

# 学位論文の要旨

論文題目：産業応用を目指した古典制御技術および推定技術の拡張  
(Extension of classical control and estimation techniques for industrial applications)

氏名 蒋煜琪 印

自動制御は、産業界のみならず現代の我々の生活を含め、各種の自動化要件を伴うあらゆる場面で必要不可欠となっている。自動制御システムの制御性能は、出力、品質、コスト、労働条件、および期待される目標の達成に直接影響する。PID(Proportional-Integral-Differential)制御は古典的な制御理論の一つである。PID 制御の構造はシンプルで、堅牢性と汎用性がある。その調整方法においては、制御対象の厳密なモデルが不可欠ではなく、例えば周波数特性のみでも設計可能であるという特徴をもつ。依然として産業分野で最も広く使用されている制御手法である。このように、簡単な調整で比較的十分な性能を実現できる制御法ではあるが、多入出力系を取り扱うのは難しい。制御対象の同定が必要であったり、制御器の設計には経験も必要で、再調整や付加的な補償が組み込まれる場合が多い。本研究は、PID 制御のもつ汎用性と設計の簡便性を拡張し、より実用的な新しい制御手法や推定手法の開発を目的とする。

本論文では、産業応用を目指した古典制御技術および推定技術の拡張を目的として、トルクセンサレス粘度推定と多点温度制御に着目し、より実用的な推定法および制御法について述べる。

## 1. トルクセンサレス粘度計への応用

日本は世界に誇る長寿国であるが、このことは同時に高齢化社会に向かっていることを意味する。食品の開発においては、嗜好性の高い食品の開発と同時に、咀嚼機能や嚥下機能が低下した高齢者に向けて、いかに高い安全性をもった食品を開発するかということが重要な課題となる。特に、食品の粘度管理においてはその重要性が高い。現況では、幅広く液体から半固体まで測れるレオメータと呼ばれる汎用型の粘度計があるが、より容易に、かつ低コストで正確な粘度特性をオンライン情報として測定・管理したいという要求がある。本論文では、トルクセンサレス粘度計の開発において、推定技術の拡張として外乱オブザーバを利用した粘度推定手法を提案する。従来の回転型粘度計は内部にトルクセンサを内蔵している。そのため大型であり、製造コストも高い。

ここではソフトウェアにより粘度を推定する手法を提案し、トルクセンサを用いることなく粘度

を高精度にリアルタイムで推定可能な粘度計を開発する。トルクセンサレス粘度計の制御法の拡張においては、外乱を含む状態推定と積分型状態フィードバック制御を導入する。PI 制御では、外乱の影響を受けやすい。したがって、速度変化に起因し粘度の推定時間も長くなり、推定精度も劣化する。この問題を改善するため、外乱を推定してフィードバック補償する。さらに、状態空間表現により速度の追従性能の向上とともに、速度変動を抑え粘度推定精度の改善を図る。提案手法の有効性について標準液を用いた実験により検証する。

## 2. 多点温度調整器への応用

工場生産においては省コスト、省労力が求められる。その結果、工場の生産ラインでは無人化、自動化が進んでいるが、ここでは温度制御技術が多用されている。また、人々の生活の質の向上に伴い、温度制御技術は工場の生産工程だけでなく、車両、農業、ホテル、一般家庭でも使用されている。さらに、その制御においては一点ではなく、平面、あるいは空間での温度制御が不可欠であり、温度を多点で均一化できないと、生産品質などに影響が生じる。したがって、現在より高性能な多点温度調整器の開発が急務となっている。

本論文では、多点温度調整器の開発において、その推定法の拡張としてSmith法を利用し、多点温度制御システムにおいて最も立ち上がりの遅いモードのむだ時間のない出力を推定する。その推定値を他のモードの指令値として利用することで、複数点間の温度差をゼロに減少させる。さらに、多点温度調整器の開発の制御法の拡張として、Smith 補償、非干渉補償、フィードフォワード補償、むだ時間差補償、温度比補償を導入する。PI 制御ではむだ時間の影響でオーバシュートを引き起こすが、Smith 補償を導入することで、むだ時間に起因する過渡応答特性の劣化を改善する。多点温度制御システムでは各モード間に干渉の影響があるが、非干渉補償を導入し、その影響を改善する。速いモードの出力を遅いモードの出力に追従させる場合、PI 制御のみでは応答速度不十分である。そこで、フィードフォワード補償を導入し、制御システムの追従性を改善する。さらに、各モードのむだ時間差に起因し、各応答の立ち上がりに誤差が生じる。ここでは、むだ時間差補償を導入し、多モードの応答の立ち上がりの誤差を補償する。また、実際の制御対象では多モードの温度基準値が異なる場合がある。この場合には、温度比補償を導入し、温度基準値に対する応答の比率を一致させることができる。以上、提案手法の有効性を構築したむだ時間を有する多入出力システムである実機を用いて検証する。

# 学 位 論 文 の 要 旨

論文題目：産業応用を目指した古典制御技術および推定技術の拡張  
(Extension of classical control and estimation techniques for industrial applications)

氏 名 蒋 煜 琪 印

Automatic control is one of the significant necessary aspects in modern life and more so in case of high automation cases. The efficiency of the automatic control system will directly affect the quantity, quality, cost, condition and the ease of reaching the expected goal. Proportional-Integral-Derivative (PID) control method, which is one of the common application of the conventional control theory, has the advantages of simple structure, robustness and adaptability. Also, the controlled object has no significant impact on the tuning method and result of the conventional PID method. These make the PID method widely used in industrial control system, and could meet the required performance in most cases. However, for the multi-input multi-output systems, PID control could not achieve the expected requirements where each mode are satisfied. Thus, the experience in system identification is needed for the adjustment of the PID parameters to make the new PID controller efficient for the control object. In this study, to improve the control performance in industrial applications, a disturbance observer with state-space technology is introduced to the sensor-less viscometer system and a slow-mode-based control method is proposed for the multi-point temperature control system.

## 1. Torque-sensorless viscometer

Japan has the highest life expectancy of any country in the world, which means that it is also moving toward an ageing society. For elderly people, the decline in masticatory function due to a decrease in self-tooth, muscle strength, etc., and the decline in swallowing function typified by aspiration and dysphagia not only change the sensation within the oral cavity but also safety regarding eating. Before, it is limited to staff with physical properties. In the development of meals, it is important to develop foods with higher palatability, and at the same time highly safety for infants and elderly people whose mastication and swallowing functions are immature or

reduced. At present, there is a general-purpose viscometer that could measure a wide range of states, from liquids to semi-solids. However, there is a growing demand for easier, lower-cost, accurate measurement and management of viscosity characteristics as online information. In this paper, as an extension of the torque sensor-less viscometer estimation method, it uses a disturbance observer to estimate the viscosity. Conventional rotary viscometers have a built-in torque sensor, therefore it is large and the manufacturing cost is high. So instead, this proposed method will estimate viscosity by using software, so the viscometer can estimate it in real-time with high accuracy but without using a torque sensor. Furthermore, as an extension of the torque sensor-less viscometer control method, state estimation including disturbance and integrated state feedback are introduced. PI control is easily affected by disturbance, therefore the estimation time of viscosity becomes longer due to the speed change, while the accuracy also deteriorates. In order to improve on this problem, the estimated disturbance feedback is compensated. Furthermore, the speed tracking performance is improved by the state-space representation, and the speed fluctuation is suppressed to improve the viscosity estimation accuracy. The effectiveness of the proposed method is verified by experiments using standard solutions.

## 2. Multi-input multi-output temperature controller.

At present, factory production requires cost-saving and labor-saving. Therefore, unmanned and automated production lines in factories are more cost-effective. Also, with the improvement of people's quality of life, temperature control technology is used not only in factory production but also in vehicles, agriculture, hotels, and daily life. Furthermore, temperature control is indispensable in terms of control points. For example, in the case of glass tempering furnace and lithium secondary battery manufacturing, if the temperature cannot be uniformly controlled, the production quality will be affected. Therefore, it is necessary to develop a high-performance multi-point temperature controller. Here, as an extension of the estimation method of the multi-point temperature controller, the Smith method is used to estimate the slowest rising mode output without the dead time in the multipoint temperature control system. The estimated value of that output is then introduced into the command value of the other mode to reduce the temperature difference between multiple points to zero. In addition, as control extensions of the development of the multi-point temperature controller, Smith compensation, non-interference compensation, feedforward compensation, dead time compensation, and temperature ratio compensation are introduced. While PI control causes overshoot due to dead time, the introduction of Smith compensation improves the response degradation of the transient response caused by it. In a multi-point temperature control system, there is the influence of interference between modes. By introducing non-interference compensation, the effect of each interference can be improved. When the fast mode follows the slow mode, the response speed is insufficient with only PI control. The feedforward compensation is then introduced to improve the tracking performance of the

control system. However, the rise of the response of each mode varies due to the dead time. Here, delay compensation is introduced to compensate for variations at the rise of multi-mode response. Lastly, the actual control target, the temperature reference value of the multi-mode may be different. In this case, temperature ratio compensation can be introduced to match the response ratio to the temperature reference value. The effectiveness of the proposed method is verified by simulation and experiments on a multi-input multi-output system including dead time.