

# 新方式リニア駆動ユニットのクランプ装置としての適用

新堀正博\* 貞広恵輔\* 村尾良男\*\* 中辻 武\*\*\*

## Application to the Clamp Equipment of New Type Linear Drive Unit

Masahiro SHINBORI\* Keisuke SADAHIRO\* Yoshio MURAO\*\* Takeshi NAKATUJI\*\*\*

### ABSTRACT

Since almost the linear drive mechanisms of being used in actual production spot have large energy consumption due to use mainly the air cylinders, the usage has been needed to be improved. Moreover, the larger equipment having a gearing and a ball screw also has been sometimes used. Therefore, we have developed a new type drive unit having two steps operation system, which filled the necessity for energy saving and the demand of an equipment miniaturization. This equipment can remarkably reduce energy consumption comparing with air cylinder as the same specification. And, It is expected that this equipment will be applied to the robot actuator and the assistant chair use for standing up etc..

This report describes the action mechanism, durability and energy consumption of a new type linear drive unit as a clamp use.

**Keywords** : new type linear drive unit, two steps operation system, energy saving, miniaturization, development, durability

### 1. 緒言

自動車等の1個流し生産ラインにおけるクランプ機構にはリニア駆動機構が用いられている。その主なものは、電気モータの回転出力をギヤ減速し、減速後に軸受会社が開発したボールねじ等を用いた回転→直線運動変換を行って使用する。もしくは、空気圧・油圧等を専門にするメーカーが開発した空気圧シリンダを用いる方法である。これらはクランプ機構に代表される通り、高速・低推力と低速・高推力移動の組み合わせ運動である。しかしながら、前者は装置全体が大きくなり過ぎてしまう、後者はエネルギー消費が大きいという欠点を有している。省エネルギーはCO<sub>2</sub>排出削減につながる。

そこで、新しいねじ機構を開発して、リニア駆動に応用し、これらの問題に対処する方法について検討を試みた。その結果、動力伝達要素としてのねじ機構は、精度の観点から雄ねじと雌ねじの大きさは同じであらねばならないという、従来の発想を転換した。そして、雄ねじと偏心してかみ合せた径の大きな雌ねじを組み合わせた。それにより、簡潔な構造の直線運動型駆動機構を持つね

じ機構が考案された。このねじ機構にばねを追加し、自律的に負荷を検知して直線移動速度を減速することで推力を増幅する省エネでコンパクトな2段階作動方式リニア駆動ユニットを考案した。この考案システムは、国際特許として出願・受理されている(PCT/JP2005/016818)。このように、本機構は、クランプ用として開発した。しかし、停電時の機械的な位置確保や負荷時に減速する特性を有しているため、アウトリガー・リハビリ用立ち上がり補助座椅子・安全性を有するロボットのアクチュエータとして利用できると考えている。本報では第一段階として、クランプ用ユニットとしての使用を目指し、リニア駆動ユニットの作用機構とクランプ用としてのユニットの耐久性および省エネ性について報告する。

### 2. リニア駆動ユニットの作用機構

図1、図2に無負荷時、負荷時における、新方式リニア駆動機構の構造・原理を示す。

新方式リニア駆動機構は、構造として雄ねじよりも径が大きい雌ねじ、ばね、ベアリング、ケース、駆動モータから構成されている。原理としては、負荷が作用していないときは式(1)のように通常のねじ運動を行い、ねじのピッチと回転数の積で雌ねじが高速移動する。

\* 専攻科 機械システム工学専攻

\*\* サイエントフィックテクノロジーズ会社

\*\*\* 機械工学科 教授

$$L_f = \frac{\theta_r}{2\pi} p \quad \dots (1)$$

$L_f$ は無負荷時の雌ねじ進み距離[mm],  $\theta_r$ は雄ねじ回転角度,  $p$ はねじピッチ[mm]である. しかし, 負荷が加わると雌ねじは径の違いで式(2)のように差動回転する.

$$L_R = \frac{\theta_r - \Theta_R}{2\pi} p \quad \dots (2)$$

$L_R$ は負荷時の雌ねじ進み距離[mm],  $\Theta_R$ は雌ねじ回転角度である.  $r$ を雄ねじ接触点半径,  $R$ を雌ねじ接触点半径とすれば, 差動回転時には接触点移動距離は等しいので

$$r \bullet \theta_r = R \bullet \Theta_R \quad \dots (3)$$

となり, 以上から減速比 $\gamma$ は

$$\gamma = \frac{L_f}{L_R} = \frac{R}{R-r} \quad \dots (4)$$

で表すことができ, 差動回転時にはねじが高速移動時の約 $1/\gamma$ の速度で低速移動するようになる.

モータ出力によって回転する雄ねじのねじ面を押す力 $F'$ は次式で表される.

$$F' = \frac{F}{\cos \beta} \quad \dots (5)$$

$F'$ はねじ面を押す力[N],  $F$ はねじ推力[N],  $\beta$ はねじ山半角である. このとき, 摩擦係数 $\mu$ をもちいて摩擦抵抗 $\mu F'$ は次式で表される.

$$\mu F' = \frac{\mu}{\cos \beta} F = \mu' F \quad \dots (6)$$

$\mu'$ は相当摩擦係数である. また相当摩擦係数 $\mu' = \mu / \cos \beta$ に対して,  $\phi' = \tan^{-1}(\mu')$ なる変数 $\phi'$ を導入すると, 締付力 $f$ [N]は次式で表される.

$$f = F \bullet \tan(\alpha + \phi')$$

$$= F \frac{\tan \alpha + \frac{\mu}{\cos \beta}}{1 - \tan \alpha \frac{\mu}{\cos \beta}} \quad \dots (7)$$

$\alpha$ はねじリード角である. そして, 入力トルク $T$ は次式で表される.

$$T = fr = Fr \frac{\tan \alpha + \frac{\mu}{\cos \beta}}{1 - \tan \alpha \frac{\mu}{\cos \beta}} \quad \dots (8)$$

$T$ は入力トルク[Nmm],  $r$ はねじ接触点の半径[mm]である. よって, ねじ推力 $F$ と入力トルク $T$ の関係は次式となる.

$$F = T \frac{1 - \tan \alpha \frac{\mu}{\cos \beta}}{r \left( \frac{\mu}{\cos \beta} + \tan \alpha \right)} \quad \dots (9)$$

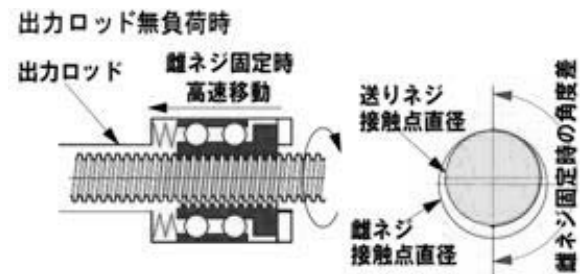


図1 新方式リニア駆動機構の構造・原理(無負荷時)

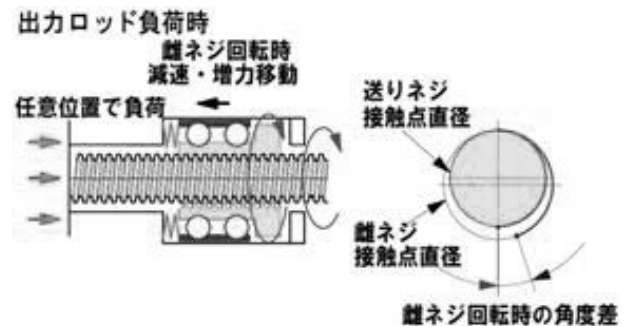


図2 新方式リニア駆動機構の構造・原理(負荷時)

新方式リニア駆動機構の負荷時の推力増加は、一定のモータ動力(100W)のもとにおける減速による。しかし、その減速は、ねじ伝達が高速のすべりから約1/10減速の差動転がり伝達へ移行することによる。

図3に、TR20×4の雄ねじとTR22×4の雌ねじの組合せにおける、負荷時の入力トルクとねじ推力の式(9)による理論計算値を示す。それに加え、同ねじの組合せにおけるねじ推力の測定結果を示す。

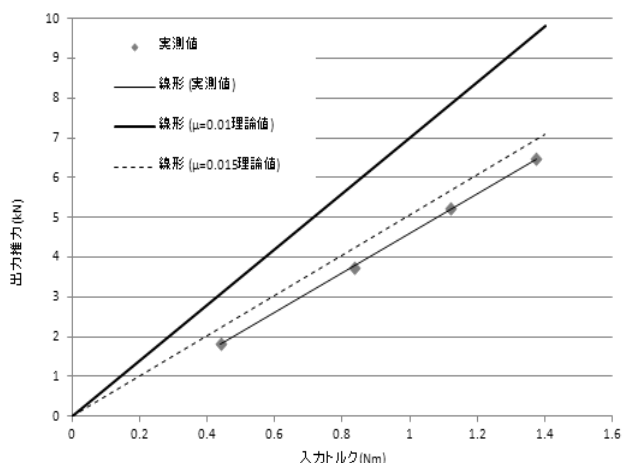


図3 入力トルク-推力特性

図3からわかるとおり、実測値は、送りねじとガイドベアリング間の摩擦を含むので、入力トルクと出力推力が0で一致しない。しかし、その摩擦はごくわずかであり、理論計算から得たねじ面摩擦係数 ( $\mu=0.015$ ) の出力直線とはほぼ並行な直線であり、同じ勾配であるといえる。よって、組合せたねじのねじ面摩擦係数が  $\mu=0.015$  であると予想できる。よって、負荷時にはすべり摩擦 ( $\mu=0.1\sim0.2$ ) の約1/10となりほぼ転がり摩擦に転じていることが判明した。その結果、式(9)より、推力増加は約10倍になることがわかる。そのときの雌ねじの移動速度は、モータ回転数1500rpmのとき無負荷時は100mm/s、負荷時は10mm/sとなる。またモータ回転数4300rpmのとき無負荷時は290mm/s、負荷時は29mm/sとなる。

### 3. ねじの摩耗特性試験

日本の生産方式の主流である1個流し生産ラインにおいて多用される位置決め・クランプ動作は、高精度かつ

大きなクランプ力(6kN)の性能が求められる。

図4に示す負荷耐久試験機により、新方式リニア駆動ユニットをクランプユニットとして、一般的に使用するため、複数回クランプ動作を行った際の摩耗特性を確認する。本駆動ユニットをクランプユニットとして一般的に使用する際の目標使用回数を100万回とし負荷耐久試験を行う。図4に示す負荷耐久試験機は装置右側に本駆動ユニット(図5)が取り付けられている。本駆動ユニットに空気圧レギュレータにより6kNの負荷を加えた状態で、クランプ動作を行う。さらに、左側に取り付けられた、制御盤により、負荷の大きさ、モータ回転数を操作する。そして、負荷耐久試験機より、入力トルク、出力推力、使用回数を記録する。

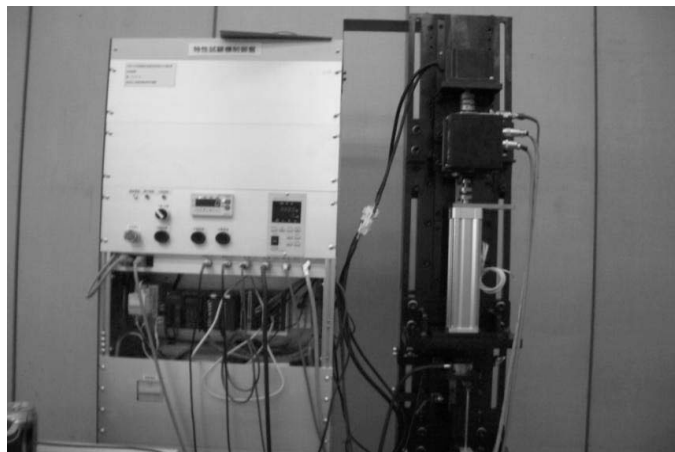


図4 負荷試験機



図5 新方式リニア駆動ユニット

### 3.1 ねじ仕様と破壊強度

負荷耐久試験において使用する雄ねじと雌ねじの強度は、新方式リニア駆動機構が発生するクランプ力の20倍以上の破壊強度を持つことを目標とした。

炭素鋼の TR20×4 の雄ねじと TR22×4 の雌ねじを組み合わせたねじの引張試験を行った。その結果、ユニットの目標推力である 6kN の 30 倍以上の破壊強度を持っており、目標破壊強度に十分達していることが確認できた。

### 3.2 負荷耐久試験

負荷耐久試験を行った結果、通常は無添加グリース(基油粘度 32cSt) だけでは、負荷時に雄ねじと雌ねじの点接触面内において微小すべりが生じた。その結果、40 万回の運転時に焼付き、試験がストップした。産業用、民生用の実用化を考えた際、100 万回の使用回数に耐えることが必要である。そこで、別途、この点接触面に適正な潤滑油の検討を行った。

負荷時の雄ねじと雌ねじの点接触面内の最大応力は、1361MPa であった。点接触部で時折生じる微小すべり速度  $V$  をモータ回転数  $n=4300\text{rpm}$ 、負荷時の減速  $1/10$ 、ねじ中心から点接触位置までの距離  $8.13\text{mm}$  のもと見積もる。そうすると、 $V = 0.37 \text{ m/s}$  と計算された。また、点接触部の荷重比  $\alpha$  は、最大応力(1361MPa) / ねじの表面硬度(2878MPa) であるので、 $\alpha = 0.47$  であった。この 0.47 の値は、 $\alpha = 0.25$  : 通常的设计荷重 (JIS) ,  $\alpha > 0.35$  : 高荷重,  $\alpha = 0.7$  : 厳しい高荷重,  $\alpha = 0.8$  : 超高荷重の高荷重域に相当し、設計ではなるべく避ける領域にある。これが本ユニットの欠点であり、潤滑油の工夫で回避すべき点でもある。

そこで、文献(1)より、ふさわしい潤滑油を選択した。図 6 は、表 1 に示す各種潤滑油の  $V=0.38 \text{ m/s}$  ( $\approx 0.37\text{m/s}$ )、 $\alpha \approx 0.5$  ( $\approx 0.47$ ) における摩擦試験結果である。潤滑油は Base oil に、接触面と化学反応し焼付き等を防止する Cl, P, S 等の極圧添加剤を添加した 5 種類。それに加え、接触面を物理的に分離する有機系二硫化モリブデンとカルシウムスルホネートという固体潤滑剤 2 種を添加したものをを用いた。図 7 は、 $V=0.38\text{m/s}$ 、 $\alpha=0.3$  (中程度の荷重) , 0.5 (高荷重) , 0.7 (厳しい荷重) , 0.8 (超高荷重) における摩耗径の結果である。

図 6 より、 $\alpha \approx 0.5$  の荷重レベルでは、各添加剤における相違が現れ、あるレベルのアスペリティ接触があることを示している。このような荷重下ではいくつかの極圧添加剤よりも固体潤滑剤の方が摩擦を低下させた。これは作用中に形成された固体潤滑剤による、アスペリティ周辺 EHL 油膜形成を促進する効果によると思われる。

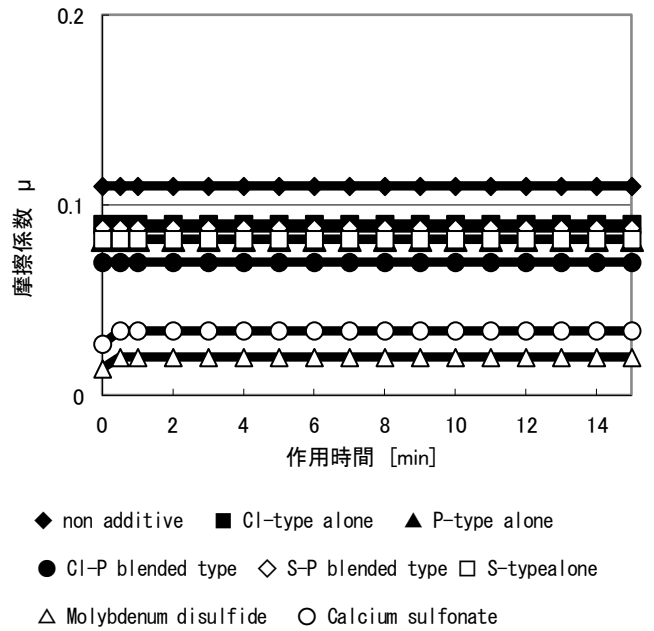
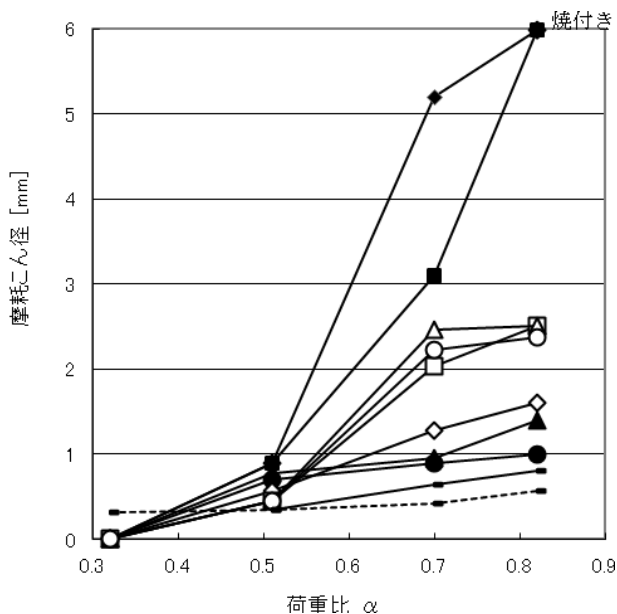


図 6 作用時間に対する摩擦係数の変化 ( $\alpha \approx 0.5$ )

表 1 基油に添加された添加剤の種類と量<sup>(2)</sup>

潤滑剤の種類	添加剤の種類と量
Base oil (non additive)	ISO VG 32 タービン油
Cl-type alone	塩素化パラフィン 4質量%
P-type alone	アミンフオスフェート 2質量%
S-type alone	硫化ラード 5質量%
Cl-P blended type	Cl と P のブレンド
S-P blended type	S と P のブレンド
Molybdenum disulfide (MoS <sub>2</sub> )	有機系二硫化モリブデン
Calcium sulfonate (SO <sub>3</sub> CaSO <sub>3</sub> )	カルシウムスルホネート

極圧添加剤に関しては、 $\mu=0.08$  程度の境界潤滑下の摩擦係数値を示しており、無添加基油が $\mu > 0.1$  の金属接触値を示したのに比較して小さく、接触面とのある程度の化学反応によって、種々の極圧皮膜を形成させていることがわかる。また図 7 より、 $\alpha \approx 0.5$  の摩耗こん径も固潤滑剤の値が低く、塑性変形による避けられない接触面直径程度になっていることがわかる。



◆ non additive ■ CI-type alone ▲ P-type alone  
● CI-P blended type ◇ S-P blended type □ S-type alone  
△ Molybdenum disulfide ○ Calcium sulfonate  
--- Hertzian contact diameter assuming frictionless elastic deformation  
— Contact diameter assuming frictionless plastic deformation

図 7 作用 15min 後の荷重比と摩耗こん径の関係

これらの結果より、優れた摩擦摩耗特性を示した二硫化モリブデン入り潤滑油（粘度 32cSt）を、本ユニット接触部に、二硫化モリブデン入りグリース（粘度 32cSt）として選択・適用した。その結果、100 万回の繰り返し使用に耐え、リニア駆動ユニットとして十分使用できることが明らかになった。

#### 4. 本駆動ユニットの省エネ性

表 2 に本駆動ユニットと同程度のクランプ力を有する空気圧シリンダを 1 年間（200 日×8 時間×60 分×2 回）クランプユニットとして使用した場合の消費電力量を示す。さらに、表 3 に表 2 と同じ期間、本駆動ユニットを使用した場合の消費電力量を示す。表 2, 3 に示すように、空気圧シリンダの年間電力使用量は 150.3kWh、それに対して、本駆動ユニットの年間電力使用量は 7.62kWh である。本駆動ユニットの年間電力使用量は空気圧シリンダの約 1/20 であり、95 % 程度のエネルギーを削減できることを示している。

表 2 における、1 ストローク空気量の単位に示す NL とは基準状態（0℃、1atm 大気圧）での体積を示すものである。

表 2 空気圧シリンダの消費電<sup>(3)</sup>

空気圧シリンダ関連項目	物理量	単位
代表シリンダ容積	502	cc
1 ストローク空気量	6.03	NL
電力量/空気量	0.13	Wh/NL
1 ストローク使用電力	0.784	Wh
年動作回数 (200×8×60×2)	192×10 <sup>3</sup>	
ユニット当たり電力使用量年間	150.3	kWh

表 3 新方式リニア駆動ユニットの消費電力<sup>(4)</sup>

新方式リニア駆動ユニット関連項目	物理量	単位
空走時間	0.99	sec
クランプ時間	0.2	sec
1 ストローク時間	2.38	sec
1 ストローク使用電力	39.7	mWh
年動作回数 (200×8×60×2)	192×10 <sup>3</sup>	
ユニット当り年間使用電力量	7.62	kWh

#### 5. 結言

本報では、新方式リニア駆動ユニットの作用機構とそのクランプ用ユニットとしての耐久性および省エネ性について検討した。その結果、以下の 3 点が判明した。

(1) 作用機構については、従来のリニア駆動機構と異

なり、コンパクトな差動ねじ機構を考案し1/10減速が実現できていることを確認した。その結果クランプユニットとして必要な6kNの推力が100W程度のモーターで十分実現できることがわかった。

(2) 負荷時における、ねじの高荷重点接触部で時折生じる微小すべりによる摩耗や焼付きは、供給グリースに二硫化モリブデンを添加することで防止できることがわかった。その結果、期待されている100万回の寿命をクリアすることができた。

(3) また、本駆動ユニットの省エネ性は、この分野で一般的によく用いられている空気圧シリンダと比較して、95%ものエネルギー削減ができることがわかった。

#### 謝 辞

本研究は平成17年度兵庫県COEプログラム、平成18年度戦略的基盤技術高度化支援事業、平成21年度科研費 基盤研究(C)(21560156)および平成21年度NEDOの助成を受けたものである。

#### 参考文献

- (1) 中辻 武, 山口永人, 村尾良男:「中程度および厳しいすべり接触における極圧添加剤の評価」日本高専学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 27-32, 2010.
- (2) T. Nakatani, T. Ikuma and A. Mori:「Reaction Characteristics of Cl-P Blended EP Additives in Early Stages of Severe Sliding Contact」Journal of, Tribology, vol. 42, No.11(1997)pp1273-1285. (Allerton Press, Inc.), 1997.
- (3) 村尾良男, 新堀正博, 貞広恵輔, 中辻 武:「新方式リニア駆動ユニットの作用機構とクランプユニットとしての耐久性およびエネルギー消費」日本高専学会誌, Vol. 16, No.3, pp. 11-16, 2011.
- (4) 中西康二:「FPSにおけるライフサイエンスアセスメント」日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 38-45, 2003.