

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12006

研究課題名(和文) 環境情報を考慮した人間共存型ロボットの物理的接触リスクの定量的暴露頻度評価手法

研究課題名(英文) Quantitative exposure frequency evaluation method of physical contact risk of human-friendly robot considering environmental information

研究代表者

琴坂 信哉 (Shinya, Kotosaka)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：30334147

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：人間と作業環境を共有する人間共存型ロボットは、その新規性から過去の事故データ等を用いた定量的な衝突リスクの暴露頻度評価が困難である。そこで、先行研究では、人間の代役がロボットと同じ作業をすることでロボットの稼働状況を再現し、定量的な暴露頻度評価を行う方法が提案されてきた。しかし、この手法では、接近の性質が考慮されておらず、特に狭隘環境では有効な評価ができないと考えられる。そこで、本研究では、接近した際の速度や距離の変化といった接近の性質を考慮した狭隘環境での暴露頻度評価手法を提案した。人間の代役を用いた先行研究と同様に検証実験を行うことにより、提案手法の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果を活用することによって、新規に活用される人間共存型ロボットの衝突リスクを定量的に評価できるようになる。その評価結果は、ロボットの活用・運用方法に対して安全性の面から評価、改善を行う指標として利用できる。その結果として、より安全な人間共存型ロボットの運用実現が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Since human coexistence robots that share the work environment with humans are a new technology, it is difficult to quantitatively evaluate the frequency of exposure to collision risk using historical accident data and other data. Therefore, previous studies have proposed a method of quantitative exposure frequency evaluation by reproducing the operating conditions of a robot by having a human substitute perform the same tasks as the robot. However, this method does not take into account the approaching properties. So, it is considered to be ineffective in narrow environments. In this study, a method for evaluating exposure frequency in a narrow environment that takes into account the approaching properties such as changes in speed and distance was proposed. Verification experiments were conducted in the same way as in previous studies using human substitutes to confirm the effectiveness of the proposed method.

研究分野：ロボット工学

キーワード：サービスロボット リスクアセスメント 暴露頻度評価 狭隘空間 定量的評価 人間共存型ロボット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、人間と環境を共有する人間共存型ロボットの実用化に期待が寄せられている。これらのロボットは、人間と作業環境を共有することから、実用化の際には衝突などの事故の発生確率が飛躍的に高まることが予想される。そのため、リスクアセスメントを実施し、許容できないリスクを取り除く必要がある⁽¹⁾。しかし、人間共存型ロボットは暴露頻度を見積もる際、その新規性・特殊性から過去の事故データ等からの見積もりができず、実機での実験も倫理的な問題から不可能なため暴露頻度の定量的な見積もりが困難であるという問題があった。

そこで、先行研究⁽²⁾では、高度に発達したロボットは人間と同じ形態で同じ動作をすると仮定し、人間の代役がロボットと同じ作業をすることでロボットの稼働状況を再現して暴露頻度の見積もりを行う方法を提案した。しかし、先行研究⁽²⁾の手法は、広い空間を移動して作業を行うロボットを対象として人間と接近している時間から評価を行っており、接近時の動きについては考慮されていなかった。特に狭隘な環境では、接近時の行動が暴露頻度に与える影響が大きいと考えられ、先行研究の手法を狭隘環境で適用するには接近の性質の考慮が不十分だという問題があった。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、接近した際の速度や距離の変化といった接近の性質を考慮した狭隘環境下での暴露頻度評価手法を提案した。人間の代役を用いた先行研究と同様に検証実験を行うことにより、提案手法の有効性を確認した。

3. 研究の方法

接近した際の速度や距離の変化といった接近の性質を考慮した評価指標としてロボット役と人間の最短の距離、接近している時間、接近時の仮想衝突余裕時間の逆数の平均とロボット役と人間の相対速度の二乗平均の4つを利用することを提案した。そして、それぞれを正規化し、統合した値を暴露頻度の総合評価値として定義し、評価値を比較することで暴露頻度を評価する方法を提案した。

提案した評価値により接近の性質の変化を伴う暴露頻度が評価可能かを確認するために、直線の廊下とL字廊下で人間とロボット役がすれ違う際の様子をステレオカメラで撮影し、三次元解析を行って得られた頭部の移動履歴から暴露頻度評価値の算出を行った。

実験の結果、より近距離で直線的にすれ違う程、また速度を落とさずにすれ違う程、暴露頻度評価値が大きくなる傾向が見られた。また、L字廊下では接近する直前まで回避行動をとれないという特徴から、直線廊下と比べて接近時の評価値が大きく変化する傾向が見られた。これらの結果から、暴露頻度評価値はその接近の性質から暴露頻度が大きいと想定される場合程大きい値を示しており、提案した手法により接近の性質の影響を考慮した暴露頻度評価が可能であることを確認した。

4. 研究成果

(1) 狭隘環境下における暴露頻度評価手法の提案

狭隘環境下では、人間とロボットが接近する際の相対移動速度や回避行動の大きさといった接近の性質を考慮した暴露頻度の評価を行う必要がある。そこで、本研究では、下記の4種類の評価指標を正規化して、一つに総合した値を狭隘空間における暴露頻度評価値と定義することを提案した。

- ・ロボット役と人間の距離の最小距離
- ・ロボット役と人間が接近状態にある時間
- ・接近状態でのロボット役と人間の相対速度の二乗平均値
- ・接近状態における仮想衝突余裕時間⁽³⁾の逆数の平均値

ここで、接近状態の定義は、先行研究⁽²⁾で採用されているロボット役と人間の身体の最短距離が1.8[m]以内にある状態とする。

最小距離 l_{dmin} については、狭隘空間の幅 A [m]とすれ違いに必要な幅⁽⁴⁾ $L=0.6$ [m]、最小距離 d_{min} の逆数を用いて式(1)のように正規化した。

$$l_{dmin} = \left(\frac{1}{d_{min}} - \frac{1}{A} \right) / \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{A} \right) \quad \text{式(1)}$$

また、接近状態にある時間は、接近状態の範囲の両側 $(1.8 \times 2 = 3.6$ [m])を男性の日常的な歩行速度⁽⁵⁾1.4[m/sec]で横切るのに要する時間 $T=3.6/1.4$ [s]を基準として正規化した I_{Tnear} を評価値とした。接近状態での相対速度の二乗平均値は、男性の日常的な歩行速度⁽⁵⁾の1.4[m/s]の二乗を基準値として正規化した I_V を評価値としている。そして、仮想衝突余裕時間の逆数は、予期しない刺激に対する反応時間0.3[s]⁽⁶⁾の逆数を基準値として正規化した I_{Tave} を評価値とした。

これら4つの評価値を近距離での相対移動速が大きいほど暴露頻度が大きく、近距離ほど相対移動速度が暴露頻度に与える影響が大きくなるように式(2)の R で表される値を暴露頻度評価値とすることにした。

$$R = I_{dmin}^2 I_{Tnear} I_V I_{Tave} \quad \text{式(2)}$$

(2) 狭隘環境下での移動履歴取得実験

ロボット役と人間の移動履歴の取得方法

本研究で提案した暴露頻度評価値の有効性を確認するために、直線廊下と L 字廊下でロボット役と人間が接近してすれ違う際の移動履歴を計測し、そこから式(2)の暴露頻度評価値を算出し、得られた値が接近の性質から予想される暴露頻度の傾向と一致しているかを確認することにした。

本実験では、移動履歴を取得するために CCD カメラ(FL2G-13SC-C, PointGrey 社製) 2 台を台座に固定したステレオカメラを使用した。また、撮影の際の解像度は、640x480 ピクセル、フレームレートは、30 [fps]とした。撮影した映像から三次元運動解析ソフト DippMotionPro(DITECT 社製)で頭部位置を抽出し、これをロボット役と人間の移動履歴とした。

実験条件

直線廊下での実験では、図1のように2枚のフェンスネットの間を廊下に見立てて、その間をすれ違う際の移動履歴の取得を行なった。この際、廊下の幅は1.6[m]、移動する廊下の全長は、11[m]とした。ロボット役と人間は、それぞれ廊下の端から同時に出発して、すれ違いを行う。また、ロボット役と人間の回避行動の必要性を変化させるために、出発点に三つの目印をつけ廊下の端から出発する際に進行方向から見て左側・中央、右側のどこから出発するかを指定して実験を行なった。

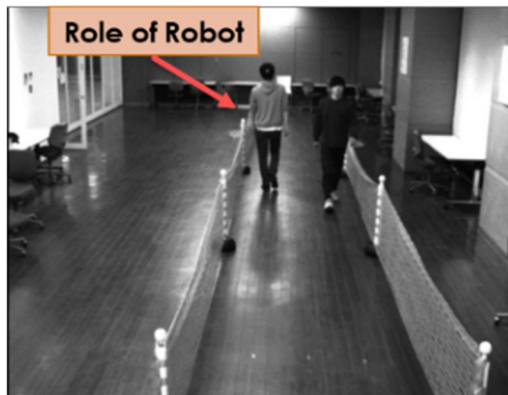


図1 直線廊下を模擬した実験環境

L 字廊下の実験では、図2のように黒シートとフェンスネットを用いて L 字廊下を再現した。廊下の幅は、1.6[m]とし、ロボット役と人間は、それぞれ廊下の端の位置から出発してすれ違いを行う。ここで、ロボット役と人間が廊下の角に到達する時間と角に到達した際の内側の壁との距離を変化させるために、廊下の幅を4等分した位置の角側の壁に近い方から順に内側・中央・外側の3点を定義し、両側の合計6地点をロボット役と人間が出発する際の位置とし、様々な組み合わせの出発点の条件で計測を行った(図3)。被験者が角の先の相手を意識して準備行動として相手の姿を確認する前から回避行動を行うことがあった。そこで、実験の際には被験者が事前の回避行動を極力取らないように、実際に角の先から人が来て回避動作が必要になる場合と人が来ない場合をランダムに設けた。

また、各廊下での実験では、ロボット役と人間には、行動の制限は設けず、自然にすれ違うように依頼した。

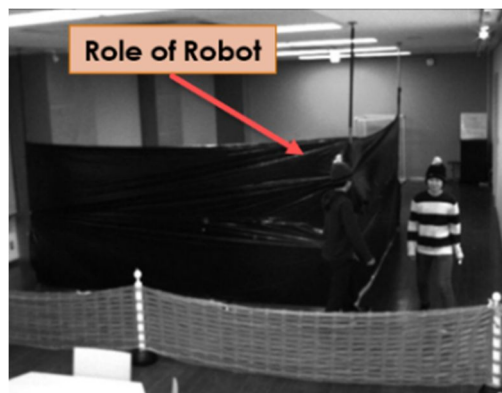


図2 L字廊下を模擬した実験環境

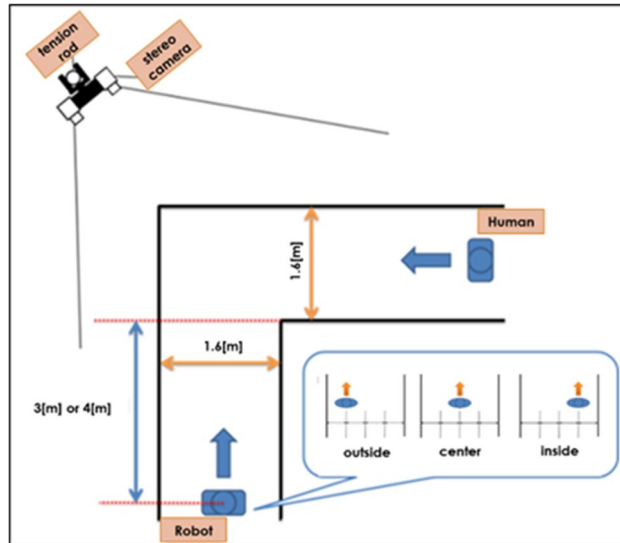


図3 L字廊下の被験者の出発位置

(3) 暴露頻度値の見積もり

直線廊下の暴露頻度評価結果

直線廊下においてロボット役と人間がそれぞれの出発位置から出発してすれ違う場合の正規化した各評価値と暴露頻度評価値の平均を表1に示す。ロボット役と人間の出発位置が共に廊下の左側の場合では、ロボット人間は接近する前から安全にすれ違うために十分な間隔があり、回避行動を取る必要がないため、そのまま直進してすれ違いを行なっている。そのため表1の出発位置が共に左側の時の暴露値は小さい値となっている。ロボット役の出発位置が左側、人間の出発位置が中央か右側の場合では、直進すると衝突のリスクがあるため、接近前に安全にすれ違うために必要な間隔を確保してからすれ違っており、この際の回避行動が小さく近距離ですれ違うほど暴露値は大きい傾向が見られた。直線廊下では被験者は接近前に回避行動をとることができ、接近前後で減速せずにすれ違っているため相対速度二乗平均の評価値は普段の歩行速度と同程度の値となっていた。また、それ以外の評価値は近距離でより直線的にすれ違う場合程大きくなっている。そのため、暴露頻度評価値はより近距離ですれ違う場合ほど大きくなる傾向を示し、直線廊下でのすれ違い時に想定される暴露頻度傾向と一致した。

表1 直線廊下における各評価値と暴露頻度評価値

| 出発位置 | | 評価値 | | | | |
|------|----|---------------|----------------|---------------|-------|-------|
| ロボット | 人間 | $I_{d_{min}}$ | $I_{T_{near}}$ | $I_{t_{ave}}$ | I_V | R |
| 左側 | 左側 | 0.550 | 0.509 | 0.365 | 0.822 | 0.051 |
| 左側 | 中央 | 0.883 | 0.505 | 0.486 | 0.953 | 0.206 |
| 左側 | 右側 | 0.839 | 0.532 | 0.421 | 0.865 | 0.146 |

L字廊下での暴露頻度評価結果

L字廊下でのすれ違いでは、被験者が出発する位置がどちらも内側に近く、接近する直前まで相手の姿が見えない場合では、角付近で相手に気が付いてから急な回避行動をとる傾向が見られた。その際、角付近で急に減速して回避行動をとる場合や、十分な回避行動がとれずに近距離まで接近する場合があります。暴露頻度評価値はより近距離で減速せずにすれ違う場合ほど大きくなっている。また、出発位置がどちらも外側に近い条件では、早い段階で相手に気が付いて回避行動をとることができるため、減速することなくスムーズにすれ違う場合が多く見られた。しかし、人は角を曲がる際により内側を通ろうとする傾向があるため、外側から出発した場合でも角に到達する時には内側近くまで移動しており、相手に気が付くタイミングや回避行動が内側近くから出発する際と同様の傾向になる場合もあった。このような傾向から、L字廊下では出発する位置が同じ場合でも被験者の接近前・接近後の行動によって接近の性質は大きく変化し、暴露頻度が接近の性質の影響を受けて変化しやすいと考えられる。また、その際の暴露頻度評価値は、より近距離で減速しない場合ほど大きく、接近の性質から想定される暴露頻度傾向と一致していることがわかった。

各条件での暴露頻度評価結果の比較

直線廊下とL字廊下における各評価値と暴露頻度評価値の平均と分散を表2に示す。表から、L字廊下では直前まで相手に気付かず急な回避行動をとることで接近時に接近の性質が変化しやすい傾向があるため、直線廊下と比べて各評価値の分散が大きいことが確認できた。また、

各廊下形状でのすれ違い時における最短距離の評価値を横軸，暴露頻度評価値を縦軸にとり，その関係を示したものを図4に示す．図中の点は，直線廊下とL字廊下の場合の計測されたすれ違い時の最短距離の評価値とその時の暴露値を示している．図4からL字廊下では，直線廊下よりも近距離まで接近する機会が多いことが確認できる．これは，L字廊下では回避するために十分な時間がないため，近い距離まで接近してしまう場合があると考えられる．また，その際に大きく減速して回避行動をとることがあり，移動速度の評価値 I_V が変動することからL字廊下では近距離での評価値のばらつきが直線廊下と比べて大きい傾向が見られた．

表2 直線廊下とL字廊下における各評価値と暴露頻度評価値の平均と分散

| 廊下形状 | | 評価値 | | | | |
|------|----|---------------|----------------|---------------|-------|-------|
| | | $I_{d_{min}}$ | $I_{T_{near}}$ | $I_{t_{ave}}$ | I_V | R |
| 直線 | 平均 | 0.771 | 0.523 | 0.419 | 0.874 | 0.130 |
| | 分散 | 0.050 | 0.006 | 0.009 | 0.052 | 0.011 |
| L字 | 平均 | 0.932 | 0.626 | 0.368 | 0.772 | 0.308 |
| | 分散 | 0.378 | 0.020 | 0.021 | 0.062 | 0.465 |

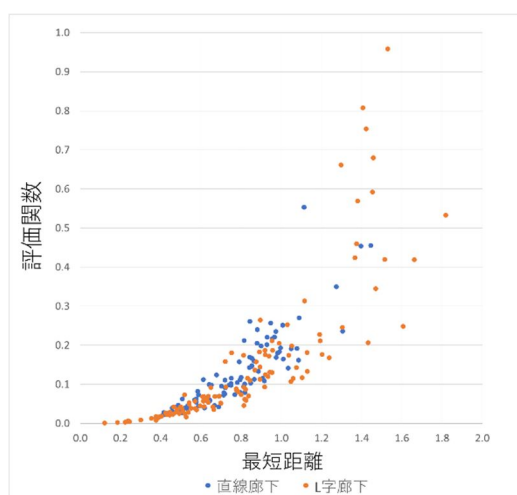


図4 最短距離と暴露頻度評価値の分布

(4) 結論

人間共存型ロボットの狭隘環境下での衝突リスクに対する暴露頻度を定量的に評価するために，4つの評価指標を正規化して統合した暴露頻度評価値を提案した．そして，直線廊下とL字廊下での移動履歴から暴露頻度評価値を算出して評価を行うことで提案手法の有効性を検証した．評価結果から，提案した暴露頻度評価値はロボット役と人間の接近の性質から想定される傾向と一致しており，提案手法は狭隘環境での暴露頻度評価手法として有効に活用できると考えられる．

参考文献

- (1) JIS B 9700 「機械類の安全性-設計のための一般原則-リスクアセスメント及びリスク低減」(2013)．
- (2) 琴坂信哉，家老将太，程島竜一，“人間の移動履歴に基づく人間共存型ロボットのリスク見積もり”，日本ロボット学会誌，Vol. 34，No. 8 (2016)，pp. 535-543．
- (3) 平岡敏洋，高田翔太，“衝突回避減速度による衝突リスクの評価”，計測自動制御学会論文，Vol. 47，No. 11 (2011)，pp. 534-540．
- (4) 毛利正光，塚口博司，高島伸哉，“歩道の幅員決定手法に関する研究”，土木学会論文報告集1981巻，310号(1981)，pp. 113-122．
- (5) 土屋和夫，“臨床歩行分析入門”(1989)，pp. 21 医歯薬出版株式会社．
- (6) Oyama, T., Tanabe, N., “Expectancy and choice reaction time as a function of stimulus presentation probability and serial dependency,” Psychologia, 25 (1982), pp. 131-143.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|