

# シングルモードの特性を応用した光コリメータの簡易製造方法

## 光路長の変化から行う予測調芯

著者	三浦 陽太, 柳田 慎吾, 三上 溪太郎, 齊藤 健治, 丹羽 洋介, 松浦 寛, 熊谷 正朗, 小澤 哲也
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	55
号	1
ページ	29-33
発行年	2021-02
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1204/00024692/">http://id.nii.ac.jp/1204/00024692/</a>

# シングルモードの特性を応用した光コリメータの簡易製造方法 光路長の変化から行う予測調芯

## A Simple Method for Manufacturing Optical Collimators Using Single-Mode Characteristics

### Predictive alignment based on changes in optical path length

三浦 陽太*	柳田 慎吾*	三上 溪太郎**	齊藤 健治***
Yota MIURA	Shingo YANAGITA	Keitaro MIKAMI	Kenji SAITO
丹羽 洋介**	松浦 寛*	熊谷 正朗*	小澤 哲也*
Yosuke NIWA	Hiroshi MATUURA	Masaaki KUMAGAI	Tetsuya OZAWA

**Abstract:** We proposed new alignment techniques that change the optical path from the lens to the beam waist to accelerate production time. In this study, the length of the optical path was varied by inserting or removing the parallel plates or wedge-shaped prisms made of BK7, or by reciprocating the total reflection mirror. The predictive alignment method was performed by calculating the optimal value based on a unique relationship between the coupling loss and beam waist position. The coupling loss was reduced to less than 0.3 dB and the alignment time was reduced when compared to the conventional method.

**Keywords:** optical collimator, gaussian beam, beam waist, coupling efficiency

## 1 緒言

一般に、光通信システムで使われる通信用光モジュールは光軸垂直方向、角度、光軸方向の軸ずれによる光損失が低くなければならない。光軸方向の結合効率を決める重要な要素としてはビームウェスト距離の依存性がある。ビームウェスト距離は光軸を調芯することで調整する。

一般的な製造方法では光ファイバ、レンズ及び全反射ミラーを3軸以上の自動ステージを用いて光軸を調芯している。この方法では角度、および位置ずれによる損失を軸ごとにパワーメータでの計測と調芯を繰り返すため時間がかかるという欠点がある。この時、光コリメータの結合効率はシングルモードがもつビームウェスト距離に大きく影響するため、精密な光軸調芯が必要となる。

本研究では、平行平板や楔型プリズムの挿抜による調芯方法を開発した。いずれの方法も光路中にBK7からなるガラス材を挿抜し、空気との屈折率差により光路長を変化させる。それにより、ビームウェスト距離を変化させ、2軸で光軸調芯を行うことができた。プリズムを利用した光軸調芯では、連続的に光路差を変化させることが可能となり、高速化や調芯精度の向上を実現した[1-4]。

また、全反射ミラーの位置を一定の速度で連続的に可変し、光路長を変動させることで調芯する手法も開発した。実際の製造では全反射ミラーの位置は固定しているが、自動ステージにより連続的に位置を前後に移動させ、この時の結合損失の変化を計測することで光軸調芯を行う。この方法では光路中にガラス材を挿入しないため、平行平板や楔型プリズムの挿抜による調芯方法より短いビームウェスト距離での調芯に有効な手法であることが分かった。

\* 東北学院大学大学院

\*\* 東北学院大学大学院(現:株式会社フジクラ)

\*\*\* 東北学院大学大学院(現: DISCO Corporation)

## 2 従来の調芯プロセス(CM type)

光モジュールの概略構造を図1に示す。2つの光コリメータ(以後、OC : Optical Collimator と呼ぶ)がパイプ状の筐体内部で対向している。OCは光ファイバを固定するフェルール、光ファイバから開口数  $NA = 0.1$  で拡がり出射する光を平行光にするコリメートレンズ、これらを固定するレンズスリーブから構成される。それぞれの部品は、接着剤やソルダーリング、または YAG レーザ溶接で固定する。ビームウェストを持つ OC 同士を最適結合させるには、対向距離の半分の位置にビームウェストを調芯した OC を使用する必要がある。

本研究における光学系を図2に示す。光源から出た光は光ファイバを通り、3 dB カプラを通過して OC へ進む。OC 内の光ファイバ端面を出射した光は、レンズにより平行光にされる。光ファイバのコア径が  $0.01 \text{ mm}$  あるため、点光源ではなくビームウェストを持つ平行光となる。全反射ミラー(以後、RM: Reflection Mirror と呼ぶ。)は OC 対向距離の中間にあるビームウェスト距離に設置する。RM で反射した光は再び OC に戻され、3 dB カプラを通過しパワーメータで計測される。この計測値が最大になるように、RM の角度  $(\theta_x, \theta_y)$  と光ファイバとレンズ間の距離  $Z_f$  軸を調整するピークサーチを行う。OC の損失が最小のときの光ファイバの位置を  $Z_f \text{ OPTIMUM}$  とする。LabVIEW プログラムによる自動調芯は動作開始時に目視で確認しながら手動で調芯する必要があるが、動作開始後は自動的に追従し自動調芯できる仕様となっている[8,9]。

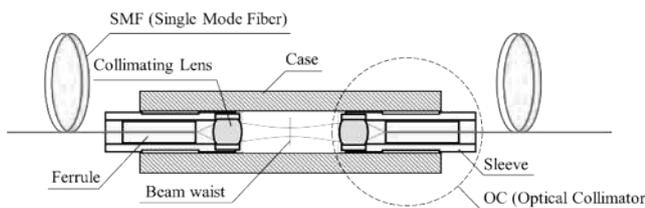


Fig. 1 Cross-sectional view of optical module

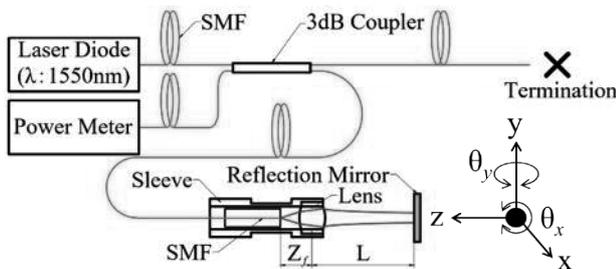


Fig. 2 Experimental system of optical collimator

## 3 ビームウェスト位置の算出

1枚レンズ系における像変換の概念図を図3に示す。ビームウェスト距離  $L$  は式(1)で示すことができる[5-7]。使用するレンズの焦点距離は  $f = 1.81 \text{ mm}$ 、レーザの波長は  $1,550 \text{ nm}$ 、光ファイバの開口数  $NA = 0.1$  である。式(2), (3)よりコア径  $\omega_1$  ( $0.005 \text{ mm}$ ) の光ファイバから出たビームはレンズによってビームウェスト径  $\omega_2$  のビームに変換される。ビームウェスト距離の補正はこれらの計算式をもとに行う。シングルモードのビームウェスト距離とビーム径を図4に示す。ビームウェスト距離は最大  $35 \text{ mm}$  を境に光ファイバとレンズ間の距離が長くなるにつれ、像変換後のビームウェスト径  $\omega_2$  が縮小する。そのため、 $Z_f$  位置の変化とビームウェスト距離の関係を見ると、ビームウェスト距離が同じでも異なるビームウェスト径を持つ  $Z_f$  位置が2つある事が分かる。また、ビームウェスト径  $\omega_2$  が縮小するとともに、ビームウェスト距離の変化は次第に緩やかになる。本研究ではビームウェスト径が小さい場合の  $Z_f \text{ OPTIMUM}$  を目標に光軸調芯を行った。

これは、ビーム径が大きい場合の  $Z_f \text{ OPTIMUM}$  は  $Z_f$  位置の変化によるビームウェスト距離の変化が非常に大きく、使用している自動ステージの分解能ではプログラムによる自動調芯ができないためである。また、2つの OC を対向する場合にビームウェスト距離が同じであってもビームウェスト径が異なっていると光損失は大きくなる。

$$L = \frac{\left(\frac{\pi\omega_1^2}{\lambda}\right)^2 \frac{1}{f} - Z_f \left(1 - \frac{Z_f}{f}\right)}{\left(\frac{\pi\omega_1^2}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{1}{f}\right)^2 + \left(1 - \frac{Z_f}{f}\right)^2} \quad (1)$$

$$\omega_1 = \frac{\lambda}{\pi \cdot NA} \quad (2)$$

$$\omega_2 = \omega_1 \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\pi\omega_1^2}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{1}{f}\right)^2 + \left(1 - \frac{Z_f}{f}\right)^2}} \quad (3)$$

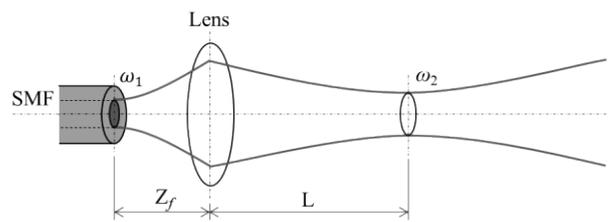


Fig. 3 Relationship between lens and beam waist position using fiber optic system

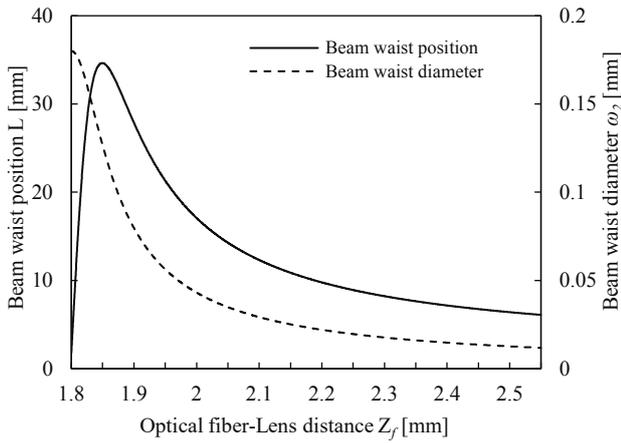


Fig. 4 Relationship between beam waist position and optical fiber - lens distance

#### 4 平行平板による調芯 (PP type)

この方法では図 5 に示す 5 枚重ねの平行平板 (BK7 材, 屈折率  $n = 1.5$ ) を用いて調芯を行った. 空気と平行平板の屈折率差で光路差が生まれ,  $Z_f$  を固定したままビームウェスト距離を変化できる. 平行平板を挿抜したときの計測値の変化を計測することで 2 軸制御により光コリメータを予測調芯することが可能となった.

平行平板 1 枚の厚さは 3 mm で式(1)により 1 枚あたりの光路長の変化量は約 1.6 mm であった. 光吸収損失は平行平板 1 枚あたり 0.24 dB 生じる.

これらをもとに, 予測調芯プログラムによる自動調芯を行う. このプログラムでは平行平板 3 枚目に最適値がくるように設定している. 2.5  $\mu\text{m}$  間隔で光ファイバの位置を Z 軸方向に動かしたときの計測値をもとに  $Z_f$  位置を予測している. これにより最適な  $Z_{f\text{OPTIMUM}}$  と調芯後の  $Z_f$  位置とでは最大誤差  $\pm 1.25\mu\text{m}$  が生じるが, コリメータ対向時の結合効率には大きく影響しない. 以下に平行平板の挿抜による光軸調芯の手順を示す.

1. RM を所望するビームウェスト距離 L となる位置に設置する.
2. OC - RM 間にスタックを挿入する (1~5 枚).
3.  $Z_f$  距離を 2.5  $\mu\text{m}$  動かし, パワーメータで計測する. これを平行平板 1 枚ごとに計測し, 元の位置に戻す.
4. ②~③の工程を繰り返し, 得られた光路差と計測値の関係から, その時の  $Z_f$  と  $Z_{f\text{OPTIMUM}}$  までの差を算出する.
5. 所望するビームウェスト距離になるよう光ファイバの位置を調芯し, プログラムを終了する.

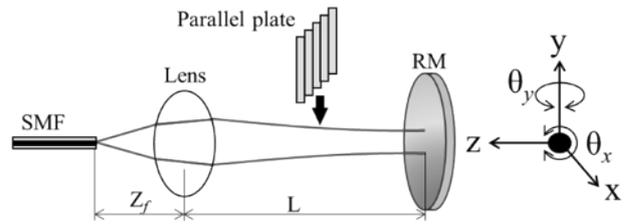


Fig. 5 Arrangement structure for PP type

#### 5 プリズムによる調芯 (WP type)

この方法では図 6 に示す 1 対の楔形プリズム (以後, WP : Wedge Prism と呼ぶ) を用いて調芯を行った. 材質は平行平板と同じ BK7 材である. 階段状に重なっている平行平板の挿抜に比べて, 光路差を連続的に変化させることができ, より精密な調芯ができる. 実験では, OC - RM 間に 1 対の WP (BK7 材, 屈折率  $n = 1.5$ ) を 1 度だけ挿抜する.

WP はおよそ直角三角形であり, 斜辺と平行な向きに, それぞれ光軸に向かって 2 枚同時に挿抜する. 空気と WP の屈折率差で光路差が生まれ,  $Z_f$  を固定したままビームウェスト距離を変化できる. 図 7 に楔形プリズムの挿抜による光結合の変化を示す. 1 対の WP は光軸へ向かって 6 mm 進めた. そのとき, 100  $\mu\text{m}$  進めるごとに光出力をパワーメータで計測した. 計測値は, WP の精度や角度などの誤差が影響し最大誤差  $\pm 0.1$  dB 生じる. 結合

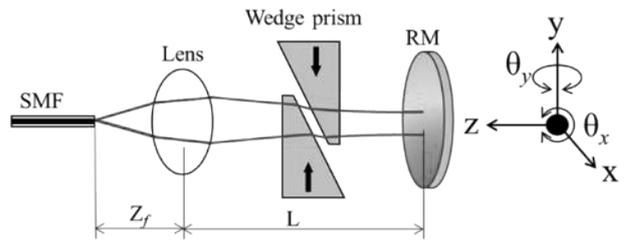


Fig. 6 Arrangement structure for WP type

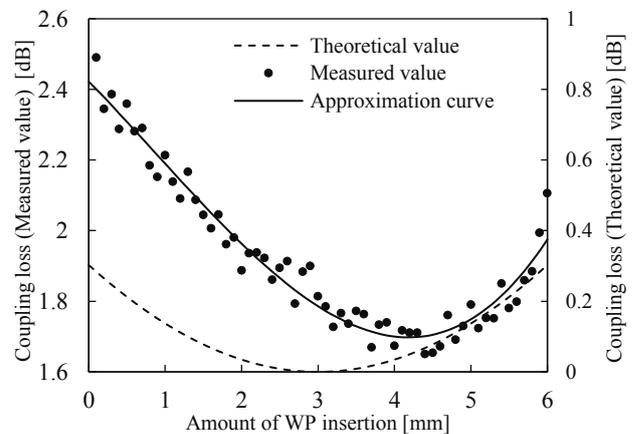


Fig. 7 Coupling loss variation with the amount of WP thickness

損失が最小となるポイントから  $Z_f$  を算出するには計測値のばらつきを抑える必要があるため、LabVIEW のプログラムで多項式近似を算出した。この近似曲線を参照し、WP 挿抜時の光ファイバ - レンズ間距離  $Z_f$  と、目標とする  $Z_{fOPTIMUM}$  の差を計算して光ファイバの位置を調整した。

以下に WP 挿抜による光軸調芯の手順を示す。

1. RM を所望するビームウェスト距離  $L$  に設置する。
2. 可視光(波長:632.8 nm)を OC から射出し、 $Z_f$  を調整して平行光にした後、手動かつ目視で RM の角度を合わせる。その後、光源を波長 1550 nm に切り替える。
3. 1 対の WP を同時に光軸上へ挿入していき、その時の結合損失の変化をパワーメータで記録する。
4. 計測値の変化から、その時の  $Z_f$  と  $Z_{fOPTIMUM}$  までの差を算出する。
5. 所望するビームウェスト距離になるよう光ファイバの位置を調芯し、プログラムを終了する。

## 6 ミラー往復による調芯(RM type)

この方法では通常は位置を固定している RM を自動ステージにより  $Z$  軸方向に連続的に可変し、光路長を変動させることで調芯を行った。図 8 に光路の概略図を示す。平行平板やプリズムを用いた光軸調芯の方法は OC - RM 間に光学材料(BK7)を光路中に挿抜する。これらと比較するため、製作する OC のビームウェスト距離は 25 mm とした。原理的にはレンズ近傍に位置するビームウェストでも RM を近づけることができるため調芯可能である。

RM は前後 5 mm ずつ連続的に位置を変化させ、パワーメータにより結合損失を常に計測する。RM の位置変化による結合損失の変化から光ファイバとレンズ間距離を算出し、最適なビームウェスト距離へ補正することができる。得られた計測値をもとに図 9 に示すような曲線を作成することで光軸調芯の状態を視覚化することも可能である。実線は調芯後の計測値、破線は  $Z_f$  が  $Z_{fOPTIMUM}$  から 0.01 mm だけ位置ずれている場合の計測値から作成した曲線である。斜線 AB は理論値を表している[5]。距離 10 mm のように短いと  $Z_{fOPTIMUM}$  から位置ずれがある場合でも波形に変化が表れにくく、調芯が難しくなる。調芯後には線が重なり、視覚的にも調芯終了の判断を行うことができる。計測値からリサージュ曲線を取ることで OC の結合状態を多

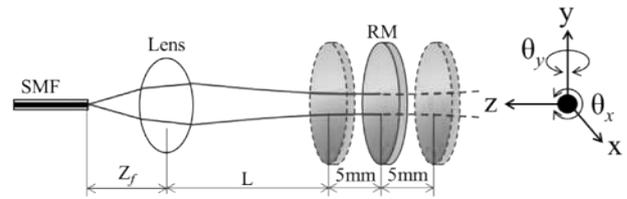


Fig. 8 Arrangement structure for RM type

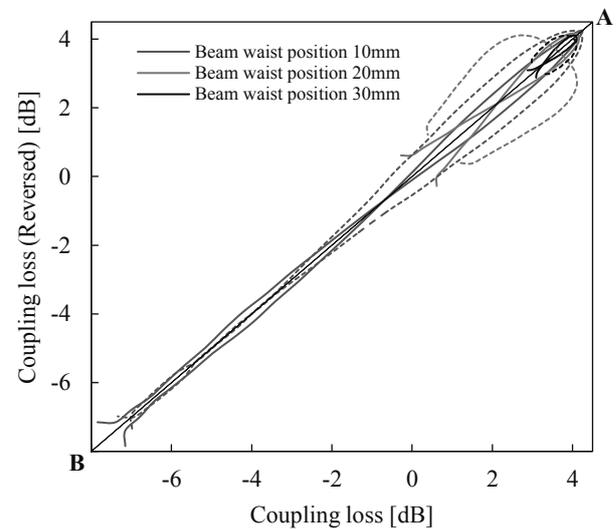


Fig. 9 Lissajous curve for each beam waist position

角的に判断することが可能となり、人的ばらつきを無くすことに有効な手段であると言える。以下に RM 往復による光軸調芯の手順を示す。全反射ミラーは 2 mm / sec の移動速度で動かしている。本研究ではビームウェスト距離 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm の 5 パターンで光軸調芯を行った。いずれのビームウェスト距離も結合損失 0.3 dB 以下で予測調芯することができた。しかし、ビームウェスト距離が短くなるほど調芯後の結合損失が悪化する傾向があった。ビームウェスト距離 10 mm の時は平均結合損失が 0.236 dB であったが、30 mm では 0.043 dB であった。以下にミラー往復による光軸調芯の手順を示す。

1. RM を所望するビームウェスト距離  $L$  に設置する。
2. 可視光(波長:632.8 nm)を OC から射出し、 $Z_f$  を調整して平行光にした後、手動かつ目視で RM の角度を合わせる。その後、光源を波長 1550 nm に切り替える。
3. 全反射ミラーを  $Z$  軸方向に前後 5 mm 動かし、結合損失の変化をパワーメータで記録する。
4. 計測値の変化から、その時の  $Z_f$  と  $Z_{fOPTIMUM}$  までの差を算出する。
5. 所望するビームウェスト距離になるよう光ファイバの位置を調芯し、プログラムを終了する。

## 7 自動調芯の結果

それぞれの方法で光軸調芯を行った結果を図 10 に示す。調芯精度や時間の観点からプリズムを用いた調芯方法とミラー往復による方法が優れていると言える。調芯精度に関しては従来方法が優れていた。従来方法では光ファイバ、レンズ及び全反射ミラーを 3 軸以上の自動ステージを用いて自動調芯しており、最小分解能でステージを動かしているため、原理的にもっとも損失を抑えることができる。

本研究では 2 軸制御による予測調芯をしており、得られた計測値をもとに光ファイバとレンズ間の距離  $Z_f$  の位置を予測して補正しているため誤差が生じてしまう。予測調芯により光学的に調芯位置を算出する方法では従来方法と同程度の精度は達成できないと考えられる。2 軸での予測調芯の精度を従来方法と同程度の精度まで向上するためには、従来方法のピークサーチ法による微調芯を組み合わせる必要があると考えられる。

調芯時間はプリズムやミラー往復による方法が優れていた。従来方法では可視光による目視での手動調芯で生じた結合損失の大きさが調芯にかかる時間に影響をあたえる。また、制御する軸の数が多いことも時間がかかる要因となっている。プリズムやミラー往復による光軸調芯は、一定速度でプリズムやミラーを動かすため調芯にかかる時間は全て同じで、2 軸制御であることから短い時間で調芯することが出来る。

また、新しい調芯方法は平行平板やプリズム挿抜、ミラーの往復が調芯時間の大半を占めている。一度に差し込む移動量を大きくし、ミラーの移動速度を上げることでさらなる時間短縮が期待できる。

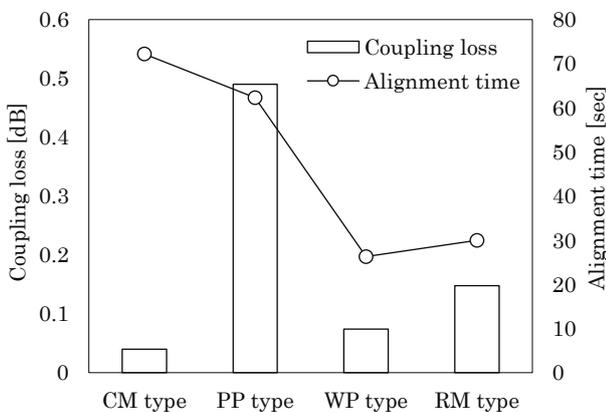


Fig. 10 Relationship between optical coupling loss and respective arrangement structure

## 8 結言

光デバイスに組み込む任意のビームウェストを持つ光コリメータを製造することを目的に、シングルモード特性を応用した光軸調芯方法を開発した。3 つの方法で光コリメータの光軸調芯を行ったところ以下の結果が得られた。

1. いずれの方法でも調芯にかかる時間は従来方法よりも短く、手動調芯による結合損失の大きさによらず時間が同じだった。
2. 2 軸制御による光コリメータの予測調芯はプリズムを利用した方法とミラーの往復による方法が有効である。
3. 予測調芯でも結合損失を 0.3 dB 以内に抑え、高い結合効率を得ることができる。

以上のことから、光路長と結合損失の変化から最適な  $Z_f$  位置を算出する光軸調芯の方法は、光コリメータの製造に有効な方法であると言える。

## 参考文献

- [1] 丹羽洋介ほか: “TEM<sub>00</sub> モードの特性を応用した光コリメータの簡易製造方法”, 2017 年度精密工学会秋季大会講演論文集.
- [2] 齊藤健治ほか: “TEM<sub>00</sub> モードの特性を応用した光コリメータの簡易製造方法(第二報)”, 2018 年度精密工学会秋季大会講演論文集.
- [3] 齊藤健治ほか: “TEM<sub>00</sub> モードの特性を応用した光コリメータの簡易製造方法(第三報)”, 2018 年度精密工学会東北支部講演会講演論文集.
- [4] 三上溪太郎ほか: “TEM<sub>00</sub> モードの特性を応用した光コリメータの簡易製造方法(第四報)”, 2019 年度精密工学会秋季大会講演論文集.
- [5] 河野健二: “光デバイスのための光結合系の基礎と応用”, 現代工学社, (1991), 40/54.
- [6] 三宅和夫: “光学技術シリーズ 8 幾何光学”, 共立出版, (1979), 8/10.
- [7] 西野憲一ほか: “やさしい光ファイバ通信”, オーム社, (1999), 45/46.
- [8] 小澤哲也: “パソコン計測制御ソフトウェア LabVIEW リファレンス・ブック”, CQ 出版, (2016), 12/162.
- [9] 小澤哲也: “図解 LabVIEW 入門”, 森北出版, (2012), 168/174.