可変型マスタースレーブ間結合力を有する バイラテラル制御による加工軌道制御

Control of Machining Trajectory using Bilateral Control Method with Variable Connecting Force for Master and Slave Robot

○学 長田 継伸 (三重大) 正 加藤 典彦 (三重大)
正 矢野 賢一 (三重大)

Tsuginobu OSADA, Mie University, osada@robot.mach.mie-u.ac.jp
Norihiro KATO, Mie University
Ken'ichi YANO, Mie University

Finishing processes such as deburring are performed on a wide variety of products in various quantities by workers on a piece-by-piece basis. Accordingly, the accuracy of the product depends on the worker's skill. To solve this problem, the bilateral control system is applied to machining support system. The aim of this research is to develop a machining support system via bilateral control system which can control the machining trajectory by reflecting the operation force. This system has the variable connecting force construction for master and slave robot based on the symmetrical bilateral controller. This construction is useful to change the feature of system according to machining condition dynamically.

Key Words: Man-machine system, Robot, Operation Support, Bilateral control

1. 緒言

多品種少量生産を目的とした製品の仕上げ加工は、ティーチング作業等の時間的要因や、形状のバラつきといった精度的要因によりその自動化が難しく、ほとんどは人手によって行われている。そのため、作業者の熟練度が加工精度に大きく影響を与えてしまい、熟練度不足による加工ミスが避けられない。

この問題を解決する一方法として、バイラテラル制御を利用した遠隔作業支援システムが開発されている[1]。バイラテラル制御とはマスタースレーブ制御の一種であり、マスター側ロボットとスレーブ側ロボットの位置と力の制御を同時に行う制御方法である[2]。加工作業に対する適用例として、久富らはスレーブ側ロボットにコンプライアンス制御器を追加することで、押しつけ力の制御がある程度可能なバイラテラル制御型の遠隔作業システムを開発している[1]。著者らも切削作業中に加工面に対する押し付け力制御をスレーブロボット側のコンプライアンス制御に完全に依存させることで、切削理論の応用を容易にする加工支援システムを開発した[3]。

熟練作業者の持つ技術を有効に生かすには、スレーブ側ロボットがマスター側ロボットに追従し、正確な動作の再現が求められる。一方で、高精度加工を実現するには、加工理論に基づく目標力や手先軌道への追従が求められる。従来の研究では、閾値を用いて追従対象を切り替える等によってこれを実現しているが、システムの安定性を考えればこの切り替えは一つの運動方程式上で特定の変数の連続的な変化によって表現される必要がある。また、加工理論等を有効に利用するには、これらの加工条件を反映可能なバイラテラル制御系を構築する必要がある。

本研究では対称型バイラテラル制御をベースとしたマスタースレーブ間結合力の動的制御が可能なバイラテラル制御手法の提案を行う。提案手法では、加工状況に応じてスレーブ側ロボットがマスター側ロボットへの追従、または目標切削力や目標軌道への追従のどちらかを優先するかを選択可能としている。また、目標値の計算には加工条件式を用い、移動速度や押しつけ力などのバイラテラル制御系の運動方程式の持つ要素と共通させることで、加工条件の反映を可能とする。

2. 制御系設計

加工支援のためにスレーブ側ロボットの動作に必要な要素は、以下の三つの状況に分類することができる。

1. 対象と接触せずマスター側ロボットに追従。
2. 加工対象物と接触後、加工理論に基づいて加工。
3. 加工面方向に対し操作者が工具軌道を修正。

これらの三つの操作条件を満たすため、新たなバイラテラル制御手法を提案する。この制御系は対象型バイラテラル制御系をベースとし、力の伝達部分に操作状況に応じて可変な変数 μ_{mj} , μ_{sj} ($j=1,2,3$)を設けることで、結合力に偏りを持たせる点に特徴がある。この運動方程式は式(1), (2)のようになる。

$$M_m \ddot{q}_m(t) + C_m \dot{q}_m(t) + C_{mp} \dot{q}(t - \tau_{m1}) = f_{op}(t) + \mu_{m1} u_m + \mu_{m2} f_m + \mu_{m3} f_{tenv}(t - \tau_{s2} - \tau_r(t)) \quad (1)$$

$$M_s \ddot{q}_s(t - \tau_{s1}) + (C_m + C_{mp}) \dot{q}(t - \tau_{m1}) = f_{env}(t - \tau_{s2}) - f_{Aenv}(t - \tau_{s2}) + \mu_{s1} u_s + \mu_{s2} f_s + \mu_{s3} f_{top}(t - \tau_{m2} - \tau_r(t)) \quad (2)$$

ここで、 q_i , M_i , C_i , C_{ip} ($i=m,s$)はマスター側ロボットとスレーブ側ロボットの位置、質量、粘性係数、および仮想粘性係数

Fig. 1 Bilateral machining support system

を表す。 u_i はロボット間の拘束力、 f_i は目標値に対する追従力を表し、それぞれ目標値からの偏差に基づいてバネ係数 2.4×10^4 [N/m]を持つバネ系を用いている。 f_{op} , f_{env} は操作者、および環境が作用する力であり、 f_{Aenv} は f_{env} を相殺するために動作し、通常は $f_{Aenv}=f_{env}$ である。 f_{op} , f_{Aenv} はマスター側からスレーブ側へ、またはその逆方向に送られる力信号を表す。また、スレーブ側ロボットには仮想インピーダンスモデルを設定し、 $M_s=1.0 \times 10^2$ [kg], $C_s+C_{sp}=6.0 \times 10^3$ [Ns/m]としている。さらに、演算ソフト上で信号の伝達部分に時間遅れを再現することで、システムが通信時間遅れを有する場合についても検証する。 τ_{m1} , τ_{s1} は各ロボットのエンコーダに対するフィルタによって発生する時間遅れを表し、 τ_{m2} , τ_{s2} は力覚センサの測定値に対するフィルタによって発生する時間遅れを表し、 τ_r はマスタースレーブ間の通信遅れを表す。本研究ではこれらのフィルタとしてローパスフィルタを使用しており、 $\tau_{m1}=\tau_{s1}=0.05$ [s], $\tau_{m2}=\tau_{s2}=0.10$ [s]としている。

μ_{mj} , μ_{sj} の変化を一つの変数の制御によって行うために、新たな変数 μ を導入し、 μ_{mj} , μ_{sj} をこの変数 μ との積として表す。本研究では、 $\mu_{m1}=\mu \times 0.10$, $\mu_{m2}=0.0$, $\mu_{m3}=\mu \times 1.0$, $\mu_{s1}=1.0-\mu$, $\mu_{s2}=\mu$, $\mu_{s3}=0.0$ としている。 $\mu_{m1}=\mu \times 0.10$ としたのは、マスタースレーブ間のインピーダンスパラメータの差により、同条件で力を加えると動作が不安定になるためである。 μ の決定は式(3)~(5)のように行う。

$$\mu = \begin{cases} 0 & (\mu_1 - \mu_2 < 0) \\ \mu_1 - \mu_2 & (0 \leq \mu_1 - \mu_2 < 1) \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_1 = \begin{cases} 0 & (f_{env} < 0) \\ f_{env}/3 & (0 \leq f_{env} < 3) \\ 1 & (f_{env} \geq 3) \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_2 = \begin{cases} 0 & (|q_m - q_s| < 0.03) \\ (|q_m - q_s| - 0.03) / 0.02 & (0.03 \leq |q_m - q_s| < 0.05) \\ 1 & (|q_m - q_s| \geq 0.05) \end{cases} \quad (5)$$

この制御方法では、スレーブ側ロボットは対象物との接触から目標力による押しつけ動作へと連続的に移行する。またマスタースレーブ間の偏差を大きくすることで、マスター側ロボットへの追従性が再出現し、操作力の付加を可能とする。

3. 押しつけ動作実験

設計した制御系を用いてスレーブ側ロボットの対象物に対する押しつけた動作実験を行った。提案手法の有効性を検証するために、 $\mu=0$ に固定することで従来のマスタースレーブ制御を再現した場合と比較した。通信遅れ時間は $\tau_r=0.10$ [s]に設定されている。実験結果を図2, 図3に示す。図2においてcase1では一定力での押しつけ、case2では接触力の増減、case3では押しつけながら送り動作を行っている。図3においてcase1では一定力での押しつけ、case2では接触力の増減、case3では接触と離脱、case4では押しつけながらの送り動作、case5では送り動作をしながら接触力の増減を行っている。

マスタースレーブ制御を用いた実験では、押しつけ力で操作することが難しいことが分かる。これはスレーブ側ロボットのマスター側ロボット位置への移動の遅れに加え、時間遅れによるマスタースレーブ間動作の安定性の低下による、オーバーシュートの発生も原因の一つと考えられる。

提案手法を用いた場合、マスタースレーブ制御を用いた場

Fig. 2 Experiment result without transfer time delay

Fig.3 Experiment result with transfer time delay

合よりも押しつけ力の制御が良好に行われている。これは、 μ の制御にはスレーブ側ロボットが測定した位置信号と力信号、マスター側ロボットから伝達された位置信号を使用しているため、動作状態の切り替えが時間遅れの存在しない場合と同様に行われるためである。

4. 結言

本研究では、加工作業中に必要とされる制御方法と運動方程式を示し、これを基に加工支援を目的としたマスタースレーブ間の拘束力の動的変化が可能なバイラテラル制御系を提案した。制御手法の有効性を通信時間遅れが存在する環境で、目標力による押しつけ動作実験を通して示した。

文献

- [1] 久富茂樹, 千原健司, 山田宏尚, 武藤高義, “力覚提示機能を有する遠隔作業システムに関する研究 (第2報)”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告, 第3号, pp.43-48, 2001.
- [2] 中尾哲也, 田中秀治, 松本雄一郎, 藤木亮彦, 森美彦, “バイラテラル制御システムの構築と制御”, 久留米工業高校専門学校紀要, 第19巻, 第1・2号, pp.12-18, 2004.
- [3] 長田継伸, 矢野賢一, “切削条件式に基づくパラメータ更新手法によるバイラテラル加工支援制御”, 日本機械学会論文集C編, Vol.77, No.781, pp.3469-3479, 2011.