



# ロボットの VR 遠隔操作における衝突危険度提示システムの開発

竹本航亮<sup>1)</sup>, 岡部太亮<sup>1)</sup>, 中村文一<sup>1)</sup>

1) 東京理科大学 理工学研究科 電気工学専攻 中村研究室 (〒 278-8510 千葉県野田市山崎 2641, 7322561@ed.tus.ac.jp)

**概要:** HMD を用いた 360 度映像体験は, ロボットの遠隔操作に際する没入感の向上に大きく寄与している. しかし, HMD で 360 度映像を見る際に用いられる球体の内側に画像を貼り付ける手法では, 運動視差を得られず, 衝突可能性のある近距離領域の距離感を掴みにくい. 本研究では, 深度センサによる 3 次元再構成と, 制御バリア関数に基づく安全性指標による評価によって, 遠隔操作時の衝突回避を目的とした危険度提示システムの開発を行う.

**キーワード:** 作業支援・評価, カメラ, センサ, テレプレゼンス

## 1. はじめに

昨今の感染症流行の影響により, テレワークをはじめとした家から遠隔で物事を行う需要が高まっている. ロボット遠隔操作の分野でも, 家にいながら旅行ができる遠隔旅行 [1] や, 従業員が家にいながら接客などの対人サービスを行うロボットカフェなどの, ヒューマノイドロボットを用いた新たなサービスが登場している. また, 建設現場や災害現場などの危険の伴う場所における調査や活動を安全に行うために, 移動体の遠隔操作の研究が長年行われている. ロボットの遠隔操作システムの視覚提示には, 固定型のスクリーンを用いるものと, ヘッド・マウント・ディスプレイ (HMD) を用いるものがある. その中でも HMD は視界を完全に覆うため, 遠隔操作時の没入感を大きく高めることができる. HMD を用いた 360 度映像体験は, ロボットの遠隔操作に際する没入感の向上に大きく寄与しており, 遠隔旅行 [1] やテレワーク [2] を目的としたロボットの視覚部に採用されている. しかし, HMD で 360 度映像を見る際に用いられる球体の内側に画像を貼り付ける手法では, 運動視差を得られず, 衝突可能性のある近距離領域の距離感を掴みにくいため危険である. 本研究では, 深度センサによる 3 次元再構成と, 制御バリア関数に基づく安全性指標による評価によって, 遠隔操作時の衝突回避を目的とした危険度提示システムの開発を行う.

## 2. 目的

本システムは, HMD を用いたロボットの遠隔操作における衝突回避を目的としている. 従来の 360 度映像提示は, 360 度カメラや複数のカメラを用いて撮影しつなぎ合わされたエクイレクタングラー形式の画像を, 球体の内面に貼り付けることで実現されている [3]. しかしこの方法では, 画像内のすべての物体について視点からの距離が等しいため, 運動視差が得られず物体までの距離を測りづらい. 距離感の欠如は障害物との衝突可能性を高め危険である. 本稿では, 360 度映像に深度データから生成した点群を重ねて表示することによる立体感付与と色による危険領域の強調に

よって, 遠隔操作者に危険を予測させ, 衝突を予防するシステムを提案する.

## 3. 制御バリア関数

制御工学において, システムが状態制約を逸脱することを防ぐための手法として, Wieland らの考案した制御バリア関数 (CBF)[4] が用いられている. CBF は状態制約の境界を漸近線として無限大に発散する関数である. 中村らは状態制約近傍における条件を緩和した拡張制御バリア関数 (拡張 CBF) を提案し, 人間がロボットを操作する際にアシストを加えるヒューマンアシスト制御において安全性を保証できることを示した [5]. 本研究では拡張 CBF を用いた安全性指標に基づいて危険度評価を行う.

### 3.1 拡張制御バリア関数 [5]

人間によって与えられることを想定するフィードフォワード入力  $u_h(t)$  をもつ, 以下の入力アフィン非線形制御システムを考える.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)(u + u_h(t)) \quad (1)$$

ここで  $x \in \mathbb{R}^n$  は状態,  $u \in \mathbb{R}^m$  は制御入力,  $u_h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$  はフィードフォワード入力である. また, 写像  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  及び  $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m}$  は局所 Lipschitz 連続写像,  $u_h$  は連続写像とする. このとき, 拡張 CBF は以下のように定義される.

**定義 1.** システム (1) および, 安全集合  $X$  を考える. ただし,  $X$  は開集合であるものとする.  $C^1$  級可微分関数  $B: X \rightarrow \mathbb{R}$  は, 以下の 3 条件を満たすとき, 拡張制御バリア関数 (拡張 CBF) とよぶ.

- (A1) 非負関数. すなわち, すべての  $x \in X$  に対して,  $B(x) \geq 0$ .
- (A2) プロパー. すなわち, 任意の  $L \geq 0$  に対してレベル集合  $\{x \mid B(x) \leq L\}$  はコンパクト集合.
- (A3) 任意の連続写像  $u_h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$  に対し, 次式を満たす非負の定数  $C, K \geq 0$  が存在する.

$$\inf_{u \in \mathbb{R}^m} \dot{B}(x, u_h(t), u) < KB(x) + C \quad (2)$$

### 3.2 ヒューマンアシスト制御 [5]

中村らが提案した拡張 CBF を用いたヒューマンアシスト制御は以下ようになる．なお，以降では表記の簡略化のため，式 (1) 右辺のベクトル場  $f(x), g(x)$  の Lie 微分  $L_f B(x), L_g B(x)$  を次式によって定義する．

$$L_f B(x) = \frac{\partial B}{\partial x}(x)f(x), L_g B(x) = \frac{\partial B}{\partial x}(x)g(x) \quad (3)$$

**定理 1.** システム (1)，安全集合  $X \subset \mathbb{R}^n$ ，および拡張 CBF  $B: X \rightarrow \mathbb{R}$  を考える．このとき，次式によって定義される入力  $u$  は，任意の連続写像  $u_h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$  に対し，任意の時刻  $t \geq 0$  において  $x(t) \in X$  を保証する．

$$u = \begin{cases} 0 & (I(x, u_h) \leq J(x)) \\ -\frac{I(x, u_h) - J(x)}{\|L_g B(x)\|^2} (L_g B(x))^T & (I(x, u_h) > J(x)) \end{cases} \quad (4)$$

ただし， $I: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ ， $J: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  は次式によって定義される関数とする．

$$\begin{aligned} I(x, u_h) &= L_f B(x) + L_g B(x) \cdot u_h(t) \\ J(x) &= KB(x) + C \end{aligned} \quad (5)$$

## 4. 提案システム

本システムは従来手法によって表示した 360 度映像に，深度センサで得た深度データから生成した点群を重畳表示する．点群は深度センサの視野内の近距離領域を立体化する．また点群には深度データを入力とし，制御バリア関数によって評価された危険度を表す色が付く．これらの立体感再現と色の変化によって，操作者に衝突の可能性がある物体を示す．

### 4.1 システム構成

本システムは遠隔操作するロボットに搭載され画像データなどの取得と送信を行う送信側と，操作者に遠隔地の映像や危険度を提示する受信側に分かれる．システム構成を図 1 に示す．受信側には 360 度映像を取得するカメラとして RICOH 社の Theta Z1 を，深度データを取得するセンサとして Intel 社の RealSense D455 を搭載する．なお，この 2 台のカメラはノート PC に接続され，位置関係を定めるために専用の台にネジで固定されている．受信側には HMD として Meta 社の Oculus Rift S がデスクトップ PC に接続されており，操作者は遠隔地の映像を高い没入感で見ることができる．デスクトップ PC は TCP/IP 通信によってデータを受信し，データの計算及び画像の表示を行う．また，受信側のデスクトップ PC にも送信側と同様の深度センサが接続されている．送信側のプログラムは Visual Studio 2019，受信側のプログラムは Unity 2020.3.4f で開発されている．コンピュータの OS は送受信側共に Windows 10 である．

### 4.2 カメラ固定台

本システムで使用する 2 台のカメラの位置関係を定めるために，専用の固定台を用いる．固定台の仕様を表 1 に示す．固定台は AUTODESK 社製 CAD ソフトの Fusion360 で設計し，DMM 社の 3D プリンターサービスを利用して 3D プリントした．台を用いた位置関係の固定により，再現

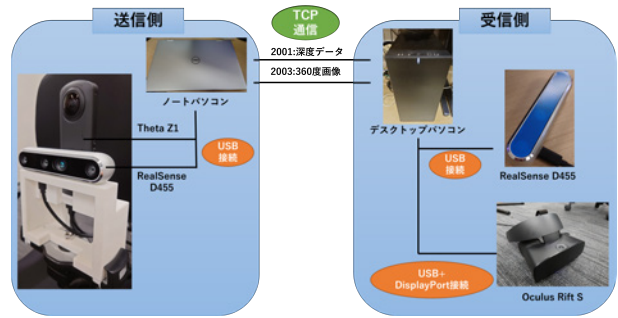


図 1: システム構成図

表 1: カメラ固定台の仕様

材質	ナイロン
サイズ	124 mm×197.5 mm×60 mm
重量	60 g
搭載用ネジ穴	3 つ

性の向上を目的としている．また固定台の底面にネジ穴を備えており，ネジによる固定のほか，平面への静置やアームでの把持などによって，ロボットに搭載することが可能となっている．

### 4.3 360 度映像遠隔配信

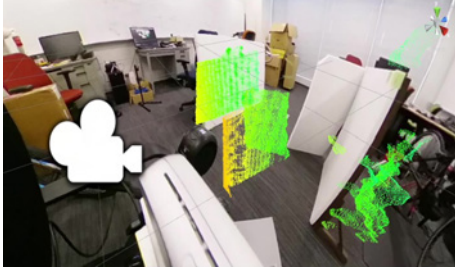
360 度画像は Open CV の機能を用いて取得される．解像度は 1920×960 である．取得された 360 度画像データはバイト配列に変換され，TCP/IP 通信で送信される．利用したポート番号は 2003 である．受信側で受け取ったバイト配列は Unity のテクスチャに変換され，球面の内側に貼り付けられる．球体には頂点の等方性に優れる ICO 球を用いる．ICO 球は Unity の仮想空間の原点に配置され，同じく原点に配置された視点から球面を見ることで，遠隔地にいるかのような映像体験が可能となる．

### 4.4 点群生成

送信側の深度センサで取得された深度フレームは，バイト配列に変換され，TCP/IP 通信で送信される．利用したポート番号は 2001 である．受信側で受け取ったバイト配列は深度フレームに再変換され，Intel RealSense SDK の機能を用いて点群情報となる．なお，プログラム上で深度フレームを格納する Depthframe 型の初期化ができないため，受信側に深度センサを接続し，取得した深度フレームに上書きすることで受信したデータの変換を行っている．Depthframe 型の初期化が行えない原因は，深度フレームのデータを格納するメモリがセンサ上に存在するためと考えられる．得られた点群情報は Unity の仮想空間内にメッシュとして描画される．点群の位置は 360 度映像に重なるように手動で調整し，Unity 内の座標で  $(-0.06, -0.1, 0.03)$  としている．また取得した深度フレームの解像度は 640×480 であるが，表示される点を間引くことで点数を 3 分の 1 に減らしている．これは点の密度を小さくすることで，背景である 360 度映像の視認を阻害しないためである．



(a) 操作者視点



(b) 俯瞰視点

図 2: システム動作結果

#### 4.5 危険度評価 [6]

本システムは、障害物との距離に対して仮想的なヒューマンアシスト制御を行い、得られた仮想入力を色によって視覚的に提示する。これにより操作に直接アシストを加えられないシステムに対しても、衝突回避を行うことができる。3.2節より式(4)で定義される入力の安全は保証されている。そこでアシストによって安全が保証されている場合の入力の集合  $U$ 、入力全体の集合  $S$  は以下のように定義できる。なお  $S \subset U \subset \mathbb{R}^m$  である。

$$U = \{u_h \in \mathbb{R}^m\} \quad (6)$$

$$S = \{u_h \in \mathbb{R}^m \mid L_g B(x) \cdot u_h(t) \leq KB(x) + C - L_f B(x)\} \quad (7)$$

このとき  $S$  の大きさが小さいほど、安全を保証できる範囲が小さく危険であるといえる。ここで各集合の Lebegue 測度を  $\mu(U), \mu(S)$  とすると、測度の比  $D(x)$  は次式で表せる。

$$D(x) = \frac{\mu(S)}{\mu(U)} \quad (8)$$

本研究ではこの  $D(x)$  を安全性指標とする。点群の色を  $D(x) = 1$  のときに緑とし、 $D(x)$  が小さくなるにつれて赤に変化させる。

#### 4.6 動作結果

提案システムの動作結果を図2に示す。図2aは遠隔操作を行う操作者の見る映像である。図2aから近距離にある物体を点群で強調し、色によって距離に基づく危険度を表せていることがわかる。また図2bから点群が360度映像に立体感を付与していることがわかる。

### 5. 実験

本システムを遠隔操作可能な電動車椅子に搭載し、走行実験を行った。本実験ではWHILL社製の電動車椅子を使用した。この電動車椅子は送信側のノートPCにUSB接続

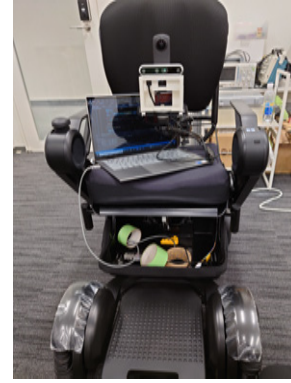


図 3: 実験で使用した電動車椅子

されており、受信側のデスクトップPCに接続されたゲームパッドの入力により遠隔操作が可能となっている。また提案システムは、台座部分を電動車椅子に接続されたアームで把持することで搭載されている。電動車椅子及びシステムの搭載された様子を図3に示す。

#### 5.1 制御則の設計

##### 5.1.1 制御対象のモデル化

電動車椅子のシステムモデルは次式のようにした。

$$\dot{x} = \frac{1}{80}(v + u_h) \quad (9)$$

ここで  $x \in \mathbb{R}$  は状態、 $v \in \mathbb{R}$  は仮想入力、 $u_h : \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}$  は操作者の与える入力である。なお  $u_h \in [-100, 100][\%]$ 、 $v + u_h \in [0, 100][\%]$  であり、電動車椅子に入力可能な最大値を100%としたときの割合を示している。また、安全集合  $X = (-\infty, -0.30)$ 、危険集合  $X_u = [-0.30, \infty)$  とした。これは用いる深度センサの計測可能な最小の深度距離が約30cmとなるためである。

##### 5.1.2 制御バリア関数の設計

次式の  $B : X \rightarrow \mathbb{R}$  は任意の定数  $K > 0, C \geq 0$  に対して定義1を満たすCBFである。

$$B = -\frac{1}{(x + 0.3)} + \frac{-(x + 0.3 + 20)|x + 0.3 + 20| + (x + 0.3 + 20)^2}{2} \quad (10)$$

式(10)は障害物まで20m以上離れていることを想定しているが、本実験では初期位置から障害物までの距離  $x(0)$  を6m以内と考える。そのため式(10)の右辺第2項は十分小さく、0とみなせる。よって  $x > -6m$  とすると、Lie微分は以下のように計算できる。

$$L_f B = 0, L_g B = \frac{1}{80x^2} \quad (11)$$

以上より仮想入力  $v$  は、次式で表せる。

$$v = \begin{cases} 0 & (I(x, u_h) \leq J(x)) \\ -u_h - 80Kx + 80Cx^2 & (I(x, u_h) > J(x)) \end{cases} \quad (12)$$

このとき  $I, J$  は以下のようになる。

$$I(x, u_h) = \frac{u_h}{80x^2}, J(x) = -\frac{K}{x} + C \quad (13)$$

式 (6), (7) 及び (13) より集合  $U$ ,  $S$  は次のようになる。

$$U = \{u_h | -100 \leq u_h \leq 100\} \quad (14)$$

$$S = \{u_h | -100 \leq u_h \leq -80Kx + 80Cx^2\} \quad (15)$$

したがって安全性指標  $D$  は次式となる。

$$D(x) = \frac{-40Kx + 40Cx^2 + 50}{100} \quad (16)$$

このとき  $0.5 \leq D(x) \leq 1$  である。また定数は  $K = 0.5, C = 0$  と設定した。

## 5.2 実験方法

発泡スチロールの板で走行路を作成した。走行路には障害物が壁から飛び出る形で配置されており、被験者は電動車椅子を遠隔操作し、障害物をよけてゴールにたどり着くことを目的とした。この操作を視覚提示が 360 度映像のみの場合と、危険度提示を行った場合の 2 通りについて行った。被験者は本稿の第一著者が担当した。

## 5.3 実験結果

2 通りの視覚提示について、操作者の視点の比較を図 4 に示す。左が 360 度映像のみ提示した場合、右が危険度提示を行った場合である。360 度映像のみの場合では障害物との距離感を掴みづらく、床との接地部分を見て距離を測っていることが確認できる。それに対し危険度提示を行った場合では点群の立体感によって距離感を掴みやすくなっており、目線が上がっていることがわかる。移動体の操作中に目線を下に向けることは、事故の可能性を見落としやすくなるため大変危険である。本システムは遠隔操作における操作者の視野を広げ、危険な箇所へ気づきやすくなることで、事故の防止につなげることができると考えられる。また点群の色によって障害物との距離を測りやすくなっており、実験では危険度提示を行った場合の方が、障害物により近づくことができることがわかった。災害現場におけるがれき撤去などの、障害物にできるだけ近づく必要のあるロボットに対して、本システムは有効であるといえる。しかし障害物に近づいた結果、車椅子の側面や後輪が障害物に接触してしまうことがあった。課題点として危険度提示領域が狭いことが挙げられる。深度センサの増設によって側面方向の危険度提示を検討する。なお図 4 右下段の画像において点群と 360 度映像が重なっていないが、これは点群と 360 度映像の遅延及びフレームレートの差によるものである。点群は 360 度映像と比べてデータ量が少ないため、約 1.5 秒早く映像が更新される。これにより主となる 360 度映像が更新される前に障害物に気づくことができるため、映像遅延のあるリアルタイムの遠隔操作の安全性向上に寄与できると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、深度データから生成した点群と、制御バリア関数に基づく安全性評価による色付けによって、遠隔操作時の衝突回避を目的とした危険度提示システムを提案し、電動車椅子の遠隔操作実験を行った。実験結果から点群に

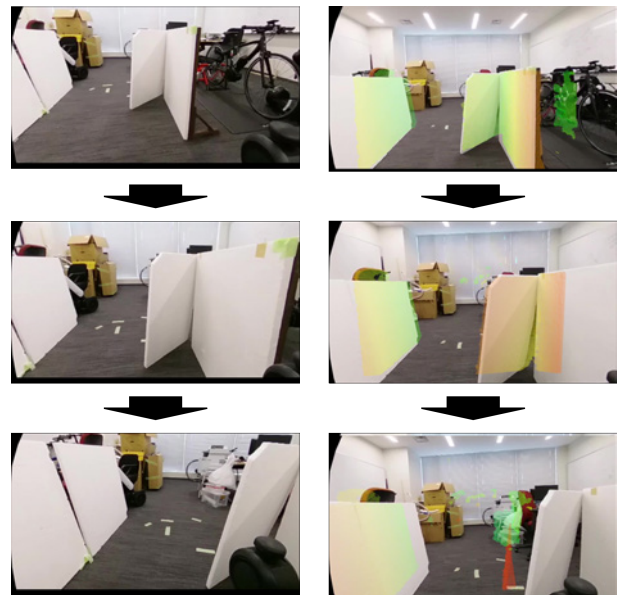


図 4: 操作者視点の比較

よる危険度の提示が、遠隔操作における事故防止に寄与できることが確認された。今後の展望として危険度提示領域の拡張に加え、加速度センサやオプティカルフローを用いた速度推定によって、自機や他の移動体の速度を考慮した危険度評価法の考案を予定している。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 20H02171, 20H02173, 22H01514 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- [1] KDDI: テレグジスタンス (R) 技術を活用した遠隔操作ロボットの量産型プロトタイプ MODEL H を開発 および、ロボット旅行体験イベントの実施, <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2018/05/29/3168.html>, 2018 年 5 月 29 日更新, 2022 年 6 月 24 日閲覧。
- [2] TELEXISTENCE: ローソン店舗にて遠隔操作ロボット、Model-T による商品陳列を開始, <https://tx-inc.com/ja/>, 2020 年 9 月 7 日更新, 2022 年 6 月 24 日閲覧。
- [3] R. Shafi et al: 360-Degree Video Streaming: A Survey of the State of the Art, *Symmetry-Basel*, Vol. 12, No. 9, pp. 1491, 2020.
- [4] P. Wieland and F. Allgower: Constructive safety using control barrier functions, *Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Nonlinear Control System*, pp. 462-467, 2007.
- [5] 中村文一, 吉永昂央, 小山悠, 江藤隼: 制御バリア関数を用いたヒューマンアシスト制御, *計測自動制御学会論文誌*, Vol. 55, No. 5, pp. 353-361, 2019.
- [6] D. Okabe, K. Takemoto, and H. Nakamura: Visualization of collision risk using a control barrier function, *IFAC-PapersOnLine* (投稿中)