法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

自動車車体の微小振動計測ー自動車内の生体情報検知とセキュリティ応用ー

増山, 康介 / MASUYAMA, Kosuke

(発行年 / Year)
2010-03-24
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2010-03-24
(学位名 / Degree Name)
修士(工学)
(学位授与機関 / Degree Grantor)
法政大学 (Hosei University)

2009 年度　修士論文

自動車車体の微小振動計測

― 自動車内の生体情報検知とセキュリティ応用 ―

MEASUREMENT OF MICRO VIBRATION OF CAR
－ DETECTION OF BIO-INFORMATION IN THE CAR AND APPLICATION FOR SECURITY －

指導教授　　渡辺嘉二郎　教授

大学院工学研究科システム工学専攻修士課程

08R6121

増山（マスヤマ）　康介（コウスケ）

MEASUREMENT OF MICRO VIBRATION OF CAR

－ DETECTION OF BIO-INFORMATION IN THE CAR AND APPLICATION FOR SECURITY －

Kosuke Masuyama

Abstract

A penetration of cars continues to grow, and a wide variety of crimes that use a car increases concurrently. Examples of these crimes include the illegal immigration and intrusion, which are occurred by human hiding amongst the car. In case of crimes, border controls and security guards check up on car by human beings or X-ray. These have problems such as a false recognition, a cost of appointments. In the specific facilities, other problems by hiding behind in a car occur. That is an invasion to the gated community which is an area of houses and condominium buildings etc., where a fence or wall surrounds the area and the entrance is guarded. In addition, the problem that an infant dies of heat stroke due to letting alone in a car for a long time increases. Against the above-mentioned cases, the mean which find out human in a car is effective.

In this paper, we aim to develop the simple system which judges a manned car or an unmanned car. The system determines by means of checking if a vibration of car includes a vibration of vital signs by human in the car. A sensing device under the car can measure the vibrations of standing vehicle. The system is comprised of a sensing device, a filter circuit, and a judging circuit. We developed two sensing devices, one employs a piezoelectric ceramic sensor, another employs a capacitor microphone sensor. And the filter circuit extracts biological signals in a signal of a data from the sensing device. The judging circuit draws a conclusion from a parameter calculated from the data through the filter circuit.

Key words *: automobile, security, a piezoelectric ceramic sensor, capacitor microphone sensor*

目次

１　序論 4
１．１　研究背景 4
１．２　本研究の目標 4
２　仮定と問題の記述 6
２．１　対象 6
２．２　被験者の仮定 6
２．３　問題 6
３　判定システム原理 7
３．１　判定システムの構成 7
３．２　センシングデバイスの原理 7
３．３　判定に用いる特徴量 9
３．４　多数決判定回路 9
３．５　サスペンションを介す振動成分の検証 10
３．５．１　サスペンションを介す振動について 10
３．５．２　自動車の振動 10
３．５．３　計測状況のモデル化 11
３．５．４　減衰振動と強制振動 12
３．５．５　結論 14
４　圧電セラミックス型センシングデバイスの開発と検証 15
４．１　圧電セラミックスセンシングデバイスの開発 15
４．２　圧電セラミックスセンサの製作 16
４．２．１　圧電セラミックスを利用した圧電セラミックスセンサの製作 16
４．２．２　圧電セラミックス(Ceramics)について 17
４．２．３　圧電効果について 17
４．３　生体計測用フィルタ回路の製作 19
４．３．１　圧電セラミックスの等価回路 19
４．３．２　生体信号通過フィルタ 19
４．４　計測実験による圧電セラミックスシステムの検証 20
４．４．１　実験方法 20
４．４．２　車体の固有振動 22
４．４．３　計測結果のパターンと特徴量の抽出 23
４．４．４　考察 24
５　コンデンサマイクロフォン型センシングデバイスの開発と検証 25
５．１　コンデンサマイクロフォン型センシングデバイスの提案 25

５．２　コンデンサマイクロフォン型センシングデバイスの製作 27
５．３　センシングデバイス内のシリコンチューブの検討 28
５．４　コンデンサマイクロフォンの原理と数学的モデル 30
５．５　生体計測用フィルタ回路の開発 32
５．５．１　開発の目的 32
５．５．２　生体計測用フィルタ回路の設計と開発 32
５．６　コンデンサマイクロフォン型センシングデバイスによる計測と検証 35
５．６．１　実験方法 35
５．６．２　実験結果と考察 36
５．７　計測実験による外乱に対する影響と閾値の検証 37
５．７．１　目的 37
５．７．２　実験方法 37
５．７．３　実験結果と考察 38
５．８　大型車両に対する汎用性の検証実験 41
５．８．１　目的 41
５．８．２　実験方法 41
５．８．３　実験結果と考察 42
５．９　有人無人判定値の推定 44
６　結論 45
７　今後の課題 46
資料 47
資料１　実際に自動車に隠れている所を発見された例 47
資料２　センシングデバイスに用いたセンサの仕様 48
２．１　圧電セラミックス資料 48
２．２　コンデンサマイクロフォン資料 49
資料３　判定回路実装 51
３．１　システム外装 51
３．２　生体計測用LSI回路 51
３．３　PSoCマイコンによる判定回路 52
資料４　実験仕様機器 55
参考文献 57
謝辞 58

1 序論

1．1　研究背景

アメリカ・メキシコ間などの国境では不法入国者や不法移民が後を絶たない．現状としてアメリカには 1200 万人の不法移民者がいるとされている[1][2]．不法入国者が入国する手段として，自動車の中に隠れることによって越境する方法がある．実際に自動車内に隠れている所を発見された例としては，くり抜いた座席の中に隠れている場合，ボンネット下のエンジン横で体を縮めている場合，ダッシュボードの中に隠れている場合，後部座席に設けられた小空間に隠れている場合などがある[3]．また，メキシコ国境に隣接する米アリゾナ州で配送トラックを装ったバンから 13 人の不法入国者が摘発された例もある[3][資料 1]．2009 年現在，不法入国や密入国の摘発方法の一つとして国境警備隊による自動車内の検査が行われている．そこにおいて，自動車内に人間が隠れているか否かを検査する方法は人間による捜索が主となっている．そのため人件費や検査時間がかかるという問題点があり，X 線による自動車内を透視する検査方法[4]も導入されているが，非常に高価であり人体への影響も否定できない．また近年数が多くなりつつあるゲーテッド型マンション[5][6]などの柵に囲まれた集合住宅などの指定施設の出入口においても，出入りする車内に潜むことによって侵入や脱出を許してしまう可能性が考えられる．

その他にも駐車場における長時間の放置が原因で幼児が熱中症などで死亡してしまう問題[7][8]がある．これらの問題は自動車内の人間の有無というものが焦点としてあり，自動車内の人間の有無を調べる手段の有効性があげられる．

本論では，自動車内の生体情報の有無を判定するシステムを提案する．物理振動を検出するセンサを内蔵したセンシングデバイス上にタイヤが乗るよう被験車を設置させ自動車内の微小振動を計測する．人が車内にいる場合，自動車の振動には人間が意識的に止めることのできない心拍，体動などの生体振動成分が含まれると考えられ，計測した微小振動情報から生体振動を抽出することで人間の有無がわかると考えられる．生体信号である心拍信号には振幅の上下運動と周期性の特徴があり，体動信号には振幅の上下運動という特徴がある．様々なフィルタ回路を用いることで生体信号を抽出し，判定に結び付けるシステムの開発を目指す．

1．2　本研究の目標

本論文では自動車内の人間の有無を簡易に判定することのできるシステムの構築を目的とする．**Fig.1**に判定システムの概要を示す．具体的には圧電セラミックス型，又はコンデンサマイクロフォン型センシングデバイス上に自動車を設置するだけで，自動車の振動に人の生体信号が含まれているかいないかを計測し，自動車内の人間の有無を判定するシステムである．主に自動車の微小振動を計測するセンシングデバイスの開発，振動情報から生体信号を抽出する生体計測用フィルタ回路の開発，抽出される生体信号の有無を調べることによって判定を下す判定回路の開発を行う．

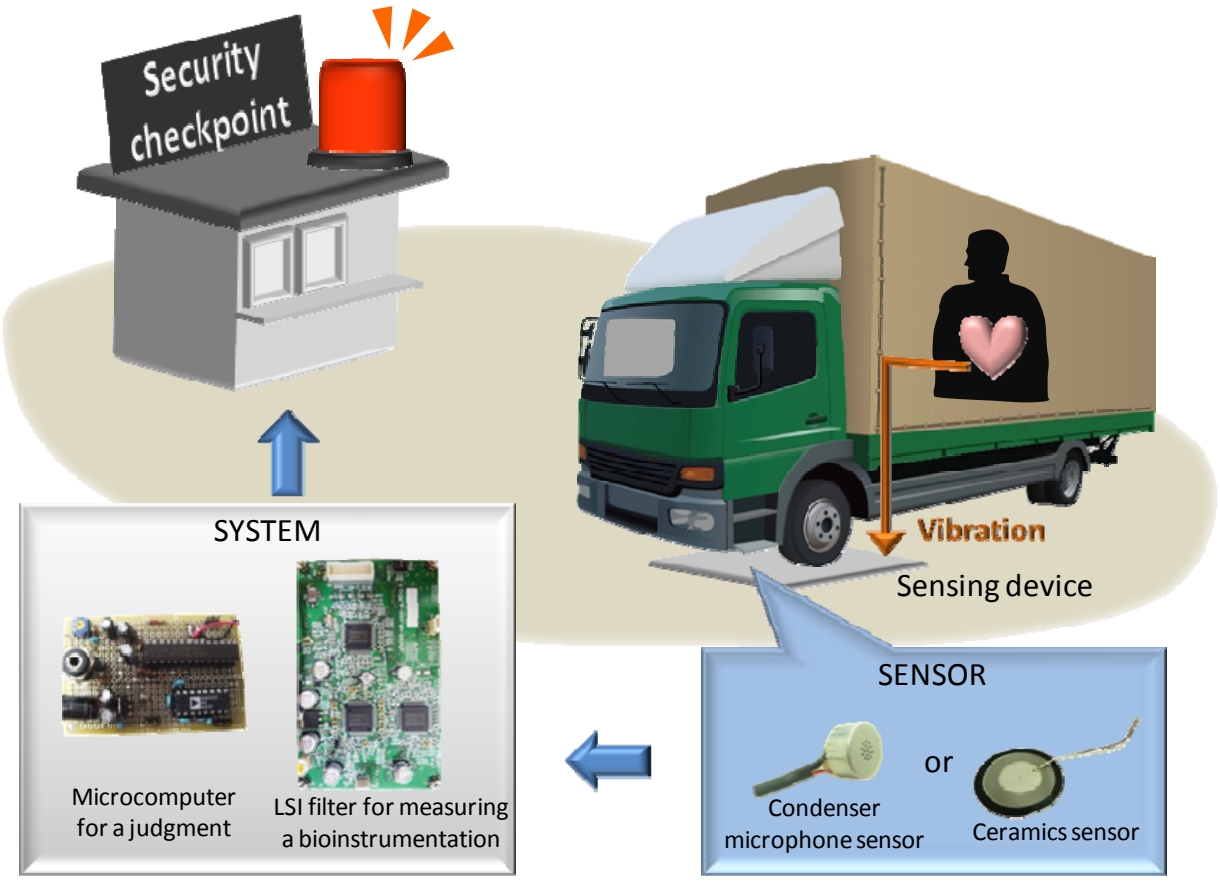


Fig.1　Outline of the judging system

2 仮定と問題の記述

2．1　対象

自動車内に潜む人間の有無の判定をするために自動車の微小振動中に含まれる生体振動を計測対象とする．

2．2　被験者の仮定

(1) 被験者は想定した姿勢以外をしないとする．行動以外から生じた振動は対象としない．

(2) 人間の心拍数は正常な範囲にあるものとする.具体的には心拍･･･42 回/分～90 回/分(0.7 Hz～1.5Hz)[9]である．

(3) 心拍の判断基準として「パルスオキシメータ」[資料 4(c)]を用いる．

(4) 静穏状態においてパルスオキシメータの表示上で心拍を見ると，おおよそ±3 拍/分以内であった．

よって本システムの評価方法にて心拍数の許容範囲を±3 拍/分とする．ここでフーリエ変換後のグラフのプロットとプロットの間の周波数間隔は，サンプリング点数・サンプリング時間より，

$$\frac{1}{data \cdot dt} = \frac{1}{6000 \cdot 0.01} = 0.0167\,[Hz]$$

(data=サンプリング点数(点)，dt=サンプリング時間(秒))となる．

心拍の誤差許容範囲±3 拍/分であるため，周波数に換算すると±0.05Hz の範囲となる．これよりパルスオキシメータからの周波数スペクトルグラフの最大値をとる周波数とシステムの周波数－スペクトルグラフのスペクトルが最大の周波数，スペクトルが二番目に大きな周波数，スペクトルが三番目に大きな周波数，スペクトルが四番目に大きな周波数のうちのいずれかが±0.05Hz の範囲の中にあればそのデータは心拍が取れていると判断することとする．

2．3　問題

本論文では自動車の微小振動を計測するセンシングデバイスの開発，振動情報から生体信号を抽出する生体計測用フィルタ回路の開発，抽出される生体信号の有無を調べることによって判定を下す判定回路の開発を行う．

自動車の微小振動を計測するセンシングデバイスの開発には自動車の微小な振動を検出するセンサと車体重量に対する耐久性が必要となる．

生体計測用フィルタ回路の開発には精度高く振動情報から生体信号を抽出することが求められる．センシングデバイスが検出する自動車の振動には，車体が風や地面によって振動する成分も含まれ，またセンシングデバイスにも地面からの振動が加わり，センサが取得する情報には不確定成分が多く含まれる．それらの不確定成分を除去しながらも，生体情報を抽出しなければならない．

判定回路においては抽出された生体情報の信憑性を考慮する必要がある．不確定成分から生じてしまう疑似生体情報を生体情報として認識しないこと，また汎用性を考えると判定を短時間で行う必要がある．

3 判定システム原理

3．1　判定システムの構成

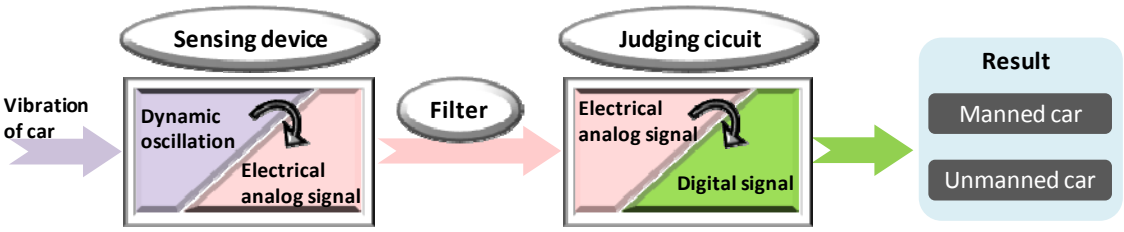


Fig.2　Configuration of a judging system

Fig.2に判定システムの構成を示す．判定システムはセンシングデバイス，生体計測用フィルタ回路，判定回路から構成される．センシングデバイスは車体の動的物理振動をアナログ電気信号に変換し，フィルタ回路によって電気信号から心拍信号を抽出する．判定回路ではフィルタ回路を通過したアナログ電気信号をA/D変換し，取得情報から生体情報量に基づいた特徴量を求めることによって有人車であるか無人車であるかの最終的な判定を行う．

3．2　センシングデバイスの原理

Fig.3に提案するセンシングデバイスの原理を示す．振動信号を検出するセンシングデバイス上に，自動車のタイヤを設置する．この状態で自動車車体に振動が生じた場合，タイヤを経てセンシングデバイスに車体の振動が伝播し，振動に同調した信号がセンサに入力される．これにより自動車車体の振動を計測することが出来る．

Fig.4にセンシングデバイス振動検出のブロック線図を示す．車体には風や道路の振動といった外部環境からの外力，人間が車内にいる場合には人間の生体信号による外力が加えられる．外力が加わった際，タイヤサスペンションに支えられた車体に固有振動が生じる[10][11]．つまり，センサに入力される振動信号は固有振動数f_c [Hz]の振動$S_c(t)$．車内に人間がいる場合，心拍振動に伴う$S_h(t)$ Hzの周期成分を持つ振動成分，体動による突発的な成分$S_b(t)$，外部環境で生じるノイズ振動n(t)が含まれる．従って，センサの出力$y(t)$は，$S_c(t)$と$S_h(t)$，$S_b(t)$，n(t)の線形和になる．ここで心拍振動に伴う振動成分$S_h(t)$，体動による突発的な振動成分$S_b(t)$，ノイズ振動成分n(t)は強制振動，また固有振動$S_c(t)$は減衰振動と見なすことが出来る．

$$y(t) = S_c(t) + S_h(t) + S_b(t) + n(t) \qquad (1)$$

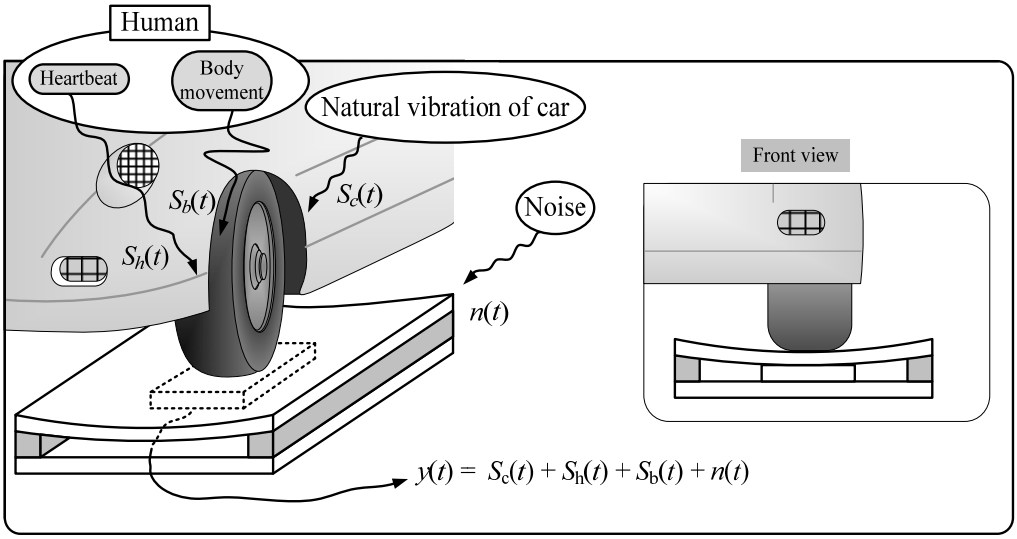


Fig.3　Principle of a sensing device

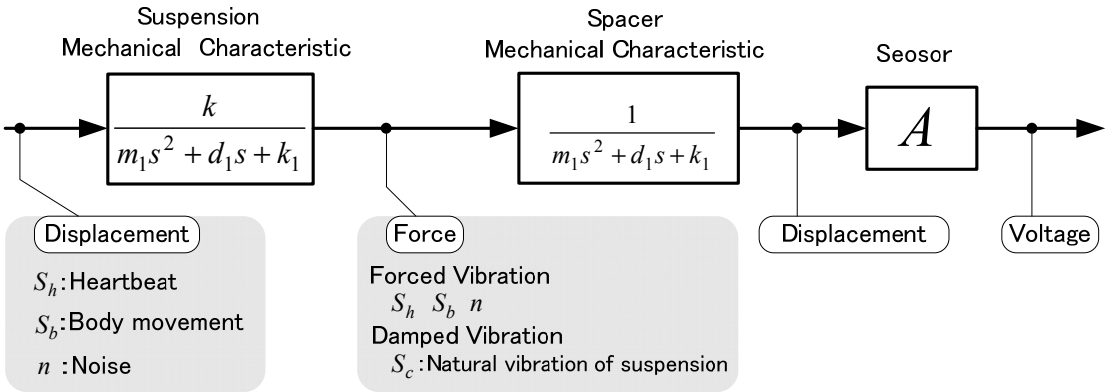


Fig.4　Simplified block diagram of the system

３．３　　判定に用いる特徴量

判定に用いる特徴量を決定する．生体計測用フィルタ回路は生体情報とみなせる信号を抽出する．抽出した信号を，サンプリング間隔 dt で A/D 変換したものを $y(k)$ とする．k は離散値(1，2，…，T/dt)，T は計測時間[sec]とする．出力信号 $y(k)$ の振幅レベルは生体情報が含まれている場合増加し，含まれていない場合減少すると考えられる．従って判定には出力信号の振幅変動を表わす標準偏差 F_b を用いる．人間の心拍の周期は 0.6～1.25s 程度であるので，1 回の計測時間 T は，1.25s の 2 倍の 2.5s とし，サンプリング間隔 dt は 0.01s とする．

３．４　　多数決判定回路

判定方法として，複数の特徴量による多数決法を提案する[資料 3]．時間窓T 秒で一つの特徴量を求め，閾値判定を行う．これをN 回繰り返し，$N/2$ 回以上有人と判定された場合，最終的に有人と判定する．尚，Nは奇数である．**Fig.5**に判定回路で行う処理のフローを示す．

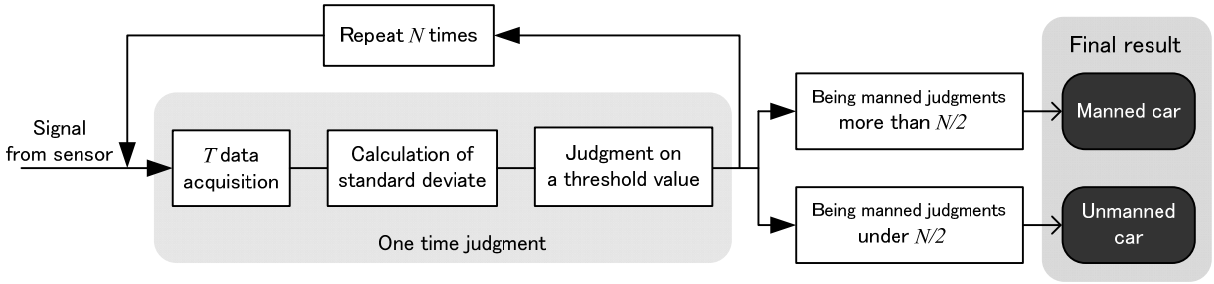


Fig.5　Flowchart of the judging circuit

３．５　　サスペンションを介す振動成分の検証

３．５．１　サスペンションを介す振動について

外力による自動車のサスペンション振動について検証する．サスペンションは運転者の乗り心地改善のために構造改善されており，様々な振動特性を持つものが存在する．本論で行う判定では駐車時の車体に様々な外力が加わると考えられる．その外力には突発的な風や地面の振動による力，周期的な心拍振動による力が含まれ，それらの力が車体を振動させ，サスペンションを介した振動がセンサに入力される．

車体の振動がサスペンションを介すことによって，どのような振動成分が発生し，センサに入力されるか考える．車体の振動から生体振動成分を抽出する本システムにおいて，突発的な風や地面の振動による力は外乱信号，周期的な心拍振動による力は入力信号と見なせる．ここではサスペンションをモデル化することによって，外乱振動成分，入力振動成分による車体振動を検証し，サスペンションを介した車体の振動に対し判定システムの有効性を検証する．

３．５．２　自動車の振動

自動車の振動は主に乗り心地に影響のあるものとして研究対象にされている．その際自動車の振動の仕方は**Fig.6**のように分類されている．振動が起きることによって，サスペンションには固有振動が生じることが推測できる．

(a) Bounding

バウンジング．車体の質量とバネで決まる．不快にならない振動は 0.8~1.5Hz とされている．モータースポーツ用の固いサスペンションでは 6Hz 程度とされている．

(b) Pitching

ピッチング．進行方向軸に対しての回転振動．ピッチングとバウンジングは通常同時に起こる．

(c) Rolling

ローリング．共振点は 5~7Hz．車が前に進む場合，バウンジングに比較して，ローリングはあまり大きくないため，乗り心地としてあまり問題にならない．

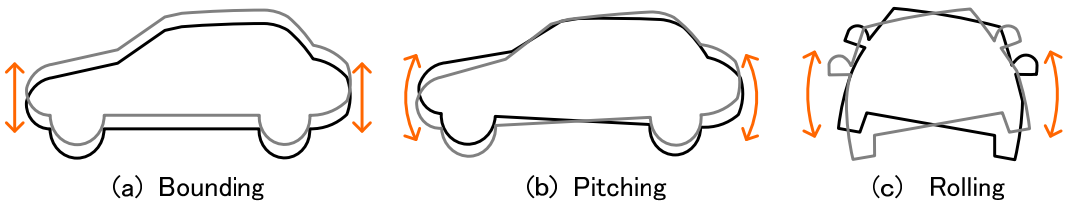


Fig.6　Vibration patterns of a vehicle

３．５．３　計測状況のモデル化

サスペンション，タイヤ，センシングデバイス(上板とセンサ)を**Fig.7**，**Fig.8**のようにモデル化する．自動車の車両重量，サスペンションのスプリングとショックアブソーバ減衰力からなる機械的モデルにおいて，車体の変位とセンサの上板の変位に着目することによってサスペンションを含めた車体全体の振動を求める．それにより突発的な風，地面の振動による力，周期的な心拍振動による力などから生じる各振動成分がどのように車体全体の振動になり，センサに入力されるか検証することが出来る[10] [11].

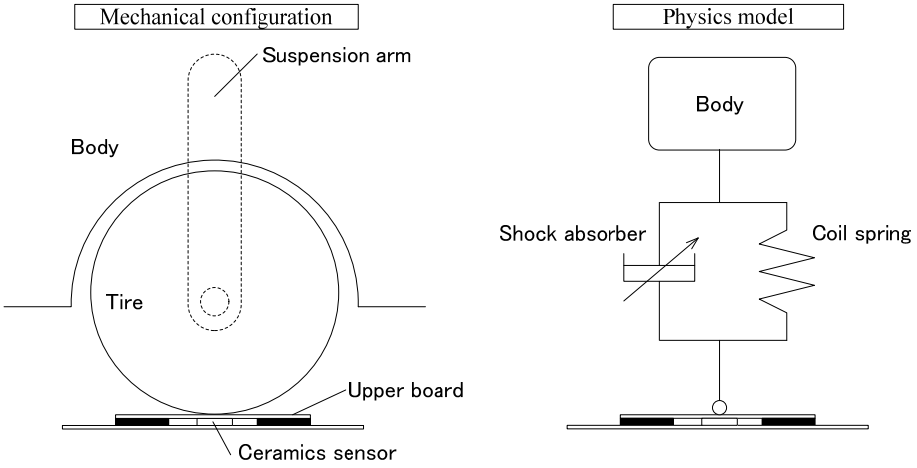


Fig.7　Mechanical configuration and physics model

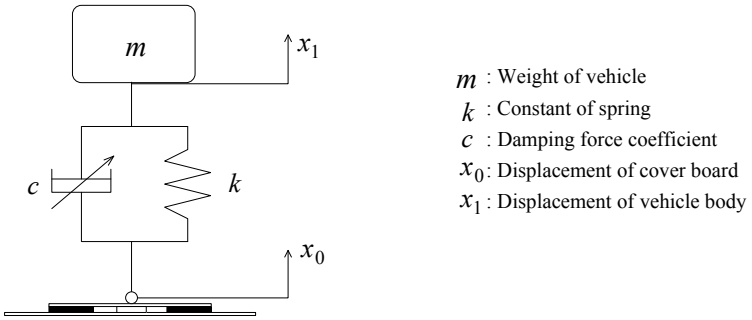


Fig.8　Dynamic mechanical characteristics on the physics model

サスペンションの運動方程式は

$$m\ddot{x}_1 + k(x_1 - x_0) = c(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) \tag{2}$$

とおける．これより車体全体の共振周波数を求める．

ここで，車体の変位が上板(センサとの接着部)の変異より十分大きいと仮定し

$$x_0 << x_1 \tag{3}$$

となる．

よって

$$m\ddot{x}_1 + kx_1 = c\dot{x}_1 \tag{4}$$

これより共振角周波数 ω，共振周波数 f を求めることができる．

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{5}$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (\because \quad \omega = 2\pi f) \tag{6}$$

自動車の固有振動は周波数 $f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$ $(\because \quad \omega = 2\pi f)$ の振動ということができ，車両重量とサスペンションばね定数により決まることがわかる．

３．５．４　減衰振動と強制振動

車体が外力から影響を受け，車体全体に生じる振動にはサスペンションのばね特性による固有振動が含まれる減衰振動と外力から生じる強制振動が含まれるといえる．減衰振動成分になる外力は突発的な風や地面の振動による力成分と考えられ，また強制振動成分になる外力は心拍信号による周期的な力と考えることが出来る．

まず突発的な風や地面の振動が外力である場合について考える．突発的な力により車体の位置 x_1 とセンサの上板の位置 x が変化し，サスペンションに振動が生じた場合**(2)**式に表す運動方程式で表現できる．ここで c はショックアブソーバ減衰力でありサスペンションで生じた固有振動を減衰させることがいえる．

$$m\ddot{x}_1 + k(x_1 - x_0) = c(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) \tag{2}$$

ここで $r = \frac{c}{2m}$，$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ とおくと

(5)式より速度 $\dot{x}$ に比例する抵抗力 $(-2m\gamma\dot{x})$ を受ける単振動の運動方程式は

$$m\ddot{x} = -m\omega_0^2 x - 2m\gamma\dot{x} \tag{7}$$

である．ω_0 は抵抗がない時の角振動数で固有角振動数である．(6)式を変形すると

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \tag{8}$$

となる．

(ⅰ)　$0 < \gamma < \omega_0$　：抵抗力が弱い場合

A'，ϕ を定数，$\omega \equiv \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$ とすると

$$x = A' \exp(-\gamma t) \sin(\omega t + \phi) \tag{9}$$

これはFig.9のような減衰振動を表わす．γ は減衰率を表わす．

(ⅱ)　$\gamma > \omega_0$　：抵抗力が強い場合

$\gamma' \equiv \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}$ とすると

$$x = \exp(-\gamma t)[A \exp(\gamma' t) + B \exp(\gamma' t)] \tag{10}$$

(ⅲ)　$\gamma = \omega_0$　のとき

$$x = \exp(-\gamma t)[A + B t] \tag{11}$$

これも**Fig.9**のような振動なしの減衰を表わすが，$\omega_0 =$ 一定のもとではこの場合が最も速やかに平衡点に達する(臨界制動).

以上より突発的な力が加わり車体の位置 x_1 とセンサの上板の位置 x が変化し，サスペンションに振動が生じた場合，減衰振動が生じるといえる．

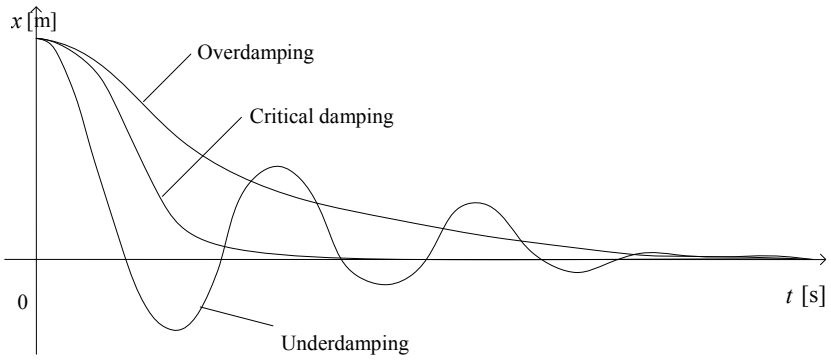


Fig.9　Comparison of damping

次に周期的な心拍信号が外力である場合の強制振動について考える．周期的な外力 $F = F_0 \cos \omega t$ を受ける強制振動の運動方程式は

$$m\ddot{x} = -m\omega_0^2 x - 2m\gamma\dot{x} + F_0 \cos \omega t \tag{12}$$

である．

これを書き直して

$$\ddot{x} + 2m\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m}\cos\omega t \qquad (13)$$

とすると，この微分方程式の一般解は

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \qquad (14)$$

の一般化に式(13)の特解を加えたものとなる．
十分時間が経つと，式(13)の一般解(減衰振動)は減衰してしまうので，特解のみが残り，解は

$$x = A\cos(\omega t - \delta) \qquad (15)$$

ただし

$$A \equiv \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2}} \quad , \quad \tan x = \frac{2\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \qquad (16)$$

となる．
$x = A\cos(\omega t - \delta)$ は入力した心拍信号の位相 δ 遅れている振動であり，心拍信号周波数の振動である．これより外力が心拍信号のような周期的なものによる成分は減衰せず，常に車体を振動させるといえる．

３．５．５　結論

以上より十分時間が経つと突発的な風や地面の振動などの外力から生じたサスペンションの固有振動成分は減衰し，外力振動である心拍振動(心拍，体動)，ノイズ振動が車体の振動となるといえる．判定において減衰する突発的な外乱に対して，長時間において一つの特徴量を求め判定するのではなく，複数の時間区間に分解することによって複数の特徴量を求め，多数決判定の材料とすることが外乱の情報を排除しロバスト性を高めるといえる．

また周期的な振動は車体全体をその周波数で振動させるといえ，車体内に定常的な心拍信号が存在する限り車体がその周波数で振動を持続するといえる．判定においては単時間内に定常的に心拍信号が含まれる場合，時間長によって特徴量の変位がないといえる．

4 圧電セラミックス型センシングデバイスの開発と検証

4．1　圧電セラミックスセンシングデバイスの開発

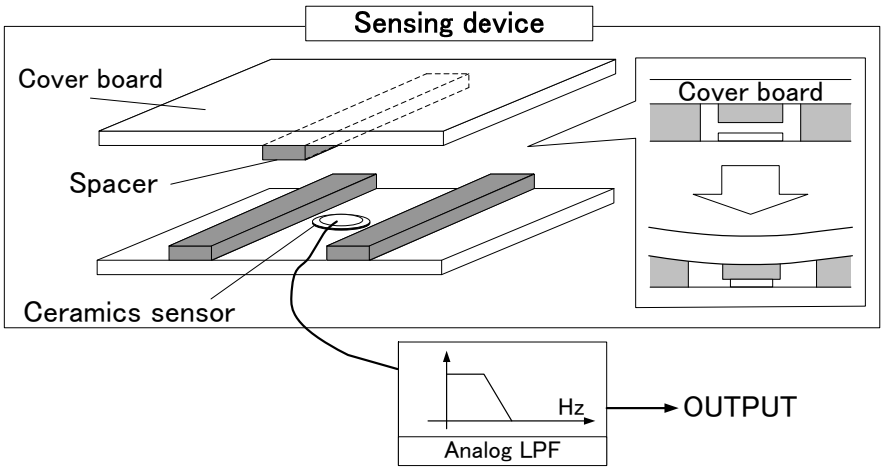


Fig.10　Structure of a ceramics sensing device

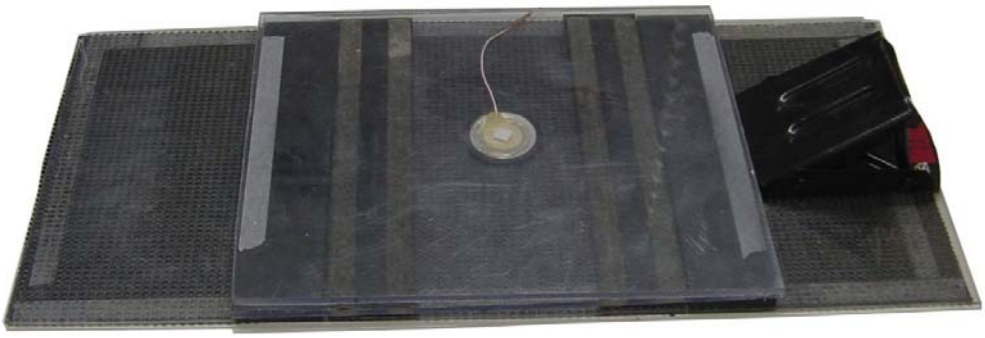


Fig.11　Photograph of the ceramics sensing device

センシングデバイスには自動車の微小な車体振動を検出できる感度と自動車の重さに対する耐久性が必要である．この条件を満たすセンシングデバイスを製作する．**Fig.10**に圧電セラミックス素子(DC-5DSN4：(株)プリモ製)[資料 2]を用いた圧電セラミックス型センシングデバイスの概要を記す．上板(250 × 550 × 5mm)と下板(250 × 550 × 2mm)の間に圧電セラミックスを設置し，両サイドに圧電セラミックスセンサより高さのあるスペーサーを設置する．センシングデバイス上に自動車の前輪または後輪を乗せると，その重さで上板が歪み，上板スペーサーが圧電セラミックスに接する．これにより自動車の荷重が直接センサに加わらないため，センサの耐久性が向上する. この状態で自動車車体に振動が発生すると, その振動はタイヤからセンシングデバイスの上板に伝播し，圧電セラミックスセンサへ振動信号が入力される．上板と下板には耐衝撃性，耐熱性に優れたポリカーボネート(ポリカ・ジャパン(株)製)を用いる．センサで検出した信号は 16HzのアナログLPFを介される．**Fig.11**にセンシングデバイスの写真を示す.

４．２　　圧電セラミックスセンサの製作

４．２．１　圧電セラミックスを利用した圧電セラミックスセンサの製作

センシングデバイスの上に車体を設置させた時，車体の振動で上板が下に歪む．その微小な歪みを検出するために，圧電効果をもつ圧電セラミックスを用いる．圧電セラミックスの利用には測定自体にエネルギーを必要としない利点もあげられる．

製作したセンサを**Fig.12**に示す．圧電セラミックスセンサに上板からの微小な力でも歪みが生じるようスペーサーを設け，変形しやすい構造にした．センサをタイヤ下に設置する際，車体重量の歪み圧力を受け脆性破壊する恐れがある.そこで圧電セラミックスを酸化しにくいステンレス板に貼り付けることによって脆性破壊を防ぐ．またエポキシ樹脂で圧電セラミックスをコーティングすることでセンサ本体の破壊を防ぐ．

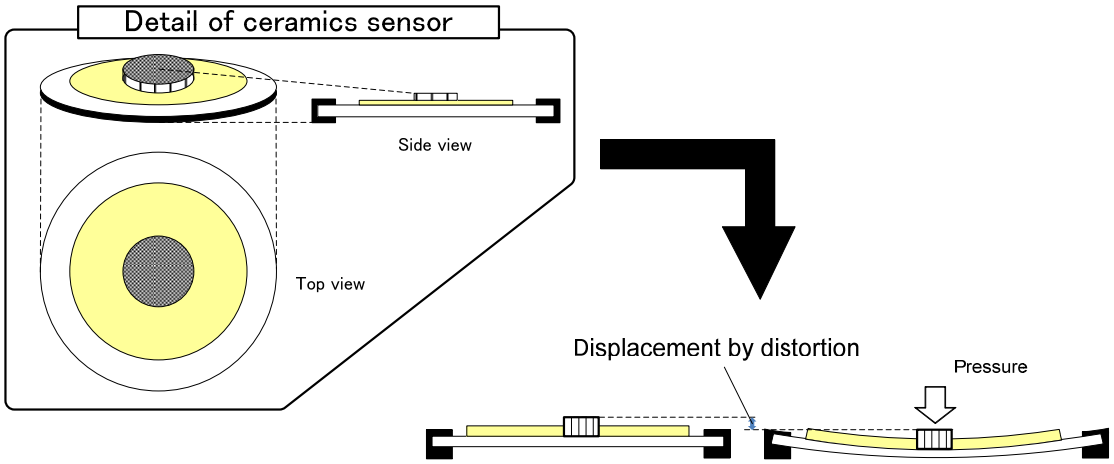


Fig.12　Schematic of the ceramic sensor

４．２．２　圧電セラミックス(Ceramics)について

圧電セラミックスは半導体圧力センサの一つとして利用される．基本成分が金属酸化物で，高温での熱処理によって焼き固めた成形体である．シリコンのような半導体や，炭化物，窒化物，ホウ化物などの無機化合物の成形体，粉末，膜など無機固体材料の総称として用いられている[12].

性質として

- 硬度は高いが，脆性破壊すること.
- 強度，破壊靭性が内部の局所的な欠陥構造に左右されやすいこと.
- 耐熱性に優れるが，熱衝撃破壊を起こしやすいこと.
- 金属より軽く，プラスチックより重いこと.

という性質が上げられる.

４．２．３　圧電効果について

半導体結晶は，歪みに応じた電圧を生成する圧電効果という特性をもつ[12].

結晶に機械的応力を加えると応力に比例した電気分極を生じ電界が発生する(正効果). 逆に結晶に電界を加えて電気分解を起こさせると電界に比例したひずみを生じる(逆効果). この現象を圧電効果といい，圧電効果を持つ圧電性結晶又は圧電体という.

圧電体では，応力 T 及び歪み S (機械的パラメータ)と電界 E 及び電気変位 D (電気的パラメータ)とが電圧効果を介して互いに結び合っている．電界 E，電気変位 D はベクトル量であるから３つの成分を持ち，応力 T，歪み S

は対象テンソル量であるから 6 つの成分を持つ．結晶に適当な座標軸をあてはめ，その x，y，z 方向の電界の成分を E_1，E_2，E_3，電気変位の成分を D_1，D_2，D_3 とする．応力の成分のうち x，y，z 方向の縦応力の成分を T_1，T_2，T_3，せん断応力を T_4，T_5，T_6 とし，歪み成分のうち縦歪みを S_1，S_2，S_3，せん断歪みを S_4，S_5，S_6 とする.

圧電体に応力 T が加わると

$$S = sT \tag{17}$$

なるひずみを発生するが,

それとあわせて圧電正効果によって応力に比例した電気変位

$$D = dT \tag{18}$$

を生じる．逆に電界Ｅを加えると

$$D = \varepsilon E \tag{19}$$

なる電気変位を生じるが，その他に圧電逆効果によって電界に比例した歪み

$$E = d_t E \tag{20}$$

を発生する．

したがって，電圧体に応力 T と電界 E が加わった場合に発生する歪み S と電気変位 D は，

$$\begin{aligned} S &= \varepsilon^E T + d_t E \\ D &= dT + \varepsilon^T E \end{aligned} \tag{21}$$

但し，ε^E ：弾性コンプライアンス(E ＝一定)

d ：圧電歪定数

ε ：誘電定数

で表わされる．また，式の独立変数をかえて T と D について解くと

$$\begin{aligned} S &= s^D T + g_t D \\ E &= -gT + (1/\varepsilon^T)D \end{aligned} \tag{22}$$

と表わすことができる．ここで d は電圧歪定数，d は電圧出力係数と呼ばれる．

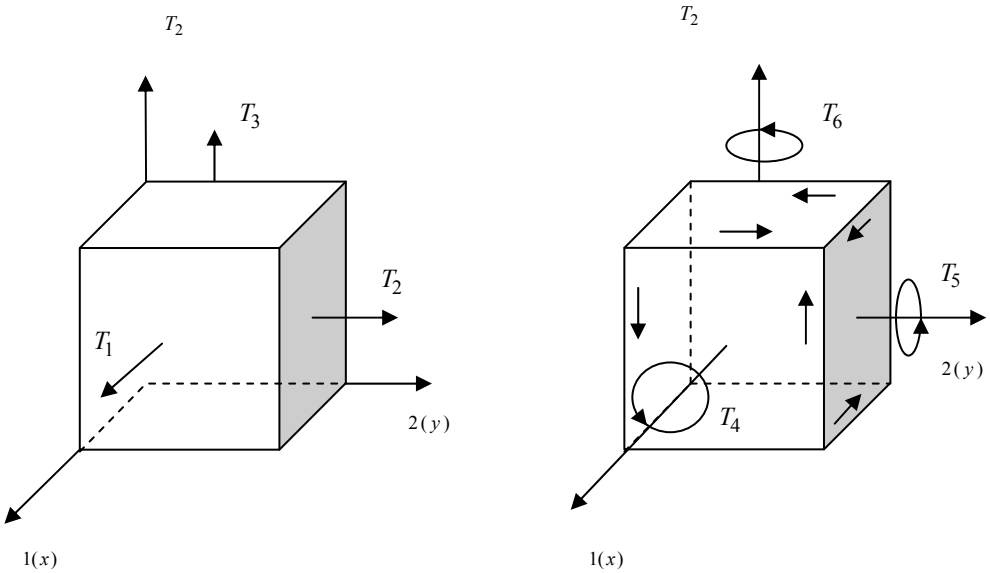


Fig.13　Stress component

４．３　　生体計測用フィルタ回路の製作

４．３．１　圧電セラミックスの等価回路

圧電セラミックスは電子回路においてコンデンサと同様に扱える．圧電セラミックスは機械的応力が加わると圧電効果により電圧が発生するが，その際コンデンサという性質から圧電セラミックスに電荷が蓄えられてしまい，圧電効果で生み出された出力電圧に電荷が付加され，全体の出力信号に不安定な要素ができてしまう．それに対して，電荷を放電するようセンサ部分となる圧電セラミックスには抵抗を並列に接続する．抵抗値を 1M(Ω)とし，時定数は $CR = 0.01$ ms となる．

４．３．２　生体信号通過フィルタ

Fig.14　Structure of the filter circuit for the signal from the ceramics

対象となる信号は生体信号であり，心拍信号である．心拍信号の周波数帯域は 0.16～16Hzとし，基本波およびその高調波成分からなる信号を対象とする．しかし圧電セラミックスを基に製作したセンサには，誘導周波数である 50Hzが多く含まれている．これを除去するためにセンサの入力信号にオペアンプLM324Nを用いたローパスフィルタを通す．通過帯域とする周波数域は，人間の心拍を通過させることを考慮し，16Hz以下とした．また抵抗値を 500，1k，10k，20k，50k，100kΩとし，増幅率を可変にした．回路の発振によるノイズは，バッファ回路を回路内に組み入れることで影響を少なくし，出力信号とGNDの電位差はオフセット調整することで解決する．電源部分にはAC-DCコンバータであるYW1515A(コーセル社製)を用いた．使用するオペアンプの仕様を**Table 1**に，YW1515Aの仕様を**Table 2**に示す．製作した回路の回路図を**Fig.15**に示す．

Table 1　Specification of LM324N OpAmp

Charging-voltage　V+	32 V
Input voltage	-3.2 ～+32 V

Table 2　Specification of YW1515A

Output power	15.0W
DC output	±15(+30) V 0.5A

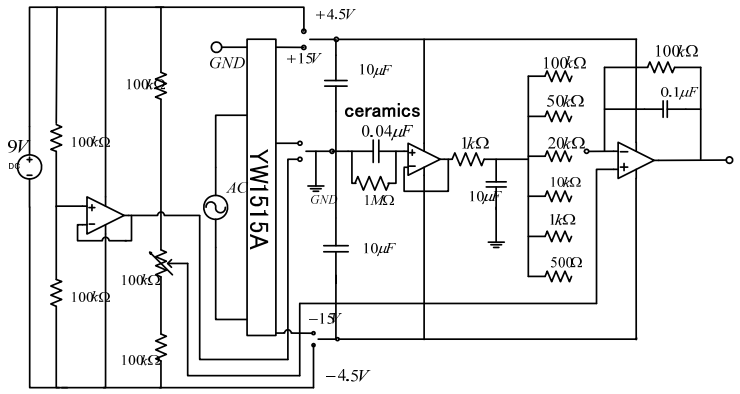


Fig.15　Circuit for biomedical measurement

４．４　　計測実験による圧電セラミックスシステムの検証

４．４．１　実験方法

開発したシステムの車種に対する汎用性を検証するため, 形, 重量の異なる以下の 4 車種を用いて計測を行う．軽自動車(Lyra：三菱自動車工業(株)製)，乗用車(Debonair：三菱自動車工業(株)製)，バン(Vanette van：日産自動車(株)製)，1.5tトラック(Dyna：トヨタ自動車(株)製)の各車両のタイヤをセンシングデバイスの上に設置し，有人状態と無人状態で計測を行う．センシングデバイスの設置位置は，各車両，前輪と後輪の 2 通りとした．被験者数は 7 名，各車両において**Table 3**に示す場所で静止した状態で計測を行う．

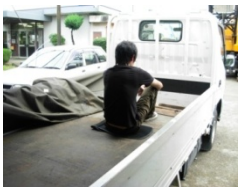
データの取得方法は 16bit ADコンバータ(サンプリング時間 10ms，ダイナミックレンジ±2.5V)でサンプリング数 1024 点の時間窓 10.24 毎にPCに取り込む．**Fig.16**にセンシングデバイスの設置写真を示す.

また特徴量に用いる標準偏差 F_b の無人有人に対する識別性を見るため以下の評価値 A を用いる．A は無人 F_b に対する有人 F_b の比率を表わし，値が大きいほど識別性が高いこととなる.

$$A = F_b \text{ of manned car} / F_b \text{ of unmanned car} \tag{23}$$

Fig.16　Photograph of the sensing device

Table 3　Measurement places on each car on Ceramic sensing device

Type of car	Place			
Automobile (Debonair)	Driver's seat	Back seat	Under the back seat	Trunk
Truck (Dyna)	Driver's seat	 Loading platform	On the roof	Hang Loading platform side
Light car (Lyra)	Driver's seat		Back seat	
Van (Vanette van)	Driver's seat		Loading platform	

４．４．２　車体の固有振動

車体は風などの外力が加わると，固有振動数 f_c Hz で振動する．この固有振動数 f_c Hz を特定するため，圧電セラミックスの出力 $y(t)$に $S_c(t)$，$n(t)$の外力振動のみが含まれる状態の計測データ，つまり無人の状態の計測データに着目する．様々な環境下で計測した 2.5s × 359 個分の無人データに自己相関を行い，自動車の固有振動周波数帯域を見るため，0.1～1.25s(0.8～10Hz) 間で自己相関係数が最大値になる時間を求め，頻度分析を行う．また同様のヒストグラムを有人データに対しても求める．

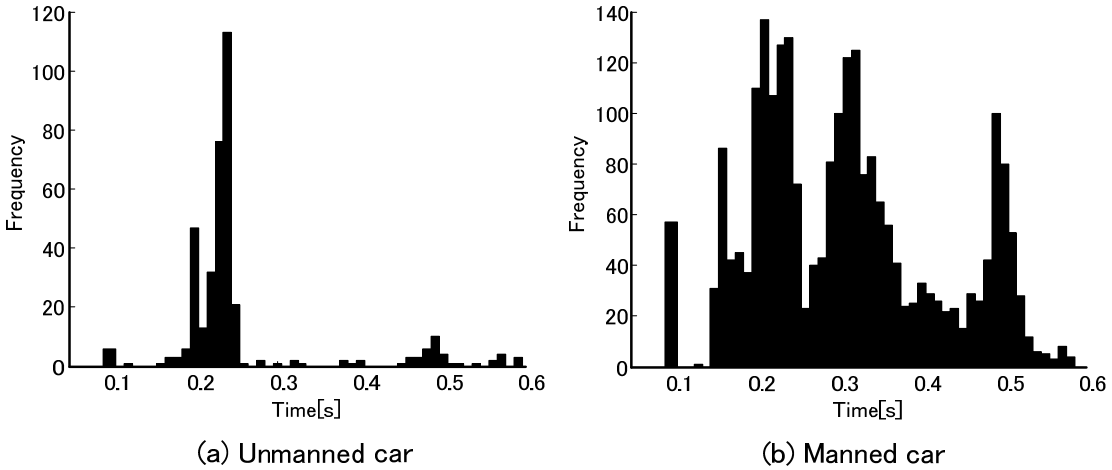


Fig.17　Histogram of the natural vibration

Fig.17の(a) に無人，(b) に有人の固有振動数の頻度分析を表すヒストグラムを示す．(a)では，0.2～0.25sに高い頻度があり，全データに対する含有率は 81%である．これより車体が突発的な外力の影響を受けた時，固有振動数 f_c Hz = 4～5Hz (1 / 0.2～ 1 / 0.25 秒)で振動するといえる．また(b)有人の頻度分布においても，0.2～0.25 秒間に高い頻度が見られ，有人の場合にも固有振動数 f_c Hz = 4～5Hzが発生しているといえる．

４．４．３　計測結果のパターンと特徴量の抽出

Fig.18に時系列の各パターン波形を示す．計測結果は被験者が静止状態の場合，心拍振動型，体動振動型の２パターンに分けられる．心拍振動型は出力 **y** (t) に含まれる生体信号が $S_h(t) > S_b(t)$ の場合といえ，体動振動型は $S_h(t) < S_b(t)$ の場合であり，体動により心拍振動型に短時間振動が含まれる場合とする．車体に生じた振動には固有振動が含まれることがわかる．無人データの計測結果は，振動が少ない場合とする．有人データ(a)と(b)と無人データ(c)では振幅値の違いがみられ, **Table 4**で示されるように標準偏差F_b を特徴量として用いる有効性が上げられる．

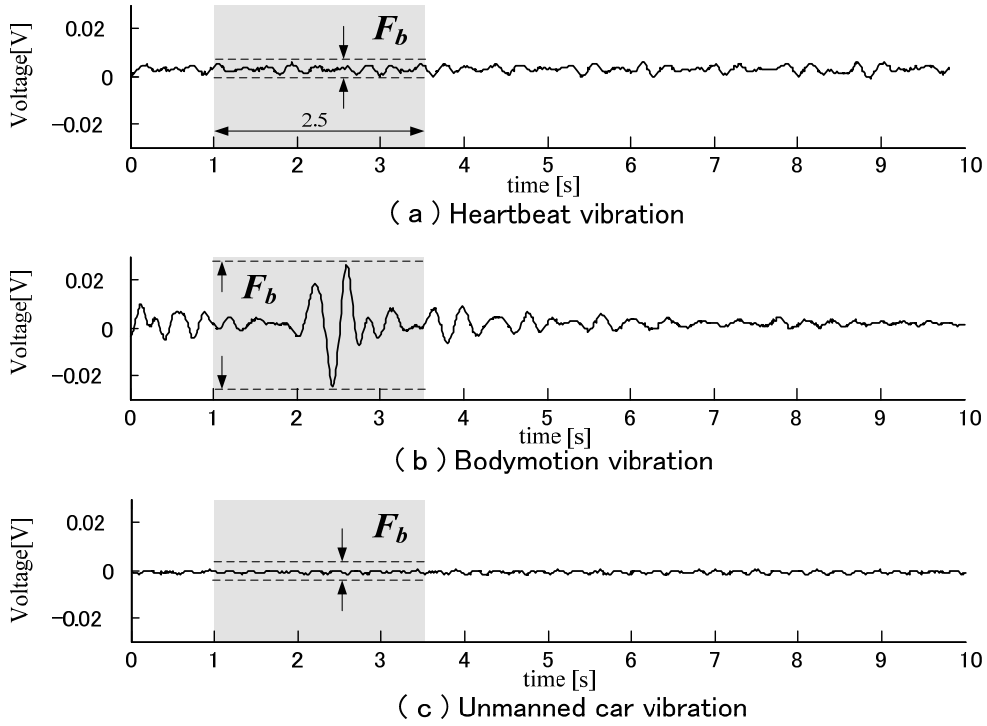


Fig.18　Waveforms of measuring by the ceramics sensing device

Table 4　Results of Parameter “A” on each car

Automobile (Debonair)		
	front	rear
Driver’s seat	1.27	1.71
Trunk	1.35	1.76
Back seat	1.16	1.69
Under seat	1.44	1.53

Truck (Dyna)		
	front	rear
Driver’s seat	1.61	0.94
On the roof	2.34	0.84
Loading platform	1.71	1.1
Hanging	7.01	4.16

Light car (Lyra)		
	front	rear
Driver’s seat	4.47	2.09
Back seat	4.47	1.90

Van (Vanette van)		
	front	rear
Driver’s seat	9.13	1.07
Loading platform	6.49	1.98

４．４．４　考察

本章では，圧電セラミックス型センシングデバイスの開発を行った．開発したセンシングデバイスは自動車の微小振動を計測でき，生体計測用フィルタ回路に信号を入力することができた．また生体計測用フィルタ回路で16Hz の LPF 行った結果を周波数解析することで，生体信号を抽出していることを確認できた．4 車種を用いた実験により，車種に限られずセンシングデバイス上にタイヤを設置することによって，微小な車体の振動を計測できることが確認できる．有人，無人を判定する特徴量として標準偏差 F_b を求め，有人無人の差異が大きいことからその有効性が上げられた．しかし無人の場合，外部環境で生じるノイズ振動 $n(t)$に心拍帯域の振動が含まれる場合や，体動に似た突発的な振動により，特徴量 F_b が増加し誤判定されてしまう場合があった．標準偏差から求めた評価値 A に着目すると圧電セラミックスセンサが車の下に設置される条件には，測定可能範囲が特定されること，その耐久性が問題としてあげられ，測定可能範囲，耐久性の向上を考える必要がある．

5 コンデンサマイクロフォン型センシングデバイスの開発と検証

5．1　コンデンサマイクロフォン型センシングデバイスの提案

圧電セラミックスセンシングデバイスの検証では，計測環境への汎用性の低さが問題として上げられた．計測環境に汎用性を持たせるための改善点として，被験車のタイヤの位置が限定されないこと，風や地面による外乱に対するロバスト性の向上がある．以上の改善点を解決するためコンデンサマイクロフォン型センシングデバイスを開発する．

Fig.19にセンシングデバイスの概念を示す．また**Fig.20**にその外観を載せる．センサ部分に圧力センサであるコンデンサマイクロフォンセンサ(condenser microphone sensor)(MX-E4758：(株)プリモ製)[資料 2]を用いる．板間にスポンジ素材のスペーサーを並べ，シリコンチューブをスペーサーの間に挿入する．そしてチューブの開口部に圧力センサを接着する．上板を介して力信号が加わることによって密閉されたチューブが潰されると，チューブ内の体積が変化し圧力変化となってコンデンサマイクロフォンに振動信号が入力される．コンデンサマイクロフォンには超高感度圧力センサを用いる．計測された圧力信号は生体計測用フィルタ回路を介し処理される．

本デバイスにはシリコン製のチューブを用いたが，塩化ビニル製などのチューブに比べて弾性率が低く，長期間上から加重が加わっても塑性変形しにくいため感度が低下しないことが利点としてあり，耐久性が保たれる．

コンデンサマイクロフォン型センシングデバイスはシリコンチューブなどの密閉空間の圧力変化を検出する原理であり，シリコンチューブの長さや設置方法をフレキシブルに調整できるため，様々な振動検出対象に対応することができ，振動検出許容面積も大きくすることが出来る．これにより各環境に対応できる計測システムを実現することが出来る．また生体計測用フィルタを用いることでより高精度に生体信号を抽出することができ，環境ノイズの影響を抑えることができる．

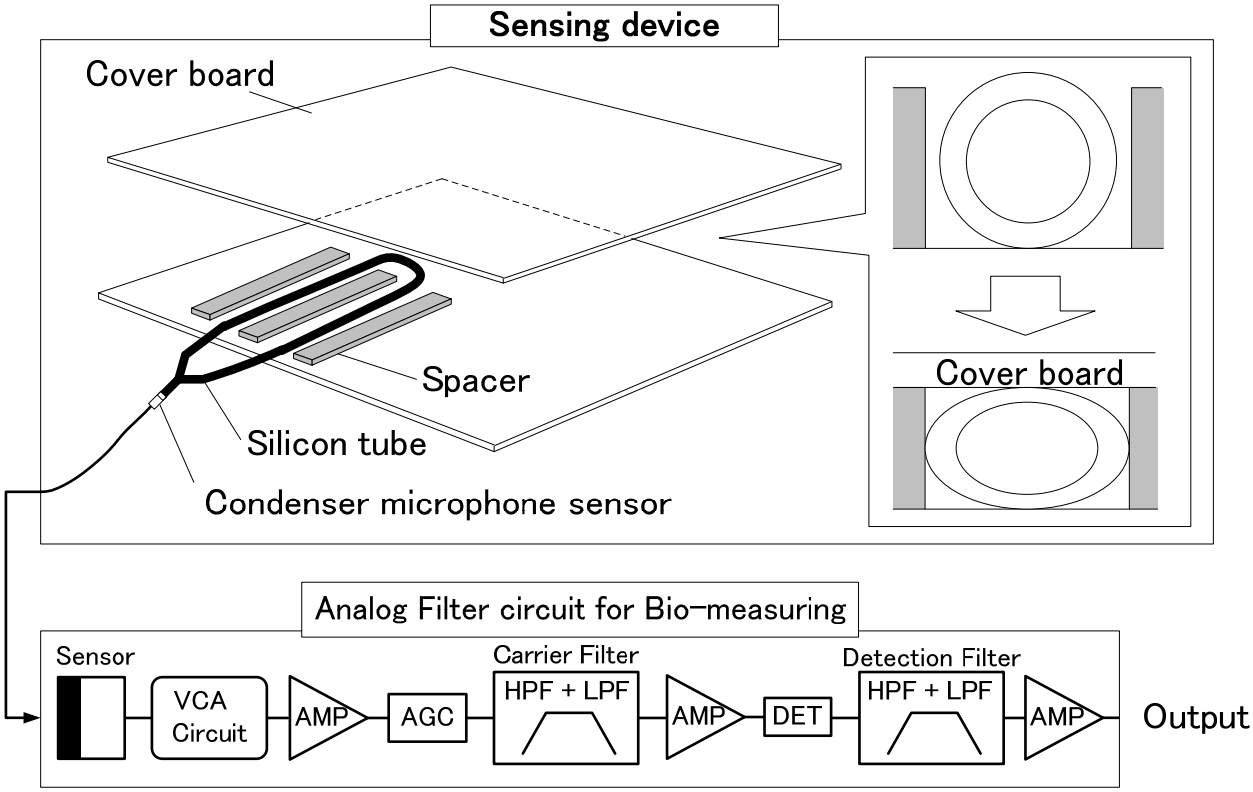


Fig.19　Structure of the condenser microphone sensing device

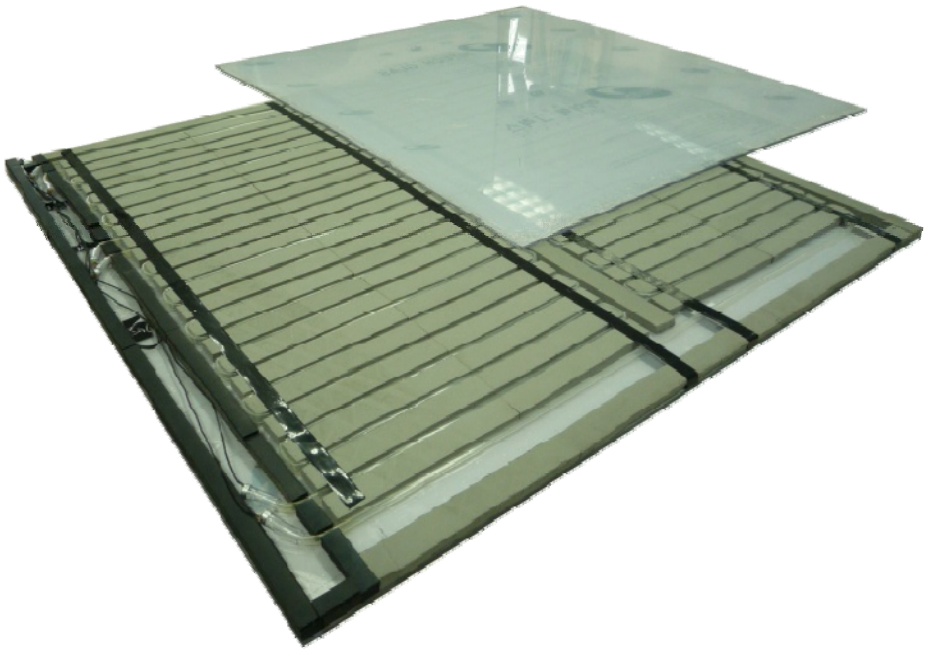


Fig.20　Photograph of the condenser microphone sensing device

５．２　　コンデンサマイクロフォン型センシングデバイスの製作

Fig.21に製作したセンシングデバイスの概要を示す．1m^{2}のセンサボードを 6 ブロックに分割し，1.5mのシリコンチューブをそれぞれに配置する．それぞれのチューブの一端開口部に圧力センサを設置し，もう一方の開口部を密閉する．チューブの配置を 6 ブロックに分解することにより，それぞれの圧力センサが許容する表面積が大きくなり，感度が向上する．またスペーサーを比較的柔軟であるスポンジ素材にすることによって，上からの力が加わった際，上からの加重だけでなく横からの加重も受けることになり，チューブの体積変位を大きくすることができる(**Fig.22**).

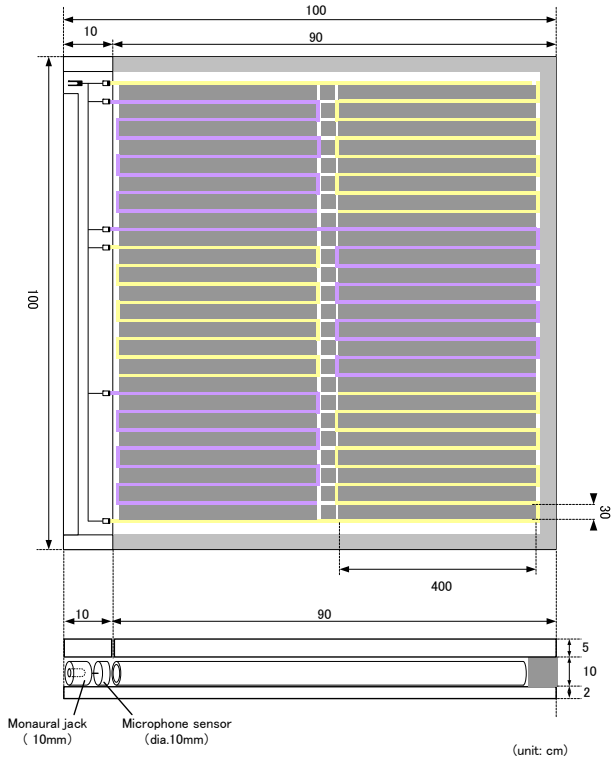


Fig.21　Sensing device included the condenser microphone

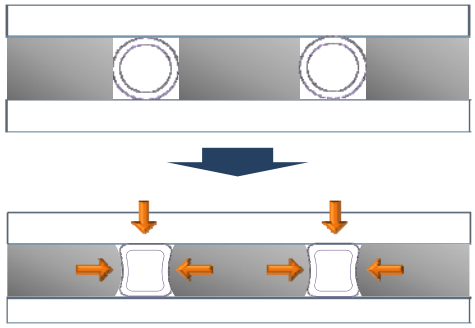


Fig.22　Deformation of the tube by external force

５．３　　センシングデバイス内のシリコンチューブの検討

製作するセンシングデバイスには被験車の設置を容易にする必要がある．そこにおいて広い面積の感受性を持たせるために，シリコンチューブの設置方法について検討する．最適なシリコンチューブの設置方法を検討する上で，シリコンチューブの長さと感度の関係に着目していく．**Fig.23**にシリコンチューブの空気圧モデルを示し，以下の変数と定数を定義する．

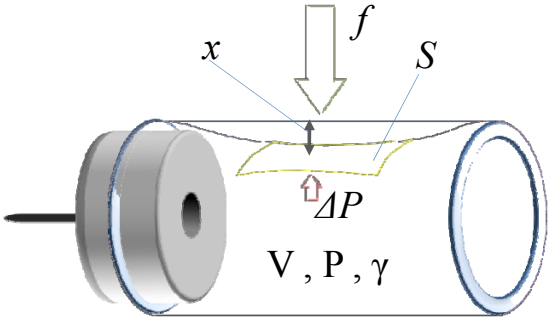


Fig.23　Pneumatic model of silicon tube

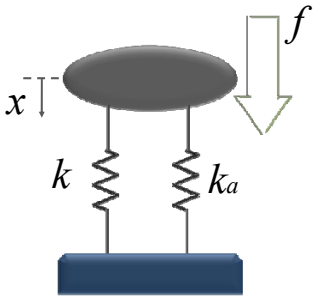


Fig.24　Physics model of Pneumatic model

V ：シリコンチューブ内容積

P ：シリコンチューブ内圧

γ ：空気の比熱比

f ：シリコンチューブにかかる力

S ：シリコンチューブに加わる力の表面積

x ：力f によるシリコンチューブの表面変位

ΔP ：力f によるエアマットレス内圧変化

チューブの変形によるチューブ内圧力変化は，熱の出し入れがない断熱変化といえる．

$$PV^{\gamma} = const \tag{24}$$

物体の微小な圧力変化 ΔP について求める．まず式(24)を微分する．

$$\begin{aligned}
&\frac{d}{dt}PV^{\gamma} + P\frac{d}{dt}V^{\gamma} = \frac{d}{dt}const = 0 \\
&\frac{dP}{dt}V^{\gamma} + \gamma PV^{\gamma-1}\frac{dV}{dt} = 0 \\
&\frac{dP}{dt} \Rightarrow \Delta P \quad , \quad \frac{dV}{dt} \Rightarrow \Delta V \\
&\Delta P = -\frac{\gamma P}{V}\Delta V
\end{aligned} \tag{25}$$

これより密閉された空間で体積が ΔV 増加すると $-\frac{\gamma P}{V}\Delta V$ だけ圧力は減少するといえる．

ここで

$$\Delta V = Sx \tag{26}$$

とおくことができ，チューブ内の圧力変化 ΔP は

$$\Delta P = \frac{\gamma P}{V} Sx \tag{27}$$

と表すことができる．これは密閉された空間で体積が変化すると，圧力もそれに応じて変化することを示す．
両辺に S を掛けると

$$S \cdot \Delta P = \frac{\gamma P}{V} S^2 x \tag{28}$$

となる．力 f に対して作用反作用の法則より $S \cdot dP = f$ が成り立つため，力 f は

$$f = \frac{\gamma P}{V} S^2 x \tag{29}$$

となる．これを**Fig.24**のようにモデル化したものに等価した場合

$$f = (k + k_a)x = \frac{\gamma P}{V} S^2 x \tag{30}$$

と求めることができ， k をエアチューブ内の空気バネ定数， k_a を特殊素材等のバネ係数と見なすことができる．
x を消去して整理すると

$$\Delta P = \frac{\gamma P}{V} \cdot S \cdot \frac{f}{k + k_a} \tag{31}$$

が得られる．これは空気バネに含まれる特殊素材等のバネ係数の大きさによって，生体信号による圧力変化が決定することを意味している．

本論で述べる計測システムは利便性などの観点から，それほどバネ係数の高い素材を使用しない．以上の結果より，振動による圧力変化を大きく得るためには，力が加わる表面積S を大きくすること，またエアチューブの歪み距離 x を大きくすることが最適だといえる．

５．４　　コンデンサマイクロフォンの原理と数学的モデル

コンデンサマイクロフォンは小型な装置ではあるが，空気振動を電気に変換する原理は空気圧や力学，電気・電子工学と関わり合い非常に複雑である．そこでマイクロフォンの現象を正確に理解するために詳細な数学的モデルを構築する．コンデンサマイクロフォンは以下の 5 つの要素で構成される．

(1) デバイス全体を覆うカン

(2) 永久電荷の蓄えられたエレクトレットフィルム

(3) エレクトレットフィルムと対になる電極

(4) エレクトレットフィルムの背面を覆うチャンバ

(5) 開空間とチャンバ内の閉空間を繋ぐオリフィス

(6) FET 電力増幅器

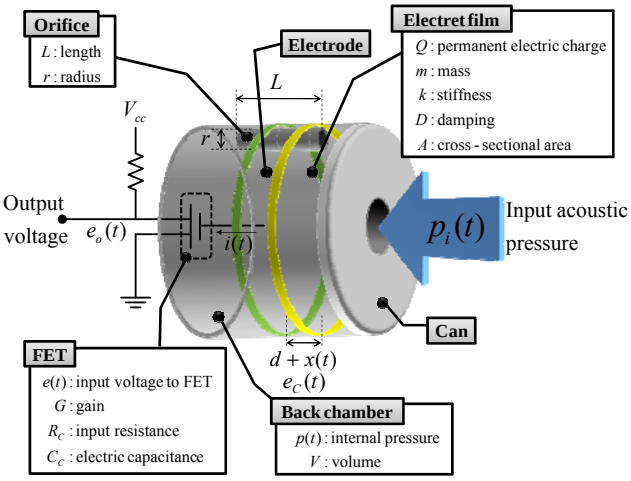


Fig.25　Structure of a condenser microphone

[変数]

$p_i(t)$　：　マイクロフォンへの入力圧力

$e_o(t)$　：　出力電圧

$p(t)$　：　背面チャンバの内圧

$x(t)$　：　エレクトレットフィルム表面の変位

$e_C(t)$：　エレクトレットフィルムと電極間の電位差

$i(t)$　：　FET への電流

$e(t)$　：　FET の入力電圧

[物理定数と変数]

ε：　空気の誘電率

V_a　：　モル体積（$V_a = 224\times10^{-3}\ \mathrm{m^3mol^{-1}}$）

γ：　空気の比熱比（$\gamma = 1.403$）

η：　空気の粘性係数($\eta = 1.8\times10^{-5}\ \mathrm{Pa\cdot s}$)

T　：　背面チャンバにおける空気の絶対温度

P_o：　大気圧（$P_o \cong 1013\mathrm{hPa}$）

R　：　気体定数（$R = 8.31447\mathrm{JK^{-1}mol^{-1}}$）

[定数]

Q　：　エレクトレットフィルムに蓄えられた永久電荷

m　：　エレクトレットフィルムの可動部分の質量

D　：　素材と構造によって決まる減衰係数

k　：　エレクトレットフィルムの剛性定数

A　：　圧力検出面の断面積

G　：　FET 増幅器のゲイン

R_C：　電気抵抗

C_C：　静電容量

L　：　オリフィスの長さ

r　：　オリフィスの半径

V　：　背面チャンバの体積

d　：　エレクトレットフィルムと電極の間隔

ここで空気流量は一定であり，またチャンバ内の圧力変化は断熱状態で，FET の入力インピーダンスは抵抗と仮定する．すると，コンデンサマイクロフォンの特性を以下の方程式で説明できる．

背面チャンバ内における圧力変化の方程式はハーゲン＝ポアズイユの法則と理想気体の状態方程式から導かれる．

$$p(t) = \frac{RT}{V} \cdot \frac{1}{V_a} \cdot \frac{\pi r^4}{8L\eta} \int \{p_i(t) - p(t)\} dt \tag{32}$$

エレクトレットフィルムの運動方程式は

$$m\frac{d^2x(t)}{dt^2} + D\frac{dx(t)}{dt} + \left(k + \frac{\gamma P_0 A^2}{V}\right)x(t) = A\left(p_i(t) - p(t)\right) \tag{33}$$

と表せ，左項についてニュートンの運動法則から初項を得る．さらにエレクトレットフィルムの塑性から第 2 項を得る．そして，エレクトレットフィルム自体とエレクトレットフィルムに影響する背面チャンバの空気のバネ力によるフックの法則から第 3 番項を得る．

マイクロフォンキャパシタと FET 入力抵抗の方程式は

$$\begin{aligned} &e_c(t) = \frac{Q}{\varepsilon S}\left(d - x(t)\right) \\ &\frac{1}{C_c}\int i(t)dt + R_c i(t) = e_c(t) \\ &e(t) = R_c i(t) \end{aligned} \tag{34}$$

であり FET からの出力電圧の方程式は

$$e_o(t) = Ge(t) \tag{35}$$

であり，これをシリコンチューブに接着させた場合**Fig.25**の様なモデルになる．

ここでエアチューブに外力が加わり，エアチューブが変形することによって生じる圧力がコンデンサマイクロフォンに入力される．これを生体計測用フィルタ回路に入力する．R_c はフィルタ回路に含まれる素子である．したがって式(34) (35) から式(36)が得られ，回路に入力される信号は電流 $i_o(t)$ となる．

$$i_o(t) = \frac{1}{R_c} Ge(t) \tag{36}$$

５．５　　生体計測用フィルタ回路の開発

５．５．１　開発の目的

コンデンサマイクロフォンから出力される電気信号から生体信号を高精度に抽出する．[13][14][15]

５．５．２　生体計測用フィルタ回路の設計と開発

コンデンサマイクロフォンセンサの出力DC電圧が不確定であるため，回路初段のLow Noise AMPはバッファ回路として使用し，ACカップリングで次段のLow Noise AMPに接続する．出力レベル(感度)や周波数特性が異なっても同一の信号処理システムが使用できるよう，**Fig.26**のインターフェース回路をセンサの後段に配置する．

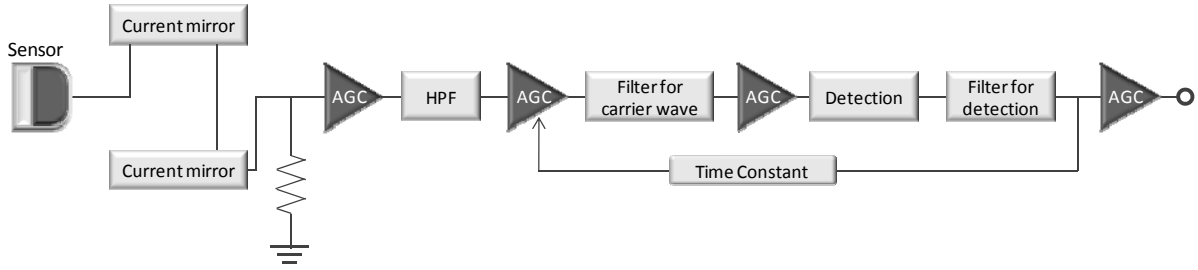


Fig.26　Structure of the filter circuit for a bio-signal measurement

(A)　AGC 機能付属

システム全体のダイナミックレンジを調整するために AGC 回路を前段に備える．AGC 回路は回路後段の振幅レベル量を前段にフィードバックすることにより，一定レベル以上の信号が入力された場合，AGC ブロック以降の振幅レベルを圧縮する．

(B)　段間増幅器とオフセット対策

フィルタ通過域信号のレベルを適正レベルまで増幅する目的で用いる．フィルタ入力信号はダイナミックレンジの通過信号と遮断信号の総和に対して設定されるため，フィルタ通過後の信号レベルは減衰してしまう．

また LPF，段間増幅器のオフセットを蓄積したまま次段の絶対値検波回路に入力すると，検波器のオフセットが発生するため，段間増幅器の前段，後段で AC カップリングを行い直流オフセットを除去する．段間増幅器のゲインを大きく設定する場合は，フィルタ出力と段間増幅器入力とのインターフェースを AC カップリングにする方が，オフセットやダイナミックレンジの確保に有利となる．

(C)　カレントミラー (Current mirror)

マイクロフォンセンサに物理現象が入力されるとエレクトリックフィルムが変形し電子の移動が生じる．そして電子が回路内へ流れ込むことによって電流 $i_o(t)$ が生じる．カレントミラー回路では基準電流と同じ値の電流を反射し出力し，出力された電流は外部負荷抵抗により電圧に変換される．カレントミラー回路の概要を**Fig.27**に示す．また出力信号の時系列データを**Fig.28**，周波数解析したものを**Fig.29**に示す．

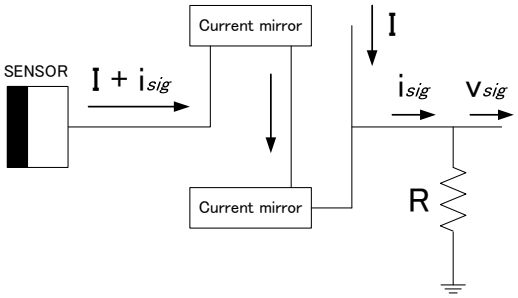


Fig.27　Structure of the current mirror circuit

(D)　搬送波フィルタ

生体信号の一つである心拍信号の特徴として高調波成分があげられる．ここで用いる搬送波フィルタはその高調波成分帯域のみを通過させるフィルタである．通過帯域は 8HzのHPFと 12HzのRPFとした．通過帯域のFFT波形を**Fig.30**に，通過信号を逆フーリエ変換し時間系列データにしたものを**エラー! 参照元が見つかりません。**に示す．

(E)　絶対値検波回路

搬送波フィルタ通過信号に対し絶対値回路，検波回路(Detection)を用いることで高周波数に乗じている低周波を抽出することが出来る．検波回路を通過した信号から心拍帯域の信号を抽出するために検波フィルタ(Filter for Detection)を用いる．**Fig.32**における青い波形が絶対値回路を通過したもの，赤線で示されるものが検波回路を通過した信号である．最後に検波された信号から心拍帯域のバンドパスフィルタを通過させることによって心拍信号の基本波を抽出する．抽出した心拍信号の周波数解析をした波形を**Fig.33**に示す．

ここにおいて検波信号の直流シフトを行う．絶対値検波信号は電圧プラス方向にオフセットを持たせるため，DC結合で増幅すると最終段増幅器の出力がプラス方向のオフセットを有する．そこで最終段増幅器の入出力信号をセンタリングする目的でACカップリングにより接続する．最終段増幅器の入力インピーダンスが充分大きければ，ACカップリング用コンデンサが前段のエンベロープ検波用LPFの特性に影響はなくなる．

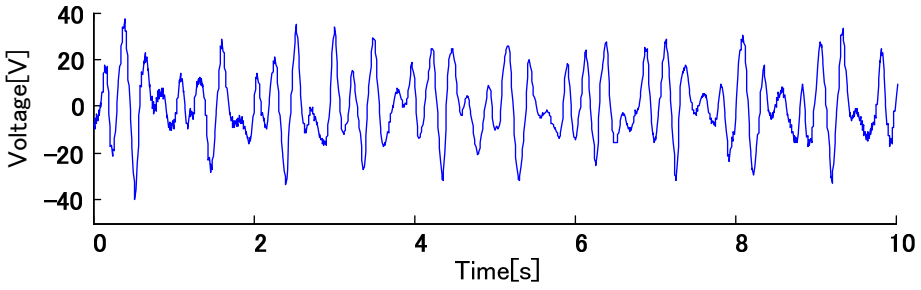


Fig.28　Time series data from a condenser microphone sensor

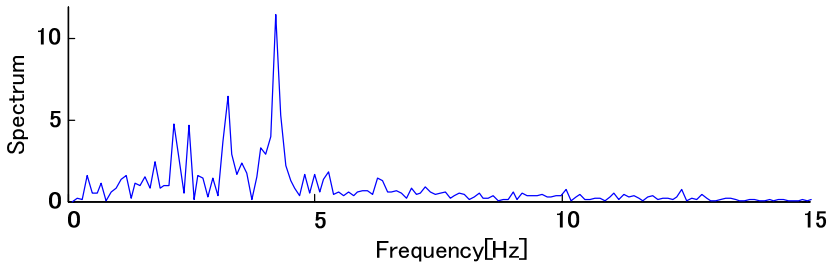


Fig.29　FFT data from a condenser microphone sensor

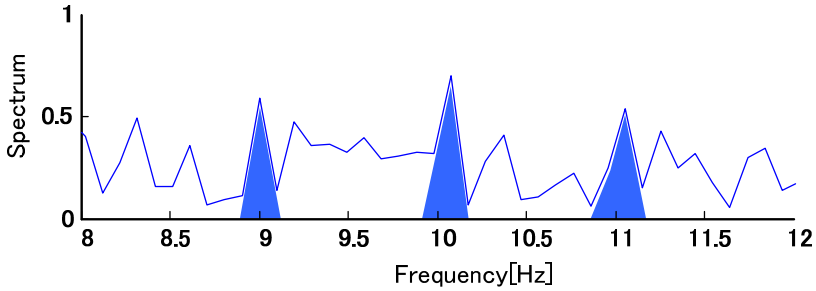


Fig.30　FFT data in the range of 8Hz to 12Hz

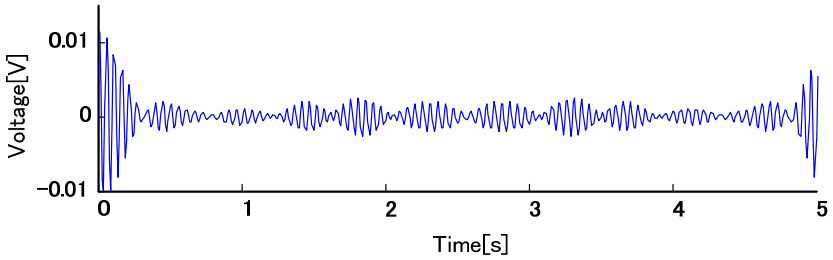


Fig.31　Time series data by the inverse Fourier transform of the frequency in the range of 8Hz to 12Hz

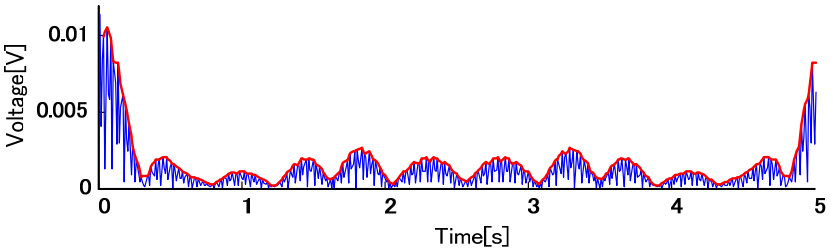


Fig.32　Full-wave rectified waveform and waveform through the detection filter

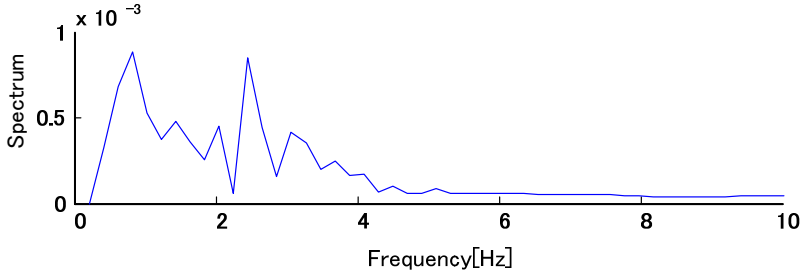


Fig.33　DFT data of the data through the detection filter

５．６　　コンデンサマイクロフォン型センシングデバイスによる計測と検証

５．６．１　実験方法

センシングデバイスの上に自動車(Debonair：三菱自動車工業(株)製)を停止させ，有人，無人の状態で計測を行う. タイヤの設置場所はシリコンチューブの真上とし, 被験者2名で行った. データの取得は16bit ADコンバータ(サンプリング時間10ms，レンジ±2.5V)でサンプリング数1024点の時間窓10.24毎にPCに取り込む．また特徴量に用いる標準偏差F_bの無人有人に対する識別性を見るため式(23)の評価値Aを用いる.

$$A = F_b \text{ of manned car } / F_b \text{ of unmanned car} \qquad (23)$$

５．６．２　実験結果と考察

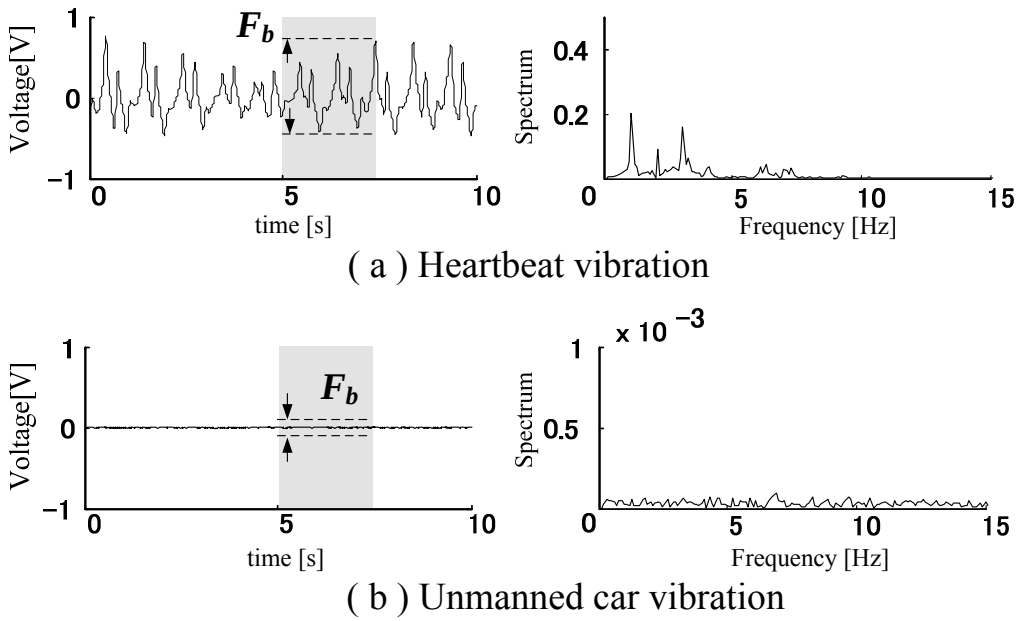


Fig.34　Waveforms of measuring by a pressure sensor sensing device

Table 5　Results of a parameter A on Pressure sensor sensing device

Automobile (Debonair)		
	front	Rear
Driver’s seat		46.0
Back seat		428

Fig.34に計測結果の波形を示す．右が時系列波形，左がFFT処理を行ったものである．有人の波形には心拍信号の特徴である 1Hzと高調波が見られる. また無人の波形から電圧レベルが低いことがわかる. 評価値Aを**Table 5**に示す．値から有人，無人に差があることがわかる．実験によりセンシングデバイス上にタイヤを設置することによって，微小な車体の振動を計測できたことが確認できる．そして計測した振動にはサスペンションによる固有振動成分，車内に人間がいる場合，生体信号が含まれることがわかった．また有人，無人を判定する特徴量として標準偏差F_bを求め，有人無人の比率から有効性が上げられた．しかし無人の場合，外部環境で生じるノイズ振動n(t)に心拍帯域の振動が含まれる場合や, 体動に似た突発的な振動により特徴量F_bが増加してしまう場合があった．また圧電セラミックスセンサが車の下に設置される条件には，測定可能範囲が特定されること，その耐久性が問題としてあげられたが，コンデンサマイクロフォンセンサとシリコンチューブを用いることでセンシングデバイスの改善が容易に行え，測定可能範囲，耐久性の向上を図ることができる．

５．７　　計測実験による外乱に対する影響と閾値の検証

５．７．１　目的

コンデンサマイクロフォンと生体計測用フィルタ回路による外乱の影響について検証する．具体的には有人，無人の被験車に 3 種類の風を当てることによって特徴量の変化を見る．

５．７．２　実験方法

屋内駐車場，屋外駐車場において有人無人状態で計測を行う．被験者は 2 人とする．また外乱として大型ファン(スーパーファンE-103 コンドル：山崎産業製)を用いた人工的な風を当てる．大型ファンの強中弱を用いて人工的に 3 種類の風を作り出し，車体から 1m離れた位置から定常的にあてる(**Fig.35**，**Fig.36**)．大型ファンの風量は強：132m^3/min，中：102 m^3/min，弱：72 m^3/minである．下記の**Table 6**に計測状態の 24 パターンを示す．それぞれの状態で 102.4 秒(2.56s×40)の計測を行い特徴量 40 個求める．総特徴量は 40×12=480 個である．

Table 6　Cases on the measurement

Location	OUT				IN			
Force of wind	W0	W1	W2	W3	W0	W1	W2	W3
Examinee1	1	2	3	4	5	6	7	8
Examinee2	9	10	11	12	13	14	15	16
Unmanned car	17	18	19	20	21	22	23	24

W0 : Force of wind = non　W1 : Force of wind = Level 1

W2 : Level 2 , W3 : Level 3

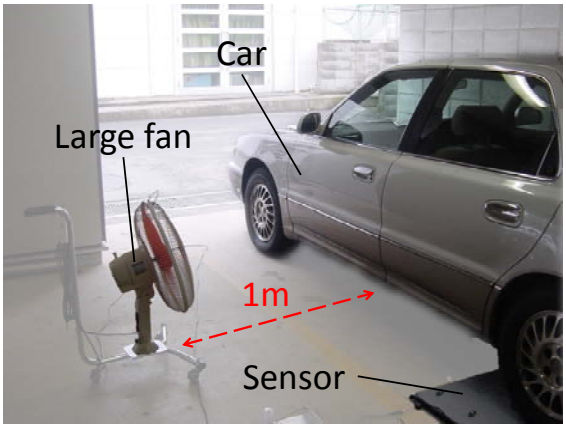


Fig.35　The circumstance of indoor measurement

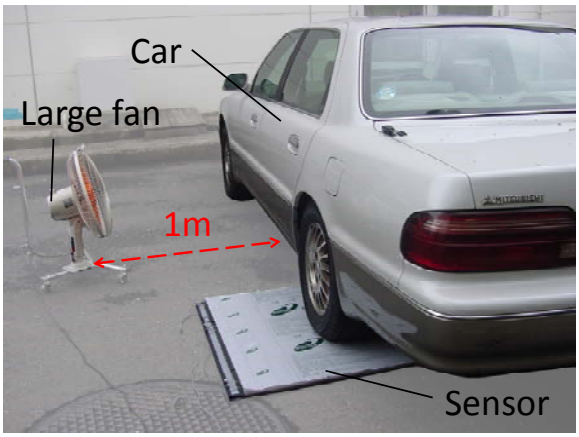


Fig.36　The circumstance of outdoor experiment

５．７．３　実験結果と考察

以下に各状況における特徴量の分布をヒストグラムに表わす．**Table 7**に評価値Aを示す．屋内屋外で異なる外乱からの影響を受けても，無人と有人で特徴量の差異があることが分かる．

すべての状況から得られた特徴量を反映した被験者 1，2 と無人状態の特徴量のヒストグラムを**Fig.37**に示す．ヒストグラムからそれぞれの特徴量分布は分散しているが，有人と無人では特徴量に偏り，差異があることが分かる．

Table 7　Results of a parameter A on Pressure sensor sensing device

	Outdoor				Indoor			
Force of wind	W0	W1	W2	W3	W0	W1	W2	W3
Examinee 1	110	15	2.4	3.9	95	54	8.5	3.9
Examinee 2	168	21.4	5.6	5.5	124	53.7	9.8	4.6
Examinee1+2	277	36	8.0	9.4	219	107	18	8.5

Force of wind	W0	W1	W2	W3
Parameter A	229	53.2	10.6	8.7

Force of wind	Outdoor	Indoor
Parameter A	12	20

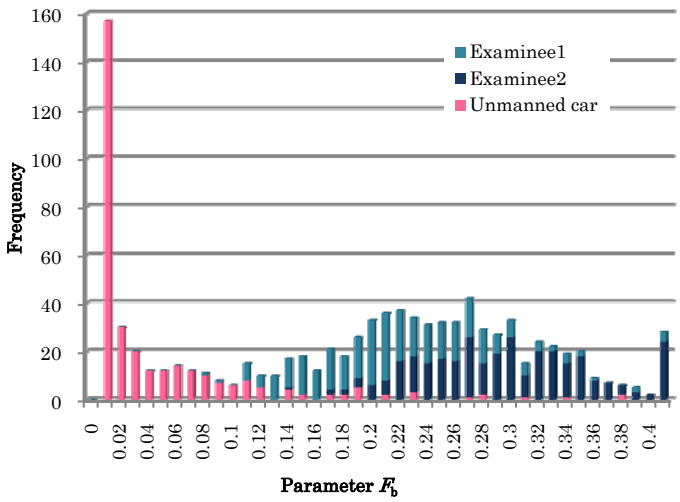


Fig.37　Histogram from data in all circumstances

次に屋外と屋内で得られる特徴量の比較を行う. **Fig.38**に屋外, **Fig.39**に屋内での特徴量のヒストグラムを示す. 無人状態では共に数値が 0~0.1 に集中しているが，屋内に比べ屋外では特徴量の分布範囲が広範囲である．これは屋外で車体が突発的におきる自然風などの影響を受けたためと考えられる.

次に有人と無人での特徴量の分布の違いについて検証する．有人・無人状態で，屋内の特徴量の分布範囲が屋外よりも小さい．有人状態での被験者 1 と被験者 2 の分布は，屋外では特徴量の分布範囲が異なる(被験者 1：0.1～0.3，被験者 2：0.2～0.4)ことに対し，屋内では被験者 1，2 ともに 0.16～0.36 に集中している.

次に外乱の強さによる影響について検討する．**Fig.40**～**Fig.43**に外乱を与えた有人状態のヒストグラムを示す. 屋外における被験者 1 ではW0, W1 時に 0.4 以上の値が多く, 被験者 2 では各風力で 0.4 以上の値が多いことなど, 風力に関係なく大きな値の特徴量が見られる．屋内では 0.2～0.3 に比較的分布が集中し，0.4 以上の値は少ない. また被験者 1，2 とも風力が変化しても特徴量は比較的まとまりがあり，有人状態では定常的な外力に対して影響が少ないと推測できる.

Fig.44に屋外での無人状態，**Fig.45**に屋内での無人状態でのヒストグラムを示す．外乱はW0：無風，W1：弱(大型扇風機)，W2：中，W3：強で表す．W0，1 での特徴量は 0.01 前後に集中し，W2，3 になるとその風量が上がるにつれ特徴量が分散している．屋外，屋内の分布を比較すると，屋内での分散は小さく同風力の特徴量にまとまった分布が見られる．一方屋外では人工的な風に加え，突発的な自然風の影響が原因と考えられる.

今回の計測によって，比較的大きく突発的な外乱が生じない限り，有人・無人の分布には差異があり，判定可能であることがわかった．車体に対する心拍以外の外力や被験者各々がもつ独自の生体信号は，判定システムにおいて不確定要素といえ，その影響を最小限にする必要性がある．そして，屋内の方が不確定要素に対する影響が少ないとわかり，外乱に対するロバスト性は屋外よりも屋内が高いといえる．無人状態を「無人」として判定するためには，特徴量の分布値範囲が狭い方が有効であり，屋内などの外乱が少ないと推測できる環境の方が，判定の精度が高くなると推測できる.

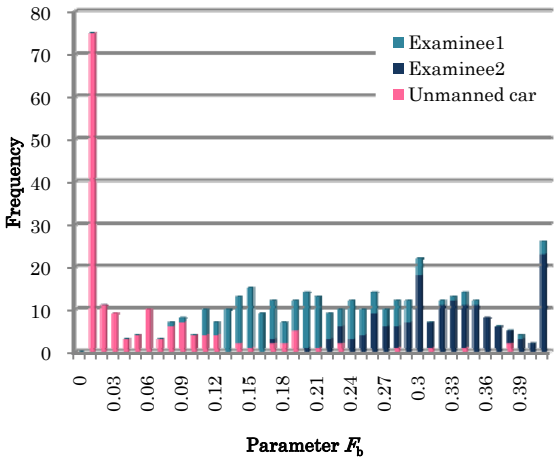


Fig.38　Histogram from data in outdoor circumstance

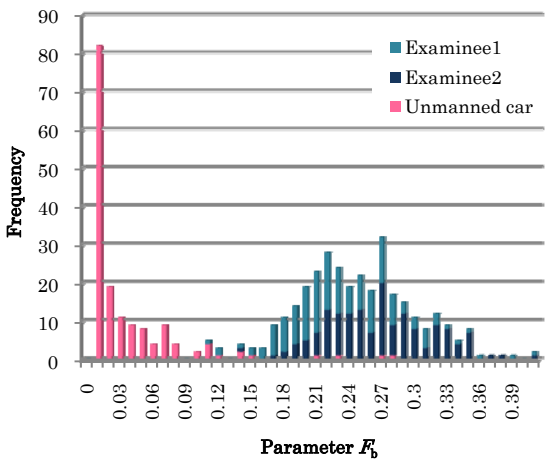


Fig.39　Histogram from data in indoor circumstance

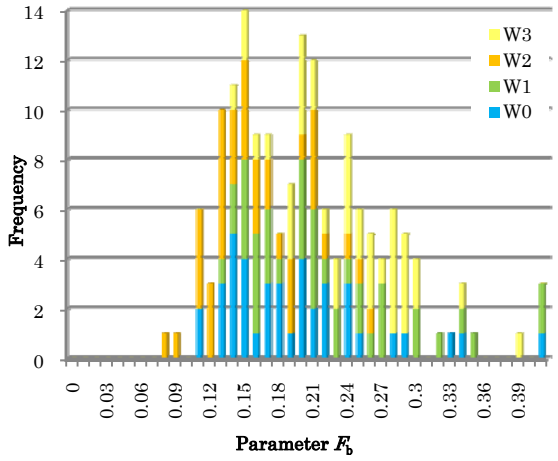


Fig.40　Histogram from data of Examinee1 in outdoor circumstance

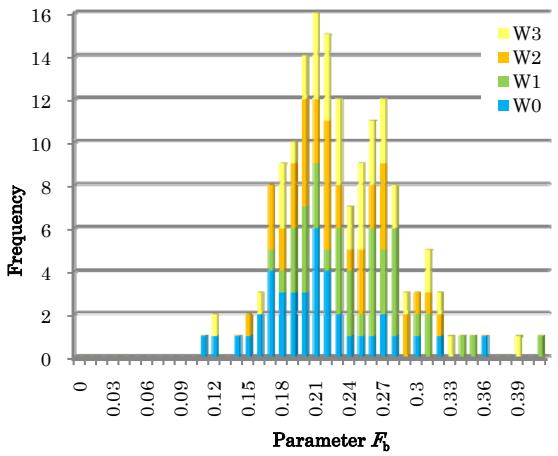


Fig.41　Histogram from data of Examinee1 in outdoor circumstance

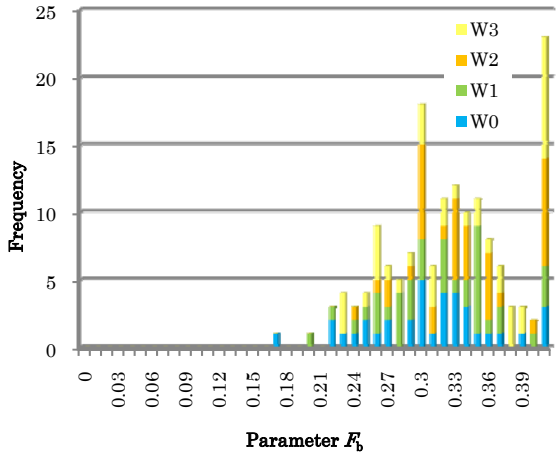


Fig.42　Histogram from data of Examinee2 in outdoor circumstance

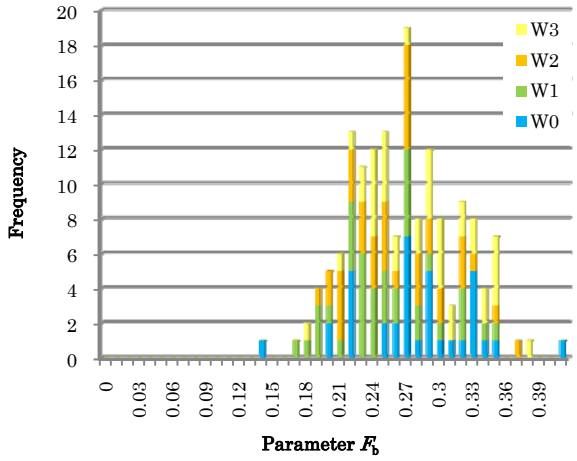


Fig.43　Histogram from data of Examinee2 in indoor circumstance

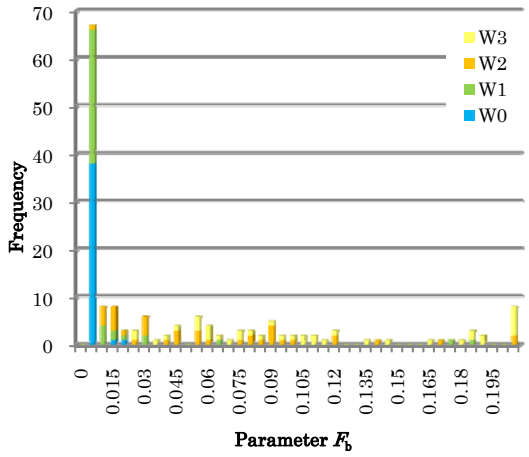


Fig.44　Histogram from unmanned data in outdoor circumstance

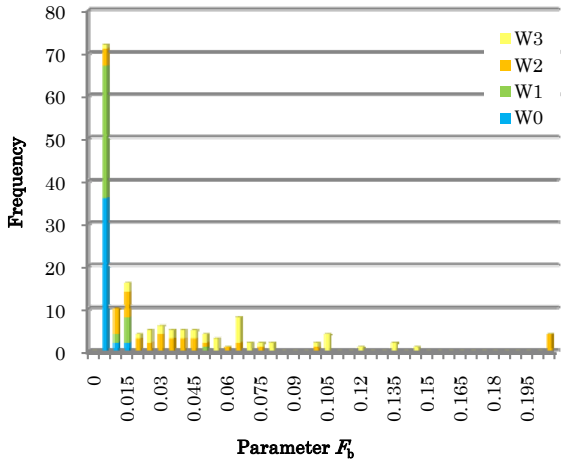


Fig.45　Histogram from unmanned data in indoor circumstance

５．８　　大型車両に対する汎用性の検証実験

５．８．１　目的

車体が大きく重量が重い場合，センシングデバイスが設置されたタイヤと車内の被験者との距離が大きくなる程，心拍振動の伝播性が低くなり，特徴量が小さくなることが予想される．そこで車載重量が重く，車体が大きいキャンピングカーを用いる計測実験から車体への心拍振動の伝播の強弱，風などの外乱に対するロバスト性，特徴量の有効性を検証する．

５．８．２　実験方法

キャンピングカー(Hiace：トヨタ自動車(株)製，標準車載重量 2,995kg)の左前輪に設置し，有人状態，無人状態で計測を行う．有人状態での被験者は 2 人とし，運転席，助手席，後部左右，屋根上の場所の 5 カ所において計測を行い，車内の人間の位置に対するシステムの汎用性を検証する．また無人状態では周囲に人がいない環境と人が往来する環境で計測を行い，その違いを検証する．**Table 8**に各計測の状況を示す．計測したデータに対し 2.5 秒間に特徴量を求める．

Fig.46　Measurement on the camper

Table 8　Measurement places on the camper on a pressure sensing device

Case	Place
Manned car	Driver seat Passenger seat Camper dinette On the roof
Unmanned car	In deserted condition In crowded condition

５．８．３　実験結果と考察

Fig.47~Fig.51に有人状態で求めたヒストグラムを示す．**Fig.52**に無人状態でのヒストグラムを示す．今実験の目的は車載重量が重く車体が大きい被験車を用いることで，乗用車と比較した車体への心拍振動の伝播の強弱，風などの外乱に対するロバスト性，2.5s毎の標準偏差を用いた特徴量の有効性を検証する．

まず有人状態での特徴量の分布について検証する．センシングデバイスと被験者の距離は助手席，運転席，ダイネット内，屋根の順に大きくなっていく．被験者 2 名を合わせた特徴量の分布をみると，距離が大きくなるにつれ分布の偏りが小さくなり，小さい値に多くの分布が見られるようになる．これによりセンサデバイスが設置された車輪と被験者との距離が大きくなる程心拍振動の伝播性が低くなり，特徴量が小さくなるといえる．

次に無人状態での分布について検証する．今実験では無人状態を周囲に人がいない環境と人が往来する環境で行った．二つの状態を比較すると，人の往来が多い状態の方が分布の偏りが小さいことがわかる．また全体の分布は最小単位の 0.002 以下に偏りが大きくあることがわかる．これより周囲の影響を受けるものの，無人状態での特徴量の分布は偏りがないといえる．

有人状態と無人状態を比較すると特徴量の分布の中心値は大きく異なり，有人と無人を比較する特徴量として標準偏差を用いることに有効性があるといえる．

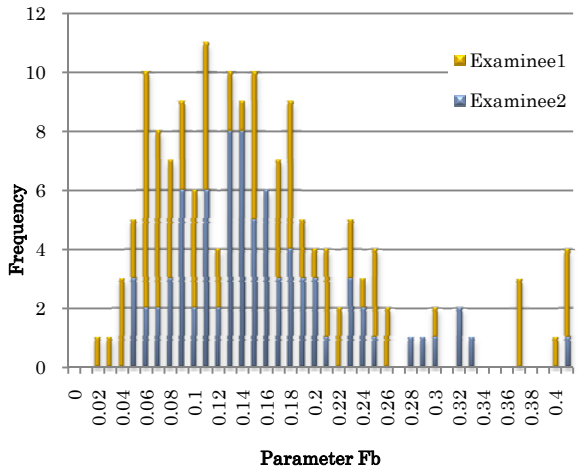


Fig.47　Histogram from data in sitting on a driver seat

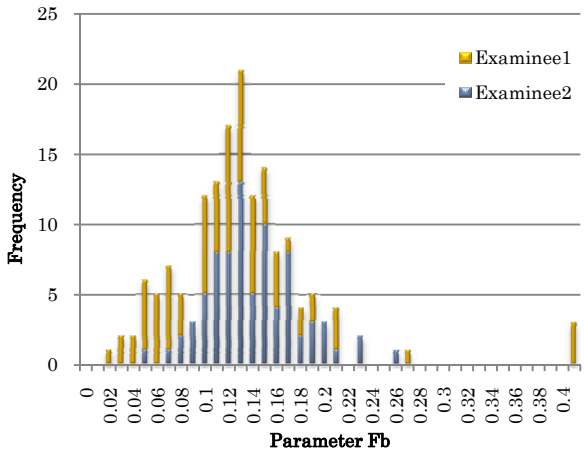


Fig.48　Histogram from data in sitting on a passenger seat

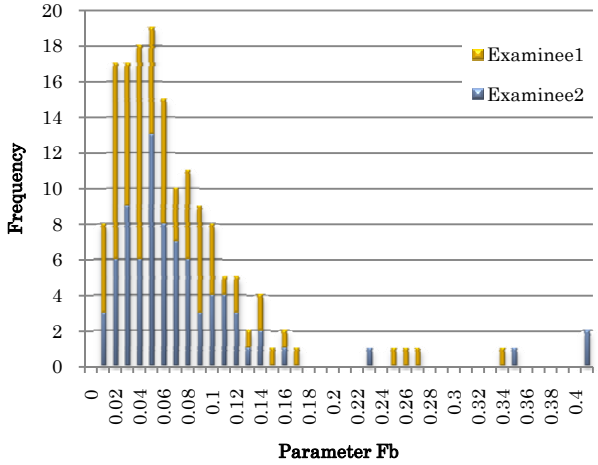


Fig.49　Histogram from data in sitting on a right camper dinette

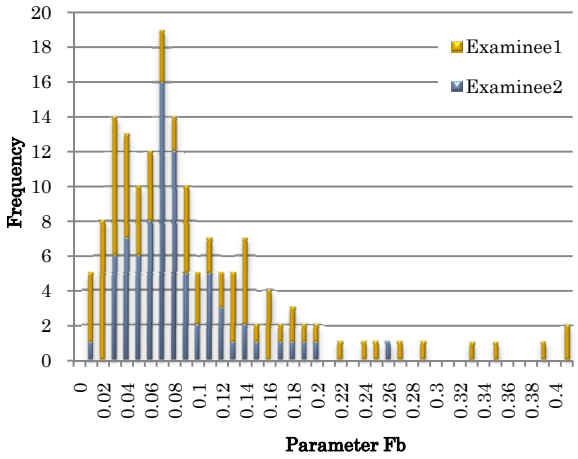


Fig.50　Histogram from data in sitting on a left camper dinette

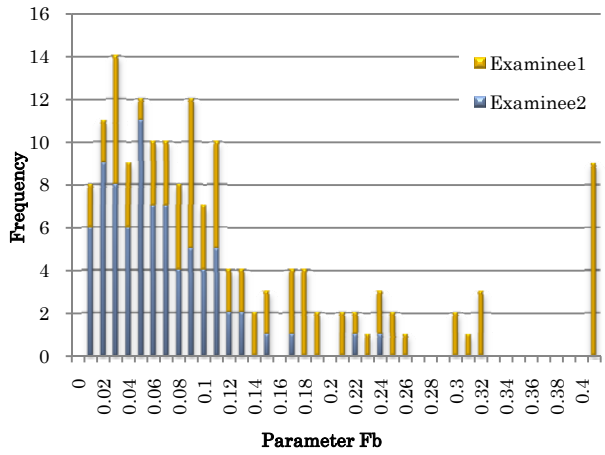


Fig.51　Histogram from data in sitting on the roof

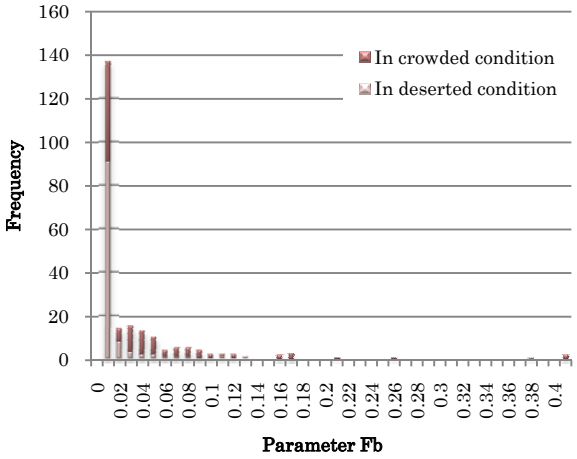


Fig.52　Histogram from data of the unmanned car

５．９　有人無人判定値の推定

判定回路に必要となる有人無人を判定するため閾値である標準偏差F_bを求める．**Fig.53**に**５．７**で行った有人，無人の各データ，**５．８**で行った有人，無人データについて標準偏差F_bが含まれる累積度数分布表を示す．

判定では誤認が考えられるが有人車を有人であると判定することが無人車を有人と判定することよりも優先される．そこにおいて無人の標準偏差 F_b が 90%を超えることを一つの条件として判定閾値の標準偏差 F_b を求めていく．無人の標準偏差 F_b が 90%を超えるのはキャンピングカーでは 0.08，乗用車では 0.12 である．また有人の標準偏差 F_b はキャンピングカーでは 0.22，乗用車では 0.34 といえる．よって有人，無人を判別する値として適切なのは 0.12～0.21 であるといえる．

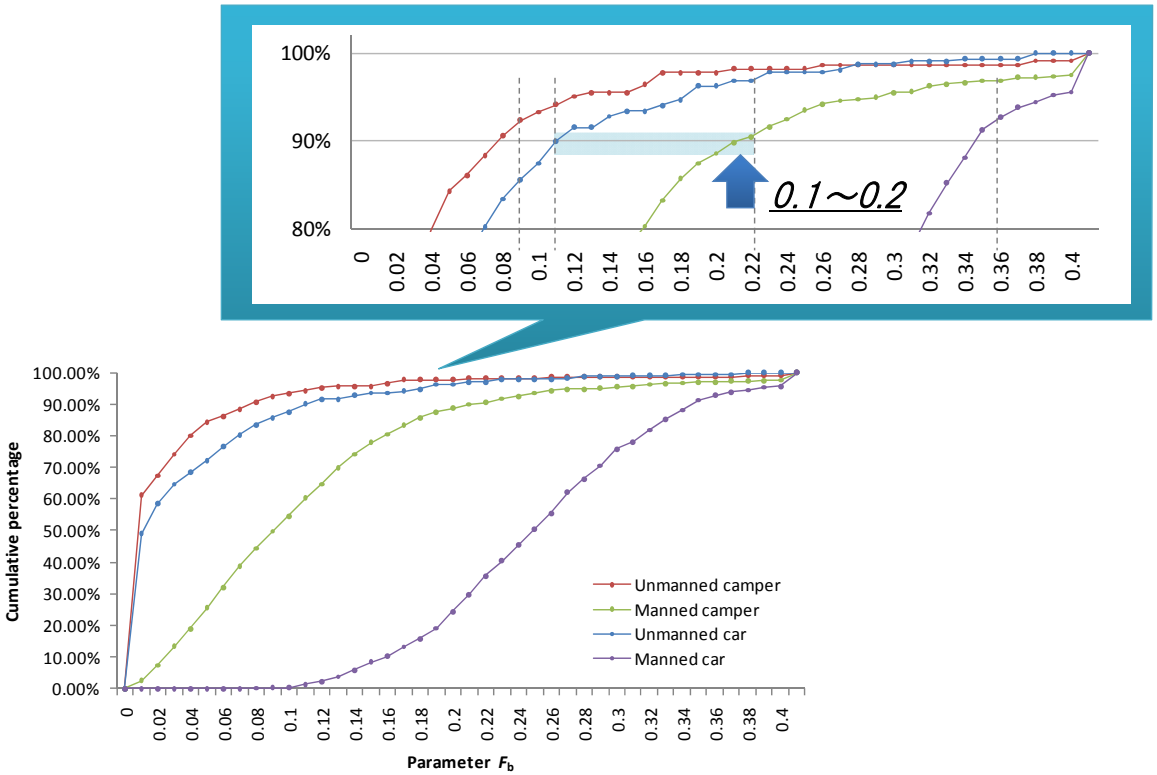


Fig.53　Cumulative frequency table

6 結論

本論文では自動車の振動を計測することによって，自動車内に人間が存在しているかを判定するシステムの開発を行った. 目的とした判定システムの開発において, 自動車の車体振動を計測するセンシングデバイスの開発, センシングデバイスから得られた電気信号から生体信号を抽出する生体計測用フィルタ回路の開発，そして抽出される生体信号の有無を調べることによって判定を下す判定回路の開発の三項目を課題にした.

まず自動車車体の振動を計測するセンシングデバイスの開発では圧電セラミックス型センシングデバイス，コンデンサマイクロフォン型センシングデバイスの 2 つのセンシングデバイスを開発した．圧電セラミックスセンサ，コンデンサマイクロフォンセンサを用いたそれぞれのセンシングデバイスは自動車の微小車体振動を検出することができたと言える.

次に生体計測用フィルタ回路の開発を行った．センシングデバイスから入力される電気信号は，生体信号の特徴を多く含む信号であり，フィルタ回路を用いることによって高精度に生体信号を抽出できた.

抽出される生体信号の有無を見ることによって判定を下す判定回路の開発では，無人と有人の計測データに対して標準偏差 F_b を用い，時間窓 2.5s 毎の判定を 9 回繰り返し，5 回以上有人と判定された場合に有人と最終判定する多数決判定を用いることによって，外乱などの突発的な不確定信号に対して信頼性を高めることができた.

以上より，自動車の車体振動を計測するセンシングデバイスの開発，センシングデバイスから得られた電気信号から生体信号を抽出する生体計測用フィルタ回路の開発，そして抽出される生体信号の有無を見ることによって判定を下す判定回路の開発を行うことができた.

7 今後の課題

本論文では，自動車の微小な振動を計測することによって，自動車内の人間の有無を判定するシステムの開発を自動車の車体振動を計測するセンシングデバイスの開発，センシングデバイスから得られた電気信号から生体信号を抽出する生体計測用フィルタ回路の開発，そして抽出される生体信号の有無を見ることによって判定を下す判定回路の開発の 3 項目において行った．

システムの最上段に位置するセンシングデバイスについては圧電セラミックス型センシングデバイスでは内部センサの直上に被験車のタイヤを設置しなければならない点，コンデンサマイクロフォン型センシングデバイスではスペーサーに用いるスポンジ素材が, 計測の回数を重ねるにつれ劣化してしまう点が問題として上げられる．

システム全体として判定システムを用いた被験車車体の計測は外乱が比較的少ないと考えられる環境，つまり風が弱く，地面の振動が少ないなどの環境で行った場合は判定を信頼性高く行うことができた．しかし外乱が多い場所では，誤判定してしまう場合があり，ロバスト性が高いとはいえない．今後の課題としてシステム全体においてロバスト性をあげるシステムの構築が必要となる．

資料

資料１　実際に自動車に隠れている所を発見された例

“The immigrants stuffed into car seats and under bonnets trying to get into Europe” ; dailymail (29 December 2007)

くり抜いた座席の中に隠れている場合

ダッシュボードの中に隠れている場合

ボンネット下のエンジン横で体を縮めてくるまっている場合

後部座席に設けられた秘密の小空間に隠れている場合

後部座席後に設けられた秘密の小空間に隠れている場合

資料 1-Fig.1　自動車に隠れている様子

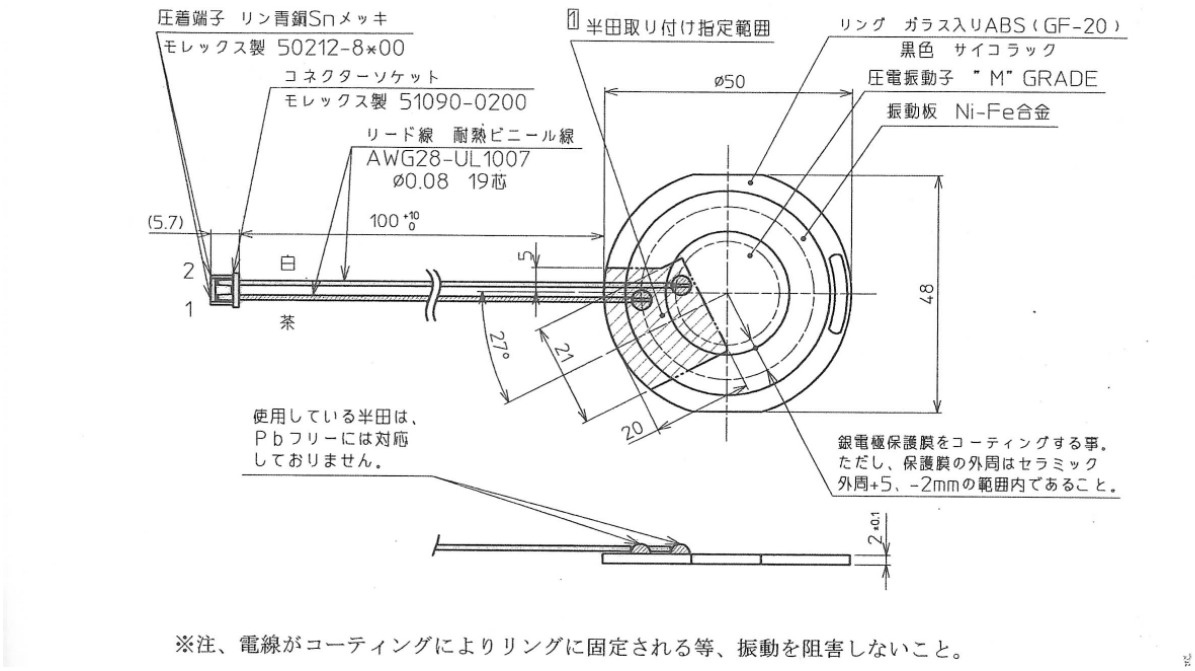
資料２　センシングデバイスに用いたセンサの仕様

２．１　圧電セラミックス資料

品名:圧電振動板

型番:DC-5DSN4:株式会社プリモ製

外観形状，材質



電気的性能

共振周波数	: 0.75kHz±0.1kHz(at　1kHz)
共振インピーダンス	: 2kΩ 以下
静電容量	: 70nF±30% (at　20℃，120Hz)
最大入力レベル	: 30V p-p
音圧レベル	: 75dBsp1 以上(共振周波数 3VRMS にて距離 10cm)
絶縁抵抗	: 10MΩ 以上　(DC50V にて)

資料 2- Fig.2　圧電振動板 DC-5DSN4 の写真

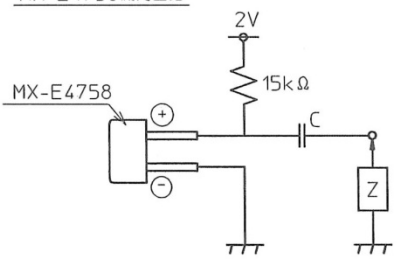
２．２　コンデンサマイクロフォン資料

測定回路

Input SPL ； 94dBspl　P型 Mic
VDD=2V,　RL=15kΩ

・音場
0.5Hz～100Hz…密閉音場（100Hz基準）
100Hz～…自由音場（1000Hz基準）

MX-E4758測定回路

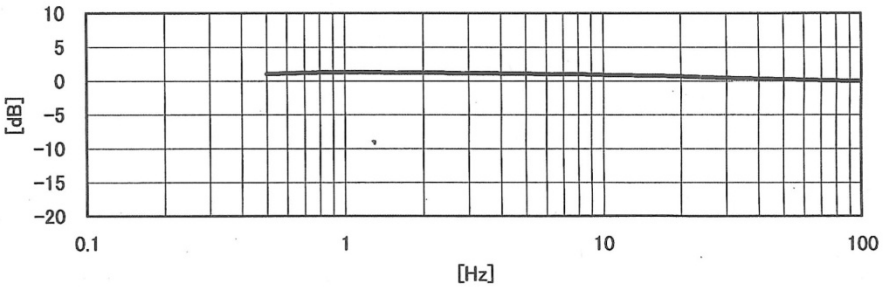


1/(2πCZ)の値は1よりも十分に小さいこと

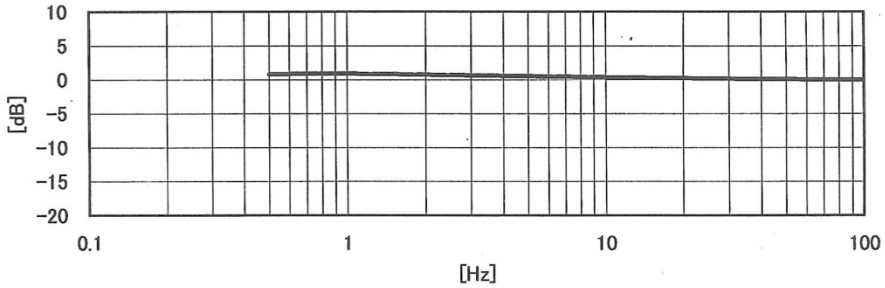
周波数特性

周波数特性
<<低周波>>

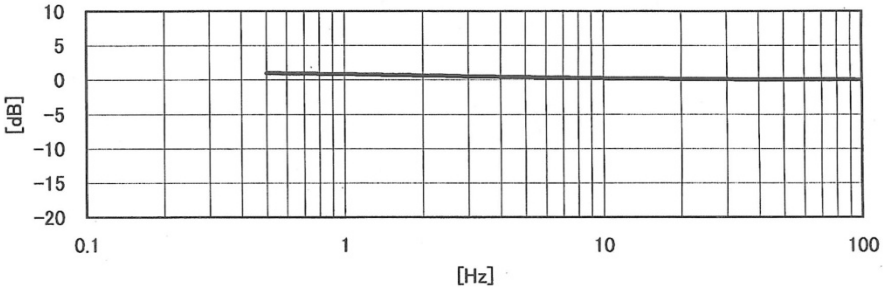
No.1



No.2

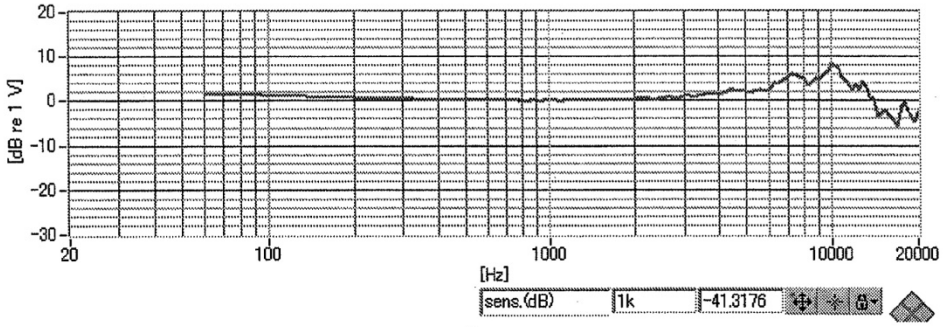


No.3

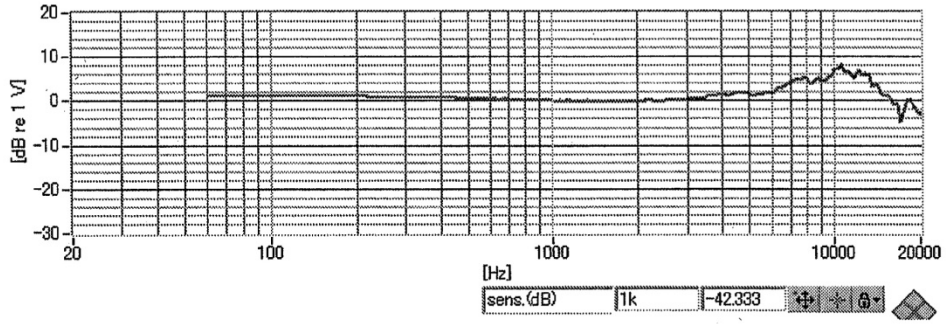


<<可聴帯>>

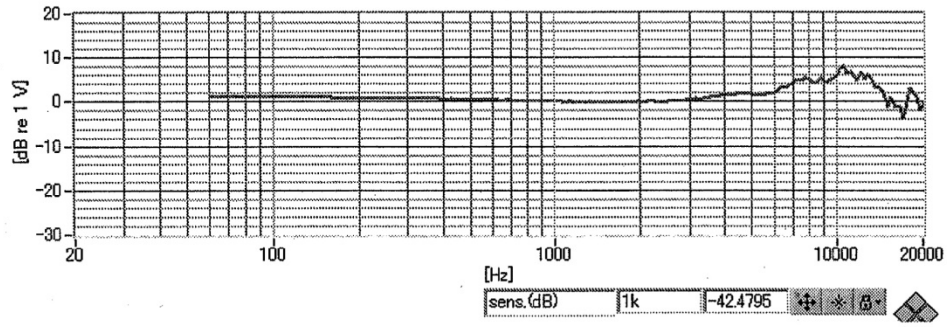
No.1



No.2



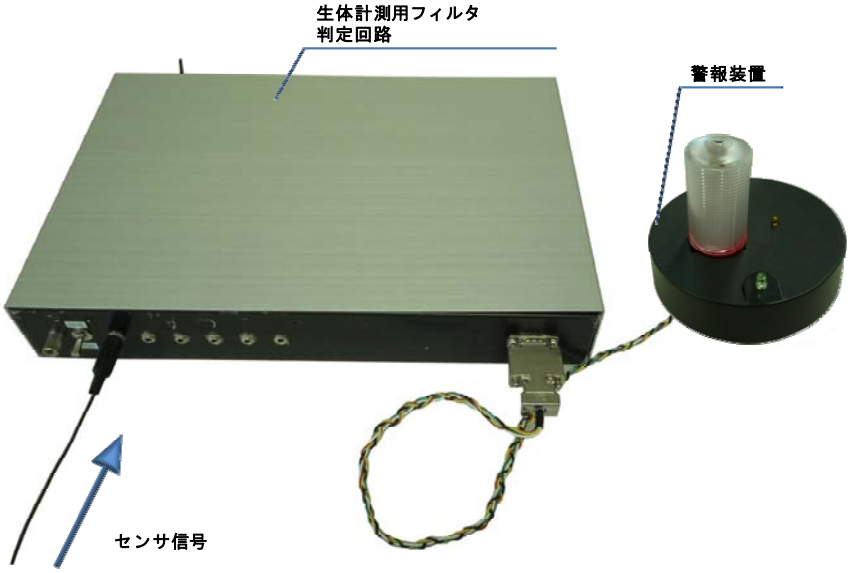
No.3



資料 2-Fig.2　コンデンサマイクロフォン写真

資料３　判定回路実装

３．１　システム外装



資料 3-Fig.3　システム外装写真

３．２　生体計測用LSI回路

資料 3-Fig.2　アナログ生体計測用 LSI 回路

３．３　PSoCマイコンによる判定回路

PSoC マイコンはアナログデジタル混在のマイコンである．アナログブロックは PGA，フィルタ，AD コンバータなどで構成され，デジタルブロックで PWM，シリアル通信などで構成され，プログラミングにより調整可能であるため，部品点数の削減やコストの削減が可能である[17].

(a)　全回路図

資料 3-Fig.3 に作成した全回路図，**資料 3-Fig.6** に完成写真を示す．PC にデータを取り込む方法としてシリアル通信を用いた．また，電源はニッケル水素電池を用いることで充電を可能とし，スイッチの切り替えにより充電池駆動と，充電及び AC アダプタによる駆動の切り分けを可能とした．また，PSoC に与える電圧は 5V であるため三端子レギュレータを用いて電圧を 5V に制御した．

(b)　アナログ部

アナログ部の処理内容を**資料 3-Fig.4** に示す．PSoC の IO ピンの入力インピーダンスが低いので前段回路として FET 介すことによりセンサの出力インピーダンスを低くし感度低下を抑えた．その後，直流カットとアンチエイリアシング回路をアナログフィルタで実装し PGA により増幅し，AD コンバータによりデジタル信号を取り込む．

(c)　デジタル部

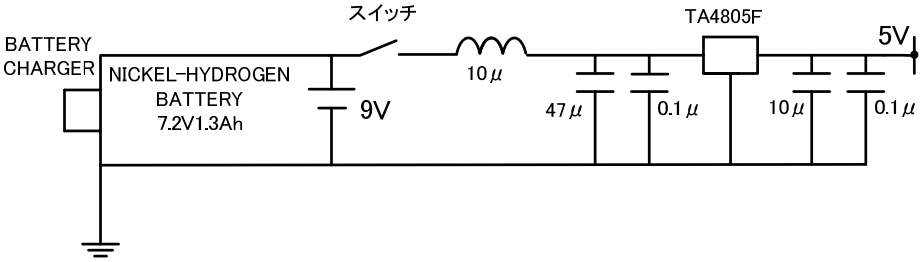
デジタルブロックの処理内容を**資料 3-Fig.5** に示す．デジタルブロックでは，PWM により AD コンバータのサンプリング時間，ブザーの周波数，シリアル通信の転送速度を制御した．PSoC でシリアル通信の転送速度を制御するには，転送速度の 8 倍の周波数のクロックを UART(TX)に与えなければならない．ここで，転送速度を 9600bps とし，9600×8Hz のクロックを UART ブロックに与える．また，PWM による割り込みにより，サンプリング周波数を 100Hz に制御した．これは，AD コンバータの取得時間は一定だがリアルタイムで CPU に演算させるためプログラムの分岐などにより計算時間が異なるためである．

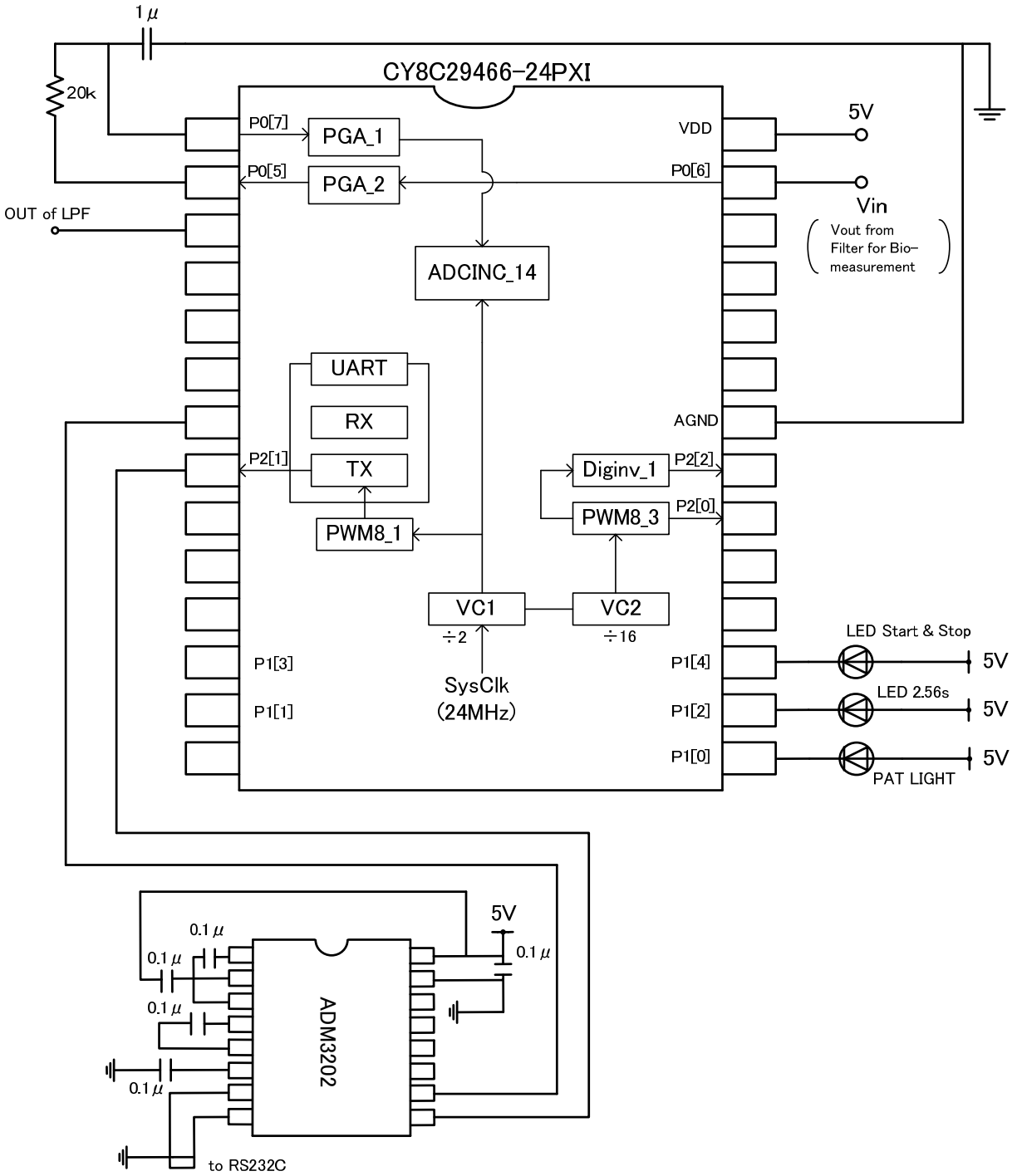
(d)　提案する判定システムの実装

判定システムの実装を C 言語により行った．特徴量は標準偏差を基とする特徴量 1 と自己相関を基とする特徴量 2 のみ実装し，判定方法は 1 次元判定を用いた．判定結果の通知方法は次の方法を用いた．時間窓 T 秒毎の判定で，有人と判定された場合 LED を点灯させる．さらに，N 回判定を繰り返し $N/2$ 回以上有人と判定(LED 点灯)された場合ブザーと LED により有人と最終判定結果を通知する．

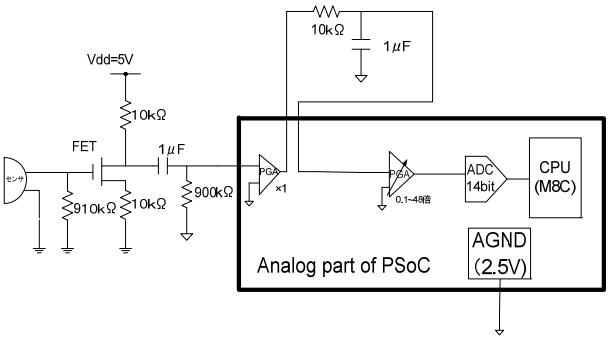
(e)　警報外装と回路

資料 3-Fig.7 に写真を示す．警報装置には計測開始終了合図用 LED，2.5s 判定用 LED，そして最終判定用 LED を付属する．

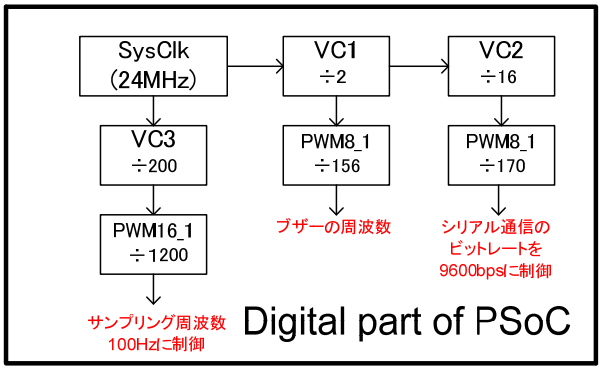




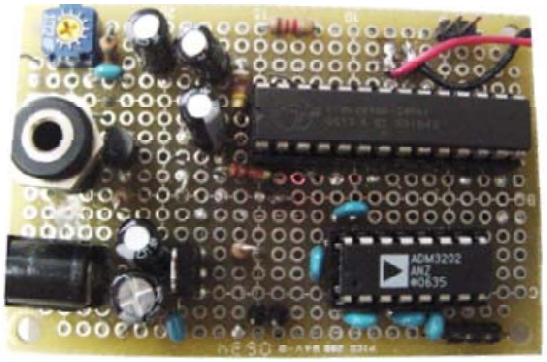
資料 3-Fig.3　PSoC 回路全図



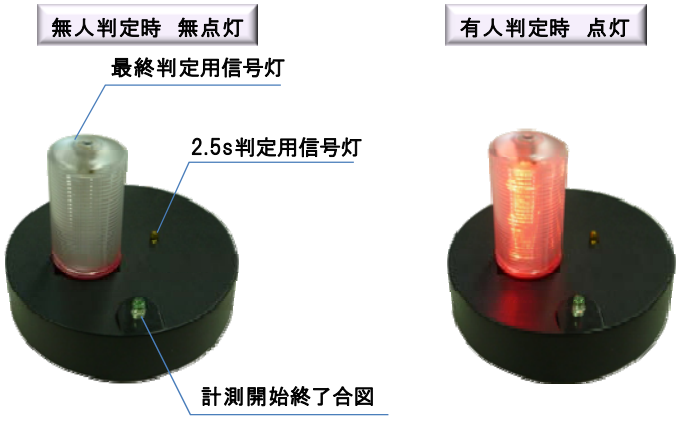
資料 3-Fig.4　PSoC 回路アナログ部



資料 3-Fig.5　PSoC 回路デジタル部



資料 3-Fig.6　PSoC 回路写真



資料 3-Fig.7　警報機外装と点灯時の様子

資料４　実験仕様機器

(a)　計測用自動車一覧

名称・車種	外装	標準車両寸法 mm 全長 × 全幅 × 全高	標準車両重量　kg
トラック Dyna トヨタ自動車		4,430× 1,695× 1,975	1,800
バン Vanette van 日産自動車		4,280× 1,630× 1,850	1,360
乗用車 Debonair 三菱自動車		4,975 × 1,815 × 1,440	1,600
軽自動車 Lyra 三菱自動車		3,395 × 1,475 × 1,510	680
キャンピングカー Hiace トヨタ自動車		4,695× 1,695× 1,980 ※使用した車両は改造品	3,000

(b)　大型扇風機

サイズ	幅 530×奥行 550×高さ 800mm
風量	113/132m^3/min
羽根	直径 450mm　4 枚
重量	9.1 kg

(c) パルスオキシメータ

資料 4 Fig.1　パルスオキシメータ(MIZONO DIGTAL MONITOR 30MB-1012)の写真

本研究では計測結果が心拍であるか検証する手段としてパルスオキシメータである MIZONO DIGTAL MONITOR 30MB-1012 を使用した．

パルスオキシメータはプローブを指先や耳などに付けて，無侵襲に脈拍数と経皮的動脈血酸素飽和度(SpO_2)をモニターするものである．MIZONO DIGTAL MONITOR 30MB-1012 のプローブは発光部分とセンサで構成されている．発光部分は赤色光と赤外光を発し，これらの光が指先等を透過したものをセンサで計測する．

酸素を全身に運んでいるのは赤血球のヘモグロビンである．酸素と結びついた酸化ヘモグロビンが多いと，血液は鮮やかな赤色になる．つまり，酸素と結びついているか否かで血液の色(血液に吸収される光の波長)が異なる．

パルスオキシメータは，2 つの波長(660nm，940nm)の光を当てて，その吸収のされかたから，酸化ヘモグロビンの割合である SpO_2(%：血中酸素飽和度)を求めている．皮膚の下には動脈も静脈も毛細血管も流れ，動脈血だけの酸素飽和度を求めるために，拍動(パルス)に伴って変化する成分だけを取り出している．660nm と 940nm の 2 つの波長の光を血液に当てて，その吸収のされ方から酸化ヘモグロビンの割合を計算することにより，心拍を知ることができる．

この特性から，外部の光，特に太陽光に弱く，日の光の下では正確に測定することができない．今回の実験ではプローブを耳たぶにつけることで計測した．

参考文献

1) 産経新聞：米上院 移民法案の採決断念 ブッシュ大統領 公的実現の機会逃す，2007年6月30日東京朝刊

2) 日本経済新聞：米移民問題にどう対応，2006年6月8日東京朝刊

3) Dailymail：The immigrants stuffed into car seats and under bonnets trying to get into Europe，29 December 2007

4) Business Wire. FindArticles.com：U.S. Customs and Border Protection Initiates Use of AS&E's Z Portal Vehicle Screening System at Southwest Border，18 May 2009.

5) 朝日新聞：囲われた街 買う安心，2008年10月13日朝刊

6) 朝日新聞：富裕層　地域に壁，2008年10月19日朝刊

7) 朝日新聞：危ない幼児の熱中症，2008年6月24日夕刊

8) 朝日新聞：車中7時間　2児が死亡，2009年6月22日朝刊

9) 産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門：
人間計測ハンドブック産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門編，朝倉書店，pp82-86，2003

10) (社)自動車技術会：自動車の制御技術，朝倉，pp72-82，1997

11) (社)自動車技術会：自動車技術ハンドブック，精興社，pp124-136，1992

12) 富士セラミックス：テクニカルハンドブック

13) 渡辺崇士，渡辺嘉二郎，中村哲夫，藤井康弘：
センサ信号処理汎用LSIの開発，電気学会論文誌. C，電子・情報・システム部門誌，Vol.123，No.5，2003

14) 渡辺嘉二郎，中村哲夫：アナログLSI設計の基礎，オーム社，2006

15) 渡辺嘉二郎，中村哲夫：アナログフィルタ設計の基礎，オーム社，2009

16) 渡辺嘉二郎，渡辺春美：睡眠中の心拍，呼吸，イビキ，体動及び咳の無侵襲計測，
計測自動制御学会論文誌，vol35-8，1012/1019（1999）

17) 桑野雅彦：PSoCマイコン・トレーニング・キット解説書，CQ出版株式会社，2008

謝辞

研究を通して，私は今まで経験したことがないくらい多くのことを学びました．わからない言葉を追いかけ，長年培われてきた知識に感動し,生活の最優先に研究があることにやりがいを感じた気持ちは今でも変わりません．研究室での出会いは人生において何ものにも変えられない存在であり，この研究室で過ごすことができた 3 年間は大きな成長の場となりました．

研究を進めるにあたり，熱心な御指導をしてくださった渡辺嘉二郎教授には多大なる感謝を申し上げます．研究に対して何不自由なく取り組むことができたのは先生のお力添えがあってこそであり，多くの経験をさせていただきました．また実験を進めるにあたりご支援をしていただきました株式会社日鉄エレックスの萬羽健様，株式会社ジェピコの中村哲夫様，岡田卓也様をはじめとするみな様，また実験環境を提供していただいた方々に深く感謝申し上げます.研究に収まらず,様々な話をさせていただいたことは私にとって大変有意義なことであり，これからも大切に人生の教訓としていきたいと思います．

また研究室の同期には本当に密の濃い時間を過ごさせていただきました．皆の研究に対する真剣さがあったからこそ，他愛ない会話も楽しく，様々な物事に真剣に素直にのめり込むことができたのだと思います．そして研究を進める中で心強く支えてくれた諸先輩方，後輩にも深く感謝致します．

様々な人の助力があった 3 年間をこのような形で残せたことを幸せに思います．

最後に学生生活を支え続けていただいた両親をはじめ家族に深く感謝致します．

平成22年2月26日

増山康介