

センサ光学系における調整誤差の定量的特定手法の検討

大坪 樹*・矢澤孝哲**・扇谷保彦**・小島龍広***

Study on Quantitative Specific Technique of Optical Alignment Errors on Optical Skid Sensor

by

Tatsuki OTUSBO*, Takanori YAZAWA**, Yasuhiko OUGIYA** and Tatsuhiko KOJIMA***

The on-machine measurement means place coincidence of machining and measurement. Since the optical sensor for it is asked for a miniaturization, optical alignment of it becomes difficult. In this paper, the optical design method in consideration of the optical alignment to make the sensor is proposed. It is carried out using the ray trace for the sensor system including an optical part with an alignment error. In this study, it is adjusted for the design of the optical skid sensor, the effect of this method is evaluated in simulation and experiment.

Key words: *Optical alignment, Optical sensor, Quantitative specific technique, Ray trace*

1. 序論

加工部品の高精度化・微細化に伴い、光を用いた非接触測定の必要性が高まっている。特に、要求される精度がマイクロメータ以下、すなわちサブミクロンからナノメータになると、チャッキングの再現性は著しく低下し、その精度では二度と同じ位置に取り付けることはできない。そのため従来からのオフラインでの計測・検査、修正加工では、満足する精度を得るために何度もその工程を往復することになり、これが部品試作時間の増大を招いている。そこで加工した工作機械上で計測する機上計測について多数研究開発が行われてきている¹⁻⁴⁾。精度の高い工作機械では、運動誤差も少なくサブミクロン以下の繰り返し精度が得られるため、そこに非接触プローブあるいは非常に小さい触圧のプローブを取り付けて測定することが多い。しかし、わずかとはいっても運動誤差を持つ工作機械で加工した加工部品を、同じ運動誤差の下で計測してよいか?との疑問があり、筆者の経験的にも研究

と異なる加工現場での作業時には、何らかの影響が残ることが見受けられる。そのため我々は、工作機械上でその運動誤差の影響を受けない機上計測センサを開発し、一定の成果を上げてきている⁵⁻⁶⁾。しかし、機上で安定して使用するためにはセンサのさらなる小型化が必要であるが、光学部品・取り付けジグ精度の高さや、取り付け・調整の微妙さの問題で、理論上の精度が得られにくい現状がある。

以上の状況に関して本研究では、センサの各部品の調整精度を考慮した光学設計を行い、その影響を定量化したうえで、それに適した筐体、部品取り付けジグを設計・製作する手法について、提案・検討した結果について報告する。

2. 臨界角法式光スキッドセンサとその問題点

2.1 臨界角法式光スキッドセンサの原理

臨界角法式変位センサ⁷⁾は、光の臨界角近傍での急峻な透過率の変化を利用し、変位を 10 μ m 程度の範囲

平成23年6月28日受理

* 工学研究科博士後期課程(Graduate School of Engineering, Doctoral Degree)

** システム科学部門(Division of System Science)

*** 教育研究支援部(Technical Division)

で1nm以下の分解能で測定できる変位計である。ほぼ同様の性能を有する変位計として静電容量型変位計があるが、ワーキングディスタンスが広く取り扱いが容易なため、インプロセス計測・制御加工に用いられている⁸⁾。しかしnmレベルの変位を計測するため、センサ製作時にはサブミリ以下の光学調整が、使用時には同レベルでの光学部品の安定性が必要であり、これが

- 1) 製造時間の増大や価格高騰
- 2) 環境の変化が激しい現場での使用時に温度ドリフトしやすい

といった問題の原因となっている。さらに、工作機械上で使用の上では、前述の運動誤差の問題のほかに、表面性状の影響を受けやすいといった問題点も見出されている。そこで運動誤差の影響、表面性状の影響、温度ドリフトの影響の3問題を、臨界角式変位センサ光学系に光スキッド機能を付与することにより、解決することを提案している。図1に光スキッドによる運動誤差低減の概念図を示す。ミクロンレベルまで集光した光プローブ(以下、スタイラスと呼ぶ)のほかに、サブミリレベルの光プローブ(以下、スキッドと呼ぶ)を同軸に設け、その変位を同時計測し両者の差分をとることで、運動誤差の影響をキャンセルするばかりでなく、光源・レーザ波長・処理回路への温度変化の影響

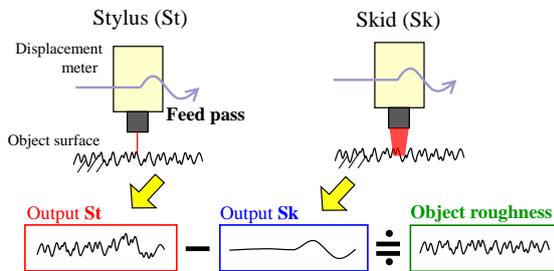


Fig.1 Principle of optical skid system

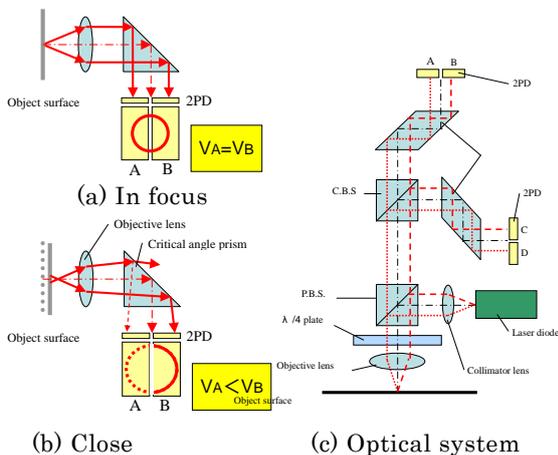


Fig.2 Principle of critical angle method

響も低減できる。臨界角法による変位検出(スタイラス光学系)の原理を図2に、スキッド光学系の原理を図3に示す。対物レンズに平行光を入射すると、そのレンズの焦点位置でレーザ光は焦点を結ぶ。被測定面が焦点位置にある場合、反射光は対物レンズを通過後も平行光になる。臨界角プリズムは、光軸に対し臨界角になるように製作・設置したプリズムなので、平行光は全反射し、下の2分割フォトダイオード(以下、2PDと記す)に入射する。光量をそれぞれ V_A , V_B とすると、 $V = V_A - V_B = 0$ となる(図2(a))。これに対し、被測定面が焦点位置より手前にある場合、対物レンズを通過したレーザ光は発散光になるので、臨界角プリズムに対して光軸より上の光は入射角が臨界角より小さくなる。反対に光軸より下の光は臨界角より大きくなる。したがって、2PDに入射する光量には $V < 0$ なる差が生じる(図2(b))。また、被測定面が焦点位置より奥側にある場合、レーザ光が収束光となるため、2PDに入射する光量差は $V > 0$ となる。これを利用して変位を測定するが、このままでは被測定面の傾きや表面反射率の違いの影響を受けるので、2分割フォトダイオードを二つ設けた光学系(図2(c))とし、光量をそれぞれ V_A , V_B , V_C , V_D として、

$$V = \{(V_A - V_B) - (V_C - V_D)\} / (V_A + V_B + V_C + V_D) \quad (1)$$

より、変位を算出する。光スキッド光学系は、スタイラスよりも広い範囲の平均変位を検出したいので、対物レンズに対して発散光を入射する。するとレーザ光の集光位置は対物レンズの焦点よりも遠ざかるが、被

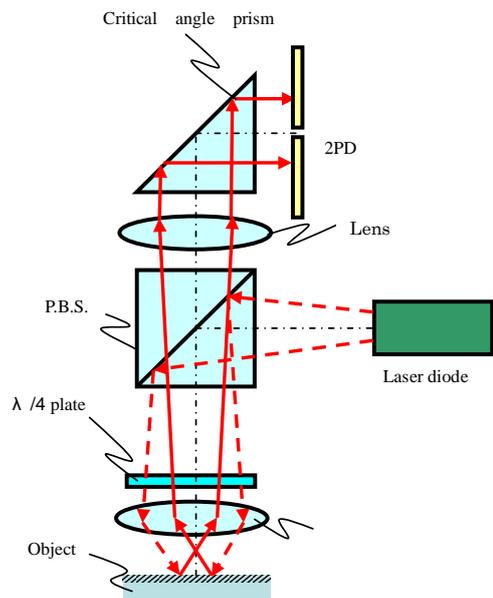


Fig.3 Optical skid system

測定面が焦点と集光位置の中間点にある場合、そこで反射したレーザ光は焦点でクロスし、対物レンズに入射することになる。そのため、対物レンズを通過した光は平行光になる。これを利用すれば、スタイラスよりも広い範囲の平均変位を検出することが可能となる。

2.2 センサの問題点

センサ構造の概略を図4に示す。従来のセンサでは、スタイラス光学系とスキッド光学系は同一平面上に設置されており、ビームスプリッタと1/4波長板を3枚使用し2つの光学系の分光を行うが、その際光学部品の固定ジグ同士が干渉するため、光学部品同士の間隔が長くなり対物レンズの焦点距離が数10mm必要となり、そのままでは必要な感度が得られない。そこで4枚のレンズ系を組むことで焦点距離を長くし、対物レンズの前にビームスプリッタと1/4波長板を設置し分光を行っている。

本センサは図4に示すように、1F部分にスタイラス光学系、2F部分にスキッド光学系とした2階建て構造とした。これにより、分光に使用する光学部品の固定ジグ同士の干渉もなく、対物レンズの焦点距離を短くできる。対物レンズ1枚のみを設置すればよく、センサの小型化ができる。実際に製作センサの寸法は70×70×70となり、従来の装置に比べ約長さ70%、幅39%、体積55%に小型化することができた。しかし、小型化を目指すことにより、各光学要素もより小型のものを使用せねばならず、寸法効果から光学系のアライメントが格段に難しく重要になり、所望の感度が得られにくい問題点が新たに発生した。

2.3 光線追跡による光学系誤差の定量化手法

光線追跡は、光束を細かな光線に分割し、反射・屈折に関する振る舞いを調べる手法であり、主に光学機器の光学設計に用いられる。本論文では、各光学要素のアライメント誤差 δ と、それにより発生する最終受光

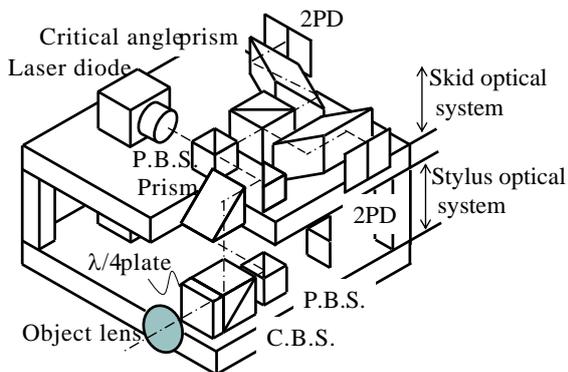


Fig.4 Schema of optical skid sensor

面(2PD)での誤差の関係を光線追跡により求め、そこからの出力を算出することで、アライメント精度がどこまで必要かを定量的に検証する手法を提案する。

以上を踏まえ本研究では、本手法による光学系誤差定量化結果に、光学系の調整手順を加味することで、センサ筐体、光学要素固定部品、光学調整用治具の設計・製作の指針(方法および公差)を与える。さらに、その結果に基づいて設計、製作、調整を行いその有効性を評価する。

3. 光線追跡によるセンサ光学系誤差の定量化

3.1 光線追跡のための仮定と誤差検討項目

本センサの光学系の基本構成は1F, 2Fとも同じなので、本研究では1Fの光学系について検討した。検討した光学系を図5に示す。ここで光線追跡は、以下の仮定のもとに行った。

- ①各光学要素(部品)は、形状、屈折率、均質性などが理想的である。
- ②レーザは波長、コヒーレンス、輝度分布、発光安定性が理想的で、対物レンズに入射するレーザ光も理想的な平行光である。
- ③アライメント時に温度変化がない。
- ④2PDは理想的に働き、無限大の大きさである。
- ⑤光学部品をジグに固定する際、変形を生じない。
- ⑥各誤差は単独で発生し、クロストークを生じない。
- ⑦その他、誤差以外もすべて理想的であるとする。

誤差を検討する光学部品は、レーザから入射する順

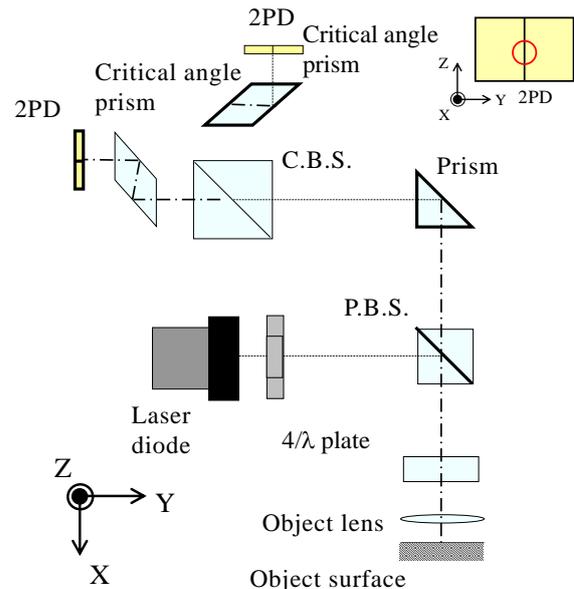


Fig.5 Optical system for correction of alignment errors

に, 偏光ビームスプリッタ (P.B.S.), 対物レンズ (Lens), 直角プリズム (Prism), 臨界角プリズム (Critical angle prism) とし, 各光学部品に対する誤差は, 位置決め誤差 ($\delta_x, \delta_y, \delta_z$) と, 姿勢誤差 (Yawing: δ_{yaw} , Pitching: δ_p , Rolling: δ_r) とする. ここで, 仮定④より 2PD 上での Z 方向の誤差は, 測定結果に影響を及ぼさない. このことから, その方向にのみ影響する誤差である $\delta_z, \delta_p, \delta_r$ は検討項目から排除してよい.

3.2 光線追跡手順と反射率計算

直径 D のレーザ光に対し, 光線に分割する分割数を N とし, i 番目の光線を R_i として光線の挙動を P.B.S. から 2PD まで追跡する. このとき, 臨界角プリズムでは, 光線の方角のほかに, 反射率も変化する. 図 6 は反射率の変化を模式的に示した図である. この反射率の変化を係数 r_{pi} は

$$r_{pi} = \frac{n_2 \cos \theta_{1i} - n_1 \cos \theta_{2i}}{n_2 \cos \theta_{1i} + n_1 \cos \theta_{2i}} \quad (2)$$

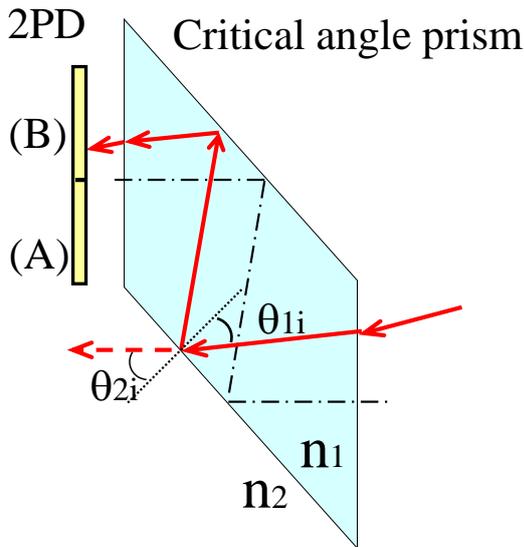


Fig.6 Calculation of reflectance on critical angle prism and intensity on 2PD

Table 1 Optical ray trace conditions

Light source [Wavelength]		Laser diode module 635nm
Laser	Diameter [mm]	φ2
	Division number	200
Mount error	Horizontal direction [μm]	-10, -5, 0, 5, 10
	Vertical direction [μm]	-10, -5, 0, 5, 10
	Yawing [°]	-200, -100, 0, 100, 200
Displacement [mm]		±0.1

として計算する. 元々一本の光線が持っている輝度を I/N (I : 光線全体が持つ光量) とし, 本光学系では臨界角プリズム内で 2 度反射することを考慮すると, 2PD 上に到達した際の光線 R_i の輝度 v_i は

$$v_i = \{ r_{pi} \times (I/N) \}^2 \quad (3)$$

となる. ここで各 2PD の素子に到達した光線の本数を m_A, m_B, m_C, m_D ($N = m_A + m_B = m_C + m_D$) とすれば, 例えば素子 A に到達する光線の光量 V_A は,

$$V_A = \sum_{i=1}^{m_A} v_{Ai} \quad (4)$$

として算出する. 最終的なセンサの出力 V は, 実際のセンサの出力と同様の計算式より

$$V = \frac{(V_A - V_B) + (V_C - V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (5)$$

として算出できる. この V について, 平均感度により, 各誤差の影響を評価する.

3.3 アライメント誤差が感度に与える影響

表 1 に計算に用いた各要素の条件を示す. 光軸方向誤差の感度への影響を図 7, 光軸垂直方向誤差の感度への影響を図 8, ヨーイングによる感度への影響を図 9 に示す. この 3 図より

- ①各要素の光軸方向誤差は, Objective lens の場合のみ影響を受けるが, それも $+5 \sim -15 \mu\text{m}$ の範囲ではほとんど影響を受けない.
- ②各要素の光軸垂直方向誤差は, Objective lens の場合のみ大きく影響し, $\pm 10 \mu\text{m}$ の誤差で感度が半分以下に劣化する.
- ③各要素のヨーイング誤差は, 測定感度に影響するが, 特に Critical angle prism と Right Angle Prism の場合が大きく影響する.

ことがわかる.

一般的な光学系の組立調整の手順を踏まえると, 本センサでは, 測定表面, Prism, C.B.S., Critical angle prism, 2PD, Objective lens の順に組立調整する. ただし 2PD は最初から設置しておき, 上記の手順において位置を確定する. このため, Prism, C.B.S., Critical angle prism の各要素の設置後, 2PD の位置を微調整することが可能であるのに対し, Objective lens はそれ自体の調整以外はできない. したがって, 前者の 3 要素は, 光線追

跡誤差解析に基づいてジグ設計・製作を行うことが必要である。例えば Critical angle prism は、光軸垂直方向・光軸方向誤差の影響を受け難いので、ヨーイング誤差が $-200''\sim 0''$ の範囲になるようにマイナス公差を許容するように誤差配分して設計・製作しさえすればよい。これに対して後者は、それ自体に調整代の余裕を持たせる必要があり、かつ Objective lens の調整方法も併せて検討する必要がある。

3.4 対物レンズの調整方法

Objective lens が図 5 の Y 軸方向に光軸より $+\delta_y$ だけ

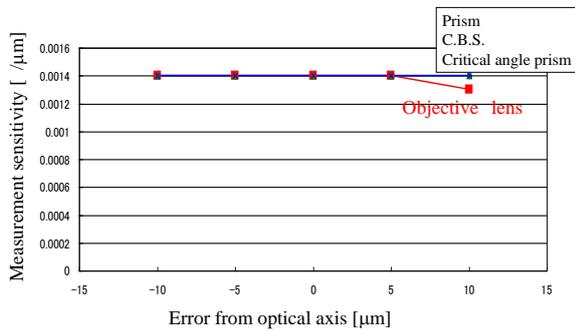


Fig.7 Influence of error along optical axis on measurement sensitivity

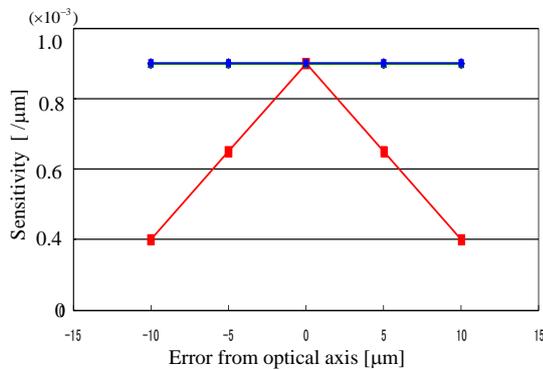


Fig.8 Influence of errors from optical axis on measurement sensitivity

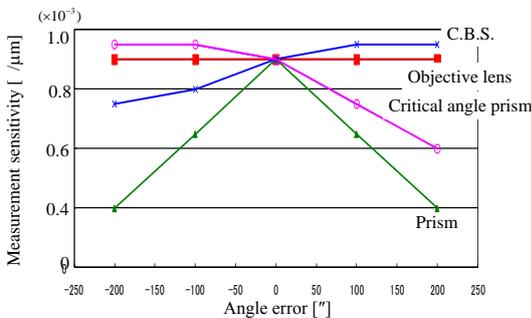


Fig.9 Influence of yawing errors on measurement sensitivity

ずれたものとする、Objective lens の光軸 a_0 が入射レーザの光軸から $+\delta_y$ だけ平行移動したとみなすことができる。このとき平行光であるレーザ光線は、 a_0 上に集光する。そのため、被測定物が焦点位置にあった場合、反射されたレーザ光線の光軸は、元のレーザ光線の光軸に対して a_0 を対称線として $+2\delta_y$ だけ平行にシフトすることになり、2PD には平行で偏った光線束が入射する。これに対し被測定面が焦点位置より遠くなると、Objective lens 通過後の光線は a_0 に対しての収束光になる。このため、臨界角プリズムにおける反射率の変化も a_0 に対して発生するので、元々の光軸に対して調整された 2PD に対して、対称に変化が表れない。すなわち、全反射の影響が反対の素子にも表れることになるので、2つの素子の出力差が 0 になる被測定物の位置は、焦点位置にならない。図 5 の場合、 $V_A=V_B$ になるのは、焦点より遠い場合に成立する。このとき、 V_C および V_D の出力は、光路に C.B.S.の反射を含むため、 V_A, V_B 側では光軸より上側にシフトしていた光線が、下側にシフトしたことに相当するので、 $V_C=V_D$ は、焦点より遠い位置ではありえず、被測定面が焦点より近い位置にある場合のみ成立する。このことを応用し、次の手順で Objective lens の調整を行う。

- ① 測定面を $V_A=V_B$ となる点 A へ移動し、その点を記憶する。
- ② 測定面を $V_C=V_D$ となる点 B へ移動し、その点を記憶する。
- ③ 仮の調整位置を点 A, 点 B の中点 C とし、その位置に測定面を移動する。
- ④ $V_A=V_B = V_C=V_D$ となるように対物レンズを調整する。

4. 実センサ光学系への適応例

図 10 に測定方法を、図 11 に従来と比較した感度測定結果を示す。この結果から、従来の調整方法に対し感度が上昇し、直線性も向上していることがわかる。これにより、本手法の有効性を本試験の範囲内において

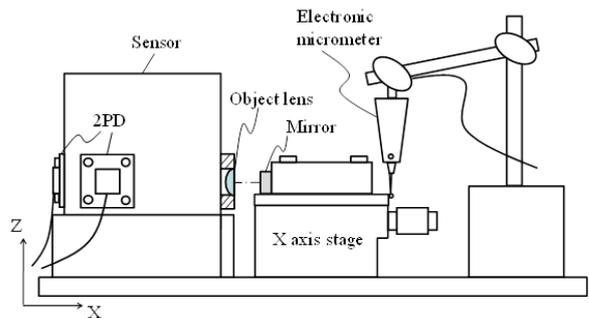


Fig.10 Experimental setup of sensitivity

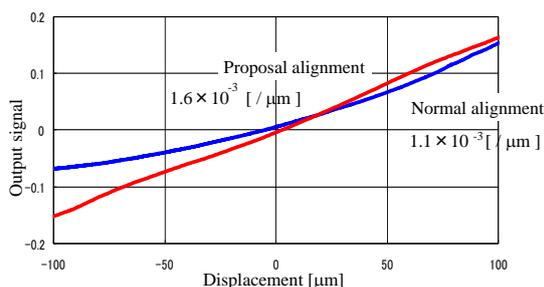


Fig.11 Effect of alignment method on sensitivity

ては確認することができた。

5. 結論

高精度な調整を必要とする光学部品を含む光学式センサについて、調整が必要な部品とその方向および精度を、光線追跡により特定し、定量化することで、光学系およびセンサの光学設計、筐体設計、要素(ジグ)設計・製作に用いる手法を検討し、本研究の範囲内で以下の知見を得た。

- (1) 光線追跡手法を用いた誤差定量化シミュレーションを行い、その結果からセンサに必要な精度と不要な精度について分類できた。
- (2) 分類した精度と光学調整手順を踏まえ、本調整で最も重要な光学部品を特定した。
- (3) 特定された光学部品 (Objective lens) の調整方法を提案した。
- (4) 上記の結果を用いて実センサの光学調整を行ったところ、センサ感度および直線性を向上することができた。

謝辞：東京都立科学技術大学名誉教授河野嗣男氏、長崎県工業技術センターの福田洋平氏、および長崎大学加工システム学研究室のメンバー、特に矢澤グループの各個人には多大なる協力をいただいたので、ここに感謝する。

参考文献

- 1) 小池雄介, 河野大輔, 松原 厚, 山路伊和夫 ; 計測融合型加工システムによる機上計測, 精密工学会誌, 76, 8(2010), pp.945-949
- 2) Youhei FUKUDA, Takanori YAZAWA, Yukio MAEDA, Takashi TAMURA, Yasuhiko OGIYA and Tatsuhiko KOJIMA ; Development of optical skid sensor for accuracy improvement of machine tool, Proceedings of ASPE 24th annual meeting, ASPE 24th Annual

Meeting(2009), pp355- 358

- 3) 浅見宗明, 大森整, 森田晋也, 林偉民, 上原嘉広宏, 渡邊裕 ; 低圧触針式機上形状測定システムの開発 : 低圧接触式プローブの高精度化, 生産と加工に関する学術講演会 2006(6), 57-58, 2006
- 4) Tatsuki Otsubo, Takanori Yazawa, Yukio Maeda, Keita Fujii, Yasuhiko Ougiya, Tatsuhiko Kojima ; Accuracy of the Triangulation Method Sensor with Optical Skid , IEEE Proceedings of ISOT 2011, Paper No.156(2012)
- 5) 福田洋平, 矢澤孝哲, 杉下悟史, 扇谷保彦, 小島龍広 ; 自走式表面性状測定非接触センサの開発, 2007年度精密工学会九州支部講演会講演論文集, pp31-32
- 6) Takanori YAZAWA, Tatsuki OTSUBO, Youhei FUKUDA, Yasuhiko OGIYA, Tatsuhiko KOJIMA ; Development of Optical Sensor for Detecting Micro Crack on Contact Surface, Key Engineering Materials, Vols.452-453, pp309-312(2011)
- 7) 小澤則光, 河野嗣男, 三井公之, 武者徹, 宮本 紘三 ; 非接触光学式微細形状測定ヘッド(HIPOSS-1), 精密工学会誌 Vol.52(12), pp2080-2086(1986.12)
- 8) 内田出, 河野嗣男, 尾西隆, 岡崎祐一, 小澤則光, 竹内喜代松 ; インプロセス計測加工精度補償の研究(第2報) : K-HIPOSSと平行板ばね式微小切込み工具台の応用, 精密工学会誌 Vol.56(1), pp134-139 (1990.01)