Mint オペレーティングシステムを用いた NIC ドライバの開発支援手法の実現

藤田 将輝[1]　乃村 能成[1]　谷口 秀夫[1]

概要：割込処理は，OS 機能を実現する処理の中でも非同期に発生するため，処理の再現が難しく，開発工数の増加を招く．仮想計算機を用いて割込をエミュレートする開発手法が提案されているが，この手法は，ハイパーバイザのオーバヘッドにより，短い間隔や一定間隔で発生する割込を再現できない．我々が研究開発している Mint オペレーティングシステムは，仮想化を用いずに複数の OS を走行可能である．そこで，Mint を用いて開発対象の OS とは別に開発支援用の OS を動作させることで，上記の問題を解決できる．具体的には，Mint 上で動作する 2 つの OS の一方を擬似的なデバイスとし，その擬似デバイスが短い間隔で割込を発生させる．本稿では，割込が多発する NIC ドライバに提案手法を適用し，NIC ドライバの開発支援に有用であることを示す．

キーワード：仮想化，割込，開発

1. はじめに

Operating System (以下，OS) の多機能化にともなって，OS のテストやデバッグに多くの工数が必要になっている [1]．特に，非同期な処理は，同じタイミングで発生しないため，再現が困難であり工数の増加を招く．この非同期な処理の 1 つに割込処理がある．割込処理の再現をする方法として，仮想計算機 (以下，VM) を用いたものがある．VM を用いることの利点は 2 つある．1 つは，1 台の計算機上で，開発を支援する機構 (以下，開発支援機構) と開発対象の OS(以下，開発対象 OS) を動作できることである．これにより，計算機を 2 台用意する場合に比べ，コストを削減できる．もう 1 つは，開発支援機構を開発対象 OS の外部に実装できる点である．これにより，実装上，開発支援機構が開発対象 OS の影響を受けない．しかし，VM を用いた開発支援手法では，VM とハイパーバイザ間の処理の遷移に伴う処理オーバヘッドが存在する．なぜなら，開発支援機構が開発対象 OS へ割込を挿入させたり，開発支援機構が開発対象 OS の動作を再現したりすることで，開発を支援するためである．このため，VM を用いた開発支援手法では短い間隔や一定間隔で発生する割込のように，処理オーバヘッドが影響する割込の再現が困難である．

そこで，ハイパーバイザの処理オーバヘッドが影響しない開発支援機構を構築する．我々が研究開発している Multiple Independent operating systems with New Technology (以下，Mint)[2] はマルチコア CPU を搭載した計算機上で仮想化を用いずに複数の OS を動作できる．本稿では，Mint を用いて，開発対象 OS の外部に開発支援用の OS(以下，開発支援 OS) を動作させ，開発対象 OS に割込を発生させることで開発を支援する手法を提案する．また，提案手法を非同期な割込が頻繁に発生する NIC ドライバに適用し，評価することにより，提案手法が NIC ドライバの開発に有用であることを示す．提案手法は，仮想化による手法に比べて，ハイパーバイザの処理オーバヘッドが無いため，短い間隔や一定間隔で割込を発生できる．

[1] 岡山大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

2. 関連研究

2.1 VM を用いた開発支援環境

OS の割込に関するテストを支援する環境の既存研究として VM を用いたものがある．VM を用いた開発支援環境は主にバグを再現することを目的として研究されている．VM を用いた割込開発支援環境は大きく分けて 2 つある．割込挿入手法 [3] とロギング/リプレイ手法 [4][5][6][7] である．これらの概要について以下で説明する．

割込挿入手法

割込挿入手法は開発対象 OS の他に，開発支援機構として，ハイパーバイザと開発支援 OS が走行する．ユーザが開発対象 OS の割込を挿入したいコード位置にハイ

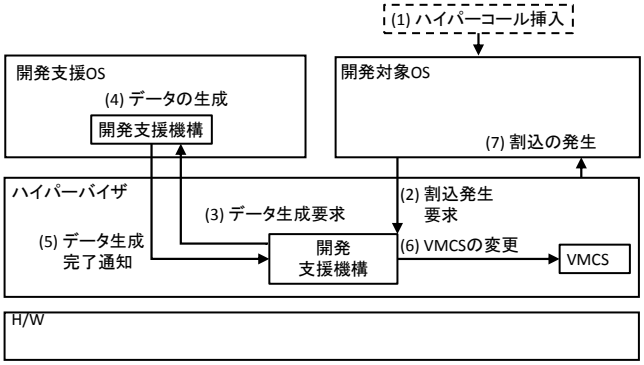

図 1 割込挿入手法の処理流れ

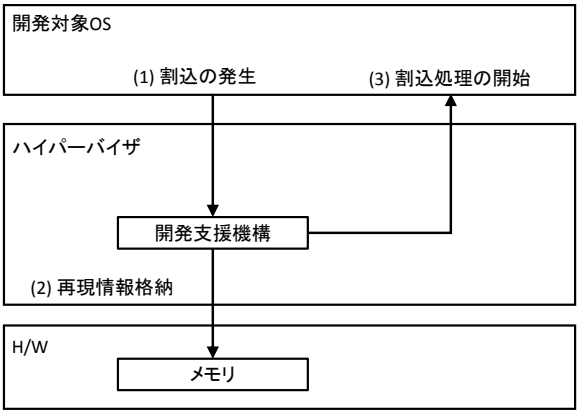

図 2 ロギングの処理流れ

パーコールを挿入することで，割込を発生させる．この際，割込は Virtual Machine Control Structure (以下，VMCS) と呼ばれるデータ構造の値を書き換えることで発生させられる．割込挿入手法の処理流れについて**図 1** に示し，以下で説明する．

(1) ユーザが割込を挿入したい OS のコード位置にハイパーコールを挿入する．この際，割込の種類とデータを指定する．
(2) 開発対象 OS に挿入したハイパーコールにより，開発対象 OS がハイパーバイザの開発支援機構へ割込発生要求を行う．その後，開発対象 OS の処理を中断し，ハイパーバイザへ処理が遷移する．
(3) ハイパーバイザの開発支援機構が開発支援 OS の開発支援機構へ割込に必要なデータの生成要求を行う．
(4) 開発支援 OS の開発支援機構が割込に必要なデータを生成する．
(5) 開発支援 OS の開発支援機構がハイパーバイザの開発支援機構へデータの生成完了を通知する．
(6) ハイパーバイザの開発支援機構が VMCS の値を変更する．これにより，処理がハイパーバイザから開発対象 OS へ処理が遷移する際に割込が発生する．
(7) 開発対象 OS へ処理が遷移し，割込が発生する．

割込挿入手法を用いた既存研究として仮想マシンモニタを用いた割込処理のデバッグ手法 [3] がある．これは仮想マシンモニタが開発対象 OS に仮想的な割込を発生させるものである．

ロギング/リプレイ手法

ロギング/リプレイ手法は開発対象 OS の他に，開発支援機構として，ハイパーバイザが走行する．この手法は開発対象 OS がバグを起こすまでの流れを保存 (ロギング) し，再現 (リプレイ) することで，バグを再現し，開発を支援する．ロギングの処理流れを**図 2** に示し，以下で説明する．

(1) 開発対象 OS に割込が発生すると，処理を中断し，ハイパーバイザに処理が遷移する．
(2) ハイパーバイザの開発支援機構が再現情報をメモリに格納する．
(3) ハイパーバイザから開発対象 OS へ処理が遷移し，開発対象 OS が中断していた割込処理を再開する．

リプレイの処理流れについて**図 3** に示し，以下で説明する．

(1) ハイパーバイザの開発支援機構がメモリから再現情報を取得する．
(2) 取得した再現情報をもとに開発対象 OS が割込の発生するアドレスまで命令を実行する．
(3) ハイパーバイザの開発支援機構が再現情報の分岐回数と，現在の開発対象 OS の分岐回数を比較する．比較結果により，以下の処理に分岐する．
  (A) 一致した場合，(4) へ進む．
  (B) 一致しない場合，(2) へ進む．
(4) 開発対象 OS へ割込が発生する．

ロギング/リプレイ手法を用いた既存研究として TTVM[4]，Aftersight[5]，Sesta[6]，および LoRe[7] がある．TTVM は再現情報に加え，開発対象 OS 側の VM の状態を保存する．Aftersight はロギングとリプレイを異なる種類のハイパーバイザで行う．Sesta はロギングを行う OS の処理を追うようにしてリプレイを行う OS を走行させる．LoRe はログのサイズと再現時間の削減を目的としている．

2.2 問題点

VM を用いた開発支援環境の問題点について以下で説明する．

(問題点 1) 短い割込間隔の再現が困難

ロギング/リプレイ手法では，ロギングにおける開発対象 OS とハイパーバイザ間の処理の遷移や再現情報の格納による処理オーバヘッドが発生する．このため，ロギングした情報における割込間隔は，CPU に発生した割込間隔よりも長大する．したがって，短い割込

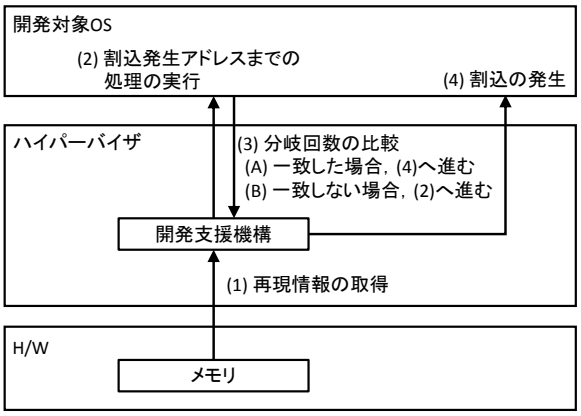

図 3 リプレイの処理流れ

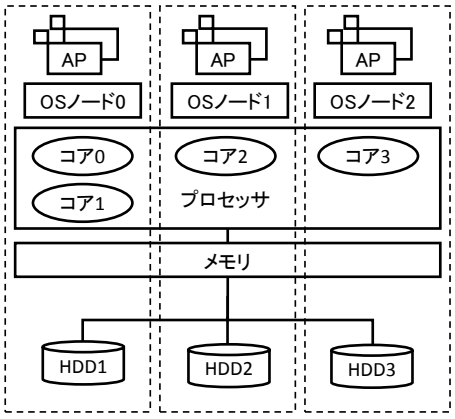

図 4 Mint の構成

間隔の再現が困難である．

(問題点 2) 一定間隔で割込挿入が困難

割込挿入手法では割込を発生させる際，OS のコードの任意の位置にハイパーコールを挿入することで割込を発生させる．ハイパーコールが実行されるタイミングは OS の処理速度に依存する．このため，複数の割込を CPU へ発生させる間隔の調整は，ハイパーコールの間隔を調整することで行う．この間隔をユーザが調整するのは困難である．したがって，一定間隔での割込挿入が困難である．

これらの問題点から，既存手法では短い間隔や一定間隔で複数割込を発生させる必要があるストレステストやパフォーマンスチューニングのようなテストには使用できないと考えられる．短い間隔や一定間隔の割込を発生させるためには，開発対象 OS が開発支援機構の処理負荷の影響を受けない環境が必要である．また，実際の割込処理の再現をするため，これらの環境は実際の割込処理と同様の挙動をする必要がある．

3. Mint を用いた開発支援環境

3.1 Mint オペレーティングシステム

Mint オペレーティングシステムは 1 台の計算機上で仮想化を用いずに複数の OS を動作できる方式である．Mint では，1 台の計算機上でプロセッサ，メモリ，およびデバイスを分割し，各 OS が占有する．Mint の構成例を**図 4** に示し，説明する．本稿では Mint を構成する OS を OS ノードと呼ぶ．Mint では，最初に起動する OS を OS ノード 0 とし，起動順に OS ノード 1，OS ノード 2,... とする．

(1) プロセッサ
コア単位で分割し，各 OS ノードがコアを 1 つ以上占有する．

(2) メモリ
空間分割し，各 OS ノードが分割領域を占有する．

(3) デバイス
デバイス単位で分割し，各 OS ノードが指定されたデバイスを占有する．

このようにして Mint ではマルチコアプロセッサ CPU のコアを分割し，複数の Linux を同時に走行できる．本稿では，Mint を用いて開発対象 OS の外部に開発支援 OS を動作させ，開発支援 OS から開発対象 OS へ割込を発生させることで開発を支援する環境を提案する．

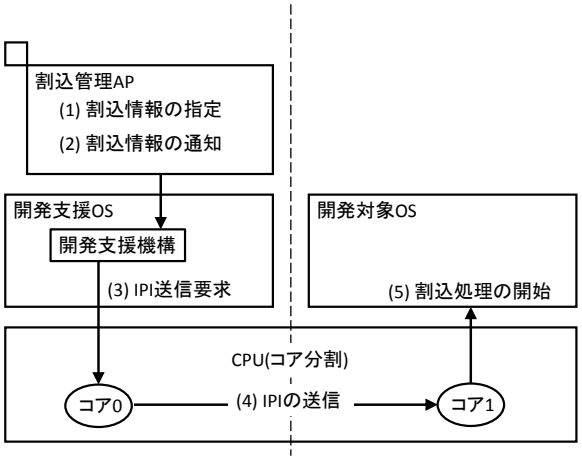

図 5 Mint を用いた開発支援環境の処理流れ

3.2 開発支援環境の構成と処理流れ

Mint を用いた開発支援環境について**図 5** に示し，説明する．Mint 上で開発支援 OS を OS ノード 0，開発対象 OS を OS ノード 1 として動作させる．開発支援 OS はコア 0 を占有し，割込管理アプリケーション (以下，割込管理 AP) と開発支援機構を持つ．開発対象 OS はコア 1 を占有する．この構成で下記の処理を行うことにより，割込を発生させる．

(1) 開発支援 OS 上で動作するアプリケーションである割込管理 AP を用いてユーザが割込情報を指定する．

(2) 割込管理 AP がシステムコールを用いて開発支援機構を呼び出す際，指定した割込情報を開発支援 OS の開発支援機構に通知する．

(3) 開発支援機構がコア 0 へ Inter-Processor Interrupt(以下，IPI) の送信要求を行う．

(4) コア 0 が IPI の送信要求を受けると，コア 1 へ IPI を送信する．
(5) コア 1 が IPI を受信すると割込処理が開始する．

上記の構成により，短い割込間隔の再現が困難 (問題点 1) と一定間隔で割込挿入が困難 (問題点 2) を解決でき，短い割込間隔と一定間隔の割込を実現できる．

3.3 Linux 改変による割込処理の挙動への影響

Mint では 1 台の計算機上で複数の Linux を動作させるために各 Linux に改変を加えている [8]．この際の改変は各 Linux の起動時に認識するプロセッサ，メモリ，およびデバイスを調停するためのものである．起動終了処理にのみ変更を加えたものであり，それ以外の機能は改変前の Linux と同様に動作する．したがって，Mint における割込処理は，改変前の Linux の割込処理と同等であるといえる．このため，提案手法は Linux の開発に有用であると考えられる．

4. NIC ドライバの開発支援環境の設計

4.1 目的

割込処理の 1 つに，デバイスドライバの割込処理がある．NIC では頻繁に通信を行なっているため，割込処理も頻繁に行われている．また，複雑化するデバイスドライバの開発を支援する手法が重要になっている．デバイスドライバを開発対象とした研究として SymDrive[9] がある．これはデバイスを用いずにドライバのコードを網羅的に実行することでバグを発見し，開発を支援するものである．しかし，SymDrive では割込を発生できないため，ストレステストやパフォーマンスチューニングのようなテストには使用できない．また，NIC の高速化による利益を高めるためには NIC ドライバやプロトコル処理を高速化させる必要があり [10]，これらを開発する際のテストが重要になっている．そこで，NIC ドライバを対象とした割込開発支援環境を構築し，ストレステストやパフォーマンスチューニングのようなテストができる環境を実現する．

4.2 設計方針

Mint を用いた NIC ドライバの割込開発支援環境の設計方針について以下に示し，説明する．

(設計方針 1) 指定した間隔と回数の割込発生
テストでは割込の間隔と回数を指定できる必要がある．そこで，本開発支援環境では発生させる割込の間隔と回数をユーザが指定可能な環境を提供する．

(設計方針 2) NIC の動作を開発支援 OS が再現
NIC ドライバの割込処理のみを開発対象とするため，ハードウェア (NIC) の動作は考慮しない．したがって，NIC を用いずに割込開発支援環境を構築する．そこで，開発支援 OS が NIC を再現することとする．これにより，NIC を用いずに NIC ドライバの割込開発支援環境を構築する．

(設計方針 3) 共有メモリを用いたパケットの受け渡し
NIC のパケット受信割込処理を再現するため，開発支援 OS から開発対象 OS へパケットを送信する必要がある．これを実現するには，入出力デバイスかメモリを用いる．本研究ではテスト対象のデバイスの動作を考慮しないため，入出力デバイスは用いない．そこで，開発支援 OS と開発対象 OS 間の共有メモリを用いる．共有メモリ上に NIC の受信バッファを配置することにより，開発支援 OS から開発対象 OS の NIC ドライバへパケットを受け渡す．

4.3 課題

4.2 節に挙げたそれぞれの各設計方針についての課題を設計方針毎に示し，以下で説明する．

設計方針 1

(課題 1) 割込間隔と回数の調整
ユーザが割込の間隔と回数を指定し，開発支援機構に通知する必要がある．この情報によって，開発支援機構が動作する．

設計方針 2

(課題 2) パケットの作成，格納
NIC を用いず NIC ドライバのパケット受信処理を再現するため，処理させるパケットを作成し，受信バッファに格納する必要がある．

(課題 3) NIC が保持する状態の更新
NIC がパケットを受信バッファに格納する際，NIC は受信バッファ状態を書き換え，受信済みの状態にする．受信バッファ状態とは受信バッファがパケットを受信しているか否かの状態である．この状態は受信ディスクリプタという受信バッファを管理する構造に含まれている．本環境では NIC を用いないため開発支援 OS が受信バッファ状態を書き換える必要がある．

(課題 4) 割込処理の発生
本環境では NIC を用いないため，開発支援 OS が，NIC の機能である OS へ割込を発生させる機能を再現する必要がある．また，発生させた割込に NIC ドライバの割込ハンドラが反応する必要がある．

設計方針 3

(課題 5) 受信バッファの作成
開発支援 OS が共有メモリにパケットを配置し，開発対象 OS が共有メモリからパケットを取得するため，共有メモリに NIC の受信バッファを作成する必要がある．

4.4 対処

課題への対処を以下に示し，説明する．また，各対処の通番は課題の通番と対応している．

(対処 1) 割込管理 AP による割込情報の指定

割込間隔と回数をユーザが指定できるようにするため，開発支援 OS 上にこれらの情報が指定できる割込管理 AP を実装する．指定した間隔をシステムコールにより開発支援機構に通知する．

(対処 2) パケットの作成，格納

割込管理 AP がパケットを作成し，作成したパケットをシステムコールにより開発支援機構に渡す．その後，開発支援機構が NIC ドライバの受信バッファにパケットを格納する．

(対処 3) NIC が保持する状態の更新

受信バッファ状態を開発支援 OS が書き換え可能にするため，NIC ドライバを改変し，受信ディスクリプタを共有メモリに配置する．これにより，開発支援 OS と開発対象 OS の両 OS で受信ディスクリプタを参照可能になる．

(対処 4) 割込契機として IPI を使用

割込の契機としてコア間割込である IPI を用いる．開発支援 OS が占有するコアから開発対象 OS が占有するコアへ IPI を送信することで開発対象 OS に割込処理を発生させる．また，IPI により NIC ドライバの割込ハンドラが反応するように NIC ドライバに改変を加える．この際の改変は割込ハンドラが動作するまでの経路を変更するものであり，割込ハンドラの処理自体に影響はない．

(対処 5) 共有メモリへ受信バッファの作成

共有メモリを用いて開発支援 OS と開発対象 OS の NIC ドライバ間でパケットを受け渡すため，NIC の受信バッファを共有メモリに作成する必要がある．このため，NIC ドライバに改変を加え，NIC ドライバの初期化処理内で受信バッファを作成する際の先頭アドレスを共有メモリ内の任意のアドレスとする．これにより，共有メモリ内に受信バッファを作成できる．

4.5 処理流れ

開発支援環境の処理流れを**図 6** に示し，以下で説明する．

(1) ユーザが割込管理 AP を用いて割込の間隔と回数を指定する．

(2) 割込管理 AP がパケットを作成する．本実装では，作成するパケットは UDP パケットを含んだ Ethernet-Frame である．

(3) 割込管理 AP がシステムコールを用いて開発支援機構を呼び出す．この際 (1) で指定した情報と (2) で作成したパケットを通知する．

(4) 開発支援機構が共有メモリに配置している受信ディスクリプタ内の受信バッファ状態を更新し，受信済みの状態にする．

(5) 開発支援機構が共有メモリの受信バッファへパケットを格納する．

(6) 開発支援機構がコア 0 へ IPI 送信要求を行う．

(7) コア 0 がコア 1 へ IPI を送信する．

(8) コア 1 が IPI を受信すると，開発対象 OS の割込ハンドラが動作する．

(9) NIC ドライバが共有メモリの受信ディスクリプタ中の受信バッファ状態を確認する．

(10) NIC ドライバが共有メモリの受信バッファからパケットを取得し，ソケットバッファに格納する．

なお，連続で割込を発生させる際は開発支援機構が (4)，(5)，および (6) の処理を指定した回数繰り返す．この連続する (4)，(5)，および (6) の処理を送信処理とする．

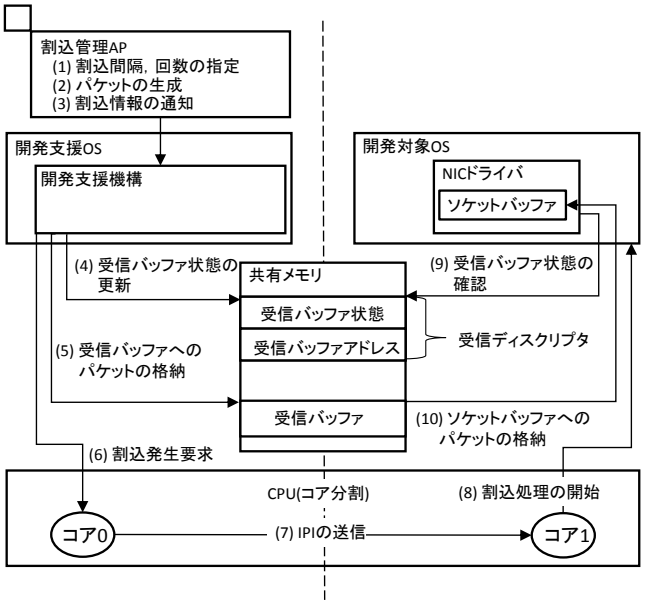

図 6 NIC ドライバの開発支援環境の処理流れ

5. 評価

5.1 評価項目

実装した開発支援環境を以下の項目で評価する．

(評価 1) 割込の間隔

(評価 2) 割込間隔の精度

(評価 3) NIC ドライバへの適用

(評価 1) では，本環境を用いることで，どの程度の短い間隔で割込を発生できるかを測定し，実現可能な割込間隔について評価する．

(評価 2) では，開発支援 OS で割込間隔を指定して連続で割込を発生させた際の開発対象 OS において，どの程度の精度で指定した割込間隔を実現できているかを評価する．

(評価 3) では本環境を用いて NIC ドライバの通信処理の性能を明らかにする．本環境において，送信間隔を指定し

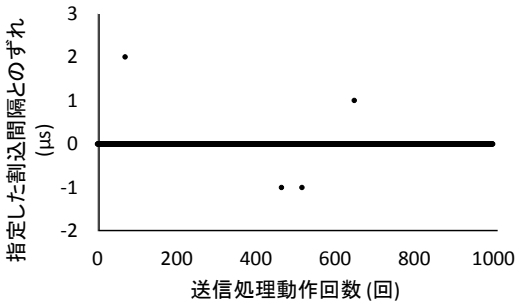

図 7 38 μ s の間隔を指定した際の割込発生間隔のずれ

て連続でパケットを送信した際，指定した間隔ならばどの程度の確率でパケットを受信できるかを評価する．また，この測定結果からどの程度の通信量を実現できているかを評価する．

5.2 割込の間隔

本開発支援環境がどの程度の短い間隔で割込を発生可能かを評価する．割込は IPI の送信によって発生するため，IPI の送信間隔は割込の発生間隔といえる．IPI の送信はパケットの送信処理の最後に行われるため，1 回の送信処理時間が割込発生間隔の最小値である．このため，送信処理にかかる時間を測定し，実現可能な割込間隔の最小値を求める．

送信処理にはメモリ複写処理が含まれており，パケットのサイズによって送信処理が変わると考えられる．したがって，3 つのパケットサイズにおける送信処理時間を測定する．具体的には，各パケットサイズで 1000 回送信処理を測定し，平均時間を取ることで，送信処理時間とした．測定に用いるパケットサイズは，以下の 3 つである．

(1) 1.5KB(MTU のサイズ)
(2) 8KB(受信バッファの半分のサイズ)
(3) 16KB(受信バッファのサイズ)

結果を**表 1** に示し，以下で説明する．パケットのサイズの増大にともなって，送信処理時間が長大していることが分かる．これは，送信処理中にメモリ複写処理が含まれるためである．表 1 の値は本開発支援環境を用いて，連続でパケットを送信しようとした際に実現できる最短の時間であるといえる．したがって，本環境は，表 1 に示した時間以上の割込間隔を実現できる．

表 1 各パケットサイズにおける送信処理時間

パケットサイズ (KB)	処理時間 (μ s)
1.5	0.205
8	1.462
16	3.664

5.3 割込間隔の精度

本環境を用いて連続で割込を発生させた際，開発対象 OS

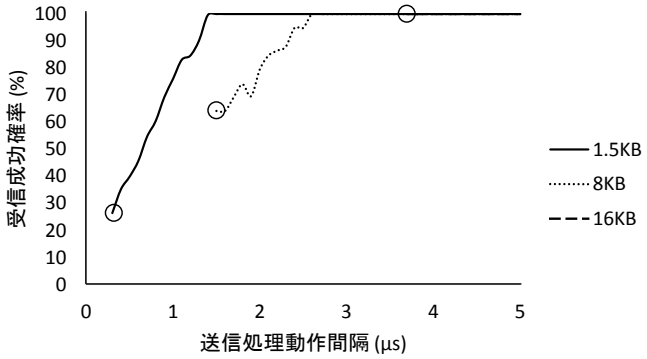

図 8 送信処理動作間隔と NIC ドライバにおけるパケット受信成功率の関係

において，どの程度の精度で指定した割込間隔を実現できているかを評価する．

評価にあたり実計算機 2 台を LAN ケーブルで接続し，NIC を用いて連続でパケットを送信し，どの程度の間隔で割込が発生するかを調査した．この結果，約 38 μ s の間隔で割込が発生していることを確認した．この際，常に割込間隔は安定せず，試行毎に 38 ± 2 μ s ほどぶれていた．また，稀に大きな外れ値があり，一定の間隔では割込が発生していないことを確認した．

そこで，本環境を用いて割込間隔を 38 μ s に指定し，1000 回連続で開発対象 OS に割込を発生させた際，割込ハンドラが動作する間隔を測定する．これにより，それぞれの間隔が 38 μ s とどれだけ差があるかを算出し，精度について評価する．

結果を**図 7** に示し，以下で説明する．ほとんどの場合，指定した間隔である 38 μ s と差がなく，指定した間隔で割込を発生できていることが分かる．1000 回の試行で 38 μ s から外れたものは 4 回であり，一番大きな外れ値が+2 μ s である．38 μ s から見ると，全てのずれは 6.25%以内に収まっている．

5.4 NIC ドライバへの適用

5.4.1 通信処理の性能

本開発環境を用いて NIC ドライバのテストを行う．以下の 2 つの測定を行うことで NIC ドライバの性能をテストする．

(1) 処理可能な送信間隔
(2) 通信速度

これらの項目を測定することにより，NIC ドライバの処理性能を明らかにする．この調査を行うことで，本環境が高速な NIC を擬似し，NIC を用いずに開発対象ドライバの処理性能をテストできることを示す．本環境を用いてテストを行うことで，開発対象ドライバがどの程度高速な NIC に対応できるかが分かる．

5.4.2 処理可能な送信間隔

指定した間隔で送信処理を 5000 回動作させ，NIC ドラ

イバでパケット受信成功率を求めることを 1 サイクルとし，送信間隔を増加させながら複数サイクル行う．これにより，割込間隔と受信成功率の関係を測定する．ここで，受信成功とは NIC ドライバ内でパケットをソケットバッファに格納することとする．受信処理にはメモリ複写処理が含まれるため，パケットサイズの増大にともなって受信成功率が 100%になる間隔が長大化すると考えられる．このため，この測定を複数のパケットサイズで行う．測定に使用するパケットサイズは 5.4.3 節と同じ以下の 3 つのものを用いる．

(1) 1.5KB(MTU のサイズ)
(2) 8KB(受信バッファの半分のサイズ)
(3) 16KB(受信バッファのサイズ)

結果を**図 8** に示し，以下で説明する．なお，図中の丸印は各パケットサイズで実現可能な送信間隔の最小値 (表 1) を示しており，これ以下の間隔は実現できないためこれ以上の間隔の結果を示している．結果から，送信間隔の増加にともなって，受信成功率が 1 次関数的に増加していることが分かる．また，パケットのサイズの増加にともなって，受信成功率が 100%になるまでの間隔が長大化している．これは，パケット受信割込処理中にメモリの複写が行われるためである．

すべてのパケットを受信可能な送信間隔が送信処理の最小値に比べて大きいのは，受信処理にはソケットバッファをドライバよりも上位のレイヤに送信する処理が含まれているためである．

5.4.3 通信速度

連続でパケットを送信した際，各パケットサイズ毎に NIC ドライバで実現できる最大の通信速度を算出した．具体的には，5.4.2 項の測定において初めてパケット受信成功率が 100%となった際の送信処理 5000 回にかかった時間とパケットのサイズから各パケットにおける通信量を算出した．

評価にあたり，NIC を用いて NIC ドライバで処理できる最大の通信量を測定した．具体的には，2 台の計算機を LAN ケーブルで接続し，一方の計算機から他方の計算機へパケットを連続で送信した際の通信速度を測定した．測定においてパケットサイズは MTU である 1.5KB とした．

結果を**表 2** に示し，以下で説明する．表 2 から提案手法を用いた際，実 NIC を大きく超える通信速度を実現できていることがわかる．また，最高で 30Gbps を実現できており，実 NIC より高速な NIC をエミュレートできていることが分かる．

本測定環境ではメモリのみを用いて通信を行なっているため，このような膨大な通信量を実現できる．測定を行った計算機のメモリ帯域幅は約 130Gbps である．また，受信処理にはメモリ複写以外に長い時間を費やす処理が含まれているため，本測定は妥当な結果であるといえる．

これらの結果から，新規 NIC ドライバ開発において開発対象ドライバを高速な NIC に対応させる際に本環境を用いることで，NIC を用いずに開発対象ドライバの処理性能を測定できると考えられる．

表 2 各パケットサイズにおける実現可能な通信量

パケットサイズ (KB)	通信量 (Gbps)
1.5(実 NIC)	0.92
1.5	6.3
8	22.7
16	30.6

6. おわりに

本稿では Mint を用いて，開発対象 OS の外部に開発支援 OS を動作させ，開発対象 OS へ割込を発生させることで開発を支援する手法を提案した．まず，VM を用いた開発支援環境の問題点を明らかにし，短い間隔や一定間隔の割込の発生が困難であることを示した．次に，問題点を解決する手段としての Mint を用いた開発支援環境について述べた．最後に，提案手法を NIC ドライバの開発に適用し，評価することで提案手法が有用であることを示した．

Mint を用いた NIC ドライバの割込開発環境では，指定した間隔で割込を発生させられる環境と NIC を用いずパケットを授受する環境を提供する．設計の課題として，割込間隔と回数の調整，パケットの作成と格納，NIC の保持する状態の更新，割込の発生，および受信バッファの作成を示した．これらの対処として，割込管理 AP の作成，開発支援機構の作成，IPI の送信，および NIC ドライバの改変を示した．割込管理 AP は開発支援 OS 上で動作する AP として実装しており，割込情報の指定とパケットの作成を行い，システムコールを用いて開発支援機構に通知する．開発支援機構はカーネルの機能として実装しており，NIC の状態の更新，受信バッファへのパケットの格納，および IPI 送信要求の発行を行う．割込ハンドラの動作，および受信バッファの作成については，NIC ドライバを改変し実現することを示した．

実装した開発支援環境を用いて連続で割込を発生させた際，非常に短い間隔で割込を発生できることを示した．また，指定した間隔と発生する間隔の差は 6.25%以内に収まっていることを示した．そして，本環境を用いて NIC ドライバのテストを行った際，NIC ドライバがどの程度の通信速度を実現できるかを調査可能であることを示した．本環境は新規 NIC ドライバの開発時に，NIC を用いずに NIC ドライバの処理性能を調査するといった使用法が考えられる．

参考文献

[1] Chou, A., Yang, J., Chelf, B., Hallem, S. and Engler, D.: *An empirical study of operating systems errors*, Vol. 35, No. 5, ACM (2001).
[2] 千崎良太, 中原大貴, 牛尾　裕, 片岡哲也, 粟田祐一, 乃村能成, 谷口秀夫：マルチコアにおいて複数の Linux カーネルを走行させる Mint オペレーティングシステムの設計と評価, 電子情報通信学会技術研究報告書, Vol. 110, No. 278, pp. 29–34 (2010).
[3] 宮原俊介, 吉村　剛, 山田浩史, 河野健二：仮想マシンモニタを用いた割込み処理のデバッグ手法, 情報処理学会研究報告, Vol. 2013-OS-124, No. 6, pp. 1–8 (2013).
[4] Samuel, T.K., George, W.D. and M.C., P.: Debugging operating systems with time-travelling virtual machines, *Proceedings of The USENIX Annual Technical Conference*, pp. 1–15 (2005).
[5] Jim, C., Tal, G., Peter and M.C.: Decoupling dynamic program analysis from executionin virtual environments, *USENIX 2008 Annual Technical Conference*, pp. 1–14 (2008).
[6] 川崎　仁, 追川修一：SMP を利用した Primary/Backup モデルによるリプレイ環境の構築, 情報処理学会研究報告, Vol. 2010-OS-113, No. 12, pp. 1–8 (2010).
[7] Li, J., Si, S., Li, B., Cui, L. and Zheng, J.: LoRe: Supporting Non-deterministic Events Logging and Replay for KVM Virtual Machines, *High Performance Computing and Communications & 2013 IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (HPCC_EUC), 2013 IEEE 10th International Conference on*, IEEE, pp. 442–449 (2013).
[8] 北川初音, 乃村能成, 谷口秀夫：Mint: Linux をベースとした複数 OS 混載方式の提案, 情報処理学会研究報告, Vol. 2013-OS-126, No. 17, pp. 1–8 (2013).
[9] Renzelmann, M. J., Kadav, A. and Swift, M. M.: SymDrive: Testing Drivers without Devices., *OSDI*, Vol. 1, pp. 4–6 (2012).
[10] 松本直人：x86 サーバにおける 40Gigabit Ethernet 性能測定と課題, 情報処理学会研究報告. IOT,[インターネットと運用技術], Vol. 2013, No. 1, pp. 1–3 (2013).