

現代社会・産業に貢献する 光コム応用計測システムの提案

産総研名誉リサーチャー，知的計測処
松本弘一

1. はじめに

これからの社会では、一カ所における巨大工場ではなく、多くのクラスターの集合体による工場が要求される。特に、人間の日常生活を重視する外に、少子化が大きな問題になっている。このような状況において、生活環境の良い場所で働くことを可能にする外に、女性や男性が働ける環境は、職場に近いことも重要である。そして、シニア世代が支援することも有効であると考えられる。

一方、製品の高品質化や施設の安全・安心を担保することも求められる。特に、外国に輸出するためには、計量法におけるトレーサビリティを確保し、相互承認協定によって貿易における関税の障壁を無くすることが重要である。このため、トレーサビリティを取ったうえで遠隔計測を実現するために、光通信用光ファイバーを利用した長さ計測法を確立した¹⁾。

1996年ごろ、図1に示すように、東京電力(株)の実用通信用光ファイバーを、20 km 長だけ借りて実証実験を行った。その結果、呼び寸法 251 mm のブロックゲージを 30 nm の精度で測定できた。しかしながら、日本には、現在多くの光ファイバー網があり、実際に使われていないダーク光ファイバーも非常に多く存在するが、適当な値段で一般の人に開放してないために、先の業務が行き止まりになっていた²⁻⁴⁾。

丁度、1998年ごろに、フェムト秒パルス用のホトニックファイバーが英国バース大学で製作され、スペクトルのブロード化に成功した。私達も共同研究を行った。このブロード光は、繰り返し周波数が一定であり、光周波数コム(光コム)と呼ばれた。このコムは、図2に示すように、多くの分野で利用できる多くの機能を持っているので、計量法における特定長さ標準器として採用された。この機能を利用すれば、多くの種類の計測に有効である⁵⁾。

本稿では、一般ユーザーも使いやすいように、低コストで、スマートな光コムを開発したので、現在の産業・社会に貢献できる計測システム技術体系に関して提案する。

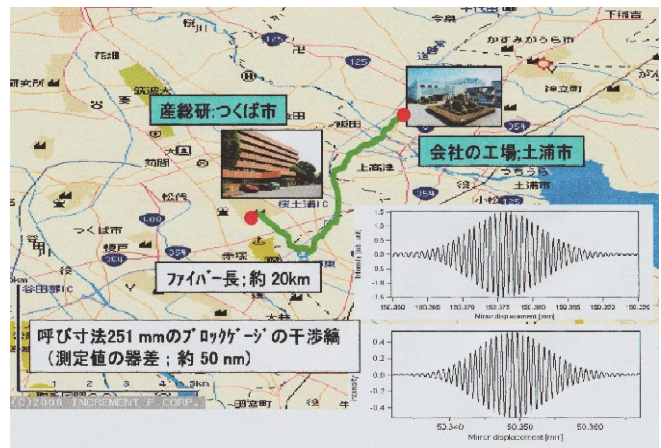


図1 通信用光ファイバー網を期待した遠隔測定

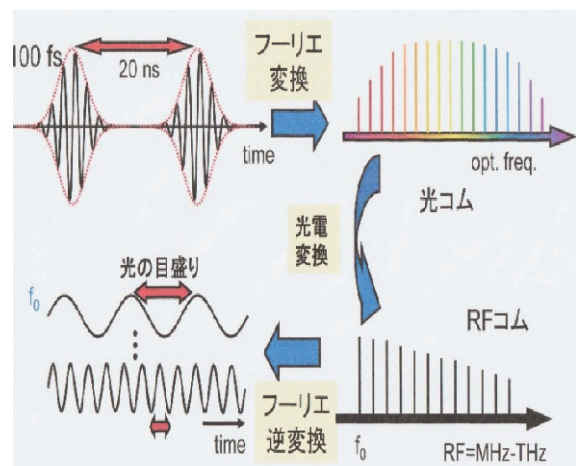


図2 光周波数コムの機能に関する模式図

2. キーとなるスマートな技術

2-1 光周波数コム光源

図3に示すように、光コムレーザー発振に必要な部品をできるだけ削減した。その中で、大きな部分を占めるのが、偏光調整器 Pol.である。これは、光ファイバーに引っ張り・捻じれを与えて位相変化を変える。3個の部分でそれぞれ、 λ 、 $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ の位相を変える機能を有している。そして、共振器において、空中部分を無くした。この結果、部品代(約25万円)を減らすことができる外に、外部振動や大気ゆらぎの影響も減らすことができた。そして、低コスト化を実現でき、安定したレーザー発振が得られた。また、レーザーボックスのサイズは、 $33\text{ cm} \times 23\text{ cm} \times 9\text{ cm}^t$ であり、コンパクトなレーザーとなっている。さらに、大きさは、必要に応じて、全体の体積で3分1以下にすることができる。

レーザーの出力パワーは $1\sim 2\text{ mW}$ 、中心波長は $1.55\text{ }\mu\text{m}$ であり、光コムの繰り返し周波数 fr は、 $34\sim 37\text{ MHz}$ である。繰り返し周波数を高くするには、一般に、光ファイバーエタロンを用いればよい。しかしながら、計測用に利用できる光パワーが小さくなり、これを大きくするために、干渉計としてタンデムレーザー干渉計を用いれば、元のままの繰り返し周波数が小さくても問題が無い。そして、 fr のふらつきは、数 Hzであった。なお、光周波数コムのスペクトルは、図4に示すように、 $30\sim 80\text{ nm}$ に偏光器で調整することができる。また、光コムの繰り返し周波数 fr の安定性を調べるために、2台の光コムで $fr1=34.876\text{ MHz}$ と $fr2=34.709\text{ MHz}$ のビート信号は同図に示すように、安定したビートが形成された。

このことは、同じ方式のレーザーであるので、弱いドリフトがあっても、同一方向であるので、キャンセルされると考えられる。また、ドリフトの原因は温度の影響であることが推察される。実際の応用においては、GPSの周波数と光コムの周波数とのビート信号が一定になるように、位相ロックをかけるので、非常に安定し光コムとなる⁶⁾。

2-2 光周波数コムのスマートな利用タンデム干渉計

光コムを光源とした応用計測技術は、多くの論文が発表されているので、本稿では詳細には紹介しないが、超精密さというよりは、低コスト化に的を絞ると、ファブリー・ペロー・エタロンなどを利用するよりも、タンデム干渉計の方が有利である。何故なら、実際の計測に利用できるレーザーのパワーが大きいからである。また、光ファイバーをうまく利用して、干渉計の安定性に関して有効である。さらに、光ファイバーはシングルモードであれば、外乱を受けない上に、場所がとらない。そして、干渉計を小さな箱に入れることも容易である。

図5に応用例の一つを示し、その優位性を示す。光源は新しく開発した光コム(図3)である。出力レーザーは、光ファイバーからであるので、光ファイバーサーキュレーターによって、第一の干渉計に向かう。ここでは、干渉計が遅延光路となっている。光ファイバーの端面は反射コーティングが

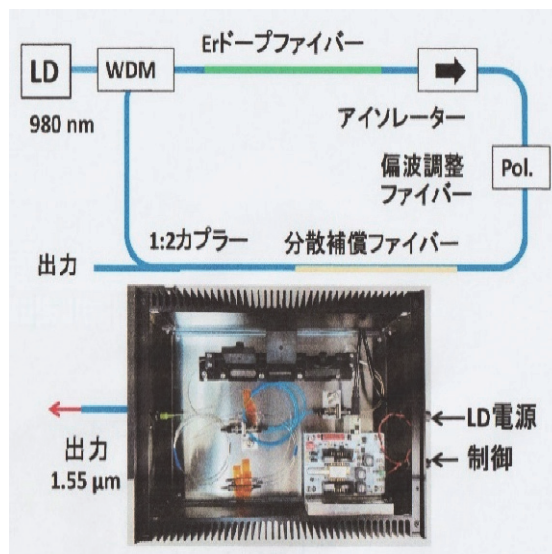


図3 開発した低コスト光コム

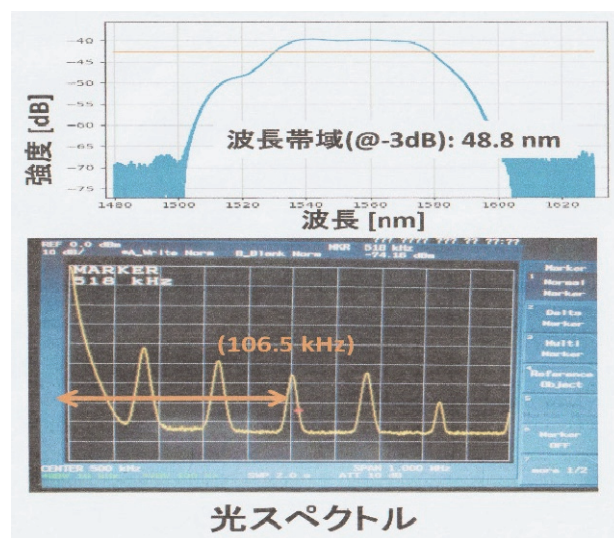


図4 波長スペクトルと2台のビート信号

施されており、フィゾーの干渉計の考えに近い。この反射率については遅延回数が多くなると、レーザーパワーが小さくなるが、7回位までは問題が無く、減衰量が小さい。実際、距離測定器、長尺ステップゲージ、三次元測定機の校正において、7点の測定を行う7点法が採用されている。

これらの遅延光は、第二の干渉計に入射し、遅延長さと測定長さが一致するところで、低コヒーレンス干渉縞と同じ信号が形成される。同図では、ゼロ光路長を光ファイバーの中に設けているので、計測物体の近くだけが、空中に出ているようにして、大気の影響や機械的振動の影響が小さくさせている。従って、小さい長さ測定や粗面物体の測定などにも有効である。さらに、干渉縞の計測に必要な光路走査装置を無くした。代わりに、分光干渉法を適用した。つまり、回折格子を回転させて光検出することによって、干渉縞をスペクトルとして取得する。さらに、光検出器からの信号を電気機器でフーリエ変換を行うと、第一と第二と干渉計の差が同図に示すように、実時間で得られるので、測定時間が短くなり、実時間計測となる⁷⁻⁸⁾。

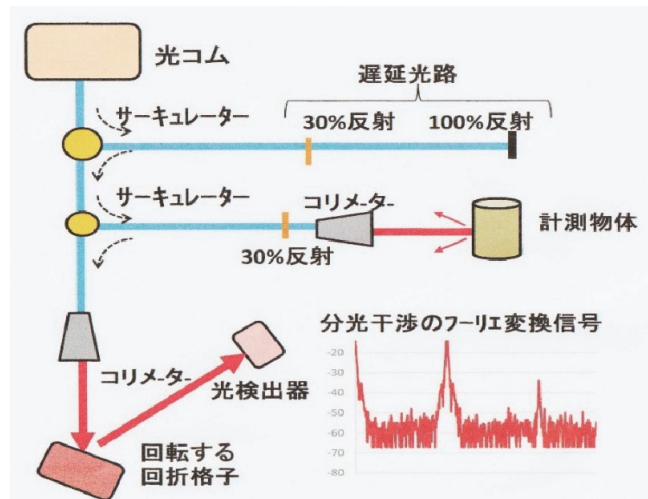


図5 スマートな実時間干渉計の例

3. 光コム周波数と GPS 技術の展開

3-1 GPS 周波数への位相ロック

本光コムシステムの電気系は1Wの以下の電力であるので、発熱量は非常に小さい。大きな影響は、レーザー装置の設置場所の環境である。従って、断熱材で装置をカバーすれば、 f_r の値はかなり一定している。周波数標準として用いるのはGPSの電波の周波数である。最近、GPS信号(周波数; 1575.42 MHz)は、簡単な小さなアンテナで受信することができるようになった。空中に位置するGPSの周波数と光コム周波数 f_a との位相ロックに関して述べる。まず、光コムをブロード周波数検出器で取得した信号には、1575.42 MHzに近い周波数の信号が存在する。つまり、 f_a 信号とGPS信号とをミキシングすれば、17.5 MHz以下の周波数のビート信号が発生される。

実際は、この信号をシンセサイザーでもう少し低周波数にダウンさせれば、取り扱いが容易になる。次に、光コムの安定化には、共振器の光ファイバーの一部を電歪素子PZTで伸縮させれば良い。しかしながら、光コムを設置している場所は、 ± 1 °C以下の温度で設定できる。この設定はゆるやかな温度変化となるので、 f_r の安定化には光コムの共振器の一部のファイバーを温度制御するのが簡便である。このような結果、 f_r の値は、 10^{-8} 以下の精度に保つことができる。

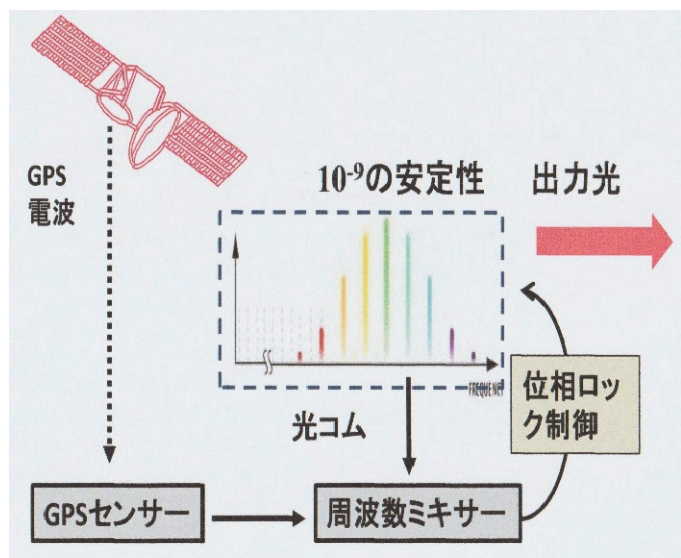


図6 GPSによる光コム周波数の絶対値の安定化

3-2 低コスト光周波数コムによる光ファイバー網からの脱却

図7に示すように、光コムが低コストになっているので、ダーク光ファイバーによって光コムのレーザーを伝送しなくても、どのような場所でも、GPS周波数によって、国家標準にトレーサブルな光コムが実現されることになる。つまり、長さ標準器である低コスト光コムを気軽に設けることができる。図7は基本的に図6と同じであるが、離れた所にある同族会社の一体感の確保が出来ることを示したものである。また、日常生活する場所と工場とが近くすることができる。場合によっては、小さな島でもよいし、国外であっても良い。なお、もっと正確な周波数が必要な場合は、GPSを利用して、国家時間・周波数標準器で校正すれば問題が無い。

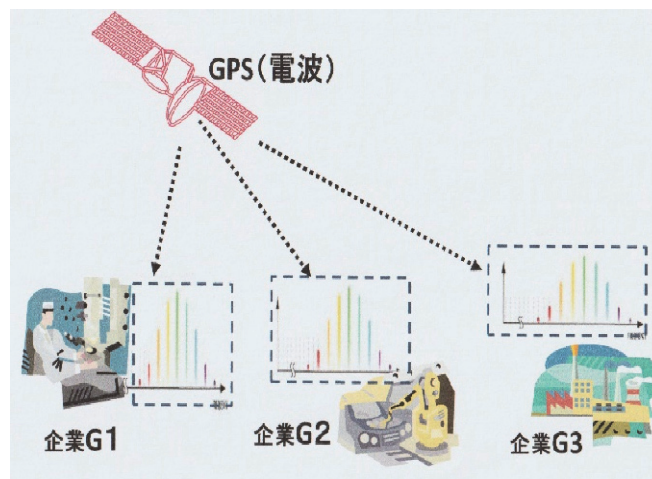


図7 企業体ごとに光コムの設置

図8に示すように、光コムレーザー直接利用することも可能である。レーザーは光ファイバー機器の安定した位置まで導き、ファイバーコリメーターでビーム径を拡大し、測定したい位置に固定されたボールレンズに入射させる。この直径10mmφのボールレンズはガラスの屈折率が2.0であるので、どの方向からもレーザービームをコリメーターに戻すことができる。このようにして、巨大な機器に対しては、光コムを独占的に利用して、常時・実時間でチェックを行い、絶対測距が測定できるので、安全性の確保や精密な機械の移動により、業務の効率化が促進される。

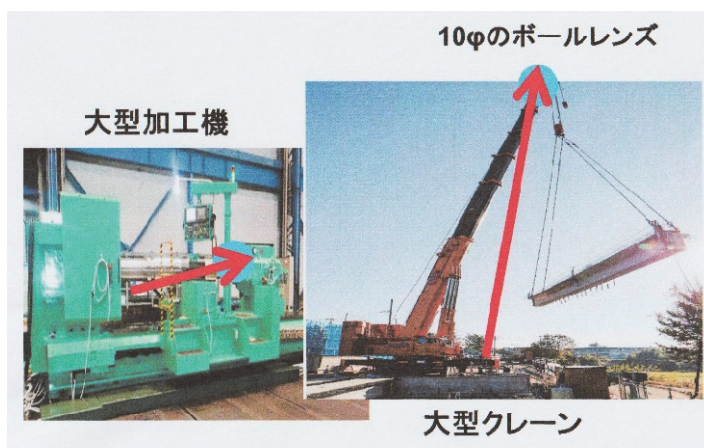


図8 大型装置の実時間計測の例

4. スマートな産業・社会のパラダイス

最近、急速に進展している三次元プリンターの場合、製品の品質管理が必須である(図9)。このプリンター技術は、家のような大きな物体を製作できるようになっている。この場合も、品質管理はもっぱら画像計測であるので、正確なものさしが必要であり、光コム干渉計が有効である。この場合、経年変化の検査も必要である。また、小さい物体に関してはナノメートルの領域に入っている。光コムの応用はピコメートルオーダーの計測にも有効である⁹⁾。これらの製作物は、相対精度が1ppmの精度が要求されることもある。

輸送に関しては、ドローンの発展が期待できる。小物の製作物は、特に、緊急性が求められることが多いので、有効である。



図9 三次元プリンターの標準機

最近、構築されている半導体工場のような大型施設においては、工場の近くに小企業を構えるのも有効である。一般的には、リモートワークが盛んになってきているが、主に、設計のようなデスクワークが多い。実験分野においても、遠隔での実験による特許の設計・新製品の製作が重要であると考えられる。特に、子育ての世代は、各種の職業を選択できるので、社会の発展に貢献できる。図 10 はこれらのことを、模式的に描いた図である。

5. まとめ

以上、低コストでスマートな光コムの開発によって、GPS とリンクして、新しい産業・社会システムの構築が可能であることを示した。豊かな社会を築くためには、三次元プリンターとドローンとの連携を行うことが期待される。さらに、計量法のトレーサビリティをとることによって、相互承認協定に合格できるので、貿易の関税の障壁は避けられる。

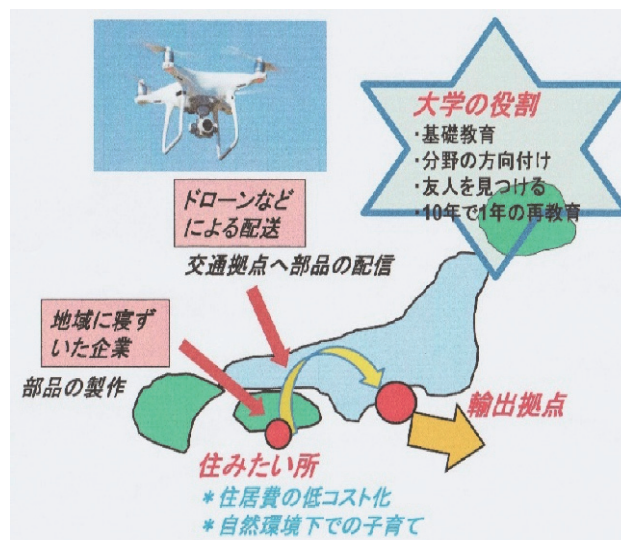


図 10 製作物の輸送にドローン

参考文献

- 1) 松本弘一, “増田秀征; “コロナ社会に貢献する光コム応用社会システムの検討”, OPJ20, (2020)11月 16 日予稿集。
- 2) 松本弘一; “計量取トレーサビリティで社会を支える遠隔校正技術と展望”, 応用物理, Vol.76, No.6(2007)pp.599-605.
- 3) H. Matsumoto, K. Sasaki ; ”Remote Measurement of Practical Length Standards Using Optical Fiber Networks and Low Coherence interferometers”, Jpn. Appl. Phys., Vol.46, No.11(2008) pp.8590-8594.
- 4) 山林由明, 吉本直; “光ファイバと無線による融合 IoT ネットワークが開く非都市部サービスの可能性”, 光アライアンス, Vo.31, No.6(2020)pp.34-38.
- 5) 松本弘一; “遠隔測定と現代社会”, 光アライアンス, Vo.31, No.11(2020)pp.37-41.
- 6) 松本弘一; “光周波数コム計測技術の進展と期待”, OPTRONICS, No.3(2014)pp.62-67.
- 7) 松本弘一; “長さ標準—歴史, 現状, 今後—”, 精密工学会誌, Vol.80, No.7(2014)pp.630-633.
- 8) 松本弘一; “回転回折格子による分光干渉計を用いた長さ・位置の測定”, 光アライアンス, Vo.31, No.6(2020)pp.39-43.
- 9) 松本弘一; “空間位置の光学測定に寄与する光ファイバーエタロン技術の開発”, 光技術コンタクト, pp.32-.
- 10) M. Kajia, H. Matsumoto ; ”Picometer positioning system based on a zooming interferometer using a femtosecond optical comb”, OPTICS EXPRESS, Vol.16, No.3(2008) p.1947.



松本弘一 MATSUMOTO, Hirokazu
国立研究開発法人 産業技術総合研究所
知的光計測処
名誉リサーチャー
hiro23_matsu@yahoo.co.jp