

Development of the nanometer order vibration control system for advanced accelerators

T. Suehiro^{A)}, Y. Morita^{A)}, S. Yamashita^{A)}, Y. Nakayama^{B)}, R. Sugahara^{C)}

^{A)} International Center for Elementary Particle Physics (ICEPP), the University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

^{B)} Electric Power Development Co., Ltd 15-1, Ginza 6-chome, chuo-ku, Tokyo, 104-8165

^{C)} National Laboratory for High Energy Physics (KEK), Tsukuba, Ibaraki, 305

Abstract

For the International Linear Collider (ILC) project, we must align electromagnets near the IR (Interaction Region) by the accuracy of 1 nm. This is because the beams are stopped down to several nm in the vertical direction to improve its luminosity. Therefore, the plinth that was able to align in 1 nm accuracy was produced. Six piezo actuators are built into the plinth, and we can adjust the position by these expansion and contraction. However, the ground vibration with the amplitude of several nm that are originated by traffic and waves obstructs the alignment. Therefore, we developed the vibration control system to deny this ground vibration. This is a feedback system that denies the vibration of the plinth by moving the piezo actuator at high speed. It is understood that the vibration with the amplitude more than the nm order is limited to the frequency band of 30Hz or less^[1]. So the speed of the feedback system is enough if it is about 50Hz. The displacement of the plinth is monitored with the electrostatic capacity type displacement sensor, and data is processed by PLC (Programmable Logic Controller). We can succeed to confirm the operation, and weaken the vibration of about 100 nm to about 20 nm for 10~20Hz. However, the system has the delay of 8ms. So our system is too slow to feed back for 50Hz vibration. And the displacement sensor with a laser interferometer is scheduled to be developed to improve accuracy because the electrostatic capacity type displacement sensor's resolution is about 20 nm.

次世代加速器のためのナノメートルオーダー振動制御装置の開発

1. はじめに

ILC加速器計画では、縦方向のビーム幅が数nmと非常に小さく、IR付近では電磁石を1nmの精度でアライメントすることが要求される。そのため、 piezoアクチュエーターを6つ用いたアライメント用の台座が開発された(図1)。しかし、交通や波浪等による数nm程度の振動が30Hz以下の周波数帯において存在し、その振動を打ち消すように制御しなければ1nmのアライメントは不可能である。したがって台座を制御するためにフィードバックシステムを開発した。

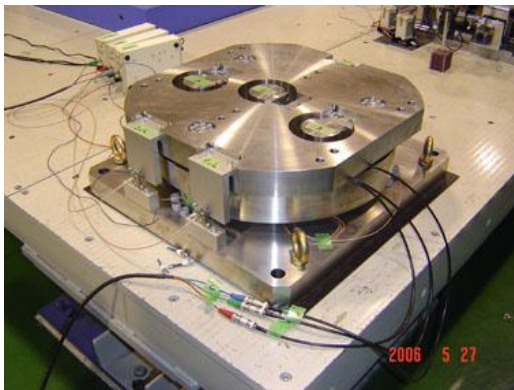


図1: 振動制御用台座

2. ピエゾ内蔵台座

図1の台座には図2の矢印のように、0~150Vに対して0~400nm伸縮する piezoが内蔵されていて、回転方向も含め3次元すべての方位に対してアライメントが可能になっている。

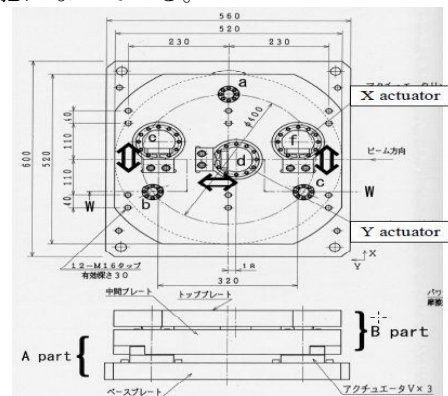


図2: ピエゾの伸縮方向

本実験ではフィードバックを正しく行うシステムを構築することを目的としているため、簡略化として高さ方向の3つの piezoのみ使用し、その piezoを同時に動かすことにより高さ方向の振動制御を行った。

3. 制御システム

振動の制御には、台座の変位を測るためにメステック社の静電容量型変位計(コントローラ:M-2213, センサープローブ:TRA616-100-V1)を使い、データの処理には三菱電機社のPLC(Programmable Logic Controller)を用いた。さらに、加振機を使って振幅100nm、1~数百Hzの振動を作り出した。他のアンプ等を含めたセットアップは図3のようにした。

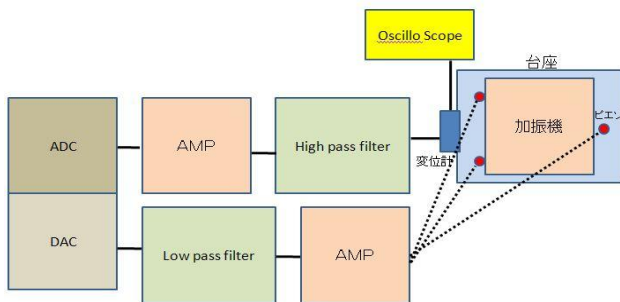


図3: 制御システムのセットアップ

ここで用いたハイパスフィルタは変位計の仕様であるゼロ点の不安定さを解消するために用いた。その後のアンプは、変位計の出力が数mVなのに対し、PLCのADCがレンジ-10~10Vで分解能が0.625mVであったために使用した。ローパスフィルタはDACから出るステップ状の電圧を滑らかにするために使用した。使用したピエゾ用のアンプが高周波で飛びのある電圧を入力すると安全装置が作動し、落ちてしまうことを防ぐためである。

ここで、このシステム全体にかかる処理時間を測定した。個々の遅れを測定したところ、ハイパスフィルタ、アンプでは1ms以下の遅れで50Hzの振動の制御を目標とする本実験では問題にならないことが分かったが、ローパスフィルタ、PLCではそれぞれ5ms、2ms程度の処理時間がかかり、現状のシステム全体では10ms程度の時間がかかることが分かった。実際に図4のようなセットアップで全体での処理時間を直接測定したところ、図5のようになり、

$$8\text{ms} \rightarrow 125\text{Hz}$$

から目標とする50Hzの振動に対しては半波長程度、の遅れが生じてしまうことになり、制御は難しいことが分かった。

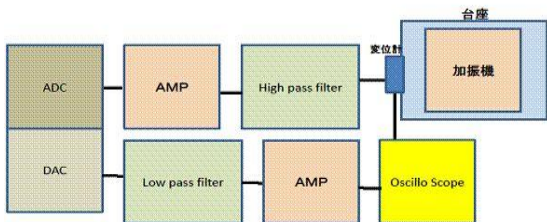


図4: システム全体にかかる時間の測定のためのセットアップ

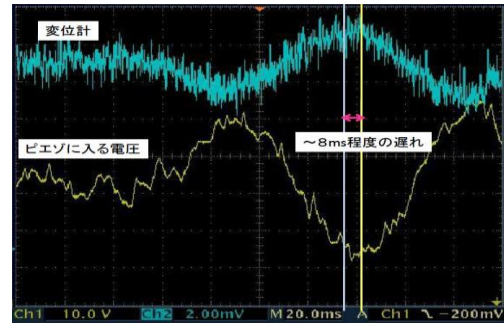


図5: システム全体での遅れ

4. 振動の制御

4.1 制御可能な振幅について

図3のセットアップから、加振機を用いて実際に制御を行った。前章で確認したフィードバックにかかる時間から1~10Hz程度であれば、タイムラグによって振動を打ち消すことが出来ないと言えないと考え、様々な振幅に対する検証を行った。代表的な図として1Hzで40nm程度の振動を制御したときの図を、図6として示す。

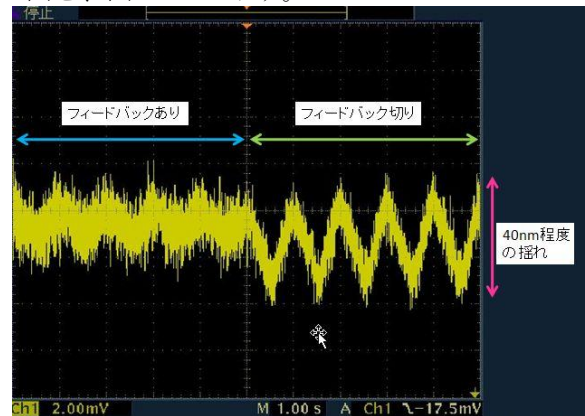


図6: 振動制御の様子

変位計のノイズが多く、加振機に起因する振動をフィードバックをかけているほうの図から確認することは難しいが、40nm程度の振幅の揺れを15nm程度まで抑えることに成功していることが分かる。次の章ではオフラインでローパスフィルタをかけ、さらにどの程度制御出来ているかについて考察する。システムの遅れが影響しない範囲で同様に測定した、他の振動数、振幅による振動制御は表1に示す。

与えた振幅(nm)	与えた振動数(Hz)			
	1	3	5	10
20	15	15	15	15
40	15	15	20	20
80		35	35	30
100		40	40	40
150		40		

表1: 各振幅、周波数に対する制御後の振幅(nm)

空欄は加振機によって作り出すことが出来なかった振動である。

この結果から小さい振動に対しては変位計の分解能から15Hz程度の制御が限界で、大きな揺れに対しては40nm程度の揺れが残ってしまうことが分かった。

4.2 制御可能な振動数について

次に、フィードバックにかかる時間が影響してしまうであろう振動数(15~40Hz)での測定を行った。結果は表2に示した。

表2: 様々な振動数に対する制御後の振幅

		与えた振動数(Hz)									
		1	3	5	10	15	20	25	30	35	40
振幅 (nm)	20	15	15	15	15	15	18	15	18	20	20
	40	15	15	25	20	20	20	18	20	25	30

この結果から振動数が増えると制御しきれない揺れになってしまい、50Hz付近ではほとんど制御が出来ないことが分かった。

5. オフラインでの解析

図6では、変位計のノイズが多いために加振機で起こした振動をどの程度制御出来ているかを確認することが難しい。したがってオシロスコープで出力したデータにオフラインでローパスフィルタをかけることによって加振機による振動を抽出する。ローパスフィルタのカットオフ周波数は図7のように無振動のときに十分ノイズが落とせている40Hzとした。

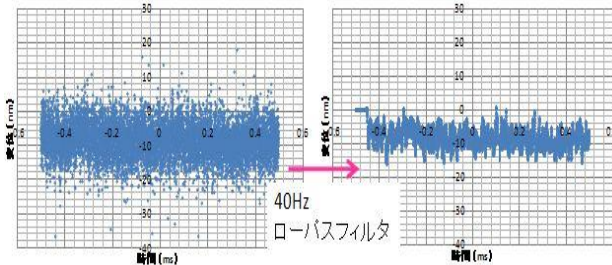


図7: 振動がない状態でローパスフィルタ

このフィルタを振動数10Hz、振幅30nmの揺れのグラフに使用したのが図8である。

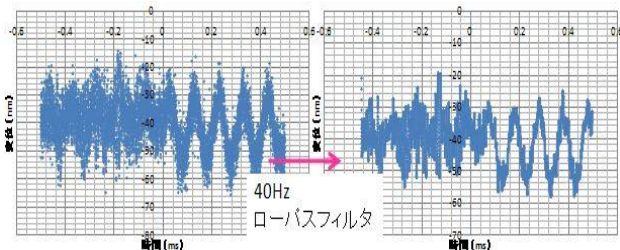


図8: 10Hz、30nmの揺れに対してローパスフィルタ

図8を見るとまだフィードバック中の細かい揺れが残っていることが分かる。しかし、変位計のからのノイズは図7の結果から40Hzのフィルタでカットされているはずなのでこの細かい揺れは実際に揺れて

いるものである。この揺れの原因はPLCに入力した変位計からの電圧にもノイズが乗っていて、図5でも確認できるようにピエゾ自身を細かく揺らしてしまうような要素があるためであると考えることが出来る。さらにローパスフィルタのカットオフ周波数を10Hzに下げると加振機に起因する振動のみを取り出すことが出来る。図9より、加振機による振動に限ってみれば30nm程度の揺れを10nm程度に抑えることが出来ていることが分かる。

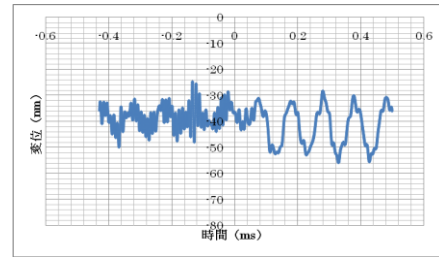


図9: 図8の揺れに対して10Hzのローパスフィルタ

6. まとめと今後の展望

前章で見たとおり、20nmが限界である変位計の分解能を劇的に向上させることなしには目標である1nmの制度での振動制御を実現することは難しい。したがって現在変位計としてマイケルソンモーレー型のレーザー変位計を開発中である。台座の位置の変化による干渉縞のズレを2分割されたフォトダイオードを使用して検出するというものである。また、同時に解決しなければいけない課題として、データ処理時間の短縮がある。現状の8ms程度の遅れでは目標とする50Hzの揺れに対する振動制御は難しい。しかし、この問題も変位計自身のノイズを減らすことにより解決することが出来ると考えることが出来ると考えている。それは最も時間をロスしてしまっているのがPLC後に使用しているローパスフィルタであるため、ノイズを減らすことが出来ればフィルタを使用しなくて済む可能性が高いからである。どちらにせよ、現状のシステムを向上させるにはレーザーを用いた変位計が必要である。

参考文献

- [1] "Ground Motion Measurement and Vibration Suppression at KEK", Ryuhei Sugahara et al. KEK-PREPRINT-2005-77, Nov 2005. 13pp; Contributed to the Workshop on Ambient Ground Motion and Civil Engineering for LowElectron Storage Ring, NSRRC, Hsinchu, Taiwan, July 21-22, 2005.
- [2] "Precision Magnet Movers for the Final Focus Test Beam", G. Bowden, P. Holik, S. R. Wagner, G.Heimlinger, R.Settles et al. SLAC-PUB-95-6132, Jun 1995.