

動的走行抵抗模擬のためのスリップシミュレーション

Wheel Slip Simulation for Dynamic Road Load Simulation

Bryce Johnson

翻訳

池田 浩之

Hiroyuki IKEDA

近年燃費規制が厳しくなり、自動車メーカーはエンジンから路面までに至る全ての駆動系ユニットに対して高効率化を余儀なくされている。その為、駆動系ユニットとしてハイブリッド用トランスミッションやバッテリーは、多くの車両に搭載されるようになってきている。運転者は車両に対しても高性能を求め続けている。横滑り防止装置やアンチロック・ブレーキ・システムのような安全装置は一層複雑になってきている。これらの背景から、自動車メーカーはより一層の要求を、車両試験装置に求めるようになってきている。要求される試験に関しては、車両慣性や空気抵抗のような単純な車両負荷を模擬するだけではなく、過渡の駆動系負荷を模擬する装置が要求されている。以前は、SLR (Service Load Replication)を用いて過渡負荷を模擬することが可能であったが、トランスミッションのシフトチェンジや車載コンピュータからのトルク制限など、非線形の場合はSLRでは試験することができない。非線形の駆動系への過渡負荷を正しく模擬する唯一の方法は、車両シミュレーション、ホイール・タイヤ・路面モデルシミュレーションを導入することである。パワートレインコントローラ[SPARC]に実装されたHORIBAホイールスリップシミュレーションにより、このホイール・タイヤ・路面モデルシミュレーションを実現することができた。

Increasingly stringent fuel economy standards are forcing automobile manufacturers to search for efficiency gains in every part of the drive train from engine to road surface. Safety mechanisms such as stability control and anti-lock braking are becoming more sophisticated. At the same time drivers are demanding higher performance from their vehicles. Hybrid transmissions and batteries are appearing in more vehicles. These issues are forcing the automobile manufacturers to require more from their test stands. The test stand must now simulate not just simple vehicle loads such as inertia and windage, but the test stand must also simulate driveline dynamic loads. In the past, dynamic loads could be simulated quite well using Service Load Replication (SLR^{*1}). However, non-deterministic events such as the transmission shifting or application of torque vectoring from an on board computer made SLR unusable for the test. The only way to properly simulate driveline dynamic loads for non-deterministic events is to provide a wheel-tire-road model simulation in addition to vehicle simulation. The HORIBA wheel slip simulation implemented in the SPARC power train controller provides this wheel-tire-road model simulation.

^{*1}: Service load replication is a frequency domain transfer function calculation with iterative convergence to a solution. SLR uses field collected, time history format data.

はじめに

タイヤ・ホイールシミュレーションの必要性を理解するためには、まず、試験装置で再現すべき駆動系の動力学に関して理解する必要がある。テストコース上で、停止状態から急激に加速するマニュアルトランスミッション車両における、左側のホイールの速度とトルクの関係をFigure 1に示す。クラッチが瞬時に接続され、乾いた路上でタイヤがスピンし、車両のアクスルシャフトでトルクと速度の大きな偏差が発生していることがわかる。トルク応答と速度応答の重要な指標は、トルク変動および速度変動の周波数・振幅・減衰である。

車両駆動系の応答

タイヤ・ホイールの速度とトルクの振動応答は、駆動系内の複数の“ばね”-“質量”-“ダンパ”系によって引き起こされ、クラッチが接続されたときの支配的な周波数は駆動系の固有振動数である。その周波数は乗用車や軽トラックの場合、一般的に5 Hzから10 Hzの範囲内と言われており、二つの慣性と駆動系のばね定数に大きく依存している。

試験装置における車両

車両を試験装置にセットさせる時、タイヤとホイールが外され、ダイナモメータが代わりに取り付けられる。(Figure 3の黄色で示されるユニット)駆動系の応答を再現するためには、タイヤの慣性、減衰、ばね定数、タイヤ・路面を模擬しなければならず、“タイヤ”-“ホイール”の慣性は同等の慣性をもつダイナモメータと置き換える必要がある。それは、駆動系の固有振動数応答を正しく再現するための唯一の方法であったが、問題は、そのような低慣性を持つダイナモメータに使用されているモータの生産コストが非常に高いことにある。

HORIBAグループは、比較的安価なダイナモメータと“タイヤ”-“ホイール”の慣性を模擬するための特別な制御方法を用いてこれを解決した。今までの“ホイール”-“タイヤ”-“路面”を模擬するHORIBAグループのソフトウェアとハードウェアは、“ホイールスリップシミュレーション”と呼ばれ、路面抵抗を付加した“車両シミュレーション”を追加した。この“車両シミュレーション”は、HORIBAパワートレインコントローラSPARC上で実行される重要なソフトウェアである。

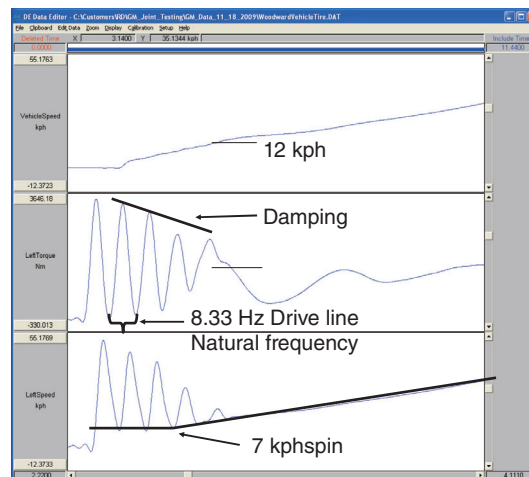


Figure 1

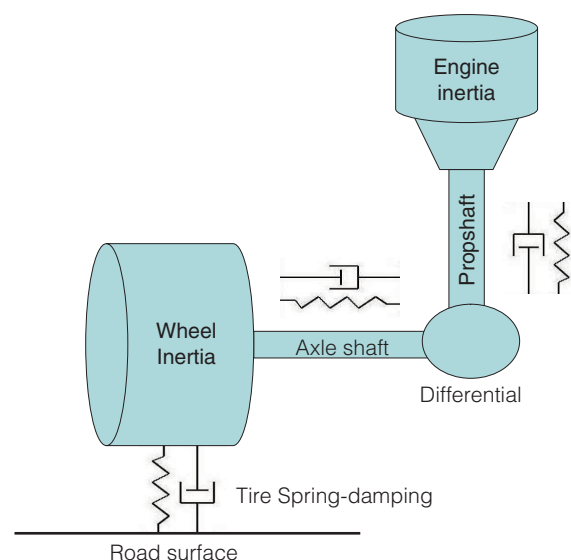


Figure 2

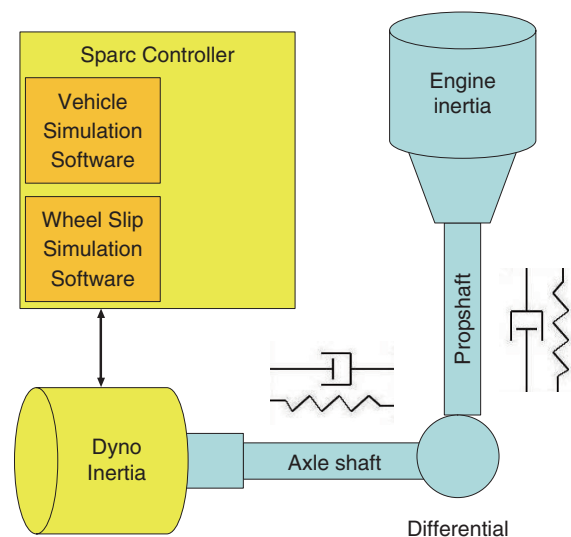


Figure 3

車両負荷シミュレーション

車両負荷シミュレーションソフトウェアは、RLS (Road Load Simulation)として知られている。基本的に、RLSには、車両重量シミュレーション、摩擦抵抗シミュレーション、空気抵抗、勾配シミュレーションが含まれている。車両重量シミュレーションでは、車両の重心に質量が集中していると仮定するのにに対し、ホイールスリップシミュレーションは、車両の動きに応じて操舵、加減速、および、制動時重量移動をリアルタイムに模擬するために、STARSの車両シミュレーションから、各タイヤモデルに車両重量が分配される。ホイールスリップは、車両シミュレーションと共に、過渡的なトルクイベントをサポートする目的で使用されている。ここで車両負荷は、車速の関数の式として表現される。

$$F_{Road} = K_A + K_B \cdot v + K_C \cdot (SpeedVehicle + v_{Headwind})^X + m \cdot g \cdot \sin(InclineHill)$$

$$F_{Veh} = T_{Measured} / RadiusWheel$$

$$SpeedVehicle = 1 / m_{Vehicle} \cdot \int (F_{veh} - F_{Road}) dt$$

上式から、駆動力と走行抵抗の差により、車両が加速されることがわかる。車両慣性とこの力で、車速を模擬する事ができ、実際に、50 mphから0 mphへコースト運転の模擬を行った場合の実車と模擬車両の比較をFigure 4に示す。この比較から、模擬(緑)が実車(青)に良く一致していることがわかる。

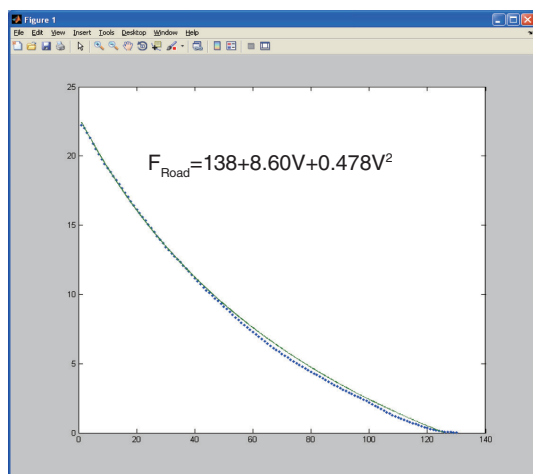


Figure 4

ホイールスリップシミュレーション

シミュレーションで適切な駆動系の動きを再現するために、試験装置には3つの要件がある。一つ目は、タイヤモデルを用いて駆動力とタイヤのスリップを模擬すること、二つ目は駆動系の固有振動数を再現するために“ホイール”-“タイヤ”の慣性を模擬すること。三つ目は、振動の減衰を制御することである。

タイヤモデル、スリップとは？

ほとんどの運転者は、濡れた路上や氷上でタイヤがスピンすることを良く知っている。しかし、乾いた路上を走行している場合にも、タイヤが常時少しだけスリップしていることはあまり知られていない、乾いたテストコース上の実車データをFigure 5に示す。車速は39.4 km/h、前輪は367 rpm、後輪は383 rpmである。実験車両は後輪駆動車であり、後輪は4600Nで駆動している。この図は、後輪は前輪より16 rpm早く回転していることを示している。以上から、この後輪は、4600Nの力で駆動している時に383 rpmで回転し、路面で16 rpmスリップしていることになる。路面を駆動する力に比例してタイヤがスリップするということがわかり、この滑りはホイールスリップと呼ばれ、車速を急激に加速させ駆動力を増加させると、力が最高点に達しタイヤが氷上のように激しくスリップする事をタイヤがスピンしている状態と言う。力とスリップの関係を再現するためには、タイヤモデルを試験装置に導入する必要がある。スリップの定義は、次式の通りである。

$$Slip = (V_{Tire} - V_{Vehicle}) / V_{Vehicle}$$

この式から、車速を前輪速度の367 rpm、タイヤ速度を後輪速度の383 rpmとすると、スリップは4.4%となる。

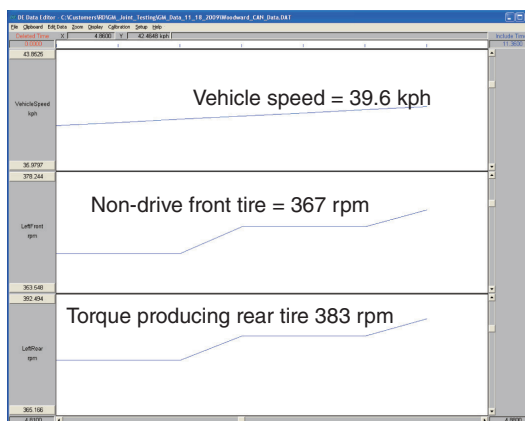


Figure 5

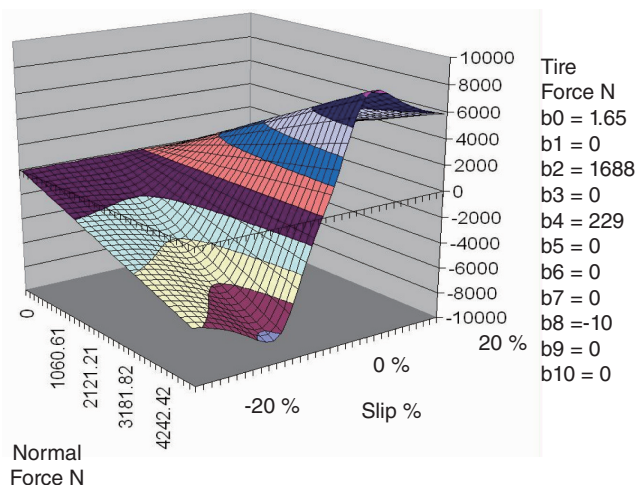


Figure 6

Pacejkaを使用した

駆動力とスリップのシミュレーション

これまで、駆動力とスリップを模擬する方法として、タイヤモデルを使用しタイヤのスリップとタイヤから伝達される力の関数として表現されてきたため、多くのタイヤモデルが存在する。その中で最も良く知られているモデルは、Pacejka-96タイヤモデルである。これはタイヤスリップの関数として駆動力を表現している。Pacejka関数は次式の通り。

$$F = D \sin(b_0 \tan^{-1}(SB + E(\tan^{-1}(SB) - SB)))$$

“F”は駆動力、“S”はタイヤスリップである。パラメータ、D、B、E、Sは、タイヤの垂直抗力とPacejkaパラメータ b_0 から b_{10} により決まる値である。 F_z はホイールにかかる垂直抗力である。STARSを用いて各タイヤの垂直抗力をリアルタイムに調整することで、重量分布が変化する車両の動きを再現することが可能である。

$$\mu_p = b_1 F_z + b_2$$

$$D = \mu_p F_z$$

$$B = (b_3 F_z + b_4)e - b_5 F_z / (b_0 \mu_p)$$

$$E = b_6 F_z + b_7 F_z + b_8$$

$$S = 100 S_{frac} + b_9 F_z + b_{10}$$

単純なモデルを使用した

駆動力とスリップのシミュレーション

多くの場合、試験者はPacejkaパラメータを入手する手段がない為、駆動力とスリップを表現する単純なモデルを用いることになる。スリップ”勾配”の二つから成り立つ

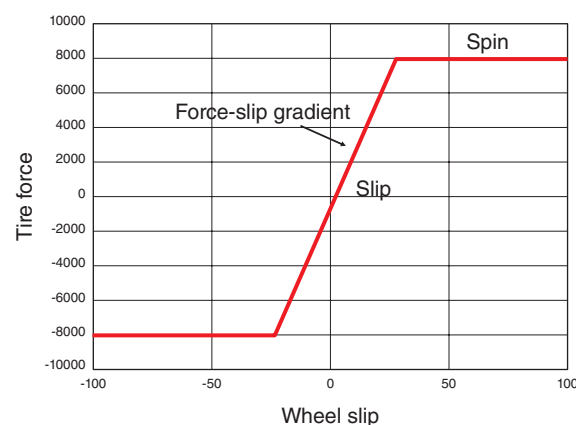


Figure 7

ているものを指し、この二つの値は実路データから比較的簡単に計算することができる。タイヤ勾配は、トルクの関数としてタイヤがスリップする運転領域を表しており、最大力は微小なスリップではなく、劇的にタイヤがスリップする運転領域を表している。また、特定の垂直抗力 F_z を存在させる駆動力も表し、タイヤの垂直抗力が変化する状況において、垂直抗力に比例して最大値が変化する。

イナーシャシミュレーションと減衰

適切なホイールスリップシミュレーションに必要なタイヤモデルシミュレーションは、3つの解決要素のうちの1つである。他の2つの重要な要求は、固有振動数と減衰を制御することである。固有振動数は、ホイールの慣性に大きく依存している為、“タイヤ”-“ホイール”の組合せ慣性を模擬することが極めて重要となる。一般的には、ダイナモメータの慣性がタイヤ-ホイール慣性より大きいことが問題になるため、ダイナモメータと“タイヤ”-“ホイール”の慣性の差を相殺する力が、ダイナモメータの慣性に付加されるよう、模擬する必要がある。これに対するHORIBAグループの解決方法は特許になっており、本文では、パラメータで調整というにとどめておく。同様に、減衰に関してもパラメータによる制御というにとどめる。

路面シミュレーション

実路面のシミュレーションには μ_p として Pacejka パラメータが組み込まれており、その値は摩擦係数のピーク値を表している。実際の摩擦係数を合理的に近似するには、 μ_p 値に、1/10から1までの値を持つ路面状態の摩擦係数 μ_n を乗ずることである。

下表に、路面 μ nの妥当な近似値を示す。

Table 1

路面状態	状態計数 μ n
完全路面	1.0
アスファルトおよび コンクリート(乾いた状態)	0.8-0.9
コンクリート(濡れた状態)	0.8
アスファルト(濡れた状態)	0.5-0.6
土砂道(乾いた状態)	0.7
土砂道(濡れた状態)	0.5-0.6
砂利	0.6
雪(固まった状態)	0.3
氷	0.1

摩擦係数 μ nは、路面の関数としてSTARSでリアルタイムに変化するパラメータで表され、実験者はこのパラメータを変更することで路面の変化を模擬することができる。実際の試験では、最初に両方のタイヤを乾いた路面状態に設定し、次に車両が加速されるにしたがい、一方のタイヤを例えば、雪の状態に変化させるといった試験を行う事がある。スプリット μ テストは、車両のトラクションコントロールの制御ロジックを試験するために行われる。

ダイナモメータサイズ

一般的には、コストと部品性能の妥協点を見つけながらダイナモメータの大きさを決定することがよくあり、過渡現象再現のためには低慣性で大きな駆動力が要求される。適切なダイナモメータの大きさを決定するためには、広範囲に渡って要求仕様を議論する必要がある。例としてはFigure 1に示す試験がある。これには、8000 rpm/sで加速性を持つダイナモメータが必要である。そのような試験装置には下記のような製品を提案している。

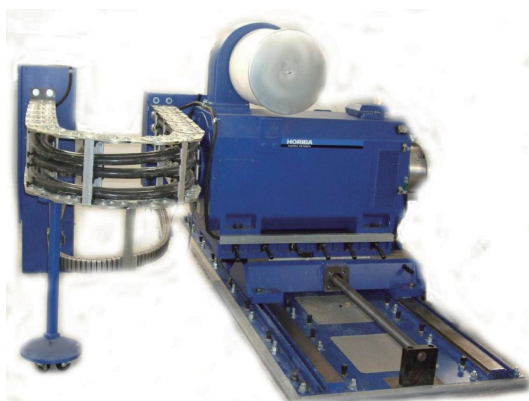


Figure 8

Dynas3 4000WH	223 kW
駆動力	600 kW
機械慣性	8.8 kgm ²
最高トルク	8109 Nm
最高角加速度	8800 rpm/sec

あるいは、下記の仕様の高性能PM4000モータと制御盤が想定される。

Dynas PM4000WH	330 kW
制御盤	600 kW
機械慣性	1.0 kgm ²
最高トルク	4200 Nm
最高角加速度	38,000 rpm/sec

この場合、安価なDynas3を使用することで、1/2以下のコストで顧客要求の最低限の角加速度を実現することが可能である。全てのダイナモメータは、ホイールスリップを再現することが可能であるが、角加速度を決定するトルク-機械慣性比によって、ダイナモメータのホイールスリップの動特性が大きく左右される。再現したい試験によっては、ホイールスリップの再現性と引き換えに振幅と周波数を減少させることで、ダイナモメータのコストを削減する場合もある。一般的に、ダイナモメータDynas3は、大型車両の低周波試験や、あまり急激でないホイールスリップ現象の再現に適している。また、ダイナモメータDynas PMは、小型車の、非常に急激なスリップ現象を再現する高周波試験に適している。

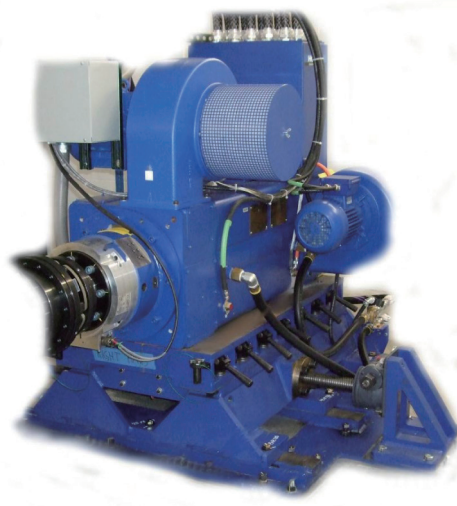


Figure 9

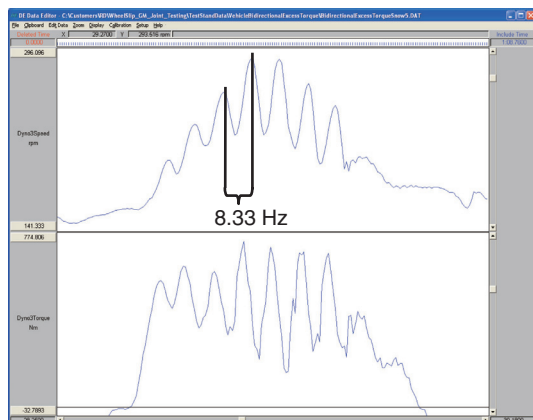


Figure 10

まとめ

駆動系固有振動数

Figure 1の試験では要求される角加速度が8000 rpm/sに対し、試験装置のダイナモメータは6000 rpm/sしかないので、Figure 1に示されるテストコースにおける車両の急峻な加速現象を再現することができなかったが、そのダイナモメータで他の現象の振幅の小さい駆動系の固有振動数を、再現することは可能であった。駆動系の固有振動数は機械慣性とばね定数の関数であり、減衰の影響をわずかに受ける。その結果、ほとんどの現象において固有振動数を再現することが可能となった。Figure 10は、エンジンの急加速によって引き起こされた雪上のスピン現象を示している。テストコースの乾いた路上を、車両が急速に加速する際の固有振動数は8.33 HzであることがFigure 1で示されたが、Figure 10にもそれが明確に示されている。

ホイールスリップモデル検証

ホイールスリップモデルを検証するために、駆動力とスリップからスリップ勾配を計算した。これは、101904 N/slipのモデルのスリップ勾配に一致する。Figure 11に、測定されたスリップ勾配が102,639であることが示されているが、これは、予測した値に対して差が0.7%以内である。最初に、トルク変換器からタイヤ駆動力を計算して求めてスリップは、車速と測定されたタイヤの回転数の差として算出し、勾配は駆動力をスリップで除して求めた。

おわりに

HORIBAグループは、現在、ホイールスリップシミュレーションを開発しており、実車データとホイールスリップシ

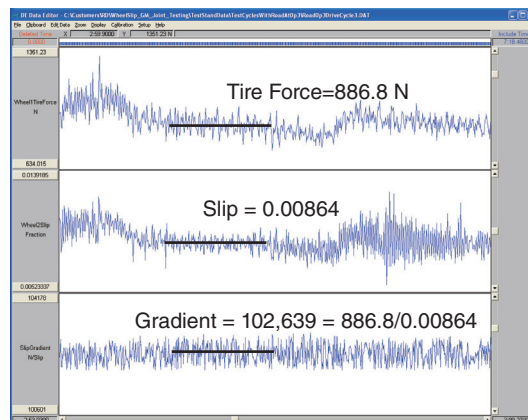


Figure 11

ミュレーションデータの相関を提示できるのも近い。要求される角加速度8000 rpm/sに対してダイナモメータが6000rpm/sしか無い場合でも、過渡現象の再現性が制限はあるが、ホイールスリップシミュレーションは可能となる。将来は、路面の凹凸などの精緻な路面シミュレーションや、ヨウセンサーによる車両制御が開発される。現在は、アルゴリズムにより、駆動系固有振動数がうまく再現されており、それにより、慣性シミュレーションが正しく動作していることがわかる。これは、ホイールスリップシミュレーションによるものであり、本稿で示したように2つのタイヤモデルの導入の成果である。試験では、適切な駆動力で“スリップ”-“スピン”現象が再現されており過渡スプリットμテストを実施することが可能である。さらに、車両のロールやコーナリング、加速によって引き起こされる重量配分変動をサポートする事で、個々のホイールへの動的重量調整も可能である。現行の導入したモデルは、市場要求の99%に対応できることを期待している。2タイヤモデルも本稿で論じたように導入した。市場要求が変化した場合であっても、コントローラSPARCは、その市場変化に対応すべくフレキシブルにモデルを拡張することが可能である。



Bryce Johnson

Principle Engineer
Automotive Test systems
HORIBA Instruments Inc.



翻訳

池田 浩之

Hiroyuki IKEDA

株式会社 堀場製作所
開発本部 エンジニアリングセンター
自動車計測システム設計部