

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「人と機械が協調した精密加工支援ロボットの開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 中部経済産業局

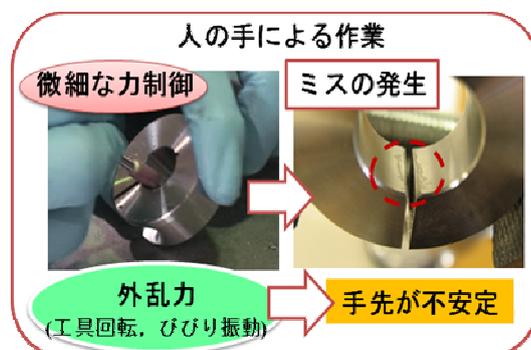
委託先 財団法人岐阜県研究開発財団

## 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

部品製造では製造途中にできる不要なバリなどを取り除く仕上げ加工の工程が必須である。

大量生産部品の場合には、形状条件を設定しプログラムすれば、自動的に仕上げ加工ができ、製品が完成する。一方、多品種少量部品の場合には、このような作業は却って効率が悪く、一般に仕上げ加工は、作業者により一品一品行われている。しかしながら、これらの作業は大変集中力の必要な作業であり、加工プロセスにおける工具の回転やバリ等から加わる力の変動の



結果、部分的な削り過ぎなどの一瞬の加工ミスによって部品が使用不能になるなど、部材の無駄や作業の無駄が多く発生している。例えば、加工によって生じるバリ等の不要部分を手加工によって  $50\mu\text{m}$  オーダーの精度で仕上げる場合、 $100\phi\times 35$  のリング状部品では、加工に 10 分、バリ取り等の仕上げ加工には熟練技術者の手で 5 分を要しているほか、歩留まりは 95%に留まっており、仕上げの短時間化、及び未熟練者であっても精度の高い仕上げ加工が切望されている。

このような背景から、多品種少量生産の現場では、バリ取り加工に対するニーズが非常に高く、平成 18 年度に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構が岡山県産業振興財団に委託した「円弧補完制御機能を利用した産業用ロボットの事業可能性調査」の報告書でも、アルミダイキャスト、鋳鉄鋳物、自動車業界で、バリ取りのニーズは非常に高い、という結果が得られている。

さらに、多品種少量部品の加工企業約二十社を独自にリサーチした結果、そのほとんどの企業でこのような多品種少量部品の精密加工支援ロボットの要望があった。一例としてプレス加工業者は金型製作時における内部の細溝部や穴及び凹凸部のバリ除去に熟練技術と時間を要し、独自の切削刃物を製作するなど対応に苦慮している。また、プレス製品のバリ除去についても形状的に機械化が難しい部分（薄板や曲線部などの複雑な形状部）の処理や、航空機部品加工会社における難削材の複雑な形状の加工に多くの時間を費やしている。このように従来の少品種大量生産型のバリ除去装置では対応不可能な現場が多く存在しており、バリ取り作業の効率化の要望は非常に高く、高い市場性が期待できる。

本研究では、仕上げ加工の精度向上と効率向上を目指し、次のような目標を設定する。

1. 加工精度を 50 $\mu$ m 以下に向上

小物加工部品のバリ取り等の際、現状では、熟練技術者の手による加工精度は 50 $\mu$ m オーダーで十分とされていることから、本装置による加工精度の目標は未熟練者においても 50 $\mu$ m 以下とする。

2. 仕上げ加工時間を従来の 80%以下に短縮

例えば、100 $\phi$ ×35 のリング状部品の仕上げ加工では、従来5分かかっていたものを、未熟練者でも、開発する精密加工支援ロボットを利用することによって、同様の作業を1分以上短縮できるようにする。

3. 歩留りを 95%から 99%に上げる

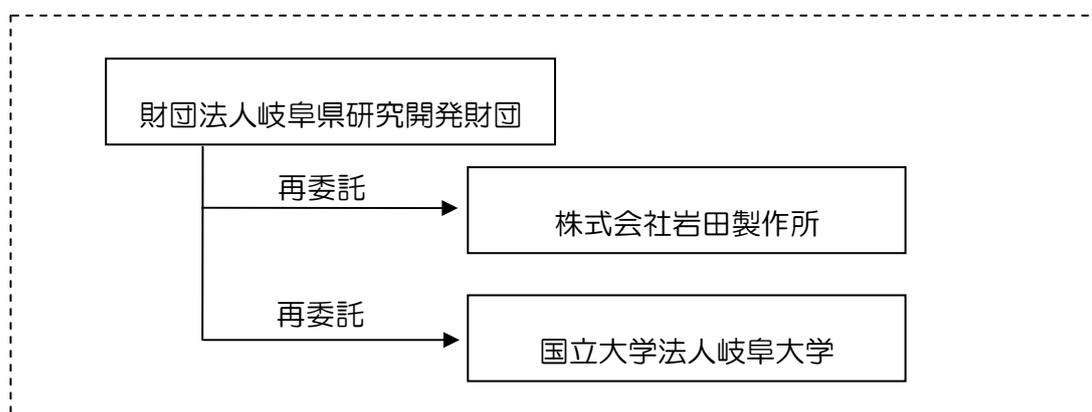
現在の歩留まり率が約 95%であるが、これを 99%まで向上させる。

4. 従来のバリ取り専用機では困難であった多品種少量部品の加工に対応

本提案のロボットでは、特別なプログラムの設定を必要とせず、人が直感的に操作することによりバリ取り他の精密加工仕上げをすることができるものであり、全く異なる発想のものである。

1-2 研究体制

1) 研究組織 (全体)



総括研究代表者 (P L)

株式会社岩田製作所

取締役開発部長 岩田 光一

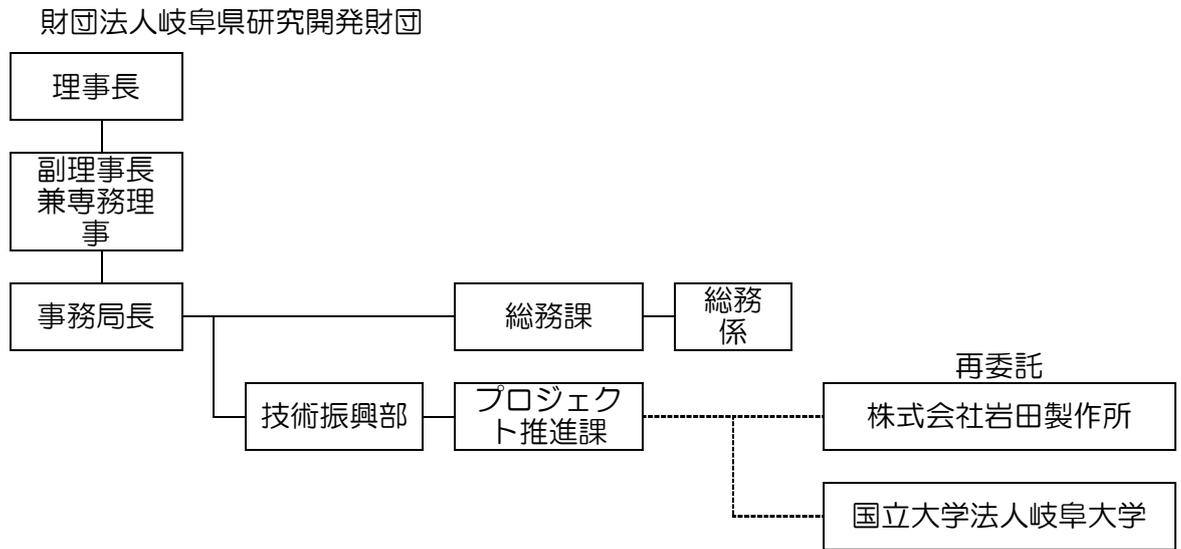
副総括研究代表者 (S L)

国立大学法人岐阜大学

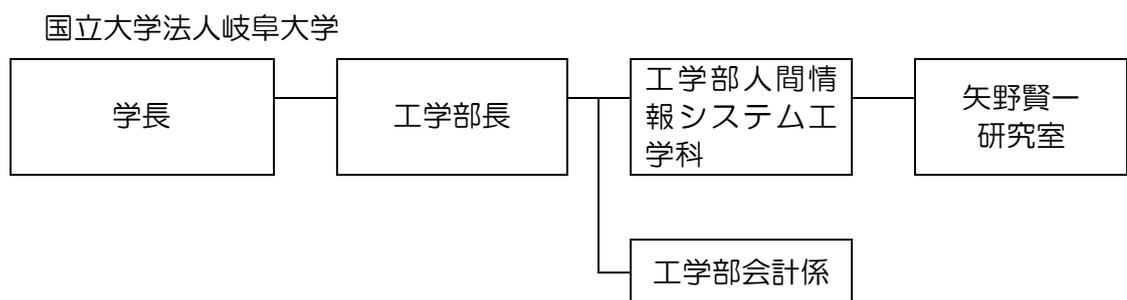
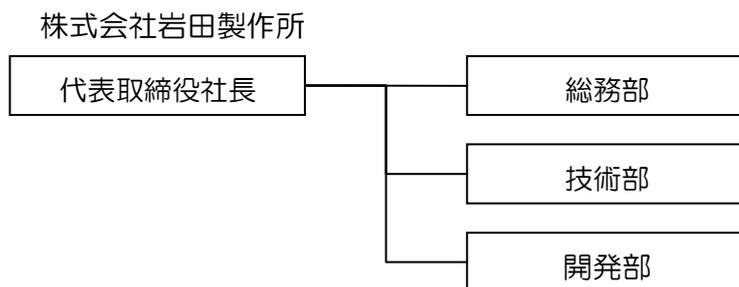
准教授 矢野 賢一

## 2) 管理体制

### ①事業管理者



### ②（再委託先）



(2) 管理員及び研究員氏名

【事業管理者】 財団法人岐阜県研究開発財団

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
堀部 哲	技術振興部長兼技術振興課長	⑤
曾賀野 健一	プロジェクト推進課 技術主査	⑤

【再委託先】

②研究員

株式会社岩田製作所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
岩田 光一	開発部 部長	②、③、④
佐々木 利春	技術部 係長	②、③、④
安藤 幸二	技術部 係長	②、③、④

国立大学法人岐阜大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
矢野 賢一	工学部人間情報システム工学科 准教授	①、③

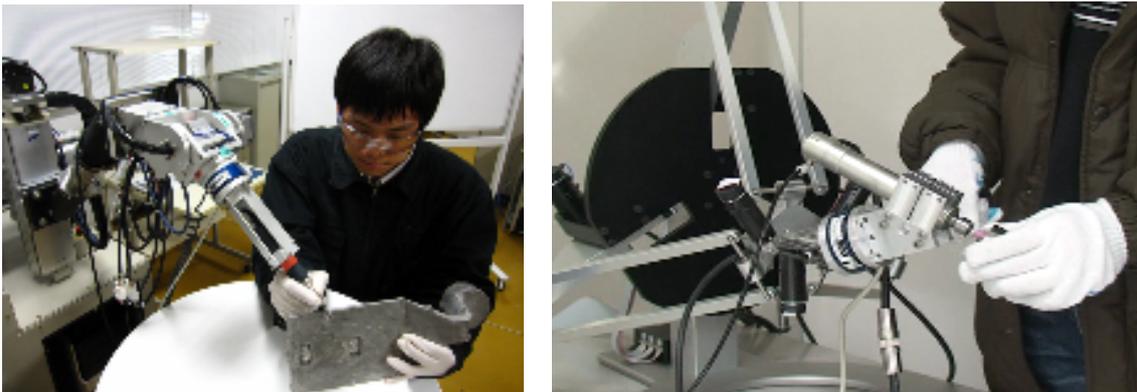
1-3 成果概要

本研究では、作業者の加工仕上げ精度検知能力の高度化を目的とした高精度力（ちから）フィードバック制御技術を開発し、加工面の状況をリアルタイムで高精度に感じながら、ミスなく高品質な加工が行える加工支援ロボットを実現する。具体的には、①工具の回転やバリ等の外乱による力の影響を除去し、加工状況を繊細に感じ取ることを可能にするデジタル適応フィルタリング技術、②作業者の加工仕上げ精度検知能力を高度化する高精度力フィードバック制御技術、③精密加工中の外乱を抑制しながら、微細な力加減をアシストする微細加工を実現する最適制御技術、④ロボットの手先と作業対象物が不用意に接触しないよう、制御を行う衝突回避制御技術、⑤ロボットに容易に装着可能な電動工具及びドリル回転速度を制御可能な制御ドライバの開発を行い、加工部品の精密仕上げをする際の加工ミスを低減すると同時に、短時間で高精度、均一な

仕上げを実現する人と機械が協調した精密加工支援ロボットを開発し、製品化することを目的とする。平成 21 年度に得られた研究成果の概要を以下に示す。

### ①デジタル適応フィルタリング技術の開発

図 1 に示すような手先に力覚センサを持つ多自由度マニピュレータを用いた加工支援ロボットを開発し、多品種少量生産でもミスなく仕上げ加工を行うことができる加工支援システムを実現することを目的とした。具体的には、力覚センサで計測される信号に混在する作業者の操作力と工具からの接触力および回転摩擦力を、本研究で新たに提案する片持ち梁モデルに基づく適応モデリング法によりそれぞれ分離することにより、回転工具による加工外乱の影響を取り除き、作業者がミスをしない加工外乱抑制制御を行った。結果として、力覚センサが一つという制約下で人の操作力と接触力の分離を実現するとともに工具回転の影響を受けて加工面からはじかれる現象を抑制した。



加工支援ロボットによる加工

### ②高精度カフィードバック制御技術の開発

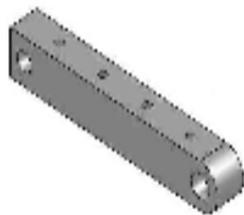
シリアルリンク構造で直動XYZ構造と3軸の自由関節を持つ6自由度マニピュレータの仕上げ加工支援ロボットを製作した結果、加工精度の向上は確認されたが、シリアルリンク構造の欠点である装置の大型化や、先端加工部分の撓みによる制御への悪影響が観察されたことにより、本研究の目標である加工精度 $50\mu\text{m}$ 以下で本体重量 $50\text{kg}$ 以下を達成することは困難である。そこで本研究では、先端撓みが $20\mu\text{m}$ 以下で小型軽量になる構造として、パラレルリンク構造の採用を検討した。

岐阜大学矢野研究室のハプティックスデバイス「デルタ」の動作特性、構造を参考にして、その特性や問題点を把握するために、試作パラレルリンクロボットを1台製作した。設計に

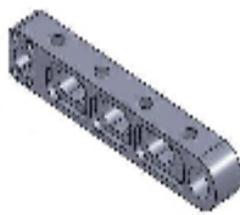
においては先端に100Nの荷重がかかった場合先端撓みが20 $\mu$ m以下であることを条件に3DCADにて応力解析を行いリンク部の太さを選定した。

左写真は試作完成した平行リンクロボットであるが、リンク部および先端プレート重量が剛性を意識するあまり当初計画より重くなってしまい10Nm以上のトルク能力を持つサーボモーターが必要となり、当初計画のモーター（許容トルク4Nm）は使用できないことが判明した。全体重量を下げるためにリンクの軽減化の検討を実施して、剛性を保ちながらリンクを軽減するH型構造に軽減孔を開ける設計を実施し、3DCADで応力解析を行い撓みの確認を行った。

一次アーム

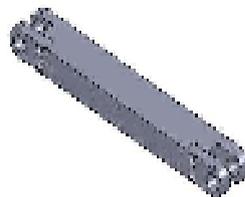


軽量化前

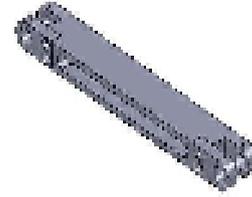


軽量化後

二次アーム



軽量化前



軽量化後

先端に100Nの荷重がかかった状態で20 $\mu$ m以内であることを確認した。リンク軽減軽減効果は全体で1000gとなったが、モーターの小型化には至らなかった。また平行リンクロボットを設置するベース部分の剛性を要求されるため、アルミフレーム構造で設計し、応力解析を行い撓みが最大で20 $\mu$ m以内であることを確認した。平行リンクロボットにドリルを装着するためのブラケットも同時に設計して応力解析をして撓みの確認を行った。またロボット先端部は加工ドリル取り付け用のブラケット装着できる機構とした。先端部サーボモーター装着仕様XYZ+回転の4自由度タイプ。

試作平行リンクロボットを岐阜大学工学部矢野研究室に持ち込み動作確認を行った結果動作上の問題はないことが確認された。

### ③精密加工支援ロボット（試作機）の開発

#### 精密加工支援ロボット（試作機）のハード開発

精密加工支援ロボットの機構的には現在の平行リンクロボット構造で問題がないことより、軽量化とよりコンパクト化を重点に再検討を実施した。材料がアルミ構造の場合その材料強度の問題より軽量化に限度があると考えられることより、リンク素材として比重が低く高強度な素材であるカーボンファイバーの採用を検討した。

カーボンファイバーは軽量で強度、弾性率が極めて高い（比強度 [引っ張り強度/比重] は

鉄の10倍)。リンク部、先端プレート部をカーボンファイバーにて設計し応力解析を実施した。応力解析の結果撓みは問題がなかった。



#### 重量検討結果

リンク部、先端プレート部でさらに1kgの軽量化が可能になったことによりサーボモーターの小型化が可能になった。結果として、平行リンクロボット本体重量は10.95kgとなり約13kgの軽量化。ほぼ当初目標を満足できるものと考えられる。

#### 精密加工支援ロボット（試作機）のソフト開発

本研究では、仕上げ加工支援を対象としたバイラテラル制御系の提案と構築を行った。そして次に構築したバイラテラル制御系に対して、切削加工条件を切削力、回転数、移動速度、単位時間当たりの切削量および切削率から構成されるものとし、それぞれの入力値を相互的に更新することで切削量を一定とする手法を提案した。この手法では作業員、あるいはロボットが直接制御可能な切削力、回転数、移動速度の三要素を制御する。この手法を用いることで工具移動速度や切削力の変動に対して、その他の要素がこれを補うように更新され、切削量が一定となるよう制御される。これによって、ハプティクスやバイラテラル制御を仕上げ加工に応用した際に発生する急激な速度変化や切削力の安定化の限界等の問題を解決した。

2台製作完了し岐阜大学矢野研究室での制御ソフト開発と岩田製作所現場での耐久性検証を実施中である。

#### ロボット本体の今後の課題

- ・カーボンファイバーのコストダウン検討（事業化に向けて）
- ・カーボンファイバーとアルミリンク接合部（接着）の耐久性検証と温度変化検証
- ・先端機構の優位性の検討

#### ④電動工具及び制御ドライバの開発

ロボット装着電動工具の開発条件

- ・ロボットが把持しやすい形状：円筒形
- ・小型：全長150以下、直径φ30以下
- ・軽量：500g以下

- ・最高回転数 50,000rpm
- ・ツール撓み：5 $\mu$ m以下目標に設計を実施

性能としては回転数 60,000rpm スピンドル精度 1 $\mu$ m以内 最大トルク 8.82N $\cdot$ cm 重量 400g でありほぼ目標値を満足できるものになった。今後はさらに軽量小型化を推進していく。ロボットの力制御と連動してそれぞれの材料に対応した最適な工具回転数や工具回転の影響によるビビリ、外乱を制御するドライバーの開発に関しては、現在開発中である。次年度以降も課題として開発を継続していく予定である。

### **⑤プロジェクトの管理・運営**

(財団法人岐阜県研究開発財団)

本プロジェクトの事業管理者として研究を3機関に委託し、その管理を行い、本研究事業の今年度の報告書を作成した。また、委員会を2回開催し、意見交換による研究事業の推進を図った。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

##### ①事業管理者

財団法人岐阜県研究開発財団 プロジェクト推進課 曾賀野 健一

〒509-0109 岐阜県各務原市テクノプラザード目1番地

(最寄り駅：東海旅客鉄道株式会社 高山本線 蘇原駅)

TEL：058-379-2212 FAX：058-379-2215

E-mail：sogano@gikenzai.or.jp

##### ②研究実施場所

株式会社岩田製作所 開発部 岩田 光一

〒501-3264 岐阜県関市池尻923-1

(最寄り駅：長良川鉄道株式会社 越美南線 関駅)

TEL：0575-23-6161 FAX：0575-23-6161

E-mail：koichi\_iwata@shalwin.co.jp

国立大学法人岐阜大学 工学部 人間情報システム工学科 准教授 矢野 賢一

〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番1

(最寄り駅：東海旅客鉄道株式会社 岐阜駅)

TEL：058-293-2507 FAX：058-293-2507

E-mail：yano-k@gifu-u.ac.jp

## 第2章 本論一（1）

部品製造では製造途中にできる不要なバリなどを取り除く仕上げ加工の工程が必須である。大量生産部品の場合には、プログラムによって自動的に仕上げ加工ができ、製品が完成するが、多品種少量部品の仕上げ加工は、作業員により一品一品行われている。こうした作業では、加工プロセスにおける工具の回転やバリ等から加わる力の変動の結果、部分的な削り過ぎなどの一瞬の加工ミスによって部品が使用不能になるなど、部材や作業の無駄が多く発生している。

本研究では、作業員の加工仕上げ精度検知能力の高度化を目的とした高精度力（ちから）フィードバック制御技術を開発し、加工面の状況をリアルタイムで高精度に感じながら、ミスなく高品質な加工が行える加工支援ロボットを実現する。具体的には、①工具の回転やバリ等の外乱による力の影響を除去し、加工状況を繊細に感じ取ることを可能にするデジタル適応フィルタリング技術、②作業員の加工仕上げ精度検知能力を高度化する高精度力フィードバック制御技術、③精密加工中の外乱を抑制しながら、微細な力加減をアシストする微細加工を実現する最適制御技術、④ロボットの手先と作業対象物が不用意に接触しないよう、制御を行う衝突回避制御技術、⑤ロボットに容易に装着可能な電動工具及びドリル回転速度を制御可能な制御ドライバの開発を行い、加工部品の精密仕上げをする際の加工ミスを低減すると同時に、短時間で高精度、均一な仕上げを実現する人と機械が協調した精密加工支援ロボットを開発し、製品化することを目的とする。平成21年度に得られた研究成果の概要を以下に示す。

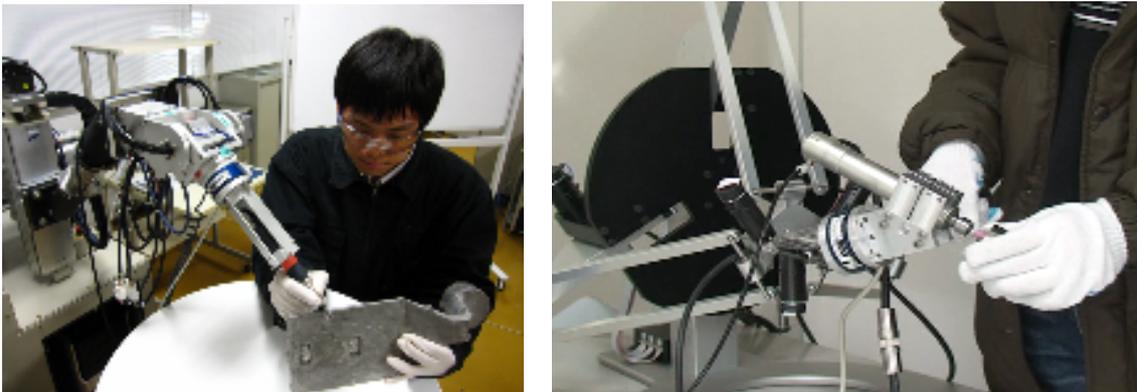
### 2-1 デジタル適応フィルタリング技術の開発

大量生産の部品加工と異なり、多品種少量部品の加工やバリ取り等の仕上げ作業は、作業員により一品一品行われている。しかしながら、これら作業は大変集中力の必要な作業であり、加工プロセスにおける工具の回転による外乱や部分的な削りすぎなどの一瞬の加工ミスによって部品が使用不可能になるなど、部材や作業の無駄が多く発生している。

大量生産を目的とした仕上げ加工プロセスの自動化に関しては、これまで非常に多くの研

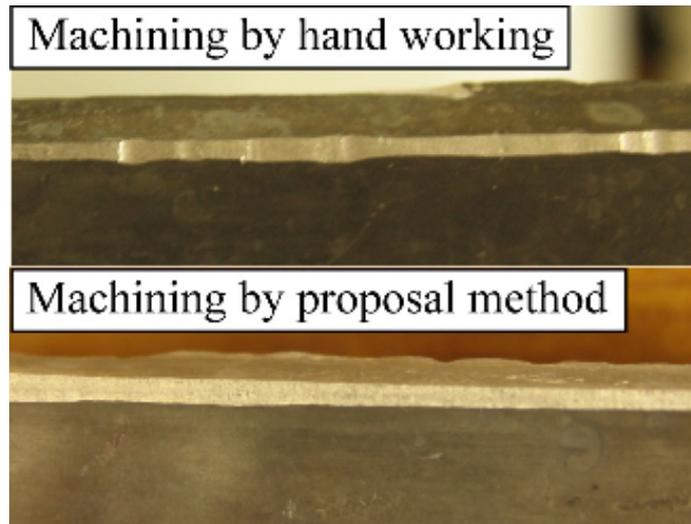
究が行われてきた。しかしながら、従来までの研究は、すべて仕上げ加工を自動化するための研究であり、被加工物の位置や形状の情報が事前に必要となる。多品種少量部品の仕上げ加工を対象とした場合、特注品にも迅速に対応可能なシステムが要求されるのに対し、これでは作業開始までの段取りに時間をとられてしまう。さらには、自動化されたシステムの問題点として、被加工物位置のずれや形状の歪みに対する加工不良の問題が課題として残っている。

そこで本プロジェクトでは、図 1 に示すような手先に力覚センサを持つ多自由度マニピュレータを用いた加工支援ロボットを開発し、多品種少量生産でもミスなく仕上げ加工を行うことができる加工支援システムを実現することを目的とした。具体的には、力覚センサで計測される信号に混在する作業者の操作力と工具からの接触力および回転摩擦力を、本研究で新たに提案する片持ち梁モデルに基づく適応モデリング法によりそれぞれ分離することにより、回転工具による加工外乱の影響を取り除き、作業者がミスをしない加工外乱抑制制御を行った。



Machining support robot

結果として、力覚センサが一つという制約下で人の操作力と接触力の分離を実現するとともに下図に示すように、回転工具による影響の補正を行わない場合と比較して工具回転の影響を受けて加工面からはじかれる現象を抑制した。本システムが導入される事により、多品種少量生産現場での仕上げ加工の製品不良防止に加え、人と機械の協調による複雑形状の精密加工や加工時間の短縮につなげることが可能となる。



Experimental results

## 2-2 高精度カフィードバック制御技術の開発

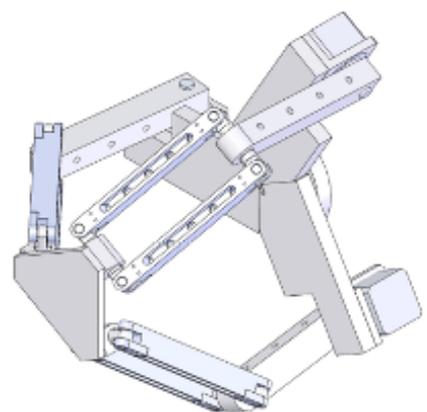
### ①ロボット構造の検討

シリアルリンク構造で直動XYZ構造と3軸の自由関節を持つ6自由度マニピュレータの仕上げ加工支援ロボットによる実験の結果、未経験者による加工精度の向上は確認されたが、シリアルリンク構造の構造的欠点である問題点が多く確認された。

1. 中間関節部にモーター等を装着するため先端部分が重くなり、それを支える付け根部分の剛性が要求される事となり装置が大型化し、重量が重くなる。
2. リンクを直線的につなぐ構造のためリンク部の撓みが相乗的に累積され制御上の大きな制約になる。
3. ノイズ等による暴走時の安全対策が困難である。

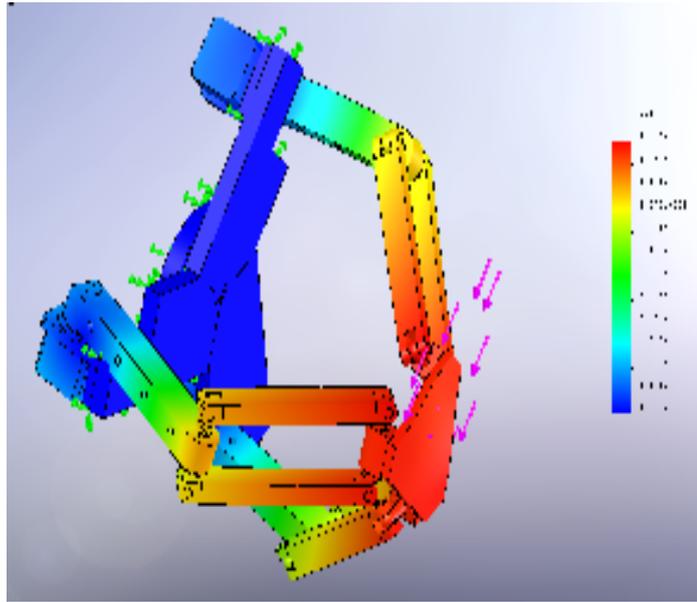
以上の点より本研究においては根本的な構造の変更を検討した。

検討の結果、小型軽量化が期待できる構造として、平行リンク構造の採用を検討する。平行リンク構造は右図に示すように、リンクが並列に並び、先端部にかかる荷重をリンク同士が支えあう構造であることから、シリアルリンク構造に比較して剛性があり小型軽量化が期待できる。さらにシリアルリンク構造のように関節部にモーターをつける構造に比較すると、構造が単純であり、自重を支える必要もない



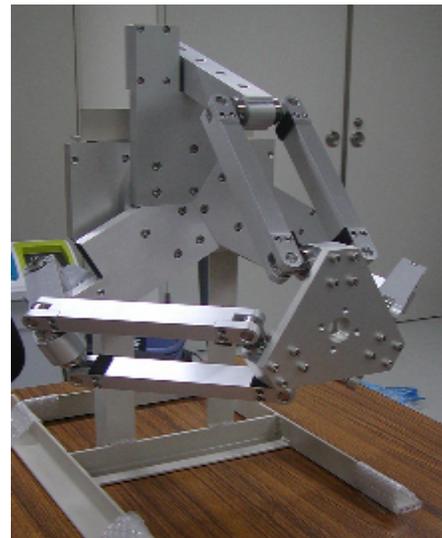
ためモーターの小型化が可能であり、その結果として製作コストの削減が期待できる。

岐阜大学矢野研究室のハプティッククスデバイス「デルタ」の動作特性、構造、剛性などを観察し、パラレルリンクロボットの特性や問題点を把握するために、試作パラレルリンクロボットを1台製作した。設計においては先端に100Nの荷重（先端ドリル+力覚センサ+加工負荷の想定値）がかかった場合、先端撓みが20 $\mu$ m以下であることを条件に3DCADにて応力解析を行い、リンク部の太さを設計した。



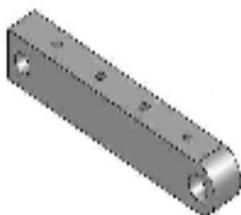
右写真は試作完成したパラレルリンクロボットであるが、

リンク部および先端プレート重量が剛性を意識するあまり当初計画より重くなってしまい（12,449g）10Nm以上のトルク能力を持つサーボモーターが必要となり、当初計画のモーター（許容トルク4Nm）は使用できないことが判明した。全体重量を下げるためにリンクの軽量化の検討を実施して、剛性を保ちながらリンクを軽減するH型構造に軽減孔を開ける設計を実施し、3DCADで応力解析を行い撓みの確認を行った。

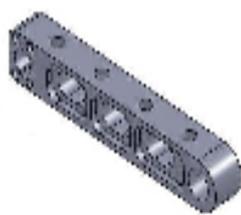


一次アーム

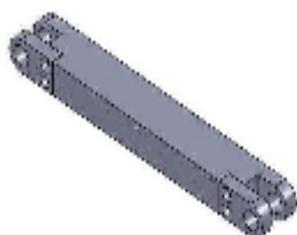
二次アーム



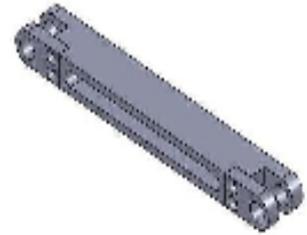
軽量化前



軽量化後



軽量化前



軽量化後

軽量化前 24,027.7g に対し軽量化後 22,879.3g となった。1,148.4g の軽量化効果がえられた。リンク軽減は全体で1,148.9g となったが、モーターの小型化には至らな

かった。先端に100Nの荷重がかかった状態で20 $\mu$ m以内であることを確認した。

解析結果は軽量化前後での撓み量はほとんど変化がなかったのでリンクアーム軽量化加工を実施した。

平行リンクロボットを設置するベース部分の剛性を要求されるため、アルミフレーム構造で設計し、応力解析を行い撓みが最大で20 $\mu$ m以内であることを確認した。

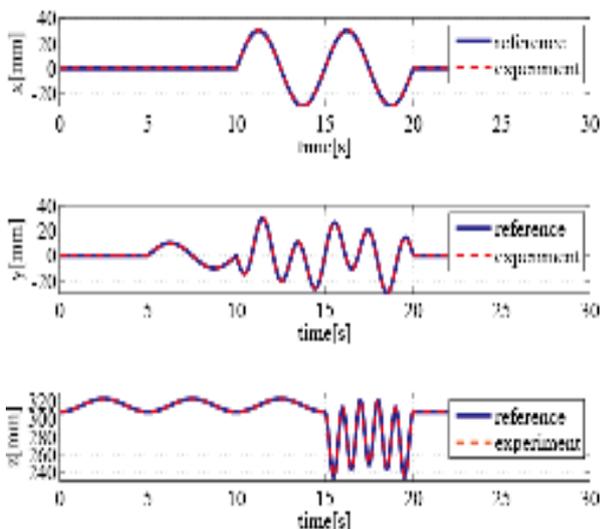
電動工具取り付けブラケットの設計と応力解析  
平行リンクロボットにドリルを装着するためのブラケットも同時に設計して応力解析をして撓みの確認を行い、全く問題がなかった。



ドリル把持部ブラケット

試作ロボットは平行リンクロボット本体部で重量23.99kgとなり、研究目標のロボット総重量50kg以内とするには、使用素材や機構の根本的な再検討する課題が残った。またロボット先端部は加工ドリル取り付け用のブラケット装着できるような機構とした。

先端部サーボモーター装着仕様XYZ+回転の4自由度タイプ。



実験装置のモデルの検証を行い、検証実験として各軸方向にサイン波の重ね合わせにより位置指令を与えた。図の青線が指令値、赤線が実験値となる。この図より目標軌道に追従していることがわかる。

これにより動作の妥当性が実証された。その結果動作上の機構的な問題が無いことが確認された。

## ②残された課題

1. ロボット重量が約22.9kgとなるため更なる小型・軽量化構造の研究
2. 平行リンク構造による作業員へのリンクの干渉の検証
3. 作業員の作業性の検証改良
4. ロボットの大きさに比べ動作範囲がせまい。(リミットスイッチ位置、ベースプレート等の問題)

5. ロボット本体重量 22.9 kg

制御機器重量 6 kg

ベース部重量 91 kg

総重量 119.9 kg で目標 50 kg を大きく上回った。

以上の課題を今後研究して実用化、事業化をめざす。

### 2-3 精密加工支援ロボット（試作機）の開発

#### 2-3-1 精密加工支援ロボットハードウェアの開発

岐阜大学矢野研究室の平行リンクロボット「デルタ」の、動作確認および構造解析のデータやサブテーマ2-2で試作した平行リンクロボットのデータより動作的な問題はないと判断できる。そこで以下の課題に重点を置き精密加工支援ロボットの開発を実施した。

1. ロボットの徹底した小型軽量化

2. ロボットの動作範囲の拡大

課題1に関して材料がアルミ構造の場合、その材料強度の問題より軽量化に限度があると考えられることより、リンク素材として比重が低く高強度な素材であるカーボンファイバーの採用を検討した。

カーボンファイバー 比重 1.8 アルミ (A6063) 比重 2.7

カーボンファイバー比強度：鉄の約10倍

比弾性率：鉄の約7倍

\* 比強度 = 引張強さ / 比重      比弾性率 = 弾性率 / 比重

材質	比重	引張強さ (MPa)	比強度
通常カーボンファイバー	1.8	約1260	約700
アルミ (A6063)	2.7	310	114
鉄 (S45C)	7.8	570	73
採用検討カーボンファイバーHR40	1.65	2920	1770

上表より剛性が必要で且つ軽量化が求められる本研究平行リンクロボットの材料としては理想的な素材といえる。採用検討カーボンファイバーは、さらに比強度が高い材料であり比強度は通常材の2.5倍で鉄の2.4倍あり、本材料の採用を決定する。

#### ①カーボンファイバー材リンクアームの設計と応力解析

本研究におけるカーボンファイバー材は、リンクのアーム部と先端プレート部に使用を試みる。中間ジョイント部は構造が複雑になるためコストが非常に高価になるのでアルミ材で製作し、アーム部をカーボンファイバー材のパイプを製作してアルミジョイント部と接着剤で固定

する方法を採用する。

1次リンクは、3本で1次リンクより先の荷重を支えることより、1本あたり50Nの荷重に対応できればよいと推測されるので、片持ち梁で50Nの荷重条件で20 $\mu$ m以内の撓みになる寸法を解析する。また2次リンクは6本で先端部を支えることより片持ち梁20Nの荷重条件にて解析

1次リンク

パイプアーム内径 $\phi$ 14.5 外径 $\phi$ 32 長さ130.5mmで撓み量0.00754mm

2次リンク

内径 $\phi$ 12 外形 $\phi$ 25 長さ130.5mmで撓み量0.01876mm

リンクアーム部と先端プレートをカーボンファイバーにすることによりサーボモーターの小型化が可能になった。

全体重量は約13kgの軽量化することができたことにより、当初の目標である50kg以内を達成できる。

先端プレート、取り付けプレート形状変更 とリミットスイッチの位置変更 により可動域が前後に42.1mm上下左右に72.0mm拡大して前後241.8mm上下左右238.2mmとなり本研究のロボット稼働域として十分なものになった。

## ②精密加工支援ロボット設計

以上の解析結果をもとに精密加工支援ロボットの設計を実施、さらにロボットベース部も設計するが基本的には同一構造とした。同様に応力検証実施した。

ベース部は前回91kgとなったため、軽量化のため外装カバーをステンレスよりアルミに変更した。これにより24kg軽量化できた。

**パラレルリンクロボット重量10.95kg**

**ベース部重量 67kg**

**制御部重量 6.00kg**

**精密加工支援ロボット総重量83.95kgで目標値50kgより33.95kg上回った。**

以上のことにより精密加工支援ロボットを2台製作し岐阜大学矢野研究室での制御ソフト開発と岩田製作所現場での耐久性検証を実施中である。検証期間が短期間でありそのデータも僅かであることより、本報告書での検証結果は提示できない。

## ③ロボット本体の今後の課題

- ・カーボンファイバーのコストダウン検討（事業化に向けて）

- ・カーボンファイバーとアルミリンク接合部（接着）の耐久性検証と温度変化検証
- ・先端機構の検討
- ・平行リンク構造による作業者へのリンクの干渉の検証
- ・作業者の作業性の検証改良
- ・ベース部の軽量化対策（30kg以内目標）

以上の課題を次年度以降研究し完成度を高め、事業化準備の予定である。



### 2-3-2 精密加工支援ロボット制御ソフトウェアの開発

（削状況の変化に対応した仕上げ加工の実現）

現在、加工現場における製品加工は、多くの製品に対して産業用ロボット等を用いることで自動化が行われている。このような生産方法は少品種大量生産を目的とした場合には有効である。しかし、多品種少量生産を目的とした製品のバリ取り等の仕上げ加工では、ティーチング作業や被加工物の位置や形状に関する情報をCADデータとして事前に用意する必要があるなどの時間的要因や、製品の固定位置のずれや形状の歪みによって加工不良が発生するなどの精度的要因によりその自動化が難しい。結果として、このような作業は人の手によって行われる必要がある作業である。しかし、このような作業では微細な力制御を要求されることに加えて、工具回転の影響やびびり振動などの外乱の影響を受ける。もし作業者の作業に対する熟練度

が不足していると、それらの影響により加工ミスを起こしやすい。さらに、悪環境下での作業や長時間の作業によって作業員への負担が増加することによって、加工ミスの発生や製品品質の低下が発生するといった問題が挙げられる。

このような問題を解決する手法の一つとして、ハプティクス技術によって加工ロボットを制御し、作業を行うといった仕上げ加工への適用に関する研究がされているが、これらの研究は少品種大量生産向けのシステムにおいて被加工物の位置情報を人が与えているに過ぎない。これらの研究に代表されるようなハプティックデバイスやバイラテラル制御により仕上げ加工を行う場合、作業員の工具の押し付け力や移動速度は自動制御と比べて均一にならず、製品の精度は作業員の熟練度に大きく依存する。そのため従来の制御手法では加工面高さを一定にする、あるいは押し付け力を一定とした力制御と位置制御のハイブリッド制御が用いられることが多く、その有効性が示されている。しかし、作業員の操作によって工具の送り速度が不規則に変化した場合や、バリの状況によって切削量を一定にすることができない場合が発生する。その結果、切削深さが増減し、過研削や切削量不足といった問題が発生する。そのため、切削を行う際のパラメータの制御には速度変化等に対して、よりロバストな制御方法が必要とされる。

そこで、まず仕上げ加工支援を対象としたバイラテラル制御系の提案と構築を行った。そして次に構築したバイラテラル制御系に対して、切削加工条件を切削力、回転数、移動速度、単位時間当たりの切削量、および切削率から構成されるものとし、それぞれの入力値を相互的に更新することで切削量を一定とする手法を提案した。この手法では作業員、あるいはロボットが直接制御可能な切削力、回転数、移動速度の三要素を制御する。この手法を用いることで工具移動速度や切削力の変動に対して、その他の要素がこれを補うように更新され、切削量が一定となるよう制御される。

バイラテラル制御系を用いて位置決め制御のみによる仕上げ加工作業を行った結果を示す。押し付け力を一定とするようにスレーブ側ロボットの押し付け方向を変化させ、工具の送り速度に関しては制御をしない状態とした。本システムへの熟練度が低い試験者に作業を行ってもらった。加工表面の測定結果を下図に示す。この実験では過研削によってスレーブ側ロボットが加工物に潜り込んでしまい、工具に過負荷がかかって停止してしまうなど、切削が困難な結果となった。また、工具の送り速度に対して切り込み深さが不安定化しており、結果として切削がうまくいっていないことが分かる。

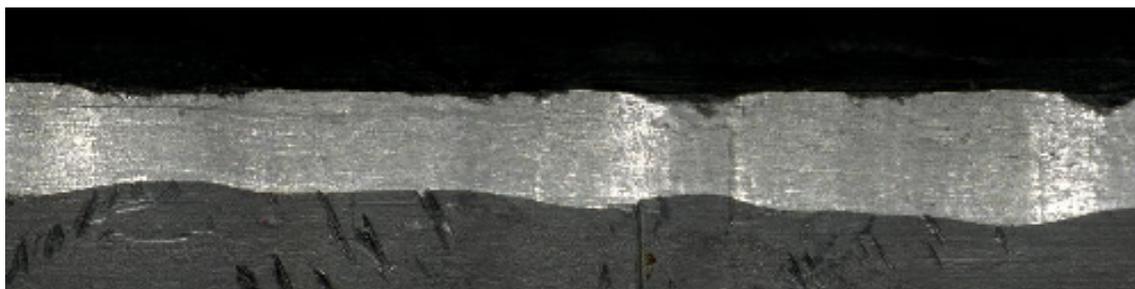


Figure of machining surface machined without any assignments

それに対し、提案手法を用いた加工実験を行った。加工実験は被加工物に対して共通部分に複数回の切削を行うことで、切削力、工具移動速度、工具回転量、切削量を測定している。加工表面の測定結果を下図に示す。

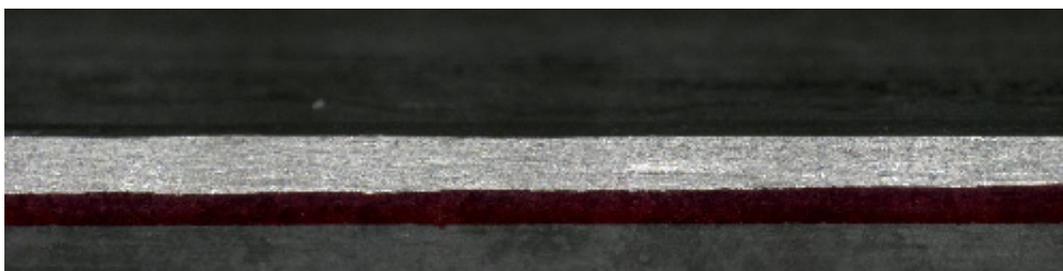


Figure of machining surface machined with proposed method

結果として、工具送り速度は先ほどと同様に不規則に変化している。これに対して、切削面を見てみると、切削力を一定とした制御方法による結果と比較して、過研削や切削量不足による切削面の不安定化が防がれ、良好な切削面が得られていることが確認できる。

## 2-4 電動工具及び制御ドライバの開発

### 電動工具の開発

電動工具の開発に関してロボット先端に装着することより、ロボットがブラケットを介して把持しやすく、且つ人の力が均一にかかる円筒型であることが望ましい、さらに小型軽量であることを望まれる。

要求性能として・ロボットが把持しやすい形状：円筒形

・小型：全長150以下、直径φ30以下

- ・軽量：500 g以下
- ・最高回転数 50,000 rpm
- ・ツール撓み：5  $\mu$ m以下

を条件に右写真の物を設計製作した。

外乱を制御するドライバーの開発に関しては、現在開発中である。次年度以降も題として開発を継続していく予定である。



## 最終章 全体総括

### ①デジタル適応フィルタリング技術の開発

ハプティック制御デバイスシステムを用いて加工試験を行うことにより、加工プロセスにおける加工振動や作業者の操作感覚の特徴抽出とその解析を行い、デジタル適応フィルタリング技術を開発することを目的とした。

結果として、ハプティック制御デバイスシステムの平行リンク機構部分にドリル、6軸力覚センサ、加工対象ワークを組み込んだシステムを使用して、加工中の工具の回転やバリ等の外乱による力、工具の回転方向、操作力の影響をオンラインで推定し、加工作業中の不要な要因を特定し除去することのできるデジタル適応フィルタリング技術を開発した。

その際、人が直接操作する際には、人が実際に加工を行う場合と同様のミスを取り除く必要があり、本研究では加工中の回転工具摩擦トルクへの影響に注目し、装置への操作力に影響を与えないように補正を適応モデリングによって、その影響力を推定し取り除く制御系を構築した。また、力覚センサが一つという制約下で人の操作力と接触力の分離を実現するデジタル適応フィルタリング技術を開発した。

本研究の有効性は加工実験により示され、回転工具による影響の補正を行わない場合と比較して工具回転の影響を受けて加工面からはじかれる現象を抑制した。本システムが導入される事により、多品種少量生産現場での仕上げ加工の製品不良防止に加え、人と機械の協調による複雑形状の精密加工や加工時間の短縮につなげることが可能となる。

## ②高精度カフィードバック制御技術の開発

本開発に適したロボットの構造としてパラレルリンク構造が有効であることが確認できた。構造上並列したリンクで先端部を支えあうことより、先端の撓みが目標値の $20\mu\text{m}$ 以下になることが、応力解析や試作を通して確認できた。しかしながら、高精度カフィードバック制御に対応し、且つ本研究の当初の目標であるロボット重量 $50\text{kg}$ 以下を達成するという、相反する条件を満たすためには構造材をアルミニウムにして、軽量化をしても限界があることが確認された。そこでロボットの根本的な軽量小型化設計と構造材を検討する課題を精密加工支援ロボットの開発で検討することとした。

構造的な動作確認を岐阜大学矢野研究室で検証として、各軸方向にサイン波の重ね合わせにより位置指令を与えたところ、目標軌道に追従していることが検証されたことより、動作上の妥当性が確認された。この結果構造上の問題が無いと検証できた。

## ③精密加工支援ロボット（試作機）の開発

①および②の成果を基に、課題として残った軽量で高強度な構造材としてカーボンファイバーを使用してロボットを設計し、応力解析や重量積算を実施した。その結果先端の撓みも目標値以内になり、リンクや先端プレートをカーボンファイバーにすることにより駆動サーボモーターの小型化が可能になりロボット本体重量を $50\%$ 以上軽量化することができた。その後微細な力加減をアシストするための精密加工支援ロボット（試作機）を開発し、デジタル適応フィルタリング技術の実機試験を行った。また、精密加工支援ロボットで加工中の外乱を抑制しながら、微細な力加減をアシストするための最適制御技術の開発を、ハプティック制御デバイスシステムを用いて開始した。具体的には、切削作業中に切削面押し付け方向に対して、スレーブ側ロボットの動作を独立したコンプライアンス制御によって制御することで、仕上げ加工作業に対応したバイラテラル制御系の構築を行った。また、切削力、工具送り速度、工具回転数等からなる加工条件式を基に、これらの値を相互に更新することで、切削量を均一化する手法を提案した。これによりハプティック制御及びバイラテラル制御を、バリ取り等の仕上げ加工に用いた場合に問題となる作業者の意思を尊重することで工具の動作が不安定となり発生する切削量の不均一化を抑制できる制御方法の提案と有効性の証明を行った。これによって、作業者の意図する位置の仕上げ加工を、作業者の熟練度に左右されることなく切削が可能な仕上げ加工支援を実現した。来年度以降には、新たに開発した精密加工支援ロボットに実装し、本提案手法の有効性を示す。

## 次年度以降の課題

- ・カーボンファイバーのコストダウン検討（事業化に向けて）
- ・カーボンファイバーとアルミリンク接合部（接着）の耐久性検証と温度変化検証
- ・先端機構の検討
- ・パラレルリンク構造による作業員へのリンクの干渉の検証
- ・作業員の作業性の検証改良
- ・ベース部の軽量化対策（30kg以内目標）
- ・ロボット製作原価の低減検討

以上の課題を今後の研究課題として平成25年度完成を目標とする。

事業化計画として以下のように考えている。

平成25年度～26年度：展示会（バリトリテクノフェア6月東京、10月大阪）に出  
品。関市周辺の企業にPRしてサンプル出荷

平成27年度～28年度：展示会データをもとに東海地区での営業展開  
（販売代理店の開拓）

メンテナンス会社の整備、量産準備

平成29年度～30年度：量産開始、全国営業展開

## ④電動工具用制御ドライバの開発

ロボット装着用の電動工具の開発、設計、製作を実施した。

開発条件

- ・ロボットが把持しやすい形状：円筒形
- ・小型：全長150以下、直径φ30以下
- ・軽量：500g以下
- ・最高回転数 50,000rpm
- ・ツール撓み：5μm以下

上記条件に沿ったものを設計製作した。

ロボットの力制御と連動してそれぞれの材料に対応した最適な工具回転数や工具回転の影響によるビビリ、外乱を制御するドライバーの開発に関しては、現在開発中である。次年度以降も課題として開発を継続していく予定である。