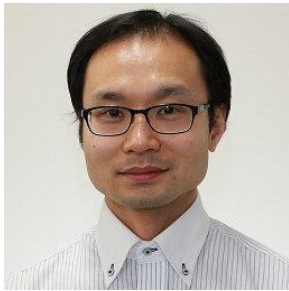


全地球無線測位システムにトレースした長さ計測に関する基盤技術の開発

Development of length measurement technology by tracing to global positioning system



韋 冬 (WEI Dong, Dr. Eng.)

長岡技術科学大学 技学研究院 機械創造工学専攻 助教
(Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering,
Nagaoka University of Technology)

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
フォトニクス分科会 国際光工学会 日本応用物理学会 日本光
学会 日本精密工学会

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

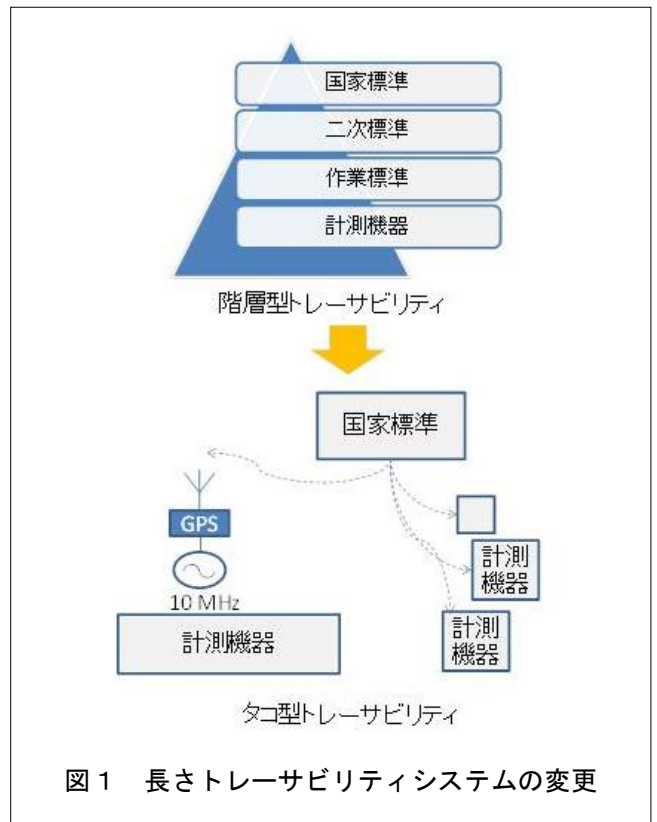
研究専門分野: 制御・システム工学 光工学・光量子工学 計測工学
計算光学

あらまし 国際単位系に七つの基本単位がある。メートルはその一つである。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 299792458m/s である。波長と周波数を掛けると真空中の光速である。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、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 \times (整数+端数)」と表せる。本研究は、全地球無線測位システムにトレースしたパルスレーザー光源を構築した。レーザー光源は、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。波長の代わりに、繰返し間隔長を用いて長さ計測を実現したい。つまり、任意の距離を「繰返し間隔長 \times (整数+端数)」と計測したい。それに必要な整数部と端数部の計測実現法を考案した。長さ計測に関連した基盤技術を開発した。

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、複数の研究グループ [1]-[3] によって研究されている。その研究成果は、宇宙空間で多衛星間の絶対位置計測や姿勢制御、飛行機のボディーに代表されるような大型部品の製造に欠かせない高速精密三次元計測 [4][5] 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。

生産現場において、ゲージブロックなどの流通可能かつ正確な長さ標準として使われている。言い換えると、メートルの媒体はものであった。周波数標準は、光ファイバーまたは全地球無線測位システム (Global Positioning System : GPS) 信号を通して、製造工場や測定室などに配信できる。つまり、メートルの実現及びそのトレーサビリティは、“もの”を通して伝達さ



全地球無線測位システムにトレースした長さ計測に関する基盤技術の開発

Development of length measurement technology by tracing to global positioning system

れる時代から、“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。まず、システムを構築した。また、光周波数コムを用いた長さ計測を実現する際、どのパラメータを「ものさし」として用いるべきかについて考えてきた。本稿では、これまでに得られた結果[6]-[20]について簡単に述べる。

2. 従来法

波長は安定した物差である。そのため、任意の距離を「波長×(整数+端数)」と表せる。正弦波を考える。隣接した山から山、または谷から谷の距離が一波長である。波長を用いて長さを評価したとき、スタート点を谷と仮定する。評価したい長さがぴったり谷から谷の距離になると、整数部が谷の数になる。谷からのずれ量は端数である。

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を利用して、整数部と端数部の計測について説明する。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。

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。両波が強めあって干渉²し、光検出器で得られる干渉信号の振幅が最大となって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いたと仮定する。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。参照鏡と物体鏡からの反射光の波形は同じになる。両波が強めあって干渉し、光検出器で得られる干渉信号の振幅が最大となり、再び明るいポイントとなる。

このようにして、明るい干渉ポイントをカウントして、整数部を計測することができる。位相系などを用いて、干渉縞が現在の位置（ここでは、明るいポイント）からどのぐらいずれているのかを評価し、端数部

を計測できる。整数部と端数部が分かれば、「波長×(整数+端数)」のように長さを評価できる。

上記の説明からわかるように、波長を使って長さを評価したとき、その整数部と端数部を計測する必要性がある。

3. 提案法

2009年7月、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。光周波数コムから出た周波数を安定させるには、繰返し周波数とオフセット周波数の両方を安定させる必要性がある。本研究は、光周波数コムの繰返し周波数のみを安定させ、繰返し間隔長を長さの「ものさし」として用いる。

本研究の方法論として、波長と繰返し間隔長の対称性に注目し、計測に使われる物差を議論してきた[21]-[24]。まず、波長と繰返し間隔長の対称性について述べる。周波数と波長との掛算は、真空中の光速になる。繰返し周波数と繰返し間隔長との掛算も、真空中の光速になる。波長と繰返し間隔長は、周波数パラメータに逆比例しているため、波長と繰返し間隔長には対称性がある。

波長は、これまでにメートルの実現に使われてきた。光周波数コムの繰返し周波数も安定しているため、繰返し間隔長もメートルの実現に使えることが分かる。繰返し間隔長を用いて任意の長さを表現したとき、必要な整数部と端数部の計測法をそれぞれ研究している。

4. 実験

実施した実験について述べる。

4.1 GPS 信号にトレーサブルなパルス光源

GPS アンテナ (Spectracom) で GPS 信号を受信する。常に 5 から 11 個の衛星から信号を受けている。図 2 は、衛星信号を受信している様子を示す。受信した GPS 信号を GPS 周波数標準 (Spectracom) に入力する。GPS 周波数標準から出た信号 (10 MHz) を周波数カウンタ用と信号合成用に分ける。信号合成用の信号は周波数合成器 (ディエステクノロジー) に入力する。周波数合成器からは光周波数コムの繰返し周波数に近い周波数を発生させる。光周波数コムの繰返

全地球無線測位システムにトレースした長さ計測に関する基盤技術の開発

Development of length measurement technology by tracing to global positioning system

し周波数を周波数合成器から出た安定した周波数にロックさせる。このようにして、光周波数コムとの繰返し周波数の安定化を実現する。図3にロックした繰返し周波数の変動を示す。

光周波数コムとの繰返し周波数の安定化の評価を行った。その結果を図4に示す。

繰返し周波数の可変性を実験した。繰返し周波数をロックした状態で繰返し周波数を増加させ、変化量が67Hzだった。これは、繰返し間隔長の変位4 μ mに相当する。また、別の値で繰返し周波数をロックしたとき、繰返し周波数を減少させ、変化量177Hzだった。これは、繰返し間隔長の変位11 μ mに相当する。3回同じ実験を繰り返した。上記の値はその中の最小値である。

落雷によって、繰返し周波数のロックが外れたことも確認した。図5にそれを示す。

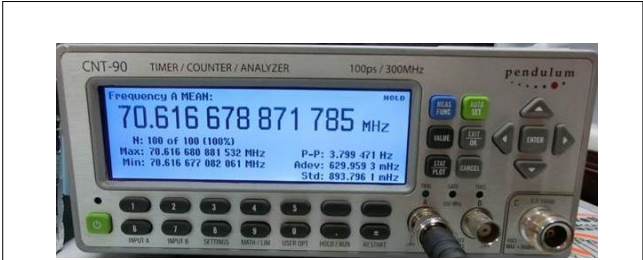


図2 GPS信号にロックした周波数標準



図3 繰返し周波数の変化状況

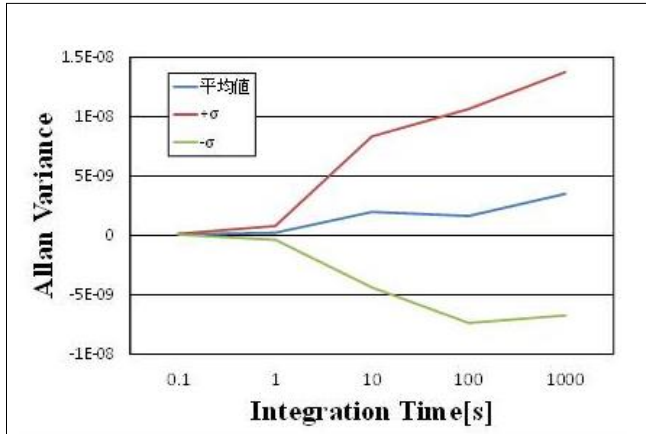


図4 繰返し周波数の安定性

4.2 干渉計の構築

光周波数コムを用いたマイケルソン干渉計を考える。物体鏡を移動したとき、異なるパルス列しか干渉しないため、離散した干渉縞の強度変化しか得られない。従来にあるマイケルソン干渉計において、端数部に関する情報がない。この問題を解決するために、複数マイケルソン干渉計を重ねた干渉計[25][26]を提案した。一つの干渉縞は、従来にあるマイケルソン干渉計で得られるパルス列の自己相関である。もう一つの干渉縞は、アンバランスなマイケルソン干渉計で得られるパ



図5 落雷による繰返し周波数のロック外れ

ルス列間の相互相関である。両干渉縞からピークを推定し、両ピーク間の距離は、計測する長さを繰返し間隔長で割った端数に相当する。

全地球無線測位システムにトレースした長さ計測に関する基盤技術の開発

Development of length measurement technology by tracing to global positioning system

4.3 信号処理 - 端数部の推定 -

干渉縞から包絡線を再生し、そのピークを高精度で推定することが本研究に重要である。構築した干渉計で干渉縞を観察した。従来、フーリエ変換法によって干渉縞の包絡線を再生した。ティーガ・カイザエネルギー演算子 (Teager-Kaiser Energy Detector: TKED) を用いた包絡線ピーク推定について検討した。その結果、これまでに報告された TKED は、雑音の影響を受けやすいことを確認した。また、データのサンプリング点数がティーガ・カイザエネルギー演算 (TKEO) による包絡線推定に影響することを見つけた[13]。

4.4 信号処理 - 整数部の推定 -

空気の群屈折率は、パルスが持つ中心波長によって異なる。異なる中心波長のパルスペアが、同じ光路を通して、温度、気圧や湿度などの環境パラメータは同じであるが、得られる長さが異なる。言い換えると、異なる中心波長のパルスペアで得られた光学的距離差が存在する。真空中の長さとは異なる中心波長のパルスペアで得られた光路差に一对一の関係がある。100MHz の繰返し周波数は、3メートル (往復) の繰返し間隔長に相当する。本研究は、パルスが往復で 3m, 6m, 9m, ... を走ったとき、温度などが変化した場合、異なる中心波長のパルスペアで得られた光路差を用いて、3m, 6m, 9m, ... を区別できるかどうか数値計算で試算した[10]。実験系を構築した[16]。

4.5 不確かさの評価

長さ計測した場合、推定された値に対して、不確かさを評価する必要がある。波長と繰返し間隔長は異なる屈折率を経由して、空气中で計測した長さを真空中の長さに変換する必要がある。その変換の過程で用いる屈折率の違いから生じる不確かさの差は無視できる。位相屈折率と群屈折率に対して、その感度係数^{*3}に大差がないことを確認した[21]。また、位相屈折率と群屈折率に由来する不確かさに大差がないことも確認した[27]。実験室で、温度、気圧や湿度の環境パラメータを測り、位相屈折率と群屈折率に由来する不確かさを比較した[19]。

5. まとめ

本研究では、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、波長の代わりに繰返し間隔長を用いて、長さ計測を実現する可能性を検討している。長さ計測を実現するために、必要な整数部と端数部の計測実現法、屈折補正、そして、不確かさ評価を考案・考察した。関連した基盤技術を開発した。その結果、空气中における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。

用語解説

*1 フェムト秒光周波数コム

図 6 (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 $\Delta\phi_{ce}$ だけずれる。図 6 (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。繰返し周波数を辿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 $f_{CEO} = f_{rep} \times \Delta\phi_{ce} / 2\pi$ シフトしている。詳細は文献[28]に譲る。

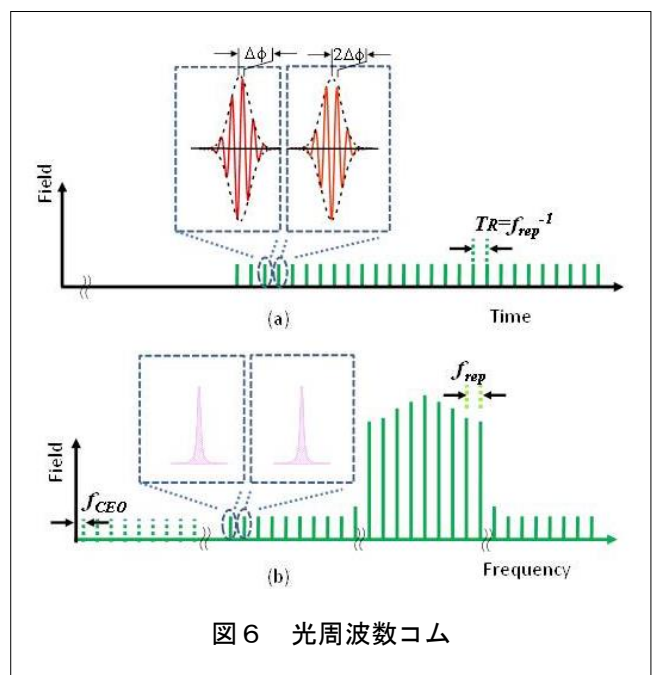


図 6 光周波数コム

全地球無線測位システムにトレースした長さ計測に関する基盤技術の開発

Development of length measurement technology by tracing to global positioning system

*2 強めあう干渉

干渉とは、複数の波が重ね合わせしたとき、新しい波形ができることである。強めあう干渉は、複数の波を重ね合わせしたとき、個々の波と谷が揃っているとき、つまり、同位相であるときに起きる現象である。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 感度係数

屈折率が温度や湿度の変化を受けたときの屈折率の変化度合を表す。

参考文献

- [1] Coddington I, et al., Rapid and precise absolute distance measurements at long range. *Nat Photon*, 2009. 3(6): p. 351-356.
- [2] Wang, X., et al., Spatial positioning measurements up to 150m using temporal coherence of optical frequency comb. *Precision Engineering*, 2013. 37(3): p. 635-639.
- [3] Jang, Y.-S., et al., Comb-referenced laser distance interferometer for industrial nanotechnology. *Scientific Reports*, 2016. 6: p. 31770.
- [4] Matsumoto, H., K. Sasaki, and A. Hirai, 103-km-Long Remote Measurements of End Standards Using Low-Coherence Optical-Fiber Tandem Interferometer in Experimental Room. *Japanese journal of applied physics*, 2005. 44(8): p. 6287-6288.
- [5] Sudatham, W., et al., Non-contact measurement technique for dimensional metrology using optical comb. *Measurement*, 2015.
- [6] Wei, D. and M. Aketagawa. Realization of length traceability by a femtosecond optical frequency comb. in *11th Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry*. 2014.
- [7] 韋冬 and 明田川正人. GPS 制御周波数標準にトレース可能な長さ計測. in *光計測シンポジウム 2014 論文集*. 2014.
- [8] Wei, D. and M. Aketagawa. Recent progress on length measurement using a comb laser interferometer. in *6rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN)*. 2015.
- [9] Wei, D. and M. Aketagawa. Uncertainty in length conversion for length measurement using a comb laser interferometer. in *International Symposium on Optomechatronics Technology (ISOT 2016)*. 2015.
- [10] Wei, D., M. Xiao, and M. Aketagawa, Using dispersion-induced group delay to solve the integer ambiguity problem: a theoretical analysis. *Journal of the European Optical Society - Rapid publications*; Vol 10, 2015: p. 15035.
- [11] 韋冬 and 明田川正人. GPS 周波数標準にトレースした光周波数コムとその周波数安定性. in *第 62 回応用物理学会春季講演会論文集*. 2015.
- [12] 韋冬 and 明田川正人. パルス列繰返し間隔長を用いた長さ計測:進捗報告. in *光計測シンポジウム 2015 論文集*. 2015.
- [13] 韋冬 and 明田川正人. 非線形演算子による干渉縞包絡線ピーク検出. in *第 76 回応用物理学会秋季講演会論文集*. 2015.
- [14] 韋冬 and 明田川正人. パルス繰返し間隔長を利用した測長法における整数部決定問題-分散による群遅延を利用した方法-. in *日本光学会 Optics and Photonics Japan 2015 講演予稿集*. 2015.
- [15] 酒井康裕, 韋冬, and 明田川正人, パルスの繰返し間隔長を用いた長さ計測 -第 2 報:時間分割を用いた長さ計測-, in *2016 年度精密工学会春季大会学術講演会 2016*. p. 61-62.
- [16] 成田優, 酒井康裕, 韋冬, and 明田川正人, 群分散遅延を利用した多パルス列干渉による絶対長さ計測 -第 1 報 理論確認と予備実験-, in *2016 年度精密工学会春季大会学術講演会 2016*. p. 35-36.
- [17] 韋冬 and 明田川正人. パルス列繰返し間隔長を用いた長さ計測における要素技術開発. in *光計測シンポジウム 2015 論文集*. 2016.
- [18] Wei, D. and M. Aketagawa, Time division approach to separate overlapped interference fringes of multiple pulse trains of femtosecond optical frequency comb for length measurement. *Optics Communications*, 2017. 382(2): p. 604-609.

全地球無線測位システムにトレースした長さ計測に関する基盤技術の開発

Development of length measurement technology by tracing to global positioning system

- [19] Wei, D. and M. Aketagawa. Uncertainty change in length conversion affected by change in environmental parameters. in Proc. SPIE 10256, Second International Conference on Photonics and Optical Engineering, 2017.
- [20] 韋冬, et al. (招待講演) 光周波数コムを用いた長さ計測—パルス列繰返し間隔長という新たな物差の構築—. in レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会, 2017.
- [21] Wei, D. and M. Aketagawa, Characteristics of an adjacent pulse repetition interval length as a scale for length. *Optical Engineering*, 2013. 53(5): p. 051502-051502.
- [22] Wei, D., K. Takamasu, and H. Matsumoto, A study of the possibility of using an adjacent pulse repetition interval length as a scale using a Helium–Neon interferometer. *Precision Engineering*, 2013. 37(3): p. 694-698.
- [23] Wei, D. and M. Aketagawa, Comparison of length measurements provided by a femtosecond optical frequency comb. *Optics Express*, 2014. 22(6): p. 7040-7045.
- [24] Wei, D. and M. Aketagawa, Comparison of two-color methods based on wavelength and adjacent pulse repetition interval length. *Journal of the European Optical Society - Rapid publications*; Vol 9, 2014: p. 14031.
- [25] Wei, D., et al., Analysis of the temporal coherence function of a femtosecond optical frequency comb. *Opt. Express*, 2009. 17(9): p. 7011-7018.
- [26] 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.
- [27] Wei, D. and M. Aketagawa, Uncertainty in length conversion due to change of sensitivity coefficients of refractive index. *Optics Communications*, 2015. 345(15): p. 67-70.
- [28] 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 25 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 26 ~ 28 年度に実施されたものです。