

病院用ベッドのクイックリリース（緊急背下げ動作）を定速化するアクチュエータの研究

1. はじめに

1.1 アクチュエータとは

アクチュエータとは、モータの回転運動をギヤやねじを介して直線運動に変換し、推力を発生させる装置である。

当社のアクチュエータは主に病院用、施設・在宅介護用の電動ベッドに使用されている。アクチュエータのロッドを伸縮させることでベッドのリンク機構を介して、ベッドの高さや背もたれが上下する。

当社製アクチュエータの外観を図1に示す。

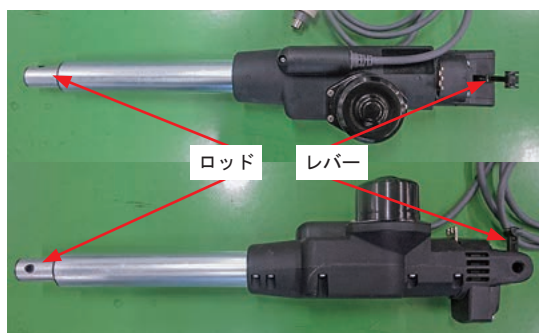


図1 当社製アクチュエータ

1.2 クイックリリースとは

病院用ベッドのクイックリリース（緊急背下げ動作）とは、患者の心肺蘇生を迅速に行うために背もたれを瞬時にフラットな状態に戻す動作を指す。この動作を実現するには、アクチュエータのロッドを瞬時に縮める必要がある。そのため、クイックリリース時にアクチュエータのレバーを引くことでブレーキが解放され、ロッドを瞬時に縮めることができる構造になっている。なお、クイックリリースは日本では重症患者用ベッドに、欧米では病院用ベッド全般に広く採用されている。

当社製アクチュエータは、レバー（図1）を引くことでアクチュエータ内のブレーキとギヤの連結を解除し、アクチュエータにかかる荷重を利用してロッドを瞬時に縮める仕組みである。

1.3 現行アクチュエータにおける課題

現行アクチュエータは、ロッドが縮む速度を減速するため、Oリングを駆動軸（以下、ネジシャフト）に挿入することで、ネジシャフトと摺動相手間に摺動抵抗を発生させ、減速す

る設計である。

しかし、Oリングの摺動抵抗だけでは十分な減速ができずに背もたれが急激に倒れてしまい、患者に衝撃が加わる可能性がある。そのため、安全性の観点からこの衝撃を緩和する必要がある。

1.4 研究の目的

本研究の目的は、クイックリリースの安全性向上を図ることである。このため、背もたれが一定の速度で倒れるようにブレーキ力を制御するアクチュエータを研究開発し、クイックリリース時に患者へ加わる衝撃を緩和する。

1.5 研究の目標値

現行のアクチュエータは、「ロッドが縮む時間：7 s以下」という仕様に対し、荷重4,000 N条件でのロッド縮み時間は0.6 sと早く衝撃が大きい。

研究の数値目標を以下の通り定める。

■ 縮み時間

アクチュエータにかかる荷重が500 N～4,000 N内でロッド縮み時間が1 s～7 sの範囲に収まること。

■ 操作性

現行アクチュエータの操作性を維持すること（レバー操作ON/OFFのみで作動）。

■ コスト

現行の当社製アクチュエータに対し、原価+20 %以内。

2. クイックリリースの定速化

2.1 アクチュエータに採用するブレーキの選定

定速下降を実現するアクチュエータのブレーキとして、ディスクブレーキ、ロータリーダンパー、遠心ブレーキを候補に挙げた。

各ブレーキ候補に対して機能・操作性・コスト・サイズ・実現性の5つの要件にて総合的に評価した。評価結果を表1に示す。

当社ではシャッター関連製品を量産しており、その製品に遠心ブレーキを採用している実績と、評価結果（表1）を踏まえ、当社では遠心ブレーキを採用して研究を進める方針とした。

表1 ブレーキ候補の評価結果

構想案	機能	操作性	コスト	サイズ	実現性	採用可否
1. ディスクブレーキ	△	×	△	×	×	×
2. ロータリーダンパー	×	○	×	○	×	×
3. 遠心ブレーキ	○	○	△	△	○※1	○

※1：シャッター関連製品で実績有り

2.2 遠心ブレーキとは

遠心ブレーキは、回転体の速度に応じた制動力を発生する機構である。

現行のアクチュエータは、クイックリリース時にブレーキを解放し、駆動軸となるネジシャフトが高速で回転しながらロッドが縮む構造となっている。

そのため、ネジシャフトを回転体とした場合、遠心ブレーキは速度依存型の受動制御ブレーキとして機能し、急激な加速や過回転の抑制に有効である。そのため、調速に適している。また、操作性も現行のレバー操作ON/OFFのみで作動を維持できる。

アクチュエータに搭載する当社製遠心ブレーキの構造を図2に示す。

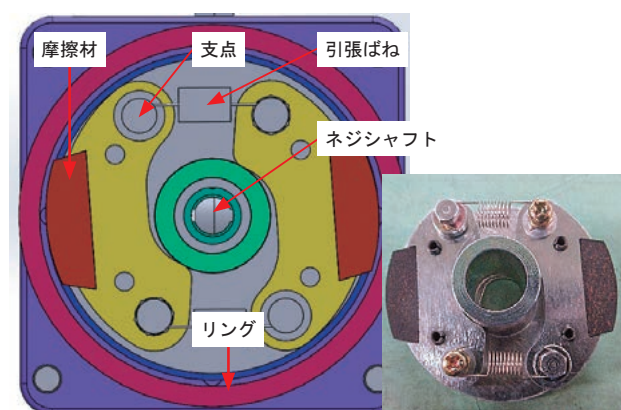


図2 当社製遠心ブレーキ (右：現物)

アクチュエータに搭載する遠心ブレーキは、以下の(1)～(3)の動作を高速で繰り返すことで回転速度を制御している。

(1) 回転速度の増加

回転体の回転速度が上昇すると、摩擦材は慣性力(遠心力)により外側へ広がる。

(2) 制動の発生

外側へ広がった摩擦材が摺動相手であるリングに接触し、摩擦力によって回転を抑制する。

(3) 制動の解除

回転速度が低下すると慣性力(遠心力)が弱まり、摩擦材はリングから離れて、制動が解除されるため、回転軸の回転速度が上昇する。

3. 下降時間の机上計算

3.1 運動方程式

荷重を受けたロッドがクイックリリース時に速度 v で縮むシステムの数式モデルは以下の通り。

$$\left(\frac{J_s}{r \tan \theta_l} + rm \frac{\sin \theta_l - \mu_m \cos \theta_l}{\cos \theta_l + \mu_m \sin \theta_l} \right) \frac{dv}{dt} + \left(\frac{r K_d}{(\cos \theta_l + \mu_m \sin \theta_l) \sin \theta_l} \right) v - rm g \frac{\sin \theta_l - \mu_m \cos \theta_l}{\cos \theta_l + \mu_m \sin \theta_l} + T_d + T = 0 \quad \cdots \textcircled{1}$$

このシステムをブロック線図で示すと図3の通り。

そのパラメータを表2に示す。

目標の下降時間を達成できるような速度から必要な遠心ブレーキトルク T_d を求める。

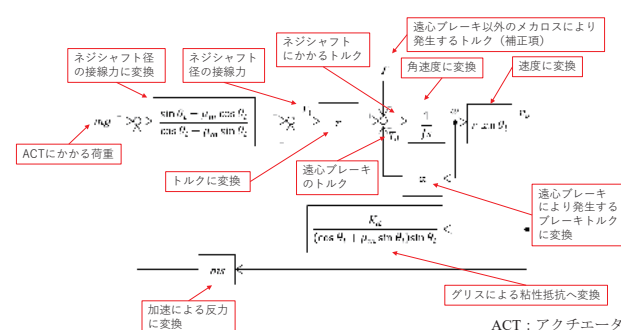


図3 クイックリリース時の動作モデルを示したブロック線図

表2 ブロック線図の各パラメータ説明

記号	パラメータ説明
m	ACTに掛かる荷重
g	重力加速度
r	ネジシャフト有効半径
θ_l	ネジシャフトリード角
μ_m	ダイケイナットとネジシャフト間の動摩擦係数
Kd	ダイケイナットとネジシャフト間のグリスによる粘性係数
J_s	駆動軸の慣性モーメント (影響の大きい遠心ブレーキのブレーキウエイト部のみ)
T_d	遠心ブレーキのトルク
T	遠心ブレーキ以外のトルク(実験値から求めた補正項)

3.2 遠心ブレーキのトルク計算

遠心ブレーキトルク T_d は以下の式となる。

$$T_d = r' \times F' = r' \times \mu' \times N' \\ = r' \times \mu' \times m' \times r' \times \omega^2 \quad \cdots \textcircled{2}$$

r' ：リング内径の半径[m]

F' ：摩擦材とリング間に生じる摩擦力[N]

μ' ：摩擦材とリング間の動摩擦係数

N' ：慣性力(遠心力)[N]

m' ：摩擦材の質量[kg]

ω ：遠心ブレーキの角速度[rad/s]

ここで、必要な遠心ブレーキトルク T_d を得るために μ' および m' の値を調整し、遠心ブレーキのブレーキ材と重量を決める。

①式をグラフ化し、線形近似したものを図4に示す。

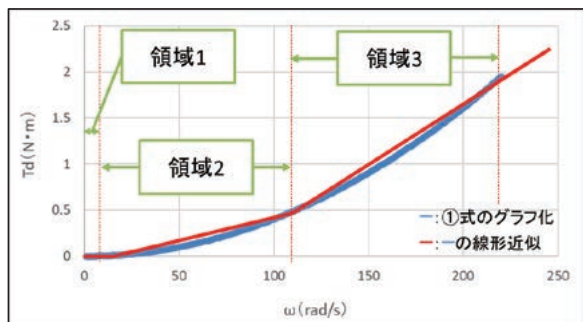


図4 遠心ブレーキの T_d と ω の関係性

今回、計算が複雑となるため、線形近似すべく、角速度にて、以下の3つに分けた。

領域1：遠心ブレーキが効き始める前 ($0 \leq \omega < 20$)

領域2：低回転域であるとき ($20 \leq \omega < 120$)

領域3：高回転域であるとき ($120 \leq \omega < 220$)

※低回転域と高回転域の区分け

二次関数を一次関数で近似する際、近似精度を確保するため、関数の傾き変化が大きい箇所を目安に設定した。図4より(1)～(3)の近似式は全て、

$$T_d = \alpha\omega + \beta \quad \cdots \textcircled{3} \quad \text{で表せる。}$$

α ：摺動リング内径の半径、ブレーキウェイトの質量、ライニングと摺動リング内径間の動摩擦係数により決まる値(近似式の傾きを指す)

β ：初期角速度(近似式の切片を指す)

3.3 シミュレーション

運動方程式の解(①、③式)より遠心ブレーキを使用した時のロッド縮み速度と時間の関係性をシミュレーションした。

荷重 500 N と 4,000 N の場合のシミュレーションをグラ

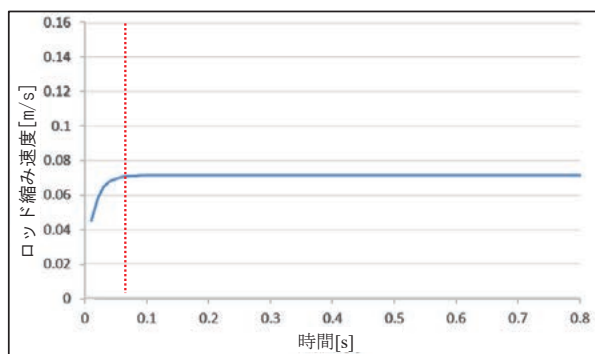


図5 荷重 500 N 時のシミュレーション

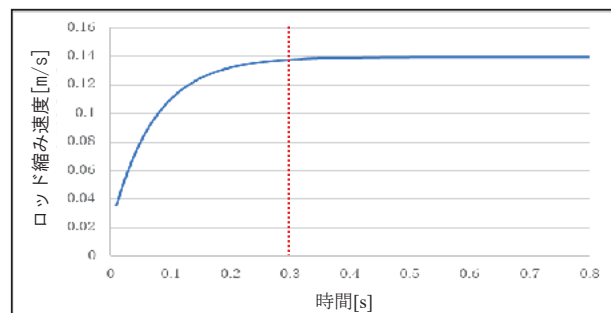


図6 荷重 4,000 N 時のシミュレーション

フで表すと図5、6のようになる。

荷重 500 N の場合(図5)は下降開始から 0.1 秒以内にロッドが縮む速度は 0.07 m/s の一定速度で安定する。荷重 4,000 N の場合(図6)は下降開始から約 0.3 s 後にロッドが縮む速度は 0.14 m/s の一定速度で安定する結果となった。

尚、図5、6の v - t グラフよりストローク 210 mm でのロッド縮み速度は、荷重 500 N で 3.0 s、荷重 4,000 N で 1.5 s となり、目標を達成できる見込みが立った(目標：1 s ～ 7 s)。

4. 試作品試験結果

遠心ブレーキ付きアクチュエータの試作品を製作し、クイックリリース時の試験を行った。試験はアクチュエータ単体に荷重をかけた状態でアクチュエータのレバーを引き、ロッドが縮む速度を測定した。

代表して荷重 4,000 N 時の v - t グラフを図7に示す。

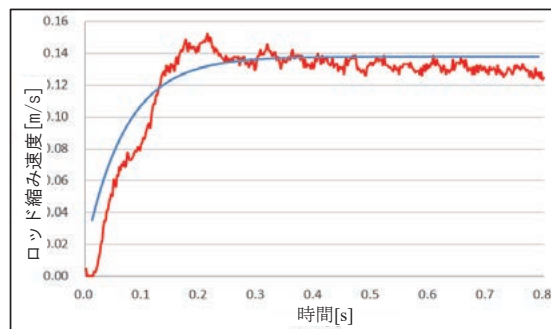


図7 荷重 4,000 N 時の試作品試験結果

測定した荷重 4,000 N 時の試験結果は赤線で示しており、図6で示したシミュレーション結果は青線で示している。

図7より試験結果は、シミュレーション結果と同等の波形を示していることを確認した。

5. 机上計算と試験結果の比較

アクチュエータにかかる荷重ごとのロッド縮み時間を試験時とシミュレーション時で比較したグラフを図8に示す。詳細のロッド縮み時間については表3～4を参照。

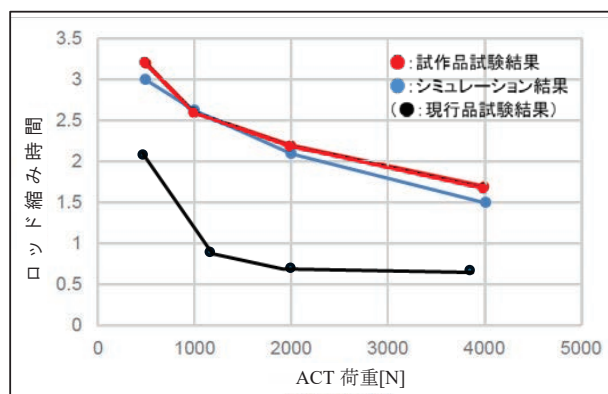


図8 荷重ごとのロッド縮み時間試験結果

表3 試作品試験結果

ACT 荷重 [N]	縮み時間 [S]
500	3.2
1,000	2.6
2,000	2.2
4,000	1.7

表4 シミュレーション結果

ACT 荷重 [N]	縮み時間 [S]
500	3.0
1,000	2.6
2,000	2.1
4,000	1.5

表3, 4よりシミュレーション通りの測定結果が得られたことが分かる。

6. まとめ

本研究の目的である「クイックリリース時にベッドの背もたれが一定の速度で倒れるように、ブレーキを制御するアクチュエータを研究し、患者へ加わる衝撃を緩和する」を達成することができた。

遠心ブレーキ付きアクチュエータの目標値に対する結果を表5に示す。

表5 目標値と結果

項目	目標値	結果・評価	判定
縮み時間	1～7秒 (ストローク210 mm、 ACTにかかる荷重 500 N～4000 N)	荷重500～4,000 Nの 全領域において、下降 時間1～7秒の範囲内 であった。	○
操作性	現行品の操作性を維持 すること (レバー操作ON/OFF のみで作動)	現行品と同様の操作性 を維持できた。 レバー操作はON/OFF のみであるため、使用 者の技量に寄らない。	○
コスト	原価 +20 %以内	原価 +27 %	×

■ 縮み時間

目標時間「1～7秒」に対して、試作品試験結果が「1.7～3.2秒」となり、目標を達成。

■ 操作性

遠心ブレーキ案を採用したことで、現行品の操作性を維持することができ、目標を達成。

■ コスト

部品点数が多いことから目標「原価+20 %以内」を達成できていないため、今後は原価低減に注力して遠心ブレーキ付きアクチュエータの量産化を目指す。

完成した当社製遠心ブレーキ付きアクチュエータを図9に示す。

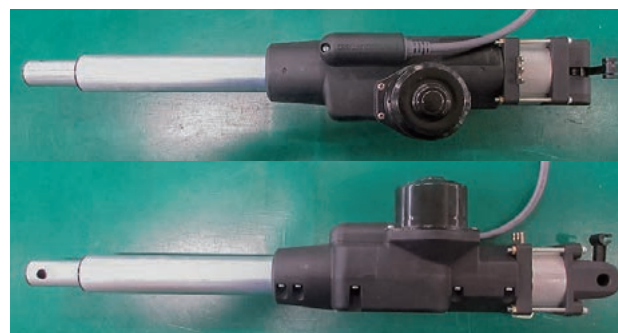


図9 当社製遠心ブレーキ付きアクチュエータ

図10に遠心ブレーキ部の3Dモデルを示す。

※遠心ブレーキ部以外についてはネジシャフトやレバー付近含め、簡略化している。

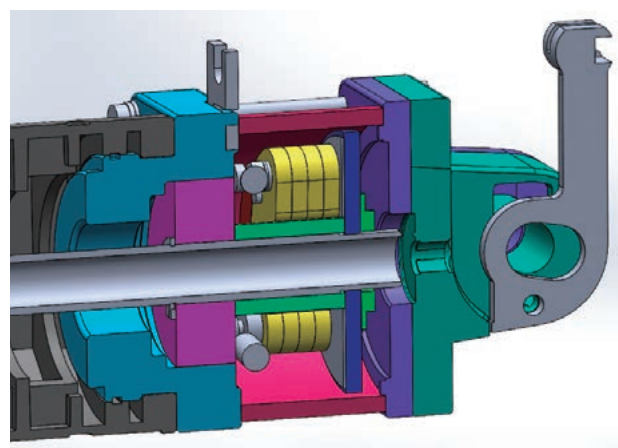


図10 遠心ブレーキ部の構造図詳細