

この現象を詳しく調べるために、プログラムで用いる係数などの条件を変えながら実験を行った。その結果、図16に示すように目標とする近接間隔の位置で力覚制御による保持動作をしようとすると、2～3Hz程度の脈動が起ることが確かめられた。

この原因に考えられることとして、

- ① 負荷荷重のノイズ成分を除去するための平準化処理に伴う時間遅れ
- ② 制御系を構成する積分要素による時間遅れ
- ③ デジタル制御におけるサイクルタイムの有限性
- ④ 人(操作者)の反応時間の有限性による制御操作の発散などが挙げられる。

加工対象からある一定の位置を保持する技術は、凹凸面を倣いながら塗装をする場合や、開先線をたどりながら溶接する工程への応用が考えられるが、距離間隔の保持動作の際にこのような振動が起ると、他に突発的な外乱が入ったときに制御系が発散してしまう可能性が高くなるので、振動を抑えるための改善が必要となる。

#### 4.4 仮想連結インピダンスモデル

振動を起こす原因として挙げた時間遅れに関する要素は装置の低コスト化を図る上で避けられないので、一定の距離間隔を保つ際に発生する振動現象を抑えるための方法として制御プログラムの工夫による解決策を考えた。

実験においてマスタ・スレーブ方式による力覚制御は、先に図13の力学モデルで説明したように、制御を単純化するために、マスタに加わる荷重と、センサが検出する反力の差を計算し、その力の大きさと向きに対して制御系に設定した慣性抵抗  $M$ 、粘性抵抗  $D$ 、剛性抵抗  $K$  の係数により次の制御サイクル後までの変位量を計算し、マスタ装置とスレーブ装置の両方にその位置まで移動するようにモータへの速度指令を出力する処理を繰り返す制御サイクルを用いた。

マスタ装置とスレーブ装置に対して同じ変位を与えるということは、言い換えればマスタ装置とスレーブ装置は固く連結されているという制御モデルになっていることを意味し、マスタ装置およびスレーブ装置の一方に生じた荷重等が他方に直に伝達されるということである。

これに対して、マスタとスレーブとの間にインピダンスを設け、両者の負荷荷重が直接ではなく、このインピダンスを介して伝わるようにすれば、仮に一方に外乱や時間遅れ要素による制御発散要因があったとしても、その影響を小さく抑えることが出来るのではないかと考えた。

このことを図式で表現すると図17のようになる。a) は、マスタとスレーブを直接連結する力学モデルである。これに対して、図17のb)のようにマスタとスレーブを切り離し、それらを粘性抵抗  $D_c$ 、剛性抵抗  $K_c$  で連結する力学モデルとすることにより、制御系を安定化させる効果が期待できる。

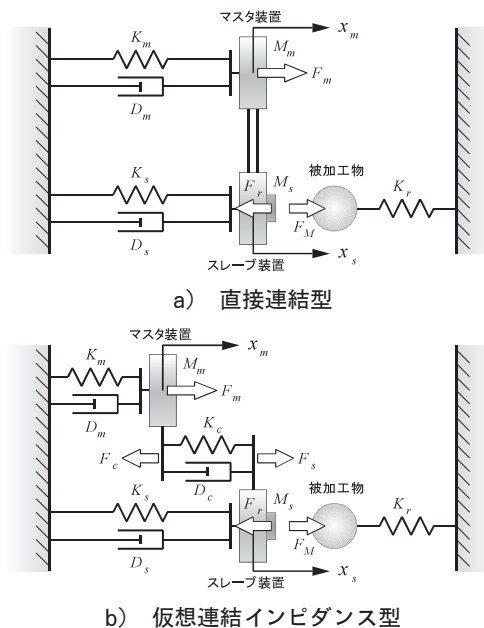


図17 マスタ・スレーブ制御系の力学モデル

仮想連結インピダンスモデルを用いた場合のバイラテラル制御ブロック線図を図18に示す。マスタは操作者が与える力と連結インピダンスを介してスレーブから加えられる力の差を計算し、マスタ側に設定した慣性抵抗  $M_m$ 、粘性抵抗  $D_m$ 、剛性抵抗  $K_m$  の係数からマスタの移動変位を計算して位置決めを行う。

一方、スレーブは連結インピダンスを介してマスタから伝えられる力と近接距離センサが検出する力の差を計算し、スレーブ側に設定した慣性抵抗  $M_s$ 、粘性抵抗  $D_s$ 、剛性抵抗  $K_s$  の係数からスレーブの移動変位を計算して位置決めを行う。

これにより、マスタとスレーブとの間で力の伝達が直接的でなくなり、またマスタおよびスレーブに仮想的に設定する慣性抵抗、粘性抵抗、剛性抵抗がマスタとスレーブで異なる係数をとるため、マスタとスレーブとの位置関係は、必ずしも同じ変位とならない。

この力学モデルにもとづいて制御プログラムを作成し、動作実験を行った。結果を図19に示す。マスタの動きに対してスレーブが少し遅れて追従している動作が認められる。これは、マスタに与えた動作指令が直にスレーブに伝達され

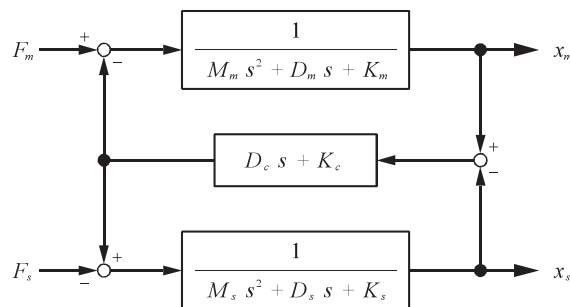


図18 仮想連結インピダンスモデルによる制御ブロック図

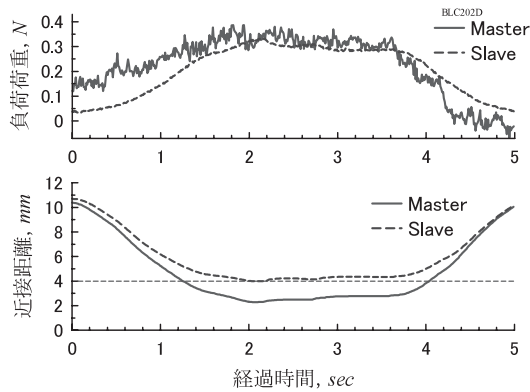


図 19 仮想連結インピダンスモデルによる力覚制御動作

ず、仮想連結インピダンスにより、マスタとスレーブの速度差および変位差によって生ずる力として伝達されるためである。

図 16 で示した距離間隔の保持の時に現れていた振動の発生が小さく抑えられていることがわかる。スレーブが目標基準位置で近接距離センサの出力によりほぼ一定に保たれている間、その保持力は制御モデルからセンサに加えられる力と、仮想インピダンス  $K_c$  によって釣り合うのに必要な距離だけマスタは先方に進んでいることになり、図からその様子が認められる。

この制御法によると、スレーブ側で機械振動や突発現象が起こったとしても、その力情報が直ちにそのまま作業者に伝えられるのではなく、幾分緩和されて伝わるので、作業者の反射的な反応を招くことなく制御系の安定性が保たれるという効果が得られる。

このことは、人の手作業における柔軟な力加減の要素が導入されたということでもあり、言い換えると、機械の制御に人の手作業の柔らかさが再現されたということもできる。

#### 4.5 木製品加工への応用

力制御を用いた木製品の研磨作業の事例<sup>9)</sup>について、仮想連結インピダンスモデルによる柔軟な力制御を木製品の自律加工における応用実験を行った。

対象作業は、図 20 に示すような木製品の自由局面を回転式紙やすり装置で研磨する工程を選び、加工荷重は試作したセンサを用いて研磨加工時の加工反力を計測しながら、手作業のような柔軟な加工が出来るかを実験した。

実験の結果の一例を図 21 に示す。工具に取り付けた力センサの出力は、ローパスフィルタによって高周波ノイズ成分が除去されている。力センサで計測される加工反力に対して負荷制御による力指令の変動が抑えられ、滑らかな加工力制御が行われている様子が認められる。

特に経過時間 4 秒付近に認められる突発的な加工反力の発生に対する負荷制御系への影響が小さく抑えられ、仮想連結インピダンスモデルによる制御プログラムにより、加工反力

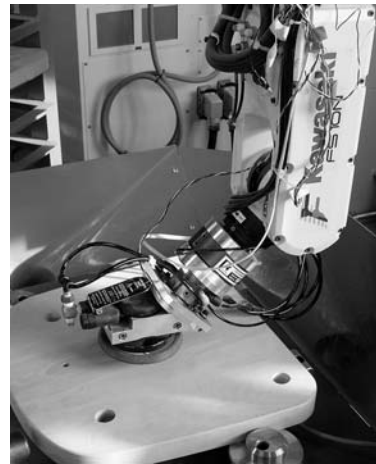


図 20 木製品表面研磨加工における力覚制御

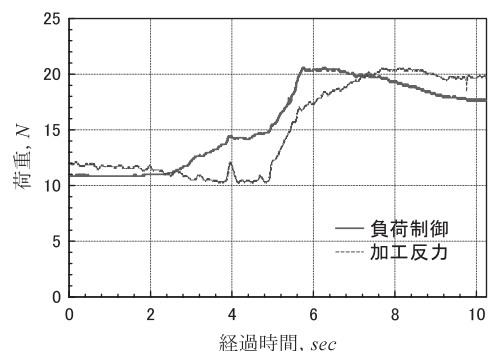


図 21 木加工における力覚制御実験結果

の突発的な変化に対する柔軟な制御においても効果が認められた。

この応用展開については、実際のラインで稼働させるためにいくつかの課題解決に向けた実験が必要であり、継続して検討を進めていくこととしている。

## 5. まとめ

遠隔加工時の加工状態の視認性を補完するため、近接距離を力覚情報に変換して帰還する方法を考案し、実験によりその効果を確認した。近接距離センサには、安価で機械金属製造分野で応用できそうな永久磁石の磁力を利用したセンサを試作し、その実用性を確かめた。また、目的に応じたセンサ出力特性の変換方法について検討した。

加工制御の安定性を向上させるとともに、手作業のような柔らかさを再現するために、仮想インピダンス制御モデルを用いた制御手法を導入し、その効果を確認した。得られた成果をリアルタイム制御ロボットによる木製品加工への応用を図るとともに、製造業における遠隔加工の実用化への応用展開を図っていきたい。

## 参考文献

- 1) 戸羽篤也, 桑野晃希; バイラテラル方式による力覚制御技術; 北海道立工業試験場報告 Vol.297 (1998)
- 2) 戸羽篤也, 桑野晃希, 中西洋介 他; 複雑形状物のハンドリングシステムの開発; 平成 11 年度事業報告書(1998)
- 3) 戸羽篤也, 桑野晃希; バイラテラル制御を応用したマスタ・スレーブ・ハンドシステムの試作; 北海道立工業試験場報告 Vol.298 (1999)
- 4) 津田尚明, 加藤典彦ほか; 実・仮想複合提示型マスタ・スレーブシステム; ヒューマンインターフェース学会誌 (2004)
- 5) 戸羽篤也; 遠隔グラインダ加工のための力覚制御法; 北海道立工業試験場報告 Vol.301 (2001)
- 6) 鎌田英博, 安田星季, 永滝真太郎, 小林祐二; 触覚センサによる研磨ロボットの教示; 日本機械学会講演論文集 (1999)