

绳牵引并联机构与多指手抓取的连接关系

郑 亚 青

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要 由于绳牵引并联机构与等价的无摩擦点接触抓取模型存在结构相关性和力传递相似性, 所以分析多指手抓取中一个位形的瞬时特性的很多工具, 可以用来研究绳牵引并联机构的相关问题. 利用平面对心抓取定理与 Ebert Uphoff 提出的相关定理, 确定 2-2 型 1R2T 机构的力封闭工作空间边界. 文中指出, Canny 关于 3 维封闭抓取的研究工作对确定 3-2 型, 3-3 型和 3-3-3 型的 3R3T 机构的力封闭工作空间边界有指导意义, 但两者之间的真实关系还有待于进一步深入研究.

关键词 绳牵引, 并联机构, 多指手抓取, 连接关系

中图分类号 TH 112 **文献标识码** A

绳牵引并联机构是一种新型并联机构, 具有结构简单、工作空间大、高负载能力、极高的负载/重量比、易拆装、可重组、模块化程度高、价格低廉和运动速度快等优点^[1]. 绳牵引并联机构在吊装领域的应用已有多年的, 目前的应用基础研究领域包括小型的装置, 如力触觉装置和风洞支撑系统, 以及在地震领域的救生系统等. 由于绳只能产生拉力, 不能承受压力, 因此用于研究的传统杆支撑并联机构的理论和方法都不适用于研究绳牵引并联机构; 相反地, 多指手抓取的手指施力的单向性性质, 使得其与绳牵引并联机构在数学的映射理论存在一定联系. 本文探讨两者在结构方面的相关性和力传递相似性问题.

1 相关性比较

1.1 绳牵引并联机构

绳牵引并联机构是将驱动器的运动和力以绳为介质, 并行转换成动平台的运动和力的封闭装置. 其组成元素包括机架、驱动器、绳、动平台、连接驱动器与绳的点状铰链和连接绳与动平台的点状铰链. 图 1 为 5 根绳牵引的 1R2T (1 个平动 2 个转动) 自由度的并联机构简图.

1.2 无摩擦点接触抓取

图 2 为 5 个无摩擦点接触抓取一个物体的示意图. 不过, 该抓取模型与一般的抓取模型的不同点在于, 每个手指要位于物体的“内部”, 即手指由里向外推产生推力而不是压力.

1.3 两者的结构相关性

为了使图 1 所示的绳牵引并联机构和图 2 所示的抓取模型存在结构上的相关, 还必须符合以下 4 个前提^[1]. (1) 因为绳与动平台的连接是点状的, 所以接触点在抓取模型上不能滑动. (2) 物体表面法线方向与相关绳的牵引方向一致. (3) 除了接触点外, 物体的几何形状是任意的. (4) 如果物体的表面法线总是能很好得到定义的, 即不存在

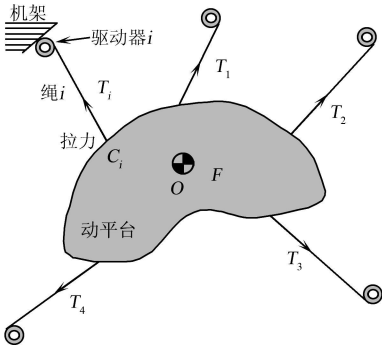


图 1 绳牵引并联机构

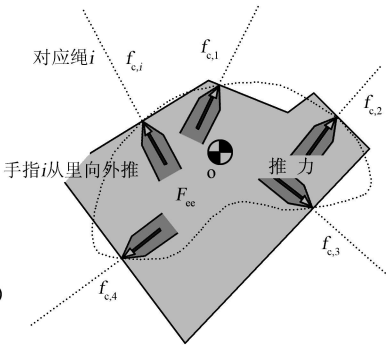


图 2 无摩擦点接触抓取模型

收稿日期 2006-02-21

作者简介 郑亚青(1974), 女, 讲师, 博士, 主要从事绳牵引并联机构的研究. E-mail: yq_zheng@hqu.edu.cn

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50475099); 国务院侨务办公室科研基金资助项目(05Q0019)

奇异的界面点. 遇到多根绳重合连接到动平台的情况, 必须用有摩擦的点接触来对应它. 在一个无摩擦点接触抓取中, 抓取所施加的力总是沿着物体的法线方向, 在操作时, 该法线方向是跟随物体的运动进行平动和转动的. 相反, 在绳牵引并联机构中, 绳牵引所产生的施加在动平台上的力取决于绳的方向. 所以, 两者的这种结构相关性是“瞬时的”^[1].

2 力传递的相似性

2.1 绳牵引并联机构

如图 1 所示, 动平台所受的基于动态静力分析的力学平衡方程可表示为

$$\boldsymbol{F} = -\boldsymbol{J}^T \boldsymbol{T}. \tag{1}$$

在式(1)中, \boldsymbol{T} 是第 i 根绳所受的拉力值 T_i 组成的 5 维列向量 $(T_1, \dots, T_5)^T$, 力旋量 \boldsymbol{F} 是由 3 个分量组成的列向量 $(F_1, \dots, F_3)^T$, 表示作用在动平台上的所有外力旋量之和, \boldsymbol{J}^T 称为机构的结构矩阵. 动平台的力封闭可表示为

$$\forall \boldsymbol{F} \in \mathbf{R}^3: \exists T_1, \dots, T_5 \in (0, \infty): \boldsymbol{F} = -\boldsymbol{J}^T \boldsymbol{T}.$$

2.2 无摩擦点接触抓取

如图 2 所示, 对于无摩擦点接触的抓取, 手指施加于接触点的力 \boldsymbol{f}_c 与物体质心合力螺旋 $\boldsymbol{F}_{ee} \in \mathbf{R}^3$ 之间的关系, 可用抓取映射 \boldsymbol{G} 表示为

$$\boldsymbol{F}_{ee} = -\boldsymbol{G} \boldsymbol{f}_c. \tag{2}$$

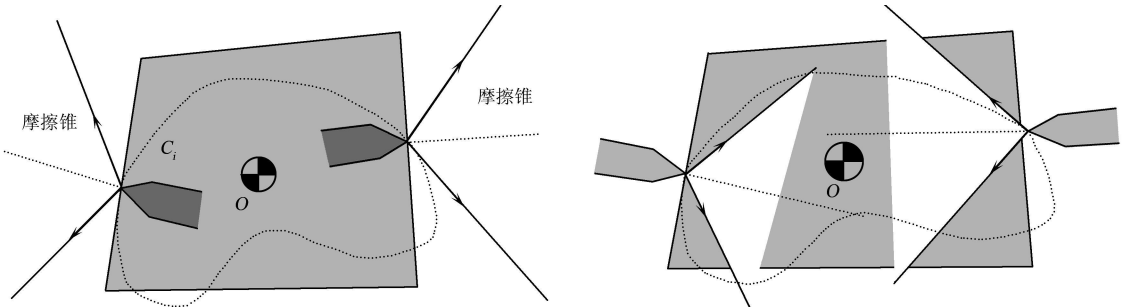
上式中, \boldsymbol{f}_c 是 $f_{c,i} (f_{c,i} \geq 0)$ 分量组成的向量 $(f_{c,1}, \dots, f_{c,5})^T$. 对于任意 $\boldsymbol{F}_{ee} \in \mathbf{R}^3$, 如果存在接触力 $\boldsymbol{f}_c \in FC$ 使 $\boldsymbol{G} \boldsymbol{f}_c = -\boldsymbol{F}_{ee}$, 则这种抓取称为力封闭抓取, 其中 $FC = \{\boldsymbol{f}_c \in \mathbf{R}^3: f_{c,i} \geq 0\}$. 比较式(1)和式(2), 将手指施加于接触点的力 \boldsymbol{f}_c 和绳的拉力 \boldsymbol{T} 相联系, 抓取映射 \boldsymbol{G} 与结构矩阵 \boldsymbol{J}^T 相联系, 很显然, 这两个式子是相似的. 这种相似性表明, 用分析抓取中一个位形的瞬时特性的很多工具, 是可以用于研究绳牵引并联机构的相关问题.

3 相似性的应用

3.1 力封闭抓取规划与动平台的自由度

在抓取的领域中, 可用凸集理论来确定力封闭抓取的条件. 该条件可以直接用来判断绳牵引并联机构的动平台是否满足力封闭. 至于满足力封闭条件的绳的数目和几何布置, 则必须用抓取规划来确定.

对于非异常曲面(除空间球面及平面上的圆外的曲面), 根据凸分析中的两个经典定理(即 Carathéodory 定理和 Steinitz 定理^[2]), 可确定实现力封闭抓取所需接触数目的上下限. 若为平面抓取所有非异常曲面(即力螺旋数为 3), 则接触数在 4~6 之间; 若为空间抓取所有非异常曲面(即力螺旋数为 6), 则接触数在 7~12 之间. 与此相对应, 可将以上的结论用来判断绳牵引并联机构的动平台是否满足力封闭. 因此, 1R2T(1 个平动 2 个转动) 自由度或 3T(3 个平动) 自由度的机构至少要 4 根绳来牵引, 而 3R3T(3 个平动 3 个转动) 机构至少要 7 根绳来牵引. 然而, 具有异常几何的物体仍可以作为绳牵引并联机构的动平台, 这是绳牵引并联机构与抓取不同的地方之一.



(a) 手指从里向外抓取

(b) 平指从外向里抓取

图 3 2 指平面有摩擦抓取

3.2 平面对心抓取定理的应用

平面对心抓取定理: 有摩擦 2 点接触平面抓取为力封闭的充分必要条件是, 2 接触点连线位于 2 摩擦锥内部, 满足该定理条件的抓取成为对心抓取^[2]. 文 [1] 用平面对心抓取定理进行推导, 得到以下的推论: 手指从里向外的 2 指平面有摩擦抓取是力封闭的(图 3(a)); 当且仅当手指以相反的方向的 2 指有摩擦抓取, 是力封闭的(图 3(b)). 这里证明从略.

以上的推论可用于确定如图 4(a) 所示的 2-2 型的 1R2T 自由度的 CRPM (Completely Restrained Positioning Mechanisms, 即完全约束定位机构) 动平台, 其参考点是否落在其力封闭工作空间之内, 并可以很容易地求出, 对应绳不同布置的机构的力封闭工作空间边界, 如图 4 所示.

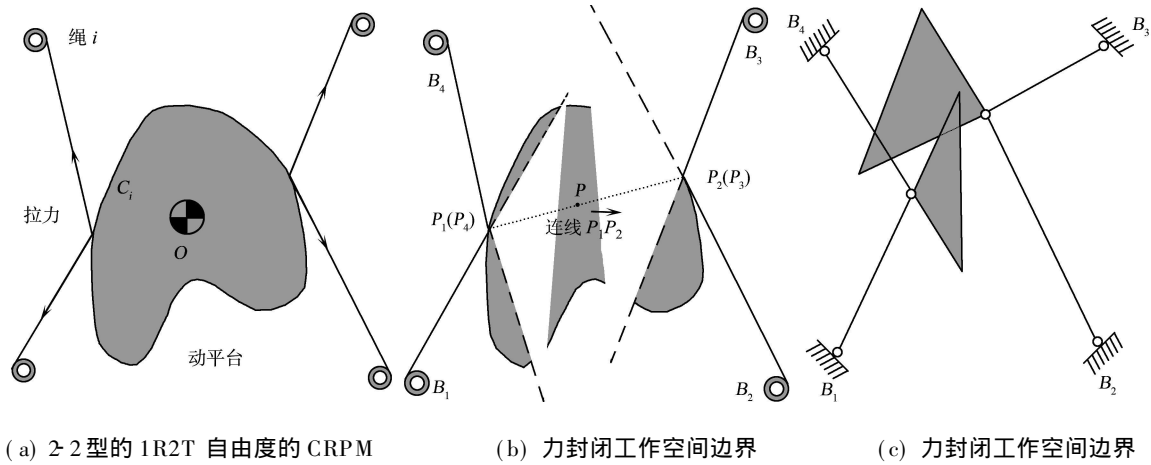


图 4 CRPM (1R2T) 的力封闭工作空间边界的确定

3.3 3 维封闭抓取的应用

由于 3R3T 机构中, 绳与动平台的连接点至少为 3 点, 故其力封闭工作空间边界不能用空间抓取定理直接来确定. 但笔者试图从 3 维封闭抓取的条件中寻找确定某类 3R3T 机构的力封闭工作空间边界的方法. 下面引入 2 个定义和 1 个定理.

定义 1 抓取平面. 用 3 个手指抓取 3 维物体, 抓取平面定义为经过手指与物体的 3 个接触点的平面, 如图 5(a) 所示^[3].

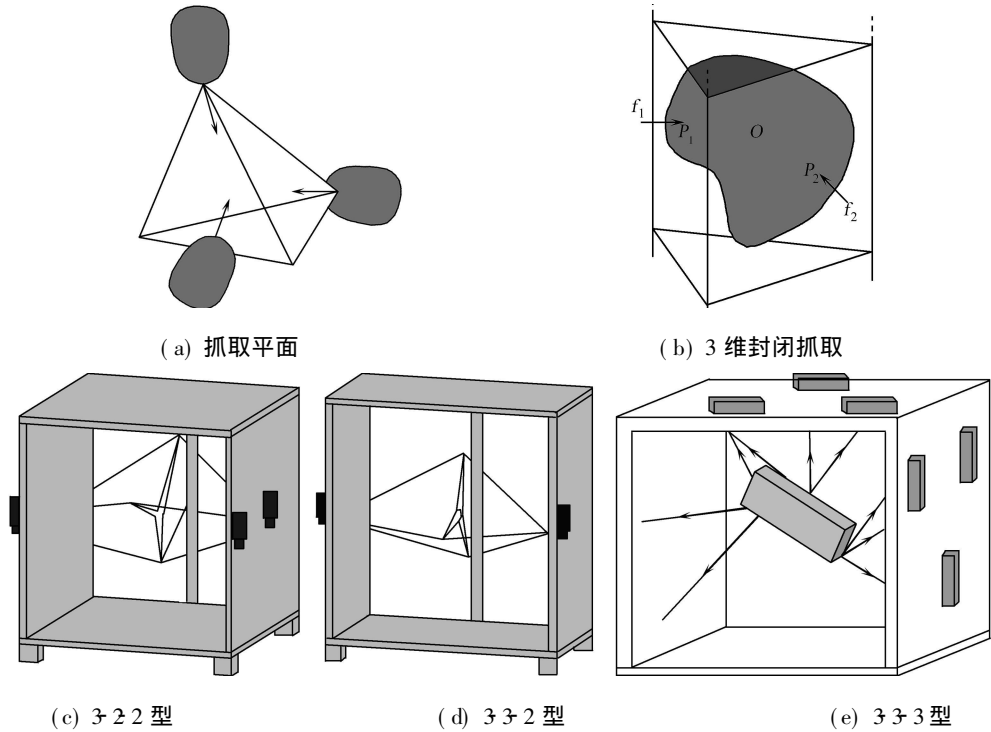


图 5 3 维封闭抓取与 3R3T 机构的力封闭工作空间边界

定义 2 3 维抓取. 如果所有的外力位于抓取平面内, 且所有的外力矩垂直于抓取平面, 则称这样的抓取为 2 维抓取问题. 若有其他方向的力螺旋作用在 2 维物体上, 则这种抓取应该视为完全的 3 维抓取问题^[3].

定理 这是由 Canny 提出的定理. 即对于具有光滑轮廓(非分块光滑)的任一 3 维物体, 利用 3 点有摩擦接触或 2 个软指可以构成力封闭抓取, 如图 5(b) 所示. 3 个圆手指能有摩擦点接触力封闭抓取任何 3 维物体^[3].

笔者认为, Canny 关于 3 维封闭抓取的研究工作对确定 3-2-2 型^[4], 3-3-2 型^[4]和 3-3-3 型^[5](图 5(c), (d) 和(e))等绳与动平台的连接点数为 3, 且每个连接点至少有 2 根绳牵引的 3R3T 机构的力封闭工作空间边界有指导意义. 但两者之间的真实关系, 还有待于进一步探讨.

4 结束语

(1) 绳牵引并联机构与等价的无摩擦点接触抓取模型, 在结构上可相类比是瞬时的; 而在力传递的相似性表明, 用来分析多指手抓取中一个位形的瞬时特性的很多工具, 是可以搬过来研究绳牵引并联机构的相关问题. (2) 绳牵引并联机构与多指手抓取之间的相似性, 可用来分析力封闭抓取规划与绳牵引并联机构的动平台的自由度数的关系. (3) 可用平面对心抓取定理, 来确定 2-2 型 1R2T 机构的力封闭工作空间边界; 同样, 可用 3 维封闭抓取应用于确定 3R3T 机构的力封闭工作空间边界.

参 考 文 献

- 1 Voglewede P A, Ebert-Uphoff I. Application of the antipodal grasp theorem to cable driven robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(4): 713~ 718
- 2 摩雷 R M, 李泽湘, 萨思特里 S S. 机器人操作的数学导论[M]. 徐卫良, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1998. 151~ 154
- 3 Canny J, Mirtich B. Easily computable optimum grasps in 2-D and 3-D[J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994 739~ 747
- 4 Verhoeven R. Analysis of the workspace of tendon-based stewart platforms[D]. [Dissertation]. Duisburg: Gerhard Mercator University, 2004 103
- 5 郑亚青. 绳牵引并联机构若干关键理论问题及其在风洞支撑系统中的应用研究[D]. [学位论文]. 泉州: 华侨大学机电及自动化学院, 2004 71

On the Connections Between Wire-Driven Parallel Manipulators and Multi-Finger Grasping

Zheng Yaqing

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract Because there exist architecture correspondences and similarity of force transmission between a wire driven parallel manipulator and its corresponding grasp with frictionless point contacts, many tools from grasping that analyze instantaneous properties of a configuration should carry over to wire driven parallel manipulators and vice versa. A method using planar antipodal grasp theorem and another theorem from it proposed by Ebert-Uphoff to determine the boundary of force closure workspace for wire driven parallel manipulators with 1R2T class with 2-2 type has been demonstrated. Finally, it has been presented that research on 3 dimensional force closure grasp by Canny may be helpful to determine the boundary of force closure workspace for wire driven parallel manipulators with 3R3T class with 3-2-2 type, 3-3-2 type and 3-3-3 type, but the real relationship between them is still underway.

Keywords wire driven, parallel manipulator, multi finger grasping, connection