フルトロイダルバリエータの構築

The Making of the Full Toroidal Variator

ロバート・フックス　R. FUCHS　田村　勉　T. TAMURA
ニール・マッカラ　N. MCCULLOUGH　松本こず恵　K. MATSUMOTO

The full toroidal variator and its main application in an infinitely variable transmission demonstrated that it has reached the required technical maturity. Although successful implementations on various vehicles, from mowers to SUVs, the technology remains largely unknown to most of the engineering community. The recent market shift, from the automotive to the industrial and agricultural sector, further widens the range of applications and technical requirements.

This paper revisits the key features of the full toroidal variator. Starting with the basic geometrical concept, the actuation as well as the control of the variator and the powertrain are then briefly reviewed pointing out the main mechanisms that permit to meet the requirements on high fuel economy, enhanced maneuverability as well as specific control objective of each application.

Key Words: full toroidal variator, torque control, geared neutral, IVT, CVT

1．はじめに

トロイダル式CVT（Continuously Variable Transmission）が1877年のC. W Hunt[1]により考案されて以来，ここ30年間の材料，潤滑油，トラボロジー，および制御分野における技術躍進によって，本技術による製品は市場に投入されるまでに成熟した．フルトロイダルバリエータは燃費性能，耐久性能，運転性能において目覚しい進歩を遂げ，量産を目指し開発が進められている．現在，フルトロイダルバリエータのニーズは乗用車から産業・農業車両領域へと拡大しており，これはフルトロイダルバリエータを組み込んだIVT（Infinitely Variable Transmission）がこの領域において利点を活かすことができるためである．IVTは燃費性能だけではなく，IVTの持つギヤードニュートラル機能によって運転操作性能（車両往復運転，低速運転）に対しても有効であることが知られている．その他の利点としては，変速機制御の柔軟性や，トランスミッションが純粋な機械構造であるため，電気ハイブリッド車両のような既存の競合技術と比べて相対的に長時間の高負荷運転が可能であること，オイル無交換化[2]を含めてメンテナンス工数が少ないこと，コストが低いことなどが挙げられる．

このフルトロイダルバリエータが特に日本の市場において注目されつつある今，フルトロイダルバリエータの全体的なコンセプトについて解説することは適時であるといえる．本報では，幾何構造にはじまり，作動原理，パワートレーン制御を含めたフルトロイダルバリエータシステム全体の構成について述べる．

2．フルトロイダルバリエータの幾何構造

フルトロイダルバリエータの幾何構造は比較的単純ではあるが，あいまいな点がいくつかあるので，本章ではこの幾何構造について整理する．**図1**にフルトロイダルバリエータの段階的な構成概念を示す．まず，**図1**(a)に示すようなトロイダル体積を考える．トロイダル断面と同じ直径を持つ球体をトロイダル体積部に挿入する（**図1**(b)）．トロイダル体積はその外形状と一致するような二つのディスクにより一意的に形成される（**図1**(c)）．フルトロイダルバリエータの名称は，ディスクの表面がトロイダル形状の表面を90度以上覆っていることに由来する．これを言い換えると，ディスクは球体をトロイダル体積内（キャビティ）に挟持していることを意味する．球体を薄く切断して形成されるローラは一方のディスクから他方のディスクへ動力を伝達し，滑らかな変速比シフトを実現する（**図1**(d)）．**図1**には示されていないが，球体の切断面に対して垂直な面に沿って形成される頂点半径を変えることで，接触面積の調整が可

能である．**図 1** (e) はフルトロイダルバリエータの主構成要素であるディスクとローラを示している．**図 1** (f) に示すように，一般的には一つのキャビティを有するフルトロイダルバリエータは二つのディスクと三つのローラから構成される．

当社ではこれまで，これら二つの主構成要素を開発してきた．これらには転がり軸受のコア技術を応用してきたが，車両メーカの要求により開発した高面圧・高温下での耐久性を確保できる軸受鋼 KUJ7 の適用もその一つである．また，IVT 部品の製造コスト低減のために，転がり軸受の標準的な加工工程，熱処理，表面処理技術が適用されている．

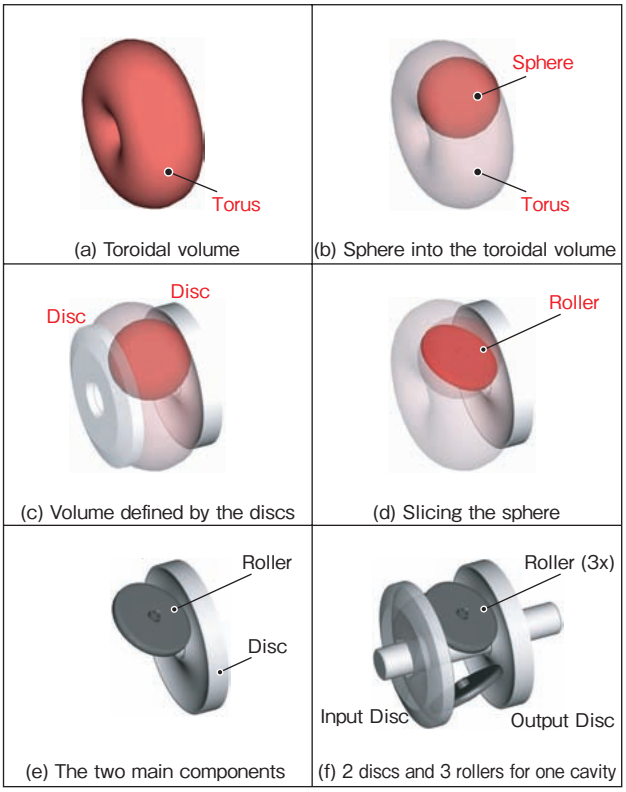

図 1　フルトロイダルバリエータの幾何構造
Geometry of the full toroidal variator

3. フルトロイダルバリエータの作動機構

本章では**図 2** に基づいて，フルトロイダルバリエータの作動機構について述べる．

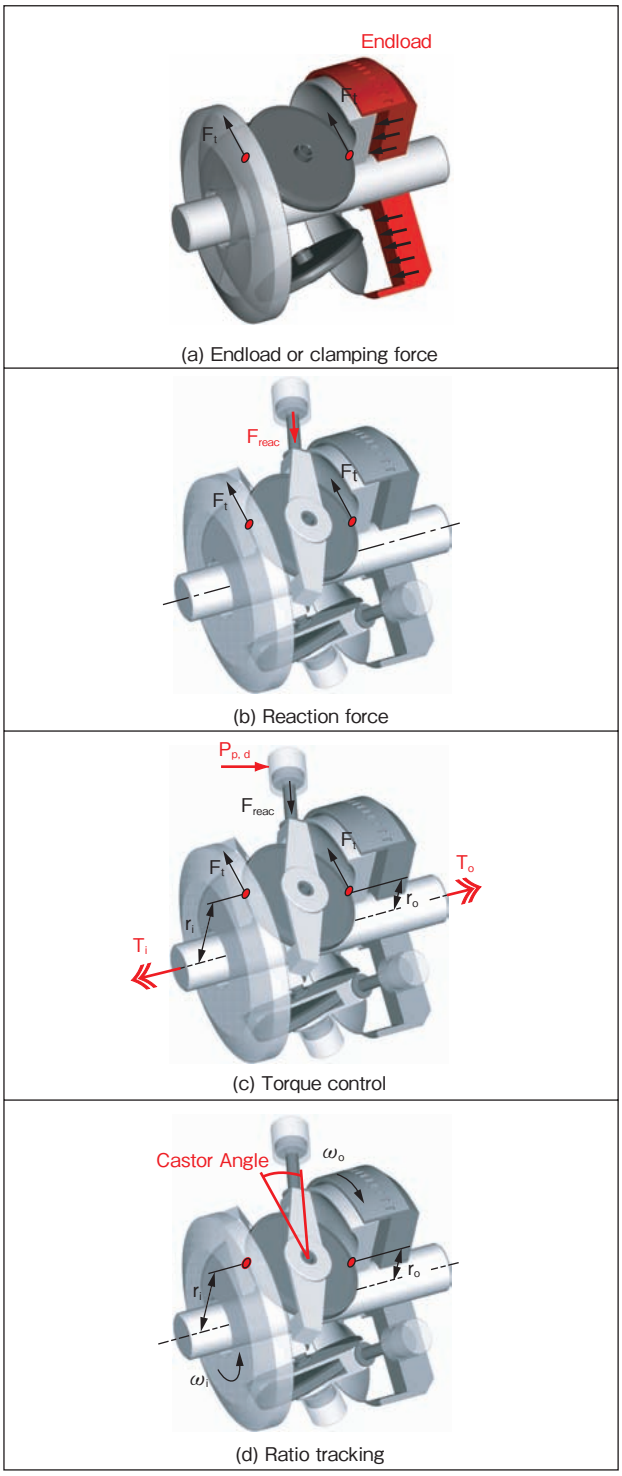

図 2　フルトロイダルバリエータの作動
Actuation of the full toroidal variator

3.1　エンドロード

トロイダルバリエータは，ディスクとローラ間の接触点に発生するトラクション力により動力を伝達する．接触点は高面圧となり完全な EHL（弾性流体潤滑）状態となる．このような高面圧の条件下では，接触点におい

て金属表面同士が互いに接触することなく，介在する油膜の微小なせん断により十分な力を伝達することができる[3]．EHL 状態にするために必要な接触面圧は一般的に 1 ～ 4GPa 程度であり，これはローラを挟持する一方のディスクに与えられた油圧によって発生するクランプ力あるいはエンドロードによって達成される（**図2**(a)）．このようなエンドロードを適用することで，それぞれの接触点でトラクション力が発生する．この力は乾燥摩擦力と類似の方法で定義され，接触部のスリップ等に依存するトラクション係数に支配される．摩擦式変速機に共通する主な欠点は接触点で発生する損失である．正確にはトロイダルバリエータの接触損失はスピン損失とスリップ損失の二つに分類され，それぞれトルクと速度に依存する．フルトロイダルバリエータの幾何構造上，特にそのスピン損失が大きく，接触効率を不利にしていることが知られている．しかし，フルトロイダルバリエータの場合，ローラはキャビティの内側に幾何学的に拘束されているため，追加損失の原因であるスラスト軸受を必要としない．このため，不利となる接触効率は，ローラ軸受との間で部分的に相殺されることになる．また，エンドロードを増加させることで機械的な制限なしに，より大きな動力を伝達できることも主な利点である．さらに，三つのローラを配置することで安定かつ適切にディスクからの軸力を他の部品に分配できるため，アンバランスによる部品の寿命低下を防止できる．

3.2　リアクション力

トラクション力に対する反力（リアクション力）を受けるため，ローラは油圧ピストンに接続されたキャリッジに取り付けられている（**図2**(b)）．この図は，フルトロイダルバリエータのシングルキャビティのすべての機構を示しており，部品点数が少ないことが分かる．エンドロードは接触点を介して動力を伝達するために必要なバリエータ駆動部であったが，ピストンは伝達力を制御する機能を有した駆動部である．接触点で発生するトラクション力はピストン圧力を作動することで制御できる．伝達トルク $T_{i,o}$ はトラクション力 F_t と接触半径 $r_{i,o}$ を乗じたものであるため，ピストン圧力と伝達トルクには直接の関係がある（**図2**(c)）．パワートレーン制御の観点からこのバリエータにより得られる利点の一つは，トルク作動性能の良さである．これによってエンジン負荷やホイール伝達トルクを容易に把握することができる．さらに，フルトロイダルバリエータはディスクの直径や三つのローラ配置による動力伝達などの幾何構造の特徴から，われわれの知る限りでは CVT の中でも最も大きなトルク容量を持っている．したがって，その用途は 20 ～ 300kW までのエンジンを搭載した車両まで多様である．このことから，フルトロイダルバリエータは乗用車を含む芝刈り機から大型トラックまでの広範囲の車両に適用可能である．

3.3　キャスタ角

ここでは，変速比シフトを可能とするためのトルク制御の主な作動機構について述べる．**図2**(d) はキャスタ角を示しており，ローラ支持軸はこのキャスタ角の方に傾いているため，ローラは自動調心の特性を有する．これは自動車のステアリングシステムにおけるキャスタ角と同様の役割を果たし，ローラは自動的に変速比に追従するため，位置制御の必要はない．したがって，フルトロイダルバリエータは変速比制御のためのフィードバックを必要としない．このようなバリエータをパワートレーンへ適用することで，すべての CVT の目的であるエンジンからホイールへの動力の伝達を，単純な制御のみで行うことができる．これはフルトロイダルバリエータに特有の技術である．

3.4　油圧

ここでは，**図3**に示すフルトロイダルバリエータを駆動するための油圧回路について述べる．**図3**(a) はトラクション力とローラのピストン力との平衡状態を示している．ローラキャリッジを閉じた油室を持つ油圧ピストンに接続することで，変速比が一定であるときの伝達トルクを予測することができる．実際には，測定された油室の圧力から伝達トルクを計算する（**図3**(b)）．変速比が一定である場合，必要とされるトルクは減圧弁から構成されるシンプルな油圧制御回路によって発生させることができる（**図3**(c)）．この減圧弁はフィードバックを適用しなくても，精度良く圧力を制御することができる．前述のように，ローラキャリッジはキャスタ角の方向に傾いているため，ディスク間の変速比に応じてローラの位置は幾何学的に追従する（**図3**(d)）．エンドロードの圧力はシャトル弁によって二つの油室の高圧側圧力となるように設定される（**図3**(e)）．この油室とエンドロードとの接続によって接触力とトラクション力の最適化が可能となり，ローラとディスク間のグロススリップ（過大な滑り）を避けることができる．

一方，その他のバリエータでは機械式カムをクランプ力として適用している．この機構でも伝達トルクに応じた適切なエンドロードの調整は可能であるが，フレキシブルではない．これは，この機械式カムがバリエータのすべての運転条件において接触部が過負荷となるように設計されるためであり，結果として効率の点で不利となる．クランプ力を最適化するために，油圧によるアクティブなシステムも開発されている．この方法は，機械式カムよりフレキシブルである．しかし，制御の観点からそのロバスト性，コスト，複雑さが主な欠点となっている．

図3には示されていないが，フルトロイダルバリエータではローラの負荷が均一になるように，ピストンが並列に接続されている．そのため，すべてのピストン圧力が等しくなり，ローラの伝達トルクは均等に分配される．また，フルトロイダルバリエータ自体がトルクセンシングの基本特性を持っているため，その油圧回路はシンプルであり信頼性が高い．

4．バリエータユニットの例

量産用バリエータユニットの例として，**図4**に入力軸と出力軸が同軸に配置された二つのキャビティを持つバリエータを示す．すべてのピストンはディスクの下側に配置され，レバー式のキャリッジを介してローラと接続される．このため，従来のトランスミッションと同様の方法で油圧回路を組み付けることができる．

ここでは，バリエータユニット全体としてのシステム効率に焦点をあてる．従来は幾何学構造に起因するフルトロイダルバリエータ固有の接触効率のみに着目されることが多かった．しかし，接触効率のみではバリエータシステムの効率を議論する上では不十分であり，ローラキャリッジの機構，クランプ力の作動機構やバリエータをトランスミッションへ実装するために必要とされるギヤについても同等に着目すべきである．前述のように，フルトロイダルバリエータの構造は他の競合技術に比べて多くの利点を示す．現在，さらなるシステム効率向上のための新機構についても開発中である[4)]．

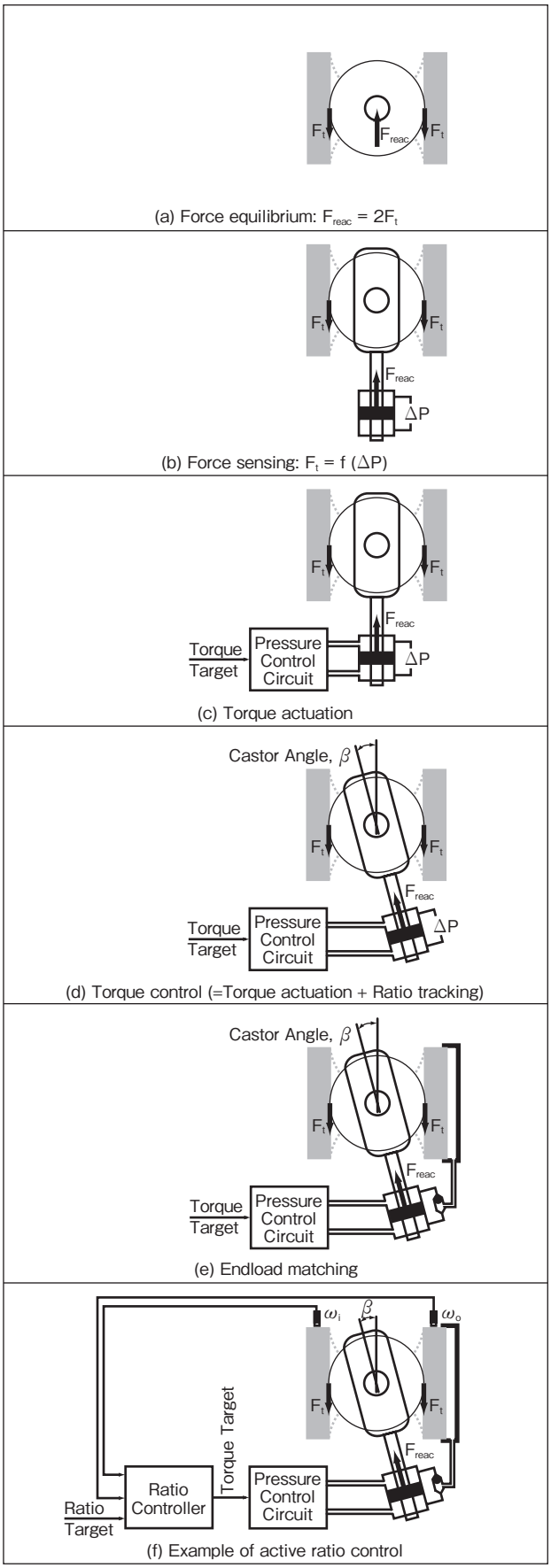

図3　油圧による作動
Hydraulic actuation and variator control

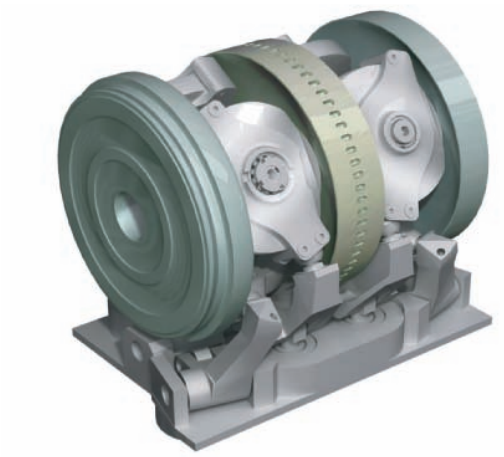

図4　バリエータユニットの例
Example of full toroidal variator unit

5. フルトロイダルバリエータの制御

本章では，フルトロイダルバリエータによるトルク制御と変速比制御の二つの制御方式について言及する．

変速機は多くの場合，変速比制御であり，駆動入力が変速比を直接決定する．変速比制御の駆動入力が一定である場合，駆動入力はいかなる外部速度変動に対しても独立であるため変速比は固定されたままである．通常，変速比制御は変速比を計測してフィードバックする．一方，フルトロイダルバリエータはトルク制御であるため，駆動入力が伝達トルクを直接決定する．結果的に，駆動入力が一定の場合，変速比はディスク間の変速比変化に応じてシフトする．また，フルトロイダルバリエータによるトルク制御はフィードバックを必要としないオープンループ制御である[5]．

このトルク制御にはいくつかの利点がある．一つは，IVT（バリエータと遊星ギヤの組合せ）はアクティブな制御なしでギヤードニュートラルを実現できることである．ローラはギヤードニュートラル時のディスクの変速比に自動的に追従するため，付加的な制御は一切必要としない．クリープトルクが必要なときには，それに応じてピストン圧を増加させればよい．二つ目の利点は，伝達トルクを正確に把握できることである．トルク制御の特徴は外部速度変動に対する変速比感度の高さに帰結される．いくつかの用途において変速比制御が必要とされる場合がある．トルク制御型フルトロイダルバリエータは，トルク応答が変速比応答に比べて相対的に速いため，**図3**(f) に示すような変速比フィードバックを追加することで容易に変速比制御型へ変換することができる．ただし，**図3**(e) と**図3**(f) を比較すると，変速比制御に比べ，トルク制御の方が基本構成がシンプルである．一方，変速比制御型のバリエータでは，アクティブフィードバックを適用してトルク制御を行ったとしても，高性能は期待できない．

6. バリエータを含むパワートレーンの制御

フルトロイダルバリエータは開ループのトルク駆動装置であるため，その主な利点はパワートレーン制御を考察することで明確となる．伝達トルクを正確に制御できるため，エンジン負荷とホイールトルクを知ることができる．このことから制御対象に関係なくパワートレーンの制御手法を効果的に機能化させることができる．自動車のパワートレーン制御の目的は，効率最適化のためにエンジン速度を制御しながらアクセルペダルの位置を車両の動力に結びつけることである．産業・農業用車両においての制御の目的は，エンジン効率の最適化という側面もあるが，主に車両速度を制限することにある．リアルタイムで制御対象を容易に線形化できるため，いずれの制御目的も複雑な制御を適用せずに達成することができる．したがって，コントローラゲインは通常二から四つ程度と少なくてよい[6] ため，車両パラメータチューニングに必要な工数とそれに関連するコストを削減できる．

図5はフルトロイダルバリエータをパワートレーンへ適用したときの概念図である．回転する慣性体の動特性はオイラー則により記述することができ，慣性体に加わるトルクの和がゼロ，すなわち $T_1 + T_2 = 0$ の場合，加速は発生せず $d\omega/dt = 0$，速度は一定で $\omega = \mathrm{const}$ となる（**図5**(a)）．トルクの和がゼロとならない，すなわち，$T_1 + T_2 \neq 0$ の場合，慣性体は加速し $d\omega/dt \neq 0$ となる（**図5**(b)）．慣性体の速度制御は典型的な制御の問題であり，モータにより容易に実現できる．モータは入力される電流によってトルクを制御できる電動アクチュエータである．速度指令値と速度計測値（フィードバック）の差を取ることで計算された慣性体の速度エラーは，モータを駆動する電流指令値を計算するための制御器へ送られる（**図5**(c)）．このような速度制御の問題は，電動モータの代わりにフルトロイダルバリエータを適用することでも解決できる．バリエータは油圧入力によりトルクを制御できる油圧－機械式アクチュエータである（ただし，比例電磁弁へは電流が入力される）．制御器は速度エラーからバリエータへの圧力指令値を計算

する（**図5**(d)）．これら二つの仕組みの主な違いはバリエータに動力源がないことである．パワートレーン全体を考えた場合，車両は制御対象となる慣性体であり，動力源はエンジンである．**図5**(e) に産業・農業用途に共通の車両速度制御の例を示す．この場合，エンジン速度は速度調整機によって局所的に制御されている．**図5**(f) はこれと反対の構成を示しており，制御対象となる慣性体はエンジンである．エンジンは動作点が最高効率点に維持されるように制御される．この場合，車両速度は直接制御されない. 車両速度制御が必要とされる場合には，車両とエンジンが異なった時定数を持つため，エンジンと車両の二つの制御器が縦列接続される．

7．おわりに

本報では，フルトロイダルバリエータの基本概念である幾何構造，作動原理，制御方法に焦点を当てて解説した．フルトロイダルバリエータはその独特の設計概念と洗練された機構によって，システムの最適化，部品点数の削減，シンプルな制御仕様を達成することができる．また, 高いトルク容量と高速のシフト性能を有しており，フィードバック制御を必要としないトルク制御駆動である．IVT として使用する場合には，制御をしなくてもギヤードニュートラル運転が可能となり，車両が連続的に前進から後退，後退から前進する往復運転を実現することができる．さらには，低速域において精度の高い操縦が可能である．これらが主な特長であり，現在では産機・農機車両メーカがフルトロイダルバリエータの利点を認識し，評価するまでに至っている．また，二つのモードを持つ IVT は，変速比幅が広いため，すべての動作条件においてエンジン効率を最適化することができる．このことは，自動車メーカが本技術の実用化に向けて取り組んでいる主な理由である．

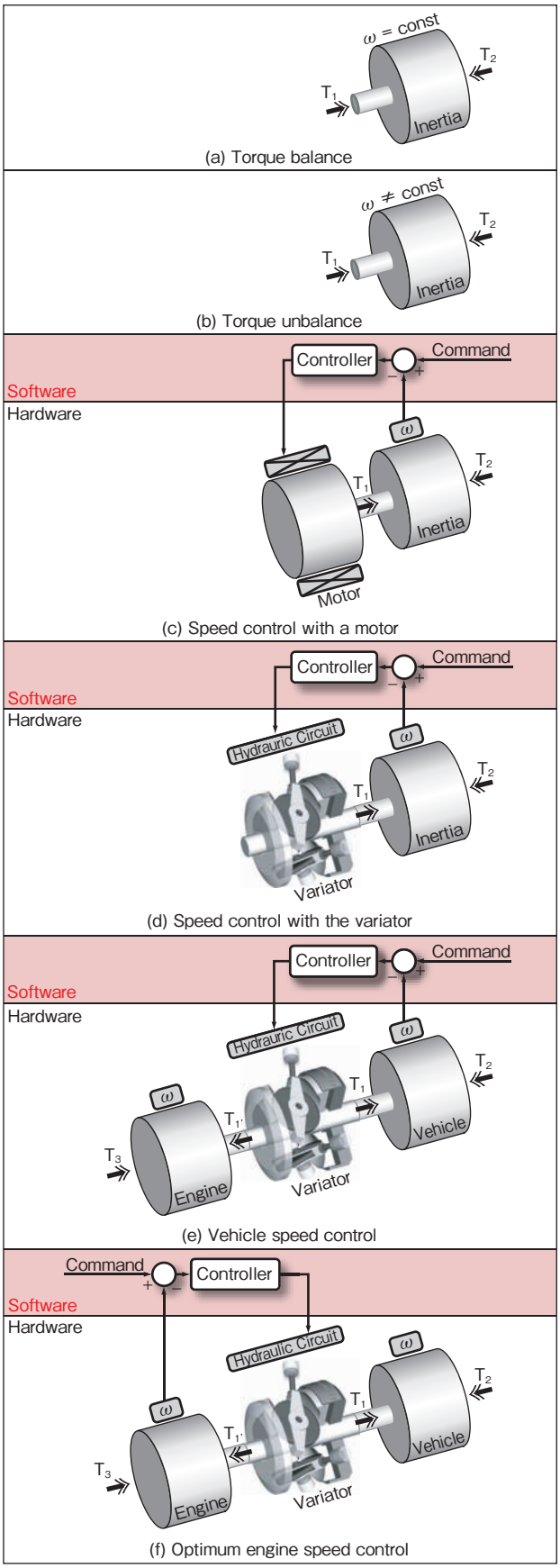

図5　フルトロイダルバリエータによるパワートレーン制御
Control of full toroidal variator based powertrains

参考文献

1）F. W. Heilich III and E. E. Shube: Traction Drives, Marcel Dekker, Inc. (1983).
2）A. P. Lee: フルトロイダル式CVTの技術動向，AT International, July (2008).
3）K. L. Johnson: The Strength of Surface in Rolling Contact, IMechE, Third Annual BP Tribology Lecture, vol. 203, (1989)151.
4）C. Brockbank and C. Greenwood: Torotrak Infinitely Variable Transmission-One Technology, Many Applications, CTI Innovative Automotive Transmissions, Berlin, December (2005).
5）ロバート・フックス，蓮田康彦，イヴ・ローテンビューラー，松本こず恵：無段変速機の制御概念，JTEKT Engineering Journal no. 1001 (2006).
6）R. Fuchs: Torque Control Strategy for Continuously Variable Transmission-Based Powertrains, JSAE, Review of Automotive Engineering, vol. 29 no. 3, July (2008)409.

筆　者

ロバート・フックス*
R. FUCHS

田村　勉**
T. TAMURA

ニール・マッカラ**
N. MCCULLOUGH

松本こず恵**
K. MATSUMOTO

*　研究・開発センター　機械システム研究部
工学博士
**　研究・開発センター　機械システム研究部