

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00213

研究課題名（和文）ストレッチャブルシステムの社会実装に向けた超柔軟材料のR2R加工プロセスの開発

研究課題名（英文）R2R processing process for elastic materials for social implementation of stretchable systems

研究代表者

太田 裕貴（Ota, Hiroki）

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30528435

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,200,000円

研究成果の概要（和文）：フレキシブルデバイスの次の世代の先進スマートデバイスはストレッチャブル素材を用いてシステム全体が伸縮可能な“システム”である。その実装のためのボトルネックは、伸縮によるシステムの不安定さと実装のための大量生産手法の欠如である。そこで本研究ではR2R加工プロセスを用いたストレッチャブルシステムの大量生産方式の実現を行なった。その結果、R2Rプロセスを用いて硬軟一体構造の基板の大量生産手法を構築するとともに、そのプロセスを用いてストレッチャブルウェアラブルデバイスのロット生産とストレッチャブル温度センサーの大型化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

R2R加工方法はロールからロールへ基板を輸送する際に、導線性ペーストなどの導電性液体材料を用いて回路を作製する加工方法であり超柔軟材料でのR2Rを用いたストレッチャブルデバイス加工は実現していない。このような次々世代のエレクトロニクスの実装のためには、高変形時における応力分布・超柔軟材料の付着加工に代表される機械工学的な体系化が必要である。本研究を通して逆問題的に機械工学を基礎としたソフト薄膜加工学に繋がったのではないかと考えられる。これらで得られた知見はウェアラブルデバイスの発展だけでなく薄膜の加工や近年発展が著しい機能性バンドエイドの加工の高効率化に資するものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：The next generation of advanced smart devices after flexible devices are “systems” in which the entire system can expand using stretchable materials. The bottleneck for implementation is the instability of the system due to stretching and the lack of a mass production method for implementation. Therefore, in this study, a mass production method for stretchable systems using the R2R process was implemented. As a result, we developed a mass production method for substrates with rigid-soft integrated structures using the R2R process, and realized lot production of stretchable wearable devices and a large-sized stretchable temperature sensor using the process.

研究分野：加工、メカトロニクス、ストレッチャブルエレクトロニクス

キーワード：R2R加工プロセス 液体金属 ストレッチャブルエレクトロニクス

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

次世代ウェアラブルデバイスの実現に向けたフレキシブル(屈曲可能)センサ・デバイスの実装が行われてきた。近年では、次々世代のエレクトロニクスデバイスとして伸縮する肌に密着し張り付けることのできるストレッチャブル(伸縮可能)センサの研究が行われている。しかし研究の多くはセンシング部分にストレッチャブル材料を用い、制御システム部分にフレキシブルプリント基板を用いている。そのため、システム全体がストレッチャビリティ(伸縮性)を有するわけではなく手の甲など構造が複雑で伸縮する人体部位に”システムごと”装着をさせることは困難である。システム全体が伸縮機能を有し、いわば薄い湿布のように体の一部分に自由自在に装着できるような設計を行う必要がある。これらの技術は、高密着・高柔軟性によるセンサの高 S/N 比や高い利便性が期待できる。さらにウェアラブルデバイスだけではなく、同じ伸縮材料からなるソフトロボットへの応用も考えられる。この社会実装に向けてボトルネックとなっているのは、ストレッチャブルシステムの大量生産方法の欠如である。

2. 研究の目的

そこで本研究ではストレッチャブルシステムの R2R 方式の加工に着目した。R2R 方式の印刷加工とは新聞印刷のように、Roll から Roll へ基板を輸送する際に、導電性ペーストや電解質を付着させて回路や電子素子を作製する加工方法である。曲がるディスプレイなどのフレキシブルプリント基板や固体バッテリーの加工には広く使用されているが、伸縮性を有する超柔軟材料で適用されていない。なぜならば、超柔軟素材である伸縮素材を R2R で輸送する制御や、基板の弾性による大変形の抑制などの技術的課題や、印刷加工上の超柔軟材料の変形や応力集中等を加味した粘弾性のモデル化といった未解明な現象(学術的問い)が残されているからである。

3. 研究の方法

本研究では申請者が開発してきた伸びるゴム素材と液体金属からなる柔軟センサと Solid-state Electronics に代表される IC(Integrated Circuit)など硬い電子素子が同一基板上にある硬軟ヘテロストレッチャブル基板を作製した。さらに R2R 加工技術でスタンドアローンで動作するストレッチャブルシステムを実現するために必要な要素技術を実現した。実際には硬軟ヘテロストレッチャブル基板の R2R 加工プロセスでの開発、液体金属配線の描写技術の確立、スタンドアローンシステムの電子素子の実装方法の確立と実証の3つを行なった。

硬軟ヘテロストレッチャブル基板の R2R プロセスでの作製 第一の要素技術である硬軟ヘテロストレッチャブル基板は、100 %以上の伸縮率を持つポリジメチルシロキサン(PDMS)薄膜上に、全く伸縮しないエポキシのパターンを作製することで R2R 加工を用いて実現した。最終的には、変形する PDMS 部分には液体金属配線を用いて、全く変形をしないエポキシ部分に制御素子を実装する。このような構成とすることでシステム全体が伸縮したとしても、固体電子素子部分は変形せず液体金属配線があるゴム材料が伸縮する。その結果、システムそのものが伸縮できる。この R2R 加工のロール上もしくはロール間にエポキシのパターン化部分を設けることにより、R2R 加工での硬軟一体基板の開発を行った。

液体金属配線の描写技術の確立 液体金属配線は R2R 加工においてロールとロールの間でディスペンサを用いた吐出により実現した。その吐出における最適化ミアンダ構造に適用することで最適な電極構造を模索した。

スタンドアローンシステムの電子素子の実装方法の確立と実証 までに行なった基盤技術をもとにスタンドアローン型のストレッチャブルシステムを構築した。実際には、光検出が可能なウェアラブル型のストレッチャブルシステムをロット生産した。さらに、温度マッピングが可能な大型のストレッチャブルシステムを構築した。

4. 研究成果

1. 硬軟ヘテロ基板第三層の R2R プロセスでの作製。Ecoflex 及び PDMS による二層構造のパターン作製の確立を行った。現在三層目のエポキシ層の確立を行っているが、その際に表面処理の必要がある。そのため、新たに表面処理が可能な仕様の R2R 装置を新規に確立する必要があることが発覚した。2 年間をかけて、新規 R2R プロセスの仕様の確立と導入を行った。実際には、ライン型のエキシマランプを R2R プロセス内に構築する。さらに、高粘度のエポキシ材料のパターン基盤を作成するためにスロットダイコーティング技術を導入する。この旧 R2R 装置の新 R2R プロセスの連携を行うことにより硬軟ヘテロ基板の R2R プロセスを完成させた。

液体金属配線の硬軟構造基板への描写技術の確立。昨年度までで、スクリーンプリンティングにより液体金属配線を考案した。実際には、液体金属にナノ材料を混合した導電性コンポジットであるが、十分に液体金属の機能を有していることが確認できた。このプロセスをもとに硬軟構造基板上に配線構造を確立した。

R2R プロセスで作製した基板を用いたデモンストレーション用デバイスの確立。で基盤の諸上限は確立できると考えられる。そのうえで、ストレッチャブルデバイスのロット生産とともに、その基板加工の手法を用いて大型デバイスの加工デモンストレーションを行った。実際には、A4 サイズの温度マッピングが可能なデバイスの実現した。以上の結果は国内外の学会及び複数の国際論文誌で論文を発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Matsuda R., Isano Y., Ueno K., Ota H.	4. 巻 7
2. 論文標題 Highly stretchable and sensitive silicone composites with positive piezoelectricity using nickel powder and ionic liquid	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 APL Bioengineering	6. 最初と最後の頁 016108 ~ 016108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0124959	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsuda Ryosuke, Song Zihao, Ota Hiroki	4. 巻 9
2. 論文標題 Electro Powerless Balloon Soft Actuator with Manually Driven Fluidic Circuit	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2201065 ~ 2201065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aelm.202201065	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ochirkhuyag Nyamjargal, Nishitai Yuuki, Mizuguchi Satoru, Isano Yuji, Ni Sijie, Murakami Koki, Shimamura Masaki, Iida Hiroki, Ueno Kazuhide, Ota Hiroki	4. 巻 14
2. 論文標題 Stretchable Gas Barrier Films Using Liquid Metal toward a Highly Deformable Battery	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 48123 ~ 48132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsmi.2c13023	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Isano Yuji, Fujita Hajime, Murakami Koki, Ni Sijie, Kurotaki Yuta, Takano Tamami, Isoda Yutaka, Matsuda Ryosuke, Nakamura Fumika, Nishitai Yuuki, Ochirkhuyag Nyamjargal, Inoue Kota, Kawakami Hiroki, Okubo Yusuke, Ueno Kazuhide, Fujie Toshinori, Ota Hiroki	4. 巻 7
2. 論文標題 Transparent and Breathable Ion Gel Based Sensors toward Multimodal Sensing Ability	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Materials Technologies	6. 最初と最後の頁 2200209 ~ 2200209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admt.202200209	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ochirkhuyag Nyamjargal、Matsuda Ryosuke、Song Zihao、Nakamura Fumika、Endo Takuma、Ota Hiroki	4. 巻 13
2. 論文標題 Liquid metal-based nanocomposite materials: fabrication technology and applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 2113 ~ 2135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0NR07479A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takaya Maika、Matsuda Ryosuke、Inamori Go、Kamoto Umihiro、Isoda Yutaka、Tachibana Daiki、Nakamura Fumika、Fuchiwaki Ohmi、Okubo Yusuke、Ota Hiroki	4. 巻 6
2. 論文標題 Transformable Electrocardiograph Using Robust Liquid/Solid Heteroconnector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Sensors	6. 最初と最後の頁 212 ~ 219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssensors.0c02135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計3件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 川上 寛樹、長竹 恭平、倪 思捷、中村 文香、堀井 辰衛、藤枝俊宜、太田 裕貴
2. 発表標題 ストレッチャブルデバイス基板のRoll-to-Roll生産プロセスの開発
3. 学会等名 日本機械学会 2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長竹恭平、川上寛樹、倪 思捷、中村 文香、堀井 辰衛、藤枝俊宜、太田 裕貴
2. 発表標題 ストレッチャブルデバイスの大量生産手法に向けた液体金属配線プロセスに関する研究
3. 学会等名 日本機械学会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroki Ota
2. 発表標題 Highly Deformable Photonic Devices Based on Liquid Metal Towards Wearables
3. 学会等名 PRiME2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	上野 和英 (Ueno Kazuhide) (30637377)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 (12701)	
研究分担者	藤枝 俊宣 (Fujie Toshinori) (70538735)	東京工業大学・生命理工学院・准教授 (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------