



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102791214 B

(45) 授权公告日 2016. 01. 20

(21) 申请号 201080065226. X

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

(22) 申请日 2010. 11. 17

代理人 王英 刘炳胜

(30) 优先权数据

61/293, 222 2010. 01. 08 US

(51) Int. Cl.

A61B 34/30(2016. 01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2012. 09. 06

审查员 姚媛

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/IB2010/055245 2010. 11. 17

(87) PCT国际申请的公布数据

W02011/083374 EN 2011. 07. 14

(73) 专利权人 皇家飞利浦电子股份有限公司

地址 荷兰艾恩德霍芬

(72) 发明人 A·波波维奇 P·西恩帕波

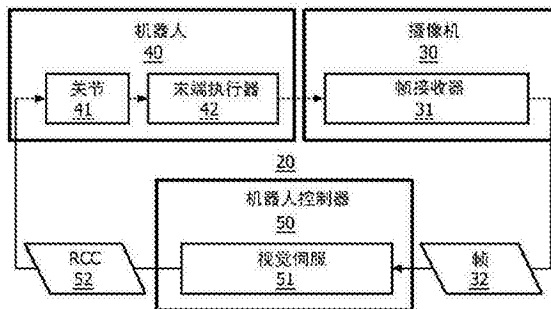
权利要求书2页 说明书10页 附图9页

(54) 发明名称

采用实时速度优化的不经校准的视觉伺服

(57) 摘要

一种用于具有光学取景器的摄像机(30)和机器人(40)的机器人控制方法,所述机器人(40)具有末端执行器(42)以及用于操纵所述末端执行器(42)的一个或多个关节(41)。所述机器人控制方法涉及:采集示出了所述摄像机(30)光学检视的图像的数字视频帧(32);以及执行视觉伺服,所述视觉伺服用于控制所述末端执行器(42)相对于所述数字视频帧(32)内的图像特征的姿态。所述视觉伺服涉及:识别所述数字视频帧(32)的图像坐标系(80)内的从跟踪点(TR)延伸至与所述图像特征相关联的目标点(TG)的跟踪向量(v_{trk});将跟踪向量映射到从与末端执行器(42)相关联的机器人坐标系(90)构建的配置空间(100)内;并从跟踪向量(v_{trk})在所述配置空间(100)内的映射导出机器人坐标系(90)内的末端执行器(42)的姿态。



1. 一种机器人系统 (20), 包括:

摄像机 (30), 其具有光学取景器, 用于采集示出了图像的数字视频帧 (32) 的序列;

机器人 (40), 其包括末端执行器 (42) 以及用于操纵所述末端执行器 (42) 的至少一个机器人关节 (41); 以及

机器人控制器 (50), 其与所述摄像机 (30) 和所述机器人 (40) 通信, 所述机器人控制器 (50) 包括用于控制所述末端执行器 (42) 相对于每一数字视频帧 (32) 内的图像特征的姿态的视觉伺服 (51),

其中, 对于每一数字视频帧 (32), 所述视觉伺服 (51) 能用于识别所述数字视频帧 (32) 的图像坐标系 (80) 内的从跟踪点 (TR) 延伸至与所述图像特征相关联的目标点 (TG) 的跟踪向量 (vtrk), 以将所述跟踪向量 (vtrk) 映射到从与所述末端执行器 (42) 相关联的机器人坐标系 (90) 构建的配置空间 (100) 内, 并从所述跟踪向量 (vtrk) 在所述配置空间 (100) 内的所述映射导出所述机器人坐标系 (90) 内的所述末端执行器 (42) 的姿态。

2. 根据权利要求 1 所述的机器人系统 (20), 其中, 所述摄像机 (30) 是被安装到所述末端执行器 (42) 上的内窥镜。

3. 根据权利要求 1 所述的机器人系统 (20), 其中, 所述视觉伺服 (51) 还能用于跟踪所述数字视频帧 (32) 内的所述图像特征的任何运动。

4. 根据权利要求 1 所述的机器人系统 (20), 其中, 所述视觉伺服 (51) 还能用于命令产生至少一个机器人关节运动, 以实现所述末端执行器 (42) 的至少一个导出的姿态。

5. 根据权利要求 1 所述的机器人系统 (20), 其中, 跟踪向量 (vtrk) 的识别设置了跟踪速度, 其包括所述图像坐标系 (80) 内的所述跟踪向量 (vtrk) 的跟踪方向和跟踪速率。

6. 根据权利要求 5 所述的机器人系统 (20), 其中, 响应于先前映射在所述配置空间 (100) 中的至少两个跟踪向量 (vtrk) 之间的指定数量的连续方向变化, 在所述配置空间 (100) 的至少两个象限之间旋转当前映射在所述配置空间 (100) 中的所述跟踪向量 (vtrk) 的所述跟踪方向。

7. 根据权利要求 5 所述的机器人系统 (20), 其中, 响应于所述数字视频帧 (32) 的相继采样帧的图像特征的运动程度, 通过速率因数 (s) 调整映射在所述配置空间 (100) 中的所述跟踪向量 (vtrk) 的跟踪速率。

8. 根据权利要求 7 所述的机器人系统 (20), 其中, 所述速率因数 (s) 是所述跟踪向量 (vtrk) 的跟踪等待时间和与所述机器人系统 (20) 的应用对应的速率中的至少一个的函数。

9. 根据权利要求 5 所述的机器人系统 (20), 其中, 响应于所述跟踪点 (TR) 与所述目标点 (TG) 之间的距离, 通过长度因数 (l) 调整映射在所述配置空间 (100) 中的所述跟踪向量 (vtrk) 的跟踪速率。

10. 根据权利要求 9 所述的机器人系统 (20), 其中, 所述长度因数 (l) 是比例控制、积分控制和微分控制中的至少一个的函数。

11. 根据权利要求 1 所述的机器人系统 (20), 其中, 所述机器人的配置空间 (90) 表示所述摄像机 (30) 关于相对于远程旋转中心的轴的旋转。

12. 根据权利要求 11 所述的机器人系统 (20), 其中, 随着所述摄像机 (30) 关于相对于远程旋转中心的所述轴的旋转, 通过探头和对所述图像特征的识别建立所述机器人的配置

空间 (90)。

13. 一种用于摄像机 (30) 和机器人 (40) 的视觉伺服 (51), 所述摄像机具有光学取景器, 用于采集示出了图像的数字视频帧 (32) 的序列, 所述机器人具有末端执行器 (42) 以及用于操纵末端执行器 (42) 的至少一个关节 (41), 所述视觉伺服 (51) 包括:

特征跟踪模块, 其用于跟踪所述数字视频帧 (32) 内的图像特征的任何运动; 以及

方向设置模块, 其响应于所述特征跟踪模块, 用于识别所述数字视频帧的图像坐标系内的从跟踪点延伸至与所述图像特征相关联的目标点的跟踪向量, 将所述跟踪向量映射到从与所述末端执行器相关联的机器人坐标系构建的配置空间内, 并从所述跟踪向量在所述配置空间内的所述映射导出所述机器人坐标系内的所述末端执行器的姿态。

14. 根据权利要求 13 所述的视觉伺服 (51), 还包括:

逆运动学模块, 其响应于所述方向设置模块, 用于命令产生至少一个机器人关节运动 (43), 以实现所述末端执行器 (42) 的至少一个导出的姿态。

15. 根据权利要求 13 所述的视觉伺服 (51), 其中, 所述摄像机 (30) 是被安装在所述末端执行器 (42) 上的内窥镜。

16. 一种包括摄像机 (30) 和机器人 (40) 的机器人控制方法, 所述摄像机具有光学取景器, 所述机器人具有末端执行器 (42) 以及用于操纵末端执行器 (42) 的至少一个关节 (41), 所述机器人控制方法包括:

采集示出了由所述摄像机 (30) 光学检视的图像的数字视频帧 (32) 的序列; 以及

执行视觉伺服以控制所述末端执行器 (42) 相对于每一数字视频帧 (32) 内的图像特征的姿态, 其中, 针对每一数字视频帧所述视觉伺服包括:

识别所述数字视频帧的图像坐标系内的从跟踪点延伸至与所述图像特征相关联的目标点的跟踪向量,

将所述跟踪向量映射到从与所述末端执行器相关联的机器人坐标系构建的配置空间内, 以及

从所述跟踪向量在所述配置空间内的所述映射导出所述机器人坐标系内的所述末端执行器的姿态。

17. 根据权利要求 16 所述的机器人控制方法, 还包括:

跟踪所述数字视频帧 (32) 内的所述图像特征的任何运动。

18. 根据权利要求 16 所述的机器人控制方法, 还包括:

命令产生至少一个机器人关节运动, 以实现所述末端执行器 (42) 的至少一个导出的姿态。

19. 根据权利要求 16 所述的机器人控制方法, 其中, 跟踪向量 (vtrk) 的识别设置了跟踪速度, 其包括所述图像坐标系 (80) 内的所述跟踪向量 (vtrk) 的跟踪方向和跟踪速率。

20. 根据权利要求 16 所述的机器人控制方法, 其中, 所述机器人的配置空间 (90) 表示所述摄像机 (30) 关于相对于远程旋转中心的轴的旋转。

采用实时速度优化的不经校准的视觉伺服

技术领域

[0001] 本发明总体涉及机器人流程期间机器人的视觉伺服。本发明尤其涉及在微创手术期间内窥镜机器人的视觉伺服。

背景技术

[0002] 一般而言,微创手术利用内窥镜,内窥镜是一种具有成像能力的长的柔性或刚性管。在将内窥镜通过自然孔口或者小的切口插入到体内时,内窥镜提供感兴趣区域的图像,外科医生在执行操作时可以通过目镜或者屏幕观看所述图像。

[0003] 视觉伺服是一种采用视觉输入(图像)来设置机器人运动参数的机器人控制方法。这一方法用于对目标的机器人追随、自主型机器人等。就手术机器人学而言,在控制回路中采用视觉伺服,其借助医学图像朝向某些特定解剖学目标(例如,器官)或手术目标(例如,仪器)引导机器人。在这一领域中,一种用于视觉伺服的标准成像模态是刚性内窥镜。将内窥镜的摄像机馈入连接至提供导引信息的机器人控制环。

[0004] 为了使所述视觉伺服的控制环闭合,必须在图像坐标与机器人关节空间之间建立数学变换(其被称为 Image Jacobian(图像雅可比矩阵))。所述整个过程被称为系统校准,并且其需要诸如摄像机校准和机器人校准的各种步骤。此外,为了提供充分的校准,必须通过图像或者利用专用传感器测量摄像机与研究中的器官/对象之间的深度。

[0005] 更具体而言,摄像机校准是设定固有摄像机参数的过程,所述参数例如为图像的光学中心、沿两个方向的焦距和像素大小。这一操作通常在手术前完成,并且其涉及采集校准对象(通常为棋盘状对象)的若干幅图像,并从这些图像计算参数。如果在手术期间改变这些参数中的一些(例如,改变摄像机聚焦),那么必须重复摄像机校准。

[0006] 机器人校准是在机器人的关节空间和末端执行器(end-effector)之间建立数学关系的过程,在这一领域内所述末端执行器为内窥镜。这一过程是一个在实践中得到完善的简单过程。然而,通常要求由技术专家来执行所述校准。如果用户/外科医生使内窥镜相对于机器人发生了移动,那么必须重复机器人校准。

[0007] 人们已经提出了各种不同的用于解决医学机器人学中的,尤其是内窥镜手术中的视觉伺服的方案,但是所有的这些方案都依赖于 Image Jacobian,其可能经受本领域已知的各种缺陷。

发明内容

[0008] 本发明提供了一种视觉伺服技术,其不依赖于 Image Jacobian 或者从内窥镜图像的深度感知。更具体而言,本发明的视觉伺服技术涉及持有内窥镜的机器人,由此消除了校准内窥镜或者获得内窥镜图像相对于机器人的相对位置的必要性。本发明的视觉伺服技术还允许机器人系统与标准内窥镜一起使用,无需对硬件做出任何调整,而且在手术工作流程中不需要额外的过程。本发明的视觉伺服还允许内窥镜在手术中变化(例如,前视到倾斜或相反)。

[0009] 本发明的一种形式是采用摄像机(例如,内窥镜)、机器人和机器人控制器的机器人系统。所述摄像机具有光学取景器(例如,前向或倾斜),其用于采集示出了图像的数字视频帧。所述机器人包括末端执行器以及用于操纵所述末端执行器的一个或多个关节。所述机器人控制器包括视觉伺服,其用于控制所述末端执行器相对于所述数字视频帧内的图像特征的姿态。为此,所述视觉伺服识别所述数字视频帧的图像坐标系内的从跟踪点延伸至与所述图像特征相关联的目标点的跟踪向量,将跟踪向量映射到从与末端执行器相关联的机器人坐标系构建的配置空间内,以及从跟踪向量在所述配置空间内的映射导出机器人坐标系内的末端执行器的姿态。

[0010] 本发明的另一种形式是一种包括具有光学取景器的摄像机和机器人的机器人控制方法,所述机器人具有末端执行器以及用于操纵所述末端执行器的一个或多个关节。所述机器人控制方法涉及:采集示出了由所述摄像机光学检视的图像的数字视频帧;以及执行视觉伺服,用于控制所述末端执行器相对于所述数字视频帧内的图像特征的姿态。所述视觉伺服涉及:识别所述数字视频帧的图像坐标系内的从跟踪点延伸至与所述图像特征相关联的目标点的跟踪向量;将跟踪向量映射到从与末端执行器相关联的机器人坐标系构建的配置空间内;以及从跟踪向量在所述配置空间内的映射导出机器人坐标系内的末端执行器的姿态。

附图说明

[0011] 图 1 图示了根据本发明的机器人系统的示范性实施例。

[0012] 图 2 图示了根据本发明的机器人控制环的示范性实施例。

[0013] 图 3-6 图示了根据图 2 所示的机器人控制环的示范性数字视频帧序列。

[0014] 图 7 图示了表示根据本发明的机器人控制方法的示范性实施例的流程图。

[0015] 图 8 图示了表示根据本发明的方向设定方法的示范性实施例的流程图。

[0016] 图 9-11 图示了根据图 8 所示的流程图的末端执行器姿态确定的第一示范性序列。

[0017] 图 12-14 图示了根据图 8 所示的流程图的末端执行器姿态确定的第二示范性序列。

[0018] 图 15 图示了表示根据本发明的光学视觉伺服方法的第一示范性实施例的流程图。

[0019] 图 16 图示了表示根据本发明的光学视觉伺服的第二示范性实施例的流程图。

[0020] 图 17 图示了根据本发明的速率因数的示范性稳定化。

[0021] 图 18 图示了表示根据本发明的速率调节方法的示范性实施例的流程图。

[0022] 图 19 图示了表示根据本发明的方向调节方法的示范性实施例的流程图。

[0023] 图 20 图示了表示根据本发明的目标探头方法的示范性实施例的流程图。

具体实施方式

[0024] 如图 1 所示,机器人系统 20 采用摄像机 30、机器人 40 和机器人控制器 50 实施涉及机器人 40 的自动运动能力的任何机器人过程。这样的机器人过程的范例包括,但不限于,医学流程、装配线流程以及涉及移动机器人的流程。具体而言,机器人系统 20 可以应用的医学流程包括,但不限于,微创心脏手术(例如,冠状动脉旁路移植术或二尖瓣置换)、微

创腹部手术(腹腔镜检查)(例如,前列腺切除术或胆囊切除术)和通过自然孔口穿越腔的内窥镜手术。

[0025] 摄像机 30 可以是具有前向光学取景器或倾斜光学取景器的任何类型的摄像机,并且其采用任意类型的帧接收器 31,所述帧接收器能够以预定帧速率(例如,每秒 30 帧)采集二维数字视频帧序列 32。在一个示范性实施例中,摄像机 30 是内窥镜,文中将其广义地定义为在结构上被配置为通过成像装置(例如,光纤光学器件、透镜、基于微型化 CCD 的成像系统等)对(例如,人或动物的)身体的解剖区域进行成像的任何装置,其具有前向光学取景器或倾斜光学取景器,并且采用能够向机器人控制器 50 提供每一数字视频帧 32 的数字帧接收器。内窥镜的范例包括,但不限于,任何类型的成像窥镜(例如,支气管镜、结肠镜、腹腔镜、关节镜等)以及与窥镜类似的配备有成像系统(例如,成像套管)的任何装置。

[0026] 文中将机器人 40 广义地定义为任何机器人装置,其在结构上配置了对一个或多个关节 41 的电动化控制,从而根据需要操纵机器人 40 的末端执行器 42 实施具体的机器人过程。在实践中,机器人 40 可以具有最少四(4)个自由度,优选具有六(6)个或七(7)个自由度。

[0027] 末端执行器 42 的姿态是末端执行器 42 在机器人 40 的坐标系内的位置和取向,并且末端执行器 42 的任何既定的姿态都决定着摄像机 40 的光学取景器在机器人 40 的坐标系内的姿态。照此,可以将摄像机 30 安装到末端执行器 42 上(例如,将内窥镜安装到机器人 40 上,从而在医学过程中提供身体解剖区域的视图)。

[0028] 对于涉及具有前向光学取景器的摄像机 30 的机器人 40 的实施例而言,机器人 40 可以允许摄像机 30 的任何暂时(provisory)取向(例如,摄像机 30 关于摄像机 30 的纵轴的手术中人工旋转)。对于涉及具有倾斜光学取景器的摄像机 30 的机器人 40 的实施例而言,机器人 40 可以具有用于使摄像机 30 关于摄像机 30 的纵轴旋转的特定的关节。

[0029] 文中将机器人控制器 50 广义地定义为任何控制器,其在结构上被配置为向机器人 40 提供一个或多个机器人控制命令(“RCC”),从而针对具体的机器人流程根据需要控制末端执行器 42 的姿态,其方式是根据需要命令每一(或多个)机器人关节 41 产生所限定的运动,以实现末端执行器 42 的预期姿态。

[0030] 例如,在摄像机 30 是安装到末端执行器 42 上的内窥镜的情况下,(一个或多个)机器人控制命令 52 可以根据需要使一个或多个机器人关节 41 产生运动,从而促进内窥镜对手术工具的仪器顶端的跟踪,由此为外科医生提供所述顶端的一致视图,或者通过所述关节运动使内窥镜朝向具体的解剖学特征,诸如,心脏手术中的血管导引所述内窥镜,也可以通过所述关节运动使内窥镜的生理运动与器官吻合,从而提供所述器官的解剖学视图的稳定图像。

[0031] 对于数字视频帧 32 内的图像的特征的机器人跟踪而言,机器人控制器 50 包括视觉伺服 51,其用于控制末端执行器 42 相对于每一数字视频帧 32 内的图像的特征的姿态。具体而言,视觉伺服 51 通过执行自适应算法实现对数字视频帧 32 内的具体图像特征的定义目标点(例如,一个或多个像素)的静态或动态机器人跟踪,所述算法自动识别从跟踪点(例如,一个或多个像素)延伸至数字视频帧 32 内的目标点的跟踪向量。此外,所述自适应算法根据需要为每一数字视频帧 32 更新所述跟踪向量,或者按照数字视频帧 32 的任何指定的帧速率更新所述向量。

[0032] 为此目的,如图 2 所示,视觉伺服 51 通过闭合机器人控制环 21 实施特征跟踪过程 53、方向设置过程 55 和逆运动学过程 57,其图像采集 33 由帧接收器 31 和(一个或多个)机器人关节 41 的(一个或多个)受控运动 43 实施。在实践中,可以通过视觉伺服 51 的模块(未示出)实施过程 53、55 和 57,所述模块是通过安装在任何平台(例如,通用计算机、ASIC 板等)上的硬件、软件和 / 或固件实现的。

[0033] 参考图 2,特征跟踪过程 53 涉及对每一数字视频帧 32 的单独处理,以识别数字视频帧 32 内的特定图像特征的目标点,这是本领域已知的。例如,图 3-6 示出了由黑色 X 标示的特定图像特征的目标点 TG 的四(4)个数字视频帧 32。在图 3-6 的这一范例中,所述特定特征可以是具有摄像机 30 的手术工具的仪器顶端,所述摄像机 30 是用于为外科医生提供所述顶端的一致视图的内窥镜,或者所述特定特征可以是诸如血管或器官的具体解剖学特征的限定部分。

[0034] 再次参考图 2,特征跟踪 53 生成指示每一数字视频帧 32 内的目标点的受到跟踪的运动的二维图像数据(“2DID”),并且方向设置过程 55 继而对所述 2D 数据 54 进行处理,从而针对每一数字视频帧 32 识别从跟踪点延伸至目标点的跟踪向量(例如,跟踪方向和跟踪速率)。所述跟踪向量的识别设定从跟踪点延伸至目标点的固定跟踪方向,并且设定跟踪速率,所述跟踪速率同样可以是固定的,也可以通过对其进行调整来优化对目标点的跟踪。对于其跟踪向量具有任意大小或者具有最低大小的每一数字视频帧 32 而言,方向设置过程 55 生成指示机器人 40 的末端执行器 42 相对于数字视频帧 32 内的图像特征的预期姿态的三维机器人数据(“3DRD”)。逆运动学过程 57 对 3D 数据 56 进行本领域已知的处理,从而根据需要生成一个或多个机器人控制命令 52,以实现(一个或多个)机器人关节 41 的(一个或多个)适当关节运动 43,由此实现末端执行器 42 相对于数字视频帧 32 内的图像特征的预期姿态。

[0035] 例如,图 3-6 图示了跟踪向量的识别,所述跟踪向量从由白色 X 标示的跟踪点 TR 延伸至目标点 TG。具体而言,图 3 示出了数字视频帧 32 (1),其具有最初处于跟踪点 TR 处的目标点 TG。如图 4 所示,随着目标点 TG 在数字视频帧 32 (2)内从跟踪点 TR 处移开,方向设置过程 55 识别通过从跟踪点 TR 指向目标点 TG 的箭头标示的跟踪向量。方向设置过程 55 从所述跟踪向量的识别为数字视频帧 32 (3)设置用于使数字视频帧 32 (2)内的跟踪点 TR 向目标点 TG 的方向运动的跟踪方向,并利用所述跟踪向量的跟踪方向和跟踪速率来确定机器人 40 的末端执行器 42 相对于数字视频帧 32 (2)内的图像特征的预期姿态。接着,逆运动学过程 57 根据需要生成(一个或多个)机器人控制命令 52,以实现(一个或多个)机器人关节 41 的(一个或多个)适当关节运动 43,由此实现末端执行器 42 相对于数字视频帧 32 (2)内的图像特征的预期姿态。

[0036] 如图 5 所示,数字视频帧 32 (3)图示了被朝向目标点 TG 的方向运动的跟踪点 TR,但是目标点 TG 仍然距跟踪点 TR 存在位移。方向设置过程 55 再次识别由从跟踪点 TR 指向目标点 TG 的箭头标示的跟踪向量。方向设置过程 55 从跟踪向量的识别为数字视频帧 32 (5)(未示出)设置用于使数字视频帧 32 (4)内的跟踪点 TR 向目标点 TG 的方向运动的跟踪方向,并利用所述跟踪向量的跟踪方向和跟踪速率确定末端执行器 42 相对于数字视频帧 32 (3)内的图像特征的预期姿态。逆运动学过程 57 再次根据需要生成(一个或多个)机器人控制命令 52,以实现(一个或多个)机器人关节 41 的(一个或多个)适当关节运动 43,

由此实现机器人 40 的末端执行器 42 相对于数字视频帧 32 (4) 内的图像特征的预期姿态。

[0037] 如图 6 所示, 数字视频帧 32 (4) 图示了再一次吻合的跟踪点 TR 和目标点 TG。因而, 数字视频帧 32 (4) 的跟踪向量为零, 并且机器人控制器 50 将使(一个或多个)机器人关节 41 保持固定状态, 直到这样的在时间上相继产生的数字视频帧 32 指示在跟踪点 TR 与目标点 TG 之间存在非零跟踪向量或者具有最低大小的跟踪向量为止。

[0038] 文中对图 1-6 的描述便于对视觉伺服 51 的一般理解。下文中对图 8-16 所示的视觉伺服 51 的示范性实施例的描述便于对视觉伺服 51 的更加详尽的理解。具体地, 对于图 15 和 16 所示的视觉伺服方法而言, 在每一视频帧内根据需要调整所述跟踪速度, 或者按照任何指定的帧速率调整所述跟踪速度, 直到锁定最佳跟踪速度为止。

[0039] 图 7 图示了由机器人系统 20 (图 1) 执行的表示视觉伺服 51 的机器人控制方法的流程图 60。具体而言, 流程图 60 包括机器人校准阶段 S61 和目标初始化阶段 S62, 所述阶段是视觉伺服阶段 S63 的先决条件。在实践中, 在最初实施阶段 S61 时, 可以仅须针对新的受到跟踪的图像特征执行阶段 S62 和 S63, 本领域技术人员应当认识到这一点。

[0040] 阶段 S61 包括本领域技术人员已知的对机器人 40 的机器人校准, 其涉及在机器人 40 的关节空间和末端执行器 42 之间建立数学关系。

[0041] 阶段 S62 包括本领域已知的对数字视频帧 32 内的图像的具体特征的目标初始化。在阶段 S62 的一个示范性实施例中, 摄像机 30 在特定环境内的垂直运动(插入) 是一项可由系统 20 的用户设置的参数, 因此其超出了视觉伺服 51 的自动控制范围。因此, 在摄像机 30 插入到所述环境内之后, 可以以两(2) 个末端执行器 42 的自由度执行由视觉伺服 51 对机器人 40 的自动控制, 所述两个自由度包括 θ 角和 ϕ 角, 其用于界定机器人 40 的二维球冠。其可能涉及在将摄像机 30 插入到所述环境内时为机器人 40 建立虚拟的远程旋转中心(“RCM”), 由此, 所述虚拟 RCM 将决定机器人 40 围绕指定枢轴点(例如, 在具有最低侵入性的手术过程中内窥镜通过患者体内的小的切口的插入点) 的运动, 其界定了机器人 40 的球锥工作区。本领域技术人员将认识到基于 θ 角和 ϕ 角将所述球锥工作区转换成二维球冠。

[0042] 对于摄像机 30 为内窥镜的机器人控制器 50 的 RCM 实施例而言, 可以通过下述方式定义相对于内窥镜的 RCM 点: (1) 利用沿内窥镜的轴被布置为与内窥镜的顶端相距固定距离的标记; (2) 用户通过计算机程序指定 RCM 点与内窥镜顶端之间的距离; (3) 将内窥镜的窥镜顶端放置到预期的插入点, 尔后将所述插入点设定为 RCM, 并将内窥镜插入到预期的深度; 或者 (4) 利用相对于机器人 40 的空间预定点, 并将机器人放置到所述预定点与预期插入点吻合的位置。

[0043] 在实践中, 机器人 40 的基于 RCM 的运动将是由机器人控制器 50 实施的用以实现流程图 60 的阶段 S63 的视觉伺服的典型工作模式。或者, 机器人控制器 50 可以为阶段 S63 的视觉伺服实施摄像机 40 的初始放置, 其定义了摄像机 40 的球锥工作区。对于任何工作模式而言(RCM 或其他), 阶段 S63 包含涉及前文结合图 2 的说明描述的特征跟踪过程 53 和逆运动学过程 57 的视觉伺服, 阶段 S63 还涉及图 8-16 所示的方向设置过程 55 的示范性实施例。

[0044] 具体而言, 图 8 图示了表示本发明的方向设置方法的流程图 70。为了便于对流程图 70 的理解, 由内窥镜末端执行器 93 代表末端执行器 42。在一个实施例中, 内窥镜末端执

行器 93 是其近端通过本领域已知的任何手段耦合至机器人 40 的内窥镜。

[0045] 参考图 8, 流程图 70 的阶段 S71 包含每一数字视频帧 32 的二维图像坐标系 80 向机器人 40 的三维、二自由度机器人坐标系 90 的映射。在通过阶段 S71 所示的一个实施例中, 图像坐标系 80 具有 x 坐标和 y 坐标, 并且机器人坐标系 90 是具有通过虚线标示的从枢轴点 91 (例如, 虚拟 RCM) 延伸至二维面 92 的轴的球冠, 所述二维面 92 是由内窥镜末端执行器 93 关于枢轴点 91 的完整旋转勾勒出来的。在已知枢轴点 91 和内窥镜末端执行器 93 的远端顶端之间的距离的实践当中, θ 角 θ 对内窥镜末端执行器 93 的远端顶端相对于原点沿面 92 的边缘关于所述球冠的轴的旋转程度给出了明确的定量表述, 而 ϕ 角 ϕ 对内窥镜末端执行器 93 的远端顶端与所述球冠的轴之间的分离程度给出了明确的定量表述。或者, 在已知枢轴点 91 和内窥镜末端执行器 93 的远端顶端之间的距离的实践当中, θ 角 θ 隐含指示内窥镜末端执行器 93 的远端顶端相对于原点沿面 92 的边缘关于所述球冠的轴的旋转程度, 而 ϕ 角 ϕ 隐含指示内窥镜末端执行器 93 的远端顶端与所述球冠的轴之间的分离程度。

[0046] 流程图 70 的阶段 S72 包含相对于由机器人坐标系 90 定义的 θ 角 θ 和 ϕ 角 ϕ 的可能范围构建机器人坐标系 90 的二维配置空间 100。具体而言, 所述配置空间的构建涉及将机器人坐标系 90 的面 92 的球面投影到充当所述配置空间 100 的二维面内。所得到的配置空间 100 表示内窥镜末端执行器 93 的顶端的相对于两个可设置参数的整个配置空间。

[0047] 流程图 70 的阶段 S73 包含相对于机器人坐标系 90 的对内窥镜末端执行器 93 的姿态确定, 其涉及以跟踪向量在图像坐标系 80 内的映射为基础的在配置空间 100 内的机器人向量的映射。具体而言, 将多个数字视频帧上的图像坐标系 80 内的图像的运动映射到配置空间 100 内。将图像坐标系 80 内的通过像素 (隐含地通过毫米) 表示的位置转换为通过机器人坐标系 90 内的两个角度 (弧度) 表示的内窥镜末端执行器 93 的姿态, 其中, 所述两个角度是由配置空间 100 表现的, 鉴于这一事实, 这一映射是具有未知比例尺的定性映射。

[0048] 例如, 如图 9-11 所示, 在三 (3) 个数字视频帧内, 对具有由围绕跟踪点 (白色 X) 的环表示的最低大小的跟踪向量 (vtrk) 的识别将实现将所述跟踪向量 (vvtrk) 映射为配置空间 100 内的机器人向量 (vrob)。在映射比例尺未知的情况下, 将图像坐标系 80 内的目标点 TG 的位置转换为通过机器人坐标系 90 内的两个角度 (弧度) 表示的内窥镜末端执行器 93 的姿态, 其中, 所述两个角度是由配置空间 100 表示的。为此目的, 图像坐标系 80 内的跟踪向量 (vtrk) 的跟踪方向决定着机器人坐标系 90 内的机器人向量 (vrob) 的机器人方向, 接着通过逆运动学对所述机器人方向进行处理, 从而使机器人关节 41 产生运动, 进而实现机器人坐标系 90 内的内窥镜末端执行器 93 的姿态。

[0049] 作为另一个范例, 如图 12-14 所示, 在三 (3) 个数字视频帧内, 对具有最低大小的跟踪向量 (vtrk) 的识别再次实现了将所述跟踪向量 (vtrk) 映射为配置空间 100 内的机器人向量 (vrob)。再次在映射比例尺未知的情况下, 将图像坐标系 80 内的目标点 TG 的位置转换为通过机器人坐标系 90 内的两个角度 (弧度) 表示的内窥镜末端执行器 93 的姿态, 其中, 所述两个角度是通过配置空间 100 表示的。为此目的, 图像坐标系 80 内的跟踪向量 (vtrk) 的跟踪方向决定着机器人坐标系 90 内的机器人向量 (vrob) 的机器人方向, 接着通过逆运动学对所述机器人方向进行处理, 从而使机器人 40 的 (一个或多个) 关节 41 产生运动, 进而

实现机器人坐标系 90 内的内窥镜末端执行器 93 的姿态。

[0050] 参考图 9-14, 如前文所述, 图像坐标系 80 和配置空间 100 之间的映射比例尺是未知的。因而, 使跟踪向量(vtrk) 归一化(即, 将长度设为 1), 并将其作为机器人向量(vrob) 变换至配置空间 100。因此, 与机器人向量(vrob) 相关的 theta 角 θ 和 phi 角 ϕ 的值界定了沿机器人向量(vrob) 的既定方向的单位机器人位移。在实践中, 可以对机器人 40 进行速度控制, 其中, 沿 theta 角 θ 方向和 phi 角 ϕ 方向这两个方向通过弧度 / 秒定义单位机器人位移。由于对机器人向量(vrob) 进行了归一化, 因而沿 theta 角 θ 方向和 phi 角 ϕ 方向的速度应当 ≤ 1 弧度 / 秒。然而, 根据其他参数(例如, 数字视频帧 32 中的特征深度、数字视频帧 32 中的跟踪点的相对速率等), 机器人向量(vrob) 的速度可能不足以使跟踪点 TR 抵达目标点 TG, 或者可能过快, 从而使跟踪点 TR 越过了目标点 TG。

[0051] 为了对图像坐标系 80 和配置空间 100 之间的未知映射比例尺做出补偿, 图 15 图示了流程图 110, 并且图 16 图示了流程图 120, 二者均表示可以在阶段 S73 期间实施的对跟踪向量的跟踪速率分量进行优化的最佳视觉伺服方法。

[0052] 参考图 15, 只要目标点已经在数字视频帧 32 的两(2)个相继的采样帧之间相对于跟踪点发生了位移, 那么流程图 110 的阶段 S111 就将涉及速率因数(s) 的初始化和图像坐标系 80 内的跟踪向量(vtrk) 的识别。在实践中, 速率因数(s) 的初始值可以是任何无量纲经验值(例如, $\leq 1 \geq$)。阶段 S111 还涉及等于跟踪向量(vtrk) 的参考向量(vref) 的初始化。

[0053] 流程图 110 的阶段 S112 涉及配置工作区 100 内的机器人向量(vrob) 的识别, 其涉及将跟踪向量(vtrk) 映射到配置工作区 100 内。阶段 S112 还涉及将跟踪速度设置为速率因数(s) 与机器人向量(vrob) 的乘积, 其中, 速率因数(s) 调整与机器人向量(vrob) 相关的 theta 角 θ 和 phi 角 ϕ 的弧度 / 秒值。将跟踪速度(s*vrob) 映射至机器人坐标空间 100, 从而采用对应的 theta 角 θ 和 phi 角 ϕ 生成 3D 机器人数据作为实现所述跟踪速度(s*vrob) 所需的机器人运动的指示。

[0054] 由于机器人 40 根据跟踪速度产生了运动, 因而鉴于这样的事实, 即: (1) 由于末端执行器 42 的任何运动, 目标点可能正在相继的采样数字图像帧 32 的图像坐标系 80 内发生运动; 以及 (2) 目标点可能正在所述环境的坐标系内运动, 必须从数字视频帧 32 的后续帧对跟踪点和目标点之间的任何位移进行更新。因此, 利用流程图 110 的阶段 S113-S117 按照数字视频帧 32 的采样速率(例如, 数字视频帧 32 的每一帧或者按照指定的数字视频帧 32 的帧速率) 来调整跟踪速度。

[0055] 具体而言, 阶段 S113 涉及在相继的数字视频帧 32 的采样帧内更新跟踪点和目标点之间的跟踪向量(vtrk)。阶段 S114 确定跟踪向量(vtrk) 是否小于准确度阈值, 建立所述阈值的目的在于, 在数字视频帧 32 的相继采样帧内不存在显著噪声的情况下保持稳定的机器人 40 的定位。如果跟踪向量(vtrk) 小于准确度阈值, 那么流程图 110 返回至阶段 S113, 从而跟踪数字视频帧 32 的下一相继采样帧内的跟踪向量(vtrk)。否则, 流程图 110 进行至阶段 S115, 以确定跟踪向量(vtrk) 和参考向量(vref) 之间的角度是否小于角度阈值 X° (例如, 90°)。

[0056] 如果跟踪向量(vtrk) 和参考向量(vref) 之间的角度小于所述角度阈值 X° , 那么流程图 110 进行至阶段 S116, 从而更新等于跟踪向量(vtrk) 的参考向量(vref), 并增大速

率因数(s),尔后返回至阶段 S112,从而根据需要针对额外的数字视频帧 32 的采样帧重复所述环。如果跟踪向量(vtrk)和参考向量(vref)之间的角度等于或大于角度阈值 X° ,那么流程图 110 进行至阶段 S117,从而更新等于跟踪向量(vtrk)的参考向量(vref),并降低速率因数(s),尔后返回至阶段 S112,从而根据需要针对额外的数字视频帧 32 的采样帧重复所述环。

[0057] 在实践中,如果系统 20 的用户旋转了摄像机 30 (例如,使内窥镜围绕其轴旋转或者使处于内窥镜的近端的 CCD 摄像机发生旋转),那么跟踪向量(vtrk)和参考向量(vref)可以改变取向。如果系统不允许这类运动,那么可以省略阶段 S117。

[0058] 阶段 S113-S117 的益处在于优化跟踪速度($s*vrob$)。具体而言,如果跟踪点在数字视频帧 32 的两个采样帧之间发生了运动,那么阶段 S115 评估最新更新的跟踪向量(S113)和先前更新的参考向量(vref)之间的角位移,以确定最新更新的跟踪向量(vtrk)是否与先前更新的参考向量(vref)处于相同的总方向内(例如,角(vtrk,vref) $<90^\circ$),或者最新更新的跟踪向量(vtrk)是否指向与先前更新的参考向量(vref)不同的方向(例如,(vtrk,vref) $\geq 90^\circ$)。在实践中,可以按照大于 0° ,小于 90° 的任何角度完成所述方向变化。

[0059] 在相同总方向的情境下,假定机器人沿正确的方向运动,从而使跟踪点沿数字视频帧 32 内的目标点的方向运动,而不会越过目标点。在这种情况下,在阶段 S116 期间更新参考向量(vref)并增大速率因数(s),并且在阶段 S112-S117 的另一环期间继续对目标点的跟踪。例如,如图 9 所示,在图像坐标系的第一帧 80 (1)内识别初始跟踪向量(vtrk),并利用其映射配置工作区 100 (1)内的机器人向量(vrob)。为机器人向量(vrob)设置跟踪速度($s*vrob$),机器人 40 由此产生相应地运动,并如图 10 所示在图像坐标系的第二帧 80 (2)内更新跟踪向量(vtrk)。图 10 的跟踪向量(vtrk)与图 9 所示的跟踪向量(vtrk)处于相同的总方向内。因而,将参考向量(vref)更新为图像坐标系 80 (1)中所示的跟踪向量(vtrk),并增大速率因数(s)。在接下来的阶段 S112-S117 的环内,利用图像坐标系的第二帧 80 (2)内的更新跟踪向量(vtrk)映射配置工作区 100 (2)内的机器人向量(vrob)。之后,为机器人向量(vrob)更新跟踪速度($s*vrob$),机器人 40 由此产生相应的运动,并在图 11 所示的图像坐标系的第三帧 80 (3)内识别新的跟踪向量(vtrk)。跟踪向量(vtrk) (图 11 中未示出)小于通过围绕跟踪点的环标示的阶段 S114 的准确度阈值,因而将机器人 40 设定到固定位置,直到下一更新跟踪向量(vtrk)大于等于所述准确度阈值为止。

[0060] 在不同方向的情境内,假定机器人 40 沿正确的方向运动,从而使跟踪点沿数字视频帧 32 中的目标点的方向运动,但是越过了目标点,或者目标点在数字视频帧 32 的相继采样帧内改变了方向。在这种情况下,在阶段 S116 内更新参考向量(vref)并降低速率因数(s),并且在阶段 S112-S117 的另一环内继续目标点的跟踪。例如,如图 12 所示,利用在图像坐标系的第四帧 80 (4)内识别的初始跟踪向量(vtrk)来映射配置工作区 100 (4)内的机器人向量(vrob)。为机器人向量(vrob)生成跟踪速度($s*vrob$),机器人 40 借此产生相应的运动,并在图 13 所示的图像坐标系的第五帧 80 (5)内识别新的跟踪向量(vtrk)。与图 12 所示的跟踪向量(vtrk)的方向相比,图 13 的跟踪向量(vtrk)处于不同的方向内。因而将参考向量(vref)更新为图像坐标系 80 (4)的跟踪向量(vtrk),并降低速率因数(s)。在接下来的阶段 S112-S117 的环内,利用图像坐标系的第五帧 80 (5)内的更新跟踪向量

(vtrk)映射配置工作区 100 (5)内的机器人向量(vrob)。之后,为机器人向量(vrob)更新跟踪速度($s*vrob$),机器人 40 由此产生相应的运动,并在图 14 所示的图像坐标系的第六帧 80 (6)内识别新的跟踪向量(vtrk)。跟踪向量(vtrk)(图 14 中未示出)小于通过围绕跟踪点的环标示的阶段 S114 的准确度阈值,因而将机器人 40 设定到固定位置,直到下一跟踪向量(vtrk)大于等于所述准确度阈值为止。

[0061] 参考图 16,流程图 120 的内在含义与流程图 110 (图 14)相同,只是其采用图像坐标系 80 内的跟踪向量的长速因数(1)实施了比例控制。长度因数(1)指示跟踪点距目标点有多远,并且可以通过像素对其加以表示。因而,在流程图 120 的阶段 S121 期间对长度因数(1)进行相应地初始化,并且在流程图 120 的阶段 S122 中可以将机器人向量(vrob)的跟踪速度表述为($s*1*vrob$)。在这种情况下,速率因数(s)的量纲为 mm/(s*像素)。在一个实施例中,可以采用长度因数(1)的微分和积分因数增强阶段 S126 和 S127 中的长度因数(1)的比例控制,这与本领域已知的 PID (比例-积分-微分)控制类似。

[0062] 图 9-14 图示了速率因数(s)的优化的两个简单的范例。在实践中,阶段 S112-S117 (图 15)以及阶段 S122-S127 的优点在于,视觉伺服 51 实时地习得(learning)最佳速率因数(s)。如果目标点以恒定速度运动,那么如图 17 所示,最初的速率因数(s)变化将在数字视频帧 32 的多个帧之后稳定化,其中,在覆盖所述帧的时间 t_s 之后将达到速率因数(s)的稳定化。否则,如果跟踪点以变化的速度运动,那么最初的速率因数(s)的变化将在数字视频帧 32 的多个帧之后以一定量的噪声稳定化。

[0063] 在实践中,图 15 和 16 所示的速率因数(s)的增大值和降低值可以是常数。或者,图 18 图示了表示本发明的速率调节方法的流程图 140。具体而言,流程图 140 的阶段 S141 包含在考虑跟踪点的跟踪等待时间或者考虑系统 20 的应用的情况下对跟踪速度($s*rob$)或者($s*1*rob$)的速率进行评估。在跟踪等待时间实施例中,对机器人 40 的控制总是在尝试以机器人 40 在任何既定时间上可能的最大速率对跟踪点进行跟踪。为此目的,对速率因数(s)的稳定化和跟踪等待时间进行评估,这样做是为了调节流程图 140 的阶段 S142 中的速率因数(s),从而尝试以其在任何既定时间上可能的最大速率对跟踪点进行跟踪。例如,对于具有低跟踪等待时间的稳定速率因数(s)或者对于不稳定的速率因数(s)(例如,目标点越过了跟踪点)在阶段 S142 中降低速率因数(s)的增大值和降低值。反之,对于具有高跟踪等待时间的稳定速率因数(s)在阶段 S142 内增大速率因数(s)的增大值和降低值。在实践中,除了固有的机器人速率以外的影响跟踪等待时间的参数包括,但不限于,跟踪点和目标点之间的距离、摄像机 30 的插入深度、摄像机 30 的顶端和 RCM 插入点之间的距离。然而,不管所述参数发生任何变化,速率因数(s)的调节都保持了跟踪速度($s*rob$)或($s*1*vrob$)的优化。

[0064] 在所述应用的实施例中,机器人 40 的控制并不一直尝试以机器人 40 的最大速率跟踪数字视频帧 32 内的跟踪点,而是以适合所述应用的速率进行跟踪。为此目的,在考虑预测的跟踪点运动的情况下,评估跟踪速度($s*rob$)或($s*1*vrob$)的速度范围,所述预测的跟踪点运动是视觉伺服 51 由数字视频帧 32 确定的,或者是由系统 20 的操作员提供给视觉伺服 51 的。在阶段 S142 期间相应地设置速度因数(s)。例如,对手术工具的静态跟踪将忽略小的震颤,因而应当将速度因数(s)设定为忽略小的震颤。而且,例如,对搏动的心脏的动态跟踪涉及心脏运动的快速变化,因此应当将速率因数(s)设定为遵循心脏运动的快

速变化。

[0065] 而且,在实践中,可能使受到跟踪的特定特征相对于机器人 40 旋转(例如,上下和左右运动在所述两个坐标系内并不相同,尤其是对于倾斜光学检视摄像机而言),并且对机器人 40 的控制可能在不曾抵达目标点的情况下围绕目标点振荡。图 19 示出了表示本发明的方向评估的流程图 150,其用于校正机器人 40 围绕目标点的潜在振荡。流程图 150 的阶段 S151 包含对跟踪速度($s*rob$)或($s*1*vrob$)的跟踪方向的评估,其涉及计量数字视频帧 32 的两个既定帧之间的连续方向变化的数量。在计数器达到指定的连续方向变化数量(优选为 2 个或 3 个连续方向变化)时,流程图 150 进行至阶段 S152,从而在使机器人 40 发生运动之前,使映射在配置工作区 100 内的机器人向量($vrob$)相对于映射在图像坐标系 80 内的跟踪向量($vtrk$)发生旋转。最快的达到收敛的技术是针对 90° 、 180° 或 270° 的旋转将配置工作区划分成四(4)个象限。在阶段 S112 内实施流程图 150,其中,在检测到正确的象限时,可能在跟踪方向做进一步评估时需要将所述象限进行细分。

[0066] 而且,在实践中,可以对机器人 40 加以控制,从而实现一旦定义了倾斜光学检视摄像机 30 的插入点(例如,RCM 点),就将自动找到并跟踪数字视频帧 32 内的特定特征。图 20 示出了表示目标探头法的流程图 160,其用于自动找到并跟踪图像 40 内的特定特征。流程图 160 的阶段 S161 包含摄像机扫描,其涉及使摄像机 30 相对于插入点围绕其轴发生旋转。摄像机 30 一旦找到了被设定为目标特征,机器人控制器 50 就将流程图 160 的阶段 S 162 中的扫描配置锁定为机器人坐标系 90,其目的在于实现前文所述的方向设置。

[0067] 尽管已经参考示范性的方面、特征和实现描述了本发明,但是所公开的系统和方法不限于这样的示范性方面、特征和 / 或实现。相反,本领域技术人员通过文中提供的描述显然可以容易地认识到,在不背离本发明的精神或范围的情况下,所公开的系统和方法可受到修改、变更或强化。因此,本发明明确地包含这样的处于其范围内的修改、变更或强化。

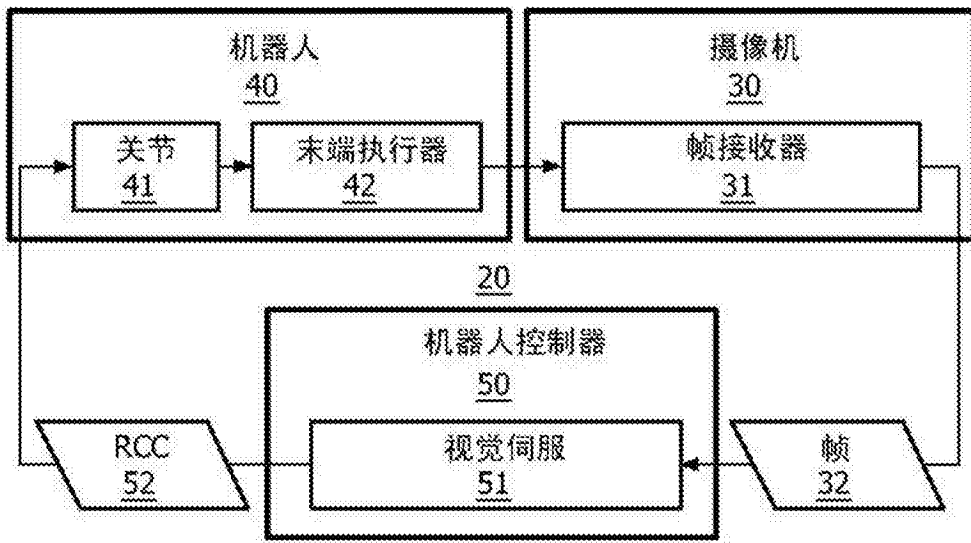


图 1

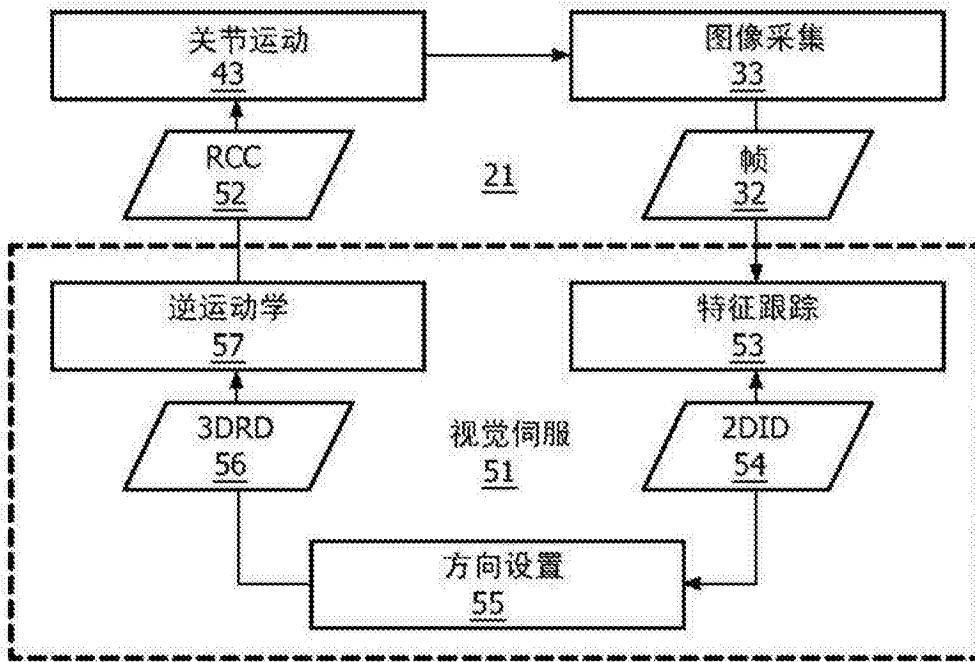


图 2

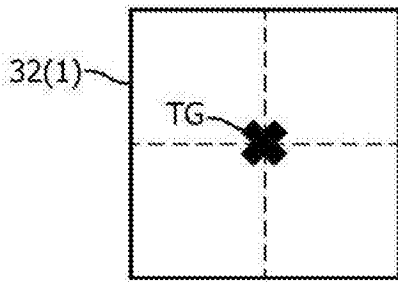


图 3

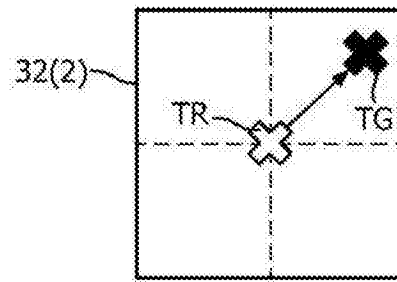


图 4

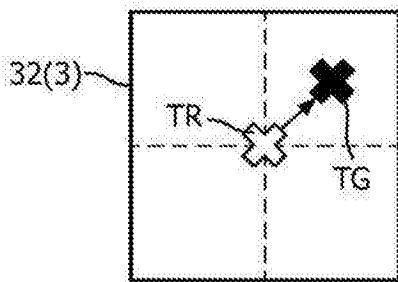


图 5

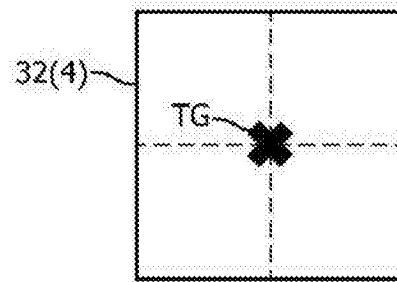


图 6

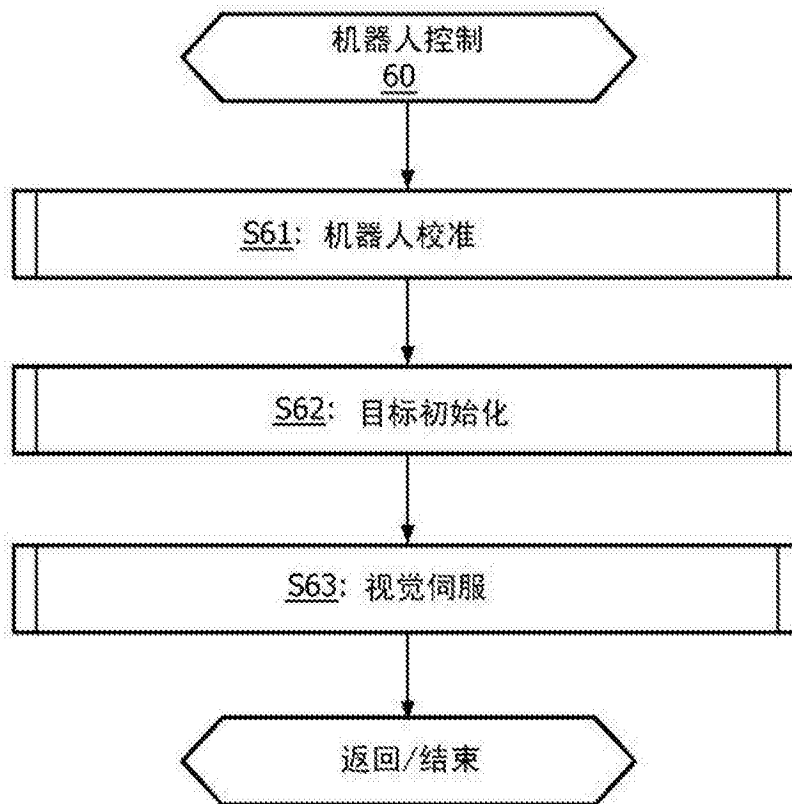


图 7

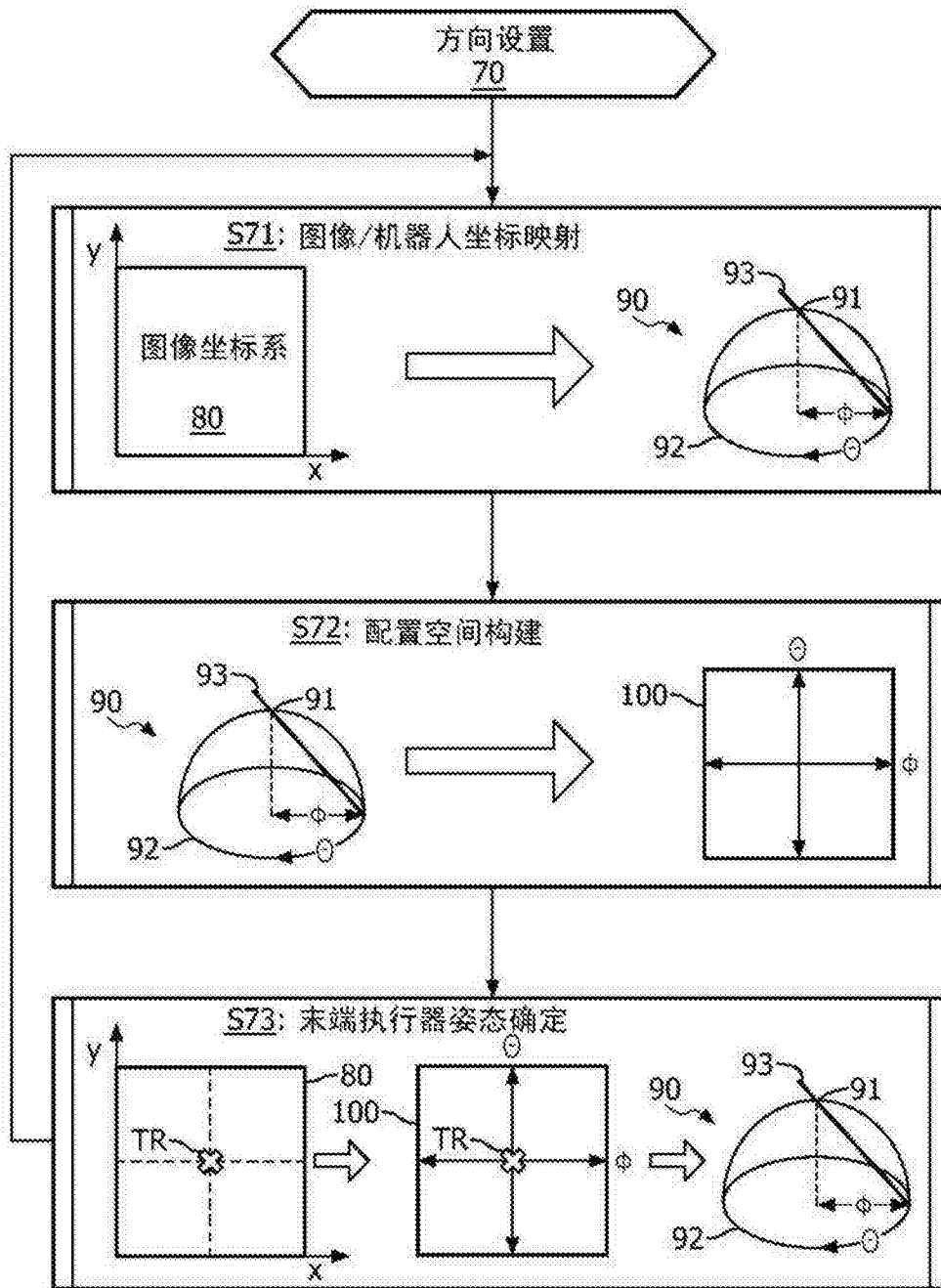


图 8

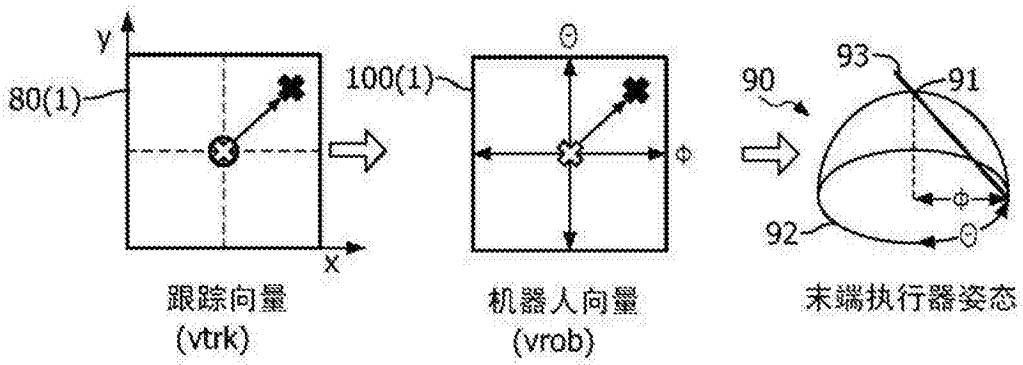


图 9

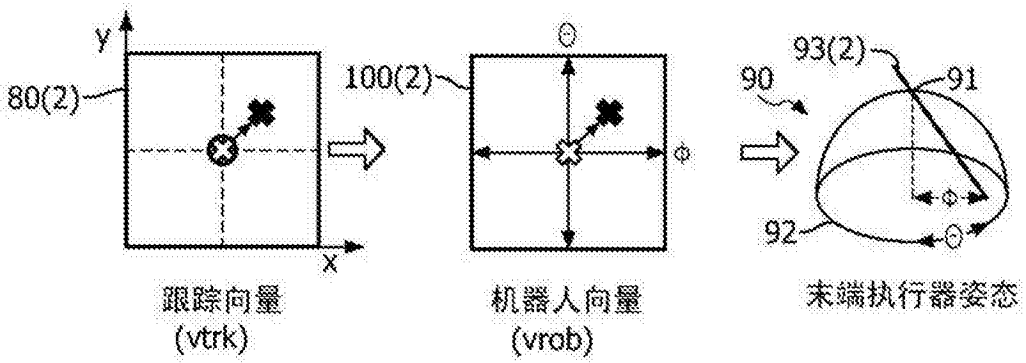


图 10

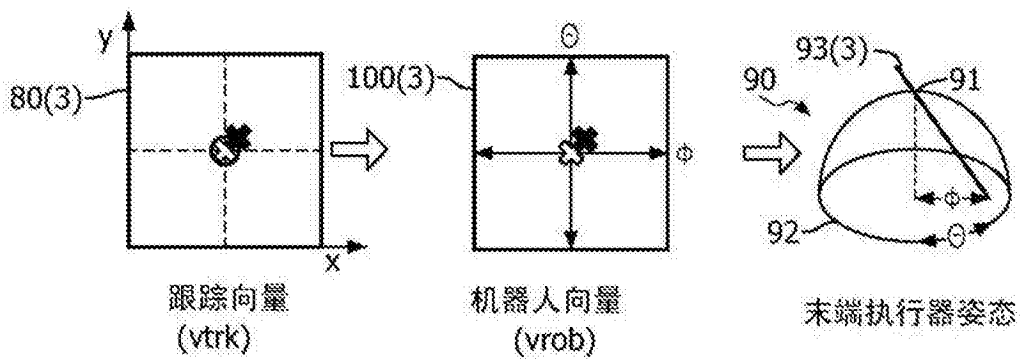


图 11

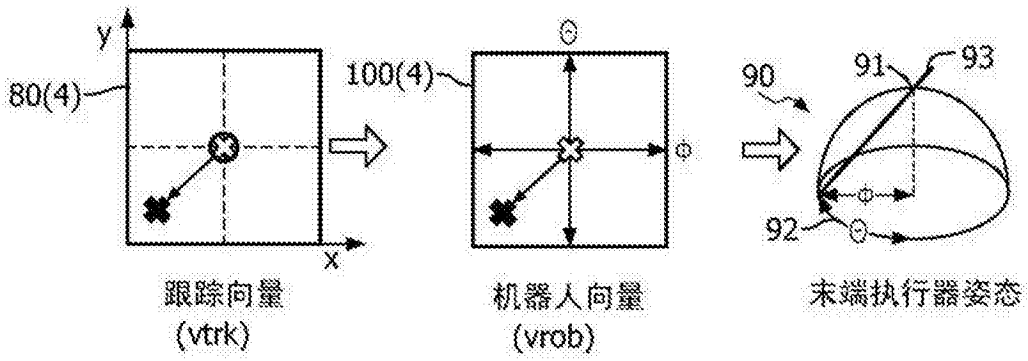


图 12

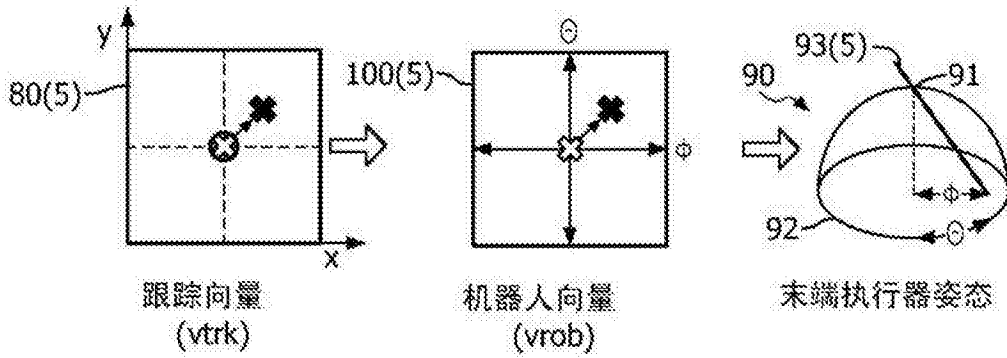


图 13

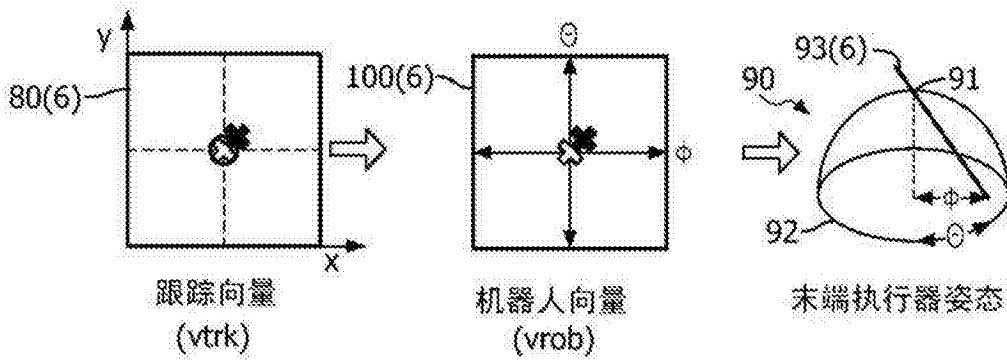


图 14

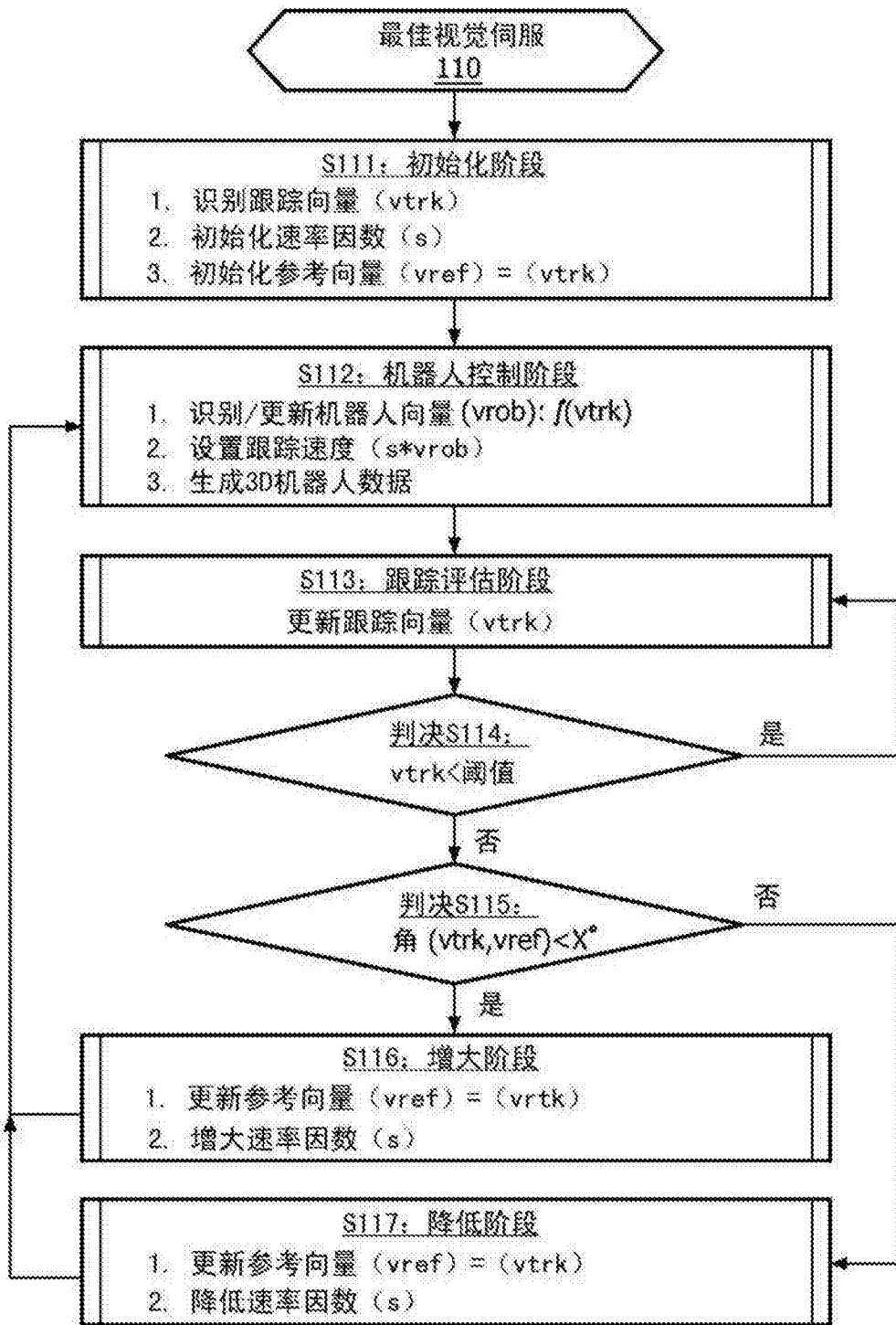


图 15

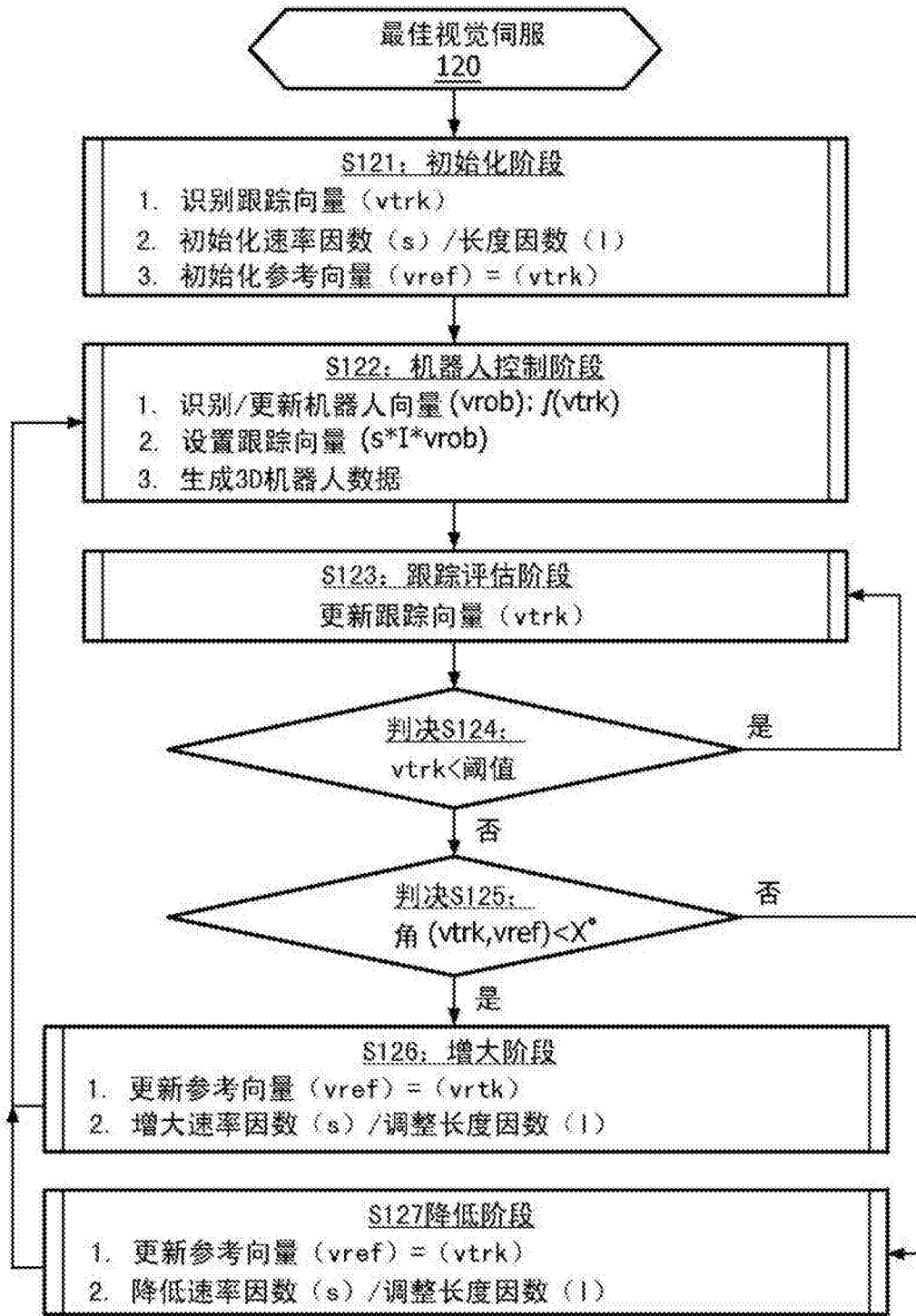


图 16

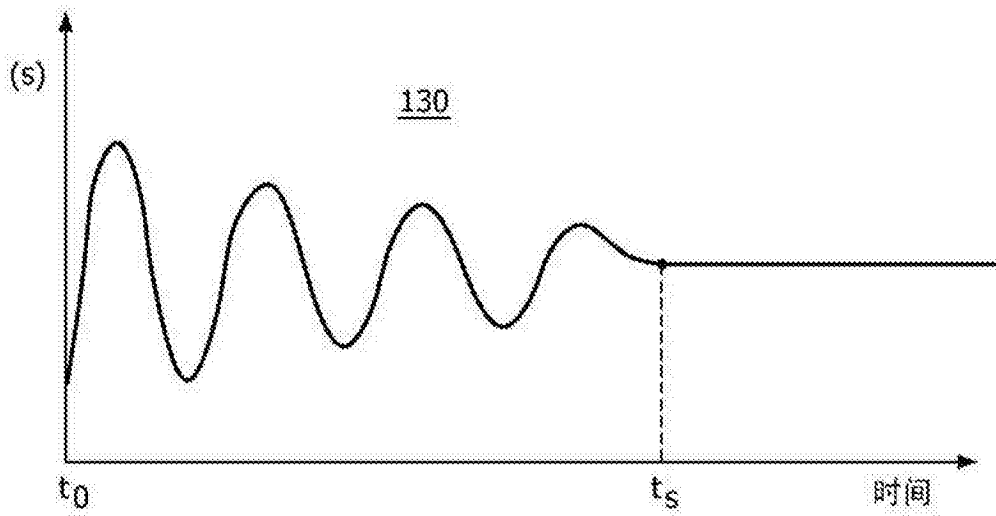


图 17

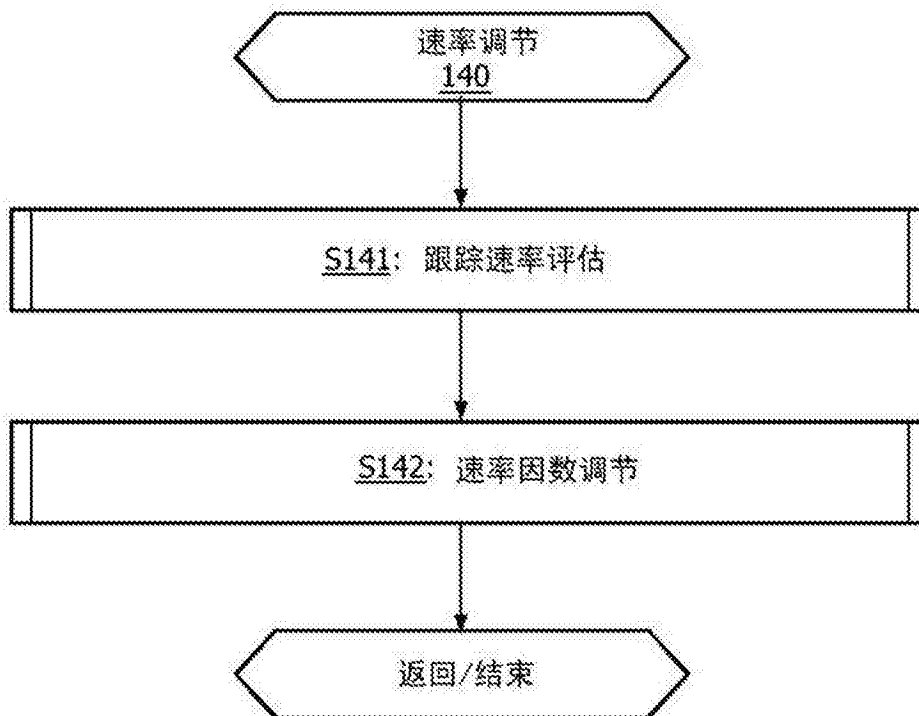


图 18

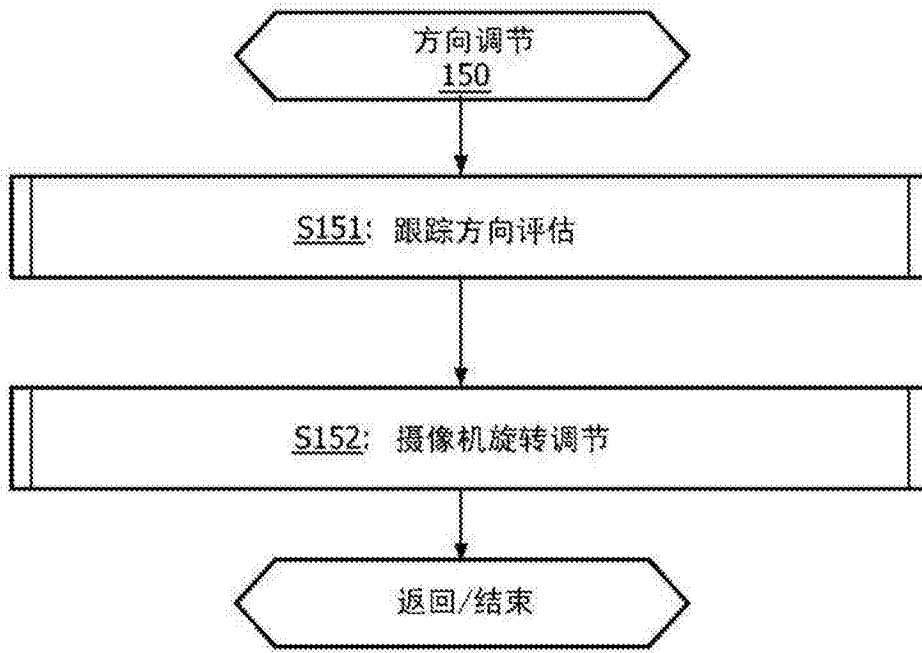


图 19

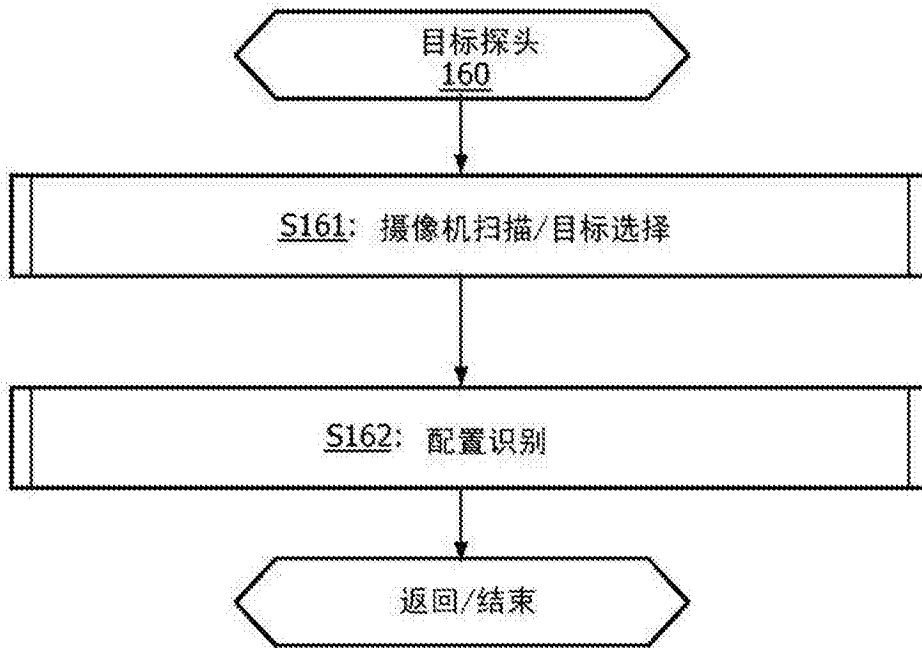


图 20

专利名称(译)	采用实时速度优化的不经校准的视觉伺服		
公开(公告)号	CN102791214B	公开(公告)日	2016-01-20
申请号	CN201080065226.X	申请日	2010-11-17
[标]申请(专利权)人(译)	皇家飞利浦电子股份有限公司		
申请(专利权)人(译)	皇家飞利浦电子股份有限公司		
当前申请(专利权)人(译)	皇家飞利浦电子股份有限公司		
[标]发明人	A波波维奇 P西恩帕波		
发明人	A·波波维奇 P·西恩帕波		
IPC分类号	A61B34/30		
CPC分类号	B25J9/1697 A61B34/20 A61B34/30 A61B90/361 G06T7/246 G06T2207/10068 Y10S901/15 Y10S901/47		
代理人(译)	王英 刘炳胜		
审查员(译)	姚媛		
优先权	61/293222 2010-01-08 US		
其他公开文献	CN102791214A		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

一种用于具有光学取景器的摄像机 (30) 和机器人 (40) 的机器人控制方法, 所述机器人 (40) 具有末端执行器 (42) 以及用于操纵所述末端执行器 (42) 的一个或多个关节 (41)。所述机器人控制方法涉及: 采集示出了所述摄像机 (30) 光学检视的图像的数字视频帧 (32); 以及执行视觉伺服, 所述视觉伺服用于控制所述末端执行器 (42) 相对于所述数字视频帧 (32) 内的图像特征的姿态。所述视觉伺服涉及: 识别所述数字视频帧 (32) 的图像坐标系 (80) 内的从跟踪点 (TR) 延伸至与所述图像特征相关联的目标点 (TG) 的跟踪向量 (vtrk); 将跟踪向量映射到从与末端执行器 (42) 相关联的机器人坐标系 (90) 构建的配置空间 (100) 内; 并从跟踪向量 (vtrk) 在所述配置空间 (100) 内的映射导出机器人坐标系 (90) 内的末端执行器 (42) 的姿态。

