

第 10 回八光熱の実験コンテスト 熱を用いて写真を現像しよう!

東京電機大学 未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科岩瀬・畠山研究室 (B 班)

概要

本実験では虫めがねカメラを用いて、鮮明な写真を撮影できる条件の指標を作成することを目的とする。本実験における鮮明な写真の条件は、文字と建物の輪郭が認識できることである。本実験を通して、自然環境の変化時に対応する撮影条件を設定することで鮮明な写真を撮影できるようにする。

実験では、手作りカメラと感光紙を用いて、青写真の撮影を行う。撮影した青写真を比較して、撮影環境の変化がもたらす青写真の変化を確認することで、鮮明に青写真を撮影する方法を模索する。

実験した結果、建物や窓の輪郭を認識できる写真を撮影できた。しかし、撮影対象に書かれた文字は認識できなかった撮影した 23 枚の写真の比較より照度、撮影時間だけでなく、撮影時の天候も写真に大きく影響する事が判明した。

本実験を通して、建物の輪郭が認識できる写真の撮影に成功し、天候が鮮明な写真を撮影する条件として重要であることが分かった。撮影した写真の撮影時における露光時間、照度の相関を調べることで、鮮明な写真の条件を探索しようとしたが実験環境や使用したカメラのピント等の問題によって鮮明な写真を撮影できる条件の指標を作成できなかった。そこで、鮮明な写真を撮影するための環境を見直した。今後、見直した環境を用いて鮮明な写真を大量に撮影し、露光時間、天候、照度の相関から鮮明な写真を撮影できる条件を探索する必要があると考える。

1 目的

本実験では虫めがねカメラを用いて、鮮明な写真を撮影できる条件の指標を作成することを目的とする。本実験における鮮明な写真の条件は、文字と建物の輪郭が認識できることである。実験では撮影条件を変化させた写真を撮影する。現像した写真の鮮明さ、撮影条件を比較することで撮影条件を検討する。本実験を通して、自然環境の変化時に対応する撮影条件を設定することで鮮明な写真を撮影できるようにする。

2 使用機器

使用機器を表 1 に示す。

表 1: 実験機器

機器名	メーカー	型番	シリアルナンバ
虫めがねカメラ	-	-	-
照度計	TASI	TASI-8720	-
ホットプレート	Abitelax	AHP-28G	15002346

本実験で使用した試料を以下に示す。

- コピーアートペーパー (感光紙)(60mm×60mm) 23 枚

3 システム

3.1 理論

写真を撮影するうえで必要となる理論として、結像公式がある。凸レンズによる光の屈折を図 1 に示す。

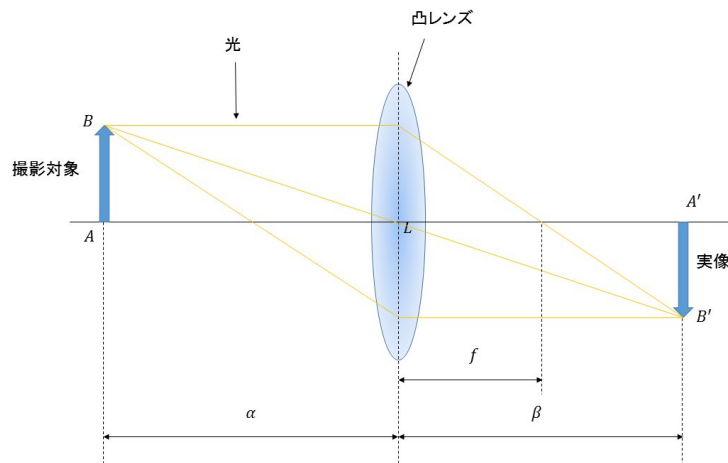


図 1: 凸レンズによる光の屈折

図 1 より、凸レンズにより撮影対象 AB に当たった光は凸レンズを通して交わり、撮影対象と上下左右反対の像 A'B' を結ぶ。この像 A'B' が結ばれる地点に紙などの光を写す投影物を置くことで像を見ることができる。ここで、焦点距離 f とレンズから撮影対象への距離 α とレンズから投影物への距離 β には式 (1) に示す結像公式が得られる。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \quad (1)$$

ここで、式 (1) において、レンズから撮影対象への距離が無限長になる場合の凸レンズによる光の屈折を図 2 に示す。

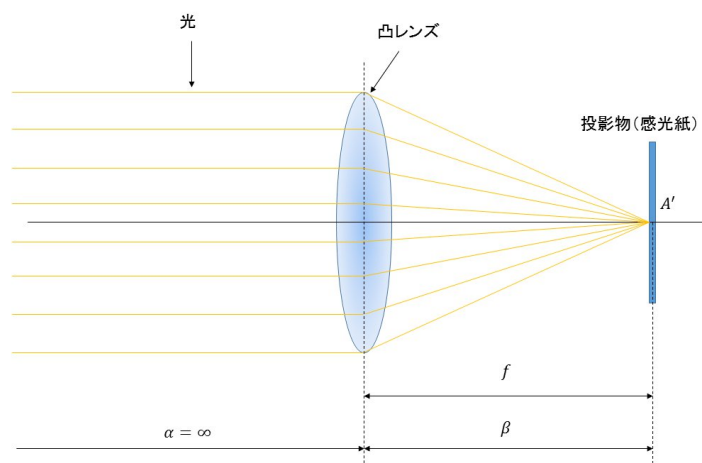


図 2: 凸レンズによる光の屈折 (無限遠)

図 2 より、レンズと撮影対象間の距離が無限遠になると、焦点距離 f は式 (2) で示される。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

式 (2) より、レンズと撮影対象間の距離が無遠慮になることで、焦点距離はレンズと投影物間の距離 β と等しくなる。これは、レンズと撮影対象間の距離が大きく離れることで、焦点距離は撮影に用いるレンズに強く依存することを表す。

次に、本実験では像 A' が結ばれる地点に感光紙を配置する。感光紙を置くことで、光の当たる地点において化学反応がおき、写真の撮影が可能になる。今回使用するジアゾ感光紙にはジアゾ化合物が塗布されており、熱を加えることで青色の染料を形成する。しかし、感光紙に光が当たるとジアゾ化合物が分解されるため、当たる光量に応じて感光紙表面のジアゾ化合物が減少する性質がある。これにより、熱を加える際、光の当たっていた場所は色が薄くなり、当たっていなかった場所は色が濃くなる。したがって、色の濃淡により写真を撮影することが可能になる。

3.2 カメラ構造

実験で使用する手作りカメラの構造について説明する。まず、カメラの構造を図 3 に示す。

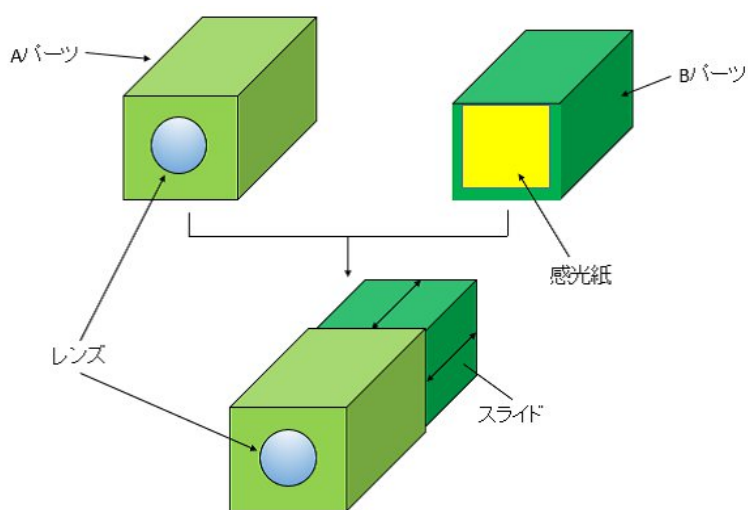


図 3: 手作りカメラの構造

図 3 に示すように、本実験で使用する手作りカメラは A パーツと B パーツで構成されている。A パーツにはレンズを取り付けて光を取り込む機能がある。B パーツには取り込んだ光を紙媒体に映し出す機能がある。B パーツには図 4 に示すように青写真を撮影するために使用するジアゾ感光紙を挿入する機構を搭載している。これにより、感光紙を簡単に取り替えることが可能になる。

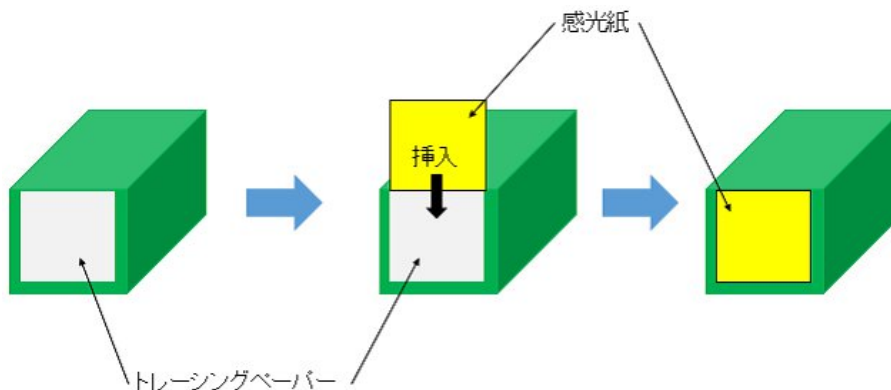


図 4: 感光紙の挿入

手作りカメラに使用した材料を表 2 に示す.

材料	個数
方眼紙	2 枚
拡大鏡	1 個
トレーシングペーパー	1 枚
画用紙 (黒)	1 枚
のり	適宜
両面テープ	適宜
セロハンテープ	適宜

カメラの作成手順を以下に示す.

- 1) 方眼紙で $8 \times 8 \times 25\text{cm}$ の筒 (以下 A パーツと示す) と $7.5 \times 7.5 \times 24\text{cm}$ の筒 (以下 B パーツと示す) を作成する.
- 2) A パーツと B パーツの内側全体に画用紙 (黒) を貼り付ける.
- 3) 方眼紙から 8×8 の正方形を切り出し, 直径 4cm の穴をあける.
- 4) 3) で作成したパーツに拡大率 3 倍のレンズを取り付ける.
- 5) A パーツの先端に 4) で作成したパーツを取り付ける.
- 6) 方眼紙から 8×8 の正方形を切り出す.
- 7) A パーツの先端に 6) のパーツを上側だけ固定するように取り付ける.
- 8) 方眼紙から凹型 (外枠 $7.5 \times 7.5\text{cm}$, 内枠 $6.5 \times 5\text{cm}$) のパーツ切り取る.
- 9) B パーツの先端にトレーシングペーパーと 8) で作成したパーツを取り付ける (8) のパーツは外側だけをセロハンテープで固定する).
- 10) 作成した A パーツの内側に B パーツを入れるように組み合わせて完成.

上記の手順で作成した手作りカメラの A,B パーツを図 5, 組み合わせたものを図 6 に示す.

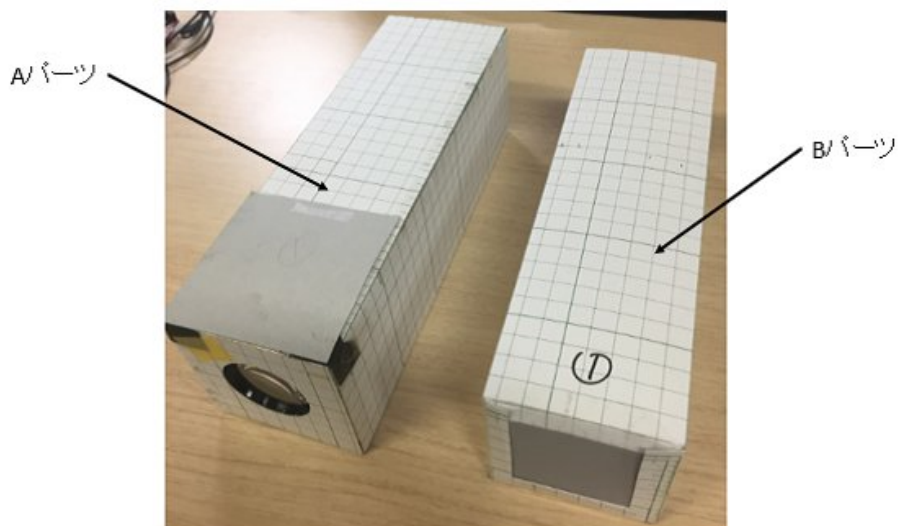


図 5: 作成した手作りカメラ (A, B パーツ)

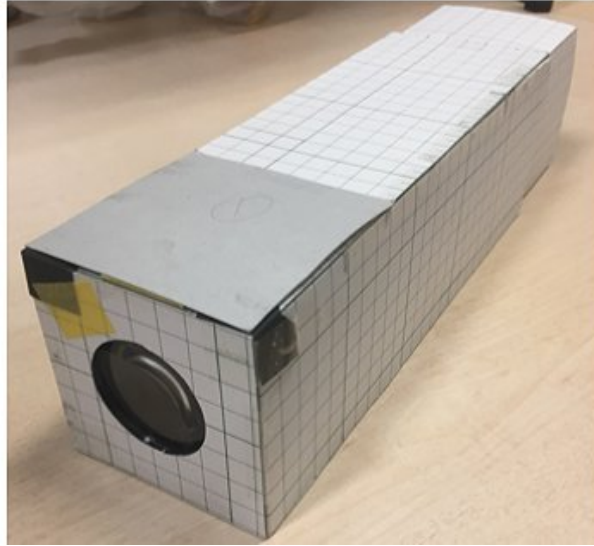


図 6: 作成した手作りカメラ (完成)

4 実験

4.1 実験内容

本実験では、手作りカメラとジアゾ感光紙を用いて、青写真の撮影を行う。手作りカメラは4節で述べたカメラを使用する。実験の内容としては、図7に示す実験環境において、天気、光量、撮影時間を変化させたうえで青写真を撮影していく。そして、撮影した青写真を比較して、環境の変化がもたらす青写真の変化を確認し、鮮明に青写真を撮影する方法を模索していく。



図 7: 実験環境

4.2 実験手順

手作りカメラを用いた青写真撮影実験の実験手順を以下に示す。

- 1) 撮影対象に向けてカメラのレンズを向けて固定する。
- 2) 下から覗きながら B パーツをスライドさせ、トレーシングペーパーに撮影対象が明瞭に映るように調整する。
- 3) 調整した位置を記録するために、A パーツと B パーツの境目に線を入れる。
- 4) 暗所に移動して、B パーツに感光紙を挿入する。
- 5) A, B パーツを再度組み合わせ、レンズに蓋をしたまま撮影場所まで持っていく。
- 6) 3) で記録した線に合わせるようにカメラを設置する。
- 7) カメラの設置場所付近の光量を計測器で測り、記録する。
- 8) 撮影開始と同時に蓋を開け、設定して時間まで放置する。
- 9) 設定時間が経過したら、蓋を閉め暗所に移動する。
- 10) カメラから感光紙を取り出す。
- 11) 取り出した感光紙を 160 度に熱したホットプレートで焼いて、青写真を現像する。

上記に示す実験手順を踏まえて、天気、光量、撮影時間が異なる様々な実験条件において青写真を撮影する。

4.3 実験結果

本実験では、東京電機大学北千住キャンパスを撮影対象として実験を行った。撮影対象を図 8 に示す。



図 8: 撮影対象

図 8 を対象に 23 回撮影を行い、写真を現像した。現像した写真の中から、文字の認識が可能であるか、窓や建物の輪郭が認識できるかという選定条件の基、最も良く撮れた写真を選定した。撮影環境を表 3、写真を図 9 に示す。

表 3: 最も良く撮れた時の撮影環境

照度 [lux]	撮影時間 [min]	天候
12220	8	晴れ

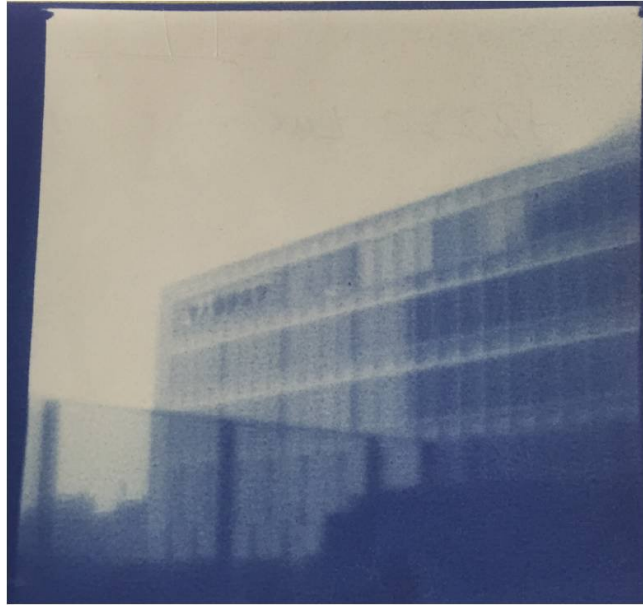


図 9: 最も良く撮れた写真

図 9 は，撮影した 23 枚の写真の中で最も輪郭の認識がしやすい写真である．図 8 に示した撮影対象と比較すると，文字の読み取りが困難であるが，存在を認識する事ができる．また，建物や窓の形が認識できる．

撮影した写真の中で，照度と撮影時間が近く，天候が異なる写真を選定した．撮影環境を表 4，写真を図 10 に示す．

表 4: 撮影環境

照度 [lux]	撮影時間 [min]	天候
13840	8	くもり



図 10: くもりの時の写真

図 10 は，図 9 と比べて建物や窓の輪郭が認識しづらく，文字は見えない．撮影環境は，照度が高く，撮影時間

が同じであるが、天候がくもりである。この事から撮影時の天候が写真に大きく影響する事が判明した。しかし、本実験では実験時の照度や撮影時間を考慮して実験を行ったが、表 3 と表 4 より撮影時の照度と撮影時間の相関関係を得ることができなかった。

5 考察

5.1 鮮明な写真を撮る撮影条件について

本節では実験条件と結果から鮮明な写真を撮れる指標を作成できるかを考える。撮影条件の相関係数を用いて実験条件のである。相関係数の計算にあたり撮影した写真を鮮明にとれたグループと鮮明にとれなかったグループに分ける。次にそれぞれの実験条件である露光時間と照度の相関係数を導出する。鮮明にとれたグループの実験条件を表 5, 鮮明にとれなかったグループの実験条件を表 6 に示す。

表 5: 鮮明に撮影できた写真の実験条件

写真の番号	時間	照度
A	12	10500
B	10	14300
C	6	12200
D	10	14000
E	9	14300
F	8	14000
G	11	8900
H	8	12200
I	14	6100
	相関係数	-0.6912

表 6: 鮮明に撮影できなかった写真の実験条件

写真の番号	時間	照度
J	30	12000
K	11	10500
L	13	6100
M	7	13840
N	3	17120
Q	6	155800
R	8	13840
T	2	17210
W	5	15580
	相関係数	-0.53983

表 5, 表 6 より鮮明にとれたグループと鮮明にとれなかったグループ共に負の相関があることが分かる。共に負の相関があるため、鮮明にとれたグループ、鮮明にとれなかったグループの相関に違いは見られなかったそのため時間と照度だけでは鮮明な写真を撮影するための関係性を見いだせなかった。

原因としては鮮明な写真のデータ数が少ないことが挙げられる。この問題の解決策としては鮮明な写真を様々な実験条件の下で大量に撮影する必要がある。しかし今回の実験ではピントのずれによって鮮明な写真を撮影できなかった事例が発生した。そこで鮮明な写真を確実に撮影できる方法を探すと考える。鮮明な写真を確実に撮影できる方法に関しては 5.2 節以降の考察で述べる。

5.2 綺麗な写真を撮影するには

本節では、綺麗な写真を撮るための方法について考察する。ただし、本節における綺麗な写真とはピントが合っていて、なおかつ適度な明るさを持った写真とする。

まずはピントの合った写真を撮るための方法について述べる。ピントの合った写真を撮るためには被写体深度というものがある。被写界深度が深いほど、ピントを合わせた被写体から離れた被写体や背景に対して

もピントが合っているように見える。手前方向への被写界深度を前方被写界深度，奥行き方向への被写界深度は後方被写界深度という。前方被写界深度と後方被写界深度の近似式を式 (3), 式 (4) に示す [2].

$$\text{前方被写界深度} = \frac{\text{許容錯乱円形} \times \text{被写体までの距離}^2}{\text{レンズ口径} \times \text{焦点距離} + \text{許容錯乱円形} \times \text{被写体までの距離}} \quad (3)$$

$$\text{後方被写界深度} = \frac{\text{許容錯乱円形} \times \text{被写体までの距離}^2}{\text{レンズ口径} \times \text{焦点距離} + \text{許容錯乱円形} \times \text{被写体までの距離}} \quad (4)$$

被写界深度は，表 7 に示すように被写体とカメラの距離が離れているほど，焦点距離が短いほど，レンズの口径が細いほど深くなる [3]. 焦点距離とは，レンズの素材と曲率半径によって決まる固有の定数である。

表 7: 被写界深度への影響

	被写界深度 浅い	被写界深度 深い
被写体との距離	近い	遠い
レンズの焦点距離	長い	短い
レンズの口径	太い	細い

被写体とカメラの距離を離すと被写界深度が深くなる理由は，被写体間の距離が被写体とカメラの距離に対して小さくなるためである。

レンズの径を変えるとピントが合いやすくなる理由について説明する。図 11 において A, B は被写体であり，太陽光を反射して光を放っているものとする。また，同じ色の線が交わっているところに光が集まっているものとする。A の光は，感光紙上のほぼ一点に集まっているのでピントが合っている。しかし，B の光は感光紙上に届く範囲が広いのでピンボケしている。図 12 のように絞りをういてレンズの口径を細くすると，B の光が感光紙上に届く範囲が狭くなるのでピンボケを抑制することができる [4].

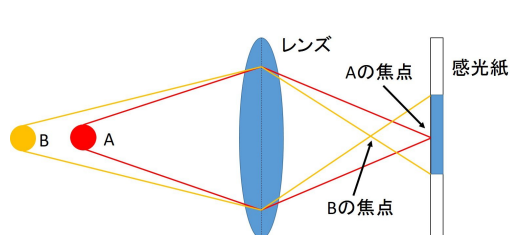


図 11: 絞りをなし

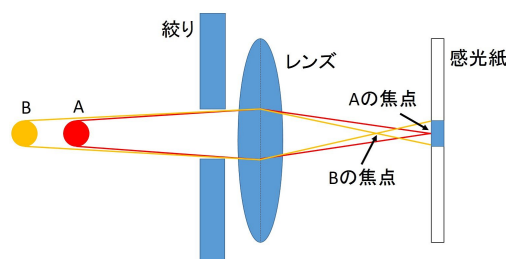


図 12: 絞りをあり

次に明るい写真を撮影するための方法について述べる。写真を明るくする方法は，レンズの口径を太くする，焦点距離を長くする，晴れた日に撮影する，露光時間を長くするの 4 つである。レンズの口径を太くすると写真が明るくなる理由は取り込める光の量が増えるからである。焦点距離を長くすると写真が明るくなる理由は感光紙に写る像の倍率が小さくなるためである。ただし，被写界深度を深くするためにレンズの口径は細いまま，焦点距離は短いままにするべきであると考えた。

綺麗な写真を撮影するためには，焦点距離の短いレンズを選定し，必要に応じてレンズの口径を細くし，晴れた日に十分な露光時間をとって遠くの被写体を撮影すればよいと考えた。ただし，露光時間が長すぎた場合は写真が白っぽくなってしまいますので時間の調整が必要である。

5.3 撮影した写真から，対象物に書かれている文字を判別可能にする方法を考察する

今回撮影した写真では，最も綺麗に撮影できたと判断した写真においても，撮影対象物に書かれた「東京電機大学」の文字を読み取ることは困難であった。そこで，どうすれば「東京電機大学」の文字を読み取る写真を撮影できるかを考察する。

今回撮影した写真では、文字を読み取ることができなかった。その原因として、ピントと解像度という2つの要素が大きな原因ではないかと考えた。原因として考えられるもう1つの要素である撮影時間に関しては、色の濃さにのみ影響すると考えたため、文字を読み取ることができない直接的な原因ではないと判断した。

まず一つ目の要因と考えたピントであるが、ピントが正確にあっていなければ像はぼやけてしまい、文字を読み取ることが困難になる。今回制作したカメラでは、ピント調整用にトレーシングペーパーを張り、写し出された像を目視確認してピントの調整を行った。この際、2つの筒を出し入れし、レンズから感光紙までの距離を変えることでピントの調整をしていたが、図13に示すようなスライド式という構造上、細かな調整が困難であった。

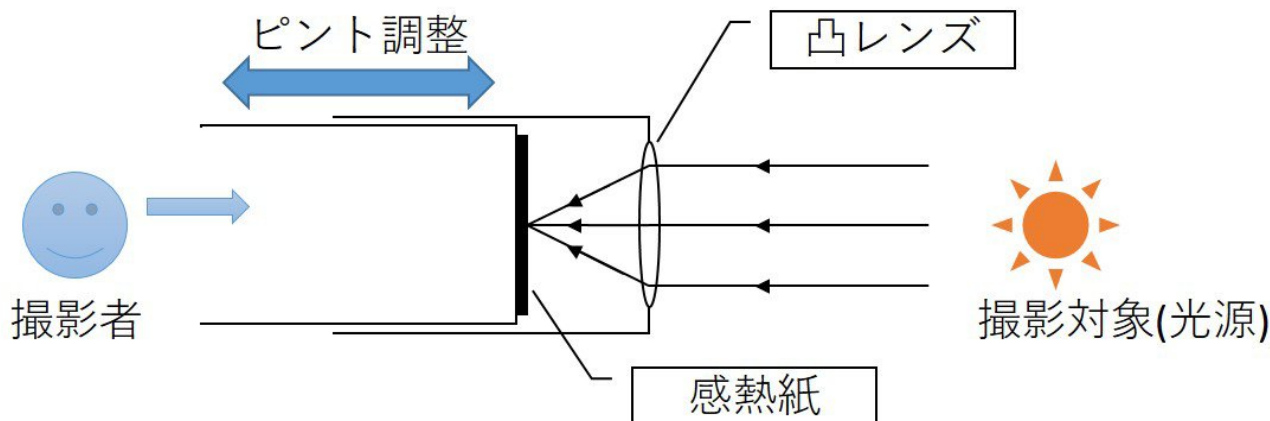


図13: スライド式

そのため、図14のように差動ねじのような構造を採用することで、より精密なピント調整ができるようになる。それぞれの筒に、ねじ穴の開いた部品を装着し、両方に1本のねじを通す。このねじを回すことで、ねじのピッチ差を利用して様々な分解能で長さの調整が可能になる。

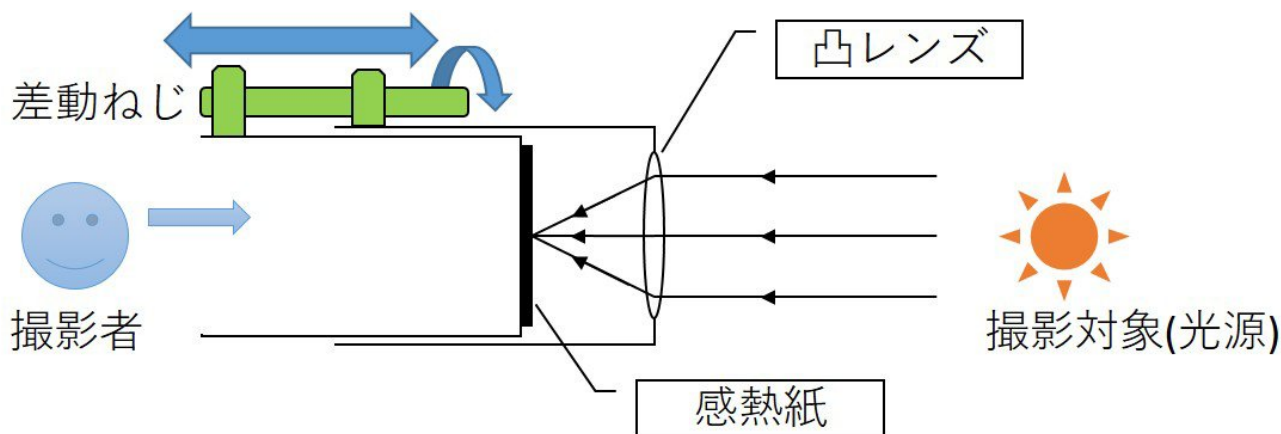


図14: 差動ねじ式

2つ目の要因は、写真の解像度の不足にあると考える。解像度を上げるとすると、一般的なデジタルカメラではセンサ側の解像度を上げることになる。しかし、今回制作したカメラはセンサにあたる部分にフィルムとしてジアゾ感光紙を用いたアナログ式である。このようなアナログ式のカメラにおいて、センサ（フィルム）の解像度について議論することが困難であると考えられる。ジアゾ感光紙は、芳香族ジアゾニウム塩が光によって分解反応を起こすことを利用している。そのため、ジアゾ感光紙の解像度は、紙の表面に塗布された芳香族ジアゾニウム塩の分子の分布に依存すると考えられる。このことから、デジタル画素センサのように画素数が一定でないジアゾ感光紙の解像度については、議論、改善が困難であると結論付ける。

そこで、フィルムの解像度を直接上げるのではなく、写された像の解像度に影響を及ぼすであろうレンズに着目する。今回、カメラに使用したレンズは、安価なプラスチック製のレンズである。このレンズはホビー用途であるため、その品質は高くない。今回のような単色の写真を撮影する場合には、光の周波数ごとの透過率など、カメラレンズの性能として一般的に語られる要素よりも、光線そのものに対するノイズの影響が大きく結果に表れると考える。図 15 に示したように、安価で低品質なプラスチックレンズでは、表面の研磨などが十分でないことが予想される。その結果、レンズを通した光線には、ノイズが乗る。このノイズにより、写される画像はぼやけたようになってしまうと考えられる。

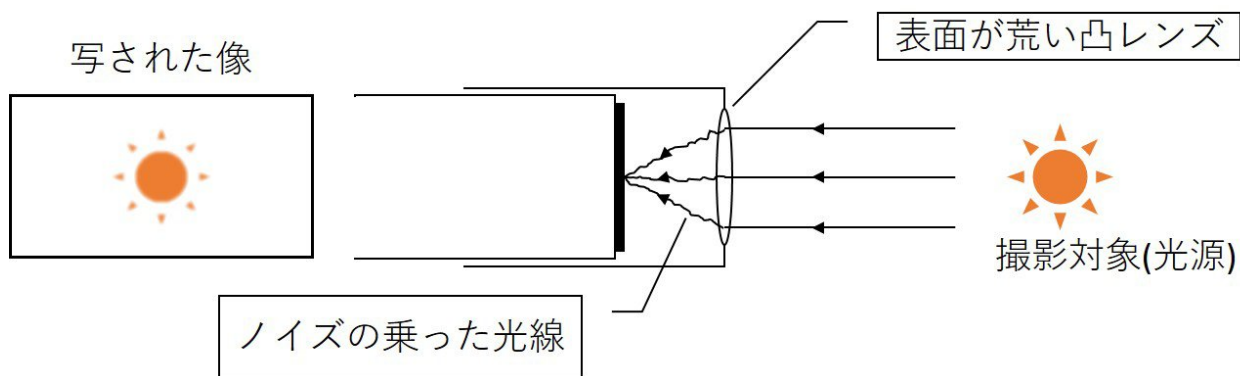


図 15: 低品質なレンズにより撮影した画像のイメージ

そこで、図 16 に示すように、研磨が十分にされ表面が滑らかになった、より高品質なレンズを使用することで、より解像感のある写真を撮影可能であると考えられる。

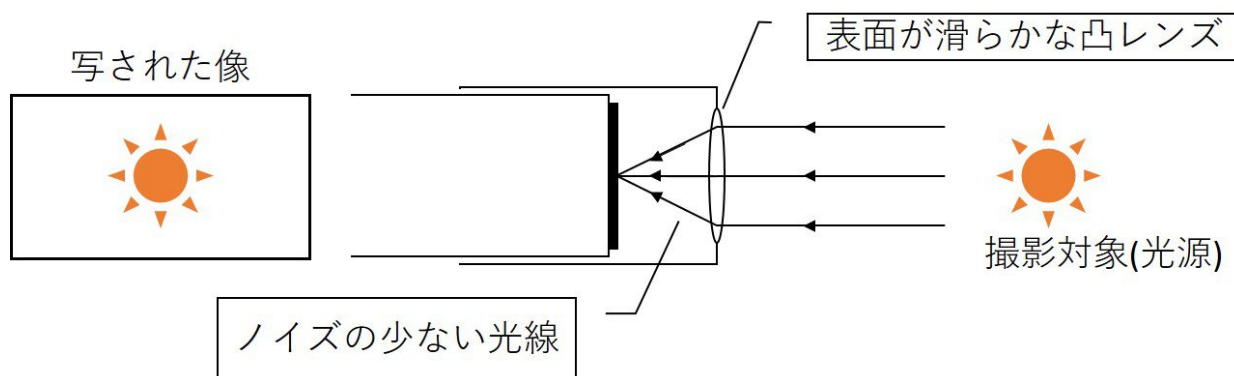


図 16: 高品質なレンズで撮影した画像のイメージ

さらに、高価なレンズは表面の滑らかさだけでなく、レンズ自体の歪みも少ないことが予想されるため、さらに光線に乗るノイズは小さくなると考えられる。このように、使用するレンズの品質を上げることが、写真の品質にも影響すると考える。

以上のように、「東京電機大学」の文字が読み取れるような写真を撮影するためには、差動ねじ機構を採用したピント調整機能による、より緻密なピント調整と、光線を低ノイズのまま通過させることができる高品質なレンズという2つが必要であると考えられる。

5.4 撮影した環境の見直し

実験環境の見直し・カメラの露光時間が長いと固定する必要がある今回撮影した写真では、文字をきれいに読み取ることができなかった。その原因を実験環境の面から考察する。

本実験では、露光時間を最短 分から最長 分として撮影している。そのため、写真を綺麗に撮影するためには、露光時間中いかにカメラを動かさずに撮影できるかが鍵を握っている。しかし、本実験を行った環境としては学校の6階であり、風が比較的強く吹く環境であった。それにもかかわらずカメラを固定する台は非常に簡素なもので、固定するには些か心許ないものとなっている。図にカメラの固定台を示す。

図に示すカメラを固定する台は、カメラを上に乗せるだけとなっているため横からの風などに非常に弱い。そのため、風によってカメラが微妙にずれることで感光紙に投影される像がズレ、出来上がった写真にブレが生じたと考えられる。

そこで、よりカメラをしっかりと固定できる台を使用することで写真を綺麗に撮影できるのではないかと考えている。図に外乱を考慮したカメラの台を示す。

図に示すカメラを固定する台は、カメラを上から乗せ両側から挟むことで横からの風に強い。また、カメラを台に乗せる際、台に対しての角度のズレも軽減できるのではないかと考えている。図にカメラを改善した台に乗せた予想図を示す。

6 結論

本実験を通して、建物の輪郭が認識できる写真の撮影に成功し、天候が鮮明な写真を撮影する条件として重要であることが分かった。本実験では虫ねがねカメラを用いて、撮影条件の異なる写真を比較することで鮮明な写真を撮影できる条件を探索した。撮影した写真の撮影時における露光時間、照度の相関を調べることで、鮮明な写真の条件を探索しようとした。しかし、実験環境や使用したカメラ等の問題によって鮮明な写真を大量に撮影することが困難であるため、相関による条件の提案はできなかった。そこでカメラのパラメータや撮影装置を見直し、鮮明な写真をより確実に撮影する方法を提案した。今後の課題として見直した実験装置で再実験し、鮮明な写真の条件を提案することが挙げられる。

7 謝辞

本実験は、株式会社八光電機様の助成を賜りました。このような貴重な実験の機会を与えていただき、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] "MiSUMi 技術講座", <http://koza.misumi.jp/>, 2016/12/11(23:10)
- [2] "わかりにくい被写界深度と絞り値・焦点距離・被写体距離の関係性をグラフにしてみた!", <http://blog.eflens.net/2015/06/calculate-depth-of-field/>
- [3] "「被写界深度」を理解して, 「ボケ」と「クッキリ」を使い分け", 2016/12/11(23:10) http://news.mynavi.jp/articles/2015/06/05/camera_kihon/
- [4] "デジタルアートのための技術とカメラブログ", 2016/12/11(23:10) <http://blog.skymapnote.com/?p=464>

A 付録

実験中に撮影した 23 枚の写真を図 17 に示す。

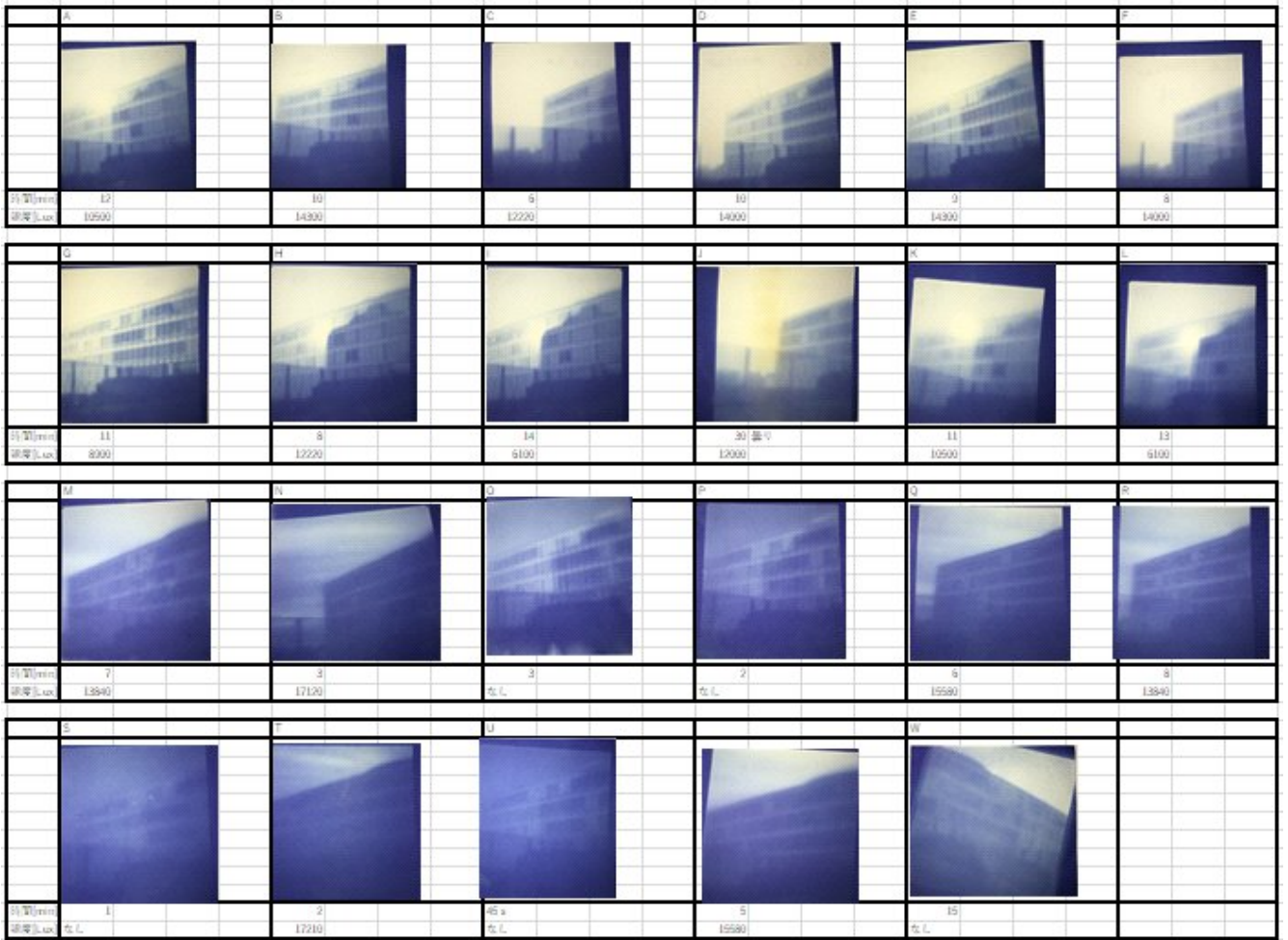


図 17: 撮影した写真の一覧