168 スマート・タイヤモジュールの基礎的研究 (第1報 通信システム)

Fundamental Study of Smart Tire Module (1st Report : Wireless Communication System)

正 藤田 隆史(東大生研) 〇正 大堀 真敬(東大生研) 吉田 秀樹(東京ガス) 正 水津 洋二(ブリヂストン)
正 鈴木 重信(ブリヂストン) 正 正木 信男(ブリヂストン) 中尾 誠(ブリヂストン)

Takafumi FUJITA, IIS University of Tokyo, Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo
Masanori OHORI, IIS University of Tokyo, Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo
Hideki YOSHIDA, Tokyo Gas Corporation, Kaigan 1, Minato-ku, Tokyo
Yoji SUZU, BRIDGESTONE CORPORATION, Ogawa Higashi-cho 3-1-1, Kodaira-shi, Tokyo
Shigenobu SUZUKI, BRIDGESTONE CORPORATION, Kashio-cho 1, Totsuka-ku, Yokohama
Nobuo MASAKI, BRIDGESTONE CORPORATION, Kashio-cho 1, Totsuka-ku, Yokohama
Makoto NAKAO, BRIDGESTONE CORPORATION, Ogawa Higashi-cho 3-1-1, Kodaira-shi, Tokyo

This study aims at a system to measure pressures and temperatures of tires of a car and forces acting between the tires and the road surface, and to transfer the body the measured data by realtime wireless communication. The real-time measurement of the forces between the tires and the road surface will greatly improve performance and reliability of the vehicle dynamics control systems including antilock breaking systems, traction control systems, and vehicle stability control systems.

Keywords: Smart Tire Module, Wireless Monitoring, Smart Structure, Short-Rage Wireless Cominucation

A 1. 研究の背景と目的

メカトロニクス技術の進歩は極めて目覚しく、応用分野の一つとしてスマート構造やスマートシステムと呼ばれる技術が注目されている。これは構造部材にセンサ及びアクチュエータを組み込んで、本来の機能を高めるものである。本研究では、自動車用タイヤにセンサを組み込み温度、圧力に加え路面との接触力を常時計測し、車載側の様々な制御システムに反映可能なモジュールを作り上げることが目的である。

自動車交通システムにおいて最も基本要素であるタイヤにも高知能化が求められているのは必然的な流れであるが、構造が比較的単純なため「高知能化」の導入は容易ではない。本論文では、車載側のシステムとは微弱無線を利用することでデータリンクを構築する可能性について検討した。計測データは温度、圧力を対象としているが、後に接地力の計測に発展させることを意図している。

A 2. 計測システム

Fig. 1 に計測システムの概念図を示す。本システムは、PC側の制御ユニットからのデータ要求信号に呼応して、タイヤ側の検出ユニットが複数のセンサ出力(圧力、温度、ひずみ)を走査し指定のデータフォーマットに整列し、返信するシステムである。ユニット間の通信は免許不要な

Fig. 1 System Configuration

315MHzの微弱無線で行われる。その制御については、検出ユニット側はマイクロコンピュータで行い、制御ユニット側はパーソナルコンピュータを用いてシリアル接続で行う。

A 3. 通信実験

Fig. 2 に示す車体を模擬したタイヤ回転試験装置を使って通信状態を調べた。最高約 100km/h 相当の試験が可能である。

制御ユニットを固定し検出ユニットを内蔵したタイヤを用いた。初めにタイヤを 10 度ずつ回転させ、各位置で静止状態での通信状況を調べた。位置関係が通信状態に与える影響は見られず、どの位置でも通信状態は良好であった。

次に回転速度が 0~500rpm までの範囲で、一定速度で回転中であっても通信状態は悪化しないことが確認できた。さらに回転速度を連続的に変化させながら計測を行ったが、通信状態は悪化しないことが確認できた。

以上の確認のうえ実際にタイヤの温度と圧力を変化させた計測を行った。いずれの場合もリアルタイムで計測できることを確認した。

しかし、通信システムを実際の使用を想定した電波強度に絞ることと同時に、通信速度を高速化したところ通信の品質の低下傾向が見られた。また、回転により電波強度の変化が確認されたが電波強度の実際的な検討は不十分である。また外部との干渉を受けない条件及び通信速度の高速化により通信の信頼性が低下する傾向を考慮のうえ、今後実車に搭載し、安定した通信が行える条件を検討する必要がある。

Fig. 2 Tire Rotating Test Machine

1. はじめに

メカトロニクス技術の進歩は極めて目覚しく、応用分野の一つとしてスマート構造やスマートシステムと呼ばれる技術が注目されている。これは構造部材にセンサ及びアクチュエータを組み込んで、本来の機能を高めるものである。本研究では、自動車用タイヤにセンサを組み込み¹⁾温度、圧力に加え路面との接触力を常時計測し、車載側の様々な制御システムに反映可能なモジュールを作り上げることが目的である。

自動車交通システムにおいては高速道路の自動料金収集システム(ETC)に代表されるように様々な形でIT技術の導入が試みられている。一方で個々の車の性能向上を目指した電子制御技術の進展も著しいものが見られるが、中でも安全性能は基本的な課題²⁾³⁾であり、先進技術を活用した多様な研究開発を通して、より高度な安全装備、安全なシステムの実用化が推進されてきた。こうした自動車の高知能化が進められる課題の一つに、最も基本要素であるタイヤにも高知能化が求められているのは必然的な流れである。しかし重要な要素部品であるにもかかわらず、構造が比較的単純なため「高知能化」の導入は容易ではない。

本研究では、微弱無線⁴⁾を利用したタイヤ空気圧警告システムや操舵支援システムのような制御・安全技術のための計測システムを統合して内蔵したタイヤのスマート構造を提案する。現在の経験的に構築され積み重ねられて複雑化したロジックと肥大化したECU(Electronic Control Unit)では将来的により高度な制御が困難になると予想されるが、タイヤを高知能化し計測システムを一つにまとめることにより、様々なシステムの協調統合とさらに高度な技術の実現が可能となる。また、リアルタイムで直接計測することで、より信頼性の高いシステムを構築することができる。

2. 計測システム

Fig. 1 System Configuration

2. 1 システムの概要

Fig. 1に計測システムの概念図を、Fig. 2に詳細を示す。本システムは、PC側の制御ユニットからのデータ要求信号に呼応して、タイヤ側の検出ユニットが複数のセンサ出力(圧力、温度、ひずみ)を走査し指定のデータフォーマットに整列し、返信するシステムである。ユニット間の通信は無線で行われる。その制御については、検出ユニット側はマイクロコンピュータで行い、制御ユニット側はPCで行う。Fig. 3に両ユニットの写真を示す。

2. 2 微弱無線システム

本システムで使用する無線信号は免許を必要としない微弱無線とする。日本国内で規定されている周波数と電界強度の関係をfig. 4に示す。これは3m離れた距離での電界強度を示したものであり、この規定内であれば免許は不要である。本システムでは315MHzを使用する。

2. 3 通信データのフォーマット

本研究では図2に示すように検出ユニットに8chのAD変換器が内蔵されているマイクロコンピュータを使用する。したがって最大8chの計測データの収集が可能であるが、システムとしての通信の可能性を確認するテストを主目的とした初期段階ではセンサ入力は温度と圧力の2chを使用することとする。使用しない6chは現時点では暫定的にゼロを入力することとする。

通信データフォーマットはマンチェスター符号化された312bitの packets単位で行われ、各 packetsはそれぞれの先頭にはプリアンプルが付きデータ認識の開始としている。

Fig. 2 System Configuration(detail)

Fig. 3 Detector Unit (left) and Control Unit (right)

Fig.4 Relation between Field Intensity and Frequency

また各パケット信号の最後には誤り訂正用のCRCチェックに用いるFCS(Flame Check Sequence)を付加して信頼性の向上を図っている。マンチェスタ符号化後のそれぞれのデータ長は24bitであり、1回の計測にかかる時間は約17msec(約57Hz)である。なお、今回初めに実験に用いたRS232Cのボーレートは38.4kbpsである。このシリアル通信ポートもマイクロプロセッサに内蔵されており、この機能をそのまま用いている。その後マイコンを書き換えて76.8kbpsとしたことで計測間隔は約100Hzとなった。なお、この速度はマイクロプロセッサの最高速度であるとともに、実車装着時を考慮した時に時速約120km/hでタイヤ回転あたり6~7回のサンプリングを実現する速度である。測定対象が温度、圧力の場合はこのような高速サンプリングは必ずしも必要ないが、車輛の運動制御に反映することを考えた場合高速サンプリングは重要な要素となることが考え

Fig. 5 Tire Rotating Test Machine

られる。実際にこのサンプリング速度で十分かどうかは現時点では判断できないが、現有のハードウェアで限界を確認することとした。

3. タイヤ回転試験機

実際にタイヤを回転させ、無線通信の状態を確認するため、Fig.5に示すタイヤ回転試験機を製作して実験を行った。Fig.5にはその概観の写真と詳細図を示した。外形は実車のタイヤハウジングを模倣したカバーが付けられており、より実際の電波伝播状況を実現することを意図している。

検出ユニットはホイールの空気室側にネジ止めされている。基板上の圧力センサと温度センサでタイヤ空気室内の空気圧と温度を直接計測することができる。また、ひずみセンサや電源用の配線は空気室内から大気側へ出し、電池ボックスはホイールのスポークにネジ止めした。Fig.5にホイールに取り付けた検出ユニットの写真とホイールまわりの配線の写真を示す。

4. エラー・ノイズ対策

トランシーバの基本動作は送受信を繰り返す。無線モジュールの特性として切り替え時に不安定になる時間が存在する。この不安定状態の間のデータは通信の障害になり通信エラーを発生させる。そこでこの時間を回避することが必要になった。OSとしてMicrosoft Windowsの使用環境下で正確な時間管理を行うのは困難なので、外付けで時間管理用回路を新たに作成し制御ユニットに付け加えた。これにより通信の信頼性は向上した。

また回路駆動電源は電池を使用しているにもかかわらず、周囲に浮遊している50Hzのノイズが温度センサ出力電圧に乗るといった問題が発生した。本システムはフルレンジ

Fig. 6 Wiring in Wheel

Fig.7 Location of Wireless Units

2V で AD 変換するので可能な限りノイズを抑制させたい。そのため検出ユニットの配線部分を電磁シールドすることでアナログノイズの抑制を行った。

5. 通信実験

5. 1 位置関係が通信状態に与える影響

検出ユニットと制御ユニットを Fig.7 のように配置し、タイヤを 10 度ずつ回転させ、静的な状態で各位置での通信状態を調べた。この時回転するに従ってアンテナ相互の位置関係が変化し、アンテナの指向性が電波強度に影響することが考えられる。Fig.8 は次に説明する回転状態での

Fig.8 Radio Wave Strength History

315MHz の搬送波について電波強度の時系列変化を計測した結果である。図(a)の大きなうねりは回転位置に対応しており電波強度が位置関係の違いによって変動している様子を表している。図(b)は電波強度が弱くなった位置での電波強度の変化を拡大表示したものである。この図から電波強度が弱くなる位置関係に於いても通信が行われている様子が推察できる。

本通信システムにおいて電波強度の変動に対して常に通信状態が保たれることが必要な条件である。実際に通信ユニット同士がどのような位置関係にあっても通信状態に与える顕著な影響は見られず、どの位置でも通信状態は良好だった。

5. 2 回転速度が通信状態に与える影響

初めに回転速度を 0~500rpm まで 50rpm ずつ変化させ、それぞれの一定回転速度での通信状態を調べた。

次に回転速度を 0rpm→250rpm→500rpm→250rpm→0rpm と変化させながら計測を行った。これは各ユニットの相対変化速度が通信に及ぼす影響を調べることになる。

Fig.8(b)の波形から回転状態でも信号らしきものは送信されていることが推定されるが、正確なデータが授受されているかは分からない。しかし、ここで実際に通信を行った結果いずれの場合でも良好な通信状態が実現されていることが確認できた。

Fig.9 Measured Results of Decompression Process

6. 計測性能確認実験

静止状態と回転状態（500rpm）でタイヤの空気を抜きながら計測を行い、圧力変化をリアルタイムで計測できることを確認した。装置の構造上タイヤ回転時の圧力変動はバルブから流出する空気量を調節することしかできない。

さらに同様な条件で、ヒータで加熱することによりタイヤ周囲の温度を変えながら計測を行い、温度変化をリアルタイムで計測できることを確認した。その測定例を Fig.9 に示す。このとき、わずかながら圧力上昇も計測された。

7. 装置の高性能化による影響

以上では比較的強い電波状態により実験を行ったが、通信のボーレートが 38.4kbps の場合に比較して 76.8kbps と高速化した場合には通信エラーが多発する傾向が見られた。

一般に電波による結合はアンテナの利得により大きな影響を受けると同時に、周囲環境による吸収、反射等の影響も非常に大きい。従って純粋に定量的な表現は難しく、あくまで可能性を検討することを目的とした定性的なものであった。今後現実に即した使用に対応することを考慮して送信ユニットの基本的な電波特性を定量的に把握することは重要な要素の一つになる。上記ボーレートを上げたことによる通信の信頼性が低下した原因を追究するためにも定量的特性の把握は重要である。

そこで送信ユニットの電波強度を電波暗室で測定した。Fig.10 はその時の結果である。横軸は電波の出力を調整する抵抗の値で、縦軸は 3m 離れた位置での電界強度である。電波強度はアンテナや周囲環境にも依存するが、ユニットのアンテナが計測用アンテナと平行の場合と垂直の場合、また、プリント基板上のアンテナのみの場合と外部アンテナを付加した場合の 4 通りの計測を行った。本装置には電波強度調整用の 100 k Ω の可変抵抗があり、これにより出力電波強度を変化させることができる。抵抗が小さいほど

大きな電流が流せ、出力も大きくなる。

この結果から、

- (1) アンテナが平行（水平）の時は垂直の場合に比べて約 10dB 大きくなる
- (2) 調節抵抗値が約 4 k Ω より小さくなった場合、電流値は増大するにもかかわらず電界強度は増大しない
- (3) 外部アンテナを付けることにより 5～10dB 電界強度が大きくなる

ことなどがわかる。また、この条件では調整抵抗が約 10 k Ω 以上で Fig.4 で示した法定範囲であることがわかる。この結果を参考に電波強度を調整すると総じて通信品質が低下し、また送受信機の位置関係により通信品質が悪化する場所が存在することが明らかになった。

9. 結論

制御・安全技術のための計測システムを統合して内蔵したスマートタイヤを提案し、その基礎的研究として、空気圧と温度をリアルタイムで直接計測できるシステムを検討し、実際に構築した。また、実用化を意図して電波強度の限界について検討を行った。その結果通信の信頼性を確保するためにはアンテナ効率や外乱雑音を考慮する必要があることが分かった。

10. 参考文献

- (1) William D. ,Siuru Jr, Sensing Tire Pressure On the Move, SENSORS , (1990) July
- (2) 日本エービーエス（株）編, 自動車用 ABS の研究, 山海堂, (1993)
- (3) 酒井秀男, タイヤ工学, グランプリ出版, (1987)
- (4) 清水当, 電波による無線データ伝送技術, CQ 出版社(1979)

Fig.10 Electric Field Strength