

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
研究期間：2007～2008  
課題番号：19560260  
研究課題名（和文） ヒューマン・フレンドリーロボットのためのメカニカル安全装置の開発  
研究課題名（英文） Development of a Mechanical Safety Device for Human-friendly Robots  
研究代表者  
甲斐 義弘（KAI YOSHIHIRO）  
東海大学・工学部・准教授  
研究者番号：00320119

研究成果の概要：本研究では、人と同一の空間で作業を行うヒューマン・フレンドリーロボットの人に対する安全性の更なる向上を目指し、ロボット暴走時にロボットの暴走を機構的に検知し、機構学を駆使して食い止める安全装置を提案し、実際に安全装置の設計および開発を行った。さらに、開発した安全装置を1自由度ロボット・3自由度ロボットに搭載し、それぞれのロボットにおける安全装置の動作実験を行い、その有効性を検証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス，ヒューマンフレンドリーロボット，安全装置

## 1. 研究開始当初の背景

医療・福祉の現場や日常生活で人と接して作業を行ういわゆるヒューマン・フレンドリーロボットの研究開発は、我が国の戦略重点科学技術課題の1つであり、日本ロボット工業会によると2025年にはロボット産業市場の大半をヒューマン・フレンドリーロボットが占めると予想されている（ロボット産業全体の市場規模8兆円の内、生活分野4.1兆円、医療福祉分野1.1兆円）。このように国民や産業界から大きな期待をされているヒューマン・フレンドリーロボットであるが、ロボット暴走時の安全対策に関する研究は十分

ではないと考えられる。

本研究では、人に対するロボットの安全性の更なる向上を目指し、ヒューマンフレンドリーロボットのための安全装置の設計・開発を行った。

## 2. 研究の目的

本研究では、以下に示す各項を研究目的とし、研究を実施した。

(1) ロボット暴走時に発生する関節の速度に着目し、予め設定しておいたレベル以上の速度が発生した場合、機構的にロボットの関節をロックし停止させる安全装置を提案し、設

計・試作を行う。

(2) 試作した安全装置を搭載した1自由度ロボットおよび多自由度(3自由度)ロボットを試作し、試作した各ロボットにおいて安全装置が目的通り機能するか否かの動作実験を行い、実験結果より安全装置の有効性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 従来の安全対策の検討

ロボットが暴走した時の従来の安全対策として、①緊急停止ボタン、②人と衝突しても人に痛みを与えないレベルの出力しか発揮しないモータの使用、③衝撃吸収材などによる衝撃力緩和、④複数の監視用コンピュータを使用しロボット暴走時にロボットのモータの電源をカットするなど挙げられる。しかし、①の緊急停止ボタンではボタンを押す前に人が傷つけられる危険性があり、②の人に痛みを与えないレベルの出力しか発揮しないモータを使用する場合にはロボットが行う作業が限定されてしまう。③の衝撃力を緩和するロボットの設計も重要であるが、人とロボットの高速での衝突は回避する方が望ましい。④の対策は有効であるが、モータの電源カット後、どの様にしてロボットの暴走を食い止めるかが問題となる。すなわち、電源カット後フリーになるモータを使用した場合は、図1に示すように、ロボットの慣性により人とロボットが衝突する可能性がある。また、電源カット後、保持ブレーキが作動するモータを使用した場合は、図2に示すように、万一、人がロボット・環境(壁など)により挟まれた場合、保持ブレーキが掛かり続けるため、人を救出することが困難となる。

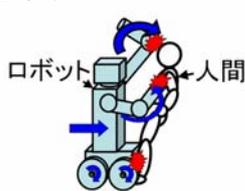


図1 モータフリー

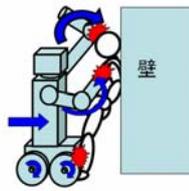


図2 保持ブレーキ付きモータ

#### (2) 安全装置の設計仕様の設定

前節(1)で示した従来の安全対策に対する検討結果を基に、本研究における安全装置の設計仕様を以下の①～⑤のように設定した。なお、本研究では、電源カット後フリーになるモータを使用する。

①ロボット暴走時のロボットの関節速度に着目し、予め設定したレベル以上の速度(以下、検知速度)が発生した際にロボットを止める(図3)。これにより、人とロボットとの高速での衝突を回避する。

②検知速度の設定変更を可能にする。これに

より、人がロボットの可動範囲内に居るときは、作業を行うために最低限必要な速度に設定し、ロボットに高速運動を要する作業を行わせる場合には、人の方がロボットの可動範囲外に出るなどの対策がとれる。

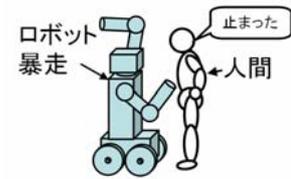


図3 本安全装置  
(速度検知→停止)

③速度による検知後、モータの電源をカットした上で、ロボットの慣性による動きを食い止める。これにより、電源カット後フリーになるモータを使用した場合のロボットと人の高速での衝突を防ぐことが期待できる。

④ロボットの動きを食い止めた(ロックした)際、万一、人が挟まれたとしても、図4に示すように、ロボットが人を挟んでいる方向とは逆方向にロボットを動かせばロックが解除できるようにする。これにより、人の救出が容易に行えるようにする。

⑤以上を機械要素のみで実現する。機械要素のみで実現するため、バッテリーおよびその交換等が不要であり、ロボット自体のバッテリー切れの際でも安全装置は作動する。

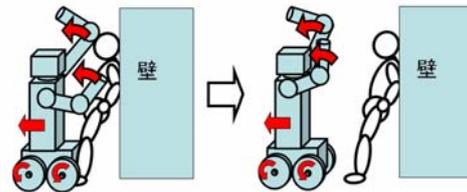


図4 本安全装置(人の救出が容易)

#### (3) 安全装置の設計

上記3章(2)節で示した安全装置の設計仕様を満たす安全装置として、図5に示すような安全装置を考案・設計した。

##### ①安全装置の構成

図5(a)に安全装置の構成を、図5(b)に安全装置のロボットへの搭載例を示す。図5(b)に示すように、モータの回転は、ベルト等の伝達機構を介してロボットの回転軸に伝えら

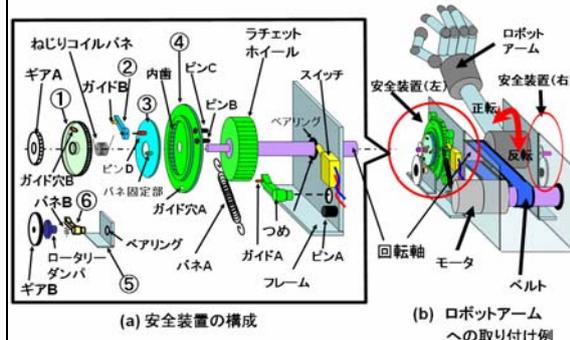


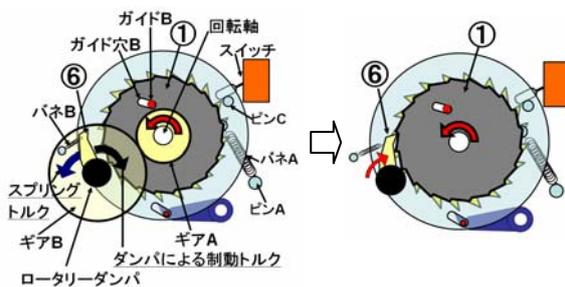
図5 考案した安全装置

れる。回転軸を正転方向・反転方向でロックする安全装置をそれぞれ設置する。以下、図5(a)を用いて、安全装置の構成を説明する。

ラチェットホイール、ギア A および部品③は回転軸と一体となって回転する。部品②は、部品③に設置されたピン D によりピン支持されている。部品②に取り付けられたガイド B は部品①に設けられたガイド穴 B に挿入される。部品①はねじりコイルバネを介して部品③に取り付けられる。部品①はラチェット状の歯を持っており、その歯はガイド穴 B を有する部分により弾性支持されている。部品④はバネ A を介してフレームに拘束されている。部品④には内歯が設けられている。「つめ」に取り付けられたガイド A は、部品④に設けられたガイド穴 A に挿入されている。ギア B にはロータリダンパが接続されており、ロータリダンパの出力軸には部品⑥が接続されている。また、部品⑥にはバネ B も接続されている。ギア B はギア A とかみ合う位置に部品⑤により設置される。モータの電源をカットするスイッチは部品④に取り付けられたピン C と接触する位置にフレームに取り付けられている。

## ② ロボット暴走時の速度の検知メカニズム

図 6 に上述した安全装置による速度検知のメカニズムを示す。まず、ロボットの回転軸の回転はギア A・ギア B を介してロータリダンパに伝わり、回転軸の回転速度に比例した制動トルクがロータリダンパの出力軸から部品⑥に作用する。回転軸の速度が予め設定した速度に至ると、ダンパの制動トルクがバネ B によるスプリングトルクを超え、部品⑥が部品①に接触後、部品①とかみ合う。これが速度検知のメカニズムである。なお、検知速度の設定は、バネ B の取り付け位置を変更することにより変更することが可能である。

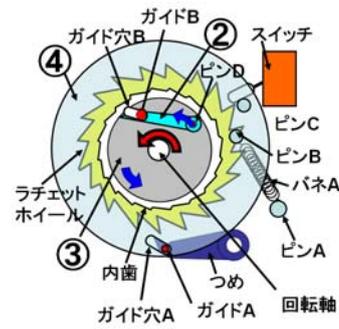


(a)通常 (b)速度検知時  
図 6 速度検知のメカニズム

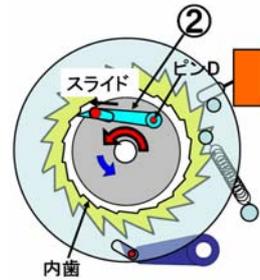
## ③ 検知後のモータの電源カット・関節ロックのメカニズム

図 7 に本安全装置による速度検知後のモータの電源カット・関節ロックのメカニズムを示す。

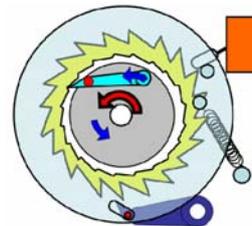
速度検知のメカニズムにより、部品①が部



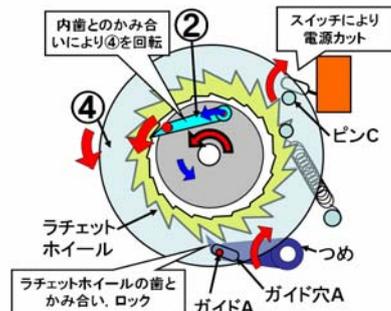
(a)通常



(b)検知時



(c) 部品④の内歯と部品②との噛み合い



(d) 電源カットと関節のロック

図 7 検知後のモータの電源カット・関節ロックのメカニズム

品⑥により拘束された後、回転軸がモータによりさらに回り続けようとする、部品③とピン D により接続された部品②も回り続けようとするが、部品②に設けられたガイド B と部品①に設けられたガイド穴 B の幾何学的拘束により部品②はガイド穴 B に沿ってスライドし、部品④の内歯と接触する(図 7(b)). さらに回転軸が回転すると、部品①のラチェットの歯とガイド穴 B を有する部分

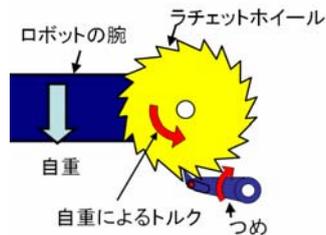


図8 ロボットの自重によるトルク

との弾性を利用し、部品②は内歯と噛み合い(図7(c)),その後、部品④を回転させる(図7(d)).部品④が回転すると、部品④に設けられたガイド穴Aと「つめ」に取り付けられたガイドAとの幾何学的拘束により、「つめ」が回転する。また、部品④に設けられたピンCにより、モータの電源が切られる。電源が切られた後、「つめ」がラチェットホイールの歯とかみ合い、ロボットの回転軸がロックされ停止する。ロボットの回転軸が停止した後、ダンパの制動トルクが消失するため、部品⑥による部品①の拘束が解かれる。しかし、ロボットの自重によるトルクが図8に示すようにロボットが動作していた方向に作用している場合、ラチェットホイールと「つめ」とのかみ合いにより、ロックは掛かり続ける。また、図8とは逆方向にロボットの自重によるトルクが作用した場合は、そのトルクにより回転軸が回転を始めるが、設定した検知速度に至ると逆方向に取り付けた安全装置によりロックが掛かり停止する(もし、検知速度に至らない場合は、検知速度以下でロボットの腕は落下し、回転軸でぶら下がり止る)。

④ロボット暴走防止後のロックの解除

回転軸をロックした後、万一、人の身体あるいはその一部がロボットの腕部の自重により挟まれてしまった場合、本安全装置では、ラチェットを使用しているため、人を挟んでいる方向とは逆方向にロボットの腕部を動かすことができる(人の救出が容易)。人を挟んでいる方向とは逆方向にロボットの腕部を動かすことによりロックも解除されるが、モータの電源は既にカットされているので、このときロボットが再度暴走する危険性はない。

(4)安全装置の試作とそれを搭載した1自由度ロボットアームを用いた安全装置の動作実験

本研究では、上述した安全装置を実際に試作し、それを搭載した1自由度ロボットも試作した。試作した1自由度ロボットを用いて安全装置の動作実験を行った。図9に試作した安全装置を示す。

試作した1自由度ロボットでは、モータからの駆動トルクがギアを介して回転軸に伝

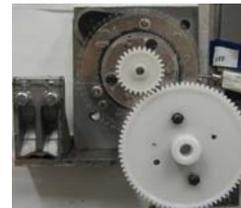


図9 試作した安全装置

わり、回転軸に安全装置が取り付けられている。1自由度ロボットのモータにより高速度(擬似的な暴走状態)を発生させ、実験を行った。高速度カメラ(株式会社ライブラリー製ひまわりHS200)によりロボットの回転軸の角速度および部品⑥の角度変位が計測できるようにマーカを取り付け、実験を行った。

(5)安全装置を搭載した3自由度ロボットアームの設計および試作

安全装置を搭載した3自由度ロボットアームの設計を行った。設計に際して、本研究ではヒューマンフレンドリーロボットのための安全装置の開発を行っており、対象とするヒューマンフレンドリーロボットでは人との衝突に備え、ロボットアームの質量・慣性モーメントをなるべく小さくすることが望まれる。各関節を駆動するモータ及びその暴走を食い止める安全装置をロボットアームの各関節に設置した場合、ロボットアームの質量・慣性モーメントが大きくなってしまふ。そこで、モータ・安全装置をロボットアームの根元に設置し、タイミングベルト等の伝達機構を用いてモータの動力を各関節に伝達することが提案できるが、この場合、安全装置によるロック時に、タイミングベルト等の弾性要素による振動によりロックが解除されてしまう可能性がある。本研究では、市販のタイミングベルト(ハイトルクタイミ

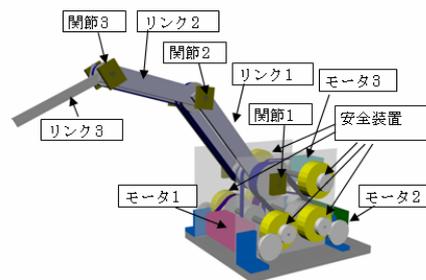


図10 3自由度ロボットの構造

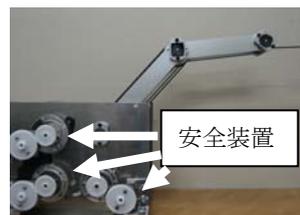


図11 試作した3自由度ロボット

ングベルト S5M, (株)ミスミ製) を用いた 3 自由度ロボットアームにおいて, 安全装置が目的通り動作するか否かの実験を行うために, 図 10 に示すような構造のロボットアームを設計し, 試作した. 試作したロボットアームを図 11 に示す.

#### (6)安全装置を搭載した 3 自由度ロボットアームを用いた安全装置の動作実験

試作したロボットアームのモータにより高速度 (擬似的な暴走状態) を発生させ, 実験を行った. ロボットアームの各回転軸および各部品⑥にマークを取り付け, 高速度カメラ (株)ディテクト製 HAS500) により, 各回転軸の角速度と各部品⑥の角度変位を計測した. なお, 本実験においては, ロボットアームに搭載した安全装置のうち 1 つでも暴走を検知し電源をカットすれば, すべてのモータの電源がカットされるように設定した.

### 4. 研究成果

#### (1) 試作した安全装置を搭載した 1 自由度ロボットアームによる安全装置の動作実験結果

図 12 に試作した安全装置を搭載した 1 自由度ロボットアームによる安全装置の動作実験の 1 例 (検知速度を  $5.76[\text{rad/s}]$  に設定した場合の結果) を示す. 図 12 の黒色の線はロボットアームの回転軸の角速度 (目盛りは左側) を, 灰色の線は部品⑥の角度変位 (目盛りは右側) を示している. 部品⑥が部品①に接触する (すなわち, 速度検知) までの角度は  $0.22[\text{rad}]$  である. 図 12 より角度変位が  $0.22[\text{rad}]$  になった時の回転軸の角速度は約  $5.7[\text{rad/s}]$  であり, 設定した検知速度 ( $5.76[\text{rad/s}]$ ) とほぼ一致していることがわかる. 速度を検知後, 回転軸の速度は若干増加するが, その後減少し, 反動により多少振動するものの, 最終的に回転軸が停止していることがわかる. したがって, 本装置はほぼ目的通り動作していると考えられる. なお, 速度を検知後, 回転軸の速度が若干増加するのは, 本安全装置では, 部品①のロック→部品

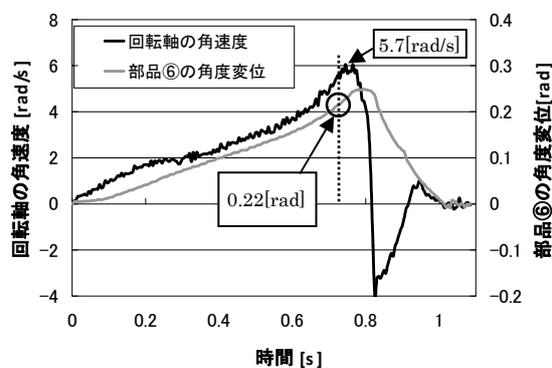


図 12 実験結果 (1 自由度ロボット)

②と部品④の内歯とのかみ合い→電源カット→つめとラチェットホイールとのかみ合いといったプロセスを踏むため, その間に回転軸の速度が増加するためである.

#### (2)安全装置を搭載した 3 自由度ロボットアームによる安全装置の動作実験結果

図 13 に実験結果の一例 (ロボットアームの関節 3 を動かしながら関節 2 を暴走させたときの実験結果, 関節 2 における検知速度を  $3.81[\text{rad/s}]$  と設定した場合) を示す. 図 13 の黒色の線は関節 2 の回転軸の角速度 (目盛りは左側) を, 灰色の線は部品⑥の角度変位 (目盛りは右側) を示している. 関節 2 における安全装置の部品⑥が部品①に接触する (すなわち, 速度検知) までの角度は  $0.22[\text{rad}]$  である. 図 13 より角度変位が  $0.22[\text{rad}]$  になった時刻の回転軸の角速度は約  $4.0[\text{rad/s}]$  であり, 設定した検知速度 ( $3.81[\text{rad/s}]$ ) とほぼ一致していることがわかる. 速度を検知後, 1 自由度ロボットと同様に回転軸の速度は若干増加するが, その後減少し, 反動により多少振動するものの, 最終的に回転軸が停止していることがわかる. したがって, 安全装置はほぼ目的通り動作していると考えられる. なお, その他の結果 (その他の種々の条件でロボットを暴走させた場合の結果) も本結果と同様であった.

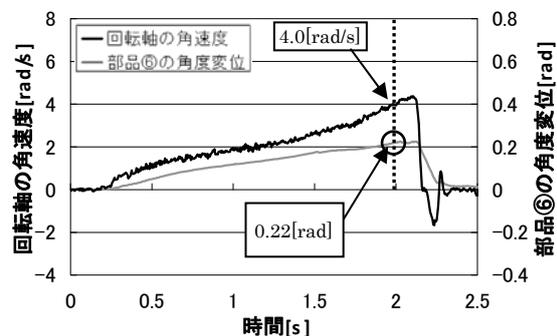


図 13 実験結果 (3 自由度ロボット)

#### (3)まとめ

本研究では,

- ①従来の安全対策に対する検討を行い, その検討結果より安全装置の設計仕様を設定した.
- ②設定した設計仕様を満たす安全装置を考案し, 実際に試作した.
- ③試作した安全装置を搭載した 1 自由度ロボットおよび 3 自由度ロボットを設計・試作し, それらを用いた安全装置の動作実験を行った. その結果, 上記 (1), (2) で示したように安全装置はほぼ目的通り動作していることが確認できた.

以上の研究成果より, 従来の安全対策 (3

章(1)節で述べた衝撃吸収材など)に加えて、本安全装置を用いることにより、ロボットの人に対する安全性の更なる向上が期待できる。

今後は、人間と同一の空間内を移動可能な移動機構をもつロボット(よりヒューマンフレンドリーロボットに近いロボット)等に本安全装置を搭載した場合に、本安全装置が目的通り機能するかなどの検証を行う予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 甲斐義弘, 横川隆一, 運動学的作業方向動作精度に基づく冗長マニピュレータの姿勢評価・制御, 日本機械学会論文集(C編), 査読有, 74巻, 2008, pp.1485-1492.
- ② Yoshihiro KAI, Naoki Fujii, Tetsuya Tanioka, Kenichi Sugawara, Rozzano C Locsin, A Walking Support Machine with Mechanical Devices to Prevent Patient's Falling and Relieve Patient's Weight, INFORMATION: An International Interdisciplinary Journal, 査読有, Vol.10, pp.655-662, 2007.

[学会発表] (計7件)

- ① 甲斐義弘, 人間共存型ロボットのためのメカニカル安全装置(実験的検討), 日本機械学会, 2009年3月7日, 茨城大学水戸キャンパス.
- ② 甲斐義弘, 人間共存型ロボットのためのメカニカル安全装置の開発(安全装置を搭載したマニピュレータの設計), 日本機械学会, 2009年3月6日, 茨城大学水戸キャンパス.
- ③ 甲斐義弘, 福祉ロボットのためのメカニカル安全装置, 日本機械学会, 2008年9月17日, 山口大学工学部.
- ④ 甲斐義弘, 人間共存型ロボットのためのメカニカル安全装置(設計および実験), 日本機械学会, 2008年8月6日, 横浜国立大学.
- ⑤ 甲斐義弘, 人間共存型ロボットのためのメカニカル安全装置の開発, 日本機械学会, 2008年6月7日, 長野県ビッグハット.
- ⑥ 甲斐義弘, ヒューマン・フレンドリーロボットのための安全装置の開発(設計および実験), 日本機械学会, 2008年3月15日, 東京海洋大学
- ⑦ 甲斐義弘, ヒューマン・フレンドリーロボットのためのメカニカル安全装置の開発, 日本機械学会, 2008年3月14日, 東

京海洋大学.

[産業財産権]

○出願状況(計2件)

名称: ロボット安全装置, およびロボット  
発明者: 甲斐義弘, 安達辰也, 奥平雄右  
権利者: 学校法人東海大学  
種類: 特許  
番号: PCT/JP2009/53427  
出願年月日: 2009年2月25日  
国内外の別: 国外

名称: ロボット安全装置, およびロボット  
発明者: 甲斐義弘, 安達辰也  
権利者: 学校法人東海大学  
種類: 特許  
番号: 特願2008-043542  
出願年月日: 2008年2月25日  
国内外の別: 国内

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

甲斐 義弘 (KAI YOSHIHIRO)  
東海大学・工学部・准教授  
研究者番号: 00320119

(2) 連携研究者

小金澤 鋼一 (KOGANEZAWA KOICHI)  
東海大学・工学部・教授  
研究者番号: 10178246