大気中の画像伝搬特性 (MTF) と気象要素との相関

防衛庁第1研究所 桜田 智実, 増谷 光正
中尾 定彦, 藤沢 彰
防衛大学校電気教室 安岡 義純

地上高 1.5m, 光路長 400m の大気伝搬路における長時間露光の画像伝搬特性を測定し, 大気の MTF の変化と気象状況との相関について検討した. 大気の MTF は日照強度に比例し, 風速に反比例して低下する特性が得られ, また, 気象要素として日照および風速の他に単位時間の気温変動回数を含めることによって, 大気の MTF の変化とよく相関づけられる特性が得られた.

1. ま え が き

遠方の被写体をテレビカメラもしくは写真機等の撮像装置で撮像する場合, 被写体からの信号光は大気や撮像光学系等の何段階かの伝搬路を経た後に結像される. この際, 撮像した像には, 伝搬路の影響によってぼけが生じる. このぼけを修正し, 像を鮮明にするための画像処理を行ったり, 伝搬路の比較を行ったりするためには, 伝搬路の特性を知る必要がある. ここで, 大気以外の伝搬路の特性は光学的な測定によってあらかじめ知ることができるが, 大気伝搬路の特性は気象状況によって絶えず変化する. このため, 撮像した像の評価や画像処理をするためには大気伝搬路の特性を知る必要がある.

伝搬路の特性はレスポンス関数 OTF (Optical Transfer Function) によって表わされるが, 伝搬路の評価は一般に OTF の絶対値 MTF (Modulation Transfer Function) を用いて行われる¹⁾. 一方, 大気の状態は大気の屈折率の乱れによって論じられ, この乱れの度合は屈折率構造定数 C_n によって表わされる²⁾. 従来, 大気伝搬路による画像伝搬特性の研究のほとんどは大気の MTF と C_n との相関を求めることによりなされており³⁾, MTF の測定装置に関する研究や C_n の測定に関する研究がなされている⁴⁾⁵⁾. しかしながら, 大気の MTF を C_n と相関づけるよりもむしろ, 一般的な気象要素との相関が得られるならばより実際的であり, 有効に利用しうるものと考えられる. しかし, 大気の状態は

多くの気象要素で構成されるので, 数値的に規定して MTF と相関づけることが困難で, この種の研究成果はほとんど見られない.

筆者らは, 大気を介して被写体を撮像する際に, 大気の影響による画像の鮮鋭度の劣化の度合いを一般的な気象要素により知ることができれば有効であると考え, 光路長約 400m の大気伝搬路を用いた長時間露光の画像伝搬特性の測定を行い, 大気の MTF の変化と気象状況との相関について検討した.

2. 大気 の MTF に影響を及ぼす気象要素の検討

画像を構成する光が大気中を伝搬する場合, 伝搬路中にあるエアロゾル等の大気浮遊粒子による散乱や, 伝搬路に沿った大気の屈折率の乱れに起因する分散およびゆらぎ等によって像の鮮鋭度が劣化する. このうち, 長時間露光による大気の MTF は, 積分効果のために, 主に屈折率の乱れに起因する分散やゆらぎによって決定される.

長時間露光時の伝搬路の MTF: $T(u)$ は, 大気伝搬路の MTF を $T_A(u)$, その他の光学系等の MTF を $T_o(u)$ とすると次式のように与えられる⁶⁾.

$$T(u) = T_o(u) \cdot T_A(u) \\ = T_o(u) \cdot \exp \{-57.44 u^{5/3} \approx C_n^2 \lambda^{-1/3}\} \quad (1)$$

ここで, u は伝送画像の空間周波数, λ は大気伝搬路長, λ は伝送画像を構成する光の波長である. また, C_n は次式で与えられる⁷⁾.

$$C_n = \frac{77.6P}{T^2} \left(1 + \frac{0.0753}{\lambda^2} \right) \times 10^{-6} C_T \quad (2)$$

ただし, $C_T^2 r^{2/3} = \langle [T(r_1) - T(r_2)]^2 \rangle$, $l_0 < r < L$

"Correlation between Image Propagation Characteristic through Atmosphere and Weather Parameters" by Tomomi Sakurada, Mitsumasa Masutani, Sadahiko Nakao, Akira Fujisawa (First Research Center, Japan Defence Agency, Tokyo) and Yoshizumi Yasuoka (National Defense Academy, Yokosuka).

ここで、 T は大気温度 (K), P は大気圧 (mb), $\langle \rangle$ はアンサンブル平均, $r=r_1-r_2$ は大気中の 2 点間の距離 (受信光学系入射瞳面の径方向を座標とする³⁾), l_0 および L はそれぞれ大気の流れの small scale および large scale と呼ばれ、大気伝搬路中に存在する種々の大きさの大気のかたまり (温度すなわち屈折率の異なる大気のかたまり) の大きさの最小値と最大値である。

(1) 式から、伝搬路の MTF に変化を及ぼす要因は、 α および λ を固定すると C_n^2 であり、また、(2) 式から C_n^2 は T, P および $\langle \Delta T(r)^2 \rangle$ の関数になっていることがわかる。しかし、 T は絶対温度で表わされているので温度が多少変化しても C_n^2 にはほとんど影響せず、また、 P についても同様のことがいえるので、 C_n^2 は主に $\langle \Delta T(r)^2 \rangle$ の変動に依存して変化することがわかる。結局、大気 MTF は大気中の 2 点間の温度差のアンサンブル平均 $\langle \Delta T(r)^2 \rangle$ の変動に応じて変化する特性を持つことが推察できる。ここで $\Delta T(r)$ は大気のじょう乱強度の大きさに応じて $10^{-3}^{\circ}\text{C} \sim \text{数}^{\circ}\text{C}$ の範囲を数十 Hz 程度までの周波数で変動する値であり、一般的な気象要素として考えられる性質のものではない。そこで、大気中の 2 点間に温度差を生じさせる原因となる一般的な気象要素は何であるかを考える必要がある。

地表面近くの大気は太陽光によって熱せられた地表面からの熱伝導、輻射および対流等によって暖められる。その結果、地表面の局所的な構成要素の違いに応じて、大気中には温度の異なった数多くの大気のかたまりが発生する。これが日中における $\langle \Delta T(r)^2 \rangle$ の発生原因であ

り、大気伝搬路に沿って存在する大気のかたまりの数と各々のかたまり間の温度差の大きさが大気伝搬路の MTE に影響を与えるものと考えられる。したがって、日中における大気 MTF は、主に日照強度、風、場所、地上高等によって変化すると考えられる。特定な場限定して考えると、大気中の 2 点間の温度差は日照強度と風速とによって変化することが推測できる。しかしながら、大気 MTF に影響を及ぼすもうひとつの要因である大気のかたまりの数は場所 (地表面の状態) に依存した量であると考えられ、一般的な気象要素でこれをモニターすることは困難であると考えられる。

上述のように、長時間露光における大気 MTF に影響を及ぼす一般的な気象要素として、日中においては日照強度と風速とがあげられる。その他に温度、湿度、気圧についても検討の必要があると思われる。また、大気 MTF と上記の気象要素との相関を検討する場合、何らかの方法で大気のかたまりの数を測定する必要がある。

3. 実験方法

図 1 に実験系統図を示す。伝搬路の MTF は矩形パターンを送らせ、そのコントラストから測定している。伝送画像としては、表面に無反射塗装を施したアルミ板に視野換算で $1 \sim 25 \text{ cycle/mrad}$ の格子を形成させた 10 種類のパターンを用いている。送光点と受光点とは同一場所に設置されており、蛍光灯の光 (FL-D, 点滅回数: 100 回/sec) で照明された伝送画像は、送光点から 200m

図 1 画像伝搬特性測定系

Experimental arrangement for measurement of image propagation characteristics.

の地点にある直径 200 mm の反射鏡で反射されて受光点に達する。受信光学系は開放口径 120 mm, 焦点距離 1,000 mm の望遠鏡と 10 倍の顕微鏡レンズとを組合せて実効的に焦点距離 10,000 mm の光学系を構成している。光学系を通った光は結像面に置かれた $200\mu\text{m}\phi$ のピンホールを経た後、光電子増倍管で検出される。その後、ロックインアンプを用いて検出出力の中から伝送画像の信号成分 (AC 成分: 100 Hz) のみを抽出して増幅し、ペンレコーダーに記録している。測定にあたっては、受信系は固定し、送信パターンを移動させている。送信パターンは、長時間露光の測定であることを考慮して約 1 Hz 以上の周波数成分を有する大気ゆらぎが積分できるように、1つの格子の端から端までが約 6 秒で受信視野の中心を横切る速度で移動させた。また、ゆらぎの平均値をレコーダー上に記録させるためにロックインアンプの出力時定数は 1 秒とした。受信望遠鏡の F 値は、螢光灯の分光スペクトル分布 (FL-D) およびフォトマルの波長感度 (S-20) を考慮し、色収差による分解能の劣化を防止するために $F:16$ で測定した。光学系の分解能、フォトマルの瞬時視野、送信パターンの移動速度およびロックインアンプの時定数とを考慮すると測定時における受信系の分解能は、15 cycle/mrad の送信パターンの測定時ではほぼ $30\mu\text{rad}$ である。

大気の MTF と一般的な気象要素との相関を容易に、

精度良く検討するために、大気伝搬路は一般的気象要素がほぼ同じであると考えられる $200\text{m}\times 250\text{m}$ の平坦な空地の中に設置した。光路長は約 400 m で、地面、池等の上を通り、地上高は約 1.5 m である。この大気伝搬路中では一般的な気象要素は同一状態であると仮定し、気象測定装置は大気伝搬路の中間点に設置した。日照強度、風向・風速、温度、湿度、気圧の一般的気象要素の他に、前述の大気のかたまりの数を測定するために、高速応答の熱電対 ($25\mu\text{m}\phi$, クロメル-アルメル) を用いて単位時間の気温変動回数を測定した。この熱電対は 0.025°C 以上の気温変動を検出することができる。風速はプロペラ形風速計の他に、低風速での測定精度を向上させるために熱線風速計を併用した。気象要素の測定結果は送受光点に伝送され、記録印字されるようになっていく。

実験は夏(期間1)、秋(期間2)および冬(期間3)の3回の時期に行った。実験期間中の気象条件を表1に示す。なお、本研究では大気の MTF と日照強度との相関を検討するために、あらかじめ実験結果からは日中以外の測定結果および雨天における測定結果は削除した。

4. 実験結果および検討

図2の写真は、受信望遠鏡に写真機を取り付けて撮影した矩形パターンの一例である。伝搬路の影響により光

表 1 実験期間中における気象条件

Weather conditions during the term of experiments.

実験期間	日照 (cal/cm^2)		風速 (m/sec)		温度 ($^\circ\text{C}$)		湿度 (%)		気温変動回数 (回/sec)	
	範囲	平均	範囲	平均	範囲	平均	範囲	平均	範囲	平均
期間 1 (53.8.8~8.29)	0~1.2	0.55	1~3.9	2	27~36	29.7	38.6~76	53	6.2~12.4	10.3
期間 2 (53.10.31~11.2)	0~0.8	0.25	0.5~1.4	1	13~17	16	43~66	55.9	3.6~6.7	4.96
期間 3 (54.2.19~3.3)	0~1.1	0.4	0.5~4.1	2.7	7~20	11.3	22~72	40	1.3~10	6.3

図 2 伝送画像と画像信号強度の変化 (u : 空間周波数)

Transmission image photo and image signal intensity propagated through the atmosphere. (u : spatial frequency)

図 3 伝送路 MTF の空間周波数依存性

Dependence of MTF on the spatial frequency.

が拡散されて明るい部分が広がっている様子が写真でも確認することができる。写真の下側には、各送信パターンでのペンレコーダーに記録された受信信号強度の変化の一例を示したものである。パターンの明部に相当した部分の信号強度を $I_{\max}$ とし、暗部に相当した部分の信号強度を $I_{\min}$ とすると、伝搬路の MTF すなわち $T(u)$ は受信パターンのコントラストで与えられ、次式から求めた。

$$T(u) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4)$$

図 3 は伝搬路の MTF の測定結果の一例を示したものである。図から送信パターンの空間周波数に対する MTF の変化の特性は日によって (測定 1, 測定 2), また、同じ日であっても時間によって (測定 2-a, 測定 2-b) 異なることがわかる。この変動は前節で述べたよう

図 4 伝送路 MTF の日照強度依存性

Dependence of MTF on the solar irradiance.

に伝搬路の大気状態の変化のみに起因したものである。

大気の状態は表 1 に示すような多くの気象要素がからみ合って形成されていて、その中の 1 つの気象要素だけで MTF との相関を求めることは不可能である。そこで、前節での検討から大気伝搬路の MTF には日照強度が最も大きな影響を与えと考えられるので、まず、日照強度のみについて検討を行った。図 4 に、MTF と日照強度との関係の一例を示している。同図は、表 1 の期間 3

図 5 伝送路 MTF の温度、湿度および風速に対する依存性 (空間周波数 $u=15$ cycle/mrad, 日照強度 $SI=0.25 \sim 0.35$ cal/cm²)

Dependence of MTF on the temperature, absolute humidity and wind velocity (Spatial frequency: $u=15$ cycle/mrad, solar irradiance: $SI=0.25 \sim 0.35$ cal/cm²)

に実施した図3と同様の実験結果から、空間周波数 $u=15$ cycle/mrad の場合についてまとめたものである。図4の結果を見ると、全体としてMTFは日照強度が強くなるにしたがって低下する傾向が観測される。しかしながら、データはかなりばらついており、図4の結果のみからMTFと日照強度との正確な相関を得ることはできない。

そこで次に、図4の結果から、日照強度が同じでありながらMTFの値が異なる原因を求めるために、日照強度が $0.25 \sim 0.35$ (cal/cm²) の間にある4つのMTFのデータについて他の気象要素との比較を行った。図5は図4の日照強度 $SI=0.25 \sim 0.35$ (cal/cm²) のときのMTFと温度、湿度および風速との関係を示したものである。図からわかるように、温度および湿度とMTFの変化との相関はほとんど見あたらない。しかし、風速 WV との関係について見ると、MTFは風速が大きくなるにしたがって良好になる様子が明白に表われている。同様な検討を表の実験期間のデータについても行った結果、図5と同様にMTFと温度および湿度との相関はなかったが、MTFと風速との関係は図6に示すように、図5の場合ほど明白でなく、また、その傾斜も異なっているが、やはりMTFは風速が大きくなるほど良好になる傾向が見られる。

以上の検討から、MTFは日照強度が大きくなるほど低下し、風速が大きくなるほど良好になるという傾向が

得られたので、この検討結果をもとに図4を、横軸を (SI/WV) の形にして書き変えてみると図7が得られる(ここで、日照強度 SI に0.1、風速 WV に0.5をプラスしてあるのは、いずれかの値が零となった場合には計算が不可能となるために、それぞれの計測量の最小単位量を加えたものである。また、後述の単位時間の気温変動回数を検討の中に加えるために、あらかじめ、図4および図7では風速が零の場合のデータは削除してあるが、風速が零の場合についても図の場合と同じ傾向が得られた)。図7を見ると、MTFは横軸にとった (SI/WV) の増加につれて低下してゆくことが図4以上に明白に表わされている。MTFの変動と気象要素との相関についてさらに詳しい検討を行うため、図7のデータのばらつきの原因について、図5と同様の方法で、MTFと温度、湿度、気圧および単位時間の気温変動回数との関係について調べた。その結果、温度、湿度および気圧については相関らしいものは見つからなかった。しかし、単位時間の気温変動回数については、気温変動回数が多くなるほどMTFが低下する傾向が見られた。そこで、日照強度および風速の他に単位時間の気温変動回数 TV を検討に含めるために、図7の結果について横軸を $(SI/WV) \times TV$ の形に書き変えてMTFとの関係を示したのが図8の○印である。図8を見ると、MTFは横軸にとった $(SI/WV) \times TV$ が大きくなるにつれて、あたかも1本の曲線上を変化するかのごとく減少してゆき、きわめ

図6 伝送路 MTF の風速依存性
(空間周波数 $u=15$ cycle/mrad, 日照強度 $SI=0.4 \sim 0.5$ cal/cm²)

Dependence of MTF on the wind velocity.
(Spatial frequency: $u=15$ cycle/mrad, solar irradiance: $SI=0.4 \sim 0.5$ cal/cm²)

図7 伝送路 MTF の SI/WV 依存性
(SI : 日照強度 (cal/cm²), WV : 風速 (m/sec))

Dependence of MTF on the SI/WV
(SI : solar irradiance (cal/cm²), WV : wind velocity (m/sec))

図8 伝送路 MTF の $(SI/WV) \cdot TV$ 依存性
(SI : 日照強度 (cal/cm²), WV : 風速 (m/sec), TV : 気温変動回数 (回/sec))

Dependence of MTF on the $(SI/WV) \cdot TV$. (SI : solar irradiance (cal/cm²), WV : wind velocity (m/sec), TV : the number of temperature variation per sec)

て強い相関が見られる。同図に、他の 2 回の実験期間中のデータを●および△印で示しているが、両者とも○印と同一線上にそって変化していることがわかる。このことは、MTF の気象条件による変化は、 $(SI \times TV)/WV$ の関数として表わされることを示している。

図 8 において、横軸にとった日照強度、風速および気温変動回数のうち、 (TV/WV) は単位長当りに存在する大気のかたまりの個数に相当する量であり、また、日照強度はその温度差の大きさを表す量に相当していると考えることができる。したがって、 $(SI \times TV)/WV$ は (1) 式および (2) 式の C_n^2 すなわち C_n^2 に相対する値であり、図 8 のように MTF と強い相関が得られることも納得できる。図 8 の MTF は、(1) 式における $T(u)$ に相当しているが、この $T(u)$ の変化は大気伝搬路の MTF: $T_A(u)$ の変化のみによって生じたものである。図 8 によると、多少のばらつきはあるが、 $T_A(u)$ は $(SI \times TV)/WV$ の増加とともに指数関数的に減少しており、このことと (1) 式との比較からも $(SI \times TV)/WV$ が C_n^2 に相対した値であることがうかがえる。

実験期間中の MTF は空間周波数 15 cycle/mrad において、図 8 に示すように 41~19% であった。また、日没 30 分後の測定では 44% の MTF が得られた。この時間帯では大気のじょう乱強度は非常に弱く⁵⁾、400m の大気伝搬路での MTF の低下はほとんど無視しうる程度と考えられ、この値は受信測定系のみによる MTF であると思われる。したがって、本実験における受信測定系の MTF: $T_0(u)$ を、 $u=15$ cycle/mrad の測定時において 44% と仮定すると、実験期間中の大気の MTF: $T_A(u)$ は 93~43% の範囲で変化したことになる。この値から、(1) 式により本実験における大気伝搬路の C_n^2 を求めると、 $\lambda=0.5\mu\text{m}$ で $C_n^2=2.7 \times 10^{-15} \sim 3.2 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ となる。一般に、大気のじょう乱強度が強いとき $C_n^2=2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 、中程度で $C_n^2=1.6 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 、弱いとき $C_n^2=6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ とされている⁸⁾ので、本実験でのじょう乱強度は中~強程度であることがわかる。これは地上高が 1.5m であり、しかも日中であることから、地表面の影響を強く受けてじょう乱強度が比較的強いためであると考えられる。大気のじょう乱強度は地上高 H によって大きく変化する。実験結果によると、 $C_n^2 \propto H^{-1/3} \sim H^{-4/3}$ の関係が報告されており^{5,9)}、 C_n^2 の H に対する依存性は報告によってかなり異なっている。本研究の結果を参考にすると、 C_n^2 は日中においては日照強度と風速とに大きく影響され、特に風速は見かけ上の地上高を変化させる効果を有していると思われる。したがって、 C_n^2 と H と相関を求める場合には、これらの気象要素を考慮した検討をしなければならない。特に、

地上高が低い範囲ではその影響は大きいものと考えられる。

5. む す び

遠方にある被写体を大気を介して撮像する際に、大気の影響による画像の鮮鋭度の変化の様子を一般的な気象要素により知ることができれば有効であると考え、地上高約 1.5m、光路長約 400m の大気伝搬路において、長時間露光による大気伝搬路の MTF の変動を測定し、一般的な気象要素との相関を検討した。その結果、大気の MTF は日照強度が強くなるにつれて低下し、風速が大きくなるにつれて増大することが明らかになった。さらに、大気の MTF は単位時間の気温変動回数にも依存し、 $(\text{日照強度}) \times (\text{気温変動回数}) \div (\text{風速})$ の量が大きくなるにつれて指数関数的に低下してゆくことがわかった。その他の気象要素である温度、湿度および気圧についても検討したが、大気の MTF の変動との相関は得られなかった。

終りに、日頃から御指導いただく防衛大学校 長谷川 太郎名誉教授、慶応大学 藤岡知夫教授ならびに実験に御協力いただいた防衛庁 1 研 中島謙技官に感謝する。

(昭和 54 年 11 月 10 日受付、昭和 55 年 7 月 9 日再受付)

【参 考 文 献】

- 1) R.E. Hufnagel and N.R. Stanley: Modulation Transfer Function Associate with Image Transmission through Turblent Media, J. Opt. Soc. Am., **54**, 1 (1964) 52-61
- 2) V.I. Tatarski: Wave Propagation in a Turblent Medium, McGraw-Hill Book Co., New York (1961)
- 3) N.S. Kopeika: Spectral Characteristics of Image Quality for Imaging Horizontally throughh the Atmosphere, Appl. Optics, **16**, 9 (1977) 2422-2426
- 4) W.H. Bailey, Jr: Line Spread Instrumentation for Propagation Measurements, SPIE., **125** (1977) 34-39
- 5) D.A. deWolf: Optical Propagation through Turblent Air. Opt. Laser Technol., **11**, 1 (1979) 29-36
- 6) D.L. Fried: Optical Resolution through a Randomly Inhomogeneous Medium for Very Long and Very Short Exposures, J. Opt. Soc. Am., **56**(1966)1372-1379
- 7) G.R. Ochs, R.R. Bergman and J.R. Snyder: Laser Beam Scintillation over Horizontal Paths from 5.5 to 145 Kilometer, J. Opt. Soc. Am., **59** (1969) 241-234
- 8) J.I. Davis: Consideration of Atmospheric Turblence in Laser System Design, Appl. Optics, **5**, 1 (1966) 139-147
- 9) K.L. Davidson, T. Houlhan, G. Schacher and C. Fairall: An Examination of Scaling Laws for C_n^2 in the Layer Adjacent to Ocean Waves, SPIE., **125** (1977) 40-42

A Tiny One-chip MOS Color Camera

*by Shusaku Nagahara, Kenji Takahashi,
Toshiyuki Akiyama, Morisi Izumita*

A novel tiny color television camera has been experimentally developed for consumer use employing one-chip MOS imager with a color filter array. Considering imager's cost and camera size, we have newly developed a 2/3 inch MOS imager and a small size 4×zoom lens with TTL view finder.

We have succeeded to design a novel circuits for reducing clock noise and fixed pattern noise that limited the sensitivity of the MOS imager camera.

This paper describes the color camera system configuration, color imager, zoom lens and the noise analysis of our imaging system. Today our camera's sensitivity has been limited by the random noise similarly to pick up tube cameras.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 34, No. 12 (1980) 1088~1095

Correlation between Image Propagation Characteristic through Atmosphere and Weather Parameters.

*by Tomomi Sakurada, Mitsumasa Masutani, Sadahiko Nakao,
Akira Fujisawa, Yoshizumi Yasuoka*

The effects of weather conditions on the image propagation through the atmosphere were studied experimentally. The white and black patterns which have the spatial frequencies of 1-25 cycle/mrad were observed at the point 400m from the patterns. Experimental data are discussed using the modulation transfer function (MTF) as functions of the temperature (T), the humidity (H), the solar irradiancy (SI), the wind velocity (WV) and number of temperature variation per sec (TV).

It is found that there are no interrelations between MTF and H and T in the propagation path, but that MTF decreases in proportion to $\exp [-(SI \times WV)/TV]$.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 34, No. 12 (1980) 1096~1101