

# メカニカル安全装置を搭載したリハビリテーション・ロボットスーツの開発 (制御方法の検討)

Development of a Rehabilitation Robot Suit with Mechanical Safety Devices:

Study on a Control Method of the Robot Suit

○ 野口蒼平(東海大院) 甲斐義弘(東海大)

菅野正太郎(東海大院) Wenlong ZHANG (UC Berkeley) 富塚 誠義 (UC Berkeley)

Souhei NOGUCHI, Yoshihiro KAI, Shotaro KANNO, Tokai University  
Wenlong ZHANG, Masayoshi TOMIZUKA, University of California, Berkeley

**Abstract:** Safety is one of the most important issues in rehabilitation robot suits. We have developed a rehabilitation robot suit with two mechanical safety devices called the “velocity-based safety device” and the “torque-based safety device”. The robot suit assists a patient’s knee joint. The velocity-based safety device switches off the motor if it detects an unexpected joint angular velocity. Similarly, the torque-based safety device switches off the motor if it detects an unexpected joint torque. The safety devices will work even when the computer breaks down, because they consist of only passive mechanical components without actuators, controllers or batteries. In this paper, we use a PID controller to generate assistive torques of the robot suit. Furthermore, we present analytical and experimental results to verify the effectiveness of the PID control.

**Key Words:** Robot, Mechatronics, Robot suit, Safety device

## 1 緒言

近年、ロボットスーツのリハビリテーション分野への応用が期待されている。このような人体に装着するロボットスーツの開発においては、その安全性が極めて重要となる。

著者らは、安全性の向上を目指し、これまでにコンピュータが故障しロボットスーツの制御が不能となった場合でも機能するメカニカル安全装置(速度ベース安全装置・トルクベース安全装置)を備えたロボットスーツを提案し、開発を行っている<sup>(1)</sup>。そのロボットスーツは患者の膝関節をアシストする。ロボットスーツの制御が不能となり患者の膝関節が予め設定したトルク以上で動かされようとする、トルクベース安全装置がそれを察知しロボットスーツを停止させる。同様に、予め設定した速度以上で動かされようとする、速度ベース安全装置がそれを検知しロボットスーツを停止させる。本ロボットスーツは、駆動モータと患者の装着部との間にトーションバネを介在させ、ふくらはぎ部に柔らかくアシスト動力を伝達する。

本研究では、モータと患者の装着部との間にトーションバネを介在させた本ロボットスーツの制御方法について、解析およびこれまでに開発したロボットスーツを用いた実験を行うことにより検討する。また、検討した制御方法を用いてロボットスーツを動作させた際、これまでに提案してきた2つのメカニカル安全装置がその制御を阻害しないか否かについても実験により検討する。

## 2 ロボットスーツの構造

これまでに著者らが開発したロボットスーツの概観を Fig.1 に示す。本ロボットスーツは、患者の大腿部とふくらはぎ部に留め具で取り付けられ、患者の膝関節をアシストする。本ロボットスーツの内部構造を Fig.2 に示す。ロボットスーツのモータはフレーム A に取り付けられており、モータのトルクは、ウォームギア、ウォームホイール、シャフト A、プレート A、トーションバネ、ギア C、ギア D、シャフト B、ギア E、ギア F、シャフト C、フレーム B を介して患者のふくらはぎ部に伝達される。速度ベース安全

装置によりロボットスーツの暴走時のシャフト A の高速度を検知し、ロボットスーツの電源が切られ、ウォームギアのセルフロック機能によりロボットスーツが停止する。ただし、患者の膝関節はトーションバネを介してアシストされるので、ウォームギアのセルフロック時でもそのバネの弾性により患者の膝関節を動かすことが可能である。

### 2-1 速度ベース安全装置

Fig.3 に速度ベース安全装置の構造を示す。ギア A はシャフト A に取り付けられる。ロータリダンパはギア B に取り付けられ、シャフト A の回転はギア A、ギア B を介してロータリダンパに伝わる。ロータリダンパの出力軸に取り付けられたバーには2つの引っ張りバネが取り付けられている。2つの引っ張りバネの多端はフレーム A にピンで取り付けられている。

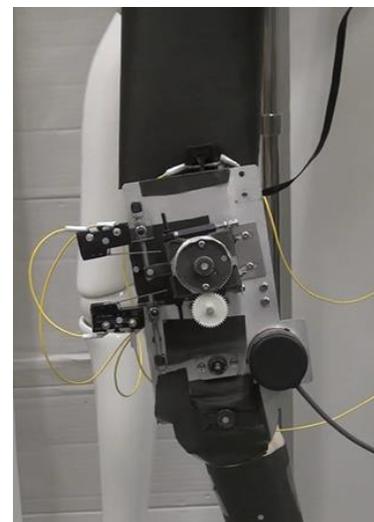


Fig. 1 Robot Suit with Mechanical Safety Devices

シャフト A があらかじめ設定した角速度 $v_s$ 以上で回転すると、バーに作用するロータリダンパによるダンピングトルクが引っ張りバネによるスプリングトルクに打ち勝ち、バーが回転し、スイッチ A が押されモータの電源が切られる。また、シャフト A が逆方向に回転した場合も同様にして逆方向に設置したスイッチが切り替えられモータの電源が切られる。なお、予め設定する角速度は、スイッチ A の設置位置を変更する、あるいは、異なるバネ定数の引っ張りバネに変更することで調節可能である。

2-2 トルクベース安全装置

Fig.3 にトルクベース安全装置の構造を示す。プレート A はシャフト A に取り付けられる。プレート A にはトーシヨンバネの一端が取り付けられており、トーシヨンバネの他端はギア C に取り付けられている。ギア C はシャフト A に固定されておらず、自由に回転できるようにベアリング支持されており、トーシヨンバネによって動力が伝達され回転する。プレート A には4本のワイヤーが取り付けられており、この4本のワイヤーはギア C に設けられた4つの穴を通り、プレート B に取り付けられている。プレート B は、ギア C とともに回転できるようになっており、シャフト A 上をスライドして移動することができる。プレート B とギア C の間には圧縮バネが設置されている。

トーシヨンバネにトルクが作用すると、プレート A の回転角度とギア C の回転角度に角度差が生じ、4本のワイヤーがねじれることによってプレート B がギア C 側に引っ張られる。あらかじめ設定したレベル以上のトルクが作用すると、プレート B はスイッチ B の位置までスライドし、スイッチ B が切り替えられ、モータの電源が切られる。設定トルクは、スイッチ B の設定位置を変えることにより調節が可能である。

3 ロボットスーツの力学モデル

上述したロボットスーツのモータで発生させるトルクを $\tau_M$ 、患者自身が膝関節で発生させるトルクを $\tau_H$ とし、各ギアやシャフトの慣性トルク、ロータリダンパによるダンピングトルク、圧縮バネによるトルク、その他摩擦トルクは十分小さく無視できるとすると、膝関節で発生するトーシヨンバネによるトルク $\tau_0$ は、次式で表せる。

$$\tau_0 = N_s N_w \tau_M - \tau_H \tag{1}$$

ここで、 $N_s$ はシャフト B とシャフト C の減速比、 $N_w$ はモータの回転軸とシャフト B の減速比である。式(1)より、トーシヨンバネにより発生するトルク $\tau_0$ は患者自身が発生させたトルクによって変化することがわかる。

4 ロボットスーツの制御系の検討

本研究では、患者自身が膝関節で発生させるトルクに依存せず、意図した目標トルク $\tau_D$ をトーシヨンバネにより発生させる制御方法として、式(2)に示す比較的単純なPID制御を用いることとした<sup>(2),(3)</sup>。

$$\tau_M = K_p(\tau_D - \tau_0) + K_D(\dot{\tau}_D - \dot{\tau}_0) + K_I \int (\tau_D - \tau_0) dt \tag{2}$$

ここで、 $K_p$ は比例ゲイン、 $K_D$ は微分ゲイン、 $K_I$ は積分ゲインである。式(2)を適用した場合のロボットスーツのブロック線図をFig.5に示す。Fig.5に示すように、トーシヨンバネのバネ定数を $k$ 、モータの回転角度を $\theta_M$ 、シャフト B の回転角度を $\theta_s$ とすると、トーシヨンバネにより膝関節で発生するトルク $\tau_0$ は次式で得られる。

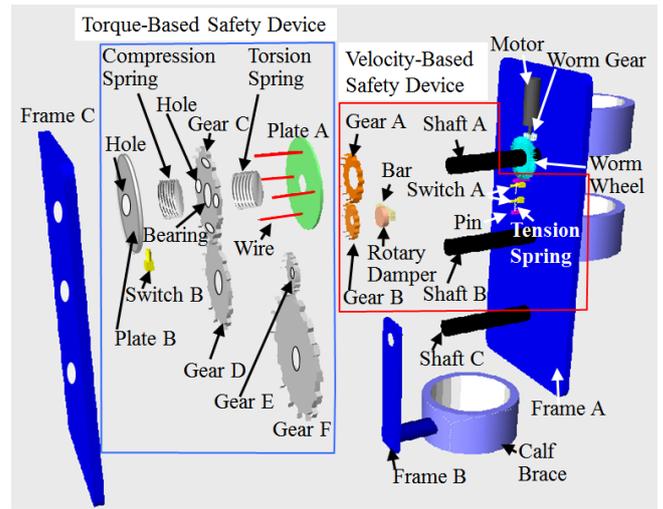


Fig. 2 Structure

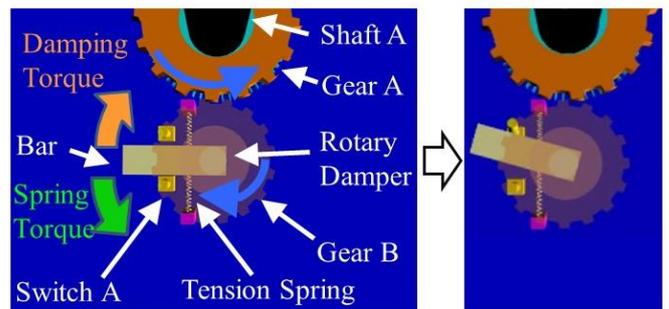


Fig. 3 Velocity-based Safety Device

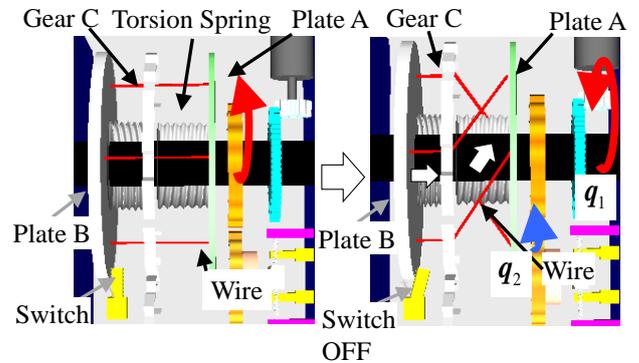


Fig. 4 Torque-based Safety Device

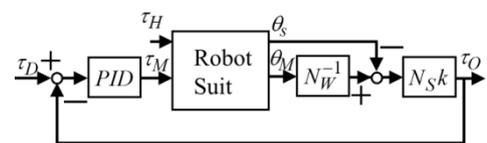


Fig. 5 Block Diagram

$$\tau_0 = N_s k (N_w^{-1} \theta_M - \theta_s) \tag{3}$$

$\theta_M$ はモータに取り付けたエンコーダで、 $\theta_s$ は別途取り付けたエンコーダにて計測し、式(3)を用いて得られた $\tau_0$ をフィードバックする。

式(2)の第一項(比例項)は目標のトルク $\tau_D$ に近づけるため、第二項(微分項)は目標トルクの変化に追従させるため

め、第三項（積分項）は患者自身が発生させたトルクに依らず目標のトルク $\tau_D$ を出力するための項である。以下に第三項の積分項を含めないとロボットスーツは目標トルク通りに出力できないことを数式で示す。

まず、積分項を含めていない式(4)により制御（すなわち、PD制御）する場合を考える。

$$\tau_M = K_P(\tau_D - \tau_O) + K_D(\dot{\tau}_D - \dot{\tau}_O) \quad (4)$$

式(1)と式(4)より、次式が得られる。

$$\tau_O = \frac{N_s N_w (K_D s + K_P)}{N_s N_w K_D s + N_s N_w K_P + 1} \tau_D - \frac{1}{N_s N_w K_D s + N_s N_w K_P + 1} \tau_H \quad (5)$$

目標トルク $\tau_D$ として一定トルク $\tau_d$ のステップ入力を与えられ、患者自身が発生させるトルク $\tau_H$ もステップ状（一定トルク $\tau_h$ ）に作用したとすると、最終値の定理より、十分時間が経った後でも、

$$\tau_O = \frac{N_s N_w K_P}{N_s N_w K_P + 1} \tau_d - \frac{1}{N_s N_w K_P + 1} \tau_h \quad (6)$$

となり、トーションバネにより発生するトルク $\tau_O$ は目標トルク $\tau_d$ に到達しない。

次に、式(2)により制御（すなわち、PID制御）する場合を考える。式(1)と式(2)より、

$$\tau_O = \frac{N_s N_w (K_D s^2 + K_P s + K_I)}{N_s N_w K_D s^2 + (N_s N_w K_P + 1)s + N_s N_w K_I} \tau_D - \frac{s}{N_s N_w K_D s^2 + (N_s N_w K_P + 1)s + N_s N_w K_I} \tau_H \quad (7)$$

上記と同様に目標トルク $\tau_D$ として一定トルク $\tau_d$ のステップ入力を与えられ、患者自身が発生させるトルク $\tau_H$ もステップ状（一定トルク $\tau_h$ ）に作用したとすると、式(7)に最終値の定理を適用して、

$$\tau_O = \tau_d \quad (8)$$

が得られる。すなわち、PID制御を適用すればトーションバネにより意図した目標トルク $\tau_D$ を出力することが可能であることがわかる。

なお、本ロボットスーツにおける $k$ は $1.13[\text{Nm/rad}]$ 、 $N_w$ と $N_s$ はそれぞれ10、6である。

## 5 実験

4章で示したPID制御をロボットスーツに適用し、患者から加えられたトルクに頼らず、トーションバネにより目標トルク（一定のトルク）が加えられるか否かを検証するために実験を行った。

### 5-1 PID制御の有効性確認実験

Fig.6に本実験の概要図を示す。本実験では、ロボットスーツの目標トルク $\tau_D$ を $3[\text{Nm}]$ に設定し、まず実験開始後5秒間障害物にロボットスーツのフレームBを接触させ動きを阻害し、膝関節部に働くトルク $\tau_O$ を各エンコーダにより計測した。5秒過ぎてから目標トルク方向と逆向きに一定の外力をフレームBに与え、関節部にかかるトルク $\tau_O$ を測定した。また、PID制御を適用した場合と適用していない場合を比較するため、 $\tau_D$ を単に減速比で割ったトルクをモータに発生させた場合についても同様に実験を行った（以下、制御なしと呼称する）。実験は3種類（ $\tau_D = 1, 3, 5[\text{Nm}]$ ）の目標トルクで各30回行った。なお、制御ありの場合のゲインはそれぞれ $K_P = 1.0$ 、 $K_D = 3.0 \times 10^{-6}$ 、 $K_I = 1.0 \times 10^{-2}$ とした。

制御なしの場合のグラフ（代表例）をFig.7に、制御ありの場合のグラフ（代表例）をFig.8に示す。その他の場合もそれぞれFig.7、Fig.8と同様の結果が得られた。各図の黒

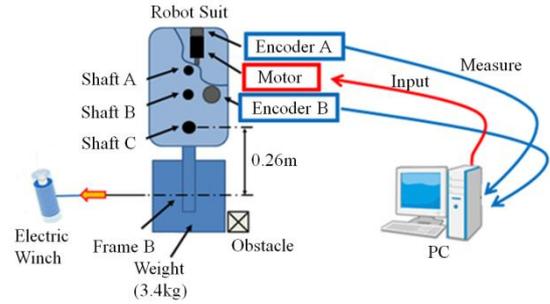


Fig. 6 Experimental Setup

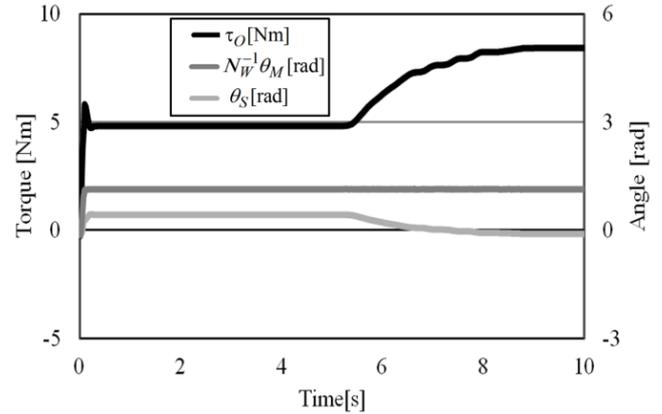


Fig. 7 Experimental Result (without PID Control)

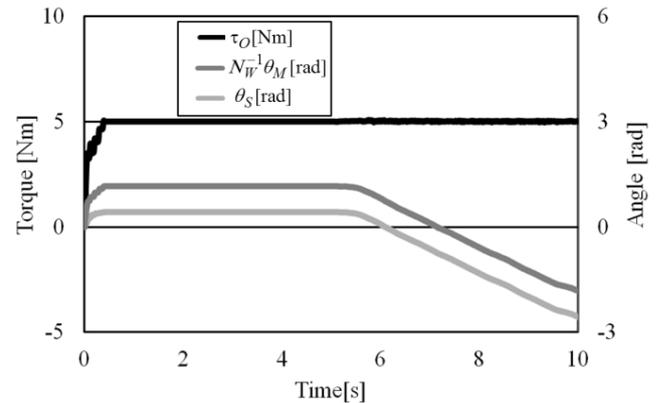


Fig. 8 Experimental Result (with PID Control)

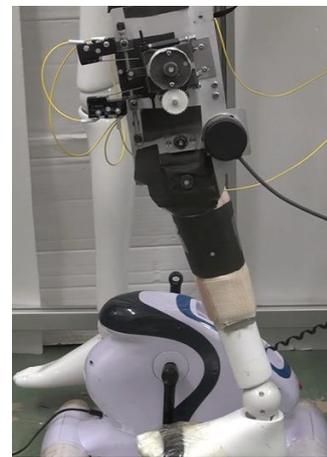


Fig. 9 Experimental Setup to Simulate a Human Walking

色の線はトーションバネにより発生するトルク $\tau_0$ を、灰色の線は $N_W^{-1}\theta_M$ を、薄灰色の線は $\theta_S$  (患者側のシャフト B の角度) を示している (各角度情報は初期位置を 0 rad とした). 制御なしの場合, トーションバネを考慮せず一定のトルクをモータに発生させているだけなので, 患者側からの動き ( $\theta_S$ ) が加えられてもモータは動かない. したがって,  $\theta_S$  の変化に伴い, トルク $\tau_0$ が増加していることがわかる. 一方, 制御ありの場合では, 患者側からの動き ( $\theta_S$ ) が加えられるとモータがそれに追従して動いており, 関節部にかかるトルク $\tau_0$ はほぼ一定である. すなわち, 患者の動き (患者から加えられたトルク) によらず, ほぼ一定のトルクで関節をアシストしていることがわかる. さらに本実験結果から, 本研究でこれまでに提案した速度ベース安全装置・トルクベース安全装置を付けた状態でも, 本実験条件においては, それらの安全装置が PID 制御を阻害することなく, ロボットスーツは目標トルクを発生していることが確認できる.

### 5-2 歩行動作追従実験

5 章 1 節より, ロボットスーツは PID 制御により, 設定した一定のトルクで制御されることが確認された. 本節では, 装着者の歩行動作 (正転・逆転) に対してロボットスーツが一定のトルクで制御されるか検証した. 等身大のマネキンの左脚膝関節部にロボットスーツを装着し, マネキンに擬似的な歩行動作を行わせることで, 関節部の動きに依らず一定のアシスト力を発生させ続けられるか否かを検証した. Fig.9 に示すように電動サイクル装置のペダル部とマネキンの左脚を固定し, 装置を動かすことでマネキンに擬似歩行運動を行わせ, 膝関節部に働くトルク $\tau_0$ を各エンコーダにより測定した. ロボットスーツの目標トルク $\tau_D$ を 0[Nm] と設定し, 実験開始から 3 周期分の関節部にかかるトルク $\tau_0$ を計測した. 実験は 30 回行った.

実験結果のグラフ (代表例) を Fig.10 に示す. 図の赤色の線はトルク $\tau_0$ , 黒色の線は $N_W^{-1}\theta_M$ , 灰色の線は $\theta_S$  を示している (各角度情報は初期位置を 0 rad とした. なお, Fig. 10 においては, 灰色の線は黒色の線と重なっているため見ることが出来ない). その他の実験結果も同様であった. Fig.10 より, 患者からの動き $\theta_S$ に対してモータが追従して動いており, ロボットスーツの膝関節部に作用するトルク $\tau_0$ が目標トルク 0[Nm]と同じく一定に制御されていることがわかる. また, 正転・逆転の両方向の動きに対して追従していることから, 患者の歩行動作に対して目標トルク通りにトルクを発生させていることがわかる. また, 本実験結果からも, 2つの安全装置が PID 制御を阻害することなく, ロボットスーツは目標トルクを発生していることが確認できる.

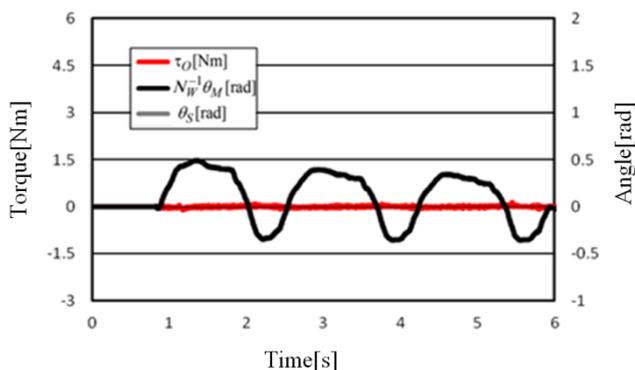


Fig. 10 Experimental Result ( $\tau_0 = 0$  Nm)

## 6 結言

本研究では, モータと患者の装着部との間にトーションバネを介在させたロボットスーツの制御方法について, 解析およびこれまでに開発したロボットスーツを用いた実験を行うことにより検討した. また, 検討した制御方法を用いてロボットスーツを動作させた際, これまでに提案してきた 2つのメカニカル安全装置がその制御を阻害しないか否かについても実験により検討した.

## 参考文献

- (1) Y. Kai, S. Kitaguchi, S. Kanno, W. Zhang, and M. Tomizuka, Development of a Rehabilitation Robot Suit with Velocity and Torque-based Mechanical Safety Devices, Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1380-1385, 2014.
- (2) 山本重彦, 加藤尚武, PID制御の基礎と応用, 株式会社朝倉書店, 1997.
- (3) 熊谷英樹, 日野満司, 村上俊之, 桂誠一郎, 現場の即戦力基礎からの自動制御と実装テクニック, 株式会社技術評論社, 2011