 轴正向成 120°(60°)角的方向上变长,在与该方向垂直的方向上变短。

(4) 动平台绕 Z 轴转动正(负)角度时,工作空间的横截面积变小,六边形的三个不相邻边的长度逐渐趋向于 0,六边形向三角形退化。

(5) 半径比、 $\psi$  角、动平台姿态角都会影响工作空间在 Z 轴方向上的高度,从而导致工作空间体积的变化。

5 结论

本文运用刚体运动学原理推导出了 6-6 机器人的雅可比矩阵。综合研究了工作空间与绳索张力、绳索长度、平台构型和尺寸之间的关系,首次得出了工作空间的形状及变化规律,还将基于运动旋量斜率的鲁棒性概念应用于 6-6 机器人抗外力扰动鲁棒性的分析。研究表明,对于任何一种平台构型,半径比为 0.5 时具有最大的工作空间体积,半径比为 1 时具有最高的鲁棒性;对于相同的动平台姿态和半径比,平台构型为等边三角形时具有最大的工作空间体积和最高的鲁棒性。此外,动平台的姿态也会极大地影响工作空间的体积、形状和鲁棒性。这些结论对于

6-6 机器人的设计和使用都具有较高的参考价值。

[参考文献]

[1] Bostelman R, Albus J, Dagalak N. Applications of the NIST Robocrane[A]. In: **Proceedings of 5<sup>th</sup> International Symposium on Robotics and Manufacturing** [C], Maui, HI, 1994

[2] Ebert I, Voglewede P A. On the connections between cable-driven robots, parallel manipulators and grasping[A]. In: **Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation** [C], New Orleans, LA, 2004

[3] Riechel A T, Bosscher P, Lipkin H. Concept paper: cable-driven robots for use in hazardous environments[A]. In: **Proceedings of 10<sup>th</sup> International Topical Meeting on Robotics and Remote Systems for Hazardous Environments** [C], Gainesville, 2004

[4] 段宝岩,苏玉鑫,仇原鹰等.新一代大射电望远镜机电光一体化设计研究[J].中国机械工程,1999,10(9):1002~1004

[5] 王文利,段宝岩,魏强等.类 Stewart 平台并联索系结构的运动学分析[J].机械设计,2000,(6):8~11

[6] 范国滨,仇原鹰.结构参数对大型射电望远镜舱索并联机构奇异性的影响[J].机械设计与研究,2004,20(2):31~34

[7] 孙欣,段宝岩.巨型索系 Stewart 平台解空间、工作空间的研究及悬索张力的优化设计[J].机械工程学报,2002,38(2):16~21

[8] Bostelman R, Albus J, Stone B. Toward next-generation construction machines[A]. In: **Proceedings of American Nuclear Society 9<sup>th</sup> International Topical Meeting on Robotics and Remote Systems** [C], Seattle, WA, 2001

[9] Wavering A J. Parallel kinematics machine research at NIST: past, present and future[A]. In: **Proceedings of 1<sup>st</sup> European-American Forum on Parallel Kinematics Machines Theoretical Aspects and Industrial Requirements** [C], Milan, Italy, 1998

[10] Pusey J, Fattah A, Agrawal S. Design and workspace analysis of a 6-6 cable-suspended parallel robot[J]. **Mechanism and Machine Theory**, 2004, 39: 761~778

[11] Bosscher P, Ebert I A. stability measure for underconstrained cable-driven robots[A]. In: **Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation** [C], New Orleans, LA, 2004

[12] 熊有伦,尹周平,熊蔡华.机器人操作[M].武汉:湖北科学技术出版社,2002

[13] Conti J P, Clinton CM, Zhang G. **Workspace Variation of a Hexapod Machine Tool**[OZ]. In: NIST TechniPub, <http://www.nist.gov/nistpubs/technipubs>, 1998