

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2021 年 1 月 7 日 (07.01.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/000288 A2

(51) 国际专利分类号:

A61F 9/02 (2006.01)

本国际公布:

— 包括按条约第17条(2)(a)所作的宣布, 不包括摘要, 发明名称未经国际检索单位审查。

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/094556

(22) 国际申请日: 2019 年 7 月 3 日 (03.07.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 中山大学 (SUN YAT-SEN UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国广东省广州市海珠区新港西路135号, Guangdong 510275 (CN)。

(72) 发明人: 黄凯 (HUANG, Kai); 中国广东省广州市海珠区新港西路135号, Guangdong 510275 (CN)。
白善荣 (JOSEPH, Bergunder Sean); 中国广东省广州市海珠区新港西路135号, Guangdong 510275 (CN)。
夏俊 (XIA, Jun); 中国广东省广州市海珠区新港西路135号, Guangdong (CN)。

(74) 代理人: 广州粤高专利商标代理有限公司 (YOGO PATENT & TRADEMARK AGENCY LIMITED COMPANY); 中国广东省广州市天河区体育西路191号中石化大厦B塔44层, Guangdong 510620 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

(54) Title: METHOD FOR IMPLEMENTING AUTOMATIC SUTURE-LESS PRIMARY CORNEAL INCISION

(54) 发明名称: 一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法

(57) Abstract:

(57) 摘要:



WO 2021/000288 A2

一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法

5 技术领域

本发明涉及自动化手术领域，更具体地，涉及一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法。

背景技术

白内障手术的初始步骤就是在患者眼部的角膜层做出一个角膜主切口，现有的方法主要是医生通过器械进行手动操作，但是不同的医生对不同患者，每次操作都会有所不同，主切口的好坏取决于主刀医生的技术和状态，而在做无缝合主切口的时候，需求的精度高，人手操作容易造成切口的损伤。

公开号为“CN102639088B”公开了一种眼睛角膜切口及角膜切口缝合的激光系统与方法，采用激光的方式对切口进行自动化的手术，但是激光的方式也容易造成角膜层的其他损伤。

发明内容

本发明旨在至少在一定程度上解决上述技术问题，提供一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法，避免在进口角膜切口手术中，造成额外的损伤。

为解决上述技术问题，本发明采用的技术方案是：一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法，包括机器操作臂和安装于所述机器操作臂上的手术刀，所述机器操作臂包括夹持所述手术刀的夹持装置和驱动所述夹持装置摆动的驱动臂；所述驱动臂上设置有第一线性马达和第二线性马达，所述夹持装置装有第三线性马达，包括以下步骤：

步骤一：使用显微镜摄像系统以 a 毫米垂直位移拍摄两幅图像；

步骤二：对每幅图像进行预处理，转换为具有灰度值的图像，并对第一幅图像进行角点检测，得到若干候选角点，并且得到所述角点的坐标；

步骤三：若干角点以各自为中心， R_j 为半径，求出相对于角点的黑点和白点，并且黑点位于角点白色像素区域和白点位于角点的黑色区域，且黑皇后的像素灰度 < 0.5 且白皇后的像素灰度 > 0.5 ，则该角点为手术刀点 P'_i ，黑点和白点

位置的计算公式如下：

$$\begin{aligned}
 X_{blacki} &= \frac{\sum_{j \in R_j} (1 - I(X_j, Y_j)) X_j}{\sum_{j \in R_i} (1 - I(X_j, Y_j))} \\
 Y_{blacki} &= \frac{\sum_{j \in R_j} (1 - I(X_j, Y_j)) Y_j}{\sum_{j \in R_i} (1 - I(X_j, Y_j))} \\
 X_{whitei} &= \frac{\sum_{j \in R_j} (1 - I(X_j, Y_j)) X_j}{\sum_{j \in R_i} (1 - I(X_j, Y_j))} \\
 Y_{whitei} &= \frac{\sum_{j \in R_j} (1 - I(X_j, Y_j)) Y_j}{\sum_{j \in R_i} (1 - I(X_j, Y_j))} \\
 R_j &\Rightarrow [(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 \leq range^2]
 \end{aligned}$$

其中， X_{blacki} 和 Y_{blacki} 分别为黑点的坐标值， X_{whitei} 和 Y_{whitei} 分别白点的坐标值， X_j 和 Y_j 是以角点为中心， R_j 为半径的范围内所有像素点的各自坐标， I 为该点的灰度值， $range$ 为选取的半径最大值； X_i 、 Y_i 分别为手术刀点 P'_i 的坐标值。

步骤四：对第一幅图像 P'_i 向第二幅图像进行匹配，得到匹配点 P''_i ， P'_i 和 P''_i 之间的像素距离；

步骤五：手术刀点的深度计算公式如下：

$$z' = \left(\frac{r}{\Delta r} + 1 \right) a$$

其中， r 为手术刀点 P' 与显微镜放大中心之间的距离， Δr 为 P'_i 和 P''_i 之间的像素距离，称为视差；

步骤六：根据计算得到手术刀的位置和相对深度，并获取虹膜的位置，将切口位置定位在虹膜边缘上距离瞳孔中心最近的一个；

步骤七：标准的无缝合角膜主切口定义为一个松散的“Z”字形，将所述机器操作臂控制手术刀沿设定的切口路径运动。

优选的，在所述步骤四中，匹配的方法为在 P'_i 建立一个以 P'_i 为中心的基础点方块区域，定义 P'_i 以外的点为邻近点，定义每个邻近点相对于 P'_i 的深度一致；在对方块区域所有的基础点进行匹配，计算分别在第二幅图像对应的匹配点，匹配点和对应的视差通过选择使得代价函数数值最小的视差来计算得出，

其中，代价函数公式为：

$$\begin{aligned} C(P'_{ij}, \Delta r) &= \min\{d(P'_{ij}, P'_{ij} - \Delta r, I_z, I_{z-a}), d(P'_{ij} - \Delta r, P'_{ij}, I_{z-a}, I_z)\} \\ d(P'_{ij}, P'_{ij} - \Delta r, I_z, I_{z-a}) &= \min P'_{ij} - \Delta r - 0.5 \\ &\leq P'_{ij} - \Delta r + 0.5\{|I_z(P'_{ij}) - I_{z-a}(P''_{ij})|\} \end{aligned}$$

其中， P'_{ij} 为对应基础点的像素位置， P''_{ij} 为对应匹配点的像素位置， I_z 为第一幅图像中每个像素的灰度值， I_{z-a} 为第二幅图像中每个图像的灰度值， $I_z(P'_{ij})$ 为 P'_{ij} 的灰度值， $I_{z-a}(P''_{ij})$ 为 P''_{ij} 的灰度值。

- 5 优选的，在所述步骤四和步骤五之间设置有校核步骤，图像中对应的匹配点 P''_{ij} 相对于 P'_i 的位置与邻近点相对于 P'_i 的位置一致，（其中， P'_{ij} 为领域点， P''_{ij} 为领域点的匹配点， P'_i 为中心点， P'_i 为中心点的匹配点）则校核成功，对于中心 P'_i 加一分，总票数 8 票（8 个领域点），达到 4 票以上（包括 4 票）匹配成功；否则，则以每个邻近点为中心建立基础点方块区域，重新执行步骤四
- 10 中的计算公式，再次计算匹配点和对应的视差，并运行投票，第一个超过 4 票者胜出。超过半数以上的匹配点和邻近点相对的位置一致，避免了 P'_i 是噪点的情况，提高手术刀点的正确性。

- 优选的，第一个校核成功的邻近点定义为新的 P'_i 点，并舍弃其他邻近点和校核不成功的点，再以第二幅图像中剩余的匹配点 P''_{ik} 为基点与第一幅图像进行匹配，得到校核点，校核点与基础点的位置一致，则匹配成功。否则，再次
- 15 执行校核步骤。翻转匹配方向，再次校核匹配的正确性，提高手术刀点的准确性。

- 优选的，对所述步骤五中的手术刀点的深度计算公式进行插值优化计算。通过插值优化计算，使得深度的计算更加准确。每个 P''_{ik} 设置两个沿着外极线
- 20 L_{ik} 插值点，分别为左插值点 P''_{ikl} 和右插值点 P''_{ikr} ，利用方块区域匹配的代价函数来计算代价 $C(P'_i, \Delta r_{ikr})$ ， $C(P'_i, \Delta r_{ikl})$ 和 $C(P'_i, \Delta r_{ik})$ ，去最小代价的插值点或原点，删除其余两个点，得到最终深度公式如下：

$$Z_{kj} = \left(\frac{r}{\Delta r_l} \Rightarrow \min_{il=ik, ikr, ikl} \{C(P'_i, \Delta r_{il})\} + 1 \right) a$$

其中， L_{ik} 为外极线， Z_{kj} 为对应 P''_{ik} 和 P'_{ij} 的深度；

最终深度计算公式:

$$Z_{p'_i} = Z_{p''_i} = \frac{\sum_{kj} Z_{kj}}{n_o}$$

其中, n_o 是 Z_{kj} 的个数。

优选的, 插值点的计算公式分别为:

$$P''_{ikl} = (P''_{ik+Li} + P''_{ik}) / 2$$

$$P''_{ikr} = (P''_{ik-Li} + P''_{ik}) / 2$$

- 5 其中, P''_{ik+Li} 为 P''_{ik} 沿着外极线正向移动 Li 个像素距离的值, P''_{ik-Li} 为 P''_{ik} 沿着外极线负向移动 Li 个像素距离的值。

优选的, 切口路径定义如下:

S1: 手术刀进入角膜层;

S2: 手术刀抬起 40-50 度, 在第一个远程中心点执行 RCM 运动;

- 10 S3: 手术刀按照 S2 中的角度前进直到抵达第二个远程中心点;

S4: 执行 RCM 运动, 手术刀下降 40-50 度;

S5: 手术刀按照 S4 的角度继续前进直至穿过角膜。

优选的, 在所述步骤七中, 手术刀执行 RCM 运动, RCM 点的位置固定, RCM 点的控制策略公式如下:

$$x_R = \frac{L_1 + L_2}{2} + (L_{tool} + L_3) \sin\left(\varphi + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right) + L_o \cos(\vartheta) + d_m \cos\left(\varphi + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$y_R = (L_{tool} + L_3) \cos\left(\varphi + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right) - L_o \cos(\vartheta) - d_m \sin\left(\varphi + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right)$$

- 15 其中, x_R 为 RCM 点的 X 轴坐标位置; y_R 为 RCM 点的 Y 轴坐标位置; L_1 为第一线性马达的线性位移; L_2 为第二线性马达的线性位移; L_{tool} 为夹持装置与手术刀刀尖的距离; L_3 为第三线性马达的线性位移; φ 为手术刀刀面与夹持装置连接端的夹角; ϑ 为手术刀刀面与水平面的夹角; L_o 为刀面长度; d_m 为第三线性马达到第一线性马达或第二线性马达的水平轴的垂直距离。

- 20 优选的, 手术刀围绕 RCM 点旋转, 且 $\vartheta = \arctan\left(\frac{h}{L_1 - L_2}\right) + \frac{\pi}{2} - \varphi$, ϑ 的角度变化轨迹为 $\vartheta = f(t)$, 第一线性马达、第二线性马达和第三线性马达的设定轨迹公

式如下：

$$\begin{aligned}
 L_3 &= (y_R + L_o \sin(f(t)) + d_m \sin\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) \\
 &\quad - (L_{tool}) \cos\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) / \cos\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) \\
 L_2 &= x_R - (L_{tool} + L_3) \sin\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) - L_o \cos(f(t)) - d_m \cos\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) \\
 &\quad + \frac{h}{2 \tan\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right)} \\
 L_1 &= x_R - (L_{tool} + L_3) \sin\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) - L_o \cos(f(t)) - d_m \cos\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) \\
 &\quad + \frac{h}{2 \tan\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right)}
 \end{aligned}$$

其中，h 为第一线性马达和第二线性马达的直线距离。

- 手术刀在移动和旋转的时候，根据 RCM 点的坐标控制策略计算第一线性马达、第二线性马达和第三线性马达的移动轨迹。同时在移动的时候，也是根据
- 5 公式计算第一线性马达、第二线性马达和第三线性马达的移动轨迹，达到控制手术刀运动的效果。

优选的，所述一种并行串联关节的机器操作臂的控制方法为，所述第一线性马达、所述第二线性马达和第三线性马达通过使用线性插值的方法定义从一个目标位置到下一个目标位置之间的位置，并设定两个目标位置之间的步长。

- 10 优选的，每一步目标位置通过计算所述切口路径来获得每一毫秒的位置。

优选的，在进行步骤一前，对显微镜系统和机器操作臂进行初始化，在初始化过程中，机器操作臂和显微镜摄像系统的 X 轴和 Y 轴坐标保持一致。机器操作臂和显微镜系统的坐标保持一致，机器操作臂的执行运动的坐标和计算的坐标保持一致，保证机器操作臂运动的准确性。

- 15 优选的，所述切口的宽度不大于所述手术刀刀面的宽度。机器操作臂控制手术刀只沿着切口路径运动，不进行其他方向的位移，保证切口的宽度不大于所述手术刀刀面的宽度，避免切口的扩大。

与现有技术相比，有益效果是：本方法基于机器操作臂和手术刀，实现了用手术刀进行全自动进行角膜切口的方法，避免了人手操作的不精准而造成伤口扩大的损伤，同时避免了激光对角膜层带来的其他损伤。

附图说明

- 5 图 1 为本发明的方法流程图；
图 2 是机器操作臂的结构示意图；
图 3 是本发明的切口路径示意图。

其中，1、手术刀；2、夹持装置；3、第一线性马达；4、第二线性马达；5、第三线性马达；6、角膜层；7、第一个远程中心点；8、第二个远程中心点。

10 具体实施方式

附图仅用于示例性说明，不能理解为对本专利的限制；为了更好说明本实施例，附图某些部件会有省略、放大或缩小，并不代表实际产品的尺寸；对于本领域技术人员来说，附图中某些公知结构及其说明可能省略是可以理解的。附图中描述位置关系仅用于示例性说明，不能理解为对本专利的限制。

- 15 本发明实施例的附图中相同或相似的标号对应相同或相似的部件；在本发明的描述中，需要理解的是，若有术语“上”、“下”、“左”、“右”“长”“短”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此附图中描述位置关系的用语仅用于
20 示例性说明，不能理解为对本专利的限制，对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语的具体含义。

下面通过具体实施例，并结合附图，对本发明的技术方案作进一步的具体描述：

实施例 1

- 25 一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法，包括机器操作臂和安装于机器操作臂上的手术刀 1，一种并行串联关节的机器操作臂包括夹持手术刀 1 的夹持装置 2 和驱动夹持装置 2 摆动的驱动臂；驱动臂上设置有第一线性马达 3 和第二线性马达 4，夹持装置装有第三线性马达 5，包括以下步骤：

步骤一：使用显微镜摄像系统以 6 毫米垂直位移拍摄两幅图像；

步骤二：对每幅图像进行预处理，转换为具有灰度值的图像，并对第一幅图像进行角点检测，得到若干候选角点，并且得到角点的坐标；

步骤三：若干角点以各自为中心， R_j 为半径，求出相对于角点的黑点和白点，并且黑点位于角点白色像素区域和白点位于角点的黑色区域，且黑皇后的像素灰度 <0.5 且白皇后的像素灰度 >0.5 ，则该角点为手术刀点 P'_i ，黑点和白点位置的计算公式如下：

$$\begin{aligned} X_{blacki} &= \frac{\sum_{j \in R_j} (1 - I(X_j, Y_j)) X_j}{\sum_{j \in R_i} (1 - I(X_j, Y_j))} \\ Y_{blacki} &= \frac{\sum_{j \in R_j} (1 - I(X_j, Y_j)) Y_j}{\sum_{j \in R_i} (1 - I(X_j, Y_j))} \\ X_{whitei} &= \frac{\sum_{j \in R_j} (1 - I(X_j, Y_j)) X_j}{\sum_{j \in R_i} (1 - I(X_j, Y_j))} \\ Y_{whitei} &= \frac{\sum_{j \in R_j} (1 - I(X_j, Y_j)) Y_j}{\sum_{j \in R_i} (1 - I(X_j, Y_j))} \\ R_j &\Rightarrow [(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 \leq range^2] \end{aligned}$$

其中， X_{blacki} 和 Y_{blacki} 分别为黑点的坐标值， X_{whitei} 和 Y_{whitei} 分别白点的坐标值， X_j 和 Y_j 是以角点为中心， R_j 为半径的范围内所有像素点的各自坐标， I 为该点的灰度值， $range$ 为选取的半径最大值； X_i 、 Y_i 分别为手术刀点 P'_i 的坐标值；

步骤四：对第一幅图像 P'_i 向第二幅图像进行匹配，得到匹配点 P''_i ， P'_i 和 P''_i 之间的像素距离；

步骤五：手术刀点的深度计算公式如下：

$$z' = \left(\frac{r}{\Delta r} + 1 \right) a$$

其中， r 为手术刀点 P' 与显微镜放大中心之间的距离， Δr 为 P'_i 和 P''_i 之间的像素距离，称为视差；

步骤六：根据计算得到手术刀的位置和相对深度，并获取虹膜的位置，将切口位置定位在虹膜边缘上距离瞳孔中心最近的一个点；

步骤七：标准的无缝合角膜主切口定义为一个松散的“Z”字形，将机器操

作臂控制手术刀运动的切口路径定义如下：

S1：手术刀 1 前进 5mm 进入角膜层 6；

S2：手术刀 1 抬起 45 度，在第一个远程中心点 7 执行 RCM 运动；

S3：手术刀 1 按照 S2 中的角度前进 1.5-2mm 直到抵达第二个远程中心点 8；

5 S4：执行 RCM 运动，手术刀 1 下降 45 度；

S5：手术刀 1 按照 S4 的角度继续前进 2mm 穿过角膜层 6。

本实施例的工作原理：手术刀点就是手术刀的位置，通过计算获得手术刀的位置和相对于显微镜系统的深度，得到了手术刀的三维坐标。同时也获得的眼部角膜和虹膜等位置信息，将手术刀置于初始位置上，通过机器操作臂控制手术刀沿着设定的切口路径运动，自动完成切口。

本方法基于机器操作臂和手术刀，实现了用手术刀进行全自动进行角膜切口的方法，避免了人手操作的不精准而造成伤口扩大的损伤，同时避免了激光对角膜层带来的其他损伤。

实施例 2

15 本实施例在实施例 1 的基础上，提供了具体的匹配方法、匹配结果校核方法和深度计算优化方法，具体为：

匹配方法为在 P'_i 建立一个以 P'_i 为中心的基础点方块区域，定义 P'_i 以外的点为邻近点，定义每个邻近点相对于 P'_i 的深度一致；在对方块区域所有的基础点进行匹配，计算分别在第二幅图像对应的匹配点，匹配点和对应的视差通过选择使得代价函数数值最小的视差来计算得出，其中，代价函数公式为：

$$\begin{aligned} C(P'_{ij}, \Delta r) &= \min\{d(P'_{ij}, P'_{ij} - \Delta r, I_z, I_{z-a}), d(P'_{ij} - \Delta r, P'_{ij}, I_{z-a}, I_z)\} \\ d(P'_{ij}, P'_{ij} - \Delta r, I_z, I_{z-a}) &= \min P'_{ij} - \Delta r - 0.5 \\ &\leq P'_{ij} - \Delta r + 0.5\{|I_z(P'_{ij}) - I_{z-a}(P''_{ij})|\} \end{aligned}$$

其中， P'_{ij} 为对应基础点的像素位置， P''_{ij} 为对应匹配点的像素位置， I_z 为第一幅图像中每个像素的灰度值， I_{z-a} 为第二幅图像中每个图像的灰度值， $I_z(P'_{ij})$ 为 P'_{ij} 的灰度值， $I_{z-a}(P''_{ij})$ 为 P''_{ij} 的灰度值， Δr 为 P'_i 和 P''_i 之间的像素距离，称为视差。

25 校核步骤：图像中对应的匹配点 P''_{ij} 相对于 P''_i 的位置与邻近点相对于 P'_i 的位置一致，（其中， P'_{ij} 为领域点， P''_{ij} 为领域点的匹配点， P'_i 为中心点， P''_i 为

中心点的匹配点)则校核成功,对于中心 P'_i 加一分,总票数 8 票(8 个领域点),达到 4 票以上(包括 4 票)匹配成功;否则,则以每个邻近点为中心建立基础点方块区域,重新执行步骤四中的计算公式,再次计算匹配点和对应的视差。超过半数以上的匹配点和邻近点相对的位置一致,避免了 P'_i 是噪点的情况,提高手术刀点的正确性。

再次计算匹配点和对应的视差后,进行校核,即运行投票,第一个超过 4 票者胜出,胜出的邻近点定义为新的 P'_i 点,并舍弃其他邻近点和校核不成功的点,再以第二幅图像中剩余的匹配点 P''_{ik} 为基点与第一幅图像进行匹配,得到校核点,校核点与基础点的位置一致,则匹配成功。否则,再次执行校核步骤。

10 翻转匹配方向,再次校核匹配的正确性,提高手术刀点的准确性。

深度计算优化具体为,对深度计算公式进行插值优化,具体的方法为在每个 P''_{ik} 设置两个沿着外极线 L_{ik} 插值点,分别为左插值点 P''_{ikl} 和右插值点 P''_{ikr} ,利用方块区域匹配的代价函数来计算代价 $C(P'_i, \Delta r_{ikr})$, $C(P'_i, \Delta r_{ikl})$ 和 $C(P'_i, \Delta r_{ik})$,去最小代价的插值点或原点,删除其余两个点,得到插值点和最终深度公式如下:

$$P''_{ikl} = (P''_{ik+Li} + P''_{ik}) / 2$$

$$P''_{ikr} = (P''_{ik-Li} + P''_{ik}) / 2$$

$$Z_{kj} = \left(\frac{r}{\Delta r_l} \Rightarrow \min_{il=ik, ikr, ikl} \{C(P'_i, \Delta r_{il})\} + 1 \right) a$$

其中, L_{ik} 为外极线, Z_{kj} 为对应 P''_{ik} 和 P'_{ij} 的深度; P''_{ik+Li} 为 P''_{ik} 沿着外极线正向移动 Li 个像素距离的值, P''_{ik-Li} 为 P''_{ik} 沿着外极线负向移动 Li 个像素距离的值。

最后,深度计算公式为:

$$Z_{p'_i} = Z_{p''_i} = \frac{\sum_{kj} Z_{kj}}{n_o}$$

其中, n_o 是 Z_{kj} 的个数。

本发明的有益效果：通过建立方块区域的匹配以及校核，能够更加准确找到手术到的位置，通过插值优化，使得深度的计算更加准确。

实施例 3

本实施例在实施例 1 或实施例 2 的基础上，提供了一种并行串联关节的机器操作臂的运动轨迹控制算法公式和方法，具体为

手术刀 1 执行 RCM 运动，RCM 点的位置固定，RCM 点的控制策略公式如下：

$$x_R = \frac{L_1 + L_2}{2} + (L_{tool} + L_3) \sin\left(\varphi + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right) + L_o \cos(\vartheta) + d_m \cos\left(\varphi + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$y_R = (L_{tool} + L_3) \cos\left(\varphi + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right) - L_o \cos(\vartheta) - d_m \sin\left(\varphi + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right)$$

其中， x_R 为 RCM 点的 X 轴坐标位置； y_R 为 RCM 点的 Y 轴坐标位置； L_1 为第一线性马达的线性位移； L_2 为第二线性马达的线性位移； L_{tool} 为夹持装置与手术刀刀尖的距离； L_3 为第三线性马达的线性位移； φ 为手术刀刀面与夹持装置连接端的夹角； ϑ 为手术刀刀面与水平面的夹角； L_o 为刀面长度； d_m 为第三线性马达到第一线性马达或第二线性马达的水平轴的垂直距离。

当手术刀 1 围绕 RCM 点旋转，且 $\vartheta = \arctan\left(\frac{h}{L_1 - L_2}\right) + \frac{\pi}{2} - \varphi$ ， ϑ 的角度变化轨迹为 $\vartheta = f(t)$ ，第一线性马达、第二线性马达和第三线性马达的设定轨迹公式如下：

$$L_3 = (y_R + L_o \sin(f(t)) + d_m \sin\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$- (L_{tool}) \cos\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) / \cos\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$L_2 = x_R - (L_{tool} + L_3) \sin\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) - L_o \cos(f(t)) - d_m \cos\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$+ \frac{h}{2 \tan\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right)}$$

$$L_1 = x_R - (L_{tool} + L_3) \sin\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) - L_O \cos(f(t)) - d_m \cos\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{h}{2 \tan(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2})}$$

其中，h 为第一线性马达和第二线性马达的直线距离。

手术刀 1 在移动和旋转的时候，根据 RCM 点的坐标控制策略计算第一线性马达、第二线性马达和第三线性马达的移动轨迹。同时在移动的时候，也是根据公式计算第一线性马达 3、第二线性马达 4 和第三线性马达 5 的移动轨迹，
5 达到控制手术刀 1 运动的效果。

另外的，第一线性马达 3、第二线性马达 4 和第三线性马达 5 通过使用线性插值的方法定义从上一个目标位置到下一个目标位置之间的位置，并设定两个目标位置之间的步长。

具体的，每一步目标位置通过计算切口路径来获得每一毫秒的位置。

10 另外的，在进行步骤一前，对显微镜系统和机器操作臂进行初始化，在初始化过程中，机器操作臂和显微镜摄像系统的 X 轴和 Y 轴坐标保持一致。机器操作臂和显微镜系统的坐标保持一致，机器操作臂的执行运动的坐标和计算的坐标保持一致，保证机器操作臂运动的准确性。

另外的，切口的宽度不大于手术刀 1 刀面的宽度。机器操作臂控制手术刀
15 1 只沿着切口路径运动，不进行其他方向的位移，保证切口的宽度不大于所述手术刀刀面的宽度，避免切口的扩大。

本实施例的有益效果：设定机器操作臂每一步的步长，一直获取切口路径并计算机器操作臂沿着切口路径运动，线性马达所需要做出的对应运动轨迹，使得机器操作臂带动手术刀能够沿着设定的切口路径运动。

20 显然，本发明的上述实施例仅仅是为清楚地说明本发明所作的举例，而并非是对本发明的实施方式的限定。对于所属领域的普通技术人员来说，在上述说明的基础上还可以做出其它不同形式的变化或变动。这里无需也无法对所有的实施方式予以穷举。凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明权利要求的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1. 一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法,包括机器操作臂和安装于所述机器操作臂上的手术刀(1),所述机器操作臂包括夹持所述手术刀(1)的夹持装置(2)和驱动所述夹持装置(2)摆动的驱动臂;所述驱动臂上设置有第一线性马达(3)和第二线性马达(4),所述夹持装置(2)装有第三线性马达(5),其特征在于,包括以下步骤:

步骤一:使用显微镜摄像系统以a毫米垂直位移拍摄两幅眼部图像;

- 步骤二:对每幅图像进行预处理,转换为具有灰度值的图像,并对第一幅图像进行角点检测,得到若干候选角点,并且得到所述角点的坐标;

步骤三:若干所述角点以各自为中心, R_j 为半径,求出相对于角点的黑点和白点,并且黑点位于角点白色像素区域和白点位于角点的黑色区域,且黑点的像素灰度 <0.5 且白点的像素灰度 >0.5 ,则该角点为手术刀点 P'_i ,黑点和白点位置的计算公式如下:

$$X_{blacki} = \frac{\sum_{j \in R_j} (1 - I(X_j, Y_j)) X_j}{\sum_{j \in R_i} (1 - I(X_j, Y_j))}$$

$$Y_{blacki} = \frac{\sum_{j \in R_j} (1 - I(X_j, Y_j)) Y_j}{\sum_{j \in R_i} (1 - I(X_j, Y_j))}$$

$$X_{whitei} = \frac{\sum_{j \in R_j} (1 - I(X_j, Y_j)) X_j}{\sum_{j \in R_i} (1 - I(X_j, Y_j))}$$

$$Y_{whitei} = \frac{\sum_{j \in R_j} (1 - I(X_j, Y_j)) Y_j}{\sum_{j \in R_i} (1 - I(X_j, Y_j))}$$

$$R_j \Rightarrow [(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 \leq range^2]$$

- 其中, X_{blacki} 和 Y_{blacki} 分别为黑点的坐标值, X_{whitei} 和 Y_{whitei} 分别白点的坐标值, X_j 和 Y_j 是以角点为中心, R_j 为半径的范围内所有像素点的各自坐标, I 为该点的灰度值, $range$ 为选取的半径最大值; X_i 、 Y_i 分别为手术刀点 P'_i 的坐标值;

- 步骤四:对第一幅图像的 P'_i 向第二幅图像进行匹配,得到匹配点 P''_i 、 P'_i 和 P''_i 之间的像素距离;

步骤五:手术刀点的深度计算公式如下:

$$z' = \left(\frac{r}{\Delta r} + 1 \right) a$$

其中, r 为手术刀点 P'_i 与显微镜放大中心之间的距离, Δr 为 P'_i 和 P''_i 之间的像素距离, 称为视差;

步骤六: 根据计算得到手术刀的位置和相对深度, 并获取虹膜的位置, 将切口位置定位在虹膜边缘上距离瞳孔中心最近的一个点;

5 步骤七: 将所述机器操作臂控制手术刀 (1) 沿设定的切口路径运动。

2. 根据权利要求 1 所述的一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法, 其特征在于, 在所述步骤四中, 匹配的方法为在 P'_i 建立一个以 P'_i 为中心的基础点方块区域, 定义 P'_i 以外的点为邻近点, 定义每个邻近点相对于 P'_i 的深度一致; 在对方块区域所有的基础点进行匹配, 计算分别在第二幅图像对应的匹配点, 10 匹配点和对应的视差通过选择使得代价函数数值最小的视差来计算得出, 其中, 代价函数公式为:

$$\begin{aligned} C(P'_{ij}, \Delta r) &= \min\{d(P'_{ij}, P'_{ij} - \Delta r, I_z, I_{z-a}), d(P'_{ij} - \Delta r, P'_{ij}, I_{z-a}, I_z)\} \\ d(P'_{ij}, P'_{ij} - \Delta r, I_z, I_{z-a}) &= \min P'_{ij} - \Delta r - 0.5 \\ &\leq P'_{ij} - \Delta r + 0.5\{|I_z(P'_{ij}) - I_{z-a}(P''_{ij})|\} \end{aligned}$$

其中, P'_{ij} 为对应基础点的像素位置, P''_{ij} 为对应匹配点的像素位置, I_z 为第一幅图像中每个像素的灰度值, I_{z-a} 为第二幅图像中每个图像的灰度值, $I_z(P'_{ij})$ 为 P'_{ij} 的灰度值, $I_{z-a}(P''_{ij})$ 为 P''_{ij} 的灰度值。

15 3. 根据权利要求 2 所述的一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法, 其特征在于, 在所述步骤四和所述步骤五之间设置有校核步骤, 若干个第二幅图像中对应的匹配点 P''_{ij} 相对于 P''_i 的位置与邻近点相对于 P'_i 的位置一致, 则校核成功; 否则, 则以每个邻近点为中心建立基础点方块区域, 按照所述步骤四中的计算公式, 再次计算匹配点和对应的视差。

20 4. 根据权利要求 3 所述的一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法, 其特征在于, 至少有半数以上的匹配点相对于 P''_i 的位置与邻近点相对于 P'_i 的位置一致。

5. 根据权利要求 3 所述的一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法, 其特征在于, 第一个校核成功的邻近点定义为新的 P'_i 点, 并舍弃其他邻近点和校核 25 不成功的点, 再以第二幅图像中剩余的匹配点 P''_{ik} 为基点与第一幅图像进行匹

配, 得到校核点, 校核点与基础点的位置一致, 则匹配成功。否则, 再次执行校核步骤。

6. 根据权利要求 5 所述的一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法, 其特征在于, 对所述步骤五中的手术刀点的深度计算公式进行插值优化计算, 每个
- 5 P''_{ik} 设置两个沿着外极线 L_{ik} 的插值点, 分别为左插值点 P''_{ikl} 和右插值点 P''_{ikr} , 利用方块区域匹配的代价函数来计算代价 $C(P'_i, \Delta r_{ikr})$, $C(P'_i, \Delta r_{ikl})$ 和 $C(P'_i, \Delta r_{ik})$, 去除最小代价的插值点或原点, 删除其余两个点, 得到最终深度公式如下:

$$Z_{kj} = \left(\frac{r}{\Delta r_l} \Rightarrow \min_{il=ik, ikr, ikl} \{C(P'_i, \Delta r_{il})\} + 1 \right) a$$

其中, L_{ik} 为外极线, Z_{kj} 为对应 P''_{ik} 和 P'_{ij} 的深度;

- 10 最终深度计算公式:

$$Z_{P'_i} = Z_{P''_i} = \frac{\sum_{kj} Z_{kj}}{n_o}$$

其中, n_o 是 Z_{kj} 的个数。

7. 根据权利要求 6 所述的一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法, 其特征在于, 插值点的计算公式分别为:

$$P''_{ikl} = (P''_{ik+Li} + P''_{ik}) / 2$$

$$P''_{ikr} = (P''_{ik-Li} + P''_{ik}) / 2$$

- 15 其中, P''_{ik+Li} 为 P''_{ik} 沿着外极线正向移动 Li 个像素距离的值, P''_{ik-Li} 为 P''_{ik} 沿着外极线负向移动 Li 个像素距离的值。

8. 根据权利要求 1-7 任一所述的一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法, 其特征在于, 切口路径定义如下:

S1: 手术刀 (1) 进入角膜层 (6);

- 20 S2: 手术刀 (1) 抬起 40-50 度, 在第一个远程中心点 (7) 执行 RCM 运动;

S3: 手术刀 (1) 按照 S2 中的角度前进直到抵达第二个远程中心点 (8);

S4: 执行 RCM 运动, 手术刀下降 40-50 度;

S5: 手术刀 (1) 按照 S4 的角度继续前进直至穿过角膜层。

9. 根据权利要求 8 所述的一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法, 其特征在于, 在所述步骤七中, 手术刀 (1) 执行 RCM 运动, RCM 点的位置固定, RCM 点的控制策略公式如下:

$$x_R = \frac{L_1 + L_2}{2} + (L_{tool} + L_3) \sin\left(\varphi + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right) + L_o \cos(\vartheta) + d_m \cos\left(\varphi + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$y_R = (L_{tool} + L_3) \cos\left(\varphi + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right) - L_o \cos(\vartheta) - d_m \sin\left(\varphi + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right)$$

5 其中, x_R 为 RCM 点的 X 轴坐标位置; y_R 为 RCM 点的 Y 轴坐标位置; L_1 为第一线性马达的线性位移; L_2 为第二线性马达的线性位移; L_{tool} 为夹持装置与手术刀刀尖的距离; L_3 为第三线性马达的线性位移; φ 为手术刀刀面与夹持装置连接端的夹角; ϑ 为手术刀刀面与水平面的夹角; L_o 为刀面长度; d_m 为第三线性马达到第一线性马达或第二线性马达的水平轴的垂直距离。

10 10. 根据权利要求 9 所述的一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法, 其特征在于, 手术刀 (1) 围绕 RCM 点旋转, 且 $\vartheta = \arctan\left(\frac{h}{L_1 - L_2}\right) + \frac{\pi}{2} - \varphi$, ϑ 的角度变化轨迹为 $\vartheta = f(t)$, 第一线性马达 (3)、第二线性马达 (4) 和第三线性马达 (5) 的设定轨迹公式如下:

$$L_3 = (y_R + L_o \sin(f(t)) + d_m \sin\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$- (L_{tool}) \cos\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) / \cos\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$L_2 = x_R - (L_{tool} + L_3) \sin\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) - L_o \cos(f(t)) - d_m \cos\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$+ \frac{h}{2 \tan\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right)}$$

$$L_1 = x_R - (L_{tool} + L_3) \sin\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right) - L_o \cos(f(t)) - d_m \cos\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$+ \frac{h}{2 \tan\left(\varphi + f(t) - \frac{\pi}{2}\right)}$$

其中, h 为第一线性马达和第二线性马达的直线距离。

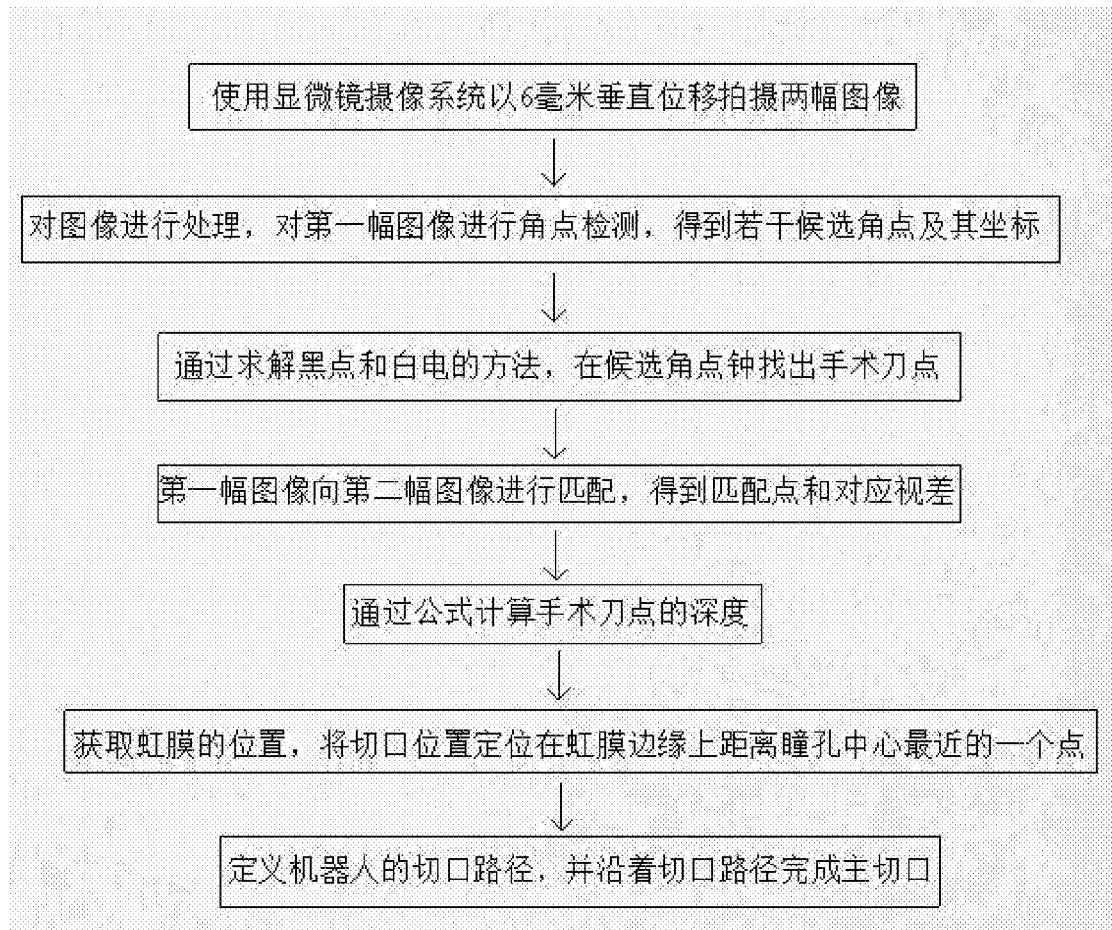


图 1

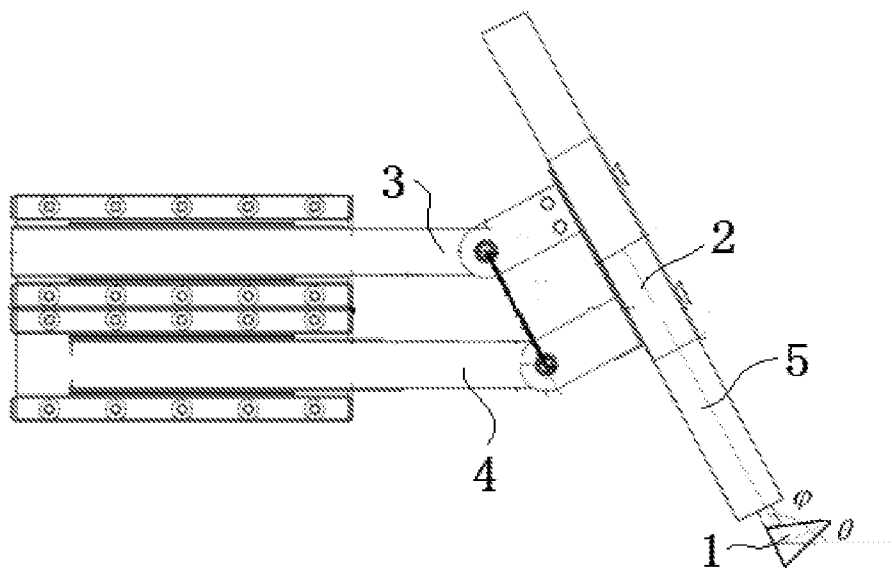


图 2

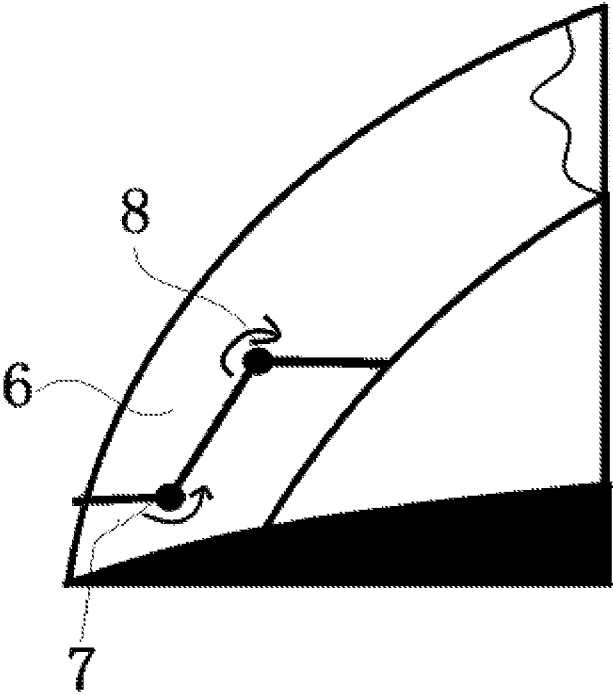


图 3

PATENT COOPERATION TREATY

PCT

DECLARATION OF NON-ESTABLISHMENT OF INTERNATIONAL SEARCH REPORT

(PCT Article 17(2)(a), Rules 13ter.1(c) and (d) and 39)

Applicant's or agent's file reference: P19050JX	IMPORTANT DECLARATION	Date of mailing (<i>day/month/year</i>) 02 September 2019 (02.09.2019)
International application No. PCT/CN2019/094556	International filing date (<i>day/month/year</i>) 03 Jul 2019 (03.07.2019)	(Earliest) Priority Date (<i>day/month/year</i>)
International Patent Classification (IPC) or both national classification and IPC A61F 9/02 (2006.01) i		
Applicant SUN YAT-SEN UNIVERSITY		

This International Searching Authority hereby declares, according to Article 17(2)(a), that **no international search report will be established** on the international application for the reasons indicated below.

1. ☒ The subject matter of the international application relates to:
 - a. ☐ scientific theories
 - b. ☐ mathematical theories
 - c. ☐ plant varieties
 - d. ☐ animal varieties
 - e. ☐ essentially biological processes for the production of plants and animals, other than microbiological processes and the products of such processes
 - f. ☐ schemes, rules or methods of doing business
 - g. ☐ schemes, rules or methods of performing purely mental acts
 - h. ☐ schemes, rules or methods of playing games
 - i. ☒ methods for treatment of the human body by surgery or therapy
 - j. ☐ methods for treatment of the animal body by surgery or therapy
 - k. ☐ diagnostic methods practised on the human or animal body
 - l. ☐ mere presentations of information
 - m. ☐ computer programs for which this International Searching Authority is not equipped to search prior art
2. ☐ The failure of the following parts of the international application to comply with prescribed requirements prevents a meaningful search from being carried out:

☐ the description
☐ the description
☐ the description
3. ☐ A meaningful search could not be carried out without the sequence listing; the applicant did not, within the prescribed time limit:

☐ furnish a sequence listing on paper complying with the standard provided for in Annex C of the Administrative Instructions, and such listing was not available to the International Searching Authority in a form and manner acceptable to it.
☐ furnish a sequence listing in electronic form complying with the standard provided for in Annex C of the Administrative Instructions, and such listing was not available to the International Searching Authority in a form and manner acceptable to it.
☐ pay the required late furnishing fee for the furnishing of a sequence listing in response to an invitation under Rule 13ter.1(a) or (b).
4. ☒ Further comments:

Name and mailing address of the ISA/CN No.6 Xituchenglu, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088 Facsimile No. (86-10)62019451	Authorized officer CHEN, Haiying Telephone No. (86-10) 62085558
--	--

**DECLARATION OF NON-ESTABLISHMENT
OF INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/CN2019/094556

[1] Claims 1-10 of the international application all relate to a method for implementing an automatic suture-less primary corneal incision, which includes a step of performing surgery on a cornea of an eye of a patient, "the machine operation arm controls a scalpel (1) to move along a set path", and falls within the scope of surgical methods, a case listed in PCT Rule 39.1(iv) as not requiring an international search to be performed. Therefore, an international search has not been performed.

专 利 合 作 条 约

PCT

宣布不制定国际检索报告

(PCT 条约17(2) (a)、细则13之三1(c)和(d)和 39)

申请人或代理人的档案号 P19050JX	重要宣布	发文日 (年/月/日) 2019年 9月 2日
国际申请号 PCT/CN2019/094556	国际申请日 (年/月/日) 2019年 7月 3日	(最早的)优先权日 (年/月/日)
国际专利分类 (IPC) 或国家分类及IPC A61F 9/02 (2006.01) i		
申请人 中山大学		

本国际检索单位根据条约17(2) (a) 宣布，对于国际申请**将不制定国际检索报告**，其理由如下：

1. ☒ 国际申请的主题涉及：
 - a. ☐ 科学理论
 - b. ☐ 数学理论
 - c. ☐ 植物品种
 - d. ☐ 动物品种
 - e. ☐ 本质上是生物学方法的动植物生产方法，微生物方法以及用所述方法获得的产品除外
 - f. ☐ 经营的方案、规则或方法
 - g. ☐ 纯智力活动的方案、规则或方法
 - h. ☐ 游戏的方案、规则或者方法
 - i. ☒ 处理人体的外科手术或治疗方法
 - j. ☐ 处理动物体的外科手术或治疗方法
 - k. ☐ 在人体或动物体上实施的诊断方法
 - l. ☐ 单纯的信息提供
 - m. ☐ 本国际检索单位不具备检索现有技术的计算机程序
2. ☐ 国际申请的下列部分不符合规定的要求，以致不能进行有意义的检索：

☐ 说明书
 ☐ 权利要求
 ☐ 附图
3. ☐ 没有序列列表，不能进行有意义的检索；申请人没有在规定的期限内：

☐ 提交符合附件C/ST. 25文本文件形式的序列列表，并且国际检索单位也未获得形式和方式可以被接受的序列列表；或者提交的序列列表不符合行政规程附件C规定的标准。

☐ 提交符合行政规程附件C规定标准的纸件或图形文件形式的序列列表，并且国际检索单位也未获得形式和方式可以被接受的序列列表；或者提交的序列列表不符合行政规程附件C规定的标准。

☐ 在答复根据细则13之三.1(a)或(b)的通知提交序列列表时，未缴纳后提交费用。
4. 补充意见：

[1] 国际申请的全部权利要求1-10涉及一种实现自动化无缝合角膜主切口的方法，其中包含对患者的眼部角膜实施外科手术的步骤“将所述机器操作臂控制手术刀（1）沿设定的路径运动”，属于外科手术方法的范畴，属于PCT细则39.1 (iv) 中所列的无需进行国家检索的情形，因此未进行国际检索。

ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	授权官员 陈海英
传真号 (86—10) 62019451	电话号码 62085558