



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115334996 A

(43) 申请公布日 2022. 11. 11

(21) 申请号 202180025532.9

(22) 申请日 2021.03.29

(30) 优先权数据

2004753.6 2020.03.31 GB

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2022.09.28

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/GB2021/050766 2021.03.29

(87) PCT国际申请的公布数据

W02021/198662 EN 2021.10.07

(71) 申请人 CMR外科有限公司

地址 英国剑桥

(72) 发明人 爱德华·约翰·莫特拉姆

格雷厄姆·约翰·威奇

(74) 专利代理机构 北京东方亿思知识产权代理

有限责任公司 11258

专利代理师 桑敏

(51) Int.Cl.

A61B 34/30 (2006.01)

A61B 90/00 (2006.01)

B25J 9/16 (2006.01)

B25J 13/08 (2006.01)

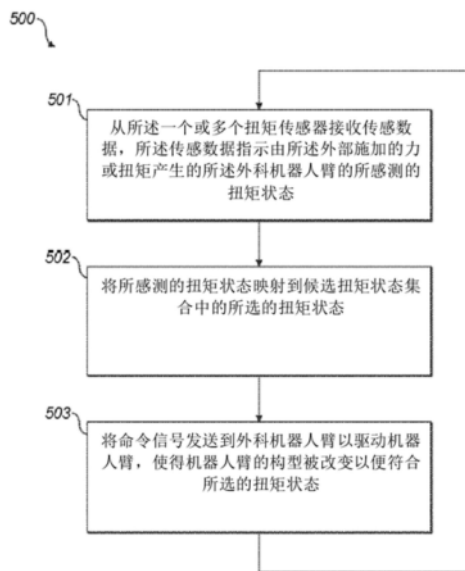
权利要求书3页 说明书18页 附图7页

(54) 发明名称

外科机器人的控制系统

(57) 摘要

一种外科机器人臂的控制系统,所述外科机器人臂包括一系列关节和一个或多个扭矩传感器,通过所述一系列关节能够改变所述外科机器人臂的构型,每个扭矩传感器被配置成感测所述一系列关节中的关节处的扭矩,所述控制系统被配置成通过以下操作来控制所述外科机器人臂的所述构型响应于外部施加的力或扭矩而被改变:从所述一个或多个扭矩传感器接收传感数据,所述传感数据指示由所述外部施加的力或扭矩产生的所述外科机器人臂的所感测的扭矩状态;将所感测的扭矩状态映射到候选扭矩状态集合中的所选的扭矩状态;以及将命令信号发送到所述外科机器人臂以驱动所述机器人臂,使得所述机器人臂的所述构型被改变以便符合所选的扭矩状态。



1. 一种外科机器人臂的控制系统,所述外科机器人臂包括一系列关节和一个或多个扭矩传感器,通过所述一系列关节能够改变所述外科机器人臂的构型,每个扭矩传感器被配置成感测所述一系列关节中的关节处的扭矩,所述控制系统被配置成通过以下操作来控制所述外科机器人臂的所述构型响应于外部施加的力或扭矩而被改变:

从所述一个或多个扭矩传感器接收传感数据,所述传感数据指示由所述外部施加的力或扭矩产生的所述外科机器人臂的所感测的扭矩状态;

将所感测的扭矩状态映射到候选扭矩状态集合中的所选的扭矩状态;以及

将命令信号发送到外科机器人臂以驱动机器人臂,使得机器人臂的构型被改变以便符合所选的扭矩状态。

2. 如权利要求1所述的控制系统,所述控制系统还被配置成迭代地执行控制回路,所述控制回路包括所述接收步骤、所述映射步骤和所述发送步骤。

3. 如权利要求1或2所述的控制系统,其中所感测的扭矩状态可由包括从所述一个或多个扭矩传感器中的每个扭矩传感器接收到的扭矩数据的列向量来表示。

4. 如权利要求1至3中任一项所述的控制系统,其中所述控制系统被配置成:

确定对应于所选的扭矩状态的一个或多个力,每个力指示由于所述外部施加的力或扭矩而作用于所述机器人臂的点处的力,所述力相对于针对所述点定义的方向来定义。

5. 如权利要求4所述的控制系统;其中所述控制系统被配置成针对每个所确定的力:

确定所述外科机器人臂的所述点的位置,由此将通过将所述点移动到所确定的位置来补偿作用于所述点处的所述力;以及

将命令信号发送到所述外科机器人臂,以将所述外科机器人臂的所述点驱动到所确定的位置。

6. 如权利要求4或5所述的控制系统,其中所述控制系统被配置成确定:

作用于所述机器人臂的单个点处的力;以及/或者

作用于所述机器人臂的 n 个点中的每个点处的至少一个力,其中 $n>1$ 。

7. 如任一前述权利要求所述的控制系统,其中所述候选扭矩状态集合中的每个扭矩状态与相应的一个或多个力对应,并且其中每个扭矩状态是其相应的一个或多个力和雅可比矩阵的乘积。

8. 如权利要求7所述的控制系统,其中所述候选扭矩状态集合中的每个扭矩状态是所述雅可比矩阵的图像的元素。

9. 如从属于权利要求6时的权利要求7或8所述的控制系统,其中:

当所述控制系统被配置成确定作用于单个点处的力时,所述雅可比矩阵是第一雅可比矩阵,所述第一雅可比矩阵表示所述一系列关节中的一个或多个关节的关节角度的变化将如何改变所述机器人臂的所述单个点的所述位置。

10. 如从属于权利要求6时的权利要求7或8所述的控制系统,其中:

当所述控制系统被配置成确定作用于 n 个点中的每个点处的至少一个力时,所述雅可比矩阵是第二雅可比矩阵,所述第二雅可比矩阵表示所述一系列关节中的一个或多个关节的关节角度的变化将如何改变所述 n 个点中的每个点的所述位置。

11. 如权利要求10所述的控制系统,其中所述第二雅可比矩阵表示所述一系列关节中的关节的子集的每个关节的关节角度的变化将如何改变所述 n 个点中的第一点的所述位

置,以及所述一系列关节中的关节的不同子集的每个关节的关节角度的变化将如何改变所述n个点中的第二点的所述位置。

12. 如权利要求6至11中任一项所述的控制系统,其中所述控制系统被配置成:

依据所述机器人臂的当前操作模式,根据以下来确定是否控制所述外科机器人臂的所述构型响应于外部施加的力或扭矩而被改变:

(i) 作用于所述机器人臂的单个点处的力;或者

(ii) 作用于所述机器人臂的所述n个点中的每个点处的至少一个力。

13. 如从属于权利要求9和10时的权利要求6至11中任一项所述的控制系统,其中所述控制系统被配置成:

计算所述第二雅可比矩阵的行列式,以便估计所述外科机器人臂的当前构型;

在使用所述第一雅可比矩阵确定的作用于所述机器人臂的单个点处的力与使用所述第二雅可比矩阵确定的作用于所述机器人臂的n个点中的相同点处的力之间进行插值,其中依据所述第二雅可比矩阵的所计算行列式对所述力进行加权;

根据插值力来控制所述手术机器人臂的所述构型响应于外部施加的力或扭矩而被改变。

14. 如从属于权利要求4至6中任一项时的权利要求7至13中任一项所述的控制系统,所述控制系统还被配置成:

使用所述雅可比矩阵的穆尔-彭罗斯伪逆来将所感测的扭矩状态映射到所选的扭矩状态,并且确定对应于所选的扭矩状态的所述一个或多个力。

15. 如任一前述权利要求所述的控制系统,其中所选的扭矩状态是所述候选扭矩状态集合中与所感测的扭矩状态具有最低欧几里德距离的所述扭矩状态,或者其中所选的扭矩状态是所述候选扭矩状态集合中与所感测的扭矩状态具有最低最小平方距离的所述扭矩状态。

16. 如任一前述权利要求所述的控制系统,所述控制系统还被配置成依据与每个扭矩传感器相关联的所确定噪声干扰级别,对从所述一个或多个扭矩传感器中的每个扭矩传感器接收到的所述传感数据进行加权,使得将较大权重应用于从被确定为与较低级别的噪声干扰相关联的扭矩传感器接收到的传感数据。

17. 如任一前述权利要求所述的控制系统,所述外科机器人臂还包括在所述机器人臂的远侧端部处的用于外科器械的附件,并且其中所述控制系统被配置成促使所述机器人臂在以下模式下操作:

外科模式,其中附接到所述附件的外科器械在患者身体内部;和

器械缩回模式,其中所述外科器械能够响应于所述外部施加的力或扭矩而从患者身体中缩回。

18. 如从属于权利要求7至14中任一项时的权利要求17所述的控制系统,其中在所述器械缩回模式下,所述控制系统被配置成将所述雅可比矩阵乘以表示与所述外科器械的纵轴平行的轴的方向的列向量,使得所述一个或多个力包括沿与所述外科器械的所述纵轴平行的所述轴作用的力。

19. 如任一前述权利要求所述的控制系统,其中所述外科机器人臂还包括一个或多个电动机集合,所述集合中的每个电动机被配置成响应于由所述控制系统发送的所述命令信

号而驱动所述一系列关节中的关节。

20. 一种控制外科机器人臂的方法,所述外科机器人臂包括一系列关节和一个或多个扭矩传感器,通过所述一系列关节能够改变所述外科机器人臂的构型,每个扭矩传感器被配置成感测所述一系列关节中的关节处的扭矩,所述方法包括通过以下操作来控制所述外科机器人臂的所述构型响应于外部施加的力或扭矩而被改变:

从所述一个或多个扭矩传感器接收传感数据,所述传感数据指示由所述外部施加的力或扭矩产生的所述外科机器人臂的所感测的扭矩状态;

将所感测的扭矩状态映射到候选扭矩状态集合中的所选的扭矩状态;以及

将命令信号发送到外科机器人臂以驱动机器人臂,使得机器人臂的构型被改变以便符合所选的扭矩状态。

外科机器人的控制系统

背景技术

[0001] 本发明涉及一种外科机器人臂的控制系统。

[0002] 可使用外科机器人系统执行侵入性医疗手术。图1展示典型外科机器人系统。展示外科机器人系统100,所述外科机器人系统对定位在手术台103上的患者102执行侵入性医疗手术。外科机器人系统100包括臂101。臂101携带外科工具106,诸如用于执行切割或抓取的工具或成像装置,诸如内窥镜。臂101可操纵其携带的外科工具,以便执行侵入性手术的各方面。

[0003] 在侵入性外科手术之前,手术室工作人员的成员(例如床边护士)通常帮助设置外科机器人系统100。在侵入性手术期间,外科机器人系统通常由外科医生从远程控制台(未展示)进行控制。在侵入性医疗手术期间,通常还需要手术室工作人员的成员在手术台103附近——使得其可以照料患者(例如清洁外科手术部位)。在侵入性外科手术之后,手术室工作人员的成员通常帮助停止使用外科机器人系统100。

[0004] 因此,提高手术室工作人员的成员可在侵入性医疗手术之前、期间和之后与外科机器人系统交互的安全性和容易性至关重要。

发明内容

[0005] 根据本发明的第一方面,提供一种外科机器人臂的控制系统,所述外科机器人臂包括一系列关节和一个或多个扭矩传感器,通过所述一系列关节能够改变所述外科机器人臂的构型,每个扭矩传感器被配置成感测所述一系列关节中的关节处的扭矩,所述控制系统被配置成通过以下操作来控制所述外科机器人臂的所述构型响应于外部施加的力或扭矩而被改变:从所述一个或多个扭矩传感器接收传感数据,所述传感数据指示由所述外部施加的力或扭矩产生的所述外科机器人臂的所感测的扭矩状态;将所感测的扭矩状态映射到候选扭矩状态集合中的所选的扭矩状态;以及将命令信号发送到所述外科机器人臂以驱动所述机器人臂,使得所述机器人臂的所述构型被改变以便符合所选的扭矩状态。

[0006] 所述控制系统还可被配置成迭代地执行控制回路,所述控制回路包括所述接收步骤、所述映射步骤和所述发送步骤。

[0007] 所感测的扭矩状态可由包括从一个或多个扭矩传感器中的每个扭矩传感器接收到的扭矩数据的列向量来表示。

[0008] 所述控制系统可被配置成:确定对应于所选的扭矩状态的一个或多个力,每个力指示由于所述外部施加的力或扭矩而作用于所述机器人臂的点处的力,所述力相对于针对所述点定义的方向来定义。

[0009] 对于每个所确定的力,所述控制系统可被配置成:确定所述外科机器人臂的所述点的位置,由此将通过将所述点移动到所确定的位置来补偿作用于所述点处的所述力;以及将命令信号发送到所述外科机器人臂,以将所述外科机器人臂的所述点驱动到所确定的位置。

[0010] 所述控制系统可被配置成确定:作用于所述机器人臂的单个点处的力;以及/或者

作用于所述机器人臂的 n 个点中的每个点处的至少一个力,其中 $n>1$ 。

[0011] 所述候选扭矩状态集合中的每个扭矩状态可与相应的一个或多个力对应,并且其中每个扭矩状态是其相应的一个或多个力和雅可比矩阵的乘积。

[0012] 候选扭矩状态集合中的每个扭矩状态可以是雅可比矩阵的图像的元素。

[0013] 当所述控制系统被配置成确定作用于单个点处的力时,所述雅可比矩阵可以是第一雅可比矩阵,所述第一雅可比矩阵表示所述一系列关节中的一个或多个关节的关节角度的变化将如何改变所述机器人臂的所述单个点的所述位置。

[0014] 当所述控制系统被配置成确定作用于 n 个点中的每个点处的至少一个力时,所述雅可比矩阵可以是第二雅可比矩阵,所述第二雅可比矩阵表示所述一系列关节中的一个或多个关节的关节角度的变化将如何改变所述 n 个点中的每个点的所述位置。

[0015] 所述第二雅可比矩阵可表示所述一系列关节中的关节的子集的每个关节的关节角度的变化将如何改变所述 n 个点中的第一点的所述位置,以及所述一系列关节中的关节的不同子集的每个关节的关节角度的变化将如何改变所述 n 个点中的第二点的所述位置。

[0016] 所述控制系统可被配置成:依据所述机器人臂的当前操作模式,根据以下来确定是否控制所述外科机器人臂的所述构型响应于外部施加的力或扭矩而被改变:(i) 作用于所述机器人臂的单个点处的力;或者(ii) 作用于所述机器人臂的所述 n 个点中的每个点处的至少一个力。

[0017] 所述控制系统可被配置成:计算所述第二雅可比矩阵的行列式,以便估计所述外科机器人臂的当前构型;在使用所述第一雅可比矩阵确定的作用于所述机器人臂的单个点处的力与使用所述第二雅可比矩阵确定的作用于所述机器人臂的 n 个点中的相同点处的力之间进行插值,其中依据所述第二雅可比矩阵的所计算行列式对所述力进行加权;根据插值力来控制所述手术机器人臂的所述构型响应于外部施加的力或扭矩而被改变。

[0018] 所述控制系统还可被配置成:使用所述雅可比矩阵的穆尔-彭罗斯伪逆来将所感测的扭矩状态映射到所选的扭矩状态,并且确定对应于所选的扭矩状态的所述一个或多个力。

[0019] 所选的扭矩状态可以是候选扭矩状态集合中与所感测的扭矩状态具有最低欧几里德距离的扭矩状态。

[0020] 所选的扭矩状态可以是候选扭矩状态集合中与所感测的扭矩状态具有最低最小平方距离的扭矩状态。

[0021] 所述控制系统还可被配置成依据与每个扭矩传感器相关联的所确定噪声干扰级别,对从所述一个或多个扭矩传感器中的每个扭矩传感器接收到的所述传感数据进行加权,使得将较大权重应用于从被确定为与较低级别的噪声干扰相关联的扭矩传感器接收到的传感数据。

[0022] 所述外科机器人臂还可包括在所述机器人臂的远侧端部处的用于外科器械的附件,并且所述控制系统可被配置成促使所述机器人臂在以下模式下操作:外科模式,其中附接到所述附件的外科器械在患者身体内部;和器械缩回模式,其中所述外科器械能够响应于所述外部施加的力或扭矩而从所述患者身体中缩回。

[0023] 在所述器械缩回模式下,所述控制系统可被配置成将所述雅可比矩阵乘以表示与所述外科器械的所述纵轴平行的轴的方向的列向量,使得所述一个或多个力包括沿与所述

外科器械的所述纵轴平行的轴作用的力。

[0024] 所述外科机器人臂还可包括一个或多个电动机集合,所述集合中的每个电动机被配置成响应于由所述控制系统发送的所述命令信号而驱动所述一系列关节中的关节。

[0025] 根据本发明的第二方面,提供一种控制外科机器人臂的方法,所述外科机器人臂包括一系列关节和一个或多个扭矩传感器,通过所述一系列关节能够改变所述外科机器人臂的构型,每个扭矩传感器被配置成感测所述一系列关节中的关节处的扭矩,所述方法包括通过以下操作来控制所述外科机器人臂的所述构型响应于外部施加的力或扭矩而被改变:从所述一个或多个扭矩传感器接收传感数据,所述传感数据指示由所述外部施加的力或扭矩产生的所述外科机器人臂的所感测的扭矩状态;将所感测的扭矩状态映射到候选扭矩状态集合中的所选的扭矩状态;以及将命令信号发送到所述外科机器人臂以驱动所述机器人臂,使得所述机器人臂的所述构型被改变以便符合所选的扭矩状态。

附图说明

[0026] 现在将参考附图借助于示例来描述本发明。在附图中:

[0027] 图1展示典型外科机器人系统。

[0028] 图2展示外科机器人系统。

[0029] 图3展示外科机器人系统的外科机器人臂。

[0030] 图4是展示第一控制回路的流程图,所述第一控制回路由控制系统执行以响应于外部施加的力或扭矩而改变外科机器人臂的构型。

[0031] 图5是展示第二控制回路的流程图,所述第二控制回路由控制系统执行以响应于外部施加的力或扭矩而改变外科机器人臂的构型。

[0032] 图6是以二维形式展示所感测的扭矩状态到候选扭矩状态集合中的所选的扭矩状态的映射的示意图。

[0033] 图7是展示控制回路的流程图,所述控制回路由控制系统执行以在器械缩回模式下响应于外部施加的力或扭矩而改变外科机器人臂的构型。

具体实施方式

[0034] 以下描述被呈现以使得本领域的任何技术人员能够制造和使用本发明,并且是在特定应用的背景下提供的。对所公开实施方案的各种修改对于本领域技术人员来说将是显而易见的。

[0035] 在不脱离本发明的精神和范围的情况下,本文中定义的一般原理可应用于其他实施方案和应用。因此,本发明并不旨在局限于所展示的实施方案,而是符合与本文中公开的原理和特征相一致的最宽范围。

[0036] 图2展示外科机器人系统。图2展示对患者202执行侵入性医疗手术的外科机器人系统200。患者202定位在手术台203上。外科机器人系统100包括机器人臂201。尽管图2中展示了一个机器人臂201,但应理解,外科机器人系统可包括任何数量的机器人臂。机器人臂201在其近侧端部处从基座209延伸。机器人臂201包括多个关节204,可通过所述多个关节改变机器人臂的构型。

[0037] 机器人臂201包括在其远侧端部处的用于外科器械206的附件。外科器械可具有细

长柄,所述细长柄在其远侧端部处具有端部执行器,以用于执行侵入性手术的各方面。外科器械的细长柄可限定其纵轴。例如,外科器械可以是切割或抓取装置或成像装置(诸如内窥镜)。外科器械206可插入患者身体202中。外科器械206可经由端口插入患者身体202中。

[0038] 机器人臂201的构型可响应于在远程外科医生控制台220处接收到的输入而被远程控制。外科医生可向远程控制台220提供输入。远程外科医生控制台包括一个或多个外科医生输入装置223。例如,这些外科医生输入装置可采取手动控制器和/或脚踏板的形式。外科医生控制台还包括显示器221。

[0039] 控制系统224将外科医生控制台220连接到外科机器人臂201。控制系统从外科医生输入装置接收输入,并且将这些输入转换成控制信号,以移动机器人臂201的关节和外科器械206。控制系统224将这些控制信号发送到机器人臂,其中对应关节相应地被驱动。控制系统224可与远程外科医生控制台220和机器人臂201分离。控制系统224可与远程外科医生控制台220并置。控制系统224可与机器人臂201并置。控制系统224可分布在远程外科医生控制台220与机器人臂201之间。

[0040] 机器人臂201的构型可响应于直接施加到所述机器人臂的外部力而被控制。例如,床边团队的成员(例如手术室护士)可直接向机器人臂施加力或扭矩(例如通过推动机器人臂的关节)。此行为将在本文中进一步详细描述。

[0041] 图3展示机器人臂301的示例。图2中所展示的机械臂201可具有与图3中所展示的机械臂301相同的特征。

[0042] 机器人臂包括基座309。机器人臂具有一系列刚性臂构件。所述一系列中的每个臂构件通过相应关节304a至304g接合到前一臂构件。关节304a至304e和304g是旋转关节。关节304f由两个旋转关节构成,所述两个旋转关节的轴彼此正交,如在虎克(Hooke's)或万向节中那样。关节304e至304g的轴相交的点可称为“腕部”。机器人臂可与图3的臂不同地接合。例如,关节304d可省略,并且/或者关节304f可准许绕单个轴旋转。机器人臂可包括一个或多个关节,所述一个或多个关节准许关节的相应侧面之间除了旋转之外的运动,诸如棱柱形关节,器械附件可通过所述棱柱形关节相对于机器人臂的更接近部分线性滑动。

[0043] 关节被构造成使得机器人臂的构型可被改变,从而允许机器人臂的远侧端部330移动到大体上以335示出的三维工作空间中的任意点。实现这一点的一种方式是在图3中所示出的布置。至少在区域335内,关节的其他组合和构型可实现类似运动范围。可存在更多或更少的臂构件。

[0044] 机器人臂330的远侧端部具有附件316,可借助于所述附件而可释放地附接外科器械306。外科器械具有线性刚性柄361以及在柄的远侧端部处的端部执行器362。端部执行器362包括用于进行手术的装置,例如切割、抓取或成像装置。如本文中所描述,末端关节304g可以是旋转关节。外科器械306和/或附件316可被构造成使得器械与机器人臂的末端关节304g的旋转轴平行地线性延伸。在此示例中,器械沿与关节304g的旋转轴重合的轴延伸。

[0045] 机器人臂的关节304e和304f被构造成使得利用保持在工作体积335中的任意位置处的机器人臂330的远侧端部,外科器械306可在圆锥内的任意方向上被引导。这种圆锥大体上以336示出。实现这一点的一种方式是在臂的末端部分包括一对关节304e与304f,所述一对关节的轴如上文所描述那样相互布置。事实上,在关节304e是旋转关节并且关节304f由两个旋转关节构成(如本文中所描述)的示例中,此关节布置可准许外科器械在球形表面

(未展示)上在任意方向上被引导。其他机制可实现类似结果。例如,如果器械在不平行于关节304g的轴的方向上延伸,则关节304g可能影响器械的姿态。

[0046] 外科器械306可通过端口317插入患者身体中。端口317可包括中空管317a。中空管317a可穿过患者的外部组织302,以便在插入和移除外科器械时以及在于患者身体内操纵器械时限制对那些组织的破坏。端口317可包括套环317b。套环317b可防止端口317穿过患者的外部组织302插入太深。

[0047] 机器人臂301包括一系列电动机310a至310h。除了由两个电动机伺服的复合关节304f之外,每个电动机都被布置成驱动绕机器人臂的相应关节的旋转。电动机由控制系统(诸如图2中所展示的控制系統224)控制。控制系统可包括中央控制器、一个或多个臂控制器和一个或多个关节控制器。中央控制器可对机器人外科系统(例如包括一个或多个机器人臂)施加控制。每个机器人臂控制器可对机器人臂施加控制。每个关节控制器可对机器人臂的一系列关节中的一个或多个关节施加控制。中央控制器、臂控制器和关节控制器中的每一者可包括处理器和存储器。存储器以非瞬态方式存储软件代码,所述软件代码可由处理器执行,以促使处理器以本文中所描述的方式输出控制信号。在其他示例中,控制系统可包括被配置成执行本文中所描述的中央控制器、一个或多个臂控制器和一个或多个关节控制器的功能的单个控制器、一对控制器或任何其他数量的控制器。

[0048] 机器人臂301可包括一系列传感器307a至307h和308a至308h。对于每个关节,这些传感器可包括用于感测关节的旋转位置的一个或多个位置传感器307a至307h,以及用于感测绕关节旋转轴施加的力或扭矩的力或扭矩传感器308a至308h。复合关节304f可具有两组传感器。用于关节的位置和/或力或扭矩传感器可与用于所述关节的电动机集成在一起。在示例中,每个关节可包括两个位置传感器,所述两个位置传感器包括在电动机处的第一位置传感器以及直接在关节处的第二位置传感器。机器人臂还可包括一个或多个电流传感器,以测量在电动机310a至310h中的一个或多个电动机处提供的电流,以便确保实际供应给电动机的电流与所述电动机的控制系统所需的电流相对应。传感器的输出被传递到控制系统,所述输出在所述控制系统中形成处理器的输入。

[0049] 控制系统从位置传感器307a至307h以及力或扭矩传感器308a至308h接收传感数据。根据位置传感器,控制系统可确定机器人臂的当前构型。例如,控制系统可针对机器人臂的每个元件(例如关节和臂构件)和外科器械存储其质量、其质心与机器人臂的前一关节的距离以及质心与前一关节的位置传感器的位置输出之间的关系。机器人臂的当前构型可通过其他手段来推断。使用所述信息,控制系统可针对机器人臂的当前构型为对机器人臂的部件的重力作用建模,并且估计由重力对机器人臂的每个关节产生的力或扭矩。控制系统随后可驱动每个关节的电动机310a至310h,以施加与所计算重力正好相反的力或扭矩,使得不管重力作用如何,机器人臂的构型都得以维持。

[0050] 手术室工作人员的成员(例如手术室护士)可在侵入性医疗手术之前、期间和之后与外科机器人臂301进行交互。为了提高这类交互发生的容易性和安全性,控制系统(例如如图2中的控制系统224)可响应于由手术室工作人员的成员直接向机器人臂施加的力(例如通过推动机器人臂的关节)而控制机器人臂301的构型。控制系统224被配置成从力或扭矩传感器308a至308h接收传感数据,所述传感数据指示由外部施加的力或扭矩在外科机器人臂处产生的所感测的力或扭矩;处理所接收传感数据;以及将命令信号发送到外科机器人

臂以驱动机器人臂,使得机器人臂的构型被改变以便符合外部施加的力或扭矩。

[0051] 控制系统可促使外科机器人臂301在多种不同模式下操作——其中机器人臂对外部施加的力或扭矩的命令响应是不同的。为了实现这一点,在这些模式的每个模式中,由控制系统对所接收传感数据执行的处理可以是不同的。这类模式的三个示例是顺从模式、外科模式和器械缩回模式。这些模式将在本文中进一步详细描述。

[0052] 顺从模式

[0053] 在顺从模式中,控制系统命令外科机器人臂,使得其构型可响应于外部施加的力或扭矩而被改变。以此方式,手术室护士可将机器人臂的任何部分推到或拉到所需位置,并且所述部分将移动到所需位置并且停留在所述位置,而不管对所述部分以及依靠于所述部分的任何部分的重力作用如何。机器人臂在此模式下的行为可称为顺从行为。手术室工作人员的成员可在侵入性医疗手术之前或之后(例如在手术室设置或清理期间)使用顺从模式。如本文中进一步描述,控制系统也可促使机器人臂的某些部分在侵入性医疗手术期间呈现类顺从行为。

[0054] 例如,顺从模式可用以将外科器械插入患者身体中的端口317中。也就是说,顺从模式可用以将外科器械的端部执行器362插入端口317中。参考图3,操作者(例如手术室团队的成员)可抓握机器人臂301和外科器械306中的一者或两者。操作者随后可施加外部力或扭矩,控制系统通过改变机器人臂301的构型来响应所述外部力或扭矩,使得器械的柄361的细长轴与穿过端口317的中空管317a的通道大致对准。操作者随后可向机器人臂和/或器械施加外部力(例如推动或拉动)或扭矩(例如扭转),控制系统通过大致平行于其细长轴移动器械并且将器械移动到端口317中的通道中来响应所述外部力或扭矩。

[0055] 图4是展示第一步骤集合的流程图,所述第一步骤集合由控制系统执行以响应于外部施加的力或扭矩而改变外科机器人臂的构型。控制系统可被配置成执行图4中所展示的步骤集合的多次迭代。也就是说,控制系统可按顺序执行步骤401、402、403和404,随后返回到步骤401以重复所述顺序。换句话说,图4是展示第一控制回路的流程图,所述第一控制回路由控制系统执行以响应于外部施加的力或扭矩而改变外科机器人臂的构型。

[0056] 在步骤401中,从机器人臂上的一个或多个力或扭矩传感器接收传感数据,所述传感数据指示由所述外部施加的力或扭矩在所述外科机器人臂的一部分处产生的所感测的力或扭矩。所接收传感数据实际上可指示由重力作用对机器人臂的部分产生的力或扭矩,以及由外科机器人臂的部分处的外部施加的力或扭矩产生的力或扭矩。所接收传感数据还可指示机器人臂的部分处的振动、惯性和/或加速度,以及由外科机器人臂的部分处的外部施加的力或扭矩产生的力或扭矩。控制系统可以能够通过通过对传感数据进行滤波来区分机器人臂的部分处的重力、外部力和振动、惯性和/或加速度。例如,低通滤波器可用以识别机器人臂的部分处的振动,因为与臂振动相关的扭矩测量值在频率上通常高于由重力和外部施加的力或扭矩产生的测量值。如本文中所描述,控制系统可针对机器人臂的当前构型为对机器人臂的部件的重力作用建模,并且从而估计由重力对机器人臂的部分产生的力或扭矩。因此,可首先调整传感数据,以便不考虑由对机器人臂的部分的重力作用以及/或者机器人臂的所述部分处的任何振动、惯性和/或加速度所产生的力或扭矩。例如,可从传感数据中减去由对机器人臂的部分的重力作用以及/或者机器人臂的部分处的振动、惯性和/或加速度所产生的力或扭矩。可替代地,可对传感数据进行数字分析(例如通过对本段中所描

述的传感数据进行滤波),其中控制系统仅考虑由外部施加的力或扭矩产生的力或扭矩。

[0057] 控制系统可独立地考虑作用于机器人臂的一系列关节中的每个关节处的力或扭矩。在此情况下,机器人臂的部分是一系列关节中的关节。

[0058] 相反,机器人臂的部分可以是相对于所述机器人臂定义的点,或相对于所述外科器械定义的点。相对于机器人臂定义的点可以在机器人臂上,或者可以不在机器人臂上,但相对于机器人臂具有固定空间关系。相对于外科器械定义的点可以在外科器械上,或者可以不在外科器械上,但相对于外科器械具有固定空间关系。例如,点可以是“腕部”。

[0059] 在机器人臂或器械的所定义点处的外部施加的力或扭矩可在机器人臂的多个关节处产生力或扭矩。因此,传感数据可包括来自多个力或扭矩传感器的所感测的力或扭矩数据,所感测的力或扭矩数据由控制系统解析,以便确定在所定义点处由外部施加的力或扭矩产生的力或扭矩。为了根据局部作用于多个关节中的每个关节处的所测量力或扭矩来确定在所定义点处的合力或扭矩,可考虑全局参考系中每个关节的旋转轴的方向。以此方式,正向运动学可用以确定在每个关节处测量的力或扭矩对作用于所定义点处的力或扭矩的贡献。控制系统还有可能同时考虑作用于所定义点和一系列关节中的某个关节处的力或扭矩。也就是说,控制系统可并行考虑:(i)作用于所定义点处的力或扭矩,以及(ii)作用于机器人臂的一系列关节中的某个关节处的力或扭矩。

[0060] 在步骤402中,使用参考位置确定所述外科机器人臂的所述部分的位置,由此将通过将所述外科机器人臂的所述部分移动到所确定的位置来补偿所感测的力或扭矩。也就是说,确定所述位置,使得通过将外科机器人臂的部分移动到所确定的位置,由外部施加的力或扭矩产生的所感测的力或扭矩将被顺从、符合或减小(例如减小到零)。

[0061] 所述参考位置是所述控制系统被配置成当没有外部力或扭矩作用于所述部分处时促使所述外科机器人臂的所述部分被驱动到达的位置。例如,参考位置可以是在施加外部力之前机器人臂的部分的位置。最初可使用位置传感器307a至307h来确定参考位置。可替代地,参考位置最初可以是使用者确定的,例如通过在外科医生输入装置处接收到的输入。此后,参考位置可迭代更新,如本文中进一步描述。

[0062] 使用所述参考位置确定所述外科机器人臂的所述部分的所述位置可包括确定满足质量-弹簧-阻尼器模型的位置,所述质量-弹簧-阻尼器模型具有取决于所述参考位置和所确定的位置的位置项。示例1和2是例示可如何执行步骤402的详细示例。

[0063] 示例1

[0064] 在示例1中,机器人臂的部分是机器人臂的一系列关节中的关节j,并且传感数据指示由外部施加的力或扭矩在所述关节处产生的所感测的扭矩 τ_j 。使用参考位置 $\theta_{j,ref}$ 确定所述关节的角位置 θ_j 。角位置 θ_j 被确定为满足以下的位置 θ_j :

$$[0065] \quad M\ddot{\theta}_j + D\dot{\theta}_j + K(\theta_j - \theta_{j,ref}) = -\tau_j \quad (\text{等式 1})$$

[0066] 其中M、D和K是常数。例如,M可以是质量常数,D可以是阻尼常数,K可以是弹簧常数。 $K(\theta_j - \theta_{j,ref})$ 是取决于所确定的位置和参考位置的位置项。 $D\dot{\theta}_j$ 是取决于所确定的位置相对于时间的一阶导数的速度项。 $M\ddot{\theta}_j$ 是取决于所确定的位置相对于时间的二阶导数的加速度项。可通过将关节j的连续角位置之间的差除以采样率来近似计算速度 $\dot{\theta}_j$ 。对于加速度

$\ddot{\theta}_j$, 可进行类似近似计算。

[0067] 一系列关节中的每个关节的角位置 θ_j 可根据示例1来独立确定。

[0068] 示例2

[0069] 在示例2中, 机器人臂的部分是所定义点p, 并且传感数据指示由外部施加的力或扭矩在所定义点处作用于一个方向上的所感测的力 f_p 。所述方向是相对于其定义所感测的力的方向。所述方向不需要对应于机器人臂的几何特征。使用参考位置 $S_{p,ref}$ 确定所述点的位置 S_p 。位置 S_p 被确定为满足下式的位置 S_p :

$$[0070] \quad M\ddot{S}_p + DS_p + K(S_p - S_{p,ref}) = -f_p \quad (\text{等式 2})$$

[0071] 其中M、D和K是常数。例如, M可以是质量常数, D可以是阻尼常数, K可以是弹簧常数。 $K(S_p - S_{p,ref})$ 是取决于所确定的位置和参考位置的位置项。 DS_p 是取决于所确定的位置相对于时间的一阶导数的速度项。 $M\ddot{S}_p$ 是取决于所确定的位置相对于时间的二阶导数的加速度项。可通过将关节j的连续角位置之间的差除以采样率来近似计算速度 $\dot{\theta}_j$ 。对于加速度

$\ddot{\theta}_j$, 可进行类似近似计算。

[0072] 返回到图4, 在步骤403中, 命令信号被发送到外科机器人臂, 以将外科机器人臂的部分驱动到所确定的位置。控制系统可使用反向运动学来确定将外科机器人的部分定位在所确定的位置中所需要的机器人臂的一系列关节中的关节的角位置。控制系统可控制电动机310a至310h中的一个或多个电动机, 以便将外科机器人臂的部分驱动到所确定的位置。以此方式, 床边工作人员的成员可能会感觉到机器人臂正在响应于其所施加的力或扭矩而自由移动——而事实上是机器人臂的电动机在驱动移动。

[0073] 返回到示例1和2, M、D和K常数可影响与机器人臂交互的手术室工作人员的成员对机器人臂的“感觉”。质量常数M是惯性项, 并且可确定控制系统响应于力或扭矩而促使机器人臂的部分加速/减速的容易程度。阻尼常数D可决定控制系统促使机器人臂的部分对变化的力或扭矩作出反应的容易程度。例如, 阻尼常数D可被设置成使得控制系统不容易促使机器人臂响应于高频力或扭矩(诸如振动)而移动——这与较低频率的力或扭矩(诸如由床边团队的成员施加的推动或扭转)形成对比。例如, 振动可能由可因摩擦引起的电动机振动而产生。不希望控制系统促使机器人臂的构型响应于由这些振动产生的高频力或扭矩而被改变。因此, 可选择M和D常数, 使得质量-弹簧-阻尼器模型充当数字滤波器——滤除这类高频力或扭矩。弹簧常数K可确定控制系统促使机器人臂的部分的位置变化所需的力或扭矩的量。M、D和K常数可由控制系统预先确定并且存储为输入。M、D和K常数可以是用户可配置的, 例如使得手术室工作人员的成员可根据其个人偏好来改变机器人臂的“感觉”。可设置不同的M、D和K常数以在不同模式下使用。

[0074] 在步骤404中, 如果所述参考位置与所确定的位置之间的差大于阈值位移, 则更新所述参考位置。如果参考位置与所确定的位置之间的差小于阈值位移, 则控制系统针对下一次或后续迭代维持在控制回路的当前迭代的步骤402中使用的参考位置。如本文中所描述, 所述参考位置是所述控制系统被配置成当没有外部力作用于所述部分处时促使所述外科机器人臂的所述部分被驱动到达的位置。因此, 以此方式, 控制系统可促使机器人臂响应

于外部施加的力或扭矩而“弹性地”或“塑性地”运转。弹性运转意指机器人臂响应于外部施加的力或扭矩而从一个位置位移,但当不再施加外部施加的力或扭矩时,机器人臂返回到所述位置。当参考位置没有在控制回路的连续迭代中被更新时,弹性运转出现。塑性运转意指机器人臂响应于外部施加的力或扭矩而从一个位置位移,并且即使当不再施加外部施加的力或扭矩时也保持所述位置。当参考位置没有在控制回路的连续迭代中被更新时,塑性运转出现。

[0075] 阈值位移可由控制系统预先确定并且存储为输入。阈值位移的大小可影响与机器人臂交互的手术室工作人员的成员对机器人臂的“感觉”。也就是说,阈值位移的大小可以是控制系统促使机器人臂响应于外部施加的扭矩或力的量而“弹性地”还是“塑性地”运转的决定因素。可设置不同的阈值位移以在不同模式下使用。阈值位移可以是用户可配置的,例如使得手术室工作人员的成员可根据其个人偏好来改变机器人臂的“感觉”。

[0076] 在示例中,返回参考示例1,阈值位移可由 $\theta_{\text{displacement}}$ 表示。如果满足以下条件,则可更新参考位置 $\theta_{j,\text{ref}}: \|\theta_{j,\text{ref}} - \theta_j\| > \theta_{\text{displacement}}$ 。参考位置 $\theta_{j,\text{ref}}$ 可被更新为等于 $\theta_j \pm \theta_{\text{displacement}}$ 。以此方式,当所感测的扭矩超过 $K \times \theta_{\text{displacement}}$ 持续阈值时间段时,机器人臂可塑性运转。 $K \times \theta_{\text{displacement}}$ 是扭矩常数,因为 K 和 $\theta_{\text{displacement}}$ 都是常数。因此,当所感测的扭矩超过扭矩常数持续阈值时间段时,机器人臂可塑性运转。阈值时间段取决于机器人臂多快到达所确定的位置(例如控制系统命令机器人臂移动的速度和加速度——这可以分别取决于本文中所描述的质量-弹簧-阻尼器模型的速度和加速度项)以及控制系统确定是否更新参考位置的频繁程度。例如,控制系统可评估参考位置是否应以5kHz的频率更新。所述频率可由控制系统预先确定并且存储为输入。所述频率可影响与机器人臂交互的手术室工作人员的成员对机器人臂的“感觉”。可设置不同频率以在不同模式下使用。

[0077] 图5是展示第二步骤集合的流程图,所述第二步骤集合由控制系统执行以响应于外部施加的力或扭矩而改变外科机器人臂的构型。参考图5描述的步骤集合可与参考图4描述的步骤集合结合使用。参考图5描述的步骤集合也可独立于参考图4描述的步骤集合来使用。

[0078] 控制系统可被配置成执行图5中所展示的步骤集合的多次迭代。也就是说,控制系统可按顺序执行步骤501、502和503,随后返回到步骤501以重复所述顺序。换句话说,图5是展示第二控制回路的流程图,所述第二控制回路由控制系统执行以响应于外部施加的力或扭矩而改变外科机器人臂的构型。

[0079] 当机器人臂包括一个或多个扭矩传感器308a至308h时,可使用参考图5描述的步骤集合,每个扭矩传感器被配置成感测机器人臂的一系列关节中的关节处的扭矩。由某些扭矩传感器提供的传感数据可能含有干扰,诸如噪声。也就是说,归因于所关注因素之外的因素,传感数据可包括多个异常值、离群值和/或错误值。因此,虽然有可能使用由扭矩传感器输出的原始传感数据(例如在图4的步骤402中),但优选的是进一步处理传感数据,以便减少其含有的噪声量。

[0080] 在步骤501中,控制系统从所述一个或多个扭矩传感器接收传感数据,所述传感数据指示由所述外部施加的力或扭矩产生的所述外科机器人臂的所感测的扭矩状态。如本文中所描述,所接收传感数据实际上可指示由重力作用对机器人臂的部分以及/或者机器人臂的所述部分处的任何振动、惯性和/或加速度产生的扭矩,以及由外部施加的力或扭矩在

外科机器人臂的部分处产生的扭矩。因此,可首先针对由对机器人臂的部分的重力作用以及/或者机器人臂的所述部分处的任何振动、惯性和/或加速度所产生的扭矩调整传感数据。

[0081] 在步骤502中,所感测的扭矩状态被映射到候选扭矩状态集合中的所选的扭矩状态。候选扭矩状态集合可以是机器人臂的可准许扭矩状态集合。候选扭矩状态集合可被编码在函数中。候选扭矩状态集合可被预先确定。

[0082] 图6是以二维形式展示所感测的扭矩状态602到候选扭矩状态集合601中的所选的扭矩状态601的映射的示意图600。在图6中,候选扭矩状态集合被编码在线性函数601中。所感测的扭矩状态602不是线性函数601的解——例如其位于函数所映射的状态集合之外。所感测的扭矩状态602被映射或被投影到作为线性函数601的解的最接近的扭矩状态——在此情况下,是所选的扭矩状态603。所选的扭矩状态603可以是候选扭矩状态集合中与所感测的扭矩状态602具有最低欧几里德 (Euclidian) 距离或最小平方距离的扭矩状态。所选的扭矩状态603可通过迭代地改进对候选扭矩状态集合中的哪个扭矩状态与所感测的扭矩状态602具有最低欧几里德距离或最小平方距离的近似计算来确定。

[0083] 所感测的扭矩状态可由包括从一个或多个扭矩传感器中的每个扭矩传感器接收到的扭矩数据的列向量来表示。扭矩状态可以任何其他适当的方式来表示。候选扭矩状态集合中的每个扭矩状态可与相应的一个或多个力对应。每个扭矩状态可以是其相应的一个或多个力和雅可比 (Jacobian) 矩阵的乘积。扭矩状态可在关节空间中进行表述。力可以笛卡尔 (cartesian) 坐标来表述。雅可比矩阵可将关节空间的变化变换成笛卡尔坐标的变化。候选扭矩状态集合中的每个扭矩状态可以是雅可比矩阵的图像的元素。矩阵的图像是所述矩阵可映射到的值集合。

[0084] 示例3是例示可如何执行步骤502的详细示例。

[0085] 示例3

[0086] 在示例3中,相对于机器人臂或相对于器械定义了单个点p。对于施加在p处的外部力f,有可能通过将虚功原理应用于净关节扭矩 τ 来推导所述力f。净关节扭矩 τ 可称为扭矩状态,并且可由包括从一个或多个扭矩传感器中的每个扭矩传感器接收到的扭矩数据的列向量来表示。根据此原理,如果将点p移动距离 $\delta \hat{f}$ 需要一系列关节中的关节j移动角度 ϑ_j ,则如果在p处在 \hat{f} 的方向上施加力,则通过关节j所见的扭矩 τ_j 与 $\frac{\delta}{\vartheta_j}$ 成比例。这可以由下式表

述: $\tau_j = \|f\| \frac{\delta}{\vartheta_j}$ 。此信息可根据下式以雅可比矩阵 J_p 进行编码:

$$[0087] \quad \boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial p_x}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial p_z}{\partial \theta_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_x}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial p_z}{\partial \theta_n} \end{pmatrix} \mathbf{f} = \mathbf{J}_p \mathbf{f} \quad (\text{等式 3})$$

[0088] 雅可比矩阵 J_p 表示净关节角度 $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ 的较小变化将移动点p的程度。可考虑机器人臂的一系列关节中的每个关节。也就是说,列向量可包括从关节304a至304g中的每个关节处的扭矩传感器接收到的扭矩数据。可替代地,可考虑机器人臂的一系

列关节中的关节的子集。例如, 可仅考虑与所定义点 p 相邻的关节——或者所定义点的任一侧的任何数量的关节。

[0089] 如本文中所描述, 指示所感测的扭矩状态 τ 的传感数据通常含有噪声干扰。因此, 存在多种所感测的扭矩状态, 其中 $\tau \notin \text{Im}(\mathbf{J}_p)$ 。也就是说, 其中所感测的扭矩状态 τ 不是雅可比矩阵 \mathbf{J}_p 的图像的元素。换句话说, 对于一个或多个所感测的扭矩状态 τ , 将没有一个力 f 是 $f = \mathbf{J}_p^{-1}\tau$ 的解。

[0090] 因此, 如本文中所描述, 所感测的扭矩状态 τ 被映射到候选扭矩状态集合中的所选的扭矩状态 $\tilde{\tau}$ 。所选的扭矩状态 $\tilde{\tau}$ 是雅可比矩阵 \mathbf{J}_p 的图像的元素。这可以被表述为 $\tilde{\tau} \in \text{Im}(\mathbf{J}_p)$ 。所选的扭矩状态 $\tilde{\tau}$ 可以是候选扭矩状态集合中与所感测的扭矩状态 τ 具有最低欧几里德距离或最小平方距离的扭矩状态。

[0091] 返回到图5, 在步骤503中, 控制系统将命令信号发送到外科机器人臂以驱动机器人臂, 使得机器人臂的构型被改变以便顺从、补偿或符合所选的扭矩状态(例如 $\tilde{\tau}$)。例如, 与处于所选的扭矩状态 $\tilde{\tau}$ 下的每个关节相关的扭矩数据 $\tilde{\tau}_n$ 可用作参考图4和示例1描述的质量-弹簧-阻尼器模型的输入。

[0092] 返回到步骤502和示例3, 可选地, 控制系统可确定对应于所选的扭矩状态的力。例如, 在已确定所选的扭矩状态 $\tilde{\tau}$ 后, 控制系统可通过求解 $f = \mathbf{J}_p^{-1}\tilde{\tau}$ 来确定对应力 f 。力 f 可表示由于外部施加的力或扭矩而作用于所定义点处的力, 所述力相对于针对所述点定义的方向 \hat{f} 来定义。通常, 雅可比矩阵 \mathbf{J}_p 将不是可逆的。这是因为, 所考虑的关节的数量 n 通常不同于笛卡尔轴的数量(例如 x, y, z), 并且因此雅可比矩阵在此情况下将不是正方形。因此, 为了求解 $f = \mathbf{J}_p^{-1}\tilde{\tau}$, 已确定 $\tilde{\tau}$, 其中雅可比矩阵不是可逆的, 可使用右反函数。还存在用于近似计算不可逆矩阵的逆的其他解决方案。

[0093] 可替代地, 雅可比矩阵的穆尔-彭罗斯(Moore-Penrose)伪逆可用以将所感测的扭矩状态映射到所选的扭矩状态, 并且在一个步骤中确定对应于所选的扭矩状态的力。例如, 力 f 可依据所感测的扭矩状态 τ 根据下式来确定:

$$f = \mathbf{J}_p^+ \tau \quad (\text{等式4})$$

[0095] 其中 \mathbf{J}_p^+ 是 \mathbf{J}_p 的穆尔-彭罗斯伪逆。

[0096] 控制系统可将命令信号发送到外科机器人臂以驱动机器人臂, 使得机器人臂的构型被改变以便顺从、补偿或符合所确定的力 f 。例如, 力 f 可用作参考图4和示例2描述的质量-弹簧-阻尼器模型的输入。

[0097] 返回到步骤702, 控制系统可替代地确定作用于机器人臂的 n 个点中的每个点处的至少一个力, 而不是如示例3中那样确定作用于单个点 p 处的力, 其中 $n > 1$ 。示例4是例示可如何以此方式执行步骤502的详细示例。

[0098] 示例4

[0099] 在示例4中, 相对于机器人臂定义了两个点。第一点是“腕部”(例如关节304e至304g的轴相交的点), 并且第二点是“肘部”(例如相对于关节304d定义的点)。对于施加在肘部的外部力 f_{elbow} , 可通过将虚功原理应用于净关节扭矩来推导所述力 f_{elbow} 。净关节扭矩可

称为扭矩状态,并且可由包括从一个或多个扭矩传感器中的每个扭矩传感器接收到的扭矩数据的列向量来表示。根据此原理,如果将肘部移动距离 $\delta \widehat{f}_{\text{elbow}}$ 需要一系列关节中的关节j移动角度 ϑ_j ,则如果在肘部处在 $\widehat{f}_{\text{elbow}}$ 的方向上施加力,则通过关节j所见的扭矩 τ_j 与 $\frac{\delta}{\vartheta_j}$ 成

比例。这可以由下式表述: $\tau_j = \|\widehat{f}_{\text{elbow}}\| \frac{\delta}{\vartheta_j}$ 。在示例4中,相对于三个方向(笛卡尔方向x、y

和z)考虑施加在腕部处的力。x、y和z方向可在全局参考系中进行定义。可替代地,x、y和z方向可在局部腕部参照系中进行定义。例如,z方向可以是与器械的方向相同的方向,并且x和y可被定义为垂直于所述z方向并且彼此垂直。在此示例中,x、y和z方向可随着腕关节移动而变化。力 f_{wrist_x} 、 f_{wrist_y} 和 f_{wrist_z} 以与本文中针对 f_{elbow} 所描述相同的方式进行处理。此信息可根据下式以雅可比矩阵 J_p 进行编码:

$$[0100] \quad \begin{pmatrix} f_{\text{elbow}} \\ f_{\text{wrist}_x} \\ f_{\text{wrist}_y} \\ f_{\text{wrist}_z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \text{elbow}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \text{wrist}_x}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial \text{wrist}_z}{\partial \theta_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \text{elbow}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial \text{wrist}_x}{\partial \theta_n} & \cdots & \frac{\partial \text{wrist}_z}{\partial \theta_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_n \end{pmatrix}$$

(等式 5)

[0101] 雅可比矩阵表示净关节角度 $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ 的较小变化将改变n个点中的每个点的位置的程度。在示例4中,考虑两个点——肘部和腕部——但有可能考虑任何数量的点。例如,可相对于器械尖端来定义点。

[0102] 在示例4中,相对于三个方向(笛卡尔方向x、y和z)考虑施加在腕部处的力。可相对于任何数量的方向考虑作用于一个点处的力。

[0103] 可考虑机器人臂的一系列关节中的每个关节。可替代地,可考虑机器人臂的一系列关节中的关节的子集。例如,可仅考虑与每个点相邻的关节(如腕部和肘部)——或者这些点的任一侧的任何数量的关节。可针对每个点考虑关节的不同子集。实际上,这可以通过将雅可比矩阵中对应于不被考虑的关节的条目设置为零来实现。

[0104] 在示例4中,所感测的扭矩状态可以与参考示例3所描述相同的方式被映射到所选的扭矩状态。也就是说,所感测的扭矩状态被映射到候选扭矩状态集合中的所选的扭矩状态。所选的扭矩状态是等式5中所展示的雅可比矩阵的图像的元素。所选的扭矩状态可以是候选扭矩状态集合中与所感测的扭矩状态具有最低欧几里德距离或最小平方距离的扭矩状态。

[0105] 在已将所感测的扭矩状态映射到所选的扭矩状态后,在步骤503中,控制系统将命令信号发送到外科机器人臂以驱动机器人臂,使得机器人臂的构型被改变以便顺从、补偿或符合所选的扭矩状态。例如,与处于所选的扭矩状态 $\tilde{\tau}$ 下的每个关节相关的扭矩数据 $\tilde{\tau}_n$ 可用作参考图4和示例1描述的质量-弹簧-阻尼器模型的输入。

[0106] 可选地,在示例4中,作用于每个点处的至少一个力可通过确定对应于所选的扭矩状态的那些力来确定。在示例4中,确定作用于肘部 f_{elbow} 处的一个力以及作用于腕部处的三

个力 f_{wrist_x} 、 f_{wrist_y} 和 f_{wrist_z} 。这可以与参考示例3所描述类似的方式来实现。也就是说,在已将所感测的扭矩状态映射到所选的扭矩状态后,如果雅可比矩阵是可逆的,则这可以通过简单地重新排列等式5来实现,或者如果雅可比矩阵不是可逆的,则这可以通过使用诸如右反的函数来实现。可替代地,雅可比矩阵的穆尔-彭罗斯伪逆可用以将所感测的扭矩状态映射到所选的扭矩状态,并且在一个步骤中确定对应于所选的扭矩状态的多个力 f_{elbow} 、 f_{wrist_x} 、 f_{wrist_y} 和 f_{wrist_z} 。

[0107] 控制系统随后可将命令信号发送到外科机器人臂以驱动机器人臂,使得机器人臂的构型被改变以便顺从、补偿或符合所确定的力中的每个力。例如,力 f_{elbow} 、 f_{wrist_x} 、 f_{wrist_y} 和 f_{wrist_z} 可用作参考图4和示例2描述的质量-弹簧-阻尼器模型的输入。

[0108] 可选地,在于步骤501中接收到指示机器人臂的扭矩状态的传感数据之后,控制系统可依据对机器人臂的当前构型的估计,在步骤502和503中根据作用于以下处的力来确定是否控制外科机器人臂的构型响应于外部施加的力或扭矩而被改变:根据示例3所确定的机器人臂的单个点;或作用于根据示例4所确定的机器人臂的n个点中的每个点处的至少一个力;或通过使用作用于根据示例3所确定的机器人臂的单个点处的力与作用于根据示例4所确定的机器人臂的n个点中的相同点处的力的加权组合。

[0109] 例如,当示例4中使用的雅可比矩阵考虑从一系列关节中的关节的仅子集——诸如邻近多个所定义点的那些——处的扭矩传感器接收到的传感数据时,参考示例4描述的方法可解析施加在机器人臂的某些部分处的力或扭矩的准确度减小。例如,如果控制系统在其中预期外部力或扭矩将被施加在机器人臂的某个部分处(其不能使用参考示例4描述的方法来准确解析)的模式下操作,则控制系统可根据作用于机器人臂的单个点处的力(如参考示例3所描述),并且考虑从所有扭矩传感器接收到的传感数据,来确定控制外科机器人臂的构型响应于外部施加的力或扭矩而被改变。

[0110] 在另一示例中,机器人臂的构型可使得在多个所定义点处考虑的方向中的两个或更多个方向变为对准(例如在示例4中,在肘部304d处考虑的方向以及在腕关节304e至304g处考虑的x、y或z方向中的一个方向)。这可以被称为机器人臂的单一构型。当机器人臂采用单一构型时,参考示例3和4描述的方法中的任一种方法可解析作用于一个点(诸如肘部)处的所施加力或扭矩的准确度减小。因此,在此情形下,控制系统可使用参考示例3和4描述的方法中的每一种方法来估计作用于机器人臂的一个点(例如肘部)处的力,并且在这些所确定的力之间进行插值,以便确定作用于肘部处的将用以控制外科机器人臂的构型的力。例如,等式6可用以在使用参考示例3和4描述的方法中的每一种方法所确定的力之间进行插值。

$$f_{\text{elbow}} = (1 - \beta) f_{\text{elbow}}^{\text{示例 3}} + \beta f_{\text{elbow}}^{\text{示例 4}}$$

[0111] (等式 6)

[0112] 其中 β 是随着雅可比矩阵的行列式而变化的加权值,所述加权值表示净关节角度的较小变化将改变多个点中的每个点的位置的程度(例如等式5中的雅可比矩阵)。此雅可比矩阵的行列式可提供对机器人臂的当前构型的估计。例如,如果此雅可比矩阵的行列式

低于阈值(例如更接近零),则控制系统可使用参考示例3描述的方法将更大的权重应用于被确定为作用于所述点处的力。如果此雅可比矩阵的行列式高于阈值(例如更远离零),控制系统可使用参考示例4描述的方法将更大的权重应用于被确定为作用于所述点处的力。

[0113] 当机器人臂采用单一构型时,控制系统还可被配置成在根据等式6在所确定的力之间进行插值之前,使用参考示例3和4描述的方法中的每种方法来考虑机器人臂的一系列关节中的关节的较小子集。待考虑的关节的子集可取决于机器人臂构型中的单一性的性质以及将解析力的点(例如所述点附近的关节)。

[0114] 可选地,控制系统可确定一个或多个扭矩传感器比其他传感器经受更大的噪声干扰。在此情形下,控制系统可以为从被确定为经受较少噪声干扰的传感器接收到的传感数据赋予更多的重要性。为了实现这一点,控制系统可将加权值 $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ 应用于从每个扭矩传感器接收到的传感数据。例如,在示例3或4中所描述的逆雅可比矩阵可借助于具有对应于扭矩状态的每个值的权重的对角矩阵来加权。也就是说,每个加权值 α_n 可与逆雅可比矩阵中的项相关联,所述逆雅可比矩阵与提供传感数据 τ_n 的扭矩传感器所关联的关节 j_n 的角度 θ_n 的变化相关。在穆尔-彭罗斯伪逆用以将所感测的扭矩状态映射到所选的扭矩状态并且在一个步骤中确定对应于所选的扭矩状态的力的示例中,对将应用于从每个扭矩传感器接收到的传感数据的权重进行编码的对角加权矩阵可被整合在雅可比矩阵的穆尔-彭罗斯伪逆内。控制系统可确定待应用于每个扭矩传感器的重要性,使得 $\sum_j \alpha_j^2 (\tau_j - \tilde{\tau}_j)^2$ 的值针对 $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ 被最小化,其中 α_n 是应用于从第n个扭矩传感器接收到的传感数据的加权值。

[0115] 外科模式

[0116] 在侵入性手术期间,外科机器人臂可在外科模式下操作。在外科模式下,外科器械处于患者身体内部。控制系统命令外科机器人臂,使得其构型可响应于在远程外科医生控制台(诸如图2中所展示的远程外科医生控制台220)处接收到的输入而被改变。外科医生可例如经由一个或多个外科医生输入装置223向远程控制台220提供输入。

[0117] 当在外科模式下操作时,控制系统可促使机器人臂的某些部分呈现类顺从行为——诸如参考图4和图5所描述。例如,只要器械306的位置和定向不受影响,肘关节304d的构型就可以能够以本文中所描述的方式响应于外部力而被改变。当机器人臂在外科模式下操作时,实现这种类顺从行为允许例如手术室工作人员的成员移动机器人臂的肘部,使得其可在手术期间接近患者。这种类顺从行为也可以是有益的安全特征,例如当手术室工作人员的成员“撞到”外科机器人臂时,这使得能够改变机器人臂的构型。

[0118] 为了实施这种类顺从行为,控制系统可以为机器人的一个或多个部分(例如腕关节集合304e至g304)定义所允许面积或体积,使得那些部分响应于外部施加的力或扭矩的移动被限制在所允许面积或体积内。所允许面积或体积被定义为使得所述面积或体积内响应于外部施加的力或扭矩的移动不会导致器械306的位置和定向受到影响。

[0119] 返回参考图4的步骤401,在外科模式下,所接收传感数据可指示由机器人臂的部分上的重力作用产生的力或扭矩、机器人臂的部分处的任何振动、惯性和/或加速度、由外科机器人臂的部分处的外部施加的力或扭矩产生的力或扭矩,以及由控制系统响应于在远程外科医生控制台接收到的输入而驱动的机器人臂在外科机器人臂的部分处产生的另一

个力或扭矩。因此,可首先调整传感数据,以便不考虑由对机器人臂的部分的重力作用以及/或者机器人臂的所述部分处的任何振动、惯性和/或加速度所产生的力或扭矩,以及/或者由驱动机器人臂的电动机响应于在远程外科医生控制台处接收到的输入而在机器人臂的部分处产生的力或扭矩。例如,可从传感数据中减去由对机器人臂的部分的重力作用所产生的力或扭矩,以及由驱动机器人臂的电动机响应于在远程外科医生控制台处接收到的输入而产生的力或扭矩。

[0120] 器械缩回模式

[0121] 可使用器械缩回模式以便从患者身体中缩回器械306。在侵入性手术已完成之后,可能需要将器械从患者身体中缩回。还可能需要在手术期间从患者身体中缩回器械。例如,在侵入性手术期间,可能需要更换或替换附接到外科机器人臂的器械。也就是说,可能需要更换器械以便使用具有不同能力的不同器械,或者可能需要在附接到机器人臂的器械出现故障的情况下更换器械。

[0122] 在器械缩回模式下,控制系统可促使外科机器人臂301呈现类顺从行为——诸如参考图4和图5描述的行为。控制系统可实现这种类顺从行为,使得手术室工作人员的成员可从患者身体中缩回器械。控制系统可促使机器人臂的构型响应于外部施加的力或扭矩(例如由手术室工作人员的成员施加的手动推动或拉动)而被改变,以便使得器械306能够沿平行于器械的纵轴的轴从患者身体中缩回。参考图3,器械306的纵轴可与器械柄361同轴。也就是说,在器械缩回模式下,控制系统可促使机器人臂的构型响应于外部力而被改变,但限制机器人臂的运动自由度,使得外科器械仅可在与其纵轴平行和/或同轴的方向上线性移动。器械306沿平行于器械的纵轴的轴从患者身体中缩回,以便在器械缩回时最小化或消除对患者的周围组织的损伤或破坏。

[0123] 图7是展示步骤集合的流程图,所述步骤集合由控制系统执行以在器械缩回模式下响应于外部施加的力而改变外科机器人臂的构型。控制系统可被配置成执行图7中所展示的步骤集合的多次迭代。也就是说,控制系统可按顺序执行步骤701、702和703,随后返回到步骤701以重复所述顺序。换句话说,图7是展示控制回路的流程图,所述控制回路由控制系统执行以在器械缩回模式下响应于外部施加的力或扭矩而改变外科机器人臂的构型。

[0124] 在初始化器械缩回模式时,控制系统可从位置传感器307a至307h中的一个或多个位置传感器接收传感数据,所述传感数据指示机器人臂的一系列关节中的一个或多个关节的旋转位置。使用所述传感数据,控制系统可确定机器人臂或器械的点的位置,以及平行于与所定义点相交的外科器械的纵轴的方向。所述点可相对于机器人臂的远侧端部或相对于外科器械来定义。

[0125] 在步骤701中,控制系统从一个或多个力或扭矩传感器接收传感数据,所述传感数据指示由外部施加的力或扭矩在所定义点处产生的所感测的力或扭矩。如本文中所描述,所接收传感数据实际上可指示由对所定义点的重力作用产生的力或扭矩,以及/或者所定义点处的任何振动、惯性和/或加速度,以及由外部施加的力或扭矩在所定义点处产生的力或扭矩。因此,可首先针对由对机器人臂的重力作用以及/或者机器人臂的所述部分处的任何振动、惯性和/或加速度所产生的力或扭矩调整传感数据。

[0126] 在步骤702中,控制系统解析所感测的力或扭矩,以便确定所感测的力或扭矩在与附接到附件的外科器械的纵轴平行的方向上作用的分量。

[0127] 在器械沿着与关节304g的旋转轴重合的轴延伸的示例中,控制系统可使用传感数据来确定所施加的外部力是否与器械的纵轴重合(并且因此也固有地与所述纵轴平行)。在器械与机器人臂的末端关节304g的旋转轴平行地(但不一定与所述旋转轴同轴)线性延伸的示例中,控制系统可使用传感数据来确定所施加的外部力是否与器械的纵轴平行。

[0128] 为了解析所感测的力或扭矩,控制系统可实施与参考图5描述的方法类似的方法。也就是说,传感数据可从一个或多个扭矩传感器被接收,并且指示由外部施加的力或扭矩在所定义点处产生的所感测的扭矩状态。控制系统随后可通过将所感测的扭矩状态映射到候选扭矩状态集合中的所选的扭矩状态来解析所感测的扭矩状态。如参考图5所描述,候选扭矩状态集合中的每个扭矩状态可以是雅可比矩阵的图像的元素。在已将所感测的扭矩状态映射到所选的扭矩状态后,控制系统可确定对应力,所述对应力指示由于外部施加的力或扭矩而作用于所定义点处并且在平行于外科器械的纵轴的方向上的力。在器械缩回模式下,控制系统可被配置成将雅可比矩阵乘以表示与外科器械的纵轴平行的轴的方向的列向量,使得确定对应力的一个或多个力包括(例如仅包括)沿与外科器械的纵轴平行的轴作用的力。示例5是例示可如何执行步骤702的详细示例。

[0129] 示例5

[0130] 在示例5中,相对于机器人臂或相对于器械定义了点p。对于施加在p处的外部力f,有可能通过将虚功原理应用于净关节扭矩 τ 来推导在平行于器械轴的纵轴的方向 $\hat{\mathbf{a}}$ 上作用的力f。此信息可根据下式以雅可比矩阵 $\mathbf{J}_{p,\hat{\mathbf{a}}}$ 进行编码:

$$[0131] \quad \boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \vdots \\ \tau_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{p}_x}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial \mathbf{p}_z}{\partial \theta_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \mathbf{p}_x}{\partial \theta_n} & \cdots & \frac{\partial \mathbf{p}_z}{\partial \theta_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{a}}_x \\ \hat{\mathbf{a}}_y \\ \hat{\mathbf{a}}_z \end{pmatrix} f = \mathbf{J}_p \hat{\mathbf{a}} f = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{p}_{\hat{\mathbf{a}}}}{\partial \theta_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial \mathbf{p}_{\hat{\mathbf{a}}}}{\partial \theta_n} \end{pmatrix} f = \mathbf{J}_{p,\hat{\mathbf{a}}} f.$$

(等式 7)

[0132] 其中方向 $\hat{\mathbf{a}}$ 是具有分量 $(\hat{\mathbf{a}}_x, \hat{\mathbf{a}}_y, \hat{\mathbf{a}}_z)$ 的单位向量,并且 $\mathbf{J}_{p,\hat{\mathbf{a}}} = \mathbf{J}_p \hat{\mathbf{a}}$ 是1乘n雅可比矩阵,所述雅可比矩阵表示净关节角度 $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ 的较小变化将在方向 $\hat{\mathbf{a}}$ 上移动点p的程度。可使用参考图5和示例3描述的方法中的任一种方法,根据表达式 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}_{p,\hat{\mathbf{a}}} f$,使用所感测的扭矩 τ 来确定力f。由于雅可比矩阵已乘以表示与外科器械的纵轴平行的轴的方向的列向量 $\hat{\mathbf{a}}$,因而确定对应于扭矩状态的力f的一个或多个力包括(例如仅包括)沿与外科器械的纵轴平行的轴作用的力。

[0133] 返回到图7,在步骤703中,命令信号被发送到外科机器人臂以驱动机器人臂,使得机器人臂的构型被改变以便顺从、补偿或符合所解析力或扭矩分量。例如,根据示例5确定的力f可用作参考图4和示例2描述的质量-弹簧-阻尼器模型的输入,以便确定应如何改变外科机器人臂的构型。由于力f仅包括作用于所定义点处并且在与外科器械的纵轴平行的方向上的所施加力或扭矩的分量,因而根据示例2确定的所定义点将被驱动到达的位置将处于与外科器械的纵轴平行的方向上。

[0134] 在其他模式下(本文中沒有详细描述),可根据参考图7描述的原理,针对一个或多个不同的方向(例如垂直于器械柄的轴的方向)来解析力。

[0135] 控制系统还可被配置成依据机器人臂或器械上的所定义位置来定义停止位置。停止位置可以是在平行于外科器械的纵轴的方向上的位置,在所述位置处,控制系统不准许所定义点被进一步朝向患者驱动。停止位置的定义防止外科机器人臂的操作者(例如床边工作人员的成员)将器械(例如正在缩回的器械,或已被替换为缩回器械的新器械)推入患者身体中太深。这可以防止对患者的伤害。

[0136] 如果控制系统确定外科器械不能从患者体内完全缩回,则控制系统可以可选地通知外科机器人臂的操作者(例如床边工作人员的成员)。控制系统可使用来自位置传感器307a至307h的数据来确定一个或多个关节的当前角位置太接近其行程范围的端部,以至于不准许器械从患者身体中缩回。当器械缩回模式被初始化时,或者在器械缩回模式的使用期间,控制系统可做出此确定。如果不能使用器械缩回模式将外科器械从患者体内完全缩回,则控制系统可自动地促使外科机器人臂的关节中的一个或多个关节的位置被调整到其行程范围的中心——以器械的位置和定向不变的方式——或者控制系统可促使外科机器人臂在外科模式下操作,使得可响应于在远程外科医生控制台(诸如图2中所展示的远程外科医生控制台220)处接收到的输入而调整一个或多个关节。

[0137] 当处于器械缩回模式下时,控制系统可以可选地使得器械和/或器械附件能够可旋转。也就是说,控制系统可使得具有与器械的纵轴平行的旋转轴的一系列关节中的关节(例如关节304g)在器械缩回时旋转。此旋转自由度可有助于手术室工作人员的成员移除或更换器械。例如,可能需要操作者能够旋转器械,以便在器械从患者体内缩回时移除端部执行器的障碍物,或者可能需要操作者能够旋转器械附件,以便更容易地将器械更换为替代器械。

[0138] 为了实现这一点,控制系统还可执行参考图4和示例1描述的方法,以便控制关节(例如关节304g)的角位移。控制系统可独立于(例如独立于但同时)控制所定义点沿与器械的纵轴平行的方向的线性位移来执行此方法。这可能尤其适合于关节(例如关节304g)位于比所定义点更远侧的情况。这是因为所述关节的角位置的变化不会导致所定义点的位移或定向变化。

[0139] 例如,控制系统还可被配置成从力或扭矩传感器接收传感数据,所述传感数据指示由所述外部施加的力或扭矩在所述一系列关节中的旋转关节处产生的所感测的力或扭矩,所述旋转关节的旋转轴与所述外科器械的所述纵轴平行。可选地,控制系统可根据参照图5描述的方法来处理所接收扭矩值。控制系统随后可使用参考角位置确定所述旋转关节的角位置,由此通过将所述旋转关节移动到所确定角位置来补偿所感测的力或扭矩。所述参考角位置是所述控制系统被配置成当没有在所确定角位置处感测到外部力时促使所述旋转关节被驱动到达的角位置。控制系统可使用参考示例1描述的质量-弹簧-阻尼器模型来确定角位置。控制系统可使用参考示例1描述的质量-弹簧-阻尼器模型来确定关节将移动到所述位置的速度和加速度。控制系统可被配置成将命令信号发送到所述外科机器人臂,以将所述旋转关节驱动到所确定角位置。旋转关节的“弹性”和“塑性”运转可如本文中参考图4所描述那样来实施。

[0140] 本文中所描述的机器人臂可用于除了外科手术之外的目的。例如,端口可以是诸

如汽车引擎的制成品中的检查端口,并且机器人可控制用于观察引擎内部的观察器械。

[0141] 申请人在此独立地公开了本文中所描述的每个单独的特征以及两个或更多个这类特征的任何组合,只要这些特征或组合能够基于本说明书作为一个整体根据本领域技术人员的公知常识来实施,而不管这类特征或特征组合是否解决本文中公开的任何问题,并且不限制权利要求的范围。申请人指出,本发明的各方面可包括任何这种单独的特征或特征组合。鉴于上述描述,对于本领域的技术人员将显而易见的是,可在本发明的范围内进行各种修改。

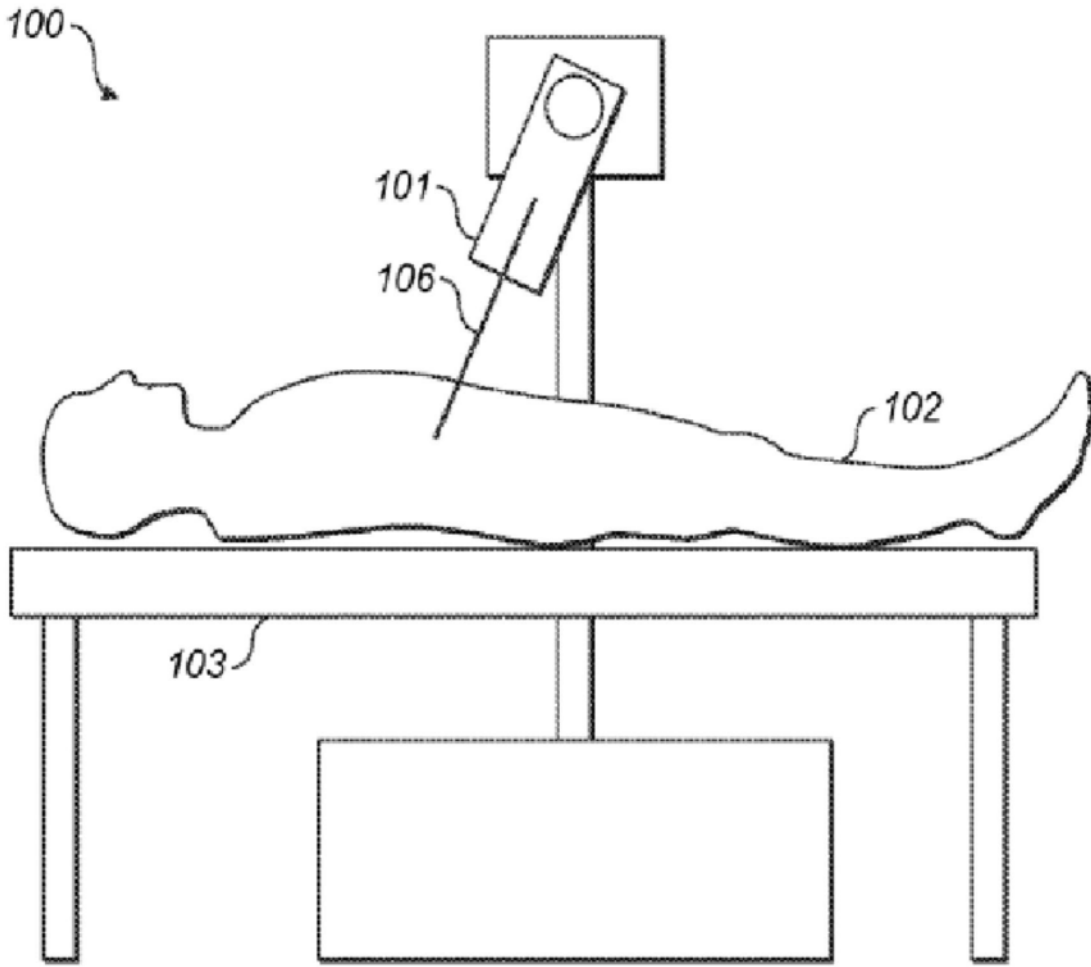


图1

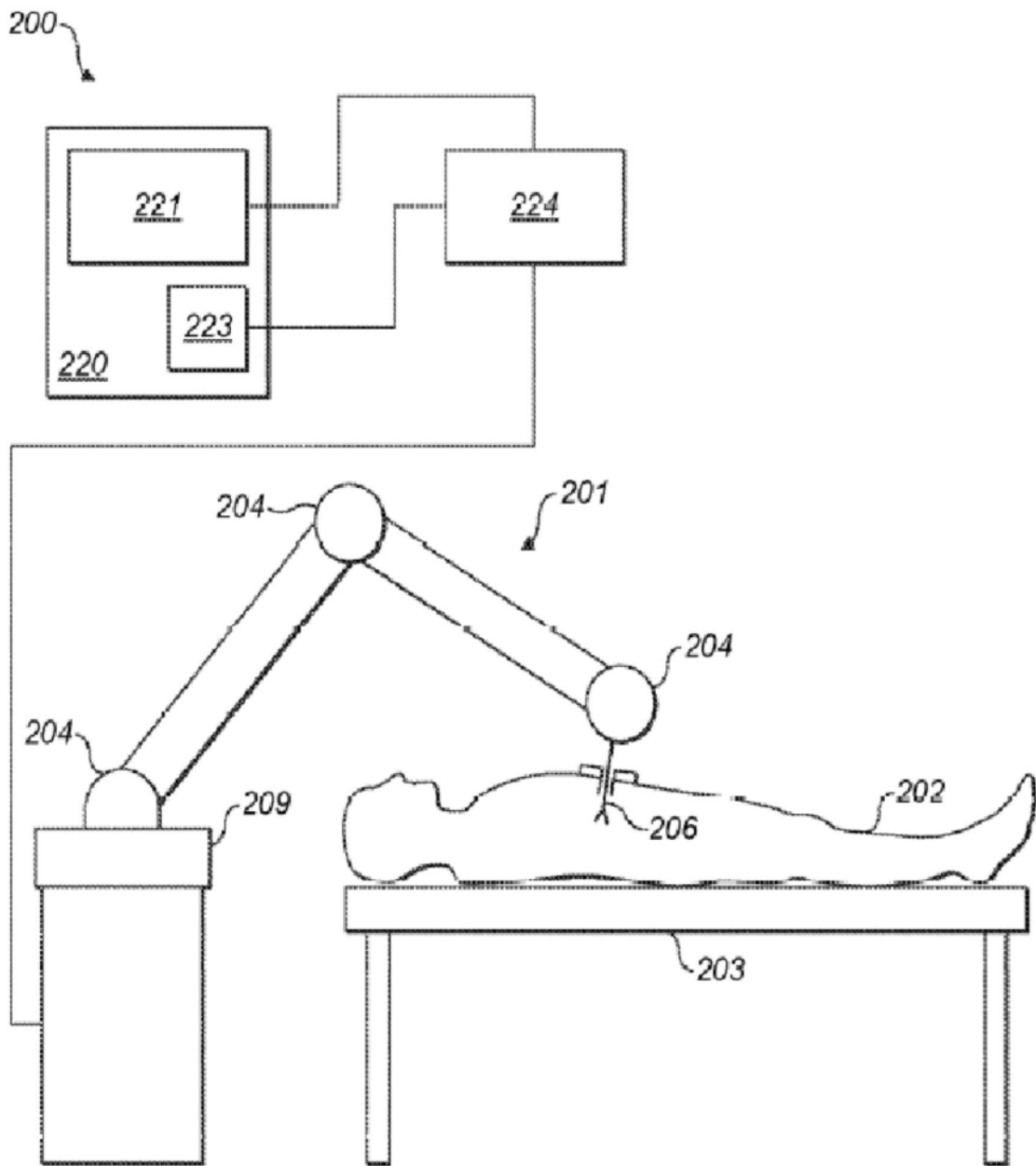


图2

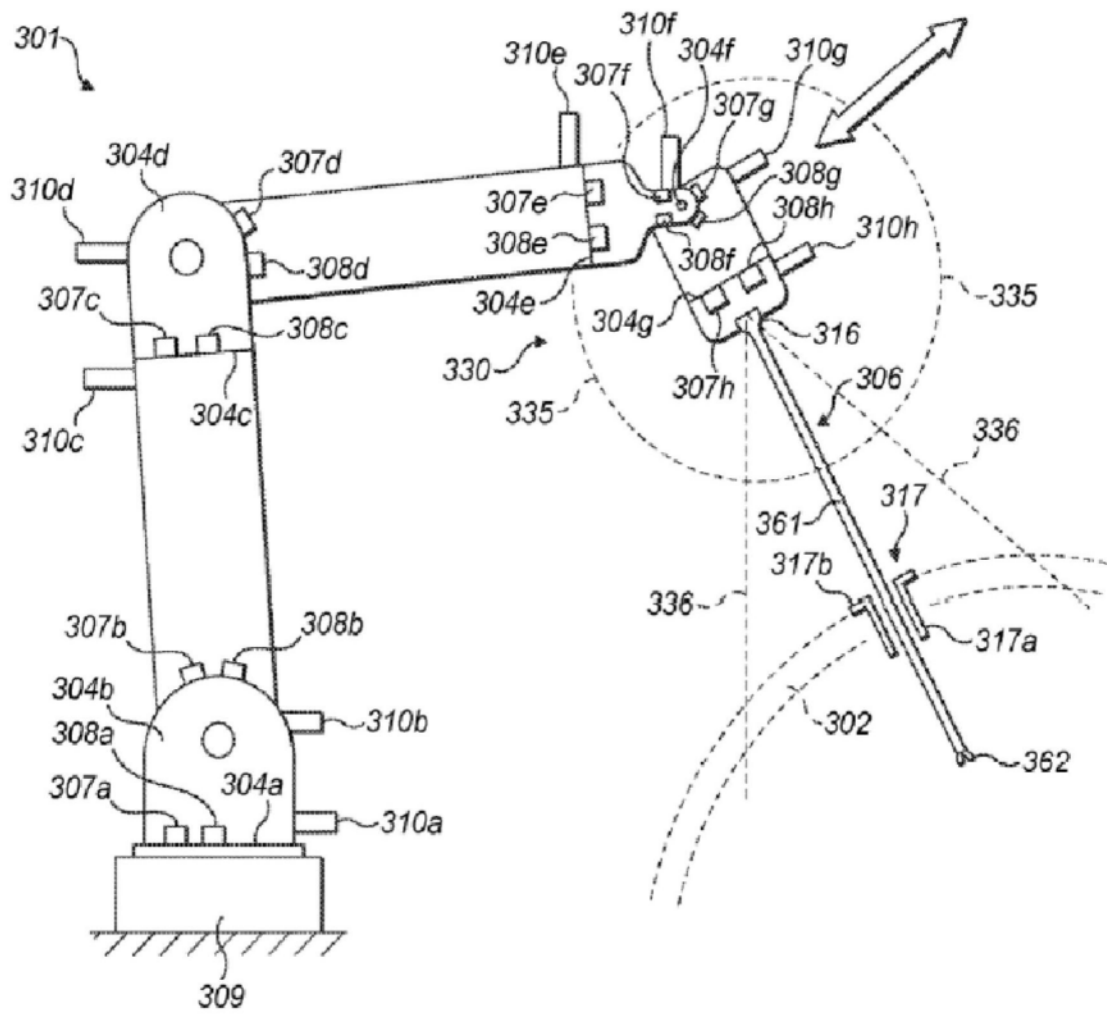


图3

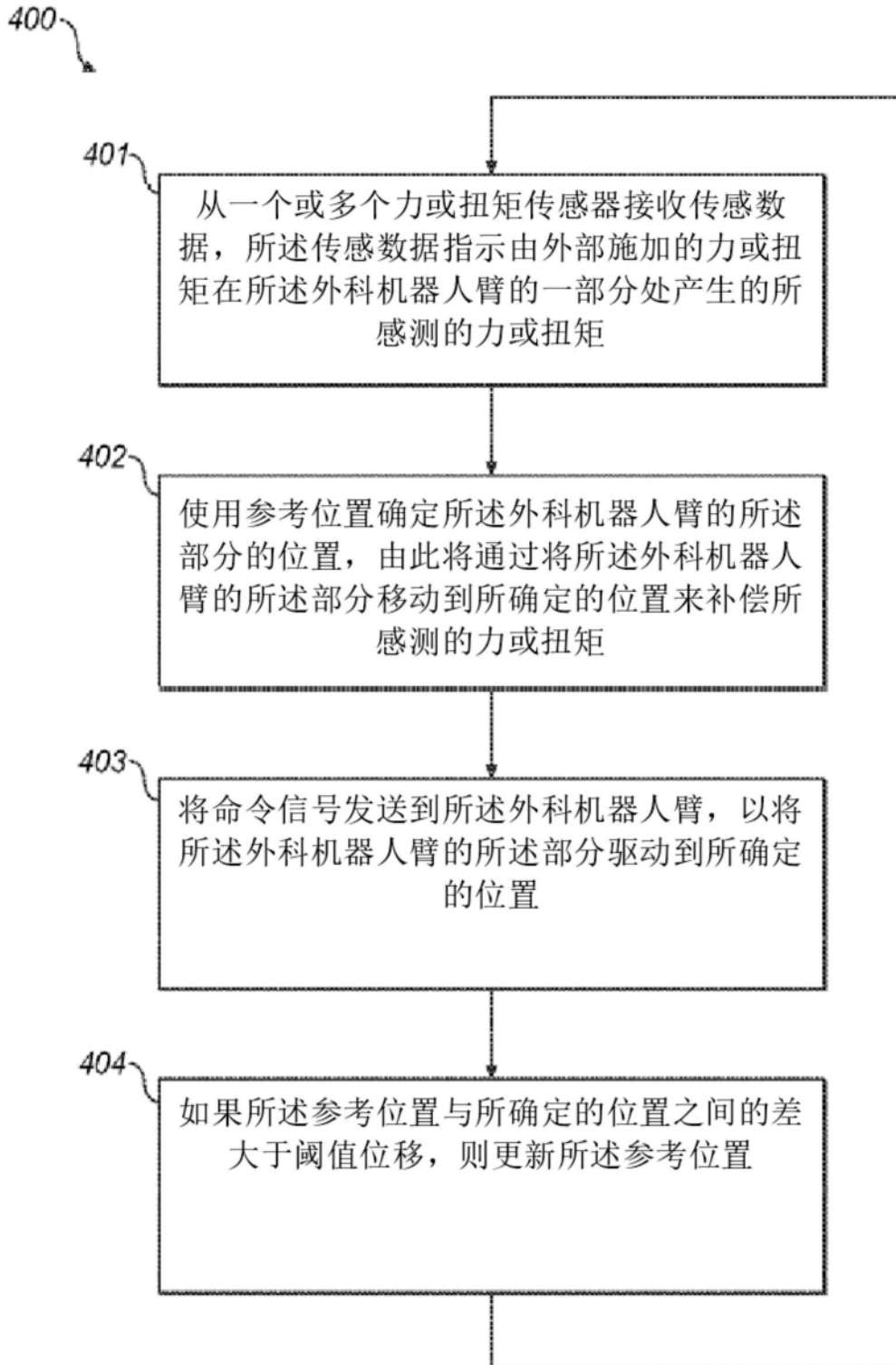


图4

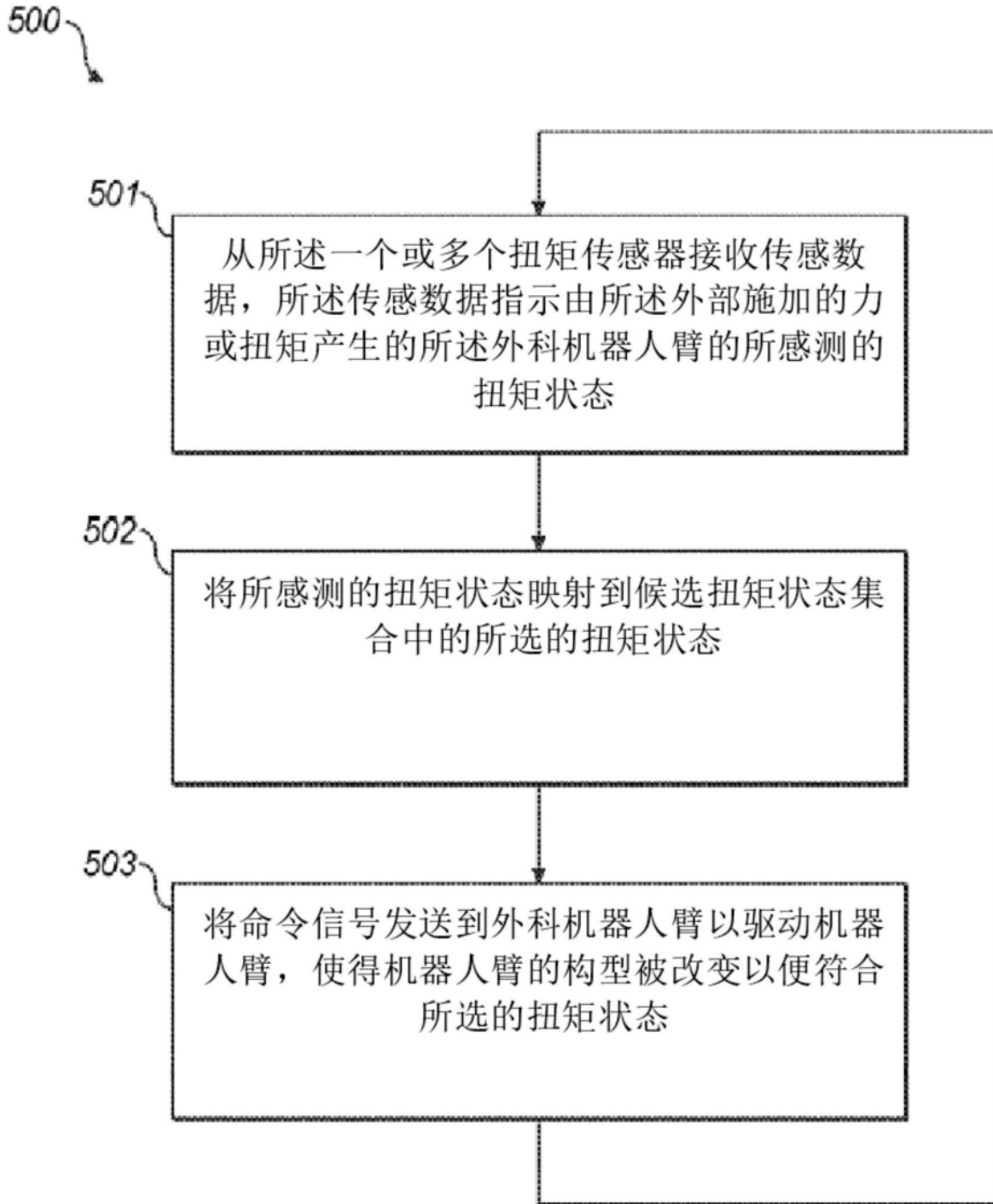


图5

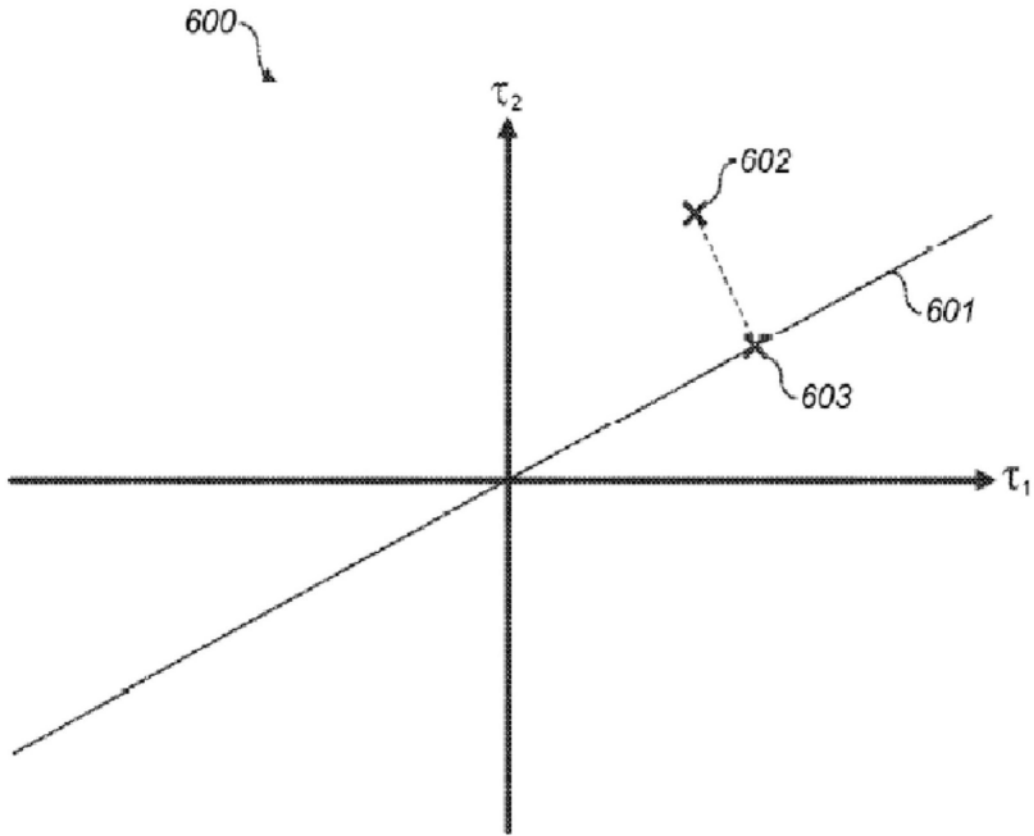


图6

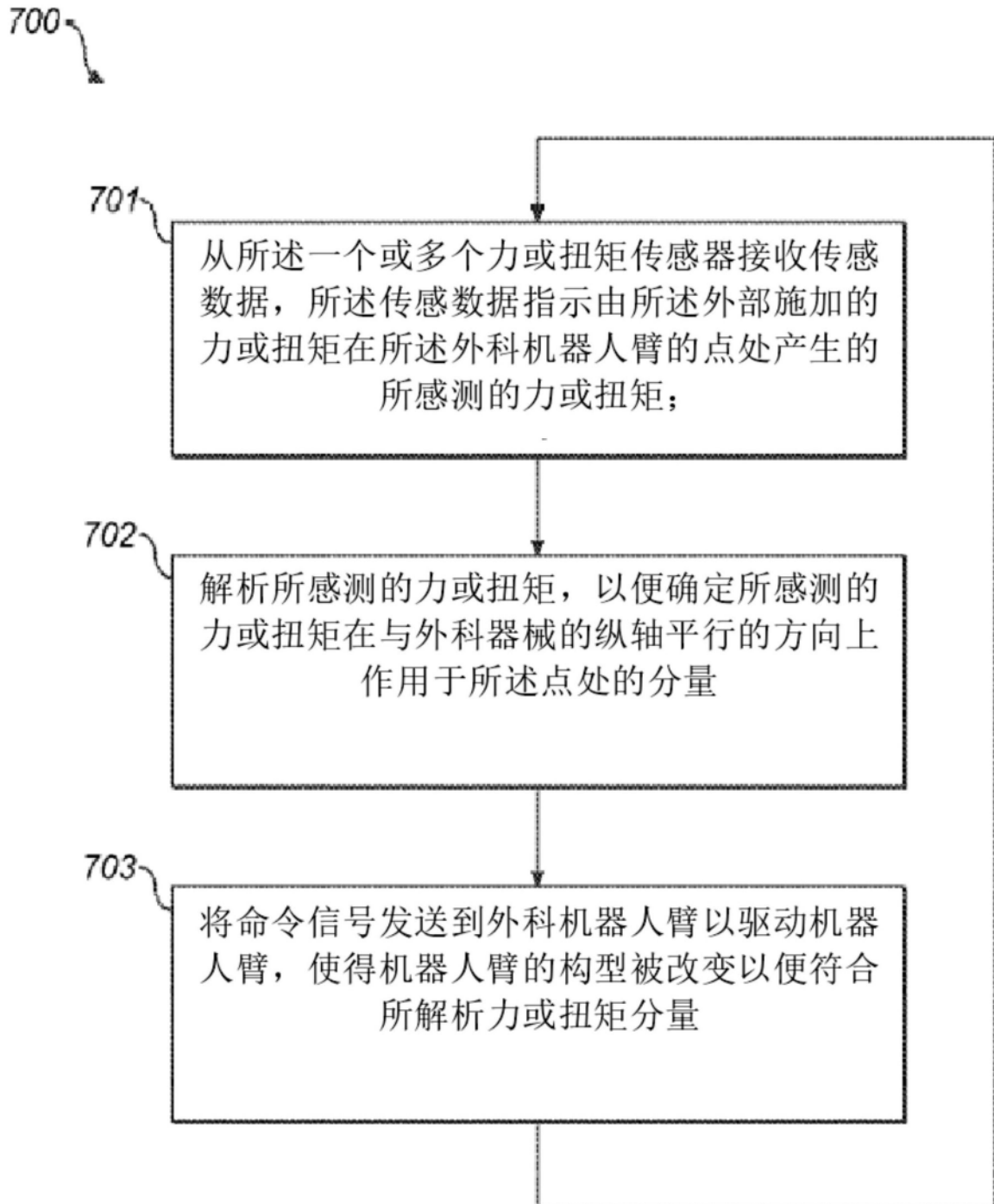


图7