

Polychrome Paper Computing: 機能性インクを用いた多色刷りによる ペーパー・コンピューティング

辻航平[†] 脇田玲[†]

我々は紙とコンピュータをシームレスに融合する新しい技術 Polychrome Paper Computing (PPC) を提案する。PPC は機能性インクを用いた多色刷りによって紙の特性を損なうことなく色彩を制御することを可能にする。本稿では、PPC の詳細とそのアプリケーションシナリオ、及びその評価について報告する。PPC は既存の紙を拡張する技術であると同時に、紙に蓄積された文化とコンピュータの融合を促進させることが期待出来る。

Polychrome Paper Computing: A Dynamic Color-generating Technology Using Printing Technique and Functional Inks

Kohei Tsuji[†] Akira Wakita[†]

In this paper, we present our novel paper computing technique called Polychrome Paper Computing which enables dynamic color change without losing thin soft character of paper. Focusing on polychrome printing techniques used in traditional paper works such as Ukiyo-e (pictures of the floating world), we have developed a multilayered structure composed of normal inks and functional inks. The technology makes it possible to generate interactive paper works that can utilize both expressions and techniques of paper human has developed. We discuss related work, the underlying concepts behind Polychrome Paper Computing and engineering details. We then describe Anabiosis, an interactive pictorial artwork based on Polychrome Paper Computing. We detail evaluations of Anabiosis and discuss its results.

1. はじめに

紙は我々の歴史において重要な役割を果たしているメディアであり、最も利用されているメディアである。フランスのメディア理論メディアオロジーでは、物理的には非常に弱い材料である紙が、人間の記憶を支え、紙幣として信用を付与され、紙に書かれた文字はイデオロギとなり革命を起こす力を持ち、人間の美的観念を表現する材料になることを指摘している[1]。更に、日本において紙は美しさを創出する役割を果たして来たメディアである。古来より襖、障子、屏風といった紙で作られた間仕切りによって空間を定義し、その表面に絵を描くことで環境にとけ込んだ美しい芸術を生み出した。同時に、紙の質感は日本人の表現の豊かさを醸成した。例えば、書道において、墨のにじみ、かすれ、ぼかしは紙の質感を利用して作り出される技法であると言える。このように、紙は我々にとって美しさを引き出してくれるメディアであり、その役割を未来へ継承することは人類の文化において重要な価値がある。

本研究では、紙とコンピューティングをシームレスに融合する新しい技術である Polychrome Paper Computing (以下、PPC) を提案する。PPC を用いることにより、紙上のオブジェクトに対し色彩変化やアニメーションなど動きのある表現が可能になる。

PPC は2つの機能より構成される。紙上のオブジェクトに対し色彩変化を可能にする色彩制御機能、紙上のオブジェクトに対し出現と消滅を可能にする表示制御機能である。そして、銅箔テープの静電容量センサーを紙に添付することにより、インタラクティブに紙上のオブジェクトを操作することが可能になる。

既存の電子部品を紙に直接埋め込む従来のペーパー・コンピューティングとは異なり、PPC は機能性インクを用いた多色刷りにより、紙の薄く柔軟な特性や質感を失うことなくコンピュータによる操作を可能にしている。同時に、既存のペーパー・コンピューティングが着目することのなかった、コンピュータを利用した紙上での表現やその手法を確立することが期待出来る。

図1にある Anabiosis は PPC を利用して作られたインタラクティブな絵画作品であり、鑑賞者が紙に描かれた蝶に触れることで、モノクロの蝶が鮮やかな色彩を帯びた蝶に変化する。我々は、試作したアプリケーションを元に展示による評価を行った。これにより、PPC が既存の紙では体験出来なかったインタラクション、エモーショナルな色彩表現、視覚的エンターテインメントを提供する技術であることが判明した。今後、紙のアフォーダンスに則したアプリケーションへの応用が可能な他、紙に蓄積された文化とコンピューティングとの融合を促進させることが期待出来る。

[†] 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University



図 1 Anabiosis

2. 関連研究

本節では関連研究として電子ペーパーや紙とプロジェクションを利用したインターフェイスについて述べる。また、近年注目を集めるペーパー・コンピューティングについても述べる。

2.1 電子ペーパー

紙のように薄型で変形可能な性質でありながら精細な静止画を表示することが可能なメディアとして電子ペーパー[2]が挙げられる。紙の視認性や携帯性という長所を保持し、表示内容を電気制御によって書き換えられるため、環境保護の観点からも注目を集めている。電子ブックやサイネージなどに利用が期待されている一方で、紙の質感は実現されていない点である[3]。紙の質感は人間が生理的・心理的に紙との親和性を感じるための重要な要素であり、そのテクスチャから我々は多くの触覚情報を受け取っている。本研究が提案する PPC は既存の紙を使用するため、紙の質感を保持し、印刷技術など紙に付随する既存の技術を継承しつつ、コンピューティングとの融合を促進することが期待出来る。

2.2 紙とプロジェクション

紙に対しプロジェクションを行うことで表示内容を変化させ、紙にディスプレイとしての機能を持たせる研究は数多く提案されている。紙をディスプレイとして使用した初めての研究として DigitalDesk[4]が挙げられる。プロジェクションによるテクスチャの投影とカメラによるユーザーの入力検知により紙に計算機の役割を持たせている。PaperWindows[5]や PaperLens[6]は紙にマーカーを添付し、プロジェクションにより映

像をマッピングすることで、紙をインターフェイスとして利用している。これらの研究はプロジェクターが存在する環境下において、紙の新しいインターフェイスとしての可能性を示している。我々の提案する PPC は、これらの研究が提案するデジタルなアプローチとは異なり、紙そのものに電気制御可能な構造を印刷するフィジカルなアプローチであると言える。

2.3 ペーパー・コンピューティング

紙自体にマイコンや LED などの電子部品を紙に添付し、インタラクティブに情報発信をする紙を作り出すペーパー・コンピューティングという分野が注目を集めている。Buechley[7]らは、導電性インクを使用し、紙上で回路を描く方法を提案した。回路を模様として描くことにより装飾の役割を付加している。この技術を用いたアプリケーションとしては、Electroic Popables[8]というインタラクティブな飛び出す絵本が提案されている。Coelho[9]らは紙漉しを利用し、導電性繊維を回路として紙の中に埋め込み LED を点灯させるなどのインタラクションを Pulp-Based Computing という手法によって実現している。Gross[10]らは、紙の造形的性質に注目し、ソフトウェアによって形状をデザインし、その展開図を印刷して電子部品と組み合わせることによって paper robot, paper lamp, paper speaker などのインタラクティブな立体物を提案している。

これらの研究は紙の機能を拡張し、ペーパー・コンピューティングという新しい分野を確立した。一方で、マイコンや LED など既存の電子部品を直接紙に添付することは、コンピュータの存在を意識させてしまう。PPC は既存のペーパー・コンピューティングとは異なり、紙の特性や質感を喪失せずにコンピューティングと融合するよりシームレスな融合を目標としている。つまり、紙が「透明なインターフェイス」[11]を保持したマテリアルに進化することを目指している。

3. Polychrome Paper Computing

PPC は紙とコンピューティングをシームレスに融合する新しい発色技術である。機能性インクを用いた多色刷りにより、紙の薄く柔軟な特性を保持しつつ紙上のオブジェクトに対しコンピュータによる操作を可能にしている。本来、紙上の文字や絵は変化することではなく、紙は静的な情報のみを扱う。しかし、紙とコンピューティングが融合することにより、既存の紙では実現出来なかった動きのある表現が可能になることや新しいインタラクションをユーザーに与えることが期待出来る。

我々は紙上のオブジェクトをコンピュータにより操作するために色彩制御機能と表示制御機能という2つの機能を開発した。

色彩制御機能は紙上のオブジェクトに対し、色彩変化をすることを可能にする。RGB の色彩変化が可能であり、無色、赤、緑、青の順で可逆変化をすることが可能

である．表示制御機能は紙上のオブジェクトに対し，出現と消滅という 2 通りの情報表示を行うことが可能になる．また，紙上に複数箇所用いることによりアニメーションを実現することが可能になる．

4. 実装

polychrome とは「多色刷りの」という意味である．多色刷りは浮世絵の制作に用いられ，異なる色のインクを階層的に印刷することによって一枚の美しい浮世絵が完成する．PPC にとって多色刷りは，様々な機能性インクを階層的に印刷するために適した手法であった．これにより，コンピュータの存在を意識させずに入出力部を紙に埋め込むことが可能になった．以下では，センサー，色彩制御機能，表示制御機能，それぞれの仕組みを解説する．

4.1 センサー

紙の裏面には銅箔テープで制作した静電容量センサーを添付している．図 2 の様に添付されたセンサーにより，人の接触を感知して電気制御を行っている．PPC においては，銅ペーストを印刷することによりセンサーを紙へ印刷することが可能であるが，本稿ではプロトタイプ段階として銅箔テープを用いている．銅箔テープは銅箔から作られており，裏面に粘着性があるため紙に貼ることが可能である．銅箔テープを用いることにより，銅ペーストで印刷したセンサーと同等の機能を保持し，紙の薄い特性を保持したままセンサーを紙へ埋め込んでいる．

4.2 色彩制御機能

色彩制御機能は合計 5 層のレイヤー構造によって実現されている．図 3 が示すように，紙の表面には装飾層と変色層と黒層の 3 層を印刷し，裏面には発熱層と回路層の 2 層が印刷されている．以下では，各層の機能説明を行う．

装飾層は紙上全体の装飾を担う層である．この層には機能性インクは用いられておらず，インクジェットプリンターによる印刷が可能である．我々の実験により，最前面に印刷することでより美しい色彩制御機能の表現が可能であることを発見した．

変色層は実際の変色が発生する層であり，液晶インクという熱によって色彩が変化する現象であるサーモクロミズムを実現した機能性インクを使用している．インクの色は，温度が上昇するにつれて無色，赤，緑，青へと可逆的に変化する．我々は 28℃ から 32℃ の温度域において色彩変化が起こる調合した液晶インクを使用した．

黒層は液晶インクの発色を可視化する役割を担っている．本研究で使用する液晶インクは，コレステリック液晶をマイクロカプセル化し，溶剤と攪拌したものである．温度が上昇するとマイクロカプセル化されているコレステリック液晶の傾きが変化し，液晶の傾きが可視光の領域にあれば美しい色彩を見ることが出来る．従って，この色の変化は，液晶自身の色が変わったからではなく，黒で塗られた上でのみ発色する．

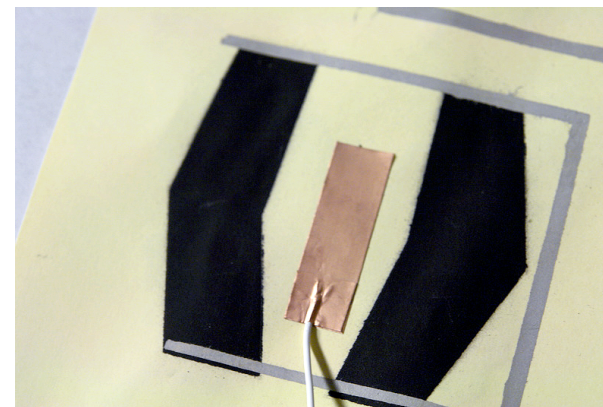


図 2 紙の裏面．中央にセンサーが添付されている．黒い部分はカーボンペーストによる発熱層，銀色部分は銀ペーストによる回路層．

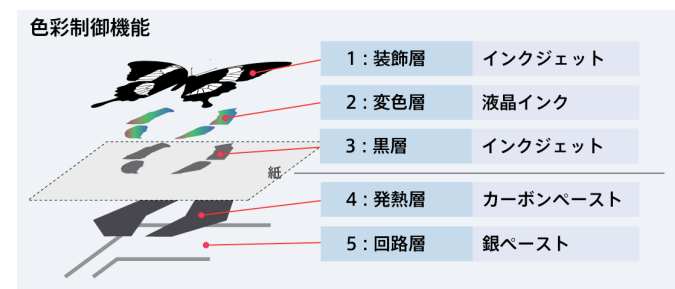


図 3 色彩制御機能のレイヤー構造

発熱層は導電性インクであるカーボンペーストを使用し実現している．発熱する仕組みを紙で実現する際，ニクロム線などの既存の発熱体を紙へ埋め込むことは紙の持つ薄い特性を喪失してしまう．実験の結果，発熱材料としてカーボンペースト，抵抗調整インクを用いることで紙の特性を失わずに発熱体を作り出せることを発見した．カーボンペーストに対し 5%にあたる量の抵抗調整インクを加えることにより，抵抗値が約 2 倍となる．カーボンペーストと抵抗調整インクを調合することにより，任意の抵抗値に調整することが可能になる．

回路層は銀ペーストを用いて回路や電極の機能を実現している．銀ペーストは他の導電性ペーストより抵抗値が低いいため回路を印刷する役割に適している．

4.3 表示制御機能

表示制御機能は合計4層のレイヤー構造によって実現されている。図4が示すように、紙の表面には、消色層と下絵の2層を印刷し、裏面には色彩制御機能と同様の発熱層と回路層の2層が印刷されている。

消色層はブラック感温インクという機能性インクによって第2層目の下絵を隠蔽する役割を担っている。ブラック感温インクは、液晶インクと同様のサーモクロミズムを実現した機能性インクである。設定温度を境に可逆的に黒色から無色へ切り換えられるため、設定温度より低い状態では図柄を隠蔽することが可能である。本研究で使用するブラック感温インクは、32℃に達すると黒から無色へと色彩変化する。これにより、隠蔽していた下絵が浮き出る仕組みとなっている。裏面は色彩制御機能と同様のカーボンペーストによって発熱を実現し、銀ペーストによって回路を実現している。

4.4 制御モジュール

紙の裏面に印刷された発熱層とセンサーは Arduino (Duemilanove) [12]でコントロールしている。Arduino の PWM 出力ポートにセンサーからの入力を受け付け接触の検知を行っている。発熱層の制御には、発熱体に印加する 15V の AC 電源をダーリントンシンクドライバ (TD62064APG) を介してコントロールしている。ひとつのダーリントンシンクドライバで 4ch 接続可能であり、Arduino からの出力ポートからの信号を制御ポートが受け取ることにより制御を行っている。

5. アプリケーション

我々は PPC を利用したアプリケーションとして、鑑賞者が絵画に触れることにより、その表示内容が変化するインタラクティブな絵画作品 Anabiosis を制作した。以下では Anabiosis について解説する。

5.1 Anabiosis

ドイツの昆虫学者 Adalbert Seitz (1860-1938) は、全 16 巻からなる図鑑 The Macrolepidoptera of the World[13]を編纂した。この図鑑は世界中の蝶や蛾のリトグラフが収録されており、Seitz の手によって生み出された蝶達は、まさに紙上で生きているかの様な美しさを有している。我々は、Seitz が紙に描いた美しい蝶に対し、蝶の美しさを損なうことなく動的な色彩変化を付与することを目的に Anabiosis を制作した。図1が示すように、Anabiosis は、何の変哲もないモノクロの蝶の絵画であり、コンピュータの存在を感じさせない。しかし、鑑賞者が絵に触れることにより既存の紙では実現出来ない動的な表現が広がる。Anabiosis は3種類の異なる表現が埋め込まれた絵画より構成される。鮮やかな蝶に変化する色彩表現 (図6)、シルエットに蝶の説明が現れるインストラクション (図7)、蝶のアニメーション (図8) である。

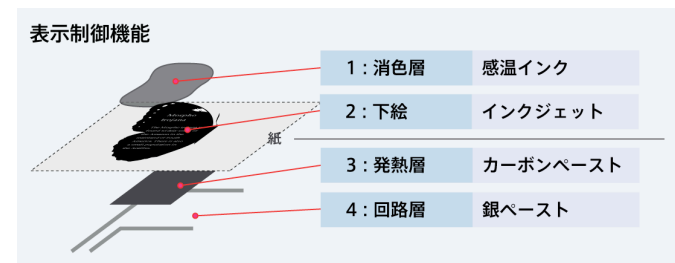


図4 表示制御機能のレイヤー構造

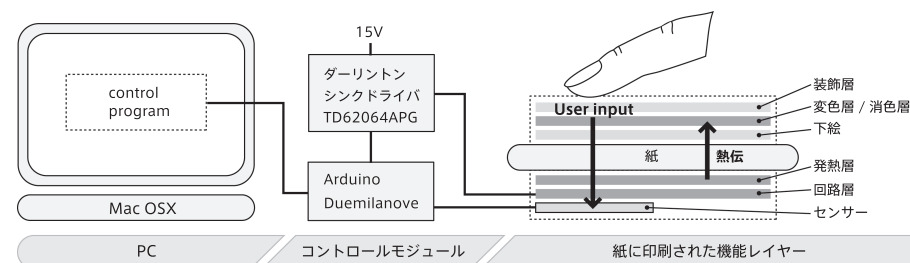


図5 システム図

一つ目の色彩表現は、鑑賞者が紙上の蝶に触れることにより、モノクロの蝶から鮮やかな色彩を帯びた蝶へ変化する絵画である。蝶の羽の部分に色彩制御機能が用いられており、入力を検知すると発熱層に通電し、羽の色彩が RGB の可逆変化を起す仕組みになっている。モノクロの蝶が色彩を帯びる瞬間は、鑑賞者の生命が紙上の蝶に分け与えられたかの様である。

二つ目のインストラクションは、鑑賞者が蝶に触れると該当する蝶の詳細が表示される。表示制御機能を利用して制作されており、入力が検知されると発熱層に通電し、消色層によって隠蔽されている蝶の詳細が出現する仕組みになっている。図6がその様子であり、蝶の影から浮き上がる文字は紙上での動的なタイポグラフィーを実現している。

最後のアニメーションは、人から生命を与えられた蝶が浮遊するシーンを表現した絵画である。5コマから構成されるアニメーションの1コマ毎に表示制御機能を適応し、順番に通電させることでアニメーションを実現している。鑑賞者が暗闇に咲く一輪の薔薇に触れると、蝶が浮遊するアニメーションが出現する。



図 6 モノクロの蝶に鮮やかな色彩が現れる様子.



図 7 シルエットに蝶の説明が現れる様子.

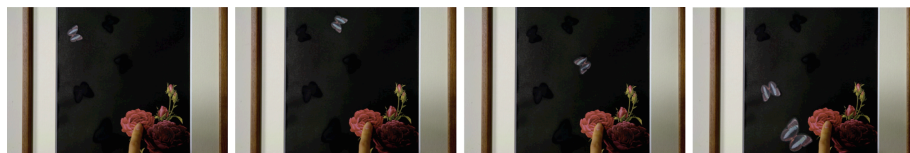


図 8 蝶のアニメーションが表示される様子.

6. 展示による Anabiosis の評価

6.1 手法

我々は評価・コメント取得のために、2つの展示会[a]において ANABIOSIS のデモ展示を行った(図9)。鑑賞者には、「紙の上の蝶に触れてみてください。」と声を掛け、紙にコンピュータが介在している情報を予め与えずに体験してもらった。2つの展示会で展示したことにより職業、年齢に片寄りなく、多くの方々に ANABIOSIS を体験してもらいコメントを取得した。

6.2 鑑賞者の反応

蝶の色彩変化が起こると同時に、多くの人が驚きの歓声をあげた。鑑賞者の中でも特に女性からの興味の高さが伺えた。はじめに「わっ、変わった!」という驚きの反

応があり、その後、「きれい」という発言が見られた。驚きから美しさへ感嘆が変化する2段階のリアクションが得られた。また、鑑賞者の多くから「不思議」「面白い」「魔法みたい」という発言を取得した。どのようなところが不思議なのか理由を質問したところ、「紙媒体なのに絵が変化する」、「触っている場所とは別の場所の色が変化する」という回答が得られた。「魔法みたい」とコメントした体験者にその理由を質問したところ、「通常、紙を押すことにより、破れる、へこむという現象が起こるのに対し、色が変わる予想とは反する現象が起きたことにより魔法みたいな感覚を味わった」という回答が得られた。

鑑賞者から「じんわりと広がる色彩がきれい」「色の変化が美しい」というコメントを多く取得した。また、蝶の羽の色が本物の様で綺麗というコメントや、色彩が徐々に現れると同時に昆虫の気持ち悪さを覚えた人もいた。この現象は液晶インクを用いることにより、モルフォ蝶を代表する昆虫の構造色の再現性を向上させたためであると推測できる。

Anabiosis を体験した人が来場している知り合いを連れて来て体験させるという行動が多く見られた。そして、既に体験した鑑賞者が連れて来た知り合いに対し自ら「蝶に触れてみて」と説明する行動も見られた。これは、Anabiosis を体験した時の驚きを共有したいという行動であると推測できる。また、体験している様子を見て実際に絵画に触りにくる鑑賞者も多く見られた。この行動は、自分にも反応するのか確かめたい欲求と同様の体験をしてみたい欲求があったためであると考えられる。

数名のインタラクションの専門家からは、絵画に触るというインタラクションの不自然性を指摘された。実際に、絵画のどこに触ればいいのか分からない鑑賞者もいた。また、絵画には PPC で色が変わる蝶の他に装飾のための蝶も描かれているおり、間違えて装飾の蝶に触る鑑賞者もいた。

6.3 Anabiosis についての考察

鑑賞者は Anabiosis を紙に描かれた蝶の絵画と認識したことがわかる。しかし、鑑賞者が保持していた紙の認識を逸脱した結果が現れたため、「不思議」「魔法みたい」という既存の紙では体験出来ない全く新しいインタラクションを作り出した。また、既存の紙では実現できない動きのあるエモーショナルな色彩表現が可能になることが判明した。そして、鑑賞者は PPC がつくり出す視覚的エンターテインメントを積極的に共有しようとするのが判明した。一方で、今後はインプットとアプリケーションが対応した自然なインタラクションのデザインが課題となった。例えば、絵本などの鑑賞者が紙に対して自然に触るような文化に則った、アプリケーションのデザインが期待される。

[a] 前者のイベント: 慶應義塾大学 SFC 研究所主催 Open Research Forum 2010 (2010 年 11 月 22 日(月)から 23 日(火))。後者のイベント: 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科 XD プログラム主催 XD eXhibition 2011 (2011 年 5 月 7 日(土)から 8 日(日))。



図 9 展示会での鑑賞者の様子. 左: Open Research Forum 2010(ORF)での展示の様子. 右: XD eXhibition での展示の様子. ORF とは異なり, 子供の鑑賞者も多数見られた.

7. 今後の課題

この節では評価により明らかになった PPC の今後の課題について述べる.

7.1 外気温と人体の接触による影響

液晶インクと感温インクは色彩変化領域の設定温度により外気温の影響を受ける. そのため, 高温な環境や人体の接触によって意図しない変色が発生してしまう可能性がある. 本研究で使用した液晶インクと感温インクの色彩変化領域は 30 °C 前後のため, 人体による接触や夏場などの高温環境において色彩変化が発生してしまう. 解決手段として, 外気温とインクの設定温度の差を広げることにより変色を回避することが可能になる. 例えば, インクの色彩変化領域の設定温度を 40 °C 以上にすることで, 高温な環境や人体の接触による変色を防止することが期待できる.

7.2 液晶インクと感温インクの制限

液晶インクと感温インクの仕様により, 両インクの印刷可能箇所や表現は制限される. 例えば, 液晶インクは下層に黒層を必要としている. また, 感温インクは有色から無色という変色の方向が決まっている. このような, 利用上の制限は, 紙上のオブジェクトに動的な表現を与える上で障壁となってしまう場合がある. しかし, インクの組合せと発想次第で, 美しい表現に昇華できるものと我々は考えている. 例えば, Anabiosis は, 液晶インクが保持する構造色の美しさを蝶の構造色と合わせることで鑑賞者にリアリティーを与えることが可能になった. また, 異なる機能性インクを用いることや印刷順序の組合せにより新たな表現の開発が期待できる.

8. おわりに

本研究では, 機能性インクを用いた多色刷りにより, 紙の薄く柔軟な特性や質感を失うことなく紙上のオブジェクトに対し色彩変化やアニメーションなど動きのある表現が可能になる Polychrome Paper Computing を提案した. そして, この技術を利用したインタラクティブな絵画作品 Anabiosis の 3 つのアプリケーションの実装を行った. 実装したアプリケーションを展示することで PPC の評価を行った. その結果, 既存の紙では体験できない新しいインタラクション, エモーショナルな色彩表現, 視覚的エンターテインメントを提供する技術であることが判明した. 紙のアフォーダンスに則したアプリケーションへの応用や, 今後の課題で述べたようなシナリオに従い改良を行うことで, 紙に蓄積された文化とコンピューティングがシームレスに融合することを促進する技術への発展が期待できる.

参考文献

- 1) 尾鍋史彦他: 紙の文化; 朝倉書店, 592pp (2006).
- 2) E-ink, <http://www.eink.com/>
- 3) 尾鍋史彦他: 電子ペーパー実用化最前線; エヌ・ティー・エス, 353pp (2005).
- 4) Wellner, P.: The DigitalDesk calculator: tangible manipulation on a desk top display; Proceedings of the 4th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp. 27-33, 1991
- 5) Holman, D., Vertegaal, R., Altosaar, M., Troje, N., Johns, D.: Paper windows: interaction techniques for digital paper; Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, 2005
- 6) Spindler, M., Stellmach, S., Dachelt, R.: PaperLens: advanced magic lens interaction above the tabletop; Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, 2009
- 7) Buechley, L., Hendrix, S., and Eisenberg, M.: Paper, Paint, and Programs: First Steps Toward the Computational Sketchbook; In Proceedings of Tangible and Embedded Interaction (TEI), pp. 9-12 (2009).
- 8) Qi, J. and Buechley, L.: Electronic popables: exploring paper-based computing through an interactive pop-up book; Tangible and Embedded Interaction (TEI), pp. 121-128 (2010).
- 9) Coelho, M., Hall, L., Berzowska, J. and Maes, P.: Pulp-Based Computing: A Framework for Building Computers Out of Paper; The 9th International Conference on Ubiquitous Computing (Ubicomp), (2007).
- 10) Greg Saul, Cheng Xu, Mark D. Gross: Interactive paper devices: end-user design & fabrication; Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction (TEI), pp. 205-212 (2010).
- 11) Ishii, H., Ullmer, B.: Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms; Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, p.234-241,1997
- 12) Arduino, <http://www.arduino.cc/>
- 13) Adalbert Seitz The Macrolepidoptera of the World, <http://www.pteronworld.com/topics/classification/seitz.html>