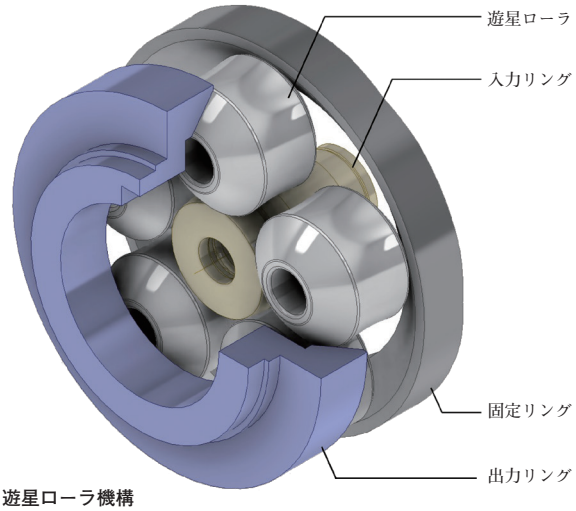
コンパクト・高減速比遊星ローラ機構の設計と試作評価

Design and Evaluation of Compact, High-Reduction-Ratio Planetary Roller Drive

●南　雲　稔　也*　　長谷川　豪　太*
Toshiya NAGUMO　　Gota HASEGAWA



遊星ローラ機構
Planetary roller drive

歯車駆動機構は高いトルク伝達能力，高効率などの優位性を有する一方，バックラッシや振動・騒音，また固定速度比に起因する制約がある。本報では，これらの課題に対応するため，トラクションドライブを用いたコンパクト・高減速比遊星ローラ機構を提案する。遊星ローラと各リングの接触条件および転動面形状を設計することでコンパクト，高減速比，無段変速および変速比無限大の構成を可能にした。さらに，本機構を用いた試作IVT（Infinitely Variable Transmission; 変速比無限大変速機）を製作し，出力特性，変速応答性，位置決め精度を評価した。その結果，速度比制御に応じた正逆転・停止動作，良好なトルク出力，約0.2秒の変速応答，±５arcsec以下の位置決め精度を確認した。併せて，機械式変速機およびトラクション減速機への応用可能性を示した。

Gear drives provide high torque capacity and efficiency, but suffer from backlash, vibration, noise, and fixed-ratio limitations. To address these issues, this paper proposes a compact, high-reduction-ratio planetary roller drive based on traction drive principles. By designing the contact conditions between the planetary rollers and each ring and the rolling-surface profiles, the mechanism enables compactness, high reduction ratio, continuously variable speed control, and an infinite variable-speed ratio. A prototype of Infinitely Variable Transmission (IVT) was fabricated to evaluate output performance, speed-ratio response, and positioning accuracy. The results confirmed forward, reverse, and zero-speed operation by speed-ratio control, favorable torque output, a response time of about 0.2 s, and positioning accuracy within ±5 arcsec. Applications to mechanical variators and traction reducers are discussed.

1　まえがき

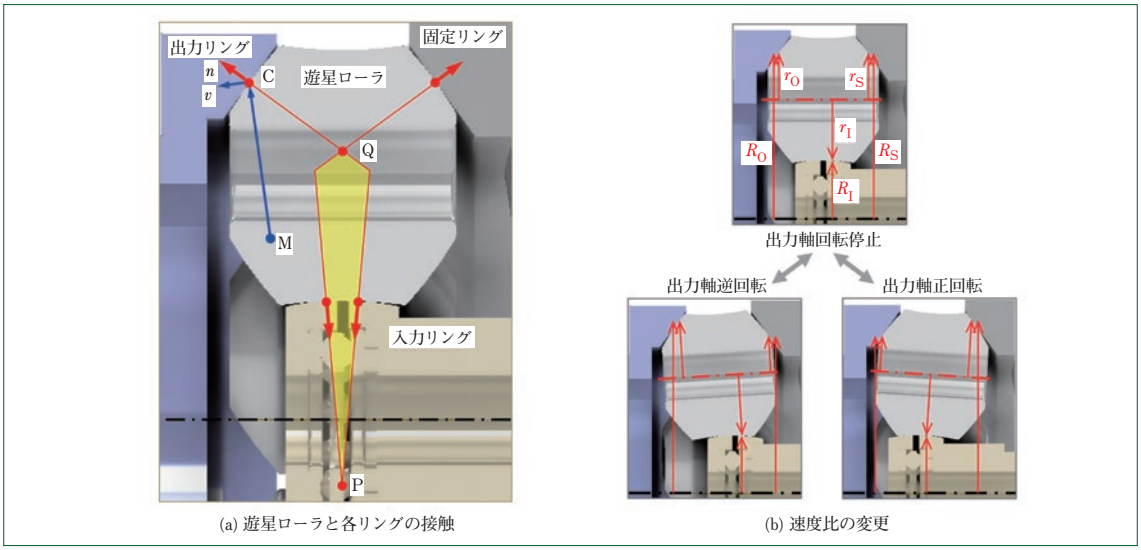
歯車駆動機構は高いトルク伝達能力，確実な回転速度伝達，高効率，高剛性といった特長があり，さまざまな産業で広範囲に使用されている。一方，歯のかみ合いに起因するバックラッシや振動・騒音の発生，固定速度比に起因するトルクや回転速度といった運転条件の変化への対応のしにくさといった課題も存在する。AIやロボティクスの普及，カーボンニュートラルへの対応などを背景に，駆動技術への要求は急速に高度化・多様化しており，用途によっては歯車駆動機構だけで最適な構成を実現しにくい場合がある。

こうした課題の解決策として，歯車駆動機構とは異なる原理で動力伝達するトラクションドライブが期待されている。トラクションドライブは，ローラを押し付けた接触部に生じる油膜のせん断抵抗によって動力伝達することで，バックラッシレスで振動・騒音が非常に小さいうえ，無段変速の構成ができ，運転条件の変化に対応可能といった特長がある。一方，コンパクト化や高減速比化がしにくい無段変速の構成では，特殊な専用部品によって複雑な構造になり大型化する，変速比（速度比の上限と下限の比）・制御性に制約があるといった課題も大きく，使用用途がかなり限定されている。

しかし，これらの課題を克服できれば，歯車駆動機構では対応が難しい要求への有効な解決策になり得る。そこで「コンパクト」「高減速比」「無段変速」「変速比無限大」を可能にする新しい遊星ローラ機構を開発した。

本報では，この遊星ローラ機構の設計および本機構を用いた試作IVTの特性評価，およびその応用例の検討について報告する。

＊技術本部



(a) 遊星ローラと各リングの接触　　(b) 速度比の変更

図1　**遊星ローラ機構の仕組み**
Operating principle of planetary roller drive

2　遊星ローラ機構の設計

図1に，遊星ローラ機構の仕組みを示す。遊星ローラ機構は，固定リングが外部に固定され，入力リングを回転させることによって遊星ローラに自転と公転が生じ，それらの回転成分が伝達され，出力リングが回転する。

本機構では，従来必要となる高精度・高剛性の遊星キャリアによる遊星ローラの支持構造を簡略化することでコンパクト化を実現した。これは遊星ローラと各リングとの接触によって遊星ローラの姿勢を安定させ，自転と公転の運動ができるように遊星ローラおよび各リングを設計することで達成した。

図1 (a) において任意の回転中心Mに対する遊星ローラの半時計方向の回転運動を考察する。出力リングとの接触点Cにおける遊星ローラの法線のベクトルnと回転運動による速度のベクトルvとのなす角が90 degより小さいとき，遊星ローラの回転運動は出力リングとの接触部によって制限された状態になる。さらに，どの位置の回転中心でも，反時計方向，時計方向どちらの回転に対しても，遊星ローラが少なくとも1個以上のリングとの接触によって拘束された状態になるとき，遊星ローラの姿勢は一意に定まり，安定した自転と公転の運動ができるようになる。

上記を満たした状態では，4つの接触部で法線ベクトルを延長した直線が凸形の四角形を形成する。**図1** (a) にこの四角形が黄色で示されている。

本機構では，3K型遊星機構の構成にすることで1段減速構造での高減速比化を実現している。**図1** (b) に，遊星ローラ機構の速度比について示す。遊星ローラと各リングとの間に滑りがないと仮定したとき，入力リングの回転速度N_Iと出力リングの回転速度N_Oの関係は式(1)で表される。

$$N_O = R N_I \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，速度比Rは遊星ローラの自転軸および各リングの中心軸から接触点までの半径によって式(2)で表される。

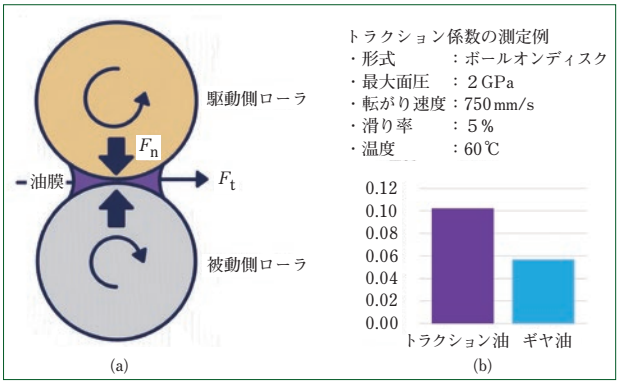


図2　**トラクションドライブの原理**
Principle of traction drive

$$R = \frac{\dfrac{r_S}{R_S} - \dfrac{r_O}{R_O}}{\dfrac{r_S}{R_S} + \dfrac{r_I}{R_I}} \quad \cdots\cdots (2)$$

式(2)で表される関係により，本機構では，固定リング側の遊星ローラとリングの半径の比r_S/R_Sと出力リング側の半径の比r_O/R_Oを近い値に設定することで，高減速比化が可能となる。さらに，遊星ローラと各リングの転動面の断面形状を次のように設計することで，無段変速や変速比無限大の構成が実現できる。

入力リングの転動面の断面形状を凸形の円弧とし，遊星ローラの入力リングと接触する転動面の断面形状を法線ベクトルの交点Pを中心とした凹形の円弧とする。これにより遊星ローラは接触部が離れたり食い込んだりすることなく一定の接触を維持した状態で，交点Pを中心に入力リングに対して傾く運動が可能になる。

固定リングおよび出力リングの転動面の断面形状を一定の傾斜角を持った直線とする。遊星ローラの固定リングおよび出力リングと接触する転動面の断面形状は，法線ベクトルの交点Pを基礎円の中心として，交点Qを接触点の法線が通過する瞬間中心としたインボリュート曲線とする。これにより遊星ローラは接触部が離れたり食い込んだりすることなく一定の接触を維持した状態で法線ベクトルの交点Qを瞬間中心として固定リングおよび出力リングに対して転がる運動が可能

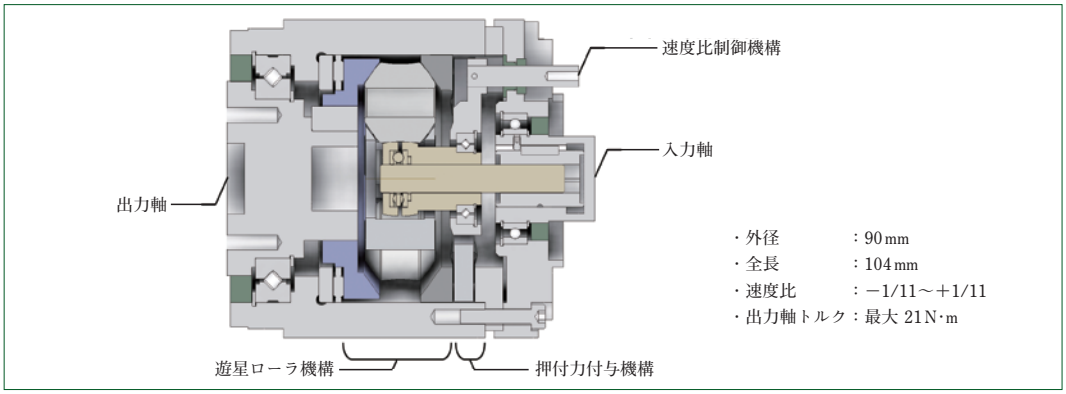


図３　試作IVTの断面図
Cross-sectional view of prototype IVT

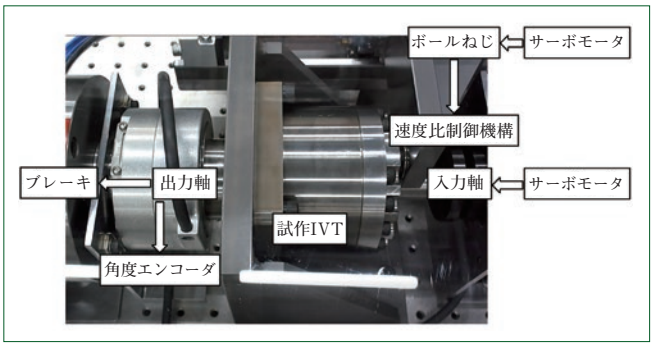


図４　試作IVTの実験装置
Experimental setup for prototype IVT

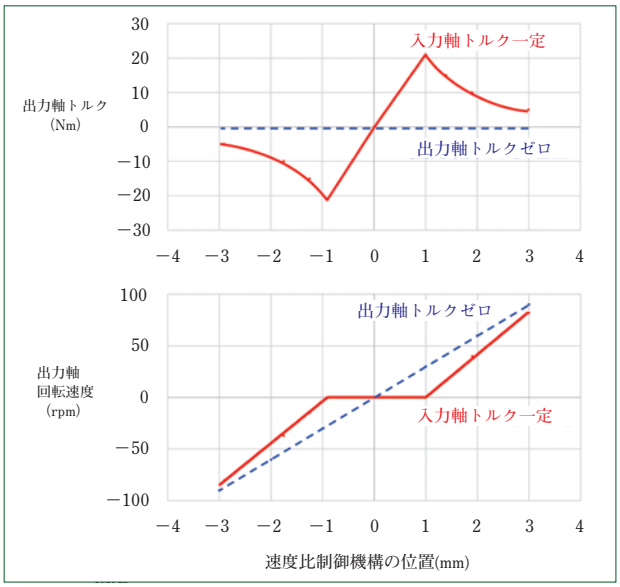


図５　試作IVTの出力特性評価
Output performance evaluation of prototype IVT

となる。

このように遊星ローラおよび各リングの転動面の断面形状を決めることによって，固定リングおよび出力リングの位置を固定した状態で入力リングを中心軸方向に動かしたとき，遊星ローラは各リングとの接触部が離れたり食い込んだりすることなく一定の接触を維持した状態で傾き角が生じる。そして各リングとの接触部の位置が移動し，速度比Rが変化する。

図１ (b) に，その入力リングの中心軸方向の位置を変更したときの遊星ローラの動きを示す。入力リングの位置が出力リングと固定リングの中間にあるとき，速度比Rが０となり出力リングは回転が停止した状態になる。入力リングが出力リングに近い位置にあるとき，速度比Rは正の値となり，出力リングは減速されながら入力リングと同じ方向に回転する。入力リングが固定リングに近い位置にあるとき，速度比Rは負の値となり，出力リングは減速されながら入力リングと反対方向に回転する。このとき，速度比Rの最高値と最低値の比を変速比とすれば，提案する遊星ローラ機構の変速比は±∞となる。

本機構は，トラクションドライブの原理によって動力伝達を行う。**図２**に，トラクションドライブの原理を示す。トラクションドライブは，駆動側と被動側のローラを法線力F_nで強く押し付けて回転させ，ローラの弾性接触部に高圧下での油膜を形成し，ローラ間の相対滑りに対する油膜のせん断抵抗力で接線力F_tを発生させて動力を伝達する。

法線力F_nに対する接線力F_tの比はトラクション係数μとし式(3)で表される。

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad \cdots\cdots (3)$$

遊星ローラ機構の出力トルクは，遊星ローラの数をZとして式(4)で表される。

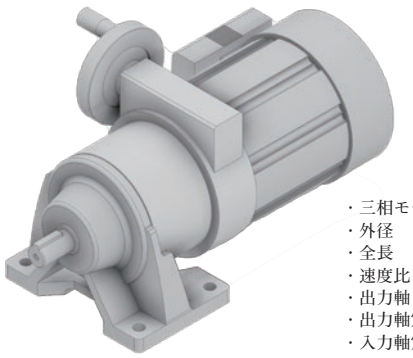
$$T_O = ZR_O F_t \quad \cdots\cdots (4)$$

トラクション係数μを大きくすることで大きなトルクを伝達できることから，トラクションドライブでは専用の潤滑油としてトラクション油が使用される。**図２** (b) に，一般的なギヤ油とトラクション油について，トラクション係数を測定した例を示す。

３　試作IVTの評価

図３に，試作IVTの構造を示す。入力軸は入力リングにスプライン接続され，出力軸は出力リングにキー接続されている。速度比制御機構はケースから突出したシャフトを外部アクチュエータから操作することで，入力リングの中心軸方向の位置を変更して速度比Rを制御する。押付け力付与機構は，カムとローラを用い，押付け力（固定リングと出力リングを中心軸方向に押し付ける力）を出力トルクの大きさに応じて適切に付与する。

図４に，試作IVTの実験装置を示す。入力軸はサーボモータによる回転速度制御で駆動される。速度比制御機構は，サ



・三相モータ容量　：0.2kW
・外径　：124mm
・全長　：325mm
・速度比　：−1/8〜+1/8
・出力軸ピークトルク：34N·m
・出力軸定格トルク　：10N·m
・入力軸定格回転速度：1800rpm

図6　機械式変速機への応用検討例
Conceptual application to mechanical variator



・外径　：91mm
・中空径　：19mm
・全長　：70mm
・減速比　：1/20，1/50
・出力軸ピークトルク：51N·m
・出力軸定格トルク　：15N·m
・入力軸定格回転速度：2000rpm

図7　トラクション減速機への応用検討例
Conceptual application to traction reducer

ーボモータに接続されたボールねじによる位置制御で駆動される。出力軸に接続したブレーキの負荷を調節することで出力トルクを制御し，出力軸に接続した角度エンコーダにより出力軸の回転速度と角度を計測して，遊星ローラ機構の滑りを評価する。

図5に試作IVTの出力特性評価を示す。ここでは入力軸回転速度を1000rpmで一定とした。出力軸トルクゼロの条件では出力軸トルクを0N·mと一定にした。速度比制御機構が0mmの位置では出力軸回転速度が0rpmになり，出力軸停止状態になっている。速度比制御機構が+3mmの位置では出力軸回転速度が90rpmになり，出力軸は入力軸と同方向に回転し，速度比Rは+1/11である。速度比Rは，速度比制御機構の位置に対してほぼリニアに変化している。逆転方向の特性については，正転方向に対してほぼ対称の特性を示している。このように本機構は出力軸トルクゼロの条件において良好な出力特性を示した。

入力軸トルク一定の条件では入力軸トルクを2.25N·mと一定にした。速度比制御機構の位置0mmから+1mmまでの範囲では出力軸回転速度が0rpmになり，出力軸が回転停止状態では速度比を制御することにより出力軸トルクが増加する特性となっている。速度比制御機構の位置を1mmとし，出力軸回転速度が0rpmから増加し始める点で出力軸トルクが最大20N·mになる。速度比制御機構をさらに動かすと，出力軸回転速度は直線的に増加しつつ出力軸トルクは低下していくという一定出力特性を示す。逆転方向の特性については，正転方向に対してほぼ対称の特性を示している。このように本機構は入力軸トルク一定の条件において良好な出力特性を示した。

また，入力軸回転速度一定の条件では，速度比を0から上限まで変化させる変速時間が0.2秒程度となり，良好な速度比制御の応答性を示した。さらに，出力軸に接続したエンコーダ信号をフィードバック制御した場合の位置決め精度は±5arcsec以下となり，精密制御用途として良好な精度を示した。

4　遊星ローラ機構の応用検討

本機構を用いることでコンパクト，高減速比，無段変速，変速比無限大，静音，低振動，バックラッシレスといった特長を備えた変・減速機を構成できる。ここでは本機構の応用検討の例として，機械式変速機とトラクション減速機について説明する。

図6に，機械式変速機への応用例を示す。産業用の機械式変速機は電気制御なしで連続的な速度調整，低速での高トルク出力，過負荷に対する耐性といった特長があり，化学・食品プロセス機械や搬送機械など特定領域で使用されている。しかし一方で，特殊な専用部品を使用した複雑な構造による大型化，変速比・制御性の制約などが課題となっている。遊星ローラ機構を機械式変速機に応用することで，これらの課題解決につながる可能性がある。

図7に，トラクション減速機への応用例を示す。トラクション減速機は，低振動で滑らかな動力伝達，静音，バックラッシレスといった特長があり，自動搬送装置や精密位置決め装置など特定領域で使用されている。しかし，既存のトラクション減速機は高減速比化しにくい，出力トルクが低いといった点が課題となっている。遊星ローラ機構をトラクション減速機に応用することで，1段減速構造のコンパクト化・高減速比化，さらに押付け力付与機構により高トルク化したトラクション減速機を構成できる。

5　むすび

(1) コンパクト，高減速比，無段変速，変速比無限大を達成可能にする遊星ローラ機構の提案とともに，その設計についてまとめた。
(2) 遊星ローラ機構を用いた試作IVTの出力特性を実験的に評価し，良好な出力特性が得られることを確認した。
(3) 遊星ローラ機構の応用例として，産業用機械式変速機とトラクション減速機について検討し，従来技術の課題に対する有効性について確認した。

本機構の適用検討，共同評価・開発に関心をお持ちの企業・研究機関は当社ウェブサイト(https://www.shi.co.jp/)の問い合わせフォームより技術本部宛てに連絡いただければ幸いである。

(参考文献)
(1)　III Heilich, F. W. and Shube, E. E., TRACTION DRIVES, (1983), MARCEL DEKKER INC.
(2)　田中裕久，トロイダルCVT，(2000)，コロナ社.