

紫外線照射法を用いた漆膜加工システムの開発

明神 優*¹ 橋本 悠希*¹Development of the *Urushi* Processing System by Ultraviolet Irradiation MethodYu Myojin*¹ and Yuki Hashimoto*¹

Abstract --- *Urushi* (Japanese lacquer) is a natural material that is not only has decorative beauty but also has many useful features for engineering field, such as electrical resistance and water resistance. In this research, we have created electronic circuit using *Urushi* as an insulating material and structure (*Urushi* Circuit). In addition, we indicated that it is possible to provide the interactive features while enjoying original beauty and texture of *Urushi*. We aimed at a multilayered circuit to create a high performance *Urushi* Circuit. Thus, we proposed and developed an *Urushi* processing method (Ultraviolet Irradiation Method) by ultraviolet light (UV). In this paper, the accuracy of the verification experiment is enhanced to improve the processing accuracy of the Ultraviolet Irradiation Method. Based on our data, we created a model to describe *Urushi* dissolved to facilitate good reproducibility and controllability. Next, the reproducibility of our model was verified by performing UV irradiation tailored to the target value. Further, we fabricated an *Urushi* Dissolution System using Ultraviolet Irradiation Method. We confirmed the feasibility of our system by performing UV irradiation tailored to the target value at optional positions.

Keywords: electronic circuit, ultraviolet light, *Urushi*

1 はじめに

近年、電子デバイス技術の進歩が著しく、ウェアラブルデバイス[1] やコミュニケーションロボット[2] , IoT デバイス[3] など、人とモノの関係性はより密接になっている。これらのデバイスは、長期使用のためには過酷な環境に耐え、衛生面について極めて安全であることが必要となる。よって、人が直接触れる素材を注意深く選び、確実に作り込まなければ、機能不全を起し、人体に悪影響を及ぼす等の可能性がある。特に電子回路は、人にとって有害な物質を多く含み、強度や耐性が低いことから、なるべく接触させないように金属や合成樹脂などの外装で覆うことや内部の耐性向上が必要であった。

これに対して本研究では、電子回路自体を改善するという視点から問題解決を図ることを考え、漆を回路の絶縁材や構造体として用いることを提案してきた[4]。漆は熱、酸、水に対する耐性など、多くの有用な特性を備えており、特に電気絶縁性に優れ、電子回路との親和性が高い[5] [6] (表1)。図1に示すように回路全体を漆で保護することで表1の特性を利用することができ、安全・安心で環境に優しい電子回路(以下、漆回路)が実現できると考えられる。

また、漆の持つ美しさ、馴染み深さ、文化的価値から、

漆回路を用いた電子デバイスは、先進技術に対して保守的な考えを持つ層においても高い所有感を与え、無理なく受け入れられるものと成り得ると考えられる。さらに回路図自体を模様とし、付加価値を見出す例[7]もあり、漆回路においても同様な効果が見込まれる。漆回路の応用例として、様々なセンサを漆に内蔵させることで、漆器・急須 + 温度センサ = 最適温度の通知、スプーン・箸 + 圧力センサ = 持ち方の矯正など、モノの使い方に応じて様々な機能を付加することが実現可能であると考えられる。

表1 漆の特性[6]

Table 1 *Urushi* features[6]

水・湿気	高い防水性を有する[8]
薬品	硫酸、塩酸、王水等に溶けない
電気	高分子と同等の絶縁性[6]
さび・腐食	防錆・防腐性を有する
硬さ	鉄と同等の硬度を有する
虫・菌	防虫・防菌性を有する[9]
熱	塗り:約 120℃・焼付け:200℃以上
環境	有害物質の発生しない天然樹脂
対人	アレルギーがなく安全

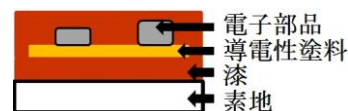


図1 漆回路の構造

Fig.1 Structure of *Urushi* Circuit

*1 筑波大学

*1 University of Tsukuba

漆を絶縁材・構造体として使用した電子回路である漆回路を高機能化するためには、広い実装面積を確保する、複数の漆回路を組み合わせることなどが考えられる。しかし、広面積への均一な漆塗布には熟練の技術を要する。また、消費する漆が増加することでコストが大きくなるという問題も生じる。そこで漆回路の多層化に焦点を当てた。多層化による実装面積の縮小により、熟練度に依存しにくく、漆の消費も抑えられる。また、漆回路の応用として漆器に直接実装することを考えており、限られた実装面積の中で複雑な回路を作成する必要があるため、多層化の効果は高い。さらに、漆はもともと重ね塗りを行うため、その工程を変えることなく多層漆回路を実装可能であることも利点となる(図2)。

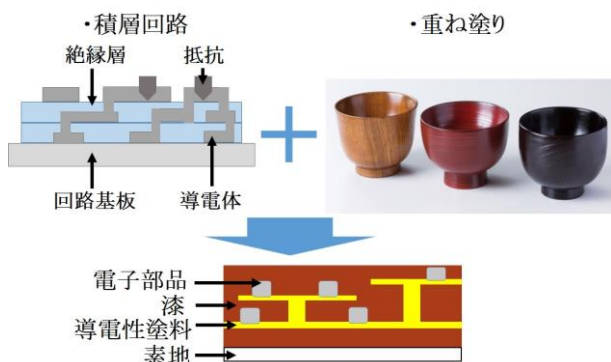


図2 多層漆回路の構想

Fig.2 Idea of multilayered Urushi Circuit

漆を絶縁材として多層回路を実装する場合、漆の各層を繋ぎ、実装面の凹凸によるショートや配線の延長による実装面積の拡大を防ぐために、漆膜に対してスルーホールや配線の溝を生成する精密な加工技術が必要となる。これに対して我々は、漆が紫外線に分解されるという特性を利用した非接触な漆膜加工手法を提案しており、紫外線による漆の分解モデルを求めた[10]。しかし、加工精度や安定性に改善の余地があった。

そこで、本論文では、本手法の加工精度と安定性を向上させ、その実験結果を基に漆分解モデルを求める。また、漆分解モデルの有効性を実験により検証する。さらには、これまでの実験で取り入れていなかった、任意の位置に紫外線を照射可能な漆膜加工システムを製作し、その有効性を検証する。

2 漆回路

本研究では、漆の特性を利用した電子回路を実現することで、センサとして使用する、既存の机や壁、漆器などに本来の使い心地を変えることなく追加機能を実装するなど、漆本来の美しさや質感の良さを楽しみつつインタラクティブな機能を提供し、人とモノの関係性の密接化を安全・安心に行うことが目的である。本章では、これまでに行ってきた漆回路の検証・実装例を示す。

2.1 水中駆動型漆回路

表1に示されている漆の防水性を検証するため、図3に示すように、漆を塗布したアクリル板上に導電性塗料(谷ロインキ製造株式会社: テクノペン)で配線パターンを作成し、全体を漆で覆った回路を水中に沈めた。その結果、4, 5 時間水中に沈めた状態でも問題なく漆回路が動作することを確認した。漆は王水に溶けないほどの耐薬性も備えていることから、水中と同様に薬品中においても性能を発揮できると考えられる。



図3 水中駆動型漆回路

Fig.3 Water-driven Urushi Circuit

2.2 蒔絵型漆タッチインタフェース

漆回路を使ったインタラクティブデバイスの実現可能性を検証した。まず、UV照射により硬化する銀ペースト(田中貴金属販売株式会社: UV-700SR1J)を使用し、シルクスクリーンによる配線パターンの作成を行った。

次に静電容量の変化を検出するIC (TTP223-BA6)やLED等の電子部品を配線パターン上に実装し、蒔絵型漆タッチインタフェースを製作した(図4)。タッチセンサ部を花の模様として描き、触れることでLEDが点灯することを確認した。以上から、蒔絵型インタラクティブデバイスが実現可能であることが示された。

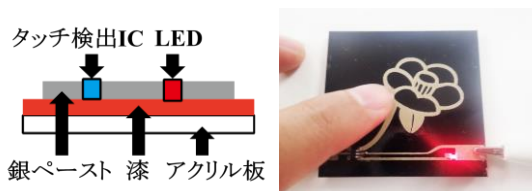


図4 蒔絵型漆タッチインタフェース[11]

Fig.4 Makie type Urushi Touch Interface[11]

2.3 カバー型漆タッチインタフェース

2.2では、配線や電子部品が露出しており、漆本来の美しさや質感の良さを楽しむ用途には不向きであった。そこで、全てを漆膜内に埋め込んだデバイスの実装を行った。その際、漆表面を均一に保つため、漆との接着力が比較的小さい塩化ビニル上に漆回路を構築した後、剥離させることで塗膜表面を均一化させる手法(以下、漆剥離法)を用いた(図5)[12][13]。製作手順は図6に示す通りである。

作成したカバー型漆タッチインタフェースを図7に示す。2.1, 2.2では外部電源とケーブル接続で漆回路を動作させていたが、本インタフェースではボタン電池(Panasonic: CR2450)を使用した電源モジュールと一体化した。これにより、インタフェース単体で、机や壁、漆

器等にセンサを後付設置できるようになった. インタラクシオン2016[14]にて本インタフェースのデモ発表を行った結果, 体験者から, 見た目がきれい, 中の配線が透けて見えることで蒔絵のように見て楽しめる, ずっと触っていたくなるような手触りがあるなどの意見をいただき, 漆の美しさや質感の良さを楽しめるインタラクティブデバイスの実現可能性が示された.

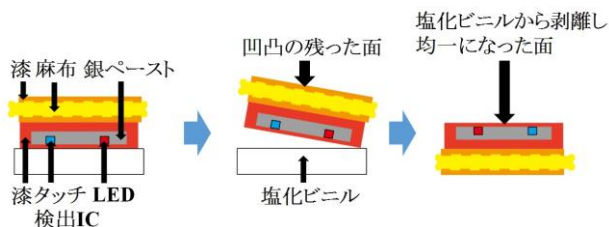


図5 漆剥離法の概略図[13]

Fig.5 Schematic view of Urushi peeling method[13]



図6 カバー型漆タッチインタフェースの製作手順

Fig.6 Fabrication procedure of Cover type Urushi Touch Interface



図7 カバー型漆タッチインタフェース

Fig.7 Cover type Urushi Touch Interface

3 提案する漆膜加工手法

漆回路の高機能化を目的とした多層化を目指すにあたり, 層間をつなぐスルーホールや各層を平坦に保つこ

とでショートや配線の延長による実装面積の拡大を防ぐ配線の埋め込みが必要である. よって漆膜に対するスルーホールや配線用の溝の加工が重要となる.

従来の基板加工手法としては, 高出力のレーザーによる熱分解やドリルによる物理的破壊が挙げられる[15][16]. しかし, これらの手法は加工部分周辺が溶解する, 歪みが生じる他, 熱に弱い素地や柔らかい素地には向かず素地の自由度が下がるなどの問題点がある. その他の手法として, 化学薬品による腐食作用を利用したエッチング[17]が考えられるが, 漆を腐食し得る溶剤が存在しないため使用できない. また, 漆硬化後の加工法として, 彫漆(漆の層を刀で彫ってレリーフ状に文様を表す)や漆を塗り重ねて研ぐという伝統的な技術は存在するが, 職人による手作業であり, 時間的・金銭的コストが高い. また, 彫刻刀等での切削は熟練した技術がない限り回路作成としての精度は低く, 加工部分周辺を無用に傷つけてしまう可能性がある.

このような状況で我々は, 漆の主成分であるウルシオールが紫外線を吸収することで分解されるという特性に着目した[18](図8). この特性から発想を得て, 熟練の技術を必要としない, 非接触漆膜加工手法(以下, 紫外線照射法)を提案してきた[4](図9).

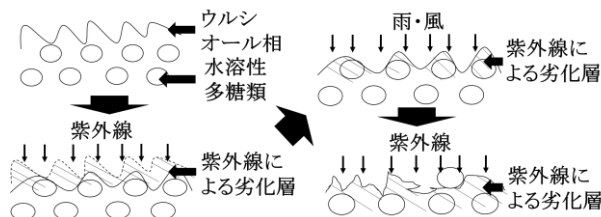


図8 漆膜の屋外曝露による劣化モデル[18]

Fig.8 Degradation model of Urushi by outdoor exposure[18]

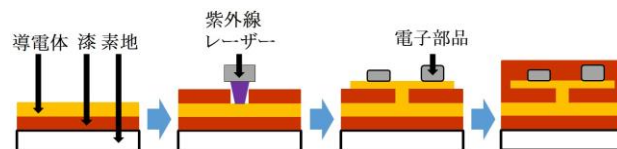


図9 漆回路の加工手法(紫外線照射法)[4]

Fig.9 Fabrication of an Urushi Circuit (Ultraviolet Irradiation Method)[4]

漆の劣化に関する先行研究[18][19][20]では, 減少量を重量差から推測しており, 直接, 照射面を計測していない. また, 紫外線照射は, 屋外曝露, 卓上照射器(照度: $5.00\text{mW}/\text{cm}^2$)や紫外線フェードメーター(照度: $5.00 \times 10\text{mW}/\text{cm}^2$)で数十~数百時間行っている. これに対して, 本手法で扱う紫外線レーザーの照度は $7.64 \sim 7.84 \times 10^3\text{mW}/\text{cm}^2$ であり, このような高強度な紫外線照射下での漆の反応は計測されていない. さらに, 漆の劣化を防ぐ目的での研究は行われているが, 漆膜の加工に転用する研究は行われてこなかった.

紫外線に露光されて変質する回路用素材としては, フォトレジストが存在する. フォトレジストは一般的に, マ

マイクロ単位の加工には、露光波長 365, 405nm が、ナノ単位の微細加工にはエキシマレーザー(波長: 157, 193, 248nm)が使用される. これに対して、漆は近紫外線(波長: 200~380nm)の吸収率の高さ[19]に加えて、高い電気絶縁性や堅牢性から、フォトレジストと絶縁材を組み合わせた役割を担っているといえる.

紫外線照射法は、紫外線レーザーの出力、照射径、照射時間を詳細に設定することができるため、より精密な加工が可能となる. また、漆の紫外線による分解は化学反応であるため必要となるエネルギーが少なく、加工部分周辺に及ぼす影響が軽減できる. さらに、非接触であるため物理的破壊に弱い素地にも対応する.

本手法による漆回路の多層化の実現可能性を検証するため、図10に示すように、銅板上に漆を塗布した2層漆回路を過去に実装した[4]. 各層には 2.1 と同様の導電性塗料を用いて、配線パターンを作成し、各層をつなぐスルーホールは紫外線照射法で生成した. その結果、設計通りに回路が動作することを確認した. しかし、適切な照射時間が不明であったため、導通が確認されるまで細かく何度も照射と導通チェックを繰り返す非効率な作業を行っていた.

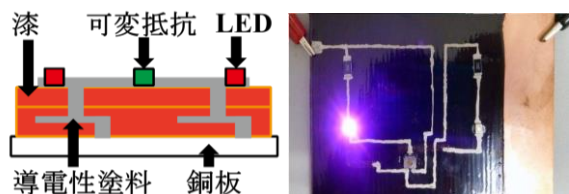


図10 2層漆回路[4]

Fig.10 Two-layer Urushi Circuit[4]

そこで我々は、紫外線強度と漆分解量の関係性を明らかにし、再現性の高い漆分解モデルを求めることで本手法を効率的に用いることを目指してきた. 過去の実験[10]では、紫外線レーザーの出力を一定(波長: 405nm, 出力: 200mV)とし、照射径の大きさで出力の調整を行った. この場合、紫外線レーザー出力が一定であれば、単位面積当たりの紫外線強度は、照射面積に反比例する. そこで「単位面積当たりの紫外線強度:照射面積 = 漆分解量:照射時間」という仮説をたて、この関係式から、照射径 1.0mm においてある漆分解量に達するまでの照射時間(= 60s)を基準とした各照射径に基づく照射時間を1試行と定めた(表2). 実験結果から、仮説は成り立ち、表2に従うことが示された. 以後、この実験[10]を「前回実験」とする.

表2 照射径に基づく1試行あたりの照射時間[10]

Table 2 Irradiation duration based on the spot diameter[10]

照射径 [mm]	1.0	1.5	2.0
面積 [mm ²]	1π	2.25π	4π
1試行あたりの照射時間 [s]	60×1 = 60	60×2.25 = 135	60×4 = 240

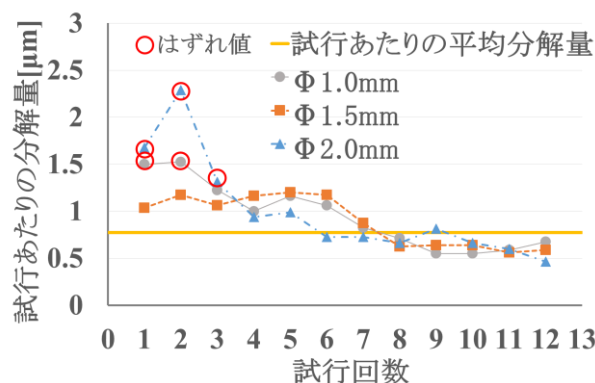


図11 前回実験の試行あたりの分解量[10]

Fig.11 The previous dissolution quantity per trial[10]

しかし、実験結果(図11)で示されるように、第1~3試行目において、試行あたりの平均分解量(0.77μm)に対して実験誤差と定めた0.47μmより大きいはずれ値が多く存在した. その結果、紫外線強度と漆分解量の関係を定量化するためのデータ量が不足し、漆分解量のモデル化への精度低下を招いた. 漆膜表層への紫外線照射時に多くのはずれ値が発生したことから、漆内部の不純物が浮き出たことや空気中の塵が漆膜表層部に付着したことが原因であると推測される.

4 評価実験

紫外線照射法の加工精度を向上させるため、従来の紫外線強度と漆分解量の関係を検証する実験の精度を高め、得られた結果から線形近似による高精度な再モデル化を行う.

前回実験では、位置精度や繰り返し精度などの使用した機器による誤差、気温や湿度などの外的環境による誤差や漆に含まれる成分の違いによる誤差のような実験内で生じる誤差を次のように定めた(*).

- I. 12 試行分の実験結果に対して試行あたりの分解量における標準偏差を求める.
- II. 求めた標準偏差の平均をその実験での標準偏差(SD_n)とする.
- III. 系統誤差および偶然誤差を±SD_n, 実験誤差(系統誤差+偶然誤差)を±2SD_nとする.

また、試行あたりの平均分解量よりも実験誤差以上に大きいまたは小さい値ははずれ値とした.

4.1 前回実験の問題に対する対策

前回実験の問題点である平均分解量より大きく外れた「はずれ値」の原因と考えられる漆内部の不純物と空気中の塵に対策を施し、精度の高い再モデル化を行う. 漆内部の不純物については、漆を濾し器にかけ、不純物の含有率を大幅に減少させた(図12:左). 漆を濾す工程は、漆芸において伝統的な方法である、吉野紙(大和物産:新吉野紙)で漆を包み絞る方法を採用した. 空気中の塵については、防塵カバー(アズワン:電波シー

ルドカバー エコノフード)内で試験片の作成を行う対策を施した(図 12 :右). また, 実験直前には試験片表面の塵や油脂等の除去を徹底して行った. 施した対策の効果を確認するため, 前回実験と本実験の試験片表面を顕微鏡(UM012C)を用いて比較した. その結果, 試験片表面に存在する不純物や塵が, 大幅に軽減されていることが分かった(図 13).

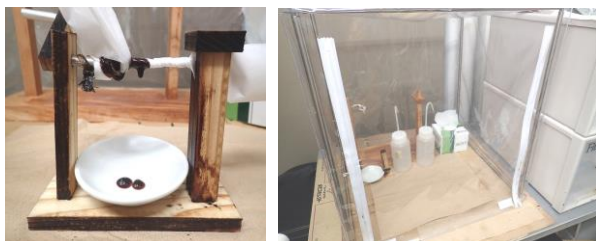


図12 左: 濾し器, 右: 試験片作成環境
Fig.12 left: Strainer, right: The environment to apply Urushi

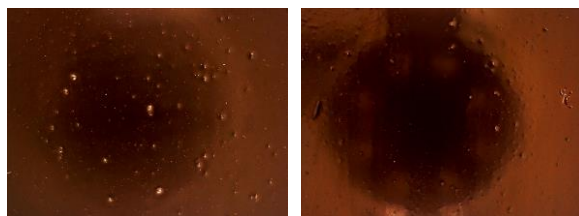


図13 試験片表面の比較(左: 前回実験, 右: 本実験)
Fig.13 Comparison of test piece surfaces (left: the previous experiment, right: the current experiment)

4.2 試験片の作成方法

実験で使用する試験片は, 縦 50mm×横 50mm×高さ 3mm の銅板を素地として以下の手順で作成した.

I. 漆塗りの準備

- ・銅板表面の汚れを金属磨き剤で除去する
- ・キッチンペーパーで残った金属磨き剤をふき取る
- ・銅板表面の油脂を脱脂剤で除去する

II. 漆塗りの手順

- ・漆をはけ塗りする
- ・湿度 60~80%, 温度約 20°C に保った恒湿槽に入れ, 1 日以上かけて硬化させる

III. 硬化後の処理

- ・側面に付着した漆を砥石(400 番)で除去する

4.3 実験手順

試験片に対して, レーザー変位計(KEYENCE: LK-G30)(繰り返し精度: 0.05 μm)を用いて計測した値と(図 14 : STEP1), 各照射径 1.0, 1.5, 2.0mm において表 2 に従った照射時間で紫外線レーザーを照射後(図 14 : STEP2), 再びレーザー変位計を用いて計測した値の差を計測した. 1 回の照射につき 10 回計測を行い, 最大値と最小値を除いた値の平均を分解量とした. 紫外線照射中は, 試験片の温度上昇を抑えるためにデスクフ

ァン(YAMAZEN: YDS-J142)による冷却を行った. 放射温度計(シンワ: 73010)を用いて試験片の温度を計測した結果, 最高表面温度は 27°C 前後であった. 漆の耐熱温度は 120°C(塗り・自然硬化時)であるから(表 1), 漆膜に対する熱の影響はほぼ無いと考えられる.

1 試行分の紫外線レーザー照射からレーザー変位計での計測までを 1 試行回数とし, 計 12 試行回数分を実験 1 回とした. 各照射径に対して合計 4 回実験を実施した. 実験前後の試験片の様子を図 15 に示す.

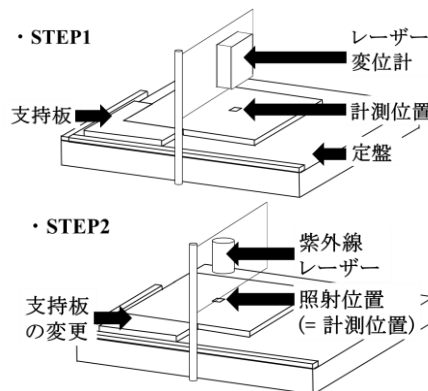


図14 分解量の計測方法

Fig.14 Measurement method of dissolution quantity

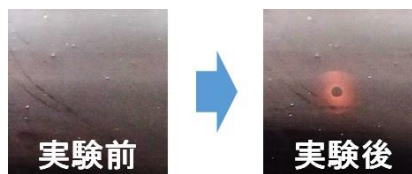


図15 照射痕

Fig.15 Irradiation mark

4.4 実験結果

本実験において, 生じる誤差を前回実験と同様の手順(4 章(*))で定めた. 表 3 (SD_n: n は実験の順番, SD_{av}: SD_{1~4} の平均)より, 本実験の系統誤差および偶然誤差を ±SD_{av} = ±0.24μm, 実験誤差(系統誤差 + 偶然誤差)を ±2SD_{av} = ±0.47μm とした.

表3 各実験の標準偏差

Table 3 The standard deviation of each experiment

SD_1	SD_2	SD_3	SD_4	SD_av
0.28	0.29	0.18	0.19	0.24

また, 実験結果から求められる試行あたりの分解量の平均と 1 つ前の試行あたりの分解量の平均の差から試行あたりの分解量の変化量(加速度)が求まる.

$$X_{av_{n+1}} - X_{av_n} = \Delta X_{av_n}$$

X_{av_n}: 試行回数 n 回目の分解量の平均,

ΔX_{av_n}: 試行回数 n 回目の分解量の変化量(加速度)

この ΔX_{av_n} が 0 であれば, 試行あたりの分解量が一定であるといえる. しかし, 上記のような系統誤差や偶然誤差が存在するため, 試行あたりの分解量の増減を

許容する許容誤差の範囲($\Delta X_{av_n} \approx 0$ とみなす範囲)を定める. 図 17 において, $\pm SD_{av}$ ($\pm 0.24\mu\text{m}$)以内に収まる値が 2 つ以上続き, かつ漆内の不純物の影響で値が大きく変化する可能性を考慮し, それ以降の試行回数で $\pm 2SD_{av}$ ($\pm 0.47\mu\text{m}$)を越えない(=はずれ値が存在しない)場合, 許容誤差の範囲内に収まった($\Delta X_{av_n} \approx 0$)とみなした.

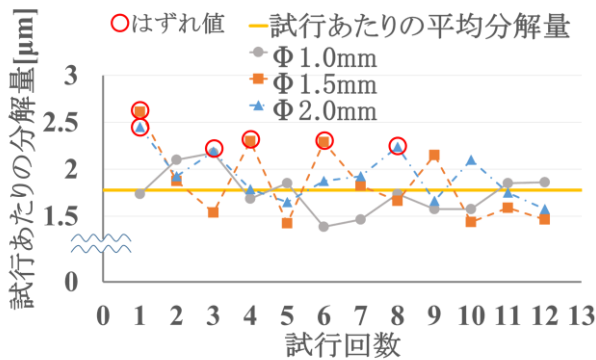


図16 試行あたりの分解量

Fig.16 Dissolution quantity per trial

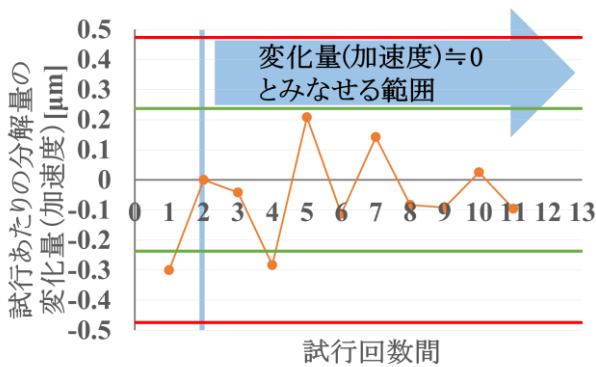


図17 試行あたりの分解量の変化量(加速度)

Fig.17 The amount of change in dissolution quantity per trial (acceleration)

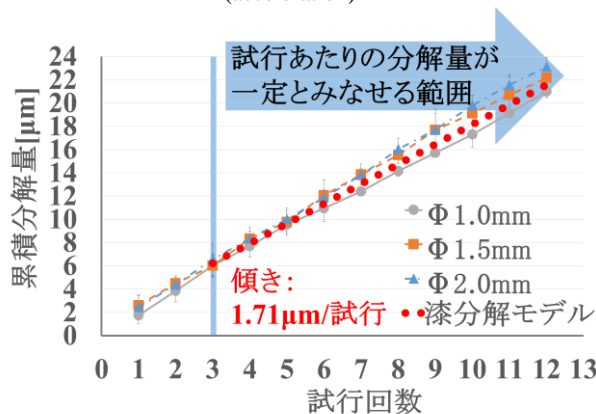


図18 累積分解量と漆分解モデルの傾き

Fig.18 Cumulative dissolution quantity and gradient of Urushi dissolution model

図 17 より, 定めた許容誤差の範囲内に第 2~3 試行目で収束した. 他の 3 回の実験についても同様にして, 全ての実験で第 3 試行目から許容誤差の範囲内に収束することがわかった. これにより, 許容誤差の範囲内

において照射径に関わらず, 試行あたりの分解量は一定であるといえる. したがって, 照射径に関わらず, 累積分解量にもとづく線形近似が可能となった. 上記の結果を受け, 本実験で求めた全て(実験 4 回×照射径 3 つ)の累積分解量の平均をとり, 線形近似を行った結果, 傾きが $1.71\mu\text{m}/\text{試行}$ となった(図 18). これは, 漆分解モデルの傾きであり, 紫外線強度と照射時間によって漆の分解量を制御可能な分解モデルが得られたといえる.

次に, 前回実験と本実験の比較を行う. 表 4 より, 試行あたりの平均分解量に対する実験誤差の割合は, 60.23%から 27.55%に軽減された. 前回実験に比べて本実験の試行あたりの分解量が大きくなったにも関わらず, 誤差の割合が少なくなったことから, 加工精度が向上したといえる. また, 第 1~3 試行目におけるはずれ値の数が減少している. これは, 4.1 によりはずれ値問題の影響が抑えられ, 本実験の定量化の精度が向上したことを示す. 以上から, 4.1 によって前回実験に比べて精度が大幅に向上した漆分解モデルが得られたといえる. したがって, 漆膜加工が使用する機器や外的環境などの影響を受けにくくなり, 加工時間の短縮を行うことが可能となった.

表4 前回実験と本実験の結果比較

Table 4 Comparison of the previous and the current experimental results

	前回実験	本実験
試行あたりの平均分解量	0.77 μm	1.71 μm
平均分解量に対する実験誤差の割合	60.23%	27.55%
はずれ値の数 (第 1~3 試行目/実験全体)	5 / 5	3 / 6
許容誤差の範囲内に収束した試行回数	第 3 試行目	第 3 試行目

4.5 考察

表 4 から, 漆分解モデルの傾き(試行あたりの平均分解量)を比較したところ, 2 倍以上大きくなった. これにより, 前回実験よりも試行あたりの分解量の時間効率が向上したといえる. また, 時間効率が上がっているにも関わらず, 試行あたりの平均分解量に対する実験誤差の割合や第 1~3 試行目のはずれ値の数が軽減された. したがって, 今回行った漆内部の不純物や空気中の塵に関する対策は評価実験の精度を高め, 紫外線照射法による加工精度や時間効率の向上につながる事が確認された.

一方, 図 16, 表 4 より, 許容誤差の範囲内に収束するのは, 第 3 試行目となり, 前回実験から改善されたとはいえなかった. また, 許容誤差の範囲内に収束したとみなした後の試行回数(第 4 試行目以降)において, 各照射径ごとの試行あたりの分解量に関するはずれ値の数が前回実験よりも多く発生した. 第 4 試行目以降の

はずれ値の原因は、紫外線レーザーの輝度ムラや分解後に残る漆内部の不純物の影響で生じる凹凸、焦点位置による分解範囲の差や生漆に含まれる大きく不揃い(0.5~1.0μm)な粒子[21]によるレーザー変位計の計測誤差の増大であると推測される(図19, 図20)。前回実験より第4試行目以降のはずれ値の数が多くなった原因は、前回実験よりも漆分解量が大きくなり、漆膜深層まで分解されたことによって、上記全ての影響を受けやすくなったためであると考えられる。

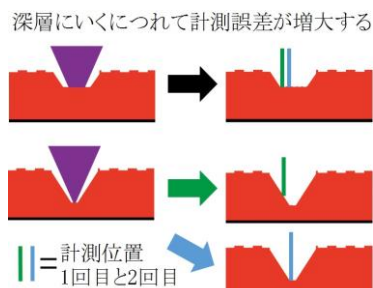


図19 紫外線レーザーの焦点位置による分解範囲の差の計測への影響

Fig.19 The influence on the measurement due to the difference in the dissolution range by the focal position of the ultraviolet light

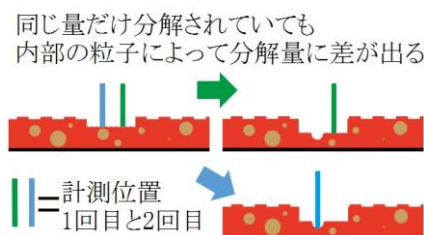


図20 生漆に含まれる粒子による計測への影響

Fig.20 The influence on the measurement by particles contained in Urushi

紫外線強度と漆分解量のより正確な関係性を得るための解決策として、まず、4.1のさらなる改善を行うことが挙げられる。具体例としては、漆を濾す回数を増やす、より目の細かい紙を使用することでより高度なる過を行う、試験片作成時の防塵スペースや漆を硬化させるための恒湿槽内の清掃を徹底する、事前に漆膜表層を除去する、清浄度を保つためのフィルタ付の作業ボックスを用いることが考えられる。また、第4試行目以降のはずれ値について対策を行う。具体例としては、流水による分解後に残る不純物の除去を行う、漆内部の粒子がサブマイクロ単位に均一化されたMR漆を使用する、紫外線レーザーの輝度ムラ分布や焦点位置の計測を行うことが有効であると見込まれる。

5 漆分解モデルの有効性の検証

前回実験では、モデルの導出までを行っていたが、評価実験で起きた誤差を含む漆分解モデルが漆膜加工を行える精度を備えているかを確認するため、得られた漆分解モデルをもとに目標とする分解量(目標値)に

対して必要な照射時間を求め、実測した分解量と目標値を比較することで有効性を検証する。

5.1 実験内容

漆分解モデルの有効性を検証するにあたり、評価実験から算出した傾き1.71μm/試行をもとに目標値に対する照射時間を表5のように求めた。

表5 目標値に対する照射時間

(行:照射径, 列:目標値, セル:照射時間[min])

Table 5 Irradiation duration required for the target value (row: irradiation spot diameter, line: target value, cell: irradiation duration (min))

	目標値 [μm]	1.92	3.84	5.77	7.69	9.61
照射径	Φ2.0 mm [min]	4.51	9.01	13.51	18.02	22.53
	Φ1.5 mm [min]	2.53	5.07	7.60	10.14	12.67
	Φ1.0 mm [min]	1.13	2.25	3.38	4.51	5.63

表5の照射時間をもとに各照射径2.0, 1.5, 1.0mmにおいて目標値である5点について計測を行った。紫外線照射は4.3と同様にデスクファンによる冷却を行いながら実施した。実測値は、レーザー変位計を用いて1回の照射につき10回計測を行い、最大値と最小値を除いた値の平均とした。そして、漆を分解した実測値と、目標値を比較することで本モデルの有効性を検証した。また、系統誤差や偶然誤差(SD_av)が存在するため、目標値に対する実測値の誤差の許容誤差を

$$0.24 / 1.71 \times 100 \approx 14\%$$

0.24: 系統誤差や偶然誤差(SD_av),

1.71: 漆分解モデルの傾き

から10%以内とした。

5.2 実験結果と考察

表6 目標値と実測値の誤差(行:照射径, セル:誤差 [%])

Table 6 Error between the target and measured values (row: irradiation spot diameter, cell: error [%])

	目標値 [μm]	1.92	3.84	5.77	7.69	9.61
照射径	Φ2.0 mm [%]	22.89	2.73	6.20	0.62	5.21
	Φ1.5 mm [%]	43.70	7.29	2.30	9.08	3.64
	Φ1.0 mm [%]	41.75	4.36	0.73	3.55	5.99

表7 平均誤差(行:照射径, 1列目:目標値1.92μmを除く平均誤差, 2列目:実験全体の平均誤差)

Table 7 Average error (row: irradiation spot diameter, first line: the average error expect for the target value 1.92 μm, second line: the average error of the entire experiment)

		1.92μm 時を除く	1.92μm 時を含む
照射径	Φ2.0 mm	3.69%	7.53%
	Φ1.5 mm	5.58%	13.20%
	Φ1.0 mm	3.66%	11.28%

表6, 表7より、目標値1.92μm時を除く平均誤差は10%以内を満たし、本検証実験の目標を達成した。この結果から、連続照射であっても問題なくモデルが使用できることが分かった。また、連続照射が可能となったことで、図20に示した課題も回避できる。以上から、本モ

デルの有効性が示されたといえる。一方、目標値 $1.92\mu\text{m}$ 時に誤差が大きく現れた原因は、試験片表面における塗りムラや塵の付着であると考えられる。また、照射径 1.5mm では、他の照射径と比べて、平均誤差が大きくなった。これは、同じ試験片であっても、漆内部の状態が異なることから、照射位置が不純物の影響を受けやすい箇所であったこと、紫外線レーザーの輝度ムラや焦点位置による分解範囲の差が生じたこと、紫外線照射中やレーザー変位計での計測中に塵が混入したことが原因であると考えられる。

上記問題への解決策としては、4.5 で述べた改善に加えて、実験中にも防塵カバーを用いる、クリーンルーム等の清浄な環境下で実験を行うことが考えられる。上記の解決策を行った後でも大きな誤差が生じる場合は、誤差の規則性を見定め、漆分解モデルに補正項を加える等の修正を行う予定である。

6 漆膜加工システムの開発

従来の漆膜加工装置では x, y 方向の位置調整を試験片側の手動移動で行っていた。そのため、位置合わせに治具を用いるなど煩雑で、試験片サイズの自由度も低かった。そこで今回、紫外線レーザー側を移動させるシステムを構築し、 x, y 方向に対して任意の位置に高精度な位置合わせを可能とするシステムを開発する。また、このシステムに 5 章の結果から得られた漆分解モデルを組み込み、有効性を確認する。

6.1 製作した漆膜加工システム

6.1.1 ハードウェアの設計・開発

実験装置とブロック図を図 21, 図 22 に示す。レーザー加工機 (SMART DIYs: FABOOL Laser Mini) のレーザー部を漆分解用の紫外線レーザーに付け替え、制御回路を増設した。任意位置への移動は、XY ステージの稼動範囲である $(x, y) = (280\text{mm}, 230\text{mm})$ 内をステッピングモータ (JKONGMOTOR: JK42H34-1334AC) 3 つをマイクロコントローラ (STMicroelectronics: ARM 32F205RB) によってベルト駆動で制御している (タイミングベルトの最小移動量: 約 0.186mm)。また紫外線レーザー出力はマイクロコントローラ (NXP Semiconductors: mbed NXP LPC1768) を用いて制御している。



図21 漆膜加工システム

Fig.21 Urushi Processing System

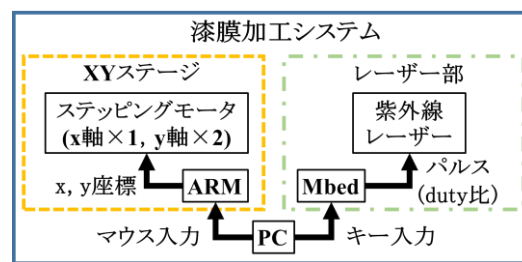


図22 漆膜加工システムのブロック図

Fig.22 Block diagram of Urushi Processing System

6.1.2 ソフトウェアの設計・開発

紫外線レーザーの制御については、照射時間の変更をソースコード自体の変更で行い、図 23 :左に示すように照射時間の残り時間が表示される。レーザー出力は、PWM 制御で行い、テンキーで duty 比を変更することで調整可能である。XY ステージの制御については、図 23 :右に示すように 1 目盛を 0.5mm とした座標 $(x', y') = (560, 460)$ 内の任意位置にマウスポインタを移動させ、クリックすることでステッピングモータが駆動し、紫外線レーザーが移動する。任意座標 (x', y') の値はコンソールから確認できる。

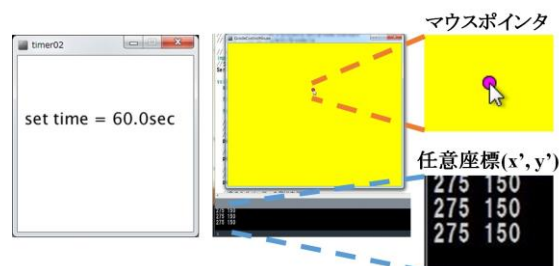


図23 左: 残り照射時間, 右: マウス入力の GUI

Fig.23 left: GUI of remaining irradiation duration, right: GUI of mouse input

6.2 XY ステージにおける繰り返し精度検証実験

本実験では、任意位置にあるレーザー部に対してレーザー変位計 (KEYENCE: LK-G500) (繰り返し精度: $2\mu\text{m}$) を 2 つ使用し、5 章までに使用していた試験片が照射位置の範囲内 ($(x', y') = (250\sim 350, 100\sim 200)$) (図 24) となる任意位置 5 箇所において初期位置から移動させたときの繰り返し精度を検証した (図 25)。各任意位置について、10 回計測を行い、その平均を求めた。

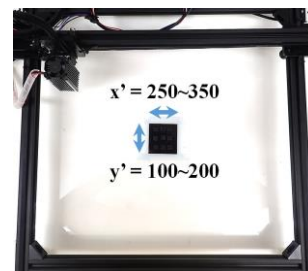


図24 漆膜加工システム内の試験片

Fig.24 Test piece in Urushi Processing System



図25 XY ステージにおける繰り返し精度検証実験の構成
Fig.25 Configuration of repeat accuracy verification experiment in the XY stage

6.3 実験結果

表 8 より, 繰り返し精度は x 軸方向に最大 0.064mm, y 軸方向に最大 0.078mm となった. 多層プリント配線板の基準穴からの部品穴位置許容差は一般的に 0.10~0.25mm であることから[22], 本システムの繰り返し精度は誤差範囲内であることが確認された. 以上から, 漆膜加工システムによる任意位置への紫外線照射が高い位置精度で可能であることが示された.

表8 任意位置に対する繰り返し精度

Table 8 Repeat accuracy for optional position

		繰り返し精度 ([mm], [mm])
任意位置 (x', y')	(275, 120)	(0.064, -0.078)
	(300, 120)	(-0.032, -0.050)
	(325, 120)	(0.010, -0.038)
	(275, 150)	(0.021, -0.014)
	(275, 180)	(-0.053, 0.036)

6.4 任意位置への漆膜加工実験

位置合わせ機構が漆分解モデルに影響を与えず, 任意位置での漆膜加工として有効であるか検証する. 6.3 から任意位置への移動が可能であることが示されたことから, 漆膜加工システムを用いて実験を行った. 照射径 1.0mm において, 表 5 に基づき目標値 5 点について紫外線照射を行う(図 26). 紫外線照射は 4.3 と同様にデスクファンによる冷却を行いながら実施した. 計測方法や許容誤差は 5.1 と同様に定めた.

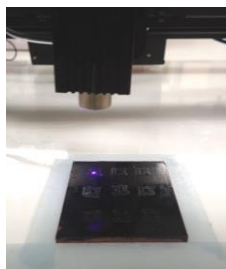


図26 漆膜加工実験の概観

Fig.26 Overview of Urushi processing experiment

6.5 実験結果・考察

表 9 より, 目標値 1.92 μm と 3.84 μm の誤差は 10% を超えた. これは, 5.2 と同様の漆膜表層における原因によるものであると考えられる. 漆膜深層(目標値 5.90 μm ,

7.69 μm , 9.61 μm)においては, 4.5 と同様の原因で誤差にばらつきが生じたと考えられる. したがって, これらの課題は 5.2 において示した改善を行い, 漆分解モデルの精度を高めることで, 誤差を軽減できると考えられる.

表 9 より, 目標値 1.92 μm を除く平均誤差は 4.39%, 実験全体の平均誤差は 6.53% となった. これは 5 章における平均誤差の目標 10% 以内を満たしている. この実験結果から, 本システムは任意位置へ目標値に合わせた漆膜加工が行えるといえ, 実現可能性が示された. また, 平均誤差に 5 章と際立った差分は現れなかったが, 位置精度が向上していることから, より小さい照射径においても加工精度を保てると思われる. 以上から, 位置合わせ機構が漆分解モデルに与える影響はなく, 漆膜加工システムの有効性が示された.

表9 照射径 1.0mm に関する目標値と実測値の誤差

Table 9 Error between target and measured values for the irradiation spot diameter 1.0 mm

目標値 [μm]	1.92	3.84	5.77	7.69	9.61
実測値 [μm]	2.21	4.24	5.90	7.41	9.75
目標値に対する 誤差 [%]	15.09	10.21	2.30	3.60	1.44

7 おわりに

本論文では, 漆膜加工手法の加工精度と安定性を向上させ, 任意位置に紫外線照射可能な漆膜加工システムの開発を目的とした.

漆膜加工手法の加工精度と安定性の向上では, 前回実験で問題となった漆内部の不純物や空気中の塵に対策を施し, 評価実験の精度を高めた. 評価実験の結果から, 許容誤差の範囲内において照射径に関わらず, 試行あたりの分解量は一定であることが示された. そこで, 累積分解量の平均について線形近似を行うことで紫外線強度と照射時間によって分解量が制御可能な漆分解モデルが得られた. また, 漆分解モデルの傾き (1.71 μm /試行) をもとに有効性を検証した. 検証実験の結果から, 許容誤差と定めた 10% 以内を満たしたことで, 目標を達成し, 本モデルの有効性が示された.

任意位置に紫外線照射可能な漆膜加工システムの開発では, XY ステージを用いて紫外線レーザー側を任意の位置に移動可能な装置と制御用ソフトウェアを試作した. 任意位置への繰り返し精度に関しては, 実験の結果, 多層プリント配線板の基準穴からの部品穴位置許容差内であり, 十分な位置精度で紫外線照射が可能であることが示された. また, 位置合わせ機構が漆分解モデルに影響があるかを検証した結果, 漆膜加工の平均誤差は目標である 10% 以内を満たした. したがって, 位置合わせ機構は漆分解モデルに影響を与えず, 任意位置での漆膜加工として, 漆膜加工システムに有効性があることが示された. 以上より, 漆膜加工システム

を用いることで、多層化に必要なスルーホールや配線の溝を、任意位置に対して高精度に作成可能であることが示唆された。

今後の展望として、課題として残った漆膜深層での不純物、レーザー変位計の計測誤差を引き起こす漆内部の大きく不揃いな粒子、実験中の塵の混入、紫外線レーザーの輝度ムラや焦点位置の分解範囲の差への対策を行うことで、現在のマイクロオーダーからナノオーダーへ漆分解モデルの精度を向上させ、漆膜上での半導体や素子生成等に展開させていきたいと考えている。また、今回開発した漆膜加工システムを用いて、実際に多層回路構築技術の確立を行っていく。さらには、製作した漆回路や漆インタフェースに対して、耐久性やロバスト性などの性能評価と共に、使い心地や所有感等を感性評価によって検証し、漆を回路やインタフェースに用いることで得られる効果を明らかにしていく。

謝辞

本研究の一部は電気通信普及財団の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] NIKE, Inc., “NIKE+FUELBAND”, http://www.nike.com/us/en_us/c/nikeplus-fuelband
- [2] JIBO, The World’s First Social Robot for the Home, <https://www.indiegogo.com/projects/jibo-the-world-s-first-social-robot-for-the-home#/story>
- [3] SmartDesk: Worlds First Smart Standing Desk | Indiegogo, <https://www.indiegogo.com/projects/smartdesk-world-s-first-smart-standing-desk#/>
- [4] 橋本悠希, 小泉直也: 漆をベースとした電子回路構築手法の基礎的検討, 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 1, pp. 64-71 (2015).
- [5] 兵神装備株式会社: 絶縁材料の性質, The Engineer’s Book, 172 (2011).
- [6] 四柳嘉章: 漆 I, 法政大学出版局 (2006).
- [7] PCB ART moeco, <http://www.moeco.jp.net/>
- [8] 脇田 実, 小島政一: 岐阜県工業試験場業務報告 堅地塗膜の吸水, 吸湿変動について
- [9] 京都漆器工芸協同組合 「抗菌漆器」のレポート記事 , <http://www.kyo-shikki.jp/think/#>
- [10] Myojin Yu, Hashimoto Yuki: *Urushi*-based Electronic Circuit: Study on Characteristic of *Urushi*’s Dissolution by Ultraviolet Light, JIIAE, Vol.4, No.1, pp.11-18, (2016.1.25).
- [11] Hashimoto Y., Koizumi N., Myojin Y., Shizuki B., Hanada N.: *Urushi* Circuit –Traditional Craft for HCI-, ACM CHI2015 Symposium on Emerging Japanese HCI Research Collection, Seoul/Korea, 2015/4/18.
- [12] Kenji Toki Studio 漆×「・」, <http://kenjitoki.tumblr.com/>
- [13] 明神優, 橋本悠希, 志築文太郎, 花田信子, 山口佳樹: 漆の美しさや質感を保った漆回路の開発, 情報処理学会 インタラクシオン 2016, pp.519-521, (2016/03/2-4).

- [14] 第 20 回一般社団法人情報処理学会シンポジウム インタラクシオン 2016, (2016/3/2-3/4), <http://www.interaction-ipsj.org/2016/>
- [15] ミッツ: プリント基板加工機, <http://www.mits.co.jp/doc/apri.htm>
- [16] 三菱電機: 基板穴あけ用レーザー加工機 <http://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/mecha/laser/items/drilling/index.html>
- [17] システムギアダイレクト: 多層基板製造工程 <https://www.systemgear.jp/kiban/process-m.php>
- [18] 佐藤貴彦: 進化した「MR III: 雅」について, 株式会社佐藤喜代松商店
- [19] 小川俊夫: うるしの科学, 共立出版株式会社 (2014).
- [20] 島津美子, 川野邊渉: 紫外線と水分が黒漆塗膜の劣化に及ぼす相乗的な影響, 色材協会誌, Vol. 76, No. 10, pp. 385-390, 2003, DOI.
- [21] 宮腰哲雄: 漆学 植生、文化から有機化学まで, 明治大学出版会, pp.75 (2016).
- [22] 日本工業標準調査会: JISC5014 多層プリント配線板, p4

(2016年9月7日受付)

[著者紹介]

明神 優 (学生会員)



2015年筑波大学理工学群工学システム学類修了。電子デバイスおよびバーチャルリアリティに関する研究に従事。

橋本 悠希 (正会員)



2010年電気通信大学電気通信研究科博士課程修了。2013年筑波大学システム情報系助教、現在に至る。インタラクティブ技術、バーチャルリアリティおよび触覚インタフェースに関する研究に従事。博士(工学)。