屋外生活支援ロボットとしての誘導式ゴルフカートの安全エンジニアリング技術の開発

栗山 龍起[*1]　猪井 博登[*2]　石塚 裕子[*2]　土肥 正男[*1]

Development of Safety Engineering Technology for Electromagnetic Guided Golf Cart as Outdoor Mobile Personal Care Robots

Tatsuyoshi Kuriyama[*1], Hiroto Inoi[*2], Yuko Ishizuka[*2], Masao Dohi[*1]

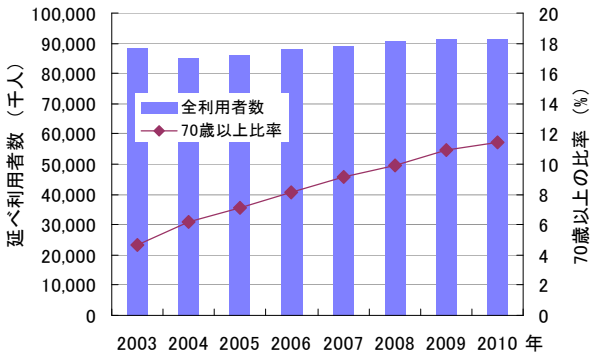
Abstract - The golf courses in Japan with an increasing number of elderly players represent the Japanese society where the population is aging. In recent years, an increasing number of golf courses in Japan have adopted electromagnetic guided golf carts. Along with the technological advancement of batteries, the use of electric type golf carts that run quietly at low running cost is increasing. In this paper, we report on the accident research of electromagnetic guided golf carts, and the development of effective safety technology for the aging society with more electrically motorized, automatic transportation.

Keywords: safety, mobile, robot, outdoor and risk assessment

1.　はじめに

高齢化社会の生活支援手段として必要となる搭乗型移動ロボットの実用化には、さまざまな状況を想定した安全対策がなされなければならない。本研究では、同様に高齢化が進むゴルフ場において、既に実用化された自動走行ロボットである電磁誘導式ゴルフカートの事故に着目し、安全対策について技術開発する。(図１参照)

安全対策は、リスクアセスメントに基づいて必要となる安全機器を開発すること、ロボットの起動制御に安全機器で構成される安全関連部を設けること、そして残留リスクに対する運用ルール構築の３軸で構成され、これら一連の取り組みを安全エンジニアリングと定義する。リスクアセスメントの補完と運用ルールの構築のために実施する全国のゴルフ場を対象とした事故事例調査を前に、今回調査票設計を目的とした事前調査を試行した。その結果、歩行者、特に高齢者と移動ロボットの間に潜む、危険事象が発生する要因が見えてきた。以下に安全対策とその妥当性について報告する。



※課税・非課税対象者数の推移調査より
*1：18～69歳が課税利用者。70歳以上が非課税利用者
*2：非課税利用者には障害者が含まれる。（出展：社団法人　日本ゴルフ場事業協会）

図１　高齢者のゴルフ場延べ利用者数の推移

2.　電磁誘導式ゴルフカート

2.1　電磁誘導式ゴルフカートについて

電磁誘導式ゴルフカート（以下，誘導式カートと示す）は自律走行ではないが、地中に敷設された誘導線と車体の中心のズレを検出するセンサと、ズレを補正するためにタイヤの向きを変えるアクチュエータを有しており、無人でも誘導線に沿って走行することが可能なロボットである。日本以外ではあまり見られず、固有に進化した搭乗型の自動走行ロボットである。

近年日本ではゴルフ場の乗用ゴルフカート導入率が高くなっており、ゴルフ雑誌社の調査[1]では導入率 98%という結果が報告されている。乗用ゴルフカートには誘導式と手動式の２タイプがあり、2011 年の時点では全国のゴルフ場が保有する乗用ゴルフカートのおよそ半数が誘導式である。[2]

2.2　ゴルフカートの事故発生状況

乗用ゴルフカートが事故を起こすことは報道からも見聞きされ知られているが、これらの多くは無理な登坂や斜面への進入による転倒や崖下への転落などの死に至るような一部の大事故であり、状況からほとんどが手動運転時の事故であることがわかる。一方，手動式カートよ

*1: IDEC 株式会社
*2: 国立大学法人大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻

1:月刊ゴルフマネジメントが行った全国のゴルフ場（2351 コース、有効回答数 643 コース）を対象にした乗用カートや営業形態に関するアンケート調査（2010.8）
2:中央労働災害防止協会（ゴルフ場の事業における労働災害防止のためのガイドライン）（2012.4）

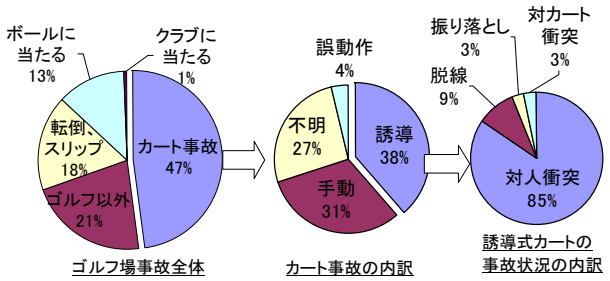


図２　誘導式カートの事故分類

り低速で穏やかに走行する誘導式カートが起こす事故については、一般にはあまり知られていない。大手保険会社のゴルフ場に対する施設利用保険の保険金支払い実績176件を調査した結果では、図２に示すように誘導式カートの事故は手動式カートより多く発生している。また，乗用ゴルフカートの耐用年数は約７～10年程度であり，全国のゴルフ場が保有するカートは更新時期を迎え，手動式から誘導式への切り替わり傾向も見られる。[2] 2011年の時点で誘導式の割合が約50%になったばかりであることを考慮すると事故発生率はさらに高いと言える。

3.　ゴルフ場に対する調査

3.1　調査方法について

誘導式カートの事故が発生する要因について仮説を立て調査票を設計するために、近畿圏の６ヶ所のゴルフ場において支配人もしくは安全担当者を対象にヒアリング調査を実施した。また，ヒヤリ・ハット事例を調査するため、キャディに対してアンケート調査を行った。表１に示す通り、調査対象として誘導式カートが導入されているゴルフ場５ヶ所と手動式カートを導入しているゴルフ場を１ヶ所で行った。ヒアリング項目は①導入したカートの種類と理由、②カート誘導路設計の考え方、③事故事例とその対策についてである。キャディに対するアンケートは④乗用ゴルフカート使用時のヒヤリ・ハット事例について実施した。以降に結果を述べる。

3.2　乗用ゴルフカートの種類と選択理由

A～E のゴルフ場が誘導式カートを採用した主な理由は、手動運転のミスによる事故発生ならびにフェアウェイへの進入を懸念したためであった。その他，プレー形態がキャディ付きのプレーから安価なセルフプレーへ移行することを予測して導入を決めたゴルフ場もある。セルフプレーへの移行は，メーカーが誘導式カートの開発を進めた理由でもある。また，動力について、バッテリータイプを導入したゴルフ場はいずれも静音性で優位であることを導入理由にあげた。ガソリンタイプを採用したゴルフ場は、導入当時はガソリンタイプの方がメンテナンス性に優れ、電動タイプはバッテリー寿命が短く価格が高かったことをあげた。現在ではリチウムイオン電池の発達によりバッテリータイプがメンテナンス性、経済性ともに優れているため、今後誘導式バッテリーカートへの置き換えが進むと考えられる。

表１　ヒアリングを実施したゴルフ場

ゴルフ場	利用者数(人／年)	プレースタイル	導入時期	走行方式	カートタイプ*2
A	54,000	キャディ	H16	誘導	B
B	38,000	キャディ	H13	誘導	G→B
C	40,000	セルフ*1	H9	誘導	G
D	38,000	セルフ*1	H16	誘導	G→B
E	40,000	セルフ*1	H12	誘導	G
F	58,000	キャディ	H11	手動	B

*1:希望によりキャディ付きプレー可. いずれのゴルフ場も希望者は全利用者の1～3割程度.
*2:Bはバッテリータイプ、Gはガソリンタイプ

表２　乗用ゴルフカートの事故事例

	事故概要	キーワード
誘導式	見通しの悪い下りカーブで、誘導路上で体操していたプレーヤに無人走行中のカートが衝突.	カーブ 誘導路・衝突 無人走行
	誘導路を歩行中のプレーヤが、後方から近づいてくる無人カートに気づかず衝突. 耳の不自由な高齢者.	誘導路 衝突・無人 高齢者
	同伴プレーヤが誘導路で屈んで見下ろしているところに, 無人走行するカートが衝突.	誘導路 衝突 無人走行
手動式	U字カーブのカート道で、カーブを曲がりきれずにブレーキ操作間違えて、カート道を逸脱し斜面を転落.	カーブ 操作ミス 転落

3.3　カート誘導路整備時の考え方

ゴルフ場のカート誘導路設計については２種類の考え方がある。一つはコース周縁や林の中など誘導路がフェアウェイから見えにくい位置に敷設する景観重視型で、もう一つはフェアウェイに近い位置に敷設するプレーヤの利便性重視型である。後者はラウンド時間短縮の点から有利と考えられ最近整備されたゴルフ場で採用されている。その他、クラブハウス近辺は出入りが多く，カート誘導路の交差点や合流点があるため一旦停止制御が必要となるなど、危険区域として共通の認識があった。

3.4　事故事例の紹介と対策

事故事例を表２に示す。いずれのゴルフ場も乗用ゴルフカート導入時には事故に対する危機認識を持ち，キャディやプレーヤへの注意喚起をはじめ，クラブハウス近辺やコースジョイント部など事故発生の可能性が高い場所への対策など事故防止に取り組んでいた。特に静音性の高い誘導式電動カートを導入している A,B,D のゴルフ場ではカートの車輪に鈴を付け、その接近をプレーヤなどに知らせる工夫を行っているが、その効果についてはいずれのゴルフ場も少ないと回答した。

事故対策は行っているが，いずれのゴルフ場においても数年間の間に数件の事故経験がある。また，事故に至らないまでもヒヤリ・ハット経験を有していることが確認された。

4.　キャディのヒヤリ・ハット調査

キャディへの乗用ゴルフカートのヒヤリ・ハット事例に関するアンケートは現時点で 131（誘導式バッテリー88、誘導式ガソリン 7,手動式バッテリー36）の有効回答を回収している。一定数の回答を確保できた誘導式バッテリーカート（N=88）を手動式カート（N=36）と比較する形での事故要因の傾向について考察する。

4.1　事故のタイプについて

乗用ゴルフカートの事故のタイプには，衝突，横転，転落，下敷きなどが挙げられるが，誘導式カート，手動式カートともに全事例に衝突の占める割合が高く、誘導式が 86.4%，手動式が 66.7%であった。また，誘導式と手動式を比較すると，誘導式のほうが衝突事例の割合が有意に多いことが確認された。

4.2　外部要因について

誘導式カートのヒヤリ・ハット事例は無人走行時が75%以上を占めていた。またその場所については、手動式カートではカーブやジョイント部に多い傾向にあったが、誘導式カートでは単路部でも起こっており、外部要因による特徴は確認できなかった。

4.3　操作・行動要因について

状況確認やブレーキ操作などカートの操作に関する要因と、カート道上の歩行や横切り、カートからの飛び降りなどプレーヤの行動に関する要因に分類し、ヒヤリ・ハットした理由を分析した。

図３に示すとおり、誘導式カートでは操作要因と行動要因の両方から起きているケースの占める割合が高く、手動式カートでは操作要因のみがヒヤリ・ハットの要因と感じている傾向にあり、その比率に有意な差が確認された。誘導式カートでは、リモコン操作による無人操作時のヒヤリ・ハットが多く、状況確認不足など操作要因とプレーヤがカート誘導路を歩行しているなど行動要因が重なってヒヤリ・ハットしたとキャディが認識している。一方、手動式カートの場合は、キャディ等が運転時にヒヤリ・ハットした経験であるため、操作によって事故を防げるという認識が高いためと考えられる。

誘導式カートの操作要因で最も多いのは図４の通り状況確認の不足であった。これは誘導式カートをリモコンで起動するときの歩行者確認のことである。状況確認してカートを起動した後に歩行者がカート誘導路に進入するケースがあり、このときリモコン操作しても停止しなかったというリモコンについて指摘しているケースもある。

一方，プレーヤ等の人の行動要因では図５の通りカート誘導路における歩行、横切り、立ち止まりで、全てカート誘導路への進入である。いずれの場合も歩行者はカートの接近に気づかない、もしくは気づくのが遅いようである。

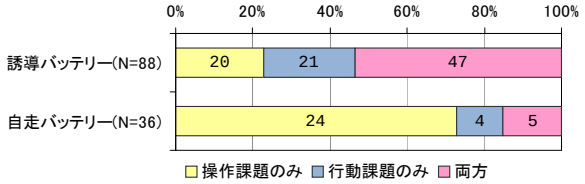


図３　ヒヤリ・ハットの事故要因

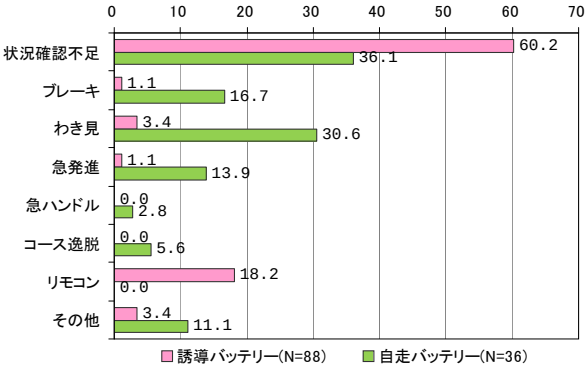


図４　ヒヤリ・ハットのカート操作要因（複数回答%）

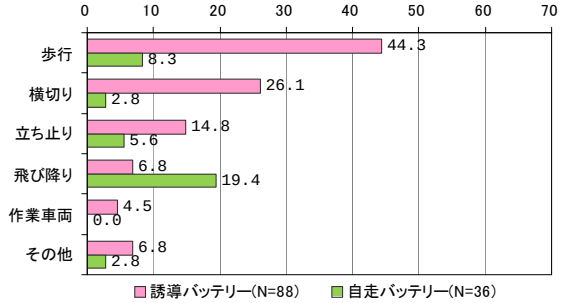


図５　ヒヤリ・ハットの行動要因（複数回答%）

5.　安全対策について

5.1　リスクアセスメントに基づく安全対策

本研究開発では事前に誘導式カートを機械と見なし、産業分野の機械安全の考え方に基づくリスクアセスメントを実施した。今回は歩行者に対して誘導式カートを危険源、カートとの衝突を危険事象として同定することができる。リスクの大きさは危害の発生確率と危害の大きさの関数であり、発生確率は機械への暴露や危険事象発生の頻度と回避の可能性からもとめる。

また､機械類の安全性設計のための国際規格によると、保護方策（安全対策）は図６に示すように３ステップで実施される必要がある。想定した危険事象と今回の調査結果より、提案する保護方策を以下に述べる。ただし第１ステップであるカートの重さや速度の低減などによる本質安全設計方策は、カートの機能を損なわないためにはその余地はないものとする。また死角からのカートの起動が危険事象発生の幾何学的要因 [3] にあたるものの、緑化された広大な敷地において見通しを確保することは現実的には困難である。結論として本質的安全設計方策の余地はないと判断する。

3:ISO12100:2010 6.2.2.1 項　幾何学的要因

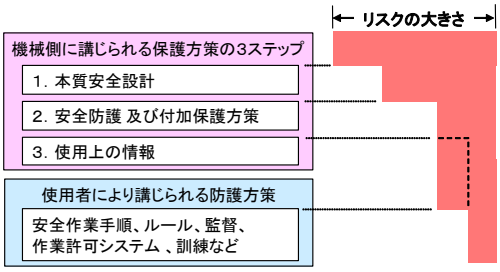


図６　ISO12100 に基づくリスク低減の手順

5.2　安全防護のための歩行者検知装置

第２ステップの安全防護として、人とカートの空間的もしくは時間的な隔離を検討する。危険事象はプレーヤとカートの移動空間の共有が原因であるため必要となる方策は防護柵の設置や踏切であるが、施設の性質上受け入れられることが困難なため、移動するカートにトリップ装置として歩行者検知装置を搭載することが必要となる。今回の歩行者検知装置としては、安全維持能力の高さから既に安全機器として認証された実績があるレーザスキャナが最適である。[1] [2]　本研究においては、屋内仕様のレーザスキャナにジンバル機構を加えてレーザを垂直方向に走査することにより、太陽光に対策することができ屋外で使用できる見込みとなった。停止判断のための防護エリアは半径２m の範囲で設定でき、誘導式カートが通常直線を走行する速度である 8km/h に対して安全に停止できる。特にレーザスキャナは歩行者以外の地形や樹木を検出しないように防護エリアをほぼ任意に設定することが可能であり、樹木などの多いゴルフ場の環境で実用的である。

5.3　付加保護方策としての安全無線非常停止装置

第２ステップとして、万が一危険な状態に陥ったときに衝突を回避するための付加保護方策が必要である。調査結果から歩行者側が回避する可能性が低いこと，誘導路の横切りなど急な状況変化があることなどから、キャディなど第三者の停止操作により衝突の確率を下げる必要がある。またヒヤリ・ハット調査からリモコン操作の信頼性を指摘する意見もあることから、安全無線技術[3]を使用した非常停止装置を提案する。今回製作した試作機はスイッチ部分に工業用の小型非常停止スイッチを使用しているため、広い角度から確実に操作できるようなハンドル形状であり、接点は２重化されている。キャディやプレーヤが腰のベルトに取り付けて携帯できるように図７のような曲線を描いたデザインとし、瞬間的な操作を可能とした。

その他、非常停止後はリセット操作なしではカートの再起動を許さず、電波干渉による通信不良や通信エリア外に移動したときには自動的にカートを停止させる。

6.　まとめ

本稿は３年間で行う研究開発の途中報告である。初年度は机上のリスクアセスメントに基づき上述した安全方策を策定して実験機を製作したが、現段階の調査結果からでも安全方策の方向性は妥当であることが確認できたと考える。今後はプレーヤ側のヒヤリ・ハット調査を経て本調査票を設計し、全国のゴルフ場へ展開し、また平行してゴルフカートの減速加速度が搭乗者へ及ぼす影響や非常停止スイッチの操作感について実証実験を行っていく。

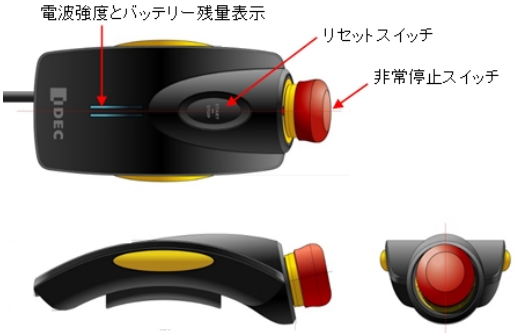


図７　安全無線非常停止スイッチのデザイン

謝辞

ヒアリング調査にご協力いただいたゴルフ場とその調整にご尽力いただいた社団法人茨木カンツリー倶楽部の支配人、並びにスタッフの皆様に深く感謝いたします。

また本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業「生活支援ロボット実用化プロジェクト」において補助金の交付を受けて行っているものです。本論文の執筆にあたり多大なご助言をいただきました関係者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

[1] IEC61496-3(2008); Safety Of Machinery - Electro-Sensitive Protective Equipment - Part 3 : Particular Requirements For Active Opto-Electronic Protective Devices Responsive To Diffuse Reflection

[2] IEC 62061(2005); Safety of Machinery-Functional Safety of Safety-Related Electrical, Electronic and Programmable Electronic Control Systems

[3] Manabu Shutto, Hitoshi Aisu, Takayoshi Shimizu, Masao Dohi, Tomonori Nishiki: “Proposal of next-generation emergency stop switch utilizing safe wireless communication for mobile robot applications”; 6th International Conference “Protective devices and systems” SIAS2010, Finland, 14-15 June, 2010

[4] Norifumi Ohsugi, Takayuki Shimizu, Masao dohi, Tomonori Nishiki: “Development of the next-generation easy-to-use safety controller suitable for various industrial applications”; 6th International Conference “Functional Safety” SIAS2010, Finland, 14-15 June, 2010