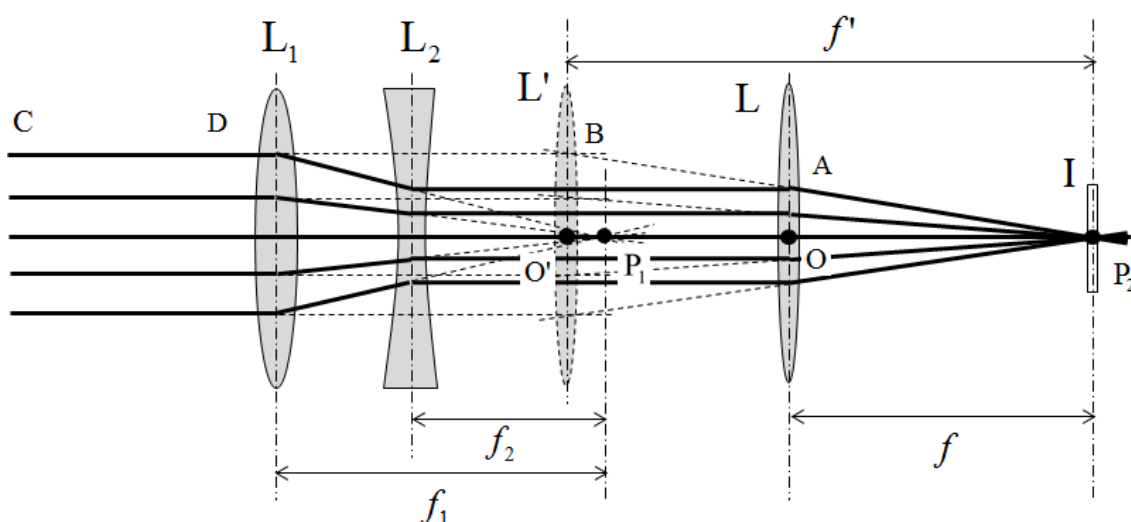


テレコンバージョンレンズの仕組み

望遠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2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。レンズの取り外しのできないコンデジが出現してから、レンズの前に取り付ける後者のタイプは急速に普及してきました。今回は、フロントコンバーターについてその仕組みを説明します。



フロントコンバーターは凸レンズと凹レンズの組み合わせでできています。例えば、上の図のレンズ L_1 と L_2 の組み合わせがそれに当たります。このとき、2つのレンズの焦点位置を一致するようにすると、平行光線が凸レンズ L_1 に入射すると、その焦点位置 P_1 に収束するように曲がりますが、凹レンズ L_2 があるために再び平行光線になって出力します。つまり、テレコンは平行光線をビーム径を変えて再び平行光線として出力するレンズ系なのです。テレコンを覗くと景色がそのまま見えますが、その大きさが少し大きくなっています。つまり、テレコンはそれ自身では焦点を結ばない光学系なのです。

テレコンを通して平行光線になった光はカメラレンズ L に入り、撮像素子 I 上の点 P_2 に焦点を結ぶことになります。この時、例えば、図の一番上の光線に着目して、 P_2 と A を結ぶ線と、 C と D を通る入射光線をそれぞれ延長して、その延長線が交わる点 B を考えます。この延長線でできた光学系は、レンズ L_1 、 L_2 、 L を考えずに、仮想的な凸レンズ L' を考えた場合と、カメラレンズ L と撮像素子 I の間の光線を考える限り、全く同じ光路を通ることになります。つまり、

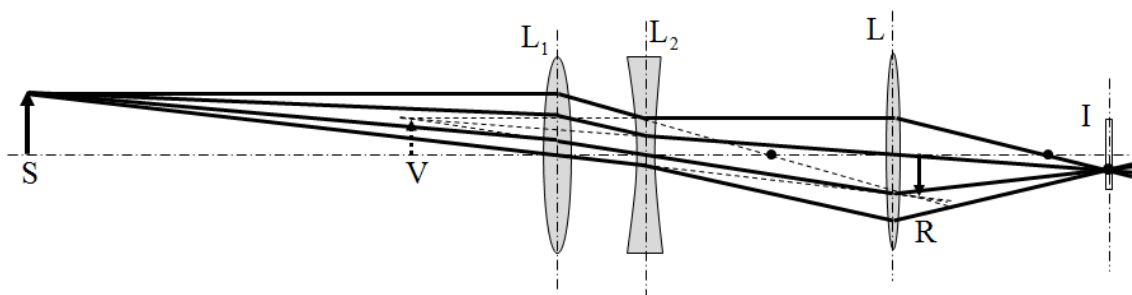
仮想的なレンズを考えることで、テレコンの役目を説明できるのです。

この時、仮想的な凸レンズ L' の焦点距離 f' は、三角形 P_2OA と三角形 $P_2O'B$ の相似関係から、カメラレンズの焦点距離を f とすると

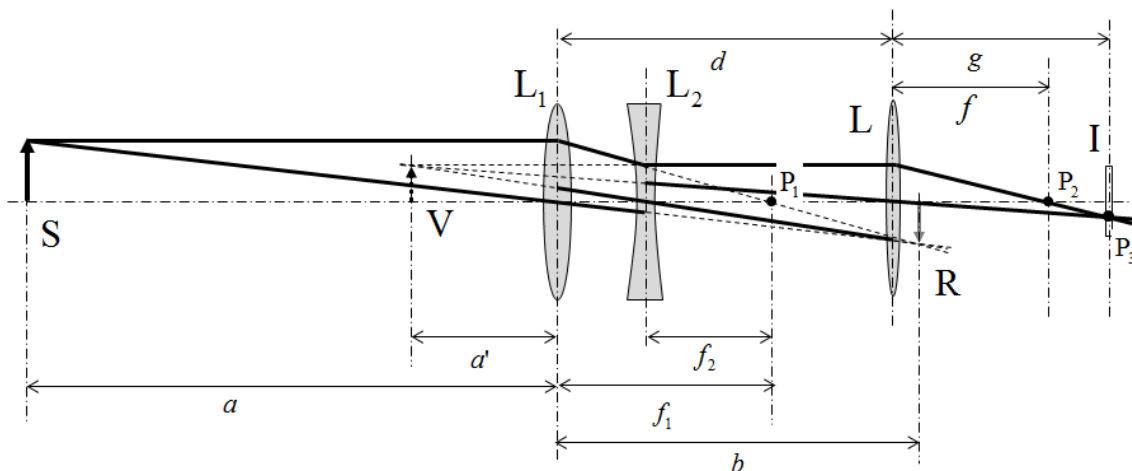
$$f' = \frac{f_1}{f_2} f = Hf$$

と求まります。ここで、 f_1 と f_2 はテレコンの凸レンズと凹レンズの焦点距離です。また、 $H \equiv f_1/f_2$ はテレコンの倍率を表しています。すなわち、テレコンを用いると、カメラレンズの焦点距離を H 倍増大させることができるのです。

しかし、この焦点距離が伸びるという考え方は、被写体が無限大の距離にあるときにだけ使える考え方です。実際の撮影では、別の考え方が必要になります。その場合の光学系を次に載せます。



この図は、 S で表した被写体(光源)をテレコンを用いて撮影している例です。この場合の光路を書くためには、まず、 L_1 レンズで S の実像を R に作ることを考えます。図では、実線は実際に光が通る光路を表し、破線は仮想的な線を表します。すべての光路を描くと図が複雑になってしまうので、実線については必要な部分だけを抜き出して描くと次のような図になります。



光源 S の先端から出た光線のうち、実像を考えるのに必要な光線は、軸に平行な光線と、凸レンズ L_1 の中心を通る光線です。この2本の線によって、実像 R の位置を特定することができます。一方、軸に平行な光線は、凹レンズ L_2 の作用で再び平行光線になり、カメラレンズ L に入射し、焦点位置 P_2 を通り、撮像素子上に焦点 P_3 を結びます。

次に、実像 R の先端を通り、凹レンズ L_2 の中心を通る光線を考えます。この光線もそのままカメラレンズ L に入射する光線として考えることができます。カメラレンズ L に入射する光線には、先に述べた平行光線と凹レンズの中心を通る光線があることになり、それが最終的には撮像素子上に像を結ぶことになるのです。この光学系は、それぞれの線を入射側に延長したところに虚像 V があるとして考え直すことができます。つまり、光源 S から出た光は、テレコンの作用により、虚像 V から出た光としてカメラレンズに入ることとなります。カメラレンズの立場で言えば、光源の位置が無限大の距離にない場合には、光源の位置が見かけ上近くにあり、しかも、像の大きさは小さくなるわけで、その分、カメラレンズの位置を変えて焦点を合わせ直さなければならないことを意味します。

虚像のできる位置はレンズの公式を用いて求めることができます。テレコンの凸レンズ L_1 から光源までの距離を a とすると、実像 R が出来る条件として、

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_1} \quad (1)$$

という関係が得られます。ここで、 b は L_1 と実像までの距離を表します。さらに、光源 S の高さを h とすると、実像 R の高さは $(b/a)h$ となります。また、虚像 V の高さは図から $(f_2/f_1)h$ になることは容易に分かります。 R と V の間には、 L_2 を中心とした三角形の相似関係があるので、

$$\frac{(f_2/f_1)h}{a' + (f_1 - f_2)} = \frac{(b/a)h}{b - (f_1 - f_2)} \quad (2)$$

という関係があります。ここで、 a' は L_1 から虚像 V までの距離を表します。まず、(2)式から h を消去し、次に(1)と(2)式から b を消去します。(2)式を変形すると、

$$a' + (f_1 - f_2) = \frac{f_2 a}{f_1 b} \{b - (f_1 - f_2)\}$$

という関係が得られますが、(1)式から得られる関係式 $a/b = (a - f_1)/f_1$ と $b = f_1 a / (a - f_1)$ を用いると、

$$a' = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 a - \frac{(f_1 - f_2)^2}{f_1}$$

という関係が求まります。ここでさらに、 $H = f_1/f_2$ という関係を用いると、

$$a' = \frac{a}{H^2} - \frac{(f_1 - f_2)^2}{f_1} \quad (3)$$

となり、虚像の位置 a' が a の関数として求まります。

それでは、テレコンを入れると、何が H 倍になるのでしょうか。そのため、倍率を計算してみます。テレコンを入れた時と、入れない時にそれぞれ焦点を合わせ直すと、カメラレンズの位置はずれていきます。テレコンを入れない場合に、光源 S とカメラレンズ L との距離、そのときの L と撮像素子 I との距離をそれぞれ $a + d''$ 、 g'' と書くことにします。すると、テレコンを入れない場合の倍率は $M = g''/(a + d'')$ になります。

一方、テレコンを入れた場合の倍率 M' は、虚像の大きさがもとの光源の大きさの f_2/f_1 倍なので、それも加味すると、 $M' = (f_2/f_1) g/(a' + d)$ と表されます。したがって、その比をとると、

$$\frac{M'}{M} = \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{a + d}{a' + d} \cdot \frac{g}{g''}$$

となります。ここで、十分遠方を撮影する場合を考えると、 $a, a' \gg d$ と $a' \approx a/H^2$ が成り立ち、さらに、 $g \approx g'' \approx f$ となるので、

$$\frac{M'}{M} \approx \frac{f_2}{f_1} \frac{a}{a'} \approx \frac{f_1}{f_2} = H \quad (4)$$

とすることができます。したがって、有限な距離にある被写体を撮影するときには、テレコンを入れると焦点距離が H 倍になるのではなくて、像倍率が H 倍になると考えた方がよいのです。また、(4)式でも分かりますが、 $a, a' \gg d$ が成り立つ限りは、基本的にテレコンをどこにおいても倍率は変化しません。