

## CVTと受動素子を組み合わせたパワーアシスト機構の基礎研究

北海道大学 ○小林 憲弘 北海道大学 田中 孝之 北海道大学 金子 俊一

## 要 旨

本稿では無段階変速機（以下 CVT）と受動素子を組み合わせたパワーアシスト機構を提案する．この機構では CVT の変速比と弾性体の貯蓄エネルギーという 2 つの制約条件が存在するため，一般的なアシスト手法は適用できない．そこでアシスト比を可変にして最終的に所望のアシスト比に近づける制御方法を検討し，シミュレーションを行った．

## 1. 序論

建設現場や生産現場では，台車を使って重量物を人手で搬送することが多い．運搬作業の軽労化と安全化のために様々なパワーアシスト台車の研究が行われてきた．動力源にモータを使った解決策として，北原らは発進時の急な加速を抑えるスロースタート方式を用いた電動パワーアシスト台車を開発している [1]．従来の解決策ではバッテリーとモーターを用いており，消費電力の大きさと車体の重さが課題であった．そこで本研究では CVT と弾性体を組み合わせたパッシブパワーアシスト機構を提案する．この機構では等速時に弾性体にエネルギーを蓄積し，加減速をアシストする．無段階に変速比を変化させる CVT を用いて弾性体が出力するトルクを制御することで，トルクを自在に調整して台車の加減速をアシストできる．この機構では CVT の変速比と弾性体の貯蓄エネルギーという 2 つの制約条件が存在するため，一般的なアシスト手法は適用できない．そこでアシスト比を可変にして最終的に所望のアシスト比に近づける制御方法を検討し，シミュレーションを行う．

## 2. 弾性体のトルク制御機構を搭載したパワーアシスト台車モデル

Fig.1 に示す弾性体のトルク制御機構は，弾性体のトルクを CVT の変速比によって調節することを目的としている．

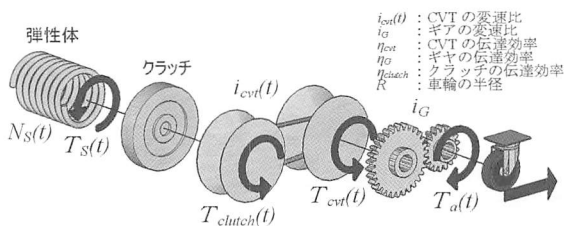


Fig. 1: Torque control mechanism for an elastic body

この機構において，車輪のトルク  $T_a(t)$  によって発生するアシスト力  $F_a(t)$  は次式のように表される．

$$F_a(t) = \frac{\beta i_G \eta_G \eta_{cv} \eta_{clutch} k_S}{R} N_S(t) i_{cv}(t) \quad (1)$$

ここで， $\beta$  はクラッチの状態を表し，クラッチが正方向のとき  $\beta = 1$ ，クラッチが繋がっていないとき  $\beta = 0$ ，クラッチが逆方向のとき  $\beta = -1$  となる．また，変速比  $i_{cv}(t)$  と巻きバネの巻き数  $N_S(t)$  にはそれぞれ次式で示される制約がある．

$$i_{cv}MIN \leq i_{cv}(t) \leq i_{cv}MAX \quad (2)$$

$$0 \leq N_S(t) \leq N_SMAX \quad (3)$$

このとき，作業者の力を  $F_h(t)$ ，台車の質量を  $M$ ，粘性摩擦係数を  $c$  とすると台車押し作業の運動方程式は次式で表される．

$$F_h(t) = M\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) - \alpha(t)F_h(t) \quad (4)$$

また，変速比  $i_{cv}(t)$  の制御則は次式のようになる．

$$i_{cv}(t) = \frac{R\alpha(t)F_h(t)}{\beta i_G \eta_G \eta_{cv} \eta_{clutch} T_S(t)} \quad (5)$$

## 3. 制御アルゴリズム

所望のアシスト力を得られるかどうかは，その時点で弾性体に蓄えられているエネルギーに依存する．よってモーターを用いる場合と異なり，一定のアシスト比を維持するように制御したり，インピーダンス制御を行うことは難しい．そこで，作業者の入力を予測して制約のもとで所望のアシスト比が得られる制御方法を用いる．この方法では，作業者は台車のダイナミクスを感じ取り，目標速度まで躍度最小軌道で加速するものと仮定した．この仮定をもとに制御器は次式のようにアシスト比を決定する．

$$\alpha(t) = k_\alpha(\alpha_{ref} - \alpha_{total}(t)) \quad (6)$$

ここで、 $k_\alpha$  は比例ゲイン、 $\alpha_{ref}$  は所望のアシスト比である。また、総合的なアシスト比  $\alpha_{total}$  の評価式には次式を用いる。

$$\alpha_{total}(t) = \int_0^t \frac{F_a(t)}{F_h(t)} dt \quad (7)$$

この制御の流れを Fig.2 に示す。ここで、 $E_s$  は弾性体のエネルギー、 $E$  は台車を目標速度まで加速させるのに必要なエネルギーである。

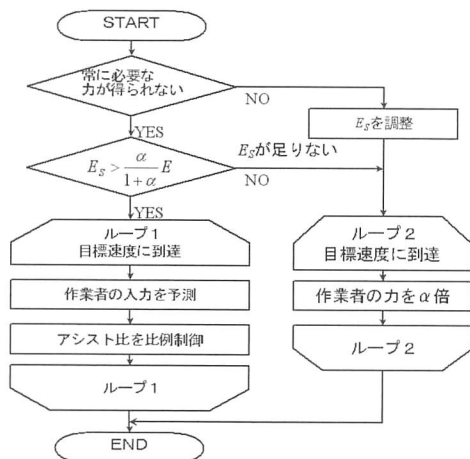


Fig. 2: Overview of the proposed control method

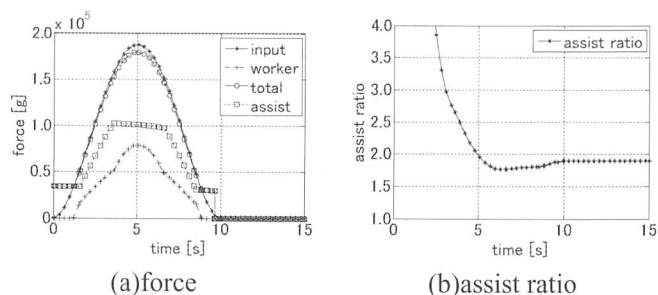


Fig. 3: simulation result at a constant assist ratio (conventional method)

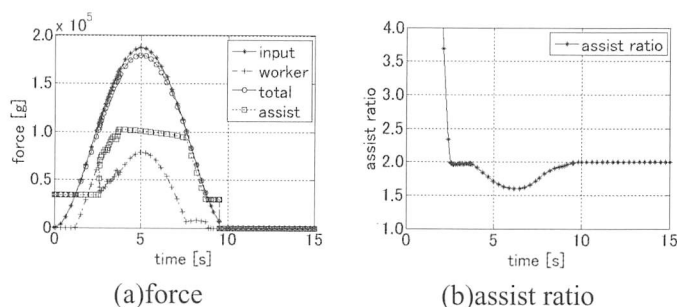


Fig. 4: simulation result at a variable assist ratio (proposed method)

#### 4. 台車押し作業のシミュレーション

作業者の力とアシスト比がどのように変化するか調べるために、提案した弾性体のトルク制御機構を用いて台車押し作業を行った場合のシミュレーションを行った。ここで、台車の質量  $M = 1000[\text{kgf}]$ 、粘性摩擦係数  $c = 0.1$  とした。作業者の目標速度は  $1[\text{m/s}]$ 、目標到達時刻は  $10[\text{s}]$  であり、作業者の入力と目標速度到達時刻は躍度最小軌道によって予測できているものとした。所望のアシスト比  $\alpha_{ref} = 2$  であり、作業者は  $F_h(t)$  と  $F_a(t)$  の合計が躍度最小軌道となるように力を制御するものとした。また、弾性体の初期エネルギーは台車を加速させるのに十分な大きさであるが、変速比の制約によって所望の値より小さい力しか出せない時刻がある場合についてシミュレーションを行った。Fig.3 に、作業者の力を常に  $\alpha$  倍するアシスト方法を用いた場合についてのシミュレーション結果を示す。Fig.3 では必要とされる力が大きくなるにつれてアシスト力に制限がかかり、最終的なアシスト比は目標値である 2 より小さくなっている。Fig.4 に、総合的なアシスト比が所望の値になるようにアシスト比をフィードバック制御した場合についてのシミュレーション結果を示す。Fig.4 の結果から、アシスト比のフィードバック制御を行うことで、総合的なアシスト比を所望の値である 2 に制

#### 5. 結論

本稿では、CVT と弾性体を組み合わせたパワーアシスト装置を用いた台車押し作業をモデル化し、シミュレーションを行った。シミュレーション結果から、作業者の力を常に  $\alpha$  倍する方法では、制約条件によって常に所望のアシスト力が得られないことが確認できた。制約条件のもとで所望のアシスト比を保障するために、アシスト比を可変にして最終的に所望のアシスト比に近づける制御方法を検討し、シミュレーションを行った。シミュレーション結果から、アシスト比をフィードバック制御することで総合的なアシスト比を目標の値に制御できることが示された。

今後は所望のアシスト比を常に保障できる方法について検討し、台車押し作業のシミュレーションを行う。また、等速時と減速時についても制御アルゴリズムを検討し、シミュレーションを行う予定である。

#### 参考文献

[1] 北原隆, 早津昌樹, パワーアシスト運搬台車の開発, 機械力学・計測制御講演論文集, pp.190(2002)