(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 115361920 A
(43)申请公布日 2022.11.18

(21)申请号 202180024856.0
(22)申请日 2021.03.26
(30)优先权数据
63/001,019 2020.03.27 US
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2022.09.27
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2021/024438 2021.03.26
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2021/195542 EN 2021.09.30
(71)申请人 马科外科公司
地址 美国佛罗里达
(72)发明人 D·G·鲍林 B·戈斯帕维克
C·W·琼斯 G·麦克万
L·格塞尔曼 K·尼希姆拉
W·丁
(74)专利代理机构 中国贸促会专利商标事务所有限公司 11038
专利代理师 宋岩
(51)Int.Cl.
*A61B 34/32*(2006.01)
*A61B 34/00*(2006.01)
*A61B 17/16*(2006.01)
*B25J 13/02*(2006.01)
*B25J 9/16*(2006.01)

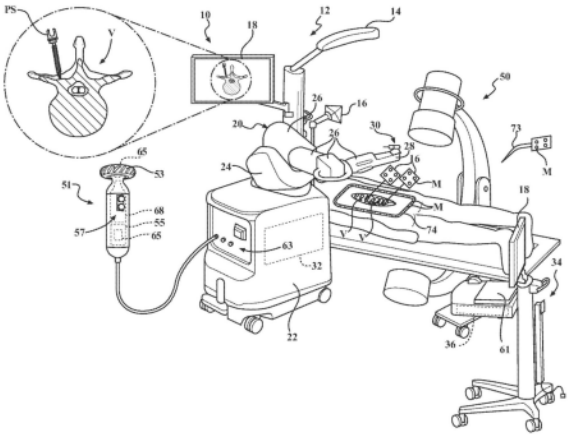
权利要求书7页 说明书36页 附图22页

(54)发明名称

# 具有触觉接口的机器人脊柱外科手术系统和方法

(57)摘要

本文公开了包括机器人操纵器、包括外科工具的技术，所述外科工具与螺钉相接并围绕旋转轴线旋转所述螺钉。触觉装置包括致动器和联接到所述致动器的旋转接口，并且所述旋转接口可由操作者的手来手动操纵。一个或多个控制器控制所述机器人操纵器的移动以沿着计划轨迹保持所述外科工具的所述旋转轴线；自主地控制所述外科工具根据所述螺钉的已知螺纹几何形状围绕所述旋转轴线以一定旋转速率旋转所述螺钉并且以一定推进速率线性地推进所述螺钉；获得指示所述螺钉与所述目标部位之间的当前相互作用的测量值；以及控制所述触觉装置的所述致动器以使所述旋转接口能够模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用。



CN 115361920 A

1.一种机器人外科系统,所述机器人外科系统包括:

机器人操纵器;

外科工具,所述外科工具联接到所述机器人操纵器并且被配置为与螺钉相接并围绕旋转轴线旋转所述螺钉;

触觉装置,所述触觉装置包括致动器和联接到所述致动器的旋转接口,并且所述旋转接口被配置为能够由操作者的手来手动操纵;

导航系统,所述导航系统被配置为跟踪目标部位的位置;以及

一个或多个控制器,所述一个或多个控制器联接到所述机器人操纵器、所述触觉装置和所述导航系统,并且所述一个或多个控制器被配置为:

控制所述机器人操纵器的移动以基于所跟踪的所述目标部位的位置来相对于所述目标部位沿着计划轨迹保持所述外科工具的所述旋转轴线;

自主地控制所述外科工具围绕所述旋转轴线以一定旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以一定推进速率线性地推进所述螺钉,其中所述旋转速率和所述推进速率是预先确定的并且与所述螺钉的已知螺纹几何形状成比例;

获得指示所述螺钉与所述目标部位之间的当前相互作用的测量值;以及

基于所获得的测量值,控制所述触觉装置的所述致动器以使所述旋转接口能够模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用。

2.如权利要求1所述的机器人外科系统,其中所述一个或多个控制器通过被配置为向所述致动器提供阻力以调整所述操作者的手旋转所述旋转接口所需的力来进一步模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用,其中旋转所述旋转接口所需的所述力反映相对于所述目标部位旋转所述螺钉所需的当前力。

3.如权利要求2所述的机器人外科系统,其中所述一个或多个控制器被进一步配置为启动自主检查模式,其中所述旋转接口能够在不具有控制所述外科工具旋转所述螺钉的能力的情况下根据经调整的力手动操纵以向所述操作者提供反映相对于所述目标部位旋转所述螺钉所需的所述当前力的触觉反馈。

4.如权利要求3所述的机器人外科系统,其中响应于一定状况或命令,所述一个或多个控制器被进一步配置为在自主地控制所述外科工具的同时启动所述自主检查模式。

5.如权利要求3或4中任一项所述的机器人外科系统,其中响应于一定状况或命令,所述一个或多个控制器被进一步配置为在停止或暂停自主地控制所述外科工具以使所述螺钉的旋转停止之后启动所述自主检查模式。

6.如权利要求3-5中任一项所述的机器人外科系统,其中响应于一定状况或命令,所述一个或多个控制器被进一步配置为在停止或暂停所述外科工具的自主控制以使所述螺钉的旋转停止之后恢复自主地控制所述外科工具以旋转所述螺钉。

7.如权利要求2-6中任一项所述的机器人外科系统,其中:

所述一个或多个控制器被进一步配置为启动手动控制模式,其中所述旋转接口能够在具有基于所述操作者手动地操纵所述旋转接口来控制所述螺钉的所述旋转速率或所述螺钉的所述推进速率中的一者的能力的情况下手动操纵;

所述一个或多个控制器被配置为响应于所述旋转接口被手动地操纵以控制所述螺钉的所述旋转速率或所述螺钉的所述推进速率中的一者而控制所述外科工具围绕所述旋转

轴线以所述旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以所述推进速率线性地推进所述螺钉;并且

所述旋转接口能够根据经调整的力手动操纵,以向所述操作者提供反映相对于所述目标部位旋转所述螺钉所需的所述当前力的触觉反馈。

8.如权利要求7所述的机器人外科系统,其中响应于一定状况或命令,所述一个或多个控制器被进一步配置为在停止或暂停自主地控制所述外科工具以使所述螺钉的旋转停止之后启动所述手动控制模式。

9.如权利要求8所述的机器人外科系统,其中响应于一定状况或命令,所述一个或多个控制器被进一步配置为从所述手动控制模式切换到恢复自主地控制所述外科工具以旋转所述螺钉。

10.如权利要求4-9中任一项所述的机器人外科系统,其中所述触觉装置被配置为触发所述状况或所述命令。

11.如任何前述权利要求所述的机器人外科系统,所述机器人外科系统还包括传感器,所述传感器被配置为获得指示所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用的所述测量值,所述一个或多个控制器联接到所述传感器。

12.如权利要求7-11中任一项所述的机器人外科系统,其中所述一个或多个控制器被配置为:

确定在所述螺钉的控制期间存在一定状况;以及

响应于确定存在所述状况,通过控制所述触觉装置的所述致动器以防止旋转所述旋转接口的能力来向所述操作者提供关于所述状况的触觉反馈。

13.如任何前述权利要求所述的机器人外科系统,其中所述导航系统被进一步配置为:

确定所述螺钉相对于被配准到所述目标部位的所述目标部位的解剖模型的位置,所述导航系统包括指示在所述螺钉相对于所述解剖模型的多个位置处所述螺钉与所述解剖模型之间的预期相互作用的预定数据;以及

基于所确定的所述螺钉相对于所述解剖模型的位置以及所述预定数据来获得指示所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用的所述测量值。

14.如任何前述权利要求所述的机器人外科系统,其中所述旋转速率和所述推进速率根据关系$\frac{\delta\theta}{\delta t}=\frac{\delta D}{\delta t}*\frac{螺距}{2\pi}$与所述已知螺纹几何形状成比例,其中$\frac{\delta\theta}{\delta t}$是所述旋转速率,$\frac{\delta D}{\delta t}$是所述推进速率,并且螺距是所述螺钉的每单位长度的螺纹数量。

15.如任何前述权利要求所述的机器人外科系统,其中所述触觉装置被进一步限定为手持悬吊台,并且所述旋转接口被进一步限定为旋钮。

16.如任何前述权利要求所述的机器人外科系统,其中所述触觉装置与所述机器人操纵器和所述外科工具远程间隔开。

17.如任何前述权利要求所述的机器人外科系统,其中所述触觉装置直接附接到所述机器人操纵器或所述外科工具。

18.如任何前述权利要求所述的机器人外科系统,其中所述一个或多个控制器被进一步配置为接收来自所述操作者的输入以选择性地调整以下各项中的一项或多项:

向所述致动器提供的所述阻力;以及

所述旋转接口控制所述外科工具以旋转所述螺钉的能力的灵敏度。

19.如任何前述权利要求所述的机器人外科系统，其中所述机器人外科系统还包括显示器，并且其中所述一个或多个控制器被进一步配置为启动模拟自主检查模式，其中所述一个或多个控制器被配置为：

模拟通过围绕所述旋转轴线以所述旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以所述推进速率线性地推进所述螺钉来自主地控制所述外科工具；

在所述显示器上显示所述外科工具的所述模拟自主控制；

获得所述螺钉与所述目标部位之间的模拟当前相互作用；以及

基于所述模拟当前相互作用，控制所述触觉装置的所述致动器以使所述旋转接口能够模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述模拟当前相互作用。

20.如权利要求19所述的机器人外科系统，其中所述一个或多个控制器被进一步配置为在自主地控制所述外科工具之前启动所述模拟自主检查模式。

21.如任何前述权利要求所述的机器人外科系统，其中所述机器人外科系统还包括显示器，并且其中所述一个或多个控制器被进一步配置为启动模拟手动控制模式，其中所述一个或多个控制器被配置为：

响应于所述旋转接口被手动地操纵以控制所述螺钉的所述旋转速率或所述螺钉的所述推进速率中的一者而接收控制输入；

模拟响应于所述控制输入而通过围绕所述旋转轴线以所述旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以所述推进速率线性地推进所述螺钉来手动地控制所述外科工具；

在所述显示器上显示所述外科工具的所述模拟手动控制；

获得所述螺钉与所述目标部位之间的模拟当前相互作用；以及

基于所述模拟当前相互作用，控制所述触觉装置的所述致动器以使所述旋转接口能够模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述模拟当前相互作用。

22.如权利要求21所述的机器人外科系统，其中响应于一定状况或命令，所述一个或多个控制器被进一步配置为在停止或暂停自主地控制所述外科工具以使所述螺钉的旋转停止之后启动所述模拟手动控制模式。

23.一种控制机器人外科系统的方法，所述机器人外科系统包括机器人操纵器；外科工具，所述外科工具联接到所述机器人操纵器并且被配置为与螺钉相接并围绕旋转轴线旋转所述螺钉；触觉装置，所述触觉装置包括致动器和联接到所述致动器并且被配置为可由操作者的手来手动操纵的旋转接口；导航系统，所述导航系统被配置为跟踪目标部位的位置；以及一个或多个控制器，所述一个或多个控制器联接到所述机器人操纵器、所述触觉装置和所述导航系统，所述方法包括：

用所述一个或多个控制器控制所述机器人操纵器的移动以基于所跟踪的所述目标部位的位置来相对于所述目标部位沿着计划轨迹保持所述外科工具的所述旋转轴线；

用所述一个或多个控制器自主地控制所述外科工具围绕所述旋转轴线以一定旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以一定推进速率线性地推进所述螺钉，其中所述旋转速率和所述推进速率是预先确定的并且与所述螺钉的已知螺纹几何形状成比例；

用所述一个或多个控制器获得指示所述螺钉与所述目标部位之间的当前相互作用的测量值；以及

用所述一个或多个控制器并且基于所获得的测量值控制所述触觉装置的所述致动器以使所述旋转接口能够模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用。

24.如权利要求23所述的方法，其中基于所获得的测量值控制所述触觉装置的所述致动器以使所述旋转接口能够模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用包括用所述一个或多个控制器向所述致动器提供阻力以调整所述操作者的手旋转所述旋转接口所需的力，其中旋转所述旋转接口所需的所述力反映相对于所述目标部位旋转所述螺钉所需的当前力。

25.如权利要求24所述的方法，所述方法还包括：

用所述一个或多个控制器启动自主检查模式，其中所述旋转接口能够在不具有控制所述外科工具旋转所述螺钉的能力的情况下根据经调整的力手动操纵以向所述操作者提供反映相对于所述目标部位旋转所述螺钉所需的所述当前力的触觉反馈。

26.如权利要求25所述的方法，所述方法还包括响应于一定状况或命令而在自主地控制所述外科工具的同时，用所述一个或多个控制器启动所述自主检查模式。

27.如权利要求25或26中任一项所述的方法，所述方法还包括响应于一定状况或命令而在停止或暂停自主地控制所述外科工具以使所述螺钉的旋转停止之后，用所述一个或多个控制器启动所述自主检查模式。

28.如权利要求25-27中任一项所述的方法，所述方法还包括在停止或暂停所述外科工具的自主控制以使所述螺钉的旋转停止之后并且响应于一定状况或命令，用所述一个或多个控制器恢复自主地控制所述外科工具以旋转所述螺钉。

29.如权利要求24所述的方法，所述方法还包括：

用所述一个或多个控制器启动手动控制模式，其中所述旋转接口能够在具有基于所述操作者手动地操纵所述旋转接口来控制所述螺钉的所述旋转速率或所述螺钉的所述推进速率中的一者的能力的情况下手动操纵；以及

响应于所述旋转接口被手动地操纵以控制所述螺钉的所述旋转速率或所述螺钉的所述推进速率中的一者而用所述一个或多个控制器控制所述外科工具围绕所述旋转轴线以所述旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以所述推进速率线性地推进所述螺钉；并且

其中所述旋转接口能够根据经调整的力手动操纵，以向所述操作者提供反映相对于所述目标部位旋转所述螺钉所需的所述当前力的触觉反馈。

30.如权利要求29所述的方法，所述方法还包括响应于一定状况或命令而在停止或暂停自主地控制所述外科工具以使所述螺钉的旋转停止之后，用所述一个或多个控制器启动所述手动控制模式。

31.如权利要求30所述的方法，所述方法还包括响应于一定状况或命令而用所述一个或多个控制器从所述手动控制模式切换到恢复自主地控制所述外科工具以旋转所述螺钉。

32.如权利要求26-31中任一项所述的方法，所述方法还包括用所述触觉装置触发所述状况或所述命令。

33.如权利要求23-32中任一项所述的方法，其中所述机器人外科系统包括传感器，所述方法还包括用所述传感器获得指示所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用的所述测量值，所述一个或多个控制器联接到所述传感器。

34.如权利要求29-33中任一项所述的方法,所述方法还包括:

用所述一个或多个控制器确定在所述螺钉的控制期间存在一定状况;以及

响应于确定存在所述状况而用所述一个或多个控制器通过控制所述触觉装置的所述致动器以防止旋转所述旋转接口的能力来提供关于所述状况的触觉反馈。

35.如权利要求23-34中任一项所述的方法,所述方法还包括:

用所述导航系统确定所述螺钉相对于被配准到所述目标部位的所述目标部位的解剖模型的位置,所述导航系统包括指示在所述螺钉相对于所述解剖模型的多个位置处所述螺钉与所述解剖模型之间的预期相互作用的预定数据;以及

用所述导航系统基于所确定的所述螺钉相对于所述解剖模型的位置以及所述预定数据来获得指示所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用的所述测量值。

36.如权利要求23-35中任一项所述的方法,所述方法还包括用所述一个或多个控制器接收来自所述操作者的输入以选择性地调整以下各项中的一项或多项:

向所述致动器提供的所述阻力;以及

所述旋转接口控制所述外科工具以旋转所述螺钉的能力的灵敏度。

37.如权利要求23-26中任一项所述的方法,其中所述机器人外科系统还包括显示器,所述方法还包括用所述一个或多个控制器启动模拟自主检查模式,所述模拟自主检查模式包括所述一个或多个控制器:

模拟通过围绕所述旋转轴线以所述旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以所述推进速率线性地推进所述螺钉来自主地控制所述外科工具;

在所述显示器上显示所述外科工具的所述模拟自主控制;

获得所述螺钉与所述目标部位之间的模拟当前相互作用;以及

基于所述模拟当前相互作用,控制所述触觉装置的所述致动器以使所述旋转接口能够模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述模拟当前相互作用。

38.如权利要求37所述的方法,所述方法还包括在自主地控制所述外科工具之前,用所述一个或多个控制器启动所述模拟自主检查模式。

39.如权利要求23-27中任一项所述的方法,其中所述机器人外科系统还包括显示器,所述方法还包括用所述一个或多个控制器启动模拟手动控制模式,所述模拟手动控制模式包括所述一个或多个控制器:

响应于所述旋转接口被手动地操纵以控制所述螺钉的所述旋转速率或所述螺钉的所述推进速率中的一者而接收控制输入;

模拟响应于所述控制输入而通过围绕所述旋转轴线以所述旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以所述推进速率线性地推进所述螺钉来手动地控制所述外科工具;

在所述显示器上显示所述外科工具的所述模拟手动控制;

获得所述螺钉与所述目标部位之间的模拟当前相互作用;以及

基于所述模拟当前相互作用,控制所述触觉装置的所述致动器以使所述旋转接口能够模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述模拟当前相互作用。

40.如权利要求39所述的方法,所述方法还包括响应于一定状况或命令而在停止或暂停自主地控制所述外科工具以使所述螺钉的旋转停止之后,用所述一个或多个控制器启动所述模拟手动控制模式。

41.一种机器人外科系统,所述机器人外科系统包括:

机器人操纵器;

外科工具,所述外科工具联接到所述机器人操纵器并且被配置为与螺钉相接并围绕旋转轴线旋转所述螺钉;

触觉装置,所述触觉装置包括致动器和联接到所述致动器的旋转接口,并且所述旋转接口被配置为能够由操作者的手来手动操纵;

导航系统,所述导航系统被配置为跟踪目标部位的位置;以及

一个或多个控制器,所述一个或多个控制器联接到所述机器人操纵器、所述触觉装置和所述导航系统,并且所述一个或多个控制器被配置为:

控制所述机器人操纵器的移动以基于所跟踪的所述目标部位的位置来相对于所述目标部位沿着计划轨迹保持所述外科工具的所述旋转轴线;

接收来自所述触觉装置的控制输入,其中所述旋转接口能够在具有基于所述操作者手动地操纵所述旋转接口来控制所述螺钉的旋转速率或所述螺钉的推进速率中的一者的能力的情况下手动操纵;

响应于来自所述触觉装置的控制输入,控制所述外科工具围绕所述旋转轴线以一定旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以一定推进速率线性地推进所述螺钉,其中所述旋转速率和所述推进速率是预先确定的并且与所述螺钉的已知螺纹几何形状成比例;

获得指示所述螺钉与所述目标部位之间的当前相互作用的测量值;以及

基于所获得的测量值,控制所述触觉装置以使所述旋转接口能够模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用。

42.一种操作如权利要求41所述的外科系统的方法。

43.一种机器人外科系统,所述机器人外科系统包括:

机器人操纵器;

外科工具,所述外科工具联接到所述机器人操纵器并且被配置为围绕旋转轴线旋转;

触觉装置,所述触觉装置包括致动器和联接到所述致动器的旋转接口,并且所述旋转接口被配置为能够由操作者的手来手动操纵;

导航系统,所述导航系统被配置为跟踪目标部位的位置;以及

一个或多个控制器,所述一个或多个控制器联接到所述机器人操纵器、所述触觉装置和所述导航系统,并且所述一个或多个控制器被配置为:

控制所述机器人操纵器的移动以基于所跟踪的所述目标部位的位置来相对于所述目标部位沿着计划轨迹保持所述外科工具的所述旋转轴线;

自主地控制所述外科工具围绕所述旋转轴线以一定旋转速率旋转所述外科工具并且沿着所述计划轨迹以一定推进速率线性地推进所述外科工具;

获得指示所述外科工具与所述目标部位之间的当前相互作用的测量值;以及

基于所获得的测量值,控制所述触觉装置以使所述旋转接口能够模仿所述外科工具与所述目标部位之间的所述当前相互作用。

44.一种操作如权利要求42所述的外科系统的方法。

45.一种模拟系统,所述模拟系统包括:

触觉装置,所述触觉装置包括致动器和联接到所述致动器的旋转接口,并且所述旋转

接口被配置为能够由操作者的手来手动操纵；

显示装置；以及

一个或多个控制器，所述一个或多个控制器联接到所述触觉装置和所述显示装置，并且所述一个或多个控制器被配置为在所述显示装置上提供模拟，所述模拟被配置为：

提供模拟外科工具，其中所述模拟外科工具被配置为与模拟螺钉相接并且相对于模拟目标部位沿着模拟轨迹围绕旋转轴线旋转所述模拟螺钉；

提供所述模拟外科工具的模拟控制以围绕所述旋转轴线以一定旋转速率旋转所述模拟螺钉并且沿着所述模拟轨迹以一定推进速率线性地推进所述模拟螺钉，其中所述旋转速率和所述推进速率是预先确定的并且与所述模拟螺钉的已知螺纹几何形状成比例；

获得所述模拟螺钉与所述模拟目标部位之间的模拟当前相互作用；以及

基于所述模拟当前相互作用，控制所述触觉装置以使所述旋转接口能够模仿所述模拟螺钉与所述模拟目标部位之间的所述模拟当前相互作用。

46.一种操作如权利要求45所述的模拟系统的方法。

# 具有触觉接口的机器人脊柱外科手术系统和方法

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求于2020年3月27日提交的美国临时专利申请号63/001,019的优先权和所有权益,所述美国临时专利申请的全部公开内容特此以引用的方式并入。

## 背景技术

[0003] 用于在患者的脊柱中执行外科手术的机器人外科系统是众所周知的。例如,当前利用机器人外科系统来将椎弓根螺钉放置在患者的脊柱中。

[0004] 当患者需要涉及放置椎弓根螺钉的外科手术时,通常会采用术前成像和/或术中成像来可视化需要治疗的患者的解剖结构-在这种情况下为患者的脊柱。然后外科医生相对于图像和/或相对于根据图像创建的3D模型计划在何处放置椎弓根螺钉。计划包括例如通过在图像和/或3D模型中标识期望姿态来确定每个椎弓根螺钉相对于它们将放置于其中的特定椎骨的位置和取向(即,姿态)。一旦设定计划,所述计划就会被传送到机器人外科系统以供执行。

[0005] 通常,机器人外科系统包括机器人操纵器,所述机器人操纵器在患者上方并且沿着与待放置的椎弓根螺钉的期望取向对准的期望轨迹定位工具引导件。机器人外科系统还包括导航系统,以确定工具引导件相对于患者的解剖结构的位置,使得机器人操纵器可以根据外科医生的计划沿着期望轨迹放置工具引导件。在一些情况下,导航系统包括附接到操纵器和患者的跟踪装置,使得机器人外科系统可以在外科手术期间通过根据需要移动工具引导件以维持期望轨迹来对患者的移动进行监测和响应。

[0006] 一旦将工具引导件定位成与期望轨迹对准,就控制机器人操纵器以保持对准。此后,外科医生通过工具引导件定位套管并且将所述套管定位成与椎骨相邻。外科医生将常规钻孔工具插入到套管中,以为椎弓根螺钉钻出导向孔。然后外科医生将钻孔工具移除并且用椎弓根螺钉驱动器将椎弓根螺钉插入到导向孔中的适当位置。在这种方法中,机器人操纵器在一定程度上未得到充分利用,因为机器人操纵器在钻出导向孔或插入椎弓根螺钉方面起到很小作用乃至不起作用。

[0007] 另一方面,于2018年11月8日提交的名为“Robotic Spine Surgery System and Methods”的US 16/184,376的公开内容公开了一种技术,通过所述技术,机器人系统可以用于自主地控制外科工具围绕旋转轴线以一定旋转速率旋转螺钉并且沿着计划轨迹以一定推进速率线性地推进螺钉。尽管在该方法中使用了机器人操纵器,但外科医生不再直接接触或控制在与组织相互作用时所涉及的力、能量、材料和信息流。反过来,这可能导致外科医生为了在外科手术期间监测和评估组织相互作用过程而习惯的触觉和感觉信息丢失。由于缺乏感觉输入,外科医生无法评估所述过程,这可能导致外科医生失去信心、情绪紧张、手术效率低下以及无法对机器人解决方案未捕获但外科医生原本可以感知的意外情况做出反应等。

## 发明内容

[0008] 本公开的第一方面涉及一种机器人外科系统，所述机器人外科系统包括机器人操纵器；外科工具，所述外科工具联接到所述机器人操纵器并且被配置为与螺钉相接并围绕旋转轴线旋转所述螺钉；触觉装置，所述触觉装置包括致动器和联接到所述致动器的旋转接口，并且所述旋转接口被配置为可由操作者的手来手动操纵；导航系统，所述导航系统被配置为跟踪目标部位的位置；以及一个或多个控制器，所述一个或多个控制器联接到所述机器人操纵器、所述触觉装置和所述导航系统，并且所述一个或多个控制器被配置为：控制所述机器人操纵器的移动以基于所跟踪的所述目标部位的位置来相对于所述目标部位沿着计划轨迹保持所述外科工具的所述旋转轴线；自主地控制所述外科工具围绕所述旋转轴线以一定旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以一定推进速率线性地推进所述螺钉，其中所述旋转速率和所述推进速率是预先确定的并且与所述螺钉的已知螺纹几何形状成比例；获得指示所述螺钉与所述目标部位之间的当前相互作用的测量值；以及基于所获得的测量值，控制所述触觉装置以使所述旋转接口能够模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用。

[0009] 在一些实施方式中，所述旋转接口包括但不限于以下各项中的任何一种或多种：旋钮、轮、旋转开关或拨盘。

[0010] 在一些实施方式中，所述触觉装置包括线性接口而不是旋转接口，诸如但不限于线性按钮、线性开关、线性触发器或线性滑块。

[0011] 在一些实施方式中，所述一个或多个控制器通过被配置为控制所述触觉装置的所述致动器来模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用。

[0012] 在一些实施方式中，所述一个或多个控制器通过被配置为向所述致动器提供阻力以调整所述操作者的手旋转所述旋转接口所需的力来进一步模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用，其中旋转所述旋转接口所需的所述力反映相对于所述目标部位旋转所述螺钉所需的当前力。

[0013] 在一些实施方式中，所述一个或多个控制器被配置为利用不同于所述致动器或除了所述致动器之外的装置来抵抗所述接口的机械运动。例如，为了影响所述接口的移动，所述触觉装置可利用机械部件，包括但不限于偏置机构、止动器、棘轮和/或齿轮系统等；电器部件，诸如但不限于电感、电容和/或电阻元件；磁性部件；电磁部件；机电部件；液压部件；以及/或者气动部件。

[0014] 在一些实施方式中，所述一个或多个控制器通过被配置为限制所述接口的运动范围来进一步模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用。

[0015] 在一些实施方式中，所述一个或多个控制器被进一步配置为启动自主检查模式，其中所述旋转接口在不具有控制所述外科工具旋转所述螺钉的能力的情况下可根据经调整的力手动操纵以向所述操作者提供反映相对于所述目标部位旋转所述螺钉所需的所述当前力的触觉反馈。

[0016] 在一些实施方式中，响应于一定状况或命令，所述一个或多个控制器被进一步配置为在自主地控制所述外科工具的同时启动所述自主检查模式。

[0017] 在一些实施方式中，响应于一定状况或命令，所述一个或多个控制器被进一步配置为在停止或暂停自主地控制所述外科工具以使所述螺钉的旋转停止之后启动所述自主

检查模式。

[0018] 在一些实施方式中，响应于一定状况或命令，所述一个或多个控制器被进一步配置为在停止或暂停所述外科工具的自主控制以使所述螺钉的旋转停止之后恢复自主地控制所述外科工具以旋转所述螺钉。

[0019] 在一些实施方式中，所述一个或多个控制器被进一步配置为启动手动控制模式，其中所述旋转接口在具有基于所述操作者手动地操纵所述旋转接口来控制所述螺钉的所述旋转速率或所述螺钉的所述推进速率中的一者的能力的情况下是可手动操纵的；所述一个或多个控制器被配置为响应于所述旋转接口被手动地操纵以控制所述螺钉的所述旋转速率或所述螺钉的所述推进速率中的一者而控制所述外科工具围绕所述旋转轴线以所述旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以所述推进速率线性地推进所述螺钉；并且所述旋转接口可根据经调整的力手动操纵，以向所述操作者提供反映相对于所述目标部位旋转所述螺钉所需的所述当前力的触觉反馈。

[0020] 在一些实施方式中，响应于一定状况或命令，所述一个或多个控制器被进一步配置为在停止或暂停自主地控制所述外科工具以使所述螺钉的旋转停止之后启动所述手动控制模式。

[0021] 在一些实施方式中，响应于一定状况或命令，所述一个或多个控制器被进一步配置为从所述手动控制模式切换到恢复自主地控制所述外科工具以旋转所述螺钉。

[0022] 在一些实施方式中，所述触觉装置被配置为触发所述状况或所述命令。

[0023] 在一些实施方式中，所述机器人外科系统还包括传感器，所述传感器被配置为获得指示所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用的所述测量值，所述一个或多个控制器联接到所述传感器。

[0024] 在一些实施方式中，所述一个或多个控制器被配置为：确定在所述螺钉的控制期间存在一定状况；以及响应于确定存在所述状况，通过控制所述触觉装置的所述致动器以防止旋转所述旋转接口的能力来向所述操作者提供关于所述状况的触觉反馈。

[0025] 在一些实施方式中，所述导航系统被进一步配置为：确定所述螺钉相对于被配准到所述目标部位的所述目标部位的解剖模型的位置，所述导航系统包括指示在所述螺钉相对于所述解剖模型的多个位置处所述螺钉与所述解剖模型之间的预期相互作用的预定数据；以及基于所确定的所述螺钉相对于所述解剖模型的位置以及所述预定数据来获得指示所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用的所述测量值。

[0026] 在一些实施方式中，所述旋转速率和所述推进速率根据关系$\frac{\delta\theta}{\delta t}=\frac{\delta D}{\delta t}*\frac{螺距}{2\pi}$与所述已知螺纹几何形状成比例，其中$\frac{\delta\theta}{\delta t}$是所述旋转速率，$\frac{\delta D}{\delta t}$是所述推进速率，并且螺距是所述螺钉的每单位长度的螺纹数量。

[0027] 在一些实施方式中，所述触觉装置被进一步限定为手持悬吊台。

[0028] 在一些实施方式中，所述触觉装置是旋转接口，诸如但不限于旋钮、旋转开关或拨盘。

[0029] 在一些实施方式中，可以使用任何植入物代替螺钉，诸如脊柱植入物，诸如杆、锚、间隔件、笼或板。

[0030] 在一些实施方式中，所述螺钉更具体地是自攻式螺钉。

[0031] 在一些实施方式中，所述触觉装置与所述机器人操纵器和所述外科工具远程间隔开。

[0032] 在一些实施方式中，所述触觉装置直接附接到所述机器人操纵器或所述外科工具。

[0033] 在一些实施方式中，所述一个或多个控制器被进一步配置为接收来自所述操作者的输入以选择性地调整以下各项中的一项或多项：向所述致动器提供的所述阻力；以及所述旋转接口控制所述外科工具以旋转所述螺钉的能力的灵敏度。

[0034] 在一些实施方式中，所述机器人外科系统还包括显示器，并且其中所述一个或多个控制器被进一步配置为启动模拟自主检查模式，其中所述一个或多个控制器被配置为：模拟通过围绕所述旋转轴线以所述旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以所述推进速率线性地推进所述螺钉来自主地控制所述外科工具；在所述显示器上显示所述外科工具的所述模拟自主控制；获得所述螺钉与所述目标部位之间的模拟当前相互作用；以及基于所述模拟当前相互作用，控制所述触觉装置的所述致动器以使所述旋转接口能够通过被配置为向所述致动器提供阻力以调整所述操作者的手旋转所述旋转接口所需的力来模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述模拟当前相互作用，其中旋转所述旋转接口所需的所述力反映相对于所述目标部位旋转所述螺钉所需的模拟当前力；其中所述旋转接口在不具有控制所述外科工具旋转所述螺钉的能力并且不具有控制所述外科工具的所述模拟自主控制的能力的情况下可根据经调整的力手动操纵以向所述操作者提供反映所述模拟当前力的触觉反馈。

[0035] 在一些实施方式中，所述一个或多个控制器被进一步配置为在自主地控制所述外科工具之前启动所述模拟自主检查模式。

[0036] 在一些实施方式中，所述机器人外科系统还包括显示器，并且其中所述一个或多个控制器被进一步配置为启动模拟手动控制模式，其中所述旋转接口在不具有控制所述外科工具旋转所述螺钉的能力并且具有基于所述操作者手动地操纵所述旋转接口在所述外科工具的所述模拟手动控制期间控制所述螺钉的所述旋转速率或所述螺钉的所述推进速率中的一者的能力的情况下是可手动操纵的，并且其中所述一个或多个控制器被配置为：模拟通过响应于所述旋转接口被手动地操纵以控制所述螺钉的所述旋转速率或所述螺钉的所述推进速率中的一者而围绕所述旋转轴线以所述旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以所述推进速率线性地推进所述螺钉来手动地控制所述外科工具；在所述显示器上显示所述外科工具的所述模拟手动控制；获得所述螺钉与所述目标部位之间的模拟当前相互作用；以及基于所述模拟当前相互作用，控制所述触觉装置的所述致动器以使所述旋转接口能够通过被配置为向所述致动器提供阻力以调整所述操作者的手旋转所述旋转接口所需的力来模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述模拟当前相互作用，其中旋转所述旋转接口所需的所述力反映相对于所述目标部位旋转所述螺钉所需的模拟当前力，并且其中所述旋转接口可根据经调整的力手动操纵，以向所述操作者提供反映所述模拟当前力的触觉反馈。

[0037] 在一些实施方式中，响应于一定状况或命令，所述一个或多个控制器被进一步配置为在停止或暂停自主地控制所述外科工具以使所述螺钉的旋转停止之后启动所述模拟

手动控制模式。

[0038] 本公开的第二方面涉及一种操作根据本公开的第一方面并且任选地根据本部分内的实施方式中的任一种的所述机器人外科系统的方法。本公开的第一方面和第二方面任选地根据本部分内的实施方式中的任一种来实施。

[0039] 本公开的第三方面涉及一种机器人外科系统，所述机器人外科系统包括：机器人操纵器；外科工具，所述外科工具联接到所述机器人操纵器并且被配置为与螺钉相接并围绕旋转轴线旋转所述螺钉；触觉装置，所述触觉装置包括致动器和联接到所述致动器的旋转接口，并且所述旋转接口被配置为可由操作者的手来手动操纵；导航系统，所述导航系统被配置为跟踪目标部位的位置；以及一个或多个控制器，所述一个或多个控制器联接到所述机器人操纵器、所述触觉装置和所述导航系统，并且所述一个或多个控制器被配置为：控制所述机器人操纵器的移动以基于所跟踪的所述目标部位的位置来相对于所述目标部位沿着计划轨迹保持所述外科工具的所述旋转轴线；接收来自所述触觉装置的控制输入，其中所述旋转接口在具有基于所述操作者手动地操纵所述旋转接口来控制所述螺钉的所述旋转速率或所述螺钉的所述推进速率中的一者的能力的情况下是可手动操纵的；响应于来自所述触觉装置的控制输入，控制所述外科工具围绕所述旋转轴线以一定旋转速率旋转所述螺钉并且沿着所述计划轨迹以一定推进速率线性地推进所述螺钉，其中所述旋转速率和所述推进速率是预先确定的并且与所述螺钉的已知螺纹几何形状成比例；获得指示所述螺钉与所述目标部位之间的当前相互作用的测量值；以及基于所获得的测量值，控制所述触觉装置的所述致动器以使所述旋转接口能够模仿所述螺钉与所述目标部位之间的所述当前相互作用。

[0040] 本公开的第四方面涉及一种操作根据本公开的第三方面并且任选地根据本部分内的实施方式中的任一种的所述机器人外科系统的方法。本公开的第三方面和第四方面任选地根据本部分内的实施方式中的任一种来实施。

[0041] 本公开的第五方面涉及一种机器人外科系统，所述机器人外科系统包括：机器人操纵器；外科工具，所述外科工具联接到所述机器人操纵器并且被配置为围绕旋转轴线旋转；触觉装置，所述触觉装置包括致动器和联接到所述致动器的接口，并且所述接口被配置为可由操作者的手来手动操纵；导航系统，所述导航系统被配置为跟踪目标部位的位置；以及一个或多个控制器，所述一个或多个控制器联接到所述机器人操纵器、所述触觉装置和所述导航系统，并且所述一个或多个控制器被配置为：控制所述机器人操纵器的移动以基于所跟踪的所述目标部位的位置来相对于所述目标部位沿着计划轨迹保持所述外科工具的所述旋转轴线；自主地控制所述外科工具围绕所述旋转轴线以一定旋转速率旋转所述外科工具并且沿着所述计划轨迹以一定推进速率线性地推进所述外科工具；获得指示所述外科工具与所述目标部位之间的当前相互作用的测量值；以及基于所获得的测量值，控制所述触觉装置的所述致动器以使所述旋转接口能够模仿所述外科工具与所述目标部位之间的所述当前相互作用。

[0042] 本公开的第六方面涉及一种操作根据本公开的第五方面并且任选地根据本部分内的实施方式中的任一种的所述机器人外科系统的方法。本公开的第五方面和第六方面任选地根据本部分内的实施方式中的任一种来实施。

[0043] 本公开的第七方面涉及一种模拟系统，所述模拟系统包括：触觉装置，所述触觉装

置包括致动器和联接到所述致动器的旋转接口，并且所述旋转接口被配置为可由操作者的手来手动操纵；显示装置；以及一个或多个控制器，所述一个或多个控制器联接到所述触觉装置和所述显示装置，并且所述一个或多个控制器被配置为在所述显示装置上提供模拟，所述模拟被配置为：提供模拟外科工具，所述模拟外科工具被配置为与模拟螺钉相接并且相对于模拟目标部位沿着模拟轨迹围绕旋转轴线旋转所述模拟螺钉；提供所述模拟外科工具的模拟控制以围绕所述旋转轴线以一定旋转速率旋转所述模拟螺钉并且沿着所述模拟轨迹以一定推进速率线性地推进所述模拟螺钉，其中所述旋转速率和所述推进速率是预先确定的并且与所述模拟螺钉的已知螺纹几何形状成比例；获得所述模拟螺钉与所述模拟目标部位之间的模拟当前相互作用；以及基于所述模拟当前相互作用，控制所述触觉装置以使所述旋转接口能够模仿所述模拟螺钉与所述模拟目标部位之间的所述模拟当前相互作用。

[0044] 本公开的第八方面涉及一种操作根据本公开的第七方面并且任选地根据本部分内的实施方式中的任一种的所述模拟系统的方法。本公开的第七方面和第八方面任选地根据本部分内的实施方式中的任一种来实施。

## 附图说明

[0045] 图1是根据一个示例的机器人外科系统的透视图。

[0046] 图2是与图1的机器人外科系统一起使用的外科机器人臂的一个示例的透视图。

[0047] 图3是与成像装置结合使用以执行脊柱手术的机器人外科系统的一个示例的透视图。

[0048] 图4是联接到机器人臂的外科工具的一个示例的局部透视图，其中外科工具包括联接到钻子的壳体。

[0049] 图5是联接到外科工具的机器人臂的局部透视图，所述外科工具联接到驱动器和螺钉。

[0050] 图6是替代外科工具的正视图。

[0051] 图7是根据一个示例在椎弓根中钻出导向孔的图示。

[0052] 图8是根据一个示例的进入椎骨的椎弓根螺钉的图示。

[0053] 图9是沿着线触觉设置的椎弓根螺钉的图示。

[0054] 图10是图1的机器人外科系统的实例的透视图，其中机器人外科系统包括触觉装置。

[0055] 图11A是示出包括自主检查模式、手动控制模式、模拟自主检查模式和模拟手动控制模式在内的各种操作模式以及触觉装置的参数的表。

[0056] 图11B是示出用于在手动控制模式期间基于来自触觉装置的输入来控制椎弓根螺钉的插入的各种技术的表。

[0057] 图11C是触觉装置的旋转接口从原始位置手动操纵到非原始位置的图示。

[0058] 图12A是在自主检查模式期间插入椎弓根螺钉时触觉装置向操作者提供触觉反馈的图示。

[0059] 图12B是在手动控制模式期间插入椎弓根螺钉时触觉装置向操作者提供触觉反馈的图示。

[0060] 图13A和图13B是示出电流输出与深度的关系的图示，这可以用于验证钻孔和椎弓根螺钉插入是根据操作者的计划。

[0061] 图14A是根据一个示例的包括触觉装置并且显示正在被插入的椎弓根螺钉的模拟的机器人外科系统的透视图。

[0062] 图14B是在模拟自主检查模式期间插入椎弓根螺钉时触觉装置向操作者提供触觉反馈的图示。

[0063] 图14C是在模拟手动控制模式期间插入椎弓根螺钉时触觉装置向操作者提供触觉反馈的图示。

[0064] 图15A是使用触觉装置操作机器人外科系统的方法的流程图。

[0065] 图15B是执行自主检查模式的示例步骤的流程图。

[0066] 图15C是执行手动控制模式的示例步骤的流程图。

[0067] 图15D是执行模拟自主检查模式的示例步骤的流程图。

[0068] 图15E是执行模拟手动控制模式的示例步骤的流程图。

[0069] 图15F是在外科手术期间实施以自主地控制椎弓根螺钉PS的插入的示例步骤的流程图。

## 具体实施方式

[0070] I.系统概述

[0071] 参考图1和图2，示出了外科机器人外科系统10，所述外科系统可以用于各种外科手术，包括但不限于脊柱手术，诸如将椎弓根螺钉、其他螺钉或其他类型的植入物放置在脊柱中的脊柱手术。机器人外科系统10包括导航系统12，所述导航系统包括定位器14和跟踪装置16、一个或多个显示器18以及机器人操纵器(例如，安装到基座22、工作台等的机器人臂20)。机器人臂20包括可旋转地联接到基座22的基础连杆24以及从基础连杆24延伸到远侧端部28的多个臂连杆26。臂连杆26围绕机器人臂20中的多个关节枢转/旋转。例如，大体以30示出用于执行脊柱手术的外科工具。外科工具30可枢转地连接到机器人臂20的远侧端部28。臂连杆26可以串联安装。可替代地，机器人臂20可包括平行臂连杆。此外，可采用任何数量的机器人臂20。

[0072] 机器人控制器32被配置为在外科工具30的操纵期间提供对机器人臂20的控制或对外科医生(本文称为“操作者”)的引导。在一个实例中，机器人控制器32被配置为控制机器人臂20(例如，通过控制其关节马达)以经由机器人臂20向操作者提供触觉反馈。该触觉反馈有助于约束或阻止操作者手动地将外科工具30移动到与外科手术相关联的预定虚拟边界之外。这种触觉反馈系统和限定虚拟边界的相关触觉对象描述于例如授予Quaid等人的于2006年2月21日提交的名为“Haptic Guidance System And Method”的美国专利号8,010,180和/或授予Otto等人的于2012年12月21日提交的名为“Systems And Methods For Haptic Control Of A Surgical Tool”的美国专利申请公布号2014/0180290，所述专利中的每一项特此以引用的方式整体并入本文。在一个实例中，机器人外科系统10是由美国佛罗里达州劳德代尔堡的MAKO Surgical Corp.制造的RIO™机器人臂交互式矫形系统。

[0073] 在一些实例中，机器人臂20基于预定工具路径和/或其他预定移动自主地行动以执行外科手术。此类移动可在外科手术期间和/或在手术之前定义。在另外的实例中，利用

手动和自主控制的组合。例如，采用手动模式(其中操作者将力施加到外科工具30以引起机器人臂20的移动)和半自主模式(其中操作者握住悬吊台以控制机器人臂20自主地遵循工具路径)两者的机器人外科系统描述于Bowling等人的于2015年6月4日提交且名为“Robotic surgical system And Method For Transitioning Between Operating Modes”的美国专利号9,566,122，所述专利特此以引用的方式整体并入本文。

[0074] 导航系统12被设置为跟踪手术室中的各种对象相对于目标坐标系的移动。此类对象包括例如外科工具30、患者的目标解剖结构(例如，一个或多个椎骨)和/或其他对象。导航系统12跟踪这些对象以达到向操作者显示它们在目标坐标系中的相对位置和取向的目的，并且在一些情况下达到相对于与患者的解剖结构相关联并且相对于目标坐标系定义(例如，经由外科导航中众所周知的坐标系变换)的虚拟边界控制或约束外科工具30的移动的目的。

[0075] 外科导航系统12包括容纳导航控制器36的计算机推车组件34。导航控制器36和机器人控制器32共同形成机器人外科系统10的控制系统。导航界面与导航控制器36进行操作性通信。导航界面包括可调整地安装到计算机推车组件34的显示器18。诸如键盘和鼠标的输入装置可以用于将信息输入到导航控制器36中或以其他方式选择/控制导航控制器36的某些方面。设想了其他输入装置，包括触摸屏(未示出)或语音激活。

[0076] 定位器14与导航控制器36通信。在所示的实例中，定位器14是光学定位器并且包括相机单元(感测装置的一个示例)。相机单元具有容纳一个或多个光学位置传感器的外壳。在一些实例中，采用至少两个光学传感器，有时三个或更多个。光学传感器可以是单独的电荷耦合装置(CCD)。相机单元安装在可调整臂上以将光学传感器定位成具有对下文论述的跟踪装置16的在理想情况下没有障碍物的视野。在一些实例中，相机单元可通过围绕旋转关节旋转而在至少一个自由度上进行调整。在其他实例中，相机单元可围绕两个或更多个自由度进行调整。

[0077] 定位器14包括与光学传感器通信以从光学传感器接收信号的定位器控制器(未示出)。定位器控制器通过有线或无线连接(未示出)与导航控制器36通信。一种这样的连接可以是IEEE 1394接口，所述接口是用于高速通信和同步实时数据传送的串行总线接口标准。所述连接还可以使用公司专用协议。在其他实例中，光学传感器直接与导航控制器36通信。

[0078] 位置和取向信号和/或数据被传输到导航控制器36以达到跟踪对象的目的。计算机推车组件34、显示器18和定位器14可类似于Malackowski等人的于2010年5月25日发布的名为“Surgery System”的美国专利号7,725,162(据此以引用的方式并入)中描述的那些。

[0079] 机器人控制器32和导航控制器36可各自或共同包括一个或多个个人计算机或膝上型计算机;适合于存储数据和计算机可读指令的存储器，诸如本地存储器、外部存储器、基于云的存储器、随机存取存储器(RAM)、非易失性RAM(NVRAM)、快闪存储器或任何其他合适形式的存储器。机器人控制器32和导航控制器36可各自或共同包括一个或多个处理器，诸如微处理器，用于处理指令或用于处理存储在存储器中的算法以实施本文描述的功能。处理器可以是任何类型的处理器、微处理器或多处理器系统。另外地或可替代地，机器人控制器32和导航控制器36可各自或共同包括一个或多个微控制器、现场可编程门阵列、片上系统、分立电路和/或能够实施本文描述的功能的其他合适的硬件、软件或固件。机器人控制器32和导航控制器36可由机器人操纵器、计算机推车组件34承载，并且/或者可安装到任

何其他合适的位置。机器人控制器32和/或导航控制器36加载有如下所述的软件。所述软件将从定位器14接收的信号转换为表示被跟踪的对象的位置和取向的数据。

[0080] 除了机器人控制器32之外，外科机器人系统10还可包括任何数量的控制器以控制外科机器人系统10的部件。例如，外科机器人系统10可包括被配置为控制外科工具30的工具控制器。作为另一个示例，外科机器人系统10可包括被配置为控制外科机器人系统10的触觉装置的触觉装置控制器(下面更详细地描述)。外科机器人系统10的控制器可被配置为单独地或组合地实施外科手术的功能。例如，机器人控制器32、导航控制器36、定位器控制器、工具控制器和触觉装置控制器可组合地操作以经由外科机器人系统10的触觉装置向操作者提供触觉反馈。作为另一个示例，机器人控制器32可单独地操作以控制机器人臂20。因此，为了体现这些不同配置，下文的描述可指也如图1所示的“一个或多个控制器33”。应当理解，“一个或多个控制器33”包括适合于执行所引用功能的任何单独的控制器或控制器的任何组合。共同的一个或多个控制器也可被认为是控制系统。

[0081] 此外，本说明书内由本文所述的一个或多个控制器33中的任一个执行的任何步骤可根据本文所述的控制算法操作，所述控制算法可根据用于解决本文所述任务的有限步骤序列来实施。

[0082] 参考图3，导航系统12包括多个跟踪装置16，本文也称为跟踪器。在所示的实例中，跟踪器16联接到患者的单独的椎骨。在一些情况下，跟踪器16经由骨骼螺钉、骨骼销等等牢固地附连到骨骼的区段。在其他情况下，可使用脊柱棘突或脊柱的其他部分上的夹具来附接跟踪器16。在另外的实例中，跟踪器16可以安装到解剖结构的其他组织类型或部分。跟踪器16相对于它们所附接的解剖结构的位置可以通过诸如基于点的配准的配准技术来确定，在所述基于点的配准中，使用数字化探针73(例如，其自身具有标记的导航指针)对骨骼上的骨骼标志进行勾勒或触及骨骼上的若干个点以进行基于表面的配准。可以采用常规的配准技术来使跟踪器16的姿态与患者的解剖结构(例如，被治疗的椎骨V)相关联。

[0083] 其他类型的配准也是可能的，诸如使用具有机械夹具的跟踪器16，所述机械夹具附接到椎骨V的脊柱棘突并且具有触觉传感器(未示出)以确定夹具所附接的脊柱棘突的形状。然后可以将脊柱棘突的形状匹配到脊柱棘突的3D模型以进行配准。触觉传感器与跟踪装置16上的三个或更多个标记之间的已知关系被预加载到导航控制器36中。基于这种已知的关系，可以确定标记相对于患者的解剖结构的位置。

[0084] 基础跟踪器16可以联接到基座22以跟踪外科工具30的姿态。在其他实例中，单独的跟踪器16可以固定到外科工具30，例如在制造期间集成到外科工具30中，或可在为外科手术做准备时单独地安装到外科工具30。在任何情况下，外科工具30的工作端借助于基础跟踪器16或其他跟踪器来跟踪。工作端可以是外科工具30的附件的远侧端部。此类附件可包括钻子、钻头、锯子、电消融装置、螺钉驱动器、丝锥、外科刀、Jamshidi针等。

[0085] 在所示的实例中，跟踪器16是无源跟踪器。在该实例中，每个跟踪器16具有至少三个无源跟踪元件或标记M以将光从定位器14反射回到光学传感器。在其他实例中，跟踪器16是有源跟踪器，并且可具有将光(诸如红外光)传输到光学传感器的发光二极管或LED。基于所接收的光学信号，导航控制器36使用常规三角测量技术来生成指示跟踪器16相对于定位器14的相对位置和取向的数据。在一些情况下，可采用更多或更少的标记。例如，在被跟踪的对象可围绕某一条线旋转的情况下，可以使用两个标记来通过测量标记围绕线在各个位

置处的位置来确定线的取向。应当理解，定位器14和跟踪器16尽管在上文被描述为利用光学跟踪技术，但是可以可替代地或另外地利用其他跟踪模态(诸如电磁跟踪、超声、射频跟踪、惯性跟踪、它们的组合等)来跟踪对象。

[0086] 还可能期望跟踪患者的皮肤表面以确保外科工具30不会无意中接触或穿透在任何期望的切口边界之外的患者的皮肤。为此，可将皮肤附接型标记M(诸如具有粘附背衬的有源或无源标记)附接到患者的皮肤以限定与患者的皮肤相关联的边界。此类标记M的阵列可以设在外围环74(圆形、矩形等)中，使得外科手术在环74内继续，而基本上不会干扰环74(即，环围绕切口和目标椎骨放置在患者的皮肤上)。一种合适的皮肤标记阵列是由德国弗莱堡的Stryker Leibinger GmbH&Co.(KG,Bötzinger Straβe 41,D-79111Freiburg,Germany)制造的SpineMask®跟踪器。还可参见授予Schoepp等人的于2015年5月13日提交的名为“Navigation System For And Method Of Tracking The Position Of A Work Target”的美国专利申请公布号2015/0327948，所述专利申请公布特此以引用的方式整体并入本文。还设想了其他合适的皮肤跟踪器。同样也可以使用数字化探针来映射皮肤表面和/或切口。然而，一旦映射，在不进一步数字化的情况下将不会检测到皮肤的任何移动，而所附接的跟踪器阵列可以检测患者的皮肤的移动。

[0087] 在开始外科手术之前，附加数据被加载到导航控制器36中。基于跟踪器16的位置和取向以及先前加载的数据，导航控制器36确定外科工具30的工作端的位置以及外科工具30相对于施加工作端将抵靠的组织的取向。附加数据可包括校准数据，诸如使跟踪器16或其标记M的位置和/或取向与外科工具30的工作端相关的几何数据。这种校准数据也可在术前或术中确定，诸如通过使用具有已知几何形状的跟踪器16上的校准探针或校准探叉(divot)以确定外科工具30的工作端例如相对于其自身的跟踪器或基础跟踪器16的位置。附加数据可包括配准数据，诸如使跟踪器16与患者的解剖结构或其3D模型相关联的变换数据。在一些实例中，导航控制器36将这些数据转发到机器人控制器32。然后机器人控制器32可以使用所述数据来控制机器人臂20，如美国专利号8,010,180或9,566,122中所述，所述两项专利先前都以引用的方式并入本文。

[0088] 导航控制器36还生成指示外科工具30的工作端相对于目标组织的相对位置的图像信号。这些图像信号被应用于显示器18。基于这些信号，显示器18生成允许操作者和工作人员查看外科工具30相对于手术部位的相对位置的图像。如上所述的显示器18可包括触摸屏或允许输入命令的其他输入/输出装置。

[0089] 在所示的实例中，使用导航系统12，可以通过以下方式来确定外科工具30的姿态：经由基础跟踪器16跟踪基座22的位置，并且基于来自机器人臂20的关节的关节编码器数据以及外科工具30与机器人臂20之间的已知的几何关系来计算外科工具30的姿态。最终，定位器14和跟踪装置16能够确定外科工具30和患者的解剖结构的姿态，因此导航系统12知晓外科工具30与患者的解剖结构之间的相对关系。一种这样的导航系统示出于授予Wu的于2013年9月24日提交的名为“Navigation System Including Optical And Non-Optical Sensors”的美国专利号9,008,757，所述专利特此以引用的方式并入本文。

[0090] 在操作中，对于某些外科任务，操作者手动地操纵机器人臂20(例如，移动所述机器人臂或引起它的移动)以操纵外科工具30对患者执行外科手术，诸如钻孔、切割、锯削、扩孔、植入物安装等。在操作者操纵外科工具30时，导航系统12跟踪外科工具30和/或机器人

臂20的位置，并且向操作者提供触觉反馈(例如，力反馈)以限制操作者将外科工具30移动到(或引起所述外科工具移动到)配准(或映射)到患者的解剖结构的一个或多个预定虚拟边界之外的能力，这会产生高度准确且可重复的钻孔、切割、锯削、扩孔和/或植入物放置。

[0091] 在一个实例中，机器人臂20以被动方式操作，并且在操作者试图将外科工具30移动到虚拟边界之外时提供触觉反馈。触觉反馈由机器人臂20中的一个或多个致动器(例如，关节马达)生成并且经由诸如缆线驱动式传动的柔性传动而传递到操作者。当机器人臂20不提供触觉反馈时，机器人臂20可由操作者自由地移动。在其他实例中，类似于美国专利号9,566,122(先前以引用的方式并入本文)中所示，机器人臂20由操作者以类似的方式操纵，但是机器人臂20以主动方式操作。例如，操作者将力施加到外科工具30，所述力由力/扭矩传感器测量，并且机器人臂20基于来自力/扭矩传感器的测量来模仿操作者的期望的移动。对于其他外科任务，机器人臂20自主地操作。

[0092] 转到图4和图5，外科工具30的一个示例被示为联接到机器人臂20的远侧端部28。更具体地，联接件40设在外科工具30与机器人臂20的远侧端部28之间以允许外科工具30相对于远侧端部28围绕轴线A旋转。在图4中，外科工具30包括钻子42以为椎弓根螺钉、其他螺钉或其他类型的植入物钻出导向孔。钻子42被布置为围绕旋转轴线R旋转。在图5中，外科工具30包括沿着旋转轴线R布置以围绕旋转轴线R旋转来插入椎弓根螺钉PS或其他植入物的驱动器44(例如，螺钉驱动器)。外科工具30包括壳体45。驱动系统(例如，马达)位于壳体45中以驱动钻子42、驱动器44或其他附件。驱动系统可具有可变速度。

[0093] 壳体45还包括夹头47或其他类型的联接器以将钻子42、驱动器44或其他附件可释放地附接到驱动系统。在一些情况下，减速器48(参见图5)可以可释放地附接到夹头47以供某些附件使用。减速器48包括与直接连接到驱动系统相比使附件的旋转速率减小的传动装置或齿轮布置。这在期望较慢旋转速率的情况下是有用的。

[0094] 在图6所示的另一个实例中，联接件40的一端支撑外科工具30以围绕轴线A旋转。联接件40的另一端支撑壳体45。壳体45可固定到联接件40，或可被支撑以在联接件40内围绕旋转轴线R旋转。换句话说，壳体45可能能够在联接件40内被动地旋转。然而，同时，联接件40限制壳体45沿着旋转轴线R相对于联接件40的轴向移动，使得壳体45的定位可以被精确地控制。跟踪器(未示出)可以安装到壳体45以跟踪壳体45的位置和/或取向，由此跟踪旋转轴线R和/或附接到壳体45的附件的远侧端部。旋转轴60可旋转地支撑在壳体45中。旋转轴60具有联接到附件(例如，如所示的驱动器44)的远侧接口/夹头62以及联接到动力源(诸如扭矩源，例如马达、用于手动旋转的可旋转手柄等)的近侧接口/夹头64。例如，驱动器44被示为联接到远侧接口62/旋转轴60。

[0095] 机器人外科系统10可包括用于控制钻子42和/或驱动器44的各种部件。例如，在图4和图5中，外科工具30包括从壳体45悬垂的手柄46。手柄46可包括用于被操作者抓握以在外科手术期间操纵外科工具30和/或机械臂20的握持部。还可存在触发器49以控制钻子42和/或驱动器44的速度，以启动机器人臂20的移动，以将旋转轴线R与期望轨迹对准等。触发器49可将信号传送到机器人控制器32和/或工具控制器以控制机器人臂20和/或外科工具30。

[0096] 在图6的实例中，外科工具30包括具有用于控制外科工具30和钻子42的内部马达的手持件66。如图所示，手持件66联接到近侧接口64，使得操作者能够抓握手持件66、触发

马达的操作并且使得马达通过旋转轴60将扭矩传递到驱动器44并最终传递到椎弓根螺钉PS。

[0097] 可采用术前成像和/或术中成像来使需要治疗的患者的解剖结构(诸如患者的脊柱)可视化。操作者可以相对于图像和/或相对于根据图像创建的3D模型计划在何处放置椎弓根螺钉PS。计划包括例如通过在图像和/或3D模型中标识期望姿态来确定每个椎弓根螺钉PS相对于它们将放置于其中的特定椎骨V的姿态。这可包括相对于患者的解剖结构的3D模型创建或定位椎弓根螺钉PS的单独的3D模型。一旦设定计划,所述计划就会被传送到机器人外科系统10以供执行。

[0098] 机器人外科系统10可与成像装置50(例如,如图3所示的C形臂)配合使用,以除了任何术前图像(例如,在外科手术之前拍摄的X射线、CT扫描或MRI图像)之外或作为这些图像的替代,拍摄患者的解剖结构的术中图像。来自成像装置50的术中图像可以帮助确定钻子42或驱动器44相对于被放置在患者的脊柱中的椎弓根螺钉PS的期望取向的实际位置。可以在每个椎骨V上采用单独的跟踪装置16,以在将椎弓根螺钉PS或其他植入物放置到椎骨V中时单独地跟踪每个椎骨V以及钻子42和/或驱动器44相对于单独的椎骨V的对应姿态。

[0099] 机器人外科系统10评估椎弓根螺钉PS的期望姿态并且创建对应于椎弓根螺钉PS的期望姿态的虚拟边界(例如,触觉对象)、预定工具路径和/或其他自主移动指令以控制机器人臂20的移动,使得以最终根据操作者的计划放置椎弓根螺钉PS的方式控制外科工具30的钻子42和驱动器44。这可包括例如在外科手术期间确保外科工具30的轨迹与椎弓根螺钉PS的期望姿态对准,例如将旋转轴线R与椎弓根螺钉PS的期望姿态对准。

[0100] 在其他实例中,操作者可在术中计划期望轨迹和/或螺钉放置。例如,操作者可以相对于目标解剖结构(例如,椎骨V)将钻子42定位在期望的进入点处,并且对钻子42进行取向,直到显示器18显示旋转轴线R的轨迹处于期望取向为止。一旦操作者对轨迹感到满意,操作者就可以向控制系统提供输入(例如,触摸屏、按钮、脚踏板等),以将该轨迹设定为将在手术期间维持的期望轨迹。为了约束外科工具30的移动以维持旋转轴线R保持沿着期望轨迹而创建的触觉对象可以是诸如图4所示的线触觉对象LH。线触觉对象LH可具有如下文进一步所述的起始点SP;限定钻子42、椎弓根螺钉PS等的期望深度的目标点TP;以及出口点EP。还设想了其他触觉对象形状、尺寸等。

[0101] 参考图7和图8,示出了椎骨V中的一个。在外科手术(诸如脊柱融合外科手术)期间,操作者可穿过椎弓根区域将一个或多个椎弓根螺钉PS插入到椎骨V的椎骨体100中。在插入椎弓根螺钉PS之前,操作者可采用钻子42来在椎骨体100中切割导向孔102。在替代实例中,诸如在采用自钻自攻式骨骼螺钉的情况下,可排除导向孔。参见例如授予Stefan Auth的于2009年12月29日发布的名为“Self-drilling bone screw”的美国专利号7,637,929中的教导,所述专利特此以引用的方式整体并入本文。

[0102] 在一个实例中,在开始钻孔之前,机器人外科系统10控制外科工具30的移动,以通过自主地将外科工具30的旋转轴线R与期望轨迹对准来沿着期望轨迹放置旋转轴线R,所述期望轨迹与导向孔102的期望取向相一致。在这种情况下,机器人臂20可沿着期望轨迹自主地定位钻子42,但是在椎骨体100上方留出间隔(如图4所示),使得钻子42尚未接触椎骨体100。这种自主定位可通过由操作者扣动外科工具30上的触发器或以其他方式向控制系统提供输入以开始移动来启动。在一些情况下,首先将外科工具30的工具中心点(TCP)带入提

供期望轨迹的线触觉对象LH的起始点SP的预定距离内(诸如在预定起始球体内)。一旦TCP(例如,钻头质心、钻尖中心等)在起始点SP的预定距离内,则扣动触发器(或者可替代地踩压脚踏板或致动某一其他输入)就会使机器人臂20自主地将外科工具30对准并定位在期望轨迹上。参见例如授予Otto等人的于2012年12月21日提交的名为“Systems And Methods For Haptic Control Of A Surgical Tool”的美国专利申请公布号2014/0180290中的教导,所述专利申请特此以引用的方式整体并入本文。机器人臂20可被编程为基于术前计划来将外科工具30移动到与患者相距一定距离处,或可将TCP移动到轨迹上的最近点。一旦外科工具30处于期望姿态,机器人外科系统10就可有效地通过以下方式来将外科工具30的旋转轴线R保持在期望轨迹上:跟踪患者的移动,并且根据需要自主地调整机器人臂20以将旋转轴线R保持在期望轨迹上,即与线触觉对象LH对准。

[0103] 在机器人外科系统10将外科工具30保持在期望轨迹上时,然后操作者可手动地操纵外科工具30以沿着线触觉对象LH朝向椎骨体100移动钻子42(或引起所述钻子的移动)以钻出导向孔102。在一些情况下,诸如当使用被动机器人臂20时,机器人外科系统10通过以下方式来约束操作者对外科工具30的移动以保持沿着期望轨迹:如果操作者试图以偏离线触觉对象LH和期望轨迹的方式移动外科工具30,则向操作者提供触觉反馈。如果操作者期望将机器人臂20返回到自由模式,以使外科工具30的移动不受约束,则操作者可以沿着线触觉对象LH拉回外科工具30使其远离患者,直到到达出口点EP为止。

[0104] 然后操作者将导向孔102钻到期望深度。钻孔速度可以由操作者经由触发器49控制,或可以基于钻子42相对于患者的解剖结构的位置自动地控制。例如,钻子42的旋转速率可在最初钻入椎骨体V期间被设定得高,但可在进一步钻入椎骨体V期间减慢,并且在最终钻到最终深度期间被设定得甚至更慢。控制系统还可以在线触觉引导期间经由与机器人控制器32通信的一个或多个传感器S(例如,一个或多个力传感器、力/扭矩传感器、扭矩传感器、压力传感器、光学传感器等等)监测接触/接触力。如果没有检测到显著的接触/接触力,这意味着外科工具30正在穿过软组织,则控制系统避免激活外科工具30的马达或其他动力源(例如,RF能量、超声马达等)。当检测到与骨骼接触(例如,光学地感测到的力高于预定阈值等)时,控制系统可以激活马达或其他动力源。操作者还可以被动地感受到接触/接触力,并且触发开关以激活动力源。

[0105] 用于约束操作者沿着期望轨迹的移动的虚拟边界(例如,触觉对象)还可经由触觉反馈指示操作者何时达到导向孔102的期望深度,例如到达目标点TP。还可以使用单独的虚拟边界来设定期望深度。在其他情况下,机器人外科系统10可自主地将导向孔102钻到期望深度。在另外的情况下,机器人外科系统10最初可自主地钻孔,但是然后可手动地完成最终钻孔,反之亦然。一旦产生导向孔102,就可以使用驱动器44来放置椎弓根螺钉PS。在一些实例中,导向孔102可能是不必要的,并且可以通过由机器人外科系统10放置的导丝或在没有任何引导的情况下放置椎弓根螺钉PS。诸如在采用自钻自攻式骨骼螺钉的情况下,导向孔可能是不必要的。参见例如授予Stefan Auth的于2009年12月29日发布的名为“Self-drilling bone screw”的美国专利号7,637,929中的教导,所述专利特此以引用的方式整体并入本文。

[0106] 使用导航系统12来连续地单独跟踪每个椎骨V并跟踪钻子42的移动的一个优点是,可将椎弓根螺钉PS插入得非常接近于脊髓103,因此,椎弓根螺钉PS及其对应的导向孔

102的放置必须精确地对准，以便避免与脊髓103相互作用或损坏所述脊髓。如果操作者以不当的角度钻出导向孔102和/或将所述导向孔钻得过深，则椎弓根螺钉PS或用于钻出导向孔102的钻子42可能会损坏脊髓103。因此，通过使用导航系统12来跟踪钻子42和/或驱动器44相对于患者的解剖结构(并且具体地为如在术前图像和/或术中图像中所勾勒的解剖结构)的姿态，可以避开脊髓103。

[0107] 一旦完成钻孔，就将钻子42从椎骨体100中取出并且经由夹头47使其与驱动系统断开连接。然后将驱动器44联接到驱动系统(具有或不具有减速器48)。

[0108] 可在机器人外科系统10的帮助下插入椎弓根螺钉PS。在一个实例中，机器人控制器32自主地控制椎弓根螺钉PS的插入，使得围绕旋转轴线R的旋转速率和沿着计划轨迹的推进速率与椎弓根螺钉的螺纹几何形状成比例。机器人控制器32可使用多种方法来自主地控制椎弓根螺钉PS的插入。

[0109] 例如，可以可在术前存储在机器人外科系统10的存储器中的恒定旋转速率或恒定推进速率插入椎弓根螺钉PS。在这样的实例中，可在手术之前将推进速率和/或旋转速率存储在机器人外科系统10的存储器中。也可在手术期间由操作者将推进速率和/或旋转速率输入并存储在机器人外科系统的存储器中。

[0110] 在另一个示例中，机器人控制器32可遵循旋转速率或推进速率的预定配置文件。旋转速率或推荐速率的预定配置文件可基于任何合适的变量，诸如时间或椎弓根螺钉PS的位置。例如，参考图9，可基于驱动器44和/或椎弓根螺钉PS相对于患者的解剖结构的位置自主地控制椎弓根螺钉PS的插入。在这样的实例中，驱动器44的旋转速率可在最初安装到椎骨体V中期间被设定得高，但可在进一步安装到椎骨体V中期间减慢，并且在最终植入到最终深度期间被设定得甚至更慢。

[0111] 图9示出了在机器人控制器32自主地控制外科工具30时椎弓根螺钉PS的原始位置。如图所示，椎弓根螺钉PS与目标部位(在这种情况下被示为椎骨V)相邻，其中计划轨迹由线性触觉对象LH表示。如果不正确地插入椎弓根螺钉PS，则椎弓根螺钉PS与椎骨体100之间的螺纹接口有损坏骨骼、螺钉PS、驱动器44或外科工具30的风险。骨骼可能是最脆弱的物质，因此如果不正确地插入螺钉，则最可能受到损坏。例如，当椎弓根螺钉PS沿着轨迹LH线性推进而围绕旋转轴线R的旋转不足时，可能会发生不当的插入。这可能会导致骨骼物质在与螺纹相邻之处被剪切掉并且被迫向下进入骨骼中。在另一个示例中，例如，当椎弓根螺钉PS围绕旋转轴线R旋转而沿着轨迹LH的推进不足时，可能会发生不当的插入，从而导致骨骼物质实际上在钻出孔的过程中在与螺纹相邻之处被剪切掉并且被迫沿着螺纹返回。在任一个示例中，不当的插入的结果是减小骨骼物质将椎弓根螺钉PS紧固在骨骼中的强度和程度。

[0112] 图9还示出了在机器人控制器32自主地控制外科工具30时使用位置控制来插入椎弓根螺钉PS。用于插入螺钉的位置控制确保在整个操作中维持适当的深度位置和角度或旋转位置。可对椎骨体100准备导向孔，如上面的实例所示，或该操作可采用自钻和自攻式螺钉从而不需要导向孔。椎弓根螺钉PS的起始点Do与椎骨体100相邻，也就是说，在螺钉穿入椎骨体100中的任何部分之前。在一个替代方案中，起始点Do可与椎骨体100间隔一定距离作为安全裕度，以确保整个操作中适当的位置控制。插入深度D沿着轨迹LH推进到作为计划深度的最终深度Df，以完成椎弓根螺钉100在椎骨体PS中的安装。

[0113] 机器人控制器32被配置为自主地控制椎弓根螺钉PS的插入，使得旋转速率和沿着轨迹LH的推进速率与椎弓根螺钉PS的螺纹几何形状成比例。每个椎弓根螺钉PS具有存储在机器人外科系统10的存储器中的已知螺纹几何形状。例如，对于每个椎弓根螺钉PS，螺纹几何形状可包括椎弓根螺钉PS长度、螺纹直径、螺纹深度、头部尺寸和螺距P(其被定义为每单位长度的螺纹数量)中的任何一个或多个。在一个具体示例中，图11A所示的椎弓根螺钉PS可具有每英寸12个螺纹的螺距。其他示例性椎弓根螺钉PS可具有每英寸8个、10个、14个、16个或其他数量的螺纹。有了机器人臂20与椎弓根螺钉PS之间的定义关系以及存储在机器人外科系统10的存储器中的椎弓根螺钉PS的已知几何形状，机器人控制器32被配置为确保适当的旋转速率和推进速度以插入具有特定螺距的椎弓根螺钉PS。

[0114] 可以在术前或术中将椎弓根螺钉PS的螺纹几何形状存储在机器人外科系统10的存储器中。在一个示例中，作为外科计划的一部分选择椎弓根螺钉PS，并且将椎弓根螺钉PS的对应螺纹几何形状与椎弓根螺钉PS相关联并输入到计划中。一旦为术中外科手术加载所述计划，机器人外科系统10就将知晓存储在存储器中以供即时访问的螺纹几何形状。在另一个示例中，操作者可以手动地选择不同的椎弓根螺钉PS，或可以使用与机器人外科系统10的操作相关的GUI来手动地输入螺纹几何形状。所输入的螺纹几何形状可从存储在存储器中的数据库获得，或可以来源于从与所选择的椎弓根螺钉PS相关联的离线规范获得这种信息的操作者。在这些示例中的任一个中，可以在操作者使用GUI输入之后将螺纹几何形状存储在存储器中，使得机器人外科系统10随后可以用所输入的螺纹几何形状实施本文所述的控制技术。在又一个示例中，可利用直接或无线连接到机器人外科系统10的测量工具来扫描或测量任何预期的椎弓根螺钉PS，以提取螺纹几何形状并且将所测量的螺纹几何形状传输到机器人外科系统10存储器。一旦将椎弓根螺钉PS的螺纹几何形状存储在机器人外科系统10的存储器中，椎弓根螺钉PS就可虚拟地呈现在导航系统12内。

[0115] 椎弓根螺钉螺距、角度或旋转位置与插入深度或沿着轨迹的推进之间的关系取决于等式θ＝D*(螺距/2π)，其中θ是角度位置，D是以单位长度计的插入深度，螺距是椎弓根螺钉PS的每单位长度的螺纹数。机器人控制器32使用这种关系来控制椎弓根螺钉PS的安装。例如，相对于时间求一阶导数，角度位置的变化率或旋转速率δθ/δt等于插入深度的变化率或推进速率δD/δt乘以螺距除以2π。这可以表示为：δθ/δt＝δD/δt*螺距/2π(等式1)。

[0116] 机器人外科系统10可包括用于准备椎弓根螺钉PS的解剖结构的各种附件。例如，外科工具30的附件中的一种可包括皮肤切开工具，诸如手术刀、手术用电刀、具有锋利尖端的其他工具等。皮肤切开工具可以很像钻子42和/或驱动器44那样安装，或可以是单独的端部执行器的一部分并且连接到附接到联接件40的底座，并且可以以与先前描述类似的方式在触觉引导下形成皮肤切口，即当产生切口时可以使用虚拟边界(例如，触觉对象)来约束操作者相对于患者的皮肤中的期望切口的移动。在一个示例中，数字化探针可以用于触及期望切口位置并且创建相关联的边界/触觉对象。在另一个示例中，可以基于皮肤跟踪器的姿态，通过数字化和/或通过术前方法来确定3D皮肤模型，并且控制系统可以使用椎弓根螺钉放置的期望计划来基于皮肤模型确定切口位置。

[0117] 类似于数字化探针的其他类型的指针也可以用于标识切口的期望位置，诸如可以安装到皮肤切开工具、端部执行器或其他部件以将可见光投射到患者的皮肤上以指示切口的位置的激光指针。可以通过以下方式使用这样的激光指针：首先将皮肤切开工具的旋转

轴线R与期望轨迹对准，此后激活激光指针以沿着期望轨迹投射光。皮肤切开工具的替代形式通过由机器人臂保持在适当位置的工具引导件来放置。由于经由皮肤跟踪器完成对患者的皮肤的跟踪，因此导航系统12也能够基于皮肤模型(例如，表面模型、点云等)以及期望轨迹与皮肤模型的交集来大致确定切口的期望位置，使得操作者能够借助于触觉反馈在患者的皮肤中的期望位置处切割期望切口。

[0118] 可以以各种方式定义触觉对象，以建立触觉反馈来引导切口的形成。可以基于皮肤切开工具的宽度、皮肤切口的期望长度和/或切口的期望深度来定义触觉对象。期望的切口深度也可由操作者控制在最大切口深度内，所述最大切口深度可以通过被编程为触觉对象的一部分的最大切口深度或可以用于防止皮肤切开工具通过端部执行器的工具引导件TG中的引导开口(未示出)滑动到预定点之外的机械止挡件来确定。

[0119] 外科工具30的附件中的一种可包括线插入工具，诸如Jamshidi针、具有管心针的另一种进入套管等。线插入工具可以很像皮肤切开工具那样安装，或可以是单独的端部执行器的一部分并且固定地连接到附接到联接件40的底座。如果线插入工具与底座之间不允许相对运动，即它们彼此固定，则可以用线触觉对象引导线插入工具进入皮肤切口，并且到达骨骼(例如，椎骨)上的目标点。如果诸如当底座包括具有开口的工具引导件时，允许线插入工具与底座之间的相对轴向滑动运动，则可以以期望取向定位工具引导件并且可以沿着工具引导件中的开口插入线插入工具。取决于到目标点的相对距离、线插入工具的长度和工具引导件位置，可以经由线触觉对象以与先前针对钻子42和/或驱动器44所述相同的方式引导线插入工具。

[0120] 由于皮肤和切口的期望位置被跟踪，因此机器人外科系统10可以控制皮肤切开工具相对于为切口创建的触觉对象的移动。在目标坐标系中定义触觉对象，使得在患者的皮肤中的期望位置处形成切口。在一个示例中，机器人外科系统10可以通过控制对皮肤切开工具的手动操纵来控制皮肤切开工具相对于触觉对象的移动。这可以通过以下方式来完成：在操作者手动地移动皮肤切开工具或手动地引起所述皮肤切开工具的移动时，约束皮肤切开工具相对于由触觉对象限定的虚拟边界的移动，使得皮肤切开工具在期望位置处形成切口。机器人外科系统10可以通过以下方式来约束皮肤切开工具相对于触觉对象的移动：向操作者生成触觉反馈，以指示皮肤切开工具已经达到切口的期望深度或以其他方式已经达到切口的期望限制。一旦在期望位置形成切口，就将皮肤切开工具从解剖结构中撤回，并且手术继续进行，直到形成所有切口为止。皮肤切开技术可以像于2018年11月8日提交的名为“Robotic Spine Surgery System and Methods”的美国专利申请US 16/184,376中所述那样。

[0121] II.触觉反馈技术

[0122] 如上所述，机器人系统10可以用于控制外科工具30以沿着计划轨迹旋转螺钉。本文描述了与机器人系统10结合使用以为外科医生提供对在机器人系统10引起外科工具30与组织相互作用时所涉及的力、能量、材料和信息流的直接触觉“感觉”、接触或控制的技术。进而，本文所述的技术提供了一种技术解决方案，以模仿外科医生为了在外科手术期间监测和评估组织相互作用过程而(手动地)习惯的触觉和感觉信息。本文所述的触觉技术恢复了外科医生在机器人控制的手术期间评估该过程的能力。所述解决方案提供了使用例如一个自由度(例如，旋转)和一个伴随现象(例如，阻力)来提供触觉反馈的优雅机制。触觉装

置可以包括控制或模仿由机器人臂20和/或外科工具30操纵螺钉(或附件)的相互作用的接口(例如,旋钮)。在一些实例中,接口的阻力被调节或放大,并且可以根据螺钉与螺钉所插入的周围组织之间的相互作用而动态地变化。在一些实例中,当用户操纵接口时,机器人转动并且推进螺钉。机器人系统通过适当的传感器捕获螺钉插入过程参数。然后,传感器信息被转换并且用于调节对接口的反馈,从而给予外科医生增强的感觉敏锐度,这有助于外科医生理解螺钉所插入的组织的一致性以及螺钉与组织之间的形状配合的抓握质量。进而,本文所述的触觉技术增加了外科医生的信心,减少了情绪压力,提高了手术效率,并且为外科医生提供了感知和应对机器人解决方案原本无法捕获的意外情况的能力。

[0123] 本文所述的触觉技术可用于多种医学应用。例如,尽管触觉技术涉及螺钉插入过程,但触觉技术也可用于各种其他医学应用。作为示例,在包括手术刀或注射器的手术期间,触觉装置的接口可提供触觉反馈以在手术刀或注射器前进通过不同组织时模仿由手术刀或注射器施加的力。触觉技术可用于涉及软组织的手术中以防止对软组织造成损伤。例如,在牵张器分离软组织的手术期间,触觉装置的接口可提供触觉反馈以在牵张器在骨生长手术(例如,下颌牵张)期间在伤口部位处、在手术开口处、在关节间隙中的骨骼之间或在骨骼之间分离软组织时模仿由牵张器施加到软组织的力(或由软组织施加在牵张器上的张力)。作为另一个示例,在包括止血带的手术期间,触觉装置的接口可提供触觉反馈以模仿由止血带施加到软组织的压力。作为又一个示例,在包括用于打开关节空间的千斤顶的手术期间,触觉装置的接口可提供触觉反馈以模仿由千斤顶施加到韧带的力(或韧带在千斤顶上的张力),从而有助于韧带平衡过程。

[0124] A.触觉装置

[0125] 参考一个示例,如图10所示,机器人外科系统10包括用于控制外科工具30的触觉装置51。触觉装置51可包括可由操作者的手手动操纵的接口53。在一个非限制性示例中,触觉装置51可以是手持式悬吊台。可替代地,触觉装置51可包括可以搁置在表面上的单元、触觉手套或模仿在手动外科手术中使用的工具(例如,螺钉驱动器)的物理设计。触觉装置51可以是被配置为向外科医生提供本文所述的能力的任何其他装置。

[0126] 触觉装置中的术语“装置”不限于本文所述的任何具体实施方案。实际上,触觉装置可包括被配置为向操作者提供触觉(感觉)的任何装置,其中触觉响应模仿在远离触觉装置的环境中发生的状况。这种装置可由以下部件中的任何一种或多种组成以提供适当的触觉:机械部件、电气部件、机电部件、软件、控制器、气动部件、液压部件。

[0127] 在图10中,触觉装置51经由基座22直接附接到机器人操纵器或外科工具30。在其他实例中,触觉装置51可附接到机器人外科系统10的任何其他合适的部件,诸如计算机推车组件34或导航系统12。在又一个示例中,触觉装置51可直接联接到机器人臂20或外科工具30,使得触觉装置51不需要由操作者握持。触觉装置51还可与机器人操纵器和外科工具30远程间隔开,如图10所示。在此类实例中,触觉装置51可无线联接到机器人外科系统10。可替代地,触觉装置51可用连接到系统10的电线供电,如图10所示。在其他实例中,触觉装置51可用作不一定附接到机器人外科系统10的独立装置。例如,触觉装置51可与不包括机器人操纵器和/或导航系统12的外科系统一起使用。

[0128] 触觉装置51的接口53可以相对于触觉装置51在一定自由度上移动。在一个示例中,接口53是可以相对于触觉装置51在一定旋转自由度上移动的旋转接口。在一些示例中,

旋转接口53可以是旋转旋钮，如图10所示。旋转接口53也可以是可旋转拨盘、球或轮。接口53可具有除了附图中具体示出或本文所述的那些配置之外的配置。

[0129] 可能期望旋转接口53使得操作者能够将旋转接口53的旋转自由度与螺钉或工具旋转的旋转自由度相关联。然而，可以利用除了旋转接口53之外的配置来实现触觉装置51的接口53。例如，触觉装置51可包括可由操作者的手手动操纵的线性接口53。在一些实例中，线性接口53可以是枢转杆、按钮、手掌或手指触发器、弹簧开关、柱塞、顺应垫或滑块。此外，一个或多个控制器33可控制触觉装置51的致动器55以使线性接口53能够模仿螺钉与目标部位之间的当前相互作用。例如，在线性接口53是按钮的实例中，一个或多个控制器33可控制致动器55，使得操作者根据当前相互作用施加更大或更小的力来按下按钮。在另一个示例中，在线性接口53是开关或柱塞的情况下，一个或多个控制器33可控制触觉装置51的致动器55，使得操作者施加更大或更小的力来致动开关或柱塞。在又一个示例中，线性接口53是包括被配置为沿着一定路径滑动的机构的滑块。一个或多个控制器33可控制触觉装置51的致动器55，使得操作者施加更大或更小的力来致动滑块和/或控制致动器55以限制滑块的线性位移。

[0130] 机器人外科系统10经由触觉装置51向操作者提供触觉反馈。如图10所示，触觉装置51可包括致动器55，所述致动器可由一个或多个控制器33控制。致动器55联接到接口53并且被配置为向接口53施加力。致动器55可包括联接在致动器55与接口53之间的驱动输出驱动轴68。一个或多个控制器33可控制致动器55以使接口53能够模仿螺钉与目标部位之间的当前相互作用。在一些实例中，接口53用于直接控制外科工具30和/或驱动器44以旋转螺钉。经由触觉装置51的直接控制也可以与触觉反馈结合以模仿螺钉与目标部位之间的当前相互作用。在这些示例中，操作者通过感知可以将接口53的自由度与螺钉移动的自由度相关联。

[0131] 致动器55可实施为马达，诸如有刷或无刷马达、直接驱动马达、主动致动器、DC马达、电动线性马达、线性电流控制马达、步进马达、电动旋转马达、扭矩器(具有有限角度范围的马达)、基于弹簧的致动器、磁致动器、液压致动器、气动致动器、手动机械致动器、被动致动器(包括磁粉制动器、摩擦制动器、阻尼阻力机构或摩擦产生机构)或它们的任何组合。

[0132] 在一些实例中，触觉装置51可包括安全特征以防止机器人系统10或触觉装置51的无意使用。例如，触觉装置51可包括用户接口57(通电开关)，需要按下所述用户接口以操纵接口53。类似地，可能需要按下用户接口57以使触觉装置51向机器人外科系统10传输命令。在另一个实例中，可能需要在被操纵之前按下接口53并且保持在按下位置。在又一个实例中，触觉装置51可包括一个或多个传感器，诸如力传感器、温度传感器、接近度传感器、光学传感器和/或压力传感器，以使一个或多个控制器33能够确定操作者的手是否接触触觉装置51。

[0133] 触觉装置51可用于各种操作模式，其中一些操作模式在图11A的表中描述(操作模式称为“触觉装置操作模式”)。如图所示，这些操作模式包括但不限于：“自主检查模式”、“手动控制模式”、“模拟自主检查模式”和“模拟手动控制模式”。这些模式的名称是为了简化理解和描述而提供的，因此可以任何其他适当的惯例来命名。这些模式的功能基于下文提供的描述来完全理解。

[0134] 参考图11A的表的B列，在每个触觉装置操作模式中，一个或多个控制器33向触觉

装置51提供触觉反馈。在自主检查模式和手动控制模式中，触觉装置51模仿椎弓根螺钉PS与目标部位之间的当前相互作用。在模拟自主检查模式和模拟手动控制模式中，触觉装置51模仿模拟椎弓根螺钉与模拟目标部位之间的当前相互作用。这些模式中的任一种可由机器人系统10自动启动、由操作者手动启动或根据任何其他命令启动。

[0135] 此外，对于本文所述的任何控制模式，螺钉位置和深度可以显示在显示装置上。

[0136] B.相互作用传感器

[0137] 对于本文所述的任何操作模式，机器人外科系统10可包括联接到一个或多个控制器33的一个或多个传感器，以获得指示系统的可移动元件(诸如植入物、螺钉和/或工具本身)与目标部位之间的当前相互作用的测量值。例如，机器人外科系统10可包括被配置为感测椎弓根螺钉PS相对于目标部位的位置的位置传感器和/或被配置为感测外科工具30的驱动器44的旋转或椎弓根螺钉PS的旋转的旋转编码器。机器人外科系统10可包括被配置为感测由目标部位施加在椎弓根螺钉PS上的力的力传感器。机器人外科系统10可包括被配置为感测由目标部位施加在椎弓根螺钉PS上的扭矩的扭矩传感器和/或被配置为感测由外科工具30的致动器生成的电参数的电参数传感器，其中所述电参数与由螺钉与目标部位之间的当前相互作用施加在外科工具30上的扭矩成比例。例如，在此类实例中，扭矩的增加可指示椎弓根螺钉PS已经接触或将接触皮质壁，扭矩的快速下降可指示椎弓根螺钉PS已经破坏皮质壁并且已经触底。机器人外科系统10还可包括被配置为感测椎弓根螺钉PS相对于目标部位的特征部的接近度的接近传感器、被配置为感测椎弓根螺钉PS在目标部位内的深度的深度传感器以及被配置为感测椎弓根螺钉PS相对于目标部位的特征部的位移的位移传感器。

[0138] 在一种实施方式中，导航系统12另外地或可替代地确定椎弓根螺钉PS与目标部位之间的当前相互作用。如前所述，可采用术前成像和/或术中成像来可视化患者的解剖结构。例如，可使用术前图像(例如，X射线、CT扫描或MRI图像)来创建患者的解剖结构(具体是目标部位)的解剖(虚拟)模型。可使用任何合适的配准方法将目标部位的解剖模型配准到目标部位。导航系统12可以跟踪机器人、工具、螺钉和/或患者并且确定椎弓根螺钉PS相对于目标部位的解剖模型的位置。导航系统12可包括指示在椎弓根螺钉PS相对于解剖模型的多个位置处椎弓根螺钉PS与解剖模型之间的预期相互作用的预定数据。在一个示例中，所述数据可存储在存储器中的查找表中以供一个或多个控制器33访问。导航系统12可基于所确定的螺钉相对于解剖模型的状态、位置、取向和/或姿态以及预定数据来获得指示椎弓根螺钉PS与目标部位之间的当前相互作用的测量值。预定数据可包括椎骨V的骨密度数据。导航系统12可使用骨密度数据和螺钉相对于椎骨V的解剖模型的状态来获得指示椎弓根螺钉PS与椎骨V之间例如在图12A所示的深度A处的当前相互作用的测量值。预定数据还可包括关于螺钉的几何形状、工具或与定义相互作用相关的任何其他特征的已知数据。

[0139] 可组合上述传感器(包括导航系统12)的任何组合以实施可移动元件与目标部位之间的感测。

[0140] C.触觉相互作用反馈

[0141] 控制器32可通过被配置为向触觉装置51提供物理反馈来模仿椎弓根螺钉PS与目标部位之间的当前相互作用。如下所述，物理反馈可以采用各种形式。

[0142] 本文所述的任何控制模式即“自主检查模式”、“手动控制模式”、“模拟自主检查模式”和“模拟手动控制模式”可以完全利用本文所述的任何触觉相互作用反馈技术。

[0143] 为了实现这些技术，触觉装置51可配备有一个或多个传感器65，如图10所示，用于感测触觉装置51的特征。例如，一个或多个传感器可检测与致动器55、接口53、其任何组合或任何其他特征相关的任何测量值。此类传感器65可实施为位置或位移传感器、增量/绝对编码器、角度传感器、电位计、霍尔效应传感器、电感传感器、电容传感器、惯性传感器(诸如加速计)、速度传感器、倾角计、陀螺仪、力传感器、扭矩传感器、应变计传感器或它们的任何组合或等效物。

[0144] 在一些实施方式中，一个或多个控制器33被配置为利用不同于致动器55或除了所述致动器之外的装置来修改或限制接口53的机械运动。例如，为了影响接口54的运动，触觉装置51可利用机械部件，包括但不限于偏置机构、止动器、棘轮和/或齿轮系统等；电器部件，诸如但不限于电感、电容和/或电阻元件；磁性部件；电磁部件；机电部件；液压部件；以及/或者气动部件。

[0145] 在一些实施方式中，一个或多个控制器33被配置为防止手动操纵接口53的能力。例如，一个或多个控制器33可确定在椎弓根螺钉PS的控制期间存在一定状况，并且作为响应，可通过控制触觉装置51的致动器55以防止旋转旋转接口53的能力来向操作者提供关于所述状况的触觉反馈。例如，所述状况可包括将防止旋转旋转接口53的能力的错误状况。这些停止状况包括椎弓根螺钉PS达到期望深度、椎弓根螺钉PS被旋转预定转数、椎弓根螺钉PS与骨骼之间的接触点的预测(如授予Moctezuma de la Barrera等人的于2016年6月28日提交的名为“Robotic surgical systems And Methods For Controlling A Tool Removing Material From A Workpiece”的美国专利申请公布号2017/0000572中所述，所述专利申请特此以引用的方式并入本文)和/或操作者根据主观知识来停止(例如，操作者可设定旋转每个椎弓根螺钉PS的时间量)。另外，所述状况可包括错误状况，诸如在机器人外科系统10内检测到的故障。在一些实例中，代替防止旋转接口53的旋转，机器人外科系统10可经由振动和/或脉冲向操作者提供触觉反馈。例如，当椎弓根螺钉PS已经达到期望深度时，一个或多个控制器33可使触觉装置51振动。

[0146] 任何上述触觉技术可以单独地或组合地用于本文所述的任何模式或示例或其等效物。此外，一个或多个控制器33可响应于任何状况(诸如来自交互传感器、触觉装置51的传感器65的读数；改变或启动控制模式；或者基于操作者的输入)而改变或修改任何触觉技术。此外，本文所述的任何技术可适用于触觉装置51的旋转接口或线性接口。

[0147] 1.触觉反馈—阻力或扭矩

[0148] 在一个示例中，物理反馈是施加到接口53的阻力。致动器55可以调整操作者的手操纵接口53所需的力或扭矩。操纵旋转接口53所需的力可反映相对于目标部位旋转螺钉所需的当前力。由于接口53联接到致动器55，所以致动器55可以生成阻力以抵抗接口53的自由度内的运动。

[0149] 例如，参考图12A，旋转椎弓根螺钉PS所需的当前力被示为$F_{PS}$，提供给致动器55的阻力被示为$F_A$，并且旋转旋转接口53所需的力被示为$F_{RI}$。$F_{RI}$被示为虚线，因为当操作者手动操纵旋转接口53时会经受$F_{RI}$。在沿着轨迹LH的不同深度处，当前力$F_{PS}$的量值变化，从而导致阻力$F_A$和力$F_{RI}$相应地变化。

[0150] 控制器32可控制致动器55以调节、修改、放大或以其他方式动态地改变阻力。为此，控制器32可以修改致动器55的操作电压、频率或电流。阻力可被建模或实施为弹簧力、

阻尼力、冲击力等。此外，阻力可基于位置、速度和/或加速度参数。

[0151] 在一些实例中，机器人外科系统10可被配置为接收来自操作者的输入以选择性地调整提供给致动器55的阻力$F_A$。另外，机器人外科系统10可被配置为接收来自操作者的输入以选择性地调整接口53控制外科工具30旋转椎弓根螺钉PS的能力的灵敏度。在一些实例中，阻力$F_A$和接口53的灵敏度是相关的。例如，阻力$F_A$越大，接口53的灵敏度越高，阻力$F_A$越小，接口53的灵敏度越低。可调整以修改接口53的灵敏度的参数包括但不限于：弹簧参数、阻尼参数、力参数、致动器55与接口53的旋转比之间的比例因子、致动器参数、力的量值、力的方向、对于任何给定阻力接口53的位移限制或范围、阻力曲线或斜率等。例如，在接口53包括弹簧并且弹簧参数被调整的实例中，这样的弹簧参数可以是弹簧刚度，其中更大的弹簧刚度需要更大的力来致动接口53。在这样的实例中，弹簧可由顺应元件形成，使得可通过改变顺应元件的材料特性或通过改变顺应元件的几何特性来修改弹簧刚度。

[0152] 在一个示例中，阻力可以是恢复力，该恢复力的量值与接口53偏离限定在接口53上或接口53与致动器55之间的原始位置(零卡位(zero detent))的量值成比例。例如，原始位置可以是在启动触觉模式时由控制器限定的接口53的位置。在一个示例中，原始位置被限定在相对于触觉装置51的静态位置。在另一个示例中，一个或多个控制器33可基于任何现有状况(诸如来自交互传感器、触觉装置51的传感器65的读数；改变或启动控制模式；完成任务；或者基于操作者的输入)来动态地调整原始位置的位置。可替代地，可诸如使用物理止动器等机械地预定义原始位置。

[0153] 在一些实施方式中，阻力可屈服于接口53的运动。换句话说，阻力不会寻求将接口53的位置恢复到任何原始位置。阻力的量值最初可较小，并且接口53从原始位置移动得越远，阻力的量值可增加。

[0154] 在一些实例中，阻力增加到向使用者传达螺钉PS已到达相对于目标部位的极限所需的量值。例如，这在螺钉可邻椎骨体的内部皮质壁的情况下可能是合适的，由此提供限制以避免破坏皮质壁。在一个示例中，阻力可被建模为具有高刚度量值的屏障力效应。可替代地，在此类实例中，控制器可控制致动器55对接口53的运动施加机械限制。

[0155] 在许多示例中，施加阻力以抵抗旋转运动。然而，可施加阻力以抵抗线性运动。例如，线性运动可抵抗接口53的线性运动。这种线性运动可以是线性接口53的机构(诸如滑块、按钮等)的运动。可替代地或另外地，线性运动可以是可以向下推动旋转接口53的示例。这些示例中的阻力可抵抗向下推动旋转接口53。

[0156] 可响应于与椎弓根螺钉PS与目标部位之间的当前相互作用相关的不同状况来提供阻力。这些状况中的任何一种都可以由上述任何交互传感器来检测。

[0157] 在一个示例中，响应于椎弓根螺钉PS的旋转位置而将阻力施加到接口53。确定螺钉PS相对于参考点的位置。可以逐渐增加或减小施加到接口53的阻力，直到螺钉已经到达指定位置。在该示例中，可以利用接口53的原始位置。接口53可以从原始位置旋转离开以命令驱动螺钉。当处于非原始位置时，将阻力施加到接口53。然而，一旦到达某个位置，阻力就可以归零，并且接口53可以弹回到原始位置。可替代地，当螺钉逐渐接近到达所述位置时，可以逐渐减小阻力(直至为零)。

[0158] 在另一个示例中，响应于椎弓根螺钉PS的插入深度而将阻力施加到接口53。在该示例中，可以利用接口53的原始位置。接口53可以从原始位置旋转离开以命令驱动螺钉。当

处于非原始位置时，将阻力施加到接口53。然而，一旦达到插入深度，阻力就可以归零，并且接口53可以弹回到原始位置。可替代地，当螺钉逐渐接近到达所述插入深度时，可以逐渐减小阻力(直至为零)。

[0159] 在另一个示例中，响应于椎弓根螺钉PS的旋转速度而将阻力施加到接口53。在该示例中，可以利用接口53的原始位置。接口53可以从原始位置旋转离开以命令驱动螺钉。当处于非原始位置时，可以根据螺钉的旋转速度逐渐增大/减小阻力。

[0160] 在另一个示例中，响应于由目标部位施加到椎弓根螺钉PS的扭矩或响应于由工具施加的扭矩而将阻力施加到接口53。

[0161] 在另一个示例中，一个或多个控制器33还可经由振动和/或脉冲向操作者提供触觉反馈。例如，一个或多个控制器33可基于相对于目标部位旋转螺钉所需的当前力来调整触觉装置51的振动频率和/或幅度。在更具体的示例中，随着相对于目标部位旋转螺钉所需的力增加，触觉装置51的振动幅度可增加，并且触觉装置51的振动频率可减小。类似地，随着相对于目标部位旋转螺钉所需的力减小，触觉装置51的振动幅度可减小，并且触觉装置51的振动频率可增加。

[0162] 可使用本文所述的示例的任何组合或其等效物来实施阻力。

[0163] 2.触觉反馈-位置

[0164] 接口53可采用阻力之外的反馈技术。在一个示例中，响应于螺钉PS与目标部位之间的当前相互作用而由致动器55主动地控制(移动)接口53位置，以向操作者提供反馈。这些状况中的任何一种都可以由上述任何交互传感器来检测。

[0165] 在一个示例中，响应于椎弓根螺钉PS的旋转位置而控制接口53的位置。可以基于螺钉的实时位置由致动器55主动地旋转接口53的位置。随着螺钉旋转，接口53也将旋转。在另一个示例中，可以将接口53的位置移动到某一固定位置或两者之间，以通知操作者关于与螺钉有关的任何位置信息，诸如最大位置或插入深度。接口53可以包括图形标度或标记以将接口位置与螺钉位置相关联。

[0166] 在另一个示例中，响应于由目标部位施加到椎弓根螺钉PS的扭矩或响应于由工具施加的扭矩而控制接口53位置。可以由致动器55主动地移动接口53的位置以向操作者指示螺钉所经受的各种扭矩水平。接口53可以包括图形标度或标记以将接口位置与螺钉扭矩相关联。

[0167] 在又一个示例中，响应于椎弓根螺钉PS的旋转速度而控制接口53的位置。可以由致动器55主动地移动接口53的位置以向操作者指示螺钉所经受的各种速度水平。接口53可以包括图形标度或标记以将接口位置与工具或螺钉速度相关联。

[0168] 3.触觉反馈—运动范围

[0169] 在另一个示例中，响应于螺钉PS与目标部位之间的当前相互作用而控制接口53使其受限，以向操作者提供反馈。这些状况中的任何一种都可以由上述任何交互传感器来检测。

[0170] 在一个示例中，接口53被限制为使得仅允许其旋转与螺钉已经转动的量相关的量。在另一个示例中，接口53被限制为仅允许其旋转与螺钉已经插入的深度相关的量。在另一个示例中，接口53被限制为使得只允许其旋转标识螺钉已经到达物理或虚拟边界的位置的量。

[0171] 在另一种实施方式中，当接口53是旋转的时，其运动范围可被控制为允许连续旋转，例如任何数量的完整360度转动。这在某些控制模式中可能是合适的，如下所述，诸如当触觉装置51用于允许用户通过控制旋转接口53达到用于输入控制的速度或力/扭矩来手动控制螺钉插入时。

[0172] D.自主检查模式

[0173] 触觉装置51的一种模式是自主检查模式。在自主检查模式期间，机器人外科系统10向操作者提供触觉反馈以模仿椎弓根螺钉PS与目标部位之间按照机器人系统10自主插入螺钉PS的当前相互作用。在自主检查模式期间，旋转接口53可根据力$F_{RI}$手动操纵，以向操作者提供反映相对于椎骨V旋转椎弓根螺钉PS所需的当前力$F_{PS}$的触觉反馈。换句话说，自主检查模式使得操作者能够在自主螺钉插入之前、期间或之后的任何给定时间“感觉到”螺钉相互作用。

[0174] 如图11A的表的B列和D列所示，触觉反馈被提供给触觉装置51用于检查，但是触觉装置51不控制外科工具30或驱动器44在自主检查模式期间插入椎弓根螺钉PS，因为机器人系统10自主地插入螺钉(参见图11A的D列)。

[0175] 图12A提供了在自主检查模式期间椎弓根螺钉PS与目标部位椎骨V相互作用的示例。在图12A中，一个或多个控制器33自主地控制椎弓根螺钉PS沿着计划轨迹LH的插入。在这种情况下，螺钉是自攻式的。同时，一个或多个控制器33控制触觉装置51模仿椎弓根螺钉PS与椎骨V之间的当前相互作用。例如，当椎弓根螺钉PS沿着计划轨迹LH插入到深度A时，一个或多个控制器33控制触觉装置51模仿椎弓根螺钉PS与椎骨V之间在深度A处的当前相互作用。因此，系统10向操作者提供触觉感觉以体验机器人系统执行螺钉PS插入。

[0176] 在一个示例中，如图11A的表中的F列所概述的，自主检查模式可以由机器人系统10在主动和自主螺钉插入的同时/期间执行。在这样的实例中，通过启动自主检查模式，旋转接口53被控制为可手动操纵，使得当螺钉被自主地插入时，操作者可经由旋转接口53从机器人外科系统10接收触觉反馈。在该示例中，自主螺钉插入不会停止进行触觉检查。当螺钉PS继续被自主地插入时，椎弓根螺钉PS与椎骨之间的当前相互作用随着插入深度连续变化。因此，在该示例中，可以改变对旋转接口53的阻力反馈，以反映椎弓根螺钉PS与椎骨之间的近乎实时的当前相互作用。可以根据任何合适的时间步长来设定对阻力的更新，诸如每N秒、螺钉每旋转N度、螺钉每位移Nmm更新一次等。

[0177] 可替代地，如图11A的表中的F列所概述的，可在一个或多个控制器33停止或暂停自主地控制外科工具30以停止椎弓根螺钉PS的旋转之后启动自主检查模式。在一个示例中，机器人系统10响应于操作者触发自主检查模式而停止或暂停自主控制。可替代地，机器人系统10响应于任何其他系统命令(诸如用户启动的停止自主运动)而停止或暂停自主控制。在任一个实例中，系统10控制触觉装置51模仿当停止或暂停系统10时存在的椎弓根螺钉PS与椎骨之间的相互作用。在执行自主检查模式之后，操作者可重新启动机器人系统10的自主控制以继续螺钉插入。

[0178] 在另一个示例中，如图11A的表中的F列所概述的，机器人外科系统10可在一个或多个控制器33自主地控制外科工具30插入椎弓根螺钉PS之前启动自主检查模式。例如，操作者可能在一个或多个控制器33自主地控制外科工具30插入椎弓根螺钉PS之前对椎弓根螺钉PS的触觉反馈感兴趣。在此类实例中，可根据外科医生手动插入部分地植入螺钉PS，随

后自主插入。可以将部分植入的螺钉PS与目标部位之间的现有相互作用反映给触觉装置51以供外科医生在启动自主插入之前检查。

[0179] 在一些示例中，自主检查模式的启动自动地启动通过一个或多个控制器33对外科工具30的自主控制。类似地，当自主检查模式被停用时，一个或多个控制器33可停止外科工具30的自主控制。设想了自主检查模式的替代实例及其能力和使用。

[0180] E.手动控制模式

[0181] 在手动控制模式中，操作者利用触觉装置51来控制外科工具30以达到诸如但不限于插入椎弓根螺钉PS的目的。在手动控制模式期间，一个或多个控制器33不会自主地控制椎弓根螺钉PS的插入(如图11A的D列所示)。相反，操纵触觉装置51的接口53以向一个或多个控制器33提供输入以控制椎弓根螺钉PS的插入。响应于来自触觉装置51的控制输入，一个或多个控制器33控制外科工具围绕旋转轴线R以旋转速率旋转螺钉，并且沿着计划轨迹LH以推进速率线性地推进螺钉。

[0182] 可以在本文所述的任何其他触觉装置模式之前或之后利用手动控制模式。在一个示例中，机器人可以自主地将螺钉插入到期望或预定的扭矩峰值、插入深度或螺钉旋转数。此后，可利用手动控制模式来完成任务的剩余部分。

[0183] 1.手动控制输入

[0184] 参考图11A的表中用于手动控制模式的G列，一个或多个控制器33可被配置为确定或接收限定可以如何将触觉装置51用作输入的输入控制技术。

[0185] 参考图11B的表，这些输入控制技术的示例包括但不限于将触觉装置51用作力或扭矩输入、旋转位置输入或旋转速度输入。输入控制技术可以根据外科医生的偏好来设定，由系统指定，或它们的任何组合。操作者可使用触觉装置51的用户接口57(图10中所示)或通过任何其他方法(诸如到显示装置18中的输入)来选择输入控制技术。

[0186] 在手动控制模式中，响应于来自触觉装置51的输入而控制工具以插入螺钉。如下所述，还存在用于控制螺钉的各种输出技术，这些技术可与用于输入控制的技术相同或不同。

[0187] a.来自触觉装置的力或扭矩输入

[0188] 参考图11B，由触觉装置51提供的一个示例性输入是由操作者施加在接口53上的力或扭矩输入。如图12B所示，操作者可施加力$F_{in}$以手动操纵接口53。该力$F_{in}$也可以是施加的扭矩。一个或多个控制器33可获得施加到接口53的力的测量值，以确定用于插入椎弓根螺钉PS的期望力并且基于所述期望力控制椎弓根螺钉PS的插入。所施加的力或扭矩可以代表操作者期望的螺钉PS与目标部位之间的力或扭矩。

[0189] 例如，一个或多个控制器33可基于用于手动地将旋转接口53从原始位置$P_0$操纵到非原始位置$P_1$的力$F_{in}$来确定用于插入椎弓根螺钉PS的期望力，如图11C所示。在这些示例中的每一个中，位置$P_1$仅被示为接口53可相对于原始位置处于的许多位置中的一个可能的示例。在一个示例中，一个或多个控制器33可被配置为通过在操作者施加力$F_{in}$时测量或计算施加到旋转接口53的扭矩来获得力$F_{in}$的测量值。在另一个示例中，一个或多个控制器33可被配置为通过在操作者施加力$F_{in}$时确定旋转接口53的加速度来获得力$F_{in}$的测量值。

[0190] 在机器人外科系统10包括具有图4-6所示的触发器49的外科工具30的实例中，操作者可通过手动操纵触发器49而不是触觉装置51的旋转接口53来控制椎弓根螺钉PS的插

入。在这样的实例中，操作者可用力$F_{in}$按下触发器49，并且触发器49可将指示操作者输入的信号传送到一个或多个控制器33。

[0191] 接口53可包括零卡位(原始位置$P_0$)，使得接口53在被操作者在施加力之后释放时返回到原始位置。因此，操作者可在无需不必要地移动他们的手的情况下将一系列的力$F_{in}$施加到旋转接口53上。在另一个示例中，接口53可以继续以不受阻碍的自由度旋转，以允许接口53旋转足够以实现期望力。因此，旋转接口53提供完整的360度运动范围，从而允许操作者用他们的手模拟旋转螺钉。

[0192] b.来自触觉装置的位置输入

[0193] 在另一个示例中，一个或多个控制器33可获得接口53的位置(或位置变化)的测量值以提供控制输入。例如，在操作者手动地将旋转接口53从原始位置$P_0$操纵到位置$P_1$的实例中，一个或多个控制器33可基于位置$P_1$相对于原始位置$P_0$的定位的定位来确定椎弓根螺钉PS的期望旋转位置。在一些实例中，一个或多个控制器33可获得旋转接口53在位置$P_1$处相对于原始位置$P_0$的旋转角度的测量值。可使用任何合适的传感器(诸如联接到接口53和/或致动器55的增量式或绝对编码器)来确定所述位置。也可以利用接口53相对于原始位置$P_0$的位移来提供输入。可替代地，可以将接口53相对于接口53的完整运动度(例如，360度)的位置用作输入而与原始位置无关。位置还可考虑接口53相对于完整运动度的累积旋转计数(例如，1转和1/2转或540度)。

[0194] 在一个示例中，接口53可包括零卡位(原始位置$P_0$)，使得接口53在被操作者在期望位置释放时返回到原始位置。在另一个示例中，接口53可以继续以不受阻碍的自由度旋转，以允许接口53旋转足够以实现期望位置。

[0195] c.来自触觉装置的速度输入

[0196] 在又一个示例中，由触觉装置51提供的输入是接口53响应于操作者操纵而经受的速度。一个或多个控制器33可使用任何合适的感测装置(诸如惯性传感器、编码器、霍尔效应传感器等)来获得接口53的速度的测量值。例如，如图11B所示，假设接口53在时间$T_0$处于原始位置$P_0$，并且操作者手动地操纵接口以在时间$T_1$移动到位置$P_1$。一个或多个控制器33可相对于时间$T_1$-$T_0$的变化确定$P_1$与$P_0$之间的距离或位移，以确定接口53的速度。该距离或位移可以是线性的或角度的。一个或多个控制器33可利用任何合适的软件或逻辑(诸如积分器、微分器、查找表等)来基于感测到的读数计算速度。

[0197] 在一个示例中，接口53可包括零卡位(原始位置$P_0$)，使得接口53在被操作者释放时返回到原始位置。在另一个示例中，接口53可以继续以不受阻碍的自由度旋转，以允许接口53旋转足够以实现期望的速度输入。

[0198] 来自触觉装置51的输入控制可以是力、位置和/或速度的任何组合。

[0199] 2.手动控制输出

[0200] 响应于来自利用上述任何输入技术(力、位置、速度)的触觉装置51的控制输入，系统10被配置为控制螺钉的插入。参考图11B，可以根据各种输出控制技术控制工具以驱动螺钉。这些输出控制技术包括力、旋转位置、插入深度和速度。下面更详细地描述这些输出控制技术，并且可以响应于任何输入技术(力、位置、速度)来利用输出控制技术。

[0201] 一个或多个控制器33可被配置为确定或接收限定应如何以手动控制模式来操作(即，力、旋转位置、插入深度和速度)工具的输出控制技术。输出控制技术可以根据外科医

生的偏好来设定，由系统指定，或它们的任何组合。操作者可使用触觉装置51的用户接口57(图10中所示)或通过任何其他方法(诸如到显示装置18中的输入)来选择输出控制技术。

[0202] 在手动控制模式输出的所有实例中，根据本文所述的技术，由螺距决定螺钉旋转和推进速率。此外，对于本文所述的任何示例，可以改变接口53的灵敏度以引起对工具的控制。可以手动或自动更新接口53的灵敏度以考虑骨密度。

[0203] a.工具的力输出控制

[0204] 响应于任何输入技术(力、位置、速度)，一个或多个控制器33可对工具进行操作以基于力控制来驱动螺钉PS。

[0205] 在一个示例中，接口53的输入位置确定由工具30输出到螺钉的力。力输出可以是扭矩。在一个示例中，接口53的输入位置可以确定工具应施加到螺钉的特定力或扭矩水平，并且工具30被控制以施加规定的力或扭矩。在另一个示例中，接口53的位置可以确定工具应施加到螺钉的最大力或扭矩水平，并且机器人和工具30继续插入螺钉直到达到最大力或扭矩为止。在这些示例中，接口53可包括零卡位(原始位置$P_0$)，使得接口53在被操作者释放时返回到原始位置。

[0206] 在一个示例中，接口53的输入速度确定由工具30输出到螺钉的力。例如，接口53的速度的增大/减小可以引起由工具施加到螺钉的扭矩的增大/减小。在该示例中，用户可能需要越来越快地转动接口53以实现完全的螺钉插入。

[0207] 在又一个示例中，施加到接口53的输入力或扭矩使工具施加力或扭矩输出以驱动螺钉。在一个示例中，接口53的输入力或扭矩可以确定工具应施加到螺钉的特定力或扭矩水平，并且工具30被控制以施加规定的力或扭矩。接口53的输入力或扭矩可以可替代地确定工具应施加到螺钉的最大力或扭矩水平，并且机器人和工具30继续插入螺钉直到达到最大力或扭矩为止。

[0208] b.工具的旋转位置输出控制

[0209] 响应于任何输入技术(力、位置、速度)，一个或多个控制器33可对工具进行操作以基于旋转位置控制来驱动螺钉PS。旋转位置可以定义为螺钉相对于参考角的旋转角度。

[0210] 在一个示例中，接口53的输入位置使工具将螺钉PS旋转到一定位置。可替代地，接口53的位移使工具根据位移旋转螺钉PS。

[0211] 在另一个示例中，接口53的速度输入使工具将螺钉PS旋转到一定位置。接口53的输入速度的增加/减少也可以引起输出位置控制的改变。在该示例中，用户可能需要越来越快地转动接口53以实现完全的螺钉插入。

[0212] 在另一个示例中，接口53的力或扭矩输入使工具将螺钉PS旋转到一定位置。在一个示例中，接口53的输入力或扭矩可以确定工具应驱动螺钉到的特定位置。接口53的输入力或扭矩可以可替代地确定工具应驱动螺钉到的最大位置，并且机器人和工具30继续插入螺钉直到达到最大位置为止。

[0213] c.工具的插入深度输出控制

[0214] 响应于任何输入技术(力、位置、速度)，一个或多个控制器33可对工具进行操作以将螺钉PS驱动到目标部位内的特定插入深度。

[0215] 在一个示例中，接口53的输入位置使工具将螺钉PS旋转到特定插入深度。可替代地，接口53的位移使工具根据插入深度旋转螺钉PS。

[0216] 在另一个示例中，接口53的速度输入使工具将螺钉PS旋转到特定插入深度。接口53的输入速度的增加/减少也可以引起插入深度的变化。在该示例中，用户可能需要越来越快地转动接口53以实现完全的插入深度。

[0217] 在另一个示例中，接口53的力或扭矩输入使工具将螺钉PS旋转到特定插入深度。在一个示例中，接口53的输入力或扭矩可以确定工具应驱动螺钉到的特定插入深度。接口53的输入力或扭矩可以可替代地确定工具应驱动螺钉到的最大特定插入深度，并且机器人和工具30继续插入螺钉直到达到特定插入深度为止。

[0218] d.工具的速度输出控制

[0219] 响应于任何输入技术(力、位置、速度)，一个或多个控制器33可对工具进行操作以基于速度控制来驱动螺钉PS。速度可以通过以下各项相对于时间的变化来定义：螺钉的旋转角度、螺钉的线性插入速率、工具的旋转速度或它们的任何组合。

[0220] 在一个示例中，接口53的输入速度使工具根据相关速度旋转螺钉PS。可替代地，接口53的位移使工具根据相关速度旋转螺钉PS。

[0221] 在另一个示例中，接口53的速度输入使工具根据相关速度旋转螺钉PS。接口53的输入速度的增加/减少也可以引起输出速度控制的改变。在该示例中，用户可能需要越来越快地转动接口53以实现一定速度。

[0222] 在另一个示例中，接口53的力或扭矩输入使工具根据相关速度旋转螺钉PS。在一个示例中，接口53的输入力或扭矩可以确定工具应驱动螺钉到的特定速度。接口53的输入力或扭矩可以可替代地确定工具应驱动螺钉到的最大速度，并且机器人和工具30继续插入螺钉直到达到最大速度为止。

[0223] e.输入与输出之间的关系

[0224] 上面描述了由触觉装置51提供的各种输入控制技术以及用于驱动工具的各种输出控制技术。可以根据下面描述的各种配置来定义触觉装置51的输入与工具的输出之间的关系。可以根据下面描述的各种配置的任何组合来定义触觉装置51的输入与工具的输出之间的关系。

[0225] 一个或多个控制器33可将触觉装置51的输入映射到工具的预定输出，所预定输出可对应于工具的默认设置。例如，一个或多个控制器33的存储器可包括查找表，其中触觉装置51的输入对应于工具的预定默认输出。在一个这样的实例中，一个或多个控制器33可获得接口53旋转30度的测量值。然后，一个或多个控制器33可基于查找表确定椎弓根螺钉PS应以1.5转/秒的旋转速度旋转。

[0226] 一个或多个控制器33可将触觉装置51的输入映射到工具的预定输出，所述预定输出可基于各种变量。例如，工具的预定输出可基于触觉装置51的可以由上述任何交互传感器或传感器65检测到的状况。例如，预定输出可以基于椎弓根螺钉PS的插入深度、旋转椎弓根螺钉PS所需的当前力$F_{PS}$和/或椎骨V的骨密度数据。作为另一个示例，工具的预定输出可基于由触觉装置51的用户接口57的传感器65感测到的读数。例如，用户接口57可包括可被按下以用于“灵敏”控制的按钮或可被致动以指示期望的控制灵敏度的滑块。预定输出可基于如由传感器65感测到的期望的控制灵敏度。

[0227] 一个或多个控制器33可基于任何合适的数学函数(诸如单调函数、线性函数(例如正比例函数)、指数函数、对数函数、多项式函数、根函数、幂函数和有理函数)来映射输入与

输出之间的关系。在一个实例中，一个或多个控制器33可基于线性函数将所测量的位置映射到期望的插入深度，使得旋转接口53旋转的度数与期望的插入深度成比例。例如，对于旋转接口53旋转的每一度，一个或多个控制器33将期望的插入深度增加1/90毫米。在另一个实例中，一个或多个控制器33可基于分段常数函数(即地板函数)将所测量的位置映射到旋转速度。在这样的实例中，一个或多个控制器33可将所测量的位置映射到期望的旋转速度，使得当旋转接口53在1度与180度(包括端值)之间旋转时，一个或多个控制器33将期望的旋转速度确定为1转/秒，而当旋转接口53在181度与360度(包括端值)之间旋转时，一个或多个控制器33将期望的旋转速度确定为2转/秒。

[0228] 一个或多个控制器可基于触觉装置51的输入与工具的输出之间的映射关系将任何输入技术(力、位置、速度)映射到工具的输出控制(力、旋转位置、插入深度、速度)。

[0229] 如图11B的D列所示，可将力输入映射到旋转位置输出、插入深度输出、力输出或速度输出。例如，可将力输入线性映射到旋转位置输出，使得可将力输入的测量值($F_{in}$的测量值)映射到成比例的螺钉旋转度。类似地，可将力输入线性映射到插入深度输出、力输出和速度输出，使得可将力输入映射到成比例的螺钉插入深度、施加到椎弓根螺钉PS的成比例的扭矩和成比例的螺钉插入速度。

[0230] 如图11B的D列所示，可将位置输入映射到旋转位置输出、插入深度输出、力输出或速度输出。例如，可将位置输入线性映射到旋转位置输出，使得可将位置输入的测量值(位置$P_1$的测量值或位置$P_1$与$P_0$之间的位移的测量值)映射到成比例的螺钉旋转度。类似地，可将位置输入线性映射到插入深度输出、力输出和速度输出，使得可将位置$P_1$相对于原始位置$P_0$的测量值映射到成比例的螺钉插入深度、应施加到椎弓根螺钉PS的成比例的最大扭矩水平和成比例的螺钉插入速度。

[0231] 如图11B的D列所示，可将速度输入映射到旋转位置输出、插入深度输出、力输出或速度输出。例如，可将速度输入线性映射到旋转位置输出，使得可将速度输入的测量值($P_1$与$P_0$之间的位移相对于时间$T_1$-$T_0$的变化的测量值)映射到成比例的螺钉旋转度。类似地，可将速度输入线性映射到插入深度输出、力输出和速度输出，使得可将速度输入映射到成比例的螺钉插入深度、施加到椎弓根螺钉PS的成比例的扭矩和成比例的螺钉插入速度。

[0232] F.模拟模式

[0233] 与上述触觉装置51相关的技术已经涉及利用物理机器人控制和/或驱动工具的术中技术。然而，可以设想利用触觉装置51来执行模拟，以便在执行实际外科手术之前在使用机器人系统方面为操作者提供训练或更大信心。参考图11A的表和图14A-14C，存在可以与触觉装置51一起使用的各种模拟模式。这些模式包括模拟自主检查模式和模拟手动控制模式，并且这些模式在下面详细描述。

[0234] 模拟模式可模拟术中可能存在的整个手术室状况，包括但不限于患者、机器人系统、机器人操纵器、患者台、导航系统、工具、螺钉。所述模拟可以可替代地模拟：螺钉和目标部位；工具、螺钉和目标部位；或者机器人操纵器、工具、螺钉和目标部位。此外，还可以在模拟中提供包括目标轨迹和插入深度的外科计划以供参考。

[0235] 模拟可以在任何合适的图形显示装置(诸如但不限于机器人系统10的一个或多个显示器18或手术室外的显示器)上执行。一个或多个控制器33可执行模拟。可替代地，触觉装置51可以连接到与机器人系统10分离的模拟系统，其中模拟系统具有其自己的控制系

统。

[0236] 可在术前或术中执行本文所述的模拟模式。例如,外科医生可以刚好在命令执行物理机器人控制之前的时刻在手术室中进行模拟。可替代地,可以在外科手术之前进行模拟。在任一个实例中,外科医生可以设置、确认或修改在模拟期间经历的系统10的任何操作参数。例如,外科医生可设置、确认或修改:外科计划,诸如椎弓根螺钉尺寸、插入深度、椎弓根进入点位置;触觉装置操作或灵敏度;触觉装置的优选控制输入技术(力/扭矩、位置、速度);工具操作、进给速率、线性推进速率、旋转速度或灵敏度;工具的优选控制输出技术(力/扭矩、位置、速度);机器人参数,诸如姿态或取向等。

[0237] 如前所述,可采用术前成像和/或术中成像来可视化患者的解剖结构。例如,可使用术前图像(例如,X射线、CT扫描或MRI图像)来创建患者的解剖结构(具体是目标部位)的解剖模型。该虚拟解剖模型可以用于模拟。另外,一旦将椎弓根螺钉PS的螺纹几何形状存储在机器人外科系统10的存储器中,所选择的椎弓根螺钉PS就可虚拟地呈现在模拟内。

[0238] 在模拟模式的执行期间,一个或多个控制器33向触觉装置51提供触觉反馈。一个或多个控制器33被配置为控制触觉装置51的致动器55以使旋转接口53能够模仿椎弓根螺钉PS与目标部位之间的模拟当前相互作用。参考图14B和图14C,一个或多个控制器33可通过配置为向致动器55提供阻力$F_A$以调整操作者的手旋转旋转接口53所需的力$F_{RI}$来模仿模拟当前相互作用,其中旋转旋转接口53所需的力反映相对于椎骨V(目标部位)旋转椎弓根螺钉PS所需的模拟当前力,如图14C中的$F_{SPS}$所示。当然,可以控制触觉装置51以使用除了阻力反馈之外的任何技术(诸如上述力、位置或运动范围反馈技术)来提供触觉反馈。

[0239] 在模拟模式的执行期间,一个或多个控制器33可被配置为使用各种方法来获得(模拟)椎弓根螺钉PS与(模拟)目标部位之间的模拟当前相互作用。例如,一个或多个控制器33可获得与模拟的坐标系中的模拟当前相互作用相对应的虚拟测量值。模拟系统可以跟踪模拟机器人、工具、螺钉和/或患者并且确定模拟椎弓根螺钉PS相对于目标部位的解剖模型的位置。模拟系统可包括指示在模拟椎弓根螺钉PS相对于解剖模型的多个位置处模拟椎弓根螺钉PS与解剖模型之间的预期相互作用的预定数据。在一个示例中,所述数据可存储在存储器中的查找表中以供一个或多个控制器33访问。模拟系统可基于所确定的螺钉相对于解剖模型的状态、位置、取向和/或姿态以及预定数据来计算指示椎弓根螺钉PS与目标部位之间的模拟当前相互作用的参数。预定数据可包括椎骨V的骨密度数据。模拟系统可使用骨密度数据和螺钉相对于椎骨V的解剖模型的状态来计算或获得指示椎弓根螺钉PS与椎骨V之间在各种深度处的模拟当前相互作用的参数。预定数据还可包括关于螺钉的几何形状、工具或与定义相互作用相关的任何其他特征的已知数据。

[0240] 1.模拟自主检查模式

[0241] 在一种意义上,模拟自主检查模式是自主检查模式的模拟版本。因此,可以将以上对自主检查模式的任何描述并入本文以理解模拟自主检查模式。在模拟自主检查模式期间,一个或多个控制器33(图形地)模拟自主地控制外科工具30,并且操作者可以使用触觉装置51来以触觉方式感测模拟自主插入。一个或多个控制器33通过模拟围绕旋转轴线R以旋转速率旋转椎弓根螺钉PS和通过模拟沿着计划轨迹LH以推进速率线性地推进椎弓根螺钉PS来模拟自主地控制外科工具30。然而,机器人系统不是物理地控制工具的操作。相反,一个或多个控制器33模拟对外科工具30的自主控制(如图11A的E列所示)以模拟自主地插

入椎弓根螺钉PS。在模拟自主检查模式期间，可根据经调整的力$F_{RI}$但在不具有控制模拟外科工具30旋转椎弓根螺钉PS的能力并且不具有控制外科工具30的模拟自主控制的能力的情况下手动地操纵旋转接口53。就像自主检查模式一样，模拟自主检查模式可在停止/暂停模拟自主螺钉插入之前、期间或之后执行。

[0242] 2.模拟手动控制模式

[0243] 在一种意义上，模拟手动控制模式是手动控制模式的模拟版本。因此，可以将以上对手动控制模式的任何描述并入本文以理解模拟手动控制模式。与手动控制模式相反，在模拟手动控制模式期间，接口53可在不具有控制(物理)外科工具30的能力的情况下手动操纵。相反，一个或多个控制器33响应于操作者手动地操纵触觉装置51的接口53(如图11A的E列所示)而模拟对外科工具30的手动控制。在模拟手动控制模式期间，一个或多个控制器33响应于来自触觉装置51的输入而模拟手动地控制外科工具30。在模拟手动控制模式期间，一个或多个控制器33模拟控制椎弓根螺钉PS的旋转速率或推进速率中的一者。操作者手动地操纵触觉装置51，并且作为响应，一个或多个控制器33可模拟控制椎弓根螺钉PS的旋转速率或推进速率中的一者(如图11A的G列所示)。例如，操作者可使用上述任何输入技术来手动地操纵接口53。响应于控制输入，一个或多个控制器33基于任何合适的输出技术(诸如用于椎弓根螺钉PS的模拟插入的力、位置或速度)来控制模拟工具的输出。在该示例中，如图14C所示，用户将力输入$F_{in}$施加到接口53，以在显示器18上实现对螺钉插入的模拟手动控制。输入力抵抗由致动器55输出的(阻力)力$F_{RI}$。

[0244] III.控制机器人外科系统的方法

[0245] 现在参考图15A，流程图示出了控制机器人外科系统10的方法的一个示例。如图所示，该流程图示出了手术期间各种触觉装置操作模式的操作。

[0246] 该流程图示出了控制机器人外科系统10插入或模拟插入椎弓根螺钉PS的方法。该方法开始于步骤200，并且直接前进到准备用于接收椎弓根螺钉PS的解剖结构的步骤202。在步骤202期间，可执行各种步骤以准备用于插入椎弓根螺钉PS的解剖结构。这些步骤可包括在患者体内形成切口的步骤(1)、用组织牵开器牵开组织的步骤(2)、将套管放置在牵开的组织中的步骤(3)、在解剖结构中钻出导向孔102的步骤(4)以及将螺纹攻入解剖结构中的步骤(5)。应当注意，步骤202不必包括上述步骤(1)-(5)。例如，在替代实例中，可排除步骤(4)和(5)，因为可排除钻出导向孔102和将螺纹攻入解剖结构中。例如，此类实例包括使用自钻自攻式骨骼螺钉的实例。

[0247] 然后该方法进行到步骤204，在该步骤中使椎弓根螺钉PS与外科工具30相互作用。在一些实施方式中，在工具30与解剖结构相互作用之前将其联接到螺钉PS。可替代地，可使用任何技术(包括手动或机器人插入)将椎弓根螺钉PS部分地安置在解剖结构中的目标部位处，此后，工具30与部分安置的螺钉PS相互作用。更有可能，将椎弓根螺钉PS附接到驱动器44的远侧端部以放置在导向孔102中的一者中。可以使用原始的线触觉对象来插入椎弓根螺钉PS，或者可以在附接驱动器44和/或椎弓根螺钉PS之后创建具有新的起始点、目标点和出口点的新的线触觉对象。在这种情况下，钻子42和/或驱动器44可以具有RFID标签或其他标识装置，使得一个或多个控制器33能够识别哪个附件连接到壳体45。壳体45可具有与一个或多个控制器33通信的对应RFID读取器等，以读取标签并且确定附接哪个附件。基于该信息，然后控制器可创建、访问或以其他方式确定新的线触觉对象。类似地，椎弓根螺钉

PS也可以配备有RFID标签，并且驱动器44可具有类似的读取器，使得一个或多个控制器33也可以确定附接哪种尺寸/类型的椎弓根螺钉PS。因此，线触觉对象可以基于驱动器44和/或椎弓根螺钉PS，使得精确地控制机器人臂20以将该特定的椎弓根螺钉PS放置到期望位置，例如相对于患者的解剖结构的期望取向和深度。

[0248] 另外地，在经由RFID标签或其他检测装置(诸如视觉相机)自动检测附件的情况下，控制系统能够将与机器人外科系统10一起利用的任何外科手术软件推进到与驱动器44相关联的下一个屏幕，所述屏幕可具有不同的提示、指令等以向操作者指示现在驱动器44已连接。可使用声音识别、姿势感测或其他输入装置来推进软件和/或改变到待治疗的下一个椎骨100和/或改变椎骨体100的正在进行手术的一侧。这也可以是基于外科工具30的位置。例如，如果所附接的附件的TCP由操作者手动地放置成更靠近脊椎V的一侧而不是另一侧，则软件可自动地推进为对应于椎骨V的该侧。可以利用显示器18或通过音频输入/输出视觉地确认所选择的椎骨V和手术侧。

[0249] 在一些手术中，可在钻出导向孔102与插入椎弓根螺钉PS之间(诸如当首先钻出所有导向孔102，然后再将所有椎弓根螺钉PS插入它们的期望位置时)将旋转轴线R移离期望轨迹。在这种情况下，在放置椎弓根螺钉PS中的每一个之前，机器人外科系统10可首先控制外科工具30的移动，以通过以先前描述的方式自主地将外科工具30的旋转轴线R与椎弓根螺钉PS中的每一个的期望轨迹对准来沿着期望轨迹放置旋转轴线R。

[0250] 该方法前进到步骤208，在该步骤中，如果操作者在步骤206期间没有结束手术的操作，则一个或多个控制器33确定选择哪个触觉装置操作模式(步骤206将在下面更详细地描述)。可以响应于任何状况或命令来选择触觉装置操作模式。在步骤210期间，该方法确定所选择的触觉装置操作模式当前是否正由一个或多个控制器33执行。如果所选择的触觉装置操作模式未由一个或多个控制器33执行，则该方法首先进行到步骤212，在该步骤中，如果触觉装置操作模式正被执行，则一个或多个控制器33结束正被执行的触觉装置操作模式。作为响应，该方法基于所选择的触觉装置操作模式进行到自主检查模式、手动控制模式、模拟自主检查模式或模拟手动控制模式中的一种模式。如果所选择的触觉装置操作模式已经被执行，则该方法继续执行所选择的触觉装置操作模式。因此，在步骤208和210期间，一个或多个控制器33确定状况是否提示启动触觉装置操作模式或操作者是否命令启动触觉装置操作模式。

[0251] 因此，可响应于一定状况或命令在任何合适的时间启动任何触觉装置操作模式。例如，响应于一定状况或命令，一个或多个控制器33可被配置为在停止或暂停自主地控制外科工具30以使椎弓根螺钉PS的旋转停止之后启动手动控制模式(也在图11A的F列中指示)。作为另一个示例，响应于一定状况或命令，一个或多个控制器33可被配置为在自主地控制外科工具30之前启动手动控制模式(也在图11A的F列中指示)。在此类实例中，一个或多个控制器33可在停止或暂停外科工具30的自主控制之后从手动控制模式切换到恢复自主地控制外科工具以旋转螺钉。作为又一个示例，响应于一定状况或命令，一个或多个控制器33可被配置为在停止或暂停外科工具的自主控制之前或之后启动模拟自主检查模式(也在图11A的F列中指示)。作为再一个示例，响应于一定状况或命令，一个或多个控制器33可被配置为在停止或暂停外科工具的自主控制之前或之后启动模拟手动控制模式(也在图11A的F列中指示)。

[0252] 在任何合适的时间启动任何触觉装置操作模式的能力为操作者提供了基于他们的偏好定制手术的能力。例如,在其中一个或多个控制器33在停止或暂停自主地控制外科工具30之后启动手动控制模式的一种配置中,一个或多个控制器33可在操作者在手动控制模式期间将椎弓根螺钉PS植入到最终深度之前最初自主地将椎弓根螺钉PS插入到初始深度(或反之亦然)。在这样的配置中,可自主地放置椎弓根螺钉PS,直到椎弓根螺钉PS在最终深度的预定距离(如由导航系统12确定)内为止。此时,操作者可用外科工具30手动完成植入椎弓根螺钉PS,使得操作者能够更主动地感觉到椎弓根螺钉PS的拧紧。操作者还可选择在手动控制模式期间使用单独的工具(电动或手动)来完成椎弓根螺钉PS的放置,而不是在自主控制期间使用。

[0253] 其他配置也说明了操作者基于他们的偏好定制手术的能力。例如,在另一种配置中,一个或多个控制器33在自主地控制外科工具30之前启动模拟自主检查模式。在这样的配置中,在一个或多个控制器33启动自主控制以插入椎弓根螺钉PS之前,操作者可在显示器18上可视化外科工具30的自主控制的模拟。在另一种配置中,一个或多个控制器33在启动手动控制模式以控制外科工具30之前启动模拟手动控制模式。在这样的配置中,在一个或多个控制器33启动手动控制模式以手动地控制插入椎弓根螺钉PS之前,操作者可在显示器18上可视化外科工具30的手动控制的模拟。

[0254] 此外,响应于一定状况或命令而启动任何触觉装置操作模式的能力消除了潜在的错误(例如,与脊髓103的碰撞)并且为操作者提供了对手术的即时控制。例如,在其中一个或多个控制器33在操作者在手动控制模式期间将椎弓根螺钉PS植入到最终深度之前最初自主地将椎弓根螺钉PS插入到初始深度的上述配置中,一个或多个控制器33可响应于一定状况或命令而启动手动控制模式。在手动控制模式的启动和自主控制的停止由状况提示的实例中,一个或多个控制器33可在自主控制期间检测到椎弓根螺钉PS在最终深度的预定距离内并且将所述状况传送到一个或多个控制器33。然后一个或多个控制器33被提示启动手动控制模式并停止自主控制,使得操作者可手动地完成椎弓根螺钉PS的放置。可以预先确定最终深度的预定距离,使得椎弓根螺钉PS不接触脊髓103。在手动控制模式的启动由命令命令的实例中,导航系统12可向操作者指示自主控制的状态。例如,显示器18可指示在椎弓根螺钉PS达到全部深度之前还剩多少转,并且/或者显示器18可图形地表示椎弓根螺钉PS、解剖结构和/或目标点,使得操作者能够容易地看到需要将椎弓根螺钉PS进一步插入多远。一个或多个控制器33还可经由触觉装置51向操作者提供触觉反馈(例如,振动或脉冲),以通知操作者椎弓根螺钉PS已经到达预定深度。一旦操作者确定椎弓根螺钉PS在最终深度的预定距离内,操作者就可命令一个或多个控制器33启动手动控制模式并停止自主控制,使得操作者可手动地完成椎弓根螺钉PS的放置。

[0255] 可提示启动触觉装置操作模式的一些示例性状况可包括椎弓根螺钉PS达到期望深度、椎弓根螺钉PS可能与脊髓103碰撞以及椎弓根螺钉PS被旋转预定转数。在此类实例中,一个或多个控制器33可被配置为自动地选择自主检查模式、手动控制模式、模拟自主检查模式或模拟手动控制模式中的一种模式。在一个这样的示例中,在一个或多个控制器33已经自主地控制外科工具30将椎弓根螺钉PS旋转预定转数之后,一个或多个控制器33可被配置为自动地选择手动控制模式以允许操作者手动地完成椎弓根螺钉PS的插入。

[0256] 机器人外科系统10可包括用于命令启动触觉装置操作模式的各种部件。例如,操

作者可使用触觉装置51命令启动触觉装置操作模式。如图10所示，触觉装置51可包括用户接口57。操作者可通过致动用户接口57以将命令传输到一个或多个控制器33来使用用户接口57选择触觉装置操作模式。可替代地，在一些实例中，操作者可按下旋转接口53以选择触觉装置操作模式。在机器人外科系统10包括图4-6的外科工具30的实例中，操作者可使用触发器49或外科工具30的用户接口59来选择触觉装置操作模式。在其他实例中，操作者可经由计算机推车组件34的用户接口(诸如计算机推车组件34的键盘61)选择触觉装置操作模式。操作者还可经由基座22的用户接口63选择触觉装置操作模式。可以设想，除操作者以外的个人可命令启动触觉装置操作模式。例如，可由远程用户使用远程用户接口从远程位置命令启动触觉装置操作模式。

[0257] 图15B示出了自主检查模式的示例性步骤。如图所示，自主检查模式包括获得指示椎弓根螺钉PS与目标部位之间的当前相互作用的测量值的步骤304；基于所获得的测量值控制触觉装置的致动器以使触觉装置51的旋转接口53能够模仿椎弓根螺钉PS与目标部位之间的当前相互作用的步骤306，该步骤包括向触觉装置51的致动器55提供阻力$F_A$以调整操作者的手旋转旋转接口53所需的力$F_{RI}$的步骤308，其中旋转旋转接口53所需的力$F_{RI}$反映相对于目标部位旋转椎弓根螺钉PS所需的当前力$F_{PS}$；以及在不具有控制外科工具30的能力的情况下根据经调整的力$F_{RI}$手动地操纵旋转接口53以向操作者提供反映相对于目标部位旋转椎弓根螺钉PS所需的当前力$F_{PS}$的触觉反馈的步骤310。

[0258] 图15C示出了手动控制模式的示例性步骤。如图所示，手动控制模式包括在具有基于操作者手动地操纵旋转接口53来控制椎弓根螺钉PS的旋转速率或椎弓根螺钉PS的推进速率中的一者的能力的情况下手动地操纵旋转接口53的步骤300；响应于旋转接口被手动地操纵以控制椎弓根螺钉PS的旋转速率或椎弓根螺钉PS的推进速率中的一者而控制外科工具30围绕旋转轴线以旋转速率旋转椎弓根螺钉PS并且沿着计划轨迹以推进速率线性地推进椎弓根螺钉PS的步骤302；先前描述的步骤304、306和308；以及根据经调整的力$F_{RI}$手动地操纵旋转接口53以向操作者提供反映相对于目标部位旋转椎弓根螺钉PS所需的当前力$F_{PS}$的触觉反馈的步骤311。

[0259] 图15D示出了模拟自主检查模式的示例性步骤。如图所示，模拟自主检查模式包括通过模拟围绕旋转轴线R以一定旋转速率旋转椎弓根螺钉PS并且沿着计划轨迹LH以一定推进速率线性地推进螺钉来模拟自主地控制外科工具30的步骤312；在显示器18上显示外科工具30的模拟自主控制的步骤314；获得指示椎弓根螺钉PS与目标部位之间的模拟当前相互作用的测量值的步骤304的实例(被示为步骤304')；基于所获得的测量值控制触觉装置的致动器以使触觉装置51的旋转接口53能够模仿椎弓根螺钉PS与目标部位之间的模拟当前相互作用的步骤306的实例(被示为步骤306')，该步骤包括向致动器55提供阻力$F_A$以调整操作者的手旋转旋转接口53所需的力$F_{RI}$的步骤308的实例(被示为步骤308')，其中旋转旋转接口53所需的力$F_{RI}$反映相对于目标部位旋转椎弓根螺钉PS所需的模拟当前力$F_{SPS}$；以及在不具有控制外科工具30旋转椎弓根螺钉PS的能力并且不具有控制外科工具30的模拟自主控制的能力的情况下根据经调整的力$F_{RI}$手动地操纵旋转接口53以向操作者提供反映模拟当前力$F_{SPS}$的触觉反馈的步骤316。

[0260] 图15E示出了模拟自主检查模式的示例性步骤。如图所示，模拟自主检查模式包括在不具有控制外科工具30旋转椎弓根螺钉PS的能力并且具有基于操作者手动地操纵旋转

接口53来控制椎弓根螺钉PS的旋转速率或椎弓根螺钉PS的推进速率中的一者的能力的情况下手动地操纵旋转接口53的步骤318;模拟通过响应于旋转接口53被手动地操纵以控制椎弓根螺钉PS的旋转速率或椎弓根螺钉PS的推进速率中的一者而围绕旋转轴线R以旋转速率旋转椎弓根螺钉PS并且沿着计划轨迹LH以推进速率线性地推进椎弓根螺钉PS来手动地控制外科工具30的步骤320;在显示器18上显示外科工具30的模拟手动控制的步骤322;先前描述的步骤304';先前描述的步骤306',该步骤包括先前描述的步骤308';以及在不具有控制外科工具30旋转椎弓根螺钉PS的能力的情况下根据经调整的力$F_{RI}$手动地操纵旋转接口53以向操作者提供反映模拟当前力$F_{SPS}$的触觉反馈的步骤324。

[0261] 参考图15A,虚线框示出了自主地控制外科工具30以插入椎弓根螺钉PS的步骤214。在准备解剖结构的步骤202和将椎弓根螺钉PS放置在外科工具30上的步骤204之后,步骤214可与步骤206、208、210中的任一个以及自主检查模式同时发生。如前所述,在手动控制模式、模拟自主检查模式和模拟手动控制模式期间,一个或多个控制器33不自主地控制外科工具30。因此,如果一个或多个控制器33启动手动控制模式、模拟自主检查模式和模拟手动控制模式中的任一个,则一个或多个控制器33停止步骤214的执行并且停止外科工具30的自主控制(如果一个或多个控制器33自主地控制外科工具30)。然而,在步骤206、208、210中的任一个期间的任何时间,或在自主检查模式期间,可执行步骤214,并且一个或多个控制器33可同时启动外科工具30的自主控制。

[0262] 自主地控制外科工具30的步骤214在图15G进一步示出。如图所示,该方法包括跟踪目标部位的位置的步骤400;沿着期望轨迹放置旋转轴线R的步骤402;基于所跟踪的目标部位的位置来控制机器人操纵器的移动以相对于目标部位沿着计划轨迹保持外科工具30的旋转轴线R的步骤404;以及自主地控制外科工具30围绕旋转轴线R以一定旋转速率旋转椎弓根螺钉PS并且沿着计划轨迹LH以一定推进速率线性地推进椎弓根螺钉PS的步骤406,其中旋转速率和推进速率是预先确定的并且与椎弓根螺钉PS的已知螺纹几何形状成比例。

[0263] 在步骤400期间,跟踪目标部位的位置。也可以将超声换能器(未示出)安装在患者的皮肤的背侧上以生成患者的解剖结构和外科手术的进展的实时图像。术中图像可以用于确定椎弓根螺钉PS遵循计划的期望轨迹或者确定钻子42或椎弓根螺钉PS是否靠近任何关键结构,包括神经和内侧或外侧皮质边界。

[0264] 在步骤402期间,将旋转轴线R与计划轨迹LH对准。如果根据外科计划,如图9所示,旋转轴线R尚未与计划轨迹LH对准,或如果出于其他原因旋转轴线R已移离期望轨迹,则在步骤402中对准旋转轴线R。具体地,在步骤402中,机器人外科系统10控制外科工具30的移动,以沿着期望轨迹放置旋转轴线R。这可包括机器人外科系统10引起外科工具30的自主移动,以沿着期望轨迹放置旋转轴线R。可替代地,机器人外科系统10可使操作者能够通过以手动模式施加力/扭矩来移动外科工具30,直到沿着计划轨迹LH放置旋转轴线R为止。机器人外科系统10可以向操作者生成反馈(视觉、听觉和/或触觉)以指示适当的对准。在一些示例中,当工具的位置在计划轨迹LH附近并相隔由吸引触觉定义的阈值距离时,吸引触觉可用于将工具30朝向计划轨迹LH拉动。

[0265] 在步骤406期间,机器人外科系统10引起外科工具30的自主移动以同时控制工具线性地沿着计划轨迹LH的自主推进,同时还控制外科工具围绕旋转轴线R的自主旋转。对推进和旋转的自主控制与由上文描述的等式1定义的螺距相关。由螺距决定的自主控制确保

了椎弓根螺钉的正确安装,以避免对周围骨组织造成损害。

[0266] 步骤214可由操作者在多个备选方案中命令。在第一示例中,机器人外科系统10可被配置为完全自主地执行。也就是说,一旦操作者已经命令机器人外科系统10执行对外科工具30的自主控制,机器人外科系统10就在没有进一步的操作者输入的情况下执行自主控制,直到操作完成为止。在替代实例中,操作者可启动操作的自主执行,然后诸如通过按压并保持按钮、通过按压并保持脚踏开关或其他连续输入控制来提供连续输入,使得如果输入停止,例如按钮或脚踏开关被释放,机器人外科系统10就暂停执行操作。与自主控制相配合,操作者可调节操作执行的速度。除了按钮或脚踏开关之外,还可提供另外的控件,使得操作者可以在具有多个离散速度的逐步函数中命令机器人速度的增加或减小。附加速度控件可包括一组按钮、选择器、拨盘或其他合适的控件。

[0267] 参考图15A,如果在步骤206期间,机器人外科系统10确定操作是否已经结束。可使用各种方法来确定操作已经结束。例如,如果操作者确定所有椎弓根螺钉PS都被植入到期望深度,则操作者可命令操作结束。作为另一个示例,如果操作者主观地确定操作已经结束,则操作者可命令操作结束。作为又一个示例,如果一个或多个控制器33确定所有椎弓根螺钉PS都被插入到期望深度,则一个或多个控制器33可触发操作结束。然而,在一些实例中,在将椎弓根螺钉PS植入到期望深度之后,操作并未结束。在此类实例中,该方法可针对另一个椎弓根螺钉PS重复图15A的方法的步骤并且继续直到所有椎弓根螺钉PS都被植入为止。

[0268] 如果机器人外科系统10在步骤206期间确定操作已经结束,则该方法前进到确定外科工具30是否插入目标部位处的步骤216。在步骤216期间,一个或多个控制器33可确定外科工具30的位置以及外科工具30是否插入目标部位处。如果机器人外科系统10确定外科工具30未被插入,则该方法前进到步骤218即操作结束。如果机器人外科系统10确定外科工具30被插入,则该方法在前进到步骤218的结束之前前进到撤回工具的步骤220。

[0269] 在步骤220期间,将外科工具30从植入物中撤回。与将椎弓根螺钉推PS进到骨骼中一样,操作者可在远离椎骨V的方向上在外科工具30处输入力,以命令撤回外科工具30。可替代地,一旦放置了植入物,机器人外科系统10就可自主地撤回外科工具30,而无需操作者的进一步输入。

[0270] 可用外科工具30实施部分椎骨关节面切除术以提供光滑的骨表面,用于最终接纳椎弓根螺钉PS的头部。切除体积可以基于操作者的计划(即,通过确定头部在3D模型中的位置)来定义。可以使用对应于头部形状的钻头或预成形扩孔器70来去除材料。在一些情况下,钻子42可将扩孔器结合在其中以避免单独的工具,使得钻子42具有较小轮廓的钻杆以产生导向孔,并且更靠近侧定位的是扩孔器70以为椎弓根螺钉PS的头部产生支座72,因此,导向孔102和支座72的至少一部分可以同时形成。在所示的实例中,钻子42具有带有近侧端部和远侧端部的钻杆,以及在远侧端部处的钻尖。扩孔器70与钻尖在近侧隔开,使得一旦已经将钻子42插入到目标椎骨体中的期望深度,扩孔器70就位于椎骨关节面附近。可采用任何合适的钻子和/或扩孔器切割特征来形成孔,例如在患者的脊柱中形成导向孔和支座来接纳植入物。

[0271] 应当理解,可以采用本文所述的系统和方法来将椎弓根螺钉PS、其他螺钉、紧固件或其他植入物放置到患者体内。因此,即使全文都将椎弓根螺钉PS作为一个示例进行参考,

本文所述的相同系统和方法也可以用于处理患者的任何解剖结构和/或将任何植入物放置到患者体内，例如放置在髋、膝、股骨、胫骨、面部、肩、脊柱等中。例如，机器人臂20也可用于放置用于脊柱植入物的笼架、放置杆、驱动销、植入螺纹杯或放置其他部件，并且可以用于髋关节置换术、椎间盘切除术或其他手术。不同的端部执行器也可以附接到机器人臂20来进行其他手术。在一些情况下，端部执行器还可具有铰接臂以促进植入物插入，即将植入物置于期望姿态。端部执行器的铰接臂可以简单地是以相同方式控制以放置植入物的机器人臂20的微型型式，或者可以是被控制以定位植入物的另一种机构。

[0272] 导航系统12可包括具有基于光学的跟踪器的光学导航系统，但是可以另外地或可替代地采用其他模态，诸如经由超声跟踪对象的超声导航系统、经由RF能量跟踪对象的射频导航系统和/或经由电磁信号跟踪对象的电磁导航系统。还设想了其他类型的导航系统。还应当理解，本文所述的模型可包括三角化网格、使用体素的体积模型或一些情况下的其他类型的3D和/或2D模型。

[0273] 在前文的描述中已经讨论了若干实例。然而，本文讨论的实例并非旨在是穷举性的或将本公开限制为任何特定形式。已经使用的术语旨在在本质上是描述性而非限制性的词语。鉴于以上教导，许多修改和变化是可能的，并且本公开可以以不同于具体描述的其他方式来实践。

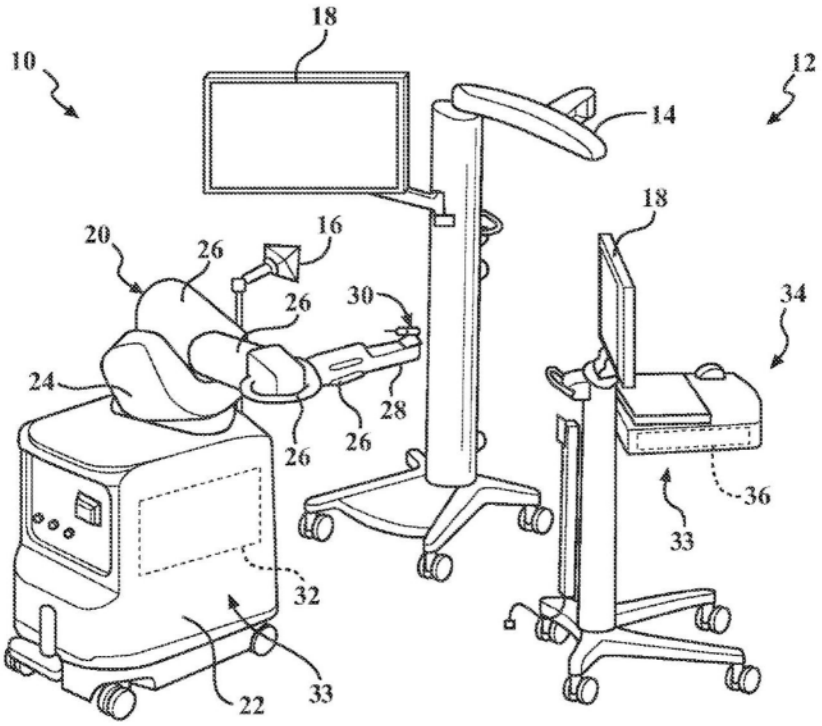

18
10
12
14
18
20
26
16
26
30
34
24
28
26
26
36
33
32
22
33

图1

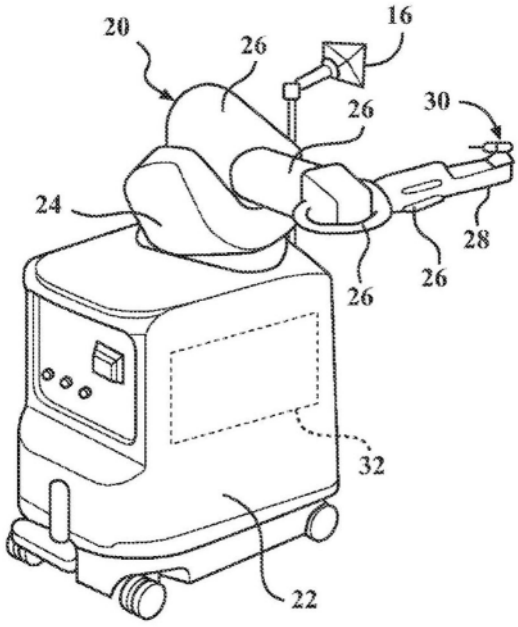

20
26
16
26
30
24
28
26
26
32
22

图2

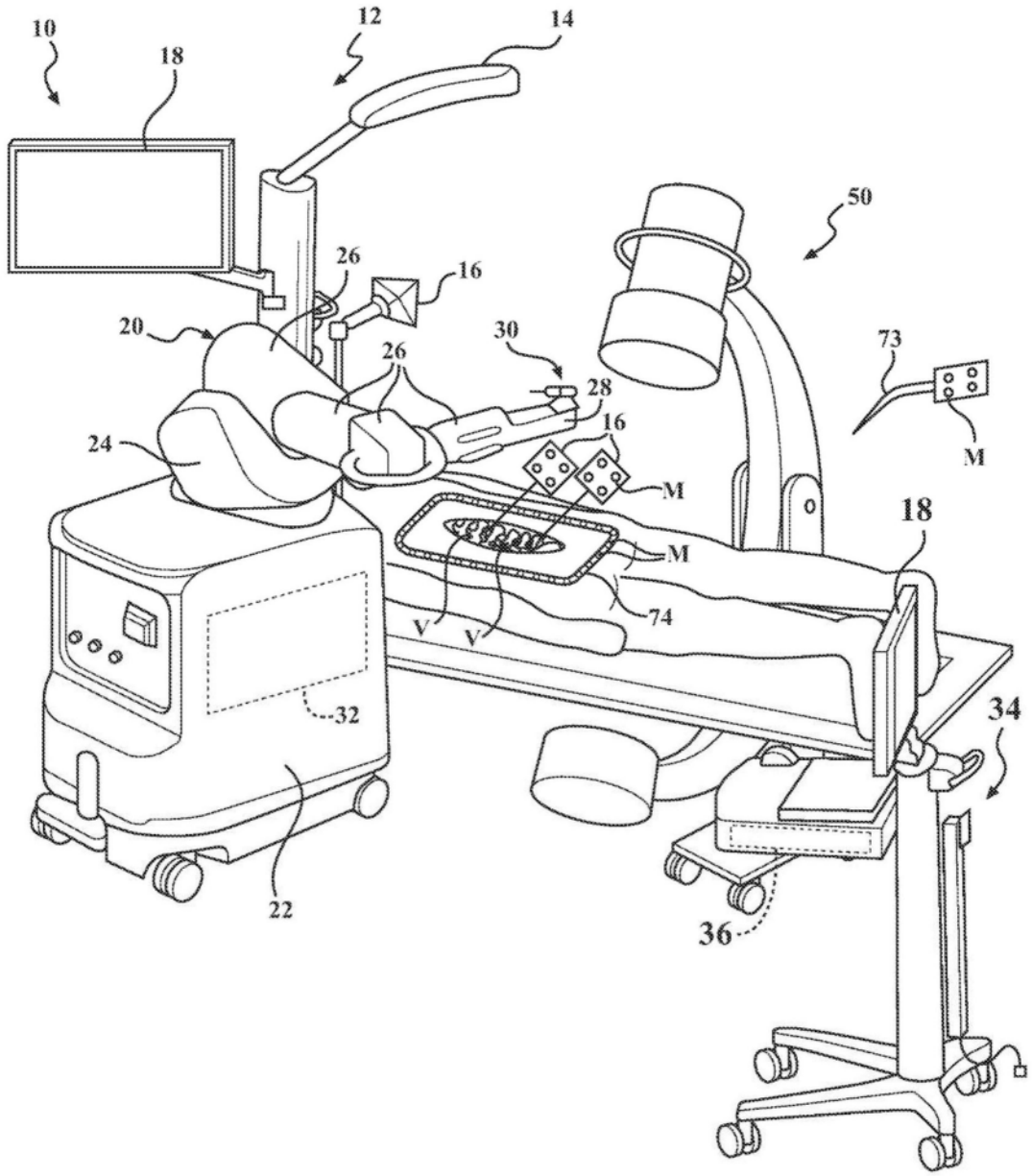



图3

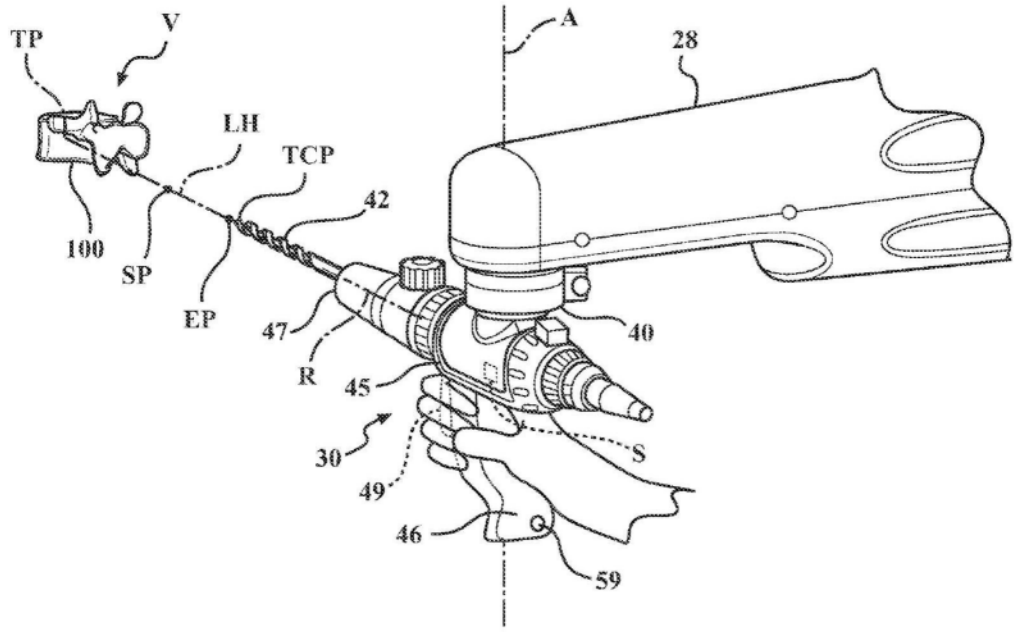

TP
V
A
28
LH
TCP
42
100
SP
EP
47
40
R
45
30
S
49
46
59

图4

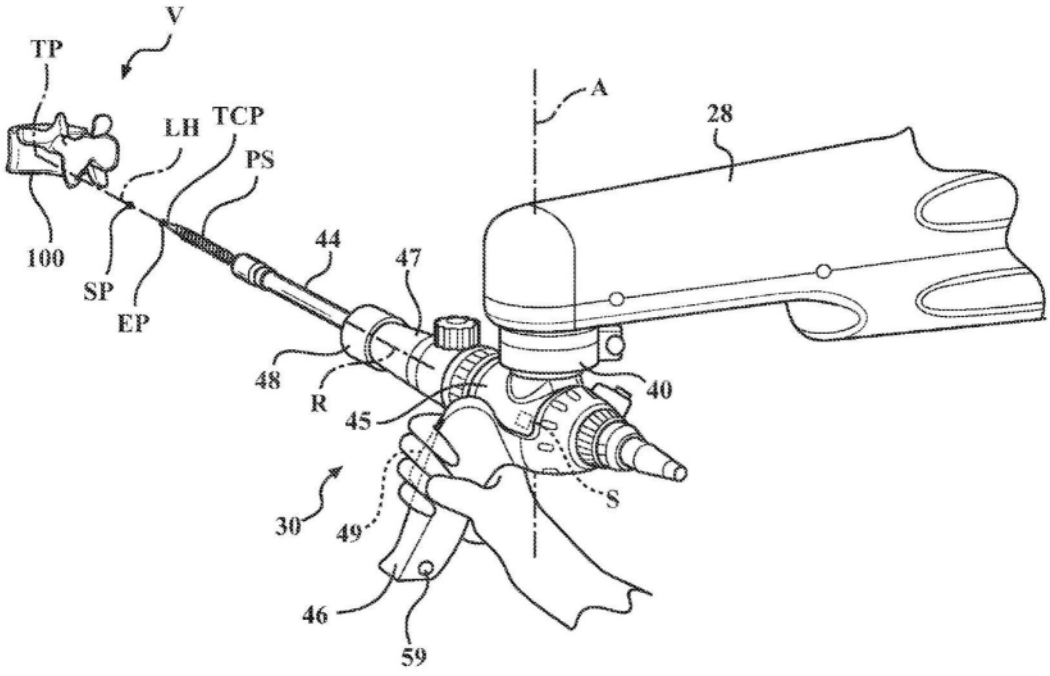

V
TP
A
28
LH
TCP
PS
44
47
100
SP
EP
48
40
R
45
S
30
49
46
59

图5

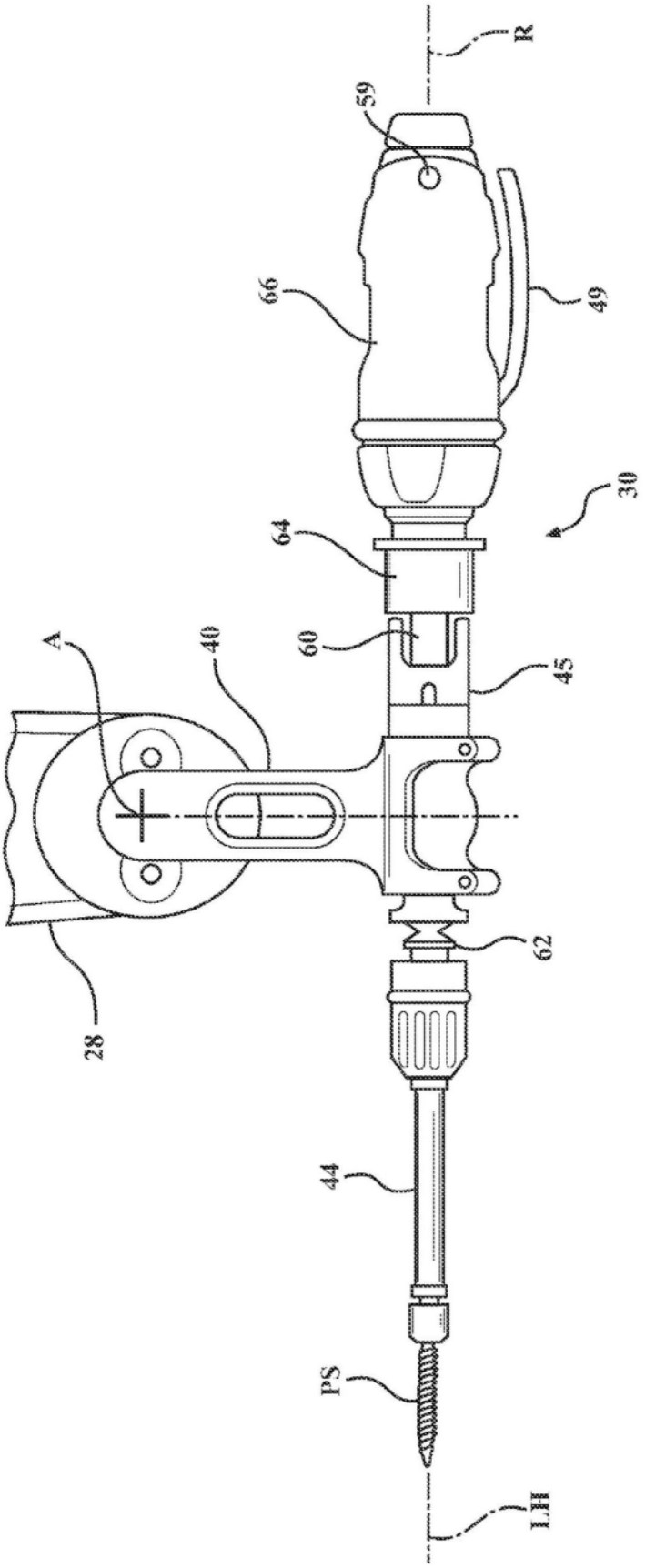



图6

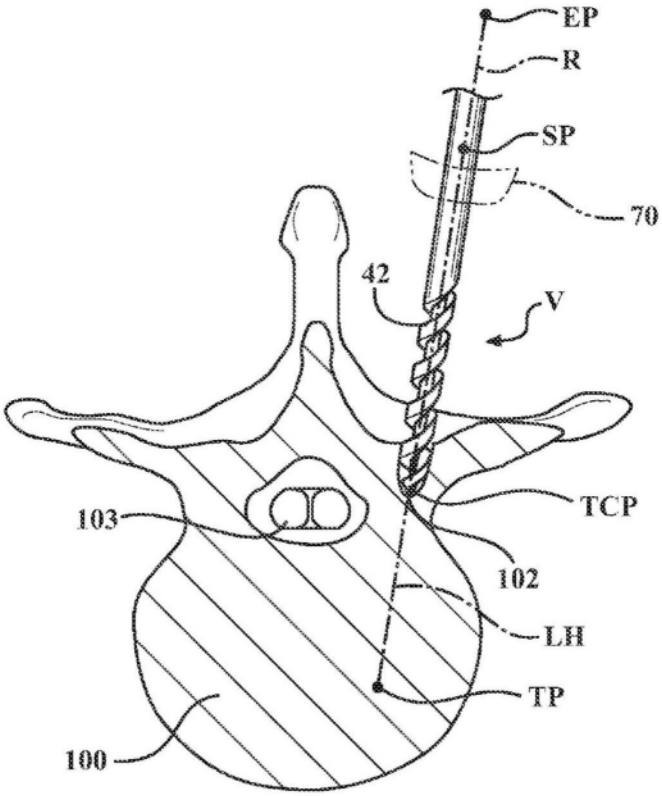



图7

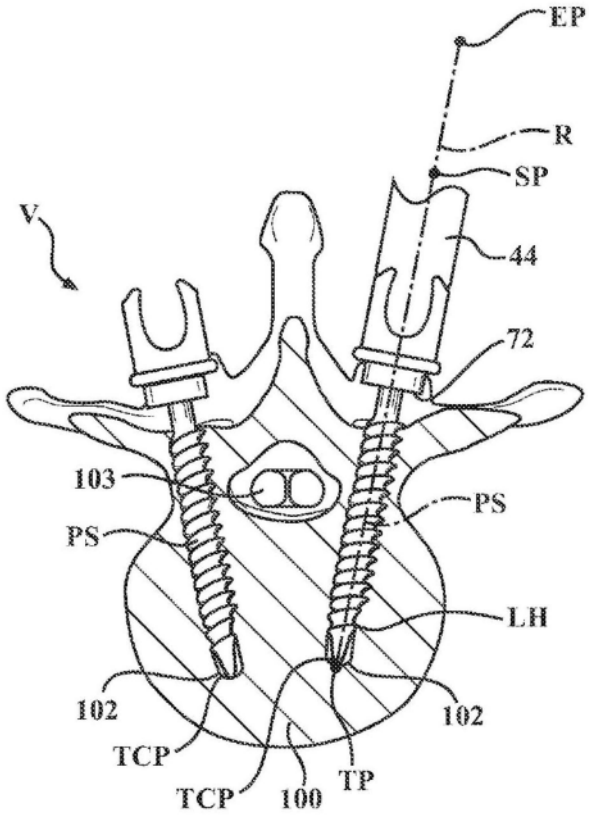



图8

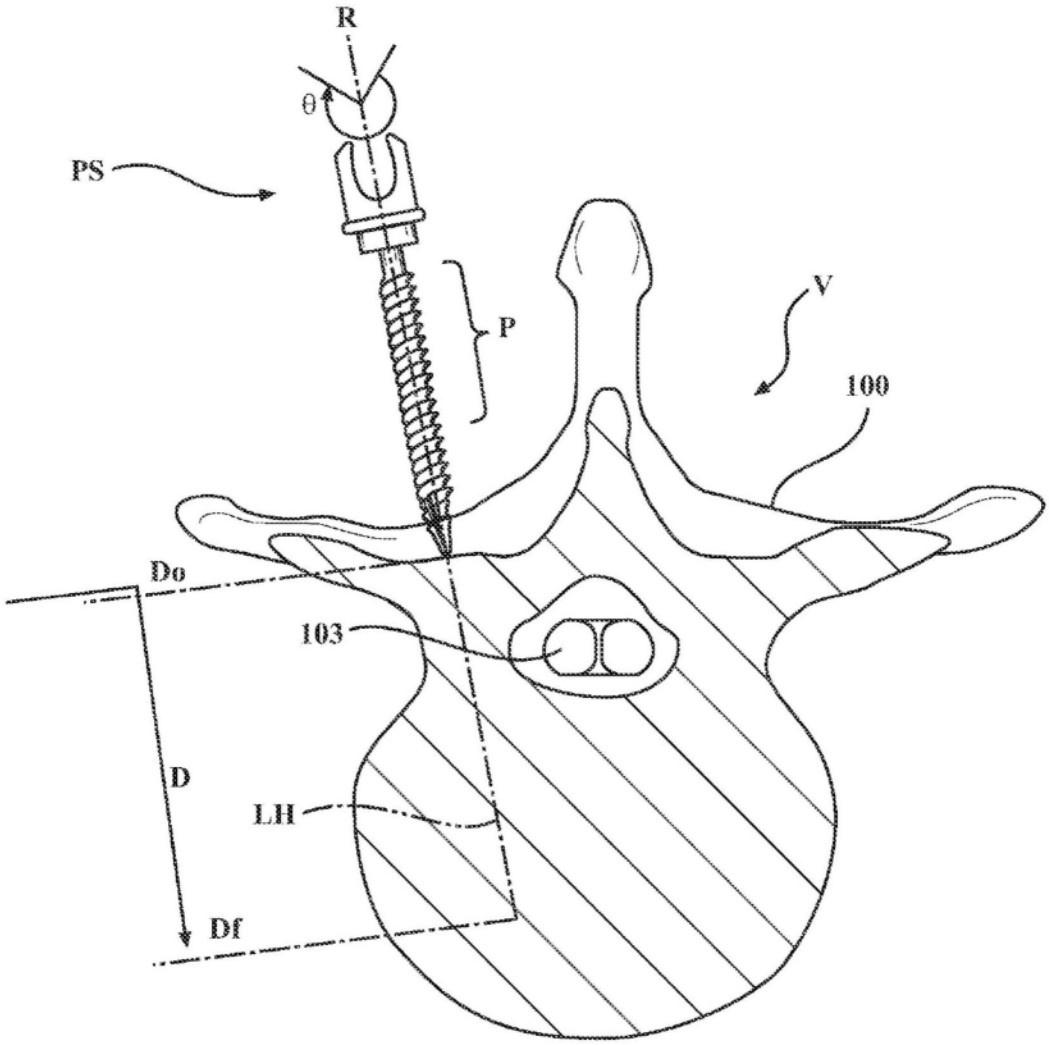



图9

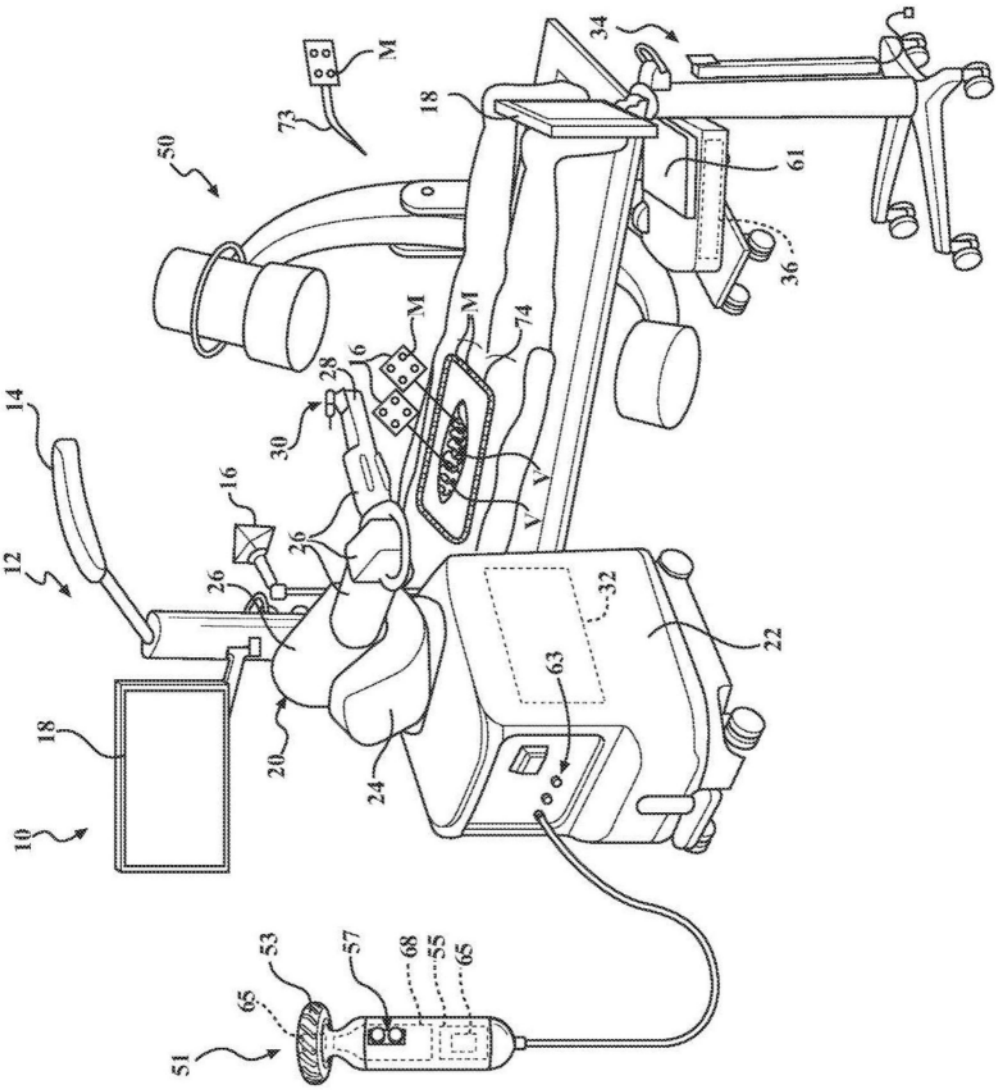

M
73
50
18
34
61
36
M
M
74
28
16
30
14
16
26
12
26
32
22
63
18
20
24
10
53
57
68
55
65
65
51

图10

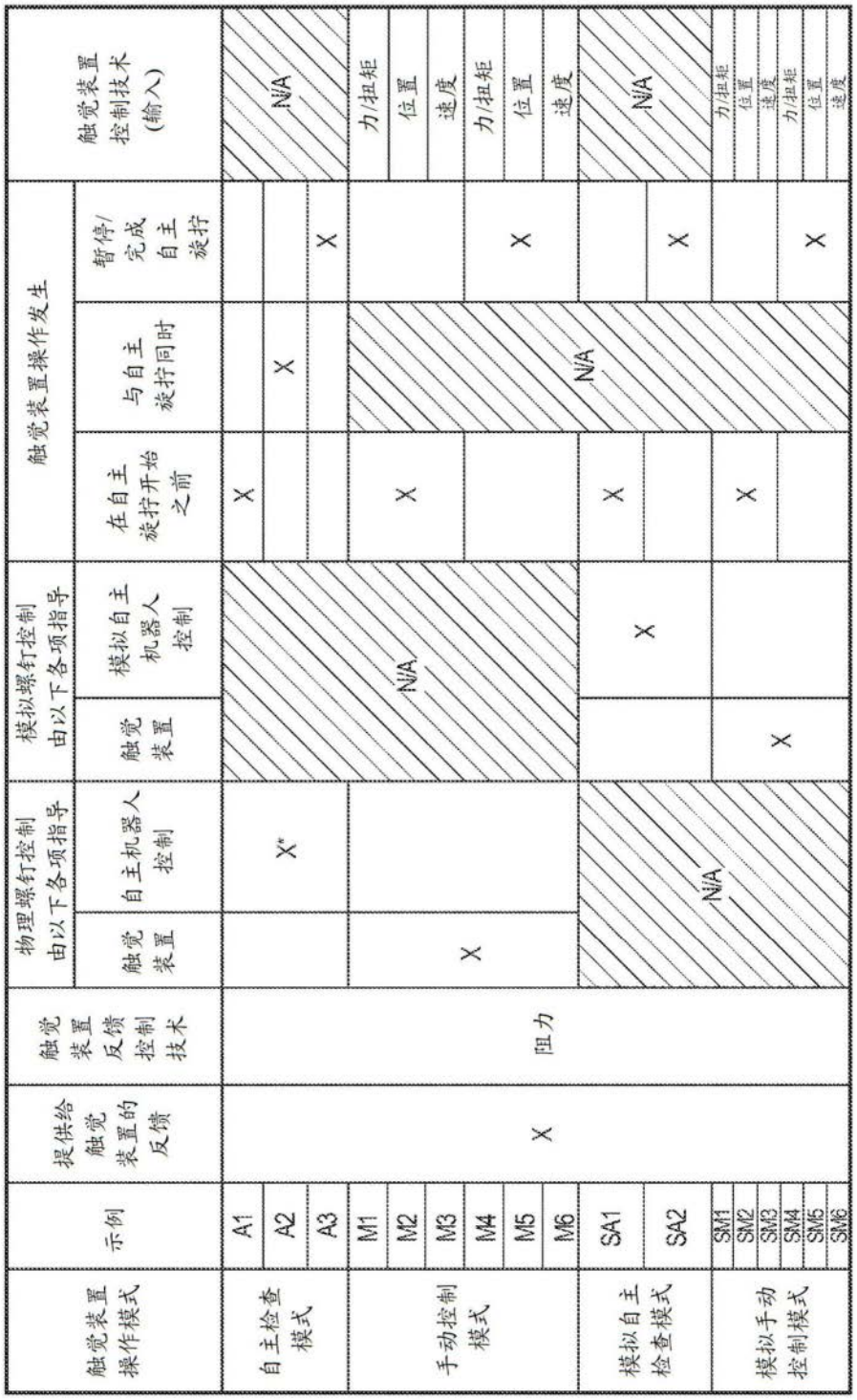

A
B
C
D
E
F
G
触觉装置操作模式
示例
提供给触觉装置的反馈
触觉装置反馈控制技术
物理螺钉控制由以下各项指导
触觉装置
自主机器人控制
模拟螺钉控制由以下各项指导
触觉装置
模拟自主机器人控制
触觉装置操作发生
在自主旋拧开始之前
与自主旋拧同时
暂停/完成自主旋拧
触觉装置控制技术(输入)
自主检查模式
手动控制模式
模拟自主检查模式
模拟手动控制模式
A1
A2
A3
M1
M2
M3
M4
M5
M6
SA1
SA2
SM1
SM2
SM3
SM4
SM5
SM6
X
阻力
X*
N/A
力/扭矩
位置
速度
*任选

图11A

| A | B | C | D |
|---|---|---|---|
| 触觉装置(输入) | 控制器测量值 | | 工具控制(输出) |
| 力/扭矩 | $F_{in}$ | 旋转位置 | 将输入力映射到螺钉旋转度 |
| | | 插入深度 | 将输入力映射到螺钉插入深度 |
| | | 扭矩 | 将输入力映射到施加到螺钉的扭矩 |
| | | 速度 | 将输入力映射到螺钉插入速度 |
| 位置 | $P_1$<br>位移 $P_1-P_0$ | 旋转位置 | 将输入位置或位移映射到螺钉旋转度 |
| | | 插入深度 | 将输入位置或位移映射到螺钉插入深度 |
| | | 扭矩 | 将输入位置或位移映射到施加到螺钉的扭矩水平 |
| | | 速度 | 将输入位置或位移映射到螺钉插入速度 |
| 速度 | $\frac{P_1-P_0}{T_1-T_0}$ | 旋转位置 | 将输入速度映射到螺钉位置 |
| | | 插入深度 | 将输入速度映射到螺钉插入深度 |
| | | 扭矩 | 将输入速度映射到施加到螺钉的扭矩 |
| | | 速度 | 将输入速度映射到螺钉插入速度 |

图11B

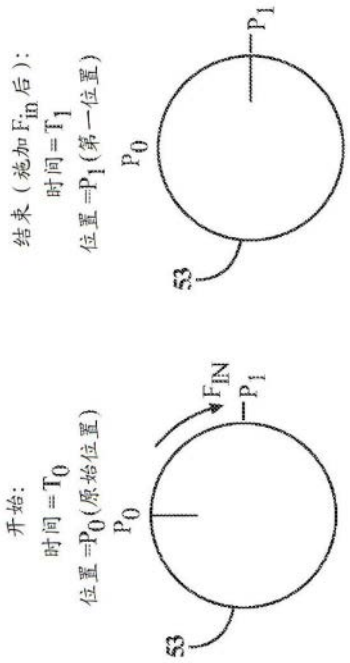

结束（施加 $F_{IN}$ 后）：
时间 = $T_1$
位置 = $P_1$（第一位置）
$P_0$
$P_1$
53
开始：
时间 = $T_0$
位置 = $P_0$（原始位置）
$P_0$
$F_{IN}$
$P_1$
53

图11C

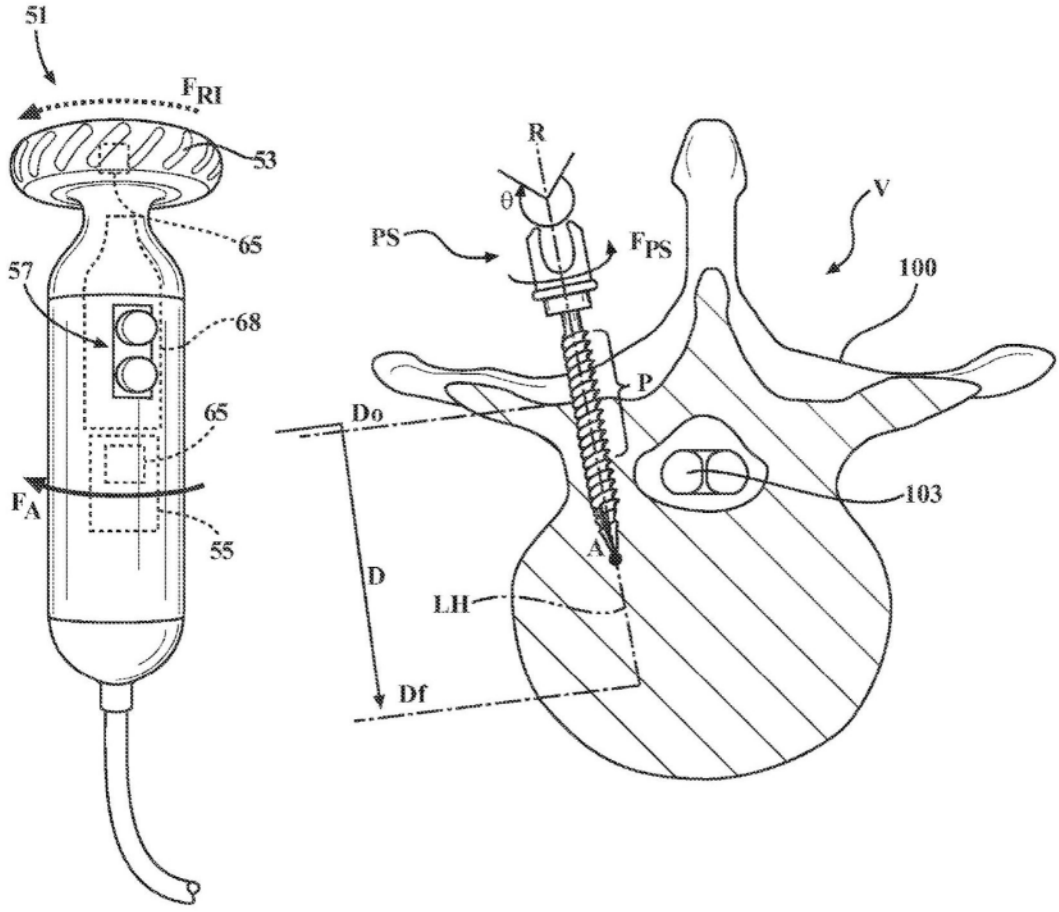

51
$F_{RI}$
53
65
57
68
65
$F_A$
55
R
θ
PS
$F_{PS}$
V
100
P
$D_0$
103
A
D
LH
Df

图12A

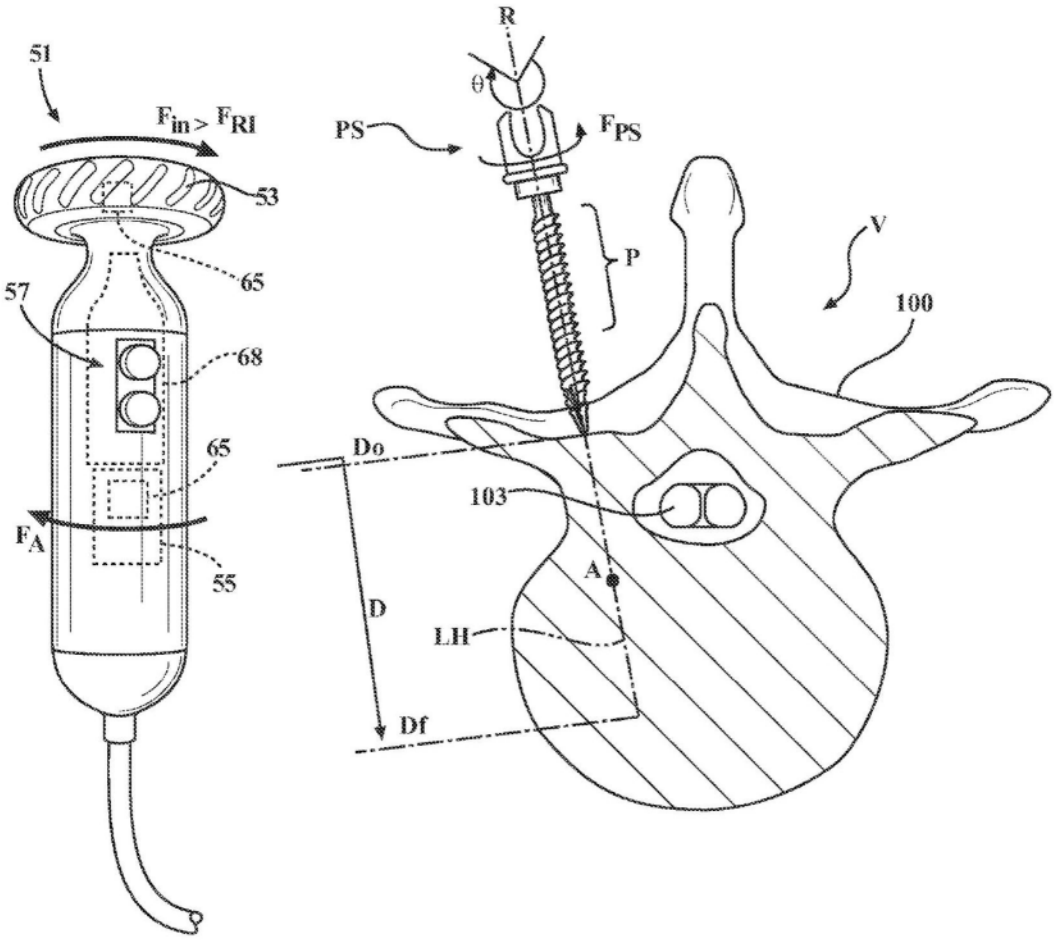



图12B

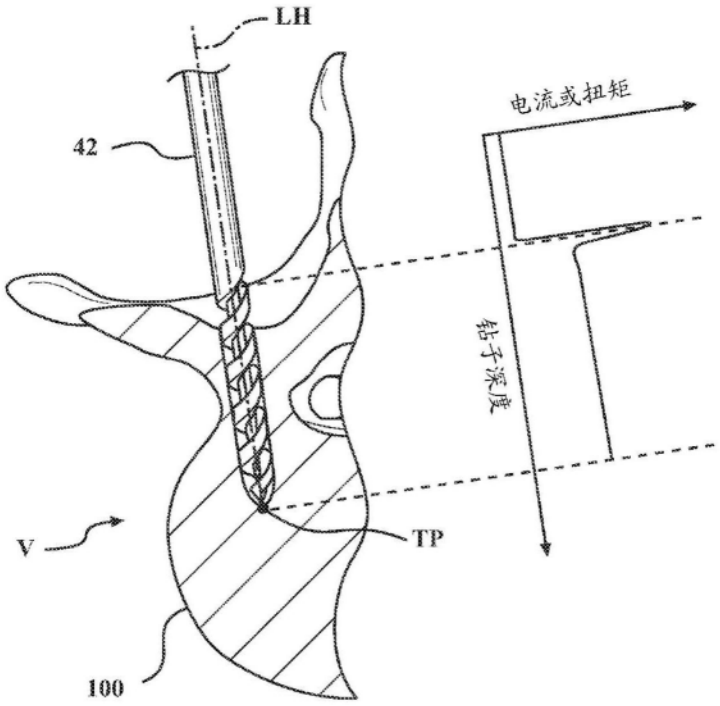



图13A

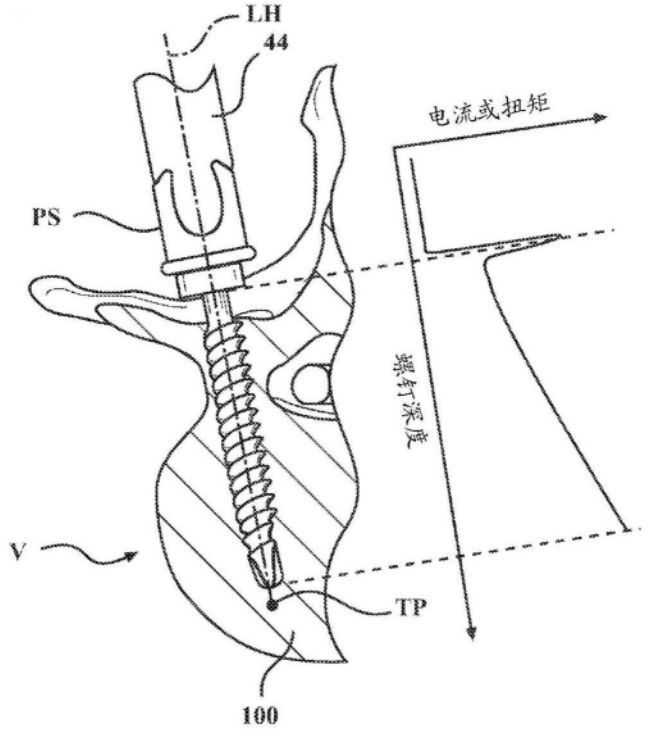



图13B

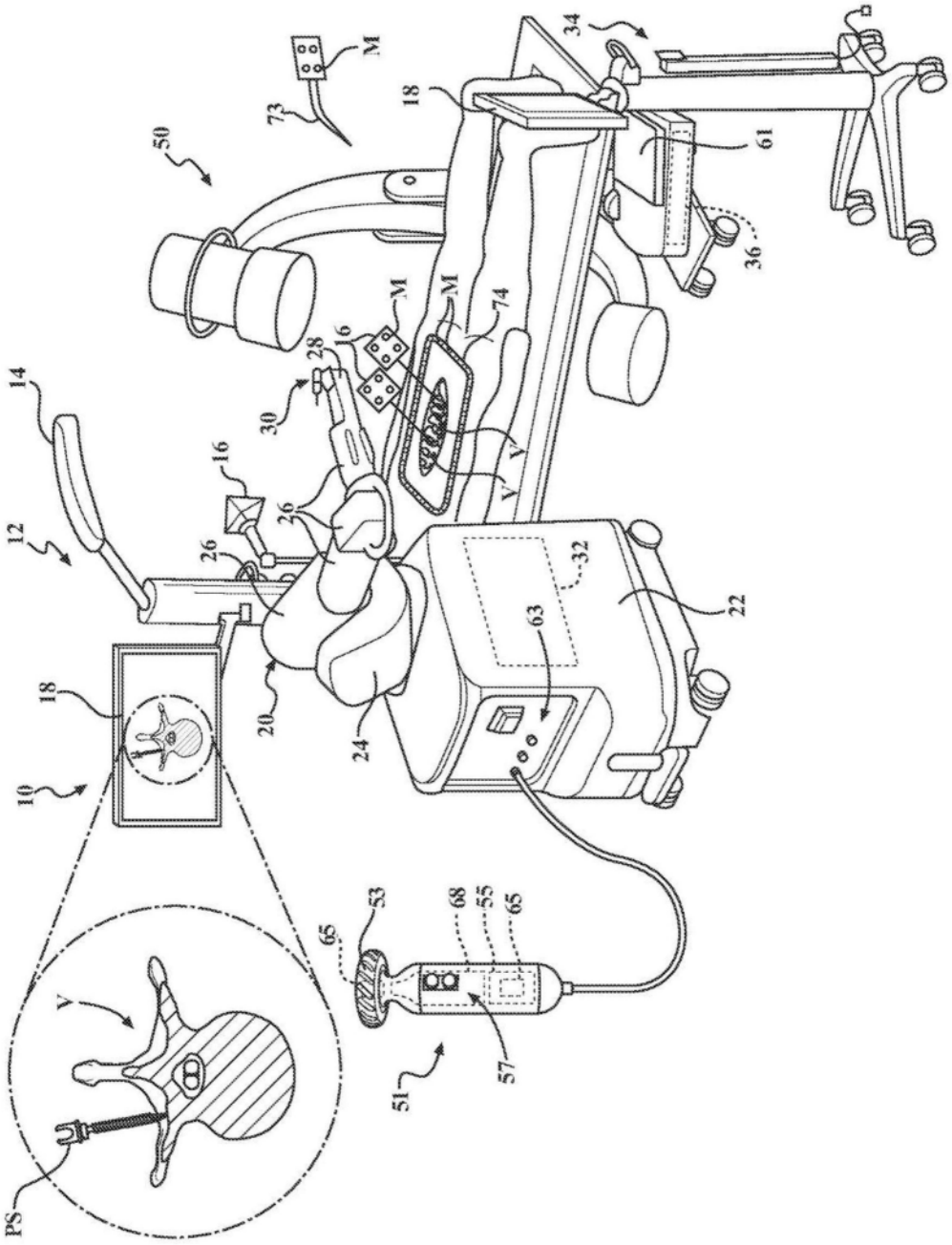

M
73
18
34
50
61
36
M
M
74
28
16
30
14
16
26
12
26
32
22
63
18
20
24
10
53
68
55
65
65
V
V
V
PS
51
57

图14A

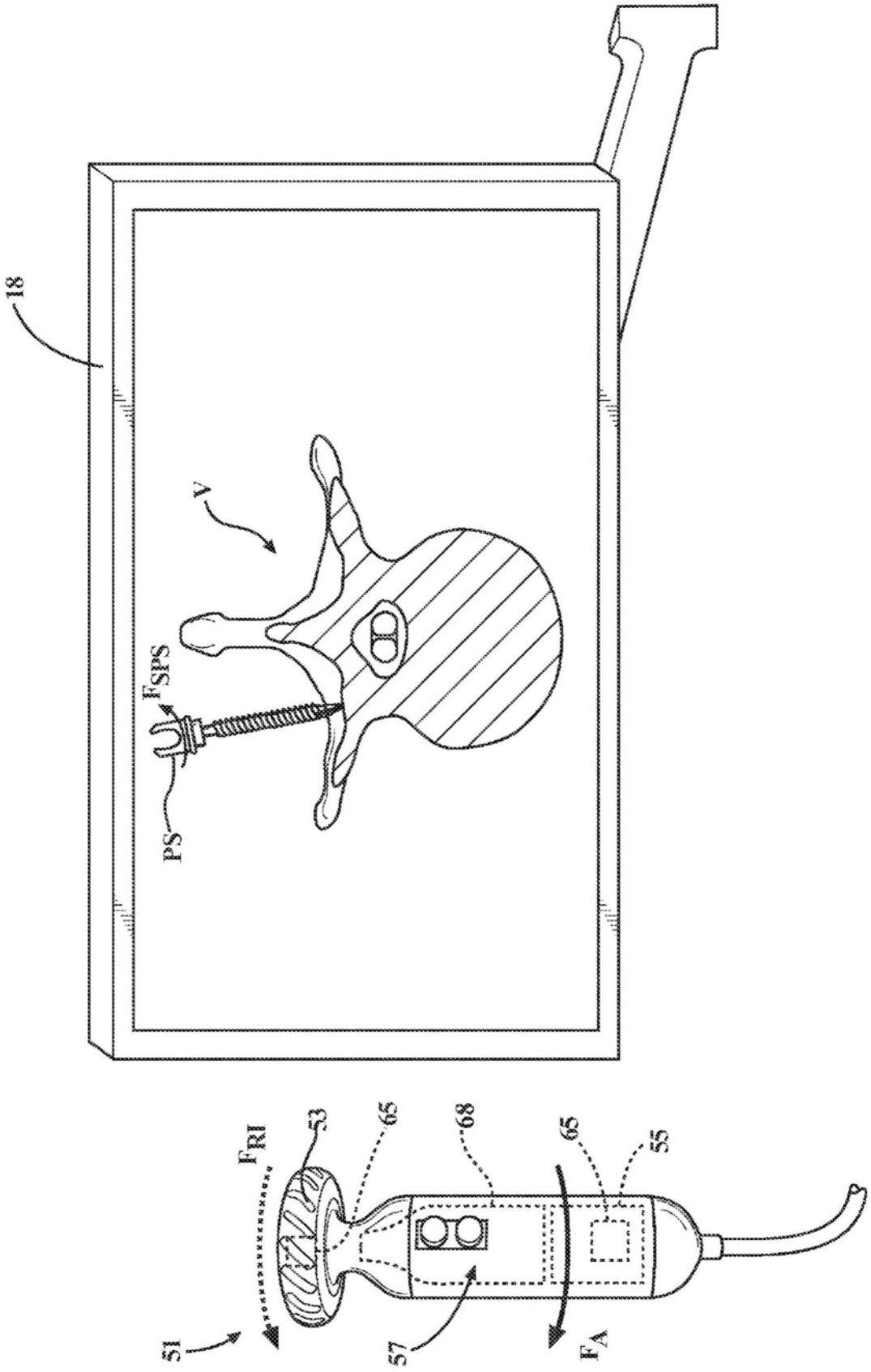



图14B

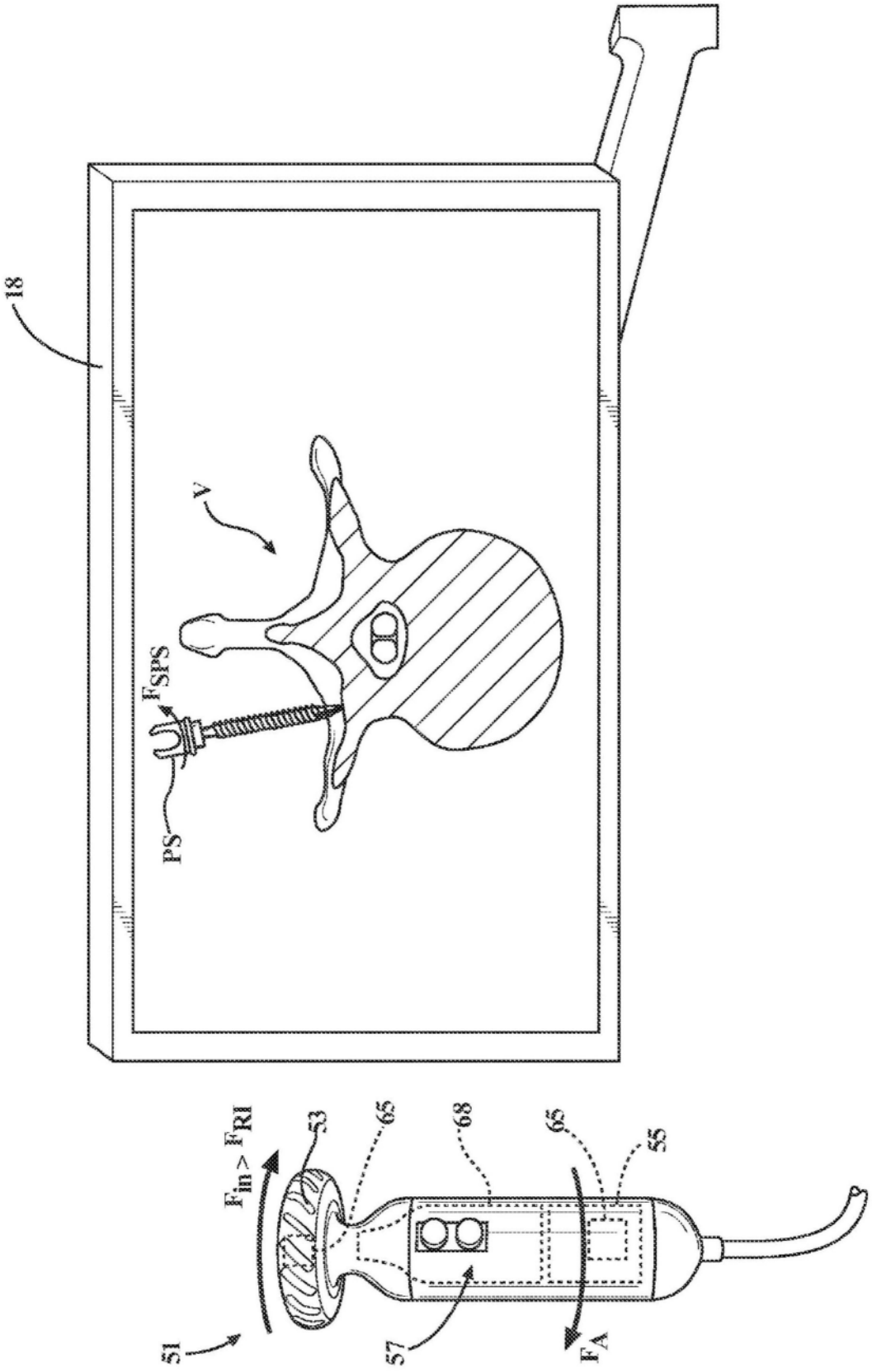



图14C

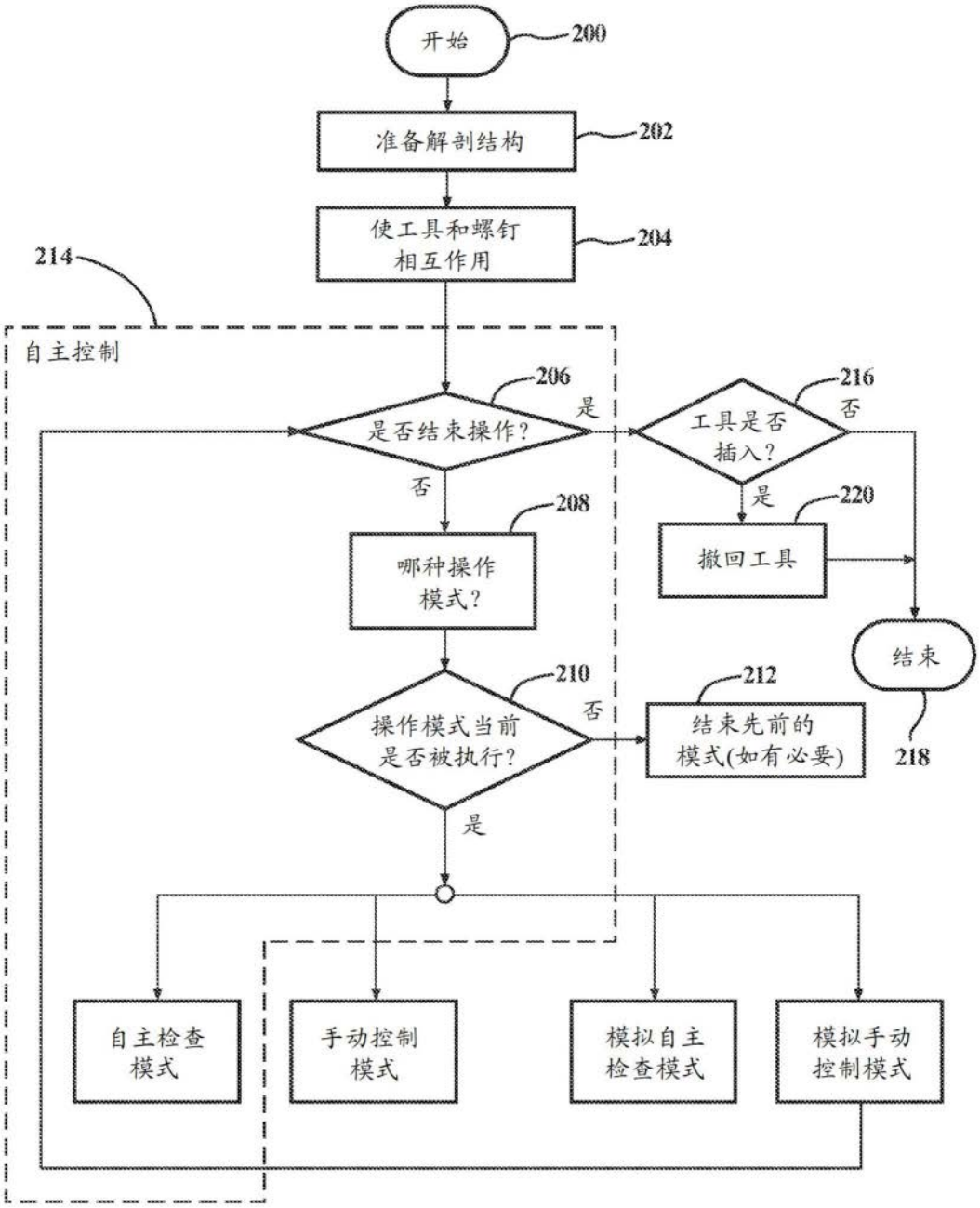

开始
200
准备解剖结构
202
使工具和螺钉
相互作用
204
214
自主控制
206
是否结束操作?
是
否
工具是否
插入?
216
否
是
220
撤回工具
208
哪种操作
模式?
结束
218
210
操作模式当前
是否被执行?
否
212
结束先前的
模式(如有必要)
是
自主检查
模式
手动控制
模式
模拟自主
检查模式
模拟手动
控制模式

图15A

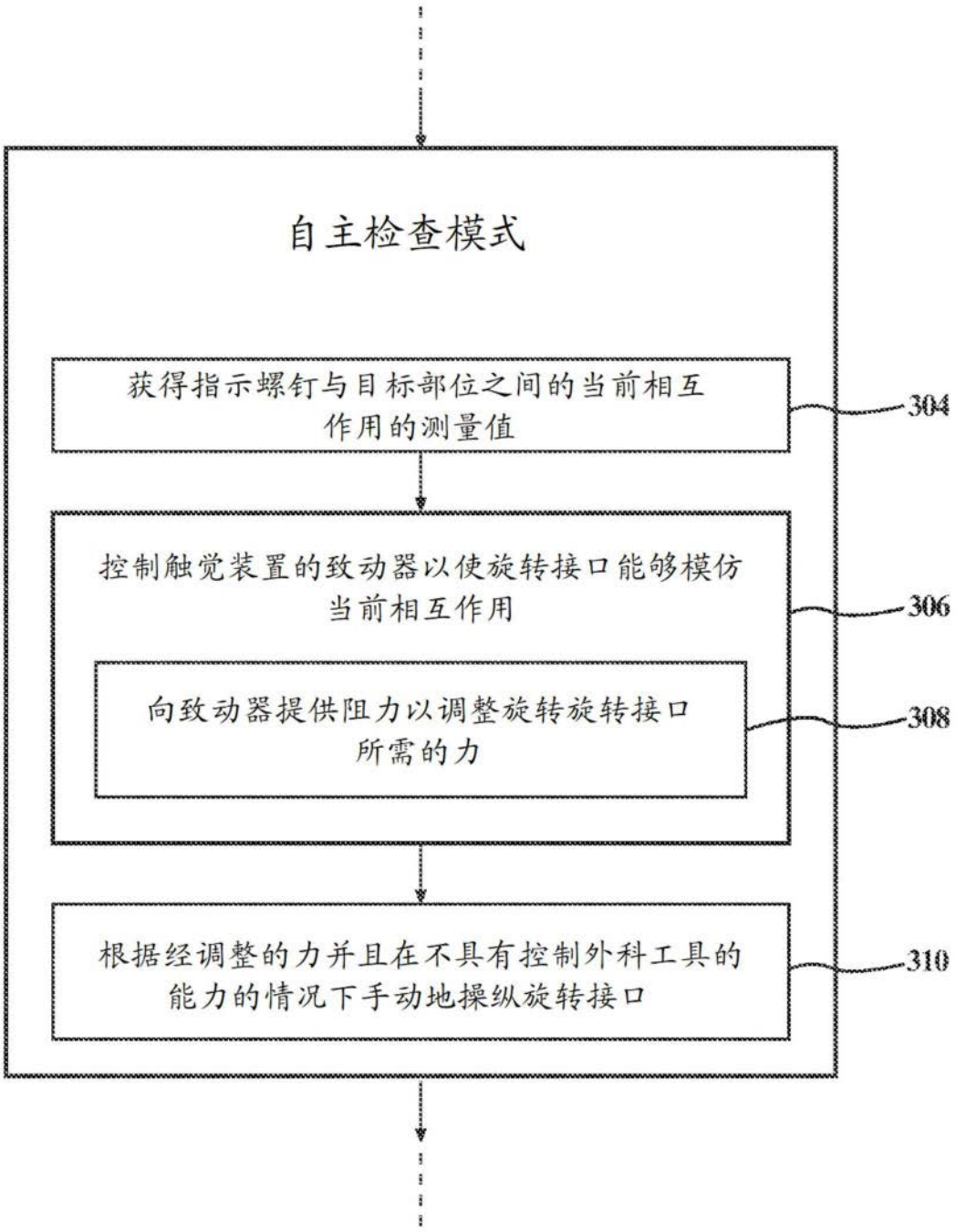

自主检查模式
获得指示螺钉与目标部位之间的当前相互作用的测量值
304
控制触觉装置的致动器以使旋转接口能够模仿当前相互作用
306
向致动器提供阻力以调整旋转旋转接口所需的力
308
根据经调整的力并且在不具有控制外科工具的能力的情况下手动地操纵旋转接口
310

图15B

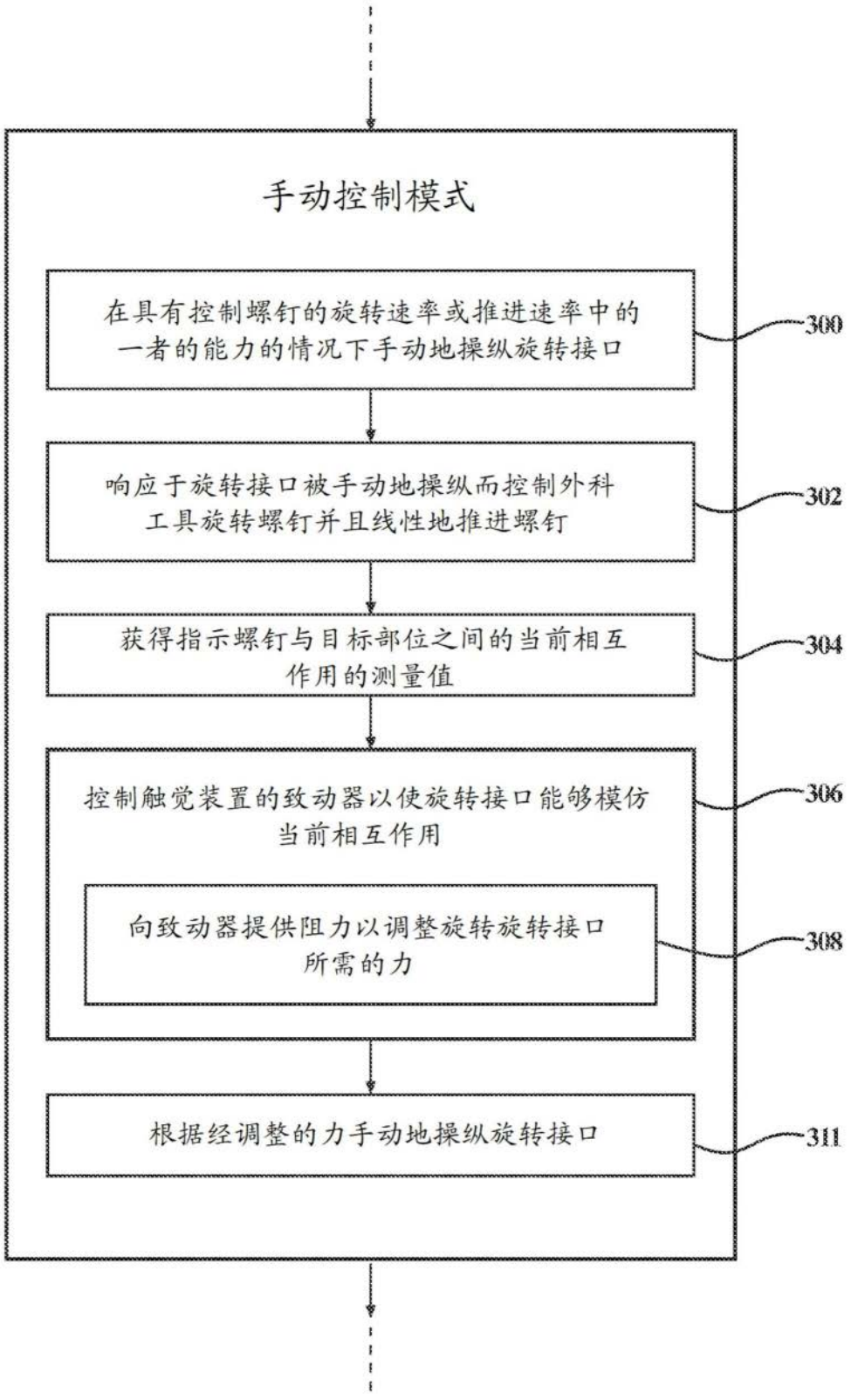

手动控制模式
在具有控制螺钉的旋转速率或推进速率中的一者的能力的情况下手动地操纵旋转接口
300
响应于旋转接口被手动地操纵而控制外科工具旋转螺钉并且线性地推进螺钉
302
获得指示螺钉与目标部位之间的当前相互作用的测量值
304
控制触觉装置的致动器以使旋转接口能够模仿当前相互作用
306
向致动器提供阻力以调整旋转旋转接口所需的力
308
根据经调整的力手动地操纵旋转接口
311

图15C

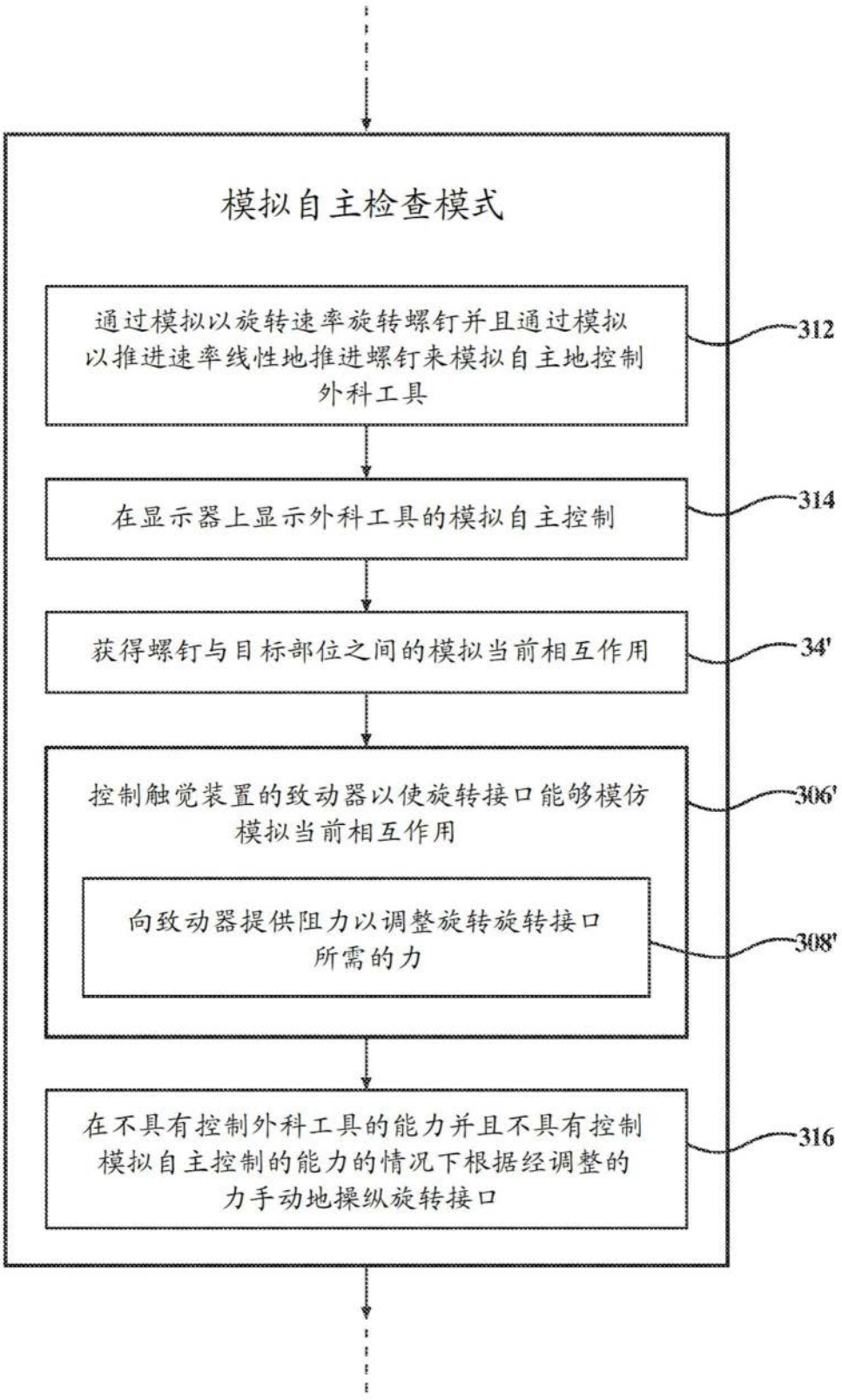

模拟自主检查模式
通过模拟以旋转速率旋转螺钉并且通过模拟以推进速率线性地推进螺钉来模拟自主地控制外科工具
312
在显示器上显示外科工具的模拟自主控制
314
获得螺钉与目标部位之间的模拟当前相互作用
34'
控制触觉装置的致动器以使旋转接口能够模仿模拟当前相互作用
306'
向致动器提供阻力以调整旋转旋转接口所需的力
308'
在不具有控制外科工具的能力并且不具有控制模拟自主控制的能力的情况下根据经调整的力手动地操纵旋转接口
316

图15D

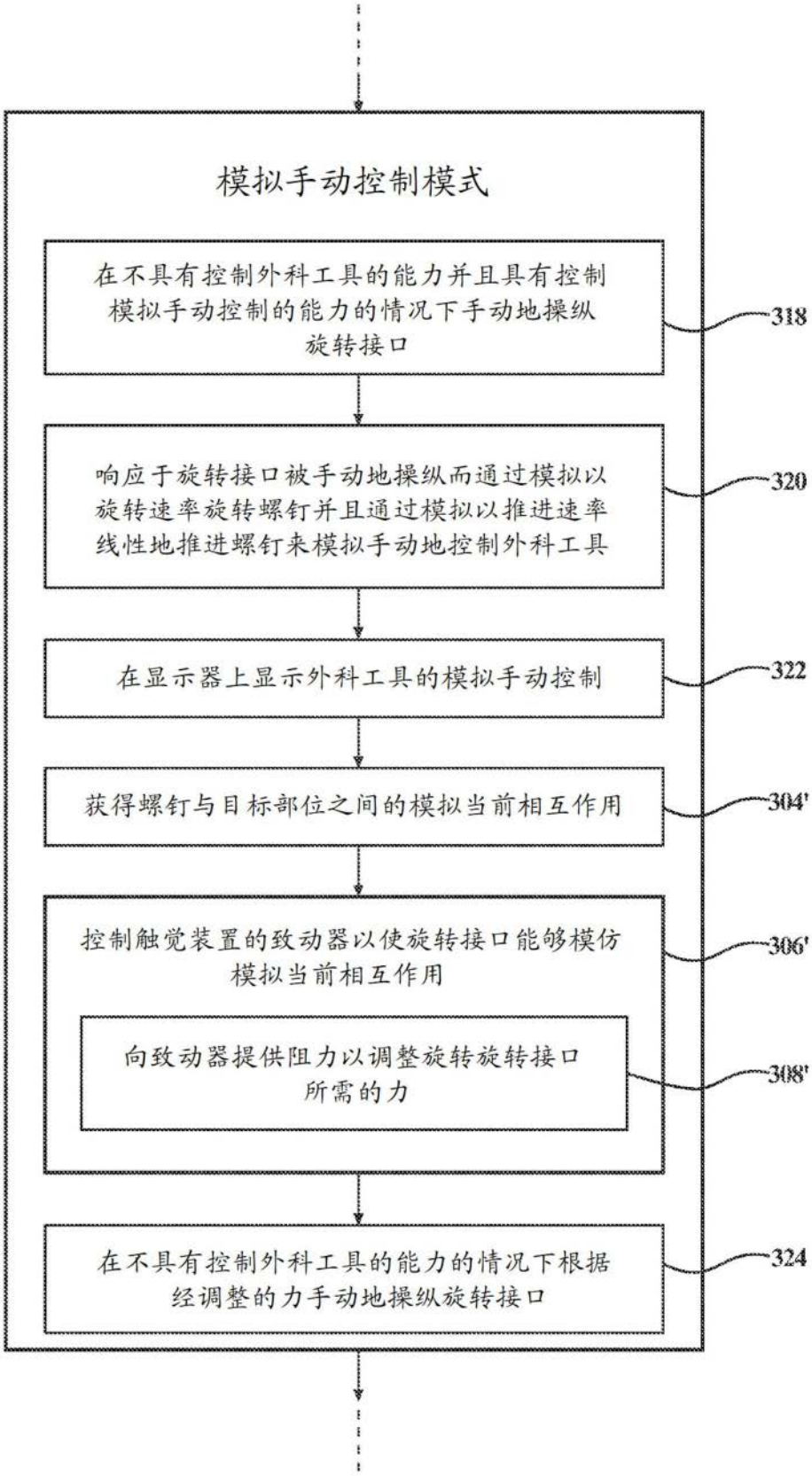

模拟手动控制模式
在不具有控制外科工具的能力并且具有控制模拟手动控制的能力的情况下手动地操纵旋转接口
318
响应于旋转接口被手动地操纵而通过模拟以旋转速率旋转螺钉并且通过模拟以推进速率线性地推进螺钉来模拟手动地控制外科工具
320
在显示器上显示外科工具的模拟手动控制
322
获得螺钉与目标部位之间的模拟当前相互作用
304'
控制触觉装置的致动器以使旋转接口能够模仿模拟当前相互作用
306'
向致动器提供阻力以调整旋转旋转接口所需的力
308'
在不具有控制外科工具的能力的情况下根据经调整的力手动地操纵旋转接口
324

图15E

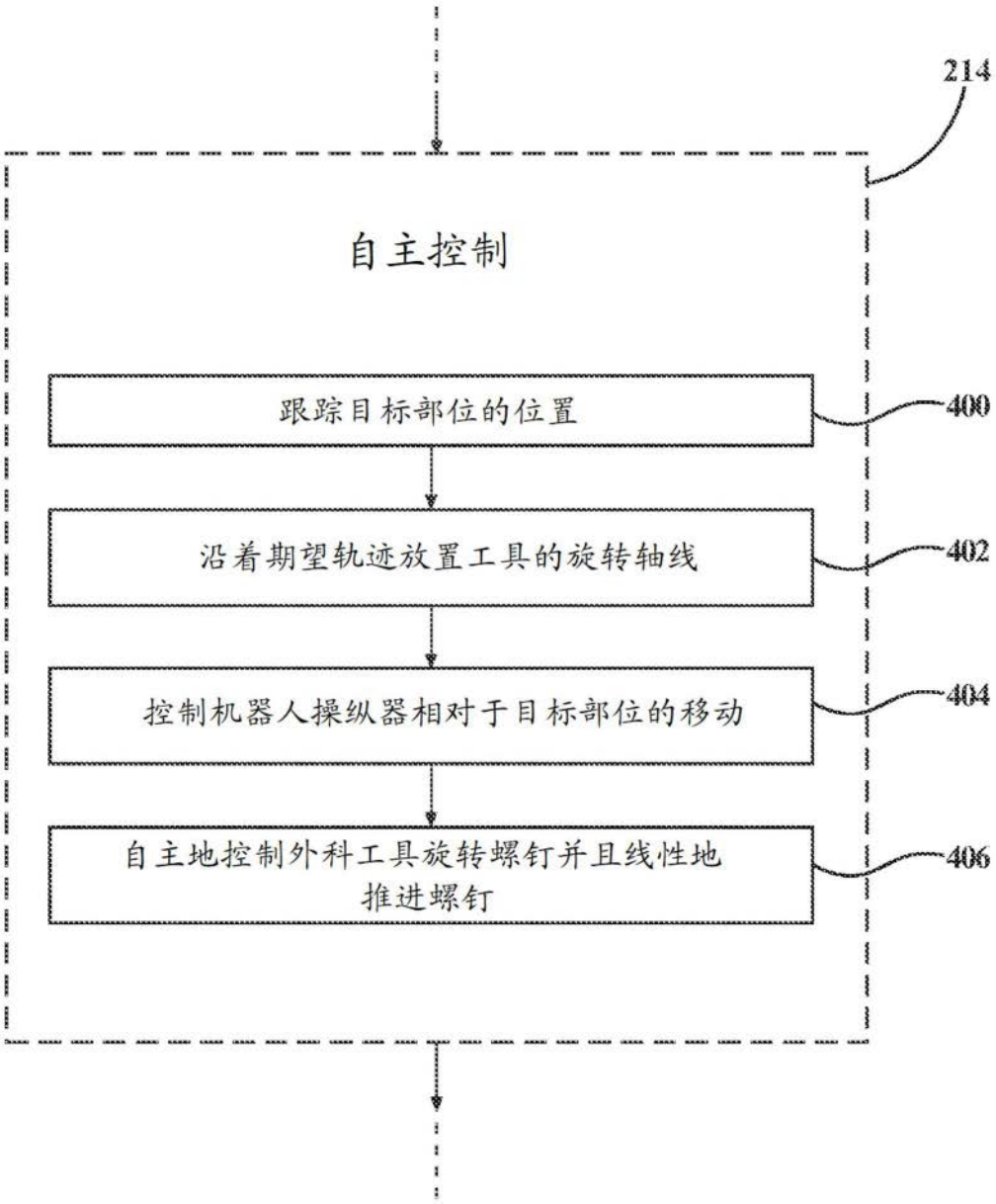

214
自主控制
跟踪目标部位的位置
400
沿着期望轨迹放置工具的旋转轴线
402
控制机器人操纵器相对于目标部位的移动
404
自主地控制外科工具旋转螺钉并且线性地推进螺钉
406

图15F