

論文内容要旨 (和文)

平成 28 年度入学 大学院博士後期課程

有機材料システム専攻

氏 名 吉田 泰則



論文題目 Research of Inkjet Printing Technology Enabling Fabrication of
Electrical Circuits on Three-Dimensional Object Surfaces

(3次元物体表面への電気回路形成を可能とするインクジェット印刷技術に関する研究)

最近、三次元立体物へエレクトロニクス機能を直接形成する技術に対する期待が高まっている。なぜならば、携帯機器の通信用アンテナ等、スペースが限られた機器に対し有効に省スペース化を行うことができるためである。将来的には、自動車部品等にも広く適用されることが期待される。しかしながら、従来の微細加工技術は、そのままでは立体物に適用することはできないため、立体物に特化した方法が模索されてきた。代表的な例は、メッキ技術を応用した 3D-MID (3-Dimensional Molded Interconnect Device)、およびエアロゾルデポジションと呼ばれる方法である。これらの従来技術は、立体物に対して精密なパターニングができる一方で、生産性を高めることが仕組み上困難である。なぜならば、単位時間当たりの加工を行う面積が非常に小さいためである。そこで、本研究では、単位時間当たりの加工面積が大きい方法として、印刷技術を基礎としたプリントドエレクトロニクス (PE) を立体物表面に適用することに着目した。

本論文では、特に、生産性の高さと、3次元曲面への追従性の高さを両立する可能性を有する方法として、ピエゾインクジェット印刷に着目した。インクジェット法は、印刷工程において版を使用しないことから、デジタルデータを元にした文書印刷に利用され、近年では、エレクトロニクス製品の製造にも利用されるようになってきた。印刷によって形成したパターンにエレクトロニクス機能を発現させるためには、ほとんどの場合において、固体分散インク (solid dispersion inks) 等の固化可能なインクが用いられる。特に、配線を形成する場合は、金属ナノ粒子インクがよく用いられ、印刷後に乾燥、焼結工程を行うことによって固体成分が析出、結合し、高い導電性を有する配線を形成できる。ピエゾインクジェット印刷は、ノズル数の増加を容易に実現できるため、高い生産性を有すると同時に、インク液滴が空間を飛翔するため、凹凸のある形状へも印刷できる。

ここで、インクジェット印刷を立体物に対して行うためには、インクジェットヘッドの位置や角度を自由に決めて印刷する機構が必要となる。しかしながら、従来のインクジェット装置はそのような機構を有することはなかった。そのため、まずは立体物に対してインクジェット印刷を行うことができる装置の作製を行った。具体的には、どのような方向に

傾けてもインクを一定の圧力で供給できる全方向インクジェットユニットを作製し、それを垂直多関節ロボットに取り付けることで、あらゆる方向に向けてインクジェット印刷することができる全方向インクジェット印刷技術を開発した。さらに、申請者は、下記の課題を抽出し、それらの解決を試みた。

(1) ピエゾインクジェットの構造がインク吐出に与える影響の基礎的解析

ピエゾインクジェットの研究の歴史は半世紀以上あり、記録として最も古いものは1962年のWinstonによる特許(US 3060,429)が知られている。その後多くの研究がなされ、現代の文書印刷技術や製造技術が実現されている。しかしながら、3次元立体物表面に電気回路を形成することを念頭において研究されたことはこれまでになかったため、新たな視点の基礎的解析手法を確立する必要があった。そこで、ピエゾの振動が引き起こすインクの振動を電気回路に置き換えて解析できる、等価回路モデルに着目した。そして、従来の等価回路モデルを実測に合わせて微修正することにより、3次元インクジェットシステムに適合した解析を行えることを見出し、基礎的な解析手法を確立した。

(2) シャープなエッジ形状を乗り越えられる大電流立体印刷配線の形成

インクジェット印刷で形成された配線は、通常は $1\mu\text{m}$ 以下の膜厚しか持たないため、電気抵抗が大きく大電流を流すには適さない。しかし、特に自動車部品としての役割を持たせるためには、大電流に耐える配線が必要である。新規作成したインクジェット印刷装置が有する高い位置精度を利用し、重ね印刷を行うことで $10\mu\text{m}$ を超える厚さの立体印刷配線を形成することに成功した。

(3) プラスチック等の低耐熱性立体基材に対する新しい焼成方法の提案

PEにおいて、耐熱性の低い基板に対する焼成はしばしば問題となる。この課題において、連続的に点灯するキセノンランプの光をファイバーでロボット先端部の集光レンズユニットまで導入する方法を提案した。これにより、導電性インクの印刷および焼成を、単一のシステムで行うことに成功した。

以上の課題を解決することで、本論文の目的である、3次元物体表面への追加的電気回路形成におけるインクジェット印刷技術の基礎を確立した。本論文は、今後行われる、インクジェット印刷技術を用いて立体物表面に電気回路を形成することを試みる全ての技術に対する基礎研究という位置付けである。本論文における成果を基礎として、この技術の研究開発が広く行われ、広く世の中の役に立つことを期待する。

論文内容要旨（英文）

平成 28 年度入学 大学院博士後期課程

有機材料システム専攻

氏 名 吉田 泰則



論 文 題 目 Research of Inkjet Printing Technology Enabling Fabrication of
Electrical Circuits on Three-Dimensional Object Surfaces

Recently, there is an increasing expectation for a technology for directly fabricating electronic functions to a three-dimensional object. Because space saving can be effectively performed for devices with limited space, such as communication antennas for portable devices. In the future, it is expected to be widely applied to automotive parts and the like. However, since conventional microfabrication technology cannot be applied for three-dimensional objects, a method specialized for three-dimensional objects has been sought. A typical example is 3D-MID (3-Dimensional Molded Interconnect Device) applying plating technology, and a method called aerosol deposition. In these conventional techniques, precise patterning can be performed on a three-dimensional object, but it is structurally difficult to increase productivity. This is because the processing area per unit time is very small. Therefore, in this research, applicant focused on applying Printed Electronics (PE) based on printing technology to the surface of three-dimensional object as a method with large processing area per unit time.

In this paper, focusing on piezo inkjet printing as a method having a possibility of compatibility between high productivity and followability to a three-dimensional curved surface. Since the inkjet method does not use a plate in the printing process, it is used for document printing based on digital data, and in recent years it has also been used for manufacturing electronic products. In most cases, solidifiable inks such as solid dispersion inks are used in order to develop the electronics function in the pattern formed by printing. Particularly, in the case of fabricating interconnects, metal nanoparticle inks are often used, and by performing drying and sintering steps after printing, interconnects having high conductivity can be fabricated. Since piezo inkjet printing can easily realize an increase in the number of nozzles, it has high productivity and since ink droplets fly through space, they can also be printed in a three-dimensional shape.

Here, in order to perform inkjet printing on a three-dimensional object, a mechanism for printing irrespective of the position and angle of the inkjet head is required. However, the conventional ink jet apparatus has never had such a mechanism. Therefore, the applicant first made a apparatus that can perform ink jet printing on three-dimensional objects. Specifically, applicant developed an omnidirectional inkjet unit that can supply ink at a constant pressure regardless of what direction it is tilted, and attach it to a vertical

articulated robot so that inkjet printing in all directions. In addition, the applicant extracted the following subjects and tried to solve them.

I. Fundamental analysis of the influence of piezo inkjet structure on ink ejection

The history of piezo inkjet research has been over half a century and the oldest record is a patent by Winston in 1962 (US 3060, 429). After that many studies have been done, modern document printing technology and manufacturing technology are realized. However, since there has never been anything studied in mind that electronic circuits are fabricated on the surface of a three-dimensional object, it was necessary to establish a fundamental analysis method of a new viewpoint. Therefore, the applicant was focused on an equivalent circuit model which can analyze oscillation of ink caused by piezo oscillation by an electric circuit. By modifying the conventional equivalent circuit model in accordance with the actual measurement, the applicant found that it is possible to perform analysis conforming to the 3 - dimensional ink jet system, and established a basic analysis method.

II. High current printed wiring which can be fabricated over the edge shape

Interconnects fabricated by inkjet printing usually have a film thickness of 1 μm or less, so they have high electrical resistance and are not suitable for flowing a large current. However, in order to have a role as an automobile electrical part, it is necessary to withstand a large current. The applicant succeeded in fabricating a printed interconnect with a thickness exceeding 10 μm by plural printing using the high position accuracy possessed by the new inkjet printing apparatus.

III. Proposal of new sintering method for low heat resistant material such as plastics

In PE, sintering to a substrate with low heat resistance is one of important issues. In this subject, the applicant proposed a method to introduce the light from the xenon lamp up to the focusing lens unit at the tip of the robot with fiber. As a result, printing and sintering of the conductive ink were successfully performed in a single system.

By solving the above problems, the applicant established the foundation of inkjet printing technology for the fabrication of additional electric circuits to the surface of 3 - dimensional object. This paper is a basic research on all technologies that will be attempted to form electric circuits on the surface of three-dimensional objects using inkjet printing technology to be carried out in the future. Based on the results in this paper, research and development of this technology will be widely conducted and the applicant hope that it will be widely useful in the world.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成 31 年 2 月 8 日

有機材料システム研究科長 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	有機材料システム専攻 氏名 吉田 泰則		
論文題目	Research of Inkjet Printing Technology Enabling Fabrication of Electrical Circuits on Three-Dimensional Object Surfaces (3次元物体表面への電気回路形成を可能とするインクジェット印刷技術に関する研究)		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	平成 31 年 1 月 29 日～ 平成 31 年 2 月 6 日
論文公聴会	平成 31 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 31 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、三次元立体物へエレクトロニクス機能を直接形成する技術分野に関し、既存技術よりも高い生産性を持った3次元プリンテッドエレクトロニクスと呼ばれる技術の構築を目指したものであり、計5章で構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的を記載している。これまで、インクジェットでは印刷中に印刷ヘッドの向きを変えることは想定されていなかったところ、本論文ではそれを可能にした全方向インクジェット印刷技術を新たに開発することで、あらゆる向きでインクジェット印刷の実行を可能としたことが記載されている。

第2章では、従来の解析モデルである等価回路モデルを、実測された振動データを用いて修正することで、実際のインク吐出現象をより忠実に再現することに成功したことが記載されている。

第3章では、自動車配線への応用を見据えた、大電流に耐える印刷配線を、全方向インクジェット印刷技術が有する高い位置精度を活用し、繰り返し印刷することで実現したことが記載されている。

第4章では、開発したインクジェット印刷装置にキセノンランプ集束光を照射できる機能を付加することで、高温での焼成が困難であった低耐熱性立体物に対しても、その表面に印刷配線を形成することに成功したことが記載されている。

第5章では、研究の総括を行うとともに、生産ラインへの組み込みという将来展望について記載されている。

以上、本論文は、新しい印刷技術の構築という観点、および学術的探求という観点から、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、2報の掲載済み学術論文、1件の査読中学術論文、および1件の国際会議発表等によってまとめられており、有機材料システム専攻の審査基準を満たしている。これらを総合的に判定し、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60分間の口頭発表、および約20分間の質疑応答により実施した。発表では、研究の背景、目的について述べられた後、独自開発された装置に関する詳しい説明がなされた。その後、新しい解析モデルの提案、立体的な大電流印刷配線の作製、低耐熱性立体物に対する立体的な印刷配線形成について詳しい説明がなされた。質疑応答では、3次元に向くヘッドはどのようなものか、等価回路モデルと吐出方向の関係、章と章のつながり等について質問がなされた。これに対し、論文申請者は適切かつ具体的に回答した。よって、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と判断し、最終試験の結果を合格と判定した。