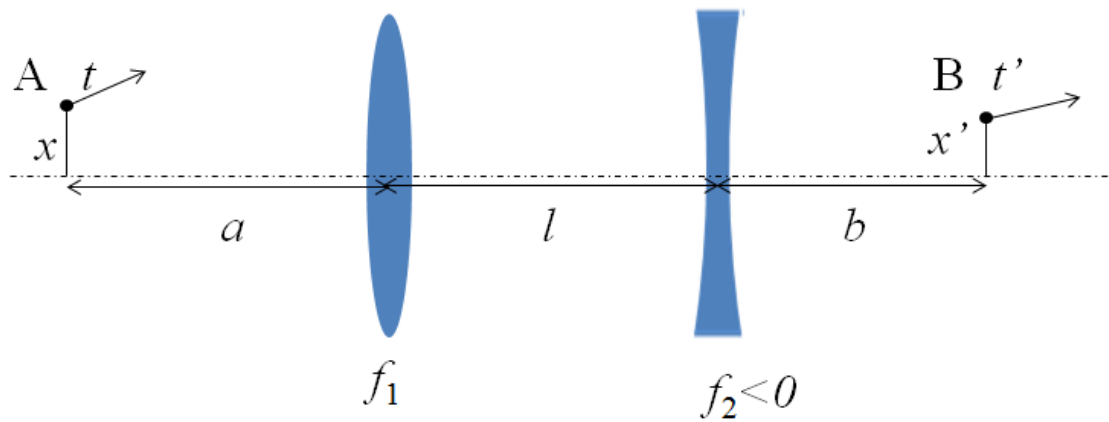


テレコンバージョンレンズの原理（リアコンバーター）

レンズの焦点距離を伸ばす方法として、テレコンバージョンレンズ（テレコンバーター；略して、テレコン）を入れる方法があります。これには二つのタイプがあって、一つはレンズとカメラ本体の間に入れるタイプ（リアコンバーター）、もう一つはレンズの前に取り付けるタイプ（フロントコンバーター）です。以前、フロントコンバーターについて書いたことがありました。最近、リアコンバーターが手に入ったので、今度はこれの原理について考えてみようと思いました。リアコンバーターは基本的に凹レンズです。それで、主レンズ（凸レンズ）の後ろに凹レンズを入れた場合の光学系について考えていきます。



レンズ系の光路を調べる際には光線行列という方法がよく用いられます。光線行列は光を光線として表して、その光路を幾何光学で考えていき、光学要素のそれぞれの働きを行列で表す方法です。この方法では、レンズについては薄肉レンズを考え、その厚みを無視します。上の図のように、中心から x だけ離れた点 A から正接 t で表される進行方向に出た光が、距離 a だけ移動し、焦点距離 f_1 の凸レンズで方向を曲げられ、さらに距離 l だけ移動し、ここで、焦点距離 $f_2 (< 0)$ の凹レンズで曲げられ、中心からの距離が x' の点 B に到達し、その進行方向が正接 t' で表されるとします。これを光線行列で表すと次のようになります。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x' \\ t' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ t \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 - \frac{b}{f_2} - \frac{1}{f_1} \left\{ l + b \left(1 - \frac{l}{f_2} \right) \right\} & a \left(1 - \frac{b}{f_2} \right) + \left(1 - \frac{a}{f_1} \right) \left\{ l + b \left(1 - \frac{l}{f_2} \right) \right\} \\ -\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \left(1 - \frac{l}{f_2} \right) & -\frac{a}{f_2} + \left(1 - \frac{l}{f_2} \right) \left(1 - \frac{a}{f_1} \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ t \end{pmatrix} \end{aligned}$$

点 A から出た光が点 B に焦点を結ぶためには、光の進行方向によらず同じ点を通るという条件を満たさないとはいけませんので、 x' に含まれる t の係数が 0 でなければなりません。すなわち、

$$a \left(1 - \frac{b}{f_2} \right) + \left(1 - \frac{a}{f_1} \right) \left\{ l + b \left(1 - \frac{l}{f_2} \right) \right\} = 0 \quad (1)$$

となります。ここで、後の都合のために、 $m \equiv 1 - b/f_2$ とおくと、(1)式は

$$m + \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{f_1} \right) (lm + b) = 0 \quad (2)$$

のように簡単に書き表すことができます。また、このときの倍率 M も

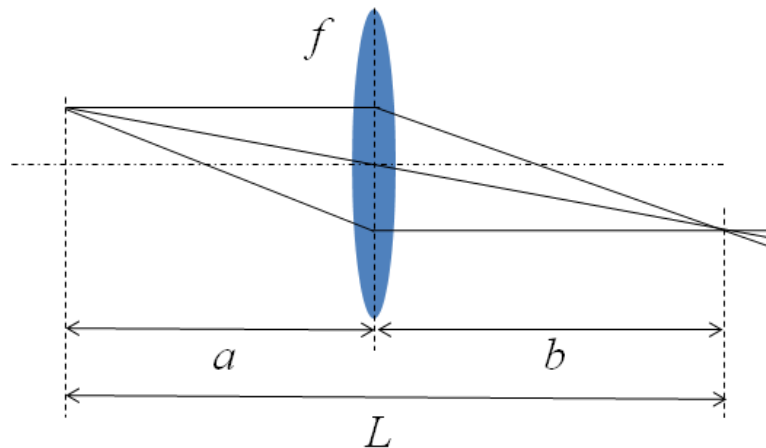
$$M = -\left(\frac{x'}{x} \right) = -\left(1 - \frac{b}{f_2} \right) + \frac{1}{f_1} \left\{ l + b \left(1 - \frac{l}{f_2} \right) \right\} = -m + \frac{lm + b}{f_1} \quad (3)$$

となります。

主レンズとカメラ本体の間にテレコンバーターを入れると b は固定されてしまいます。これに対して、 l は主レンズの焦点を合わせると変化していきます。それで、(2)式から被写体と主レンズとの距離 a を変えたときに l がどのように変化するか表すと次のようになります。

$$l = \frac{-1}{\frac{1}{a} - \frac{1}{f_1}} - \frac{b}{m} \quad (4)$$

次に、テレコンバーターを入れたら、焦点距離が変化するかどうか実際に測定してみることにします。今回のような場合やカメラレンズのように複合レンズの場合、実効的なレンズの位置が分からないため、単レンズのように平行光線を入射してその焦点位置から焦点距離を測定する方法が使えないことがあります。このような場合の焦点距離の測定方法についてまず考えてみます。複合レンズを下図のような一つの凸レンズとして考えてみることにします。



このとき、次のレンズの公式が成り立ちます。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (5)$$

薄い単レンズの場合は a と b を測定すれば、焦点距離はこの式から求められますが、これらが分からなくても求める方法があります。それには撮影倍率を用います。まず、(5)式を変形して、

$$\frac{L}{a(L-a)} = \frac{1}{f} \quad (6)$$


とします。ここで、 $L = a + b$ です。一方、倍率 M は

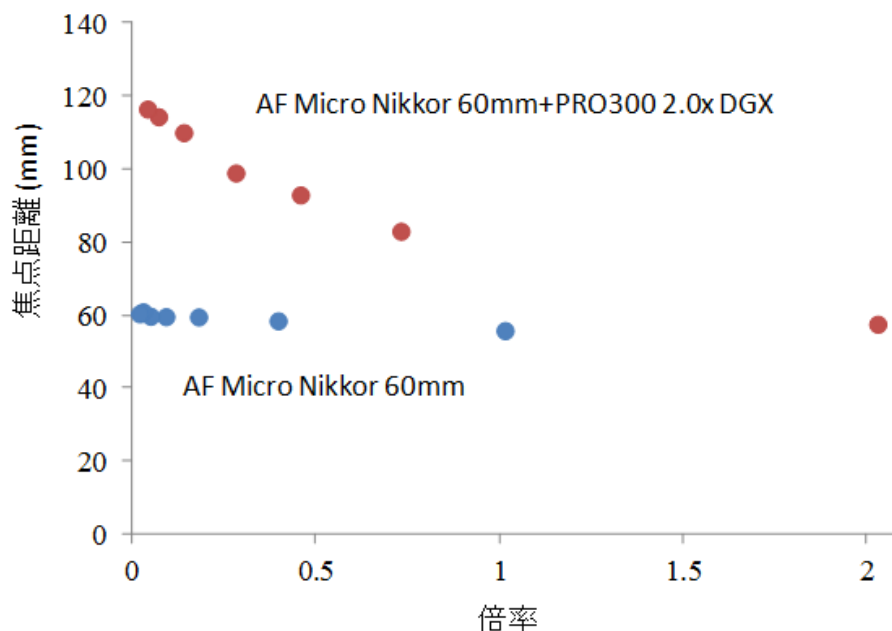
$$M = \frac{b}{a} = \frac{L-a}{a} \quad (7)$$

となります。(7)式を変形して、 $a = L/(M+1)$ とし、これを(6)式に代入すると、 $L/(a^2M) = 1/f$ となるので、

$$f = \frac{LM}{(M+1)^2} \quad (8)$$

とすることができます。すなわち、被写体と実像との距離 L と倍率 M が分かれば焦点距離が分かることとなります。

実際にこの方法で焦点距離を測定をしてみました。カメラには Nikon D7100 を使い、レンズには AF Micro Nikkor 60 mm を用いました。また、テレコンバーターには Kenko 製の Pro300 2.0x DGX を使い、距離を変えながらスケールを撮影し、スケールとカメラのイメージ面 ( の記号のあるところ) までの距離を測り、得られた画像から倍率を計算しました。その結果が次の図です。



レンズ単体だと、被写体にもっとも接近した等倍撮影でも、遠方を写した場合でも、焦点距離はほぼ 60 mm の一定値を与え、この測定法が妥当なことを示しています。ところが、テレコンバーターを挿入すると、無限遠では確かに焦点距離は 2 倍の 120 mm に漸近的に近づいていきますが、最接近で撮影すると元の焦点距離 60 mm に近くなっています。ただし、この場合でも倍率は 2 倍になっています。これらのことを説明していこうと思います。

そこで、(8)式を用いて、今回のテレコンバーターの場合について考えていきます。(8)式を用いるためには、被写体と実像との距離 L を求めなければなりません。そこで、(4)式を用いて、

$$L = a + l + b = a + \frac{-1}{\frac{1}{a} - \frac{1}{f_1}} - \frac{b}{m} + b \quad (9)$$

とします。一方、倍率 M はすでに(3)式のように求められていて、

$$M = -m + \frac{lm+b}{f_1} \quad (10)$$

となります。これらを(8)式に代入すればよいのですが、式はかなり複雑になります。それで、被写体が十分に遠い場合、それと最近接で測定した場合の二つについて考えみます。

被写体が十分に遠い場合は、 $a \rightarrow \infty$ となりますが、その漸近的な振る舞いを調べるために、 x が十分に小さいときに $1/(x-p) = -1/p - x/p^2 + \dots$ という展開ができることを用います。これを用いると、(4)式から、 $l \approx f_1 - b/m + f_1^2/a$ となります。ただし、展開の一次の項までをとりました。これを(10)式に代入すると、 $M \approx mf_1/a$ となります。一方、(9)式は $L \approx a$ となります。これらを(8)式に代入すると、

$$f \approx \frac{a \cdot mf_1/a}{(mf_1/a+1)^2} \approx mf_1 \quad (11)$$

となり、焦点を無限遠にしてテレコンバーターを入れた場合の見かけの焦点距離は、主レンズの焦点距離の m 倍になります。最初に定義した $m \equiv 1 - b/f_2$ が実はテレコンバーターの焦点距離の倍率を表すパラメータだったのです。

次に、最近接撮影の場合を考えます。主レンズだけの撮影で、等倍撮影の場合は主レンズは焦点距離分だけ前に繰り出します。したがって、 l は無限遠撮影の場合の値に主レンズの焦点距離分だけ増加します。つまり、 $l = 2f_1 - b/m$ となります。これを(10)式に入れると、 $M = -m + \{(2f_1 - b/m)m + b\}/f_1 = m$ となり、焦点距離の倍率を与える m がそのまま最近接撮影での撮影倍率を与えることとなります。さらに、(4)式の l とこの場合の l を比較すると、 $af_1/(a-f_1) - b/m = 2f_1 - b/m \rightarrow a = 2f_1$ となるので、テレコンバーターを挿入しても、被写体との最近接距離は変化しないことが分かります。ただし、この場合の見かけの焦点距離 f は一般的には f_1 とは異なります。

以上のような考察を実際の場合に当てはめてみます。

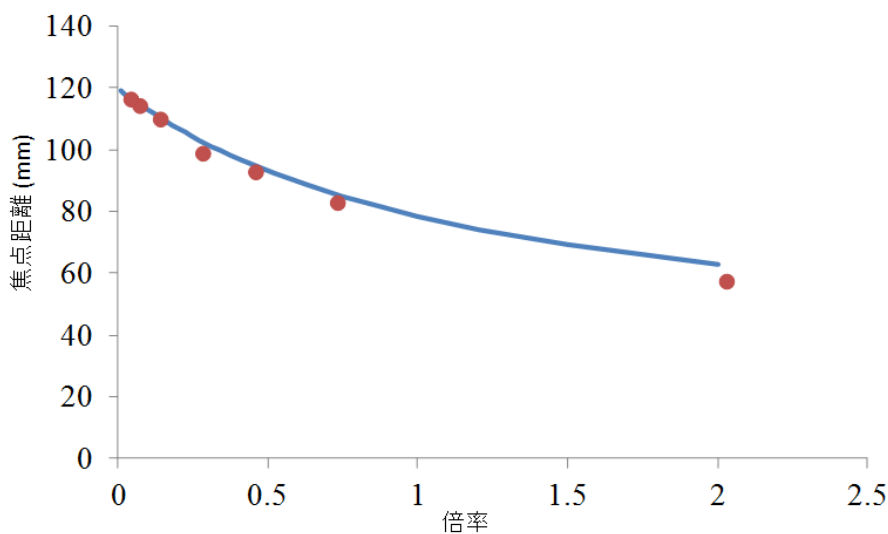


これはテレコンバーターを実際のカメラに装着したところです。各部の寸法はノギスでおおよそ測ってみました。違っているかもしれません。カメラボディの先端からイメージセンサまでの距離は 46.8 mm、テレコンバーターの厚みは 43.7 mm、それに主レンズで焦点を無限遠に合わせたときの見かけの凸レンズの位置がレンズの終端から $60-46.8=13.2$ mm の位置です。これらの数値を使ってまず、 b の値を推定してみます。無限遠に合わせたときの l は $l = f_1 - b/m$ で表されます。したがって、

$$l + b = f_1 - b/m + b$$

$$= 13.2 + 43.7 + 46.8 = 103.7$$

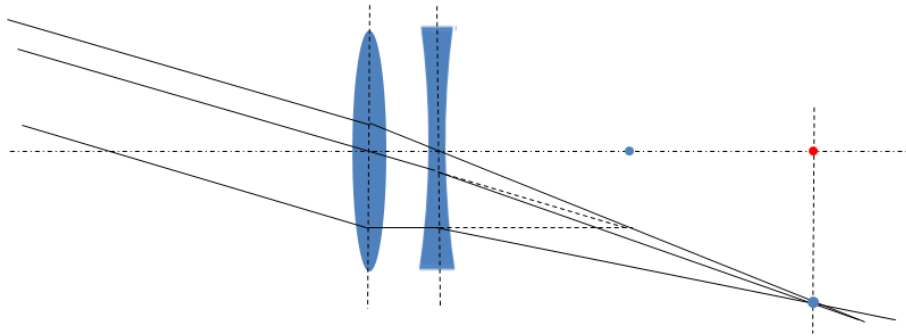
となります。ここで、2 行目の式は mm 単位で表した実測値を代入しました。この式に $f_1 = 60(\text{mm})$ 、 $m = 2$ を代入して b と求めると、 $b = 87.4(\text{mm})$ になりました。 $m \equiv 1 - b/f_2$ の関係から、 $f_2 = -87.4(\text{mm})$ も決定されます。



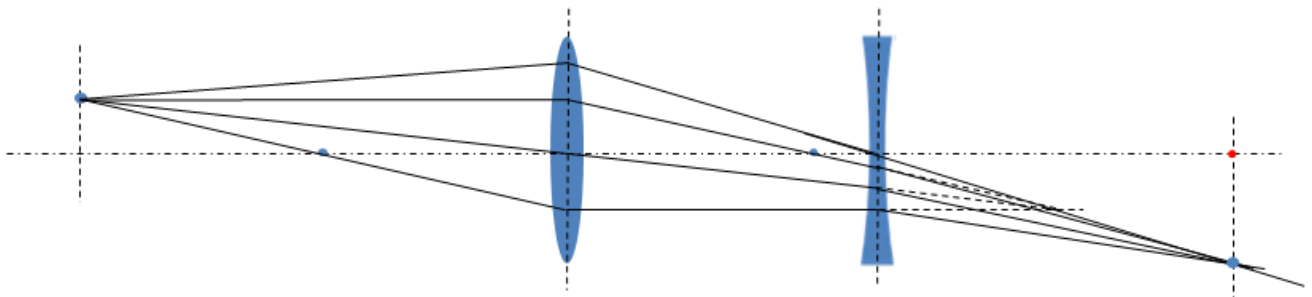
これらの値と(8)-(10)式を用いて、見かけの焦点距離を計算したのが上のグラフです。実線は計算値、赤

丸は実測値ですが、若干のずれはあるもののほぼ合っていることが分かります。

最後に、光路の図を実際の寸法に合わせて描いてみました。



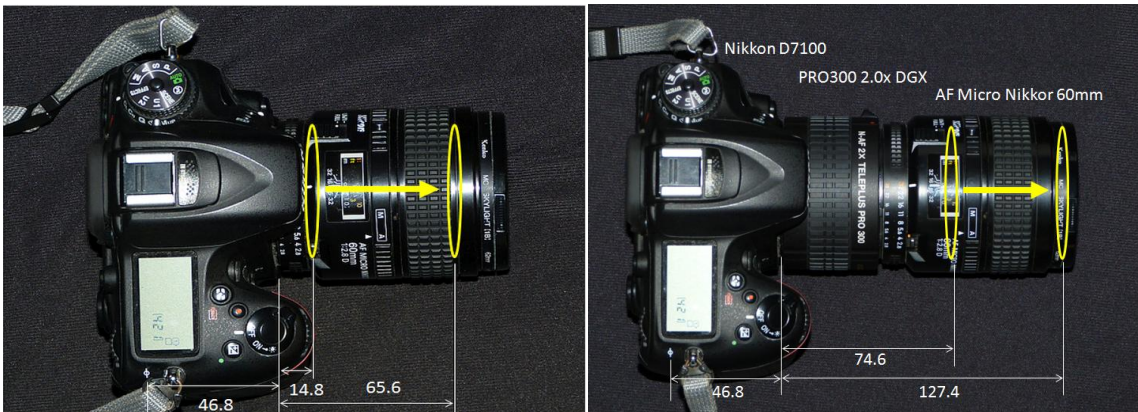
これは焦点を無限遠に持っていったときです。凹レンズを入れることにより焦点距離が伸びていることが分かります。



そして、これは最近接撮影をした場合の光路図です。凸レンズによる焦点位置が凹レンズがあるために曲げられ、像が拡大されている様子がよく分かります。

追記：直観的に分かりやすいように、上の実験データを用いて、見かけの凸レンズがどの場所にあるのかを図示してみました。今、実験では L と M のデータが分かっているので、これから次の関係を用いて b を求め、実際のカメラに当てはめてみました。

$$a = L / (M + 1)$$
$$b = L - a = ML / (M + 1)$$



左側がテレコンバーターなしの場合、右側が入れた場合です。実測値を用いているので、予想とは若干

ずれているところもあるのですが、雰囲気は分かります。レンズの上に描いた黄色の長楕円形の図形がテレコンバーターを含めた複合レンズを単一の凸レンズだと考えたときの位置を表します。左側の図形が遠くを撮影した場合、右側が最近接を撮影した場合です。実際には、最近接の場合はレンズが繰り出すのでこの写真とはちょっと異なります。テレコンバーターを入れた場合はレンズの位置がテレコンバーターの厚さ分程度、前に来ていることが分かります。これは、遠方を撮影するときにはテレコンバーターを入れたことにより焦点距離が長くなったということを意味し、最近接を撮る場合には焦点距離が長くない代わりにレンズが前に来たため接写倍率が上がったということを意味しています。ちょうどエクステンションリングを入れたのと同じような効果になるわけです。