

電子ペーパーが創るユビキタス社会

—電子ペーパークライアントを目指して—

The Ubiquitous Society with Electronic Papers - Toward the Electronic Paper Client System -

服部 励治 九州大学 大学院システム情報科学研究院 電子デバイス工学部門
井上 創造 九州大学 附属図書館 研究開発室

電子ペーパー技術は、粒子移動型ディスプレイという新しい技術の登場により花開こうとしている。この技術は、今までの反射型ディスプレイにはない紙のような質感と外観を与えるだけでなく、バイステイブル (Bistable) 性^{☆1}という、電力を与えなくとも表示を維持する特性を有している。このディスプレイの応用は液晶ディスプレイ (LCD) とは明らかに違ったものとなり、究極のモバイルディスプレイとして期待が大きい。つまり、ユビキタスネットワークを基盤としてコンピュータと人間を繋ぐ最も身近なインタフェースである。しかし、その通信形態は既存のものと同じとは限らない。なぜならば電子ペーパーにはそう多くのハード機能を搭載できないからだ。電子ペーパーは、ハードディスク、メモリなどの記憶装置だけでなく CPU などの演算装置も取り除き、本来の表示機能、データのやりとりの通信機能、そしてタッチパネルを基本とした入力機能だけを残した物にする。すなわち電子ペーパーはシンクライアントを超えた“電子ペーパークライアント”であるべきであろう。

ここまで来た電子ペーパー技術

電子ペーパーというデバイスのイメージは実に明確である。外観は紙であるが、その表示は電子的に変わる。それが究極の電子ペーパーである。しかし、そのようなデバイスの実現は非常に難しい。紙のように薄く、柔らかく、軽くて丈夫なディスプレイは、TV 応用まで可能になった液晶技術を用いてもなかなか実現できない。TV 用ディスプレイ技術と電子ペーパー用ディスプレイ技術はまったく別物なのである。

しかし、この数年で電子ペーパー技術は飛躍的に進歩を遂げた。液晶技術とはまったく別の技術が発展を遂げたためである。その技術とは、電気泳動ディスプレイを代表とする荷電粒子を電界で移動させコントラストを得る、粒子移動型ディスプレイである。

この電気泳動ディスプレイは、米国のベンチャー企業である E-Ink 社が開発したように思われがちであるが、実はこの基本的な原理は 1969 年に日本人である太田勲夫氏によって発明されたものである¹⁾。現在の液晶技術の主流である TN 液晶^{☆2}が発明されたのが 1971 年であるので、その歴史は液晶ディスプレイより古いことになる。当時、液晶技術はまだ多くのフラットパネル技術

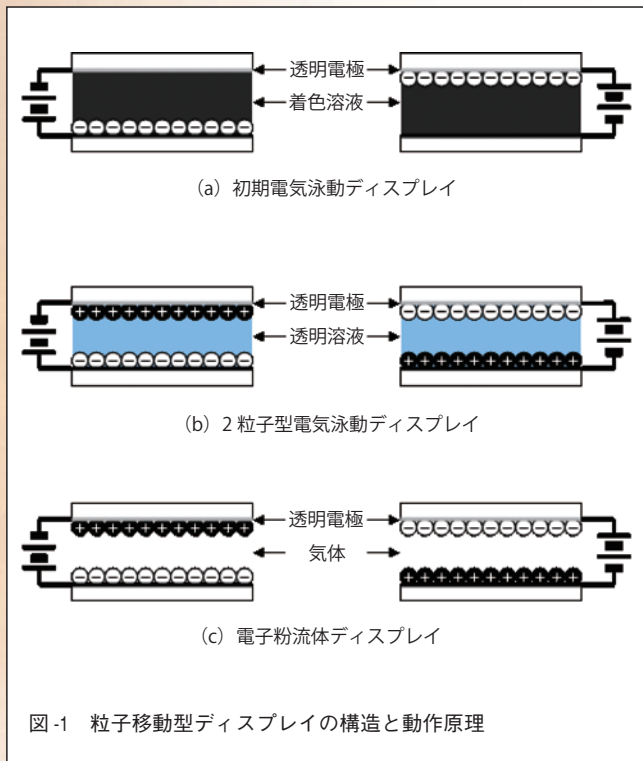
の 1 つに過ぎず、別段優れたものではなかった。これに対し電気泳動ディスプレイは開発が一步早く進み、フラットパネルディスプレイとして最も有望視されていたのである。しかし、70 年代半ばに TN 液晶の開発が急激に進むと、瞬く間に他のディスプレイを駆逐してしまった。それ以来、電気泳動ディスプレイも忘れ去られ、長い間、日の目を見ることはなかった。再び電気泳動ディスプレイが脚光を浴びだしたのは、30 年近くたった 1997 年に先述の E-Ink 社が設立されてからである²⁾。

電子ペーパー技術の主流となる粒子移動型ディスプレイ

図 -1 は現在使われている 3 種類の粒子移動型ディスプレイの原理と構造を表したものである。図 -1(a) は発明時の構造で、電極に挟まれた着色溶液の中に 1 種類の電荷を帯びた粒子が分散している。ここで電極に電圧を加えると、荷電粒子はその極性と電界方向によって溶液の中を電気泳動し、左図では溶液色、右図では粒子色が透明電極越しに見えるようになる。発明時は、粒子が重力によってパネル下方に偏ってしまったり、着色溶液の染料が粒子へこびり付き、コントラストが低下してしまったりするなどの問題があったが、ナノテクノロジーが発達した現在では劇的にこれらの問題が解消され、米国

☆1 バイステイブル (Bistable) 性: 双安定性。2 つの準安定状態を持つこと。ディスプレイの場合、画素がこの性質を持てば、電圧をかけずとも表示を維持できる。

☆2 TN (Twisted Nematic) 液晶: 液晶分子がセルの中で 90 度ねじれるようになっている液晶セル。今日最も広く利用されている構造。



ベンチャーである SiPix 社がこの方法を用い製品化まで至っている³⁾。SiPix 社の技術の一番の特徴はギャップを保ち粒子の偏りを防ぐ壁を印刷技術で基板上に作製し、ディスプレイを Roll-to-Roll プロセス^{☆3}で作製することである。

次に図-1(b)は E-Ink 社が採用する方法である。彼らは正負に荷電し異なる色を持つ2種類の粒子を用いている。これにより電圧によって電極にひきつける粒子の色の違いによりコントラストを得ることができる。この場合、溶液は透明でよく着色染料を用いないため粒子への悪影響を避けることができるだけでなく、ギャップ間距離を狭くでき低電圧化にも寄与する。この2粒子技術は E-Ink 社で発明されたものではないが、彼らは溶液と粒子を数百ミクロンの大きさのカプセル中に包含する技術を開発した。このカプセルをさらに溶液の中に分散させることにより、インクのように塗布してディスプレイを作製することができる。これが彼らの社名の所以でもある。

最後に図-1(c)はブリヂストンが開発した電子粉流体ディスプレイ (QR-LPD) の構造である。図-1(b)との違いは溶液を用いず、その代わりに気体を用いていることである。粒子は溶液内ではなく気体中を移動する。これにより飛躍的に応答性が改善され、電気泳動型では数十～数百ミリ秒かかってしまう応答を、1/100 以下の0.2ミリ秒以下にすることができる。さらに、このディスプレイは閾値特性が明確で、縦横の線状電極で構成された単純マトリックス駆動が可能である。これに対し、先の電気

泳動型は閾値特性が不明瞭で応答時間が長いために、基本的に単純マトリックス駆動ができず、TFT (薄膜トランジスタ) を画素ごとに作製して駆動させるアクティブマトリックス駆動となる。この違いは製造コストの違いだけでなく、後に述べるフレキシブル化に対しての優位性も生み出す。

液晶ディスプレイとは違う粒子移動型ディスプレイ

現在、液晶ディスプレイは小型から大型まで、またモバイル応用からテレビ応用まであらゆる分野で主流となっている。オールマイティに思える液晶ディスプレイには果たしてまったく弱点がないのであろうか？

実は液晶ディスプレイの弱点は、通常用いられている透過型ではなく、自ら発光せず外光を反射する反射型での使用に存在する。反射型ディスプレイは屋外の太陽光の下でも見ることができる。さらにバックライトが要らない分低消費電力でもあることから、モバイル応用には最適なディスプレイであるといえる。しかし、一般的な液晶ディスプレイは偏光フィルムによって光の50%をカットしてしまい、その反射率は決して50%を超えない。実際、液晶や数多くのフィルムでの光の吸収があり、その値は30%程度である。新聞紙の反射率が60%であることを考えると非常に暗いディスプレイであることが分かる。つまり、人々はこれまでに暗い反射型ディスプレイか、消費電力の高い透過型ディスプレイを使わざるを得なかったのである。

一方、粒子移動型ディスプレイの反射率は、これを上回り40%程度を得ることができる。それでも新聞紙に比べ暗く、液晶に比べてそれほど大きくない値であると思われるかもしれないが、人の目は明るさを対数スケールで感じるため、数値以上に60%と40%の差は小さく、40%と30%の差は大きい。

さらに、粒子移動型ディスプレイを見ると大きく液晶ディスプレイと見た感じが違うことに気づくであろう。それは光の反射形態にある。図-2は反射型TN液晶ディスプレイと粒子移動型ディスプレイの光の反射を模式的に表したものである。まずTN液晶において室内の照明からディスプレイに入射した光は偏光フィルム、ガラス、液晶などを経て入射角=反射角という反射の法則を保ち反射される。このとき、視認者の目は反射角と約±10°以内になければならない。言い換えれば液晶ディスプレイを見るときにはその反対側に必ず照明が存在しなければならないということである。すなわち天井にたくさん蛍光灯があり、あらゆる角度から光が飛び込んでくる恵まれた環境において初めて30%という反射率が得

☆3 Roll-to-Roll プロセス：フレキシブル基板をロール上に巻いた状態で一方から製造ラインに供給し、製造プロセスを経てロール上に巻き取ることのできるプロセス。

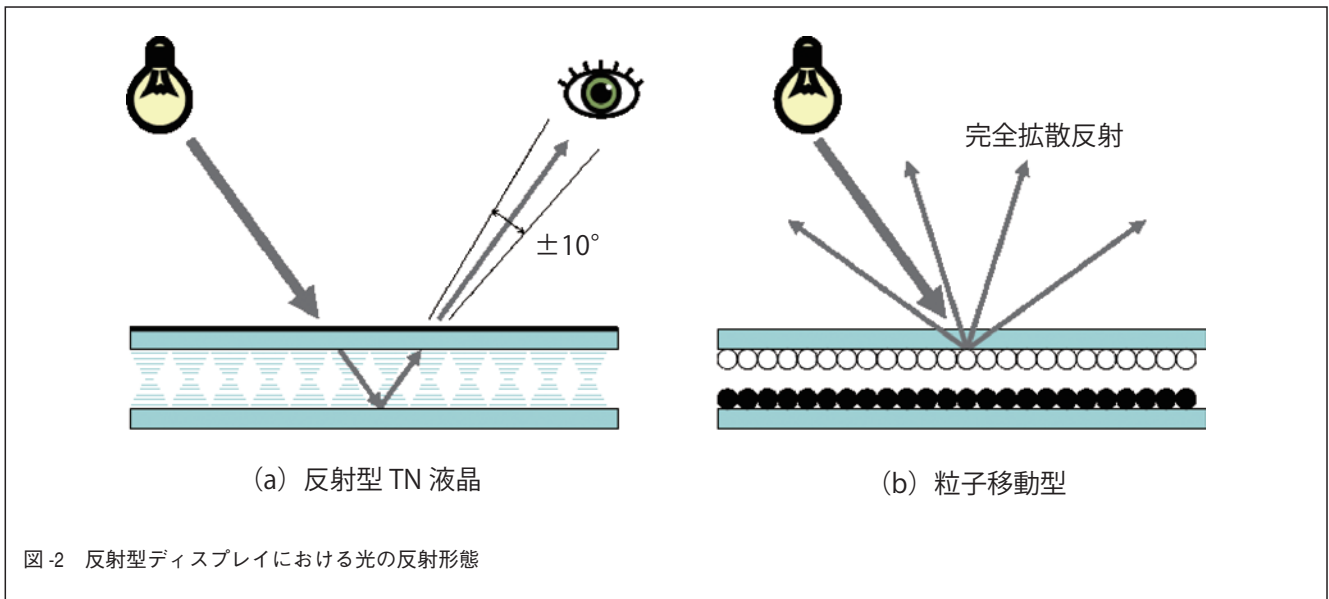


図-2 反射型ディスプレイにおける光の反射形態

られるのである。一方、粒子移動型ディスプレイにおいて入射光はあらゆる方向に拡散して反射(完全拡散反射)され、どこに照明があっても反射光を得ることができる。これは完全に紙の反射と等しい。粒子移動型ディスプレイが紙と同じような質感で見える理由はここにある。

このほか、粒子移動型ディスプレイには液晶ディスプレイが持たない特性がある。その1つがバ이스テブル性である。これは図-1における右と左の状態が電圧をかけなくとも維持されることを意味する。このバイステブル性が得られる理由は電荷が導体に近づいたときに導体内に反対の電荷が誘起され(鏡像現象)クーロン力で引き合うためである。これにより一度表示された画像は電源なしで保持され、同じ内容を長く表示する用途のディスプレイではきわめて低消費電力化に有効である。もう1つ特性を挙げるとすれば物理的強度であろう。TN液晶の光特性はギャップ長に対し非常に敏感であり、ガラス基板のパネルであっても、画面を指で押すと表示が大きく乱れてしまう。これはプラスチック基板を用いてフレキシブル化するとき大きなハンディとなる。しかし、粒子移動型ディスプレイではギャップ長にはそれほど敏感ではなく、フレキシブル化しても問題ない。

もちろん液晶技術においても、このような問題を踏まえコレステリック液晶やバイステブル性液晶など、TN液晶とは違うディスプレイの研究・開発が長い間行われてきた。特にコレステリック液晶ディスプレイは、積層構造を用い明るいフルカラーディスプレイの実現に至っている。

電子粉流体ディスプレイの最新技術

以上のように、粒子移動型ディスプレイはすべて今までにない紙に近い視認性を持つが、ここではブリヂストンが開発するQR-LPDにおける最近までの開発状況を示

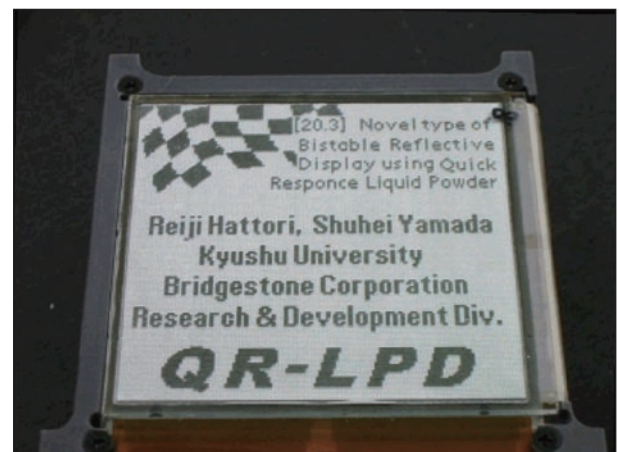


図-3 国際ディスプレイ会議(SID2003)で発表された160×160ピクセル白黒QR-LPD

すことにする。このQR-LPDは2001年より開発が進められ、2002年4月に初めて新聞発表により世の中に公表された。この時示されたディスプレイは黄色と黒色の粉を使った32×32ピクセル、1cm×1cmの小さなものであったが、すでに0.2msecという現在と同じ応答速度を持っており、単純マトリックスで動画を表すことができていた。その後、白色の粒子の開発と画面の大型化が進み、2003年5月の国際情報ディスプレイ会議(SID2003)では図-3のようなディスプレイが発表された⁴⁾。その後も順調に開発が進み、2004年にはプラスチック基板を用いたフレキシブルパネル⁵⁾、2006年にはフルカラーパネルが発表されるに至っている⁶⁾。現在の開発は、大きくカラー化とフレキシブル化に向けて行われている。次にそれらの技術を詳しく説明しよう。

■カラー化技術

QR-LPDのカラー化には大きく分けて2つの方法が考え



(a) カラー粒子によるモノクロームカラーパネル。部分カラー化も可能



(b) 白黒粒子+RGBW カラーフィルタによるフルカラーパネル

図-4 カラー化された QR-LPD

られる。1つは粒子自体の色を変えるものであり、もう1つは白黒のパネルにカラーフィルタを用いるものである。

前者はカラーフィルタが要らないので、コスト面に優位性がある。現時点ではすでに白、黒、黄のほか赤、青、緑などの主な色の開発は済んでいる。今後必要ならば他の色の開発も可能である。図-4(a)にはカラー粒子を用いたディスプレイが示されている。1つは黄色と赤のモノクロームカラーのものであり、もう1つはディスプレイの上部に赤色の粒子を使ったものである。これらのパネルは商品の値段を示す棚札を想定して開発されたものである。白黒では地味な感じを受けざるを得ないが、カラー化されることにより、目に付きやすく、棚札としての機能向上を果たしていることが分かる。しかし、この方法でフルカラー化するためには非常に小さい画素の中に RGB の粒子を個別に充填していく技術が必要となり、現時点ではまだフルカラー化は実現されていない。

一方、後者の方法ではフルカラー化は容易である。

図-4(b)は白黒の粒子と RGBW のカラーフィルタを使ったパネルを示したものである。QR-LPD では中間調を表示することも容易であるので、写真のように色数の多いフルカラー表示が可能となっている。しかしながら、RGBW のサブピクセルが平面的に配列したピクセル構造では、どうしても面積的に反射率が減少してしまうことが避けられない。RGB フィルタでは 1/3、RGBW フィルタでは 1/2 に反射率が減少してしまう。反射型カラーディスプレイが非常に暗くなってしまうのはここに原因がある。それでも液晶ディスプレイに比べると白の反射率が高い分、フルカラーでも明るくなっていることには違いない。

■フレキシブル化技術(プラスチック基板、薄膜チップ)

QR-LPD のフレキシブル化は、開発の早い段階から取り組まれてきた。基本的に QR-LPD は単純マトリックス駆動

で TFT を基板上に作成する必要がなく、プラスチック基板を問題なしに使えたためである。さらに、先に述べたように機械的变化に強く化学的に安定な QR-LPD は、柔らかく気密性の低いプラスチック基板と非常に相性が良いといえる。また、プラスチック基板は熱膨張率が大きく、微細加工時の位置合わせが非常に困難となるが、QR-LPD ではパネル作製時に高温プロセスも微細な位置合わせも必要としないため、熱膨張率の問題は少ない。熱膨張率で問題となるのは、上下 2 枚の基板の熱膨張率が違うときで、パネルの反りとなって表れる。

図-5(a)は 2006 年に発表されたフレキシブルパネルである。このパネルは基板のフレキシブル性を活かし Roll-to-Roll 方式で作製されている。現在、有機 TFT などプラスチック上に TFT を作成する研究が盛んに行われているが、このパネルはその開発を待つ必要がなく、TFT 作製時の歩留まりの問題も気にしなくても良い。

図-5(a)を見るとパネル部分は薄くフレキシブルで理想とする電子ペーパー像にかなり近くなっていることが分かるが、下部の駆動回路の部分が問題となる。この部分には、ドライバ LSI、コントローラ LSI、電池が内蔵されている。これら LSI チップ自身の厚さは通常 500 μm と決して厚いものではなく、それらをパネルのプラスチック基板上に直接実装すれば全体を薄くすることは可能である。しかし、この厚さのシリコンチップはフレキシブル性がなく、実装された部分を曲げることはできない。もし曲げた場合、チップの破壊、またはそれより早く電氣的接続が破壊されてしまうことになる。我々はこれらの問題を解決するために図-5(b)に示されているようにシリコンチップをさらに厚さ 35 μm まで薄くし、フレキシブル性を持たせた⁷⁾。チップを薄くする技術はそれほど難しいものではないが、研磨によってチップ内に残る応力をうまく逃がすことがキーとなる。また、このような薄くて壊れやすい薄膜チップをうまく機械的に実装できるかが問題であったが、すでに量産に対応できる実装手法も開発できている。

このチップを使えば、駆動回路部分も薄くフレキシブルになり、加えて電源供給をペーパーバッテリー／太陽電池／電磁波供給などで行えば、パネル全体が薄くフレキシブルである真の電子ペーパーが実現できる。図-5(c)は、まだコントローラ、電源回路が実装されておらず不完全であるが、その可能性を示すものである。



図-5 フルフレキシブル化パネル

このパネルは、ドライバを実装した形で薄膜フレキシブル化されている。言うまでもなく、このパネルは通常のドライバを使ったときと同じ特性で駆動することが確認済みである。

薄膜・フレキシブル化により拡大するアプリケーション

わずか4、5年前までは、市場調査会社による電子ペーパー市場予測はそれほど大きいものでなかった。本命視された電子書籍、電子新聞などの市場でさえ期待するほどではなく、ビジネスとしてあまり魅力のない規模の大きさが報告されていた。ところが最近、電子ペーパーの市場予測が次々と上方修正されている。これは、かつての市場予測は既存の反射型液晶ディスプレイ技術開発の延長線上でなされたものであり、今日の粒子移動型ディスプレイのブレークスルーが市場予測に大きくインパクトを与えたためである。

さらに、フレキシブル化技術はアプリケーションのシーンを爆発的に拡大させることであろう。紙とほとんど等しい形状は、今まで紙媒体が使われていた用途を容易に置き換えることができる。たとえば、棚札は厚紙をプラスチックのホルダに入れて使っているが、電子ペーパーをこの厚紙と同じ寸法で作製したならば、そのままのホルダを利用して、ほんの数時間で電子棚札に置き換えることが可能となる。

また、フレキシブル化は丈夫さにも反映される。フレキシブル化されたパネルは落としても割れることはなく、衝撃を吸収する。また、人を傷つけることもないであろう。この丈夫さという特性もアプリケーションを広げるキープポイントとなる。

もう1つ、アプリケーションを広げる大切な機能は無線通信技術である。電源供給は、先に述べたようなペーパーバッテリー／太陽電池／電磁波供給などで無線化してもデータのやりとりを有線で行っているのは台なしである。次章ではその電子ペーパーにおける無線通信システムを考える。

シンクライアントを超える “電子ペーパークライアント”

電子ペーパーのためのネットワークシステム

以上のように、電子ペーパーはネットワークに繋がりながら紙のように薄くなりつつある。しかし、この薄いデバイスに今までのようなPCが行ってきた処理を求めるときにはいかに、紙に近い薄さとコストを実現するためには、電子ペーパーはできるだけハードを取り除いた必要最小限のものにとどめなければならないのである。

図-6は電子ペーパーをネットワークに接続したときの構成を示した図である。電子ペーパーには、最低限のハードであるパネルを駆動させるドライバと電源回路が必要である。QR-LPDでは、ドライバはすでに薄膜・フレキシブル化されパネル上に搭載できることが示された。電源回路はどのようなものになるかを後に述べるが、現時点でペーパー電池も実用になっていることから、フレキシブル化も十分に可能である。また、ネットワークに接続するためには、通信チップと入力データを処理してドライバに送るコントローラチップが必要になる。これらのチップもドライバと同様に薄膜・フレキシブル化すればプラスチックパネル上に搭載できるであろう。これに加え、アプリケーションのシーンを広げるためには、タッチパネルなどの入力装置がぜひともほしいところである。現在の技術では、タッチパネルのためのハードが電子ペーパーにとって過剰負荷になる可能性があるが、搭載が困難な場合は簡単なスイッチでもよい。これらが、電子ペーパーをネットワークシステムに組み込んで使用する際の必要最小限の構成である。

これ以外にメモリ、CPU、デコーダ、ブラウザソフトなどのハード／ソフト機能は、搭載すれば処理が速く通信量を減らすことができるが、反面、それ自体の実装のため厚さが増すだけでなく、さらに電源供給のため電源回路が大規模になり、厚さ・重さが加算される結果となる。こうなれば従来のPC端末と同じとなり、電子ペー

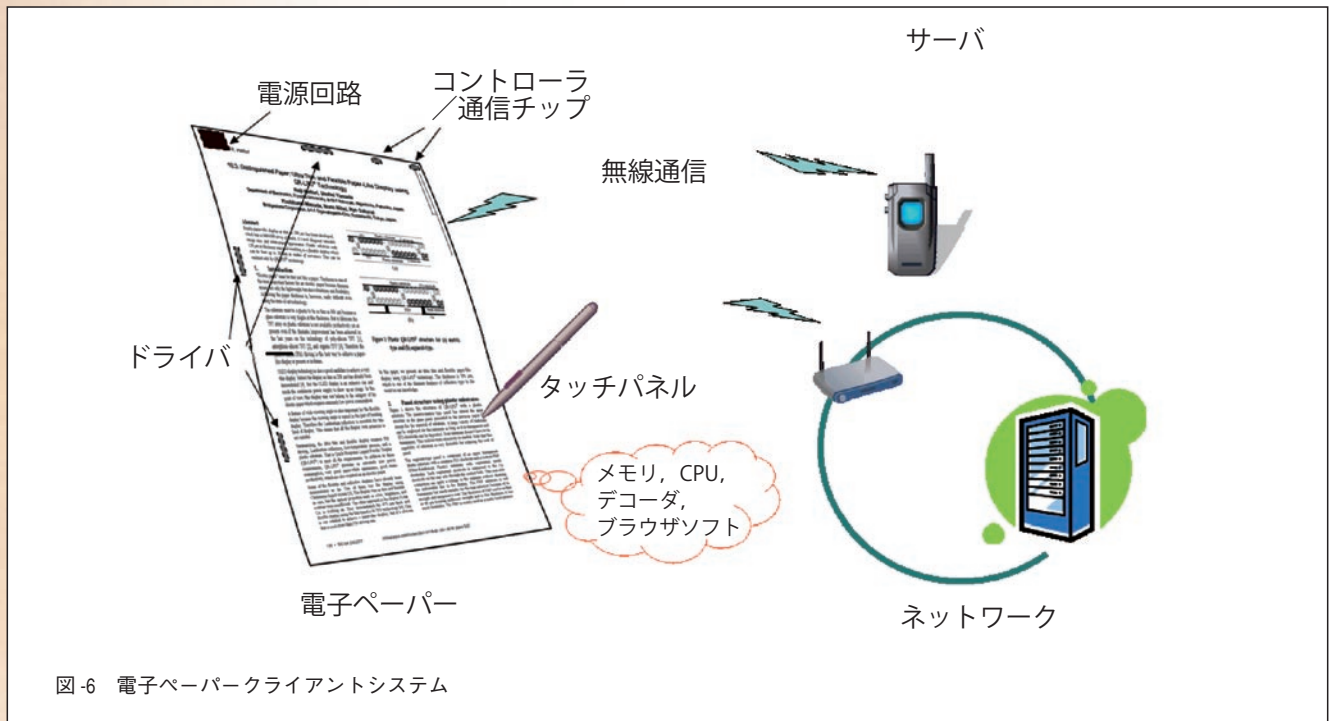


図-6 電子ペーパークライアントシステム

パーとしての差別化ができない。電子ペーパー側のハード/ソフトの機能を最小限にとどめ、残りをサーバ側に託す、それが最も電子ペーパーの特性を活かすネットワーク構成といえるであろう。

一方、既存のネットワークアーキテクチャの世界では、セキュリティの理由からシンクライアント/シンコンピューティングへの動きが盛んである。シンクライアントという観念は、できるだけサーバに処理を集中させクライアント側では最小限度にとどめるというものである。この観念は1990年代半ばに主にクライアントのコスト低減を目的に唱えられたものであるが、PCの高性能化・低価格化が怒涛のごとく進み、ごく最近までその普及は難しいものであった。しかし近年、情報セキュリティが強く求められるようになり、クライアント側に情報を持たないシンクライアントシステムが新たな価値を持って再登場を果たした。現状ではシンクライアントシステムは多くのグループから売り出され、その規格はさまざまである。

このように考えると、電子ペーパーのための最良のネットワークシステムはシンクライアントの観念と一致しており、シンクライアントの観念を究極的に推し進めたものといえる。つまり、電子ペーパーのためのネットワークシステムは、シンクライアントシステムを超えたものであり、我々はこれを“電子ペーパークライアントシステム”という新しい言葉を使って表したい。

電子ペーパークライアントシステムの特徴

この電子ペーパークライアントシステムは、シンクラ

イアントの特性をそのまま継承することができる。ここでシンクライアントから継承された特性を挙げると次のようになる。

- **高セキュリティ**：クライアントにデータを持たないため、大量のデータの流出を防ぐことができる。ただ、電子ペーパーの場合はパネルがメモリ性を持つため画像からの情報流失に注意しなければならない。
- **管理の容易性**：サーバでソフトウェアが実行され、クライアントには画像データのみが配信されることから、クライアントでの設定が不必要となり管理が容易となる。
- **高信頼性**：ハードが少なく故障率が低くなる。電子ペーパー自身の信頼性はこれからの開発課題であるが、ハードの装填数が少ないことは信頼性向上がしやすいことを意味する。
- **低維持コスト**：導入コストは高いが、システム管理が容易でハードの信頼性が高いため、維持コストが低い。
- **高拡張性**：サーバ側でシステム拡張に対応さえしていれば、クライアント側では何の作業も必要としない。ただ、無線交信可能な領域に電子ペーパーを持ち込むだけでシステムの拡張が可能である。
これに加え電子ペーパークライアントでは次のような特性が加わる。
- **低消費電力**：機能を極力サーバ側に移すことによりクライアント側のハードが軽くなり消費電力が小さくなる。
- **低コスト**：シンクライアントの場合は、サーバ側もユーザが購入すると考えなければならないため低価格を謳うことはできないが、電子ペーパークライアントの場合、シンクライアントとの端末価格だけを比較する

と、ハードの量が少ない分格段に低価格化できる。

- **高柔軟性・高発展性**：電子ペーパークライアントの形態は、電子棚札や電子案内板などの小型・簡単なものから電子ポスターや電子新聞などの大型・複雑なものまでさまざまであるが、クライアントの仕様がどのように変わろうともサーバのソフトを変えるだけで対応できる。今後、さまざまな形態で発展するであろう電子ペーパーに柔軟に対応できる。

このように電子ペーパークライアントシステムにはさまざまな利点が考えられるが、反面、クライアントのハードを極端に省くことにより次のような弊害が考えられる。

- **通信量の増大**：クライアント側でメモリを持たないとすれば、フォントデータも内蔵できず、フォントを画像データと同じように逐次送信しなければならない。また、CPUもデコーダも持たないとすれば、JPEGなどの圧縮技術も使えないので通信量の増大が懸念される。従来技術ではない電子ペーパー特有のデータ圧縮通信技術の開発が必要である。ただ、一度、画面のデータを送ってしまえばパネルがメモリ性を持っているため次からは変更部分だけの送信でよいということもいえる。
- **セキュリティ**：クライアント側でCPUを持たないため従来の手続きでの暗号化して送られたデータを端末で復号化するという作業が困難になるかもしれない。また、クライアントの識別においても複雑な手続きや演算を行うことは避けなければならない。電子ペーパーに搭載可能な暗号化や認証手続きの開発が望まれるところである。

以上、電子ペーパークライアントシステムにおける多くのメリットと新たな開発課題を挙げた。このネットワークシステムは、電子値札や電子案内板のような小さな画面規模のものから電子書籍や電子ポスターのような簡単な大きな画面規模のものまで、適応することができる。そして電子ペーパークライアントシステムの規格を早期に確立することが電子ペーパー普及のキーポイントとなると思われる。

ここで1つ注意してもらいたいことは、今まで述べてきたことはこの電子ペーパーがネットワークに接続された場合のアプリケーションであり、このほかにネットワークに接続せず使用する場合も考えられるということである。たとえば電子書籍としてのアプリケーションでデータをコンパクトメモリでやりとりする手法も考えられる。この場合、人々は本のコンテンツをコンパクトメモリで買うことになり、通信できないところでも使用でき、著作権の問題も解決しやすいという利点を持つ。

	紙媒体	電子ペーパー
情報保持のコスト	情報量小のとき優位	情報量大のとき優位
情報表示のコスト	情報量に比例	複数枚表示時は大(1枚でも表示可能)
場所を選ばない読み書き	容易	容易
電子的な取り扱い	困難	容易
媒体そのものの検索	困難(RFIDなど?)	容易
経年変化	ある	実質なし(バックアップ可能)
電力なしでの読み書き	容易	すでに表示されたものは容易
読み書き制限	鍵などの物理的管理が必要	表示されたもの以外は容易
一意の識別	難しい	IDにより可能

表-1 紙媒体と電子ペーパー媒体の比較

紙媒体と電子ペーパークライアントの比較

ここでは、紙と電子ペーパーとの記憶／表示媒体としての特性比較を行う。なお電子ペーパーは先に述べた電子ペーパークライアントとしてネットワークでサーバと接続されているものとする。その概要を表-1に示す。

■情報保持のコスト

まず、各媒体における情報保持のコストを考える。ここでは、表示内容にデータ量という量が与えられるとし、データ量あたりのコストを考える。紙の場合は、紙を増やせば増やすほど容量が増えるため、大雑把に考えれば以下の式で表すことができる。

$$\text{「紙による情報保持のコスト」} = \text{「1枚あたりのコスト} \times \text{データ量} / \text{1枚あたりのデータ量」}$$

また、電子ペーパーの場合は、サーバ側に巨大なストレージがあると仮定すれば、データ量が増えてもコストは一定である。

$$\text{「電子ペーパーによる情報保持のコスト」} = \text{「電子ペーパーのコスト」}$$

これを模式化すると図-7のようなグラフになる。つまり、あるデータ量までは紙の方が低コストだが、それ以上は電子ペーパーの方が低コストということである。交点は(電子ペーパーの値段)÷(紙の値段)枚で与えられる。

■情報表示のコスト

一方で、表示できるデータ量を増やすためにはどのく

らいコストがかかるかを考える。紙の場合、情報表示を増やしていく場合、紙の枚数を増やしていけばよい。したがって、

「紙による情報表示のコスト」
 =「1枚あたりのコスト」×「表示データ量」／「1枚あたりのデータ量」

となる。

一方、電子ペーパーの場合は紙と同様に電子ペーパーの枚数を増やして表示(複数枚で表示)する場合と、電子ペーパー1枚で表示を切り替えて表示(1枚で表示)する場合がある。前者の場合、前述の情報保持のようにストレージを増やしても、一度に表示できるデータ量は増えないので情報表示コストは

「電子ペーパーによる情報表示のコスト(複数枚で表示)」
 =「1ディスプレイあたりのコスト」×「表示データ量」
 ／「1画面あたりのデータ量」

となる。つまり、情報保持のコストとは対照的に、紙のほうが情報表示のコストは圧倒的に低いことになる。ただし、LCDなどのディスプレイでは1台の値段が電子ペーパーの何十倍以上となるため、複数枚表示は2枚程度が限界である。一方、後者の場合は

「電子ペーパーによる情報表示のコスト(1枚で表示)」
 =「1ディスプレイあたりのコスト」

となる。一般的には、「1枚あたりのコスト」<「1ディスプレイあたりのコスト」である。これを模式化すると、**図-8**のようになる。前節と同様、紙と電子ペーパー1枚での表示のコストの交点は(電子ペーパーの値段)÷(紙の値段)枚となる。

■場所を選ばない読み書き

上記の、情報保持のコストや一度に表示する情報のコストにおいて、コストを機器の重さと置き換えて考えると、同様に、あるデータ量までは紙や電子ペーパーのほうが軽量であり、表示データ量あたりの重さは紙や電子ペーパーのほうが軽量であるといえる。

つまり、紙や電子ペーパーの場合は、持ち歩きが比較的容易であるのに対し、計算機の場合はモバイルPCであっても比較的労力を伴うため、紙のほうがどこでも読み書きできるといえる。

近年では携帯電話のほうが紙よりも場所を選ばないという考えもあるが、この場合はデータ量あたりの重さにおいて携帯電話のほうが軽いということである。しかし依然として表示データ量あたりの重さは携帯電話のほうが重い。

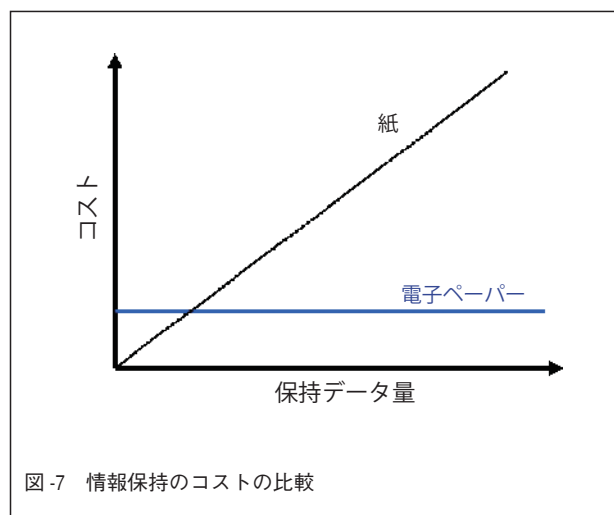


図-7 情報保持のコストの比較

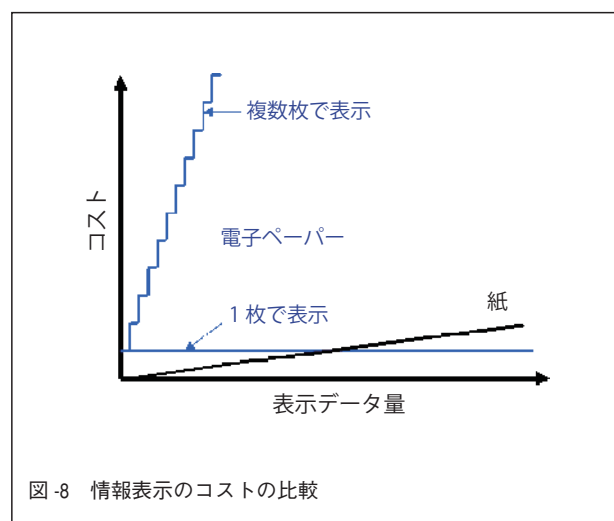


図-8 情報表示のコストの比較

■電子的な取り扱い

電子的な取り扱いについては当然、電子ペーパーのほうが得意である。これは以下のような処理を含む。

- 内容の複写
 - 通信による内容の送信
 - 内容の検索
 - 格納場所の検索
 - 内容の編集や加工
 - メタデータやフォントデータなどの付加情報の付帯
- 格納場所の検索とは、文書やファイルといった、内容の構成単位の見つけやすさという意味である。読者にも経験があるかもしれないが、紙の資料が紛失したということはしばしば起こり得る。一方、電子ペーパーの場合は、データの内容の検索と同じ手間で検索が可能である。

■経年変化

紙の場合は、紙の経年変化に伴い、内容も読みにくくなったりして劣化する。しかし電子ペーパーの場合は、上記の内容の複写が容易なことにより、バックアップを自動的に取ることで経年変化を回避することが可能である。

■電力なしでの読み書き

紙や電子ペーパーの場合は電力がなくても人間が読み書きすることが可能である。一方、計算機の場合は電力がなければ通常ディスプレイの表示は消えるため、読み書きはできない。

■読み書き制限

紙に表示される内容を読み書きできる人を制限しようと思えば、その紙を鍵つきのファイル棚に入れるなどして、物理的な管理をする必要がある。一方で電子ペーパーの場合は、電子的な権限管理に基づいた、高度な管理が可能である。

■一意の識別

文書やファイルなど、内容を構成する単位に一意の識別子をつけようとする、紙幣や証券が厳重な管理で行われるように、管理に非常に大きな労力がかかる。一方で電子ペーパーの場合も当然労力がかかるものの、URLやIPアドレスの例で分かるように比較的容易である。

電子ペーパークライアント実現への要求技術

このように電子ペーパークライアントシステムがユビキタス社会発展に大きく貢献すると考えられるが、そのシステムを実現するためには、さらにどのような技術的課題が残されているであろうか？

最小限度に抑えたハードによって電子ペーパーの消費電力は最小に抑えられるはずであるが、ここではその値が実際どの程度になるか定量的に検討する。また、この値によって電力供給方法が決まり、使用法・用途が決まってくるため、ここでは消費電力に的を絞るような技術開発が真の電子ペーパーの実現のために残されているかを検討する。

消費電力

電子ペーパーの消費電力を考えると大きく分けて、表示部分、入力部分、コントローラを含めた通信部分に分かれる。

まず、表示部の消費電力を考えよう。ここではブリヂストンが開発するQR-LPDにおける消費電力について考察する。なお、他の粒子移動型ディスプレイはTFTを必要とするアクティブマトリックス駆動であるが、パネル消費電力に関してはそう大きく差異はないと考えられる。

QR-LPDはバイステイブル性を有しているので消費電力は書き換え時のみ必要である。いったん、パネルに書き換えられると後は電力が要らない。これがこの種のディスプレイが超低消費電力であるという理由である。したがって、書き換え時の電力を求めることになるが、これも書き換えスピードによって変わってくる。すなわち、

パネル1回を書き換えるのに必要なエネルギー [J] が決まり、それを何秒で行うかによって電力 [W=J/s] が変化する。したがって、電池を使用する場合は電力に関係なく書き換え回数で制限され、太陽電池や電磁波送電の場合は書き換え回数でなく電力で制限されることになる。

QR-LPDの1ピクセルは容量性負荷と考えられ、基本的に書き換えには容量を駆動電圧まで充電するエネルギーと粒子を移動させるエネルギーが必要である。また、パッシブマトリックス駆動の場合、非選択のピクセルも重複して充放電することが必要である。さらに現在、コントラストを向上させるために数回書き込みを行っている。これらのことを考えて、5cm×10cm程度のディスプレイを1回書き換えるのに必要なエネルギーを求めると最大4mJのエネルギーが必要となる。また、1秒間で書き換えを行うとすると4mWの電力が必要であることになる。

一方、通信部分に必要な電力を考える。現在の存在する無線通信の規格で比較的高速で低消費電力なものにBluetoothがあるが、この出力は送受信時で約100mW、待機時で約1mW必要とされている。将来、Wibreeという新しい規格ではこれら値が1/10になるらしい。

ここで注意すべきことは表示部分の電力や通信部の送受信時の電力は常時必要でなく、表示時のみに必要となることである。つまり、電子ペーパーのアプリケーションによっては書き換えが日に1回とか月に1回といった頻度で行うだけでよい場合がある。電子棚札や電子ポスターなどのアプリケーションがこれにあたる。このような場合には、充電可能な2次電池と太陽電池や電磁波送電とを組み合わせ、待機時間に充電し、書き換え時に2次電池から電力供給するとすれば、電源システムを最もコンパクトに設計できるであろう。ただし、通信部の待機消費電力は絶えず必要であるので、電力供給能力はこれを上回らなければならない。これが電力供給の第1の目標値となり、待機消費電力の低減が重要技術となることが分かる。また、信号の送受信時での消費電力が他の電力に比べて桁違いに大きい。この電力を落とすことにより2次電池の容量を小さくでき書き換え回数を増やすことができる(図-9参照)。

電力供給技術

最近ではペーパー電池などが開発され、電池を搭載してもペーパー状の薄膜化が実現できる。電力供給システムとして電池のみの場合が最もシンプルでコストの面でも優位であるが、使用時間が短くなり電池交換の手間や費用で反対にコスト高となる。先に述べたように半永久的な使用を実現するためには2次電池と無線電力供給を組み合わせたシステムが

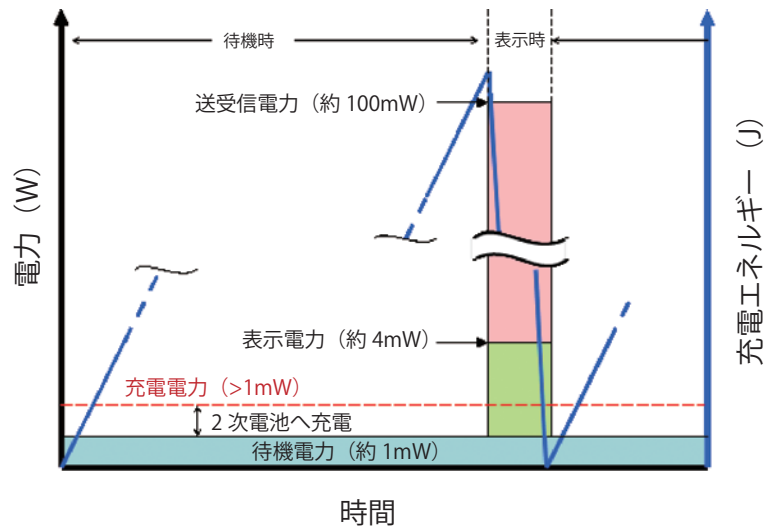


図-9 待機時と表示時の消費電力と充電エネルギー

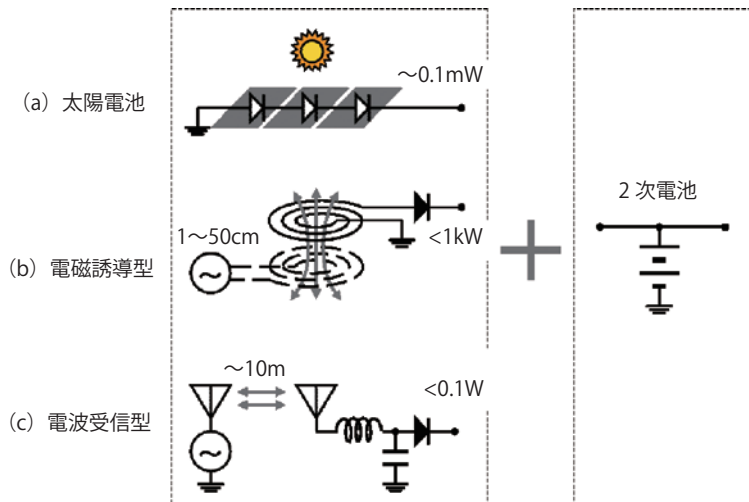


図-10 無線電力供給方法

最も理想的である。ここでは待機消費電力を供給し得る無線電力供給技術に何があるかを考えよう。

図-10は無線電力供給方法を模式的に表したものである。

第1の候補は太陽電池である。電子ペーパーは反射型で常に外光がある環境で使用される。したがって、必ず太陽電池も発電できる環境である。電子ペーパーはどのくらいの明るさで使用されるであろうか？ リビングでの明るさは150～300ルクス、オフィスは500～800ルクス、雨、曇り、晴天の屋外ではそれぞれ1,000、10,000、100,000ルクスと考えられる。電子ペーパーの応用は基本的に人の目に付きやすくなるように用いられ、暗い屋内でもライティングされて使われる。したがって、最低オフィス環境ぐらいの明るさ600ルクスで使われると考えてよいであろう。今、この明るさで4cm²程度の太陽

電池から得られる電力は約0.1mWと計算される。0.1mWという値は、現状のBluetoothチップの待機電力の1/10である。残念ながら現状では太陽電池で駆動することはできない。しかし待機電力が1/10以下となるならばサーバからのトリガで表示を変えることのできるアプリケーションに使えるシステムが構築できる。

第2の候補は電磁誘導型電力送電である。コードレス電話の充電やSUICAなどのICカードでの電力供給に使われている方法である。この場合、電力の上限は1,000W程度まで送ることができ、電力送電量としては十分であるが、送電できる距離は1cmから50cm程度に限られる。すなわち、電子ペーパーの近くには送電装置が必要であり、使用場所が制限される。ICカード的な応用では可能であるが、電子ペーパーとしての応用には距離的な問

題がある。

第3の候補は電波受信型である。これは電磁波によって電力を送り、アンテナで受信するものがあるが、送信する電波強度、送電距離、受け止めるアンテナの大きさと送電量が決まる。それぞれの大きさに制限があるが、100mWを10m程度まで送ることが可能といわれている。もしこれが実現されるのであれば電子ペーパーの応用には非常に適した技術となる。確かに放射する電波強度を上げればいくらでも電力を送れるに違いないが、電磁波を無制限に空中に発することは電波公害になりかねず、健康被害も懸念される。法的規制もされているためこれらの問題をいかにクリアするかが問題である。

通信

通信規格は通信距離、通信速度、消費電力を考え決めなければならない。通信距離と消費電力はどの規格でもトレードオフの関係があり、先に述べたように電子ペーパーは消費電力低減の要求が厳しいことから、どうしても通信距離は短距離にならざるを得ない。また、通信速度であるが、200ppi、Letterサイズ、2値表示の電子ペーパーが必要とする情報量は $2.2k \times 1.7k = 3.7$ (Mbit)となり、もし、Bluetooth(最高通信速度723.2kbps)を用いるとするならば、1画面の情報量を送信する時間は5秒以上を要する。この時間はアップデートを待つ時間として決して短い時間ではない。よって、高速通信であるBluetoothでさえ、十分な通信速度ではないことより、さらなる高速化もしくは何らかのデータ圧縮技術が必要となる。

入力技術

タッチパネルの技術は、電子ペーパークライアントを実現するためにはぜひ欲しい機能である。現在、タッチパネルの技術として、抵抗膜方式、静電容量方式、光学方式、表面弾性波方式、電磁誘導方式などがある。この中で電磁誘導方式はペン操作時で約30mA、待機時で1mAの消費電流が必要であるが、候補技術の中で最も消費電力が低い。さらにパネル裏面に設置することができ、反射率低下を招かない。そのため一番の有力候補であると考えられる。しかしながら、回路規模が大きくなりタッチパネルも高価なので価格が高くなるのが懸念される。一方、抵抗皮膜式は消費電流約50mA、透過率約80%であるが、価格面では優位である。消費電力の面では、いずれの方式もさらに一層の低減が望まれる。

まとめ

本稿では電子ペーパー技術の1つであるQR-LPDを中心にそのカラー化技術、フルフレキシブル技術を紹介し、それを利用した電子ペーパークライアントシステムの提案とその技術的課題を指摘した。電子ペーパーに向けて、「本当にその市場があるのか?」、「LCDで十分ではないか?」というネガティブな問いがよく投げかけられるが、これらの疑問は、本稿で示した理想的な電子ペーパーデバイスと究極的なシンククライアントシステムである電子ペーパークライアントシステムを完成させたならば完全に払拭するであろう。これら完成の技術課題は数多くあるが、どれも現在の技術で乗り越えられないものではなく、電子ペーパークライアントによってユビキタス社会の成熟する時代はもうすぐそこまで来ていると思われる。

謝辞 本稿を作成するにあたり、QR-LPDの写真の使用および技術紹介に同意いただきましたブリヂストン(株)様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 太田勲夫, 特公昭 50-15115.
- 2) <http://www.e-ink.com/>
- 3) <http://www.sipix.com/>
- 4) Hattori, R., Yamada, S., Masuda, Y. and Nihei, N.: Novel Type of Bistable Reflective Display Using Quick Response Liquid Powder, Proceeding of Society for Information Display, pp.846-849 (2003).
- 5) Hattori, R., Yamada, S., Masuda, Y., Nihei, N. and Sakurai, R.: Ultra Thin and Flexible Paper-like Display Using QR-LPD Technology, Proceeding of Society for Information Display, pp.136-139 (2004).
- 6) Sakurai, R., Ono, S., Kita, S. and Masuda, Y. and Hattori, R.: Color and Flexible Electronic Paper Display Using QR-LPD Technology, Proceeding of Society for Information Display, pp.1922-1925 (2006).
- 7) Hattori, R., Asakawa, M., Masuda, Y., Nihei, N., Yokoo, A., Yamada, S. and Tanuma, I.: Passive-Matrix Flexible Electronic Paper Using Quick-Response Liquid Powder Display (QR-LPD) Technology and Custom Driver Circuits, 2007 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers, Vol.50, pp.74-75 (ISSCC 2007).

(平成19年7月2日受付)

■ 服部 励治: hattori@ed.kyushu-u.ac.jp

九州大学大学院システム情報科学研究科電子デバイス工学部門准教授。昭和63年大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻前期課程修了。博士(工学)。ディスプレイ新技術の研究に従事。SID, IEEE, 電子情報通信学会, 応用物理学会, 有機EL討論会, 各会員。

■ 井上 創造(正会員): sozo@lib.kyushu-u.ac.jp

九州大学附属図書館研究開発室准教授。平成14年九州大学大学院システム情報科学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。データベースおよびRFID情報システム研究に従事。IEEE, ACM各会員, 日本データベース学会正会員。

注) QR-LPDはブリヂストン(株)の登録商標です。