

文章编号: 1000-4750(2013)11-0245-06

高速柔索牵引摄像机器人动力工作空间研究

于亮亮, 仇原鹰, 苏 宇

(西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室, 西安 710071)

摘 要: 首先, 提出了一种基于最小二范数的高速柔索牵引摄像机器人的索力快速优化算法; 其次, 基于集合理论得到了动力工作空间的一致求解策略; 进而, 仿真计算了给定结构参数下的机器人动力工作空间, 并结合机器人沿工作空间顶面特定曲线运行时索长及索力的变化规律, 对工作空间顶面形成的原因进行了分析; 最后, 借助工作空间底面剖视图研究了机器人工作空间底面的可达区域与支撑杆高度的影响关系, 得出合理选取支撑杆高度的依据。

关键词: 并联机器人; 柔索牵引并联机构; 摄像机器人; 工作空间; 索力求解

中图分类号: TP242 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.07.0543

DYNAMIC WORKSPACE OF A HIGH-SPEED CABLE-DRIVEN CAMERA ROBOT

YU Liang-liang, QIU Yuan-ying, SU Yu

(Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design of Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Firstly, a quick optimal arithmetic of the tensions for the high speed cable-driven camera robot is proposed based on the minimum 2-norm. Secondly, a uniform solution strategy for the dynamic workspace is obtained by the set theory. Furthermore, the dynamic workspace under the given structural parameters is simulated, and the forming reason of the workspace top is analyzed through the change mechanisms of lengths and tensions of the cables when the robot moves along the specific curves on the workspace top. Finally, the relations between reachable area of the workspace bottom and the heights of the masts are studied by means of the bottom section views, from which some reasonable selection criteria for the mast heights are obtained.

Key words: parallel robot; cable-driven parallel manipulator; camera robot; workspace; tension solution

与传统的刚性连杆并联机器人相比, 柔索牵引并联机器人柔支链惯量减小, 工作空间更大; 结构简单, 易于拆装、重组, 模块化程度高并且成本低廉的优点^[1]。因此被广泛应用于飞行器风洞实验、人体康复训练、吊装作业和大型射电望远镜观测等方面^[2-5]。

随着电视转播技术的进步, 常需进行空中全景

式拍摄, 以往的拍摄方法是借助摇臂、曲臂升降车和直升飞机等设备实现。但是摇臂摄像机、曲臂升降车摄像系统工作区域和拍摄角度都非常有限, 且易于干扰观众视线; 直升飞机航拍, 震颤和噪音干扰大, 成本高昂。近年来借助于柔索牵引并联机器人可完美的实现这种大范围的全景拍摄要求^[6], 目前已知的柔索牵引摄像机器人速度可达 9m/s ^[7],

收稿日期: 2012-07-23; 修改日期: 2012-09-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175397, 51105290)

通讯作者: 仇原鹰(1958—), 男, 河北定州人, 教授, 博士, 博导, 常务副院长, 院党委书记, 从事机械 CAD/CAE/CAM、机电一体化研究 (E-mail: yyqiu@mail.xidian.edu.cn).

作者简介: 于亮亮(1981—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 工程师, 硕士, 从事绳牵引并联机器人研究(E-mail: yll1822@163.com);

苏 宇(1982—), 男, 陕西宝鸡人, 博士生, 从事绳牵引并联机器人研究(E-mail: suyuvitamin@163.com).

其结构如图 1 所示。该机器人系统由一个中央控制处理器同时驱动四个独立的卷扬机，每个卷扬机上的柔索通过架设在场角支撑杆的顶端滑轮牵引摄像机平台运动。由于摄像平台采用了复合铰结构，使得摄像机的转动和平动可实现完全解耦，摄像机平台在工作空间内具有三个平动自由度。因此可将摄像机平台抽象成点状，在其工作空间内不必考虑干涉问题^[8]。

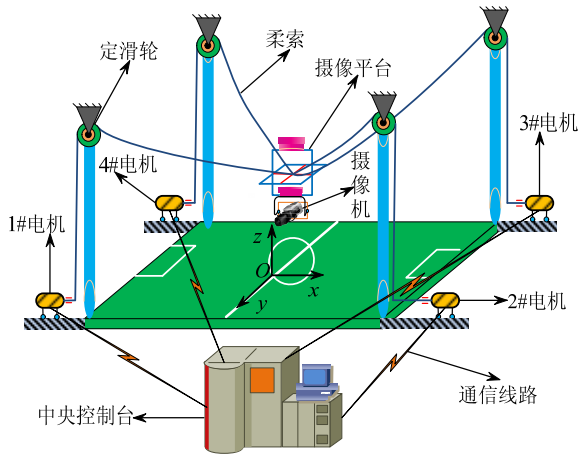


图 1 柔索牵引摄像机机器人示意图

Fig.1 Schematic diagram of the cable-driven camera robot

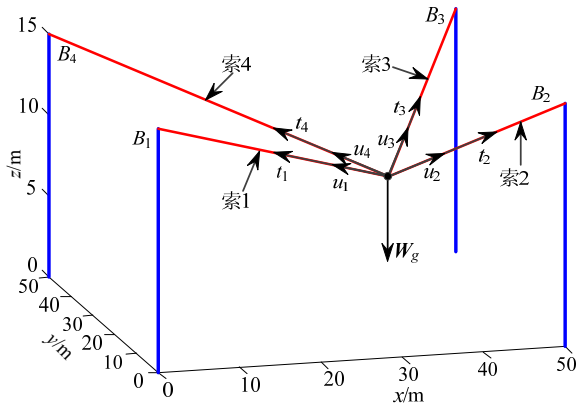


图 2 柔索牵引摄像机系统受力分析

Fig.2 Tension analysis of the cable-driven camera robot

工作空间是柔索牵引并联机器人的重要研究内容之一。Pham^[9]、Gouttefarde^[10]、郑亚青^[11]和刘欣^[12]等基于静力平衡方程，采用递归维数缩减法、区间分析、半代数集合和统一求解策略，求解了柔索牵引并联机器人的静力工作空间。但是对于绳牵引摄像机机器人，必须要有较好的机动性以便可以随时拍摄到高速移动中的目标点，因此该系统的动力工作空间与上述文献研究的静力工作空间有明显差异。

对于四索驱动的三维运动摄像机，冗余驱动的

索力解不唯一，因此需要采用优化方法寻求利于运动控制的最优解。而考虑到系统的高机动性要求，还要实现驱动力的快速解算。

由于冗余驱动条件下的柔索牵引并联机器人快速动力解算以及基于动力解算的工作空间研究均未见文献报道，本文将尝试一种冗余驱动柔索牵引并联机器人的驱动力快速解算方法，进而对机器人的动力工作空间进行剖析。

1 系统动力学方程及其快速求解方法

建立全局坐标系 $O-xyz$ ， ${}^oB_i = [{}^ox_{B_i}, {}^oy_{B_i}, {}^oz_{B_i}]^T$, $i=1, \dots, 4$ 为支柱上滑轮与柔索的铰接点在全局坐标系下的位置矢量， ${}^oT_o = [{}^ox_o, {}^oy_o, {}^oz_o]^T$ 表示在全局坐标系下的工作云台位置。

柔索的长度矢量 oL_i 在全局坐标系中为：

$${}^oL_i = {}^oB_i - {}^oT_o \tag{1}$$

柔索的长度为：

$$L_i = \|{}^oL_i\| = \sqrt{({}^oB_i - {}^oT_o)^T ({}^oB_i - {}^oT_o)} \tag{2}$$

索长速度变化与末端执行器(工作云台)速度之间的关系：

$${}^o\dot{L} = -J^T \dot{X} \tag{3}$$

其中： $\dot{L} = [\dot{L}_1 \ \dot{L}_2 \ \dot{L}_3 \ \dot{L}_4]^T$ 为柔索长变化速度矩阵； $\dot{X} = [\dot{x}^o] = [{}^ox_o, {}^oy_o, {}^oz_o]^T$ 为工作云台的运动旋量； $J = [{}^ou_1 \ {}^ou_2 \ {}^ou_3 \ {}^ou_4]$ 为结构矩阵。利用 Newton-Euler 法，推导柔索牵引摄像机系统的动力学方程^[3]：

$$M(X)\ddot{X} = JT + W_g + W_e \tag{4}$$

式中： $M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}$ 为工作云台的质量；

$T = [t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4]^T$ 为柔索拉力矢量； $W_g = Mg$ ， $g = [0, 0, -g]^T$ 为重力加速度矢量； t_i 为第 i 根绳索的张力标量； W_e 为作用在工作云台上的外力。

由式(4)可直接求得柔索张力的极小范数最小二乘解 T ：

$$T = T_d + \text{Null}(J)\lambda = J^+ (M(X)\ddot{X} - W_e - W_g) + \text{Null}(J)\lambda \tag{5}$$

式中： $J^+ = J^T (JJ^T)^{-1}$ 为 J 的 Moore-Penrose 逆； $\text{Null}(J)\lambda$ 是式 (5) 的齐次解， $\text{Null}(J) =$

$[n_1 \ n_2 \ n_3 \ n_4]^T$ 为 \mathbf{J} 的零空间向量; λ 为任意标量。

实际应用中, 柔索可承受的索力是受约束的。索力的最小值是防止索虚牵规定的最小索力, 最大值受索自身可承受的最大拉力约束。考虑到合理分配索力以使系统整体的能耗最小, 并兼顾索力的快速解算的要求, 柔索拉力的求解准则采用索力解的最小范数, 即:

$$\min \|\mathbf{T}(\lambda)\|_2$$

约束条件: $t_i \in (t_{\min}, t_{\max}), i=1,2,3,4$

对 λ 进行求解。由 $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$ 可以求得 λ 的取值范围:

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{\min} - \mathbf{T}_d \leq \mathbf{Null}(\mathbf{J})\lambda \leq \mathbf{T}_{\max} - \mathbf{T}_d \\ \lambda_l = \max \left(\min_{1 \leq i \leq 4} \left(\frac{t_{i,\min} - T_{d,i}}{\mathbf{Null}(\mathbf{J})_i}, \frac{t_{i,\max} - T_{d,i}}{\mathbf{Null}(\mathbf{J})_i} \right) \right) \\ \lambda_u = \min \left(\max_{1 \leq i \leq 4} \left(\frac{t_{i,\min} - T_{d,i}}{\mathbf{Null}(\mathbf{J})_i}, \frac{t_{i,\max} - T_{d,i}}{\mathbf{Null}(\mathbf{J})_i} \right) \right) \\ \lambda_l \leq \lambda \leq \lambda_u \end{cases} \quad (6)$$

经仿真计算, 每组索力的解算时间均值为 0.39ms。

2 动力工作空间求解

由于索的单向约束性质, 柔索牵引并联机器人的工作空间是满足索拉力约束条件下末端执行器实现力和力矩平衡的所有位置的集合。本文通过工作空间一致求解策略, 分析计算柔索牵引摄像机器人的工作空间。由于驱动电机功率和索强度的限制, 同时避免虚牵现象的发生, 每根索的拉力必须介于一定范围。因此, 柔索牵引并联机器人工作空间的数学描述如下^[11]: 给定一个位置 \mathbf{X} ,

$$\exists t_{i,\min} \leq t_i \leq t_{i,\max} \quad (t_{i,\min} > 0 \cap t_{i,\max} > 0 \cap t_{i,\min} > t_{i,\max}, i=1,2,3,4): \sum_{i=1}^4 t_i \hat{\mathbf{J}}_i + \mathbf{W} = \mathbf{0} \in \mathbf{R}^n, \quad t_{i,\min}, t_{i,\max}$$

分别为第 i 根绳的最小预紧力和最大许可拉力, $\mathbf{W} = \mathbf{W}_e + \mathbf{W}_g - \mathbf{M}(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{X}}$ 则 \mathbf{X} 属于动力工作空间。

对于完全约束柔索牵引并联机器人, 其动力工作空间是满足以下关系的所有末端执行器位置的集合:

$$\begin{aligned} \{\mathbf{X} : \text{rank}(\mathbf{J}) = 3 \cap \forall \mathbf{q} \in \mathbf{R}^n \mathbf{q}^T \mathbf{W} > 0 \exists k : \mathbf{q}^T \hat{\mathbf{J}}_k < 0 \\ \cap \Gamma_{\min}^- \leq \Gamma_{\max}^+ + \mathbf{q}^T \mathbf{W} \leq \Gamma_{\max}^- \} \cup \{\mathbf{X} : \text{rank}(\mathbf{J}) = 3 \\ \cap \forall \mathbf{q} \in \mathbf{R}^n \mathbf{q}^T \mathbf{W} = 0 \exists j, k : \mathbf{q}^T \hat{\mathbf{J}}_j > 0 \end{aligned}$$

$$\cap \Gamma_{\min}^- \leq \Gamma_{\max}^+ + \mathbf{q}^T \mathbf{W} \cap \Gamma_{\min}^+ + \mathbf{q}^T \mathbf{W} \leq \Gamma_{\max}^- \}。$$

其中: $\mathbf{q} = \hat{\mathbf{J}}_a \times \hat{\mathbf{J}}_b$, a, b 为 \mathbf{J} 中任意 2 个线性独立的列向量的下标; $k, j \in \{1,2,3,4\} - \{a,b\}$; Γ_{\min}^- 、 Γ_{\max}^- 分别为 \mathbf{q} 负方向上投影矢量之和的绝对值下限与上限, $\Gamma_{\min}^- = \sum_{\mathbf{q}^T \hat{\mathbf{J}}_k < 0} |\mathbf{q}^T \hat{\mathbf{J}}_k| t_{k,\min}$,

$\Gamma_{\max}^- = \sum_{\mathbf{q}^T \hat{\mathbf{J}}_k < 0} |\mathbf{q}^T \hat{\mathbf{J}}_k| t_{k,\max}$; Γ_{\min}^+ 、 Γ_{\max}^+ 分别为 \mathbf{q} 正

方向上投影矢量之和的下限与上限,

$$\Gamma_{\min}^+ = \sum_{\mathbf{q}^T \hat{\mathbf{J}}_k > 0} |\mathbf{q}^T \hat{\mathbf{J}}_k| t_{k,\min}, \quad \Gamma_{\max}^+ = \sum_{\mathbf{q}^T \hat{\mathbf{J}}_k > 0} |\mathbf{q}^T \hat{\mathbf{J}}_k| t_{k,\max}。$$

在一致性求解策略数学描述中的外力项包含加速度信息。分别在 x, y, z 的正反方向上添加惯性力 $-\mathbf{M}(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{X}}$ 后, 对各工作空间结果取其交集, 得到动力工作空间。

3 动力工作空间仿真结果及局部特性分析

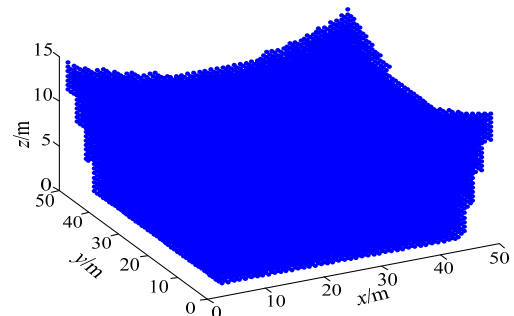
计算工作空间的参数如表 1 所示。

表 1 系统参数变量表

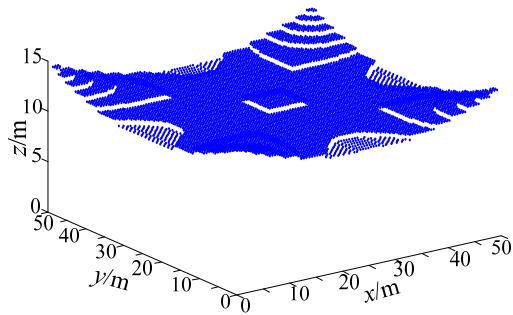
Table 1 Parameter list of the system variables

系统参数	数值
支撑杆高度 H/m	15
相邻支撑杆间距 B/m	50
索力上、下限 $(T_{\min}, T_{\max})/N$	(10,980)
摄像机平台质量 M/kg	26.5
摄像机平台的最大运动加速度 $a/(m/s^2)$	2

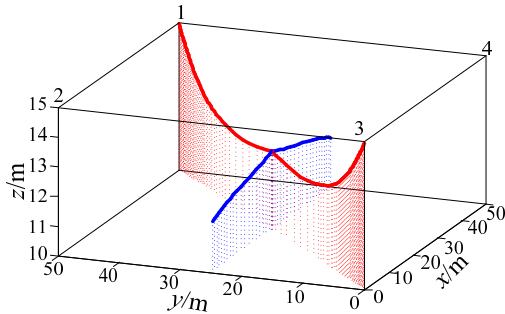
图 3(a)为四索牵引系统的动力工作空间, 图 3(b)为工作空间的顶面俯视图, 图 3(c)为用过工作空间中部的铅垂面和过工作空间对角线的铅垂面分别切割工作空间时, 得到的工作空间顶面中截线和对角截线。



(a) 工作空间整体



(b) 工作空间顶面俯视图



(c) 工作空间顶面截线

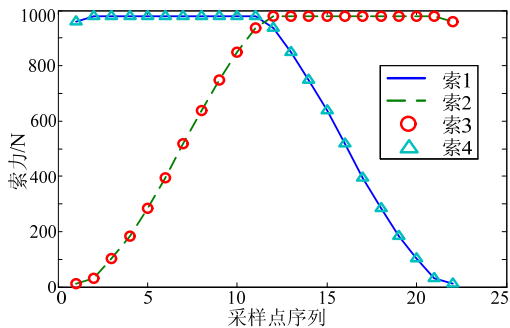
图 3 摄像机器人动力工作空间示意图

Fig.3 Schematic diagram of the robot dynamic workspace

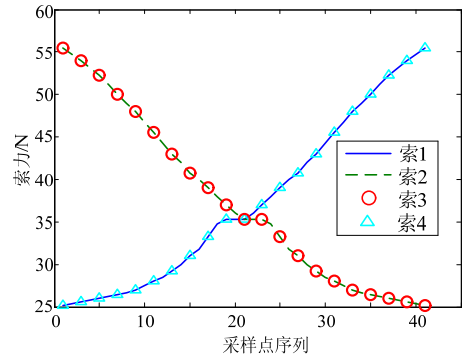
图 3(b)表明,工作空间的顶面是以工作空间中心轴对称的曲面。曲面的成因是由于在不同高度上,形成工作空间的有效区域不同。四角处空间向上逐渐延伸,靠近对称中心位置处空间有凸起。因为索力上限明显大于摄像机平台的重力,每根索都有能力将平台拉到其铰点附近,因此四角处有向上延伸的趋势。另外,在对称中心附近四索的长度和受力情况相近,因此能够形成更大的合力,所以图 3(c)工作空间在中间处有凸起。

当摄像机平台经过工作空间顶面中截线时,各根索的索力和索长变化如图 4(a)、图 4(b)所示。

当摄像机平台经过工作空间顶面对角截线时,各根索的索力和索长变化如图 5(a)、图 5(b)所示。

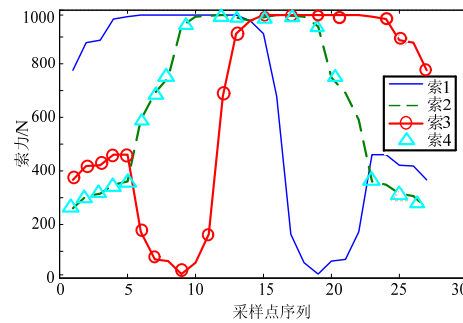


(a) 索力变化曲线

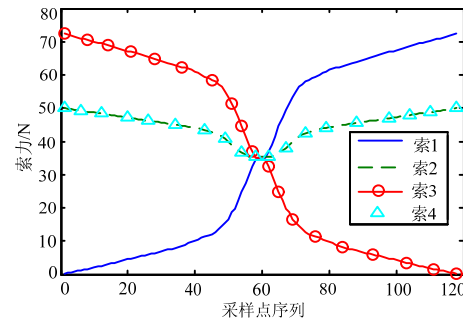


(b) 索长变化曲线

图 4 摄像机沿中截线运动时的索力及索长变化曲线
Fig.4 Change curves of the cable lengths and tensions with the camera moving along the median transversal



(a) 索力变化曲线



(b) 索长变化曲线

图 5 摄像机沿对角截线运动时的索力及索长变化曲线
Fig.5 Change curves of the cable lengths and tensions with the camera moving along the diagonal transversal

由图 4 和图 5 可见,当摄像机平台处于空间某位置时,长度较短的柔索跨度较小,所以此时为保持摄像机平台的平衡状态,其索力就需要比长度较长的索大,在顶部边界面的各点处,长度较小的索其索力先于其它索达到设定的索力最大值,这也是工作空间不能继续升高的原因。

下面讨论工作空间与地面相交的底面的形状。随着支撑杆的升高,工作空间的三维形状不断变化,此时工作空间底面的形状随之变化。图 6

显示了不同高度的支撑杆下摄像机平台在底面的工作可达范围。

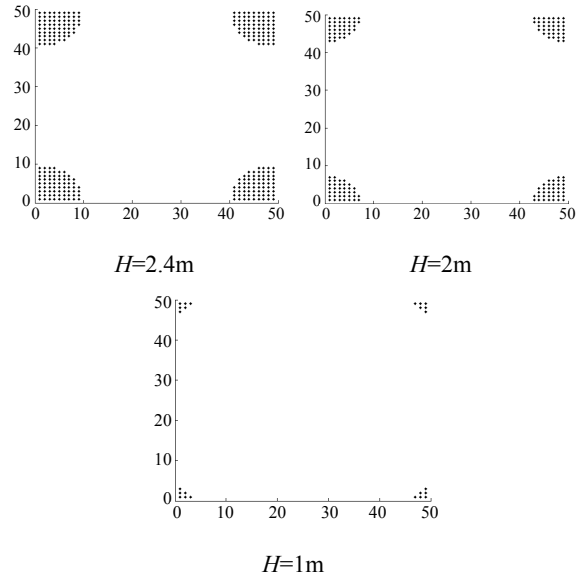
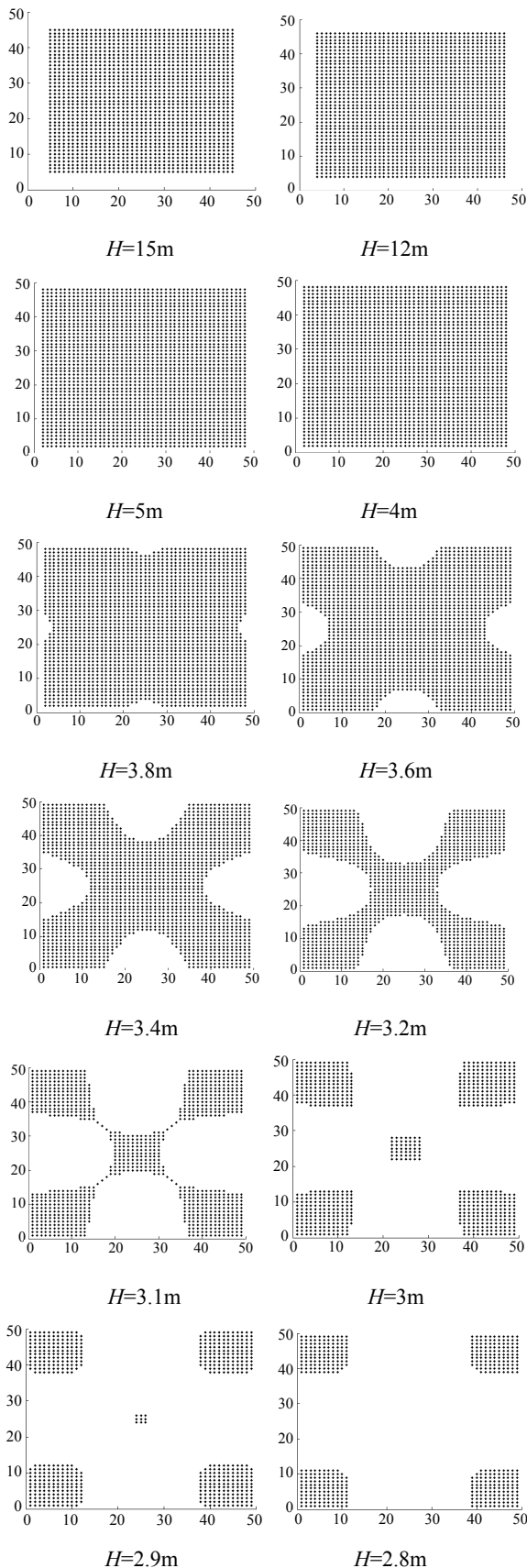


图 6 workspace底面形状随支撑杆高度的变化
Fig.6 Variation of workspace's bottom shapes with the heights of the masts

从图 6 看出，支撑杆高度变化对摄像机平台可达 workspace 底面区域的影响较大。当支撑杆高度 $H > 4\text{m}$ 时，平台的工作空间底面区域联通且呈现为规则的矩形，随着支撑杆高度的快速增加矩形区域缓慢减小；当支撑杆高度小于 4m 时，平台的工作空间底面矩形区域的四边上开始逐渐出现凹陷，且随着支撑杆高度的降低，凹陷区域快速增大同时 workspace 底面上的可达区域锐减。由此可见，本例中为使摄像机机器人在接近地面的低空上有灵活充足的工作范围，支撑杆高度不能小于 4m 。在此基础上，根据要求的飞行高度增加支撑杆的高度对 workspace 的影响很小。上图中 H 从 4m 增加到 15m 时底面矩形边长从 48m 减小为 45m ，高度增加了 275% 的同时矩形面积仅减小约 12% 。

考虑动态运动时，柔索张力增加，在强度约束条件下，机器人末端的动力可达 workspace 相对静力可达空间有所减少。以本仿真分析为例，动力 workspace 与静力 workspace 之比为 81.4% 。

4 结论

(1) 考虑到合理分配索力以使系统整体的能耗最小，并兼顾索力的快速解算的要求，采用最小二范数求解准则求解了柔索摄像机机器人的驱动索力，在算例中，每个轨迹离散点处的动态索力解算时间均值为 0.39ms 。

(2) 在动力工作空间一致性求解策略的数学描述中考虑加速度信息, 分别在 x 、 y 、 z 的正反方向上添加惯性力 $-M(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{X}}$ 后, 对各工作空间结果取其交集, 得到动力工作空间。在本文算例中, 动力工作空间与静力工作空间的体积之比为 81.4%。

(3) 利用数值仿真得到了动力工作空间的形状, 对其成形的原因进行了分析。进而在工作空间顶部曲面的中心曲线和对角曲线上规划了摄像机的运动, 得到了索长及索力的变化规律。

(4) 绘制了工作空间与地平面的相交图形, 根据工作空间底面形状随支撑杆高度的变化, 得到了支撑杆高度对摄像机器人在低空运行时的可达工作范围。

参考文献:

- [1] Borgstrom P H, Borgstrom N P, Stealey M J, et al. Design and implementation of NIMS3D, a 3-D cabled robot for actuated sensing applications [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(2): 325—339.
- [2] Mao Y, Agrawal S K. Wearable cable-driven upper arm exoskeleton - motion with transmitted joint force and moment minimization [C]. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, Alaska, USA, 2010: 4334—4339.
- [3] 刘欣, 仇原鹰, 盛英. 风洞试验绳牵引冗余并联机器人的刚度增强与运动控制[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1156—1164.
Liu Xin, Qiu Yuanying, Sheng Ying. Stiffness enhancement and motion control of a 6-DOF wire-driven parallel manipulator with redundant actuations for wind tunnels [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1156—1164. (in Chinese)
- [4] Li C D, Yi J Q, Yu Y. Inverse control of cable-driven parallel mechanism using type-2 fuzzy neural network [J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(3): 459—464.
- [5] 路英杰, 任革学. 大射电望远镜 FAST 整体变形索网反射面仿真研究[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 165—169.
Lu Yingjie, Ren Gexue. Simulation of the cable meshreflector for the large radio telescope FAST [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(10): 165—169. (in Chinese)
- [6] Vincent T L. Stabilization for film and broadcast cameras [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28(1): 20—25.
- [7] Spidercam. Bowcam [EB/OL]. <http://dev.spidercam.org/en/products/bowcam>, 2012-8-1.
- [8] 苏宇, 仇原鹰. 绳牵引并联机器人完备干涉判定条件推导[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 44—51.
Su Yu, Qiu Yuanying. Derivation of complete interference conditions for wire-driven parallel robots [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 44—51. (in Chinese)
- [9] Cong Bang Pham, Song Huat Yeo, Guilin Yang, et al. Force-closure workspace analysis of cable-driven parallel mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(1): 53—69.
- [10] Marc Gouttefarde, Clément M. Gosselin. Analysis of the wrench-closure workspace of planar parallel cable-driven mechanisms [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(3): 434—445.
- [11] 郑亚青, 刘雄伟. 绳牵引并联机构拉力分布优化[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 140—145.
Zheng Yaqing, Liu Xiongwei. Optimal tension distribution of wire-driven parallel manipulators [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 140—145. (in Chinese)
- [12] 刘欣, 仇原鹰, 盛英. 绳牵引并联机器人工作空间的存在条件证明及一致求解策略[J]. 机械工程学报, 2010, 46(7): 27—34.
Liu Xin, Qiu Yuanying, Sheng Ying. Proofs of existence conditions for workspaces of wire-driven parallel robots and a uniform solution strategy for the workspaces [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(7): 27—34. (in Chinese)