

自動車用乗員検知センサ

Occupant Sensor System using a Flexible Tactile Force Sensor

久保木 尚文 *

Naobumi Kuboki

岡村 浩代 *

Hiroyo Okamura

榎本 貴行 *

Takayuki Enomoto

西本 卓矢 *

Takuya Nishimoto

大上 壽一 *2

Toshikazu Ohue

安東 和義 *2

Kazuyoshi Ando

要 約 自動車の衝突安全装置や運転支援技術の高機能化を目指して、座席状況（乗員体格、チャイルドシートの有無など）を判断するセンサの開発を進めている。特に米国においてはエアバッグの加害性低減が求められており、そのためには乗員体格や姿勢などを判断するセンサが必要とされている。我々は感圧フィルムセンサを用いて座席に加わる乗員の荷重分布データを測定し、乗員体格をクラス分類する方法の検討を行った。

座席に加わる荷重分布に認められる二つのピークの距離及び加圧されている幅から乗員の身体特徴を判断する方法について判断精度の検証を行い、大人と子供の識別では90 %程度の判別正解率を期待できることがわかった。

1. はじめに

近年、自動車の安全性向上を目的としてSRS（Supplemental Restraint System：補助的乗員拘束装置）エアバッグ装置が広く普及し、シートベルトプリテンショナやフォースリミッタ等の様々な衝突安全技術が導入されてきている。しかしその一方で、米国において急速に普及したエアバッグが原因とされる死亡事故が報告され、米国運輸省のNHTSA（National Highway Traffic Safety Administration）はエアバッグの加害性を低減した、より安全なスマートエアバッグの開発¹⁾を求めている。このスマートエアバッグに求められる要件は衝突の規模や座席の状況（チャイルドシートの有無、乗員体格や姿勢、位置など）に応じてエアバッグの展開を制御するというものであり、座席状況を判断するためのセンサが必要になる。この乗員体格や姿勢を判断する装置として、電界センサ方式²⁾や赤外線方式³⁾などの様々なセンシング方式が提案されているが、それぞれメリット・デメリットがあることも知られている。

そこで、我々は車載環境で使用できる感圧フィルムセンサを開発し、座席に加わる乗員荷重分布情報から乗員体格などの判断を行う方式について可能性検討を行い、荷重分布情報を利用した乗員検知センサのプロトタイプ機を試作したので報告する。

2. 感圧フィルムセンサによる体格判断

感圧フィルムセンサは電子鍵盤楽器や医療等の計測用途で使用されており、パソコン用キーボードなどに使用されているメンブレンスイッチと類似の構造をしている。違いはメンブレンスイッチはOn/Offの2値しかないのに対し、感圧フィルムセンサは半導電性である感圧インクを電極部に用いており、電極部に加わる圧力に応じて電極間の電気抵抗が連続的に変化する特性を有していることである。メンブレンスイッチと同様に感圧フィルムセンサは多様なパターンをスクリーン印刷により形成でき、現状の自動車用シート構造を大幅に変更することなく座席に設置することが可能である。更に、ウレタンフォームと表皮との間に設置した場合、センサが薄くしなやかなため乗員が異物感を感じにくいという特長も有している。

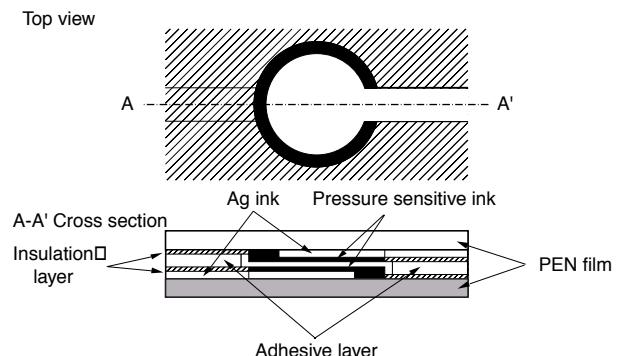


図1 感圧フィルムセンサ模式図
Schematic drawing of a pressure sensing element

* 自動車電装技術研究所

*2 ニッタ株式会社

我々は基材フィルムにポリエチレンナフタレート（PEN）を使用した車載用感圧フィルムセンサを開発した。開発した感圧フィルムセンサ感圧点の上面及び断面を図1に示す。感圧点に形成されている電極部の直径は約10 mmであり、感圧フィルムセンサの総厚みは約0.2 mmである。銀インクによる配線部には絶縁層を印刷し、銀のマイグレーション発生を抑えてある。更に、感圧点の電極間に空隙があり、空隙にあるエアが雰囲気温度により膨張、収縮すると感圧フィルムセンサが応答する最小圧力が変動することから、通常のメンブレンスイッチと同様に空気抜き（図示せず）も設けてある。

感圧フィルムセンサの抵抗値と印加圧力とは図2に示すように反比例の関係があり、雰囲気温度依存性を有している。主にセンサ感度は感圧インク組成、基材フィルム種及び厚さ、センサセル構造（電極面積及び電極間距離）により決定され、温度依存性は基材フィルムや感圧インク硬度が周囲温度に応じて変化することが主要因であると考えている。

感圧フィルムセンサの抵抗値変化は図3で示すオペアンプの反転増幅回路を利用して読み出している。図中の可変抵抗 R_s が感圧点の抵抗を示している。感圧点に加わる圧力と感圧点の抵抗値とは反比例の関係（式1）にあり、オペアンプ出力電圧 V_{out} は感圧点に加わる圧力 P と式2で示されるとおり比例関係となる。このように電圧を読み取るだけで簡単に感圧点に加わる圧力を知ることができる。

$$A = R_s \cdot P \quad (1)$$

A : 感度

R_s : 感圧点の電気抵抗

P : 感圧点に加わる圧力

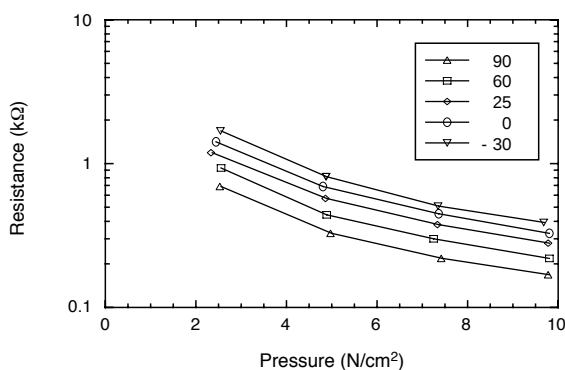


図2 感圧フィルムセンサの感圧特性
Sensor performance

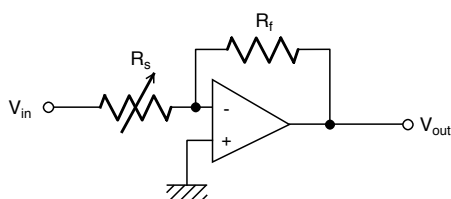


図3 読み取り回路
Read-out circuit

$$\begin{aligned} V_{out} &= -V_{in} \cdot (R_f/R_s) \\ &= -V_{in} \cdot (R_f/A) \cdot P \end{aligned} \quad (2)$$

V_{out} : オペアンプ出力電圧

V_{in} : オペアンプ入力電圧

R_f : 帰還抵抗

つぎに、感圧フィルムセンサを用いて乗員体格を判断する方法を考える。

従来から検討されている座席のシートクッションに加わる荷重から判断する方法⁴⁾の場合、着座姿勢が固定されていれば体重との相関が期待できるが、バックレスト角度に依存してシートクッションに加わる荷重が変化するという問題がある。また、小さな子供の場合は足がフロアに届かないのに対し、大人の場合は足からフロアに荷重が逃げており、シートクッションに加わる荷重から単純に体重を推定すると誤差が大きくなる問題もある。更に、感圧フィルムセンサによって荷重を測定する場合には、感圧フィルムセンサ自体の温度依存性のみならず、シートクッションに使われているウレタンフォーム硬度等の雰囲気温度や湿度依存性、経年変化の影響も受けるという問題がある。

そこで、感圧点を2次元マトリックス状に多数配置した感圧フィルムセンサを座席のウレタンフォームと表皮との間に設置し、各感圧点に加わる圧力を計測することによって得られる荷重分布情報と身体特徴との関係を考察する。人間が座席に座ったときにシートクッションが受ける荷重分布の例を図4に示す。これを見ると、臀部下に“ふた山”の圧力ピークが認められる。この圧力ピークは座骨結節下に現れることが知られており、このピーク値と身長、体重、肥満度を示すローレル指数及び大腿最大外周径との間には有意な相関は認められないことが水上ら⁵⁾によって報告されている。これは座骨結節の形状が前方（先端）に行くにしたがって尖って狭くなっており、座面と骨盤との角度に依存して座面と接触する面積が変化し、それに従ってピーク値が変化する。そのため計測したピーク値から乗員体重を推定することは困難である。

そこで骨格と身体特徴との関係を考えてみると、日本においては藤井による全四肢骨について回帰直線方程式による身長推定式⁶⁾が広く用いられており、脊柱長計測による身長の推定⁷⁾

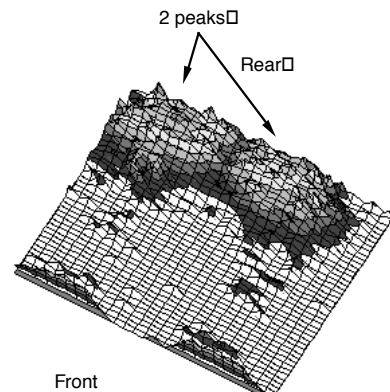


図4 荷重分布測定例
Example of pressure distribution

の報告等もなされているが、ここで着目している骨盤下部と身体特徴との関係に関しては、河内ら⁸⁾により性差が大きく、個人差が大きいことが報告されている。また、臀部サイズと身体特徴との関係と考えた場合、座位臀幅と体重との間に相関があることが知られている。そこで、座骨結節下に認められる特徴的な二つのピークの距離（以下では"ピーク距離"と表記）と乗員身長との関係及び座位臀幅と関連する加圧されているエリアの幅（以下では"加圧幅"と表記）と乗員体重との関係について検討し、これらのパラメータから乗員の身長、体重を推定した場合の精度について考察することとした。

3. 実験

感圧点を配置するピッチを狭くすれば、荷重分布に関する多くの情報を得ることが可能となるが、感圧フィルムセンサと信号処理ユニットとのインターフェース回路の増大をまねき、車載装置としては大きく高価なシステムとなってしまう。実用性を考慮して実験機作製にあたっては、なるべく少ない感圧点で乗員の身体特徴を判断できるようにする必要がある。

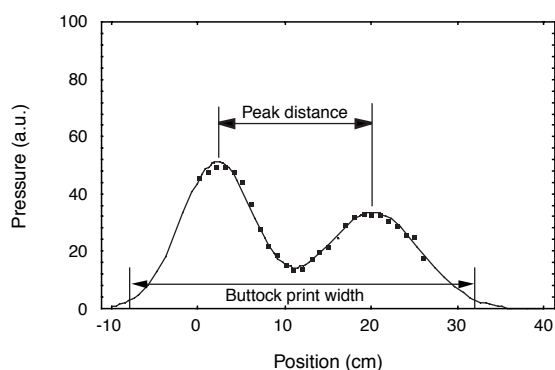


図5 圧力プロファイル
Example of pressure profile



写真1 感圧フィルムセンサの設置状況
Installation of distributed tactile force sensor mat

図4のふた山の圧力ピークを通り、座席の左右方向に延びる直線上にある感圧点の圧力データを図5に示す。図中の点は感圧点における測定データであり、実線は近似曲線により近似した結果を示している。我々はこの近似曲線と身体特徴との関係、具体的には、近似曲線の二つのピーク位置の距離をピーク距離とし、近似曲線の左右に広がる裾の距離を加圧幅として身長及び体重との関係を整理することとした。

実験においては臀部サイズ情報と身体特徴との関係を調査することが目的であるため、感圧点を配置する範囲は乗員が着席した場合に臀部が来る位置とし、前後方向のピッチを2.5 cm、左右方向のピッチを3 cmとして、8行8列（64点）の感圧点を配置した感圧フィルムセンサを準備し、小型セダン用助手席シートクッションのウレタンフォームと表皮との間に取り付けた。（写真1参照）

実験においては、センサを設置してある座席を取り付けた車両に乗車してもらう方法で荷重分布計測を行った。被験者は3歳～65歳までの男女212名を対象とした。荷重分布測定時の着座姿勢は、成人に対してはバックレストやシートスライダーを好みの位置に調整してもらい、特に姿勢の指示を与えていない。一方、子供に対しては標準的なバックレスト角度に調節した座席に臀部を奥に入れる姿勢をとるように指示している。被験者が成人の場合は、被験者乗車後に車両を約300 mの周回路を速度約10 km/hで走行した後に車両を停車させた状態（エンジンOn）で荷重分布データを収集しているが、被験者が子供の場合は車両を移動させずに（エンジンOff）実施している。また、被験者の体格データは実験車に乗車する直前に身長計及び体重計を用いて計測している。なお、被験者の身長及び体重は靴を脱いだ状態で計測し、体重は服を着た状態で測定している。

計測したデータの中から極端な前座りなどによりセンサ設置範囲外に臀部が来ていた測定データを取り除いた残り166データに対して、近似曲線から求めたピーク距離と乗員身長との関係を図6に示す。これを見ると、ピーク距離が大きくなると被験者身長が直線上に高くなることがわかる。また、成人に関しては性差が認められる。データに対し回帰直線を求め、その回帰式を用いてピーク距離から身長を推定したときの推定身長と実際の身長との差の標準偏差は11.6 cmである。

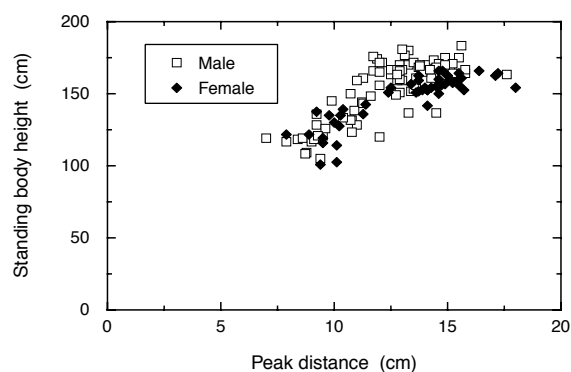


図6 身長とピーク距離の関係
Correlation between peak distance and standing body height

つぎに、近似曲線から求めた加圧幅と被験者体重との関係を図7に示す。加圧幅が大きくなるにしたがって体重が直線上に大きくなるのがわかる。また、体重に関しても身長と同様に成人に関しては性差が認められる。このデータから回帰直線を求め、その加圧幅から回帰式を用いて体重を推定したときの推定体重と実体重との差の標準偏差は9.5 kgである。

4. 考察

ここでは衝突実験用ダミー人形のサイズを基準にして、実験機で得られた結果から大人と子供の判別精度を見積もる。衝突実験用ハイブリッドIIIダミーファミリーの身長及び体重を表1に示す。体格クラス分類方法は各ダミー人形の身長及び体重の中間値をクラス境界とし、

- ・クラス1: 3歳児ダミー人形相当以下
- ・クラス2: 6歳児ダミー人形相当
- ・クラス3: 小柄な女性ダミー人形相当
- ・クラス4: 標準的な男性ダミー人形相当以上

の4クラスに分類する場合に対し、差の標準偏差から乗員身長及び体重に対するクラス分類確率を求める。

図8にピーク距離から身長を推定した場合における乗員身長に対して各々のクラスに分類される確率を求めた結果を示す。このグラフから、例えば、身長150 cm程度の小柄な成人が着席した場合、それぞれのクラスに分類される確率は、

- ・クラス1: 0.01 %
- ・クラス2: 9.10 %
- ・クラス3: 74.77 %
- ・クラス4: 16.12 %

であることがわかる。身長の場合と同様に、加圧幅から体重を推定した場合における乗員体重に対する各々のクラスに分類される確率を求めた結果を図9に示す。このグラフから身長の場合と同様に、体重50 kg程度の小柄な成人が着席した場合における各クラスに分類される確率を求めると、

- ・クラス1: 0.10 %
- ・クラス2: 9.38 %
- ・クラス3: 84.11 %
- ・クラス4: 6.41 %

であることがわかる。その他のダミー人形相当の身長及び体重に対して同様の計算を行った結果を表2に示す。

今回の結果から、6歳児ダミー人形相当以下を子供とし、小柄な女性ダミー相当以上を大人として判断する場合、ピ-ク距離から判断するアルゴリズムと加圧幅から判断するアルゴリズムのどちらの手法を使っても子供と大人の判別は90 %程度の正解率が期待できる。

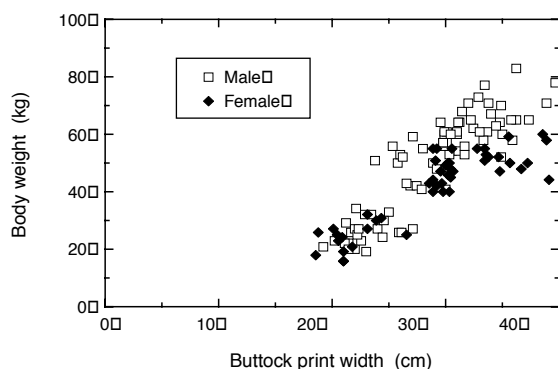


図7 加圧幅と体重の関係
Correlation between buttock print width and body weight

表1 衝突実験用ダミー人形のサイズ
Size of crash test dummy family

	Standing body height	Body weight
3 year old child dummy	94 cm	15 kg
6 year old child dummy	119 cm	24 kg
5 percentile American female dummy	150 cm	49 kg
50 percentile American male dummy	173 cm	78 kg

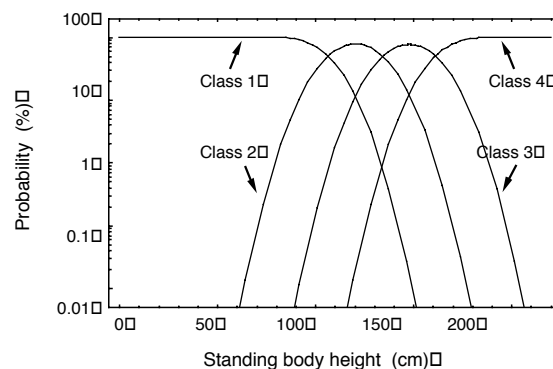


図8 乗員身長に対するクラス分類確率曲線
Probability curves calculated using the experimental results (peak distance)

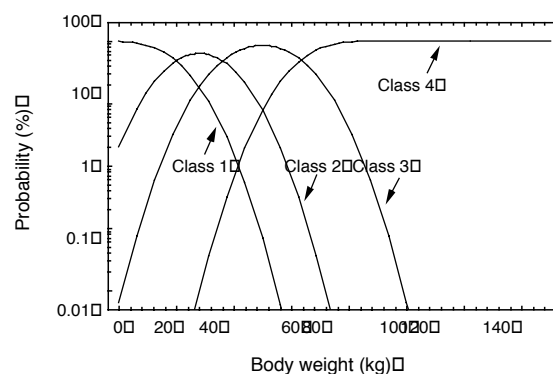


図9 乗員体重に対するクラス分類確率曲線
Probability curves calculated using the experimental results (buttock print width)

表2 ダミー人形相当の乗員に対するクラス分類確率
Probabilities of classification for different size occupants

	Probability (%)							
	Peak distance				Buttock print width			
	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
3 year old child dummy	85.90	14.08	0.02	0	68.16	30.64	1.20	0
6 year old child dummy	14.10	76.79	9.10	0.01	31.84	58.68	9.48	0
5 percentile American female dummy	0.01	9.10	74.77	16.12	0.10	9.38	84.11	6.41
50 percentile American male dummy	0	0.05	16.07	83.88	0	0	6.41	93.59

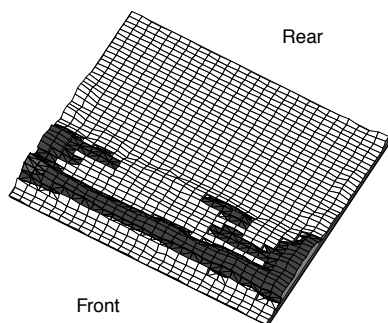


図10 チャイルドシートを置いた場合の荷重分布例
Example of pressure distribution (child restraint seat on a seat cushion)

5. プロトタイプ機の開発

チャイルドシートを使用することが日本においても義務化されるなど、助手席乗員クラス分類にあたってチャイルドシートの有無を判断することが実用上重要になる。自動車メーカーは安全上の観点から、助手席エアバッグ装着車の場合には後席にチャイルドシートを取り付けることを推奨しているが、ユーザーがチャイルドシートを助手席に装着するケースも考えられる。

あるチャイルドシートを置いたときの荷重分布の例を図10に示す。このように人間が着席している場合と大きく荷重分布が異なる。この分布形状を比較することにより、座席占有物が人なのかチャイルドシートを含めた物なのかを判断できるかどうかを考察する。実験機を用いて座席にチャイルドシート、砂袋、鞆等の物が置かれているときの荷重分布データを収集し、前章で収集した人のデータと併せて半分のデータを学習データとして利用してNeural networkを作成し、残りのデータを作成したNeural networkに入力したときに出力された結果を求めたところ、今回の実験データにおいては90%程度の正解率が期待できることがわかった。しかし、Neural network等の学習機能を利用する場合にはいくつかの問題点が考えられる。

一つは、学習データに利用するデータをどのように規定したかによって判断精度が変化することであり、既に市販されているチャイルドシートは無数に存在し、すべてのチャイルドシートを網羅したNeural networkを作成することは事実上不可能であることが挙げられる。更に、新種のチャイルドシートが発売された場合、古いチャイルドシートにしか対応していないNeural networkを使用したシステムは誤判断する可能性が高く

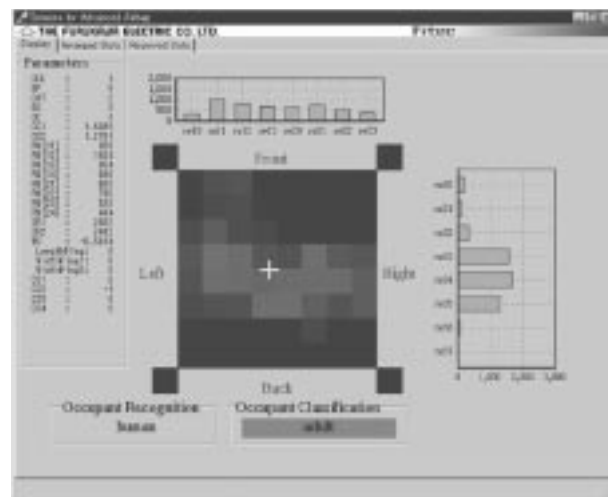


図11 プロトタイプ機による測定例（小柄な女性の場合）
Example of prototype system display (small female, sitting)

なり、新型チャイルドシートをユーザーが使用できないという点が挙げられる。パターン学習とFuzzyルールを併用した判断方法の検討⁹⁾もなされているが、我々は圧力ピークが認められる位置とピーク周辺の荷重データとの関係から人と物とを判別するアルゴリズムを検討している。

そこで人と物とを判断するアルゴリズムと上述した体格クラス分類アルゴリズムとを搭載したプロトタイプ機を試作した。このプロトタイプ機を作製するにあたって、実験機では判断できなかった極端な前座りに対しても荷重分布を計測できるようにするために、前後方向の感圧点ピッチを拡大して着座部の全面をカバーする範囲に8行8列（64点）の感圧点を配置した感圧フィルムセンサを新たに作製した。プロトタイプ機は、各感圧点の圧力を計測し荷重分布データから乗員情報を判断する信号処理ユニットとパソコンで構成し、パソコン画面上に信号処理結果を表示、測定データを保存できるようにしている。更に、乗員クラス分類アルゴリズムにおいては信号処理ユニットの負荷を低減するために、近似曲線を算出しない簡素化した処理に修正している。このプロトタイプ機による判断結果の例を図11に示す。図中の中央部は8行8列（64点）の荷重分布を示しており、濃淡が変化している部分に荷重が加わっていることを示している。上部と右部のバーはそれぞれ列と行データの和を示しており、+は測定荷重の重心位置を示している。この測定例は小柄な女性が左足を前に伸ばした姿勢（写真2参照）で着席した場合の測定結果であり、感圧点を設置している範囲をシ



写真2 測定状況
View of a measurement situation (small female, sitting)

ートクッション前端付近まで広げたことにより、左大腿部下の荷重も計測できている。また、乗員体格判断結果も成人が着席していると正しく判断できている。

6. おわりに

車載環境で使用可能な感圧フィルムセンサの開発を行い、その感圧フィルムセンサより得られる荷重分布情報から乗員体格判断を行う方法の検討を行った。その結果、今回検討した判別方法を用いて乗員を成人と子供の2クラスに分類する場合、90%程度の判別正解率が期待できることがわかった。

今後は試作したプロトタイプ機を用いて乗員姿勢による影響やチャイルドシートなどの物が座席に搭載されている場合の判断について検証し、フィールドにおける利用状況を加味した判断精度について検討し、実用上の問題点を明確にしたいと考える。

謝辞

車載用感圧フィルムセンサ開発において、ニッタ（株）RETS事業部の上田敦氏と初田雅弘氏に感圧インク及びセンサセル構造を検討していただきました。判断アルゴリズム検討において、パターン認識手法の適用に関して古河インフォメーション・テクノロジー（株）科学技術センターの荒井憲一氏に検討していただき多くの示唆をいただきました。実験機作製に関してニッタ（株）RETS事業部の斗米 徹氏と藤崎達也氏にハード設計やソフト開発に御協力いただきました。また、プロトタイプ機開発では古河インフォメーション・テクノロジー（株）科学技術センターの有馬康弘氏に御協力いただきました。

最後になりましたが、判断アルゴリズム検討実験において古河電気工業（株）従業員とご家族に快く御協力いただきました。このほか、多くのかたのサポートなくして開発は進みませんでした。この場をかりて、皆様に心より深謝いたします。

参考文献

- 1) 例えばU.S. Department of Transportation NEWS November 22, 1996 : NHTSA ANNOUNCES COMPREHENSIVE PLAN TO IMPROVE AIR BAG TECHNOLOGY AND REDUCE AIR BAG DANGER
- 2) K. Jinno et al.: SAE PAPER 971051 (1997)
- 3) G. Wetzel et al.: SAE PAPER 971047 (1997)
- 4) K. Kompaß et al.: SAE PAPER 960226 (1996)
- 5) 水上ほか：日本パラプレジア医学会雑誌，7（1994），114
- 6) 吉野ほか：科学警察研究所報告 法科学編，39（1986），1
- 7) 寺沢ほか：日本法医学誌，39（1985），35
- 8) 河内ほか：製品科学研究所研究報告，120（1991），51
- 9) W. Fultz et al.: Vehicle Safety Restraint Systems: Performance, Technologies, and Implementation Strategies, TOPTEC, August 10, 1999 Costa Mesa, California