

ロボットによる空間構成法における接合法に関する基礎的研究

三次元ジグソーパズルの切削加工におけるロボットアームの姿勢による影響

Basic Research on Connection of pieces in Space Composition Method by Robot
Effect of Robot Posture on Milling for 3D Jigsaw Puzzle

白髪 誠一

大阪工業大学ロボティクス&デザイン工学部空間デザイン学科
構造デザイン研究室 教授

Seiichi Shiraga

Professor, Structural Design Laboratory,
Dept. of Design and Architecture, Osaka Institute of Technology

1. はじめに

本研究は、ロボティクスを用いた空間の構成法について研究することを目的としている。2019 年度において筆者ら¹⁾は、三次元ジグソーパズルの内部構造を単純な構成方法にすることで定式化できることを示している。また、ロボットアームを用いて、図1に示すピースを、写真1に示すようにスタイロフォームをスチロールカッターで切断することで製作している。しかし、強度と剛性が低いため、プロダクトとしての完成度は低い。

ロボットアームを用いたケミカルウッドの切削について、Silva.L.B.ら²⁾は、ロボットの姿勢によって剛性が変化し、その剛性が切削面の粗さに影響することを示している。

2020 年度の研究では、三次元ジグソーパズルのピースをケミカルウッドを切削して製作するために、ロボットの姿勢と切削条件による切削面の粗さへの影響を調べることを目的とした切削実験を行った。

2. 実験方法

図2に実験装置を示す。ロボットアームにケミカルウッドを取付け、設置台に固定したハンドグラインダで切削を行う。ケミカルウッドは、75mm 角、長さ 150mm で、比重は 0.8 である。ハンドグラインダには刃径 6 φ、刃長 16mm の超硬カッターを取付けた。

表1に供試体一覧を示す。実験変数は、ケミカルウッドの送り方向を X 方向（水平方向）と Z 方向（鉛直方向）、ロボットアーム姿勢を水平姿勢と垂直姿勢、ハンドグラインダの回転数を 11400 ~ 29000 (min⁻¹)、送り速度を 1 ~ 3 (mm/sec) と設定した。

ケミカルウッドの各辺の端部において、切削幅は 10mm、切削深さは 1mm として長さ方向に 30mm を 1 往復させることで 2mm の深さの切削を行った。供試体は以下のルールに従う。

H	V	10	1
ロボットアームによる 送り方向	ロボットアーム姿勢	ハンドグラインダ 回転速度	送り速度
H: X 方向 [mm]	H: 水平	1: 1 [mm/sec]	1: 1 [mm/sec]
V: Z 方向 [mm]	V: 垂直	2: 2 [mm/sec]	2: 2 [mm/sec]
		20: 20200 [min ⁻¹]	3: 3 [mm/sec]
		30: 29000 [min ⁻¹]	

ロボットアームは、xArm6 (UFACTORY 社製) を使用した。切削中は、ロボットアームの TCP (Tool Center Point) の座標と各関節に生じるトルクを 100Hz で計測した。

切削後、切削面の表面粗さを図3に示すダイヤルゲージ (Mitutoyo 社製) で計測する。計測は、切削幅 10mm の中心線上で 1mm ピッチで行った。

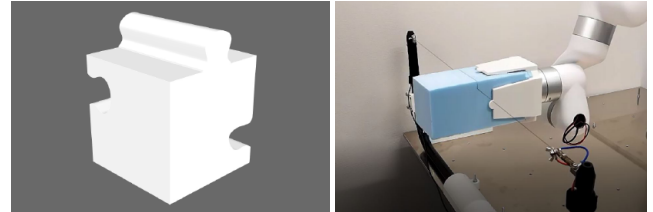
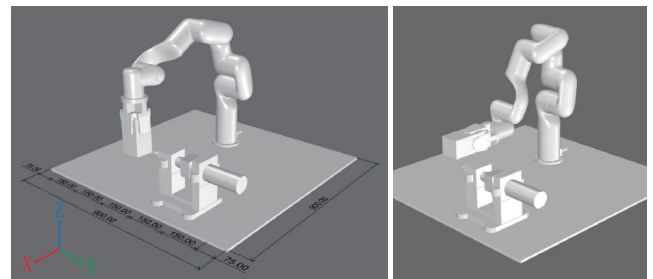


図1 パズルのピース

写真1 切断状況



a) 垂直姿勢

b) 水平姿勢

図2 実験装置図

表1 供試体一覧

No.	供試体	送り方向	ロボット姿勢	回転数 (min ⁻¹)	送り速度 (mm/sec)	平均値 m	標準偏差 σ	変動係数 v
1	HV101	X	垂直	11400	1	-0.339	0.200	0.012
2	HV102	X	垂直	11400	2	-0.259	0.240	0.015
3	HV201	X	垂直	20200	1	-0.442	0.190	0.012
4	HV202	X	垂直	20200	2	-0.178	0.190	0.012
5	HV203	X	垂直	20200	3	0.016	0.170	0.010
6	HV301	X	垂直	29000	1	-0.330	0.200	0.012
7	HV302	X	垂直	29000	2	-0.709	0.220	0.013
8	HV303	X	垂直	29000	3	-0.200	0.180	0.011
9	VV101	Z	垂直	11400	1	0.238	0.073	0.007
10	VV102	Z	垂直	11400	2	0.181	0.100	0.008
11	VV201	Z	垂直	20200	1	0.067	0.084	0.007
12	VV202	Z	垂直	20200	2	0.143	0.091	0.007
13	VV203	Z	垂直	20200	3	0.038	0.093	0.007
14	VV301	Z	垂直	29000	1	0.024	0.091	0.007
15	VV302	Z	垂直	29000	2	0.051	0.089	0.007
16	VV303	Z	垂直	29000	3	0.234	0.097	0.008
17	VH101	X	水平	11400	1	0.304	0.094	0.006
18	VH102	X	水平	11400	2	0.356	0.100	0.006
19	VH201	X	水平	20200	1	0.097	0.078	0.005
20	VH202	X	水平	20200	2	0.107	0.093	0.005
21	VH203	X	水平	20200	3	0.177	0.097	0.006
22	VH301	X	水平	29000	1	0.069	0.074	0.004
23	VH302	X	水平	29000	2	0.205	0.094	0.006
24	VH303	X	水平	29000	3	0.120	0.084	0.005
25	HH101	Z	水平	11400	1	-0.050	0.092	0.007
26	HH102	Z	水平	11400	2	-0.083	0.230	0.019
27	HH201	Z	水平	20200	1	-0.110	0.086	0.007
28	HH202	Z	水平	20200	2	-0.026	0.098	0.008
29	HH203	Z	水平	20200	3	-0.064	0.180	0.015
30	HH301	Z	水平	29000	1	-0.116	0.100	0.009
31	HH302	Z	水平	29000	2	-0.098	0.180	0.015
32	HH303	Z	水平	29000	3	-0.154	0.140	0.012

3. 実験結果

図4に回転数 20200min^{-1} の供試体の計測結果を示す。横軸は始時点からの距離 X 、縦軸は始時点からの相対深さ Z を表している。表1には、各供試体の計測値の平均値、標準偏差および変動係数を示している。図4a)に示す供試体HHでは、深さ Z は $-0.266\text{mm} \sim 0.192\text{mm}$ で推移しており、送り速度による差は小さい。図4b)に示す供試体HVでは、距離 X が大きくなるにつれて切削面が深くなり、送り速度によるばらつきが大きい結果となった。図4c)の供試体VHおよび図4d)の供試体VVは、深さ Z は $-0.147\text{mm} \sim 0.321\text{mm}$ で送り速度によるばらつきが小さい。

4. 考察

図5に水平姿勢での計測値の標準偏差を示す。供試体HHは図5a)に示すように回転数が大きくなると標準偏差が小さくなり、図5b)に示すように送り速度が大きくなると標準偏差が大きくなる傾向が見られる。それに対して供試体VHは、回転数や送り速度に関係なく標準偏差は小さい結果となった。これより水平姿勢では、送り方向を鉛直方向としたとき切削面の粗さを抑えることができることが分かる。

図6に垂直姿勢での標準偏差を示す。供試体HVは、回転数や送り速度に関係なく標準偏差が $0.17 \sim 0.24$ である。これに対し、供試体VVは標準偏差が $0.07 \sim 0.10$ となっている。これより、垂直姿勢でも送り方向を鉛直方向としたときが切削面の粗さを抑えることができることが分かる。

実験後、写真2に示す垂直姿勢と水平姿勢について、水平方向と鉛直方向の剛性を手で押すことで確認した。その結果、鉛直方向の揺れが大きく、水平方向に比べて剛性が低いことが分かった。このことから、剛性の高い水平方向に対して切削面が直交することになる鉛直方向を送り方向とすることで切削面の粗さを抑えることができることが確認できた。

5. まとめ

三次元ジグソーパズルのピースをケミカルウッドを切削して製作するために必要なロボットの姿勢と切削条件による切削面の粗さへの影響を調べた結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 超硬カッターでの切削では、切削面は $\pm 0.3\text{mm}$ 程度の粗さになる。
- 2) ロボットアームの剛性の高い方向に対して切削面を直交させることで切削面の粗さを抑えることができる。

パズルのピースを製作するためには嵌合面の精度が重要となる。また、ピースの嵌合面には曲面が含まれるため、曲面の切削を行う際におけるロボットの姿勢の制御方法と切削面の精度の関係について検討が必要である。

【参考文献】

- 1) 青木優里香、白髪誠一：三次元ジグソーパズルの内部構造の構築 三次元ジグソーパズルのアルゴリズム・デザインに関する研究（その1）、日本デザイン学会第67回春季研究発表大会概要集, pp.372-373, 2020年
- 2) Leandro Batista da Silva, Hayato Yoshioka, Hidenori Shinno and Jiang Zhu: Tool Orientation Angle Optimization for a Multi Axis Robotic Milling System, Int. J. of Automation Technology, Vol.13, No.5, pp574 ~ 582, 2019

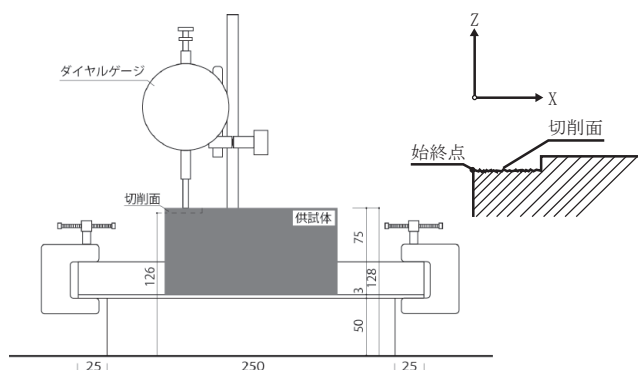


図3 表面粗さ計測

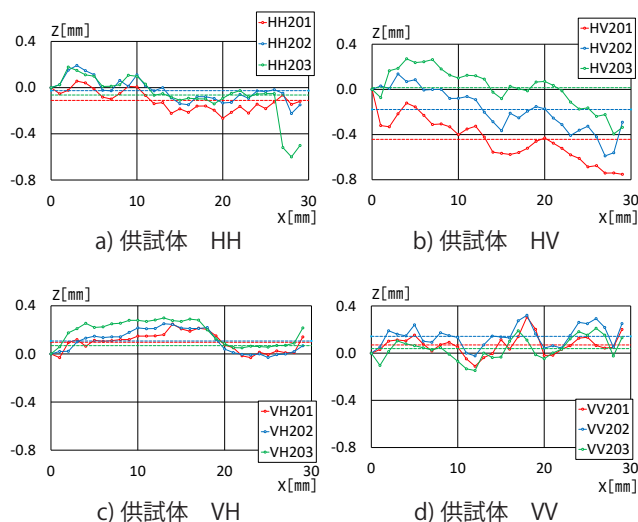


図4 表面粗さ計測結果

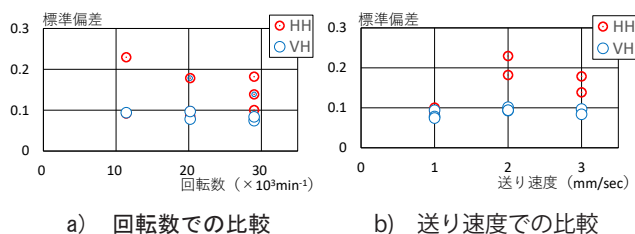


図5 水平姿勢で標準偏差

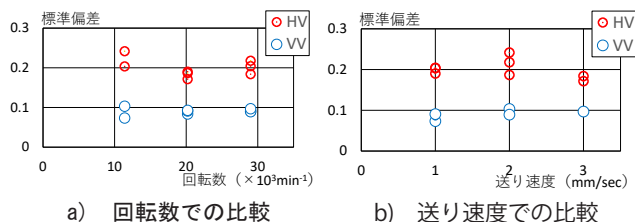


図6 垂直姿勢での標準偏差

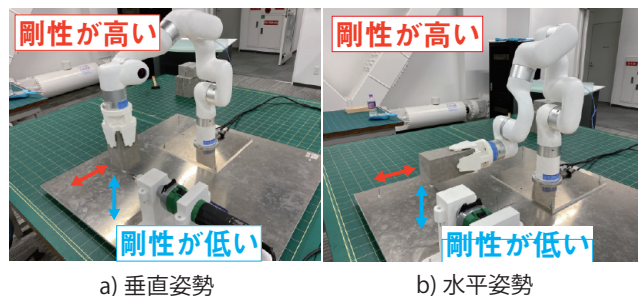


写真2 剛性の変化