

市川 晴久

電気通信大学大学院 情報理工学研究科・教授

環境知能実現を目指す超低消費電力化統合システムの研究開発

§ 1. 研究実施体制

(1)「電通大」グループ

- ① 研究代表者:市川 晴久 (電気通信大学大学院 情報理工学研究科、教授)
- ② 研究項目
 - ・統合システムの研究開発
 - 環境知能統合システム基盤ネットワークの構築
 - ユビキタス環境知能統合デモシステムの構築

(2)「NTT」グループ

- ① 主たる共同研究者:武藤 紳一郎(マイクロシステムインテグレーション研究所、
研究グループリーダー)
- ② 研究項目
 - ・フルワイヤレス端末および極低ビットイベント表現の研究開発
 - ワイヤレス端末・回路技術の研究
 - MEMS デバイス技術の研究
 - 極低ビットイベント表現の構築
 - フルワイヤレスセンサノードを用いた実証

(3)「小林」グループ

- ①主たる共同研究者:小林 光 (大阪大学 産業科学研究所 教授)
- ②研究項目
 - ・硝酸酸化法を活用したシステム・ディスプレイの研究開発
 - 回路マクロセルの研究開発
 - システム回路の研究開発

(4)「佐藤」グループ

①主たる共同研究者:佐藤 健一 (名古屋大学大学院 工学研究科 教授)

②研究項目

・BoP 地域の IT 環境を革新するゼロ電力・メンテナンスフリー大容量ネットワークシステム

§ 2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

A. 電通大グループ(ULP 統合システムの研究)

(1) ULP 統合システムの設計

ULP 統合システムの設計においては、ULP 統合システムのターゲット市場を想定し、外部仕様を設計する必要がある。次に外部仕様を実現するシステム構成要素(サブシステム)を設計する。ULP 領域の成果は部品レベルの技術が多く、その場合、それらの成果はサブシステムの消費電力低減あるいはサブシステムの機能革新として見える。サブシステムの機能革新が束ねられてターゲット市場に有用な ULP 統合システム全体の革新的機能を生み出すことが望まれる。以上を念頭に昨年度までに下記の成果を得ている。

(a) ULP 統合システムのターゲット市場として BoP (Base of Pyramid) を選択

(b) 領域全プロジェクト成果横断的に有用性を発揮する研究開発目標コンセプトとして Place & Play (P&P) を提案

(c) ULP 統合システムの適用可能性の検討のため、代表的な BoP 地域としてバングラデシュとの人的交流を開始し、現地の ICT 実情調査を実施

今年度は、統合システムデモに備えるため、BoP 地域において最も数が多く、その経済発展が世界の持続的発展にとって重要な、農民に的を絞って彼らのニーズを分析して ULP 統合システムの機能仕様を詳細化した。また、信学会ソサイエティ大会において BoP セッションを開催し、BoP への ICT 技術展開の可能性を議論するとともに、東日本大震災での通信網復旧活動報告をお願いして災害時の ICT と BoP 向け ICT の共通点について着目した議論を行った。

2012 年 1 月には、九州大学 Grameen Creative Lab がトヨタ自動車と共同で検討している移動式テレセンターの有効性調査に参加し、ULP 統合システム適用可能性を調査する計画を立案した。移動式テレセンターは ULP 統合システムのサブシステムである P&P コアシステムを搭載する自動車と見ることができ、農民を支援する NPO と農民との具体的な連携活動への適用性を調査する。

(2) ULP 統合システム構成要素の設計

昨年度までの研究開発により、ULP 統合システムは、インターネットの発展形であり、さらにはインターネットを置き換える新たなユビキタスワイヤレスネットワークになること、バックヤードを除いて P&P 化されたサブシステムになることを条件とし、その構成要素は下記に分類されることとした。各分類に対して ULP 領域成果を適用する具体例を設定している(図 1 参照)。

- P&P ユビキタス端末: RFID やセンサー端末などモノに付される端末

- P&P クライアントシステム: PC、携帯電話、スマートフォンなど人が使う端末

- P&P アクセスネットワークシステム: 上記 2 種類の端末群を P&P コアシステムに接続するためのシステム

- P&P コアシステム: サービスを享受するためにユーザが必要とする情報・リソースのほとんどを内蔵し、P&P バックヤードシステムに対して、携帯電話接続のような細い接続しかなくとも、P&P アクセスネットワークシステムを介してユビキタス端末、クライアントシステムにサービスを提供するシステム。サービスは、近未来はブロードバンドインターネットサービスであり、ユビキタスネットワーク時代にはP&Pユビキタス端末の多様性を吸収し実世界情報処理を行う高度なユビキタスサービスが加わったサービスである。

- P&P バックボーン接続ネットワーク: P&P コアシステムを P&P バックヤードシステムに接続するネットワークであり、携帯電話回線のような低速低容量のネットワークを想定する。

- P&P バックヤードシステム: 近未来は ULP 化されたインターネットバックボーンシステムであり、これがユビキタスネットワーク時代は大規模な実世界データの交換と処理を行うシステムに発展する。

H23 年度も、引き続き各チームと研究成果を適用すべき ULP 統合サブシステムについて、適用による P&P 化効果の評価や統合デモでアピールする機能提示方法を協議した。特に、佐藤グループについて、統合システムデモの質を高めるため、下記の検討を行った。

佐藤グループは、H22 年度までの研究成果であるパッシブ光波長ルーティング素子は高速大容量なコアネットワークが適用ターゲットであったが、これを P&P アクセスネットワークシステムに適用することを想定し、ゼロ電力・メンテナンスフリー大容量ネットワークシステムの開発を計画した。これに対し、ULP 統合システムの特徴として設計した、無線通信と独立電源の利用により、置くだけでシステム動作する"Place & Play"性を強化するために、上記光ネットワークシステムの適用法を詳細化した。これまでの設計では、社会インフラを前提にしないためにアクセスネットワークは無線通信システムのみで構成することとしてきたが、無線での長距離通信には多くの電力を必要とする。光ファイバ敷設が困難でないケースについて光ファイバを活用することで、消費電力を大幅に軽減できる。この点に着目し、省電力化目的で、Radio Over Fiber (ROF)技術を用いてアドホックに光ファイバ網を建設し、これを以降に建設する多様な通信に多重利用するネットワーク構想を考案した。これにより、省電力化に加えて、無線通信アクセスから始めて段階的に大容量な光アクセスネットワークを構築するシナリオが可能となる。

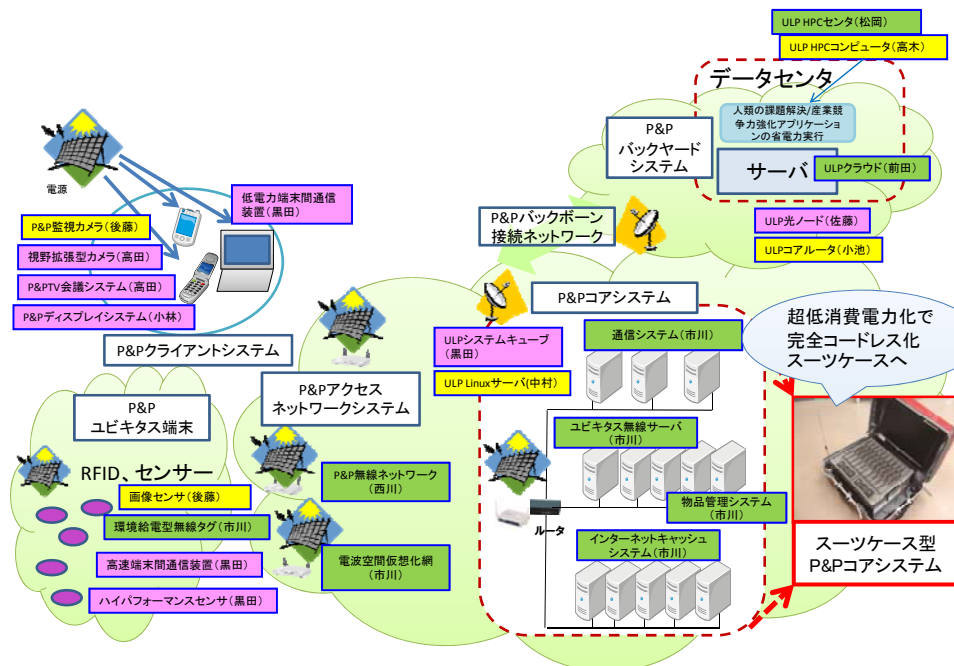


図 1 ULP 統合システム

(3) ULP 統合システムの構築

今年度前半は、8 月に開催された国際会議"International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED2011)"併設の公開シンポジウムにおいて ULP 統合システムを紹介するため、デモシステムを開発した。その後は、来年度に予定される最終デモに向けて、システム設計、開発、他領域チームとの連携を進展させるとともに、ULP 統合システムの主要な機能を担う P&P コアシステムの技術的実現性、すなわち P&P コアシステムの機能を実現する 2 つのソフトウェアシステム、インターネットシステムとユビキタスネットワークシステムの技術的実現性についての研究を推進した。これらの開発はこれまでの開発を統合する活動であるため、一連の統合開発打ち合わせを実施した(本セクション末尾表を参照)。

(3. 1) ULP 統合システムデモ版の開発と公開デモの実施

ULP 領域成果のインパクトを示すために、ULP 統合システムデモは、現状技術で構成できるシステム(Before 版)、ULP 領域成果を適用して構成されるシステム(After 版)及び After 版が ULP 領域成果で実現できることを実証的に説明する要素技術デモにより構成する。Before 版は実現しようとする機能を説明し、かつ、ULP 領域成果適用の必要性を示す役割を担う。一方、ULP 領域成果をシステムに組み込んで機能させるためには技術的成熟期間が必要である場合が多いので、After 版の多くは Before 版が提示する課題を解決するイメージを表現するモックアップなどになる。今年度は公開デモに向けて、上記デモフレームワークを説明する素材を準備するとともに、Before 版プロトタイプを開発した。

(3. 1. 1) ULP 統合システムデモ版

公開デモにおいて、登場させる ULP 統合サブシステムの必要性と機能的役割を統合システム全体の中で理解できるように、BoP 地域の農民を支援する ICT システムとして ULP 統合システムのデモ版を開発した。すなわち、ICT 使用目的を農業生産性向上と設定し、それに必要な ULP 統合システムサブシステムの具体例を設計した。図 2 に構築したデモシステムを示す。デモシステムの構成要素は次のとおりである。P&P クライアントシステムは Android 版スマートフォン、P&P ユビキタス端末はアクティブ RFID とその電波を受信、デジタルサンプリングして P&P コアシステムに送る電波空間デジタルライザー。これらの端末はデータを無線 LAN を使って P&P コアシステムに送信する。P&P アクセスネットワークは無線 LAN 信号を中継してアクセスサービスを提供する。P&P コアシステムは図3に示すように、独立電源で動作する小形のデータセンタである。P&P コアシステムはインターネットバックボーンと携帯3G モジュールで接続する。P&P コアシステムにはそのコンポーネントの消費電力をモニター表示する機能を組み込み、ULP 領域成果適用前の消費電力を動的に表示できる。

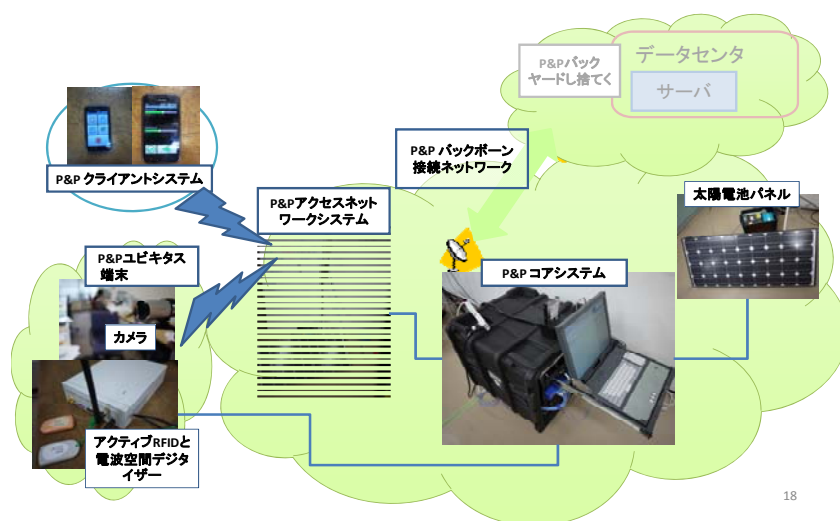


図 2 ULP 統合システムデモ版

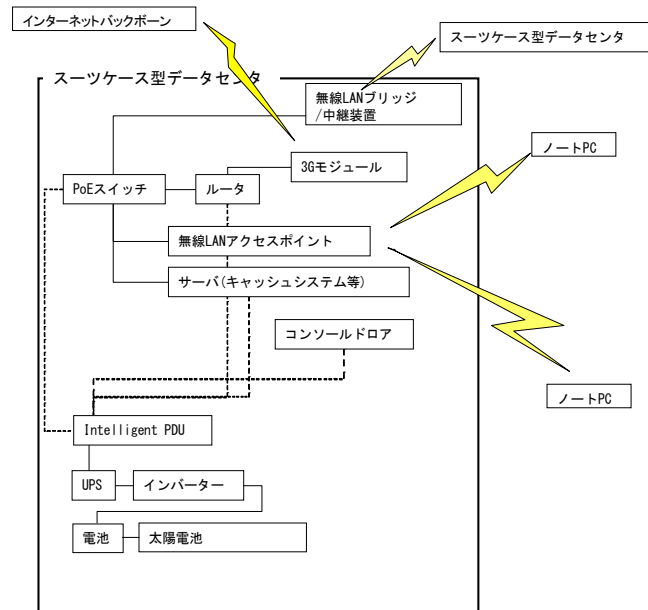


図 3 P&P コアシステムデモ版の装置構成

(3. 1. 2) P&P コアシステムのサービス機能

P&P コアシステムには、昨年度までに開発してきたインターネットシステム及びユビキタスネットワークシステムソフトウェアを搭載した。インターネットシステムにより、インターネットへのブロードバンドアクセスインフラがない地域においても、擬似的にブロードバンドインターネットサービスを提供するサービスをデモできる。デモでは、インターネットへのブロードバンドアクセスがある拠点においてハードディスクにインターネットコンテンツをダウンロードし、通信インフラがない地域にそのハードディスクを運ぶことによりコンテンツ閲覧する。また、ユビキタスネットワークシステムにより、複数の異なる通信方式を用いるアクティブ RF タグの信号をソフトウェアにより受信するサービスをデモできる。

(3. 1. 3) デモシナリオと農業支援システムの開発

BoP 地域農民の ICT ニーズのうち、農業生産性の向上についてデモシナリオを作成した(図 4 参照)。農業生産性の向上アプローチのうち、農作物生産の効率化と販売の効率化に着目した。農作物生産の効率化については、生産活動の定量化が生産性向上に直結したとする日本農業の事例に当たり、農地センシング、農作業ログ取得、農作物の生育状況モニタリングをデモシナリオに組み込んだ。販売の効率化については、バングラデシュ NPO の Grameen Communications が実現しようとしている農民による農作物のダイレクトマーケティングをデモシナリオに組み込んだ。農作物生産効率化シナリオを動的にデモするため、多目的センサー機器を模擬する P&P クライアントシステム、そこから発信される情報を表示する Web システム(P&P コアシステム上で動作)、この Web を閲覧し、農業情報を入力するための P&P クライアントシステム(Android 版スマートフォンソフトウェア)を農業支援システムとして開発した。

An Example of Agricultural Productivity Improvement

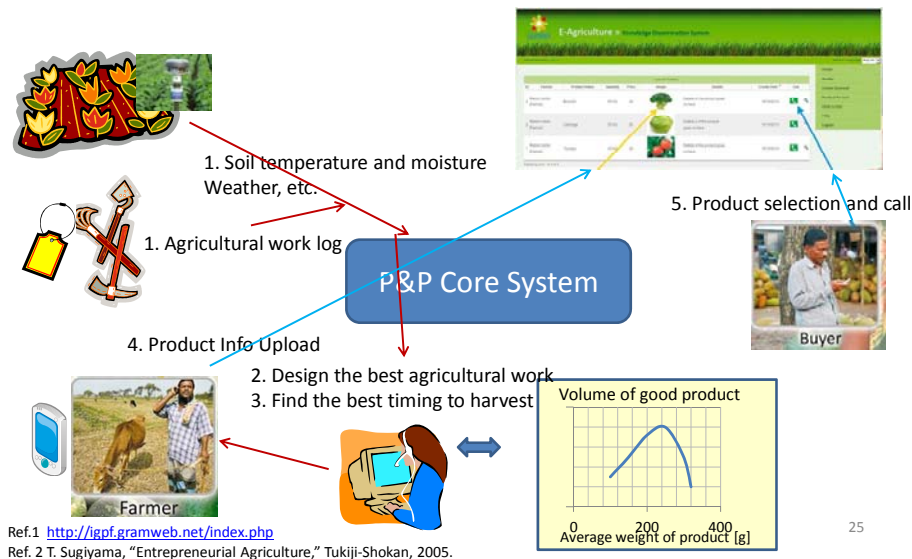


図 4 ULP 統合システムデモ版における農業生産性向上シナリオ

(3. 1. 4) P&P コアシステムの P&P 評価

P&P コアシステムの P&P 動作に必要な太陽電池電源を見積もるための基礎データとして、P&P コアシステム構成部品の消費電力を測定した。すべての構成部品を動作させた場合に約 190W を消費し、待機時には約 160W を消費することを測定した。バングラデシュのダッカにおける適当な動作条件(太陽電池により 1 日で蓄電池を充電し、不照日数 7 日でも継続動作が可能)に対して 67 m²の太陽電池パネルが必要であることを見積もり、領域成果の適用による調停省電力化の必要性をデモにおいて表現した。

(3. 2) P&P インターネットシステムの開発

ハードディスクやフラッシュメモリなどのリムーバブル・メディアの物理的運搬によりブロードバンドインターネットサービスを疑似的に提供しようとする P&P インターネットシステムの構想は、技術的課題を多く含んでいる。中でも基本的な技術課題として、コンテンツのダウンロード・再利用可能性、ユーザのインターネットアクセス予測性について、モニター実験により検討中である。

(3. 3) P&P ユビキタスネットワークシステムの開発

電波空間データを高速サンプリングしてコアシステムまで伝送することで電波空間を仮想的にコアシステムまで延伸し、ソフトウェア無線技術で受信することにより、多様なユビキタス端末を共通にネットワーク化する基盤を実現しようとする P&P ユビキタスネットワークシステムの構想は、電波空間仮想化に関わる課題やユーザがネットワークを利用するための課題を含んでいる。ネットワー

ク帯域の偏在、変動に対してソフトウェア無線処理を最適配置するため、昨年度開発したプロトタイプをベースに、ソフトウェア無線処理を分散配置する実装を行い、動作を確認した。また、ユーザ個別のユビキタスネットワークを仮想設定するための設計を行った。また、電波空間データを配信するサーバのスケールラビリティを確保するための技術検討を行った。

B. 小林グループ

(1) 硝酸酸化法を活用したシステム・ディスプレイ

(1-1) 回路マクロセルの研究開発

INV、BUF、NAND、NOR をはじめとする硝酸酸化法を活用した専用 TFT 用ロジックセルの設計・試作・評価に取り組み、回路セルライブラリの構築を行った。

(1-2) システム回路の研究開発

今年度取り組む回路マクロセル試作の評価結果をベースに、システム・ディスプレイの提供可能な機能、システム回路構成の仕様検討を行った。下記システム構成となり、従来シリコン(LSI)上で実現していたディスプレイ・システム機能を提供するランダムロジック回路(プロセッサ、周辺回路)を、10年前にガラス基板上に形成したMPU(Z80)を用いて、仮検証を行った。液晶ディスプレイモジュールは既存品を用いた。

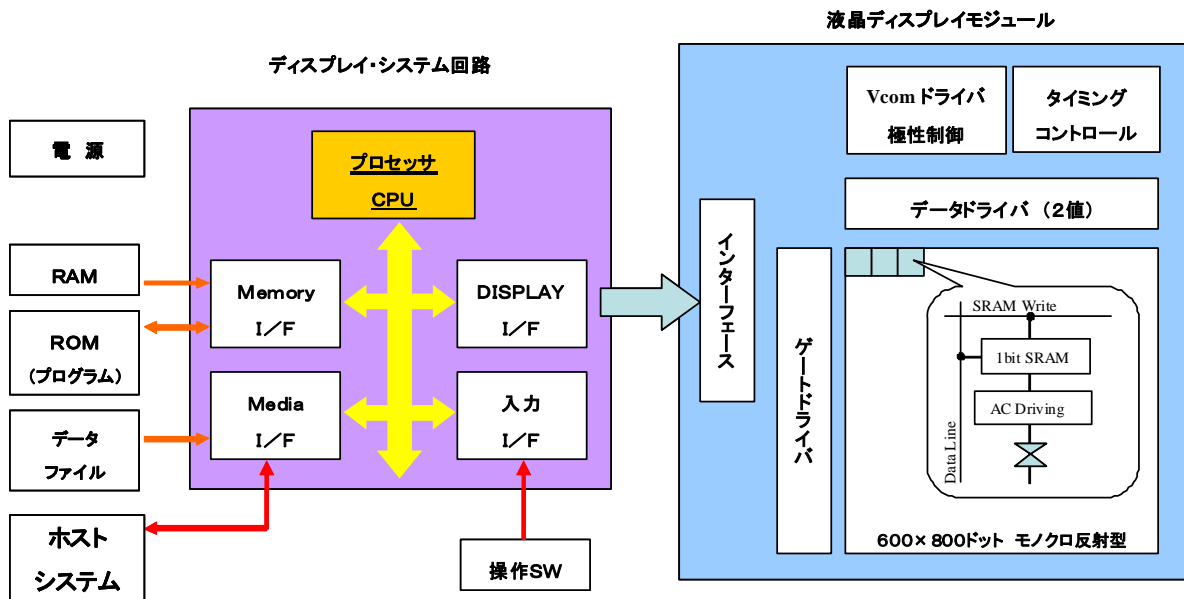


図1 作製したシステム・ディスプレイの構成

作製したディスプレイモジュール仕様は、以下の通りである。

- ・画面サイズ:5 型反射型白黒
- ・解像度:SVGA (600×B/W×800 dots)
- ・表示リフレッシュレート:1 Hz
- ・駆動方式:画素内メモリにより表示データのトラフィックを低減して消費電力抑制
- ・Z80 と FPGA で駆動した場合の消費電力を比較

図2に実際に作製したデモ評価機の写真を示す。このように、反射型白黒液晶ディスプレイを作製し、電子ブック使用中の消費電力を測定することに成功した。ガラス基板上に作製した MPU の消費電力が $\sim 7.5\text{mW}$ であるのに対し、Si 基板上に作製した FPGA の消費電力は $\sim 150\text{mW}$ であり、ガラス基板上に作製した MPU の消費電力は、Si 基板上に作製した FPGA の消費電力の1/20であった。このように、ガラス基板上に作製した MPU では、SOI 効果により、消費電力を低コストで大幅に低減できることを定量的に確認した。



図2 電子ブックをガラス基板上 MPU(Z80)と FPGA で駆動した時の消費電力を比較するデモ機

また、新たに、反射型カラー液晶ディスプレイのデモ評価機を作製することになり、ディスプレイ・システム機能を提供するランダムロジック回路を、ガラス基板上に形成した MPU(改良型 Z80 と MIPS 32 bit)を駆動し、消費電力を測定するデモ評価機的设计・作製を行った。设计・作製したデモ評価機の構成を図3に示す。

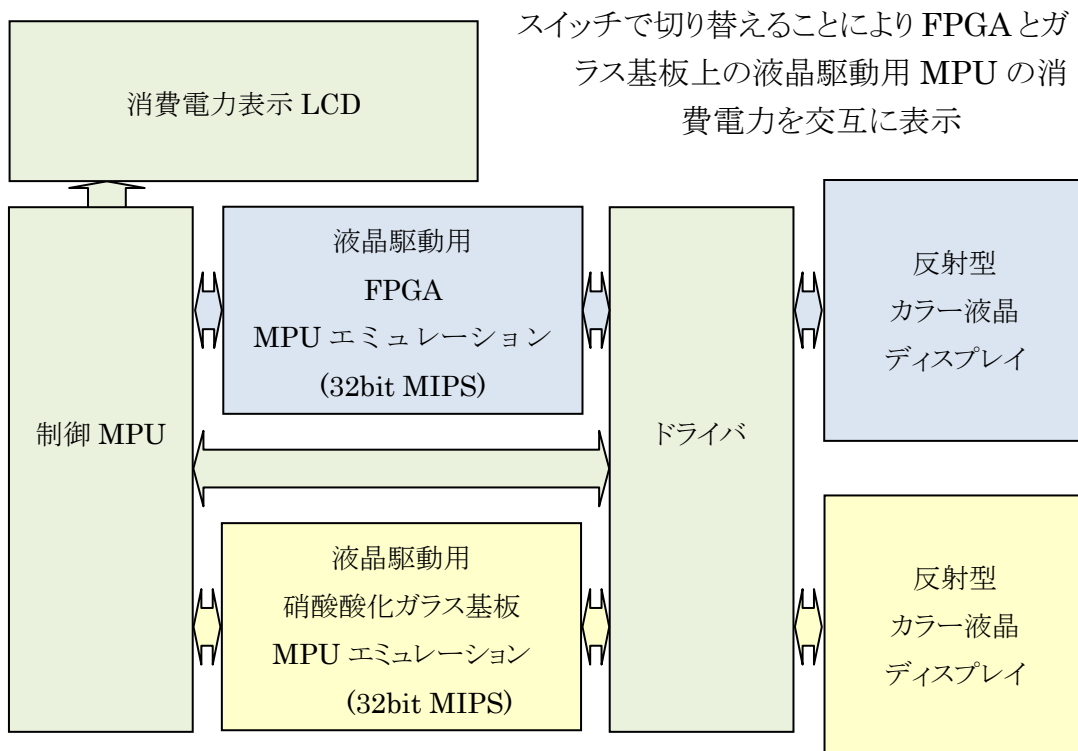


図3 反射型カラー液晶ディスプレイ消費電力測定デモ機の構成

作製中のディスプレイモジュール仕様は、以下の通りである。

- 画面サイズ:5 型以上、反射型カラー
- 解像度:SVGA (600×B/W×800 dots)
- 表示リフレッシュレート:1 Hz
- 駆動方式:画素内メモリにより表示データのトラフィックを低減して消費電力抑制

また、ガラス基板上のMPUを作製する準備として、Vthの評価やSPICEパラメータの抽出に必要なガラス基板上のTEGを、日立ディスプレイズ試作ラインを利用して、作製を完了した。

C. 佐藤グループ

BoP 地域のように電力基盤、交通基盤が未整備であり、通信技術者も十分に確保できない地域において、分散配置された無線基地局やデータセンタを接続する大容量通信網を構築するには、消費電力の最小化とメンテナンスフリー化の達成が望まれる。これを実現する光ネットワークにおいて、任意の入出力ファイバ、任意の波長パスとノードの電気装置(ルータ、電気クロスコネクタ装置等)とをフレキシブルに接続することが必要である。これを実現する上でキーとなる、集積化光適応フィルタ回路のチップを試作し、伝送実験によりその特性を検証した。

上記を達成するため従来は大規模なマトリクススイッチを用いた構成が検討されていたが、スイッチ規模が大きく実用的でない。そこで本研究では drop する光信号を段階的に選択する多段選択型チューナブルフィルタを考案し、コンパクトなデバイス構成で光パスの drop を実現した。本研究で提案した drop 方式、並びに達成されたスイッチ規模削減効果を図1に示す。提案チューナブルフィルタの構成は複数あるが、本研究では光信号の分波に 100GHz 間隔の波長群を分波する為の新機能AWG (Arrayed Wavelength Grating) を使用して、2段階で信号を抽出するチューナブルフィルタを構成した。信号を選択するためのスイッチにはタップ型 8×1 TOSW (Thermo Optic Switch)を使用した。抽出したスペクトルのピーク値におけるロスは 12.0 [dB]であった。また、ロスが最大となるのは 191.7[THz]を抽出した場合の 14.9 [dB]であった。全チャンネルを通じたロスの変動を 3 [dB] 未満に抑えることができ、所望の波長抽出機能を実現できた。また、伝送特性評価実験を行い、良好な伝送特性を確認し、本提案構成の有効性を実証した。

尚、本研究に関する成果に関連して、電子情報通信学会東海支部学生研究奨励賞並びにIEEE名古屋支部学生奨励賞を受賞している。

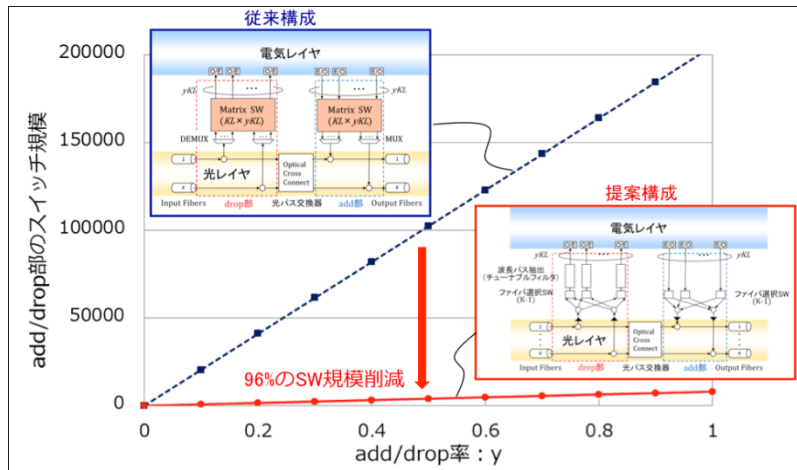


図1 提案 drop 方式並びに達成されるスイッチ規模削減効果

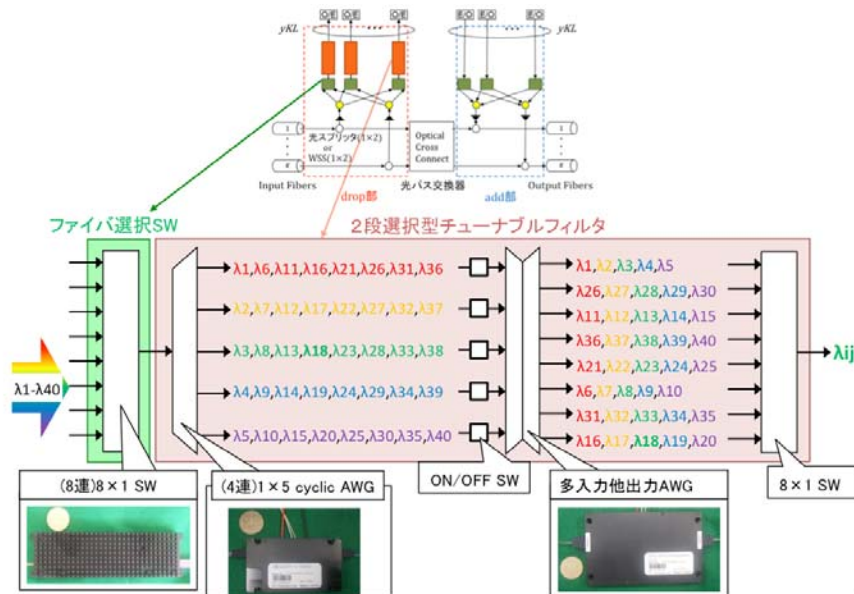


図2 2段選択型チューナブルフィルタプロトタイプ構成

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

(高田グループ)

A-1. Hideki Takase, Hiroyuki Tomiyama and Hiroaki Takada, "Partitioning and Allocation of Scratch-Pad Memory for Energy Minimization of Priority-Based Preemptive Multi-Task Systems," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E94-A, No. 10, pp. 1954-1964, Oct 2011.

A-2. 立松知紘, 高瀬英希, 曾剛, 川島裕崇, 富山宏之, 高田広章, "実行トレースマイニングを用いた組込みシステムにおけるタスク内 DVFS のためのチェックポイント抽出," 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 12, pp. 3729-3744, 2011 年 12 月.

(NTT)

B-1. M. Ugajin, T. Shimamura, S. Mutoh, and M. Harada, "Design and Performance of a Sub-Nano-Ampere Two-Stage Power Management Circuit in 0.35-um CMOS for Dust-Size Sensor Nodes," IEICE Trans. on Electronics, vol. E94-C, no. 7, pp. 1206-1211, 2011.

(小林グループ)

C-1. Y. Kubota, T. Matsumoto, S. Imai, M. Yamada, H. Tsuji, K. Taniguchi, S. Terakawa and H. Kobayashi, "Sub-micrometer ultralow power TFT with 1.8 nm NAOS SiO₂/20 nm CVD SiO₂ gate stack structure", IEEE Trans. Electron Dev., vol. 58, No. 4, pp. 1134-1140, 2011. (DOI: 10.1109/TED.2011.2108657)

C-2. T. Fukushima, A. Ohnaka, M. Takahashi and H. Kobayashi, "Fabrication of low reflectivity poly-crystalline Si surfaces by structure transfer method", Electrochem. Solid-State Lett., vol. 14, No. 2, pp. B13-15, 2011. (DOI: 10.1149/1.3515990)

C-3. M. Takahashi, Y. Higashi, S. Ozaki and H. Kobayashi, "Chemical states of copper contaminants on SiO₂ surfaces and their removal by ppm-order HCN aqueous solutions", J. Electrochem. Soc., vol. 158, No. 8, pp. H825-829, 2011. (DOI: 10.1149/1.3599832)

C-4. T. Matsumoto, Y. Kubota, S. Imai and H. Kobayashi, "Nitric Acid Oxidation to Form a Gate Oxide Layer in Sub-Micrometer TFT", Electrochem. Soc. Trans., vol. 35, No. 4, pp. 217-227, 2011. (DOI: 10.1149/1.3572285)

C-5. P. Hockicko, P. Bury, P. Sidor, H. Kobayashi, M. Takahashi and T. Yanase, "Analysis of A-DLTS spectra of MOS structures with thin NAOS SiO₂ layers", Cent. Eur.

J. Phys. Vol. 9, No. 1, pp. 242-249, 2011. (DOI: 10.2478/s11534-010-0038-4)

C-6. S. Jurecka, H. Kobayashi, W.-B. Kim, M. Takahashi and E. Pincik, "Study of density of interface states in MOS structure with ultrathin NAOS oxide", Cent. Eur. J. Phys., vol. 10, No. 1, pp. 210-217, 2012. (DOI: 10.2478/s11534-011-0092-6)

C-7. Y. Kubota, T. Matsumoto, H. Tsuji, N. Suzuki, S. Imai and H. Kobayashi, "1.5 V-Operation Ultr-Low Power Circuit of Poly-Si TFTs Fabricated Using Nitric Acid Oxidation of Silicon (NAOS) Method", IEEE Trans. Electron Devices, 59 (2012) 385.

(佐藤グループ)

D-1. R. Hirako, H. Hasegawa, K. Sato, and M. Okuno, and O. Moriwaki, "Compact matrix-switch-based hierarchical optical path cross-connect with colorless waveband add/drop ratio restriction," IEICE Special Issue on Photonic Network Technologies in Terabit Network Era, 2011, IEICE Trans. Commun., Vol. E94-B, No. 4, April 2011, pp. 918-927.

D-2. K. Ishii, S. Mitui, H. Hasegawa, K. Sato, S. Kamei, M. Okuno, and H. Takahashi, "Development of hierarchical optical path cross-connect systems employing wavelength/waveband selective switches," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 3, Issue 7, pp. 559-567, July 2011.

(3-2) 知財出願

① 平成 23 年度特許出願件数(国内 6 件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 9 件)