

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 1日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560486

研究課題名（和文） デジタルカメラを用いたトンネル坑内簡易粉じん量測定システムの開発

研究課題名（英文） Dust Concentration Measurement for Sprayed Concrete Suspended Dust for Tunnel Construction Work by using Digital Camera

研究代表者

進士 正人 (SHINJI MASATO)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：40335766

研究成果の概要（和文）：

トンネル坑内でフラッシュ撮影を行うとフラッシュ光のミー散乱により写真には坑内に浮遊する粉じんが雪のように写ることは古くアナログカメラの時代から知られていた事実であった。本研究ではこの現象を利用し、デジタルカメラによるフラッシュ撮影写真から粉じん量を測定する方法を確立する。そのため、写真の白濁度とデジタル粉じん計の粉じん濃度とを直接ニューラルネットワークにより学習するシステムを構築した。そして、画像処理手法を利用しトンネル坑内の粉じん濃度を推定する方法を考案した。その結果、デジタルカメラのフラッシュ画像から簡便に粉じん濃度の測定ができることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

It was a fact among the tunnel engineers from the era of analog cameras that the white marks appear in the flashed photograph during the tunnel construction. This reason is that suspended dusts reflect like a snow by Mie scattering of flash light. By using this phenomenon, the simple dust concentration measurement by using digital camera was developed. This measurement system was based on the neural network system. This neural network system studies the relationship the value of the digital dust indicator and the whiteness of the flashed digital camera. As a result, it found that simple dust concentration measurement from the digital camera flash image has a good relationship the value of digital dust indicator.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：建設環境・粉じん測定

1. 研究開始当初の背景

トンネル建設工事に坑内で従事する作業員が施工中に発生する粉じんを吸引することでじん肺症を引き起こす危険性は依然として高いと言わざるを得ない。そのため、坑内換気技術の開発や粉じんの発生そのものを抑制する材料の開発などがこれまでも熱心に行われてきた。

作業環境下で粉じん濃度を抑制することはじん肺症予防に根本的な効果が期待される。そのため、作業環境を把握する指標として、粉じん濃度測定は極めて重要である。平成 20 年には、厚生労働省によるトンネル坑内の作業員を対象とした「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」（以下、本文中では“ガイドライン”と略称する）が改定され、「光散乱式デジタル粉じん計」（以下「デジタル粉じん計」と呼ぶ。）を用いた粉じん濃度測定が義務化された。しかし、デジタル粉じん計は高価で測定に手間がかかる問題点があった。そのため、より安価で簡便な粉じん濃度測定法の開発が望まれていた。

2. 研究の目的

粉じんが浮遊する暗い空間内でレーザー光などの強い光を照射すると、照射光の波長と同程度以上の大きさの粉じんは「ミー散乱」が発生し、キラキラと白く輝く現象が観測される。この現象は古くから「チンドル現象」としてよく知られた現象である。光散乱式デジタル粉じん計もこの現象を利用しており、測定管内に吸引した空気中にレーザー光を照射し、粉じんによる散乱光の強さから粉じん濃度を換算している。

一方、トンネル坑内では、カメラでフラッシュ撮影を行うと、坑内の浮遊粉じんなどがフラッシュに反射して白斑として撮影される。このことはアナログカメラの時代からトンネル技術者の中ではよく知られた常識であった。そのため、トンネル技術者はこれまでフラッシュを可能な限り使用しないきれいな坑内写真を撮影することに努力した。これに対し、研究代表者は、カメラによるフラッシュ画像の白斑を画像処理し、その結果から粉じん濃度が測定できれば、より安価で簡単な粉じん濃度測定法となることに着想した。そこで、本研究では、デジタルカメラのフラッシュ機能を用い、粉じんが浮遊するトンネル坑内をフラッシュ撮影し、フラッシュ光による粉じんの散乱光を画像に記録し、その画像から人工知能プログラムを用いて粉じん濃度を即時に測定する方法を開発す



写真-1(a)低粉じん濃度時のフラッシュ撮影画像



写真-1(b) 高粉じん濃度時のフラッシュ撮影画像

る。

その上、デジタルカメラは撮影したその場で画像を確認できること、画像自体もデジタル化されており画像処理しやすいことなどの利点を有し、即時の粉じん測定が可能である。そして、デジタルカメラ自体の性能向上とカメラ本体の販売価格の低下により、粉じんの浮遊状況記録画像としても利用できると考えた。

3. 研究の方法

(1) 粉じん撮影方法の検討

できるだけ条件の良い撮影条件を確保するため、撮影方向の景色を除去し、粉じんの散乱光のみを画像に記録することを目的とした撮影方法を検討した。その結果、フラッシュによる反射光の少ないつや消し黒ペンキで塗色したブラックパネル（当初 900×1,200mm、その後 900×600mm）に向かってフラッシュ撮影する方法を考案した。それにより、粉じんのみが白く散乱した画像を撮影す

ることが可能となる。

(2) 粉じん測定のアプローチ

カメラでフラッシュ撮影した画像には、フラッシュの照射方向に浮遊している粉じんの散乱光が記録される。写真-1 (a), (b) にトンネル坑内でフラッシュ撮影した画像の例を示す。写真-1 (a) は、粉じん濃度が 0.9 mg/m^3 時の画像で、写真-1 (b) の画像は、粉じん濃度が 6.6 mg/m^3 時の画像である。これらの画像から粉じん濃度が高いと、画像に粉じんの散乱光が多く撮影されるようになり、画像全体が明るく、言い換えると、フラッシュ画像の全体輝度が高くなるのがわかる。これを利用して、フラッシュ撮影画像から抽出した輝度情報を粉じん濃度に換算する。本測定法のアプローチを図-1 に示す。写真-1 からわかるように、フラッシュ撮影画像には記録された白斑が重なりあったり、白色度が異なったりしている。これは、様々な位置のいろいろな粒径の粉じんフラッシュ光で散乱するため、輝度と粉じん濃度との関係が複雑になることを示している。したがって、輝度情報から粉じん濃度への換算には、人間の刺激と反応に関する脳神経組織を数学的に模擬したコンピュータアルゴリズム（人工知能プログラム）のひとつであるニューラルネットワークを利用した。

ニューラルネットワークは、入力した多数の刺激（以下、「特徴量」と呼ぶ。）による反応を経験として自動的に学習し、刺激に対する反応のアルゴリズムを構築する。このアルゴリズムは、定式化やモデル化が困難な事象の判別解析に適している。特に、ニューラルネットワークは学習時に与えた入出力値に誤差を含んでいる場合も許容誤差を適度に設定することにより、その範囲内でなめらかにかつ連続な入出力関係が実現されるため、誤差に強いコンピュータアルゴリズムを構築できる特徴を有する。

4. 研究成果

(1) 現場実験

実際のトンネル建設現場における適用実験は、山岳工法発破掘削（補助ベンチ付全断面）で施工している2車線道路トンネル内において、吹付けコンクリート作業中に実施した。フラッシュ撮影はつや消し黒ペンキで塗色したブラックパネルをレンズから 1.5 m の位置に設置し、ブラックパネルに向かってデジタルカメラ（オリンパス製“ $\mu 795\text{SW}$ ”）を床上 1.3 m の高さに設置し撮影を実施した。あわせて、デジタルカメラでの撮影と、光散乱式デジタル粉じん計（柴田科学製“LD-3K2”）を同期させるため、1分間隔のデジタル粉じん計の測定に合わせてフラッシュ撮影を行い、合計343回のフラッシュ撮影画像と撮影時の粉じん濃度を測定した。

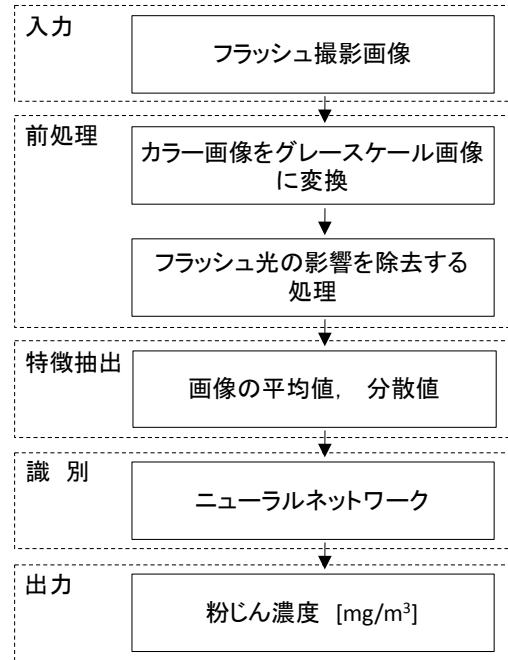


図-1 粉じん測定アルゴリズム

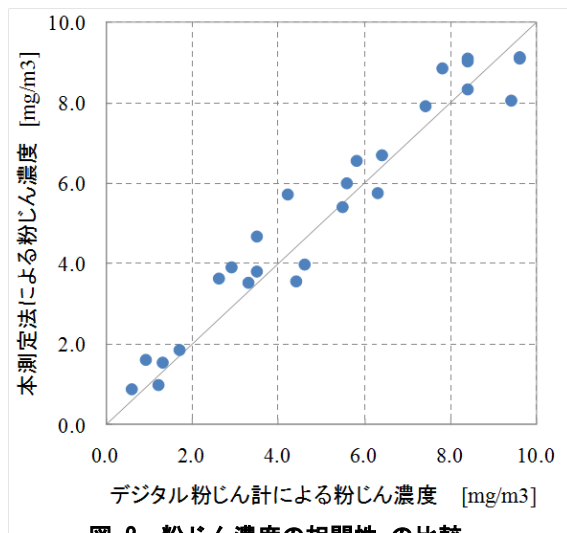


図-2 粉じん濃度の相関性の比較

(2) ニューラルネットワークによる学習

先に述べたように、ニューラルネットワークの機能を精度よく発揮させるためには、ニューラルネットワークへの効果的な学習が重要となる。そのため、学習のための入力データは、適用される粉じん濃度の範囲より広いことが望ましい。今回の測定データは、高い測定精度が求められる 3.0 mg/m^3 前後に数多くのデータが採取できており、ニューラルネットワークの学習に使用するデータとして十分に有用であることがわかった。そこで、フラッシュ撮影画像343枚中273枚を粉じん濃度分類別に無作為抽出し、特徴量としてこれらの画像1枚ごとに求めた平均値、分散値と、デジタル粉じん計のフラッシュ撮影と同

時に測定した粉じん濃度をニューラルネットワークに学習させた。

(3) 簡易粉じん測定の精度検証

本研究で利用したニューラルネットワークでは、階層型ニューラルネットワークモデルを採用し、学習には誤差逆伝搬法を用いた。ニューラルネットワークは、最適な中間層数、ユニット数を決定する方法が確立されておらず、問題ごとに試行錯誤するしかない。そのため、学習データ用に用いたテストデータ(70枚)を入力して算出した粉じん濃度とデジタル粉じん計による粉じん濃度との相関係数を比較することで、ニューラルネットワークの構造を決定した。その結果、ニューラルネットワークの構造は、中間層数は1層、ユニット数は9とした場合に、相関係数が最も高く、0.93であった。

光散乱式デジタル粉じん計によって測定した粉じん濃度と本測定法でニューラルネットワークを用いフラッシュ写真から推定した粉じん濃度との相関図を図-2に示す。この図から、両者の間には良く相関があることが確認でき、本測定法の有効性が検証できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 岸田 展明, 進士 正人; “フラッシュ写真を用いた簡易粉じん測定法”, トンネルと地下, 査読有, 第42巻11号, pp.55-60, 2011年11月.
- ② 進士 正人, 岸田 展明; “トンネル坑内におけるデジタルカメラを利用した簡易粉じん測定法”, 土木学会論文集G, 査読有, Vol. 66, No. 1, pp.1-8, (2010).
- ③ 進士 正人, 岸田 展明; “ニューラルネットワークを利用したデジタルカメラによる粉じん濃度測定の実用化”, 土木学会論文集G, 査読有, Vol. 66, No. 4, pp.194-200, (2010).

[学会発表] (計4件)

- ① 佐々木 雄紀, 岸田 展明, 筒井 隆規, 進士 正人 「携帯電話のカメラ機能を用いたトンネル坑内での簡易粉じん濃度測定方法」土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, VI-391, 愛媛大学, 松山市, 2011年9月7-9日.
- ② 岸田 展明, 進士 正人 「トンネル坑内に浮遊する粉じん物性の時系列変化の一事例」土木学会トンネル工学報告集, 第20巻, pp.267-272, 土木学会, 東京都, 2010年11月25-26日.
- ③ Noriaki Kishida and Masato Shinji “The density measuring system of

suspended dust by using an artificial neural network”, Second Japan - China Workshop on tunneling Safety & Risk, pp.353-362, Aug.27-28, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, 2010

- ④ M.Shinji, N.Kishida, T.Tsutsui and A.Hirama, “The simple sprayed concrete dust density measurement by using flashed digital camera Image”, Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2010, CD-ROM, May 14-20, Vancouver, Canada, 2010.

[その他]

ホームページ等

<http://tunnel.civil.yamaguchi-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

進士 正人 (SHINJI MASATO)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：40335766