

聴覚情報を用いたテレ・マシニング・システム

光石 衛・小林 統・割澤 伸一 (東京大学・工学部)

Abstract: This paper describes a tele-machining system using auditory information including both verbal and non-verbal information. The advantage of using auditory information is that a human operator can monitor the manufacturing process, in the background, while the visual information requires direct attention. In the proposed system non-verbal information is actively used to present the motion of the tool and machining state. Verbal information is transmitted to the system operator in case of an extraordinary cutting state and is used to confirm the instructions of the operator. The effectiveness of the system was demonstrated by experiment.

Keywords: tele-machining, stereo-sound, verbal and non-verbal information, user-friendly manufacturing system

1. はじめに

テレオペレーション技術、人工現実感技術等の進歩により、時間遅れが生じるような遠隔地、物理法則やスケールの異なる微小世界及び宇宙空間などの「異なる世界」に存在する機械を操作・加工するシステムが実現可能となってきた。本論文では、ユーザ・フレンドリな環境を提供するためにテレ・マシニング・システムの情報提示機能として何が必要であるかを述べる。その中で特に聴覚情報を利用する意義、及び情報提示手法の可能性について述べる。また、システムの実現法、構築法について述べる。さらに、異なる世界に存在する加工機械に組み込まれた多軸力センサから得られる加工状態や、人間の思考を支援するための情報を聴覚情報(音声情報、及び、非音声情報)として提示する方法について述べる。最後に本システムを用いてテレ・マシニングを行なった場合の結果を述べる。

2. テレ・マシニング・システムとは

遠隔地、微小世界、宇宙空間といった人間の通常感覚では直接知覚することのできない世界のことを本論文では「異なる世界」と呼ぶこととする。操作者が異なる世界に存在する対象の状態を認識でき、また対象に対して操作、

特に加工を可能にするシステムのことを「テレ・マシニング・システム」と呼ぶこととする(図1)[1~10]。

3. システムに必要な情報提示機能

異なる世界と操作者の存在する環境を結ぶシステムを構築するにあたり、操作者への情報提示において次に述べることを考慮しなければならない(図2)。

- テレ・マシニング・システムにおいては、操作者に次の情報を知らせる必要がある:
 - 加工機械の状態(回転、位置、送り速度、送り方向)、
 - 加工状態(非切削状態、通常切削状態、異常切削状態)、
 - 操作者の意図が的確にシステムに伝わっているかどうか、
 - 操作者が意図した通り動作が行なわれているかどうか。
- 異なる世界での対象の状態を把握するためにそこで得られる情報を操作者のいる環境へ提示する時、異なる

Tele-Machining System Using Auditory Information
MITSUISHI Mamoru, KOBAYASHI Osamu, WARISAWA Shin'ichi
(Faculty of Engineering, the University of Tokyo)

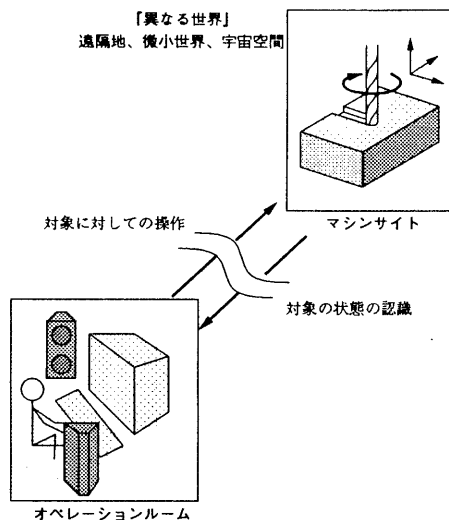


図1: テレ・マシニング・システム

世界の情報をありのままに伝えるだけで十分とは限らない。それらの情報をもとにした別の情報を提示することによってユーザ・フレンドリな環境を構築することができる。例えば、宇宙空間での作業では音を聞くことはできないが、操作者の環境での疑似的な音が作業の効率をあげる。

- 異なる世界に存在する加工機械に対して正確に操作者が思ったことが伝わっているかどうか確認できることにより、操作への安心感が増し、ユーザ・インターフェイスが向上する。具体的には、工作物と工具との関係、工具の動作許容範囲を提示し、危険な操作に対してはシステムが警告する。

4. テレ・マシニング・システムにおける聴覚情報の意義

以下の理由により本論文で述べるテレ・マシニング・システムでは、聴覚情報を積極的に利用する。

- 人間は主に視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚といった五感によって情報を得ている。その中でも支配的なのが視覚である。視覚によって詳細な情報を得ることができるが、注目している対象についての情報しか得ることができない。それに対し、聴覚は人間の可聴領域である20Hzから20kHzの音で十分な音圧さえあれば、音源がどこにあって認知することができる[11]。
- 視覚は、目を閉じるとほとんど機能しなくなるが、聴覚は構造的に人間の意思によって感覚を遮断することはできない。耳を手で塞ぐことができる程度である。しかし、認識したくない音も存在するために、人間はまわりにある聴覚情報をいつもすべて認識しているわ

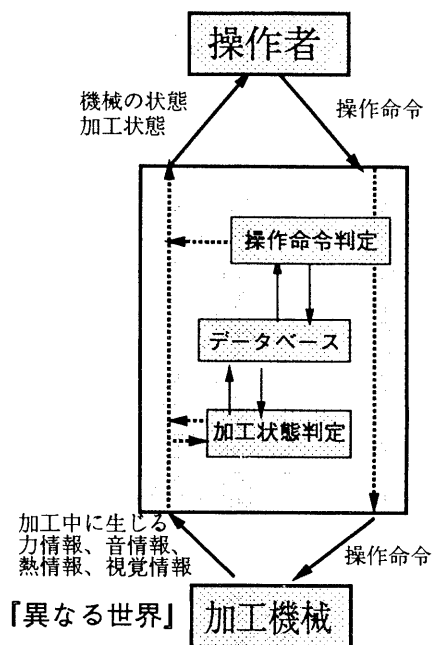


図2: 操作者を取り巻く情報

けではない。新しい情報や必要な聴覚情報は認識しているが、長時間変化しない情報や不必要な聴覚情報は認識しなくなるというような情報の取捨選択が無意識のうちに行なわれている。人間は変化する聴覚情報に対して敏感である。したがって、操作者に強要せずに情報提示を行なうことができる。

- 音は空間的な広がりを持って存在するが、人間はその広がりの中から欲しい聴覚情報を聞くことができる。
- 聴覚情報として提示する時に、大きく二つの与え方が考えられる。一つは非音声情報、いわゆる「音」である。パラメータとして音の高さ、音の大きさ、音質、音像定位(音源の存在する位置)、時間変化があげられる。これに対し、音声情報がある。これはいわゆる「音」としての性格のほか「言葉」であることが重要である。人間は言葉を媒介として思考することが多いが、その言葉を直接提示することによって、情報を操作者にダイレクトに伝えることができると考えられる。しかし、言葉が万能というわけではない。方向、色、形など言葉では表現しにくいことも多くある。
- 聴覚情報の音像定位に関しては視覚情報とのマッチングにおいて有効である。つまり、音源の位置は視覚情報によってよりはっきりと認識できる。聴覚によって音像定位を鋭く識別することは難しいが、視覚情報とセットにすることでより効果的に伝えることができるようになる。
- 冗長な聴覚情報は操作者にとって不快な音となり得

る。これは操作の妨げとなり、情報を騒音とみなすようになるので情報を凝縮して伝える。

5. 非音声情報による情報提示の可能性

音像定位は本来3次元であり、これを忠実に実現する場合、音源となるべき位置にスピーカを配置することが考えられる。しかしながら多くの場所から音を発生させる必要性がある時には非現実的である[12]。人間は音像定位を両方の耳に到達する音の位相差や音圧差を用いて認識しているのでそのことをシミュレートする方法が現実的である。一方、人間は音像定位を聴覚情報だけで正確にとらえているわけではなく、特に、頭の正中間においてはあいまいである。視覚情報とのマッチングにより、正確な位置を決定している。

音像定位を時間軸上に正確にコントロールできるとき、非音声情報を用いて次のような情報提示が可能になると考えられる。

対象のパラメータ・音の高さの対応 対象のうち速度や回転数のパラメータに対し、音の高さを対応させる。例えば、エンジンの回転数に応じて実際に音が高くなることが知られている。工具の送り速度に応じて音が高くなることは実際にはないかもしれないが、音が高くなることは感覚的に受け入れられる。

対象の座標空間・音像空間の対応 対象の動きを音像の動きとして実現する。対象の動きの位置ベクトル、または、速度ベクトルを音像の位置ベクトルと対応させる。例えば、工具の送り速度の情報を音像の直線の動きで表現する(図3)。

対象のパラメータ・音像空間の対応 対象のもつ情報のうち実際に空間を動いていないパラメータに対し、架空の動きを対応させて、それを音像の動きとして表現する。例えば、工具の回転の情報を音像の円の動きで表現する(図3)。

音の連続性 音像の動きを連続的に表現するときには音の変化はその場所の変化だけであるが、不連続な音で表現するときには、その一回一回の音に対して人間は注意をうながされるので強調したい時には不連続な音の方が効果的である(図4)。

不連続な音の規則性・不規則性 一定間隔で提示される音に対しては速さを感じることができる。継続して規則正しく提示されていた音が、乱れた間隔で不規則に提示されると不安感を覚える(図4)。

複数の音源 一つの音源によるより、多くの音源を用いて音像定位を再現したほうがより多くの情報を付加することができる。しかし、付加する情報が多過ぎても認識できなくなり騒音になる可能性がある。

点・線・面 音像は点の概念であるが、複数の音源に秩序を持たせるという観点から、線や面として表すことが考えられる。

非音声情報による情報提示の可能性について予備的実験を行ない以下のことがわかった。

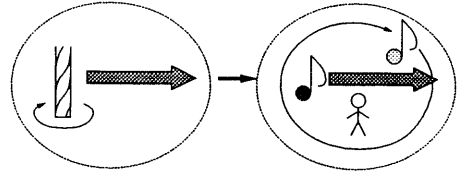


図3: 対象と音像空間

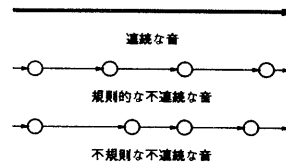


図4: 音の連続性・規則性

- 方向知覚の実験により、被験者は視覚と異なり音像定位を間違えることが確認された。特に頭の正中間ではよく間違える。実験では方向を時計の文字版の数字で表した。これは30°の分解能があり、しかも誰でもが意識せずに使えるためである。
- 不連続な音をランダムな音像定位を持たせて提示する時、1秒より短い間隔で提示すると人間は方向についていくことができなくなる。つまり、これより短い間隔でランダムな音像定位を提示することは無意味である。
- 不連続な音の音像定位がある軌跡をとる時、ある程度の速さを持たせないと認識が難しくなる。これは、軌跡をとる時に人間が次にどの位置に音像が現れるか予想できるようになったにもかかわらず、実際の音が聞こえるのが遅れると心理的に動揺を生じ、その動揺が次の音の音像定位を決定する時に不安定な要素として働くからだと考えられる。
- 距離の知覚実験により感覚的な距離(相対的に遠い、近い)は認識できるが正確な距離を把握することは難しいことが判明した。したがって一度間違った認識をするとずっとそれを基準に知覚することになる。相対的關係を利用する音の軌跡を提示することは有効である。

6. 聴覚情報を用いたシステムの実現

前節までに述べたことをふまえ聴覚情報を用いたテレ・マシニング・システムを次のように実現する。本システムでは加工機械としてマシニング・センタを扱う。

- 通常、工具の操作は数値を介して行なわれるので、方向を間違えやすい。このため、垂直方向(主軸方向)の挙動を音声情報を用いて、水平方向の挙動を非音声情報を用いて提示する。具体的には水平方向の工具の移動情報から工具の速度ベクトルを求め、これを音像

の位置ベクトルの軌跡、及び、音の高さとして表現する。

- 工具の回転数や回転方向が変化するとき、確認のために音声情報および非音声情報でそれらを提示する。具体的には回転の変化を音像の不連続な円運動に対応させ、その間隔及び音の高さによって回転の速さを表現する。また、回転数を音声情報によっても提示する。
- 工具の移動に伴う加工状態の変化は非音声情報の音質を変えらることによって提示する。ただし、びびりを生じたといった危険な事象については音声情報によって提示する。
- 実際に命令を加工機械に送る前にその命令によって工具、及び工作物がどのような状態になるかの確認ができるようにする。具体的には工具がどの方向にどのくらいの速さで移動するか、工具が工作物と接触するかどうか、工具が許容範囲をこえてオーバートラベルしないかどうかを音声情報によって提示する。

7. システムの構成

本節では、異なる環境として遠隔地を例とし、聴覚情報を用いたテレ・マシニング・システムの構成について述べる。

7.1 ハードウェア・システムの構成

システムは異なる世界としての「マシン・サイト」と操作者の存在する「オペレーション・ルーム」とそれらを結ぶ「情報伝送システム」から成る(図5)。

「マシン・サイト」には加工機械としてマシニング・センタ、視覚情報を取り込むためのTVカメラがある。

マシニング・センタはコンピュータ・ネットワークにつながれた外部のコンピュータから直接制御できるようにになっている。また、このマシニング・センタには多軸力センサが組み込まれており、このデータも実時間制御装置で処理できるようにしている。

「オペレーション・ルーム」には操作情報入力装置、視覚情報再生装置(TVモニター)、聴覚情報再生装置がある。聴覚情報再生装置は非音声情報を提示するシンセサイザ、それをコントロールし、また音声情報を提示するワークステーション、ワークステーションとシンセサイザとを結ぶMIDI[13,14]、そして、増幅装置及びスピーカから成る(図6,7,8)。本システムでは音像定位を2次元で表し、それを音圧差によって実現している。

「情報伝送システム」は操作情報及び多軸力センサのデータを伝送するコンピュータ・ネットワークと、視覚情報である映像信号を伝送するアナログ回線とから成る。

7.2 ソフトウェアシステムの構成

システムは次の各プロセスから成る(図9)。

加工機械操作パネルプロセス マシン・サイトにあるマシニング・センタを操作する時の人間とのインターフェイスであり、工具の回転に関する操作(始動、停止、回転数、回転方向)、移動に関する操作(各軸の送り、送り速度)の入力ができる(図10)。

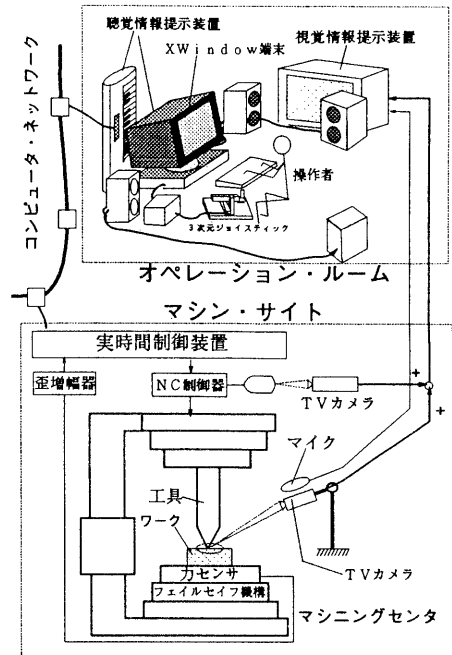


図5: テレ・マシニング・システム

加工機械制御プロセス ネットワーク上のコンピュータから送られる命令を直接マシニング・センタに伝える。

音声情報提示プロセス 加工機械操作パネルプロセス、加工状態判定プロセスからのデータをもとに、操作者に音声情報を提示する。

非音声情報提示プロセス 加工機械操作パネルプロセス、加工状態判定プロセスからのデータをもとに、操作者に非音声情報を提示する。

多軸力データ測定プロセス マシニング・センタに組み込まれた多軸力センサからのデータをA/D変換によって取り込む。

加工状態判定プロセス 多軸力センサによって得られる力情報をもとに力のベクトル軌跡を求め、加工状態が異常

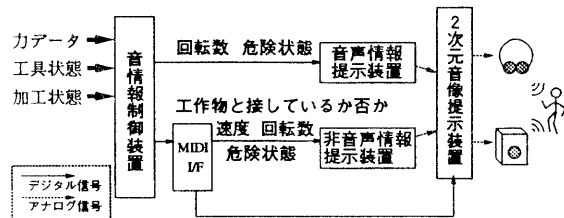


図6: 聴覚情報を用いたシステム

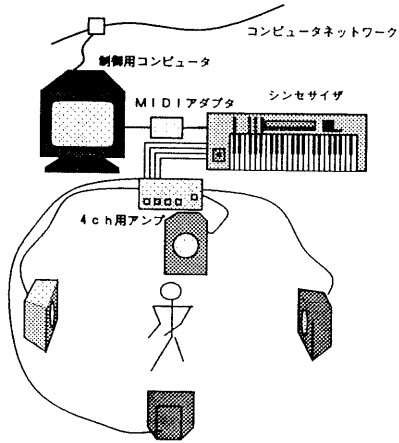


図 7: 非音声情報提示装置

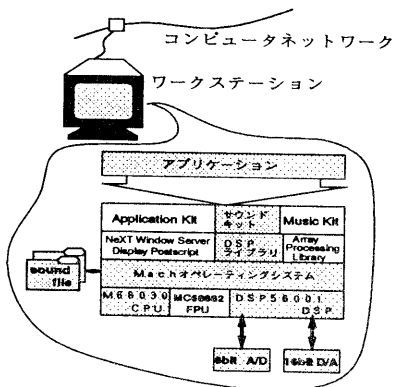


図 8: 音声情報提示装置

であるかどうかを判定する [15]。

8. 遠隔地からの加工実験および結果

本節では遠隔地からの加工実験について述べる。オペレーション・ルームとマシン・サイトとして LAN で結ばれた 2 つの場所を選び、テレ・マシニング・システムを実現した。

実験では同一の加工を次の 3 通りの方法で行なった:

1. 操作に対して、テレビカメラ及び操作パネル上の数値による視覚情報だけで、聴覚情報が与えられない場合、
2. 操作に対して上記の視覚情報と、機械の状況(回転、位置、送り速度)及び加工状態(非切削、通常切削、異常切削)を聴覚情報として提示した場合、
3. 操作に対して上記の視覚情報と、機械の状況と加工状態、ユーザ・フレンドリな情報(工具が工作物の領域

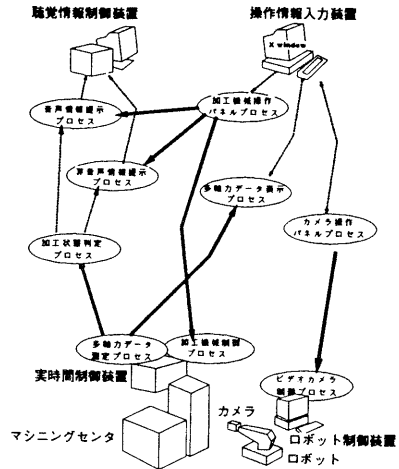


図 9: ソフトウェア・システムの構成

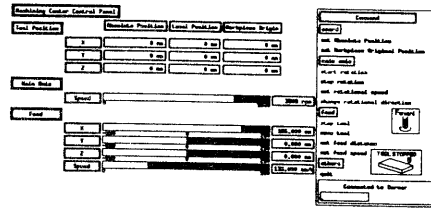


図 10: 加工機械操作パネル

に入るかどうか、工具が許容範囲を越えないかどうかの警告)を聴覚情報として提示した場合。

実験により以下のことが判明した。

- 非音声情報提示装置によって工具の動きに応じて音が生じることは操作者にとって操作に対する安心感をもたらす。送り速度が遅い時には視覚情報である TV カメラからの情報をみてもよくわからない。聴覚情報によって動いていることの確認ができると次の操作に安心して移ることができる。
- 工具の挙動が変わった時には音に変化するので、モニターによって視覚情報を見ていなくても認識できる。工具が一定の動作を続けている時には音は変化しないので情報がやがて意識されなくなる。つまり、挙動が変化したという情報を聴覚情報が変化した時にもみ得ることができる。したがって操作者に冗長な情報を与えずに済む。
- 回転数や工具の回転軸方向の動作を音声情報で提示することは有効である。非音声情報によって提示することも可能である。
- 現在の工具の動きの情報よりもこれから工具領域に入るかどうか、許容範囲を越えないかどうかといった情報が操作する上で重要になってくる。

- 非音声情報の音像定位については他の視覚情報システム (X-Window 端末、マシン・サイトのモニタ) とマッチングをきちんととらなくてはならない。
- 操作者の意図の確認を行なうとこれからのようなことが起きるのか把握できて良いが、その項目が多ければ多いほど操作性は下がる。確認には提示すべき情報を選び、すぐに実際の動作に移れるようにすることが大切である。
- 確認時に工具の動きは把握しているのに、実行時には音像定位をあえて行なう必要はない。
- 情報提示を考える時に、聴覚情報、あるいは視覚情報の両方を効果的に提示するようにシステム全体を考えなくてはならない。

9. おわりに

本論文では、聴覚情報を用いたテレ・マシニング・システムに要求される機能、ハードウェア、ソフトウェア・システムの構成法について述べた。特に、非音声情報による情報提示の可能性について述べた。さらに遠隔地からの加工実験を行ない、システムの性能評価と問題点を指摘した。

参考文献

- [1] 光石衛, 葛岡英明, 割澤伸一, 畑村洋太郎, 長尾高明, “加工の臨場感通信システムの試み,” 1990 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 503/504, 1990.
- [2] 光石衛, 割澤伸一, 長尾高明, 畑村洋太郎, “異なる世界を結ぶ加工システム,” 1991 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 611/612, 1991.
- [3] 光石衛, 長尾高明, 畑村洋太郎, “臨場感をもつ対蹠地からの加工システムの試み,” 1991 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 609/610, 1991.
- [4] 光石衛, 割澤伸一, 関念啓聡, 畑村洋太郎, 長尾高明, “超環境を結ぶヒューマン・フレンドリな生産システム,” 7th Symposium on Human Interface, 179/186, Kyoto, Japan, 1991.
- [5] M.Mitsuishi, et al., “Development of a User Friendly Manufacturing System,” *Proc. Intern. Conf. on Manufacturing Systems and Environment (MSET21)*, 111/118, 1990.
- [6] Mitsuishi,M., Warisawa,S., Hatamura,Y., Nagao,T. and Kramer,B., “A User-Friendly Manufacturing System for Hyper-Environment,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, 1992 (will appear).
- [7] Mitsuishi,M., Nagao,T., Hatamura,Y., Kramer,B. and Warisawa,S., “A Manufacturing System for the Global Age,” *The Eighth International IFIP WG5.3 Conference (PROLAMAT'92)*, Tokyo, Japan, 1992 (will appear).
- [8] Hatamura,Y., Nagao,T., Mitsuishi,M., Nakagawa,G., Sugishita,H. and Kramer,B., “A Fundamental Structure for Intelligent Manufacturing and Its Application to a Machining Center,” *The Eighth International IFIP WG5.3 Conference (PROLAMAT'92)*, Tokyo, Japan, 1992 (will appear).
- [9] Mitsuishi,M., Warisawa,S., Hatamura,Y., Nagao,T. and Kramer,B., “Trial of a Remote Reality-Based Manufacturing System in Japan Operated from the United States,” *1992 Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, San Francisco, U.S.A. 1992 (will appear).
- [10] Peter H. Lindsay and Donald A. Norman (中溝幸夫, 箱田裕司, 近藤倫明 訳), “情報処理心理学入門 1 感覚と知覚,” サイエンス社, 1986.
- [11] Blauert,J. (森本政之, 後藤敏幸 訳), “空間音響,” 鹿島出版会, 1986.
- [12] MIDI 企画協議会, “コンピュータ & MIDI,” 音楽之友社, 1988.
- [13] “実践入門 MIDI と音源の技術,” トランジスタ技術 2 月号 CQ 出版者, 1990.
- [14] Mitsuishi,M., Nagao,T., Hatamura,Y. and Warisawa,S., “Real-time Machining State Detection Using Multi-axis Force Sensing,” *Annals of the International Institution for Production Engineering Research (CIRP Annals.)*, 1992(will appear).