

**Control of Wave Systems
Based on Reflected Wave Rejection**

September 2015

Eiichi Saito

主 論 文 要 旨

報告番号	甲 第 号	氏 名	齊 藤 英 一
主論文題目： Control of Wave Systems Based on Reflected Wave Rejection (反射波除去に基づく波動システムの制御)			
<p>(内容の要旨)</p> <p>コンピュータおよび制御技術の向上により産業機械・ロボットの高速かつ高精度な駆動が可能になっている。しかしながら、その高速な応答により機械共振による振動が励起され、更なる高速化や精度の向上を妨げている。加えて制御信号の通信路や DA 変換器に含まれるむだ時間によっても制御系の高周波域の位相余裕が減少し、しばしば振動が生じる原因となっている。このように産業機械・ロボットの高速・高精度化において、機械共振抑制およびむだ時間補償を考慮した制御が必須となっている。</p> <p>本研究の目的は、機械共振系とむだ時間系のモデル化において、分布定数系である波動方程式を導入し、波動システムの制御として統一的な振動抑制手法および制御を構築することである。</p> <p>第 1 章では、本研究の背景および目的について関連研究を交えて説明している。</p> <p>第 2 章では、機械共振系とむだ時間系それぞれに対し、波動方程式を用いたモデル化を示している。入出力の伝達関数から各系における波動の伝播構造を明らかにし、これらが両系において等価であり、振動が発生する原因が反射波であることを示している。</p> <p>第 3 章では、波動システムにおける振動を抑制するために反射波を推定し、除去するための基本制御構造について提案している。反射波除去は波動伝播時間を用いた時間遅れを含む補償器となり、実装が簡便でありながらも高次振動の抑制に効果があることを確認している。</p> <p>第 4 章では、前章で述べた反射波除去による振動抑制制御を応用し、境界条件や波動伝播の様子が異なる様々な機械共振系の振動抑制制御に適用し、効果の検証を行っている。特に、実際の産業機械やロボットの忠実なモデル化を目指した波動方程式の表現ならびに境界条件の設定方法を示している。</p> <p>第 5 章では、むだ時間系を対象とした反射波除去について示している。具体的には、第 2 章にて述べた機械共振系とむだ時間系との類似性に着目し、反射波除去による制御方法と等価弾性力フィードバックによるむだ時間補償を提案し、それぞれの性能を検証している。</p> <p>第 6 章では、機械共振とむだ時間の双方を含む波動システムにおける反射波除去法を提案している。提案手法はインナーループで反射波を除去することで、機械共振系を等価的にむだ時間のみで示される系に変換し、アウターループでむだ時間と等価むだ時間を合わせて補償し、安定化を達成するものとなっている。この提案を基に、波動システムの先端位置センシングに基づいた構成法、ならびに推定ねじれ反力を用いた構成法を示し、それぞれ検証を行っている。</p> <p>第 7 章では、波動システムが外乱およびパラメータ変動に対してロバストな応答を得るためのオブザーバ構築について述べている。特に、波動外乱オブザーバを実装した波動システムの感度関数・相補感度関数による解析を行い、有効性を示している。さらに波動外乱オブザーバを応用した力制御系についても提案、検証を行っている。</p> <p>第 8 章では、本研究の成果を要約し、展望とともに結論を述べている。</p>			
			以上

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Integrated Design Engineering	Student Identification Number	First name Surname Eiichi Saito
Title Control of Wave Systems Based on Reflected Wave Rejection		
<p>Abstract</p> <p>Recently, progress in performance of computer and control techniques has contributed to rapid and accurate control of industrial machines and robots. However, the rapid movements excite the mechanical resonances, which prevent the machines and robots from further improvement of rapidness and accuracy. In addition, time delay included in a communication system or DA converter decreases phase margin of a controlled system, and it also induces vibrations. Therefore, in order to realize the further rapid and accurate motion of machines and robots, vibration suppression of mechanical resonance and time-delay compensation should be considered in the control design.</p> <p>The purpose of this dissertation is to construct a unified control of mechanical resonant system and time-delay system as control of wave system by introducing modeling based on wave equation which is one of distributed parameter models.</p> <p>Chapter 1 introduces the background and objective of this dissertation.</p> <p>In chapter 2, both mechanical resonant and time-delay systems are modeled by using a wave equation. Structures of wave transmission in both systems are revealed from the transfer functions, and there exists similarity between the mechanical resonant and time-delay systems from the wave transmission point of view. In addition, it is clarified that causes of vibrations are reflected wave in the wave systems.</p> <p>Chapter 3 describes a basic structure for eliminating the reflected wave from the wave systems to suppress the vibrations. The reflected wave rejection scheme is composed of a reflected wave estimator and a feedforward compensator for the reflected wave, which can be implemented by using a time-delay element. Although it is easy to implement the proposal, it is effective for suppression of high-order vibrations.</p> <p>In chapter 4, the reflected wave rejection is applied to various mechanical resonant systems which have different boundary conditions and wave transmission characteristics. In particular, expression of wave equation and setting methods of boundary conditions are shown for practical industrial machines and robots.</p> <p>Chapter 5 explains the reflected wave rejection for a time-delay system. Considering the similarity between resonant and time-delay systems, control design based on reflected wave rejection and time-delay compensation with elastic force feedback are proposed.</p> <p>In chapter 6, the reflected wave rejection for wave systems including both mechanical resonance and time-delay is proposed. The resonant system is transformed into an equivalent time-delay system, in which there only exists traveling wave, by the reflected wave rejection in the inner loop. As for the outer loop, actual and equivalent time-delays are simultaneously suppressed by a typical time-delay compensation method. Based on the basic structure, the reflected wave rejection which uses a reaction force from the wave system instead of the tip position is also proposed.</p> <p>Chapter 7 shows a wave disturbance observer for enhancing robustness against disturbance and parameter variations. The viability of the wave system with a wave disturbance observer is analyzed by the sensitivity and complementary sensitivity functions. Moreover, force control using the wave disturbance observer as force estimator is also proposed.</p> <p>Finally, this dissertation is concluded in chapter 8.</p>		