

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102272549 B

(45) 授权公告日 2013. 03. 13

(21) 申请号 200980154403. 9

(22) 申请日 2009. 11. 10

(30) 优先权数据

61/113, 759 2008. 11. 12 US

12/273, 831 2008. 11. 19 US

12/273, 840 2008. 11. 19 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2011. 07. 12

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2009/063853 2009. 11. 10

(87) PCT申请的公布数据

W02010/056658 EN 2010. 05. 20

(73) 专利权人 齐戈股份有限公司

地址 美国康涅狄格州

(72) 发明人 莱斯利 .L. 德克

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 邵亚丽

(51) Int. Cl.

G01B 9/02 (2006. 01)

G01B 11/24 (2006. 01)

G01B 11/02 (2006. 01)

G02B 27/14 (2006. 01)

G02B 26/08 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101033937 A, 2007. 09. 12, 全文 .

US 2002/0109851 A1, 2002. 08. 15, 全文 .

US 2004/0174526 A1, 2004. 09. 09, 全文 .

US 2005/0046864 A1, 2005. 03. 03, 全文 .

审查员 邢明浩

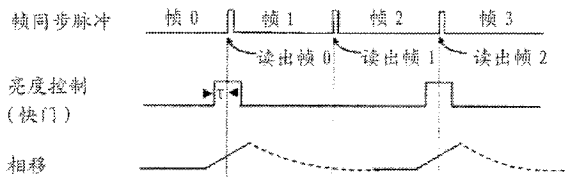
权利要求书 6 页 说明书 18 页 附图 3 页

(54) 发明名称

振动场合中的相移干涉

(57) 摘要

本发明提供一种相移干涉测量 (PSI) 方法和对应的系统, 包括: (i) 在测试表面反射回来的测试光与参考表面反射回来的参考光之间记录相位序列中的每个相位的干涉图, 该干涉图对于腔的每个不同横向位置定义干涉信号, 所述腔由测试表面与参考表面定义; (ii) 基于至少一些记录的干涉图, 计算腔的初始相位图; (iii) 基于初始相位图与至少一些记录的干涉图, 计算至少一些相移增量的每一个的估计; 以及 (iv) 基于所述估计与至少一些记录的干涉图, 计算改善的相位图。



1. 一种用于振动场合的相移干涉方法,所述方法包括:

对于相位序列中的每个相位,记录从测试表面反射回来的测试光与从参考表面反射回来的参考光之间的干涉图,所述测试光和参考光来自共同光源,每个干涉图对应于通过将反射的测试光与反射的参考光进行干涉而产生的强度图案,所述干涉图定义由测试表面和参考表面定义的腔的不同横向位置中的每一个的干涉信号,每个干涉信号包括一系列对应于所述相位序列的强度值,所述相位序列中的每对相位之间的差定义对应的相移增量;

每个相移增量包括系统分量与振动造成的随机分量,所述随机分量产生下述可能性:相移增量的极性相对于所述系统分量的极性将发生改变;

其中,记录所述干涉图以产生至少两个不同的干涉图集合,所述不同的集合包括第一集合和第二集合,所述第一集合包括至少一对干涉图,所述第二集合包括至少一个干涉图,其中第一集合中的所述至少一对干涉图的相移增量的极性改变的可能性小于包括来自第二集合的至少一个干涉图的任意干涉图对的相移增量的极性改变的可能性;

基于所述第一集合中的所述至少一对干涉图来计算所述腔的初始相位图;

基于上述初始相位图与至少一些所记录的干涉图来计算至少一些所述相移增量的每一个的估计;以及

基于所计算的所述相移增量的估计与至少一些所记录的干涉图来计算改善的相位图。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,用于计算所述相移增量的所记录的干涉图包括来自第二集合的至少一个干涉图。

3. 根据权利要求1所述的方法,其中,计算所述相移增量估计包括:将所述腔的不同位置的干涉信号拟合成理论腔的理论干涉信号的集合,所述理论腔对应于所述初始相位图并且根据所述相移增量的估计被参数化。

4. 根据权利要求3所述的方法,其中,所述相移增量的参数化的估计包括不同位置共同的相移增量的集合。

5. 根据权利要求1所述的方法,其中,用于记录所述干涉图的电子检测器定义帧率,并且其中,第一集合中的每个干涉图以小于帧率的倒数的积分时间被记录。

6. 根据权利要求5所述的方法,其中,所记录的第一集合中的干涉图包括至少一对连续干涉图,该至少一对连续干涉图在横跨所述电子检测器的相邻帧的相移增量期间取得。

7. 根据权利要求1所述的方法,其中每个相移增量的系统分量定义:相移增量的绝对幅度、用于产生所述幅度的时间段、以及等于该绝对幅度除以该时间段的相位斜率,并且其中,记录所述干涉图以使得对应于第一集合中的干涉图的每个相移增量的相位斜率大于对应于涉及第二集合中的干涉图的相移增量的任意相位斜率。

8. 根据权利要求7所述的方法,其中,所述第一集合中的干涉图记录在所述相位序列的末端。

9. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述相位序列是通过机械式相移、波长调谐、电光相位调制或声光调制产生的。

10. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述第一集合的相移增量的系统分量的绝对幅度基本上等于 $\pi/2$ 弧度。

11. 根据权利要求1所述的方法,其中,计算所述初始相位图包括:计算第一集合中的不同干涉图对中的每一个的最初相位图,并且对所述最初相位图进行平均。

12. 根据权利要求 3 所述的方法,其中,所述拟合包括根据下述表达式对不同横向位置 x 的干涉信号 I_j 进行拟合,以确定所述相移增量估计:

$$\frac{I_j(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})}{B(\mathbf{x})} = \cos(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j) = C_j \cos(\bar{\theta}(\mathbf{x})) + S_j \sin(\bar{\theta}(\mathbf{x})),$$

其中 Δ_j 定义所述相位序列,以 j 为索引;

其中表达式 $\cos(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j)$ 对应于用于所述初始相位图 $\bar{\theta}(\mathbf{x})$ 的理论干涉信号;

其中 $A(x)$ 与 $B(x)$ 是所记录的干涉信号的 AC 分量与 DC 分量;

其中 $C_j = \cos(\Delta_j)$ 而 $S_j = -\sin(\Delta_j)$; 以及

其中根据 $\Delta'_j = \text{Mod}_{2\pi}(\Delta_j - \Delta_{j-1})$ 从所述相位序列确定所述相移增量估计 Δ' 。

13. 根据权利要求 3 所述的方法,其中,所述拟合还造成在所述相位序列期间所述测试表面的活塞、尖端以及倾斜中的至少两个发生改变。

14. 根据权利要求 1 所述的方法,还包括存储或输出关于所述改善的相位图的信息。

15. 根据权利要求 1 所述的方法,其中,计算所述初始相位图包括基于第一集合中的至少一些干涉图而不是第二集合中的任何干涉图确定所述初始相位图的极性。

16. 一种相移干涉方法,包括:

对于相位序列中的每个相位,记录在从测试表面反射回来的测试光与从参考表面反射回来的参考光之间的干涉图,所述测试光和参考光来自共同光源,每个干涉图对应于通过将反射的测试光与反射的参考光进行干涉而产生的强度图案,所述干涉图定义由测试表面和参考表面定义的腔的不同横向位置中的每一个的干涉信号,每个干涉信号包括一系列对应于所述相位序列的强度值,所述相位序列中的每对相位之间的差定义对应的相移增量;

其中,用于记录干涉图的电子检测器定义帧率,并且其中,所记录的干涉图包括第一集合,所述第一集合包括至少一对干涉图,以小于帧率的倒数的积分时间记录所述至少一对干涉图中的每一个;

基于所述第一集合中的所述至少一对干涉图来计算所述腔的初始相位图;

基于上述初始相位图与至少一些所记录的干涉图来计算至少一些所述相移增量的每一个的估计;以及

基于所计算的所述相移增量的估计与至少一些所记录的干涉图来计算改善的相位图。

17. 根据权利要求 16 所述的方法,其中,所记录的所述第一集合中的干涉图包括在横跨电子检测器的相邻帧的相移增量期间取得的连续干涉图中的至少一对。

18. 根据权利要求 16 所述的方法,其中,计算所述相移增量估计包括:将所述腔的不同位置的干涉信号拟合成用于理论腔的理论干涉信号的集合,所述理论腔对应于所述初始相位图并且根据用于所述相移增量的估计被参数化。

19. 根据权利要求 18 所述的方法,其中,参数化的所述相移增量的估计包括不同位置共同的相移增量的集合。

20. 根据权利要求 16 所述的方法,其中,所述第一集合包括连续干涉图的多个对,每个所述干涉图以小于帧率的倒数的积分时间来记录并且在横跨电子检测器的相邻帧的相移增量期间被取得。

21. 根据权利要求 20 所述的方法,其中,计算所述初始相位图包括:计算第一集合中的

不同干涉图对中的每一个的最初相位图,并且对所述最初相位图进行平均。

22. 根据权利要求 16 所述的方法,其中计算所述初始相位图包括基于第一集合中的至少一些干涉图而不是不同于第一集合的第二集合中的任何干涉图来确定所述初始相位图的极性。

23. 根据权利要求 22 所述的方法,其中,计算所述初始相位图还包括:基于一个或多个所记录的干涉图信号来识别基本上彼此正交的一对或多对所记录的干涉图,并且基于所识别的正交干涉图对来确定所述初始相位图的绝对幅度。

24. 根据权利要求 16 所述的方法,其中,所述相位序列是通过机械式相移、波长调谐、电光相位调谐或声光调制产生的。

25. 一种用于振动场合的相移干涉系统,所述系统包括:

相移干涉装置,包括光源、相移干涉仪和电子检测器,所述相移干涉装置被配置为对于相位序列中的每个相位、记录从测试表面反射回来的测试光与从相移干涉仪的参考表面反射回来的参考光之间的干涉图,所述测试光和参考光来自对应于该光源的共同光源,

每个干涉图对应于通过将反射的测试光与反射的参考光进行干涉而产生的强度图案,所述干涉图定义由测试表面和参考表面定义的腔的不同横向位置中的每一个的干涉信号,每个干涉信号包括一系列对应于所述相位序列的强度值,所述相位序列中的每对相位之间的差定义对应的相移增量;

每个相移增量包括由相移干涉仪产生的系统分量和由振动造成的随机分量,所述随机分量产生下述可能性:相移增量的极性相对于所述系统分量的极性将发生改变;

其中,所述相移干涉装置被配置为记录所述干涉图以产生至少两个不同的干涉图集合,所述不同的集合包括第一集合和第二集合,所述第一集合包括至少一对干涉图,所述第二集合包括至少一个干涉图,其中第一集合中的所述至少一对干涉图的相移增量的极性改变的可能性小于包括来自第二集合的至少一个干涉图的任意干涉图对的相移增量的极性改变的可能性;

电子处理器耦接到所述相移干涉装置,其中该电子处理器被配置为:(i) 基于所述第一集合中的所述至少一对干涉图来计算所述腔的初始相位图;(ii) 基于所述初始相位图与至少一些所记录的干涉图来计算至少一些所述相移增量的每一个的估计;以及(iii) 基于所计算的所述相移增量的估计与至少一些所记录的干涉图来计算改善的相位图。

26. 根据权利要求 25 所述的相移干涉系统,其中,通过所述电子处理器计算所述相移增量估计的计算包括将所述腔的不同位置的干涉信号拟合理论腔的理论干涉信号的集合,所述理论腔对应于所述初始相位图并且根据所述相移增量的估计被参数化。

27. 根据权利要求 25 所述的相移干涉系统,其中所述电子检测器被配置为根据帧率记录所述干涉图,并且所述相移干涉装置被配置为记录第一集合中的干涉图以包括连续干涉图的至少一对,每个所述干涉图以小于帧率的倒数的积分时间被记录并且在横跨电子检测器的相邻帧的相移增量期间被取得。

28. 根据权利要求 25 所述的相移干涉系统,其中,每个相移增量的所述系统分量定义所述相移增量的绝对幅度、用于产生所述幅度的时间段、以及等于该绝对幅度除以该时间段的相位斜率,并且其中,相位干涉装置被配置为记录所述干涉图以使得对应于第一集合中的干涉图的每个相移增量的相位斜率大于对应于涉及第二集合中的干涉图的相移增量

的任意相位斜率。

29. 一种相移干涉系统,包括:

相移干涉装置,包括光源、相移干涉仪和电子检测器,所述相移干涉装置被配置为对于相位序列中的每个相位,记录从测试表面反射回来的测试光与从相移干涉仪的参考表面反射回来的参考光之间的干涉图,所述测试光和参考光来自对应于所述光源的共同光源,

每个干涉图对应于通过将反射的测试光与反射的参考光进行干涉而产生的强度图案,所述干涉图定义由测试表面和参考表面定义的腔的不同横向位置中的每一个的干涉信号,每个干涉信号包括一系列对应于所述相位序列的强度值,所述相位序列中的每对相位之间的差定义对应的相移增量,

其中所述电子检测器被配置为根据帧率记录所述干涉图,并且其中,所述相移干涉装置被配置为记录所述干涉图以包括第一集合,所述第一集合包括至少一对干涉图,以小于帧率的倒数的积分时间记录所述至少一对干涉图中的每一个;

电子处理器耦接到所述相移干涉装置,其中,所述电子处理器被配置为:(i) 基于所述第一集合中的所述至少一对干涉图来计算所述腔的初始相位图;(ii) 基于所述初始相位图与至少一些所记录的干涉图来计算至少一些所述相移增量的每一个的估计;以及(iii) 基于所计算的所述相移增量的估计与至少一些所记录的干涉图来计算改善的相位图。

30. 根据权利要求 29 所述的系统,其中所述相移干涉装置还被配置为使得所记录的所述第一集合中的干涉图包括在横跨电子检测器的相邻帧的相移增量期间取得的连续干涉图中的至少一对。

31. 一种相移干涉方法,包括:

对于相位序列中的每个相位,记录从测试表面反射回来的测试光与从参考表面反射回来的参考光之间的干涉图,所述测试光和参考光来自共同光源,每个干涉图对应于通过将反射的测试光与反射的参考光进行干涉而产生的强度图案,所述干涉图定义由测试表面和参考表面定义的腔的不同横向位置中的每一个的干涉信号,每个干涉信号包括一系列对应于所述相位序列的强度值,所述相位序列中的每对相位之间的差定义对应的相移增量;

基于所记录的干涉图中的至少一些干涉图来计算所述腔的初始相位图;

基于所述初始相位图与至少一些所记录的干涉图来计算至少一些所述相移增量的每一个的估计;以及

基于所计算的所述相移增量的估计与至少一些所记录的干涉图来计算改善的相位图,

其中,每个相移增量包括系统分量和由振动造成的随机分量,以及

其中,计算所述相移增量估计包括对于至少一些所述相移增量基于关于所述系统分量的信息确定所述估计的极性。

32. 根据权利要求 31 所述的方法,其中,确定所述估计的极性包括将关于所述系统分量的信息与所述相移增量估计的集合的正极性和负极性中的每一个进行相关。

33. 根据权利要求 31 所述的方法,其中,计算所述初始相位图包括基于一个或多个所记录的干涉信号来识别基本上彼此正交的一对或多对所记录的干涉图。

34. 根据权利要求 33 所述的方法,其中,所述识别出多个正交对,并且其中,计算所述初始相位图还包括:计算每个正交对的最初相位图,将所有所述最初相位图的极性设置为相同,以及之后对所述最初相位图进行平均以提供所述初始相位图。

35. 根据权利要求 31 所述的方法,其中计算相移增量估计包括将所述腔的不同位置的干涉信号拟合成理论腔的理论干涉信号的集合,所述理论腔对应于所述初始相位图并且根据所述相移增量的估计被参数化。

36. 根据权利要求 35 所述的方法,其中参数化的所述相移增量的估计包括不同位置共同的相移增量的集合。

37. 根据权利要求 31 所述的方法,其中,所述用于记录所述干涉图的电子检测器定义帧率,并且其中,所述干涉图的至少一对连续干涉图以小于帧率的倒数的积分时间被记录并且在横跨电子检测器的相邻帧的相移增量期间被取得。

38. 根据权利要求 31 所述的方法,其中,所述相位序列是通过机械式相移、波长调谐、电光相位调制或声光调制产生的。

39. 根据权利要求 35 所述的方法,其中所述拟合包括根据下述表达式对不同横向位置 x 的干涉信号 I_j 进行拟合,以确定所述相移增量估计:

$$\frac{I_j(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})}{B(\mathbf{x})} = \cos(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j) = C_j \cos(\bar{\theta}(\mathbf{x})) + S_j \sin(\bar{\theta}(\mathbf{x})),$$

其中 Δ_j 定义所述相位序列,以 j 为索引;

其中表达式 $\cos(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j)$ 对应于用于所述初始相位图 $\bar{\theta}(\mathbf{x})$ 的理论干涉信号;

其中 $A(x)$ 与 $B(x)$ 是所记录的干涉信号的 AC 分量与 DC 分量;

其中 $C_j = \cos(\Delta_j)$ 而 $S_j = -\sin(\Delta_j)$; 以及

其中根据 $\Delta'_j = \text{Mod}_{2\pi}(\Delta_j - \Delta_{j-1})$ 从所述相位序列确定所述相移增量估计 Δ' 。

40. 根据权利要求 35 所述的方法,其中所述拟合还造成在所述相位序列期间所述测试表面的活塞、尖端以及倾斜中的两个或多个发生改变。

41. 根据权利要求 31 所述的方法,还包括存储或输出关于所述改善的相位图的信息。

42. 根据权利要求 31 所述的方法,其中,基于所计算的相移增量来计算改善的相位图包括:

基于所计算的相移增量的估计与至少一些所记录的干涉图,计算中间相位图;

基于所述中间相位图与至少一些所记录的干涉图,计算所述每个相移增量的改善的估计;以及

基于所述相移增量的改善的估计与至少一些所记录的干涉图,计算所述改善的相位图。

43. 根据权利要求 31 所述的方法,其中,基于所计算的所述相移增量的估计来计算所述改善的相位图包括将所记录的不同横向位置的每一个处的干涉信号拟合成所计算的相移增量的估计的正弦函数,以确定每个位置处的腔相位。

44. 根据权利要求 43 所述的方法,其中,所述正弦函数产生所记录的干涉信号的一个或多个谐波,以模拟所述腔中的多个反射。

45. 一种相移干涉系统,包括:

相移干涉装置,包括光源、相移干涉仪和电子检测器,所述相移干涉装置被配置为对于相位序列中的每个相位、记录从测试表面反射回来的测试光与从相移干涉仪的参考表面反射回来的参考光之间的干涉图,所述测试光和参考光来自对应于所述光源的共同光源,

每个干涉图对应于通过将反射的测试光与反射的参考光进行干涉而产生的强度图案，所述干涉图定义由测试表面和参考表面定义的腔的不同横向位置中的每一个的干涉信号，每个干涉信号包括一系列对应于所述相位序列的强度值，所述相位序列中的每对相位之间的差定义对应的相移增量；

每个相移增量包括由相移干涉仪产生的系统分量和由振动造成的随机分量；以及

电子处理器耦接到所述相移干涉装置，其中，所述电子处理器被配置为：(i) 基于至少一些所记录的干涉图来计算所述腔的初始相位图；(ii) 基于所述初始相位图与至少一些所记录的干涉图来计算至少一些所述相移增量的每一个的估计；以及 (iii) 基于所计算的所述相移增量的估计与至少一些所记录的干涉图来计算改善的相位图，

其中，由所述电子处理器进行的对所述相移增量估计的计算包括基于关于至少一些所述相移增量的系统分量的信息来确定所述估计的极性。

46. 根据权利要求 45 所述的系统，其中，由所述电子处理器进行的极性的确定包括将关于所述系统分量的信息与所述相移增量估计的集合的正极性和负极性中的每一个进行相关。

47. 根据权利要求 45 所述的系统，其中，由所述电子处理器进行的对所述初始相位图的计算包括基于一个或多个所记录的干涉信号来识别基本上彼此正交的一对或多对所记录的干涉图。

48. 根据权利要求 47 所述的系统，其中，由电子处理器进行的对多个正交对的识别和对初始相位图的计算还包括：计算每个正交对的最初相位图，将所有所述最初相位图的极性设置为相同，以及之后对所述最初相位图进行平均以提供所述初始相位图。

49. 根据权利要求 46 所述的相移干涉系统，其中，由所述电子处理器进行的对相移增量估计的计算包括将所述腔的不同位置的干涉信号拟合成理论腔的理论干涉信号的集合，所述理论腔对应于所述初始相位图并且根据用于所述相移增量的估计被参数化。

50. 根据权利要求 49 所述的相移干涉系统，其中，参数化的所述相移增量的估计包括不同位置共同的相移增量的集合。

振动场合中的相移干涉

技术领域

[0001] 本发明涉及相移干涉方法 (phase shifting interferometry methods) 以及相关的系统。

背景技术

[0002] 干涉光学技术广泛地应用于测量精密光学元件的表面构型 (topography)、光学厚度、平坦度以及其他几何学属性与折射率属性, 所述精密光学部件诸如用于平版印刷光掩模中的玻璃基板。

[0003] 例如, 为了对测量表面的表面轮廓 (profile) 进行测量, 可使用干涉仪 (interferometer) 将从测量表面反射的测量波前与从参考表面反射的参考波前进行结合, 以形成光学干涉图案。光学干涉图案的强度曲线中的空间变化对应于结合的测量波前与参考波前之间的相位差, 此相位差由测量表面相对于参考表面的轮廓变化造成。使用相移干涉 (PSI) 可精确地确定测量表面的对应轮廓与相位差 (phase difference)。

[0004] 使用 PSI, 对于参考波前与测量波前之间的多个相移中的每一个记录光学干涉图案, 从而产生跨越至少一个光学干涉的完整循环 (例如, 从相长干涉到相消干涉, 接着再回到相长干涉) 的一系列光学干涉图案。光学干涉图案定义了所述图案的每个空间位置的一系列强度值, 其中, 每个强度值的系列对具有相位偏移 (phase-offset) 的相移具有正弦依赖关系, 该相位偏移等于该空间位置的结合的测量波前与参考波前之间的相位差。使用本领域已知的数值技术, 对于每个空间位置的相位偏移被从强度值的正弦依赖关系提取出来从而提供测量表面相对于参考表面的轮廓。这种数值技术一般称为相移算法。

[0005] PSI 中的相移能够通过将从测量表面到干涉仪的光学路径长度相对于从参考表面到干涉仪的光学路径长度发生改变而产生。例如, 参考表面能够相对于测量表面移动。除了这种机械式相移, 相移能够通过电光或声光调制而被引入。此外, 对于恒定的非零光程差, 能够通过改变测量波前和参考波前的波长而引入相移。随后的申请已知为波长调谐 PSI 并且记载在例如授予 G. E. Sommargren 的美国专利 No. 4, 594, 003 中。

[0006] 相移干涉仪的一个示例是采用诸如激光的相干源照明的 Fizeau 干涉仪。例如, 任意形状的测试表面利用 Fizeau 干涉仪形成图像, 该干涉仪能够沿着 Z 轴产生受控的相移, 用于具有选定算法的 PSI 采集。该光学系统沿着 Z 轴对齐, 并且该表面成像到一个相机上, 使得每个像素对应于 XY 平面中的唯一位置。将激光束引导至参考表面和测试表面, 从测试表面和参考表面反射的光束之间的干涉被采样作为相移的函数, 随后利用 PSI 算法分析从而提取测试表面相位图, 使用已知的激光束的波长将该相位图转换为物理单位。传统 PSI 算法假定恒定的扫描运动 (即, 恒定速度)。

[0007] 如果扫描运动不均匀, 那么测得的表面轮廓发生错误。不幸的是, PSI 中的扫描运动往往不均匀。这能够由于扫描机构的非线性运动而发生, 或者通过不同地作用在干涉仪的每个部件上的振动而发生。

发明内容

[0008] 这里公开的是用于振动场合的的相移干涉方法和系统。

[0009] 本发明人已发现如果取得至少一部分对振动较不敏感的相移干涉 (PSI) 数据, 并且使用该数据来建立用于拟合的初始相位图的极性 (sign), 则可有效地改善使用相移干涉数据估计实际相移增量与预期 (系统) 相移增量之间因振动而造成的偏差的拟合方法。例如, 可使用较平缓的机械式相移 (gradual mechanical phase shifts) 的初始序列来收集 PSI 数据, 其中一个或多个较陡的机械式相移 (rapid mechanical phase shifts) 跟随该较平缓的机械式相移。在强烈振动场合中, 平缓序列的一个或多个实际相移增量的极性可能会与对应的预期相移增量的极性相反。然而, 除非是在特高频大振动场合, 不然较陡的相移增量不太可能会发生所述极性改变的情况。另一方面, 由于较陡的机械式相移会产生额外的振动与噪音, 因此对整个相移序列来说是不理想的。因此, 可使用来自较陡的相移的数据来建立相位图的正确极性, 而在建立极性之后使用来自较平缓的相移序列中的数据来改善相位图的准确度。上述方法十分重要, 因为即使使用其他最佳化拟合 (optimized fitting), 当振动导致实际相移增量与预期相移增量的极性相反时还是会造成相位图的错误极性。所以, 例如, 有可能将凹面地形错误地计算为凸面地形, 反之亦然。

[0010] 此外, 为了解决上述问题, 一种收集 PSI 数据用以在大振动场合中具有较鲁棒 (robust) 的相移增量极性的方法为 - 在相移增量横跨 (straddles) 照相机的相邻帧期间收集一对或多对连续的干涉图 (consecutive interferograms) 中的每一个, 其中每一个这种干涉图都具有小于在照相机的帧率 (frame rate) 的倒数的积分时间。上述方法可以用于一些、或甚至所有的相移序列。

[0011] 此处公开了用于确认相位图的极性 (或等效地, 确认实际相移增量的序列的极性) 的另一技术, 该技术使用 PSI 数据的拟合 (fitting) 以在振动场合中估计相移增量的实际序列, 然后比较该估计结果与相移增量的预期序列以确定是否要维持相移增量的估计序列的极性不变或将其反向。例如, 可以计算相移增量的预期序列与相移增量的估计序列的正极性和负极性中的每一个之间的相关, 其中较高的相关指示正确的极性。使用具有正确极性的实际相移增量的估计序列可以随后确定具有正确极性的改善的相位图。上述比较与相关技术是可行的, 因为即使大振动会导致整个相移序列中的实际相移增量与预期相移非常不同 (包含极性相反), 但每当振动使得预期相移增加时也会使得预期相移减少, 因此实际相移增量的序列保持对预期相移增量的序列的相关。在此情况下, 预期相移增量的序列将“相位偏差 (phase bias)”给与 (impart) 实际相移增量的序列。上述相关技术可应用于以传统方式获得的 PSI 数据以确定相位图的正确极性, 还可以应用于对于当以特定方式采集对于由振动导致的极性的变化具有鲁棒性的 PSI 数据时得到的极性进行确认。

[0012] 更一般地, 现在将概述此处公开的方法和系统的不同方面和特征。

[0013] 一般的, 在一方面, 此处公开一种相移干涉 (PSI) 方法包括: (i) 对于相位序列中的每个相位, 记录在从测试表面反射回来的测试光与从参考表面反射回来的参考光之间的干涉图, 所述测试光和参考光来自共同光源, 每个干涉图对应于通过将反射的测试光与反射的参考光进行干涉而产生的强度图案, 所述干涉图对于由测试表面和参考表面定义的腔的不同横向位置中的每一个定义干涉信号, 每个干涉信号包括一系列对应于所述相位序列的强度值, 所述相位序列中的每对相位之间的差定义对应的相移增量; (ii) 基于所述至少

一些记录的干涉图来计算腔的初始相位图；(iii) 基于所述初始相位图与至少一些所述记录的干涉图来计算至少一些所述相移增量的每一个的估计；以及 (iv) 基于所述相移增量的计算的估计与至少一些所述记录的干涉图来计算改善的相位图。例如，所述改善的相位图可以是测试表面的表面构型的指示。

[0014] 在实施例的一个集合中，所述 PSI 方法用于振动场合，并且每个相移增量包括系统分量与振动造成的随机分量。所述随机分量产生下述可能性：相移增量的极性相对于所述系统分量的极性将发生改变。记录所述干涉图以产生干涉图的至少两个不同集合，所述不同的集合包括第一集合和第二集合，所述第一集合包括至少一对干涉图，所述第二集合包括至少一个干涉图，其中第一集合中的所述至少一对干涉图的相移增量中发生极性改变的可能性小于包括来自第二集合的至少一个干涉图的任意干涉图对的相移增量发生极性改变的可能性。基于所述第一干涉图集合中的所述至少一对干涉图来计算腔的初始相位图。

[0015] 这些实施例还包括下述特征中的任意一个。

[0016] 用于计算所述相移增量的所述记录的干涉图可以包括来自第二集合的至少一个干涉图。

[0017] 计算所述初始相位图可以包括基于第一干涉图集合中的至少一些干涉图而不是第二集合中的任何干涉图来至少确定所述初始相位图的极性。例如，计算所述初始相位图可以包括计算第一集合中的不同干涉图对中的每一个的最初相位图，并且对所述最初相位图进行平均。例如，用于计算所述最初相位图的不同干涉图对的相移增量的系统分量的绝对幅度可以基本上等于 $\pi/2$ 弧度（模 π ）。此外，在另一示例中，计算所述初始相位图还包括基于一个或多个记录的干涉图信号来识别基本上彼此正交的一对或多对所记录之干涉图并且基于所识别的正交干涉图对来确定所述初始相位图的绝对幅度。用于得到初始相位图的绝对幅度的正交干涉图可以来自第一集合、第二集合或这两个集合的结合。

[0018] 用于记录第一集合中的每个干涉图的积分时间小于用于记录第二集合中的每个干涉图的积分时间。

[0019] 用于记录所述干涉图的电子检测器定义帧率，并且第一集合中的每个干涉图以小于帧率的倒数的积分时间被记录。此外，例如，所述第一集合中的记录的干涉图包括至少一对连续干涉图，该至少一对连续干涉图在横跨所述电子检测器的相邻帧的相移增量期间取得。

[0020] 所述用于连续相位的每个相移增量的系统分量可以定义：相移增量的绝对幅度、用于给与所述幅度的时间段和等于该绝对幅度除以该时间段的相位斜率，并且其中，记录所述干涉图以使得对应于第一集合中的干涉图的每个相移增量的相位斜率大于对应于第二集合中的干涉图的相移增量的任意相位斜率。例如，相移增量的系统分量的绝对幅度可以基本上相等。在特定应用中，优选地是所述第一集合中的干涉图记录在所述相位序列的末端。

[0021] 计算所述相移增量估计可以包括对于至少一些所述相移增量基于关于所述系统分量的信息确定所述估计的极性。例如，确定所述估计的极性可以包括计算关于所述系统分量的信息与所述相移增量估计的集合的正极性和负极性中的每一个的相关。

[0022] 在另一实施例集合中，用于记录所述干涉图的电子检测器定义帧率，并且所述记

录的干涉图包括第一集合,第一集合包括每个都以小于帧率的倒数的积分时间被记录至少一对干涉图,以及其中,基于第一干涉图集合中的至少一对干涉图来计算所述初始相位图。此外,例如,所述第一集合中的记录的干涉图可以包括至少一对连续干涉图,该至少一对连续干涉图在横跨所述电子检测器的相邻帧的相移增量期间取得。

[0023] 这些实施例还可以包括下述特征中的任意一个。

[0024] 计算所述初始相位图可以包括基于第一干涉图集合中的至少一些干涉图来至少确定所述初始相位图的极性。例如,计算所述初始相位图可以包括计算第一集合中的不同干涉图对中的每一个的最初相位图,并且对所述最初相位图进行平均。例如,用于计算所述最初相位图的不同干涉图对的相移增量的系统分量的绝对幅度可以基本上等于 $\pi/2$ 弧度 (模 π)。此外,在另一示例中,计算所述初始相位图还包括基于一个或多个记录的干涉图信号来识别基本上彼此正交的一对或多对记录的干涉图,并且基于所识别的正交干涉图对来确定所述初始相位图的绝对幅度。用于得到初始相位图的绝对幅度的正交干涉图可以来自第一集合、第二集合 (如果有第二集合的话) 或这两个集合的结合。

[0025] 计算所述相移增量估计可以包括对于至少一些所述相移增量基于关于所述系统分量的信息确定所述估计的极性。例如,确定所述估计的极性可以包括计算关于所述系统分量的信息与所述相移增量估计的集合的正极性和负极性中的每一个的相关。

[0026] 仍在另一实施例集合中,每个相移增量包括系统分量与振动造成的随机分量,并且计算所述相移增量估计包括对于至少一些所述相移增量基于关于所述系统分量的信息确定所述估计的极性。例如,确定所述估计的极性可以包括计算关于所述系统分量的信息与所述相移增量估计的集合的正极性和负极性中的每一个的相关。

[0027] 这些实施例还可以包括下述特征中的任意一个。

[0028] 计算所述初始相位图可以包括基于一个或多个记录的干涉图信号来识别基本上彼此正交的一对或多对记录的干涉图。例如,可以识别多个正交对,以及计算初始相位图的还可以包括:计算每个正交对的最初相位图,将所有所述最初相位图的极性设置为相同,以及之后对所述最初相位图进行平均以提供所述初始相位图。

[0029] 最后,上述三个实施例集合中的任意一个中的实施例可以包括下述特征中的任意一个。

[0030] 计算所述相移增量估计可以包括:将所述用于腔的不同位置的干涉信号拟合成用于理论腔的理论干涉信号的集合,所述理论腔对应于所述初始相位图并且通过用于所述相移增量的估计被参数化。例如,所述用于相移增量的参数化估计包括不同位置共同的相移增量的集合。此外,例如,所述拟合包括最小平方优化以计算所述相移增量估计。此外,所述拟合还可以造成在所述相位序列期间所述测试表面的活塞、尖端以及倾斜中的一个或多个 (例如,两个或多个) 发生改变。

[0031] 所述共同光源可以是激光。

[0032] 通过在小于共同光源的相干 (coherent) 长度的范围内进行相移可产生相位序列。

[0033] 所述相位序列可以通过机械式相移、波长调谐、电光相位调制或声光调制而产生。例如,可以通过改变测试光与参考光之间的光程差来产生相位序列。或者,可以通过改变从共同光源到所述检测器的测试光与参考光之间不为零的光程差的共同光源的波长来产生

相位序列。

[0034] 所述方法还可以包括基于改善的相位图来确定测试表面的表面构型。

[0035] 所述拟合可以包括根据下述表达式对不同横向位置 x 的干涉信号 I_j 进行拟合，

以确定所述相移增量估计：
$$\frac{I_j(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})}{B(\mathbf{x})} = \cos(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j) = C_j \cos(\bar{\theta}(\mathbf{x})) + S_j \sin(\bar{\theta}(\mathbf{x}))$$
，其中

Δ_j 定义所述相位序列，以 j 为索引，其中表达式 $\cos(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j)$ 对应于用于所述初始相位图 $\bar{\theta}(\mathbf{x})$ 的理论干涉信号，其中 $A(\mathbf{x})$ 与 $B(\mathbf{x})$ 是所述记录的干涉信号的 AC 分量与 DC 分量，其中 $C_j = \cos(\Delta_j)$ 而 $S_j = -\sin(\Delta_j)$ ，以及其中根据 $\Delta'_j = \text{Mod}_{2\pi}(\Delta_j - \Delta_{j-1})$ 从所述相位序列确定所述相移增量估计 Δ'_j 。

[0036] 例如，用于记录的干涉信号的 AC 分量和 DC 分量可以根据表达式

$$A(\mathbf{x}) = \frac{\max(I(\mathbf{x})) + \min(I(\mathbf{x}))}{2}, B(\mathbf{x}) = \frac{\max(I(\mathbf{x})) - \min(I(\mathbf{x}))}{2}$$
 来确定。

[0037] 所述拟合还可以包括后续拟合以造成在相位序列期间测试表面的活塞、尖端以及倾斜发生改变，其中所述记录的干涉信号 I_j 与初始拟合确定的相移增量估计 Δ_j 拟合到下述表达式：

[0038]
$$\frac{I_j(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})}{B(\mathbf{x})} = \cos(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j + \delta_j + \alpha_j x + \beta_j y)$$
，其中 δ_j 、 α_j 以及 β_j 分别对应于

活塞、尖端和倾斜的相移增量系数。例如，后续拟合可以被线性化以产生以下表达式：

[0039]
$$\frac{I_j(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})}{B(\mathbf{x})} = \cos(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j) - \sin(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j)(\delta_j + \alpha_j x + \beta_j y)$$
。

[0040] 基于所述计算的相移增量来计算改善的相位图包括：(i) 基于所述计算的相移增量的估计与至少一些所述记录的干涉图，计算中间相位图；(ii) 基于所述中间相位图与至少一些所述记录的干涉图，对于所述每个相移增量计算改善的估计；以及 (iii) 基于所述改善的相移增量的估计与至少一些所述记录的干涉图，计算所述改善的相位图。

[0041] 基于所述相移增量的计算的估计来计算所述改善的相位图可以包括将在不同横向位置的每一个处的记录的干涉信号拟合成所述计算的相移增量的估计的正弦函数，以确定每个位置处的腔相位。例如，所述正弦函数可以产生所述记录的干涉信号的一个或多个谐波，以模拟腔中的多重反射。

[0042] 所述方法还可以包括存储或输出关于所述改善的相位图的信息。

[0043] 通常，在另一方面，此处公开的相移干涉 (PSI) 系统包括：相移干涉 (PSI) 装置和电子处理器。所述 PSI 包括光源、相移干涉仪和电子检测器。所述 PSI 装置被配置为对于相位序列中的每个相位、记录在从相移干涉仪的测试表面反射回来的测试光与从参考表面反射回来的参考光之间的干涉图，所述测试光和参考光来自共同光源。每个干涉图对应于通过将反射的测试光与反射的参考光进行干涉而产生的强度图案，所述干涉图对于由测试表面和参考表面定义的腔的不同横向位置中的每一个定义干涉信号，每个干涉信号包括一系列对应于所述相位序列的强度值，所述相位序列中的每对相位之间的差定义对应的相移增量。所述电子处理器耦接到所述相移装置，其中该电子处理器被配置为：(i) 基于至少一些所述干涉图来计算腔的初始相位图；(ii) 基于上述初始相位图与至少一些所述记录的干涉图来计算至少一些所述相移增量的每一个的估计；以及 (iii) 基于所述相移增量的计

算的估计与至少一些所述记录的干涉图来计算改善的相位图。

[0044] 在用于该系统的实施例的第一集合中,每个相移增量包括由相移干涉仪产生的系统分量与振动造成的随机分量。所述随机分量产生下述可能性:相移增量的极性相对于所述系统分量的极性将发生改变。对于该第一实施例集合,所述相移装置被配置为记录所述干涉图以产生干涉图的至少两个不同集合,所述不同的集合包括第一集合和第二集合,所述第一集合包括至少一对干涉图,所述第二集合包括至少一个干涉图,其中第一集合中的所述至少一对干涉图的相移增量中发生极性改变的可能性小于包括来自第二集合的至少一个干涉图的任意干涉图对的相移增量发生极性改变的可能性。此外,所述电子处理器被配置为基于第一干涉图集合中的至少一对干涉图来计算所述腔的初始相位图。

[0045] 用于所述系统的实施例的第一集合的实施例还可以包括用于对应的首先提到的方法实施例的集合的上述任何特征。

[0046] 在用于所述系统的实施例的第二集合中,用于记录所述干涉图的电子检测器定义帧率,并且所述 PSI 装置被配置为记录所述干涉图以包括第一集合,所述第一集合包括至少一对干涉图,以小于帧率的倒数的积分时间记录所述至少一对干涉图中的每一个,并且其中,基于所述第一干涉图集合中的所述至少一对干涉图来计算腔的初始相位图。此外,例如,所述 PSI 装置可以被配置为使得所述第一集合中的记录的干涉图包括至少一对连续干涉图,该至少一对连续干涉图在横跨所述电子检测器的相邻帧的相移增量期间取得。

[0047] 用于所述系统的实施例的第二集合的实施例还可以包括用于对应的第二提到的方法实施例的集合的上述任何特征。

[0048] 在用于所述系统的实施例的第三集合中,每个相移增量包括由相移干涉仪产生的系统分量与振动造成的随机分量,并且由所述电子处理器进行的所述相移增量估计的计算包括基于关于所述至少一些相移增量的系统分量的信息来确定所述估计的极性。例如,所述电子处理器可以被配置为通过将其配置为计算关于所述系统分量的信息与所述相移增量估计的集合的正极性和负极性中的每一个的相关来确定所述估计的极性。

[0049] 用于所述系统的实施例的第三集合的实施例还可以包括用于对应的第三提到的方法实施例的集合的上述任何特征。

[0050] 如在此使用的,“light(光)”并不限于可见光范围内的电磁辐射,而是通常可以指示紫外光、可见光、近红外光以及红外光范围内的电磁辐射。

[0051] 如在此使用的,“integration time(积分时间)”是相位序列中的其中一个给定的相位或相位范围内、由电子探测器记录干涉强度图案而经过的时间段。

[0052] 如在此使用的,电子检测器的“frame rate(帧率)”是用于读出电子检测器的所有元件所需的最短时间段的倒数。

[0053] 除非另有定义,此处使用的所有技术与科学术语都具有与本发明所属技术领域的普通技术人员所熟知的相同的意义。如果与通过引用包含于此的任何文件抵触,则以本发明为主。

[0054] 从下面的详细描述中,本发明的的其他特征、目标和优点将变得清楚。

附图说明

[0055] 图 1 是相移干涉系统的示意图。

[0056] 图 2 是作为模拟的一部分的测试表面轮廓的曲线图。

[0057] 图 3A-图 3D 是来自分别具有 90、135、10 和 -10 度的实际相移增量的一对模拟相移干涉图的、用于图 2 中的测试表面的计算的表面轮廓（左）和残留（右）的曲线图，其中，所述计算假定 90 度的期望的相移增量。

[0058] 图 4 是对于图 2 和图 3 中的模拟的、作为从 -180 至 +180 度的实际相移增量的函数的残留差的曲线图。

[0059] 图 5 是 PSI 数据采集策略的示意图，用于减小下述可能性：振动将导致实际相移增量的极性不同于期望的相移增量的极性。

[0060] 在不同附图中的类似附图标记指示共同的元件。

具体实施方式

[0061] 这里使用的术语“包括”及其变体与术语“包含”及其变体同义地使用，是开放的非限制性的术语。

[0062] 本发明中存在许多可能的实施方式，数量太多，无法在这里描述。目前优选的一些可能的实施方式如下所述。但是，不能过分地强调，这里说明的是本发明的实施方式，而不是对本发明的说明，其并非被限制为这一部分描述的详细实施方式，而是描述在权利要求的更广泛的术语中。

[0063] 相移干涉仪

[0064] 本发明涉及相移干涉仪。图 1 示出用于获得干涉信号的相移干涉系统 50 的一个实例，包括干涉仪 51 和处理器 52（例如，自动计算机控制系统）。可对测量系统 50 进行操作以获得测试对象 53 的表面的空间位置的相移干涉数据。

[0065] 系统 50 包括光源 54、第一聚焦光学镜片（例如，一个或多个透镜）56、光束分离元件 57、第二聚焦光学镜片 60、参考对象 58、第三聚焦光学镜片 61 和检测器 59。光源 54 发送具有高相干性（coherence）的光谱窄带光（例如，激光）。第一聚焦光学镜片 56 将来自于光源 54 的光聚焦到光束分离元件 57，其将光重新朝向第二聚焦光学镜片 60 导向，其对准该光并且将所对准的光传送到参考对象 58。

[0066] 参考对象 58 可以是例如一片玻璃，局部地反射所对准的光并且部分地传送所对准的光。通过参考对象 58 的光朝向测试对象 53 传送。从测试对象 53 反射的光和从参考对象 58 反射的光由第二聚焦光学镜片 60 接收，其将结合的反射光传送回光束分离元件 57。光束分离元件 57 将结合的光传送到第三聚焦光学镜片 61，该光学镜片将结合的光聚焦到检测器 59。参考对象 58 的部分反射性表面限定参考表面，并且测试对象 53 的反射性表面限定测试表面。干涉仪的参考表面和测试表面限定腔（cavity）。

[0067] 检测器 59 是典型的多维检测器（例如，电荷耦合装置（CCD）或者电荷注入装置（CID）），具有布置在一维或多维（例如，二维）中的多个检测器元件（例如，像素）。该检测器也在这里称为“照相机”。光学镜片 60 和 61 将从测试对象 53 反射来的光聚焦到检测器 59 上，使得检测器 59 的每个检测器元件接收从测试对象 53 的对应空间位置（例如，点或其他小区域）反射的光。从测试对象 53 的各自空间位置反射的光和从参考对象 58 反射的光在检测器 59 处干涉从而形成干涉图案或“干涉图（interferogram）”。每个检测器元件在该检测器元件处产生与干涉图的强度相关的检测器信号，其又对应于测试表面和参考

表面上的特定横向位置。

[0068] 系统 50 配置成测量与测试对象 53 的空间位置相关的干涉信号。典型地,系统 50 在从参考对象 58 反射的光与从测试对象 53 反射的光之间产生一系列相移增量。例如,参考对象 58 能够通过由计算机 52 控制的扫描机制(例如,电子机械转换器 63(例如,压电转换器(PZT)),和相关联的驱动电子设备 64)沿着扫描维度轴线(在图 1 的实例中为 Z 轴线)移动(displace)通过许多扫描位置。因此,因为扫描机制改变从测试对象反射的光与从参考表面反射的光之间的光学路径差异(OPD),所以相移增量被产生。在一些实施例中,相继(successive)扫描位置之间的扫描位置增量为至少大约 $\lambda/15$ (例如,至少大约 $\lambda/8$,至少大约 $\lambda/4$),其中 λ 是在每个像素处检测的光的平均波长。

[0069] 对于每个相移,检测器 59 输出用于测试对象的多个不同空间位置的每一个的强度值(例如,由给定检测器元件检测到的强度)。沿着扫描位置所得,每个空间位置相应的强度值定义与空间位置对应的干涉信号。对应于共同位置的强度值定义对于那个相移的数据集(即,干涉图)。在特定实施例中,对于相移增量的系列的数据集能够利用 PSI 算法分析从而提取用于腔的相位图(phase map),其可以使用光源 54 的已知波长以物理单位表达。该相位图表示测试表面相对于参考表面的表面轮廓。在下述进一步的实施例中,公开其他技术用于确定和/或改善测试表面相位图。

[0070] 图 1 仅仅是相移干涉仪的一项实例。虽然图 1 中的相移系统 100 包括 Fizeau 干涉仪,但是其他实施例可采用不同类型的干涉仪,诸如 TwymanGreen 干涉仪、Mach Zehnder 干涉仪、Michelson 干涉仪、Fabry-Perot 干涉仪以及掠入射式(grazing-incidence)或非平衡式 Mirau 干涉仪。同样,该干涉仪可以是大大孔径(aperture)、显微镜或者光纤光学传感器干涉仪。

[0071] 此外,可使用其他技术来执行相移。虽然图 1 的实施例使用机械式相移器来改变 OPD,但在其他实施例中,例如,也可使用电光相位调制。此外,除了改变 OPD,还可使用波长调谐(wavelength-tuning)。例如,图 1 中的光源 54 可以是可调谐的光源(例如,可调谐激光二极管),相移增量的系列可以通过扫描光源的波长而被引入,使得对应于测试路径和参考路径之间的非零 OPD 的相移发生改变。共同持有的美国专利 No. 4, 594, 003 与 No. 6, 359, 692 描述了波长调谐相移干涉仪的其他细节,其内容通过引用的方式结合于此。此外,在共同持有的美国专利 No. 6, 924, 898 中,公开一种相移干涉仪(例如,参见图 7),由此通过调制正被导向至测试表面的光的传播波向量(wave-vector)而被引入,其内容通过引用的方式结合于此。这种调制可以例如通过声光调制而实现。

[0072] 在大振动场合下的 PSI 数据

[0073] 考虑采用数量 M 个相移单帧干涉图进行 PSI 数据采集。振动意味着 M 帧之间的相移包括随机分量,这样能够假定先验推理的无特定相位关系。但是,假定帧干涉时间相对于存在的振动要短,使得对比损失(contrast loss)可忽略不计。M 优选为大值,至少比较于传统 PSI 采集,使得能够假定临时相位的宽采样(大的临时相位多样性(temporal phase diversity))。即使在不存在振动的情况下 M 大于传统 PSI,其仍然代表仅仅少量的时间,所以不是对当前的照相机技术的主要要求(great imposition)。假定两个光束干涉,腔强度如下:

[0074]

$$I(\mathbf{x}, t) = A(\mathbf{x}) + B(\mathbf{x}) \cos(\theta(\mathbf{x}) + \varphi(t)) \quad (1)$$

[0075] 其中, $\theta(\mathbf{x})$ 是腔相位 (或者“相位图”), \mathbf{x} 代表双分量矢量, 表示场位置 (对应于测试表面和参考表面中的每一个上的横向位置), $\varphi(t)$ 是时间依赖相移, $A(\mathbf{x})$ 和 $B(\mathbf{x})$ 分别是 DC 和 AC 项。AC 和 DC 项能够简单地经由下式估计得到:

$$\begin{aligned} [0076] \quad A(\mathbf{x}) &= \frac{\max(I(\mathbf{x})) + \min(I(\mathbf{x}))}{2}, \\ B(\mathbf{x}) &= \frac{\max(I(\mathbf{x})) - \min(I(\mathbf{x}))}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

[0077] 其中, 在最大 (“max”) 和最小 (“min”) 计算中使用 M 个干涉图的整个集合。这些估计对于大量的帧来说是最好的, 尤其是驱动用于 M 的最小值。DC 和 AC 项也可通过对于每个场位置将正弦波拟合至等式 (1) 而估计到。

[0078] 当不存在振动时, 已知相移序列 $\varphi(t)$, 腔序列 $\theta(\mathbf{x})$ 能够在每个场位置被确定从而产生例如测试表面相对于参考表面的表面轮廓。但是, 即使在振动的场合中, 在相移序列 $\varphi(t)$ 变得未知的情况下, 也可使用迭代拟合技术估计腔相位。

[0079] 例如, 可以使用预期的相移序列来得到用于腔相位的初始估计, 然后能够通过根据初始腔相位并且在实际相移序列对于所有场位置都是相同的这一假设下 (如下文更详细地说明, 这一假设可以放宽从而用于小的频率, 诸如尖端 (tip)、尖端 (tilt) 和活塞 (piston))、通过将 PSI 数据 $I(\mathbf{x}, t)$ 拟合至等式 (1) 而计算对于相移的实际序列的估计。然后能够从对于每个场位置计算的相移和 PSI 数据来确定对于腔相位的改善的估计, 如果必要的话采用进一步的迭代。

[0080] 但是, 在大振动场合下, 这一迭代方法会破坏对于腔相位的整体极性的不关注, 或者等同于, 对于相移序列的整体极性。这可以从等式 (1) 中的余弦项的自变量 (argument) 来理解。例如, 若振动导致在时间 $t = t_1$ 的第一干涉图 $I(\mathbf{x}, t_1)$ 与在时间 $t = t_2$ 的第二干涉图 $I(\mathbf{x}, t_2)$ 之间的实际相移增量 ϕ_{12} 具有与预期相移增量的极性相反的极性, 则应用到这对干涉图上的拟合技术会产生具有错误极性的腔相位。因此, 例如, 可能会将测试表面的凹面构型 (topology) 报告为凸面, 反之亦然。值得注意的是, 即使对于其他最佳化拟合, 该情况仍然会发生。

[0081] 此外, 虽然许多 PSI 算法与拟合程序 (fitting routines) 对实际相移增量与预期相移之间的某些偏差具有鲁棒性, 但本发明人认识到对于振动大到足以改变实际相移增量的极性的情况将完全破坏该鲁棒性。(如在此使用的, 当以 2π 为模 (modulo) 的相位是以 $-\pi$ 弧度到 $+\pi$ 弧度表示时, 相移增量的“极性”被理解为相位的极性)。

[0082] 如通过图 2、图 3A-3D 和图 4 中示出的模拟所示例的, 其中对于图 2 (其中假设参考表面为完全平坦) 中示出的测试表面模拟出对于多个实际相移增量的每一个的干涉图 $I_p(\mathbf{x})$ 与 $I_k(\mathbf{x})$, 并且在假设实际相移增量等于 $\pi/2$ 弧度 (或等同于 90 度) 的预期相移增量的情况下从上述干涉图计算出相位图, 其中腔相位由下式给出:

[0083]

$$\theta(\mathbf{x}) = \tan^{-1} \left[\frac{(I_k(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})) \cos(\varphi) - (I_p(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x}))}{(I_k(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})) \sin(\varphi)} \right] \quad (3)$$

[0084] 如图 2 所示,测试表面是 500 个像素的正弦曲线形状的线条,具有 6 个条纹 (fringe) 的峰谷偏移 (PV departure)。图 3A 示出如果实际相位增量确实为 90 度的情况下计算的表面轮廓 (左边) 与残留 (residual) (右边)。相位图如期望般理想。该残留是测量轮廓与真实轮廓之间的差。残留不为零的原因是因为使用等式 (2) 计算的 AC 项与 DC 项中的误差。

[0085] 虽然当相位增量偏离 90 度时会使得残留变严重,但是表面极性仍保持不变并且整体轮廓是正确的。例如,图 3B 示出如果实际相位增量是 135 度而不是 90 度的情况下的计算的表面轮廓 (左边) 与残留 (右边)。即使对于大的偏移,在实际相位增量的极性保持在正极性 (即 0 度~180 度之间) 的条件下就能保持整体轮廓。例如,图 3C 示出如果实际相位增量确实是 10 度而不是 90 度的情况下计算的表面轮廓 (左边) 与残留 (右边)。

[0086] 然而,若实际相移增量的极性相对于 90 度的预期相移增量的极性发生变化 (即,如果实际相移增量超过 0 度 (或 180 度) 界线),则相位图的极性会反转 (flip),因而产生灾难性的 (catastrophically) 的残留。例如,图 3D 示出如果实际相位增量真实为 -10 度的情况下计算的表面轮廓 (左边) 与残留 (右边)。此计算结果将为峰的表面轮廓报告为谷,将为谷的表面轮廓报告为峰。

[0087] 图 4 中概括的模拟是作为实际相位增量 (-180 度~180 度,以 1 度为增量) 的函数的 rms 残留的曲线图。如所预期的,由于所述反向 (inversion) 该残留在 0 度以下变得非常大。虽然当远离 90 度时也会使得残留变大,但相对于上述反向的影响,其影响程度相对而言比较小。(该模拟所示出的 180 附近的与 0 度附近的那些一样大的突然的改变的原因是由于 AC 与 DC 不定性 (AC and DC uncertainties) 所引起的误差对于相位增量的那些值不同地作用)。

[0088] 此模拟示出即使实际相移增量与预期相移增量之间的变化 (variation) 很大,如果实际相移增量的极性与预期相移增量的极性相同,则计算的相位图一般都会对应于测试表面的实际轮廓,也因此可将此相位图作为后续迭代拟合技术的有用的起始点以进一步减少残留。然而,如果极性改变,则初始确定的相位图将非常不理想,并且会使得后续的迭代拟合技术得到错误解答。此外,如果通过计算出从干涉图的对应对 (corresponding pairs) 中所计算的若干最初相位图 (preliminary phase map) 的平均来确定初始相位图,则非但不能减少误差,且在一对或多对干涉图对应于具有改变了相对于预期相移增量的极性的实际相移增量时还会增加误差。

[0089] PSI 数据的处理

[0090] 假设提供了初始相位图估计 $\bar{\theta}(\mathbf{x})$ 。假设此起始相位图在进行采集时不变,可使用 $A(x)$ 与 $B(x)$ 的测量值来以最小平方法 (least squares sense) 计算出相对于该相位图的所有帧 I_j 之间的相移 Δ_j 的估计。为此,将每个帧拟合到下述等式:

$$[0091] \quad \frac{I_j(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})}{B(\mathbf{x})} = \cos(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j) = C_j \cos(\bar{\theta}(\mathbf{x})) + S_j \sin(\bar{\theta}(\mathbf{x})) \quad (4)$$

[0092] 其中 $C_j = \cos(\Delta_j)$ 而 $S_j = -\sin(\Delta_j)$ 。引入下述矩阵:

$$[0093] \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} \cos(\bar{\theta}_1) & \sin(\bar{\theta}_1) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\bar{\theta}_i) & \sin(\bar{\theta}_i) \\ \vdots & \vdots \\ \cos(\bar{\theta}_{NP}) & \sin(\bar{\theta}_{NP}) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \frac{I_{j,1} - A_1}{B_1} \\ \vdots \\ \frac{I_{j,i} - A_i}{B_i} \\ \vdots \\ \frac{I_{j,NP} - A_{NP}}{B_{NP}} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} C_j \\ S_j \end{pmatrix} \quad (5)$$

[0094] (其中 $i = 1 \dots NP$ 代表所有的像素) 减少了解等式 $\mathbf{D}\mathbf{A} = \mathbf{Y}$ 的任务。左乘 \mathbf{D}^T 得到 $\mathbf{S}\mathbf{A} = \mathbf{D}^T\mathbf{Y}$, 其中 $\mathbf{S} = \mathbf{D}^T\mathbf{D}$ 是对称分散矩阵 (symmetric scatter matrix), 接着左乘 \mathbf{S}^{-1} 后通过 $\mathbf{A} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{D}^T\mathbf{Y}$ 确定 \mathbf{A} 。值得注意的是, 这等于对于 \mathbf{S} 与 \mathbf{C} 、对于每帧解下述等式:

$$[0095] \quad \begin{bmatrix} \sum \cos(\bar{\theta}_i)^2 & \sum \cos(\bar{\theta}_i) \sin(\bar{\theta}_i) \\ \sum \cos(\bar{\theta}_i) \sin(\bar{\theta}_i) & \sum \sin(\bar{\theta}_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_j \\ S_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \left(\frac{I_{j,i} - A_i}{B_i} \right) \cos(\bar{\theta}_i) \\ \sum \left(\frac{I_{j,i} - A_i}{B_i} \right) \sin(\bar{\theta}_i) \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0096] 总合遍及区域中的所有像素并且对于每帧存在一个等式。接着通过下述等式得到相移:

$$[0097] \quad \Delta_j = \tan^{-1} \left[-\frac{S_j}{C_j} \right] \quad (7)$$

[0098] 可通过下述等式从这些相移中确定相移增量 Δ' :

$$[0099] \quad \Delta'_j = \text{Mod}_{2\pi} (\Delta_j - \Delta_{j-1}) \quad (8)$$

[0100] 假设不必硬性规定相位图在进行采集期间不变, 通常目标表面在进行采集期间可忍受 (undergo) 刚体运动 (rigid body motion)。幸运的是, 可将等式 (4) 扩展到解决不只是纯活塞 (pure piston) 的更高阶腔运动 (higher order cavity motion)。在大部分的情况下, 这些高阶项非常小, 但在某些情况下将此拟合扩展为包含小振幅的尖端 / 倾斜运动和 / 或幂项 (power terms) 是有用的。在这些情况下, 首先使用等式 (7) 得到活塞项的估计, 接着等式 (4) 以线性形式重写以解决此估计的较小高阶变化。例如, 为了包含较小的尖端与倾斜变化, 等式 (4) 重写为:

$$[0101] \quad \frac{I_j(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})}{B(\mathbf{x})} = \cos(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j + \delta_j + \alpha_j x + \beta_j y) \quad (9)$$

$$[0102] \quad = \cos(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j) - \sin(\bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j) (\delta_j + \alpha_j x + \beta_j y)$$

[0103] 并且在利用公等式 (7) 确定 Δ_j 后, 通过下述等式计算每帧 j 的变化:

$$[0104] \quad \begin{bmatrix} \sum \sin(\theta'_j)^2 & \sum \sin(\theta'_j)^2 x & \sum \sin(\theta'_j)^2 y \\ \sum \sin(\theta'_j)^2 x & \sum \sin(\theta'_j)^2 x^2 & \sum \sin(\theta'_j)^2 xy \\ \sum \sin(\theta'_j)^2 y & \sum \sin(\theta'_j)^2 xy & \sum \sin(\theta'_j)^2 y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_j \\ \alpha_j \\ \beta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum (\cos(\theta'_j) - F_j) \sin(\theta'_j) \\ \sum (\cos(\theta'_j) - F_j) \sin(\theta'_j) x \\ \sum (\cos(\theta'_j) - F_j) \sin(\theta'_j) y \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0105] 其中总合遍及所有的区域位置 $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$, $\theta'_j(\mathbf{x}) = \bar{\theta}(\mathbf{x}) + \Delta_j$, $F_j(x) = \frac{I_j(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})}{B(\mathbf{x})}$,

δ 是相移从 Δ 的偏差, 而 α_j 与 β_j 分别是 x 倾斜系数与 y 倾斜系数。或者, 若刚体运动具有较大的振幅, 则可通过非线性最佳化方法 (nonlinear optimization methods) 来解等式 (4)。

[0106] 现在利用简单的减法可以得到相邻帧之间的相移增量。因为这些相位是相对于相同的初始相位图估计 $\bar{\theta}(\mathbf{x})$ 计算的, 所以在初始相位图估计的极性是正确的条件下, 可将相位图估计从确定的相位增量中约去 (cancel out), 使得所判断的相位增量的精确度几乎不取决于初始相位图估计的质量。

[0107] 接着可以通过使用确定的相位增量和干涉图的对应序列来计算出最后的干涉相位图 $\Theta(\mathbf{x})$, 以改善初始相位图估计 $\bar{\theta}(\mathbf{x})$ 。在一实施例中, 可以通过对于每个像素单独地计算第一阶 (1st order) 干涉信号的相位来得到此最后的相位图, 其中此第一阶干涉信号是通过最小平方分析、使用造成任何测量的空间相依性的测量的相移、沿着相移轴 (时间轴) 而获得的。此外, 可同时计算出第一谐波与第二谐波 (harmonic) 以产生能够使信号失真的腔多重反射 (cavity multiple reflections)。这十分重要, 因为当取样不一致时无法依靠正交性 (orthogonality) 将这两个谐波隔离。最好是能够甚至包括具有高腔精确值 (high cavity Finesses) 的高频谐波 (higher harmonics)。因此, 下述等式将每个像素 i 拟合至每个干涉图:

$$[0108] \quad I_i = A' + b \cos(\Theta_i + \delta) + c \cos(2\Theta_i + 2\delta)$$

$$[0109] \quad = A' + b \cos(\Theta_i) \cos(\delta) - b \sin(\Theta_i) \sin(\delta) + c \cos(2\Theta_i) \cos(2\delta) - c \sin(2\Theta_i) \sin(2\delta) \quad (11)$$

$$[0110] \quad = A' + B'_i \cos(\delta) + C'_i \sin(\delta) + D'_i \cos(2\delta) + E'_i \sin(2\delta)$$

[0111] 其中 δ 代表对于干涉图的测量的相移。定义出数据矩阵:

$$[0112] \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 1 & \cos(\delta_1) & \sin(\delta_1) & \cos(2\delta_1) & \sin(2\delta_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(\delta_i) & \sin(\delta_i) & \cos(2\delta_i) & \sin(2\delta_i) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(\delta_M) & \sin(\delta_M) & \cos(2\delta_M) & \sin(2\delta_M) \end{pmatrix} \quad (12)$$

[0113] 以及向量:

$$[0114] \quad \mathbf{A} = [A', B', C', D', E']^T, \mathbf{Y} = [I_1, \dots, I_M]^T \quad (13)$$

[0115] 再次将任务减少到对于 \mathbf{A} 解等式 $\mathbf{D}\mathbf{A} = \mathbf{Y}$ 。值得注意的是, 对于每个像素估算 \mathbf{Y} 与 \mathbf{A} 。遵循标准最小平方程序 (Least Squares procedure), 该解答是 $\mathbf{A} = [\mathbf{D}^T \mathbf{D}]^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{Y}$ 。这等于对于 $A' \dots E'$ 、对于每个像素解下述等式:

$$[0116] \quad \begin{bmatrix} M & \sum \cos(\delta_j) & \sum \sin(\delta_j) & \sum \cos(2\delta_j) & \sum \sin(2\delta_j) \\ \sum \cos(\delta_j) & \sum \cos(\delta_j)^2 & \sum \cos(\delta_j) \sin(\delta_j) & \sum \cos(\delta_j) \cos(2\delta_j) & \sum \cos(\delta_j) \sin(2\delta_j) \\ \sum \sin(\delta_j) & \sum \sin(\delta_j) \cos(\delta_j) & \sum \sin(\delta_j)^2 & \sum \sin(\delta_j) \cos(2\delta_j) & \sum \sin(\delta_j) \sin(2\delta_j) \\ \sum \cos(2\delta_j) & \sum \cos(2\delta_j) \cos(\delta_j) & \sum \cos(2\delta_j) \sin(\delta_j) & \sum \cos(2\delta_j)^2 & \sum \cos(2\delta_j) \sin(2\delta_j) \\ \sum \sin(2\delta_j) & \sum \sin(2\delta_j) \cos(\delta_j) & \sum \sin(2\delta_j) \sin(\delta_j) & \sum \sin(2\delta_j) \cos(2\delta_j) & \sum \sin(2\delta_j)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A' \\ B' \\ C' \\ D' \\ E' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum I_{j,i} \\ \sum I_{j,i} \cos(\delta_j) \\ \sum I_{j,i} \sin(\delta_j) \\ \sum I_{j,i} \cos(2\delta_j) \\ \sum I_{j,i} \sin(2\delta_j) \end{bmatrix} \quad (14)$$

[0117] 总合遍及所有的帧。接着通过对于每个像素分别地估算来获得最后的相位图:

$$[0118] \quad \Theta(\mathbf{x}) = \tan^{-1} \left[-\frac{C'(\mathbf{x})}{B'(\mathbf{x})} \right] \quad (15)$$

[0119] 此最后拟合 (last fit) 消除了与 DC 项 A 中的不确定性有关的所有误差。唯一的剩余误差是第一谐波的空间奇数幂 (spatially odd powers)。在某些实施例中,可以通过使用 Leslie L. Deck 所获得的共同拥有的美国专利 No. 2008/0266571, 名为“Vibration Resistant Interferometry”中所描述的技术的进一步处理来除此误差,其内容通过引用的方式结合于此。

[0120] 在其他实施例中,所述处理可继续进行。例如,现阶段可能使用计算的相位增量与最佳相位图来改善 AC 项与 DC 项的精确度。通过以最小平方法将每个像素拟合至等式 (1),也就是通过解下述等式求出 $A(x)$ 与 $B(x)$:

$$[0121] \quad \begin{bmatrix} M & \sum \cos(\theta'(\mathbf{x})) \\ \sum \cos(\theta'(\mathbf{x})) & \sum \cos(\theta'(\mathbf{x}))^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(\mathbf{x}) \\ B(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum I(\mathbf{x}) \\ \sum I(\mathbf{x}) \cos(\theta'(\mathbf{x})) \end{bmatrix} \quad (16)$$

[0122] 其中总合遍及所有 M 个帧并且 $\theta'_{j}(x) = \Theta(x) + \Delta_{j}$ 。利用重新计算的 AC 项与 DC 项,可将新的 $\theta'_{j}(x)$ 应用于等式 (7) 以改善相位增量,并且最后重复等式 (15) 以取得进一步改善的相位图。可视需要重复执行这一连串操作,不过模拟已经显示此重复程序与 VC 的单个应用所产生的结果基本上相同。

[0123] 如图 2 到图 4 中的模拟所示,造成实际相移增量相对于预期相移增量改变极性的振动会造成计算的相位图中的反向。值得注意的是,如果等式 (4) 到等式 (7) 的处理中将该反向的相位图作为初始相位图,则所确定的相移增量序列也会具有不正确的极性。这十分明显,因为这两个项皆位于等式 (4) 中的余弦项的自变量内,而该等式是偶函数 (even function)。因此,等式 (4) 到等式 (7) 的整个处理序列仍会产生具有不正确极性的“改善的”相位图。

[0124] 因此,此处公开的某些实施例直接确保 PSI 数据处理中使用的初始相位图的极性是正确的。具体地,以某种方式取得 PSI 数据的至少一个子集 (subset) 以充分地降低因振动而造成实际相移增量相对于预期相移增量的极性改变的可能性,并且该 PSI 数据的子集用于建立上述 PSI 数据处理中使用的初始相位图的正确极性。或者 (或此外),在某些实施例中,可将计算的相移增量的序列与预期相移增量的序列进行比较 (例如进行相关运算),以确定实际相移增量序列的正确极性。

[0125] PSI 数据的鲁棒采集

[0126] 一种降低振动对实际相移增量的影响的方法是增加取得相移干涉图的机率。不幸的是,对于这种较陡的相移有实际性的限制。这些限制包括照相机的帧率周期下限、每个干涉图的积分时间下限以及给与期望的相移增量 (通常为 +90 度或 -90 度) 所需的时间下限。此外,较陡的相移 (诸如测试光与参考光之间的 OPD 的快速机械式扫描) 会产生额外的振动使得后续取得的 PSI 数据更加恶化。

[0127] 然而,在此发现,在初始相位图具有正确的极性的条件下,即使在大振动场合中,PSI 数据处理技术也是鲁棒的。此外,可以只基于 PSI 数据的较小的子集、利用正确的极性来确定初始相位图。因此,在某些实施例中,较陡的相移只会给与取得的干涉图的子集,并且只在确保实际相移增量与预期相移增量的极性是相同的所需的程度。此子集用于确定初始相位图 (或甚至是整个相位图) 的极性,并且在上述的后续 PSI 数据处理中可使用通过较平缓的相移所取得的额外的干涉图 (可单独或与所取得的干涉图中的较陡的相移结合)。

[0128] 有许多方法来取得 PSI 数据的至少一个子集, 该子集对于导致实际相移增量发生极性变化的振动的的影响具有鲁棒性。例如, 若我们考虑到对应到 90 度或 $\pi/2$ 弧度的预期相移增量的一对干涉图, 则用于给与预期相移的时间周期 T 需满足下述等式:

$$[0129] \quad T < \lambda / (4fA) \quad (17)$$

[0130] 其中 λ 是测试光与参考光的波长, f 是振动频率, 而 A 是振动振幅。根据该等式, 实际相移会变化, 但是极性会保持不变。因此, 在某些实施例中, 从满足等式 (17) 的一对相移干涉图中取得用于建立初始相位图的极性的 PSI 数据的子集。可将该等式加以推导以产生振动频率的分布与振动振幅的分布, 以便控制用于确定初始相位图的极性 (或等效地, 确定实际相移增量序列的极性) 的 PSI 数据采集。

[0131] 在某些实施例中, 干涉图对的相移是连续且线性进行的, 在这种情况下每个这种干涉图都具有等于 T 的积分时间。在某些实施例中, 为了快速地从照相机中读出每个干涉图的强度值, 相移时间 T 横跨了照相机的帧率中的两个相邻帧, 并且在帧改变前后都具有积分时间 T, 通常 T 仅是照相机的帧率周期的一小部分 (例如 1/4)。在此情况下, 各个干涉图的积分时间的中间点之间的预期相移增量是 $\pi/2$ 弧度。以下将针对此方法做更详细的说明。

[0132] 四对 (QuadPair) 的产生

[0133] 四对“QuadPair”, 或 QP 是一对短持续时间 (duration) 的干涉图, 并且这对干涉图之间具有已知的相移 (标称的 90 度)。与 DC 项同时测量的 QP 提供了一种产生初始相位图的方法, 以防通过其他方式不能得到初始相位图。图 5 示出了一种产生 QP 的最优方法。当相位偏移时, 通过快门 (shutter) 控制光源亮度以横跨照相机的帧同步 (frame sync)。相移可应用在许多方面 (即, 机械式运动或波长调谐) 并且相移的实际极性是已知但不重要的 (immaterial)。典型地, 预期相移的幅度为 90 度。虽然图 5 只示出 QP 的采集, 但只要干涉图的总数大于或等于三, 在此描述的分析就可以应用于一个或多个 QP, 而这一个或多个 QP 具有任何数量的伴随的单个干涉图。如果亮度本身可以被调制 (例如, 通过使用激光二极管), 则不需快门。因此, 实施例可包括调制的照相机快门 (modulated camera shutter)、调制的光源 (modulated source), 或两者。参考图 5, τ 代表单个帧经历的积分时间。帧 0 与帧 1 构成一个 QP, 而帧 2 与帧 3 构成另一个 QP。

[0134] 干涉相位在照明期间标称地 (nominally) 偏移 90 度。这可通过许多方式实现。由于基于标准 PZT 的相移器 (standard PZT based phase shifters) 可达到所需的实际速度, 因此机械式相移是其中一种选择。例如, 由于在一般桌上型环境下所产生的振动会增强至千赫 (kHz) 范围, 所以必须在 1 毫秒 (ms) 或更少时间内取得这些 QP。对于氦氖 (HeNe) 波长 (633nm), 由于典型干涉仪中的 80nm 的物理位移 (physical displacement) 会产生 90 度相移, 所以对于 1ms 采集仅需的机械速度为 80 微米 (micron)/秒 (sec)。~ 1mm/sec 的速度对大部分的强烈振动来说是足够的。机械式相移的优点在于没有腔长度依赖性 (cavity length dependence), 而缺点在于产生腔运动 (cavity motion), 如果该腔运动非常剧烈, 则会使得参考 (或测试) 表面受压和变形。因此, 如果通过这种较陡的机械式相移来取得 QP, 则除了利用较平缓的相移所取得的干涉图外, 序列必须要以较平缓的相移开始并且以较陡的相移结束, 使得较陡的相移所引起的振动不会影响到在较平缓的相移期间所取得的干涉图的完整性。

[0135] 另一种相移方法是波长调谐。外部腔激光二极管 (external cavity laser diodes) 是具有快速、宽频波长调谐功能的光源, 并且可作为不相等光程干涉仪 (unequal path interferometers) 中的相移器使用。例如, New Focus StableWave™ 可以调谐频率至 100 兆赫 (THz)/秒。对具有光程 (optical path) 长度 D (其中一种方式) 的腔而言, 光学调谐率 (optical tuning rate) $\dot{\nu}$ 的干涉频率 f 是:

$$[0136] \quad f = \frac{2\dot{\nu}D}{c} \quad (18)$$

[0137] 在调谐率为 100 兆赫 (THz)/秒 (sec) 的情况下, 10mm 的腔会经历 6.67KHz 的干涉频率, 并且此干涉频率会与腔的长度呈线性比例。因此, 这种激光能足够快速地产生腔相移率, 并且此腔相移率远远超过环境振动可影响所有实际腔长度的相位的速率。波长调谐法的优点在于不需要物理上 (physically) 干扰腔就能够使相位偏移, 但是需要知道腔的长度以便准确地设定 QP 相移增量。

[0138] 另一种相移方法合并电光相位调制器 (electro-optical phase modulator; EOM)。通过偏光 (polarization) 将测试波前与参考波前分离, 使得 EOM 可单独地调谐待测波前或参考波前的相位。调谐频率可以是非常快速的, 容易满足用以停止 (freeze) 振动运动所需的相位率。使用 EOM 来进行相位调谐的

[0139] 优点在于不需要物理上干扰腔就能够使相位偏移。

[0140] 形成四对的两个干涉图不需要为时间相邻 (time adjacent), 虽然取决于四对的产生机制 (production mechanism) 这么做可能比较方便。即使此方法对于 QP 相位增量偏离 90 度具有鲁棒性, 但重要的是要知道 QP 相位增量的极性, 否则作为结果的表面相位图会反向。

[0141] 初始相位图的四对分析与后续分析

[0142] 考虑利用数量 NQ 个 QP 加上 N 个相移单帧干涉图得到总计 $M = N + 2NQ$ 个帧来进行采集。因为振动意味着 N 个帧与数量 NQ 个 QP 之间的相移可以是随机的, 所以我们无法先验推理假设任何特定的相位关系。然而, 帧积分时间必须相对于振动的存在要短, 使得对比损失可以被忽略。M 最好大一点 (至少跟传统的 PSI 采集相比), 以便确保能够宽采样时间相位 (即时间相位多样性)。再次假设双光束干涉, 等式 (1) 描述了腔强度, 而等式 (2) 使用 M 个干涉图的整个集合进行最大值与最小值计算以求出 AC 项与 DC 项。这些估计适用于大数量的帧并且实质地导出 M 的最小值。对于 NQ 个 QP, 可通过下述等式作出腔相位图 $\theta(x)$ 的估计:

[0143]

$$\theta(\mathbf{x}) = \tan^{-1} \left[\frac{(I_k(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})) \cos(\varphi) - (I_p(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x}))}{(I_k(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})) \sin(\varphi)} \right] \quad (19)$$

[0144] 其中 $I_k(x)$ 与 $I_p(x)$ 是 QP 中使用的两个干涉图, 而 φ 是这两个干涉图之间的相移 (假设此相移为 QP 的标称相移 (nominal phase shift) - 通常为 90 度)。接着对这些个别相位图一起进行平均以得出平均相位图估计 $\bar{\theta}(\mathbf{x})$:

$$[0145] \quad \bar{\theta}(\mathbf{x}) = \sum_{k=0}^{NQ-1} \theta_k / NQ \quad (20)$$

[0146] 接着可将该平均相位图估计用作上述等式 (4) - 等式 (16) 的 PSI 数据处理分析中

的初始相位图估计。

[0147] 相位偏差分析 (Phase Bias Analysis)

[0148] 另一种解决当振动造成实际相移增量与预期相移增量不同时的问题的方法是使用相位偏差概念。在这种实施例中，不需要取得 PSI 数据的至少一个子集，其中该子集合对于极性变化具有鲁棒性。

[0149] 例如，考虑上述利用 M 个相移单帧干涉图来进行采集（例如等式 (1)）。首先，如等式 (2) 中所述，从 M 个干涉图中确定 DC 项 A(x) 与 AC 项 B(x)。接着选择一对或多对干涉图，其中每个干涉图对彼此之间相对正交。

[0150] 上述操作可以通过检查相对于 AC 与 DC 范围的干涉图强度来完成。例如，在某些实施例中，需要对于每个像素分离地找到具有最接近 DC 的像素的干涉图。该干涉图构成正交对 (in-quadrature pair) 的两个干涉图中的一个，并且通过找到具有最接近 DC+AC 或 DC-AC 的像素的干涉图来选择另一干涉图。可对多个像素的每一个执行此过程，从而产生大量的正交对，但其中一些正交对可以是冗余的 (redundant)。虽然有许多方法可降低正交对的整体性 (ensemble of pairs) 用以消除冗余的正交对，但其中一种较佳的方法是确保每个干涉图只被使用一次。以这种限制，最后的候选者 (candidates) 的最大数量不会超过 M/2。此外，相对于 DC (对于第一对干涉图) 和 DC±AC (对于第二对干涉图) 限制像素强度的偏差可以用于确保候选者接近正交。值得注意的是，减少候选者的数量 (到 ≥ 1 的值) 能够显著地改善算法处理速度，并且由于第一个相位图不需要非常高的品质，因此不会影响算法度量性能 (algorithm metrology performance)。

[0151] 对于所选择的 NQ 个干涉图的每一个，可以根据下述等式计算相位图估计 $\theta(x)$ ：

[0152]

$$\theta(\mathbf{x}) = \tan^{-1} \left[\frac{(I_k(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})) \cos(\varphi) - (I_p(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x}))}{(I_k(\mathbf{x}) - A(\mathbf{x})) \sin(\varphi)} \right] \quad (21)$$

[0153] 其中 $I_k(x)$ 与 $I_p(x)$ 是正交对中使用的两个干涉图，而 φ 是这两个干涉图之间的相移（假设为 90 度）。此时每个相位图的极性不确定，因此任意选择一个正交对，并且将每一个其他正交对相位图的极性设定成与第一个极性最大相关。接着对这些个别相位图一起进行平均以得出平均相位图估计 $\bar{\theta}(\mathbf{x})$ ：

$$[0154] \quad \bar{\theta}(\mathbf{x}) = \sum_{k=0}^{NQ-1} \theta_k(\mathbf{x}) / NQ \quad (22)$$

[0155] 接着将该平均相位图估计用作初始相位图估计，以根据等式 (4) - 等式 (7) 计算出实际相移增量。

[0156] 现在确定计算的相移序列的极性是否正确（或者等效地，来自正交对的选择的极性是否正确）。具体地，将计算的相移序列与预期相移序列进行比较。如果极性正确，则这两个序列应该与另一序列相关，因为虽然大的振动会使得整个相移序列中的实际相移增量与预期相移非常不同（包含极性相反），但每当振动使得预期相移增加时，振动也会使得预期相移减少。因此，计算相移增量的预期序列与所计算的相移增量序列的正极性和负极性中的每一个之间的相关，其中较高的相关表示所计算的相移增量序列的正确极性。可通过下述等式表示此相关：

$$[0157] \quad Corr^{\pm} = \sum_{j=0}^M \Delta_j^{\pm} \Psi_j \quad (23)$$

[0158] 其中 Δ_j^{\pm} 是对于两个可能的极性值的测量的相移增量分布,而 Ψ_j 给出预期相移增量序列,并且每个序列中的相位是以 2π 为模、从 $-\pi$ 弧度到 $+\pi$ 弧度(或者等效地, -180 度 $\sim +180$ 度)的表示。产生具有最正值(most positive)的Corr的相移增量分布被认为是正确的相移增量分布。

[0159] 用于确定改善相位图的分析接着基于计算的相移序列的正确极性继续进行上述(例如等式(11)-等式(15))的计算。

[0160] 在其他实施例中,该相位偏差技术可以与四对技术或其他技术结合,用于具有不会因振动而造成极性改变的PSI数据的至少一个子集,以提供冗余检查(redundant check)确保极性是正确的。

[0161] 此外,在一些实施例中,如上面的等式(21)-等式(22)中阐明的可以确定初始相位图,只是等式中使用的不同正交对的极性不是任意选择的,而是由如等式(19)或等式(20)中阐明的通过从一个或多个QP中确定的初始相位图的极性来进行设置。

[0162] 测量模式

[0163] 对上述分析进行小的改变可实现一些有用的替代测量模式。例如,例行性地执行对许多测量值的平均,以降低噪声基准(noise floor)并改善仪器精度(instrument precision)与可重复性(repeatability)。利用上述分析,由于在相移时获得的每个单个干涉图可被加入到用于计算相位图的干涉图的集合中,,因此连续平均模式(continuous averaging mode)是可能的。该集合越大,最后相位图中的相位误差就会越小。值得注意的是,只需执行一次QP采集或相关分析以估算数据极性。

[0164] 一种适用于在环境干扰期间实时地(real-time)持续监控腔相位的模式称为连续相位(continuous phase)。一旦如前文所述作出了相位图的测量,则每个连续的QP就足够通过使用等式19来产生腔相位的另一独立测量。因此,持续地取得QP允许实时地监控腔相位变化。

[0165] 第三种用于实时校准干涉仪腔的模式是连续相位模式的衍生(derivation),称为连续校准(continuous alignment)。连续校准模式在校准操作期间持续地监控特定的光学参数,诸如倍率(power)或散光(astigmatism)。当这些参数最小化时,腔为最佳校准。

[0166] 软件

[0167] 上述分析步骤可以使用标准编程技术(standard programming techniques)以计算机程序实现。设计这些程序用于在可编程计算机或专用集成电路上运行,其中可编程计算机或专用集成电路都包括电子处理器、数据存储系统(包括存储器和/或存储元件)、至少一个输入装置以及至少一个输出装置,诸如,显示器或打印机。程序代码应用于输入数据(例如,来自检测器的图像)以执行此处描述的功能,并且产生输出信息(例如,相位图、表面轮廓,等等),该信息应用于一个或多个输出装置。每个这种计算机程序可以利用高级程序(high-level procedural)语言或基于对象(object-oriented)编程语言、或者汇编语言或机器语言来实现。此外,语言可以是编译(compiled)语言或解释(interpreted)语言。每个这种计算机程序可被储存在计算机可读存储介质(例如,CD ROM或磁盘)上,当计算机读取时,导致计算机中的处理器执行分析并控制此处描述的功能。

[0168] 其他方面、特征和优点都在本发明的范围之内。

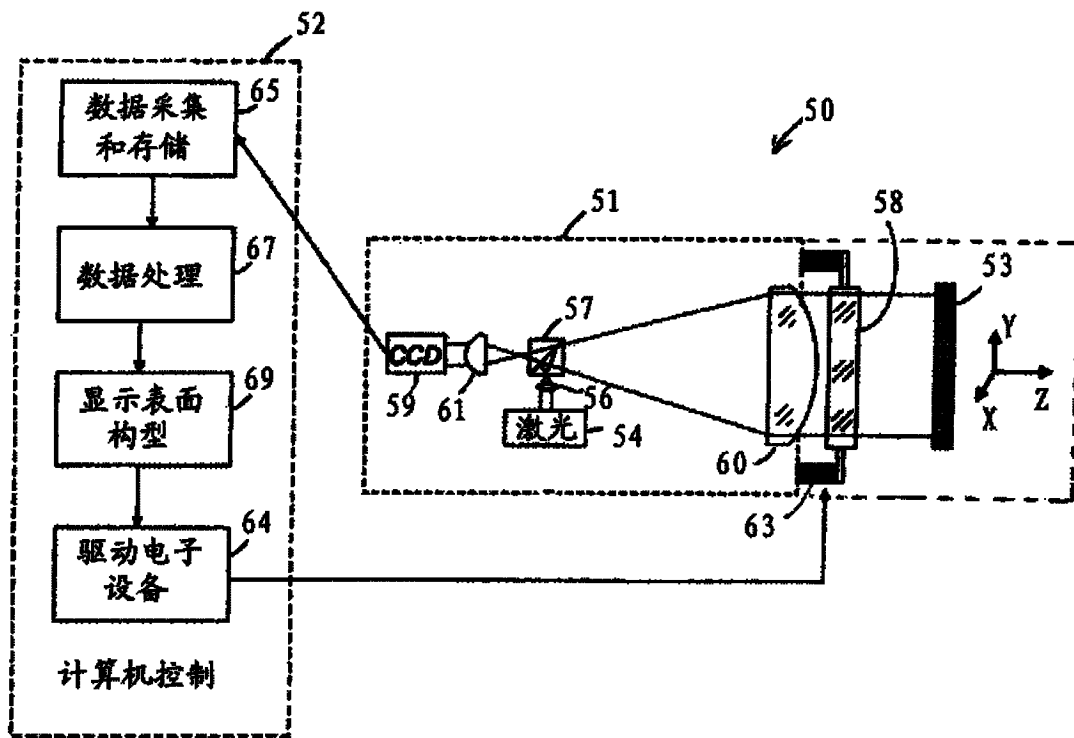


图 1

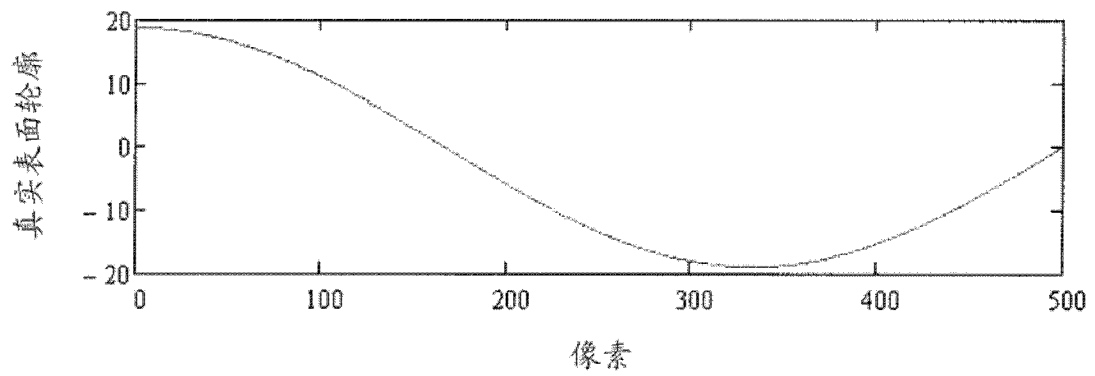


图 2

$$\begin{pmatrix} \Phi \\ Res \end{pmatrix} := M(NQ, NF, \Phi t, R, DP, 90 \cdot \text{deg}, \alpha)$$

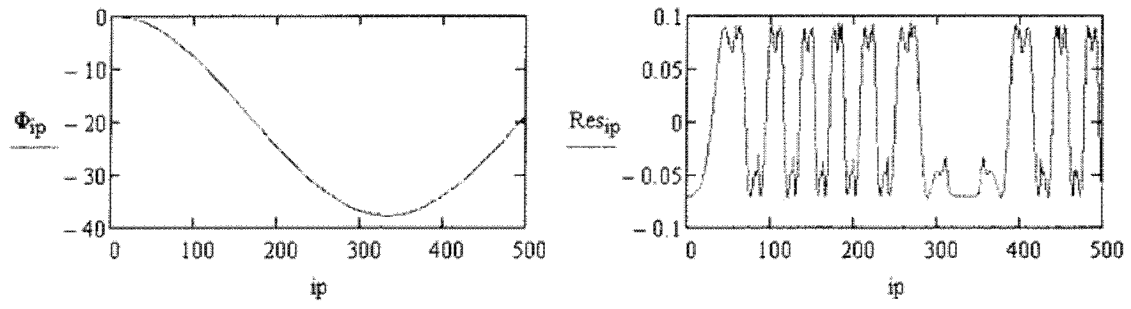


图 3A

$$\begin{pmatrix} \Phi \\ Res \end{pmatrix} := M(NQ, NF, \Phi t, R, DP, 135 \cdot \text{deg}, \alpha)$$

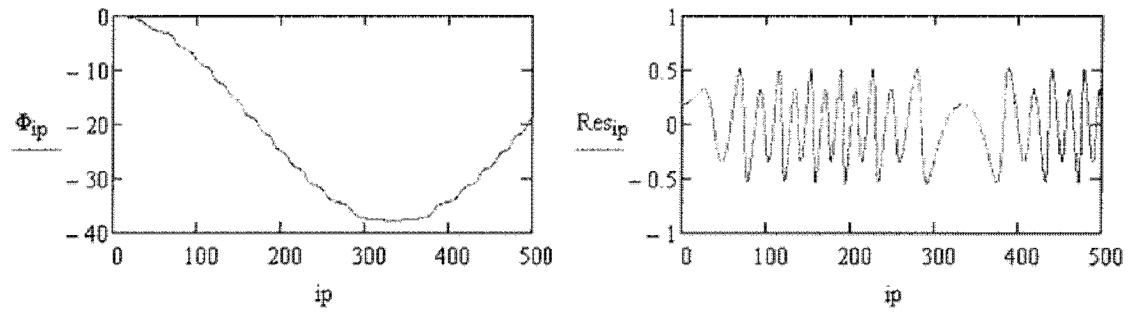


图 3B

$$\begin{pmatrix} \Phi \\ Res \end{pmatrix} := M(NQ, NF, \Phi t, R, DP, 10 \cdot \text{deg}, \alpha)$$

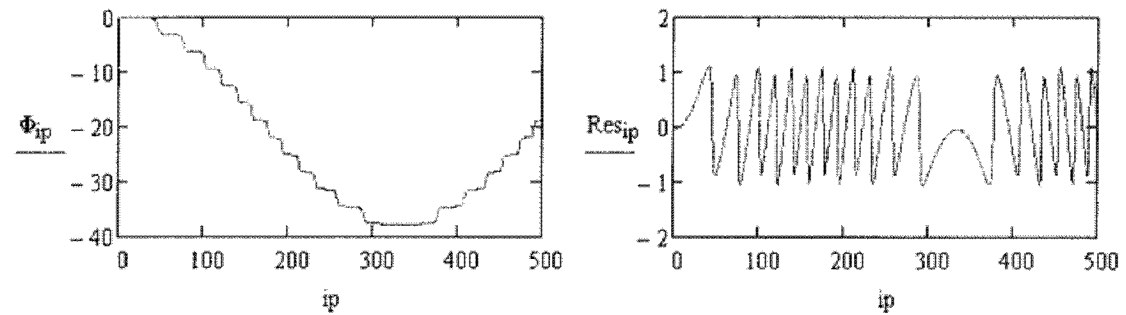


图 3C

$$\begin{pmatrix} \Phi \\ Res \end{pmatrix} := M(NQ, NF, \Phi t, R, DP, -10 \cdot \text{deg}, \alpha)$$

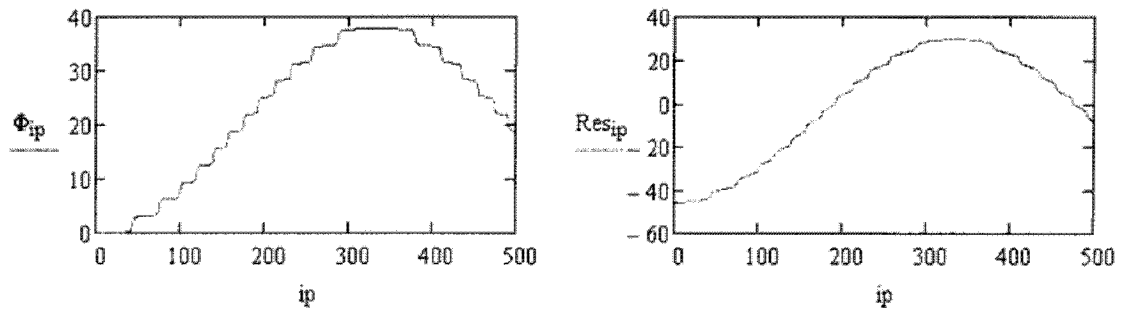


图 3D

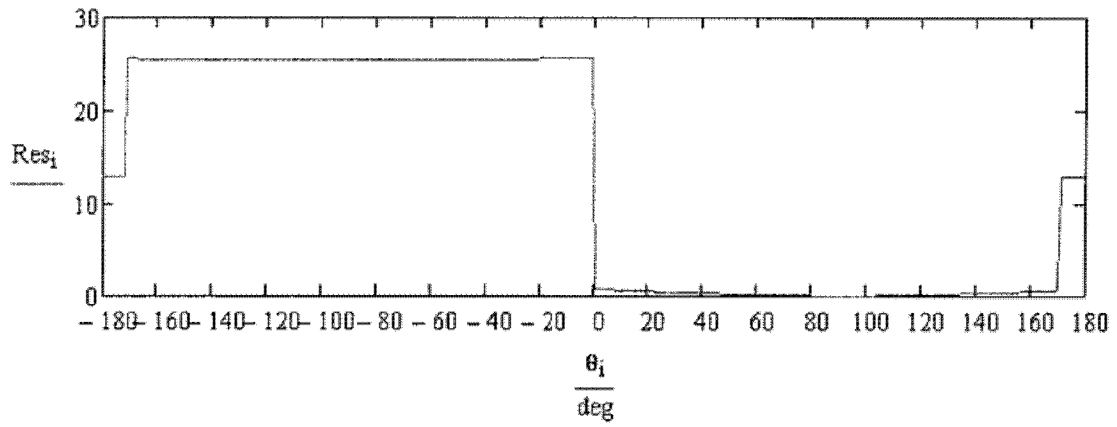


图 4

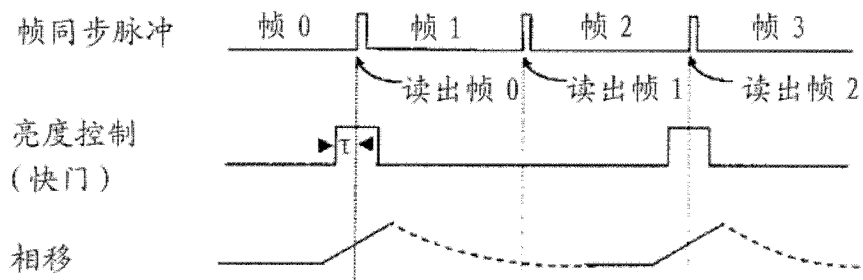


图 5