

平成２９年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「工業製品製造に適した革新的な多次元制御方式による
３Ｄプリンタの技術開発」

研究開発成果等報告書

担当局 関東経済産業局

補助事業者 タマティーエルオー株式会社

目 次

第 1 章 研究開発の概要

- 1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1－2 研究体制（研究組織、管理体制、研究者氏名、協力者）
- 1－3 成果概要
- 1－4 当該研究開発の連絡窓口

第 2 章 本論

- 2－1 新規多自由度ステージの機構研究と制御技術の開発
- 2－2 インクジェット適正と実用性を両立させた UV 硬化型樹脂インクの開発
- 2－3 開発した UV 硬化型樹脂インクに適したインクジェットヘッド System の開発
- 2－4 多次元制御方式プリンタの試作と評価

最終章 全体総括

第1章 研究開発の概要

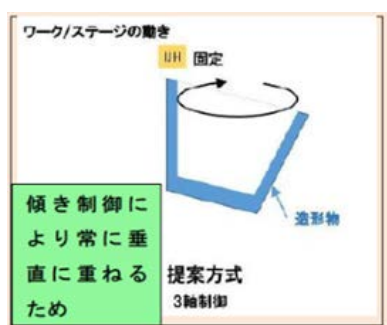
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 背景

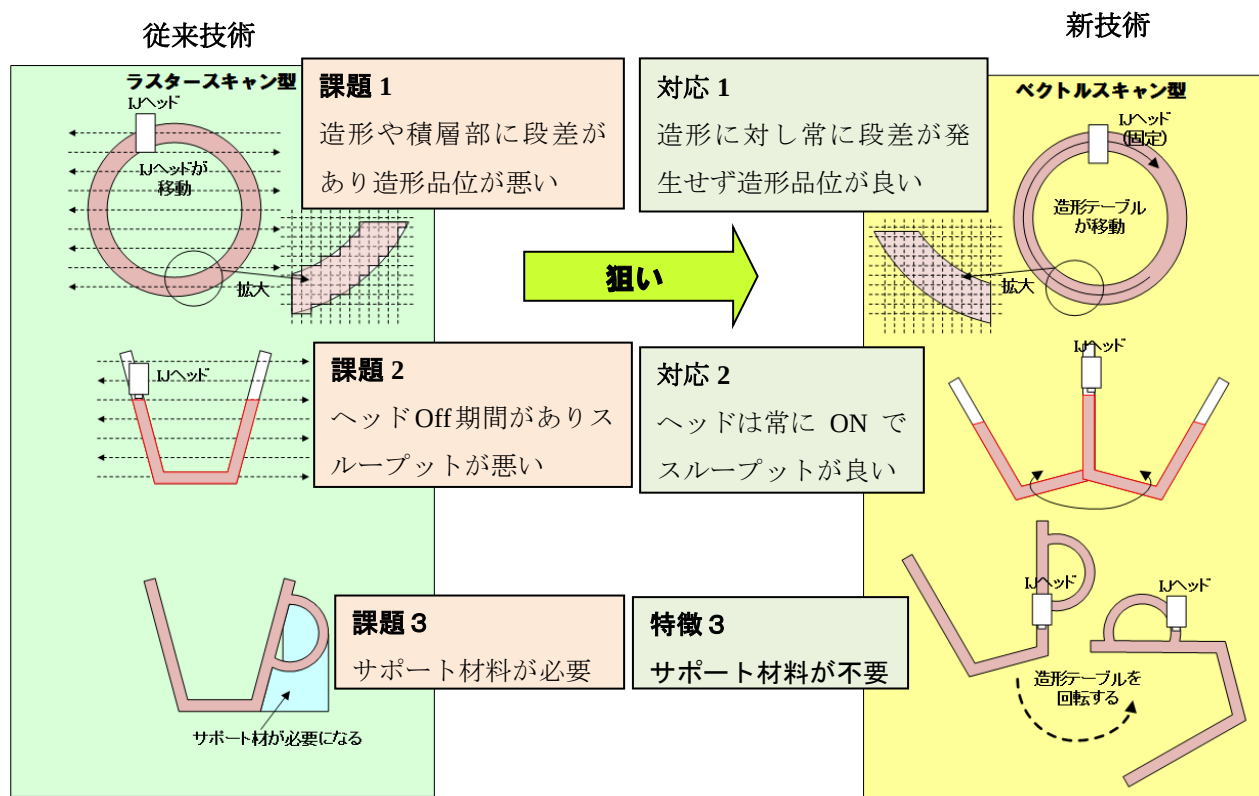
近年立体造形分野に、通常のプリンタ技術を応用した3D プリンタが活発に使われるようになってきたが、2次元プリンタをベースにしたラスタスキャン方式で、かつモールド材を使ったFDM 方式が主流のため工業製品への応用を考える上では制限が多く、次のような要求に答えていく必要がある。

- * 造形制限のないフレキシブルな立体造形
- * 高速、高精度、高精細な立体造形
- * 異種材料を組み合わせた複合立体造形

傾斜造形



複合材造形



2) 研究目的及び目標、実施結果

上記背景から本プロジェクトの具体的な課題を次の4項目に設定した。

(1) 新規な 3D プリンタに適した高速、高精度多自由度ステージの機構研究とその制御技術の開発

サブテーマ【1-1】パラレルリンク機構の検討、設計

サブテーマ【1-2】ステージの試作

サブテーマ【1-3】アクチュエータの選定と制御方式の実証

(2) 新規な 3D プリンタに適したインクジェット適正と実用性を両立させた新規な UV 硬化型樹脂インクの開発

サブテーマ【2-1】モノマーの開発及びインク組成

サブテーマ【2-2】インクジェット特性によるインクの改善

サブテーマ【2-3】インク硬化特性の改善

(3) 新規な 3D プリンタに適した新規な UV 硬化型樹脂インクに適したインクジェットヘッドの開発

サブテーマ【3-1】ヘッド基本構成の確定と設計

サブテーマ【3-2】ヘッド試作及び駆動回路試作

サブテーマ【3-3】インクジェット特性の確定

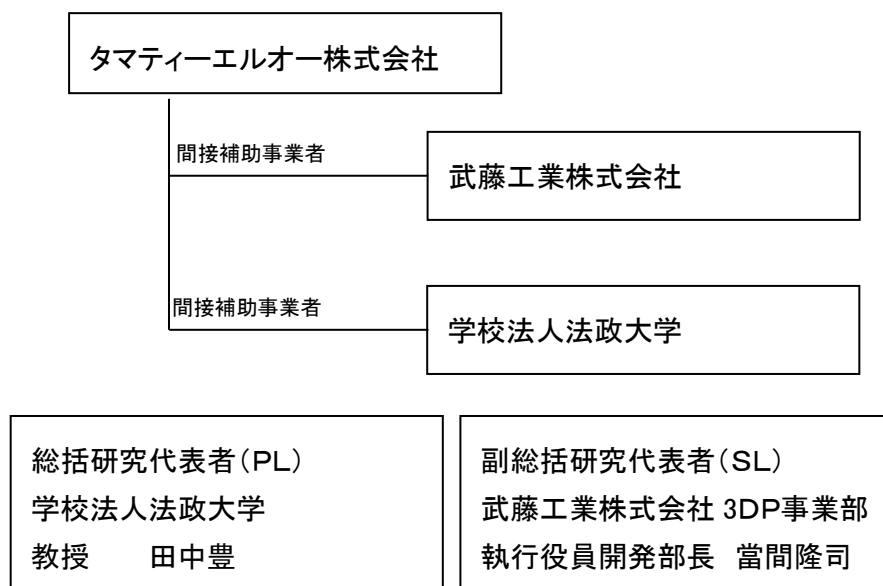
(4) 多次元制御方式 3D プリンタの試作と評価

項目	目標値	実施結果
(1) 新規な 3D プリンタに適した高速、高精度多自由度ステージの機構研究と制御技術の開発	最大造形物：210×297×150 (mm) 垂直耐荷重：20kg 繰り返し位置決め精度：10 μ m 最大移動速度：200mm/s 以上 X-Y-Z 軸周りの回転	1. 新パラレルリンクおよびインクジェットヘッドで動作確認、システム制御の互換性等の検討を進めた。 2. 新パラレルリンク設計はX-Y-Z軸回りの回転運動 θ_x , θ_y , θ_z が実現できた。但し、 θ_z は軸受の耐久性の問題で形式変更を行ったため 60° 程度になってしまった。

(2) 新規な 3D プリンタに適したインクジェット適正と実用性を両立させた新規な UV 硬化型樹脂インクの開発	硬化エネルギー：300mJ/cm² 以下 硬化物硬度：鉛筆硬度 3H 以上 粘度：20mPa・S 以下 表面張力：30±3N/m	インクジェットヘッドを構成する部材の浸漬試験を実施し問題ないことが明らかとなった 硬化エネルギー、硬化物硬度、粘度、表面張力の確認を行い、目標値通りであることを確認した。
(3) 新規な 3D プリンタに適した新規な UV 硬化型樹脂インクに適したインクジェットヘッドの開発	高粘度インク対応：20mPa・S 以上 ノズル密度：150 n/inch 以上	実験機をより現実に近い形で動作出来る様にす 為更に改造を行い、一連の造形シーケンスをバッチ処理で実現出来る様に改造を行った R 社製ヘッドと T 社製ヘッドの比較を行いドライバを含め完成度の高い T 社製をベースにすることに決定した。
(4) 多次元制御方式 3D プリンタの試作と評価	工業製品製造に適した 3D プリンタの試作品の完成	カチオン重合 UV 硬化型インクを 25, 200pL × 70 層を積み重ね Φ0.65 × H5.09 の柱を造形した。また異物上（瀬戸物の置物の犬の頭）に柱を造形した。

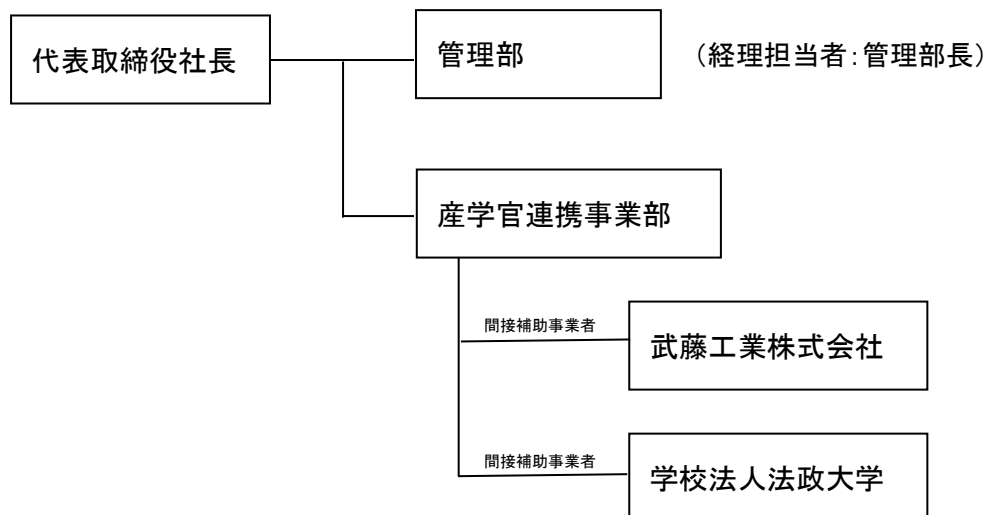
1-2 研究体制(研究組織、管理体制、研究者氏名、協力者)

1) 研究組織(全体)



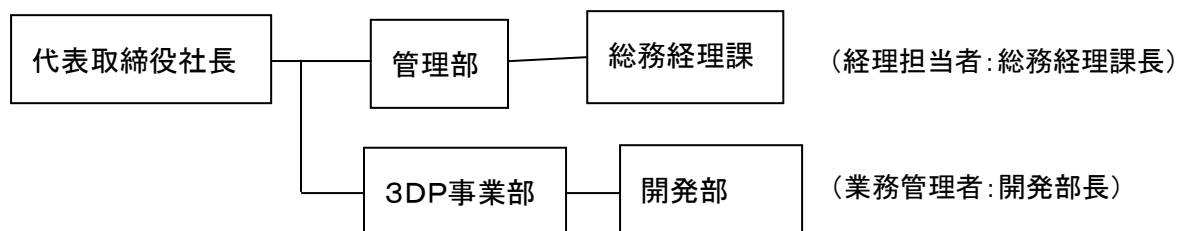
2) 管理体制

(1) 事業管理機関(タマティーエルオー株式会社)

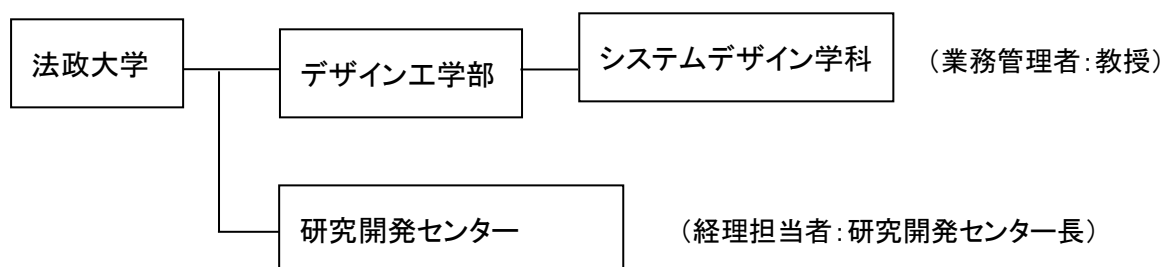


(2) 間接補助事業者

【武藤工業株式会社】



【学校法人法政大学】



(3) 研究者氏名

氏 名	所 属・役 職
當間 隆司(SL)	武藤工業(株) 3D プリンタ事業部 開発部 部長
小室 茂雄	同 部員
櫻井 純一	同 部員
佐々木 聖	同 部員
大柏 宣栄	同 部員
菅原 諒	同 部員
橋本 竜馬	同 部員
田中 豊(PL)	学校法人法政大学 デザイン工学部 教授
田沼 千秋	同 理工学部 客員教授
池田 昌弘	同 デザイン工学研究科
加藤 航	同 デザイン工学部システムデザイン学科
関 智弥	同 デザイン工学部システムデザイン学科

(4) 協力者(研究開発推進委員会 委員)

氏名	所属・役職	備考
田中 豊	学校法人法政大学 デザイン工学部 教授	PL
當間 隆司	武藤工業(株) 3D プリンタ事業部 開発部 部長	SL
佐々木 聖	同 部員	委
大柏 宣栄	同 部員	委
田沼 千秋	学校法人法政大学 理工学部 客員教授	委
池田 昌弘	同 デザイン工学研究科	委
加藤 航	同 デザイン工学部システムデザイン学科	委
関 智弥	同 デザイン工学部システムデザイン学科	委
福岡 新五郎	ウナック研究所	アドバイザー
五嶋 裕之	(株)工苑 開発部部長補佐	アドバイザー
山県 通昭	タマティーエルオー(株)代表取締役	
三宅 隆	同 調査専門員	委 事務局
晝馬 俊治	同 調査専門員	委

1-3 成果概要

- 1) 新規な 3D プリンタに適した高速、高精度多自由度ステージの機構研究とその制御技術の開発
サブテーマ【1-1】パラレルリンク機構の検討、設計
サブテーマ【1-2】ステージの試作
サブテーマ【1-3】アクチュエータの選定と制御方式の実証
 - ・直接造形物の形に沿って造形材料を積層するベクトルスキャン方式に適した多自由度造形機構を検討し、基本的な仕様を満たす機構を開発した。
- 2) 新規な 3D プリンタに適したインクジェット適正と実用性を両立させた新規な UV 硬化型樹脂インクの開発
サブテーマ【2-1】モノマーの開発及びインク組成
 - ・インク主成分であるカチオン重合モノマーの開発と最適なインク組成の開発を行った。サブテーマ【2-2】インクジェット特性によるインクの改善
 - ・開発した樹脂及びインクジェット用インクの特性を多面的に評価を行った。サブテーマ【2-3】インク硬化特性の改善
 - ・より低照度の光源で、かつ暗反応の起こらない増感剤の配合のバランスを確認した。
- 3) 新規な 3D プリンタに適した新規な UV 硬化型樹脂インクに適したインクジェットヘッドの開発
サブテーマ【3-1】ヘッド基本構成の確定と設計
 - ・カチオン重合 UV 硬化型インクに適正のあるインクジェットヘッドと硬化用 UV 光源の選定を行った。サブテーマ【3-2】ヘッド試作及び駆動回路試作
 - ・インクの高粘度化及び立体造形の為のインク吐出用駆動波形の最適化を図った。サブテーマ【3-3】インクジェット特性の確定
 - ・インク物性の最適化とインクジェット特性（吐出安定性、吐出速度等）とのバランスを総合的に判断してパラメータを決定した。
- 4) 多次元制御方式 3D プリンタの試作と評価
多自由度ステージの機構とインクジェットヘッドを組合せ、プリンタを試作し、造形物を製作した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

対外的な問合せの担当者

タマティーエルオー株式会社 産学連携事業部 三宅 隆

電話：042-570-7240

FAX：042-570-7241

E-mail：miyake-takashi@tama-tlo.com

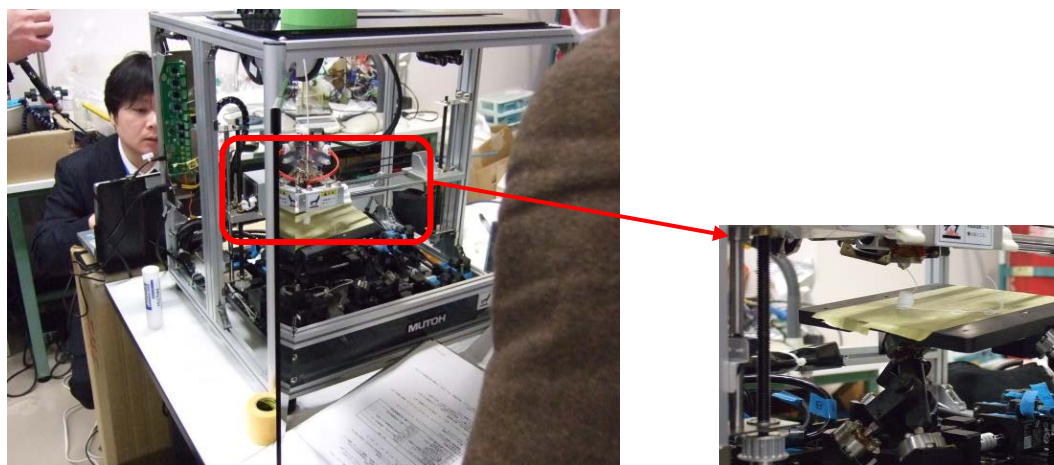
第2章 本論

2-1 新規な 3D プリンタに適した高速、高精度多自由度ステージの機構研究とその制御技術の開発

1) 初年度予備実験

機械振興協会所有の 6 軸パラレルリンク機構をリニューアルし、FDM ヘッドモジュールとのリンクを行い 3D プリンタのメーカーとして必要な仕様の洗い出しを行った。

造形は円筒を作成したが、メーカーの可動範囲が高さ方向によって制限される範囲が大きく異なり、通常造形では直行軸系のメーカーより不利であることが分かった。



2) 多自由度造形機構の検討および設計

初年度予備実験結果より、可動範囲を広くした（A4サイズ×150mmの立体を製作できることを目標に新方式のパラレルリンク機構を設計試作した。

(1) パラレルリンク機構の形式検討

様々なパラレルリンク機構を調査した結果、今回のアプリケーションに於いては直動型が最も適していると判断した。

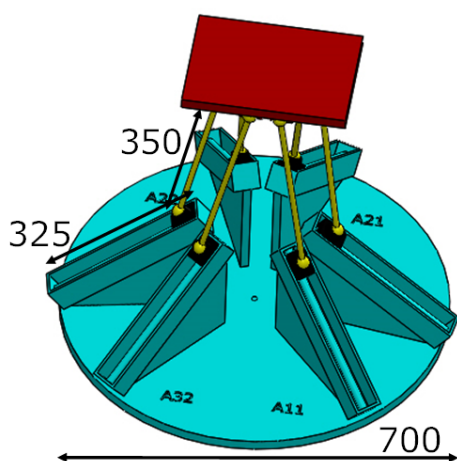
タイプ	伸縮型	回転型	ワイヤ型	直動型
例	Stewart Platform型	HEXA型 DELTA型	パラレルワイヤ懸垂型	直動固定型
高速応答性	×	◎	◎	○
出力	○	×	×	○
可動領域	×	◎	◎	△
剛性	◎	×	×	○
精度	○	×	×	◎
実用例				

(2) 設計・試作

下図のような直動固定型モデルで設計を行い試作した。

駆動アクチュエータは単軸のロボットで、ボールねじピッチを 0.5 mm/Rot として分解能を上げる方法を採用、出力は単軸あたり 100W のモータを採用した。

単軸アクチュエータは 30° の取り付け角とし移動量と角度のバランスを取り、ジョイントはテーブル側をマグネットジョイント、軸側をユニバーサルジョイントとした。

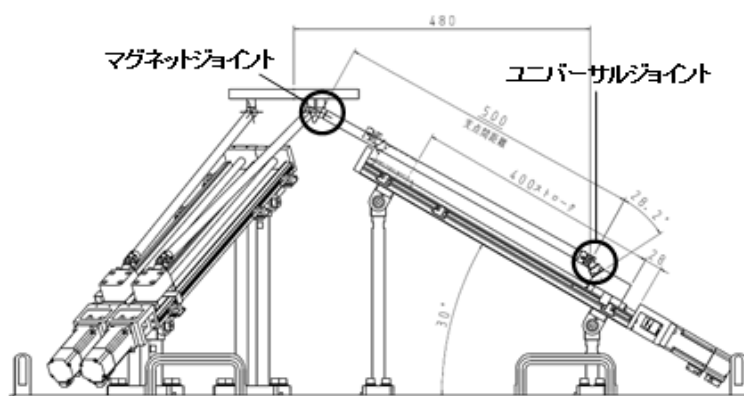


タイプ	パラレルメカニズム (platformジョイント6つ)
可動エリア	約460×490×275mm (Platform可動領域)
ヘッド	固定 (A2域が必要)
精度	中
剛性	低
速度応答性	高
回転自由度	高
価格 (ハード)	中

キー技術となる軸の取り付け角を 30° に設定する方法として、単軸を2本の支柱で支え、組み付け時にシムで調整を行う構成を取った。

結合部については腕にねじれの力が掛かるためユニバーサルジョイント部には回転の自由度を与えるジョイントを追加した。

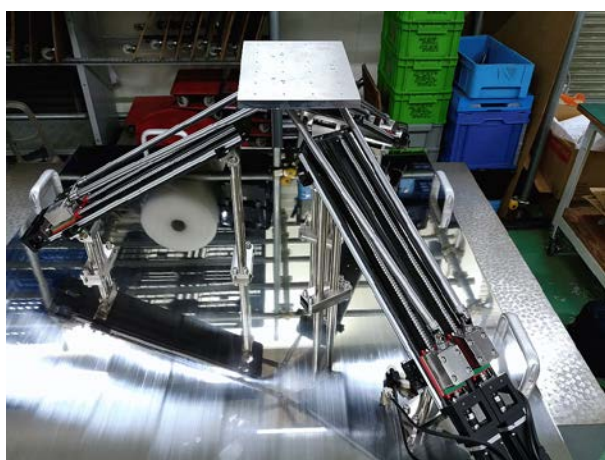
各単軸のセンサは上端と下端と HP の3点を把握できるモノとした。



3) パラレルリンク機構の試作

設計に基づき試作を行った結果、造形テーブルの傾き角は 40° 程度まで動くことが確認された。又、メーカーの最大領域としては高さ 400 mm 程度まで上がる為、A4 サイズ以上の造形が可能である事が確認できた。

制御については EtherCAT（今後の標準 I/F）を採用し、汎用性を高めた。
動作検証は動作コマンドを手書きで編集した。



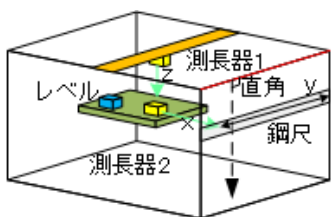
4) 課題

試作結果の評価の中で次のような課題が見えて来て、実用化する上では更なる研究開発が必要であることが判明した。

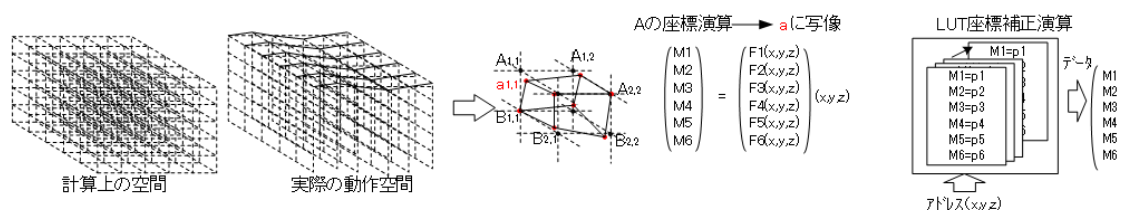
(1) 精度の検証方法

造形用のデータは X, Y, Z の直交座標で生成されるため、6 軸メーカーは直交座標系の位置を正しくトレースする必要があるが、自由度が増え誤差要因が増えたことで座標としての調整は難しく、実空間が歪んでいることを前提に考える必要があることが分かった。

この歪みを補正するため LUT（ルックアップテーブル）で座標補正を行うこととしてその準備として以下のような測定系を構築し試験方法の確認を行った。



6 軸メーカーは基準面がないためヘッド位置を基準として左図のような測定系とした。

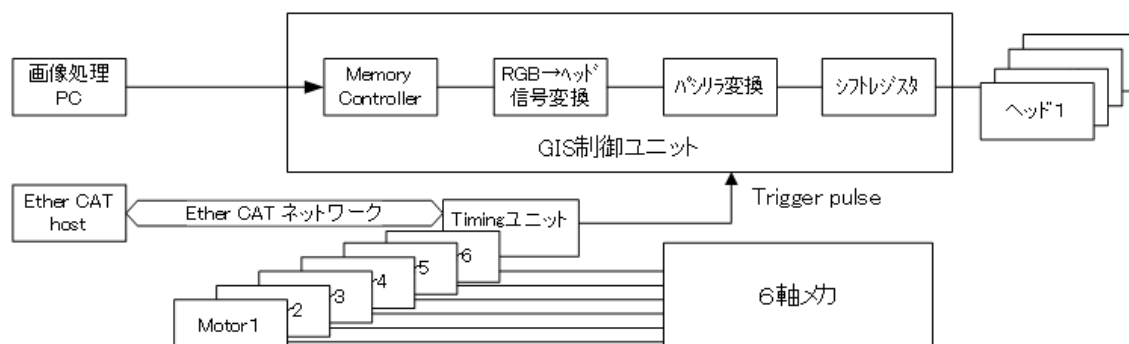


歪み補正の考え方

ただ利用したレーザ測長器の精度では小さい変位量に対する誤差は確認できるが、座標全体の位置を精度良く測定するのは無理があり、本格的な測定系を構築しなければこの考え方の実用化は難しいことが分かった。

(2) システム構成

造形作業の内、形状から造形ポイントの座標や必要なステージの傾きを演算するアプリケーション側の処理（C A D／C A Mの領域）は外付の画像処理P Cで行い、3 Dプリンタ側は、画像処理P Cから指令された座標とステージの傾きで造形作業を行う単純な構成とした。画像処理P Cの部分は今回のP J Tの対象外とし、造形実験のプログラムは全て手動で行うこととした。



実用化に当たってはアプリケーション側の開発が不可欠であり、大きな投資が必要になる。

2-2 新規な 3D プリンタに適したインクジェット適正と実用性を両立させた新規な UV 硬化型樹脂インクの開発

1) モノマーの開発およびインク組成の最適化

インク主成分としてカチオン重合モノマーを選択し、インク表面張力、粘度などのインク物性に加え、インクジェット特性や安定性・安全性に配慮したインクを開発。

インクの開発はメーカ主体の共同開発でメーカ側の秘密事項に属するため、インクそのものの成分や詳しい特性については把握出来ていない。

プロジェクトとしては、ヘッドと組み合わせた特性を把握することで応用面の課題を見つけることを主眼にして活動した。

(1) マテコン試験

インクジェットヘッドを構成する部材の浸漬試験を実施し問題ないことを確認した。
(2社のインクジェットヘッドを調査)

(2) UV 硬化インクとヘッド吐出評価

造形時に必要となるインク硬化に必要な光エネルギーの照度と積算光量の関係を調査した。基本的には照度が強くなるほど硬化に必要な積算光量は少なくなるが、イン

対象ヘッド	R 社		T 社	
温度 (° C)	20 ± 5	50 ± 5	20 ± 5	50 ± 5
構造物	変化なし	変化なし	許容値	許容値
接着剤	変化なし	変化なし	許容値	許容値

クの流動化停止（ゲル化）は 50mJ 以上のエネルギー、照度は 15mW/cm² 以上必要であることを確認した。

照射時間 (sec)	照射エネルギー(15mW/cm ² , λ=365nm)			
	35%	50%	70%	100%
60	0.32			
45	0.24			
34	0.18	0.26	0.36	0.51
15	0.08	0.11	0.16	0.23
6	0.03	0.05	0.06	0.09
3	0.02	0.02	0.03	0.05

Unit : J/cm²

タックフリー

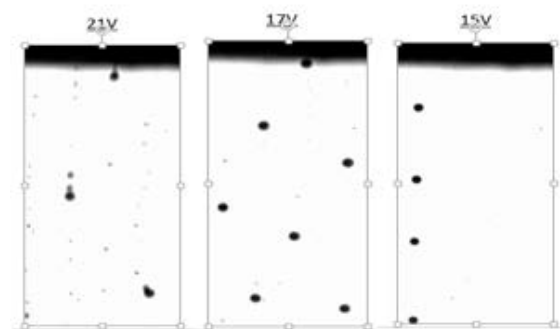
(3) インクジェット特性の把握

開発した樹脂及びインクジェット用インクの特性をノズルからのインクの吐出状況および硬化の状況を高速度カメラシステムで動画観察して確認した。

* 吐出電圧による吐出される液滴の状態確認

吐出電圧 23 v では一つの液滴に余分な液滴が連なってしまう。

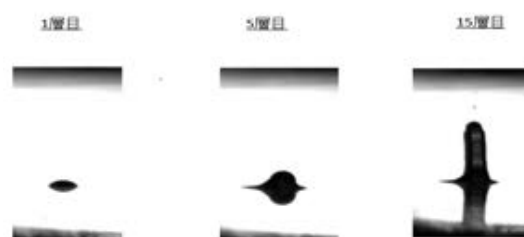
吐出電圧 15 v ではノズルにより吐出されないものが発生する。中間の 17 v を採用し実験する。



* 液滴の基板への積層状況の確認

1 層あたり 100 滴、1 層ごとに 1 回露光の形で積層の状況を確認した。

5 層目辺りまでは水平方向に広がってしまうが、5 層目辺りから柱が立ち始めることが確認できた。



* インク吐出体積

- ・インク液滴体積は、駆動電圧およびドロップ数に依存する。
- ・全体的に設計値より多く吐出されている結果になっているが、その後の調査で一回当たりの吐出量の設定に誤りがあったことが判明した。このため、高速ビデオカメラでインク液滴の吐出観察を行ったところ、インク液滴の数が設定値の 7 倍吐出されていることが分かった。
- ・インク液滴体積の測定時のパラメータ設定に誤りがあったためである。すべての測定データを修正するとほぼ設計値となることを確認した。

(4) インク液滴の濡れ特性

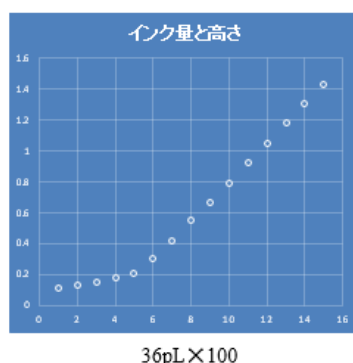
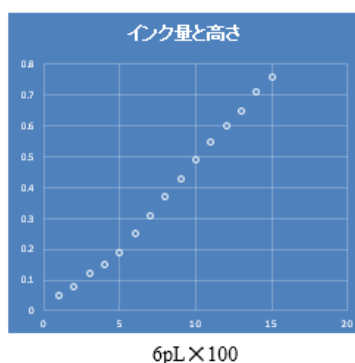
ガラス基板上にインクを滴下させて放置した場合、時間による広がりを確認
ガラス基板上のインクはレベリングするが、60sec 程度であれば直径は 1.5 倍以内であることを確認した。

放置時間 (sec)	50層 (2100pL)	100層 (4200pL)	200層 (8400pL)
3	0.5	0.65	0.9
6	0.6	0.7	1
30	0.7	0.7	1
60	0.7	0.8	1.1

ガラス基板
白インク

(5) インク液滴の積層過程

(2) 項で、1 層あたり 100 滴、1 層ごとに 1 回露光の形で積層の様子を示したが、これを定量的に確認した。



これよりインクの積層過程は、ベースが形成される過程と円柱が形成される過程に分けることが出来、分岐点は1回あたりの容積によらず5層目辺りで、高さは0.2mmあたりになっていることが確認できる。

(6) 駆動波形、チラー温度の確認

インクのチラー温度の設定と吐出電圧・波形を変更して吐出状況を確認した。

チラー設定温度(40℃)		チラー設定温度(45℃)					チラー設定温度(50℃)					
駆動波	駆動電圧	駆動波形	ライブラリ 1	ライブラリ 2	ライブラリ 3	ライブラリ 4	ライブラリ 5	○	△	△△	×	-
21V	21V	駆動電圧	1	2	3	4	5	吐出可	吐出が不安定	吐出が非常に不安定	吐出不可	実験未実施
19V	19V	19V	-	○	-	-	-					
17V	17V	21V	-	○	-	-	-					
15V	15V	19V	○	○	○	○	○					
13V	13V	17V	○	○	○	○	○					
	13V	15V	×	×	×	×	×					

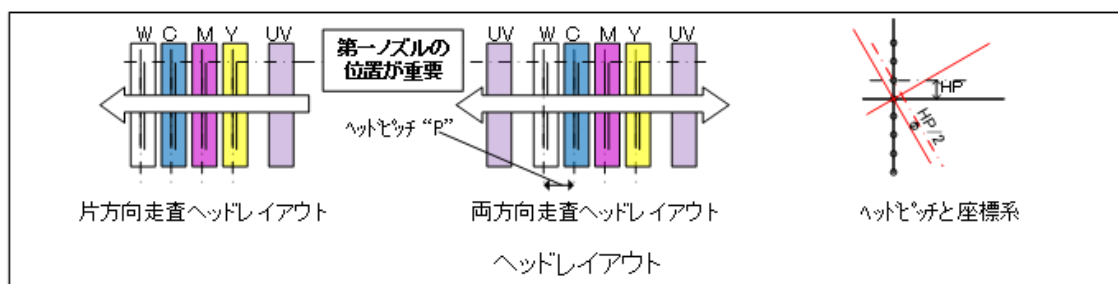
○	吐出可
△	吐出が不安定
△△	吐出が非常に不安定
×	吐出不可
-	実験未実施

暫定条件として駆動電圧17V、波形ライブラリー4、チラー温度45℃を決定した。

2-3 新規な3Dプリンタに適した新規なUV硬化型樹脂インクに適したインクジェットヘッドの開発

1) ヘッドの基本構成の確定と設計

インクジェットヘッドとしての適性を持たせる様に、UV硬化インクのチューニングと、高出力が得られるUV-LEDユニットを開発し、ヘッドノズルを詰まらせ無いようなヘッドとUV光源の配置を決定した。



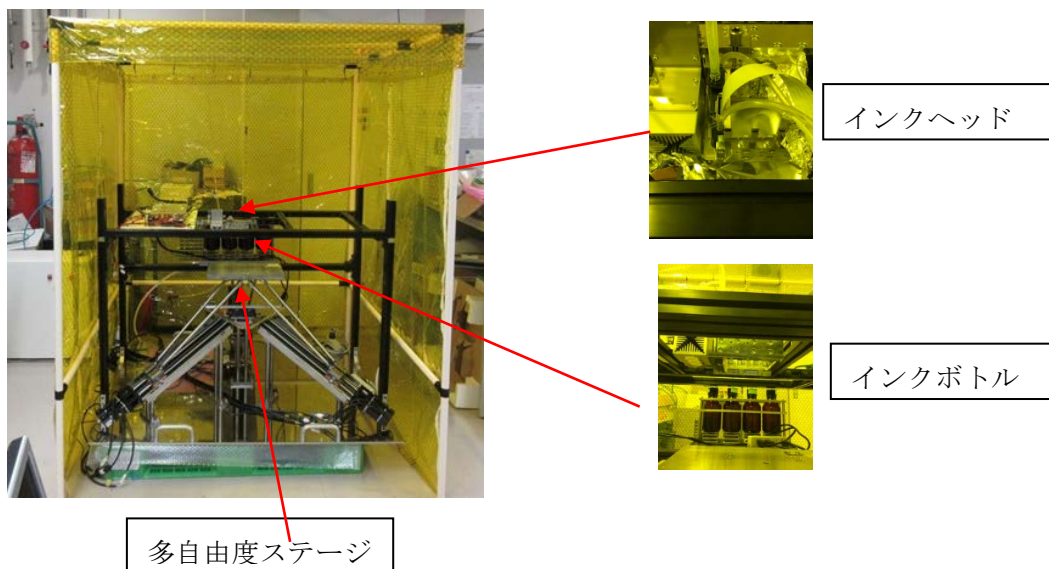
2) インクジェットヘッドおよび駆動回路選定

RICOH製ヘッドと東芝テック製ヘッドを比較検討し、当面安定性が優れていた東芝テック製ヘッドを進めることを決定した。

2-4 多次元制御方式3Dプリンタの試作と評価

試作した多自由度ステージの機構と開発したインクジェットヘッドSystemを組み合わせる3Dプリンタとして完成させ基本的な動作の確認を行った。

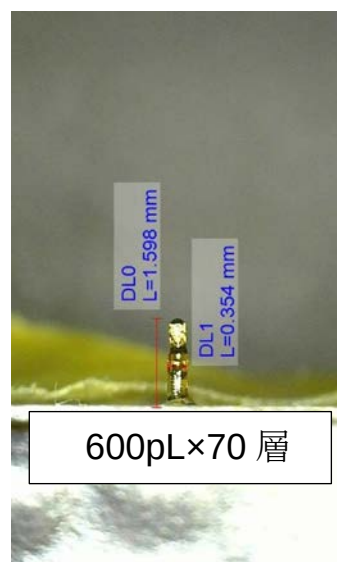
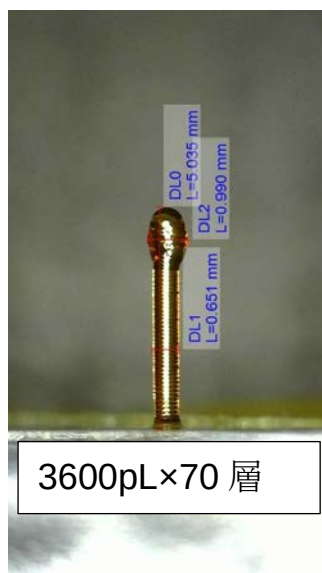
1) 完成した試作機



2) 造形実験

種々のトラブルや、造形データの構築が難しく、当初予定した形状の造形は出来なかったが、基本形状として最小単位の柱の造形を行った。

(1) 柱の造形



軸受け部分の破損により、露光位置への移動時に振動が発生し、柱の生成が出来なかったが、移動速度を抑えることにより造形出来た。

(2) 傾いた柱の造形

サポート材無しで傾斜した造形が出来ることの最低限の確認としてステージを傾けて犬の模型の上に傾いた柱をサポート材無しで造形する実験を行った。本実験は試作機のステージの駆動が損傷してしまったため、インク評価用に製作した吐出実験機を使用して行った。(インクヘッドは試作機から取り外して使用)

柱は犬の後ろ側に傾いている。



最終章 全体総括

多自由度の造形を行うインクジェット3Dプリンタとしては、必要な開発項目が多く残っており、早急な実用化は難しいが、当面は開発された要素を生かした次のような実用化を検討していく。

1) 多自由度造形機構

円筒や球面などの3次元構造体表面に2D印刷するようなカスタム対应用途への応用

2) インクジェット適正と実用性を両立させたUV硬化型樹脂インクと適合するヘッド

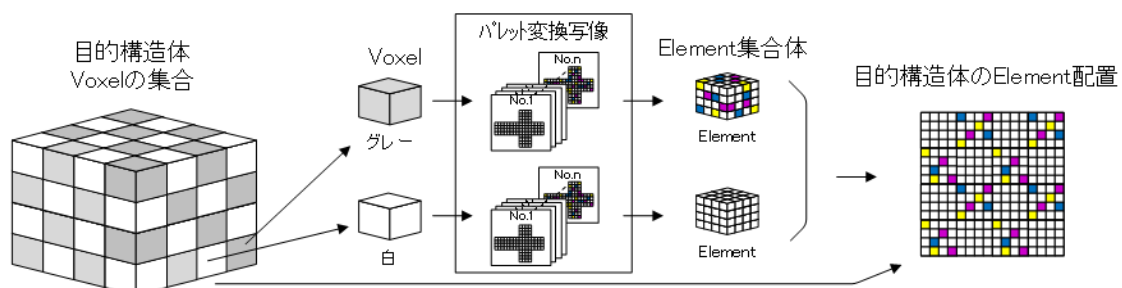
高温耐性と他の材料との接合性を持ったエポキシUV硬化インクの開発が完了しインクジェット適正が確認されたので金属板への3D付加造形のアプリケーションや印刷物への点字の造形を検討していく。

3) フルカラー造形の特許

インクジェット方式は一回のインクの吐出量は数十pIと小さいため、構造体を作る場合は同一個所に複数の吐出する必要がある。1ヘッドだとヘッド当たりのインク消費量が大きいので4ヘッド造形を行うことを考えている。

4ヘッドを使うことを前提にするとW, Y, M, Cの4色を使えばカラー化が出来るため、以下の変換系を考え特許申請を行った。

早急な実用化は難しいが、立体物のフルカラー造形が必要になったときには有力な武器になると考えている。



フルカラー造形に関する特許を国際出願済み。(PCT/JAP2017/007407)

国内および米国で移行し、登録は 2018 年 3 月までには完了予定。

4) 事業展開スケジュール

想定するサンプル出荷先						
スケジュール	事業年度	平成 30 年度	平成 31 年度	平成 32 年度	平成 33 年度	平成 34 年度
	サンプルの出荷 (含む派生品)			→		
	追加研究	→	→			
	設備投資		→			
	製品等の生産 (派生含む)			→	→	→
	製品等の販売 (派生品含む)			→	→	→
	特許出願	→				
	出願公開		→			
	特許権設定			→		
	ライセンス付与				→	→
売上見込	売上高 (千円) (派生品含む)	0	0	28,000	80,000	173,150
	装置販売数量 (台) (派生品含む)	0	0	2	5	10
	インク販売量 (Kg)	0	0	200	750	1,925
	売上高の根拠	1) 派生品は先行して販売 3D プリンタ装置 (10,000 千円/台) 以降になる予定。 2) インク 40 千円/Kg インク使用量 1 台当たり 100Kg/年 3) 売上げは、プリンタ装置販売と累積稼働台数のインク年間使用量で算出した。 4) インクの価格を平成 34 年度からは 5% 値が下がるとして計算				

現状のヘッドを使用した場合、1 ノズル当り 42pl で、平均使用ノズル数を 150 ノズルとし駆動パルスを 5KHz とすると 1 秒で吐出できるインクは $42\text{pl} \times 150 \times 5000 = 31.5 \mu$

プリンタの動作として 1/5 の時間が吐出時間とすると 1 時間当たり 12 分で

$$31.5 \mu \times 60 \text{ 秒} \times 12 \text{ 分} = 22.7\text{ml}$$

1 日 24 時間稼働でメンテナンス、段取り替えを考慮しプリンタの実動作は 15 時間とすると 1 日当たりのインク使用量は $22.7\text{ml} \times 15 \text{ 時間} = 340.5\text{ml}$

25 日稼働で約 8.5L/月 年間で 102L 比重 1.0 で約 100 kgになる。(1 ヘッド機最大稼働率)

4 ヘッド機として 50%グレーを標準と考えるとインクの吐出量は 50%となり、200kg/年

平均稼働率を 50%とすれば 100 kg/年と考えられる。