

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に関する研究

武田 峻矢^{*1}, 山田 陽滋^{*1}, 岡本 正吾^{*1}

A study on 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 a human-robot coexistence system which is highly expected to be introduced in such fields of manufacturing as cell production lines. We discuss a method for quantitatively estimating the probability of occurrence of a collision between a human and a fixed-type robot when it falls into a run-away state. We apply the concept of dynamic manipulability ellipsoid to compute the potential run-away space of a robot taking avoidance actions of both human and robot actions into account. Then, compute the probability of occurrence of the collision taking into consideration the avoiding motion space of a human subject represented from the results of psychological experiments in which he avoids abrupt approaching motion of the end effector. The study contributes to obtaining the minimum distance required for a robot to be separated from a worker.

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

1. 緒 言

1.1 研究背景 作業者と共存できるロボットの協調運転は、両者間の距離を縮め、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。Pre-collision safety は Ikuta ら⁽²⁾らの指摘にはじまり、Kulić ら⁽³⁾は、人間の位置、生体情報、顔の向きに応じてロボットを制御し、減速または経路を変更することにより衝突回避を行う方策を示した。そして、ISO 10218-1 の改定に伴い⁽¹⁾、製造分野における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発展を遂げてきた。例えば、森岡ら⁽⁴⁾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⁽⁵⁾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

ニピュレーター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。しかし、これらは省スペース等の効果については述べられていない。

他方、規制動向から捉えると、昨今は、リスクアセスメントを行って、許容されるリスクの範囲内での運転条件であれば、ロボットの協調運転 (collaborative operation) ができるようになっている。機械指令改定に伴う同規格の 2010 年におけるハーモナイズドレビューにより、協調運転時のロボットの運転速度もリスクアセスメントの結果に基づいて、事業者により、安全関連系に係る一定の技術要件の下で合理性を伴って決めてよいとされるようになった。

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⁽⁶⁾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⁽⁷⁾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

^{*1} 名古屋大学工学部機械理工学専攻 (〒 464-8603 名古屋市千種区不老町) takeda.shunya@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

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⁽⁸⁾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⁽⁹⁾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をさらに縮められる可能性がある。加えて、安全関連系としての衝突を回避するための人間存在検知技術のターゲット同定にも、貢献することが期待される。

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眼部や頭部を、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。人間の眼部を含む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、人間の眼部を含む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⁽¹⁰⁾で提案された保護分離距離の考え方を出発点として議論を展開する。保護分離距離は、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、衝突が起きる前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、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、ロボットの接近に対する人間の回避動作を陽に考慮し、ロボットの相対的な運動条件によって、安全距離をどれだけ縮めることができるかについて考察する。

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 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、ロボットの動作軌跡上に侵入し、かつロボットがその時点で故障により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 回運動される際に、その協調運転のために、人間がロボット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ろう。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, 単位 [$\frac{1}{s}$]) 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、潜在暴走空間内で作業を行うとき、実際に人間の眼球または頭部と、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分離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、ISO 10218-1⁽¹⁾に規定されているように、合理的に実用可能な時はいつでも、次の安全機能が用いられる時点またはその前に、単一故障は検知されなければならないとしているため、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であり、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⁽¹¹⁾で、この空間を可操作性楕円体で表現した⁽¹²⁾。しかし、ロボットの暴走は、急激な運動の変化をもたらすことから、本論文ではこのような運動に伴う動学的な要素も考慮できる動的な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 動的な可操作性楕円体による潜在暴走空間の求積
動的な可操作性楕円体は、ロボットの関節駆動トルクベクトルを $\boldsymbol{\tau} \equiv [\tau_1, \dots, \tau_5]^T$ としたとき、 $\|\boldsymbol{\tau}\| \leq 1$ 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 $\dot{\boldsymbol{v}}$ の全ての集合である⁽¹²⁾。関節変数（角変位）ベクトルを $\boldsymbol{q} \equiv [q_1, \dots, q_N]^T$ 、関節角速度ベクトルを $\dot{\boldsymbol{q}}$ 、手先速度ベクトルを \boldsymbol{v} とするとき

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

の関係が成り立つ。ここで $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})$ はロボットの機構に依存したヤコビ行列である。また $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$ をロボットアームの慣性行列とすると、 $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{q})$ の特異値分解

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{U}_d \boldsymbol{\Sigma}_d \boldsymbol{V}_d^T \quad (3)$$

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

$$\boldsymbol{\Sigma}_d = \begin{bmatrix} \sigma_{d1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{d2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{d3} & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{U}_d \equiv [\boldsymbol{u}_{d1}, \boldsymbol{u}_{d2}, \boldsymbol{u}_{d3}]. \quad (4)$$

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

$$M_{ij}(\boldsymbol{q}) = \sum_{k=\max(i,j)}^n \text{tr} \left(\frac{\partial^0 \boldsymbol{T}_k}{\partial q_j} \hat{\boldsymbol{H}}_k \frac{\partial^0 \boldsymbol{T}_k}{\partial q_i} \right) \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 $\text{tr}(\cdot)$ は行列の対角要素の和を表す。また、 $\hat{\boldsymbol{H}}_i$ とはリンク i の疑似慣性行列で、

$$\hat{\boldsymbol{H}}_i = \int_{\text{link } i} {}^i \boldsymbol{r}^i \boldsymbol{r}^i{}^T dm \quad (6)$$

で与えられる。ここに、 ${}^i \boldsymbol{r}$ は Σ_i から見たリンク i の任意の点であり、また $\int_{\text{link } i}$ 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な可操作性楕円体を求めることができる。

これらの加速度ベクトルの集合から、ロボットが暴走を開始してから保護停止に導かれるまでの間に動き得る空間を求める。

ロボットは動的な可操作性楕円体の各主軸方向にそれ

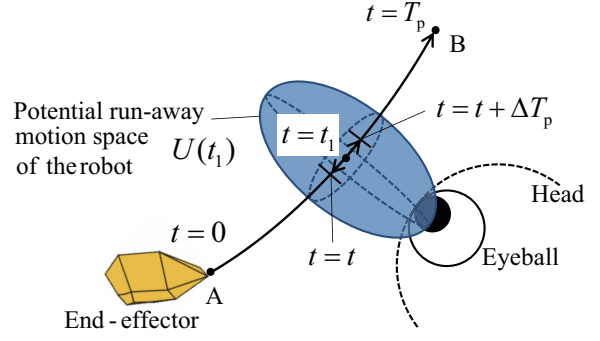


Fig. 1 A supposed situation of a human in the vicinity of a robot motion trajectory

ぞれ $\sigma_{d1}, \sigma_{d2}, \sigma_{d3}$ の加速度を持つ。ロボットが暴走したときの、最悪の運動パターンを考慮すると、後述の図4に示すようになる。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始動するまでの反応時間である。同図ではロボットは出力し得る最大の加速度で加速し、自己診断機能が発効されるまで、最大速度で $t_R^{(r)}$ の間動作を続ける。その後自己診断による保護停止により動作が停止するまでが具体的な潜在暴走空間として定量的に算出される。図1は、時刻 $(t, \Delta T_p]$ に含まれる $t = t_1$ において暴走するロボットの潜在暴走空間と人間の眼球と頭部を示している。同図の場合、潜在暴走空間 $U(t_1)$ と人間の眼球または頭部が重なり合う部分が0とはならないため、式(1)の $P_C(t) \neq 0$ となる。

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
今、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眼球あるいは顔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、 $U(t)$ と人間の眼球あるいは頭部の一部が重なる部分の体積を $W_e(t)$ あるいは $W_h(t)$ 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 $P_{C|R}(t)$ を $U(t)$ と $W_k(t)$ ($k = e, h$) 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。

$$P_{C|R}(t) = \frac{W_k(t)}{U(t)} \quad (7)$$

西山ら⁽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い、さらにロボットが暴走し、人間の眼部または頭部を襲う際の人間の回避動作を計測し、解析する心理学実験を行った。その概観が図2に示されている。この実験は、倫理部会の承認を得て

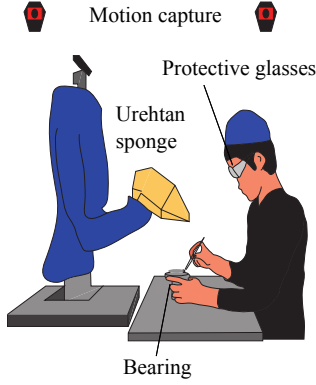


Fig. 2 An image of the psychological experiment

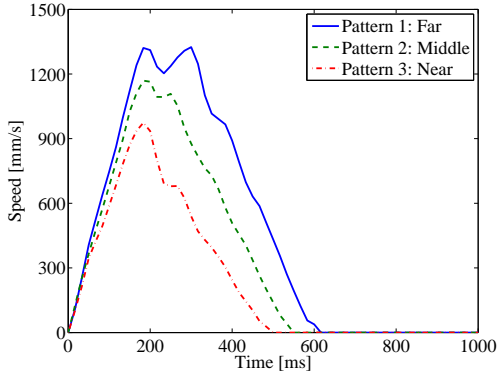


Fig. 3 Speed patterns of the robot

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。そこで、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分離距離の算出を行う。

本実験では、ロボットとして HIRO (川田工業株式会社製) が用いられた。これは、双腕付上部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、安全関連系に位置づけられる近接センサ信号の ON により、保護停止を実行する。今、人間との分離距離に応じて近接センサが ON するものとし、この分離距離をいくらにするかを本節 3.2 で論じる。

ロボットの手先の位置ベクトル 5r は、手先先端に最も近い座標系 Σ_5 からみた手先位置ベクトルであり、具体的に ${}^5r = [0 \ 200 \ 0]^T$ である。 ${}^B r \equiv [r_x \ r_y \ r_z]^T$ として、 ${}^B r$ のヤコビ行列 $J(q)$ は $J_i \equiv [\frac{\partial r_x}{\partial q_i} \ \frac{\partial r_y}{\partial q_i} \ \frac{\partial r_z}{\partial q_i}]^T$ を用いて、

$$J(q) = [J_1 \ J_2 \ J_3 \ J_4 \ J_5]^T \quad (8)$$

で表す。

図 3 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

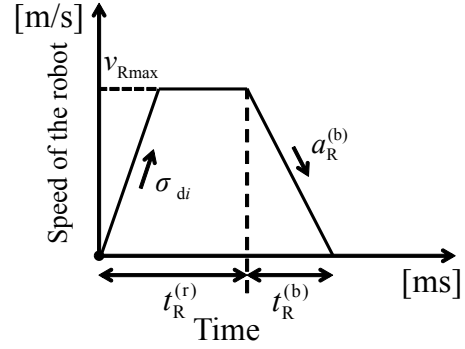


Fig. 4 A method for calculating the potential runaway space of the robot

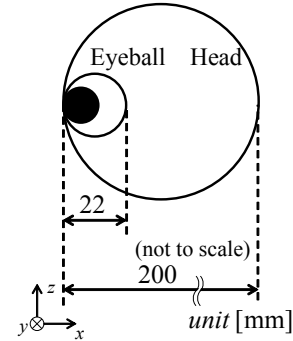


Fig. 5 Position relationship between an eyeball included in the head

を示している。本研究ではコントローラに安全 PLC が用いられていることを前提として、図 4 の $t_R^{(r)} = 120$ 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_{Rmax} は、2000 mm/s とした。ロボットの緊急停止時の加速度を表す $a_R^{(b)}$ は、図 3 の減速時の加速度を考慮し 9000 mm/s² を用いる。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、 \hat{H}_i が求められる。以上の数値を式 (5)(9) に代入することにより、動的可操作性楕円体の主軸方向の最大到達距離は、図 4 の速度パターンモデルより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 (4) から得られる。これらをそれぞれの主軸に対して適用し、ロボットの潜在暴走空間を具体的に算出する。

3.2 衝突を避ける分離距離 式 (7) から分かるように、 $P_C(t)$ が常に 0 になる条件は $W_k(t) = 0$ ($k = e, h$) 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、人間の眼球または頭部がロボットの潜在暴走空間を示す楕円体の内部に侵入しない分離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。前出の規格 ISO/TS 15066⁽¹⁰⁾ の安全距離算出方法に従って、両者の距離を決定することが現行規制下では求められている。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、両者の最小の分離距離はさらに短縮できる可能性がある。

ここからは、文献⁽⁸⁾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。眼球または頭部がロボットの潜在暴走空間に一部でも含まれる場合、両者が衝突する確率が正になる。

今、心理学実験におけるロボットの運転開始時 ($t = 0$) の初期位置の 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 ${}^B X_{Hpq}$ とすると、両者の分離距離 ${}^B X_{pq}$ は

$${}^B X_{pq} \equiv {}^B X_{Hpq} - {}^B X_R \quad (9)$$

で表される。式 (9) で与えられる分離距離に対して、 (p, q) 試行における参加者とロボットの衝突確率 $P_{C|Rpq}(t) \neq 0, t > 0$ となった場合に変更を加える。すなわち、今、そのときの人間の眼球あるいは頭部との x 軸方向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

$${}^B \tilde{X}_{pq} = {}^B X_{pq} + \Delta_{pq} + X_S \quad (10)$$

と分離距離を変更する。ここで X_S は安全性を考慮に入れたマージン距離とする。ISO/TS 15066⁽¹⁰⁾で示される保護分離距離では、ロボットと人間の現在の位置と速度に応じて求められる両者に必要な距離に加えて、ロボットに検知されるまでに人間の身体の一部が侵入できる距離として侵入距離 C 、人間とロボットそれぞれの位置の不確かさ Z_d, Z_r がマージン距離として加えられている。 X_S はこれにならって設けられる定数である。

眼部と頭部の大きさ、および幾何学的な位置関係は、図5に示すように定めた。眼球は頭部前面に接しており、それぞれの形状は直径 22 mm, 200 mm の球であると仮定した。

4. シミュレーション結果に基づく分離距離の見積もり

シミュレーション結果の一例として、ロボットの運動軌跡上に存在する潜在暴走空間と人間の回避動作に伴う頭部の動きの時間的推移を図6に示す。同図は、潜在暴走空間と人間の頭部が衝突する、すなわち、やがて $P_{C|R}(t) \neq 0$ を迎える両者の衝突前と後を示している。同図は、図2の xz 平面図を示している。楕円が

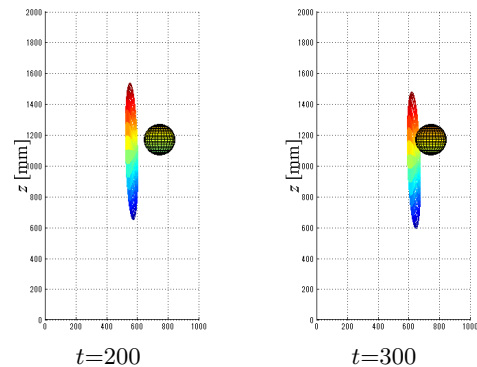


Fig. 6 Potential run-away space of the robot and a human head

ロボットの潜在暴走空間を示し、球は人間の頭部を示している。図の t [ms] はロボットが通常運転軌跡上を、動作を開始し始めてからの時刻を示している。ロボットが動作をすることにより、潜在暴走空間が徐々に人間の頭部の方向に近づき、 $t = 300$ ではロボットの潜在暴走空間と人間の頭部が重なる。つまりこのとき、 $W_h(t) \neq 0$ となるので、頭部の位置を3.2節の式(10)にしたがってさらに 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。これらの結果は、実験条件での x 軸方向の分離距離 170 mm と足し合わせて計算している。

5. 考 察

衝突を避けるために必要な分離距離 ${}^B X_{pq}$ を、参加者の眼部あるいは頭部ごとにまとめロボットの動作腕それぞれについて表1に示した。参加者は3名であるが、 ${}^B X_{pq}$ の個人差は少ないことが分かる。

結果から、身体異なる部位に対する分離距離の計算を行うことが可能となった。本論文では、3次元的にロボットの潜在暴走空間と人間の眼部または頭部が重なりをもつかを考慮し、 x 軸方向の一次元の分離距離を求めた。

6. 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、

Table 1 Results of the separation distances

	Participant A		Participant B		Participant C	
	Eyeball [mm]	Head [mm]	Eyeball [mm]	Head [mm]	Eyeball [mm]	Head [mm]
Average(Right)	159.9	172	158.7	173.2	162.3	178.2
Average(Left)	160.3	175.4	161.5	173.6	163.5	176.5
Average(Total)	160.1	175.4	160.1	173.4	162.9	175.4
Maximum(Total)	162	178	164	181	165	181

人間の眼部あるいは頭部の心理学実験の結果を用いる。頭部に急に近接するロボットに対する参加者の動作特性を考慮したことにより、両者の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分離距離をそれぞれの参加者に対して決定した結果を示した。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120 msと設定されるロボットとの間におよそ170 mmの分離距離が必要であるという結果を得た。以上、本手法により、重篤度の高い眼部や頭部に対して、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分離距離が算出できることを合理的に示した。これにより、作業現場におけるスペースの節約が可能であることを示した。本論文で報告したシミュレーションでは、ロボットが、繰り返し運転軌道上を最も接近した時に暴走を始め、人間が回避行動を始める状況を想定している。

今後の課題として、3.2節で設けた安全マージン距離をいくりにするかの議論がある。どの方向からロボットが接近すると、最悪の状態、運転軌道上のどのあたりで人間が回避を始めるかも考慮しながら、さらに現実的な議論を展開したい。

参考文献

- (1) ISO 10218-1, "Robots for individual requirements - Safety requirements", (2006)
- (2) Koji IKUTA, Hideki ISHII and Makoto NOKATA, "Safety Evaluation Method of Design and Control for Human-Care Robots", *The International Journal of Robotics Research*, Vol.22, No.5 (2003), pp.281-297.
- (3) Dana KULIĆ and Elizabeth CROFT, "Pre-collision safety strategies for human-robot interaction", *Autonomous Robots*, Vol.22, Issue.2 (2007), pp.149-164.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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).
- (9) 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.
- (10) ISO/TS 15066, "Robots and robotic devices- Collaborative robots", (2016)
- (11) 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.
- (12) Tsuneo YOSHIKAWA, "Dynamic manipulability of robot manipulators", *IEEE Robotics and Automation*, Vol.2, No.1 (1985), pp.1033-1038.