

自動停止機能・自律移動機能を有するロボティック 電動車いす

Robotic Personal Mobility Based on Automatic Braking and Autonomous Movement Technologies

上 松 弘 幸
Hiroyuki Uematsu

笹 井 裕 之
Hiroyuki Sasai

今 岡 紀 章
Noriaki Imaoka

北 澤 一 磨
Kazuma Kitazawa

グエン ジュイヒン
Duyhinh Nguyen

安 藤 健
Takeshi Ando

要 旨

日本など先進国を中心として、大規模施設内での高齢者などに対する移動サービスの必要性が高まっている。筆者らは、空港などの屋内大規模空間での活用を想定し、自動停止機能・自律移動機能を備えたロボティック電動車いすWHILL NEXTを開発した。自動停止機能については対象物への接近を可能とする2段階停止技術、自律移動機能では複数台の隊列走行を可能とする隊列走行技術により、ロボティック電動車いすの屋内での活用に対応した。また、実際の空港の現場において、開発した2つの技術を評価した結果、要素技術としては十分に有効に機能することを確認した。

Abstract

There is a growing need for mobile services by elderly people in large-scale facilities, mainly in developed countries such as Japan. In this paper, we discuss automatic braking and autonomous mobile technologies installed in the robotic electric wheelchair "WHILL NEXT," which was developed for use in a large indoor space such as an airport. In particular, an automatic stop function with a two-step approach that allows access to the target object, and an automatic driving technique that allows multiple rows of WHILL NEXT to run using autonomous mobile technology are developed. As a result of evaluating the two developed technologies at an airport site, we confirmed that the developed technologies function as expected.

1. はじめに

近年、超高齢社会である日本など多くの国において高齢化が進行し、移動に不自由のある高齢者が増加している。政府統計[1]によると、歩行可能距離が500 m以下の高齢者は、65歳以上の5人に1人、75歳以上の約半数におよぶと推定される。

高齢化の進行に伴い、屋外での移動支援に関しては、公共交通や自動車などの移動手段や乗り合いなどのサービスが発展してきている。一方、屋内での移動支援は、人手によるサービスに頼っており、屋外移動により目的地に移動した後の、目的地内での移動支援サービスの必要性が高まっている。また、空港などの大規模施設では、移動する側の支援の必要性に加え、支援する側の負担も課題となっている。

大規模施設内での移動支援として、国内外空港ではPRM (Passenger with Reduced Mobility: 運動機能に制限のある旅客) 向けサービスが積極的に行われている。これは、欧米を中心としてPRMの移動支援が義務化されているためであり、日本国内の空港においても対応が急務となっている。空港では、長距離の歩行が困難な旅客の移動や、日常的に車いすを利用している旅客が自身の車いすをチェックインカウンターに預けた後の空港内移動

に対して、手動車いすを貸し出し、スタッフが手押しで移動をサポートするサービスが提供されている。また、旅客が飛行機に搭乗した後、搭乗ゲート付近で空になった車いすの回収作業も空港スタッフの人手によって行われており、スタッフの身体的・時間的負荷の高い業務となっている。もし電動車いすを貸し出すことができれば、空港スタッフは移動サポートの負荷を軽減することができ、旅客も空港スタッフに気を使うことなく搭乗までの時間を過ごすことができる。

この問題を解決するために、筆者らは、手動車いすの電動化を実現し、搭乗者による手動運転時には衝突を防止する自動停止機能や、目的地まで自動的に走行する自律移動機能を開発した。

上記のような技術開発は、自動車を中心として研究開発[2][3]が進められているが、自動車の走行環境より人との共存度が高い空港などの公共空間内を対象として行われているものは少ない。

2章では、開発しているロボティック電動車いすWHILL NEXTの概要と空港での利用シーンを説明し、3章で自動停止機能、4章で自律移動機能隊列走行について論じる。また、5章では開発した機能を活用した空港での実証について報告する。

2. ロボティック電動車いすWHILL NEXT

2.1 ロボティック電動車いすの概要

ロボティック電動車いすWHILL NEXTは、WHILL(株)と共同開発を進めている屋内移動支援用のモビリティである。外観を第1図に示す。ロボティック電動車いすの車両部分はWHILL社の電動車いすをベースとしている。WHILL社の電動車いすは、独自のオムニホイールによるコンパクトで小回りの利く走行系と、先進的なデザイン性が特徴である。一方、筆者らは実用性と安全性の高い自律移動技術の開発を行い、これまでに病院内自律搬送ロボットシステム「HOSPI^(注1)」[4]を商品化し、生活支援ロボットの安全性に関する世界標準の規格認証を取得するなど、多くの実績を有している。ロボティック電動車いすは、WHILL社の電動車いすの左右前方にレーザーレンジファインダ(LRF)を配置した独自開発のセンサユニットを搭載することで、高性能なモビリティの実現を目指している。第1表に主な仕様を示す。

ロボティック電動車いすは、広い屋内空間における移動支援を目的として開発しており、まずは空港での活用



第1図 ロボティック電動車いす WHILL NEXT
Fig. 1 Robotic personal mobility: WHILL NEXT

第1表 ロボティック電動車いすの仕様

Table 1 Specification of robotic personal mobility

寸法	600 (W)×1035 (D)×900 (H) mm
重量	60 kg
最大荷重	110 kg
最高速度	6 km/h
走行距離	15 km ※路面状況などにより変化
充電時間	5 時間

(注1) 当社の登録商標。

を目指している。現状、空港では不慣れな操縦や万一の操縦ミスによる衝突のおそれが高いため、電動車いすの貸し出しは行われていない。ロボティック電動車いすは、操縦ミスによる衝突の防止と、回収作業の自動化を行うことで、空港スタッフの移動サポート業務の負荷軽減を目指している。

2.2 ロボティック電動車いすの機能

ロボティック電動車いすには、自動停止と自律移動の大きく2つの機能が搭載されている。ここではこれらの機能について概要を記す。

自動停止機能は、搭乗者の操縦に関わらず自動的に停止させることで衝突を回避するものである。ロボティック電動車いすはLRFにより周囲の障害物の位置を検出することができる。自身の速度から、LRFで検知した障害物に衝突のおそれがあると判断すると、ロボティック車いすは自動的に停止する。

また、自律移動機能は、ロボティック車いすが指示した目的地まで自動的に経路を決め、移動するものである。ロボティック電動車いすは、あらかじめ記憶した走行環境の地図情報と、LRFで検知した周囲の情報(壁や什器(じゅうき)など)をマッチングすることで、自己位置を認識することができる。また、現在の自己位置と地図情報とをもとに、目的地までの経路を自動的に算出することができるために、障害物を回避しながら目的地まで移動することができる。この自律移動機能によって、使用後の車いすを自動的に回収することや、搭乗者が指示した目的地まで自動で案内することが可能となる。以下では、これらの自動停止機能と自律移動機能を空港で活用するために、対応すべき課題とそれぞれの機能について詳しく説明する。

3. 自動停止機能による衝突回避

3.1 開発課題および目標

ロボティック電動車いす導入のためには、万一の操縦ミス時にも安全に停止する機能に加えて、初めて使用する搭乗者にも操縦しやすくする必要がある。本自動停止機能は「操縦性を最大限阻害せずに衝突を回避する安全安心な自動停止機能」を開発目標とした。

3.2 自動停止アルゴリズム

(1) 自動停止機能による衝突回避方法

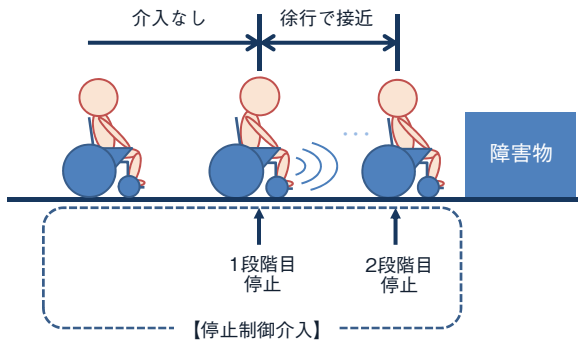
近年、自動車に自動ブレーキシステムが実用化されている。車道を走行する自動車の自動ブレーキシステムによる衝突回避に対し、車いすの場合は歩行者と同じ環境

で小回りの利くような移動を行うため、あらゆる方向を検知しながら細かい制御を行う必要がある。このような電動車いすに対しても衝突回避技術の開発が行われている[5]。基本原理としては、車いす周辺に存在する物の位置をセンシングし、その位置が障害物検知エリアに存在する場合は車いすの制御系に介入し、停止・減速・回避といった動作を強制的に実行するシステムとなっている。

先行研究では、制御系の介入としてジョイスティック操縦に対して速度を遅くさせる「減速制御介入」を必ず実施している。一方、空港内で使用することを想定すると、搭乗者の多くは初めて乗ることになり、ジョイスティック操作に不慣れである。このような不慣れな操縦に対して、さらに減速制御介入を行うと、車いすの挙動が搭乗者自身の操縦の結果なのか、制御介入による結果なのか判断できないため、操縦に慣れることはさらに困難となる。

そこで、ロボティック電動車いすの衝突回避手法は、ジョイスティック操縦に対して、車いすを停止させる「停止制御介入」のみとした。このように、衝突を回避するための必要最小限の制御介入とすることで、車いすの挙動がジョイスティック操縦と異なる状況を少なくし、操縦に慣れやすい仕様とした。

停止制御介入のみの場合、停止時に障害物に接近しすぎると搭乗者や周囲の人が不安を覚えることから、障害物よりも少し離れた位置で停止することが望ましい。しかし、その場合、狭い通路を通るときやショップでの物品閲覧など接近を必要とする状況では、操縦性を阻害してしまう。そこで、本衝突回避機能には、停止の制御介入を行った後に、さらに搭乗者から障害物方向へ一定の操作入力があった場合は「徐行で接近+再接近時に停止」を制御介入とする衝突回避を自動で切り替えることにした。本稿ではこれを2段階停止と呼ぶ。2段階停止のイメージを第2図に示す。



第2図 2段階停止機能
Fig. 2 Two-step automatic braking system

[2] 障害物検知エリア

本開発で作成した障害物検知エリアを述べる。今回の衝突回避手法では、停止制御介入を行うことから停止制御介入時に描くロボティック電動車いすの制動軌跡を用いて障害物検知エリアを作成する。ロボティック電動車いすは独立2輪方式の挙動を示すため、駆動輪軸を結ぶ線上を回転中心の位置が移動しながら円弧軌跡を描くような軌道を描く。この移動中の回転中心位置は、(1)式のように算出することができる。

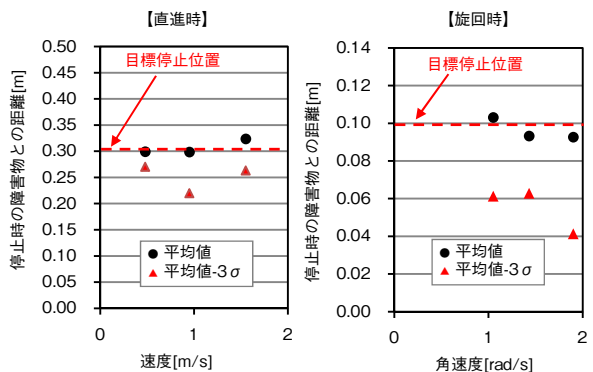
一方、停止制御介入時の回転中心位置は、停止制御介入した際の直進時の制動距離 $D(v)$ および旋回時の制動角度 $\theta(\omega)$ を用いて、(2)式と推定可能である。ここで、 D および θ はそれぞれロボティック電動車いすの直進速度 v および旋回速度 ω を変数とする関数である。

$$\text{移動中の回転中心位置} = \frac{v}{\omega} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{移動時の回転中心位置} = \frac{D(v)}{\theta(\omega)} \dots\dots\dots (2)$$

上記のように、本障害物検知エリアは、ロボティック電動車いすの直進速度 v と旋回速度 ω から求められる制動軌跡をもとに推定可能なため、リアルタイムに算出することで適切に障害物検知エリアを調整することが可能である。

本障害物検知エリアを用いて目標とする直進時、旋回時の障害物までの停止距離精度を確認した結果を第3図に示す。第3図に示したように直進時、旋回時とも目標値どおりに停止ができた。また、実際の制御を行う際は制御遅れなどにより制動距離にばらつきが発生するが、それを考慮しても衝突前に停止することが確認された。



第3図 自動停止技術の性能検証
Fig. 3 Performance evaluation of automatic braking system

4. 自律移動機能による自動回収

4.1 ロボティック電動車いすの自動回収概要

空港では、旅客が飛行機に搭乗するなどによりロボティック電動車いすの利用を終えると、空になったロボティック電動車いすを元の待機場所に回収する必要があるが、自律移動機能により、人や障害物を回避しながら自動的に待機位置に戻ることが可能である。しかしながら、人の行き交う空港での運用を想定した場合、複数台のロボティック電動車いすが各々のタイミングで離散的に待機位置に向かうと、人の移動の流れを妨げることが予想される。本開発では、複数のロボティック電動車いすが隊列を組んで通路端を隊列走行して待機場所に向かうようにすることで、人の行き交う空港内での自動回収を行う自律移動機能の実現を目指す。

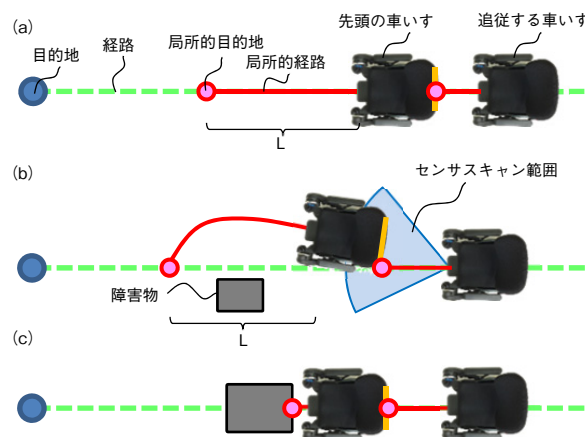
4.2 自律移動機能による隊列走行の概要

前方のロボティック電動車いすの位置をカメラなどセンサで認識して追跡することで、隊列走行を実現する方法が考えられる[6]。しかしながら、人の行き交う空港内では、隊列の間を人が通過したり、曲がり角や什器類により前方のロボティック電動車いすが認識できなくなったりすると、後方のロボティック電動車いすは立ち往生してしまう。また、追従するロボティック電動車いすが追従する対象の走行軌跡に関係なく、単純に追跡すると、カーブ走行時は隊列の後半になるにつれて走行軌道の曲率が小さくなり、走行軌跡が曲がり角と干渉してしまうため、走行を継続できなくなってしまう。

一方、自律移動機能を用いて、すべてのロボティック電動車いすが走行する経路情報を共有し、各ロボティック電動車いすが自己位置と前方のロボティック電動車いすの位置を認識しながら移動することにより、前方のロボティック電動車いすを見失うことなく、カーブも問題なく走行することができる隊列走行が実現できる。

第4図は回収作業中の自律移動の仕組みの概要を示している。各ロボティック電動車いすは指定された経路上で前方L[m]先に局所的な目的地を設定し、その位置に向かって速度制御を行う。図中の (a) は障害物がないときの走行の様子である。図中の (b) は局所的目的地までに障害物があるときの走行の様子である。このときは、障害物を避けながら局所的目的地まで走行する。図中の (c) は指定された経路上に障害物が存在しているときの走行の様子である。この状態で障害物を回避すると、経路から一定距離以上外れてしまい、隊列が大きく乱れることになってしまう。そのため、この場合は障害物の手前に局所的目的地を設定する。ロボティック電動車い

すは、局所的目的地から所定の距離以内に近づくと一時的に停止する。その後、障害物が移動し、経路上からなくなると自動的に局所的目的地が前方に移動するため、それに合わせてロボティック電動車いすも走行を再開する。



第4図 自律移動機能による隊列走行の概要
Fig. 4 Overview of platooning with autonomous movement

5. 羽田空港における実証評価

5.1 実証目的

開発した自動停止技術と自律移動技術が、利用を想定している空港の環境において有効に確認するかを検証することを目的とする。

5.2 実証方法

開発した2つの技術を搭載したロボティック電動車いすWHILL NEXTを羽田空港国際線の制限エリアに持ち込み、エリア内を走行することで技術の有効性を検証した。なお、WHILL NEXTの操作は、当社技術スタッフ、空港管理会社スタッフ、航空会社スタッフとした。

自動停止機能は、制限エリア内を隅々まで走行し、空港内に設置されたATMや自動販売機、空港での待ち時間を過ごすためのカフェカウンターやデスクの利用などの17の利用シーンを想定した行動を実際に行い、技術の有効性を評価した。一方、自律移動機能は、第5図のように羽田空港国際線ターミナルの搭乗ゲート105番から109番までの約260 mを走行範囲として検証を実施した。



第5図 自律移動技術の評価走行エリア

Fig. 5 Evaluation area for autonomous movement system

5.3 実証結果

自動停止機能は、フードコートや自動販売機の利用など13のシーンでは操縦者の操作を妨げることなく衝突を防止でき、有効に機能することがわかった(第6図)。空港の制限エリア内を隅々まで走行し、細いパイプ椅子(直径約10 mm)のような細い障害物についても適切に検出し、停止した。また、フードコートや免税店エリアなど通路が狭い環境においても、立ち往生することなく、走行できることが確認できた。これにより開発した自動停止機能が過不足なく有効に働き、障害物との衝突は回避しながら、通常の活動を妨げることなく動作できることが示された。さらに、ATM操作、自販機での物品購入、ショップでの物品閲覧など2段階停止が有効に機能することがわかった。一方で、掲示板などWHILL NEXTに搭載されたセンサの検出部の高さが空間となっている障害物も存在しており、停止機能が動かない障害物が少数ではあるが存在していることも確認された。

自律移動機能に関しては、指定したエリアを数回往復し、すべての試走において自己位置を見失うことなく、



第6図 自動停止技術の検証シーン

Fig. 6 Field evaluation of automatic braking system

走行を完了することができた。また、走行途中で歩行者などの障害物が出現した場合には、衝突する前に停止できることが確認された(第7図)。ただし、搭乗時間直前の搭乗ゲート付近のような、空港利用者が密集しておりWHILL NEXTの通行できる幅がないことが明らかである場所では、WHILL NEXTの通過により空港利用客の行動に影響を与えることを避けるため、今回の実証では検証を行わなかった。



第7図 自律移動技術の検証シーン

Fig. 7 Field evaluation of autonomous movement system

5.4 実証考察

自動停止技術は、想定した17のシーンのうち、13のシーンで有効に確認することが確認された。雑貨店の狭い通路走行や、商品棚の商品を取るなどの4つのシーンにおいては、従来の手動車いすでも作業が難しいシーンがあった。また、下部に空隙のある掲示板のように、WHILL NEXTのセンサ配置では検出が困難な障害物の存在も確認された。これらに対しては、店舗内レイアウト変更や掲示板下部への植栽配置など施設側での対応を含めて検討していく必要がある。

また、自律移動技術に関しては、WHILL NEXTの通行幅が確保できる程度の人ごみにおいては問題なく走行できることが確認された。実運用導入に向けて、通行幅が確保できない混雑状況における対応を、技術面と空港運用面の両面から検討する必要がある。

6. まとめ

近年必要性が高まっている大規模施設内での高齢者などに対する移動サービスとして、自動停止・自律移動機能が搭載されたロボティック電動車いすWHILL NEXTを開発した。自動停止機能では、人の操縦への制御介入を停止のみに絞り、さらにカウンターやATMなどへの接近を許容するための2段階停止を実装した。さらに、自律移動機能を用いた隊列走行により、使用後のロボティッ

ク電動車いすを無人で回収する機能の実装も実現した。自動停止機能について、羽田空港国際線ターミナルにて実証試験を実施した。空港内で想定される利用シーンを検証し、自動停止機能が通常の活動を妨げることなく有効に機能することを確認した。また自律移動機能についても、空港内の通常的环境下では問題なく走行できることを確認した。

今後は、より混雑した環境下や一般ユーザー試乗による実証実験を進め、機能の向上と改善を図る。さらに、実導入に向けて、空港関係者らと導入後の運用方法の検討を継続して実施してゆく。また、ショッピングモールなど他の大規模屋内空間や、歩道などの半屋外環境などでも活用いただけるよう、実証試験のフィールドを広げてゆき、人の移動をトータルでサポートできるモビリティの実現を進める。

本研究開発を行うにあたり、東京国際空港ターミナル(株)に多大なるご助言・ご協力を頂きました。また、本研究開発の一部は、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構「ロボット活用型市場化適用技術開発プロジェクト」の助成を受けて実施されたものです。この場をお借りし、厚く御礼申し上げます。

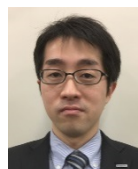
参考文献

- [1] 国土交通省, “都市における人の動き(平成22年全国都市交通特性調査集計結果から)(第2編),” <http://www.mlit.go.jp/common/001087037.pdf>, 参照 Apr. 20, 2018.
- [2] 田中雅樹 他, “衝突回避減速度に基づく前方障害物衝突防止支援システム,” 自動車技術会論文集, vol. 40, no. 2, pp. 553-559, 2009.
- [3] 鎌田実, “自動運転の未来図 第1回 自動運転の現状と今後 - 技術面から -,” 国民生活, no. 61, pp.29-31, Aug. 2017.
- [4] R. Murai et al, “Recognition of 3D dynamic environments for mobile robot by selective memory intake and release of data from 2D sensors,” IEEE/SICE Inter'l Symp Sys. Integ, Fukuoka, pp. 621- 628, Dec. 2012.
- [5] 小太刀崇 他, “搭乗型移動ロボットのための移動リスク低減アルゴリズムとつくば市ロボット特区における実証実験,” 日本ロボット学会誌, vol. 32, no. 7, pp. 651-662, 2014.
- [6] Taishi Onozato et al, “A Control System for the Robot Shopping Cart,” 2010 IRAST International Congress on Computer Applications and Computational Science (CACAS 2010), Singapore, pp.907-910, Dec. 2010.

執筆者紹介



上松 弘幸 Hiroyuki Uematsu
生産技術本部 ロボティクス推進室
Robotics Promotion Office,
Production Technology and Engineering Div.



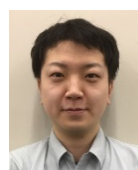
今岡 紀章 Noriaki Imaoka
生産技術本部 ロボティクス推進室
Robotics Promotion Office,
Production Technology and Engineering Div.



グエン ジュイヒン Duyhinh Nguyen
生産技術本部 ロボティクス推進室
Robotics Promotion Office,
Production Technology and Engineering Div.



笹井 裕之 Hiroyuki Sasai
生産技術本部 ロボティクス推進室
Robotics Promotion Office,
Production Technology and Engineering Div.



北澤 一磨 Kazuma Kitazawa
生産技術本部 ロボティクス推進室
Robotics Promotion Office,
Production Technology and Engineering Div.



安藤 健 Takeshi Ando
生産技術本部 ロボティクス推進室
Robotics Promotion Office,
Production Technology and Engineering Div.
博士(工学)