

The orbit correction study at the PF ring and PF-AR by the eigen vector method with constraint conditions

Kentaro Harada^{1A}, Takashi Obina^A, Norio Nakamura^B, Hiroshi R. Sakai^B, Hiroyuki Takaki^B

^AKEK-PF, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^BISSP-SRL, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8581

Abstract

The eigen vector method with constraint conditions (EVC) is the new orbit correction scheme. When the global COD correction is done by the EVC, the local orbit correction can simultaneously be made without the deterioration of the global COD correction and the increase of the kick angle of the steering magnet. In order to demonstrate the advantage of the EVC, the machine studies were made at the PF ring and the PF-AR. The results successfully confirmed the advantage of the EVC.

PF及びPF-ARにおける束縛条件付き固有ベクトル法による 軌道補正スタディ

1. はじめに

挿入光源を多数用いる第3世代放射光源においては、運転中に電子ビームの軌道(COD, closed orbit distortion)を安定に保つことが必須である。そのためには軌道変動の原因を取り除くのみならず、積極的に速い軌道補正を行うことが非常に有効である。しかしながら、挿入光源両脇のBPM(beam position monitor)に対する局所軌道補正を、リング全周に対する補正系から独立したシステムとして組んだ場合、例えば両方のシステムが同じCODを補正しようとして結局補正が収束しないといった様なシステム間の干渉を完全に防ぐことは至難の業である。そこで、その様な問題がそもそも生じない方法である、束縛条件付き固有ベクトル法(EVC, eigen vector method with constraint conditions)が考案された[1],[2]。EVCにおいて局所COD補正は、ラグランジュの未定乗数法による束縛条件という形で広域COD補正に取り込まれる。単一のシステムを用いる為、干渉は元々存在せず、さらにシステム全体が単純に構築できるのは大きな利点である。

計算機によるシミュレーションは既に行われ、その結果、EVCを用いて問題なく局所COD補正が行えること、その場合に広域COD補正の性能が悪化しないこと、そして、補正電磁石の強さが大幅に増大しないことが分かっている。そこで今回、次のステップとして、PFとPF-ARにおいてマシンスタディを行い、実際のマシンでEVCの性能を試すことになった。本スタディの目的は、BPMや補正電磁石の誤差、CODの非線形性などの影響を受ける実際のマシンにおいてもEVCがうまく働くことを実証することである。

2. 束縛条件付き固有ベクトル法

束縛条件を付けない固有ベクトル法(EV, eigen

vector method)は、PFリングやPF-ARでも普段用いられている一般的なCOD補正方法である。EVでは、測定されたCOD \vec{y} を補正するための補正電磁石の蹴り角 \vec{x} は

$$M\vec{x} + \vec{y} = 0 \leftrightarrow M^T M\vec{x} + M^T \vec{y} = 0$$

$$\rightarrow \vec{x} = -\tilde{A}^{-1} M^T \vec{y}$$

により求められる。ここで、 M は補正電磁石のCODに対する応答行列、 M^T はその転置行列、 $A = M^T M$ は補正電磁石の個数次元の正方行列である。 A の逆行列を求める際、補正電磁石の強さやBPM誤差によるスパイク的な擬似CODの影響を抑える為、利用する固有ベクトルの数を制限する。そのようにして求めた A の逆行列が \tilde{A}^{-1} である。

束縛条件付き固有ベクトル法(EVC)を用いる為には、COD \vec{y} から蹴り角 \vec{x} を求める行列に変更を加えればよい。 i 番目のBPMでCOD $z_i (= y_i)$ をゼロにする為の束縛条件は、応答行列 M の i 行目を \vec{c}_i とすると、 $\vec{c}_i \cdot \vec{x} + z_i = 0$ と書ける。ラグランジュの未定乗数を λ とすれば、問題は

$$S = \frac{1}{2} (M\vec{x} + \vec{y})^2 + \sum_i \lambda_i (\vec{c}_i \cdot \vec{x} + z_i)$$

の最小値を求めることに帰着でき、最終的に解は

$$\vec{x} = \left(-\tilde{A}^{-1} + \tilde{A}^{-1} C (C^T \tilde{A}^{-1} C)^{-1} C^T \tilde{A}^{-1} \right) M^T \vec{y} - \tilde{A}^{-1} C (C^T \tilde{A}^{-1} C)^{-1} \vec{z}$$

となる。計算の詳細は参考文献[1],[2]に述べられている。

3. マシンスタディ方法と軌道補正系

今回のスタディでは、PFリング及びPF-ARにおいて通常用いられているCOD補正系をそのまま用いた。

¹ E-mail: kentaro.harada@kek.jp

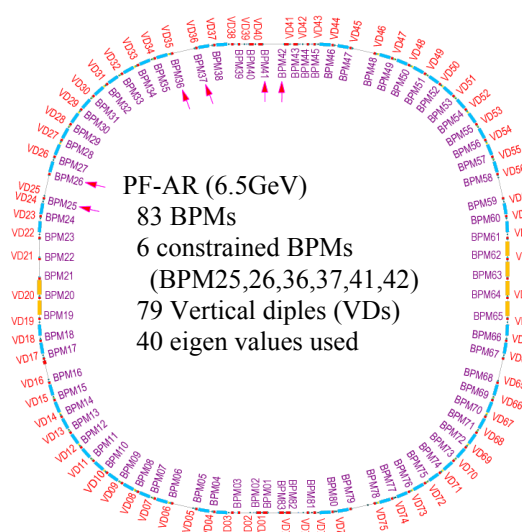


図1 PF-ARのビーム診断補正系の概略

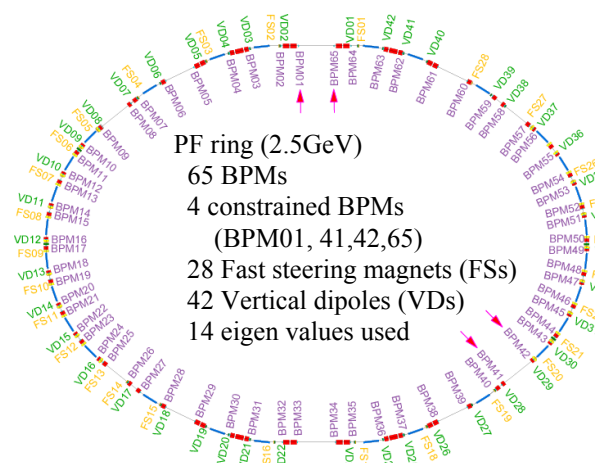


図2 PFリングのビーム診断補正系の概略

PFリング及びPF-ARのビーム診断補正系の概要と、マシンスタディの方法について以下で述べる。

3.1 PF-AR

図1にPF-ARのビーム診断補正系の概略を示す。水平方向の軌道補正には偏向電磁石の補正コイルが用いられているが、ヒステリシスの影響が大きい為、今回のスタディでは使用せず、垂直方向の軌道補正のみ行うことにした。垂直方向の補正電磁石(VD)の台数は79台である。BPMは83箇所あるが、順に水銀リレーで切り替えながら4台の信号処理系で処理している。その為、リング1周のCOD測定にはおよそ10秒を要する。また、BPMのビーム位置分解能はおよそ8 μm である。

束縛条件は挿入光源NW12, NW2, NE1の3台(両脇で計6箇所)のBPM)に対して課した。スタディ中にはあるVD1台を使ってCODを発生させ、それを他の78台で補正し、補正後のCODを束縛の有無で比較するという一連の動作を、各VD(全79台)に対して行った。

3.2 PFリング

図2にPFリングのビーム診断補正系の概略を示す。PFリングにおいても偏向電磁石の補正コイルが水平軌道補正に用いられているため、スタディでは垂直方向の補正のみ行った。PFリングには65箇所のBPMが存在するが、信号処理系はそれぞれのBPMに取り付けられており、BPMの分解能も1 μm 以下と非常に優れている。垂直補正電磁石は2種類存在し、遅いステアリング(VD)が42台ある他に、速いステアリング(FS)が28台あり、およそ20Hzまでの垂直軌道フィードバック[3]に用いられている。

束縛条件は挿入光源MPW19とU02の2台(BPM4箇所)に対して課した。スタディにおいては、ある1台のVDでCODを発生させ、それをFSを使って補正した。

4. マシンスタディの結果

4.1 PF-AR

スタディにおいて発生させたCODの初期振幅は、(もちろん各VDに依るが)およそ $\pm 400 \mu\text{m}$ 程度であった。図3に束縛した6点のBPMにおけるCODのRMS (root mean square) 値を示す。EVCを用いた場合、全ての場合について束縛点のCODはBPMの分解能である8 μm 程度まで抑えられた。一方でEVを用いると、場合に依っては数十 μm のCODが挿入光源内部に残ってしまった。束縛していないBPMまで含めた全BPMでのCODのRMSを図4に、EVCとEVでの補正電磁石の蹴り角のRMSの比較を図5に示す。どちらもEVCとEVで大きな差はない。EVCはEVに比べ、広域COD補正の性能は同等であり、補正電磁石の蹴り角も大きく増大しないことが分かった。

ただし、COD源が束縛点のすぐ隣にある場合、EVに比べてEVCでは束縛していない点のCODで比較的大きなRMSが残ることがあった。例えばCOD源がVD35やVD40である場合であるが、これはVDをCOD源として用いているので、局所的に補正電磁石が不足してしまった為である。別の方法でCODを発生させるか、付近に補正電磁石を追加するなどすれば、全ての場合にCODは小さく抑えられる。

4.2 PFリング

スタディにおいて発生させたCODの初期振幅は、およそ $\pm 200 \mu\text{m}$ 程度であった。速いフィードバックを稼働させるとCODはすぐに補正されるが、念のために数秒待ってからデータを保存した。図6に典型的なCODのパターンを示す。束縛点は矢印で示された4点である。EVCを用いた場合、この4点でのCODはEVに比べて非常に小さく抑えられていることが分かる。図7に全ての場合に対する束縛した4点でのCODのRMSを示す。EVCの場合、束縛点のCODは例外なく1 μm 以下まで抑えられている。BPMの分解能が非常に優れている為、EVCの優位性がさらにはっきりと確認できる。図8に全てのBPMにおけるCODのRMSを示す。EVCの広域COD補正の

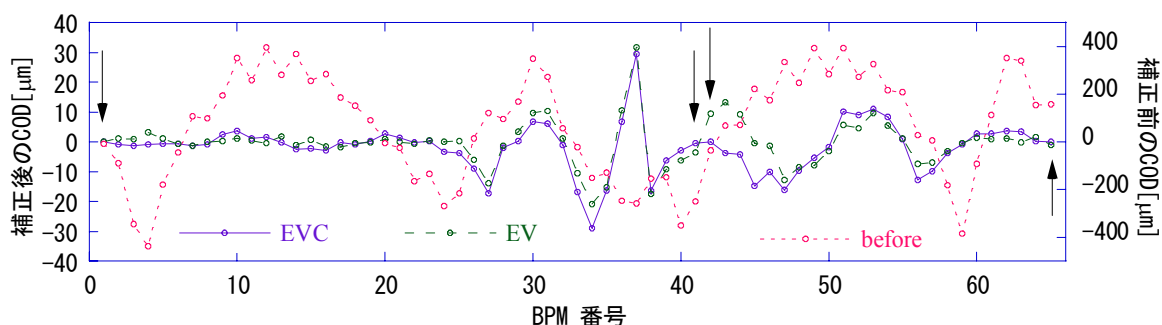


図 6 PF リングにおける典型的な COD パターン

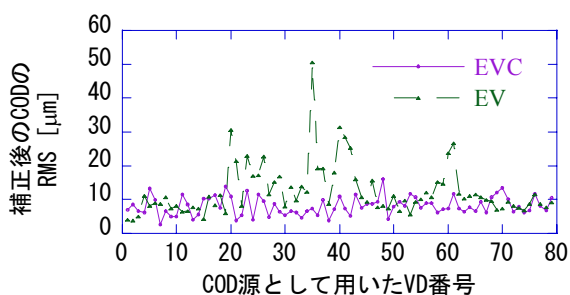


図 3 PF-AR における束縛点の COD の RMS

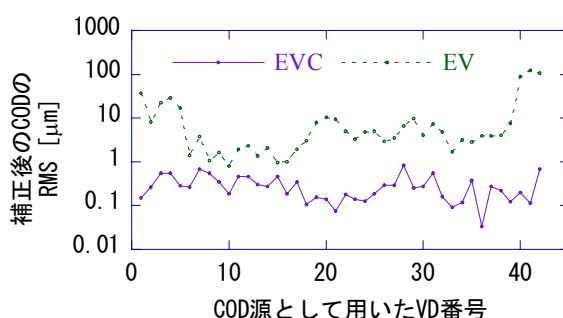


図 7 PF リングにおける束縛点の COD の RMS

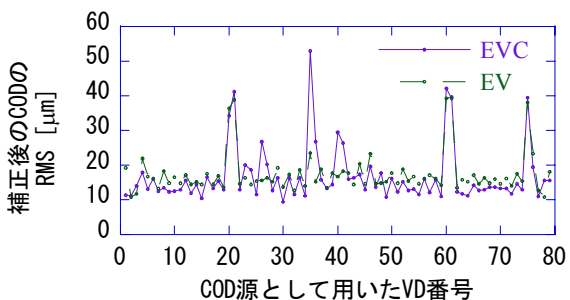


図 4 PF-AR における全 BPM での COD の RMS

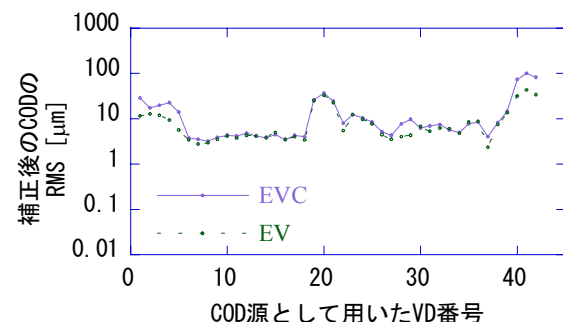


図 8 PF リングにおける全 BPM での COD の RMS

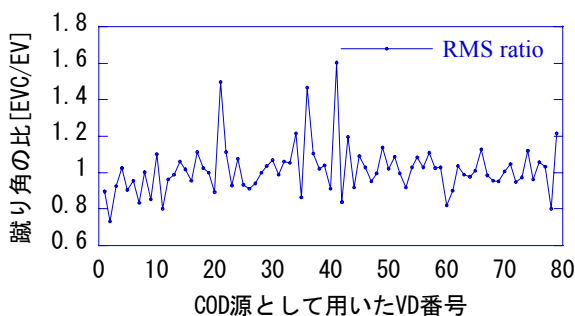


図 5 補正電磁石の蹴り角の RMS の比較

性能はEVと同等である。しかしながら、PF-ARの場合と同様に、COD源が束縛点直近に存在する場合(例えばVD 1 - VD 5 及び VD 40 - VD 42をCOD源として用いた場合)、EVCではEVに比べて大きなRMSが残ってしまっている。これは、この部分に2点の束縛点があるにも関わらず3台のFSしか存在しない為であり、FSの台数を1-2台増やせばCODは容易に小さく抑えられる。

5. 結論

PFリングとPF-ARで行ったマシンスタディを行い、実際のマシンでもEVCの優位性を確認することができた。束縛したBPMにおいてCODのRMSは、ARでは約 $8\mu\text{m}$ 、PFでは $1\mu\text{m}$ 以下と、BPMの分解能程度まで抑えられ、またほとんどの場合、EVCとEVで全BPMのCODのRMSと補正電磁石の蹴り角は同等であった。

参考文献

- [1] M.Satoh, Y.Kamiya and N.Nakamura, "New COD Correction Method for Orbit Feedback", Proc. of EPAC 1998, pp1723-1725
- [2] M.Satoh, N.Nakamura and Y.Kamiya, "Error Analysis of a New COD Correction Method Uniting Global and Local Feedbacks", Proc. of PAC 1999, pp1174-1176
- [3] T. Obina et. al, "Global Feedback System For Photon Factory Storage Ring", Proc. of EPAC98, pp1726-1728