

解説2 小型・高効率のゼロ・バックラッシ減速機を用いた位置決め装置 ローラドライブ

三共製作所 大石 貴司*

*おおいし あつし：開発設計本部 商品開発課

URL：http://www.sankyo-seisakusho.co.jp/

はじめに

少子高齢化による労働人口減少の社会的背景から、業務効率と付加価値額が高い労働生産性の向上を図るため、製造分野では機械化・自動化・省力化、人工知能（AI）、IoT技術の活用による省人化が進められている。また、市場ニーズの多様化により、多品種少量生産でも短納期が求められ、段取り替えなどのフレキシブル性に対応できる生産性の高い設備が要求されることから、位置決め制御の高速化・高精度化のためにゼロ・バックラッシの減速機構が必要になる。

位置決め装置は小型モータ＋減速機方式とDD（ダイレクトドライブ）方式の2つの方式がある。前者はコンパクト、高トルク、高剛性の駆動機構を構成できる。また、小型モータを使用できるため、省電力でもある。歯車機構に代わって、カム-ローラフォロア機構を採用することでゼロ・バックラッシが可能となり、高速安定性が期待で

きる。こうした背景から、下記内容を満たす、減速機構の開発が進められてきた。

- ① 両方向回転における高度な角度伝達精度
- ② 応答性と整定性
- ③ 外力や偏荷重に対する耐性
- ④ 高効率
- ⑤ 高速性を有すること
- ⑥ 省スペース（小型）

これらの要求事項のすべてに高次元で応える減速機として、当社ではゼロ・バックラッシ減速機「ローラドライブ」をラインアップしている。本稿では、ゼロ・バックラッシを実現するローラドライブの機構の特徴について紹介する。また、ローラドライブとDDモータとの小型化比較、さらに小型ローラドライブMRシリーズについても紹介する。

ローラドライブ

ローラドライブとは、当社のゼロ・バックラッシ角度伝達システムである。構造は、螺旋テーパリブ形状の入力軸（ローラギヤカム）と円筒ローラフォロアを放射状に配置した出力軸（ローラギヤ）を直交にレイアウトしたものである（図1）。入力軸（ローラギヤカム）リブ断面はテーパ形状で出力軸のローラフォロアと予圧状態にて転がり接触をすること（図2）により、バックラッシがなく、高効率な角度伝達を実現するものである。

ローラドライブは、その特異な構造から以下の特徴を有する。

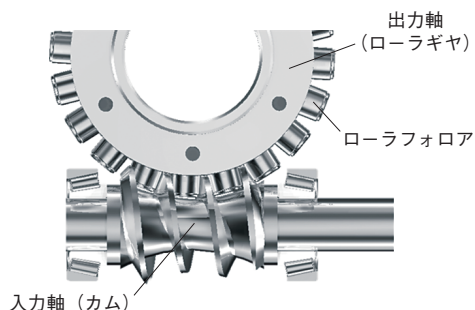


図1 ローラギヤカム機構

- ① バックラッシがなく、反転時特性に優れる
- ② 転がり運動による円滑な角度伝達が可能となる
- ③ 正常な潤滑条件下では、構成部品の摩耗がなく、長期間にわたって精度が劣化しない
- ④ 予圧構造により、固有振動数が高いため、サーボゲインを高く設定でき、応答性の高いシステム構築が可能となる
- ⑤ 予圧かみ合い構造であるため、出力系の回転剛性(ねじり剛性)が高く、回転させながらの作業や偏荷重を受ける用途に適している

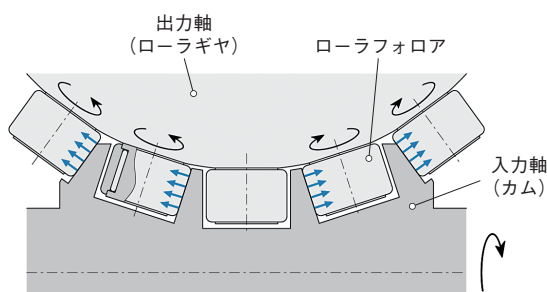


図2 予圧メカニズム

ことで、回転方向の変化に対しても高度な角度伝達精度を確保する(図4)。

ローラドライブの特徴

(1) ゼロ・バックラッシ

初めに一般的な歯車機構のヒステリシス線図を図3に示す。横軸は出力に作用するトルク、縦軸はねじれ角である。トルクゼロ近くでねじれ角が急激に変化している。このねじれ角の差がバックラッシである。

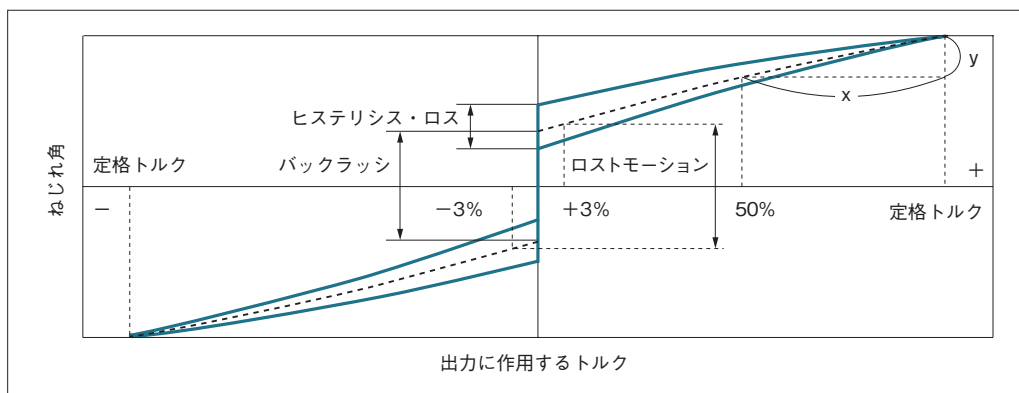
入力軸のテーパ断面形状リブと出力軸のローラフォロアが予圧状態にて転がり接触をすることにより、バックラッシ(入出力軸要素間の遊び・ガタ)がない。併せて構造・材料の最適化によりロストモーション、ヒステリシス・ロスを最小化する

(2) 耐久性

ローラドライブを構成するすべての要素が転がり接触による動力伝達であるため、適正な潤滑条件下では機械的な摩耗が発生しない。このため、長期間にわたり初期精度を維持することが可能である。図5は、500万回動作試験の経時評価であるが、位置決め精度劣化がないことが確認される。

(3) 高速で円滑な角度伝達

転がり接触による伝達効率の良さと入力軸リブ形状の最適化設計により、滑らかで発熱が少なく、従来の歯車減速機構と比較して高速で円滑な角度伝達が可能である。



※バックラッシ：トルクゼロでも生じる回転角（ガタつき）
 ロストモーション：±3%定格トルクを加えたときに生じるヒステリシス曲線幅の中間点のねじれ角
 ヒステリシス・ロス：トルクを正逆に加えた際に、完全に戻りきらないねじれ角

図3 一般的なヒステリシス線図

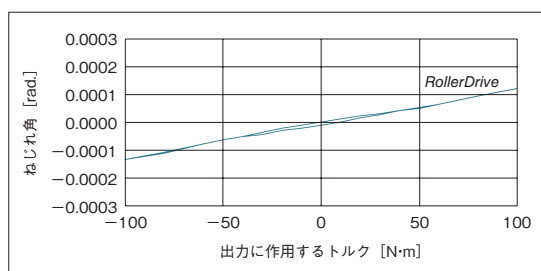


図4 ローラドライブ ヒステリシス線図

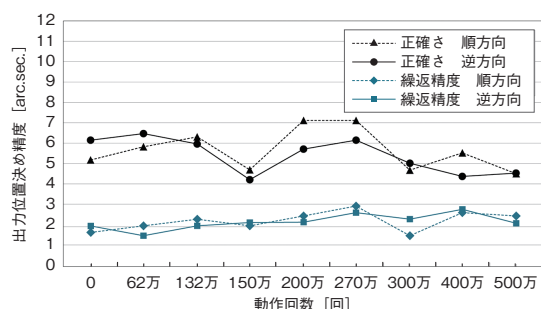


図5 位置決め精度経時変化試験

(4) 高い応答性と整定性

従節(出力テーブル)が運動状態から停止する際に残る従節の振動を残留振動といい、入力系のバックラッシュやたわみによる回転伝達不良が原因である。ローラドライブは、テーパリブカムが2本以上のローラフォロアで係合し、ゼロ・バックラッシュの予圧構造で、入出力軸の動力伝達が行われるため、高い固有振動数を示す。このことから、サーボモータとの相性も良く、非常に高い応答性が得られる。

(5) 入力軸の最適化設計

ローラドライブでは、入力回転ムラは、関数としてダイナミック(動的)特性に影響を及ぼすため、この回転ムラの要因となる入力軸リブ形状の設計は重要視される。3万台以上の販売実績から得られたデータを反映した自社開発CAEシステムにより、機構学的に最もバランスされた形状に最適化設計、FEM解析(図6)が行われている。

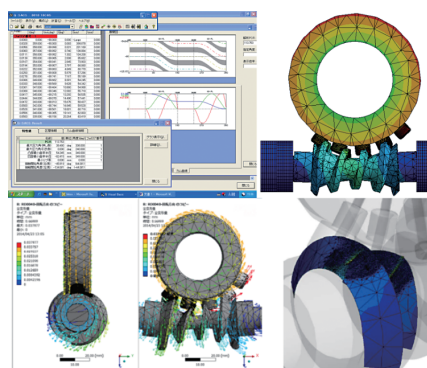


図6 自社開発設計ツールとFEM

(6) 省スペース化

入力軸と出力軸を直交レイアウトすることで、高さを抑えたコンパクトな形状とし、また、出力軸には大口径の中空穴を設けることで、配線・配管を通すなど、自由度の高い装置となっている。

ローラドライブとDDモータ

(1) ローラドライブとDDモータの特性値

負荷を直接駆動するDD(ダイレクトドライブ)方式と駆動源(モータ)と減速機を組み合わせた2つの方式がある。前者は減速機のロストモーションや摩擦トルクの影響を受けないが、大きなモータトルクが必要となる。後者では減速機を介し、微小トルクを高トルクに変換できる。

式(1)および式(2)はDDモータでの電気エネルギーと機械エネルギーの相互変換式を表す。

$$P_1 = K_1 D^2 L n \quad (\text{kW}) \quad (1)$$

ここで、 D : ロータ直径 (m) L : ロータ長さ (m)

K_1 : 比例係数 n : 回転速度 (rpm)

$$K_1 = C_i A_c B_m \quad (2)$$

ここで、 C_i : 係数 ($(1.0 \sim 1.1) \times 10^{-4}$ 程度)

A_c : アンペア導体数 (A/m)

B_m : ギャップ磁束密度 (T)

発生トルクは、モータ体積に比例する。小型化のためには、アンペア導体数およびギャップ磁束密度を可能な限り大きくする必要がある。

ローラドライブ特性は、許容接触応力の式(3)で

求められ、カム、ローラフォロアそれぞれの軌道面、転動体の強度となり、DDモータがギャップ磁束密度とアンペア導体数の非接触伝達に対し、ローラドライブは、転がり伝達の機械的係合で、材料硬度、圧縮強さから決まるため、高トルクの伝達が可能となる。

$$P_{max} = \sqrt{\frac{E \cdot \Sigma \rho}{\pi \left(1 - \frac{1}{m^2}\right) \cdot 2} \cdot \frac{Q}{L_a}} \quad (N/mm^2) \quad (3)$$

ここで、

E : ヤング率(鋼の場合 $E = 207,900 \text{ N/mm}^2$)

M : ボアソン数(鋼の場合 $m = 10/3$)

$\Sigma \rho$: 両円筒の曲率の和 ($\Sigma \rho = \rho_1 + \rho_2$)

ρ_1 : 円筒1の曲率 (mm^{-1})

ρ_2 : 円筒2の曲率 (mm^{-1})

Q : 両円筒にかかる法線方向の荷重 (N)

L_a : 両円筒の接触長さ (mm)

ローラドライブ許容面圧の目安

H_RC40以上の場合 1,244.6 N/mm²

H_RC50以上の場合 1,754.2 N/mm²

表1は、DDモータとローラドライブの特性値から筐体高さを積厚とし、単位面積当り推力を概算比較した例である。ローラドライブは、DDモータに対し、約12~29倍のトルクを伝達できるこ

表1 単位面積当り推力の比較

項目	Roller Drive RA40	DD Motor Sample A	DD Motor Sample B
直径(幅) [mm]	95	100	128
長さ [mm]	115	—	—
高さ(積厚) [mm]	65	96	58.5
体積 [mm ³]	710,125	753,982	752,776
瞬時最大トルク (起動停止トルク) [N・m]	57.7	15	6
単位面積 当り推力 [N/mm ²]	0.146	0.012	0.005
製品質量 [kg]	2.5	4.5	5.2

とがわかる。

(2) 減衰特性と高速位置決め制御

DDモータは角度伝達精度に優れるが、構造上、機械的ダンピングはほとんど期待できないため、上位からの位置指令に対し、モータ位置をフィードバック制御で演算、トルク指令に変換する整定時間の遅れを外乱応答、振動低減の予測制御で補償する取組みが行われている。図7に、同負荷・同動作条件下でローラドライブとDDモータのダイナミック特性を比較した実験結果を示す。DD

90°旋回時の出力動作特性比較

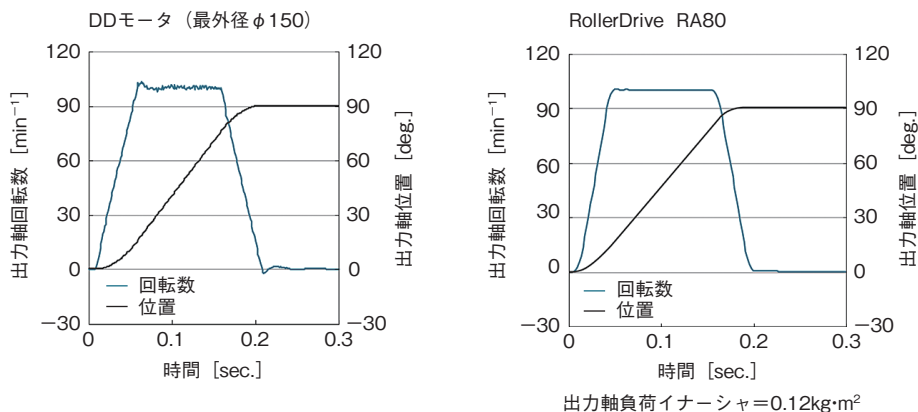


図7 ダイナミック特性試験

モータのダイナミック(動的)特性では制御遅れによる波形の乱れが見られるが、ローラドライブでは、波形の乱れがほとんど見られず、入力制御指令に対する出力動作の高い追従性が確認された。モータ位置指令が直接、最終従節(出力軸)に伝えられるDDモータと比べ、減速機を介して最終従節に動力伝達することで、変位・トルクは1/速比となり、モータ負荷が大幅に軽減される。たとえば、DDモータで、200パルスの残留振動は、減速機1/20の場合、 $200/20=10$ パルスまでモータ負荷が軽減される。

また、ゼロ・バックラッシュ構造で、系の固有振動数が高いことも大きな要因である。

ローラドライブが動的アプリケーション、たとえば、転写、連続測定、連続加工などにおいても、高い品質、精度を提供できる理由がここにある。

小型ローラドライブMRシリーズの開発

(1) 背景・コンセプト

電子部品など対象ワークの小型化・高精度化が進み、減速機が小型化の傾向となる市場予測から、世界最小ローラドライブMRシリーズ(図8)の開発を行った。開発コンセプトは下記の通りである。

- ① 両方向回転における高度な角度伝達精度
- ② 高い応答性と整定性

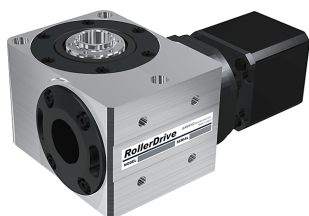


図8 ゼロ・バックラッシュ減速機MRシリーズ

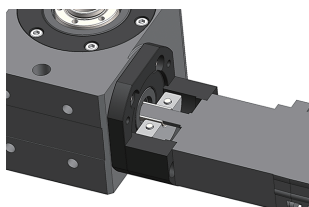


図9 モータ締結

- ③ 外力や偏荷重に対する耐性
- ④ 効率の良さ
- ⑤ 高速性を有すること
- ⑥ 省スペース(小型、軽量)
- ⑦ 出力軸中空穴
- ⑧ 低価格

(2) 小型ローラドライブMRシリーズの特徴

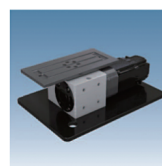
軸間距離(D)=31.5 mm以下のモータ容量50 W~200 Wを対象とした小型ゼロ・バックラッシュ減速機で、入力回転ムラを抑えるため、モータ軸は、中空カム軸とセットカラーでリジットに固定(図9)され、省スペースかつ高い固有振動数でトルク伝達が行われる。下記にMRシリーズの特徴を挙げ、表2に能力表を示す。図10は用途例である。

- ① テーパーバリエカムを2本以上のローラフォロアで係合させたゼロ・バックラッシュの予圧構造で、ほかのノンバックラッシュ減速機と比較し、剛性が高く、高速安定性に優れる
- ② すべての構成部品が転がり伝達のため、効率

表2 MRシリーズ能力表

機種		MR25	MR32
減速比		12	12
起動停止時上限トルク	N・m	7.8	15
許容入力回転数	min ⁻¹	2,000	2,000
面振れ量	μm以下	50	50
許容アキシヤル荷重	N	609	625
許容ラジアル荷重	N	708	795
許容モーメント荷重	N・m	9.4	10.9
製品重量	kg	1.3	2.1

使用例



アライメントテーブル



旋回・揺動アーム



ハンドリングユニット

図10 ローラドライブの用途例

が高い。図11は同方式のローラドライブ製品RAシリーズの伝達効率で、85%以上となる

- ③ 回転ムラを抑えたゼロ・バックラッシの予圧構造とシンプルな入力構成(図9)から、高い固有振動数でトルクが伝達され、高い応答性と整定性が可能
- ④ 高い繰返し位置決め精度
- ⑤ 小型、軽量、コンパクトの世界最小ローラドライブ

(3) 位置決め精度

位置決め制御方式は、フルクローズドループ、セミクローズドループ、オープンループがある。ローラドライブは、セミクローズドループで使用されることが多く、この方式では、ゼロ・バックラッシ構造と繰返し精度の高精度化が最も重要となる。角度伝達精度は、モータの位置指令に補正量を与え補償されるが、減速機固有の繰返し誤差は補正ができないためである。フルクローズドループは最終従節のスケールで位置決めされるため、問題とならない。また、オープンループでは高精度位置決めよりは、安価で伝達トルクを重視した用途での使用が多い。このことから、ローラドライブは、繰返し位置決め精度を重視した特性値となっている。表3はMRシリーズ繰返し位置決め

精度の実績値を表す。

(4) 小型化

ローラドライブ小型化の課題は、部品の高精度化で、低価格帯の小型モータ市場とはミスマッチとなる。軸間距離(D)が短くなると放射状に配置したローラフォロアとカム係合ピッチ円が小さくなり、製造過程における部品誤差と組立誤差が、位置決め精度に及ぼす影響が大きくなる。たとえば、軸間距離(D)20mmで、部品誤差1μmの場合、位置決め精度に20~30 arc.sec.の誤差が生じる。また、製造過程における誤差のほか、初期馴染みが与える影響も同様に大きくなり、構成部品の高精度化が必要となる。これらの問題解決に、専用加工機導入と治工具改善による部品の高精度化および装置の高剛性化により、高い特性・性能を実現した。

おわりに

ローラドライブは、ゼロバックラッシ・テクノロジーの優れた運動特性についてさまざまな分野・用途で高い評価をいただいている。さらなる小型化・高速化・高精度化の要望に答えるため、継続的に技術追求を行い、革新的な生産を実現する技術・製品を提供していく所存である。

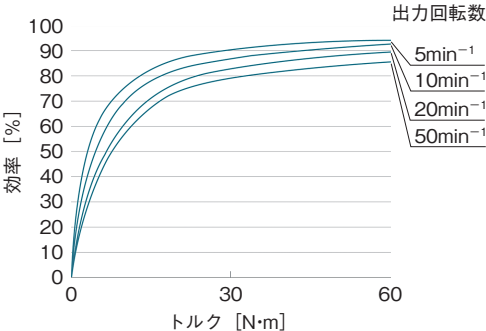


図11 RAシリーズの伝達効率

表3 繰返し位置決め精度の実績値(arc.sec.)

MR25	±5
MR32	±5