

SuperKEKBにおけるターンバイターンモニターを用いたベータトロン関数の測定 BETATRON FUNCTION MEASUREMENTS USING THE GATED TURN-BY-TURN MONITORS AT SUPERKEKB

三塚岳 *^{A)}、飛山真理 ^{A)}、森健児 ^{A)}、杉本寛 ^{A)}

Gaku Mitsuka*^{A)}, Makoto Tobiyama^{A)}, Kenji Mori^{A)}, Hiroshi Sugimoto^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The SuperKEKB collider (2016–) is a major upgrade to the KEKB collider (1998–2010) at KEK. In the SuperKEKB commissioning Phases 2 (Feb.–Jul. 2018) and 3 (from Mar. 2019), the betatron phase advances between adjacent beam position monitors and betatron functions have been measured using a total of 138 gated turn-by-turn monitors. A fast RF gating of the monitors enables turn-by-turn beam position detections by focusing only on an artificially-excited non-colliding bunch, while leaving colliding bunches unaffected. In this proceedings, we will present the optics measurement results for SuperKEKB Phases 2 and 3, and discuss advanced signal-extraction methods such as NAFF and independent component analysis.

1. はじめに

$8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のルミノシティを目指す SuperKEKB では、ビーム衝突点におけるビームサイズを極小まで絞らなければならない。そのため、衝突点でのベータトロン結合 (X-Y 結合) や鉛直方向の分散関数の低減が不可欠である。また、ベータトロン関数の擾乱はダイナミックアパーチャの減少と鉛直方向エミッタンスの増大につながるため、ベータトロン関数の高精度測定と補正も重要になる。

SuperKEKB では、主にビーム非衝突かつ低ビーム電流時 ($\lesssim 30 \text{ mA}$) にステアリング磁石を用いてビームを蹴り、その閉軌道応答を解析して X-Y 結合と分散関数を求めている。一方で、SuperKEKB が目標とするルミノシティを実現するためには、大電流蓄積中または衝突実験中であっても非衝突バンチを用いたベータトロン関数や X-Y 結合等のビームオプティクス測定が求められる。ビーム衝突中の測定では、ステアリングの代わりに入射キッカーや横方向フィードバックキッカーを用いて特定バンチのみを励振させる。併せて、測定系でも特定バンチの情報のみを切り出す特殊なビーム位置モニターが必要になる。

本論文で議論するゲート付きターンバイターンモニター (GTBT) は、まさにその様な用途のために開発されたビーム位置検出回路である [1]。GTBT は次の測定を主な目的としている。

- 目的 1 大電流蓄積中および衝突実験中における非衝突バンチを用いたビームオプティクス測定
- 目的 2 衝突点のベータトロン関数測定や X-Y 結合測定等のビームスタディ
- 目的 3 ビーム入射時の入射ビーム診断

GTBT のインストールは Phase 1 (2016 年 2 月から 6 月) 開始前に行われ、Phase 2 開始前の 22 台増設を経て、現在は電子リングに 68 台、陽電子リングに 70 台、合わせて 138 台の GTBT が備わっている。

以下、まず第 2 章で GTBT の概要について説明し、次の第 3 章ではデータ解析の流れと手法について論ずる。第 4 章ではベータトロン関数の測定結果とその評価について、続く第 5 章で衝突点における X-Y 結合測定について議論する。最後に、第 6 章で現在進めている新型 GTBT 開発の状況を報告する。

2. ゲート付きターンバイターンモニター

Figure 1 に示す様に、GTBT は 1U サイズのビーム位置検出回路であり、既設のビーム位置モニター (BPM) と 508 MHz 狭帯域検波回路 [2] の間に挿入して使用する。

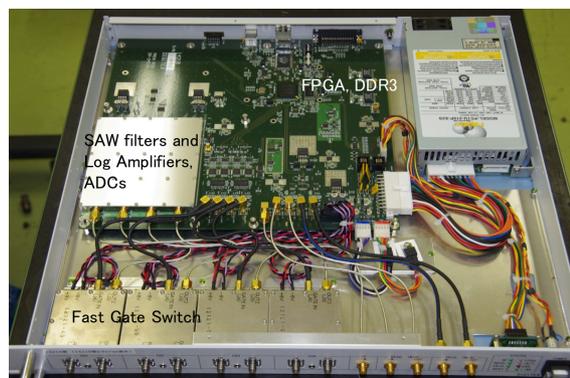


Figure 1: Top view of the gated turn-by-turn monitor detector.

GTBT は計 4 チャンネルの独立した BPM 入力を持ち、入力信号はまず高速 RF スイッチ [3] に送られる。高速 RF スイッチでは特定バンチ (パイロットバンチと呼ばれる非衝突バンチ) の情報のみを切り出し、その他のバンチ情報は 4 チャンネルの BPM スルー出力へ送り返す。これら GTBT をスルーした信号は 508 MHz 狭帯域検波回路へ送られ、閉軌道測定に使用される。

高速 RF スイッチで切り出されたバンチ情報は、508 MHz バンドパスフィルター、低ノイズアンプ (HMC616、ゲイン合計 40 dB)、ログアンプ (ADL5513) を通過後、ピークホールド回路を経て 14 bit ADC

* gaku.mitsuka@kek.jp

(ADS850) により AD 変換される。これらを司るタイミングは FPGA (Spartan-6, XC6SLX100T-3FGG484) で生成される。

Figure 2 に示したのは、高速 RF スイッチによるパンチ切り出し特性である。図中上段の入力 RF 信号 (-20 dBm, 青) から切り出されたのが、下段の信号 (赤) である。スイッチングノイズは 2mVpp まで抑えられている。立ち上がり・立ち下がり時間は 0.6 ns なのでパンチ間隔 (4 ns) よりも十分短い。RF スイッチの挿入損失は 4 dB、アイソレーションは 80 dB であり、いずれも十分良い性能を示している。

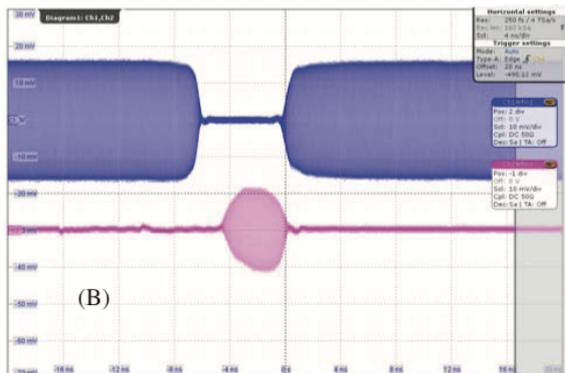


Figure 2: Switch response for a 4 ns gate input.

3. GTBT データ解析の流れと手法

Figure 3 に GTBT データフローと解析手法の概略を示す。隣接する複数台の GTBT に対して 1 台の割合で合計 21 台の Linux サーバーが割り振られており、GTBT データは一旦それら Linux サーバーに集約される。電圧情報から位置情報への変換はあらかじめ用意した 3 次多項式に従い Linux サーバー内で行われる、位置情報は EPICS IOC を経由して他のサーバー間で共有される。

ベータトロン関数の導出などは別に用意した Linux 計算サーバー内で行う。まず GTBT データ (位置・時間情報) を EPICS IOC を経由して Linux 計算サーバーに集約し、集約したデータを独立成分分析 (Independent

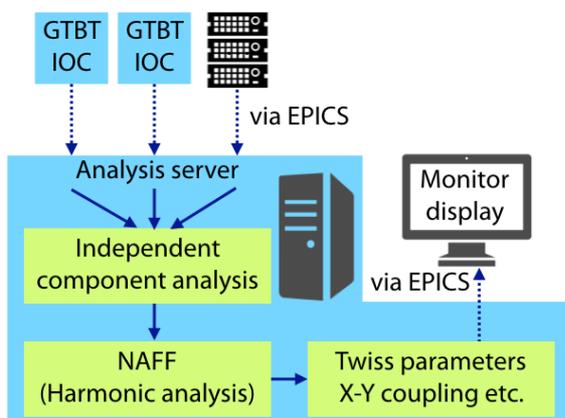


Figure 3: Data flow of the gated turn-by-turn monitors.

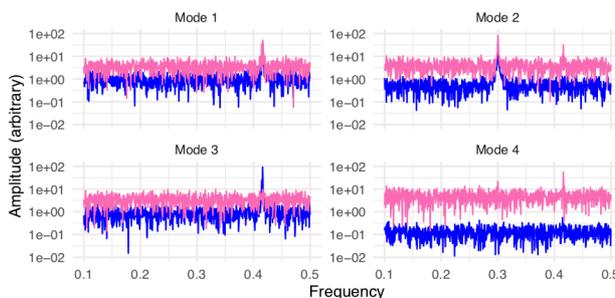


Figure 4: FFT spectra of four decomposed components by SVD (purple) and ICA (blue).

Component Analysis [4]、以下 ICA) を用いて複数の加法的な成分 (モード) に分離する。モード数の選択は任意であり、何個のモードに分離するかは状況次第であるが、一般的には 4 から 6 モードに分離すれば、データに含まれるベータトロン振動とノイズ成分を十分良く分離できる。

ここで ICA とスペクトル分解に広く用いられる特異値分解 (SVD) の性能を比較する。Figure 4 は $\nu_y \sim 0.42$ でベータトロン振動をしている実際のビームデータを ICA 又は SVD で 4 つのモードに分離し、各モードの周波数スペクトラムを比較したものである。なお、入力信号には比較を容易にするため $\nu = 0.3$ のダミー信号も混入させている。ICA (青) ではベータトロン振動成分とダミー信号成分が良く分離されているが、SVD (ピンク) ではモード 2 と 4 においてベータトロン振動成分とダミー信号成分が同一モード内に混在している。スペクトル分解能力はノイズ除去だけでなく、第 5 章で議論する X-Y 結合解析にも影響が大きいため、本研究では性能の優れた ICA を採用している。

次に、ノイズ除去を行ったデータに対して調和解析を行い基本周波数、位相、振幅を決定する。ここでは一般的な調和解析である高速フーリエ変換 (FFT) ではなく、NAFF [5] を用いる。Figure 5 に示すのは、ターン数 (つまり入力点数) に対する周波数、振幅、位相決定精度の比較である。入力信号は単純なサインカーブと、正規分布に従うノイズ成分 10% を混合させたものである。Figure 5 から分かるように、FFT (ピンク) に比べて NAFF (青) は全ての項目で高い精度を示しており、1000 ターン程度で十分高い精度が得られている。少ないターン数で十分な精度を得られれば、データ取得点数を少なく設定出来るためデータ取得中のダンピングの影響を小さく抑えられる。またビーム周回前に行う入射調整においても有利である。

4. ベータトロン関数測定

NAFF による調和解析のあと、ベータトロン関数の導出を行う。GTBT データからベータトロン関数を求める手法はいく通りか提案されているが、ここで使用するのは調和解析で得られる振幅と位相に基づく方法である。水平方向のベータトロン振動を

$$X = a\sqrt{\beta} \cos \phi_s \quad (\text{ただし } \phi_s = 2\pi n\nu_x + \phi_x)$$

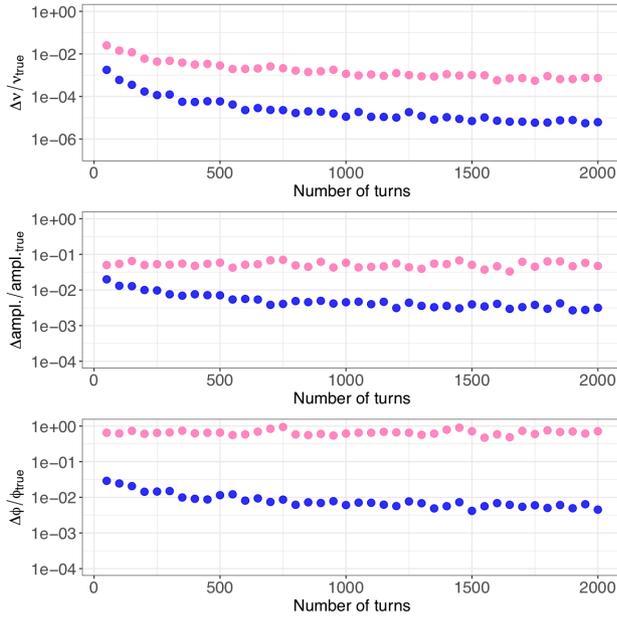


Figure 5: (Top) Frequency, (middle) amplitude, and (bottom) phase measurements by FFT (purple points) and NAFF (blue points).

とおくと、 $\beta' = -2\alpha$ なので

$$\begin{aligned} X' &= a \frac{\beta'}{2\sqrt{\beta}} \cos \phi_s - \frac{a}{\sqrt{\beta}} \sin \phi_s \\ &= -\frac{a}{\sqrt{\beta}} (\alpha \cos \phi_s + \sin \phi_s) \end{aligned} \quad (1)$$

が得られる。ここで GTBT で測定出来る量 p_x/p_0 を

$$p = b\sqrt{\beta} \exp(i\phi_p)$$

とすると、 $X' = p$ から

$$\frac{i - \alpha}{\beta} = \frac{b}{a} \exp[i(\phi_p - \phi_s)]$$

という関係が得られ、変形すると

$$\beta = \frac{a}{b \sin(\phi_p - \phi_s)}, \quad \alpha = -\frac{b}{a} \beta \cos(\phi_p - \phi_s) \quad (2)$$

となる。Equation (2) 左の分子・分母に $\sqrt{\beta}$ を掛けた量および ϕ_s と ϕ_p はそれぞれ調和解析で得られる振幅と位相なので、GTBT による測定だけでベータatron関数の導出が可能である。

Figure 6 に示すのは、NAFF で得られた位相の進みと SAD モデル値の差 (上段)、および Eq. (2) 左から導出したベータatron関数と SAD モデル値の差 (下段) である。使用したデータは Phase 3 の電子リングで非衝突パンチを入射キッカーを用いて水平方向に励振させ測定したものである。標準偏差は $\sigma_{\Delta\phi} = 0.07$ と $\sigma_{\Delta\beta/\beta} = 0.17$ である。

位相の進みに着目すると、特に衝突点 (0 m または 3016 m) 付近でモデルとの差が大きいことが分かる。こ

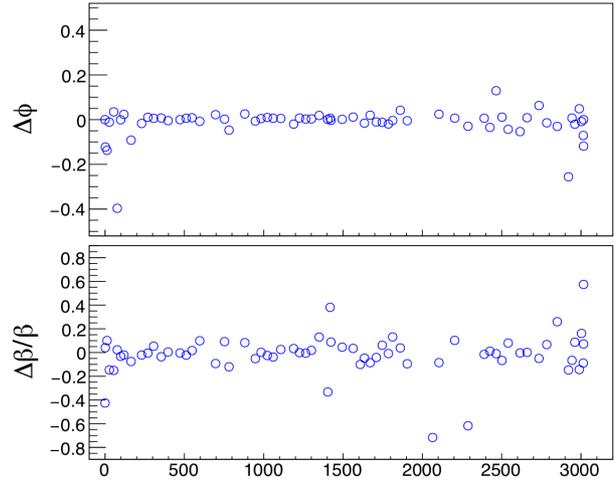


Figure 6: (Top) Phase advance and (bottom) beta-beat measurements in the SuperKEKB electron ring in Phase 3.

れは閉軌道の応答を用いた測定とモデルとの比較でも見られる傾向であり、実際のビームオプティクスとモデル間の差に起因するものと考えられる。

次に、ベータatron関数に着目すると、位相の進みと同様に衝突点付近でモデルとの差が大きい。Equation (2) 左から分かるように $\beta \propto 1/\sin(\phi_p - \phi_s)$ なので、モデルとの残差は衝突点付近の位相のずれがベータatron関数へ伝搬してきたものだと考えられる。また、ベータatron関数は調和解析の振幅と直接比例関係にあるので、GTBT のゲイン較正の影響を受けやすいことが分かる。この点に考慮した“3BPM 法” [6] と呼ばれる手法では、振幅をあらわに用いずにベータatron関数を導出するため、確かにモデルとの残差は Eq. (2) を用いるよりも小さかった。

Figure 6 で見られる標準偏差 $\sigma_{\Delta\phi}$ と $\sigma_{\Delta\beta/\beta}$ の 1/3 程度は閉軌道の応答を用いた測定でも確認されているが、今後は GTBT による測定精度をさらに向上させるため、絶対ゲイン較正、位置算出アルゴリズム、ノイズ除去等に注意を払って研究を継続していく。

5. ビーム衝突点における X-Y 結合測定

Figure 7 に示すのは、Phase 2 での specific luminosity ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} / \text{mA}^2$) とビームカレント積 (mA^2) の関係である [7]。

Figure 8 に示すのは、シミュレーションによる specific luminosity とビームカレント積の関係であり、衝突点での X-Y 結合に有限の chromatic 成分がある場合、specific luminosity がどの程度低下するかを表している [8]。このシミュレーションの結果から、X-Y 結合 r_1 と r_2 の chromatic な成分 r'_1 と r'_2 が specific luminosity 低下の原因ではないかと疑われる。仮に $r'_1 \sim 12 \text{ rad}$ と $r'_2 \sim 3 \text{ m}$ ならば、Fig. 7 に見られる specific luminosity の低下を概ね説明出来る。他方、このシミュレーションで仮定している r'_3 と r'_4 は GTBT 以外の方法で測定した値に比べ非常に大きな値である。つまり、測定値程度の r'_3 と r'_4 で

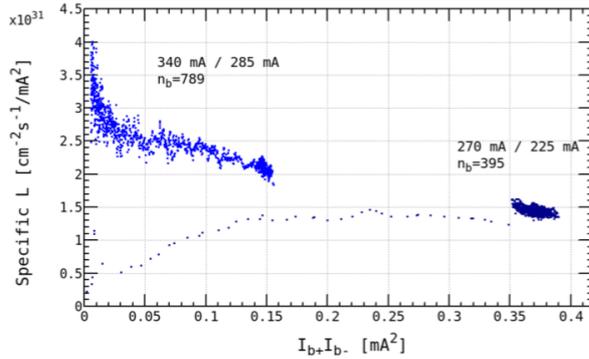


Figure 7: Specific luminosities for each beam-current product in Phase 2.

あれば specific luminosity に影響を及ぼさない事を意味している。以上は Phase 2 での議論であるが同様の現象は Phase 3 でも起こり得るため、今回は GTBT データを用いて衝突点の X-Y 結合を chromatic な成分も含めて測定した。

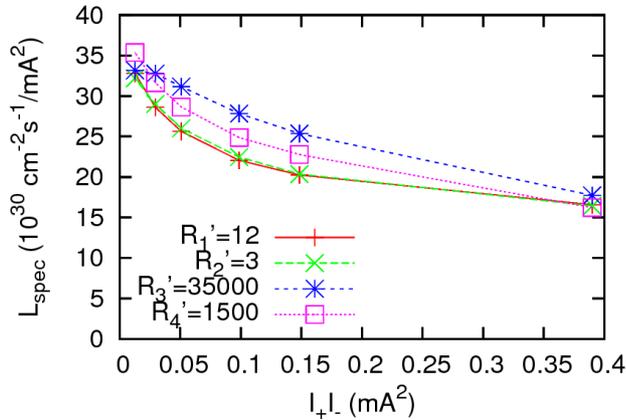


Figure 8: Simulated specific luminosity degradation for each chromatic coupling parameter.

まず、GTBT で測定可能な量を用いて X-Y 結合を解析的に導出する。はじめに $x \dots$ を couple した系、 $X \dots$ を decouple した系とすると、二つの系は結合パラメータ r_i と μ (ただし $\mu^2 + (r_1 r_4 - r_2 r_3) = 1$) を用いて

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu & 0 & r_4 & -r_2 \\ 0 & \mu & -r_3 & r_1 \\ -r_1 & -r_2 & \mu & 0 \\ -r_3 & -r_4 & 0 & \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ X' \\ Y \\ Y' \end{pmatrix} \quad (3)$$

と書ける。ここで右辺の X を

$$X = a\sqrt{\beta} \cos \phi_s \quad (\text{ただし } \phi_s = 2\pi n\nu_x + \phi_x)$$

とおくと、

$$X' = -\frac{a}{\sqrt{\beta}} (\alpha \cos \phi_s + \sin \phi_s)$$

となる (Eq. (1) 参照)。次に左辺の y を

$$y = c\sqrt{\beta} \cos(2\pi n\nu_x + \phi_y)$$

と置く。Equation (3) より得られる

$$y = -r_1 X - r_2 X', \quad y' = -r_3 X - r_4 X'$$

に X, X', y, y' を代入し整理すると、

$$r_2 = -\frac{c}{a} \beta \sin(\phi_y - \phi_x) \quad (4)$$

$$r_1 = \frac{\alpha}{\beta} r_2 - \frac{c}{a} \cos(\phi_y - \phi_x) \quad (5)$$

$$r_4 = -\frac{d}{a} \beta \sin(\phi_y - \phi_x) \quad (6)$$

$$r_3 = \frac{\alpha}{\beta} r_4 - \frac{d}{a} \cos(\phi_y - \phi_x) \quad (7)$$

が得られる (d は $\sqrt{\beta}$ で規格化した y' の振幅)。Equation (4-7) から分かるように、結合パラメータは全て位相と振幅を用いて決定されるため、調和解析の精度が重要になる。GTBT データを用いた結合パラメータの導出を各 $\Delta p/p$ で行い、

$$r_i \equiv r_i^0 + r_i' \left(\frac{\Delta p}{p} \right) + r_i'' \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^2$$

でフィットするとベストフィット値から結合パラメータの $\Delta p/p$ に対する一次の項 $r'_1 - r'_4$ が求まる。

Figure 9 に Phase 3 における陽電子リングの衝突点 X-Y 結合パラメータを示す。赤点が GTBT データから得られた結果であり、青線がそれらに対するベストフィット二次曲線、灰色の領域は 68% 信頼区間である。この解析で得られたパラメータ値は $r'_1 = (5.07 \pm 2.07)$ rad、 $r'_2 = (1.76 \pm 0.44)$ m であり、Fig. 8 に示したシミュレーションの想定値のおよそ 1/2 に相当する。一方、ビームビームスキャンと呼ばれる別種の方法でもほぼ同時期に X-Y 結合の chromatic 成分を調べており、ここでは有限の r'_1 に起因する衝突点ビームサイズの変化がシミュレーション予測値の約 1/2 であった (測定値 $\Delta\sigma_{y,meas}^* = 0.26 \mu\text{m}$ に対し、 $r'_1 = 12$ rad を想定したシミュレーション予測は $\Delta\sigma_{y,sim}^* = 0.55 \mu\text{m}$)。この様に、独立した二種の方法から同程度の r'_1 が得られているため、ここに示した r'_1 は信頼性が高いと言える。本解析結果を Fig. 7 および Fig. 8 と比較すると、現在の specific luminosity 低下の半分は r'_1 に由来するものではないかと考えられる。

6. 新型 GTBT の開発状況

これまで示したように、GTBT は第 1 章で提示した目的を達成するために十分な基本性能を有している。一方で、現行 GTBT のアップグレードとなる新型 GTBT の開発も進行中である。現行機と開発機の違いを Table 1 にまとめた。現在は電圧情報から位置情報への変換を Linux サーバーに構築した EPICS IOC 内で行なっているが、変換を高速化するため Zynq FPGA 内で行うことを検討している。また、Zynq 内に FFT の様な調和解析を実装すれば、現行機では行われていないリアルタイムデータ処理や初期解析が可能となり、GTBT 間の同期確立等を高速で行える。現行機では SiTCP が担っている

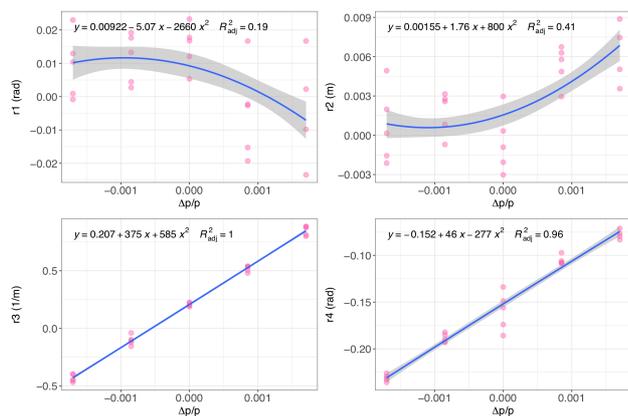


Figure 9: X-Y coupling parameters in Phase 3 positron ring.

TCP/IP 通信も、新型 GTBT では Arm Linux が担当する予定である。本開発は処理能力の向上のほか、既に製造停止したパーツの代替という今後の GTBT 増設にとって重要な側面もある。

新型 GTBT 開発は昨年度から継続しており、今年度中にいよいよ試作 1 号機を完成させ KEK で動作試験を行う予定である。

Table 1: Proposed Upgrades to the Present Gated Turn-by-turn Monitor

| | Present GTBT | New GTBT |
|------------------------------|--------------|-----------|
| Position calculation | EPICS IOC | Zynq |
| Realtime analysis (FFT etc.) | None | Zynq |
| TCP/IP network | SiTCP | Arm Linux |

参考文献

- [1] M. Tobiyama *et al.*, “Development of Gated Turn-by-Turn Position Monitor System for the Optics Measurement During Collision of SuperKEKB”, Proceedings of IBIC2013, Oxford, UK, Sep. 2013, pp. 295-298.; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IBIC2013/>
- [2] H. Ishii *et al.*, “508MHz 狭帯域ビーム位置検出器の開発”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, Aug. 9-11, 2014, pp. 1195-1199.; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/index.html
- [3] T. Naito *et al.*, “Beam Oscillation Monitor for the Multi-Bunch Beam”, Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, May. 2013, pp. 506-508.; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2013/>
- [4] A. Hyvärinen and E. Oja, “Independent component analysis: algorithms and applications”, Neural Networks Vol. 13, pp. 411-430 (2000).; <https://www.cs.helsinki.fi/u/ahyvarin/papers/>
- [5] F. Laskar, “Frequency analysis for multi-dimensional systems. Global dynamics and diffusion”, Physica D, Vol. 67, pp. 257-281 (1993).; [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(93\)90210-R](https://doi.org/10.1016/0167-2789(93)90210-R)

- [6] A. Langner and R. Tomás, “Optics measurement algorithms and error analysis for the proton energy frontier”, Phys. Rev. ST Accel. Beams Vol. 18, 031002 (2015).; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.18.031002>
- [7] Y. Ohnishi, “SuperKEKB フェーズ 2 におけるコミッションングの成果”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 1-6.; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/index.html
- [8] K. Ohmi, “Optics aberration at IP and Beam-beam effects”, The 2018 International Workshop on the High Energy Circular Electron Positron Collider, IHEP, Beijing, China, Nov. 12-15, 2018; <https://indico.ihep.ac.cn/event/7389/>