

DOI: 10.3901/JME.2022.03.036

一种用于眼内手术的混联机构设计与运动学分析*

杨 洋 陈子路 广晨汉 郑 昱 林 闯
(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

摘要: 为利用机器人实现眼内手术操作所需的远程运动中心(Remote center of motion, RCM)运动模式, 提出了一种新型六自由度混联机构(RP+PPRRP/PPRR)。首先受 U 副结构形式的启发, 利用两组 RPPRP 平面五杆机构单元重构出 PPRRP/PPRR 并联构型。根据螺旋理论计算该机构的自由度, 并分析自由度性质, 从而确认机构对 RCM 运动模式的兼容性。利用坐标变换方法建立机构的正运动学模型以及包含 RCM 参数(算法)的逆运动学模型。然后基于机构构型, 设计、构建了物理样机。最后采用主从控制方式进行物理样机运动实验, 验证运动学模型(算法)的正确性以及机构对眼内手术的适配性。

关键词: 眼内手术; 混联机构; 运动学分析; 远程运动中心

中图分类号: TH112

Design and Kinematics Analysis of a Serial-parallel Hybrid Mechanism Used for Intraocular Surgeries

YANG Yang CHEN Zilu GUANG Chenhan ZHENG Yu LIN Chuang
(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: To realize RCM (remote center of motion) motion mode required for robot-assisted intraocular surgeries, a novel six-degree-of-freedom series-parallel hybrid mechanism (RP+PPRRP/PPRR) is proposed. Firstly, inspired by the structure of U pair (Universal pair), the parallel configuration (PPRRP/PPRR) is reconstructed by two sets of planar five-bar mechanism (RPPRP) units. After calculating the DOFs (degrees of freedom) and analyzing their characteristics based on screw theory, the capability of RCM motion mode for this mechanism is confirmed. Subsequently, the forward kinematics model and the inverse kinematics model of this mechanism containing RCM parameters are established through coordinate transformation method. Then, according to the configuration of the mechanism, a physical prototype is designed and established. Finally, based on master-slave control method, a motion experiment is performed to verify the correctness of the kinematic model and the adaptability of this mechanism to intraocular surgeries.

Key words: intraocular surgery; hybrid mechanism; kinematics analysis; remote center of motion

0 前言

利用机器人实现眼内手术, 特别是眼后节手术时, 须在巩膜处开孔, 然后将末端器械刺入巩膜孔进行手术操作^[1]。在手术中, 眼内的器械会绕刺入点进行三维转动以及沿器械轴线的移动。这与微创手术(机器人辅助的)中常用的远程运动中心(Remote center of motion, RCM)机构所提供的运动

模式一致, 即机构的输出构件可以绕空间中某固定点(RCM 点)转动以及沿过该固定点的轴线移动, 并且在此固定点处并没有实际的运动副存在^[2-3]。

近年来, 国内外学者对用于眼内手术机器人的 RCM 机构的进行了研究。其中多数机构通过机构构型物理地约束出固定的 RCM 点, 比如: 美国霍普金斯大学、荷兰埃因霍温大学、美国哈佛大学及北京航空航天大学的学者分别研发过基于平行四杆构型的 RCM 机构^[4-7]; 日本东京大学、美国加州大学洛杉矶分校的研究者各自利用圆弧导轨来构建 RCM 机构^[8-9]。

* 国家自然科学基金(51875011)和国家重点研发计划(2017YFB1302702)资助项目。20210214 收到初稿, 20210704 收到修改稿

如图 3 所示, P_1 与 P_2 的运动方向正交, P_3 与 P_4 的运动方向正交。 P_1 、 P_2 所处的平面与 P_3 、 P_4 所处的平面平行。 R_1 、 R_2 的轴线 A_1 、 A_2 正交(交于点 S_0), R_3 、 R_4 的轴线 A_3 、 A_4 正交(交于点 S_d)。 A_1A_2 张成的平面与 A_3A_4 张成的平面平行。 P_5 、 P_6 的运动方向平行, R_5 的轴线方向与 P_5 的运动方向相同, P_5

2 机构运动学模型

2.1 正运动学模型

在不同构件上依次建立坐标系来构建相应的变换矩阵, 进而得到末端器械的位姿相对于基座的变换矩阵。

$${}^4_0T_f = {}^1_0T_f {}^2_1T_f {}^3_2T_f {}^4_3T_f \quad (7)$$

为描述各变换矩阵, 建立了笛卡儿直角坐标系, 如图 5 所示。

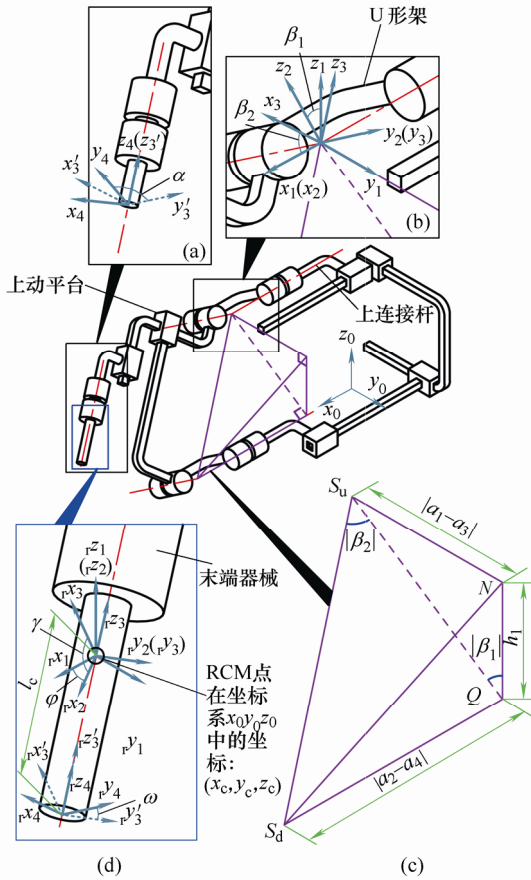


图 5 正逆运动学模型

$x_0y_0z_0$ 为基座坐标系, 建立方式与图 3 中的相同。

坐标系 $x_1y_1z_1$ 固定于上连接件, 见图 5b, 原点与点 S_u 重合, x_1 轴、 y_1 轴、 z_1 轴的方向分别始终与 x_0 轴、 y_0 轴、 z_0 轴相同。可构建变换矩阵 1_0T_f , 其中变量为 a_4 。

$${}^1_0T_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_4 + d_1 \\ 0 & 1 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$x_2y_2z_2$ 固定于上 U 型架, 见图 5b, 原点与点 S_u

重合, x_2 轴与 x_1 轴重合, y_2 轴与 A_4 轴重合, x_2 轴、 y_2 轴、 z_2 轴在初始状态下的方向与 x_0 轴、 y_0 轴、 z_0 轴相同。可构建变换矩阵 2_1T_f , 其中变量为 β_1 。

$${}^2_1T_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_1 & -\sin \beta_1 & 0 \\ 0 & \sin \beta_1 & \cos \beta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$x_3y_3z_3$ 固定于上动平台, 如图 5b 所示, 原点与点 S_u 重合, y_3 轴与 y_2 轴重合, x_3 轴与末端器械轴线垂直, x_3 轴、 y_3 轴、 z_3 轴在初始状态下的方向与 x_0 轴、 y_0 轴、 z_0 轴相同。可构建变换矩阵 3_2T_f , 其中变量为 β_2 。

$${}^3_2T_f = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & 0 & \sin \beta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta_2 & 0 & \cos \beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$x_4y_4z_4$ 固定于末端器械上, 如图 5a 所示, 原点与末端器械的末端点重合, z_4 轴与 z_3 轴重合, x_3 轴、 y_3 轴、 z_3 轴在初始状态下的方向与 x_0 轴、 y_0 轴、 z_0 轴相同。可构建变换矩阵 4_3T_f , 其中变量为 a_5 。

$${}^4_3T_f = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & d_2 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_5 - h_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\sin \beta_1 = \frac{a_1 - a_3}{\sqrt{(a_1 - a_3)^2 + h_1^2}} \quad \cos \beta_1 = \frac{h_1}{\sqrt{(a_1 - a_3)^2 + h_1^2}}$$

$$\tan \beta_2 = \frac{a_4 - a_2}{\sqrt{(a_1 - a_3)^2 + h_1^2}} \quad \sin \beta_2 = \frac{\tan \beta_2}{\sqrt{\tan^2 \beta_2 + 1}}$$

$$\cos \beta_2 = \frac{1}{\sqrt{\tan^2 \beta_2 + 1}}$$

β_1 的正切值为 $|NS_u|/|NQ|$, 符号与 $a_1 - a_3$ 一致。其中 NS_u 为 S_dS_u 在 y_0 轴上的投影, NQ 为 S_dS_u 在 z_0 轴上的投影。 β_2 的正切值为 $|QS_d|/|QS_u|$, 符号与 $a_4 - a_2$ 一致。其中 QS_d 为 S_dS_u 在 x_0 轴上的投影, QS_u 为 S_dS_u 在 $y_0o_0z_0$ 面上的投影。

将式(8)~(11)代入式(7), 可得

$${}^4_0T_f = \begin{bmatrix} o_{x_f} & p_{x_f} & q_{x_f} & x_f \\ o_{y_f} & p_{y_f} & q_{y_f} & y_f \\ o_{z_f} & p_{z_f} & q_{z_f} & z_f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
o_{x_f} &= \frac{\cos \alpha}{k} & o_{y_f} &= \frac{-\Delta_y \Delta_x \cos \alpha}{m^2 k} + \frac{h_1 \sin \alpha}{m} \\
o_{z_f} &= \frac{\Delta_x h_1 \cos \alpha}{m^2 k} + \frac{\Delta_y \sin \alpha}{m} & p_{x_f} &= -\frac{\sin \alpha}{k} \\
p_{y_f} &= \frac{\Delta_y \Delta_x \sin \alpha}{m^2 k} + \frac{h_1 \cos \alpha}{m} \\
p_{z_f} &= \frac{-\Delta_x h_1 \sin \alpha}{m^2 k} + \frac{\Delta_y \cos \alpha}{m} \\
q_{x_f} &= \frac{-\Delta_x}{mk} & q_{y_f} &= \frac{-\Delta_y}{mk} & q_{z_f} &= \frac{h_1}{mk} \\
x_f &= a_4 + d_1 + \frac{d_2}{k} + \frac{-\Delta_x (a_5 - h_2)}{mk} \\
y_f &= a_3 - \frac{\Delta_y}{mk} \left(\frac{\Delta_x d_2}{m} + a_5 - h_2 \right) \\
z_f &= h_1 + \frac{h_1}{mk} \left(\frac{\Delta_x d_2}{m} + a_5 - h_2 \right)
\end{aligned}$$

式中, $k = \sqrt{\frac{\Delta_x^2}{h_1^2 + \Delta_y^2} + 1}$, $m = \sqrt{h_1^2 + \Delta_y^2}$, $\Delta_y =$

$a_1 - a_3$, $\Delta_x = a_2 - a_4$ 。

至此, 得到了机构的运动学正解。

2.2 RCM 运动模式算法及逆运动学模型

如图 5d 所示, 末端器械已刺入 RCM 点(坐标为 (x_c, y_c, z_c))且刺入深度为 l_c 。可通过 z - y - z 欧拉角描述法^[17]表示末端器械的空间姿态(2_1T_r 、 3_2T_r 及 4_3T_r), 即 RCM 运动模式所需的三个旋转运动。再利用刺入深度 l_c 及 RCM 点坐标建立相应的变换矩阵(1_0T_r 及 4_3T_r)。

利用以上的变换矩阵, 可得到末端器械的位姿相对于基座的变换矩阵

$$\begin{aligned}
{}^4_0T_r &= {}^1_0T_r {}^2_1T_r {}^3_2T_r {}^4_3T_r \quad (13) \\
{}^4_3T_r &= \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^3_2T_r &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^2_1T_r &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$${}^1_0T_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_c \\ 0 & 1 & 0 & y_c \\ 0 & 0 & 1 & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^4_0T_r = \begin{bmatrix} o_{x_r} & p_{x_r} & q_{x_r} & x_r \\ o_{y_r} & p_{y_r} & q_{y_r} & y_r \\ o_{z_r} & p_{z_r} & q_{z_r} & z_r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, $x_r = x_c + l_c \sin \gamma \cos \varphi$, $y_r = y_c + l_c \sin \gamma \sin \varphi$, $z_r = z_c + l_c \cos \gamma$, $o_{x_r} = \cos \omega \cos \gamma \cos \varphi - \sin \omega \sin \varphi$, $o_{y_r} = \cos \omega \cos \gamma \sin \varphi + \sin \omega \cos \varphi$, $o_{z_r} = -\cos \omega \sin \gamma$, $p_{x_r} = -\sin \omega \cos \gamma \cos \varphi - \cos \omega \sin \varphi$, $p_{y_r} = -\sin \omega \cos \gamma \sin \varphi - \cos \omega \cos \varphi$, $p_{z_r} = \sin \omega \sin \gamma$, $q_{x_r} = \sin \gamma \cos \varphi$, $q_{y_r} = \sin \gamma \sin \varphi$, $q_{z_r} = \cos \gamma$ 。

变换矩阵 1_0T_r 、 2_1T_r 、 3_2T_r 及 4_3T_r 分别对应坐标系 $rX_1 rY_1 rZ_1$ 、 $rX_2 rY_2 rZ_2$ 、 $rX_3 rY_3 rZ_3$ 及 $rX_4 rY_4 rZ_4$ 。前 3 个坐标系的原点都位于 RCM 点, 最后 1 个坐标系的原点位于器械的末端点上。在初始状态下, 各坐标系的所有坐标轴方向都与基座坐标系的一致。

变换矩阵 4_0T_r 及 4_0T_r 都同样地描述末端器械相对于基座坐标系的位姿, 故矩阵应相等。

$${}^4_0T_r = {}^4_0T_f \quad (14)$$

若矩阵相等, 则其对应元素分别相等。这里 ${}^4_0T_f(i, j)$ 表示矩阵 4_0T_f 第 i 行, 第 j 列的元素 ($1 \leq i \leq 4$, $1 \leq j \leq 4$); 同理, ${}^4_0T_r(i, j)$ 表示矩阵 4_0T_r 第 i 行, 第 j 列的元素。

通过观察式 (13), 可首先联立 ${}^4_0T_f(3, 1)$ 、 ${}^4_0T_f(3, 3)$ 、 ${}^4_0T_r(3, 1)$ 及 ${}^4_0T_r(3, 3)$

$$\frac{q_{x_f}}{q_{z_f}} = \frac{{}^4_0T_f(3, 1)}{{}^4_0T_f(3, 3)} = \frac{{}^4_0T_r(3, 1)}{{}^4_0T_r(3, 3)} = \frac{q_{x_r}}{q_{z_r}} \quad (15)$$

可求得

$$\Delta_x = -h_1 \tan \gamma \cos \varphi \quad (16)$$

接着, 联立 ${}^4_0T_f(3, 2)$ 、 ${}^4_0T_f(3, 3)$ 、 ${}^4_0T_r(3, 2)$ 及 ${}^4_0T_r(3, 3)$

$$\frac{q_{y_f}}{q_{z_f}} = \frac{{}^4_0T_f(3, 2)}{{}^4_0T_f(3, 3)} = \frac{{}^4_0T_r(3, 2)}{{}^4_0T_r(3, 3)} = \frac{q_{y_r}}{q_{z_r}} \quad (17)$$

可求得

$$\Delta_y = -h_1 \tan \gamma \sin \varphi \quad (18)$$

然后, 分别联立 ${}^4_0T_f(4, 1)$ 及 ${}^4_0T_r(4, 1)$, ${}^4_0T_f(4, 2)$ 及 ${}^4_0T_r(4, 2)$, ${}^4_0T_f(4, 3)$ 及 ${}^4_0T_r(4, 3)$

$$\begin{cases} x_f = {}^4_0T_f(4, 1) = {}^4_0T_r(4, 1) = x_r \\ y_f = {}^4_0T_f(4, 2) = {}^4_0T_r(4, 2) = y_r \\ z_f = {}^4_0T_f(4, 3) = {}^4_0T_r(4, 3) = z_r \end{cases} \quad (19)$$

可求得

$$\begin{cases} a_1 = y_c - z_c \tan \gamma \sin \varphi \\ a_2 = -\frac{d_2}{\sqrt{\zeta}} - d_1 + x_c - z_c \tan \gamma \cos \varphi \\ a_3 = (h_1 - z_c) \tan \gamma \sin \varphi + y_c \\ a_4 = -\frac{d_2}{\sqrt{\zeta}} - d_1 + x_c + (h_1 - z_c) \tan \gamma \cos \varphi \\ a_5 = \left\{ \sin \gamma \left[d_2 \cos \varphi \sqrt{\zeta} + (z_c - h_1) \times \right. \right. \\ \left. \left. \tan \gamma \sin^2 \varphi \right] + (z_c - h_1) \cos \gamma + \right. \\ \left. \sin^2 \gamma \left[(h_2 + l_c) \sin^2 \varphi - h_2 \right] + \right. \\ \left. h_2 + l_c \cos^2 \gamma \right\} / \zeta \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\zeta = 1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \varphi$ 。

最后, 再分别联立 ${}^4T_f(1,1)$ 及 ${}^4T_r(1,1)$, ${}^4T_f(1,2)$ 及 ${}^4T_r(1,2)$

$$\begin{cases} o_{x_f} = {}^4T_f(1,1) = {}^4T_r(1,1) = o_{x_r} \\ p_{x_f} = {}^4T_f(1,2) = {}^4T_r(1,2) = p_{x_r} \end{cases} \quad (21)$$

可求得

$$\cos \alpha = \frac{\cos \omega \cos \gamma \cos \varphi - \sin \omega \sin \varphi}{\sqrt{\zeta}} \quad (22)$$

$$\sin \alpha = \frac{\sin \omega \cos \gamma \cos \varphi + \cos \omega \sin \varphi}{\sqrt{\zeta}} \quad (23)$$

通过分析可得到

$$\alpha = \begin{cases} \arccos(\cos \alpha) & \sin \alpha \geq 0 \\ -\arccos(\cos \alpha) & \sin \alpha < 0 \end{cases} \quad (24)$$

至此, 得到了基于 RCM 参数的机构运动学逆解, 也即 RCM 算法。若此机构不需要实现 RCM 运动模式, 只需要将 l_c 的值固定为 0, 视 (x_c, y_c, z_c) 为器械末端点的空间位置, 则可获得一般情况下的机构运动学逆解。

3 物理样机及运动实验

3.1 物理样机

根据眼内手术实际要求及混联机构构型, 对关键元器件进行选型, 并设计出混联机构的物理样机。

如图 6 所示, 采用型号相同的高精度直线电机(型号: Parker MX80L, 重复定位精度 $\pm 10 \mu\text{m}$, 行程 100 mm)实现并联部分的 4 个主动移动副, 其行程都呈对称分布 $-50 \text{ mm} \leq a_i \leq 50 \text{ mm}$ ($i=1, 2, 3, 4$)。同样地, 串联部分的主动移动副 P_5 采用尺寸更加紧凑的高精度压电位移台(型号: Newport CONEX-SAG-LS48P, 重复定位精度 $0.025 \mu\text{m}$, 行程: 48 mm)实现, $-24 \text{ mm} \leq a_5 \leq 24 \text{ mm}$ 。串联部分的主动转动副 R_5 通过伺服电机(型号: DCX10, 分辨率: $5'$)实现, $-\pi \text{ rad} \leq \alpha \leq \pi \text{ rad}$ 。为保证机构刚度, 被动副 R_2 及 R_4 采用对称的 U 型结构设计。

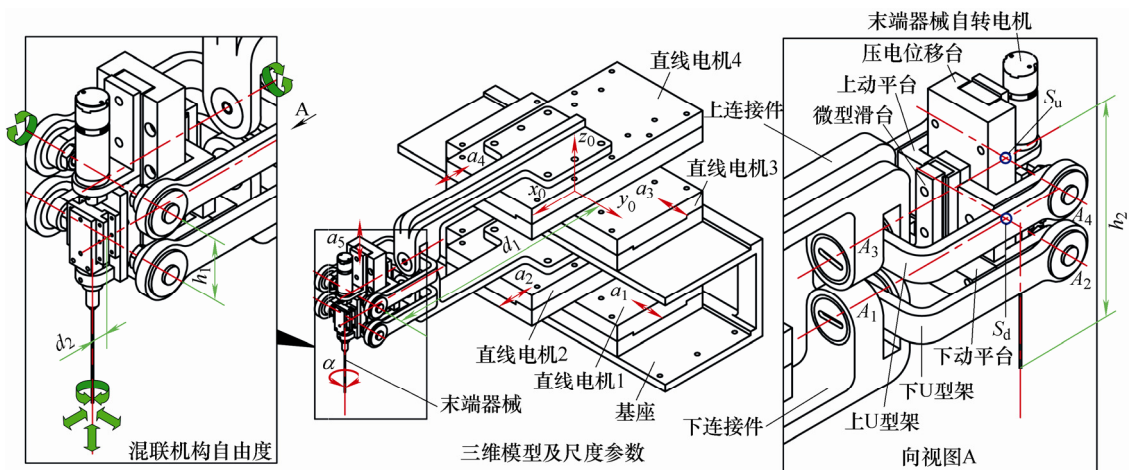


图 6 物理样机

图 6 中机构处于初始状态, 所有主动副的移动(转动)量都为 0(处于行程的 0 点位置)。机构的基座坐标系原点位于: 直线电机 4 垂直于移动方

向的结构对称面与轴线 A_1 的交点处, x_0 轴与轴线 A_1 重合, y_0 轴与轴线 A_2 平行, z_0 轴与末端器械轴线平行。在建立基座坐标系后, 确定了关键的结

构参数 h_1 、 h_2 、 d_1 及 d_2 。

3.2 运动实验

在得到机构的运动学正逆运动学模型(利用 Adams 软件进行验证)后,采用主从的方式控制机构(机器人)进行运动实验。主手为 6 自由度操纵杆(型号: 小龙电器 SMC35B3G),为 6 个主动副提供输入信号。

在运动实验前,利用绝对关节臂测量系统(型号: Hexagon RA-7135, 单点重复位置精度: $\pm 59 \mu\text{m}$, 空间位置精度: $\pm 75 \mu\text{m}$)对机构的实际结构参数进行标定,并通过视觉手段(三目体视显微镜, 型号: XYH-3A)对虚拟远心的精度进行了初步的测量,远心的空间位置精度可达 $\pm 0.15 \text{ mm}$,已能满足眼球模型实验及离体动物眼球实验的要求。

通常情况下,利用机器人实现眼内手术的流程如图 7 所示。在手术开始时,机构处于初始状态,如图 8a 所示。图 8 中的眼球模型是使用光敏树脂 3D 打印而成,眼球模型上留有开孔以模拟刺入点(RCM 点)。

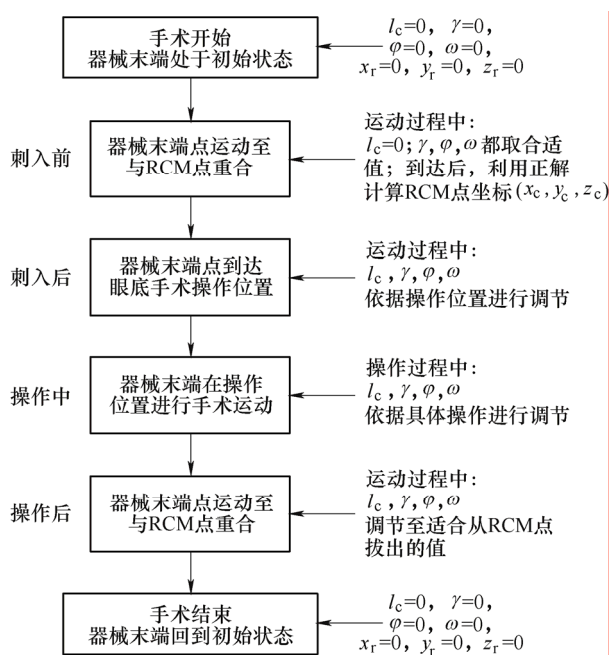


图 7 基于机器人的眼内手术流程

在明确 RCM 点后,操作人员在显微镜的辅助下观察机构末端,并操纵杆控制机构以某一合适姿态运动,直至器械末端点移动至 RCM 点。机构运动过程中 l_c 的值始终为 0,如图 8b 所示。

在此阶段,若末端器械的姿态始终与初始状态一致($a_1 = a_3$ 且 $a_2 = a_4$),则控制器直接根据操纵杆输入信号和逆运动学模型解算各关节预期位移,并控制机构完成相应的运动;若需要调整末端器械姿态,则保

持直线电机 1 及直线电机 2 不动,然后控制器将操纵杆的姿态调整输入信号代入逆运动学模型,从而解算出直线电机 3 及直线电机 4 的预期位移,并控制直线电机 3 和直线电机 4 完成相应的运动,从而对末端器械的姿态进行调整。姿态调整完毕后,需要移动器械时,则令运动方向平行的直线电机的位移变化量保持相同,即 $\Delta a_1 = \Delta a_3$ 且 $\Delta a_2 = \Delta a_4$ 。

当器械末端点到达 RCM 点后,器械进入 RCM 运动模式,如图 8c、8d 所示。在此过程中, (x_c, y_c, z_c) 坐标保持不变,仅有参数 l_c 、 γ 、 φ 及 ω 四个参数需要根据实际运动进行调整。在此阶段, (x_c, y_c, z_c) 是将主动副的关节变量代入正运动学模型计算出的固定参数,包含上述固定参数的逆运动学模型即为包含 RCM 参数的逆运动学模型。然后,控制器将操纵杆的输入信号代入包含 RCM 参数的逆运动学模型,实现 RCM 运动。

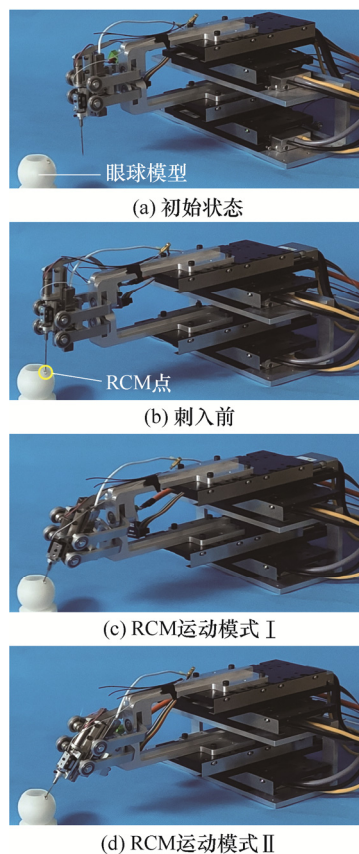


图 8 样机运动过程

手术操作完成后,操作人员借助显微镜观察末端器械与眼球模型,在避免与眼球模型发生干涉的前提下,调整末端器械的姿态并使 $l_c \leq 0$,将末端器械从眼球模型中拔出,并操作机构回到初始状态。

机构通过操纵杆控制实现了位姿调整以及 RCM 运动,验证了正运动学模型、包含 RCM 参数

(算法)的逆运动学模型的正确性,证明了此混联机构对眼内手术的适配性。

4 结论

(1) 提出了一种新型串-并混联机构。此机构具有 6 个自由度,且自由度的性质与眼内手术所需要的 RCM 运动自由度匹配。

(2) 利用坐标变换,建立了机构的正运动学模型以及包含 RCM 参数(算法)的逆运动学模型。通过对 l_c 取值的固定,可将含 RCM 参数的逆运动学模型退化为一般的逆运动学模型。

(3) 构建了机构的物理样机,通过主从控制方式进行了运动实验,验证了机构运动学模型(算法)的正确性以及眼内手术的适配性。

参 考 文 献

- [1] 贺昌岩, 杨洋, 梁庆丰, 等. 机器人在眼科手术中的应用及研究进展[J]. 机器人, 2019, 41(2): 265-275.
HE Changyan, YANG Yang, LIANG Qingfeng, et al. Applications and research progress of robot assisted eye surgery[J]. Robot, 2019, 41(2): 265-275.
- [2] HUANG L, YIN L, LIU B, et al. Design and error evaluation of planar 2-DOF remote center of motion mechanisms with cable transmissions[J]. Journal of Mechanical Design, 2020: 1-14.
- [3] 黄龙, 杨洋, 苏鹏, 等. 1R1T 远程运动中心机构的型综合[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 131-136.
HUANG Long, YANG Yang, SU Peng, et al. Type synthesis of 1R1T remote center of motion mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 131-136.
- [4] HE X, ROPPENECKER D, GIERLACH D, et al. Toward clinically applicable steady-hand eye robot for vitreoretinal surgery[C]// ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York: ASME, 2012: 145-153.
- [5] de SMET M D, MEENINK T C M, JANSSENS T, et al. Robotic assisted cannulation of occluded retinal veins[J]. PloS One, 2016, 11(9): e0162037.
- [6] SUZUKI H, WOOD R J. Origami-inspired miniature manipulator for teleoperated microsurgery[J]. Nature Machine Intelligence, 2020, 2(8): 437-446.
- [7] HE C, HUANG L, YANG Y, et al. Research and realization of a master-slave robotic system for retinal vascular bypass surgery[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 78.
- [8] UETA T, YAMAGUCHI Y, SHIRAKAWA Y, et al. Robot-assisted vitreoretinal surgery: Development of a prototype and feasibility studies in an animal model[J]. Ophthalmology, 2009, 116(8): 1538-1543.
- [9] RAHIMY E, WILSON J, TSAO T C, et al. Robot-assisted intraocular surgery: development of the IRISS and feasibility studies in an animal model[J]. Eye, 2013, 27(8): 972-978.
- [10] WEI W, GOLDMAN R E, FINE H F, et al. Performance evaluation for multi-arm manipulation of hollow suspended organs[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 25(1): 147-157.
- [11] NASSERI M A, EDER M, NAIR S, et al. The introduction of a new robot for assistance in ophthalmic surgery[C]// 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). New York, IEEE, 2013: 5682-5685.
- [12] ZHOU M, YU Q, HUANG K, et al. Towards robotic-assisted subretinal injection: A hybrid parallel-serial robot system design and preliminary evaluation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(8): 6617-6628.
- [13] 郑昱, 杨洋, 郭如靖, 等. 眼科手术微振动操作模块的设计与研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 26-34.
ZHENG Yu, YANG Yang, WU Rujing, et al. Design and research of a module for micro vibration operation in ophthalmic microsurgery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 26-34.
- [14] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
HUANG Zhen, ZHAO Yongsheng, ZHAO Tieshi. Advanced spatial mechanism[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [15] ZENG Daxing, LU Wenjuan HUANG Zhen. Over-constraints and a unified mobility method for general spatial mechanisms, part 1: Essential principle[J]. Chinese

Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(5): 869-877.

- [16] 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.

- [17] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1996.

XIONG Youlun. Fundamentals of robots techniques[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996.

作者简介: 杨洋, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人机构学、医疗机器人、智能机械设计与控制。

E-mail: yang_mech@buaa.edu.cn

陈子路, 男, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为机器人机构学。

E-mail: chenzilu@buaa.edu.cn

广晨汉(通信作者), 男, 1990 年出生, 博士, 博士后。主要研究方向为机械设计、刚性折纸及机构学。

E-mail: guangchenhan@buaa.edu.cn

郑昱, 男, 1993 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人动力学与控制技术。

E-mail: zhengyu_me@buaa.edu.cn

林闯, 男, 1996 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人控制与计算机视觉。

E-mail: lincuang@buaa.edu.cn

第 10 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

基于热感应的多维传感机理及柔性电子皮肤研究

作 者: 赵 帅

毕业学校: 清华大学

指导教师: 朱 荣

人体皮肤是一个精致的多维信息感知系统, 为人体提供和外界交互的多种信息。近年来, 具有类似人体皮肤功能的柔性电子皮肤, 因为在可穿戴电子、健康监测、智能机器人/假肢等领域具有广阔的应用前景, 而成为研究热点。这些应用需求也对电子皮肤的传感能力和结构特征提出了严格要求, 当前电子皮肤在高灵敏传感、多感知集成、低成本制备、低信号耦合上仍面临很大挑战。

针对这一问题, 提出基于热感应的多维信息传感机制作为解决方案, 在机理、材料、器件和应用等方面展开系统研究。基于热感应的多维信息传感, 是利用热敏元件和外界的传导/对流换热对自身电阻的调控, 将温度、导热、流场、压力等信息均转化为热敏元件的电阻信息进行统一检测。建立了多物理量传感的数学模型, 为材料和器件设计提供了理论基础。为实现压力传感, 提出压热效应的概念以及掺杂型、多孔型、串联型等三种功能材料结构, 建立了材料的导热系数和其所受压力之间的理论模型。

基于热感应的温度和导热传感机理, 实现了能够同时检测温度和导热系数的柔性热物性传感器, 导热系数测量范围对应的材料覆盖了空气、棉花、塑料、玻璃、金属等典型物质种类。通过热敏膜设计和调理电路配置, 实现了物质和温度的独立测量。研制的柔性热物性传感器和智能手指具有物质分辨、温感模拟、接近距离感知、温湿度检测等功能。

采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)和银纳米颗粒, 设计了多孔型和串联型两类具有压热效应的功能材料, 实现了两种不同传感特性的压力传感器, 且灵敏度、量程等性能均可通过材料参数进行调控和定制。在此基础上, 优化设计了一种渐变孔隙的多孔材料, 实现了高灵敏、低检测下限和大量程的传感性能, 并应用于脚部行走、指部按压等人体运动信息检测; 针对人体脉搏特征, 优化设计了一种串联型功能材料, 实现了不同按压力下的脉搏信息检测。

基于热感应的多维信息传感机理, 本文研制出阵列式多功能柔性电子皮肤, 集成了压力、温度、导热、流场等传感功能, 采用统一的热感应原理和检测电路, 既实现了高灵敏的多感知集成, 又保证了简单的结构布局和较高的检测效率, 低信号耦合并易于大面积扩展, 在可穿戴电子、智能机器人等领域具有广泛的应用前景。