

「視覚情報と力覚情報に基づく移動ロボットの遠隔制御技術に関する研究」  
神戸大学大学院海事科学研究科 元井 直樹

## 1 研究の背景と目的

近年、我が国は未曾有の自然災害や大規模なプラント事故を経験したことで、安全安心な社会基盤をより強固に構築する必要に迫られており、その実現に向けた革新的な科学技術の開発が喫緊の課題である。特に、災害地や事故現場などの人間が直接介入することが極めて困難な状況において、人間の代わりに周囲環境の情報収集や診断監視等を可能とする、遠隔操作に基づく環境情報の取得が、救命や二次災害防止の鍵となる。このようなシステムにおいては、高度な操作に基づく遠隔制御技術が不可欠となることは想像に難くない。しかし、緊急な行動が要求される非日常的環境下においては、経験と知識を有する熟練者に特化した複雑な遠隔操作よりも、むしろ誰もが直感的に操作可能な遠隔制御技術の実現が望まれる。これは人間の「五感」に基づいた遠隔制御技術が必要であることを意味している。

これらの観点より、本研究では、人間の「五感」、その中でも特に遠隔操作に直接的に関連する視覚情報と力覚情報の多覚情報に基づく移動ロボットにおける直感的な遠隔制御技術の開発を目指す。

## 2 研究方法・研究内容

本申請課題においては、申請者がこれまでに開発している力覚伝達機能を有する遠隔制御技術を基盤とし、視覚情報を付与することで移動ロボットにおける多覚情報に基づく遠隔操作技術の開発を行う。そのために本研究課題では、具体的な二つの研究目標に分類し、並行して遂行する。それぞれの研究目標について以下に詳述する。

### A: 多覚情報に基づく直感的な遠隔制御技術の開発

従来の視覚センサに基づく移動ロボットの遠隔制御技術に、周囲環境情報に基づく力覚情報のフィードバック機能を付与することで、多覚情報に基づく直感的な遠隔制御技術の開発を行う。そのために、まず周囲環境情報と移動ロボットの運動情報に基づく力覚情報生成技術の開発を実施する。力覚フィードバックを有する移動ロボットの遠隔制御技術における従来研究においては、測距センサ等で観測した周囲環境情報に基づく力覚情報生成およびその力覚伝達技術が報告されている。しかし、その多くが移動ロボットと周囲環境の幾何学的関係のみに基づき力覚フィードバックを行っている。そのため、環境とシステムにおける接触等の危険性がないにも関わらず、力覚情報が生成され、操作性の低下をまねきうる。そこで、移動ロボットの現在の並進・旋回速度等の運動情報と、加減速等の運動性能情報を加味し、移動ロボットと環境との接触の危険性に基づく速度領域群を算出することで、衝突の危険性を定量的に示す。

次に、上述の衝突の危険性に基づく力覚フィードバック生成手法を構築する。上述の衝突の危険性に対する線形変換に基づく力覚フィードバックを生成した場合、衝突の危険性の有無の切替面においてチャタリングが生じ、操作性の劣化をまねく場合がある。そこで、衝突の危険性に応じた力覚フィードバック生成においてヒステリシス特性を持たせることで、チャタリングを防止しつつ適切な力覚伝達を実現する力覚指令値生成手法を開発する。

最後に、多覚情報に基づく直感的な遠隔操作技術を開発するために、開発した力覚フィードバック手法と、視覚センサからの視覚情報の融合を行う。力覚および視覚情報の融合により、高い操作性を有する遠隔操作システムを構築する。

### B: 多覚情報フィードバックを実現する遠隔操作システムの設計試作

力覚情報と視覚情報のフィードバック機能を実現する遠隔操作システムの設計試作を行う。特に、操作者が操作する操作システムは、遠隔操作における操作性に大きな影響を与える。そこで、自動車等の操作において広く普及しているハンドル型のステアリング・アクセル型システムを設計試作する。なお、操作システムの試作においては、高繊細な力覚フィードバックの実現を目指し、モーター等の仕様を精査する。

一方で、移動ロボットにおいては視覚センサとしてのカメラ、および環境情報取得のための測距センサを設置する。また、インターネットを介して取得したセンサ情報を送信することで、操作者に視覚情報および測距情報を実時間で通知可能とする。

### 3 研究成果

本研究で構築した視覚情報と力覚情報に基づく移動ロボットの遠隔制御システムの概要を図1に示す。本遠隔操作システムでは2台のPCを用いて移動ロボットと操作システムを各々制御する。まず、操作システムにおいて生成された並進速度・旋回速度指令値を、移動ロボットへインターネット等を用いて送信することで遠隔操作が可能となる。また、移動ロボットには測距センサと視覚センサが設置されている。測距センサから計測された環境情報をもとに、移動ロボットと環境との接触可能性を示す Safety Velocity Area (SVA)を算出し、操作者側のPCへ送信することで仮想的な力指令値を生成し、力覚フィードバックを実現する。同時に、視覚センサにより取得した画像情報をインターネットを通じて操作者側のPCへ送信し、PC画面において画像情報を実時間で提示することで、視覚フィードバックを実現する。結果、本システムを用いることで、視覚情報と力覚情報に基づく移動ロボットの遠隔制御を実現することが可能となる。

なお、以降においては研究目標Aである制御手法開発、および研究目標Bであるハードウェア開発についてそれぞれ詳述する。また、開発技術を本システムに統合実装し、実施した評価試験結果を示し、開発技術の有効性を確認する。

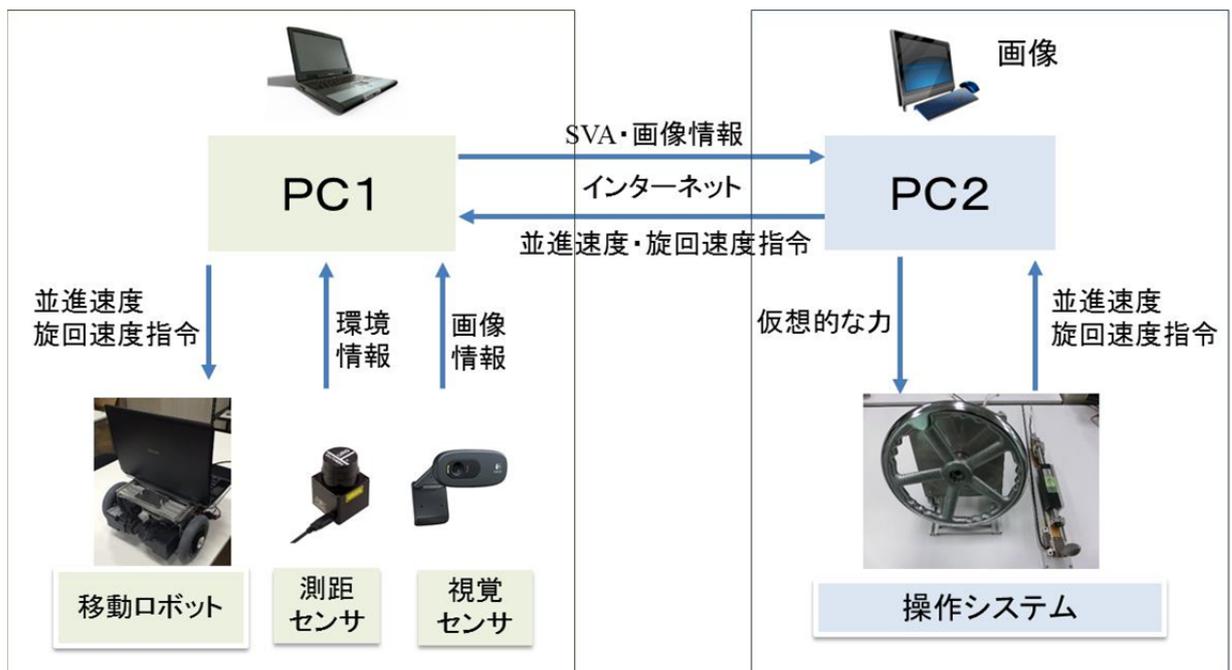


図1 遠隔操作システム概要

### A: 多覚情報に基づく直感的な遠隔制御技術の開発

移動ロボットと環境との単位時間後の接触の危険性を定量的に示す SVA を開発した。SVA は、単位時間後に移動ロボットが取りうる並進・旋回速度域から算出される予測軌道と環境との接触の可能性をもとに算出される。SVA の一例を図 2 の左図における青四角で示す。SVA 内の並進・旋回速度を指令値として用いる場合、移動ロボットは環境との接触の可能性が低く、安全な走行が可能となる。一方で、SVA 外の並進・旋回速度を指令値として用いた場合、環境への接触の危険性が高くなる。

そこで、SVA と並進・旋回速度指令値の関係より力覚フィードバックを行う。図 2 の左図①に並進・旋回速度指令値がある場合、SVA の領域外にある速度指令値が存在するため、環境への接触の可能性が高い。そこで、図 2 の右図①に示すように、力指令値を生成し、操作者に接触の危険性を力覚で通知する。ここで、①における力指令値は SVA 外に速度指令値が存在する積算時間に応じて増加する。力覚フィードバックにより、図 2 の左図②に示すように並進・旋回速度指令値が SVA 領域内に入った場合、図 2 の右図②に示すように力指令値を単位時間の間一定とした後、③に示すように力指令値を減じ、0 とする。このようにヒステリシス特性を持たせることで、SVA の境界面に対する力フィードバックのチャタリングを防ぐことができる。なお、並進・旋回速度指令値が常に SVA 内に存在する場合は、力フィードバックを 0 とすることで力覚伝達を行わない。

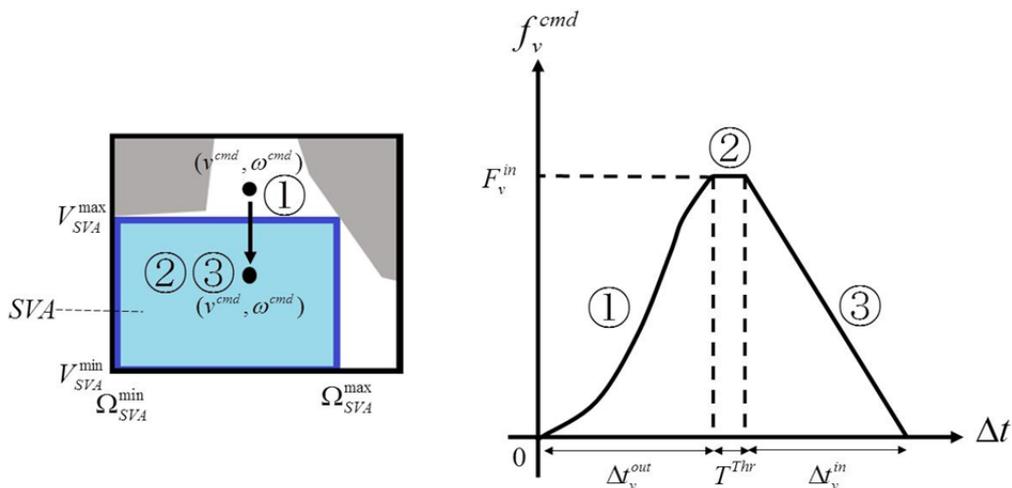


図 2 仮想的な力指令値の生成手法

### B: 多覚情報フィードバックを実現する遠隔操作システムの設計試作

図 3 に本研究で試作した操作システムを示す。自動車等の操作において広く普及しているハンドル型のステアリングを旋回速度用システムとし、リニアモータをアクセルと



図 3 操作システム



図 4 移動ロボット

しての並進速度用システムとした操作システムを設計試作した。なお、本操作システムを用いることで並進・旋回速度方向に独立した力覚フィードバックを実現することが可能となる。

また、図4に示すように移動ロボットに視覚センサおよび測距センサを設置することで、環境情報および画像情報を計測可能とする。なお、計測した環境情報および画像情報はインターネットを通じて操作者側のPCへ送信される。また、操作者側のPCでは、移動ロボットの視覚センサで取得した画像情報を表示することで、操作者への実時間での視覚情報提示を可能とする。

### ●評価試験結果について

開発技術を試作機へと統合実装した評価試験結果を図5に示す。図5に示す3パターンの実験概要は以下の通りです。

Case 1: 視覚情報のみを用いた遠隔制御

Case 2: 視覚情報と従来手法に基づく力覚情報フィードバックによる遠隔制御

Case 3: 視覚情報と提案手法に基づく力覚情報フィードバックによる遠隔制御

図5における黒点は測距データで計測した環境情報である。図5に示すように、Case 1 および Case 2 の従来手法における遠隔操作では、切り替えしが頻繁に行われていることが分かる。これは、Case 1 および Case 2 の手法では、環境認識に熟練が必要であり、操作性が悪いためである。一方で、提案手法を用いた Case 3 の実験結果では、切り替えしがほぼなく、目的の軌道を走行できていることが分かる。以上より、提案手法を用いることで操作性が改善されており、提案手法の有効性を確認できた。

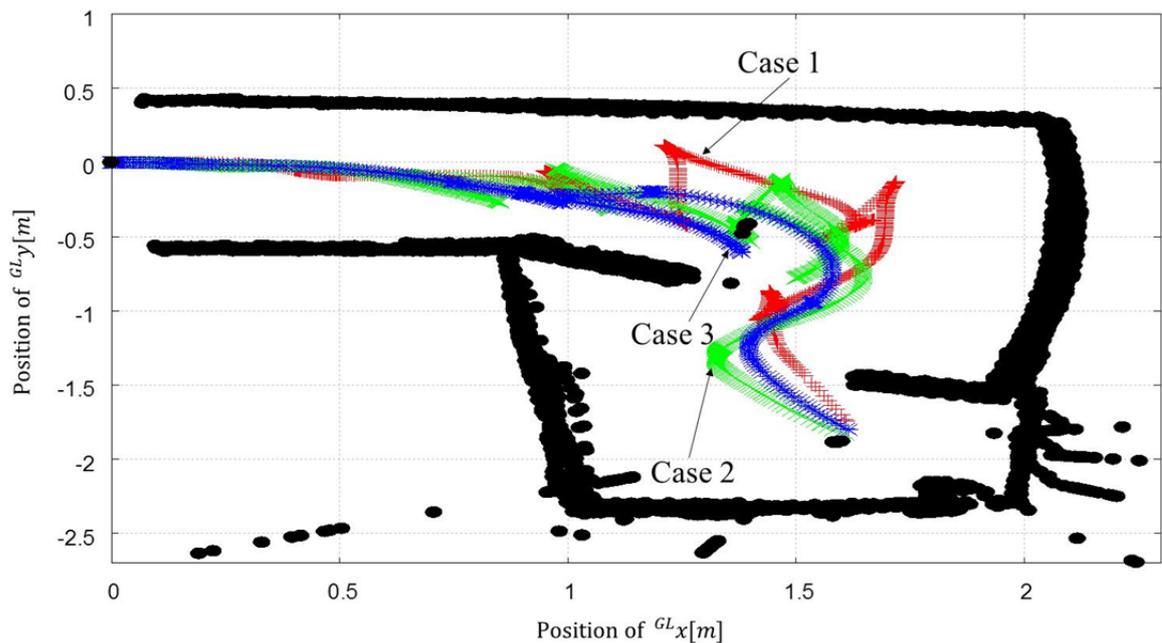


図5 評価試験結果

## 4 生活や産業への貢献および波及効果

本研究課題で確立した多覚情報に基づく遠隔制御技術により、災害地や事故現場などにおける高度な情報収集機能を有す、直感的な遠隔操作システムの基礎が具現化された。また、本開発技術は自動車の運転アシスト技術を始めとした輸送機械への直線的な応用が可能であり、操作性の向上や環境適応性能の向上に直結する。そのため、本研究が有する安全・安心な生活への貢献および波及効果は大きいと考えられる。