

2022年 1月 6日

機械工学専攻		学籍番号	第 153111 号	指導教員	真下 智昭
氏名	出原 俊介				佐藤 海二

## 論文内容の要旨 (博士)

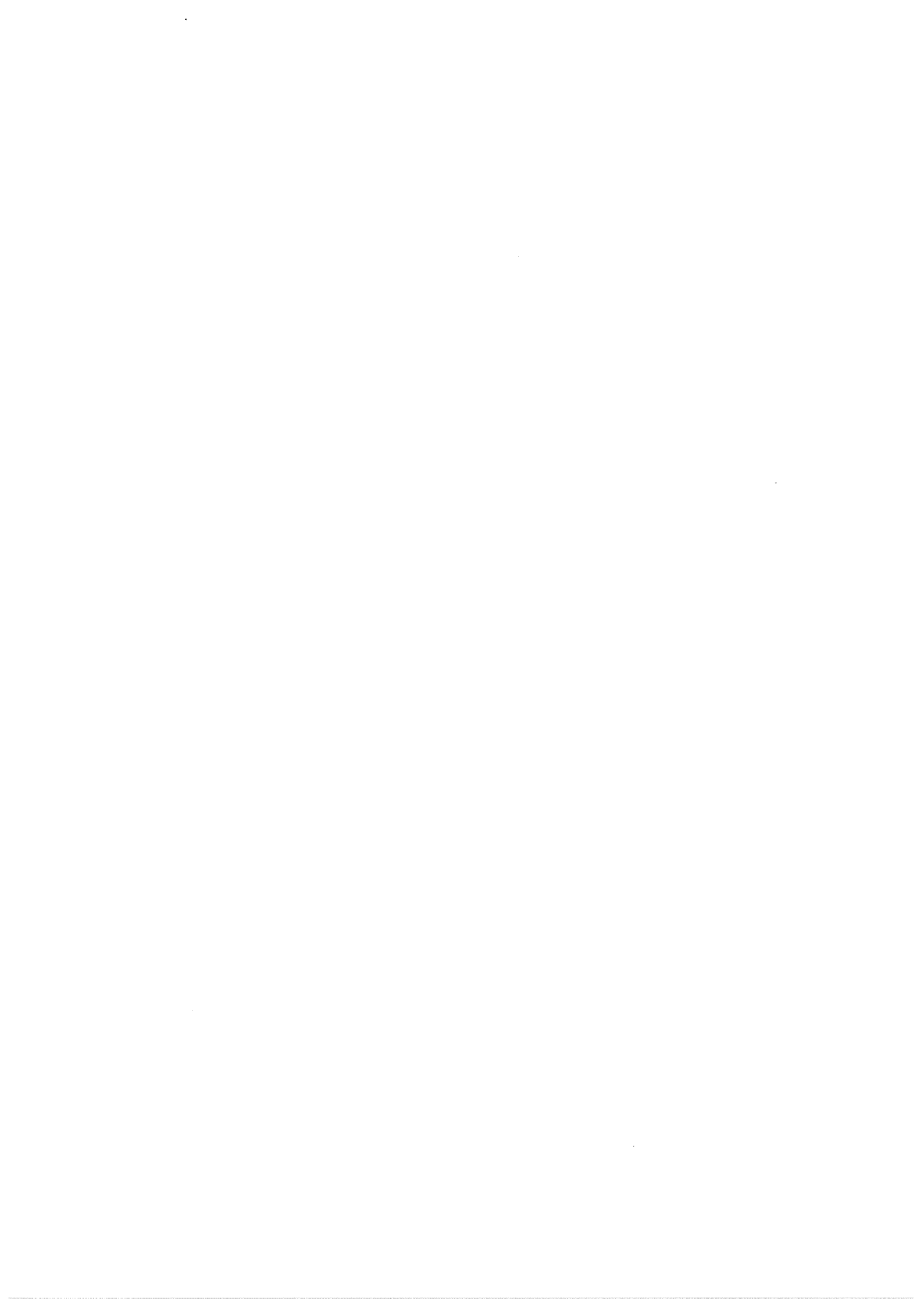
博士学位論文名	リニア超音波モータの小型化と高性能化に関する研究
---------	--------------------------

(要旨 1,200 字程度)

近年、内視鏡のような医療機器やスマートフォンなどのカメラモジュールの小型化が期待されている。そのような装置において、リニアモータの小型化は、ズームやオートフォーカスを行う機構を小型化するために重要な課題である。しかし、モータは小さくなるにつれて、発生力および応答性が低下し、必要な性能が得られなくなるという問題がある。圧電効果を駆動原理とする超音波モータは、シンプルな構造で、体積あたりの推力が大きいことから、小型リニアアクチュエータとしての期待が高い。実際、さまざまな振動モードを使用したリニア超音波モータが提案されており、比較的高い推力を示している。しかし、これらの原理は、ステータが長いもしくは複雑な形状であることや、予圧機構やガイド機構といった追加機構による大型化が問題となっている。

本研究は、小型ロボットやカメラデバイスへの応用に向けて小型リニア超音波モータの研究開発を行なった。一つ目は、ステータが立方体形状のマイクロリニア超音波モータで、ステータの大きさは高さ2.6 mm、幅2.6 mm、奥行き2.2 mmである。ステータには直径1.4 mmの穴があり、スライダが挿入されて直動動作を行う。スライダはスリット加工が施された薄肉円筒であり、弾性変形によって予圧を与えている。ステータの設計するため、振動のモデル化しを行い、最適な形状の検討を行った。さらに、スライダの設計方法については、薄肉円筒の弾性力学に基づいて明らかにした。試作したモータは実験的に評価され、予圧を最適化することで、10 mN以上の実用的な推力を発揮した。また、入力電圧の印加時間を調整することにより、約1  $\mu\text{m}$ の微小変位が得られた。二つ目は、駆動方向に短い薄型形状のスライダを用いたリニア超音波モータである。このモータは穴の開いた薄い板状のステータと、スリット加工を施した薄肉円筒のスライダで構成されており、駆動原理の検証とモータの基本的性能の評価を行った。小型ステータの高さと幅は約4.5 mm、厚さは約1 mmで、スライダを挿入するための中央の穴は2.7 mmである。推力は、電圧50  $V_{p-p}$ で約8 mN、100  $V_{p-p}$ で約13 mNと、オートフォーカス機構として実用的な推力を発揮する。さらに、モータとカメラデバイスを組み合わせたオートフォーカス機構を試作し、実際にレンズの位置調節を行う。最後に、この薄型リニア超音波モータの駆動原理を基に大きさ約1 mmの超小型リニア超音波モータを開発し、駆動実験によって性能評価を行った。

この論文で提案する小型リニア超音波モータは従来の小型リニアモータでは達成できない小さなサイズで実用的な性能を発揮することができ、スマートフォンや内視鏡などの幅広いアプリケーションの小型化を可能にする。



Date of Submission (month day, year) : Jan. 6<sup>th</sup>, 2022

Department of mechanical engineering	Student ID Number D153111	Supervisors Tomoaki Mashimo Kaiji Sato
Applicant's name Shunsuke Izuhara		

## Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Miniaturization and Performance Improvement of Linear Ultrasonic Motors
-----------------	---

Approx. 800 words

Miniature linear actuators are required for a variety of future devices ranging from mobile devices to minimally invasive medicines. For example, the miniaturization of camera modules is required to meet the rising demand for thinner and more compact structures in various fields, such as cellphones, drones, and endoscopes. A camera module for smartphones must be designed to be thin because the thickness of smartphones is strictly limited by their specifications. In these, miniature linear actuators play an important role in controlling optical systems, such as zoom and autofocus features, to allow camera modules to obtain clearer images. For thinner and smaller applications, a further miniaturization of auto-focus mechanisms is expected. Therefore, miniature of linear actuators is a permanent target for such applications, as existing linear actuators cannot satisfy the specifications required for the miniature devices such as dimensions and thrusting force.

Piezoelectric ultrasonic motors have the potential to become the most appropriate linear motors for miniature applications as they feature simple structure and high force density. In fact, several miniature linear ultrasonic motors have been already implemented to cameras. Their theory of operation depends mainly on the simultaneous excitation of two vibration modes and resonant impact drive mechanisms. This drive mechanisms employs vibration modes that are dependent on the stator length. Although these miniature linear ultrasonic motors provide a relatively high force density, the requirement of a long stator adds to the complexity of further miniaturization.

Further miniaturization of linear ultrasonic motors has been studied using several principles in the past, but still none has satisfied the requirement of many applications. This thesis introduces two miniature linear ultrasonic motors. Several vibration modes have been implemented as the driving principles of the prototypes. The result prototypes, to our knowledge, are the smallest and the thinner linear motors ever made.

The first prototype is a micro linear ultrasonic motor with a cuboid stator. The stator comprises of a metallic cuboid and piezoelectric elements bonded to its four sides. The size of the prototype stator with piezoelectric elements measures 2.6 mm in height, 2.6 mm in width, and 2.2 mm in depth (length in slider travel direction). There is a hole of 1.4 mm at the stator center, and the slider inserted into the hole moves linearly. This hollow design is similar to the voice coil motor and is suited as linear actuators for miniature auto-focus mechanisms. As the driving principle, it uses the simultaneous excitation of two vibration modes generated by the cuboid stator. Experiments clarify the output characteristics in response to the input voltages. By optimizing the preload between the stator and slider experimentally, the motor thrust force has been improved to over 10 mN, which is a practical force for moving small objects. In addition, a minute displacement of about 1  $\mu\text{m}$  can be obtained by adjusting the input time of the applied voltage.

The second one is a miniature linear piezoelectric ultrasonic motor with a thin and hollow design. It consists of a thin square stator with a hole and an elastic cylindrical slider with a slit. The miniature stator has a height and width of 4.5 mm and a thickness of less than 1 mm with a center hole of 2.7

mm for inserting the slider. The slider is designed to have a slightly larger diameter than the diameter of the stator hole, and the cylinder expands radially and contacts the inner surface of the rigid stator representing a preload force. This design provides both a hollow structure for centering a lens and an optimal preload for enhancing the motor thrust force. After optimizing the preload empirically, the fundamental characteristics are evaluated experimentally. The output force is improved to approximately 8 mN at a voltage  $50 V_{p-p}$ . A higher thrust force of 12.9 mN that leads to a quick response, which is a requirement of autofocusing is obtained at a voltage amplitude of  $100 V_{p-p}$ . A practical experiment to prove the feasibility of the prototype for auto-focus mechanisms has been carried out. The experiment is conducted by fitting an actual lens to the prototype, then place the lens at a distance of an image sensor. A feedback control system is then implemented to change the distance between the sensor and the lens to get a clearer image. Furthermore, this motor is miniaturized to a length of 1mm and a thickness of 0.3 mm, and its performances are evaluated.

The findings in this thesis demonstrate that the proposed motors provide size and performances that cannot be achieved by conventional miniature linear motors.