

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月12日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560242

 研究課題名（和文） 人間共存型ロボットのリスクアセスメントのための物理的接触
 リスクの暴露頻度評価手法

 研究課題名（英文） Exposure frequency evaluation method of physical contact risk for
 the risk assessment of human-coexistence robot

研究代表者

琴坂 信哉 (KOTOSAKA SHINYA)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：30334147

研究成果の概要（和文）：

近年、介護福祉分野等での人間共存型ロボットの活躍が期待されるようになってきた。人間共存型ロボットは、人間の周囲で活動するため、あらかじめリスクアセスメントを行うことが求められている。しかしながら、その新規性から、過去の事故履歴等のデータが存在しないため、定性的なリスクアセスメントしか行えなかった。そこで、本研究では、高度に発達した人間共存型ロボットは、人間と同様の動作、作業方法で作業を行うと仮定し、ロボット役の人間の動作を計測することによって定量的な衝突リスクの暴露頻度を評価する手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

In recent years, human-coexistence robot to do housework and services, i.e., the realization of human-coexistence robot has been desired. Human-coexistence robot, in order to work around the human, to be in frequent contact with humans is to be expected. Therefore, it is necessary to perform risk assessment in advance. However, since human-coexistence robot is new device, the statistical data of the past accident does not exist. In addition, the contents of work and working environment are not stable. Therefore, the conventional risk assessment technique can not be used. In this research, a quantitative evaluation method for exposure frequency of the collision risk of the human-coexistence robot that works in human's living environment is proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：人間共存型ロボット、リスクアセスメント、安全性、接触・衝突リスク、動作計測

1. 研究開始当初の背景

近年、福祉介護分野におけるロボットや家

庭向けのロボット等、人間と活動環境を共有するロボットシステム（以降、人間共存型ロ

ロボットと呼ぶ)が開発、実用に供せられるようになってきた。それに伴い、人間とロボットの衝突事故発生の可能性が飛躍的に高まることが予想されている。従来、ロボットの安全対策は、その動作範囲に人間が立ち入らないことを原則としてきた。しかし、人間共存型ロボットは、人間と活動環境を共有し、場合によっては人間との接触を行う作業の実施が期待されている。そのため、従来からの安全対策では不十分であることが指摘され、新しい安全対策のガイドラインの策定等の活動が行われてきた。その中心的方策となっているのが、JIS B 9702「機械類の安全ーリスクアセスメントの原則ー」である。この規格では、機械類の安全対策として、リスクアセスメントの実施を求めている。一般的な機械では、対象とする機械の事故履歴やFMEA解析、FTA解析を援用したリスク分析によって、リスクアセスメントが行われている。通常、リスクは、その危害のひどさと危害への暴露頻度の積で評価される。ところが、人間共存型ロボットは、その新規性から過去の事故履歴等の統計データが存在しない。また、類似する機械も存在しないことから危害への暴露頻度を類推することも困難である。さらに、様々な作業環境で使われることが想定されており、作業内容も一定ではないという特徴もある。これらも危害への暴露頻度評価を困難にしている。もちろん、評価対象となる人間共存型ロボットを実際に運用し、その事故の統計データを取得すれば評価することは可能であるが、そのような実験を行うことは倫理的な問題がある。また、機械装置のリスクの場合、被害が単発的な事象であることが多く、そもそも統計的なデータを得にくいという事情もある。そこで、これまではリスクアセスメントの実施者の「勘」により「頻繁に起こる」、「時々発生する」といった分類で頻度を決定し、リスクアセスメントを実施してきた。これでは、アセスメントの数値そのものの信頼性に疑問が持たれると同時に、スリーステップメソッド等のリスク低減手法の効果を精確に評価することができない。そのため、実施者によらない定量的な根拠を持った暴露頻度評価値を用いたリスクアセスメントを行う手法が求められてきた。

2. 研究の目的

人間共存型ロボットは、多自由度のリンク機構や移動機構から構成されており、従来機械よりも自由度が格段に増えている。また、その作業内容は、単純な移動や繰り返し動作だけではなく、掃除や片付けといった環境に依存する不定形の作業の実行が期待されている。さらに、作業環境には、不定数の人間が存在しており、かつ管理された環境とは言

い難い。そのため、リスクアセスメントの際に必要な危害が発生する状況や利用環境の特定が困難であるという特徴がある。最も近い形態の従来型機械である産業用ロボットは、通常、床に固定されており、作業内容も人間共存型ロボットに期待されるものとは大きく異なる。そのため、産業用ロボットの事故履歴データが援用することもできない。

一方、人間共存型ロボットの危険源の特徴は、移動や腕の動作に伴う機械的危険源であると思われる。これは、ロボットを構成する機器の大半が従来から用いられてきている装置類であり、その電気的危険源は十分に理解が蓄積されているからである。また、先に述べた新規性、作業環境の不定性、作業内容の汎用性といった特徴が、その目的とする動作に由来するものであるからである。

そこで、本研究では、人間共存型ロボットと人間の物理的接触に関わる衝突等の機械的危険源に関するリスクの暴露頻度の定量的評価手法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 人間の移動履歴に基づく暴露頻度評価手法

人間が生活する環境では、人間が用いる道具があり人間にとって活動しやすい構造になっている。この環境の元で作業を行うロボットは、新たに道具を持ち込んだり環境整備を行うのではなく、従来からある人間のための道具を、その環境下で使いこなすことが合理的である。そこで、本研究では、高度に発達した人間共存型ロボットは、人間に近い外観や動作を行うと想定する。この考え方に基づけば、人間共存型ロボットの活躍が期待される場所に、ロボットに期待される作業を行わせる「人間」による代役を投入することによって、人間型共存ロボットの運用時に近い状況を作り出すことができるはずである。すなわち、人間共存型ロボットのリスクアセスメントに必要とされる具体的な利用状況、環境の限定を行うことができるはずである。

また、衝突等の機械的危険源による危害は、人間と機械が接近しているときに発生する可能性が高く、衝突リスクへの暴露頻度と接近状態にある時間には、正の相関があると考えられる。すなわち、人間共存型ロボットに見立てた人間と、その周囲の人間の移動履歴を計測し、その接近頻度を計測すれば、人間共存型ロボットの衝突リスクに対する暴露頻度を評価することができるはずである。この方法は、“正確な”衝突リスクへの暴露頻度を与えるものではないが、リスクの相対的な評価に用いることのできる具体的な根拠を持った数値を与えることができるはずである。例えば、人間共存型ロボットの安全に関わる設計改善の効果を定量的に評価、検討

を行うことができるはずである。そこで、本研究では、衝突の危害に関する暴露頻度評価を人間の移動履歴を計測することによって行う手法を提案する。

(2) 接近度の定義

人間共存型ロボットと人間が接近した場合、少し動いただけで接触してしまう場合や、両者が手を伸ばした状態でのみ接触する場合など、様々な状態が想定される。さらに、接近の度合いによって、引っ掻き、こすれ、衝突などのロボットが人間に与える危害の種類も異なると考えられる。そこで、衝突リスクへの暴露頻度を評価するにあたり、接近の度合いを考慮することにした。

本手法では、接近度を人間と人間共存型ロボットの距離によって、4段階に分類することにした。図1に接近度の概念図を示す。接近距離が1.8[m]以上である状態を接近度0、同様に0.9~1.8[m]を接近度1、0.4~0.9[m]を接近度2、0.4[m]以下を接近度3と定義する。この数値は、身長1.7[m]程度の人間が腕を伸ばしたときにおける体の中心から手先までの距離がおおよそ1.8[m]であることに基づいて決定した。接近度1では、両者が手を伸ばした状態でのみ接触の可能性があり、接近度2では、両者のうち片方が手を伸ばしている場合に接触の可能性があり、接近度3では、わずかな動作でも接触する可能性がある。そして、接近度0の状態では、衝突の可能性はないと判断する。

なお、ここでは、ロボットや人間が持つ可能性のある道具類や、ロボットが作業対象物を投擲するような場合は想定しないことにする。

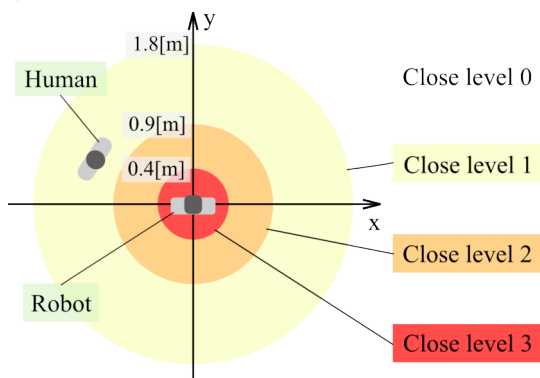


図1 Definition of the proximity level for exposure frequency evaluation

(3) 接近頻度の定式化

接近頻度の定式化には、接近回数又は接近時間を用いたものが考えられる。過去に行われた産業用ロボット・工作機械などのリスクアセスメントの事例の中では、1日に1回接近が発生する、1ヵ月に1回接近が発生する、

などの回数表記を用いた接近頻度の表示が一般的であった。これらの機器は床に固定されており、基本的に作業・点検時などの特定の用事がある場合のみ人間が接近し、1回接近するとある程度まとまった時間の間接近し続けるということが想定されていると考えられる。この場合、接近回数と危害の発生確率の間には比例関係に近い正の相関が成り立つため、接近頻度の表示形式に回数を用いた表示方法が用いられているのだと思われる。それに対して人間共存型ロボットの場合、ロボットと人間双方が移動可能なため、一瞬すれ違う状況、長時間接近し続ける状況など、様々な状況が発生する可能性がある。つまり、接近の状況によって接近している状態にある時間にばらつきが生じると考えられる。そこで、本手法においては、接近回数ではなく接近時間を主とした接近頻度の表現を採用することにした。

人間共存型ロボットと周囲の人間（以降、被験者と呼ぶ）との接近度毎に、それぞれの接近時間を算出し式(1)のように接近頻度の定式化を行った。

$$F_{T,n,A} = \frac{1}{A} \frac{1}{T_n} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{n,ij}^{CLx} \quad (1)$$

ただし、 i はロボット、 j は被験者を表す。また、 m は、ロボットの台数、 n はロボットの作業範囲内に存在する被験者の数、 T_n はロボットの作業範囲内に被験者が n 人が存在したときの合計作業時間[sec]、 $C_{n,ij}^{CLx}$ はロボットの作業範囲内に被験者が n 人が存在したときのロボット i と被験者 j の接近度 C_{Lx} の状態での接近時間[sec]、 A はロボットの作業範囲の移動可能な床面積[m²]とする。

人間共存型ロボットに作業を行わせた結果、例えば合計で1分間の接近があった場合に、それが10分間の作業を行った中での1分なのか、1時間の中での1分なのかによって意味合いが異なる。そこで、式(1)では、作業時間全体を考慮するために、接近時間を作業時間全体で除し、接近頻度の時間による正規化を行った。すなわち、式(1)の表す $F_{T,n,A}$ は、単位時間当たりにおける人間共存型ロボットと n 人の被験者との接近度 C_{Lx} の状態での接近時間の総和となる。

(4) 衝突リスクへの暴露頻度評価実験

人間共存型ロボットの作業を行う人間（以

表1及び表2で示した接近時間[sec]を、式(1)に代入して算出したロボット役とその他の被験者との接近頻度を表3に示す。表3は、単位時間におけるロボット役と他の被験者1人当たりの接近時間をあらわしている。その単位は[hour/hour/person]となっている。表の中では、行で部屋内に存在した被験者の数で分類し、そして列で接近度を分類し、接近頻度を表示している。

以上より、人間共存型ロボットが、作業を行う際の衝突リスクを表す接近頻度を評価することができた。本研究では、この接近頻度を衝突のリスクに対する暴露頻度として捉えることにより、定量的なリスク評価を行うことを提案している。

表2 Total time for each proximity level (7 subjects)

a. Proximity Level 1

Number of subjects	1	2	3	4	5	6	7
1		32.9	23.9	48.9	24.0	79.8	61.0
2	32.9		295.8	61.7	344.5	6.5	2.5
3	23.9	295.8		19.1	221.5	0.0	0.0
4	48.9	61.7	19.1		0.0	122.3	0.0
5	24.0	344.5	221.5	0.0		0.0	0.0
6	79.8	6.5	0.0	122.3	0.0		17.1
7	61.0	2.5	0.0	0.0	0.0	17.1	
Total Proximity Time[sec]	270.6	743.9	560.3	251.9	589.9	225.7	80.6

b. Proximity Level 2

Number of subjects	1	2	3	4	5	6	7
1		3.9	7.8	5.5	8.7	6.4	3.6
2	3.9		63.1	7.9	1.1	0.0	0.1
3	7.8	63.1		0.0	156.8	0.0	0.0
4	5.5	7.9	0.0		0.0	0.0	0.0
5	8.7	1.1	156.8	0.0		0.0	0.0
6	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0
7	3.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	
Total Proximity Time[sec]	36.0	76.1	227.7	13.5	166.6	6.4	3.7

c. Proximity Level 3

Number of subjects	1	2	3	4	5	6	7
1		0.3	0.3	0.9	1.5	0.0	0.0
2	0.3		0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
3	0.3	0.0		0.0	6.9	0.0	0.0
4	0.9	0.1	0.0		0.0	0.0	0.0
5	1.5	0.0	6.9	0.0		0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Total Proximity Time[sec]	3.1	0.3	7.3	1.0	8.5	0.0	0.0

表3 Estimated proximity level of the robot

Number of people	Measurement time[sec]	Proximity frequency [minute/hour/m ² /person]		
		CL1	CL2	CL3
6	24.7	0.37	0.06	0.00
7	433.9	0.21	0.03	0.00
Total Measurement time[sec]	458.7			

(5) 考察

①移動履歴計測実験の結果について

測定範囲内の人数が7人である状態が、全測定時間の95%を締めている。そこで、表2の接近度毎の接近時間のn=7場合に注目すると、2~7のロボット役以外の被験者同士では、全く接近が発生しなかった場合が存在していることがわかる。これは、ロボット役以外の被験者は基本的に着席してデスクワークを行っており、席の近い被験者同士でのみ接近が生じたためであると考えられる。撮影した動画を確認したところ、そのような傾向

を確認することができた。それに対して、部屋内を移動し掃除機をかけていたロボット役の間は、他の被験者6人全てに対して接近度1以上の状態で接近している。表3を見ると、1時間当たり、被験者1人あたりに換算して約17.34分の間、接近度1の状態に接近していたとわかる。また、接近度3の状態での接近頻度は極端に低くなっている。掃除の邪魔にならないため、周囲の被験者が無意識的にロボット役とある程度距離をおき、このような結果になったのではないかと考えられる。このように周囲の人間が人間共存型ロボットを回避するような状況は実運用の際にもあり得ると考えており、この点を具体的に評価することができたと考えている。

②測定環境の影響について

測定結果に影響する要因として、被験者、ロボット役の身体の大きさ、および姿勢の変化があげられる。これらのパラメータの変化は、接近度の評価に影響を与える。

本論文で提案する定式化では、身体に関しては、身長1.7[m]前後、姿勢に関しては直立姿勢であることを想定している。本論文では移動に関わる衝突リスクの評価を行うことを目標としたため、これらを定式化より除外した。作業中の姿勢の変化や、身体サイズ(ロボットのサイズも含む)の評価への考慮は、身体形状の測定により行うことが可能である。今後検討していきたい。

また、大きく測定結果に影響する要因としては、測定環境(部屋の大きさ、構造等)、および人間共存型ロボットの行う作業内容があげられる。現状では、作業内容や作業環境が変化すると、暴露頻度の再評価が必要である。しかし、作業ごとに毎回測定するのは、煩雑なため有用性を損なってしまう。そこで、現実的な方法として、まずは人間共存型ロボットに期待する標準的な作業のシナリオを作り、リスク評価、安全に関する設計改善を行っていく方法が考えられる。本手法は、このようなアプローチに有効に使えると考えている。将来は、個々の作業環境の特徴を捉えて、標準的な参照テーブルを作成する等の方法を開発したい。

③測定された暴露頻度の信頼性について

本手法では、各接近度ごとに接近頻度を求め、それを危害への暴露頻度とした。これは、“正確な”衝突確率を表す数値ではない。実際に、実験中、一度も衝突していないし、あくまで上記の条件下での有限時間内での測定に基づく数値であるからである。それを承知で、あえて正確さの評価を行うとしたら、具体的な事故履歴等の統計データとの照らし合わせが必要である。しかし、先に述べたように、人間を対象とした衝突実験を行うこ

とは、倫理的な問題がある。ここにリスクアセスメントを実施することの困難さがある。運用しなければデータが集まらない、そして、データが無ければ安全に運用することができないという鶏と卵の状態になってしまう。そこで、本研究では、あえて正確かどうかを二の次にして提案を行った。少なくとも、本手法を用いれば、従来型の危害への暴露頻度の評価に用いられてきた、「頻繁にある：5点」、「たまにある：4点」などの定量的評価に対して、根拠を持った裏付けを与えることができると考えている。

④危害の種類の影響について

衝突に関わる機械的危険源は、はさみこみ、手先の衝突、押し潰し等様々な状況が考えられる。本手法では、それぞれの接近度ごとに接近の状況に応じた機械的危険源が想定可能であると考えている。接近度ごとのそれぞれの危険源の暴露頻度を評価することができれば、将来的に、より正確な衝突リスクを評価することができるようになるはずである。

4. 研究成果

本研究では、人間共存型ロボットの機械的危険源による危害の暴露頻度評価にロボット役の人間を作業環境に投入し、その移動履歴を計測することにより評価する手法を提案した。実際に、移動履歴を計測することにより、衝突の危害に対する暴露頻度評価値の算出を行った。今回の計測実験では、暴露頻度をそれぞれの条件下での接近頻度の平均として算出した。これが、平均で良いのか、それとも最悪値を用いるべきなのかは、まだ議論を必要とする。また、今回、算出した暴露頻度は、部屋の広さ、人口密度、作業内容に依存して変化するものと思われる。しかし、リスクアセスメントに用いるためには、それらの評価条件を考慮しつつ代表的な値を求める必要があると思われる。そこで、まずは人間共存型ロボットに期待する標準的な作業のシナリオを作り、リスク評価、設計改善を行っていく方法が考えられる。本手法は、このようなアプローチに有効であると考えている。

本手法は、これまで「勘」に頼って求められてきた暴露頻度の評価に具体的な根拠を与えることができる。これによって、柔らかい被覆、挟み込み検出装置、衝撃力軽減動作等、様々なロボット安全技術のリスク低減効果を具体的かつ定量的に比較することができ、どのような状況で、どのような手法が最適なのかを議論することができるようになる。その結果として、人間共存型ロボットの持つリスクが、受容可能なリスクなのかどうかを具体的に議論することができるよう

になり、実用化に一步近づくことができる。

本研究の成果は、本格的にロボットが広く一般社会に普及した場合には、不要となる技術ではある。最終的には、ヒューマノイドロボットだけではなく、さまざまなタイプのロボットが現れるだろうし、十分な事故の統計データを得ることも可能になっていることが予想されるからである。社会的なロボットの許容度や必要性の変化、ロボットが社会生活の仕組みそのものを変えているかもしれない。しかし、まず、人間共存型ロボットの普及のための第一歩のためには、まず安全確保が避けて通れない関門である。そのためには、本手法で提案するようリスクの定量的な評価手法が必ず必要となると考えている。

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)

[学会発表] (計3件)

①琴坂信哉, 程島竜一, 人間の動作解析に基づく人間共存型ロボットのリスク見積もり -危険源への暴露頻度評価方法の比較検討-, 第30回日本ロボット学会学術講演会, 2012年9月20日, 札幌コンベンションセンター (札幌) .

②琴坂信哉, 新田恭平, 程島竜一, 人間の動作解析に基づく人間共存型ロボットのリスク見積もり -ロボットと人間との共同作業における機械的危険源への暴露頻度評価-, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2012年5月28日, アクトシティ浜松 (浜松) .

③家老将太, 琴坂信哉, 程島竜一, 人間の動作解析に基づく人間共存ロボットのリスク見積り, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2011年5月28日, 岡山コンベンションセンター (岡山) .

6. 研究組織

(1) 研究代表者

琴坂 信哉 (KOTOSAKA SHINYA)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：30334147