



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



第9回CMI Symposium
10/22/2021

CMI研究開発の成果について

On the results of CMI R & D

東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

臼杵 年

Hiroshi Usuki



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



内容

Contents

・CMI概要

CMI overview

・研究テーマ

Research theme

・研究成果概要

Outline of research results



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



産学官連携により競争力のある早期製造技術開発を目指す

Efficiently develop aircraft manufacturing technology through industry-academia-government collaboration and maintain the technical advantage of our country

難削材料を安く早く加工する技術課題

High speed and low cost cutting of difficult-to-cut materials

組立作業の自動化課題

Automation of assembly work

- ・難削材料の高速切削加工 CFRP, チタン合金, Al-Li合金
- ・Near net shape 3Dプリント(メタル), 熱間接合, 熱間ストレッチ
- ・ロボット利用技術 ロボット切削, ロボットシーリング

産業界(12社)

Boeing
三菱重工業
川崎重工業
SUBARU
DMG森精機

出光興産
京セラ

丸隆工業
KSI
佐渡精密
青山精工
東京貿易テクノシステム

大学

東京大学 生産技術研究所
東京農工大学
東京電機大学
広島大学

官・行政

経済産業省
製造産業局
航空機武器宇宙産業課

NEDO
材料・ナノテクノロジー部



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



研究拠点

Research base

柏地区

Kashiwa campus

- ・切削加工関係研究課題
- ・成型加工関係研究課題

Cutting process relation research

Molding process relation research

駒場地区

Komaba II campus

- ・組立関係研究課題

Assembly Relation Research

委託先(東京農工大, 東京電機大, 広島大)

Subcontractor

Tokyo University of Agriculture and Technology

Tokyo Denki University

Hiroshima University

- ・残留応力シミュレーション関係課題

およびロボット高精度制御関係課題



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



- 研究テーマ

Research theme





研究テーマ(FY2021)

1. 6軸制御の誤差予測(オフライン補正)

Error prediction of 6-axis control (offline correction)

2. 三次元位置測定制御技術の基礎的開発(オンライン補正)

Basic development of three-dimensional position measurement and control technology (Online correction)

3. 残留応力データ(素材, 加工)の収集と 残留応力低減法の開発

Collection of residual stress data (materials, processing) and development of residual stress reduction methods

4. 高難易度部材加工プログラムのアルゴリズム提案

Proposal of algorithm for automatic generation of machining program for high difficult-to-cut parts

5. メタルデポジション

Metal Deposition

6. 複合材等切削コンペ

Cutting tool competition for composite materials etc.

7. (FS)高速画像処理を利用した3D位置計測

Measurement of 3D position using high-speed image processing

8. 技術相談会

Technical Consultations

ロボット切削技術の 高精度化

High-precision robot cutting technology

そり等の低減

Reduction of warping

加工工程の効率化 (自動工程計画)

Efficiency of the machining process
(Automatic process planning)

自動検査・高速画像処理

Automatic inspection and high-speed image processing

高度自動化工場

Advanced automation plant

・部品加工精度の向上と効率化

Improving the accuracy of part processing and the efficiency of machining process

・需要変動へのフレキシビリティ の向上

Increasing manufacturing flexibility for demand fluctuations

組立工程の自動化

Automation of the assembly process



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



・研究成果概要

Outline of research results



6軸制御の誤差予測(オフライン補正)

Error prediction of 6-axis control (offline correction)



広島大学茨木研究室

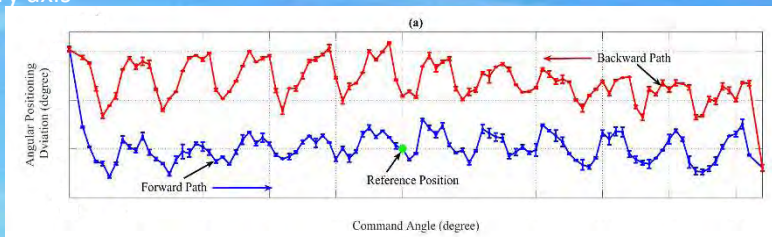
目的 Objective

6軸ロボットの絶対的位置決め精度を、可動領域全体で向上させるための、新しいオフライン補正法の開発
Development of a new offline compensation scheme for a six-axis robot to improve its absolute positioning accuracy over the entire workspace.



新技術 New proposal

誤差原因として、各回転軸の角度位置決め誤差を測定、「ルックアップテーブル」として組み込んだ新しい幾何学モデルを提案した。A new kinematic model was proposed with the angular positioning error in a “lookup table” of every rotary axis



指令角度（横軸）に対するA1軸の角度位置決め誤差
Angular positioning error of A1-axis for command angles (horizontal axis)

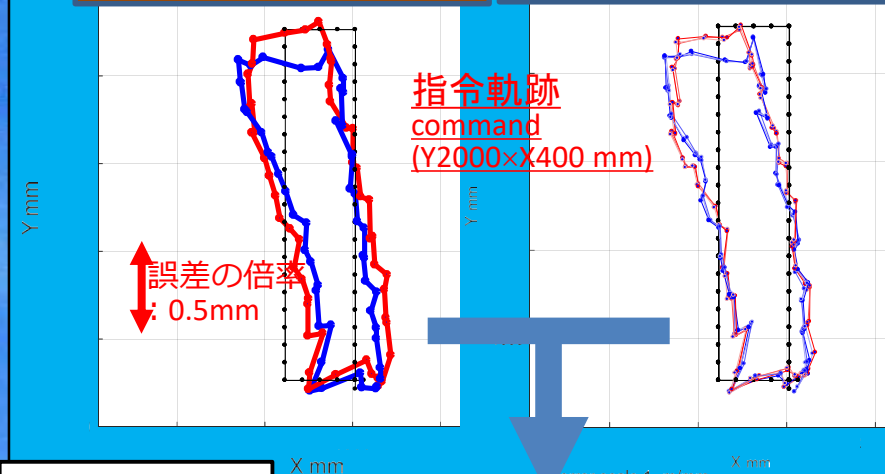
成果 Achievement

この図と同様に、大きな位置決め誤差の低減を、可動領域全体で達成した。

Significant improvement of positioning accuracy was observed over the entire workspace, similarly as these measured trajectories.

提案モデルによる予測 軌跡 Predicted

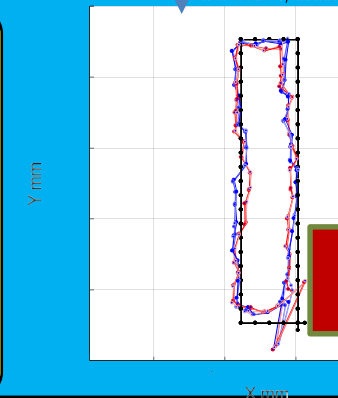
補正前の測定軌跡 Measured, uncompensated



今後の課題 Future tasks

- モデルの予測精度のさらなる向上
- オンライン補正との組み合わせ

Further improvement of prediction accuracy.
Combination with online compensation.



補正後 Compensated

三次元位置測定制御技術の基礎的開発(オンライン補正)

Basic development of 3D position measurement control technology (online control)



東京大学臼杵研究室

目的 Purpose

6軸多関節ロボットを用いた新しい切削加工システムの開発
Development of a new system using a 6-axis articulated robot

ロボットでの作業は現在はバリ取りなど精度が低くてもできる作業のみ実用化されている。この研究ではロボットの軌跡精度を航空機向け部品が製造可能なレベルに向上し切削システムを構築する。既存の手法より環境負荷を小さくする。また、大きな部品の少量多品種生産ではロボットの動作範囲の広さが利点となると考えられる。



6軸多関節ロボット
6-axis articulated robot



加工用
モータユニット
Milling head

Currently, only work that can be done with low accuracy, such as deburring, has been put into practical use with industrial robots. The goal of this research is to improve the trajectory accuracy of the robot to a level where aircraft parts can be manufactured and to construct a cutting system. This method will have a smaller environmental impact than before. In addition, the wide motion range of the robot will be an advantage in small-lot, high-mix production of large parts.

内容 Contents

ロボット外部からより正確な座標を測定し、本来のロボット制御コンピュータの外部から、理想軌跡との誤差をリアルタイムにフィードバックする。誤差をできるだけ小さくするとともに、制御の遅延を防ぐ必要がある。

More accurate coordinates are measured from the outside of the robot, and the error from the ideal trajectory is fed back in real time from the outside of the original robot control computer to correct it. It is necessary to minimize the error and prevent delay in control.



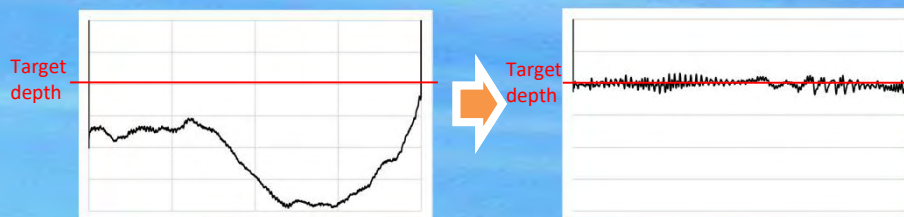
オンライン補正システムの概略
Outline of online correction system



金属加工による性能評価
Performance evaluation by metal milling

成果 Achievements

測定と補正による軌跡精度の向上
Improve trajectory accuracy by correction
開発したロボット補正システムを利用した際の精度向上例
Example of robot correction system effect



現在の化学的除去加工の代替手法としてロボット切削の有効性を提案
Proposal for alternative method of chemical milling

今後の課題 Future tasks

- ・ロボットの意図しない動作や振動を抑えながら、必要な精度を発揮できる加工機械として開発する。
- ・ロボットによる多様な加工の実現のため、より複雑な加工にも対応できるか検討していく。
- ・The robot will be developed as a machine tool that can achieve the required accuracy while suppressing unintended movements and vibrations of the robot.
- ・In order to realize various machining by robots, we will examine whether it can handle more complicated machining.

残留応力データの収集と残留応力低減法の開発

Collection of residual stress data (materials, machining) and development of residual stress reduction method



東京大学柳本研究室

東京農工大学笹原研究室

目的 Purpose

切削加工に起因する残留応力や歪みは、加工条件の選定を複雑にし、加工後に手戻り作業を要する原因となる。この残留応力や歪みを予測、制御するために、**残留応力メカニズムの解明と、残留応力シミュレーション手法の開発**を実施する。

Machining induced residual stress and strain complicate the selection of machining conditions and lead to manual adjustment work. In order to predict and control this residual stress and strain, we will elucidate the residual stress mechanism and develop a residual stress simulation method.



Example of strain distribution on a machined surface & Image of deformation seen from the side

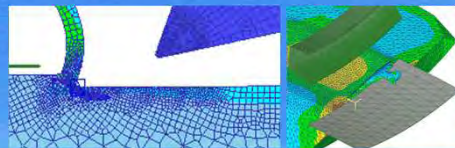
成果 Achievements

・2次元切削解析モデルに加工前の材料の初期応力分布を再現し、フェイスミル加工における仕上げ面生成メカニズムを再現した多工程解析を行うことで、高い解析精度が得られた。High accuracy was obtained in 2D cutting analysis model for initial stress distribution & in multi-process model that reproduced the finished surface of face milling.

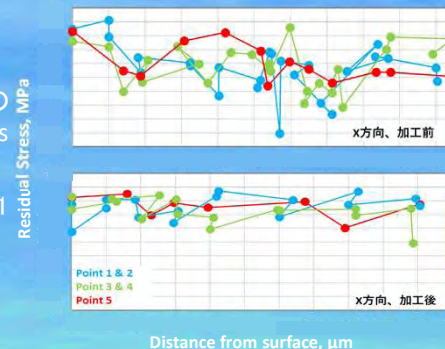
・フェイスミル加工中の限定領域を再現した3次元切削解析モデルを開発し、その解析精度を検証した。A 3D cutting analysis model was developed that reproduced the limited area during face milling.

・フェイスミル加工前後のX方向及びY方向のデータを測定した。X & Y direction stress was measured for before & after face milling.

・電解研磨装置を用いて素材の表層から約1 mmまで深さ方向のデータを測定した。加工後は表層から約0.5 mm深さまでのデータを取得した。Data in the depth direction was measured after electrolytic polishing for before & after face milling condition.



2D and 3D cutting residual stress analysis

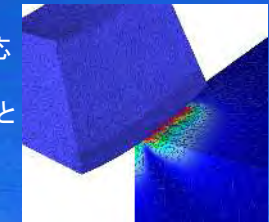


Residual stress for before & after face milling

内容 Contents

●3次元の残留応力分布を予測可能な残留応力シミュレーション手法を開発 Developed a residual stress simulation method that can predict the 3D residual stress distribution.

これまでの研究で開発した2次元切削残留応力解析モデルを基に、加工前の応力分布を導入した3次元切削残留応力解析モデルへと拡張する。Based on the 2D cutting residual stress model developed in the previous research, it will be extended to a 3D cutting residual stress analysis model that introduces the stress distribution before machining.



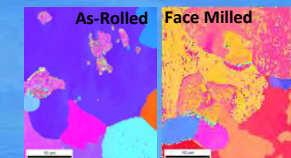
3D cutting analysis model

●残留応力データを収集し、残留応力メカニズムを解明 Collect residual stress data and elucidate the residual stress mechanism.



Xray diffraction machine

●アルミニウム合金圧延材の切削加工について、加工前後の残留応力分布データを収集し、ミクロ組織を観察することで残留応力発生メカニズムを明らかにする。The residual stress generation mechanism due to face milling will be clarified by collecting residual stress distribution data before and after machining and observing the microstructure.



Microstructure observation

今後の課題 Next Step

残留応力データ収集・シミュレーション手法開発と「高難度部材加工プログラムのアルゴリズム提案」を合わせて、**最適な加工プログラムを生成する自動化システム**を構築する。By combining the development of residual stress data collection / simulation methods and the "algorithm proposal for high-difficulty member machining programs", we will build an automated system that generates the optimum machining program.

高難易度部材加工プログラムのアルゴリズム提案

Proposal of algorithm for automatic generation of machining program for high difficult-to-cut parts

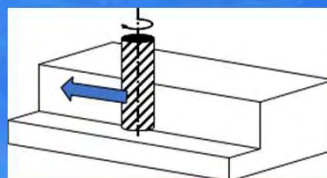


東京大学土屋研究室

目的 Purpose

加工の難易度判定要素を抽出し、最適加工条件選定手法を確立
Extract cutting difficulty judgment factors and establish the optimum cutting condition selection method

加工現場において加工結果を最適化する加工条件を決定する道筋は、熟練者の経験に頼っている。これを自動化するため、加工現象状態から加工難度を判定し、加工条件や加工工具を最適化して製造工程を決定するアルゴリズムを構築する。



The route to determine the machining conditions for optimizing the machining result in the manufacturing site depends on the experience of experts.

In order to automate this process, we construct an algorithm for determining the machining difficulty from the machining phenomenon state, optimizing the machining conditions and machining tools, and determining the manufacturing process.

目標成果 Goal Achievements

加工難度の判定に関する要素を抽出し、最適切削条件を選定する手法を確立し、熟練作業レベルの最適切削条件を目指す。

We will extract the factors related to the judgment of cutting difficulty, establish a method to select the optimum cutting conditions, and aim for the optimum cutting conditions at the level of skilled workers.

2021年度の成果目標

意図的な工具劣化による切削現象の変化の把握

Understanding changes in cutting phenomena due to intentional tool deterioration
Tools' deterioration level from cutting results to predict cutting conditions to optimize the algorithm

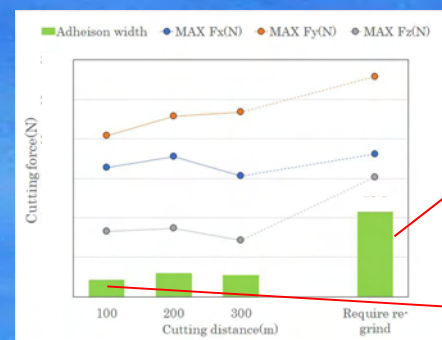
Investigating algorithms to predict cutting results from tool deterioration optimize cutting conditions

内容 Contents

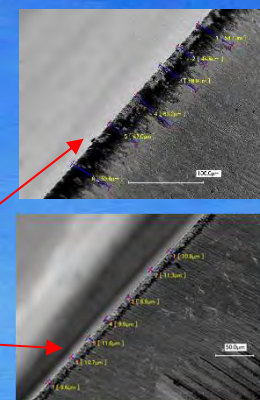
●マシニングセンタでの基礎実験 Basic Experiment at Machining Center

切削距離に伴い切削現象変化を調査するために、刃先凝着幅変化と切削抵抗の関係に注目して調査した。刃先の凝着幅変化に伴い切削抵抗も変化することを確認した。

In order to investigate the change in cutting phenomenon with the cutting distance, the relationship between the change in cutting edge adhesion width and cutting resistance was investigated. It was confirmed that the cutting resistance also changed as the adhesion width of the cutting edge changed.



切削距離と刃先凝着幅、切削抵抗の関係
Relationship between cutting distance, cutting edge adhesion width, and cutting force



高深度顕微鏡 (SEM) による観察
Observation with SEM

今後の課題 Future tasks

今後、工具刃先形状を意図的に劣化させ、加工特性の関係を把握してアルゴリズム提案に繋げる。

In the future, the shape of the tool edge will be intentionally deteriorated, the relationship with the machining characteristics will be grasped, and the algorithm will be proposed.

メタルデポジション Metal deposition



東京大学岡部(洋)研究室

目的 Purpose

高機能な治具を短納期・低コストで製造する
Jig manufacturing with low cost and high-performance



金属粉末積層
Metal deposition

機械加工
Machining

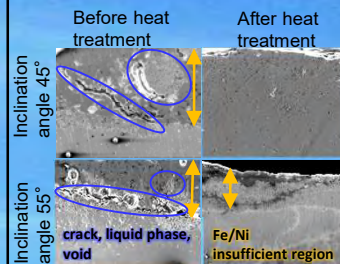


実験装置
Experimental equipment

- 金属積層造形+機械加工を同一の機械で行うことで複雑形状の高精度・高効率加工を実現しコスト削減を図る。
- Complex-shaped manufacturing with high precision and efficiency by combining deposition and machining.

成果 Achievements

・傾斜角と捩れ角の造形を行ない、それらの成形可能条件をまとめた。
The inclination angle and torsion angle were created and the forming conditions were summarized.

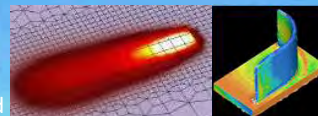


熱処理前後の内部欠陥
Inner defects before and after heat treatment

・積層造形物のマイクロ分析を行った結果、内部欠陥が見られた。
As a result of micro analysis of laminated samples, inner defects were observed.

・3パターンの熱処理実験を行い、内部欠陥を減少できる最適な熱処理条件を得た。
Conducting the experiment of three patterns of heat treatment, we obtained optimum conditions for reducing inner defects.

・SimuFactを用いて積層造形物の変形予測解析を行い、解析精度を明らかにした。また、解析精度向上のために熱源パラメータを最適化した。
Using SimuFact, we analyzed the prediction of deformation and clarified the analysis accuracy. In addition, the parameters of heat source were optimized to improve the analysis accuracy.



FEM解析によるゆがみ予測
Prediction of distortion by FEA

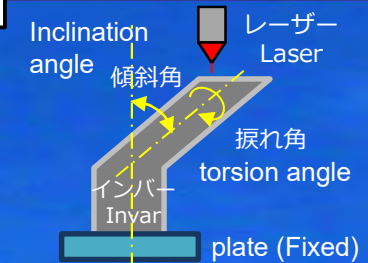


傾斜角と捩れ角を持つ積層体
Fabrication with inclination and torsion angles

内容 Contents

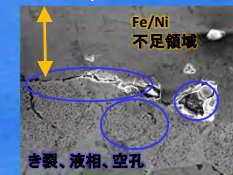
①複雑形状治具の製造のための造形自由度の拡大

Expansion of the freedom degree in fabrication for manufacturing of complex-shaped jig



②造形品質の微視的分析と材料特性の評価

Microanalysis of lamination quality and evaluation of material properties



造形品の断面観察
Observation of laminated sample

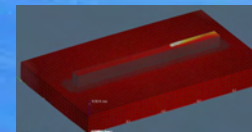
SEM(走査型電子顕微鏡)やEDS(エネルギー分散形X線分光器)により、積層体の微視的な観察と組織分析を行う。

Microscopic observation and analyses on the lamination by using SEM and

EDS.

③数値解析による高精度造形の実現

Numerical analysis for high-precision fabrication



数値解析モデル
Simulation model

造形物のゆがみを予測し、事前対策することで、低コストで高精度な造形を可能とする。
High accuracy predicting method for taking measures to the distortion in lamination leads high-precision fabrication at low cost

今後の課題 Next Steps

微視的分析に基づいて、傾斜と捩れの複合角での最適成形条件を明確にする。さらに、数値解析との合わせ込みを行ない、複合角を持つデモ金型を作製する。

We will optimize the laminating conditions for combined angles based on SEM and EDS analyses. Then, the demonstration jig which has the combined angles will be laminated with performing numerical analysis.

切削工具コンペ(複合材用工具ベンチマーク)

Cutting tool competition (Comparison of tool performance) for composite materials and so on



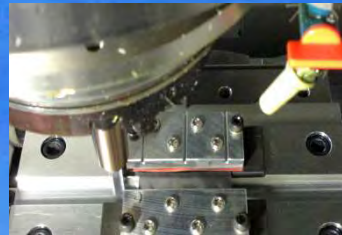
東京大学土屋研究室

目的 Purpose

過去の切削試験の知見に基づき試験を行い、切削工具の特性を評価する

Perform tests based on the knowledge of past cutting tests and evaluate the characteristics of cutting tools

複合材用切削工具は、毎年各社から多くの新工具がリリースされている。ユーザーは、それら工具を用い個別の切削試験を実施し評価している。そのため、各種切削工具について切削実験を行い、その特性を評価する。



As for cutting tools for composite materials, many new tools are released every year by each company. Users perform and evaluate individual cutting tests using these tools. Therefore, cutting experiments are conducted on various cutting tools and their cutting characteristics are evaluated.

目標成果 Goal Achievements

切削試験による工具特性評価
Tool characterization by cutting test

評価内容

- 加工前後の工具を評価(幾何形状測定、観察)
- 加工結果の評価
切削抵抗、切削温度、など

Evaluation contents

- Evaluate tools before and after machining (geometric shape measurement, observation)
- Evaluation of processing results
Cutting force, Cutting temperature, etc.

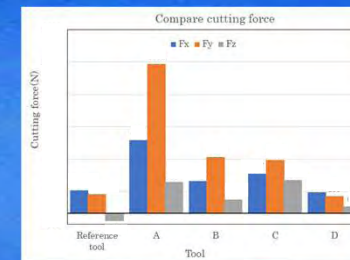


試験用切削工具
Cutting tool used for testing

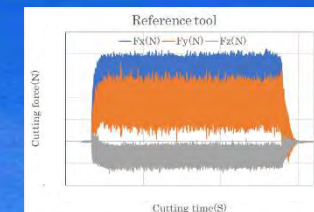
内容 Contents

● 切削実験結果 Cutting result

切削抵抗測定結果の比較により工具特性を調査した。
The characteristics of the tool were investigated by comparing the measurement results of the cutting force.



各種工具による切削力測定結果の比較
Comparison of cutting force measurement results with various tools



切削抵抗測定(例)
Cutting force measurement (example)



例 刃先の摩耗観察結果
Example: Wear observation result of cutting edge

今後の課題 Future tasks

工具刃先形状評価方法を確立し、工具特性を評価する

Establish a tool edge shape evaluation method and evaluate tool characteristics



東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo



第9回CMI Symposium
10/22/2021

Thank you so much
for your attention

