DOI: 10.3901/JME.2020.19.103

一种可用于微创手术的并联机构运动学分析与性能优化^{*}

叶伟¹ 谢镇涛² 李秦川²

(1. 浙江理工大学机电产品可靠性分析与测试国家地方联合工程研究中心 杭州 310018;

2. 浙江理工大学机械与自动控制学院 杭州 310018)

摘要: 与串联机构相比, 并联机构具有刚度好, 精度高, 响应快等优点, 适合用于医疗领域。微创穿刺活检等手术要求机器人机构能够输出远中心运动。提出了一种用于微创手术的新型远中心并联机构, 其分支内部包含平行四边形闭环子链。采用螺旋理论对机构自由度进行了分析, 证明其能输出两个转动运动和一个移动运动, 且所有运动均通过远端固定中心。对机构进行位置分析, 建立了驱动参数与末端参数之间的映射。通过速度分析建立了雅可比矩阵, 并分析得到了机构的奇异位形, 包括逆解奇异、正解奇异和混合奇异。应用搜索法分析了机构的工作空间。采用运动/力传递指标对机构进行了性能分析, 绘制工作空间内的性能图谱。以优质空间大小为目标对机构进行了尺度优化。

关键词: 并联机构; 微创手术; 螺旋理论; 工作空间; 性能指标

中图分类号: TH112

Kinematics Analysis and Performance Optimization of a Parallel Manipulator for Minimally Invasive Surgery

YE Wei¹ XIE Zhentao² LI Qinchuan²

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Reliability Analysis and Testing for Mechanical and Electrical Products, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018;

2. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018)

Abstract: Compared with serial manipulators, parallel manipulators have the advantages of good rigidity, high precision and quick response, which are suitable for medical field. Operations in minimally invasive biopsies require robotic manipulators that can output remote center of motion. A novel parallel manipulator with remote center of motion is proposed for minimally invasive surgery. Each limb of the parallel manipulator includes a closed-loop parallelogram. Mobility analysis is carried out based on screw theory, which shows the manipulator has two rotational and one translational degrees of freedom passing through a fixed remote center. Mapping between the input parameters and the end-effector output parameters is obtained through position analysis. Jacobian matrix is established based on velocity analysis, which is used to determine the singular configurations of the manipulator. It has inverse singularities, direct singularities and combined singularities. Workspace is obtained using a search method. Performance analysis is conducted based on the motion/force transmission index. Performance distributions in the workspace are sketched. Optimal design is carried out to improve the global performance of the parallel manipulator.

Key words: parallel manipulator; minimally invasive surgery; screw theory; workspace; performance index

0 前言

微创手术是通过微小创口将特殊器械、物理能

量或化学药剂送入人体内部, 完成对人体内病变、畸形、创伤的灭活、切除、修复或重建等操作而达到治疗目的的外科手术^[1]。眼科微创手术是一种在眼球内进行的显微外科手术, 一般在虹膜上开切口, 伸入显微手术器械进行玻璃体切割或者视网膜手术等操作。眼球的体积较小, 可以视作直径约为 24 mm 的球体^[2], 这就使得手术操作空间较小, 又

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51525504, 51705465)。20200306 收到初稿, 20200520 收到修改稿

由于人类的生理性颤抖以及手术时间长、精度要求高等特点^[3], 必须引入辅助手术机器人来提升手术成功率。

眼科微创手术需要机器人驱动手术器械执行以绕虹膜刺入点为中心的三个转动自由度和通过虹膜刺入点的一个移动自由度, 该中心应远离机器人本体以避免干涉。这种围绕一个远离机器人本体的固定点运动被称为远中心运动^[4](Remote center of motion, RCM)。要使机器人实现 RCM 运动, 机器人机构的自由度应等于或者大于 RCM 运动所需的自由度。当机器人的自由度高于目标自由度时, RCM 运动需要通过运动控制来实现^[5]。当机器人控制出现问题时, 就会使得手术器械偏离远心点, 造成严重后果。采用自由度等于目标自由度的机器人机构具有先天优势, 从机构约束上保证自由度, 更具可靠性。著名的达芬奇手术机器人^[6]就采用了机构约束保证实现 RCM 运动。其他通过机械结构实现 RCM 运动的机构包括平行四边形类机构^[7-11]、球形关节^[12-13]机构、齿轮机构^[14]等。

并联机构具有刚度好、精度高、动态响应好等优点, 适合应用于微创手术领域。KUO 等^[4]提出一种四自由度运动解耦的并联 RCM 机构, 并进行了运动学与工作空间分析。ZOPPI 等^[15]提出一类四分支的并联 RCM 机构, 并对微创手术工作空间进行了分析。LI 等^[16]提出一种相交平面的方法, 综合出一类两自由度和三自由度 RCM 机构。YE 等^[17]提出一种由固定移动副驱动的 RCM 机构。CHEN 等^[18]提出一种两分支四自由度的并联 RCM 机构。

本文提出一种分支中包含 4R 平行四边形闭环子链的新型 RCM 并联机构, 分支内的闭环子链使得该机构具有很好的刚度。运用螺旋理论对该机构进行了自由度分析。通过运动学分析建立了位姿与驱动参数之间的映射。对机构进行了速度和奇异分析。最后基于运动/力传递指标绘制了机构的性能图谱, 并开展了机构参数优化。

1 机构描述与自由度分析

1.1 机构描述

如图 1、2 所示, 该远中心并联机构的动平台 M 通过三条分支与基座相连。分支 1 和分支 2 为 $R(P_a)RR$ 分支(R : 转动副。 P_a : 4R 平行四边形闭环子链), 分支 3 为 $R(P_a)RC$ 分支(C : 圆柱副)。该机构可以定义为 $2R(P_a)RR-R(P_a)RC$ 机构。每一分支的 P_a 铰链通过转动副与基座相连。分支 1、2 中靠近动平台的两个转动副轴线平行, 且垂直于该分支内与

基座相连的转动副轴线。分支 3 中两个转动副轴线相互垂直, 圆柱副轴线与动平台上分支 1、2 的转动副轴线垂直。分支 1、分支 2 所有构件共面且对称布置, 分支 3 所有构件共面。手术器械固定在动平台上, 其轴线与圆柱副轴线重合, 且是分支 1、2 所在平面和分支 3 所在平面的交线。分支 1 和 2 中与基座相连的转动副共轴, 其轴线与分支 3 中基座相连转动副轴线相交于点 O 。可知手术器械始终通过 O 点。分支 3 中基座相连转动副轴线与水平面间呈 30 度夹角以满足操作空间要求。图 3 为 $2R(P_a)RR-R(P_a)RC$ 机构的虚拟样机, 图 4 为 $2R(P_a)RR-R(P_a)RC$ 机构的实物样机。

图1 远中心并联机构三维简图

图2 远中心并联机构简图

1.2 自由度分析

螺旋理论^[19]在并联机构自由度分析中被广泛应用。为便于分析, 定义 $A_i (i=1,2,3)$ 为各分支第一转动副的中心点; $B_i, C_i, D_i, E_i (i=1,2,3)$ 为各分支 P_a 铰链四个转动副的中心点; $F_i (i=1,2,3)$ 为各分支第二转动副的中心点; G 为分支 1、2 第三转动副的中心点; H 为分支 3 圆柱副的中心点, 定义圆柱副轴线方向单位矢量为 w 。在基座上建立坐标系 $Oxyz$, 其中原点为点 O , x 轴与 A_2A_1 重合, y 轴与分支 3

中基座转动副轴线重合, z 轴满足右手定则。定义分支 1、2 所在平面为平面 Σ_1 , 平面法矢量为 $\mathbf{u}$; 分支 3 所在平面为平面 Σ_2 , 平面法矢量为 $\mathbf{v}$ 。

图 3 并联机构虚拟样机

图 4 并联机器人实物样机

平行四边形机构中, 相对两杆的相对运动为圆弧移动。为便于分析, 将 P_a 铰链等效为一个移动副。以分支 1 为例, 其中 P_a 铰链的运动可以用下式表示

$$\mathcal{S}_e = (\mathbf{0}; \mathbf{r}_{E_1 D_1} \times \mathbf{u}) \quad (1)$$

式(1)表示 P_a 铰链具有一个沿 $\mathbf{r}_{E_1 D_1} \times \mathbf{u}$ 方向的移动自由度。

对运动副简化后的机构进行自由度分析。在坐标系 $Oxyz$ 中, 分支 1 的运动螺旋为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{11} = (\mathbf{x}; \mathbf{0}) \\ \mathcal{S}_{12} = (\mathbf{0}; \mathbf{r}_{E_1 D_1} \times \mathbf{u}) \\ \mathcal{S}_{13} = (\mathbf{u}; \mathbf{r}_{F_1} \times \mathbf{u}) \\ \mathcal{S}_{14} = (\mathbf{u}; \mathbf{r}_G \times \mathbf{u}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{x}$ 是 x 轴的方向矢量。 $\mathcal{S}_{11}$ 是转动副 A_1 的运动螺旋, $\mathcal{S}_{12}$ 是复杂铰链 P_a 的等效运动螺旋, $\mathcal{S}_{13}$ 是转动副 F_1 的运动螺旋, $\mathcal{S}_{14}$ 是转动副 G 的运动螺旋。

对式(2)求反螺旋, 可得分支 1 的约束螺旋为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{11}^r = (\mathbf{u}; \mathbf{0}) \\ \mathcal{S}_{12}^r = (\mathbf{0}; \mathbf{x} \times \mathbf{u}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\mathcal{S}_{11}^r$ 表示分支 1 提供一个约束力, 该约束力过坐标原点 O , 方向平行于矢量 $\mathbf{u}$; $\mathcal{S}_{12}^r$ 表示分支 1 提供一个约束力偶, 该力偶的轴线平行于矢量 $\mathbf{x} \times \mathbf{u}$ 。

分支 2 与分支 1 结构相同, 根据对称性, 可得分支 2 的约束螺旋同样为式(3)所示。

分支 3 的运动螺旋可表示为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{31} = (\mathbf{y}; \mathbf{0}) \\ \mathcal{S}_{32} = (\mathbf{0}; \mathbf{r}_{E_2 D_2} \times \mathbf{v}) \\ \mathcal{S}_{33} = (\mathbf{v}; \mathbf{r}_{F_3} \times \mathbf{v}) \\ \mathcal{S}_{34} = (\mathbf{w}; \mathbf{0}) \\ \mathcal{S}_{35} = (\mathbf{0}; \mathbf{w}) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\mathcal{S}_{34}$ 和 $\mathcal{S}_{35}$ 构成了圆柱副 H 的运动螺旋, 其余各运动螺旋含义与式(2)类似。

对式(4)求反螺旋, 可得分支 3 约束螺旋为

$$\mathcal{S}_{31}^r = (\mathbf{v}; \mathbf{0}) \quad (5)$$

式中, $\mathcal{S}_{31}^r$ 表示分支 3 提供一个约束力, 该约束力过坐标原点 O , 方向平行于矢量 $\mathbf{v}$ 。

综合式(3)、(5), 可写出动平台的约束螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{11}^r = (\mathbf{u}; \mathbf{0}) \\ \mathcal{S}_{12}^r = (\mathbf{0}; \mathbf{x} \times \mathbf{u}) \\ \mathcal{S}_{31}^r = (\mathbf{v}; \mathbf{0}) \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)求反螺旋, 可得动平台的运动螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_1^m = (\mathbf{0}; \mathbf{u} \times \mathbf{v}) \\ \mathcal{S}_2^m = (\mathbf{x}; \mathbf{0}) \\ \mathcal{S}_3^m = (\mathbf{u}; \mathbf{0}) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)表明, 机构的动平台有三个自由度, 包括两个转动自由度和一个移动自由度。其中, 转动轴线均通过点 O (即 RCM 点), 方向分别沿着 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{u}$ 方向。移动自由度沿着 $\mathbf{u} \times \mathbf{v}$ (即矢量 $\mathbf{w}$) 方向。因此, 该机构可输出两转动一移动 RCM 运动。在器械上增加一个自转自由度后, 可输出三转动一移动 RCM 运动, 能满足微创手术自由度需要。

2 位置分析

选取关节 B_1 、 B_2 、 B_3 为该并联机构的驱动关节, 驱动角度为 $\theta_{12}, \theta_{22}, \theta_{32}$ 。位置分析的目的在于建立驱动关节参数与输出参数间的映射。该机构具有三个自由度, 需要引入三个独立参数描述动平台的位姿, 此处采用末端点 P 的坐标 (x_0, y_0, z_0) 。已知动平台的位置参数, 求解各驱动关节输入参数的这一过程为位置逆解。由于机构各分支始终位于某一平面内, 位置逆解可转化为平面几何问题。

取分支 1 进行分析, 如图 5 所示, 作 $F_1 E_1' // C_1 B_1$, 与 $O E_1$ 交于点 E_1' 。分支 1 中各参数含义如表 1 所示。

表1 分支1参数含义

参数	含义
φ_{11}	OG 与 OE'_1 的夹角
φ_{12}	E'_1G 与 E'_1O 的夹角
φ_{13}	E'_1G 与 E'_1F_1 的夹角
φ_{14}	GF_1 与 F_1C_1 的夹角
L	杆 GP 长度
L_1	杆 OB_1 长度
L_2	杆 B_1C_1 长度
L_3	杆 C_1F_1 长度
L_4	杆 F_1G 长度
a_1	杆 E'_1G 长度

图5 分支1平面图

根据 GO 、 OP 共线, 可得 G 点的坐标 $[x_1, y_1, z_1]$

$$\begin{cases} x_1 = x_0 \left(1 - \frac{L}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \right) \\ y_1 = y_0 \left(1 - \frac{L}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \right) \\ z_1 = z_0 \left(1 - \frac{L}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \right) \end{cases} \quad (8)$$

易得

$$\varphi_{11} = \arccos \frac{x_1}{b} \quad (9)$$

式中, $b = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}$ 。

在 $\triangle OGE'_1$ 中, 运用余弦定理易得

$$a_1 = \sqrt{b^2 + (L_1 - L_3)^2 - 2(L_1 - L_3)x_1} \quad (10)$$

此时, $\triangle OGE'_1$, $\triangle E'_1GF_1$ 三边已知, 可用正弦定理或者余弦定理求得

$$\varphi_{12} = \arcsin \frac{b \sin \varphi_{11}}{a_1} \quad (11)$$

$$\varphi_{13} = \arccos \frac{a_1^2 + L_2^2 - L_4^2}{2a_1 L_2} \quad (12)$$

易得 $\theta_{12} = \pi - \varphi_{12} - \varphi_{13}$ 。

分支2与分支1结构相同, 可将分支2对应的参数代入上面计算过程即可得到 θ_{22} 的表达式。

对分支3进行分析(图6)。作 $F_3E'_3 // C_3B_3$, 与 OE_3 交于点 E'_3 ; $F_3E'_3 // HO$, 与 $H'F_3$ 交于点 F'_3 。分支3中各参数含义如表2所示。

表2 分支3参数含义

参数	含义
β	HF_3 与 HO 的夹角
φ_{31}	HO 与 OA_3 的夹角
φ_{32}	E'_3F_3 与 $E'_3F'_3$ 的夹角
φ_{34}	HF_1 与 F_3C_3 的夹角
l_1	杆 OB_3 长度
l_2	杆 B_3C_3 长度
l_3	杆 C_3F_3 长度
l_4	杆 F_3H 长度

图6 分支3平面图

易得 $\varphi_{31} = \arccos \frac{y_1}{b}$, 在 $\triangle HH'F_3$ 中, 根据正弦定理可得

$$|H'F_3| = \frac{l_4}{\sin \varphi_{31}} \sin \beta \quad (13)$$

根据 $|H'F_3| = l_1 - l_3$, 易得

$$|F_3F'_3| = |H'F_3| - |H'F'_3|$$

$$|F_3F'_3| = \frac{l_4}{\sin \varphi_{31}} \sin \beta - l_1 + l_3 \quad (14)$$

在 $\triangle E'_3F'_3F_3$ 中, 易得 $\angle E'_3F'_3F_3 = \pi - \varphi_{31}$, 运用正弦定理, 便可求得 φ_{32} , 从而解出 $\theta_{32} = \varphi_{31} - \varphi_{32}$ 。

位置正解是已知三个驱动参数, 求解末端点的坐标, 是上述过程的逆运算, 仍可以通过几何法列方程进行求解。由于在后续分析中, 位置正解不会用到, 此处省略。

3 速度与奇异分析

3.1 速度分析

速度分析的目的在于建立关节空间的速度与末

端执行器速度之间的映射关系,是后续机构奇异位形分析的基础。此处运用螺旋理论对机构的雅可比矩阵进行求解^[20]。

动平台的瞬时速度 $\$P$ 可以表示为

$$\$P = \sum_{j=1}^{C_i} \dot{\theta}_{ij} \$_{ij} \quad i=1,2,3 \quad j=1,2,\dots,C_i \quad (15)$$

式中, $\$P = [\omega^T \quad v_O^T]^T$, ω 是动平台的角速度, v_O 是动平台上与坐标原点重合点的线速度矢量; C_i 是支链 i 的单自由度关节运动螺旋数目, $\dot{\theta}_{ij}$ 是支链 i 中第 j 个关节的转动或移动速度。在自由度分析时,已得到了动平台的约束螺旋系。根据运动螺旋与约束螺旋互易积为零可得

$$J_c \$P = 0 \quad (16)$$

式中, $J_c = \begin{bmatrix} 0 & u^T \\ [x \times u]^T & 0 \\ 0 & v^T \end{bmatrix}$ 是约束子矩阵,表示支链

对动平台的约束。

对雅可比矩阵余项即运动子矩阵进行求解。锁定分支 1 的主动关节,此时分支 1 增加了一个约束螺旋为

$$\$'_{13} = (r_{GF_1}; r_G \times r_{GF_1}) \quad (17)$$

式中, r_{GF_1} 是 GF_1 的方向矢量。 $\$'_{13}$ 表示过点 G , 沿着 GF_1 方向的力螺旋,其物理意义是分支驱动关节提供的驱动力螺旋。

对式(15)两边以式(17)做互易积,可得

$$J_{q1} \dot{\theta}_{12} = J_{x1} \$P \quad (18)$$

式中, $J_{q1} = \$'_{13} \circ \$_{12}$, $J_{x1} = [[r_G \times r_{GF_1}]^T \quad r_{GF_1}^T]$ 。

分支 2 与分支 1 结构相同,可直接写出

$$J_{q2} = \$'_{23} \circ \$_{22} \quad J_{x2} = [[r_G \times r_{GF_2}]^T \quad r_{GF_2}^T]$$

利用同样的方法对 J_{q3} 、 J_{x3} 求解。锁定分支 3 主动关节,此时分支 3 增加的约束螺旋为

$$\$'_{32} = (v \times w; r_{F_3} \times (v \times w)) \quad (19)$$

式中, $\$'_{32}$ 表示过点 F_3 , 沿着 $v \times w$ 方向的力螺旋,其物理意义是分支驱动关节提供的驱动力螺旋。

对式(15)两边以式(19)做互易积,可得

$$J_{q3} \dot{\theta}_{32} = J_{x3} \$P \quad (20)$$

式中, $J_{q3} = \$'_{32} \circ \$_{32}$, $J_{x3} = [[r_{F_3} \times (v \times w)]^T \quad [v \times w]^T]$ 。

整理以上方程,可得包含雅可比矩阵的机构速度方程如下

$$J_q \dot{q}_0 = J_x \$P \quad (21)$$

$$J_q = \text{diag}(1,1,1,(\$'_{13} \circ \$_{12}),(\$'_{23} \circ \$_{22}),(\$'_{32} \circ \$_{32}))$$

$$\dot{q}_0 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \dot{\theta}_{12} \quad \dot{\theta}_{22} \quad \dot{\theta}_{32}]^T$$

$$J_x = \begin{bmatrix} 0 & u^T \\ [x \times u]^T & 0 \\ 0 & v^T \\ [r_G \times r_{GF_1}]^T & r_{GF_1}^T \\ [r_G \times r_{GF_2}]^T & r_{GF_2}^T \\ [r_{F_3} \times (v \times w)]^T & [v \times w]^T \end{bmatrix}$$

3.2 奇异分析

根据雅可比矩阵分析机构奇异位形^[21]。

当 $\det(J_q) = 0$ 且 $\det(J_x) \neq 0$ 时,机构处于逆解奇异位形(图 7)。通过分析可知,仅当 $\$'_{13} \circ \$_{12} = 0$ 或 $\$'_{23} \circ \$_{22} = 0$ 或 $\$'_{32} \circ \$_{32} = 0$ 时,满足逆解奇异条件,此时 $GF_i // D_i E_i (i=1,2)$ 或 $HO \perp E_3 D_3$,机构自由度瞬时减少。

图 7 逆解奇异位形

当 $\det(J_q) \neq 0$ 且 $\det(J_x) = 0$ 时,机构处于正解奇异位形。通过分析可知,机构发生正解奇异有三种情况。

情况 1: 当矢量 u 与矢量 v 共线,即平面 Σ_1 与平面 Σ_2 共面,机构正解奇异(图 8)。此时,矩阵 J_x 的第一行与第二行线性相关,矩阵降秩,机构自由度瞬时增加。在实际应用中,末端无法达到此摆动角度,因此在实际应用中不存在。

图 8 正解奇异位形一

情况 2: 当矢量 r_{GF_1} 与矢量 r_{GF_2} 共线,机构正解奇异(图 9)。此时矩阵 J_x 的第四行与第五行线性相关,矩阵降秩,分支 1 与分支 2 的传递力螺旋线性相关,机构自由度瞬时增加。

图 9 正解奇异位形二

情况 3: 当分支 3 的驱动力螺旋 $\$_{32}^r$ 通过点 O 时, 该力螺旋与约束螺旋 $\$_{11}^r$ 和 $\$_{31}^r$ 共面且交于一点。此时, 矩阵 J_x 的第一行、第三行与第六行线性相关, 机构的自由度瞬时增加。该奇异位形如图 10 所示。

图 10 正解奇异位形三

当机构同时满足逆解奇异和正解奇异条件时, 机构出现混合奇异, 如图 11 所示。

图 11 混合奇异位形

4 工作空间

并联机构的工作空间一般较小, 由于多分支约束的复杂性, 工作空间形状无法直观得到。这里采用搜索法确定机构的工作空间。

机构的尺度参数如表 3 所示。限定驱动副行程 $5^\circ \leq \alpha_i \leq 175^\circ$ ($i=1,2,3$), 其他约束条件包括以下几点。

(1) 考虑点 G 和 E_1' 间距离, 令 $L_4 - L_2 \leq GE_1'(GE_2') \leq L_2 + L_4$ 。

(2) 避免动平台与分支构件干涉, 令点 F_i ($i=1, 2, 3$) 到 GO 距离大于等于 20 mm。

(3) 避免圆柱副 H 与转动副 G 干涉, 令 $HG \geq 60\text{mm}$ 。

(4) 为远离图 10 所示的奇异位形, 令 $\varphi_{34} \leq \pi$ 。

表 3 机构尺度参数

尺度参数	数值
杆 GP 长度 L/mm	370
杆 OB_1 长度 L_1/mm	220
杆 B_1C_1 长度 L_2/mm	150
杆 C_1F_1 长度 L_3/mm	140
杆 F_1G 长度 L_4/mm	270
杆 OB_3 长度 l_1/mm	262.75
杆 B_3C_3 长度 l_2/mm	90
杆 C_3F_3 长度 l_3/mm	140
杆 F_3H 长度 l_4/mm	150
HF_3 与 HO 的夹角 $\beta/^\circ$	55

给定搜索范围: $-45\text{ mm} \leq z_0 \leq 0\text{ mm}$, $-40\text{ mm} \leq x_0, y_0 \leq 40\text{ mm}$ 利用软件将工作空间点离散化, 然后判断每一个点是否满足约束条件, 可得到机构的可达工作空间如图 12 所示。

图 12 工作空间

图 12 中的工作空间表示手术器械末端点所能到达的位置。由图可知, 工作空间包含一个以 O 点为中心, 高度为 45 mm, 顶角为 60° 的圆锥体。由于微创手术 95% 的操作都位于顶角为 60° 的圆锥体内^[22], 且眼球为一个直径约 24 mm 的球体, 工作空间能够满足眼科微创手术要求。

5 性能分析与优化

机构设计尺寸参数的合理性直接影响机构的整体性能。对机构进行性能分析是优化设计的基础。雅可比矩阵条件数在机构的精度分析与灵巧度分析

中应用广泛,但是当机构存在转动与移动的混合自由度时,会出现元素的单位量纲不统一,物理意义不明确等问题^[23]。运动/力传递性能指标^[24-26]反应了能量从驱动关节到末端动平台的传递效率,具有无量纲、与坐标系无关等优点。因此此处采用该指标进行分析。

5.1 局部传递指标

在运动/力传递性能指标中,定义输入传递性能、输出传递性能如下

$$\lambda_i = \frac{|\$_{ii} \circ \$_{Ti}|}{|\$_{ii} \circ \$_{Ti}|_{\max}} \quad (22)$$

$$\eta_i = \frac{|\$_{Oi} \circ \$_{Ti}|}{|\$_{Oi} \circ \$_{Ti}|_{\max}} \quad (23)$$

式中, λ_i 是分支 i 的输入传递性能指标, η_i 是分支 i 的输出传递性能指标, 输入传递性能指标和输出传递性能指标分别表示能量从驱动输入端传递到分支和从分支传递到输出端的效率。 $\$_{ii}$ 是分支 i 的输入运动螺旋(ITS), $\$_{Oi}$ 是分支 i 的输出运动螺旋(TWS), $\$_{Ti}$ 是分支 i 的传递力螺旋(OTS), 分母最大值计算方法详见文献[25]。 λ_i, η_i 的取值范围是 0 到 1, 值越高代表机构对应的传递性能越好, 综合考虑各分支的输入传递性能和输出传递性能, 可得到局部运动/力传递性能指标(LTI), 其表达式为

$$\Gamma = \min\{\lambda_i, \eta_i\} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (24)$$

式中, Γ 量纲为一旦与坐标系选择无关。 Γ 的值越大, 表示机构在该瞬时姿态的运动/力传递特性越优异, 而当 Γ 的值接近或等于 0 时, 表示机构接近奇异位形, 无法有效地将运动/力从驱动副传递至动平台, 会出现卡死等现象。

以分支 1 为例, 运动螺旋和约束螺旋分别如式(2)、(3)所示。分支 1 的主动关节为 P_a 铰链, 可得 $\$_{i1} = \$_{12}$; 传递力螺旋已在速度分析部分进行求解, 可得 $\$_{T1} = \$_{13}^r$ 。

以此类推, 可得分支 2 和分支 3 的传递力螺旋:

$$\$_{T2} = \$_{23}^r, \$_{T3} = \$_{32}^r。$$

保留第 i 个分支单一驱动, 锁住另外两个分支内驱动, 可得到的五维力螺旋系如表 4 所示。此时机构仅有一个自由度, 根据螺旋的互易求得分支 i 的输出运动螺旋 $\$_{Oi}$, 其中 $\$_{Oi}$ 满足

$$\$_{Oi} \circ U^i = 0 \quad (25)$$

将上述求得的分支输入运动螺旋、输出运动螺旋和传递力螺旋代入式(22)~(24), 可得到机构的 LTI 指标。

将机构可达工作空间内包含的以 O 点为中心,

表 4 分支保留/锁住的组合

保留的驱动	锁住的驱动	作用到动平台的力螺旋
1	2、3	$U^1 = (\$_{11}^r, \$_{12}^r, \$_{31}^r, \$_{T2}, \$_{T3})$
2	1、3	$U^2 = (\$_{11}^r, \$_{12}^r, \$_{31}^r, \$_{T1}, \$_{T3})$
3	1、2	$U^3 = (\$_{11}^r, \$_{12}^r, \$_{31}^r, \$_{T1}, \$_{T2})$

高度为 45 mm, 顶角为 60° 的圆锥体作为机构的目标工作空间。下面给出机构在目标工作空间内的 LTI 指标分布。用角度 φ 和 χ 描述末端执行器即手术器械的姿态, h 取末端点 z 坐标的绝对值, 其中 $x_0 = h \tan \varphi \cos \chi$, $y_0 = h \tan \varphi \sin \chi$ 。几何关系如图 13 所示。

图 13 工作空间几何关系图

分别将 h 取值为 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm, 以 φ 和 χ 为坐标, 绘制机构在工作空间内的性能分布图, 如图 14a~14d 所示。由图可知, 机构在目标工作空间内绝大部分的区域的 LTI 指标大于 0.7, 说明该机构整体性能较好。随着 h 取值的增加, 机构的性能变好; LTI 指标可以反应在目标工作空间内机构距离奇异位形的远近, 由图 14 可知, 在目标工作空间内机构远离奇异位形。

5.2 全域传递指标

LTI 指标只反映了机构在特定位形下的运动/力传递性能, 无法对机构整体运动/力传递性能进行评价。为弥补 LTI 指标的不足, 引入全域传递指标。从传递角的定义出发, 将工作空间内 $\Gamma \geq 0.8$ 的区域定义为优质传递空间。优质传递空间与整体工作空间的比值为全域传递指标

$$\sigma = \frac{\int_S dW}{\int_S dW} \quad (26)$$

式中, W 是机构的整体工作空间, S_G 是优质传递空间的面积, S 是整体工作空间的面积, σ 是全域传递指标。显然, σ 取值于 0 到 1 之间。 σ 越大, 表明机构优质传递空间所占百分比越大, 机构的性能越好。

观察图 14, 注意到机构的 LTI 指标分布关于原

点中心对称,说明分支3对LTI指标影响较小。因此,在此机构中,将分支1、2的尺度参数 L_2 与 L_4 作

图14 LTI指标分布图

为优化参数。计算不同参数对应的 σ 值,可以得到性能更为优越的参数选择。图15是以 $h=20$ mm为例,绘制的全域传递指标(GTI)变化图。

图15 全域传递指标变化图

图14b所示机构的参数对应图15中的点1,此时 $\sigma=0.80$ 。由图15可知,机构性能与 L_2 和 L_4 长度正相关。在图中取点2,此时 $L_2=154$ mm、 $L_4=276$ mm。与点1相比,显然点2对应的机构参数整体性能更好, $\sigma=0.96$ 。绘制点2参数对应机构的LTI指标分布图,如图16所示。对比图14b可知, $\Gamma \geq 0.8$ 区域面积显著增加,机构的性能得到了优化。

图16 LTI指标分布图($L_2=154$ mm, $L_4=276$ mm, $h=20$ mm)

6 结论

(1) 提出了一种新型RCM并联机构,该机构分支内含平行四边形闭环子链。通过螺旋理论分析自由度表明该机构能输出绕远端定点的两个转动运动和过该点的移动运动,满足微创手术任务要求。

(2) 建立了机构的位置和速度模型。奇异分析表明机构存在逆解奇异、正解奇异和混合奇异。机构的工作空间包含一个顶角为 60° 、高45 mm的圆

锥体, 满足眼科微创手术要求。基于运动/力传递指标的性能分析表明机构在工作空间内性能良好, 并通过全域传递指标对机构进行了优化设计。

(3) 该机构可用于眼科、穿刺活检等微小创口高精度要求的外科手术。

参 考 文 献

- [1] 王国彪, 彭芳瑜, 王树新, 等. 微创手术机器人研究进展——“微创手术机器人及器械基础理论与关键技术”双清论坛综述[J]. 中国科学基金, 2009, 23(4): 209-214. WANG Guobiao, PENG Fangyu, WANG Shuxin, et al. A perspective on medical robotics for minimally invasive surgery—Review on the Shuangqing seminar titled “Fundamental theory and key technology of robotics for minimally invasive surgery” [J]. Science Foundation of China, 2009, 23(4): 209-214.
- [2] 赵堪兴, 杨培增. 眼科学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2013. ZHAO Kanxing, YANG Peizeng. Ophthalmology[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013.
- [3] 肖晶晶, 杨洋, 李大寨, 等. 眼科显微手术机器人研究进展及关键技术分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 15-22. XIAO Jingjing, YANG Yang, LI Dazhai, et al. Advances and key techniques of ophthalmic microsurgical robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 15-22.
- [4] KUO C H, DAI J S. Kinematics of a fully-decoupled remote center-of-motion parallel manipulator for minimally invasive surgery[J]. Journal of Medical Devices, 2012, 6(2): 021008.
- [5] GHODOUSSI M, BUTNER S E, WANG Y, et al. Robotic surgery—the transatlantic case[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 11-15, 2002, Washington, DC. USA: IEEE, 2002: 1882-1888.
- [6] GUTHART G S, SALISBURY J K. The IntuitiveTM telesurgery system: Overview and application[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 24-28, 2000, San Francisco, California. USA: IEEE, 2000: 618-621.
- [7] CHEN Genliang, WANG Jiepeng, WANG Hao. A new type of planar two degree-of-freedom remote center-of-motion mechanism inspired by the Peaucellier–Lipkin Straight-Line linkage[J]. Journal of Mechanical Design, 2019, 141(1): 015001.
- [8] LI Jianmin, ZHANG Guokai, XING Yuan, et al. A class of 2-degree-of-freedom planar remote center-of-motion mechanisms based on virtual parallelograms[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2014, 6(3): 031014.
- [9] TAYOR R H, FUNDA J, ELDIDGE B, et al. A telerobotic assistant for laparoscopic surgery[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 1995, 14(3): 279-288.
- [10] 宗光华, 裴旭, 于靖军, 等. 双平行四杆型远程运动中心机构的设计[J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 103-108. ZONG Guanghua, PEI Xu, YU Jinjun, et al. Design of double parallelogram remote center of motion mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12): 103-108.
- [11] YE Wei, ZHANG Bo, LI Qinchuan. Design of a 1R1T planar mechanism with remote center of motion[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 149: 103845.
- [12] KIM S K, SHIN W H, KO S Y, et al. Design of a compact 5-DOF surgical robot of a spherical mechanism: CURES[C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 02-05, 2008, Xian. China: IEEE, 2008: 990-995.
- [13] NOUAILLE L, POISSON G, ZHANG X, et al. Method of dimensional optimization of spherical robots for medical applications using specialized indices[J]. Advanced Robotics, 2014, 28(3): 173-186.
- [14] LEHMAN A C, TIWARI M M, SHAH B C, et al. Recent advances in the CoBRASurge robotic manipulator and dexterous miniature in vivo robotics for minimally invasive surgery[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224(7): 1487-1494.
- [15] ZOPPI M, ZLATANOV D, GOSSELIN C M. Analytical kinematics models and special geometries of a class of 4-DOF parallel mechanisms[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(6): 1046-1055.
- [16] LI Jianmin, ZHANG Guokai, MÜLLER A, et al. A family of remote center of motion mechanisms based on intersecting motion planes[J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 135(9): 091009.
- [17] 叶伟, 杨臻, 李秦川. 一种远中心并联机构运动学与性能分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 65-73. YE Wei, YANG Zhen, LI Qinchuan. Kinematics and performance analysis of a parallel manipulator with remote center of motion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 65-73.

- [18] CHEN Genliang, WANG Jue, WANG Hao, et al. Design and validation of a spatial two-limb 3R1T parallel manipulator with remote center-of-motion[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 149: 103807.
- [19] LU Wenjuan, ZENG Daxing, HUANG Zhen. Over-constraints and a unified mobility method for general spatial mechanisms Part 2: Application of the principle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(1): 1-10.
- [20] JOSHI S A, TSAI L W. Jacobian analysis of limited-DOF parallel manipulators[J]. Journal of Mechanical Design, 2002, 124(2): 254-258.
- [21] GOSSELIN C M, ANGELES J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(3): 281-290.
- [22] LUM M J H, ROSEN J, SINANAN M N, et al. Kinematic optimization of a spherical mechanism for a minimally invasive surgical robot[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 26-May 01, 2004, New Orleans, Los Angeles. USA: IEEE, 2004: 829-834.
- [23] MERLET J P. Jacobian, manipulability, condition number, and accuracy of parallel robots[J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128(1): 199-206.
- [24] WANG Jinsong, WU Chao, LIU Xinjun. Performance evaluation of parallel manipulators: Motion/force transmissibility and its index[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(10): 1462-1476.
- [25] 陈祥, 谢福贵, 刘辛军. 并联机构中运动/力传递功率最大值的评价[J]. 机械工程学报, 2014, 50(3): 1-9.
CHEN Xiang, XIE Fugui, LIU Xinjun. Evaluation of the maximum value of motion/force transmission power in parallel manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 1-9.
- [26] ZHOU Yanhua, XIE Fugui, LIU Xinjun. Optimal design of a main driving mechanism for servo punch press based on performance atlases[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(5): 909-917.

作者简介: 叶伟, 男, 1988 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为并联机器人机构学。

E-mail: wye@zstu.edu.cn

李秦川(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为并联机器人机构学和应用技术。

E-mail: lqchuan@zstu.edu.cn