

SPring-8 蓄積リング COD データ取得の高速化

Fast COD data acquisition at the SPring-8 storage ring

藤田貴弘^{#,A)}, 増田剛正^{A)}, 籠正裕^{A)}, 山下明広^{A)}, 佐々木茂樹^{B)}

Takahiro Fujita^{#,A)}, Takemasa Masuda^{A)}, Masahiro Kago^{B)}, Akihiro Yamashita^{A)}, Shigeki Sasaki^{A)},

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

A stabilization of a beam orbit is one of important topics for synchrotron radiation accelerators. A periodic correction of a closed orbit of electron beam takes central role in the beam orbit stabilization, after major causes of beam orbit fluctuations were cured. Electronics of beam position monitor at the SPring-8 storage ring, which are in operation since 2006, have capability of re-configuration in signal detection scheme, since the electronics is composed of DSP and FPGA. We reconfigured the electronics and COD data at a repetition of every 1 ms is obtained as post-process. This 1ms COD data is analyzed and the beam orbit fluctuation was evaluated. While the post-processing data, we have been developing software for periodic correction of the beam orbit in order to shortening the period of the correction. The period was shortened from 7 sec to 1 sec since 2012 April. After that we prepared reflective memory network which have good real time property. Owing to the reflective memory network, it have become possible that the COD data is obtained at 10 Hz with real-time. Moreover, the obtained 10-Hz COD data is recorded to a database system, which is newly developed as MADOCA II control system for future SPring-8 database. We report upgrading of the hardware and software for COD measurement and status of COD correction.

1. はじめに

放射光リングにおいて光軸の安定化は重要なテーマであり、さまざまな軌道変動の原因除去後は、周期的な軌道補正が光軸安定化の役割を担う。

SPring-8 蓄積リングでは 2006 年に COD 測定用の信号処理回路が更新され、その測定分解能や測定速度の向上が図られている。更新された信号処理回路は re-configurable な DSP を用いているため、必要に応じて COD の測定スキームを変更できるよう構成されている。

2006 年の処理回路更新時には COD 測定スキームについての最適化は行っていなかったが、最近、10 ms 程度の早い軌道変動によるトラブルが発生するようになり、これらを捕捉するために 1 ms 毎の COD データが取得できるよう DSP および関連ソフトウェアの改造を行った。

DSP の改造と並行して、定常的な軌道変動および挿入光源のギャップ駆動、位相駆動に伴う軌道変動抑制のために周期的な COD 補正の高速化を行っている。高速化は COD 測定回路のファームウェア、およびワークステーション上のソフトウェアがおもな変更箇所である。それに関連するデータ転送のための広帯域ネットワークや高速データベースの整備も行った。

2. COD 信号処理回路

2006 年に更新した COD 測定用の信号処理回路は実際のビーム信号を用いて評価が行われ、分解能で 3 倍、測定の繰返しで 7 倍の改善が得られている^[1]。具体的には 3 秒毎に $0.1 \text{ um rms}/(\text{Hz})^{1/2}$ の測定繰返しと測定分解能である。処理回路は RF 周波

数と同じ周波数 (508.58MHz) を検波周波数とし、これを IF(250kHz)にダウンコンバートとして 2MSPS 16bit の ADC で検波するものである。回路方式は BPM の電気的な安定度を得るために 4 電極の同時サンプリングではなく、BPM の各電極信号を切り替える multiplexing 方式である。ADC によってサンプリングされたデータは DSP で電圧に復調され、ビーム位置に変換される。DSP は re-configurable であるので、multiplexing の繰返し、1 電極あたりのサンプル長、切り替えてから次の電極をサンプルし始めるまでの遅延時間等が可変になっている。1 つの ADC には 3 台の BPM(12 電極)が接続されているので、全 BPM を切り替えて測定するには(電極あたりの積分時間) $\times 12$ +セトリングタイムが必要である。積分時間を 1 ms としたとき、約 15 ms で全 BPM のスキャンが終了する。

3. DSP 改造による高速 COD データ取得 (ポストプロセス)

SPring-8 では、2011 年、2012 年に、数 ms から 100 ms 程度の比較的短い時間でビーム軌道が変動し、ビームアバウトに至るといふトラブルがたびたび発生した。ビーム軌道が大きくなると真空機器保護のためのインターロックにより加速空洞に供給される RF 信号がオフされて蓄積ビームは 0.1 ms 程度で失われてしまう。しかも、運転再開後のビーム軌道は正常であったため、原因の特定は困難であった。

こういった比較的速い軌道変動を捕捉するために DSP の改造を行った^[2]。各 BPM 信号を切り替えるタイミングは DSP が制御しており、2006 年当初は 1 つの電極の積分時間は 1 ms に設定していたため、

[#] tfujita@spring8.or.jp

全 BPM 信号を処理するには約 15 ms を要していた。

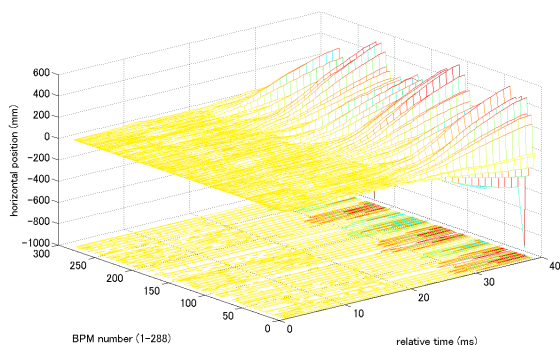


Figure 1 : Beam orbit trend just before the sudden orbit shift due to a failure of power supply of a steering magnet.

これを電極あたり 64 us に短縮化して、リング全周の COD が 1 ms 毎でスキャンできるように改造した。ただし、1 ms ごとの COD データを VME やワークステーションまで常時転送することはデータ転送が間に合わなかったため、DSP ボード上のメモリにリングバッファを構築して、イベントが生じるまで常時上書きアップデートしておき、イベントが起こるとアップデートを止めるようにした。

アップデートを止めるイベントには、BPM 4 電極の和がある閾値を下回った場合、および、外部コマンドが停止信号を生成した場合の 2 通りを用意した。前者のイベントによって、速い軌道変動によるビームアポート前のリング全周の軌道が 1 ms 毎に取得可能になった。また、後者のイベントによって、定常状態での軌道変動が 1 ms 毎に取得可能になった。

ただし、BPM システムはリングの軌道補正を行うことが主目的のシステムであるため、電極あたりの積分時間を短くすることで分解能が低下することは避けなければならないが、ADC で検出する信号には 508.58MHz 以外の周回周波数の整数倍の周波数に起因する、250kHz 以外の成分が少なからず存在し、それらは電極あたりの積分時間を短くすることで、スペクトルのすそ野が 250kHz にも影響することが予想された。これを解決するため、これまでは DSP 上で IF データから振幅に復調後、平均化の処理を行っていたが、ベクトルデータのまま平均化をとり、最後に振幅に戻すよう変更した。250kHz は各スキャンごとに同じ位相でサンプリングが開始され、不要周波数成分はランダムな位相でサンプリングが開始することになるので、多数回の測定により、不要周波数はキャンセルされる。

Figure 1 はビームアポートが起きる 40 ms 前からのリング全周の水平方向ビーム軌道を 1 ms 毎に捕捉したものである。真空機器保護のインターロックは挿入光源上下流のビーム軌道が水平方向に 500 um

ずれると RF 信号をオフするように構築されており、ずれが約 500 um になるまで同じパターン軌道が成長していくさまが観測されている。

ビームアポート直前の軌道データに対して軌道補正のシミュレーションを行った結果が Figure 2 である。Figure 2 から、特定の場所でのキックがこの軌道偏差を生成していることが分かる。この場合は補正電磁石電源が故障の原因であったと予測されたため、該当する電源交換により、ビームアポートが解消された。また、軌道が変動し始める前の 1 ms 毎の COD データから各 BPM のデータのばらつきとベータatron関数の相関からこのシステムの位置測定分解能を評価したところ、およそ水平、垂直方向それぞれ 1.1 um rms, 1.7 um rms であった。分解能が 1.5 倍ほど異なるのは真空チェンバーの形状と BPM 電極の配置できまる位置感度係数の違いと一致している。

外部停止コマンドを用いてリングバッファのアップデートを停止させる機能は定期的にリングの軌道の健全性を確認するために利用することを検討している。

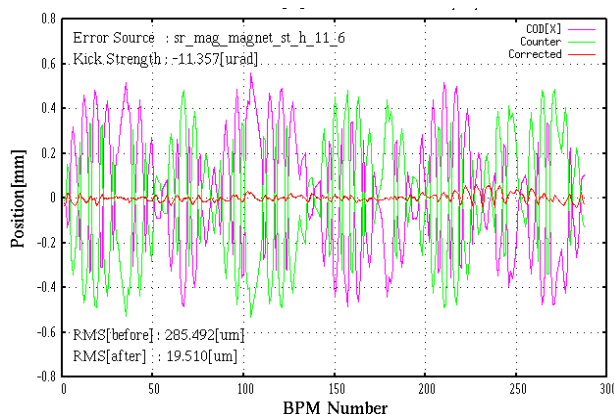


Figure 2 : From an error estimation of observed COD during the beam abort it was indicated that there was large kick around the steering magnet of st_h_11_6.

4. ソフトウェア改造による周期的軌道補正高速化

前述の通り、1Hz の帯域での BPM の位置分解能は 0.1 um rms 程度であり、一方、BPM 位置でのビームサイズは水平、垂直方向それぞれに 200um, 6um 程度であるので、BPM 分解能は十分である。それに対して利用運転中は挿入光源のギャップ/位相駆動、または高速偏光切替用キッカーの運転により 10um 程度の軌道変動が生じる場合がある。これらを補正すべく、また、通常の軌道変動を改善すべく軌道補正の高速化を行っている。分解能を多少犠牲にして補正を高繰り返し化することで軌道安定度を改善することが目的である。

4.1. これまでの周期的軌道補正

SPring-8 蓄積リングでの軌道補正に用いている制御計算機の配置を Figure 3 に示す。また、その概要は次の通りである。リング全周に配置された BPM (290 台) の信号を順々に切り替えて AD 変換し、DSP 上で位置データにまで変換される。位置データはリングの 4 か所に設置された BPM 用 VME 計算機 (monbpm_[a-d])へ吸い上げられた後、中央制御室のワークステーションに転送される。COD データは 2000 点程度の多数の同期した信号を低レイテンシで転送する必要があるため、データの転送は NFS を経由して転送を行っていた。多数のメッセージを用いて転送するよりもレイテンシの面で有利であったためである。

ワークステーション上では COD データとリングのラティスから補正すべき補正電磁石励磁量を計算し、補正電磁石電源に電流をセットする。いわゆるグローバル補正である。

補正電磁石は水平/垂直方向共にセルあたり 6 台ずつ配置されているが、分解能の粗い電磁石電源と精密なものがある^[3]。周期的補正においてはセルあたり 2 台 (水平方向)、3 台 (垂直方向) 設置されている精密な補正電源を用いている。BPM 用の VME 計算機と同様に補正電磁石電源用の VME 計算機も蓄積リングに沿って 4 台 (magps_[a-d])設置されており、ワークステーションから補正電磁石用の VME 計算機までは RPC でその指令値 (補正電磁石電流値) 設定される。

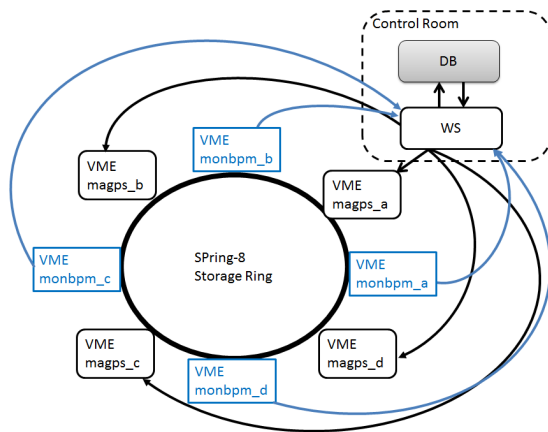


Figure 3 : Schematics of COD correction.

このように周期的補正を高速化するにあたっては、蓄積リングに分散されて設置されている VME 計算機とワークステーション間に大量のデータをしかも同期をとってやり取りするところが大きな課題である。

従来の周期的 COD 補正の流れは次のようであった。

1. COD 測定後データをデータベースに書き込む
2. データベースから COD データを読み出してリファレンス軌道との差分に対して、補正量

を計算する

3. 現在のステアリング電磁石設定値をデータベースから読み出す
4. 3. の現在値に補正量を加えて補正電磁石電源に電柱値を設定する

これらの処理は異なる機器 (BPM,補正電磁石) を制御し、また、データベースともデータをやり取りするものの、シングルプロセスで記述されていたため、それぞれの機器とのやり取りで、場合によっては秒程度あるオーバーヘッドの間なにもしないで待っていた。例えば、COD 測定の開始に 300ms、各 COD 回路を同期させるためのトリガ生成に 1000ms、測定終了待ち+データの転送に 1.5 秒、補正電磁石への設定に 1.5 秒等であった。

4.2. 周期的補正の改造

これらのオーバーヘッドを改善、または並列化することでオーバーヘッドを実質的に解消すべく制御ソフトウェアの改造を行った。COD データ転送高速化のためにリフレクティブメモリ整備や新たな MADOCA II 用データベースへの書き込みも行った。Figure 4 にその構成を示し、以下にその詳細を述べる。

COD 測定開始のコマンドを発行してから実際に実行されるまでの待ち時間を改善するために、COD 測定のプロセス、補正プロセス、データベースアクセスのプロセスをそれぞれ別のプロセスとし、共有メモリでデータ共有することとした。また、補正電磁石電源への電流値設定をイベント型のメッセージを用いることでメッセージ処理に要するオーバーヘッドの短縮化を行った。これにより、ソフトウェアのオーバーヘッドがかなり改善された。

COD データの転送を NFS から専用のリフレクティブメモリ^[4]を用いた転送に変更した。COD 測定のタイミングを確実に制御するために DSP ボードに供給しているトリガと同じトリガをタイミング制御用のリフレクティブメモリに供給し、このタイミングで各計算機に割り込みを掛けるようにした。これにより、ハードおよび制御計算機全てが共通のハードトリガを基準として動作するようになった。こうして、ワークステーションまで含めてリアルタイムな COD 測定が可能になり、現状では 10Hz で運用している。

10Hz で測定された COD データは将来の SPring-8, SPring-8II のために開発された MADOCA II データベース^[5]に 10Hz で書き込むようにした。MADOCA II データベースはインメモリー型で読み込み/書き込みが高速に行える Redis と永久保存用の Cassandra から構成される。書き込む COD データはコメント、時刻、水平、垂直位置および 4 電極電圧であり、10Hz で連続的に書き込むと 1 時間あたり 240MB 程度と大容量であるので、1 週間は全データを保存し、その後は 1/100 のデータ量に間引かれて Cassandra で永久保存されるような設定で運用している。なお、現在はデータベース移行の過渡期であるため、同時にこれまでのデータベース Sybase にも 1/100 に間引いたデータを書きこんでいる。Sybase では書き込み

完了までの時間が不確定であり、時折処理に時間がかかることがあるため、別のスレッドで処理することで、他の処理に影響を与えないようにしている。

これらのソフトウェアの改造、およびリフレクティブメモリの整備、データベースの整備によって COD データは 10Hz でリアルタイムに測定しながら、1Hz での軌道補正が可能となった。

4.3. 周期的補正高速化による改善の確認

フィードバックが発振せずに、系が安定であるかはフィードバックループ内のレイテンシとゲインによる。レイテンシが大きければフィードバックループのゲインを上げることができない。

COD 補正はソフトウェアによる部分がほとんどであるので、系のレイテンシを求めることは困難であった。そこで、レイテンシを仮定して簡単なシミュレーションを行った。シミュレーションにおいて考慮した内容は

- COD 測定の積分時間
- COD 測定終了から補正電磁石に励磁の指令が届くまでの時間
- 補正電磁石の立ち上がり速度（電源の速度、電磁石のインダクタンス、真空チャンバーの渦電流による）

である。なお、COD 測定の分解能が有限であるがためのノイズは考慮しなかった。

補正のゲインを 1.0, 0.75, 0.5, 0.25 と変えた場合のシミュレーション結果を Figure 5 に示す。ゲインを上げると低周波の抑制はできるが、逆に高周波の振動を励起してしまうため、ゲイン 0.25 程度が適していることが分かる。

実際にビーム蓄積時に周期的軌道補正のゲインを変えて Linear Spectrum Density($\mu\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$)を測定した。測定はビームラインフロントエンド部に設置されている XBPM⁶⁾の出力信号を高速デジタイザで測定した。結果を Figure 6 に示す。水平方向にはわずかであるが、垂直方向にはゲインを上げると 0.1Hz から 1Hz 程度の振動が励起される。また、積分スペクトルを計算すると、水平、垂直両方ともに改善がみられるのはゲインが 0.25 の場合であることが分かった。

次に ID ギャップを駆動した時の軌道変動について改善の程度を観測した。ソフトウェア改修前が Figure 7(a)であり、改修後が Figure 7(b)である。これはリングの 1 か所の BPM を用いて測定した水平方向、垂直方向のビーム位置の時間変化である。Figure 7 において水平方向のビーム位置はギャップの開閉によって異なっているが、これは ID ギャップが閉まることによって観測している BPM 位置での平衡エネルギーが違っているのが分散関数を通して見えていることによる。

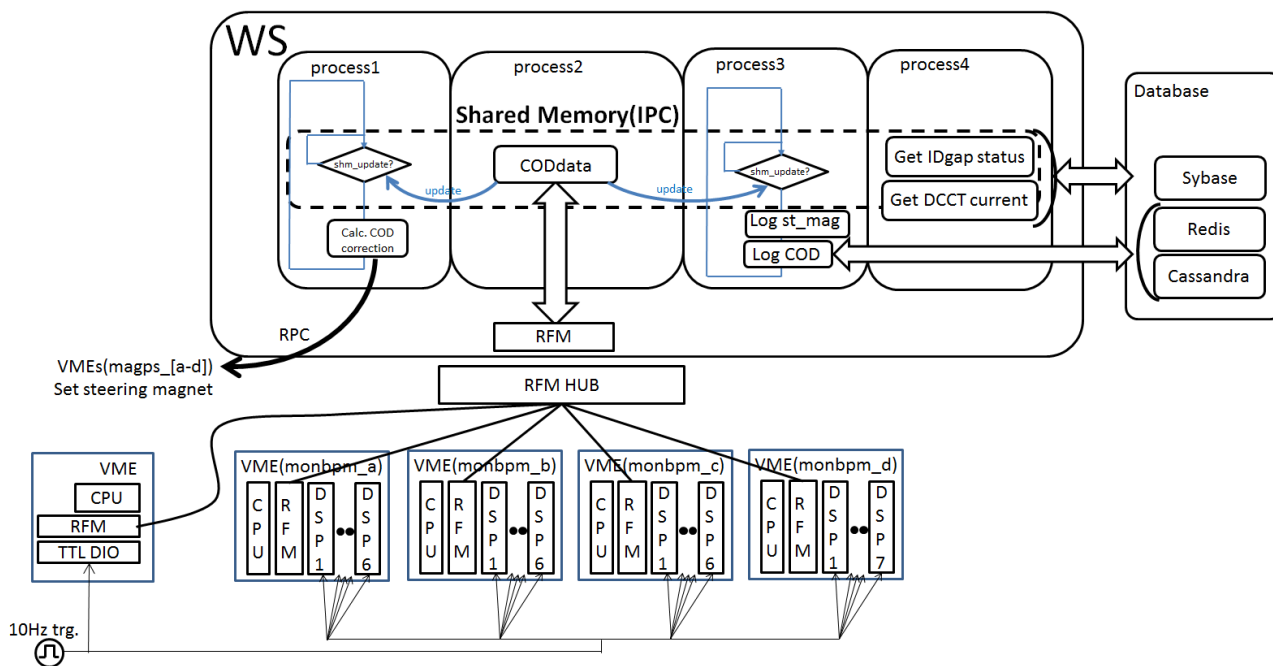


Figure 4 : Configuration of automatic COD correction program on a workstation, reflective memory network for cod data and fast database system.

5. まとめ

SPring-8 蓄積リングの COD 信号処理回路の DSP 論理を改造し、任意のタイミングまたはビームア

ポートのタイミングで COD データを 1kHz で取得可能（ポストプロセス）になっている。これにより、数 ms 以上の時間で軌道変動が起きてビームがアポートされた場合、その直前の軌道が捕捉できるよ

うになった。また、定常状態の軌道変動も 1 μm 程度の分解能で可能になった。

これに並行してソフトウェアの改造も行い、周期的軌道補正の高速化を進めている。2012年4月より1 HzでCOD測定、1 Hzで補正を行うようにした。2014年5月からは補正は1 Hzのままであるものの、COD測定を10 Hzに高速化した。これらを実現するためのリフレクティブメモリの整備、MADCOCA II用データベースの整備も行った。近い将来には補正電磁石もリフレクティブメモリネットワークに組み込み、10 Hzで軌道補正を行うことを予定している。

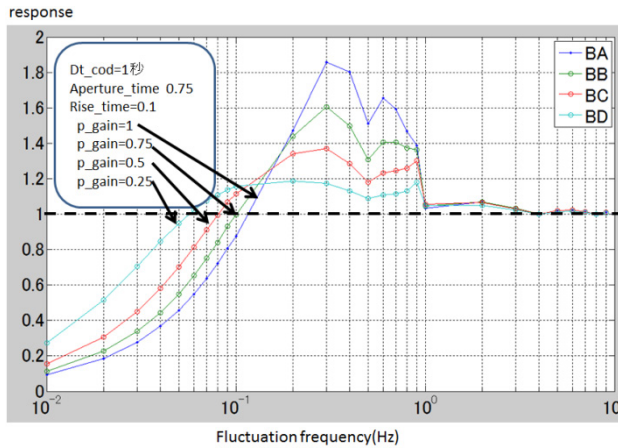


Figure 5 : Simulation on frequency response of periodic orbit correction.

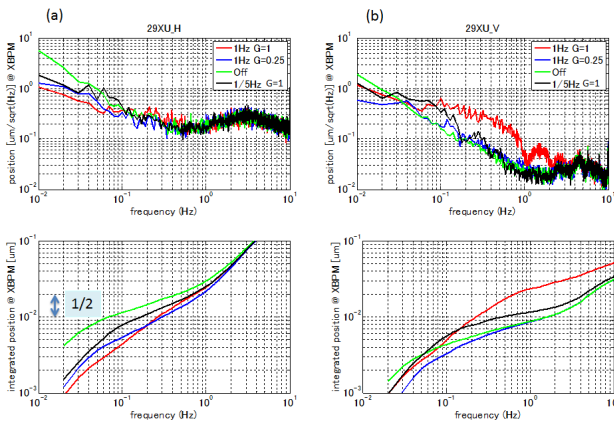


Figure 6 : Linear Spectrum Density and its integral spectrum observed by XBPM at ID29XU. (a) and (b) are for horizontal and vertical direction, respectively.

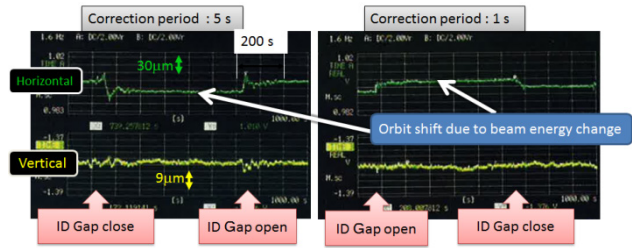


Figure 7 : Beam orbit fluctuation when ID gaps were changed.

参考文献

- [1] T. Fujita et al., Proc. of PAC07, p.3997, (2007), Albuquerque, USA.
- [2] T. Fujita et al., IPAC14, p.274, (2014), Dresden, Germany.
- [3] H. Takebe et al., Proc. of ICALEPS, PO2.048-4 (2005).
- [4] T. Masuda Nucl. Inst. and Meth. A, 543, (2005), 415-430.
- [5] A. Yamashita et al., Proc. of 10th PASJ, p. 235 (2013), Nagoya, Japan.
- [6] H. Aoyagi et al., Nucl. Inst. and Meth. A, 467-468 (2001) 252-255.