

車 載 用 光 波 応 用 計 測

Applied Optical Measurement for Vehicle

板 倉 安 正⁽¹⁾
Yasumasa Itakura

要 旨

近年、光を利用する計測が注目を集めている。本小論は、自動車に搭載されるセンサに主点をおいて、光波応用計測の基本的な考え方といくつかの応用例についてまとめたものである。光波応用計測は、高精度、高速性、高感度、非接触にその特長がある。これらの特長を生かしたセンサとして、アンチスキッド用の非接触対地速度センサ、ウィンド・ワイパー制御用の雨センサ、安全な制動システムのための路面状態センサのは発が進められ、それぞれの実用性が確認された。光波応用計測に基づく各種センサは将来の自動車にとってますます有用なものとして発展するであろう。

This paper describes the basic concept and some examples of applied optical measurement for various sensors installed on a vehicle. The applied optical measurement has the advantages of high accuracy, rapid response, high sensitivity and noncontact to object. Some sensors, for example, ground velocity sensor, precipitation rate sensor and road surface sensor, have been developed to improve a safety, a driving performance and an amenity of vehicle.

These opto-electrical sensors could play a key role in future of vehicle.

(1) 滋賀大学教育学部

1. ま え が き

光波応用計測とは、光の波動性によって生じる諸現象を利用して、種々の量を計測することを言う。周知の通り、光は波動性と同時に粒子性を有している。光と物質との量子的な相互作用を理解する上では、粒子性、すなわち、光量子効果が重要となるが、空間を伝搬する光の現象の多くは、光を波として表すことによって説明される。

以下では、光の波動性に着目した種々の応用計測の中から、車に関連あるもの、中でも車両搭載を主とするもの、について述べる。ここで紹介する具体的なセンサ開発研究のいくつかはこれまでにこの技報にも報告されている。したがって、この小論では、光波応用計測の総説的な内容を多くし、既に報告された車載用光センサについては、そのいくつかを実例として引用することにする。先ず、光の簡単な解説から始める。

2. 光とその性質

2.1 光

古代、光は神として信仰の対象になっていたこともあった。人間は目によって光を認識しているのであるが、科学が十分に発達していない昔には、光は、余りにも捉えどころのない神秘的ものであったためと思われる。科学的な考え方を導入して、いくつかの成果を挙げたギリシャの哲学者も光については明解な解答を与えていない。ニュートン(1642-1727)の時代に至って、光は科学のそ上に登る。ニュートンは光の基本的な性質を次の公理にまとめている。¹⁾

「公理1：反射角と屈折角は、入射角と同一平面内にある。

公理2：反射角は入射角に等しい。

公理3：もし屈折された射線がまっすぐ入射点に送り返されたならば、それは入

射線によってさきに描かれた直線上に屈折されるであろう。

公理4：疎な媒質から密な媒質への屈折は、垂線に近づくようにおこなわれる。すなわち、屈折角が入射角より小さくなるようにおこなわれる。

公理5：入射の正弦は、屈折の正弦に対して正確にまたはほぼ正確に与えられた比になる。

公理6, 7, 8 省略」

これらは現在の光学の礎を成すものである。

しかしながら、ニュートンは光の本質として、自分の説に都合の良い粒子説をとっていた。光の波動説は、ホイヘンス(1629-1695)、ヤング(1773-1829)、フレネル(1788-1827)の研究により固められ、マックスウェル(1831-1879)によって光の電磁波論として確立される。さらに、今世紀になって、プランク(1858-1947)が量子の考えを導入すると、それを受けて、アインシュタイン(1879-1955)は光量子論を展開し、光は、粒子性を有すること、すなわち、波動性と粒子性を同時に有しているものと考えられるようになった。以上が光の科学史の概略である。²⁾³⁾

ところで、光の本質が明確にされる以前に、光の計測への応用は始まっていた。エジプト時代には、光の直進性を利用した測量が行われていたし、17世紀には、望遠鏡による天体観測が近代科学の花を咲かせた。光や電気に限らず、その技術は科学より前に経験的に始まっていることが多い。もっとも、科学が確立することによって、その技術が飛躍的に発展することは言うまでもない。

2.2 波としての光

光が横波として z 方向に伝搬するとき、数式的には次のように表される。

$$u(z, t) = A e^{j(kz - \omega t + \theta)} \quad (1)$$

ここで

A : 振幅 (この2乗はエネルギーの単位となる)

$k=2\pi/\lambda$; λ : 光の波長

$\omega=2\pi f$; $f=c/\lambda$, f : 光の周波数,

c : 光の速度

θ : 位相角

いろいろな光の現象を観測する場合、上式の実数部のみが問題となるわけであるが、計算上、このように指数関数で表す。指数項、 $kz-\omega t+\theta$ はまとめて位相という。横波(スカラー波)は振幅と位相で一意的に表される。スカラー波としての光のいろいろな性質は、上の数式によって記述されるが、分かりやすい表現をすれば次のようになる。

光は、妨げるもののない均一媒質中では、式(1)で表されるように正弦波として、変化することなく進行する。光波には、伝搬するとき等位相面が進行方向に垂直な平面波と同心球状になる球面波とがある。一般的には、光源が遠方にあるときは平面波、近くにあるときは球面波として扱われる。伝搬中に妨げるものがある場合、例えば、一つの開口があれば光はそこを2次光源として伝搬していく。光は開口によって折り曲げられて、より広がって伝搬していくように見える。これが回折である。光の進行方向に遮蔽物がある場合も、同様に回折によって扱うことができる。また、屈折率の異なる二つの媒質の境界面では、光は伝搬してきた媒質へ戻されるか、または、進行方向を曲げられて新しい媒質中へ進んでいく。前者が反射で、後者が屈折である。

媒質の異なる境界面が多数ある場合には、擾乱を受けて光の進行方向が定まらなくなる。この現象を散乱といい、小さい多数の粒子(例えば雨滴)や凹凸の激しい表面に光が照射されたときは、顕著な散乱が起こる。

同一の媒質の空間内に、二つの光波が存在するとき、重ねの理によって二つは作用を及ぼし合う。光の強いところが重なればその和としてより強く、弱いところはより弱くなる。これが干渉である。

2.3 偏 光

マックスウェルは電気と磁気に関する現象を四つの偏微分方程式と三つの媒質関係式にまとめた。この式を、真空中で代表される誘電体等方性媒質において解くと、電界と磁界が互いに直交し、さらに、伝搬方向にも直交して進行するベクトル波が得られる。これを電磁波という。この電磁波の計算された速度が空気中の光の速度に等しかったので、マックスウェルは「光は電磁波」であると結論した。この推論の正しさは、ヘルツ(1857-1894)によって、電磁理論の発表から15年後に実証される。

電磁波はベクトル波であるから、一般的には、電気ベクトルは進行方向 z に垂直な面内の直角座標 x, y 軸上に各々の成分を持つ。これを偏光していると言う。磁気ベクトルも同様であるが光の現象では電気ベクトルで説明することが多い。 (x, y) 平面内での電気ベクトルの軌跡は、一般には楕円になるので、これを楕円偏光という。この軌跡が円になる場合は、円偏光、また、ある一定の方向にのみ電気ベクトルが振動している場合は、直線偏光と呼ばれる。

偏光状態は直交する二つの電気ベクトルによって表されるから、反射や屈折によって電気ベクトルの直交成分比が変わるとき、偏光状態も変化することになる。この変化は、ある入射角をもって、屈折率の異なる二つの媒質の境界層へ入る場合や、異方性を有する結晶中を伝搬する場合に顕著に現れる。複屈折、旋光性(偏光面の回転)、2色性、遅延(移相性)などの現象がそうである。

3. 車載用光波応用計測の基礎

光が科学的に扱われるようになって、その応用技術も飛躍的に発展した。レーザや光ファイバに代表される最近の高度技術の発達は、計測分野における光の応用を著しく進めた。これらは小林、山口⁵⁾の文献に詳しい。これらの文献には、光を利用する計測について包括的かつ体系的にまとめられているので、参考のために、表1、表2に掲載しておく。干渉、回折、散乱、偏光、吸収、反射、直進性などの光の性質を巧みに利用し、多くの応用が実用化されている。光が計測において有力なメディアとされるのは、非接触、高感度、高精度および高速性にあると思われる。

車載用、すなわち、一般大衆車に取り付けられるセンサには、厳しい環境下での高信頼性が要求

表-1 光のパラメータと諸現象・効果⁴⁾

光の多様な パラメータ	光の伝播に関する多くの現象・効果							
	反射	吸収	屈折	分散	散乱	干渉	回折	遅延
振幅	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	
波長	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○
位相						◎	◎	◎
偏波面	◎		◎		○	○		○ ◎
スペクトル分布	◎	◎	◎	◎	◎			
カラー	◎	○						

◎：よく利用されている、○：何らかの関連がある

される。自動車のおかれる環境は、温度・湿度、降雨・雪などの耐候的条件、振動、衝撃などの機械的条件、電源・電磁障害などの電磁気的条件下に分けられる。車にとっては、それぞれに厳しい条件ではあるが、筆者のわずかな経験では、車載用光センサとしては、走行中の振動、降雨雪中の走

表-2 光の諸現象とその応用⁵⁾

干渉を用いる計測

検出される量	最終的に得られる量または測定器
縞の位置	透明体の厚さ、屈折率、面までの距離、複屈折量
縞の形状	表面形状、屈折率分布、レンズ収差、複屈折分布
縞の移動速度 (光ビート)	線速度(レーザ・ドップラ速度計)、角速度(ファイバ・ジャイロ)
縞のコントラスト	スペクトル(フーリエ分光)、星の径(天体干渉計)
縞の位置の波長依存性	スペクトル(干渉フィルタ、ファブリ・ペロー分光器、回折格子)

回折・散乱による計測

検出される量	最終的に得られる量
回折像のひろがり	粒子や孔の径
回折スポットの位置	パターンの繰返し周期と方向
散乱光強度	粒径、粒子数、相変化
散乱光の角度分布	粒径、表面粗さ
散乱光の周波数シフト	粒子の速度

偏光を利用した計測

検出される量	最終的に得られる量(効果の名称)
屈折率差(複屈折量)	応力(光弾性効果)、電場(電気光学効果)、磁場、温度
偏光回転	磁場・電流(ファラデー効果、カー効果)
楕円率(エリプソメトリ)	屈折率、膜厚
偏光度	表面粗さ、粗径(波長より小さい)

直進性を利用した計測

検出される量	最終的に得られる量
スポット位置	面の高さ(三角測量法)
スリット像の曲がり	断面形状(光切断法)
格子の投影像	表面の等高線(モアレ法)
影の大きさ	断面形状(投影器)
光の往復時間	距離

吸収と反射の利用

検出される量	最終的に得られる量
透過光の減衰	厚味、吸収率(濃度)
反射率	屈折率(密度、組成)

行、路面の照度変動が信頼性を高める上で障害となっているように思われる。走行に伴う振動は位相を検出するような高精度計測を困難にしている、光の干渉を利用する方式を考える場合は十分な検討を要する。

現在では、1台の車に数十個のセンサが取り付けられていると言われている。車載用センサはいまのところ機械的な動作原理に基づくものが多く、光センサは光学式の回転やトルク検出などまだ数は少ない。光波応用計測を基本とする車両搭載用光センサとしては、非接触計測、耐電磁誘導性の強さが特長であって、今後の発展が期待される。特に、レーザや光ファイバはこれからますます利用が増えると考えられるが、ここでは触れないことにする。今回は、インコヒーレントな自然光などを光源とし、空間を伝搬する光の波としての現象を利用するものについて主に述べる。

センサの中には、ある量が多いか少ないかなどのような、2値選択的なものも含まれる。しかしながら、計測というのは量を測るものであるから、たとえ最終的には2値選択であっても、光波応用計測としてのセンサは定量検出を基本にしておくのが望ましい。このような立場から、筆者が開発に係ったセンサを例に挙げて、車載用の光波応用計測の実際に触れてみたい。

4. 雨 セ ン サ⁷⁾⁸⁾

4.1 動作原理と仕様

光の直進性と回折（多数の雨滴のときは多重散乱になるが、単一雨滴では回折によるマスキング効果として扱う）を利用したセンサである。

図-1に示すように、発光部（発光ダイオード）から放射された平行ビームを有限距離隔てて受光部（ホトトランジスタ）で受信する。この平行ビーム中を雨滴が通過すると、式（1）の A が変化して、受信の光量変化が生じる。これを検出すれば、降

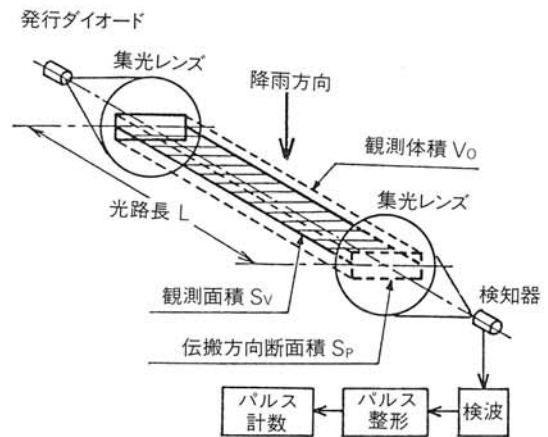


図-1 光電式降雨強度センサの構成

Fig. 1 Configuration of the opto-electrical type of precipitation rate sensor.

雨の程度がわかる。単に降雨の強弱のみを検出しさえすればよいのであれば、電気信号の変化をパルスに変えてその数の大小を知ればよいことになる。しかしながら、たとえワイパーを制御するだけのセンサであっても、降雨強度を定量的に算出できるようにしておいて利用する方が、センサの性能を向上させる上で望ましい。このためには、光ビームの平行性、パルス変換時のしきい値設定に留意しなければならない。図-1において、降雨強度が h (mm/h)のときの観測面積 S_v (m²)を通過する観測時間 T (s)の雨滴の全体積 W (m³)は降雨強度の定義から次のように表される。

$$W = 2.78 \times 10^{-7} h S_v T \quad (\text{m}^3) \quad (2)$$

一方、 T (s)間の出力パルス数を p_o (個)とし、そのときの雨滴の平均体積を v_o (m³)とすれば、検出された雨滴の体積 W はまた次式で与えられる。

$$W = p_o v_o \quad (\text{m}^3) \quad (3)$$

降雨強度が h の時の雨滴の平均体積 v_o は雨滴の体積確率密度関数 $p(h, a)$ により、雨滴半径を a として、

$$\begin{aligned} v_o &= \int_0^\infty (4\pi/3) a^3 p(h, a) da \\ &= 9.12 \times 10^{-10} h^{0.63} \end{aligned} \quad (4)$$

で求められ、 v_0 は h のみの関数となる。雨滴の体積確率密度関数はMarshall-Palmerの雨滴粒径分布⁹⁾を $n(h, a) da$, とすると、

$$n(h, a) da = n_0 e^{-\alpha a} da \quad (5)$$

ここで、 $n_0 = 8 \times 10^6 (\text{m}^{-4})$, $\alpha = 8,200 h^{-0.21} (\text{m}^{-1})$

を用いて、

$$p(h, a) = (a^3/6) \alpha^4 e^{-\alpha a} \quad (6)$$

で定義されている。Wangらは文献(10)の理論に基づいて観測を行い、式(5)は通常の雨に対して有効であると述べている。式(4)を式(3)に代入すれば、

$$W = 9.12 \times 10^{-10} p_0 h^{0.63} \quad (7)$$

となり、次いで上式の W と式(2)の W が等しいとおいて、

$$h = 1.96 \times 10^{-7} (p_0/S_e T)^{2.7} \quad (8)$$

を得る。降雨強度は小さな雨滴のミスカウントがなければ出力パルス数の2.7乗に比例する。

式(6)の体積確率密度関数から推察されるように、降雨強度が小さくなると半径の小さい雨滴が多くなる。どの程度まで小さい雨滴が検出されるかはパルス整形時のしきい値によって決定される。しきい値を検知器を含む信号処理回路の雑音実効電圧の約3倍に選ぶことにし、これを検知器出力端に換算した値を V_i (V) とすると、検出可能な最小雨滴半径 a_{min} は次のようにして推察される。

図-1に示したように、光ビームの伝搬方向断面積 S_p (m^2) に対して半径 a の雨滴によって光ビームの一部がしゃへいされたとすると、そのときの光量変化はそれらの断面積に比例するとして $\pi a^2/S_p$ で表される。光量変化に比例する電気信号振幅がしきい値 V_i より大きければパルスが発生するから、搬送波光ビームによる検知器出力端のピーク電圧を V_c (V) とすれば、

$$\pi a^2/S_p \geq 2V_i/V_c \quad (9)$$

なる関係が成立する。従って、 a_{min} は次式によ

って推定される。

$$a_{min} = \sqrt{2S_p V_i / (\pi V_c)} \quad (10)$$

検出可能最小雨滴半径 a_{min} が求まると、検出されない雨滴の体積確率 P_{miss} は式(6)より、

$$P_{miss} = \int_0^{a_{min}} p(h, a) da \\ = 1 - e^{-\beta} (\beta^3/6 + \beta^2/2 + \beta + 1) \quad (11)$$

ここで

$$\beta = \alpha a_{min} = 8,200 a_{min} h^{-0.21}$$

と表される。従って、式(3)によって計算される雨滴の平均体積 W は $(1 - P_{miss})W$ に減少する。雨滴の平均体積 v_0 を一定とみなせる a_{min} の範囲において、この減少は出力パルスのミスカウントによって生じると考えることができる。実際にミスカウントを伴って計数されたパルス数を p_c とすれ

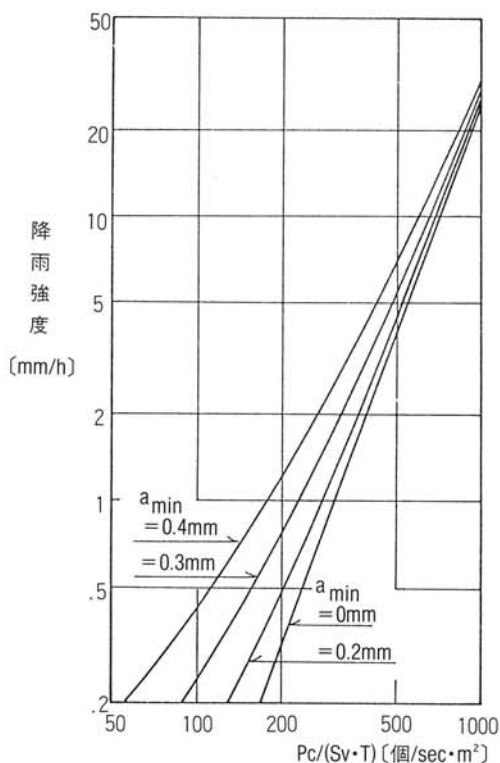


図-2 観測面積で規格化された1秒間の出力パルス数と降雨強度の関係⁷⁾

Fig. 2 Precipitation rate as a function of the number of output pulses normalized by the observation area and time.

ば、式(3)より、

$$(1 - P_{miss}) p_o v_o = p_c v_c \quad (12)$$

であるから、

$$p_o = p_c / (1 - P_{miss}) \quad (13)$$

となって、実測された出力パルス数 p_c から $a_{min}=0$ としたときのパルス数 p_o が算出される。式(13)を式(8)に代入すれば、

$$h = 1.96 \times 10^{-7} [p_o / \{S_v T(1 - P_{miss})\}]^{2.7} \quad (14)$$

が得られる。ところで、式(11)から明らかなように、 P_{min} は降雨強度 h の項を含むため、上式から h と p_c を単純な数式で表すことはできない。図-2は、幾つかの a_{min} に対して観測面積・観測時間当りの出力パルス数 $p_c/(S_v T)$ と降雨強度との関係を示している。当然のことではあるが、

$a_{min}=0$ のときは、式(8)に示すように h は $p_c/(S_v T)$ の2.7乗に比例する。 a_{min} が有限の値をもつときは、降雨強度の小さい範囲で2.7乗則が

表-3 光電式降雨強度センサの仕様⁷⁾

発光部	
発光ダイオード	EL-1L1
発光波長	950nm
変調周波数	30 kHz
発光出力	約5mW
集光レンズ	40φmm, $f=40$ mm
開口	14×7mm
光路長	1m
観測断面積	$1.4 \times 10^{-2} \text{m}^2$
観測体積	$9.8 \times 10^{-6} \text{m}^3$
受信部	
開口	14×7mm
集光レンズ	40φmm, $f=40$ mm
検知器	OS-14
前置増幅器	利得 17 dB
処理部	
検波回路	全波直線検波回路
高域通過フィルタ	8次バターワースカスケード
総合利得	55 dB
シュミット回路	しきい値 1.2V
単安定マルチバイブレータ	パルス幅 9ms
測定降雨強度範囲	1~30mm/h

らのずれが大きいの。このような場合には、図-2から $\log h$ と $\log(p_c/(S_v T))$ に対する2次の近似式を求め、この式に基づいて実測した p_c から h を算出することができる。近似式は最小自乗法を適用すれば容易に導出可能である。

具体的なセンサの設計・製作手順は文献(7)を参照されたい。試作したセンサの仕様を表-3にまとめておく。

4.2 観測結果

観測に先立って行った光ビームの均一性の検討

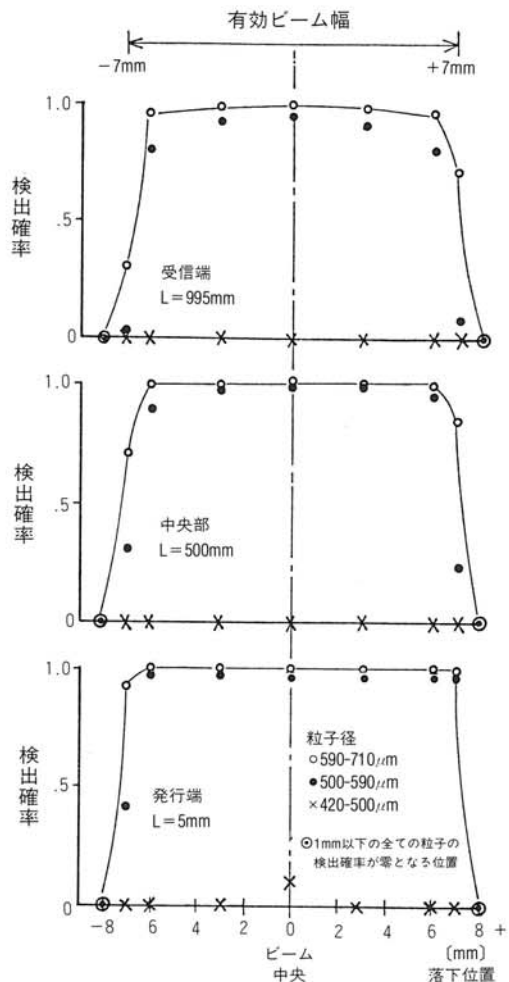


図-3 光ビーム中の雨滴の検出確率⁷⁾

Fig. 3 Detection probability of raindrop in the light beam.

結果を図-3に示す。この図を参考にして、直径 $500\mu\text{m}$ 以上の雨滴の検出を対象にビーム幅を 0.014 m 、光路長 $L=1\text{ m}$ に選んだ。また、図-2より $h=1\text{ mm/h}$ 、 $a_{\min}=0.2\text{ mm}$ のとき、出力パルス数を50個以上とするには $S_r T > 0.15\text{ (s} \cdot \text{m}^2\text{)}$ を要するから、 $S=0.014\text{ m}^2$ として、 $T=10\text{ s}$ とした。図-4は観測結果の一例である。10秒間の出力パルス数を転倒ます雨量計のますが転倒する時間内で平均した値に対して、転倒ます雨量計の降雨強度を図示したものである。

同図の実線は $a_{\min}=0.25\text{ mm}$ としたときの理論曲線であって、実測値はこれによく一致した。

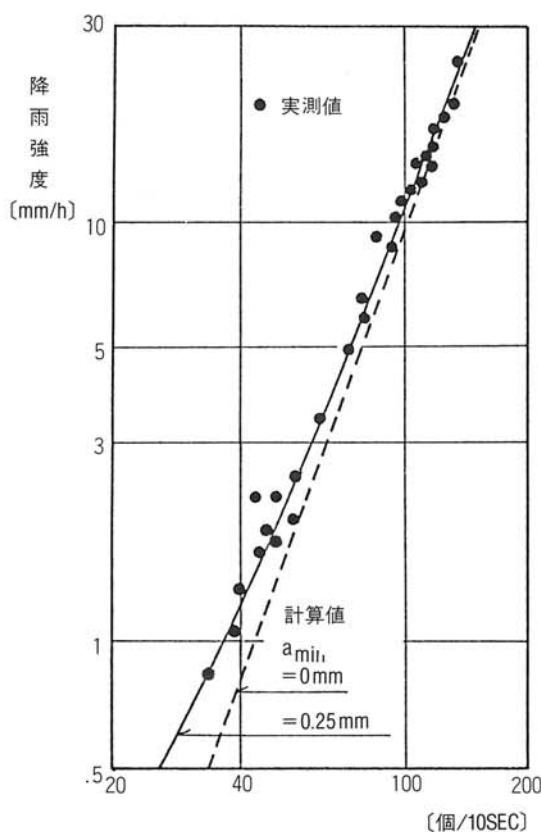


図-4 ます一転倒時間の平均出力パルス数と降雨強度の観測結果⁷⁾

Fig. 4 Mean number of output pulses in the time interval of one buckettripping vs precipitation rate measured.

このセンサの特長は、降雨強度算出の理論的根拠が明確であることと、その算出の高速性にある。特に、パルス整形時のしきい値を変えることによって、検出可能な雨滴の大きさを調整できるので、目的に応じたセンサを設計することができる。例えば、これをワイパーの制御に用いる場合、センサは定量的な判断の根拠をもっているので、強雨用、弱雨用など、その目的に応じた設計が可能となる。

5. 路面センサ¹¹⁾¹²⁾

このセンサは、反射による偏光状態が路面の湿潤状態によって異なることを利用している。湿潤状態ばかりでなく、路面の仕上げ状態、種類、凍結・圧雪状態などによっても偏光状態は変化するので、それぞれの検出も可能であるが、ここでは、主に湿潤状態の検出について述べる。このセンサについては、本技報 Vol. 4 No. 2 pp66/75 (1986) に詳しい。

このセンサの開発に当たっても、偏光状態から単に乾燥、湿潤を区別するのではなく、路面の湿潤状態を定量的に表現できるようにして、それに基づいて判別するようにした。

一般に、反射時の偏光度 P は次式で定義される。

$$P = \frac{\phi_h - \phi_v}{\phi_h + \phi_v} = \frac{\Lambda - 1}{\Lambda + 1} \quad (15)$$

ここで

$\Lambda \equiv \phi_h / \phi_v$: 偏光比

ϕ_h : 水平偏光反射放射束

ϕ_v : 垂直偏光反射放射束

入射角、反射角を水のブリュースター角 (53.1°) にとっているので、路面が完全に水で覆われたときは、鏡面反射であって垂直偏光成分が0となり、 $\Lambda \rightarrow \infty$ で $P \rightarrow 1$ となる。一方、路面が完全拡散面に近いときは、 $\Lambda \rightarrow 1$ で $P \rightarrow 0$ となる。

路面の湿潤状態を表すパラメータとして、路面

上の観測視野内で鏡面反射に支配されている領域の割合 α を導入すると、受光された反射放射束は次式で表される。

$$\begin{aligned}\phi_h &= \alpha \phi_{w,h} + (1-\alpha) \phi_{d,h} \\ \phi_v &= \alpha \phi_{w,v} + (1-\alpha) \phi_{d,v}\end{aligned}\quad (16)$$

ここで

ϕ_w : 視野全域が水面で覆われたときの受光される反射束

ϕ_d : 視野全域が乾燥路面のときの受光される反射放射束

上式を式 (15) に代入すると、この場合の偏光度は次式のようにになる。

$$P = \frac{P_d(1-\alpha) + \alpha A}{(1-\alpha) + \alpha A} \quad (17)$$

ここで

$$\begin{aligned}P_d &\equiv \frac{\phi_{d,h} - \phi_{d,v}}{\phi_{d,h} + \phi_{d,v}} : \text{乾燥路面の偏光度} \\ A &\equiv \frac{\phi_{w,h} + \phi_{w,v}}{\phi_{d,h} + \phi_{d,v}} : \text{水面と乾燥路面の} \\ &\quad \text{反射放射束比}\end{aligned}$$

と定義し、また水面の偏光度は 1 とした。上式より乾燥時は $\alpha=0$ として $P=P_d$ となり、路面が完全に水面で覆われたときは $\alpha=1$ として $P=1$ となる。

実際の測定では、受光部にプリズムを置いて路面の同一視野を 2 ケ所に結像させ、垂直と水平の

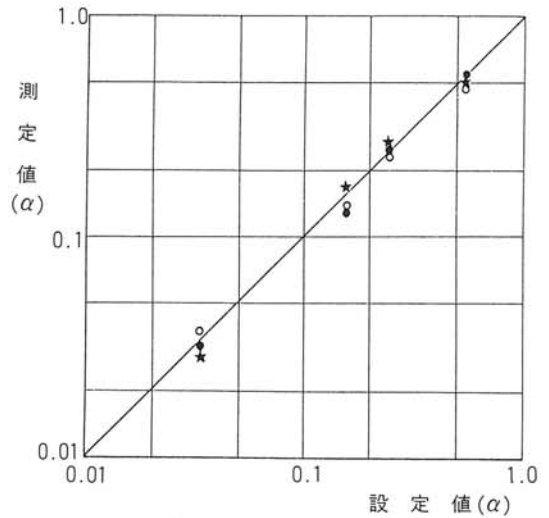


図-5 路面湿潤状態パラメータ α の模擬実験結果
Fig. 5 Experimental result of an optical model for the road-surface moisture presented by the parameter α .

2つの直線偏光子を入れて同時に ϕ_h, ϕ_v を求める。従って先ず、偏光比 Λ が得られる。そして、この Λ 値より算出した偏光度 P より、路面状態のパラメータ α を求める。すなわち、定量値 α を根拠にして路面湿潤状態の判別を行うわけである。

図-5はこれを確認するために行った実験結果を示している。市販の3種類のサンドペーパーを完全拡散面とみなし、この一部に一定面積の穴(矩形)を開けてこれを水面に浮かべて偏光度を測定

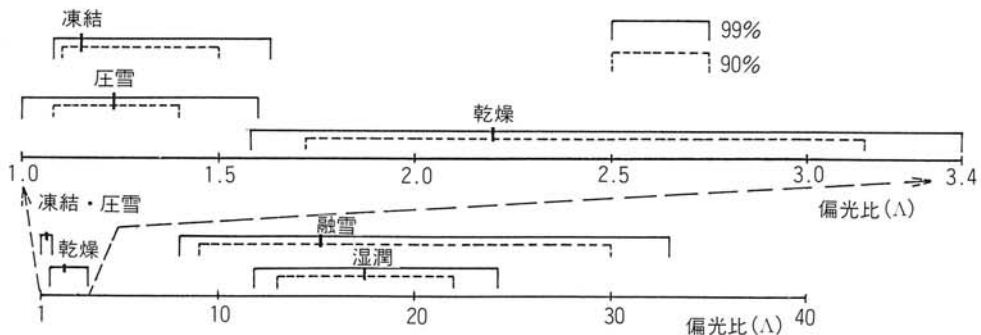


図-6 各路面状態における偏光比の分布

Fig. 6 Distribution of the polarization ratio measured at some states of road surface.

する。その偏光度から式(17)を逆に解いて求めた α と穴の面積の視野面積に対する比(設定 α 値)を比較した。同図より、両者は一致し、 α が路面湿潤状態を表すパラメータとして適することを確認することができた。

周知の通り、路面状態は複雑である。同じ乾燥路面でも常に同じ偏光度を示すとは限らない。このような場合は、一般に、数多くのデータから統計値を求める。測定された偏光比はガウス分布をずらすとして、路面判定のために整理した結果は図-6に示すとおりである。同図より、乾燥、湿潤、融雪、凍結、圧雪の判定が可能であることがわかる。このように統計的処理手法を取り入れることは、これからのセンサのひとつの特徴となるであろう。

また、図-7は雨が降り出したときの路面偏光度の経時変化である。偏光度の急激な変化から、雨の降り始めの推定の可能性があることがわかる。このように路面湿潤状態の経時変化を表すことができたのは、偏光度によって定量的に路面の湿潤状態を表すようにしていたからである。これもまた、計測に基礎を置いているセンサの特徴であると言える。

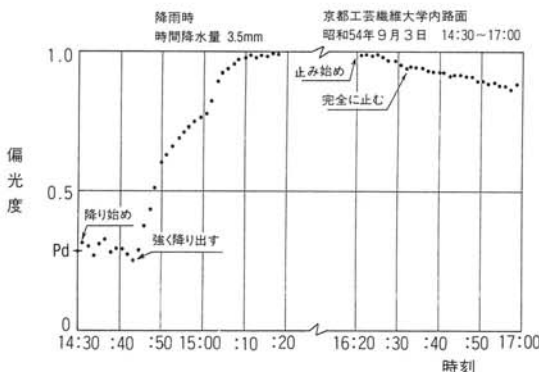


図-7 雨中における偏光度の経時変化¹¹⁾

Fig. 7 Time variation of the polarization degree at a road surface in the rain.

6. 空間フィルタ速度センサ¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾

6.1 出力スペクトル

このセンサは空間フィルタを用いる光電方式によって、非接触に移動する対象の速度を求めるものである。このセンサの特長は、例えば路面のある範囲の不規則輝度分布を一つのパターンとみなして、これとある特定のパターンとを重ねて空間積分を実行することによりランダムな対象からその移動速度に関する情報を抽出することにある。具体的には、パラレル・スリット・レティクルと呼ばれる空間フィルタ上に結像された対象の輝度分布が移動するときの光強度の変動を電気信号に変換すると、その電気信号の中心周波数がその対象のイメージ角速度に比例することを利用してその速度を求めるものである。

このセンサの基本構成は図-8に示すとおりであって、出力電気信号 $e(t)$ は数式的には次のように表される。

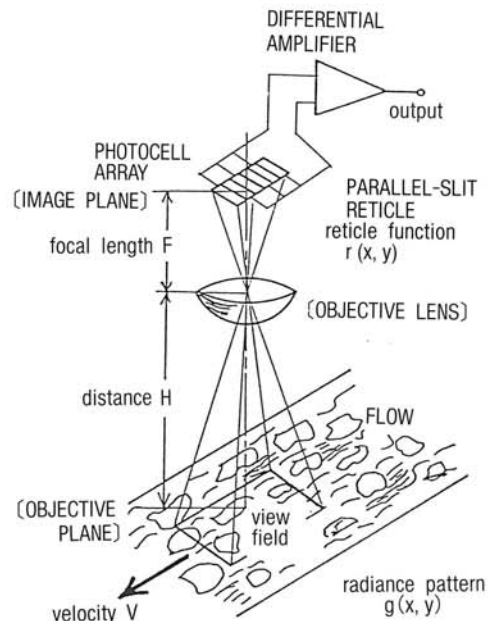


図-8 空間フィルタ速度センサの基本構成

Fig. 8 Configuration of the spatial filter velocity sensor.

$$e(t) = K \iint i(x - \Omega t, y) r(x, y) dx dy \quad (18)$$

ここで

$i(x, y)$: 対象の像の輝き空間分布 (物面上 $g(x, y)$)

$r(x, y)$: 空間フィルタ関数

$\Omega \equiv V/H$: イメージ角速度

V : 対象の移動速度

H : 対象とセンサの距離

K : 光電変換数

対象の $i(x, y)$ が確定的 (deterministic) である場合、その空間フーリエ変換 $I(u, v)$ は時間的に一定である。従って、パーシバルの定理より、 $r(x, y)$ を実関数として、

$$e(t) = \frac{K}{4\pi^2} \iint I(u, v) e^{-j\omega t} \cdot R(-u, -v) du dv \quad (19)$$

が得られる。3 値有極性パラレル・スリット・レティクルの場合、 $R(u, v)$ ($r(x, y)$ のフーリエ変換) は

$$R(u, v) = AB \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k \text{SINC} \left[\frac{A(u - ku_0)}{2} \right] \cdot \text{SINC} (Bv/2) \quad (20)$$

ここで

$$d_0 = d_{\pm 2} = d_{\pm 3} = d_{\pm 4} = 0,$$

$$d_{\pm 1} = \sqrt{3}/\pi, \quad d_{\pm 5} = -\sqrt{3}/(5\pi)$$

$u_0 = 2\pi/a$: 基本波空間角周波数

$A = na$: スリットの並び方向の長さ

n : スリットの数

a : 基本スリットの幅

B : スリットの長さ

で与えられる。上式において、 $B \rightarrow \infty$ のとき、

$$\text{SINC} (Bv/2) = (2\pi/B) \delta(v) \quad (21)$$

と近似されるから、式 (19)、(20)、(21) より

$$e(t) = \frac{KA}{2\pi} \sum d_k \int I(u, 0) \text{SINC} \left[\frac{A(u - ku_0)}{2} \right] \cdot e^{-j\omega t} du \quad (22)$$

となり、さらに、 A がある程度大きい場合、

$u = ku_0$ の周りのメッセージのみ有効であるから、

$$e(t) = \frac{KA}{2\pi} \sum d_k I(ku_0, 0) \cdot \int \text{SINC} \left[\frac{A(u - ku_0)}{2} \right] e^{-j\omega t} du \quad (23)$$

となる。ただし、 $I(u, v)$ は回転対称であるとした。上式はさらに

$$\begin{aligned} e(t) &= \frac{KA}{2\pi} \sum d_k I(ku_0, 0) e^{jku_0 \Omega t} \\ &\quad \cdot \int \text{SINC} (Ay/2) e^{-jy \Omega t} dy \\ &= K \sum d_k I(ku_0, 0) e^{jku_0 \Omega t} \\ &\quad \div (2\sqrt{3}/\pi) K I(u_0, 0) \cos(u_0 \Omega t) \\ &\quad - A/2\Omega \leq t \leq A/2\Omega \end{aligned} \quad (24)$$

となって、目標が視野内にある時間内 $[-A/(2\Omega) \leq t \leq A/(2\Omega)]$ で正弦波信号が得られることがわかる。上式より容易に、このときの中心周波数が目標のイメージ角速度 Ω に比例することがわかる。

対象が確率的 (stochastic) である場合には、 $i(x, y)$ は時間的に変化するから、式 (19) は意味を持たなくなる。この場合は、 $e(t)$ の自己相関関数を求め、それをフーリエ変換してパワースペクトル密度を導出する。(付録参照)

$$E(\omega) = \frac{K^2}{2\pi\Omega} \int |R(\omega/\Omega, v)|^2 N_I(\omega/\Omega, v) dv \quad (25)$$

ここで

$N_I(u, v)$: $i(x, y)$ のウィーナスペクトル密度

同じく 3 値有極性レティクルを用いるときは、式 (22) と同様にして、

$$\begin{aligned} E(\omega) &= \frac{K^2 A^2 B}{\Omega} \sum d_k^2 N_I(ku_0, 0) \text{SINC}^2 \left[\frac{A(\omega/\Omega - ku_0)}{2} \right] \\ &\quad \div \frac{3K^2 A^2 B}{\pi^2 \Omega} N_I(u_0, 0) \text{SINC}^2 \left[\frac{A(\omega - u_0 \Omega)}{2\Omega} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

スペクトルの推定には十分な観測時間を要するが、上式より、スペクトル密度最大の周波数がイメージ角速度に比例することがわかる。

6. 2 測定対象と測定精度

この測定法の原理は、前節で述べたように、出力電気信号の中心周波数を求めることに帰着される。一見、簡単そうな原理であるが、測定対象によって信号処理を考えねばならない。確定的対象と確率的对象に分けた場合、表-4に示すような分類が考えられる。確定的対象と言うのは厳密にはごく限られたものしか存在しない。多くは確率的であり、表-4の中で右へ行くほどそれだけ確率的な状況が強いと考えられる。ここで、確定的、確率的と言うのは空間に対する定義であって、それぞれについて、さらに時間的に定常、非定常に分けられる。車載用として実用化が望まれる対地速度センサは、確率的な輝度空間分布を持つ路面を対象とする。

確定的対象の場合は、式(24)からわかるように、対象が一定速度で移動していれば、信号の一つのサイクルの周期から正確にイメージ角速度に比例する周波数を求めることができる。測定精度はその周期の測定精度によって決まる。

一方、確率的对象の場合、高い精度を得るためには、空間フィルタの狭帯域性と長い観測時間を要する。測定精度は、レティクルのスリット対数と、観測時間内に含まれる信号のサイクル数¹⁶⁾に関係し、次式で与えられる。

表-4 空間フィルタ速度センサの測定対象の分類

	確定的	確率的
定 常 的	一定背景中のボール 普通風景中のボール及び車 一般路面(定速走行)	水 路 流 潮 流 河 川 流 土 石 流 噴煙・噴気
非定常的	夜間走行中の車のヘッドライト 一定背景中の変化球	上 昇 流

$$\varepsilon = \frac{1}{2\sqrt{3}n\sqrt{N}} \quad (27)$$

さらに、対象の移動が定常でない場合、確率的对象については高い測定精度を得るのがより困難になる。確定的対象についてはこの場合でも、信号の1サイクル内では定常とみなせば、1サイクル毎の周波数算出は可能である。

なお、実際の移動速度を求めるには、センサから対象までの距離Hの値を要する。この値が既知であるか、または、精度よく求められる場合は、問題はないが、これが困難な場合には、周波数の推定誤差にこの誤差が加わって全体の測定精度は悪くなる。

6. 3 対地速度センサ¹⁷⁾

このセンサは路面に接触しないで対地速度が求められるところが最大の特長であって、これについては本技報 Vol. 1, No. 1 pp 87/98 (1983) に詳しい。この開発に係わりながら、筆者が感じているこのセンサの問題点は次のようである。

1) 車両の上下振動による高さHの変動：

これについては、別の方法で高さHを測定しておくようにして補正するのが望ましい一つの解決策であると思われる。

2) 路面照度の急激な変動（例えば、路面上の交通標識、太陽光の影、降雨中走行時のしぶきなどの影響）：

出力電気信号が過渡的に大きな変化をするため、ミスカウントを生じる。横断歩道などのマークについてはレティクルの開口を工夫するなどの解決策が施されている。

太陽光などを避けるには、取り付け位置を工夫するのも一つの方法であろう。逆に、路面が暗い場合には照明を要する。

3) 過渡的な走行速度変動：

急停車のような過渡的な走行は非定常状態と考えられるから、単純なパルスカウント法による

周波数抽出法では精度が悪くなる。一般に非定常の扱いは難しく、信号処理法に工夫を要する。

6. 4 土石流速度センサ

18)19)20)

確率的でしかも非定常である対象の例として、土石流速度センサについて述べる。この場合も、結局、出力電気信号の中心周波数の推定の困難さが問題である。この困難さを知るために、得られた出力波形の一例を図-9に示す。振幅の変動と位相シフトが多く認められる。

既に述べたように、この場合は非定常であるから、確率的对象であるにもかかわらず、長い観測時間を設定することができない。そこで次のように仮定して解析することにした。観測視野内のパターンは当然空間的に不規則であるが、それが観測視野に入ってから出までの時間 ΔT 内では、この不規則なままそのパターンを変えないで、しかも、一定速度で移動するものとする。すなわち、この時間内では定常で確定的な対象であるとみなす訳である。そしてこれが時間的に連続につながっていると看做する。このように考えると、この時間 ΔT 内の中心周波数抽出にはMEM解析 (Maximum Entropy Method 最大エントロピー法)が適用できる。図-9の土石流に対して適用した解析

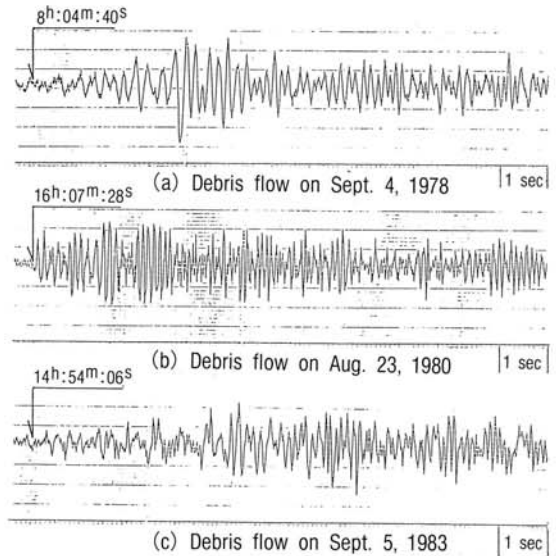


図-9 3つの土石流に対して観測された出力波形の例¹⁸⁾

Fig. 9 Examples of three of sensor output signal waveforms corresponding to three debris flows.

結果を周波数スペクトルの3次元的時間変化として図-10に示す。同図より、土石流の先端速度は遅く、後続流は早くなって最大値に達した後、徐々に減少していく様子が読み取れる。この変化はビデオによる目視的な観測傾向と一致し、土石流の表面速度に対する定量的な知見を与えたものとして注目されている。

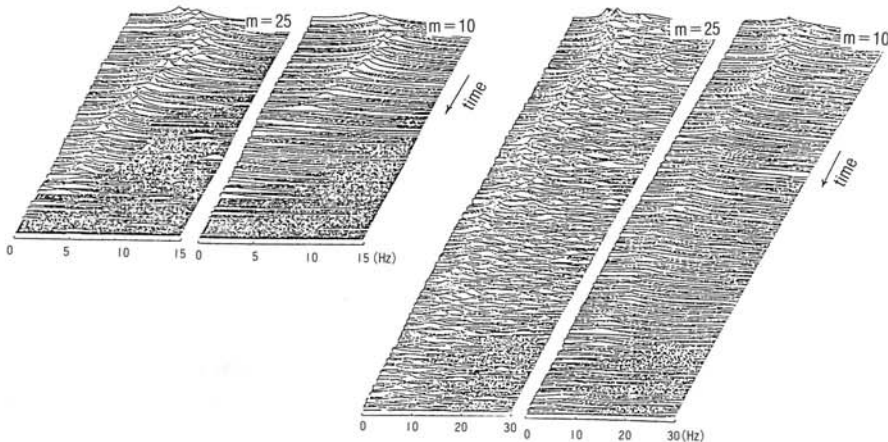


図-10 MEM解析による出力スペクトル²⁰⁾

Fig. 10 Output spectra of the sensor's signal obtained from the MEM analysis every 0.5sec.

この例は、光波応用計測における信号処理の重要性を示したものである。今後のセンサ、あるいは、センシングの進展の一つの方向を示唆しているものと言える。

7. あ と が き

自動車の光波応用計測についていくつかの例を挙げながら解説した。計測とは量を測ることである。従って、車載用光センサとしても、単に2値判定的な機能だけを求めるのではなく、常に対象を定量的に検出する方法を追求し、定量値に基づいた判定を目指すべきである。

最近のセンサでは、物理量の変換素子（トランスジューサ）から直接対象とする値を表示する方式ではなく、信号処理によって求めるべき値を推定して行くと言う手法が採用されるようになってきている。これはソフトセンサあるいはインテリジェント（知能化）センシングと呼ばれている。知能化センシングの進歩の段階と効果について、山崎は次のようにまとめている。²¹⁾

- 1) 影響量の補償や直線性などの特性改善（知能化初歩的段階）：精度の向上、設計の自由度の増大などがもたらされる。
- 2) 自動校正、自己診断などの自律的機能付与（自律化段階）：自動化、省力化、分散処理などセンシングシステムの機能が確立される。
- 3) 多次元計測、像構成、特徴抽出、パターン認識などの機能創出（本格化段階）：複雑な対象から知的操作により有効な情報が効率よく得られる。

現在の車載用光センサは、残念ながら知能化されたとは言えないが、この小論で解説した通りその方向を目指していることは読み取れる。別の言い方をすれば、これらのセンサは利用者側からのアプローチを求めていると言える。より人間の顔をしたセンサを目指しているということになるの

であろうか。このような傾向は、技術の進歩において常にそうであったように、技術と人間との調和の追求ということである。そのような方向の中では、車載用光センサはその例としてふさわしいものであると言える。車においては、機械としての性能の向上は、とりもなおさず人間の安全性や快適性を求めることにつながるのであるから。そして、このような車載用の知能化センサにとって、ソフトで知的な光波の応用は必要不可欠であると思われる。

参 考 文 献

- 1) ニュートン（島尾訳）：光学、岩波文庫（1983）
- 2) Born & Wolf: Principle of Optics, Pergamon (1980)
- 3) 板倉：偏光フィルムの応用、CMC出版（1986）
- 4) 小林：計測と制御、Vol. 26, No. 4, pp290/295 (1987)
- 5) 山口：計測と制御、Vol. 26, No. 4, pp283/289 (1987)
- 6) 五十嵐：計測と制御、Vol. 25, No. 8, pp722/728 (1986)
- 7) 板倉：電気学会論文誌、Vol. 104C, No. 1, pp17/23 (1984)
- 8) Itakura: Proc. ICO-13, pp328/329 (1984)
- 9) J.S.Marshall & W.M.Palmer: J.Meteorol. vol. 5, pp165/166 (1948)
- 10) T.Wang & S.F.Clifford: J. Opt. Soc. Amer. Vol. 65, pp927/937 (1975)
- 11) 板倉、堤、竹鼻：照明学会誌、66巻 pp450/454 (1982)
- 12) Itakura, Tsutsumi, Takehana: Proc. Ann. Meeting of O.S.A., No. 177 (1982)
- 13) 堤、室井：電気学会雑誌、Vol. 102, pp713/719 (1982)

- 14) 小林：計測と制御、Vol. 19, No. 4, pp409/417 No. 6, pp571/580 (1980)
- 15) Y.Aizu & T.Asakura: Appl. Phys. Vol. B43, pp209/224 (1987)
- 16) Itakura, Tsutsumi & Takemura: Final Proc 2nd Inter. Conf. on Crime Countermeasure, ppC07/C13 (1977)
- 17) 堤、板倉、津田川、竹村、竹鼻、坂本、藤村：照明学会誌、66巻、pp55/59 (1984)
- 18) Itakura, Ogawa, & mizuhara: Fluid Control and Measurement, pp781/786 (1985)
- 19) Itakura & Taniguchi: Proc. ICO-14 pp63/64 (1987)
- 20) 板倉：理研シンポジウム、pp23/26 (1987)
- 21) 山崎：電子情報通信学会誌、70巻、pp2/9 (1987)

付 録

$C(\tau)$ を $e(t)$ の自己相関関数として、出力パワースペクトルは次式で定義される。

$$E(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (\text{A} \cdot 1)$$

同じく定義により、

$$\begin{aligned} C(\tau) &= E [e(t) e^*(t+\tau)] \\ &= K^2 \iint r(x, y) r^*(\alpha, \beta) E [i(x-\Omega t, y) \cdot i^*(\alpha-\Omega(t+\tau), \beta)] dx dy d\alpha d\beta \\ &= K^2 \iint r(x, y) r^*(\alpha, \beta) R_I(x-\alpha+\Omega\tau, y-\beta) dx dy d\alpha d\beta \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 2)$$

ここで

$$R_I(\Delta x, \Delta y) : i(x, y) \text{ の自己相関関数} \\ (\text{空間定常性を仮定})$$

であって、再びパーシバルの定理より、

$$\begin{aligned} C(\tau) &= \frac{K^2}{4\pi^2} \iint r(x, y) \iint R^*(u, v) N_I(u, v) \\ &\quad \cdot e^{-j[u(x+\Omega\tau)+vy]} dudv dx dy \\ &= \frac{K^2}{4\pi^2} \iint |R(u, v)|^2 N_I(u, v) e^{-ju\Omega\tau} dudv \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 3)$$

ここで

$$\begin{aligned} N_I(u, v) &: R_I(\Delta x, \Delta y) \text{ のフーリエ変換} \\ &(\text{ウィーナスペクトル密度}) \\ &(\text{空間エルゴード性を仮定し、} \\ &\text{回転対称であるとする。}) \end{aligned}$$

式(A・3)を式(A・1)に代入して、

$$\begin{aligned} E(\omega) &= \frac{K^2}{4\pi^2} \iiint |R(u, v)|^2 N_I(u, v) e^{-j(\omega+\Omega u)\tau} \\ &\quad d\tau dudv \\ &= \frac{K^2}{2\pi\Omega} \int |R(\frac{\omega}{\Omega}, v)|^2 N_I(\frac{\omega}{\Omega}, v) dv \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 4)$$

が得られる。