

機関番号：13102
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008年度～2010年度
 課題番号：20760286
 研究課題名(和文) ロボットマニピュレータの停止振動抑制と軌跡追従誤差の最適最小化手法
 研究課題名(英文) Minimization method of both vibration suppression and path tracking error for robot manipulator.
 研究代表者
 宮崎 敏昌 (Toshimasa MIYAZAKI)
 長岡技術科学大学・工学部・准教授
 研究者番号：90321413

研究成果の概要(和文)：

産業用ロボットのモーションに於いて、速さと正確さの両立は大変重要である。しかしながら、産業用ロボットは非線形外力や共振周波数によって振動が発生する場合がある。一般には、ノッチフィルタリング手法によりその影響を除去するが、軌跡誤差が増大してしまう。そこで、本研究課題では零位相ノッチフィルタを用いた軌跡誤差最小化手法について検討する。また、高速位置決め制御系と併用することで、高速・高精度な振動抑圧位置制御系を実現している。

研究成果の概要(英文)：

It is important to achieve rapid and accurate control of the motion of industrial robots. However, industrial robots often have vibration which is caused by the resonant frequency and nonlinear interference force from various joints of the robot. In this case, the notch filtering method for generating a reference is useful for suppressing the resonant phenomenon. However, the path tracking error of the robot motion increases because phase delay becomes large by using the notch filter.

In order to overcome these problems, this paper proposes a zero-phase notch filter without phase delay for fast path tracking. Moreover, this paper proposes a fast position control method based on D-PD control with dynamic feed-forward compensation. Using these proposed strategies, this paper achieves fast and accurate robot motion control without vibration and overshoot.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電気機器

キーワード：機械力学・制御, 知能ロボティクス, モニタリング

1. 研究開始当初の背景

近年、産業用ロボットは、ランニングコストや精度と同等に安全性が求められている

が、これらに関して学術的な裏付けの元での制御技術が確立しているとは言い難い。従来の産業用ロボットでは、正確な動作の実現の

ための仕組みと安全性のための仕組みを別々に構成することが一般的であり、両者をシームレスに結合し、運用するためには多くの試行錯誤を必要としていた。これは、両者が目指す制御は相反する物で有ることが大きな問題であった。

そこで、両者の目指す制御目標を同一にとらえ、高精度位置制御・制振制御システムを共通の制御基盤として構成し、モーション指令及び受動的な力制御指令を動的に組み替えることで、より高性能かつ安全な産業用ロボットの制御を実現する。本研究課題においては、高精度位置制御システム+振動抑圧システムについて研究開発し、より容易に産業用ロボットにおける振動現象の抑圧と軌跡誤差の圧縮を同時に行うための新しい手法を提案し実機による実証を行うことを目的とする。従来、産業用ロボットでは振動現象の抑圧には指令値生成にノッチフィルタを用いることが多かった。このノッチフィルタには、軌跡誤差を大きくする問題点があった。

本提案は、この問題点を解決するため、ノッチフィルタによる振動抑圧に加え、位相補償のためのゲインを追加する。この構成は、非常に簡単であるが、その効果は高く、産業用ロボットの制御システムへの適用にはきわめて適している。本課題に於いては、提案手法の有効性を確認するために、3リンクマニピュレータによる停止振動及び先端軌道測定による実験結果を用いる。

本研究課題に関して、これまでに、シミュレーションによる提案手法の確認と、実機実験による有効性の確認を行った。これらの研究成果により、特定の姿勢における振動現象の抑圧及び軌跡誤差の抑圧について、その有効性が確認された。しかしながら、ロボットの姿勢や関節軸によっては、振動の抑圧効果が弱い場合があり、この点が広く産業用に利用することができない問題点であった。

2. 研究の目的

産業用ロボットは、製造行程における単純作業の担い手から、人間や環境との協調を必要とする複雑な作業への担い手へと、その適用範囲を広げている。本研究課題においては、産業用ロボットにおける振動現象の抑圧と軌跡誤差の圧縮を同時に行うための新しい手法について提案し、実機による実証を行うことを目的とする。従来、産業用ロボットでは振動現象の抑圧には指令値生成にノッチフィルタを用いることが多いが結果として、軌跡誤差を大きくする問題点があった。本提案は、この問題点を解決するため、ノッチフィルタによる振動抑圧に加え、位相補償のためのゲインを追加することで、軌跡誤差の問題の解決を目指す。この構成は、非常に簡単であるが、その効果は高く、産業用ロボット

の制御システムへの適用にはきわめて適している。本課題に於いては、提案手法の有効性を確認するために、3リンクロボットマニピュレータによる停止振動及び先端軌道測定による実験を行う。同時に、先端振動を効果的に測定する手法等についても検証する。

3. 研究の方法

制御対象である産業用ロボットの各関節軸の動特性は、2 慣性共振系として表現され、速度制御系は状態オブザーバに基づいた状態フィードバックとPIコントローラによって構成される。通常は、この速度制御系の外側に位置制御系の閉ループを構築することで各関節の位置を制御することになる。しかしながら、これだけでは軌跡追従特性をロバストに維持することは困難である。そこで、フィードフォワード制御器である前置補償器 $FF(s)$ を速度制御系に挿入することで、制御系の軌跡追従特性を改善する。

PIコントローラ、状態オブザーバ、状態フィードバックによるフィードバック制御系と前置補償器の極配置と指定零点より、各関節の制御特性のロバスト化を行い、その上で各関節の速度応答を一致させるようにして、ロボットの軌跡追従性を向上させる。

上記により、軌跡追従性の高い制御系は実現可能であるが、ロボットの先端部における停止時の残留振動などの影響をすべて排除できないという問題が残されている。そこで、以下で述べるような、指令値の段階で操作を加えることで、軌跡誤差を低減する方法が有効である。

本研究課題では、共振現象抑制および負荷慣性変動による共振点の推移に対応するために、位置指令値フィルタリング法を提案し、位置指令値生成の段階で、負荷慣性変動による共振現象を排除するようにフィルタリングを行っている。また、位置指令値フィルタリングはオフライン処理なので、既存の制御系に手を加えることなく適用可能である。産業用ロボットは一般的に、教示動作により目標ポイントを取得し、ポイント間を軌跡補完することで位置指令を生成している。通常、この教示動作によって生成された指令を使用して動作させている。振動抑制を行う場合、一般的にノッチフィルタが使用されるが、ノッチフィルタの影響でロボット先端軌跡の誤差が増大する傾向にある。本手法を用いることで、教示データに追従した指令軌跡を生成することができ、ロボット先端軌跡誤差を低減させることができる。

共振現象の影響、つまり位置指令値フィルタリングによる応答改善を評価するために、動力学フィードフォワード補償によって非線形外乱トルクの影響を排除して検証する。

従来法では、ノッチフィルタにより発生す

る位置指令の位相遅れを補償する手法を提案した。従来法では位相遅れを完全に補償できず、残留位相遅れの補償が必要である。

そこで、提案法では新たに、位相遅れを持たないフィルタを作成することで、位相遅れ問題の解決を図る。提案法ではそもそも位相遅れを持たないノッチフィルタによる指令値フィルタリング方法として、零位相差ノッチフィルタを提案する。提案する零位相差ノッチフィルタは、FIR デジタルフィルタを用いて、アナログフィルタを介さずに直接デジタルフィルタで設計する手法を取っている。提案法では、ローパスフィルタ(LPF)およびハイパスフィルタ(HPF)のインパルス応答をフィルタ係数として使用し、FIR デジタルフィルタを構築している。

零位相差ノッチフィルタは、零位相差 FIR デジタルフィルタを基礎理論として設計したものである。零位相差 FIR デジタル

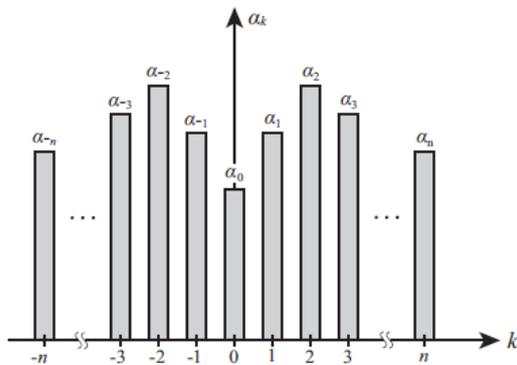


図 1. 零位相フィルタの FFT 解析

フィルタでは、図 1 に示すように、インパルス応答が座標軸を境に左右対称となっており、基準時刻以降における出力が存在する。そのため、フィルタリングには未来値が必要となる。零位相差ノッチフィルタは、零位相差 LPF と零位相差 HPF を組み合わせることで実現できる。零位相差ノッチフィルタによ

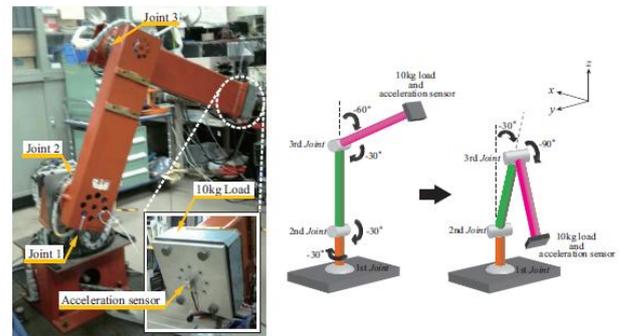
るフィルタリングは、位置指令を直接、零位相差ノッチフィルタに通過させることで、新たな位置指令を生成する形となる。

零位相差ノッチフィルタの設計指針として、振動要素である共振点部分のゲインを下げるようにフィルタ形状を設計した。また、ロボットの動作周波数が低周波であるので、低周波領域のゲイン特性を安定にすることで、動作への悪影響を回避している。

以上の研究により、目的とする停止振動の抑圧と高精度位置決めとの両立を可能とした制御系について開発した。

4. 研究成果

本研究課題では、提案手法の有効性を確認するために、3 軸の産業用ロボットを対象と



(a) Three-degree-of-freedom robot manipulator (b) Motion attitude

図 2 実機実験装置

し実機実験を行った。3 軸の産業用ロボットの概略を図 2 に示す。

実機実験では、ロボットの先端部に 10[kg] の負荷を取り付け、産業用ロボットにとって重要な問題となる停止振動と軌跡誤差に焦点を当てた。実験結果より残留振動抑制制御でのオーバーシュート・振動収束時間について、また、高速位置制御での軌跡誤差について評価する。また、停止振動実験では加速度センサによりロボットアームの先端振動も

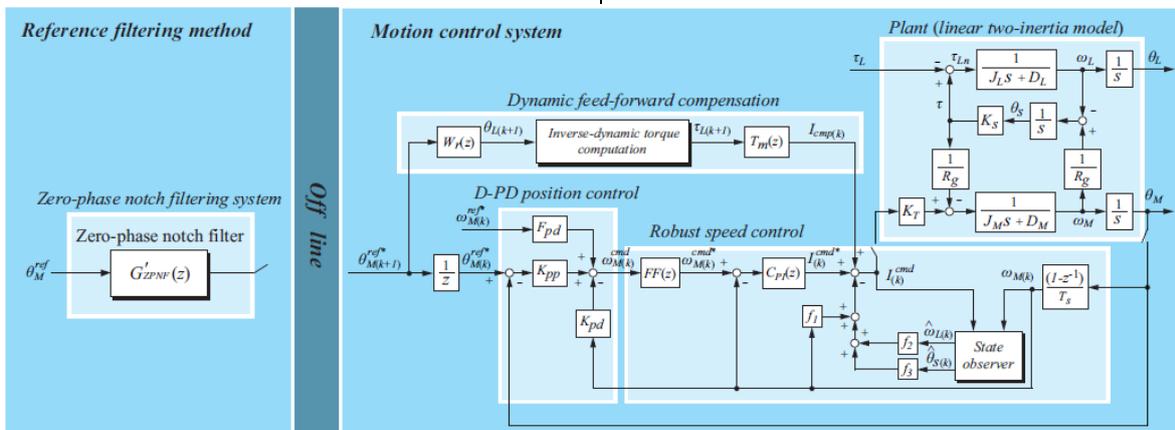


図 3 提案法による各関節軸のモーション制御系

観測した。実機実験では、図3の制御系を用い、位置指令値フィルタリング方法と動力学フィードフォワード補償(DFFC)を併用し、以下の3パターンで実験を行った。

- (a) ノッチフィルタ+ 動力学フィードフォワード補償
(Only notch filter + DFFC)
- (b) 従来法+ 動力学フィードフォワード補償
(Conventional filtering method + DFFC)
- (c) 零位相差ノッチフィルタ+動力学フィードフォワード補償
(Zero-phase notch filter + DFFC)

なお、提案法との比較対象には、従来法である位相遅れ補償ノッチフィルタを用いる。ノッチフィルタのみを用いた場合の結果は、振動抑制の指標であり参考データとして記載する。実験条件を図3に示す。停止振動は、位置応答が目標値に到達した時刻以降におけるオーバーシュートの最大値とした。また、振動収束時間は、位置指令が目標値に到達した時刻と位置応答が目標値の $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.05\%$ に収束するまでの時刻の差とする。停止振動実験では、フィルタリングを行うことで、停止振動が低減されているかを確認した。実験と同様の条件でシミュレーションおよび実機実験を行った。第1軸の実験結果を図4,5, 定量的評価を表1に示す。図4より、零位相差ノッチフィルタを用いることで、ノッチフィルタの効果により停止振動が低減されていることがわかる。また、ノッチフィルタリングによる追従誤差も改善されて、従来法と同等以上の結果が得られた。提案法を用いることで、追従誤差の劣化を防ぎ、かつ、共振現象による残留振動を抑圧することで、停止振動およびオーバーシュートの双方を十分低減できていることが確認できる。最終的に、提案法において、従来法と比較してオーバーシュート量を約31%低減することができた。図5より、ロボットアーム先端の振動は、提案法を用いることで十分抑制できている。また、振動の収束時間も短縮できていることが確認できる。実験結果より、提案法の振動抑制に関する有効性が確認された。軌跡誤差実験は、3軸を同時に動作させた場合に、各軸の追従誤差が軌跡にどのような影響を及ぼすかについて確認した。実験結果を図6に示す。図6より、零位相差ノッチフィルタを適用することで、ノッチフィルタに起因する位相遅れによる軌跡誤差が大幅に低減され、軌跡追従性が向上していることが確認できる。図15に示す軌跡誤差曲線は、空間座標系の指令値と軌跡誤差実験結果間の距離を3次元で換算して求めたものである。提案法では、軌跡誤差を大幅に低減できている

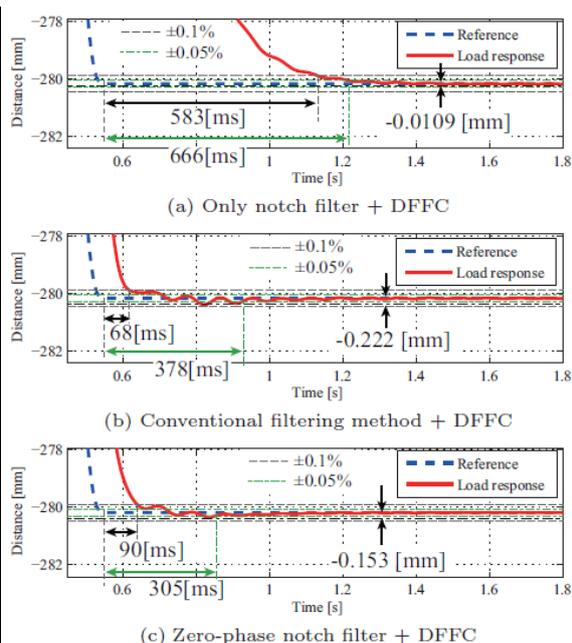


図4 先端軌跡の振動抑圧実験結果

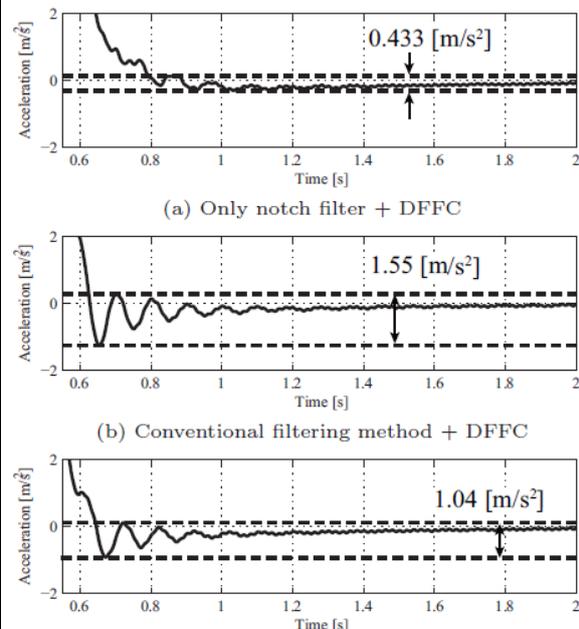


図5 ロボット先端振動実験結果

ことが確認できる。以上の結果より、提案法は軌跡追従性の向上に有効であると言える。

本研究課題では、零位相差ノッチフィルタと動力学フィードフォワード補償を実装したD-PD位置制御系を併用し、産業用ロボットの停止振動の抑制および良好な軌跡追従性能の維持を両立させる手法を提案した。そして、提案法の有効性を実機実験により確認した。提案法では、位相遅れを持たず波形歪みのない零位相差ノッチフィルタにより位置指令をフィルタリングすることで、共振周波数成分が励起せず位相遅れのない位置指令を生成した。それにより、軌跡追従誤差の

表 1 実験結果まとめ

	Only notch filter	Conventional filtering method	Zero-phase notch filter
Vibration amplitude [m/s ²]	0.433	1.55	1.04
Convergence time (±0.1 [%]) [ms]	583 (587)	68 (202)	90 (112)
Convergence time (±0.05 [%]) [ms]	666 (686)	378 (335)	305 (348)
Overshoot [mm]	-0.0109 (-6.337 × 10 ⁻⁶)	-0.222 (-0.340)	-0.153 (-0.200)

(※ () : Simulation results)

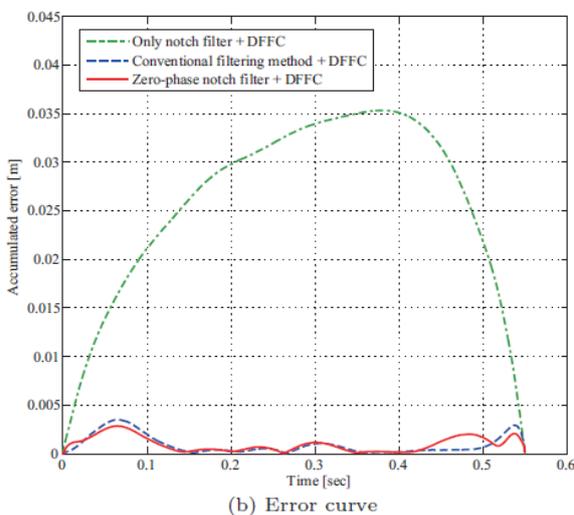
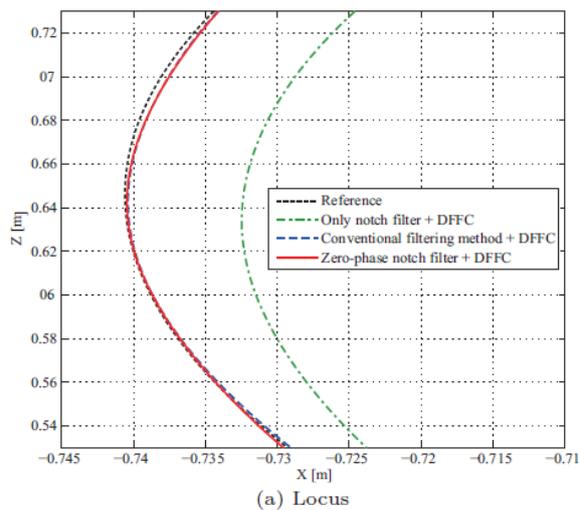


図 6 軌跡追従実験結果

劣化防止，停止振動低減を実現した。実機実験による検証の結果，提案法は，停止振動において最大アンダーシュート量の低減および振動収束時間の短縮が可能であり，また，軌跡追従性に関しても軌跡誤差を大幅に低減することができた。これは，提案法により

各軸が適切に制御されたことによる結果である。提案法は，産業用ロボットの残留振動抑制および軌跡追従制御に対して，高い有効性を発揮すると言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者，研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

[1] 吉岡崇，嶋田直樹，大石潔，宮崎敏昌，”産業用ロボットの推定負荷情報に基づくロボスト位置制御系の一設計法”，第 28 回日本ロボット学会学術講演会，平成 22 年 9 月 22 日

[2] Takashi Yoshioka, Naoki Shimada, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki, “Motion Control Method of Industrial Robot Based on Dynamic Torque Compensation and Estimated Load Information”，電気学会東京支部新潟支所研究発表会，平成 22 年 11 月 27 日

[3] 吉岡崇，嶋田直樹，大石潔，宮崎敏昌，”産業用ロボットの高性能先端位置応答のためのプロフィール設計法の検討”，電気学会産業計測制御研究会，平成 23 年 3 月 9 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎 敏昌 (Toshimasa MIYAZAKI)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：90321413