

車両型ロボットの経路制御における衝突回避則の研究

電子技術部 電子制御チーム 山岡 清志
横浜国立大学大学院 環境情報研究院 上野 誠也
樋口 丈浩

現在、様々な試験研究機関等で産業用、医療用等の多様なロボットの要素、システム技術が研究開発されている。また、本県においても産業振興等の政策として、生活支援ロボット等の実用化の進展を推進している。本研究は、生活支援ロボット等の実用化の進展に必要な安全性、実用性を検証するために、多様なロボットのうち車両型ロボットに着目し、安全性に資する制御手法を検討した。提案する手法は危険を予測し、ロボットを安全な経路に導く制御手法である。本手法をロボットの経路制御に適用し、有効性を確認した。

キーワード：衝突回避、情報量獲得、安全性、危険予測

1 はじめに

戦後、産業機器の自動化の普及に伴い産業用ロボットの研究開発が進展し、自動車、電子機器等の工場等において産業用ロボットが普及している。このため、従来は人間が行っていた作業を代替し、作業効率を格段に向上させ、生産性の向上に貢献している。また、近年は産業用に限らず、医療用、災害対応用等とロボットの適用範囲が広がっている。これらのロボットシステムは、要素技術の設計・加工、組立に係る研究開発が盛んに行われ、小型軽量化、操作性等の向上が進展している。また、産業用ロボットに代表される従来のロボットの活動領域は、多くの場合、工場等の屋内の比較的単純で、障害物等の危険な要素が少ない画一的な領域となっている^{1,2)}。

しかし、近年は、ロボットの普及に伴い、活動領域が多様化されている。このため、将来は、従来よりも複雑で、危険な要素を含む多様な領域での活動が見込まれている。これらの領域での活動には、操作性、安全性の向上が必須である。このうち、安全性に関する技術の進展のためには、ロボットシステムの安全な経路移動、障害物回避に対して有効な制御手法の進展が必要とされている^{3,4)}。

本研究では、安全性に対処する手法を検証するために多様なロボットシステムのうち災害対応用ロボットに適用可能なロボットとして、様々な研究開発実績を有し、多用途への応用が可能な車輪移動型ロボットに着目した。このロボットシステムの経路制御に有効な手法を提案し、最適制御の観点から、安全性に関して調査・検討するものである。これまでに航空機等の飛行体における衝突回避の研究において、安全な回避が行われ有効性が示された手法^{5,7)}がある。検討する手法は、これらを適用し、比較的複雑な領域

において、障害物判明のために現在の情報を基に、定義される情報により将来の危険度を予測して安全性を確保し、連続した滑らかな制御系が構築できるように設計する。また、従来の移動ロボット⁸⁾に比べて、センシング機能のコストを抑え比較的小さいロボットに搭載できることを目指している。数値シミュレーションにて本手法の有効性を示す。

2 制御則

2.1 概要

本稿で扱うモデルは、水平面内を速度 V_0 で移動し、方位角 ψ_0 を制御入力とする制御系により経路制御を行う。また、横滑りや空回りが無いと仮定する。本手法は、壁等に隠れている不確実な情報を獲得し危険を判明する制御則と、侵入してくる移動物体を相対距離から危険度を判明する制御則を組み合わせ1つの制御則としたものである。これにより、ロボットは、壁等の障害物を回避し、侵入してくる移動物体の回避を連続して滑らかに制御する(図1参照)。以降、情報を獲得し危険を判明する制御則及び移動物体を相対距離から危険度を判明する制御則を示し、続いて、それらを組み合わせた制御則を導く。

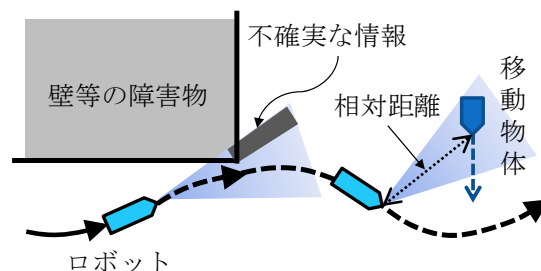


図1 本研究の経路制御の概要

2. 2 情報獲得制御則

組み合わせて一つにした制御則のうち、情報を獲得し危険を判明する制御則について述べる。本制御則は、獲得した情報量をフィードバック制御により障害物を早期に見つけ、危険を回避する制御則である。情報獲得の概念を図2のように慣性座標系として定義する。

ロボットから計測される点線で示されている三角形の領域を「注目領域」とし、その面積を S_E として表す。その領域の中で、視野を遮る障害壁が存在すれば、情報が得られない領域が発生する。この領域の面積を S_B として近似し、濃い灰色で示す。残りの領域は情報が判明され安全が確保された「判明領域」 S_C であり、次式で求められる。

$$S_C = S_E - S_B \quad (1)$$

これから注目領域 S_E に対する判明領域 S_C との比を「情報判明度」 I_L として、次のように定義する。

$$I_L = \frac{S_C}{S_E} \quad (2)$$

本制御則は、この I_L を基準となる情報獲得要求値 I_R 以上に確保する制御である。

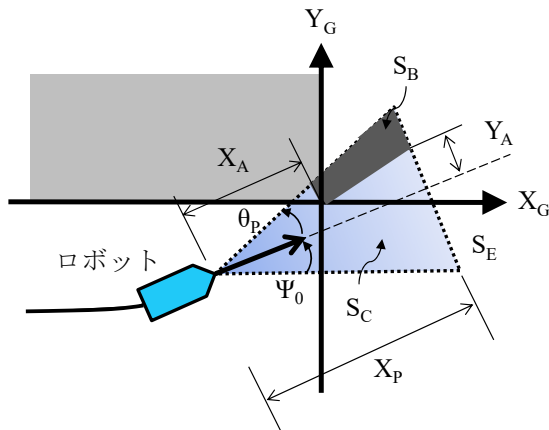


図2 情報獲得の概要

図2に示す座標系 (X_G, Y_G) に視界を遮る壁が存在するとし、その右下端を原点とする。注目領域 S_E は、進行方向に X_P 、視野角 θ_p の三角形とし、式(3)で示す。また、情報が得られない領域 S_B を式(4)で近似する。

$$S_E = X_P^2 \cdot \tan \theta_p \quad (3)$$

$$S_B = \frac{1}{2} (X_P^2 - X_A^2) \cdot (\tan \theta_p - \tan \theta_A) \quad (4)$$

$$\text{ただし、} \tan \theta_A = \frac{Y_A}{X_A}$$

式(2)から(4)を用いて情報判明度の時間変化率 $\dot{I}_L$

が求まる。情報判明度 I_L は、次式で設定される最小減少率以下になるように制御する。

$$(\dot{I}_L)_{\min} = k_E (I_L - I_R) \quad (5)$$

ただし、 k_E はゲインである。ロボットは、目的の方向へ進行しているとすると、十分に情報があれば、その進行方向の方位角を維持するための角速度 $(\omega_0)_D$ により直進させる。

情報量が不足している場合は、情報判明度の減少率の制限の範囲で、情報を獲得するように角速度 $(\omega_0)_I$ を制御する。角速度制限を考慮し、方位角維持の制御則と合わせて制御則 $(\omega_0)_S$ が次式のように導かれる。

$$(\omega_0)_S = \begin{cases} (\omega_0)_I & ((\dot{I}_L)_{\min} > \dot{I}_L) \\ (\omega_0)_D & ((\dot{I}_L)_{\min} < \dot{I}_L) \end{cases} \quad (6)$$

2. 3 衝突回避制御則

組み合わせた制御則のうち、侵入してくる移動物体との衝突の危険性を予測し、衝突を回避する制御則を述べる。危険性を数値的に表現するために危険度を用いて定義する。ロボットと移動物体との概念を図3のようにロボットを中心とした機体座標系として定義する。

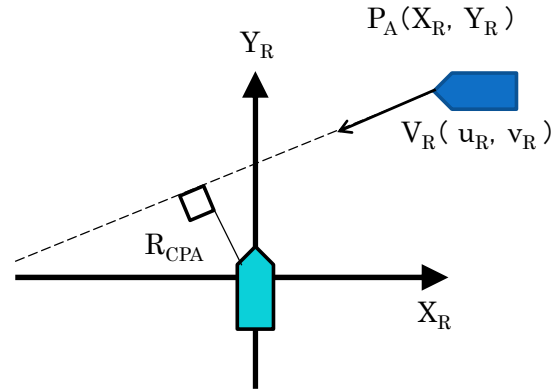


図3 危険度の定義の概要

本稿では、お互いが直進を続けた場合の最も接近する最接近距離 R_{CPA} (Range to Closest Point to Approach) を危険度として用いる。また、時間の情報として、最接近時間 T_{CPA} (Time to Closest Point to Approach) を用いる。 T_{CPA} が長ければ、時間的な余裕が有るため R_{CPA} を増加させる回避が可能となるが、短ければ急操舵が必要となる。本制御則は、 T_{CPA} と R_{CPA} を組み合わせることにより、危険の少ない方向に機体を誘導し、安全な回避が可能となるものである。最接近点の座標と T_{CPA} の定義を次式のように示す。

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_R \\ Y_R \end{pmatrix} + T_{CPA} \cdot \begin{pmatrix} u_R \\ v_R \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\text{ただし, } T_{CPA} = -\frac{X_R u_R + Y_R v_R}{u_R^2 + v_R^2}$$

式 (7) から最近距離 R_{CPA} が次式で与えられる。

$$R_{CPA} = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2} \quad (8)$$

危険度 φ は、最近距離 R_{CPA} と設計者が設定する安全隔離距離 R_0 から次式で定義する。なお、この距離が確保された時を安全とする。

$$\varphi = \frac{R_0^2}{(R_0^2 + R_{CPA}^2)} \quad (9)$$

危険度は 0 から 1 の値を取る。危険度の値が 0 の時が最も安全であり、1 の時が最も危険である。

ロボットは、移動物体が視野に無いときは、フィードバック制御により要求値 I_R まで情報を獲得するように移動する。また、視野に存在するときは、危険度を安全な値まで下げるように回避する。危険度の変化率と移動物体との相対速度の関係から衝突回避則として回避角速度 $(\omega_0)_s$ が求められる。

衝突回避則と情報獲得制御則を危険度が安全な値まで連続的に変化するように合成する。次式に導かれた制御則を示す。

$$\omega_0 = (1 - k_A)(\omega_0)_s + k_A(\omega_0)_A \quad (10)$$

$(\omega_0)_s$ は情報獲得制御則による角速度、 $(\omega_0)_A$ は衝突回避制御則による角速度、 k_A は目標の判明によってリアルタイムに求めることができる係数である。

3 数値計算

3.1 問題の設定

制御則の有効性を確認するために、数値シミュレーションを行った。図 4 に示すような障害物を含み動的に変化する比較複雑な環境となるように設定した。

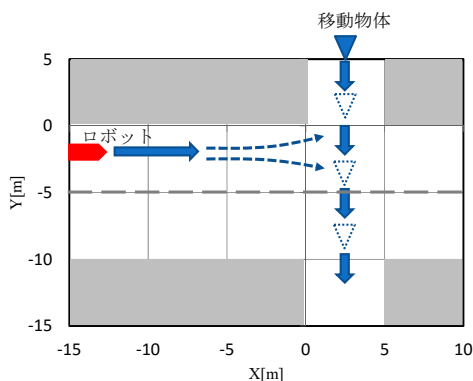


図 4 問題の設定

初期条件としてロボットは、図に示す経路を左から右へ移るように障害物を回避し、侵入してくる移動物体を回避する。移動物体は、ロボットからは視認できない領域から直進してくるものとし、回避行動はしない。

3.2 計算結果

基本特性を確認するために、視界を遮る障害物の回避のみ、そして侵入してくる移動物体の回避を行った。本ケースの計算条件は、ロボットと侵入してくる移動物体の速度は 5 m/s とする。情報獲得要求値 $I_R=0.9$ 、注目領域 $X_p=7.5$ m、最大旋回角速度を 10 deg/s、 $\theta_p=45$ deg、安全隔離距離 R_0 は 2.0 m とした。計算結果を図 5 に示す。これから、移動物体が無い場合は、視界を遮る障害物を避けながら移動し、ほぼ直線的な回避行動をとっていることがわかる。移動物体が有る場合は、移動物体を回避するために、より多く回避行動をとっていることがわかる。

情報獲得要求値 I_R の差異による性能差を確認した。情報量の違いによる差異を見るために 3 種類の情報獲得要求値を用いて検証する。計算条件は、 I_R 以外の注目領域等について基本特性と同一とする。計算結果を図 6 に示す。本ケースにおいては、計算条件が比較的安全な条件であることから顕著な差異はないことが示された。しかし、この条件においても情報獲得要求値が高いほど安全な回避をとることが示された。

注目領域が回避性能に与える影響を図 7 及び図 8 に示す。図 5 及び図 6 では、視野角 $\theta_p=45$ deg、進行方向の距離 $X_p=7.5$ m の三角形の注目領域として計算している。この注目領域を基準として、情報獲得要求値 I_R が 0.9 として、これらの形状を表すパラメータの θ_p 及び X_p を変更して回避性能に与える影響を検証した。図 7 に示す視野角と最小距離の関係から、 θ_p の変更により、明らかな変化が生じている。視野角 45 deg を境に注目領域の幅が広がるほど最小距離が増加している。また、狭くなるほどある程度までは最小距離が増加している。一方、図 8 に示す奥行の距離と最小距離の関係から、注目領域の奥行が大きくなるにつれて最小距離は減少傾向が確認できるが、その差は大きくない。これらのことから、安全性を確保するためには、奥行きの変化よりも、視野角の変化により幅広い注目領域を使用することが適切であることが示された。

移動物体の速度がロボットの回避性能に与える影響を図 9 に示す。移動物体の速度を 5 m/s を基準として、1 m/s、3 m/s、10 m/s と変更して回避性能を検証した。基準の速度よりも遅いと、ロボットは少しの回避動作で移動物体の前を通り過ぎるように移動している。また速い場合は、遠方から回避行動をとっていることが示された。いずれの場合でも、適切に対処していることがわかった。これらは図 10 に示すロボットと移動物体の相対距離の関係からもわ

かる。移動物体の速度が遅い場合は、ゆるやかな回避行動をとっている。速い場合は、短い時間で危険を検知し速やかな回避行動をとっていることが示された。

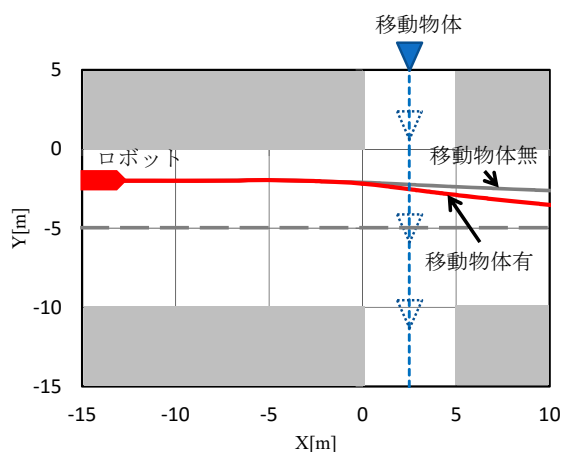


図5 基本特性（移動物体の有無）

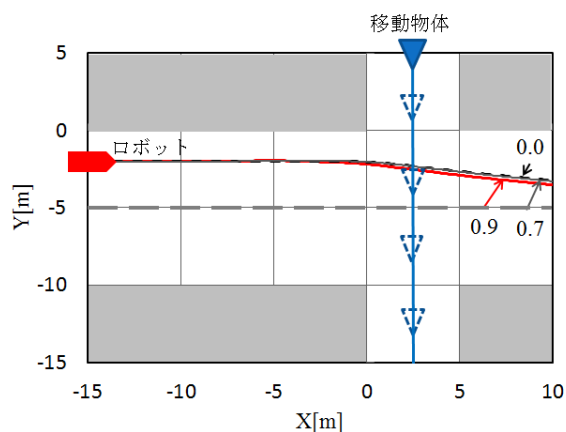


図6 基本特性（情報獲得要求値の差異）

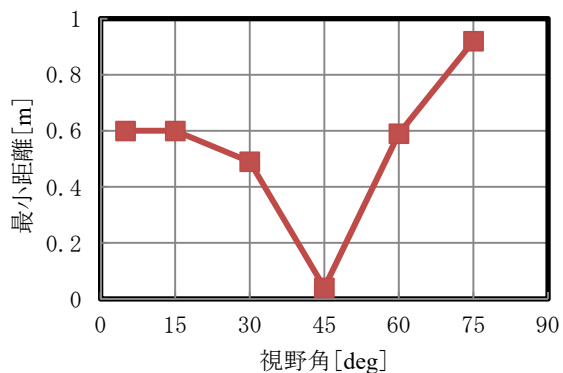


図7 注目領域と最小距離の関係（視野角）

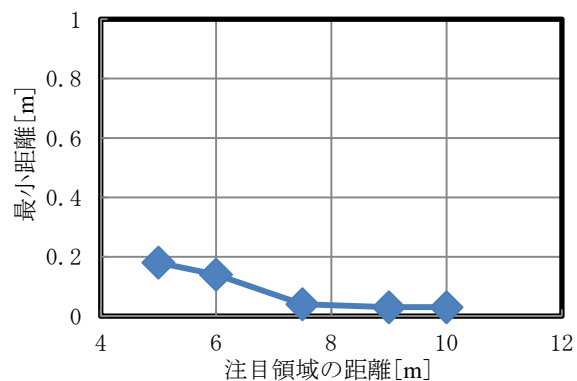


図8 注目領域と最小距離の関係（距離）

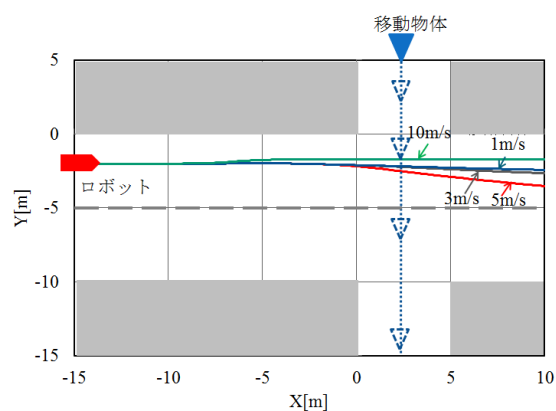


図9 移動物体の速度変動

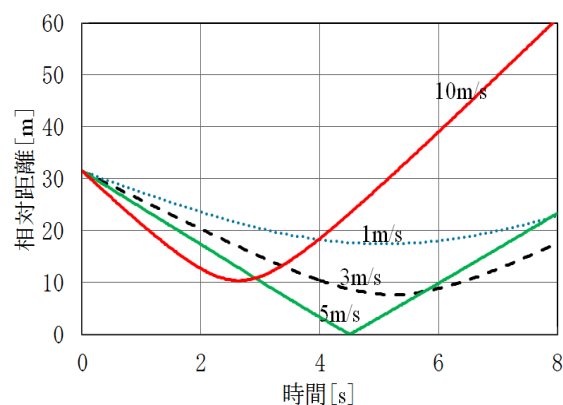


図10 相対距離

4 まとめ

本研究は、車両型ロボットに適用可能な制御則を構築し、障害物と移動物体が存在する比較的複雑な環境において、安全性を検証したものである。その結果、障害物回避制御の有効性や、移動物体に対する有効な衝突回避性制御を確認することができた⁹⁾。本制御則の基本的な有効性が確認

できたため、危険な要素を含む多様な領域で活動が可能な小型ロボットへの適用の展望を得ることができた。

文献

- 1) “産業用ロボット技術ロードマップ”, 日本機械学会誌 Vol.111, No.1072, pp.260 (2008.3) .
- 2) “ ロボット技術の研究開発動向”, 科学技術・学術政策研究所, 科学技術動向 (2003 年 9 月号) , pp.14-23.
- 3) “ ロボット分野”, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, www.nedo.go.jp/content/100109922.pdf (参照:2016-05-20)
- 4) “先端ロボット技術による ユニバーサル未来社会の実現に向けて”, 文部科学省・経済産業省, www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/jjkaigou/dai30/siryou4.pdf (参照:2016-05-20)
- 5) 塩入英明, 上野誠也; 日本航空宇宙学会論文集 Vol.51, No.595, pp.13-16 (2003) .
- 6) S.Ueno, T.Higuchi, and K.Iwama; “Collision Avoidance Law using Information Amount”, Numerical Analysis – Theory and Application, Intech, pp.609-626, (2011).
- 7) Takehiro Higuchi *et al.* ; “Experiment of Collision Avoidance Control Law with Information Amount Feedback Using Vehicle Model”, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol.6, No.1, pp.001-006 (2013)
- 8) “ロボットの要素技術”, NEDO ロボット白書 2014, p1-11
- 9) 山岡清志, 上野誠也, 樋口丈浩; 平成 28 年電気学会全国大会講演論文集, pp.333-334 (2016.3)

Study on Collision Avoidance Guidance Law for Trajectory Control of Vehicle Robot

Seiji YAMAOKA, Seiya UENO, and Takehiro HIGUCHI

This study verified safety of the control law which was applicable to a vehicle robot in the comparatively complicated environment where there were the obstacle and moving object. This control law is guided on the trajectory where a robot is safe by predicting risk. The effectiveness of the obstacle avoidance and the collision avoidance of moving object was confirmed by the results of such simulations what have been done in this paper. The prospects of the application to a small robot were obtained by basic effective confirmation of this control law.