国家標準にリンクした超精密ものづくり計測の最先端を目指して

東北大学大学院工学研究科 ファインメカニクス専攻 精密ナノ計測学分野 清水研究室
 Nano-Metrology and Control Laboratory, Department of Nanomechanics, Tohoku University
 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 准教授 清水裕樹

TEL : 022-795-6953

FAX : 022-795-6953

URL : <http://www.nano.mech.tohoku.ac.jp>

E-mail : staff@nano.mech.tohoku.ac.jp

1. 研究室の概要

当研究室の前身は、東北大学精密工学科精密測定学研究室（歴代担当教員：藤井康治教授、鎌田修教授、清野慧教授）にさかのぼります。精密工学科は1991年、2004年、2016年にそれぞれ機械電子工学科、ナノメカニクス専攻、ファインメカニクス専攻に改組され現在に至っています。2007年4月より高偉教授が担当されているナノ計測制御学分野（現在は精密ナノ計測学分野）において、高偉教授と一体となつての研究室運営の下、先輩方が長年築いてきた精密計測の研究基盤を継承しつつ、超精密ものづくり計測の最先端を目指して研究と教育活動を行っています。

研究室には、スタッフ4名（高偉 教授、清水裕樹 准教授、松隈啓 助教、水戸正美 非常勤職員）、学生28名（大学院博士後期課程5名、研究生1名、前期課程14名、学部4年生4名、3年生4名）、計32名が在籍（2019年12月現在）しています（図1）。

2. 主な研究内容

ものづくりの基本は機械を用いて製品を作ることです。製品の品質保証、ものづくり精度の向上には、機械の運動と製品の形状を対象とする計測が必要不可欠です。当研究室では、精密ナノ計測¹⁾の研究基盤を構築しながら、超精密加工品の形状および超精密機械の運動を必要な精度で計測するという超精密ものづくり計測の研究に取り組んでいます。最近行っている主な研究内容は以下のとおりです。

2.1 光学式超精密多軸変位・角度センサの開発

2軸光ナノグリッドと波動光学系を組み合わせることで、超精密ものづくり計測の基本道具となる高精度かつコ

ンパクトな多軸変位・角度センサの開発を行っています。図2には回折光干渉型シングル計測ポイント $XYZ \cdot \theta_x \theta_y \theta_z$ 6軸サーフェスエンコーダを示しています²⁾。シングルレーザービームを短ピッチの2軸光ナノグリッドに入射して得られる回折光を利用することで、工作機械や半導体製造、検査装置で多用されるステージのXYZ3軸変位および $\theta_x \theta_y \theta_z$ 3軸角度を、コンパクトな形態でサブnm・サブ角度秒の分解能で高速に一括計測できます。

2.2 国家標準にダイレクトにリンクした超高精度・高確度・高安定精密多軸計測技術の開発

次世代の「つながる工場」において必須となる、国家標準にトレーサブルな超高精度・高確度・高安定計測技術の確立を目指し、時間・周波数の国家標準であるモード同期フェムト秒レーザー（光周波数コム）と光ナノグリッドとの融合で実現する、国家標準とダイレクトにリンクした精密多軸計測手法の新原理を提案・開発しています。

図3には、2軸光ナノグリッドを利用して、光周波数コムを角度スケールコムに変換する原理を示しています³⁾。光ナノグリッドの分光作用により生成される回折光群においては、各コムモードの光周波数はそれぞれの1次回折光の回折角と一対一の関係にあり、高安定な角度スケールコムとして活用できます。この角度スケールコムを自由曲面光学部品の形状測定に利用する手法や、光周波数コム光源を用いた新たな原理に基づく差動型共焦点レーザープローブ⁴⁾などの研究開発も進めています。

2.3 高精度大面積2軸光ナノグリッド生成手法の開発

図4には、国家標準にダイレクトにリンクした精密多軸計測技術の開発に必須となる、大面積2軸光ナノグリッド生成光学系を示しています⁵⁾。露光基板と2枚の反射鏡

図1 研究室メンバー

図2 サブ nm・サブ角度秒分解能 6 軸サーフェスエンコーダ

図4 非直交型 2 軸ロイドミラー干渉計によるナノグリッド創成

図3 光周波数コムで生成する高安定角度スケールコム

からなる非直交型ロイドミラー干渉光学系を構成し、これに独自の偏光制御を融合することで高精度な 2 軸光干渉パターン生成および一括転写を実現するもので、これまでに 100 mm 四方サイズの大面積 2 軸光ナノグリッドの一括転写に成功しており、そのさらなる高精度化に取り組んでいます⁶⁾。

3. 主な教育活動

心身共に健康で、豊かな「人間力」をもち、日本、ひいては世界の産業界を背負っていきける高い「実行力」「創造力」を備える優れた研究者・技術者を育成することを目標として、東北大学の伝統である「研究第一主義」「門戸開放」「実学主義」を理念として掲げ、「最先端の研究」を通して「役立つ教育」を行うことを心掛けています。所属学生には、学部での研究室配属から修士研究をまとめ上げるまでの学部・修士一貫教育プロセスを通じて、自ら独創的な実験装置を設計・構築し、とことんまでその性能を突き詰めるプロセスを経験してもらうことで、システム全体を捉えて俯瞰する能力の育成を図っています。

また、学生を積極的に企業との共同研究に参加させてい

ます。早い段階から社会との接点をもてる機会を与えることで、明確な目標をもつことができ、研究へのモチベーションが向上するようです。実戦的な研究テーマを担当した経験は卒業後のキャリアにもプラスになります。

さらに、教育上もう一つ心掛けていることは、学生の国際性を育成することです。ものづくりがボーダレスの時代を迎えている中、それに柔軟に対応できる研究者・技術者の育成が社会から求められています。当研究室では、毎週の定期ゼミを半分英語で行う、海外大学との交流活動に参加させる、博士課程学生に海外の大学、研究機関に留学する機会を与える、海外から研究者、留学生を積極的に受け入れるなどの工夫を行っています。

4. おわりに

当研究室は精密工学会を主な学会活動の場として利用させていただいております。これまで、学会を通して多くの大学、研究機関および企業の皆さまと交流する機会を得ることができました。これからも精密工学会会員の皆さまから研究室へのご指導ご鞭撻を賜りますよう、お願い申し上げます。

参考文献

- 1) W. Gao : Precision Nanometrology, Springer, (2010), ISBN 978-1-84996-253-7.
- 2) X. Li, W. Gao, H. Muto, Y. Shimizu, S. Ito and S. Dian : A six-degree-of-freedom surface encoder for precision positioning of a planar motion stage, *Prec. Eng.*, **37** (2013) 771-781.
- 3) Y. Shimizu, Y. Kudo, Y.L. Chen, S. Ito and W. Gao : An optical lever by using a mode-locked laser for angle measurement, *Prec. Eng.*, **47** (2017) 72-80.
- 4) X. Chen, T. Nakamura, Y. Shimizu, C. Chen, Y.L. Chen, H. Matsukuma and W. Gao : A chromatic confocal probe with a mode-locked femtosecond laser source, *Opt. and Laser Technol.*, **103** (2018) 359-366.
- 5) Y. Shimizu, R. Aihara, K. Mano, C. Chen, Y.L. Chen, X. Chen and W. Gao : Design and testing of a compact non-orthogonal two-axis Lloyd's mirror interferometer for fabrication of large-area two-dimensional scale grating, *Prec. Eng.*, **52** (2018) 138-151.
- 6) Y. Shimizu, K. Mano, H. Murakami, S. Hirota, H. Matsukuma and W. Gao : Design optimization of a non-orthogonal two-axis Lloyd's mirror interferometer for fabrication of large-area two-dimensional scale gratings, *Prec. Eng.*, **60** (2019) 280-290.