

メカニカル安全装置を搭載した歩行訓練ロボットの開発 (メカニカル安全装置の動作確認実験)

Development of an Ambulation Training Robot Equipped with Mechanical Safety Devices (Experimental Study on the Safety Device)

○ 学 川村泰棋 (東海大院) 正 甲斐義弘 (東海大)

学 松田拓也 (東海大院)

Taiki KAWAMURA, Yoshihiro KAI, Takuya MATSUDA
Tokai University, Kitakaname4-1-1, Hiratsukashi, Kanagawaken

Key Words : Rehabilitation, Walking Support Machine, Safety Devices

1. 緒言

現在、日本では高齢化が進行しており、21世紀半ばには、国民の3人に1人が65歳以上という高齢社会の到来が予想されている⁽¹⁾。それに伴い、加齢や疾病等により歩行障害を持つ患者が増加すると考えられる。そこで患者自身がある程度自立し、安全に歩行リハビリテーションを行える歩行訓練ロボットの開発が望まれている。歩行訓練ロボットのような人と密接にかかわるヒューマンフレンドリーロボットにおいて人に対する安全対策は非常に重要である。

本研究では、歩行訓練ロボットの誤動作時等において、人にとって危険なロボットの高速運動を機械要素のみで検知しロボットの暴走を機械要素のみで食い止める安全装置(メカニカル安全装置)を搭載した歩行訓練ロボットを開発することを目的とする。

本報告では歩行訓練ロボットに搭載したメカニカル安全装置が目的通りに動作するか否かについて、動作確認実験を行う。

2. 歩行訓練ロボットの概観

歩行訓練ロボットの概観を図1に示す。本歩行訓練ロボットは後輪にメカニカル安全装置を搭載したドライブユニットがある。

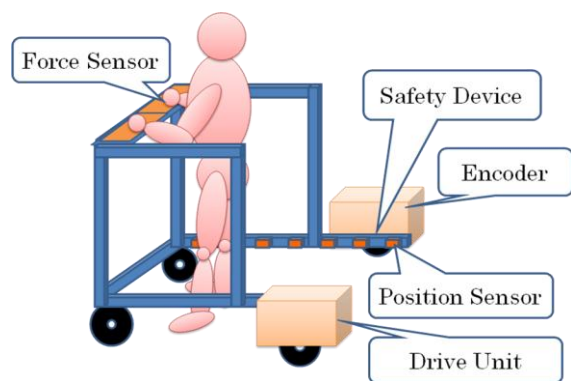


Fig.1 Ambulation Training Robot

図2にメカニカル安全装置を搭載したドライブユニットを示す。モータの出力は、かさ歯車を介して安全装置の取り付けられている回転軸へ伝達され、回転軸に取り付けられている歯車により車輪軸へと出力される。モータが前方および後方に暴走した場合を考慮し、安全装置はモータ1つにつき2つ取り付けられている。

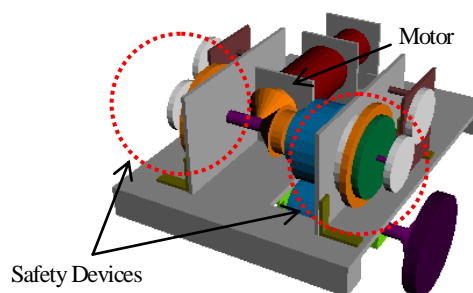


Fig.2 Drive Unit

また、患者の足元には足の位置を検知するための位置センサを搭載し、そのデータを基にモータにかかる電圧を制御し歩行訓練ロボットの速度を調整する。また手元に軽量・薄型6軸力センサが取り付けられており、患者の手元にかかる力を測定し水平方向の力は歩行訓練ロボットを動かすためのきっかけとして利用し、鉛直方向の力は患者のリハビリテーションの効果を把握するのに活用する。

3. メカニカル安全装置

3-1 メカニカル安全装置の構成

図3に本研究で提案する安全装置の構成を示す。軸Aはモータに接続されている。軸AはホールA、ホールB、ホールCに挿入され、歯車Aに接続される。ラチェットホイール・プレートB・歯車Aは軸Aと一体となって回転する。また、歯車Aの回転は、歯車Bに伝えられ、歯車Bに接続されているロータリダンパが回転する。ストップAはロータリダンパの軸に取り付けられている。バネAの一端はストップAに他端はピンAを介しフレームBに取り付けられている。バネBの一端はフレームAに、他端はプレートAのピンBに接続されている。また、プレートAは、回転軸の回転が伝わらなくなっており、内歯車が設けられている。プレートAに設けられたガイドホールAにラチェット爪のガイドバーAが挿入される。プレートBのピンDは爪AのホールDに挿入され、爪AはピンDを中心とした回転運動をする。爪AのガイドバーBはプレートCのガイドホールBに挿入されている。プレートCのピンEにはバネC(ねじりコイルバネ)の一端が固定されている、プレートBのピンCにはもう一端が固定されている。バネCによる張力が発生しているため、常に同じ方向にスプリングトルクが働いている。このため、プレートBの回転(回転軸の回転)はバネCを介し、プレートCに伝わり、一体となって回転する。

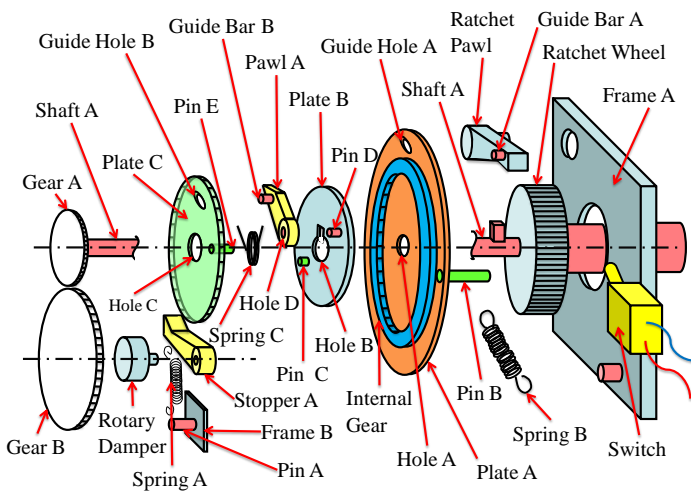


Fig.3 Mechanical Safety Device

3-2 速度による検知およびロックのメカニズム

図4に速度による検知およびロックのメカニズムを示す。

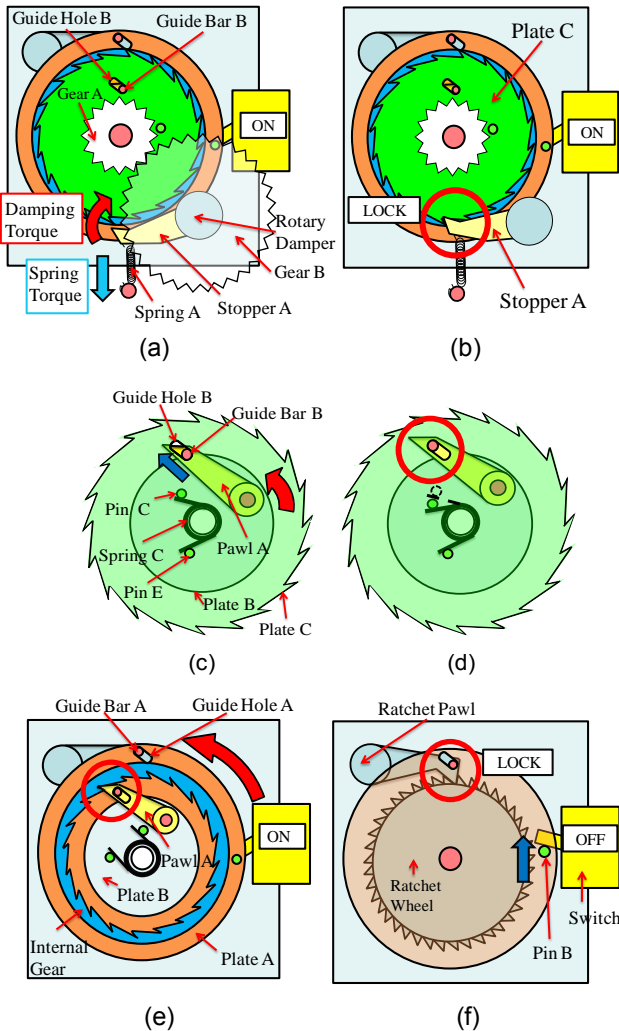


Fig.4 Mechanism of Safety Device

図4(a)に示すように、回転軸に角速度が発生するとストップパAにはダンパより角速度に比例したトルク(ダンピングトルク)が作用する。ストップパAにはバネAも取り付けられているのでスプリングトルクも作用する。回転軸の角速度が設定速度以上になると、ストップパAに作用するダンピングトルク

はバネAによるスプリングトルクに打ち勝ち、ストップパAが回転し、プレートCがストップパAによりロックされる(図4(b))。これが速度による検知である。ストップパAによりプレートCがロックされた後も、回転軸は回転を続けようとする。これにより回転軸(プレートB)とプレートCの回転にずれが生じる(図4(c))。このずれによりプレートCに設けられたガイドホールBと爪AのガイドバーBの幾何学的拘束により、爪Aがスライド(図4(d))し、爪Aが内歯と接触する(図4(e))。爪Aが内歯車と接触すると、爪Aにより、プレートAが回転する(図4(e))ので、プレートAに設けられたピンBによりスイッチが切り替えられ、電源がカットされる。そして、プレートAに設けられたガイドホールAとラチェット爪のガイドバーAの幾何学的拘束によりラチェット爪が動きラチェットホイールと噛み合い、回転軸がロックされる(図4(f))。なお、検知する速度の調整はバネAのバネ定数や取り付け位置を変更することによって調節することができる。

4. 速度検知からロックするまでの回転角度の解析

3章で示したように、本安全装置は速度検知してから回転軸をロックするまでに回転軸に回転角度が必要である。人との衝突をなるべく避けるためには、この回転角度は小さいほうが望ましい。本章では、安全装置が速度を検知してから回転軸をロックするまでの回転角度の理論解析とその回転角度を短縮する手法について述べる。

4-1 速度検知からロックするまでの回転角度

図5に速度検知からロックまでに必要な回転角度について示す。まず速度を検知すると、爪Aがスライドし内歯と接触する。このときの回転角度 α は爪AのガイドバーBがガイドホールBをスライドする距離D[m]、回転中心からピンDまでの距離をLとすると次式で表わされる(図5(a),(b))。なお、 α は微小であるためDを α の円弧として近似する。

$$\alpha = \frac{D}{L} \quad (1)$$

次に爪Aが接触してから内歯と噛み合うときに、すぐ噛み合う場合と接触して回転してから噛み合う場合がある。後者の場合に爪Aが内歯と噛み合うためには、最大内歯一つ分の回転が必要である。ここでは、内歯の歯数をNとすると噛み合うまでの最大角度 β は次式で表わされる(図5(c),(d))。

$$\beta = \frac{2\pi}{N} \quad (2)$$

爪Aが内歯に噛み合うとプレートAに回転が伝わり、プレートAが回転することでラチェットホイールとラチェット爪が噛み合いロックする。ここでラチェットホイールの歯数をMとするとプレートAが回転する角度 γ は次式で表わされる(図5(e),(f))。

$$\gamma = \frac{2\pi}{M} \quad (3)$$

以上のことから速度検知からロックがかかるまでの回転角度 θ は次式で表わされる。

$$\theta = \alpha + \beta + \gamma \quad (4)$$

4-2 回転角度の短縮

前節では速度を検知からロックするまでの最大回転角度 θ を求めた。本節ではこの最大回転角度 θ の要素の 1 つである回転角度 β (図 5(d)参照)を小さくすることを考える。

爪 A が内歯と接触し噛み合うまでの回転角度 β は内歯の歯数 N と関係している。内歯の歯数 N が多くなり、内歯が細くなるほど、爪 A がすぐに噛み合う確率が上昇し、また、爪 A が接触し噛み合うまでの回転角度の短縮に有効である。しかし、歯数 N を増やし、内歯を細かくすると強度に問題がある。そこで、少ない歯数でより良い効果を得るために、図 6 に示すような複数の爪 A を用いる手法を提案する。

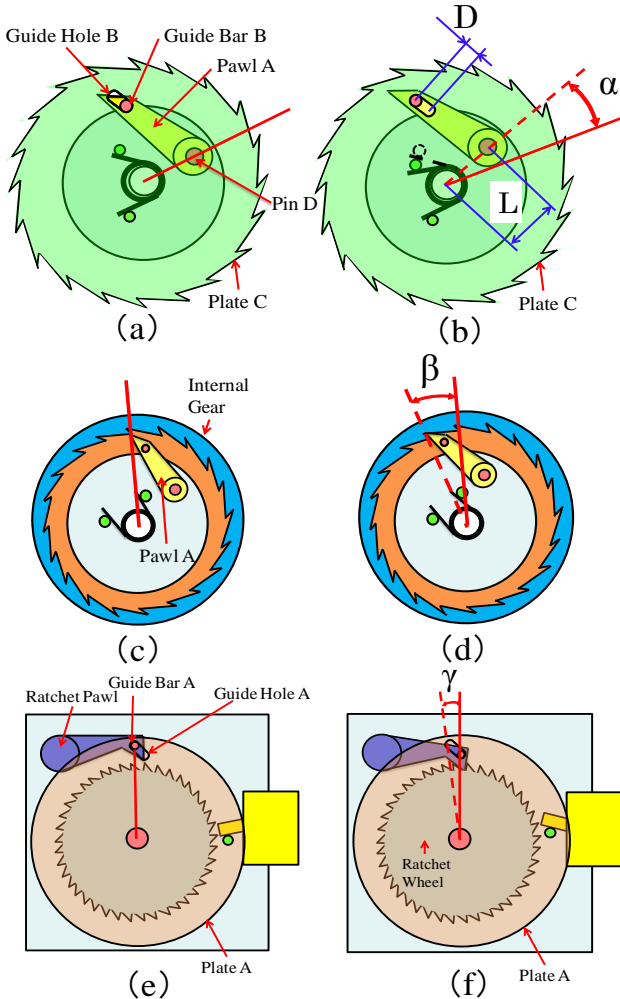


Fig.5 Rotational Angle

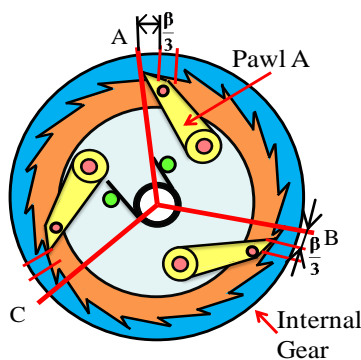


Fig.6 Internal Gear and Pawl A

図 6 において、A の位置の爪 A が内歯と噛み合わなかったとき、A の位置の爪 A のみの場合、噛み合うためにはロボッ

トの回転軸が内歯 1 つ分の角度 ($2\pi/N[\text{rad}]$) 回転する必要がある。そこで、図 6 のように 3 つの爪 A を内歯の歯幅を 3 等分にした位置にそれぞれずらして配置する。これにより、A の位置の爪 A が内歯と噛み合わなかったとしても、回転軸が内歯の歯幅の $1/3(2\pi/3N[\text{rad}])$ だけ回転すれば、B の位置の爪 A が内歯と噛み合うことになる。すなわち、3 つの爪 A の位相を変えて配置することで、内歯の歯幅の $1/3$ の回転で噛み合わせることができ、内歯の数が 3 倍されたのと同じ効果が得られる。本手法を利用すれば、 n 個の爪で n 倍の効果が得られる。より短い角度で関節をロックすることが期待できる。

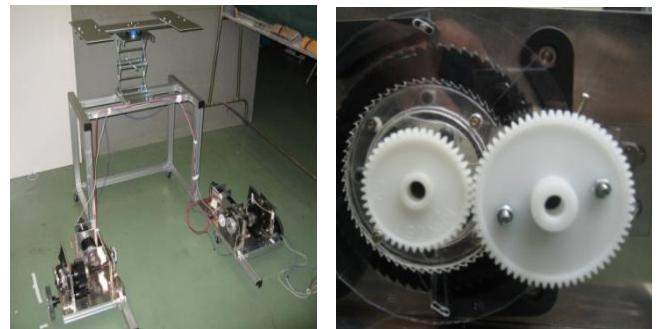
以上より、図 6 のように安全装置を設計すれば速度を検知してから回転軸をロックするまでの最大角度 θ は、

$$\theta = \alpha + \frac{\beta}{3} + \gamma \quad (5)$$

となる。

5. 試作した歩行訓練ロボット

図 7 に試作した歩行訓練ロボットとメカニカル安全装置を示す。試作したメカニカル安全装置には図 6 に示したように 3 つの爪 A を用いている。試作した安全装置の実際の寸法を式(5)に代入して、 θ を求めると、 $\theta = 19.1^\circ$ となり、この角度と歩行訓練ロボットの車輪径等より、速度検知から車輪軸がロックされるまでに歩行訓練ロボットが移動する距離は理論上最大で 25.0[mm]であった。



(a) Ambulation Training Robot

(b) Safety Device

Fig.7 Ambulation Training Robot and Safety Device

6. 動作確認実験

6-1 実験方法

歩行訓練ロボットのモータを突然設定速度以上で駆動させ、安全装置が速度を検知してから歩行訓練ロボットが停止するまでの移動距離を計測する。そのため、ストップ A とロボットの回転軸にマーカを取り付け、高速度カメラ (ディテクト社製 HAS500) を用いて、ストップ A の角度変位 (速度検知時の計測) と回転軸の角速度 (ロボットの動き) を計測した。速度の設定値は 3.63[rad/s], 2.56[rad/s], 1.91[rad/s] とし、各設定値につき 5 回ずつ実験を行った。速度の設定はバネ A の取り付け位置を調節して行なった。

6-2 実験結果

図 8, 図 9, 図 10 に、設定値を 3.63[rad/s], 2.56[rad/s], 1.91[rad/s] とした場合の実験結果の一例を示す。図の黒の線は回転軸の角速度 (目盛りは左側) を表し、灰色の線はストップ A の回転角度 (目盛りは右側) を示している。

図 8 よりストップ A がプレート C に接触する (すなわち、速度検知) までの角度は 0.17[rad] である。図 8 よりストップ A の角度変位が 0.17[rad] になった時刻の角速度は約 3.5[rad/s] であり、設定した検知角速度 (3.63[rad/s]) とほぼ一致していることがわかる。同様に図 9 の速度検知までの角度

は $0.12[\text{rad}]$ で、角度変位が $0.12[\text{rad}]$ になった時刻の角速度は約 $2.6[\text{rad/s}]$ であり、設定した検知速度 ($2.56[\text{rad/s}]$) とほぼ一致していることがわかる。さらに、図 10 の速度検知までの角度は $0.08[\text{rad}]$ で、角度変位が $0.08[\text{rad}]$ になった時刻の角速度は約 $2.0[\text{rad/s}]$ であり、設定した検知速度 ($1.91[\text{rad/s}]$) とほぼ一致していることがわかる。以上より、いずれの場合も速度を検知後、回転軸は減速し、角速度が 0、すなわちロボットが停止したことがわかる。

検証した。

なお、本研究の一部は財団法人メカトロニクス技術高度化財団の研究助成 (2009 年～2010 年度) により行われた。ここに厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- (1) 寺岡, 阿波, 岩坪, リハビリテーション可能な歩行支援機の開発, 日本機械学会 [No.04-26] シンポジウム講演論文集, pp.204-207, 2004

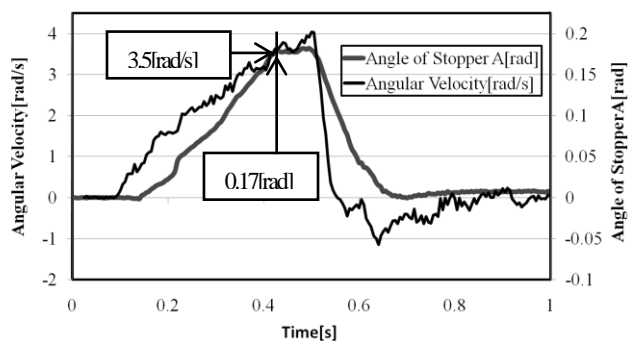


Fig.8 Experimental Result (Setting Value = $3.63[\text{rad/s}]$)

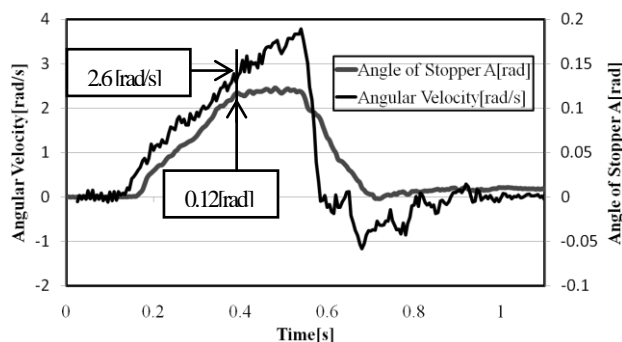


Fig.9 Experimental Result (Setting Value = $2.56[\text{rad/s}]$)

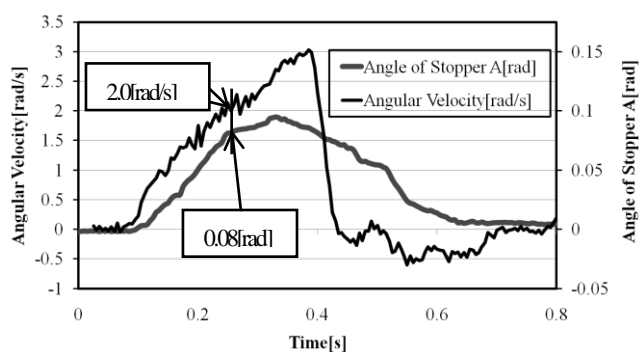


Fig.10 Experimental Result (Setting Value = $1.91[\text{rad/s}]$)

次に、安全装置が動作してから歩行訓練ロボットが停止するまでのそれぞれの設定値での最大移動距離を求めた。その結果、設定値 $3.63[\text{rad/s}]$ のときの最大移動距離は $47.0[\text{mm}]$ 、 $2.56[\text{rad/s}]$ のときは $49.3[\text{mm}]$ 、 $1.91[\text{rad/s}]$ のときは $34.9[\text{mm}]$ であった。各場合の実験値が理論値 ($25[\text{mm}]$) を超えた原因として、タイヤのすべり、ギアのバックラッシュ等が考えられる。

7. 結言

本研究では、メカニカル安全装置の動作確認実験を行い、歩行訓練ロボットにおけるメカニカル安全装置の有効性を