

人間の回避動作を考慮した共存ロボットの運転条件決定方法

武田 峻矢^{*1}, 山田 陽滋^{*1}, 岡本 正吾^{*1}

A method for estimating the probability of occurrence of a human-robot collision in consideration of human avoidance action characteristics

Shunya TAKEDA^{*1} Yoji YAMADA^{*1} and Shogo OKAMOTO^{*1}

^{*1} Department of Mechanical Engineering, Nagoya University
Furo-chou, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

The paper deals with a safety issue on human-robot coexistence systems which are intensively developed in such fields of manufacturing as cell production sites. We discuss a method for quantitatively estimating the probability of occurrence of a collision between a human and a fixed-type robot taking its run-away state into account. We apply the concept of dynamic manipulability ellipsoid to compute the potential run-away space of a robot. Then, we compute the probability of occurrence of the collision. We further computed the protective separation distance to cause null overlapped space between the robot's potential run away and the face volume of the human subject represented from the results of psychological experiments. Finally, we compared the computed results of the separation distance between the two cases where the human subject takes and doesn't take an action of avoiding the abrupt approaching motion of the end effector.

Key Words : Avoidance actions, Dynamic Manipulability Ellipsoid, Separation distance

1. 緒 言

1.1 研究背景 製造分野において、ISO 10218-1の改定に伴い⁽¹⁾、ロボット安全は安全柵に象徴される隔離技術から、作業者との共存を許す協調運転技術へとパラダイムシフトの時期を迎えている。例えば、森岡ら⁽²⁾はセル生産組立システムの構築のため、光カーテンのONとOFFの切り替えを状況に応じて行い、協調作業の場合は、ロボットアーム部の動作制限およびIPカメラによる作業者監視により安全の確保を行った。また、Tanら⁽³⁾は近距離で人間・ロボット協調作業を目的とし、2つの光カーテンを用いて、3つのエリアそれぞれにおいてロボットマニピュレータの動作の制限を変更する方法を提案した。さらにIPカメラで作業者を監視し、作業者の状況に応じてロボットの制御を行った。これらの技術は、安全技術向上に主眼を置くものであるが、人間・ロボット間の距離を縮めることによる作業効率のアップや省スペースについては、検討が及んでいない。

他方、規制の緩和も生産性の向上に寄与する要因であるといえる。ISO 10218-1⁽¹⁾、5.10節の協調運転(collaborative operation)は、そもそも人間・ロボッ

ト間の距離を縮め、これにより作業スペース、作業時間のさらなる節約を図るところに狙いがある。同規格の2010年のシステムティック・レビューは、これに加えて、安全関連系に係る一定の技術要件の下で、事業者により合理性を伴って協調運転時のロボットの運転速度を決めてよいと規定した。

筆者らのグループは、セル生産分野における人間・ロボット協調をターゲットとして、Ogureら⁽⁴⁾が示したリスクアセスメントの結果に基づきロボットの鋭利な手先が眼部を襲うリスクに着目し研究を行ってきた。すなわち、手先が人間の眼に急接近する心理学実験における人間の回避動作特性について、まず、服部ら⁽⁵⁾は人間の回避反応時間は作業の種類には依存しないことを示した。つぎに、回避反応時間は人間の眼球と接近するエンドエフェクタとの初期距離に依存することを明らかにした。さらに西山ら⁽⁶⁾は人間が誤ったタイミングでロボットの作業空間に侵入し、ロボット手先が接近する状況での回避動作を計測した。そして加速度の異なる手先速度パターンに応じて回避反応時間が変化することを報告した。

これらの人間の回避動作に関する知見を得る研究と並行して砂田ら⁽⁷⁾は、心理学実験により得られた回避動作をもとに外挿シミュレーションによりロボットの

^{*1} 名古屋大学工学部機械理工学専攻 (〒464-8603 名古屋市中種区不老町) takeda.shunya@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

動作を拡張した。そして、人間の回避動作特性を考慮すれば、ロボットの作動距離を延長できることを示した。このように、人間の認知特性を陽に考慮することにより、本論文の冒頭に述べた作業者とロボット間の距離は、さらに縮められる可能性がある。

1.2 研究目的 本論文では、セル生産現場において、多関節ロボットと作業者が対峙して協調作業を行う人間・ロボット共存系に着目する。その際、例えば、運転中のロボットの動作範囲に侵入して作業を行う作業者の頭部を、ロボットが故障により通常とは異なる軌道を通り急襲する状況を想定する。人間の頭部へのロボット手先の衝突は、人間・ロボット共存系を対象としてリスクアセスメントを行う際に必ず、重篤な傷害を伴うリスクをもたらすとの見積もりが与えられる危険部位である。そのためわれわれはとくに、人間の頭部とロボットの手先の衝突に着目し、両者の衝突を避けるためのロボットの運転条件を決定する新たな手法を提案することを目的とする。ここでは、人間の安全性確保を目的として、ロボットと人間が隔てられるべき距離について、ISO/TS 15066⁽⁸⁾で提案された保護間隔距離の考え方を出発点として議論を展開する。保護間隔距離は、リアルタイムの人間存在検知技術を用いて常に両者間の距離を計測し、マージン距離を加えた必要な間隔が保たれないと判断されたときに、ロボットを停止させるリスク低減方策の適用を前提として考えられてきたものである。しかし、これはロボットの正常運転時における安全距離規範であり、ロボットの暴走時を考慮していない。本研究でわれわれは、ロボットの暴走を考慮し、人間存在検知技術の使用の如何に拘わらず、人間・ロボット間の距離を求める方法について論ずる。その際、ロボット暴走時には、合理的に実用可能な時はいつでも、次の安全機能が適用される時点またはその前に、単一故障が検知されなければならないとしているISO 10218-1⁽¹⁾に規定された技術搭載を前提とする。その状況において、前出の規格ISO/TS 15066⁽⁸⁾の間隔距離算出方法に従って、両者の距離を決定する。しかしながら、さらに生産性を考慮しようとするのであれば、人間の回避動作も考慮に入れる可能性が考えられる。これにより、両者の最小の間隔距離はさらに短縮できる可能性がある。

1.3 想定される人間・ロボット間衝突状況と衝突確率算出方法の考え方 図1に示すように、ロボットは手先が点Aから点Bまで予め決められた軌道を通って、周期 T_p で繰り返し自動運転されるものとする。この状況において、作業者が、ロボットの動作軌道上に侵入し、かつロボットがその時点で故障により

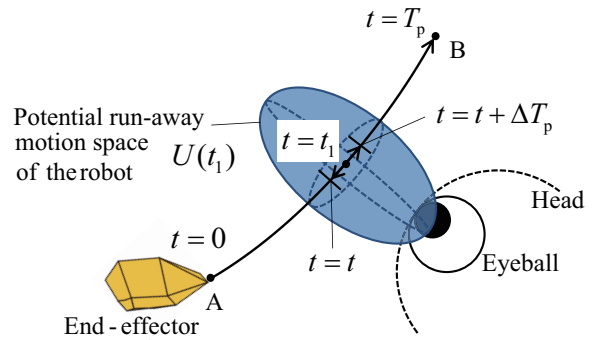


Fig. 1 A supposed situation of a human in the vicinity of a robot motion trajectory

暴走し作業者の予期せぬ動作を行った場合の、両者の衝突の可能性を以下の手順で定量評価していく。まず、ロボットが決められた軌跡 AB 上を 1 回運転される際に、人間がロボットとの協調運転のために、その近傍に存在する確率 $P_H(t)$ は、対象が繰り返し作業であることから統計的に見積もることが可能である。つぎに、時刻 t から $t + \Delta T_p$ の間にロボットが故障する確率は、ロボットの正常運転時のシステムとしての故障率を λ_R (=一定) とすれば、 $\lambda_R \cdot \Delta T_p$ で計算可能である。また、ロボットが暴走し、後述する潜在暴走空間内で作業を行うとき、実際に人間の頭部と、ロボットの手先が衝突する確率を $P_{C|R}(t)$ とする。

以上より、ロボットが決められた軌跡上を繰り返し運転されている間の時刻 $(t, t + \Delta T_p)$ において故障し、その近傍において人間が協調作業を行っている状況において、 $P_C(t)$ は下式 (1) で算出可能であることが分かる。

$$P_C(t) = P_H(t) \times \lambda_R \cdot \Delta T_p \times P_{C|R}(t) \quad (1)$$

衝突を避けるためには、式 (1) において $P_C(t)$ を $t > 0$ で常に 0 にする必要がある。本稿では式 (1) を求めるうえで中心的な議論となる $P_{C|R}(t)$ を導出し、衝突を避ける最小の間隔距離を求める手法の提案を行う。

2. ロボットの潜在暴走空間

2.1 潜在暴走空間 ロボットが時刻 t に故障し、暴走した場合には、通常の軌道とは異なる軌道を通ることが考えられる。本研究は、製造環境における産業用ロボットの協調運転を対象としているので、ロボットには自己診断機能が備わっていることを前提とすることができる。つまり、自ら故障を検知しロボットが暴走する状態からある時刻後で停止状態に終了させることができる。ロボットは故障し暴走を開始すると、各ジョイントがどのような速度を出力するか不確か

あり、この状況下で停止状態に至るまでの時間、ロボットの手先は時刻 t の位置からある空間の範囲において不確定的に位置決めされることになる。これをロボットの潜在暴走空間と呼ぶ。

西山らは先の報告⁽⁹⁾で、この空間を可操作性楕円体で表現した。しかし、ロボットの暴走は、急激な運動の変化をもたらし得ることから、本論文ではこのような運動に伴う力学的な要素も考慮できる動的可操作性楕円体を導入してロボットの潜在暴走空間の算出を行う。

2.2 動的可操作性楕円体による潜在暴走空間の求積
動的可操作性楕円体は、ロボットの関節駆動トルクベクトルを $\tilde{\tau} \equiv [\tau_1, \dots, \tau_5]^T$ としたとき、 $\|\tilde{\tau}\| \leq 1$ を満足するような関節駆動トルクベクトルを用いて実現できる手先加速度 \dot{v} の全ての集合である⁽¹⁰⁾。関節変数(角変位)ベクトルを $\mathbf{q} \equiv [q_1, \dots, q_N]^T$ 、関節角速度ベクトルを $\dot{\mathbf{q}}$ 、手先速度ベクトルを \mathbf{v} とするとき

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (2)$$

の関係が成り立つ。ここで $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ はロボットの機構に依存したヤコビ行列であり、基準座標系を Σ_B 、 Σ_B で表した手先先端位置ベクトルを ${}^B\mathbf{r} \equiv [r_x \ r_y \ r_z]^T$ とすると、 ${}^B\mathbf{r}$ のヤコビ行列 $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ は $\mathbf{J}_i \equiv [\frac{\partial r_x}{\partial q_i} \ \frac{\partial r_y}{\partial q_i} \ \frac{\partial r_z}{\partial q_i}]^T$ を用いて、

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = [\mathbf{J}_1 \ \mathbf{J}_2 \ \dots \ \mathbf{J}_N]^T \quad (3)$$

で表される。

また $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ をロボットアームの慣性行列とすると、 $\mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})$ の特異値分解

$$\mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) = \mathbf{U}_d \Sigma_d \mathbf{V}_d^T \quad (4)$$

によって、動的可操作性楕円体の主軸はそれぞれ $\sigma_{d1}\mathbf{u}_{d1}, \sigma_{d2}\mathbf{u}_{d2}, \sigma_{d3}\mathbf{u}_{d3}$ で与えられる。ただし、

$$\Sigma_d = \begin{bmatrix} \sigma_{d1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{d2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{d3} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{U}_d \equiv [\mathbf{u}_{d1} \ \mathbf{u}_{d2} \ \mathbf{u}_{d3}]. \quad (5)$$

ロボットアームの慣性行列 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ は、その $i, j (i, j = 1, 2, \dots, N)$ 要素を $M_{ij}(\mathbf{q})$ とすると、

$$M_{ij}(\mathbf{q}) = \sum_{k=\max(i,j)}^n \text{tr} \left(\frac{\partial {}^B\mathbf{T}_k}{\partial q_j} \hat{\mathbf{H}}_k \frac{\partial {}^B\mathbf{T}_k}{\partial q_i} \right) \quad (6)$$

で求められる。 ${}^B\mathbf{T}_k$ は基準座標からリンク k のローカル座標への同次変換行列である。式(6)で、 $\text{tr}(\cdot)$ は行列の対角要素の和を表す。また、 $\hat{\mathbf{H}}_i$ とはリンク i の

疑似慣性行列で、

$$\hat{\mathbf{H}}_i = \int_{\text{link}_i} {}^i\mathbf{r}^i \mathbf{r}^i{}^T dm \quad (7)$$

である。さらに、式(7)で ${}^i\mathbf{r}$ は、 Σ_i から見たリンク i の任意の点であり、また \int_{link_i} はリンク i 全体について積分することを表している。

以上の方法により、各姿勢におけるロボットの動的可操作性楕円体を求めることができる。

ロボット暴走時、動的可操作性楕円体から得られる加速度を用いて、手先が人間の頭部方向に動き得る距離を求めることができる。ロボットの手先先端を原点とし、動的可操作性楕円体の主軸 $\mathbf{u}_{d1}, \mathbf{u}_{d2}, \mathbf{u}_{d3}$ を軸とする座標系を Σ_R とする。動的可操作性楕円体を Σ_R で表すと、

$$\frac{u_1^2}{\sigma_{d1}^2} + \frac{u_2^2}{\sigma_{d2}^2} + \frac{u_3^2}{\sigma_{d3}^2} = 1 \quad (8)$$

となる。そして、 Σ_R で示した頭部中心位置ベクトルを、 ${}^R\mathbf{p}_H \equiv [p \ q \ r]^T$ と定義する。 Σ_R の原点と、点 ${}^R\mathbf{p}_H$ を通る直線の方程式は

$$\frac{u_1}{p} = \frac{u_2}{q} = \frac{u_3}{r} \quad (9)$$

となる。動的可操作性楕円体から求められる ${}^R\mathbf{p}_H$ 方向の加速度成分 $a_R^{(a)}$ は、式(8)(9)を連立することにより以下のように求められる。

$$a_R^{(a)} = \frac{\sigma_{d1}\sigma_{d2}\sigma_{d3}\sqrt{p^2+q^2+r^2}}{\sqrt{p^2\sigma_{d2}^2\sigma_{d3}^2+q^2\sigma_{d3}^2\sigma_{d1}^2+r^2\sigma_{d1}^2\sigma_{d2}^2}} \quad (10)$$

また、ロボットの時刻 t の速度ベクトルを $\mathbf{v}_R(t)$ とすると、頭部方向への速度成分の大きさ v_{Rp} は $\mathbf{v}_R(t)$ と ${}^R\mathbf{p}_H$ のなす角を θ と定義した場合、以下の式で計算できる。

$$v_{Rp}(t) = v_R(t) \cos \theta = v_R(t) \frac{\mathbf{v}_R(t)^T \cdot \mathbf{v}_{Rp}(t)}{v_R(t) \cdot v_{Rp}(t)} \quad (11)$$

以上で求めたロボットの暴走時の頭部方向への加速度成分 $a_R^{(a)}$ および速度成分 v_{Rp} を考慮し、ロボットが暴走したときの最悪の運動パターンを用いて、潜在暴走空間から求められる頭部方向への暴走距離 d_p を図2または図3の方法で算出する。すなわち、図2は暴走時の速度がロボットの最大速度に到達する場合であり、図3は暴走時の速度がロボットの最大速度に到達しない場合を示している。この2つの運動パターンに場合分けし、図2の場合

$$d_p = \frac{1}{2} (2t_R^{(r)} - \frac{v_{R\max} - v_{Rp}}{a_R^{(a)}}) \times v_{R\max} \quad (12)$$

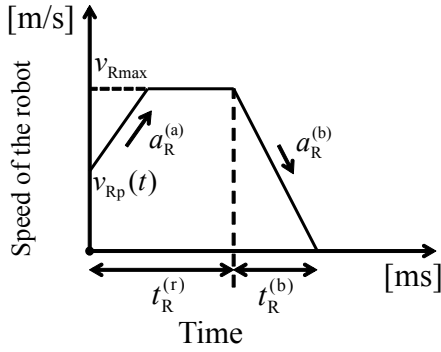


Fig. 2 Speed pattern 1 for calculating the potential run-away space of the robot

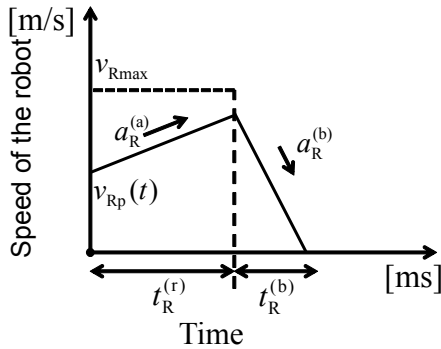


Fig. 3 Speed pattern 2 for calculating the potential run-away space of the robot

図 3 の場合

$$d_p = \left(\frac{3}{2} v_{Rp} + a_R^{(a)} \times t_R^{(r)} \right) \times t_R^{(r)} \quad (13)$$

を用いてそれぞれ暴走距離 d_p が求められる。同図において、 $t_R^{(r)}$ はロボットのフォールトがロボットの安全関連システムに影響を与え始めてから、システムが保護停止を実施するまでの反応時間である。

3. 心理学実験に基づく衝突確率の計算例

3.1 潜在暴走空間からの衝突確率の計算 ロボットの暴走によって、その軌跡の近傍に居合わせた人間の頭部とロボットの手先が衝突する場合を考える。ロボットの潜在暴走空間の体積を $U(t)$ とし、 $U(t)$ と人間の頭部の一部が重なる部分の体積を $W_h(t)$ と定義する。潜在暴走空間内におけるロボットの手先位置の存在確率は一様であると考えてよいので、式 (1) の $P_{C|R}(t)$ は $U(t)$ と $W_h(t)$ の単純な体積の比較として以下の式で表すことができるものとする。

$$P_{C|R}(t) = \frac{W_h(t)}{U(t)} \quad (14)$$

潜在暴走空間 $U(t)$ と人間の頭部が重なり合う場合、 $W_h(t) = 0$ とはならないため、式 (1) で $P_C(t) \neq 0$ と

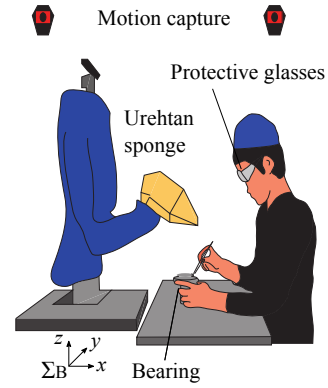


Fig. 4 An image of the psychological experiment

なる。

Hattori⁽¹¹⁾は、人間が誤ったタイミングでロボットの作業空間内で作業を行うという状況下で、さらにロボットが暴走し、人間の眼部または頭部を襲うというシナリオにおける心理学実験を行い、その際の人間の回避動作を計測し、解析を行った。その概観が図 4 に示されている。この実験は、倫理部会の承認を得ており、著者らの研究グループがこれまで行った同様の心理学実験の中で、結果的に最も人間の眼部あるいは頭部とロボットの手先の距離が小さくなった実験である。

実験方法として、セル生産現場を再現するため、ロボットと人間の協調作業を想定し、図 4 のように HIRO と参加者を配置した。

本研究で用いた、ロボット HIRO (川田工業株式会社製) は、双腕付上体ヒューマノイド形ロボットで、左右の腕それぞれに $N = 5$ のジョイントを持つ。HIRO は、安全関連系に含まれる近接センサ信号の ON により、保護停止を実行する。今、人間との間隔距離に応じて近接センサが ON するものとし、この間隔距離をいくらにするかを本節 3.2 で論じる。

ロボットの手先先端の位置ベクトル 5r は、手先に最も近い座標系 Σ_5' からみたベクトルであり、具体的に ${}^5r = [0 \ 200 \ 0]^T$ である。作業者が誤ったタイミングでロボットの動作範囲内で作業する状況を模擬するために、参加者には次のように実験の課題を与えた。参加者は決められた位置で頭部を固定し、ピンセットを用いてベアリングの組み立て作業を行う。実際の作業現場では作業者は作業台上の部品等を注視し、ロボットの手先先端は周辺視野でとらえていると考えられるため、本実験でも同様にロボットの手先先端を周辺視野でとらえられる位置に、ベアリングを設置した。

参加者が図 4 のようにベアリングの組立作業を行っているとき、ランダムな時間間隔でロボットを参加者の眼部方向へ動作させた。ロボットの動作速度は図 5 に

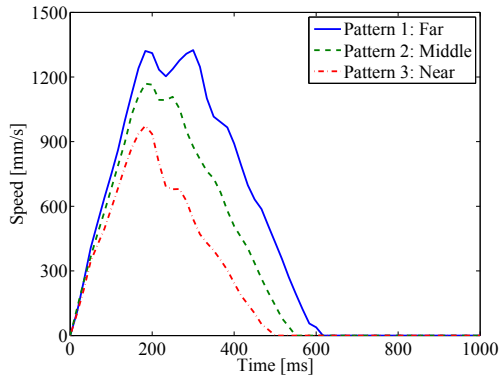


Fig. 5 Speed patterns of the robot

示すとおりである。図5のPattern 1の減速部は最高速度で運転されるロボットの手先が保護停止される場合の速度パターンを示している。ここから計算されるロボットの緊急停止時の最大加速度 $a_R^{(b)}$ は 9000 mm/s^2 である。本研究ではコントローラに安全 PLC が用いられていると仮定して、図2または図3の $t_R^{(r)} = 70 \text{ ms}$ とした。HIROの性能を考慮し、ロボットの最大速度を示す $v_{R\max}$ は、 2000 mm/s とした。他方、HIROの片腕は、重量 5.0 kg 、半径 30 mm の一様な円柱としてモデル化した。これらの仮定から、式(7)の \hat{H}_i が求められる。以上の数値を式(6)に代入し、その結果をさらに式(4)に代入することにより、動的可操作性楕円体を求めることができる。この結果に基づき、頭部方向への最大到達距離である暴走距離 d_p は、図2または図3の速度パターンを適用して求めることができる。 σ_{di} ($i = 1, 2, 3$) は主軸方向の加速度の値であり式(5)から得られる。

本稿では最も参加者に近い位置から動作を開始するPattern3に着目した。これらのロボットの動作に対し参加者が行う回避動作を、モーションキャプチャシステムおよびビデオで記録した。3名の参加者それぞれに対して、3つのロボットの動作パターンでそれぞれ20回ずつ行い、合計で60試行のデータを記録した。この実験の結果を用いて、本研究の主題である、人間の回避動作を考慮してロボットの手先が衝突しないための間隔距離の算出を行う。

3.2 衝突を避ける間隔距離 式(14)から分かるように、 $P_C(t)$ が常に0になる条件は $W_h(t) = 0$ が成り立つときのみである。つまり、人間がロボットの作業領域内に居合わせ、ロボットが暴走した場合でも、人間の頭部がロボットの潜在暴走空間の内部に侵入しない間隔距離をあらかじめ確保することによって、両者の衝突を避けることが可能となる。

本稿では、文献⁽¹¹⁾の心理学実験で与えられた実験条件にシミュレーション上の変更を加える。実験で得

られた参加者の動作データを、3.1節の方法で求めたロボットの潜在暴走空間のデータに加える。

今、心理学実験におけるロボットの運転開始時 ($t = 0$) における手先位置の x 軸成分を ${}^B X_R$ 、参加者 p の q 回目の実験における $t = 0$ の x 軸方向の位置成分を ${}^B X_{H_{pq}}$ とすると、両者の間隔距離 ${}^B X_{pq}$ は

$${}^B X_{pq} \equiv {}^B X_{H_{pq}} - {}^B X_R \quad (15)$$

で表される。式(15)で与えられる間隔距離に対して、 (p, q) 試行における参加者とロボットの衝突確率 $P_{C|R_{pq}}(t) \neq 0, t > 0$ となった場合に、以下の変更を加える。すなわち、今、そのときの人間の頭部の x 軸方向との重なりが最も大きく(深く) Δ_{pq} となったとすると、このときの Δ_{pq} を用いて

$${}^B \tilde{X}_{pq} = {}^B X_{pq} + \Delta_{pq} + X_S \quad (16)$$

と間隔距離を変更する。ここで X_S は ISO/TS 15066⁽⁸⁾ にならって設けられる定数とする。

また、頭部の形状は直径 200 mm の球であると仮定した。

4. 間隔距離の見積もり

先の実験においては、ロボットの運動が開始され、潜在暴走空間が人間の頭部の方向に近づき、徐々に潜在暴走空間と人間の頭部との重なりが大きくなる。このような場合は、 $W_h(t) \neq 0$ となるので、ロボットの運転開始時における人間の頭部の位置を3.2節の式(16)にしたがってさらに図4の x 軸正の方向に Δ だけ平行移動させ、再び $P_{C|R}(t) = 0$ にならないか確かめる。この操作が繰り返され、潜在暴走空間内に頭部が侵入しない状況を見つけ出し、このときをもって最小の分離距離 ${}^B \tilde{X}_{pq}$ を算出した。これらの結果を、実験条件での x 軸方向の間隔距離 ${}^B X_{pq}$ と足し合わせる。ただし、 $X_S = 0$ としている。

3名の参加者に対して、実験で得られた回避動作を伴った場合(以下、これを場合Aと呼ぶ)を用いて間隔距離の計算を行った。それに加え、参加者が回避動作を伴わないという動作(以下 \bar{A} と呼ぶ)を以下のように定め、同様に間隔距離を求めた。すなわち、ロボットの運転が開始され、参加者の回避動作が観測され始める直前の位置で、人間の頭部が静止し続けるという場合を仮に作り出した。

両者の場合で、それぞれの試行ごとに間隔距離を求め、参加者 E~G の平均と最大をまとめたものを表1に示した。この表から、場合Aでは、3名の参加者で平均で約 600 mm 以上、最大値を考慮するとさらに大

Table 1 Results of the separation distances

	Participant E		Participant F		Participant G	
	w/	w/o	w/	w/o	w/	w/o
Average separation distance [mm]	570.6	597.9	613.3	638.8	593.2	593.2
Maximum separation distance [mm]	605	633	650	667	628	628

きな間隔距離が必要になっていることが分る。これらの中で、参加者 E, F に関しては、場合 \bar{A} と比較して間隔距離を縮めることが可能であることが分かった。このことから、回避動作が間隔距離を短くするために有効である可能性が示唆された。

一方、参加者の結果では実験により回避動作が示されていることが確認されているにもかかわらず、間隔距離の短縮には有効でないという結果となった。Hattori⁽¹¹⁾のまとめによると、それぞれの参加者の回避反応時間の平均は 299.2, 223.9, 463.6 ms であった。これらを図 5 の横軸 (Time) に照らし合わせて考えると、参加者 G はロボットが停止してから回避動作を開始していることが分る。

5. 結 言

本稿では、セル生産現場を対象として、通常運転を行うロボットの運動軌跡の近傍に作業者が居合わせる状況下において、ロボットが動作中に故障により暴走することを想定した。その際、ロボットの潜在暴走空間を動的可操作性楕円体の考えを用いることにより、保護停止までの動作パターンから算出できることを示した。そして、時々刻々得られる潜在暴走空間に対し、人間の頭部の心理学実験の結果を用いた。頭部に急に近接するロボットに対する参加者の回避特性を考慮した、衝突確率を見積もるためのシミュレーションを行った。そして、衝突を避けることができる最小の間隔距離の結果ををそれぞれの参加者に対して示した。その結果、3名の参加者に対する実験結果の解析により、反応時間が 70 ms と設定されるロボットとの間におよそ 600 mm の間隔距離が必要であるという結果を得た。さらに、回避動作を考慮しない場合と比較して間隔距離が短くなる可能性があることを示した。以上、本手法により、重篤度の高い頭部に対して、繰り返し作業を行うロボットが暴走しても人間が危害を被ることがない間隔距離が算出できることを合理的に示した。

本稿では一次元的に x 軸方向のみを考慮して間隔距離の計算を行った。しかし、実際には、間隔距離のさらなる短縮のためにも 3 次元的な距離を算出することを今後の課題とする。

参 考 文 献

- (1) ISO 10218-1, "Robots for individual requirements - Safety requirements", (2006)
- (2) Masahiro MORIOKA and Shinsuke SAKAKIBARA, "A new cell production assembly system with human-robot cooperation", CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.59 (2010), pp.9-12.
- (3) Jeffrey Too Chuan TAN, Feng DUAN, Ryu KATO, and Tamio ARAI, "Safety strategy for human-robot collaboration: Design and development in cellular manufacturing", Advanced Robotics, Vol.24, No.5-6(2010), pp.839-860.
- (4) Takuya OGURE, Yoshihiro NAKABO, SeongHee JEONG, and Yoji YAMADA "Hazard analysis of an industrial upper-body humanoid", Industrial Robot: An International Journal, Vol.36, No.5(2009), pp.469-476.
- (5) Takamasa HATTORI, Yoji YAMADA, Shuji MORI, Shogo OKAMOTO, and Susumu HARA, "Psychological Experiments on Avoidance Action Characteristics for Estimating Avoidability of Harm to Eyes from Robots", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2012), pp.5400-5405.
- (6) 西山智也, 山田陽滋, 岡本正吾, 原進, 武田峻矢, "ヒューマンエラーが引き起こす至近距離でのロボット手先動作に対する回避動作特性", 日本機械学会東海支部第 64 期通常総会・講演会, No.153-1 (2015).
- (7) Koji SUNADA, Yoji YAMADA, Takamasa HATTORI, Shogo OKAMOTO and Susumu HARA, "Extrapolation Simulation for Estimating Human Avoidability in Human-Robot Coexistence Systems", IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, (2012), pp.785-790.
- (8) ISO/TS 15066, "Robots and robotic devices- Collaborative robots", (2016)
- (9) 西山智也, 山田陽滋, 服部貴政, 岡本正吾, 原進, "暴走時の自己診断機能による運動制御を仮定したロボットエンドエフェクタと眼球の衝突確率の見積もり", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 3A1-I05 (2014), 1-3.
- (10) Tsuneo YOSHIKAWA, "Dynamic manipulability of robot manipulators", IEEE Robotics and Automation, Vol.2, No.1 (1985), pp.1033-1038.
- (11) Takamasa HATTORI, "Analyses on Harm-Avoidance Actions against a Mechanical Hazard Suddenly Attacking an Eye for Human-Robot Cooperative Systems", Doctoral Thesis at the Graduate School of Engineering, Nagoya University, (2014).