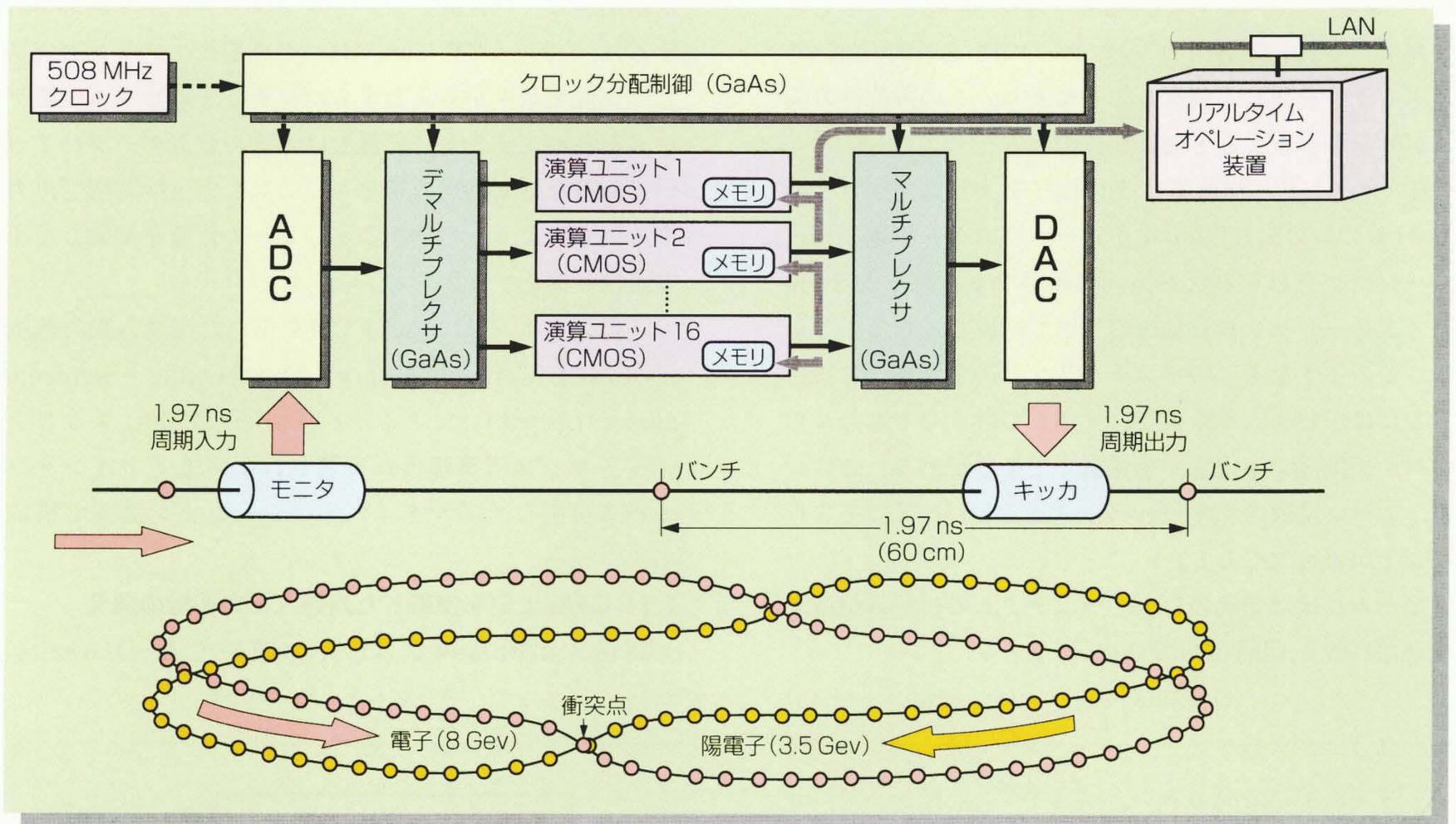


超高速(508 MHz)のビーム位置デジタルフィードバック制御システム

Ultra High-Speed(508 MHz) Beam Position Digital Feedback System

黒川真一* Shin'ichi Kurokawa 中山尚英*** Takahide Nakayama
亀谷雅嗣** Masatsugu Kametani 森山國夫**** Kunio Moriyama



注：略語説明 ADC(Analog-to-Digital Converter), DAC(Digital-to-Analog Converter)

ビーム位置デジタルフィードバック制御システムの全体構成

周長約3,000 mのBファクトリーリングを光速で周回する約5,000個のバンチの電子・陽電子ビームを安定に維持するためには、バンチごとのビーム位置フィードバック制御が不可欠である。

文部省高エネルギー物理学研究所で建設中のBファクトリーは、光速レベルまで加速した電子と陽電子を衝突させたとき大量に発生するB中間子のふるまいを研究することにより、「物質・反物質の対称性の破れ」の解明を行うための装置である。

リング当たり5,120個の光速でリングを周る電子ビーム・陽電子ビームバンチ(電子・陽電子ビームの塊)を安定に維持するためには、結合バンチの不安定性を克服する必要がある。このため、位置モニタからのデータを1.97 nsごとに入力し、位置データを基にフィードバック

演算した制御量をバンチキッカへ出力する超高速ビーム位置デジタルフィードバック制御システムを開発した。

高速入力部では、GaAsカスタムLSIで入力データを16個のデータに高速で振り分け、制御演算部の並列処理を可能とした。CMOSカスタムLSIを使用した制御演算ユニットでは、任意の4点の位置データに基づくデジタルフィルタ演算を行う。

制御演算ユニットで使用するパラメータを実時間で調整するため、リアルタイムオペレーション装置を設け、ビーム調整試験の効率化を図った。

*文部省高エネルギー物理学研究所 理学博士 **日立製作所 機械研究所 ***株式会社日立情報制御システム 技術士(電子応用部門) ****日立製作所 大みか工場

1. はじめに

文部省高エネルギー物理学研究所では、素粒子物理学での「物質と反物質の対称性の破れ」を解明する目的で、Bファクトリーと呼ばれる加速器システムを建設している。光速レベルまで加速された電子ビームバンチ(電子塊)と陽電子ビームバンチ(陽電子塊)を衝突させたときに発生するB中間子(ボトムクォークbを含んだ中間子)のふるまいを詳しく調べることにより、この対称性の破れが解明されるものと期待されている。

Bファクトリー加速器は、B中間子を大量に発生させるため、おのおの5,120個の電子ビームバンチと陽電子ビームバンチがそれぞれ反対方向に周回する、長さ約3kmのストレージリング形加速器二つで構成している。しかし、このような多くのバンチをリングの中で安定に維持するには、ビーム電流強度に比例して強くなるおのおのバンチ位置の不安定性を克服する必要がある。このため、ビーム位置のフィードバック制御をバンチごとに行うことが不可欠である。

ビームはほぼ光速のため、バンチごとのビーム位置データは1.97 ns間隔(約0.6 m)で発生する。

ここでは、これらのデータを高速に処理し、バンチごとに制御する超高速ビーム位置デジタルフィードバック制御システムについて述べる。

2. 超高速ビーム位置デジタルフィードバック制御システムの構成

超高速ビーム位置デジタルフィードバック制御システムは、1.97 ns周期(508 MHz)の高速サンプリング周期で、位置モニタから入力するバンチごとのビーム位置データを各バンチごとに記憶し、過去の位置データに基づいて演算した制御出力量をキッカに1.97 ns周期で出力することにより、バンチごとのビーム位置を制御して不安定性を抑止する。

このシステムは、GaAs LSIを用いた高速入出力基板とCMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)LSIを用いたフィードバック演算基板、およびフィードバック演算基板に実装されたメモリとインタフェース可能なリアルタイムオペレーション装置で構成する。

2.1 GaAs LSIを使用した高速入出力基板の開発

高速入出力基板では1.97 ns周期でA-D(Analog-

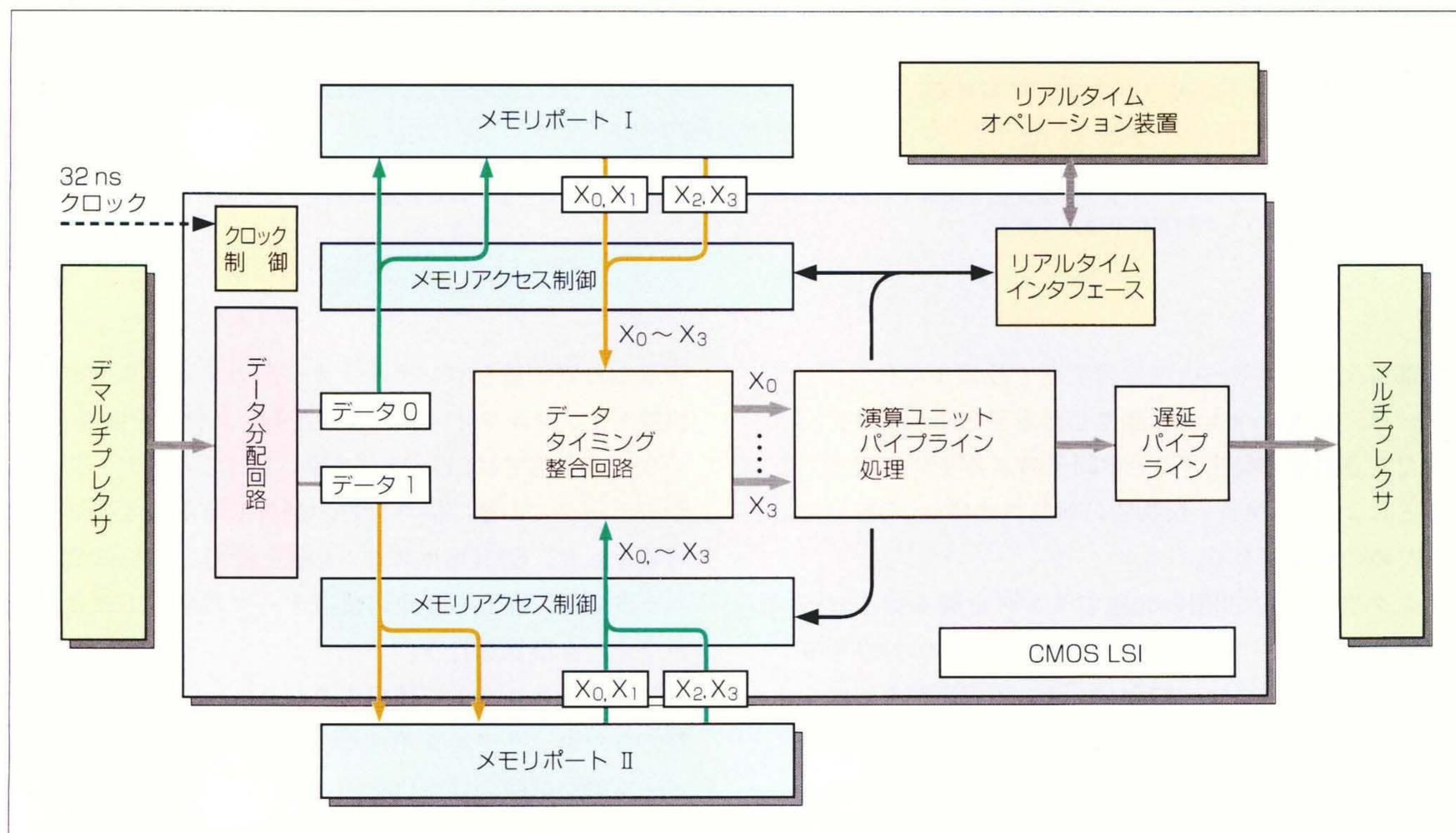


図1 フィードバック演算用ユニット(CMOS LSI)の構成

デマルチプレクサからの位置データ(データ0, 1, ...)を交互に別のメモリポートからメモリに書き込み、演算用位置データ(X_0, X_1, X_2, X_3)を交互に別のメモリポートから読み込む並列メモリアクセスを行っている。

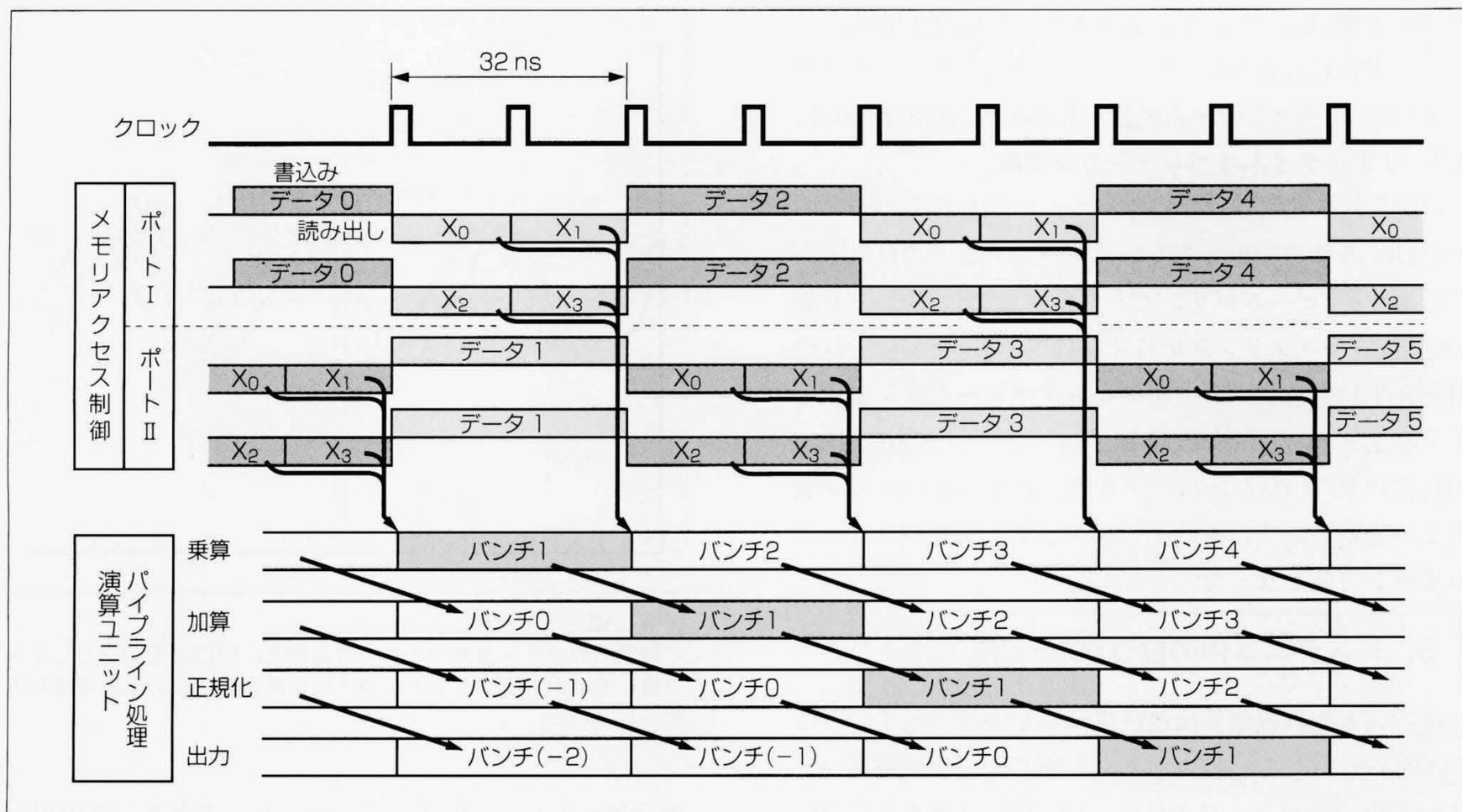


図2 CMOS LSIユニットの動作タイムチャート

メモリアクセス制御は、バンチごとのビーム位置データ(データ0, 1, 2, ...)を各メモリポートから交互にメモリに保存し、並行して演算用の位置データ(X_0, X_1, X_2, X_3)をメモリから読み出す。演算ユニットでは、乗算、加算、正規化、出力を1サイクルで同時に処理(パイプライン処理)する。

Digital)変換されたデータを、DMUX(Demultiplexer)によって16個のデータに振り分け、フィードバック演算基板へデータを出力する。フィードバック演算によって求められた制御量は、MUX(Multiplexer)によって1.97 ns周期のデータに統合してD-A変換した後、キッカに出力する。

DMUX, MUXそれぞれについて、4個のLSIで8ビット精度のデータ処理を並列に行うことによって高速処理を実現した。

高速の並列データ処理システムでは、各構成部へのクロックタイミングのばらつき(スキュー)が問題となる。そこで、ADC(Analog-to-Digital Converter), DAC(Digital-to-Analog Converter), および各DMUX, MUXへのクロック分配制御を高速入出力基板の中央に配した専用のGaAs LSI 1個に集中化し、クロック段数の増加につながるLSI間での同期信号の伝送などを不要にした。この方式により、タイミングのばらつきのない安定した動作が可能となった。

また、基板の開発にあたっては、波形ひずみの少ない高速データ伝送を実現するため、基板内に構築される分布定数回路のインピーダンスに対して細密な調整を行った。

2.2 CMOS LSIを使用したフィードバック演算ユニットの開発

フィードバック演算ユニット(CMOS LSI)の構成を図1に示す。フィードバック演算は、任意の過去の四つのバンチ位置データを用いたデジタルフィルタ演算である。この演算を508 MHzの動作周期で処理するためには、4 G演算/sの高速演算能力と、1.97 ns当たり5回のメモリアクセス(最新の一つのバンチ位置データのメモリへの書込みと、制御量演算に用いる過去の四つのバンチ位置データの読み出し)を行う能力が要求される。これを実現するため、演算のパイプライン処理を行う演算ユニットと、並列メモリアクセス制御機構を備えたCMOS LSIユニットを開発した。

CMOS LSIユニットの動作タイムチャートを図2に示す。

CMOS LSIユニットには、アクセスタイム10 nsのSRAM(Static Random Access Memory)に対して、2組のメモリポートを設けた。ポートIとポートIIは、順次入力されるバンチごとの位置データ(データ0, データ1, データ2, ...)を交互にメモリに書き込み、一方に書き込んでいる間に、他方から制御演算に用いる過去のデ

ータを4個(X_0, X_1, X_2, X_3)メモリから読み出す。

読み出された各バンチごとのデータに対して、パイプライン的に乗算・加算・正規化・出力の各処理が行われる。

2.3 リアルタイムオペレーション機能

研究目的に使用されるこのシステムでは、演算パラメータや動作条件の変更、あるいは特定のバンチの位置データの実時間(ビームがリングを1周する時間約1~10 μ sの応答性)モニタリングが特に有効である。そこで、加速器運転中に実時間でリアルタイムオペレーション装置とインタフェース可能な機能を、フィードバック演算用LSI内に設けた。これにより、リアルタイムオペレーション装置での特定バンチの実時間データ収集と演算パラメータの変更が可能となった。

3. システム単体の動作試験結果

このシステムの信号伝達特性の例を図3に示す。このシステムに対して、出力が入力と同じ値になる演算パラメータの設定を行った条件で、64 MHzのサイン波形の入力に対して、このシステムの入力波形を見ると、約2 nsの階段状の波形になっている。これは、このシステムが2 ns以下のサンプリングで入力演算出力処理を行っていることを示す。

また模擬入力データにより、リアルタイムオペレーション装置のバンチごとのデータの実時間収集、演算パラメータの変更、および動作条件の変更についても正常に動作することを、システム単体として確認した。

4. おわりに

ここでは、文部省高エネルギー物理学研究所の「物質・反物質の対称性の破れ」の解明に用いられる装置のうち、

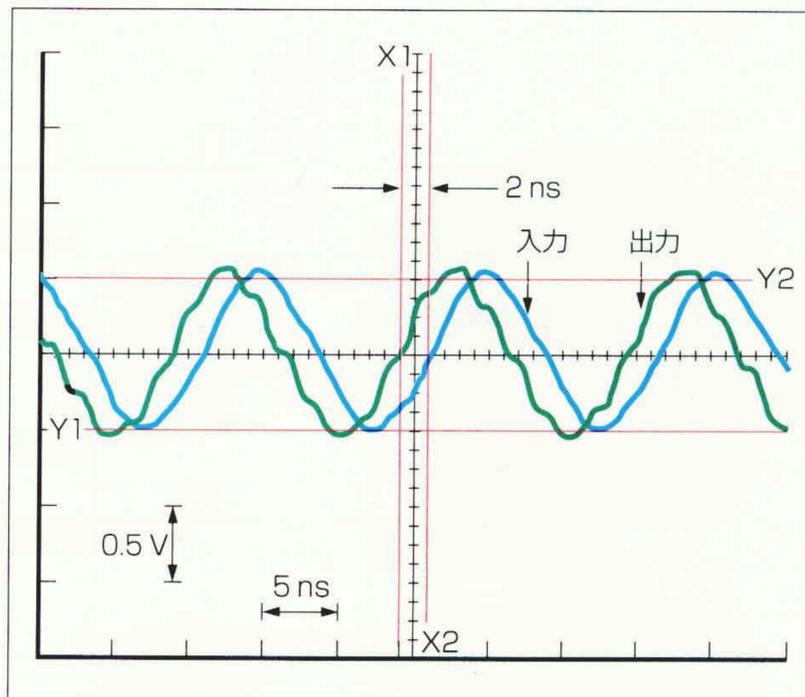


図3 信号伝達特性

64 MHzのサイン波形の入力信号波形と、制御出力演算として入力値をそのまま出力したときのこのシステムの入力波形を重ねて表示している。

電子ビームバンチと陽電子ビームバンチをリングの中で安定に維持する超高速ビーム位置デジタルフィードバック制御システムについて述べた。

今後、実際の加速器システムにこのシステムを導入し、モニタとキッカとを組み合わせたシステム全体の遅れ時間の調整などを図り、ビーム位置制御の実証確認試験を行う予定である。

また、リアルタイムオペレーション機能をさらに充実させ、超高速フィードバック制御システムのパラメータを動的に操作する外側の制御ループによるパラメータの自動調整機能を実現し、上位システムのヒューマンインタフェースとの統合などを行って、よりヒューマンフレンドリーなシステムの構築を図る考えである。

参考文献

- 1) Kurokawa, et al. : FIR Filter for Bunch-by-Bunch Feedback System of TRISTAN II, The 9th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan(1993)
- 2) 亀谷, 外 : スーパーリアルタイムパラレルコントローラの開発と性能評価, Proceeding of the Third Intelligent FA Symposium, JAACEシステム制御情報学会(1991-7)