

周波数分析を用いた衝突判定アルゴリズム

Algorithm for Crash Judgement by Frequency Analysis

松田 一男*
Kazuo MATSUDA

福井 努*
Tsutomu FUKUI

蛭田 行男*
Yukio HIRUTA

要 旨

周波数分析を用いた衝突判定アルゴリズムを開発した。本アルゴリズムでは衝突したか否かの判断をエネルギー成分と周波数成分の両方の演算によりおこなう。周波数成分の算出には乗除演算不要なアダマール変換を用い、現状のマイコンレベルのハードウェアで周波数分析を実現した。その結果、衝突判定の精度が向上し、開発に要する期間も短縮できた。

ABSTRACT

A crash judgement algorithm that uses frequency analysis has been developed. This algorithm judges whether or not a crash has occurred by calculating both energy elements and frequency elements. Frequency analysis is implemented in hardware at the current microcomputer level using a Hadamard transform that does not require multiplication or division in the calculation of frequency elements. This approach improves the accuracy of crash judgements and reduces development time.

1. まえがき

近年、衝突安全に対する意識が高まっている。国内保安基準に衝突テストが導入され、諸外国では従来の正面バリアへの衝突以外に、ODB(オフセットデフォーマブルバリア)に代表されるオフセット系の衝突テストが導入されている。Fig.1に代表的な衝突テストとその発生加速度波形の例をあげる。

衝突時に乗員の保護を行なうには、以下の2点が重要である。

- 衝突のエネルギーを吸収し、かつ乗員の生存空間を確保するボデーの衝突性能。
- 乗員の室内部品との2次衝突を防ぎ、傷害を低減させる乗員拘束装置の性能。

衝突判定アルゴリズムは、その乗員拘束装置のうち、エアバッグやベルトプリテンショナーのON/OFF判断も含む作動タイミングを制御する。

今回、その衝突判定アルゴリズムに関し、新たに周波数分析手法を取り入れた新アルゴリズムを開発した。その結果、従来より容易に衝突判定が可能となったので、それを報告する。

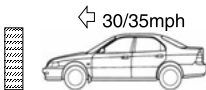
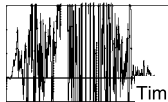
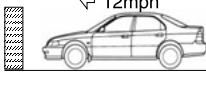
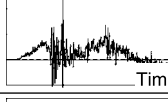
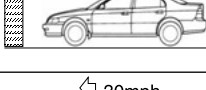
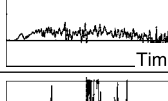
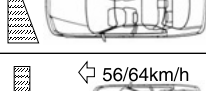
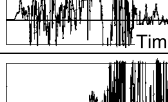
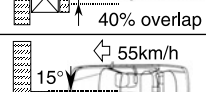
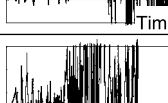
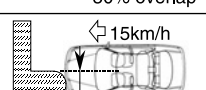
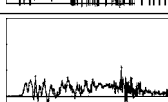
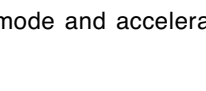
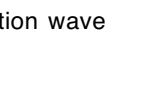
Type	Mode	Figure	Acceleration
Full frontal crash	Front 30 mph Front 35 mph		
	Front 12 mph		
	Front 8 mph		
Angular crash	Right /Left 30° 30mph		
Frontal offset crash	Offset Deformable Barrier (ODB)		
	Automotive Motor Sports (AMS)		
	Aliantz		

Fig.1 Crash mode and acceleration wave

2. 衝突判定アルゴリズムとは

2.1. 電子式 SRS の概要説明

初期の SRS においては Fig.2 左に示すように機械式のセンサを車体前方に、別の機械式センサを車体中央部のユニット内部に配置していた。それらのセンサは電気的には接点となっており、両方のセンサの同時 ON でエアバッグのガスを噴出するインフレーターへ電気が通電される仕組みであった。この方式を機械式マルチポイントセンシングとよぶ。

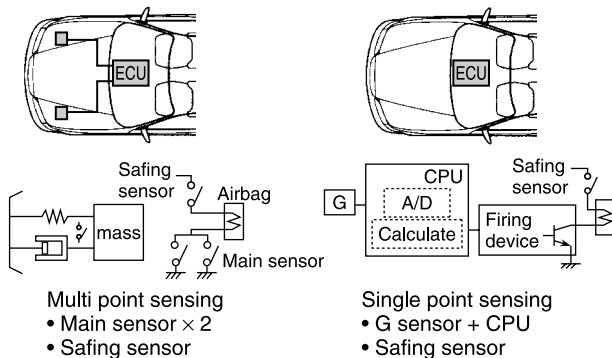


Fig.2 Mechanical/Electrical SRS

それに対し 93 年夏以降からは Fig.2 右に示すように、車体中央に設置されたユニット内に加速度センサを持ち、その加速度センサからの出力を CPU により演算を行ない、その演算の結果、衝突だと判定された場合に、ユニットが点火

回路を ON させる。この方式を電子式シングルポイントセンシングとよぶ。

その加速度センサの出力を演算し、衝突か否かを判断するのが衝突判定アルゴリズムである。また、衝突時の発生加速度は車種により異なる。そのため、衝突か否かを判断するしきい値は車種ごとに異なる。その車種ごとのしきい値を設定する作業をセッティングとよぶ。

2.2. 衝突判定の難しさ

衝突判定の難しさは以下の 2 点である。

● ON 要件と OFF 要件が有り、それぞれに高信頼度を要求される。

● ON 要件には後述する TTF という時間要件が有る

エアバッグは、悪路走行を含む通常走行時や、8mph 程度 of エアバッグが無くても乗員の傷害が低い軽衝突では確実に OFF であり、逆にエアバッグが必要な衝突では必ず ON しなければならない。その ON と OFF の性能目標に対しては高い信頼性が要求される。

また、ON の性能目標の場合は衝突開始からエアバッグへ展開信号を出すまでの時間が規定されている。これを TTF (Time To Fire) とよぶ。一般に TTF は乗員の移動距離が 5 inch の時点でエアバッグが展開しているよう設定する。エアバッグの展開には通常約 30ms 必要であるから、TTF は(乗員が 5inch 移動する時間) - 30ms となる。通常この値は正面高速衝突の場合で 8ms ~ 15ms であり、高速衝突本来の高加速度が発生する以前の時間である。Fig.3 に高速衝突の場合の加速度と速度、および移動距離を示す。この例からわかるように、高速衝突を判定するには、まだ十

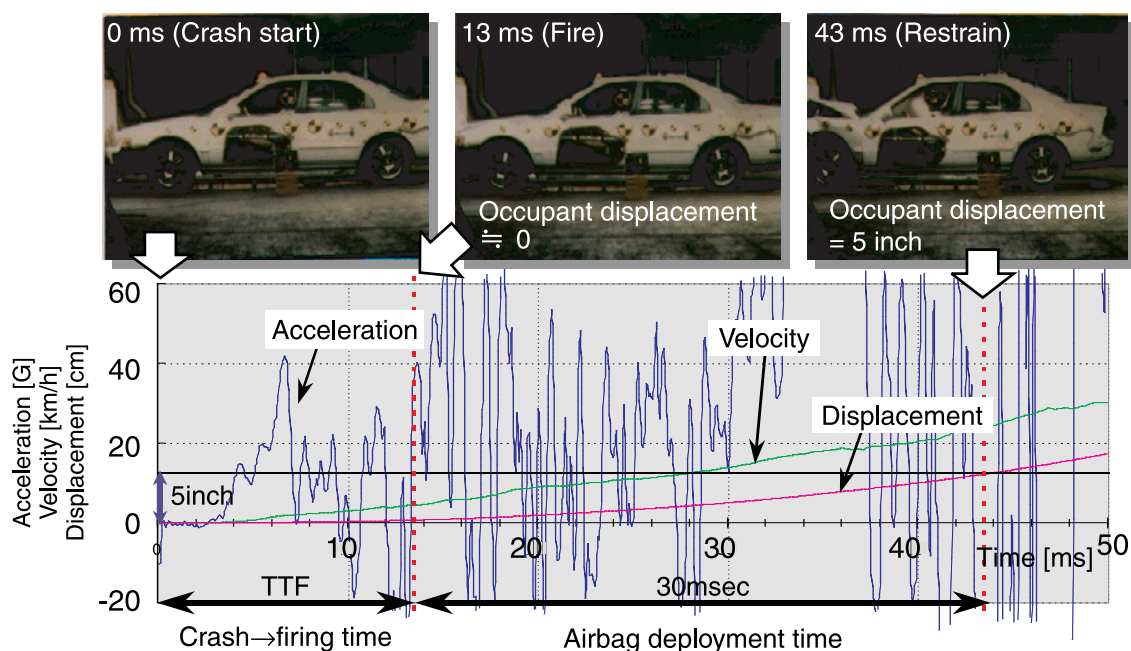


Fig.3 High speed crash

分衝突加速度が発生していない時点で、エアバッグの作動が必要とされる大きな衝突であること、つまりこれから高加速度が発生することを予測しなければならない。これが衝突判定の難しさである。

2.3. 従来の衝突判定アルゴリズムの概要

Fig.4 に従来の衝突判定アルゴリズムの一例を示す。この例では加速度の変化率である加速度の微分を基に計算をおこなっている。通常はこれ以外に速度変化を示す加速度の積分、移動距離を示す加速度の2重積分などを基に計算をおこなっている。この例の手法では加速度波形の演算途中でテーブル処理を用いており、ある限られた範囲のデー

タのみ評価する演算となっている。このような処理の場合、全データの情報からこの部分以外の情報が欠落することがある。すなわち加速度波形の特徴抽出が十分にできない場合がある。

3. 新衝突判定アルゴリズムの概要

3.1. 周波数分析による衝突判定の妥当性

加速度波形の特徴抽出をおこなうために、われわれは周波数分析を導入した。この手法は音声認識、モード解析等、振動に関する特徴抽出のために広く使われている。Fig.5に解析結果の一例を示す。これは短時間フーリエ変換といわ

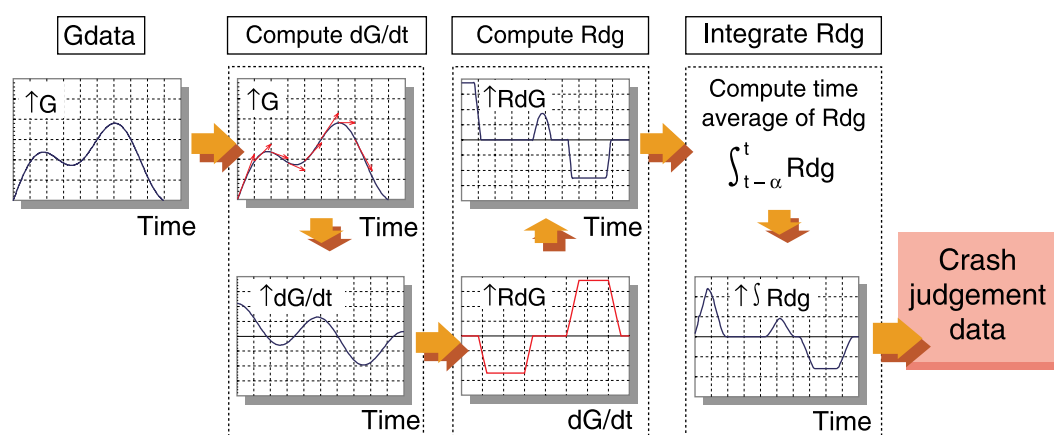


Fig.4 One of previous crash algorithm

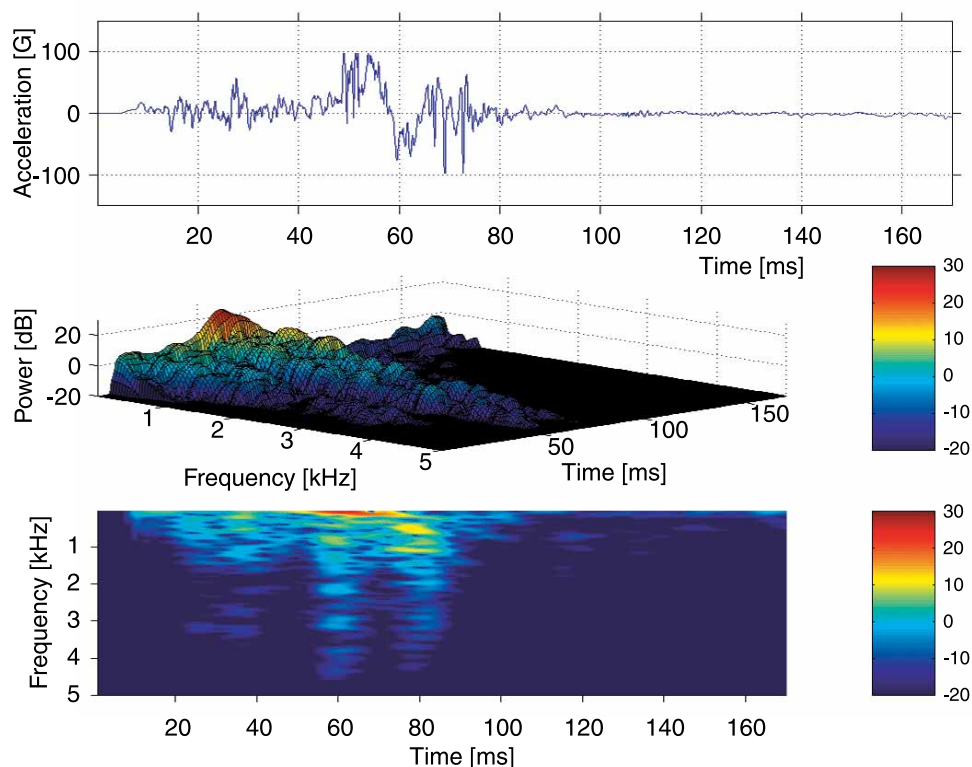


Fig.5 STFT analysis

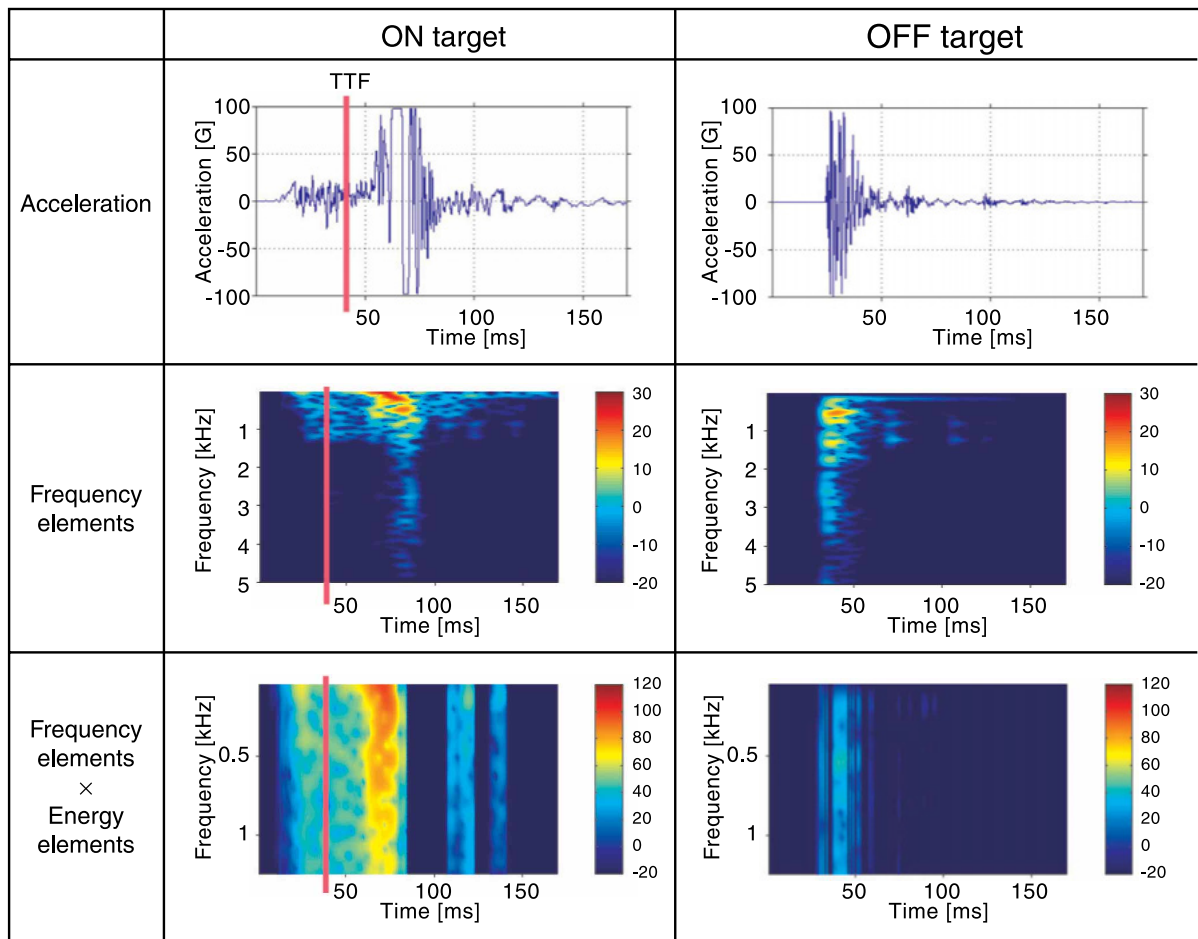


Fig.6 Frequency elements and Energy elements

れる手法で、加速度波形の周波数成分の変動を時間変化でとらえたもので、STFT(Short Time Fourier Transform)⁽¹⁾⁽²⁾とよばれる。

この解析の結果、周波数分析により衝突判定をおこなうためには、単なる周波数成分では不十分であり、Fig.6に示すように周波数成分データと、その時点でのエネルギー量との積をとることが必要であることが分かった。これは衝突時にはまず部材に応力が蓄積され(エネルギー蓄積)その後、圧壊による応力の放出(高周波成分の発生)というメカニズムからも推察できる。Fig.7にその簡略化したモデルを示す。

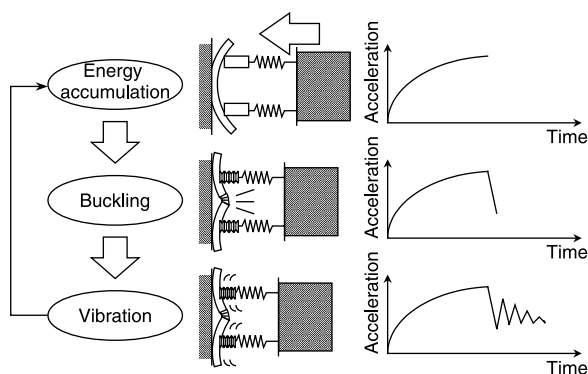


Fig.7 Model of generating a crash acceleration

3.2. ECU による実現手法(アダマール変換)

ここまでの解析にはフーリエ変換を用いた。しかし、フーリエ変換の周波数分解精度は高いが、実数の乗除演算が多い。そのため、現状のセンサ ECU のハードウェアでは実現困難である。そこで、われわれは周波数分解精度は落ちるが加減算のみで周波数分解を行なえるアダマール変換⁽³⁾を採用した。これにより演算量は時間比で 1.9%に低減された。

アダマール変換(Walsh Hadamard Transform)とは以下の特徴をもつ周波数分析手法である。

- 変換行列として(1, -1)のみを要素とする行列を用いる(演算が加減算のみ)。
- 直交性を有する方形波群によって元波形を表現する(広義のフーリエ変換)。

変換は線形1次変換で、以下の式で表現できる。

$$\begin{pmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ \vdots \\ Y_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & & & \\ & H & & \\ & & n \times n & \\ & & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_{n-1} \end{pmatrix}$$

変換後データ

変換行列

変換前データ

変換行列は以下に示すように2次の基本行列をもとに、2次→4次、4次→8次、・・・n次→2n次と再帰的に作成される。

$$2 \text{ 次変換行列: } H_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$4 \text{ 次変換行列: } H_4 = \begin{pmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & -H_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$8 \text{ 次変換行列: } H_8 = \begin{pmatrix} H_4 & H_4 \\ H_4 & -H_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$n \text{ 次変換行列: } H_n = \begin{pmatrix} H_{n/2} & H_{n/2} \\ H_{n/2} & -H_{n/2} \end{pmatrix}$$

16次1ms サンプリング時のアダマール変換の基底関数とその周波数特性を Fig.8 に示す。方形波分解による誤差の影響は有るが、基本周波数のスペクトルは理論どおり分解できている。ここで SQ とはシーケンスとよび、アダマール変換の次数で周波数に相当するインデックスである。

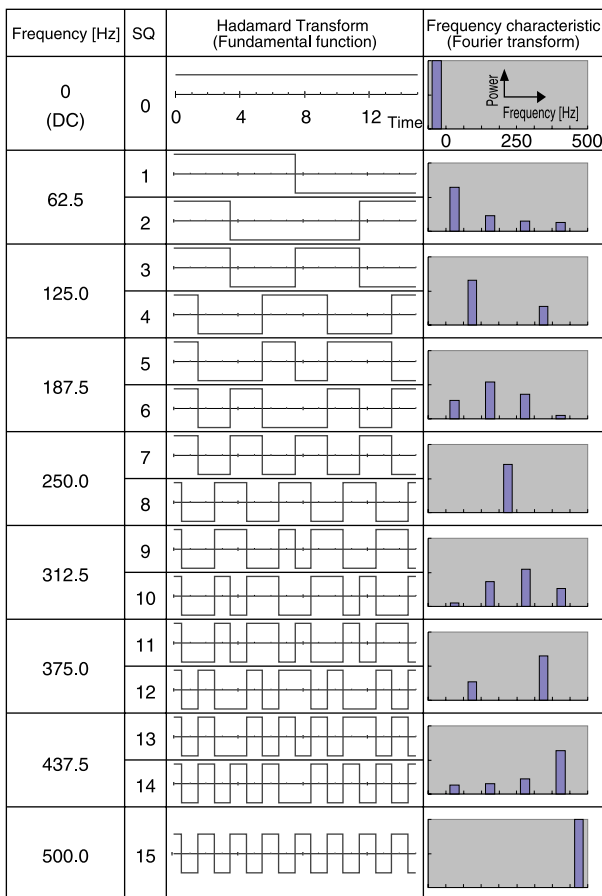


Fig.8 Frequency characteristic of Hadamard transform

具体的な衝突波形への適用例を Fig.9 に示す。16 次のアダマール変換を用いる場合、1つの加速度データから周波数ごとに16種類のデータが生成される。ここでSQ4にピークが有ることは、元の加速度波形とSQ4の基底関数の形がその時点で最も一致していることを示す。すなわち元の加速度データから周波数成分ごとに、16種類のデータを抽出しており、それぞれのデータはその周波数ごとの基底関数との一致程度を表している。

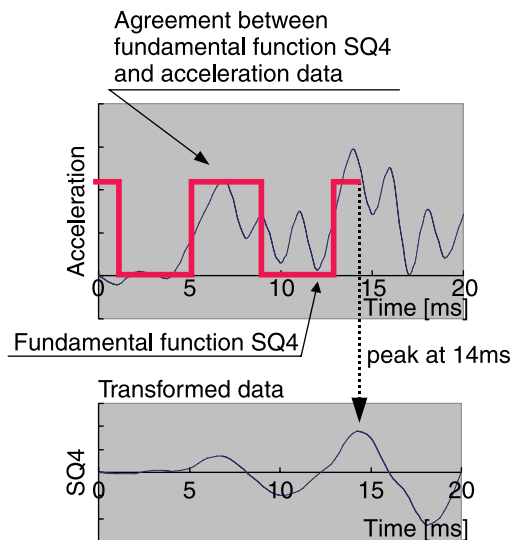
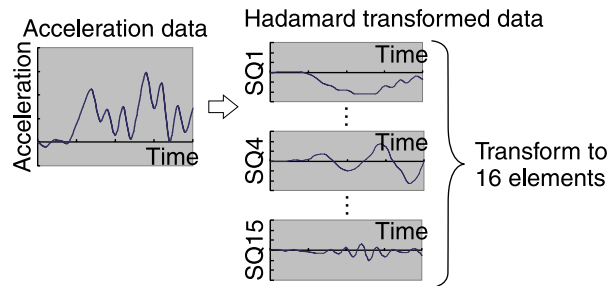


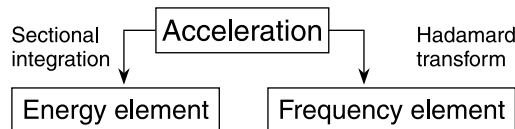
Fig.9 General idea of frequency analysis

3.3. アルゴリズム概要

今までの解析結果をもとに、本アルゴリズムは、加速度信号をエネルギー成分と周波数成分に分解し、指定のエネルギー成分と周波数成分(アダマール変換データ)が、設定されたしきい値を越えた場合に衝突と判定する。

簡単なブロック図と判別フローを Fig.10 に示す。また、周波数成分のしきい値は、エネルギー成分の出力により、段階的に可変になっている。

Block diagram



Judgement flow chart

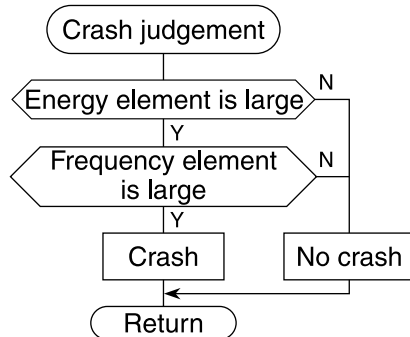


Fig.10 Concept of the crash algorithm

3.4. 検証内容

本アルゴリズムは周波数成分による衝突判定を行っている。そのため周波数成分の変動に対するタフネス(ロバスト性)の確認が重要となる。セッティングを行った衝突モード以外のリアルワールドでの衝突では、衝突時に発生する周波数成分が変動し、規定の要求が出せない場合が考えられる。従来のアルゴリズムでは基本的に速度変化を基準にしているため、そのような場合でも比較的比例関係が保たれることが経験的に分かっている。よって本アルゴリズムに対しては以下の項目について検証し、適合性を確認した。

- 共振の影響
- 衝突速度およびモード
- 周波数変動

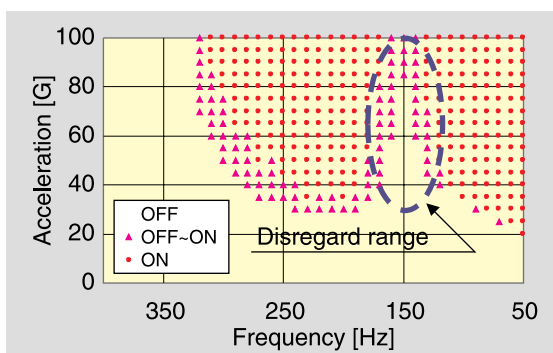
共振に対する検証では、過去に測定された衝突波形の中で、ECU取り付けブラケットの共振が大きく、その影響を考慮する必要がある衝突波形に対しても、本アルゴリズムではセッティングが容易であることを確認した。Fig.11 に従来アルゴリズムと本アルゴリズムの周波数ごとの ON 特性を示す。本アルゴリズムでは従来アルゴリズムでは区別の難しい、ある周波数成分のみを評価しないセッティングが可能となり、ブラケットの共振を避けてセッティングしていることがわかる。

衝突速度およびモードの検証では、法規以外の速度での衝突や、リアルワールドでの衝突を想定したバリアテストを実施した。具体的には2モードの衝突テストを実施し、その展開制御の適合性を確認した。Table 1 にその結果を示す。

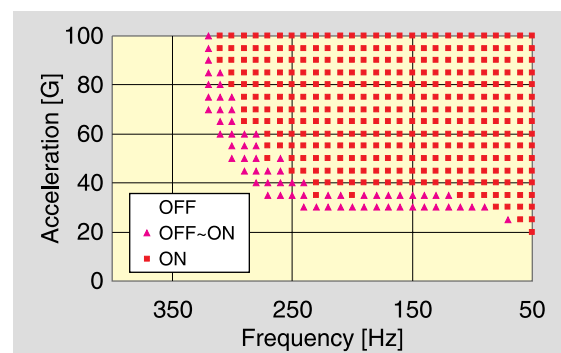
周波数変動による影響の検証では、実際の衝突波形の周波数成分をコンピュータ上で乱数を用いて変動させてやり、周波数の変動に対するタフネスを確認した。Fig.12 にその生成法を示す。元の加速度波形を周波数成分に分解し、その周波数成分の振幅を乱数により変動させ、それを逆変換し、一定の拘束条件で、その波形の使用可否を決定する。

Table 1 Out of regular crash mode

Mode	Figure	Target	Result	Judgement
Full frontal crash 24mph		15.8	14	○
Frontal offset 24mph		43.3	34	○



New algorithm



Previous algorithm

Fig.11 Disregard one of frequency range

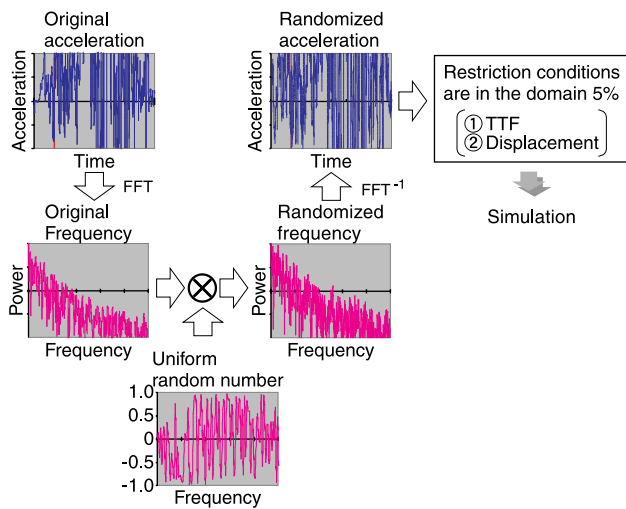


Fig.12 Changing frequency element

4. 効果確認

従来アルゴリズムに対し、本アルゴリズムが有効となる例をあげる。

Fig.13 において従来アルゴリズムの特性1とは、従来のアルゴリズムで、OFF目標のみを満足させた場合の特性である。この場合、ON目標の確保が課題となる。また、従来アルゴリズムの特性2とは1とは逆にON目標を満足させた場合の特性である。この場合、OFF目標の確保が課題となる。それぞれの折れ線は衝突波形の速度変化を表す。

Fig.14 ではこれらの波形に対して本アルゴリズムを適用した場合である。本アルゴリズムではON目標とOFF目標の両立が容易に達成できているのがわかる。

また、アルゴリズム構造が単純化されたことにより、周波数成分とエネルギー成分の相関を自動的に探索するツールが作成できた。その結果、半自動でセッティングの見通しがつけられるようになり、セッティング期間が大幅に短縮できた。

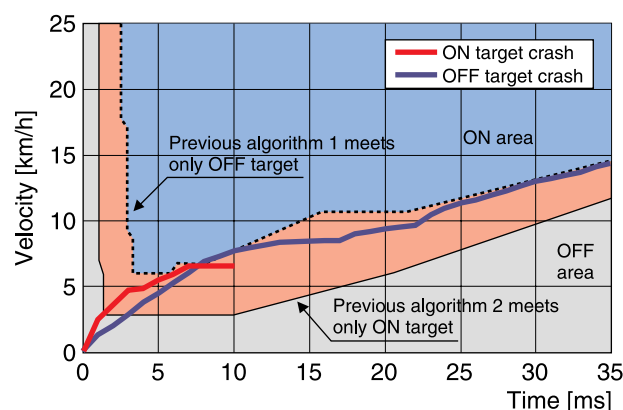


Fig.13 Characteristic of previous algorithm

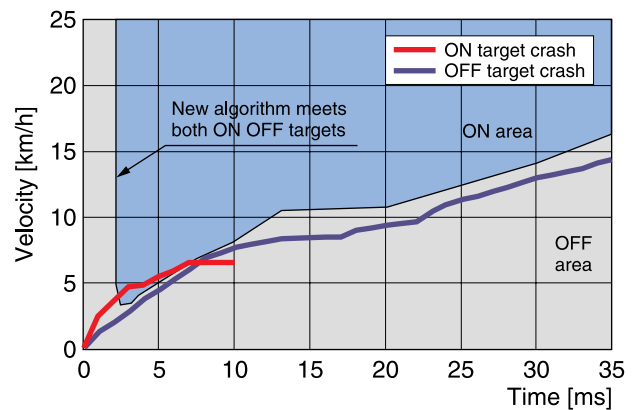


Fig.14 Characteristic of new algorithm

5. まとめ

アダマール変換を用いることにより、現状のセンサECUのハードウェアに搭載可能なマイコンレベルで周波数分析手法を取り入れた衝突判定アルゴリズムを完成し、その成立性を確認できた。

その結果、衝突判定の精度向上がはかれた。また、セッティング時間も大幅に短縮できた。

今後は、本アルゴリズムの性能向上、セッティング効率向上のため更なる改良をおこない、適用機種拡大に努力したい。

謝 辞

本アルゴリズムの開発にあたり、(株)ケーヒンの皆様に多大なご協力をいただきました。本紙面をお借りしてお礼を申し上げます。

参考文献

- (1) 南慶一朗, 河田聡: 科学計測におけるデータ処理技法, インターフェイス, 第20巻, 第1号, p.110-119 (1994)
- (2) Charles K. Chui 著, 桜田明, 新井勉共訳: 短時間フーリエ変換と不確定性関係, ウェブレット入門, 東京, 東京電機大学出版局, 1993, p.64-72
- (3) 原島博: 直交変換の特徴とその比較, 画像情報圧縮, 東京, オーム社, 1991, p.98-104

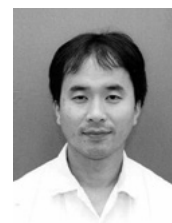
■著 者■



松田 一男



福井 努



蛭田 行男