(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 115243823 A
(43)申请公布日 2022.10.25

(21)申请号 202180010606.1

(22)申请日 2021.01.22

(30)优先权数据
62/965,491 2020.01.24 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2022.07.22

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2021/014632 2021.01.22

(87)PCT国际申请的公布数据
WO2021/150904 EN 2021.07.29

(71)申请人 诺万达公司
地址 美国马萨诸塞州

(72)发明人 M·卢卡斯 S·奚望

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司 31100
专利代理师 侯颖媛 张鑫

(51)Int.Cl.
B23K 26/03(2006.01)
B23K 26/082(2014.01)
B23K 26/08(2014.01)
B23K 26/38(2014.01)
G05B 19/19(2006.01)

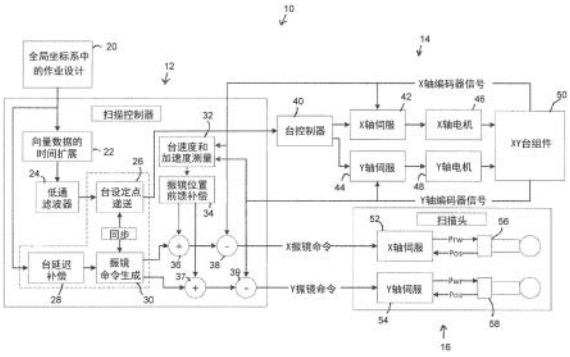
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

用于使用位置前馈补偿来提高大面积激光加工中的精度的系统和方法

(57)摘要

公开了一种提供对工件的即时激光加工的激光加工系统。激光加工系统包括:配置成支撑工件的定位系统;配置成控制工件在定位系统上的移动的定位系统控制器;配置成在工件上方扫描激光束的扫描器系统;以及配置成操作扫描器系统和定位系统控制器的扫描器控制器,该扫描器控制器接收向量输入数据以在前馈位置补偿中使用。



CN 115243823 A

1.一种提供对工件的即时激光加工的激光加工系统,所述激光加工系统包括:

定位系统,所述定位系统配置成支撑所述工件;

定位系统控制器,所述定位系统控制器配置成控制所述工件在所述定位系统上的移动;

扫描器系统,所述扫描器系统配置成在所述工件上方扫描激光束;以及

扫描器控制器,所述扫描器控制器配置成操作所述扫描器系统和所述定位系统控制器,所述扫描器控制器接收向量输入数据以在前馈位置补偿中使用。

2.如权利要求1所述的激光加工系统,其特征在于,所述向量输入数据部分地被低通滤波并以降低的数据速率提供。

3.如前述权利要求中任一项所述的激光加工系统,其特征在于,所述扫描器控制器以经定位系统延迟补偿的高数据速率操作所述扫描器系统,其中扫描器定位通过对所述定位系统位置和速度的观察来补偿。

4.如前述权利要求中任一项所述的激光加工系统,其特征在于,所述向量输入数据沿两个不同路径提供,以将所述降低的数据速率的输入提供到所述定位系统控制器并将所述经定位系统延迟补偿的高数据速率的输入提供到所述扫描器控制器。

5.如前述权利要求中任一项所述的激光加工系统,其特征在于,所述系统通过对随时间观察到的位置变化进行积分来计算所述工件的速度和加速度。

6.如权利要求5所述的激光加工系统,其特征在于,所述系统使用所计算的所述工件的速度和加速度来预测所述工件的未来位置。

7.如前述权利要求中任一项所述的激光加工系统,其特征在于,所述扫描器系统的较高带宽使得振镜镜被定位在所述工件的预测路径上,而与所述工件的速度或位置的变化无关。

8.如前述权利要求中任一项所述的激光加工系统,其特征在于,在作业开始时,以不需要与提供到所述扫描器控制器的经定位系统延迟补偿的高数据速率的输入同步的速率将经低通滤波的降低的数据速率的输入提供到所述定位系统控制器。

9.一种提供对工件的即时激光加工的激光加工系统,所述激光加工系统包括:

定位系统,所述定位系统配置成支撑所述工件;

定位系统控制器,所述定位系统控制器配置成控制所述工件在所述定位系统上的移动;

扫描器系统,所述扫描器系统配置成在所述工件上方扫描激光束;以及

扫描器控制器,所述扫描器控制器配置成操作所述扫描器系统和所述定位系统控制器,所述扫描器控制器确定所述定位系统的预期向量以在前馈位置补偿中使用。

10.如权利要求9所述的激光加工系统,其特征在于,所述扫描器控制器响应于向量输入数据而操作所述定位系统控制器,所述向量输入数据被部分地时域扩展并以降低的数据速率提供,所述扫描器控制器以经定位系统延迟补偿的高数据速率操作所述扫描器系统。

11.如权利要求9-10中任一项所述的激光加工系统,其特征在于,所述降低的数据速率和所述经台延迟补偿的高数据速率是同步的。

12.如权利要求9-11中任一项所述的激光加工系统,其特征在于,所述向量输入数据被进一步低通滤波以提供所述降低的数据速率。

13.如权利要求9-12中任一项所述的激光加工系统,其特征在于,所述向量输入数据沿两个不同路径提供,以将所述降低的数据速率的输入提供到所述定位系统控制器并将所述经定位系统延迟补偿的高数据速率的输入提供到所述扫描器控制器。

14.如权利要求9-13中任一项所述的激光加工系统,其特征在于,所述系统通过对随时间的位置变化进行积分来计算所述工件的速度和加速度。

15.如权利要求9-14中任一项所述的激光加工系统,其特征在于,所述系统预测所述工件的未来位置。

16.如权利要求9-15中任一项所述的激光加工系统,其特征在于,所述扫描器系统的较高带宽使得振镜镜被定位在所述工件的经预测路径上,而与所述工件的速度或位置的变化无关。

17.如权利要求9-16中任一项所述的激光加工系统,其特征在于,在作业开始时,以不需要与提供到所述扫描器控制器的所述经定位系统延迟补偿的高数据速率的输入同步的速率将经低通滤波的降低的数据速率的输入提供到所述定位系统控制器。

18.一种提供对工件的即时激光加工的方法,所述方法包括:

提供定位系统,所述定位系统配置成支撑所述工件;

提供定位系统控制器,所述定位系统控制器配置成控制所述工件在所述定位系统上的移动;

提供扫描器系统,所述扫描器系统配置成在所述工件上方扫描激光束;

提供扫描器控制器,所述扫描器控制器配置成操作所述扫描器系统和所述定位系统控制器;

响应于向量输入数据而操作所述定位系统控制器;以及

以经定位系统延迟补偿的高数据速率操作所述扫描器系统。

19.如权利要求18所述的方法,其特征在于,所述向量输入数据部分地被低通滤波并以降低的数据速率提供。

20.如权利要求18-19中任一项所述的方法,其特征在于,扫描器定位通过对所述定位系统位置和速度的观察来补偿。

用于使用位置前馈补偿来提高大面积激光加工中的精度的系统和方法

优先权

[0001] 本申请要求于2020年1月24提交的美国临时专利申请第62/965,491号的优先权，该申请的公开内容通过引用以其整体结合在此。

背景技术

[0002] 本申请总体涉及激光扫描系统，并且尤其涉及大面积即时(on-the-fly)激光标记和切割系统。

[0003] 激光扫描系统通常用于在材料处于运动时标记或切割材料。这种工艺在工业上通常被称为“即时”。这些系统通常采用诸如旋转编码器或线性编码器之类的位置测量系统作为反馈以用于控制工件定位系统的运动。在两轴系统中，工件定位系统通常是XY台，尽管在一些系统中，工件以单个轴定位，并且扫描头以正交轴定位在工件之上。如本文所使用的，术语“定位系统”通常是指这些系统配置及其等效物。激光振镜控制器可使用定位系统的编码器信息来偏移振镜位置，从而使经转向的激光束跟随工件的运动。

[0004] 在大面积上进行的高精度激光微加工已经产生了使用外部运动系统在激光加工扫描头的固定扫描区域下方移动工件的系统设计。外部移动系统可以是单轴的(通常用于基于网络的转换工具)，或是例如在显示器加工(诸如有机发光二极管(OLED)切割、氧化铟锡(ITO)刻划、通孔钻孔等)中使用的基于两轴龙门(gantry)(或XY)台的系统。在此类两轴系统中，由于需要将激光加工步骤与使用高精度半导体加工技术生产的工件上的工艺品对齐，激光束定位精度已经变得更加严格。对于此类系统，通常需要在+/-500mm的加工区域内将激光束精确且可重复地定位到+/-5μm(有效精度为10PPM)。

[0005] 某些激光定位系统采用组合的激光头定位和工件定位。例如，美国专利第5,751,585号公开了一种被公开为紧凑的组合系统布局的系统，该系统使用X和Y定位系统在一个维度上移动扫描头，并且在另一个维度上移动材料。通过路径平移(panning)分析来协调定位系统与振镜之间的运动。

[0006] 美国专利申请公开第2018/0339364号公开了一种系统，其中激光扫描器控制器利用单独的XY台控制器并与激光转向振镜同步地引导XY台。该系统采用跨通信域接口在扫描器控制器与台控制器之间传输信息，包括台控制器需要遵循的位置命令和用于使扫描器控制器和台控制器同步的时钟信息。

[0007] 美国专利申请公开第2018/0056443号公开了具有激光扫描器和由台控制器控制的可移动台的激光加工设备。激光扫描器由扫描器控制器控制，该扫描器控制器同步由台控制器控制的台的移动。该公开还包括桥接设备，该桥接设备在两个子系统的控制器(诸如扫描器控制器和台控制器)之间同步和传输实时数据。然而，该参考文献的公开指出采用多个扫描器的系统的精度受到以下事实的限制，即扫描器的路径命令是基于反馈读取，该反馈读取必定相对于该命令延迟，并且噪声更多，并且可能容易出错。

[0008] 基于激光振镜的转向系统通常使用闭环伺服电机，其中由振镜电机上的集成传感

器提供位置反馈。此类伺服系统在命令位置与实际镜位置之间具有有限的跟踪延迟。该跟踪延迟引起激光束在跟随材料定位系统时的位置误差。这是因为引起振镜位置命令变化的定位编码器系统在测量定位系统的瞬时位置。然而，在振镜跟踪延迟间隔期间，定位系统的实际位置将移动到新的相对位置。

[0009] 在大面积微加工系统的情况下，此类误差的大小超出误差预算多于一个量级。例如，典型的振镜伺服系统具有250微秒的跟踪延迟，并且其中工件定位系统以500mm/秒的速度移动，所得的位置误差将是0.00025(秒)*500(mm/秒)＝0.125(mm)。这将导致对于此类系统完全不可接受的激光加工控制。

[0010] 《激光微/纳米工程杂志(JLMN)》2012年第2期第7卷的文章“Laser Scanner-Stage Synchronization Method for High-Speed and Wide-Area Fabrication(用于高速和大面积制造的激光扫描器台同步方法)”公开了用于大面积制造的同步激光振镜扫描器和线性台的即时方法。该文章公开了一种大面积处理系统，该系统使用XY台位置编码器数据来使激光扫描系统跟踪材料定位系统(XY台)的移动，以实现即时2D激光加工。该参考文献的系统公开为在线性台与振镜扫描器之间提供实时信号传输。

[0011] 然而，仍然存在对更高效且更经济的即时激光标记系统的需要，该系统以更高速度和精度提供改进的激光标记精度。

发明内容

[0012] 根据一方面，公开了本发明提供一种激光加工系统，该激光加工系统提供对工件的即时激光加工。激光加工系统包括：定位系统，该定位系统配置成支撑工件；定位系统控制器，该定位系统控制器配置成控制工件在定位系统上的移动；扫描器系统，该扫描器系统配置成在工件上方扫描激光束；以及扫描器控制器，该扫描器控制器配置成操作扫描器系统和定位系统控制器，该扫描器控制器接收向量输入数据以在前馈位置补偿中使用。

[0013] 根据另一方面，本发明提供了一种激光加工系统，该激光加工系统提供对工件的即时激光加工。激光加工系统包括：定位系统，该定位系统配置成支撑工件；定位系统控制器，该定位系统控制器配置成控制工件在定位系统上的移动；扫描器系统，该扫描器系统配置成在工件上方扫描激光束；以及扫描器控制器，该扫描器控制器配置成操作扫描器系统和定位系统控制器，该扫描器控制器确定定位系统的预期向量以在前馈位置补偿中使用。

[0014] 根据进一步的方面，本发明提供了一种方法，该方法提供对工件的即时激光加工，所述方法包括：提供定位系统，该定位系统配置成支撑工件；提供定位系统控制器，该定位系统控制器配置成控制工件在定位系统上的移动；提供扫描器系统，该扫描器系统配置成在工件上方扫描激光束；提供扫描器控制器，该扫描器控制器配置成操作扫描器系统和定位系统控制器；响应于向量输入数据而操作定位系统控制器；以及以经定位系统延迟补偿的高数据速率操作扫描器系统。

附图说明

[0015] 参考附图可以进一步理解本申请，在附图中：

[0016] 图1示出了根据本发明的一方面的扫描器和控制系统的说明性图解功能视图；

[0017] 图2示出了图1的系统的说明性图解部件视图；以及

[0018] 图3示出了图1的系统中的扫描头和工件的相对位置的说明性图解坐标表示。

[0019] 所示出的附图仅用于说明性目的。

具体实施方式

[0020] 申请人已经发现由定位误差引起的振镜跟踪延迟可以通过利用振镜相对于低带宽、缓慢移动和高惯性的工件定位系统的高带宽、高速度和高加速能力来显著地减小或消除。此外，已经发现，可以通过对有限时间段内的位置变化进行积分来从用于位置跟踪的位置编码器数据计算工件定位系统的速度和加速度。

[0021] 使用该速度信息的对定位系统的未来位置的预测假设了定位系统的运动将在振镜跟踪延迟的时间间隔内近似直线。该假设被认为是有效的，因为改变定位系统位置的典型位置更新速率是5KHz或更小，或者每次命令更新200微秒。因此，在振镜跟踪延迟间隔内，定位系统将在接近直线上行进，因为在该间隔内，系统的命令位置仅被更新一次。另外，定位系统伺服控制器具有其自己的跟踪延迟，该跟踪延迟导致对新命令的延迟反应，这进一步增强了该假设。

[0022] 将定位系统相对于当前测量位置的预测位置添加到振镜命令流。振镜伺服系统的较高带宽使得振镜镜(galvanometer mirror)的位置能够在定位系统的预测路径上，而与定位系统的速度和位置的变化无关。该过程涉及位置前馈运动控制，并且减少在恒定速度操作模式期间伺服系统的跟踪延迟。跟踪延迟可定义为由伺服系统控制的致动器的命令位置与实际位置之间的延迟。然而，在本发明的实施例的系统中，位置前馈用于调整振镜轨迹，使得系统遵循所测量的外部运动系统的预测路径。

[0023] 在工件运动跟踪应用中，在工件跟随期间，激光振镜伺服跟踪延迟引起扫描位置误差。这是从工件的位置测量的时刻到镜基于该测量偏转的时刻的工件移动导致的结果。根据本发明的各方面的激光扫描系统精度的显著改进使用基于工件定位系统的估计速度和加速度的位置前馈补偿。可以使用工件定位系统的位置编码器数据以导出系统的速度和加速度来计算与振镜的伺服跟踪延迟成比例的激光振镜的预测位置调整。命令数据的预测调整使光束转向到移动的工件的实际位置，从而改进整体激光定位精度。

[0024] 根据实施例，本发明涉及在即时标记激光扫描系统中使用位置前馈。例如，图1在10处示出了这种位置前馈控制系统的逻辑流的功能视图。具体而言，图1示出了包括扫描控制器12的控制系统10，扫描控制器12驱动两个定位系统(在这种情况下为XY台14和扫描头16)。整体激光加工数据被表示为全局坐标系中的向量数据20并且被提供到扫描控制器12，全局坐标系通过适当的坐标变换与定位和振镜坐标系对齐。全局作业坐标系原点和激光振镜原点彼此重合，而定位系统原点和定位系统的位置坐标在运行时使用线性变换对齐。

[0025] 作业数据被提供到两个路径。在一个路径中，向量数据被时域扩展22、低通滤波24、并且排队以降低的数据速率递送到定位系统26。在第二路径中，原始作业数据执行被延迟了28根据经验导出的定位系统跟踪延迟的持续时间，以允许定位系统开始移动。作业向量数据以高数据速率(典型地为100KHz)时域扩展，以递送到振镜伺服30。在作业开始时，经低通滤波的作业数据经由定位系统控制器40以降低的更新速率递送到定位系统，该更新速率可以与振镜更新速率同步也可以不与振镜更新速率同步。在定位系统跟踪延迟之后，振镜数据以高数据速率递送到振镜伺服50。

[0026] 定位系统编码器数据以与振镜命令数据递送速率相同的速率被采样，并且在若干采样间隔内被积分，以计算定位系统的平均速度和加速度32。关于振镜计算位置偏移，该位置偏移与振镜跟踪延迟和当前计算的定位系统速度和加速度成比例34。该偏移被添加到振镜命令数据36。偏移是预测位置偏置，该预测位置偏置使激光被转向到在跟踪延迟之后工件将处于的位置。在后续步骤中，经调整的振镜命令数据通过减去由定位系统编码器测量的当前定位系统位置来进一步调整38。后一计算有效地移除由定位系统执行的低频分量，并导致在振镜的可访问场内的命令。台14包括台控制器40以及X轴伺服42和Y轴伺服44、X电机46和Y轴电机48以及XY台组件50。扫描头16包括X轴扫描头伺服52和Y轴扫描头伺服54以及X轴功率和位置反馈系统56和Y轴功率和位置反馈系统58。

[0027] 图2示出了系统部件的物理实施例。在图2的系统中，控制器60(例如，由马萨诸塞州贝德福德市(Bedford,Massachusetts)诺万特公司的剑桥科技(Cambridge Technology, a Novanta Corporation company)销售的ScanMaster控制器(SMC))用于协调系统的标记操作。控制器60(例如，经由以太网集线器或交换机68)使用采用各种更高级别的协议以传递信息的以太网和TCP/IP通信连接到受监督的可编程逻辑控制器(PLC)62、作业准备PC 64和运动控制器66，例如，运动控制器66可由明尼苏达州伊代纳市(Edina,Minnesota)的ACS运动控制公司(ACS Motion Control)提供。

[0028] 控制器60并行地接进由运动控制器66使用的编码器数据，从而具有对在运动系统控制下的定位系统的位置控制的直接观察。具体而言，运动控制器60也经由例如标准输入/输出协议与PLC 62直接通信。运动控制器66(例如，经由EtherCAT)直接耦合到运动X轴驱动器70，并且进而耦合到运动Y轴驱动器72，这两者都耦合到控制器60以及相应的X轴驱动7和Y轴驱动80。控制器60还提供对激光器74的控制(例如，调制、选通和供能)以及对扫描器76的控制(例如，GSBμs)。该直接观察消除了在编码器数据首先去往运动控制器然后回波的情况下的包括潜在异常(诸如延迟和其他未知效应)的XY台控制器的依赖性。

[0029] 在作业数据处理期间，SMC(30)以可被编程在100Hz与1KHz之间的范围内的相对低的更新速率向运动控制器66递送位置更新。SMC不依赖于确定是否到达先前位置，而只是运动控制器以其自己的更新速率将位置命令作为离散点或作为一系列轮廓化的移动数据点转发到定位系统轴伺服。本文公开的实施例仅作为本发明的示例提供，并且其他系统可包括例如使用其他运动控制器和伺服驱动器，尤其是在对控制器的基于标准以太网的TCP/IP通信可用的情况下。

[0030] 与定位系统控制器位置更新的释放同时发生的，SMC以更高速率(100KHz)计算振镜的位置设定点。这些位置更新表示理想的作业数据位置、用于消除振镜跟踪延迟引起的位置误差的位置前馈偏置、以及基于定位系统实际位置的全局坐标系调整。由SMC进行的协调运动控制持续到标记作业结束为止，标记作业结束时可由PLC进行正常的定位系统控制。注意，不需要特殊控制模式许可——在此过程中使用标准发布的接口。

[0031] 尽管图2的标记/激光加工系统的设计使用标准软件工具(诸如由马萨诸塞州贝德福德市诺万特公司的剑桥科技销售的剑桥科技的ScanMaster设计器)，但定位系统和扫描系统的运动的整体同步可能需要额外的配置信息。例如，某些根据经验导出的属性需要指定如下。

[0032] 由编码器对定位系统位置的测量涉及受使用中的特定编码器(定位系统编码器分

辨率)限制的精度。该分辨率必须以mm/编码器计数为单位来定义。为了实现+/-5μm的系统精度,典型方法是使用10倍于该需求的测量方法,因此最小编码器分辨率应为至少0.5微米/计数。越高的分辨率将导致越高的精度,然而,在编码器可产生正交脉冲的速率(其是定位系统速度的函数)将被超过时将达到极限。在选择编码器分辨率时要考虑的第二个限制是扫描器控制器以某些信令速率(典型地为25MHz)或以低于某些信令速率(典型地为25MHz)解码正交数据的能力。

[0033] 另一属性涉及定位系统跟踪延迟。这是可通过发送一系列移动命令并且同步地采样定位系统编码器来进行的经验测量。定位系统控制器的制造商可提供用于测量该属性的软件,然而,使用SyncMaster支持软件促进该测量,因为SyncMaster支持软件可以同时驱动定位系统并测量其位置。

[0034] 例如,图3示出了描述在坐标链接系统中描述系统坐标的可能方法。这里的关键属性是X_0、Y_0,X_0、Y_0是从定位系统起始位置的偏移;如果被命令移动到那里,系统将把定位系统带到一位置处,使得工件原点在扫描头原点的正下方。图3示出了以拐角为参考的系统90,假设基板可以以可重复的方式(例如,使用限位销)机械地放置在系统上。图3示出了在92处的头原点参考系。再次,这仅是一个实施例,因为材料和作业坐标系也可以例如是以中心为参考的。

[0035] 在装备有(如由马萨诸塞州贝德福德市诺万特公司的剑桥科技销售的)Lightning II扫描器的系统中,测量振镜跟踪延迟是使用Lightning II支持软件TuneMaster II来完成的。使用诸如ScanMaster设计器之类的工具将恒定的速度激励发送到扫描器,并且可以使用TuneMaster II的V-Scope特性来直接确定跟踪延迟,再次,所有这些工具都是由马萨诸塞州贝德福德市诺万特公司的剑桥科技提供的。

[0036] 进一步的属性涉及定位系统编码器校准数据。先进的运动控制器通常有能力使用激光干涉仪测量工具来线性化编码器传感器,以校准定位系统的运动。定位系统控制器使用校准数据来改变轴轨迹,以便使否则由于编码器非线性而将出现的位移误差最小化。扫描器控制器以与定位系统控制器类似的方式使用相同的校准数据来线性化编码器。这是必要的,因为扫描控制器与定位系统控制器并行地访问原始编码器数据,并且扫描控制器无法访问经校准的编码器信息。

[0037] 根据各种实施例,本发明提供了使用基于移动实体的速度和加速度测量的激光转向系统的预测定位来克服扫描系统跟踪延迟引起的标记误差。此类系统的使用实现了灵活的系统架构,其中可以将定位系统控制器选择为满足积分器的需求。振镜扫描控制器独立于定位系统控制器而不断地跟踪定位系统的运动,并且应用预测算法以使扫描器跟踪延迟引起的位置误差最小化。由于这种非侵入式观察技术,不需要紧密地耦合振镜扫描头与定位系统控制器的时基。这简化了积分过程并使实现功能系统所需的信息量最小化。

[0038] 本领域技术人员将理解,在不脱离本发明的精神和范围的情况下,可以对上文公开的实施例进行多种修改和变化。

[0039] 要求保护的是:

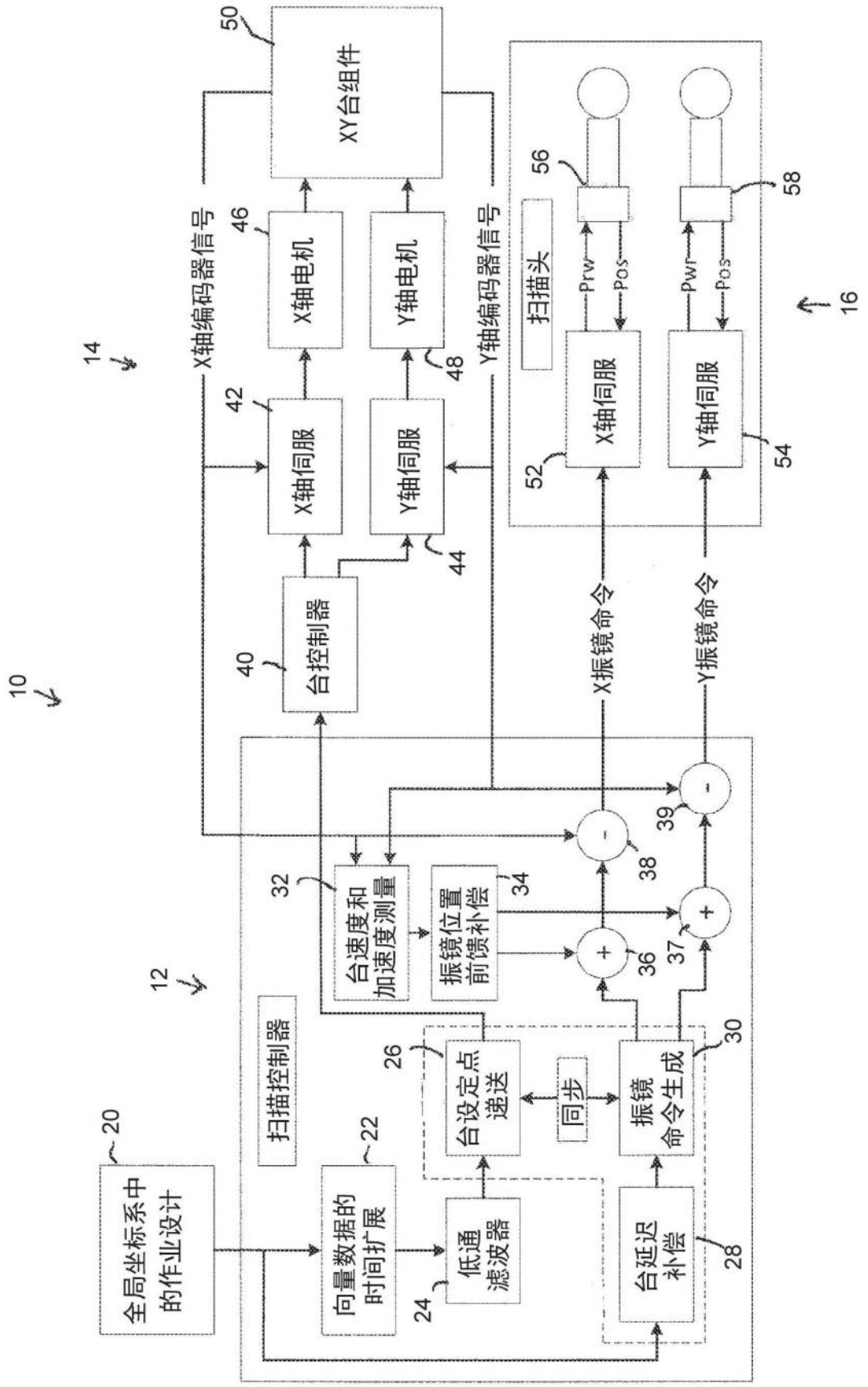

全局坐标系中的作业设计
20
向量数据的时间扩展
22
低通滤波器
24
台设定点递送
26
同步
台延迟补偿
28
振镜命令生成
30
扫描控制器
台速度和加速度测量
32
振镜位置前馈补偿
34
36
37
38
39
台控制器
40
X轴伺服
42
X轴电机
46
Y轴伺服
44
Y轴电机
48
XY台组件
50
X轴编码器信号
Y轴编码器信号
X振镜命令
Y振镜命令
扫描头
56
58
Prw
Pos
X轴伺服
52
Y轴伺服
54
10
12
14
16

图1

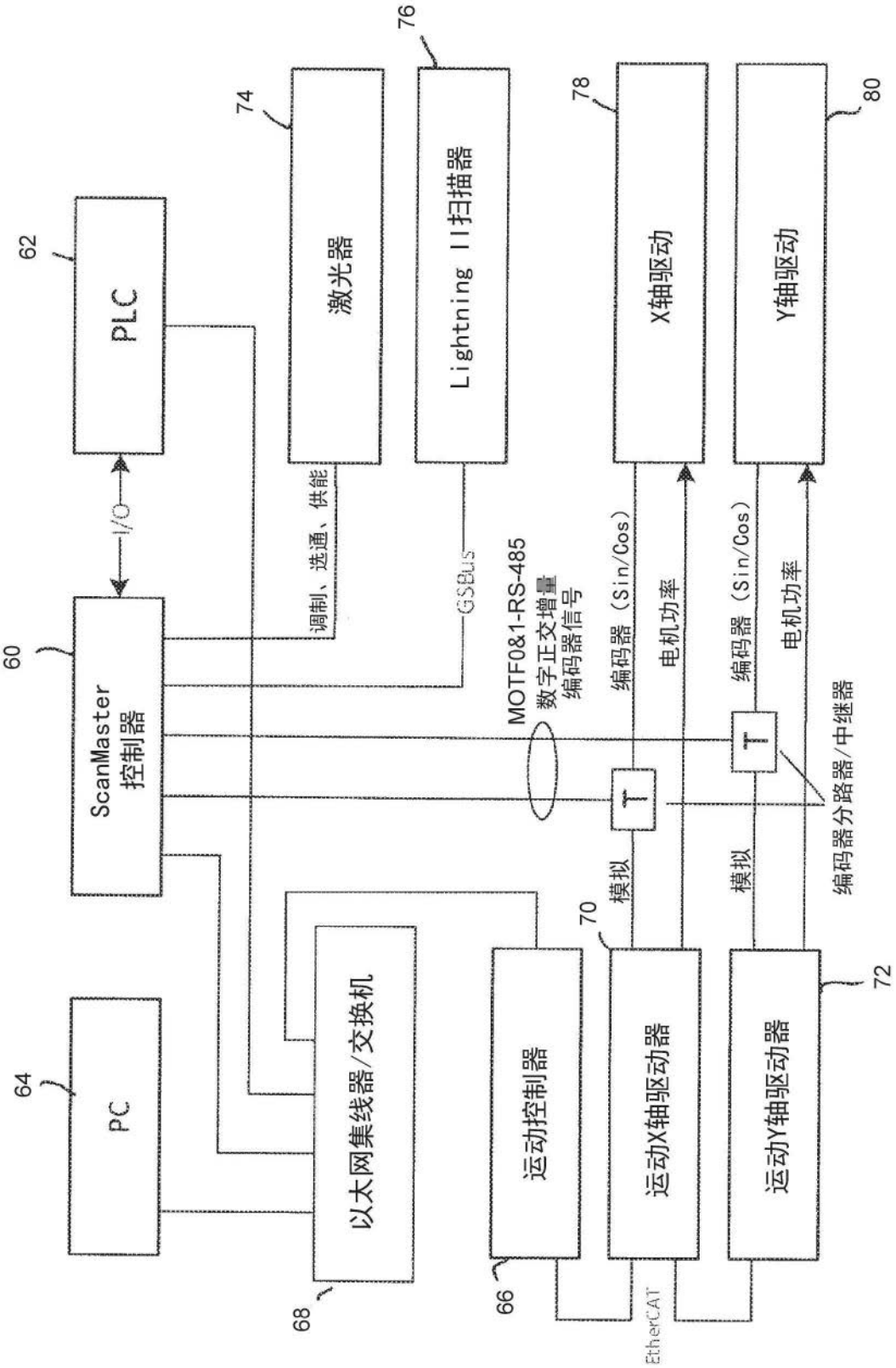

62
PLC
I/O
60
ScanMaster
控制器
64
PC
68
以太网集线器/交换机
74
激光器
76
Lightning II扫描器
调制、选通、供能
GSBus
MOTF0&1-RS-485
数字正交增量
编码器信号
78
X轴驱动
80
Y轴驱动
编码器（Sin/Cos）
电机功率
编码器（Sin/Cos）
电机功率
编码器分路器/中继器
模拟
模拟
70
运动控制器
运动X轴驱动器
运动Y轴驱动器
72
66
EtherCAT

图2

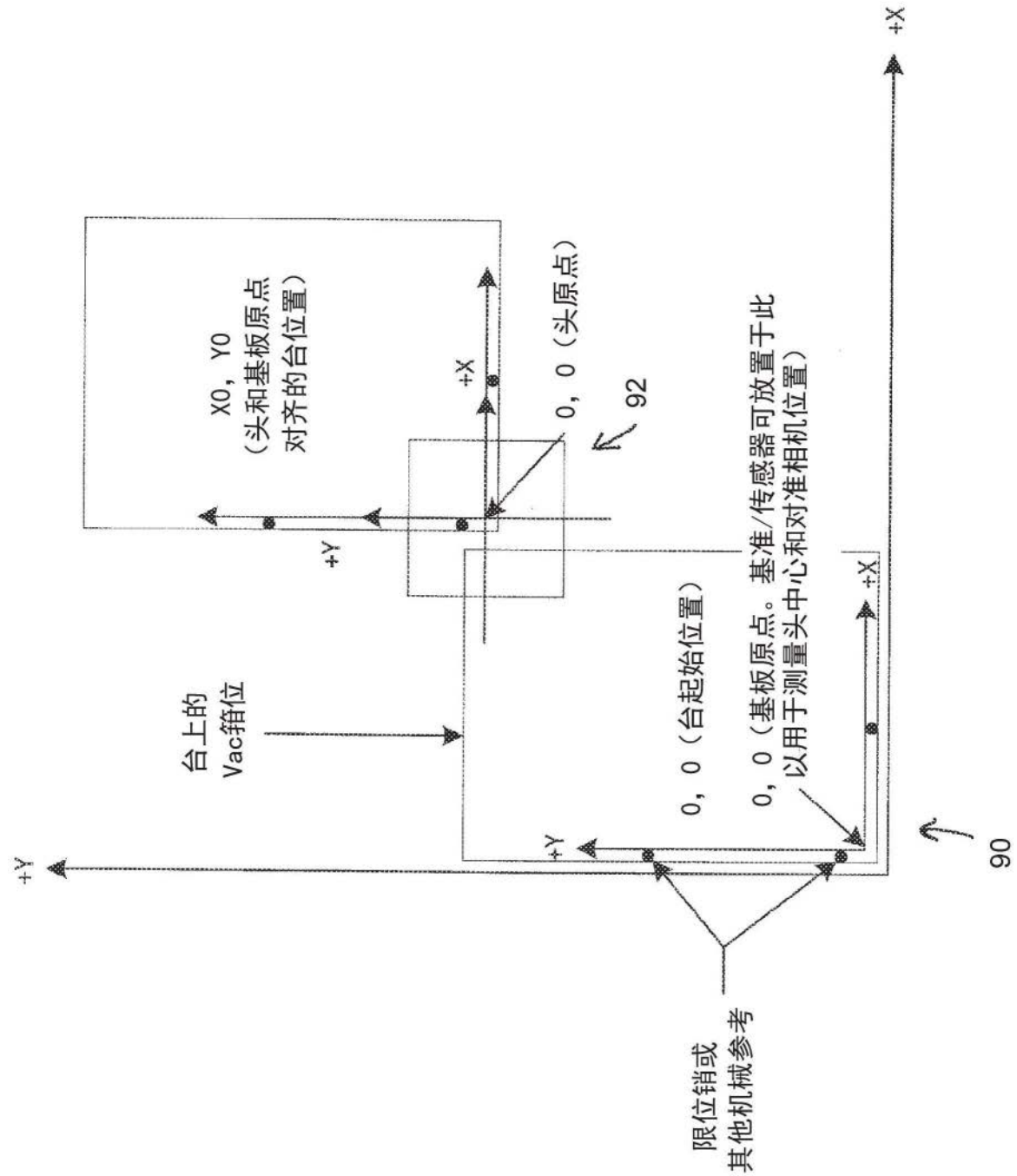

+X
+Y
X0, Y0
（头和基板原点
对齐的台位置）
+X
+Y
0, 0（头原点）
92
台上的
Vac销位
0, 0（台起始位置）
0, 0（基板原点。基准/传感器可放置于此
以用于测量头中心和对准相机位置）
+X
+Y
90
限位销或
其他机械参考

图3