画像のスペクトルエンベロープ分析による車両巾計測

学生員 近 藤 広 隆 (立命館大学)

正 員 中 西 恒 彦 (立命館大学)

Measurement of Vehicle Width by Analyzing Spectrum Envelope of Image

Hirotaka Kondo, Student Member, Tsunehiko Nakanishi, Member (Ritsumeikan University)

This paper deals with a noncontact method to measure the width of vehicles by image processing.

There are many methods to measure the length of objects, but it is difficult to measure the length of moving objects without stopping. So a noncontact measurement method is needed for the vehicle width measurement. This paper reports the simple system construction using a portable camera and a personal computer, and reports calculating method using Fourier Transformation to achieve noncontact measurement of vehicle width.

We consider that the brightness of a vehicle on the image differs from background. The general measurement method is to count the pixels count or edge of difference in the brightness between a vehicle image and the background image, but the accuracy of this method is not high enough. We make a spatial frequency spectrum of the image for scale of measurement, which corresponds to vehicle width, and we reanalyze the frequency analysis of the brightness spectrum. Then, we are able to obtain the vehicle width.

In this paper, we show the usefulness of this method for the width measurement of vehicles in the traffic flow.

キーワード：非接触計測，画像計測，周波数分析，スペクトルエンベロープ

1. まえがき

現在の自動車交通流において、大型車混入率が交通流特性に影響を与え、渋滞等を引き起こしていることが知られており、その影響を予測し、適切な交通情報を流すことが必要である。そのためには車両の走行速度や交通量に加えて車種判別の情報が重要となる。そこで、本報告では車種判別に必要な車両大きさ、すなわち車両巾を画像のスペクトルエンベロープ分析から計測する方法について述べる。

現在使われている自動車の長さの計測方法は、超音波パルスの反射信号計数法や、道路面に埋め込んだコイルのインダクタンス変化計測法、車両の走行ラインに沿って必要な数の光電スイッチを配置した光ビーム切断式長さ計を用いた計測法等がある^[1]。しかし、これらの方法は、計測システムの設置が大規模になる等の問題点が挙げられ、移動物体の計測法として望ましい方法ではない。これらを解決するための計測法として、画像計測による非接触計測法がある。

画像計測による従来からの一般的方法では、物体をCCDカメラ等で撮影し、バックグラウンドとの明度差から

エッジを識別して、そのピクセル数を計数する方法であるが^[2]、バックグラウンド明度の変動により閾値明度の設定が困難となり、高精度の計測が期待できなかった。また、移動物体の撮影にはブレを生じ、エッジの検出が困難である。これらのエッジ検出法は微分演算と等価であり、明度の不均一性や明度雑音などに対する不確実性の欠点を有している。本報告で提案する方法は空間周波数を計測尺度とする方法で、バックグラウンドと物体の明度差が曖昧であっても計測が可能となる。また、二度の積分演算による計測であるためノイズに強い車両巾計測が行える特徴を有している。一方で、画像計測では情報量が過大になり、リアルタイム計測は困難とされているが、著者らは抽出情報を限定して高速化を実現する方法を提案しており^{[3][4]}、交通流計測に適用している。これは、可搬性に優れた汎用ビデオカメラを用い、リアルタイム自動化計測の実現のために、映像信号の一部分の明度情報のみを抽出する方法を採っている。それにより、情報量が軽減でき、パーソナルコンピュータや簡単なシステム構成で高速に情報処理が行える。この方法により、移動物体の長さが限定された場合にはフレーム時間内の物体の存在検出を空間周波数分析

によって可能にしている。本報告ではこの存在検出に加えて、車両巾の自動化計測法について提案する。

ここでは車両の明度分布が一定で、道路との明度差が存在するものとし、映像から得られた物体の明度分布に対して空間周波数分析を行う。計算されたパワースペクトルのエンベロープは周期性を持ち、この周期性が車両巾に対応している。この周期性を捉えるために、再度の周波数分析を行って車両巾計測を実現した。また、実画像計測を通して本方法の精度について報告する。

2. 画像と周波数スペクトル

フレーム時間内リアルタイム計測を行うため、文献[3][4]で述べているように車両進行方向に対して直角に、すなわち道路断面方向に特定部分の明度分析領域を設け、そこで得られる明度分布から車両巾計測を行うことにした。

< 2・1 > 画像抽出法 本方法では、必要な画像情報は一部分のみとするので、画像全体を抽出する汎用のフレームメモリボード等を用いるのは、リアルタイム計測を行う上で不適当となる。そこで、特定部分の明度分析領域に対応した映像信号（NTSC信号）だけを直接サンプリングすることにした。この領域の抽出のために、パーソナルコンピュータのグラフィック表示機能を利用し、グラフィック信号をNTSC信号と同期をとって映像抽出のサンプリング制御信号に当てる。一方で、このグラフィック信号とNTSC信号をスーパーインポザに通して重ね合わせた映像から、サンプリングポイントが容易に判断できる。また、グラフィック信号のコントロールにより任意位置設定が可能となる。これにより、リアルタイム画像抽出が任意領域で実現できる。

< 2・2 > 明度パワースペクトル 上記の方法によって得られる明度波形 $g(x)$ を（1）式に示す。

$$g(x) = \begin{cases} H+d & \left(|x-\tau| < \frac{W}{2} \right) \\ d & \left(|x-\tau| > \frac{W}{2} \right) \end{cases} \quad \cdots (1)$$

- ただし、 d : 道路明度
- H : 車両と道路の明度差
- W : 車両巾
- τ : 車両の中央位置
- x : 分析領域の位置

この波形に対して空間周波数分析（フーリエ変換）を行うが、得られた明度分布の空間周波数スペクトルは車両位置の影響を受けており、このスペクトルから車両巾の解析を行うのは困難である。そこで、位置の影響を打ち消すために、そのパワーを求めると、明度分布のパワースペクトル $P_o(f)$ は、

$$P_o(f) = \left\| \frac{H}{\pi f} \sin(\pi W f) \right\|^2 \quad \cdots (2)$$

となり、車両位置の影響を受けなくなる。なお、 f は明度分布の周波数成分で、この結果の導出は文献[3]に明確に示されている。

< 2・3 > 物体長の特徴量 車両巾に依存した明度分布パワースペクトルの周波数特性を（2）式に基づいて作図したものが図1である。横軸は画像の空間周波数（cycle/m）で、縦軸は各周波数成分に対するパワーであり、車両と道路の明度差に依存する。ここで、車両巾 W_1 は短い巾の車両を想定し、車両巾 W_2 は長い巾の車両を想定している。この図のエンベロープにはパワーがゼロとなる極小値が周期的に現れており、その周期は車両巾 W に反映されていることが示される。また、その周期は車両と道路の明度差 H の値に影響を受けないというのは（2）式からも明らかである。したがって、この極小値の位置の計測、またはエンベロープの周期の推定によって、明度差に依存しない車両巾計測が実現できる。

図1. 車両の大きさによる明度分布パワースペクトル
Fig.1. The power spectra of some vehicle models
for width difference.

3. エンベロープ周期による車両巾推定法

図1の結果より、微分演算による極値解析を行い、極小値が存在する周波数 f を一点だけ求め、その周波数の値から車両巾を推定するのは可能である。しかし、一点の極小値だけを捉えて車両巾と判断するのは誤計測の可能性がある。実際の映像はノイズの影響を受けており、必ずしも一点の極小値が真の車両巾を示しているとは言えない。そこで、エンベロープ周期を推定する方法を試みた。このため、明度分布パワースペクトルに対して再度の周波数分析を行い、エンベロープの周期性分析を行った。図2はこの周期性分析をDFT(Discrete Fourier Transformation)によって行った結果の一例で、車両巾を1.5mと想定した。

図2. 明度分布パワースペクトルの周期性成分パワー
Fig.2. The periodic component of power spectrum.

この結果、パワースペクトルのエンベロープに対してそのまま周期性分析を行っても、エンベロープの周期を捉えられないことが示された。これは $f=0$ でパワー値がゼロ、すなわち極小値になっておらず、周期がくずれていることに起因している。ここで (2) 式に着目すると、明度分布のパワースペクトルは正弦関数と $1/f$ 減衰関数の積の自乗で与えられており、 $f=0$ で極小値周期をくずしているのは、 $1/f$ 減衰関数に起因していると考えられる。そこで、この $1/f$ 特性を補正するために、明度分布パワースペクトルに対して f^2 倍の乗算を施す。その補正パワースペクトルに対して、周期性分析である再度の周波数分析を行うことにした。補正パワースペクトル $P_c(f)$ は、

$$P_c(f) = f^2 \times P_o(f) = \left\| \frac{H}{\pi} \sin(\pi W f) \right\|^2$$

$$= \frac{H^2}{2\pi^2} (1 - \cos(2\pi W f))$$

... (3)

となり、当然、車両巾に対応した周期性を持っている。一方、 $P_c(f)$ は偶関数であるから、周期性分析に際して、正弦変換を行う必要がなく余弦変換のみの積分演算で十分であり、高速な周期性分析が可能となる。このようにして得られるエンベロープの周期性成分 $C(\alpha)$ は、

$$C(\alpha) = \frac{1}{2\pi\beta} \int_0^{2\pi\beta} P_c(f) \cos(2\pi\alpha f) df$$

$$= \begin{cases} H^2/2\pi^2 & (\alpha=0) \\ -H^2/4\pi^2 & (\alpha=W) \\ 0 & (\alpha \neq 0, \alpha \neq W) \end{cases}$$

... (4)

ただし、 $\beta=1,2,\dots$

となる。ここで α は補正パワースペクトルの周波数であり、エンベロープ周期、すなわち、長さを示すディメンションとなる。また、 $2\pi\beta$ は積分範囲を示している。

この結果、周期を示す α がゼロの時と、 α が車両巾 W に一致した時のみスペクトルが存在することが示された。

つまり、スペクトルが α がゼロ以外に存在した場合、その α が車両巾を示す値となる。 α がゼロの時のスペクトルは、補正パワースペクトルの直流成分値を示している。

4. デジタル処理による車両巾計測

<4・1> エンベロープ近似と計測範囲 3

章では、観測される明度波形を連続関数とし、分析領域長が無限として扱ってきたが、実際には離散的なデータが得られ、そのデータ数も限定される。このため、車両の存在を想定した明度波形データに対して DFT を施しても、パワースペクトルは離散的になり、スペクトル分解能が低下する。これはサンプル区間に対応する明度分析領域の長さが短いときには顕著になり、理論に示した明度分布のエンベロープが捉えられない。また、明度分析領域の長さが長く、明確なエンベロープが得られたとしても、周期性分析による測長可能な範囲は、明度分析領域の長さの $1/2$ であり、得られた長さが車両巾を示しているのか、車両の陰になっていない部分の道路巾を示しているのかの判別は不可能である。そこで、仮想的に明度分析領域を拡大した。

道路の明度値と同じ値のデータを引き延ばすことで、仮想的に分析領域を拡大すると、近似的に原型のエンベロープを得ることができ、得られる長さの範囲も、仮想分析領域に応じて広くなり、実際の分析領域の長さを分析可能にする。その仮想分析領域の長さは、少なくとも実際の分析領域の長さの2倍を必要とする。

図3は画像の明度分析領域の長さが3.5mで、そこに1.5m巾の車両が存在している場合を想定したときの明度分布パワースペクトルと、その補正パワースペクトルを DFT によって求めた結果である。ここでは、分析領域巾を4倍に拡大して分解能を向上させている。

図3. 車両明度分布データに対するパワースペクトル
Fig.3. The compensated power spectrum of model vehicle.

補正スペクトルのエンベロープは実線で示しているが、この方法によって得られるエンベロープは、ほぼ正規の積分計算で得られる余弦曲線に近い形が得られることが示され、周期も明確に現れる。なお、引き延ばしデータ数をより多く増やせば、パワースペクトルのエンベロープ周期が、より明確に現れる。

< 4・2 > 車両巾計測 図3の補正エンベロープから車両巾を求めるための周期性分析, すなわち, DCT (Discrete Cosine Transformation) を実施したスペクトルを図4に示す. なお, パワーの標本データ数はエイリアシングを考慮に入れて, 明度分布標本データ数の1/2であり, そのデータ数でDCTを施し, そのパワーをとっている^[5]. 具体的には, 明度分析領域から得られる画像分析標本データ数は64点で, 仮想的に明度分析領域を広げるために, 64点目を256点目まで引き延ばして得たパワースペクトルに対してDCTを施している.

図4. 補正パワースペクトルに対する周期性成分パワー

Fig. 4. The periodic component power of compensated power spectrum.

このようにデータを引き延ばし, 仮想的に明度分析領域を広げることによって得られたスペクトルは, 単一スペクトルとはなっていないが, 周期がゼロ付近を除いてパワー値が最大となったときの周期が物体長を示しており, 確実に明度分布パワースペクトルのエンベロープ周期を捉えることができた. この図では, 車両巾以外の周期スペクトルがほとんど現れていないが, 実際には小さいパワー値を持った周期スペクトルが極わずかに出ている. また, 画像分析標本データ数が少なければ, 車両巾以外を示す周期スペクトルが現れるが, 車両巾に対応するスペクトルが大きく現れている.

< 4・3 > 計測精度とデータ数 仮想明度分析領域の長さを(5)式で示すと, 明度分布 $g(x)$ の空間周波数 f は(6)式となり, 離散的な値を取る.

$$L_i = L_o \frac{N_i}{N_o} \quad (5)$$

$$f = \frac{n}{L_i} \quad (6)$$

ただし, N_o : 画像分析標本データ数

N_i : 仮想明度分析標本データ数

L_o : 画像分析領域の長さ

L_i : 仮想明度分析領域の長さ

n : 高調波次数 ($n = 0, 1, 2, \dots$)

また, エンベロープ周期分析範囲の有効最大値 $f_{\max}$ は n の

最大値を $N_i/2$ として,

$$f_{\max} = \frac{N_i}{2L_i} \quad (7)$$

である. この範囲で周期性分析を行うときの分解能は $1/f_{\max}$ で, 周期に対応する α は分解能と高調波次数 m の積で,

$$\alpha = \frac{m}{f_{\max}} = m \frac{2L_i}{N_i} = 2 \frac{nL_o}{N_o} \quad (8)$$

ただし, m : 高調波次数 ($m = 0, 1, 2, \dots$)

と与えられる. つまり, 仮想明度分析領域の長さは周期分析精度に影響を与えず, L_o/N_o , すなわち, ピクセルサイズに分析精度は依存することになる. また, エンベロープ周期分析範囲を小さくすると, それに応じて分解能が低下し, 分析精度が落ちることになる. ちなみに周期分析のための有効データ数 m は周波数データ数の1/2であって, $m = N_i/4$ となり, 測長可能な最大長さ $\alpha_{\max}$ は

$$\alpha_{\max} = \frac{L_i}{2} \quad (9)$$

である.

5. 実画像計測

スペクトルエンベロープの分析法による車両巾計測を実画像において試みた. 計測法の概要は, 高所に設けたビデオカメラで道路を撮影し, 明度分析領域を道路断面方向に設け, そこで得られる明度データから車両巾計測を行うことにした. ただし, 計測するにあたってその明度分析領域内の道路幅をあらかじめ計測しておく必要がある.

今次の実験では1994年10月15日昼間に, 滋賀県草津市内京滋バイパス歩道橋上にカメラを設置し, 自動車交通流の撮影を行った. 図5は自動車交通流の実写映像と明度分析領域(線分)を示す.

図5. 実写映像と明度分析領域
Fig. 5. An example of camera location and brightness analyzing area.

(a) 明度分布

(b) 明度分布の補正パワースペクトル

(c) 補正パワースペクトルの周期性成分パワー

図6. 黒い車両に対する周波数分析
Fig.6. The frequency analysis of black vehicle.

図6は車両巾1.86mの黒い車両の例、そして図7は車両巾1.76mの中間色の車両の例について、それぞれ得られた明度分布と補正パワースペクトル、さらにはそのエンベロープ周期性成分を示している。一般に黒色や中間色の車両のスペクトルは不明確となるが、実画像計測においても、明度分布パワースペクトルのエンベロープ周期は明確に現れており、その補正パワースペクトルの周期性スペクトルが最大値となったときの周期の値が、その車両巾を示している。なお、白色車両のスペクトルは図3～4とほぼ同様になる。

今次実験の車両巾計測では走行する車両に対して順次周

(a) 明度分布

(b) 明度分布の補正パワースペクトル

(c) 補正パワースペクトルの周期性成分パワー

図7. 中間色の車両に対する周波数分析
Fig.7. The frequency analysis of gray vehicle.

期性パワースペクトルを計算し、1～3mの範囲で最大パワーを有する周期を求めた。図8には実測車両巾と計測車両巾の関係、表1にはその色別の計測精度を示している。これらは走行車150台について計測した結果であり、その内訳は白い車両が69台、黒い車両が51台、中間色の車両が30台である。なお、これらの計測は画像分析領域を道路上の3.34mとし、この長さは画像上で150ピクセルに対応している。この150点をFFTが使用可能となる512点までデータを引き延ばし、分解能が最大となるエンベロープ周期分析範囲の有効最大値 $f_{\max}$ まで周期性分析を行い、車両巾計測を行った。

図8から、車両巾による計測精度に違いが生じないことが示されている。また表1より、中間色の車両巾計測の精度には白い車両や黒い車両と比べてばらつきが生じ、誤差の値も大きくなっていることが示されている。実際の映像では、轍跡などの影響で道路明度は一定ではなく、明度が勾配を持った値となっており、中間色の車両の計測精度が落ちるのは道路の明度分布に影響を受けやすいことに起因している。また今次実験において、計測を行った車両の走行速度は様々であり、道路上の走行位置も様々であった。しかし、パワースペクトルを評価対象に選んだことで走行位置による計測精度の違いは見られなかった。また単一フレームの画像分析であるので走行速度による影響もなく、全車両における計測誤差は5%以内であった。なお、車両巾が1ピクセルずれた場合、このスペクトルエンベロープの周期が約4.5cm変化する。すなわち今次計測では、その誤差はスペクトル分解能によって生じる誤差範囲内にほとんどが含まれている結果といえ、最大でも2ピクセルのずれに納まっている。以上のことから本計測法は車両巾計測を行ううえで十分適用できる結果だといえる。

図8. 計測結果

Fig.8. The result of measurement.

表1. 計測精度

Table 1. The accuracy of measurement.

	maximum error (%)	average error (%)
WHITE VEHICLE	3.78	-0.54
GRAY VEHICLE	4.88	-1.30
BLACK VEHICLE	3.78	-0.67

6. あとがき

本論文では計測対象を自動車交通流とし、その車両巾計測の非接触計測実現のため、画像計測での手法について述べた。その精度は画像分析標本データ数に応じて変動する

が、標準化誤差、スペクトル分解能による誤差内ではほぼ車両巾計測が行えることを示した。より高精度に計測したい場合には、より多くのデータをサンプルする必要がある。しかし、得られるデータ数には限りがあり、画像の解像度に問題もあるので、画像計測での精密計測は限界がある。それでも本方法において、車両巾の非接触自動化計測を実現する可能性を見出すことができた。また、今次は車両を計測対象にしてきたが、車両に限らず明度分布一定の物体に対しても比較対象の長さが確認できたなら、非接触に物体長計測を行う可能性も見出すことができた。

(平成7年1月27日受付, 同7年5月17日再受付)

文 献

- [1] 宮迫康夫, 宮内 勝:「車両センサーの研究開発状況」, 交通工学, Vol.20, No.4, pp.45-50(1985)
- [2] テレビジョン学会:「テレビジョン画像工学ハンドブック」, オーム社, pp.1245-1249(1984)
- [3] 田口耕造, 小野川義彦, 中西恒彦:「TV映像からの車両認識」, システム制御情報学会論文誌, Vol.6, No.10, pp.446-456(1993)
- [4] 吉川仲次, 田口耕造, 中西恒彦:「TV画像による交通流計測」, 電学論C, 114巻11号, 平成6年, pp.1154-1159
- [5] 佐川雅彦, 貴家仁志:「高速フーリエ変換とその応用」, 昭晃堂, (1992)
- [6] 近藤広隆, 中西恒彦:「画像を用いた物体長の計測」, 平成6年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, p.G60(1994)
- [7] 前田 渡:「デジタル信号処理の基礎」, オーム社, (1980)

近藤 広隆 (学生員) 1972年3月25日生まれ。平成6年立命館大学理工学部電気工学科卒業。現在同大学大学院理工学研究科修士課程在学中。画像計測に関する研究に従事。

中西 恒彦 (正員) 1944年1月1日生まれ。昭和43年立命館大学大学院理工学研究科修士課程電気工学専攻修了。立命館大学理工学部電気工学助手を経て現在同教授。放射能計測器の開発から計測工学に入門し、現在ではランダム現象である自動車交通流の計測と解析法の研究に従事。工学博士。電気学会、計測自動制御学会、交通工学研究会などの会員。