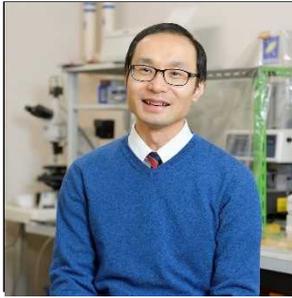


全地球測位システムを利用したレーザー測長器における知的信号処理手法の開発

Development of intelligent signal processing methods for laser length measuring instrument using global positioning system



韋 冬 (WEI DONG Dr. Eng.)

長岡技術科学大学

工学研究院 機械創造工学専攻 准教授

(Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology・Associate Professor)

日本精密工学会 日本精密工学会 知的ナノ計測専門委員会 日本応用物理学会 日本応用物理学会 フォトニクス分科会 国際光工学会 一般社団法人 日本光学会

受賞：第 14 回インテリジェント・コスモス奨励賞 (2015) 第 11 回船井研究奨励賞 (2012)「第 25 回独創性を拓く 先端技術大賞」文部科学大臣賞 (2011)

研究専門分野：計測制御工学 光工学・光量子工学 計測工学
計算光学

あらまし

国際単位系 (International System of Units、SI) に七つの基本単位 (長さ・質量・時間・アンペア・熱力学的温度・光度・物質質量) がある。メートルは長さの基本単位である。メートルは真空中の光速で定義されている。真空中の光速は 299792458 m/s である。メートルの定義をそのまま使って実際の長さを計測するのは困難である。高精度のメートルの実現手段として、レーザーがよく使われている。単色のレーザーは正弦関数として観測可能な周期的変化を示す波を発する。波長は、波 (波動) の周期的な長さのことである。

(例えば、レーザーポインターの仕様書をよく見ると、波長 650nm と書いてある。) 波長と周波数を掛けると真空中の光速である。真空中の光速が定数であるから、この関係からわかるように、周波数が安定すれば、波長が安定する。長さ計測を実現する際、安定したレーザー光源がよく使われる。なぜなら、レーザー

光源が安定した周波数を持っているからである。出射された光が持つ波長も安定している。そのため、任意の距離を「波長 × (整数 + 端数)」と表せる。本研究室では、これまでは全地球無線測位システム (Global Positioning System、GPS) にトレースしたパルスレーザー光源を構築した。パルスレーザー光源が発する隣接したパルス間の繰返し間隔長 (以下では、繰返し間隔長) が安定している。任意の距離を「繰返し間隔長 × (整数 + 端数)」と計測したい。それに必要な知的信号処理手法を考案し、開発していた。

1. 序論

2009 年 7 月フェムト秒レーザーによるフェムト秒光周波数コム^{*1} (以下では光周波数コム) が計量法の特定標準器 (長さ) として採用された。光周波数コムを用いた長さ計測技術が盛んに研究されている (例えば、[1-3])。その研究成果は長距離計測や三次元計測などの場面で活躍すると予想される。また、図 1 に示すような、光周波数コムによる新たな長さトレーサビリティシステムの実現にもつながる。メートルの実現及びそのトレーサビリティは“情報”として伝わる時代へと変わる可能性が出てきた。

本研究室では GPS 信号にトレーサブルな光周波数コムを用いた長さ計測を研究している。本稿では、これまでに得られた結果について簡単に述べる。



図 1 長さトレーサビリティシステムの変更

全地球測位システムを利用したレーザー測長器における知的信号処理手法の開発

Development of intelligent signal processing methods for laser length measuring instrument using global positioning system

1.1 波長を用いた従来法と繰返し間隔による提案法

上で述べたように波長は安定した物差である。そのため、従来法の一つとして、任意の距離を「波長×(整数+端数)」と表せる。後で述べるマイケルソン干渉計を利用して、整数部と端数部を計測することができる。

光周波数コムの繰返し周波数も安定しているため、繰返し間隔長も長さ計測の実現に使えることが分かっている[4]。任意の距離を「繰返し間隔長×(整数+端数)」と表せる。繰返し間隔長を用いて、任意の長さを表現した時、必要な整数部と端数部を計測する必要がある。

2. 知的信号処理に関する実験

3.1 干渉縞の形成

本研究の基礎である干渉縞について述べる。干渉縞は時間とともに変動する信号と理解できる。干渉縞を得るために、干渉計が使われる。長さ計測によくマイケルソン干渉計が使われる。マイケルソン干渉計はレーザー光源、ビームスプリッタ、参照鏡、物体鏡と光検出器で構成されている。

マイケルソン干渉計の光源を光周波数コムとした時、干渉計はパルス列干渉計となる。光周波数コムは複数の波長を持っている。そのため、パルス列干渉計は複数の波の干渉現象を利用している。複数の波長による干渉縞の重ね合わせは光周波数コム干渉計の干渉縞となる。

その基礎として、単一波長による干渉縞の形成を説明する。単一波長を光源としたマイケルソン干渉計を考える。光源から発する波は安定した波であり、それを正弦波として考えることができる。ビームスプリッタから見た物体鏡が参照鏡と同じ距離にあると仮定する。そのとき、参照鏡と物体鏡からの反射光の波形は同じになる。両波が強めあう干渉²し、光検出器で得られる干渉信号の振幅が最大となる。明るいポイントとなる。物体鏡がビームスプリッタから見た遠ざかる方向に波長の半分だけ動かしたと仮定する。光が物体鏡で反射されて、道を往復する。つまり、光は物体鏡が移動した距離の倍を走る。参照鏡と物体鏡からの反射光

の波形は波長分だけずれる。波が正弦波であると仮定しているため、参照鏡と物体鏡からの反射光の波形は同じになる。両波が強めあう干渉し、光検出器で得られる干渉信号の振幅が最大となる。再び、明るいポイントとなる。

複数の波長による干渉縞を考える。(つまり、光周波数コムを光源としたマイケルソン干渉計を考える。)ビームスプリッタから見た物体鏡が参照鏡と同じ距離にあると仮定する。そのとき、どの波長の光でも参照鏡と物体鏡からの反射光の波形は同じになる。どの波長の波も強めあう干渉し、光検出器で得られる干渉信号の振幅が最大となる。明るいポイントとなる。つまり、すべての波長による明るいポイントが重なり、光周波数コム干渉計の干渉縞として、明るいポイントとなった。物体鏡がビームスプリッタから見た遠ざかる方向に動かしたと仮定する。動かした距離にあった波長が再び、明るいポイントを作り出す。個々の波長、つまり長さが異なるため、他の波長は弱い明るいポイントを作り出すか、黒いポイントを作り出す。物体鏡を動かしたことで、光周波数コム干渉計の干渉縞の強度が減少する。このように、光周波数コム干渉計における計測のキーポイントは干渉縞が明るいポイントとなる点を探すことである。その点はビームスプリッタから見た物体鏡が参照鏡と同じ距離にあるか、繰り返しかつ離れた距離にあるかのどちらである。測長を実現するには、整数は明るいポイントの数を数えてわかる。参照鏡の長さ目盛で、物体鏡の移動距離(端数)を計測できる。

3.2 加重平均による位相クロス点の算出

明るいポイントの位置を特定できるパラメータは包絡線のピーク[5]と位相クロス点[6]がある。従来にある位相クロス法[6]は平均を用いて、位相クロス点を求めている。光周波数コムの光源のパワースペクトルはガウス関数だと仮定できる。ウィーナーヒンチンの定理³によると、干渉縞のスペクトルはガウス関数である。各周波数ペアの信号雑音比(signal-noise ratio、SN比)が異なる。ノイズが一定だとしたら、信号のスペクトルが強い信号がより高いSN比を持つ。より高いSN比を持つ信号から再生した位相クロス点は低い

全地球測位システムを利用したレーザー測長器における知的信号処理手法の開発

Development of intelligent signal processing methods for laser length measuring instrument using global positioning system

SN 比を持つ信号から再生した位相クロス点より信頼できる。これまでの従来法は、異なる SN 比の信号で再生した位相クロス点の算術平均を求めた。提案法は、周波数ペアの強さに比例した加重平均による位相クロス点の算出方などを提案し、検討した。図 2 に提案法のアイディアを模式図で示す。

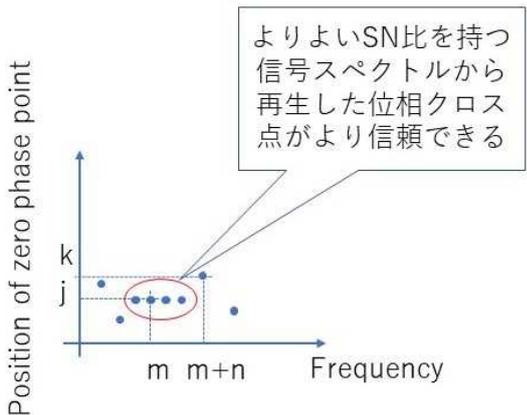


図 2 提案法の模式図

ここで、提案法の要点のみを述べた。詳細は関連論文 [7] に譲る。

3.3 チャープ Z 変換を使った必要な位相点のみの再建

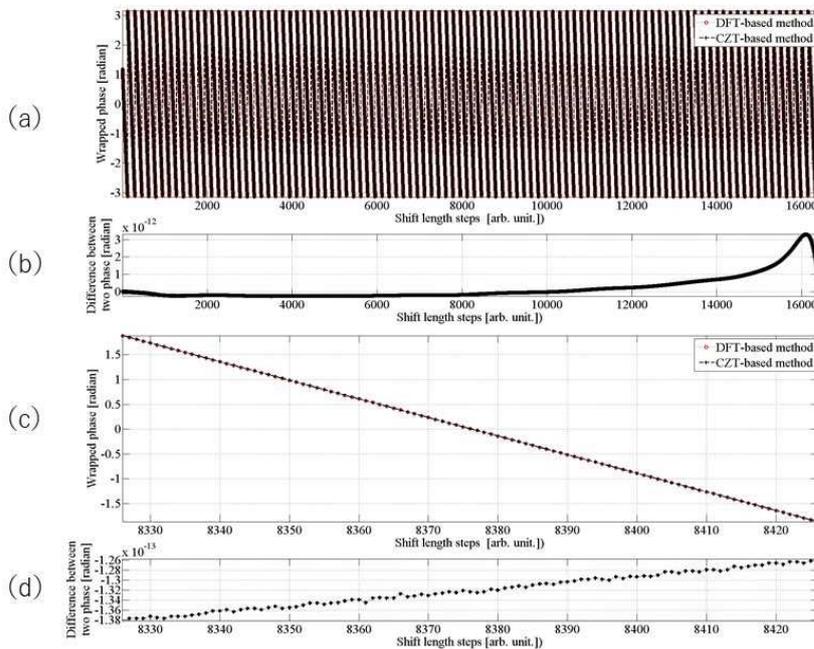
ここで、提案法の要点のみを述べる。詳細は関連論文 [8] に譲る。

干渉計で位相のゼロクロス点を検出する目的 [6] は包絡線ピークの下にある位相がゼロをクロスする点を求めることで両ミラー間（つまり、物体鏡と参照鏡）の変位を検出することにある。従来法 [9] では、次のような一連の処理をする。位相を検出するために、信号をフーリエ変換して、周波数領域でフィルタ処理を実施する。フィルタで選択した周波数成分を逆フーリエ変換し、折り畳まれた位相を得ることができる。フーリエ変換は通常、離散フーリエ変換（discrete Fourier transformation、DFT）を使って、実施される。ここで、従来法を DFT/IDFT 法と定義する。IDFT は逆離散フーリエ変換の略である。一般に、係数及び計算の順番を除けば DFT と IDFT に違いがない。言い換えると、先に、IDFT を計算し、後で DFT 計算をしても、従来法は成立する。提案法は、DFT の代わりにチャー

プ Z 変換（Chirp z-Transform、CZT）を使うことを提案した。ここで、提案法を IDFT/CZT 法と定義する。DFT/IDFT 法を使った方法は情報理論分野の復調と変調の理論に由来する。情報理論分野において、原信号を完全に復元することができることを目的にしている。そのため、すべてのラップされた位相を再建している。提案法は包絡線ピーク下にある位相クロス点を求めるために、特化した方法である。それは what you see is what you need のアプローチである。DFT/IDFT 法を使った方法と提案法の着目点は異なる。IDFT/CZT 法を使った場合、必要な位相点のみを再建することができる。ゼロ詰め*4 を使って、必要な位相点の補間を行ったとき、DFT/IDFT 法によるデータ数が莫大となる。IDFT/CZT 法を使ったアプローチは計測に不用な位相サンプリング点の再建の抑制につながる。図 3 に提案法による計算の一例を図示する。

全地球測位システムを利用したレーザー測長器における知的信号処理手法の開発

Development of intelligent signal processing methods for laser length measuring instrument using global positioning system



図(a)において、赤い○はDFT/IDFT法による結果である。黒い+はIDFT/CZT法による結果である。

図(b)は図(a)に示したDFT/IDFT法による結果とIDFT/CZT法による結果との差である。

図(c)は図(a)の中心部の拡大図である。

図(d)は図(b)の中心部の拡大図である。

図3 提案法による計算の一例

3.4 チャープ Z 変換を用いたサブピクセル分解能の実現

ここで、提案法の要点のみを述べる。詳細は関連論文[10]に譲る。

全ての位相を再建すると、IDFT/CZT法はDFT/IDFT法と等価である。包絡線ピーク位置決定に限って、IDFT/CZT法を用いたほうが有利である。なぜなら、すべての包絡線を再建する必要がないからだ。再建範囲を指定したIDFT/CZT法のほうが計算時間がかからない。かつ、計算量が少ない。包絡線ピークが存在する範囲をいかに制限するのが計算時間と計算量を低減できる鍵となる。既知の情報を用いて包絡線ピークが存在する範囲を指定し、IDFT/CZT法を用いたサブピクセル分解能を実現した。

3.5 短時間フーリエ変換を用いた干渉計の走査機構の線形性の確認

ここで、提案法の要点のみを述べる。詳細は関連論文[11]に譲る。

干渉計測にマイケルソン干渉計を使っていることは上

記で述べた。マイケルソン干渉計において、両アームの距離を変えるために、参照鏡を走査させている。具体的には、参照鏡に piezoelectric (PZT) などを付ける。PZTなどは線形に走査している保証はない。これまでは、複数の非線形走査の補正法[12-17]が提案されている。問題は、PZTなどが線形走査しているかどうかを確認する方法はこれまでの処理方法の中に存在しなかった。

DFT/IDFT法を実施した場合、信号を構成する周波数成分がどのように時間変化していくかを捉えることができない。なぜなら、フーリエ解析は時間に関する信号を周波数領域へ変換する手法で、時間に関する情報を失ってしまう。言い換えると、フーリエ変換は各時間における周波数情報を提供できない。別の周波数が安定したレーザーを用いて、参照ミラーの変位を観察することができる。それに余計なコストがかかる。光学系が巨大となる。本研究はまず、現在が使っているミラー掃引装置の線形走査性を確認するために、余計なレーザーを導入せず、干渉縞を解析することによ

全地球測位システムを利用したレーザー測長器における知的信号処理手法の開発

Development of intelligent signal processing methods for laser length measuring instrument using global positioning system

って、目的を達成することを目指した。
提案法では短時間フーリエ変換 (short-time Fourier transform、short-term Fourier transform、STFT)

を用いて PZT などの走査機構の線形性を確認する。

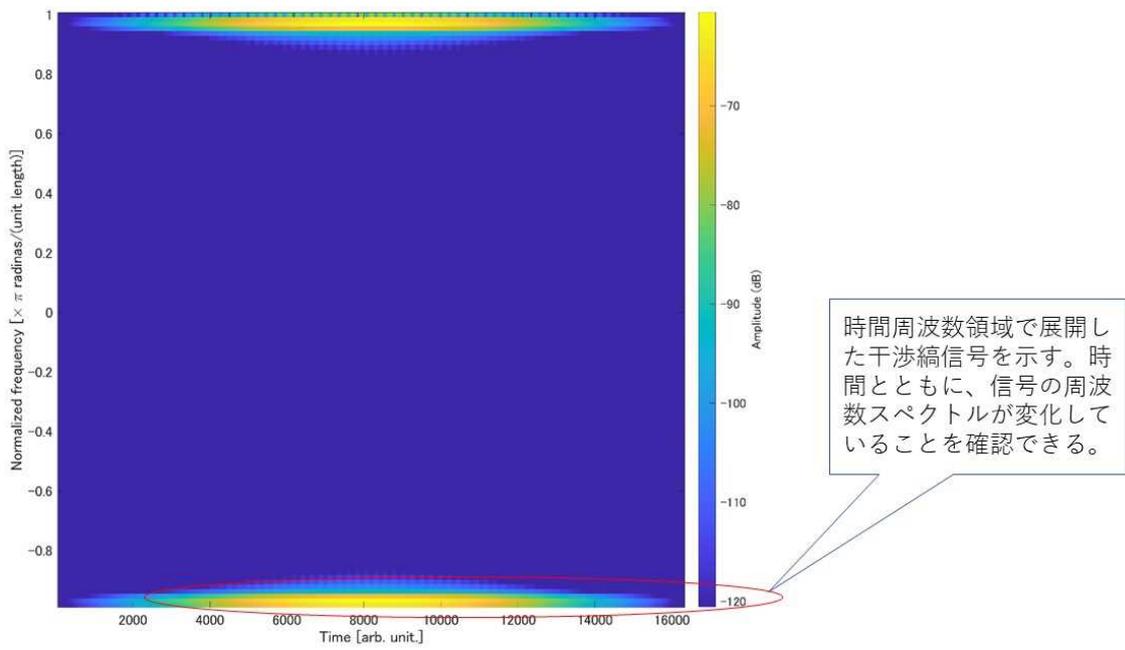


図4 提案法による計算の一例

図4に提案法による計算の一例を図示する。その結果によって、干渉縞の処理法が変わる。PZTなどの非線形走査がなしと確認できるなら、DFT/IDFT法を実施し、包絡線ピーク位置を得る。PZTなどによる非線形走査があると判断した場合、時間周波数領域で信号を分解し、フィルタ処理でノイズを除去し、逆変換し包絡線を復調した方法がよい。なぜなら、非線形走査があった場合、周波数領域で時間ごとの信号スペクトルが重なり、DFT/IDFT法を実施し、単一のフィルタを実施した場合、ノイズが綺麗に低減できないからである。STFTは不確定性原理^{*5}に縛られる。言い換えると、周波数と時間との間には、識別精度に関して背反する関係がある。周波数と時間との両方を正確に知ろうとすれば限界がある。具体的には、時間幅の広い窓は周波数分解能が良いがその分、時間分解能は悪い。逆に時間幅の狭い窓を使えば、時間分解能は良いが周波数分解能が悪い。本研究は、周波数変化の時刻を完

全に識別する必要がない。信号の周波数に変化があったかどうかを特定したいだけである。そのため、実現可能な最大の時間幅の窓を用いて、周波数分解能をよくした。

4. まとめ

本研究室では、GPSにトレースした光周波数コムを用いた長さ計測を研究している。波長と隣接したパルスの繰返し間隔長の類似性から、繰返し間隔長を用いて、長さ計測を実現している。長さ計測を実現するために、必要な知的信号処理手法を考案し、開発した。ここでは、その成果の概要を紹介した。本研究の結果、空気中における絶対長さ計測の技術向上やタコ型トレーサビリティシステムの実現につながる。

全地球測位システムを利用したレーザー測長器における知的信号処理手法の開発

Development of intelligent signal processing methods for laser length measuring instrument using global positioning system

用語解説

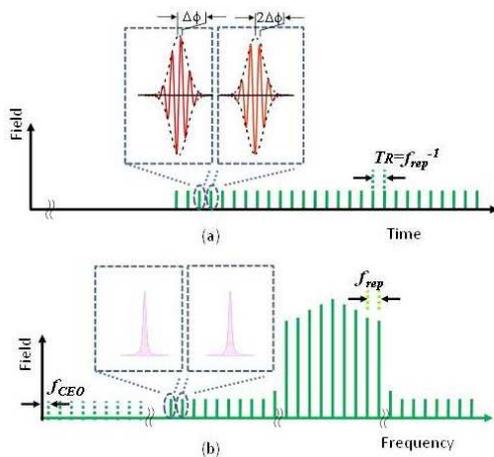


図5 光周波数コム

*1 フェムト秒光周波数コム

図 5.(a)は時間領域において、光源が発する電場の振る舞いを説明する。パルスは中心周波数 ω_c で伝搬する。

パルス間の時間間隔は T_R である。パルスが一回伝搬する

ごとに、電場が包絡線に対して、位相 $\Delta\phi_{cc}$ だけずれる。

図 5.(b) は周波数領域において、電場の振る舞いを説明する。複数の周波数成分が等間隔（繰返し周波数）

$f_{rep} = 1/T_R$ で並んでいる。繰返し周波数にたどって、ゼロ周波数と比較すると、光周波数コムがゼロ周波数

からオフセット周波数分だけ $f_{CEO} = f_{rep} \times \Delta\phi_{cc} / 2\pi$ シフトしている。詳細は文献[18]に譲る。

*2 強めあう干渉

干渉は複数の波が重ね合わせした時、新しい波形ができることである。強めあう干渉は、複数の波が重ね合わせした時、個々の波と谷が揃っているとき、つまり、同位相であるとき、起きる現象である。空間にある一点で個々の波の山と山またはその谷と谷が干渉すると合成した波の振幅の絶対値は大きくなる。このことを強めあう干渉という。

*3 ウィーナーヒンチンの定理

光源のパワースペクトルの逆フーリエ変換は自己相関関数と等しい。自己相関とは、信号がそれ自身を時間シフトした信号とどれくらい一致するかを測る尺度である。マイケルソン干渉計では、物体鏡を固定し、参照鏡をシフトさせることで、信号とそれ自身を時間シフトした信号を実現する。マイケルソン干渉計では、両信号がビームスプリッターで重なり、干渉縞を検出している。このように、干渉縞は光源の自己相関関数を計測している。

*4 ゼロ詰め

ゼロパディング (Zero Padding) とも呼ばれている。ゼロ詰めとは、元のデータの両側にゼロを付け加えることである。時間データに対して、ゼロ詰めすると、DFT ビン (つまり、表示可能な周波数分解能) の間隔を小さくすることができる。これによって、推定したい振幅スペクトルの周波数が DFT ビンに対応していない可能性を低減することができる。周波数領域でゼロ詰めすると、時間領域の間隔を小さくすることができる。これによって、推定したい包絡線ピーク位置が時間サンプリング点に対応していない可能性を低減することができる。

*5 不確定性原理

フーリエ変換はある信号の時間周波数解析のツールである。フーリエ変換に限って、不確定性原理を理解すると、ある信号を短い時間で観察したい場合、その現象に伴う広い範囲にわたる信号周波数成分を取らないといけない。逆に、ある信号を細かい周波数領域で観察したい場合、その現象に伴う長い時間にわたる信号を取らないといけない。言い換えると、短い時間での観察と細かい周波数領域での観察は両立しない。時間観察と周波数観察にトレードオフの関係である。

参考文献

1. Jang, Y.-S., J. Park, and J. Jin, *Comb-mode resolved spectral domain interferometer enabled by a broadband electro-optic frequency comb*. Photonics Research, 2023. 11(1): p. 72-80.
2. Liu, Y., et al., *Proof-of-concept study of the*

全地球測位システムを利用したレーザー測長器における知的信号処理手法の開発

Development of intelligent signal processing methods for laser length measuring instrument using global positioning system

virtual optical scale bar by the pulse-to-pulse interferometry. Optics Express, 2022. **30**(2): p. 2063-2077.

3. Caldwell, E.D., et al., *The time-programmable frequency comb and its use in quantum-limited ranging*. Nature, 2022.

4. Minoshima, K. and H. Matsumoto, *High-Accuracy Measurement of 240-m Distance in an Optical Tunnel by use of a Compact Femtosecond Laser*. Appl. Opt., 2000. **39**(30): p. 5512-5517.

5. Wei, D., et al., *Time-of-flight method using multiple pulse train interference as a time recorder*. Opt. Express, 2011. **19**(6): p. 4881-4889.

6. Pawlowski, M.E., et al., *Multispectral phase-crossing white-light interferometry*. p. 88-93.

7. Wei, D. and M. Xiao, *Frequency selection for reconstruction of fringe envelope using the stability of position on optical axis direction of the phase minimum values of different frequencies*. Optical Engineering, 2019. **58**(8): p. 1-5, 5.

8. Wei, D., Y. Nagata, and M. Aketagawa, *Partial phase reconstruction for zero optical path difference determination using a chirp Z-transform-based algorithm*. Optics Communications, 2020. **463**: p. 125456.

9. Takeda, M., *Fourier Fringe Demodulation*, in *Phase Estimation in Optical Interferometry*. 2014, CRC Press. p. 1-30.

10. Wei, D., Y. Nagata, and M. Aketagawa, *Sub-pixel visualization of the envelope peak in a pulse train interferometer*. Optics Communications, 2020. **476**: p. 126317.

11. Wei, D., et al., *A scanner error discriminator based on short-time Fourier transform in pulse train interferometry*. Optics Communications, 2021. **488**: p. 126816.

12. Olszak, A. and J. Schmit, *High-stability white-light interferometry with reference signal for real-time correction of scanning errors*. 2003. **J**

Optical Engineering (1).

13. Peatross, J. and S.D. Bergeson, *Fourier spectroscopy of ultrashort laser pulses*. 2006. **74**(9): p. 842-845.

14. Chen, D., J. Schmit, and M. Novak, *Real-time scanner error correction in white light interferometry*. SPIE/COS Photonics Asia. Vol. 9276. 2014: SPIE.

15. Ekberg, P., R. Su, and R. Leach, *High-precision lateral distortion measurement and correction in coherence scanning interferometry using an arbitrary surface*. Optics Express, 2017. **25**(16): p. 18703-18712.

16. Luo, S., et al., *Advanced signal processing in a white-light scanning interferometer for exact surface profile measurement*. SPIE/COS Photonics Asia. Vol. 10819. 2018: SPIE.

17. Luo, S., et al., *Signal correction by detection of scanning position in a white-light interferometer for exact surface profile measurement*. Applied Optics, 2019. **58**(13): p. 3548-3554.

18. Jun, Y., H. Schnatz, and L.W. Hollberg, *Optical frequency combs: from frequency metrology to optical phase control*. Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, 2003. **9**(4): p. 1041-1058.

この研究は、平成30年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和元年～3年度に実施されたものです。