

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	人力ロボティクスの研究 (第10報, CVTとパワーアシストを用いた人力関節駆動機構の操作負荷低減)
Title(English)	Study on Human-Powered Robotics – 10th Report: Operation Effort Reduction of Human-Powered Joint Mechanism Using CVT and Power Assist –
著者(和文)	菅原雄介, シャフィク・ムハマド, 島悠貴, 松浦大輔, 武田行生, 遠藤央, 岡本淳
Authors(English)	Yusuke Sugahara, Muhammad Syafiq, Yuki Shima, Daisuke Matsuura, Yukio Takeda, Mitsuru Endo, Jun Okamoto
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, , , 2A2-J10
Citation(English)	The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec), , , 2A2-J10
発行日 / Pub. date	2018, 6

# 人力ロボティクスの研究

## (第10報, CVTとパワーアシストを用いた人力関節駆動機構の操作負荷低減)

### Study on Human-Powered Robotics

– 10th Report: Operation Effort Reduction of Human-Powered Joint Mechanism Using CVT and Power Assist –

○正 菅原雄介 (東工大)                      ムハマドシャフィク (東工大)    学 島悠貴 (東工大)  
 正 松浦大輔 (東工大)                      正 武田行生 (東工大)                      正 遠藤央 (日本大)  
 正 岡本淳 (女子医大)

○Yusuke SUGAHARA, Muhammad SYAFIQ, Yuki SHIMA,  
 Daisuke MATSUURA and Yukio TAKEDA, Tokyo Institute of Technology  
 Mitsuru ENDO, Nihon University  
 Jun OKAMOTO, Tokyo Women's Medical University

In this paper, clanking effort reduction method for the single-DOF human-powered joint mechanism having regenerative servo clutches, by the power assist using regenerative energy and continuously variable transmission is proposed. Through the experiments, it was confirmed that the assist motor compensated external torque immediately and CVT reduced the clanking torque and power of assist motor, when an external force applied on the output shaft and its torque suddenly changed.

**Key Words:** Human-powered robotics, Regenerative clutch, Power assist, Continuously Variable Transmission

#### 1 緒言

著者らは、操作者が入力する動力を直接用いながらも、システム内部の動力流れを制御することにより、システムの運動制御を実現しようとする「人力ロボティクス」を提案し研究を行っている [1]。はじめに著者らは、人間がハンドルを回すことを動力源として用い、パウダクラッチとトルクセンサを用いたシステムにより、正転・逆転を含む出力軸のサーボ制御を行う1自由度の関節機構を試作し、人間の運動を動力として用いた出力軸角度のサーボ制御が可能であることを確認した [2, 3]。この研究では、伝達トルクを制御するのにパウダクラッチを用いていたが、トルク時定数が大きくサーボ制御に不都合という問題があった。また、クラッチは力学的に仕事をしないので原理的にはエネルギーを消費しないことが望ましいが、実際は大きな発熱がありエネルギー効率が悪いという本質的な問題点もある。これに対し著者らは、より時定数が小さくまたエネルギーの回収が可能な回生ブレーキをもちい、これと差動歯車により構成される回生サーボクラッチを提案し、評価実験を行ったところ、パウダクラッチに比べ時定数が小さく制御性が良いことが確認できた [4]。またこの回生サーボクラッチを2つ用い、出力軸の角度制御を行う1自由度関節駆動機構 THR75 の試作と評価を行い、出力軸の位置制御を実現した [5]。さらに、回生ブレーキが発電するエネルギーを有効利用し、操作者が動力を与える入力軸に必要なトルク変動を補償すべくモータによるパワーアシストを行ったところ、入力軸（ハンドル）のトルク変動は抑えられたが、回生ブレーキによる発電のみではアシストに十分な電力を得ることができなかった [6]。

そこで本研究では、パワーアシストに加えて CVT を用い減速比を制御することで、電力を大きく消費することなく操作時の負荷を低減することを目的とする。

#### 2 構造と動作原理

開発した1自由度人力関節駆動装置 THR75RII の写真と構造、電源システムの構成をそれぞれ図1,2,3に示す。

この装置は回生クラッチを正転用と逆転用の二つ備えている。回生クラッチは図のようにそれぞれ回生ブレーキとして用いる DC モータと差動歯車を接続して構成されており、入力軸が回転していれば回生ブレーキにより制動トルクを制御することで出力

軸にトルクを伝達することができる [4]。これによって操作者によりハンドルから入力された動力を用いながら正転、逆転両方向へのトルク出力を可能としている。また出力軸はロータリエンコーダを備えており、PD 制御則により関節角度をフィードバックすることで出力軸の角度制御が実現できる。回生クラッチによる出力軸のサーボ制御の詳細に関しては文献 [5] を参照されたい。

図中のアシストモータは、操作者がハンドルに大きなトルクを加えなければならないときのみアシストトルクを発生するのが理想的である。この時は出力軸が大きなトルクを発生しているときであり、したがって回生クラッチが制動力を発揮し回生電流が発生しているときであるので、回生電流をそのまま用いてアシストモータを駆動することができれば一番好都合である。しかしながら実際は瞬間的な回生エネルギーのみでは不十分であったため、回生ブレーキが制動力を発生する際に得られる回生電流をごく容量の小さいバッテリーに充電しておき、これを用いてアシスト用モータを駆動している。詳細に関しては文献 [6] を参照されたい。

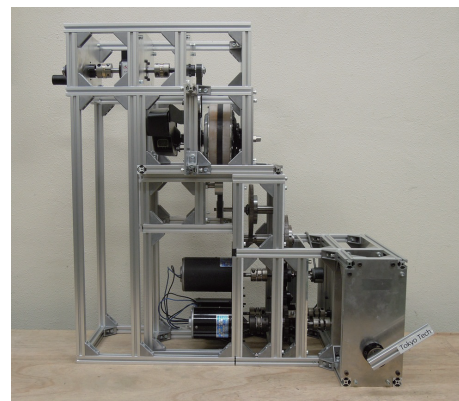


Fig.1 Photograph of THR75RII.

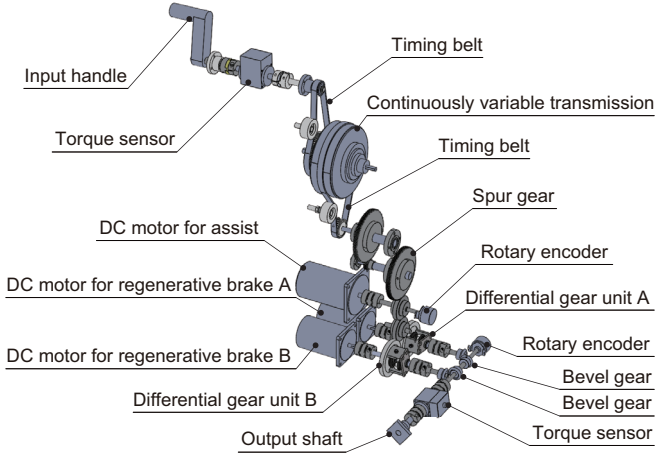


Fig.2 Structure of THR75RII.

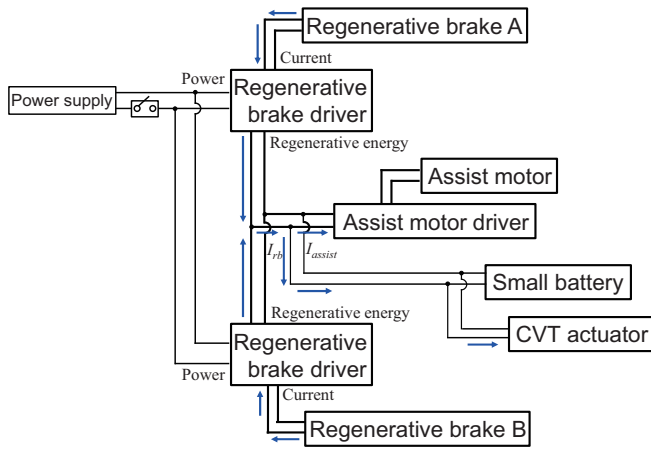


Fig.3 Power system configuration of THR75RII.

本研究ではこれに加え、平田、田中らの研究 [7, 8, 9] を参考に、入力用ハンドルの直後に自転車用の CVT として市販されている NuVinci@N171[10] を搭載した。この製品は付属の DC モータの駆動により入力軸-出力軸間の減速比を 0.57~2.0 の間で連続的に変化させることができる。駆動用モータはホール素子を備え回転数のセンシングが可能であり、本研究ではこれに基づきフィードバックを掛けることで減速比の制御を行う。

### 3 CVT とアシストモータの制御

出力軸は回生クラッチによる伝達トルクの制御によって位置制御がなされるが、回生クラッチの伝達トルクは PD 制御則で計算されるため [4]、目標軌道の加減速や出力軸にかかる外力によって入力軸に必要なトルクは大きく変化する。前報 [6] ではこれをモータによるアシストで補償していたが、前述のとおり回生クラッチによる発電のみではアシストに十分な電力を継続的に得る事はできなかった。

本研究ではこの入力軸のトルク変動を、モータによるアシストトルクに加え、CVT による減速比の変更で補償する。ただし CVT が減速比を変化させるには時間を要するため、出力軸が大きなトルクを発生する必要がある場合にはまず瞬間的にアシストモータがトルクを発生し、CVT による減速比の変化に従ってアシストトルクを減少させる。

アシストトルク  $\tau_{assist}$  と CVT の目標減速比  $r_{cvt}$  は以下の式

で算出する：

$$\tau_{assist} = \begin{cases} 2\tau_d - \frac{\tau_{hd} r_{cvt}}{r_{sys}} & (\tau_d \geq \frac{\tau_{hd}}{r_{sys} r_{cvt}}) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (1)$$

$$r_{cvt} = \begin{cases} \frac{2r_{sys}\tau_d}{\tau_{hd}} & (\tau_d \geq \frac{\tau_{hd}}{r_{sys} r_{cvt}}) \\ 1 & (otherwise) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 $\tau_d$  : PD 制御則で計算される出力軸の目標トルク、 $\tau_{hd}$  : ハンドルの目標トルク、 $r_{cvt}$  : CVT の実際の減速比、 $r_{sys}$  : CVT を除く駆動系の減速比。

### 4 評価実験

開発した 1 自由度人力関節駆動装置 THR75RII と提案する制御系を用いて評価実験を行った。出力軸の目標角度は原点に固定し、操作者がハンドルを回して動力を加えている状態で、出力軸に手で外力トルクを加えた。実験結果を図 4~8 に示す。

図 4 に示す出力軸の計測トルクより、時刻  $t = 22 \sim 40$  s で出力軸に外力が加わっていることがわかる。この間、図 5 より、出力軸の角度偏差を補償するべく PD 制御により逆転方向に目標トルクが発生し、これに基づき逆転側の回生クラッチがトルクを発生しており、出力軸の角度制御は適切に行われていることが確認できる。

ここで、図 4 に示すように、出力軸にかかる外力トルクはこの期間中ほぼ一定であるが、アシストトルクは目標値・実測値ともに初めに大きく立ち上がり、その後時間とともに減少している。

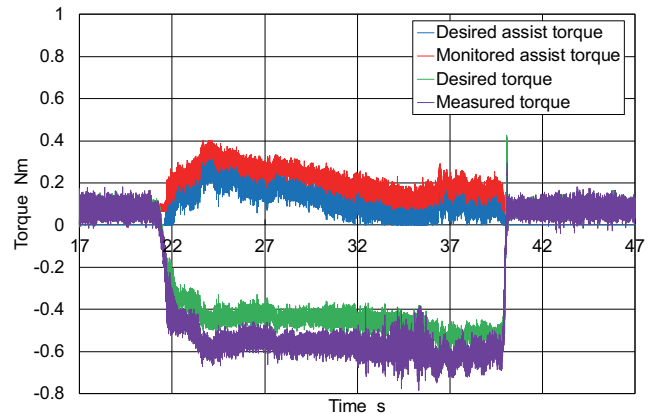


Fig.4 Output shaft torque and assist torque.

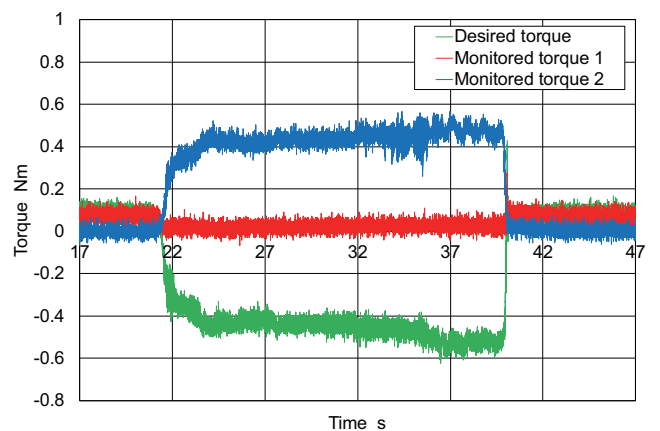


Fig.5 Desired torque and monitored torques of regenerative clutches.

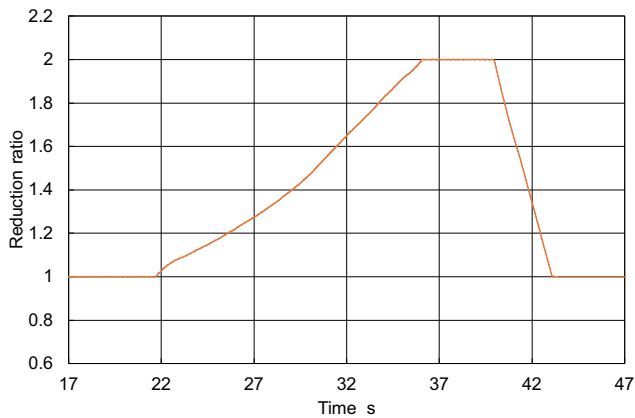


Fig.6 Reduction ratio of CVT.

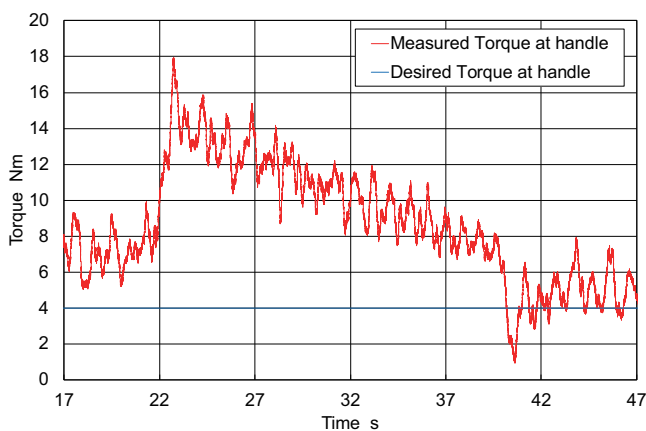


Fig.7 Handle torque.

一方図6を見ると、CVTの減速比は外力がかかっている間に増加してゆき、15秒ほどかけて最大値に達し、外力が除かれると速やかに1に戻っている。また図7より、ハンドルのトルクははじめに大きく立ち上がるものの、外力の大きさは一定であるにもかかわらず単調に減少していく。これらより、大きなトルクを必要とする際にまずアシストモータがトルクを補償し、次いでCVTが減速比を変更することによって、操作時のハンドルのトルクを低減するよう働いていることが確認できる。

加えて、図8に示すアシストモータの電源電力は、外力が付加されると大きく立ち上がるが、CVTの減速比の変更に従って徐々に減少している。CVTの働きによりアシストモータの消費電力の低減が実現できていることが確認できた。

今回の実験により確認された課題としては以下の二点があげられる。

まず、図7に示すハンドルトルクの実測値は、全期間を通じて目標値である4 Nmに抑えられておらず、操作時の負荷の低減には成功したものの、ハンドルトルクを目標値へ収束させることはできなかった。これはCVTの追加により動力の伝達経路が複雑化し効率が下がったためであり、増減速機構の設計を見直す必要があると考えられる。

また、CVTの減速比の変化に長く時間がかかることも課題であり、CVT駆動用モータを再検討する必要がある。

## 5 結言

回生サーボクラッチを用いた1自由度人力関節駆動装置において、回生エネルギーを用いたモータによるアシストとCVTによる減速比の調整による、操作者が加えるハンドルトルクの負荷低減手法を提案した。試作機を開発し実験により評価したところ、

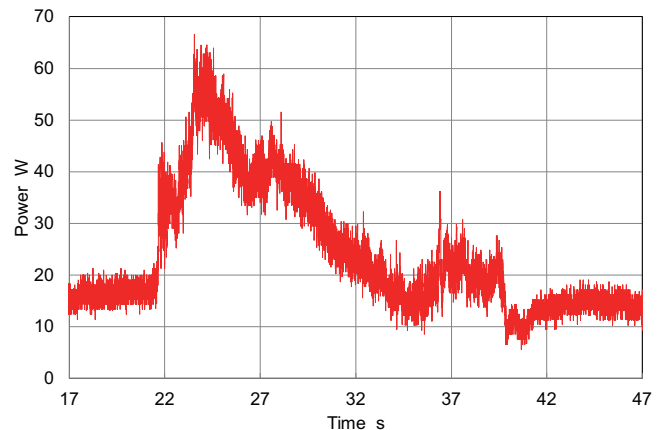


Fig.8 Power of assist motor driver.

出力軸に外力がかかり出力トルクが急激に変化した際も、まずアシストモータがトルクを補償し、次いでCVTの稼働によりハンドルのトルクを低減でき、またCVTによりアシストモータの消費電力を低減できた。

今後は、動力伝達機構全体の設計、CVT駆動モータ、アシスト用小容量バッテリーのエネルギー収支の制御について検討を行い、操作者の負担の少ない人力駆動装置の開発を進めてゆく。

## 謝辞

本研究の一部は科研費17H02131, 17K06254の助成を受け、また競輪の補助(25-113, 26-99, 27-123)を受けて実施した。また本研究で用いたCVTはFallbrook Technologies, Inc.により提供された。この場を借りて感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] 菅原雄介, “人力ロボティクスの提案”, *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 41, No. 2 (2017), pp. 73-78.
- [2] 菅原雄介, 小林了, “人力ロボティクスの研究(第1報, 1自由度関節機構の試作)”, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(2013)*, 2A1-E01.
- [3] Y. Sugahara, “Human-powered robotics – concept and one-dof prototype,” *Proc. of the 21st CISM IFToMM Symp. on Robot Design, Dynamics and Control* (2016), pp. 191-198.
- [4] 菅原雄介, 遠藤央, 岡本淳, 松浦大輔, 武田行生, “人力ロボティクスの研究(第7報, 回生サーボクラッチの動作実験)”, *第21回ロボティクスシンポジウム* (2016).
- [5] Y. Sugahara, K. Kikui, M. Endo, J. Okamoto, D. Matsuura and Y. Takeda “A Human-Powered Joint Drive Mechanism Using Regenerative Clutches,” *Proc. of the IEEE/RSJ Int'l. Conf. on Intelligent Robots and Systems* (2017), pp. 6337-6342.
- [6] 島悠貴, 菅原雄介, 松浦大輔, 武田行生, 遠藤央, 岡本淳, “人力ロボティクスの研究(第9報, 人力関節駆動機構における回生エネルギーを用いた駆動アシスト)”, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(2017)*, 2A2-L04.
- [7] Y. Hirata, S. Ando and K. Kosuge, “Cadence Control of Cycling Wheelchair with Continuously Variable Transmission and Servo Brake,” *Proc. of the IEEE Int'l. Conf. on Robotics and Automation* (2016), pp. 3062-3068.
- [8] 田中優斗, 平田泰久, “無段変速機とクラッチを用いた足こぎ車いすの走行制御”, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(2017)*, 2A1-K02.
- [9] 田中優斗, 平田泰久, “無段変速機とクラッチを用いた足こぎ車いすの踏力評価”, *第18回システムインテグレーション部門講演会(2017)*, pp. 2645.
- [10] Fallbrook Technologies Inc., “NuVinci®Technology,” <http://www.fallbrooktech.com/nuvinci-technology>, (参照日 2018年3月1日).