

論文内容要旨 (和文)

平成27年度入学 大学院博士後期課程

有機材料工学専攻 有機デバイス分野

氏名 吉田 小波



論文題目

Fundamental Study of Soft Blanket Gravure Printing Technology

for Three-Dimensional Object Surfaces

(3次元立体物表面へのソフトブランケットグラビア印刷技術に関する基礎研究)

印刷法を用いて各種電子デバイスを作製する「プリンテッドエレクトロニクス (PE)」技術は、従来の無機半導体製造プロセスと異なり、高速で大面積にデバイスを製造できるとして、PE技術に適した各種印刷法が研究されている。さらに印刷法は、プラスチック、布、紙等、パターンニング可能な対象物の選択範囲が広い。しかしながら、従来の印刷法によるパターンニングは全て「平面」に限定されていた。そこで本研究は、曲面・立体物表面等、既に存在する物体の表面に機能性材料を印刷することで電子デバイスを作製する技術を提案、「3D-プリンテッドエレクトロニクス (3D-PE)」技術と名づけて研究を開始した。

本研究では、3D-PE技術を実現する印刷技術の一つとして、グラビアオフセット印刷に、非常に厚くて柔らかいオフセットローラ (これを「ソフトブランケット」と命名) を適用した「ソフトブランケットグラビア (SBG) 印刷技術」を新規に提案し、曲面に対する印刷技術に関する基礎研究を行った。また、SBG印刷技術は、ソフトブランケットを用いることで、曲面に対する微細パターンの印刷が可能であるのみならず、従来のグラビアオフセット印刷では困難であった条件下に於いても印刷が可能であることが明らかになったため、本研究は、SBG印刷技術が持つ優れた印刷特性のメカニズムを解明することも目的の一つとした。

本論文は、下記の6章により構成されている。

第1章 序論

本章では、PE技術に使用されてきた各種印刷法を俯瞰し、3D-PE技術を提案するに至った背景、およびそれを実現するために提案した印刷技術のうちの1つであるSBG印刷技術の基本構成について述べた。SBG印刷は、従来のグラビアオフセット印刷と同じく、凹版へのインクの「充填」、凹版からブランケットへのインクの「受理」、ブランケットから印刷対象物へのインクの「転写」により行われるが、転写時に、ソフトブランケットが印刷対象物の形状に合わせて変形することで曲面に対して印刷することが出来ることを特徴とする。

第2章 曲面に追従可能な機能性材料「銀ナノ粒子・銀ナノワイヤ混合導電材料」の研究

本章では、SBG印刷技術に適用する機能性材料の一つとして、低温焼成で低い抵抗率を発現し、かつ曲げに対する強い耐性を有する、銀ナノ粒子・銀ナノワイヤ混合導電材料を開発した。混合前の銀ナノ粒子、および銀ナノワイヤ単体での抵抗率、曲げ実験、電子顕微鏡観察などから、常温での導電性および曲げ耐性を有する銀ナノワイヤが、銀ナノ粒子に対して少量混合されることにより、混合導電材料は低温焼成で抵抗が発現し、曲げ耐性が強化されると結論づけた。強い曲げ耐性を有する混合導電性材料は、印刷時に変形を伴うSBG印刷に最適な材料である。

第3章 ソフトブランケットグラビア印刷技術を用いた曲面への印刷

本章では、まず、平面基板を用いてSBG印刷の印刷圧力および印刷速度依存性から最適な印刷条件を求めた。そして、その平面における最適印刷条件を用いて、様々な曲面形状を有する物体に対して、様々なパターンを印刷することに成功した。また、立体物上に銀配線を印刷後、ICやLEDを実装し、印刷した銀配線がICおよびLEDの駆動に耐えうる配線として機能することを実証した。

第4章 ソフトブランケットグラビア印刷技術の特殊な印刷特性

SBG印刷は、通常のグラビアオフセット印刷では困難であった条件下に於いても印刷可能であることを見出した。例えば、通常、版深 $10\mu\text{m}$ で使用される凹版を、 $20\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ と深くすると、線幅は濡れ広がることなく、銀配線高さは、 $2.5\mu\text{m}$ から、 $5.0\mu\text{m}$ 、 $7.5\mu\text{m}$ と線形に増加した。また、銀インクの粘度を、通常のグラビアオフセット印刷に用いられるインクの10分の1まで希釈しても銀配線を印刷可能であることが明らかになった。ソフトブランケットは、非常に柔らかくポリジメチルシロキサン (PDMS) を用いて作製されていることから、SBG印刷の特殊な印刷特性は、インクに含有される溶媒がソフトブランケットによく吸収されるためではないかと推論づけた。

第5章 ソフトブランケットグラビア印刷技術が持つ特殊な印刷特性のメカニズム解明

前章で見出したSBG印刷の特殊な印刷特性の限界を明らかにするべく、版幅 $50\mu\text{m}$ 、版深 $10\sim 100\mu\text{m}$ の版を用いて印刷した銀配線高さの版深依存性を求めた。その結果、SBG印刷では、版深が $10\sim 40\mu\text{m}$ までの間は、印刷された銀配線の高さが線形に増加し、版深が $50\mu\text{m}$ 以上ではほぼ飽和することが明らかになった。インクに含まれる溶媒を最適化し、版深 $50\mu\text{m}$ 以上の版を用いることで、 $11\mu\text{m}$ 以上の高さを持つ銀配線を版幅通りに（濡れ広がることなく）印刷できること発見した。さらに市販の銀インク及び版深 $10\mu\text{m}$ の版を用いて繰り返し印刷を行ったところ、100回以上の連続印刷が可能であることを明らかにした。

SBG印刷の高い受理特性の原因を明らかにするため、高速度カメラを用いて受理プロセスを詳細に観察した。その結果、通常のグラビアオフセット印刷は、受理時に版とブランケットとの間でインクが糸を引き、ランダムに分裂していくが、SBG印刷ではインクの糸引きが全く見られず、版のインクがブランケットにスムーズに受理される様子が観察された。これらの実験結果より、SBG印刷は、ソフトブランケットによるインク内の溶媒の吸収により印刷特性が向上するという推論が正しいことを明らかにした。

第6章 総括

本研究により得られた成果についてまとめた。SBG印刷技術は、3D-PE技術を実現する曲面・立体物表面への印刷技術であるが、その優れた印刷特性は、従来のPE技術にも十分適用可能な印刷技術である。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成30年2月8日

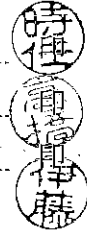
理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 時任 静士

副査 高橋 辰宏

副査 伊藤 浩志



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	有機材料工学 専攻 有機デバイス 分野 氏名 吉田 小波		
論文題目	Fundamental Study of Soft Blanket Gravure Printing Technology for Three-Dimensional Object Surfaces (3次元立体物表面へのソフトブランケットグラビア印刷技術に関する基礎研究)		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	平成30年1月29日～ 平成30年2月6日
論文公聴会	平成30年2月6日	場 所	工学部10号館405教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	平成30年2月6日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000字程度)

本論文は、曲面・立体物表面上に機能性材料をパターンニングし、電子デバイスを作製する「3Dプリンテッドエレクトロニクス(3D-PE)技術」を実現する印刷手法の一つとして、非常に軟らかく厚い「ソフトブランケット」を用いた「ソフトブランケットグラビア(SBG)印刷技術」を新規に提案し、当該印刷技術について研究したものであり、計6章から構成されている。

第1章では、本研究の背景、目的、ならびに新規SBG印刷の原理を記載している。本研究の目的は、SBG印刷を用いて曲面・立体物表面上に微細なパターンを形成可能にし、さらにSBG印刷の印刷原理を解明することである。

第2章では、SBG印刷技術に適用可能な導電性材料として、曲げに強く、かつ低抵抗を示す銀ナノワイヤ・銀ナノ粒子複合材料の作製に成功したことを述べている。

第3章では、最初に平面基板を用いてSBG印刷の最適印刷条件を求め、当該印刷条件および銀インクを用いて様々な曲面や立体物表面上に、様々な形状の銀配線パターンの印刷に成功したことを記載している。

第4章では、SBG印刷のベースとなるグラビアオフセット印刷と、SBG印刷の印刷特性を比較した結果、SBG印刷は、通常のグラビアオフセット印刷では印刷不可能となる印刷条件下においても印刷可能であることを明らかにしたことを記載している。

第5章では、ソフトブランケットへの吸収率が異なる2種類の溶剤を含有する2種類のインクを用いることで、インクに混合される溶剤による印刷特性の依存性を明らかにしたことを述べている。さらに、グラビアオフセット印刷およびSBG印刷の受理プロセスを直接観察することで、印刷特性の違いのメカニズムについて記載している。

第6章では、第2章から第5章までの研究内容を総括し、3D-PE技術を実現する手段の一つとしてSBG印刷技術を提案・研究した結果、立体への印刷のみならず、従来の平面印刷技術の発展にも深く寄与する、として本論文をまとめている。

以上のことから、本論文は、工学における学術的探求、および新しい印刷技術の実用化という観点から、博士(工学)の学位を授与するに十分であると判断した。また、本論文の研究成果は、3報の掲載済み学術論文、および3件の国際会議発表等によってまとめられており、有機材料工学専攻の審査基準を満たしている。以上を総合的に判定し、研究成果および研究内容ともに工学的貢献が十分に認められたために合格と判定した。

なお、本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

最終試験は、学位論文の内容に関する約50分間の口頭発表、および20分間の質疑応答により実施した。発表では、研究の背景・目的について述べた後、SBG印刷による曲面・立体物表面上への印刷結果、およびSBG印刷の特殊な受理特性に言及、さらにSBG印刷と従来のグラビアオフセット印刷における受理メカニズムの違いについて説明がなされた。質疑応答では、SBG印刷の「転写」ではなく「受理」プロセスに注目した理由や、受理プロセスに影響するその他の要因の可能性、連続印刷特性の実験条件等について質問があった。これに対して申請者は、研究内容を十分に理解した上で適切かつ具体的に回答した。その結果、博士(工学)として必要とされる専門知識および研究遂行能力を十分に備えているものと判断し、最終試験の結果を合格とした。