

# 分光情報の三次元地図から消化器系の病変を発見する分光センサの開発

代表研究者

松本 光広

神奈川大学 工学部経営工学科 准教授

## 1 はじめに

筆者は、測定する対象物からイメージング分光器に入射する光を分光することで、分光から得られる光の波長を用いて対象物を把握することを考えている。測定する対象物は、イメージング分光器周りの円状領域における全方位に多数あり、多数の対象物の中心付近にイメージング分光器を設置することで、多点同時に対象物からの光の波長を知る。現在広く用いられているイメージング分光器は、測定する対象物からの光を分光することで、光の波長を知ることができる。対象物から入射する光の領域は、イメージング分光器の前方における線状領域のみである (Bearman, et al., 2015, 守屋, 1999)。イメージング分光器周りの全方位における対象物からの光の波長を知るためには、イメージング分光器を回転させて走査する必要がある。イメージング分光器を駆動させる走査では、全方位を走査するまでに時間がかかり、走査する方位によって測定時間に差が生じる。筆者は、センサ周りの円状領域を多点同時に分光できる分光センサを開発した (松本, 2014)。開発した分光センサは、対象物からの光を集光せず、かつ透過型回折格子を用いた分光により分光効率が低いため、分光できる対象物からの光はレーザー光などの強い光のみに止まっている。

本研究では、円状領域の対象物からの光を多点同時に分光して光の波長を知ることができるイメージング分光器を開発する。開発するイメージング分光器は主に、円環型スリット、双曲面鏡および集光レンズを用いて対象物からの光を集光して、集光した光を円錐型プリズムを用いて分光することで分光効率を高める。分光された光は画像センサに投影され、画像センサに投影される分光の位置は光の波長により異なる。イメージング分光器は、投影された分光の位置から光の波長を知ることができる。イメージング分光器の構造において、測定する対象物からイメージング分光器に入射する光の軌跡を用いて、画像センサに投影される分光の位置を計算する。上記の仕組みを用いて、実際にイメージング分光器を構成する。

## 2 イメージング分光器の構成

開発するイメージング分光器の構造と仕組みについて述べる。イメージング分光器の座標系を設定して、測定する対象物からイメージング分光器に入射される光の軌跡から、画像センサに投影される分光の位置を計算する。

### 2-1 構造と仕組み

図1にイメージング分光器の構造を示す。イメージング分光器は、円環型スリット、双曲面鏡、集光レンズ、絞り、コリメートレンズ、円錐型プリズム、フォーカスレンズ、画像センサおよび遮光カバーにより構成する。円環型スリット、双曲面鏡、集光レンズ、絞り、コリメートレンズ、円錐型プリズム、フォーカスレンズ、画像センサおよび遮光カバーについて、それぞれの中心軸をすべて一致させて設置する。測定する対象物からの光は、イメージング分光器周りの円状領域における全方位から中心軸に向かって、円環型スリットを通りイメージング分光器に入射する。入射した光は、双曲面鏡により反射して、集光レンズにより集光される。集光された光は、絞りを通り、コリメートレンズにより屈折して、イメージング分光器の中心軸に平行な光となる。平行にされた光は、円錐型プリズムにより光の各波長ごとに異なる屈折率で屈折することで、分光される。光の各波長ごとの分光は、フォーカスレンズにより屈折してイメージング分光器の中心軸に平行な光となり、画像センサに垂直に投影される。画像センサに投影された分光の位置は、光の各波長により異なる。イメージング分光器は、投影された分光の位置から光の波長を知ることができる。

### 2-2 座標系

図2にイメージング分光器の座標系を示す。イメージング分光器について、分光器の中心を原点0とし、正面を $X$ 軸、垂直方向を $Z$ 軸とした座標系を $X-Y-Z$ とする。 $X-Y$ 平面上において、 $X$ 軸から角度 $\theta$ の軸を $R$ 軸とする。画像センサについて、センサの左上端を原点 $O_i$ とし、原点から右方向を $X_i$ 軸、原点から下方向を $Y_i$ 軸とした座標系を $X_i-Y_i-Z_i$ とする。なお $X_i$ 軸、 $Y_i$ 軸および $Z_i$ 軸は、それぞれ $X$ 軸、 $Y$ 軸および $Z$ 軸と平行とする。

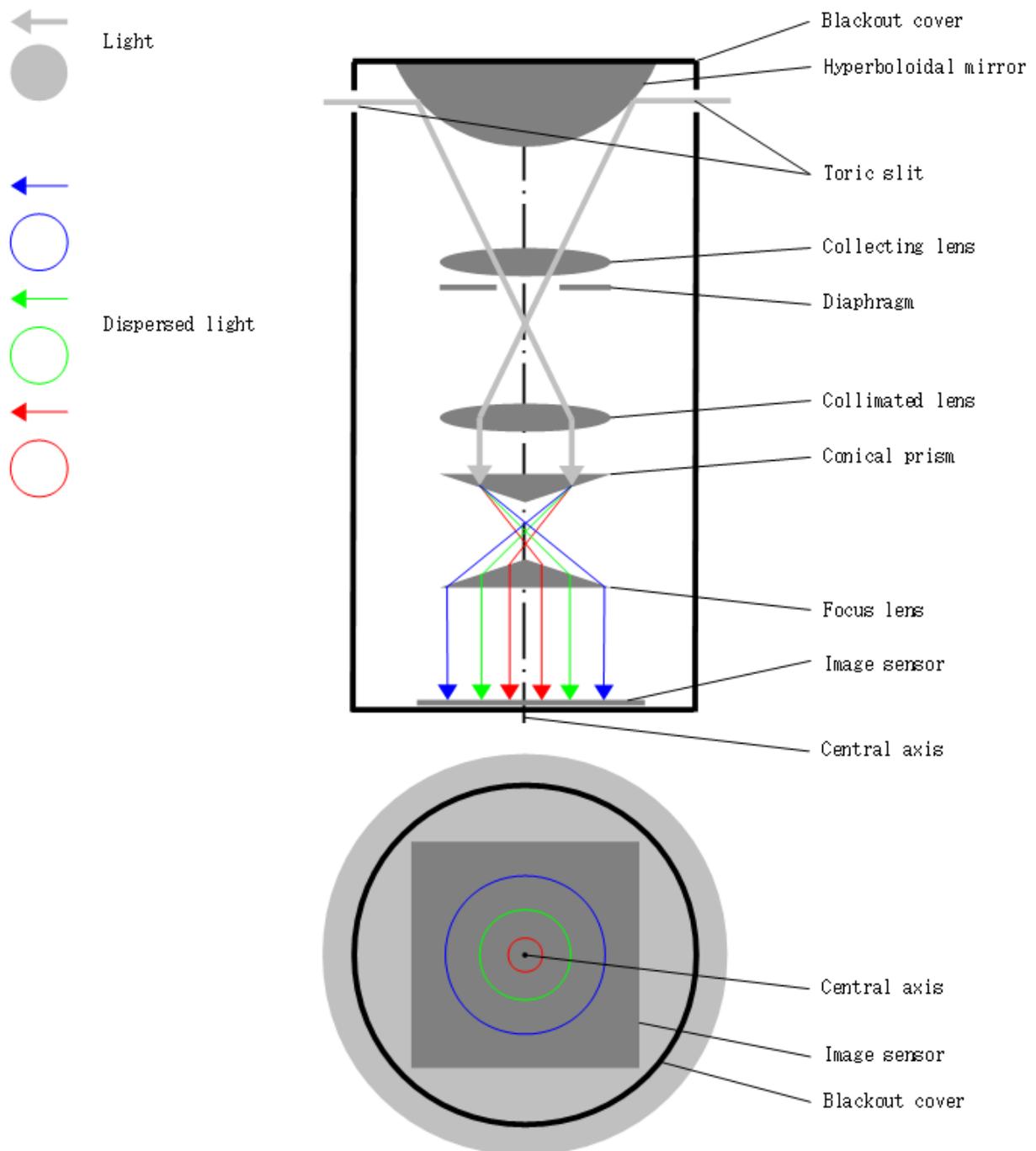


Fig.1 Mechanism of imaging spectroscope

### 2-3 画像センサに投影される分光の位置

測定する対象物からイメージング分光器に入射する光は、 $Z$ 軸に向かって $X$ - $Y$ 平面上を $R$ 軸マイナス方向へ進む。イメージング分光器に入射した光は、 $Z$ 軸マイナス方向へ進む。したがって、光の軌跡は $R$ - $Z$ 平面上において求める。測定する対象物からの光はイメージング分光器周りの円状領域から $R$ 軸マイナス方向へ $Z$ 軸に向かい、幅 $w_t$ の円環型スリットの通過点 $T_s$ における座標 $(r_{Ts}, z_{Fm1})$ から入射する。入射した光は、双曲面鏡の表面上の反射点 $R_m$ における座標 $(r_{Rm}, z_{Fm1})$ で反射する。なお通過点 $T_s$ および反射点 $R_m$ を通る直線は、双曲面鏡の焦点 $F_{m1}$ の座標 $(0, z_{Fm1})$ を通り、 $Z$ 軸方向の座標を $z_{Fm1}$ で一定とする。反射した光は、絞りの通過

点  $T_d$  における座標  $(r_{Td}, z_{Td})$  を通り，双曲面鏡の焦点  $F_{m2}$  およびコリメートレンズの焦点  $F_c$  における座標  $(0, z_{Fm2})$  を通る．通過した光は，コリメートレンズの屈折点  $R_c$  における座標  $(r_{Rc}, z_{Rc})$  で屈折して，Z 軸に平行な

← Trajectory of light

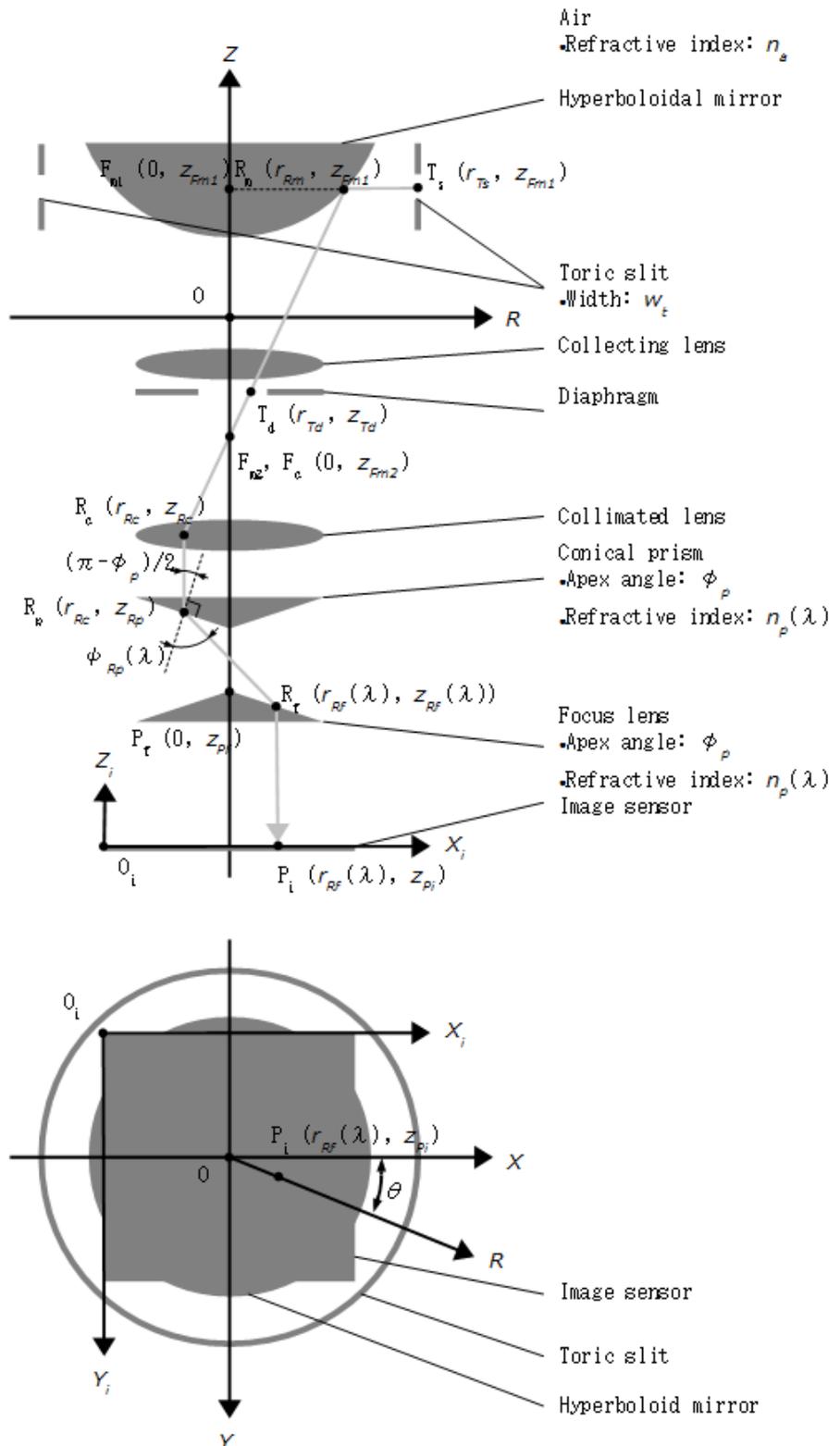


Fig.2 Coordinate system of imaging spectroscopy

光となる。平行となった光は、円錐型プリズムの屈折点  $R_p$  における座標  $(r_{Rp}, z_{Rp})$  で、光の波長  $\lambda$  ごとに異なる屈折率で屈折して分光する。分光された光は、フォーカスレンズの屈折点  $R_f$  における座標  $(r_{Rf}(\lambda), z_{Rf}(\lambda))$  で、再び  $Z$  軸に平行な分光となる。円錐型プリズムおよびフォーカスレンズは、頂角  $\phi_p$  および屈折率  $n_p(\lambda)$  を同じとすることで、再び  $Z$  軸に平行な分光となる。なおフォーカスレンズの屈折点  $R_f$  における座標  $(r_{Rf}(\lambda), z_{Rf}(\lambda))$  は、光の波長  $\lambda$  ごとに異なる。平行となった分光は、画像センサの投影点  $P_i$  における座標  $(r_{Rf}(\lambda), z_{Pi})$  で、画像センサに垂直に投影される。

双曲面鏡の双曲面は、双曲線を  $Z$  軸回転させることで生成される。双曲線の方程式は、正の定数  $a$  および  $b$  を用いて、

$$\frac{z^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1 \quad \dots (1)$$

と表せる。双曲面鏡の焦点  $F_{m1}$  における  $Z$  軸方向の座標  $z_{Fm1}$  は、

$$z_{Fm1} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots (2)$$

と表せる。双曲面鏡の焦点  $F_{m2}$  における  $Z$  軸方向の座標  $z_{Fm2}$  は、

$$z_{Fm2} = -\sqrt{a^2 + b^2} \quad \dots (3)$$

と表せる。反射点  $R_m$  における  $R$  軸方向の座標  $r_{Rm}$  は、式(1)を用いて、

$$r_{Rm} = \frac{b}{a} \sqrt{z_{Fm1}^2 + a^2} \quad \dots (4)$$

と表せる。屈折点  $R_c$  における  $R$  軸方向の座標  $r_{Rc}$  は、座標  $(r_{Rm}, z_{Fm1})$  および座標  $(0, z_{Fm2})$  を用いて、

$$r_{Rc} = \frac{z_{Rc} - z_{Fm2}}{z_{Fm1} - z_{Fm2}} r_{Rm} \quad \dots (5)$$

と表せる。屈折点  $R_p$  における光の屈折は、円錐型プリズムの光の波長  $\lambda$  における屈折率を  $n_p(\lambda)$ 、空気の屈折率を  $n_a$ 、入射角  $(\pi - \phi_p)/2$  を、および屈折角  $\psi_{Rp}(\lambda)$  として、スネルの法則を用いて(尾崎, 2005),

$$n_p(\lambda) \sin\left(\frac{\pi - \phi_p}{2}\right) = n_a \sin \psi_{Rp}(\lambda) \quad \dots (6)$$

と表せる。屈折点  $R_p$  および屈折点  $R_f$  の関係は、

$$\tan\left(\psi_{Rp}(\lambda) - \frac{\pi - \phi_p}{2}\right) = -\frac{r_{Rc} - r_{Rf}(\lambda)}{z_{Rp} - z_{Rf}(\lambda)} \quad \dots (7)$$

と表せる。フォーカスレンズの頂点  $P_f$  における座標  $(0, z_{Pf})$  および屈折点  $R_f$  の関係は、フォーカスレンズの頂角を  $\phi_p$  として、

$$\tan \frac{\phi_p}{2} = \frac{r_{Rf}(\lambda)}{z_{Pf} - z_{Rf}(\lambda)} \quad \dots (8)$$

と表せる。屈折点  $R_f$  における  $R$  軸方向における座標  $r_{Rf}(\lambda)$  は、式(7)および式(8)を用いて、

$$r_{Rf}(\lambda) = \frac{\tan \frac{\phi_p}{2}}{\tan \frac{\phi_p}{2} - \tan\left(\psi_{Rp}(\lambda) - \frac{\pi - \phi_p}{2}\right)} \left\{ r_{Rc} + \tan\left(\psi_{Rp}(\lambda) - \frac{\pi - \phi_p}{2}\right) (z_{Rp} - z_{Pf}) \right\} \quad \dots (9)$$

と表せる。投影点  $P_i$  における  $R$  軸方向の座標  $r_{Rf}(\lambda)$  は、分光された光の波長  $\lambda$  により異なる。投影点  $P_i$  の  $X_i$ - $Y_i$  平面上における  $X_i$  軸方向の座標  $x_i$  は、原点  $O$  から原点  $O_i$  における  $X_i$  軸方向の距離を  $d_{Xi}$  として、

$$x_i = d_{Xi} + r_{Rf}(\lambda) \cos \theta \quad \dots (10)$$

と表せる. 投影点  $P_i$  の  $X_i$ - $Y_i$  平面上における  $Y_i$  軸方向の座標  $y_i$  は, 原点  $0$  から原点  $0_i$  における  $Y_i$  軸方向の距離を  $d_{Y_i}$  として,

$$y_i = d_{Y_i} + r_{Rf}(\lambda) \sin \theta \quad \dots (11)$$

と表せる. 画像センサにおける投影点  $P_i$  における座標  $(x_i, y_i)$  を用いて, 分光された光の波長  $\lambda$  を知ることができる.

### 3 実際に構成したイメージング分光器

図3に実際に構成したイメージング分光器の外観を示す. イメージング分光器は, 円環型スリットから測定する対象物からの光を取得する. イメージング分光器は, 内部を遮光するために黒色の遮光カバーで周りを覆う. 遮光カバーの内部には, 双曲面鏡, 集光レンズ, 絞り, コリメートレンズ, 円錐型プリズムおよびフォーカスレンズが設置されている.

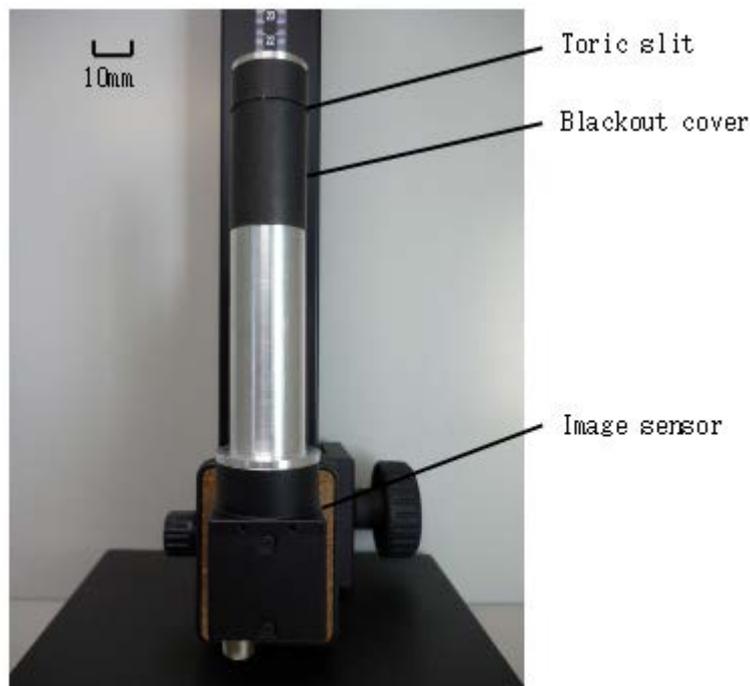


Fig.3 Image of imaging spectroscopy

### 4 おわりに

本研究では, 円状領域の対象物からの光を多点同時に分光して光の波長を知ることができるイメージング分光器を開発した. 開発したイメージング分光器は主に, 円環型スリット, 双曲面鏡および集光レンズを用いて対象物からの光を集光して, 集光した光を円錐型プリズムを用いて分光することで分光効率を高める. 分光された光は画像センサに投影され, 画像センサに投影される分光の位置は光の波長により異なる. イメージング分光器は, 投影された分光の位置から光の波長を知ることができる. イメージング分光器の構造において, 測定する対象物からイメージング分光器に入射する光の軌跡を用いて, 画像センサに投影される分光の位置を計算した. 上記の仕組みを用いて, 実際にイメージング分光器を構成した.

今後, 構成したイメージング分光器を用いて, イメージング分光器の測定性能を評価する.

## 【参考文献】

Bearman, G. and Van veen C., Hyperspectral imaging opens new perspectives in cultural heritage, Laser Focus World, Vol.51, No.5 (2015), pp.54-56.

松本光広, 二次元平面内の全方向を測定する分光センサ, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.814 (2014), DOI:10.1299/transjsme.2014dr0160.

尾崎義治, 朝倉利光, ヘクト光学 I(2005), p.156.

## 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
円状領域を多点同時に分光できるイメージング分光器の開発	日本機械学会九州支部講演論文集, No.168-1, pp.373-374	2016年3月